



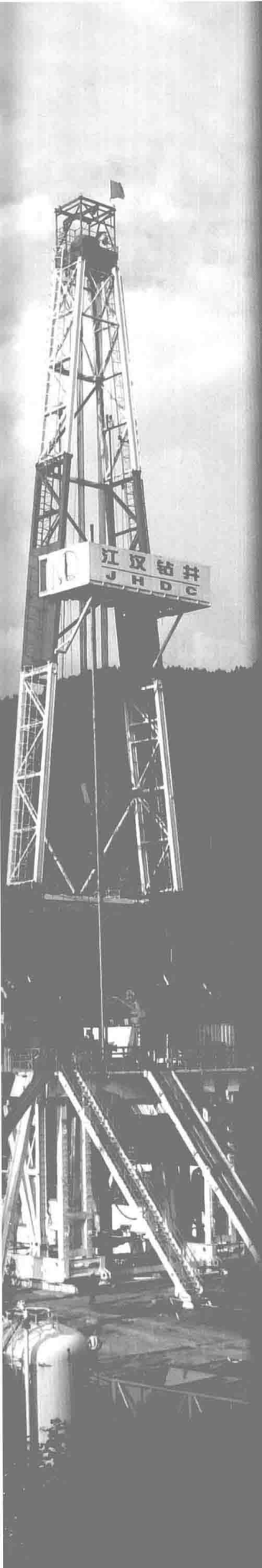
涪陵页岩气 工程技术 实践与认识

杨国圣 张玉清◎编著

PRACTICE AND
UNDERSTANDING OF
SHALE GAS ENGINEERING
TECHNOLOGY IN
FULING

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)



涪陵页岩气 工程技术 实践与认识

杨国圣 张玉清◎编著

PRACTICE AND
UNDERSTANDING OF
SHALE GAS ENGINEERING
TECHNOLOGY IN
FULING

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

内 容 提 要

本书以涪陵焦石坝页岩开发过程中的石油工程技术为基础,系统介绍了钻井、测录井、压裂等工程技术和“井工厂”钻井、“井工厂”压裂、泵送桥塞分级射孔、连续油管作业、油基泥浆及油基钻屑处理等新技术新工艺,以及相应的技术成果、现场应用案例分析、施工认识等。全书共分11章,第一章为绪论,第二章为钻井工程技术,第三章为钻井液技术,第四章为油基钻井液水平井固井技术,第五章为录井技术,第六章为测井技术,第七章为泵送桥塞与分级射孔联作技术,第八章为大规模缝网压裂技术,第九章为连续油管作业技术,第十章为试气与评价技术,第十一章为废弃物处理与钻井液重复利用。

本书可供从事页岩气开发的研究人员、工程技术人员及石油院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

涪陵页岩气工程技术实践与认识/杨国圣,张玉清编著.
—北京:中国石化出版社,2015.11
ISBN 978-7-5114-3500-2

I. ①涪… II. ①杨… ②张… III. ①油页岩-石油
工程-涪陵区 IV. ①TE3

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第247729号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街58号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京柏力行彩印有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092毫米16开本28.25印张672千字
2015年12月第1版 2015年12月第1次印刷
定价:108.00元

编 委 会

主 编：杨国圣 张玉清

副主编：刘德华 李增科

编 委：熊青山 冯爱国 龚起雨 宋金初

杨海平 张国锋 许明标

前 言

随着国内页岩气勘探开发的突破,石油工程技术已成为页岩气藏高效开发的关键影响因素之一。自2010年中国石化钻第一口页岩气井至今,已完钻压裂200余口井,实现年产 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$ 产能规模,其建设周期、应用或创新的石油工程技术等方面达到或超过国内外同类技术水平。

由于页岩储层的特殊性,在钻井工程、储层改造等方面遇到诸多新的挑战,伴随我国“重庆涪陵国家级页岩气示范区”的高速建设,页岩气开发工程中的相关问题得到很好的解决和创新。为了及时总结页岩气产能建设示范工程实施过程中国产化技术进展及应用效果,同时便于推广应用,本著作对钻井、测录井、压裂等工程技术,以及“井工厂”钻井、“井工厂”压裂、泵送桥塞分级射孔、连续油管作业、油基泥浆及油基钻屑处理等新技术新工艺,相应的技术成果、现场应用案例分析及施工认识等进行了系统介绍。全书共分11章,第一章为绪论,第二章为钻井工程技术,第三章为钻井液技术,第四章为油基钻井液水平井固井技术,第五章为录井技术,第六章为测井技术,第七章为泵送桥塞与分级射孔联作技术,第八章为压裂技术,第九章为连续油管作业技术,第十章为试气与评价技术,第十一章为废弃物处理与钻井液重复利用。

涪陵页岩气石油工程技术的极大成功是在中国石化总部领导和中石化石油工程技术服务有限公司的指挥下,江汉油田分公司等单位的支持下,中原石油工程公司、胜利石油工程公司等单位的通力协作下,钻井和压裂施工周期及成本大幅下降,创造了良好的业绩和多项生产技术纪录。在此对给予大力关心帮助支持的领导及单位表示特别感谢。

本书编写主要由中石化江汉石油工程有限公司及长江大学共同完成,参与撰写和统稿的有江汉石油工程公司的李增科、龚起雨、冯爱国、宋金初、杨海平、危胜宏、王伟、张国锋、吉玉林、潘金国、周福兴、代一钦、汪成芳、叶应贵、彭超、田海涛、蒋成白、杨家祥、胡毅等,长江大学的楼一

珊、刘德华、熊青山、许明标、刘卫红、周志宏、陈恭洋、马卫国、张占松、付美龙、钟宝荣、易先中、郭康良、许东进等。

本书是国内首部关于页岩气开发过程中石油工程技术研究与应用的著作，具体内容和问题是在实践探索中的总结与体现，许多内容也是首次公开发表，希望能提供借鉴和指导，同时也希望读者批评指正。

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 页岩气在能源战略中的地位和作用	(1)
第二节 页岩气工程技术发展历程	(2)
第三节 页岩气工程特点及难点	(4)
第二章 钻井工程技术	(7)
第一节 钻井难点	(7)
第二节 钻机与配套设备	(9)
第三节 井身结构设计	(17)
第四节 上部地层快速钻井技术	(23)
第五节 井眼轨迹控制	(35)
第六节 “井工厂”钻井	(47)
第三章 钻井液技术	(54)
第一节 非目的层段水基钻井液体系	(54)
第二节 油基钻井液体系	(61)
第三节 井壁稳定	(79)
第四节 井漏预防与处理	(93)
第四章 油基钻井液水平井固井技术	(105)
第一节 油基钻井液水平井固井特点及难点	(105)
第二节 油基钻井液水平井固井流体	(107)
第三节 固井设计	(118)
第四节 固井装备及工具	(122)
第五节 固井工艺	(123)
第六节 固井质量评价	(126)
第五章 录井技术	(135)
第一节 页岩气录井技术系列优选	(135)
第二节 地层压力预测与监测	(139)



第三节	页岩气录井综合导向·····	(158)
第四节	页岩气录井综合解释与评价·····	(163)
第五节	远程录井与井场信息化建设·····	(175)
第六章	测井技术 ·····	(185)
第一节	页岩储层特征与实验分析·····	(185)
第二节	页岩气测井系列优选·····	(194)
第三节	测井施工工艺·····	(197)
第四节	页岩气储层测井识别与评价·····	(203)
第五节	页岩储层岩石力学参数测井评价·····	(220)
第七章	泵送桥塞及多级射孔联作技术 ·····	(232)
第一节	技术难点及应对措施·····	(232)
第二节	泵送桥塞流体力学分析·····	(234)
第三节	多级射孔参数优化设计·····	(242)
第四节	设备与器材·····	(246)
第五节	关键技术及施工工艺·····	(261)
第八章	大规模缝网压裂技术 ·····	(283)
第一节	页岩气压裂技术进展·····	(283)
第二节	缝网压裂技术·····	(285)
第三节	压裂液与支撑剂·····	(290)
第四节	压裂装备·····	(293)
第五节	压裂施工技术及应用·····	(304)
第六节	“井工厂”压裂技术 ·····	(325)
第九章	连续油管作业技术 ·····	(336)
第一节	连续油管作业技术特点及难点·····	(336)
第二节	连续油管管材与装备选型·····	(337)
第三节	水平段连续油管力学基础·····	(340)
第四节	连续油管水平段延伸技术·····	(348)
第五节	连续油管在线检测技术·····	(353)
第六节	钻塞技术·····	(357)
第七节	其他作业·····	(365)
第十章	试气与评价技术 ·····	(373)
第一节	渗流机理·····	(373)

第二节	试气工艺技术.....	(377)
第三节	产能分析与预测.....	(388)
第四节	动态分析评价.....	(392)
第十一章	废弃物处理与重复利用	(401)
第一节	钻井液重复利用.....	(401)
第二节	含油钻屑处理.....	(404)
第三节	压裂返排液的重复利用技术.....	(416)
附 录	涪陵地区地质条件	(426)
参考文献		(428)

第一章 绪 论

第一节 页岩气在能源战略中的地位和作用

随着经济的不断发展,世界各国能源供应不足的矛盾日益突出。2011年,我国石油表观消费量为 $4.7 \times 10^8 \text{ t}$,对外依存度达56.5%;天然气表观消费量为 $1290 \times 10^8 \text{ m}^3$,对外依存度达23.8%。而2011年国内石油、天然气产量仅分别增长0.3%和7.9%,远低于同期油气消费量的增速。据中石油经济技术研究院发布的《2013年国内外油气行业发展报告》称,2013年中国石油和天然气对外依存度分别达到58.1%和31.6%。据专家预测,2020年我国天然气消费量将达到 $2000 \times 10^8 \text{ m}^3$,而预期天然气产量为 $1200 \times 10^8 \text{ m}^3$,供需差距在 $800 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上。因此,为缓解我国油气的供需矛盾,寻找新能源势在必行。

环境保护和应对气候变化都要求以非化石能源大幅度替代化石能源,但无论是发达国家还是发展中国家大多难以实现。以污染少的能源替代污染多的能源,降低煤炭比重,增加天然气比重是更现实的环保选择。近些年来,北美页岩气勘探开发区带的快速扩展和页岩气产量的大幅飙升,使全球掀起了一场轰轰烈烈的“页岩气革命”,其迅速成为勘探开发的新热点。页岩气的大力发展将会为人类社会的绿色健康发展开辟新思路且作出重大贡献。

页岩气是指主要以吸附、游离方式赋存于富有机质页岩及夹层中的热成因或生物成因的天然气。页岩气是一种特殊的非常规天然气资源,其赋存不受圈闭的控制,主要是自生自储成藏的连续性气藏。其储层一般具有储层厚、孔隙度小、渗透率特低等物性特征及单井产量低、开发周期长、采收率低等开发特征。

我国页岩气资源潜力巨大,根据国土资源部调查,我国陆域页岩气地质资源潜力为 $134.42 \times 10^{12} \text{ m}^3$,可采资源潜力为 $25.08 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (不含青藏地区)。如果按照目前的消费水平,这些储量足够中国使用300年,这无疑会帮助我国解决相当长一段时间的能源危机,对保障国家能源安全将会发挥重要作用。

页岩气作为一种分布广泛、清洁高效的气体能源,其工作近些年来受到国家领导高度重视,先后多次作出重要批示,提出对页岩气资源进行开发,要尽快制订规划,搞好资源调查,研究开采技术方法,作全面技术经济论证,加强生成机理、富集条件、技术攻关和重点靶区的研究。目前,中国页岩气资源的勘探开发已纳入国家战略规划中。国民经济和社会发展“十二五”规划明确要求“推进页岩气等非常规油气资源开发利用”;2012年,“加快页岩气勘查、开发攻关”第一次写入政府工作报告。已制定的《科学发展的2030年国家



能源战略》也将页岩气摆到十分重要位置。由此可见,页岩气在能源战略中占有非常重要的地位和作用。

第二节 页岩气工程技术发展历程

页岩气工程是围绕页岩气钻探、开发及储运而实施的知识、技术和资金密集型工程,是页岩气勘探开发的核心业务,包括钻井、完井、生产、油藏及储运等,是一项复杂的系统工程,涉及力学、化学、地质、材料、机电及管理等多学科领域。石油与天然气工程学科的发展水平,不仅取决于本学科发展的积累,而且与经济社会的发展和需求密切相关。

随着页岩气勘探开发领域的不断扩大及页岩气工程技术水平的不断进步,页岩气资源不断被发现和探明,且生产成本大幅下降,尤其是在目前较高的天然气价格下,页岩气开采变得更加经济可行,其经济价值和战略意义也越来越受到重视。因此,许多国家对页岩气工程技术开展研究。目前,页岩气在国内外得到了大规模的开发,主要原因之一是页岩气工程技术取得突破性进展,如水平井钻井技术、储层整体改造压裂技术、集成化钻井作业模式等。

一、国外页岩气工程技术发展历程

美国对页岩气的研究有较长的历史,是全球页岩气勘探开发最早、技术水平最高的国家,其在页岩气方面做了大量工作,目前已进入页岩气开发的快速发展阶段。

1821年,美国在阿巴拉契亚盆地完钻世界第一口产自页岩的商业天然气井,被认为是美国页岩气工业(也是天然气工业)的开始。1914年,在密歇根盆地发现第一个页岩气田;1926年,在阿巴拉契亚盆地成功实现页岩气商业开发;20世纪70年代中期,美国页岩气步入规模化发展阶段;80年代,大型水力压裂技术、减阻处理技术开始应用;1991年,试钻水平井,但并不成功;1998年,清水压裂取代凝胶压裂,完井技术取得突破;1999年,二次压裂增产技术获得成功应用;2002年,Devon能源公司7口Barnett页岩气实验水平井取得巨大成功;2002年以后,水平井钻完井及压裂技术不断取得进步并得到推广应用。

在井型上,美国页岩气钻井先后经历了直井、单支水平井、多分支水平井、丛式井、丛式水平井的发展历程。2002年以前,直井是美国开发页岩气的主要钻井方式。2002年以后,水平井已成为页岩气开发的主要钻井方式。丛式水平井因能降低成本、节约时间,在页岩气开发中逐步增多。

随着页岩气工程技术大规模推广应用,美国页岩气产量由2006年的 $278.92 \times 10^8 \text{ m}^3$ 快速增长到2012年的 $2653.28 \times 10^8 \text{ m}^3$,平均年增长率为46.6%,且2013年产量达到 $2764 \times 10^8 \text{ m}^3$ (占美国天然气总产量约40%)。页岩气产量的增加改变了美国天然气结构比例,影响了全球能源供给格局。

受美国页岩气取得巨大成功的影响,加拿大迅速由初期勘探研究阶段进入商业开发初步阶段,是全球第二个进行页岩气勘探与商业开发的国家。加拿大发展速度较快的原因是其地质结构与美国西部地区类似,可直接移植并应用美国成熟技术。



除北美美国、加拿大外,其他部分国家也对页岩气工程技术进行了研究,但相对来说,还不是很成熟。

二、国内页岩气工程技术进展

与北美相比,中国页岩气勘探开发起步较晚。2000年,中国开始跟踪国际页岩气勘探开发进展;2004年,启动页岩气资源调查;2006年,开展页岩气资源评价;2008年,设立“中国重点地区页岩气资源潜力及有利区带优选”页岩气项目;2009年,完成了第一口页岩气评价井——威201井。至此,我国页岩气勘探开发的序幕正式拉开。涪陵焦石坝地区多口水平井整体取得突破,标志着中国页岩气由勘查阶段步入开发阶段。

据不完全统计,中国已在四川、鄂尔多斯、渤海湾、沁水、泌阳等盆地,云南昭通、贵州大方、湖北建南、湖南涟源、贵州铜仁等地区开展了页岩气钻探与水力压裂试气。截至2013年底,我国累计完成页岩气钻井285口,其中调查井105口(直井)、探井94口(直井)、评价井86口(水平井),经过水力压裂和测试,日产超过 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的井有38口(其中直井18口、水平井20口),日产超过 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的井有24口(其中直井3口、水平井21口),2013年我国页岩气产量达到 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$,2014年达到 $12 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

目前,中国页岩气开采已进入自主技术阶段,初步形成了长水平段水平井优快钻井技术、桥塞技术、压裂试气技术、废液与油基钻屑处理技术等一系列自主技术,成为继美国和加拿大之后使用自主技术装备进行页岩气商业开采的国家。

虽然我国页岩气勘探开发取得了可喜的进展,但是还存在钻完井周期较长、开发成本高等问题。针对这些难题,中国石油化工集团公司(简记为中石化)以技术国产化、优质高效低成本成井和有效压裂为目标,通过持续攻关研究,逐步形成了以钻井、钻井液、固完井、分段压裂、关键井下工具为主体,具有自主知识产权的单项工程技术和配套工程技术系列,具备了水平段长2000m钻完井、分段压裂20段以上的设计与施工能力,并在涪陵焦石坝、彭水等区块页岩气勘探开发实践中得到了成功应用,2014年页岩气产量达 $9.94 \times 10^8 \text{ m}^3$ (占我国页岩气总产量的82.8%)。涪陵焦石坝区块页岩气大规模商业开发,彭水等区块页岩气勘探取得重大进展,标志着中石化页岩气工程技术已走在中国的前列。中石化在实践探索中形成了页岩气高效开发配套工程技术,主要包括:

- (1) 钻井优化设计及优快钻井技术;
- (2) 油基钻井液及配套工艺技术;
- (3) 页岩气水平井固井技术;
- (4) 水平井大规模分段压裂关键配套工具、材料及技术;
- (5) 钻井液、压裂液回收及再利用技术;
- (6) 页岩气技术装备仪器等研发取得重大进展。

上述技术在页岩气勘探开发实践中的应用,推进了中石化页岩气资源勘探开发的进程。

在中石化下属诸多单位中,江汉石油工程公司在页岩气的勘探开发中发挥了重要作用。自2010年以来,该公司立足国内现有技术,强化攻关研究和集成配套,实现了页岩气开发全套工程技术的自主化和国产化,仅用4年时间完成国外公司30年的技术发展之路,基本满足了页岩气的勘探开发需求,实现了页岩气工程技术跨越式发展。



2010年12月,中石化江汉油田第一口页岩气探井建111井完钻,经大型压裂日产天然气 3000m^3 ;同月,中石化第一口页岩气参数井河页1井完钻;2011年,在鄂西渝东的建南地区完钻中石化第一口页岩气水平井建页HF-1井;2012年5月,“涪陵大安寨页岩气产能示范区建设项目”启动;2013年11月,国家能源局正式批复设立“重庆涪陵国家级页岩气示范区”;2014年,提前完成新建 $20 \times 10^8\text{m}^3$ 的产能任务。

自2012年后,江汉石油工程公司历经建南区块技术探索、大安寨区块技术试验,涪陵焦石坝页岩气开发的技术推广应用,初步形成了长水平段水平井系列自主技术、工具及材料。

(一) 钻井系列

- (1) “井工厂”钻井技术;
- (2) 优快钻井技术;
- (3) 油基钻井液技术;
- (4) 三维长水平段水平井井眼轨迹控制技术;
- (5) 适合油基钻井液、长水平段、大规模压裂条件下水平井固井技术;
- (6) 钻井液回收及再利用技术;
- (7) 含油钻屑及固井前置液处理技术。

(二) 测录井系列

- (1) 优选页岩气储层测井评价的测井系列,形成了适合涪陵页岩气测井施工工艺;
- (2) 确定页岩气储层测井识别和评价方法,形成了涪陵页岩气储层测井解释标准;
- (3) 确定页岩气储层岩石力学参数测井评价方法,为水平井布井、储层压裂改造提供了依据。

(三) 压裂系列

- (1) 长水平段水平井大规模分段技术;
- (2) “井工厂”压裂技术;
- (3) 压裂液技术;
- (4) 泵送桥塞技术;
- (5) 钻塞技术;
- (6) 压裂液回收及再利用技术;
- (7) 压裂装备、工具。

上述技术的发展,标志着江汉石油工程公司工程技术走在了全国的前列。

第三节 页岩气工程特点及难点

页岩气藏地质条件(见附录)及自身特性等,决定了页岩气工程特点及难点。

一、页岩气工程特点

页岩气总体上以吸附和游离状态存在于低孔隙度、特低渗透率、富有机质的暗色泥页



岩或高碳泥页岩层系中。页岩不仅是烃源岩,而且还是页岩气藏的储集层和封盖层。页岩气藏是典型的“自生自储”气藏。页岩气不同于常规天然气的特点,决定了其工程特点。

(一) 工程技术探索的长期性

美国页岩气开发已有很长历史,前期发展并非一帆风顺,后期在政府各种优惠政策支持下,中小油气(能源)公司进行了长期深入研究和技术研发,最终在水平井钻完井技术和水力压裂技术实现突破后,才促进了页岩气开发的迅猛发展。典型的是 Barnett 页岩气田从 1981 年被发现,经过 22 年产量才达到 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。漫长的发展过程表明页岩气的开发需要一定时间探索。从对比研究页岩气储层结果来看,中国页岩气形成的富集地质条件和地理条件与北美地台页岩气相比非常复杂且相差较大。因此中国要实现工业化规模开发也需要花费一定的时间对其地质特征进行认识,摸索相适应的工程技术。

(二) 工程技术要求高精尖

国内开发区块地质构造复杂,在钻井过程中地质设计与实钻地层差异较大,上部地层及页岩储层漏、喷、垮等井下复杂情况多发,摩阻扭矩、轨迹控制、井眼清洁问题突出,地层可钻性差,机械钻速较低,提速困难;缺少针对性的钻井液及固井水泥浆体系,含油钻屑处理困难,开发成本高;加之页岩气储层渗透率特低,因此开采页岩气对钻完井技术提出了高精尖的要求。

(三) 投资大、风险高

由于页岩气储层特征决定了页岩气井产量较低且成本较高。据美国早期页岩气井数据统计,40%的井初期裸眼测试无气流,55%的井初始无阻流量没工业价值,所有井都需要实施储层压裂改造。美国主要页岩气藏勘探开发成本统计表明,页岩气井单井成本 $300 \times 10^4 \sim 800 \times 10^4$ 美元,是 2000 ~ 2003 年美国陆上油井单井成本 45×10^4 美元的 7 倍、气井单井成本 65×10^4 美元的 5 倍,其中 Haynesville 页岩气藏单井成本与美国 2000 ~ 2003 年海上油气井的单井成本 969×10^4 美元相当。目前国内页岩气水平井单井成本为 $5000 \times 10^4 \sim 8500 \times 10^4$ 元,因此页岩气工程投资大。

页岩气采收率低于常规天然气。相关数据表明,常规天然气采收率可达 60%,页岩气采收率一般小于 60%。由于埋藏深度、地层破裂压力、有机质含量和吸附气量等不同,采收率也不尽相同。埋藏较浅、地层破裂压力低、有机碳与吸附气含量低的页岩气藏采收率约 60%,埋藏较深、地层破裂压力高、吸附气含量高的页岩气藏采收率为 25% ~ 50%。吸附气含量的不确定性加大了工程投资的风险。

二、页岩气工程难点

我国页岩气开发与美国相比,在许多方面存在较大差异,具体如下:

(1) 美国页岩气主要产自上古生界—中生界,中国自元古界到新生界(新近系)都有页岩发育;美国产气页岩主要是海相沉积,而中国除海相页岩外,还有较为发育的海陆过渡相和陆相页岩;美国页岩热演化成熟度 R_o 为 1.0% ~ 3.5%,处在生气高峰期,中国海相页岩 R_o 为 2.3% ~ 5.1%,为高一过成熟热裂解成气阶段,陆相页岩 R_o 为 0.4% ~ 1.2%,处于低熟—成熟阶段,以生油为主,局部生气;北美地台构造稳定,断裂少,除有一定抬升外,很少有大的构造改造。中国构造背景总体处在活动性较强的区域,断裂发育,大部



分页岩都经历了强烈的后期多次改造，南方海相页岩大面积出露；中国页岩储层杨氏模量较低、泊松比高，岩石脆性指数低于美国页岩储层，可压性差。而美国页岩本身硅质含量高，易压裂。

(2) 深度差异。美国的页岩气层深度在 800 ~ 2600m，而四川盆地的页岩气层埋深在 2500 ~ 5000m。页岩气藏埋深的增加大大增加了开采成本和技术上的难度。

(3) 钻井现场地势存在差异。如美国 Barnett 页岩气钻井现场地势平坦，典型的丛式井组需 2 ~ 5acre(约 8000 ~ 20000m²)，每个井场 4 ~ 8 口井，在允许的条件下可钻 12 ~ 16 口井；而我国四川盆地页岩气井场地势起伏，只能因地制宜修建井场。

(4) 四川盆地的页岩气钻经层位含硫化氢，且含浅层气。

(5) 美国页岩气的开发以中小企业为主，由于行业内竞争较为充分，中小企业为了生存不得不加快创新，技术创新在短时间内可转化为生产力，从而促成了美国页岩气的大发展；而我国页岩气的勘探开发主要由几大有石油石化企业实施，而且这种模式短时间内改变的可能性不大。

上述差异决定了我国页岩气开发不能简单照搬美国技术，加之国内有些技术在页岩气藏开发尚无先例，有些核心技术根本买不到也很难学到，故中国页岩气开发存在诸多挑战和困难。具体如下：

(1) 上部地层承压能力低，采用空气、泡沫钻井，因出水量大等，无法有效实施；

(2) 地层可钻性差，单只钻头进尺少，机械钻速较慢；

(3) 井壁稳定性差，易产生漏、塌、卡钻等井下复杂情况及故障；

(4) 岩屑床难清除，会产生卡钻、憋泵等井下故障；

(5) 摩阻和扭矩大，起下钻、加压困难，井眼轨迹控制难；

(6) 地层漏失，造成钻井液大量漏失及卡、埋钻具等事故；

(7) 长水平段油基钻井液条件下固井难度大；

(8) 泵送桥塞多级射孔联作施工难度大；

(9) 浅层气发育，地层压力预测及准确检测困难；

(10) 页岩气层水平段超长、地层倾角变化大，水平井地质导向难度大；

(11) 页岩气具有独特的赋存状态、成藏聚集模式，储层特征决定了页岩气储层压裂改造难。

虽然我国页岩气工程技术还面临诸多难点，一些关键技术也还有待突破，但随着国家对页岩气勘探开发技术攻关与设备研发力度的加大，终将会形成适合我国国情的核心技术体系。目前，国内页岩气由“勘探突破”向“战略展开”阶段转变，加快页岩气资源勘探开发，已成为世界主要页岩气资源国家的共同选择。随着全球对清洁能源需求日渐扩大、天然气价格不断上涨，以及页岩气工程技术水平的不断进步，未来页岩气工程技术将更加高效、安全、绿色。

第二章 钻井工程技术

在页岩气勘探开发过程中,钻井起了十分重要的作用,如寻找和证实含气构造、获得工业页岩气流、探明含气面积和储量、取得有关页岩气田的地质资料 and 开发数据、最后将页岩气从地下取到地面上来等,无一不通过钻井来完成,钻井是勘探开发页岩气资源的重要环节与手段。江汉石油工程公司页岩气钻井技术经历了探索、试验、推广阶段,各项技术日趋成熟,已形成了自主的页岩气钻井技术系列。本章及以后章节所涉及技术应用工区主要包括鄂西渝东、建南、大安寨及涪陵焦石坝。本章介绍了钻井难点、钻机与配套设备、井身结构、优快钻井、井眼轨迹控制、“井工厂”钻井等。

第一节 钻井难点

鄂西渝东建南、涪陵大安寨页岩气井所钻地层为沙溪庙组、自流井组。涪陵焦石坝页岩气井所钻地层为三叠系须家河组、雷口坡组、嘉陵江组、飞仙关组,二叠系长兴组、龙潭组、茅口组、梁山组,石炭系黄龙组,志留系韩家店组、小河坝组、龙马溪组和奥陶系五峰组。由于地质构造复杂,钻井面临“斜、漏、垮、喷、毒、硬、卡、深”等技术难题。此外,页岩气水平井钻井还面临浅层气技术难题。

一、地层倾角大、断层多,井易斜

沙溪庙组、自流井组地层倾角一般超过 30° ,如图 2-1 所示,部分岩层呈垂直状态,常规钻井易井斜,如涪页 X-XHF 井直井段钻至井深 1291m 自流井组时,钻遇断层,且井斜由 1.2° (井深 877m)增至 12.16° (井深 1291m)。

二、裂缝、溶洞发育,漏失严重

沙溪庙组、自流井组断层和裂缝发育;雷口坡组、嘉陵江组溶洞、裂缝、地下河发育,如图 2-2 所示;二叠系裂缝气活跃,志留系存在断层和破碎带。钻井主要难点是漏层多、漏失量大,如焦页 XX-XHF 井茅口组漏失密度为 $1.10\text{g}/\text{cm}^3$ 水基钻井液 590m^3 ,涪页 X-1HF 井自流井组漏失密度为 $1.42\text{g}/\text{cm}^3$ 油基钻井液 1200m^3 。

三、地层硬、研磨性强、夹层多,可钻性差

沙溪庙组、自流井组为大段砂泥岩,研磨性强;长兴组、龙潭组、茅口组、栖霞组地层硬、夹层多,研磨性强,跳钻严重,钻井参数无法强化,易损坏钻头、钻柱及顶驱装置



等钻具。



图 2-1 鄂西渝东地层倾角



图 2-2 焦页 X-XHF 井钻遇地下河

四、泥页岩层水平段钻进，井壁易失稳垮塌

自流井组东岳庙段、大安寨段及志留系龙马溪组泥页岩水平段钻井，易产生水化失稳和应力失稳，如图 2-3、图 2-4 所示。



图 2-3 东岳庙段炭质页岩垮塌



图 2-4 小河坝组泥岩垮塌

五、浅层气活跃，井控风险大

鄂西渝东自流井组、涪陵焦石坝工区飞仙关组、长兴组、茅口组、栖霞组、龙马溪组裂缝气活跃，且部分含气层含硫化氢，如图 2-5 所示。



图 2-5 焦石坝长兴组出气(含硫化氢)