

SJP 水泥浆封堵强涌水钻孔可控注浆工艺技术研究

裴向军¹, 王文臣^{1,2}, 谢俊革², 张佳兴¹, 杨福全³, 杜野¹

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 长春工程学院, 吉林 长春 130021; 3. 云南冶金资源股份有限公司, 云南 昆明 650000)

摘要:以云南毛坪铅锌矿勘查钻孔涌水治理实践为背景, 针对金刚石钻进钻孔高涌水压力和大流量涌水的工程实际, 对多种涌水治理方案进行了论证分析。依据实测的涌水量及涌水压力等参数, 提出了可控注浆堵涌工艺。论述了 SJP 水泥浆基本组成及其性能特点, 可控注浆止涌的工艺技术, 分析了止涌注浆孔口压力变化与孔内浆液处境之间的关系, 提出了止涌注浆压力变化中的“零起点”和“零终点”及 h 值等新概念, 以及利用压力变化判断涌水通道类型的方法等。经 3 个涌水钻孔的注浆止涌的实践表明, 按研究成果对大涌水量钻孔进行治理, 有效封堵了这 3 个强涌水钻孔, 保证了工程顺利施工。

关键词:强涌水; SJP 浆液; 可控注浆

中图分类号: P634.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)05-0062-06

Research on the Controlled Grouting Process with SJP Cement Slurry for Plugging of Strong Water Gushing Borehole/PEI Xiang-jun¹, WANG Wen-chen^{1,2}, XIE Jun-ge², ZHANG Jia-xing¹, YANG Fu-quan³, DU Ye¹ (1. State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu Sichuan 610059, China; 2. Changchun Institute of Technology, Changchun Jilin 130021, China; 3. Yunnan Metallurgical Resources Co., Ltd., Kunming Yunnan 650000, China)

Abstract: On the background of practice of water gushing treatment in prospecting borehole in Yunnan Maoping lead-zinc deposit, the paper analyzes several treatment schemes according to the diamond drilling engineering practice with high water gushing pressure and large gushing flow. Based on the measured parameters of water inflow and water gushing pressure, controlled grouting technology is put forward. The paper discusses the basic composition of SJP cement slurry and the performance characteristics and controlled grouting technology, analyzes the relationship between the pressure at orifices and the circumstance of grouting slurry in borehole, and puts forward new concepts of “zero starting point”, “zero ending point” and h value in grouting pressure changing, as well as the way to determine the type of gushing-water tunnel by pressure change, etc. The research result has been successfully applied in 3 serious water gushing boreholes to ensure the smooth construction.

Key words: strong water gushing; SJP slurry; controlled grouting

0 引言

钻孔涌水现象^[1]常见于水利水电工程、工程勘察和井下钻探等工程中^[2-4]。云南省昭通市毛坪铅锌矿区深部找矿勘探的钻孔, 主要布置在井下 670 中段。在该中段施工的钻孔, 普遍存在钻孔涌水, 最大涌水量 250 m³/h, 最大涌水压力 2 MPa, 个别钻孔涌水温度 40 ℃ 左右。涌水严重影响钻探施工, 有的钻孔被迫停工, 严重影响了矿区的勘探进程。为此, 曾试用过普通水泥浆、常规注浆工艺方法等技术方

案, 都未得到预期的效果。2014 年开始采用 SJP 水泥浆和可控注浆方法, 对 3 个涌水钻孔的注浆治理, 取得了很好的效果。

1 矿区地质与水文地质概况

昭通毛坪铅锌矿区内构造十分发育, 不同时期形成的褶皱和断裂构造相切割, 形成了本区复杂的构造形式。区内断层发育, 断层形式多样且组合式样复杂。裂隙倾角多在 60°~80°, 属陡倾型。矿区

收稿日期: 2016-07-18; 修回日期: 2017-03-12

基金项目: 成都理工大学地质灾害与地质环境保护国家重点实验室团队重点课题“粘度时变灌浆材料扩散与固结研究”(编号: SKLGP2014Z001)

作者简介: 裴向军, 男, 蒙古族, 1970 年生, 教授, 博士生导师, 地质灾害应急专家, 博士, 从事工程边坡稳定性评价与治理等教学与研究以及浆材与注浆等研究工作, 四川省成都市成华区二仙桥东三路 1 号。

岩性有白云岩、灰岩、炭质页岩等,层间破碎带和断层破碎带溶蚀裂隙发育。670中段施工的钻孔均有涌水现象,出水点有一共同特点,为NE走向断层破碎带(或层间破碎带)、溶蚀裂隙破碎带和NW走向的断层溶蚀破碎带。个别钻孔涌水量较大,最高可达 $250\text{ m}^3/\text{h}$ 。洛泽河是矿区主要地表水体,为当地侵蚀基本,也是矿坑水自然排泄面。

2 钻孔涌水治理方案的可行性分析

670中段钻孔涌水压力、涌水量和出水点的孔深位置等差异较大,需要针对不同孔内情况提出治理涌水方案。目前,治理钻孔涌水的技术方法有:顶涌钻进法、压力平衡法、套管隔离法和注浆封堵法等,以下对这几种钻孔止涌方法的适用条件和需要解决的问题等进行简要的分析。

2.1 顶涌钻进法

顶涌钻进对涌水不直接处理,而是顶着孔口涌水持续钻进的方法^[7],该方法的适应条件为:

(1)涌水压力和涌水量都不大,对钻进回次各工序无明显影响的钻孔;

(2)涌水点以下没有坍塌层或有易坍塌层但层厚不大,同时有护壁性能较强的冲洗液,使孔壁保持稳定;

(3)深孔出现涌水,采取顶涌钻进时,需有钻杆涂抹润滑脂的钻杆润滑技术措施;

(4)要符合矿山对矿坑内钻孔涌水量的限定(毛坪矿要求钻孔涌水量达到 $30\text{ m}^3/\text{h}$ 时就要进行止涌处理)。

对于条件适合的钻孔,顶涌钻进是应对钻孔涌水最简便、经济的方法。

2.2 压力平衡法

使用泥浆冲孔钻进,钻孔出现涌水时,可以通过加大泥浆密度,使孔内泥浆液柱对孔内出水点处的压力与该处的涌水压力相平衡^[8],实现钻进时钻孔不涌不漏的止涌方法。压力平衡法适用的条件有:

(1)泥浆的相对密度 ρ 要满足式(1)的条件,即:

$$\rho g H = \rho_{\text{水}} g [H + 100(P - P_0)] \quad (1)$$

式中: H ——孔内涌水点到孔口的高度, m; P ——孔口涌水压力, MPa; P_0 ——从涌水点到孔口冲洗液沿环状间隙上返的压力损失, MPa; 100——1 MPa对应的水头高度, m/MPa; $\rho_{\text{水}}$ ——水的密度,取 $1\text{ g}/$

cm^3 。

如果 $H = 220\text{ m}$ 、 $P = 0.7\text{ MPa}$ 、 $P_0 = 0.1\text{ MPa}$,代入(1)式,得 $\rho = 1.27\text{ g}/\text{cm}^3$ 。只要配制出密度 $1.27\text{ g}/\text{cm}^3$ 的泥浆,就有可能进行压力平衡钻进。

(2)压力平衡法的制约。

对于钻孔与钻杆间环状间隙较大的钻进方法,可以采用压力平衡法处理钻孔涌水^[9];对于环状间隙小(2.5 mm左右)、钻进转速高(钻头线速度 $1\sim 3\text{ m/s}$)和岩粉颗粒很细(微米级)的金刚石钻头绳索取心钻进方法(简称绳钻),是不应采用压力平衡法处理钻孔涌水,原因是它将引起钻进时泵压剧增、钻杆内壁结皮和岩粉不易清除等问题。本矿区的钻进方法正是绳钻。

2.3 套管隔离法

对于孔内出水点的位置不深的孔,用套管隔离涌水层可作为止涌的一个选项^[9],只是套管下端的密封有些难度,尤其是终孔起拔套管,其中密封与起拔是不易解决好的矛盾。

2.4 注浆封堵法

用水泥浆封堵孔内涌水^[5-6]或漏水裂隙是常用的经济、简便的处理方法。对于该矿区采用普通水泥浆封堵钻孔时,单孔注入的水泥量高达上百吨,未取得止涌效果,原因如下。

(1)矿区的构造裂隙和溶蚀的缝隙十分发育,且裂隙的张开度较宽、产状陡倾,地下水多为承压水。

(2)普通水泥浆凝结时间长,特别是常规注浆法开始注入的稀浆。这种浆液进入宽、陡的裂隙后会有以下动向:

①进入裂隙内的浆液,因其与水的密度差较大,会很快沿宽陡裂隙流向下方,而流向钻孔上方裂隙内的浆液较少;

②注浆停泵后,浆液在失去流动性之前,会继续不停地整体向裂隙下方滑落,使钻孔与裂隙交汇点上方的浆液更少;

③当裂隙内浆体上方边界,下落到钻孔—裂隙交汇点以下时,钻孔重新与裂隙水连通;

④若裂隙内的水是流动的,会加速上述浆体动向的过程。这是在倾陡裂隙采用常规注浆工艺,成功率不高的主要原因之一。

实践证明,对于宽陡裂隙、强涌水的钻孔,采用普通水泥浆和常规注浆工艺方法止涌,是难以奏效

的。

3 SJP 水泥浆

SJP 水泥浆是由复合硅酸水泥或普通硅酸盐水泥和外加剂组成,通过外加剂加量调节水泥的水化反应,进而控制浆液的可泵期和凝结时间。

3.1 SJP 水泥浆的组成

(1) 水泥:复合硅酸盐水泥(32.5、42.5);

(2) 水:工业用水;

(3) SJP 外加剂:用于不同的注浆目的和地层条件,止涌可用 SJP-1,其中包括 3 种外掺剂,加量 1 号为 0.1%~0.15%、2 号为 1.5%~2.0%、3 号为 1%~1.5%。

3.2 SJP 水泥浆性能特点^[11-12]

(1) 水泥浆的起始稠度较小,起始稠度 10~12 s(水是 8 s),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。

(2) 水泥浆可泵期是可调的。自水泥浆搅匀时起,到可泵送的最后时刻,这段时间称作可泵期。稠度发生突变的时间点,就是水泥浆可泵期的终点时刻。通过调节 SJP 外加剂的加量和水灰比等,可使水泥浆的可泵期在 5~50 min 的范围内调节,以满足可控注浆工艺对可泵期的需要。

(3) 水泥浆的初凝时间短,2~3 h 初凝,初凝过后 2~3 h 终凝。

(4) 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%。

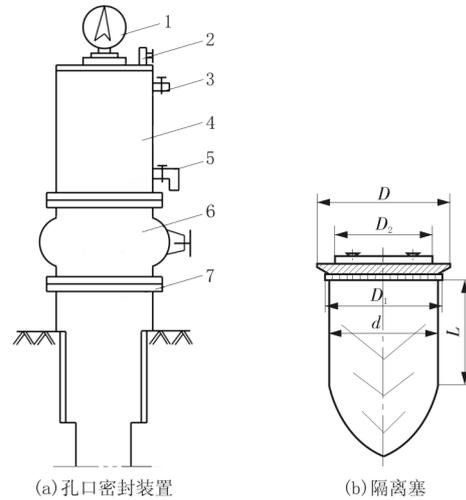
4 SJP 水泥浆可控注浆工艺技术

由于 SJP 水泥浆的可泵期和凝结时间可调,所以能够实现水泥浆在涌水裂隙内扩散范围的控制。可控注浆法实施浆液扩散范围的调控方式,因注浆目的不同而有所不同,封堵钻孔涌水的可控注浆,是以总注浆量并分批次地连续注浆,以各批次的水泥浆量、批次的间隔时间等,对浆液扩散范围实施调控。

4.1 孔口密封装置和隔离塞

孔口密封是止涌注浆的必要措施,孔口密封装置能够实现浆液与地下水的隔离,防止浆液下行过程中的稀释等,装置结构如图 1(a)所示。隔离塞可用木质本体,上部固定胶皮板,如图 1(b)所示,有关尺寸见表 1。

隔离塞置于图 1(a)的短管内,大阀门宜采用能



1—孔口压力表;2—进浆管接头;3—排气阀;4—短管;5—放水阀;6—大阀门;7—法兰

图 1 孔口封闭系统

表 1 不同孔径用隔离塞尺寸 mm

钻头	孔径	D	D_1	d	D_2
NQ	75.7	85	76	68	64
HQ	96	105	96	88	84
PQ	122	132	122	114	110

快速开闭的球心阀门,其通孔直径要稍大于隔离塞直径。与大阀门相连的套管,与孔口-孔壁间要固定牢固和密封严密。

4.2 注浆量的确定

水泥浆的注入量,主要是以充填钻孔四周裂隙需要的浆液量确定。

4.2.1 浆液扩散形状和范围

通过室内试验装置,模拟得到的浆液扩散图形近似梨形,如图 2(a)所示。从图中可见,浆液大部分流到裂隙下方,钻孔上方裂隙内的浆液量较少。一般情况下,裂缝越宽、越陡、浆液粘度越稀和注浆量越少,梨形越显细长,而钻孔与裂隙交汇的上方裂隙内的浆液量会更少;反之亦反。

钻孔上方裂隙内浆液充填范围较小,这对宽、陡裂隙上部的封堵不利。为增加钻孔上部裂隙内浆液的注入量,可根据浆液的可泵期将其分批注入。如图 2(b)所示,前批次浆液(V_1)进入裂隙并接近可泵期终点(浆液开始失去流动性)时,接续有下批次浆液(V_2)进入裂隙, V_1 浆液到达可泵期终点时刻并失去流动性,后续的 V_2 浆液进入裂隙下行受阻,迫使浆液向两侧和向上流动的浆液增多。

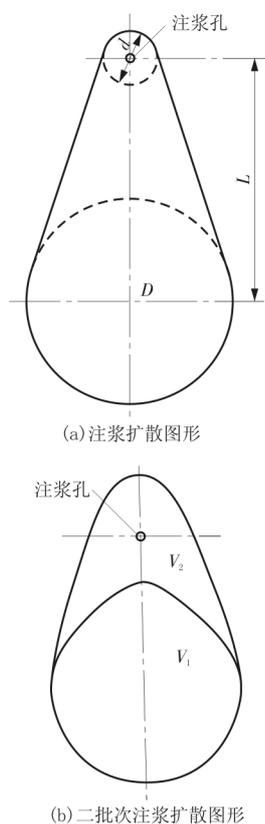


图2 浆液在宽、陡倾裂隙内的扩散图形

4.2.2 确定水泥浆量

钻孔止涌注浆的水泥浆量,应以不分批注浆时,钻孔上方裂隙的水泥浆达到正常的“高度”(图2a中的 $d/2$),需要注入的水泥浆量来确定。计算所需水泥浆量(V)的方法有以下2种。

4.2.2.1 模拟推演法

已知孔内涌水裂隙的宽度、倾角、浆液稠度和注浆泵量等资料,利用室内模拟试验得到的浆液扩散图形和数据,输入要求的 $d/2$ 等数据,演算出需要的水泥浆量 V 。

4.2.2.2 估算法

以涌水量、涌水压力和出水点数量等参数预测裂隙宽度,如涌水量大而涌水压力并不大、出水点少等,说明缝隙较宽。对于 $d/2$ 的要求,现以图2为浆液扩散基本图形,并假定某涌水孔裂缝宽 $\delta=4\text{ mm}$ 、要求 $d=12\text{ m}$,估判 $D=25\text{ m}$ 、 $L=20\text{ m}$ 等,代入(2)式,计算 V :

$$V = 10^{-3} \eta \left[\delta \times \frac{(d^2 + D^2) \frac{\pi}{4} + (d + D)L}{2} + 30q \right]$$

$$= 10^{-3} \times 1.2 \left[4 \times \frac{(12^2 + 25^2) \times 0.785 + (12 + 25) \times 20}{2} + \right.$$

$$\left. 30 \times 4.5 \right]$$

$$= 3.387 \text{ m}^3 \quad (2)$$

式中: q ——出水点以上30 m孔段为水泥浆,该孔段单位长度的容积(L/m), $\varnothing 76\text{ mm}$ 孔径为4.5 L/m;
 η ——因浆液损失的补偿系数,取1.2。

按制浆机每次制浆400 L,搅9次共制浆 $V=3600\text{ L}$ 。即共9批次,每次间隔4 min。

4.3 确定水泥浆的可泵期

假如某孔在330 m有裂隙涌水,注浆量3600 L,把孔内浆液面压到300 m(距出水点30 m),需替浆水量 $V_T=300 \times 4.5 + 50 = 1400\text{ L}$ (50 L为地表管路容积),注浆泵量按 $Q=100\text{ L/min}$,制浆机3台,各400 L,共搅 $3600/400=9$ 搅拌桶,每台机搅3次,3台机起始开机错开时间,两机间错开4 min。若连续注浆和替浆水,此次注浆共需泵注时间 $T=(V+V_T)/Q=(3600+1400)/100=50\text{ min}$ 。确定该孔用水泥浆可泵期有以下2种情况。

(1)以 $T=50\text{ min}$ (连续注浆、水总量的时间)作为9桶水泥浆(时间起点不同)可泵期相同。

可泵期为50 min,即自第1桶水泥浆搅匀开始计时,连续注浆、水到结束时为止,进入裂隙内的浆液前端的第1桶浆,开始失去流动性,而最后(第9桶)水泥浆还需18 min到达可泵期终点时刻,在此期间,裂隙内的浆液仍会向下移动,使钻孔裂隙上方的浆液量减少。对于不能保证连续注浆,注浆过程占用时间 $>50\text{ min}$,可以采用这种包括泵替浆水在内的泵注时间,作为各桶浆液统一的可泵期。

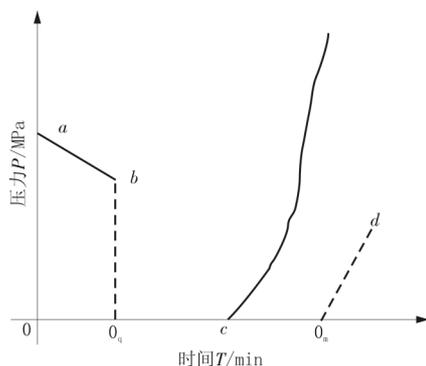
(2)仍用上例,只把泵送水泥浆的时间作为可泵期,泵送3600 L水泥浆需要时间是 $3600/100=36\text{ min}$,各搅拌桶的水泥浆可泵期同为36 min。当第9桶浆泵送完了时,进入裂隙内的第1桶浆液开始失去流动性,使浆体沿裂隙下滑受阻,此时钻孔内还有约1400 L的水泥浆,等待替浆水将其压入裂隙;泵送替浆水推压水泥浆进入裂隙时,因裂隙内的浆液已有凝结,整体下移受阻,使得后进裂隙的浆液更多地向钻孔两侧和向上流动,如图2(b)所示。

4.4 SJP水泥浆配方试验

本次注浆要求水泥浆的可泵期确定之后,按要求的可泵期试配SJP水泥浆配方。试配是以调节外加剂的加量和水灰比来寻求需要的可泵期,通常增加2号剂量,初凝时间缩短,增加1号、3号剂量,可泵期延长。

5 注浆过程中孔口压力分析

泵送水泥浆和替浆水的整个过程中,浆液前端在孔内的位置,可根据孔口装置上的压力表压力的变化情况进行预测和判断,孔口压力变化曲线见图3。



a—钻孔涌水压力;b— 0_q 压力为零的起点;c—浆液开始进入裂隙; 0_m —零末点;d—泵送替浆水结束

图3 钻孔止涌注浆孔口压力变化

5.1 孔内涌水压力、零起点和 h 值

泵送浆液开始时,压力表迅速升到某一值,该值为孔口涌水压力值(图3, a 点),由于水泥浆的密度大于水的密度,随着水泥浆进入孔内,孔内静液柱压力相应的增加,该压力增加值可以平衡相应的涌水压力,使泵压降低,所以孔口压力呈直线下降(泵量稳定时)。当压力降到 b 点时,迅速降到零,对应于横坐标轴上的 0_q 点,称作零起点。此时孔内浆液到达与孔口垂直高度等于 h 的相应孔深, h 值用下式计算:

$$h = \frac{100P}{\rho - \rho_{\text{水}}} \quad (3)$$

式中: P ——孔口涌水压力,MPa; ρ ——水泥浆的密度, g/cm^3 ; $\rho_{\text{水}}$ ——水的密度, g/cm^3 。

以某涌水孔为例(其结构如图4所示),涌水量为 $100 \text{ m}^3/\text{h}$,涌水压力为 $P = 0.6 \text{ MPa}$,水泥浆密度 $\rho = 1.73 \text{ g}/\text{cm}^3$,得出 h 为 82 m 。对应于钻孔倾角 80° 的孔段长度 L 为 83 m 。该孔段内的浆液量 V_c 为 402 L ,如果泵量稳定为 $100 \text{ L}/\text{min}$,需约 4 min ,开始 0 起点。

5.2 涌水通道判断

5.2.1 裂隙型涌水通道

过 0_q 点后,继续在零压力下注浆,当孔内浆液到达涌水裂隙(330 m)时,因浆液进入裂隙,流动阻力增加,孔口压力增大,对应图3中的 c 点(即 0 末点),

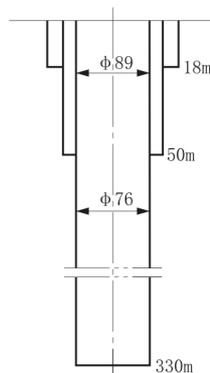


图4 某涌水孔结构

此时注入的浆液量 $V_c = 5 \times 50 + (330 - 50) \times 4.6 = 1538 \text{ L}$,泵送时间稍多于 15 min 。此后随注入裂隙内浆液增多,泵压(孔口压力)快速上升,直升到高于孔口涌水压力。

5.2.2 大断面溶蚀型涌水通道

注浆过程中,如果浆液到达出水点时,没有出现压力由零开始上升的 c 点,而是直到泵送替浆水时,在 0 末点(0_m)出现压力上升。它只能在泵送替浆水时出现,而且是在孔内浆液面距出水点距离 $\leq h$ 。说明涌水通道可能是大断面、大容积的充水空间,浆液进此大空间被迅速稀释并毫无阻力。压力所以从 0_m 点升起,不是因为浆液流动受阻,而是因为孔内浆液面到出水点的高度等于 h 时,孔内液柱(浆和水)的静浆柱压力与涌水压力相平衡,而当过 0_m 点后,继续向孔内泵送的替浆水,使孔内液体中,重度的水泥浆液柱减少、水柱增加,使孔内液柱压力小于涌水压力。假如此时关系泵并打开孔口装置(图1)上的大阀门和阀门,孔内的水将会涌出。也就是说,随着 h 值减少,要相应的增大泵压才能把替浆水全部注入孔内。过 0_m 点压力的上升速率与泵水时的泵量有关,泵量是均衡的意味着 h 值匀速减少,孔口压力则匀速上升。压力升到图3中的 d 点,正是泵送替浆水结束时,此时的压力值 P_d 用下式计算:

$$P_d = \frac{P - 30(\rho - \rho_{\text{水}})}{100} \quad (4)$$

式中:30——替浆水把孔内浆液面压到距出水点的高度, m 。

综上所述,注浆压力变化判断溶洞类涌水通道,有以下3点:(1)泵替浆水时,在 0_m 点压力上升;(2)泵量稳定下压力匀速上升;(3)泵替浆水结束时的压力等于或接近 P_d 。

6 结论

(1) 金刚石绳索取心钻进强涌水钻孔的治理方案中:不应采用的方法——压力平衡法;最好不用的方法——套管隔离法;条件合适可用的方法——顶涌钻进法;基本的治理方法——注浆封堵法。毛坪矿区670中段,采用SJP注浆工艺成功封堵3个涌水孔(ZK670-96-250孔、ZK670-7+1-50孔、ZK670-118-1孔),因涌水停钻的钻孔恢复正常钻进。

(2) 注浆封堵法中,普通水泥浆和常规注浆工艺,无法满足止涌要求,而且水泥用量大、耗时长;SJP水泥浆和可控注浆工艺,适用于封堵强势涌水的钻孔。这是因为SJP浆液的可泵期是可以调控的,可泵期过后浆液稠度增长加快等性能特点,能够实现进入裂隙内的浆液扩散图形进行调控的可控注浆止涌工艺。

(3) SJP浆液的可控注浆止涌,需要先做好注浆施工的工艺设计,包括涌水孔的资料(钻孔结构、出水点的位置、涌水量和涌水压力等),确定水泥浆量、替浆水量、水泥浆的可泵期和配方试验、材料用量计算和搅浆与泵送各工序的布置安排等。

(4) 配备必要的室内配方试验用器具和现场注浆施工用的制浆与泵送设备,是保证注浆正常、连续进行,并得到预期止涌效果的重要技术装备条件。

(5) 注浆施工各岗位的人员需进行必要的岗位

培训,已有多孔注浆施工实践说明,岗位工作不规范、各岗位配合不协调,是造成注浆施工中断和被迫停止的主要原因。

参考文献:

- [1] 刘世禄,侯广尧,刘洪林. 涌水钻孔封堵技术探讨[J]. 中州煤炭,2009,(9):63-64.
- [2] 张剑平,旋建新,胡伟,等. 某坝基钻孔涌水观测及其原因分析[J]. 勘察科学技术,1999,(4):58-60.
- [3] 李焰,余常茂. 三峡坝基灌浆施工主要技术问题及解决措施[J]. 水利水电科技进展,2007,(1):31-35.
- [4] 张祖海,董海燕,丁昌盛,等. 新疆温泉县AKT1-1地热孔钻探施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(8):17-21.
- [5] 杨栋,段康康,赵阳升,等. 井下水文钻孔涌水后注浆固孔与堵水实践[J]. 西安矿业学院学报,1999,(S1):108-110.
- [6] 潘光明,赵鹏,邱法林. 引流渗透控制注浆技术及涌水治理应用研究[J]. 煤炭科学技术,2016,(1):95-101,108.
- [7] 武永清. 庆阳地区钻孔涌水事故综合处理技术[J]. 甘肃地质,2013,(2):84-86.
- [8] 黄汉仁,等. 泥浆工艺学原理[M]. 北京:石油工业出版社,1981.
- [9] 陈万权. 特大涌水孔的施工与防治[J]. 探矿工程,1987,(2):46-48.
- [10] 黄开明,左悦林. 香格里拉县普朗铜矿区涌水钻孔钻进工艺[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(2):7-11.
- [11] 裴向军,黄润秋,李正兵. 锦屏一级水电站左岸卸荷拉裂松弛岩体灌浆加固研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,(2):284-288.
- [12] 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.