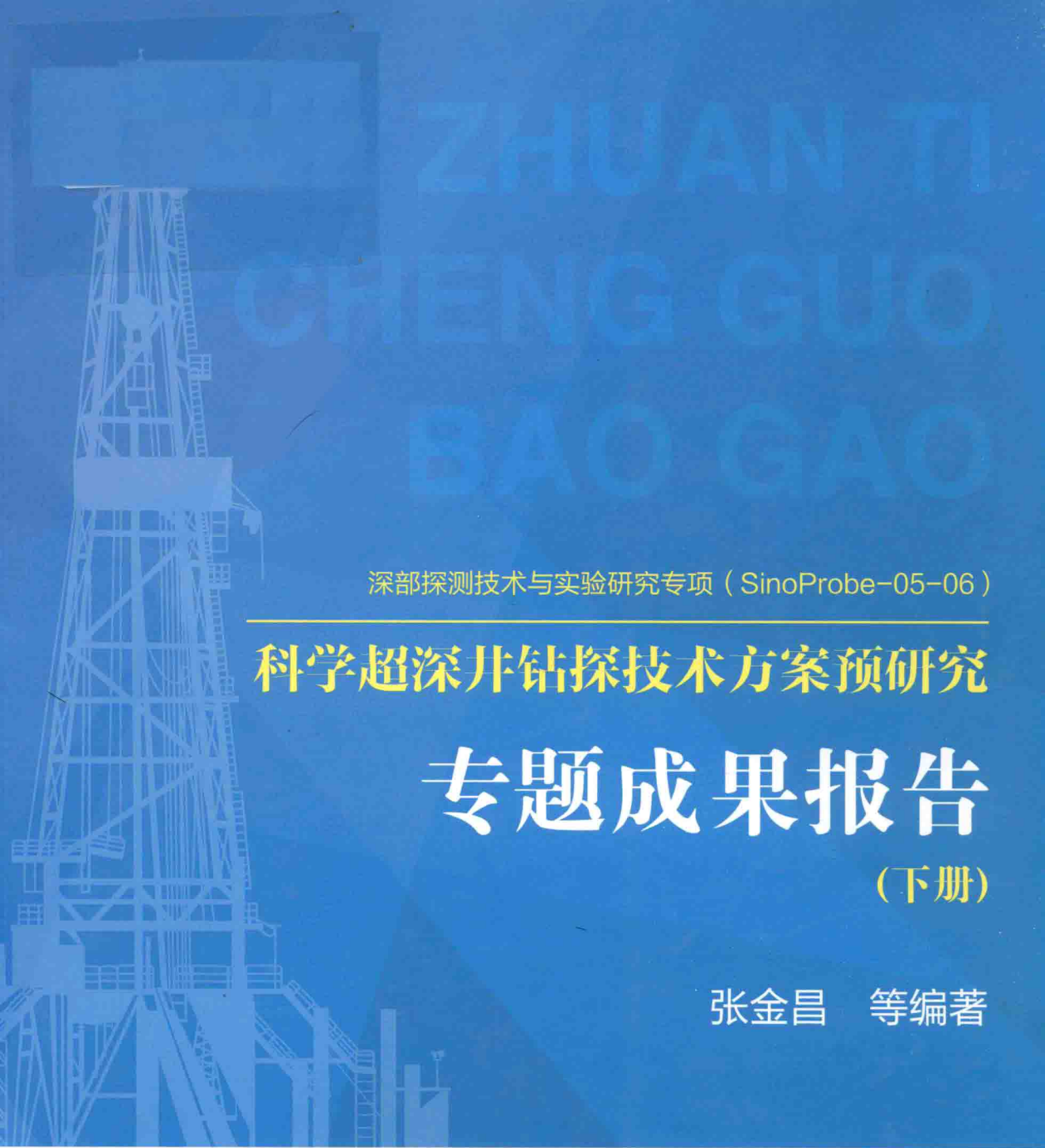




深部探测技术与实验研究专项 (SinoProbe-05-06)

科学超深井钻探技术方案预研究

专题成果报告

(下册)

张金昌 等编著

地质出版社

深部探测技术与实验研究专项 (SinoProbe-05-06)

科学超深井钻探技术方案预研究 专题成果报告

(下册)

张金昌 等编著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书是“深部探测技术与实验研究”项目中“科学超深井钻探技术方案预研究”(SinoProbe-05-06)的专题研究成果报告(下册),包括:专题10 井壁稳定性与钻孔安全的研究专题成果报告,专题11 套管与固井技术的研究专题成果报告,专题12 钻进数据采集、传输与处理技术的研究专题成果报告,专题13 事故预防与处理研究专题成果报告,专题14 科学超深井钻井设计软件研究专题成果报告,专题15 50m地震探测爆破孔钻机及快速成孔技术研究专题成果报告。

本书可供从事科学钻探等相关专业技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

科学超深井钻探技术方案预研究专题成果报告. 下册 /
张金昌等编著. —北京:地质出版社, 2016.1
ISBN 978-7-116-09630-1

I. ①科… II. ①张… III. ①超深井—钻探—专题研
究—研究报告—中国 IV. ①P634

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 018767 号

Kexue Chaoshenjing Zuantan Jishu Fang'an Yuyanjiu Zhuanti Chengguo Baogao

责任编辑:吴宁魁

责任校对:王洪强

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

电 话:(010) 66554528(邮购部);(010) 66554627(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010) 66554686

印 刷:北京地大天成印务有限公司

开 本:787mm×1092mm^{1/16}

印 张:13

字 数:320千字

版 次:2016年1月北京第1版

印 次:2016年1月北京第1次印刷

定 价:60.00元

书 号:ISBN 978-7-116-09630-1

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

出版说明

经过五年时间近 30 位钻探技术科技工作者艰难的预研究工作，“地壳探测工程”的技术准备专项“深部探测技术与实验研究”第 5 项目中的第 6 个专题“科学超深井钻探技术方案预研究”（SinoProbe-05-06）的研究报告终于完成了。“深部探测技术与实验研究”专项（2008—2012）是“地壳探测工程”的培育性研究计划。深部探测专项的核心任务和总体目标是：为“地壳探测工程”做好关键技术准备，围绕“地壳探测工程”的全面实施，解决关键探测技术难点与核心技术集成，形成对固体地球深部层圈立体探测的技术体系；在不同自然景观、复杂矿集区、含油气盆地深层、重大地质灾害区等关键地带开展科学钻探工程，进行试验、示范，形成若干深部探测实验基地；解决急迫的重大地质科学热点难题，部署实验任务；实现深部数据融合与共享，建立深部数据管理系统；积聚、培养优秀人才，形成若干技术体系的研究团队；完善“地壳探测工程”设计方案，推动国家立项。“深部探测技术与实验研究”专项的启动标志着我国入地计划拉开序幕，具有重大、深远的科学意义。

万米以上科学超深钻探工程将是人类科技历史上前所未有的开创性重大科学工程，各个环节都会遇到用常规方法难以解决的问题。必须提前对涉及的关键技术与装备开展先行研究，以攻克难题，找到解决的方法，研究先进适用的工艺技术，研制必要的新型装备。根据预研究成果，可将研究与开发方向归纳为以下 12 个重点：①超深井钻探总体技术方案；②钻探设备、井场和钻井安全设施；③特深井钻杆柱；④垂孔钻进和定向钻进技术；⑤碎岩与取心钻进技术；⑥井底动力；⑦泥浆、钻井水力学和固相控制；⑧套管与固井；⑨钻孔稳定性及井内事故预防与处理；⑩钻进参数检测、传输与管理；⑪钻杆和钻具的测试设施；⑫其他方面。

为了充分发挥预研究成果在我国科学钻探中的基础作用，为我国“地壳探测工程”，尤其是万米科钻工程的筹备和设计发挥指导作用，决定公开出版预研究系列成果报告。预研究系列成果报告由成果报告、15 个专题成果报告（上、中、下三册）和一份科普报告组成。

成果报告由前言、上篇 13000m 科学超深井钻孔施工方案、下篇科学超深井钻井设计软件研究成果报告三部分组成。

专题成果报告由上、中、下三册组成：

上册内容包括五个专题成果报告：专题 1 国内外科学超深井钻探技术调研和对比研究专题成果报告；专题 2 钻探技术总体方案及经济性研究专题成果报告；专题 3 钻探设备总体方案和主要技术参数研究专题成果报告；专题 4 钻杆柱使用深度极限研究及解决方法研究专题成果报告；专题 5 井底动力钻具的探索研究专题成果报告。

中册内容包括四个专题成果报告：专题 6 碎岩方法与工具的研究专题成果报告；专题 7 取心钻进技术及侧壁取样技术研究专题成果报告；专题 8 防止井斜、控制井身轨迹技术的研究专题成果报告；专题 9 泥浆类型选择、性能维护保障的研究专题成果报告。

下册内容包括六个专题成果报告：专题 10 井壁稳定性和钻孔安全的研究专题成果报告；专题 11 套管与固井技术的研究专题成果报告；专题 12 钻进数据采集、传输与处理技术的研究专题成果报告；专题 13 事故预防与处理研究专题成果报告；专题 14 科学超深井钻井设计软件研究专题成果报告；专题 15 50m 地震探测爆破孔钻机及快速成孔技术研究专题成果报告。

科普报告由科学钻探、近现代钻探技术发展、钻探技术与可持续发展三章组成。

预研究成果报告的出版仅作为万米科学钻探工程启动后工程设计时的参考，具体钻井工程设计、需开展的研究项目、设备、工艺技术参数选择以工程具体情况而定。

编著者

2015 年 9 月

目 录

出版说明

专题 10 井壁稳定性与钻孔安全的研究专题成果报告

第 1 章 概述	(3)
第 2 章 国内外现状及发展趋势	(5)
2.1 探索阶段	(7)
2.2 准科学发展阶段	(9)
2.3 科学发展阶段	(9)
2.4 发展趋势	(10)
第 3 章 井壁不稳定的原因分析	(11)
3.1 井壁不稳定地层的类型与井壁不稳定现象	(11)
3.2 地层组构特性、理化性能和井壁稳定性的室内评价方法	(12)
3.3 井壁不稳定的原因分析	(17)
第 4 章 原地应力对井壁稳定性的影响	(24)
4.1 地层压力及其评价方法	(24)
4.2 上覆岩层压力梯度及其拟合方法	(27)
4.3 井壁围岩受力分析	(28)
4.4 井壁稳定和钻孔安全钻井液密度窗口	(30)
第 5 章 地层温度对岩石力学性质的影响	(34)
5.1 温度对花岗岩纵波波速的影响	(34)
5.2 温度对花岗岩单轴实验力学参数的影响	(35)
5.3 温度对花岗岩三轴实验力学参数的影响	(37)
第 6 章 地层温度对井壁稳定性的影响	(42)
6.1 地层温度对钻井液密度的影响	(42)
6.2 地层温度附加应力	(44)
第 7 章 井壁稳定性预测模型的现场应用	(47)
7.1 WFSD 项目简介	(48)
7.2 龙门山地震断裂带地应力分析	(48)
7.3 地应力异常对井壁稳定的影响	(49)
第 8 章 存在的问题及工作建议	(54)
参考文献	(55)

专题 11 套管与固井技术的研究专题成果报告

前言	(59)
第 1 章 套管程序设计	(60)
第 2 章 活动套管技术	(63)
2.1 活动套管的固定设计	(64)
2.2 活动套管的套管鞋设计	(65)
2.3 活动套管防返扣设计	(66)
2.4 扶正器设计	(66)
2.5 活动套管施工工艺	(67)
第 3 章 膨胀管技术	(68)
3.1 膨胀管技术分类和应用	(68)
3.2 膨胀管技术	(70)
3.3 膨胀管技术现状与发展	(79)
3.4 膨胀管技术在超深井中的应用	(86)
第 4 章 套管检测与保护技术	(87)
4.1 套管检测	(87)
4.2 套管保护技术	(93)
第 5 章 高温固井技术	(95)
5.1 高温水泥浆体系	(95)
5.2 高温隔离液	(97)
5.3 高温固井工艺	(98)
5.4 固井质量检测	(100)

专题 12 钻进数据采集、传输与处理技术的研究专题成果报告

第 1 章 科学超深井钻探数据采集与传输技术面临的难题及成因	(103)
1.1 科学超深井钻探过程中必须采集与传输的数据	(103)
1.2 超深井钻探过程中井下数据采集与传输的方式及仪器	(105)
1.3 超深井井下的温度、压力梯度预测及其对现有技术的挑战	(109)
第 2 章 国内外现有钻进数据采集与传输技术的调研和分析结果	(112)
2.1 国内外现有井下数据采集与传输仪器的调研和分析结果	(112)
2.2 国内外现有地表数据采集与传输仪器的调研和分析结果	(114)
第 3 章 本专题科研组提出的科学超深井钻探数据采集、传输与处理技术方案	(117)
3.1 超深井钻探数据采集与传输技术的应用方案	(117)

3.2 超深井钻进数据处理的技术应用方案	(126)
参考文献	(129)

专题 13 事故预防与处理研究专题成果报告

第 1 章 研究内容	(133)
第 2 章 科学超深井施工中可能发生的孔内事故	(134)
第 3 章 科学超深井的事故预防研究	(136)
第 4 章 科学超深井孔内事故处理预案研究	(139)

专题 14 科学超深井钻井设计软件研究专题成果报告

第 1 章 国内外研发现状	(147)
1.1 国外钻井工程软件研发现状	(147)
1.2 国内钻井工程软件研发现状	(147)
第 2 章 技术方案与路线	(149)
2.1 现有研发技术调研	(149)
2.2 技术方案确定	(150)
2.3 软件功能设计	(151)
2.4 软件结构设计	(151)
第 3 章 数据库建设	(153)
3.1 基础数据库	(153)
3.2 设计信息数据库	(154)
3.3 数据库操作模块	(155)
第 4 章 软件开发	(158)
4.1 设计模块	(158)
4.2 用户辅助模块	(173)
第 5 章 系统特点	(177)

专题 15 50m 地震探测爆破孔钻机及快速钻进成孔技术研究专题成果报告

前言	(181)
第 1 章 绪论	(182)
1.1 专题概况	(182)

1.2	目的任务	(182)
1.3	指导思想与技术路线	(183)
1.4	工作情况	(184)
1.5	取得的主要成果与认识	(184)
第2章	专题任务执行情况综述	(185)
2.1	执行情况	(185)
2.2	钻机的总体方案及结构性能	(185)
2.3	钻机的基本技术参数及性能	(187)
2.4	钻机液压系统的特点	(188)
2.5	实施过程及实物工作量	(189)
第3章	专题实施技术路线和关键技术的科学性、先进性和创新性评述	(193)
3.1	实施技术路线	(193)
3.2	关键技术的科学性	(193)
3.3	先进性	(194)
3.4	创新性	(194)
第4章	项目成果其他方面情况	(195)
4.1	取得的发明专利等知识产权情况	(195)
4.2	项目成果对相关研发工作的开展以及本学科及相关学科发展的作用和影响	(195)
4.3	项目成果目前的应用、转化情况及其前景分析	(195)
4.4	项目成果的其他经济、社会效益分析与评述	(195)
4.5	项目在人才培养和队伍建设、组织管理、国际合作等方面情况	(196)
第5章	存在的问题	(197)
	结论	(198)

专题 10

井壁稳定性与钻孔安全的研究 专题成果报告

专题编号: SinoProbe-05-06-10 (201011063-10)

工作起止年限: 2010—2012 年

专题负责人: 张培丰 刘宝林

报告主编: 张培丰 刘宝林

提交时间: 2015 年 07 月 20 日

提交单位: 北京探矿工程研究所

中国地质大学(北京)

课题名称: 科学超深井钻探技术方案预研究

课题承担单位: 中国地质科学院勘探技术研究所

第 1 章 概 述

科学超深井与其他钻井的区别在于深部岩石所处于高地应力、高地温、高地层压力的“三高”环境，使深部岩体的组织结构、基本行为特征和工程响应均发生根本性变化，是导致超深井事故出现多发性和突发性的根本原因所在。

井壁稳定问题包括钻井过程中的井壁坍塌或缩径、地层破裂或压裂两种基本类型，是所有钻井工程所遇到的普遍性问题。井壁岩石失稳，其实质就是井壁岩石所受的应力超过它在井眼状态下的强度，钻井液的侵蚀作用减弱岩石的强度，同时产生的水化应力改变岩石的应力状态。当井内钻井液柱压力过低时，作用在井壁上的最大主应力与最小主应力差超过该处岩石的剪切强度，井壁岩石发生破坏，对于脆性岩石井壁发生崩落现象，对于塑性岩石井壁发生缩径；当井内钻井液密度过大使岩石所受的周向应力超过岩石的拉伸强度而造成地层破裂。

造成井壁失稳的因素很多，主要包括地质因素和工程因素两个方面。地质因素主要有：地质构造类型和原地应力（大小、方向及非均匀性）、地层的岩性和产状、含黏土矿物的类型、弱面的存在及其倾角、层面的胶结情况、地层强度、裂隙节理的发育情况、孔隙度、渗透性及孔隙中的流体压力等。工程因素主要包括：钻井液的性能（失水、黏度、流变性、密度）、钻井液的成分与地层岩石化学作用的强弱（水化、膨胀作用）、井周钻井液侵入带的深度和范围、井径大小、井眼裸露时间、钻井液的环空返速、对井壁的冲蚀作用、循环动压力和起下钻的波动压力、井眼轨迹的形状、钻柱对井壁的摩擦和碰撞等。对于科学超深井钻探来说，热膨胀对井壁稳定性的影响则不能忽略，有文献（刘佑荣等，1999）报道：对中硬岩石，温度每增加 1°C 则产生 0.4MPa 的温差应力；对坚硬岩石，温度每增加 1°C 则产生 1.0MPa 的温差应力。对于 13000m 深的科学超深井，由于取心作业，钻井液反复循环及停止循环，井壁温度变化预计超过 50°C ，在井壁上有可能产生的温差应力将超过 50MPa 。

另外，套管柱设计时，套管额定强度主要依据常温材料性能来确定的。在温度较高时，由于材料性能发生改变，屈服强度、抗拉强度、弹性模量和延伸率等参数也会变化，如果仍以常温数据设计，安全系数必然降低。目前，没有详细的套管材料屈服强度与温度之间关系的数据，国外文献取温度每升高 1°C ，屈服强度降低值为 20°C 时屈服强度的 0.0544% 。例如：令 20°C 时屈服强度为 1， 385°C 时屈服强度为：

$$1 - 0.0544\% \times (385 - 20) = 0.80144$$

也就是套管在 385°C 时的屈服强度仅是其 20°C 的 80.144% 。由此可见，在高温条件下，套管材料屈服强度的降低程度，应得到套管设计人员的高度重视。

对科学超深井来说，钻井液循环温度高，取心钻具的环空间隙较小，起下钻对井壁产生的波动压力（黏滞波压力和惯性波压力）大，井壁稳定问题更为突出。井喷、井漏、地

层的坍塌，钻具的黏附，固井不返水泥浆等许多井内问题都是由于没有掌握井壁稳定状况，导致措施失当而引起的。此外，井壁稳定性问题还涉及套管程序的设计、井口装置的选择、钻井液措施和固井方法的选择。所以，井壁稳定性问题是科学超深井钻探施工的关键问题之一。

针对沉积地层，中国石油天然气集团公司将“复杂地层条件下深井超深井钻井技术研究”列为“九五”、“十五”重大科技工程项目之一，并根据不同区域深井超深井的钻井技术难点设置了包括“钻前地层压力与井壁稳定预测”在内的5个研究课题。这一项目成果对我国山前构造等复杂地层条件下5000~6000m深井优快钻井及加快深部油气勘探开发步伐具有十分重要的作用。然而，我国已实施的科学钻探最深的钻孔为CCSD-1井，完井深度5158m；油气井最深的是塔深1井，完井深度8408m，超过7000m的深井仅有10余口，与国外均有很大的差距。科学超深井所钻地层已超出沉积岩的深度范畴，大多属于结晶岩。对于结晶岩地层原地应力状态和地层力学参数的研究滞后于沉积岩，因此，结晶岩地层井壁稳定性钻前预测以及当前钻头处地层的井壁稳定性实时评价研究，是我国实施科学超深井钻探急需解决的理论和工程难题之一。

本专题的研究内容：

- 1) 详细调研深孔条件下井壁稳定性和钻孔安全方面的研究应用现状；
- 2) 研究探讨深孔条件下井壁围岩应力应变与地应力状态、温度场、孔隙流体、钻井液压力等关系，初步建立相应模型；
- 3) 研究探讨深孔条件下钻井液与井壁围岩的物理化学作用机理，初步建立化学-力学效应关系模型；
- 4) 基于微平面滑移理论，构造岩石微观-宏观的本构模型，借助于有限元方法开展井壁的稳定性的分析，初步编制数值计算分析软件；
- 5) 提出可行的井壁稳定性试验研究方案。

通过本专题的研究，提出在给定钻井液体系下为保持科学超深井井壁安全所需的合理钻井液密度，建立钻井安全钻井液当量密度窗口，为科学超深井井身结构、钻井工艺和钻井液设计提供依据。

本专题取得的主要成果：

- 1) 完成国内外井壁稳定性和钻孔安全技术研究现状和发展趋势的调研；
- 2) 初步完成了井壁稳定性实验研究；
- 3) 建立了钻井液密度和井底压力随温度变化模型；
- 4) 建立了区域地层坍塌压力、地层破裂压力梯度曲线；
- 5) 建立了现场随钻实时检测地层坍塌压力、地层破裂压力的简易方法——钻井液密度微调法；
- 6) 发表论文4篇；
- 7) 培养研究生2名。

第 2 章 国内外现状及发展趋势

目前, 钻井深度超过万米的超深井是前苏联在科拉半岛钻成的 SG-3 井, 完井深度为 12261m, 1991 年第二次侧钻至井深 12869m。深度超过 9000m 的超深井有 7 口, 美国 4 口 (罗杰斯 1 井 9583m、巴登 1 井 9159m、瑟复兰奇 1-9 井 9043m、Emma Lou 2 井 9029m), 前苏联 2 口 (SG-3 井 12869m、SG-1 井超过 9000m), 德国 1 口 (KTB 井 9101m)。

科学超深井钻探最突出的技术问题是地温和压力, 高温地层不仅带来钻井工具、材料的使用温度问题, 更主要的是井壁稳定问题。德国 KTB 科学钻探主孔设计深度 14000m, 因井底温度高达 280℃, 岩层过陡, 地层应力过大, 实际完钻深度仅为 9101m。

依据美国石油学会 (API) 《API 推荐实践 10B——固井材料试验推荐实践 (第 22 版)》的推理, 地温梯度 3℃/100m, 则 13000m 井底地层温度为 400~415℃, 尾管挤水泥温度 410.53℃, 井底围岩温度和泥浆循环温度的变化对井壁稳定性和钻孔安全的影响必将是超深科学钻探所面临的巨大挑战。

表 2.1 列出全球地温超过 300℃ 的钻孔, 其中温度最高的是日本葛根田 WD-1A 勘探井, 井底温度达到 500℃ (Ikeuchi et al., 1998)。WD-1A 井设计井深 4000m, 实钻至 2550m, 地温达到 350℃; 在钻进至 3451m 以后, 由于地温急剧升高, 钻井液凝胶化; 钻至 3729m 时地温达到 500℃, 出于安全考虑停钻。在井深 3500m 处, 泵入 40℃ 的钻井液, 井底钻井液温度达到 170℃; 6.5h 后, 井底钻井液温度 280℃; 83h 后, 井底钻井液温度 420℃。

表 2.1 地温超过 300℃ 的钻孔

国别	地点	井深/m	温度/℃
中国	西藏羊八井	2006	329
美国	Fenden Hill	4660	320
	Saltonlake	3200	353
日本	鹿儿岛	2505	373
	葛根田	3729	500
	秋田县	2486	311
意大利	Naples	3046	419
	拉德瑞罗	4092	380
冰岛	Namafrall	2048	310
	Krafla	1724	386
	Krafla (IDDP-1)	5000 (项目进行中)	预计 550

2005 年，冰岛 IDDP - 1 井获得国际大陆科学钻探组织（International Continental Scientific Drilling Program，简称 ICDP）立项，设置 41 个研究项目，由 8 个国家 51 个研究团队组成项目组，目的是通过钻探开采超临界状态（压力 22.12MPa、温度 374.15℃）的地热流体，以改善地热能发电的经济性，原计划于 2009 年 7 月完钻。IDDP - 1 井位于 Krafla 地热田，1975 年—1984 年间，该地区施工了多口地热井，事故频繁，其中距 IDDP - 1 井 300m 的 KJ - 39 井深度 1724m，井底温度达到 386℃。原计划 2008 年 8 月，IDDP - 1 井钻至 2400m，下入 $\Phi 339.7\text{mm}$ 套管。但钻至 2103m 深度，多次发生井内事故，并 3 次侧钻（图 2.1 所示），不得已将 $\Phi 339.7\text{mm}$ 套管下到 1958m。目前，该项目进展缓慢（图 2.2）。

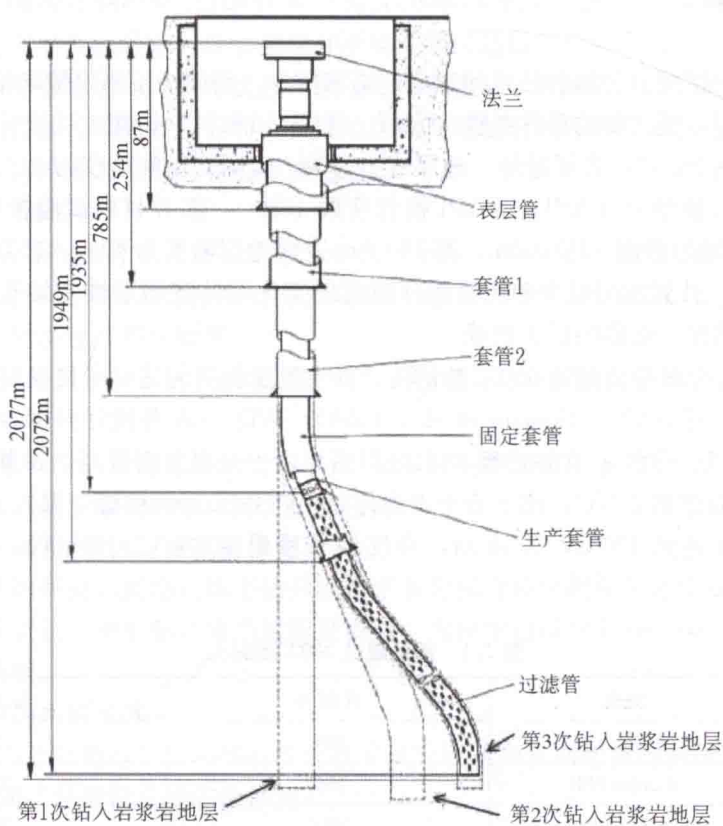


图 2.1 IDDP - 1 井钻井结构图

1993 年，我国羊八井施工的 ZK4002 孔，完井深度 2006.8m，测得井底温度 329℃，因施工工艺和技术手段等原因，导致热储层裂隙被高温固化的泥皮堵塞，未获得连续的热流体。

据不完全统计（杨龙，2003），我国深探井钻井井下复杂和事故多（时效超过 10%）、周期长（均超过 2 年），包括圣科 1 井、英科 1 井、克参 1 井、东秋 5 井、崖城 13 - 1 - 3 井、郝科 1 井等 10 余口深探井或深井发生了严重的套管磨损问题及破裂或挤毁事故。塔

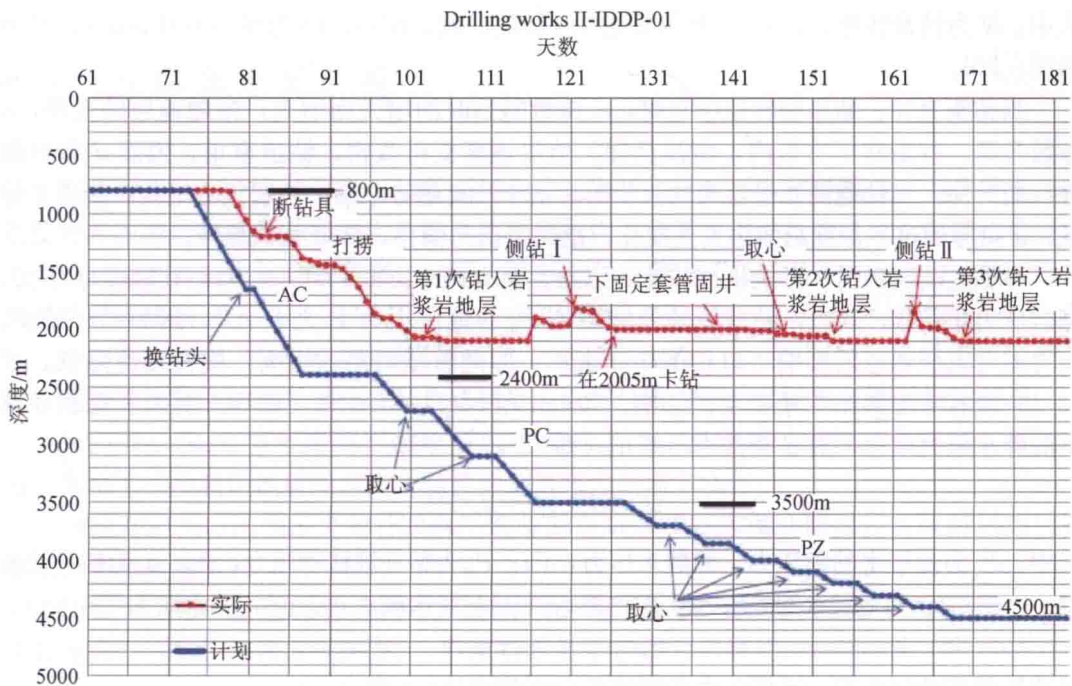


图 2.2 IDDP-1 井钻井施工进度

里木近几年已发生多起套管磨损破裂和挤毁事故，如阳霞 1 井因 244.5mm SM110TT 套管多处严重磨损，在用清水替换管内钻井液时造成套管挤毁，最后该井报废，直接经济损失将近 4000 万元。

在井壁稳定性问题中，地层压力（Formation Pressure）及其控制问题，首先受到国内外钻井界的极大重视，对地层压力的形成机理、预测、监视和测试方法，地层破裂理论和现场测试，压力控制理论和工艺，都做了大量的研究，研制了许多专用的仪器和设备。

一般来说，井壁稳定性技术的发展分为 3 个阶段：①探索阶段——以地层压力为主的经验性定性分析；②准科学发展阶段——以统计学为基础的地应力定量化数学描述；③科学发展阶段——钻井地质环境因素评价及钻前井壁稳定性预测技术的应用。

2.1 探索阶段

地层压力的研究始于 20 世纪 60 年代，1966 年，壳牌石油公司的 Jordan 和 Shirley (1996) 在对大量钻井、录井数据统计中发现，机械转速曲线可以用来检查压力异常地层。但机械转速受钻井工艺和钻井参数的影响比较大，为了排除这些因素的干扰，Jordan 等引入了 d 指数概念，其表达式为：

$$d = \frac{\lg\left(0.0547 \frac{R}{N}\right)}{\lg\left(0.0684 \frac{P}{D_b}\right)} \tag{2.1}$$

式中： N 为转盘转速， r/min ； R 为钻进 $1m$ 所需时间， h/m ； D_b 为钻头直径， mm ； P 为钻压， kN 。

当钻头直径、钻压和转速一定时， d 指数随钻时的增大而增大，即随地层的变硬， d 指数升高。在正常压实带内，由浅至深，地层逐渐变得致密，钻进愈难，因而 d 指数随井深而升高。当钻遇高压过渡带的页岩时，由于压实趋势中断，地层压力增大，压力差降低， d 指数的这一深度趋势也发生变化，出现了低向偏移，即 d 指数异常。

在钻进高压带时，影响机械转速的因素主要有两个方面：其一，岩石孔隙度 φ 增大，基岩应力 σ 降低；其二，钻井液柱静液压力 P_m 与地层压力 P_f 之差 ΔP （压力差）减少。压力差对机械转速的影响可以用图 2.3 表示，即随着压力差的增大，机械转速降低。式（2.1）没有考虑到钻井液密度的影响。Rohm 和 McClendon 等（1977）引入了沉积环境下的静水压力概念，对 d 指数进行修正，即

$$d_c = d \times \frac{P_n}{P_m} = d \times \frac{\rho_n}{\rho_m} \tag{2.2}$$

式中： P_n 为地层水的静压力，即静水压力， Pa ； P_m 为钻井液柱静压力， Pa ； ρ_m 为钻井液密度， g/cm^3 ； ρ_n 为地层水的静压力当量密度， g/cm^3 ，淡水取 $1.0g/cm^3$ ，海水取 $1.07g/cm^3$ 。

1977 年，Kanagawa 对取自现场的岩样进行室内匀速加载试验时发现，岩样中由于裂纹的出现将产生一系列声信号，当加载达到岩样在地下所受的最大应力时，岩样中产生的声信号将有一个突然显著的增加，这种现象称为凯塞尔效应。通过岩石的凯塞尔效应，开始了应用声发射凯塞尔效应法测定地应力。

我国开展地层压力研究工作的起步较晚，首先取得效果的是在高温蒸汽地热田的勘探开发。1979 年，汪仲英等将地层压力梯度引入西藏羊八井地热田，建立了羊八井热田的地层压力梯度数学模式和零压面等高线图，西藏地热地质大队成功施工了数十口地热井，为西藏地热发电和地热能源利用做出了重大贡献。

油气地层的压力预测和监视，始于 1980 年。原地矿部石油海洋地质局组织了四川第一普查勘探大队和江苏第六普查勘探大队的钻井、泥浆和气测人员，开始了 d 指数预测，取得了初步成果，夏村等和陈吉永等科技人员先后发表了四川和江苏的 d 指数预测结果。

1981 年， d 指数方法和地震、声波预测方法在河南第五普查勘探大队开展，比较准确地预报了桥、白构造四口井的地层压力。

1981 年和 1982 年，东海龙 1 井和龙 2 井的随钻预测和地震、声波预测也取得成效，准确预报了龙 1 井井深 3287m 的高压异常带。根据预测结果，成功地在龙 2 井实现了压力平衡钻进，顺利安全地钻穿了多层高压油气层。这一成果的取得，极大地鼓舞了石油钻井对井壁稳定性和钻井安全的研究投入，并取得了一系列成果，大幅度降低了井内事故的发生。

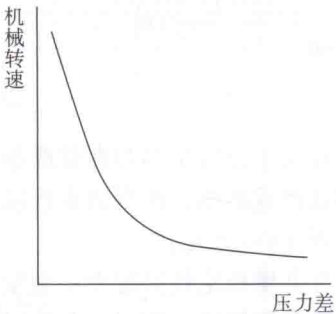


图 2.3 机械转速与压力差的关系曲线