

全过程欠平衡钻井 井筒流动模型

魏 纳 孟英峰 编著

QUANGUOCHENG QIANPINGHENG
ZUANJING JINGTONG
LIUDONG MOXING



电子科技大学出版社

全过程欠平衡钻井

井筒流动模型

魏 纳 孟英峰 编著

QUANGUOCHENG QIANPINGHENG
ZUANJING JINGTONG
LIUDONG MOXING



电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

全过程欠平衡钻井井筒流动模型 / 魏纳, 孟英峰编著. —成都: 电子科技大学出版社, 2015. 10

ISBN 978-7-5647-3251-6

I. ①全… II. ①魏… ②孟… III. ①欠平衡钻井—井筒流动—模型—研究 IV. ①TE 249

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 214608 号

全过程欠平衡钻井井筒流动模型

魏 纳 孟英峰 编著

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)

策划编辑: 罗 雅

责任编辑: 罗 雅

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 成都勤慧彩色制版印务有限公司

成品尺寸: 185mm×260mm 印张 9.375 字数 270 千字

版 次: 2015 年 10 月第一版

印 次: 2015 年 10 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-5647-3251-6

定 价: 34.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83201495。
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

前 言

全过程欠平衡钻井井筒流动模型是在传统稳态气、液、固多相流模型基础上，更全面、系统、精确地研究不同工况条件下井筒流动与压力传递规律，它主要包括：正常钻进时稳态气、液、固多相流动以及停止循环条件下的瞬态气液两相流动。

为此，本书主要研究内容和认识如下。

(1) 建立了欠平衡正常钻进条件下气、液、固稳态多相流动数学模型，全面考虑井筒不同流体特性，建立了相应的辅助方程，模拟结果与室内及现场实验实测数据吻合（误差 $\leq 2.8\%$ ）。在此基础上，实例分析了欠平衡钻井过程中不同施工参数对井筒压力剖面和其他流动参数的影响，提出了稳态流动条件下的压力控制方法。

(2) 在气液两相流动的基础上充分考虑井下压力波产生、传递，从而建立了停止循环井筒气液两相瞬态流动数学模型，并且全面考虑井筒不同流体特性、压力传递规律，提出了相应的辅助方程、边界条件和初始条件。综合初始条件、边界条件，采用特征线法和有限差分法联合求解从而得到数值模拟结果。本书对开井条件下不同作业过程中遇到气侵时井筒瞬态气液流动进行数值模拟，模拟结果与实验实测数据较吻合，满足实际工程的需要。在此基础上提出了适用于现场的井筒流动压力控制方案与措施。

(3) 针对欠平衡钻井钻遇裂缝时由于重力置换而引起的漏喷同存问题，研究了其发生条件和裂缝中气液两相流动特征。然后，基于气液两相的动量方程分别建立了气相模型和液相模型，提出了数值模拟方法，采用可视化实验与数值模拟手段还原了欠平衡钻井钻遇裂缝性气藏又喷又漏的物理过程。

(4) 在结合套管阀施工流程的基础上，建立关井条件下井底压力波动变化规律数学模型，通过实验及数值模拟发现：对于孔隙性地层而言，在注气欠平衡井中注气量越大其欠压值也越大，关阀后由于连续气侵所造成的井底压力与地层压力平衡时间也较长；而对于裂缝性地层而言，井下不断有钻井液向地层漏失，因此，其平衡地层压力时间较孔隙性地层更长。该研究结果为套管阀的合理使用提供了理论依据。

本书研究所提出的理论、模型和方法能够有效指导全过程欠平衡钻井的压力剖面 and 井筒流动参数设计。通过本书的研究，丰富了全过程欠平衡钻井井筒流动理论体系，形成了全过程欠平衡钻井井下稳态、瞬态多相流动压力动态预测与控制方法，这对全过程欠平衡钻井的技术发展具有积极意义。

本书由魏纳、孟英峰、李皋、万里平、李永杰等同志合作编著，张栗瑞、方强、陈光凌、李鹏杰等同志参与校核和排版。本书在编写过程中还得到了西南石油大学石油与天然气工程学院相关领导的大力支持，在此表示感谢。



目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究目的和意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 欠平衡正常钻井稳态多相流动理论发展	4
1.2.2 欠平衡钻井停止循环气侵瞬态多相流动理论研究	5
1.2.3 国内外欠平衡钻井井筒多相流动实验台架建设	7
1.3 本书主要研究内容及思路	10
第 2 章 可视化实验台架研制	13
2.1 实验模拟条件	13
2.2 模拟的相似性要求	13
2.3 主要设备及流程	14
2.4 本章小结	16
第 3 章 稳态多相流动理论、实验及数值模拟	17
3.1 井筒稳态多相流动理论回顾	17
3.2 气液两相流动参数	17
3.3 气液两相流流型判别及力学模型	19
3.3.1 垂直井中的流态类型	19
3.3.2 气液两相流流型判别	20
3.3.3 流动特性参数预测	21
3.3.4 钻柱内两相流动参数确定	27
3.3.5 过钻头压降计算	28
3.4 井内气液两相流基本方程建立	31
3.4.1 连续方程推导	31
3.4.2 运动方程推导	32
3.4.3 井筒气液两相流动辅助方程	34
3.5 稳态模型求解计算流程	38
3.6 气液两相流稳态流动实验	40
3.7 井筒流动特征参数敏感性分析及数值模拟	46
3.8 本章小结	53
第 4 章 全过程欠平衡钻井停止循环拟稳态 多相流理论研究	54
4.1 单向敞开管流单股气气侵静止非牛顿液体的气泡动态分析	54
4.2 单向敞开管流连续气气侵静止非牛顿液体有钻井液顶出的水动力学分析	60
4.3 单向敞开管流连续气气侵静止非牛顿液体无钻井液顶出的水动力学分析	63
4.4 单向封闭管流连续气气侵静止非牛顿液体的水动力学分析	69

4.5 本章小结.....	72
第5章 压力波传递速度研究.....	73
5.1 气液两相管流压力波波速数学模型研究.....	73
5.2 波速理论值与实验结果比较.....	75
5.3 波速与持气率的关系.....	75
5.4 波速与压强的关系.....	77
5.5 波速与液体物性的关系.....	78
5.6 本章小结.....	79
第6章 井筒气液两相瞬态流动求解.....	80
6.1 气液两相流动方程的特征线解法.....	80
6.2 气液两相流动方程的有限差分法.....	82
6.3 有限差分法流动参数还原.....	83
6.4 井筒气液两相流初边值问题.....	84
6.5 瞬态模型求解计算流程.....	85
6.6 停止循环条件下井下气侵瞬态室内实验及数值模拟.....	86
6.6.1 单向敞开管流单股气气侵瞬态室内实验.....	86
6.6.2 单向敞开管流单股气气侵瞬态数值模拟.....	88
6.6.3 单向敞开管流连续产气气侵拟稳态实验(零液流).....	98
6.6.4 单向敞开管流连续产气气侵拟稳态数值模拟(零液流).....	102
6.6.5 单向敞开管流连续产气气侵瞬态实验.....	103
6.6.6 单向敞开管流连续产气气侵瞬态数值模拟.....	105
6.6.7 欠平衡钻井条件下地层—井筒漏喷同存实验及数值模拟.....	116
6.6.8 单向封闭管流连续产气气侵瞬态实验(套管阀).....	123
6.6.9 单向封闭管流连续产气气侵瞬态数值模拟(套管阀).....	126
6.7 本章小结.....	134
第7章 结论及建议.....	135
7.1 结论.....	135
7.2 主要成果及创新点.....	135
7.3 建议.....	136
参考文献.....	137



第1章 绪 论

1.1 研究目的和意义

随着我国经济的快速发展,对能源的需求日益上升,我国的石油消费增长速度远远大于石油产量的增长速度,石油进口量逐年增多。从1993年开始,我国成为石油净进口国,而到2000年进口量迅速增至5000万吨、2004年达到1.15亿吨。据预测,至2020年国内石油年消费将超过5亿吨;如果不事先采取必要的、有效的措施,至2020年我国将出现每年2.5~2.7亿吨的石油供求缺口。如果石油消费的供应过度依赖进口,必然会影响国民经济的良性发展,甚至使国家安全受到威胁。因此,努力增加国内的石油供应能力、减少对进口原油的依赖程度,是摆在我国石油工业面前的艰巨任务。

我国油气资源丰富,但资源探明率低。全国第二次油气资源评价表明,我国石油资源量为 1068×10^8 t,探明储量为20%左右,可采储量占2%~3%,其中难动用油气资源(或称非常规油气资源)占总资源量的70%左右,而且比例有逐年上升的趋势,油气藏勘探开发的方向逐渐由常规油气资源向非常规油气资源发展。

伴随着油气资源的长期开采,各大早期主力油田已经从勘探、开发、增产、稳产向产量递减的方向发展,逐渐不能满足国民经济发展的需要。同时,各主力油气田也很难发现大型陆相整装油气田,我国已经从陆相沉积开始向海相沉积勘探开发进军。而对于新区块而言,储层保护是及时发现油气藏和有效开发油气藏的关键,因此,采用全过程欠平衡钻井是实现储层保护的必要手段。然而,目前常规欠平衡钻井虽然在钻井过程中实现了井底流压低于地层压力,在钻井过程中保护了储层,但往往在停止钻井后的重浆压井、起下钻等作业对于储层造成了严重伤害,特别是致密砂岩储层。基于这种工程背景,工业界开始关注全过程欠平衡钻井这项技术。

全过程欠平衡钻井技术是欠平衡钻井技术的完善和发展,该技术能够进一步地保护和维持地层原始状态,达到防止储层污染,提高及时发现储层的能力和达到最优开发效果的目的。各种文献中对全程欠平衡钻井技术的叫法不一致,但对该技术的理解基本一样。全过程欠平衡钻井技术是指:在揭开储层后到投产以前的各作业措施都保持井底流压小于储层压力的欠平衡状态。它主要包括:欠平衡钻井、欠平衡起下钻、欠平衡压取心、欠平衡测井、欠平衡完井等。

全过程欠平衡技术的优越性在于:

(1) 全过程欠平衡技术将形成在不压井的条件下实现钻井、起下钻、电测和完井的全过程欠平衡技术,能够更有效地防止钻井液、完井液对产层的污染,实现真正意义上的解放和保护油气层。

(2) 全过程欠平衡技术可以降低常规钻井技术对裂缝性油气藏带来的储层伤害,提高储层的探明率和开发效率。

(3) 全过程欠平衡技术还能节省压井液、保护液的费用,节约起钻前和钻后替换处理钻井液的时间和费用,减少废弃钻井液对环境污染,并显著提高欠平衡作业的安全性。

全过程欠平衡钻井的核心问题是:实现各作业工况下的欠平衡施工。因此,不同工况下的多相流动计算、预测井底压力和控制井底压力就成为该项技术发展的关键。在稳态多相流动较为成功地解决了钻井条件下的流动计算的背景下,对于停止循环时不同作业方式(起下钻、接单根、套管阀

等)下由于气侵所引起的井下瞬态多相流动研究还处于起步阶段,它的实质是指:在井底欠平衡状态的初始条件下,钻井液停止循环,由于地层流体侵入的作用井下表现为随时间变化的不稳定气液两相流,该流动又可分为管流单向敞开和单向封闭两种,它主要涉及:①接单根井下流体静止,地层流体连续侵入井筒;②每次起钻抽吸地层,地层流体侵入井筒;③套管阀关闭后造成地层流体侵入井筒,如图 1-1 所示。由这三种工况所引起的气液两相瞬态流动是全过程欠平衡的难点和攻关方向。

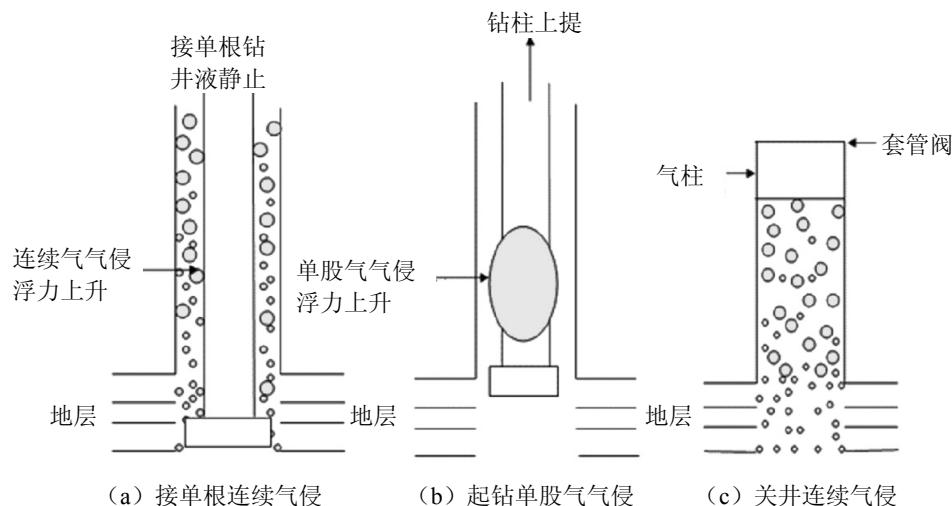


图 1-1 全过程欠平衡钻井停止循环条件下不同工况气侵瞬态流动

因此,研究全过程欠平衡钻井井筒流动模型,特别是停止循环条件下不同工况的瞬态多相流动模型及求解方法对于完善全过程欠平衡钻井工艺计算、实现井下压力的有效控制都具有积极的现实意义。

1.2 国内外研究现状

(1) 国外发展与现状

储层欠平衡钻井技术产生于 20 世纪 90 年代初,欠平衡钻井技术迅速发展,其主要原因是石油工业发展面临着两大挑战。其一是远景性的油气资源匮乏,可动用储量迅速减少,新探明储量增加缓慢,勘探开发难度日益增大,发现巨型、大型油气田的可能性越来越小,因此勘探开发的主要任务转移到中小型油气田、复杂地质条件和地表环境的油气田、非常规油气资源、低压低渗油气资源的勘探开发以及中、后期油气田的改造挖潜上;其二是努力降低油气勘探开发成本。

美国和加拿大一直领导着这一领域的技术潮流,并已成为其主流钻井技术之一,其安全记录比常规过平衡井高出近 30%,欠平衡井的产量可达常规钻井的 2~10 倍,节省了增产措施的费用。据有关文献报道,美国 1994 年欠平衡钻井井数占年钻井总数的 7.6%,1996 年占 13%,2003 年占 30%,2005 年达到 40%。

为了实现钻井、完井全过程的欠平衡状态,可以使用强行起下钻设备进行带压强行起下钻,加拿大的 SNUBCO 公司生产了几种规格的带压起下钻装置,其 S-15 型撬装式带压起下钻装置额定提升力 680 kN、额定加压防顶力 430 kN、起下最大行程 3.5 m,适合于 H_2S 和在 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境下使用。2002 年,Weatherford 公司开发了一种新井下工具——井下套管阀(Downhole Deployment Valve, 简称 DDV),是一种在起下钻和完井过程中隔离油气的井下工具,目前已经投入使用,而



快速起钻阀 (Quick Trip Valve, 简称 QTV) 是哈里伯顿公司开发的另一种新井下工具, 其作用与 DDV 基本相同, 可以作为套管的一个内部附件下入井内或者临时安装在工作管柱上。QTV 与 DDV 的主要区别在于: QTV 是靠机械激发的装置, 不需要外部液压控制管线。

(2) 国内发展与现状

受国外欠平衡钻井的发展, 我国从 1995 年开始了零星地试用欠平衡钻井技术 (塔里木解放 128 井、川西南矿区、川中矿区、辽河、长庆等油田的零星十多口井), 有油井也有气井。“欠平衡钻井”的技术特征是在循环钻井过程中实现, 并保持欠平衡, 因此它具有在钻开储层的过程中很好地发现储层的能力。但在起下钻、中测、测井、完井等工序前都采用了“压井”; 尽管有人称采用了“平衡压井”, 但毫无例外都是“过平衡压井”; 在投产措施上绝大部分采用了“套管固井加射孔”的完井方式, 多数情况下采用了酸压改造。在这种技术体系下, 我国的储层欠平衡钻井一开始就与“勘探发现”密切相连, 多数储层欠平衡钻井的实验井都有良好的, 甚至是突出的钻井中的油气显示, 当然也有一部分由于储层原因或工艺措施原因没有显示。由于最后的投产措施仍然是固井、射孔、酸化、压裂。因此, 储层欠平衡钻井技术对“开发井中的提高单井产能、降低投产成本”没有多大帮助。

这样, 我国的欠平衡钻井技术从发展之初就烙上了“在探井中采用欠平衡钻井”的特色印记。这也导致了当时比较流行的看法: 欠平衡钻井有助于探井发现, 但当油田已经是探明的, 也就没必要再采用欠平衡钻井了; 对开发井提高产能欠平衡钻井没有帮助, 反正最后还是要靠酸化压裂投产, 因此在开发井钻开储层中没必要采用欠平衡。在这种观点的主导下, 我国的储层欠平衡钻井技术发展得很缓慢。这种局面终于在 1998 年被大港油田千米桥区块的开发所打破。千米桥区块属于潜山风化壳裂缝性储层, 虽然经勘探早就知道该储层的存在, 但常规过平衡钻井钻开储层过程中的严重井漏导致钻井难度高和低产, 使探井不能钻穿整个几百米厚的目的层, 有些井甚至刚进潜山面就由于井漏而放弃。采用了欠平衡钻井技术之后, 不但顺利地钻穿整个储层, 而且在欠平衡钻井过程中油气高产。欠平衡钻穿整个储层, 不但解决了井漏的难题, 而且揭示了储层的真实产能。大港油田千米桥区块的储层欠平衡钻井, 使欠平衡钻井用于发现油气层的能力发挥到了极致, 这也掀起了我国欠平衡钻井技术应用的第一个高潮。

随后, 各油田纷纷学习大港千米桥的经验, 上马了一批欠平衡井。但人们很快发现: 大港的经验不是各地通用的。问题的关键在于: 所有的在欠平衡钻井过程中有良好产能显示的储层, 在过平衡压井、固井射孔、酸化压裂之后, 有的储层可以得到不错的产能, 而更多的储层不能得到起码的产能。最突出的例子是四川的充深 1 井, 该井在 2206 米须家河组地层欠平衡钻井, 随钻产气、火炬高 8~20 m (估计产气量至少在 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上), 中途测试前的过平衡压井使得原始产能损失约 90%, 正压差的固井又使产能损失达到 99% 以上, 而最后的酸压解堵也只挽回了原始产能的 3%~5%。

对于充深 1 井的产能是如何损失掉的问题, 系统的研究得出的结果是: 不同的油气藏对正压差下水基钻井液侵入伤害反应是不一样的。对于充深 1 井的须家河组这样的致密砂岩干气储层, 正压差下的水基钻井液侵入伤害是迅速的、大范围的、致命的和不可恢复的。对于这类储层, “发现裂缝、利用裂缝、保护裂缝”的自然产能投产方式一定是最经济、最有效的完井技术方案。在上述观点的支持下, 四川石油管理局、西南油气田分公司、西南石油大学联合研制, 形成了包括钻井、起下钻、取芯、测井、完井各个环节均实现欠平衡的全过程欠平衡钻完井配套技术。该技术在四川邛西构造首次完整应用, 是该地区单井产能得到了大幅度提高, 并取得了勘探上的巨大突破。全过程欠平衡钻井在邛西构造的规模化应用使我国储层欠平衡钻井技术的应用掀起了一个继大港千米桥之后的小高潮。

全过程欠平衡钻井技术在邛西构造的成功应用吸引了国内钻井界的目光, 但在全国其他地区没有规模化地成功应用过。

根据国内外全过程欠平衡发展现状可以看出,虽然国内外在全过程欠平衡的工具设备研发上投入大量人力、物力,但全过程欠平衡钻井井筒流动理论体系还不完善,主要体现在停止循环时井下压力的预测和计算。全过程欠平衡钻井流动模型主要涉及钻进条件下的稳态多相流动计算与停止循环条件下的由于气侵所导致的气液两相瞬态流动计算。停止循环条件下主要涉及:①接单根井下流体静止,气体连续侵入井筒;②每次起钻抽吸地层单股气体侵入井筒;③使用套管阀等造成地层流体侵入井筒,如图 1-1 所示。因此,有必要研究高精度稳态多相流动模型与瞬态多相流动数学模型,最终形成完整的全过程欠平衡钻井井筒流动理论模型。

1.2.1 欠平衡正常钻进稳态多相流动理论发展

多相流理论是计算和控制井底压力的主要理论依据,在循环状态下可以通过稳态多相流计算,配合控制手段有效地控制井底压力、实现欠平衡。几十年来,多相流计算理论的完善和丰富主要依赖于实验研究与理论研究相结合的手段进行,其主要研究历程如下。

1963 年 Duns & Ros 为了全面描绘气液两相流动现象,通过无因次分析, Ros 确定出 10 个无因次群。Ros 在长为 10 m、直径为 32~142.3 mm 的垂直管道中进行了气液两相流动实验,得到了流态图。

1980 年, Taitel & Barnea & Dukler 在前人的基础上采用气液相表观速度作为计算参数来识别流态,他提出了描述转变的物理模型,发展了理论基础的转变方程。

1994 年, Ansari 等人把以往各个单一流型的机理研究成果组合起来。流型预测来自 Taitel & Barnea, 泡状流压降模型来自 Gaetano, 段塞流压降模型来自 Sylvester, 环状流压降模型来自 Hewitt 等;同时,他对关系式的某些系数进行了修正,形成了综合性的压降预测方法。

2002 年, Allan 等人提出一种计算井筒和管道多相流参数的新方法“组分追踪法”。它不需要将压力、温度内插入标准图版,也不把油、气、水分别考虑。他们提出的“组分追踪法”准确地考虑了各组分相对于空间和时间的变化,并预测了在烃类和水变化基础上的流体性质如密度、黏度、热传导、热容以及表面张力等,从而更准确地预测压降、温度变化和流型转变。

在 2004 年, H.Shi 等人提出用漂移模型来描述井筒多相流,他在管径为 15 cm 的倾斜管中开展多相流实验,同时,测试数据确定漂移模型参数。

几十年来国内外学者在理论和实验的基础上建立了稳态多相流模型,其流型划分如图 1-2 所示。

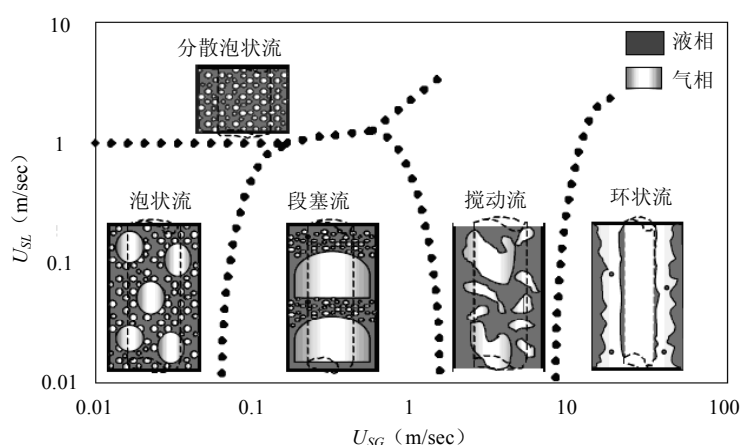


图 1-2 传统多相流流型图

1.2.2 欠平衡钻井停止循环气侵瞬态多相流动理论研究

现有稳态多相流理论用来解决欠平衡钻井瞬态流动计算也存在诸多缺陷,这主要体现在理论建模和实验方法手段上。

理论缺陷:现有稳态多相流动理论均以稳态流动为研究基础,其计算思路是通过计算不同压力条件下的气、液相表观流速从而计算压力降等特征参数,且由于其稳态流动,因此其流动过程不是时间函数。

而对于瞬态流动而言,其流动特征表现非稳定流动,管流一端在一定时期内可能没有气相产出,比如:停止循环后起钻抽吸地层,井筒遭遇气侵,气相浮力上升顶出钻井液。另外,瞬态多相流动一定是压力等特征参数随时间函数变化。基于这两方面考虑,稳态多相流动就无法适应这工况条件下的工程计算。

实验缺陷:现有稳态多相流动所开展的实验均以低黏牛顿流体(清水)为实验介质,而钻井条件下高压、高黏、非牛顿流体钻井液与其性质大为不同,因此,开展钻井用多相流动实验研究也需要考虑采用在高温、高压、非牛顿流体的实验条件下进行。

因此,在停止循环条件下井下压力预测和动态计算主要需要考虑的是由于地层流体侵入引起的井下压力波动和井下气液两相流的瞬变过程。这一瞬变流动过程主要涉及井下气体浮力上升动态分析、井下压力扰动的传播的以及其计算方法。

1.2.2.1 单股气、连续气气侵静止液体气相浮力上升运动

在欠平衡钻井停止循环条件下,接单根井下流体静止欠压值加大、每次起钻抽吸地层以及使用套管阀等都会造成地层流体侵入井筒。因此,有必要研究地层流体特别是气体是如何在静止液体中动态浮力膨胀上升并穿越静止液体,影响井下压力的波动。

(1) 单股气气侵静止液体气相浮力上升运动

根据国内外研究发现:气泡穿越静止液体时,液体的物性如黏度、表面张力等因素对气体上升速度和形态变化影响较大。国内外学者在该领域做了大量研究,建立了诸多数学模型描述气泡上升动态过程,这些模型大多假设气泡达到最终速度时是由浮力、阻力、曳力等力的平衡。同时,对于非牛顿流体使用三种无量纲数组描述其行为特性,包括雷诺数 Re 、莫顿数 Mo 以及 Eotvos 数。

① 气泡上升特性的实验方法

Gian Piero Celata 研究气泡上升速度与其位置的关系,如图 1-3 中 (a)、(b) 所示。这两幅图分别表示气泡在纯液体和含表面活性剂液体中的速度与位置的变化。从图中不难发现,气泡在刚启动时,获得初速度,运动一段距离后其受力达到平衡,气泡达到终了速度状态。

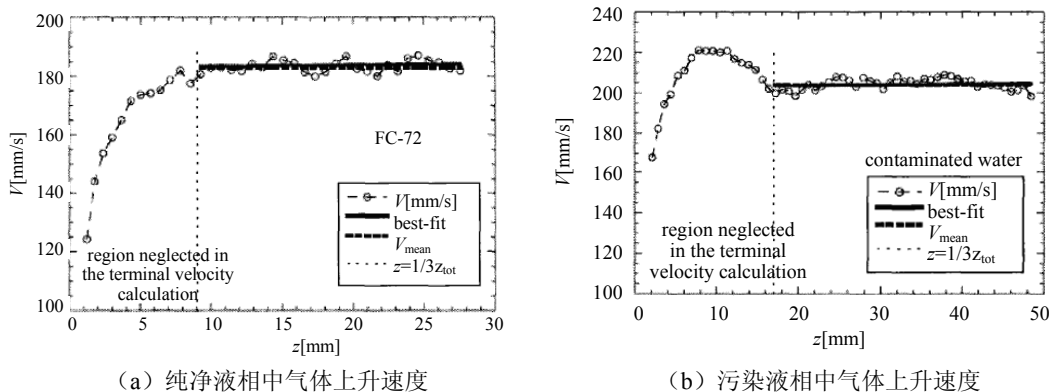


图 1-3 气泡上升速度

②气泡上升终速度的影响因素

Amol.A.Kulkarni 研究发现, 气泡在液体中受到的力包括: 重力、浮力、曳力、表面张力、黏性力、附加质量力等。影响上升速度的因素有气泡大小、形状和液体物理性质如: 密度、黏度、表面张力等。

气泡形态对气泡上升终速度的影响:

Tomiyama 认为影响气泡终速度核心因素为气泡的形变。较小的气泡形变导致较小的终速度和较大的气泡纵横比, 而较大形变将会导致较大的终速度以及较小的气泡纵横比。

液相纯度对气泡上升终速度的影响:

Tomiyama 实验发现, 随着气泡表面活性物质的增加, 其上升速度在某一个临界大小值之前一直下降, 而在达到临界值之后, 上升速度不再受液相纯度的影响。

液相黏度对气泡上升终速度的影响:

在黏弹性流体中, 终速度在某个临界尺寸处表现出非连续性; 在其他剪切变稀液体中, 却未发现上述情况。速度的跳跃可能是由于从 Sroke 区域向 Hadanmard 区域转变的结果, 而此时黏弹性占据主导地位。Rodrigue 等在对多种黏弹性流体的研究后发现, 转变的尺寸是溶质浓度的函数, 且弹性力限制了区域的转变。

(2) 连续气气侵静止液体气相浮力上升运动

国内外对于该领域研究主要涉及气举采油卸载流动分析, 但该研究是圆管流动, 且研究内容多停留在拟稳态范围, 在本论文调研过程中还未发现国内有利用压力波传递理论和特征线解法求解该的瞬态过程的案例。在调研中发现, 国外有利用计算流体力学软件数值模拟连续气气侵静止非牛顿流体的例子, 如图 1-4 所示。

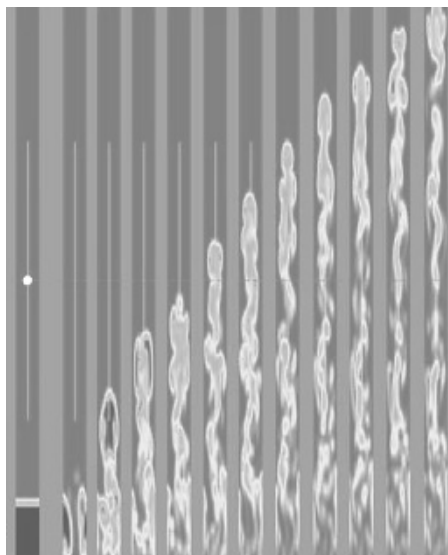


图 1-4 连续气气侵静止非牛顿流体

1.2.2.2 瞬态多相流动解法和计算

(1) 图解法

图解法就是在不同的时间、不同的地点, 按一定的线性规律在 H、Q 坐标图上画出特征线, 由此确定单位步长内压力变化。图解法一般包括: 简单管路水力波动计算和考虑摩擦损失后水力波动计算。

(2) 解析法

解析法就是从三大方程组推导出各工况下管流中水力波动值的计算公式。水力波动方程是一组偏微分方程，难以求解；但对于工程计算而言，可忽略方程中某些非线性项，使方程组将会变成线性方程组，在给出初值、边界值条件下，经过计算得到解析解。

(3) 有限差分法

有限差分法是一种简单、常用的水力波动计算数值方法，有限差分格式分为显式格式和隐式格式。20 世纪 80 年代以来，出现了一些稳定性好、计算精度较高的显式差分格式，它们被用来计算水力波动变化。

(4) 特征线法

气液两相瞬态多相流动的基本方程为偏微分方程，特征线法是将偏微分方程变换成全微分方程，然后用一阶有限差分求解。特征线法能考虑阻力影响问题，具有较高的精确度。

1.2.3 国内外欠平衡钻井井筒多相流动实验台架台建设

多年来，国内外学者为了提高不同工况下多相流动计算模型精度问题，陆续建立了流动实验台架进行物理模拟以修正数学模型，其主要发展如下。

1. 国外发展情况

(1) ACTF 实验装置

1997 年，由美国能源部和 BDM 公司牵头、各大石油公司和技术服务公司参与，Tulsa 大学负责的长达五年的 ACTS 计划启动。该项目总体目标是建立一个岩屑运移模拟装置——ACTF，功能与井筒模拟器相当，用其研究非牛顿流体性质和岩屑运移规律。该项目启动之前 Tulsa 大学已有在低压常温下研究流体性质和岩屑运移规律的密闭循环实验设备。该 LPAT 密闭循环装置是世界上最大的密闭循环系统之一，这个循环系统包含了钻井液循环系统的所有设备，包括带搅拌机的泥浆罐、振动筛、流动管线、泵及压缩机。其中实验管段长 30.5 m，井眼内径 0.205 m，钻杆外径 0.115 m，钻杆转速 0~140 rpm，液体流量 0~2.65 m³/min，气体流量 0~35 m³/min，实验管段倾斜角度在 0~90°间变化。ACTF 实验架要求在常压和特定温度、压力下进行气、液、固三相流动实验。实验管段还可以在不同的倾斜角度和钻杆旋转速度下实验，因此可以很好地模拟水平井、大斜度井的岩屑运移情况。ACTF 实验架主要由实验架的起升系统、岩屑注入和清除系统、气体和液体注入系统、温度控制系统、实验监测系统、钻柱旋转系统等组成，如图 5-5 所示。



图 1-5 ACTF 密闭循环装置

(2) SCR 实验装置

实验装置垂直长度约为 12 m，9.5 m 实验管路可以进行可视化实验。管路系统安装在 15 m 的工作台上，其可以在枢轴上转动。此装置可以测试管路从水平到垂直的任何角度，如图 1-6 所示。



图 1-6 SCR 实验装置

用于实验部分的有 5 个透明塑料管，内径 200 mm，测试装置在顶部，空气供给系统由两台相同的空压机组成，总气量为 40 000 m³/d，排气压力 700 kPa。液体循环系统由一单作用泵构成，排量是 5800 m³/d，额定压力 600 kPa，如图 1-7 所示。



图 1-7 SCR 实验装置



(3) TUFFP 实验装置

该环道长 420 m, 内径 77.9 mm, 为水平钢管。有 4 个 3 m 长的透明 PVC 管测量站, 每个测量站有 1 台压力变送器、1 台差压变送器、2 台电容传感器 (用于测持液率)。管道入口有 1 个清管球发球装置, 末端有 1 台分离器和称重罐 (装有 1 台重量传感器用于测出口液体流量, 兼作清管球收球装置)。流量采用涡轮流量计测量。实验介质为煤油和空气, 煤油循环使用。一般采用手动操作改变流量。实验参数采用计算机采集, 共有 23 个通道, 采集频率为 50 Hz。通常每次实验记录 20~60 min, $53 \times 10^4 \sim 125 \times 10^4$ 个数据点, 可以得到关于流动结构的详细信息, 如流型、液塞频率、液塞速度、液塞持液率和液膜高度等。

(4) 法国流体力学研究所实验环道

该实验环道长 90 m, 内径 50 mm, 实验介质为空气和水, 水流量范围 0.1~8 L/s, 气流量范围 0.0005~0.1 kg/s。流量采用孔板流量计测量, 液位采用 5 个线状平行探针测量 (后改为 4 个环状平行探针, 间距 50 mm)。与探针相同位置有 5 台压力变送器, 旋转压缩机提供恒定 0.7 MPa 的压力。测量参数采用计算机采集, 采集频率为 10 Hz。

(5) WASP 实验环道

WASP 实验环道位于英国帝国理工学院。该环道长 36 m, 内径 77.9 mm, 采用不锈钢管 (其中末端附近为 1 m 长的透明管) 制作, 可倾斜。实验介质为油、水和空气, 最高压力为 3 MPa, 出口为大气压。油、水罐为 5 m³, 气罐为 65 m³。管道末端有一个液塞捕集器, 液体循环使用。持液率 (液高) 采用四组线状平行探针和一个 γ 密度仪来测量。流量采用孔板流量计测量。末端附近有一台绝对压力变送器和一台差压变送器。透明管外安装有一台摄像机, 测量参数由计算机进行采集。探针采样频率为 500 Hz, γ 密度仪采样周期为 40 ms, 压力和流量采样周期为 2.5 s。一次操作记录约 10 min, 取样 250×10^4 个数据点。液相折算速度一般低于 2 m/s, 气相折算速度一般低于 15 m/s。

(6) CALTEC 实验环道

CALTEC 实验环道位于英国。该环道长 60 m, 内径 50.8 mm, 有 S 形起伏管, 总高差超过 33 m, 可以进行地形起伏段塞流实验研究。实验介质采用空气和水、水循环使用。测量段的前一段下倾 2°, 然后是 S 形起伏管, 最后进入 33 m 高的直径为 152.4 mm 直软管, 上部与大气相通, 兼作简单气水分离器)。测量段有 6 台压力变送器、8 个液塞探针。1 台电磁流量计装在起伏管顶端用来测液塞速度, 在起伏管底部和顶部装有 2 台 γ 密度仪用来测量持液率。

(7) Boussens 实验环道

Boussens 实验环道是位于 Elf Aquitaine Boussens 研究中心的一个大型实验装置。第一段是水平段和近水平段, 角度为 $-10^\circ \sim 10^\circ$, 长 120 m, 内径 152 mm; 第二段角度 $0 \sim 90^\circ$, 长 30 m, 有两种内径 (76 mm 或 152 mm)。实验介质采用水、凝析液和天然气, 最高操作压力为 5 MPa。

2. 国内发展情况

(1) 1995 年, 中国石油大学李相方等人对空气在垂直环空钻井液中流型分布规律和岩屑运移规律研究时设计了一套两相流实验装置。实验管为有机玻璃环空管, 内管直径 0.05 m, 外管直径为 0.12 m, 管段长约 10 m。水泵将水箱里的泥浆泵入环空内, 液体涡轮流量计测量泥浆的流量, 空气压缩机给储气罐供气, 储气罐内的气体通过节流阀及陶瓷破气滤网进入环空, 与泥浆混合成气液两相流, 但此循环系统只能在较小工况下实验。

(2) 2000 年, 西南石油大学刘绘新、梁红、孟英峰等人设计了空气雾化钻井实验架, 井筒高 15 m, 外筒内径 0.07 m, 内筒外径 0.03 m, 空压机排量 6 m³/min, 压力 0.8 MPa, 功率 40 kW, 气罐容积 2 m³。实验架由气源系统、岩屑输送系统、流体注入系统、井筒系统、测量系统组成。

通过调研发现, 多相流动预测模型存在一定的局限性和误差, 这些都必须通过实验手段对其修

正，才可以提高预测精度。因此，建立可视化实验架进行欠平衡钻井流动模拟，这是研究的关键之一。
国内外多相流动实验台架参数对比，如表 1-1 所示。

表 1-1 国内外实验架主要部件及参数对比

类别	Tulas 大学	西南石油大 学	中国石油 大学	SINTEF 实验 装置	SCR 实验 装置	TUFFP 实验环道	法国流体力 学研究所实 验环道	WASP 实验环道	CALTEC 实验环道	Boussens 实验环道
井筒	高： 100 in 外筒内径： 81/2 in 内孔外径： 5 in	高： 15 m 外筒内径： 70 mm 内孔外径： 30 mm 测孔位置： 5 m、8 m、 11 m	内管直径 0.05m 外管直径为 0.12m 管段长约 10 m	室外管流总长达 1000 m，其中的 一条管流水平管 长 400 m，后面 的竖 直 管 高 52 m，内 径 189 mm。其中的 50 m 水平管可 以起伏一定的角 度，后面的 70 m 水平管可以下倾 2°	垂直长度约为 12 m，9.5 m 内径 200 mm	环道长 420 m 内径 77.9 mm	环道长 90 m 内径 50 mm	长 36 m 内径 77.9 mm	长 60 m 内径 50.8 mm 有 S 形起 伏管	第一段水平 段和近水平 段，角度为 -10°~10°， 长 120 m，内 径 152 mm； 第二段角度 0°~90°，长 30 m，有两种 内径（76 mm 或 152 mm）
压缩机	排量： 35 m ³ /min 压力： 0.7 MPa、 15 MPa 功率： 283 kW	排量： 6 m ³ /min 压力： 0.8 MPa 功率： 40 kW 气罐： 2 m ³		压力： 9 MPa 功率： 700 kW	（气相）排量： 40000 m ³ /d； 压力 700 kPa （液相）排量： 5800 m ³ /d； 额定压力 600 kPa		压力 0.7 MPa	油、水罐为 5 m ³ ，气罐 为 65 m ³		
环空 参数	返速： 0.5~ 20 m/s 压力： 0.2 ~ 12 MPa	返速： 15 m/s 压力： 0.2 MPa ~ 0.3 MPa		2 MPa 的中等 压力下，液相折 算 速 度 为 0.15~3.7 m/s， 气相折算速度 为 0.5~14 m/s			水流量范围 0.1~8 L/s， 气流量范围 0.0005~ 0.1 kg/s	最高压力 为 3 MPa， 出口为大气压，液相 折算速度 一般低于 2 m/s，气 相折算速 度一般低 于 15 m/s		实验介质采 用水、凝析液 和天然气。最 高操作压力 为 5 MPa
用途 特点	钻井	钻井	钻井	钻井	钻井	油气储运 方面	油气储运 方面	油气储运 方面	油气储运 方面	油气储运 方面

1.3 本书主要研究内容及思路

全过程欠平衡钻井井筒流动模型包括：钻进时稳态气、液、固多相流动和停止循环时由于气侵（单股气、连续气）所引起的瞬态气液两相流动两部分构成。因此，本书主要研究内容和思路如下。

（1）可视化实验架的研制

自主研制一套可视化全过程欠平衡钻井多相流动实验装置（高 18 m，环空管内径 90 mm、内管外径 50 mm），采用有机玻璃管作为实验管路以达到可视化实验的目的，管路安装并使用压力传感器、压降传感器、流量计以及数字式温度计等先进仪器设备以实现实验数据的自动采集；采用压



缩空气和水作为实验介质开展实验。

(2) 气、液、固稳态多相流动研究

从经典流体力学理论出发,对现有多相流模型进行优选,建立欠平衡正常钻进耦合地层渗流的稳态气、液、固多相流动数学模型;在考虑相间滑移的情况下建立气、液、固多相流的控制方程组、初始和边界条件,提出数值解法。利用该方法对稳态多相流动进行数值模拟并采用室内和现场实验数据验证和修正该模型。最后,数值模拟不同钻井液排量、充气量、井口回压、钻井液密度、钻井液黏度等施工参数对井筒压力剖面等特征参数的影响,得出规律性认识。

(3) 单向敞开管流气侵(地层单股出气、地层连续出气)瞬态气液两相流动实验及数值模拟研究

单向敞开条件下水动力学分析又可分为井口有钻井液顶出和井口无钻井液顶出两种。

①从流体力学理论出发,首先,建立气液两相流动的控制方程组、初始和边界条件;其次,建立单股气、连续气相浮力上升穿越并顶出静止非牛顿流体的动态数学模型,包括持气率、压降、顶出钻井液体积等,同时考虑压力波的产生、传递,按照瞬态多相流的求解理论进行气液两相特征参数的计算;最后,通过室内实验进行物理模拟和数学模型的验证。

②对于井口无钻井液顶出的地层连续出气多相流可按照零液流拟稳态多相流理论进行井下压力剖面的预测。在稳态多相流动基础上,考虑气液两相 100%滑脱损失,建立井下零液流动数学模型,包括:压降、持气率、流型等。同时,考虑井口回压对该类特殊气液两相流的特征参数影响,从而提出欠平衡钻井停止循环后接单根或井下长期静止时井口回压施加的可行性,这样,保证在该工况下既实现欠平衡,又维持井下安全,实现井下压力人为可控。在此基础上,通过室内实验验证所建数学模型的准确性。

(4) 欠平衡条件下地层—井筒物质交换规律研究,主要指漏喷同存

通过理论分析、数值模拟以及可视化实验研究,还原井下漏喷同存的实际情况,揭示欠平衡钻井条件下的“井筒—地层物质交换”客观规律。

(5) 单向封闭管流气侵瞬态流动实验及数值模拟研究

首先,建立不同储层介质类型的地层—井筒耦合流动模型(双重介质、孔隙性介质),然后采用气体穿越静止液体动态分析理论以及套管阀使用工艺流程,数值模拟在不同地层使用套管阀时关阀后的井下压力动态变化,揭示压力变化规律。

研究路线如图 1-8 所示。