



中国科协第 46 次“青年科学家论坛”

论文集

地下钻掘采工程不稳定理论与控制技术



高德利 张玉卓 王家祥 主编



中国科学技术出版社

地下钻掘采工程不稳定理论与控制技术

中国科协第 46 次“青年科学家论坛”

论文集

高德利 张玉卓 王家祥 主编

中国科学技术出版社

• 北 京 •

图书在版编目 (CIP) 数据

地下钻掘采工程不稳定理论与控制技术: 中国科学技术协会第 46 次“青年科学家论坛”论文集/高德利, 张玉卓, 王家祥主编. -北京: 中国科学技术出版社, 1999.8

ISBN 7-5046-2712-7

I. 地… II. ①高… ②张… ③王… III. ①地下开采-稳定性-研究-文集②地下开采-稳定性-过程控制-研究-文集 IV. TD803-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 34116 号

中国科学技术出版社出版

北京海淀区白石桥路 32 号 邮政编码: 100081

电话: 62179148 62173865

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京地质印刷厂印刷

*

开本: 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张: 16.375 字数: 398 千字

1999 年 9 月第 1 版 1999 年 9 月第 1 次印刷

印数: 1—1000 册 定价: 40.00 元

(凡购买本社的图书, 如有缺页、倒页、
脱页者, 本社发行部负责调换)

内 容 简 介

本书是中国科协第46次“青年科学家论坛”论文集，它的活动主题即是“地下钻掘采工程不稳定理论与控制技术”。本次论坛邀请活跃在地下钻掘采工程领域科研与管理第一线并已取得突出成绩的年轻教授、研究员和高级工程师共计36人参加，共收到论文34篇，内容涉及油气钻采、煤炭开采、岩土工程及工程地质等方面的最新研究成果（或成果精选），它们在一定程度上反映了我国地下钻掘采工程领域的科技研究与发展水平，以及对地下钻掘采工程不稳定性问题的深刻认识与控制对策等。

本书可供从事地下钻掘采工程的科技工作者及高等院校有关师生阅读，也可供相关部门的管理人员参考。

高波利 题

责任编辑 屈惠英

封面设计 王铁麟

责任印制 王 沛

责任校对 王勤杰

前 言

本书收集了 34 篇学术论文,都是由出席中国科协第 46 次“青年科学家论坛”的代表们撰写的,内容涉及他们在各自的专业研究上取得的最新研究成果(或成果精选),在一定程度上反映了我国地下钻掘采工程领域的科技研究与发展水平,以及对地下钻掘采工程不稳定性问题的深刻认识与控制对策等。

地下钻井、掘进及开采(简称“地下钻掘采”),在若干具有战略或社会重要性的应用领域,是关键技术。这些应用领域主要包括:地下资源勘探与开发,矿业生产,城市基础设施建设,地下环境监测与治理,以及地球科学研究,等等,都是人们普遍关心的重大经济或社会问题。例如,地下蕴藏着丰富的可供人类利用的资源,如原煤、石油、天然气、地热、水及其他矿产资源等,都是极其宝贵的自然资源;面向 21 世纪,地下资源的可持续利用问题将更加突出,在技术、成本及环保等方面对地下钻掘采工程提出了更高的要求,也给科技工作者提出了许多新的研究课题。

在地下钻掘采过程中,人类必须与地下的自然环境打交道。这种自然环境不仅极其复杂多变,而且具有一定的隐蔽性,直接影响地下钻掘采工程的顺利进行,甚至造成巨大的经济损失和人身伤亡。例如,在我国西部,由于地面和地下条件复杂以及油气埋藏深(超过 5000 米)等原因,在深井(≥ 4500 米)钻探中经常遭遇井眼系统失稳等复杂情况,如井壁垮塌或缩径,井漏,井涌(甚至井喷),井斜,阻卡,以及储层损害等,采用常规的理论和技术往往很难驾驭这种场面,结果不仅造成了巨大的直接经济损失(数以亿计),而且严重制约了西部油气勘探开发的步伐。再例如,在煤矿开采过程中,时常遭遇冲击地压、煤及瓦斯突出、边坡滑坡及矿区地表沉陷等不稳定性引发的灾害,从而严重影响了煤炭工业的正常运营和可持续发展。因此,如何正确认识和评估地下复杂的地质环境及岩体性质,如何掌握井巷系统的失稳机理并建立有关预测模型,如何测量与控制地下钻掘采过程的稳定性,等等,都是需要长期进行探索的重大研究课题。

目前,我国有一批活跃在地下钻掘采工程领域的跨世纪青年学术带头人,他们在各自的专业研究上已经取得了突出成就。继中国科协成功地举办了数十次“青年科学家论坛”活动之后,高德利教授和张玉卓研究员发起了以“地下钻掘采工程不稳定理论与控制技术”为主题的第46次“青年科学家论坛”,并得到了地下钻掘采工程领域青年科学家们的热烈响应。根据中国石油学会、中国煤炭学会、中国地质学会和中国核学会等学术团体及有关部门或专家的推荐,本次论坛邀请活跃在地下钻掘采科技领域的36位青年科学家代表(均具有高级职称,多数具有博士学位),出席于1999年10月18日至21日在杭州举办的学术论坛活动,其主要目的是围绕“地下钻掘采工程的不稳定性与控制”问题进行深入研讨,并在一定程度上总结已经取得的高水平研究成果,展望未来的发展趋势,规划面向21世纪的科技发展战略等。这次论坛活动由石油大学高德利教授和煤炭科学研究总院张玉卓研究员担任执行主席,在“地下钻掘采工程不稳定理论与控制技术”的主题之下,主要讨论如下三个科学问题:

1. 地下地质环境和岩体性质评估理论和方法;
2. 地下井巷系统的不稳定性及其预测方法;
3. 地下钻掘采过程测量与控制技术。

同时,我们希望通过这样的学术论坛活动,增进青年科学家之间的相互了解,促进学科间的相互交叉渗透,拓宽视野,启迪思维,发掘更多的跨世纪优秀科技人才,推动地下钻掘采科技事业的不断发展。

最后,我们要特别感谢中国科协对本次活动给予的关心和支持;同时感谢中国科学技术出版社为本书的顺利出版所给予的大力支持。在筹组本次论坛活动的过程中,我们得到了石油大学(北京)和煤炭科学研究总院的热情帮助,石油大学学位办的巫荣京同志做了许多日常工作,在此一并表示衷心感谢。

高德利 张玉卓

1999年7月23日于北京

目 录

油气钻井中井眼系统的不稳定性与控制问题·····	高德利 (1)
房柱式采煤法煤柱稳定性研究进展·····	张玉卓 (10)
煤矿软岩工程技术现状及展望·····	何满潮 (16)
世界石油钻井科技发展水平与展望·····	王同良等 (24)
煤层顶板稳定性的岩性—结构分类及其应用·····	彭苏萍等 (35)
钻井压力预测的新思路·····	罗晓容 (43)
泥页岩水化反应的系统仿真模型研究·····	孟英峰等 (50)
井壁不稳定性与控制技术·····	路继臣 (61)
川东高陡构造防塌技术·····	李鹭光 (67)
莺歌海盆地异常超压系统的成因机制及其预测·····	解习农等 (74)
采动覆岩空间结构及其与应力场的动态关系探讨·····	姜福兴等 (79)
地下结构物地震土压力计算理论及方法·····	张建民 (85)
大尺寸真三轴水力压裂模拟与分析·····	陈 勉等 (93)
煤巷锚杆支护测试与设计 ·····	康红普 (100)
回采巷道锚杆支护系统可靠性分析 ·····	马云东 (106)
地下巷道断面形状优化 ·····	吕爱钟等 (116)
辽河盆地滩海地区下第三系层序地层与地质环境 ·····	朱筱敏等 (123)
从成油、成气期论塔里木盆地的油气勘探前景 ·····	卢双舫等 (132)
我国东部油田堵水理论和技术研究 ·····	姜汉桥 (140)
岩石渗透率受热变化的实验研究 ·····	吴晓东等 (146)
稠油的微生物降解及应用实验研究 ·····	张廷山等 (150)
江苏特低渗砂岩油藏裂缝预测及开发方式设计——以 W2 断块为例 ·····	娄国泉等 (156)
薄及极薄煤层低成本开采技术评价 ·····	郑行周 (163)
地下大跨度采场围岩突变失稳风险预测 ·····	高 谦 (169)
欠平衡钻井泡沫流体在井筒中的流变学计算 ·····	许树谦 (177)
井筒气液两相流流型转换机制与控制 ·····	孙宝江等 (188)
高温高压泥浆 P- ρ -T 特性及其对井眼压力系统的影响 ·····	汪海阁 (195)
网络化远程钻井多方协同指导智能系统研究 ·····	屈 展等 (203)
地面与井下的通信系统及其数学模型 ·····	刘修善等 (210)
垂直井眼中管柱屈曲与摩擦模拟实验研究 ·····	高德利等 (217)
深井、超深井套管与钻头系列分析研究 ·····	管志川等 (226)
长庆油田套损井综合治理技术 ·····	赵振峰 (233)
套管荷载分析与强度设计软件研究 ·····	高德利等 (239)
湿喷混凝土技术研究 ·····	张 明 (247)

油气钻井中井眼系统的不稳定性与控制问题^①

高德利

(石油大学)

摘要 在油气钻井过程中,井眼系统的不稳定性与控制问题,是一个关键的学术和技术课题,对工程的质量、速度和效益具有重大的直接影响,因而受到普遍重视。本文强调了这一课题的基础研究意义,详细讨论了井眼轨迹的偏斜与控制、井眼失稳与控制及实钻地层特性评估方法等问题,并阐述了有关的学术思想。最后,文中讨论了地下钻掘技术的未来发展趋势及其需要解决的核心问题。

在若干具有战略或社会重要性的应用领域,地下钻掘是关键技术^[1],如图1所示。它的主要应用领域包括:地下资源的勘探与开发,地下环境监测与治理,地球科学研究,矿业生产,以及城市基础设施建设和地下空间利用,等等。

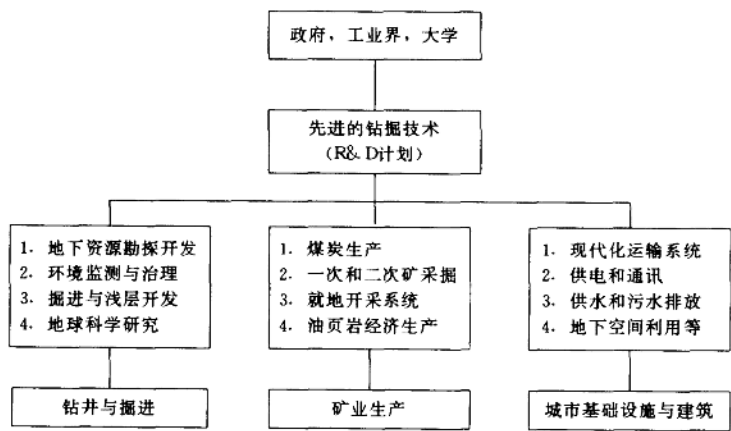


图1 地下钻掘技术的用途

在油气勘探开发中,钻井是必不可少的基本环节,具有资金和技术密集型工程特征。面向21世纪,我国地下油气资源的可持续利用问题将更加突出,再加上世界油价的持续低迷等因素,在技术、成本及环保等方面对油气钻井提出了更高的要求,也使钻井科技工作者面临许多新的挑战和技术难题,需要认真规划、研究与解决。

在钻井工程中,人类必须与地下的自然环境打交道。这种自然环境不仅极其复杂多变,而且具有一定的隐蔽性,需要长期进行探索,并找到切实有效的预测方法。同时,井下钻

^① 本课题获国家杰出青年科学基金项目(批准号:59825115)资助。

井系统受狭长井眼的约束及恶劣工况的影响,其技术性能很难适应各种钻进过程的要求,需要在机械、测量与控制等方面对井下钻井系统进行不断的改进或革新。对复杂钻井问题,目前的研究与技术现状,仍缺少深入的科学认识及有效(或高效)的技术手段,从而极大地影响了复杂钻井的速度和效益,甚至造成巨大的损失。例如,在我国西部,由于地面和地下条件复杂以及油气资源埋藏深(超过 5000 m)等原因,在深井(≥ 4500 m)钻探中经常遭遇井眼系统失稳的复杂情况,如井壁坍塌或缩径、井漏、井涌(甚至井喷)、井斜、阻卡以及储层损害等,采用常规理论和技术往往很难驾驭这种场面,结果不仅造成了巨大的直接经济损失(数以亿计),而且严重制约了西部油气勘探开发的步伐。因此,正确认识和有效地评估地下复杂的自然环境,深入探索井眼系统的失稳机理并建立有关模型,精确预测、测量与控制钻井过程的稳定性,等等,都是需要长期进行探索的重大学术和技术难题。解决这些难题,是实现优质、安全、高效及低成本钻井的关键之所在。

在油气钻井过程中,井眼轨迹的偏斜与控制、井眼失稳与控制及地层损害与控制等问题,均属于井眼系统的不稳定性与控制问题的主要研究内容。这些问题,涉及垂直井、定向井、水平井、丛式井、复杂结构井及深井、超深井的钻井质量与安全,直接影响石油工业的勘探与开发速度和效益。在国内,由于石油工业起步较晚等原因,关于这些问题的基础研究比较薄弱,从而严重制约了有关技术的突破性发展。因此,为了寻找技术上的突破口,加强这一重大课题的基础研究,十分必要和迫切。

影响井眼系统不稳定性的诸种因素可分为客观和主观两个方面^[2]。在客观方面有:地质构造类型和原地应力,地层的孔隙度、渗透率及孔隙压力,地层的岩性、产状、各向异性及矿物组分,地层的强度及弱面情况等。在主观方面有:井下钻井系统特性,钻井参数(钻压及扭矩等),钻井液的性能(失水、粘度、流变性、密度等)及其对泥页岩的水化作用,井眼的形状、方向及其裸露时间,钻井液对井壁的冲蚀作用及波动压力,钻柱与井壁的相互作用等。因此,在进行井眼系统的不稳定性与控制研究时,应综合考虑上述主客观因素的影响。

1 井眼轨迹的偏斜与控制问题

无论是钻垂直井,还是钻斜井(包括定向井、水平井及丛式井等)或复杂结构井,如何控制井眼轨迹沿设计轨道钻达地下目标,是一个复杂的学术和技术难题。

1.1 井眼轨迹的偏斜机理

在旋转钻井中,井眼的形成是钻头与地层相互作用的结果,亦即钻头的钻进轨迹便是井眼轨迹。在相互作用中,钻头的结构特性及其受力状态(即钻头的机械作用力和转角)是直接影响井眼轨迹的重要因素,后者取决于底部钻具组合的受力和变形。因此,影响钻进轨迹的主要因素,一般应包括底部钻具组合、钻头、钻井操作参数、已钻井眼轨迹及待钻地层等。其中,底部钻具组合、钻头及钻井操作参数,是可以人为控制的主观因素,而地层特性则是不可人为改变的客观因素;井眼轨迹在钻前是预测和控制的对象,在钻后则可通过测斜而获知。井眼轨迹的形成,即与主观因素有关,也受客观因素的影响。同时,已钻出的井眼轨迹又会产生反作用,它不仅对钻柱的受力和变形具有较大影响,而且对地层的各向异性钻井效应也有不可忽视的作用。由于上述诸多复杂因素的影响,在实际钻井中,

井眼轨迹的偏斜往往是不可避免的,甚至严重影响井身质量和钻井效率。

1.2 井眼轨迹控制问题

所谓井眼轨迹控制,就是采用合理措施(包括井下工具及测控系统等),强制钻头沿预置轨道破碎地层而定向钻进的过程。钻头和地层的各向异性及其相互作用特性,是影响实钻井眼轨迹的直接因素。如何充分认识、正确评估和合理利用所钻地层的各向异性钻井特性,如何正确预测计算及随钻控制钻头对地层的作用力,以及如何精确地监测实钻井眼轨迹,都是井眼轨迹控制研究中的复杂科学与技术问题。从实际需要出发,研究与开发先进的井下工具、测控仪器及相应的软件系统,是解决井眼轨迹控制问题的关键所在。

1.3 基础研究进展

通过多年不断的探索^[3,4],国内学者从研究地层的各向异性及井下钻井系统的造斜特性入手,建立了钻头与正交各向异性地层的相互作用模型,提出了有效钻力的新概念及各向异性钻井理论,并将地层按各向异性划分为12类(国外学者只提出其中的2类),分别探讨了它们对井眼轨迹漂移的影响规律。这一研究成果合理地解决了井眼轨迹漂移的认识问题与定向控制的物理准则问题,在前人研究的基础上向前迈进了一大步。为了提出定向控制的技术对策,国内学者对井下钻井系统(或称“底部钻具组合”)进行了深入研究,建立了相应的三维非线性动态控制方程,采用加权残值法、有限元法及三弯矩方程等方法,对底部钻具组合受力和变形问题进行了成功的求解,并研制了数值模拟计算软件系统。在井下控制工具和仪器研制方面也取得了一些进展。

1.4 定向钻井系统

定向钻井系统,一般由执行机构(底部钻具组合)、测量系统及控制系统三部分组成,是定向钻井技术的核心。若把钻进过程比喻成一个人在工作,那么执行机构好比是人的手,控制系统好比是人的大脑,而测量系统则好比是人的眼睛和其他的感觉器官。井眼轨迹定向控制技术的发展,总是以执行机构的不断更新、测量系统的不断完善及自动化控制程度的不断提高为基本特征。

在钻进过程中,执行机构除了破岩钻进以外,还应完成增斜、稳斜及降斜等动作。人们理想中的执行机构,是能够根据控制要求在井下自动变换工作状态,即在一口定向井中使用一套执行机构,就能够连续、稳定、快速、准确地实现增斜、稳斜及降斜的井眼轨迹控制目标。为了实现这个理想,长期以来,国内外有关专家在井下工具研制方面作出了坚持不懈的努力,并不断取得新进展。

随钻测量(measurements while drilling,简称MWD)技术的进步,对于提高导向钻井水平、降低钻井成本、保证钻井安全及加速钻井科学化和自动化进程等,均具有重要意义。MWD技术发展的主要特征为:①测量内容越来越丰富(图2),现在的MWD不仅能够测量井斜、方位及工具面等几何参数,而且能够对钻压、钻头扭矩及井下振动等力学参数进行测量,同时还能对地层的自然伽马、密度、电阻率及孔隙度等地质参数进行测量,已发展成为随钻测井(logging while drilling,简称LWD)和随钻地震(seismic While Drilling,简称SWD);②测量传感器的位置越来越靠近钻头,从而使测量滞后的状况不断得以改善;③实时数据信号无线传输技术逐渐完善。

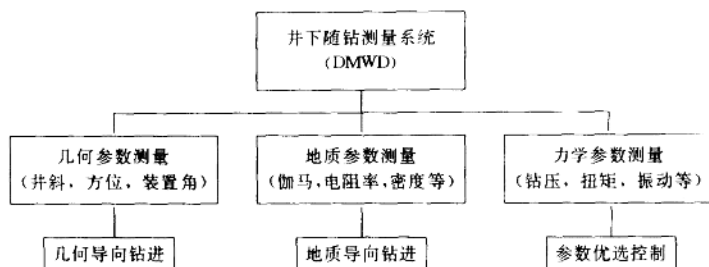


图 2 随钻测量与应用

要实现计算机智能控制,就必须在钻井系统中增加微电脑(计算机)。这种由可调造斜装置、MWD和微电脑构成的智能定象钻井系统,正是定向钻井工作者所期望的。采用这样的定向钻井系统,在下钻前就将井眼轨道设计参数存入微电脑,在钻进过程中,MWD随时测定钻头的空间位置,同时将测量结果送入微电脑,由微电脑立即完成测量计算处理,并与设计轨道进行比较,以此为据作出智能分析和决策,同时向执行机构发出指令,以校正钻进方向的偏差,控制钻头按预置井身轨道钻进。

井下钻进过程控制品质受到多种复杂因素的干扰,其中包括所钻地层的特性,所用钻头的特性及其随钻变化,底部钻具组合的力学特性及其随钻变化,水力因素和动力因素的影响,井眼空间狭小及其稳定性,等等。因此,要实现井下钻进过程的自动控制,还必须在物理模型、智能软件、执行机构及计算机测控系统等方面进行大量的多学科交叉研究。

1.5 国内存在的问题

目前,国内所采用的井眼轨迹控制方法,仍是开环人工控制,井眼轨迹监测与控制的软件和硬件条件仍不理想,在施工中不得不频繁地更换底部钻具组合及进行纠偏作业等,甚至会造成井眼轨迹“脱靶”等严重事故,这不仅影响了井身质量,而且制约了钻井速度,增加了钻井费用。在井眼轨迹控制决策研究方面,存在的主要不足包括:①过去的工作缺少系统优化研究,侧重于底部钻具组合的静力分析和地层力分析,仍未建立起综合考虑钻进目标与现有约束条件(包括测量、工具、操作及地层等)的优化控制决策模型和计算系统;②关于井下钻井系统的动力学、运动学及非线性研究,所做的工作较少,缺少必要的科学计算与分析系统;③对井下钻井系统的随钻变化特性认识不足,并缺少必要的实时分析方法和软件技术;④钻头受力预测计算精度仍不理想,国内在井下力学测量方面仍比较落后,缺少先进的随钻测量技术。

2 井眼失稳机理与控制问题

井眼失稳问题(包括涌、漏、塌、卡等)具有普遍性,给油气钻井工程带来巨大事故损失,其中井壁失稳占有较大比重。据有关资料介绍^[5],全世界石油钻井中仅井壁失稳所造成的经济损失就高达数亿美元(5亿~10亿)。因此,正确认识井眼失稳机理,研究与开发有效的井眼稳定性控制技术,对于保障钻井安全、提高钻井速度和效益,具有十分重要的实际意义。

2.1 井眼失稳机理

在钻井过程中, 如何保持井眼稳定, 是钻井安全保障的关键技术问题。为了便于讨论这个问题, 取 P_p 表示地层孔隙压力, P_f 表示地层破裂压力, P_c 表示地层坍塌压力 (使井壁岩石产生剪切破坏而造成坍塌或塑性变形的最小井内液柱压力), P_w 表示井内液柱压力。于是, 当 $P_w < P_p$ 时, 则发生井涌 (甚至引起井喷); 当 $P_w > P_f$ 时, 则发生井漏 (机理: 由于井内泥浆密度过大, 致使岩石所受的周向应力超过岩石的拉伸强度, 从而造成地层破裂。); 当 $P_w < P_c$ 时, 则发生井壁坍塌或缩径, 又称为井壁失稳, 其力学机理为: 处于地层深处的岩石, 受上覆地层压力、水平向地应力及地层孔隙压力的作用, 在井眼钻开前, 地下岩层处于应力平衡状态, 井眼钻开后, 井内泥浆柱压力取代了所钻岩层提供的对井壁的支撑, 破坏了地层的原有应力平衡, 引起井眼周围应力重新分布; 由于井内液柱压力较低, 使得井壁周围岩石所受应力强度超过岩石本身的强度而产生剪切破坏, 对于脆性地层会产生坍塌掉块, 井径扩大, 而对塑性地层, 则向井眼内产生塑性变形, 造成缩径。

2.2 压力平衡控制

影响地层孔隙压力、地层破裂压力及地层坍塌压力的因素很多, 其中地层本身的力学和理化特性以及原地应力的作用, 是不可忽略的重要客观因素。如何正确测定所钻地层的力学和理化特性以及原地应力分布, 是井眼稳定性研究中的基础问题; 如何正确评估和建立地层的三个压力剖面及其横向分布规律, 是一个复杂的科学与技术问题。从压力平衡的角度出发, 一旦掌握了所钻地层的压力特性, 就可以合理地确定井内液体的密度, 科学地控制井内液柱压力, 使井眼保持稳定性。当 $P_c \leq P_p$ 时, 则井眼稳定性要求 $P_p < P_w < P_f$; 当 $P_p < P_c$ 时, 则要求 $P_c < P_w < P_f$; 当 $P_f \leq P_c$ 时, 则井壁不塌就漏, 无法进行压力平衡控制, 这时应考虑从工程上采取特殊措施, 如防塌堵漏及调整井身结构等。

2.3 地应力状态与井壁稳定性

地应力的大小、方向及其各向异性, 对井壁的稳定性具有不可忽略的重要影响。地下任一点的地应力状态可用三个主应力分量表示, 即垂直地应力 (σ_v)、最大水平地应力 (σ_H) 及最小水平地应力 (σ_h)。三个主地应力的比值 (表征地应力的各向异性程度) 对坍塌压力和破裂压力有显著的影响, 比值越大, 坍塌压力和破裂压力的差值就越小 (亦即钻井液安全密度窗口越小), 钻井作业就越困难, 甚至出现既漏又塌的灾难性事故。不同地区, 地应力的分布规律亦不同。例如^[6]: 对于陆上多数油田和渤海湾地区, $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$; 对于大庆长垣构造 (不包括外围探区), $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$; 对于南海油田、苏北油田、新疆玛湖浅层及辽河油田双南地区等, $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ 。因此, 各地区的地应力数值应具体测定。由上述地应力各向异性对钻井液安全密度窗口的影响规律可以推论: 不同地应力分布规律, 钻进方向 (亦即井眼轨迹) 对井壁稳定性的影响规律也不同, 如表 1 所示。由此可见, 无论地应力分布规律如何, 总是沿中间地应力方向钻进相对最不稳定。

表 1 钻进方向对井壁稳定性的影响

地应力 分布规律	钻进方向	σ_v	σ_H	σ_h
$\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$		最不稳定		
$\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$			最不稳定	
$\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$				最不稳定

2.4 解决井壁失稳问题的基本思路

由于影响井壁失稳的因素较多,在实际工作中必须综合考虑技术对策。从目前的认识和实践水平分析,解决井壁失稳问题的基本方法包括:①化学方法:使钻井液体系性能与所钻地层理化特性相匹配,也可通过化学反应随钻强化固井壁;②力学方法:可确定合理泥浆密度及优化井眼方向设计;③优化井身结构设计,封固不稳定井段;④改善工艺操作,减少动力载荷作用^[6,7];⑤提高机械钻速,减少裸眼时间;⑥加强钻前预测和随钻实时测量。

3 实钻地层特性评估方法问题

实钻地层特性参数(包括地层的岩性、理化特性、地应力、压力特性、可钻性、各向异性及岩石力学参数等),是钻井优化设计与施工控制的基础数据。如何精确提取这些地层信息,是工程技术人员普遍关心的关键技术问题之一,直接关系到工程的质量和效益。在实钻地层信息提取中可利用的资料包括:钻井和录井资料、地震资料、测井资料、地质资料,岩心及测试资料等。前人的研究多限于岩心实验,尽管发挥了重要作用,但费钱费事,精度偏低,而且能够测定的地层也有限,某些地层特性参数还无法通过这样的岩心实验进行测定。从国内外发展趋势看,利用钻井、录井、地震、测井及地质等信息资料评估地层特性参数,既省钱省事,又能提高精度,关键是要建立合理的评估模型和软件系统^[8,9]。

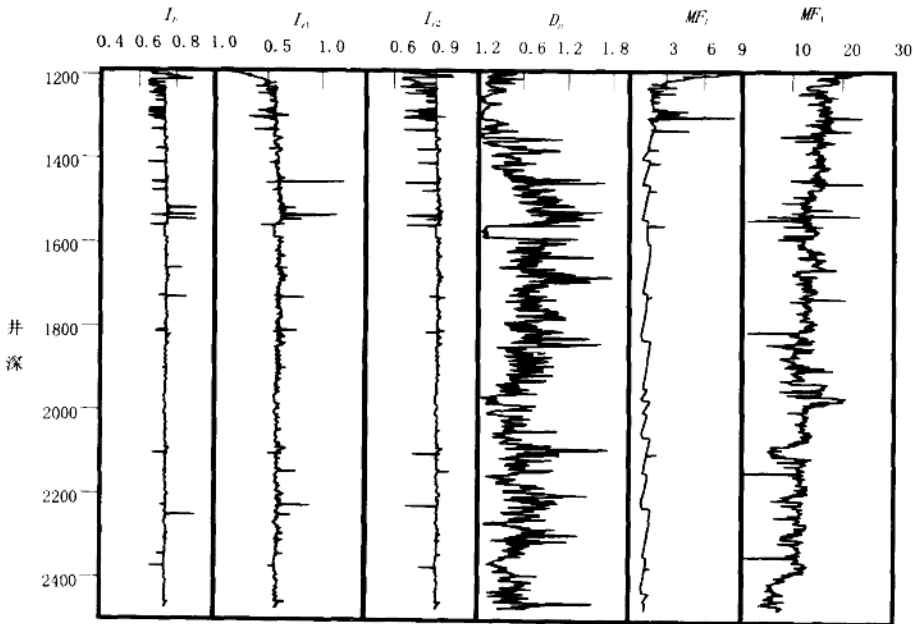


图3 某定向井 $\phi 311.15$ mm 井段约束优化反演计算结果

(计算初值: $I_p=0.5$, $I_{c1}=0.5$, $I_{c2}=0.5$, $D_p=0.1$ (m/h) /kN, $MF_i=1.0$ kN, $MF_s=50$ kN)

例1 钻头和地层各向异性钻井特性参数的优化反演计算。笔者将井下钻进过程视为一个系统进行分析研究,在钻柱力学及三维钻速方程的基础上建立了优化反演模型,并提出三种优化反演算法,即分层试探法、无约束优化法和约束优化算法。获得优化反演模型和算法之后即可建立相应的计算机处理系统(软件),进而可根据钻井的输入与响应数据优化反演计算实钻地层特性参数。实际计算和分析结果表明,约束优化反演算法不仅速度快、稳定性好,而且不会因陷入局部极小点导致结果的不唯一,因此较适合实钻地层特性参数的反演计算。因此,我们利用渤海歧口地区某定向井(S形井身剖面)的实钻数据,通过约束优化反演计算,获得了上部井段钻头和地层各向异性钻井特性参数的计算结果,如图3所示,由此表明优化反演方法的可行性,特别是对于具有一定经验的情况,利用约束优化反演方法更能满足计算的精度要求,并可保证计算结果的唯一性。在图3中, MF_A 和 MF_L 表示地层岩石分别沿钻头轴向和侧向的门限钻压; I_1 和 I_2 表示正交各向异性地层的各向异性指数; D_s 表示沿地层法向的钻进效率; I_b 表示钻头各向异性指数。

例2 地层岩石抗钻强度特性的测井评估。由于岩石的弹性力学特性与其测井响应值之间存在一定的关系,借鉴地球物理测井理论,可以建立计算模型。把地层抗钻强度特性参数作为基本参数(主要包括地层岩石的硬度、可钻性级值、塑性系数、抗压强度及抗剪强度等),可直接利用测井数据进行反演计算,再经过统计处理和聚类分析,即可建立相应井段的地层岩石抗钻强度特性综合分级剖面,为钻头合理选型和钻井参数优化设计提供科学依据。由于测井数据排除了在室内实验中脱离地下客观环境的不利影响,直接反映了实钻地层岩石的原始特性,因而所获得的评估结果其可靠性较高^[10]。

4 发展趋势

旋转钻井,在本世纪初就已经问世。迄今,它仍作为一种最主要的钻井方式,在全世界被广泛采用。综观旋转钻井的发展历程,在技术和装备上的明显进步,还是最近20多年的事情。70年代末期出现了PDC钻头,是一个明显的进步标志,随后便出现了快速发展的生动局面:进入80年代,相继出现了随钻测量(MWD)仪器,可控井下马达,以及水平井钻井技术等;进入90年代,随钻测井(LWD)和随钻地震(SWD)等先进的测量技术不断投入商业应用,大位移井、多分支井钻井技术,以及连续管技术等,得到迅速发展和应用。可以说,旋转钻井技术在最近20多年的发展日新月异。展望未来,由于人类对“健康、安全、环境”更高目标的追求,以及石油工业上游成本差的驱动(亦即效益目标的驱动),旋转钻井技术的积极发展势头在进入21世纪后必将有增无减。

制约油气钻井发展的主要技术问题,可归结为钻进的“间断”。目前造成“间断”的主要原因包括:接单根,更换钻头及底部钻具组合等,钻具失效,井眼失稳(漏、塌、喷、卡、阻),纠斜作业,非随钻测量,达不到最优决策,以及多层次井身结构等。为了减少钻进“间断”,必须不断研究和提高钻井整体技术和装备水平,尤其是井下钻井系统的研究,需要不断加强。井下钻井系统的最终发展目标,是“地下钻掘机器人”。与一般的机器人有所不同,它必须能够在地下极其复杂的地质环境及非常恶劣的工况下进行有效的工作。它前进的路(钻进的路)不仅有许多“艰难险阻”,而且是“漆黑一团”。因此,它必须能够精确探测前方和周围的地质环境及本身的状态,进而作出正确的分析和决策,并且能够自动

适应所处的工作环境,沿着“预定的路线”或要求冲向“地下目标”,完成人类赋予它实地探索地下资源并加以开采的神圣任务。这种地下钻掘机器人,是自动化、智能化钻井的核心,将是多种高新技术和产品的进一步研究和开发及其微型化集成的结果,代表着未来钻井与掘进技术的发展趋势^[11,12]。

5 结束语

(1) 油气钻井是地下油气资源勘探开发工程中的基本环节之一,具有资金和技术密集型工程特征。在钻井过程中,如何使钻头沿预置轨道钻进并保持井眼稳定性(减少或避免漏、涌、塌、卡等井下复杂和事故),亦即如何有效地控制井眼系统的稳定性,是一个非常重要的关键技术问题。为了寻找技术上的突破口,有关的基础研究应予以加强。

(2) 井眼轨迹控制技术虽然发展较快,但仍有许多研究工作要做,以便不断提高技术水平和作业效率。人们将不断追求更先进的定向钻井系统和工艺,在机械、测量与控制等方面需要不断的深入探索。

(3) 影响井眼不稳定性因素较多,对于具体情况应做具体分析研究。遇到复杂情况,应采取综合的技术对策。从发展趋势分析,在井眼的稳定性控制方面,今后应加强钻前科学预测及随钻实时监测等工作。

(4) 利用钻井、录井及测井等资料评估实钻地层的岩石特性参数,既能省钱省事,又能提高精度,应积极倡导这方面的研究工作。解决问题的技术关键在于评估模型和软件系统的建立,同时也不能忽视数据的采集与存储等配套工作。

(5) 以减少作业间断、降低作业成本及增强技术竞争能力为目标,美国等西方发达国家正在致力于研究和开发一种智能化钻井系统^[1],它是未来自动化钻井与掘进技术的核心,最终的目标将是“地下钻掘机器人”。对此,应从我国经济社会发展的高度予以充分理解和重视,并积极采取响应对策。

参 考 文 献

- [1] National Research Council; *Drilling and Excavation technologies for the Future*, NATIONAL ACADEMY PRESS, WASHINGTON, D. C. 1994
- [2] 高德利, 陈勉, 王家祥. 浅谈定向井井壁稳定性问题. 石油钻采工艺, 1997, 19 (1): 1~5
- [3] 高德利, 刘希圣, 徐秉业. 井眼轨迹控制. 山东东营市: 石油大学出版社, 1994
- [4] Gao, Deli; *Predicting and Scanning of Wellbore Trajectory in Horizontal Well Using Advanced Models*, SPE paper 29982, Proceedings of the Fifth International Conference on Petroleum Engineering Held in Beijing, November 1995, 297~308
- [5] 高德利, 等. 油气钻探新技术. 北京: 石油工业出版社, 1998
- [6] C. Gong, D. Gao, B. Xu; *Wellbore Stability Analysis*, IMMM'97 International Symposium on Microstructures and Mechanical Properties of New Engineering Materials, 6-8 August, 1997, Mie University Press, Japan
- [7] Helio Santos and Claudio Wolter; *Consequence and Relevance of Drillstring Vibration on Wellbore Stability*, SPE/IAIJC 52820, presented at the 1999 SPE/IAIJC Drilling Conference held in Amsterdam, Holland, 9-11 March 1999. Vol. 2: 25~32
- [8] I. G. Falconer, T. M. Burgess, M. C. Sheppard; *Separating Bit and lithology Effects from Drilling Mechanics Data*,

- [9] 高德利, 杨进, 张辉. 实钻地层特性评估方法的研究. 岩石力学与工程学报, 1999, 19 (1): 65~69
- [10] 杨进, 高德利, 胡开利, 郑权方. 利用测井资料进行钻头合理选型研究及其应用. 石油钻采工艺, 1998, 20 (2): 18~21
- [11] 高德利. 浅谈油气钻井学术问题、技术现状及发展趋势. 石油钻采工艺, 1999, 21 (3): 10~17
- [12] TOPIC 2: Advances in Drilling and Well Completion Technology, The Fifteenth World Petroleum Congress, Beijing, 1997

作者简介

高德利, 男, 1958 年生于山东禹城。1982 年 1 月大学毕业于华东石油学院开发系油气钻井专业, 1984 年获西南石油学院矿场机械硕士学位, 1990 年获石油大学石油工程博士学位, 1992 年作为博士后被清华大学晋升为固体力学副教授, 1993 年被石油大学特聘为教授。现任石油大学(北京)教授、博士生导师, 石油工程研究所所长, 国家“211 工程”石油大学重点学科建设项目负责人之一, 并担任中国石油学会青年工作委员会主任委员等职。主要从事“油气井工程力学、井下过程控制及实钻地层信息技术”等研究, 是国家重大科技成果“定向井、丛式井技术”(“七五”)和“石油水平井钻井成套技术”(“八五”)的主要完成者, 这两项科研成果分别于 1991 年和 1997 年获得国家科技进步一等奖; 同时, 还负责完成了多项部级重点科技项目及 3 项基金项目, 开展了海洋钻井与完井及西部深井钻探等研究。已发表论文 88 篇, 出版专著 2 部, 主编学术论文集 5 部。自 1992 年以来, 荣获首届“孙越崎科技教育基金”能源大奖、第四届中国青年科技奖及首届“清华大学优秀博士后”奖, 并获“国家教委跨世纪优秀人才基金”及“国家杰出青年科学基金”的资助, 1993 年被评为北京市高等学校(青年)学科带头人, 1995 年首批进为中国石油天然气总公司跨世纪学术、技术带头人, 1996 年首批入选国家“百千万人才工程”, 1993 年开始享受国务院颁发的政府特殊津贴。

通信地址: 北京 902 信箱(邮编: 100083)

电话: (010) 69745566 转 3702; E-mail: gdll@www.bjpeu.edu.cn 或 dlgaio@public.bta.net.cn