

阎铁 李士斌 编著

LILUNSHIJIAN

深部井眼

岩石力学理论与实践

石油工业出版社

深部井眼岩石力学理论与实践

阎 铁 李士斌 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书详细阐述了深部井眼围岩应力分布状态,介绍了深部井眼岩石可钻性及力学参数的室内实验方法,给出了岩石可钻性与岩石力学参数、岩石可钻性与动态力学参数和岩石力学参数与围压之间的定量关系,建立了不同围压条件下的岩石可钻性的计算方法。最后介绍了岩石可钻性和岩石各向异性在大庆深井钻井中的应用方法,给出了应用神经网络优选钻头的新方法。

本书可供油气井工程、油田开发工程和地质钻探工程的研究人员和工程技术人员参考,也可作为油气井工程专业的本科生、研究生的教材和参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

深部井眼岩石力学理论与实践/阎铁,李士斌编著.
北京:石油工业出版社,2002.9

ISBN 7-5021-3830-7

I. 深…

II. ①阎…②李…

III. 深井-油气钻井-岩石力学

IV. TE21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 048194 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

河北省地勘局测绘院印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 7.75 印张 192 千字 印 1—500

2002 年 9 月北京第 1 版 2002 年 9 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3830-7/TE·2787

定价: 20.00 元

前 言

深部地层防斜打直问题和深部硬地层快速钻进问题是深井超深井钻井中两大技术难题，是制约深井超深井钻井发展的技术关键。深部井眼岩石力学的研究，特别是深部井眼岩石可钻性和岩石各向异性的研究是实现这两项关键技术突破的前提。只有清楚地了解和掌握地层岩石的可钻性规律，才可能有针对性地优选钻头、优化设计参数，从而提高钻井速度；只有弄清深部地层的岩石各向异性的变化规律，选择合理的钻具结构和钻进参数，才能实现深井钻井的井斜合理控制。因此，深部井眼岩石力学的研究是解决深井钻井关键技术的重要课题。

本书从深部井眼岩石力学的实验研究入手，通过岩石可钻性、岩石弹性参数、岩石硬度和塑性系数的室内实验及分析，建立了深部井眼岩石可钻性与岩石力学参数间的相关关系，得出了深部井眼岩石可钻性与岩石力学参数间的相关方程；通过深部井眼岩石可钻性的动态分析，建立了岩石可钻性与动态力学参数间的相关关系。通过围压条件下岩石力学参数的室内实验，建立了岩石力学参数与围压之间的定量关系；通过围压条件下的岩石可钻性分析，建立了在不同围压条件下的岩石可钻性的计算方法。根据这些实验结果和研究成果，应用人工神经网络技术建立了钻头优选方法，并在大庆深井钻井中得以应用，取得了较好的应用效果。当前，随着石油工业的发展，寻找深部油气资源已经迫在眉睫，深井钻井技术的发展必定会给深部油气资源的有效开发带来巨大的经济效益和社会效益，本书的出版如能为我国深井钻井技术的发展有所促进，作者将感到无比的欣慰。

本书在编写过程中，得到了中国工程院院士、哈尔滨工业大学王光远教授的帮助和指导，大庆石油学院张建群教授对本书提出了宝贵的意见，在此表示由衷的感谢。大庆钻井一公司、吉林油田钻采院、大庆石油学院钻井教研室和科研处等单位的有关同志在编写和实验以及收集资料的过程中给予了大力的支持和帮助，在此一并向他们表示感谢。

由于作者水平有限，疏漏和错误之处在所难免，敬请各位读者批评指正。

编者

2002年6月

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 基本概念	(1)
第二节 深部地层岩石的特点及深井钻井的难点	(2)
第三节 钻井岩石力学在石油钻井中的应用	(3)
第二章 钻井岩石力学在深井钻井应用的技术发展状况	(6)
第一节 深井超深井钻井技术发展状况	(6)
第二节 深井钻井岩石力学发展状况	(7)
第三节 深井钻井的关键技术和深井岩石力学的研究状况	(8)
第三章 深部井眼围岩应力分析	(11)
第一节 深部井眼围岩的原始应力状态	(11)
第二节 单元体及其斜截面上的应力状态	(16)
第三节 岩体的应力平衡微分方程和协调方程	(19)
第四节 深部直井眼围岩应力分析	(24)
第五节 深部斜井眼围岩应力分析	(30)
第四章 岩石可钻性及力学参数室内实验与静动态分析	(34)
第一节 岩石可钻性及力学参数概念	(34)
第二节 岩石可钻性及力学参数室内实验研究	(38)
第三节 岩石可钻性与岩石力学参数的相关性研究	(51)
第四节 岩石可钻性的动态分析	(53)
第五节 声波岩石可钻性的分级研究	(58)
第五章 深部井眼围压条件下岩石可钻性规律研究	(61)
第一节 围压条件下岩石力学参数的室内实验研究	(61)
第二节 围压条件下岩石可钻性计算	(74)
第三节 岩石可钻性的各向异性规律研究	(78)
第四节 应用测井资料预测深部井眼岩石可钻性	(81)
第六章 岩石可钻性在大庆深井钻头优选中的应用	(83)
第一节 大庆油田深部井眼的岩石特点	(83)
第二节 大庆深部井眼岩石可钻性和钻头资料数据库的建立	(84)
第三节 人工神经网络法优选钻头技术	(90)

第四节	大庆深井钻头类型优选结果·····	(94)
第五节	大庆深井钻头优选结果现场验证及分析·····	(95)
第七章	应用岩石各向异性分析深部井眼地层自然造斜规律·····	(97)
第一节	基本概念·····	(97)
第二节	钻头与地层相互作用分析·····	(99)
第三节	深部井眼的地层自然造斜规律研究·····	(102)
第四节	大庆深井防斜效果评价·····	(107)
参考文献	·····	(114)

第一章 绪 论

第一节 基本概念

一、钻井岩石力学参数有关概念

在石油钻井中，相关的钻井岩石力学参数主要如下：

1. 岩石弹性模量

岩石弹性模量是指岩石在单轴压缩条件下，轴向应力与轴向应变之比。对于线弹性一类岩石来说，由于应力与应变曲线为直线或近似呈直线形式，因此，此时岩石弹性模量为一常量。而对于非线性弹性类岩石，它是应力与应变曲线上任意点的斜率。

2. 岩石泊松比

岩石泊松比是指岩石在单轴压缩条件下的横向应变与轴向应变之比。一般情况下，由于岩石的横向应变和轴向应力的关系以及轴向应变和轴向应力的关系多数为曲线形式，即岩石泊松比随轴向应力的增加而增大。因此，常取应力与应变曲线的直线段作为计算依据。

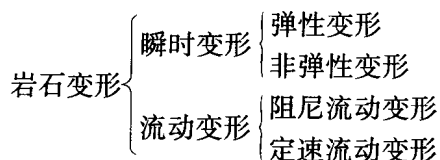
3. 岩石变形模量

岩石变形模量是指岩石在单轴压缩条件下的轴向应力与总应变之比。对于线弹性一类岩石来说，其变形模量和弹性模量是相同的；对于弹塑性或塑弹性岩石，其变形模量、弹性模量和塑性模量之间存在倒数叠加关系。

4. 岩石剪切模量

岩石剪切模量是指作用在岩石剪切面上的剪切应力与相应的剪应变之比。剪切模量是衡量岩石抗剪切能力的重要参数，岩石剪切模量越大，说明岩石越难发生剪切变形，当岩石剪切模量无穷大时，岩石就变成了刚体。

以上这些岩石力学参数都与岩石的变形有关，对于不同的岩石在不同的应力状态下，所表现出的变形状态不一样。在石油钻井中，地下岩石一般都处于三向应力状态下，再加之井底的高温高压，致使岩石的变形及相应的力学参数会发生较大的变化。实际上地下岩石在复杂的井下应力状态下，将经受着复杂的物理变化过程，有可能会产生以下变形。



二、钻井地层岩石特性参数有关概念

在石油钻井中涉及到的地层岩石特性参数主要包括以下几个：

1. 地层岩石硬度

地层岩石硬度是指地层中岩石抵抗其他物体压入的能力，也被称为岩石的抗压入强度。

它不同于岩石的强度，它更好地反映了钻井过程中岩石抵抗破碎的能力，因此得到了广泛的应用。

2. 地层原始地应力

地应力是指存在于地壳中的内应力。它是由于地壳内部的垂直运动和水平运动的力及其他因素的力而引起介质内部单位面积上的作用力。地层原始地应力是指地层未经人工开挖或扰动以前的天然应力，有人又称为原始应力或固有应力。在石油钻井中是指在钻井、油气开采等活动之前，地层中地应力的原始大小。

3. 地层岩石可钻性

地层岩石可钻性是指在一定的技术条件下地层岩石抗破碎的难易程度。岩石可钻性的概念是人们从钻井实践中总结出来的专有名词，用来说明钻井中破碎岩石的工具与岩石特性之间的关系。它是石油钻井中十分重要的参数之一。

4. 地层岩石研磨性

地层岩石研磨性是指地层中岩石磨损钻井工具的能力。在石油钻井中，随着钻头的连续不断破碎岩石，岩石也不断地磨损钻头，对于不同的地层，钻头的磨损程度不同，因此反映出它的研磨性也不同。

5. 地层岩石各向异性

地层岩石各向异性是指地层中岩石在不同方向上所反映出的岩石性能不同。在石油钻井中，常常是指不同方向上岩石的可钻性不一样。它是石油钻井中的一个重要参数，它对于钻井中的井眼轨迹的设计与控制都有十分重要的意义。

第二节 深部地层岩石的特点及深井钻井的难点

一、深部地层岩石的特点

一般深井是指完钻井深为 4500~6000m 的井；超深井是指完钻井深为 6000m 以上的井。在如此深的井眼中，井底地层岩石的温度将达到近 200℃ 左右，压力将达到 50MPa 左右，并且井下岩石处于三向应力，即处于围压状态。在这样的高温高压状态下，井下地层岩石性能将发生明显的变化。

1. 井底围压将使岩石硬度增加，塑性增强

当井眼打开后，井底岩石受到上覆岩层压力、钻井液液柱压力和由上覆岩层压力产生的水平地应力的作用。在这些压力的作用下，就相当于井下岩石受到围压的作用。根据三轴应力实验结果，围压的作用将使岩石产生各向压缩效应，必然导致岩石的硬度增加和塑性增大，并且在一定的液柱压力下，岩石将从脆性破坏转变为塑性破坏。因此在深井钻井过程中，随着井眼的加深或钻井液密度的增大，钻进速度的下降不仅由于岩石硬度的增大，而且也由于岩石塑性的增大，特别是由于钻头齿每次与岩石的作用所破碎岩石的体积减小的缘故。

2. 井底温度将使岩石的硬度减小

根据室内三轴应力实验结果，在三轴压缩应力的情况下，岩石的强度随着温度的升高而降低，岩石的硬度也随着温度的升高而降低，但岩石的塑性并不是都增大。白云岩和粉砂岩的塑性变形能力随温度升高而降低，而石灰岩和盐岩的塑性变形能力则随温度的升高而增

大。总的说来，在高温的各向压缩条件下，大部分沉积岩石是具有塑性变形能量的，而且沉积岩石开始呈现塑性变形的压力和温度值要比硅质的火成岩和变质岩低得多。

二、深井钻井的技术难点

在石油工业中，深井、超深井技术是石油勘探和开发深部油气等资源必不可少的关键技术。随着我国西部和东部深层钻探工作的进一步加强，需要完成的深井、超深井的比例将逐步增加。目前对于复杂地质条件下深井、超深井钻井的难点主要有以下几个方面。

1. 地层压力的不确定性，给地质和工程设计造成困难

深井、超深井钻井中井身结构和分段钻井液密度是决定一口井成败的关键，决定这两者的主要因素是全井的孔隙压力和破裂压力能否提供准确。目前，深井特别是深探井地质设计中一般不提供全井破裂压力数据，提供的地层孔隙压力数据往往精度很低，难以作为施工的可靠依据。探井中地层压力的不确定性除给设计合理的井身结构和分段钻井液密度带来重大影响外，还可能在同一井段内打开两个或更多的不同压力系统，引发井下事故。

2. 地层状态和岩性的不确定性，给钻井施工带来难度

井下复杂情况主要是钻遇复杂地层而钻井措施不当引发的。同一地层的状态和岩性不同又决定着引发井下复杂情况的严重程度，如地层倾角的大小、裂缝发育的程度、泥页岩和盐膏层的长短等，井下复杂的严重程度常常随上述各因素的量级增大而增大。在探井中，上述地层的状态和岩性常常没有预告或预告不准，造成事先没有准备或准备不足的被动局面。

3. 地层分层深度和完井深度的不确定性，给准确钻达目的层带来难度

这种深度的不确定性必然会影响到各层套管的下入深度与分段钻井液密度，以及造成已经达到钻机极限负荷而仍未钻达设计目的层或者错过钻井目的层，使整个钻井施工失败。

4. 深井钻井的复杂地质条件，易于产生井下事故

钻井工程意义上的复杂地质条件是指易于引发井下复杂事故（井涌、井漏、井塌、井斜等）和井下事故（井喷、卡钻、断钻具）的各种地层。深井、超深井要钻穿多套地层，会遇到多种复杂地层，故一口井常常要预防和处理几种不同性质的井下复杂情况，再加之深井的高温高压高地应力会使井下复杂情况的严重程度加剧，这就增加了深井钻井的难度。

第三节 钻井岩石力学在石油钻井中的应用

一、优选钻头类型，提高钻井速度

在旋转钻井中，钻头是破碎地层岩石的直接工具，井眼是由钻头破碎岩石而形成的。一个井眼形成的好坏，所用的时间的长短，与所钻地层岩石的特性和钻头本身的性能有关外，更与钻头与地层的相互适应程度有关。一口井从开钻到完钻，往往要钻过十几个甚至几十个不同的地层，这些地层由于沉积年代不同、沉积环境不同，致使地层岩石的力学参数和性能都不同。即使是同一沉积环境和年代，不同的沉积物所形成的地层其岩石性能也不完全相同。如泥岩、页岩、砂岩等，它们的性能都有各自的特点。在石油钻井中，表现为地层岩石的特性参数不同，常常以地层岩石可钻性、岩石研磨性来代表。一般情况下，从上到下地层岩石的可钻性随着井深增加在减小，也就是说随着井身的增加，地层越来越难钻。对于钻头来说，一口井使用的钻头从几只、十几只到几十只不等，并且随着设计井深的增加，所用钻

头的数量也在成比例增加。一只钻头在上部地层（2000m以内）平均进尺在300~500m，在2000~4000m一只钻头平均进尺只有200m左右，在4000m以下一只钻头的进尺不到100m。当然钻头的进尺多少还与钻头的结构和类型有关，目前钻头的类型很多，按形状结构分，有刮刀钻头、牙轮钻头、PDC钻头；按照轴承和布齿分，又有滑动性和滚动性牙轮钻头；按照所适应的地层分又有硬地层钻头、中硬地层钻头及软地层钻头。

最佳的钻头与地层岩石的配合是保证钻井顺利施工，提高钻井速度的前提。在石油钻井中，钻头的选择主要依据是所钻地层的岩石可钻性等参数。因此地层岩石可钻性确定的准确与否直接决定了所使用钻头是否合理。合理的钻头选择可以保持钻进速度最高，钻头进尺最大，钻头在井底的工作时间最长，全井钻头用量最少，从而钻井成本也最低。所以，地层岩石可钻性的研究对于石油钻井中提高钻井速度，降低钻井成本具有十分重要的意义。

二、分析地层自然造斜规律，控制井眼轨迹

石油钻井中的井眼轨迹控制，就是采用合理的钻井措施（包括底部钻具组合、钻井操作参数及测控系统等），强制钻头沿预置的轨道破碎地层而定向钻进的过程。按钻进井眼轨迹的不同设计要求，井眼轨迹控制技术可分为直井防斜打直技术和定向控制技术两方面，其中定向控制又包括定向造斜与增斜、定向降斜、定向稳斜等钻进过程。在井眼轨迹控制中，测斜与计算是不可缺少的井眼轨迹监测手段。导向钻井系统的应用，使井眼轨迹控制技术发展到令人鼓舞的新水平。导向钻井系统，通常由导向马达、可遥控的井下工具、高效钻头及随钻测量系统等单元组成，具有连续控制井眼轨迹的多功能特性。

在旋转钻井中，井眼的形成是钻头与地层相互作用的结果，即钻头的钻进轨迹就是井眼轨迹。在井眼轨迹控制技术中，除专用的钻井工具及仪器外，钻头的力学特性和地层岩石力学特性是影响井眼轨迹的主要因素，也属于钻井技术领域的重要研究课题。关于钻柱力学的研究主要是研究底部钻具组合的受力与变形，不是本文的研究重点。对于地层岩石特性对井眼轨迹的影响，常常应用钻头与地层相互作用理论，分析研究地层可钻性和各向异性致使井眼轨迹偏离设计轨道的原因，研究地层的自然造斜规律，提出合理的控制措施。因为地层因素在钻井过程中是不可控因素，只能认识它、了解它，掌握它们的变化规律，以便更好地为钻井施工服务。只有更清楚地了解这些不可控因素，充分利用它们的自然变化规律，调节可控因素，实现井眼轨迹的合理控制。因此，地层岩石力学特性参数的研究特别是地层岩石各向异性和可钻性的研究是井眼轨迹控制中十分重要的内容。

三、设计钻井参数，保持井壁稳定

保持井壁稳定，一直是石油钻井中的主要问题之一。据统计，世界各国每年消耗在处理这类问题的费用高达数亿美元。因此，人们很早就开始了这一问题的研究，取得了一些研究成果。主要是从岩石力学、地球物理测井、工程录井、环空水力学和钻井液化学等方面分析井壁稳定问题，建立地层孔隙压力剖面、地层坍塌压力剖面和地层破裂压力剖面，以实现钻井液性能、井身结构及其他工程参数的优化设计。

井壁动力稳定性的研究是当前的热点。实际上，作用于井壁的泥浆柱压力是随时间变化的，应该是动力载荷。因为钻柱或套管在充满井眼的泥浆中运动都会引起压力的瞬态波动，其大小和分布规律是影响井壁稳定的主要因素之一。波动压力的计算是制定泥浆附加密度的主要依据，与地层破裂压力结合就可确定起下钻的运动速度。波动压力的实际作用使井壁受

到突然施加的瞬态载荷，井壁附近的岩石的应力状态是一种动态响应。因此，针对多孔岩石介质的井眼，分析研究在不同载荷下的动力响应及其对井壁稳定性的影响，进而制定井壁稳定的保护措施。

本书在充分调研国内外深井超深井钻井技术和深部岩石力学应用状况及发展的基础上，根据深井钻井地层岩石的特点，建立深部地层岩石围岩应力分析模型和深部地层的岩石可钻性及地层岩石各向异性计算模型与方法，研究深部地层岩石性能的变化规律，特别是深部地层的岩石可钻性和地层岩石各向异性的变化规律；根据深部地层的岩石可钻性变化规律，结合大庆地区深井地层的钻进特点，建立适合于大庆油田深井的钻头优选新方法，提高大庆油田深井的钻井速度；根据深部地层的岩石各向异性变化情况，建立地层造斜力计算模型，分析和研究大庆深部地层的自然造斜规律，提高大庆油田深井的钻井效率。

(1) 充分调研了国内外深井超深井钻井状况，分析了钻井岩石力学在深井超深井中的应用状况，讨论了深井超深井的关键技术及钻井岩石力学在深井超深井钻井中的作用，阐述了钻井岩石力学在深井超深井钻井中的发展前景。

(2) 在深部井眼钻井围岩应力分析中，首先分析了深部井眼岩石的原始应力状态，给出了原始地应力的计算方法；其次分析了深部直井眼围岩应力状态，建立了深部直井眼钻井围岩应力的基本方程，研究了深部直井眼钻井围岩应力的分布规律；再次，对深部斜井眼钻井围岩应力状态进行了详细分析，得出了深部斜井眼围岩应力的分布规律；最后，分析了温度、压力对围岩应力的影响，为研究深部井眼的岩石可钻性等参数奠定了基础。

(3) 在深部井眼岩石可钻性及力学参数实验分析中，通过深部井眼岩石可钻性、岩石弹性参数、岩石硬度和塑性系数的室内实验及分析，建立了深部井眼岩石可钻性与岩石力学参数间的相关关系，得出了深部井眼岩石可钻性与岩石力学参数间的相关方程；通过深部井眼岩石可钻性的动态分析，建立了岩石可钻性与动态力学参数间的相关关系，依此对岩石可钻性进行了分级，为深井钻井应用岩石可钻性进行钻头优选，提高钻井速度提供了依据。

(4) 在深部井眼围压条件下岩石可钻性研究中，通过围压条件下岩石力学参数的室内实验，建立了岩石力学参数与围压之间的定量关系；通过围压条件下的岩石可钻性分析，建立了在不同围压条件下的岩石可钻性的计算方法；通过岩石可钻性各向异性的研究，分析了岩石各向异性沿各不同方向的分布规律，为深部井眼的直井防斜和定向井的轨迹控制提供了依据。

(5) 在岩石可钻性的应用研究中，根据大庆油田深井钻井的实际，分析了大庆油田深部井眼的岩石特点，经过现场统计和现场试验，建立了大庆油田深部井眼岩石可钻性和钻头使用等参数的数据库，应用人工神经网络法对大庆油田深井使用的钻头进行了优选，经过大庆油田两口深井的现场实验，钻井速度提高在20%以上。

(6) 在深井岩石各向异性应用研究中，根据深部井眼钻头与岩石相互作用的分析，建立了深部井眼钻头与岩石相互作用的三维钻速方程，依此分析了岩石力学参数对井眼轨迹的影响关系；依据所建立的地层力计算新模型，分析了深部井眼的地层自然造斜规律，计算了大庆油田深部井眼的地层自然造斜能力，并将这些模型应用到深井钻井防斜中，取得了较好的防斜效果。

第二章 钻井岩石力学在深井钻井应用的技术发展状况

第一节 深井超深井钻井技术发展状况

深井一般是指完钻井深为 4500~6000m 的井；超深井是指完钻井深为 6000m 以上的井。深井、超深井技术是勘探和开发深部油气资源的必不可少的关键技术。总结我国陆上深井超深井的钻井大致可分为三个发展阶段。

1. 深井钻井起步阶段

第一阶段从 1966 年到 1975 年。1966 年我国第一口深井大庆松基 6 井（井深 4719m）的完成，标志着我国钻井工作由钻浅井和中深井发展到钻深井的阶段。在这一阶段，由于当时注意力主要集中于勘探和开发浅层和中深层油气藏等原因，只钻了 5 口深井。这是我国深井钻井的起步阶段。

这 5 口深井是依靠自己的力量，在十分艰苦的条件下完成的。所用钻机和井架是经过改造和加工的 3200m 中深井钻机和塔式井架；所用钻杆以从原苏联进口的细扣钻杆为主；上部地层所用钻头是刮刀钻头，下部地层用滚动轴承牙轮钻头；所用钻井液是细分散体系为主；钻井液化学处理剂及水泥外加剂品种很少；所用水泥车的功率只有 300 到 400 马力。因钻杆和牙轮钻头质量较差，断钻杆和掉牙轮事故经常发生，起下钻十分频繁。就是在这样技术水平较低和设备较差的情况下，继大庆的松基 6 井之后，又分别在大港、胜利和江汉油田钻成了 4 口超过 5000m 的深井，初步积累了钻深井的经验。

2. 深井和超深井钻井初步发展阶段

第二阶段从 1976 年到 1985 年。1976 年我国第一口超深井四川女基井（井深 6011m）的完成，标志着我国钻井工作由钻深井进一步发展到钻超深井。从 1976 年开始，我国每年深井的钻井数量逐年增加，由 1976 年的每年完成 3 口增加到 1985 年的 29 口。在这阶段中，除完成 170 口深井外，还完成了 10 口超深井，其中包括 2 口井深超过 7000 m 的超深井，这是我国深井超深井钻井的初步发展阶段。

在这一阶段中，钻井装备得到初步改善。从 1976 年开始，我国从罗马尼亚多次批量进口 6000m 深井钻机，总数超过 100 台，成为陆上钻深井的主力钻机。从 60 年代中期开始从德国、法国、日本进口的对焊钻杆，在这阶段中已全部替代了细扣钻杆，较好地解决了断钻杆问题。在深井钻井工艺技术方面，我们发展了优选参数钻井和近平衡钻井技术；钻井液体系由细分散发展到粗分散，开发了三磺和聚合物等钻井液体系；钻井液化学处理剂和水泥外加剂品种增多，逐步形成系列。但是，在处理深井井下复杂情况和事故方面，尚显技术不成熟，特别是井喷着火使我们付出了沉重的代价。

3. 深井超深井技术进入规模化应用阶段

第三阶段从 1986 年到现在。1986 年塔里木石油勘探开发指挥部的前身——南疆石油勘探公司成立，揭开了塔里木盆地大规模勘探的序幕。1989 年 4 月塔里木指挥部正式成立，

塔里木会战从此开始。90年代前期川东气区的勘探开发也进入高潮,使我国深井超深井钻井工作进入规模性应用阶段。在这时期中,深井超深井数量进一步增加,11年共完成深井超深井687口,其中深井654口,超深井33口,平均年完成深井超深井62口。

在这一时期,深井钻井装备进一步改善。在塔里木会战前期,对全部在用的罗马尼亚深井钻机进行了重大改造,提高了机泵效率;从1985年起,陆续从美国引进了22台5000m到9000m电驱动二手钻机;更为可喜的是90年代中期国内研制成6000m电动钻机,经试用,性能良好,达到国际90年代先进水平,具备了批量生产的条件;少数深井超深井钻机已配备了顶部驱动装置;1984年从美国引进的50台大功率(1000马力)水泥车全部投入应用,经国产化后已替代了原来的小功率水泥车,为深井固井创造了基本条件;1985年从美国引进的“三合一”牙轮钻头生产线投产,随后又从美国引进了两条PDC钻头生产线,使钻头品种和质量得到较大幅度增加和提高;并且国内已经开始生产部分规格品种的套管和钻杆。装备上的这些改善,有力地支持了塔里木和川东的深井超深井钻井工作。

第二节 深井钻井岩石力学发展状况

钻井岩石力学是以岩石力学基本理论和实验技术为基础,研究深井、定向井和水平井等安全快速钻井以及油田开发过程中遇到的地下岩体中与岩石力学有关的各种工程问题。指导钻采工程的合理设计,解决比较隐蔽的井下事故、工程灾害的预防和其他石油工程问题。主要研究内容包括:(1)油田构造的地应力、井眼周围的岩石应力分布、深部温压条件下的岩石强度、弹性模量、力学参数及流变特性等试验;进行不同工程问题(例如水力压裂、出砂、套管变形等)的模拟试验和数值计算分析。(2)深部井眼岩石强度、塑性、可钻性及研磨性等力学特性随井深的变化规律;机械、水力破岩机理与规律;破岩工具的设计与研制;机械钻速方程的建立与计算机模拟仿真。研究日的主要有两个,其一是解决深部井眼井壁稳定、套变套损的预防、水力压裂设计和油田开采中的出砂等问题;其二是根据地层岩石特性参数确定最佳的钻头适应类型、优选最佳的钻井参数,解决深部井眼的钻井速度过低的问题,从而使钻井速度和钻井效益最大化。

在钻井岩石力学参数研究方面,以研究钻井井壁岩石应力状态为重点,主要是研究井眼岩体的内力、应力和构造应力,岩体的应力分布规律,不同井眼状态的应力分布规律,井眼周围弹性和非弹性区的应力分布与变形,井眼的力学破坏准则与破坏条件,各种压力状态下的岩石应力计算,以及所钻地层的孔隙压力、破裂压力和坍塌压力的预测等。其目的是优选钻井液密度,确定合理的钻井操作参数,防止钻井过程中的井漏、井塌和井涌等复杂问题的发生,解决深井、超深井钻井中的井壁稳定问题。据统计,世界上各国每年消耗在处理井壁稳定问题上的费用高达数亿美元,因此,井壁稳定问题已经成为钻井安全保障技术中的关键技术之一。实际上人们很早就进行了这一问题的研究,只是大多数研究者都是从静力学的角度进行研究,虽然也取得了一些很有价值的成果,但这一问题一直没有彻底解决。特别是近年来,随着石油勘探领域的不断扩大,井眼不断加深,深部温压条件下的井眼应力分布及稳定问题也变得越来越突出。

在钻井岩石力学性能研究方面,主要包括钻井地层中岩石可钻性、岩石研磨性、岩石各向异性、压力特性以及岩石的各种强度研究等。岩石可钻性是石油钻井中比较重要的一个参数,也是近年来石油钻井中研究的一个热点问题。地层岩石可钻性是指在一定的钻井条件

下, 岩石抵抗破碎的能力。衡量岩石可钻性的指标很多, 如岩石可钻性级值、抗钻强度等, 选取何种指标取决于应用目的。目前研究地层岩石可钻性的方法主要有两种。一种是利用声波测井资料与室内岩石可钻性实验数据进行对比回归, 得出不同层段的岩石可钻性变化规律, 以此优选与之适应的钻头类型和预测钻进速度。此方法的优点在于将室内实验数据与现场测井资料直接相联系, 有利于直接分析岩石可钻性的变化规律。缺点是室内实验常需要很多岩心, 且实验工作量大。另一种方法是利用钻速方程根据实际钻井数据进行反求。岩石可钻性计算的准确与否取决于钻速模型的可靠程度和现场实钻资料的准确性。该方法确定的岩石可钻性实际上是个当量系数, 包含着其他因素的影响。它的优点是可以建立连续的地层岩石可钻性剖面, 不需要大量的岩心和实验。缺点是计算的准确性往往受到数据准确性的限制。这两种方法目前应用的较多, 但对于深井条件下的岩石可钻性问题尚缺乏深入的研究。特别是在石油工业发展要求向更深部要储量、要产量的今天, 石油钻井面临着深井、超深井钻井技术不断提高, 缩短深井钻井周期, 降低钻井成本, 提高钻进效益的问题, 深入研究深部井眼特别是围压条件下的岩石可钻性更有必要。

钻井地层岩石各向异性也是钻井工程中的一个重要参数, 它对于定向井、水平井的井眼轨迹控制和直井的防斜打直都具有十分重要的意义。岩石各向异性就是岩石在各方向的性能不同, 如岩石可钻性等。由于地层中岩石存在的这种可钻性差异, 在钻头受力相同的情况下, 井眼就会发生偏斜, 这就是井眼轨迹控制问题。目前研究地层岩石各向异性问题基本有两种方法。一是岩石各向异性钻速方程方法, 它是考虑地层的岩石各向异性, 根据钻头力与钻进方向的关系, 建立包括钻头力学参数、岩石各向异性等地层参数的钻速方程, 用于定向井、水平井等钻进轨迹的预测与控制。该方法必须与钻柱力学分析模型共同使用, 在用钻柱力学确定了钻头机械力之后才能应用。二是地层岩石各向异性造斜方法。该方法根据地层各向异性造斜理论, 通过等效钻头力的方法, 将地层岩石各向异性产生的造斜效果在钻头上虚拟出一个等效力, 一般称为地层造斜力, 然后按钻头合力方向设计钻进方向。该方法可以方便地分析地层各向异性对井眼偏斜产生的效果, 有利于研究地层的自然造斜规律, 帮助解决直井钻井过程中井眼防斜的问题。

综合国内外文献资料的调研与分析, 基本掌握了当前钻井技术的发展动态。目前随着石油钻井技术的不断发展, 钻井测量技术已从井下随钻测量 (MWD) 发展到随钻测井 (LWD) 技术, 以及即将出现的随钻地震 (SWD) 技术; 钻井破岩工具已从原来的刮刀钻头到两牙轮钻头、三牙轮钻头、金刚石钻头、PDC 钻头及热稳定钻头; 井眼轨迹控制已从原来的地面控制发展到井下控制和将来的井下自动控制。这些钻井新工具和新技术的出现与发展, 也带动了钻井其他领域研究的发展。目前钻井岩石力学研究基本上从常温常压的岩石力学分析向高温高压的岩石力学性能研究方向发展, 从单一的室内实验研究向室内实验和现场地球物理参数及理论分析综合方向发展。

第三节 深井钻井的关键技术和深井岩石力学的研究状况

随着石油工业的发展, 深层钻探工作将进一步加强, 需要完成的深井超深井比例将进一步增加。几年的深井钻井实践证明, 由于深井地质情况的复杂性, 如高温高压、高陡构造、难钻地层、多压力系统及不稳定页岩地层等, 给我国的深井钻井带来了很多的难度, 致使一些地区的深井超深井钻井技术尚未完全过关, 主要表现为井下复杂事故频繁, 建井周期长,

工程费用高,从而极大地阻碍了勘探开发的步伐。例如,在南海莺琼大气区的崖城 21-1 构造的钻探中,在深部地层钻遇高温高压天然气产层,地温梯度达到 $3.98^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,产层孔隙压力大于 100MPa 。原海洋石油总公司曾在该构造上先后钻两口深井,结果钻井过程中频繁发生井涌、井漏、卡钻等井下复杂情况,导致两口井报废,造成 1.6 亿元人民币的巨额损失。两年后在该构造上又钻第三口井,钻至井深 4680m 完钻,但钻井时间长达 268 天,钻井费用近 1.3 亿元人民币,代价也是相当高的。

纵观深井超深井钻井技术的发展,尚有一些关键技术问题需要进一步研究。主要包括:井眼稳定技术、井斜控制技术、高效破岩及洗井技术、固井技术、钻井与完井液技术,以及管柱优化设计技术。

1. 井眼稳定技术

井眼稳定技术是钻井安全保障技术中的关键之一,主要解决钻井过程中的井漏、井涌、井塌和卡钻等复杂问题,包括所钻地层的孔隙压力、破裂压力和坍塌压力的预测技术,井身结构的优化设计技术,以及钻井液的化学稳定技术等。在深井超深井钻井中,重点需要解决的技术问题主要是:(1) 大段泥页岩的井壁坍塌问题;(2) 软泥岩的井径缩小问题;(3) 高压盐水层、多套压力系统地层、盐岩层及膏泥岩地层的安全钻进问题;(4) 高温高压气层的井眼稳定问题等。

2. 高效防斜及轨迹控制技术

防斜打快技术主要包括地层岩石各向异性分析技术,地层自然造斜特性的评估技术,底部钻具组合分析技术,合理钻压控制技术,高效防斜钻井系统的研制等。在深井超深井钻井中,重点需要解决的技术问题主要是:(1) 深部高陡构造等易斜地层的防斜打直问题;(2) 深部坚硬地层井眼轨迹控制问题等。

3. 高效破岩与提高钻速技术

高效破岩与提高钻速技术包括水力、机械破岩工具研制及洗井设计,地层岩石可钻性的评价,破岩方式的优选,以及破岩工具(如钻头类型等)的优选技术,深部地层提高钻速技术等。在深井超深井钻井中,重点需要解决的技术问题主要是,深部井段、大尺寸井眼及难钻地层的高效快速钻进技术问题。深部井段是指 4500m 以上的井段,大尺寸井眼主要是指 $\phi 444.5\text{mm}$ 井眼,难钻地层包括硬塑性地层及其他可钻性极差的地层。

4. 深部井眼固井及完井技术

主要包括抗高温水泥浆流变性设计,固井防窜技术,套管串结构优选技术,完井方法优选技术等。在深井超深井钻井中,重点需要解决的技术问题主要是:(1) 多油层小间隙($\phi 216\text{mm}$ 井眼下 $\phi 177.8\text{mm}$ 套管, $\phi 149.2\sim 152.4\text{mm}$ 井眼下 $\phi 127\text{mm}$ 套管),尾管固井技术问题;(2) 抗复合盐、超高密度水泥浆技术问题;(3) 长封固段、高压复合盐水油气层的固井工艺问题;(4) 地层对套管的高温 and 挤压作用及套管的磨损与腐蚀问题等。

5. 深井超深井钻井液与完井液技术

主要包括分层段钻井液控制技术,高压差防卡钻井液技术,高温($150\sim 250^{\circ}\text{C}$)、高密度($>2.0\text{g}/\text{cm}^3$)钻井液体系,以及储层(特别是石炭系油层)保护技术等。在深井超深井钻井中,重点需要解决的技术问题主要是:(1) 由钻井液性能不好引起的井下复杂问题;(2) 高温高压条件下钻井液或完井液性能稳定性问题;(3) 深部储层污染和储层有效保护技术问题等。

在以上五项深井超深井钻井的关键技术中,前三项都与地层的岩石性能有关,因此,岩

石工程力学问题成为研究这三项关键技术的核心问题。在井眼稳定技术中，井眼围岩应力分析是该技术的关键基础研究工作，它是确定地层破裂压力的基础，优选钻井液密度的依据，也是保证井眼稳定的前提条件。

在高效防斜及轨迹控制技术中，地层岩石的各向异性分析和地层自然造斜特性的评估是该项技术的关键。同种钻头在同样的钻井参数条件下，钻进不同的地层，井眼偏斜的情况常常会不同，要求轨迹控制或防止井斜的措施也不同，这就是地层岩石的性能不一样所致。因此地层岩石性能特别是岩石各向异性的研究是深部地层井眼防斜和轨迹控制的技术关键。

在高效破岩与提高钻速技术中，地层中岩石性能特别是地层岩石可钻性是该技术的关键。尽管地层岩性是不可变因素，但我们必须研究它、了解它，掌握他们的变化规律，并且合理地应用这种变化规律，选择最佳的技术措施，从而实现高效率破碎岩石，提高钻井速度。

综上所述，为了解决深井超深井的关键技术问题，深部井眼的围岩应力分析、深部井眼的岩石可钻性研究和岩石各向异性研究、深层井眼防斜、钻头优选和提高深层钻井速度等将是本书的主要内容。

第三章 深部井眼围岩应力分析

第一节 深部井眼围岩的原始应力状态

地壳表面的岩石内存在着自然应力，这是众所周知的，但是天然岩石或地层中的原地应力状态如何？产生的原因和发展的趋势规律性怎样？等等，是当前石油工程和地学工程所需要解决的问题。

未经钻井的地区，或不受开发影响的仍处于自然平衡状态的地下岩层（岩体）称为原岩。原岩中天然赋存的应力称为原岩应力或初始应力，在地质力学中称之为原地应力。原岩应力在岩体空间有规律的分布状态称为原岩应力场。

就其成因来说，原岩应力是由上覆岩层重量所形成的自重应力和由构造运动所产生的构造应力组成的。而后者是由现今构造应力所组成的，它与地壳变动和活动有关。其大小主要与岩体的分布密度、裂隙的大小和方向以及断层、褶皱等构造形迹和岩体的流变性有关。对岩体工程和石油钻探工程来说，主要应考虑重力应力（或上覆岩层垂直应力）和构造应力，即可认为原岩应力是重力应力和构造应力叠加而成的。当然，影响原岩应力的因素还有地形、水的压力和热应力等，在某些特定情况和工程中是应考虑的。但是值得提及的是，就天然岩体的构造应力这一术语来说，在不同的学术领域中仍没有统一的认识，例如，有人将岩体内自然应力称为构造应力，在地质力学中称之为地应力等等。这说明人们对天然岩体中应力状态的研究还远远不够，同时与天然岩体中的应力的来源、成因和发展的理论见解有关。

当石油工程在地层或岩体内部进行钻井、开发作业时，自然会扰动岩石的自然平衡状态。使之在一定范围内（比如在井眼周围1~2倍的井径或更大的范围内）的原岩应力发生变化，变化后的应力我们称之为次生应力。次生应力直接影响着岩体的稳定性，例如在钻井过程中或裸眼采油过程中都有可能会出现各种不同的井壁岩石失稳现象。为了控制岩体的稳定，保证施工质量，必须了解和掌握岩体中次生应力的大小和方向及其分布规律，但是，次生应力是在原岩应力的基础上产生的，为此，首先应了解原岩应力。

一、地应力基本概念

原地应力：是指地层岩石未经人工开挖或扰动以前的天然应力。有人又将原地应力称为初始应力或固有应力。在油田应力场研究中，原地应力是指钻井、油气开采等活动之前，地层中地应力的原始大小。原地应力从构成上主要由重力应力、构造应力、孔隙压力等构成。从时间上分为古地应力和现今地应力。从方向上分为垂直应力和水平应力。

重力应力：地壳上部各种岩体由于受地心引力的作用所引起的应力称为重力应力或上覆岩层压力，即重力应力是由岩体自身引起的。岩体的自重作用不仅产生垂向应力，而且由于岩体的泊松效应和流变效应也会产生水平应力。瑞土地质学家海姆1878年首先提出过原岩应力的概念，他认为在岩体中的原始垂直应力与其上覆岩层的重量成正比。

构造应力：地壳形成之后，地下岩体在慢长的地质年代中，经历构造运动，有的地方隆