

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.06.030

# 帷幕注浆在阿尔金山隧道突泥涌水 处治中的实践与思考

庞小冲,王永刚,唐学军

(甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司,甘肃 兰州 730030)

**摘要:**为解决全强风化花岗岩地质条件下突泥涌水突发性、灾害性的难题,依托柳园至格尔木国家高速公路(G3011)关键控制工程阿尔金山隧道,在传统帷幕注浆处治岩溶涌水、断层破碎带涌水技术的基础上,针对阿尔金山隧道高寒、高海拔自然条件下内燃机降效严重、注浆压力损失和水泥水化速度减缓、早期强度低等情况,结合全强风化花岗岩地层强度低、结构松散,水稳性差,在富水条件下极易崩解形成流塑体而发生突涌的特点,现场通过TSP、地质雷达和超前水平钻孔等综合勘察预报手段,实验确定新型注浆材料、压力与配合比,采取前进式、后退式和集束袖阀管注浆等帷幕注浆组合措施取得了较好的封闭固结效果,为隧道通过富水断层破碎带创造了条件,保证了项目的顺利实施。

**关键词:**高海拔隧道;全强风化花岗岩;突泥涌水;帷幕注浆

中图分类号:U452

文献标识码:A

文章编号:1672-1144(2021)06-0186-07

## Practice and Thinking of Curtain Grouting in Treatment of Mud Bursting in Altun Mountain Tunnel

PANG Xiaochong, WANG Yonggang, TANG Xuejun

(Gansu Province Transportation Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730030, China)

**Abstract:** This paper focuses on the sudden and disastrous problem of mud inrush and water inrush under the geological conditions of fully strongly weathered granite, which are common problems in the key control project of Liuyuan Golmud National Expressway (G3011) in the Arkin mountain tunnel. Altun mountain tunnel has high cold and high altitude, under the natural conditions, the efficiency of internal combustion engine is seriously reduced grouting pressure loss, slow cement hydration speed and low early strength under the natural conditions of high cold and high altitude. Based on the traditional curtain grouting technology for treating karst water gushing and water gushing in fault fracture zone, combined with the characteristics of fully strongly weathered granite stratum with low strength, loose structure and poor water stability, it is very easy to disintegrate and form flow plastic body under water rich conditions. TSP, geological radar, advanced horizontal drilling and other comprehensive survey and prediction methods are adopted on site and the pressure and mix ratio of new grouting materials determined by field tests. Combined curtain grouting measures such as forward, backward and cluster sleeve valve pipe grouting have achieved good sealing and consolidation effect, created conditions for the tunnel to pass through the water rich fault fracture zone and ensured the smooth implementation of the project.

**Keywords:** high altitude tunnel; full strongly weathered granite; mud bursting; curtain grouting

帷幕注浆技术起初多在水电大坝地基的加固中应用,近年来在隧道岩溶涌水及软弱破碎地层突泥涌水的封堵与加固领域应用较广。早期刘招伟等<sup>[1]</sup>在圆梁山隧道毛坝向斜、桐麻岭背斜及断裂带

高压富水地层采用帷幕注浆技术取得较好效果;近期张伟杰等<sup>[2]</sup>对富水破碎岩体帷幕注浆进行了模型试验研究,为岩体帷幕注浆进行了理论分析和探讨;李洪彬<sup>[3]</sup>、李战荣<sup>[4]</sup>在区域断层涌水中采用帷

幕注浆堵水提供很好的借鉴和指导;周文<sup>[5]</sup>和周小生等<sup>[6]</sup>介绍了针对富水风化花岗岩隧道突泥涌水灾害帷幕注浆技术及相关的加固圈厚度结构模型模拟分析,并提出了相关的工艺参数;余波等<sup>[7]</sup>与彭琦等<sup>[8]</sup>对帷幕防渗性能进行了研究。目前,帷幕注浆技术虽在隧道工程中的应用已日趋成熟,但针对高寒、高海拔注浆相关的研究和实践较少,仅刘菲<sup>[9]</sup>进行了相关的实验研究,缺乏工程实例验证。

本文依托阿尔金隧道在富水全强风化花岗岩地层突泥涌水处治中帷幕注浆加固的实践,结合高寒、高海拔自然环境下相关施工内燃机降效折减、注浆压力损失和水泥水化速度减缓、早期强度低等特殊情况,对传统的帷幕注浆加固技术进行了针对性的优化,并对适用的注浆材料、施工工艺、质量检验与效果进行了介绍,冀此提供类似工程借鉴和参考。

### 1 工程概况

作为甘肃省高寒、高海拔第一长隧道,柳园至格尔木国家高速公路(G3011)关键控制工程阿尔金山隧道地处青藏高原偏远地区,自西北向东南穿越当金山和阿尔金山山脉,海拔 3 200 m ~ 3 800 m,长 7 527 m,最大埋深 530 m;隧道按高速公路分离式单向双洞四车道设计,设计车速 80 km/h,建筑限界净宽为 10.25 m(紧急停车带净宽为 13.25 m),净高

5.0 m。阿尔金山隧道不仅地质条件复杂多变,分布有区域性断裂、岩爆、软岩变形、突泥涌水等不良地质;而且自然条件严酷恶劣,夏季干燥酷暑,冬季严寒漫长,多年平均气温 3.1℃,最低 -34.3℃,最高 35.9℃,最冷月平均气温 -13.1℃,最大季节性冻土深度约 233 mm;此外,由于高寒、高海拔自然条件制约,施工过程中人员及机械设备组织难度大,施工条件差,建设难度大。

阿尔金隧道地质详勘揭露 YK287 + 560—YK289 + 030 段为大段落加里东晚期侵入二长花岗岩,其紧接宽度近 900 m 的 F5、F7 区域性断裂带,该段埋深 420 m ~ 476 m,如图 1、图 2 所示。受区域断裂及构造影响,隧道多处穿越次级断裂及构造节理密集带,地下水以基岩裂隙水和第四系孔隙水为主,断层破碎带、褶皱带和节理密集带为地下水的贮存运移创造了内部条件,局部具有弱承压性。该段原设计为Ⅲ级围岩,施工中掌子面揭露围岩较破碎,局部有揉皱现象,动态调整衬砌结构参数为:初支喷射 C25 混凝土 22 cm,内设 I16 型钢拱架,拱墙铺挂 Φ6 钢筋网(20 cm × 20 cm),并设 Φ42 × 4 mm 的超前导管支护(环向间距 40 cm),Φ22 水泥药卷锚杆(L = 250 cm),二衬为模筑 C30 混凝土 40 cm,无仰拱,采用上下台阶法开挖。

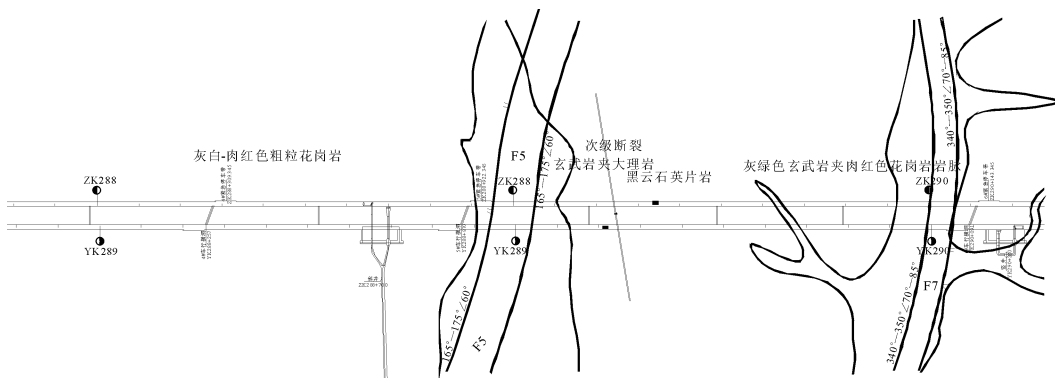


图 1 阿尔金山隧道洞身段工程地质平面图

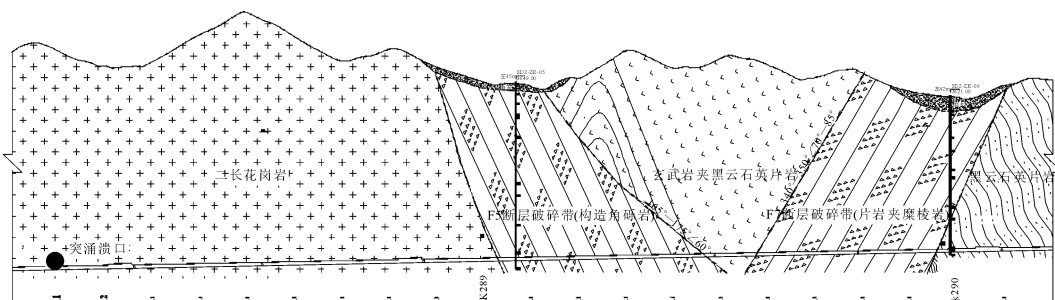
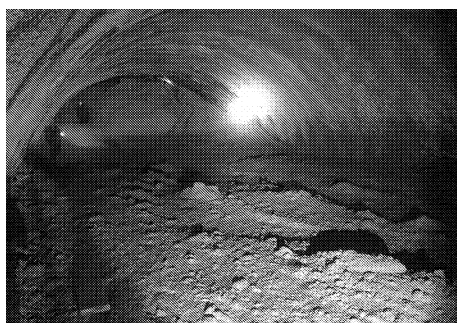


图 2 突涌段地质纵断面图

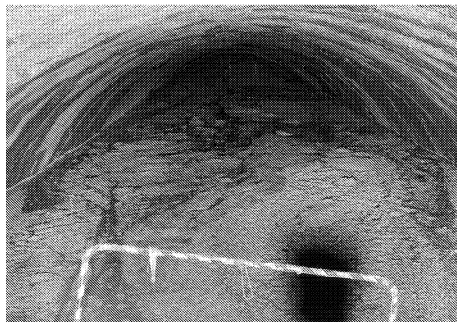
隧道右线施工至 YK288 + 090 处时,上台阶右侧拱脚开始出现小规模涌泥,流速较慢,随后出现快速大量涌泥,突出至二衬台车处(YK288 + 014 处),距离掌子面 76 m,突涌量达 1 500 m<sup>3</sup>;经紧急撤离现场施工人员和机械后,在清淤、码袋反压和准备施工平台时,掌子面拱顶偏右侧出现第二次突泥涌水,泥石流短时间内突涌至距掌子面 160 m 处,突涌量达约 3 200 m<sup>3</sup> 左右;后考虑施工安全,掌子面完全封闭,以待进一步勘查和处治方案,并布置现场视频监控设备,视频显示第三次突涌开始以清水为主,随后转为泥石流,突涌至距至掌子面 116 m 处,突涌量约 1 800 m<sup>3</sup>,现场情况如图 3 示。



(a) 第一次突涌



(b) 第二次突涌



(c) 第三次突涌

图 3 突涌现场情况

结合现场踏勘和物探分析,突涌体以稀粥样饱水花岗岩碎屑为主,夹淤泥及碎块石,其具有强度低、结构松散,水稳性差的典型特点,突发性和灾害性明显,严重影响施工及结构安全,并制约施工进度。

## 2 帷幕注浆综合处治方案

### 2.1 突涌原因与加固机理

根据现场情况,通过 TSP、地质雷达和超前水平钻孔等综合地质预报手段<sup>[10]</sup>,查明该段突泥涌水主要受 F5、F7 区域性断裂下的次生断层构造和全强风化影响,在富水条件下崩解形成流塑体而发生突涌。该断层带与隧道左右线存在交叉,交角为 42°~51°,左右线交叉宽度 16 m~35 m;地下水经多次排泄,已表现为成股状流水,基本无压力,判断水位降至上台阶位置。

考虑该段富水破碎带横向延伸范围较长,围岩结构松散、无自稳性,施工难度大且安全风险高,确定通过帷幕注浆在纵向一定长度和横向开挖轮廓外一定范围实施注浆,高压浆液扩散对洞周围岩、土体空隙进行填充,封闭外围地下水至洞内的排泄通道,防止其弱化围岩,水泥浆液与断层碎屑等形成水泥结石体而具备较高强度,以承担洞周围岩压力及外水压力,保证结构长期稳定性<sup>[11]</sup>。

### 2.2 应急处治方案

隧道掌子面发生突涌后,及时组织现场施工人员和机械撤离。由于多次突涌后溃口尚未封闭,突涌泥石流呈自然稳定堆积扇分布,保证洞身结构的安全稳定和避免诱发更大规模的突涌失稳是应急处治的首要工作。根据现场情况,首先在掌子面后方 15 m(YK288 + 075)处采用砂袋码砌(预埋泄水孔)临时支挡突涌体,并通过  $\Phi 42 \times 4$  mm 小导管斜向注浆固结和喷射混凝土封闭对溃口形成正面支撑,临时加固完成后清淤至二衬台车附近,如图 4 所示;然后以堆积突泥体作为施工平台,对 YK288 + 075—YK288 + 090 段突涌体上方空腔泵送混凝土回填封闭,以进一步稳定溃口及突涌体,消除掌子面突涌失稳塌方的风险;如图 5、图 6 所示,在 YK288 + 075 处分部开挖突涌体至上台阶底并施作止浆墙,为下一步的帷幕注浆做准备。

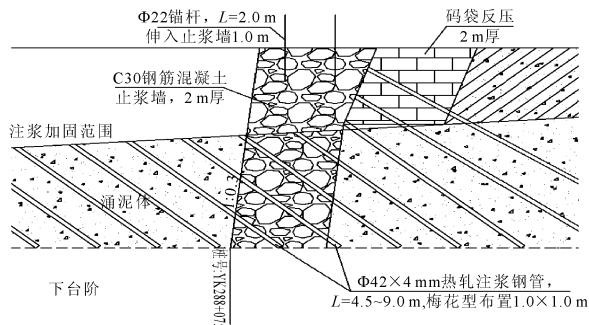


图 4 突涌体应急加固措施

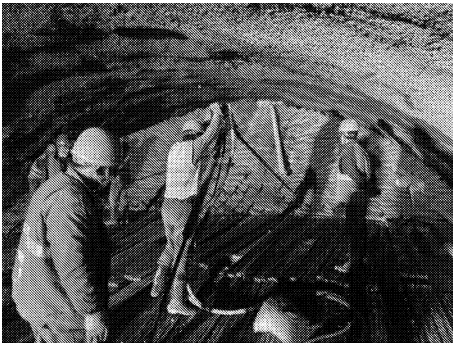
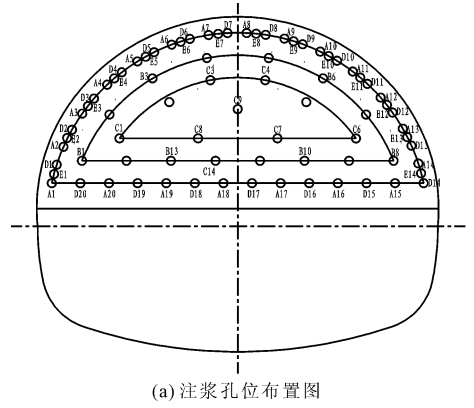


图 5 突涌体临时加固施工



(a) 注浆孔位布置图

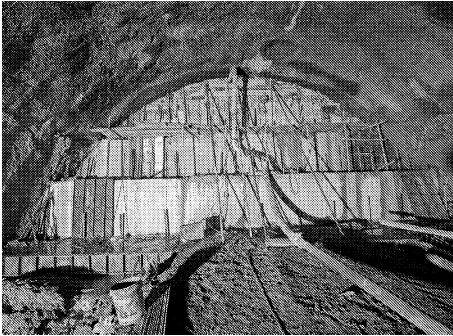
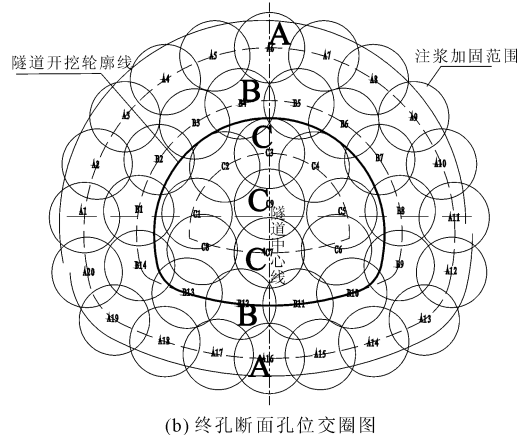


图 6 突涌体止浆墙施工



(b) 终孔断面孔位交圈图

图 8 帷幕注浆注浆孔布置图

### 2.3 帷幕注浆加固方案

帷幕注浆加固承载圈主要承担外围破碎围岩(碎屑)压力及静水压力,根据经验类比并结合经公式计算<sup>[12-13]</sup>,注浆加固圈厚度确定为 5.0 m。为保证安全,帷幕注浆平台充分利用施工开挖形成的上台阶以避免进一步开挖扰动,根据现场情况确定断面尺寸 12.6 m×6.0 m(宽×高);按照终孔交圈无盲区原则和浆液扩散半径布置注浆孔,注浆加固长度为 30 m,共设 5 环注浆孔,其中 A、B、C 环注浆长度 30 m,D 环注浆长度 18 m,E 环长度 12 m,共布设注浆孔 77 孔;同时在拱部设置 33 根 32 m 长(环向间距 45 cm)Φ108×6 mm 的超前注浆管棚补充注浆<sup>[14]</sup>,并作为后续掌子面开挖的纵向支护,如图 7、图 8 所示。

帷幕注浆的效果主要与浆液料种类、注浆压力、地层渗透性、注浆时间等因素相关,其中注浆压力、时间和地层渗透性常受现场施工工艺控制和围岩特性制约<sup>[15]</sup>,考虑阿尔金山隧道高寒、高海拔自然环境下燃油注浆机功率降效折减,注浆压力损失导致浆液填充率下降,环境与材料低温导致水泥水化速度减缓、早期强度低等特殊情况,处治方案对传统的帷幕注浆加固技术进行了针对性的优化,以实现其可注性、可控性、稳定性、耐久性、无污染和经济性要求。

#### 2.3.1 注浆料的选择与压力的控制

目前国内外常用注浆材料有水泥砂浆、改性水玻璃单液浆、普通水泥单液浆(C 浆)、普通水泥-水玻璃双液浆(C-S 浆)、超细水泥浆(MC 浆)和快硬硫铝酸盐水泥单液浆(HSC 浆)等,各注浆材料性能对比具体见表 1。为保证洞周松散围岩的有效填充固结,并具有一定强度以利于施工和运营期的结构安全耐久,经现场试验(如表 2 所示),采用水灰比(0.8~1.0):1.0 快硬硫铝酸盐水泥单液浆<sup>[16]</sup>具有可注性好,早期固结强度高,相较于传统浆液其还具有后期强度稳定,不易弱化降低的优点,有

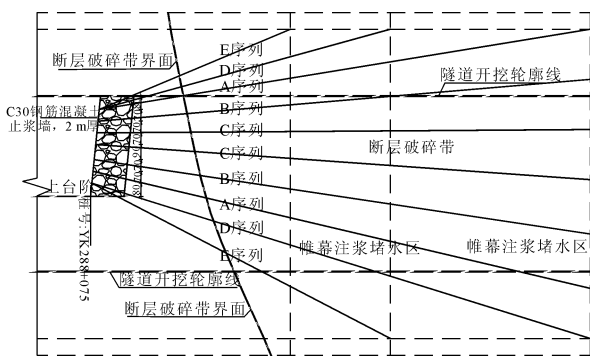


图 7 注浆孔纵剖面图

效解决了高寒、高海拔环境下浆液凝固慢,早期强度低的问题;此外,考虑处治方案的经济性,局部堵水封闭辅助采用普通水泥水玻璃双液浆( $W:C=(0.8\sim 1.0):1.0,C:S=1:1$ )。

表 1 注浆材料性能对比表

	优点	缺点
C 浆 普通水泥单液浆	凝胶时间长,局部空隙较大位置,扩散范围较大;固结体强度高,单价低	凝结时间过长,易受地下水稀释影响;颗粒粗,在粉细砂等土层中扩散不良
MC 浆 超细水泥浆	颗粒细,粉细砂等土层中可注性好;固结体强度高	凝结时间过长,易受地下水稀释影响;单价较高
HSC 浆 快硬硫铝酸盐水泥单液浆	具有良好的抗分散性,可有效控制注浆区域;固结体强度高;易结石固结微膨胀性	黏度大,影响扩散范围;单价高
C-S 浆 普通水泥-水玻璃双液浆	凝结时间可控,可达控域注浆目的;单价低	粉细砂等土层中可注性差;抗压、抗剪强度低,易被高压水破坏

表 2 硫铝酸盐水泥单液浆参数表

浆液种类	浆液配比参数 W:C	凝胶时间 /h:min	3 d 抗压强度 /MPa
硫铝酸盐水泥单液浆	0.6:1.0	0:24	19.1
	0.8:1.0	1:20	11.5
	1.0:1.0	1:35	8.5

### 2.3.2 注浆工艺的优化

针对高海拔下注浆压力损失导致的围岩填充效果不良问题,依次采用三种注浆工艺以切实保证注浆封堵与固结效果:首先进行前进式分段注浆施工,由外向内、由下到上、跳孔注浆作业,通过注浆加固掌子面前方 8 m~10 m 范围内围岩(碎屑);然后采用钻杆后退式分段注浆,对注浆孔一定范围破碎围岩进行填充固结;最后采用集束袖阀管分段注浆,在每个注浆孔内安装 2~3 根  $\Phi 42$  mm 刚性袖阀管(提前制作)进行分段注浆,实现对掌子面分孔分部的全断面注浆加固。

**前进式注浆:**如图 9 所示,使用 130 mm 钻头成孔,前段设孔口管以导向定位,为实现快速堵水封闭和固结强度,压注快硬硫铝酸盐水泥单液浆,钻、注交替,边钻边注;每循环钻孔注浆分段长度 2 m~3 m,间隔孔位调控压注,同时对已实施的注浆孔的进行注浆效果进行验证。

**后退式注浆:**在前进式注浆初步固结具备成孔条件后,针对局部破碎岩层从孔底开始分段进行注浆,采用钻注一体机( $\Phi 59$  钻孔)钻至设计孔深后,

分段后退注入浆液并逐节拆除钻杆(每节 2 m),直至全孔压注完成为止。

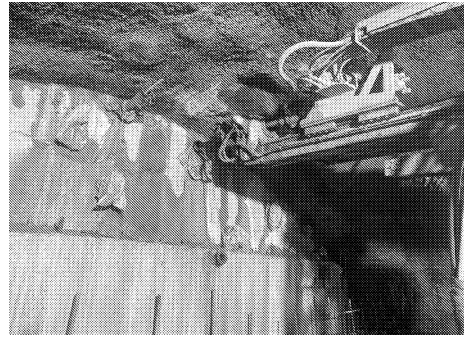


图 9 前进式注浆

**集束袖阀管注浆:**经以上两步工序达到成孔条件,考虑高海拔条件下注浆固结效果的折减,通过集束袖阀管注浆进行控制和补强,避免传统注浆工艺仅在松散地层大量扩散或跑浆,而密实地层难以压注的问题;采用 130 mm 钻头钻孔至设计深度,按照注浆长度在孔内安装 2~3 根  $\Phi 42$  mm 刚性袖阀管,如图 10 所示;根据出水情况和注浆效果,间歇压注水泥-水玻璃双液浆或硫铝酸盐水泥单液浆,至设计终压,现场注浆参数如表 3 所列。

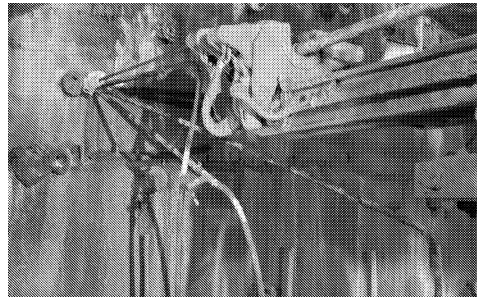


图 10 集束袖阀管分段注浆

表 3 注浆参数及注浆表(A 序列)

注浆方式	注浆参数	单孔注浆量/ $m^3$	分段注浆量/ $m^3$		
			1~16	16~24	24~32
前进式注浆	快硬硫铝酸盐水泥单液浆, $W:C=1:1$ , 设计终压 3 MPa	2.54	—	—	—
后退式注浆	快硬硫铝酸盐水泥单液浆, $W:C=0.8:1.0$ , 设计终压 6 MPa	1.17	—	—	—
袖阀管注浆	普通水泥-水玻璃双液浆, $W:C=(0.8\sim 1.0):1.0,C:S=1:1$ , 设计终压 15 MPa	—	1.28	2.28	2.95

### 2.3.3 施工机械与原料的配置

(1) 加强相关原料储存、运输和浆液拌制过程中的保温工作,减少热量的散失;注意浆液拌制的温度,控制浆液温度在 20℃ 以上以提高化学活性;为减少反应准备时间;将浆液进行提前混合;同时设置拌和水加热锅炉和料仓暖气管道,确保集料温度及浆液出料温度。

(2) 由于低压、缺氧、寒冷环境下,燃油等内燃机械功率损失较大,施工过程中尽量避免内燃机设备,而使用大功率电能注浆机以保证注浆压力。

## 3 注浆质量的判定

注浆质量可根据注浆量和注浆压力判定<sup>[17-18]</sup>。注浆量包含空间与时间分布效应,空间效应指浆液分布规律和地层吸浆特性对应,若地层均匀则空间浆液分布相对均衡,一般来说地层差异性较大,外围孔缺少边界约束注浆量偏大;时间效应指随着空隙或裂隙的注浆填充,地层吸浆量逐渐减小,后序孔吸浆量一般小于前序孔。

通过现场钻设检查孔取芯样,发现芯样浆脉分布渗透明显,充填固结较好,且检查孔内基本无明水、无塌孔和涌泥现象,如图 11 所示,表明注浆效果总体较好。

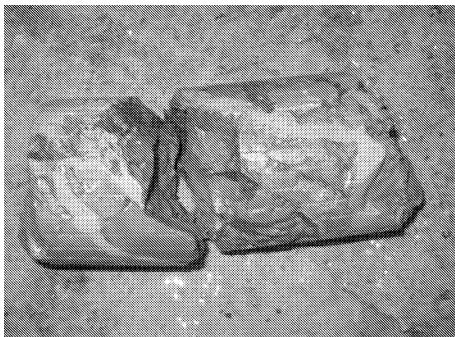


图 11 注浆效果钻芯取样检查

随着科技技术的发展,利用孔内摄像评定注浆效果是一种操作方便、实用的方法,它能够较为直观的反映浆液充填度、地层的稳定性以及地下水情况,以对注浆质量进行分析判识。

若有孔内出现塌孔、淤泥、出水混浊等情况,应进行补注浆液处治;如图 12 所示,通过对孔内高清摄像检查,孔壁光滑,无塌孔情况发生,说明地层得到了有效加固。

$P$ - $Q$ - $T$  曲线特征分析法是根据注浆施工过程记录数据进行注浆时间  $T$  与注浆压力  $P$ 、注浆量  $Q$  曲线绘制以判定注浆质量。如图 13 所示(以 A1 孔后退式注浆为例), $P$ - $Q$ - $T$  曲线表明开始浆液时,浆液

沿围岩内松散孔隙通道快速流动,注浆量较大;随着浆液的充填而注浆压力逐渐上升,注浆压力基本维持在 6.6 MPa 而不再上升,单位时间注浆量逐渐减小而维持较低水平(12 L/min),地层表现为不吸浆,说明围岩孔隙基本完成充填,注浆质量良好,达到设计结束标准。



图 12 孔内摄影成像评定注浆效果

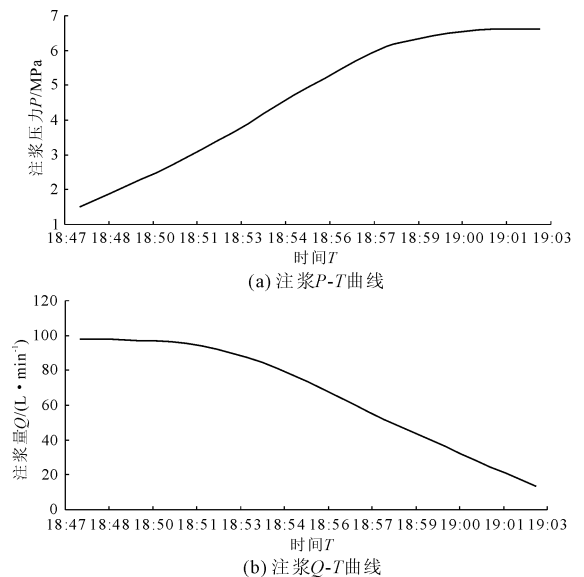


图 13 A1 号孔注浆  $Q$ - $P$ - $T$  曲线

阿尔金山隧道 K288 + 090 段全强风化花岗岩突泥涌水经帷幕注浆处治后,开挖掘进掌子面揭露淤泥质水分被水泥浆液析出,呈干粉末状,无明水出露,地层缝隙中均被水泥浆脉填充,形成注浆脉络,地层含水率明显降低,自稳性较好,无掉块、坍塌现象,地层得到有效加固,如图 14 所示。考虑该突涌段经加固后顶部可能存在一定空腔,为保证施工及运营期结构安全,对该段衬砌结构进行加强:初支为喷射 C25 混凝土 26 cm,  $\Phi 22$  水泥药卷锚杆(L-300 cm),间距 60 cm(纵)  $\times$  100 cm(环),内设  $\Phi 8$  钢筋网(15 cm  $\times$  15 cm),120 a 钢拱架并封闭成环,纵向间距 60 cm;二衬为 60 cm 厚 C30 模筑钢筋混凝土,设仰拱;按三台阶法开挖,进尺控制在 80 cm 左右。

监控量测数据反映该帷幕注浆处治段累计沉降变形 5.6 cm, 累计收敛变形 8.3 cm, 初支施做三天后沉降变形速率基本稳定在 1 mm/d 以下, 并稳步下降, 说明帷幕注浆处治效果良好, 为隧道通过富水断层破碎带创造了条件。

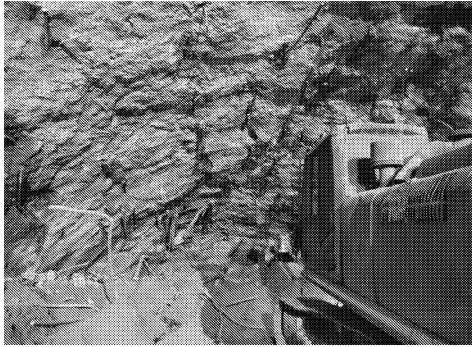


图 14 帷幕注浆后掌子面围岩加固情况

## 4 结论

阿尔金山隧道地处青藏高原东缘偏远荒芜的戈壁荒漠, 项目区本身自然条件恶劣, 施工条件极为艰苦, 该灾害发生条件超出设计阶段区域地勘的预判, 事发突然, 高寒、高海拔的复杂现场条件与施工条件对灾害的处治异于寻常, 结合灾害处治过程中技术的实践与总结, 有如下结论:

(1) 注浆首先需要明确其目的, 了解工程对象富水、孔隙率等特性和施工条件, 其次需要采用匹配的设备、工艺与材料, 这样才能保证注浆的效果。快硬硫铝酸盐水泥单液浆具有可注性好, 早期固结强度高和后期强度稳定的优点, 可有效解决了高寒、高海拔环境下浆液凝固慢, 早期强度低的问题。

(2) 加强相关原料储存、运输和浆液拌制过程中的保温工作, 减少热量的散失, 以提高浆液的化学活性, 必要时对水泥等原料进行预加热, 提高浆液的出料温度。

(3) 高寒、高海拔条件下帷幕注浆应是一个动态的、多循环的过程, 动态在于注浆压力, 浆液配比需试验、验证; 多循环在于压力与温度特殊条件下多次压注以保证其效果, 且注浆过程是内外、前后等多顺序和前进、后退等多工序的循环过程。

(4) 对于帷幕注浆评判体系应贯穿于注浆前、注浆中和注浆后。评判体系的主要作用是及时发现注浆工作的不足, 从而修正和调整注浆参数与方案, 采取注浆补救措施, 切实保证注浆质量。

本文在传统的帷幕注浆加固技术基础上, 对阿尔金山隧道高寒、高海拔的自然条件下富水强全风

化花岗岩地层突泥涌水帷幕注浆处治技术在注浆材料、施工工艺等方面进行了优化, 取得了较好的处治效果, 保证了项目的顺利实施, 并希望同类工程提供借鉴。

## 参考文献:

- [1] 刘招伟, 张顶立, 张民庆. 圆梁山隧道毛坝向斜高水压富水区注浆施工技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1728-1734.
- [2] 张伟杰, 李术才, 魏久传, 等. 富水破碎岩体帷幕注浆模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1627-1634.
- [3] 李洪彬. 华蓥山隧道帷幕注浆涌水治理技术[J]. 西南公路, 2018(4): 27-31.
- [4] 李战荣. 隧道穿越强涌水大断层施工超前帷幕注浆技术[J]. 铁道建筑, 2017, 57(9): 78-80.
- [5] 周文. 富水风化花岗岩隧道帷幕注浆技术研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13(4): 224-227.
- [6] 周小生, 廖福勇, 张海亮. 富水全强风化花岗岩隧道注浆加固参数研究及其效果评价[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(6): 136-139.
- [7] 余波, 张国军, 朱旭芬, 等. 混凝土坝基础防渗帷幕体老化的基本特点及其多尺度效应[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(4): 13-18.
- [8] 彭琦, 高大水, 高江林, 等. 关联帷幕防渗性能变化的重力坝结构稳定评价方法[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(3): 65-68.
- [9] 刘菲. 高海拔地区公路构筑物加固注浆材料试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [10] 王朋朋, 张勇, 许帆, 等. 深长向斜隧道涌突水综合预报技术及应用[J]. 公路, 2019, 64(5): 297-301.
- [11] 刘鹏飞, 梁树文, 郑亮亮. 帷幕注浆加固法在高含水率黄土隧道中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(4): 1137-1144.
- [12] 何俊辉, 李婷婷, 赵艳纳. 岩溶区隧道特大涌水突泥段帷幕注浆方案研究[J]. 西部交通科技, 2015(4): 70-75.
- [13] 罗昊, 邓飞, 何刚, 等. 隧道白云岩砂化段帷幕注浆处理技术[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(18): 7441-7450.
- [14] 翟锐超. 软弱围岩隧道帷幕注浆施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2015(3): 1-4.
- [15] 王凯, 李术才, 杨磊, 等. 全风化花岗岩加固特性注浆模拟试验[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017, 50(11): 1199-1209.
- [16] 李开放, 朱玉龙, 魏雄雄. 不同温度下注浆材料性能试验研究[J]. 施工技术, 2018, 47(S4): 1291-1296.
- [17] 阳云, 李广跃. 厦门过海隧道超前帷幕注浆方案优化研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(11): 1888-1894.
- [18] 周文. 全断面帷幕注浆技术在均昌隧道突水突泥灾害治理中的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13(5): 227-229.