

刘塘坊铁矿 1 号副井井筒冻结钻孔施工实践

王 兵, 汪志祥, 董 梅, 李宏伟

(安徽省煤田地质局水文勘探队, 安徽 宿州 234000)

摘 要:介绍了冻结法施工的原理和特点;简述了刘塘坊铁矿 1 号副井井筒冻结钻孔的基本情况,分析了本工程施工的难点和采取的技术措施,介绍了施工中需要注意的事项和环节,对本工程进行了施工总结。

关键词:冻结法;井筒冻结;偏斜率;牙轮钻进;防斜纠偏;耐压试验

中图分类号:TD265 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2011)04-0053-05

Construction Practice of Freezing Borehole in an Auxiliary Shaft/WANG Bing, WANG Zhi-xiang, DONG Mei, LI Hong-wei (Hydrologic Exploration Team, Anhui Provincial Bureau of Coal Geology, Suzhou Anhui 234000, China)

Abstract: The principle and characteristics of freezing construction is introduced and the situation of freezing borehole of 1[#] auxiliary shaft of Liutangfang iron mine is described. The paper analyzed the difficulties and the technical measures in the engineering construction, introduced the attentions and steps in the construction and summed up the operation.

Key words: freezing method; shaft freezing; deviation ratio; roller boring; inclining prevention and deviation correction; withstanding test

1 概述

在矿井建设中,当拟建的井筒场地岩土层是松散不稳定的冲积层和裂隙发育的含水层,或者是淤泥、松软泥岩以及饱和含水和水头特别高的地层时,需采用一种特殊的竖井开凿方法——冻结法进行施工。

1883 年德国最早用冻结法开凿竖井,并获专利。我国于 1955 年首次在开滦林西煤矿应用此法开凿风井以来,至今已开凿 400 多个井筒,最大冻结深度为 702 m。自 1992 年起,冻结钻孔工艺被广泛应用于城市地铁、桥墩、隧道、港口、大容积地下硐室,以及深基础工程施工中。

冻结法的实质是利用人工制冷技术临时改变岩土性质以固结地层和隔断地下水,以便在冻结壁的保护下进行井筒或地下工程掘砌施工的特殊性施工技术。

冻结法施工的基本原理:在井筒开挖之前,从地面沿其井筒外围一定距离的同心圆周上(布孔圈径)按等间距向下垂直钻孔,孔底深入不透水层,然后向每个钻孔中沉放下入用无缝钢管加工制做的下端焊接封闭底锥的冻结管;在地面安装冷冻设备,采用氨(NH₃)为制冷剂,将冷媒剂氯化钙(CaCl₂)溶液(习惯称为盐水)冷却到-20~-30℃,用循环泵和插至冻结管深处的聚氯乙烯供液管将盐水送入冻结管。经低温盐水长时间连续地吸取管外的热量,使

周围地层冻结。盐水吸取地层的热量后温度上升,在循环泵的作用下,经回路管回到冷冻设备和制冷剂接触而重新冷却。原为液态的氨,在减压的条件下蒸发时摄取盐水的热量后,经压缩和冷凝又使其液化,在管道内循环流动,重复使用。在每一冻结管周围形成的冻土圆柱体,其直径随时间而增大,这些圆柱体互相交接成密实而闭合的冻土墙,能承受水、土压力并阻隔地下水,在它的保护下开挖地层和修筑衬砌。

冻结法的优点主要有:(1)能有效隔绝地下水,其抗渗透性是其它任何方法不能相比的,可提高井壁外围土体的稳定性,确保立井开凿掘进和井壁砌筑作业施工安全可靠;(2)适用性强,几乎不受地层条件限制;(3)环保型工法,对周围环境污染性小,无异物进入土壤,噪声小,冻结结束后,冻土融化,不影响周围地下结构;(4)经济合理。

冻结岩土所需的钻孔为冻结钻孔,与常规钻孔不同之处是:防止孔斜,是保证冻结钻孔质量的首要目标。冻结孔钻施工要求高垂直度,钻孔偏斜率要求在 3‰之内,终孔偏距严禁超标,且不能向井筒中心方向偏斜,避免冻结钻孔偏斜进入井筒开凿直径内,保证竖井开凿掘进时井筒周围土体冻结壁的完整连续性。冻结钻孔采用一径到底的钻孔结构,钻进方式主要采用无心钻头全面回转钻进一次成孔的

收稿日期:2010-06-29; 修回日期:2010-12-18

作者简介:王兵(1966-),男(汉族),安徽无为,安徽省煤田地质局水文勘探队市政工程公司经理、工程师,测量工程专业,从事市政工程、基础工程、地质勘探的施工管理工作,安徽省宿州市地质路 4 号, wangbingswd@163.com。

施工方法。孔径大小必须保证冻结管顺利下入,且冻结管应有良好的密封性。

2 工程概况

2.1 场地地形、地貌与自然条件

刘塘坊矿业有限公司(刘塘坊铁矿)位于安徽省霍邱县周集镇境内,105国道从矿区西侧通过,北距阜阳市60 km,南距合六叶高速公路入口(姚李入口)约90 km,可东行直通六安、合肥,交通便利。矿区处于淮河中上游南岸,属淮河Ⅱ级阶地。拟建的刘塘坊铁矿1号副井场地位于矿区东南部,现均为农田。场地地面标高在28~30 m,地势相对平坦。场区气候属暖温带半湿润气候区,温度中等。年平均气温15.4℃,最高42℃,最低-22.9℃。年平均降雨量1100 mm左右,6~8月为雨季。

2.2 场地岩土构成及性质

据钻孔揭露,刘塘坊1号副井场地地层:上部松散层0~254 m为新生界第四系上更新统(Q₃)、中下更新统(Q₂₊₁₂)冲积形成的耕土、粘性土、中细砂夹粉质粘土、粘土等。下部基岩254~310 m(层厚56 m)为太古界吴集组变质岩,其中254~278 m(层厚24 m)为风化斜长角闪片麻岩,浅灰绿色,强~中等风化,中细粒变晶结构,片麻状构造,主要矿物成分为斜长石、角闪石及少量石英等。岩心呈碎块及少量短柱状,节理裂隙发育;278~292 m(层厚14 m)为混合花岗岩,浅肉红色,粗粒变晶结构,块状构造,主要矿物成分为长石、石英等,岩心呈短柱状,节理裂隙发育;292~310 m(层厚18 m)为斜长角闪片麻岩,浅灰绿色,细粒变晶结构,片麻状构造,主要矿物为角闪石、石英、长石等,岩心呈短柱状及少量碎块状,节理裂隙发育。据调查场区不存在影响场地稳定性的溶洞、地裂缝等不良地质现象。

2.3 井筒冻结钻孔设计参数

拟建的刘塘坊铁矿1号副井井筒净直径5.50 m,井口设计标高30.00 m,井底标高-530.00 m,井筒深度560.00 m。冻结段最大掘进直径8.2 m,冻结壁厚度5.5 m,控制层埋深254 m,冻结深度310 m,终孔最大孔间距3.5 m,冻结布孔方式为双圈冻结,外圈孔圈径13.0 m,内圈孔圈径11.1 m。具体冻结钻孔布设参数为:内圈孔孔数16个,孔深254 m,开孔间距2.166 m;外圈孔孔数32个,孔深310 m,开孔间距1.274 m。测温孔2个:深孔310 m,浅孔255 m;水文孔1个,孔深138 m;钻孔总数51个,总工程量14687 m。冻结钻孔设计参数见表1。

表1 井筒冻结钻孔设计参数

序号	项目	数值
1	筒井净直径/m	5.5
2	冻结段最大掘进直径/m	8.2
3	控制层埋深/m	254
4	冻结深度/m	310
5	冻结壁厚度/m	5.5
6	终孔最大孔间距/m	3.5
7	积极冻结期盐水温度/℃	-28
8	维护冻结期盐水温度/℃	-22~-24
9	钻孔总工程量/m	设计冻结孔48个、水文孔1个、测温孔2个,共计14678 m
10	冻结钻孔设计参数	双圈布孔 圈径/m 孔数/个 孔深/m 开孔间距/m
		外圈 13.0 32 310 1.274
		内圈 11.1 16 254 2.166

3 技术要求

(1) 开孔孔位与设计孔位偏差不得超过30 mm。

(2) 各类钻孔必须确保设计下管深度,不得有负值,不大于设计深度0.5 m(以自然地坪算起)。

(3) 冻结孔偏斜要求:冻结钻孔偏斜率必须严格控制,靶域半径控制在800 mm,不得向井心偏斜300 mm,冻结孔终孔最大孔间距为3.50 m;测温孔偏斜要求:偏斜率按不大于3‰控制。

(4) 采用Ø133 mm×6 mm的无缝钢管作冻结管,所有管材均选用20低碳钢无缝钢管(GB/T 8163-1999)。

(5) 冻结管焊接采用J422焊条,外圈孔冻结管、测温管全部采用外接箍连接方式,接箍长度均为150 mm,内圈孔冻结管采用内接箍连接方式,焊接坡口不得小于15°。

(6) 冻结管耐压试验:冻结管下置完成后,必须按《矿山井巷工程施工及规范》(GBJ 213-90)要求进行水压耐压试漏试验。

4 施工设备仪器

采用TSJ-2000/660E型转盘钻机(电动机110 kW)4台套,配置22.5 m四角加强型钻塔(采用型钢制造的组合式整体底盘,安装后可实现整体搬迁移位;有效负荷36 t);TBW850/60型泥浆泵(电动机90 kW)4台套。5LZ165D型螺杆钻具2套;电焊机4台套。

检测仪器:采用CXY-5型陀螺测斜定向仪2台套,实现不提钻测斜(可在Ø89 mm钻杆内测斜)。

5 冻结钻孔施工难点

(1) 冻结钻孔垂直度要求精确度高,偏斜率>

3‰,靶域半径控制在800 mm,不得向井心偏斜300 mm,基岩终孔最大孔间距3.5 m;

(2)外圈钻孔入岩56 m,基岩段岩石较硬,尤其在278~292 m处为混合花岗岩,更增加了施工难度;

(3)工期短(合同工期60天)、任务重、井盘布孔圈径小,开孔间距1.274 m,孔距近,如何对4台钻机施工作业进行合理安排控制,保证各台钻机在整个施工周期内,相互之间不发生干扰和影响,避免钻孔超斜发生串孔或超径、坍塌现象。总而言之,严格控制钻孔偏斜是保证冻结孔成孔质量的关键环节。

针对以上困难,在项目开工前,依据井筒检查钻孔提供的地质资料分析本工程条件下,现有设备机具的能力,决定采用三牙轮钻头全面回转钻进,孔身结构为一径到底、一次成孔的施工方法。由于该地区基岩段岩石坚硬,纠偏非常困难,因此加大了对上部土层孔斜的控制力度。开孔前必须找中、找平,严格把握好开孔关。项目技术负责人组织相关人员认真编写施工组织设计,确定冻结钻孔施工的技术措施,并向所有技术人员、机班长进行技术交底,施工中严把质量关。

6 冻结钻孔施工技术措施

6.1 牙轮钻头的选型

本工程冻结管采用 $\varnothing 133 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 规格的无缝钢管,孔径的大小必须保证冻结管的顺利下入,根据以往施工经验,选用外径规格为190.5 mm($7\frac{1}{2}$ in)的三牙轮钻头。根据本工程地层特点选择牙轮钻头的类型和结构。

(1)上部0~254 m为第四系松散层,主要是中细砂夹粉质粘土、粘土类岩层,此类岩层软而塑性大,研磨性小,牙轮钻头钻进时,切削齿切入岩土进行碎岩,且钻进中切削齿的磨损很小;为了控制钻孔偏斜,同时为了避免钻进粘结性软岩时,发生堵水糊钻现象,钻压不宜过大。因此,选用自洁式MP型齿加密钢齿牙轮钻头。

(2)下部基岩段254~310 m(层厚56 m)为太古界吴集组变质岩,地层压入硬度大,研磨性较高,为了防止钻头切削齿过早磨损,避免崩断切削齿,因此选用XHP型楔型合金镶齿牙轮钻头。

6.2 牙轮钻进技术参数

由《钻井工具手册》表2-16查得三牙轮钻头推荐的钻压与转速数值范围见表2。

表2 三牙轮钻头推荐的钻压与转速

序号	钻头直径 /mm	钻头系列	钻头型式	钻压 /($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-2}$)	转速 /($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)
1	≥ 190	MP	1	0.55~0.80	140~90
2	≥ 190	XHP	5	0.50~0.85	60~40

就本工程地层特点来分析:(1)上部第四系松散层粘土类岩石层中钻进,钻压过大,易发生钻孔偏斜,钻头易产生堵水糊钻现象,因此,钻压应选得小一些;(2)下部基岩为变质岩,岩石为片麻岩和花岗岩,岩石较硬,研磨性较强,钻压不足于造成钻头早期磨损,钻压要适当加大,使岩石产生体积破碎,从而提高钻进效率。

牙轮钻头钻进宜采用高压、低转速、大排量的技术参数,而冻结钻孔施工则主要是以保证钻孔的垂直度为主,需要降低钻头压力,控制进尺并及时测斜(每20 m测斜一次),确保孔斜不超出标准值。综合考虑多种因素,为了满足冻结钻孔施工的特殊要求,确定本工程限制性钻进技术参数如表3所列。

表3 本工程冻结孔钻进技术参数

序号	地层深度 /m	钻头 /mm	钻压 /kN	转速 /($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	泵量 /($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)
1	开孔 0~20	190.5MP	5~10	37	850
2	松散层 20~254	190.5MP	10~20	52、84、145	850
3	基岩 254~310	190.5XHP	30~80	37、52	850

6.3 钻具组合

本工程采用 $\varnothing 89 \text{ mm}$ 钻杆,以增加钻具刚度,防止孔斜。下部加压钻具采用直径为 $\varnothing 159 \text{ mm}$ 加重管(每米重力1.212 kN)进行孔底加压(利用中和点以下加重管的重力作为给进压力)。由于加重管的铅垂作用,钻杆受力的中和点下降,并落在直径粗、刚度大的加重管上(中和点应在加重管上部 $1/5 \sim 1/4$ 处,加重管总长度根据钻压的大小进行调整确定),使钻杆全部处于受拉状态,避免产生弯曲变形,以减少钻杆与孔壁的摩擦,使钻具沿钻孔轴线回转。加重管可保证钻具工作时具有稳定性和垂直性,并具有导向作用,以减少孔斜发生。

本工程采用的钻具组合为:

(1)上部松散层(0~254 m)钻进: $108 \times 108 \text{ mm}$ 四方主动钻杆 $\rightarrow \varnothing 89 \text{ mm}$ 钻杆 $\rightarrow \varnothing 159 \text{ mm}$ 加重管 $\rightarrow \varnothing 190.5 \text{ mm}$ MP型钢齿牙轮钻头。

(2)下部基岩(254~310 m)钻进: $108 \times 108 \text{ mm}$ 四方主动钻杆 $\rightarrow \varnothing 89 \text{ mm}$ 钻杆 $\rightarrow \varnothing 159 \text{ mm}$ 加重管 \rightarrow

Ø190.5 mm XHP 型镶齿牙轮钻头。

(3) 纠偏钻具配合: 108 × 108 mm 四方主动钻杆 → Ø89 mm 钻杆 → 稳定器 → 5LZ165D 螺杆钻具 → 弯接头 → Ø190.5 mm 牙轮钻头。

6.4 浇筑钻场基础(灰土盘)平台

首先以井筒中心位置为基准,量出钻场场地范围并平整场地。由于钻场为农田,地势低洼易积水,造孔施工正处多雨季节,为保证安全顺利施工,须将钻场基础垫实抬高。首先采用分层铺设夯实三七灰土,回填厚 400 mm,再浇筑不小于 350 mm 厚的 C30 砼结构基础(灰土盘)平台,以保证钻塔整体稳定性;便于钻塔(含设备钻具)的整体搬迁移位。同时整个钻场水平误差不超过 ±5 mm。并预留钻孔位置和砌筑泥浆循环沟槽。

6.5 泥浆系统

统一设立泥浆站。泥浆池集中布置并配套好泥浆设施。泥浆池及泥浆沟槽均采用砖砌。泥浆沟槽长度不少于 50 m,且设置中间沉淀池。由于每台钻机在同一时间内施工穿过的地层性质不同,因而对泥浆的要求也不相同,因此,每台钻机有各自独立的泥浆系统,以便于调配泥浆性能指标,以免相互影响,便于管理。

6.6 确定孔位

以井筒中心为基准,测定孔位。钻孔孔位采用钉桩法设立明显标志。

6.7 钻机安装

按设备的安装要求进行,必须保证天轮中心、转盘中心、孔位中心三点一线,并垫实钻机底盘,保证钻机稳固、水平。接通水、电,安装夜间照明,调试机械设备,保证状态良好,检查钻具,确保钻具顺直完好,无弯曲变形现象,做好各项准备工作。

6.8 泥浆制备

选取优质粘土,并经试验确定其各项指标,正常钻进时,泥浆性能为:密度 1.10 ~ 1.15 g/cm³,含砂量 > 4%,失水量 > 25 mL,胶体率 < 95%。施工中加强对泥浆性能的监测,经常测定泥浆指标,根据冲积层和基岩的地层特点调整泥浆指标以保证钻孔护壁效果。及时清理沉淀的岩粉,采用除砂器降低泥浆中的固相含量,改善泥浆性能指标,有利于钻头的清洗和岩屑的排除,避免二次重复破碎,以提高钻进速度。

6.9 成孔钻进

钻进时,保持立轴平稳旋转不能晃动,严格把好开孔关。按钻孔深度及地层情况合理选择钻进参

数、钻速、钻压及冲洗量。钻进中严格控制钻机转速,以防止钻孔偏斜。严格控制钻孔偏斜率及钻孔间距,使其符合设计要求。

6.10 钻孔测斜

为检查钻孔偏斜情况,按规范和设计要求每钻进 20 m 测斜一次,并每隔 30 ~ 50 m 绘制钻孔实际偏斜方位图以指导施工。

7 钻孔防斜纠偏措施

按要求每 20 m 测斜一次,对偏斜率超过或接近规范要求的层段,及时纠偏,适当增加测斜点,发现钻孔偏斜时,分析原因,采取相应的纠斜措施。

7.1 扫孔纠偏法

一般在粘土层中发生孔偏,可利用原有钻具,更换三翼钻头或多翼钻头进行扫孔纠偏。这种方法是从喷嘴出来的泥浆直接冲刷翼片外刃与孔壁接触的地方,可使钻头的翼片,特别是底外刃不产生泥包现象,始终保持锋利状态,便于和孔壁接触扫出新的台阶把孔纠直。

7.2 扩孔纠偏法

使用原有钻具,换用比原来钻头直径大的钻头扩大孔径,钻至原深度时更换原钻头,开钻前应将钻具吊离孔底 1 m 左右,然后慢速给进开出一个新孔,当钻进几米后,钻孔已修直时,再转入正常钻进。

7.3 垫、移钻塔法

钻孔较浅(100 m 以内)出现孔斜时,采用垫钻塔、移钻塔是一种行之有效的办法。发现孔斜时,应先采用垫钻塔方法,如行不通时,应采用移钻塔法。推钻塔时应不起钻具,把钻塔朝孔斜方位上的方向移,要做到快速、稳妥。实际原理就是利用上部孔段较直,控制底部孔斜。但必须保证孔口孔位不超规定。

7.4 使用螺杆钻进行纠斜

螺杆钻纠偏是深孔基岩段最为有效的纠偏方法。其基本原理是利用螺杆钻与弯接头构成的弯钻具,向钻孔偏斜的反方向造斜,来达到纠偏的目的。

螺杆钻纠偏的成败与效果与定向、纠偏钻进以及纠偏后的钻进有关。其中定向的精度直接决定着纠偏的成败;纠偏钻进时弯接头的度数以及钻进的段长,直接影响着纠偏的效果;纠偏后的钻具组合及钻进参数也会对纠偏效果产生较大的影响。为取得较为理想的纠偏效果,应做好以下工作:

(1) 定向前应对钻孔进行精确测斜,以便精确定向;

(2)认真分析钻孔的偏斜情况,做出正确的定向方案;

(3)选择合适的弯接头,本工程配备 0.5° 、 1° 、 1.5° 弯接头供纠偏时选择;

(4)采用陀螺定向仪定向,在操作过程中要细心,把人为误差减小到最低限度;

(5)纠偏钻进时,钻压一般取 $8 \sim 12$ kN,钻进段长一般为 $3 \sim 7$ m,具体据钻孔的偏斜情况及弯接头的度数而定;

纠偏后要及时进行测斜,根据测斜情况决定其钻进方法与参数。当纠偏后的方位正确,顶角较小时,则用短钻铤加压钻进;当纠偏后的方位正确,顶角较大时,则用长钻铤轻压钻进;当纠偏后的方位正确,顶角较理想时,则用长钻铤正常钻压钻进。

8 冻结管安置

8.1 下管

下管前要重新丈量钻具全长和校验孔深,确保下管深度符合设计要求。根据每个孔的深度进行配管,并对管子逐根进行准确丈量、编号、组合配套,并做好原始记录。

8.2 冻结管焊接

冻结管、测温管设密封底锥和加强隔板,冻结管的底锥焊接必须是双层,焊接后必须在地面打压合格后,方可使用。要求底锥钢板和加强隔板厚度不小于各类管壁厚,材质与各类管相同。焊接时要求管材、管箍、焊条的材质必须一致,焊接厚度不低于冻结管壁厚,焊接必须严密,无砂眼,无裂纹,并且要求管端必须对正,保证同心度,焊接要严格按焊接工艺进行焊接。

8.3 冻结管耐压试验

冻结管下入孔内后,必须立即注入清水,用水压机进行动压试漏试验。试验压力为 3.5 MPa,试压条件为 30 min 内压力不降,或压力下降值小于 0.05 MPa,再延续 15 min,其压力保持不变为合格。打压试漏必须设专人负责,并做好原始记录。下管结束经打压试漏合格后,才能转入下一个孔施工。打压试漏合格后加盖密封管口,以防杂物掉入或泥浆灌入管内。若冻结管耐压试验不符合要求,则应立即起拔,查明原因,重新下置合格的冻结管,并且经打压试漏合格。

9 施工效果

在冻结钻孔施工中,冻结孔的偏斜率高低直接

影响着井筒冻结周期的长短,影响着冻结费用的高低和施工的安全;而冻结孔的成孔时间长短则直接影响工程进度的快慢。因此,如何优质、高效地完成冻结钻孔的施工是承建单位十分注重的关键问题。本工程项目通过合理选用机械设备和钻进方法,进行设备安装、钻具结构组合、操作规程和操作技术等工艺技术因素方面的人为控制,加大对上部土层和风化基岩的测斜密度,重点对外圈冻结钻孔(深 310 m)进行监测,发现偏斜大的地方及时进行纠偏。本工程冻结孔 W6、W15、W23、W27、W30 五个孔上部测斜发现偏斜较大,采取了人工定向螺杆钻具进行纠偏,成孔时间分别为 $6 \sim 7$ 天,进度较慢,其他多数钻孔进度均在 4 天之内。由于采取了以上行之有效的防斜降斜技术措施,从而保证了冻结钻孔的垂直度,冻结孔的偏斜率全部满足设计要求。本工程冻结钻孔施工情况见表 4。

表 4 冻结钻孔施工情况一览表

序号	冻结孔类别	冻结钻孔单孔施工进度统计/孔							偏斜率	试漏试验
		总数	2天	3天	4天	5天	6天	7天		
1	外圈孔 (310 m)	32		2	17	8	2	3		
2	内圈孔 (254 m)	16	4	10	2				$>3\%$	合格
3	测温孔	2			2					
4	水文孔	1	1							

10 结语

本工程合同工期为 60 天,工程总价 300 多万元。实际施工历时 51 天,比合同工期提前 9 天完成,施工中 4 台钻机平均钻月效率为 2160 m;每台钻机月产值 50 余万元。施工结束时,甲方及业主对冻结孔进行偏斜率及试漏试验复测,复测结果与施工过程数据基本吻合,钻孔合格率 100%,得到了甲方及业主的一致好评,取得了良好的经济效益和社会效应。

参考文献:

- [1] 编写组. 井巷工程施工手册[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1980.
- [2] 王永丰,张洪信. 冻结钻施工中发挥水力作用的浅见[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2004, 31(4): 54-55.
- [3] 吴茹. 浅谈冻结法施工方法[J]. 中小企业管理与科技, 2009, (12).
- [4] 韩广德,等. 中国煤炭工业钻探工程学[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2000.
- [5] 杜晓瑞,等. 钻井工具手册[M]. 北京:石油工业出版社, 2000.