



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属

理论与技术前沿丛书
SERIES OF THEORETICAL AND TECHNOLOGICAL FRONTIERS OF
NONFERROUS METALS

复杂地层钻探技术

DRILLING TECHNOLOGY IN COMPLEX FORMATION

彭振斌 孙平贺 曹 函 等编著
Peng Zhenbin Sun Pinghe Cao Han



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团



国家出版基金项目

NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属理论与技术前沿丛书

复杂地层钻探技术

DRILLING TECHNOLOGY IN COMPLEX FORMATION

彭振斌 孙平贺 曹 函 彭文祥 左文贵
胡焕校 杨俊德 熊清林 匡立新 编著

Peng Zhenbin Sun Pinghe Cao Han Peng Wenxiang Zuo Wengui
Hu Huanxiao Yang Junde Xiong Qinglin Kuang Lixin



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团

图书在版编目(CIP)数据

复杂地层钻探技术/彭振斌,孙平贺,曹函等编著.

—长沙:中南大学出版社,2015.11

ISBN 978-7-5487-2066-9

I. 复... II. ①彭... ②孙... ③曹... III. 复杂地层-钻探
IV. P634

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 296696 号

复杂地层钻探技术

彭振斌 孙平贺 曹 函 等编著

☐责任编辑 刘小沛 胡业民

☐责任印制 易建国

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙鸿和印务有限公司

☐开 本 720×1000 1/16 ☐印张 20.5 ☐字数 397 千字

☐版 次 2015 年 11 月第 1 版 ☐印次 2015 年 11 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-2066-9

☐定 价 77.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容简介

Introduction

本书系统地介绍了目前钻探所遇各种复杂地层的钻进技术。全书共分5章,内容十分丰富,涵盖全面,是目前针对钻进所遇到的各种复杂地层或复杂情况阐述相关钻探工艺技术较为系统的书籍,全书包括复杂地层的分类、各种复杂地层的探测、复杂地层护壁堵漏技术以及各种复杂地层的钻探工艺技术等。

全书搜集了国内外关于复杂地层方面的最新成果或成熟的钻进工艺技术,可供高等院校师生、生产工程技术人员和技术工人参阅。

作者简介

About the Authors

彭振斌，1952年8月出生，湖南宁乡人。中南大学教授，博士生导师，地质工程学科带头人，主要从事钻探工程、地质工程相关领域的教学与科研工作。1992年获得湖南省优秀科技工作者、湖南地质系统优秀科技工作者，1993年获得国务院政府特殊津贴，1995年获得湖南省优秀科技开发先进个人，2001年获得全国宝钢优秀教师奖，2007年被评为中南大学教学名师。被英国剑桥传记中心评为1993—1994年度世界有成就的人，多年来获得厅级以上各种奖励45项。主持完成国家、省部级课题30余项，出版专著13部，公开发表国内外学术论文120余篇。荣获各类奖励50余次，其中“金刚石岩芯钻探配套技术推广应用”获得国家进步一等奖、“钻井系列堵漏剂”获湖南省教委科技进步一等奖、中国有色金属工业总公司科技进步三等奖等。参加工作以来，已培养硕士、博士生140余名，其中博士生70余名。

孙平贺，籍贯吉林松原，1982年3月出生。中南大学讲师，硕士研究生指导老师，美国环境与工程地质学家协会会员。主要从事非开挖、矿产地质及非常规能源钻进技术的教学与科研工作。2006年毕业于中国地质大学(武汉)勘查技术与工程专业，同年获准硕博连读；2009年受国家留学基金委资助赴美留学并完成博士论文，2011年获地质工程专业中美联合培养博士学位；同年进入中南大学地质资源与地质工程博士后科研流动站深造，并任教于地质工程系。先后主持、参与国家级、省部级课题12项；完成的科技成果获国际先进鉴定水平2项，省级工法2项；公开发表国内外学术论文40余篇，参编教材1部；拥有授权国内专利11项；荣获湖北省优秀博士论文、中国施工企业管理协会科技进步奖、广东省土木工程师协会科学技术奖、广东省市政行业协会科学技术奖等多项荣誉。

学术委员会

Academic Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主 任

王淀佐 中国科学院院士 中国工程院院士

委 员 (按姓氏笔画排序)

于润沧	中国工程院院士	古德生	中国工程院院士
左铁镛	中国工程院院士	刘业翔	中国工程院院士
刘宝琛	中国工程院院士	孙传尧	中国工程院院士
李东英	中国工程院院士	邱定蕃	中国工程院院士
何季麟	中国工程院院士	何继善	中国工程院院士
余永富	中国工程院院士	汪旭光	中国工程院院士
张文海	中国工程院院士	张国成	中国工程院院士
张懿	中国工程院院士	陈景	中国工程院院士
金展鹏	中国科学院院士	周克崧	中国工程院院士
周廉	中国工程院院士	钟掘	中国工程院院士
黄伯云	中国工程院院士	黄培云	中国工程院院士
屠海令	中国工程院院士	曾苏民	中国工程院院士
戴永年	中国工程院院士		

编辑出版委员会

Editorial and Publishing Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主 任

罗 涛(教授级高工 中国有色矿业集团有限公司总经理)

副主任

邱冠周(教授 国家“973”项目首席科学家)

陈春阳(教授 中南大学党委常委、副校长)

田红旗(教授 中南大学副校长)

尹飞舟(编审 湖南省新闻出版局副局长)

张 麟(教授级高工 大冶有色金属集团控股有限公司董事长)

执行副主任

王海东 王飞跃

委 员

苏仁进 文援朝 李昌佳 彭超群 谭晓萍

陈灿华 胡业民 史海燕 刘 辉 谭 平

张 曦 周 颖 汪宜晔 易建国 唐立红

李海亮

总序

Preface

当今有色金属已成为决定一个国家经济、科学技术、国防建设等发展的重要物质基础,是提升国家综合实力和保障国家安全的关键性战略资源。作为有色金属生产第一大国,我国在有色金属研究领域,特别是在复杂低品位有色金属资源的开发与利用上取得了长足进展。

我国有色金属工业近 30 年来发展迅速,产量连年来居世界首位,有色金属科技在国民经济建设和现代化国防建设中发挥着越来越重要的作用。与此同时,有色金属资源短缺与国民经济发展需求之间的矛盾也日益突出,对国外资源的依赖程度逐年增加,严重影响我国国民经济的健康发展。

随着经济的发展,已探明的优质矿产资源接近枯竭,不仅使我国面临有色金属材料总量供应严重短缺的危机,而且因为“难探、难采、难选、难冶”的复杂低品位矿石资源或二次资源逐步成为主体原料后,对传统的地质、采矿、选矿、冶金、材料、加工、环境等科学技术提出了巨大挑战。资源的低质化将会使我国有色金属工业及相关产业面临生存竞争的危机。我国有色金属工业的发展迫切需要适应我国资源特点的新理论、新技术。系统完整、水平领先和相互融合有色金属科技图书的出版,对于提高我国有色金属工业的自主创新能力,促进高效、低耗、无污染、综合利用有色金属资源的新理论与新技术的应用,确保我国有色金属产业的可持续发展,具有重大的推动作用。

作为国家出版基金资助的国家重大出版项目,《有色金属理论与技术前沿丛书》计划出版 100 种图书,涵盖材料、冶金、矿业、地学和机电等学科。丛书的作者荟萃了有色金属研究领域的院士、国家重大科研计划项目的首席科学家、长江学者特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者、全国优秀博士论文奖获得者、国家重大人才计划入选者、有色金属大型研究院所及骨干企

工作的技术人员提供参考。

编著过程中，尽量采用了国家已经颁布或即将颁布的标准、规范，尽可能地采用复杂地层分类、探测和钻进方面的最新资料和成果，由于钻进技术日新月异，肯定还有很多资料收集不到或有所遗漏，以及在编写、出版过程中出现一些差错，希望读者或相关人士将信息及时反馈给我们，以便再版时修订、补充和完善。

目录

Contents

第1章 绪论	1
1.1 复杂地层概述	1
1.2 复杂地层钻进技术的发展	2
第2章 复杂地层分类	7
2.1 国内复杂地层分类	7
2.2 复杂地层成因分析	9
2.2.1 地质因素	9
2.2.2 技术因素	11
2.2.3 其他因素	13
2.3 复杂地层分类	16
2.3.1 垮塌漏失地层	16
2.3.2 冻土地层分类	26
2.3.3 钻孔易弯曲地层分类	30
2.3.4 难取芯地层分类	34
2.3.5 坚硬地层分类	38
2.3.6 地应力分类	44
第3章 复杂地层探测技术	46
3.1 复杂地层探测设备及仪表	46
3.1.1 井径仪	46
3.1.2 电测水位计	47
3.1.3 钻孔测漏仪(钻孔流量计)	47
3.1.4 钻孔弯曲的测量仪器	53

3.1.5 钻孔摄像设备	53
3.2 复杂地层探测方法	57
3.2.1 复杂情况探测方法	57
3.2.2 成像测井系列	81
3.2.3 钻孔弯曲探测方法	85
第4章 复杂地层护壁堵漏技术	90
4.1 复杂地层概述	90
4.1.1 岩石的性质	90
4.1.2 岩层的孔隙性	90
4.1.3 地层的含水情况	91
4.2 复杂地层钻孔护壁堵漏	91
4.2.1 孔壁失稳分析	91
4.2.2 孔壁稳定的基本原理	93
4.2.3 钻孔漏失的分析	97
4.2.4 预防和治疗钻孔漏失的基本方法	101
4.2.5 孔壁坍塌分析	111
4.2.6 预防和治疗孔壁坍塌的基本方法	112
4.3 复杂地层塌孔和漏失事故处理措施	118
4.3.1 风化砂层塌孔事故处理措施	118
4.3.2 钻孔遇溶洞群坍塌事故处理	119
4.3.3 绿泥石化层掉块垮孔事故处理措施	119
4.3.4 河床卵石层塌孔事故处理措施	120
4.3.5 钻具在大溶洞内严重弯曲变形事故处理措施	122
4.3.6 钻具被溶洞阻留事故处理措施	123
4.3.7 冲积砂砾层钻进坍塌事故处理措施	124
4.3.8 无水位钻孔孔壁坍塌事故处理措施	125
4.3.9 大滚石层钻孔塌陷事故处理措施	126
4.3.10 强风化水敏地层严重塌孔事故处理措施	127
4.3.11 断层破碎带掉块垮孔事故处理措施	127
4.3.12 小口径钻孔漏失层塌孔事故处理措施	127
4.3.13 多点长孔段漏失层塌孔事故处理措施	128

4.3.14 钻孔既涌又漏还坍塌事故处理措施	129
4.4 各类复杂地层的主要问题和处理措施	130
4.4.1 复杂地层的主要问题	130
4.4.2 钻遇各类复杂地层的处理措施	130
第5章 复杂地层钻进技术	138
5.1 难取芯地层钻进技术	138
5.1.1 岩矿芯采取的基本要求	138
5.1.2 影响岩矿芯采取率及质量的因素	139
5.1.3 取芯钻具	142
5.1.4 取芯工艺	151
5.1.5 取芯方法技术	170
5.1.6 提高岩矿芯采取率及质量的措施	173
5.2 钻孔易弯曲地层钻进技术	175
5.2.1 概述	175
5.2.2 钻孔弯曲的原因	180
5.2.3 钻孔弯曲的测量	195
5.2.4 钻孔弯曲的预防与纠正	217
5.3 高地应力地层钻进技术	228
5.3.1 高地应力的成因及分布特征	228
5.3.2 高地应力地层中岩土体的受力分析	233
5.3.3 高地应力条件下钻孔变形分析	234
5.3.4 高地应力对钻进工艺的影响	239
5.3.5 高地应力条件下的钻孔稳定性分析	241
5.3.6 高地应力对套管的影响	242
5.4 冻土地层钻进技术	250
5.4.1 冻土及其基本特性	250
5.4.2 冻土的可钻性	254
5.4.3 冻土钻孔内温度分布	261
5.4.4 冻土地层钻进技术	267
5.5 坚硬地层钻进技术	277
5.5.1 金刚石钻进	277

4 / 复杂地层钻探技术

5.5.2	冲击回转钻进	284
5.5.3	贯通式潜孔锤反循环连续取芯钻探技术	296
5.5.4	牙轮钻进	300

参考文献	307
------	-----

第1章 绪论

1.1 复杂地层概述

地层是由各种造岩矿物组成的,矿物的化学成分和性质,直接影响着岩石的性质和地下水的化学成分。各种类型的岩石,其物理性质和化学性质也不同,如强度、硬度、弹性、塑性、脆性、孔隙度、含水率、水溶性、水敏性(遇水崩解、剥落)、分散性、膨胀性和离子交换吸附、水化等性能。

另外,由于内动力地质作用(如地壳运动、岩浆作用和变质作用)和外动力作用(如风化、剥蚀、堆积、成岩等作用)使地层中存在着各种空隙、裂隙和溶隙。在这些空隙中,一般都有流体(水、油、气)和某些松软的固体堆积物或化学沉积物充填其中。同时,地下水的埋藏条件和运动状态,对地层的稳定性起着极其重要的作用。

一般情况下,地层是处于相对稳定状态的,但是由于上述各种地质因素的存在,对其实施钻探时可能会破坏它原有的稳定状态,出现各种复杂的情况——钻孔坍塌、掉块、冲洗液漏失、涌水、井喷、膨胀缩径等问题,影响正常钻进。出现上述影响钻探的各种情况的地层统称为复杂地层^[1]。

上述的复杂地层和由于技术、工艺以及因钻探要求更新而产生的其他复杂情况,统称为钻探复杂条件。

在钻探过程中,破碎地层是比较常见的一类复杂地层。破碎地层通常可分为两类:一是在构造运动作用下形成的复杂破碎地层,即由地质构造运动所产生的挤压、张拉、剪切等作用,使岩层产生节理、裂隙、裂缝、断层和片理,其中坚硬的脆性岩石受构造力的剧烈作用最容易形成复杂破碎地层。二是由外力地质作用所形成的复杂破碎地层,即风化层、河流冲积层、洪积层、风积层。岩层经风化作用变为岩性较松散、胶结不良的风化层,而冲积、洪积、风积作用形成的各种沉积层一般含有黏土、流砂、卵石、砾石、漂石,从而形成更为复杂的地层。由于在破碎地层中,碎块状岩石存在大小不均、胶结性差、结构松散、换层频繁、软硬悬殊、颗粒级配悬殊等特点,所以在钻进过程中碎块不能稳定受力,容易发生滚动,产生多个切削面,使得破岩效率降低,岩芯采取率低,容易出现垮孔、掉块和卡钻等事故;再者因为破碎地层渗透性强,容易造成冲洗液漏失,或者出现涌水等

事故。实践表明,在复杂破碎地层中钻进施工,技术上主要存在三难——钻进难、护壁难、取芯难^[2]。

1.2 复杂地层钻进技术的发展

我国的钻探工程是在非常薄弱的基础上逐步发展起来的。在过去的几十年里,国内钻探工作者对复杂破碎地层钻进技术进行了大量的研究,并取得了骄人的成绩,其中许多技术已经达到了国际先进水平,且在实践生产中取得了很好的效果。当然,其中也还存在许多难题亟待解决。随着我国中东部一大批老矿山在已有勘查范围内资源的枯竭,未来地质找矿和钻探施工无疑将需要向更深、更复杂地层及其外围区域拓展,以延长矿山开采年限,满足国家对资源的急需要求。因此,进一步研究破碎复杂地层的钻进技术,解决其存在的问题,改进已有的技术方法,探索出更有效的新方法和新技术,对未来寻找新矿产资源将有着非常明显的现实意义。

在复杂地层中钻进,主要会遇到钻进、保护孔壁、取芯等困难问题。虽然目前国内外钻进技术可以解决一些复杂地层钻进问题。但是,由于复杂地层的复杂程度不同,对于取芯(样)要求不同,目前国内外钻进技术还难于达到钻进的目的要求^[3]。

在保护孔壁方面:①国内外覆盖层钻进中,对于厚度小于20~50 m的覆盖层,一般采用泥浆护壁快速钻穿覆盖层,然后下入套管隔离覆盖层;对于比较厚的覆盖层采用多层套管的钻孔结构,逐级钻进并下入套管,最终靠多层套管隔离保护孔壁。存在的问题是:钻孔结构复杂、套管数量多、成本较高。国外采用的同径跟管取芯钻进技术,虽有一定的优越性,但还存在钻具使用寿命短和适用范围有限等不足。②采用优质泥浆与多功能无固相冲洗液护壁堵漏。③采用水泥护壁堵漏,在漏失轻微、坍塌掉块严重的地层中,采用水泥护壁是行之有效的方法。对于地层比较单一、地层厚度不大和岩芯质量要求不高的复杂地层钻探,钻探难度相对不大,比较容易满足地质勘探要求。而对于水利水电工程勘察岩芯钻探和工程施工钻探,由于覆盖层厚、地层复杂,上述技术难以满足要求。

卵砾石覆盖层由于地层松散、包裹砂卵砾石无规律、砾石大小不均、换层频繁、软硬悬殊和要求岩石采取率高(80%)等,在工时矿产资源钻探技术难以满足要求。国内水利水电勘察等部门的多家单位对覆盖层钻探和工程施工钻探进行了长期的探索,在传统钻探技术的基础上,先后经历了锤击跟管取芯钻进技术和推广应用金刚石取芯钻进技术两个重要阶段(两次重大技术突破),先后取得一大批科研成果,促进了水利水电勘察技术的发展。

(1)第一次重大技术突破——锤击跟管硬质合金取芯钻进技术

20世纪50年代,国家电力公司成都勘测设计研究院针对卵砾石覆盖层钻探中,因地层不稳定出现的钻孔频繁垮塌、钻进效率低和取芯质量较差等问题,成功地研究和总结出了“孔内爆破技术研究”,较好解决了这种地层钻进中的跟管技术难题。后来,经过不断改进,形成了一整套完善的锤击跟管取芯钻进技术,并在水利水电勘察中得到广泛应用。目前,这种技术仍然是一种对付架空层的主要技术方法,其中,取芯钻进方法与80年代前所不同的是采用金刚石钻进代替了硬质合金钻进和钢粒钻进。

早期锤击跟管钻进原理(工艺流程):先导孔钻进→孔底爆破→锤击跟管→先导孔钻进。具体技术方法:①采用比套管小一级的钻具在套管下部孔段进行取芯钻进(先导孔钻进),钻进方法为硬质合金和钢粒钻进,有时采用泥浆护壁。②当裸孔段的孔壁垮塌和掉块对正常取芯钻进构成比较严重的影响时,采取孔内爆破方法在裸孔孔段进行爆破;③采用吊锤打击的方法将套管逐根跟到孔底,靠套管护壁。①、②、③工艺形成一个钻进周期,构成完整的锤击跟管取芯钻进工艺流程。该技术方法尽管存在一定的技术缺陷:①具有炸坏套管的可能;②套管容易在锤击时变形;③一级套管难以实现长孔段跟管等。但在尚无其他有效技术方法的情况下,该技术不失为一种实用的取芯钻进技术。

(2)第二次重大技术突破——金刚石取芯钻进技术

20世纪80年代,随着天然金刚石在钻探中的成功应用和人造金刚石技术的飞跃发展,水利水电勘察部门开展了金刚石钻进技术在深厚覆盖层中的研究,具有代表性的研究项目是:国家电力公司成都勘测设计研究院承担的国家六五攻关项目“深厚砂卵石层金刚石钻进与取样技术的研究”,成功地实现了金刚石取芯钻进技术移植(推广),并在国内广泛推广应用。

在取芯(样)技术方面:采取高质量的岩芯标本仍然是现代岩芯钻探的主要目的之一。所谓“取芯质量”,主要包括岩芯采取率和反映岩层(或矿层)结构状态及物理力学性能的程度。不同勘探目的的钻孔,采取岩芯质量的要求不同,矿床勘探钻孔,主要目的是查明矿层位置和含矿量,要求只需得到较高的岩矿芯采取率即可。工程地质勘探钻孔,除了必须采取足够数量的岩芯以外,还须取出保持地层原始结构状态和物理力学性状的岩样,即原状岩样,同时还须查明地层的水文地质条件。为了达到上述目的,有的还须进行必要的孔内测试。

取芯钻具的结构对取芯质量有重要的影响。目前主要采用回转式取芯钻具。回转式取芯钻具包括单管钻具、单动双管钻具、双动双管钻具和三层管钻具。绳索取芯钻具一般属于单动双管钻具。按冲洗液流向分有正循环钻具和反循环钻具。

单管正循环钻具取芯的效果最差,不论什么结构和采用什么类型的冲洗液,其采取率最低,且不能取原结构状岩样。反循环钻具大多采用局部反循环,有单

管反循环和双管反循环两种。反循环钻具岩芯采取率最高,可以达到 100%,它的缺点是岩芯质量差,分选严重,一般不能反映原状结构。

双动双管钻具的岩芯采取率高,但它的适用范围有限,由于只能采用硬质合金钻头,故一般只适用于软塑性岩层。

三层管钻具实质是在双管钻具的内壁增加一层薄壁的半合管,以避免退出岩芯时人为损坏破碎的岩芯。

单动双管钻具(包括绳索取芯钻具)是目前应用最广的取芯钻具,它适用于各种岩层,结构种类很多,性能相差也很远。

金刚石钻进和绳索取芯钻进,以及有的单位研制的专用取芯钻具,采用清水或泥浆作为冲洗液,可以获得较高的岩芯采取率,但是想要取到原状岩样是比较困难的。在一些破碎地层,采取率仍有明显地降低;在无泥质的砂卵石覆盖层,只能采取大块的卵石,而且只能采取扰动样。人们为了提高岩芯采取率,为了在破碎地层、软弱夹层和砂层取样,设计了各式各样的取芯钻具和取芯工具,这些钻具和取芯工具的共同特点是减少或避免冲洗液对岩芯的冲刷,在一定的地层如泥质胶结地层、破碎地层和厚砂层有一定效果,但适用范围较小,尤其对漂砾石层、砂卵石层和薄砂层不能见效。

在钻进碎岩技术方面:覆盖层质地坚硬,结构复杂,其成分主要由坚硬的火成岩、变质岩组成,漂石和卵石的可钻性级别一般在 7~11 级,颗粒级配无规律性,从细砂到粒径 10m 以上的漂砾无一不有,钻进碎岩有一定的难度。目前主要采用有硬质合金钻进法、金刚石钻进法、冲击钻进法、潜孔锤钻进法。其中金刚石钻进法碎岩效率较高,相比潜孔锤钻进法在可钻性为 5~7 级的岩石中钻进效率有明显提高,在坚硬致密“打滑”岩层中可成倍地提高钻进效率;特别是在裂隙及解理发育(岩芯容易堵塞)的岩层钻进可以提高回次岩芯长度,提高岩矿芯采取率,对于硬、脆、碎的破碎带效果更为明显^[4]。

为了战胜复杂地层,20 世纪 50 年代以来,国内地质勘探部门就开始重视钻井液护壁技术,把它作为处理孔内复杂问题的主要措施之一。利用各种无机盐和有机护胶剂的化学处理,大大改善了钻井液的性能,增强了钻井液的护壁性能。煤碱剂、丹宁酸钠、亚硫酸纸浆废液配制的细分散钻井液是这个时期的代表。随着化学工业的发展,钠-羧甲基纤维素、铁铬盐等新型钻井液处理剂的出现,使细分散钻井液又提升到一个新水平。以碳酸钙钻井液为代表的粗分散体系和以聚丙烯酰胺为代表的低固相钻井液,70 年代以来在国内地质岩芯钻探中几乎是同时或相继出现的,而且很快为后者所替代,目前以聚丙烯酰胺及其衍生物配制的分散低固相优质轻钻井液,在提高钻进效率和护壁效果方面发挥了巨大的作用。

随着优质轻钻井液的推广和技术发展的要求,黏土粉特别是膨润土粉应运而