

白涧铁矿南区复杂地层钻探施工技术

李红梅, 石 逊

(河北省地矿局第九地质大队, 河北 邢台 054000)

摘要: 邢台白涧铁矿南区地层岩石破碎、部分地层含角砾、胶结性差、漏失严重, 钻探施工中存在掉块卡钻、缩径、坍塌、埋钻及孔内泥浆全部漏失等难题。通过优化钻孔结构、使用新工艺、新方法, 合理选择钻进参数, 采用绳索取心钻进配合预留技术套管, 有效解决了上部煤系地层的坍塌问题; 采用反丝套管的方法, 极大地减轻了由于地层缩径、掉块引起的套管下不到位、起拔困难等风险; 常规型绳索取心钻杆替代套管方法的采用, 提高了含角砾、松散地层的穿过速度, 减少了钻探工作量的报废, 加快了施工进度; 特别是高胎体双水口钻头的使用, 提高了钻进效率, 节约了钻探施工成本, 项目得以如期完成。

关键词: 破碎地层; 钻孔缩径; 钻孔坍塌; 绳索取心钻进; 高胎体双水口钻头

中图分类号: P634 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2021)11-0029-06

Drilling technology for complex formation in the south area of Baijian Iron Mine

LI Hongmei, SHI Xun

(Hebei Bureau of Geology 9th Geological Brigade, Xingtai Hebei 054000, China)

Abstract: The formation in the south area of Baijian Iron Mine in Xingtai is broken, containing breccia locally, and with poor cementation and serious leakage; thus, leading to some drilling problems, such as sticking due to falling stones, borehole contraction, collapse, drilling string burial, full circulation loss. By optimizing the drilling structure, using new processes and methods, properly selecting drilling parameters, using wireline core drilling plus pre-set technical casing, collapse of the upper coal measure strata was effectively eliminated. The use of reverse-thread casing greatly reduced the risks in placement of casing and pulling out of casing caused by borehole shrinkage and falling stones. The adoption of conventional wireline coring drill rods instead of casing improved the drilling speed in breccia and loose formation, reduced drilling abandonment, and sped up drilling progress. Notably, the use of the high matrix double nozzle bit improved drilling efficiency, and saved drilling construction cost, allowing the project to be completed on schedule.

Key words: broken formation; borehole shrinkage; borehole collapse; wireline coring; high matrix double nozzle bit

白涧铁矿南区勘查项目是邢台市“十三五”重点建设项目, 同时也是河北省“十三五”重点勘查规划项目之一。该铁矿是目前河北省南部发现的最大的高品位大型磁铁矿床, 资源储量大、品位高、矿石组构简单, 是河北省乃至全国未开发的优质铁矿资源。本次钻探任务位于白涧铁矿南区, 存在工期短, 对区域内地层状况、施工技术难点掌握不够等

现实问题。通过优化钻孔结构, 使用新工艺、新方法以及合理选择钻进参数^[1]等对策圆满完成了钻探任务, 为下一步的勘探奠定了基础。

1 概况

1.1 项目概况

白涧铁矿钻探工程项目, 位于邢台沙河市西部

收稿日期: 2021-09-06; 修回日期: 2021-10-31 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.11.005

作者简介: 李红梅, 女, 汉族, 1969年生, 高级工程师, 探矿工程专业, 从事钻探、钻井技术及管理工作, 河北省邢台市钢铁北路416号, 1824963227@qq.com。

引用格式: 李红梅, 石逊. 白涧铁矿南区复杂地层钻探施工技术[J]. 钻探工程, 2021, 48(11): 29-34.

LI Hongmei, SHI Xun. Drilling technology for complex formation in the south area of Baijian Iron Mine [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(11): 29-34.

章村煤矿、窑坡村附近。东距沙河市、107国道、京广铁路、京深高速公路20~25 km,邢台—峰峰一级公路通过工区,交通方便。

本次勘探主要是对白洞铁矿南区进行详查,设计钻孔5个,孔深730~1100 mm,钻探工作量4179 m。经专项部署,精心组织,于2020年8月正式开钻施工,2020年底完成全部工作量,钻孔合格率100%。

1.2 地质概况^[2]

本勘探区域范围内地层出露较全,最下早古生界奥陶系,晚古生界石炭系、二叠系,中生界三叠系、白垩系,新生界第四系。

(1)早古生界奥陶系(O)。该系与下伏寒武系为连续沉积,可分为5组。岩性特征为:灰色薄—中厚层粉细晶白云岩,局部夹内砾屑粉细晶白云岩,灰色中厚夹薄层燧石条带、结核白云岩夹内砂屑、杂色中厚—厚层角砾状白云质粉晶灰岩、角砾状泥晶灰岩夹粉晶白云质灰岩。深灰色中厚—巨厚层泥晶灰岩、花斑状泥晶灰岩、含生屑粉晶灰岩夹层纹灰岩、沥青灰岩、含铁硅质结核、闪长岩。本段局部地层胶结松散,含泥质较多,遇水膨胀缩径、掉块。

(2)晚古生界石炭系(C)。平行不整合于中奥陶统之上。包括中统本溪组、上统太原组。主要岩性为灰—灰黑色炭、泥、铝土质粉砂岩及砂质泥岩和炭、泥质页岩,夹2~7层石灰岩,含煤2~12层。本段局部地层胶结松散,有采空区,易坍塌。

(3)晚古生界二叠系(P)。本系地层包括山西组、下石盒子组、上石盒子组、石千峰组。主要岩性为深灰—灰黑色砂质页岩、中细粒砂岩、泥岩夹细砂岩及煤层,底部为中细粒砂岩,含燧石白云质泥质灰岩,中部粉砂岩、细砂岩夹页岩,是重要的产煤层位,含煤3层,其中2号煤稳定可采,1号煤局部可采。局部因煤矿开采导致岩石松散,易坍塌。

(4)新生界第四系(Q)。广泛分布,包括以下地层:主要为紫褐色粘土及砾石层,冰川作用的产物;砖红、黄红色粘土夹杂的基岩碎块主要为黄土状粉质粘土、粉土夹砾石层;粉土、砂土、砂砾石层。分布于河床及其两侧。

综上所述,区域内上部地层主要是砂岩、泥岩、煤等软硬不一的岩石,局部因煤矿开采导致岩石松散,易坍塌。下部地层主要是坚硬的白云岩、灰岩、角砾岩,局部地层胶结松散,含泥质较多,遇水膨胀

缩径、掉块。整个区域内岩溶裂隙发育,有破碎带,钻探施工中几乎全漏,泥浆护壁性差,时常发生掉块卡钻。

1.3 钻探技术要求及质量指标

终孔直径 ≤ 75 mm,岩心采取率 $\geq 70\%$,矿心采取率 $\geq 80\%$ 。每100 m倾角偏差 $\geq 2^\circ$ 。采用环保无污染冲洗液钻进,每班至少观测水位1~2回次。每钻进100 m,进、出矿层时(矿层厚度 < 5 m时只测量一次)要测量孔深,孔深误差率 $< 1/1000$ 。封孔水泥强度为42.5 MPa,全孔封孔,水灰比 < 0.5 。

2 钻探工艺

2.1 设备及机具选择^[3]

本次施工使用XY-5、XY-6B、CD-2000型钻机各1台,NB-250型泥浆泵3台,SG-23型钻塔3部、SJ-1000型绳索取心绞车3部、绳索取心钻杆若干。

2.2 钻孔结构及钻进方法^[4-6]

根据以往相邻矿区的钻探施工经验,考虑到第四系地层含卵石,可能会影响到钻进效率和整体施工进度,经我队相关专家和甲方专家共同分析地质情况,经甲方同意变更施工设计,变更后钻孔结构采取5级成孔,即 $\text{O}150$ mm—130 mm—110 mm—96 mm—75 mm(见图1)。

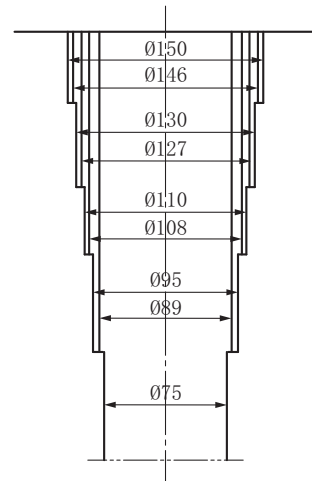


图1 钻孔结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the drilling structure

(1)钻遇采空区。钻进过程中首先采用 $\text{O}150$ mm金刚石钻头单管钻具钻进至基岩后,下入 $\text{O}146$ mm护壁套管作为孔口管,下入 $\text{O}127$ mm套管作为技术套管。然后采用 $\text{O}110$ mm取心钻具钻进至穿

过采空区后,起拔 $\varnothing 127$ mm套管,采用 $\varnothing 130$ mm扩孔钻头,钻进至完整的采空区下底板后,下入 $\varnothing 127$ mm套管,隔离采空区。

(2)若没有钻遇采空区,用 $\varnothing 110$ mm取心钻进至奥灰岩完整地层后,下入 $\varnothing 108$ mm套管。换用 $\varnothing 95$ mm绳索取心钻具钻进,穿过奥灰岩峰峰组见磁县组后,下入 $\varnothing 89$ mm套管,必要时可以使用 $\varnothing 89$ mm绳索取心钻杆当作套管使用。最后换用 $\varnothing 75$ mm金刚石绳索取心钻具钻进至终孔。

2.3 钻头的选择^[7-9]

针对矿区内的地层情况及岩石可钻性,金刚石钻头、扩孔器的磨损情况,通过合理选择金刚石钻头胎体硬度、扩孔器外径及保径胎体硬度等措施提高钻进效率。为了解决环空间隙小、泵压高问题,普遍选择扩孔器外径比正常扩孔器大1~2 mm,钻头也相应加大1~2 mm。在下部破碎、泥质含量多、遇水膨胀的地层,为避免频繁起下钻,而使孔壁受到强烈

的抽吸作用,加剧孔壁不稳定,造成坍塌掉块,形成超径孔段,进而引起断钻杆等事故的频繁发生,采用了高胎体双水口钻头。在钻遇采空区时采用全面不取心钻头钻进。

可钻性在6级以下的地层(砂岩、泥岩等)多选用底唇面为多阶形和内锥形或锯齿形、胎体硬度HRC30~35、金刚石粒度60~80目的直水口孕镶金刚石钻头。钻头平均寿命可达230 m。

可钻性在6级以上的地层(闪长岩、灰岩、白云岩等)多选用底唇面为多阶形和内锥形或锯齿形、胎体硬度HRC25~30的金刚石孕镶钻头。钻头平均寿命可达150 m。

2.4 钻进参数的选择^[10]

结合以往相邻区域钻探施工经验,以及各地层的钻进速度、设备运行等情况,总结出最优钻进参数如表1所示。

表1 钻进参数优选

Table 1 Optimization of drilling parameters

钻进层位	钻进方法	钻进口径/mm	钻压/kN	转速/(r·min ⁻¹)	泵量/(L·min ⁻¹)
上部覆盖层	金刚石单管	150	5~10	50~100	50~60
煤系地层	金刚石单管	130	6~16	150~200	200~250
下部奥灰岩及闪长岩地层	金刚石绳索取心	95	12~18	350~700	60~80
		75	10~13	400~700	50~80

3 钻探施工中存在的问题及解决措施

3.1 钻探施工中存在的问题

(1)上部地层软硬互层,钻孔弯曲控制难度大。岩石松散(见图2),易坍塌、卡钻,不仅钻进效率低,而且地层坍塌易造成钻孔回填现象,甚至会出现埋钻,报废工作量。



图2 煤系地层岩心

Fig.2 Cores from the coal measure strata

(2)下部地层局部有破碎带,含角砾,泥质含量大,胶结松散易膨胀(见图3、图4),易发生掉块卡钻、缩径,下放起拔套管困难,造成孔内套管遗留,增加成本等问题。

(3)钻进过程中几乎是全孔漏失,钻杆摩擦阻大,易发生断钻杆的事故,再加上地层原因,往往会出现事故越处理越复杂的情况。



图3 下部破碎带岩心

Fig.3 Cores from the lower fracture zone



图4 下部水化膨胀地层岩心

Fig.4 Cores from the lower hydration swelling formation

3.2 主要解决措施

3.2.1 冲洗液的应用^[11-14]

(1)上部地层为第四系和煤系地层,地层胶结松散,易坍塌;下部局部地层含泥质、角砾,容易水化膨胀、缩径和分散,机械强度降低,容易造成卡钻、埋钻等事故。因此需加入具有抑制泥页岩缩径、有利于减弱泥页岩的水化渗透、减小失水量的聚合物,如腐植酸钾(KHm)。

另外冲洗液还需要良好的携砂能力、较高的动切力、好的流变性能和润滑性等。

(2)在钻进第四系地层及煤系地层时,使用低固相钾基聚合物冲洗液,其配比为:1 m³水+30 kg膨润土+5 kg KHm+适量烧碱和润滑剂。其性能为:粘度29~33 s,密度1.03~1.05 g/cm³,失水量4 mL/30 min,pH值8~9。

在钻进至下部灰岩及闪长岩地层中因局部地层破碎、含角砾及泥质,故采用高分子聚合物无固相冲洗液,其配比为:1 m³水+0.2%~0.5% AC-141+0.5%~2% KHm+适量烧碱和润滑剂。其性能为:粘度30~35 s,密度1.01~1.04 g/cm³,失水量5 mL/30 min,pH值8~9。

3.2.2 孔内压力平衡调控措施^[15]

钻进过程中,当地层被钻进打开后,会破坏了地层原有的地应力平衡,加上地层破碎、胶结性差,极易形成孔内掉块现象,甚至由于地层应力失去原有的平衡,引起孔壁坍塌。为确保地层相对稳定,需适量提高冲洗液的密度来构建新的应力平衡模式,以防止围岩地应力作用挤垮孔壁,造成事故。

通过以下措施达到了平衡地层压力、维护孔壁稳定的效果。

(1)调节孔内液柱静压力。通过调整冲洗液密度,改变孔内液柱压力。在保证孔内压力稳定的前

提下,尽可能地降低冲洗液的密度。

(2)降低环空压力降。通过合理选择钻具组合,增大环状间隙、控制冲洗液粘度和切力、保证冲洗液正常循环的情况下,尽可能地降低冲洗液的上返速度,提高冲洗液的润滑性能,降低冲洗液循环阻力等措施保证环空压力降在合理的范围内。

(3)控制提下钻速度和加速度。尽量避免抽吸作用对孔内薄弱孔段的破坏。

(4)重新开泵时应采用较小的泵量。

(5)提下钻时,应先把钻具里的内管取出,降低孔内波动压力。

3.2.3 护壁措施

(1)反丝套管的应用。为了解决破碎地层下套管难、起拔套管时孔内遗失套管的问题,结合地层情况,采用反丝套管作为护壁套管,提升完孔后套管的回收利用率。

下反丝套管应注意确保套管底部坐落在完整、具备一定承载力的岩石上,避免在钻进过程中,因为套管底部出现超径、坍塌等造成放空,进而引起套管脱落。再者,下套管的同时应在套管外壁均匀涂抹聚合物凝胶,并在套管下放完成后封闭套管外壁环状间隙,避免杂物进入环状间隙。进而提高套管起拔的成功率。

(2)钻杆当护壁管的应用。在施工过程中,如遇施工到下套管的位置后,由于孔内坍塌或地层破碎掉块等原因导致套管无法下放到位置,可以使用钻杆配合特制的钻头扫孔至下套管的位置后代替套管使用。避免报废工作量,甚至废孔的风险。

3.2.4 高胎体双水口钻头的使用

在钻孔施工到奥灰岩后,根据钻孔实钻经验及数据,选用高胎体双水口钻头进行施工。此钻头金刚石胎体高度是以上所选金刚石钻头的2倍。钻进过程中每个钻头的使用寿命约为以上所选金刚石钻头的2.5倍,极大地提高了钻进效率,减少了提下钻次数,减少提升孔内钻杆的抽吸现象,进而保证了孔壁稳定性,保证了孔内安全。同时节约了施工成本,带来了很好的经济效益。

3.2.5 质量保证措施^[16-18]

3.2.5.1 岩心采取率保证措施

第四系地层采用弹子式单管钻进,钻进中须用小泵量钻进至岩心管长度的1/2~2/3时,停泵从主动钻杆中投入弹子,待水泵憋水后,干钻至岩心管打

满,形成自堵。干钻时必须上下活动钻具,防止烧钻,感觉岩心卡牢即可提钻。提钻时,由于弹子密封岩心管接头,使岩心管内形成真空,岩心不易掉落,确保了岩心采取率。煤系地层及其以下地层采用绳索取心钻具施工,在施工过程中通过每回次取心后测量岩心直径、钻具到孔底后先轻压慢转0.3~0.4 m后再恢复正常参数钻进等方法很好地保证了岩心采取率。全孔最低岩心采取率为92%,矿心最低采取率高达98%。

3.2.5.2 钻孔弯曲度保证措施

(1)场地平整、坚固。设备安装牢固、周正,设备安全防护设施齐全有效。

(2)开孔前必须对钻探设备及安装质量进行全面的检验。钻机、动力机、钻塔必须安装稳固,天车、立轴、孔口三点必须在一条直线上。如果不合乎要求,必须进行修正,调整,确保钻孔的垂直度,预防

孔斜。

(3)开孔钻进中,应逐步加长岩心管,并采用轻压、慢钻、适当泵量钻进,且钻进至25 m后测量一次倾角和方位角。

(4)为了避免磁铁矿磁场对测斜数据的影响,采用陀螺测斜仪进行测斜。

(5)换层钻进时,由软变硬时,轴心压力要适当变小,钻速要相应降低;由硬转软时,压力要减小到正常压力的1/3,要控制回次进尺长度,且粗径钻具要适当加长。

通过一系列的保证措施,孔斜率控制在了所要求的范围内,本次施工钻孔合格率达到100%。

4 施工效率分析

本次施工中,总计完成钻孔5个,钻孔合格率100%。台月效率由以往的483 m提高至679 m。和以往在此区域施工的钻进效果对比见表2。

表2 钻进效果对比

Table 2 Comparison of drilling efficiency

施工期间	台月效率/m	矿心采取率/%	纯钻时间率/%	事故停待时间率/%	工作量报废率/%
以往施工	483	92	42	7.6	3
本次施工	679	98	51	5.1	0

5 结语

此次施工,我们对此区域内的地质特点有了初步的了解。通过绳索取心钻杆护壁、双水口钻头新工艺的尝试,丰富了在此地区钻探施工的经验,总结出了相对应的施工参数,提高了钻进效率,顺利地完成了本次钻探任务。既提高了钻进效率又节约了钻探成本,既锻炼了现场技术人员又开阔了施工技术应用的方向。为今后此地区和类似地层的钻探施工积累了技术经验,拓展了施工思路,增强了发展动力。

参考文献(References):

- [1] 邓鹏,黄明勇,方青,等.贵州省旦坪铝土矿钻探施工工艺[J]. 钻探工程,2021,48(3):78-85.
DENG Peng, HUANG Mingyong, FANG Qing, et al. Exploration drilling technology for the Danping Bauxite Mine in Guizhou province[J]. Drilling Engineering, 2021,48(3):78-85.
- [2] 张彦海,李光宏,白明.河北省沙河市白洞铁矿详查报告[R].邢

台:河北省地矿局第十一地质大队,2010:13-15.

ZHANG Yanhai, LI Guanghong, BAI Ming. Detailed Investigation Report of Baijian iron mine in Shahe city, Hebei Province [R]. Xingtai: 11th Geological Brigade of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources, 2010:13-15.

- [3] 鄢泰宁.岩土钻掘工程学[M].武汉:中国地质大学出版社,2001.
YAN Taining. Geotechnical Drilling Engineering[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2001.
- [4] 李光宏,李红梅.多种钻探工艺技术在白洞铁矿区的应用实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(9):49-52.
LI Guanghong, LI Hongmei. Application practice of several drilling technologies in Baijian iron ore area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(9):49-52.
- [5] 杨芳,陈师逊.深部地质钻探钻孔结构与施工分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(11):21-26.
YANG Fang, CHEN Shixun. Analysis of design and construction of deep geodrilling boreholes[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(11):21-26.
- [6] 陈风云,王虎,谷天本.小秦岭地区深部钻探钻孔结构设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(7):44-46.

- CHEN Fengyun, WANG Hu, GU Tianben. Design of borehole structure of deep drilling in Xiaoqingling region [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2011, 38(7):44-46.
- [7] 孙丙伦,孙友宏,徐良.金矿复杂地层金刚石取心钻头选型试验研究[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2008,35(8):71-72,76.
- SUN Binglun, SUN Youhong, XU Liang. Research on optimizing experiment of diamond coring bit for drilling in gold mine of complex stratum [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2008,35(8):71-72,76.
- [8] 刘勇,常江华.某金矿水平绳索取心钻进钻头选型及试验分析[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2011,38(7):73-75.
- LIU Yong, CHANG Jianghua. Selection of horizontal wire-line coring bit in a gold mine and the test analysis[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2011, 38(7):73-75.
- [9] 熊虎林,徐龙生.泉子街地区地层可钻性分析及钻头选型[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2019,46(2):30-34.
- XIONG Hulin, XU Longsheng. Formation drillability analysis and drill bit selection for the Quanzijie area[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2019, 46(2):30-34.
- [10] 段鸿海,胡春跃.承德M24矿区深孔钻探钻进参数的选择分析[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2011,38(3):17-20.
- DUAN Honghai, HU Chunyue. Selection analysis on drilling parameters of deep drilling in M24 Mining Area of Chengde[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2011,38(3):17-20.
- [11] 刘俊辉.成膜防塌无固相冲洗液在广西向阳坪地区复杂地层中的应用[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2020,47(12):36-41.
- LIU Junhui. Drilling fluid technology for complex formation drilling in the Xiangyangping area of Guangxi [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020, 47(12):36-41.
- [12] 肖冬顺,符文,吴琼,等.青海五龙沟矿区泥岩地层冲洗液研究[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2019,46(9):45-50.
- XIAO Dongshun, FU Wen, WU Qiong, et al. Drilling fluid for mudstone in Wulonggou Mine of Qinghai province [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2019,46(9):45-50.
- [13] 刘志峰.无固相冲洗液在变质岩系复杂地层绳索取心钻进中的应用[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2017,44(4):14-18.
- LIU Zhifeng. Application of solid-free flushing fluid for wire-line coring in complex metamorphic rocks formation [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2017,44(4):14-18.
- [14] 郑继天,李小杰,关晓琳.水文地质钻探冲洗液的选用[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2016,43(10):242-244.
- ZHENG Jitian, LI Xiaojie, GUAN Xiaolin. Selection of drilling fluid for hydro-geological drilling [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016, 43(10):242-244.
- [15] 乌效鸣,俞承城.钻孔液动压力平衡问题[J].*探矿工程*,1995(1):47-48.
- WU Xiaoming, YU Chengcheng. Balance of drilling fluid pressure [J]. *Exploration Engineering*, 1995(1):47-48.
- [16] DZ/T 0227—2010,地质岩心钻探规程[S].
DZ/T 0227—2010, Geological core drilling regulations[S].
- [17] 汤凤林,A.Г.加里宁,段隆臣.岩心钻探学[M].武汉:中国地质大学出版社,2009.
- TANG Fenglin, A. G. Kalinin, DUAN Longchen. Core Drilling [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2009.
- [18] 陈兵,姚燕,张峰,等.浅论神农架地区岩溶复杂地层钻探施工技术[J].*资源环境与工程*,2010(4):398-400.
- CHEN Bing, YAO Yan, ZHANG Feng, et al. Discussion on drilling construction technology of complex karst stratum in Shennongjia [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2010(4):398-400.

(编辑 荐华)