

复杂地层高压旋喷护壁堵漏技术的研究与应用

李中明, 肖尧, 罗婷

(湖南省水文地质环境地质调查监测所, 湖南长沙 410129)

摘要:借鉴复杂地层高压旋喷护壁堵漏技术设计了一种带有特殊喷嘴的旋喷钻具,在复杂地层钻进,尤其是多层段复杂地层和深部复杂地层钻进时,泥浆护壁失效的情况下,将该钻具下到复杂孔段,利用泥浆泵将水泥浆液压入,通过旋喷钻具连续旋转喷射出高压水泥浆切割坍塌孔段孔壁,使不稳定孔壁的破碎岩土崩落掉块与水泥浆混合,候凝后,在坍塌孔段形成直径不规则的柱状水泥岩土混合物,重新钻穿后,形成有一定强度的“水泥套管”,从而达到同径护壁堵漏的目的。详细介绍了该项技术的旋喷钻具的设计、水泥浆液配方、工艺原理、技术要点、操作要领及生产应用效果。

关键词:复杂地层;高压旋喷;旋喷钻具;水泥浆;同径护壁堵漏

中图分类号:P634.8 文献标识码:A 文章编号:2096-9686(2022)04-0074-07

Research and application of high pressure rotary jet grouting technology for plugging in complex formation

LI Zhongming, XIAO Yao, LUO Ting

(Hunan Hydrogeology and Environmental Geology Institution, Changsha Hunan 410129, China)

Abstract: With high-pressure jet grouting plugging technology for complex formations, a jet grouting tool with special nozzles is designed to drill through complex formations, especially multi-layer complex formations and deep complex formations where drilling mud fails to protect hole walls. The drilling tool is lowered to the complex hole section, and cement slurry is hydraulically injected by the mud pump, and sent out continuously through the tool at high pressure to cut the hole wall at the collapsed section where broken rock and soil from the unstable hole wall is mixed cement slurry. After waiting for setting, a columnar cement-rock-soil mixture with irregular diameter is formed at the collapsed hole section. After re-drilling, a “cement casing” with some strength is formed to achieve wall protection at the same diameter. The design, cement slurry formula, process principle, technical points, operation essentials and field application effects of the technology are introduced in detail.

Key words: complex formation; high pressure jet grouting; rotary jet drilling tool; cement slurry; borehole protection and leakage control at the same diameter

0 引言

复杂地层钻进,尤其是多层段复杂地层和深部复杂地层钻进时,在泥浆护壁堵漏失效的情况下,通常采用灌注水泥浆和套管护壁堵漏的方法。灌注水泥浆虽然能实现同径护壁堵漏,但由于泥浆渗

透半径小,与孔壁岩石结合强度不够,在后期的钻进过程中,因钻杆扰动,泥浆浸泡,易造成护壁堵漏失效。而用套管护壁,对于浅孔和单一复杂地层来讲,是最可靠的护壁堵漏方法,但对于多层段复杂地层,往往受口径制约,难以达到地质目的,而深部

收稿日期:2022-03-03; 修回日期:2022-05-18 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.04.011

基金项目:湖南省核工业地质局科研基金资助项目“复杂地层高压旋喷护壁堵漏技术的研究与应用”(编号:KY2013-TY-01)

第一作者:李中明,男,汉族,1988年生,工程师,探矿工程专业,长期从事钻探技术与管理工作,湖南省长沙市经开区东六号南段100号,49765528@qq.com。

引用格式:李中明,肖尧,罗婷.复杂地层高压旋喷护壁堵漏技术的研究与应用[J].钻探工程,2022,49(4):74-80.

LI Zhongming, XIAO Yao, LUO Ting. Research and application of high pressure rotary jet grouting technology for plugging in complex formation[J]. Drilling Engineering, 2022,49(4):74-80.

复杂地层扩孔风险大、扩孔和套管成本高。因此在上述复杂地层施工中迫切需要一种便捷、可靠、低廉的同径护壁堵漏方法。

高压旋喷技术广泛应用于地基加固。在地质钻探中的应用方面,吴金生等^[1]研发了通过调节泥浆泵排量控制泵压从而实现扫孔和喷射注浆不同施工作业切换的组合钻具,从而实现钻孔护壁。本文借鉴高压旋喷技术的基本原理,根据地质钻探设备、工艺、地层的特性,系统研究了适用于地质钻探复杂地层钻进施工的旋喷钻具结构、水泥浆液配方、工艺原理、技术要点、操作要领^[2-4],并进行了生产试验,取得了较好的应用效果。

1 高压旋喷护壁堵漏技术的设计原理

针对复杂地层钻进,尤其是多层段复杂地层和深部复杂地层钻进施工过程中出现漏失、垮塌问题,借鉴高压旋喷加固地基的原理,将高压旋喷技术引入岩心钻探复杂地层钻进中,改变常规水泥浆灌注方法,提高水泥浆在岩心钻探复杂地层钻进护壁堵漏中的有效性^[5-6]。

通过在钻杆下端安装旋喷钻具,下到复杂地层目的层后,泥浆泵将改性水泥浆通过钻杆,经高压旋喷钻具下部喷嘴形成高压射流射出,在钻具缓慢旋转和自下向上提升过程中,切割破碎层,在此过程中,水泥浆液不断渗透复杂地层段孔壁、裂隙,并与不稳定孔壁的破碎崩落及切割下来的岩土混合,完全充填垮塌超径形成的空间,经过一段时间候凝后,在坍(垮)塌孔段形成一段直径不规则的柱状水泥岩土固结体,重新钻穿后,形成有一定强度的“水泥套管”达到同径护壁堵漏裸孔钻进的目的。

1.1 高压旋喷钻具结构特点

在参考地基处理高压旋喷钻具的基础上^[7-10],结合小口径绳索取心钻具的特点,设计了适合绳索取心钻进的高压旋喷钻具,钻具由旋喷体、喷嘴、钢球、钻头等组成(见图1)。

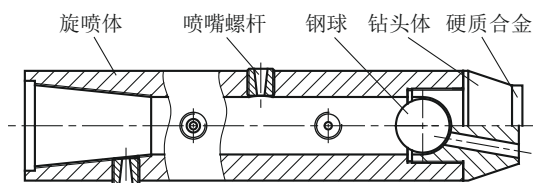


图1 旋喷钻具结构

Fig.1 Structure of the rotary jet drilling tool

1.1.1 喷嘴

喷嘴是旋喷钻具的关键组成部件,是将高压液流的压力能转化成动能的元件。它的结构直接决定射流动能大小,直接影响固结体半径,也就是直接影响护壁堵漏效果^[11-12]。

在高压高速条件下,单位时间内从喷嘴射出的射流具有很大的能量,其关系见式(1):

$$F=10^{-3}\rho AV^2 \quad (1)$$

式中: F ——喷射力,N; ρ ——浆液密度,kg/L; V ——射流平均速度,m/s; A ——喷嘴截面积,m²。

从式(1)可见,喷嘴的截面积对射流的影响比较明显。圆锥角 θ 为 $13^\circ\sim 14^\circ$ 时,流量损失最小,喷嘴的流速流量值较大。喷嘴直径宜在3~5 mm之间。

喷嘴带M16外丝扣,用时拧入旋喷体,可按不同地层需要,方便调整喷嘴口径(见图2)。

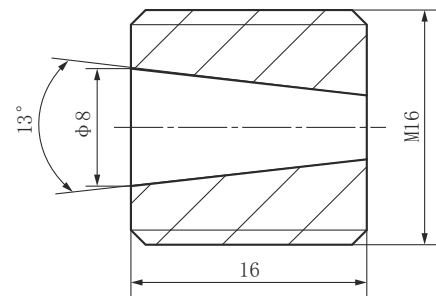


图2 喷嘴结构

Fig.2 Structure of the nozzle

1.1.2 旋喷体

旋喷体外径65 mm,内径34 mm,长260 mm,加工有4个M16螺孔,用于连接喷嘴,可按不同地层需要,方便调整喷嘴数量(见图3)^[13]。

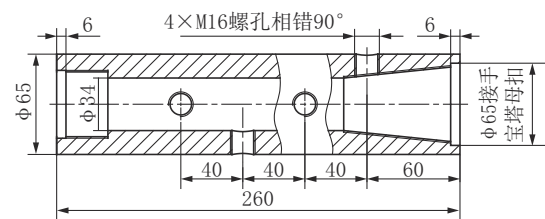


图3 旋喷体结构

Fig.3 Structure of the jet grouting body

1.1.3 钻头

为锥形硬质合金钻头,前部镶有3块硬质合金,底部2个通孔,便于下钻遇阻时扫孔。钻头内有 $\phi 32$ mm锥面,当高压旋喷施工时,投入钢球止水

(见图4)。

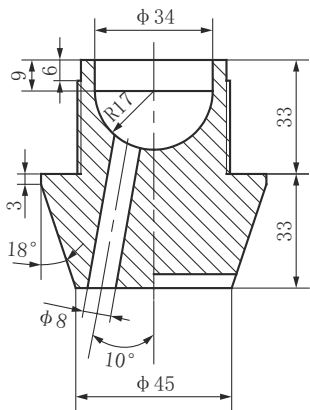


图4 钻头结构

Fig.4 Structure of the drilling bit

1.2 高压旋喷水泥浆液配方

1.2.1 无流动水条件下的配方

经过室内实验,目标层位无流动水时,综合考虑高压旋喷工艺耗时以及水泥浆性能,采用水泥浆配方为:水灰比0.5(灰:水泥96%+膨润土4%),减水剂1%,水玻璃2%~3%。膨润土主要增加浆液和易性及流变性、膨润土要预水化^[14]。

该水泥浆性能:流动度190~210 mm,析水率2%~4%,初凝时间4.5 h,终凝时间6.5 h。

1.2.2 有流动水条件下的配方

目标层位有流动水时,可采用SJP水泥浆^[15],该水泥浆具有起始稠度小,随时间延长,稠度增加不大,到浆液开始要失去流动性时,稠度有一个突变的时间点的特性。其配方为水泥、水、SJP外加剂^[15],其中SJP外加剂包括3种外掺剂,助剂1号为纤维素类有机材料,用于打破水泥颗粒被水化产物隔离的状态,使其快速参与反应,同时在水泥颗粒间生成致密的胶结物;助剂2号钙硅质早强剂、3号酰胺类稳定剂主要用于控制水泥水化的反应速度与反应程度。3种助剂采用不同的剂量,水泥浆的可泵期可在5~50 min的范围内调节,水泥浆2~3 h初凝,初凝过后2~3 h终凝,水泥浆固结过程中析水率小,且后期强度较纯水泥浆提高10%。

现场使用中应根据旋喷护壁需求,严格计算、控制旋喷工艺耗时,调节好水泥浆的可泵期,避免水泥浆堵塞钻杆事故发生。

实验水泥浆配方为:水灰比0.6(425普通硅酸

盐水泥),助剂1号0.33%,助剂2号2.0%,助剂3号0.6%。

该水泥浆性能:流动度200 mm,可泵期50 min,初凝时间2 h,终凝时间5 h。

2 高压旋喷护壁堵漏技术施工工艺

高压旋喷水泥浆护壁堵漏技术工艺流程为:确定护壁孔段→组装旋喷钻具→下入旋喷钻具(扫孔)→配置水泥浆→(投入钢球)压浆旋喷提升→提出旋喷钻具→清洗旋喷机具→候凝→扫孔钻进。

2.1 组装、检测旋喷钻具

机具组装,下孔前,应进行地面试喷,并检查高压系统的完好性及设备的可靠性和压力。确定旋转、提升速度等参数。

2.2 下入旋喷钻具

(1)下钻要稳,遇坍塌孔段用泥浆扫孔到目的层。

(2)下钻时喷嘴用胶带缠封保护,到目的层投入钢球后,为确保喷嘴缠封胶带顺利冲开,宜先采用流动性更好的低粘度浆液或清水。

2.3 旋喷水泥浆液量计算

喷浆量计算有体积法和喷量法2种方法,体积法适用于理论计算,现场应用中一般采用喷量法计算。

(1)体积法:

$$Q = (\pi/4)D_1^2 k_1 h_1 (1 + \beta) + (\pi/4)D_2^2 k_2 h_2 \quad (2)$$

式中:Q——需用浆量, m³; D₁——旋喷体直径, m; D₂——注浆管直径, m; k₁——填充率,取0.75~0.9; k₂——未旋喷范围的填充率,取0.5~0.75; h₁——旋喷长度, m; h₂——未旋喷长度, m; β——损失系数,取0.1~0.2。

(2)喷量法:

以单位时间喷射的浆量及喷射持续时间,计算出浆量:

$$Q = (H/V)q(1 + \beta) \quad (3)$$

式中:V——提升速度, m/min; H——喷射长度, m; q——单位时间喷浆量, m³/min。

2.4 水泥浆配制

(1)水泥过筛网,颗粒<3.5 mm,膨润土浸泡。

(2)按配方顺序,添加材料,充分搅拌,同时要注意观察,具体次序为:水(扣除浸泡膨润土用水)→水泥→浸泡膨润土→水玻璃→减水剂。

(3)浆液过滤:在吸水管前设一道过滤网,滤网目数应小于喷嘴直径。

(4)已制成的待用浆液应不间断搅拌,防止沉淀。

2.5 压浆旋喷提升

(1)将钻具下入到目的孔段底部后,卸开主动钻杆投放钢球止水。

(2)重新接上钻杆,用低粘度浆液或清水冲开喷嘴保护胶带,然后压送配制好的水泥浆液。

(3)喷射注浆参数:压力达到规定值并稳定后(当泵压升高后稳定),水泥浆到底,转动钻杆缓慢往上提。其参数见表1。

表1 高压旋喷注浆技术参数

喷嘴直径/mm	喷嘴数量/个	浆液压力/MPa	浆液流量/(L·min ⁻¹)	提升速度/(cm·min ⁻¹)	旋转速度/(r·min ⁻¹)
3~5	3~4	8~20	60	12~15	50

当喷至加固孔段顶部位置时(当泵压减小时),停止旋喷作业提出孔内钻具,并及时清理。

旋喷过程中,应随时记录异常情况,并做好施工记录。要安排专人在泥浆泵旁边观察泵压变化,当憋泵时,提起水泵操纵手把。

2.6 压送替浆水

替浆水公式:

$$Q_{\text{压}} = K(L-M)D + Q_{\text{地}} \quad (4)$$

式中:Q_压——替浆水量,L;K——压水系数,浅孔取0.9,深孔取0.95;L——钻孔深度,m;M——孔内静水位,m;D——每米钻杆容积,L/m;Q_地——地面管阀及水泵容积,L。

2.7 清洗机具设备

水泥浆液灌注完毕,认真清洗注浆机具、设备;钻杆内不得残存水泥浆。

2.8 扫孔

候凝时间在12~16 h为宜,地层松软取小值,地层完整可选大值。实践表明,候凝时间过短,水泥与孔壁的固结体会因强度过小而受到破坏。候凝时间过长,水泥强度较高,易在松软孔段扫出新孔。

3 工程应用及分析

3.1 地表试验

通过地表试验,检查、验证整个系统运行情况,喷嘴喷射情况,水泥浆性能及设备,钻具工作稳定情

况,直观检验喷射状态。地表试验现场见图5。



图5 地表试验现场

Fig.5 Surface test site

试验设备:BW-250型泥浆泵、高压管、主动钻杆、泵压表、搅拌桶、手电钻(搅拌器用)、带喷嘴的钻具2套(一套带锥度的喷嘴钻具,一套没有锥度的喷嘴钻具,各有4个喷嘴,喷嘴直径5、3 mm)。试验分清水和水泥浆2种情况进行(见表2)。

表2 喷嘴试验参数对比

冲洗液类型	喷嘴直径/mm	泵压/MPa	泵量/(L·min ⁻¹)	喷射距离/m	备注
清水	θ ≤ 13°	2	60	3	
		4		6.5	
		6		7.5	
		8		9	
	5	2	60	2	
		4		5	
		6		6	
		8		6.5	
水泥浆(水灰比0.5)	θ ≤ 13°	2	60	2.5	水泥浆配方:水灰比0.5,减水剂1%,水玻璃2%~3%
		4		5	
		6		6.5	
		8		8.5	
	5	2	60	1.5	
		4		3	
		6		4	
		8		4.5	

从表2可以看出,喷嘴的直径和泵量一定的情况下,泵压越高,喷射距离越远。小直径喷嘴比大直径喷射的距离远。从实验中可看出带有锥度θ喷嘴雾化比直喷嘴的雾化好。但从多次实验情况来看,

带有锥度的喷嘴口易损坏,而且带锥度的喷嘴机加工工艺复杂,不适应野外生产,在实际生产应用中通常采用直径3~5 mm的直喷嘴。

3.2 生产应用情况

3.2.1 湖南省郴州石盖塘某铅锌矿项目生产应用

湖南省郴州石盖塘某铅锌矿项目ZK1803孔设计倾角90°,施工设备为GXY-2型钻机、BW-160/10型泥浆泵。开孔用 $\varnothing 110$ mm硬质合金钻头,地层为第四系残坡积物,开孔即采用优质泥浆,钻进5 m后,岩心变硬,其岩层为石炭系中的白云岩;钻进到9.03 m岩石破碎,表现为岩层裂隙发育,结构松散。从第9回次开始岩心破碎,采取率在20%~50%,特别是在21.16~29.43 m处泥浆严重漏失。从9~32.40 m段采用旋喷注浆护孔壁破碎、封漏失孔段,经透孔钻进到32.40 m,下入 $\varnothing 108$ mm套管32.43 m,然后改 $\varnothing 75$ mm绳索取心钻进。

在60~230 m段,为白云质灰岩。钻进到95~121 m遇构造破碎带,裂隙发育,见有大裂隙,宽度约为150 mm,夹带泥质灰岩,在高水头压力作用下岩层发生垮塌,钻进过程中频繁发生断钻杆事故,为此进行旋喷注浆护孔。

在237~436 m为中细粒似斑状黑云母花岗岩,特别在275~317 m岩层受地质应力的强挤压作用下,岩石极为破碎,胶结松散,表现为钻进堵水、堵心,经常发生钻杆折断,稍不注意会造成烧钻事故。此段破碎段较长,如果冲洗液选择和操作方法不当,一旦坍塌,极易形成连锁反应,坍塌无法控制。为此每钻进10多米进行旋喷注浆护孔,连续灌注3次,护住了此严重破碎、垮孔段。取出了水泥心(见图6)。最后钻进至436 m终孔。

此孔注浆所用的旋喷钻具有直径4 mm的直喷嘴4个,相隔80 mm,分别安在4个不同的方向。注浆用水泥为42.5普通硅酸盐水泥,水灰比0.5。耗用

水泥8包,减水剂4 kg,水玻璃12 kg。旋喷技术参数见表3。

表3 某铅锌矿项目现场旋喷技术参数

Table 3 Technical parameters of on-site rotary jet grouting in a lead-zinc mine

喷嘴直 径/mm	喷嘴数 量/个	泵压/ MPa	泵量/(L· min ⁻¹)	提升速度/ (cm·min ⁻¹)	旋转速度/ (r·min ⁻¹)
4	4	5~10	60	8~12	54

注:候凝15 h扫孔

3.2.2 湖南省汝城某铀矿项目生产应用

为了进一步检验高压旋喷护壁堵漏技术工艺及方法,我们在湖南省汝城县某铀矿项目ZK43-02孔进行了生产应用。

主动钻杆,高压管(50 m),立式搅拌桶,水电钻(搅拌器用),带有喷嘴的旋喷钻具1套(旋喷钻具有直径4 mm的直喷嘴4个,相隔距离80 mm,分别安在4个不同的方向), $\varnothing 75$ mm绳索取心钻杆700 m,水泥4包,减水剂2 kg,水玻璃6 kg。

该地区主要是覆盖层中粗粒似斑状黑云母花岗岩,石英硅化带,碎裂蚀变花岗岩硅化构造角砾岩,绿泥蚀变花岗岩。岩层软硬交替,蚀变碎裂遇水极易松散膨胀,掉块和钻井液漏失严重。

ZK43-02施工所用钻机为GYH-1500型,泥浆泵为BW-250型。开孔用 $\varnothing 110$ mm金刚石钻头,地层为第四系残坡积物,采用浓泥浆,钻进到30多米,岩心变硬,其岩石为花岗岩,下入 $\varnothing 89$ mm套管。变径 $\varnothing 75$ mm绳索取心,钻进至127回次,孔深285.70 m,岩心为花岗岩,继续钻进3个回次后出现钻机憋车、泵压升高现象,采用泥浆护壁无效后无法继续钻进。因 $\varnothing 89$ mm套管已下至285.70 m,不能用小一级套管封住复杂地层段,故采用高压旋喷技术解决护壁问题。在孔深286 m处,碰到水泥面,扫孔取出水泥心样,扫孔穿过坍塌孔段后,采用 $\varnothing 75$ mm钻进,钻进5 m后见完整花岗岩,钻进至终孔。

旋喷钻具有直径4 mm的直喷嘴4个,相隔80 mm,分别安在4个不同的方向。此孔注浆用42.5普通硅酸盐水泥,水灰比0.5。耗用水泥4包,减水剂2 kg,水玻璃6 kg。具体旋喷技术参数见表4。

3.2.3 山西省繁峙县某金矿项目应用

2021年7月,在山西省繁峙县某金矿ZK1102钻



图6 ZK1803孔水泥心

Fig.6 Cement core taken from ZK1803 well

表4 某铀矿现场旋喷技术参数

Table 4 Technical parameters of on-site rotary jet grouting in an uranium mine

喷嘴直 径/mm	喷嘴数 量/个	泵压/ MPa	泵量/(L· min ⁻¹)	提升速度/ (cm·min ⁻¹)	旋转速度/ (r·min ⁻¹)
4	4	8~10	60	12~15	50

注:候凝15 h扫孔

孔施工,地层为片麻岩,下部构造发育,岩石蚀变强烈,无地下水,施工采用TW系列金刚石绳索取心钻进工艺,使用膨润土、纤维素、植物胶等材料的高性能泥浆施工。当 $\varnothing 75$ mm(NTW)金刚石绳索取心钻进至232~264 m层段时,钻遇多层强蚀变破碎带,其最厚处有16 m,孔内垮塌、掉块严重,卡埋钻现象频发,施工难度极大。因 $\varnothing 95$ mm套管位于45 m处,上部岩石完整坚硬,扩孔难度大、成本高,故选用高压旋喷技术解决该层段孔壁不稳定问题,并根据钻机设备特点优化高压旋喷工艺。

施工所用钻机为EP600PLUS型便携式全液压钻机,BW150型泥浆泵,NTW钻杆。

根据设备条件,对旋喷钻具、水泥浆配方、施工操作3个方面进行了优化。

(1)旋喷钻具:为保障旋喷切力,采用直径4 mm的直喷嘴3个,分别安在相隔120°的3个不同方向,呈螺旋状分布。

(2)水泥浆配方:为提升浆液流变性,提高了减水剂的加量。此孔注浆采用配方为:水灰比0.5(42.5普通硅酸盐水泥),减水剂1.5%,水玻璃3%。

(3)施工操作:为实现更好的旋喷效果,利用液压钻机无级调速的优势,适当降低了钻具提升速度与旋转速度。具体旋喷技术参数见表5。

表5 某金矿现场旋喷技术参数

Table 5 Technical parameters of on-site rotary jet grouting in a gold mine

喷嘴直 径/mm	喷嘴数 量/个	泵压/ MPa	泵量(L· min ⁻¹)	提升速度/ (cm·min ⁻¹)	旋转速度/ (r·min ⁻¹)
4	3	5~8	60	10~15	30

注:候凝20 h扫孔

利用旋喷钻具先导钻头扫孔到264 m,从下往上旋喷注浆,用水泥6包,减水剂4.5 kg,水玻璃9 kg。候凝20 h后扫孔,在226 m处遇完整水泥心(见图7),扫孔后正常钻进,后续穿过该层位后未再

出现卡埋钻问题,顺利终孔。



图7 ZK1102岩心与水泥心

Fig.7 Rock core and cement core taken from ZK1102 well

4 高压旋喷护壁堵漏技术特点和应用技术要点

4.1 技术特点

该技术具有设备简单、施工方便、速度快、效益高、成本低、操作简单、适用范围广等特点。

(1)能在十多个小时解决复杂地层护壁堵漏问题,确保继续同径裸孔钻进,大幅减少套管投入、节省时间。

(2)能大幅提高纯钻进时间,减少孔内事故时间,提高台月效率,降低钻探成本。

4.2 应用技术要点

(1)灌浆前必须准备充分,分工明确,指挥统一,动作协调迅速,全部浆量必须一次灌完。

(2)应详细了解、掌握、记录实际孔深和孔内护壁孔段情况,并进行详细分析。

(3)应根据孔内情况合理确定喷嘴数量、直径和工艺参数。旋喷施工中要注意泵压,转速,提升速度等参数的控制,并及时根据地层情况进行调整。

(4)喷射注浆自下而上连续进行,送浆到位后停泵,中途不得任意中断喷射、提升。因卸管或其他原因(停电、停水、机械故障等)造成的注浆中断,停泵时间超过0.5 h,应清洗管路,防止堵塞。恢复旋喷时,从中断处0.5 m以下开始,以保证旋喷体质量。

(5)在高压旋喷过程中出现压力骤然下降,上升

等异常情况时,应查明产生的原因并及时采取措施。

(6)施工中应如实记录高压旋喷的各项参数和出现的异常现象,做好钻孔及旋喷作业原始记录。

5 结语

通过高压旋喷护壁堵漏技术工艺的试验和野外生产实践,实现了高压旋喷技术在岩心钻探中的应用,形成了较完善的复杂地层高压旋喷护壁堵漏技术体系。工程应用实践表明,该技术具有安全性强、施工简便、防漏堵漏效果好等优点,尤其适用于解决多层段复杂地层和深部复杂地层钻进严重垮孔漏失问题,解决了复杂地层护壁堵漏受孔径限制的难题,提高了钻孔质量。这一成果为复杂地层护壁堵漏增添了一种行之有效的手段。进一步研究旋喷钻具喷嘴的几何形状,采用专门的高压旋喷设备,引进双管旋喷工艺,拓展应用范围,该技术前景广阔。

参考文献(References):

- [1] 吴金生,李俊萍,张统得,等.一种用于钻孔护壁的高压喷射注浆组合钻具:201520666584.6[P].2015-12-16.
WU Jinsheng, LI Junping, ZHANG Tongde, et al. High-pressure jet grouting combined drilling tool for borehole wall protection:201520666584.6[P].2015-12-16.
- [2] 王达,何远信,等.地质钻探手册[M].长沙:中南工业大学出版社,2014
WANG Da, HE Yuanxin, et al. Geological Drilling Handbook [M]. Changsha: Central South University Press, 2014
- [3] 李世忠.钻探工艺学[M].北京:地质出版社,1998.
LI Shizhong. Drilling Technology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998.
- [4] 乌效鸣,胡郁乐,贺冰新,等.钻井液与岩土工程浆液[M].武汉:中国地质大学出版社,2002.
WU Xiaoming, HU Yule, HE Bingxin, et al. Drilling Fluid and Geotechnical Slurry [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2002.
- [5] 陶建华,李粤南,陈惠明,等.高压旋喷水泥浆护壁技术的研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(3):11-17.
TAO Jianhu, LI Yuenan, CHEN Huiming, et al. Research and application of wall protection technology with high pressure jet grouting cement slurry [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(3):11-17.
- [6] 彭金灶.马坑外围矿区ZK7924孔施工难点及对策[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(9):10-12,15.
PENG Jinzao. Construction difficulties in ZK7924 hole of surrounding mining area of Makeng [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(9):10-12,15.
- [7] 张红涛.粗砂砾石地层中高压旋喷桩隔水帷幕施工技术[J].钻探工程,2021,48(6):113-117.
ZHANG Hongtao. Construction of the jet grout water cut-off curtain in coarse gravel formation [J]. Drilling Engineering, 2021,48(6):113-117.
- [8] 陈哲,张兆楠,石逊.福清核电厂边坡工程高压旋喷与帷幕灌浆止水施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(5):71-75.
CHEN Zhe, ZHANG Zhaonan, SHI Xun. Application of high pressure jet grouting and curtain grouting water sealing in a nuclear power project [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(5):71-75.
- [9] 宋刚练,牌卫卫,江建斌,等.应用于污染场地原位修复的旋喷工艺研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(7):85-89.
SONG Ganglian, PAI Weiwei, JIANG Jianbin, et al. Research on rotary jet grouting technology applied in situ remediation of contaminated site [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(7):85-89.
- [10] 宋志彬,张金昌,冯起赠,等.防渗加固高压旋喷注浆技术的研究与应用[J].探矿工程,2003(1):38-42.
SONG Zhibin, ZHANG Jinchang, FENG Qizeng, et al. The Research and application of high pressure rotary jetting technique for leak proofing and soil strengthening engineering[J]. Exploration Engineering, 2003(1):38-42.
- [11] 崔高汉,胡仲杰,方勇,等.高压旋喷成桩机理分析及其对设备的要求[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(9):24-27,31.
CUI Gaohan, HU Zhongjie, FANG Yong, et al. Discussion on the mechanism analysis of high-pressure rotating spray pile and request for the equipments [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008,35(9):24-27,31.
- [12] 罗帅训,赵建勃,贺雪峰,等.高压旋喷多管喷头的研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(7):78-81,87.
LUO Shuaxun, ZHAO Jianbo, HE Xuefeng, et al. Development of the 11-tube high-pressure rotary jet nozzle[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(7):78-81,87.
- [13] 隆威,莫志柏,张忠永.单管高压旋喷扩径技术与植筋旋喷桩技术的研究与应用[J].探矿工程,2003(1):46-48.
LONG Wei, MO Zhibai, ZHANG Zhongyong. Application of and research on single-tube high pressure grouting technique and reinforced chemical churning pile technique[J]. Exploration Engineering, 2003(1):46-48.
- [14] 裴向军,王文臣,谢俊革,等.SJP水泥浆封堵强涌水钻孔可控注浆工艺技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(5):62-67.
PEI Xiangjun, WANG Wenchen, XIE Junge, et al. Research on the controlled grouting process with SJP cement slurry for plugging of strong water gushing borehole [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(5):62-67.
- [15] 张佳兴,裴向军,靖向党.SJP型浆材在地基加固中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(4):72-75.
ZHANG Jiaying, PEI Xiangjun, JING Xiangdang. Application of SJP slurry in foundation reinforcement [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(4):72-75.

(编辑 荐华)