

准噶尔盆地复杂深井 钻井关键技术与实践

杨虎 杨明合 周鹏高 王虎 等著



石油工业出版社

准噶尔盆地复杂深井钻井关键技术与实践

杨 虎 杨明合 周鹏高 王 虎 等著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要以准噶尔盆地山前深大构造、石炭系火山岩、吉木萨尔凹陷致密油和玛湖凹陷低渗透储层等复杂区域为研究对象,对其地层压力系统和井筒力学系统进行研究和建模分析,研究了各区域钻井地质、井身结构特点和各项钻井提速技术。同时,重点介绍了深层气体钻井、火山岩气藏水平井、致密油工厂化水平井和南缘山前高温高密度深井的钻井关键技术。本书既有系统的基础理论和最新的钻井技术成果,也有大量的典型案例分析,深入浅出,方便广大读者阅读。

本书适合从事油气勘探工程、钻采工程、油气开发工程、探矿工程的技术人员及相关研究院所的科研人员、高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

准噶尔盆地复杂深井钻井关键技术与实践/杨虎等著. —北京:石油工业出版社, 2017.1

ISBN 978-7-5183-1605-2

I. 准…

II. 杨…

III. 准噶尔盆地-深井钻井-技术

IV. TE245

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 274659 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com

编辑部: (010) 64523562 图书营销中心: (010) 64523633

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 27.75

字数: 590 千字

定价: 98.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

目前，世界石油工业面临着严峻的形势，远景性的石油资源严重匮乏，勘探开发难度日益增大，新探明储量的增加速度远小于可动用储量的减少速度。从世界范围的勘探形势来看，中浅层巨型大型油田的发现难度越来越大。因此，人们将能源发展重点放在复杂地质条件的深层油气藏、非常规油气资源的勘探开发，以及油气田的改造和挖潜上，这种形势必将导致勘探开发难度和成本日益增加。

中国未探明石油储量中约 73% 埋藏在深部地层。因此，深部油气资源勘探开发是各石油公司提高油气勘探开发效益、提高企业竞争力的关键。随着油气勘探开发不断向深部地层发展及现代科学技术的进步，深井超深井钻井技术不断发展，应用规模日益扩大。因此，复杂地质条件下深井油气钻井新技术的研究和推广，对于提高勘探效率、增加油气生产能力和节约勘探开发成本均具有十分重要的意义。

深井超深井钻井是一项复杂的系统工程，需要有科学的理论、先进的技术及装备、高素质的人才队伍和科学的管理作为支持。深井超深井钻井技术水平是一个国家或企业钻井技术水平高低的标志。目前，美国和欧洲的深井钻井技术水平处于世界领先水平。中国深井超深井钻井起步晚，但近年来发展迅速，在深井机械钻速、钻井周期、单井钻头用量等方面都取得了很大进步。同时，在深井钻井装备上也有了很大发展。已形成一条以自主研发为主与有选择地吸收国外先进技术相结合的道路，同时开展了大量深井钻井理论研究，例如岩石破碎力学、岩石工程力学、钻井流体力学与物理化学、钻井管柱力学与井下控制工程学、优质钻井液等，推动中国深井超深井钻井技术向优质高速、经济有效和安全环保方向发展。

准噶尔盆地是中国西部重要的石油天然气能源基地。近些年来，油气勘探领域逐渐向深部复杂地层拓展，钻井工程出现了诸多问题，严重制约着准噶尔盆地深层油气勘探开发的效率。包括深部大构造地应力与压力系统复杂，井身结构难以优化；深层二叠系和石炭系火山岩研磨性强，机械钻速慢；裂缝性火山岩气藏保护及防漏治漏难度大；山前构造和断裂带推覆体地层倾角大，防斜快钻难以实现；超深井抗高温高密度钻井液和固井技术还未完善；致密油水平井无法实现有效开发等。为此，中国石油新疆油田公司联合多家钻探公司、高校及科研单位，开展了多项有关复杂深井钻井的配套技术研究。通过近年来的

课题攻关和现场试验,引进推广了多项国外先进技术,包括垂直钻井系统、旋转导向系统、扭力冲击器等。同时,笔者自主研发配套了多项关键技术,包括气基流体钻井技术、火山岩气藏水平井钻井技术、南缘下组合超深井钻井配套技术、深层岩石力学评价与 PDC 钻头个性化研发、深层致密油工厂化水平井钻井技术等。

笔者综合应用力学、数学、物理化学、数理统计等基础科学的理论和方法,在借鉴国内外学者研究成果和新疆油田近十年复杂深井、水平井钻井实践的基础上,综合研究了准噶尔盆地复杂深井、水平井钻井基础理论、设计方法及配套技术。同时,笔者在深井钻井理论研究方面也取得了新认识和新方法,例如复杂地质条件地应力计算模型与图版解释法;深层地应力与井壁稳定性的力学模型;深层二叠系、石炭系岩石抗钻特性测井评价模型;高陡地层气体钻井防斜理论与钻具组合;泡沫流体稳态流动模型与泡沫钻井携岩极限井深理论;充气液钻井气液流量组合设计新方法;欠平衡钻井井底欠压值约束理论;超深井非常规井身结构与套管程序;致密油水平井工厂化钻井平台优化模型、致密油长水平井轨迹导向与控制技术等。笔者将这些研究工作和现场经验加以总结,奉献给读者,并期望该书能对复杂深井钻井理论与工程的进一步研究和应用产生抛砖引玉的效果。

本书包括 13 章内容,大致分为六部分。第一部分介绍国内外深井钻井技术进展,以及准噶尔盆地重点深层油气领域钻井难点和近些年研究攻关取得的技术成果;第二部分针对准噶尔盆地重点勘探领域的地层压力系统、地应力及井壁稳定性进行理论创新和现场应用;第三部分重点阐述针对深部难钻地层的气基流体钻井基础理论和配套技术的研究成果,包括空气钻井、氮气钻井、泡沫钻井、充气液钻井等;第四部分针对准噶尔盆地深部二叠系和石炭系岩石抗钻特性进行分析并建立测井反演模型,研究重点探区的 PDC 钻头选型,同时开展相关钻井提速技术的试验研究;第五部分针对火山岩裂缝性气藏和深层致密油,开展水平井钻井和工厂化钻井配套技术研究;第六部分针对准噶尔盆地重点深层探区,阐述深井钻井液和高密度固井配套技术的研究和应用成果。

本书第 1 章、第 2 章、第 12 章由杨虎和王虎撰写;第 6~10 章由杨虎撰写;第 5 章、第 13 章由杨明合撰写;第 3 章、第 4 章、第 11 章由周鹏高、杨虎撰写。全书由杨虎和王虎统稿并审定。

本书的出版得到了石油工业出版社、中国石油新疆油田公司和长江大学的大力支持和帮助。本书涉及的部分内容源于笔者近 10 年参与的中国石油天然气集团公司“新疆大庆”专项课题、中国石油天然气股份有限公司勘探工程钻井攻关项目。这些项目的顺利完成得到了中国石油大学(北京)鄯捷年、樊洪海教授,西南石油大学蒲晓林、付建红教授,长江大学夏宏南、王越之教授的大

力帮助。项目组的张伟、聂明虎、许江文、杨洪、徐新纽、邢鹏云、李维轩、文乾彬、石建刚、徐生江等同事付出了辛勤的工作和智慧，为本书提供了诸多有价值的学术观点和宝贵素材，在此深表谢意！同时，还要感谢中国石油西部钻探工程有限公司、中国石油川庆钻探工程有限公司、中国石油钻井工程研究院等项目参与单位的同事在现场施工和技术试验给予的帮助和支持。

由于笔者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恭请广大读者批评指正！

杨 虎

2016 年 7 月于克拉玛依

目 录

1 绪 论	1
1.1 国外深井钻井技术概况	1
1.2 中国深井钻井技术现状	2
1.3 中国深井钻井面临的技术挑战	3
1.4 中国复杂深井钻完井技术进展	5
1.5 深井超深井钻井技术发展趋势	8
参考文献	9
2 准噶尔盆地深层钻井技术研究进展	10
2.1 准噶尔盆地构造演化与油气分布	10
2.2 准噶尔盆地重点钻探领域工程地质特征	12
2.3 重点领域深层钻井技术及应用成果	21
参考文献	38
3 复杂深井地层压力预、检测技术与实例	40
3.1 地层压力预、检测理论依据	40
3.2 地震资料预测方法	42
3.3 测井资料检测方法	46
3.4 准噶尔南缘地层压力预、检测实例	50
参考文献	69
4 深层地应力及井壁稳定评价技术与实践	71
4.1 地应力测量与计算	71
4.2 井壁稳定性力学模型	85
4.3 典型构造区域井壁稳定评价实例	89
4.4 裂缝性油气藏水平井钻井方位优化	99
参考文献	105
5 深部地层抗钻特性评价技术与实例	107
5.1 岩石力学及抗钻特性参数获取方法	107
5.2 西北缘深部地层岩石力学与抗钻特性参数实验分析	115

5.3 西北缘深部地层岩石力学与抗钻特性剖面建立及应用	129
参考文献	140
6 气体钻井技术基础理论与实例	142
6.1 气体钻井定义及特点	142
6.2 气体钻井循环压力计算	143
6.3 气体钻井井眼净化理论	146
6.4 气体钻井流程与设备	151
6.5 艾克1井氮气钻井实例	156
6.6 火北1井区空气钻井实例	164
参考文献	169
7 泡沫钻井技术基础理论与实例	171
7.1 泡沫流体功能和特性	171
7.2 泡沫钻井流程与设备	181
7.3 泡沫流体稳定机理	183
7.4 泡沫钻井力学模型	185
7.5 泡沫流体携岩极限理论	190
7.6 风南8井泡沫钻井实例	196
参考文献	202
8 充气液钻井技术基础理论与实例	204
8.1 充气钻井液两相流体	204
8.2 充气液钻井流程与设备	206
8.3 充气液钻井的注气方式	212
8.4 气液注入流量设计方法	215
8.5 百泉1井充氮气钻井实例	221
参考文献	226
9 火山岩气藏水平井钻井技术研究与实例	228
9.1 克拉美丽气田火山岩气藏地质概况	228
9.2 井身结构及完井方式优化设计	232
9.3 水平井井眼轨迹设计与控制技术	239
9.4 液相欠平衡钻水平井技术与实例	250
9.5 冻胶阀欠平衡完井技术应用	256

参考文献	262
10 致密油水平井工厂化钻井技术研究与实例	264
10.1 致密油钻井难点及研究思路	265
10.2 “工厂化”钻井关键技术研究	271
10.3 井身结构优化与钻井提速技术	282
10.4 三维水平井轨迹设计与控制技术	288
10.5 致密油“甜点”随钻评价及轨迹导向技术	302
10.6 致密油“工厂化”水平井应用效果	313
参考文献	316
11 复杂深井快速钻井技术研究与实践	318
11.1 高效 PDC 钻头选型与应用	318
11.2 井下辅助提速工具优选与应用	331
11.3 易斜地层防斜快钻技术	343
参考文献	354
12 复杂深井钻井液技术研究与实例	356
12.1 新型聚合盐钻井液研究与应用	356
12.2 低油水比水包油钻井液技术	371
12.3 油基钻井液体系研究与应用	381
参考文献	402
13 高温高密度固井配套技术研究与实例	403
13.1 南缘深井、超深井固井技术难点	403
13.2 高密度固井水泥浆体系研究	405
13.3 水泥浆防气窜评价与设计	413
13.4 南缘深井提高固井质量技术研究	416
13.5 高温高密度固井技术应用实例	426
参考文献	431

1 绪 论

中国未探明石油储量约有 $85 \times 10^8 \text{ t}$ ，其中 73% 埋藏在深部地层。因此，深部油气资源勘探开发是各石油公司提高油气勘探开发效益、提高企业竞争力的关键。随着油气勘探开发不断向深部地层发展及现代科学技术进步，深井超深井钻井技术不断发展，应用规模日益扩大。

深井超深井钻井技术是一项复杂的系统工程，需要有科学的理论、先进的技术及设备、高素质的人才队伍和科学的管理作为支持。深井超深井钻井技术水平是一个国家或企业钻井技术水平高低的标志。目前，世界上钻深井和超深井的国家已达 80 多个，美国和欧洲的深井钻井技术水平一直处于世界领先水平。

中国石油近年来在深井机械钻速、钻井周期、单井钻头用量等方面都取得了很大进步，同时在深井钻井装备上也有了很大发展。但是同世界先进水平相比，中国石油在复杂深井钻井水平方面还有很大差距。近年来，中国石油在塔里木油田却勒和迪那地区、玉门油田窟窿山地区、四川油气田川东地区、新疆油田南缘山前构造和西北缘断裂带等复杂深井钻井过程中遭遇了世界性的难题。突出表现在山前高陡构造和逆掩推覆体防斜打快问题、窄密度窗口压差卡钻问题、恶性井漏的防治问题及山前构造地应力复杂、地层破碎、异常高压等。针对这些问题，钻井研究人员经过多年攻关，提出了相应的解决方法，为同类地层的钻探指明了方向。

1.1 国外深井钻井技术概况

通常把 4000 ~ 6000m 的井称为深井，6000 ~ 9000m 的井称为超深井，超过 9000m 的为特超深井。深井超深井钻井技术始于 20 世纪 30 年代末，80 年代以后有大的发展，完井井深已突破 12km。在世界范围深井超深井钻井技术水平领先的国家有美国和欧洲的一些国家等。美国于 1938 年钻成世界上第一口 4573m 的深井，1949 年钻成第一口 6255m 的超深井，1972 年美国钻成第一口特深井，井深为 9159m。

1984 年，苏联钻成世界上第一口井深超万米的特超深井 SG-3 井，创造了 12400m 的世界超深井的记录。1991 年，该井第二次侧钻至井深 12869m。德国于 1994 年钻成 1 口 9107m 的超深井（大陆科学探索井）。迄今为止，世界上已钻成 8000m 以上的超深直井近 20 口。包括美国、俄罗斯、挪威、奥地利、德国、英国及阿根廷等国家。

世界上最深的井为位于俄罗斯东部 Chayvo 油田的 O-14 生产井，完钻深度为 13500m。这口井属于俄罗斯石油公司，该井有此成就很大程度上归功于埃克森美孚石油公司的快速钻井（Fast Drill）技术。O-14 井属于 Shakhalin-1 项目的一部分，该项目实施过程中诞生了一大批特超深井，2013 年完钻的 Z-13 井井深为 12450m，Z-42 井井深为 12700m；2014 年完钻的 Z-40 井井深为 13000m。

美国深井钻井速度快、事故少、成本低、效益好,平均单井成本比世界其他地区的低40%~50%。20世纪80年代中期,美国钻一口井深约为5000m的深井钻井周期约为90d,钻一口井深约为6000m的深井钻井周期约为140d,钻一口井深约为7000m的深井钻井周期约为7~9个月。其中,处理井下复杂情况所耗费的时间占完井周期的5%~15%。据统计,1999—2010年,美国台月钻井进尺是中国的2倍,加拿大则是中国的3倍。

俄罗斯拥有适用高纬度地区的先进深井钻井技术,其中涡轮及电动钻具钻深井方面处于世界领先地位,电磁波随钻测量(MWD)、井眼轨迹控制及纠斜技术具有先进水平。苏联于1956年钻成第一口井深4812m的深井,截至1990年累计钻深井2400口。欧洲北海地区是世界上深井集中地区,平均井深超过5000m,属海上高温高压深井。目前,北海地区测量井深8000m左右的大位移井钻井周期一般为80d左右。

德国1990年完成的KTB大陆科探井井深9107m,在钻井中应用了大量高新技术,包括自动垂直钻井系统(VDS)、顶驱、铝合金钻杆、金刚石绳索取心、无固相抗高温钻井液、耐高温低转速大扭矩螺杆动力钻具、变速涡轮钻具等。

1.2 中国深井钻井技术现状

中国深井和超深井钻井起步较晚。1966年,大庆油田钻成国内第一口深井——松基6井,井深为4719m;1976年,钻成第一口超深井——女基井,井深为6011m。中国深井钻井技术发展大致经历了三个阶段。即深井的起步阶段(1966—1975年)、深井和超深井的初步发展阶段(1976—1985年)、深井与超深井的规模发展阶段(1986年至今)。

20世纪90年代以来,中国各大石油公司、科研单位、高等院校重点针对塔里木盆地、川东地区深层、准噶尔盆地山前深大构造的油气勘探,联合进行了复杂地质条件下深井超深井钻井技术攻关,从而提高了中国深井超深井钻井技术水平,并使中国深井超深井钻井进入规模化应用的阶段,完成了一批超深井钻井,深井钻井技术水平已达到国际先进水平。例如,塔参1井井深7200m、塔中4井井深为7220m、塔深1井井深为8014m、克深7井井深为8023m。

中国石油最深的井为塔里木盆地的一口评价井克深902井,完钻井深为8038m。该井完钻于2015年1月,钻探时间368d。2016年3月,位于中国四川盆地川东北地区的一口探井——马深1井顺利完钻,完钻井深达到8418m,刷新亚洲最深井的记录。该井钻井过程中创造了一系列高指标和新纪录,一是在陆相地层积极推广应用泡沫钻井、高速涡轮+孕镶金刚石钻头技术、低速大扭矩螺杆+高效PDC钻头技术和旋冲钻井、优质钻井液等新技术,平均机械钻速提高64%;二是在下部海相地层,采用旋冲钻井和高效螺杆复合钻井技术,机械钻速较常规牙轮钻头提高近3倍。

近些年,准噶尔盆地在超深井钻井方面也取得了积极进展,已成功完成6口超深井的钻探。例如,南缘下组合大丰1井完钻井深为7353.0m,西湖1井完钻井深为6268.0m;腹部中央凹陷的莫深1井完钻井深为7380.0m,达探1井完钻井深为6226.0m;西北缘山前断裂带风城1井完钻井深为6130m。通过多年技术研究和集成试验,初步形成了适合准噶尔盆地深井超深井的钻井配套技术。

1.3 中国深井钻井面临的技术挑战

中国陆上深井超深井主要分布于新疆塔里木盆地、准噶尔盆地、四川盆地等地区，这些地区地质条件均很复杂，深井超深井钻井存在地层压力系统多、裸眼井段长、井壁稳定性复杂、地层高温（240℃）、高压（压力系数 2.5）、深部地层岩石可钻性差等难点。同时，还要解决山前陡构造、复杂难钻地层、地应力集中、地层压力异常、地层破碎、地层塑性流变、高矿化度（高密度）、高硫化氢浓度等复杂地质条件带来的一系列钻井技术难题。

探井尤其是新区第一口探井具有地质环境因素不确定的特点，包括地层压力、岩石力学特性、应力非均质性、地层状态和岩性、地层分层深度和完井深度的不确定性等，严重影响了钻井设计的科学性、钻井技术措施的针对性和有效性，从而增大了井身结构优化、井眼稳定、井眼轨迹控制、机械钻速的提高、井下复杂情况及事故的预防和处理的难度。

1.3.1 山前复杂构造井身结构设计问题

山前复杂的地质条件易对地震资料的品质造成不利的影响。制订钻井方案时，无论是地质构造形态、地层分层都存在很大的不确定性，钻井过程中经常出现意外，导致井身结构、钻井液密度设计都存在很大的不确定性，增加了钻井难度。

表 1.1 为塔里木油田大北地区部分完成井盐膏层对比情况。部分井钻完预测的盐层，下入了封隔盐层的技术套管后又遇到盐层，为封隔意外出现的盐层需要增加一层套管，致使塔里木盆地山前深部小尺寸井眼钻井非常普遍。为避免小尺寸井眼钻井，必须预留一到两层的技术套管，这样又会导致开钻井眼尺寸加大，使上部井段钻井周期大幅度增加。塔里木盆地山前地区复杂深井本身就面临井身结构层次不够问题，增加预留套管层次必然导致大尺寸套管下得更深，致使钻井速度大大降低，大尺寸套管的强度也难以满足安全钻井和生产要求，对井身结构的合理设计带来很大挑战。

表 1.1 塔里木油田大北地区完成井盐膏层对比（单位：m）

古近系地质分层		大北 1	大北 2	大北 3	大北 101	大北 102	大北 103	大北 201	克深 2 井
苏维依组		5283.5 ~ 5451.0	4208.5 ~ 4412.5	5695 ~ 5906	4825.5 ~ 5151	4588 ~ 4786	5060.5 ~ 5270.5	4194 ~ 4419	4472.5 ~ 4710.5
库姆格列木组	泥岩段	5570	4555	6000	5216	4875.5	5286	4525	4854
	膏盐岩段		5289	7071	5705	5041.5	5484.5	5923	6510.5
	白云岩段		5293		5708.5	5046.5	5486		6516.5
	膏泥岩段		5541		5725	5315	5677		6564.5
	砂砾岩段		5559		5747	5338	5693.5	5940	6571.5

山前探井地层压力预测与钻井液密度设计主要基于地震资料，由于地震资料品质差，

制约了地层压力预测的精度。如何科学合理的设计井身结构与钻井液密度，成为钻井面临的主要技术难题。大北地区由于漏封盐层，有 5 口井被迫采用 4 ~ 4 $\frac{3}{8}$ in 井眼裸眼完井（大北 2 井、大北 3 井、大北 101 井、大北 103 井、大北 201 井），给试油资料录取带来很大难度（表 1.2）。

表 1.2 塔里木油田大北地区卡层不准导致的复杂与事故

井号	盐膏层段（m）	完钻井深（m）	套管下深（m）	事故复杂简况
大北 2	4555 ~ 5287	5831.11	5in×5737.7	5594 ~ 5701m 井段频繁发生井漏、卡钻，提前下入 5in 尾管，4 $\frac{3}{8}$ in 井眼完井
大北 3	6000 ~ 7070	7090.88	5in×7058.00	5 $\frac{7}{8}$ in 钻头钻至 7072.81m 发生井漏卡钻，侧钻提前下入 5in 套管，4 $\frac{3}{8}$ in 井眼完井
大北 201	4525 ~ 5297	6145.00	5in×5981.00	5920.12 ~ 5981m 井段频繁发生井漏，起下钻阻卡严重，钻至 5981m 后提前下 5in 套管，4in 井眼完井
大北 101	5216 ~ 5705	5919.00	5 $\frac{1}{2}$ in× 5790.00	5711.52 ~ 5790m 井段发生井漏 6 次，累计漏失钻井液 405.48m ³ ，钻至 5790m 下入 5 $\frac{1}{2}$ in 套管，4 $\frac{3}{8}$ in 井眼完井
大北 103	5258 ~ 5667	5946.00	5in×5787.31	钻至 5668.99m 发生井漏，处理井漏和溢流过程中又发生卡钻，侧钻至 5649m 中完，4 $\frac{3}{8}$ in 井眼完井

1.3.2 山前高陡构造及逆掩推覆体防斜打快问题

近年来，塔里木、新疆、玉门、西南等油气田钻井中普遍遇到高陡构造问题。塔里木油田以库车山前构造为代表，浅部地层普遍高陡，地层倾角大，往往一口井中地层倾角大于 30°的井段长达 3000m 以上。玉门油田以青西地区为代表，地表出露地层为高陡、难钻的志留系，钻井速度缓慢。西南油气田川东北和川西北地区地层高陡、井深、断层多、地层层序倒转、裂缝发育、岩石可钻性差，完钻井深超过 5000m，上部约 3000m 井段地层倾角一般在 30°~87°之间。

2005 年以前，围绕高陡构造地层钻井尽管尝试了多种防斜技术，但效果并不理想，主要表现在：

（1）不能有效施加钻压，钻压稍高就严重井斜；只能采用轻压吊打，导致钻井速度极低。塔里木油田（截至 2004 年），上部（井深 3500m 以上）大井眼高陡构造地层平均机械钻速只有 2.27m/h，平均需要钻井时间 100d 以上，大大低于正常钻压钻进的速度。

（2）由于上部井身质量不好，导致套管破损事故多发。塔里木油田由于山前构造有效的防斜手段少，井身质量差，加上钻井周期长，钻柱对套管偏磨问题非常突出，引起的套管损坏非常严重。2005 年迪那地区 4 口井技术套管严重磨损甚至磨穿，英深 1 井套管磨穿，不得已回接 8 $\frac{1}{8}$ in 套管。技术套管磨损、磨穿也给钻井带来了很大的安全风险。

1.3.3 高研磨性地层提高钻井速度的问题

松辽盆地深层为大段火成岩地层，钻井面临的主要问题是地层硬、岩石可钻性差。如

大庆徐家围子地区岩石硬度高达 200 ~ 500MPa, 可钻性级值平均在 7 ~ 9 级之间, 最高达 10 级。松辽盆地深层泉二段以下地层平均机械钻速仅为 1.2m/h 左右, 且钻头磨损快、寿命低、单只钻头进尺少, 导致钻头用量多, 制约了整体提速。

塔里木库车山前上部地层普遍存在大段砾石层, 其中博孜 1 井砾石层厚高达 5479m, 该井段钻井用时 396d, 平均机械钻速只有 0.89m/h, 平均单只钻头进尺 70.5m。大北 3 井砾石层厚 3020m, 该井段钻井用时 143d, 累计使用钻头 43 只 (26in 井眼 13 只, 17½ in 和 16in 井眼共 30 只), 平均机械钻速只有 1.20m/h。

四川盆地川东北地区储层埋藏深, 上部大套侏罗系地层研磨性强, 可钻性差, 2005 年以前该区深井钻井周期普遍在一年以上, 严重制约了该地区勘探开发的进程。

1.3.4 窄密度窗口和裂缝性井漏防治问题

塔里木库车山前储层段普遍裂缝发育, 尤其是迪那等地区气藏厚度 (气柱高度) 为 300m 左右, 由于气柱上下为同一压力系统, 气藏压力系数上高下低, 使用同一密度钻井液, 当平衡气藏上部的气层压力时, 气藏下部就会产生较大的压差, 导致严重的井漏, 当平衡下部气层压力时, 上部气藏就会发生严重的气侵, 表现为窄钻井液密度窗口漏喷问题非常突出。统计 1996—2005 年间塔里木克拉 2 气田和迪那气田所钻的 30 口井中, 共有 23 口井发生 278 次井漏, 15 口井发生 53 次溢流, 累计漏失的高密度 ($2.00\text{g}/\text{cm}^3$ 以上) 钻井液 19957m^3 , 损失时间 459d, 消耗加重材料 47680t、堵漏材料 1493t, 不仅大幅度增大了钻井成本, 还增加了钻井风险。

西南油气田的井漏主要表现为大裂缝或溶洞造成的恶性井漏和长段低压恶性井漏两大类, 这两类井漏堵漏难度大, 漏失钻井液量多, 损失时间长。据统计, 2005 年单井平均漏失钻井液 1451m^3 。四川盆地事故复杂损失也主要表现为漏失损失。2003—2005 年, 有 3 口井先后因井漏严重而报废。

严重井漏不仅造成了钻井液和材料的巨大损失, 还导致复杂时间的增加, 对目的层还会产生严重的伤害。

1.3.5 复杂深井高密度固井质量问题

塔里木库车山前构造为高压、高产气藏, 吉林、大庆深层为高温、高含 CO_2 气藏, 四川川东北地区为高产、高含 H_2S 气藏, 这类井如何提高固井质量, 防止气窜, 降低水泥石和套管腐蚀, 均面临着严峻挑战。在 2005 年中国石油进行的高温、高压、高含 H_2S 的“三高”井隐患排查中发现, 克拉 2 井区 14 口生产井中有 12 口井井口不同程度带压, 四川盆地罗家寨、铁山坡等地区多口井存在固井质量不合格现象, 松辽盆地深层多口天然气井也存在井口带压和套管腐蚀的问题, 严重影响了气井的安全。

1.4 中国复杂深井钻完井技术进展

针对以上难题, 中国深井超深井配套钻井技术有待进一步深化研究。近些年来, 各科研机构 and 油气田公司积极探索、努力攻关, 取得了一些成果。主要包括钻井工程地质环境

信息提取和科学化描述技术,复杂地质条件深井超深井优化设计技术,多压力系统、高陡构造、难钻地层的安全优质高效钻井技术,高密度、抗高温、抗储层伤害钻井液技术,井下复杂情况及事故的预防和处理技术,提高复杂层段及小间隙固井质量技术,先进技术装备,特殊工艺钻井技术的应用与发展等。

1.4.1 钻井地质环境因素描述与评估技术

钻井地质环境因素评估技术的研究与应用目前已进入科学化阶段。利用地震资料预测地层孔隙压力和待钻井段岩石力学参数纵向剖面 and 区域分布的不足之处在于模型建立假设不完全合理、层速度提取精度低等。对各种复杂地质条件,高围压、高温对深部岩石力学特征的影响国内研究较少。

随着随钻测量(MWD)、随钻测井(LWD)、驻波检测器(SWD)技术的应用,国外不断提出地层压力随钻预测检测新方法,其理论基础更可靠,考虑因素更为全面,更注重高温、高压模拟试验手段的开发应用和数据综合利用,时效性、自动化程度、计算精度不断提高,对钻井作业的指导作用更强。海相碳酸盐岩地层压力的预测与检测在国内外尚属技术难题,还没有成熟的思路和方法。

非常规井身结构配套技术提高了复杂深井抗风险能力。通过进行钻前压力预测与地质风险评估,在常规井身结构的基础上,结合地质目的和完井要求,推广应用了非常规井身结构配套技术。塔里木油田、西南油气田、新疆油田多口深井非常规井身结构的成功应用,降低了因地质复杂造成的工程风险,提高了复杂深井的钻井成功率,有利于达到目的。

1.4.2 山前高陡构造防斜打快技术

由于山前高陡构造等复杂条件的影响,深井超深井井斜问题十分突出,基于传统静力学防斜理论的防斜技术常以牺牲钻井速度来控制井斜,使防斜与打快的矛盾更加突出。为此,国内突破传统的静力学防斜理论,提出了钻柱涡动理论,并以此为基础形成了动力学防斜理论,为高陡构造防斜打快技术奠定了基础。研究应用了光钻挺大钻压防斜技术、偏轴钻具组合防斜打快技术、刚柔钻具组合防斜打快技术、井下动力钻具防斜打快技术等,均取得良好应用效果。

国外,防斜打直方面更侧重于机电液一体化的旋转导向闭环钻井系统的研究与应用,已有多套产品投入商业化应用,如VDS自动垂直钻井系统、SDD自动直井钻井系统、ADD自动定向钻井系统、AGS(Geo Pilot)自动导向钻井系统、SRD(Power Drive)旋转导向自动钻井系统、RCLS(Auto Tark)旋转导向闭环系统等。为适应复杂地质条件下防斜打快的要求,对工具进行适应性改进,推出了Power V、Verti Tak、Smart Drilling、Path Finder等工具及产品。目前,旋转导向闭环技术知识产权多为西方国家拥有,中国虽然开展了这方面的研究,但研制的类似产品未实现商业化推广。

垂直钻井技术得到规模化应用,大幅度提高了钻井速度。对于山前构造井提高钻井速度、保证井身质量及防止套管磨损发挥了至关重要的作用。通过引进垂直钻井技术在高陡构造地层的应用,并对工具和工艺持续进行改进,目前已成为山前高陡构造提速的主体技术。该技术在新疆、塔里木、玉门、大庆、长庆等油田相继得到了推广应用,同时加快了

该技术的国产化进程。

1.4.3 提高深井超深井钻井速度技术

目前,国内外提高深井超深井钻速的研究热点为螺杆钻具加高效 PDC 钻头、涡轮钻具加金刚石钻头、旋冲钻井技术、欠平衡钻井技术、气体钻井技术、导向钻井技术等。膨胀管技术的研究与应用为复杂地质条件下井身结构设计与井下复杂情况的处理提供了新的技术手段,可提高固井质量、减少复杂情况及事故时间、减小上部井眼的尺寸和套管层次,从而降低钻井成本,提高钻进效率。

近些年,中国气体钻井技术得到规模化推广应用,提速效果显著。同时,气体钻井的装备、工具、工艺也得到了配套发展,已基本形成了系列化的气体钻井装备、工具和工艺系列,气体钻井装备 80% 以上实现了国产化。例如,川东地区改变了传统的钻井液钻井技术,利用空气钻井、泡沫钻井和氮气钻井结合新型钻头等钻井新技术,钻速平均提高 3 倍以上,建井周期由原来的 180d 缩短到 59d 左右。目前,四川盆地完成一口井深为 6000m 的深井所用钻井时间与过去钻一口井深为 4000m 的井所用钻井时间相当。然而,国外气体钻井的深度超过 6300m,中国气体钻井技术用于深井钻井的研究刚刚起步。

1.4.4 抗高温强抑制钻井液技术

20 世纪 60—70 年代,中国研制出多种抗温 120 ~ 150℃ 的处理剂;20 世纪 80 年代以后,研制出多种抗温 200℃ 以上的新型处理剂,如抗钙、抗盐、抗温 260℃ 的絮凝剂 CPD,抗温 260℃ 的降滤失剂 COP-1 等。

超深井钻井液体系有油基钻井液、水基钻井液和气体钻井液三大类。目前国外油基钻井液体系有真油基和逆乳化两种,其热稳定性好,抗电解质能力强,抗温 260℃,但是维护费用高,测井解释困难。水基钻井液体系具有成本低、有利于环保等优点,但必须通过抗高温处理剂复配才能保证其性能稳定。

近年来,国内外在对应用基础理论和新技术进行深入研究的基础上,成功研制了聚合物、多元醇、甲酸盐、稀硅酸盐、合成基等水基防塌钻井液体系,以及适应于复杂地质条件、环保性能优良的第二代合成基钻井液体系,这代表了钻井液技术的发展方向。中国在超高温钻井液处理剂开发,油基钻井液、环保型的合成基钻井液的研究应用,超高温高压条件下储层损害机理和保护研究等方面与国外还存在着较大差距。

1.4.5 深井固井技术

目前,国外油井水泥外加剂已有 14 个大类数百个品种,新型聚合物外加剂的耐温性和抗盐性有了很大提高。国内油井水泥外加剂也形成了 10 余个品种,但抗高温外加剂品种少,且抗盐能力和稳定性较差。

斯伦贝谢 (Schlumberger) 公司的 CemCRETE 理论和得克萨斯州石油钻井研究所的颗粒级配理论的提出及发展,为高强低密度水泥浆与高密度水泥浆的研究应用奠定了基础。近年来,国内外深井超深井固井水泥浆体系主要有高密度水泥浆体系、新型泡沫水泥浆及超低密度水泥浆体系、防窜水泥浆体系、塑性水泥、MTC 体系等。国内已研制开发了多套防

窄水泥浆体系，且低密度、高密度防气窜固井技术达到了国际先进水平。

固井技术的进步提高了深层天然气井的固井质量。研制出了纤维—胶乳—微膨胀、高强低密度、抗 180 °C 高温的水泥浆体系，为提高固井质量创造了条件。形成了气体钻井空井下套管、生产套管悬挂回接、环空加压候凝等工艺技术，完善了间歇式反挤补救措施，并持续对固井工具、水泥外加剂进行筛选和改进。综合固井工艺技术的提高，使固井质量得到明显改善。

在固井工具开发方面，国内多家公司生产的固井配套工具的质量和可靠性已达到了国外同类产品的水平。

1.4.6 钻井信息技术

20 世纪 80 年代，国外开始钻井信息系统的建设。90 年代，应用数学模型结合人工智能先进技术，研究与建立了集钻井数据采集、传输、钻井数据库、钻井工程设计、钻井施工监测和钻井生产指挥于一体的钻井信息系统，如美国兰德马克钻井数据管理平台、意大利阿吉普公司的钻井信息系统等，实现了钻井数据资料的实时采集、处理，并通过卫星通讯实现了数据的远程传输和处理。

20 世纪 90 年代，国内各油田、高校等单位相继开发了钻井工程计算机软件及钻井工程数据库系统、钻井信息管理系统。1998 年，胜利油田等单位完成了钻井信息卫星通信的试验，目前已建成了较为完善的钻井工程信息综合管理系统。中国钻井信息技术与国外的差距主要表现在理论模型的科学性及软件系统功能的综合性与完善性等方面。

1.5 深井超深井钻井技术发展趋势

深井超深井钻井技术的发展以现代钻井技术的发展为基础，重点解决高温、高压、多压力系统、山前构造、难钻地层等深井钻井难点。现代钻井技术发展以现代科学技术为基础，以提高勘探开发综合效益为目标，其主导发展趋势为：以信息论、系统论和控制论为理论基础，把以计算机技术为核心的遥测、遥控技术融入钻井工程技术，用高新技术改造传统的钻井技术，向智能化、自动化钻井方向发展，创造最大化的勘探开发经济效益和社会效益。

今后较长时期内，中国对西部地区、南方海相地区及东部深层油气勘探开发将进一步加强。复杂地质条件下深井超深井钻井技术仍然是中国 21 世纪实施油气资源战略、提高勘探开发效益的重要技术支持手段。为此，中国应在跟踪和引进国外先进深井钻井技术、装备的同时，应加强自主研发与应用攻关，重点在加强核心技术的研发与配套，并高度重视基础理论研究，努力缩小与国外先进水平的差距。

目前，深井超深井钻井技术发展趋势主要为：

(1) 向集成化、信息化、智能化、自动化方向发展。

深化复杂地质条件下深井超深井钻井技术，开发具有更深钻探能力、更高自动化程度、更符合 HSE 要求的深井超深井钻机、井下工具、实时测量工具，向信息化、集成化、自动化闭环钻井技术发展。