

Stability Study of Natural Gas Hydrate Reservoir

Pan Keli(Oil & Gas Well Drilling Engineering)

Directed by Professor Zhang Weidong

Abstract

Gas hydrate is a ice-like crystalline compound, formed by water molecules and natural gas molecules under certain temperature and pressure conditions, also called clathrate hydrate or “fire ice”. For the gas forming gas hydrate is mainly methane, it is also called methane hydrate. Natural gas hydrate distributes mainly in the marine continental margin sediments and permafrost environments, and most of found gas hydrate existed in the former. Natural gas hydrate has many merits, such as high energy density, wide distribution, abundant resource, shallow buried and so on. It is recognized the most prospective energy in the 21st century. So the research about exploitation of natural gas hydrate is very important significant.

Based on analyzed thermal physical and mechanics properties of natural gas hydrate and its formation, and discussed mechanical regime of stability of bore well in gas hydrate formation, its influencing factor and stabilization technique in detail with reference to the theory and method of oil and gas well bore stability. The author analyzed the characteristics of dissociation of gas hydrate in porous medium and the intrusion of drilling fluid into gas hydrate formation, and coupled the dynamic equation of gas hydrate dissociation to the multi phase seepage flow equation of oil and gas, and established the seepage flow model of intruding of drilling fluid into gas hydrate formation with gas hydrate dissociation. Then consider the infection of the seepage to the stress of well-week, analysis the stability of gas hydrate formation. At last, we have a primary research about the relationship between gas hydrate and coastal landslide.

Key words: gas hydrate formation, hydrate dissociation, mud permeation, well-bore stability

关于学位论文的独创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在指导教师指导下独立进行研究工作所取得的成果，论文中有关资料和数据是实事求是的。尽我所知，除文中已经加以标注和致谢外，本论文不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含本人或他人为获得中国石油大学（华东）或其它教育机构的学位或学历证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对研究所做的任何贡献均已在论文中作出了明确的说明。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文作者签名：潘克立

日期：2009年5月28日

学位论文使用授权书

本人完全同意中国石油大学（华东）有权使用本学位论文（包括但不限于其印刷版和电子版），使用方式包括但不限于：保留学位论文，按规定向国家有关部门（机构）送交学位论文，以学术交流为目的赠送和交换学位论文，允许学位论文被查阅、借阅和复印，将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，采用影印、缩印或其他复制手段保存学位论文。

保密学位论文在解密后的使用授权同上。

学位论文作者签名：潘克立

日期：2009年5月28日

指导教师签名：张峰

日期：2009年5月28日

第一章 绪论

1.1 课题的来源、目的和意义

随着油气资源的巨大消耗,人类在 21 世纪后期将面临油气资源的枯竭,全球经济发展面临着严峻的挑战。世界各国都把寻求新的替代能源作为能源战略的重要内容,相继投入大量的资金和人力开展新能源的研究。

天然气水合物是近二十年来在海洋的冻土带发现的新型能源。天然气水合物(Natural Gas Hydrates),是由天然气与水分子在一定压力和较低温度下形成的一种固态结晶物质。自然界中存在的天然气水合物中天然气的主要成分为甲烷(>90%),所以又常称为甲烷水合物(Methane Hydrates),主要存在于海深 400~3000 米的海洋沉积物和大陆永久冻土带中。

天然气水合物具有以下特点^[1]:

(1)资源量巨大。初步估算,世界上天然气水合物中甲烷碳的含量超过 10^9 g,是当前已探明的所有化石燃料矿产(煤、石油、天然气)总含碳量的两倍。

(2)分布范围广。全球海洋总面积的 90%具备天然气水合物形成的温度和压力条件,深海钻探计划(DSDP)和大洋钻探计划(ODP)一些站位取到的水合物样品证实了其分布的广泛性。

(3)能量密度高。每立方米的固体水合物,可释放 164 立方米的甲烷气体,其能量密度是普通天然气的 2 到 5 倍。

(4)杂质少,无污染,燃烧后几乎不会产生有害污染物质,是一种新型的清洁能源。

(5)埋藏浅。通常埋藏于水深大于 300~500m 的海底以下 0~1000m 处,矿层厚数十厘米至上百米。

(6)对环境的影响大。海底天然气水合物分解排出大量具有温室效应的甲烷气体,并可能引发大规模海底滑坡等地质灾害。

目前,各国关于天然气水合物的研究知识处于试验阶段,还没有达到商业开采的阶段。天然气水合物的开采难点之一是储层的稳定性问题,天然气水合物的开采是一个敏感系统,储层温度、压力、体积的微小变化都会导致水合物的分解和生成。水合物的开采是一个多相转变的过程,在从固相转变为气相、液相的过程中,由于储层性质、压

力、温度等的变化，容易引起水合物的分解。目前对水合物储层的研究主要集中在两个方面：一是水合物地层钻井过程中井壁稳定性的研究；二是天然气水合物与海底滑坡的关系。本文主要分析了水合物地层钻井过程中井壁稳定性的特点和影响因素，建立水合物地层钻井过程中稳定评价的力学模型。并对水合物与海底滑坡的关系进行了初步探讨。

1.2 天然气水合物研究现状

1.2.1 天然气水合物研究的三个阶段

自 1810 年英国科学家 Davy 在实验室首次发现天然气水合物和 1888 年 Villard 人工合成天然气水合物后，人类就再也没有停止过对天然气水合物的研究和探索。在这近 200 年的时间里，全世界对天然气水合物的研究大致经历了三个阶段^[2]：

(1) 第一阶段

从 1810 年 Davy 发现天然气水合物和次年对气水合物正式命名并著书立说到 20 世纪 30 年代初。在这 120 年中，对天然气水合物的研究仅停留在实验室，且争议颇多。

(2) 第二阶段

自美国 Hammerschmidt 1934 年发表了关于水合物造成输气管道堵塞的有关数据后，人们开始注意到天然气水合物的工业重要性，从负面加深了对天然气水合物及其性质的研究。在这个阶段，人们关注研究其组成、结构、相平衡和生成条件，研究主题是工业条件下水合物的预报和清除、水合物阻化剂的研究和应用。

(3) 第三阶段

20 世纪 60 年代，特罗费姆克等发现了天然气的这样一个特性，即它可以以固态形式存在于地壳中。特罗费姆克等的研究作为世界上第一座天然气水合物矿田——前苏联麦索雅哈气田的发现、勘探与开发前期的准备工作提供了重要的理论依据，大大拓宽了天然气地质学的研究领域。1971 年前后，美国学者开始重视天然气水合物的研究。1972 年，在阿拉斯加获得世界上首次确认的冰胶结永冻层中的天然气水合物实物。对天然气水合物藏成功的理论预测、天然气水合物形成带内样品的成功检出和测试，被认为是本世纪最重大的发现之一。可以说，从 60 年代至今，全球天然气水合物的研究跨入了一个崭新的阶段——第三阶段，即把天然气水合物作为一种能源进行全面研究和实践开发的阶段，世界各地科学家对天然气水合物的类型和物化性质、自然赋存和成藏条件、资源评价、勘探开发手段以及天然气水合物与全球气候变化和海洋地质灾害的关系等进行

了广泛而卓有成效的研究。

1.2.2 国外水合物勘探现状

美国科学家早在 1934 年首次在输气管道中发现了天然气水合物,它堵塞了管道,影响了气体的输送而开始了对水合物结构及形成条件的研究。随后美国、加拿大在阿拉斯加北坡、马更些三角洲冻土带相继发现了大规模的水合物矿藏。70 年代初英国地调所科学家在美国东海岸大陆边缘所进行的地震探测中发现了“似海底地震反射层”。紧接着于 1974 年又在深海钻探岩芯中获取天然气水合物样品,并释放出大量甲烷,证实了“似海底地震反射”与天然气水合物有关。1979 年美国借助深海钻探计划(DSDP)和大洋钻探计划(ODP),长期主持和组织了此项工作,最早指出天然气水合物为未来的新型能源,并绘制了全美天然气水合物矿床位置图。积极参加这项工作的还有英国、加拿大、挪威、日本和法国等。1991 年美国能源部组织召开“美国国家天然气水合物学术讨论会”。重要的是 1995 年冬 ODP64 航次在大西洋西部布莱克海台组织了专门的天然气水合物调查,打了一系列深海钻井,首次证明天然气水合物广泛分布,肯定其具有商业开发的价值。同时指出天然气水合物矿层之下的游离气也具有经济意义。以甲烷碳量计算,初步估计该地区天然气水合物资源量很多,可满足美国 105 年的天然气消耗。在天然气水合物取得一系列研究成果的基础上,美国地质学会主席莫尔斯于 1996 年把天然气水合物的发现作为当今六大成就之一。因此,美国参议院于 1998 年通过决议,把天然气水合物作为国家发展的战略能源列入国家级长远计划,要求能源部和美国地质调查局等有关部门组织实施,其内容包括资源详查、生产技术、全球气候变化、安全及海底稳定性等五方面的问题,拟每年投入资金 2000 万美元,要求 2010 年达到计划目标,2015 年将投入商业性开发^[3]。2000 年由蒙特雷海湾海洋馆权威学者率领的考察队在北美大陆架边缘、距海面 860 米的卡罗米纳近海布莱克海脊发现大量甲烷水合物,该馆科学家波尔说:这里发现的甲烷水合物可满足美国 105 年的天然气需求;美国继续在东南大际边缘、俄勒冈外太平洋西北边缘、阿拉斯加北坡、墨西哥湾大陆边缘、密西西比峡谷等海域开展工作^[4]。

俄罗斯自 60 年代开始,先后在白令海、鄂霍茨克海、千岛海沟、黑海、里海等开展了天然气水合物调查,并发现有工业意义的矿体。近年,俄罗斯在巴伦支海和鄂霍茨克海等海域进行可燃冰的调查与研究。位于西西伯利亚东北部的 Messoyakha 天然气水合物矿田已成功生产了 17 年^[5]。

加拿大地质调查局在西海岸胡安—德夫卡洋中脊区发现约 1800 亿吨油当量的天然气水合物资源量,其蕴藏量估计是美国布莱克海台的 10 倍,1997—1999 年年地质调查局和温哥华大学联合实施钻探,取得可喜成果;近年还加强了北极加拿大地区的甲烷水合物的调查与研究^[6]。

日本海洋天然气水合物调查与研究起步较晚,但发展很快,现已处于先进行列。80 年代末 ODP127、131 航次在日本周缘海域进行钻探,获得了天然气水合物及 BSR 异常广布的重要发现。美国能源部的 Krason 在 1992 年日本东京召开的第 29 届国际地质大会上表明在日本周缘海域共发现 9 处 BSR 分布区。天然气水合物矿层位于海底以下 150-300m 处,矿层厚度分别为 3m、5m、7m,总厚为 15m。估计在日本南海海槽的 BSR 分布面积约 35000km²。由于美国能源部发表了上述评估数据,加之日本油气能源短缺,引起了日本通产省、科技界及企业界的高度重视。1995 年日本通产省资源能源厅石油公司(JNOC)联合 10 家石油天然气私营企业制定了 1995-1999 年宏伟的“甲烷天然气水合物研究及开发推进初步计划”,投资 6400 万美元。通过对日本周边海域,特别是南海海槽、日本海东北部的鄂霍茨克海的靶区调查,发现南海海槽水合物位于水深 850—1150m 离岸较近,易于开发。水合物赋存在砂岩和火山沉积物中,其孔隙度为 35%,水合物充填率达 85%,初步评价,日本南海海槽的天然气水合物甲烷资源量为 $7.4 \times 10^{12} \text{m}^3$,可满足日本 100 年的能源消耗^[7]。1996 年确认冈县御前崎海域水下 2700 米处发现甲烷水合物,分布面积广,蕴藏丰富,受到很大震动和鼓舞。在日本资源厅内有常设“甲烷水合物开发研究委员会”,日本能源学会内专设“甲烷水合物委员会”,专门组织学者专家从事专题调查与研究;日本计划在 2004 由海洋科学技术中心建造一艘地球深部探测船,能在 7000 米深处有效地开采这种矿藏。1997 年日本在南海海槽实施了导向性钻探,1998 年与加拿大合作,在加拿大北部三角洲进行试验钻探,主要是穿透冻土层,获取岩芯样品技术,检查研制的技术设备。1999 年 11 月在南部海沟水深 950 米处蕴藏有丰富的天然气水合物——可燃冰,区域分布面积 42000 平方米,储量约为目前日本年天然气消费量的 1400 倍,据计算:其中含天然气可达 7.4 万亿立方米,相当于日本 140 年消费天然气的总量^[8]。

德国从 80 年代后期还曾利用“太阳号”调查船与其他国家合作,先后对东太平洋俄勒冈海域的卡斯凯迪亚,以及西南太平洋和白令海域进行了水合物的调查。在南海海槽、苏拉威西海、白令海等地都发现了与水合物有关的地震标志,并获取了水合物样品。

印度在 1995 年全国地质地球物理年会上统一了认识,认为天然气水合物已成为当

代地质工作的主题。在印度科学和工业委员会的领导下制定了“全国天然气水合物研究计划”，投资 5600 万美元。迄今为止，印度已在其东西地区发现了多处地球物理异常，显示出良好的找矿前景。

韩国资源研究所和海洋开发研究所于 1997 年开始在其东南部近海郁龙盆地进行水合物调查，相继发现了 BSR、振幅空白带、浅气层、麻坑、海底滑坡、菱锰结核等一系列与水合物相关的标志。

新西兰在北岛东岸近海水深 1-3Km，发现面积大于 $4 \times 10^4 \text{km}^2$ 的 BSR 分布区。澳大利亚近年在其东部豪勋爵海底高原发现 BSR 分布面积达 $8 \times 10^4 \text{km}^2$ 。巴基斯坦在阿曼湾开展了水合物调查，也取得了进展。

总之，目前已调查发现并圈定有天然气水合物的地区主要分布在西太平洋海域的白令海、鄂霍茨克海、千岛海沟、冲绳海槽、日本海、四国海槽、南海海槽、苏拉威西海、新西兰北岛；东太平洋海域的中美海槽、北加利福尼亚一俄勒冈滨、秘鲁海槽；大西洋海域的美国东海岸外布莱克海台、墨西哥湾、加勒比海、南美东海岸外陆缘、非洲西海岸海域；印度洋的阿曼海湾；北极的巴伦支海和波弗特海；南极的罗斯海和威德尔海，以及黑海与里海等。目前世界这些海域内有 88 处直接或间接发现了天然气水合物，其中 26 处岩心见到天然气水合物，62 处见到有天然气水合物地震标志的似海底反射 (BSR)，许多地方见有生物及碳酸盐结壳标志。据专家估算：在全世界的边缘海、深海槽区及大洋盆地中，目前已发现的水深 3000m 以内沉积物中天然气水合物中甲烷资源量为 $2.1 \times 10^{16} \text{m}^3$ (2.1 万万亿方)。水合物中甲烷的碳总量相当于全世界已知煤、石油和天然气总量的二倍。可满足人类 1000 年的需求，其储量之大，分布面积之广，是人类未来不可多得的能源。以上储量的估算尚不包括天然气水合物层之下的游离气体^[9]。

1.2.3 我国天然气水合物勘探现状

我国对海洋天然气水合物的调查与研究起步较晚，1997 年在完成“西太平洋气体水合物找矿前景与方法”课题中，认定西太平洋边缘海域，包括我国南海和东海海域，具有蕴藏这种矿藏的地质条件。相继有广州海洋地质调查中心在南海、青岛海洋地质研究所东海，都发现天然气水合物矿藏的地震标志，特别是 1999 年 10 月地质调查中心在南海西沙海槽开展了天然气水合物的前期调查，并取得可喜的成果：主要采集到高分辨率多道地震测线 534.3 公里，至少在 130 公里地震剖面上识别出天然气水合物矿藏的显示标志 BSR，矿层厚度为 80-300 米。这一发现拉开了我国海洋天然气水合物调查研究

的序幕,填补了这一领域调查研究的空白^[10]。

近年来,国家领导和国土资源部、科技部、财政部、国家计委等部委领导非常重视天然气水合物的调查与研究^[11]。首先是对我国管辖海域历年来做过大量的地震勘查资料分析,在冲绳海槽的边坡、南海的北部陆坡、西沙海槽和西沙群岛南坡等处发现了海底天然气水合物存在的似海底地震反射层(BSR)标志。并在对海底天然气水合物的成因、地球化学、地球物理特征、外北采集、资料处理解释、钻孔取样、测井分析、资源评价、海底地质灾害等方面进行了系统的研究,并取得了丰富的资料和大量的数据。

自 1984 年始,我国地质界对国外有关水合物调查状况及其巨大的资源潜力进行了系统的资料汇集。广州海洋地质调查局的科技人员对 80 年代早、中期在南海北部陆坡区完成的 2 万多公里地震资料进行复查,在南海北部陆坡区发现有似海底反射(BSR)显示。根据国土资源部中国地质调查局的安排,广州海洋地质调查局于 1999 年 10 月首次在我国海域南海北部西沙海槽区开展海洋天然气水合物前期试验性调查。完成三条高分辨率地震测线共 543.3km。2000 年 9-11 月,广州海洋地质调查局“探宝号”和“海洋四号”调查船在西沙海槽继续开展天然气水合物的调查。共完成高分辨率多道地震 1593.39km、多波束海底地形测量 703.5km、地球化学采样 20 个、孔隙水样品 18 个、气态烃传感器现场快速测定样品 33 个。获得突破性进展。资料表明:地震剖面上具明显似海底反射界面(BSR)和振幅空白带。BSR 界面一般位于海底以下 300-700m,最浅处约 180m。振幅空白带或弱振幅带厚度约 80-600m,BSR 分布面积约 2400km。以地震为主的多学科综合调查表明:海域天然气水合物主要赋存于活动大陆边缘和非活动大陆边缘的深水陆坡区,尤以活动陆缘俯冲带增生楔区、非活动陆缘和陆隆台地断褶区水合物十分发育。根据 ODP184 航次 1144 钻井资料揭示,在南海海域东沙群岛东南地区,100 万年以来沉积速率在每百万年 400-1200m 之间,莺歌海盆地中中新世以来沉积速度很大。资料表明:南海北部和西部陆坡的沉积速率和已发现有丰富天然气水合物资源的美国东海岸外布莱克海台地区类似。南海海域水合物可能赋存的有利部位是:北部陆坡区、西部走滑剪切带、东部板块聚合边缘及南部台槽区。本区具有增生楔型双 BSR、槽缘斜坡型 BSR、台地型 BSR 及盆缘斜坡型 BSR 等四种类型的水合物地震标志 BSR 构型。从地球化学研究发现南海北部陆坡区和南沙海域,经常存在临震前的卫星热红外增温异常,其温度较周围海域升高 5-6℃,特别是南海北部陆坡区,从琼东南开始,经东沙群岛,直到台湾西南一带,多次重复出现增温异常,它可能与海底的天然气水合物及油气有关。

综合资料表明:南海陆坡和陆隆区应有丰富的天然气水合物矿藏,估算其总资源量达 643.5-772.2 亿吨油当量,大约相当于我国陆上和近海石油天然气总资源量的 1/2。

西沙海槽位于南海北部陆坡区的新生代被动大陆边缘型沉积盆地。新生代最大沉积厚度超过 7000m,具断裂活跃。水深大于 400m。基于应用国家 863 研究项目“深水多道高分辨率地震技术”而获得了可靠的天然气水合物存在地震标志:①在西沙海槽盆地北部斜坡和南部台地深度 200-700m 发现强 BSR 显示,在部分测线可见到明显的 BSR 与地层斜交现象;②振幅异常,BSR 上方出现弱振幅或振幅空白带,以层状和块状分布,厚度 80-450m;③BSR 波形与海底反射波相比,出现明显的反极性;④BSR 之上的振幅空白带具有明显的速度增大的变化趋势。资料表明:南海北部西沙海槽天然气水合物存在面积大,是一个有利的天然气水合物远景区。

2001 年,中国地质调查局在财政部的支持下,广州海洋地质调查局继续在南海北部海域进行天然气水合物资源的调查与研究,计划在东沙群岛附近海域开展高分辨率多道地震调查 3500km,在西沙海槽区进行沉积物取样及配套的地球化学异常探测 35 个站位及其他多波束海底地形探测、海底电视摄像与浅层剖面测量等。另据我国台大海洋所及台湾中油公司资料,在台西南增生楔,水深 500-2000m 处广泛存在 BSR,其面积 $2 \times 10^4 \text{km}^2$ 。并在台东南海底发现大面积分布的白色天然气水合物赋存区。

地球上的天然气水合物蕴藏量十分丰富,大约 27%的陆地(大部分分布在冻结岩层)和 90%的海域都含有 NGH,陆地上的 NGH 存在于 200~2000m 深处,海底之下沉积物中的 NGH 埋深为 500~800m^[12]。

根据 NGH 的形成条件分析:最可能形成 NGH 的两个区域是:①高纬度陆地(冻土带)和大陆架,这里温度很低(小于 0℃);②陆地附近沿海海底(深度 2000m 以内),这里温度接近 0℃而压力很高(大于 3MPa)。

据最新资料,迄今已至少在全球 116 个地区发现了 NGH。其中陆地 38 处(永久冻土带),海洋 78 处,其中美国 12 处,日本 12 处,俄罗斯 8 处,加拿大 5 处,挪威、中国、墨西哥各 3 处,秘鲁、智利、巴拿马、阿根廷、印度、澳大利亚、新西兰、哥伦比亚各 2 处,巴西、巴巴多斯、尼加拉瓜、危地马拉、委内瑞拉、哥斯达黎加、乌克兰、巴基斯坦、阿曼、南非、韩国各一处,南极永冻带 5 处。这些发现大多数是通过对地球物理资料的解释——如获得地震 BSR 标志确定的,又主要是由 ODP(国际大洋钻探)和 DSDP(国际深海钻探)钻探的成果予以证实的。其中 15 处通过钻井取样确认,8 处通过钻井测井发现,8 处应用活塞取芯和重力取芯器发现。已经探明和估计的全球气体水合

物的分布见图 1-1^[13];

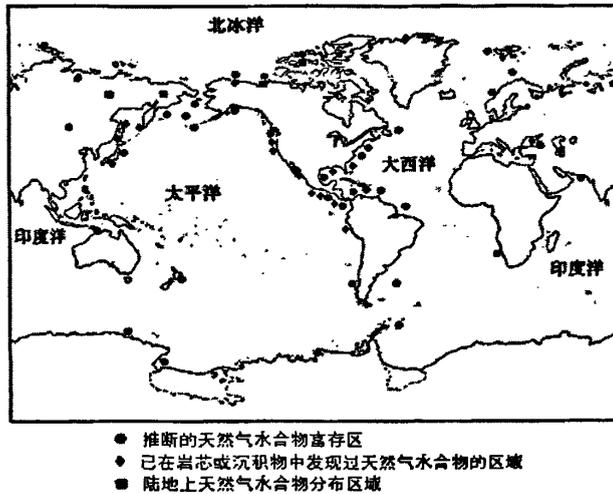


图 1-1 全球已知和估计的 NGH 沉积层的分布

Fig. 1-1 Worldwide distribution of the given and estimated NGH sedimentary layer

NGH 中天然气量的大小主要取决于以下 5 个条件^[14]: ①NGH 的分布面积; ②储层厚度; ③孔隙度; ④NGH 饱和度; ⑤水合指数。因此, NGH 层段内天然气的体积=NGH 的分布面积(m^2) \times NGH 层的厚度(m) \times NGH 储层孔隙度($\%$) \times NGH 饱和度($\%$) \times NGH 产气因子(水合指数为 6.325 时为 164, 水合指数为 7.474 时为 139)。目前各国科学家对全球 NGH 的资源量较为一致的评价为 $2 \times 10^{16} m^3$, 如果将此储量折算为地球上的有机碳资源, 其有机碳约占全球有机碳的 53.3%, 而煤、石油和天然气三者之和才占到 26.6%, 即 NGH 蕴藏量约为现有地球化石燃料(石油、天然气和煤)总碳量的 2 倍^[15]。因此, NGH 作为潜在能源, 对于面临能源危机的人类来说, 无疑具有极大的吸引力。

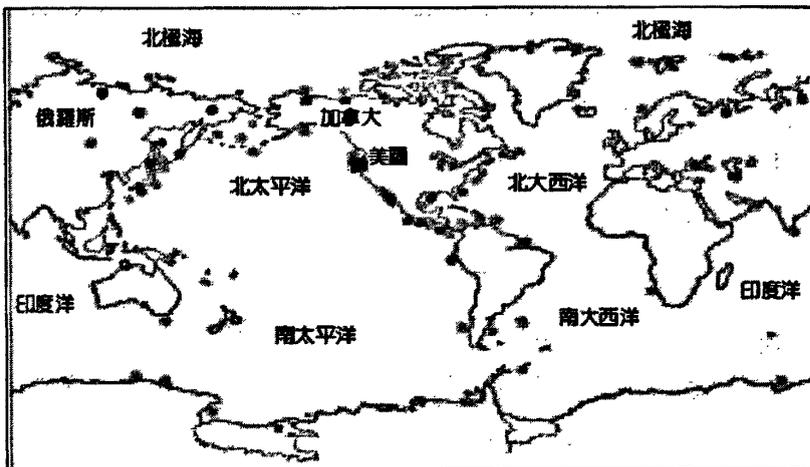


图 1-2 全球已探明埋藏有天然气水合物的位置与分布图。

Fig. 1-2 Worldwide identified position buried NGH and its distribution graph

1.3 研究目标、研究内容，拟解决的关键问题

1.3.1 研究目标

在分析水合物地层热物理及力学性质的基础上，通过分析合物在多孔介质中的分解以及钻井液侵入水合物地层的特性，将水合物分解的动力学方程耦合到多相渗流方程中建立伴随有水合物分解的钻井液侵入水合物地层的渗流模型。并在此基础上考虑渗流对井周应力的影响，分析水合物地层井壁稳定，并对天然气水合物与海底滑坡的关系进行探讨。

1.3.2 研究内容

(1)水合物热物理及力学性质研究

对纯水合物的热物理性质及其研究情况进行详细调研，对水合物地层的地质参数及力学性质进行总结，为水合物地层稳定分析和计算打下基础

(2)钻井过程中井壁稳定的研究

在分析井壁失稳机理和形式的基础上讨论水合物地层地应力分布和确定方法。根据线弹性理论和有效应力理论计算不考虑水合物分解作用的井周围岩有效应力分布。结合岩石破裂准则确定坍塌压力和破裂压力，并分析影响井壁稳定的因素。

(3)耦合钻井液入侵的水合物分解动力学模型

在合理假设的基础上将水合物分解动力学方程与一般渗流及热传导方程耦合起来，建立钻井液入侵的渗流模型并求解，分析水合物地层孔隙压力、温度等地质参数的变化。建立井壁力学稳定分析模型。

(4)天然气水合物与海底滑坡

初步讨论了天然气水合物分解对海底滑坡的影响，解释水合物分解状况下海底滑坡的力学机制。

1.3.3 拟解决的关键问题

(1)钻井液入侵下水合物分解动力学模型。

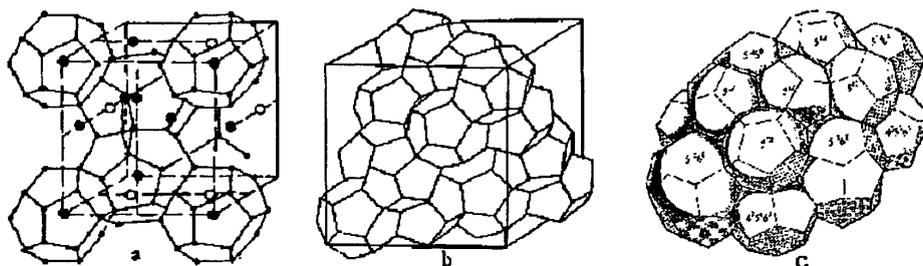
(2)钻井液入侵及水合物分解引起井周地层参数的变化。

(3)水合物地层钻井过程中井壁稳定性分析。

第二章 天然气水合物的结构与性质

2.1 天然气水合物的结构

迄今为止,已发现的天然气水合物结构类型有3种,即I型结构、II型结构和H型结构(见图2-1)^[16]。



a、I型结构水合物 b、II型结构水合物 c、H型结构水合物

图2-1 天然气水合物立方笼型结构图

Fig. 2-1 Cubic cage structure of NGH

I型结构为立方晶体结构,包含46个水分子,由2个小孔隙和6个大孔隙组成。小孔隙为五边形十二面体(5^{12}),大孔隙是由12个五边形和2个六边形组成的十四面体($5^{12}6^2$),结构如图(2-1a)所示^[17]。 5^{12} 孔隙由20个水分子组成,其形状近似为球形, $5^{12}6^2$ 孔隙则是由24个水分子所组成的扁球形结构。I型结构的水合物,当所有孔隙都被客体分子所占据时,理想分子式为 $8M \cdot 46H_2O$ (或 $M \cdot 5.75H_2O$),式中M表示客体分子,5.75称为水合数。I型结构在自然界分布最为广泛,仅能容纳甲烷(C_1)、乙烷(C_2)这两种小分子的烃以及 N_2 、 CO_2 、 H_2S 等非烃分子。

II型结构为菱形晶体结构,包含136个水分子,由8个大孔隙和16个小孔隙组成。小孔隙也是 5^{12} 孔隙,但直径略小于结构I的 5^{12} 孔隙;大孔隙是包含28个水分子的立方对称的准球十六面体($5^{12}6^4$),由12个五边形和4个六边形所组成,结构如图(2-1b)所示。II型结构的水合物,当所有孔隙都被客体分子所占据时,理想分子式为 $24M \cdot 136H_2O$ (或 $M \cdot 5.67H_2O$)。II型结构除包容 C_1 、 C_2 等小分子外,较大的“笼子”(水合物分子中水分子间的空穴)还可容纳丙烷(C_3)及异丁烷($i-C_4$)等烃类。

H型结构为六方晶体结构,包含34个水分子,单晶中有三种不同的孔隙,3个 5^{12} 孔隙,2个 $4^35^66^3$ 孔隙和1个 $5^{12}6^8$ 孔隙,结构如图(2-1c)所示。 $4^35^66^3$ 孔隙是由20个水分子组成的扁球形的十二面体, $5^{12}6^8$ 孔隙则是由36个水分子组成的椭球形的十二面体,

结构如图 2-2 所示。H 型结构的水合物, 当所有孔隙都被客体分子所占据时, 理想分子式为 $6M \cdot 34H_2O$ (或 $M \cdot 5.67H_2O$)。其大的“笼子”甚至可以容纳直径超过异丁烷($i-C_4$)的分子, 如 $i-C_5$ 和其他直径在 $7.5\sim 8.6\text{\AA}$ 之间的分子。H 型结构水合物早期仅见于实验室, 1993 年才在墨西哥湾大陆斜坡发现其天然形态。II 型和 H 型水合物比 I 型水合物更稳定。除墨西哥湾外, 在格林大峡谷地区也发现了 I、II、H 型 3 种水合物共存的现象。

2.2 天然气水合物的存在条件及存在方式

2.2.1 天然气水合物的存在条件

水合物的形成与水蒸气的冷凝不同。当压力一定时, 天然气温度等于或低于水合物露点温度时就会析出液态水, 而当天然水温度等于或低于水合物形成温度时, 液态水就会与天然气中的某些气体组分形成水合物。所以, 水合物形成温度总是等于或低于露点温度。因而天然气水合物的成藏需具备四个基本条件:

- (1) 原始物质基础—气和水的足够富集;
- (2) 足够低的温度;
- (3) 较高的压力;
- (4) 一定的孔隙空间。

2.2.2 天然气水合物的存在方式

研究表明, 目前发现的天然气水合物主要赋存于浅海陆架陆坡区的海底沉积物和极地冻土地区的各种碎屑沉积物孔隙之中, 只有 6% 左右的天然气水合物以块层状出现。地球上气体水合物可以以多种方式存在:

- (1) 占据大的岩石粒间孔隙;
- (2) 以球粒状散布于细粒岩石中;
- (3) 以固体形式填充在裂缝中;
- (4) 大块固态水合物伴随少量沉积物。

2.3 天然气水合物的成因及成藏模式

2.3.1 天然气水合物的成因

目前世界各国对气体水合物的研究勘察仍处于探索阶段, 关于其成因的假说尚处于初级阶段^[18], 重点是研究气体水合物形成的物质来源(天然气和水)、确定形成和稳定的

温压条件、分析有关的地质构造环境。

(1)物质来源

形成天然气水合物的水的来源有两类，一是水和甲烷一起被运移并从过滤流中沉淀；二是从沉积物原地萃取，随着甲烷的不断供给和共生水合物的形成，使得纯水从周围的沉积物中渗透扩散到反应带内。

天然气水合物的烃类气体主要有两种成因^[19]：生物成因和热成因，少数地区天然气水合物包含了两种成因的烃类气体。生物成因甲烷主要由近表层沉积物中的微生物在低温下分解形成，由二氧化碳还原($\text{CO}_2+4\text{H}_2\rightarrow\text{CH}_4+2\text{H}_2\text{O}$)以及醋酸根发酵($\text{CH}_3\text{COOH}+4\text{H}_2\rightarrow\text{CH}_4+\text{CO}_2$)作用形成(Paull 等, 2000)。CO₂还原作用产生的甲烷量依赖于溶解 H₂ 的供应量，醋酸根发酵产生的甲烷量则受到醋酸根的量的限制，而这些最终均取决于沉积物有机质的含量。在生物作用生成甲烷的过程中，会出现较大的碳同位素分馏(一般为 60‰~70‰)。热成因甲烷则是由于酪根在温度超过 120℃时经热降解作用形成，一般是较大深度下的有机质(天然气田或来源于地壳深部)热分解形成，其向上运移并在合适的构造或岩石圈闭中堆积下来。在此过程中，碳同位素较少出现分馏，因此，其碳同位素组成与沉积物有机质碳同位素组成比较接近。除上述生物成因和热解成因外，还有可能的是上述两种类型的混合。尽管存在热解成因和混合成因的天然气来源，但在自然界中气体水合物大部分是由生物成因的天然气形成的。

生物成因的甲烷大多为 CO₂ 还原，其 CO₂ 通常由原地有机质氧化和分解形成，之后经微生物还原作用生成甲烷。因此，由生物成因的甲烷形成的天然气水合物中的气体大多来源于天然气水合物附近的局部沉积物。

热成因的甲烷是由于酪根在温度超过 120℃时经热降解作用形成，根据典型的地温梯度推算，其埋藏深度应该大于 1km，而天然气水合物存在于海底至海底以下 500m 左右。因此，由热成因的甲烷形成的天然气水合物的气体均应来源于深部，后随断层、泥火山等有利构造向上经过长距离运移，到达海底或海底附近后形成天然气水合物，如里海与泥火山有关的天然气水合物。

生物成因的甲烷水合物为 I 型结构，其分布十分广泛。现已证实为生物成因的甲烷水合物的地区包括美国东南部近海、加利福尼亚北部近海、秘鲁、黑海和墨西哥湾。生物成因的水合物具有甲烷占烃类气体混合物 99%以上和甲烷的碳同位素值通常低于-60‰的特征。

(2)天然气水合物稳定带

天然气水合物稳定带(GHSZ)是指在特定的温度和压力条件限制下的一个范围^[20]，在这个范围内天然气水合物与游离烃气达到相平衡。对海底天然气水合物来说，稳定带是指由地温梯度决定的温度、深度关系曲线和水合物相边界曲线确定的水合物稳定带底界和海底之间的区域，见图 2-2。水合物稳定带底界和海底之间的距离即是水合物稳定带的厚度。

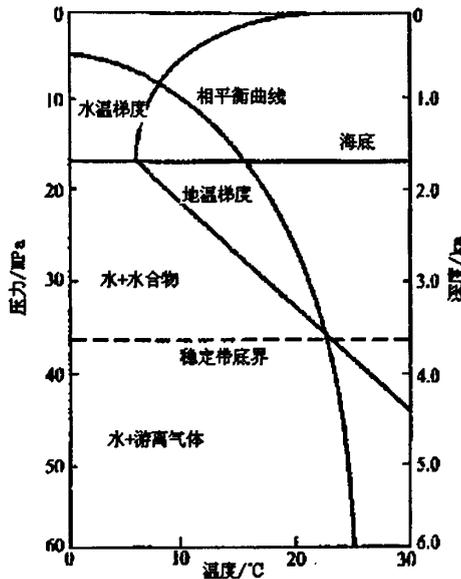


图 2-2 天然气水合物稳定带示意图

Fig. 2-2 Structure of NGH stabilized zone

天然气水合物稳定带控制着天然气水合物的成矿作用、分布规律和演化过程，其厚度与水深、底层水温度、压力、地温梯度、孔隙水盐度、天然气成分有关。深部海洋沉积物的物理性质和表面化学特征也会影响天然气水合物的稳定性，同时会降低稳定带的厚度，目前研究一般不考虑这些因素。稳定带厚度主要取决于地温梯度和海水深度，并且随着水深的增加而增厚；当水深不变时，潜在厚度取决于地温梯度，地温梯度越高，稳定带厚度越薄，反之越厚。

(3)地质构造作用

假设具有充足的烃类气体和水分子供应，并且具备合适的温压条件，那么天然气水合物是否一定就可以在海底之下沉积物中生成呢？理论上看来可行。但在实际的自然状况下，除前述两种基本要素外，天然气水合物的形成还必须有充足的流体载体的供应以及流体载体的输导系统。该输导系统必须为流体载体提供一定的动力来源、运移通道空间等。可见地质环境是气体水合物形成的重要控制条件，也正是由于地质条件的不同，导致天然气水合物的形成模式和分布上的巨大差异。

天然气水合物的形成与地质构造环境密切相关,其形成的沉积控制因素有岩性、沉积速率、有机碳含量、沉积环境及沉积相等几个方面。世界上已探明的天然气水合物位置主要是在大陆坡、水下高原、边缘海和内陆海,尤其是那些与泥火山、盐(泥)底辟及大型构造断裂有关的海盆中。此外,大陆上的大型湖泊(如贝加尔湖),由于水深较大且有气体来源,温、压条件适合,同样可以生成天然气水合物。较快的沉积速率有利于水合物的形成,已发现的水合物主要产于新生代的地质层中,尤其是晚第三纪以来的松散沉积中,它们的沉积速率一般超过 30m/Ma。储集层岩性为粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、砂岩及砂砾岩,其中的水合物含量最高可达 95%(m/m)。海底沉积物中有机碳分析研究表明,水合物发现地沉积物中有机碳含量一般较高[$\geq 1\%$ (m/m)],有机碳含量低于 0.5%(m/m)则难以形成水合物。

2.3.2 天然气水合物的成藏模式

对海底天然气水合物形成的地质模式,各家说法不一。根据水合物形成的地质环境不同可分为三种模式^[21]:即低温模式(Cryogenic Model)、沉积模式(Sedimentation Model)和过滤模式(Filtration Model)。低温模式认为极地大陆架上的天然气水合物是由于地下天然气和饱和气体在地下水中冷却起来和永久冻土共同形成天然气水合物(Kvenvolden, 1988)。在自然界中,产于高纬度大陆地区永冻土层油气田中的气体水合物,如西伯利亚和阿拉斯加地区,其形成可能属于低温冰冻模式。沉积模式是含有天然气的浅部沉积层在大陆坡上崩塌下来,在适当的温度、压力条件下形成水合物。过滤模式中,含有气体的流体流入天然气水合物稳定带的过程中,在适宜的温度、压力条件下固结起来形成水合物。过滤型天然气水合物又可分为两类:稳定型和活动型。稳定型水合物气体来自稳定带内,而活动型水合物气体则来自稳定带的下部游离气(Hyndman and Davis,1992)。

根据天然气水合物的气体来源不同,提出了天然气水合物的静态和动态两种成因机制^[22]。静态形成体系:即先存的天然气田因温度或孔隙压力或天然气浓度的变化而转变为天然气水合物(图 2-3a)。在此过程中,无外来物质的加入,天然气储层若受到冷却作用引起地温降低,压缩作用导致天然气压力增加,或者由于储层成岩作用使天然气浓度增加均可形成天然气水合物。二是动态形成体系:即天然气从下部运移至天然气水合物稳定带而生成天然气水合物(图 2-3b)。在此过程中有外来物质进入天然气水合物形成带中,储层中天然气和饱气水的渗滤作用、分子扩散作用或者含气重力流的迁移运动可以形成天然气水合物。

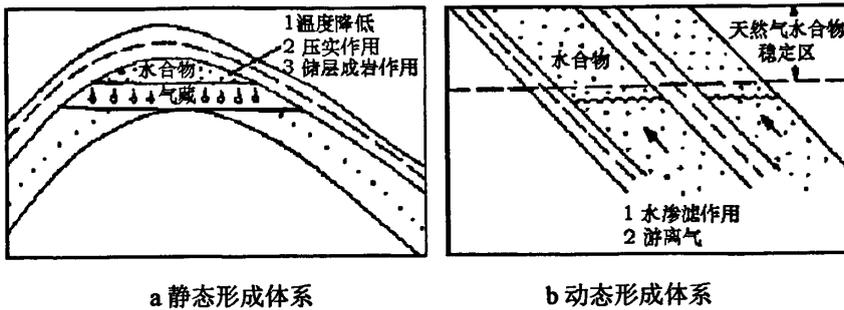


图 2-3 天然气水合物形成的地质成藏模式
Fig. 2-3 Pattern of NGH forming

2.4 天然气水合物的热力学性质

2.4.1 天然气水合物的导热系数

水合物藏的导热系数受地质构造、岩石骨架矿物成分、孔隙大小、流体成分和含量、地下温度、地下压力等多种因素的影响，因此要准确计算导热系数非常困难。特别是含天然气水合物沉积层中天然气水合物的分布模式有多种，不同模式对导热系数的估算影响很大，且天然气水合物的饱和度也变化不定，这就使得含天然气水合物地层的导热系数更难确定。在此假设天然气水合物是孔隙流体的一部分，即天然气水合物在沉积层中的分布属于孔隙填充模式。由于固态天然气水合物的导热系数与液态水相差无几，且天然气水合物储层通常在海底埋藏不深，厚度也不大，因此受地热梯度的影响很小。因此可以把天然气水合物储层看成同上覆地层一样被流体所充满的各向同性非均质体，从而只考虑沉积压实作用的影响。根据流体饱和和多孔介质的导热系数计算公式可估算某处地层的导热系数 $k^{[23]}$ 。

$$k = k_r \left[1 - \frac{\phi(1 + 2k_f/k_r) - (1 - k_f/k_r)}{\phi(1 - k_f/k_r) + 3k_f/k_r} \right] \quad (2-1)$$

式中： k_r 为骨架的导热系数； ϕ 为孔隙度； k_f 为孔隙多相流体的有效导热系数。

2.4.2 天然气水合物的比热

比热 $C(\text{KJ/kg}\cdot\text{K})$ 是一定量的物质在一定条件下温度升高 1 度所需要的热量，是用以衡量物质所包含的热量的物理量。

用试验的方法确定水合物的比热主要存在以下两个问题^[24]：一是天然气水合物的蒸汽压随着温度的升高而升高，如果水合物的压力小于蒸汽压，水合物就要分解，这样测得的比热要比实际值大得多；二是很难确定试验中所使用的天然气水合物是否是纯净的水合物，如果水合物中含有冰颗粒，则试验测得的比热就是水合物和冰综合作用的结果，

如果温度高于冰点温度，冰就会融化成水，而水的比热要比水合物大得多。目前有三种技术方法可以用来测量水合物的比热和分解热。Handa 等人用改装后的 Tian-Calvet 量热计测量了甲烷、乙烷、丙烷以及异丁烯的水合物的比热和分解热。在比热试验中量热计的压力要比相同条件下的分解压力大得多，这样才能保证水合物不会分解，从而保证测得的比热不含有分解热，在试验最后，使量热计的温度保持在 273.15K。在试验的基础上，Handa 提出了适用于甲烷、乙烷和丙烷的水合物的摩尔比热与绝对温度的拟合计算式

$$C_{p,m} = a + bT + cT^2 + dT \text{ (J/(K} \cdot \text{mol))} \quad (2-2)$$

其中 a, b, c, d 为常数,其值见表 2-1。根据此式可以计算不同温度下的天然气水合物比热值。

表 2-1 Handa 模拟公式中的常数
Table 2-1 Constant in Handa simulated formula

	T/K	a	b	c×10 ²	d×10 ⁵
CH ₄	85-270	6.6	104538	-0.3640	0.6312
C ₂ H ₆	85-265	22.7	1.8717	-0.5358	1.076
C ₃ H ₈	85-265	-37.6	4.8606	-1.625	3.291

研究表明，在压力为 9MPa 时，天然气水合物的比热 C(KJ/kg·K)与温度的关系^[25]为：

$$C = 0.216 + 8 \times 10^{-3} T \quad (2-3)$$

在温度为 243K 时天然气水合物的比热与压力的关系近似于方程：

$$C = 1.91 + 2.85 \times 10^{-3} P \quad (2-4)$$

2.4.3 天然气水合物的吸附热

天然气水合物是天然气气体和水的类冰状混合物，其结构特点为气体分子被困在水分子构成的空穴之中，水分子靠分子间氢键连接在一起，天然气和水分子之间靠范德华力结合在一起。水合物的形成过程是水分子先以氢键结合成笼形结构，天然气分子再进入笼形结构的吸附过程。因为吸附过程是一个气体凝聚的过程，天然气分子由分散态到凝聚态降低了吸附质分子的自由度，因而表示系统紊乱程度的熵减少。同时，吸附也意味着气体在固体表面凝聚，降低了固体表面的自由焓^[26]。在定温定压下，吸附过程是放

热过程。由于气体在形成为水合物的过程条件上的差异，不同的天然气水合物其吸附热也各不相同。表 2-2 为 Davidson 等对天然气水合物的不同组分进行分别研究得出的各组成气体的吸附热。

表 2-2 不同气体分子的吸附热
Table 2-2 Adsorption heat of different gas molecule

客体分子	结构	吸附热/ KJ/mol
H_2S	I	-30.5
甲烷	I	-23.8
乙烷	I	-33
异丁烷	II	-37.2
丙烷	II	-40.5

2.4.4 天然气水合物的分解热

水合物的分解是吸热反应，吸热量的大小关系到如何开采和利用水合物。可是由于天然气水合物形成压力高，以及形成水合物的纯度不易确定等原因使得水合物分解热不易直接测量。但在气相存在的情况下，可以用 Clausius-Clapeyron 方程，沿 P-T 相平衡线计算各个摩尔生成焓^[27]。其公式如下：

$$\frac{d \ln P}{d(1/T)} = \frac{\Delta h^f}{ZR} \quad (2-5)$$

其中：R-气体常数；P-温度为 T 时的分解压力；Z-平衡的气相压缩因子。

假设水与甲烷的分子数之比为 6.15:1，分解温度为 285K，可以通过 P-R 方程求出压缩因子 Z，进一步应用 Clausius-Clapeyron 求出甲烷水合物的分解热为 54.67kJ/mol。HANDA 等用量热法对水合物的分解热进行了测量，并给出了几种常见气体水合物的分解热，见表 2-3。从表中可以看出在一定的温度范围内水合物的分解热是个常数，甲烷水合物的分解热与 285K 时的理论值的误差为 8.8%。随后 Rueff 等也用量热法对甲烷水合物的分解热进行了测量，发现甲烷水合物在温度为 285K 条件下的平均分解热为 54.48kJ/mol，与理论值的误差仅为 0.35%。虽然 Rueff 的测量温度范围与 HANDA 等的区别很大，但其误差仅为 0.53%，这就表明水合物分解热和温度的关系不大，而主要和形成水合物的天然气类型有关^[28]。国内孙志高等人用 Clausius-Clapeyron 方程进行了 I、II 和 H 型水合物分解热的计算，结果也表明水合物的分解热主要和填充水合物晶格的气体分子直径有关，与 HANDA 等的试验结果相吻合。

表 2-3 HANDA 对于天然气水合物分解热测量结果
 Table 2-2 Adsorption heat of different gas molecule

气体种类	T/K	分解热/KJ/mol	
		$H \leftrightarrow I + G$	$H \leftrightarrow L + G$
CH_4	160-210	18.13 ± 0.27	54.19 ± 0.28
C_2H_6	190-250	25.70 ± 0.37	71.80 ± 0.38
C_3H_8	210-260	27.00 ± 0.33	129.2 ± 0.4
$(CH_3)_3CH$	230-260	31.07 ± 0.20	133.2 ± 0.3

H-水合物; I-冰; G-气体; L-液体

第三章 水合物储层井壁稳定性力学原理

岩石是地球表层的物质，在漫长的地质年代里，由于地质构造运动、地层重力、地温不均、地层水压梯度、地球自转、地幔热对流及岩浆侵入等原因使地壳物质产生了内应力效用，这种应力称为地应力^[29]。地应力是客观存在的，不论地层处于地球的什么位置都具有地应力，只不过在不同的地区，地应力的强弱程度和作用方向存在着差异。也就是说在任何一口井开钻前，地层岩石中就已存在原地应力，地层岩石处于应力平衡状态，当井眼钻开后，钻井液液柱压力取代了所钻岩层提重的支撑，破坏了地层原来的应力平衡，引起井眼周围岩石的应力重新分布。如果重新分布的应力超过岩石所能承受的最大载荷，井壁失稳就会发生。因此，确定对于钻遇水合物地层的地应力是研究井壁周围稳定性的前提。

3.1 原地应力构成

水合物往往赋藏在距海底有一定深度，水深大于 300m 的海底沉积层中。水合物储层的地应力主要由地壳构造运动的动应力(古构造应力和现代构造应力)和上覆地层及海水重量的静应力、孔隙压力耦合而成。通常将地应力的大小用三个主应力来表示：一个是垂向地应力，另两个为最大、最小水平地应力。由于地质构造运动的方向性，两个水平方向上的地应力往往是不同的。

(1)垂向地应力

垂向地应力 σ_v 是由上覆地层和海水重力引起的。由于岩层的密度随深度而变化，故 σ_v 也是深度的函数。它是随着地层密度和深度而变化的，因此可用密度测井资料来求出

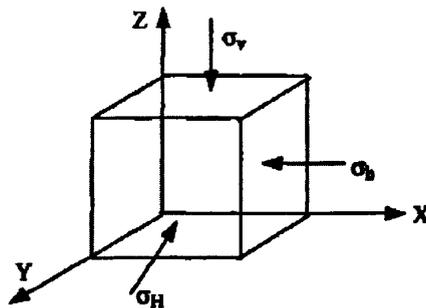


图 3-1 原应力示意图

Fig. 3-1 Structure of natural stress

垂向地应力 σ_v 。

$$\sigma_v = 0.001g(\rho_w h' + \int_b^H \rho(h) \cdot dh) \quad (3-1)$$

即：

$$\sigma_v = 0.001g\rho_w h' + \sum_{i=1}^n \frac{D_i \rho_i g}{1000} \quad (3-2)$$

垂向地应力 σ_v 。

式中： σ_v 为垂向应力，Mpa； h' 为海水深度，m； H 为距海底深度，m； D_i 为测井距离，m； ρ_i 为第*i*段地层密度， kg/m^3

(2)水平地应力

水平地应力为最小水平地应力 σ_h 和最大水平地应力 σ_H 。水平地应力一般认为由两部分组成：一是由上覆岩层压力的泊松效应引起的；二是构造运动的结果^[30]。考虑到实际中构造应力在各个方向都基本存在，而且是不相等的，可采用石油大学黄荣樽教授^[31]表示地应力大小的关系式来估算水合物地层的水平主应力^[31]：

$$\sigma_H = \left(\frac{\mu_s}{1-\mu_s} + \beta \right) (\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p \quad (3-3)$$

$$\sigma_h = \left(\frac{\mu_s}{1-\mu_s} + \gamma \right) (\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p \quad (3-4)$$

式中： σ_H ， σ_h 为最大、最小水平地应力，MPa； μ_s 为地层静态泊松比； β ， γ 为构造应力系数； α 为有效应力系数，也称Biot系数； P_p 为孔隙压力，MPa。

利用上述关系式，采用已钻井压裂数据，可以确定出系数 β ， γ 的值，在确定出不同压裂点的 σ_H ， σ_h 以及 β ， γ 值后，用统计方法可以得出计算区块的构造应力系数 β ， γ ，再利用(3-4)，(3-4)式就可连续计算原地最大水平地应力和最小水平地应力。

μ_s 是一个弹性系数，如果要对整个井眼取大量的岩心做试验来测定 μ_s 几乎是不可能的。所以，根据岩石的弹性力学理论，利用声波测井资料可以求得连续的动态泊松比值 μ_d ：

$$\mu_d = \frac{0.5 \times (\Delta T_s / \Delta T_p)^2 - 1}{(\Delta T_s / \Delta T_p)^2 - 1} \quad (3-5)$$

式中： ΔT_s 为水合物地层纵波时差， $\mu\text{s}/\text{m}$ ； ΔT_p 为水合物地层横波时差， $\mu\text{s}/\text{m}$ 。

由动态泊松比值 μ_d 计算静态泊松比值 μ_s 的计算公式为：

$$\mu_s = A_1 + K_1 \times \mu_d \quad (3-6)$$

其中： $A_1 = 0.24543 - 0.155843 \lg(\text{SD})$ ， $K_1 = 0.050248 + 0.364781 \lg(\text{SD})$ ，SD 为三轴试验时的围压差，MPa。

有效应力系数 α 的计算可根据室内试验和现场试验数据获得，也可采用公式计算。根据 Biot 理论，由于岩石中的孔隙并不是完全连通的，使得孔隙压力的传递受到阻碍，孔隙压力的有效传递值与总孔隙压力之比定义为有效应力系数。根据多孔连续介质理论，有效应力系数的表达式如下：

$$\alpha = 1 - \frac{K_b}{K_m} \quad (3-7)$$

这里：

$$K_b = 10^9 \rho_b \left[\frac{1}{\Delta t_p^2} - \frac{4}{3\Delta t_s^2} \right] \quad (3-8)$$

$$K_m = 10^9 \rho_m \left[\frac{1}{\Delta t_{mp}^2} - \frac{4}{3\Delta t_{ms}^2} \right] \quad (3-9)$$

式中： K_b ， K_m 分别为水合物地层体积模量和骨架体积模量，MPa； ρ_b ， ρ_m 分别为水合物地层和骨架(砂岩或泥岩)的密度， g/cm^3 ； Δt_p ， Δt_{mp} 分别为水合物地层及其骨架的纵波时差， $\mu\text{s}/\text{m}$ ； Δt_s ， Δt_{ms} 分别为水合物地层及其骨架的横波时差， $\mu\text{s}/\text{m}$ 。

3.2 水合物储层井壁应力分析

3.2.1 井壁围岩应力分布

当水合物储层被钻开后，原有的应力平衡被打破，原来井眼处的岩石被钻井液代替，这时就引起了井壁围岩应力的重新分布。由于地下情况复杂，为便于分析，先做如下基本假定：

(1)地层完整，井眼是一个圆形的直井眼；

- (2)地层岩石为均质、各项同性的线弹性体;
- (3)不考虑钻井液和地层间的相互作用, 包括渗流、扩散、传热等。

由此根据弹性力学理论^[32], 垂直井眼周围岩石的受力分析可以简化为无限大平面上有一圆孔受有均匀内压 P_f , 同时平面的无限远处受最大、最小水平地应力 σ_H 和 σ_h 的作用, 其铅直方向上还受到上覆地层和海水压力 σ_v , 如图 3-2:

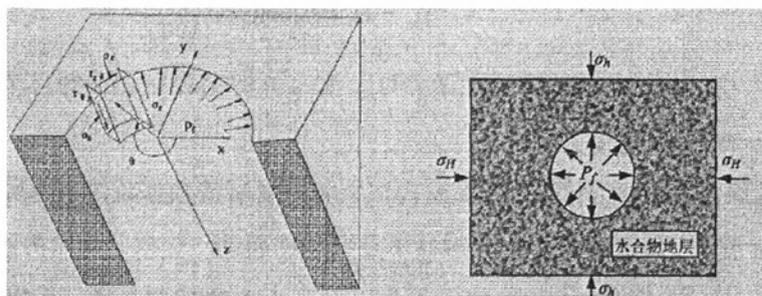


图 3-2 水合物地层受力图

Fig. 3-2 Force diagram of NGH layer

考虑到岩石为小变形弹性体, 则线性叠加原理是适用的, 即井周围总的应力状态可通过研究各应力分量对井周的应力贡献然后再用叠加的方法来获得。据此, 可将井壁受力分解为以下三种情况:

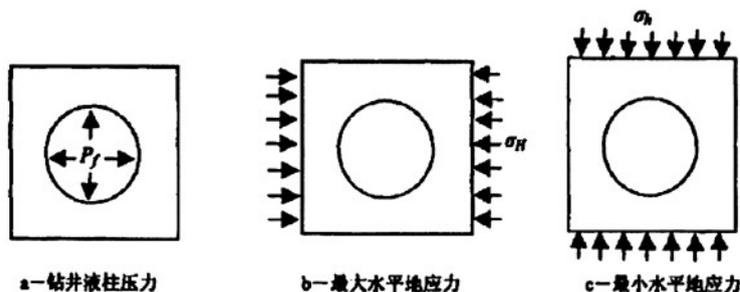


图 3-3 井壁受力平面图

Fig. 3-3 Force plan of wellface

3.2.2 由钻井液液柱压力 P_f 引起的井周应力分布

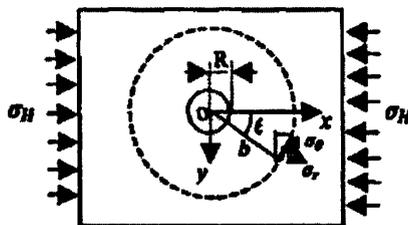
根据拉密的解答(只有内压, 并且外半径远远大于内半径的情况)得在内压 P_f 作用下所引起的井周应力分布:

$$\sigma_r = \frac{R^2}{r^2} P_f \tag{3-10}$$

$$\sigma_\theta = \frac{R^2}{r^2} P_f \tag{3-11}$$

3.2.3 由最大水平地应力 σ_H 所引起的井周围应力分布

这里主要考虑井壁周围岩石受力情况，相当于圆孔附近的应力，为求解方便，采用极坐标。首先将直边变换为圆边。为此，以远大于 R 的某一长度 b 为半径，以坐标原点为圆心，作一个大圆(如图 3-4)，在大圆某点 A 处，应力状态与无孔时相同，即：



$$(\sigma_x)_{r=b} = \sigma_H, (\sigma_y)_{r=b} = 0, (\tau_{xy})_{r=b} = 0$$

图 3-4 最大主应力示意图

Fig. 3-4 Structure of maximum principal stress

由坐标变换得到该处的极坐标下的应力分量为：

$$(\sigma_r)_{r=b} = \frac{\sigma_H}{2} + \frac{\sigma_H}{2} \cos 2\theta \quad (3-12)$$

$$(\tau_{r\theta})_{r=b} = -\frac{\sigma_H}{2} \sin 2\theta \quad (3-13)$$

于是问题变成，内径为 R 外半径为 b 的圆环或圆筒，在外边界上受有(3-12, 3-13)式所示的面力，为方便求解将这个面力分解成两部分，其中第一部分为：

$$(\sigma_r)_{r=b} = \frac{\sigma_H}{2}, (\tau_{r\theta})_{r=b} = 0 \quad (3-14)$$

第二部分为：

$$(\sigma_r)_{r=b} = \frac{\sigma_H}{2} \cos 2\theta, (\tau_{r\theta})_{r=b} = -\frac{\sigma_H}{2} \sin 2\theta \quad (3-15)$$

由(3-14)式引起的应力可根据拉密解答得：

$$\sigma_r = \frac{\sigma_H}{2} (1 - \frac{a^2}{r^2}), \sigma_\theta = \frac{\sigma_H}{2} (1 + \frac{a^2}{r^2}), \tau_{r\theta} = 0 \quad (3-16)$$

用半逆解法求解出(3-15)式所引起的应力，步骤如下：

根据面力(3-15)的特点，假设应力函数的形式如下：

$$\varphi = f(r) \cos 2\theta \quad (3-17)$$

代入以下相容方程

$$\nabla^2(\nabla^2\varphi) = 0 \quad (3-18)$$

得:

$$f(r) = Ar^4 + Br^2 + C + \frac{D}{r^2} \quad (3-19)$$

从而得应力函数为:

$$f(r) = (Ar^4 + Br^2 + C + \frac{D}{r^2}) \cos 2\theta \quad (3-20)$$

由此各应力分量形式如下:

$$\sigma_r = -(2B + \frac{4C}{r^2} + \frac{6D}{r^4}) \cos 2\theta \quad (3-21)$$

$$\sigma_\theta = (12Ar^2 + 2B + \frac{6D}{r^4}) \cos 2\theta \quad (3-22)$$

$$\tau_{r\theta} = (6Ar^2 + 2B - \frac{2C}{r^2} - \frac{6D}{r^4}) \sin 2\theta \quad (3-23)$$

将边界条件(3-15)式, 及边件条件:

$$(\sigma_r)_{r=R} = 0, \quad (\tau_{r\theta})_{r=R} = 0 \quad (3-24)$$

代入上式求解待定系数 A, B, C, D, 然后令 $R/b=0$ 得:

$$A = 0, \quad B = -\frac{\sigma_H}{4}, \quad C = \sigma_H \times R^2, \quad D = -\frac{\sigma_H \times R^4}{4} \quad (3-25)$$

将(3-25)代入(3-24), 并与(3-23)相叠加, 得到由面力(3-15)所引起的应力为:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_H}{2} (1 - \frac{R^2}{r^2}) + \frac{\sigma_H}{2} (1 - \frac{R^2}{r^2}) (1 - 3\frac{R^2}{r^2}) \cos 2\theta \quad (3-26)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_H}{2} (1 + \frac{R^2}{r^2}) - \frac{\sigma_H}{2} (1 + 3\frac{R^4}{r^4}) \cos 2\theta \quad (3-27)$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = -\frac{\sigma_H}{2} (1 - \frac{R^2}{r^2}) (1 + 3\frac{R^2}{r^2}) \sin 2\theta \quad (3-28)$$

3.2.4 由最小水平地应力 σ_h 所引起的井周应力分布

此种情况与上种情况完全类似, 其解法也一致, 只需将上种情况下得到的解答中的 θ 用 $\theta+90^\circ$ 代替, σ_H 用 σ_h 代替, 即可得到该种情况下的应力分布为:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_h}{2} (1 - \frac{R^2}{r^2}) - \frac{\sigma_h}{2} (1 - \frac{R^2}{r^2}) (1 - 3\frac{R^2}{r^2}) \cos 2\theta \quad (3-29)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_h}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_h}{2} \left(1 + 3\frac{R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (3-30)$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = \frac{\sigma_h}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) \left(1 + 3\frac{R^2}{r^2}\right) \sin 2\theta \quad (3-31)$$

3.2.5 由垂直地应力 σ_v 引起的井周应力分布:

按平面应变条件得:

$$\sigma_z - \mu_s(\sigma_r + \sigma_{\theta}) = \sigma_v - \mu_s(\sigma_H + \sigma_h) \quad (3-32)$$

代入公式有:

$$\sigma_z = \sigma_v - \mu_s \left[2(\sigma_H - \sigma_h) \frac{R^2}{r^2} \cos 2\theta \right] \quad (3-33)$$

因此在钻井液液柱压力和地应力的联合作用下, 井周地层距井轴 r 处的应力分布为:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) \left(1 - 3\frac{R^2}{r^2}\right) \cos 2\theta + \frac{R^2}{r^2} P_f \quad (3-34)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 3\frac{R^4}{r^4}\right) \left(1 - 3\frac{R^2}{r^2}\right) \cos 2\theta + \frac{R^2}{r^2} P_f \quad (3-35)$$

$$\sigma_z = \sigma_v - \mu_s \left[2(\sigma_H - \sigma_h) \frac{R^2}{r^2} \cos 2\theta \right] \quad (3-36)$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = \frac{\sigma_h}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) \left(1 + 3\frac{R^2}{r^2}\right) \sin 2\theta \quad (3-38)$$

式中: σ_r 为距井轴 r 处的井壁径向应力, MPa; σ_{θ} 为距井轴 r 处的井壁轴向或切向应力, MPa; θ 为井周上某点与水平最大主应力方向的夹角; σ_z 为距井轴 r 处的井壁轴向应力, MPa; $\tau_{r\theta}$ 为距井轴 r 处的井壁剪应力; R 为井眼半径, m; P_f 为钻井液液柱压力, MPa; σ_H 、 σ_h 分别为最大、最小水平地应力, MPa; σ_v 为上覆地层和海水压力, MPa; μ_s 为水合物地层静态泊松比。

3.2.6 井壁有效应力分布

当 r 取值为井半径 R 时, 得井壁应力计算式为:

$$\sigma_r' = P_f - \alpha P_p \quad (3-39)$$

$$\sigma'_\theta = (\sigma_H + \sigma_h) - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta - P_f - \alpha P_p \quad (3-40)$$

$$\sigma'_z = \sigma_v - 2\mu_s(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta - \alpha P_p \quad (3-41)$$

由此我们可以看出,井周各点所受的应力是随转角的变化而变化,其规律如下图(3-5)所示:

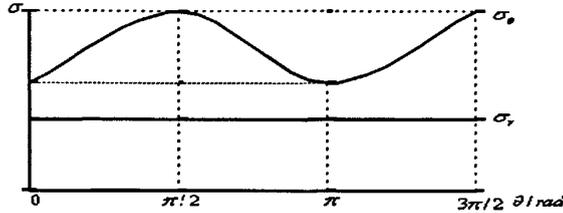


图 3-5 井眼周围应力变化
Fig. 3-5 Stress change around wellbore

从图中我们可以发现 $\sigma'_\theta > \sigma'_r$, 且当 θ 为 90° 或 270° 时二者之间的差值最大(σ'_r 在井壁上各处均相等, 与 θ 无关), 也即井壁所受的挤应力最大。因此在这两个方位处井壁岩石最容易发生剪切破坏导致井壁坍塌, 此处的有效周向应力为:

$$\sigma'_\theta = 3\sigma_H - \sigma_h - P_w - \alpha P_p \quad (3-42)$$

而在 θ 为 0° 和 180° 处, σ'_θ 最小, 容易发生拉伸破裂, 有效周向应力为:

$$\sigma'_\theta = 3\sigma_h - \sigma_H - P_w - \alpha P_p \quad (3-43)$$

3.3 井壁坍塌和破裂压力计算

在了解了井周薄弱点的应力以后, 就需要应用合适的强度屈服准则以便分析井壁的破坏极限, 从而计算井壁的坍塌和破裂压力。

3.3.1 岩石强度破坏准则介绍

(1) 剪切破坏准则

井壁坍塌大部分是剪切破坏^[33], 当井内钻井液液柱压力过低时, 井壁周围岩石所受应力超过岩石本身的抗剪强度, 井壁就发生剪切破坏。对于脆性地层会产生坍塌掉块, 导致井径扩大; 而对于塑性地层则会向井眼内产生塑性变形。水合物地层往往是孔隙度较高的砂岩地层, 剪切破坏导致的坍塌是水合物井壁失稳的主要形式。

对岩石材料的剪切破坏, 最常用的破坏准则是莫尔-库伦准则^[34]。

莫尔-库伦准则假设只有最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 对岩石的破坏有影响，认为岩石沿某一平面发生剪切破坏不仅与该面上的剪应力有关，而且与该面上的正应力 σ_n 也有关。岩石并不是沿着最大剪应力作用面产生破坏，而是沿着剪应力与正应力达到最不利于组合的某一面产生破裂。该理论认为：同性材料抵抗破坏的剪切力等于沿潜在破坏面滑动时的摩擦阻力与内聚力之和，即：

$$\tau_n = C + \sigma_n \tan \varphi \quad (3-44)$$

式中： φ 为内摩擦角， $\varphi = 2\beta - \pi$ ； C 为粘聚力或固有剪切强度，MPa。正应力 σ_n 和剪应力 τ_n 用最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 表示为：

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi \quad (3-45)$$

$$\tau_n = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos \varphi \quad (3-46)$$

由此可得到用最大主应力和最小主应力表示的莫尔-库伦准则：

$$\sigma_1 = \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 \quad (3-47)$$

其中 $\sigma_c = \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$ 为单轴抗压强度。考虑孔隙压力，用有效主应力表示为：

$$\sigma_1' = \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3' \quad (3-48)$$

式中： σ_1' 为有效最大主应力，MPa； σ_3' 为有效最小主应力，MPa。

在垂直井眼中井壁径向有效应力 σ_r' ，井壁周向有效应力 σ_θ' ，井壁轴向有效应力 σ_z' ，即为井壁的三个有效主应力 σ_1' ， σ_2' ， σ_3' 。当钻井液密度选定时，井壁三个有效主应力大小排列顺序便确定。

(2) 拉伸破裂准则^[35]

岩石的抗拉强度只有抗压强度的几分之几甚至十几分之几，因此在拉伸应力的作用下，很容易被拉伸破坏。对于井眼结构来说，当井内钻井液液柱压力过高时，在井壁处会出现拉应力，当拉应力超过地层的抗拉强度 S_t 时，就会出现拉伸破坏，发生井漏事故。

按最大拉应力理论，井壁应力满足以下等式时，井壁岩石将处于张性极限平衡状态：

$$\sigma_{\theta\min} = -S_t \quad (3-49)$$

式中： S_t 为岩石的抗拉强度。

3.3.2 井壁坍塌压力计算

我们把发生井壁失稳(剪切破坏或塑性变形)时钻井液的当量密度(或井内液柱压力)称为井壁坍塌压力。岩石剪切破坏主要受最大和最小有效主应力的控制。两者的差值越大,井壁越易坍塌。在上述井壁岩石主应力分析中,已经指出井壁最大和最小有效主应力分别为周向应力 σ'_θ 和径向应力 σ'_r ,而且在 $\theta = 90^\circ$ 和 270° 处,二者差值最大,是井壁最易发生失稳坍塌的位置。

将 σ'_θ , σ'_r 为别为井壁坍塌处的最大和最小有效主应力代入,便可以求得保持井壁稳定所需要的当量钻井液密度公式为:

$$\rho_m = \frac{3\sigma_H - \sigma_h - 2CK + \alpha P_p (K^2 - 1)}{HK^2} \times 100 \quad (3-50)$$

式中： ρ_m 为坍塌压力的当量钻井液密度, g/cm^3 ; H 为井深, m ; $k = \text{ctg}(45^\circ - \varphi)$, φ 为岩石的内摩擦角; C 为岩石粘聚力, MPa ; α 为有效应力系数。

上式只代表保持井壁上该地层不允许有任何坍塌崩落的钻井液密度值,如果允许地层有一定的井径扩大率,这对某些坍塌夹层有事是必要的,因为钻井液的设计要顾及裸眼段大部分地层的稳定性的需要。设井径扩大系数为 $\lambda = r/r_1$ (r_1 为钻头半径, r 为井眼扩大处的半径),则根据围岩有效应力公式,代入摩尔-库仑准则,得到欲使扩大后井径得以稳定的钻井液密度为:

$$\rho_m = \frac{Q_1 - 2CK + \alpha P_p (K^2 - 1) - Q_2 K^2}{H\lambda^2 K^2} \times 100 \quad (3-51)$$

式中:

$$Q_1 = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} (1 + \lambda^2) + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} (1 + 3\lambda^4) \quad (3-52)$$

$$Q_2 = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} (1 - \lambda^2) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} (1 - 4\lambda^2 + 3\lambda^4) \quad (3-53)$$

3.3.3 破裂压力的计算

井壁地层破裂是由于井内泥浆密度过大，使井壁岩石所受到的周向应力超过岩石的拉伸强度造成的，即 $\sigma_{\theta} \geq S_t$ 。从式(3-40)可以看出，当 P_w 增大时， σ_{θ} 变小，当 P_w 增至一定程度时， σ_{θ} 将变成负值，此时周向应力由压缩变成拉伸，当拉伸应力足以克服该岩石的抗拉强度时，地层便发生破裂。如前所述破裂发生在 σ_{θ} 最小处，即 $\theta = 0^\circ$ 和 180° 处，将式(3-42)代入拉伸破裂准则式(3-49)有：

$$P_f = 3\sigma_h - \sigma_H - \alpha P_p + S_t \quad (3-54)$$

式中 P_f 为地层破裂压力，换算成当量泥浆密度为：

$$\rho_f = \frac{3\sigma_h - \rho_H - \alpha P_p + S_t}{H} \times 100 \quad (3-55)$$

3.4 水合物地层井壁力学稳定与影响因素

3.4.1 安全钻井液密度窗口的确定

根据前面的分析可知，当井内钻井液液柱压力过低时，井壁很可能发生坍塌破坏(地层坍塌压力)；当井内钻井液液柱压力过大时，井壁可能发生拉伸破坏(地层破裂压力)。因此从力学角度来说，在水合物地层钻井时，钻井液液柱压力必须大于或等于地层坍塌压力，小于或等于地层的破裂压力。故钻井液存在一个合理密度范围，称为安全钻井液密度窗口，其上限对应于破裂压力，下限对应于坍塌压力。井壁力学稳定就是要使钻井液密度在这个窗口内。即：

$$\rho_m \leq \rho_w \leq \rho_f \quad (3-56)$$

式中： ρ_m 为坍塌压力的当量钻井液密度， ρ_w 为钻井液密度， ρ_f 为破裂压力的当量钻井液密度，单位均为 kg/m^3 。

3.4.2 井壁稳定的影响因素

在忽略了钻井液与地层相互作用的前提下我们用线弹性和有效应力理论分析了井壁稳定的力学原理和条件。从前面分析可以看出在这种假设条件下井壁稳定只取决于原地应力、孔隙压力、岩石固有强度。然而在水合物地层的钻采过程中，钻井液的入侵和井内温度、压力的变化引起水合物的分解是不可避免的，这些作用都可能影响井壁围岩应力分布。其作用主要表现在以下几个方面：

(1) 钻井液向地层渗透

在海洋深水油气钻井中，出于环保和成本考虑，使用最广泛的是水基钻井液体系。同样水合物也赋藏在深水海底沉积层中，加之水基钻井液对水合物抑制性较好^[24]，因此海域水合物勘探开发钻井的首选是水基钻井液体系。由于井内压力通常大于地层孔隙压力，因而在井内水力和渗透压差作用下，水基钻井液就会向水合物地层渗透和扩散，从而导致井壁围岩应力发生变化。

(2) 井壁附近水合物分解

井眼打开后，由于井内压力变化以及钻井液和水合物地层的热交换将导致井壁附近水合物不可避免地发生分解。含水合物的沉积物岩石力学性质与不含水合物的差异较大，因而水合物分解本身就会对井壁围岩应力分布产生影响，况且水合物分解还会产生水和大量天然气，同样对井壁围岩的应力分布有影响。

(3) 温度扰动

由于钻井液循环以及钻具摩擦生热等因素的影响，井壁地层的温度在钻井过程中是处于不断变化过程中的。而井壁温度变化不仅使水合物无法保持稳定，还会导致井壁产生附加热应力，对井壁力学稳定也有影响。不过由于海底水合物赋藏水深都超过 300m，因而钻井液循环温度不高；其地层距海底又浅，都在 1000m 以内(姚伯初)因而地温不高。这两个因素加起来，使得钻井液与地层温度差不大，因而温度变化产生的热应力不像高温深井那样显著，可以忽略，其主要是对井壁附近的水合物稳定构成影响。

所以归纳起来，钻井液和水合物地层间的作用主要是压差产生的渗透和温差导致水合物分解这两个方面，二者共同作用影响着井壁围岩应力分布。因此在计算水合物地层井壁围岩应力场和分析井壁稳定性时，首先需要分析这两个因素对井壁应力场的影响规律。

第四章 钻井液入侵水合物储层地应力分析

钻井过程中井内液柱压力通常大于地层孔隙流体压力,因此钻井液在压差作用下向地层渗透是钻井液和水合物地层作用的主要方式。当没有流体流入或流出水合物地层时,根据上章推到的井壁应力分布计算式可知,原状地层孔隙压力将直接决定着井壁有效应力的大小。而当钻井液向渗透性较强的水合物层渗流时,会增大围岩孔隙压力,从而减小了地层骨架颗粒间的有效支撑应力。这种渗流作用引起的孔隙压力增量越大,岩石抗剪强度降低就越多,对围岩稳定性造成的不利影响也越大^[36]。因此研究钻井液入侵水合物地层的特性及规律是我们进一步研究水合物地层稳定的基础。

4.1 钻井液在一般油气地层的侵入

当井眼打开后,最先和水合物地层接触的就是钻井液。为便于分析它在水合物地层的侵入特性,先简单分析一般油气层钻井液的侵入特性。

4.1.1 钻井液侵入地层机理

由于钻井液柱压力大于地层孔隙内流体压力,致使钻井液在水力和渗流压差的作用下,驱走井壁周围地层孔隙中的原生流体而侵入地层,直到静水压力与维持毛细管力平衡时为止。

钻井泥浆滤液侵入含油气层的机理类似于油藏注水开发中的水驱油气过程,两者不同之处在于侵入的作用范围小,仅限于井眼周围一个有限的环形。

4.1.2 钻井液侵入油气地层理论计算模型

传统的侵入过程研究方法是基于一种阶跃模型,该模型假设地层可动烃被泥浆液完全按照活塞式驱替,侵入带具有均匀的含水饱和度和电阻率。但在精确研究侵入过程时,这种阶跃模型是无能为力的,必须要考虑实际侵入过程的特点^[37]。近几年,国内外众多研究人员开始把钻井液的侵入过程视作动态过程来研究。最新实验研究结果表明,钻井液的侵入主要以驱替、混合与扩散3种动态过程进行^[38]。在用数学模型分析此动态侵入过程时,往往做如下假设:

- (1)地层均匀且各向同性;
- (2)孔隙中的油(气)、水两相不混且微可压缩;
- (3)考虑毛管压力,忽略重力,流体只是水平方向的径向流动;
- (4)地层中流体参数服从达西定律;

(5)整个侵入过程中温度不变。

驱替过程:

驱替是指钻井液在渗透压差作用下,向井壁附近多孔介质渗流,并驱替走孔隙中可动流体(水、气、油)而占据孔隙空间。这种驱替实际上是一个多相渗流过程,因此满足下列油(气)和水两相渗流连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\rho_1 k k_{r1}}{\mu_1} \frac{\partial p_1}{\partial x} \right] = \frac{\partial (\rho_1 S_1 \phi)}{\partial t} \quad (4-1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\rho_w k k_{rw}}{\mu_w} \frac{\partial p_w}{\partial x} \right] = \frac{\partial (\rho_w S_w \phi)}{\partial t} \quad (4-2)$$

式中: p_1 , p_w 为油(气)、水压力, S_1 , S_w 为油(气)水饱和度, μ_1 , μ_w 为油(气)、水粘度, k_{r1} , k_{rw} 为油(气)、水相对渗透率, K 为地层绝对渗透率, ϕ 为地层孔隙度。

混合扩散过程:

所谓混合指的是钻井液侵入地层后,即当流体被泥浆滤液挤向地层深处时,在侵入前缘与地层孔隙中原始流体相混合。发生混合作用时,由于钻井液泥浆滤液矿化度一般和地层共生水的矿化度不同,二者之间的物理混合扩散传质方程:

$$\left(\frac{1}{r} \frac{\partial C_w}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_w}{\partial r^2} \right) = \frac{\partial C_w}{\partial t} \quad (4-3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\rho_w K k_{rw}}{\mu_w} r \frac{\partial p_w}{\partial r} \right) + q_w C_{wf} = \frac{\partial (\phi \rho_w S_w C_w)}{\partial T} \quad (4-4)$$

其中 C_{wf} 、 C_w 为泥浆滤液和地层水的矿化度, D 扩散系数, C_w 与质量分数定义相吻合。 S_w 和 P_w 可有渗流方程求解。扩散驱动力是由钻井液与地层水之间的离子浓度差产生的,然而在动态侵入过程中,虽然混合置换与扩散相继发生,但置换的驱动力仍然受井筒与地层之间的压力差控制。

初始条件和边界条件:

$$C_w(r > r_b, t) \Big|_{t=0} = C_{wi}$$

$$\frac{\partial C_w}{\partial r} \Big|_{r=r_b} = 0 \quad (4-5)$$

$$C_w \Big|_{r \leq r_b} = C_{mf}$$

式中: C_{wi} 、 C_{mf} 为原始地层流体和钻井液矿化度。

式(4-1)至(4-5)构成了整个钻井液径向侵入油(气)地层的数值计算模型。用隐式压力

显示饱和度法求解油(气)、水两相渗流方程，可得到不同时刻地层压力和流体饱和度的径向分布；对扩散方程，可得到不同时刻径向水的矿化度分布。

4.1.3 钻井液在油气层的侵入特性与影响因素

钻井液侵入油气储层是一个复杂的物理过程，与泥浆滤液性质、滤饼渗透率、井内泥浆柱和地层的压差、毛细管压力、油气水的相渗透率、不同矿化度的液体扩散对流以及泥浆浸泡时间等因素有关。其侵入油气地层的特点为：

- (1)侵入速率很小，因而毛管力和重力的影响相对增强；
- (2)侵入是由井孔向地层径向渗入，随侵入深度加大，单位面积的侵入速率减小；
- (3)侵入速率随时间而很快降低，属于不稳定渗流。

而这种侵入对原状地层的改变主要体现为：

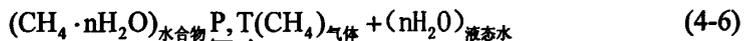
- (1)泥浆滤液携带的微粒在储层孔隙表面沉积和在孔喉处被捕集，导致孔隙度降低；
- (2)由于含水量的增加以及孔隙压力的变化，使孔隙地层颗粒间联系减弱，导致近井地带地层力学性能降低，容易引发扩径或缩径。

4.2 水合物在海底沉积层中的分解

海底水合物地层孔隙往往不是完全被水合物饱和的，还存在气和原生水，三者处于相平衡。因此钻井液在水合物地层的侵入类似钻井液侵入含气地层，主要不同就在于钻井过程中温度压力变化会导致井壁附近水合物发生分解，从而钻井液侵入过程中存在相变，而水合物分解生成的水和气又会反过来影响钻井液的侵入。因此掌握水合物在沉积地层的分解特性是分析钻井液侵入水合物地层特性及进一步研究井壁稳定的基础。

4.2.1 纯水合物的相平衡条件

要分析水合物的分解特性首先需要了解它的稳定条件。由于天然气水合物90%以上属于I型，其中甲烷含量都在90%以上，因此甲烷水合物的稳定条件是学者研究最多的。根据前述水合物形成条件可知，当水和甲烷气体充足时，在一定温度和压力下，水合物就会在水中形成。其形成过程可用下面公式表示：



当温度压力条件合适水合物形成时，反应就向左边进行；而形成后当温度升高或压力降低时，反应就向右边进行，这就是水合物分解。可见维持水合物稳定需要满足一定的温度压力关系，常被称为相平衡条件。当维持水合物稳定的相平衡条件改变时，水合物就会发生分解。因此研究水合物的分解首先要掌握它的相平衡规律。

一般来说,温度越高,形成水合物所需的压力也越高,相应的温度越低,形成所需的压力也相应降低,常将这种温度关系用图来表示即所谓的相平衡图。Miles 提出了关于天然气水合物稳定存在的温度压力方程:

$$P = 2.8074023 + aT + bT^2 + cT^3 + dT^4 \quad (4-7)$$

其中: $a = 1.559474 \times 10^{-1}$, $b = 4.8275 \times 10^{-2}$, $c = 2.78083 \times 10^{-3}$, $d = 1.5922 \times 10^{-4}$ 。

根据试验数据拟合得到的温压函数关系,国外已有学者和研究机构将各种气体水合物的相平衡条件编制成计算机模拟计算软件,可方便地计算纯的或混合的气体水合物相平衡温度与压力。

4.2.2 纯水合物分解研究

最初人们对水合物分解的研究主要集中在与其分解相关的热力学平衡条件上,后来学者们从动力学角度研究水合物分解特性及相关影响因素。

天然气水合物的分解涉及气体、水和固体水合物,温度、压力、水合物粒子表面积和分解推动力等对固体水合物分解速率都有很大影响。水合物分解过程可分为两个步骤:

(1)水合物粒子表面的笼形格子结构的解构,这一过程可以由下面的化学反应来描述:



其中, G 表示气体; λ_2 为水合物中每个水分子所包络的气体分子数。

(2)客体分子由表面的解吸过程。水合物分解发生在固体表面,而不是固体内。分解过程为吸热过程,并假定分解过程中固体粒子保持恒温。随着分解的进行,水合物粒子数减少,气体在固体表面产生,产生的气体进入主体气相。

目前,主要有两种 NGH 分解速度的计算方法。

(1)Kim 分解动力学方程

Kim 等提出的水合物分解动力学方程是:将 NGH 的表面积作为一个已知参数来计算,假设在具有高搅拌速率的条件下,忽略气相主体到粒子表面的传质阻力和水相主体到粒子表面的传热阻力,在进一步假设 NGH 分解速率与粒子总表面积和推动力(三相平衡逸度和气相主体甲烷逸度之差)成正比的前提下,提出如下的分解速率方程:

$$\frac{dn^H}{dt} = K_d A_s (f_c - f) \quad (4-9)$$

其中:

n^H —— t 时刻以水合物形式存在的气体量, mol;

$\frac{dn^H}{dt}$ —— 分解速度, 即单位时间内水合物分解生成的气体量, mol/min;

A_s —— NGH 粒子的总表面积, m^2 ;

K_d —— NGH 分解速率常数, 和温度有关, $mol/(m^2 \cdot Pa \cdot min)$;

f_g 、 f —— 三相平衡逸度和气相主体甲烷逸度, Pa.

(2) 孙长宇分解动力学方程^[39]

2002 年孙长宇等通过实验测定了 CH_4 水合物在不同温度、压力下的分解动力学数据, 建立了 CH_4 水合物分解动力学模型, 考察温度、压力及推动力对分解速率的影响。

水合物分解为吸热过程, 假定实验过程中固体粒子保持恒温。水合物分解过程包括: 粒子表面笼形格子结构的化解; CH_4 分子由表面解吸。以上过程发生在固体表面, 而不是其内部。随着分解过程的进行, 粒子收缩, $CH_4(g)$ 在固体表面产生, 产生的 $CH_4(g)$ 进入透明釜上方的气相中。假定反应容器中的气体摩尔数随着 CH_4 水合物的分解而增加。

$CH_4(g)$ 由水合物的分解速率为 $-\frac{dn^H}{dt}$, n^H 为水合物中 $CH_4(g)$ 的量(mol)。由于水合物之间存在孔隙, 当水合物分解温度高于 $0^\circ C$ 时, 分解产生的 H_2O 流向透明釜下部, 可排除质量传递的影响, 因此假定固体表面的气体逸度等于 CH_4 在主体气相中的逸度 $f_{CH_4}^g$, 并可进一步假定 H_2O 与粒子表面的传热阻力可以忽略, 粒子温度实际上等于 H_2O 的温度。因此水合物的分解速率可以写作:

$$r^H = -\frac{dn^H}{dt} = k \cdot n^H \quad (4-10)$$

当 $t=0$ 时, $n^H = n_0^H$ 。

式中, r^H 为水合物分解速率, mol/min; n_0^H 为水合物中 CH_4 气的总物质的量, mol; k 为表观分解速率常数, min^{-1} , 可用来校正水合物粒子表面积的影响。

对上式积分可得到:

$$\frac{n^H}{n_0^H} = \exp(-k \cdot t) \quad (4-11)$$

由式(4-10)可知, 气体水合物的分解反应在三相共存条件下可看作一级反应。

由于分解压力低于该温度下粒子的三相平衡压力, 因而可假定分解速率正比于推动力, 此处的推动力为气体在三相平衡压力下的逸度与固体表面气体的逸度之差。水合物分解推动力为 $f_g - f$, 表观速率常数 k 与 $f_g - f$ 呈线性关系, 可表示为

$$k = k(f_g - f) \quad (4-12)$$

式中, k 为速率常数, $min^{-1} \cdot MPa^{-1}$; f 和 f_g 分别为固体表面气体的逸度与气体在三

相平衡压力下的逸度, MPa。k 与推动力的大小无关, 根据实验数据拟合的 k 值可以预测 CH_4 水合物在其他温度和推动力下的表观分解速率常数^[9]。

4.2.3 水合物分解数学模型

到目前为止, 能够较好反映水合物分解过程的模型很多。从时间排序来看, 其中的十个能够代表近年来的发展历程^[40]。

(1)Holder 模型(1982)

该模拟器为三维单相气体渗流模型, 可以模拟与常规气藏相邻的水合物层中的气体产出。对于具有下伏天然气层的水合物藏, 首先应开采常规气藏。随着生产过程中气藏压力的降低, 气藏与水合物藏界面处的压力降低, 从而使水合物分解。模型中考虑气相的质量守恒和能量守恒, 但没有考虑水合物分解时水的产出。计算结果表明, 水合物层分解的气体在总产气量中占很大比例, 并且随时间增加; 随着水合物的分解, 气/水合物界面温度降低。

(2)Mcguire 模型(1982)

Mcguire 提出了两个热力模型和一个降压模型。两个热力模型为解析模型, 包括前缘驱替模型和裂缝流动模型, 分别代表水合物层产气量的上限和下限。模型研究了孔隙度、渗透率、储层厚度、注入温度及裂缝尺寸的影响。降压模型为利用水力裂缝井开发水合物的一维孔隙流动模型。计算结果表明, 降压生产时的产气量与裂缝尺寸、油藏厚度、渗透率以及井底流压有关。

(3)GBayles 模型(1986)

该模型为热力解析模型, 模型考虑了井筒和底、盖层热损失, 计算得到了单井蒸汽吞吐开发水合物藏方式热利用率的上限和下限, 研究了水合物藏深度、厚度以及孔隙度的影响。结果表明蒸汽吞吐方式开采水合物藏也是可行的。

(4)Burshears 模型(1986)

该模型为三维气、水两相模拟器, 用来模拟与常规气藏相邻的水合物的分解, 但它没有考虑水合物分解的动力学过程。水合物的分解主要受水合物与气体界面处压力降的影响, 模型中假设圆形地层中心一口井, 产气量一定, 水合物分解的压力温度条件瞬时平衡。模拟结果表明, 水合物分解过程中不需要额外的外来热量, 而且水合物分解过程中产出的水不是特别多, 不会对气体流动产生严重影响。

(5)Selim 模型(1990)

该模型为热力解析模型, 由分解相和未分解相的连续性方程、达西方程和能量守恒

方程组成,并假设水合物分解的水是静止不动的,分解出的气量仅与温度有关。计算结果表明水合物分解前缘的移动速度与时间 $t^{-1/2}$ 成正比;水合物的分解速度与孔隙介质的孔隙度有关,而与渗透率无关;产出能量与注入能量的比为 6.2~11.4。该模型中没有考虑多相多维、热量传递及水合物分解动力学等,假设条件太多。

(6)Yousif 模型(1990)

该模型为一维三相(气、水、水合物)有限差分数值模拟器,用来模拟 Berea 水合物岩心在实验室的降压生产过程,主要计算产气量与水合物分解前缘的位置,数值模拟计算结果与实验室试验结果吻合较好。

(7)Moridis 模型(1998)

LawrenceBerkeley 国家实验室在 TOUGH2 通用数值模拟软件中加入了 EDSHYDR 模块形成的完善的水合物新模型。TOUGH2 是一个多组分、多相的热能模拟软件,EDSHYDR 模块通过求解物质和能量守恒方程,可以模拟各种复杂地层情况下天然气的平衡和动力学模型,而且考虑了气相中的 Klinkenberg 效应和分子扩散。新加 EDSHYDR 模块中考虑 4 相(气、液、冰、水合物)9 组分(水合物、水、甲烷、非甲烷烃类、分解产生的甲烷、分解产生的非甲烷烃类、盐、水溶性抑制剂和拟组分热焓),各组分存在于各相中。该模型可描述水合物分解的所有机理,包括降压、注热、加入抑制剂的效应。模拟结果表明,从甲烷水合物藏中开采甲烷气在技术上是可行的,且具有极大的潜力;热力开采与降压开采联合应用,效果会更好。

(8)Ahmadi 模型(1999)

该模型为一维解析模型,可以描述封闭水合物藏降压分解产生天然气开发的过程,模型未考虑分解产生的水的影响,计算得到压力和温度分布。研究结果表明水合物藏产气速度受压力、温度、渗透率和井底流压的影响。

(9)Masuda 模型(1999)

该模型为基于水合物分解动力学理论开发的气、水两相数值模拟器。模型中将渗透率考虑为水合物饱和度的函数,能量方程考虑热传导和热对流。以 Kim-Bishnoi 方程描述水合物分解速度。计算结果与 Berea 岩心实验结果一致。

(10)Swinkels 模型(1999)

该模型由 Shell 公司研制,为三维、三相(气、水、水合物)四组分(甲烷、非甲烷烃类气体、水、焓)热力有限差分模型。模型模拟的是海底的而不是极地环境的水合物,因此不包含水的固相。用室内相平衡软件包来计算各组分的热力学性质,考虑水合物的

相特征、能量守恒及储层压实作用,利用水平井模拟了水合物顶气藏的开采。结果表明,在井筒周围焦耳—汤姆逊效应起重要作用,在水合物开采过程中需要大量生产井以保证分解产生的水的产出和能量的注入。

4.2.4 各种模型评价对比

从天然气水合物开采数值模拟研究历程来看,可以将模型分为降压模型和加热模型两大类,这些模型都重点模拟水合物的分解、运移和产出。对于矿场实用的计算模型,应当考虑以下6个基本因素:流体在孔隙介质中的流动、流体向周围岩层的热量传递、水合物分解动力学、气水两相流动、三维油藏形态、矿场多井系统等。根据上述模型中是否考虑了这些主要因素对模型进行评价,结果见表4-1所示。

表 4-1 水合物模型对比
Table 4-1 Contrast of NGH model

模型		考虑因素					
		因素 1	因素 2	因素 3	因素 4	因素 5	因素 6
降压模型	Holder 模型	√	√			√	√
	Mcguire 模型 a		√				√
	Burshears 模型	√	√		√	√	√
	Yousif 模型	√		√	√		
	Ahmadi 模型	√					√
	Masuda 模型	√	√	√	√		
热力模型	Mcguire 模型 b		√				√
	G.Bayles 模型		√				√
	Selim 模型						√
	Moridis 模型*	√	√	√	√	√	√
	Swinkels 模型*	√	√		√	√	√

注:因素1——孔隙介质中的流动;因素2——向周围岩层中传递热量;因素3——分解动力学;因素4——两相气水流动;因素5——三维笛卡儿坐标系;因素6——矿场应用;√表示模型中考虑该因素;*表示模型综合考虑降压开采和热力开采。

4.2.5 水合物在多孔介质中的分解研究

在上述水合物分解讨论中,都没有涉及水合物在多孔介质中分解特性研究,而自然界中的水合物都赋藏在永冻区或海底的多孔沉积地层中,而且孔隙中还含有其他流体,因而研究水合物在多孔介质中的分解特性对钻井评价和水合物的开发设计都有重要的意义。

(1)海底地层中的水合物相平衡

对多孔介质中水合物分解研究比较多的集中在水合物的热力学性质和分解条件上，即相平衡研究。与纯水，气，水合物三相稳定条件相比，海底沉积层中水合物形成和稳定存在除受温度影响外，还受到孔隙流体盐度和孔隙效应这两个因素制约，这些因素共同导致水合物只能在距海底一定深度的范围内的沉积层中存在。

① 孔隙流体盐度

海底水合物通常距海底较浅，成岩作用不强，孔隙水的含盐度基本上和海水差不多。而盐的存在以及浓度的变化对水合物的稳定条件是有影响的。Kobayashi 等研究发现随着盐分浓度的增加，甲烷水合物的稳定条件向着低温、高压方向移动的现象。这表明加入盐分将阻碍水合物的形成。而且随着温度的增加，盐度的影响也越来越大。多位学者根据实验拟合了不同甲烷浓度和盐度下的水合物温压关系，如 Dickens 和 QuinbyOHunt^[17] 依据试验数据得出了天然海水中甲烷水合物温度的经验关系式：

$$\frac{1}{T} = 3.79 \times 10^{-3} - 2.83 \times 10^{-4} \log(P) \quad (4-13)$$

② 孔隙效应

与管道、井筒以及实验室内形成水合物条件相比，在多孔介质中，相邻接触相间的界面能减少会引起毛细管作用，从而导致不同相间压力差异而使水合物相平衡发生迁移。Makogon 首先指出与纯气液体相比，气体水合物在多孔介质中生成需要更低的温度或更高的压力。Yousif 和 Sloan^[4] 通过在岩心及多种土介质上对气体水合物生成及分解试验得到了近似的结论。上述学者都将微小多孔介质中的水合物平衡迁移归因于毛细作用。

不过 Henry 等用 Blake 海台海底沉积岩样合成水合物时，发现毛细管作用对水合物稳定并没有产生很大影响。Doug Turner 和 Dendy Sloan 用亚得里亚海底砂岩样品以及陶瓷在实验室内进行了水合物合成试验，同样发现在亚得里亚海底砂岩中水合物形成温度并没有因为毛细管作用发生较大相平衡偏移。随后用 Clennell^[41] 等人提出的 Kelvin_Clapeyron 近似法对孔径效应分析，发现孔径尺寸为 600nm 时，在毛细管力作用下水合物相平衡只有 0.2% 的向下偏移，而对大于 600nm 孔径的多孔介质来说，毛细管作用基本上对水合物相平衡不产生影响。Kastner 绘出了全球已发现水合物赋藏地区的水合物相平衡图，从中也发现几乎没有相偏移情况发生。因而对于海底水合物来说，由于距海底较浅，沉积压实作用不明显，地层孔隙中的毛细管作用对水合物稳定条件的影响可以忽略不计，主要是孔隙中流体性质影响较大。

(2)水合物储层分解研究

除了在实验室研究多孔介质中水合物分解特性外,一些学者也用模型研究从天然气水合物储层分解取气的相关技术。Holder^[42]等提出了采用降压分解水合物的数学模型,模型以地层中热量和质量的传递为基础,他们认为地层中敏感的热量传递为水合物的分解提供了能量。Makogon^[43]假设气体水合物的降压分解过程类似于固体融化,采用经典的 Stefan 问题描述了降压分解水合物的过程,提出了用于描述天然气在多孔介质中移动以及热传递的基本方程,得到了有关压力分布的自相似解,但他的模型中忽略了水合物分解产生的水的影响。在 Yousif^[44]等人的一维模型中考虑了水相的移动。结果发现在水合物分解过程中地层中会出现一个最大含水量,而分解产生的气体在减压下膨胀会推动分解区的水形成一个水相前缘。而且气体相对渗透性降低还会使气体流动变慢从而导致孔隙压力增加,进一步影响了水合物的分解,因此在世界水合物开采过程中,产生的水应及时排除。由于到目前为止也只有前苏联的麦索亚哈气田进行过实际的水合物开采,因而上述各模型都还是处于概念模拟上并没有被实际数据所验证。

4.2.6 水合物在海底沉积层中的分解特性

结合上述多孔介质中水合物分解和纯水合物分解动力学研究结果以及相应水合物相平衡条件,可归纳推导出以下几点海底沉积层水合物分解特性:

(1)海底水合物的相变过程主要受温度、压力和孔隙流体性质特别是盐度控制,但同纯水合物一样,压力和温度是主要影响因素;

(2)孔隙的毛细管作用对相变本身影响不大,主要是影响分解产生的水、气和原有地层流体的运移,也就是说毛细管作用对于水合物分解中的传质有很大的影响;

(3)由于海底沉积层的温度都大于或等于 0℃,因而水合物分解过程中的自保作用不存在;

(4)与一般实验室内进行的水合物分解最大的不同是海底水合物分解是一个受限的孔隙空间进行的,模拟计算表明在一个受限的环境中水合物的分解会显著增加孔隙压力,增加程度取决于沉积层的渗透系数和增温速度。比如当地层渗透性很小而水合物受热又很快,则分解产生的气体和水不能及时流走会导致孔隙压力增加很大。因而相对于等压来说要使水合物完全分解就需要更多的热量,这就意味着在恒定加热速度下,完全分解需要较长的时间,即分解速度变慢。此外如果水合物分解就发生在距海底很近的沉积层的话,由于上覆岩层重量较小,这样增加的孔隙压力会导致液化和破裂,由此

可能引发一些海底沉积薄层滑坡。

总之海底水合物分速度和范围受温压改变程度、沉积地层的渗透性，水合物分布和数量等因素影响。由于水合物分解的焓变反过来会导致温度发生改变，孔隙流体压力也会因相变而改变，分解释放的水又影响液态溶液的盐度等等原因使得海底水合物分解是一种比融化和升华更为复杂的过程。到目前为止，气体水合物分解的各项研究特别是动力学研究还在进行中。

4.3 钻井液在水合物地层的侵入分析研究

4.3.1 钻井液入侵过程分析

如前所述，钻井液在压差的作用下向水合物地层渗透并驱替地层中原有的水和气体。同时由于钻井液本身温度偏高以及钻具摩擦生热，使得井内温度高于地层温度，导致井壁周围水合物发生分解。而分解产生的水和气同侵入的钻井液一起又被新进入的钻井液驱赶着向地层深处运移。因此钻井液在水合物地层的侵入伴随着水合物的分解以及热量的传递。当井眼打开后，钻井液固相和液相迅速渗入井壁，导致井壁附近含水量剧增，同时井壁附近水合物也由于温度和压力的急剧变化而较快地分解成水和气，导致井壁附近含水量进一步加大，如果是砂岩介质，就很可能液化。而且水合物的分解使得孔隙顺畅，导致渗透性相应提高从而加快侵入速度，对钻井液固相堆积形成滤饼也有不利影响。因此从井眼打开到井壁附近水合物完全分解这期间是井壁最不稳定的，滤饼形成也较通常地层慢。随着钻进的进行，滤饼在逐渐形成，透过滤饼的泥浆滤液在压差的作用下继续向深处侵入，由于这个时候温度变化不是很剧烈，水合物的分解也就相对缓慢一些，加之侵入及水合物的分解使孔隙压力加大，也抑制了水合物的分解。到侵入后期，孔隙中的气体和水越来越多，孔隙压力继续升高，气体被压缩泥浆滤液渗流基本停止，但扩散还会存在。在这个阶段，如果孔隙内温压条件合适，部分气体和水又会重新形成水合物。

4.3.2 钻井液侵入的传热分析

以往在分析钻井液侵入油气地层时往往把它看成一个等温渗透过程，不考虑温度的影响。实际上钻井进程是一个非绝热过程，在钻井液循环和滤液侵入井壁地层的过程中往往还伴随着和地层的热交换活动特别是在水合物地层钻井时，由于钻头摩擦、钻井液本身循环温度较高以及海底水合物赋藏距海底较浅地温较低等共同作用使钻井液温度

高于地层温度，那么热量会通过骨架传导和侵入流体的对流换热和地层进行热交换，导致地层温度升高从而使井壁附近水合物发生分解。而在过压钻井条件下温度也就成了水合物分解的主要推动力。因而在分析钻井液侵入水合物地层及对井壁稳定影响时，不能把它看成一个等温过程。况且水合物分解本身也是一个吸热反应，分解的同时也会影响地层温度，温度的变化又反过来影响水合物分解速度。因此在分析钻井液侵入水合物地层特性时必须考虑温度这个重要因素，是一个非等温侵入过程。

4.3.3 耦合水合物分解的钻井液侵入数学模型

根据上述对钻井液侵入过程和传热特性分析，可知钻井液侵入水合物地层的一个主要特点就是在侵入过程中伴随有水合物的分解以及温度的变化。在过压钻井条件下，温度成了水合物分解的主要因素，其控制着水合物的分解速度和范围。而钻井液侵入以及水合物分解又会改变孔隙压力，影响孔隙流体流动和水合物分解速度。因此钻井液的侵入过程实际上是水合物分解、温度场和渗流场的耦合过程，其共同作用并影响井壁附近地层的固有力学、孔隙水压力、毛细管压力、水饱和度、电阻率等参数大小因而构建合适的侵入数值模型就成了我们评估这些影响并进而分析井壁稳定的最有效途径。

由前所述，井壁最易失稳是在钻井液侵入初始的某个时段，而这期间主要是钻井液在地层中的渗流和水合物分解。因此可以不考虑扩散作用。这样我们就可以将钻井液在水合物地层的侵入归结为伴随有相变的多相流体在水合物地层这种多孔介质中的渗流和传热，利用多孔介质的传热传质基本原理和借鉴钻井液在油气层侵入的数值模型就可以构建钻井液在水合物地层的侵入模型。显然水合物分解对渗流的影响是模型构建的关键，在这里我们把水合物分解处理成一个非等强度的持续水源和气源，并将前述水合物分解动力学模型引入渗流方程，得到了类似于侵入油气地层的计算模型。

由于大多数天然气水合物分布在海洋中，因此模型中考虑海洋环境下天然气水合物的分解，即模型中考虑水、气、水合物三相，而不考虑冰相(如果是冻土环境中天然气水合物的分解，则需要考虑冰相)。天然气水合物分解后产生气和水，流向井底，因此地层为气和水两相渗流，水合物为固相，不参与流动。考虑水合物在多孔介质中的相平衡和分解动力学特征和分解过程中的吸热现象以及加热开采过程中地层的能量守恒，建立天然气水合物开采模拟的数学模型。

(1)模型假设条件

为便于分析钻井液和税额毫无分解对孔隙压力和含水量的影响，进行如下假设：

① 不考虑原始地层和水基钻井液中的盐分，孔隙初始被水、水合物和甲烷气体完全饱和，三相保持热力学平衡。其中水合物为固相，仅考虑水、气两相渗流，流体渗流符合达西定律；

② 能量守恒方程中考虑四个部分：热传导、热对流、内部热源以及由于水合物分解而消耗的热量；

③ 水合物分解产生气和水，忽略水和气重新生成水合物的过程，相平衡瞬间建立；

④ 忽略气在水中的溶解，水合物和水不可压缩，比热，导热系数为常数；

⑤ 忽略重力作用

⑥ 地层骨架各向同性，且是刚性体，即不考虑变形。

(2)模型方程构建

假设从井壁地层中取一单元控制体。根据质量守恒、水合物分解动力学规律、达西定律和能量方程可得如下系列方程是。：

① 水、气体和水合物的渗流方程：

$$\nabla \cdot (\rho_g V_g) + \frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho_g s_g) = m_g \quad (4-14)$$

$$\nabla \cdot (\rho_w V_w) + \frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho_w s_w) = m_w \quad (4-15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho_h s_h) = -m_h \quad (4-16)$$

式中： ϕ 为地层孔隙度； s_H 为水合物饱和度； s_w 为水饱和度； s_g 为甲烷气体饱和度； ρ_w 为水的密度， kg/m^3 ； ρ_g 为气体密度， kg/m^3 ； ρ_h 为水合物密度， kg/m^3 ； V_w 为水渗透率， m/s ； V_g 为气体渗流速度， m/s ； m_w 为水合物分解水的质量生成速率， m/s ； m_g 为水合物分解气的质量生成速率， kg/s ； m_h 为水合物分解质量速率， kg/s 。

式(4-14)和(4-15)右边项相当于一般渗流方程的源(汇)项，反映了水合物分解对渗流的影响。Yousif等人给出了 m_w 、 m_h 和 m_g 之间的关系：

$$m_h = m_g + m_w \quad (4-17)$$

$$m_g = m_h \frac{M_g}{n_w M_w + M_g} \quad (4-18)$$

式中 M_g 为甲烷分子量； M_w 为水分子量； n_w 为水合物分子中水分子数目，对于甲烷水合物 $n_w \approx 6$ 。

根据水合物分解的化学过程及分解动力学特征，其分解速度可以表示成：

$$m_h = K_d A_r (p_e - p) \quad (4-19)$$

其中： K_d 为反应速度常数， $\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ Pa}\cdot\text{s})$ ； A_r 为反应比面， m^{-1} ； p_e 为反应临界压力， Pa 。

② 气体和水的流动满足达西定律：

$$V_w = -\frac{k k_{rw}}{\mu_w} \nabla \cdot p_w \quad (4-20)$$

$$V_g = -\frac{k k_{rg}}{\mu_g} \nabla \cdot p_g \quad (4-21)$$

式中： k 为多孔介质绝对渗透系数； μ_g ， μ_w 为水和气体动力学粘度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； k_{rw} ， k_{rg} 为水和气体相对系数； p_w ， p_g 为水和气体的渗流压力， MPa 。

③ 能量守恒方程：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} [\phi(\rho_w S_w U_w + \rho_g S_g U_g + \rho_h S_h U_h) + (1-\phi)\rho_s C_s T] \\ & + [\nabla \cdot (\rho_w h_w V_w) + \nabla \cdot (\rho_g h_g V_g)] + q_h \frac{m_g}{M_g} = \nabla \cdot (\lambda_e \nabla \cdot T) \end{aligned} \quad (4-22)$$

式中： U_w ， U_g ， U_h 为水、气和水合物单位质量的内能， J ； ρ_s 为沉积层骨架密度， kg/m^3 ； C_s 为骨架的等压比热， $/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$ ； h_w ， h_g 为水和气的比焓， J ； q_h 为甲烷水合物摩尔分解热， J/mol ； λ_e 为总的有效导热系数， $\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ 。

上式左边第一项表示单元体内能的增量，第二项表示对流传出的能量，第三项是水合物分解放出的热量，最后一项是热传导进入单元体的能量。

用温度可近似将上式表示为：

$$(\rho C)_e \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(\rho_w C_w V_w + \rho_g C_g V_g) T] + q_h \frac{m_g}{M_g} = \lambda_e \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4-23)$$

其中：

$$(\rho C)_e = (1-\phi)\rho_s C_s + \phi[\rho_w S_w C_w + \rho_g S_g C_g + \rho_h S_h C_h] \quad (4-24)$$

式中： C_w ， C_g ， C_h 为水、水合物和气体的等压比热。

④ 状态方程：

$$\rho_s = \text{常数}$$

$$\rho_h = \text{常数}$$

$$\rho_w = \text{常数}$$

$$\rho_g = \frac{PM_g}{RTZ} \quad (4-26)$$

⑤ 辅助方程：

$$S_w + S_g + S_h = 1$$

$$P_c(S_w) = P_g - P_w$$

$$k_{rw} = k_{rw}(S_w, S_h)$$

$$k_{rg} = k_{rg}(S_w, S_h)$$

$$P = S_w P_w + S_g P_g \quad (4-27)$$

4.3.4 模型求解及分析

(1)数值求解：

隐式求解压力：

将渗流方程(4-14)至(4-16)各式左右两端分别乘以 B_g ， B_w ， B_h ，得：

$$\text{左端} = B_g \left\{ \nabla \cdot \left(\frac{kk_{rg}}{B_g \mu_g} \nabla \cdot p_g \right) + m_g \right\} + B_w \left\{ \nabla \cdot \left(\frac{kk_{rw}}{B_w \mu_w} \nabla \cdot p_w \right) + m_w \right\} - B_h m_h \quad (4-28)$$

$$\text{右端} = B_g \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_g}{B_g} \right) + B_w \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_w}{B_w} \right) + B_h \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_h}{B_h} \right) \quad (9)$$

其中：

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_g}{B_g} \right) = \frac{\partial \phi}{\partial t} \left(\frac{S_g}{B_g} \right) + \frac{\partial S_g}{\partial t} \left(\frac{\phi}{B_g} \right) - \frac{\phi S_g}{B_g^2} \frac{\partial B_g}{\partial t}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_w}{B_w} \right) &= \frac{\partial \phi}{\partial t} \left(\frac{S_w}{B_w} \right) + \frac{\partial S_w}{\partial t} \left(\frac{\phi}{B_w} \right) - \frac{\phi S_w}{B_w^2} \frac{\partial B_w}{\partial t} \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_h}{B_h} \right) &= \frac{\partial \phi}{\partial t} \left(\frac{S_h}{B_h} \right) + \frac{\partial S_h}{\partial t} \left(\frac{\phi}{B_h} \right) - \frac{\phi S_h}{B_h^2} \frac{\partial B_h}{\partial t}\end{aligned}\quad (4-30)$$

将(4-30)代入(4-29), 则右端变为:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} - \phi \left[\frac{S_w}{B_w} \frac{\partial B_w}{\partial P_w} \frac{\partial P_w}{\partial t} + \frac{S_g}{B_g} \frac{\partial B_g}{\partial P_g} \frac{\partial P_g}{\partial t} + \frac{S_h}{B_h} \frac{\partial B_h}{\partial P_h} \frac{\partial P_h}{\partial t} \right] = \phi C_t \frac{\partial p_w}{\partial t} \quad (4-31)$$

其中:

$$\begin{aligned}C_t &= C_p + C_w S_w + C_g S_g + C_h S_h \\ C_p &= \frac{1}{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial p} \\ C_w &= -\frac{1}{B_w} \frac{\partial B_w}{\partial p_w} \\ C_g &= -\frac{1}{B_g} \frac{\partial B_g}{\partial p_g} \\ C_h &= -\frac{1}{B_h} \frac{\partial B_h}{\partial p_h}\end{aligned}\quad (4-32)$$

由左端与右端相等得到:

$$B_g \left\{ \nabla \cdot \left(\frac{k k_{rg}}{B_g \mu_g} \nabla \cdot p_g \right) + m_g \right\} + B_w \left\{ \nabla \cdot \left(\frac{k k_{rw}}{B_w \mu_w} \nabla \cdot p_w \right) + m_w \right\} - B_h m_h = \phi C_t \frac{\partial p_w}{\partial t} \quad (4-33)$$

假设单元体体积为 V_B , 采用单元体法建立差分格式:

$$B_g (\Delta T_g \Delta p_g + G_g + M_{vg}) + B_w (\Delta T_w \Delta p_w + G_w + M_{vw}) - B_h M_{vh} = \frac{(V_p C_t)_{ijk}^n}{\Delta t} (p_{wijk}^{n+1} - p_{wijk}^n) \quad (4-34)$$

其中:

$$\begin{aligned}G_w &= 0 \\ G_g &= \Delta T_g \Delta p_{cgw} \\ V_p &= V_b \phi \\ M_{vw} &= V_b m_w\end{aligned}$$

$$M_{vg} = V_b m_g$$

$$M_{vh} = V_b m_h \quad (4-35)$$

展开整理得：

$$A_{Tijk} p_{wij(k-1)}^{n+1} + A_{Sijk} p_{wi(j-1)k}^{n+1} + A_{wijk} p_{w(i-1)jk}^{n+1} + E_{ijk} p_{wijk}^{n+1} + A_{Eijk} p_{w(i+1)jk}^{n+1} \\ + A_{Nijk} p_{wi(j+1)k}^{n+1} + A_{Bijk} p_{wij(k+1)}^{n+1} = B_{ijk} \quad (4-36)$$

其中：

$$A_{Tijk} = B_{wijk} T_{wij(k-\frac{1}{2})}^n + B_{Eijk} T_{wij(k-\frac{1}{2})}^n$$

$$A_{Bijk} = B_{wijk} T_{wij(k+\frac{1}{2})}^n + B_{Eijk} T_{wij(k+\frac{1}{2})}^n$$

$$A_{Sijk} = B_{wijk} T_{wi(j-\frac{1}{2})k}^n + B_{Eijk} T_{wi(j-\frac{1}{2})k}^n$$

$$A_{Nijk} = B_{wijk} T_{wi(j+\frac{1}{2})k}^n + B_{Eijk} T_{wi(j+\frac{1}{2})k}^n$$

$$A_{wijk} = B_{wijk} T_{w(i-\frac{1}{2})jk}^n + B_{Eijk} T_{w(i-\frac{1}{2})jk}^n$$

$$A_{Eijk} = B_{wijk} T_{w(i+\frac{1}{2})jk}^n + B_{Eijk} T_{w(i+\frac{1}{2})jk}^n$$

$$E_{ijk} = -[A_{Tijk} + A_{Bijk} + A_{Sijk} + A_{Nijk} + A_{wijk} + A_{Eijk} + \frac{(V_p C_t)^n}{\Delta t}]$$

$$B_{ijk} = -\frac{(V_p C_t)^n}{\Delta t} p_{wijk}^n - W_{ijk}$$

$$W_{ijk} = B_w (G_w + M_{vw}) + B_g (G_g + M_{vg}) - B_h M_{vh} \quad (4-37)$$

应用预处理的共轭梯度法求解差分方程组(4-36)，既得水相压力分布，代入毛管力公式，可得气相压力分布。

显示求解饱和度：

建立方程(4-14)和(4-16)中水组分和水合物组分的差分方程：

$$\Delta T_w^n \Delta p_w^{n+1} + M_{vw} = \frac{1}{\Delta t} \left[\left(\frac{V_p S_w}{B_w} \right)_{ijk}^{n+1} - \left(\frac{V_p S_w}{B_w} \right)_{ijk}^n \right] \quad (4-38)$$

$$-M_{vh} = \frac{1}{\Delta t} \left[\left(\frac{V_p S_h}{B_h} \right)_{ijk}^{n+1} - \left(\frac{V_p S_h}{B_h} \right)_{ijk}^n \right] \quad (4-39)$$

则水，水合物，气体饱和度可由下式求得：

$$\left(\frac{V_p S_w}{B_w}\right)_{ijk}^{n+1} = \Delta t(\Delta T_w^n \Delta p_w^{n+1} + M_{vw}) + \left(\frac{V_p S_w}{B_w}\right)_{ijk}^n \quad (4-40)$$

$$\left(\frac{V_p S_h}{B_h}\right)_{ijk}^{n+1} = -M_{vw} \Delta t + \left(\frac{V_p S_h}{B_h}\right)_{ijk}^n \quad (4-41)$$

$$S_g = 1 - S_w - S_h \quad (4-42)$$

根据式(4-17)至(4-19)，将水合物分解项处理为：

$$(M_{vg})_{ijk}^{n+1} = K_d (A_s V_b)_{ijk} (p_e - p_g^{n+1})_{ijk} \quad (4-43)$$

求解流程图：

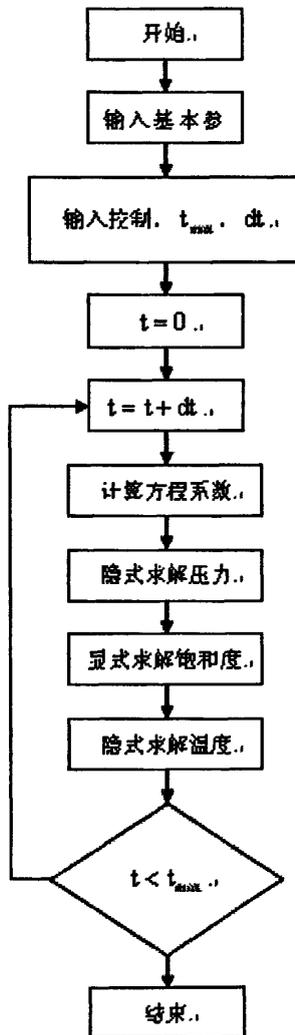


图 4-1 求解流程图

Fig. 4-1 Solving flow chart

模拟计算软件界面：



图 4-2 程序主界面

Fig. 4-2 Main interface of the software

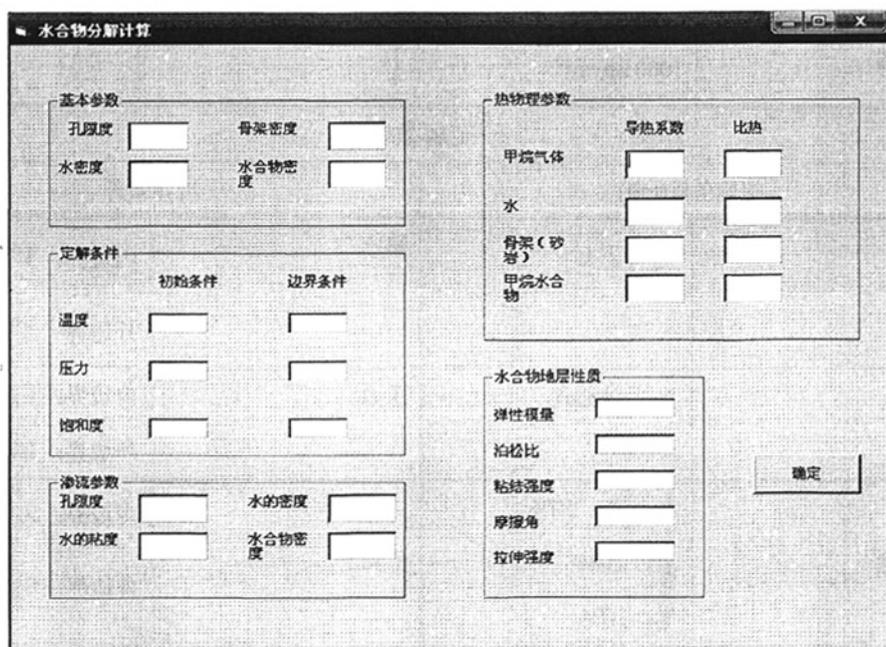


图 4-3 数据输入界面

Fig. 4-3 Interface of data recording

(2)数值模拟分析

计算所用参数及定解条件见表 4-2 所示。

表 4-2 有限元计算参数和模型定值条件

Table 4-2 Parameter for finite element method and model definite condition

基本参数

孔隙度	40%	骨架密度	2000 kg/m ³
水密度	1000 kg/m ³	水合物密度	910 kg/m ³

热物理参数

	导热系数	比热	水合物分解热
甲烷气体	0.007 W/m ⁰ C	2093 J/kg ⁰ C	54.48 KJ/mol
水导热系数	0.58 W/m ⁰ C	4200 J/kg ⁰ C	
骨架(砂岩)	1.5 W/m ⁰ C	880 J/kg ⁰ C	
甲烷水合物	0.53 W/m ⁰ C	2500 J/kg ⁰ C	

渗流参数

孔隙度	40%	水的粘度	1.81.8×10 ⁻³ Pa·s
水密度	1000 kg/m ³		

定解条件

初始条件(t=0)		边界条件	
温度	T ₀ = 2 ⁰ C	温度	内边界: 5 ⁰ C 外边界: 2 ⁰ C
压力	P ₀ = 10MPa	压力	内边界: 15MPa 外边界: 10MPa
饱和度	水合物: 50% 水: 40% 气: 10%	饱和度	内边界: S _w = 1 外边界: S _w = 40%

地层导热性能还受温度影响。对于孔隙介质骨架和一般液体来说,其导热性一般随温度升高而降低。但水是一个例外,其导热系数随温度增加而上升。此外气体导热系数

也随温度上升而增加。而且对于孔隙流体来说，温度增加也使得对流换热增强。因此综合来看，对于饱和水、气体、水合物的水合物地层来说，其导热性能应随温度增加而成上升趋势，可按图 4-4 所示关系进行模拟计算。此外相对渗透率也假设只是含水饱和度的函数，并满足下列函数关系进行模拟计算。此外相对渗透率也假设只是含水饱和度的函数，并满足下列函数关系：

$$k_{rg} = \begin{cases} (1 - \frac{S_w}{0.9})^{3.5}(1 + 3S_w), & 0 \leq S_w \leq 0.9 \\ 0, & S_w \geq 0.9 \end{cases}$$

$$k_{rw} = \begin{cases} (\frac{S_w - 0.2}{0.8})^{3.5}, & 0.2 \leq S_w \leq 1 \\ 0, & 0 \leq S_w \leq 0.2 \end{cases} \quad (4-44)$$

图 4-5 表明了毛管力与含水饱和度的关系

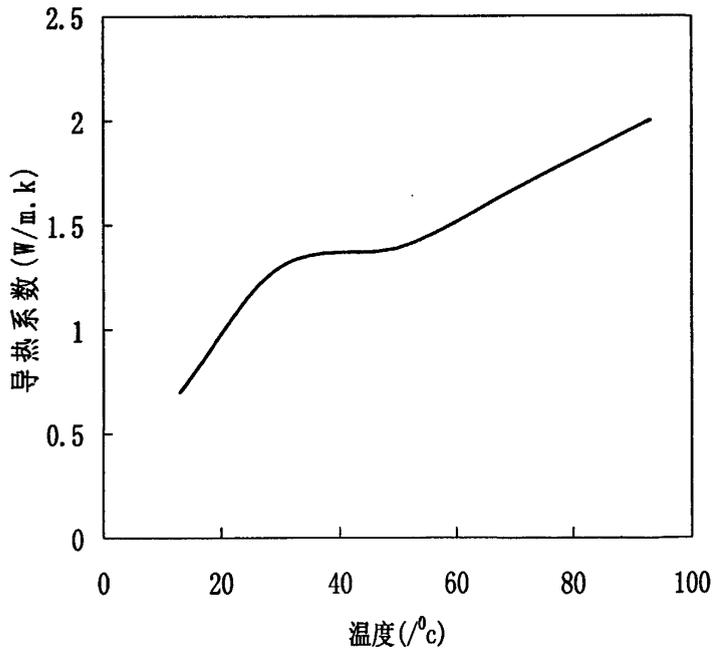


图 4-4 温度与导热系数的关系
Fig. 4-4 Temperature-K-factor curve

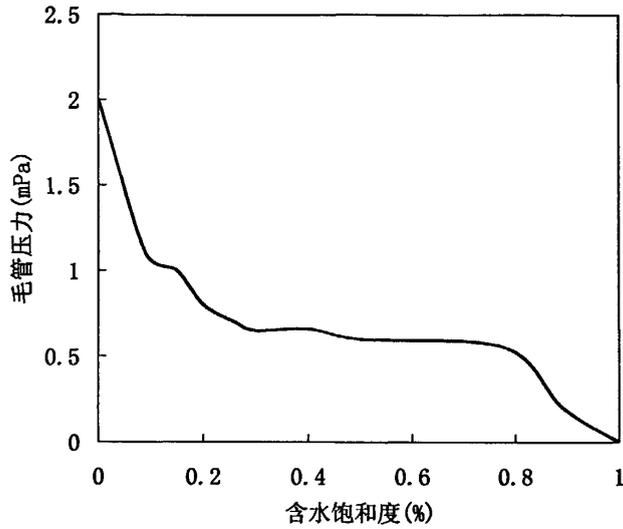


图 4-5 毛管力与含水饱和度的关系

Fig. 4-5 Capillary pressure-saturation curve

① 温度分布情况

图 4-6 是近井壁某处一点的温度变化情况。从图中可以发现最初阶段温度上升很快,大约经过 6 分钟后温度已无太大变化。图 4-7 是不同时刻井周温度沿 X 方向分布图,可以发现距井眼中心大约 1m 处,地层温度已经不受井内温度变化影响。此外还可以看出随着时间推移,加之水合物分解是吸热,温度变化已经没有最初 10s 阶段那样剧烈。

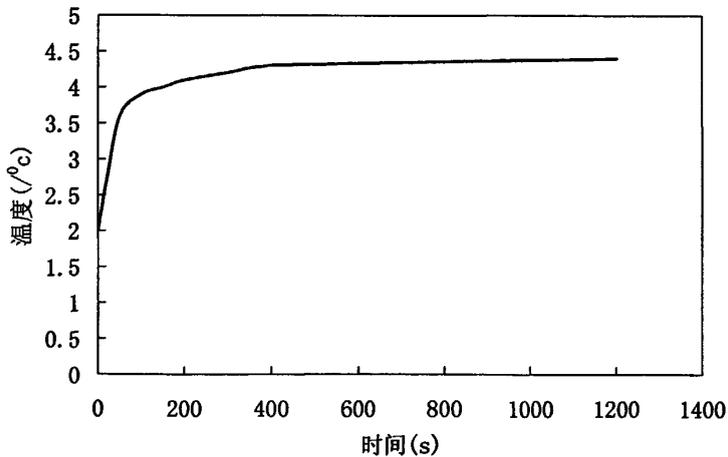


图 4-6 井壁附近温度随时间变化图

Fig. 4-6 Temperature around wellface-time curve

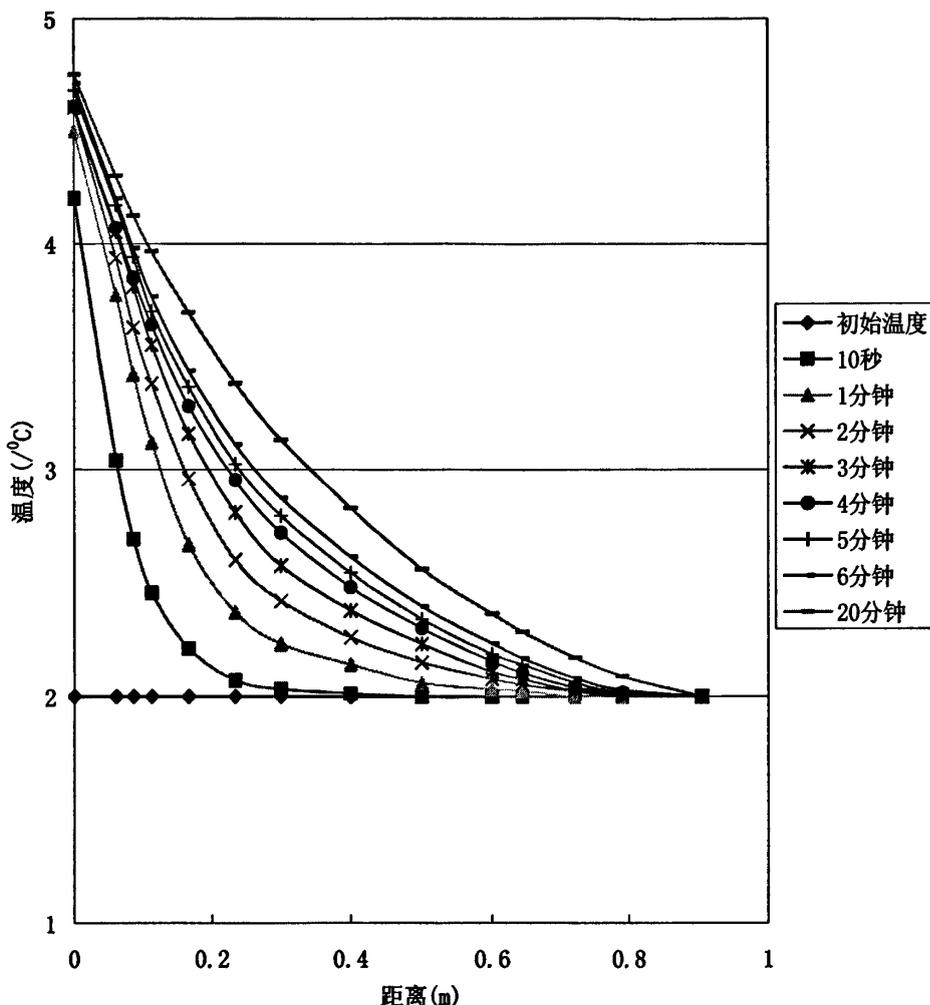


图 4-7 不同时刻井周温度沿 X 方向的分布

Fig. 4-7 Distribution of temperature around well at different moment along X direction

② 孔隙压力分布情况

当井内压力高于孔隙流体压力时，压差产生的水头会逐渐向外围扩散。随着时间推移，钻井液侵入量增多，孔隙压力会逐渐增大。图 4-8a-b 和图 4-9a-b 表明不同位置处孔隙压力增加程度和快慢是不一样的。在靠近井壁处，水合物分解剧烈，加之钻井液快速浸入，使得孔隙压力迅速升到并接近井内压力，而在离井壁稍远位置，压力增加比较缓慢，况且由于温度并没有井壁处高，水合物分解不是很剧烈，导致压力不高。

图 4-10 表示在定井内压力情况下温度变化对井壁附近孔隙压力的影响。可以发现，当温度升高时，由于水合物分解速度和程度增加，使得孔隙压力增加速度高于 5℃ 时的

增加速度，但最终会趋于井内液柱压力。

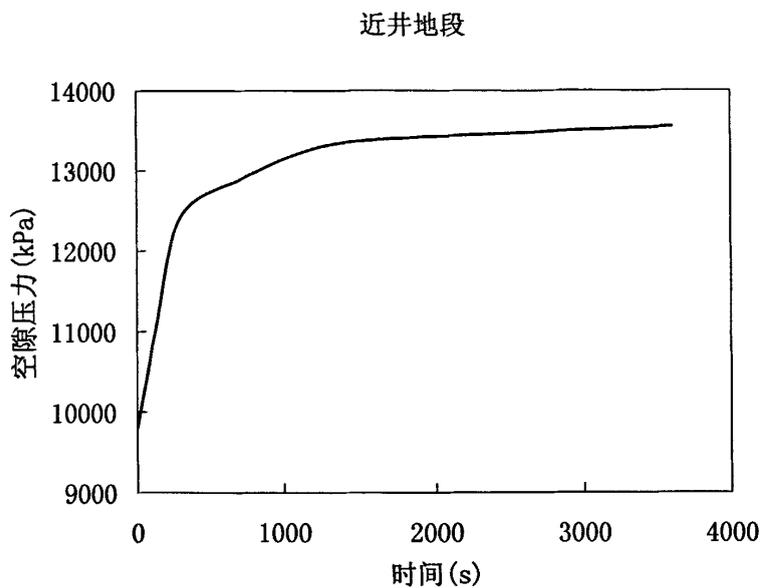


图 4-8a 孔隙水压随时间变化规律
Fig. 4-8a Void water pressure-time curve

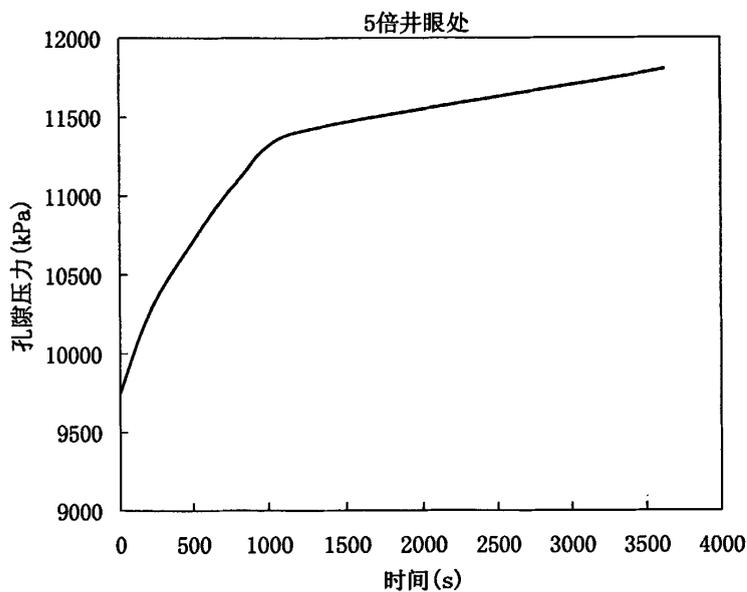


图 4-8b 孔隙水压随时间变化规律
Fig. 4-8b Void water pressure-time curve

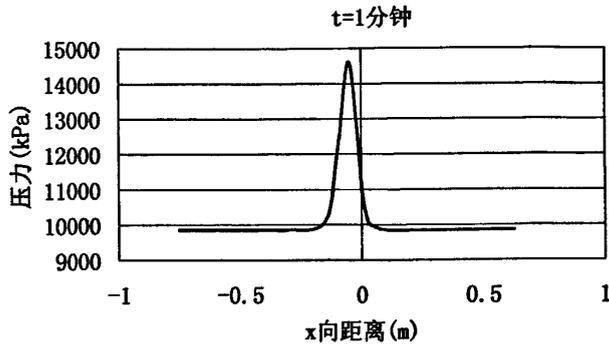


图 4-9a 不同时段井周孔隙压力沿 X 方向的分布

Fig. 4-9a Distribution of pore pressure around well at different moment along X direction

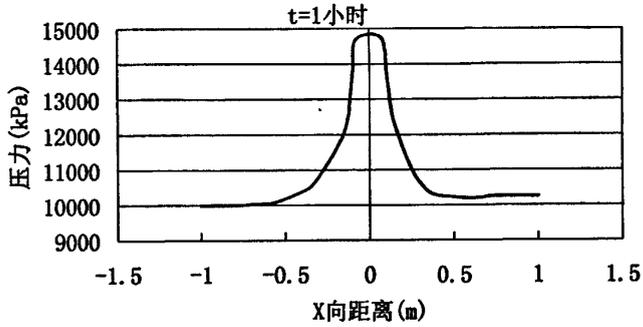


图 4-9b 不同时段井周孔隙压力沿 X 方向的分布

Fig. 4-9b Distribution of pore pressure around well at different moment along X direction

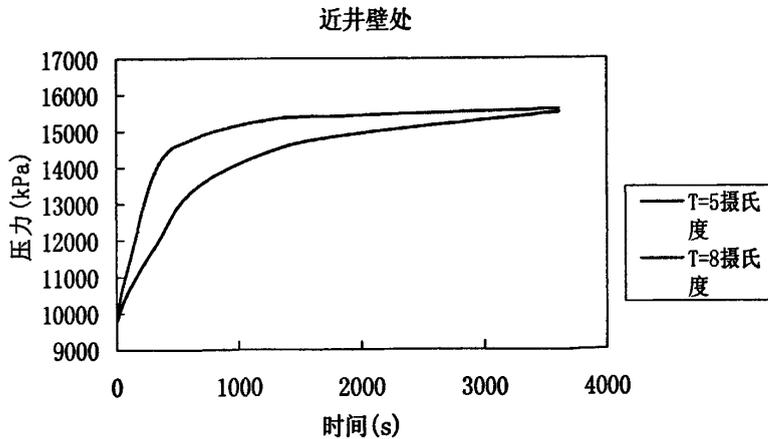


图 4-10 温度升高对井壁附近孔隙水压力分布的影响

Fig. 4-10 Influence for temperature increasing to the viodwater pressure distribution around well face

通过对耦合水合物分解的钻井液侵入水合物地层数值模型进行数值模拟计算分析,

可以发现模拟结果与前面所分析的钻井液在水合物地层侵入过程和传热特性是基本吻合的,这说明我们对伴随有水合物分解的钻井液侵入地层特性分析是基本正确的。

4.4 钻井液侵入和水合物分解对井壁应力场的影响

从上面分析可知,钻井液侵入以及水合物分解会不同程度导致地层孔隙压力增大。而根据 Terzaghi 有效应力原理可知,孔隙压力增大会使骨架应力降低,从而使地层抵抗破坏的能力下降,井壁也就容易失稳。尤其是在近井壁区域,由于受井内温度扰动大,水合物分解比较剧烈,加之水力梯度大,所以此范围内的孔隙压力增加程度高,相应也是井壁最脆弱的地区。可见钻井液渗流侵入和水合物分解对井壁应力场的影响是通过改变孔隙压力进而改变地层有效应力的方式来体现的。

当温度一定时,井内压力越大,钻井液侵入程度越深,孔隙压力扩散也越远^[45]。而当井内压力一定时,水合物分解程度和范围就成了孔隙压力改变的关键因素。而它们又主要受井内温度控制。井内温度越高,水合物分解程度也就越高,对孔隙压力影响程度也越大。因此井内温度和井内压力是保持水合物地层井壁稳定的两个最核心的关键因素。这也是为什么水合物地层钻井时要对井内温度和压力进行控制的一个主要原因。

此外由上述结果可知地层含水饱和度也会在钻井液侵入过程中逐渐变大,一方面是钻井液中的水进入地层,另一方面水合物分解出来的水也会使含水量加大。当地层含水量过高时,会使水合物地层骨架水化加剧,导致井壁更加不稳。因此水合物钻井还应该对钻井液失水量进行必要控制。

综上所述,在对水合物地层井壁稳定性进行分析和计算时,必须考虑钻井液的侵入和水合物分解,二者对井壁有效应力影响很大。而水合物分解与钻井液侵入又是耦合一起,考虑钻井液侵入即考虑水合物分解,而考虑水合物分解也就意味着要考虑钻井液渗流侵入。

4.5 考虑钻井液侵入的井壁力学稳定性分析模型

Paslay 等^[46]运用多孔隙弹性理论研究了孔隙流体运动对井壁周围应力的影响。并证明了孔隙流体流动产生的附加应力在井壁围岩总应力分布中占有重要比例。刘玉石等也根据孔弹性理论用有限元法分析了井周存在稳定达西渗流时的井壁围岩应力变化情况,发现井壁周向和径向应力与用弹性理论计算的结果相比差别比较大。因此在可渗透性的水合物地层井壁围岩应力计算时应考虑渗流的影响。

4.5.1 考虑钻井液渗流效应的井壁稳定分析模型

当井壁有渗流存在时，通常一种处理方法是将井壁堪称完全渗透的，骨架充水后没有膨胀和收缩，不会改变原理的物理力学性质，并假设渗流满足达西定律，这样将其比拟成热弹性问题而得到如下渗流附加应力(黄荣樽，1995)：

$$\sigma_r^* = \left[\frac{\alpha(1-2\mu_s)}{2(1-\mu_s)} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) - \phi \right] (P_f - P_p) \quad (4-45)$$

$$\sigma_\theta^* = \left[\frac{\alpha(1-2\mu_s)}{2(1-\mu_s)} \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \phi \right] (P_f - P_p) \quad (4-46)$$

$$\sigma_z^* = \left[\frac{\alpha(1-2\mu_s)}{2(1-\mu_s)} - \phi \right] (P_f - P_p) \quad (4-47)$$

式中各参数定义见第三章说明。此附加渗流应力地应力一起构成了整个井壁有效应力分布(图 5-1 所示)。这样式(3-28)至式(3-31)就变为：

$$\begin{aligned} \sigma_r^* &= \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) (1 - 3\frac{R^2}{r^2}) \cos 2\theta + \frac{R^2}{r^2} P_f \\ &- \alpha P_r + \left[\frac{\alpha(1-2\mu_s)}{2(1-\mu_s)} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) - \phi \right] (P_f - P_p) \end{aligned} \quad (4-48)$$

$$\begin{aligned} \sigma_\theta^* &= \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 3\frac{R^2}{r^2}\right) \cos 2\theta - \frac{R^2}{r^2} P_f \\ &- \alpha P_r + \left[\frac{\alpha(1-2\mu_s)}{2(1-\mu_s)} \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \phi \right] (P_f - P_p) \end{aligned} \quad (4-49)$$

$$\begin{aligned} \sigma_z^* &= \sigma_v - \mu_s [2(\sigma_H - \sigma_h) \frac{R^2}{r^2} \cos 2\theta] - \alpha P_r \\ &+ \left[\frac{\alpha(1-2\mu_s)}{2(1-\mu_s)} - \phi \right] (P_f - P_p) \end{aligned} \quad (4-50)$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = -\frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) \left(1 + 3\frac{R^2}{r^2}\right) \sin 2\theta \quad (4-51)$$

式中： P_r 为距井轴 r 处的孔隙压力，MPa。只要确定出岩石各部分渗透孔隙压力的变化规律，即可求得井壁围岩的应力状态。因而将上章计算出的孔隙水压力和气体压力按下式计算出平均压力后代入(4-48)至(4-50)式即可求出有渗流情况的井壁围岩分布：

$$P_r = S_w P_w + S_g P_g \quad (4-52)$$

在井壁处即 $r = R$ 处的应力分布为：

$$\sigma_r = P_f - \alpha P_r - \phi(P_f - P_p) \quad (4-53)$$

$$\sigma_\theta = (\sigma_H + \sigma_h) - 2(\sigma_H - \sigma_h)\cos 2\theta - P_f - \alpha P_r + \left[\frac{\alpha(1-2\mu_s)}{(1-\mu_s)} - \phi\right](P_f - P_p) \quad (4-54)$$

$$\sigma_z = \sigma_v - 2\mu_s(\sigma_H - \sigma_h)\cos 2\theta - \alpha P_r + \left[\frac{\alpha(1-\mu_s)}{2(1-\mu)} - \phi\right](P_f - P_p) \quad (4-55)$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = 0 \quad (4-56)$$

由于钻井液侵入，可以认为 $P_r = P_f$ 。这样结合前述的强度判断准则就可以计算出井壁存在渗流时的安全钻井液密度窗口。

4.5.2 数值模拟计算及分析

对上述模型进行数值模拟计算，渗流场和温度场计算参数及定值条件与上一节相同，应力场计算参数如表 4-3 所示：

表 4-3 应力场计算参数

Table 4-3 Parameter for stress field

地应力	孔隙压力	钻井液柱压力	水合物地层性质
$\sigma_H = 30\text{MPa}$ $\sigma_h = 20\text{MPa}$	外边界： $P_p = 10\text{MPa}$ 内边界： $P_p = 15\text{MPa}$	$P_f = 15\text{MPa}$	弹性模量：3000MPa 泊松比：0.5 粘结强度：2MPa 摩擦角：30° 拉伸强度：1MPa

为对比分析，首先计算了井眼内边界无载荷即不存在钻井液是井周应力分布情况，如图 4-11 所示，从图中可以看出在井壁出 X 方向和 Y 方向应力相差最大，因而此处最容易出现剪切破坏。这也说明井眼打开后如果井壁所受井内液柱压力与其所受地应力无法重新建立平衡时，井壁就会出现垮塌。

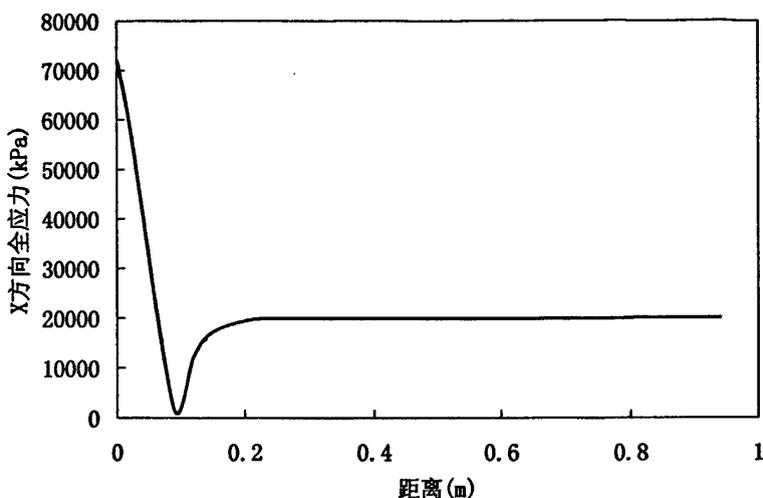


图 4-11a 打开井眼后无钻井液循环的井周围岩应力分布图(X 方向)

Fig. 4-11a Structure of stress distribution around well without drilling fluid circulating after turn on the hole (along X direction)

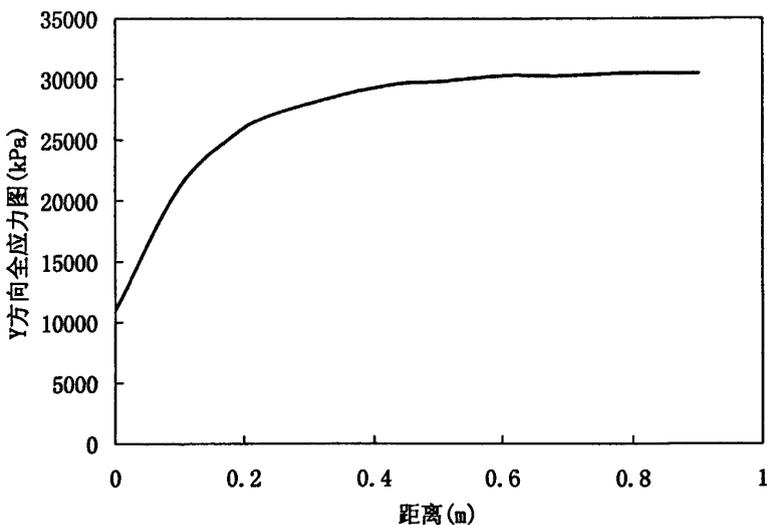


图 4-11b 打开井眼后无钻井液循环的井周围岩应力分布图(Y 方向)

Fig. 4-11b Structure of stress distribution around well without drilling fluid circulating after turn on the hole (along Y direction)

随后将 15MPa 液柱压力加载到井壁处，先不考虑渗流作用即井壁封闭，此时井壁应力分布如图 4-12。此图为井壁处开始的沿 X 方向的全应力分布图。可以发现钻井液柱作用下井壁周围应力先是拉应力，后变成压应力，井眼距离增加，井周应力逐渐趋向原地层应力。从这里也可以看出井眼打开后钻井液柱压力对井周围岩应力场的扰动同温度

和渗流场一样，局限在大约 1m 的范围内。

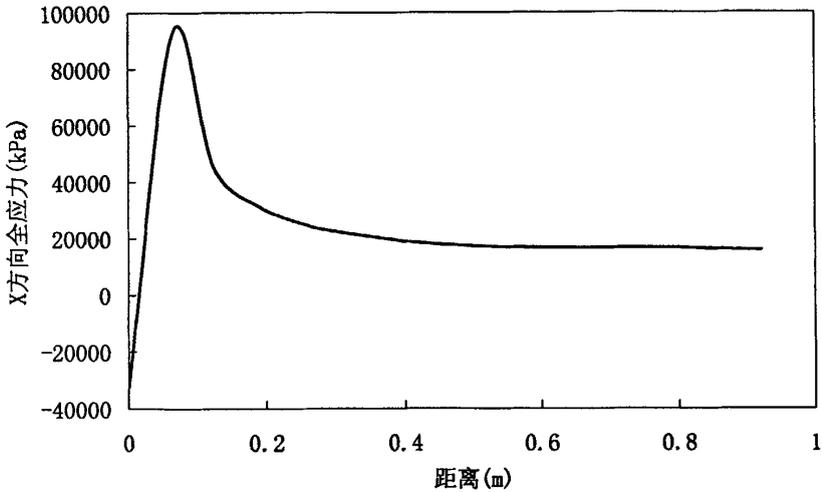


图 4-12 不考虑渗流时 X 方向的全应力分布图

Fig. 4-12 Complete stress distribution along X direction (dismissal filtering flow)

图 4-13 及 4-14 为考虑渗流时井周应力变化。可见随着孔隙压力的不断增加，井壁附近的总应力和最大主应力也不断增加。可以断定当孔隙压力升高到一定程度时，由于其对骨架作用类似“浮力”效应，因而骨架可能会产生拉伸。

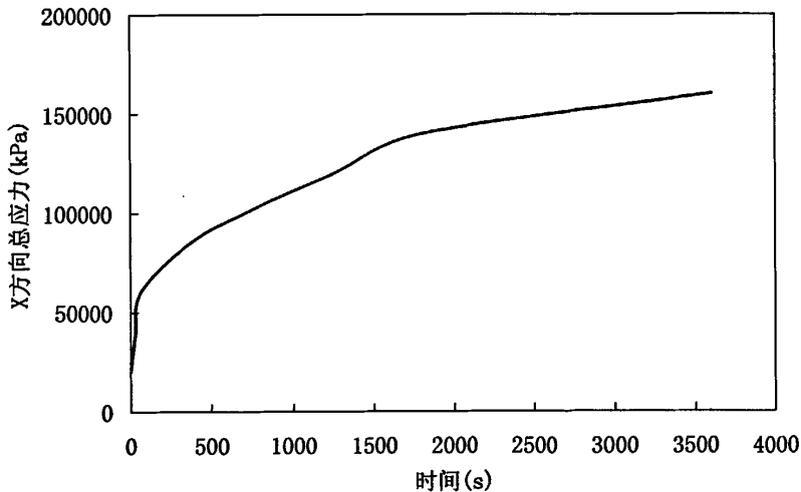


图 4-13 考虑渗流时 X 方向的全应力变化图

Fig. 4-13 Complete stress distribution along X direction (considering filtering flow)

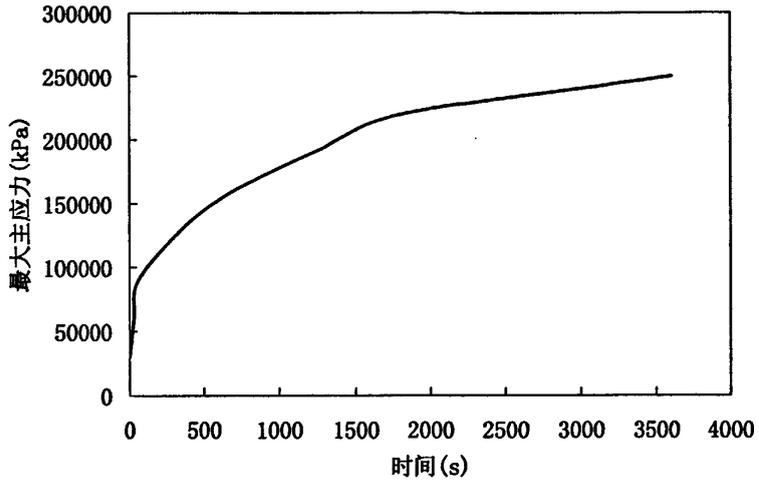


图 4-14 考虑渗流时不同时刻最大主应力变化图

Fig. 4-14 Structure of maximum principal stress at different moment (considering filtering flow)

第五章 天然气水合物与海底滑坡

5.1 水合物分解对海底滑坡的影响

天然气水合物的形成与分解会对海洋沉积物力学性质产生很大的影响。甲烷水合物的形成会替取孔隙中的水和甲烷。孔隙中被替取的流体水和溶解甲烷(在一些情况下为气态)转变为固态的甲烷水合物。固态天然气水合物替换液态水会增加沉积物的强度,同时也会使孔隙度和渗透率降低^[47]。

相反,当天然气水合物不稳定时,会分解形成水和天然气。固态物质转变成液态和氣态会降低沉积物的剪切强度,使沉积物容易被破坏。如果天然气水合物分解释放的天然气超出了气体饱和度,会产生气泡,从而进一步降低了沉积物强度。

天然气水合物分解过程也会影响沉积物的孔隙压力。当沉积物的孔隙水已经饱和时,甲烷水合物的继续分解会使释放到孔隙中的水和气体体积超过原先天然气水合物占有的体积。当沉积物是在较好封闭环境下,压力会增加。而当容许通过流体流动释放压力时体积就会增加。因此,当存在低渗透的沉积层时,天然气水合物分解会导致压力超过静水压力,形成超压。孔隙压力的增加、沉积物体积的膨胀与气泡的发育都可能使沉积物强度变弱。

天然气水合物在大陆边缘沉积物中的稳定区可看作是一个向海增厚的楔状体。该楔状体上陆坡有一个明显的界限。对于中低纬度地区的水体温度结构,甲烷水合物稳定带的上限对应于海底深度 500-700m。大于该水深,甲烷水合物在海底是稳定的,稳定带的厚度随着水深增加而增加。

天然气水合物存在带上限附近的沉积物最易被天然气水合物分解的效应影响。这些地区的天然气水合物对短期的底水温度热扰动很灵敏,因此,更可能经历反复的幕式的天然气水合物形成与分解。但是,当水深增加时,天然气水合物相边界上方的沉积物厚度也相应增加。沉积物中温度变化的传递主要通过热传导的方式进行,这需要几千年的时间才能把海底温度变化事件传递到沉积层深部,从而改变相边界的位置。瞬时的热事件由于增加的水深而受到阻碍或消除^[48]。

天然气水合物稳定场上限附近的沉积物作为海底的露头,也最可能因天然气水合物分解造成孔隙压力的最大变化。这是因为压力控制了天然气水合物分解产生的气体的相对体积(图 5-1)。

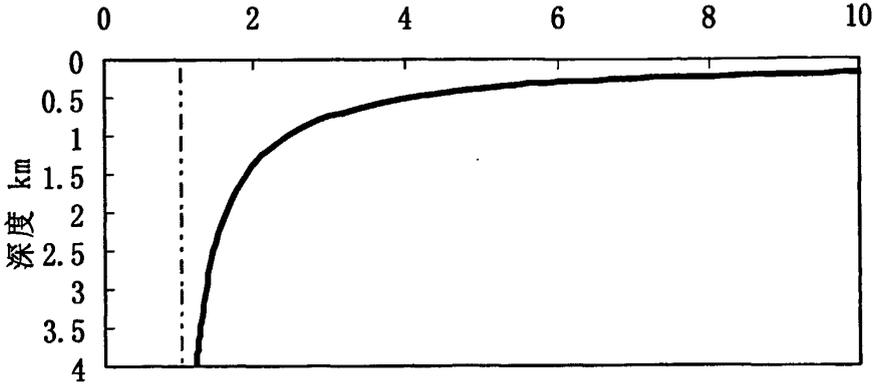
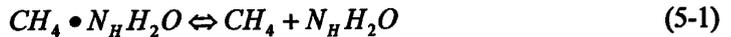


图 5-1 海底天然气水合物分解前后体积对比

Fig. 5-1 Volume contrast of subsea NGH resolving fore-and-aft

水合物分解后产生水和天然气。单位体积水合物 V_h 分解后产生水的体积 V_w 和天然气的体积 V_g 的总和 V_d 与分解后地层孔隙压力 P_{od} 有关。



其中 N_H 是水合物系数，一般取值为 5.75^[4]。

忽略固体状态的水合物以及液态水的压缩性，等压条件下水合物分解前后体积变化为：

$$\frac{V_d}{V_h} = \frac{V_g + V_w}{V_h} \quad (5-2)$$

$$V_g = \frac{nRT}{P_{od}} \quad (5-3)$$

式中， n —— V_h 体积下水合物产生甲烷气体的物质的量，mol；

R ——气体常数， $R=8.31J/(mol \cdot K)$

根据(5-2)式和(5-3)式，我们可以计算出：当 $1m^3$ 水合物分解产生 $0.8m^3$ 的水的同时，可产生 $164m^3$ 标准状况下的甲烷气体。

由(5-2)式和(5-3)式，我们可以计算出海平面不同深度水合物进行分解时，在等压情况下分解后体积与分解前体积的比值。从图 5-1 可以看出，在水深 2000 以内水合物分解后体积变化比较明显，甲烷气体和分解水的体积是原水合物体积的 1.6 倍以上。体积增大，造成地层孔隙压力增加，由此导致水合物层强度减小，出现海底垮塌现象。

图 5-2 简单的描述了水合物分解导致的海底滑坡的过程^[49]。

a)表示在水合物稳定带中的一个斜坡沉积物下覆盖了一层水合物层，目前状态下保持稳定。

b)当海平面降低，或者海水密度降低时，水合物层压力相对降低，水合物稳定带顶部下降，原来这一部分的水合物分解产生气体，降低地层强度，地层压力增大，斜坡失稳，产生剪切破坏。

c)水合物继续分解，地层开始出现拉伸破坏和坍塌。由此导致海水密度进一步降低，压力继续下降，水合物分解面积继续增大，最终导致水合物暴发性分解。

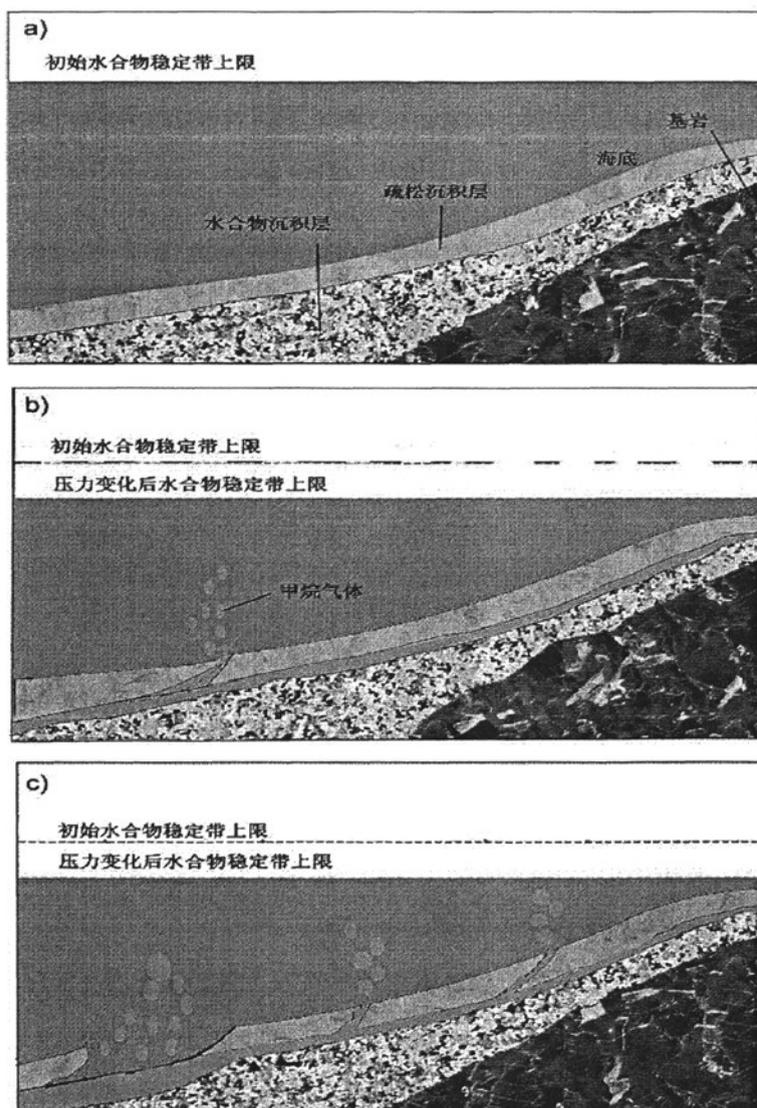


图 5-2 水合物分解导致海底滑坡示意图(根据 N. Sultan et al. 2004 修改)

Fig. 5-2 Structure of sea slide led by NGH resolving

5.2 水合物分解作用下海底滑坡的力学机制

5.2.1 海底滑坡的剪切破坏

海底滑坡便意味着岩土体的破坏，可用库仑-纳维尔破裂准则进行判断，即：

$$\tau = C + (\sigma_n - P)g\phi \quad (5-4)$$

式中， C 是岩土的内聚力； σ_n 是正应力； P 是孔隙压力； ϕ 是内摩擦角。

图 5-3 所示，由于水合物的分解，岩土的内聚力 C 下降，孔隙压力 P 增加，内摩擦角 ϕ 减小。作用的结果使得破裂线的斜率降低，红色的地区从水合物分解前的稳定区变成了水合物分解后的破坏区。斜坡剪切破坏的几率急剧增大。

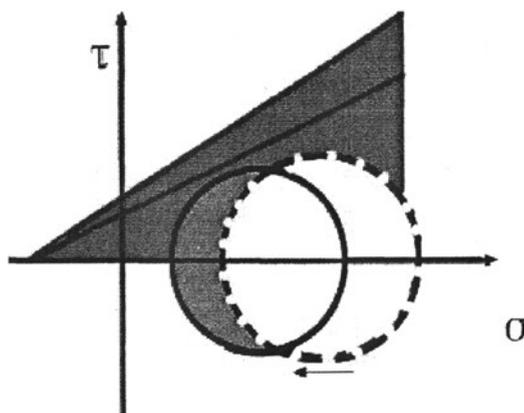


图 5-3 水合物分解对海底滑坡剪切破坏

Fig. 5-3 Shear damage to sea slide by NGH resolving

5.2.2 海底滑坡的拉伸破坏

由于水合物的分解产生大量的天然气，如果斜坡比较致密，使得天然气不能泄露出去，则水合物层的孔隙压力不断增加。

由于 1m^3 天然气水合物可分解为 0.8m^3 水和 164m^3 标态下的天然气。忽略固体状态的水合物、液态水的压缩性以及储层温度的变化，在等容条件下进行水合物的分解，可计算分解后天然气的压力：

根据理想气体方程

$$P_1V_1 = P_2V_2 \quad (5-5)$$

可得到分解后天然气的压力(即水合物的孔隙压力)可达到 82MPa 。

按照岩石单轴拉伸破裂准则：

$$\sigma_3 - P = -S_t \quad (5-6)$$

$$P = \sigma_3 + S_t \quad (5-7)$$

即水合物的孔隙压力大于等于最小主应力与岩石抗拉强度的和时，便产生拉伸破坏，进而导致海底滑坡的产生。

5.3 安全系数分析法

安全系数定义为抗滑力与滑动力的比值。

最简单的情况如图 5-4 所示，斜面与水平面的夹角为 β ，斜面的厚度为 Z ，斜面以下为水合物层。只要位于坡面上的岩土单元体能够保持稳定，则整个坡面就是稳定的。假设斜坡是无限大的，单元体内部的力平行于斜坡，并且可以互相抵消($Q_L=Q_R$)。因此可以得到^[50]：

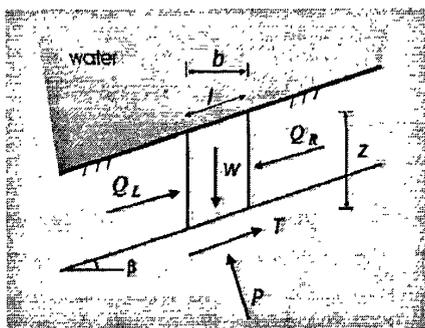


图 5-4 水合物分解和斜坡受力分析图(来自于 Nash,1987)

Fig. 5-4 Analytical map for NGH resolving and force slope

$$P = W \cos \beta = \sigma \cdot l \quad (5-8)$$

$$\sigma = \frac{W}{b} \cos^2 \beta = \gamma z \cos^2 \beta \quad (5-9)$$

$$T = W \sin \beta = \tau \cdot l \quad (5-10)$$

$$\tau = \frac{W}{b} \sin \beta \cos \beta = \gamma z \sin \beta \cos \beta \quad (5-11)$$

在式中， W 是单元体的重力($W=\gamma zb$)， γ 是岩土的比重。

单元体的抗滑力有粘聚力 C 、重力在斜坡上的垂直分量与摩擦系数的乘积。

单元体的滑动力是重力在斜坡上的平行分量。则安全系数为：

$$F_s = \frac{C + \gamma z \cos^2 \beta \tan \phi}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} \quad (5-12)$$

考虑到天然气水合物分解，将导致孔隙压力的增大，为此考虑 ΔP 的影响。

当 $\Delta P \leq \gamma z \cos^2 \beta$ 时，

$$F_s = \frac{C + (\gamma z \cos^2 \beta - \Delta P) \tan \phi}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} \quad (5-13)$$

当 $\gamma z \cos^2 \beta < \Delta P < \gamma z \cos \beta + S_i$ 时,

$$F_s = \frac{C}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} \quad (5-14)$$

当 $\Delta P \geq \gamma z \cos \beta + S_i$ 时, 产生了拉伸破坏, 则

$$F_s = 0 \quad (5-15)$$

与天然气水合物相关的海底滑坡研究是滑坡研究的一个新的方向, 与国外相比, 我国在这方面的研究基本还是空白。随着我国油气勘探向海洋的进发和天然气水合物研究计划的实施, 对与天然气水合物相关的海底滑坡的研究是保证水合物藏安全开发的一项新的任务。由于海洋相对与陆地的特殊性, 目前主要能通过地震反射剖面 and 岩芯取样进行研究, 因此对这种由天然气水合物引发的海底滑坡的性质和滑坡动力学的认识远不及对陆地滑坡认识的完善, 尚存在一系列基础问题亟待解决。以下即方面将是以后研究的重点: 天然气水合物蕴藏区域沉积物力学性能的研究; 量化天然气水合物和天然气水合物胶结的沉积物机械特性研究; 沉积物对天然气水合物形成和分解时导致的理化条件变化的力学响应的研究; 因天然气水合物分解而引发的海底滑坡事件的数值模拟的研究; 这种海底滑坡触发机制动力学的研究。

第六章 结论

天然气水合物具有能量密度高、赋藏广泛以及清洁环保等特点,使其有望成为未来可替代新能源,因而是目前能源领域研究的热点问题。进入 21 世纪以后,各国都加快了勘探开发天然气水合物的步伐。目前天然气水合物的研究还处于试验阶段,全球范围内还没有实现天然气水合物的工业开采。目前国内外各种天然气水合物开采模拟的研究重点都放在了产能预测上,对天然气水合物储层的稳定性研究则几乎空白。近年来,与天然气水合物储层稳定相关的两个领域开始受到国内外学者的重视,即天然气水合物钻井过程中的近井壁地带稳定和天然气水合物分解与海底滑坡的关系。本文主要研究了天然气水合物储层在钻进过程中近井地带的稳定性。在总结前人对水合物及其地层热物理及力学性质研究的基础上,对影响水合物地层井壁力学稳定的因素进行了较为系统的数值模拟研究,初步取得了一些有意义的成果,得到以下几点结论和认识:

(1) 水合物地层是多孔隙渗透性沉积地层,且水合物对温度和压力比较敏感,因而钻井过程中钻井液必然和地层发生相互作用,导致井壁力学状态改变,影响了井壁的稳定性。因此在分析水合物地层井壁稳定时,必须考虑钻井液和地层之间的相互作用。

(2) 井内压力通常大于地层孔隙压力,因而钻井液在压差作用下向水合物地层侵入是钻井液和地层间的主要作用方式。与钻井液侵入油气层相比,侵入过程中伴随有水合物分解是主要的不同之处。

(3) 水合物在海底沉积地层中的分解从本质上来说与实验室内纯水合物分解没有任何区别,同样受温度和压力控制,因而可以用纯水合物分解动力学模型描述海底沉积层中的水合物分解。所不同的是海底沉积层中的水合物分解是在一个受限的环境下进行的,当分解产生的水和气无法排除时,就会使孔隙压力急剧增大。

(4) 水合物分解以及钻井液的侵入都会使孔隙压力和含水饱和度不同程度地增加,而根据有效应力原理,这将会使地层骨架所受有效应力减小。因此当水合物本身不充当骨架支撑时,钻井液侵入和水合物分解对井壁应力场的影响主要是通过改变孔隙压力来体现的。当温度一定时,井内压力越大,钻井液侵入程度越深,孔隙压力扩散的也越远。而当井内压力一定时,水合物分解程度和范围就成了孔隙压力改变的关键因素。而这主要受井内温度控制。井内温度越高,水合物分解程度也就越高,对孔隙压力影响的程度也越大。因此井内温度和井内压力是水合物地层稳定的两个最为核心的影响因素。

由于时间有限,有些问题处理相对简单。本文主要有以下不足之处:

(1) 主要从弹性力学角度分析了井壁稳定性问题，即认为井壁一旦出现剪切破坏就会坍塌。而实际情况表明，由于孔隙流体迁移的粘滞效应，井壁出现裂缝并不会导致井眼内出现大面积的垮塌。因此仅仅用弹性理论不能提高地层坍塌压力预测精度。

(2) 考虑实际水合物赋藏条件以及钻井实际情况，在分析中将温度只看成对水合物分解有影响，而忽略了其对渗流场以及应力场的影响。

(3) 在考虑有渗流存在的井壁应力场分布时假设孔隙骨架是完全刚性的，即在孔隙流体压力变化过程中固体骨架不产生任何弹性或塑性变形。而实际钻井过程中由于渗流导致的孔隙压力变化会使井壁围岩地层发生变形，地层变形又反作用于流体，使孔隙流体压力发生改变。因而井壁围岩地层的孔隙压力不仅取决于孔隙流体含量的变化，而且还受到地层变形的影响。所以在更精确的分析渗透性地层井壁稳定时，应该考虑流固耦合作用。

针对以上不足，今后还需要在以下几个方便展开进一步的研究工作：

(1) 首先要对水合物沉积地层的力学性质做更加准确的研究，尤其要掌握水合物饱和度和地层力学参数之间的关系，比如水合物饱和度和弹性模量、抗压强度、摩擦角等量之间的对应关系，并构建新的水合物地层力学本构关系。

(2) 考虑温度对渗流、应力场的影响，建立热-液-固三场耦合井壁稳定弹塑性分析模型，编写与水合物地层相符的模拟系统。

(3) 考虑孔隙骨架变形对地层应力场的影响，简化渗流和流固耦合模型，更加准确的分析渗流作用下应力场的变化。

参考文献

- [1] 宋召军, 刘立.天然气水合物研究现状与展望[J].吉林地质, 2003, 22(4):64-68.
- [2] 陈汉宗, 周蒂.天然气水合物与全球变化研究[J].地球科学进展, 1997, 12(1):37-41.
- [3] Kvenvolden K A. Gas Hydrate-Geological perspective and global change[J].
Rev.GeoPhys.,1993,(31):173-187.
- [4] 姚伯初.南海北部陆缘天然气水合物初探[J].海洋地质与第四纪地质, 1998,
18(4):11-18.
- [5] 张光学, 黄永祥, 陈邦彦.海域天然气水合物地震学[M].北京:海洋出版社, 2003
- [6] 何拥军, 陈建文, 曾繁彩等.世界天然气水合物调查研究进展[J].海洋地质动态, 2004,
20(6):43-46
- [7] 马在田, 宋海斌, 孙建国.海洋天然气水合物的地球物理探测高新技术[J].地球物
进展, 2000, 15(3):1-5
- [8] 马在田, 耿建华, 董良国等.海洋天然气水合物的地震识别方法研究.海洋地质与第四
纪地质, 2002, 22(1):1-8
- [9] 市川枯一郎著, 庞馨萍译.日本《资源与环境》[J], 1999(5):57-64
- [10] 程远方, 徐同台.安全泥浆密度窗口的确立及应用[J].石油钻探技术.1999, 27(3)
16-18
- [11] Cheng Y F, Yan J, Wnag G. A Comprehensive Study of Wellbore Stability in Shale
Formation and Its Application to Horizontal Drilling operation[J].SPE37080,1996
- [12] 丰全会, 程远方, 张建国.井壁稳定的弹塑性模型及其应用石油钻探技术[J], 2000
28(4):9-10
- [13] 黄文件, 刘道平, 周文铸等, 天然气水合物的热物理性质[J].天然气化工, 2004,
29(4):66-70
- [14] 金春爽, 汪集肠.天然气水合物的地热研究进展[J].地球科学进展, 2001, 16(4):
540-543
- [15] 黄筷子, 樊栓狮, 石磊.天然气水合物的导热系数[J].化学通报, 2004, (10):737-742
- [16] Stoll R D, Bryan G M. Physical properties of the sediments containing gas
hydrates[J].Geophysical Res, 1979, 84(B4):1629-1634
- [17] Osmau Matsubayashi, Nigel Edwards R. Relationship between electrical and thermal

- conductivities for evaluating thermal regime of gas hydrate bearing sedimentary layers[J].The Annals of the New York Academy of Sciences.1999.
(912):167-172
- [18] W F Waite, J Pinkston, S H Kirby. Proceedings of the Fourth International Conference on Gas Hydrate(C).Yokohama, 2002:728-733
- [19] Sloan E D. Clathrate Hydrates of Natural Gases(2nd edit)[M].New York: Dekiker,1998
- [20] 史斗,孙成权,朱岳年.国外天然气水合物研究进展[M].兰州:兰州大学出版社,1992
- [21] 周怀阳, 彭小彤, 叶瑛.天然气水合物[M].北京: 海洋出版社, 2000
- [22] Anderson G K. Enthalpy of dissociation and hydration number of carbon dioxide hydrate from the Clapeyron equation[J].Chem Thermodynamics, 2003, (35):1771-1183
- [23] 孙志高, 樊栓狮, 郭开华等.天然气水合物分解热的确定[J].分析测试学报, 2002, 21(3):7-9
- [24] John L Cox. Natural Gas Hydrates :Properties, Occurrence and Reeovery[M]. Boston:Butterworth, 1983
- [25] Dvorkin J, Heigerud M B, Waite W F, et al. Introduction to Physical properties and elasticity model[A].Natural gas hydrate in oceanic and permafrost environments[C],2000,245-260
- [26] 吴志强等.海域天然气水合物的岩石物性研究[J].海洋地质动态, 2004, 20(6):13-17
- [27] Ecker C, Dvorkin J, Aura M. Estimating the amount of gas hydrate and free gas from marine seismic data[J].Geophysics, 2000, 65:565 — 573
- [28] 龚建明, 王红霞.天然气水合物在沉积地层中的分布模式[J].海洋地质动态, 20(6):6-8
- [29] 赵洪伟, 陈建文, 龚建明等.天然气水合物饱和度的预测方法[J].海洋地质动态, 2004, 20(6):22-24
- [30] G邦特巴思著.易志新, 熊亮萍译.地热学导论[J].北京:地震出版社, 1988
- [31] 胡湘炯, 高德利.油气井工程[M].北京:中国石化出版社, 2003
- [32] 徐同台.钻井工程井壁稳定新技术[M].北京:石油工业出版社, 1999
- [33] 李天太, 高德利.井壁稳定性技术研究及其在呼图壁地区的应用.西安石油学院学报(自然科学版)[J], 2002, 17(3):23-26
- [34] 佟曼丽.油田化学[M].山东东营:石油大学出版社, 1992
- [35] 雷正义.沙泥岩地层井壁力学稳定性研究及软件编制[硕士学位论文 EB].四川:西南

- 石油学院, 2004
- [36] 周保中.吉林大情字井地区井壁稳定技术研究[工程硕士学位论文 EB].黑龙江:大油学院, 2003
- [37] 高德利, 陈勉.谈谈定向井井壁稳定问题[J].石油钻采工艺, 1997, 19(1):1-4
- [38] 李志明, 张金珠.地应力与油气勘探开发[M].北京:石油工业出版社, 1997
- [39] 刘向君, 罗平亚.石油测井与井壁稳定[M].北京:石油工业出版社, 1999
- [40] 王力, 刘春雨, 杨锐等.利用测井资料计算井壁稳定条件研究[J], 西部探矿工程, 2003,11:59-61
- [41] 黄荣蹲, 邓金根, 王康平.井眼系统稳定性分析-三个地层压力剖面的确定.中国石油工程学会钻井基础理论学组第三届年会论文集[C].
- [42] Kaul N, Rosenberger A, Villinger H. Comparison of measured and BSR-derived Heat flow values, Makram accretionary prism, Pakistan[J].Marine Geology, 2000,164(12):37-51
- [42] Treh A M, Lin G, Maxwell E, et al. A seismic reflection Profile across the Cascadia subduction zone offshore central Oregon: New constraints on methane distribution and crystal structure[J].Journal of Geophysics Research, 1995,100 (B6):15101 — 15116
- [43] Davis E E, Hyndmna K D, Villinger H. Rates of fluid expulsion across the northern Cascadia accretionary Prism: constrains from new heat flow and multi-channel seismic reflection data[J].Journal of Geophysics research, 1990, 95(B6):8869-8889
- [44] 范德江, 杨作升.冲绳海槽天然气水合物的发育与分布[J].石油学报, 2004, 25(3):11-17
- [45] 黄荣蹲, 邓金根, 陈勉.井壁坍塌压力和破裂压力的计算模型[J].钻井工程井壁稳技术[M].北京:石油工业出版社, 1999:104-112
- [46] 徐芝纶.弹性力学(第三版)[M].北京:高等教育出版社, 1998
- [47] 陈秀云, 汤洪杰.垂直井眼井壁稳定的理论分析[J].石油钻探技术, 1999, 27(4):21-23
- [48] 楼一珊, 刘刚.大斜度井泥页岩井壁稳定的力学分析[J].江汉石油学院学报, 1997 19(1):61-64
- [48] 刘向君, 叶仲斌, 王国华等.流体流动和岩石变形耦合对井壁稳定性的影响[J].西油学院学报, 2002, 24(2):50-52
- [49] 刘玉石, 白家社, 黄荣蹲等.硬脆性泥页岩井壁稳定问题研究[J].石油学报, 1998,

19(1):85-88

- [50] Zhang Jianhua, Hu Qi, Liu Zhenhua. Estimation of true formation resistivity and water saturation with a time21apse induction logging method[J]. The log analyst, 1999, 40(2):138-148

致 谢

在论文完成之际，对我的导师张卫东副教授表示衷心的感谢。

在论文研究阶段，张老师都给予了我无私的指导和帮助，使我的研究工作得以顺利完成。张老师活跃的思维和刻苦钻研的精神和任老师广博的知识和严谨的科学态度都给我留下了深刻的印象，张老师的教诲是我终身受益的宝贵财富。

感谢石工学院各位老师对我的培养和帮助。

同时向给我的研究工作提出建议和意见的专家表达我的敬意和谢意。