

摘要

近年来,土工织物膨润土垫(GCL)被越来越多地应用到各种防渗工程之中,它的防渗有效性越来越引起了人们的重视,同时对室内试验研究和机理分析也提出了越来越高的要求。GCL的防渗有效性至少包括三个方面:①工程应用条件下GCL渗透系数的大小;②在液体渗过GCL的过程中,膨润土对液体中有害物质的吸附能力;③用于防渗系统的GCL内部剪切强度的高低。这三方面重要特性指标将直接影响防渗工程的稳定安全性和功能有效性。本文针对土工织物膨润土垫的室内试验以及试验结果的机理分析,从上述三个方面入手进行了研究工作,并得到一些有价值的结论和成果:

1) 研制土工合成材料渗压仪 Geo-Syn, 可以实现 GCL 试样在竖向常应力或水平常应变条件下对不同水化液、渗透液的渗透试验;

2) 对 GCL 及其中膨润土进行自由膨胀试验和水化膨胀试验, 以研究 GCL 所表现出来的膨胀特性及其影响因素, 包括正应力、加压水化顺序和水化液体类型。结果表明上述因素都对 GCL 的膨胀特性产生了影响, 两种试验的结果可以得到类似的影响规律。

3) 采用蒸馏水、垃圾渗滤液等液体和含单一类型阳离子的溶液作为水化液和渗透液, 对 GCL 表现出来的渗透性能进行了试验研究。结果发现水化、渗透液体中阳离子的离子价、浓度以及水化离子半径都对 GCL 的渗透系数产生了影响。

4) 采用 X 射线衍射、压汞试验和扫描电子显微镜等试验手段, 对 GCL 中膨润土的微观结构进行了研究, 揭示了水化、渗透液体对 GCL 渗透性能产生影响的原因。并采用膨润土分阶段水化理论和双电层理论对 GCL 所表现出来的膨胀特性和渗透性能变化规律进行了机理分析。

5) 通过渗透试验研究了应力水平及加压水化顺序对 GCL 渗透性能的影响, 结果发现 GCL 所承受的竖向应力、水平应变大小以及加压水化顺序都影响着渗透系数的变化。

6) 对渗入、渗出 GCL 的液体进行等离子光谱分析, 研究在液体渗透过程中 GCL 所表现出来的吸附能力及其影响因素, 包括水化液类型、渗透时间。采

用 X 射线衍射和 X 射线荧光光谱分析对膨润土的吸附结果进行了验证。结果发现 GCL 对渗过的液体有很强的吸附能力，但是随着渗透量的增大，吸附能力逐渐降低。同时也发现水化液体类型对 GCL 吸附能力的变化也存在较大的影响。

7) 采用室内剪切试验对膨润土的剪切强度进行了试验研究，分析了正应力和水化液体类型的影响。将试验结果应用于某垃圾填埋场工程中，采用运动破坏分析法计算分析不同条件下的稳定安全系数。结果发现填埋场防渗系统的安全系数受到众多因素的影响，包括垃圾体力学性质、GCL 的剪切强度等，因此将室内剪切试验应用于防渗工程时，选择合理的参数是至关重要的。

8) 将本文的研究成果与实际工程结合起来分析，对 GCL 应用于实际防渗工程的施工方法提出了一些建议。

关键词：土工织物膨润土垫，防渗有效性，渗透系数，吸附能力，内部剪切强度，微观结构，机理分析

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：李志斌

2007年1月8日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

签名：李志斌

2007年1月8日

第 1 章 概述

1.1 选题背景及研究意义

土工织物膨润土垫 (Geosynthetic Clay Liner, 简称 GCL) 是 20 世纪 90 年代在美国开发的一种新型防水材料, 由于其具有较低的渗透系数而在土木工程领域得到了广泛应用, 在垃圾填埋场、河流堤坝、人工湖、污水处理池、地下室等防渗工程中均有所应用。GCL 用于实际防渗工程后, 其防渗作用是否有效主要取决于以下三个方面: 一是 GCL 作为一种防渗材料本身的渗透性能。如果 GCL 在某种受力条件下对某种液体的防渗能力很差的话, 就不能有效地阻止液体渗过 GCL, 这时它的防渗作用就失效了; 二是 GCL 在有液体渗过的过程中, 对液体中有害物质的吸附能力。即使第一方面提到的 GCL 的渗透性能没有失效, 仍然会有少量液体渗过 GCL, 这些渗透的液体有可能会对周围环境造成危害, 此时 GCL 中膨润土在液体渗透过程中对其中有害物质的吸附能力就显得非常重要了。如果膨润土不能吸收液体中大量的有害物质的话, 采用 GCL 作为防渗材料也就失去了环保的意义; 三是 GCL 本身剪切强度的大小。GCL 用到实际工程中以后会承受剪应力, 如果 GCL 所承受的剪应力超过了它本身抗剪切强度的话, GCL 就会发生剪切破坏, 导致防渗系统发生破坏。如果 GCL 的防渗功能失效的话, 不仅造成了资源的浪费, 还可能对周围环境产生污染, 防渗也就失去了意义。下面就 GCL 在垃圾填埋场、河流堤坝以及人工湖防渗工程中的应用情况以及 GCL 一旦发生防渗失效造成的危害分别进行介绍。

1.1.1 垃圾填埋场防渗^[1]

我国现有城镇居民超过 4 亿, 年产生生活垃圾超过 1.5 亿吨, 目前最常用的处理方法为堆肥、焚烧和填埋。前两种方法在我国应用非常广泛, 但是它们对环境的污染是非常严重的; 我国也有很多城镇采用填埋方法处理生活垃圾, 但是由于资金和技术手段的限制, 绝大多数填埋场只是进行简单的填埋处理, 不具备必要的环境保护设施, 因此对环境仍然具有非常恶劣的影响。随着我国的经济社会发展、城市化进程的推进和人类环保意识的增强, 固体废弃物的处置受

到政府与社会的高度重视，兴建生活垃圾卫生填埋场的呼声也越来越高。90年代以来，我国相继在多个城市建设生活垃圾卫生填埋场，建设标准逐步与国际发达国家的标准看齐。

GCL最早就是应用到垃圾填埋场的衬里和封盖系统中，目前欧美国家垃圾填埋场建设的规范中要求生活垃圾卫生填埋场中必须使用包括GCL和土工膜的衬里系统，图1.1和图1.2是垃圾填埋场衬里和封盖结构示意图。在我国，垃圾填埋场的防渗系统也从1987年兴建的杭州天子岭填埋场的高密度聚氯乙烯膜（HDPE）单层防渗衬里系统发展到2005年建成的杭州市第二垃圾填埋场的高密度聚乙烯（HDPE）土工膜和GCL复合防渗衬里系统。

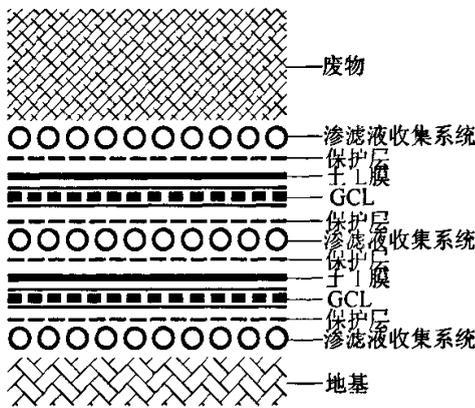


图1.1 垃圾填埋场衬里结构示意图

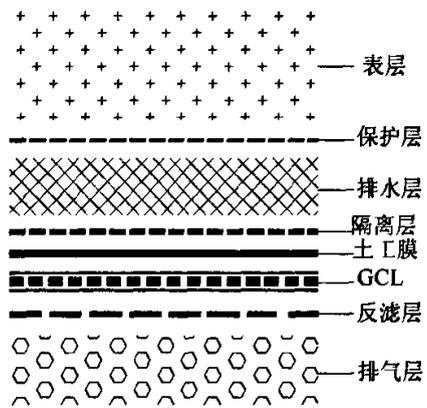


图1.2 垃圾填埋场封盖结构示意图

在垃圾卫生填埋场中，如果 GCL 防渗材料发生失效的话，垃圾降解产生的渗滤液就会渗透到周围的土层和地下水中，填埋气体（主要成分为甲烷）也将向四周空气中扩散而产生二次污染，严重污染填埋场周围的生态环境。因此，在填埋场的建设和运营过程中，封闭起来的垃圾渗滤液和填埋气不因 GCL 材料的防渗失效而向外围生态系统扩散，是对垃圾无害化处理的基础和前提。

1.1.2 河流堤坝防渗

在河流堤坝两侧，河流水位和地下水水位之间存在着水头差，河流和地下水之间将会发生水力交换，这将会造成以下三方面的危害：(1)渗流将对堤坝的强度和稳定性造成不利影响，如果堤坝中砂的含量较高的话，还存在发生管涌

和流砂的可能，对河流的防汛造成危害；(2)如果河流的水位高于地下水水位的话，河水就会对地下水形成补给，河水中含有的有害物质也将进入到地下水中而造成污染，危及河流两岸人民的身体健康；(3)河水对地下水形成补给后，河流的流量减小，对下游的航运和人们的日常生活造成不利影响。所以在河流底部要铺设防渗系统，目前很多河流堤坝防渗工程都选择GCL作为防渗材料。如果GCL的防渗功能失效的话，上述三方面的危害也将会出现，影响到河流沿岸人们的正常生活。图1.3是GCL在德国Eberswalde河口用于河道防渗的一个工程实例（1997），该工程河道长1km，边坡比为1: 3。河道下层基土主要是砂土和大块黏土。大块黏土的分布变化很大，一部分达到河床表面，一部向下延伸至12 m深处。砂的密度随深度增加而增加，但在河床向下3~6m深处，砂土的密度都很低。地下水流近似垂直河道流向，地下平均水位为34 m，比河道正常水位低3 m多。为了将水头损失控制在容许范围内，德国HOW河流域管理局在工程中用针刺GCL结合针刺砂垫的方法成功地达到了河道防渗的目标^[2]。

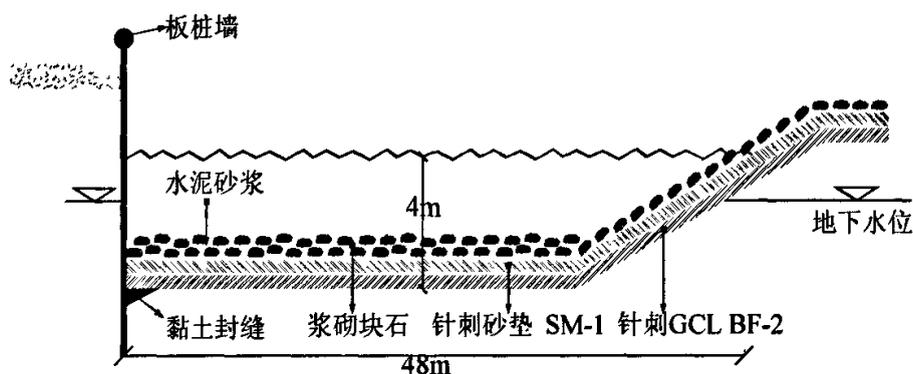


图1.3 GCL在德国Eberswalde河口用于河道防渗

1.1.3 人工湖防渗

近年来新建、改建的人工湖中，GCL作为防渗材料得到了广泛的应用。GCL作为湖底防渗材料具有以下两方面优点：(1)虽然GCL的渗透系数很低，但仍允许少量液体透过，湖水和周围环境中地下水仍然存在着水力交换；(2)GCL对湖水中悬浮物质有吸附作用，使湖水更加清澈。表1.1反映了国内几家公司生产的GCL在各省市人工湖防渗工程中的应用情况。如果用于人工湖防渗的GCL发生防渗失效的话，湖水将与地下水发生大量的水力交换，当湖水水位高于地下水

水位时，湖水将会对地下水形成补给，这样就要花费大量资金来维持人工湖的水位。另一方面由于GCL对湖水中的悬浮物质失去了吸附作用，湖水将变得浑浊不清。

表1.1 GCL在我国人工湖防渗工程中的应用统计*

省市	工程数量	使用面积/m ²	省市	工程数量	使用面积/m ²
北京	9	167398	上海	37	95907
浙江	28	138385	江苏	22	77213
天津	1	7000	安徽	6	18395
湖北	3	7280	陕西	1	6000
广东	4	13240	云南	3	18220
广西	1	20000	江西	2	7254
甘肃	1	10000	重庆	1	15000
内蒙古	1	25000	河北	1	50000

*注释：本表的数据来自对多个GCL生产厂家网站资料的统计结果。

综上所述，制约着采用GCL作为防渗材料的防渗工程能否正常发挥作用的最重要的因素就是GCL的防渗有效性，而GCL防渗有效性的三个方面——GCL的渗透性能、吸附能力和内部剪切强度又受到很多因素的影响，包括GCL所承受的应力水平、GCL的水化条件、水化液和渗透液类型等，本文就是从上述三个方面入手，通过试验研究各种因素对GCL防渗有效性的影响。通过本文的研究，在理论上可以提出GCL防渗有效性的试验和机理分析方法，为科研人员提供研究方法和思路；在实践中为工程设计人员和决策者提供有价值的参考，针对不同的工程条件选择不同的设计和施工方法，扬长避短，使得GCL更加广泛地被应用到防渗工程中，促进国内膨润土产业和GCL制造业的迅猛发展。

1.2 GCL 简介

GCL是将两层土工织物或者土工膜中间夹一层薄薄的膨润土用织物纤维缝合、针刺，或者用粘结剂粘合而成，也有的GCL产品只有一层土工膜，其上用粘结剂粘上一层薄薄的膨润土。Koerner (1996)^[3]按GCL结构组成将现有的GCL产品分成如图1.4所示的四种形式：土工织物包裹的粘合GCL、土工织物包裹的针刺GCL、土工织物包裹的缝合GCL以及单层土工膜粘合GCL。

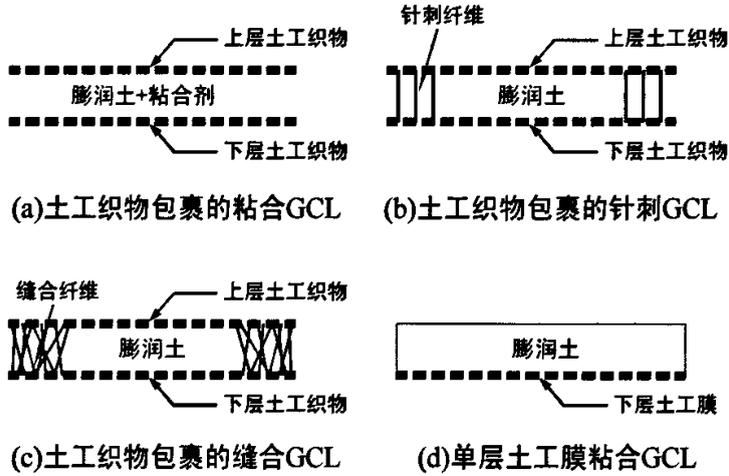


图1.4 四种类型GCL的示意图

1.2.1 防渗机理

GCL产品中的膨润土颗粒间有孔隙，从微观上看，膨润土是粒径小于 $2\mu\text{m}$ 的无机质，主要结构体系为Si-Al-Si，即由云母状薄片堆垒而成单个颗粒，这些薄片的上下表面带负电，因此膨润土的结构单元是互相排斥的。膨润土在水化时，水分子沿Si-Al-Si结构单位的硅层表面吸附起来，使相邻的结构单元之间的距离加大。钠基膨润土单元晶层中，存在极弱的键，钠离子连接各层薄片，钠

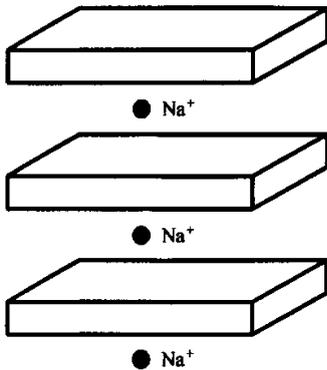


图1.5 水化前钠离子连接各层单质薄片

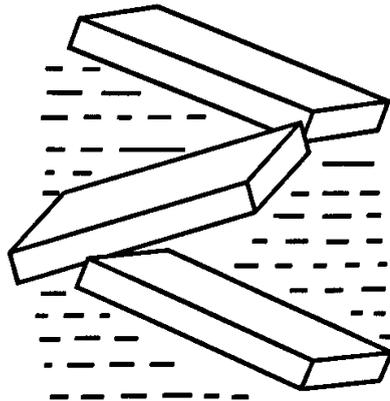


图1.6 水化后单质薄片间充满水

离子本身半径小，离子价低，水易进入单位晶层，引起晶格膨胀，如图1.5、1.6所示。膨润土水化后，形成不透水的可塑性材料，同时挤占土颗粒间的空隙，形成致密的不透水防水层，从而达到防水目的^{[4][5]}。

1.2.2 工程特性^[6]

(1)低透水性。一般GCL的渗透系数为 10^{-10} ~ 10^{-8} cm/s，钠基膨润土由于其独特的水化作用，膨胀性更大，其渗透系数更小。

(2)胀缩性。膨润土在吸水时会膨胀，失水时会收缩，并且其独有的膨胀力具有渗透到裂纹内部的能力，与其它防水材料对施工完成以后出现的缺陷无法弥补相比，其超强的自我修复能力，使其能持久发挥防水性能。

(3)耐久性。因为膨润土是天然无机物，时间的变化和周边物质的影响对其化学性质的影响很小，并且不易发生老化和腐蚀现象，因此可以永久保持其防水能力。

(4)抗冻性。试验表明，经过反复的冻融循环，GCL的渗透系数只有微小的改变，其抗冻性能良好。

(5)施工简单，工期短。只用简单的施工工具就可以施工，相对比较简单，与其它防水方法相比工期短。与沥青防水相比，大约缩短50%的工期；与土工膜相比，其柔性好，不用焊接；和压实黏土相比，体积小，重量轻，施工简便。

(6)易检测，易修补。防水施工结束后，可以立即检查出施工不足的地方或者施工上有问题的地方，以及防水材料的损坏等，可以减少防水施工中可能发生的失误。对破损的部位，可以马上简单地进行缝补，所以防水修补非常容易。

(7)抗剪强度。不加筋GCL的内摩擦角大约为 30° ，粘聚力大于10kPa；饱水后，内摩擦角下降至 10° ，粘聚力只有5kPa左右。加筋GCL的抗剪强度在干燥状态下与不加筋GCL差别不大，但在饱水状态下，其内摩擦角为 20° 左右，粘聚力可达10kPa。如果需要较高的抗剪强度，选择加筋膨润土是必要的。

1.2.3 与压实黏土衬垫相比的优缺点^[6]

压实黏土衬垫（Compacted Clay Liner，简称CCL）是用压实机械把一定含水量范围内的黏土，按一定的压实标准进行碾压，使其达到最大干密度和较低的透水率。CCL不仅具有良好的防渗效果，同时也具有较好的工程性能，因此广

泛用于各种防渗工程中。GCL开发出来以后，一个主要用途是代替CCL用于防渗工程，两者都有自己的优点和缺点，表1.2列出了GCL和CCL的主要不同点。

表1.2 GCL和CCL的主要不同点

特点	压实黏土衬垫CCL	土工织物膨润土垫GCL
材料	天然黏土或者膨润土	膨润土、土工织物和土工膜
建设方法	现场施工	工厂加工然后现场铺设
厚度	大约60~90cm	大约13mm
渗透系数	$\leq 1.0 \times 10^{-7} \text{cm/s}$	$\leq 5.0 \times 10^{-8} \text{cm/s}$
材料来源	场地附近要有充足的黏土源	可以方便地运送到任何场地
施工	施工缓慢、复杂	施工快捷、简单
质量保证	很难控制安装质量；要求有严格的CQA程序	预制造产品，经过严格的控制，CQA要求较低
费用	45~450元/平方米	36~52元/平方米
经验	丰富	欠缺

与CCL相比，GCL具有以下优点：(1)GCL厚度小，在垃圾填埋场中应用时可以节省大量的填埋空间；(2)GCL的施工方便、快捷；(3)GCL可以被运送到任何地方，它的使用不受当地是否有黏土资源的限制；(4)铺设GCL不需要重型设备；(5)GCL的运放和压实不需要大量的交通运输和能量，对大气污染较少；(6)GCL不受天气条件的影响（如干旱、冰冻等）；(7)GCL的施工不需要水，这使得在干旱缺水地方也能正常施工；(8)GCL是工厂制成品，可以保证材料的连续性和均匀性；(9)GCL的质检工作简单，施工质量容易得到保证；(10)相比CCL，GCL能更好的承受冻融循环和干湿循环过程；(11)施工期间GCL不会因为干燥而发生破坏；(12)GCL承受不均匀变形的能力比CCL高。

虽然相比CCL，GCL有很多优点，但是也有以下几方面的缺点：(1)在安装前或安装时遇到水，会使膨润土发生水化反应。这会导致其膨胀，土工织物有可能脱落，从而使防渗系统的整体性受到破坏；(2) GCL较薄，一旦破损，对渗透系数的影响相对较大。而CCL的某一部位或某一层发生破损对整体防渗能力影响不大；(3)GCL对液体中有害物质的吸附能力比CCL差；(4)当液体中含有浓度较高的金属离子时，GCL的防渗性能会降低，而离子对CCL防渗性能的影响不大；(5)如果场地附近有充足的黏土资源，则CCL的造价要低于GCL；(6)CCL的使用历史悠久，工程建设经验丰富，而GCL的使用也就10年左右时间，经验欠缺。

1.3 国内外研究现状及存在的问题

1.3.1 GCL渗透性能的研究

1.3.1.1 土工合成材料渗压仪的发展现状

根据边界条件的不同，可以把土工合成材料渗压仪分为刚性壁的和柔性壁的两类，其中被应用最早的是刚性壁渗压仪，它的优点是价格便宜、使用方便、大部分材料包括化学腐蚀性材料均可使用，但是缺点是侧壁渗漏很难避免。

Giroud等（1989）^[7]研制了能进行土工膜渗透试验的渗压仪，如图1.7所示，其中试样的直径为186mm；吴景海（2002）^[8]在Giroud渗压仪的基础上加以改进，研制了对土工膜进行渗透试验的渗压仪，如图1.8所示。

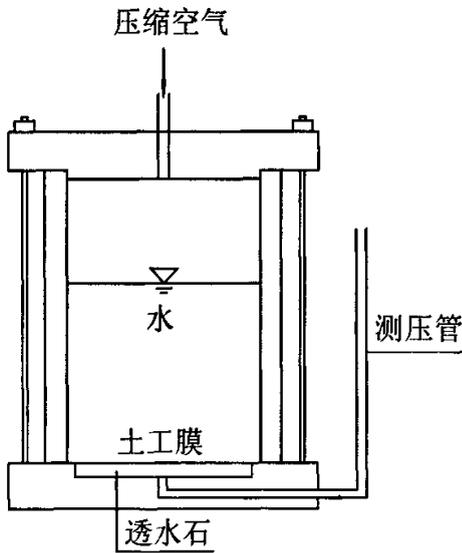


图1.7 Giroud渗透试验装置图

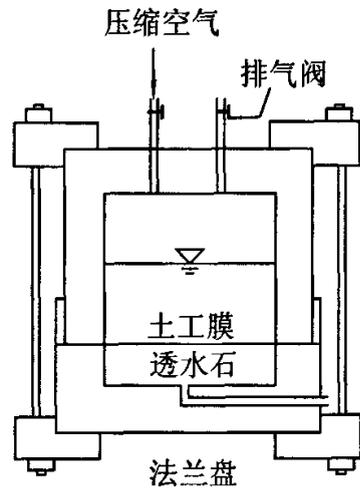


图1.8 吴景海的渗透试验装置图

王保田等（1999）^[9]仿照旁压仪由两侧平衡腔和中间量测腔组成的原理设计出新的PTV-1型渗透仪，如图1.9所示，该渗透仪施加给土工织物的最大竖向应力为1MPa，该仪器采用杠杆比为1：10的砝码加载。试验采用常水头，通过调节出水口的高度来调节水头差。

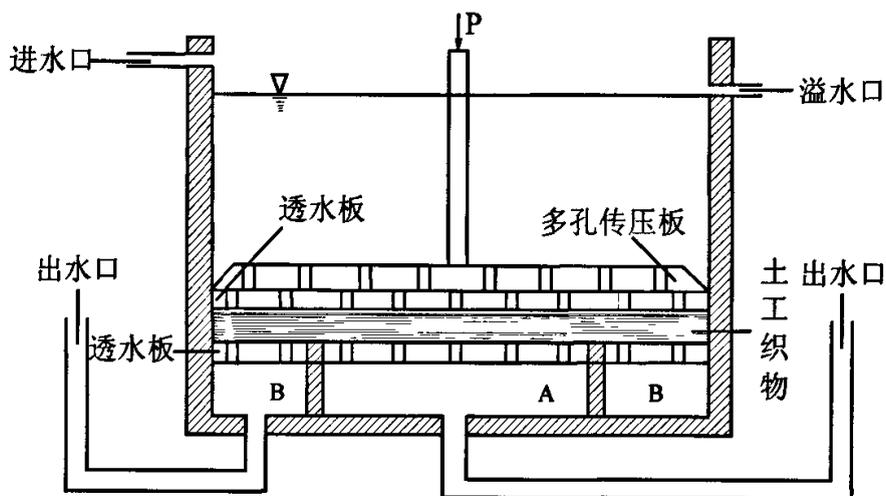


图1.9 PTV-1型渗透仪

南京水利科学研究院研制了刚性壁的土工膜渗压仪，如图 1.10 所示^[10]，鄢俊（2000）^[11]使用该仪器对 5 种 HDPE 膜进行了渗透试验；戴鹏飞（2002）^[12]采用自行研制的土工膜渗压仪研究了渗透压力对土工膜渗透系数的影响，其渗压仪如图 1.11 所示，试验结果如图 1.12 所示。

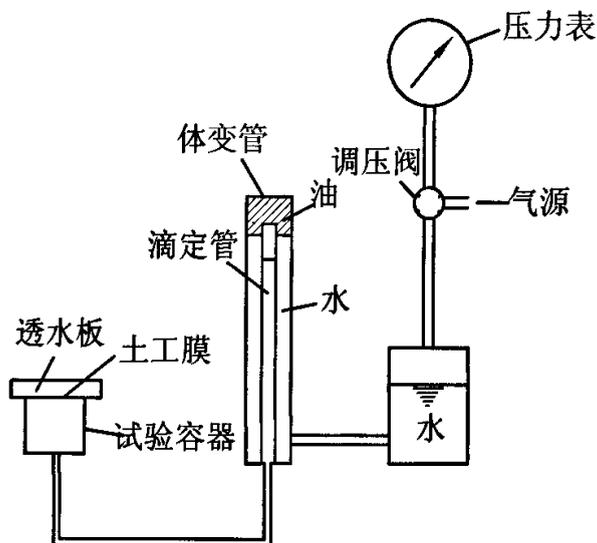


图1.10 规范中渗压仪的示意图

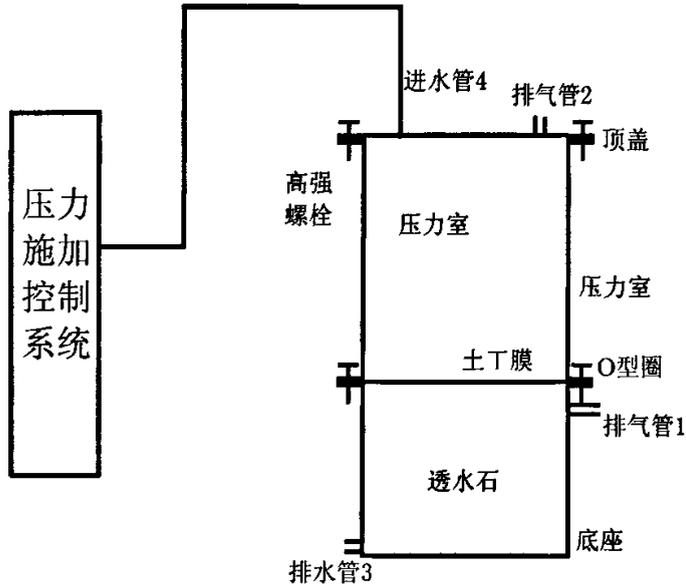


图 1.11 戴鹏飞的渗透试验装置图

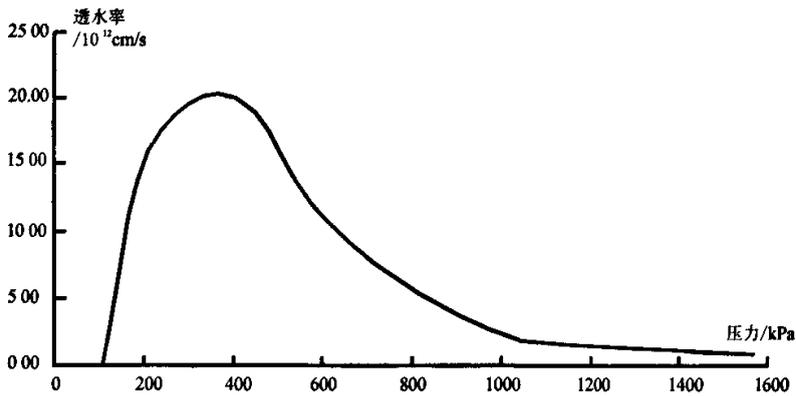


图 1.12 戴鹏飞的渗透试验结果

20 世纪 90 年代以后，国内外学者开始使用柔性壁渗压仪对土工合成材料进行渗透试验研究，柔性壁渗压仪通过围压对包裹试样柔性膜的压力作用有效地避免刚性壁渗透仪中存在的试样侧壁渗漏问题，而且可以通过提供竖向应力、渗透压力和围压很好的模拟现场。目前国外学者进行土工合成材料渗透试验都采用柔性壁渗压仪，虽然具体样式有所不同，但是基本体系是相同的，图 1.13 是 Ruhl 和 Daniel (1997) [13] 使用的柔性壁渗压仪示意图，试样放置在一个密封

良好的压力室内，可以通过施加气压来控制围压，土工合成材料放置在橡胶膜中，上下各有一片透水石，可以量测流入液体和流出液体的体积。

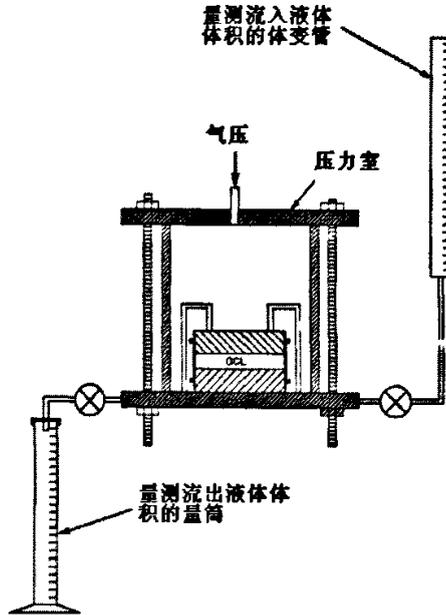


图1.13 柔性壁渗透仪示意图

李宪 (2005)^[14]在常规三轴仪的基础上研制开发了柔性壁渗透仪，如图 1.14 所示，该渗透仪由水力系统、水量量测系统和渗透仪压力室系统三部分组成，水力系统利用常规三轴仪的空气压缩机提供压力室水头、进水水头和出水水头，还可以提供常水头或变水头；水量量测系统包括进水水量量测装置和出水水量量测装置，是用体变管和管路组成的，通过体变管中液面的变化可以读取进水水量和出水水量；渗透仪压力室系统由压力罩、轴、端盖、多孔板、基座、柔性膜、O 型圈、压力室进水管、进水排气排水线和排水线组成，密封性能良好。

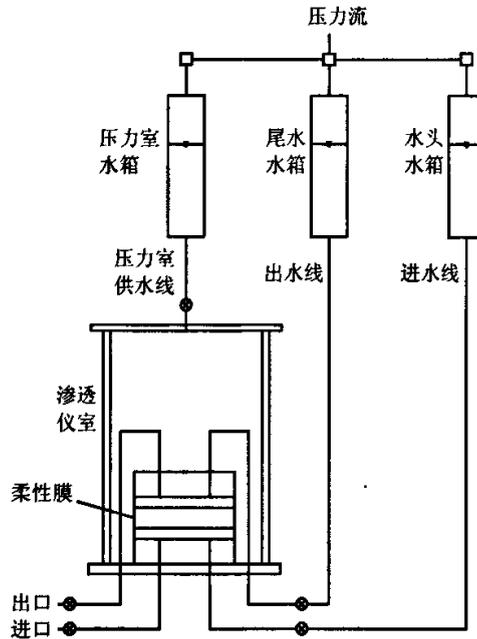


图1.14 李宪的柔性壁渗透仪装置图

综上所述，国内外学者已经研制了多种进行土工合成材料渗透试验的渗压仪，可以进行不同竖向应力和渗透压力条件下的渗透试验，但是无论是刚性壁渗压仪和柔性壁渗压仪，它们都不能在试验过程中对试样施加水平向应力，也就无法模拟实际工程应用中土工合成材料发生水平向应变后的渗透情况。本文拟对GCL在承受水平向应力发生变形后的防渗性能进行试验研究，故必须研制能满足试验条件的土工合成材料渗压仪。

1.3.1.2 GCL渗透性能的试验研究结果

国内使用GCL作为防渗材料的历史比较短，相关的研究也比较罕见。李宪(2005)^[14]通过试验对GCL渗透性能进行了研究，内容主要包括：(1)对GCL中膨润土的膨胀特性和含水率进行了试验，对GCL的抗拉强度和剥离强度进行了测试，对它的内部抗剪强度也进行了测试。(2)在现有三轴试验系统的基础上，研制了专门用于测量GCL渗透系数的柔性壁渗压仪，并利用该试验装置对GCL渗透系数随时间变化的趋势进行了研究。(3)通过对不同孔洞GCL试样水化过程中渗透系数的测试，对GCL在不同穿孔孔径随时间的自愈能力进行了试验研究，

总结了一些 GCL 的自我愈合能力规律, 并且对影响 GCL 自愈能力的因素进行了简单分析。但是他的研究没有涉及到 GCL 在不同的应力水平下渗透系数的变化, 也没有涉及到不同水化液和渗透液对 GCL 渗透系数的影响。

国外学者对 GCL 渗透特性的研究开展的比较广泛, 也取得了一系列有意义的研究成果, 经归纳可分为以下几个方面:

(1) 在不同应力水平下对 GCL 的渗透性能影响规律的研究方面。Petrov 和 Rowe 等 (1997) [15] 进行了采用蒸馏水作为水化液和渗透液的针刺 GCL 水化膨胀试验和渗透试验, 结果发现随着正应力的增大, GCL 的自由膨胀量和渗透系数都呈现减小的趋势, 而且渗透系数和正应力两者的对数值之间存在明显的线性关系; Petrov 和 Rowe (1997) [16] 对针刺的 GCL 进行了承受正应力条件下的水化膨胀试验和渗透试验, 并验证了渗透介质、正应力、水化介质和膨润土水化程度对渗透系数的影响, 试验结果表明随着正应力的减小 GCL 的渗透系数呈现增大的趋势; LaGatta 和 Boardman 等 (1997) [17] 通过室内模型试验对 GCL 承受不均匀沉降时的渗透性能进行了试验研究, 结果表明当 GCL 承受的拉应变在 1%~10% 之间时渗透系数保持小于 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$, 与材料和试验条件有关系。本文拟采用类似的方法对 GCL 承受竖向应力条件下的膨胀特性和防渗性能进行试验研究, 并研究加压水化顺序对其的影响规律, 而且将首次采用土工合成材料渗压仪对水平向变形条件下的 GCL 渗透性能进行研究。

(2) 在水化液和渗透液对 GCL 渗透性能影响方面。Petrov 和 Rowe (1997) [16] 通过渗透试验研究了水化液和渗透液类型对针刺 GCL 渗透系数的影响, 所采用的水化液和渗透液包括蒸馏水、0.01mol/l~2.0mol/l NaCl 溶液以及模拟垃圾渗滤液, 试验结果表明随着渗透液浓度的增大 GCL 的渗透系数呈现增大的趋势; Ruhl 和 Daniel (1997) [13] 对五种不同 GCL 的渗透性能进行了试验研究, 试验中采用七种不同的渗透液, 分别为模拟生活垃圾渗滤液、模拟危险废弃物渗滤液、模拟粉煤灰渗滤液、生活垃圾渗滤液、自来水、HCl 和 NaOH 溶液; Lake 和 Rowe (2000) [18] 以 3g/l 到 5g/l 的氯化钠溶液作为介质, 对 GCL 的渗透性做了试验研究, 发现氯化钠的弥散系数随着 GCL 孔隙比的减小而呈线性减小趋势, 并且和氯化钠溶液的浓度关系不大; Shackelford 和 Benson 等 (2000) [19] 通过试验分析了 GCL 对非标准液体的渗透性, GCL 中膨润土的颗粒级配和蒙脱石的含量对渗透性能都有较大影响, 其它影响渗透性的因素还有 GCL 的厚度、GCL 的水化程度、GCL 的孔隙比和试验时间; Lin 和 Benson (2000) [20] 通过阿太堡界限试验、

自由膨胀试验和渗透试验研究了干湿循环对 GCL 的塑性、膨胀性和渗透性能的影响, 试验中采用了三种水化液——蒸馏水、自来水和 0.0125mol/lCaCl_2 溶液; Jo 和 Katsumi 等 (2001) [21] 通过试验研究了未完全水化的 GCL 对单一种类溶液的渗透性, 溶液的浓度、阳离子化合价和 pH 值对 GCL 的渗透性均有影响, 含有二价或者三价阳离子的溶液的渗透性要比含有单价或者不含阳离子的溶液高一些, 并且渗透性随着溶液浓度的增加而增大, 而 pH 只有在低于 3 或者高于 11 时才会对渗透性产生影响; Shan 和 Lai (2002) [22] 通过渗透试验分析了水化液和渗透液对 GCL 自由膨胀量和渗透性能的影响, 试验中用到了蒸馏水、自来水、垃圾渗滤液、酸雨、海水和汽油五种液体; Rowe 和 Mukunoki 等 (2004) [23] 研究了采用蒸馏水和飞机油水化后的 GCL 在多次冻融循环后渗透性能的变化规律, 结果发现采用飞机油水化后的 GCL 渗透系数比蒸馏水水化后的小一个数量级, 而且增加冻融循环次数对 GCL 渗透性能的影响很小; Kolstad 和 Benson 等 (2004) [24] 研究了多种盐的混合溶液对未完全水化 GCL 膨胀性能和渗透性能的影响, 结果表明渗透液的离子强度和 RMD 值对 GCL 的膨胀量和渗透系数有较大影响, 其中膨胀量和 RMD 呈正比关系, 与离子强度成反比关系, 而渗透系数恰好相反; Lee 和 Shackelford (2005) [25] 对含有两种不同品种膨润土的 GCL 进行了渗透性试验, 试验采用自来水和含有 5、10、15、20、50、100 和 500mmol/lCaCl_2 的溶液作为渗透介质; Jo 和 Benson 等 (2005) [26] 对 GCL 的渗透性能进行了超过 2.5 年的渗透试验研究, 研究中使用 NaCl、KCl 和 CaCl_2 溶液来分析离子浓度和离子价对 GCL 长期渗透性能的影响, 并且验证了渗透试验结束标准的影响; Lee 和 Shackelford 等 (2005) [27] 研究了包含两种钠基膨润土的 GCL 的液限、沉淀体积和自由膨胀量和渗透系数之间存在的关系, 采用蒸馏水和 CaCl_2 溶液作为水化液和渗透液。

上述学者们的研究虽然广泛, 但是没有把液体影响和离子影响的研究有效地结合起来, 本文虽然也将研究各种液体作为水化液和渗透液时 GCL 防渗性能的变化规律以及溶液特性对 GCL 渗透系数的影响, 但是与前人研究不同的是, 本文拟通过微观分析的手段将两者结合起来, 从微观角度入手, 通过分析离子的影响来揭示液体对 GCL 渗透性能产生影响的机理。

1.3.2 膨润土吸附能力的研究

国内学者对膨润土吸附能力的试验研究开展的比较早,也取得了一些研究成果:朱利中对膨润土的吸附性能进行了大量的研究工作,分别用氯化十六烷基吡啶(CPC)和溴化十六烷基三甲铵(CTMAB)改性的有机膨润土吸附处理水中的苯胺,研究了两种有机膨润土吸附处理苯胺的性能及适宜条件^[28];分别用溴化十八烷基三甲铵(OTMAB)、溴化十六烷基三甲铵(CTMAB)和溴化十二烷基三甲铵(DTMAB)改性膨润土,研究了有机膨润土吸附水中 α -萘胺、 β -萘胺和 α -萘酚的性能及适宜条件^[29];分别用溴化十二烷基三甲铵(DTMAB)、溴化十四烷基苄基二甲基铵(TPAC)、溴化十六烷基三甲铵(CTMAB)溴化十八烷基三甲铵(OTMAB)改性膨润土研究了有机膨润土吸附水中菲、蒽、萘、芘的适宜条件、性能及机理^[30];制备了一系列双阳离子有机膨润土,用于吸附水中的苯胺、对硝基苯酚、2,4-二氯酚,研究了两种表面活性剂不同配比和有机物本身性质对膨润土吸附特征的影响及规律^[31];用正交实验法研究微波合成有机膨润土的适宜条件,并对微波法与常规方法合成有机膨润土的结构及吸附水中有机污染物的性能作比较^[32];用长碳链季铵盐溴化十六烷基三甲铵(CTMAB)与短碳链阳离子表面活性剂(TMAB)按不同配比改性膨润土,研究了双阳离子有机膨润土吸附水中菲的适宜条件、性能及机理^[33]。

蒋引珊和童振亮等(1995)^[34]通过试验研究了膨润土对电池中有害重金属离子的吸附性能,并分析了膨润土类型以及干湿性能的影响;周玉林(1995)^[35]研究了膨润土对溶液中 Cu^{2+} 离子的吸附性能,分析了膨润土中蒙脱石的含量、可交换阳离子容量以及母液的初始浓度对吸附量的影响规律;刘莺和黄晓佳等(2002)^[36]以原土(未改性的膨润土颗粒)作为比较对象,研究了有机膨润土对水中的非极性有机化合物和阴离子污染物的吸附性能;陈林(2003)^[37]研究了改性膨润土对水中铵根离子的吸附性能;王忠安(2004)^[38]进行了用膨润土吸附的方法去除废水中重金属离子的研究;张富韬(2003)^[39]以环境矿物材料-膨润土为原料,研制新型、高效、廉价的吸附剂,研究了对镍、铁、铜、甲醛、苯酚、苯胺、氨氮和硝酸根氮的吸附规律;席永慧(2003)^[40]通过大量的实验室摇动-接触(batch-contact)试验,研究粉煤灰对有毒有害金属阳离子(Ni^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Pb^{2+})吸附量的大小、吸附等温线的型式,并同时与膨润土、天然黏土、粉质黏土进行对比研究;马少健和李长平等(2004)^[41]采用微波辐射技术活化膨润土制备 Cu^{2+} 废水处理吸附剂,研究了微波辐射时间、膨润土用量、振荡吸附时间、废水中 Cu^{2+} 初始浓度、pH值等对微波活化膨润土吸附去除 Cu^{2+} 效果

的影响；杨秀红和胡振琪等（2004）^[42]通过等温吸附试验研究了改性膨润土及钠化钙基膨润土对 Cd^{2+} 的吸附，并与土壤对 Cd^{2+} 的吸附进行了比较，并分析了pH值的影响；宋宝华和邹东雷等（2004）^[43]利用HDTMA对膨润土进行有机改性，以苯酚为研究对象，通过一系列实验研究HDTMA的最佳改性浓度及其吸附苯酚的效果和影响条件；于瑞莲和胡恭任（2005）用溴代十六烷基吡啶对天然膨润土进行改性，研究其去除垃圾渗滤液中COD和色度的适宜条件^[44]；用苜基二甲基十四烷基氯化铵对膨润土进行改性，并用BAC-膨润土处理水质复杂的垃圾渗滤液^[45]；蓝磊和童张法等（2005）^[46]用制备的改性膨润土对含Cr(VI)模拟废水进行吸附实验，分析了改性土用量、pH值和吸附时间对吸附率的影响，并对吸附机理进行了探讨。

国外学者中，Smith和Jaffe（1990）^[47]、Smith和Galon（1995）^[48]以及Kapoor和Viraraghavan（1998）^[49]研究了有机膨润土对水中阳离子和有机物产生吸附的规律并从微观的角度进行了机理分析；Triantafyllou和Christodolou等（1999）^[50]以及Kaya和Oren（2005）^[51]通过试验研究了钠化膨润土对水中重金属离子的吸附作用；Khan和Rehman等（1995）^[52]、Khan和Rehman等（1995）^[53]、Bereket和Aroguz等（1997）^[54]、Mellah和Chegrouche（1998）^[55]以及Khandelwal和Rabideau（1998）^[56]研究了天然膨润土对水中重金属离子的吸附规律。

虽然对膨润土吸附能力的研究非常广泛，但是这些研究有几个共同之处：
①对天然膨润土进行改性，研究改性前后膨润土吸附能力的变化；
②研究手段非常相似，都是将膨润土放到所要研究的溶液中浸泡，采用离心或者搅拌的方式使膨润土的吸附能力充分发挥；
③经膨润土吸附后的溶液采用某种方式测量某种物质的浓度来计算吸附率，必要时采用X射线衍射和扫描电镜等方式从微观角度进行分析。而GCL用到实际工程中时，它的吸附能力的发挥主要是在液体渗透过程中，上述研究方法大多为简单地使用浸泡的方式来研究膨润土的吸附能力，这样与实际情况相脱节。本文拟将吸附能力研究与液体透过GCL的过程相结合，主要研究GCL对渗透液体的吸附能力，类似研究在国内外还没有开展。

1.3.3 GCL内部剪切强度的研究

国内至今没有学者开展过这方面的研究工作，在国外，学者们针对GCL的内部剪切强度开展了一些研究工作，主要包括：Gilbert和Scranton等（1998）^[57]

指出目前试样的水化条件和剪切速率对室内剪切试验的结果存在很大的影响，他们通过研究提出了采用直剪仪测量GCL内部剪切强度的试验方法；Fox和Rowland等（2005）^[58]采用大型直剪仪对粘合GCL、缝合GCL和针刺GCL的内部剪切强度进行了试验研究，该直剪仪可以量测出GCL的峰值剪切强度和残余剪切强度，试验研究了正应力、GCL类型和水化条件对GCL内部的峰值剪切强度和残余剪切强度的影响规律；Zornberg和McCartney等（2005）^{[59][60]}采用大型直剪仪对414组GCL试样的内部剪切强度进行了试验研究，研究了GCL类型、正应力和剪切速率的影响规律。

他们的研究虽然涉及到了正应力、GCL类型、水化条件和剪切速率对GCL内部剪切强度的影响，而且所采用大型直剪仪可以测量出GCL内部剪切强度的峰值和残余值，但是没有考虑到不同水化液的影响。实际工程应用中，GCL可能被不同种类的液体水化，此时其内部剪切强度的变化对防渗系统是否发生破坏具有重要的意义。本文的研究就是从这方面入手，主要研究了几种液体水化后GCL内部剪切强度的变化规律。

随着人们对水资源的关注，对环境污染的问题逐渐也重视起来了。现在很多工程项目都需要作防渗处理，如渠道、地下储油罐和垃圾填埋场等，对于防渗材料防渗有效性的研究也越来越受到工程界和学术界的重视。值得一提的是目前GCL作为一种经济、有效的防渗材料被越来越多的应用到市政工程、水利工程、人工湖及建筑地下室、防渗等工程之中，本文研究的成果完全可以推广到这些领域。由此可见，本文的研究成果将不仅在学术界富有理论内涵，还具有重要的工程应用价值。

1.4 研究内容及创新点

本文将研究如下与 GCL 防渗有效性相关的问题：

1) 能够对单独承受竖向应力或水平向应力的 GCL 进行渗透试验的土工合成材料渗压仪的研制。

2) GCL 在承受不同应力水平下渗透性能的试验研究，包括：

☆GCL 水化膨胀规律的研究；

☆渗透压力对 GCL 渗透系数影响的研究；

☆GCL 在承受不同竖向应力时渗透系数的变化规律及影响因素的研究；

☆GCL 在承受不同水平向应力时渗透系数变化规律的研究。

3) 水化液和渗透液的不同对 GCL 渗透性能和吸附能力的研究, 包括:

☆对几种渗透液体进行化学分析, 确定其中金属离子的浓度和有机物的含量;

☆对采用不同液体水化、渗透的 GCL 进行自由膨胀试验、水化膨胀试验和渗透试验, 研究液体对 GCL 膨胀特性和渗透性能的影响;

☆对 GCL 中膨润土进行试验前后的微观结构分析, 探讨液体对 GCL 膨胀性和渗透性能产生影响的原因;

☆对填埋场垃圾渗滤液、老港垃圾填埋场场内池塘水在渗透前后进行化学分析, 以此来研究液体渗过过程中 GCL 对金属离子和有机物的吸附性能。

4) 溶液特性对 GCL 渗透性能影响的研究, 包括:

☆研究溶液中离子的离子价、浓度、水化离子半径对 GCL 中膨润土自由膨胀量的影响规律;

☆研究溶液中阳离子的离子价、浓度以及水化离子半径对 GCL 渗透性能的影响规律;

☆对溶液水化后的 GCL 中膨润土进行微观分析, 并对水化后的溶液进行离子分析, 研究溶液特性对 GCL 膨胀性和渗透性产生影响的原因;

☆采用膨润土分阶段水化理论和双电层理论对 GCL 膨胀特性和渗透特性变化规律的机理进行分析。

5) 水化液体类型对 GCL 内部剪切强度影响规律的研究。

☆研究水化液体类型和正应力对 GCL 内部剪切强度的影响;

☆结合运动破坏分析方法将试验研究结果应用到垃圾填埋场边坡稳定性计算中, 并对稳定性的影响因素进行了分析研究。

本文的创新点有以下几个方面:

(1) 研究开发能对 GCL 在承受不同应力水平下的渗透系数进行试验的土工合成材料渗压仪;

(2) 研究在渗透过程中 GCL 对液体中离子和有机物的吸附性能, 这样的研究更加具有实际意义;

(3) 结合微观分析手段, 采用膨润土分阶段水化理论和双电层理论揭示 GCL 的膨胀性能和渗透性能发生变化的机理;

(4) 通过剪切试验, 研究水化液体类型和正应力对 GCL 内部剪切强度的影响。

第2章 试验材料、仪器及试验方法

本章首先介绍了室内试验所使用的土工织物膨润土垫（GCL）的相关性能指标，然后对本文涉及的水化膨胀试验、渗透试验、自由膨胀试验、化学分析、微结构研究和剪切试验使用仪器设备的结构、特点、工作原理以及使用方法进行详细地阐述，为后续试验研究工作奠定了基础。

2.1 试验材料 GCL

本文室内试验所采用的 GCL 产自江苏省宜兴市非织造布厂，它是将颗粒状的钠基膨润土通过针刺的方式包裹在两层土工织物之间，属于 Bentomat 类型，单位面积质量为 5.32kg/m^2 ，如图 2.1 所示，底层土工织物是单位面积质量为 112g/m^2 的编织土工织物，上层土工织物是单位面积质量为 221g/m^2 的无纺土工布。材料生产商所提供的关于土工织物膨润土垫的基本特性指标见表 2.1。

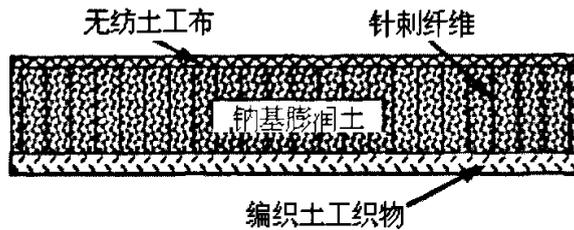


图 2.1 土工织物膨润土垫(GCL)示意图

为了试验研究的准确性，特地对厂商提供的材料进行了试验研究，测得该 GCL 中天然钠基膨润土的含水量为 17.0%（略高于技术指标中 $\leq 12\%$ 的要求，这是因为材料出厂以后在潮湿房间里面放置过久的缘故），对蒸馏水的自由膨胀量为 28.0 ml/2g 。X 射线荧光光谱分析的结果表明膨润土中 SiO_2 的含量为 57.2%， Al_2O_3 的含量为 16.1%， Fe_2O_3 的含量为 5.7%，可知该膨润土的硅铝率为 2.62，介于蒙脱石（硅铝率为 4）和高岭土（硅铝率为 2）之间。图 2.2 为 GCL 中膨润土的 X 射线衍射的结果曲线，通过对衍射曲线的分析可知该膨润土中蒙脱石（Montmorillonite）的含量为 67%，高岭土（Kaolinite）的含量为 14%，伊利石

(Illite) 的含量为 12%，正长石 (Orthoclase) 的含量为 4%，石英 (Quartz) 的含量为 2%。通过试验得到的 GCL 中膨润土的各方面性能指标列于表 2.2。

表 2.1 厂家提供的 GCL 的基本特性指标

试验项目		单位	指标值	检测标准	
无纺 土工 布	单位面积质量		g/m ²	221.0	GB/T 13762-1992
	断裂强度	纵向	kN/m	6.77	GB/T 15788-1995
		横向		7.27	
	断裂伸长率	纵向	%	51.67	
		横向		72.50	
编织 土工 布	单位面积质量		g/m ²	112.0	
	断裂强度	纵向	kN/m	22.62	GB/T 15788-1995
		横向		21.41	
	断裂伸长率	纵向	%	18.33	
		横向		19.67	
膨润 土	膨胀系数		ml/2g	24.70	
	含水量		%	11.80	ASTM D4643
	流体损耗		ml	17.60	ASTM D5891
土工 织物 膨润 土垫	单位面积质量		kg/m ²	5.56	GB/T 13762-1992
	厚度		mm	6.78	GB/T 13761-1992
	断裂强度	纵向	kN/m	11.85	GB/T 15788-1995
		横向		10.28	
	断裂伸长率	纵向	%	19.50	
		横向		10.67	
	垂直渗透系数		m/s	2.69×10 ⁻⁹	
钠基膨润土含量		kg/m ²	5.32	ASTM D3776	

表 2.2 试验得到 GCL 中膨润土的性能指标

性能	指标值	性能	指标值
初始含水量/%	17.0	Na ₂ O	3.3
初始厚度/mm	6.65~6.84	K ₂ O	0.7
pH	9.89~10.67	MgO	3.7
化学成分	含量/%	离子交换能力/mmol/g	
SiO ₂	57.2	Na ⁺	0.445
Al ₂ O ₃	16.5	K ⁺	0.010
CaO	3.4	Ca ²⁺	0.159
TiO ₂	0.8	Mg ²⁺	0.017
Fe ₂ O ₃	5.7	对蒸馏水的自由膨胀量/ml/2g	28.0

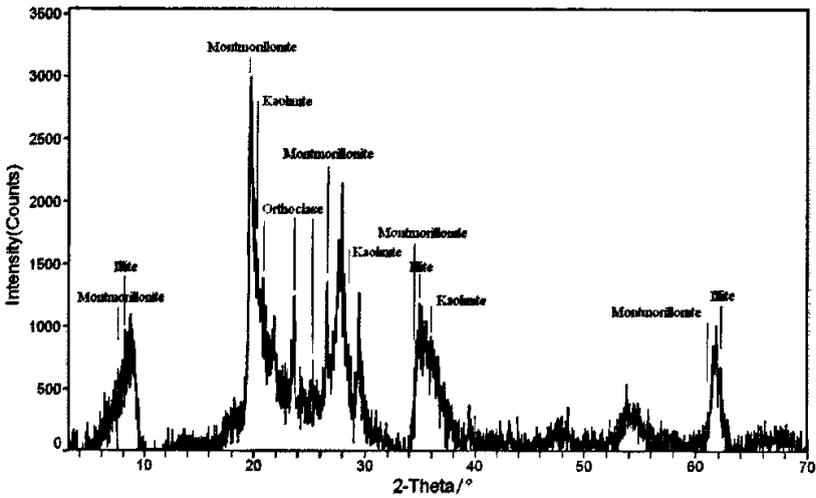


图 2.2 GCL 中膨润土的 X 射线衍射曲线

采用万能试验机对天然 GCL 和完全水化后的 GCL 进行纵向拉伸试验，得到 GCL 的应力应变关系曲线如图 2.3 所示。从图中可以看出，天然 GCL 的断裂强度为 10.48kN/m，断裂伸长率为 17.0%，都略小于厂家提供的 11.85 kN/m 的断裂强度和 19.5%的断裂伸长率；而水化 GCL 的断裂强度为 9.31kN/m，断裂伸长率为 21.0%。完全水化后虽然 GCL 的断裂强度减小了，但是伸长率增大了，因此，GCL 水化后抵抗不均匀变形的能力提高了。

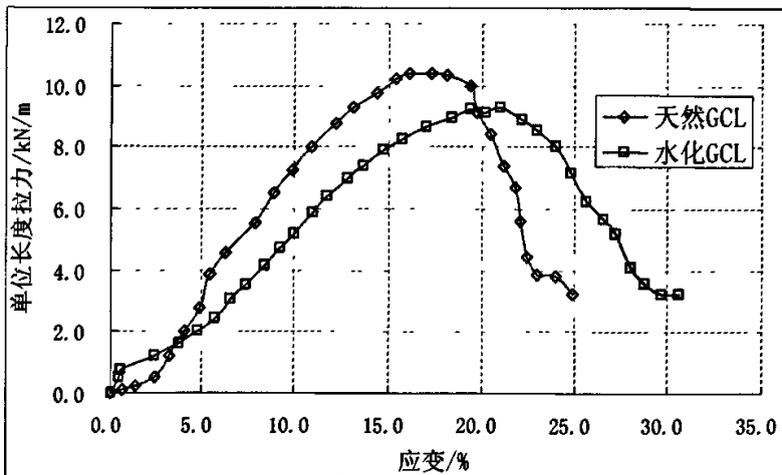


图 2.3 GCL 的应力应变关系曲线

2.2 水化膨胀试验

借助常规固结仪来进行水化膨胀试验，试样面积为 30cm^2 ，通过砝码施加竖向应力，而固定在固结仪顶部的千分表可以对试样的竖向变形量进行实时量测。GCL 水化膨胀试验的方法和步骤如下：

(1)首先切一块尺寸为 $10\text{cm}\times 10\text{cm}$ 的 GCL，然后把环刀放在试样中间部位，用彩色笔沿着环刀内侧做标记，移去环刀，用带针头的注射器向标记处的 GCL 中注入少许水化液，静置 2~3 分钟后用锋利的剪刀沿着彩色标记剪开 GCL。

(2)把 GCL 放入到干燥的固结仪中，GCL 上、下两侧均要放置透水石和滤纸，放置过程如图 2.4 所示。

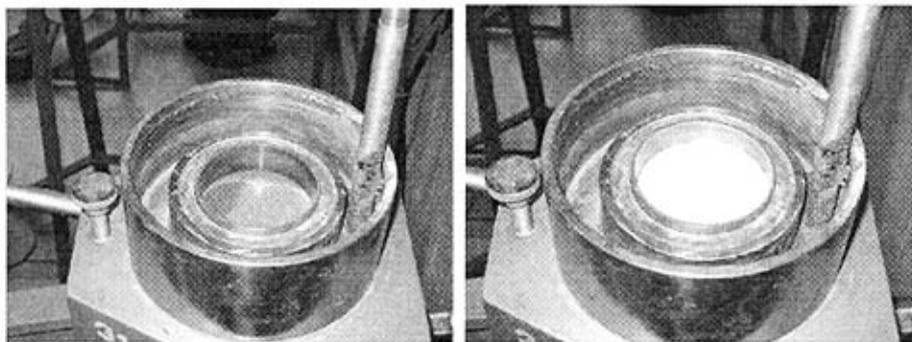
(3)把固结仪其它部分安装好，不放置砝码，固结仪静置 10 分钟后，记录千分表的读数作为初读数。

(4)放置砝码施加某一等级的竖向应力，同时开始记录千分表的读数和历时。

(5)待 GCL 的变形稳定后（24 小时内变形量不超过 0.001mm ）向固结仪中加满水化液，对千分表的读数和进行实时量测。

(6)待 24 小时内 GCL 的变形量不超过 0.001mm 时即可终止试验。

为了消除温度对试验结果的影响，本文所进行水化膨胀试验均在 $20^\circ\text{C}\pm 2^\circ\text{C}$ 的温度下进行。



a) 固结仪底部放置透水石

b) GCL 试样放入固结仪中



图 2.4 GCL 试样放入固结仪的过程

2.3 渗透试验

2.3.1 土工合成材料渗压仪 Geo-Syn

2.3.1.1 构造和特点

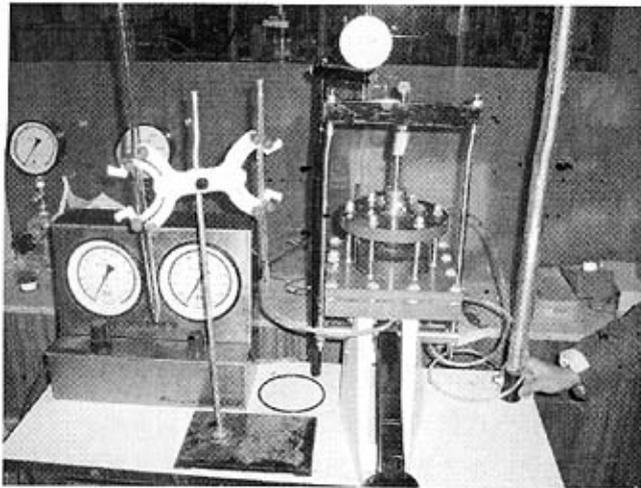


图 2.5 土工合成材料渗压仪 Geo-Syn

通过搜集大量国内外渗压仪方面的资料，并结合土工合成材料的特点，自

行研制了土工合成材料渗压仪 Geo-Syn，该仪器由压力室、加压系统、渗透压力施加系统和量测系统几部分组成，能够进行土工合成材料在承受竖向压力或水平向拉力时的渗透试验，图 2.5 为 Geo-Syn 渗压仪的实物图。

压力室是仪器的核心部分，它的密封性能是试验成败的关键所在。图 2.6 是压力室的前视图和上视图，压力室分为上、下两盘，土工合成材料试样放置在两盘之间，两盘由 12 根螺栓连接起来。上盘包括底座、有机玻璃罩、盖板、竖轴、螺栓、刚性承压板和透水石几个部分，其中底座由厚度为 1cm 的方形刚板制成，中间有直径为 11cm 的开口；盖板顶部有一直径为 3mm 的小孔，用螺栓拧紧密封，用于排出压力室中的空气，侧方直径为 2mm 的小孔用来施加渗透压

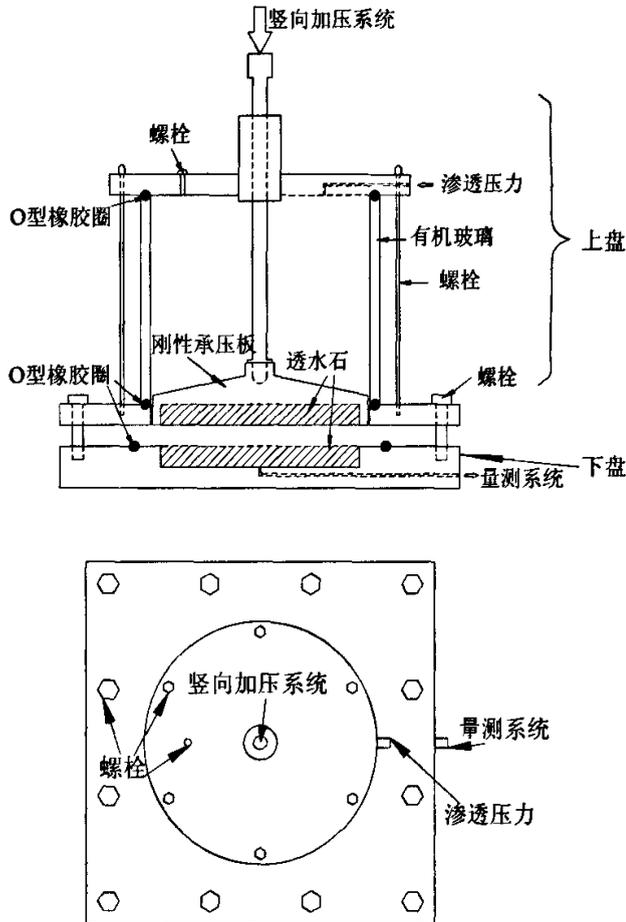


图 2.6 渗压仪压力室的前视图和上视图

力；有机玻璃罩由厚度为 1cm 的有机玻璃制成，可以承受超过 2MPa 的压力，与盖板和底座接触处分别用 O 型橡胶圈密封，盖板和底座通过 6 根长螺栓固定在一起；竖轴上可以施加竖向应力，竖轴与盖板的接合处密封和润滑良好；刚性承压板的作用是把竖轴的力均匀地传递给直径为 10cm 的透水石，刚性承压板直径略大于透水石是为了便于在试样周围涂抹膨润土来防止侧壁渗透。下盘由厚度为 2cm 的方形钢板制成，中间有一直径 10cm、深 1cm 的凹槽，凹槽中心有一个直径为 2mm 的小孔，渗透过的液体流过小孔进入到量测系统。

加压系统包括竖向加压系统和水平加压系统，Geo-Syn 型土工合成材料渗压仪只能对单独承受竖向应力或水平向应力的土工合成材料进行渗透试验，竖向加压系统类似常规固结仪，杠杆比为 10:1，通过悬挂砝码来施加竖向应力，所能施加的最大竖向应力为 400kPa，通过安装在加压系统顶部的千分表来量测试样的竖向变形。进行单独承受竖向应力的土工合成材料渗透试验时，试样放置方法如图 2.7 所示，试样放置在上盘内部，这时上下两盘直接接触，先拧紧连接上下盘的螺栓，然后将试样放置在上盘的开口中。

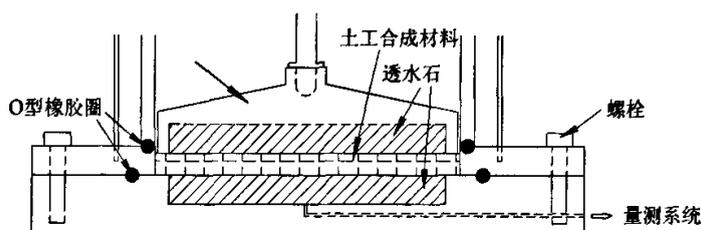


图 2.7 土工合成材料的放置（承受竖向应力）

水平加压系统如图 2.8 所示，由底座、拉杆、螺旋千斤顶和应力环组成，进行单独承受水平向应力的土工合成材料渗透试验时，试样放置方法如图 2.9 所示。试验时首先将压力室下盘放在图 2.8 中 A 处，然后把土工合成材料试样平铺在上面，试样的宽度略小于上、下盘间螺栓的最大间距，利用两端的夹具 B 和 C 将试样夹紧，然后利用螺旋千斤顶 D 施加水平向拉力，通过应力环 E 读取拉力和试样伸长量来计算水平向应变。达到试验所需水平向应变时停止加载，把压力室上盘放在试样上并拧紧连接上、下盘的螺栓即可进行渗透试验，试验过程中通过调节螺旋千斤顶保持稳定的水平向应变。

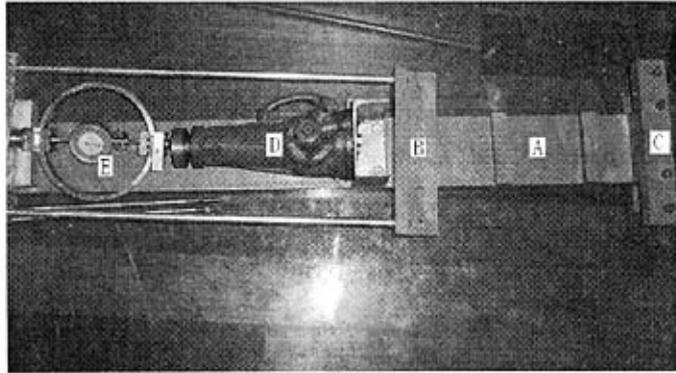


图 2.8 水平加压系统实物图

A: 压力室下盘放置区; B: 可动夹具; C: 固定夹具; D: 螺旋千斤顶; E: 应力环

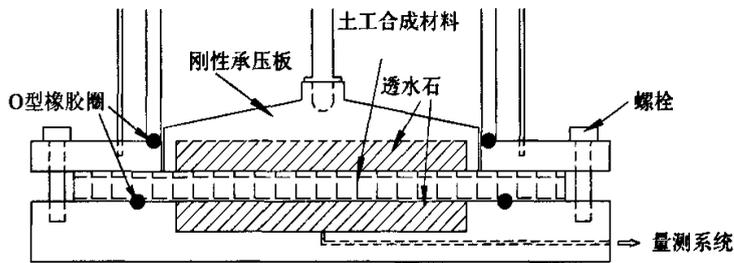


图 2.9 土工合成材料的放置 (承受水平向应力)

渗透压力施加系统包括气压源设备和气水转换装置, 同济大学岩土工程重点实验室的气压装置可以不间断提供 0~5MPa 的稳定气压, 气水转换装置采用的是体变管, 可以将气压转换为液体压力。

量测系统包括渗入、渗出土工合成材料的液体体积的量测, 渗入液体的体积通过体变管量测, 精度为 0.1ml, 渗出液体体积采用滴管量测, 可以通过选择不同精度的滴管来控制测量精度。

本文所研制的 Geo-Syn 型土工合成材料渗压仪具有以下特点:

☆密封良好。试样与压力室侧壁之间通过涂抹钠基膨润土密封, 经过采用有色溶液进行试验发现涂抹的钠基膨润土密封良好, 液体只从试样渗出。

☆通过气水转换装置可以施加最大 2.0MPa 的渗透压力, 使得即使当渗透系数非常小的情况下试验也能够在较短时间完成。

☆能够对试样施加最大 400kPa 的竖向应力, 使得仪器可以进行承受竖向应

力条件下土工合成材料的渗透试验；通过水平拉力系统能够对试样施加水平应力，使得仪器可以对发生水平向应变后的土工合成材料进行渗透试验。

☆能够精确量测渗入、渗出试样的液体体积，其中渗入液体体积量测精度为 0.1ml，渗出液体体积的量测精度最高可达 0.01ml。

2.3.1.2 工作原理

土工合成材料渗压仪 Geo-Syn 是常水头渗透试验装置，其原理是达西定律，表达式为：

$$Q = K \cdot I \cdot A \cdot t \quad (2.1)$$

式中 Q —渗透流量 (m^3)；
 K —渗透系数 (m/s)；
 A —土工合成材料的渗透面积 (m^2)；
 I —水力梯度；
 t —渗透时间 (s)。

土工合成材料渗压仪的渗透压力是通过气压来施加的，故水力梯度的计算公式为：

$$I = p / \gamma_w / H \quad (2.2)$$

式中 p —渗透压力 (kPa)；
 γ_w —水的重度，这里取 9.81kN/m^3 ；
 H —土工合成材料试样的厚度 (m)。

试验时需要量测的物理量有渗透流量、渗透压力、渗透面积、试样厚度和渗透时间，通过下式可以得到土工合成材料的渗透系数：

$$K = \frac{Q \cdot \gamma_w \cdot H}{p \cdot A \cdot t} \quad (2.3)$$

2.3.2 GCL 渗透试验方法和步骤

对于单独施加竖向应力或单独施加水平向应力的 GCL 渗透试验，试验的方法和步骤是有所区别的，单独施加竖向应力时渗透试验按以下步骤进行：

(1)切一块尺寸为 $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ 的 GCL，然后把渗压仪的刚性承压板放在试样

中间部位，用彩色笔沿着承压板外侧做标记。

(2)移去承压板，用带针头的注射器向标记处的 GCL 中注入少许水化液，静置 2~3 分钟后用锋利的剪刀沿着彩色标记剪开 GCL。

(3)把渗压仪上、下两盘固定在一起，将一块直径为 10cm、厚度为 1cm 的干燥透水石放在下盘的凹槽中，上面放置一块同样大小的滤纸。

(4)把切好的 GCL 试样放置在滤纸上，上面放置一张直径为 10cm 的滤纸，然后放置一块直径为 10cm、厚度为 1cm 的干燥透水石，透水石上面放置刚性承压板。

(5)把有机玻璃罩放置好以后将连接盖板和底座的螺栓拧紧。

(6)把安装好的压力室放到不施加压力的加压系统上，放置 10 分钟后读取加压系统上的百分表读数作为初读数。

(7)施加某一等级的竖向应力，每隔一小时读取百分表读数，待 24 小时内 GCL 竖向变形量不超过 0.001mm 后向压力室中注入水化液。

(8)待 24 小时内 GCL 的变形量不超过 0.001mm 时，取下并打开压力室，把 GCL 上的刚性承压板、透水石和滤纸拿掉，将使用水化液拌合的钠基膨润土均匀的涂在 GCL 试样四周并压紧。

(9)把滤纸、透水石和刚性承压板放回，安装好压力室，并注满渗透液，放到加压系统中并施加竖向应力。

(10)放置 24 小时后，将压力室与量测系统和渗透压力施加系统连接，施加渗透压力，通过体变管和滴管量测一段时间内渗入和渗出 GCL 的液体体积，时间采用秒表量测，精度为 0.01s，液体的 pH 值和电导率采用哈希公司生产的 sensION™378 台式多参数测定仪（如图 2.10 所示）来测定。

(11)渗透试验满足结束标准后即可终止试验。



图 2.10 sensION™378 台式多参数测定仪

单独施加水平向应力时，GCL 渗透试验要按以下步骤进行：

(1)切下一条长度为 28cm、宽度为 20cm 的 GCL 试样。

(2)把渗压仪下盘放到水平加压系统的 A 处（参见图 2.9），将干燥的透水石和滤纸放到下盘的凹槽中，然后把切好的 GCL 试样放置在下盘上面，并用夹具 B 和 C 夹紧。

(3)通过螺旋千斤顶对试样施加水平下拉力，通过应力环量测拉力大小，并采用直尺量测 GCL 的伸长量。

(4)待水平应变达到试验数值后停止加力，将渗压仪上盘和下盘固定在一起。

(5)往上盘的开口中加入水化液，使 GCL 试样完全水化，在此过程中通过调整千斤顶推力来保持稳定的水平向应变。

(6)将使用水化液拌合的钠基膨润土均匀的涂在 GCL 试样四周并压紧，依次将滤纸、透水石和刚性承压板放到试样上，安装好压力室。

(7)按上述(4)和(5)步骤进行渗透试验。

渗透试验结束是通过 ASTM D6766 标准来判断的。ASTM D6766 中规定 GCL 渗透试验的结束标准为：连续四次测得的渗透系数相差不超过 25%（渗透系数不小于 10^{-8} cm/s 时）或 50%（渗透系数小于 10^{-8} cm/s 时）；渗透液渗入渗出 GCL 的流量之比为 0.75~1.25；渗出液与渗入液的 pH 值之比和电导率 EC 之比为 0.9~1.1^[61]。

为了消除温度对试验结果的影响，本文所进行渗透试验均在 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 的

温度下进行。

2.4 自由膨胀试验

GCL 中膨润土的自由膨胀试验参照 ASTM D5890 标准进行，具体的试验方法和步骤如下^[62]：

(1)取一块 GCL，用剪刀将中间的针刺纤维剪断，取出其中的膨润土。

(2)用研钵将膨润土捣碎，使之能 80%通过直径为 0.075mm 的筛子，将过筛后的膨润土烘干。

(3)向量程为 100ml 的量筒中加入 90ml 的水化液，称取 2g 的膨润土放入其中，放入时必须加倍小心以防止洒落，2g 膨润土分为 20 次加入，每次 0.1g，待前次加入的膨润土完全沉降后才能再次加入。

(4)2g 膨润土完全加入后，沿着量筒侧壁加入水化液，将粘在侧壁的膨润土冲洗下去，直至液体体积为 100ml 为止。

(5)用保鲜膜封住量筒上口，静置24小时后读取量筒中沉降后膨润土的体积，精确到0.5ml。读数时应忽略任何低密度的絮状物质(有时呈浅白色)，从沉降的膨润土顶部算起，如图2.11所示。

(6)整个试验过程中不可以晃动量筒。

为了消除温度对试验结果的影响，本文所进行自由膨胀试验均在 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 的温度下进行。

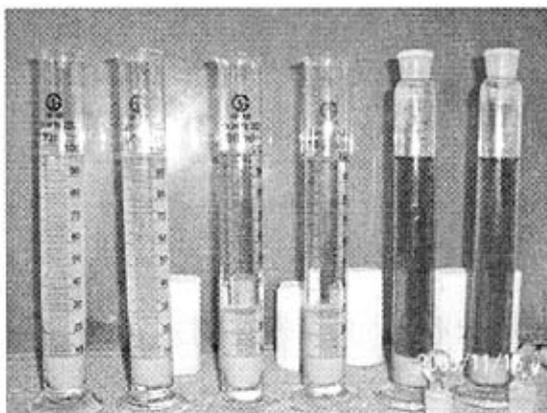


图 2.11 自由膨胀试验

2.5 化学分析的方法、仪器及原理

2.5.1 溶液 BOD₅、COD 和氨氮含量的量测

生物化学需氧量 (Biochemical Oxygen Demand, 简称 BOD) 是一个反映水中生物降解的含碳有机物的含量以及排到水体后所产生的耗氧影响指标, 它并不反映具体的 (某一种的) 有机物含量, 而只是间接地反映能被微生物分解的有机物重量, BOD₅ 是指在 5 天时测定的生物化学需氧量的值。该值的测量按照国家标准《水质 五日生化需氧量 (BOD₅) 的测定 稀释与接种法》(GB7488-87) 进行, 原理为: 测定水样培养前的溶解氧和在 20°C 下培养五天后的溶解氧, 二者之差即为五天的生物化学需氧量。为使试样中含有足够的溶解氧, 需用含有一定养分和饱和溶解氧的水 (称为稀释水) 将水样适当稀释, 直至培养后减少的溶解氧占培养前溶解氧的 40%~70% 为宜^[63]。

化学需氧量 (Chemical Oxygen Demand, 简称 COD) 是反映在一定条件下化学方法能氧化的有机物的量, 它是在高温、有催化剂以及强酸环境等条件下, 强氧化剂氧化有机物的所消耗的氧的量。该值的测量按照国家标准《水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法》(GB11914-89) 进行, 原理为: 在强酸性条件下, 一定量的重铬酸钾将水样中还原性物质 (有机的和无机的) 氧化, 过量的重铬酸钾以试剂亚铁灵作指示剂, 用硫酸亚铁铵回滴。由消耗的重铬酸钾量即可计算出水样中还原性物质被氧化所消耗的氧的 mg/l 数^[64]。

氨氮含量 (NH₄-N) 指以氨或铵离子形式存在的化合氨, 氨氮是水体中的营养素, 可导致水富营养化现象产生, 是水体中的主要耗氧污染物。该值的测量按照国家标准《水质 铵的测定 纳氏试剂比色法》(GB7479-87) 进行, 原理为: 以游离态的氨或铵离子等形式存在的氨氮与纳氏试剂反应生成黄棕色络合物, 该络合物的色度与氨氮的含量呈正比, 可用目视比色或者用分光光度法测定^[65]。

2.5.2 溶液中金属离子浓度的量测

溶液中金属离子的浓度采用美国 Perkin Elmer 公司生产的 Optima 2000DV 型等离子体原子发射光谱仪测定。测量原理为: 仪器以场致电离的方法形成大体积的 ICP 火焰, 其温度可达 10000K, 试样溶液以气溶胶态进入 ICP 火焰中,

待测元素原子或离子即与等离子体中的高能电子、离子发生碰撞吸收能量处于激发态，激发态的原子或离子返回基态时放射出相应的原子谱线或离子谱线，通过对某元素原子谱线或离子谱线的测定，可以对元素进行定性或定量分析。

图 2.12 是 Optima 2000DV 型等离子体原子发射光谱仪的实物图，它的主要技术参数及特点为：(1)垂直、水平双转换炬管；(2)频率为 40.68HZ，光谱范围为 160~900nm，分辨率为 0.003nm；(3)对 K、Na、Ca、I、P、S 等 72 种元素作定性、定量分析；(4)稳定性 RSD<1.5%，精密度 CV≤0.5%。

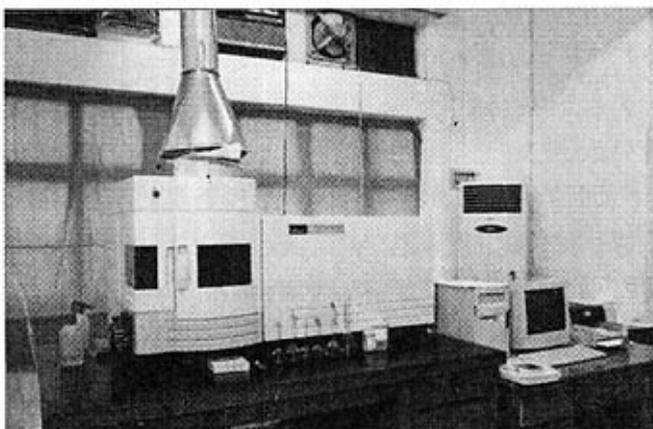


图 2.12 Optima 2000DV 型等离子体原子发射光谱仪

2.6 微观分析的方法、仪器及原理

2.6.1 X 射线衍射分析

采用日本株式会社理学 (Rigaku) 生产的 D/max2550VB3+/PC 型 X 射线衍射仪进行试验，该仪器为铜线源的，产生的 X 射线波长为 $1.54056 \times 10^{-10} \text{m}$ ，将土粉碎后过 200 号筛 (0.075 mm 孔径)，按粉末方法准备试样。X 射线扫描角度从 $5^\circ \sim 70^\circ$ ，间隔为 0.02° ，这个扫描范围和间隔可以确保找出土中的矿物。

根据衍射曲线结果，结合 Bragg 方程可以计算出膨润土中蒙脱石矿物的层面间距 d ，计算原理和方法如下^{[66][67]}：

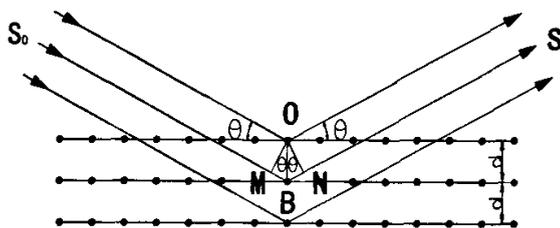


图 2.13 Bragg 反射条件

若把晶面空间点阵结构看成一簇平面的原子点阵结构，衍射 X 射线可以看作在这簇平面点阵（面网）上的反射，则可推导出晶体反射的 Bragg 条件。X 射线通过两个相邻的平面后，其光程差为（图 2.13）：

$$\Delta = \overline{MB} + \overline{BN} = 2d \sin \theta \quad (2.4)$$

虽然把 S 当成反射，但它的本质仍是 X 射线通过晶体后发生的衍射线，所以通过两相邻平面 X 射线光程差 Δ ，一定是波长 λ 的整数倍，即：

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.5)$$

式中 d —原子面层间距（晶面间距）；

θ —X 射线束与平面间的夹角；

λ —X 射线波长。

可见一束 X 射线入射在一个晶体面网上，只有满足 Bragg 条件才有可能产生“反射”，为区别不同平面反射（或衍射），式（2.5）有时写成：

$$2d_{hkl} \sin \theta_{hkl} = n\lambda \quad (2.6)$$

hkl 称为衍射指标，它的值越小， d 值越大，通常使用（001）平面组的平面点阵间距 d_{001} 来表示晶面的层间距，简写为 d 。X 射线衍射曲线的第一个峰值就是对应（001）平面组的峰值，可以读出其衍射角度，根据公式（2.6）就可以计算出层面间距。

2.6.2 X 射线荧光光谱分析

X 射线荧光光谱分析的原理是：当能量高于原子内层电子结合能的高能 X 射线与原子发生碰撞时，驱逐一个内层电子而出现一个空穴，使整个原子体系处于不稳定的激发态，激发态原子寿命约为 $10^{-12} \sim 10^{-14}$ s，然后自发地由能量高的状

态跃迁到能量低的状态。这个过程称为驰豫过程。驰豫过程既可以是非辐射跃迁，也可以是辐射跃迁。当较外层的电子跃迁到空穴时，所释放的能量随即在原子内部被吸收而逐出较外层的另一个次级光电子，此称为俄歇效应，亦称次级光电效应或无辐射效应，所逐出的次级光电子称为俄歇电子。它的能量是特征的，与入射辐射的能量无关。当较外层的电子跃入内层空穴所释放的能量不在原子内被吸收，而是以辐射形式放出，便产生X射线荧光，其能量等于两能级之间的能量差。因此，X射线荧光的能量或波长是特征性的，与元素有一一对应的关系。图2.14给出了X射线荧光和俄歇电子产生过程示意图。因此，只要测出荧光X射线的波长或者能量，就可以知道元素的种类，这就是荧光X射线定性分析的基础。此外，荧光X射线的强度与相应元素的含量有一定的关系，据此可以进行元素定量分析。

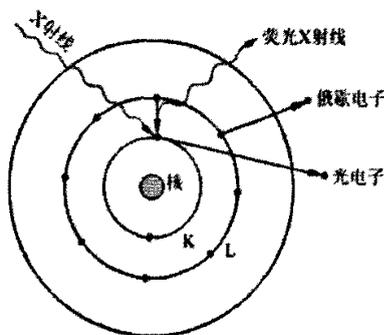


图 2.14 荧光 X 射线及俄歇电子产生过程示意图

X射线荧光光谱法具有以下特点：(1)分析的元素范围广，从 ^{11}Na 到 ^{92}U 均可测定；(2)荧光X射线谱线简单，相互干扰少，样品不必分离，分析方法比较简便；(3)分析浓度范围较宽，从常量到微量都可分析，重元素的检测限可高达1ppm，轻元素稍差；(4)分析样品不被破坏，分析快速，准确，便于自动化。

本次试验采用德国布鲁克公司生产的SRS3400型X射线荧光光谱仪，将土粉碎后过200号筛（0.075 mm孔径），按粉末方法准备试样，可以对膨润土中含有的元素进行半定量分析，得到其中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 、 TiO_2 以及 SO_3 的相对百分含量。

2.6.3 扫描电子显微镜

扫描电子显微镜的工作原理是用一束极细的电子束扫描样品，在样品表面激发出次级电子，次级电子的多少与电子束入射角有关，也就是说与样品的表面结构有关，次级电子由探测体收集，并在那里被闪烁器转变为光信号，再经光电倍增管和放大器转变为电信号来控制荧光屏上电子束的强度，显示出与电子束同步的扫描图像。图像为立体形象，反映了标本的表面结构。为了使标本表面发射出次级电子，标本在固定、脱水后，要喷涂上一层重金属微粒，重金属在电子束的轰击下发出次级电子信号。



图 2.15 XL-30 ESEM 型扫描电子显微镜

本次试验使用荷兰 Philips 公司生产的 XL-30 ESEM 型环境扫描电子显微镜进行，如图 2.15 所示。该仪器具有以下特点：(1)高性能数字信号环境扫描电镜，分辨率为 30 埃，放大倍数为 400000 倍，加速电压为 30kV；(2)全计算机菜单控制，数字图象采集、储存和打印；(3)马达驱动样品台，鼠标控制 X, Y, Z 方向移动和样品旋转，自动复位；(4)高真空模式和环境模式转换，适合干燥和含水样品的表面结构观察。

为了使拍摄的图片能够真正反映出试样的本来面貌，制备试样时要尽量保持土样的原状结构，本文试验中制备试样时，首先用细而尖的剪刀将 GCL 的针刺纤维剪断，然后采用手掰的方式取出其中的膨润土，在放大镜下选取断面较平整的试样用于试验研究。试验时首先将样品放到扫描电子显微镜中进行抽真空，真空度达到仪器要求时即可进行试验。

2.6.4 压汞试验

本次试验采用美国康塔公司的Autoscan 60型自动压汞仪,如图2.16所示。制备试样时,待水化膨胀试验或者渗透试验结束后,立刻用细而尖的剪刀将GCL的针刺纤维剪断,采用手掰的方式取出其中的膨润土,立刻放入液氮中,以快速冷冻至冰点,然后将冰冻试样在真空状态下通过升华去除水分。这一过程可消除由于气、水相之间弯液面引起的表面张力。并且在理想状态下,这一处理过程可以将因土样失水而可能引起的土体微结构变化,并进而引起土体出现收缩的可能性降至最低。

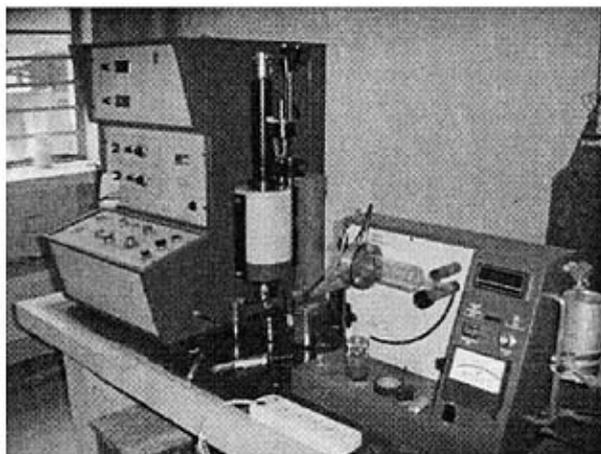


图 2.16 Autoscan 60 型自动压汞仪

压汞法测定土中孔隙分布是依据非浸润性液体在没有压力作用时不会流入固体孔隙的原理。所需压力取决于接触角、孔隙形状和液体的表面张力,根据 Washburn 公式 (1921) [68] 圆柱形孔隙注入液体时所需压力大小为:

$$P = \frac{-2\sigma \cos\theta}{r} \quad (2.7)$$

式中 P —施加的压力;

σ —导入液体的表面张力,本次试验为0.48N/m;

θ —导入液体与固体材料的接触角,本次试验为140°;

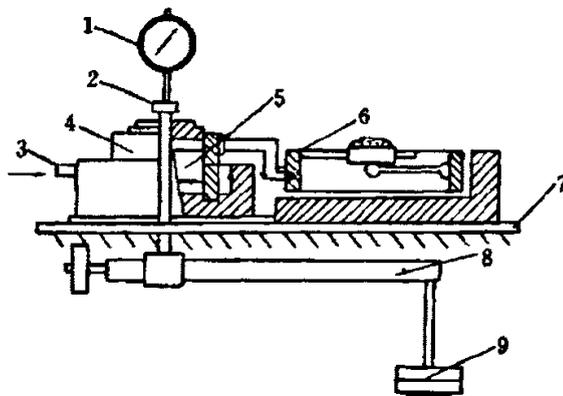
r —圆柱形孔隙的半径。

利用压汞仪将汞用不同压力注入到膨润土的孔隙中,记录每一级压力增量时的进汞量,由 Washburn 方程将压力换算成孔隙半径,便得出了土中孔隙分布

结果^[69]。

2.7 室内直接剪切试验的仪器和方法^{[70][71]}

室内直剪试验采用应变控制式直接剪切仪进行,如图2.17所示,由剪切盒(水槽、上剪切盒、下剪切盒)、垂直加压构架、剪切推动装置、测力计以及位移量测系统等组成,加压设备采用杠杆传动。测力计采用应变环,量表为百分表;采用千分表量测剪切盒的水平向剪切位移;剪切推动装置采用电动机传动设备,剪切速率为1.0mm/min;剪切位移每增大0.2mm,测读一次测力应变环的百分表读数,为了保证两者读数的同步性,采用数码摄像技术。其它所需仪器设备还有环刀、切土刀、钢丝锯、滤纸、毛玻璃片、透水石等。



1—垂直变形百分表; 2—垂直加压框架; 3—推动座;
4—剪切盒; 5—试样; 6—测力计; 7—台板; 8—杠杆;
9—砝码

图 2.17 应变控制式直剪仪结构示意图

直剪试验的方法和步骤为:

(1)对准剪切盒的上下盒,插入固定销钉,在下盒内放一块洁净透水石及一张湿润滤纸。

(2)将盛有试样的环刀,平口向下、刀口向上,对准剪切盒上盒,在试样面放一张湿润滤纸和一块透水石,然后将试样通过透水石徐徐压入剪切盒底,移去环刀,并依次放置传压活塞和加压构架。

- (3)加挂砝码，施加正应力，在加载过程中应分级加荷，轻轻放置。
- (4)施加正压力5min后，向剪切盒内注满水。放置5min后安装测力环，徐徐转动手轮，使上盒前段的钢珠恰与测力环接触，测记测力环百分表初读数。
- (5)拔去上、下盒的固定销钉，然后开动电动机，使测力环受压，测读水平向千分表读数和测力环百分表读数，直至剪切位移达到8mm直关闭电动机。
- (6)剪切结束后，卸去剪切力和正压力，取出试样，进行观察。

第3章 应力水平对 GCL 膨胀特性和渗透性能的影响

本章首先介绍了渗透压力对 GCL 渗透性能的影响规律,并选择了合适的渗透压力进行后续渗透试验,然后就竖向应力和加压水化顺序对 GCL 的水化膨胀特性和渗透性能的影响规律进行了分析探讨,最后就发生水平向应变后 GCL 的渗透性能进行了试验研究。

3.1 渗透压力的影响

为了研究渗透压力对 GCL 渗透系数的影响,对采用自来水水化、正应力为 25kPa 的 GCL 试样依次进行渗透压力为 25kPa、50kPa、75kPa、100kPa 和 150kPa 的渗透试验。各级渗透压力下试验测定的 GCL 试样渗透系数见图 3.1。可以看出,渗透系数随着渗透压力的增大有增大的趋势,当渗透压力从 25kPa 增大到 150kPa 时,渗透系数增大了 52.35%。而一般防渗工程中 GCL 所受到的渗透压力都不会大于 100kPa,并且综合实验室条件和仪器本身特点来考虑,以及试验对比的便利,本文所有渗透试验均选择在渗透压力为 50kPa 下进行。

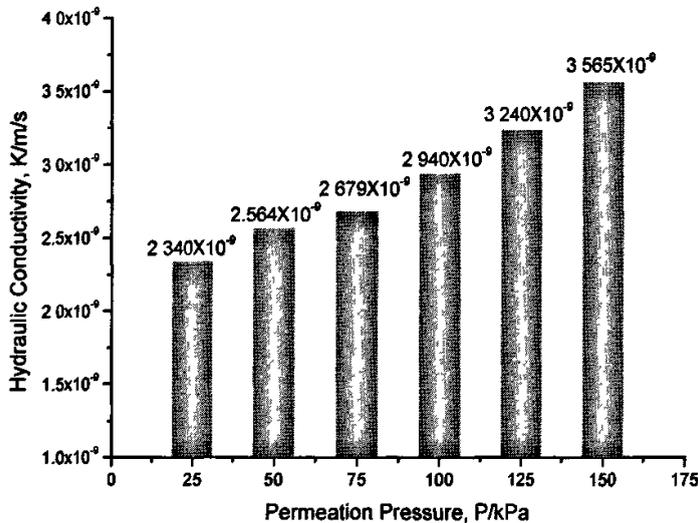


图 3.1 渗透系数与渗透压力的关系

3.2 GCL 水化膨胀特性的试验研究

GCL 用到防渗系统中时,上部必然承受竖向荷载,而且在某些工程应用中要承受相当大的竖向应力,比如用于生活垃圾卫生填埋场底部衬里系统时。因此研究 GCL 在承受竖向荷载后的水化膨胀特性是工程应用的需要。考虑到实际情况,本文主要研究 GCL 在两种条件下的水化膨胀特性:一种是在承受荷载以前没有水化,室内通过先施加竖向应力而后使其水化的方式来模拟;另一种是在承受荷载以前已经完全水化,室内通过先使其完全水化而后施加竖向应力的方式来模拟。

3.2.1 GCL 在先加压后水化条件下的膨胀特性

3.2.1.1 水化膨胀试验简介

借助常规固结仪进行水化膨胀试验,试验中 GCL 试样的面积为 30cm^2 , 首先把 GCL 试样放在固结仪中,然后施加压应力使 GCL 发生压缩变形。待压缩变形停止后,往容器中放入自来水,记录 GCL 厚度随时间的变化,直到试样在 24h 内的变形不超过 0.001mm 时即可终止试验。记录 GCL 试样的初始厚度 H_0 、压应力作用下未水化时的厚度 H_c 和最终厚度 H_w 。试验结束后,取出 GCL 试样并量测膨润土的最终含水量 ω 。

试验采用的压应力等级为 3kPa、6kPa、15kPa、25kPa、50kPa、100kPa、150kPa、200kPa、300kPa 和 400kPa。实际工程中 GCL 所承受的压应力在此应力范围内,较低的应力等级是模拟 GCL 用于封盖或者湖泊工程的情况,而较高的应力等级是模拟 GCL 用于大型垃圾填埋场的底部衬里系统的情况。

3.2.1.2 GCL 的孔隙比

为了量化膨润土单位面积质量的变化以及它对 GCL 最终厚度的影响,本文引入“GCL 孔隙比 e_B ”的概念,将之定义为 GCL 中土工织物和膨润土的总孔隙体积与土工织物和膨润土的总颗粒体积的比值,即为:

$$e_B = \frac{V_{vb} + V_{vg}}{V_s} = \frac{V_l - V_s}{V_s} = \frac{H_{GCL} - H_s}{H_s} \quad (3.1)$$

式中 V_{vb} —膨润土的孔隙体积 (cm^3);

V_g —上层和下层土工织物的孔隙体积 (cm^3);

V_s —土工织物和膨润土的总颗粒体积 (cm^3);

V_t —GCL 的总体积 (cm^3);

H_{GCL} —GCL 的厚度 (mm);

H_s —GCL 中土工织物和膨润土颗粒的厚度 (mm)。

H_s 采用下式计算得到:

$$H_s = H_b + H_g = \frac{M_B}{\rho_b(1+\omega_0)} + \frac{M_{GEO}}{\rho_g} \quad (3.2)$$

式中 H_b —膨润土颗粒的厚度 (mm);

H_g —土工织物颗粒的厚度 (mm);

M_B —GCL 中膨润土的单位面积质量 (kg/m^2);

M_{GEO} —GCL 中土工织物的单位面积质量 (kg/m^2);

ρ_b —膨润土颗粒的密度 (kg/m^3);

ρ_g —土工织物颗粒的密度 (kg/m^3);

ω_0 —膨润土的初始含水量 (%)。

对于本次试验中所用到的 GCL, 相关的参数为: $\rho_b=2.61\text{kg}/\text{m}^3$; $\omega_0=17.0\%$; $\rho_g=0.91\text{kg}/\text{m}^3$; $M_{GEO}=0.33\text{kg}/\text{m}^2$ 。

3.2.1.3 试验结果

对 GCL 试样做了正应力作用下的水化膨胀试验, 结果如表 3.1 和图 3.2~3.5 所示。从图 3.2 可以看出, 膨润土吸收水分使得 GCL 发生膨胀变形, 直到厚度不再发生变化。在正应力为 3kPa、6kPa、15kPa、25kPa、50kPa、100kPa、150kPa、200kPa、300kPa 和 400kPa 下的水化” 间依次为 12.8d、12.1d、9.8d、9.5d、8.3d、8.0d、6.0d、6.0d、5.0d 和 5.0d; 正应力较低”, 最初的蠕变速率很大, GCL 的最终水化厚度较大, 随着正应力 σ_w 的增大, GCL 的最终厚度减小, 同” 膨润土的最终含水量 ω 和最终 GCL 孔隙比 e_B 也随之降低, 这可以从表 3.1 和图 3.2~3.5 中得到。

表 3.1 GCL 试样在正应力作用下的水化膨胀试验结果

σ_w /kPa	M_{GCL} /kg/m ²	H_0 /mm	H_σ /mm	H_w /mm	ω /%	e_B
3	5.39	6.838	6.717	9.670	131.3	3.38
6	5.39	6.832	6.658	8.970	120.9	3.06
15	5.37	6.869	6.521	8.610	112.6	2.91
25	5.47	6.884	6.382	8.240	106.9	2.69
50	5.48	6.851	6.274	7.700	102.1	2.44
100	5.41	6.828	6.102	6.940	95.64	2.13
150	5.33	6.871	5.858	6.520	92.40	1.98
200	5.41	6.858	5.752	6.253	87.75	1.82
300	5.45	6.847	5.463	5.845	70.06	1.72
400	5.44	6.874	5.374	5.690	63.06	1.65

注意: M_{GCL} 是 GCL 的单位面积质量。

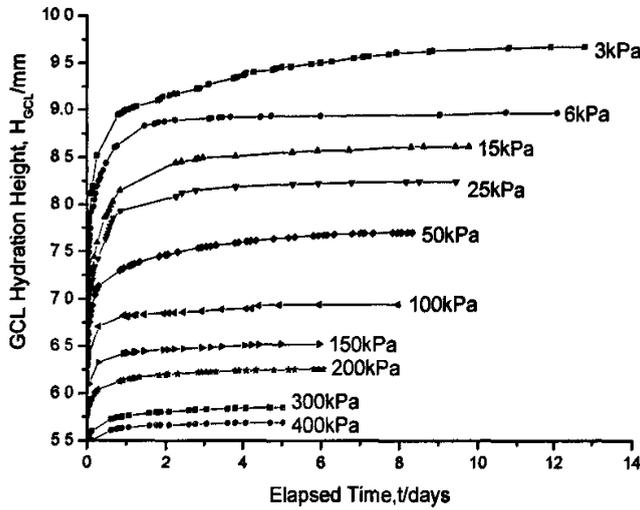


图 3.2 自来水为水化液体时 GCL 的水化膨胀曲线

压应力越低”，膨润土的最终含水量就越高，也就需要更长的”间才能完成 GCL 的水化过程。试验结果表明压应力的提高缩短了 GCL 水化”达到稳定的”间。定义水化膨胀应力 σ_s 为 GCL 最终厚度与初始厚度保持相等”的压应力，可以通过对试验结果的分析得到。图 3.3(a)是压应力作用下未水化”的 GCL 厚度 H_0 和最终厚度 H_w 随压应力变化的曲线。作为参考，GCL 的初始厚度也在图中给出。图 3.3(b)是 GCL 的厚度变化随压应力变化的曲线。统计分析可得，最

终厚度变化量 $\Delta H_w (H_w - H_0)$ 和压应力的关系式为:

$$\Delta H_w = -0.8269 \times \lg(\sigma_w) + 3.8461 \quad (3.3)$$

当最终厚度变化量 $\Delta H_w = 0$ 时的压应力就是所要求的水化膨胀应力, 因此 GCL 的水化膨胀应力 σ_c 为 104.1kPa。

如果把试验结果绘制到半对数坐标系中 (如图 3.4 所示), GCL 最终厚度 H_w (或最终 GCL 孔隙比 e_B) 与压应力 σ_w 之间呈现明显的线性关系, 关系式为:

$$H_w = 10.683 - 1.8961 \times \lg(\sigma_w) \quad (3.4)$$

和

$$e_B = 4.0247 - 0.9001 \times \lg(\sigma_w) \quad (3.5)$$

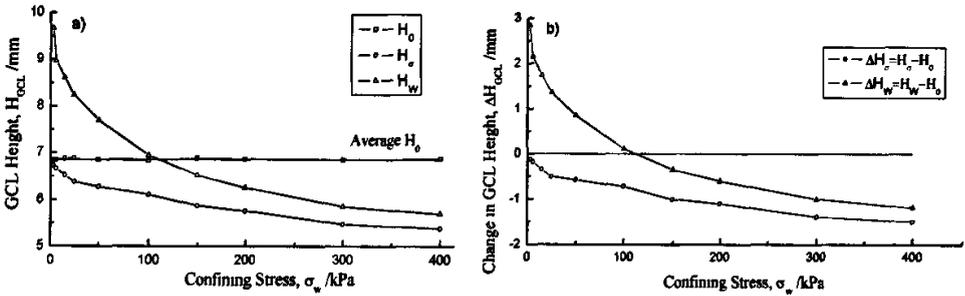


图 3.3 压应力与 (a)GCL 厚度和 (b)GCL 厚度变化量之间的关系曲线

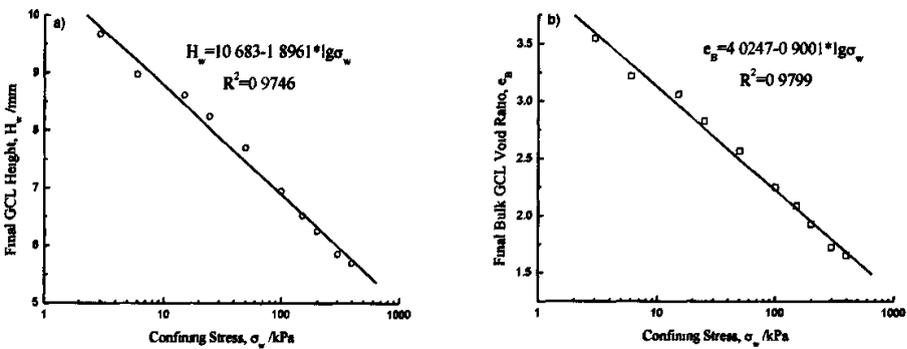


图 3.4 压应力与 (a)GCL 最终厚度和 (b)GCL 最终孔隙比的关系曲线

由图 3.4 的数据得到的公式 (3.4) 和 (3.5) 的相关系数 R^2 分别为 0.985 和 0.980。

图 3.5 是最终 GCL 孔隙比和最终厚度与膨润土的最终含水量的关系曲线。当膨润土含水量较小时, 最终 GCL 孔隙比 e_B 和最终厚度 H_w 都随着含水量的增大而缓慢增加; 当膨润土的含水量超过某一值时 (本次试验中为 87.8%), 最终 GCL 孔隙比 e_B 和最终厚度 H_w 随着含水量的增大而迅速增加。从图 3.4 中还可以看出, e_B 和 ω 之间以及 H_w 和 ω 之间存在明显的双线性关系, 本研究中, 分界点为 $\omega=87.8\%$ 。

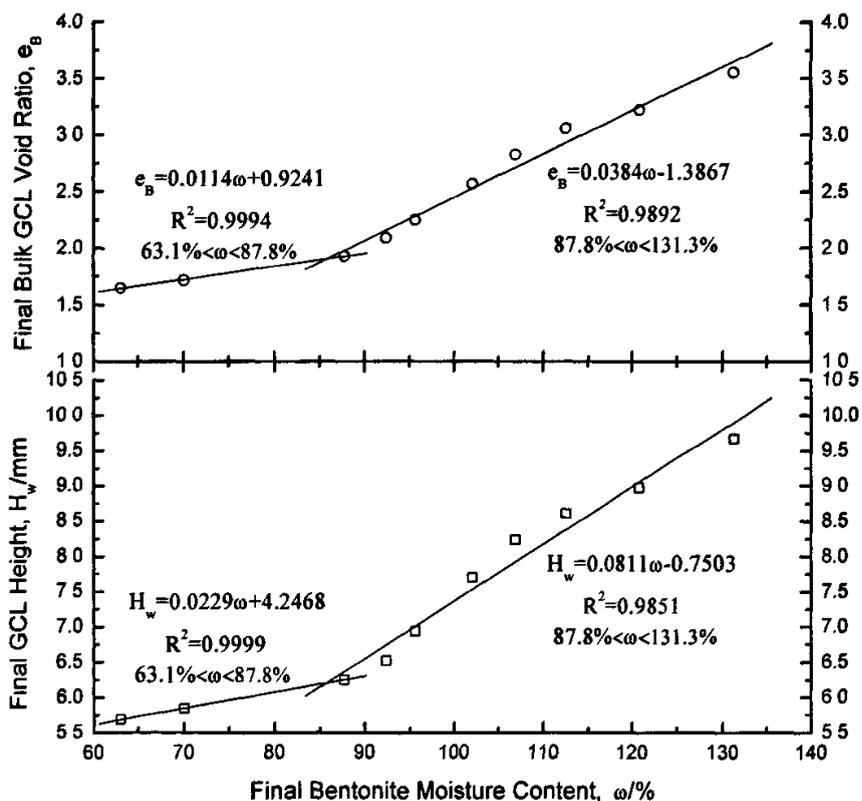


图 3.5 水化膨胀试验得到的 GCL 特性曲线

从以上分析可以看出, 对于特定的室内试验条件, σ_w 、 e_B 、 H_w 和 ω 之间存在着良好的相关性, 这表明只要选择合理的试验方式, GCL 的水化膨胀特性参数可以通过上述四个参数的任意一个来估算。

3.2.2 GCL 在先水化后加压条件下的膨胀特性

利用常规固结仪对完全水化后的 GCL 进行加压和回弹试验，试验方法类似常规固结试验，加压等级为 25kPa、50kPa、100kPa、200kPa、250kPa、300kPa、350kPa 和 400kPa，卸载等级为 200kPa、100kPa、50kPa 和 25kPa，每级荷载维持 24h。各级荷载下经过 24h 后 GCL 的厚度如表 3.2 所示，先水化后加压条件下和先加压后水化条件下 GCL 的厚度变化如图 3.6 所示。

表 3.2 GCL 在先水化后加压条件下的厚度变化

压力/kPa	0	25	50	100	200	250	300
厚度/mm	10.617	9.807	9.338	8.561	7.504	7.193	6.887
压力/kPa	350	400	200	100	50	25	0
厚度/mm	6.577	6.414	6.629	7.001	7.463	7.929	9.140

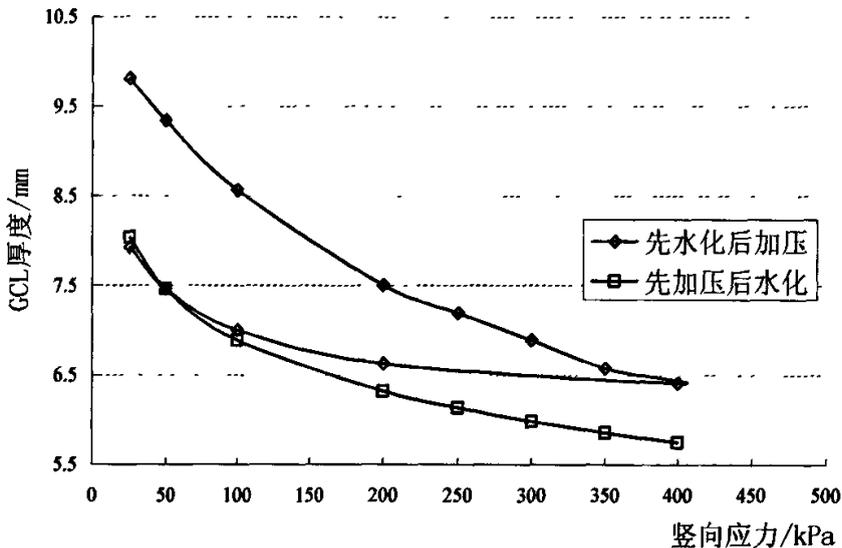


图 3.6 两种条件下 GCL 的厚度变化曲线

从图中可以看出，先加压后水化条件下 GCL 的厚度要比同等压力下先水化后加压条件小的厚度小一些，而且要比后者卸载回弹时的厚度还要小，这说明了 GCL 在完全水化后承受荷载时抵抗变形的能力提高了。

3.3 水化膨胀后 GCL 渗透性能的试验研究

3.3.1 先加压后水化条件下 GCL 的渗透特性

进行了 10 个竖向应力等级下的先加压后水化条件下的渗透试验，竖向应力分别为 15kPa、25kPa、50kPa、75kPa、125kPa、200kPa、250kPa、300kPa、350kPa 和 400kPa。为了表征流过 GCL 的液体量，引入孔隙体积流量 PVF (Pore volumes of flow) 这个参数，定义为渗过 GCL 的液体体积和 GCL 孔隙体积之比。图 3.7、图 3.8 和图 3.9 依次为竖向应力为 15kPa、125kPa 和 400kPa 下的渗透试验结果曲线。图中 pH、EC 和 Q 分别表示液体的 pH 值、电导率和流量，下标 *out* 和 *in* 分别表示渗出和渗入 GCL 液体的相关指标。

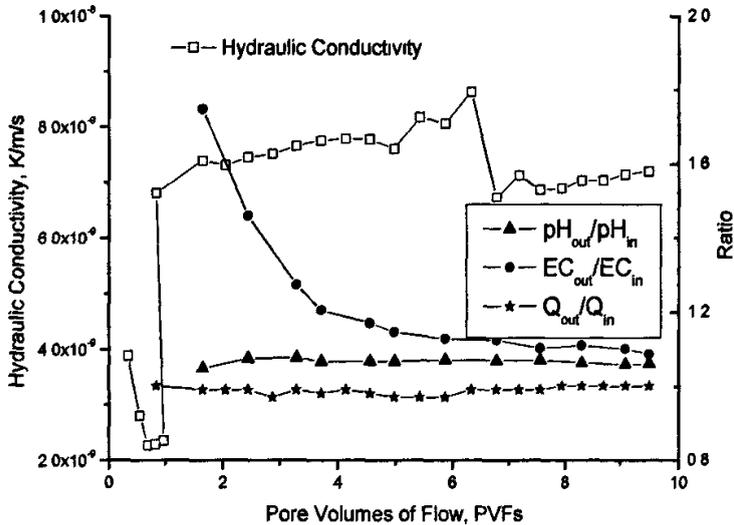


图 3.7 竖向应力为 15kPa 时的渗透试验结果曲线

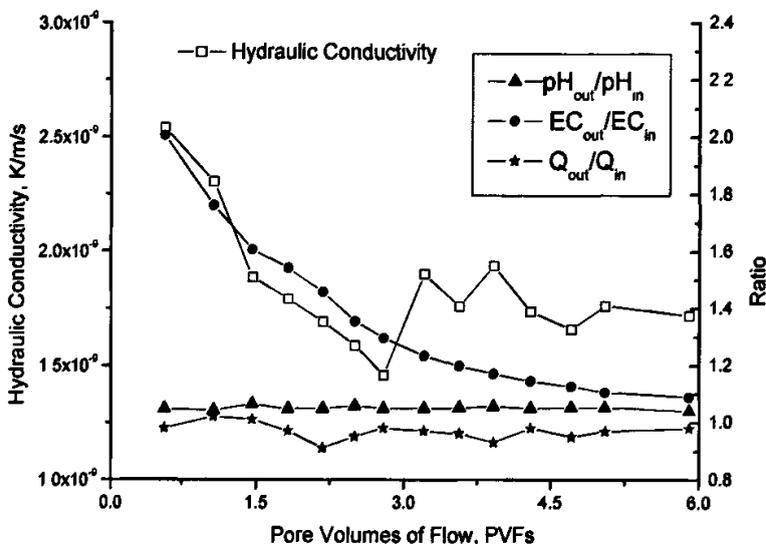


图 3.8 竖向应力为 125kPa 时的渗透试验结果曲线

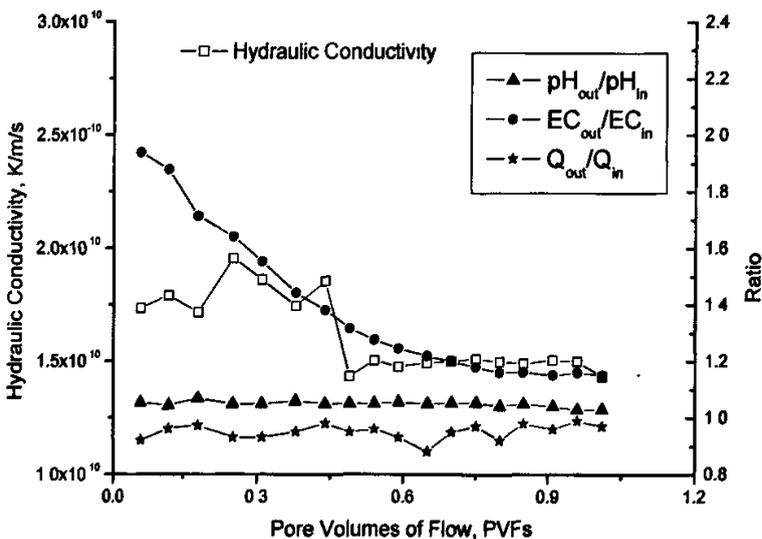


图 3.9 竖向应力为 400kPa 时的渗透试验结果曲线

从图中可以看出，采用 pH 值和渗出渗入液体 Q 之比来判断 GCL 渗透试验结束的标准很快就可以满足，但是 EC 值的判断标准要经历一段时间的渗透才能够满足。渗透系数初始阶段变动剧烈，后段逐渐趋于稳定，当 EC 值判断标准满足时，渗透系数的变动已经非常小，基本上达到了稳定。

表 3.3 和图 3.10 是先加压后水化条件下 GCL 的渗透系数随竖向应力变化的结果。从中可以看出, 当竖向应力从 15kPa 增大到 125kPa 时, 渗透系数的减小不明显, 都是 10^{-9} m/s 数量级; 当竖向应力从 125kPa 增大到 250kPa 时, 渗透系数急剧减小, 从 10^{-9} m/s 数量级明显减小到 10^{-11} m/s 数量级, 减小了近 100 倍; 当竖向应力从 250kPa 增大到 400kPa 时, 渗透系数反而有所增大, 从 10^{-11} m/s 数量级增大到 10^{-10} m/s 数量级。结合图 3.3(a)来看, GCL 的最终厚度减小趋势随着竖向应力的增大而减缓, 当竖向应力小于 125kPa 时, GCL 的最终厚度的减小量非常明显, 但是考虑到压力小时 GCL 中膨润土的孔隙比较大, 所以渗透系数的减小不明显; 当竖向应力在 125kPa 到 250kPa 之间时, 虽然 GCL 的最终厚度随竖向应力增大而减小的趋势趋缓, 但是 GCL 中膨润土的孔隙比已经很小, 所以渗透系数呈现明显的减小趋势; 当竖向应力在 250kPa 到 400kPa 之间时, GCL 的最终厚度随竖向应力增大的减小量非常小, 而且 GCL 中膨润土的孔隙比减小也非常小, 但是由于 GCL 的厚度很小, 因为水力梯度与 GCL 的厚度成反比, 所以此时水力梯度非常大, 大约为 800, 从图 3.1 可以看出, GCL 的渗透系数随着水力梯度的增大而略有增长, 也就导致在此应力水平下 GCL 的渗透系数反而出现增大的趋势。

表 3.3 先加压后水化条件 GCL 在各级竖向应力下的渗透系数

竖向应力/kPa	渗透系数/m/s	竖向应力/kPa	渗透系数/m/s
15	7.820×10^{-9}	200	2.315×10^{-10}
25	2.559×10^{-9}	250	7.383×10^{-11}
50	2.055×10^{-9}	300	9.155×10^{-11}
100	1.885×10^{-9}	350	1.404×10^{-10}
125	1.719×10^{-9}	400	1.433×10^{-10}

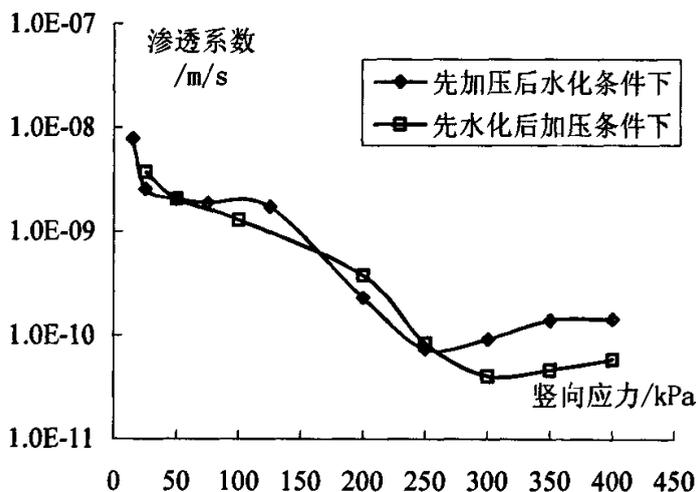


图 3.10 两种条件下 GCL 在各级竖向应力下的渗透系数曲线

3.3.2 先水化后加压条件下 GCL 的渗透特性

进行了 8 个竖向应力等级下的先水化后加压条件下的渗透试验，竖向应力分别为 25kPa、50kPa、100kPa、200kPa、250kPa、300kPa、350kPa 和 400kPa。渗透系数随竖向应力变化的情况见表 3.4 和图 3.10。从中可以看出，当竖向应力从 15kPa 增大到 100kPa 时，渗透系数的减小不明显，都是 10^9 m/s 数量级；当竖向应力从 100kPa 增大到 300kPa 时，渗透系数急剧减小，从 10^9 m/s 数量级明显减小到 10^{11} m/s 数量级，减小了近 100 倍；当竖向应力从 300kPa 增大到 400kPa 时，渗透系数也是呈现略有增大的趋势。出现这种现象的原因和先加压后水化条件下类似，是因为由于 GCL 厚度的降低，在同样的渗透压力下 GCL 的水力梯度有所增大，也就导致渗透系数出现增大的现象。

表 3.4 先水化后加压条件 GCL 在各级竖向应力下的渗透系数

竖向应力/kPa	渗透系数/m/s	竖向应力/kPa	渗透系数/m/s
25	3.732×10^{-9}	250	8.394×10^{-11}
50	2.059×10^{-9}	300	4.069×10^{-11}
100	1.307×10^{-9}	350	4.626×10^{-11}
200	3.778×10^{-10}	400	5.807×10^{-11}

比较两种条件下的渗透系数曲线可以发现，竖向应力小于 250kPa 时两者的渗透系数相差不大，但是竖向应力大于 250kPa 时先水化后加压条件下的渗透系

数要小于先加压后水化条件，这是因为当竖向应力大于 250kPa 时，先水化后加压条件下 GCL 的厚度要大一些，故渗透系数增大的现象不显著。在实际工程应用中，如果 GCL 用于承受较大的荷载的防渗系统时，最好在堆载前使其完全水化，这样它的防渗性能就能得到更好的发挥。

3.4 水平向应变对 GCL 渗透性能的影响

在防渗工程中，GCL 抵抗不均匀沉降的能力是决定防渗系统是否能够正常发挥作用的关键因素之一，而不均匀沉降将会导致 GCL 承受剪拉应力而发生拉应变。Gilbert 和 Murphy (1987) [72]验证了短距离内的不均匀沉降对垃圾填埋场封盖系统的危害要比长距离内的均匀沉降的危害大的多。不均匀沉降用畸变 Δ/L 来表征，也就是沉降量 Δ 和水平距离 L 的比值，如图 3.11 所示。由不均匀沉降引起的水平向应变 ϵ_H 可以通过图 3.12 来确定。

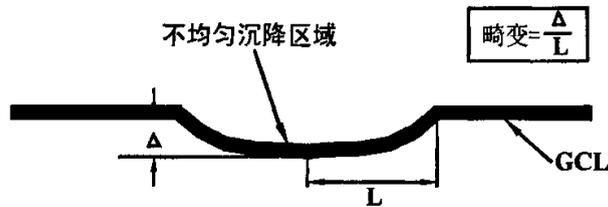


图 3.11 畸变的定义

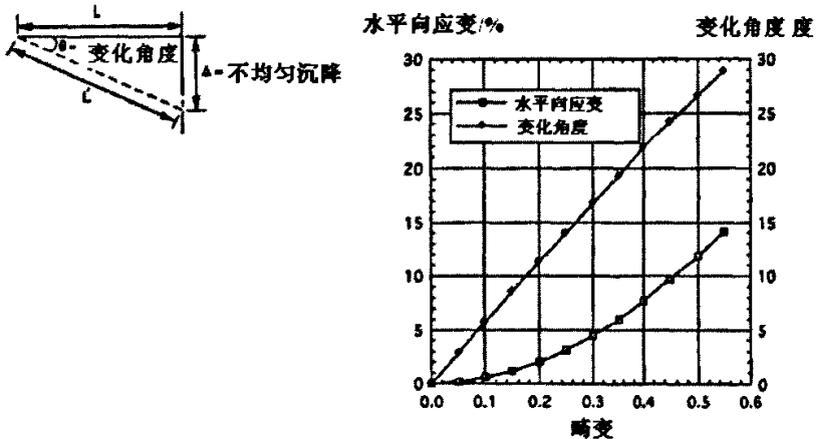


图 3.12 水平向应变及变化角度和畸变的关系

对 GCL 进行拉伸试验的结果表明（见图 2.3），GCL 的断裂应变为 17.0%，故此次对 GCL 发生水平向应变后渗透系数的试验研究中采用 6 个等级的水平向应变变量，分别为 2.0%、4.0%、6.0%、10.0%、14.0%和 16.0%，渗透液体为自来水，采用先施加水平向应变而后水化的方式，完全水化后再进行渗透试验，所施加正压力为 0kPa，渗透压力为 50kPa，试验得到的渗透系数见图 3.13。

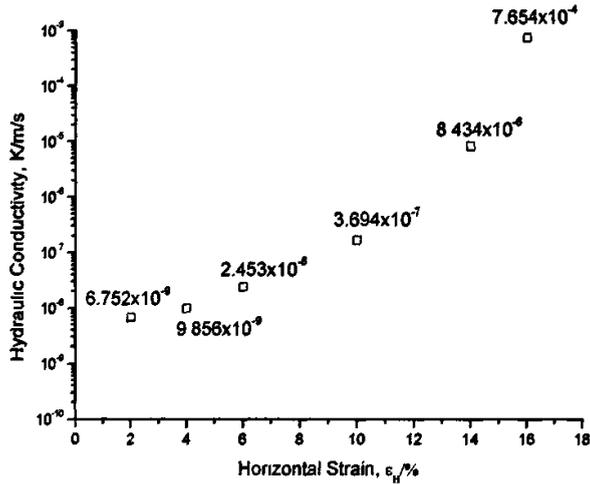


图 3.13 GCL 渗透系数与水平向应变的关系

从图 3.13 中可以看出水平向应变对 GCL 的渗透性能有很大的影响，随着水平向应变的增大，GCL 渗透系数也相应地增大，而且当水平向应变大于 6.0%后，渗透系数随水平向应变增大的速率明显加快。这是因为：当 GCL 承受水平向拉力后，不仅上、下层的土工织物产生水平向伸长，中间所夹的膨润土也被拉松散，此时膨润土遇水发生水化后孔隙度要大得多，渗透系数也就增大。当水平向应变很大（大于 6.0%）时，GCL 水化后有的地方膨润土厚度非常小，甚至出现了水平向应变为 16.0%时 GCL 中个别地方膨润土含量非常少的情况，所以此时渗透系数很高，GCL 的防渗能力完全消失，所以建议 GCL 用于防渗工程时要预估其所承受的最大不均匀沉降量，严格控制 GCL 的水平向应变在 6.0%以内，这样 GCL 的防渗能力才能得到正常发挥。

3.5 本章小结

本文通过水化膨胀试验研究了 GCL 在承受竖向应力后的变形特性,并且使用自行研制的土工合成材料渗压仪 Geo-Syn 测量了 GCL 在承受不同正应力和水平向应变条件下的渗透系数,并对数据进行了分析研究,得到以下结论:

(1)通过水化膨胀试验可以发现加压水化顺序对 GCL 的水化膨胀特性有影响,GCL 完全水化后再加压时厚度的压缩量较小,此时 GCL 抵抗变形的能力增强了。

(2)在先加压后水化膨胀试验中,GCL 的最终厚度、GCL 的孔隙比、膨润土含水量和正应力之间存在良好的相关性。

(3)土工合成材料渗压仪 Geo-Syn 可以测量出 GCL 在不同应力条件下的渗透系数,试验机理简单,操作方便,操作过程完全按照国际标准要求进行,试验结果精确度高。

(4)无论哪种加压水化顺序下,GCL 的渗透系数随着正应力的增大均出现先减小后略有增大的规律,但是先水化后加压条件下渗透系数增大的现象不显著。因此当把 GCL 用于承受较大的荷载的防渗工程时,尽量在施工结束后使其完全水化。

(5)GCL 的水平向变形对其渗透系数有较大影响,渗透系数随着水平向应变的增大而迅速增大,在实际工程中要严格控制 GCL 的水平向应变在 6%之内,否则 GCL 就会失去防渗效果。

第4章 GCL对各种液体的防渗性能和吸附能力

本章对采用不同液体作为水化、渗透液时 GCL 膨胀性能和防渗性能进行了试验研究, 结合压汞试验结果分析了液体产生影响的原因, 并且就渗透过程中 GCL 对液体中金属阳离子和有机物的吸附能力进行了研究。

4.1 选用液体和试验方案

本次试验研究工作选用蒸馏水(以下简称 DDW)、自来水(以下简称 TW)、雨水(以下简称 RW)、上海老港生活垃圾填埋场场内池塘水(以下简称 PW)和上海老港生活垃圾填埋场渗滤液(以下简称 MSWL)作为水化液和渗透液。使用美国哈希公司生产的 sensION™378 台式多参数测定仪测量了液体的 pH 值和电导率 EC 值; 对 TW、RW、PW 和 MSWL 进行等离子光谱分析, 得到了其中金属阳离子的浓度; 并测定出 PW 和 MSWL 的生物化学需氧量(BOD₅)、化学需氧量(COD)和氨氮含量(NH₄-N)。各种液体所测定的结果如表 4.1 所示。

表 4.1 各种液体的指标统计表

液体	pH	EC ms/cm	BOD ₅ mg/l	COD mg/l	NH ₄ -N mg/l	Zn mg/l	Pb mg/l	Co mg/l	Ni mg/l
DDW	7.053	0.043							
TW	7.342	0.641				0.40			0.08
RW	6.477	0.227				0.19			0.04
PW	8.251	8.12	300	1700	108.12	0.16			0.13
MSWL	8.242	27.3	2500	16000	3425.8	1.80	0.2	0.08	0.49
液体	Ba mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Cr mg/l	Mg mg/l	Ca mg/l	Cu mg/l	Na mg/l	K mg/l
DDW									
TW	0.05	1.50	0.08		11.27	45.13	0.18	73.25	8.58
RW	0.06	0.29	0.05	0.03	0.74	12.88	0.06	4.42	2.36
PW	0.13	1.11	0.58	0.12	151.2	97.2	0.41	1319.5	726.3
MSWL	0.42	15.72	0.82	0.81	199.7	165.3	0.77	3115	2407.5

为了分析液体对 GCL 渗透性能的影响规律, 本文进行了三个类型的试验研究: 自由膨胀试验、水化膨胀试验和渗透试验, 自由膨胀试验和水化膨胀试验

是为了研究液体对 GCL 膨胀性能的影响。本文所进行渗透试验的水化液和渗透液如表 4.2 所示, 每次试验均采用 25kPa 的竖向应力和 50kPa 的渗透压力, 其中试验 6、试验 7 是为了和试验 5 进行对比, 分析水化液的不同对 GCL 渗透性能的影响, 试验 1 和试验 6、试验 3 和试验 7 对比可以反映渗透液的种类对 GCL 渗透性能的影响。

表 4.2 试验所选择的液体

试验序号	水化液	渗透液
1	DDW	DDW
2	TW	TW
3	RW	RW
4	PW	PW
5	MSWL	MSWL
6	DDW	MSWL
7	RW	MSWL

4.2 GCL 防渗性能的研究结果及分析

4.2.1 自由膨胀试验和水化膨胀试验结果

GCL 对各种液体的自由膨胀试验和正应力为 25kPa 时水化膨胀试验结果如表 4.3 所示, GCL 对各种液体的水化膨胀试验曲线如图 4.1 所示。

表 4.3 自由膨胀和水化膨胀试验结果

水化液	DDW	TW	RW	PW	MSWL
自由膨胀量/ml/2g	28.0	26.5	27.0	11.8	5.9
水化膨胀后 GCL 厚度/mm	8.498	8.181	8.254	7.261	6.524

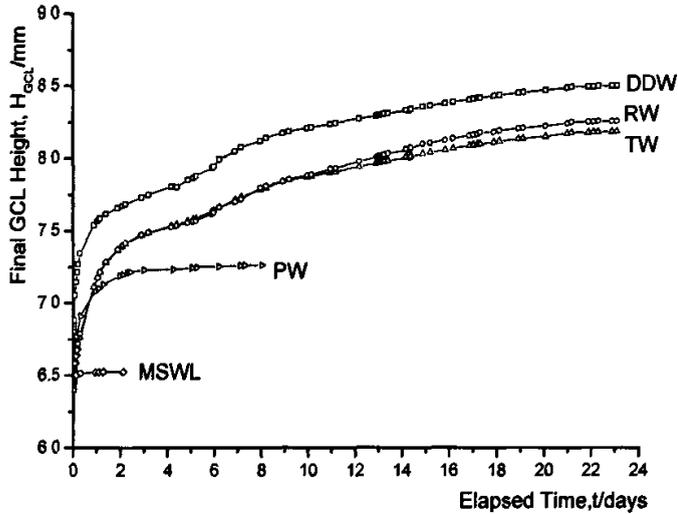


图 4.1 水化膨胀试验结果曲线

从表 4.3 和图 4.1 中可以看出, GCL 在各种液体中的膨胀量从大到小依次为: DDW>RW>TW>PW>MSWL。采用 RW 和 TW 作为水化液时 GCL 的膨胀量相差不多, 都比采用 DDW 作为水化液的膨胀量小一些, 而采用 PW 和 MSWL 作为水化液时 GCL 的膨胀量与采用 DDW 相比减小了很多。采用 MSWL 作为水化液时水化时间最短, 2 天就可以达到稳定, 采用 PW 作为水化液时水化时间为 8 天, 而采用 DDW、TW 和 RW 水化需要经历 23 天才能达到稳定。

4.2.2 渗透试验结果

4.2.2.1 水化液和渗透液都是 DDW、TW 和 RW 时

采用 DDW、TW 和 RW 作为水化液和渗透液时 GCL 试样的渗透试验结果分别如图 4.2、图 4.3 和图 4.4 所示。试验刚刚开始时渗透系数波动较大, 当孔隙体积流量达到一定值后渗透系数逐渐达到稳定, 这时 DDW 的孔隙体积流量值为 1.1, TW 为 3.2, RW 为 5.0, 三个试验中渗出和渗入液体的 pH 之比和 Q 之比都能迅速达到稳定, 而渗透试验的结束与否都是取决于 EC 的比值, 三个试验最终结束时孔隙体积流量依次为 2.15、5.87 和 6.30, 渗透系数依次为 2.540×10^{-10} m/s、 2.253×10^{-9} m/s 和 2.139×10^{-9} m/s。在水化液和渗透液为 DDW 的渗透试验过程中, GCL 试样的厚度基本上不再发生变化, 说明试样在水化膨胀

阶段已经水化完全了，这也是 GCL 的渗透试验能够在很小的孔隙体积流量时就能达到稳定的原因；而水化液和渗透液为 TW 和 RW 的渗透试验中，GCL 的厚度刚开始时逐渐减小，但是很快达到稳定，而且减小量不大，说明试样在渗透试验中还会发生离子交换，所以这两种渗透试验达到稳定时孔隙体积流量要大。

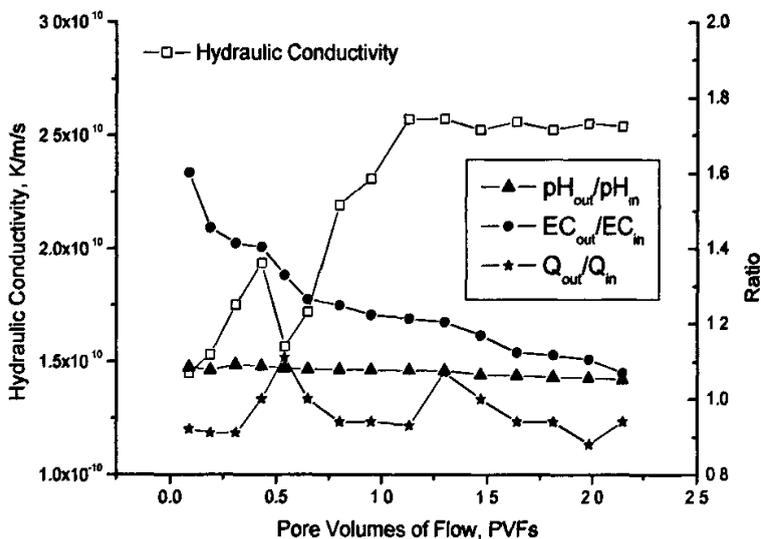


图 4.2 水化液和渗透液为 DDW 时渗透试验的结果

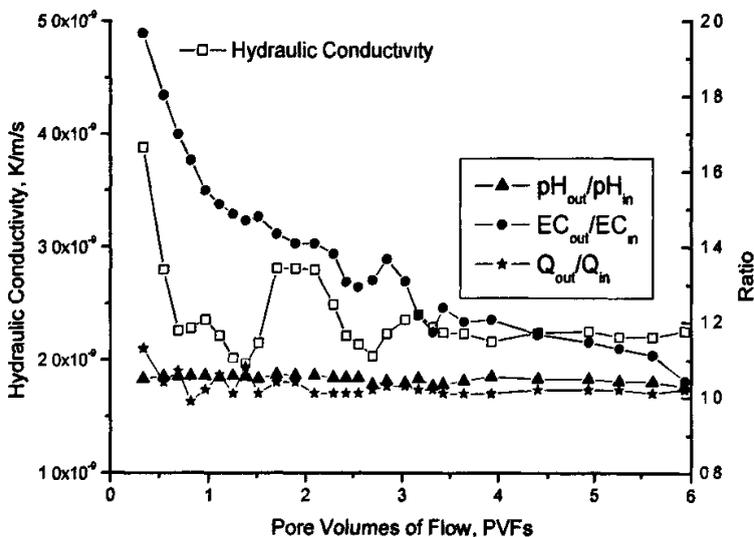


图 4.3 水化液和渗透液为 TW 时渗透试验的结果

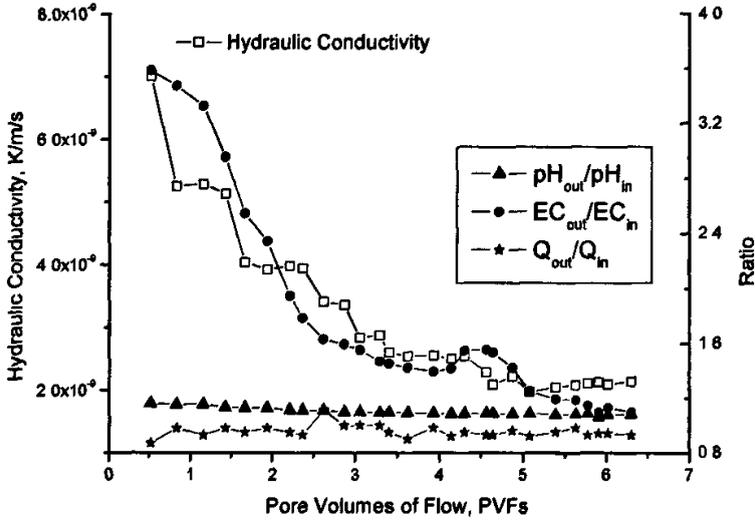


图 4.4 水化液和渗透液为 RW 时渗透试验的结果

4.2.2.2 水化液和渗透液都是 PW 时

采用 PW 作为水化液和渗透液时 GCL 试样的渗透试验结果如图 4.5 所示。从图中可以看出，同前面三个试验类似，渗透系数刚开始也有波动，但是波动不大，当孔隙体积流量大于 3.8 以后渗透系数达到稳定，渗出和渗入液体的 pH 之比和 Q 之比都能迅速达到稳定，而渗透试验的结束与否都是取决于电导率 EC

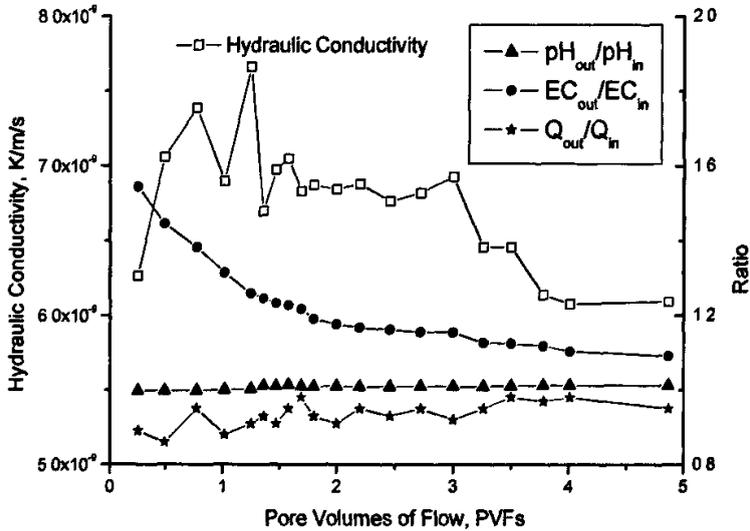


图 4.5 水化液和渗透液为 PW 时渗透试验的结果

的比值，试验最终结束时孔隙体积流量为 4.87，渗透系数为 $6.092 \times 10^{-9} \text{m/s}$ 。渗出液体的 pH 值开始时有增大，而后趋于稳定，但是都高于渗入液体的 pH 值，渗出液体的电导率逐渐减小，直到最后达到稳定，而且一直高于渗入液体的。

4.2.2.3 水化液和渗透液都是 MSWL 时

采用 MSWL 作为水化液和渗透液时 GCL 试样的渗透试验结果如图 4.6 所示。渗透系数逐渐减小，当孔隙体积流量大于 1.5 以后渗透系数达到稳定，渗出和渗入液体的 pH 之比和 Q 之比都能迅速达到稳定，而渗透试验的结束与否都是取决于电导率的比值，试验最终结束时孔隙体积流量为 2.23，渗透系数为 $3.613 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 。渗出液体的 pH 值从最开始减小后经历一段稳定期，在孔隙体积流量为 1.1 时突然增大，而后逐渐减小，渗出液体的电导率逐渐增大，这与前面几个试验都是不同的，整个试验过程中渗出液体的电导率都要低于渗入液体的。

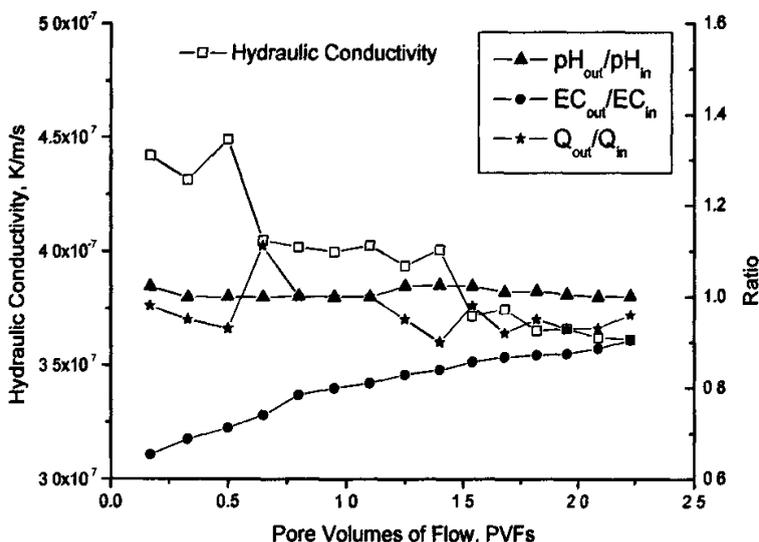


图 4.6 水化液和渗透液为 MSWL 时渗透试验的结果

4.2.2.4 水化液是 DDW、渗透液是 MSWL 时

采用 DDW 作为水化液、MSWL 作为渗透液时 GCL 试样的渗透试验结果如图 4.7 所示。当孔隙体积流量大于 1.5 以后渗透系数达到稳定，渗出和渗入液体的 pH 之比和 Q 之比都能迅速达到稳定，而渗透试验的结束与否都是取决于电导率 EC 的比值，试验最终结束时孔隙体积流量为 3.16，渗透系数为 $3.111 \times 10^{-9} \text{m/s}$ 。

渗出液体的 pH 值逐渐减小直至达到稳定, 整个渗透试验中均大于渗入液体的 pH 值, 而渗出液体的电导率逐渐增大直至稳定, 与采用 MSWL 作为水化液和渗透液的试验结果相同, 整个试验过程中渗出液体的电导率都要低于渗入液体的。

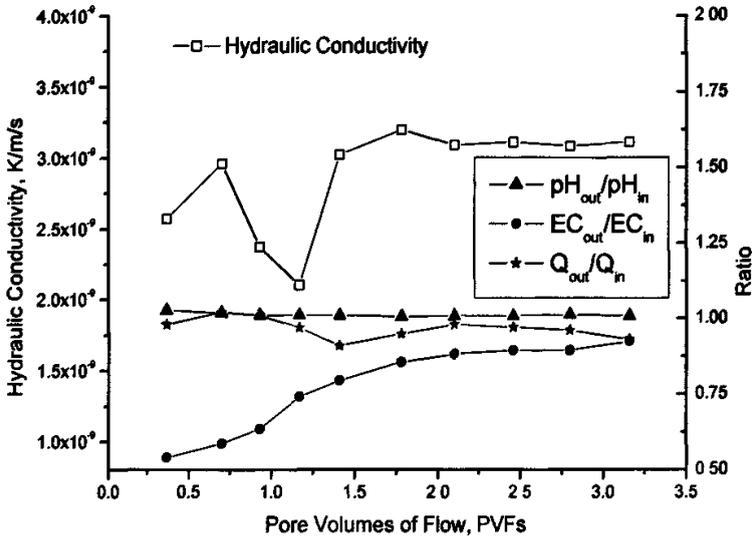


图 4.7 水化液为 DDW、渗透液为 MSWL 时渗透试验的结果

4. 2. 2. 5 GCL 渗透系数和膨润土膨胀量的关系

选择不同液体作为水化液和渗透液时 GCL 的渗透系数如表 4.4 所示, 试验结束后试样的物理性质如表 4.5 所示, 其中压汞试验的试样来自水化完成后没有进行渗透试验的 GCL。

表 4.4 渗透试验的结果

水化液	渗透液	渗透系数/m/s
DDW	DDW	2.250×10^{-10}
TW	TW	2.253×10^{-9}
RW	RW	2.139×10^{-9}
PW	PW	6.092×10^{-9}
MSWL	MSWL	3.613×10^{-7}
DDW	MSWL	3.111×10^{-9}
RW	MSWL	1.470×10^{-8}

表 4.5 试验后 GCL 试样的物理性质

试验序号	最终厚度/mm	最终含水量/%	膨润土的压汞试验结果	
			比表面积/m ² /g	孔隙体积密度/cc/g
1	8.50	136.80	7.6617	0.0420
2	8.18	125.12	12.6096	0.0599
3	8.25	129.14	11.9050	0.0551
4	7.26	104.12	12.7561	0.0654
5	6.51	81.12	13.1509	0.0708

从上面两表可以看出：①采用 MSWL 作为水化液和渗透液时，GCL 的渗透系数最高，比采用 DDW 作为水化液和渗透液时大将近 30 倍，而且最终厚度和最终含水量也最低，压汞试验得到的膨润土比表面积和孔隙体积密度也最高，说明此时 GCL 中的膨润土水化后颗粒之间接触最松散，孔隙比也最大；②采用 TW 和 RW 作为水化液和渗透液的情况下，GCL 的渗透系数非常接近，比采用 DDW 作为水化液和渗透液大一个数量级；③同样采用 DDW 作为水化液时，采用 DDW 作为渗透液时 GCL 的渗透系数比采用 MSWL 作为渗透液时小约 200 倍；同样采用 MSWL 作为渗透液时，采用 DDW、RW 和 MSWL 作为水化液时 GCL 的渗透系数依次为 3.111×10^{-9} m/s、 1.470×10^{-8} m/s 和 3.613×10^{-7} m/s，说明水化液和渗透液对 GCL 渗透性能均有影响。

图 4.8 为渗透试验的物理指标关系曲线，从图中可以看出，膨润土的孔隙体积密度越大，GCL 的渗透系数也就越高；膨润土的最终含水量越大，GCL 的渗透系数越小；GCL 的最终厚度越大，则它的渗透系数也就越小；膨润土的最终含水量和最终厚度之间存在明显的线性关系，关系式为：

$$H_w = 0.0368\omega + 3.5026 \quad (4.1)$$

第 4 章 GCL 对各种液体的防渗性能和吸附能力

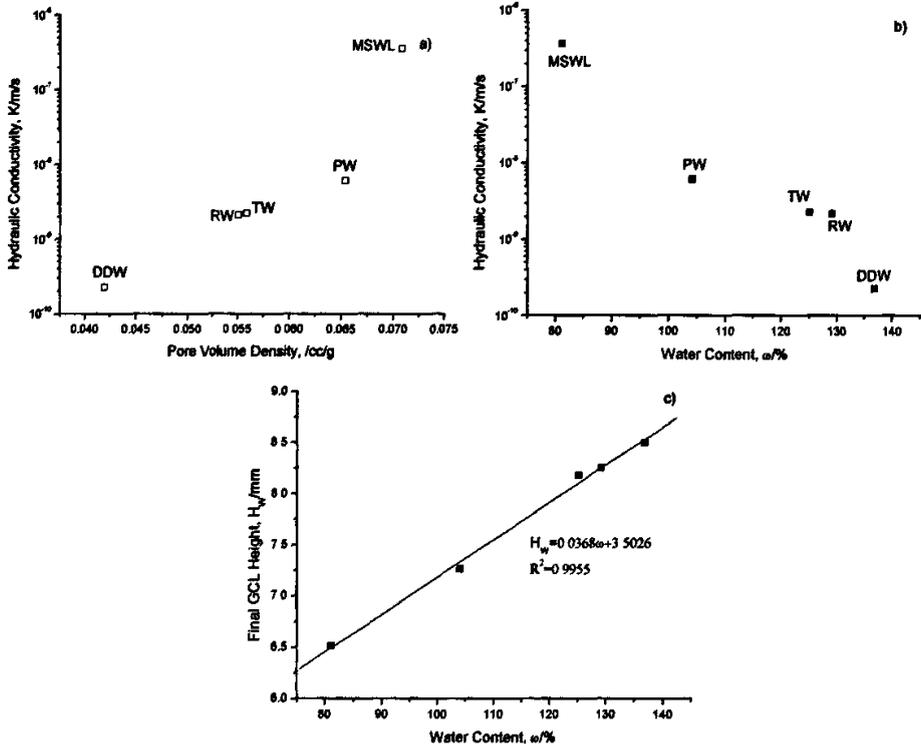


图 4.8 渗透试验后 GCL 试样的物理指标关系曲线

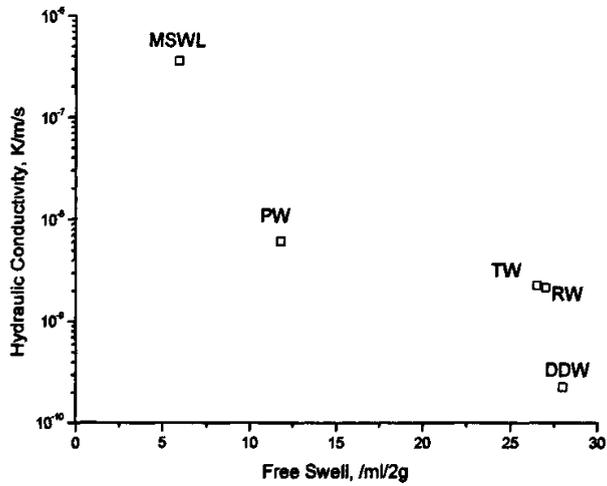


图 4.9 GCL 的渗透系数和膨润土自由膨胀量的关系

图 4.9 和图 4.10 分别反映了 GCL 渗透系数和膨润土自由膨胀量、GCL 渗透系数和 GCL 水化膨胀量之间的关系，可以看出虽然 GCL 的渗透系数和膨润土的自由膨胀量以及 GCL 水化膨胀量之间没有明显的线性关系，但还是可以清楚地反映出膨润土的自由膨胀量越大，GCL 的水化膨胀量越大，GCL 的渗透系数就越小的规律。

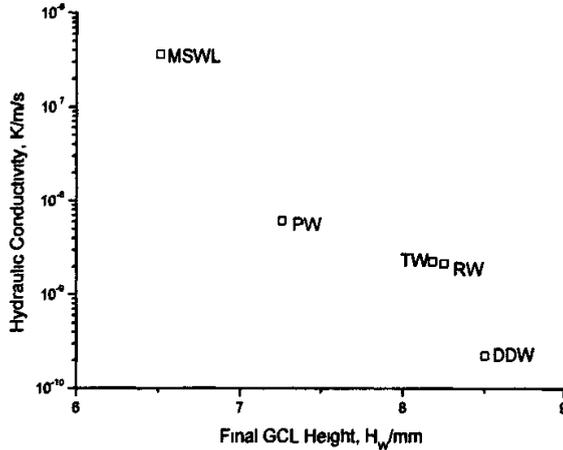


图 4.10 GCL 的渗透系数和水化膨胀厚度的关系

4.2.3 液体对 GCL 防渗性能产生影响的原因分析

采用压汞试验对液体完全水化后膨润土的微观结构进行研究，可以得到液体对 GCL 渗透系数产生影响的原因，具体分析过程如下^{[73][74][75][76]}。

孔隙中汞占据的孔隙体积百分比随着进汞压力由 p 增至 $p + \Delta p$ 而降低，在孔隙半径 $(d, d + \Delta d)$ 的微小区间内，相应的能使汞进入孔隙的孔径由 r 减小至 $r + \Delta r$ 。定义 Dv 为依孔径的孔隙体积分布率，则有：

$$dV = -Dv(r)dr \quad (4.2)$$

意义为每单位孔径变化所造成的孔隙体积的变化率。联立式(2.7)与式(4.2)可得：

$$Dv(r) = \frac{p}{r} \left(\frac{dV}{dp} \right) \quad (4.3)$$

另一个用于分析孔隙分布方程是依对数半径的孔隙体积分布率 $Dv(\log r)$ ，

即：

$$Dv(\lg r) = \frac{dV}{d \lg r} = rDv(r) \quad (4.4)$$

联立式 (4.3) 和式 (4.4)，得到：

$$Dv(\lg r) = p \frac{dV}{dp} = \frac{dV}{d \lg p} \quad (4.5)$$

在进汞过程中，使汞进入孔隙的压力 p 大小直接与孔径分布有关；而在出汞过程中，压力 p 大小与孔隙本身大小有关，即当 $dV/dr < 10^{-6}$ 时，能够顺利出汞，反之则汞残留在孔隙内^{[77][78]}。

从一次完整的进汞曲线可对得到很多参数，如平均孔径、孔隙体积密度、孔径分布、最可几孔径、比表面积分布等，这就为定量研究膨润土经过液体水化后的孔隙特性提供了可能。

本次压汞试验的进汞过程中压力范围为 172.4~273531.5kPa，探测到的孔径范围为 2.69~4266.44nm。

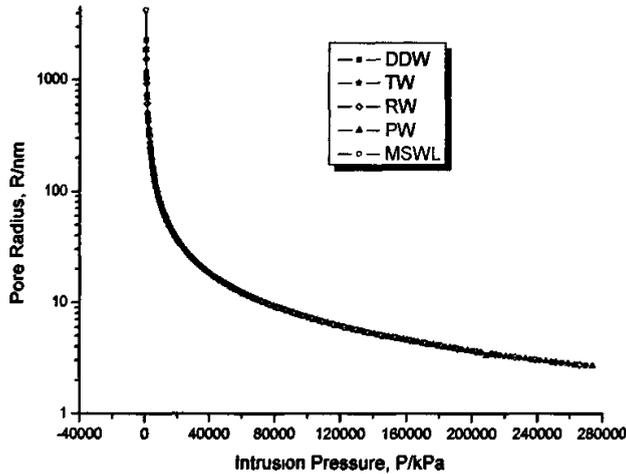


图 4.11 进汞压力与孔径的关系

图 4.11 为进汞过程中进汞压力 (Intrusion Pressure) 和孔径 (Pore Radius) 之间的关系曲线，图中 DDW、TW、RW、PW、MSWL 分别代表采用蒸馏水、自来水、雨水、上。老港垃圾填埋场场内池塘水和上。老港垃圾填埋场渗滤液完全水化后的膨润土 (下同)。可以看出随着进汞压力的增大，孔径越来越小，

且在初级阶段下降较快，随着压力的增大孔径变化越来越小。五分液体水化后膨润土的曲线分布基本一致，说明土体的孔隙结构对进汞压力~孔径关系曲线影响不大。

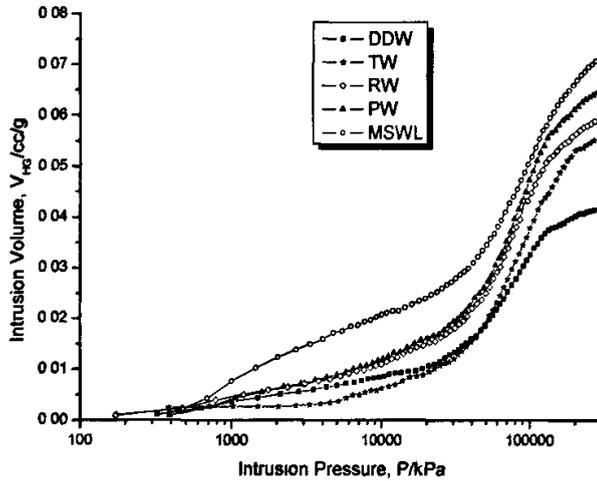


图 4.12 进入孔隙汞的体积和进汞压力的关系

图4.12是进入孔隙汞的体积（Intrusion Volume）和进汞压力（Intrusion Pressure）的关系曲线，可以看出孔隙体积增加的速率在开始阶段非常缓慢，压力达到一定值（大约为500~600kPa）时增大速率加快，压力达到50000~60000kPa时孔隙体积开始迅速增大，当压力达到约200000kPa后增大速率开始减缓。同时，随着进汞压力的增大，累积比表面积在开始阶段也仍然是缓慢增长，在压力达到一定值（大约为60000kPa）后开始迅速增长，如图4.13所示，本文将该压力称为阈值 P_f ，当进汞压力小于阈值时，汞仅向大孔进入，但压力达到阈值时，汞开始通过狭窄的孔喉进入窄小的孔洞，这说明在进汞过程中存在“瓶颈”效应（ink-bottle effect）^[79]。了后，随着进汞压力的增大，进汞体积开始迅速增加，并在很小的压力增量下迅速升至峰值，之后 $P \sim V_{Hg}$ 曲线转向平缓，说明了后进汞量稳定，孔隙体积增长缓慢。

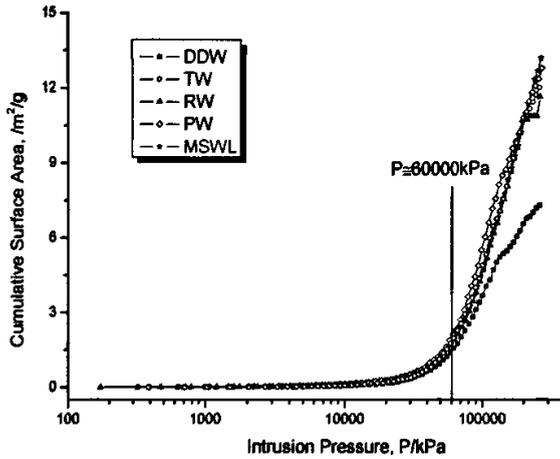


图 4.13 累积比表面积与进汞压力的关系

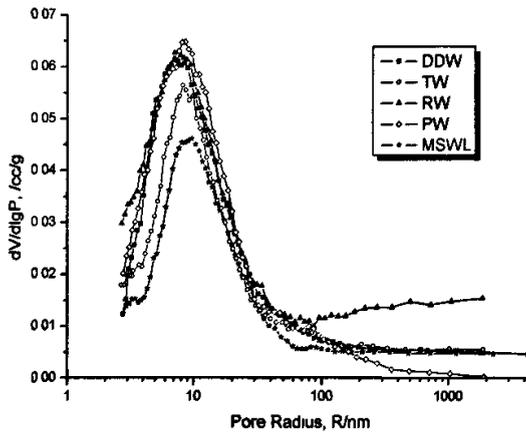


图 4.14 孔径分布微分曲线

图 4.14 是孔径分布的微分曲线，同样可以反映出孔隙体积增加速率的变化规律，随着孔径的减小（进汞压力增大），孔隙体积增加速率刚开始迅速增大，达到峰值后又迅速减小，其中微分曲线峰值对应的孔径就是最可几孔径。最可几孔径的物理意义为：试样中小于该孔径则不能形成连通的孔道，即为出现几率最大的孔径^[80]。DDW、TW、RW、PW、MSWL 水化后 GCL 中膨润土的最可几孔径依次为 7.17nm、8.27nm、7.96nm、8.64nm 和 9.73nm，大小顺序为 DDW<RW<TW<PW<MSWL。

在整个进汞曲线上，将孔径范围分为 n 个区间，在第 i 个孔径区间内，进汞

体积增量为 V_i ，区间平均半径为 R_i ，可以得到均布孔径平均值 R_m （Mean Distribution Radius）由下式给出：

$$\ln R_m = \frac{\sum_1^n V_i \ln R_i}{\sum_1^n V_i} \quad (4.6)$$

经过计算，得到 DDW、TW、RW、PW 和 MSWL 水化后 GCL 膨润土的均布孔径依次为 11.95nm、18.41nm、18.36nm、20.38nm 和 26.09nm，大小顺序为 DDW<RW<TW<PW<MSWL。

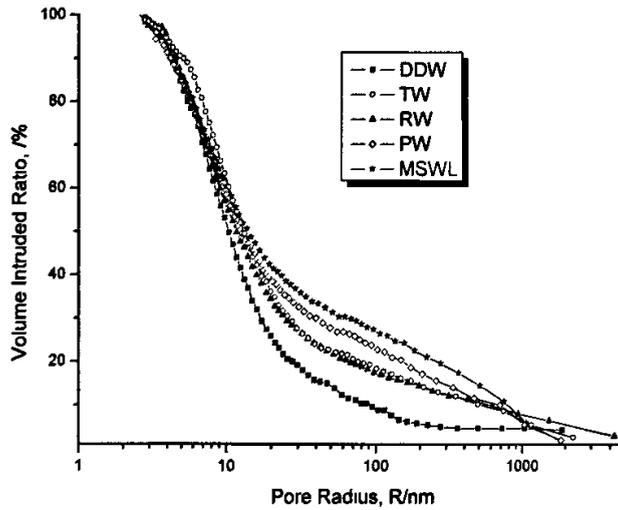


图 4.15 孔隙累积分布曲线

图 4.15 是孔隙累积分布曲线，纵坐标表示大于某一孔径的孔隙体积占总孔隙体积的百分比，横坐标表示膨润土中孔隙的半径，以对数坐标表示，纵坐标表示半径大于某一孔隙半径的孔隙占总孔隙的比例。从图中可以看出，采用 RW 和 TW 水化后 GCL 中膨润土的孔隙分布情况基本一致，而采用 DDW 水化后 GCL 中膨润土中微小孔径的孔隙占的比例要比 RW 和 TW 水化膨润土中的大，采用 MSWL 水化后大孔径的孔隙占的比例最大。

根据压汞曲线的特点，按照在一定范围内的孔隙具有相似的特性，将孔隙划分为大孔隙 (>4000nm)微中孔隙 (400nm~4000nm)微小孔隙 (40nm~400nm)和微孔隙 (<40nm) 四种类型^{[81][82][83]}，具体孔隙分布如图 4.16 所示。

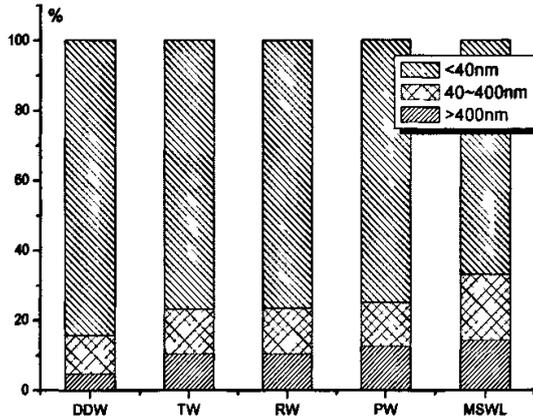


图 4.16 水化后 GCL 中膨润土的孔隙分布图

构造体积分形模型来模拟材料的分形孔隙，考虑边长为 L 的立方体，将它分成 m^3 个等大的小立方体。选定一个规则，去掉部分这样的小立方体，剩下的小立方体为 $N_1(m)$ 个。以此不断操作，使剩下的立方体的尺寸不断地减小，而数目不断增大，剩下的无限个小立方体构成材料的基体，而去掉不同阶次的小立方体空间构成材料内不同阶次孔隙。在 k 次操作后，剩下的立方体尺寸为

$R_k = L/m^k$ ，其数目为 $N_k = N_1^k = (R_k/L)^{-D_b}$ ，这里 $D_b = \lg N_1 / \lg m$ 为孔隙体积分维数。而由此导出结构的体积为： $V_k \propto R_k^{3-D_b}$ (4.7)

让 $k \rightarrow \infty$ 或 $R_k \rightarrow 0$ 时， $V_k \rightarrow V(R)$ ，则这个极限有

$$\frac{dV}{dR} \propto R^{2-D_b} \quad (4.8)$$

根据孔隙体积 $V_p(R) = R^3 - V(R)$ 则可得到

$$\lg(-dV_p/dR) \propto (2 - D_b) \lg R \quad (4.9)$$

公式 (4.9) 表明孔隙体积分维可以借助体积的量测来决定。上式中 V_p 可由一定压力 P 下压汞试验的压入汞体积 V 确定， R 可由此压力 P 下对应的孔径确定。在 Excel 数学分析软件中绘制 $\lg(-dV_p/dR)$ 和 $\lg R$ 的散点图，确定两者之间的线性表达式及相关系数 R^2 ，可以确定试样的孔隙体积分形维数 D_b [84][85][86][87]。

从分形理论的纯数学观点考察孔隙体积分形维数 D_b ，它实质上是一个表征材料孔隙空间分布形态复杂程度的量，即孔隙体积分形维数越大，材料孔隙的空间分布形态越复杂。当分形维数为 3 时表明材料的孔隙分布形态可用三维空间几何图形描述，但当分形维数大于 3 时，则表明孔隙的分布形态已相当复杂且不

规整,已不能用欧氏几何的三维图形描述孔隙的空间分布形态,而只能用分形维数描述它的空间形态^{[88][89][90][91]}。根据上述方法确定的采用DDW、TW、RW、PW和MSWL水化后GCL中膨润土的孔隙体积分形维数 D_v 依次为3.3631、3.4575、3.4229、3.5867和3.6470,都大于3,说明这几种膨润土孔隙的分布形态已经相当复杂,而且复杂程度排列顺序为DDW<RW<TW<PW<MSWL。

表 4.6 压汞试验的结果统计表

膨润土类型	DDW	TW	RW	PW	MSWL	
孔隙体积密度/cc/g	0.0420	0.0599	0.0551	0.0654	0.0708	
比表面积/m ² /g	7.6617	12.6096	11.9050	12.7561	13.1509	
最可几孔径/nm	7.17	8.27	7.96	8.64	9.73	
均布孔径/nm	11.95	18.41	18.36	20.38	26.09	
孔径分布 /%	中孔隙	4.72	10.36	10.40	12.53	14.41
	小孔隙	10.89	13.01	13.24	12.73	18.79
	微孔隙	84.39	76.63	76.36	74.74	66.81
孔隙体积分形维数	3.3631	3.4575	3.4229	3.5867	3.6470	

综合上述各种分析方法的结果如表 4.6 所示,孔隙体积密度、最可几孔径和均布孔径反映了膨润土孔隙的密度和孔径大小,比表面积反映了膨润土中孔隙的松散程度,体积分维数反映了膨润土中孔隙的复杂程度,孔径分布反映了膨润土中大、中、小孔隙的比例。从表中可以看出,孔隙体积密度、比表面积、最可几孔径、均布孔径、孔隙体积分维数和较大孔径孔隙所占的比例从小到大的排列顺序都是 DDW<RW<TW<PW<MSWL,说明了采用 MSWL 水化后 GCL 中膨润土的孔隙密度最高,较大孔径的孔隙所占比例最高,膨润土结构最为松散而且孔隙复杂程度最高,也就直接导致了采用 MSWL 水化后 GCL 的渗透系数最大;同样道理,采用 DDW 水化后 GCL 的渗透系数最小。

4.3 渗透过程中 GCL 吸附能力的研究

4.3.1 渗透过程中 GCL 吸附试验结果

4.3.1.1 PW 作为水化液和渗透液的试验结果

表 4.7 为渗透前后 PW 中阳离子浓度以及液体的生物化学需氧量 (BOD₅)、化学需氧量 (COD) 和氨氮含量 (NH₄-N),其中吸收比例是指渗透过程中被 GCL

吸附的物质浓度和原液中物质浓度的比值，负值表示渗透后液体中离子浓度高于原液。从表中可以看出，Na 的浓度增大了 6.9%，Ni 和 Ba 的浓度没有发生变化，其它阳离子的浓度都有不同程度的减小，说明在渗透过程中 GCL 中的膨润土对这些金属阳离子有吸附作用，而 Na 浓度的增大是因为在渗透过程中膨润土颗粒表面吸附的金属阳离子和 PW 中的高价金属阳离子发生了离子交换。渗透过程中 GCL 中膨润土对 Mn 的吸附作用最强，吸收比例为 67.2%，对 Fe 的吸附作用最弱，吸收比例仅仅为 5.4%。渗透过程中 GCL 中膨润土对 PW 中有机物的吸附作用也很强，对 BOD₅ 和 COD 的吸附比例分别为 33.3% 和 29.4%，而对 PW 中化合氮的吸附作用非常微弱，吸收比例只有 4.7%。

表 4.7 渗透前后 PW 中各成分浓度

成分	BOD ₅ mg/l	COD mg/l	NH ₄ -N mg/l	Zn mg/l	Ni mg/l	Ba mg/l	Fe mg/l
原液	300	1700	108.12	0.16	0.13	0.13	1.11
渗透后	200	1200	103.07	0.09	0.13	0.13	1.05
吸收比例/%	33.3	29.4	4.7	43.8	0.00	0.00	5.4
成分	Mn mg/l	Cr mg/l	Mg mg/l	Ca mg/l	Cu mg/l	Na mg/l	K mg/l
原液	0.58	0.12	151.2	97.2	0.41	1319.5	726.3
渗透后	0.19	0.08	112.3	65.6	0.28	1410.8	484.0
吸收比例/%	67.2	33.3	38.9	32.5	31.7	-6.9	33.4

4.3.1.2 MSWL 作为水化液和渗透液的试验结果

对 MSWL 作为水化液和渗透液时渗出 GCL 的液体进行化学分析，得到液体中各种金属阳离子的浓度和 BOD₅、COD 以及氨氮含量。图 4.17 为阳离子浓度与孔隙体流量的关系曲线，图中点线表示渗透前液体中该离子的浓度，表 4.8 为渗出液中 BOD₅、COD 以及氨氮含量。

表 4.8 渗出液中的 BOD₅、COD 以及氨氮含量

孔隙体流量	BOD ₅ /mg/l	COD/mg/l	NH ₄ -N/mg/l
0.50	800	6200	1059
1.25	900	6800	1538
2.09	1600	15800	1585
原液	2500	16000	3426

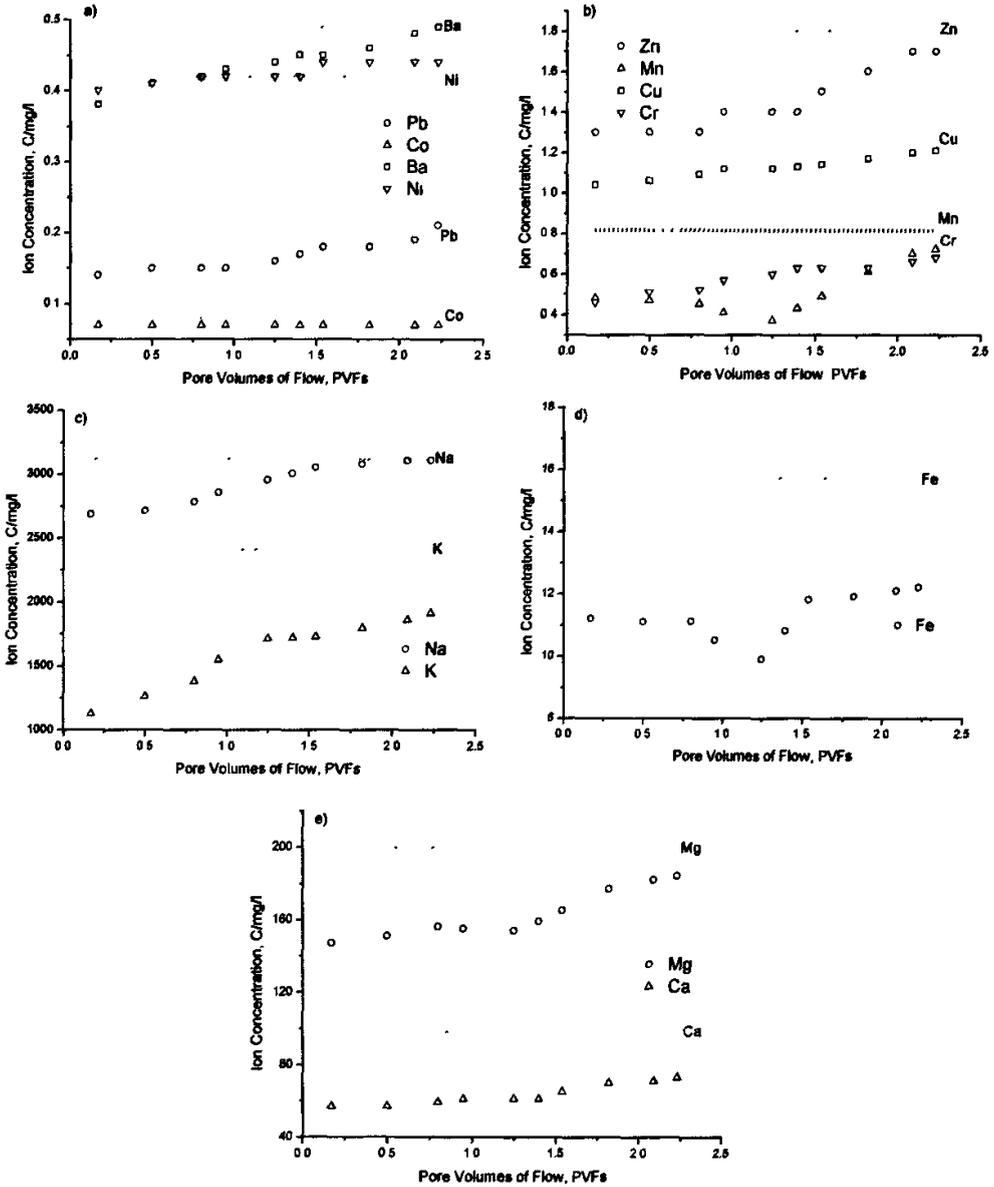


图 4.17 渗出液中金属阳离子浓度与孔隙体积流量关系

从图 4.17 和表 4.8 可以看出，渗透过程中 GCL 对各种金属阳离子以及有机物和化合氨均有吸附作用，而且渗透试验开始时吸附作用最强，随着液体不断渗过 GCL，它的吸附作用逐渐减弱，在渗透试验结束时，渗出液中个别离子的浓度和渗入液中的基本相等，说明此时 GCL 对这些离子的吸附作用已经非常微

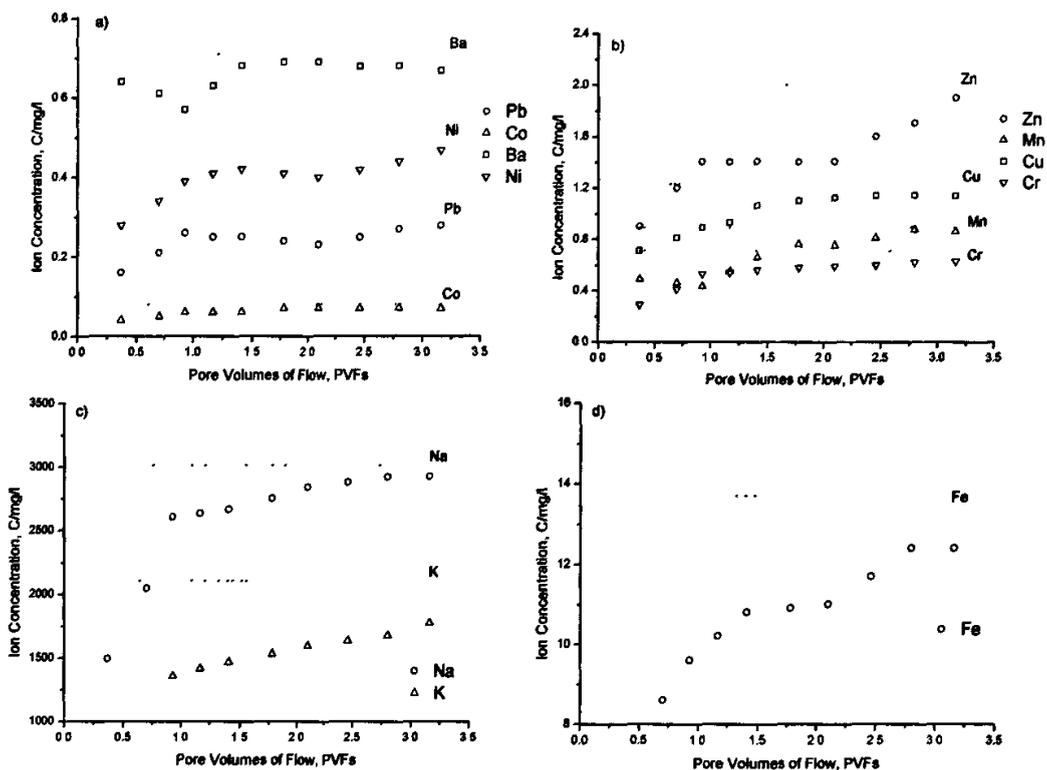
弱。采用 MSWL 作为水化液和渗透液时，渗透过程中 GCL 对 BOD₅、NH₄-N、Fe、Ca、K 的吸附能力一直都很强，而对 COD、Zn、Pb、Ba、Mn、Cr、Mg、Cu、Na 的吸附能力随着渗透试验的进行明显减弱，对 Co 和 Ni 的吸附能力在整个渗透过程中都很弱。

4.3.1.3 DDW 作为水化液、MSWL 作为渗透液的试验结果

对 DDW 作为水化液、MSWL 作为渗透液时渗出 GCL 的液体进行化学分析，得到液体中各种阳离子的浓度和 BOD₅、COD 以及氨氮含量。图 4.18 为金属阳离子浓度与孔隙体流量的关系曲线，表 4.9 为渗出液中 BOD₅、COD 以及氨氮含量。

表 4.9 渗出液中的 BOD₅、COD 以及氨氮含量

孔隙体流量	BOD ₅ /mg/l	COD/mg/l	NH ₄ -N/mg/l
0.70	900	10600	464
2.10	1400	10800	1280
原液	2500	16000	3426



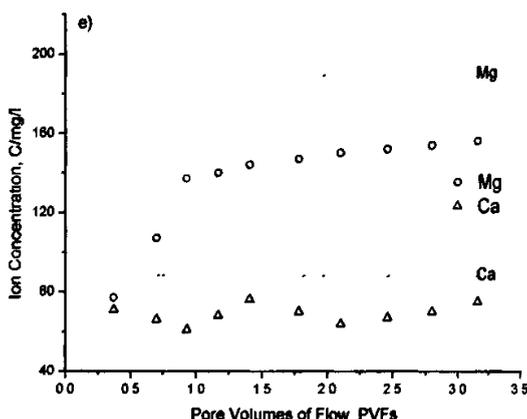


图 4.18 渗出液中金属阳离子浓度与孔隙体积流量关系

从图 4.18 和表 4.9 可以看出，在液体渗透过程中 GCL 对各种金属阳离子以及有机物均有吸附作用，而且渗透试验开始阶段吸附作用较强，但是随着液体不断渗过 GCL，它的吸附能力逐渐减弱，在渗透试验结束时，渗出液中个别金属阳离子的浓度和渗入液中的基本相等，说明此时 GCL 对这些离子的吸附能力已经非常微弱。在渗透过程中 GCL 对 BOD₅、COD、NH₄-N、Ba、Ca 的吸附能力一直都很强，而对 Zn、Pb、Co、Ni、Fe、Mn、Cr、Mg、Cu、Na、K 的吸附能力随着渗透试验的进行明显减弱。此种情况下 GCL 对液体中的 Co 和 Ni 离子也有一定的吸附能力，而采用 MSWL 水化的 GCL 对这两种离子几乎没有吸附能力。

表 4.10 为分别采用 MSWL 和 DDW 作为水化液时同样孔隙体积流量比（孔隙体积流量与最终孔隙体流量的比值）条件下渗透过程中 GCL 对各种金属阳离子、BOD₅、COD 和 NH₄-N 的吸附比例对照表。当孔隙体积流量比为 22.2% 时，除了 BOD₅、COD 和 Ca 离子外，采用 DDW 水化的 GCL 在渗透过程中的吸附能力明显强于采用 MSWL 水化的。在整个试验过程中，采用 DDW 水化的 GCL 对 NH₄-N、Zn、Pb、Ni、Ba、Mg、Cu 和 Na 的吸附能力都要强于采用 MSWL 水化的，而对 BOD₅、Fe、Mn、Cr 和 K 的吸附能力当孔隙体积流量比增大到一定程度后要弱于采用 MSWL 水化的，但是吸附比例的差值不大，说明采用 DDW 作为水化液时渗透过程中 GCL 的整体吸附能力要强于采用 MSWL 作为水化液时。产生这种现象有两方面的原因，一方面是因为当采用 MSWL 作为水化液时，在水化过程中 GCL 中已经对 MSWL 中的金属阳离子和有机物产生了吸附，GCL 的吸附能力已经得到了部分地满足，因此在渗透过程中 GCL 的吸附能力与采用

第 4 章 GCL 对各种液体的防渗性能和吸附能力

DDW 水化相比有所下降；另一方面，与采用 DDW 水化后的 GCL 中膨润土相比，采用 MSWL 水化后膨润土的孔隙体积密度大、较大孔径孔隙比例高，渗透过程中 GCL 的渗透系数大，液体渗过 GCL 的速率高、渗透时间短，也就导致了 GCL 中膨润土与渗透液体的接触时间短，这也会影响 GCL 吸附能力的发挥。

表 4.10 渗透试验过程中 GCL 的吸附比例对照表（单位：%）

孔隙体积流量比 /%	BOD ₅		COD		NH ₄ -N		Zn	
	MSWL	DDW	MSWL	DDW	MSWL	DDW	MSWL	DDW
22.2	68.0	64.0	61.3	33.7	69.1	86.5	27.8	40.0
44.6							22.2	30.3
56.3	64.0		57.5		55.1		22.2	30.0
66.5		24.0		32.5		62.6	16.7	30.0
88.6	36.0		1.3		53.7		5.6	15.0
孔隙体积流量比 /%	Pb		Ni		Ba		Fe	
	MSWL	DDW	MSWL	DDW	MSWL	DDW	MSWL	DDW
22.2	25.0	30.0	2.4	30.6	16.3	52.1	29.4	37.2
44.6	25.0	16.7	0	14.3	12.2	40.8	33.2	21.2
56.3	20.0	20.0	0	16.3	10.2	42.3	37.9	20.4
66.5	10.0	23.3	-4.8	18.4	8.2	43.7	24.9	19.7
88.6	5.0	10.0	-4.8	10.2	2.0	38.0	23.0	9.5
孔隙体积流量比 /%	Mn		Cr		Mg		Ca	
	MSWL	DDW	MSWL	DDW	MSWL	DDW	MSWL	DDW
22.2	42.7	48.3	37.0	42.3	24.4	43.2	41.8	25.0
44.6	50.0	25.8	27.6	21.1	22.4	23.8	37.8	13.6
56.3	54.9	14.6	25.9	18.3	22.9	22.2	37.8	20.5
66.5	40.2	15.7	22.2	16.9	17.4	20.6	33.7	27.3
88.6	14.6	2.2	18.5	12.7	8.9	18.5	27.6	20.5
孔隙体积流量比 /%	Cu		Na		K			
	MSWL	DDW	MSWL	DDW	MSWL	DDW		
22.2	16.5	34.1	11.9	32.0	47.7	54.6		
44.6	11.8	13.8	8.4	11.5	35.9	30.4		
56.3	11.8	10.6	5.2	8.6	28.9	27.4		
66.5	10.2	8.9	2.0	5.7	28.2	24.4		
88.6	5.5	7.3	0.3	3.1	22.7	20.4		

4.3.2 GCL 中膨润土微观分析的结果

4.3.2.1 X 射线衍射的结果及分析

对试验前 GCL 中的膨润土(图中用 Original Bentonite 表示)、采用 PW 作为水化液和渗透液时渗透试验结束后 GCL 中的膨润土(图中用 PW 表示)、采用 MSWL 作为水化液和渗透液时渗透试验结束后 GCL 中的膨润土(图中用 MSWL 表示)分别进行 X 射线衍射, 并采用 X' Pert HighScore 软件对衍射曲线进行分析, 分析结果如图 4.19 所示, 图中阴影部分表示该峰值对应的化合物已经为软件所识别, 可以看出三个衍射曲线所反映出的化合物基本都为软件所识别了, 所识别出化合物的名称及其化学式如表 4.11 所示, 其中 Montmorillonite、Kaolinite、Illite 和 Orthoclase 是膨润土的主要矿物成分, 其它化合物是软件识别出来的最有可能存在的化合物, 不考虑具体化合物是否有可能在膨润土中存在的问题, 而是主要为了找出哪些元素是膨润土中最有可能存在的。从表中可以看出, 试验前膨润土中所含有化合物是膨润土的主要矿物成分中最常见的几种, 而采用 PW 作为水化液和渗透液后的膨润土中除了含有膨润土的主要矿物成分以外, 还出现了 P、Mn、As 几种元素, 说明在水化渗透过程中 PW 中的这几种元素被膨润土吸附了。采用 MSWL 作为水化液和渗透液后的膨润土中出现了 Zn、Cu、As、La、Fe、Li 等几种元素, 说明了在水化渗透过程中 MSWL 中的这些元素被膨润土吸附了。

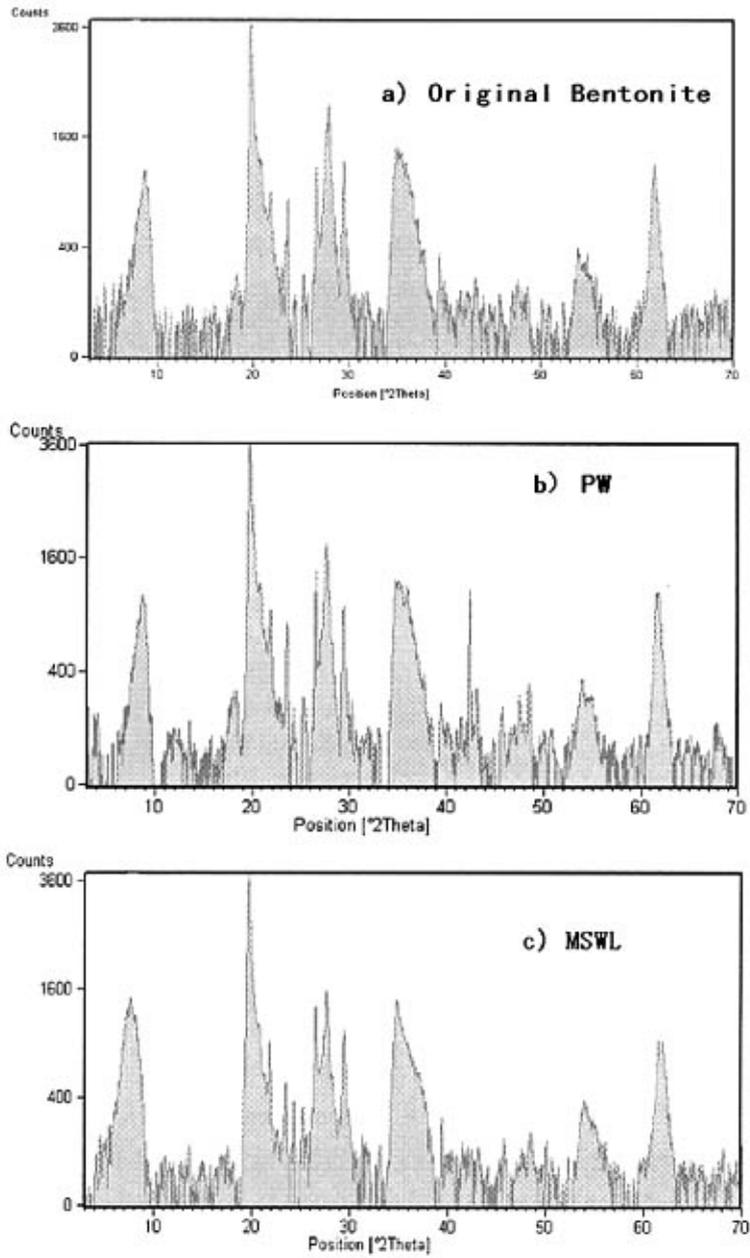


图 4.19 X' Pert HighScore 软件的识别结果

第 4 章 GCL 对各种液体的防渗性能和吸附能力

表 4.11 X' Pert HighScore 软件识别的化合物一览表

化合物名称	化合物化学式
<u>试验前的膨润土</u>	
Montmorillonite	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{16}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O}$
Kaolinite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Illite	$\text{K}_{0.7}\text{Al}_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Orthoclase	$(\text{K}_{0.88}\text{Na}_{0.10}\text{Ca}_{0.099}\text{Ba}_{0.012})(\text{Al}_{0.005}\text{Si}_{2.995}\text{O}_8)$
Quartz	SiO_2
<u>采用 PW 作为水化液和渗透液后的膨润土</u>	
Montmorillonite	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \bullet \text{H}_2\text{O}$
Kaolinite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Illite	$\text{K}_{0.7}\text{Al}_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Orthoclase	$(\text{K}_{0.88}\text{Na}_{0.10}\text{Ca}_{0.099}\text{Ba}_{0.012})(\text{Al}_{0.005}\text{Si}_{2.995}\text{O}_8)$
Microcline	$\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$
NweBeryite	$\text{MgHPO}_4(\text{H}_2\text{O})_3$
Inesite	$\text{Ca}_2\text{Mn}_9\text{Si}_{10}\text{O}_{28}(\text{OH})_2 \bullet 5\text{H}_2\text{O}$
Novacekite	$\text{Mg}(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \bullet 12\text{H}_2\text{O}$
Caldecaydrite	$\text{CaAl}_2\text{O}_4 \bullet 10\text{H}_2\text{O}$
<u>采用 MSWL 作为水化液和渗透液后的膨润土</u>	
Montmorillonite	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \bullet \text{H}_2\text{O}$
Illite	$\text{K}_{0.7}\text{Al}_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Orthoclase	$(\text{K}_{0.88}\text{Na}_{0.10}\text{Ca}_{0.099}\text{Ba}_{0.012})(\text{Al}_{0.005}\text{Si}_{2.995}\text{O}_8)$
Stranskiite	$\text{Zn}_2\text{Cu}(\text{AsO}_4)_2$
Vermiculite	$\text{La}_{0.65}(\text{AlO}_{0.251}\text{Fe}_{0.077}\text{Mg}_{5.565})(\text{Si}_{5.735}\text{Al}_{2.265}\text{O}_{20}(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_{14})$
Anorthite sodian	$\text{Na}_{0.45}\text{Ca}_{0.55}\text{Al}_{1.55}\text{Si}_{2.45}\text{O}_8$
Willemseite	$(\text{Na}, \text{Mg})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Ferriclinoholmquistite	$\text{Li}_2(\text{Fe}, \text{Mg})_3\text{SiO}_{22}(\text{OH})_2$
Pushcharovskite	$\text{Cu}(\text{AsO}_3\text{OH}) \bullet \text{H}_2\text{O}$

4.3.2.2 X 射线荧光光谱分析的结果及分析

对试验前 GCL 中的膨润土(图中用 Original Bentonite 表示)、采用 PW 作为水化液和渗透液时渗透试验结束后 GCL 中的膨润土(图中用 PW 表示)、采用 MSWL 作为水化液和渗透液时渗透试验结束后 GCL 中的膨润土(图中用 MSWL 表示)、采用 DDW 作为水化液 MSWL 作为渗透液时渗透试验结束后 GCL 中的膨润土(图中用 DDW-MSWL 表示)分别进行 X 射线荧光光谱分析,可以得到膨润土中几种常见氧化物的质量百分含量(Mass Content),结果如图 4.20 所示,其中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 和 TiO_2 是黏土矿物中常见

的几种氧化物，图中 Others 表示这几种常见氧化物以外的物质。从图中可以看出，常见氧化物以外物质的质量百分含量从大到小的顺序为：DDW-MSWL>MSWL>PW>Original Bentonite，渗透试验结束后三种膨润土中常见氧化物以外物质的百分含量高于试验前的膨润土，说明在渗透试验过程中有物质吸附到膨润土上，这个百分含量的大小也反映了膨润土所吸附物质质量的多少，而膨润土上所吸附物质越多，膨润土的吸附能力也就越强，因此通过 X 荧光光谱分析能够证明采用 DDW 水化后 GCL 中膨润土的吸附能力要强于采用 MSWL 水化后的。另外，Na₂O 质量百分含量的大小可以反映钠基膨润土中离子交换程度的高低，Na₂O 的质量百分含量越小，说明渗透试验过程中高价金属阳离子交换 Na 离子的量越多，从图中可以看出，GCL 中膨润土的 Na₂O 的质量百分含量从大到小的顺序为：Original Bentonite>PW>DDW-MSWL>MSWL，这就说明采用 MSWL 作为水化液和渗透液时 GCL 中膨润土发生的离子交换最多，这与前面的分析结果是相吻合的。

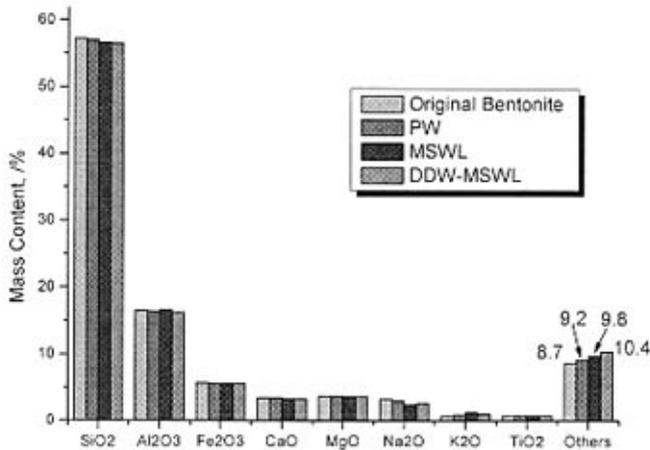


图 4.20 X 荧光光谱分析结果的柱状图

4.4 本章小结

本章通过膨胀试验和渗透试验研究了水化、渗透液种类对 GCL 渗透性能和吸附能力的影响，并对数据进行了分析研究。并且使用 X 射线衍射、压汞试验、等离子光谱分析以及 X 射线荧光光谱分析等手段对液体和膨润土从微观角度进行了研究，揭示了液体类型产生影响的机理，通过本章研究得到以下结论：

(1)水化液体类型对 GCL 的膨胀性能有影响,通过自由膨胀试验和水化膨胀试验发现 GCL 在蒸馏水中的膨胀量最大,而在垃圾渗滤液中的膨胀量最小。

(2)水化液和渗透液种类均对 GCL 的渗透性能有影响,采用蒸馏水作为水化液和渗透液时 GCL 的渗透系数最小。当水化液同为蒸馏水时,GCL 对蒸馏水的防渗性能明显高于垃圾渗滤液的;而当渗透液同为垃圾渗滤液时,采用蒸馏水水化的 GCL 渗透系数最低。

(3)GCL 的渗透系数和其膨胀性之间存在此消彼长的关系,GCL 的膨胀性越好,其渗透系数就会越低,反之亦然。

(4)液体对 GCL 膨胀量和渗透系数产生影响的原因可以从膨润土的微观结构变化角度进行分析。通过压汞试验发现,采用蒸馏水水化后膨润土的孔隙体积密度最小、较大孔隙所占比例最低、孔隙体积分维数最小,因此这种条件下 GCL 的膨胀量最大,渗透系数最低。

(5)通过对液体中离子浓度和有机物浓度进行化学分析,发现在液体渗透 GCL 的过程中,膨润土对液体中含有的阳离子和有机物均有吸附作用,而且在渗透初期吸附能力最强,随着渗透过程吸附能力有所降低。通过 X 射线衍射和 X 射线荧光光谱分析也证实了渗透过程中膨润土的确发挥了吸附作用。

(6)将 GCL 应用到实际防渗工程中时,为了提高 GCL 的防渗性能和对有害物质的吸附能力,最好在铺设完成后用蒸馏水或者自来水使 GCL 充分水化。

第 5 章 溶液特性对 GCL 膨胀性和渗透性的影响

本章对含有单种阳离子的溶液作为水化、渗透液时 GCL 的膨胀特性和防渗性能进行了试验研究,分析了溶液中阳离子的离子浓度、离子价以及水化离子半径对膨润土自由膨胀量和 GCL 渗透系数的影响规律,采用膨润土分阶段水化理论和双电层理论,并结合微观分析手段分析了阳离子对 GCL 膨胀性和渗透性产生影响的机理,研究过程中采用了 X 射线荧光光谱分析、压汞试验、扫描电子显微镜以及等离子光谱分析等先进的试验方法。最后,尝试用本章的研究成果对第四章所得到的试验现象进行解释。

5.1 膨润土的水化机理

5.1.1 膨润土分阶段水化理论

Norrish 和 Quirk (1954)^[92]、van Olphen (1977)^[93]、McBride (1994)^[94]、Prost 和 Koutit 等 (1998)^[95]以及 Jo 和 Katsumi 等 (2001)^[22]等国外学者提出了膨润土分阶段水化理论,采用该理论可以对膨润土的膨胀特性进行机理解释。分阶段水化理论认为膨润土的水化过程分为结晶水化和渗透水化两个阶段。膨润土遇到水后立即发生结晶水化,在此阶段,强大的水化力吸引水分子使得在蒙脱石结构层表面形成强结合水层,此阶段一直持续到在蒙脱石层间形成数层水分子。渗透水化在结晶水化后进行,但是只有当蒙脱石结构层表面吸附有单价阳离子时才会发生。在渗透水化阶段,蒙脱石结构层间吸附更多的水分子,因此对蒙脱石的结构层之间的联结形式和层间距离起着决定性作用,也就直接影响了膨润土的膨胀特性。当水化过程达到平衡状态时,结构层间所吸附的水分子层数与孔隙液体中阳离子的浓度成反比,也就是说当孔隙中单价阳离子浓度较低时并且单价阳离子吸附在蒙脱石结构层表面时,蒙脱石结构层间强结合水的体积大,蒙脱石的结构层间距大,因此膨润土水化后的体积也较大。

当膨润土中蒙脱石结构层表面吸附了多价阳离子时,只发生结晶水化而不发生渗透水化,蒙脱石的内层空间膨胀量很小,大约只有 1.96nm (四层水分子

的厚度)^[96]。当孔隙液体中含有阳离子时,渗透水化发生的程度受其离子交换程度的影响,而离子交换的程度与孔隙液体中阳离子的浓度又有直接关系。

膨润土孔隙液体中的多价阳离子取代蒙脱石结构层表面吸附的 Na^+ 后,蒙脱石结构层间的强结合水体积将减小,直至达到内层空间有四层水分子的状态,膨润土的体积也会发生收缩。如果孔隙液体中只含有单价阳离子的话(或者蒙脱石结构层表面没有发生离子交换),结构层间强结合水的体积和层面间距将随着孔隙液体中阳离子浓度的增大而减小。因此,膨润土的体积膨胀或者收缩取决于在水化液中蒙脱石矿物结构层间强结合水的体积大小。影响矿物层间强结合水体积的因素有多种,包括阳离子离子价、浓度以及水化离子半径等,这些因素都对GCL的膨胀特性存在影响^[97]。

5.1.2 双电层理论

蒙脱石具有由两个硅氧四面体层间夹一个氢氧化铝八面体层重复堆叠的结构单位层,如图5.1所示。蒙脱石中同晶置换比较普遍,一般发生于八面体中,也发生于四面体中,其中的 Si^{4+} 和 Al^{3+} 很容易被 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等低价阳离子置换,导致黏土颗粒带负电荷。因此孔隙液体中的阳离子为土粒表面的负电荷所吸附,但被吸附的阳离子并不以单独的离子形式出现,而以水化离子形式出现。这些水化离子体积较大,阻碍着阳离子的密集。另一方面这些阳离子除受土粒表面的静电引力外,同时又受到布朗运动的扩散力作用,因此阳离子的分布是不均匀的,愈靠近土粒表面,阳离子浓度越大,随着离土粒表面距离的加大,阳离子的浓度逐渐降低,直至达到孔隙液体的正常浓度为止,这个层称为扩散层。同样的,阴离子则为土粒表面的负电荷所排斥,随着离土粒表面距离的加大,阳离子浓度低的同时,阴离子的浓度则逐渐增加,最后阴离子也达到水溶液中的正常浓度为止。土粒表面的负电荷与受土粒表面负电荷影响的阳离子层及阴离子层(即扩散层)合起来称为双电层,示意图如图5.2所示^[98]。

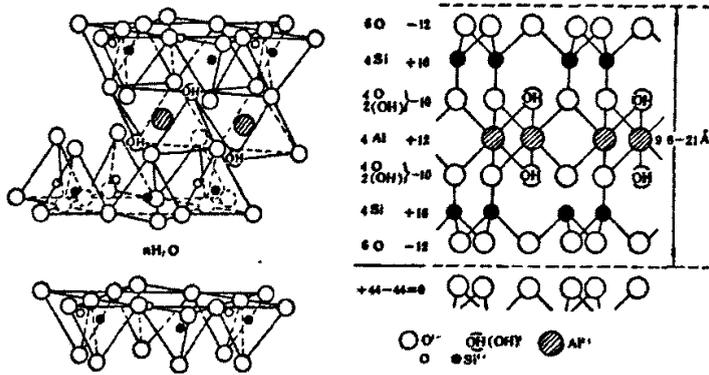


图 5.1 蒙脱石结构图

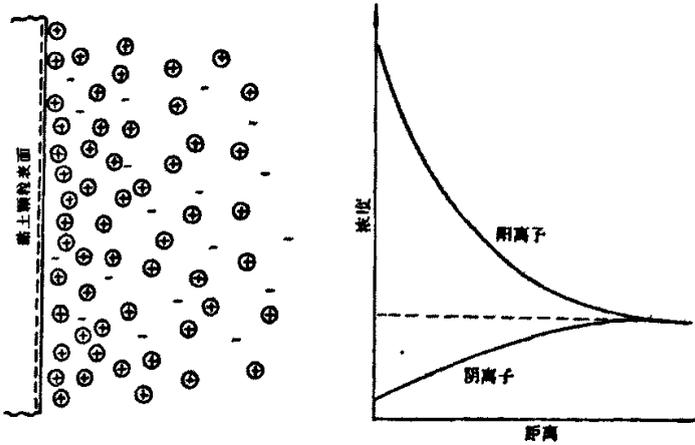


图 5.2 黏土颗粒表面双电层示意图

扩散层厚度 H ，由胶体化学分析可用下式表示：

$$H = \frac{1}{\epsilon v} \left(\frac{DkT}{8\pi n_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.1)$$

式中 ϵ —单位电子的电荷 ($1.60 \times 10^{-20} \text{C}$)；

v —离子价；

D —水溶液的介电常数；

k —波兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-25} \text{J/K}$)；

T —温度 (T)；

n_0 —距土粒表面很大距离处的离子浓度 (以离子数 $1/\text{cm}^3$ 计)。

由式(5.1)可以看出,扩散层厚度与孔隙液体所含阳离子的离子价成反比,与水溶液的介电常数和温度的平方根成正比,与水溶液中离子浓度的平方根成反比。

膨润土的渗透性能受到黏土颗粒之间的相互作用及吸附在其颗粒表面水分子体积的控制,这些水分子与孔隙中的水分子相比是不动的,在影响渗流方面的作用与黏土颗粒相同,因此也可以看作强结合水。当黏土颗粒表面的强结合水体积增大时,孔隙中弱结合水和自由水的比例就会降低,与此同时孔隙水流动的路径将变得更加狭窄且曲折,这种变化的宏观表现就是膨润土渗透系数的减小。当黏土颗粒表面双电层厚度由于某种原因减小时,黏土颗粒表面的强结合水厚度减小,黏土的孔隙比增大,大孔隙的比例也将增大,表现在宏观上就是膨润土渗透系数的增加。因此,影响膨润土颗粒表面双电层厚度的因素,包括孔隙液体中阳离子的离子价、浓度以及水化离子半径等,也将对膨润土的渗透系数产生影响^{[99][100][101]}。

5.2 试验材料和试验方案

本次试验研究所采用的方法有以下几种:GCL中膨润土的自由膨胀试验、GCL的渗透试验、压汞试验、扫描电子显微镜分析以及等离子光谱分析。选用NaCl、KCl、CaCl₂、ZnCl₂、AlCl₃五种溶液作为水化液和渗透液,每种溶液采用7个浓度等级,分别为0.005mol/l、0.0075mol/l、0.01mol/l、0.03mol/l、0.05mol/l、0.1mol/l和1.0mol/l,每个浓度等级都进行自由膨胀试验,而只有NaCl、CaCl₂和AlCl₃溶液中的0.005mol/l、0.01mol/l、0.05mol/l和0.1mol/l四个浓度等级要进行压汞试验、扫描电子显微镜分析以及等离子光谱分析。选择NaCl和KCl溶液是为了研究单价阳离子和水化离子半径对GCL膨胀特性和防渗性能的影响规律(Na⁺和K⁺的水化离子半径不同),选择CaCl₂和ZnCl₂是为了研究二价阳离子的影响规律,选择AlCl₃是为了研究三价(高价)阳离子的影响规律。另外,同时对采用蒸馏水作为水化液和渗透液的GCL进行自由膨胀试验和渗透试验,为试验结果的对比分析提供基础。由于受到试验材料和时间的限制,盐溶液中只对采用Na盐和Ca盐溶液作为水化液和渗透液的GCL进行渗透试验,寻找渗透系数和自由膨胀量之间的关系,采用其它盐溶液作为水化、渗透液时GCL的渗透系数通过自由膨胀量来推算。

5.3 自由膨胀试验和渗透试验的结果及分析

5.3.1 自由膨胀量和渗透系数的关系

为了分析 GCL 中膨润土的自由膨胀量和 GCL 的渗透系数之间存在的相关关系,对 7 种浓度的 NaCl 和 CaCl₂ 溶液进行了自由膨胀试验和渗透试验,其中自由膨胀试验中量测了膨润土发生自由膨胀后的含水量,具体方法为:待膨润土的自由膨胀试验结束后,用虹吸管将 100ml 量筒中膨润土上部的液体吸出,然后将底部存留的膨润土倒入铝盒中进行含水量试验。在试验前先将本次所有自由膨胀试验要使用的膨润土研磨、过筛,然后混合在一起,试验在标准养护室中进行,这样也就使得膨润土在不同盐溶液中自由膨胀量的差异完全是由溶液种类不同引起的,而将材料的不均匀性、温度、湿度等环境因素的影响降到了最低。采用 NaCl 和 CaCl₂ 溶液作为水化液和渗透液时 GCL 中膨润土的自由膨胀量和 GCL 的渗透系数如表 5.1 所示。

表 5.1 自由膨胀试验和渗透试验结果

溶液种类	溶液浓度/mol/l	自由膨胀量/ml/2g	含水量/%	渗透系数/m/s
NaCl	0.005	26	1609.32	8.760×10^{-10}
	0.0075	25	1549.68	1.593×10^{-9}
	0.01	24	1472.37	1.623×10^{-9}
	0.03	20	1233.82	6.560×10^{-9}
	0.05	19	1057.14	9.512×10^{-9}
	0.1	14	826.19	2.907×10^{-8}
	1.0	7	290.57	1.388×10^{-7}
CaCl ₂	0.005	24	1323.68	3.607×10^{-9}
	0.0075	21	1235.34	4.590×10^{-9}
	0.01	19	1080.85	9.734×10^{-9}
	0.03	10	588.41	4.721×10^{-8}
	0.05	9	485.51	9.677×10^{-8}
	0.1	8	406.38	1.427×10^{-7}
	1.0	4	271.36	1.977×10^{-7}
DDW		28	1505.83	2.250×10^{-10}

通过分析发现 GCL 的渗透系数和膨润土的自由膨胀量以及自由膨胀含水量之间存在如图 5.3 所示的关系,关系式为:

$$\log k_c / \log k_{DDW} = 0.1411(\omega_c / \omega_{DDW} + S_c / S_{DDW}) + 0.6409 \quad (5.2)$$

式中 k_c —盐溶液作为水化液和渗透液时 GCL 的渗透系数 (m/s);
 k_{DDW} —DDW 作为水化液和渗透液时 GCL 的渗透系数 (m/s);
 ω_c —膨润土在盐溶液中自由膨胀后的含水量 (%);
 ω_{DDW} —膨润土在 DDW 中自由膨胀后的含水量 (%);
 S_c —膨润土在盐溶液中的自由膨胀量 (ml/2g);
 S_{DDW} —膨润土在 DDW 中的自由膨胀量 (ml/2g)。

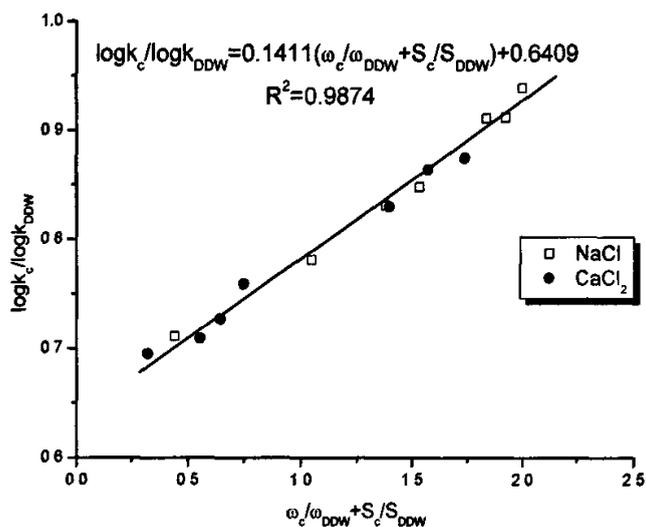


图 5.3 渗透系数和自由膨胀量及含水量的关系

图 5.3 说明了采用盐溶液作为水化液和渗透液时,在 GCL 的渗透系数和 GCL 中膨润土的自由膨胀量之间存在明显的相关关系,只要知道 GCL 中膨润土在盐溶液中的自由膨胀量及含水量,就可以推算出采用该盐溶液作为水化液和渗透液时 GCL 的渗透系数。

通过自由膨胀试验得到 GCL 中膨润土在各种盐溶液中的自由膨胀量和含水量,结果见表 5.2 (膨润土在 NaCl 和 CaCl₂ 溶液中的自由膨胀量见表 5.1)。通过自由膨胀试验得到 GCL 中膨润土在各种单一盐溶液中的自由膨胀量和含水量,根据公式 (5.2) 计算采用该盐溶液作为水化液和渗透液时 GCL 的渗透系数,结果同样见表 5.2 (采用 NaCl 和 CaCl₂ 溶液作为水化液和渗透液时 GCL 的渗透系数见表 5.1)。

第 5 章 溶液特性对 GCL 膨胀性和渗透性的影响

表 5.2 盐溶液中膨润土的自由膨胀量和 GCL 的渗透系数

溶液种类	溶液浓度/mol/l	自由膨胀量/ml/2g	含水量/%	渗透系数/m/s
KCl	0.005	25	1482.35	1.816×10^{-9}
	0.0075	24.5	1446.71	2.069×10^{-9}
	0.01	24	1379.25	2.518×10^{-9}
	0.03	17	990.70	1.238×10^{-8}
	0.05	14	796.83	2.594×10^{-8}
	0.1	10	579.49	6.383×10^{-8}
	1.0	4	196.13	2.776×10^{-7}
ZnCl ₂	0.005	23	1339.44	3.060×10^{-9}
	0.0075	20	1165.52	6.149×10^{-9}
	0.01	19	1082.35	8.178×10^{-9}
	0.03	12	691.10	4.044×10^{-8}
	0.05	9	557.62	7.472×10^{-8}
	0.1	8	512.65	9.178×10^{-8}
	1.0	5	254.64	2.197×10^{-7}
AlCl ₃	0.005	17	925.30	1.419×10^{-8}
	0.0075	14	840.56	2.368×10^{-8}
	0.01	12	730.97	3.722×10^{-8}
	0.03	7	445.27	1.181×10^{-7}
	0.05	6	358.44	1.583×10^{-7}
	0.1	4.5	287.67	2.170×10^{-7}
	1.0	4	231.53	2.579×10^{-7}

5.3.2 阳离子离子价的影响

5.3.2.1 对膨润土自由膨胀量的影响

阳离子离子价对膨润土自由膨胀量的影响规律如图 5.4 所示。图中 DDW 指的是膨润土在蒸馏水中的自由膨胀量，数值为 28ml/2g。从图中可以看出：①在相同浓度时，膨润土在单价阳离子（Na⁺和 K⁺）溶液中的自由膨胀量最大，而在高价阳离子（Al³⁺）溶液中的自由膨胀量最小，在二价阳离子（Ca²⁺和 Zn²⁺）溶液中的自由膨胀量介于两者之间；②当溶液浓度小于或等于 0.01mol/l 时，阳离子离子价从+2 到+3 对膨润土自由膨胀量的影响要大于从+1 到+2 的影响，而当溶液浓度大于 0.01mol/l 小于 1.0mol/l 时，阳离子离子价从+1 到+2 对膨润土自由膨胀量的影响要大于从+2 到+3 的影响；③当溶液浓度为 1.0mol/l 时，阳离子离

子价的变化对膨润土自由膨胀量几乎没有影响。

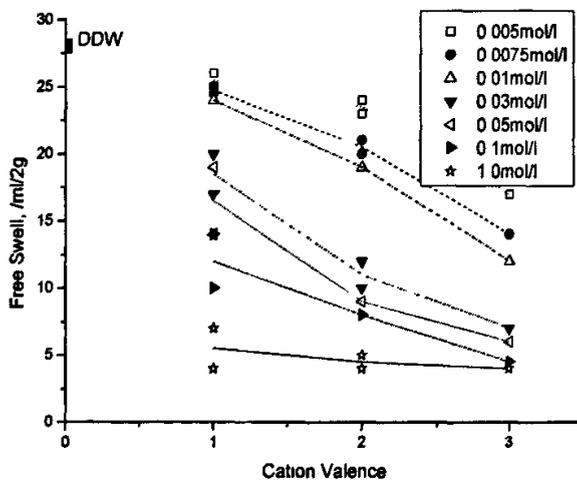


图 5.4 膨润土自由膨胀量与阳离子离子价的关系

图 5.5 反映了溶液浓度对膨润土自由膨胀量的影响规律，从图中可以得到阳离子离子价的影响有以下两个方面：①单价阳离子溶液中，KCl 溶液对膨润土自由膨胀量的影响要大于 NaCl 溶液的影响，膨润土在 KCl 溶液中的最大自由膨胀量和最小值的差值为 21.0ml/2g，而在 NaCl 溶液中差值为 19.0ml/2g，这说明了 K^+ 对膨润土自由膨胀量的影响要大于 Na^+ 的影响；②在二价阳离子溶液中，在不

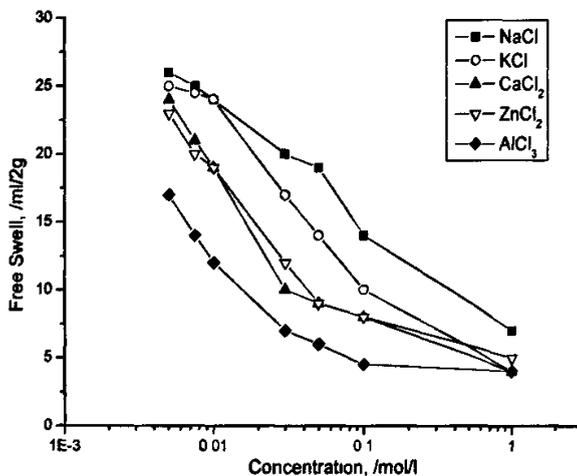


图 5.5 膨润土自由膨胀量与溶液浓度的关系

同溶液浓度时，膨润土在 CaCl_2 和 ZnCl_2 溶液中的自由膨胀量的差值最大为 $2.0\text{ml}/2\text{g}$ ，平均为 $0.7\text{ml}/2\text{g}$ ，两者之间的差别很小，说明二价阳离子的种类对膨润土自由膨胀量几乎没有影响。

采用膨润土的分阶段水化理论对上述试验结果进行机理分析：①水化液中阳离子为单价离子时，蒙脱石颗粒表面发生的离子交换作用较弱，阳离子的存在对渗透水化阶段的影响相对较小，所以膨润土的膨胀量也就越大。表 5.3 是自由膨胀试验后水化液中阳离子的浓度，从表中可以看出，浓度相同时，采用 AlCl_3 溶液水化交换出 Na^+ 的浓度最高，而采用 NaCl 溶液水化交换出 Na^+ 的浓度最低；②当溶液浓度较高时，无论渗透水化阶段发生程度如何，由于孔隙液体中阳离子的浓度比较大 ($1.0\text{mol}/\text{l}$) 时，蒙脱石结构层间强结合水的体积和层面间距都比较小，膨润土的自由膨胀量很小，此时阳离子离子价的影响相比而言是可以忽略的；③因为 Ca^{2+} 和 Zn^{2+} 的离子交换能力相差不大，因此采用 CaCl_2 和 ZnCl_2 溶液水化对膨润土的渗透水化阶段影响相当，宏观上表现为采用这两种溶液水化后膨润土的自由膨胀量相差很小。

表 5.3 自由膨胀试验后水化液中阳离子浓度 (单位: mol/l)

水化液	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Fe}^{2+}(\text{Fe}^{3+})$	Al^{3+}
DDW	1.78E-3	1.01E-5	4.28E-5	4.88E-5	1.34E-7	1.16E-6
0.005mol/l NaCl	0.0070	1.15E-5	4.24E-5	2.01E-5	1.23E-7	4.33E-6
0.01mol/l NaCl	0.0121	1.32E-5	3.84E-5	2.03E-5	2.43E-7	2.13E-6
0.05mol/l NaCl	0.0553	1.71E-5	4.43E-5	1.96E-5	1.61E-7	1.74E-6
0.1mol/l NaCl	0.1057	4.31E-5	3.90E-5	2.22E-5	1.43E-7	1.33E-6
0.005mol/l CaCl_2	0.0026	2.95E-5	0.0047	6.21E-5	1.43E-7	1.22E-6
0.01mol/l CaCl_2	0.0036	3.02E-5	0.0095	1.16E-4	1.43E-7	1.07E-6
0.05mol/l CaCl_2	0.0058	5.23E-5	0.0458	4.42E-4	1.07E-7	9.63E-7
0.1mol/l CaCl_2	0.0065	6.03E-5	0.0935	6.38E-4	1.25E-7	7.04E-7
0.005mol/l AlCl_3	0.0020	1.59E-5	0.0013	1.74E-4	5.39E-7	0.0031
0.01mol/l AlCl_3	0.0029	2.20E-5	0.0023	1.88E-4	8.93E-7	0.0069
0.05mol/l AlCl_3	0.0049	5.41E-5	0.0031	4.92E-4	4.41E-6	0.0404
0.1mol/l AlCl_3	0.0078	8.38E-5	0.0048	7.83E-4	7.79E-6	0.0804

5.3.2.2 对 GCL 渗透系数的影响

阳离子离子价对 GCL 渗透系数的影响规律如图 5.6 所示，图中 DDW 指的是采用蒸馏水作为水化液和渗透液时 GCL 的渗透系数，数值为 $2.250 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 。从图中可以看出：①在同一溶液浓度时，采用单价阳离子 (Na^+ 和 K^+) 溶液作为

水化、渗透液时 GCL 的渗透系数最大，而采用高价阳离子 (Al^{3+}) 溶液作为水化、渗透液时 GCL 的渗透系数最小，在采用二价阳离子 (Ca^{2+} 和 Zn^{2+}) 溶液作为水化、渗透液时 GCL 的渗透系数介于两者之间；②当溶液浓度小于或等于 $0.01mol/l$ 时，阳离子离子价从+2 到+3 对 GCL 渗透系数的影响要大于从+1 到+2 的影响，而当溶液浓度大于 $0.01mol/l$ 小于 $1.0mol/l$ 时，阳离子离子价从+1 到+2 对 GCL 渗透系数的影响要大于从+2 到+3 的影响；③当溶液浓度为 $1.0mol/l$ 时，渗透系数为 $1.388 \times 10^{-7}m/s \sim 2.776 \times 10^{-7}m/s$ ，受阳离子离子价的影响已经非常微弱。

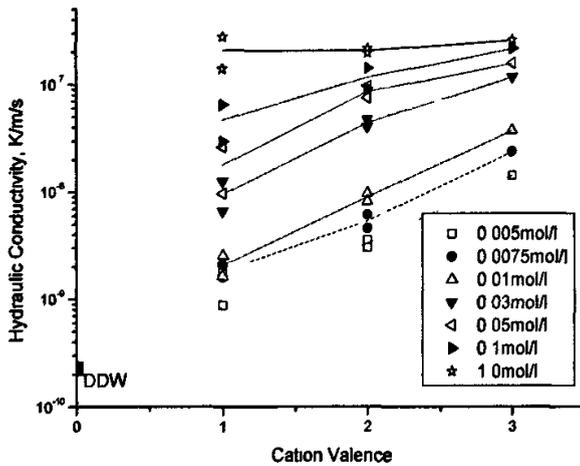


图 5.6 GCL 渗透系数与阳离子离子价的关系

图 5.7 反映了溶液浓度对 GCL 渗透系数的影响规律，从图中可以得到阳离子离子价的影响有以下几个方面：①不论采用何种溶液作为水化液和渗透液，当溶液浓度为 $1.0mol/l$ 时，GCL 的渗透系数相差不大，而随着浓度从 $0.005mol/l$ 增大至 $1.0mol/l$ ，GCL 渗透系数的最大值和最小值之比越来越小，说明了浓度越高，离子价对 GCL 渗透系数的影响就越小；②单价阳离子溶液中，采用 KCl 溶液作为水化、渗透液时 GCL 的渗透系数要略大于采用 NaCl 溶液作为水化、渗透液的，而采用 NaCl 溶液作为水化、渗透液时 GCL 渗透系数的最大值和最小值之比为 158.45，采用 KCl 溶液时为 54.81，说明了 K^+ 对 GCL 渗透系数的影响要小于 Na^+ 的影响，这与两者对膨润土自由膨胀量的影响规律正好相反；③在二价阳离子溶液中，在不同溶液浓度时，采用 $CaCl_2$ 和 $ZnCl_2$ 溶液作为水化、渗透液时 GCL 渗透系数的最大值与最小值之比为 1.55，平均值为 1.26，两者之间的

差别很小, 说明二价阳离子的种类对 GCL 的渗透系数几乎没有影响。

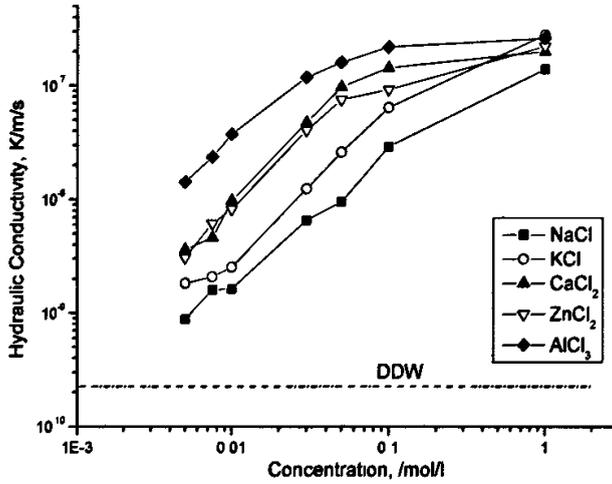


图 5.7 GCL 渗透系数与溶液浓度的关系

采用双电层理论对上述试验结果进行机理分析: ①根据公式 (5.1) 可知, 膨润土颗粒表面的双电层厚度与孔隙液体中阳离子的离子价成反比, 也就是说阳离子的离子价越大, 双电层厚度也就越小。与溶液中含有多价阳离子的情况相比, 溶液中含有单价阳离子时, 双电层的厚度要大的多, 膨润土颗粒表面的强结合水比较厚, 膨润土的孔隙比小, 大直径孔隙比例低, 因此 GCL 的渗透系数小一些; ②当溶液浓度较高时, 无论孔隙液体中含有何种阳离子, 膨润土颗粒表面的双电层厚度都很小, GCL 的渗透系数也就很大, 此时阳离子离子价的影响相比而言是可以忽略的。

5.3.3 阳离子浓度的影响

5.3.3.1 对膨润土自由膨胀量的影响

从图 5.5 中可以看出, 不论溶液中含有哪种阳离子, 随着溶液浓度的增大, 膨润土的自由膨胀量都呈现减小的趋势。

单价阳离子溶液 (NaCl 和 KCl) 中浓度对膨润土自由膨胀量的影响最大。当这两种溶液的浓度从 0.01mol/l 增大到 1.0mol/l 时, 膨润土的自由膨胀量分别减小了 17.0ml/2g 和 20.0ml/2g。在二价和高价阳离子溶液 (CaCl₂、ZnCl₂ 和 AlCl₃) 中, 膨润土自由膨胀量随浓度增大而减小的更快, 尤其是当溶液浓度介于

0.005mol/l 和 0.1mol/l 之间时, 膨润土自由膨胀量有显著变化, 而当溶液浓度介于 0.1mol/l 和 1.0mol/l 之间时, 膨润土自由膨胀量的变化幅度很小。

从图中还可以看出, 当浓度介于 0.01mol/l 和 0.1mol/l 之间时, 膨润土在含有不同离子价的阳离子溶液中自由膨胀量差值最大, 当溶液浓度较高(接近 1.0mol/l) 时, 膨润土在各种溶液中的自由膨胀量都很小, 因此差值也很小。这表明了离子价只有在溶液浓度既不高也不低的情况下对膨润土自由膨胀量才有显著的影响, 而当溶液浓度较低或者较高时影响非常小。

膨润土分阶段水化理论指出: 当水化过程达到平衡状态时, 结构层间所吸附的水分子层数与孔隙液体中阳离子的浓度成反比, 也就是说当孔隙中单价阳离子浓度较低时并且单价阳离子吸附在蒙脱石结构层表面时, 强结合水的比例较高, 自由水体积较少, 因此膨润土水化后的体积较大, 这就是膨润土的自由膨胀量随着水化溶液浓度的增大而减小的根本原因。另外, 当水化液和渗透液为单价阳离子溶液(NaCl 溶液或 KCl 溶液) 时, 在较低溶液浓度下膨润土发生明显的渗透水化, 蒙脱石结构层间强结合水比例大, 因此膨润土的自由膨胀量较水化液、渗透液为多价阳离子溶液时大; 而当溶液浓度接近 1.0mol/l 时, 无论渗透水化阶段程度如何, 膨润土的自由膨胀量都非常小(4.0ml/2g~7.0 ml/2g), 因此膨润土的自由膨胀量对单价阳离子溶液的浓度最敏感。

5.3.3.2 对 GCL 渗透系数的影响

从图 5.7 中可以看出, 不论溶液中阳离子是何种类型, 溶液浓度对 GCL 的渗透系数都有影响, 表现为渗透系数随着溶液浓度的增大而增大。比如, 采用 NaCl、KCl 和 CaCl_2 溶液作为水化、渗透液, 当溶液浓度为 0.005mol/l 时 GCL 的渗透系数分别为 $8.760 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 、 $1.816 \times 10^{-9} \text{m/s}$ 和 $3.607 \times 10^{-9} \text{m/s}$, 而当溶液浓度为 1.0mol/l 时分别为 $1.388 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 、 $2.766 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 和 $1.977 \times 10^{-7} \text{m/s}$, 分别增大了 158.4 倍、152.3 倍和 54.8 倍。

GCL 渗透系数对单价阳离子溶液的浓度最敏感, 而对多价阳离子溶液的浓度最不敏感。当水化液和渗透液为 NaCl 溶液时, 随着溶液浓度从 0.005mol/l 增大到 1.0mol/l, GCL 的渗透系数增大了 158.4 倍, 而当水化液和渗透液为 AlCl_3 溶液时, 渗透系数仅仅增大了 11.2 倍。

当溶液浓度小于 0.075mol/l 之间时, GCL 渗透系数受溶液浓度的影响最显著, 而当溶液浓度大于 0.075mol/l 时, 渗透系数受溶液浓度的影响很小, 尤其当

溶液浓度接近 1.0mol/l 时，溶液浓度对渗透系数不再产生影响。

双电层理论指出：膨润土颗粒表面双电层的厚度与孔隙液体中阳离子浓度的平方根成反比，这就是 GCL 的渗透系数随着溶液浓度的增大而增大的根本原因。另外，当水化液和渗透液为单价阳离子溶液（NaCl 溶液或 KCl 溶液）时，在较低溶液浓度下膨润土颗粒表面的双电层厚度变化不大，而当溶液是多价阳离子溶液时双电层厚度明显减小，因此 GCL 的渗透系数较水化液、渗透液为多价阳离子溶液时小；而当溶液浓度接近 1.0mol/l 时，无论溶液时含有的是单价阳离子还是多价阳离子，GCL 的渗透系数都非常高（ $1.388 \times 10^{-7} \text{m/s} \sim 2.776 \times 10^{-7} \text{m/s}$ ），因此 GCL 的渗透系数对单价阳离子溶液的浓度最敏感。

5.3.4 水化离子半径的影响

5.3.4.1 对膨润土自由膨胀量的影响

Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Al^{3+} 的水化离子半径分别为 0.45nm、0.3nm、0.6nm、0.6nm 和 0.9nm，各种溶液浓度下膨润土的自由膨胀量和阳离子水化离子半径的关系如图 5.8 所示。从图中可以看出，如果不考虑阳离子离子价和离子类型的影响，在同一浓度下膨润土的自由膨胀量随着阳离子水化离子半径的增大呈现先增大后减小的趋势。对应于从 0.005mol/l 到 1.0mol/l 的几个浓度等级，膨润土自由膨胀量随水化离子半径增大而增大的百分比依次为 4.00%、2.05%、0.00%、17.65%、35.71%、40.00%和 75.00%，减小的百分比依次为 34.62%、44.00%、50.00%、65.00%、68.42%、43.75%和 0.00%，可见在浓度较低的情况下，膨润土自由膨胀量随水化离子半径增大而增大的幅度非常小，但是减小的幅度非常大；浓度较高时，膨润土自由膨胀量随水化离子半径增大而增大的幅度和减小的幅度都非常大，这说明了只有当溶液的浓度超过一定量值后，水化离子半径才会对膨润土的自由膨胀量产生影响。

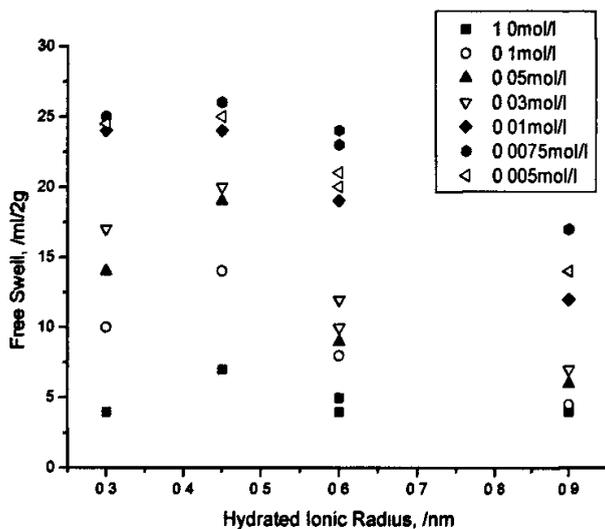


图 5.8 膨润土自由膨胀量与阳离子水化离子半径的关系

当溶液中阳离子为单价离子时，膨润土的自由膨胀量随着水化离子半径的增大而呈增大的趋势。这是因为在单价阳离子溶液中膨润土发生渗透水化时，水化阳离子在蒙脱石结构层间占据了相当大的体积，因此水化阳离子半径越大，蒙脱石结构层间距就越大，表现到宏观上就是较大的膨润土自由膨胀量。而当溶液中含有多价阳离子时，水化离子对膨润土的影响就表现在结晶水化阶段，而不是渗透水化阶段，此时水化离子半径的大小对蒙脱石结构层的影响很小，也就不会造成膨润土的自由膨胀量的较大变化。

5.3.4.2 对 GCL 渗透系数的影响

各种溶液浓度下 GCL 的渗透系数和阳离子水化离子半径的关系如图 5.9 所示。从图中可以看出：①当阳离子为单价离子时，渗透系数随着水化阳离子半径的增大而呈减小的趋势，各个浓度下对应水化离子半径为 0.45nm 的渗透系数与对应 0.3nm 的渗透系数最小比值为 0.36，平均值为 0.54，说明对于单价离子而言，各个浓度下渗透系数随着水化离子半径减小的幅度基本相当；②当阳离子从单价变为二价和从二价变为三价时，渗透系数随着水化阳离子半径的增大而增大，而且溶液浓度越小，渗透系数的增大程度越大，说明水化离子半径越大，溶液浓度对 GCL 渗透系数的影响就越小。

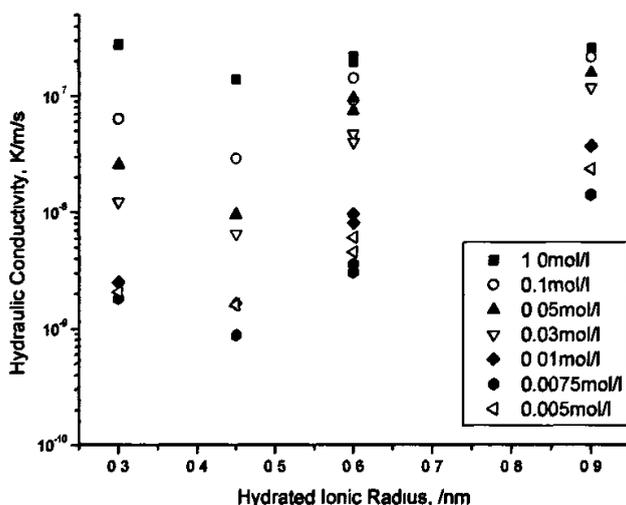


图 5.9 GCL 渗透系数与水化离子半径的关系

当溶液中阳离子为单价离子时，GCL 的渗透系数随着水化离子半径的增大而呈减小的趋势。这是因为在单价阳离子溶液中，较大的水化阳离子阻碍着双电层中阳离子向黏土颗粒表面的聚集，也因此会使得双电层厚度有所增大，这在公式 (5.1) 中没有反映出来。而当溶液中含有高价阳离子时，离子价以及浓度对双电层厚度的影响远远超过水化离子半径的影响，因此水化离子半径的大小不会造成 GCL 渗透系数的较大变化。

5.3.5 各种因素影响小结

对 GCL 中膨润土的自由膨胀量和 GCL 的渗透系数产生影响的因素及其影响规律见表 5.4。可以看出，阳离子离子价、溶液浓度和水化离子半径对膨润土的自由膨胀量和 GCL 的渗透系数具有类似的影响规律，较小的自由膨胀量和较大的渗透系数一般与较高的阳离子离子价和较大的溶液浓度联系在一起的。

表 5.4 膨润土自由膨胀量和 GCL 渗透系数影响因素小结

影响因素	性能	
	膨润土自由膨胀量	GCL 渗透系数
阳离子离子价	①随着离子价的增大而减小 ②当离子浓度不高 (<1.0mol/l) 也不低 (>0.1mol/l) 时才有显著影响	①随离子价的增大而增大 ②浓度为 1.0mol/l 时不受离子价影响
溶液浓度	①随着浓度的增大而减小 ②当浓度小于 0.1mol/l 时才有显著影响	①随着浓度的增大而增大 ②对单价阳离子溶液的浓度最敏感, 而对多价阳离子溶液的浓度最不敏感
水化离子半径	①随着水化离子半径的增大呈现先增大后减小的趋势 ②只有当溶液的浓度超过一定量值后, 水化离子半径才会产生影响 ③当溶液为单价离子溶液时, 随着水化离子半径的增大, 膨润土自由膨胀量增大	①随着水化离子半径的增大呈现先减小后增大的趋势 ②当溶液为单价离子溶液时, 随着水化离子半径的增大, GCL 渗透系数减小

5.4 溶液特性对 GCL 膨胀性和渗透性影响的微观分析

5.4.1 扫描电子显微镜的结果及探讨

对 0.005mol/l、0.01mol/l、0.05mol/l 和 0.1mol/l 四个浓度等级 NaCl、CaCl₂ 和 AlCl₃ 溶液水化后的膨润土进行扫描电子显微镜分析, 可以直观地反映出膨润土的结构和孔隙分布情况。对每种溶液水化后的膨润土分别进行 5000 倍、10000 倍和 20000 倍的扫描, 为了排除选择扫描点对结果的影响, 对每块膨润土选择两个地方进行扫描, 结果基本相同时才认为该扫描结果能够代表此块膨润土, 否则重新选择扫描点扫描, 所有扫描的结果如附录所示。图 5.10 为采用四种浓度等级 AlCl₃ 溶液水化后膨润土的 10000 倍扫描电子显微镜结果, 可以清晰地看出, 随着溶液浓度的增大, 膨润土的孔隙结构发生了明显的变化, 当浓度为 0.005mol/l 时 (如图 5.10a), 虽然膨润土内部有大孔隙存在, 但是膨润土颗粒表面比较光滑, 孔隙结构致密; 当溶液浓度增大到 0.01mol/l 时 (如图 5.10b), 膨润土颗粒表面开始变得粗糙, 孔隙增多, 孔隙结构开始变得松散; 当溶液浓度增大到 0.05mol/l 时 (如图 5.10c), 膨润土颗粒表面变得非常粗糙不平, 出现了

大量的小孔隙，孔隙结构变得比较松散；当溶液浓度增大到 0.1mol/l 时（如图 5.10d），膨润土内部出现了很多裂缝，说明膨润土颗粒没有结合在一起，孔隙结构变得非常松散。这直观地解释了 GCL 的渗透系数随着 AlCl_3 溶液浓度的增大而明显增大的现象。同样的，通过附录的图可以看出，采用 NaCl 溶液和 CaCl_2 溶液水化后膨润土的微观结构出现了类似的规律，只是随着溶液浓度的增大孔隙结构的变化没有 AlCl_3 溶液明显，限于篇幅这里不再介绍。通过对采用不同浓度的同种溶液水化后膨润土的扫描电子显微镜结果的分析，可以解释溶液浓度对 GCL 渗透系数影响规律出现的原因。

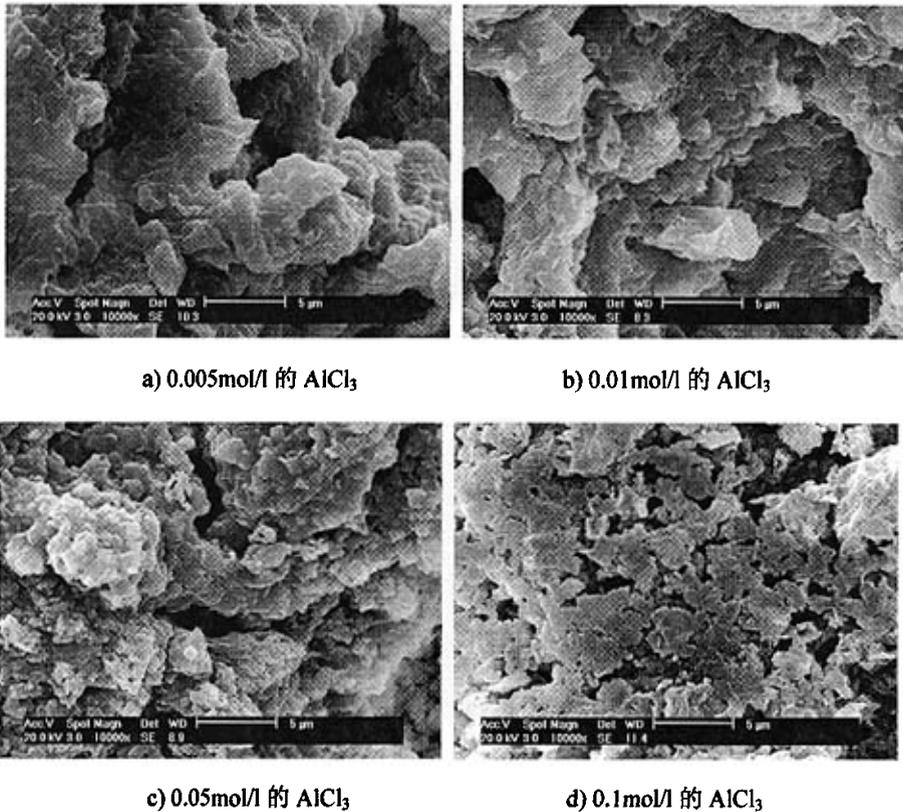


图 5.10 采用 AlCl_3 溶液水化后膨润土的 10000 倍扫描电子显微镜图

图 5.11 为采用 0.1mol/l 的溶液水化后膨润土的 20000 倍扫描电子显微镜结果，可以看出，当水化液为 NaCl 溶液时，膨润土颗粒表面非常光滑，颗粒水化后联结在一起，土体完整性好，结构致密，孔隙很少；而当水化液为 CaCl_2 溶液时，虽然膨润土颗粒表面仍然很光滑，但是膨润土颗粒之间的联结开始变得松散，

出现了很多孔隙；当水化液为 AlCl_3 溶液时，膨润土结构完全散开，颗粒表面不再光滑，出现了裂缝。这就直观地解释了同样浓度下采用 NaCl 、 CaCl_2 和 AlCl_3 溶液水化的 GCL 渗透系数逐渐变大的现象。同样的，通过附录的图可以看出，其它三个浓度下采用三种溶液水化后膨润土的微观结构出现了类似的规律，只是规律不如溶液浓度为 0.1mol/l 时明显，限于篇幅这里不再介绍。通过对采用同样浓度的三种溶液水化后膨润土的扫描电子显微镜结果的分析，可以解释溶液中阳离子类型（离子价）对 GCL 渗透系数影响规律出现的原因。

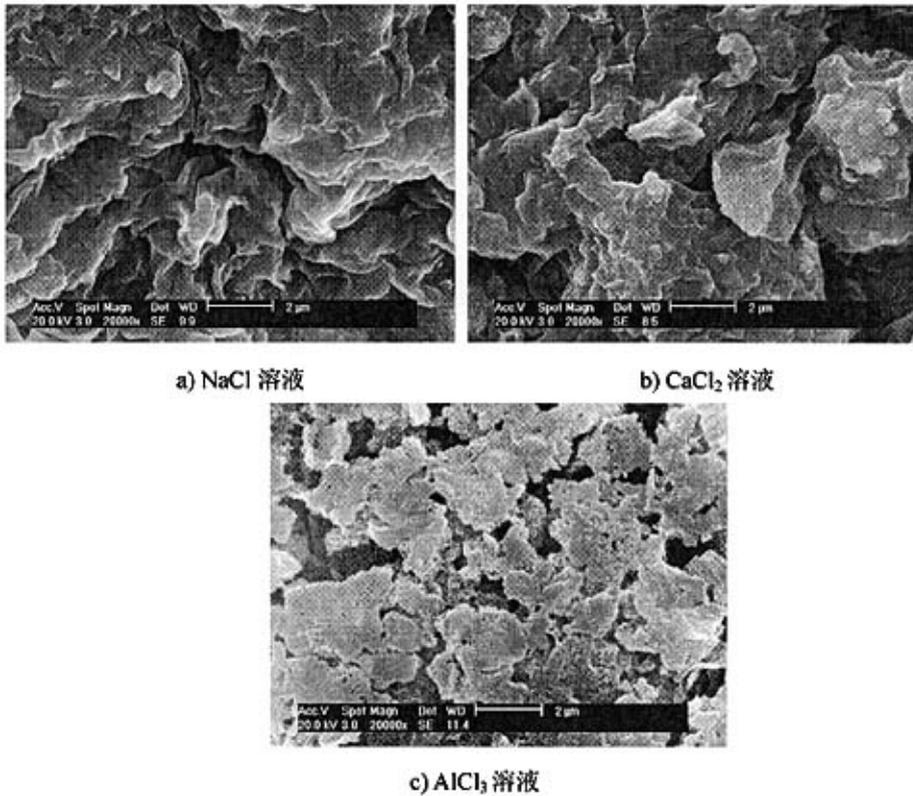


图 5.11 采用浓度为 0.1mol/l 的溶液水化后膨润土的扫描电子显微镜图

5.4.2 压汞试验的结果及探讨

对 0.005mol/l 、 0.01mol/l 、 0.05mol/l 和 0.1mol/l 四个浓度等级的 NaCl 、 CaCl_2 和 AlCl_3 溶液水化后的膨润土进行压汞试验分析，可以定量地反映出膨润土的孔隙大小和孔径分布情况，如表 5.5 所示。孔隙体积密度、最可几孔径和均布孔径

反映了膨润土中孔隙的密度和孔径大小，比表面积反映了膨润土中孔隙的松散程度，孔隙体积分形维数反映了膨润土中孔隙的复杂程度，孔径分布反映了膨润土中大、中、小孔隙的比例。对比采用相同浓度的三种不同溶液水化后的膨润土试验结果可以看出，孔隙体积密度、比表面积、最可几孔径、均布孔径、孔隙体积分形维数和较大孔径孔隙所占的比例从小到大的排列顺序都是 $\text{NaCl} < \text{CaCl}_2 < \text{AlCl}_3$ ，而且都比采用 DDW 水化后的大，说明采用 AlCl_3 水化后 GCL 中膨润土的孔隙密度最高，较大孔径的孔隙所占比例最高，膨润土结构最为松散而且孔隙复杂程度最高，也就直接导致了采用 AlCl_3 水化后 GCL 的渗透系数最大，其次依次为采用 CaCl_2 溶液水化的 GCL 和采用 NaCl 溶液水化的 GCL，而且三者都大于采用的 DDW 水化的 GCL；对比采用不同浓度的同一种溶液水化后的膨润土试验结果可以看出，孔隙体积密度、比表面积、最可几孔径、均布孔径、孔隙体积分形维数和较大孔径孔隙所占的比例都随着溶液浓度的增大而增大，也就解释了 GCL 渗透系数呈现随着溶液浓度增大而增大的规律。

表 5.5 膨润土的孔隙大小和孔径分布情况统计表

溶液种类	浓度 /mol/l	孔隙体积密度 /cc/g	比表面积 /m ² /g	最可几孔径 /nm	均布孔径/nm	孔径分布/%			孔隙体积分形维数
						中孔隙	小孔隙	微孔隙	
DDW	/	0.0420	7.6617	7.17	11.95	4.72	10.89	84.39	3.3631
NaCl	0.005	0.0455	7.7564	7.23	13.40	6.03	10.68	83.29	3.3710
	0.01	0.0476	7.9865	7.65	14.56	7.88	11.73	80.39	3.3889
	0.05	0.0490	8.8965	8.12	17.88	8.46	12.09	79.45	3.4290
	0.1	0.0512	11.3490	9.45	20.98	12.40	16.06	71.54	3.4925
CaCl ₂	0.005	0.0485	8.0546	7.88	16.54	7.35	10.81	81.84	3.4074
	0.01	0.0496	9.2114	8.66	18.45	10.34	13.01	76.65	3.4565
	0.05	0.0580	16.6554	10.03	24.19	14.25	20.78	64.97	3.5983
	0.1	0.0624	18.5660	10.56	26.43	15.41	22.25	62.34	3.6425
AlCl ₃	0.005	0.0505	10.4543	9.02	20.13	11.04	15.50	73.46	3.4783
	0.01	0.0558	13.4656	9.86	22.67	13.23	20.34	66.43	3.5534
	0.05	0.0688	21.4557	10.85	28.66	16.35	23.20	60.45	3.7024
	0.1	0.0728	23.9570	11.25	29.40	18.76	26.93	54.31	3.7534

5.5 本章所得规律对液体影响规律的解释

本文第四章试验所用到的液体中含有多种阳离子，这些液体对 GCL 中膨润

土性能的影响可以通过单一阳离子的影响规律来解释。表 5.6 为第四章试验所采用五种液体中主要阳离子的浓度,其中 TW 和 RW 中 Na^+ 和 K^+ 的浓度都介于 0 和 0.005mol/l 之间,多价阳离子的浓度非常低,对膨润土的性能影响非常小,因此采用 TW 和 RW 水化、渗透后膨润土的自由膨胀量和 GCL 的渗透系数应该与采用 0.005mol/l 单价阳离子 (Na^+ 和 K^+) 溶液水化、渗透的结果相差不大。通过试验得到了采用 0.005mol/l 单价阳离子溶液水化、渗透后的最大值分别为 $26.0\text{ml}/2\text{g}$ 和 $1.816 \times 10^{-9}\text{m/s}$, 而采用 TW 和 RW 水化、渗透后膨润土的自由膨胀量分别为 $26.5\text{ml}/2\text{g}$ 和 $27.0\text{ml}/2\text{g}$, 渗透系数分别为 $2.253 \times 10^{-9}\text{m/s}$ 和 $2.139 \times 10^{-9}\text{m/s}$, 差值非常小。说明可以用 0.005mol/l 单价阳离子的盐溶液对 GCL 产生影响的规律来解释 TW 和 RW 产生影响的规律。

PW 中 Na^+ 的浓度为 0.057mol/l , K^+ 的浓度为 0.019mol/l , 二价阳离子的浓度总和为 0.0088mol/l , 三价阳离子的浓度总和为 $1.98 \times 10^{-5}\text{mol/l}$ 。 Na^+ 的浓度接近 0.05mol/l , K^+ 的浓度接近 0.01mol/l , 二价阳离子的浓度接近 0.01mol/l 。根据单一盐溶液的试验结果,采用 0.05mol/l NaCl 溶液水化、渗透后的膨润土自由膨胀量为 $19.0\text{ml}/2\text{g}$, GCL 渗透系数为 $9.519 \times 10^{-9}\text{m/s}$, 采用 0.01mol/l KCl 溶液水化、渗透后的上述两值分别为 $24.0\text{ml}/2\text{g}$ 和 $2.518 \times 10^{-9}\text{m/s}$, 采用 0.01mol/l ZnCl_2 溶液水化、渗透后的上述两值分别为 $19.0\text{ml}/2\text{g}$ 和 $8.178 \times 10^{-9}\text{m/s}$, 采用 0.01mol/l CaCl_2 溶液水化、渗透后的上述两值分别为 $19.0\text{ml}/2\text{g}$ 和 $9.734 \times 10^{-9}\text{m/s}$ 。采用 PW 水化、渗透后的上述两值分别为 $11.8\text{ml}/2\text{g}$ 和 $6.092 \times 10^{-9}\text{m/s}$, 渗透系数和上述采用盐溶液的数量级相同,而自由膨胀量和渗透系数值有所差异,主要因为 PW 液体中各种类型阳离子对膨润土性能的影响不是阳离子影响规律简单的叠加,而且还要考虑到液体中三价阳离子的影响。

同样道理,MSWL 中 Na^+ 的浓度为 0.135mol/l , K^+ 的浓度为 0.062mol/l , 二价阳离子的浓度总和为 0.0125mol/l , 三价阳离子的浓度总和为 $2.81 \times 10^{-4}\text{mol/l}$ 。而 Na^+ 的浓度接近 0.1mol/l , K^+ 的浓度接近 0.05mol/l , 二价阳离子的浓度接近 0.01mol/l 。根据溶液特性影响的试验结果,采用 0.1mol/l NaCl 溶液水化、渗透后的膨润土自由膨胀量为 $14.0\text{ml}/2\text{g}$, GCL 渗透系数为 $2.907 \times 10^{-8}\text{m/s}$, 采用 0.05mol/l KCl 溶液水化、渗透后的上述两值分别为 $14.0\text{ml}/2\text{g}$ 和 $2.594 \times 10^{-8}\text{m/s}$, 采用 0.01mol/l ZnCl_2 溶液水化、渗透后的上述两值分别为 $19.0\text{ml}/2\text{g}$ 和 $8.178 \times 10^{-9}\text{m/s}$, 采用 0.01mol/l CaCl_2 溶液水化、渗透后的上述两值分别为 $19.0\text{ml}/2\text{g}$ 和 $9.734 \times 10^{-9}\text{m/s}$ 。采用 MSWL 水化、渗透后的上述两值分别为 $5.9\text{ml}/2\text{g}$

和 $3.613 \times 10^{-7} \text{m/s}$ ，虽然都比上述盐溶液的结果小，但是还是能够反映出溶液中阳离子浓度的影响规律，同时也验证了 MSWL 对膨润土性能的影响不是盐溶液影响结果的简单叠加。

表 5.6 液体中各种阳离子的浓度（单位：mol/l）

液体	Na	K	Ca	Mg	Cu	Mn	Ba	Ni	Fe
TW	3.18E-3	2.20E-4	1.13E-3	4.70E-4	2.77E-6	1.45E-6	3.65E-7	1.36E-6	2.68E-5
RW	1.92E-4	6.05E-5	3.22E-4	3.08E-5	9.23E-7	9.09E-7	4.38E-7	6.78E-7	5.18E-6
PW	5.74E-2	1.86E-2	2.43E-3	6.30E-3	6.31E-6	1.05E-5	9.49E-7	2.20E-6	1.98E-5
MSWL	1.35E-1	6.17E-2	4.13E-3	8.32E-3	1.18E-5	1.49E-5	3.07E-6	8.31E-6	2.81E-4

第四章的试验结果表明，当同样采用 DDW 作为水化液体时，渗透液为 DDW 和 MSWL 时 GCL 的渗透系数分别为 $2.540 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 和 $3.111 \times 10^{-9} \text{m/s}$ ，采用 MSWL 作为渗透液时 GCL 渗透系数要比采用 DDW 大 11.2 倍。两种情况下，GCL 在水化阶段的微观结构变化是一样的，而当 MSWL 渗透时，由于膨润土孔隙液体中被含有浓度较高阳离子的 MSWL 充满，因此膨润土颗粒表面的双电层厚度将有所降低，强结合水的比例降低，膨润土的孔隙比增加，因此导致 GCL 的渗透系数增大；而 DDW 渗透过程中膨润土的微结构基本保持不变，所以 GCL 的渗透系数要小得多。

当渗透液体同样为 MSWL 时，采用 DDW、RW 和 MSWL 水化的 GCL 渗透系数分别为 $3.111 \times 10^{-9} \text{m/s}$ 、 $1.470 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 和 $3.613 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 。这是因为在 GCL 水化阶段，采用 DDW 水化的膨润土颗粒表面双电层厚度大，而采用 RW 和 MSWL 水化的膨润土颗粒表面双电层厚度小，尤其是当水化液为 MSWL 时，由于其中阳离子的浓度非常高（见表 5.6），使得膨润土颗粒表面双电层厚度非常小，膨润土颗粒表面的强结合水厚度小，弱结合水和自由水的比例高，膨润土的孔隙比大，大直径孔隙比例高，所以 GCL 的渗透系数非常大。

5.6 本章小结

本章通过自由膨胀试验和渗透试验研究了采用盐溶液作为水化、渗透液时 GCL 的膨胀特性和渗透性能，并且通过膨润土分阶段水化理论和双电层理论对溶液中阳离子的影响机理进行了分析，并采用微观手段进行来了验证，利用本章所得到的规律对第四章液体产生影响的规律进行了解释，通过本章研究得到

以下结论:

(1)膨润土的分阶段水化理论认为水化过程分为结晶水化和渗透水化两个阶段,而对膨润土的膨胀性起决定作用的是渗透水化发生的程度。当蒙脱石结构层表面吸附的阳离子为单价离子时,上述两个水化阶段都将发生,而当单价离子被多价离子取代后,膨润土中将只发生结晶水化。另外,蒙脱石结构层间吸附强结合水的体积和结构层间距还受到孔隙液体浓度的影响。

(2)双电层理论认为膨润土的渗透系数受其表面双电层厚度的控制,双电层厚度越大,膨润土表面的强结合水厚度就越大,孔隙比就会小得多,大直径孔隙比例也较低,因此膨润土的渗透系数就越小。而膨润土颗粒表面的双电层厚度与孔隙液体中阳离子的离子价、浓度和水化离子半径等因素有关。

(3)在盐溶液中,GCL 的渗透系数与其自由膨胀量和含水量之间存在良好的线性相关性,可以通过 GCL 中膨润土的自由膨胀量和膨胀后含水量来推算 GCL 的渗透系数。

(4)溶液中阳离子的离子价、浓度以及水化离子半径对 GCL 的膨胀特性和渗透性能存在着影响,应用膨润土分阶段水化理论和双电层理论可以很好地对上述试验规律进行机理分析。

(5)第四章所用的液体中含有多种阳离子,而且浓度有大有小,这些离子综合起来对 GCL 的膨胀性能和防渗能力产生影响,而不是各种离子单独产生影响的简单叠加。

第6章 GCL 内部剪切强度的试验与应用研究

本章采用室内直剪仪对不同液体水化后 GCL 中的膨润土进行了剪切试验,液体分别为老港垃圾填埋场的渗滤液 (MSWL)、老港垃圾填埋场场内池塘水 (PW)、自来水 (TW) 和蒸馏水 (DDW),通过试验分析了正应力和水化液体类型对 GCL 中膨润土剪切强度的影响,得到了液体水化后 GCL 的内部剪切强度。然后通过运动破坏分析法将试验结果应用到某垃圾填埋场稳定性计算中,通过计算分析了垃圾体的力学性质、边坡形态以及 GCL 内部剪切强度对稳定安全系数的影响规律。

6.1 剪切试样的制备

本次剪切试验采用同济大学岩土工程重点试验室的常规室内直剪仪进行,将 GCL 中天然膨润土取出,采用某一种液体水化,制成面积为 30cm^2 、高度为 2cm 的剪切试样,通过剪切试验测得该膨润土试样的剪切强度来代表 GCL 在该液体中的内部剪切强度。之所以采用 GCL 中膨润土的剪切强度而不是直接量测 GCL 整体的剪切强度有以下两方面的原因。

(1)GCL 内部针刺纤维的影响。本文对 GCL 整体的剪切强度进行过以下两种试验尝试:①采用常规直剪仪对 GCL 进行了剪切试验,试验方法为:将剪切盒下盒用硬木塞住,木块表面距离剪切盒顶面有 4mm 的距离,采用强力胶将水化后 GCL 的下层编织土工织物固定到木块上。GCL 的上部放置一块带有小钉子、面积为 30cm^2 的木块,小钉子突出木块 1mm ,刺入到 GCL 上层的无纺土工布中,如图 6.1 所示。

把上部剪切盒放到下部剪切盒上,施加正应力,并安装好相应的量测设备即可进行剪切试验。本文对采用自来水水化 4d 后的 GCL 试样进行了剪切试验,正压力采用 50kPa 。当剪切位移达到最大值后 (8mm) 停止剪切试验,剪切结果如图 6.2 所示,可以看出剪应力随着剪切位移的增大而不断增大,当剪切位移为 8mm 时剪应力达到了 59.3kPa ,远远超过一般黏性土的剪切强度。取出试样进行

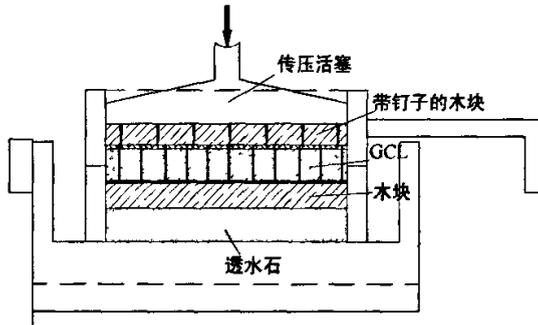


图 6.1 GCL 剪切试样安装示意图

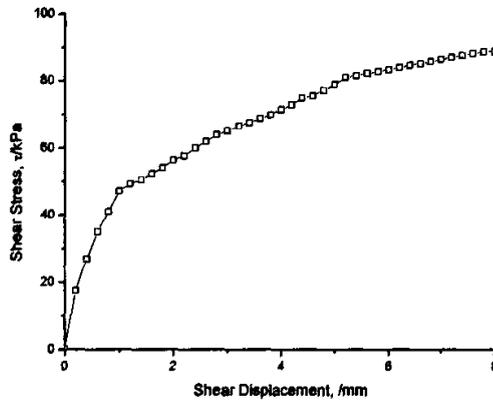


图 6.2 最大剪切位移为 8mm 时 GCL 剪应力和位移关系曲线

观察，发现 GCL 的上、下层土工织物间发生了明显的相对位移，但是连接它们的针刺纤维完好无损。出现上述现象是因为试验的剪切位移不够，针刺纤维没有发生破坏，此时的剪应力没有反映出 GCL 中膨润土的剪切强度，而是反映了针刺纤维的抗拉强度。②通过对常规剪切仪进行改进加大了剪切位移，使剪切位移由常规的 8mm 增大到 20mm，其它方法同上，对采用自来水和老港填埋场垃圾渗滤液水化 4d 后的 GCL 试样进行了剪切试验，试验结果如图 6.3 所示。从图中可以看出，两种 GCL 的剪应力前期略有差别，当剪切位移大于 8mm 后，两条曲线差异很小，并且都呈现了剪应力随着剪切位移增大而不断增大的现象，剪切位移为 20mm 时试样的剪应力分别为 119.4kPa 和 121.4kPa，比上面试验得到的强度还要大。取出 GCL 试验进行观察，发现内部针刺纤维仍然没有破坏，

可以知道此时测得的 GCL 剪切强度仍然只是反映了针刺纤维的抗拉强度，而没有反映出水化液体类型对 GCL 内部剪切强度的影响。

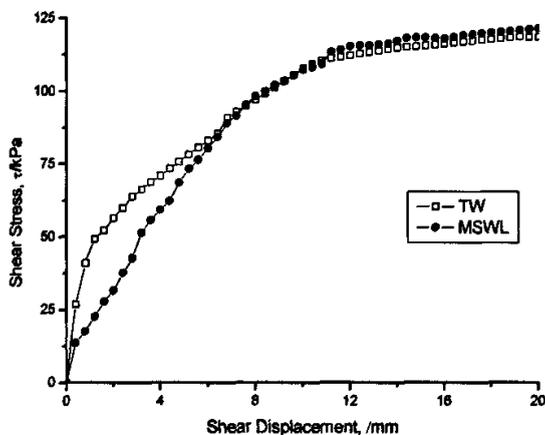


图 6.3 最大剪切位移为 20mm 时 GCL 剪应力和位移关系曲线

对上述两种试验尝试进行分析可知，决定 GCL 短期剪切强度的主要因素就是其中的针刺纤维，即使能够实现剪切位移足够大能够使针刺纤维发生破坏，此时得到的剪切强度仍然是针刺纤维的强度，而没有反映出膨润土强度对 GCL 强度的影响。

(2)GCL 中针刺纤维的强度随着时间推移会发生衰减。GCL 中针刺纤维的主要成分是聚丙烯纤维，Vink 和 Fontijn (2000)^[102]通过烘箱老化试验研究了聚丙烯纤维氧化条件下强度衰减规律，分析了氧气压力、老化温度和材料类型的影响，得到了纤维的强度衰减随着氧气压力的增大而加快的结果，图 6.4 反映了 100°C 时聚丙烯纤维的抗拉力随时间的衰减规律，可以看出纤维强度的衰减非常迅速，氧气压力为 0.2MPa 时强度在 50 天之内就衰减为零。虽然 GCL 应用于实际防渗工程时，氧气压力和温度不一定能够达到试验的条件，但是聚丙烯纤维强度随时间而衰减的规律仍然是存在的。Hsuan (2002)^[103]研究了针刺 GCL 和缝合 GCL 中聚丙烯纤维的在物理和化学作用下的强度衰减现象，分析了纤维材料结构尤其是聚合体的方向和环境条件的影响，得到了强度衰减率（衰减后纤维的强度和初始强度的比值）和时间的关系曲线，如图 6.5 所示。图中虽然没有标出时间的量值，但是可以得出针刺纤维强度衰减的规律：初始阶段强度随时间衰减很慢，但是当时间超过某一量值后，强度急剧衰减。图 6.6 是针刺纤维的峰值抗拉强度衰减率和时间的关系曲线，从中可以得到和上面类似的规律。

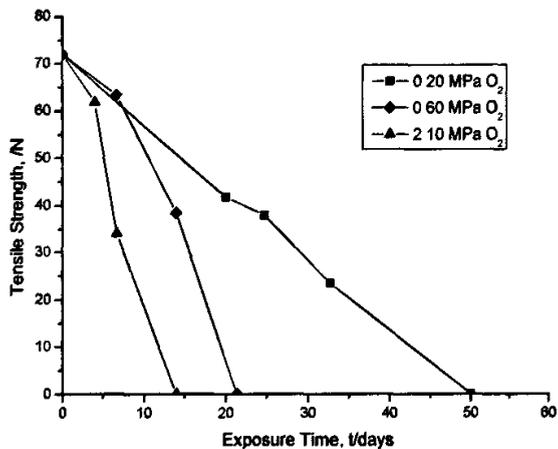


图 6.4 聚丙烯纤维的抗拉力随时间衰减曲线

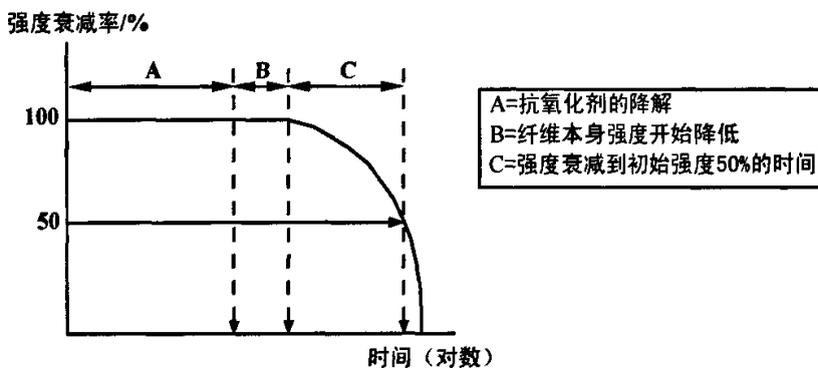


图 6.5 针刺纤维的强度衰减率随时间变化曲线

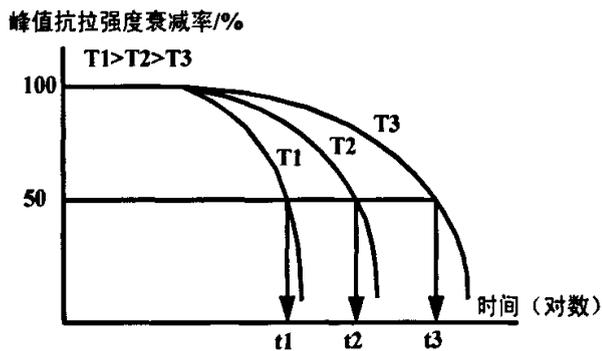


图 6.6 针刺纤维峰值抗拉强度衰减率随时间变化曲线

Mengjia 和 Hsuan (2004) [104] 通过高压氧化试验研究了氧气压力对聚丙烯纤维强度的影响, 所采用的温度为 35、45、55 和 65°C, 氧气压力为 0.02、1.3、2.8、4.9 和 6.3MPa, 图 6.7 反映了 65°C 时氧气压力对纤维抗拉强度衰减率的影响规律, 可以看出温度对强度衰减的影响要比气体压力大, 温度为 35°C 时强度在 25 个月衰减到原来的 40%左右, 而温度为 65°C 时强度在 12 个月就衰减到初始强度的 40%。并且得到了强度衰减率和温度、氧气压力和时间关系式, 为:

$$\ln(\text{强度衰减率}) = -C \cdot \exp\left[-\frac{E_{\infty} + \alpha P_{O_2}}{RT} + \beta P_{O_2}\right] * t \quad (6.1)$$

式中 C 、 α 、 β —常数;

E_{∞} —表征 1 个标准大气压下气体活化能的常数;

P_{O_2} —氧气压力 (MPa);

R —气体普适常数;

T —温度 (K);

t —时间 (d)。

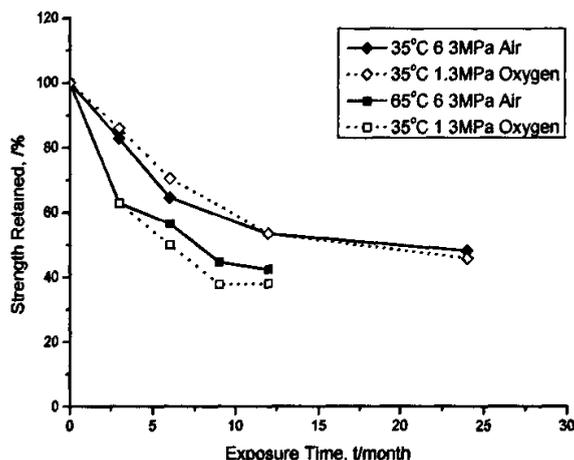


图 6.7 纤维强度衰减率和气体压力的关系曲线

基于上述两方面的分析, 本文剪切试验针对 GCL 中的膨润土进行, 相当于研究了 GCL 的长期剪切强度。采用常规的室内剪切试验方法, 试样制作分为两个阶段进行: 第一阶段是水化阶段, 使膨润土在试验液体中发生限制水化, 时间为 2d; 第二阶段是加压固结阶段, 将水化后的试样放置到固结仪中, 施加竖向应力, 时间为 2d。在水化过程中, 为了模拟膨润土包裹在 GCL 水化的情况(竖

向变形受到上、下层土工织物和针刺纤维的限制), 采用限制膨润土试样竖向变形的方 法, 具体方法和步骤为:

①取 10cm×10cm 的 GCL 试样, 测量初始厚度, 然后分别放置到装有 MSWL、PW、TW 和 DDW 液体的容器中自由水化, 2d 后取出 GCL 试样, 再次量测厚度, 结果见表 6.1。

表 6.1 GCL 试样自由水化结果

水化液体	MSWL	PW	TW	DDW
初始厚度/mm	6.84	6.73	6.78	6.65
自由水化后厚度/mm	8.28	9.42	10.10	11.08
所需膨润土质量/g	89.81	76.01	69.63	62.11

②取 5 块面积为 30cm² 的圆形 GCL 试样, 完全取出其中膨润土, 分别称量膨润土的重量, 取平均值, 可以得到面积为 30cm² 的 GCL 中所包含膨润土的质量, 经过称量、计算得到该值为 14.10g。

③本文所用限制膨润土膨胀的仪器高度为 40mm (两个环刀高度), 面积为 30cm², 计算使膨润土限制膨胀后高度为 40mm 所需膨润土的质量, 比如当采用 DDW 为水化液体时, 需要用天然膨润土的质量为: 40mm/ (11.08mm-2.00mm) *14.10g=62.11g, 计算结果如表 6.1 所示。

④将称好的膨润土放到限制膨胀仪器中, 然后放入液体中水化。2d 后打开膨胀仪器, 将面积为 30cm²、高度为 40mm 的试样取出, 放到固结仪中加压固结, 2d 后取出, 切下高度为 20mm 的一块, 放到直剪仪中进行剪切试验。

6.2 试验内容

本次试验采用老港垃圾填埋场垃圾渗滤液 (MSWL)、老港垃圾填埋场场内池塘水 (PW)、自来水 (TW) 和蒸馏水 (DDW) 作为水化液体, 每种液体进行 6 个应力等级的剪切试验, 依次为 25kPa、50kPa、100kPa、150kPa、200kPa 和 300kPa, 每组试验水化时间为 2d, 加压固结试验为 2d。剪切过程采用的是应变控制式的固结快剪, 剪切速率为 1.0mm/min。

6.3 剪切试验结果

剪切试验结束后，打开剪切盒，取出膨润土试样，发现存在非常明显的剪切破坏面，如图 6.8 所示（左半部分为剪切面）。破坏面上出现沿着剪切相对位移方向的条纹，剪切面光滑，平整度高。



图 6.8 剪切试验结束后膨润土的剪切破坏面

图 6.9~6.12 分别是水化液为 MSWL、PW、TW 和 DDW 时剪应力和剪切位移的关系曲线。从图中可以看出：①无论采用何种液体作为水化液，膨润土的剪应力都迅速出现峰值，出现峰值时剪切位移均小于 1.8mm；②采用 MSWL 水化后的膨润土，正应力小于 150kPa 时，剪应力出现峰值后基本保持不变，这是因为此时膨润土比较松散，土粒之间的粘结力小，个别土颗粒间出现相对滑动对整体的剪切性能影响不大；③其它情况下剪应力迅速出现峰值后，随着剪切位移的继续发生，剪应力逐渐减小；④采用同一种液体水化后，膨润土的峰值剪切强度随着正应力增大而增大；⑤在同一种正应力下，不同液体水化后膨润土的峰值剪切强度从大到小依次为 $DDW > TW > PW > MSWL$ ，说明采用 DDW 水化后膨润土的抗剪切能力最强，而采用 MSWL 水化的最弱。因此在实际工程应用中，天然的 GCL 铺设完成后，最好采用离子含量低的液体（如自来水）进行水化，这样有利于提高防渗工程的稳定性。

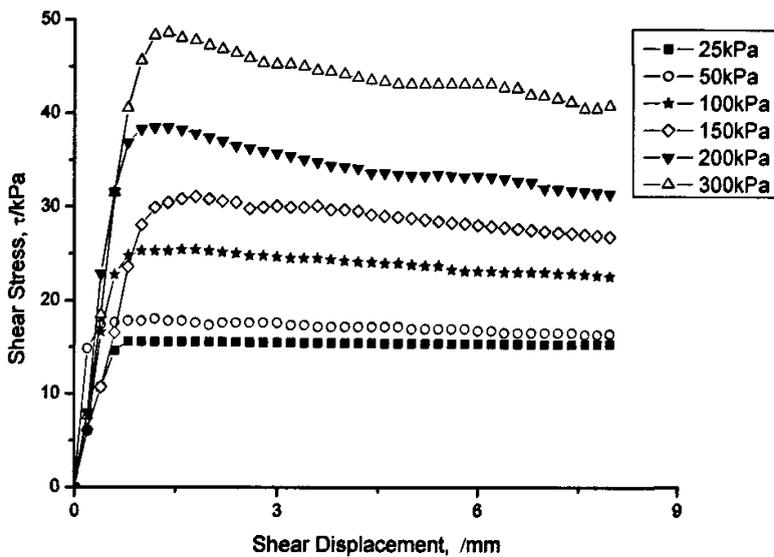


图 6.9 水化液为 MSWL 时剪切试验的结果曲线

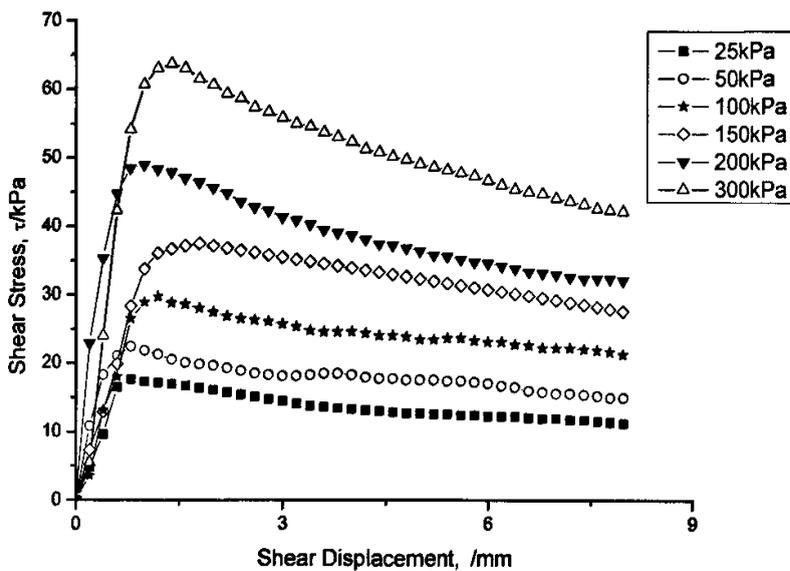


图 6.10 水化液为 PW 时剪切试验的结果曲线

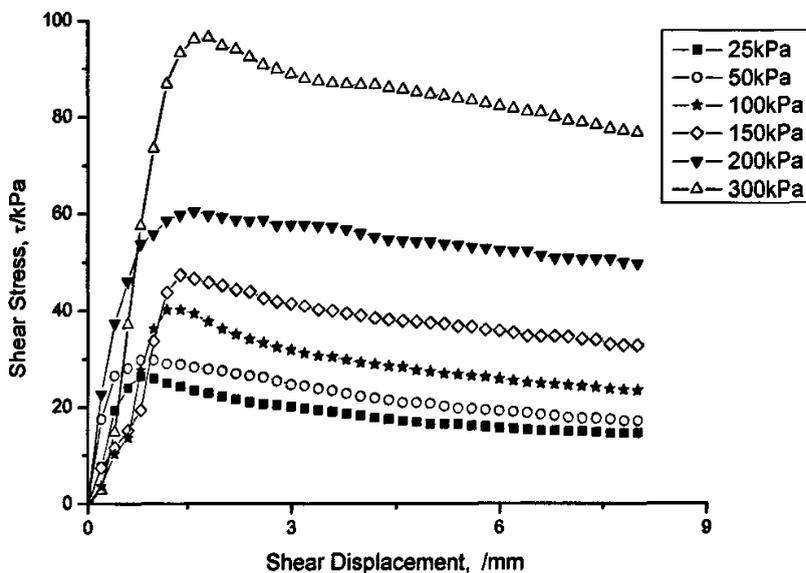


图 6.11 水化液为 TW 时剪切试验的结果曲线

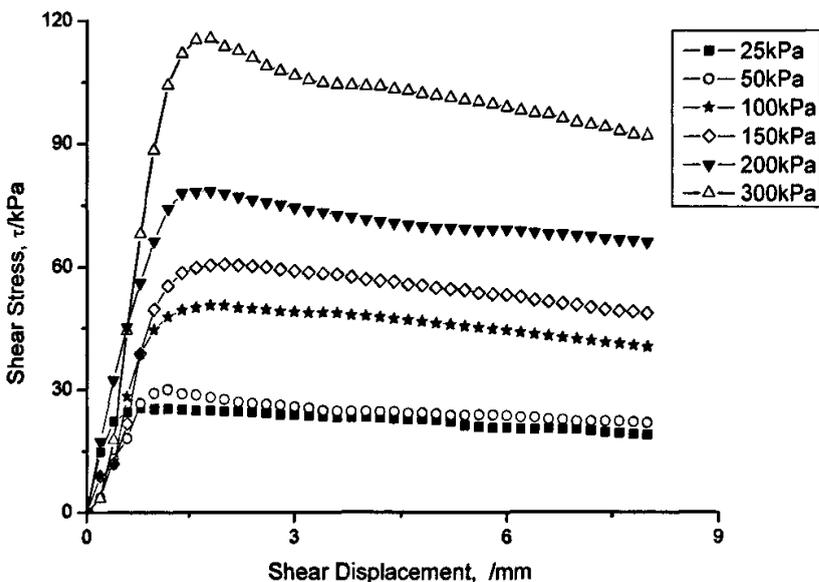


图 6.12 水化液为 DDW 时剪切试验的结果曲线

将采用同种液体水化后 6 个不同正应力下得到的剪切强度绘制成 $\tau \sim \sigma$ 关系曲线，通过最小二乘法拟合找到两者之间存在的线性关系式，就可以得到此种液体水化后膨润土的 c 、 ϕ 值，作为后续计算的依据。图 6.13 为采用 MSWL 水

化后膨润土的 $\tau \sim \sigma$ 关系曲线，拟合公式为 $\tau = 12.63 + 0.123 \cdot \sigma$ ，相关系数 R^2 为 0.996，可以推算出此时膨润土的 c 为 12.63kPa， φ 为 7.0° 。

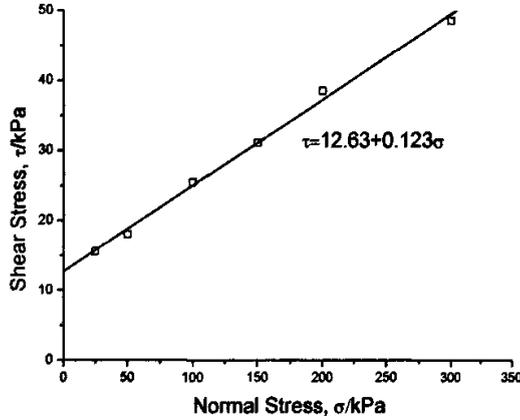


图 6.13 水化液为 MSWL 时膨润土的 $\tau \sim \sigma$ 关系曲线

表 6.2 是各级正应力下膨润土的剪切强度和相应的剪切参数统计表，从表中可以看出，随着正应力的增大，采用四种液体水化后膨润土的剪切强度差距越来越大。当正应力为 25kPa 时，采用 DDW 水化的膨润土剪切强度比采用 MSWL 水化的大 63.9%；而当正应力为 300kPa 时，此值为 146.3%。说明随着正应力的增大，液体类型对膨润土的剪切强度影响越来越明显，工程实践中，当 GCL 应用到承受较大正应力的部位时，最好事先用离子含量低的液体（如自来水）进行水化，这样防渗系统的稳定性更容易得到保证。

表 6.2 剪切试验结果统计表

液体类型 \ 剪切强度/kPa	正应力/kPa						剪切参数		
	25	50	100	150	200	300	c /kPa	φ / $^\circ$	R^2
MSWL	15.57	17.99	25.39	31.09	38.49	48.75	12.63	7.0	0.996
PW	17.61	22.39	29.63	37.37	48.84	63.66	13.36	9.6	0.996
TW	24.23	29.67	40.04	47.25	60.48	96.39	14.88	14.2	0.971
DDW	25.52	29.86	50.46	60.48	78.44	115.67	15.07	18.1	0.993

6.4 GCL 内部剪切强度的应用

6.4.1 垃圾填埋场边坡稳定性分析方法

钱学德和 Koerner 等^{[105][106]}提出了计算垃圾填埋场边坡稳定性的方法——运动破坏分析法，但是他们的方法中没有考虑剪切破坏面粘聚力的影响。为了将本文的试验研究成果与该方法结合起来应用，本文推导了能够同时考虑剪切破坏面粘聚力和内摩擦角的计算方法。图 6.14 为垃圾填埋场边坡主动楔体和被动楔体的划分和作用力示意图，推导过程中所用到的物理符号含义如下（其中下标 A 、 P 分别代表主动楔体和被动楔体）： W 表示楔体的重量； F 表示滑动破坏面的摩擦力； N 表示垂直于滑动破坏面的正压力； E 表示作用在主动、被动楔体接触面的力， E_H 、 E_V 是其在水平向和竖向的分力； C 表示滑动破坏面的粘聚力； c 表示接触面的粘聚强度； δ 表示接触面的内摩擦角； α 是前坡角； β 是后坡角； θ 是填埋单元的坡度； B 是垃圾体的顶部宽度； H 是后边坡的高度； γ_{sw} 是边坡上垃圾体的重度； ϕ_{sw} 是垃圾体的内摩擦角； FS 表示稳定安全系数，其中 FS_V 表示楔体接触面的安全系数。

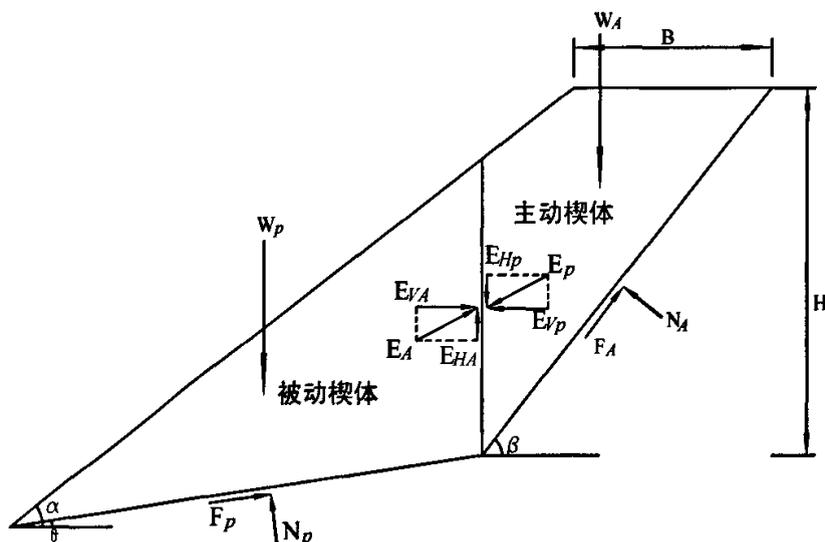


图 6.14 垃圾填埋场边坡作用力示意图

在运动破坏分析法的推导过程中进行了下述假定：①楔体之间的作用力 E 的方向与楔体分界面法向夹角为 ω ，作用点位于距分界面底部 $1/3$ 高度处。作用力分解为垂直分界面和平行于分界面的两个分量，如图 6.14 所示；②楔体分界面的安全系数 FS_V 不小于 1，且不小于整个边坡的安全系数 FS ；③破坏面上各点的安全系数 FS 处处相等；④不考虑垃圾体粘聚力的影响。

对图 6.14 中被动楔体进行受力分析，在竖直方向平衡方程为：

$$W_p + E_{VP} = N_p \cos \theta + F_p \sin \theta \quad (6.2)$$

$$F_p = (C_p + N_p \tan \delta_p) / FS_p \quad (6.3)$$

$$E_{VP} = E_{HP} \tan \phi_{sw} / FS_V \quad (6.4)$$

令
$$m_{sw} = \tan \phi_{sw} / FS_V \quad (6.5)$$

把式 (6.5) 代入到式 (6.4) 中，可得：

$$E_{VP} = E_{HP} m_{sw} \quad (6.6)$$

把式 (6.3) 和式 (6.6) 代入到式 (6.2) 中，整理可得：

$$W_p + E_{HP} m_{sw} = N_p (\cos \theta + \sin \theta \tan \delta_p / FS_p) + C_p \sin \theta / FS_p \quad (6.7)$$

在水平方向平衡方程为：

$$F_p \cos \theta = E_{HP} + N_p \sin \theta \quad (6.8)$$

把式 (6.3) 代入到式 (6.8) 中，可以得到：

$$N_p = \frac{E_{HP} FS_p - C_p \cos \theta}{\tan \delta_p \cos \theta - \sin \theta FS_p} \quad (6.9)$$

把式 (6.9) 代入到式 (6.7) 中，整理可以得到：

$$E_{HP} = \frac{W_p (\tan \delta_p \cos \theta + \sin \theta FS_p) + C_p}{\cos \theta FS_p + \sin \theta \tan \delta_p - \cos \theta \tan \delta_p m_{sw} + \sin \theta m_{sw} FS_p} \quad (6.10)$$

对图 6.14 中主动楔体进行受力分析，在竖直方向平衡方程为：

$$W_A = F_A \sin \beta + N_A \cos \beta + E_{VA} \quad (6.11)$$

$$F_A = (C_A + N_A \tan \delta_A) / FS_A \quad (6.12)$$

$$E_{VA} = E_{HA} m_{sw} \quad (6.13)$$

把式 (6.12) 代入到式 (6.13) 中，可以得到：

$$W_A = N_A (\cos \beta + \sin \beta \tan \delta_A / FS_A) + C_A \sin \beta / FS_A + E_{HA} m_{sw} \quad (6.14)$$

在水平方向平衡方程为：

$$F_A \cos \beta + E_{HA} = N_A \sin \beta \quad (6.15)$$

把式 (6.12) 代入到式 (6.15) 中, 可以得到:

$$N_A = \frac{E_{HA} FS_A + C_A \cos \beta}{\sin \beta FS_A - \cos \beta \tan \delta_A} \quad (6.16)$$

把式 (6.16) 代入到式 (6.14) 中, 整理可以得到:

$$E_{HA} = \frac{W_A (\sin \beta FS_A - \cos \beta \tan \delta_A) - C_A}{\cos \beta FS_A + \sin \beta \tan \delta_A - \cos \beta \tan \delta_A m_{sw} + \sin \beta m_{sw} FS_A} \quad (6.17)$$

因为 $E_{HP} = E_{HA}$, $FS_P = FS_A = FS$, 并且假定 $\delta_P = \delta_A = \delta$, 并且利用一元二次方程 $ax^2 + bx + c = 0$ 的求根公式计算稳定安全系数 FS , 公式为:

$$FS = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (6.18)$$

通过推导可知:

$$a = (W_A + W_P) \sin \beta \sin \theta m_{sw} + W_A \sin \beta \cos \theta + W_P \sin \theta \cos \beta$$

$$b = (W_A + W_P) \sin \beta \sin \theta \tan \delta - (W_A + W_P) \sin \beta \cos \theta \tan \delta m_{sw} \\ - (W_A + W_P) \cos \theta \cos \beta \tan \delta - (W_A + W_P) \sin \theta \cos \beta \tan \delta m_{sw} \\ - C_A (\cos \theta + \sin \theta m_{sw}) - C_P (\cos \beta + \sin \beta m_{sw})$$

$$c = (W_A + W_P) \cos \theta \cos \beta \tan^2 \delta m_{sw} - W_A \sin \theta \cos \beta \tan^2 \delta - W_P \cos \theta \sin \beta \tan^2 \delta \\ + C_A (\cos \theta \tan \delta m_{sw} - \sin \theta \tan \delta) + C_P (\cos \beta \tan \delta m_{sw} - \sin \beta \tan \delta)$$

$$C_A = c_A H / \sin \beta$$

$$C_P = c_P (H - B \tan \beta) \sin(\pi/2 + \theta - 2\alpha) / \sin(\alpha - \theta)$$

公式 (6.18) 中主动、被动楔体的重量可以采用下列公式计算:

若 $B < H / \tan \beta$, 则有

$$W_A = 0.5 \gamma_{sw} H^2 / \tan \beta - 0.5 \gamma_{sw} (H / \tan \beta - B)^2 \tan \alpha \quad (6.19)$$

$$W_P = 0.5 \gamma_{sw} [(H / \tan \alpha - H / \tan \beta + B)^2 \tan \alpha \tan \theta / (\tan \alpha - \tan \theta) \\ + (H / \tan \alpha - H / \tan \beta + B)^2 \tan \alpha] \quad (6.20)$$

若 $B \geq H / \tan \beta$, 则有

$$W_A = 0.5\gamma_{sw} H^2 / \tan \beta \quad (6.21)$$

$$W_p = \gamma_{sw} [0.5(H/\tan \alpha - H/\tan \beta + B)^2 \tan \alpha \tan \theta / (\tan \alpha - \tan \theta) + H(B - H/\tan \beta + 0.5H/\tan \alpha)] \quad (6.22)$$

(1) FV_{\min} 的计算

当 $FS_V = \infty$ 时, 平行于主动、被动楔体分界面的作用力为 0, 两个楔体间的作用力垂直于楔体分界面, 此时通过式 (6.18) 计算所得的稳定安全系数就是最小稳定安全系数 FV_{\min} , 方程为:

$$FS_{\min} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (6.23)$$

通过推导可知:

$$a = W_A \sin \beta \cos \theta + W_p \sin \theta \cos \beta$$

$$b = (W_A + W_p) \sin \beta \sin \theta \tan \delta - (W_A + W_p) \cos \theta \cos \beta \tan \delta - C_A \cos \theta - C_p \cos \beta$$

$$c = -W_A \sin \theta \cos \beta \tan^2 \delta - W_p \cos \theta \sin \beta \tan^2 \delta - C_A \sin \theta \tan \delta - C_p \sin \beta \tan \delta$$

(2) FV_{\max} 的计算

假定 $FS_V = FS$, $m_{sw} = \tan \phi_{sw} / FS$, 此时通过式 (6.18) 计算所得的稳定安全系数就是最大稳定安全系数 FV_{\max} , 方程为:

$$aFS_{\max}^3 + bFS_{\max}^2 + cFS_{\max} + d = 0 \quad (6.24)$$

通过推导可知:

$$a = W_A \sin \beta \cos \theta + W_p \sin \theta \cos \beta$$

$$b = (W_A + W_p) \sin \theta \sin \beta \tan \delta + (W_A + W_p) \sin \theta \sin \beta \tan \phi_{sw} - (W_A + W_p) \cos \theta \cos \beta \tan \delta - C_A \cos \theta - C_p \cos \beta$$

$$c = -(W_A + W_p) \cos \theta \sin \beta \tan \delta \tan \phi_{sw} - (W_A + W_p) \sin \theta \sin \beta \tan \delta \tan \phi_{sw} - W_A \sin \theta \cos \beta \tan^2 \delta - W_p \sin \beta \cos \theta \tan^2 \delta - C_A \sin \theta \tan \delta - C_A \sin \theta \tan \phi_{sw} - C_p \sin \beta \tan \delta - C_p \sin \beta \tan \phi_{sw}$$

采用数学分析软件 Matlab 编制程序, 可以方便求得上述一元二次方程或一元三次方程的解, 就可以得到边坡稳定安全系数的上、下限。

6.4.2 边坡稳定性计算及影响因素分析

某一垃圾填埋场一侧依山体建成，边坡形状与图 6.14 的边坡类似。填埋场的防渗系统中采用了土工织物膨润土垫，本文只对 GCL 的内部稳定性进行分析计算。垃圾填埋场的相关参数为：垃圾体的重度 γ_{sw} 为 10.2kN/m^3 ，内摩擦角 ϕ_{sw} 为 33° ，剪切破坏面的粘聚力和摩擦角采用本文试验所得的结果，如表 6.2 所示；前坡体的坡高比为 4:1 (α 为 14.0°)，填埋单元的坡度为 2% (θ 为 1.1°)，后坡体的坡高比为 3:1 (β 为 18.4°)，垃圾体顶部宽度 B 为 20m，后坡体高度 H 为 30m。

通过 Matlab 软件编制的程序计算采用 MSWL、PW、TW 和 DDW 水化后 GCL 稳定安全系数的最小值和最大值，计算结果如表 6.3 所示。从表中可以看出，采用 DDW 水化后 GCL 的安全系数最大，其最小值比采用 MSWL 水化后的安全系数最小值大 72.4%，比采用 TW 水化的要大 49.8%，所以 GCL 应用于实际工程时，最好用自来水使其水化，可以增强 GCL 的稳定性。

表 6.3 GCL 的稳定安全系数

液体	MSWL	PW	TW	DDW
安全系数最小值	1.489	1.748	2.230	2.567
安全系数最大值	1.567	1.823	2.304	2.639

影响 GCL 稳定性的因素有很多，本文通过计算分析垃圾体内摩擦角、填埋单元坡度、GCL 的内部剪切强度、前、后坡角的影响。

(1) 垃圾体内摩擦角 ϕ_{sw} 的影响

图 6.15 反映了 GCL 稳定安全系数的最大值和最小值与垃圾体内摩擦角的关系，可以看出：GCL 的最大安全系数随着垃圾体内摩擦角的增大而逐渐增大，而最小安全系数则保持不变。这是因为在计算 FS_{\min} 时假定垃圾体的 $FS_y = \infty$ ，也就是不考虑垃圾体内摩擦角的影响。最大安全系数和最小安全系数的差值随着垃圾体内摩擦角的增大而增大，但是当垃圾体的内摩擦角从 20° 增大到 50° 时，两者之间的差异不超过 9.33%。

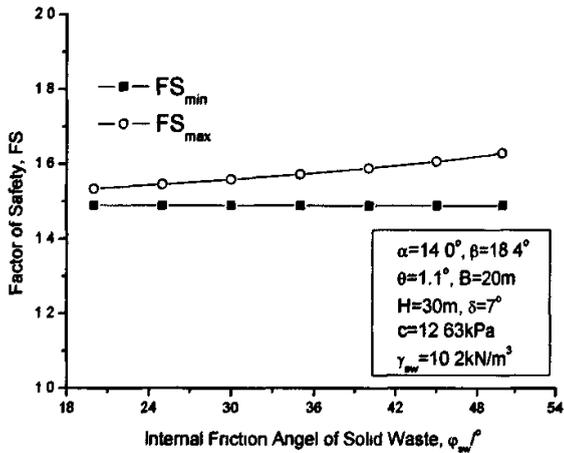


图 6.15 GCL 的安全系数和垃圾体内摩擦角的关系

(2) 填埋单元坡度的影响

图 6.16 反映了 GCL 的安全系数同填埋单元坡度之间的关系,可以看出 GCL 的最大和最小安全系数都随着填埋单元坡度的增大而增大,两者之间的差值随着坡度的增大而减小。这是因为在其它参数都固定的情况下,增大填埋单元坡度会增大被动楔体的体积,虽然增大了滑动体的重量,但是同时也增大了内摩擦力,而且后者增大的幅度要大于前者,所以安全系数反而有所增大。如果 GCL 的粘聚力为 0,则会出现相反的规律,如图 6.17 所示,因为此时 GCL 内部不存

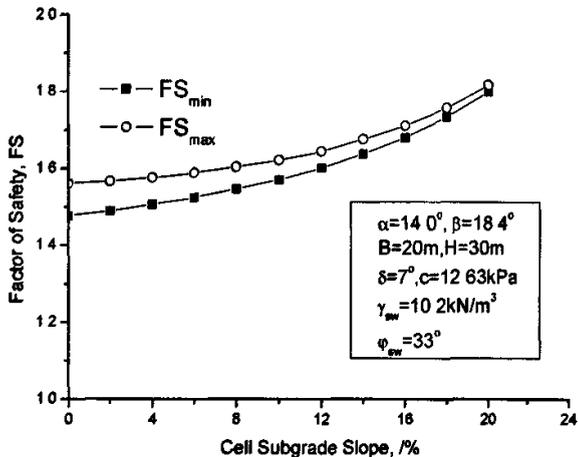


图 6.16 GCL 的安全系数与填埋单元坡度的关系

在粘聚力了，在滑动体重量增大的情况下，GCL 的安全系数必然有所减小。此时，两者之间的差值仍然是随着填埋单元坡度的增大而减小。

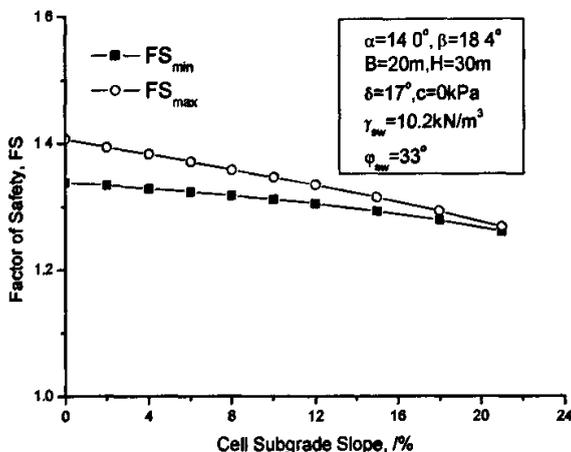


图 6.17 GCL 粘聚力为零时安全系数和填埋单元坡度的关系

(3)GCL 内部抗剪强度 c 、 δ 的影响

图 6.18 反映了 GCL 的安全系数与其内部粘聚力之间的关系，可以看出 GCL 的最大和最小安全系数都随着 GCL 内部粘聚力的增大而增大，而且基本呈线性增大。这是因为在其它参数都固定的情况下，增大 GCL 的粘聚力会大大增大楔体的抗滑摩擦力 F_p ，也就会增加 GCL 的安全系数。

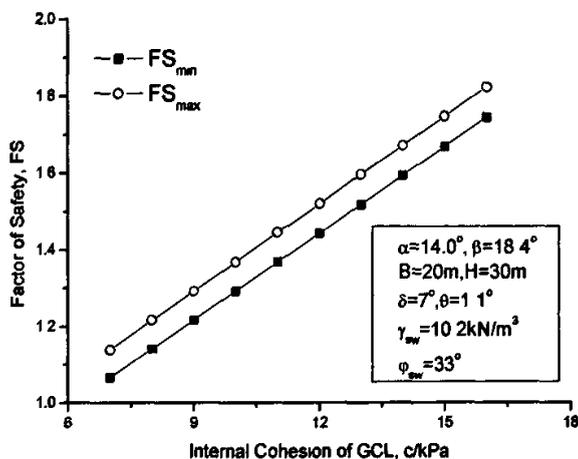


图 6.18 GCL 的安全系数和内部粘聚力的关系

图 6.19 是 GCL 的内摩擦角和安全系数之间的关系, 最大和最小安全系数随 GCL 内摩擦角的增大也几乎呈线性增长, 这同样是因为增大了内摩擦角就会相应的增大楔体的抗滑力。

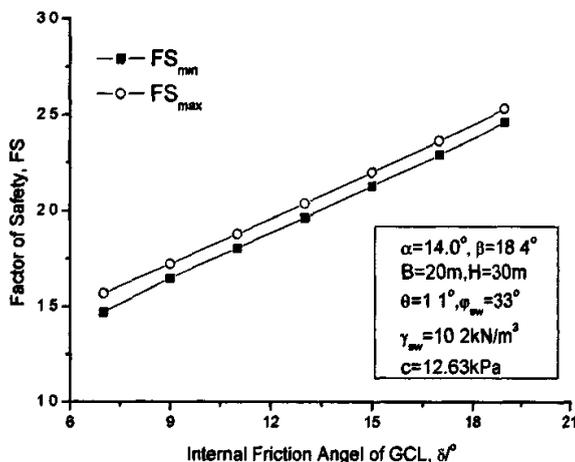


图 6.19 GCL 的安全系数和内摩擦角的关系

GCL 的稳定安全系数随着它内部剪切强度的增大而增大, 这也就解释了采用 MSWL 水化的 GCL 安全系数最小, 而采用 DDW 水化的安全系数最大的规律。因此在实际工程中, 要想保证 GCL 的稳定性, 最好选择内部剪切强度大的 GCL 作为防渗材料或者采用 DDW 预先水化。

(4) 坡角 α 、 β 的影响

图 6.20 反映了 GCL 的稳定安全系数和前坡角之间存在的相关关系, 最大和最小安全系数随着 α 的增大出现先减小后增大的趋势, 当 α 为 15° 时均出现最小值。这是因为在其它因素不变的条件下, 随着 α 的增大, 被动楔体的体积增大, 也就导致被动楔体的重量 W_p 增大, 而同时被动楔体的摩擦力 F_p 也增大。当前坡角小于 15° 时, 被动楔体重量增大的影响大于摩擦力的影响, 使得安全系数减小; 当前坡角超过 15° 时, 摩擦力的影响超过了重量的影响, 因此安全系数会出现先减小后增大的趋势。

图 6.21 是 GCL 的安全系数与后坡角之间的关系, 从图中可以看出, 最大和最小安全系数随着 β 的增大而迅速减小, 当后坡角为 30° 时最小安全系数基本等于 1, GCL 处于临界平衡状态。最大安全系数和最小安全系数之间的差值随着 β

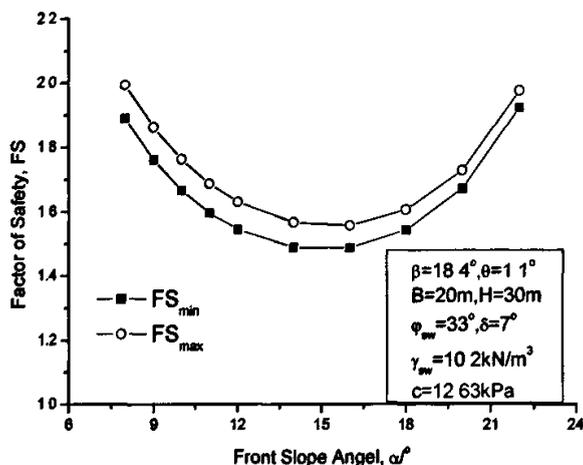


图 6.20 GCL 安全系数和前坡角的关系

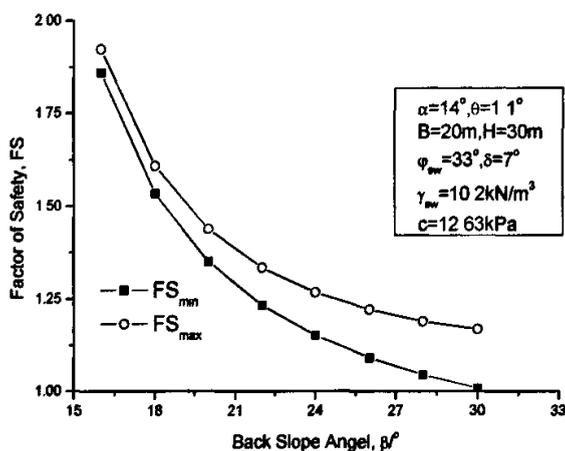


图 6.21 GCL 安全系数和后坡角的关系

的增大而略有增加，但是没有超过最小安全系数的 15.66%。在其它因素保持不变的条件下，当后坡角 β 增大时，虽然主动楔体和被动楔体的重量都有所增大，但是被动楔体增大的速度要远远大于主动楔体，图 6.22 是被动楔体和主动楔体的重量比与后坡角的关系，重量比随 β 的增大而迅速从 0.25 增大到 2.09。所以虽然主动楔体的增大导致下滑力增大，但是抗滑力增大的幅度要大于下滑力，所以安全系数越来越大。

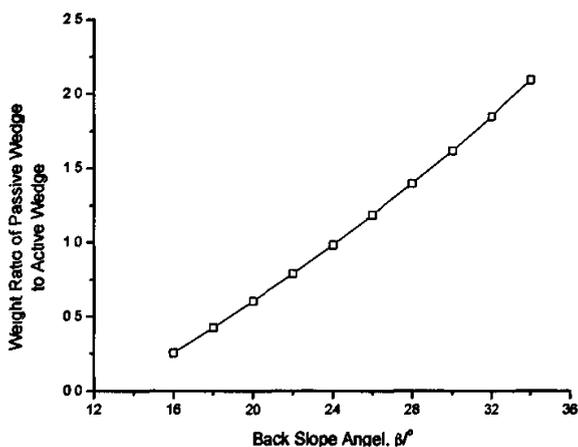


图 6.22 楔体重量比与后坡角的关系

6.5 本章小结

本章采用室内直剪试验对 GCL 中膨润土的剪切强度进行了试验，以此来表征 GCL 的内部剪切强度，并分析了正应力和水化液类型的影响。推导了基于运动破坏理论的稳定安全系数计算公式，将剪切试验结果应用到某垃圾填埋场边坡稳定性分析中，并探讨了各种因素对安全系数的影响，通过本章的研究得到以下结论：

(1) 采用 GCL 膨润土的剪切强度来表征 GCL 的内部剪切强度是合理可行的。

(2) 正应力和水化液类型对膨润土的剪切强度存在影响，其中正应力越大，膨润土的剪切强度安就越大；采用蒸馏水水化后膨润土的剪切强度最大，而采用垃圾渗滤液水化后剪切强度最小。

(3) 运动破坏理论考虑了垃圾体力学性质、边坡形态和破坏面剪切强度等因素对稳定性的影响，基于此理论得到的安全系数计算公式物理力学意义充足，结果有代表性。

度采用运动破坏理论，结合本章剪切试验的结果，对使用 GCL 作为防渗材料的某垃圾填埋场稳定性进行计算，发现经过蒸馏水水化后 GCL 的稳定安全系数最大。

(5) 在实际工程应用中，GCL 铺设完成后在堆载之前最好用蒸馏水或者自来水充分水化，这样能够大大提高防渗工程的稳定性。

第7章 结论与展望

7.1 主要结论

本文通过室内试验对 GCL 应用于防渗工程后的防渗有效性进行了研究,探讨了 GCL 所承受的应力水平、水化液和渗透液种类和水化条件对其防渗有效性的影响,并从微观角度入手进行了机理分析。试验中使用了自行研制加工的土工合成材料渗压仪,也用到了 X 射线衍射、X 射线荧光光谱分析、压汞试验、等离子光谱分析等先进的微观研究手段,并严格按照国际标准进行。通过一系列的研究工作,研究结果可以归纳为以下几个方面:

1) 本文所研制的土工合成材料渗压仪 Geo-Syn 结合了国内外现有渗透仪器的优点,并充分考虑了土工合成材料的特点。Geo-Syn 由压力室、加压系统、渗透压力施加系统和量测系统几部分组成,能够对单独承受竖向应力或水平向应变条件下的 GCL 进行渗透试验。试验完全按照 ASTM D6766 标准的要求进行操作,能够精确量测出不同条件下 GCL 的渗透系数。

2) 对 GCL 的自由膨胀试验和水化膨胀试验结果表明:①GCL 的水化厚度随着正应力的增大而逐渐减小;②在相同正应力下,先加压后水化的 GCL 厚度要小于先水化后加压的厚度;③水化液体中阳离子的离子价越大、浓度越高,水化后膨润土的自由膨胀量越小,GCL 水化膨胀厚度也越小,水化液为蒸馏水时 GCL 的膨胀量明显大于采用垃圾渗透液水化的膨胀量。

3) 通过渗透试验发现水化液体和渗透液体都对 GCL 的渗透性能产生较大影响,具体表现为:①水化液和渗透液为蒸馏水、自来水、雨水、老港垃圾填埋场场内池塘水和老港垃圾填埋场垃圾渗滤液时,GCL 的渗透系数依次增大;②当水化液是蒸馏水时,GCL 对蒸馏水的防渗能力要远远超过对垃圾渗滤液的防渗能力;③当渗透液是垃圾渗滤液时,采用蒸馏水作为水化液时 GCL 的渗透系数大于采用雨水作为水化液的情况,更大于采用垃圾渗滤液作为水化液时 GCL 的渗透系数;④水化、渗透液中阳离子的离子价、浓度以及水化离子半径都对 GCL 渗透系数产生了影响,GCL 的渗透系数随着阳离子离子价的增大和浓度的升高而增大,单价阳离子的水化离子半径和 GCL 的渗透系数成反比。

4) 通过压汞试验对膨润土水化后的微结构进行分析, 结果发现: ①采用蒸馏水水化后膨润土的孔隙体积密度最小, 平均孔隙直径最小, 而且大直径孔隙比例最低, 所以此时渗透系数也最小; ②对含单一阳离子溶液水化后的膨润土进行微观分析发现膨润土的微结构特征与 GCL 的渗透系数大小存在相关性, 膨润土的孔隙体积密度越小, 平均孔隙直径越小, 大直径孔隙比例越低, GCL 的渗透系数就越小, 反之亦然。

5) 采用膨润土分阶段水化理论和双电层理论分别可以对 GCL 膨胀特性和渗透性能的变化规律进行机理分析。膨润土水化分阶段理论指出, 膨润土的水化过程分为结晶水化和渗透水化两个阶段, 对膨润土的微观结构形成起决定作用的渗透水化发生的程度。本文通过自由膨胀试验发现溶液中阳离子的离子价、离子浓度和水化离子半径都对膨润土的渗透水化发生的程度有一定影响, 因此也影响了 GCL 的膨胀特性; 双电层理论指出, 膨润土的渗透性能受到黏土颗粒表面双电层厚度的影响, 双电层厚度越小, 则膨润土的渗透系数就越大。本文通过渗透试验发现影响膨润土颗粒表面双电层厚度的因素, 包括孔隙液体中阳离子的离子价、浓度以及水化离子半径等, 也将对膨润土的渗透系数产生影响。

6) GCL 所承受的竖向应力、加压水化顺序以及水平向应变对其渗透系数均产生影响, 具体表现为: ①无论加压水化顺序如何, GCL 的渗透系数随着竖向应力的增大呈现先减小后略有增大的变化趋势, 实际工程中将 GCL 应用于承受较大竖向荷载的位置时要慎重考虑, 最好事先通过室内试验来确定选择 GCL 作为防渗材料是否满足设计要求; ②实际工程中 GCL 的水化条件有先加压后水化和先水化后加压两种, 当竖向应力小于 250kPa 时两者的渗透系数相差不大, 但是竖向应力大于 250kPa 时先水化后加压条件下的渗透系数要小于先加压后水化条件, 这是因为当竖向应力大于 250kPa 时, 先水化后加压条件下 GCL 的厚度要大一些; ③本文试验发现, 随着 GCL 水平向应变的增大, 其渗透系数急剧增大。因此实际应用中要通过对地基变形的监测不断调整堆载方案, 使 GCL 的水平向应变保持在一定范围 (本文建议小于 6%)。

7) 在液体渗透 GCL 的过程中, 膨润土将会对液体中的阳离子和有机物发生吸附作用, 吸附能力的高低与水化液类型和渗透时间的长短有直接关系, 而且在渗透初始阶段膨润土的吸附能力要远远大于渗透稳定阶段。X 射线衍射和 X 荧光光谱分析也证明了在液体渗透过程中膨润土能吸附液体中的有害物质。

8) 由于 GCL 中针刺纤维的强度很高, 在短期内 GCL 发生剪切时, 其剪切

强度主要由针刺纤维的抗拉强度决定。而由于针刺纤维的强度随着时间发展会逐渐降低,所以从长远角度看对 GCL 的剪切强度将不产生影响,本文用膨润土的剪切强度来代表 GCL 的内部剪切强度是有理论意义和现实意义的。通过本文的剪切试验发现,采用蒸馏水水化后膨润土的抗剪强度要高于采用垃圾渗滤液水化的试样。

9) 在 GCL 应用到实际防渗工程中时,在 GCL 铺设完成以后、施加竖向荷载之前采用离子含量小、浓度低的液体(比如自来水、雨水)使其完全水化,这样不但可以减小 GCL 的渗透系数和提高吸附能力,而且还可以增大防渗系统的抗剪切稳定性。

7.2 展望

本文的研究虽然得到了一系列有理论意义和实践价值的结论,为提高防渗工程中 GCL 的防渗有效性提供了有价值的参考,但是在以下几个方面仍然存在不足之处,需要开展更深入的研究工作。

1) 本文研制的土工合成材料渗压仪对于同时承受竖向和水平向应力下的 GCL 还无法进行试验研究,而实际工程中 GCL 要同时承受两个方向的应力。因此如何将现有渗压仪进行改造,使其能够实现上述要求就变得尤为重要。

2) 本文对 GCL 防渗能力和吸附能力的研究都是研究它的短期性能,对内部剪切强度的研究也是通过研究短期性能来代表长期性能。而实际防渗工程中, GCL 防渗有效性的发挥是一个长期的过程,因此其长期性能比短期性能更有意义。但 GCL 长期性能的研究需要相当长的时间,要通过进一步改进研究方法、进行持续不断的研究才能够实现。

3) 本文只是对 GCL 这一种防渗材料的防渗有效性进行了研究,而很多工程的防渗系统是由多种防渗材料构成的,每种材料的性能都将对整体防渗有效性产生影响,因此要将多种防渗材料作为一个有机整体来加以研究。

4) 本文对 GCL 防渗性能和稳定性能分别进行了研究,而两者其实是互相影响、相互制约的,液体渗透 GCL 前后对其剪切强度会产生影响,同样 GCL 局部发生轻微剪切破坏对它的防渗性能也会有影响。因此希望结合实际工程建设和运营期间的监控,将两方面综合起来进行研究。

致谢

论文的付梓印刷，意味着我4年半的研究生学习生涯即将结束。在这段时间内，我先后得到了众多师长和朋友的悉心指导和鼎力相助，在此表示我由衷的感谢。

首先将我的谢意和祝福送给我的导师卢耀如院士，虽然他工作繁忙，经常要在各个城市间奔波，但仍然一直都非常关注我论文的进展情况，给了我很多有价值的建议。另外，卢院士在生活方面也给了我热切的关怀和帮助。我从卢院士身上学到的不仅是科学严谨的治学态度，还学到了许多为人处事的道理。

本论文是在副导师徐超副教授的悉心指导下完成的。在这4年半的时间里，徐老师无论是在学习还是生活方面都给予了我无微不至的关怀和帮助，我们之间也逐渐形成了亦师亦友的关系，在此表示衷心的感谢和崇高的敬意。叶观宝教授作为我的硕士导师，在此期间也为我提供了巨大的帮助。叶老师渊博的知识、严谨的治学态度、敏锐的科学洞察力、富于创新的精神和平易近人的作风，令我感动、难忘，并使我终生受益，深表感谢。

本论文的顺利完成还要感谢岩土加固与测试技术研究室赵鸿钧老师、高彦斌老师、白航老师和邢皓枫老师。还要感谢岩土工程实验室的陈宝、洪积敏、徐祖兴、龚志明、吴晓峰等老师，在论文的试验过程中，他们给我提供了很多帮助。对所有的授课老师及评阅、评议本论文和出席论文答辩会的各位专家学者致以衷心的感谢！

感谢张曦、邓治纲、殷海涛、张刚、汤竞、郭宏斌、林文英等同学的无私帮助，与他们形成的8年同窗之谊使我感受到了“出外靠朋友”的真谛。感谢教研室同门在我几年的研究生学习期间所给予的关怀和帮助，我们一起营造的轻松活跃的教研室气氛也为我提供了一个良好的学习、生活环境。

感谢女友钱霞在我学习和生活中倾注了的无限的爱，论文的试验期间她经常陪我一起动手，并多次给我提出好的意见和建议，我的论文也有她的一份。

最后，将我的感激之情献给至今仍黄土地上劳作、两鬓早已花白的父母。你们的默默支持一直是我前进的根本动力，我虽然不在你们身边，但我的心永远和你们在一起，“我毕业了，你们也可以休息一下了”。

李志斌

2007年1月

参考文献

- [1] 赵由才, 龙燕, 张华. 生活垃圾卫生填埋技术. 北京: 化学工业出版社, 2004
- [2] 周正兵, 王钊, 王俊奇. GCL——一种新型复合土工材料的特性及应用综述. 长江科学院院报, 2002, Vol.19 (1): 35~38
- [3] Koerner R K. Geosynthetic clay liners, Part one: an overview. Geotechnical Fabrics Report, 1996, Vol.14(4): 22~25
- [4] 施有志, 马时冬. 垃圾填埋场中的土工聚合物膨润土衬垫. 华侨大学学报(自然科学版), 2002, Vol.23 (2): 151~156
- [5] Qian X D, Koerner R M, Gray D H. Geotechnical aspects of landfill design and construction. New Jersey: Prentice Hall, 2002
- [6] 胡虎. 膨润土垫在垃圾填埋场工程中的应用. 有色冶金设计与研究, 2004, Vol.25 (4): 70~71, 74
- [7] Giroud J P, et al. Leakage through liners constructed with geomembranes- part I: Geomembrane liners. Geotextiles and Geomembranes, 1989, Vol.7: 342~365
- [8] 吴景海. 含土工膜防渗层渗透量的研究: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 1992
- [9] 王保田, 徐志伟, 张文慧, 等. 土工织物渗透仪研制及试验成果. 大坝观测与土工测试, 1999, Vol.23 (1): 37~39
- [10] 中华人民共和国行业标准. SL/T235-1999. 土工合成材料测试规程. 1999
- [11] 鄢俊. 土石坝土工薄膜防渗结构优化设计研究及应用: [硕士学位论文]. 南京: 南京水利科学研究院, 2000
- [12] 戴鹏飞. 土工合成材料的防渗与反滤试验研究: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 2002
- [13] Ruhl J L, Daniel D E. Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, Vol.123(4): 369~381
- [14] 李宪. GCL 防渗特性及填埋场防渗系统的研究: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 2005
- [15] Petrov R J, Rowe R K, Quigley R M. Selected factors influencing GCL hydraulic conductivity. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, Vol.123(8): 683~695
- [16] Petrov R J, Rowe R K. Geosynthetic clay liner (GCL)-chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance. Canadian Geotechnical Journal, 1997, Vol.34: 863~885
- [17] LaGatta M D, Boardman B T, Cooley B H, et al. Geosynthetic clay lines subjected to differential settlement. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, Vol.123(5): 402~410

- [18] Lake C K, Rowe R K. Diffusion of sodium and chloride through geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 2000, Vol.18: 103~131
- [19] Shackelford C D, Benson C H, Katsumi T, et al. Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids. *Geotextiles and Geomembranes*, 2000, Vol.18: 133~161
- [20] Lin L C, Benson C H. Effect of wet-dry cycling on swelling and hydraulic conductivity of GCLs. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, Vol.126(1): 40~49
- [21] Jo H Y, Katsumi T, Benson C H, et al. Hydraulic conductivity and swelling of nonprehydrated GCLs permeated with single-species salt solutions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, Vol.127(7): 557~567
- [22] Shan H Y, Lai Y J. Effect of hydrating liquid on the hydraulic properties of geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 2002, Vol.20: 19~38
- [23] Rowe R K, Mukunoki T, Li M H, et al. Effect of freeze-thaw on the permeation of arctic diesel through a GCL. *Journal of ASTM International*, 2004, Vol.1(2): 1~13
- [24] Kolstad D C, Benson C H, Edil T B. Hydraulic conductivity and swell of nonprehydrated geosynthetic clay liners permeated with multispecies inorganic solutions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, Vol.130(12): 1236~1249
- [25] Lee J M, Shackelford C D. Impact of bentonite quality on hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, Vol.131(1): 64~77
- [26] Jo H Y, Benson C H, Shackelford C D, et al. Long-term hydraulic conductivity of a geosynthetic clay liner permeated with inorganic salt solutions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, Vol.131(4): 405~417
- [27] Lee J M, Shackelford C D, Benson C H, et al. Correlating index properties and hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, Vol.131(11): 1319~1329
- [28] 朱利中, 成群, 沈学优, 等. 有机膨润土吸附苯胺的性能及其在水处理中的应用. *环境污染与防治*, 1994, Vol.16 (6): 15~17
- [29] 朱利中, 李益民, 张建英, 等. 有机膨润土吸附水中萘胺、萘酚的性能及其应用. *环境科学学报*, 1997, Vol.17 (4): 445~449
- [30] 朱利中, 陈宝梁, 罗瑜. 有机膨润土吸附水中多环芳烃的性能及机理研究. *环境科学学报*, 2000, Vol.20 (1): 21~26
- [31] 沈学优, 卢瑛莹, 朱利中. 有机物在水/双阳离子有机膨润土界面的吸附贡献率研究. *浙江大学学报(理学版)*, 2003, Vol.30 (1): 69~74
- [32] 李济吾, 朱利中, 蔡伟建. 微波合成有机膨润土及其吸附水中有机物的性能. *中国环境科学*, 2004, Vol.24 (6): 665~669
- [33] 朱利中, 马荻荻, 陈宝梁. 双阳离子有机膨润土对非的吸附性能及机理研究. *环境化学*, 2000, Vol.19 (3): 256~261
- [34] 蒋引珊, 童振亮, 张雨力. 膨润土对干电池溶液中重金属离子的吸附作用. *应用化学*,

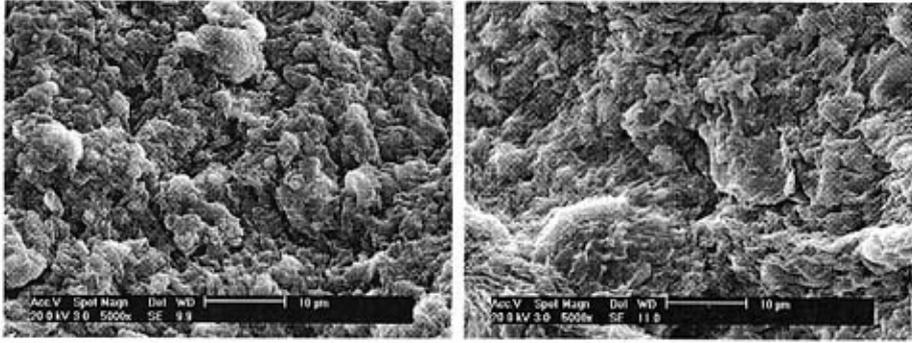
- 1995, Vol.12 (6): 101~102
- [35] 周玉林. 膨润土对溶液中 Cu^{2+} 离子的吸附作用. 西南工学院学报, 1995, Vol.10(4): 109~112
- [36] 刘莺, 黄晓佳, 刘学良, 等. 有机膨润土对水中苯、甲苯、乙苯、二甲苯和铬酸根离子的吸附性能. 应用化学, 2002, Vol.19 (4): 317~320
- [37] 陈林. 改性膨润土对水中 NH_4^+ 离子吸附研究:[硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2003
- [38] 王忠安. 膨润土吸附废水中重金属离子的研究:[硕士学位论文]. 辽宁: 东北大学, 2003
- [39] 张富韬. 垃圾卫生填埋场渗滤液处理技术中的新型吸附机的研究:[博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2003
- [40] 席永慧. 废弃物屏障系统技术理论研究:[博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2003
- [41] 马少健, 李长平, 陈建新. 微波焙烧活化膨润土处理 Cu^{2+} 废水的研究. 金属矿山, 2004, (6): 56~60
- [42] 杨秀红, 胡振琪, 高爱林, 等. 钠化改性膨润土对 Cd^{2+} 的吸附研究. 环境化学, 2004, Vol.23 (5): 506~509
- [43] 宋宝华, 邹东雷, 陈延君, 等. 城市废弃物填埋场中有机膨润土的防渗研究. 环境工程, 2004, Vol.22 (6): 65~68
- [44] 于瑞莲, 胡恭任. $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 复合 CPB-膨润土处理垃圾渗滤液. 中国非金属矿工业导刊, 2005, (3): 37~38, 57
- [45] 于瑞莲, 胡恭任. BAC-膨润土处理垃圾渗滤液的实验研究. 工业水处理, 2005, Vol.25 (3): 43~45
- [46] 蓝磊, 董张法, 李仲民, 等. 改性膨润土对废水中六价铬的吸附过程研究. 环境污染与防治, 2005, Vol.27 (5): 352~354, 358
- [47] Smith J A, Jaffe P R, Chiou C T. Effects of ten quaternary ammonium cations on tetrachloromethane sorption to clay from water. *Envir. Sci. Techno.*, 1990, Vol.24: 1167~1172
- [48] Smith J A, Galan A. Sorption of nonionic organic contaminants to single and dual organic cation bentonites from water. *Envir. Sci. Techno.*, 1995, Vol.29: 685~692
- [49] Kapoor A, Viraraghavan T. Use of immobilized bentonite in removal of heavy metals from wastewater. *Journal of Environmental Engineering*, 1998, Vol.124: 1020~1024
- [50] Triantafyllou S, Christodolou E, Syngouna P N. Removal of nickel and cobalt from aqueous solutions by Na-activated bentonite. *Clays Clay Miner.*, 1999, Vol.47: 567~572
- [51] Kaya A, Oren A K. Adsorption of zinc from aqueous solutions to bentonite. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, Vol.B125: 183~188
- [52] Khan S A, Rehman R, Khan M A. Adsorption of Chromium(III), chromium(V) and silver(I) on bentonite. *Waste Mgmt.*, 1995, Vol.15: 271~282
- [53] Khan S A, Rehman R, Khan M A. Sorption of strontium on bentonite. *Waste Mgmt.*, 1995, Vol.15: 271~282
- [54] Bereket G, Aroguz A Z, Ozel M Z. Removal of Pb(II), Cd(II), Cu(II), and Zn(II) from aqueous solutions by adsorption on bentonite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1997, Vol.187: 338~343

- [55] Mellah A, Chegrouche S. The removal of zinc from aqueous solutions by natural bentonite. *Water Res.*, 1997, Vol.31: 621~629
- [56] Khandelwal A, Rabideau A J, Shen P L. Analysis of diffusion and sorption of organic solutes in soil-bentonite barrier materials. *Envir. Sci. Techno.*, 1998, Vol.32: 1333~1339
- [57] Gilbert R B, Scranton H B, Daniel D E. Shear strength testing for geosynthetic clay liners. *ASTM Special Technical Publication*, 1997, Vol.1308: 121~135
- [58] Fox P J, Rowland M G, Scheithe J R. Internal shear strength of three geosynthetic clay liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, Vol.124(10): 933~944
- [59] Zornberg J G, McCartney J S, Swan R H. Analysis of a large database of GCL internal shear strength. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, Vol.131(3): 367~380
- [60] McCartney J S, Zornberg J G, Swan R H. Effect of shear displacement rate on the internal shear strength of GCLs. *Geotechnical Special Publication*, 2005: 130~142
- [61] American Society for Testing and Materials (ASTM). D6766. Standard test method for evaluation of hydraulic properties of geosynthetic clay liners permeated with potentially incompatible liquids. Philadelphia
- [62] American Society for Testing and Materials (ASTM). D5890. Standard test method for swell index of clay mineral component of geosynthetic clay liners. Philadelphia
- [63] 中华人民共和国国家标准. GB7488-87. 水质 五日生化需氧量 (BOD₅) 的测定 稀释与接种法, 1987
- [64] 中华人民共和国国家标准. GB1914-89. 水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法, 1989
- [65] 中华人民共和国国家标准. GB7479-87. 水质 铵的测定 纳氏试剂比色法, 1987
- [66] 莫志深, 张宏放. 晶态聚合物结构和 X 射线衍射. 北京: 科学出版社, 2003. 136~137
- [67] 周公度, 郭可信. 晶体和准晶体的衍射. 北京: 北京大学出版社, 1999. 51~54
- [68] Washburn E W. The dynamics of capillary flow. *Phys. Rev.*, 1921, Vol.17(3): 273~283
- [69] 叶为民, 黄雨, 崔玉军, 等. 自由膨胀条件下高压密膨胀粘土微观结构随吸力变化特征. *岩石力学与工程学报*, 2005, Vol.24 (24): 4570~4575
- [70] 袁聚云, 徐超, 赵春风, 等. 土工试验与原位测试. 上海: 同济大学出版社, 2004. 84~87
- [71] 中华人民共和国行业标准. SL237-1999. 土工试验规程, 1999
- [72] Gilbert P A, Murphy W L. Prediction mitigation of subsidence damage to hazardous waste landfill covers. Rep. No. EPA/600/2-87/025, Geotechnical Laboratory U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station, Washington, D.C. Rep., 1987
- [73] Pusch R. Mineral-water interactions and their influence on the physical behavior of highly compacted Na bentonite. *Canadian Geotechnical Journal*, 1982, Vol.19: 381~387
- [74] Delage P, Guy L. Study on the structure of a sensitive Champlain clay and its evolution during consolidation. *Canadian Geotechnical Journal*, 1984, Vol.21: 21~35
- [75] Juang C H, Robert D H. Pore size distribution and permeability of sandy soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1986, Vol.12(9): 822~867
- [76] Tessier D, Dardaine M, Beaumont A, et al. Swelling pressure and microstructure of activated

- swelling clay with temperature. *Clay Minerals*, 1998, Vol.33: 255~267
- [77] Moro F, Bohni H. Ink-bottle effect in mercury intrusion porosimetry of cement-based materials. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2002, Vol.192: 135~149
- [78] Laskar M A, Kumar R, Bhattacharjee B. Some aspects of evaluation of concrete through mercury intrusion porosimetry. *Cement and Concrete Research*, 1997, Vol. 27: 93~105
- [79] Diamond S. An inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 2000, Vol. 30: 1517~1525
- [80] 李淑进, 赵铁军, 吴科如. 混凝土渗透性与微观结构关系的研究. *混凝土与水泥制品*, 2004, (2): 6~8
- [81] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性. *中国科学*, 1987, 12 (B 辑): 309~318
- [82] 王清. 长春地区黄土状土湿陷性分析. *吉林地质*, 1991, 10 (3): 43~49
- [83] 胡瑞林, 官国林, 李向全, 等. 黄土湿陷性的微结构效应. *工程地质学报*, 1999, 7 (2): 161~167
- [84] 唐明. 混凝土孔隙分形特征的研究. *混凝土*, 2000, (8): 3~5
- [85] 唐明, 王甲春, 李连君. 压汞测孔评价混凝土材料孔隙分形特征的研究. *沈阳建筑工程学院学报 (自然科学版)*, 2001, 17 (4): 272~275
- [86] Diamond S. Aspects of concrete porosity revisited. *Cement and Concrete Research*, 1999, Vol.29(6): 1181~1188
- [87] 李后强, 江富泉. 分形理论及其在分子科学中的应用. 北京: 科学出版社, 1997
- [88] 李永鑫, 陈益民, 贺行洋, 等. 粉煤灰-水泥浆体的孔体积分形维数及其与孔结构和强度的关系. *硅酸盐学报*, 2003, 31 (8): 777~779
- [89] Lange D. Image analysis techniques for characterization of pore structure of cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 1994, Vol.24(5): 841~853
- [90] Pandey S P, Sharma R L. The influence of mineral additives on strength and porosity of OPC mortar. *Cement and Concrete Research*, 2000, Vol.30(1): 19~23
- [91] Jiang L H, Guan Y G. Pore structure and its effect on strength of high-volume fly ash paste. *Cement and Concrete Research*, 1999, Vol.29(4): 631~633
- [92] Norrish K, Quirk J. Crystalline swelling of montmorillonites, use of electrolytes to control swelling. *Nature*, 1954, Vol.173: 255~257
- [93] van Olphen H. An introduction to clay colloid chemistry(2nd Edition). New York: Wiley, 1977
- [94] McBride M. Environmental chemistry of soils. New York: Oxford University Press, 1994
- [95] Prost R, Koutit Y, Benchara A, et al. State and location of water adsorbed on clay minerals: consequences of the hydration and swelling-shrinkage phenomena. *Clays and Clay Minerals*, 1998, Vol.46(2): 117~131
- [96] Terzaghi K, Peck R B, Mesri G. Soil mechanics in engineering practice(2nd Edition). New York: John Wiley & Sons, 1996
- [97] Zhang F, Low P, Roth C. Effects of monovalent exchangeable cations and electrolytes on the relation between swelling pressure and interlayer distance in montmorillonite. *Journal of Colloid*

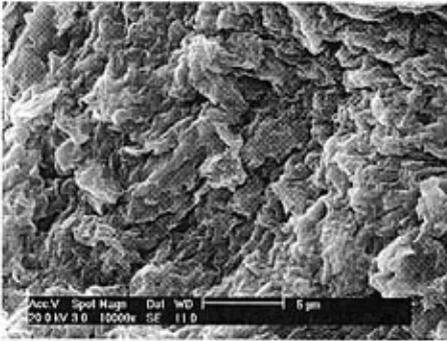
- and Interface Science, 1995, Vol.173: 34~41
- [98] Shang J, Lo K, Quigley M. Quantitative determination of potential distribution in Stern-Guoy double-layer model. Canadian Geotechnical Journal, 1994, Vol.31: 624~636
- [99] Gleason M H, Daniel D E, Eykholt G R. Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, Vol.123(5): 438~445
- [100] Keren R, Singer M J. Effect of low electrolyte concentration on hydraulic conductivity of sodium/calcium-montmorillonite sand system. Soil Sci. Soc. Am. J., 1988, Vol.52(2): 368~373
- [101] Kenney T C, van Veen W A, Swallow M A, et al. Hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures. Canadian Geotechnical Journal, 1992, Vol.29(3): 364~374
- [102] Vink P, Fontijn H F N. Testing the resistance to oxidation of polypropylene geotextiles at enhanced oxygen pressures. Geotextiles and Geomembranes, 2000, Vol.18: 333~343
- [103] Hsuan Y G. Approach to the study of durability of reinforcement fibers and yarns in geosynthetic clay liners. Geotextiles and Geomembranes, 2002, Vol.20: 63~76
- [104] Mengjia L, Hsuan Y G. Temperature and pressure effects on the degradation of polypropylene tape yarns-depletion of antioxidants. Geotextiles and Geomembranes, 2004, Vol.22: 511~530
- [105] Qian X D. Waste mass stability on geosynthetic lined slopes. Michigan Department of Environmental Quality, Waste Management Division, 1998
- [106] Qian X D, Koerner R M, Gray D H. Translational failure analysis of landfills. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, Vol.139(6): 506~519

附录 膨润土的扫描电子显微镜结果

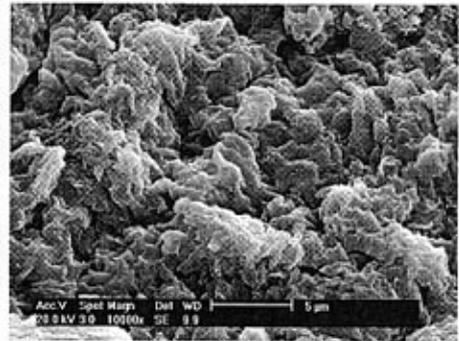


a) 放大 5000 倍

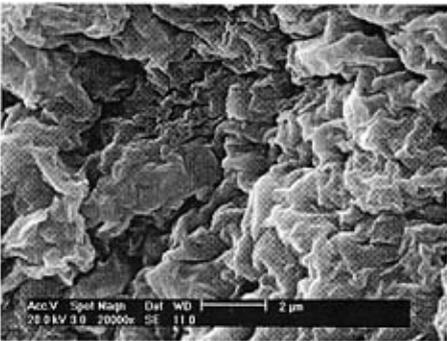
a) 放大 5000 倍



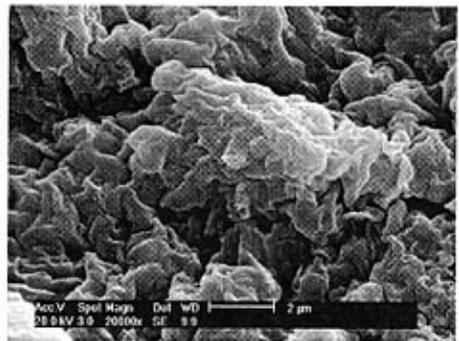
b) 放大 10000 倍



b) 放大 10000 倍



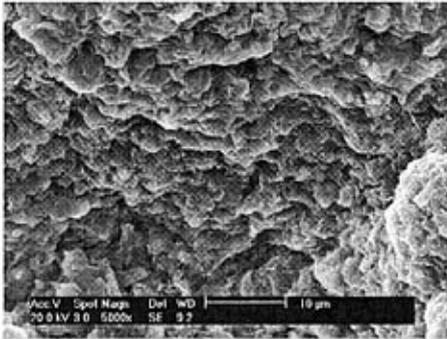
c) 放大 20000 倍



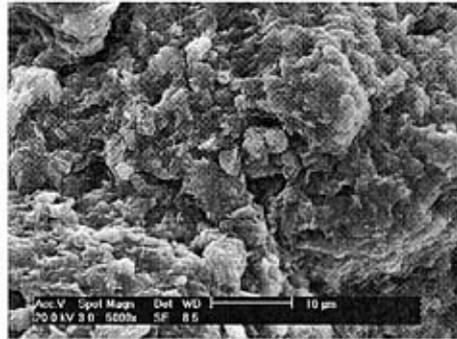
c) 放大 20000 倍

附图 1 0.005mol/l NaCl 水化后膨润土

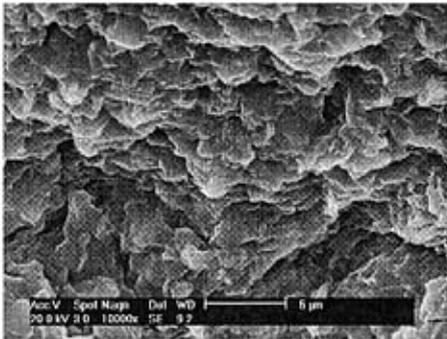
附图 2 0.01mol/l NaCl 水化后膨润土



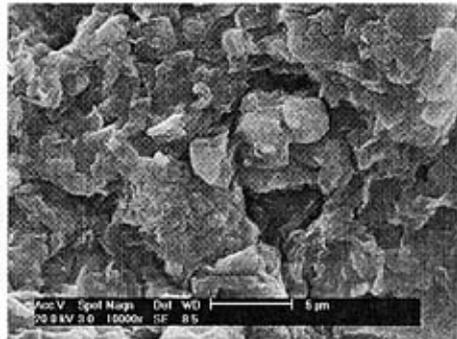
a) 放大 5000 倍



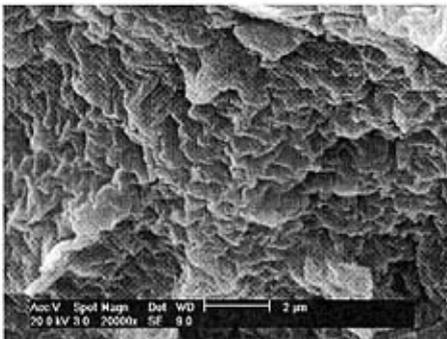
a) 放大 5000 倍



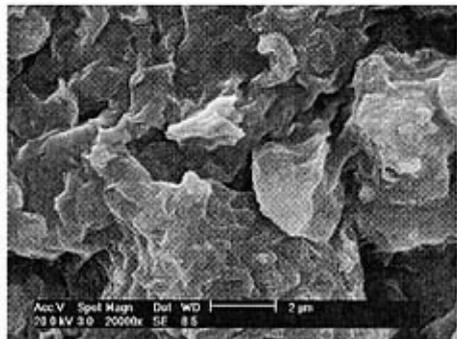
b) 放大 10000 倍



b) 放大 10000 倍



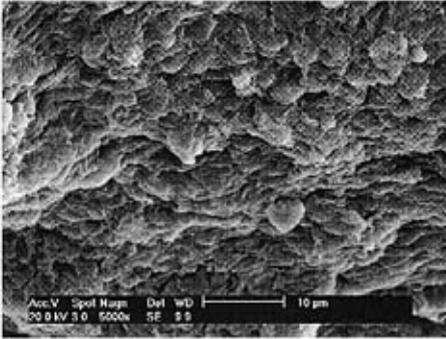
c) 放大 20000 倍



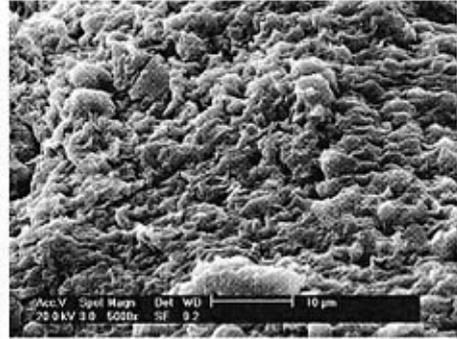
c) 放大 20000 倍

附图 3 0.05mol/l NaCl 水化后膨润土

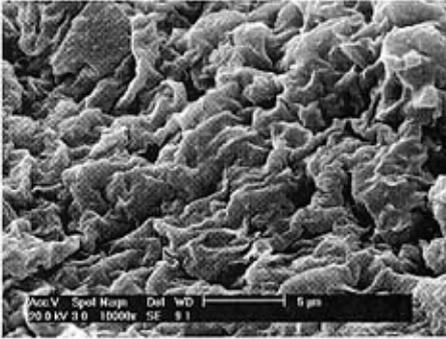
附图 4 0.1mol/l NaCl 水化后膨润土



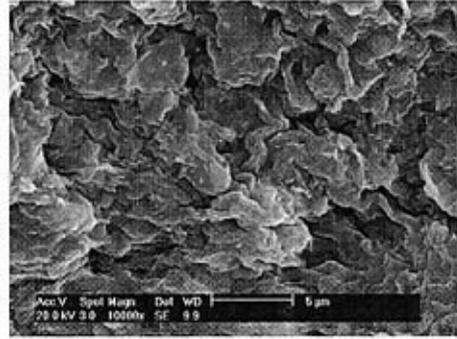
a) 放大 5000 倍



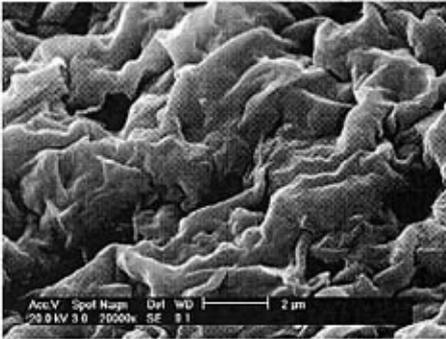
a) 放大 5000 倍



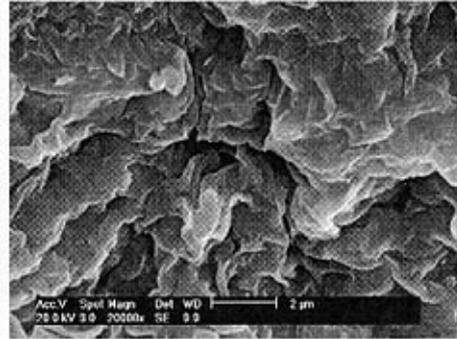
b) 放大 10000 倍



b) 放大 10000 倍



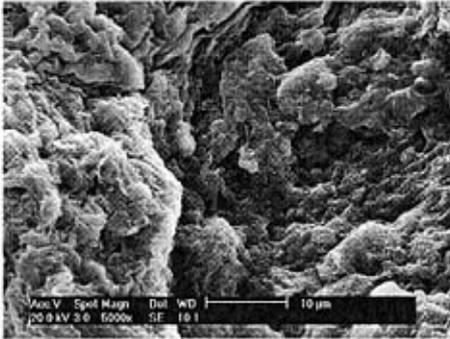
c) 放大 20000 倍



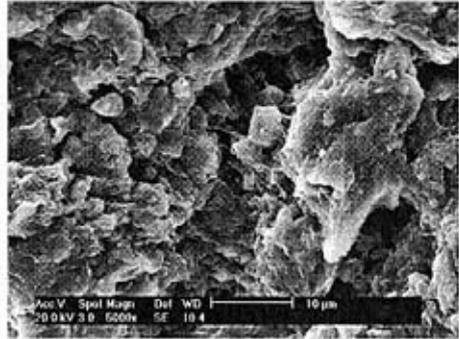
c) 放大 20000 倍

附图 5 0.005mol/l CaCl₂水化后膨润土

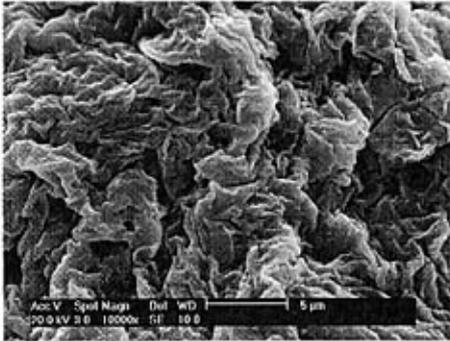
附图 6 0.01mol/l CaCl₂水化后膨润土



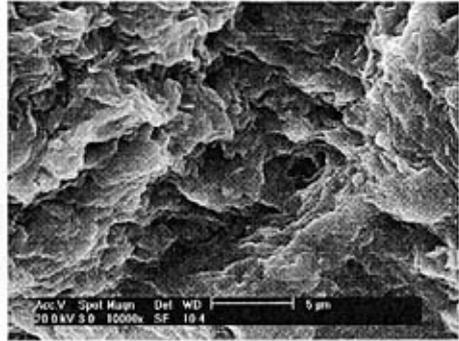
a) 放大 5000 倍



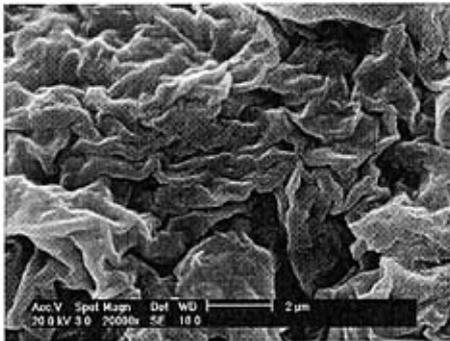
a) 放大 5000 倍




b) 放大 10000 倍



b) 放大 10000 倍




c) 放大 20000 倍




c) 放大 20000 倍

附图 7 0.05mol/l CaCl₂水化后膨润土

附图 8 0.1mol/l CaCl₂水化后膨润土



附图 9 0.005mol/l AlCl₃水化后膨润土 附图 10 0.01mol/l AlCl₃水化后膨润土



附图 11 0.05mol/l AlCl_3 水化后膨润土 附图 12 0.1mol/l AlCl_3 水化后膨润土

个人简历 在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

李志斌, 男, 1980年11月生。

2002年7月毕业于同济大学地质工程专业, 获学士学位。

2002年9月入同济大学攻读地质工程专业硕士研究生, 2004年3月提前攻读博士学位。

已发表论文:

- [1] 叶观宝, 李志斌, 徐超, 王森, 杨晓明. 桩土应力比曲线的机理分析. 勘察科学技术, 2004, Vol.22(3): 1~5, 6
- [2] 李志斌, 徐超, 卢耀如, 叶观宝. 与现代生活垃圾卫生填埋场相关的岩土工程问题. 岩土工程界, 2004, Vol.7(增刊): 211~216
- [3] 李志斌, 叶观宝, 徐超. 高速公路软基处理方案模糊评价因素. 岩土工程技术, 2004, Vol.18(6): 320~323
- [4] 李志斌, 叶观宝, 徐超. 沉管碎石桩加固效果及其影响因素分析. 建筑科学, 2005, Vol.21(2): 60~64
- [5] 李志斌, 叶观宝, 徐超. 水泥土搅拌桩复合地基桩土应力比的对比分析. 地下空间与工程学报, 2005, Vol.1(3): 386~389, 418
- [6] 李志斌, 卢耀如, 周念清. 影响塑料排水板处理效果的因素. 施工技术, 2005, Vol.34(6): 56~57, 75
- [7] 李志斌, 叶观宝, 徐超. 水泥土添加剂室内配比试验的模糊正交分析. 水文地质工程地质, 2005, Vol.32(4): 117~119
- [8] 李志斌, 徐超, 卢耀如, 叶观宝. 现代生活垃圾卫生填埋场的研究现状及存在的问题. 环境工程, 2005, Vol.23(4): 60~64
- [9] 李志斌, 叶观宝, 徐超. 高速公路沉降预测方法的优化选择. 石家庄铁道学院学报, 2005, Vol.18(3): 24~27
- [10] 李志斌, 卢耀如, 徐超, 叶观宝. 垃圾填埋场衬垫封盖系统稳定性实验方法研究. 环境科学与技术, 2006, Vol.29(8): 112~114
- [11] 徐超, 李志斌, 廖星樾. 上海生活垃圾卫生填埋场的若干岩土工程问题. 上海环境科学, 2005, Vol.24(5): 222~226, 230
- [12] 叶观宝, 李志斌, 徐超. 塑料排水板处理软弱地基的平面应变简化方法探讨. 结构工程师, 2006, Vol.22(1): 51~55
- [13] 李志斌, 徐超, 叶观宝. 影响HDPE膜与砂界面摩擦特性因素的斜板仪试验研究. 岩土力学, 2006, Vol.27(12): 2289~2293
- [14] 李志斌, 徐超. 液体对土工织物膨润土垫膨胀性和渗透性的影响. 岩土力学, 2006, Vol.27(增刊1): 581~585

待发表论文:

- [1] 李志斌, 徐超, 叶观宝. Hydration swelling characteristics of needle-punched geosynthetic clay liners. 哈尔滨工业大学学报(英文版), 已录用
- [2] 李志斌, 徐超, 黄亮. 水化后 GCL 中膨润土的微观结构研究. 岩土力学(增刊 2), 已录用

参加的科研项目:

- [1] 江苏省交通厅科研项目, 长板-短桩法复合地基加固机理与应用研究, 批准号: 03Y023, 2003~2005
- [2] 江苏省交通厅科研项目, 水泥土搅拌法处置高含盐量软土的试验研究, 批准号: 03Y024, 2003~2005