

油气藏地质及开发工程国家重点实验室资助



复杂油气藏开发丛书

复杂油气藏固井液技术 研究与应用

郭小阳 李早元
辜 涛 张兴国 等 编著



科学出版社

油气藏地质及开发工程国家重点实验室资助
复杂油气藏开发丛书

复杂油气藏固井液技术研究与应用

郭小阳 李早元 辜 涛 张兴国 等 编著

科学出版社
北 京

内 容 简 介

本书主要介绍解决我国复杂地质、工况条件下的固井问题中针对固井液研究得到的基础理论、新思路、新材料、新方法及现场应用等方面的总结,具有针对性、实用性、知识性的特点,面向研究、面向生产,希望能通过此书为广大油气井固井技术领域相关人员提供有益的借鉴。全书共分为八章,主要介绍固井工作液的概念及在复杂油气藏勘探开发中遇到的挑战、高效抗污染隔离液技术、可固化诸漏工作液、固井水泥石酸性气体腐蚀与防腐体系、稠油热采井铝酸盐水泥浆体系、水泥环完整性评价模型与试验、固井水泥石增韧改性技术以及自修复水泥浆技术。

本书读者对象为相关科研院所研究人员、高等学校教师和研究生,同时也适合石油行业专业技术人员和材料、化学等其他相关专业技术人员作为参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂油气藏固井液技术研究与应用 / 郭小阳等编著. —北京: 科学出版社, 2017.6

(复杂油气藏开发丛书)

ISBN 978-7-03-042918-6

I. ①复… II. ①郭… III. ①复杂地层-油气藏-固井-油井水泥-研究 IV. ①TE256

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 309772 号

责任编辑: 张 展 刘 琳 / 责任校对: 韩雨舟

封面设计: 陈 敬 / 责任印制: 余少力

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年6月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017年6月第一次印刷 印张: 15

字数: 350千字

定价: 149.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

丛书编写委员会

主 编：赵金洲

编 委：罗平亚 周守为 杜志敏

张烈辉 郭建春 孟英峰

陈 平 施太和 郭 肖

本书作者

郭小阳 李早元 辜 涛

张兴国 程小伟 李 明

刘 健 黄 盛 郑冠一

丛 书 序

石油和天然气是社会经济发展的重要基础和主要动力,油气供应安全事关我国实现“两个一百年”奋斗目标和中华民族伟大复兴中国梦的全局。但我国油气资源约束日益加剧,供需矛盾日益突出,对外依存度越来越高,原油对外依存度已达到 60.6%,天然气对外依存度已达 32.7%,油气安全形势越来越严峻,已对国家经济社会发展形成了严重制约。

为此,《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》对油气工业科技进步和持续发展提出了重大需求和战略目标,将“复杂地质油气资源勘探开发利用”列入 11 个重点领域之首的能源领域的优先主题,部署了我国科技发展重中之重的 16 个重大专项之一“大型油气田及煤层气开发”。

国家《能源发展“十一五”规划》指出要优先发展复杂地质条件油气资源勘探开发、海洋油气资源勘探开发和煤层气开发等技术,重点发展天然气水合物地质理论、资源勘探评价、钻井和安全开采技术。国家《能源发展“十二五”规划》指出要突破关键勘探开发技术,着力突破煤层气、页岩气等非常规油气资源开发技术瓶颈,达到或超过世界先进水平。

这些重大需求和战略目标都属于复杂油气藏勘探与开发的范畴,是国内外油气田勘探开发工程界未能很好解决的重大技术难题,也是世界油气科学技术研究的前沿。

油气藏地质及开发工程国家重点实验室是我国油气工业上游领域的第一个国家重点实验室,也是我国最先一批国家重点实验室之一。实验室一直致力于建立复杂油气藏勘探开发理论及技术体系,以引领油气勘探开发学科发展、促进油气勘探开发科技进步、支撑油气工业持续发展为主要目标,以我国特别是西部复杂常规油气藏、深海油气以及页岩气、煤层气、天然气水合物等非常规油气资源为对象,以“发现油气藏、认识油气藏、开发油气藏、保护油气藏、改造油气藏”为主线,油气并举、海陆结合、气为特色,瞄准勘探开发科学前沿,开展应用基础研究,向基础研究和技术创新两头延伸,解决油气勘探开发领域关键科学和技术问题,为提高我国油气勘探开发技术的核心竞争力和推动油气工业持续发展作出了重大贡献。

近十年来,实验室紧紧围绕上述重大需求和战略目标,掌握学科发展方向,熟知阻碍油气勘探开发的重大技术难题,凝炼出其中基础科学问题,开展基础和应用基础研究,取得理论创新成果,在此基础上与三大国家石油公司密切合作承担国家重大科研和重大工程任务,产生新方法,研发新材料、新产品,建立新工艺,形成新的核心关键技术,以解决重大工程技术难题为抓手,促进油气勘探开发科学进步和技术发展。在基本覆盖石油与天然气勘探开发学科前沿研究领域的主要内容以及油气工业长远发展急需解决的?

主要问题的含油气盆地动力学及油气成藏理论、油气储层地质学、复杂油气藏地球物理勘探理论与方法、复杂油气藏开发理论与方法、复杂油气藏钻完井基础理论与关键

技术、复杂油气藏增产改造及提高采收率基础理论与关键技术以及深海天然气水合物开发理论及关键技术等方面形成了鲜明特色和优势，持续产生了一批有重大影响的研究成果和重大关键技术并实现工业化应用，取得了显著经济和社会效益。

我们组织编写的“复杂油气藏开发丛书”包括《页岩气藏缝网压裂数值模拟》《复杂油气藏储层改造基础理论与技术》《页岩气渗流机理及数值模拟》《复杂油气藏随钻测井与地质导向》《复杂油气藏相态理论与应用》《特殊油气藏井筒完整性与安全》《复杂油气藏渗流理论与应用》《复杂油气藏钻井理论与应用》《复杂油气藏固井液技术研究与应用》《复杂油气藏欠平衡钻井理论与实践》《复杂油藏化学驱提高采收率》等 11 本专著，综合反映了油气藏地质及开发工程国家重点实验室在油气开发方面的部分研究成果。希望这套丛书能为从事相关研究的科技人员提供有价值的参考资料，为提高我国复杂油气藏开发水平发挥应有的作用。

丛书涉及研究方向多、内容广，尽管作者们精心策划和编写、力求完美，但由于水平所限，难免有遗漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

国家《能源发展战略行动计划(2014—2020 年)》将稳步提高国内石油产量和大力发展天然气列为主要任务，迫切需要稳定东部老油田产量、实现西部增储上产、加快海洋石油开发、大力支持低品位资源开发、加快常规天然气勘探开发、重点突破页岩气和煤层气开发、加大天然气水合物勘探开发技术攻关力度并推进试采工程。国家《能源技术创新行动计划(2016—2030 年)》将非常规油气和深层、深海油气开发技术创新列为重点任务，提出要深入开展页岩油气地质理论及勘探技术、油气藏工程、水平井钻完井、压裂改造技术研究并自主研发钻完井关键装备与材料，完善煤层气勘探开发技术体系，实现页岩油气、煤层气等非常规油气的高效开发，保障产量稳步增长突破天然气水合物勘探开发基础理论和关键技术，开展先导钻探和试采试验；掌握深—超深层油气勘探开发关键技术，勘探开发埋深突破 8000m 领域，形成 6000~7000m 有效开发成熟技术体系，勘探开发技术水平总体达到国际领先；全面提升深海油气钻采工程技术水平及装备自主建造能力，实现 3000m、4000m 超深水油气田的自主开发。近日颁布的《国家创新驱动发展战略纲要》将开发深海深地等复杂条件下的油气矿产资源勘探开采技术、开展页岩气等非常规油气勘探开发综合技术示范列为重点战略任务，提出继续加快实施已部署的国家油气科技重大专项。

这些都是油气藏地质及开发工程国家重点实验室的使命和责任，实验室已经和正在加快研究攻关，今后我们将陆续把相关重要研究成果整理成书，奉献给广大读者。



2016 年 1 月

前 言

固井是建井的主要工程环节之一，对钻井和采油工程有承上启下的重要作用。其成败关系到一口井的前期钻井投资效益，作业质量也会对单井产能和油气藏整体开发效果造成极大影响。

固井的工程工艺、装备工具和工作液性能都是影响成败和质量的关键因素。本书所指固井液，主要包括完成固井必须使用的前置液（冲洗液和隔离液）与后置液、固井水泥浆及其形成的水泥石。由于固井水泥浆为水硬性胶凝材料，一旦注入井内并凝结，其作业效果就难更改。所以，固井是石油勘探开发工程技术领域中唯一一项地下隐蔽性高风险作业，而固井液的设计和应用是关系到提高注水泥质量、保证油气井寿命、提高采收率及合理开发油气田的关键技术之一。

当前，油气勘探开发已由简单地貌区转到复杂地形区域，由浅层转到深层，由常规油气资源转到低渗透和非常规油气资源，由陆地转向海域、深海等地区。固井工程的核心始终在于获得优质的水泥环并保证其在油气井整个生命周期内具有有效的层间封隔能力。复杂勘探开发条件下保证固井质量的难度不断增大，由此对常规固井液提出了更严峻的挑战。

作者认为工程应用科学与材料科学研究的关系为：工程需求促进材料科学研究，材料科学技术发展创新保障工程效果和质量。因此，作者及其课题组近年来围绕提高复杂油气藏固井质量的要求，在材料科学研究的基础上，对复杂油气藏固井液技术进行了较为系统的研究，形成了具有一定研究特色的固井液技术，部分研究成果在复杂油气井固井工程中进行了现场试验或得到了推广应用。

本书主要是团队近年来在解决我国复杂地质、工况条件下的固井问题中针对固井液研究得到的基础理论、新思路、新材料、新方法及现场应用等方面的总结，具有针对性、实用性、知识性的特点，面向研究、面向生产，希望能通过此书为广大油气井固井技术领域相关人员提供有益的借鉴。全书共分为八章，主要介绍固井工作液的概念及其在复杂油气藏勘探开发中遇到的挑战、高效抗污染隔离液技术、可固化工作液技术、固井水泥石酸性气体腐蚀与防腐体系、稠油热采井铝酸盐水泥浆体系、水泥环完整性评价模型与试验、固井水泥石增韧改性技术以及自修复水泥浆技术。

本书的研究成果得到了中国石油天然气集团公司科技发展部、中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司、塔里木油田分公司、辽河油田分公司、川庆钻探公司以及中国石化西南油气分公司以和中石化石油工程西南分公司等单位的大力支持和帮助。杨香艳、赵启阳、吴奇兵、谢鹏、关素敏、武鹏、王岩、刘萌、易亚军、胡光辉、杨元意、

杨雨佳、刘萌、张凯、梅开元、王升正、龙丹、张明亮、杜建波、邓双、谢冬柏、邓智中、孙劲飞、樊晓霞等研究生参与了研究以及资料收集和整理工作。对以上单位和个人表示衷心的感谢。

由于水平有限，加上编写比较仓促，书中难免出现一些不妥与错误之处，敬请专家、读者批评指正。

编写组

2017 年 5 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 固井及固井液	1
1.2 复杂油气藏固井液面临的挑战	3
1.3 本书主要内容简介	5
第 2 章 高效抗污染隔离液技术	8
2.1 钻井液与水泥浆接触污染机理	8
2.1.1 钻井液与水泥浆接触污染的危害	8
2.1.2 钻井液与水泥浆接触污染机理研究	14
2.1.3 固井井下流体相容性评价方法	20
2.2 高效抗污染隔离液体系	24
2.2.1 高效抗污染隔离液组成材料	24
2.2.2 高效抗污染隔离液体系综合性能	28
2.2.3 隔离液多倍体积置换技术	37
2.3 高效抗污染隔离液的现场应用	39
第 3 章 可固化堵漏工作液	43
3.1 可固化堵漏工作液材料组成及性能	44
3.1.1 可固化堵漏液基础材料优选	44
3.1.2 可固化堵漏工作液性能评价	57
3.1.3 工程适用性	62
3.1.4 与钻井液的相容性	66
3.1.5 堵漏性能研究	68
3.2 现场应用	69
3.2.1 MX001-H5 井堵漏应用	69
3.2.2 JS104-2HF 井固井应用	72
第 4 章 固井水泥石酸性气体腐蚀与防腐体系	75
4.1 固井水泥石酸性气体腐蚀研究现状	75
4.2 酸性气体对固井水泥石的腐蚀	78
4.2.1 CO ₂ 环境下水泥石的腐蚀	78
4.2.2 H ₂ S 环境下水泥石的腐蚀	85
4.2.3 CO ₂ 与 H ₂ S 联合环境下水泥石的腐蚀	90
4.2.4 单向腐蚀试验方法	96
4.3 防腐蚀水泥浆体系研究	98
4.3.1 粉煤灰防腐蚀水泥浆体系	98

4.3.2 胶乳防腐蚀水泥浆体系 101

4.3.3 磷铝酸盐与硅酸盐复合水泥浆体系 104

4.3.4 锌盐水泥浆体系 107

第5章 稠油热采井铝酸盐水泥浆体系 112

5.1 G级加砂水泥石高温强度衰退分析 112

5.1.1 G级油井水泥基材及辅材性能 113

5.1.2 低温条件下石英砂对水泥石抗压强度的影响 114

5.1.3 多周期高低温循环对加砂水泥石强度影响 117

5.2 稠油热采井铝酸盐水泥浆体系研究 118

5.2.1 铝酸盐水泥基材及辅材性能 119

5.2.2 低温条件下外掺料对铝酸盐水泥石强度的影响 121

5.2.3 高温条件下外掺料对铝酸盐水泥石强度的影响 123

5.2.4 改性铝酸盐水泥体系综合性能研究 124

5.2.5 改性铝酸盐水泥石耐温机理分析 127

5.3 稠油热采井铝硅酸盐水泥浆体系现场应用 128

5.3.1 铝酸盐水泥高温性能现场模拟评价 128

5.3.2 铝酸盐水泥浆体系在Q-1的现场应用 130

第6章 水泥环完整性评价模型与试验 136

6.1 水泥环完整性评价力学模型研究 136

6.1.1 水泥环界面初始作用力研究 136

6.1.2 定向井水泥环应力分布模型研究 145

6.1.3 定向井固井水泥环应力分布模型现场应用 164

6.2 基于应力等效的水泥环完整性试验评价 170

6.2.1 水泥环完整性评价仪工作原理 170

6.2.2 水泥环完整性评价仪的应用 171

第7章 固井水泥石增韧改性技术 179

7.1 等离子改性橡胶粉增韧水泥浆 179

7.2 纤维增韧水泥浆 185

7.2.1 聚酯纤维对水泥石力学性能的影响 186

7.2.2 碳纤维对水泥石力学性能的影响 190

7.2.3 水镁石纤维对水泥石力学性能的影响 192

7.2.4 碳酸钙晶须对水泥石力学性能的影响 195

7.2.5 混杂纤维对水泥石力学性能的影响 197

第8章 自修复固井水泥浆技术 201

8.1 自修复水泥浆研究现状 201

8.1.1 混凝土用自修复材料研究现状 202

8.1.2 固井水泥浆自修复材料研究现状 203

8.2 固井水泥石自修复性能评价方法 205

8.2.1 水泥石力学强度恢复率评价方法 205

8.2.2	水泥石渗透恢复率评价方法	207
8.3	烃激活型自修复水泥浆体系	208
8.3.1	烃激活型自修复材料的制备	208
8.3.2	烃激活型自修复材料对水泥浆性能的影响	216
8.3.3	烃激活型固井自修复水泥浆自修复性能评价	219
8.4	热自修复水泥浆体系	223
8.4.1	热自修复材料性能	223
8.4.2	热自修复材料对水泥浆性能的影响	223
8.4.3	热自修复水泥浆自修复性能评价	225

第1章 绪 论

1.1 固井及固井液

固井的主要工作内容是在钻井作业钻达一定的井深后，在已完钻的井眼内下入套管，在套管与裸眼、套管与上层套管之间的环形空间注入具有设计性能的水泥浆，使其在预定时间内凝结、硬化并与地层、套管胶结，达到密封环空、封隔井下复杂情况与复杂地层、支撑与保护套管、层间封隔等目的^[1-4]。

固井连接钻井、完井、开发三大环节，具有承前启后的重要作用，针对钻井开发的不同时期，其主要作业目的如下。

(1)对钻井而言：封隔井下复杂情况，如塑性盐层、高压水层、大段泥页岩以及疏松破碎带等，防止井眼失稳，从而减少井下复杂事故；同时，为泥浆循环提供良好的井眼通道，保证后续钻井作业能顺利进行，以缩短建井周期，降低油气勘探开发成本。

(2)对完井而言：为完井作业提供良好的井眼基础。只有得到良好层间封隔的井眼，才能根据油田长期开发的需要选用适宜的完井方式，如多油层的分层测试、分层开采、分组开采等，同时，有利于完井作业的顺利进行。

(3)对油气井投产开发而言：①为油气开采提供良好的油气流通通道；②防止油气资源由于环空窜流而散失，以提高采收率；③防止油气藏本身的能量由于环空窜流而散失，以延长油井自喷生产时间，降低油气生产成本；④防止井口套管外冒油、气、水影响油气井正常生产，并降低由此而产生的额外生产费用；⑤支撑、保护套管，防止套管在后续生产过程中因受力或受地层流体腐蚀而损坏，确保油气井寿命满足油田长期开发的需要；⑥便于实施压裂、酸化、分层注水、分层开采等强化开采措施，以提高采收率。

如果固井质量不好、层间未能得到良好的封隔，将对后续钻井、完井、开发等作业造成一系列不利影响。

(1)对钻井而言，由于不能有效封隔井下复杂情况，复杂情况将影响后续钻井作业的顺利进行，从而影响油气井的建井周期和建井成本，甚至影响整个区块的勘探、开发进程。

(2)对完井而言，由于地层之间未能得到良好的层间封隔，将无法根据油田长期开发的需要，选择适宜的完井方式，同时，地层流体乱窜也不利于完井作业的顺利进行。

(3)对开发而言，由于地层未能得到良好的层间封隔，①将难以进行分层测试、分层开采或分组开采等开采措施，致使部分储量难以动用，从而不利于提高采收率；②油气藏本身的能量将通过窜流通道散失，油气井、油气藏均达不到其全部产能，从而不利于提高采收率并降低油气开采成本；③高压地层水将通过窜流通道进入油气藏，影响油气

资源在地下的分布、运移,甚至对油气藏造成严重破坏,如油层水淹;④酸液、压裂液、注入水将通过窜流通道进入非目的层,从而降低强化开采措施的效果,同时,注入流体乱窜,将使波及地区的地应力、地层压力剖面发生显著变化,从而影响油气田的正常生产及合理开发,甚至造成严重生产事故,如断块复活造成的套管成片破坏;⑤油气井套管得不到水泥环的良好保护,容易被地层流体、注入流体腐蚀损坏,被非均匀地应力压坏,从而影响油气井的正常生产,甚至缩短油气井的正常生产寿命,使其无法满足油田长期开发的需要,从而影响油田的长期勘探开发效益。

在影响固井质量的因素中,井眼条件、地层条件、井身结构、套管选型及作业工况等因素是客观存在的或限定的,仅有固井液和注水泥施工工艺可以设计和调控。因此,性能优良的固井工作液是保证固井作业顺利实施并获得良好固井质量的重要物质基础,固井液的相关研究也一直是油气井工程领域的重点和热点。

所谓固井液,就狭义而言,主要包括前置液(冲洗液和隔离液)、水泥浆(领浆和尾浆)和后置液。就广义而言,还应该包括钻井液,其原因在于,固井时井筒内均为钻井液,固井过程中必须将待封固段内的钻井液全部替换为水泥浆。

1. 前置液

由于组分之间不具有相容性,水泥浆和钻井液接触后,常常发生化学接触污染,出现流动性能恶化、稠化时间急剧缩短、强度降低等影响固井质量、危及作业安全的现象,甚至还会造成“插旗杆”“灌香肠”等恶性固井事故。为此,在固井作用中,必须在钻井液和水泥浆之间注入一定数量的前置液,其主要作用包括:隔离水泥浆与钻井液,防止二者直接接触而产生混浆污染;稀释和分散钻井液,使钻井液更利于被顶替干净而提高顶替效率;有效地冲刷井壁和套管壁上的钻井液和/或虚厚泥饼,提高水泥与井壁和套管壁的界面胶接强度。

前置液一般按加重与否可分为冲洗液和隔离液,根据作业要求的不同,二者既可单独使用,也可配合使用。前置液的主要性能要求包括密度、流变性、悬浮稳定性、耐温性、与钻井液和水泥浆的相容性以及冲洗效率。

2. 水泥浆

水泥浆是固井工程的核心,其主要由油井水泥、多种少量加入以调节水泥浆性能的外加剂和多种大量加入以改善水泥浆性能的外掺料组成。如无特指的情况下,油井水泥一般是指应用历史最长、应用范围最为广泛的 API 硅酸盐油井水泥。近年来,针对某些特殊工况固井需求,逐渐发展出了一些特种油井水泥,如为满足稠油火烧固井需要而发展起来的高铝水泥、磷酸盐水泥等。常用的油井水泥浆外加剂包括改善水泥浆流动性能的分散剂、控制水泥浆失水的降失水剂、加快油井水泥水化反应进程的促凝剂和延迟油井水泥水化反应进程的缓凝剂,以及其他一些改善水泥浆、水泥石性能的材料,如纤维增塑剂、橡胶粉增塑剂等。常用的油井水泥外掺料包括用于降低水泥浆密度的减轻剂、用于提高水泥浆密度的加重剂和防止水泥石高温强度衰退的高温稳定剂等。

水泥浆的主要性能要求包括:常规的 API 性能,如密度、流变性、悬浮稳定性、滤失量、稠化时间、抗压强度等。近年来随着固井工况复杂程度的提高以及人们对固井水

泥石性能认识的发展,相继提出了一些特殊的性能要求,如体积收缩率、抗拉强度、杨氏模量、泊松比等。

3. 后置液

后置液,因被置于碰压用的固井胶塞之后,也常被称为压塞液,其主要作用是清洗胶塞下行和/或破损后套管内壁上残留的水泥浆,防止其与钻井液掺混发生污染,同时,也协助防止钻井液中的固相颗粒在候凝期间大量沉降、在胶塞以上大段堆积、测井工具下不到底的情况。现场应用中,后置液的类型多样,既有专门配制的水泥浆,也有直接将处理后钻井液或将水泥浆配浆水作为后置液的情况。

4. 钻井液(固井时井眼中的钻井液)

钻井液本身的黏切、重力、对井壁和套管的吸附力是阻碍顶替的三大因素。在钻进过程中,钻井液必须具备较高的黏度和切力,以悬浮岩屑、携带岩屑,有效清洗井眼、净化井眼,防止岩屑在井底被重复切削而影响钻井效率,防止岩屑在斜井段、水平段、大肚子井段堆积而造成阻卡等。在固井过程中,为提高顶替效率,钻井液反而不能具备太高的黏度和切力,否则将不利于被顶替干净,从而严重降低固井质量。因此,通过调整钻井液性能,降低钻井液塑性黏度,屈服值会降低环空压耗,水泥浆能更有效地将窄间隙中的钻井液置换出来,有助于提高顶替效率和固井质量。

1.2 复杂油气藏固井液面临的挑战

经过多年的探索、发展与积累,目前国内固井液技术已趋于成熟,基本能够满足常规油气藏固井的需要。但在油气勘探开发由简单地貌区转到复杂地形区域,由浅层转到深层,由常规油气转到低渗透和非常规油气,由陆地转向海域、深海及极地以及深井超深井、水平井与大位移井、水力压裂等钻完井方式由特殊走向普及的新背景下,复杂油气藏固井对固井液提出了更高的要求,固井液技术液面临着新的挑战^[5-7]。概括起来,国内固井液目前面临的挑战有“盐、温、漏、蚀、热、压”六大方面。

1. “盐”

“盐”的问题,主要是指复合盐层、盐水层以及海洋固井用盐水混配水泥浆,对水泥浆和油井水泥外加剂的抗盐要求较高,同时对水泥石和套管形成腐蚀,以及盐层蠕变可引发井下事故复杂,如卡套管、挤毁套管等问题。国内主要有以塔里木油田为代表的巨厚复合盐层,以青海油田为代表的高含盐地层,以四川龙岗、九龙山、磨溪为代表的深层上覆高压盐水气藏。海外主要有中亚、西亚等合资勘探区域盐下油藏与油区,如阿姆河右岸B区块上侏罗统启莫里—提塘阶潟湖相盐膏岩层,其埋藏深度为2200~3600m,平均盐膏岩层厚度达1000m,局部含高压盐水。

高含盐地层对固井工作液的挑战主要表现在以下方面。

(1) 无盐或欠饱和盐水泥浆,地层溶解进入的盐会造成水泥浆促凝或超缓凝。

(2)盐的溶解造成水泥环与盐膏层间形成溶蚀裂隙区,二界面形成窜流通道。

(3)饱和盐水泥浆,流变性差,失水量大,稠化时间难控制,高含盐量使强度发展缓慢。

(4)盐饱和度受井温影响较大,长封固段很难做到上下水泥石强度一致。

(5)凝固后盐重结晶时水泥基体形成微裂隙,影响水泥石强度和安定性。

2. “温”

油井水泥在不同温度、环境条件下的水化机理以及外加剂、外掺料在不同循环温度、温度区间下的性能变化规律是影响固井工作液性能与固井质量的要素之一。“温”的问题,主要是指海洋浅表低温、长封固段上下的大温差、深井超深井的井底高温、稠油热采井超高温等工况下面临的异常温度情况,这些工况对外加剂和油井水泥浆的性能要求高,影响油井水泥浆的性能、外加剂的作用效果,易引发固井水泥环的封固性能或完整性等方面的问题。

温度对固井工作液的挑战主要表现在以下方面。

(1)低温:水泥浆强度发展缓慢,静胶凝过渡时间长,容易发生窜流和套管变形。

(2)高温/超高温:化学反应加速导致水泥浆体系敏感反应,有机材料降解造成化学品有既定安全温度区间,高温条件下外加剂效能与稠化时间难掌控。

(3)大温差:封固段超长温差大,造成顶部水泥浆超缓凝。

(4)温度影响水泥浆流变参数,影响注替参数、水泥浆密度科学设计。

3. “漏”

“漏”的问题,主要是在地层承压能力低、安全压力窗口窄的情况下,水泥浆密度设计、合理浆柱结构设计和平衡压力固井设计困难大的问题,以及注水泥过程中水泥浆漏失无法确保返高、导致需封固井段漏封、影响井控安全和井筒完整性的问题。井漏几乎是全国各油气田固井均常面临的一大难点,国内典型代表有塔里木山前地区盐膏层及盐下目的层、塔里木台盆区碳酸盐岩地层、四川川东北裂缝性酸性气藏、青海南翼山构造地层等窄安全密度窗口地层。

漏失对固井作业的影响如下。

(1)钻井液和水泥浆严重掺混,降低顶替效率。

(2)严重影响后期水泥石性能,使层间封隔质量得不到良好的保证。

(3)水泥浆漏失会使有效液柱压力降低而不能压稳地层,带来井控风险。

4. “蚀”

“蚀”的问题,主要是指高酸性气藏开发、二氧化碳提高采收率、二氧化碳地质封存、高矿化度地层水等腐蚀性工况环境对水泥石形成腐蚀损伤,进而影响井筒完整性的问题。国内酸性气藏有长庆地层水腐蚀、塔里木迪那—克拉和川渝地区 CO_2 与 H_2S 酸性气田伴生水腐蚀、大庆—吉林松辽盆地气藏 CO_2 腐蚀等。

腐蚀对固井工作液的挑战主要表现在以下两个方面。

(1)水泥石性能受腐蚀后退化,水泥环层间封隔能力将降低甚至失去层间封隔的

作用。

(2)失去对套管的保护作用,引起套管腐蚀,诱发地层流体窜流及环空和井口带压,对自然环境和人身安全产生严重威胁,增加勘探开发成本。

5. “热”

“热”的问题,主要是指在稠油蒸汽吞吐($>300^{\circ}\text{C}$)、火烧油层($>500^{\circ}\text{C}$)等超高温条件下,现有常规加砂水泥体系经多个热循环周期后,水泥石强度衰退明显,渗透率急剧增大,造成套损严重,难以满足油井开采寿命对水泥环耐久性要求的问题。国内采用热采强化开采技术的油田有辽河油田和吐哈油田的中深井稠油热采以及新疆克拉玛依的浅层稠油热采。

超高温作业对固井工作液的挑战主要表现在以下两个方面。

(1)油井水泥浆组分中的硅酸盐矿物发生水化,单体强度降低,在硬化过程中发生晶型转化,水泥石结构破坏。

(2)火驱开发燃烧过程伴随热裂解、低温氧化及高温氧化等化学反应,产生的 CO_2 对水泥石有腐蚀作用。

6. “压”

“压”的问题是指水泥环受到外力冲击或井筒内压力大幅变化或周期性变化,局部区域产生高压、高拉的应变区,使水泥环结构完整性和力学完整性遭到破坏,导致层间封隔失效,严重影响后期采气及井的使用寿命问题。国内复杂应力环境的工况有致密油气井压裂、页岩气井大规模体积压裂、储气库井周期性注采等。

复杂应力作业工况对固井工作液的挑战主要表现在以下三个方面。

(1)固井水泥石在井下应力环境下的力学行为和失效机理尚未完全探明,制约材料改性技术进步。

(2)水泥石属于天然的硬脆性材料,对其韧性化改造难度大。

(3)水泥石增韧改性效果评价手段尚未统一,常规方法不能准确反映井下实际工况。

1.3 本书主要内容简介

针对上述复杂油气藏为固井液带来的技术难题,西南石油大学固井研究室围绕提高复杂油气藏固井质量、保证水泥环在油气井正常生产寿命期间的长期密封性能的要求,并结合川渝酸性油气藏、辽河油田稠油热采以及川渝页岩气的勘探开发等实际需求,进行了系列的固井液体系研究工作,形成了以下七个方面的复杂油气井固井液相关技术成果。

1. 高效抗污染隔离液

通过研究水基钻井液和油钻井液对水泥浆化学污染的规律和机制,初步探明了化学接触污染的机理。针对接触污染问题,开展材料优选与性能设计,研发出了具有性能优