

北京冯家峪铁矿坑道水平硬岩钻进技术实践

李海明

(北京市地质工程设计研究院, 北京 101500)

摘要:北京冯家峪铁矿地层坚硬致密、研磨性较弱、构造发育、易造斜、岩性复杂,坑道水平钻进中钻孔倾角变化范围较大(-55°~60°),上仰孔施工中冲洗液易沿着钻杆流出并对施工人员、钻机设备造成较大危害,洞内安全生产隐患较多,这些都给钻进施工带来了较大困难。对此,选用主机质量轻、所需安装空间小的Z7559型全液压钻机,选取满眼组合钻具,定制软胎体金刚石钻头;合理选用、调整冲洗液性能及泵量,正确调整钻进工艺参数;采取限制回次进尺、合理安装钻机等措施,确保工程质量和施工安全。对坚硬地层大倾角洞内水平钻进施工具有一定的借鉴意义。

关键词:坚硬地层;大倾角;坑道钻进;水平钻进

中图分类号:P634

文献标识码:B

文章编号:1672-7428(2016)05-0022-05

Technical Practice of Horizontal Hard Rock Drilling in Beijing Fengjiayu Iron Mine Tunnel/LI Hai-ming (Beijing Institute of Geological Engineering Design, Beijing 101500, China)

Abstract: The stratum was hard and compact with weak abrasiveness, structural development, easily inclining and complex lithology in Beijing Fengjiayu iron mine. The inclination angle change range was large (-55~60) in tunnel horizontal drilling; during upward hole construction, the flushing fluid was easy to outflow down along the drill pipe, which caused great harm to constructor and drilling equipment. The hidden dangers in the tunnel brought difficulties to drilling construction. Therefore, some measures were chosen to ensure construction quality and safety, such as selecting Z7559 full hydraulic drilling machine with light-weight main body and small installation space, full-packed assembly, custom-made soft matrix diamond bit, rational selection and adjustment of flushing fluid properties and pump volume, proper adjusting drilling parameters, restricting roundtrip meterage and reasonable installation of drilling machine.

Key words: hard stratum; large inclined angle; underground drilling; horizontal drilling

北京云冶矿业有限责任公司是北京市较大的铁矿企业之一,其拥有的冯家峪矿区过去一直采用露天开采,随着开采深度的加大,露采境内的铁矿石越来越少。为确保矿山产量,矿主委托我院开展洞内水平钻进勘探施工(相当于详查控制)。本次钻探工程采用全液压巷道钻机在洞内开展大倾角水平钻探施工,实际完成钻孔78个,总进尺6347.83 m,其中,Ø59 mm 钻孔55个,进尺4193.09 m,Ø46 mm 钻孔23个,进尺2154.74 m。

1 矿区概况及工程要求

1.1 地理位置及地层

冯家峪铁矿位于北京市密云区城北,直距30 km,隶属于密云区冯家峪镇冯家峪村。

矿区主要地层是四合堂群山神庙组第三组,为铁矿赋存层位。地层岩性以角闪岩相变质岩为主,

岩石组合为黑云角闪斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩、磁铁石英岩和少量石榴子石片麻岩及角闪岩等。岩石可钻性级别较高,一般为8~9级,局部夹杂石英脉,岩石可钻性可达11级。

矿区断裂构造比较发育,共发现大小断裂构造20条。受断裂构造的影响,岩石裂缝发育。

1.2 施工矿洞情况

施工矿洞断面规格为3.00 m×2.70 m,洞内坡度较平缓,但纵横交错,洞室结构较为复杂;洞内动力电为75 kVA的380 V三相动力电;巷道内的水源基本可以满足正常施工的需求,不足时使用洒水车供给;部分坑道铺设轨道,可以使用矿用牵引机车转运设备物资,未铺设轨道的坑道可使用手推车转运设备物资。

1.3 钻探工程要求

本次钻探工程全部由甲方提供地质设计,共设

计钻孔68个,单孔孔深31.70~122.70 m不等,设计总工作量4472.70 m,设计倾角 $-55^{\circ}\sim 60^{\circ}$,终孔直径 ≤ 46 mm。

2 钻探施工技术

2.1 钻探技术质量要求

根据地质设计和矿主要求,具体如下。

(1)岩心采取率:矿心及顶、底板5 m内的岩心采取率 $\leq 80\%$,其他部位岩心平均采取率 $\leq 70\%$ 。

(2)孔斜:钻孔倾角为 $-55^{\circ}\sim 60^{\circ}$ (斜孔或水平孔),顶角偏差 $\geq 3^{\circ}/100$ m。

(3)封孔:在孔口用木桩等做标记,不需进行专门封闭。

2.2 施工主要技术难点

由于地层和矿区特点,本工程施工主要存在以下几个方面的技术难点。

(1)钻进效率低。由于地层岩性以角闪岩相变质岩为主(局部夹杂石英脉),长石、石英、磁铁矿等造岩矿物含量较高,岩石坚硬致密且研磨性较弱,钻进施工中金刚石不容易自磨出刃,从而影响钻进效率。

(2)坚硬地层大倾角洞内钻探施工在钻机选择上具有局限性。钻探施工在坑道内进行,现场场地狭小,钻机既要体积小、易搬迁,又要满足钻进硬岩时的给进力需求。

(3)矿床构造发育,影响岩心采取率。受构造控制,构造带部分岩石比较破碎,导致岩石碎屑(块)进入岩心与岩心管之间的环状间隙,随着进入环状间隙的碎屑(块)越来越多,岩心与岩心管之间的摩擦阻力逐步增大,给进困难,进而出现岩心堵塞,不仅影响岩心采取率,而且影响回次进尺长度,降低台月效率。由于坑道机窝空间小,钻具很短,对台月效率方面的影响可以忽略,故而只考虑对岩心采取率的影响。

(4)上仰孔孔口密封困难,施工中冲洗液易沿着钻杆流入设备。上仰孔的施工中,冲洗液受重力作用影响极易流出孔口,顺着钻杆流入钻机主机体,冲刷钻机内润滑脂,增大了钻机零部件磨损破坏的风险。

(5)易发生钻孔弯曲。角闪岩相变质岩产状较陡,岩石的各向异性差异较大,属于强造斜地层,给钻探施工带来极大困难。

(6)安全生产形势严峻。由于现场场地狭小,设备比较集中,对设备的防漏电、防水、防火等方面的安全措施提出了较高要求;勘探坑道还会排出各种有毒、有害气体及粉尘,对施工人员健康造成极大威胁。

2.3 设备机具选择

2.3.1 钻机

针对坚硬地层大倾角钻进,经调研,初步确定YGK-300Z型全液压钻机与Z7559型全液压钻机。YGK-300Z型全液压钻机给进力大,机械化程度高,但其体积大,质量达到2500 kg,无法在洞内安装;Z7559型全液压钻机体积小,主机质量仅为380 kg,搬迁方便,能满足给进力要求,而且有利于减少工人劳动强度,缩短辅助工作时间,提高台月效率。因此,确定采用Z7559型全液压钻机。Z7559型全液压钻机是一款坑内无塔架钻机,主轴转速为(速比为2:1)600~1800 r/min,主轴最小扭矩为480 N·m,轴向最小推力为35 kN,轴向最小拉力为27 kN,电动机的额定功率为45 kW,动力头行程为1.5 m,液压系统工作压力20 MPa,最大压力25 MPa,地下作业中钻孔倾角、方位角均可在 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 内变化,采用 $\varnothing 59$ mm钻进钻孔深度可达350 m,采用 $\varnothing 46$ mm钻进钻孔深度可达450 m。其主要部件为立柱、动力头、滑道、夹持器、动力车、操纵台等。动力车、操纵台和主机体分开安装,其体积较小,便于安装,详见图1~3。

2.3.2 泥浆泵

根据本工程特点,采用体积小、易于搬迁且性能稳定的BW150/50型泥浆泵。

2.3.3 测斜仪

鉴于磁铁矿大倾角洞内水平钻进孔内测斜的需求,选购了JTL-40GX(W)型光纤陀螺及KXP-4D型全方位测斜仪。JTL-40GX(W)型光纤陀螺测斜仪无需测井电缆就能在现场使用,可以省去笨重的测井电缆绞车,通过G50型无线手持机给测斜仪发指令进行测量操作,具有操作简单、使用方便、仪器可靠、测量精度高、不受磁场干扰等优点。但其顶角测量范围仅为 $0^{\circ}\sim 50^{\circ}$,不能完全满足测斜范围的需求,为此采用KXP-4D型全方位测斜仪作为补充。



图1 Z7559型全液压钻机施工现场



图2 Z7559型全液压钻机机动车



图3 Z7559型全液压钻机操纵台

2.3.4 钻具

由于钻孔倾角较大,钻遇地层复杂,施工现场狭小,为便于实现连续给进,保证钻孔质量,设计了钻具与钻杆级差较小的 $\phi 59/46$ mm TT型普通双管取心钻具(无锡探矿机械总厂生产),配套钻杆为 $\phi 56$ mm TT型钢钻杆及 $\phi 43$ mm TT型铝合金钻杆。

2.3.5 防漏电装置

考虑到坑道内施工的工作环境,为配电柜配置了防潮漏电断路器,漏电断路器与三相三线相匹配。

2.4 施工工艺方法

2.4.1 钻孔结构设计

由于钻孔布设在坑道内,且开孔即为完整的坚硬岩层,为了节约成本、简化工序,故采用 $\phi 59$ mm(或 $\phi 46$ mm)TT型金刚石普通双管钻具钻进一径到底。钻孔结构及倾角范围如图4所示。

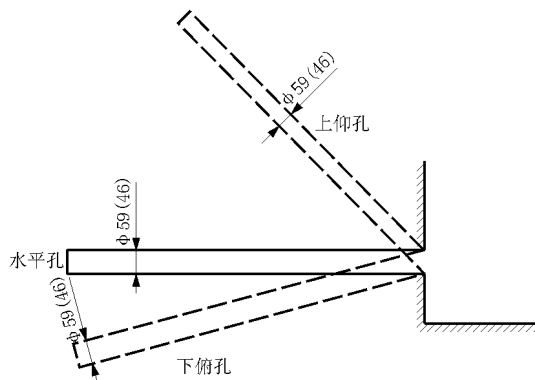


图4 钻孔倾角示意图

2.4.2 钻进工艺参数选择

钻进规程参数详见表1。当钻遇坚硬致密弱研磨性的较完整地层时,压力、转速都尽量取最大值,泵量适当取小值;当钻遇构造发育的破碎地层时,压力适当减小,转速、泵量取较小值。当钻孔倾角 $\geq 30^\circ$ 时,由于上仰孔倾角较大时,受钻具自重、摩阻力等影响,使施加于钻头的有效给进力减小,故应适当加大钻压,同时为了防止冲洗液倒流而影响设备的施工安全,应适当减小泵量,降低转速。

表1 钻进规程参数

钻进方法	钻头直径/ mm	钻压/ kN	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	泵量/ ($L \cdot \min^{-1}$)
金刚石普通	46	4~7	750~1200	25~40
		(5~8)	(600~900)	(20~35)
双管钻进	59	4.5~8.5	600~1000	30~45
		(5.5~10)	(600~800)	(25~40)

注:括弧内为上仰孔倾角较大($\geq 30^\circ$)时的钻进参数。

2.4.3 钻具(钻头)的选择及应用

采用 $\phi 59$ mm或 $\phi 46$ mm TT型普通双管取心钻具组合。钻具组合为: $\phi 59(46)$ mm TT型取心钻头+ $\phi 59(46)$ mm下扩孔器+ $\phi 56(44)$ mm TT型钻具外管+ $\phi 59(46)$ mm上扩孔器+ $\phi 56(43)$ mm TT型钻杆; $\phi 59$ mm TT型普通双管取心钻具如图5所示。

由于地层坚硬,最初采用钻机厂家随钻具一起提供的 $\phi 59(\phi 46)$ mm孕镶金刚石钻头,主要性能



图 5 059 mm TT 型普通双管取心钻具

参数:胎体硬度为 HRC20 ~ 35;人造金刚石品级为 SMD,粒度为 60 ~ 80 目,浓度为 100%。经使用,这类钻头在坚硬地层中效果较差。后经多次试验,选用软胎体孕镶金刚石钻头,具体性能参数:胎体硬度为 HRC8 ~ 20;人造金刚石品级为 SMD,粒度为 60 ~ 80 目,浓度为 75% ~ 80%;采用内外棱条柱状聚晶金刚石保径;采用平底形或圆弧形的唇面形状;采用常规水口形式,水口数量为 6 个或 8 个。用过的钻头如图 6 所示。



图 6 用过的孕镶金刚石钻头

2.4.4 安全施工技术措施

(1)施工区电器设备的电缆,均选用防水性能好、外皮强度高的耐高温防水电缆。电器设备均使用可靠的防漏电开关。

(2)施工设备须有良好的防水措施。为配电柜特意制作了 30 cm 高的金属底座,将其抬离地面;配备抽水设备应对突发情况,施工过程中遇到涌水现象时,切忌立即提出钻具,应在采取必要的防涌水措施后再进行钻进施工。

(3)施工机台应配备经培训合格的电工、电焊工等特种施工人员,特种工作必须由持有特种作业许可证的人员操作,并须有人专门看护,严禁在洞室内进行电气焊操作。

(4)禁止动用明火施工或取暖,处理好易引起火灾的物源,配备足够的、合格的消防器材,并做好消防工作。

(5)经常检查巷道内的通风情况,保证空气新鲜畅通;巷道内严禁动用明火。还须防范坑道排出的有毒、有害、易燃、易爆气体,为此,采购了 CD4 型多参数气体测定器,对甲烷(CH_4)、一氧化碳(CO)、氧气(O_2)、硫化氢(H_2S)等气体浓度进行实时监测,当环境中检测到待测气体的浓度达到或超过或低于(O_2)预置报警值时,测定器立即发出声光报警。

3 工程质量及保证措施

3.1 工程质量情况

经统计,本工程单孔岩心采取率在 94.67% ~ 100.00%,平均为 99.08%;钻孔倾角误差在 0.9° 以内(最大孔深为 153.19 m);其他指标均符合设计要求及规范要求。

3.2 主要技术措施

3.2.1 孔斜预防

(1)按照要求固定钻机。先立立柱部件,立柱上端靠牢在坑道拱顶的围岩上,下端用水平垫板支撑后锁紧,再将钻机放在立柱转盘上固定,按作业要求,调整到需要位置,务必使钻杆轴线在需要钻孔的位置上。

(2)钻具选择上尽量采用“刚、直”的满眼钻具。施工中采用的两套钻具均为满眼钻具的组合形式。 $\text{O}59.46$ mm TT 型取心钻具均为厚壁钻具,刚度较大,且两种钻具组合的钻柱与孔壁之间的间隙都较小,使得孔斜得到了有效的控制。

(3)及时测斜。为了掌握孔斜情况,每钻进 30 m 测一次顶角和方位角,以保证钻孔测斜数据的高精度和可靠性,以便在出现孔斜趋势时采取相应的应对措施。

3.2.2 确保坚硬地层取心率及钻进效率

(1)限制回次进尺。此次施工采用了长度 1.5、3.0 m 两种内岩心管。在完整的地层,可以使用 3.0 m 内岩心管,回次进尺 ≥ 3.0 m;在构造发育的破碎地层,须采用 1.5 m 内岩心管,回次进尺 ≥ 1.5 m。视钻进情况,及时对卡心装置做具体调整:卡簧座与钻头内台阶之间的间隙一般为 3 ~ 4 mm,在施工大倾角上仰孔时将该间隙调节至 3 mm 左右,在钻遇破碎地层时将该间隙调节至 2 ~ 3 mm。

(2)合理选用冲洗液,在非破碎地层使用无固相冲洗液。在坚硬致密且岩体完整的地层,在保证钻孔安全等基础上,不漏和微漏地层可以用清水加

皂化液或 PHP 无固相冲洗液作为循环介质钻进。上述无固相冲洗液有较好的紊流减阻及润滑性能,循环阻力小,能够较好地携带、悬浮岩屑,能有效提高机械钻速,提高钻进效率。在使用 PHP 无固相冲

洗液仍然漏失时,可以用低固相泥浆钻进。遇有孔壁坍塌、严重掉块、严重漏失时用高浓度 PHP、大裂隙堵漏剂等方法进行堵漏,必要时用水泥浆固孔。冲洗液配方及性能见表 2。

表 2 冲洗液配方与性能

泥浆种类	配 方			性 能					
	人工粘土/%	CMC/%	PHP/(mg·L ⁻¹)	漏斗粘度/s	密度/(g·cm ⁻³)	滤失量/[mL·(30 min) ⁻¹]	含砂量/%	pH 值	
粘土泥浆	3~5	0.1~0.3	100~150	22~25	1.05~1.10	<20	<4	8~9	
低固相泥浆	1~3	0.1~0.3	100~150	20~22	1.02~1.04	<15	<4	7~8.5	
无固相泥浆		0.3	150~300	18~20	1.005~1.007	<25	<4		

(3)使用软胎体金刚石钻头。因钻遇地层属硬—坚硬地层,具有弱研磨性,故选取了胎体硬度 HRC8~20 的孕镶金刚石钻头,以保证金刚石自锐速率。最初使用的金刚石钻头(HRC20~35)钻进速度缓慢,平均时效仅为 1.09 m,钻遇石英岩地层时效仅 0.29 m,甚至会出现不进尺现象。在选用软胎体孕镶金刚石钻头(HRC8~20)后,平均时效可达 2.10 m。经实践发现,胎体硬度 HRC8~10 的金刚石钻头适用于石英脉、磁铁石英岩地层的钻探施工,胎体硬度 HRC10~15 金刚石钻头适用于黑云角闪斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩等地层的钻探施工,胎体硬度 HRC15~20 金刚石钻头适用于磁铁矿、赤铁矿地层的钻探施工。

(4)在大倾角上仰孔洞内钻探施工中采用 Ø46 mm 口径钻进。分别采用 Ø59、46 mm 金刚石取心钻进大倾角上仰孔,相较之下 Ø46 mm 金刚石取心钻进效率更高,这是因为:一方面,Ø59 mm 取心钻具组合与孔壁摩擦力更大,使得全液压钻机夹持器夹盘胶套更易磨损,需要频繁更换胶套,增加了辅助时间,大大降低了钻进效率;另一方面,在大倾角上仰孔施工中需要克服钻具自重给孔底加压,而 Ø59 mm 取心钻具组合自重较大,使得钻机加压困难,影响钻进效率。综上所述,在大倾角上仰孔洞内钻探施工中采用 Ø46 mm 孔径能更好地确保转速、钻压等钻进参数的执行,提高钻进效率。

3.2.3 防冲洗液倒流措施

(1)采用小泵量。为防止上仰孔施工中冲洗液沿钻杆流入设备,在钻进参数选择上尽量选取小泵量,即选用 32 L/min 的泵量。

(2)在孔口附近挖导流孔。可以使流出孔口的冲洗液沿着导流孔及时流走,避免其沿着钻杆流入钻机主机体内。

4 结论及建议

(1)Z7559 型全液压钻机具有整机体积小、质量轻、搬迁方便、操作人员劳动强度低、钻进效率较高等特点,适用于大倾角洞内水平钻进。但其立柱部件两端、立柱转盘上固定尤为重要,确保钻杆轴线在需要钻孔的位置上,对成孔质量至关重要。

(2)在坚硬地层大倾角洞内水平钻进中采用“刚、直”的满眼钻具组合形式,可以有效预防孔斜。本次钻探工程最大孔深为 153.19 m,经测斜,钻孔顶角都能控制在 0.9°以内。

(3)在构造发育的破碎地层,限制回次进尺,是确保岩心采取率的有效方法之一。本次施工,单孔岩心采取率均在 94.67% 以上,平均可达 99.08%,破碎地层也达到 90% 以上。

(4)使用软胎体孕镶金刚石钻头,有利于坚硬致密弱研磨性地层中金刚石自磨出刃,保持较好的自锐速率,从而提高钻进效率。本次施工采用软胎体(HRC8~20)孕镶金刚石钻头在坚硬岩层中钻进,平均时效为 2.10 m,比使用钻机厂家提供的金刚石钻头(HRC25~35,平均时效为 1.09 m)有了较大提高。

(5)在大倾角上仰孔洞内钻探施工中尽量采用较小的 Ø46 mm 口径钻进,Ø43 mm 铝合金钻杆自重较小,所需给进力较小,能更好地确保转速、钻压等钻进参数的执行,提高钻进效率。

(6)在施工条件局限性较大的洞内施工中,采用小泵量,在孔口附近挖导流孔,能够防止上仰孔施工中冲洗液沿钻杆流入钻机主机体内。本次施工证明,此方法实用有效。

(7)坑道钻探受工作环境限制,施工人员和

(下转第 50 页)

5 结论

(1) 分析研究了针对负角度螺纹薄弱部位进行扭转最大扭矩计算的方法,其计算结果与静扭测试非常接近,误差在6.6%以内,可以作为深孔绳索钻杆螺纹设计的重要参考;

(2) 负角度螺纹在传递扭矩时,各个螺纹受方面传递扭矩大小不同,可以根据其扭矩值分布情况进行螺纹规格参数进一步优化设计;

(3) 负角度螺纹锥度、牙高和危险截面面积对负角度螺纹最大扭矩有不同程度影响,影响因素最大的是危险截面面积,因而增大危险截面面积可有效增加螺纹最大扭矩;

(4) 对比分析不同螺纹规格的静扭测试和理论计算结果,3500-N-II 试样负角度螺纹规格,牙高为1 mm,锥度为1:16 负角度螺纹可以作为深孔负角度螺纹的重要参照螺纹规格。

参考文献:

[1] 董海燕,王鲁朝,杨芳,等. 国产 CNH(T) 绳索取心钻杆在中国

岩金勘查第一深钻工程中的应用分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(1):49-53.

- [2] 山本晃. 螺纹连接的理论与计算[M]. 郭可谦译. 上海:上海科学技术出版社,1984.
- [3] 刘巨保,张薇,王世永. 套管钻井中连接螺纹力学分析及设计计算[J]. 大庆石油学院学报,2006,30(1):47-49,56.
- [4] 高连新,金焯. 套管连接螺纹的受力分析与改善措施[J]. 上海交通大学学报,2004,38(10):1729-1732.
- [5] 苏继军. 金刚石绳索取心钻杆接头螺纹的优化研究[D]. 吉林长春:吉林大学,2005.
- [6] 刘建群. 旋转台肩连接螺纹轴向载荷分析与计算[D]. 吉林长春:吉林大学,2005.
- [7] 赵大伟,赵国仙,赵映辉,等. $\varnothing 88.9\text{mm} \times 9.35\text{mm}$ G105 钻杆内螺纹接头胀扣失效分析[J]. 石油矿场机械,2009,38(6):56-60.
- [8] 谭申刚. MJ 螺纹强度理论与计算[M]. 陕西西安:西北工业大学出版社,2014.
- [9] 刘华南,郭威,孙友宏,等. 绳索取心钻杆超声波探伤方法分析研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(7):31-33.
- [10] 满国祥,杨宏伟. 国产绳索取心钻杆设计与制造技术的分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(2):49-52.

(上接第26页)

设备的安全问题凸显。要建立完善的安全生产管理机构,全面加强对施工人员的安全培训;要配备相应的防漏电、防水、防火设备,还应确保通风安全,对有毒、有害、易燃、易爆气体实时监测。

参考文献:

- [1] 吴光琳. 定向钻进工艺原理[M]. 四川成都:成都科技出版社,1991.
- [2] 李世忠. 钻探工艺学(上册)[M]. 北京:地质出版社,1992.
- [3] 刘广志. 金刚石钻探手册[M]. 北京:地质出版社,1991.
- [4] 秦沛. 矿山洞内同一位置垂直向上向下钻探施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2004,31(11):47-49.
- [5] 吉路波,宋强军. 大倾角上山岩巷快速掘进技术实践[J]. 科技与企业,2014,(15):248-248.
- [6] 李宝辉,刘志会. 深孔勘察中强自然造斜地层的防斜纠斜工艺技术措施[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(7):8-9.
- [7] 常江华. 坑道水平孔取心钻进技术的应用[J]. 化工矿物与加工,2014,(11):46-48.
- [8] 倪林祥. 关于岩石研磨性与金刚石孕镶钻头的选型[J]. 探矿工程,1980,(5):11-15.

- [9] 闵东. 坑道钻探硐室设计及坑道钻探施工安全措施[J]. 西部探矿工程,2010,22(1):59-60.
- [10] 梁绪年,李建斌,刘清. 浅谈甘肃玛曲大水金矿坑道水平钻探施工[J]. 西部探矿工程,2014,26(8):77-79.
- [11] 庄生明,吴金生,张伟,等. 汶川地震断裂带科学钻探项目 WFSD-4 孔取心钻进技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):126-129.
- [12] 张伟,贾军. 汶川地震科学钻探二号孔取心钻进方法的选择[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(7):5-7.
- [13] 谭志军. 矿山坑内钻探技术现状及其发展方向[J]. 矿山地质,1990,11(3):80-82,98.
- [14] 张蛮庆. 高强度人造金刚石孕镶钻头钻进坚硬岩层的试验效果[J]. 探矿工程,1980,(5):43.
- [15] 陶士先,陈礼仪,单文军,等. 汶川地震断裂带科学钻探项目 WFSD-2 孔钻井液工艺研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(9):45-48.
- [16] 汤凤林, Чихоткин В. Ф., 高申友,等. 关于金刚石钻进参数合理配合的分析研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(10):76-80.
- [17] 汤士博,熊伟,彭万利,等. 加强钻探工程管理工作的措施和建议[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(8):68-70,79.
- [18] 刘治,李宁,刘长江. 谈钻探项目施工管理[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(2):82-84.