

天然气开采工程技术丛书

TIANRANQI SHENJING CHAOSHENJING
ZUANJING JISHU

天然气深井超深井 钻井技术



蒋祖军 郭新江 王希勇 主编

中国石化出版社

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

天然气开采工程技术丛书

- 天然气井工程地质
- 天然气深井超深井钻井技术
- 高温高压气井完井技术
- 致密砂岩气藏储层改造技术
- 致密砂岩气藏采输技术

责任编辑：许 倩
责任校对：李 伟
封面设计：七星博纳

ISBN 978-7-5114-0837-2



9 787511 408372 >

定价：60.00元

天然气开采工程技术丛书

天然气深井超深井钻井技术

蒋祖军 郭新江 王希勇 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书详细介绍了天然气深井超深井井身结构设计理论和方法、钻头选型技术、复合钻井技术、液体欠平衡钻井技术、气体钻井技术、防斜钻井技术、井控技术、钻井液技术、储层保护技术、油层套管防磨减磨技术。对国内天然气深井超深井钻井工程面临“喷、漏、卡、塌、毒、硬、斜、磨”等技术问题的解决方案进行了详细阐述,理论与实例结合,操作性强。

本书可供从事天然气钻井、完井、采气、井下作业及相关领域的工程技术人员参考,也可作为石油院校教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

天然气深井超深井钻井技术 / 蒋祖军, 郭新江, 王希勇主编.
—北京: 中国石化出版社, 2011.5
(天然气开采工程技术丛书)
ISBN 978-7-5114-0837-2

I. ①天… II. ①蒋… ②郭… ③王… III. ①深井-
油气钻井-技术②超深井-油气钻井-技术 IV. ①TE245

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 042032 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.cn

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 21.5 印张 536 千字
2011 年 5 月第 1 版 2011 年 5 月第 1 次印刷
定价: 60.00 元

序

我国是天然气资源丰富的国家之一，据2004年完成的第三次资源评价结果，全国拥有天然气资源量 $47.14 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，其中陆上拥有天然气资源量 $36.22 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，勘探开发利用潜力大。

我国是开采和利用天然气最早的国家之一，早在2000多年前，我们的祖先就已经开始采气熬盐，当时的钻井采气技术已经达到了相当高的水平。近十多年来我国天然气工业迅猛发展，发现并开发了苏里格、靖边、普光、大牛地、克拉2、塔中1、合川、新场、徐深、榆林、迪那2、广安、子洲、大天池、克拉美丽、乌审旗等一批探明天然气地质储量超 $1000 \times 10^8 \text{m}^3$ 的大气田，到2009年累积探明天然气地质储量 $87077.57 \times 10^8 \text{m}^3$ ；生产天然气 $843.95 \times 10^8 \text{m}^3$ ；建成了连接大半个中国天然气消费市场的“西气东输”工程、“川气东送”工程；天然气工业正在成为我国油气工业快速发展的主要增长点和推动力。在长期天然气勘探开发的实践中积累了丰富的经验，形成了适合于我国天然气工业发展特点的理论和技术。

长期从事天然气勘探、开发、集输研究与中国石化西南油气分公司工程技术研究院集多年的研究成果和丰富的经验，厚积薄发推出这套《天然气开采工程技术丛书》，主要针对我国复杂气藏全面系统总结出具有我国天然气开采工程特色理论和技术。《天然气井工程地质》总结了工程地质学与天然气钻井工程密切结合的成功尝试；《天然气深井超深井钻井技术》系统阐述了国内复杂地层深井超深井钻井工程面临“喷、漏、卡、塌、毒、硬、斜、磨”等技术问题的解决方案，对解决我国复杂地层深井超深井钻井井下复杂问题有很好的参考价值；《高温高压气井完井技术》集安全、经济、高效三位一体，全面系统地阐述了高温高压气井完井技术与经验，具有很强的实用价值与指导作用；《致密砂岩气藏储层改造技术》针对致密砂岩气藏储层的特点系统总结了“压得开、进得去、撑得起、出得来、排得尽、稳得住”的储层改造技术，针对性强，特色突出；《致密砂岩气藏采输技术》针对气层压力不高单井产量较低及含酸性气体等特点形成有效的实用技术，能作为我国特殊气藏开发、集输技术的借鉴……。丛书内容丰富，结构合理，较成功地尝试了勘探与开发的结合、工程与地质的结合、地下与地面的结合、技术与经济的结合……。理论与实践结合密切，理论应用准确恰当，事例深刻丰富，具有明显的特色，实用性强。对我国天然气特别是复杂气藏勘探开发有很好的参考价值。适合于高等学校、从事天然气勘探开发的工程技术人员、科技工作者参考应用。丛书的出版发行将有助于提高我国天然气开发理论和技术水平。

油气藏地质及开发工程国家重点实验室主任、中国工程院院士

罗平亚

2010年10月10日

前 言

深井超深井钻井技术是为满足深部油气勘探开发的需求,迅速发展起来的现代特色钻井技术。在钻井界,深井通常是指完钻井深为 4500 ~ 6000m 的井,超深井通常指完钻井深为 6000m 以上的井,完钻井深超过 9000m 的超深井称之为特深井。深井超深井钻井工程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保障,深井超深井钻井是一个国家或企业钻井技术水平的重要标志之一。

世界深井钻井技术的发展始于 20 世纪 30 年代末,美国于 1938 年钻成世界上第一口 4573m 的深井,1949 年钻成 6255m 的超深井,1972 年又钻成了第一口井深为 9159m 的特深井。1987 年,前苏联钻成了一口井深为 12262m 的世界上最深特深井,1991 年,侧钻至 12869m。目前,全球能钻 4500m 以上深井的国家有 80 多个,有 30 多个国家能钻 6000m 以上的超深井,中国是其中之一。美国是世界上钻深井历史最长、工作量最大、技术水平最高的国家,累计钻深井已占全球 85% 以上。截止到 2006 年,世界上钻达 8000m 以上超深井有 9 口,中国石化西北分公司塔深 1 井也在其列。

我国深井和超深井钻井技术起步较晚,其技术发展大体经历了三个阶段:第一阶段是从 1966 年到 1975 年的起步阶段,1966 年 7 月 28 日,我国在大庆油田钻成第一口深井——井深 4719m 的松基 6 井,之后又断断续续在大港、胜利和江汉油田建成了 4 口超过 5000m 的深井,初步积累了深钻井的经验。第二阶段是 1976 年至 1985 年的初步发展阶段,1976 年 4 月 30 日在四川地区完成了第一口超深井——井深 6011m 的女基井,标志着我国钻井工作由打深井进一步发展到打超深井;从 1976 年开始,我国每年都打深井(超深井),到 1985 年共完成了 170 口深井和包括井深 7175m 的四川关基井、井深 7002m 的新疆固 2 井在内的 10 口超深井。第三阶段是 1986 年至今的规模应用阶段,平均年完成深井超深井 100 口左右,2006 年 7 月 12 日,中国石化西北油气分公司部署在塔里木盆地塔河油田的塔深 1 井成功钻至井深 8408m,创造了亚洲超深井的纪录;2009 年 8 月 11 日,中国石化西南油气分公司部署在四川盆地新场气田的川科 1 井完钻于井深 7566.50m,成为国内最深的海相超深科探井。

我国陆地上的深井超深井主要集中在新疆塔里木盆地和四川盆地,地质条件均十分复杂,钻遇地层具有压力系统多、安全窗口窄、井壁稳定性差、可钻性差、地层倾角大易井斜等特点,目的层具有埋藏深、高压、高温、高产、高含硫化氢或二氧化碳等难点,深井超深井钻井工程面临“喷、漏、卡、塌、毒、硬、斜、磨”等诸多技术难题。“七五”以来,国内各大石油公司、科研单位、高等院校重点针对四川盆地、塔里木盆地深层油气勘探进行了复杂地质条件下深井超深井钻井技术联合攻关,走出了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,逐步形成有独立特色的深井超深井钻井技术,深井超深井钻井迅速发展。2006 年中国石化钻 4500m 以上深井 196 口,平均井深 5458m,平均钻井周期仅为 128 天,四川盆地川东北探区井深 7170m 的元坝 1 井钻井周期只有 280 天。

尽管天然气深井超深井钻井技术迅速发展,但迄今为止,国内外还没有较为全面的关于天然气深井超深井钻井技术专著,本书的出版无疑将填补这项空白,为关心和支持天然气深井超深井钻井技术进步的广大科技人员提供参考。

全书分十一章，第一章介绍了天然气深井超深井钻井技术发展现状，由蒋祖军、胡大梁、王希勇、黎昌华编写；第二章介绍了天然气深井超深井井身结构设计理论和方法，由郭新江、严焱诚、朱礼平、廖忠会、张继尹编写；第三章介绍了钻头选型技术，由郭新江、李群生、肖国益、王希勇编写；第四章介绍了天然气深井超深井复合钻井技术，由李群生、王希勇编写；第五章介绍了液体欠平衡钻井技术，由李群生、廖忠会、王希勇编写；第六章介绍了天然气深井超深井气体钻井技术，由朱化蜀、王波、蒋祖军、肖国益编写；第七章介绍了天然气深井超深井防斜钻井技术，由房舟、肖国益、黎昌华、王希勇编写；第八章介绍了天然气深井超深井井控技术，由胡大梁、廖忠会、王希勇、朱礼平编写；第九章介绍了天然气深井超深井钻井液技术，由李丽、欧彪、周建平编写；第十章介绍了天然气深井超深井储层保护技术，由李丽、欧彪、任茂编写；第十一章介绍了天然气深井超深井油层套管防磨减磨技术，由朱化蜀、吴建忠编写。全书最后由蒋祖军、郭新江、王希勇统稿定稿。

本书编著过程中，得到了中国石化油田勘探开发事业部、西南油气分公司及西南石油局、胜利油田分公司及胜利石油管理局、中原油田分公司及中原石油勘探局、西北油气分公司及西北石油局、中国石油西南油气田分公司、西南石油大学的领导、专家、教授大力支持和帮助，在此一并感谢。由于编著者水平局限，加之时间仓促，书中不妥之处恳请同行专家批评指正。

郭新江

2010年9月9日

目 录

第一章 深井超深井钻井技术发展现状	(1)
第一节 国外深井超深井钻井技术现状	(1)
一、国外深井超深井钻井概况	(1)
二、国外深井超深井钻井技术	(4)
第二节 国内深井超深井钻井技术现状	(8)
一、国内深井超深井钻井概况	(8)
二、国内深井超深井主要钻井技术	(10)
第三节 天然气深井超深井钻井技术发展方向	(13)
一、国外深井超深井钻井技术发展趋势	(13)
二、国内天然气深井超深井钻井技术发展方向	(14)
第四节 天然气深井超深井钻井技术难点及对策	(16)
一、天然气井特点	(16)
二、天然气深井超深井钻井主要技术难点	(17)
三、天然气井深井超深井钻井技术对策	(18)
参考文献	(21)
第二章 天然气深井超深井井身结构设计	(22)
第一节 地层压力理论及预测方法	(22)
一、基本概念	(23)
二、地层孔隙压力预测方法	(28)
三、地层破裂压力预测方法	(31)
四、井眼坍塌应力预测方法	(34)
第二节 井身结构设计理论	(35)
一、井身结构设计原理	(35)
二、井身结构设计的基础参数	(39)
第三节 井身结构设计方法	(40)
一、井身结构设计方法及步骤	(40)
二、套管尺寸与井眼尺寸选择和配合	(42)
第四节 套管选型及强度校核	(43)
一、套管选型	(43)
二、强度校核	(44)
三、等安全系数法套管强度设计	(46)
第五节 应用实例	(51)
参考文献	(53)
第三章 钻头选型技术	(55)
第一节 地层岩石力学参数	(55)

一、岩石力学参数求取方法	(55)
二、利用测井资料计算岩石力学参数	(59)
第二节 钻头选型方法	(63)
一、钻头选型考虑的因素	(63)
二、钻头选型方法	(63)
第三节 钻头选型	(71)
一、钻头分类	(71)
二、岩石分类	(72)
三、地层硬度分级	(73)
四、钻头选型实例	(74)
参考文献	(78)
第四章 复合钻井技术	(80)
第一节 井下动力钻具工作原理	(80)
一、螺杆钻具工作原理	(80)
二、涡轮钻具工作原理	(95)
第二节 井下动力钻具的选择	(99)
一、螺杆钻具的选择	(99)
二、涡轮钻具的选择	(101)
第三节 复合钻井配套技术	(102)
一、螺杆钻具配套技术	(102)
二、涡轮钻具配套技术	(109)
参考文献	(111)
第五章 液体欠平衡钻井技术	(112)
第一节 液体欠平衡钻井井筒多相流技术	(112)
一、气液两相流的流型判别	(113)
二、欠平衡钻井环空流动模型的建立	(114)
三、多相流井底压力计算基本模型	(117)
第二节 合理欠压值设计	(119)
一、欠平衡钻井井内基本压力关系	(119)
二、井底欠压值的确定依据	(119)
三、井底欠压值的设计流程	(123)
四、地层压力的计算	(123)
五、钻井液密度窗口的确定	(124)
第三节 液体欠平衡钻井工艺技术	(125)
一、主要设备及工艺流程	(125)
二、井底欠压的控制	(127)
参考文献	(131)
第六章 深井超深井气体钻井技术	(132)
第一节 气体钻井技术概述	(132)
第二节 注入参数优化设计	(133)

一、最小动能法原理	(133)
二、最小注气量计算方程	(134)
三、计算结果校正	(136)
四、气体钻井欠压值合理设计分析	(138)
第三节 气体钻井工艺技术	(138)
一、气体钻井主体设备	(139)
二、气体钻井辅助设备	(139)
三、气体钻井工艺技术的应用	(140)
第四节 井下着火及燃爆监测	(147)
一、井下燃烧方式概述	(147)
二、燃爆机理与井下灭火	(151)
三、井下燃烧的计算机模拟	(156)
四、实验研究	(157)
五、井下燃爆监测系统	(160)
第五节 地层出水监测技术	(163)
一、出水监测原理	(163)
二、出水监测仪器研制	(163)
三、出水监测仪器的现场应用	(164)
第六节 气液转换技术	(165)
一、气体钻进结束后井壁失稳复杂情况实例	(165)
二、井壁失稳原因分析	(166)
三、气液转换技术	(166)
参考文献	(169)
第七章 深井超深井防斜钻井技术	(171)
第一节 深井防斜钻井技术	(171)
一、井斜机理分析	(171)
二、防斜钻井技术	(173)
第二节 单弯螺杆钻具防斜技术	(177)
一、防斜单弯螺杆钻具力学特性分析	(177)
二、应用实例	(180)
第三节 钟摆钻具组合防斜技术	(182)
一、常规钟摆钻具组合力学特性分析	(182)
二、预弯钟摆钻具结构与力学性能分析	(187)
三、应用实例	(191)
第四节 偏轴组合防斜打快技术	(193)
一、偏轴组合防斜原理	(193)
二、应用实例	(194)
第五节 垂直钻井防斜技术	(195)
一、垂直钻井技术进展及井斜控制机理	(195)
二、国内外自动垂直钻井系统	(197)

三、应用实例	(197)
参考文献	(199)
第八章 天然气深井超深井井控技术	(200)
第一节 天然气井压力变化特点	(200)
一、天然气的特性	(200)
二、天然气侵入井内的方式及影响	(201)
三、环空气体运移特征	(203)
第二节 溢流控制原理	(205)
一、U形管原理	(206)
二、井底常压原理	(207)
三、关井允许的最大套管压力	(207)
四、关井立管压力	(208)
五、压井液密度的确定	(209)
第三节 天然气井井控装备	(210)
一、防喷器组合	(210)
二、节流、压井管汇	(215)
三、其他装置	(224)
第四节 天然气井压井方法及应用	(226)
一、常规压井方法及应用	(226)
二、非常规压井方法及应用	(233)
参考文献	(237)
第九章 深井超深井钻井液技术	(238)
第一节 钻井液体系控制因素及作用机理	(238)
一、高密度钻井液体系	(238)
二、抗高温钻井液体系	(240)
第二节 深井超深井钻井液体系	(242)
一、复合金属离子聚磺钻井液	(243)
二、硅醇聚磺钻井液	(246)
三、甲酸盐钻井液	(250)
四、油基钻井液	(254)
五、仿油基钻井液	(256)
第三节 井下复杂情况预防及处理	(257)
一、井壁稳定钻井液技术	(257)
二、防漏堵漏钻井液技术	(264)
参考文献	(271)
第十章 深井超深井储层保护技术	(273)
第一节 天然气储层损害的评价方法	(273)
一、室内评价方法	(273)
二、矿场评价方法	(275)
三、气藏损害评价方法和装置	(277)

第二节 天然气储层伤害因素	(279)
一、气层潜在损害因素	(279)
二、气层外部损害因素	(281)
第三节 天然气储层保护的钻井完井液技术	(286)
一、储层保护对钻井液的基本要求及钻完井液类型	(287)
二、屏蔽暂堵储层保护技术	(288)
三、高酸溶防漏堵漏技术	(293)
参考文献	(302)
第十一章 深井超深井油层套管防磨技术	(303)
第一节 套管磨损机理分析	(303)
一、影响套管磨损的主要因素分析	(303)
二、套管磨损机理分析	(309)
三、套管磨损预测	(312)
第二节 套管防磨减磨技术	(315)
一、主动防磨技术	(315)
二、被动防磨技术	(316)
第三节 套管磨损评价技术	(325)
一、铁屑监测评价技术	(325)
二、测井评价技术	(328)
参考文献	(331)

第一章 深井超深井钻井技术发展现状

从我国陆地油气资源分布格局来看，东部老区作为国内石油资源主力产区，浅层和中深层的勘探程度较高，深层及超深层探明程度很低，具有很大石油资源潜力；中部地区是天然气富集区，有超过一半的天然气资源量在深部地层；西部地区是国内石油产量的主要战略接替区，但近 70% 的油气资源埋藏在深部地层，主要为天然气资源。因此，国内石油公司对于提高勘探开发效益，增强竞争力，保证国家能源安全，必须向地层深部进军，向深层要储量要产量，需要大力发展深井超深井钻井技术，开启深层油气宝库的大门。

第一节 国外深井超深井钻井技术现状

一、国外深井超深井钻井概况

目前，深井超深井钻井技术水平处于世界领先的国家有俄罗斯、美国和德国。其中美国是世界上深井钻井历史最长、工作量最大（占全球的 85% 以上）、技术水平最高的国家。1938 年，美国成功完钻第一口 4573m 深井，1949 年完钻第一口 6256m 超深井，1972 年完钻第一口 9159m 特深井，近年来每年深井钻探数量约 1000 口。德国于 1994 年成功完钻一口 9107m 特超深井（大陆科学探索井）。目前世界上最深井是位于俄罗斯联邦北部地区科拉半岛的 SG - 3 井，该井于 1970 年初开钻，1987 年完成 12262m 钻进，1991 年侧钻至井深 12869m 完钻（井底最高温度达 250℃）。据不完全统计，目前世界上已钻成 8000m 以上超深、特超深井直井 12 口，其中美国 6 口，前苏联 2 口，挪威 1 口，奥地利 1 口，原民主德国 1 口，中国 1 口^[3-6]，其中具有代表性的超深、特超深井钻井情况统计见表 1 - 1 - 1，2007 年世界主要国家或地区钻井数及总进尺见表 1 - 1 - 2。

表 1 - 1 - 1 国际上部分特超深井钻井情况统计表

国 别	井 号	井深/m	周期/d	完井年份
前苏联	SG - 3	12869	约 7665	1991
前苏联	SG - 1	9000	约 2190	1983
美 国	巴登 1 号	9159	543	1972
美 国	罗杰斯 1 号	9583	504	1974
美 国	瑟复兰奇 1 - 9	9043	1152	1983
美 国	Emma Lou2	9029		1980
德 国	KTB	9101	约 2555	1994
挪 威	Norsk hydro	9723		1994
中 国	塔深 1 井	8408	461	2006

表 1-1-2 2007 年世界主要国家或地区钻井数及总进尺

国家或地区	2007 年							2006 年	
	油井	气井	干井	暂停井	服务井	总井数	总进尺/ $\times 10^4 \text{ m}$	总井数	总进尺/ $\times 10^4 \text{ m}$
北美地区	22740	41603	5297	150	1822	71612	11696.50	73026	11669.09
美 国	16668	29573	4757	10	1230	52238	9260.32	49100	8621.73
加拿大	5766	11712	475	140	587	18680	2252.18	23239	2857.55
墨西哥	277	318	59	0	5	659	1804.43	656	185.98
其 他	29	0	6	0	0	35	4.16	31	3.83
南美地区	3615	295	190	161	446	4787	822.54	4083	752.45
委内瑞拉	1195	35	30	70	220	1550	272.13	1508	264.55
阿根廷	1174	131	32	0	112	1446	254.25	1271	256.37
巴 西	424	15	82	67	41	629	103.80	485	83.61
哥伦比亚	300	81	24	20	15	440	73.76	315	50.89
厄瓜多尔	146	0	1	1	1	149	44.20	145	43.22
秘 鲁	169	9	0	0	0	178	26.43	85	13.61
特立尼达和多巴哥	60	12	3	3	22	100	12.47	103	12.86
其 他	150	12	18	0	35	215	35.49	171	27.35
西欧地区	191	69	38	13	35	649	212.93	657	210.69
英 国						308	88.52	307	89.60
挪 威	118	15	12	4	30	179	75.43	165	66.74
丹 麦	20	6	0	0	2	28/	14.51	27	15.05
荷 兰	1	30	4	0	0	35	12.26	41	14.37
其 他	52	18	22	9	3	104	22.21	117	24.93
东欧和前苏联	271	45	35	3	5	6259	1515.07	6095	1475.84
俄罗斯						4800	1239.19	4730	1218.24
前苏联其他国家						1100	228.66	1070	219.28
罗马尼亚	237	20	11	0	2	270	31.27	200	24.28
其 他	34	25	24	3	3	89	15.93	86	17.04
非洲地区	1245	188	135	43	60	1571	393.66	1522	354.15
埃 及	300	104	50	2	12	468	109.12	403	92.15
阿尔及利亚	205	55	10	10	20	300	85.04	285	77.90
苏 丹	225	0	15	14	14	268	53.31	268	53.22
尼日利亚	99	11	13	5	3	131	36.63	143	39.29
利比亚	139	4	5	2	3	152	30.31	128	25.94
安哥拉	61	0	10	1	3	76	20.80	63	15.94
加 蓬	71	3	3	2	0	82	13.57	74	11.75

续表

国家或地区	2007 年							2006 年	
	油井	气井	干井	暂停井	服务井	总井数	总进尺/ $\times 10^4 \text{m}$	总井数	总进尺/ $\times 10^4 \text{m}$
突尼斯	21	11	10	1	1	44	12.40	27	9.06
其 他	124	0	19	3	4	150	32.57	136	28.90
中东地区	1335	209	47	34	78	1703	405.81	1649	392.04
沙 特	383	45	5	18	32	483	119.25	420	102.54
阿 曼	290	20	2	0	5	317	87.15	350	96.50
伊 朗	194	31	4	1	5	235	51.80	188	41.42
也 门	154	6	4	4	10	178	34.99	194	38.14
阿联酋	96	7	2	1	6	112	29.06	105	28.24
塔卡尔	20	66	1	0	1	88	25.35	85	24.48
科威特	60	0	1	6	6	78	18.23	73	18.19
叙利亚	50	9	6	1	10	75	17.33	70	16.43
土耳其	39	16	21	5	3	81	13.31	71	10.28
其 他	49	10	2	0	0	61	9.34	93	15.81
远东地区	15570	1600	1426	63	165	18824	5431.15	18794	5463.66
中 国	14200	850	1200	0	60	16300	3718.56	16299	3717.27
印 度	305	56	119	48	32	560	1365.50	510	1383.49
泰 国	230	183	6	2	15	436	142.36	502	163.91
印 尼	570	420	55	5	50	1100	112.32	1075	102.23
马来西亚	103	31	8	3	0	145	26.57	137	29.54
越 南	47	2	4	1	1	55	20.37	50	18.44
巴基斯坦	35	25	6	0	0	66	16.55	57	17.16
其 他	80	33	28	4	17	162	28.92	164	31.63
南太平洋	159	58	146	20	3	386	92.31	291	74.87
澳大利亚	160	56	130	0	0	346	76.13	345	77.21
新西兰	26	17	6	0	0	49	9.96	30	11.24
其 他	7	1	2	0	1	11	2.78	10	2.53
世界总计	45160	44083	7306	467	2612	105831	20566.51	106211	20411.90

资料来源：《世界石油》2008 年 9 月。

随着科技进步，新技术、新工艺、新装备和新工具的发展和应用，深井超深井钻井效率不断提高，钻井技术经济指标显著上升，近 20 年来进步最快，美国和欧洲北海地区尤为突出。

借助于完善的设计、先进的技术和装备以及严密的管理，美国深井钻得快、事故少、成本低、效益好。20 世纪 80 年代中期，美国 1 口 5000m 左右深井平均钻井周期约 90d，

5500m 左右深井钻井周期约 110d, 6000m 超深井钻井周期约 140d, 7000m 超深井钻井周期约 210 ~ 300d, 井下复杂情况所占时间为 5% ~ 15%。到 20 世纪 90 年代, 美国在复杂地质条件下成功完钻的 5 口 7500m 超深预探井, 钻井周期最短的不到 1 年, 最长的也不到 2 年^[4]。目前, 欧洲北海地区 8000m 大位移深井, 其钻井周期一般为 90d。

就深井平均单井成本而言, 美国要比世界其他地区低 40% ~ 50%。深井平均单井钻头用量由 20 世纪 80 年代初的 35 只下降到 90 年代初的 22 只, 单只钻头平均进尺达 230m, 而 1992 年世界各国(平均井深 5099m)平均单井钻头用量和单只钻头进尺分别为 26 只和 199m, 单井成本 1129 万美元, 比 1991 年的 876 万美元增长 29%^[4~5]。

前苏联深井钻井速度相对较慢, 1989 年 4000m 的开发井钻井周期 264d, 探则井为 357d; 5000m 开发井钻井周期 503d, 探井则为 654d; 6000m 开发井钻井周期 858d, 探井则为 1094d。在平均井深大致相当的情况下与美国相比, 生产井平均建井周期是美国的 4 倍, 探井则为 8 倍。12869m 特深井 SG-3 井历时十四年钻达 12000m, 1991 年完钻(含侧钻), 而 9000m 的特深井 SG-1 井历时 6 年^[3]。然而, 若不考虑地质条件的差异, 前苏联深井钻井技术对发展中国家来说, 仍处于领先地位。

二、国外深井超深井钻井技术

深井超深井钻井是一个复杂的系统工程, 其技术涉及多学科领域, 深井超深井钻井技术从整体上反映了一个国家或一个时代的工程技术综合水平。

随着科学技术的不断发展, 国外钻井技术和装备也取得了长足的发展, 主要体现在提高劳动生产率和降低劳动强度、降低消耗、提高可靠性和安全性、环保以及经济性的要求。

1. 国外深井钻井设备的发展与进步

20 世纪 80 年代中期, 国外深井钻井装备形成系列化、标准化和规范化。90 年代中期出现了交流变频驱动、液压传动的大功率绞车, 并成为发展趋势。90 年代末, 深井钻机基本采用 ACSCR-DC 电驱动钻机(交流电机效率 96%, 直流电机效率 91%, 绞车减轻 20% ~ 30%, 占地面积减少 25% ~ 40%)和顶部驱动装置(安装顶驱占钻机总数 23% 以上, 包括动力水龙头), 井口机械化、井下自动化和整机智能化水平大幅度提高。21 世纪以来, 国内外研究改进、开发创新了多种新型石油钻机, 涌现了许多新结构新技术。近年来, 为了适应浅海、海滩、沙漠和丘陵等不同地带油气藏的勘探和开发, 美国、中国、德国、法国、加拿大、意大利、墨西哥和罗马尼亚等国先后开发了各种类型的石油钻机。国内外在顶部驱动钻机、小井眼石油钻机、套管钻机、液压钻机、自动化钻机及钻机配套技术方面发展很快, 一些技术已进入实用阶段。

国外深井超深井钻机分为 6000m、7000m、8000m、9000m、10000m 和 15000m, 钻机装备先进精良^[3]。截至 2007 年底, 全世界拥有陆地石油钻机 4300 多台, 美国则是目前拥有深井钻机最多的国家, 估计世界上目前钻 9000m 以上的钻机有 90 多台, 而美国就占 80 多台, 且万米以上特超深井钻机有 8 台, 其中有 1 台钻深可达 22000m。

国外超深井钻机具有以下特点:

- ① 采用可控硅直流电机驱动, 可使钻机在较大范围内调速;
- ② 配备大功率的三缸柱塞式泥浆泵, 压力高, 排量大;
- ③ 配备大通径的转盘, 8000m 以上的钻机转盘通径为 $\phi 1257.3\text{mm}$ 。

为安全、快速、高效地钻成深井超深井, 国外正在研制大型化、自动化钻井设备:

- ① 更高功率的地面设备 号称世界上第一台输出功率为 500hp(1hp = 745.7W)的绞车由

大陆－爱姆斯科公司研制，由四台高扭矩直流电机驱动。泥浆泵的输入功率可达 2500hp。

② 自动化钻机 由于勘探和开发的环境条件和地质构造越来越恶劣，自动化钻机将具有很高的适应性、经济性、可靠性和先进性。目前美国和英国等已研制成功了 6100m 自动化较高的深井钻机，随着时间的推移，自动化钻机的用量将大量增加。自动化钻机将引入智能技术，使之成为智能化钻机。智能钻机成本高，但钻井效率高、经济效益高，是今后发展的方向。智能钻机主要用于危险性大或边远地区，在钻机上无人操作，通过卫星遥控钻井。到 2010 年，这种遥控智能钻机将会有一定发展，并取得很好的经济效益和社会效益。

③ 连续管钻机 连续管钻机采用一条很长的柔性金属软管，起下钻时连续地将软管缠绕在一个直径很大的滚筒上，中间不用拆卸钻杆，可节省起下钻时间 60%～70%。连续管钻机重量轻，占地面积小。连续管钻机钻深可达 15240m。目前世界上已有 500 多台连续管钻机，预计 2010 年可达 800 多台。

2. 国外深井超深井钻井技术

(1) 井身结构技术

对美国、法国、罗马尼亚、奥地利、沙特阿拉伯及阿联酋等国家的深井超深井钻井资料调研及分析发现，国外在深井超深井钻井中采用的套管、钻头系列的种类很多，随地区、井深、钻井目的及钻井工艺技术水平不同而不同^[7]。套管层次有三层、四层、五层、六层、七层等。套管尺寸最大达到 $\phi 914.4\text{mm}$ ，最小为 $\phi 88.9\text{mm}$ ；井眼尺寸最大到 $\phi 1066.8\text{mm}$ ，最小到 $\phi 120.7\text{mm}$ ，套管与井眼之间的间隙为 9.5～76.2mm。美国常用的井身结构见表 1-1-3，943-29R 井七开制井身结构如图 1-1-1，Binghorn1-5 井七开制井身结构如图 1-1-2，阿拉伯美国石油公司 Khuff 井八开制井身结构如图 1-1-3。

表 1-1-3 美国常用套管程序

地 区	套管/mm	井径/mm	井深/m	地 区	套管/mm	井径/mm	井深/m
西德克 萨斯 Pecos 县 (五开)	$\phi 508$	$\phi 660.4$	150	俄克拉何马州 Roger Mills 县 (五开)	$\phi 508$	$\phi 660.4$	30
	$\phi 339.7$	$\phi 444.5$	600		$\phi 339.7$	$\phi 444.5$	1350
	$\phi 273.1$	$\phi 311.15$	3300		$\phi 273.1$	$\phi 311.15$	4650
	$\phi 193.7$	$\phi 241.3$	4800(尾)		$\phi 193.7$	$\phi 241.3$	5400(尾)
	$\phi 127$	$\phi 165.1$	6600(尾)		$\phi 127$	$\phi 165.1$	6990(尾)
密西西比州 亚拉巴马井 (七开)	$\phi 762$	$\phi 914.4$	15	怀俄明州 Fremont 县 (四开)	$\phi 508$	$\phi 660.4$	600
	$\phi 508$	$\phi 660.4$	600		$\phi 339.7$	$\phi 444.5$	2100
	$\phi 355.6$	$\phi 444.5$	4200		$\phi 273.1$	$\phi 311.15$	4800
	$\phi 273.1$	$\phi 311.15$	6000		$\phi 196.9$	$\phi 241.3$	5700
	$\phi 196.9$	$\phi 241.3$	6600(尾)				
	$\phi 127$	$\phi 165.1$	6900(尾)				

国外复杂深井超深井套管、钻头系列设计具有以下特点：

① 开孔直径大，导管和表层套管尺寸大。

国外大多数深井及超深井都采用一层或两层较大尺寸的导管来封隔疏松表层，常用的导管尺寸有 $\phi 508\text{mm}$ 、 $\phi 609.6\text{mm}$ 、 $\phi 660.4\text{mm}$ 、 $\phi 762\text{mm}$ 、 $\phi 914.4\text{mm}$ 、 $\phi 1066.8\text{mm}$ 等，最大到 $\phi 1219.2\text{mm}$ 。上部采用大尺寸套管结构的优点：