

## 摘 要

水泥砂浆和混凝土是近现代使用最广泛的建筑材料,也是当前应用量最大的人造材料。普通水泥基材料有其独特的优势,如造价低廉、能抗高压、经久耐用、不易燃烧、安全稳定等,但这类材料也同时存在抗拉强度低、极限延伸率小以及在浇注初期易产生塑性收缩裂缝等缺点。为克服上述缺点,复合化是水泥基材料高性能化的主要途径,纤维增强是其核心内容之一。

为了减小水泥基材料在凝固固化过程中收缩,并提高其韧性,本文在水泥基材料中加入 Y 型聚丙烯纤维进行系统研究。Y 型聚丙烯纤维是结晶型聚丙烯经过特殊的抽丝生产工艺及表面处理后的异形截面纤维,与传统的圆形截面纤维相比,其 Y 型截面增加了纤维的比表面积,与水泥基材料复合时,加大了纤维表面与水泥基材料的接触面积,增大了基体材料对增强材料的握裹力。

本文重点研究 Y 型聚丙烯纤维对水泥基复合材料的性能影响。主要研究内容包括:(1) 水灰比对聚丙烯纤维增强水泥砂浆力学性能的影响;(2) 聚丙烯纤维不同掺加工工艺对水泥基复合材料的影响,最佳掺加工工艺的确定,并探讨其工艺原理;(3) Y 型聚丙烯纤维掺量变化对水泥砂浆、混凝土的抗裂性能、抗冲击性能的影响;(4) 聚丙烯纤维的加入对硅灰混凝土的性能影响;(5) 聚丙烯纤维均匀分布和梯度分布情况对水泥砂浆的影响;(6) 通过正交试验确定聚合物乳液的最佳掺量,以及聚丙烯纤维聚合物砂浆、混凝土最佳配合比;(7) 利用扫描电镜(SEM)和能谱分析仪(EDS)对水泥基复合材料进行微观分析,探讨聚丙烯纤维、聚合物乳液对水泥砂浆、混凝土的耐水性能和收缩变形性能的改性机理;(8) 对纤维增强水泥砂浆、混凝土材料的阻裂性能从理论上进行初步探讨,提出聚丙烯纤维聚合物砂浆混凝土的固结模型。

研究表明,水灰比对聚丙烯纤维水泥复合材料力学性能的影响是比较明显的,本实验条件下,水灰比为 0.44 时力学性能较好;将 Y 型聚丙烯纤维以先掺法工艺掺入水泥基体中,纤维的分散性较好,能更好的发挥作用;通过实验分析,混凝土中聚丙烯纤维掺量以取水泥质量的 0.2%~0.6%为宜,而砂浆中纤维的掺量以取水泥质量的 0.4%~1.2%为宜;掺加聚丙烯纤维可以提高水泥砂浆、混凝土的抗裂、抗冲击、和抗收缩等性能,分析了掺加 Y 型聚丙烯纤维对水泥基复合材料抗裂性能、抗冲击性能、耐水性能和抗收缩性能的影响;根据正交试验获得的聚丙烯纤维聚合物砂浆的最佳配比是:聚合物乳液 4%,减水剂 1.0%,聚丙烯纤维 1.0%,水泥 100%,砂子 250%,

水灰比 0.44；聚合物乳液的加入，可以充填组分之间的孔隙，降低孔隙率，改善过渡区晶体结构疏松的缺点，由此增加了混凝土的密实度，提高了水泥混凝土的强度性能，这将使水泥混凝土的耐久性得到提高；对聚丙烯纤维增强水泥砂浆、混凝土材料的阻裂机理，从理论上进行了初步探讨，并提出了聚丙烯纤维聚合物砂浆混凝土的固结模型。

研究表明，聚丙烯纤维具有化学稳定性好、耐腐蚀、与水泥基体的粘结力强等特点。将 Y 型聚丙烯纤维掺加到水泥砂浆、混凝土中，可以使其性能明显改善，聚丙烯纤维必将成为改善水泥砂浆、混凝土的有效途径。

**关键词：**Y型聚丙烯纤维；水泥基复合材料；水泥砂浆；混凝土；物理力学性能

## ABSTRACT

Cement mortar and concrete not only are most widely used modern building materials, but also are the largest amount of man-made materials currently. Ordinary cementitious materials have unique advantages, such as low cost, resistance to high pressure, durability, difficult to combustion, security, stability, et al. Such materials also have low tensile strength, elongation limit, and easy to produce plastic shrinkage cracks in the early casting. To overcome these shortcomings, composite is the main channel of improving high-performance of cementitious composites, and fiber reinforced is one of its core content.

In order to reduce the contraction of cementitious materials in the process of condensation curing and to improve its toughness, adding Y-polypropylene fiber in cementitious materials in this paper is studied systematically. Y-polypropylene fiber has profiled section through a special spinning polypropylene production technology and surface treatment, and its Y-shaped cross-section can increase the specific surface area compared with the traditional circular section. When adding in cementitious composites, increased the contact area between fiber surface and the cementitious materials, this increases the bonding force of matrix to fiber.

This paper focuses on the performance of Y-polypropylene fiber in cementitious composites. The main research includes: (1) Water-cement ratio influences the mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced cement mortar; (2) Study on the influences of different mixing process of adding polypropylene fiber in the cementitious composites to determine the best mixing technology, and its mechanics; (3) Change the content of Y-polypropylene fiber in the cement mortar, and study concrete cracking performance, impact resistance; (4) Study on the performance of adding polypropylene fiber in silica fume concrete; (5) Study on polypropylene fiber evenly distributed and gradient distribution of cement mortar; (6) Using orthogonal test to determine the best amount of polymer emulsion and polymer polypropylene fiber mortar, as well as the best mixture of concrete; (7) Using scanning electron microscopy (SEM) and the spectrum analyzer (EDS) to study the micro-analysis of the modified mechanism of water-resistant properties and properties of contraction deformation of polypropylene fiber and polymer emulsion in cementitious composites; (8) Study the fiber-reinforced cement, concrete barrier from the

crack of a preliminary in theory, put forward the consolidation of polypropylene fiber / polymers concrete mortar model.

The results show that, Water-cement ratio influences the mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced cementitious composites obviously, when the water-cement ratio was 0.44, the compression and flexural strength of polypropylene fiber-reinforced cementitious mortar are higher than that of other water-cement ratio mixtures. Pre-adding Y-polypropylene fiber can make fiber disperse better and enhance the concrete performance. Compared polypropylene fiber-concrete with the regular concrete, the slump loss decreased 16.92% to 31.82%. Through the experimental analysis, the content of polypropylene fiber in concrete should better be the quality of cement 0.2% to 0.6%, while the amount of fiber in the mortar should better be 0.4% to 1.2%. Adding polypropylene fiber can increase the impact resistance, cracking, and anti-contraction performance of cement mortar or concrete. The effect of the Y-polypropylene fiber in cement composite is analyzed, such as impact resistance, anti-cracking performance, water resistance and anti-contraction performance. The orthogonal test indicates the best ratio of the polypropylene fiber polymer mortar is: polymer emulsion accounts 4%, superplasticizer is 1.0%, polypropylene fiber is 1.0%, cement is 100%, sand is 250%, and water-cement ratio is 0.44. The addition of emulsion polymer can fill the pores, reduce porosity and improve the shortcomings of loose transitional zone crystal structure, which increased the density, the intensity and the durability of performance of concrete. The fiber-reinforced cement, concrete barrier from the crack of a preliminary is studied theoretically, and the consolidation of polypropylene fiber polymers concrete mortar model is put forward.

The results show that, as polypropylene fiber has chemical stability, corrosion resistance, and the cement-based adhesive power, it can be added into cementitious mortar, concrete to improve the performance. And adding polypropylene fiber will be the effective way to improve cementitious mortar and concrete.

**Keywords:** Y-polypropylene fiber; cementitious composites; cementitious mortar; concrete; physical mechanical property



## 原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：周敏 日期：2008.6.19

## 关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解济南大学有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借鉴；本人授权济南大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

(保密论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名：周敏 导师签名：李国忠 日期：2008.6.19

# 第一章 绪 论

## 1.1 纤维增强水泥基材料的发展历程

水泥砂浆和混凝土是近现代使用最广泛的建筑材料,也是当前应用量最大的人造材料<sup>[1]</sup>。近百年来,水泥与水泥基材料的总发展趋势是不断提高强度,特别是近 50 年,对水泥砂浆、混凝土强度的要求越来越高<sup>[2]</sup>。通过强度的提高可以使现代建筑适应大跨度、重载、高耸和承受恶劣环境的要求,但因为水泥砂浆、混凝土具有脆性大、韧性差等缺陷,而且强度越高,这种缺陷就越突出。

人们为解决上述矛盾进行了长期的探索,发现在水泥砂浆、混凝土中加入纤维材料可以大幅度提高其抗压、抗折、抗剪、抗冲击强度和韧性,并相应地使水泥砂浆、混凝土的抗裂、抗渗等性能得到很大程度的提高<sup>[3]</sup>。纤维增强水泥基复合材料通常指以水泥净浆、砂浆或者混凝土为基体,以非连续的短纤维或者连续长纤维作增强材料所组成的。

岩棉水泥是二十世纪用量较大的纤维增强水泥材料之一<sup>[4]</sup>。岩棉纤维来源丰富、价格低廉,具有很高的强度和模量,且纤维与水泥基体相互作用良好,是一种传统的水泥制品增强纤维。但是近年来的研究发现,岩棉纤维对人体具有较大的危害,许多发达国家已经逐步禁止岩棉纤维增强水泥制品的使用。

钢纤维增强水泥基复合材料是纤维增强水泥基复合材料理论研究较早的一种,与其它增强纤维相比,对钢纤维增强水泥基复合材料的研究比较广泛深入<sup>[5]</sup>。自 1910 年美国的鲍特(Porter)提出把短的钢纤维均匀分散在混凝土中加强制成建筑材料和 1911 年美国的格拉哈姆(Graham)明确了在普通混凝土中加入钢纤维以增加强度和稳定性以来,人们对钢纤维的研究越来越关注,相应提出了许多计算模式和施工方法,现已用于建筑行业中。钢纤维增强水泥基复合材料常被用于制造道路路面、机场跑道、隧道衬砌、框架节点、堰堤等许多方面。在普通混凝土中加入体积掺量 1.5%~2%的钢纤维能有效提高普通混凝土的抗拉、抗折、抗弯强度,显著改善抗冲击性能、韧性、抗裂、抗渗和抗疲劳性能<sup>[6]</sup>。钢纤维加入到水泥基复合材料中后,改变了材料的破坏方式,提高了材料的强度(包括热压强度、抗拉强度和抗弯强度),特别是大幅度提高了材料的韧性。另外,复合材料的耐磨性、耐疲劳性、抗冲击性和冻融性等也有不同程度的改善。钢纤维增强水泥基复合材料的用途广泛,主要应用于公路、飞机跑道、

工厂地板、堤坝桥墩、以及河流水库、隧道的内衬等<sup>[7-9]</sup>。目前，钢纤维增强水泥基复合材料在许多工程建设中得到了应用。

玻璃纤维具有很高的强度和模量，并且来源丰富，制造成本较低，是复合材料中增强纤维的主要品种之一。最早进行玻璃纤维增强水泥基材料研究的，当属前苏联科学家 Biryukovich 等人，并于 20 世纪 50 年代后半期使其达到实用化<sup>[10]</sup>，我国科学家也曾参与早期研究工作。普通玻璃纤维的耐碱性较差，在水泥基体这样的碱性环境中极易失去其强度和刚性<sup>[11]</sup>。六十年代以前，玻璃纤维的耐久性问题一直没有得到解决，因此玻璃纤维增强水泥制品一直未能推广应用。直到 70 年代初期，英国建筑研究院向普通玻璃纤维中加入二氧化锆，研制成功了耐碱玻璃纤维，使玻璃纤维在碱性环境中耐腐蚀性有了大幅度提高，玻璃纤维增强水泥制品才由英国的 Pilkington Brothers 公司生产并推广应用。其生产方法有预拌法、重力成型法、压制成型法、注模成型法、挤压成型法、喷涂法、缠绕法、层压法等多种，其制品的抗拉强度、抗冲击强度和韧性比素水泥砂浆有明显的提高，可被用于幕墙、屋顶材料、缆索管、贮水池、船体等多个方面<sup>[12]</sup>，但是，玻璃纤维受水泥中碱腐蚀的问题仍然没有得到彻底解决，所以耐久性问题仍然存在<sup>[13]</sup>。

天然纤维主要是指自然界中生长的植物形成的一类纤维，其纤维品种和数量非常巨大，取之不尽，用之不竭<sup>[14]</sup>。天然纤维增强水泥基材料的研究与开发，具有重要的意义和广阔的前景。可用于增强水泥基材料的天然纤维主要有棉秸、玉米秸、黄麻、亚麻、剑麻、椰子壳、甘蔗渣、木纤维等。许多科学家从事天然纤维增强水泥基材料的研究，并已发表大量的研究论文和综述评论<sup>[15-19]</sup>。天然纤维加入到水泥砂浆、混凝土中后，材料的强度和韧性都有明显的提高。与玻璃纤维相似，在碱性环境中，天然纤维会发生分子降解而失去力学性能。因此，天然纤维增强水泥基材料同样存在长久使用性问题。某些科学家采用天然纤维涂覆疏水保护剂或采用低碱性基体的方法，来解决天然纤维增强水泥基材料的耐久性问题，但最终结果仍不十分理想<sup>[20]</sup>。因此，如何提高天然纤维的耐碱性，提高天然纤维增强水泥基材料的耐久性需要进一步深入研究。

合成纤维增强水泥基材料方面的研究进行的较晚，迄今为止，在国际上用于增强水泥砂浆、混凝土的合成纤维主要有维纶（聚乙烯醇纤维）、脂纶（聚丙烯脂纤维）、丙纶（聚丙烯纤维）与乙纶（聚乙烯纤维）。尼龙纤维是最早用于水泥及混凝土的低弹性模量合成纤维之一。Goldfein 在砂浆中使用 5.5% 体积的尼龙纤维，测得其抗冲

击强度大大增加；Williamson 用板材进行了抗爆试验，证实了它的能量吸收特性，预拌法及喷射法都能用于生产这种复合材料。由于低弹性模量的合成纤维具有价格低、能明显改善水泥砂浆、混凝土的抗冲击性、韧性等性能，国内外对它们的研究非常深入、并取得了一系列的研究成果，现已用于建筑生产中，在这些合成纤维中，聚丙烯纤维由于增强效果好、价格便宜、来源丰富而倍受人们注目。维纶增强水泥板的耐久性研究表明，此种制品即使长期暴露于大气中仍具有较高的强度，但其韧性随时间推移而有所下降。主要是由于纤维与水泥基体界面的粘结强度不高所致。目前，英国、德国、瑞士、比利时、意大利等国均在用维纶替代石棉纤维生产水泥板<sup>[21-22]</sup>。采用合成纤维增强水泥基材料应重点考虑其与水泥材料的弹性模量匹配问题、耐腐蚀性问题及纤维与基体的界面结合问题。

混杂纤维增强水泥基材料是采用两种或两种以上不同材质、不同性能的纤维作为增强材料制成的。由于这些纤维相互取长补短，因而有可能使制品获得较优异的性能<sup>[23-25]</sup>。例如意大利 Fibronit 公司在 90 年代采取了用纤化聚丙烯薄膜、抗碱玻璃纤维无捻粗纱与抗碱玻璃纤维短切原丝混杂增强的措施，开发了商品名称为 Retiver 的纤维水泥复合材料，其力学行为既优于纤化聚丙烯薄膜增强水泥，又优于玻璃纤维增强水泥<sup>[26]</sup>。混杂纤维增强水泥基材料将是今后的一个研究热点<sup>[27]</sup>。

在普通混凝土中加入碳纤维和 Kevlar 纤维的研究并不是很多，因为它们的价格太高，目前在大多数工程上难以推广使用。

## 1.2 聚丙烯纤维增强水泥基材料的研究现状

早在 20 世纪 70 年代初，美、英等国已开始将聚丙烯单丝纤维使用于某些混凝土制品与工程中，所用纤维的直径与钢纤维相近，那时就发现聚丙烯纤维有助于提高混凝土的抗冲击性<sup>[28]</sup>。为充分发挥聚丙烯纤维对水泥基体的增强作用，英国萨里大学用经高倍拉伸制得的纤化聚丙烯纤维，以较高的体积率掺加于水泥基体中，在实验室内制成抗拉强度与变形能力均较高的薄壁纤维水泥板。意大利 Fibronit 公司根据英国此项技术的专利进行了商业性开发，设计并制作了专门生产纤化聚丙烯增强水泥板的装备，产品的商品名称为“Netcem”。根据 10 年大气暴露的试验结果，Netcem 波板的耐久性是令人满意的，但尚需积累更长期的试验资料。英、美等国还研究了将编织聚丙烯纤维网格布以较高的体积率掺加于水泥基体中，也得到了较好的试验结果。1984 年 Zollo 等人<sup>[29]</sup>进行了普通混凝土和聚丙烯纤维混凝土的抗压强度、劈拉强度及抗折强度对比实验，得出结论，随着纤维体积率的增加，抗压强度降低，而劈拉强度和抗

折强度有所提高,随后几年内其他研究者<sup>[30-32]</sup>所得实验结果基本与上述结果类似。然而,1988年 Mindess 和 Vondran<sup>[33]</sup>报导指出聚丙烯体积掺量为 0.5%时抗压强度可提高 25%。A.M.Achozaimy 等人<sup>[34]</sup>研究了聚丙烯纤维对普通混凝土和加入掺和料的混凝土一些性能的影响,他们的研究表明对于普通混凝土,纤维的加入只对抗冲击性有提高,而对抗压强度、抗折强度没有影响,对于加入掺和料的混凝土尤其是加入硅灰的混凝土,抗压强度则明显提高,同时抗冲击性提高幅度更大。

进入二十一世纪,我国也加快了聚丙烯在水泥砂浆、混凝土中应用研究的步伐,汪洋等人<sup>[35]</sup>采用进口聚丙烯纤维,进行实验室研究,以大量试验为依据,得出少量短切聚丙烯纤维加入混凝土后可明显提高混凝土的抗拉强度、抗渗和抗冻性能。游有鯤等人<sup>[36]</sup>通过改变聚丙烯纤维掺量,研究其改善高强混凝土高温爆裂性能,以及高温后高强混凝土吸水率、剩余强度性能及其恢复性能,研究中还说明采用其它具有防水功能的养护溶液可能更明显的改善混凝土试样抗折性能效果,为高温后高强混凝土的结构修补提供了一种技术途径。袁震宇等人<sup>[37]</sup>的研究得出:在砂浆中加入 0.05%和 0.10% (体积掺量) 的聚丙烯纤维可以使砂浆平板的裂缝分别减少 65%和 75%。姚武等人<sup>[38]</sup>的试验结果也说明聚丙烯纤维比石棉纤维更能吸收能量,当体积掺量小于 1% 时,虽不能提高混凝土强度,却能大幅度提高其抗弯性能及韧性;当掺量较高时,不仅能减小复合材料的脆性,而且能增加水泥基体的极限强度。华渊等人<sup>[39]</sup>发现聚丙烯纤维的加入能有效提高混凝土的抗断裂性能,当其体积率在 0.7%~0.9%之间而其它条件基本相同时,聚丙烯纤维混凝土配筋的断裂韧性、初裂荷载、裂缝平均间距分别是基准混凝土配筋梁的 18~24 倍、1.32~1.37 倍和 56%~64%。廖宪廷等<sup>[40]</sup>的试验结果表明改性聚丙烯纤维与水泥基体之间粘结力较强,纤维加入增加了材料的耐磨性。但是由于水泥砂浆、混凝土的组成、聚丙烯纤维类型及实验条件的不同,不同研究者所得研究结果不尽相同,甚至出现相反结果;王瑞兴<sup>[41]</sup>等人认为聚丙烯纤维对提高混凝土抗冻性能不能起到积极的作用,相反还略有负面影响。这与以往的试验研究结果和推测不太一致,这有待进一步验证和解释。但他们在试验中又发现,聚丙烯纤维掺入后,可以减少混凝土冻融循环后的表面剥落现象,保持混凝土外观的完整性。

由前面的研究可以发现,由于采用的聚丙烯纤维掺加工工艺和试验方法不同,纤维的改善效果各有侧重,需要一整套完全适合纤维增强水泥砂浆、混凝土的试验方法。

### 1.3 纤维增强水泥基复合材料的理论研究现状

纤维对基体的增强作用表现在当材料受到外力作用时,应力使材料变形,这种应

力将从基体传到纤维，纤维和基体共同承受外来应力，纤维起到了增强作用。如果应力使基体开裂，应力将全部转移到纤维上，直至纤维被破坏。这种损坏机理上的变化，使复合材料的柔韧性、坚固性、抗冲击性、受拉性、抗挠强度、疲劳寿命、抗磨损、收缩性、耐久性等性能得到改善。

关于纤维增强水泥基复合材料的增强机理主要有两种观点<sup>[42-45]</sup>。一种是美国学者 Rmualoli 提出的纤维间距机理<sup>[46]</sup>，根据线弹性断裂力学理论来说明纤维对于裂缝发生和发展的约束作用。该理论认为在水泥材料内部原来就存在缺陷，欲提高这种材料的强度，必须尽可能地减少缺陷的程度，提高韧性，降低内部裂缝端部的应力集中系数。另一种是英国的 Swangat 等人提出的复合材料机理<sup>[47]</sup>，理论出发点是复合材料构成的混合原理，将纤维增强水泥材料看作是纤维强化体系，并应用混合原理来推定纤维混凝土的抗拉和抗弯强度，提出了纤维增强水泥基复合材料强度与纤维的掺入量、方向、长径比以及粘结力之间的关系。

## 1.4 主要研究内容

本文重点研究掺加 Y 型聚丙烯纤维对水泥基复合材料的性能影响。众所周知，在其他条件相同的情况下，增强材料表面越粗糙或表面积越大，与基体材料黏结性能就越好，则从基体中拔出所耗能就越大，如混凝土中的螺纹钢的增强效果优于平直的钢筋条<sup>[48]</sup>。Y 型聚丙烯纤维是经过特殊的抽丝生产工艺及表面处理后制成的纤维，因其横截面像一个大写的英文字母 Y，所以称之为 Y 型聚丙烯纤维。增大 Y 型聚丙烯纤维的表面积就能加大纤维与基体材料的接触面积，提高水泥基体对纤维的握裹力，使掺有纤维的水泥砂浆或混凝土的极限拉伸率提高，从而极大地提高砂浆或混凝土的抗裂性<sup>[49]</sup>。

为使聚丙烯纤维在水泥砂浆和混凝土中发挥较大的作用，最重要的前提条件是要使纤维分散良好，而聚丙烯纤维的分散性，除与纤维的种类有关，还与纤维的掺加工工艺有关。聚丙烯纤维的价格较高，如果在水泥基复合材料中掺量较大，会相应增加工程成本，而且对抗拉、抗压等性能也没有太大的贡献<sup>[50]</sup>，所以本文首先确定聚丙烯纤维的掺量范围和掺加工工艺，然后研究聚丙烯纤维增强水泥砂浆和混凝土的抗压、抗折、抗裂、抗冲击性能、软化系数、收缩变形等性能变化，最后对砂浆和混凝土微观结构进行研究，为水泥砂浆和混凝土性能的改善提供依据。具体内容如下：

### (1) 原材料的选择

根据水泥基复合材料的应用场所确定所用的原材料，主要有硅酸盐水泥、Y 型聚

丙烯纤维、粗细骨料、减水剂、聚合物乳液以及硅灰等。

## (2) 确定水灰比和纤维掺加工工艺

在试验中取固定胶砂比以及外加材料掺量，改变用水量，研究不同水灰比对试样抗压、抗折强度的影响，确定出水灰比；选择分散性好的 Y 型聚丙烯纤维，研究纤维先掺法和后掺法对制品性能的不同影响，确定出最佳掺加工工艺；在砂浆和混凝土中掺加不同量的纤维，通过研究砂浆、混凝土性能变化确定出聚丙烯纤维合适的掺量范围。

## (3) 聚丙烯纤维掺量变化对砂浆和混凝土性能影响研究

主要研究聚丙烯纤维掺量变化对砂浆、混凝土的和易性能、抗裂性能、抗冲击性能、耐水性能和收缩变形等性能的影响；聚丙烯纤维的加入对硅灰混凝土的性能影响和聚丙烯纤维均匀分布和梯度分布情况对水泥砂浆的影响也作了一定研究。

## (4) 正交法确定聚丙烯纤维增强聚合物水泥砂浆和混凝土的配比

考察聚丙烯纤维、聚合物乳液和减水剂的掺量对砂浆、混凝土性能的影响，用正交试验法求出聚丙烯纤维增强聚合物水泥砂浆、混凝土最佳配合比。

## (5) 机理分析

重点研究聚丙烯纤维阻裂机理，提出聚丙烯纤维聚合物砂浆混凝土的固结模型。

## 第二章 原材料与试验方法

### 2.1 原材料

#### 2.1.1 水泥

水泥的品种应根据水泥基材料所处的环境条件来确定,水泥强度等级的选择应根据混凝土的强度等级来确定,对中低强度的混凝土,水泥强度等级一般应为混凝土强度等级的1.5~2.5倍<sup>[51]</sup>;对高强混凝土,水泥强度等级与混凝土强度等级的比值可小于1.5,但不宜低于0.8。用高强度等级的水泥配制低强度等级的混凝土时,较少的水泥用量即可满足混凝土的强度,但水泥用量过少会严重影响混凝土拌合物的和易性及混凝土的耐久性;用低强度等级水泥配制高强混凝土时,会因水灰比太小及水泥用量过大而影响混凝土拌合物的流动性,并会显著增加混凝土的水化热和混凝土的干缩及徐变,同时混凝土的强度也不易得到保证,经济上也不合理,故水泥强度等级与混凝土的强度等级相适应。

本研究选用山东水泥厂生产的42.5#普通硅酸盐水泥,其化学组成见表2-1,主要物理性能见表2-2,特点是早强和低碱度,目的是使制品可以快速脱模和减少对聚丙烯纤维的侵蚀。

表 2-1 水泥的化学组成

CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Σ
63.90	21.67	5.07	5.19	1.08	2.30	99.21

表 2-2 水泥的物理性能

水泥 编号	凝结时间(min)		标准稠度需水量 (%)	细度 (%)
	初凝	终凝		
C-10	103	188	27.4	7.4
安定性 合格	抗折强度(MPa)		抗压强度(MPa)	
	3d	28d	3d	28d
	3.2	7.4	23.8	49.6

#### 2.1.2 增强材料

增强材料选用四川华神化学建材有限责任公司生产的Y型聚丙烯纤维, Y型聚丙烯纤维和普通聚丙烯纤维基本性能指标列于表2-3。



表 2-3 两种聚丙烯纤维的基本性能

基本性能	普通聚丙烯纤维	Y型聚丙烯纤维
熔点/°C	165	165~175
燃点/°C	590	590
断裂强度/MPa	276	≥300
断裂伸长率/%	15	15~20
弹性模量/MPa	3793	>3500
纤维长度/mm	3~25	3~25
密度/g·cm <sup>-3</sup>	0.90	0.91
直径/μm	48	45
耐酸碱性	极强	强
横截面形状	圆形	Y型

### 2.1.3 骨料

粗骨料选用碎石，粒径5~20mm，连续级配，含泥量<0.6%。碎石表面粗糙，棱角多，较为清洁，而且用碎石配制混凝土时，碎石与水泥石间的界面粘结力强，故碎石混凝土的强度高于卵石混凝土，特别是在水灰比较小的情况下，强度相差尤为明显，细骨料，选用河砂，细度模数2.8，含泥量<1.5%，经筛洗后砂的级配见表2-4。

表2-4 颗粒分布

方孔边长/mm	2.0	1.6	1.0	0.5	0.16	0.08
累计筛余	0	7	34	66	89	100

### 2.1.4 减水剂

采用山东省建筑科学研究院外加剂厂生产的萘系高效减水剂，其主要成分是β基萘磺酸盐甲醛缩合物，是一种非引气型减水剂，其形态为粉剂(A型)，含固量≥94%。该减水剂对各种水泥适应性好，改善混凝土的可操作性，广泛应用于公路、铁路、桥梁、隧道、电站、大坝、高层建筑等工程。

### 2.1.5 聚合物乳液

采用临沂龙祥混凝土结构维修中心生产的LGT002型聚合物乳液，固含量为22%。LGT002是以高分子聚合物为基料，掺入适量改性剂、稳定剂和其它有机助剂配制而成的水乳状产品，加到水泥浆、水泥砂浆中制成聚合物水泥砂浆，可以增加原水泥砂浆的粘结性、抗震性、耐水性和抗冻性。因其成膜温度比其它通常使用的聚合物更低，故其使用范围更广<sup>[52]</sup>。

## 2.1.6 硅灰

硅灰是冶炼铁和硅工业产生的废尘，含SiO<sub>2</sub>达90%以上，有很高的活性<sup>[53]</sup>。本实验中采用的硅灰比表面积为21000m<sup>2</sup>/kg，主要性能见表2-5所示。

表 2-5 硅灰的主要性能

Loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	密度 g/cm <sup>3</sup>
2.3	93.1	1.1	1.0	0.7	0.4	1.4

## 2.2 基本性能测试方法

### 2.2.1 抗折强度的测试

测试砂浆性能时成型40mm×40mm×160mm的条形试样，抗折强度试验采用的是三点加载简支梁。将试样插入抗折试验机的支梁上，使加荷辊与两个支承辊保持等距，普通试样的成型面应与受力方向垂直，而测试纤维梯度分布试样时，4层梯度分布试样的梯度方向为垂直受力方向，即第1、2层在受拉区，第3、4层在受压区，使富纤维层在受拉区，如图2-1所示。

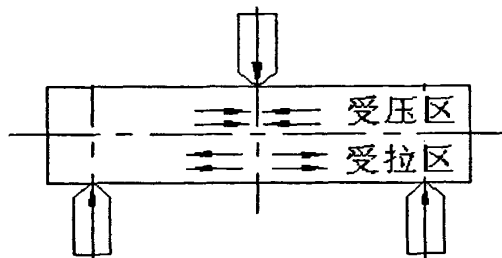


图 2-1 聚丙烯纤维砂浆抗折强度试验示意图

### 2.2.2 抗压强度的测试

用做完抗折试验后的砂浆试样进行抗压强度测定。抗压试验采用YE-30液压式压力试验机。试验时将试件放在抗压夹具内，普通试样的成型面应与受压面垂直，纤维梯度分布的试样成型面应与受压面平行，即梯度方向为垂直受力方向，受压面积为40mm×40mm。将抗压夹具连同试样置于抗压实验机上、下台面之间，下台板球轴应通过试件受压面中心。开动机器，使试件在加荷开始后20~40秒内破坏。记录每个试件的破坏荷载P，抗压强度按下式计算：

$$\sigma_c = P / F \quad \text{式(2.1)}$$

式中  $\sigma_c$ —抗压强度，MPa；P—破坏强度，N；F—试样受力面积，mm<sup>2</sup>。

### 2.3.3 坍落度的测试

坍落度为表示混凝土拌合物稠度的一种指标,以此确定拌合物浇注时相对的流动性<sup>[54]</sup>。坍落度的测试方法:用一个上口100mm、下口200mm、高300mm喇叭状的坍落度桶,将混凝土拌和物分三层按规定方法装入坍落度桶内,每层装入高度应稍大于桶高的三分之一;每装一层用捣棒插捣25次插捣在全部面积上进行,沿螺旋线由边缘渐向中心,插捣底层混凝土时,捣棒应捣至底部,插捣其他两层时,应插捣至下层表面为止,插捣时,捣棒须垂直,最后刮平;垂直向上将桶提起移到一旁,桶顶上平放一木尺,用钢尺量出木尺底面至与坍落混凝土拌和物最高点之间的高度差,以厘米计,精确至0.5厘米,即为该混凝土拌合物的坍落度。

同一次拌和的混凝土拌合物的坍落度应测两次,取其算术平均值作为试验结果,每次须换一次新的拌合物,如两次结果相差2厘米以上,须作第三次试验。如第三次的结果与前两次结果中的每一次仍相差2厘米以上时,则整个试验须重做。

### 2.3.4 抗干缩开裂性能的测试

水泥砂浆抗干缩开裂性能试验及结果评定参照P.P.Kraai提出的砂浆及混凝土干燥收缩裂缝测试方法进行试验<sup>[55]</sup>。试验方法简述如下:试件成型于914mm×610mm×19mm的木模,模板底部衬有聚乙烯薄膜,以减小底模对试样收缩变形的影响。木模的周围钉有一圈金属网,用于限制收缩变形。金属网系用宽25mm,网眼为2mm的金属网沿中线弯折90°制成,如图2-2所示。拌合物经搅拌机搅拌3分钟后,浇注并流满整个木模,用刮刀刮平试样表面后,开启电风扇和碘钨灯,风速约4.5w/s~5.5m/s的电风扇位于试模边约1.5m处,连续吹24小时,三只1000w碘钨灯位于试模上方约1.5m处,光照4小时。试验结果评定:根据裂缝宽度把裂缝分为四级,每一级对应着一个权值,用每级宽度的裂缝长度分别乘以其相应的权值,再相加起来得到的总和称为开裂指数,据此衡量开裂程度。

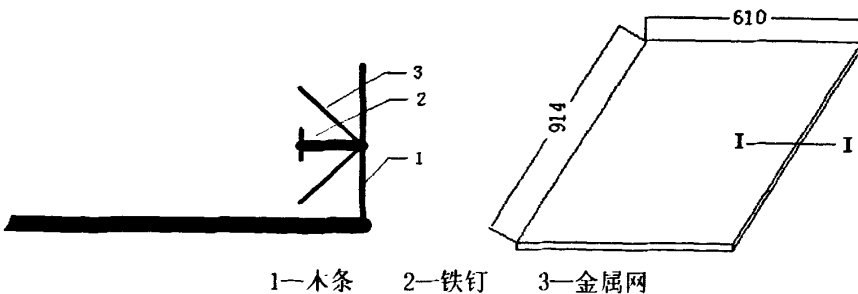
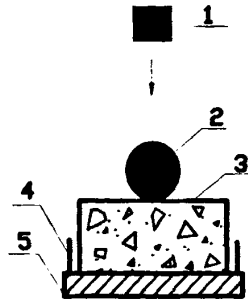


图 2-2 砂浆开裂试验模板示意图

## 2.2.5 抗冲击性能的测试

采用ACI-544（美国混凝土协会）委员会推荐的试验方法，来测试水泥砂浆的冲击性能<sup>[56]</sup>。装置如图2-3所示：



1—冲击锤；2—传力球；3—抗冲击试件 4—测试挡板；5—刚性底板  
图 2-3 聚丙烯纤维砂浆抗冲击试验示意图

(1) 按标准方法成型尺寸为 $\Phi 150 \times 64 \text{mm}$ 的圆饼状试样，每组六个，标准养护28天；

(2) 冲击锤重4.5kg，下落高度 $h=457 \text{mm}$ ，传力球直径64mm，测试挡板和试样间距为5mm；

(3) 传力球和试件同心，并在冲击锤的中线上，测试时，冲击锤自由落下，每完成一次冲击即为一个循环；

(4) 每次冲击循环后，仔细观察试样表面，直到试样表面出现第一条裂缝时，记录冲击次数，然后重复进行冲击循环，直到试样破坏。

该试验方法通过以下几项指标评价或比较试样的抗冲击能力：①出现第一条裂缝（初裂）的冲击次数 $n_1$ ；②初裂后，试件体积膨胀，当试件和4块挡板中任意3块接触时的冲击次数 $n_2$ ， $n_2$ 定为试样破坏次数；③试件初裂和破坏时冲击次数的差值 $\Delta n = n_2 - n_1$ ；④冲击韧性 $W$ 即试样达到破坏时吸收的全部冲击能量， $\Delta W$ 为初裂后保持整体性的能力或者说能继续吸收的冲击能量。⑤冲击延性指标 $\beta$ 指试样在受冲击变形时保持不产生破裂的强度，即试样从屈服到破坏之间的变形能力。

$W$ 、 $\Delta W$ 和 $\beta$ 按下列公式计算：

$$W = n_2 \times mgh \quad \text{式(2.2)}$$

$$\Delta W = (n_2 - n_1) \times mgh \quad \text{式(2.3)}$$

$$\beta = n_2 / n_1 \quad \text{式(2.4)}$$

式中： $m$ 为冲击锤重量(4.5kg)；

$g$ 为重力加速度( $9.8\text{m/s}^2$ );

$h$ 为冲击锤的下落高度( $0.457\text{m}$ )。

在每组所得到的六个数据中淘汰最大和最小值, 剩余的四个数值中如果它们中有一个超出其余两块平均值的15%, 淘汰该值, 如果最大和最小值均超出其余两块平均值的15%, 淘汰该组数据, 对有效数值, 取平均值作为该组试验结果。

### 2.3.6 吸水率的测定

将经室温养护7天的试样, 于 $50^\circ\text{C}$ 的烘箱内烘干24小时, 用天平准确称量其绝干重量 $m_0$ , 记录后, 在 $20^\circ\text{C}$ 左右的水中竖起。试样之间间隔不小于10mm, 上端距水面不小于20mm。24小时后从水中取出, 用湿毛巾擦去表面的水分, 然后再称其重量, 记为 $m_1$ 。利用公式(2.5)计算其吸水率:

$$\omega = (m_1 - m_0) / m_0 \times 100\% \quad \text{式(2.5)}$$

式中  $\omega$  ——吸水率;  $m_1$ 、 $m_0$  ——吸水前、后试样的质量。

### 2.2.7 软化系数的测试

先制得6块尺寸为 $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$ 的标准试样, 放在 $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ , 相对湿度大于90%的养护室内, 养护7天。取其中的3块试样放在 $40 \pm 2^\circ\text{C}$ 烘箱内烘至绝干, 测得绝干强度, 另外3块泡水24小时测得饱水强度。

$$K_p = \frac{R_{\text{饱水}}}{R_{\text{绝干}}} \quad \text{式(2.6)}$$

式中:  $K_p$  ——材料的软化系数

$R_{\text{饱水}}$  ——材料吸水饱和状态下的强度(MPa)

$R_{\text{绝干}}$  ——材料在干燥状态下的强度(MPa)

### 2.2.8 自然干燥收缩率的测试

首先在两端分别带有收缩的头的 $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$ 的三联试模内成型试样。五个试样为一组样本, 收缩头的中心线与试样的中心线重合。试样制备好放置1天后, 检查测头是否牢固, 否则重做。将制备好的试样浸没在 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 的水中, 水面高出试样20mm, 浸泡72h, 将试样从水中取出, 用拧干的湿布抹去表面的水分, 并将测头擦干净, 立即测量初始长度 $l_0$ , 然后放入温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , 相对湿度 $(55 \pm 5)\%$ 的标准干燥室内, 采用测长200mm~300mm的千分尺进行测量, 每天测量1次计为 $l_1$ , 直至达到干收缩平

衡，即连续三天内任意两天的测长读数波动值小于0.001mm。

水泥砂浆试样自然干燥收缩率按式（2.7）计算：

$$S = \frac{(l_1 - l_0)}{l_0} \times 100\% \quad \text{式(2.7)}$$

式中S——干燥收缩率，%

$l_0$ ——试样初始长度，mm

$l_1$ ——试样干燥后的长度，mm

## 第三章 聚丙烯纤维/水泥复合材料工艺性能研究

### 3.1 水灰比的确定

在考察聚丙烯纤维增强水泥基复合材料基本性能之前,首先确定水泥基复合材料的水灰比。依照普通水泥砂浆常用水灰比,研究聚丙烯纤维增强水泥砂浆的最佳水灰比。实验中胶砂比取1:2.5,聚丙烯纤维掺量为水泥质量的0.5%,减水剂掺量为水泥质量的1.2%。进行水灰比实验时先将聚丙烯纤维、水泥、砂搅拌1分钟,然后加入水,考虑聚合物乳液中带入的水分,实际加水量为总需水量减去聚合物乳液带入的水。水灰比对聚丙烯纤维增强水泥砂浆的性能影响情况见表3-1。

表 3-1 水灰比变化对水泥砂浆强度的影响

编号	水灰比	3d抗折强度(MPa)	3d抗压强度(MPa)	7d抗折强度(MPa)	7d抗压强度(MPa)	28d抗折强度(MPa)	28d抗压强度(MPa)
S1	0.40	3.55	23.95	5.17	29.63	6.09	39.76
S2	0.42	3.98	24.80	5.67	30.50	6.96	42.50
S3	0.44	4.55	30.02	5.88	35.96	7.12	44.67
S4	0.46	4.28	22.77	5.34	31.73	6.78	41.36

从表3-1可以看出,水灰比为0.44时,试样S3各龄期的抗压、抗折强度比其他试样的强度高,3天抗折强度比水灰比取0.40时的试样S1提高了28.17%,抗压强度提高了25.34%,28天强度分别比试样S1提高了16.91%、12.35%;试样S3的3天抗折强度比水灰比取0.46时的试样S4提高了6.31%,抗压强度提高了31.84%,28天强度分别比试样S4提高了5.01%、8.00%。

水灰比过小时,拌和体系粘度大,物料不易搅拌均匀,另外还有可能造成水泥后期水化不足,所以使试样强度降低;水灰比过大时,拌和料流动度大,易成型,但过多的水分将造成试样内部孔隙增加,使试样强度降低;而水灰比取0.44时,拌和料流动度适中,也不会因为缺水造成水泥后期水化不足。因此,在后续实验中将水灰比确定为0.44。

### 3.2 聚丙烯纤维掺加工艺的研究

纤维的掺加工工艺一定程度上决定了纤维的分散性,而纤维增强水泥基复合材料中所用的纤维,在水泥基体中必须具有良好的分散性,即不结团、不成束,只有这样的纤维才能在实际的砂浆、混凝土工程中推广和应用。有些纤维可能在某些方面具有相

当令人振奋的特点,但是如果这种纤维在水泥基体中难以分散,那么它的推广必然受到影响,只能停留在实验室水平上,而且纤维分散性的好坏还直接影响着水泥基复合材料的后期耐久性<sup>[57]</sup>。假设有两根纤维并列在一起,在计算根数的时候就只能看成是一根纤维。纤维的分散效率越低,则实际产生阻裂效果的独立纤维根数越少,纤维平均间距的实际值也就越大。

通常的复合材料成型工艺中,纤维在基体中的掺和工艺有两种,一种是将纤维与基体材料先干混合均匀,然后再加水混和均匀,称为先掺法;另一种是后掺法,将基体材料加水混合均匀后再加入纤维混合均匀。针对聚丙烯纤维增强水泥砂浆复合材料,我们也采用这两种研究方法,在纤维掺量一定的前提下,对比聚丙烯纤维的先掺法与后掺法,考察两种工艺对聚丙烯纤维分散性及制品性能的影响,以确定聚丙烯纤维合适的掺加工艺。两种工艺的流程如图3-1、3-2所示。

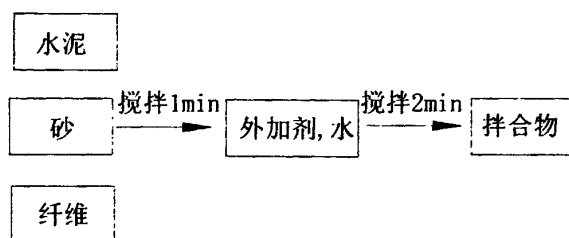


图 3-1 先掺法

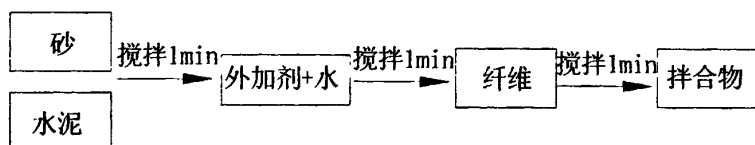


图 3-2 后掺法

实验所用胶砂比为 1:2.5, 水灰比为 0.44, Y 型聚丙烯纤维掺加量为水泥质量的 0.5%, 减水剂掺量为水泥质量的 1.2%, 试样尺寸为 40×40×160mm, 试验结果见表 3-2。

表 3-2 聚丙烯纤维掺加工艺对水泥砂浆强度的影响

性能	3d抗折强度(MPa)	3d抗压强度(MPa)	7d抗折强度(MPa)	7d抗压强度(MPa)	28d抗折强度(MPa)	28d抗压强度(MPa)
先掺法	4.56	29.86	6.10	34.86	7.35	44.50
后掺法	3.98	26.50	5.57	26.56	7.00	42.32

从表3-2可以看出按先掺法工艺制得的试样各龄期强度均比后掺法的好, 3d抗折强度达到4.56MPa, 比后掺法制得的试样提高了14.57%。



采用先掺法工艺时，纤维在水泥砂浆中的分散情况如图3-3所示，后掺法分散情况如图3-4所示。从图中可看出，先掺法工艺中纤维呈单丝状分布于基体中且分散均匀，没有粘团结团现象，后掺法工艺中纤维多呈束状分布，有粘团结团现象。上述现象与掺加工艺有关，先掺法工艺中纤维与基料在干拌中被强烈分散，所以纤维的分散性好，纤维之间发生粘连的机会很小，纤维以单丝状均匀分布使其能最大限度的发挥作用。后掺法工艺中纤维吸水润湿后为水泥所包裹，在搅拌过程中纤维束不易打开，在体系中纤维呈束团状将明显降低其增强作用，因此采用先掺法工艺的砂浆和混凝土性能要比后掺法工艺砂浆和混凝土的性能好。

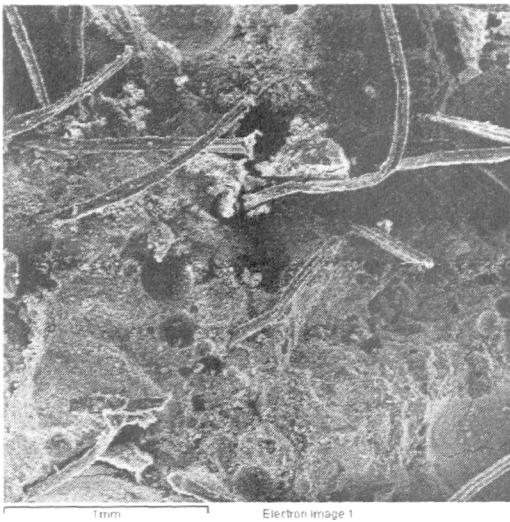


图 3-3 先掺法中纤维分散情况

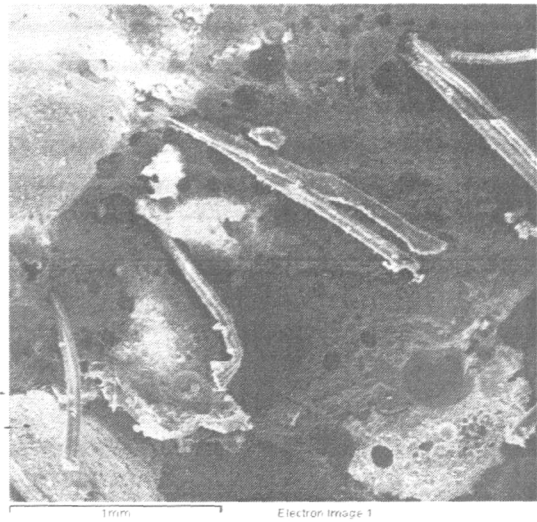


图 3-4 后掺法中纤维分散情况

实验中还发现，在试件成型前浆体的搅拌时间不应超过9分钟，时间过长由于摩擦作用会造成纤维强度降低，同时会使水泥流动性降低，不利于成型。

### 3.3 聚丙烯纤维掺量范围的确定

众所周知，纤维在混凝土中有增强增韧的作用，而纤维的掺量与混凝土的性能改善有直接关系<sup>[58-59]</sup>。纤维在混凝土中的数量太少，达不到预期效果，而纤维在混凝土中的数量太多，则纤维与纤维之间相互搭接，降低了粘结强度，这样会影响混凝土的性能，加大混凝土的成本。

由表2-3中数据可以算出，1kg聚丙烯纤维不含空隙的密实体积约为 $0.0011\text{m}^3$ ，当 $1\text{m}^3$ 混凝土中掺有1kg纤维时，其体积率为0.11%。聚丙烯纤维的直径为 $48\mu\text{m}$ ，换算成表示纤维粗细程度的细度值为1.78tex，即1000m长的纤维重1.78g，折算出1kg聚丙烯纤维的长度为：

$$1000 m \times \left( \frac{1000 g}{1.78 g} \right) = 600000 m = 600 km \quad \text{式(3.1)}$$

若把1kg的长度单位为19mm的纤维掺到1m<sup>3</sup>混凝土中，则意味着1m<sup>3</sup>混凝土内分布有3158万根纤维，相当于每立方厘米混凝土中含有31.58根纤维。

混凝土设计为C40，水灰比0.48，其中砂率为35%，掺加1.2%的萘系高效减水剂，综合考虑经济性和材料性能，Y型聚丙烯纤维掺加量取水泥质量的0%~1%，以先掺法加入，抗压性能指标随掺量变化如图3-5。

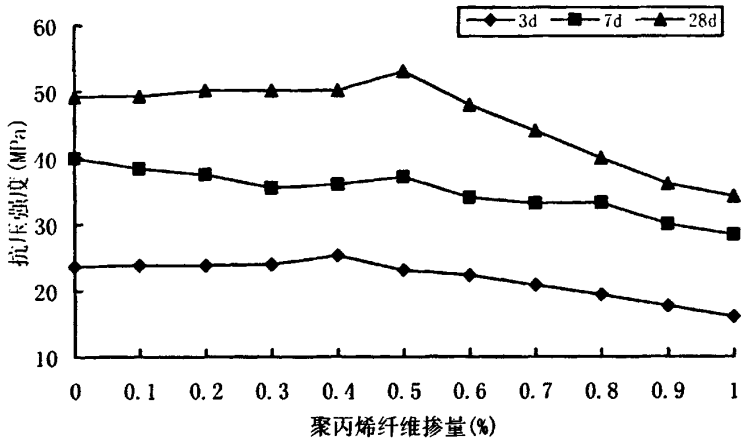


图3-5 混凝土抗压强度随纤维掺量的变化图

由图3-5可以看出，混凝土3d抗压强度在聚丙烯纤维掺量为0.4%时是一转折点，此时抗压强度是25.31MPa，比空白试样提高了7.11%，但掺量大于0.4%时，随掺加量的增大，抗压强度降低，当掺加1%的聚丙烯纤维时，抗压强度仅为空白试样的67.71%。而混凝土7d和28d抗压强度在聚丙烯纤维掺量为0.5%时是一转折点，此时7d抗压强度是37.18MPa，是空白试样的93.09%，28d抗压强度是53.11MPa，是空白试样的107.79%。当掺量小于0.8%时，各龄期抗压强度的下降程度均小于20%，所以聚丙烯纤维掺量应小于水泥质量的0.8%。

新拌混凝土和易性是混凝土的一项主要性能指标，和易性的好坏直接影响混凝土的施工性能及硬化混凝土的各种性能<sup>[60]</sup>。和易性是指混凝土是否易于施工操作和均匀密实的性能，是一个很综合的性能，其中包含流动性、粘聚性和保水性<sup>[61]</sup>。影响和易性主要有用水量、水灰比、砂率以及包括水泥品种、骨料条件、时间和温度、外加剂等几个方面<sup>[62]</sup>。在混凝土中加入低掺量的聚丙烯纤维，混凝土的流动性会有所下降，粘聚性和保水性有所提高。基于以上分析，本实验采取坍落度法来测定Y型聚丙烯纤维对混凝土拌和物和易性的影响。

混凝土设计为C40，坍落度为160cm~180cm，水灰比取0.48，砂率为35%，掺加1.2%的萘系高效减水剂，Y型聚丙烯纤维掺加量为水泥质量的0%~0.8%，以先掺法加入基体材料中，测定混凝土的坍落度S和坍落度损失率 $\eta$ ，结果见表3-3。

表3-3 纤维掺量变化对混凝土坍落度的影响

编号	PP掺量 (%)	0min		20min		30min		60min		备注
		S	S1	$\eta$	S2	$\eta$	S3	$\eta$		
pp-0	0	180	130	27.78	90	50	35	80.56	有泌水、离析	
pp-1	0.2	170	145	14.71	120	29.41	50	70.59	轻微离析	
pp-2	0.4	170	150	11.76	135	20.59	55	67.65	无泌水、无板结	
pp-3	0.6	165	150	9.09	135	18.18	60	63.64	无泌水、无板结	
pp-4	0.8	165	145	12.12	120	27.27	40	75.76	均匀性不好和易性不好	

经实验发现，通过合适的搅拌工艺及纤维掺量，聚丙烯纤维混凝土拌和物流动性没有降低，同时拌和物浆体更加均匀，泌水现象明显降低，粘聚性和保水性都有大幅度提高。从表3-3可知，掺加聚丙烯纤维的混凝土与普通混凝土相比，坍落度损失降低了16.92%~31.82%，这主要是由于纤维提供的各向同性的支撑量限制了水分从混凝土移向表面的速率和规模，但当掺量过大时，聚丙烯纤维在混凝土中不易分散均匀，可以看到有成束的纤维未被打开。

综合考虑混凝土的抗压强度和坍落度得出：在混凝土中聚丙烯纤维掺量应为水泥质量的0.2%~0.6%。

以相同的方法，研究纤维掺量变化对砂浆的影响，本实验中胶砂比取1:2.5，水灰比为0.44，掺加1.2%的萘系高效减水剂，综合考虑经济性和材料性能，Y型聚丙烯纤维掺加量为水泥质量的0%~2%，以先掺法加入，抗折、抗压强度掺量变化如图3-6、3-7所示。

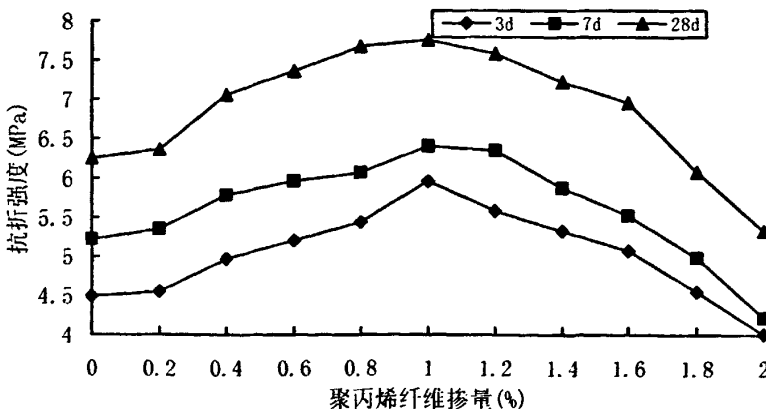


图 3-6 水泥砂浆抗折强度随纤维掺量的变化图

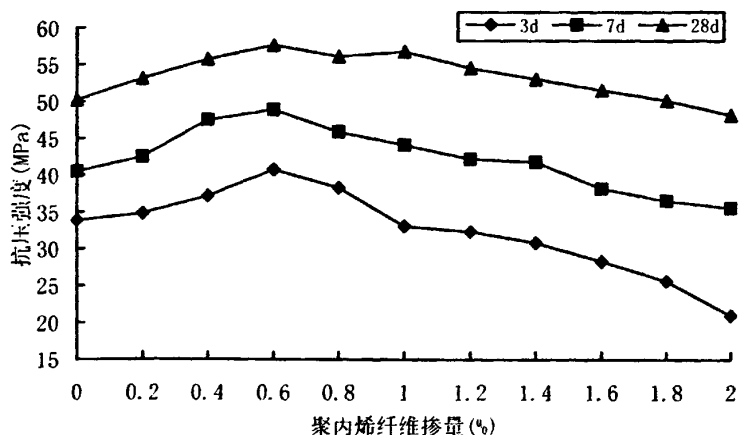


图 3-7 水泥砂浆抗压强度随纤维掺量的变化图

从图3-6、3-7中可以看出各龄期聚丙烯纤维增强水泥砂浆的抗折、抗压强度先随纤维掺量的增大而提高,表现为正增强效应,在纤维掺量达到某个数值—最佳掺量时,抗折、抗压强度随掺量的增大而降低,表现为负增强效应出现这种现象的主要原因在于掺量超过一定范围时,纤维在水泥基体中的平均间距逐渐缩小,小到一定距离后,纤维之间相互搭接、交叉、缠绕、重叠,从而与水泥浆接触面积减小,与基体的粘结减弱,最终导致抗压、抗折强度的降低。

本实验条件下,考察指标为抗折强度时,聚丙烯纤维最佳掺量为1.0%,取此掺量时水泥砂浆3天、7天和28天龄期的抗折强度分别比空白试样增长了32.74%、22.80%、24.16%;考察指标为抗压强度时,聚丙烯纤维最佳掺量为0.6%,取此掺量时水泥砂浆3天、7天和28天龄期的抗压强度分别比空白试样增长了19.52%、20.71%、14.63%。聚丙烯纤维掺量为0.4%时,水泥砂浆的抗折、抗压强度开始明显增加;聚丙烯纤维掺量为1.2%时,水泥砂浆3天、7天和28天龄期的抗折强度分别比空白试样增长了24.28%、21.65%、21.28%;而抗压强度分别是空白试样的95.48%、104.30%和108.80%。因此,水泥砂浆中聚丙烯纤维的掺量范围为0.4%~1.2%。

### 3.4 本章小结

(1) 本实验条件下,水灰比为0.44时,试样3天抗折强度比水灰比取0.40时的试样提高了28.17%,抗压强度提高了25.34%,28天强度分别提高了16.91%、12.35%;比水灰比取0.46时的试样提高了6.31%,抗压强度提高了31.84%,28天强度分别提高了5.01%、8.00%,而且此水灰比时拌和料流动度适中,水泥水化较完全。

(2) 按先掺法工艺制得的试样各龄期强度均比后掺法的好,3d抗折强度达到4.56MPa,比后掺法制得的试样提高了14.57%;将Y型聚丙烯纤维以先掺法工艺掺入

水泥基体中，纤维的分散性较好，能更好的发挥作用。

(3) 通过实验分析，混凝土中聚丙烯纤维掺量取水泥质量的0.2%~0.6%，水泥砂浆中纤维的掺量取水泥质量的0.4%~1.2%；在聚丙烯纤维增强混凝土中，聚丙烯纤维掺量为0.4%时是一转折点，此时抗压强度是25.31MPa，比空白试样提高了7.11%；在聚丙烯纤维增强水泥砂浆中，考察指标为抗折强度时，聚丙烯纤维最佳掺量为1.0%，取此掺量时水泥砂浆3天、7天和28天龄期的抗折强度分别比空白试样增长了32.74%、22.80%、24.16%；考察指标为抗压强度时，聚丙烯纤维最佳掺量为0.6%，取此掺量时水泥砂浆3天、7天和28天龄期的抗压强度分别比空白试样增长了19.52%、20.71%、14.63%。

## 第四章 聚丙烯纤维对水泥砂浆、混凝土性能的影响

### 4.1 聚丙烯纤维掺量变化对抗裂性能的影响

水泥砂浆混凝土是非均质材料，这种非均质材料在成型之初，其内部存在着较多的原生缺陷，原生缺陷的来源可能是骨料和浆体间的界面结合不良，也可能是未充分振实留下的气孔或泌水毛细通道，当混凝土表面处于应力状态时，原生缺陷的存在使混凝土表面的应力场不连续，在裂纹的尖端将形成应力集中，并引发其扩展，最终将导致这些原生的细小的裂纹逐步扩展形成大的裂缝<sup>[63]</sup>。

在水泥混凝土浇注3~4小时后，水泥处于终凝期，此时浆体已失去可塑性，但强度尚未发展，因此失水造成的表面应力很容易使混凝土表面原生裂缝扩展，形成不规则的、无取向性的短小裂缝，即通常所说的“塑性裂缝”<sup>[64]</sup>。

塑性开裂是薄板混凝土结构（诸如桥面板、路面板、工业地坪）在硬化早期的常见病、多发病。塑性开裂控制的好坏直接影响到混凝土的长期使用性能，因此，对于塑性开裂往往采取设置挡风遮口设施、现场喷洒水雾、缩短浇注至养护的时间间隔等措施，这些措施均能有效减轻或避免水泥混凝土塑性开裂。但从增强混凝土，的长期抗裂性能考虑，掺入纤维是最有效的方法之一<sup>[65-66]</sup>。

混凝土抗干缩开裂性能试验及结果评定参照美国混凝土学会ACI—544“纤维增强混凝土的性能测试”技术报告中P.P.Kraai提出的砂浆及混凝土干燥收缩裂缝测试方法进行试验<sup>[55]</sup>。试验配比见表4-1，聚丙烯纤维掺量为试验用水泥质量的0%~0.6%。

表 4-1 混凝土抗干缩开裂试验配比

试件编号	水泥(kg)	砂+碎石 (kg)	水灰比	纤维(%)
S1	8	12(4+8)	0.5	0
S2	8	12(4+8)	0.5	0.2
S3	8	12(4+8)	0.5	0.4
S4	8	12(4+8)	0.5	0.6

配比选择较高的水泥用量、用水量和砂率是为了加速开裂和加大裂缝宽度，便于实验比较。考虑到发生塑性裂缝处混凝土较薄，使用了粒径在5~10mm之间的碎石。

试验结果评定：根据裂缝宽度把裂缝分为四级，每一级对应着一个权值，用每级宽度的裂缝长度分别乘以其相应的权值，再相加起来得到的总和称为开裂指数，据此

衡量开裂程度。试样1的开裂指数为： $15 \times 3 + 64 \times 2 + 53 \times 1 + 38 \times 0.5 = 245$ ，依此计算方法分别计算出S2、S3、S4号试样的开裂指数，列于表4-2中。

表 4-2 聚丙烯纤维减少混凝土干缩开裂的效果比较

编号	裂缝宽度范围内的裂缝长度 L(mm)				开裂指数 /开裂率
	$d \geq 3$ (权值 3)	$3 < d \leq 2$ (权值 2)	$2 > d \geq 1$ (权值 1)	$d \leq 1$ (权值 0.5)	
S1	15	64	53	38	245/100%
S2	0	15	19	30	64/26%
S3	0	0	12	24	24/9.8%
S4	0	0	9	20	6.5/7.7%

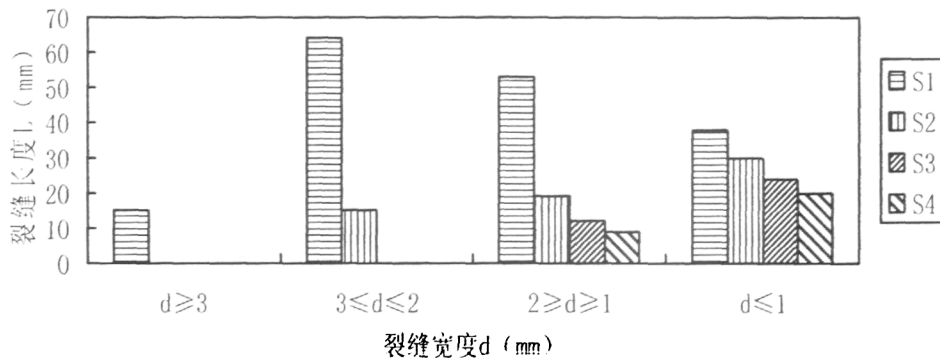


图 4-1 聚丙烯纤维增强混凝土裂缝长度分布图

从表4-2可以看出素混凝土S1含有宽度大于3mm的裂缝，而且较长，设其开裂率为100%；而掺加聚丙烯纤维的混凝土S2、S3、S4比S1裂缝减少许多，开裂率分别降低了74%，90.2%和92.3%，从表中数据也可以看出随着纤维掺量的增加，开裂指数大幅度下降，其裂缝的趋势是由宽到窄，由大到小。由此可见，掺加聚丙烯纤维对控制混凝土塑性裂缝的产生是非常有效的。图4-1直观地显示出聚丙烯纤维增强混凝土裂缝长度分布情况，该图以裂缝宽度为横坐标，以裂缝长度为纵坐标，反映了每条裂缝宽度对应裂缝长度情况。图中显示加入纤维后，混凝土板的大宽度裂缝明显减少，而且长度也明显缩短，而宽度小于1mm的裂缝长度相对较大。

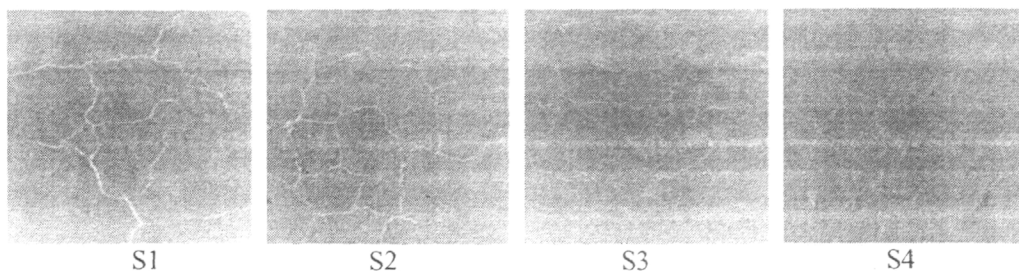
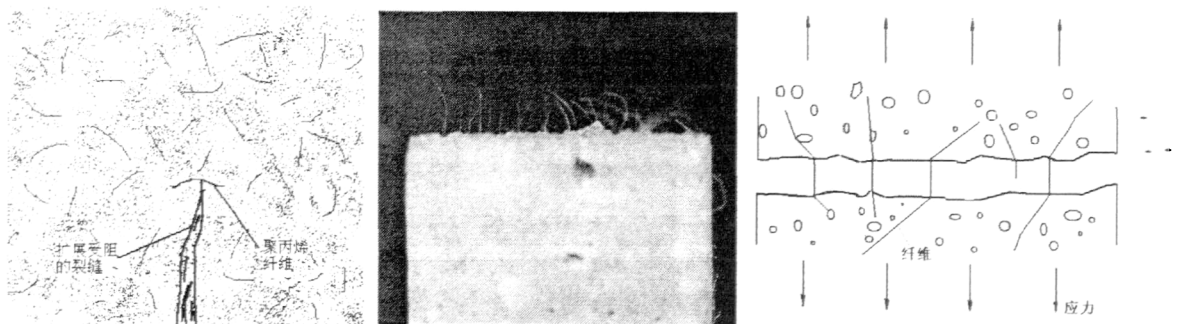


图 4-2 混凝土开裂实物照片

图4-2为混凝土开裂实物照片，从图中可以看出掺加聚丙烯纤维的混凝土表面塑

性收缩裂缝分布广而微细，而素混凝土的裂缝比较宽，而且较长，另外，掺加聚丙烯纤维的混凝土板，当出现裂缝时，在裂缝处可以看到很多纤维丝，正是这些纤维丝的存在阻止了裂缝的进一步扩展，保证了板的完整性，使混凝土板在出现裂缝后还能继续承受一定的应力。

因为微裂纹在向细裂纹发展的过程中，必然碰到多条不同向的微纤维，遭遇到纤维的阻挡，将消耗能量，使裂缝难以进一步发展，图4-3为纤维阻止裂缝扩展的示意图，由图中可以看出，当砂浆中一旦有裂缝发生时，因为裂缝的前端与纤维相交，使得引起裂缝的拉应力得以削弱或消除，从宏观上解释，就是提高了砂浆的抗裂能力。刚刚浇注的混凝土含水率较大，表面水分大量蒸发，产生表面表层收缩，当混凝土表面拉应力超过了混凝土早期的抗拉强度，即产生塑性收缩裂缝。若在砂浆中掺加适量的聚丙烯纤维，则能在砂浆或混凝土中形成均匀分布的三维网络，可承受因基材收缩而引起的内应力，阻挡裂缝的扩展，减少早期的干缩裂缝和塑性收缩裂缝，因此起到了阻裂作用。



a 纤维阻止裂缝扩展示意图 b 断裂处纤维取向变化的实物图 c 裂缝处纤维取向改变的示意图  
图 4-3 纤维阻止裂缝扩展示意图

图4-3-a是试样断面处纤维取向变化的实物图，图4-3-b、4-3-c模拟了聚丙烯纤维在受力后取向的改变。从图中可以看出，当砂浆或混凝土受到应力作用，产生的裂缝张开时，纤维会拉成和应力作用线相同的取向，因而能消耗一定的应力，增加混凝土的强度。

## 4.2 聚丙烯纤维掺量变化对水泥砂浆抗冲击性能的影响

水泥砂浆、混凝土在使用过程中，有可能受到反复冲击作用，导致材料的破坏，因此，抗冲击性能也是水泥砂浆、混凝土的重要性能指标。国内外研究表明：聚丙烯纤维加入水泥砂浆和混凝土中能有效改善其抗渗、抗冻、抗冲击、柔韧性和抗疲劳等性能<sup>[62-63]</sup>。为此，本论文对聚丙烯纤维增强砂浆的抗冲击性能进行了试验研究，



水泥砂浆的抗冲击试验配比及结果见表4-3，其中聚丙烯纤维和减水剂掺量都是取水泥质量比，冲击韧性 $W$ 和 $\Delta W$ 按式(2.2)、式(2.3)计算。

表 4-3 水泥砂浆抗冲击试验配比及结果

编号	C:S:W	聚丙烯纤维(%)	减水剂(%)	$n_1$	$n_2$	$\Delta n=n_2-n_1$	$W$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$ )	$\Delta W$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$ )
S1	1:2.5:0.44	0	1.0	51	56	5	1128.61	100.77
S2	1:2.5:0.44	0.4	1.0	187	199	12	4010.59	241.84
S3	1:2.5:0.44	0.7	1.0	207	221	14	4453.97	282.15
S4	1:2.5:0.44	1.0	1.0	276	293	17	5905.03	342.61

以冲击韧性 $W$ 为指标进行评价，由表4-3中水泥砂浆试样S1、S2、S3和S4的试验结果可知，掺入0.4%~1.0%的聚丙烯纤维可使水泥砂浆的冲击韧性提高2.5~4.2倍左右；而水泥砂浆试样在初裂后继续保持整体性的能力或者说继续吸收能量的能力( $\Delta W$ )提高了1.4~2.4倍左右；掺加聚丙烯纤维可使水泥砂浆抗冲击韧性 $W$ 明显提高，且试样在初裂后可以继续保持整体性，继续吸收能量的能力 $\Delta W$ 比素水泥砂浆继续吸收能量的能力要高得多。

聚丙烯纤维能改善水泥砂浆抗冲击性能，主要是因为聚丙烯纤维的掺入能使由水化热、温差、干湿、离析等因素作用形成的原生裂隙的尺寸有效细化，由此可以提高基体材料介质的连续性，减小了冲击波被阻断引起的局部应力集中现象，而且聚丙烯纤维能使水泥砂浆具有更好的微观孔结构，吸收更多的冲击能量，有效约束裂缝扩展。

### 4.3 聚丙烯纤维对硅灰混凝土的影响研究

混凝土设计为C40，水灰比0.48，其中砂率为35%，具体混凝土配合比见表4-4，其中硅灰、聚丙烯纤维和减水剂掺量都是取水泥质量比。由于各试验配比中参加了不同量的硅灰和聚丙烯纤维，所以对各配比中的用水量进行了微量的调整，以保持坍落度基本不变。

表4-4 聚丙烯纤维/硅灰混凝土配合比设计

编号	水泥( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	砂( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	石子( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	硅灰(%)	纤维掺量(%)	减水剂(%)
A-1	360	690	1268	0	0	1
A-2	360	690	1268	0	0.2	1
A-3	360	690	1268	0	0.6	1
B-1	342	690	1268	5	0	1
B-2	342	690	1268	5	0.2	1
B-3	342	690	1268	5	0.6	1
C-1	324	690	1268	10	0	1
C-2	324	690	1268	10	0.2	1
C-3	324	690	1268	10	0.6	1

按表4-4中各配比做出试样，在标准条件下养护，并分别测得3d、7d、28d抗压强度值，如图4-4、4-5、4-6所示。

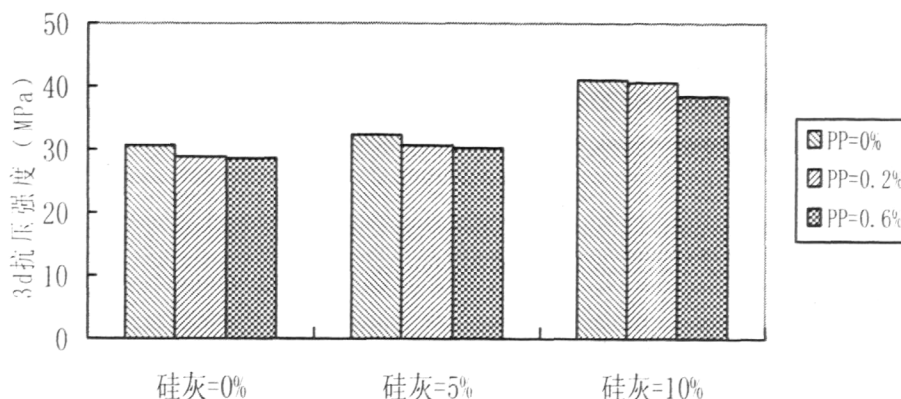


图 4-4 聚丙烯纤维/硅灰混凝土 3d 抗压强度

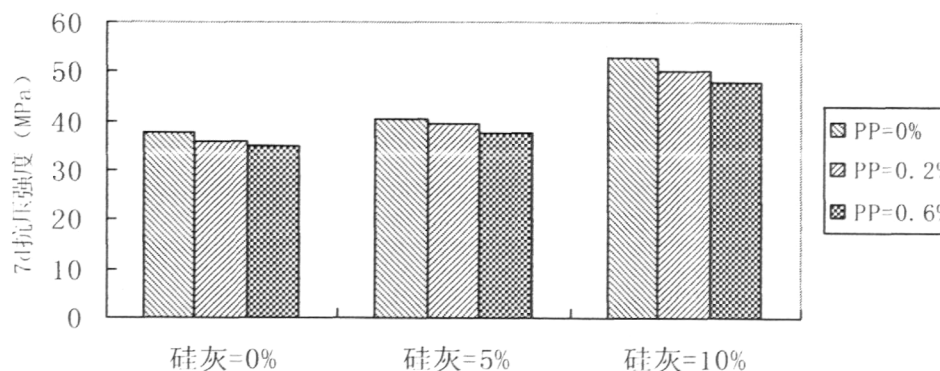


图 4-5 聚丙烯纤维/硅灰混凝土 7d 抗压强度

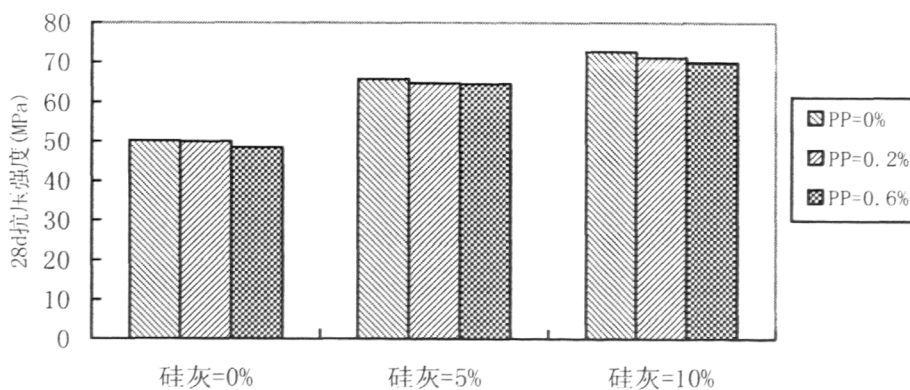


图 4-6 聚丙烯纤维/硅灰混凝土 28d 抗压强度

由图4-4、4-5、4-6可以看出，掺入聚丙烯纤维可使混凝土3d、7d、28d抗压强度有一定程度的损失。而掺入硅灰后，混凝土各龄期的抗压强度明显提高。当只掺入0.2%的聚丙烯纤维时，试样的3d抗压强度比空白试样降低了4.81%，28d抗压强度比空白试样降低了0.40%；掺入0.6%的聚丙烯纤维时，试样的3d抗压强度比空白试样降低了6.54%，28d抗压强度比空白试样降低了3.39%；加入硅灰后，试样的抗压强度随硅灰

的掺量增加而增大，掺加5%的硅灰时，试样的3d抗压强度比空白试样增加了5.56%，28d抗压强度比空白试样增加了30.88%；掺加10%硅灰时，试样的3d抗压强度比空白试样增加了33.99%，28d抗压强度增加了44.82%。掺量0.2%聚丙烯纤维，10%硅灰时，比空白试样3d抗压强度增加了25.82%，28d抗压强度增加了39.44%。由此得出，虽然掺加聚丙烯纤维可以减少塑性收缩裂缝与早期的干缩裂缝，但会使混凝土的抗压强度有一定的损失，加入硅灰可以弥补这种缺陷，所以同时掺加聚丙烯纤维与硅灰的增强效果比单独掺加聚丙烯纤维的好。

硅灰的比表面积为 $23.2\text{m}^2/\text{g}$ ，水泥的比表面积为 $3560\text{cm}^2/\text{g}$ ，细小的硅灰颗粒可以填充相对较大的水泥颗粒间的孔隙，使胶凝材料具有好的级配<sup>[67]</sup>。同时，硅灰对水泥粒子的填充性使水泥石的密实性提高，降低了填充水泥粒子间空隙的用水量，一定程度上提高了混凝土的抗压强度。

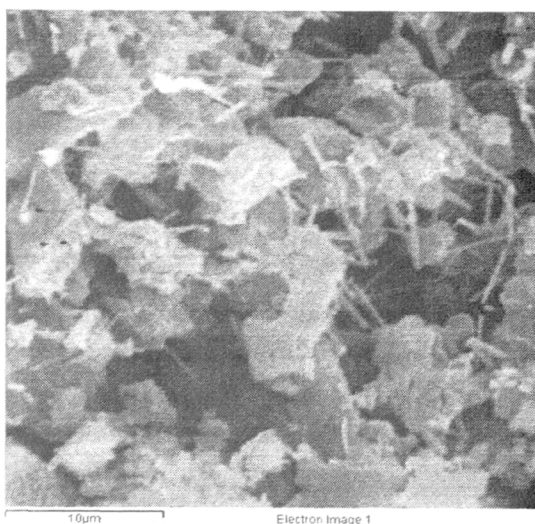


图4-7 基准试样的SEM照片

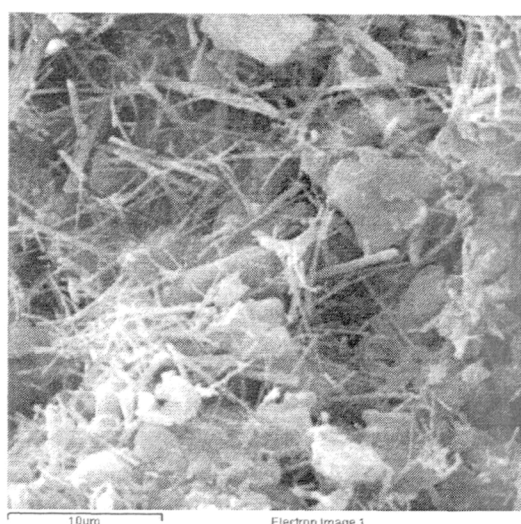


图4-8 掺加10%硅灰试样的SEM照片

结合扫描电镜照片，如图4-7、4-8所示，分析混凝土强度增大原因，从图4-7中可以看出水泥水化28d后，水化产物结构疏松，还存在没有水化的水泥颗粒，而且出现大量晶体颗粒大、规则排列的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体；而在掺10%硅灰的水泥浆体中，水化产物呈凝胶状，见图4-8，几乎找不到结晶完整粗大钙矾石和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体，水化产物没有固定的规则外形，尺寸极其细小，硬化体呈现整体化结构，凝胶状的水化产物并不独立分散分布。

#### 4.4 Y型聚丙烯纤维梯度分布对水泥砂浆性能影响的研究

梯度材料，就是在材料的制备过程中，选择两种或两种以上性质不同的材料，通

过连续地控制材料的微观要素使其成分和组织都呈连续变化的新型材料<sup>[68-70]</sup>。目前梯度材料的研究领域主要集中在金属、陶瓷及其它无机小分子复合材料领域<sup>[71]</sup>，而水泥基材料的梯度功能化研究相对较少。水泥基材料作为原料最丰富、用量最大的建筑工程材料，近期内尚找不到可以替代的材料，但是其拉压强度比小、抗裂能力低、脆性大等自身存在的缺陷又在很大程度上限制了其应用范围<sup>[72-74]</sup>。尤其在梁、板等受弯构件中，由于在受力时上部受压应力，下部受拉应力，受力后就很容易断裂，如果在构件的受拉部位配上一种抗拉能力强的材料—聚丙烯纤维，并且使纤维在水泥砂浆或混凝土中形成三维网络，就可以减少其早期干缩裂缝和塑性收缩裂缝<sup>[75]</sup>。

本文通过在水泥砂浆中掺加一定量的聚丙烯纤维，将其结构按照使用环境的需求呈梯度分布，探索聚丙烯纤维梯度分布结构对水泥砂浆抗折、抗压和抗冲击性能的影响，使聚丙烯纤维增强的水泥基梯度材料可以用在某些特殊的领域，如桥梁、水库、水坝、混凝土路面、桥面、机场道面、地坪等。

聚丙烯纤维梯度分布试样的制备：在空白试样配比基础上外加聚丙烯纤维，纤维总掺量为水泥质量的1.0%，各层掺量为：第1层为该层水泥质量的2%，第2层为1.5%，第3层为0.5%，第4层为0。制作试样时，将已拌好的4份砂浆依次注入模具，各层浇注时间间隔不能超过30s，注入每层料浆后振动7s，最后振动20s，在此过程中，各层间组分相互渗透、扩散形成梯度分布。

聚丙烯纤维梯度分布试验配比及试验结果见表 4-5，其中聚丙烯纤维和减水剂掺量都是取水泥质量比， $n_1$ 、 $n_2$ 分别为初次出现裂缝的冲击次数和破坏冲击次数，冲击延性指标  $\beta$  为破坏冲击次数与初次出现裂缝的冲击次数之比。进行抗压、抗冲击试验时，试样成型面应与受压面平行，即梯度方向为垂直受力方向。

表 4-5 聚丙烯纤维梯度分布试验

编号	C:S:W	聚丙烯纤维(%)	减水剂(%)	28d 抗折强度(MPa)	28d 抗压强度(MPa)	$n_1$	$n_2$	冲击延性指标 $\beta$
S1	1:2.5:0.44	0	1.0	7.25	46.25	2	2	1.00
S2	1:2.5:0.44	1.0	1.0	7.60	44.80	13	60	4.62
S3	1:2.5:0.44	1.0	1.0	7.95	48.33	18	90	5.00

从表4-5可知，与空白试样S1相比，掺入聚丙烯纤维的S2、S3两组抗折强度明显地增大。均匀掺加1.0%聚丙烯纤维的2#试样能使水泥砂浆28天抗折强度提高了4.83%，抗压强度降低了3.14%；而同等掺量时聚丙烯纤维梯度分布的试样S3抗折强度提高了9.66%，抗压强度提高了4.50%，因此纤维梯度分布比均匀分布对抗折强度的增强效果更好一些。

S3试样的冲击延性指标最大,说明该试样在受冲击变形时保持的强度并且不产生破裂的能力最大,即试样从屈服到破坏之间的变形能力最大。从试验结果得知,纤维的掺入大幅度地提高了水泥砂浆的初裂、终裂冲击次数和冲击延性。相比较而言,聚丙烯纤维掺入水泥砂浆时梯度分布比均匀分布能更显著地提高砂浆的冲击延性。原因是:在相同掺量时,梯度分布的试样受力面比均匀分布的试样含有更多的纤维。聚丙烯纤维的分散性和方向性好,纤维在砂浆的方向与裂缝垂直,能最大发挥纤维的阻裂效应从纤维在抗冲击过程中的能耗机理分析。

根据复合材料力学理论,纤维不仅能够转移荷载,还能与基体界面粘合,当沿着纤维方向承受拉力时,外力通过基体传递给纤维,使纤维砂浆复合材料的抗拉强度和冲击延性有所提高,从而改善水泥基材料的性能。本试验中,在相同纤维含量下,纤维的梯度分布,明显地增加了受拉区的纤维含量,在承受最大拉应力部位,梯度分布的纤维含量是均匀分布的2倍。

## 4.5 本章小结

(1) 掺加聚丙烯纤维对控制混凝土塑性裂缝非常有效,而且随着纤维掺量的增加,开裂指数大幅度下降,其裂缝的趋势是由宽到窄,由大到小,掺加0.2%~0.6%聚丙烯纤维的混凝土比素混凝土的开裂率分别降低了74%, 90.2%和92.3%;

(2) 掺加聚丙烯纤维可使水泥砂浆抗冲击韧性 $W$ 明显提高,且试样在初裂后可以继续保持整体性,继续吸收能量的能力 $\Delta W$ 比素水泥砂浆继续吸收能量的能力要高得多。掺入0.4%~1.0%的聚丙烯纤维可使水泥砂浆的冲击韧性提高2.5~4.2倍左右;而水泥砂浆试样在初裂后继续保持整体性的能力或者说继续吸收能量的能力 $\Delta W$ 提高了1.4~2.4倍左右;

(3) 将聚丙烯纤维掺入硅灰混凝土中可以提高混凝土的抗裂性,而且硅灰的掺入可使水泥浆与骨料、聚丙烯纤维之间的界面过渡区得到改善,并使孔结构细化而使制品比较致密;在混凝土中掺加0.2%聚丙烯纤维,10%硅灰时,3d抗压强度比基准试样增加了25.82%,28d抗压强度增加了39.44%。

(4) 聚丙烯纤维梯度分布比均匀分布对水泥砂浆强度的增强效果好一些,均匀掺加1.0%聚丙烯纤维能使水泥砂浆28天抗折强度提高4.83%,抗压强度降低3.14%,而同等掺量时聚丙烯纤维梯度分布可使抗折强度提高9.66%,抗压强度提高4.50%,且梯度分布时水泥砂浆冲击延性指标比不掺聚丙烯纤维以及均匀掺加等量纤维的水泥砂浆明显增大。

## 第五章 复合材料最佳配比的试验研究

### 5.1 正交试验法确定聚丙烯纤维聚合物砂浆配比

为考察聚合物乳液、减水剂和聚丙烯纤维的掺量对水泥砂浆性能的影响,寻求复合材料最佳配比,进行正交试验。本实验中试样尺寸为40mm×40mm×160mm,胶砂比为1:2.5,水灰比为0.44。依据正交试验数据处理理论,将聚合物乳液、减水剂、聚丙烯纤维作为三个因素,设计三因素三水平正交试验,其中聚合物乳液、减水剂和聚丙烯纤维掺量为水泥质量百分比,因素与水平见表5-1,正交试验结果见表5-2。

表 5-1 正交试验因素水平表

因素 水平	聚合物乳液(%)	减水剂(%)	聚丙烯纤维(%)
	A	B	C
1	2	0.5	0.4
2	4	1.0	0.7
3	6	1.5	1.0

表5-2 L<sub>9</sub>(3<sup>3</sup>)正交试验结果

试验号	因素			各龄期抗折强度/MPa			各龄期抗压强度/MPa		
	A	B	C	3d	7d	28d	3d	7d	28d
1	1	1	1	4.6	5.66	6.58	19.28	25.94	37.89
2	1	2	2	4.75	5.63	6.44	20.31	23.31	33.75
3	1	3	3	4.28	4.95	5.55	17.03	20.39	30.39
4	2	1	2	4.78	5.72	7.15	19.25	25.78	36.80
5	2	2	3	6.35	6.75	7.8	29.69	34.45	45.63
6	2	3	1	5.23	5.69	6.35	21.41	25.39	32.11
7	3	1	3	5.3	5.9	7.22	23.16	26.09	36.33
8	3	2	1	4.85	5.90	6.11	22.44	27.27	34.30
9	3	3	2	4.93	5.69	6.25	21.78	26.88	35.47

28d抗折强度(MPa)

28d抗压强度(MPa)

因素	聚合物乳液	减水剂	聚丙烯纤维	试验结果	聚合物乳液	减水剂	聚丙烯纤维	试验结果
	1	1	1		1	6.58	1	
2	1	2	2	6.44	1	2	2	33.75
3	1	3	3	5.55	1	3	3	30.39
4	2	1	2	7.15	2	1	2	36.80
5	2	2	3	7.8	2	2	3	45.63
6	2	3	1	6.35	2	3	1	32.11
7	3	1	3	7.22	3	1	3	36.33
8	3	2	1	6.11	3	2	1	34.30
9	3	3	2	6.25	3	3	2	35.47
均值1	6.190	6.983	6.347		34.010	37.007	34.767	
均值2	7.100	6.783	6.613	优方案: A2B1C3	38.180	37.893	35.340	优方案: A2B2C3
均值3	6.527	6.050	6.857		35.367	32.657	37.450	
极差	0.910	0.933	0.510		4.170	5.236	2.683	

通过直观分析,得出聚丙烯纤维聚合物砂浆最佳配合比为A2B1C3,或者A2B2C3,即聚丙烯纤维掺量取1.0%,聚合物乳液掺量为水泥质量的4%,而减水剂的掺量在0.5%~1.0%之间。A2B2C3这一方案在正交试验中出现过,现将其重复试验一次,并与方案A2B1C3以及基准试样进行对比,试验结果见表5-3。

表 5-3 聚丙烯纤维聚合物砂浆优方案对比试验

项目	聚合物乳液(%)	减水剂(%)	聚丙烯纤维(%)	各龄期抗折强度(MPa)			各龄期抗压强度(MPa)		
				3d	7d	28d	3d	7d	28d
				A2B1C3	4	0.5	1.0	6.15	6.86
A2B2C3	4	1.0	1.0	6.30	6.85	7.95	30.11	36.45	49.80
基准试样	0	0	0	4.31	5.45	6.74	32.87	39.00	50.65

从表5-3中可以证明A2B2C3是最优方案,掺加1.0%的聚丙烯纤维,4%聚合物乳液,1.0%减水剂使水泥砂浆的抗折强度和抗压强度都有了较明显的提高,提高的幅度随龄期的不同也各异,3d抗折强度比空白试样提高了46.17%,28d抗折强度提高了17.95%,对水泥砂浆抗压强度的影响也类似于其对抗折强度的影响。

因为聚丙烯纤维与基体的界面结合受聚合物乳液的影响,所以为进一步分析因素A(聚合物乳液)和因素C(聚丙烯纤维)交互作用对砂浆强度的影响,对表5-2中数据进行交互分析如图5-1。

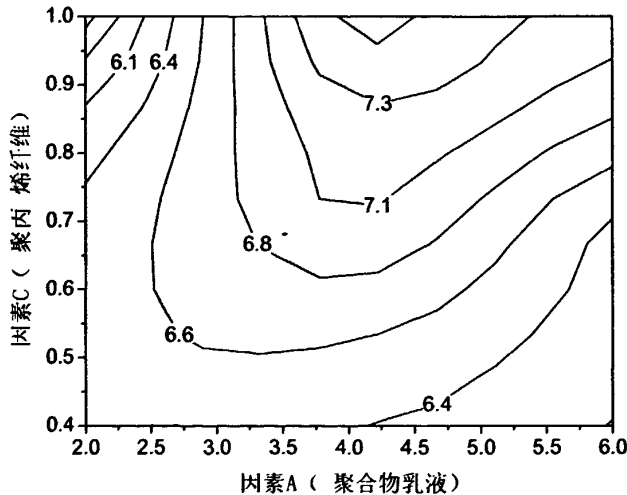


图 5-1 因素 A、C 与砂浆 28d 抗折强度关系的等值线图

由图5-1可知,水泥砂浆28d抗折强度在聚丙烯纤维掺量小于0.75%时,变化较缓,但当聚丙烯纤维掺量达到1.0%时,变化明显,水泥砂浆28d抗折强度随聚合物乳液掺

量的增加呈先增大后减小的趋势，聚合物掺量3.5%~5.0%时，抗折强度最好。

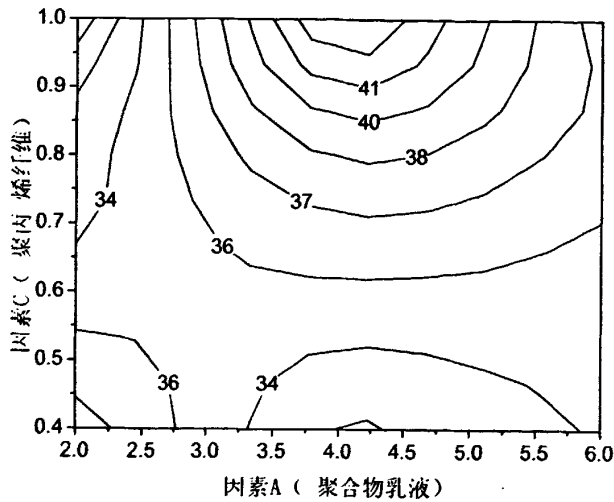


图 5-2 因素 A、C 与砂浆 28d 抗压强度关系的等值线图

图5-2中显示砂浆28d抗压强度随聚丙烯纤维掺量的增加而增加，随聚合物乳液掺量的增加而降低，因此，纤维掺量为1.0%，聚合物乳液掺量为4%时水泥砂浆获得的抗压强度最大。

## 5.2 正交试验法确定聚丙烯纤维聚合物混凝土配比

混凝土材料作为21世纪最重要的人造建筑材料之一，已经广泛地应用于城市建设、港口码头、交通工程等领域，但混凝土耐久性问题限制其在许多领域的应用<sup>[76-77]</sup>。通过开展混凝土结构耐久性的研究，一方面可以对已有的建筑物进行科学的耐久性评定和剩余寿命预测，以选择对其正确的处理方法；另一方面则有利于新建工程项目的耐久性设计。

以往的研究经验表明，掺加高分子聚合物乳液或减水剂可在一定程度上改善混凝土的界面结合状况<sup>[77]</sup>，掺入聚丙烯纤维是改善水泥混凝土的抗裂性的有效手段<sup>[78]</sup>。因此，本试验同样以聚合物乳液、减水剂、聚丙烯纤维作为三个因素，设计三因素三水平正交试验，因素水平表见表5-4。具体试验中用灰量为 $360\text{kg/m}^3$ ，水灰比为0.48，砂用量 $690\text{kg/m}^3$ ，碎石用量 $1268\text{kg/m}^3$ 。由于各试验配比中掺加了不同量的聚合物乳液和减水剂，所以需要对各配比中的用水量进行了微量的调整，以保持水灰比不变。制作尺寸为 $150\text{mm}\times 150\text{mm}\times 150\text{mm}$ 的试样，成型后以报纸覆盖表面，以防止水分蒸发，在温度为 $20\pm 5^\circ\text{C}$ 情况下静置一昼夜，然后编号拆模。拆模后的试件立即放在温度为 $20\pm 3^\circ\text{C}$ ，湿度为90%以上的标准养护室中养护28天后，按标准方法进行抗压



试验, 结果如表5-5所示。

表 5-4 正交试验因素水平表

水平 \ 因素	聚合物乳液(%)	减水剂(%)	聚丙烯纤维(%)
	A	B	C
1	0	0	0
2	3	0.5	0.3
3	6	1.5	0.6

表5-5  $L_9(3^3)$ 正交试验结果

试验号 \ 因素	A	B	C	28d抗压强度 (MPa)
	S 1	1	1	1
S 2	1	2	2	48.5
S 3	1	3	3	47.7
S 4	2	1	2	53.4
S 5	2	2	3	59.5
S 6	2	3	1	55.2
S 7	3	1	3	54.7
S 8	3	2	1	58.0
S 9	3	3	2	59.7
均值1	49.067	53.033	54.733	
均值2	56.033	55.333	53.867	优方案:
均值3	57.467	54.200	53.967	A3B2C3
极差	8.400	2.300	0.866	

通过直观分析, 得出聚丙烯纤维聚合物混凝土最佳配合比为A3B2C3, 即聚合物乳液掺量为水泥质量的6%, 减水剂的掺量为水泥质量的0.5%, 聚丙烯纤维掺量取水泥质量的0.6%。A3B2C3这一方案在正交试验中出现过, 现将其重复试验一次, 并与表5-5正交试验中最优方案A3B3C2以及基准试样进行对比, 试验结果见表5-6。

表 5-6 聚丙烯纤维聚合物混凝土优方案对比试验

项目	聚合物乳液(%)	减水剂 (%)	聚丙烯纤维 (%)	28天抗压强度 (MPa)
A3B2C3	6	0.5	0.6	60.1
A3B3C2	6	1.5	0.3	58.6
基本试样	0	0	0	52.0

表5-6中数据也可以证明A3B2C3是最优方案, 掺加0.6%的聚丙烯纤维, 6%聚合物乳液, 0.5%减水剂使混凝土28天抗压强度提高了15.58%。

下面对表5-5中混凝土抗压强度的试验数据进行正交计算及处理, 绘出各因素水平变化对混凝土抗压强度影响趋势图, 如图5-3所示。

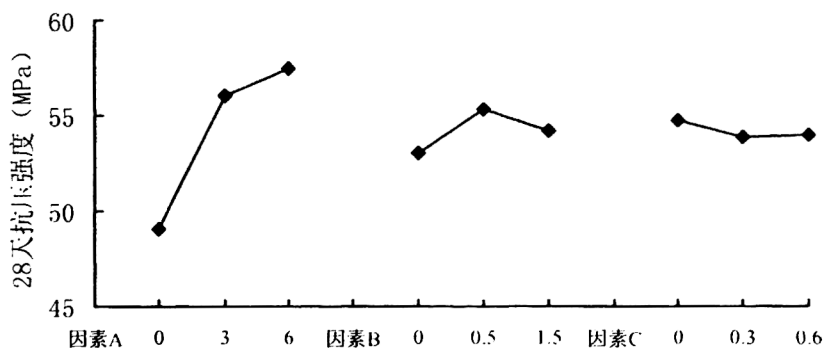


图5-3 因素水平变化影响趋势图

从因素水平变化对28天抗压强度影响趋势图可以看出，因素A的极差最大，即聚合物乳液掺量是对强度影响最大的因素；其次的影响因素是B，即减水剂；因素C极差最小，即聚丙烯纤维对强度的影响最小。

从表5-5中数据可以看出，掺加6%聚合物乳液、1.5%减水剂和0.6%聚丙烯纤维的试样S9抗压强度最大，是基准混凝土试样S1的117.06%；只掺加1.5%减水剂和0.6%聚丙烯纤维时混凝土的抗压强度比基准试样S1降低了6.47%；只掺加6%聚合物乳液和0.6%聚丙烯纤维的试样S7比基准试样S1增大了7.25%；只掺加6%聚合物乳液和0.5%减水剂的试样S8的抗压强度比基准试样S1增大了13.73%。由此可以看出掺加聚合物乳液是提高纤维混凝土强度的关键。

对未掺加聚合物乳液的试样和掺加聚合物乳液的试样进行扫描电镜和能谱分析，如图5-4、5-5所示。

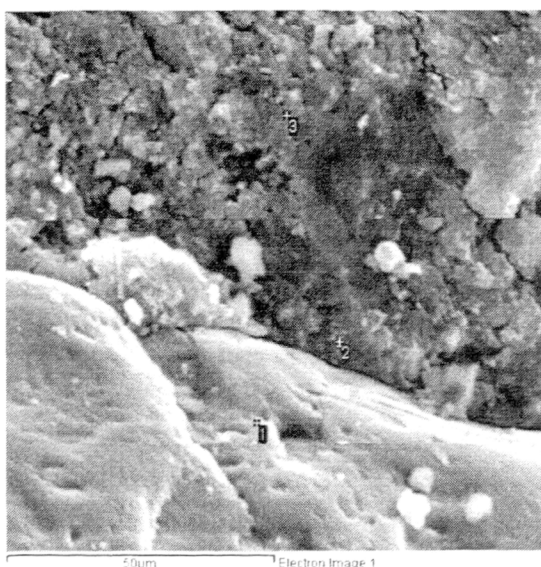


图 5-4 未掺加聚合物乳液的混凝土界面区

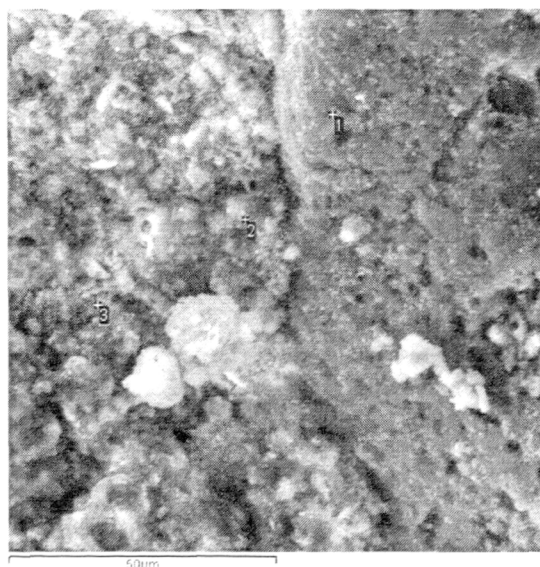


图 5-5 掺加聚合物乳液的混凝土界面区

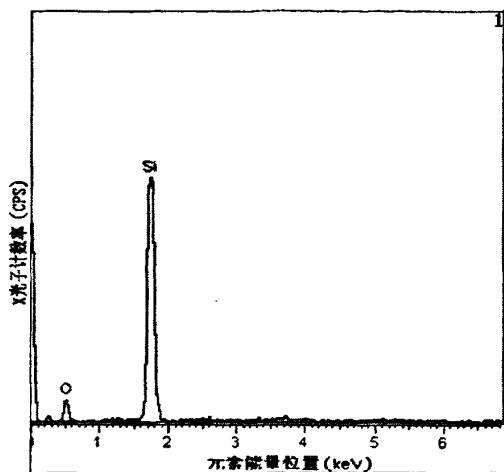


图 5-4 中点 1 能谱图

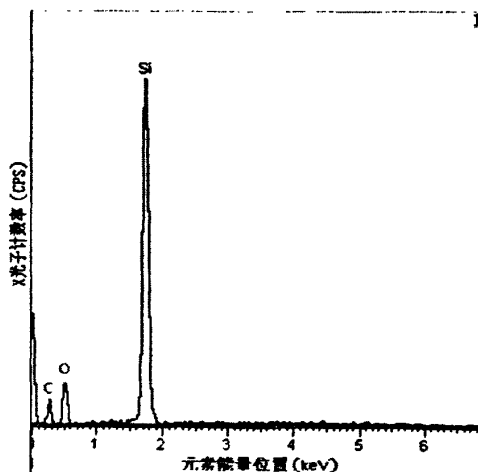


图 5-5 中点 1 能谱图

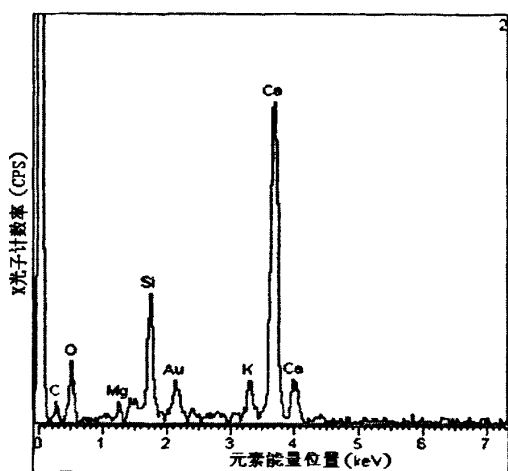


图 5-4 中点 2 能谱图

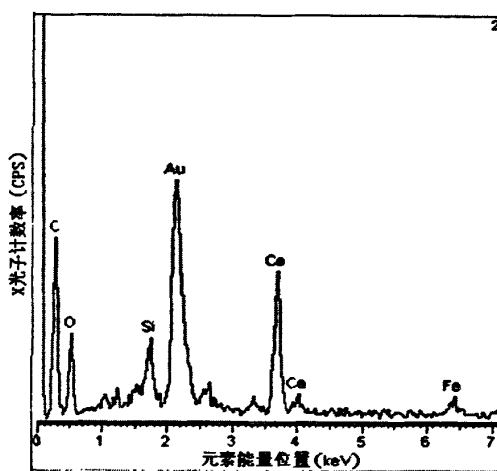


图 5-5 中点 2 能谱图

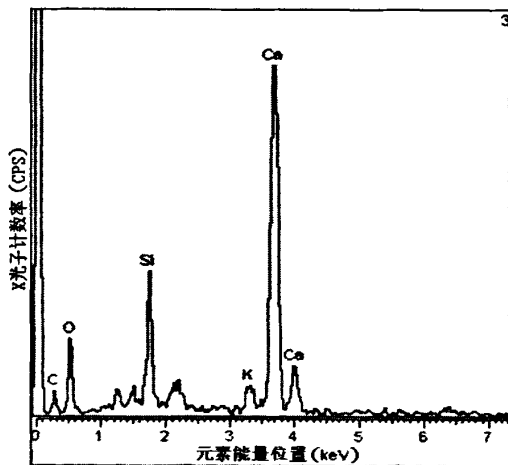


图5-4中点3能谱图

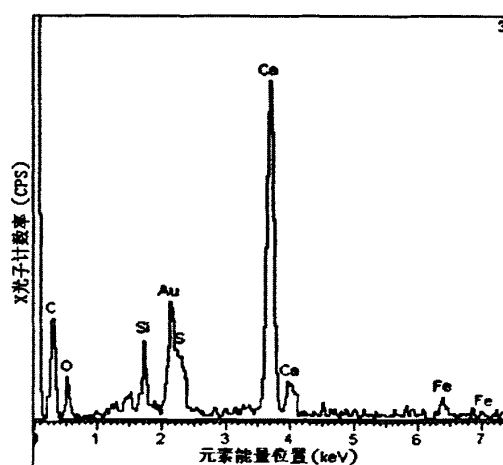


图5-5中点3能谱图

从图5-4中可以看出，未掺加聚合物乳液的混凝土，骨料与基体材料间存在明显的缝隙，说明其界面结合不良，界面过渡区水泥水化产物主要呈针状和絮状，存在着

较大的孔洞。能谱分析结果显示位置2、位置3中主要含有Ca、Si、O等元素。

从图5-5中可以看出掺加聚合物乳液后，混凝土中的骨料已经被水泥的水化产物包裹，过渡区结构紧密，明显改变了骨料与基体材料界面的微观结构。能谱分析结果显示，图5-5中位置2和位置3处均含有C、O元素，说明基体材料中分布有聚合物，且位置2处的C、O元素含量高于位置3处的含量，可知该位置形成了聚合物富集层。位置2处于过渡区，说明聚合物乳液的加入，可以充填组分之间的孔隙，降低孔隙率，改善过渡区晶体结构疏松的缺点，由此增加了水泥混凝土的密实度，提高了水泥混凝土的强度性能，这将使水泥混凝土的耐久性得到提高。

### 5.3 聚丙烯纤维/水泥复合材料的耐水性研究

材料的耐水性是指材料长期在饱和水的作用下不破坏，强度也不显著降低的性质。衡量材料耐水性的指标是材料的软化系数，软化系数反映了材料饱水后强度降低的程度，是材料吸水后性质发生变化的重要特征之一。一般材料吸水后，水分会分散在材料内微粒的表面，削弱其内部结合力，强度则有不同程度的降低。当材料内含有可溶性物质时（如石膏、石灰等），吸入的水还可能溶解部分物质，造成强度的严重降低<sup>[79]</sup>。

材料耐水性限制了材料的使用环境，软化系数小的材料耐水性差，其使用环境尤其受到限制。软化系数的波动范围在0至1之间。工程中通常将 $K_p > 0.85$ 的材料称为耐水性材料，可以用于水中或潮湿环境中的重要工程。用于一般受潮较轻或次要的工程部位时，材料软化系数也不得小于0.75。

研究聚合物乳液与聚丙烯纤维交互作用对水泥砂浆吸水率和软化系数的影响，聚合物乳液掺量取正交试验所得的最佳掺量，试验配比按表5-7中所列，试验结果见表5-8所示，其中聚丙烯纤维、聚合物乳液和减水剂掺量都是取水泥质量比。

表 5-7 聚丙烯纤维水泥砂浆耐水性试验配比

编号	C:S:W	聚丙烯纤维(%)	聚合物乳液(%)	减水剂(%)
S0	1:2.5:0.44	0	0	1.0
S1	1:2.5:0.44	0.4	0	1.0
S2	1:2.5:0.44	0.7	0	1.0
S3	1:2.5:0.44	1.0	0	1.0
S4	1:2.5:0.44	0	4	1.0
S5	1:2.5:0.44	0.4	4	1.0
S6	1:2.5:0.44	0.7	4	1.0
S7	1:2.5:0.44	1.0	4	1.0

表 5-8 聚丙烯纤维增强水泥砂浆吸水率及软化系数试验结果

编号	试样重量		吸水率 (%)	对比 (%)	抗压强度		软化系 数	对比 (%)
	饱水重 量(g)	绝干重 量(g)			饱水强 度(MPa)	绝干强 度(MPa)		
S0	572.2	547.9	4.43	100	23.13	29.77	0.77	100
S1	570.6	546.2	4.47	100.9	25.44	31.41	0.71	92.2
S2	568.1	543.4	4.54	102.5	34.00	37.78	0.70	90.9
S3	563.8	539.0	4.60	103.8	37.06	41.18	0.69	89.6
S4	581.4	556.8	4.42	99.8	24.87	33.16	0.79	102.6
S5	579.7	555.4	4.38	98.9	29.76	35.43	0.84	109.1
S6	577.6	553.6	4.33	97.7	30.28	33.64	0.90	116.9
S7	575.8	552.9	4.15	93.7	32.05	36.84	0.87	113.0

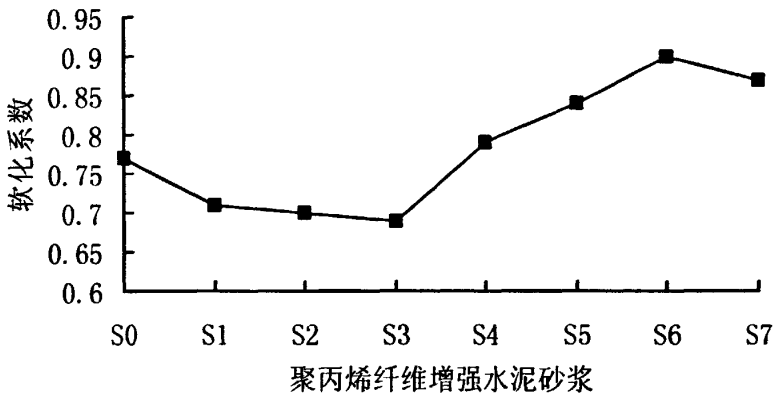


图 5-6 聚丙烯纤维增强水泥砂浆软化系数直观图

从表5-8中可以看出，不掺加聚合物乳液时，随聚丙烯纤维掺量增加，吸水率有不同程度的提高，如S1、S2和S3的吸水率分别比基准试样S0提高了0.9%、2.5%和3.8%；而只掺加聚合物乳液不含纤维的试样S4吸水率比S0降低了1.33%，既掺加聚丙烯纤维又掺加聚合物乳液的试样S5、S6和S7的吸水率分别比基准试样S0降低了1.1%、2.3%和6.3%；图5-6是聚丙烯纤维增强水泥砂浆软化系数直观图，从图中可以看出，不掺加聚合物乳液时，随聚丙烯纤维掺量增加，软化系数都有不同程度的降低，如S1、S2和S3的软化系数分别比基准试样S0降低了7.8%、9.1%和10.4%；而只掺加聚合物乳液的S4比S0提高了2.6%，既掺加聚丙烯纤维又掺加聚合物乳液的试样S5、S6和S7分别比基准试样S0提高了9.1%、16.9%和13.0%。所以同时掺加聚丙烯纤维和聚合物乳液能有效的降低水泥砂浆的吸水率，提高软化系数，对水泥砂浆的耐水性有一定的改善作用，而且软化系数越大，说明材料的抗渗性越好。

水泥在硬化过程中表面水分的蒸发，会使表面裂纹更多。裂纹的存在为水分子进入浆体内部创造了条件，造成耐水性降低。纤维能有效降低结构体内部裂纹的数量和尺度，提高材料的连续性和致密性，改善了水泥的抗渗能力，进而提高耐水性。

工程实际中，材料是亲水性或憎水性，通常以润湿角的大小划分，润湿角为在材料、水和空气的交点处，沿水滴表面的切线与水和固体接触面所成的夹角。其中润湿角  $\theta$  愈小，表明材料愈易被水润湿。当材料的润湿角  $\theta < 90^\circ$  时，为亲水性材料；当材料的润湿角  $\theta > 90^\circ$  时，为憎水性材料。水在亲水性材料表面可以铺展开，且能通过毛细管作用自动将水吸入材料内部；水在憎水性材料表面不仅不能铺展开，而且水分不能渗入材料的毛细管中，见图5-7。

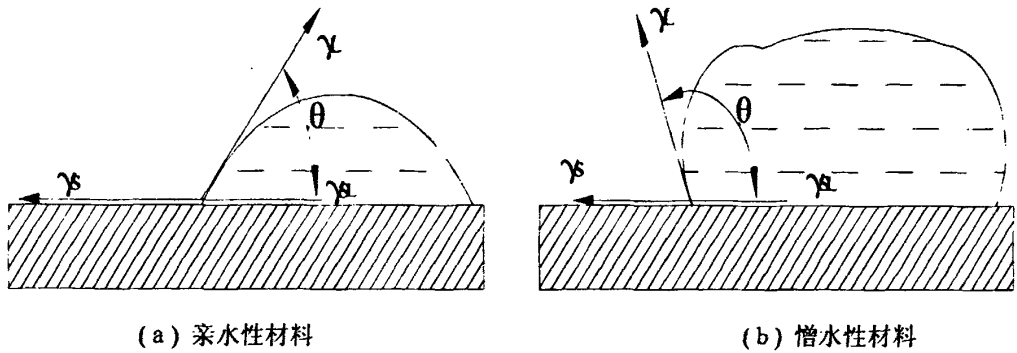


图 5-7 材料润湿示意图

在聚丙烯纤维与水泥基体之间的界面结合良好的情况下，因为聚丙烯纤维为憎水性材料，润湿角  $\theta > 90^\circ$ ，水在憎水性材料表面不仅不能铺展开，而且水分不能渗入水泥基材料的毛细管中，所以加入聚丙烯纤维可以提高水泥砂浆的软化系数，改善水泥基材料的耐水性。

为了进一步探明聚丙烯纤维与水泥基体之间的界面结合状况，利用扫描电镜来分析掺加聚合物乳液对Y型聚丙烯纤维在水泥基体中的界面结合情况的影响。不掺加聚合物乳液的聚丙烯纤维增强水泥砂浆断裂后，拔出的纤维表面光滑，如图5-8所示，聚丙烯纤维与基体之间的结合区结构比较疏松，纤维表面没有明显的附着水泥水化物，造成此现象的原因是水泥水化产物与纤维表面的结合力不强，没有形成牢固的化学键结合；掺加聚合物乳液的聚丙烯纤维增强水泥砂浆断裂后，如图5-9所示，纤维表面有明显的附着物，纤维与基体之间结合比较紧密，这是因为聚合物乳液能明显的改善界面区结合情况，形成结构致密的过渡区，因此能明显地提高砂浆综合性能。

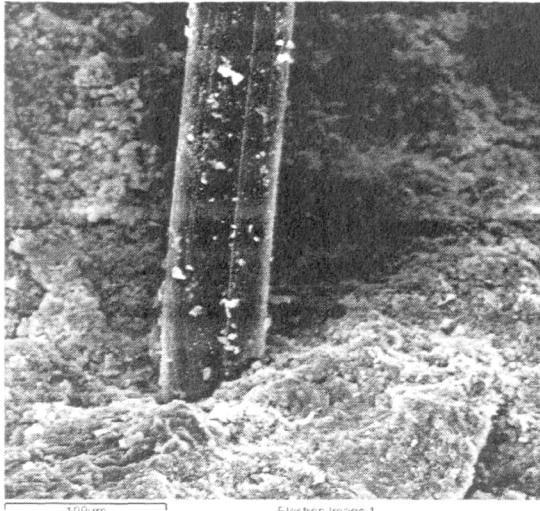


图 5-8 聚丙烯纤维增强水泥砂浆

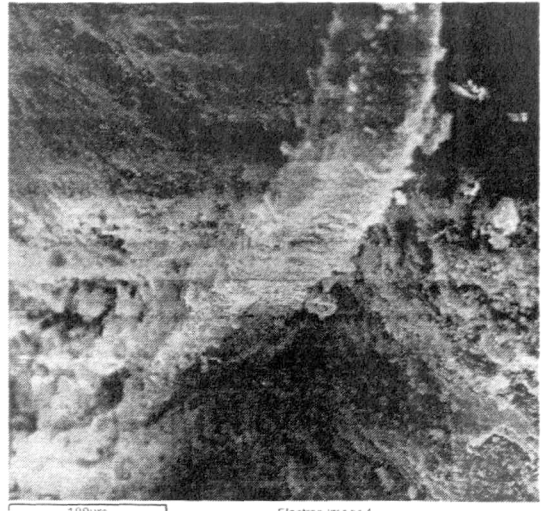


图 5-9 聚丙烯纤维增强聚合物水泥砂浆

#### 5.4 聚丙烯纤维聚合物砂浆收缩变形性能研究

水泥砂浆的收缩是指由于砂浆中所含水分的变化、化学反应及温度变化等因素引起的体积缩小。按照作用机理可分为浇注初期(终凝前)的塑性收缩、硬化砂浆的干燥收缩、自收缩、温度变化引起的收缩变形及碳化收缩变形等五种,本文重点研究水泥砂浆在硬化后由于内部水分向外部环境迁移而引起的干燥收缩。干燥收缩是由于砂浆毛细孔内部的水分向环境蒸发引起的,毛细孔的孔径越小,维持自由水的力越大,则失水率越小,干燥收缩也就越小。

本文参照《公路工程水泥混凝土试验规程》JTJ053-93测试聚丙烯纤维对水泥砂浆自然干燥收缩变形性能的影响。按照表5-7中所列配比进行试验,水泥砂浆试样自然干燥收缩率按式(2.7)进行计算,结果见表5-9,干缩变形随龄期增长的变化趋势见图5-10所示。

表 5-9 聚丙烯纤维聚合物砂浆的干缩率(%)

龄期 试样	0	3d	7d	14d	28d	45d	60d	90d	120d
S0	0	0.003	0.016	0.033	0.046	0.060	0.078	0.085	0.097
S1	0	0.0028	0.012	0.026	0.031	0.051	0.075	0.074	0.083
S2	0	0.0015	0.009	0.017	0.026	0.047	0.061	0.062	0.074
S3	0	0.0018	0.013	0.022	0.033	0.049	0.064	0.074	0.081
S4	0	0.0025	0.010	0.021	0.026	0.052	0.048	0.047	0.054
S5	0	0.0014	0.008	0.016	0.021	0.036	0.035	0.032	0.049
S6	0	0.0007	0.005	0.011	0.014	0.021	0.021	0.022	0.034
S7	0	0.0004	0.003	0.009	0.007	0.015	0.014	0.013	0.013

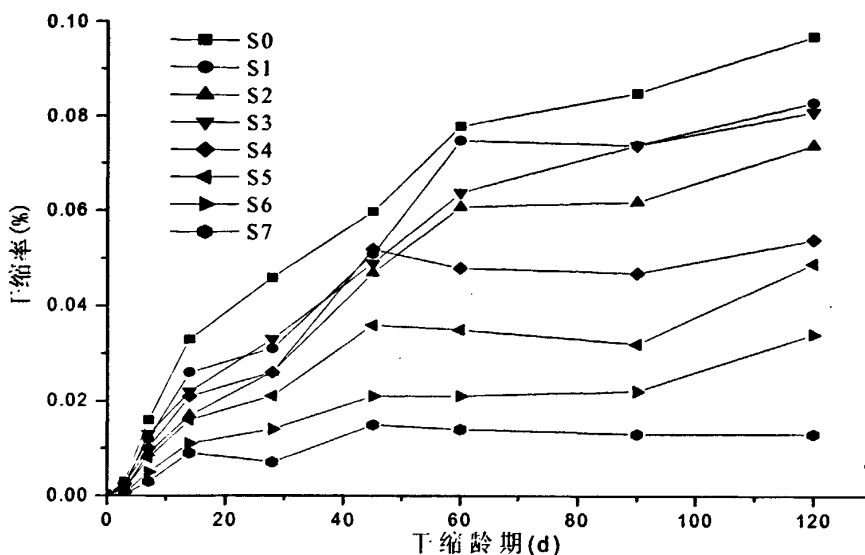


图 5-10 聚丙烯纤维聚合物砂浆随龄期的干缩变形趋势

从试验结果中可见，在水泥砂浆中掺加Y型聚丙烯纤维能够降低其干缩率，随着纤维掺量的增大，水泥砂浆的干缩率呈先减小而后增大的趋势。在纤维掺量为0.7%时，水泥砂浆的干缩率最低，120d时比素砂浆降低23.71%；复掺Y型聚丙烯纤维和聚合物乳液能够显著降低砂浆的干缩率，掺加1%的Y型聚丙烯纤维和4%的聚合物乳液时，水泥砂浆120d的干缩率比素砂浆降低86.60%。

在水化初期，因水份蒸发，空隙减少，颗粒之间距离缩短而产生体积收缩，基体材料发生一系列物理化学反应，生成的结晶和凝胶态物质从填充在颗粒之间，使水泥砂浆的收缩率慢慢增大。从砂浆发生收缩变形的机理来解释聚丙烯纤维和聚合物乳液对砂浆收缩变形的抑制作用，当砂浆干燥时，由于毛细孔负压增加致使固相产生弹性压缩变形而发生收缩。砂浆干燥收缩值的大小主要取决于水泥石所含毛细孔的多少，由于聚丙烯纤维均匀分布在砂浆中，纤维弹性变形大，对毛细孔压力有抵消作用，掺入纤维后，由于表层材料中存在聚丙烯纤维，使砂浆的失水面积减小，水分迁移也困难，另外聚合物乳液在水泥硬化过程中的填充作用，堵塞了部分毛细孔和外界连接的通道，也造成了水分内外迁移的困难。

## 5.5 本章小结

(1) 根据正交试验获得的聚丙烯纤维聚合物砂浆的最佳配比是：聚合物乳液4%，减水剂1.0%，聚丙烯纤维1.0%，水泥100%，砂子250%，水灰比0.44，采用此配比时，聚丙烯纤维聚合物砂浆3d抗折强度比基准试样提高了46.17%，28d抗折强度提高了17.95%。



(2) 根据正交试验获得的聚丙烯纤维聚合物混凝土的最佳配比是：聚丙烯纤维0.6%，减水剂0.5%，聚合物乳液6%，水泥100%，砂子192%，碎石352%，水灰比为0.48，此时可使聚丙烯纤维聚合物混凝土28天抗压强度比基准混凝土提高了15.58%。

(3) 同时掺加聚丙烯纤维和聚合物乳液能有效的降低水泥砂浆的吸水率，提高软化系数，对水泥砂浆的耐水性有一定的改善作用，而且软化系数越大，说明材料的抗渗性越好，与基准水泥砂浆相比，掺加1.0%聚丙烯纤维、4%聚合物乳液的水泥砂浆吸水率降低了6.3%，软化系数提高了13.0%。

(4) 在水泥砂浆中掺加Y型聚丙烯纤维能够降低其干缩率，随着纤维掺量的增大，水泥砂浆的干缩率呈先减小而后增大的趋势。在纤维掺量为0.7%时，水泥砂浆的干缩率最低，120d时比素砂浆降低23.71%；复掺Y型聚丙烯纤维和聚合物乳液能够显著降低砂浆的干缩率，掺加1.0%的Y型聚丙烯纤维和4%的聚合物乳液时，水泥砂浆120d的干缩率比素砂浆降低86.60%。

## 第六章 聚丙烯纤维阻裂机理分析及固结模型的提出

### 6.1 聚丙烯纤维阻裂机理分析

从材料本质上看,以聚丙烯等合成材料制造的聚丙烯纤维是具有一定弹性的柔性物质,其具有较大的横向以及纵向的变形特征。聚丙烯纤维的这一特点,使得以往采用刚体假设描述或分析纤维混凝土抗裂机制的理论方法存在不足。因此,在以下的讨论中,我们假定聚丙烯纤维是弹性体,并且这种纤维由于受压产生的变形以及由于变形所储存的弹性力均不可忽略,在此情况下可以假设聚丙烯纤维增强水泥为理想线弹性材料。

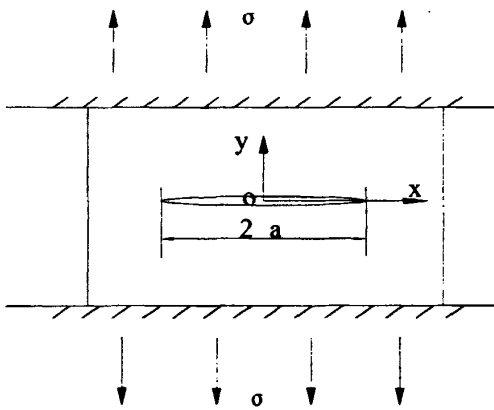


图 6-1 带裂纹的板状试样(不加纤维)

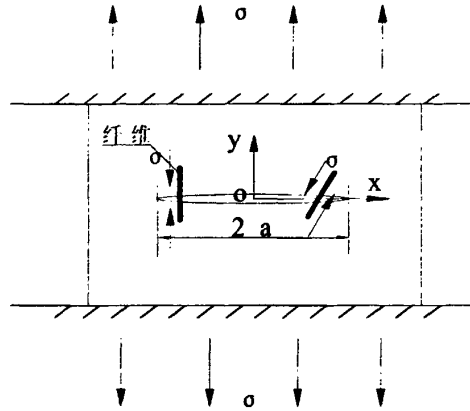


图 6-2 带裂纹的板状试样(加纤维)

以聚丙烯纤维聚合物混凝土为例,设有一相当大的混凝土板状试样,单位厚度( $B=1$ )上下两端加均布载荷 $\sigma$ 形成拉应力状态。根据Griffith裂口理论,此时板中储存的初始弹性应变能 $U_0$ 为:

$$U_0 = \frac{1}{2} \sigma \epsilon V = \frac{1}{2} \sigma \frac{\sigma}{E} V = \frac{\sigma^2}{2E} V \quad \text{式(6.1)}$$

其中 $\frac{1}{2} \sigma \epsilon$ 为弹性应变能密度,表示单位体积物体中储存的弹性应变能,在此条件下,应力应变满足虎克定律 $\epsilon = \frac{\sigma}{E}$ ;  $V$ 为板的体积,  $E$ 为材料的弹性模量。

假设在板上出现一个垂直于拉伸方向深度为 $C$ 的裂纹,长度为 $2a$ ,如图6-1所示(若为边缘裂纹时,长度为 $a$ ),当 $a$ 远小于受力板的面内尺寸时,可将平板视为无限大板。

当平板出现裂纹后, 裂纹上下表面不再有应力, 所以靠近裂纹表面的应力、应变被松弛, 系统将释放出部分能量:

$$U_1 = -\frac{\pi\sigma^2 a^2 c}{E} \quad \text{式(6.2)}$$

则出现长度为 $2a$ 的裂纹后板增加的表面能为:

$$U_2 = 4ac\gamma, \quad c \leq 1 \quad \text{式(6.3)}$$

因此在形成裂纹后平面应力条件下系统总能量 $U$ 为:

$$U = U_0 + U_1 + U_2 = \frac{\sigma^2}{2E} V - \frac{\pi\sigma^2 a^2 c}{E} + 4ac\gamma \quad \text{式(6.4)}$$

式(6.4)中 $E$ ,  $\pi$ ,  $V$ ,  $\gamma$ 均为常数, 所以系统内能是外加应力与裂纹长度以及厚度的函数, 将上式对裂纹长度 $a$ 进行一次偏微分并使其为0, 得:

$$\frac{\partial U}{\partial a} = -\frac{2\pi\sigma^2 ac}{E} + 4c\gamma = 0 \quad \text{式(6.5)}$$

则裂纹长度有一临界值 $a_c$ , 且

$$a_c = \frac{2E\gamma}{\pi\sigma^2} \quad \text{式(6.6)}$$

其二次偏微分为 $\frac{\partial^2 U}{\partial a^2} = -\frac{2\pi\sigma^2 c}{E} < 0$ 。所以当 $a_c = \frac{2E\gamma}{\pi\sigma^2}$ 时, 系统内能有极大值。该

式说明, 当裂纹长度 $a < a_c$ 时,  $a$ 的增加会引起系统内能的增加, 若外界无能量补充, 则裂纹不会扩展; 若 $a > a_c$ , 裂纹长度的增加会引起系统内能的下降, 所以裂纹的扩展是自发趋势, 裂纹将失稳扩展。

由式(6.5)可以求出, 当裂纹长度一定时, 应力 $\sigma$ 的临界值 $\sigma_c$ , 即

$$\sigma_c = \left( \frac{2E\gamma}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{式(6.7)}$$

该式表明, 对应着物体内部一定长度的裂纹 $a$ , 存在着一个临界应力 $\sigma_c$ , 当外加应力 $\sigma > \sigma_c$ 时, 裂纹便会失稳扩展。

纤维加入后, 使得基体与纤维组成的复合材料的弹性模量 $E$ 发生了改变, 此时该复合材料的弹性模量为

$$E_f = E_m [1 + V_f (CF \cdot n - 1)] \quad \text{式(6.8)}$$

$E_m$ 为基体弹性模量,  $V_f$ 为纤维的体积分数,  $n$ 为纤维弹性模量与基体弹性模量的比值。根据复合材料理论可知, 当纤维在基体中呈一维、二维、三维分布时,  $CF$ 分别为 $1$ 、 $\frac{3}{8}$ 、 $\frac{1}{5}$ 。由于纤维(聚丙烯纤维)的掺量很小, 约占水泥质量的 $0\% \sim 1.0\%$ ,

所以相对于不加纤维前水泥基体的弹性模量减少的很少,当裂纹在扩展过程中遇到与之不平行的纤维时,如图6-2所示。

裂纹要穿过纤维继续扩展则需要消耗一部分能量 $\Delta U$ ,这部分能量的消耗来自于纤维的拉断或者裂缝偏转纤维拔出或者纤维变形。当外加应力 $\sigma$ 足够大,即

$\sigma \gg \left( \frac{2E_f \gamma}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}}$ 时,如果纤维与基体的结合力强,裂纹的扩展会使纤维断裂,见图6-3-a,

纤维的断裂需要消耗较大的能量,这是纤维增强的理想状态;如果纤维与基体的结合力不够强,裂纹的扩展会使纤维从基体中拔出,消耗一部分能量后形成新的表面,见图6-3-b,这种情况纤维诱导裂纹沿纤维方向扩展,使扩展能消耗殆尽,这是纤维对裂纹的偏转作用;当外加应力 $\sigma$ 不足以使纤维断裂或拔出时,纤维在应力的作用下发生弹性变形,见图6-3-c,会产生一个对抗 $\sigma$ 的反作用应力 $\sigma'$ ,在这个过程中纤维产生的弹性变形能由外加应力 $\sigma$ 提供,当外加应力 $\sigma$ 不能够继续提供时,裂纹的扩展就会到此为止。以上三种情况纤维都起到了阻裂的作用。

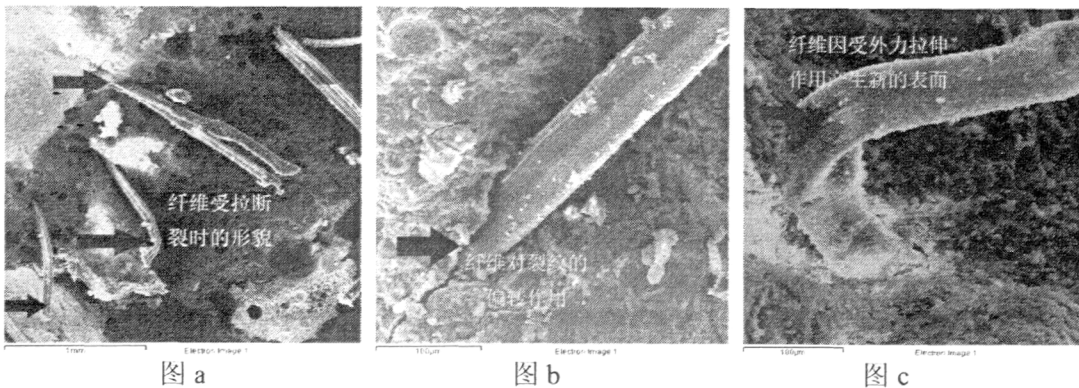


图 6-3 纤维阻裂形式

## 6.2 聚丙烯纤维聚合物砂浆混凝土的固结模型

根据中心质假说,聚丙烯纤维增强水泥基复合材料的最终结构模型可概括为以下五点<sup>[83-86]</sup>:

(1) 各级中心质(分散相)以最佳状态(均布、网络、紧密)分散在各级介质(连续相)之中。在中心质与介质的界面两侧,存在着过渡性的界面区(过渡带),是渐变的非均质的过渡结构。排列次序为中心质—界面区—介质。

(2) 网络化是中心质的特征,各层次的中心质网络结构构成水泥基复合材料的强化的网络骨架是高强、高性能的必要条件。

(3) 界面区保证着中心质与介质的连续性,因此界面区的优劣决定水泥基复合材

料的强度、韧性、耐久性、整体性、均匀性的优劣，强化界面是高强、高性能水泥基复合材料的又一必要条件。界面区非不应是水泥基复合材料中的薄弱部分，还应有利于网络结构的形成和中心质效应的发挥，将中心质某些性能传给介质。所以，界面区的组成结构以及界面区的中心质效应是研究高强、高性能水泥基复合材料的重点。

(4) 各种尺寸的孔隙也是一种分散相，分布在各级介质之中，因此也是中心质。尺寸较大的孔对强度等性能不利，也不参与构成网络。为了区别于大中心质，称之为大中心质P。它在水泥基复合材料中起着补给水分与提供水化物空间等有利作用。

(5) 综上所述，高强、高性能水泥基复合材料是由三个层次的网络化的优质中心质与能够发挥有利作用的界面区和优质的介质所构成，但大中心质P的尺度与含量应加以限制。

上述结构模型是以水泥基材料性能得到充分发挥时为准，因此称为最终结构模型。

按照中心质假说理论，可以提出聚丙烯纤维增强聚合物水泥砂浆、混凝土材料的理想组成固结模型。聚合物纤维水泥混凝土的固结过程是一个非常复杂的物理化学过程<sup>[87]</sup>，既有水泥的水化反应、聚合物与聚丙烯纤维、集料之间的物理吸附、粘结作用，又包含有聚合物、水泥、减水剂之间的相互反应和作用的过程。大体可分为以下两个阶段。

第一阶段：将聚合物乳液与水泥砂浆一起搅拌时，聚合物均匀分散于水泥浆体中。随着水泥颗粒的水化，部分乳液失去水分堆积在一起，形成聚合物膜。随着水泥水化的进一步进行，聚合物膜也越来越多，最终聚合物在水泥混凝土中形成部分连续的网状结构，包裹住水泥颗粒，示意图如图6-4所示。加入的减水剂则吸附在水泥颗粒表面，由于表面活性剂的定性吸附，水泥颗粒固-液界面自由能降低，提高了水泥浆体的分散性。而骨料、聚丙烯纤维不参与反应，与周围分布的水泥浆体和聚合物乳液通过物理吸附和粘结作用结合在一起。

第二阶段：在纤维混凝土中加入聚合物乳液后，水分不容易散失，浆体具有更好的和易性，水泥水化具有更充分的水分，而且形成的聚合物膜能把水泥石中的 $C_2S$ ， $C_3S$ 等有效活化成分分散成许多份，将其包裹在聚合物交联网络内，只能在聚合物膜内继续完成固化，形成水泥石。由于聚合物膜内水泥水化颗粒较小，聚合物乳液存在能够使其继续水化的水分得到保证，因此其水化程度较高。在此过程中生成大量水化硅酸钙C-S-H，其凝胶尺寸较小，结晶度较低，穿插在结晶度高的氢氧化钙C-H和钙

矾石C-A-S-H之中，并与聚合物乳液紧密结合起来。而普通混凝土在水化时水分容易散失，形成孔洞，而且其中 $C_2S$ ， $C_3S$ 等有效活化成分颗粒较大，在外层水化后，里面的活性成分由于缺水而不能继续水化，水泥的水化程度往往不够完全。随着水泥水化及其它化学反应的不断进行，水泥水化物、骨料、聚丙烯纤维、聚合物乳液形成的聚合物膜交织在一起，形成了一个整体。加入的聚合物乳液充填在各组分之间的孔隙中，由此降低了孔隙率，提高了水泥混凝土的密实度，则其耐久性也得到了提高。

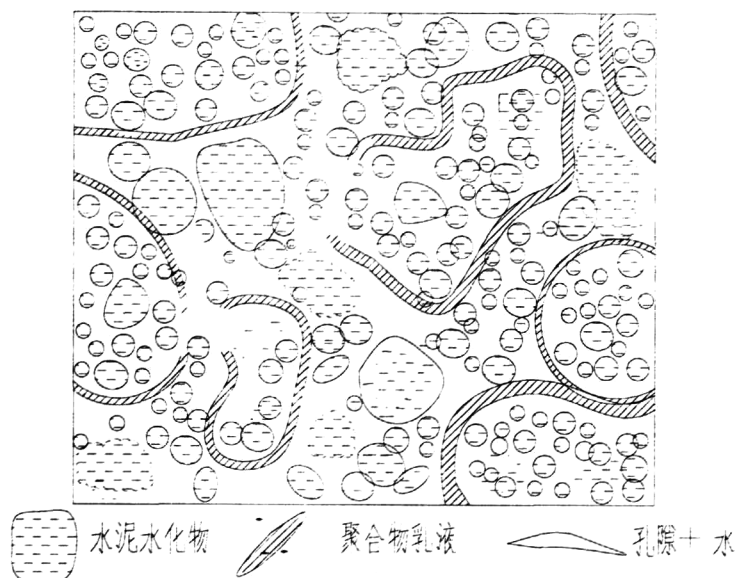


图6-4 聚合物乳液对纤维水泥混凝土的固结模型

混凝土的一级界面是指粗集料与硬化水泥浆体之间的界面，除去一级界面外，硬化水泥浆体中还存在着许多种颗粒与水化产物及纤维与水化产物之间的界面，如细集料与水泥水化产物间、纤维与水泥水化产物间的界面等，这些界面统称为二级界面<sup>[88]</sup>。

二级界面的粘结好坏直接影响到水泥基复合材料的耐久性。由图6-5可见，未掺聚合物乳液的混凝土，在界面区水灰比局部较高， $Ca(OH)_2$ 晶体和钙矾石晶体密集，两者形成的晶体都较大，又因为 $Ca(OH)_2$ 晶体具有取向性，致使该区域结构疏松，孔隙较多，结构不均匀，因此砂粒与硬化浆体间以及聚丙烯纤维与硬化浆体间的界面粘结不良，如图6-5中放大区域所示。另外，普通混凝土在水化时水分容易散失，形成孔洞，而且其中 $C_2S$ ， $C_3S$ 等有效活化成分颗粒较大，在外层水化后，里面的活性成分由于缺水而不能继续水化，水泥的水化程度往往不够完全。而掺加聚合物乳液后的混凝土，水分分布比较均匀，水泥水化较好，浆体内部微裂纹很少，形成的二级界面显微结构较均匀、较致密，几乎观察不到取向性很好的 $Ca(OH)_2$ 晶体，孔隙较少，如图6-6所示。由此说明聚合物乳液的加入，可以充填组分之间的孔隙，降低孔隙率，

改善二级界面区晶体结构疏松的缺点，增加了水泥混凝土的密实度，这将使水泥混凝土的耐久性得到提高。

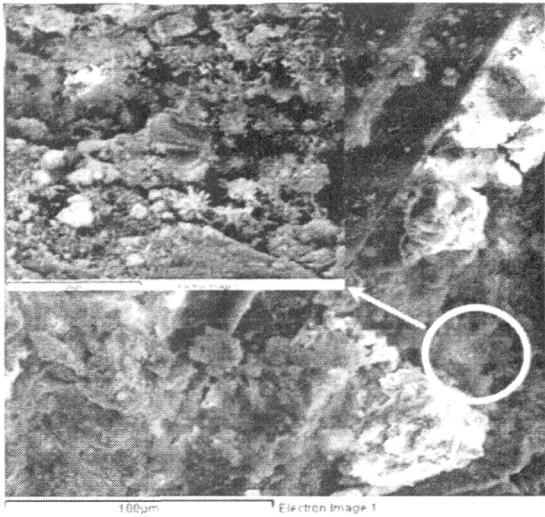


图6-5 未掺加聚合物乳液的混凝土界面区

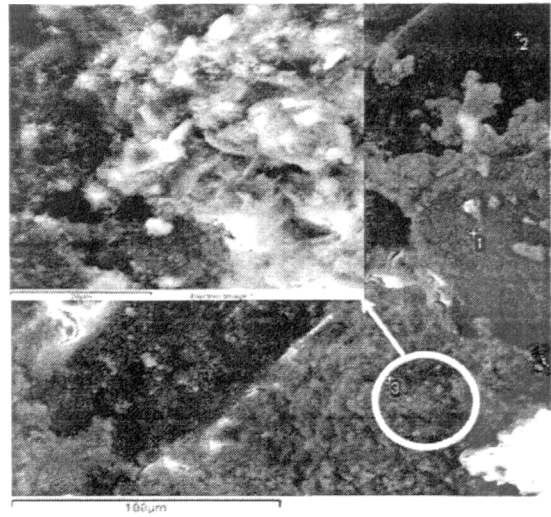


图6-6 掺加聚合物乳液的混凝土界面区

对掺加聚合物乳液的试样图6-6中的特殊点进行能谱分析，如图6-6-a、6-6-b、6-6-c所示。从图6-6-a可以看出点1处为细骨料，因掺加了聚合物乳液，在能谱图中不只可以观察到Si、Ca等细骨料主要成分，还可以看出该处含有C、O元素，说明细骨料在一定程度上被聚合物乳液包裹，这必然增大了细骨料与水泥浆体之间的粘结作用；图6-6中点2处为水泥基体剥落后，裸露的聚丙烯纤维，因为所用扫描电镜为Li靶，所以低于Li的H元素观察不到，此处能谱分析显示了聚丙烯纤维的主要成分—C，而且在聚丙烯纤维表面，也能测得C、O元素的存在，说明纤维表面也包裹有聚合物乳液；图6-6中点3在二级界面处，此处能谱分析显示含有大量的C、O元素，说明基体材料中分布有聚合物，且位置3处的C、O元素含量高于位置1、2处的含量，可知该位置形成了聚合物富集层。

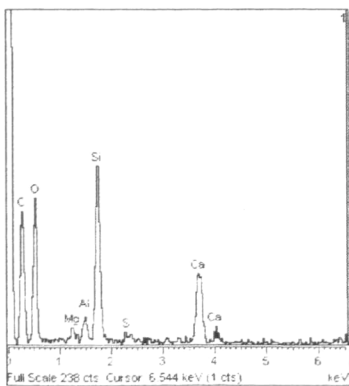


图 6-6-a 点 1 能谱图

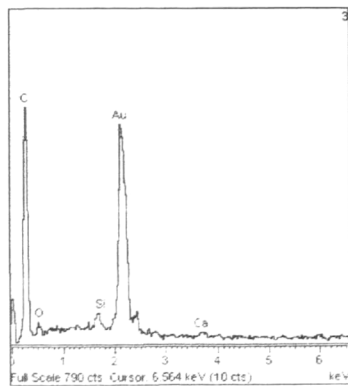


图 6-6-b 点 2 能谱图

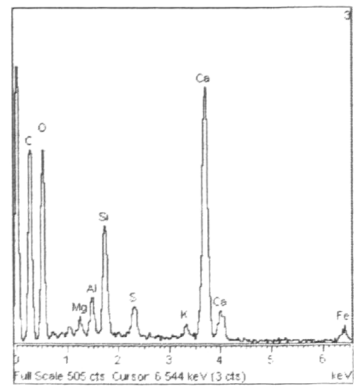


图 6-6-c 点 3 能谱图

扫描电镜分析及能谱分析均说明聚合物乳液能改善水泥混凝土的二级界面粘结

效果，提高水泥混凝土的密实度，从而提高混凝土的耐久性。

### 6.3 本章小结

(1) 假设聚丙烯纤维增强水泥为理想线弹性材料，提出了纤维起阻裂作用的三种情况：如果纤维与基体的结合力强，裂纹的扩展会使纤维断裂，纤维的断裂需要消耗较大的能量，这是纤维增强的理想状态；如果纤维与基体的结合力不够强，裂纹的扩展会使纤维从基体中拔出，消耗一部分能量后形成新的表面，这种情况纤维诱导裂纹沿纤维方向扩展，使扩展能消耗殆尽，这是纤维对裂纹的偏转作用；当外加应力不足以使纤维断裂或拔出时，纤维在应力的作用下发生弹性变形，当外加应力不能够继续提供弹性变形能时，裂纹的扩展就会到此为止。

(2) 按照中心质假说理论，提出聚丙烯纤维增强聚合物水泥砂浆混凝土材料的理想组成固结模型，聚合物乳液与水泥砂浆一起搅拌时，随着水泥颗粒的水化，部分乳液失去水分堆积在一起，形成聚合物膜，最终在水泥混凝土中形成部分连续的网状结构，随着水泥水化及其它化学反应的不断进行，水泥水化物、骨料、聚丙烯纤维、聚合物乳液形成的聚合物膜交织在一起，形成了一个整体。加入的聚合物乳液充填在各组分之间的孔隙中，由此降低了孔隙率，提高了水泥混凝土的密实度，则其耐久性也得到了提高。



## 第七章 结论与创新点

### 7.1 结论

本文通过在水泥砂浆、混凝土中加入Y型聚丙烯纤维、聚合物乳液,使水泥砂浆、混凝土的许多性能得到很大程度的提高。通过大量的实验,得出如下结论:

(1) 本实验条件下,水灰比为0.44时力学性能较好,3天抗压强度达到30.02MPa,抗折强度达到4.55MPa,28天抗压强度达到44.67MPa,抗折强度达到7.12MPa;将Y型聚丙烯纤维以先掺法工艺掺入水泥基体中,纤维的分散性较好,能更好的发挥作用,3d抗折强度达到4.56MPa,比后掺法制得的试样提高了14.57%,抗折强度提高了12.68%;聚丙烯纤维增强混凝土与普通混凝土相比,坍落度损失降低了16.92%~31.82%;通过实验分析,混凝土中聚丙烯纤维掺量以取水泥质量的0.2%~0.6%为宜,而砂浆中纤维的掺量以取水泥质量的0.4%~1.2%为宜。

(2) 掺加聚丙烯纤维对控制混凝土塑性裂缝非常有效,掺加0.6%聚丙烯纤维的混凝土比素混凝土开裂率降低了92.3%;掺入0.4%~1.0%的聚丙烯纤维可使水泥砂浆的冲击韧性提高2.5~4.2倍,继续吸收能量的能力 $\Delta W$ 提高了1.4~2.4倍左右;在混凝土中掺加0.2%聚丙烯纤维,10%硅灰时,3d抗压强度比基准试样增加了25.82%,28d抗压强度增加了39.44%;聚丙烯纤维梯度分布比均匀分布对水泥砂浆强度的增强效果好一些;均匀掺加1.0%聚丙烯纤维能使水泥砂浆28天抗折强度提高4.83%,抗压强度降低3.14%,而同等掺量时聚丙烯纤维梯度分布可使抗折强度提高9.66%,抗压强度提高4.50%,且梯度分布时水泥砂浆冲击延性指标比不掺聚丙烯纤维以及均匀掺加等量纤维的水泥砂浆明显增大。

(3) 根据正交试验获得的聚丙烯纤维聚合物砂浆的最佳配比是:聚合物乳液4%,减水剂1.0%,聚丙烯纤维1.0%,水泥100%,砂子250%,水灰比0.44,采用此配比时,聚丙烯纤维聚合物砂浆3d抗折强度比基准试样提高了46.17%,28d抗折强度提高了17.95%;聚丙烯纤维聚合物混凝土的最佳配比是:聚丙烯纤维0.6%,减水剂0.5%,聚合物乳液6%,水泥100%,砂子192%,碎石352%,水灰比为0.48,此时可使聚丙烯纤维聚合物混凝土28天抗压强度比基准混凝土提高了15.58%。与基准水泥砂浆相比,掺加1.0%聚丙烯纤维、4%聚合物乳液的水泥砂浆吸水率降低了6.3%,软化系数提高了13.0%,120d的干缩率降低了86.60%。

(4) 假设聚丙烯纤维增强水泥为理想线弹性材料, 提出了纤维起阻裂作用的三种情况: 如果纤维与基体的结合力强, 裂纹的扩展会使纤维断裂, 纤维的断裂需要消耗较大的能量, 这是纤维增强的理想状态; 如果纤维与基体的结合力不够强, 裂纹的扩展会使纤维从基体中拔出, 消耗一部分能量后形成新的表面, 这种情况纤维诱导裂纹沿纤维方向扩展, 使扩展能消耗殆尽, 这是纤维对裂纹的偏转作用; 当外加应力不足以使纤维断裂或拔出时, 纤维在应力的作用下发生弹性变形, 当外加应力不能够继续提供弹性变形能时, 裂纹的扩展就会到此为止。

(5) 按照中心质假说理论, 提出聚丙烯纤维增强聚合物水泥砂浆混凝土材料的理想组成固结模型, 聚合物乳液与水泥砂浆一起搅拌时, 随着水泥颗粒的水化, 部分乳液失去水分堆积在一起, 形成聚合物膜, 最终在水泥混凝土中形成部分连续的网状结构, 随着水泥水化及其它化学反应的不断进行, 水泥水化物、骨料、聚丙烯纤维、聚合物乳液形成的聚合物膜交织在一起, 形成了一个整体。加入的聚合物乳液充填在各组分之间的孔隙中, 由此降低了孔隙率, 提高了水泥混凝土的密实度, 则其耐久性也得到了提高。

## 7.2 本文创新之处

本文采用 Y 型聚丙烯纤维取代普通圆形截面的聚丙烯纤维作用于水泥砂浆和混凝土, 由水泥砂浆和混凝土存在的实际问题、破坏形式及微观结构出发, 较为系统地研究了 Y 型聚丙烯纤维增强聚合物砂浆和混凝土的基本工艺和性能, 初步研究了 Y 型聚丙烯纤维梯度分布形式对水泥基材料的影响, 结合 Y 型聚丙烯纤维增强聚合物砂浆和混凝土的微观结构, 提出了聚丙烯纤维聚合物砂浆和混凝土的固结模型。

## 7.3 今后工作建议

由前面的研究可以发现, 聚丙烯纤维在水泥基材料中呈乱向分布, 使混凝土抗裂性大大增强, 但对混凝土强度却没有多大的帮助。如果能使纤维在混凝土中按照人们的意愿来分布, 那么对纤维混凝土性能的提高将会有更大的帮助。如: 使纤维的纵向都垂直于抗折强度试验中试样的折断方向, 以及劈裂强度试验中试样的破裂面, 那么混凝土的抗折强度和劈裂强度将会有更大的提高。

## 参考文献

- [1] 龚益, 沈荣焘, 李清海. 杜拉纤维在土建工程中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002
- [2] 李悦. 超高强混凝土的研究进展[J]. 国外建材科技, 2007, 28(1): 15-18
- [3] 赵敏, 高俊刚, 邓奎林, 等. 改性聚丙烯新材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002
- [4] 张洪良, 徐玉秀. 石棉纤维水泥制品工业的发展概况[J]. 山东建材, 1994, (6): 17-19
- [5] 董香军, 王岳华, 高淑玲. 钢纤维和聚丙烯纤维混凝土的试验研究[J]. 混凝土, 2003, (11): 14-17
- [6] 孙伟, 严云. 钢纤维硅灰高强混凝土的力学行为及界面特性[J]. 中国科学, A 辑, 1992, (2): 217-224
- [7] 程庆国, 高路彬, 徐蕴贤, 等. 钢纤维混凝土理论及应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999
- [8] 高丹盈, 刘建秀. 钢纤维混凝土基本理论[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994
- [9] 林小松, 杨国林. 钢纤维高强与超高强混凝土[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [10] 崔玉忠. 玻璃纤维增强水泥的发展现状与前景[J]. 玻璃纤维, 1999, (1): 22-26
- [11] 黄家骏. 玻璃纤维材料在土木工程领域的应用[J]. 平原大学学报, 2002, 19(2): 35-39
- [12] S. Diamond. The GFRC durability problem: Nature, characteristics, and test methods [C]. Proc. PCI Symp. Durability of Glass Fiber Reinforced Concrete, Illinois, USA, Precast/Prestressed Concrete. Inst., Chicago, USA, 1985: 199-209
- [13] 彭红涛, 莫永京, 雷廷武, 等. 玻璃纤维对水泥土抗压和抗拉强度的影响[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(4): 105-108
- [14] 杨淑慧. 植物纤维化学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001
- [15] 田文玉. 植物纤维混凝土的收缩裂缝及耐久性明[J]. 国外建筑科学, 1995, (3): 41-49
- [16] 章希胜. 植物纤维水泥防渗漏面板研制[J]. 中国建筑防水, 1998, (2): 13-14
- [17] 周敏, 谢红波, 李国忠. 玉米秸秆增强氟石膏纸面石膏板的研制[J]. 非金属矿, 2007, (4): 8-10
- [18] 叶颖薇. 竹纤维和椰纤维增强水泥复合材料[J]. 复合材料学报, 1998, (8): 92-98
- [19] 李国忠, 于衍真. 植物纤维增强水泥基复合材料的性能研究[J]. 硅酸盐通报, 1997, (3): 42-45
- [20] 李国忠, 于衍真. 植物纤维增强石膏复合材料的微观结构研究[J]. 复合材料学报, 1997, 14(3): 72-75
- [21] 邓宗才. 高性能合成纤维混凝土北京[M]. 北京: 科学出版社, 2003
- [22] 沈荣焘. 低掺率合成纤维在混凝土中的作用机制的研究[J]. 黑龙江交通科技, 2005, (4): 14-15
- [23] 华渊, 曾艺. 纤维混杂效应的试验研究. 混凝土与水泥制品, 1998, (4): 45-49
- [24] 钱江平, 贡浩平, 孙伟. 纤维混杂与微膨胀复合对混凝土阻裂性能的影响[J]. 东南大学学报, 1996, 26(5): 30-36
- [25] 孙伟, 钱红萍, 陈惠苏. 纤维混杂及其与膨胀剂复合对水泥基材料的物理性能影响[J]. 硅酸

盐学报. 2000, 28(2): 95-99

- [26] 华渊, 姜稚清, 王志宏. 混杂纤维增强水泥基复合材料的疲劳损伤模型[J]. 建筑材料学报, 1998, 1(2): 144-148
- [27] 王成启, 吴科如. 混杂纤维水泥基复合材料及其应用[J]. 工业建筑, 2002, (9): 51-53
- [28] S. Goldfein. Fibrous reinforcement for Portland cement [J]. Modern Plastics, 1965, 42 (8): 156-160
- [29] R.F.Zollo. Collated fibrillated polypropylene fibers in FRC [J]. Fiber reinforced Concrete International Symposium. ACI Special Publication, 1984:397-409
- [30] A.Litvin. Properties of concrete containing polypropylene fibers [J]. Report to Wire Reinforce Institute, 1985, 1: 25-32
- [31] D.A.Fanella, A.E.Naaman. Stress-strain properties of fiber reinforced mortar in compression [J]. ACI Journal, 1985, 82 (4): 475-483
- [32] A.J.Al.Tayyib, M.M.Al.Zahrani, A.Rasheeduzzafar, et al. Effect of polypropylene fiber reinforcement on the properties of fresh and hardened concrete in the Arabian Gulf environment [J]. Cement and Concrete Research, 1988, 18(4): 561-570
- [33] S.Mindess, G.Vondran. Properties of concrete reinforced with fibrillated polypropylene fibers under impact loading [J]. Cement and Concrete Research, 1988, (18): 109-115
- [34] A.M.Alhozaimy, P.Soroushian, F.Mirza. Mechanical properties of polypropylene Fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic [J]. Cement and Concrete Composites, 1996, (18): 85-92
- [35] 汪洋, 杨鼎宜, 周明耀. 聚丙烯纤维混凝土的研究现状与趋势[J]. 混凝土, 2004, (1): 24-27
- [36] 游有鲲, 钱春香, 缪吕文. 掺聚丙烯纤维的高强混凝土高温性能研究[J]. 安全与环境工程, 2004, 11(1): 63-66
- [37] 袁震宇, 吴慧敏, 杨建西. 聚丙烯纤维对砂浆抗裂性能影响的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 1999, (6): 41-42
- [38] 姚武, 马一平, 谈慕华. 聚丙烯纤维水泥基复合材料物理力学性能研究(II)-力学性能[J]. 建筑材料学报, 2000, 3(3): 235-239
- [39] 华渊, 刘荣华, 曾艺. 纤维增韧高性能混凝土的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 1998, (3): 80-83
- [40] 廖宪廷, 何元, 杨序刚. PP 纤维水泥复合材料的界面行为-耐磨性能研究[J]. 建筑材料学报, 1999, 2(4): 324-328
- [41] 王瑞兴, 钱春香, 丁庆领, 等. 聚丙烯纤维对混凝土性能的改善研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2004, (1): 41-43
- [42] 丁黔森. 建筑用聚丙烯短纤维[J]. 化学建材, 2003, (4): 45-46
- [43] 杨锦才, 成美凤. 在改性聚丙烯纤维混凝土上的力学性能[J]. 天津城市建设学院学报, 2004, 10(1): 75-78
- [44] 李顺凯, 蔡安兰, 严生. 改性聚丙烯纤维砂浆和混凝土的性能试验[J]. 南京工业大学学报, 2004, 2(26): 58-61
- [45] 李秋义, 李家和, 袁杰. SFRC 兼有阻裂作用的复合理论[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35(4):

81-83

- [46] 李秋义, 李家和, 杨向宇. SFRC 纤维间距理论存在的问题[J]. 混凝土, 2003, (2): 14-16
- [47] 李秋义, 张东兴, 袁杰. FRP 复合理论与 FRC 复合理论[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35(3): 74-78
- [48] 马一平, 谈慕华, 吴科如, 等. Y 形聚丙烯纤维体积分数、环境温度、湿度对水泥砂浆塑性干缩开裂影响的三元线性回归分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2001, (4): 33-34
- [49] 陈绍华. 聚丙烯混凝土增强纤维网的优良特性和应用[J]. 产业用纺织品, 2003, (2): 17-20
- [50] 肖耀军. 聚丙烯纤维在水泥混凝土中的应用[J]. 广东建材, 2004, (6): 16-18
- [51] 周桂梅, 黄绪泉. 聚丙烯纤维在高性能混凝土中的应用[J]. 铁道建筑, 2004, (7): 85-87
- [52] 建筑科学研究院建筑材料研究室. 混凝土集料与混凝土试验方法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1972
- [53] 周敏, 曹杨, 李国忠. 聚丙烯纤维和硅灰在水泥基材料中的协同效应[J]. 混凝土与水泥制品, 2007, (5): 40-42
- [54] 贾哲, 姜波, 程光旭, 等. 纤维增强水泥基复合材料研究进展[J]. 混凝土, 2007, (8): 65-68
- [55] P P Kraal. A proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete [J]. Concrete Construction, 1985, 30(9): 775-777
- [56] 赵国藩, 彭少民, 黄承速. 钢纤维混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999
- [57] 尹正刚, 王坚. 聚丙烯纤维增强水泥基材料性能技术应用及研究的现状[J]. 建筑材料, 2007, (10): 43-44
- [58] 陈磊, 陈太林. 聚丙烯纤维混凝土力学性能分析[J]. 化学建材, 2004, (5): 57-59
- [59] 董芸, 杨华全. 纤维混凝土抗裂性能研究[J]. 人民长江, 2006.8, 37(8): 89-90
- [60] 杨永宽, 曾树佳. 聚丙烯纤维混凝土的机理及应用[J]. 广东建材, 2006, (8): 60-61
- [61] 王成启, 吴科如. 不同弹性模量的纤维对高强混凝土力学性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2002, (3): 36-37
- [62] 赵军, 高丹盈, 汤寄予. 聚丙烯纤维高强混凝土的力学性能[J]. 混凝土, 2006, (5): 10-12
- [63] 段志华, 付高鹏, 张守元. 聚丙烯纤维混凝土或砂浆的施工及力学性能[J]. 洛阳理工学院学报, 2002.6, 23(2): 94-96
- [64] Tian L, Xu T H, Zhao T J, et al. Study on Toughness of Strain Hardening Cementitious Composites. 中山大学学报(自然科学版), 2007, (46): 181-182
- [65] Rami H. H, Mohammed M, Smadi. Role of fibers in controlling unrestrained expansion and arresting cracking in Portland cement concrete undergoing alkali-silica reaction [J]. Cement and Concrete Research, 2004, (34): 103-108
- [66] I B Topc, M Canbaz. Effect of different fibers on the mechanical properties of concrete containing fly ash [J]. Construction and Building Materials, 2007, (21): 1486 - 1491
- [67] 肖佳, 周士琼, 徐亦冬. 粉煤灰、硅灰对水泥胶砂性能影响的试验研究[J]. 混凝土, 2003, (8): 28-31

- [68] 张联盟, 涂溶, 袁润章. 梯度材料的研究进展与发展新动向[J]. 中国陶瓷工业, 1995, (1): 23-126
- [69] 李进, 田兴华. 功能梯度材料的研究现状及应用[J]. 宁夏工程技术, 2007.3, (6): 80-83
- [70] 贡长生, 张克立. 新型功能材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001
- [71] 杨久俊, 贾晓林, 吴科如, 等. 水泥基梯度复合功能材料物理力学性能的初步研究[J]. 新型建筑材料, 2001, (11): 1-3
- [72] 赵军, 艾兴, 张建华. 功能梯度材料的发展及展望[J]. 材料导报, 1997, (11): 57-60
- [73] 杨久俊, 海然, 吴科如, 等. 组分梯度复合对水泥基材料物理力学性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2002, (12): 803-806
- [74] Yang J J, Hai R, Wu K R, et al. Effect of the component and fiber gradient distributions on the strength of cement-based composite materials [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003, (6): 61-64
- [75] 周敏, 曹杨, 李国忠. Y型聚丙烯纤维\硅灰对混凝土强度性能的影响[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2008.1, 22(1): 18-21
- [76] M. Arandigoyen, J.I. Alvarez. Pore structure and mechanical properties of cement-lime mortars [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37: 767-775
- [77] 申爱琴, 李祝龙, 王小明. 聚合物乳液改性水泥混凝土的微观结构[J]. 混凝土, 2001, (3): 40-42
- [78] 周敏, 许红升, 李国忠, 等. 聚丙烯纤维增强水泥砂浆的性能研究[J]. 化学建材, 2006, 22(2): 31-35
- [79] 刘利, 徐玲玲, 花海东. 外墙外保温聚合物砂浆吸水性能的研究[J]. 新型建筑材料, 2006, (12): 46-48
- [80] 黄昊, 付志军. 正交设计在聚丙烯混凝土配合比中的运用[J]. 广东土木与建筑, 2006.6, (6): 21-23
- [81] 袁勇. 混凝土结构早期裂缝控制[M]. 北京: 科学出版社, 2004
- [82] Zhang W S, Li B X, Wang H X, et al. Analysis of pore structures and their relations with strength of hardened cement paste [J]. Journal of Wuhan University of Technology. 2005, 20(1): 114-117
- [83] 吴中伟. 高性能混凝土(HPC)的发展趋势与问题[J]. 建筑技术, 1998, 29(1): 8-13
- [84] 吴中伟. 高性能混凝土及其矿物细掺料[J]. 建筑技术, 1999, 30(3): 160-163
- [85] 吴中伟. 绿色高性能混凝土与科技创新[J]. 建筑材料学报, 1998.3, 1(1): 1-7
- [86] 吴中伟. 纤维增强—水泥基材料的未来[J]. 混凝土与水泥制品, 1999, (1): 5-6
- [87] 葛兆明. 混凝土外加剂[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004
- [88] 杨全兵, 吴学礼, 黄士元. 去冰盐对混凝土剥蚀的物理机理[J]. 上海建材学院学报, 1991, 4(4): 341-346

## 致 谢

值此论文完成之际,谨向多年来关心和支持我的各位老师及同学致以最崇高的敬意,并向他们表示我最诚挚的谢意。

本文是在导师李国忠教授的悉心指导下完成的,从选题、实验到论文的撰写修正过程中,都倾注了恩师大量的心血和汗水。三年来,恩师不但赐予了我诸多思想上的启迪和工作方法上的教诲,而且在生活上也给予了许许多多的关怀和照顾,在此谨向恩师致以崇高的敬意和诚挚的感谢,恩师严谨的作风、至尚的品格和勇于开拓的科学精神将永远铭刻于心!

在实验和性能测试过程中,我得到了本教研室的曹笃霞老师、李建权老师、陈娟老师、柳华实老师以及实验中心的吴波老师、王英姿老师的热心帮助与大力支持,在此对各位老师表示衷心的感谢!同时,感谢研究生处的老师在学习生活上给与的指导和帮助!本论文的顺利完成还得益于本课题组的曹杨、张寿国及师弟赵帅、于洋、丁海洋,师妹周娜、田颖、柏玉婷的热心帮助,在此对他们表示真诚的感谢!

最后,感谢默默支持和爱护我的亲人,是他们对我无私的厚爱和殷切的期望,支持着我,鼓励着我,感谢他们在我近二十年求学路上给予我的关心、理解和支持和关爱!感谢所有在生活、学习与工作上支持和帮助我的老师和朋友们!

周敏

2008年5月于济南

## 攻读硕士学位期间发表的学术论文和申请的专利

- [1] 周敏, 许红升, 李国忠, 等. 聚丙烯纤维增强水泥砂浆的性能研究[J]. 化学建材, 2006, 22(2): 31-35
- [2] 周敏, 谢红波, 李国忠. 玉米秸秆增强氟石膏纸面石膏板研制[J]. 非金属矿, 2007, 30(4): 8-10 (中文核心)
- [3] 周敏, 曹杨, 李国忠. 聚丙烯纤维和硅灰在水泥基材料中的协同作用[J]. 混凝土与水泥制品, 2007, (5): 40-42 (中文核心)
- [4] 周敏, 李国忠. 外加材料对混凝土孔隙率的影响[J]. 中北大学学报, 2008, (4) (EI 期刊源)
- [5] 周敏, 曹杨, 李国忠. Y 型聚丙烯纤维/硅灰对混凝土强度性能的影响[J]. 济南大学学报 (自然科学版), 2008, (1): 18-21 (中文核心)
- [6] 周敏, 张寿国, 李国忠, 等. 农作物秸秆增强氟石膏复合材料的微观结构研究[J]. 有机氟工业, 2007, (4): 14-16
- [7] Cao Yang, Zhou Min, Li Guozhong, et al. Property Study of Fiberglass/ Gypsum Composites[C]. Proceedings of 2006 Beijing International Environmental Technology Conference, 2006, (9): 182-185 (ISTP 收录)
- [8] 曹杨, 周敏, 李国忠, 等. C-S-H 凝胶产物的 Ca/Si 比对碱-骨料反应的影响[J]. 山东化工, 2007, 36(2): 8-11
- [9] 曹杨, 周敏, 李国忠, 等. 偏高岭土对碱—集料反应的影响[J]. 山西建筑, 2006, 32(7): 166-168
- [10] 周敏, 李国忠. 聚合物乳液对纤维混凝土二级界面的改性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2008 年 1 月投 (审稿中)
- [11] 张锦峰, 谢红波, 周敏, 李国忠. 氟石膏/粉煤灰复合保温墙板研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2005, (6): 47-50
- [12] 许红升, 曹杨, 周敏, 张寿国, 李国忠. 纤维聚合物砂浆/聚苯乙烯复合屋面保温板的研制[J]. 混凝土与水泥制品, 2006, (3): 59-61
- [13] 谢红波, 曹杨, 曹凤霞, 周敏, 李国忠. 脱硫石膏综合利用现状及其抹面材料的研制[J]. 再生资源研究, 2006, (6): 28-31
- [14] 李国忠, 李长春, 于衍真, 曲朝霞, 周敏. 申请“脱硫石膏轻质墙板”国家发明专利. 专利号: 200610070220.7