

文章编号: 1000-7598-(2014) 08-2219-07

水泥基速凝浆液裂隙扩散机制 与压力特性试验研究

孙子正, 李术才, 刘人太, 张庆松, 张乐文, 郑 卓

(山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061)

摘 要: 水泥基速凝浆液广泛应用于富水裂隙围岩注浆工程。为研究水泥基速凝浆液在裂隙注浆中的扩散机制与压力特性, 选取水泥-水玻璃浆液及高聚物改性水泥浆液, 采用不同水灰比及混合体积, 开展了静水条件下单一平板裂隙的注浆扩散模型试验, 通过监测浆液的注浆扩散形态和注浆过程中不同测点的压力变化, 研究了水泥基速凝浆液的静水扩散规律和注浆扩散压力分布规律。试验结果表明, 水泥-水玻璃浆液和高聚物改性水泥浆液具有相似的扩散形态和压力分布变化, 两者的显著差别在于高聚物改性水泥浆液扩散所需的注浆压力明显小于水泥-水玻璃浆液, 且凝结固化时间相对较长, 有利于延长注浆扩散距离。研究结果应用于张马屯铁矿注浆堵水工程, 解决了裂隙岩体渗漏水问题, 实现了围岩稳定性控制。研究成果具有一定的理论和实践意义, 对类似工程具有参考价值。

关 键 词: 水泥基速凝浆液; 注浆模型试验; 扩散形态; 注浆扩散压力; 现场试验

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

Fracture defusing mechanism and pressure characteristic tests of rapid setting cement-based grouts

SUN Zi-zheng, LI Shu-cai, LIU Ren-tai, ZHANG Qing-song, ZHANG Le-wen, ZHENG Zhuo

(Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Rapid setting cement-based grouts are widely used in water rich fracture grouting engineering. In order to study the defusing mechanism in fracture and pressure characteristic of rapid setting cement-based grouts, single planet fracture grouting model text under hydrostatic conditions were carried out using cement-silicate grout and polymer modified grout with different proportions. The diffusing behavior and the pressure variations in different measuring points were recorded to study the laws of hydrostatic diffusion of rapid setting cement-based grouts and the pressure distribution of grout diffusion. Results show that cement-silicate grout and polymer modified grout are similar in diffusing behavior and variation of pressure distribution, while the diffusing pressure of the cement-silicate grout is obviously higher than cement-silicate grout polymer modified grout, which has a relatively longer condensate and solidifying time and is conducive to improving the diffusing distance. The results are used in Zhangmatun iron mine with success in governing the water leakage in rock fracture and stability of the surrounding rock, which has a certain theoretical and practical significance and offers an reference for similar projects.

Key words: rapid setting cement-based grouts; grouting model test; diffusion behavior; grouting diffusion pressure; field test

1 引 言

注浆是地下工程不良地质灾害防治中常用的技术手段, 多年工程实践证明, 注浆对地下工程建设中的施工安全、绿色环保和节能减排都具有重要的意义^[1]。各类地下工程中, 裂隙岩体为常见的工程岩体, 常伴随破碎岩体加固和地下水灾害防治问题,

多应用注浆方法治理, 裂隙注浆具有广泛的工程应用背景^[2-8]。

裂隙注浆中多采用普通水泥浆液及水泥基速凝浆液, 由于水泥浆液凝结时间较长、受地下水流影响大、在工程实践中往往注浆量大, 带来成本过高的问题, 水泥基速凝浆液逐渐成为裂隙注浆应用的重要注浆材料。针对裂隙注浆中不同地下水环境和

收稿日期: 2014-04-01

基金项目: 国家 973 课题 (No.2013CB036001); 教育部新世纪优秀人才支持计划 (No.NCET-11-0317); 山东大学自主创新基金 (No.2012GN011)。

第一作者简介: 孙子正, 男, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事地下工程水灾害防治方面的研究工作。E-mail: narthil_sword@163.com

不同浆液性质等情况,诸多学者开展了深入的研究。其中阮文军^[9]在研究浆液流型和黏度时变特性的基础上建立了裂隙注浆扩散模型;郑玉辉^[10]在注浆模型中考虑了注浆过程中浆液推动地下水及其影响半径;罗平等^[11]针对宾汉流体浆液建立了倾斜单裂隙流动模型理论;李术才等^[12]针对水泥浆液开展了单裂隙动水注浆模型试验,研究了浆液扩散规律和封堵机制;张改玲等^[13]开展了单裂隙化学浆液扩散影响试验研究,定性分析了堵水效果与动水流速间的反相关关系。

水泥-水玻璃浆液和高聚物改性水泥浆液是典型的水泥基速凝类浆液,在涌水封堵和岩体快速加固等方面具有广泛的应用^[14-18]。但此类浆液的速凝特性导致其注浆扩散规律更加复杂,而相关的理论和模型试验研究鲜有报道。本文采用自行研发的平板裂隙模型试验系统,结合张马屯铁矿注浆堵水工程,针对两种浆液开展注浆扩散试验,对比研究其扩散形态规律和注浆扩散压力分布规律,并根据试验结果开展了注浆设计改造,确保了裂隙注浆的安全和最终效果,对类似工程具有一定的借鉴意义。

2 平板裂隙模型试验

2.1 研究对象、理论依据及基本假设

水泥基速凝浆液平板裂隙扩散试验研究对象为浆液扩散规律,即在富水裂隙注浆中水泥基速凝浆液的扩散形态,试验的理论依据为流体力学,本试验基本假设如下:

①准三维平板裂隙。②水泥基速凝浆液为均质流体,不可压缩且各向同性。③浆液不会通过裂隙表面进入岩体。④浆液运动过程因地下水作用流失浆液微团不发生沉积封堵作用。⑤浆液运动过程中流型不变,只是黏度存在时变性,变化为幂函数关系。⑥忽略钢化玻璃挠度引起的裂隙宽度变化。

2.2 可视化模型试验系统

裂隙注浆模型试验系统由山东大学研发^[7],共分为5部分:可视化试验台、双液注浆系统、光纤监测系统、供水系统和实时录像系统。

其中试验台面积为 $2\text{ m}\times 4\text{ m}$ (见图1),主要由裂隙上层、下底面与密封系统3部分组成,试验台可承受最大注浆压力为 3 MPa ,该试验台具有以下优点:实现了注浆全程的可视化,可观察注浆后的浆液充填扩散情况;试验台被注介质层厚度可调,可以进行不同隙宽的裂隙注浆模拟;能够实施高水压、高水流速和较高注浆压力的室内模拟试验;方便埋设各类监测原件。

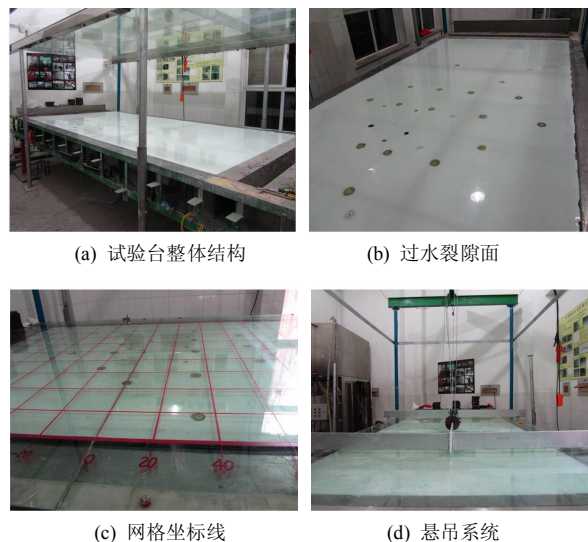


图1 可视化试验台

Fig.1 Visual test bed

2.3 试验材料

试验采用的浆液为水泥-水玻璃浆液(C-S浆液)和GT-1浆液,其中GT-1浆液为高聚物改性浆液^[19]。试验中涉及的试验材料如下:

(1)水泥 试验用水泥为山东山水水泥厂生产的42.5R普通硅酸盐水泥,水泥品质符合文献^[20]的标准。试验用水泥浆水灰比为1:1。

(2)水玻璃 选用水玻璃,模数 $M=3.0$,水玻璃浓度 $B'_e=40$,密度为 1.38 g/cm^3 。

(3)高聚物改性材料 高聚物改性液由高聚物添加剂和含速凝剂的复合溶液混合而成,高聚物添加剂主要为聚乙烯醇、乙二醇和聚丙烯酸钠等。高聚物添加剂为水泥改性常用高聚物,高聚物改性材料的黏度性质具有一定的代表性。高聚物改性注浆材料主要性能可见参考文献^[19]。

2.4 试验方案

两种浆液均采用双液注浆工艺进行平板裂隙注浆试验,采用的水泥浆和添加浆液(水玻璃或高聚物改性浆液)的混合体积比($V_c:V_a$)为1:1,2:1与3:1,注浆速率为 0.2 m/s 。试验过程中通过录像系统和监测系统记录浆液扩散过程中的形态和不同点处的注浆压力变化。

3 试验结果及其分析

3.1 静水条件下注浆扩散规律

注浆试验过程中的实时录像系统记录了静水条件的注浆扩散形态变化,图2箭头所示意处为光纤压力传感器,传感器布置综合考虑了注浆扩散方向及距离因素,其中测点0记录注浆管路压力即注浆出口压力。

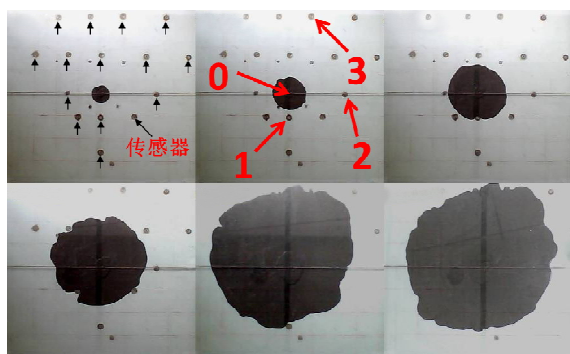


图 2 静水条件下浆液扩散形态图

Fig.2 Diffusion profiles of grouts under hydrostatic condition

通过试验结果可知:

(1) 静水条件下单一平板裂隙注浆模拟试验中, 浆液扩散受到的注浆压力作用、静水压强作用和裂隙阻力是轴对称的, 同时浆液也可以看作各向同性的流体, 所以浆液扩散迹线为圆形, 圆心为注浆孔, 在静水注浆工程中, 浆液在水平裂隙中的圆形扩散是研究浆液扩散机制的基础模型。

(2) C-S 浆液和 GT-1 浆液具有黏度时变性, 浆

液扩散运移过程中黏度增加较快且材料具有一定的抗分散性能, 因此, 在静水扩散过程中浆-水交界面较为清晰, 未出现由于浆液稀释原因造成的浆、水混合区, 对裂隙内地下水产生了驱替作用。

(3) 水泥基速凝浆液在双液混合后, 黏度逐渐增大, 由于双液混合时间不同, 初始注入浆液与后注入浆液在同一时刻黏度不同, 在注浆扩散早期, 浆液的黏度相对较小, 浆液性质对注浆扩散影响并不显著, 浆液呈现较好的圆形轴对称扩散; 随着时间的推移, 浆液逐渐稠化, 黏度注浆增加, 导致黏度空间分布存在不均匀性, 对浆液扩散造成影响, 浆液只能保持类似圆形或椭圆形的扩散形态, 在浆液发生凝结固化作用后, 浆液运动阻力将显著增大。

3.2 注浆扩散压力分布规律

3.2.1 测点压力变化分析

注浆速率恒定时, 静水压力恒定为 0.2 kPa, 选择图 2 所示测点 0、1、2、3 处传感器检测数据, 在不同浆液配合比条件下, 不同测点压力随时间变化规律见图 3。

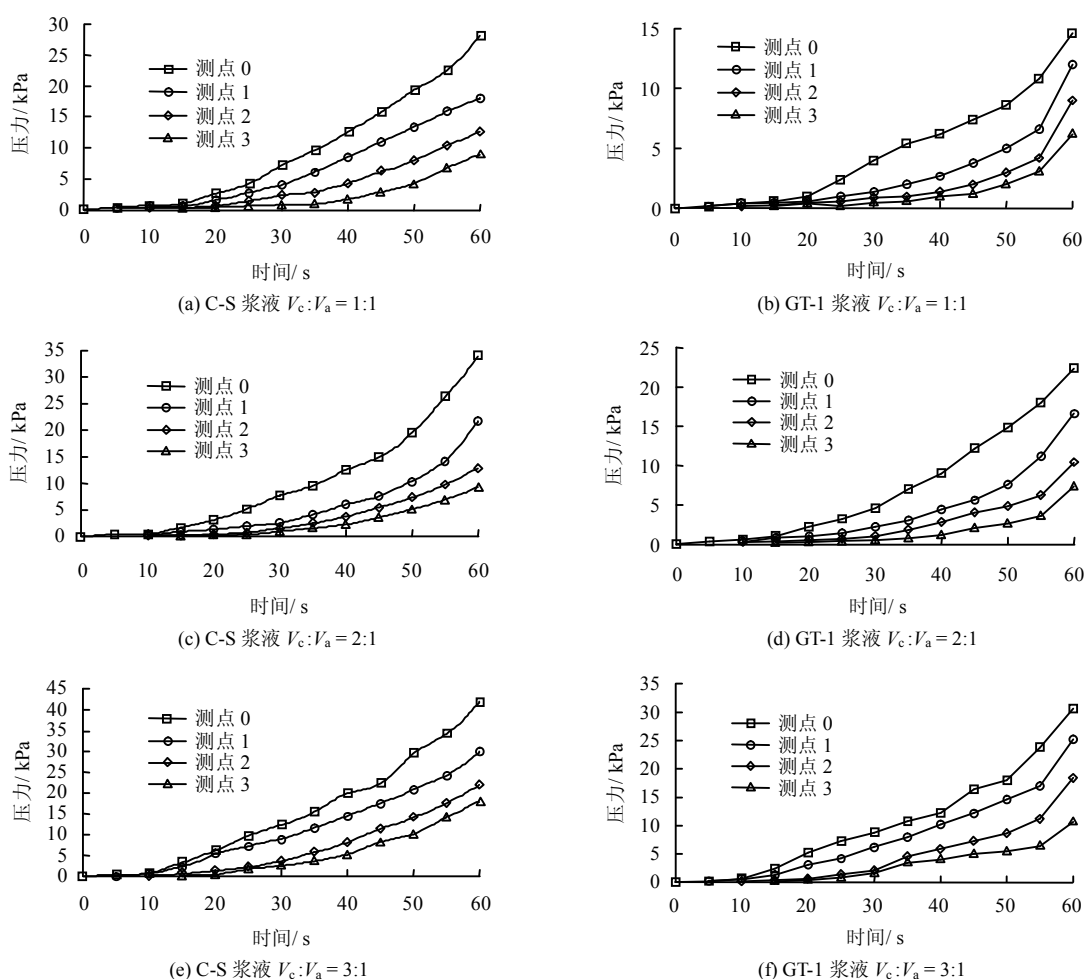


图 3 浆液不同体积配比压力时间曲线

Fig.3 Pressure-time curves of grouts under different volume ratio

依据试验数据分析可知:

(1) C-S 浆液和 GT-1 浆液黏度变化较快, 各个测点的注浆压力, 随着时间增长而增长, 且增长速率逐渐变大。

(2) 距离注浆孔越近的测点, 注浆压力越高, 随着扩散距离增加, 压力在扩散方向上呈非线性衰减。

(3) C-S 浆液和 GT-1 浆液在同一测点的压力, 随混合体积比的增加而增大, 即注浆工程选用浆液

配比范围内, 同一测点水泥比例增大, 则监测压力增大。

(4) 在同一测点, 相同时间和相同混合体积比条件下, GT-1 浆液的压力明显小于 C-S 浆液, 比例约为 47%。

3.2.2 注浆扩散压力分布分析

通过注浆压力监测数据整理获得了两种浆液的压力分布规律, 即注浆压力随扩散半径和注浆时间的变化, 见图 4。

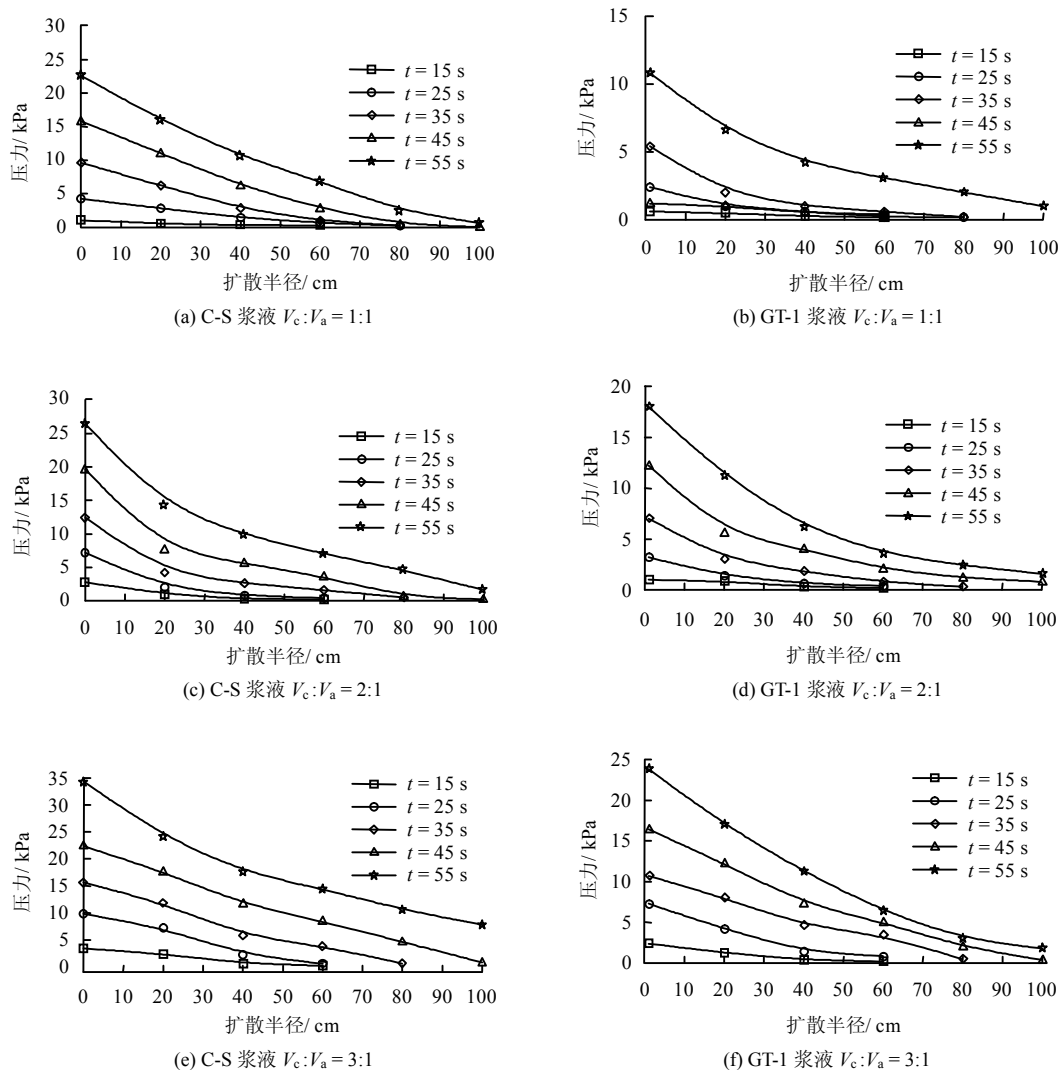


图 4 压力扩散半径曲线

Fig.4 Pressure -diffusion distance curves under different volume ratio

分析图 4 数据可知:

(1) C-S 浆液和 GT-1 浆液在浆液扩散过程中, 注浆压力随扩散半径增长逐步衰减, 其压力衰减呈非线性特征。注浆孔区域附近压力衰减最为显著, 远离注浆孔处压力衰减速率逐步减缓。

(2) 浆液扩散过程中, 同一测点注浆压力随着时间增长而增大, 且越靠近注浆孔, 该趋势越明显。

(3) GT-1 浆液压力分布变化规律与 C-S 浆液类似, 但注浆压力变化随时间规律不完全相同。GT-1 浆液同等配比条件下阻力较小, 压力较小, 但初期黏度较大, 又需要增大注浆压力, 浆液的压力分布在初期展现出更加复杂的规律, 但是在 30 s 之后, 黏度增长较为均匀, 塑性转化过程较慢, 有利于注浆封堵。

4 工程应用

4.1 工程概况

济南张马屯铁矿为岩浆岩侵蚀形成的矽卡型矿床,主要赋水与导水岩层为大理岩,主要导水通道为构造应力作用下形成的断裂、裂隙与破碎带。在-240 m水平巷道掘进过程中遇到破碎带,掘进面有少量滴水,如图5所示,通过容积法测得掘进面3处渗漏水点水量分别为1.7、2.5、2.9 m³/h,继续掘进渗漏水量有进一步增大趋势,需针对断层破碎带展开围岩加固及防治水工作,先期开展超前预注浆治理,累计注入单液水泥浆810 t,未能止住涌水,矿方前期注浆过程中测试得到巷道围岩达到5.2 MPa时发生掉块现象,为保障围岩安全,根据围岩岩性及裂隙节理发育情况将注浆许可压力设定为3 MPa。



图5 巷道围岩渗漏水

Fig. 5 Water leakage in surrounding rock

4.2 裂隙渗漏水治理面临的困难

(1) 前期注浆工程采用单液水泥浆液,工程用量大,成本高。

(2) 水泥浆液注浆过程压力增长慢,扩散范围过大,凝结固化时间较长,工期长。

(3) 围岩表面存在渗漏水现象,在采掘扰动影响下裂隙开度变大,涌水量增加。

(4) 岩体裂隙节理发育,掘进面围岩破碎,注浆过程中围岩稳定性控制困难。

4.3 问题应对及施工设计

巷道围岩存在少量渗漏水,未形成涌水,在少量渗漏水条件下,针对注浆工程,岩体裂隙内赋存地下水可视为以静储量形式存在,该工况下岩体裂隙内注浆可简化为静水条件下单一平板裂隙注浆模型,通过模型试验研究有助于解决巷道渗漏水问题。

根据单一平板裂隙注浆扩散模型试验,水泥基速凝浆液适用于裂隙岩体渗漏水治理中,且C-S浆液和GT-1浆液具有类似的扩散规律,即针对4.2节问题(1)及(2),巷道破碎围岩渗漏水治理侧重破碎岩体加固和地下水灾害防治问题,注浆材料应改

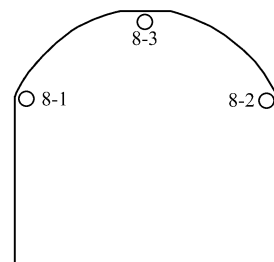
用水泥基速凝浆液,此类浆液凝结固化速度快,便于控制区域扩散,且便于及时开展下一步工程掘进。

根据不同浆液的注浆压力分布规律分析可知:相同水灰比及外加剂配比浆液,C-S和GT-1浆液在同一测点时,GT-1压力显著低于C-S浆液,这有利于浆液在裂隙注浆中扩大扩散范围,同时确保围岩安全。

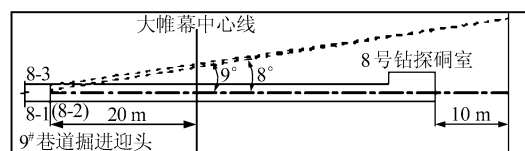
根据3.2.2节的分析,浆液的注浆压力在注浆段内是随着扩散距离增加而迅速衰减的,C-S浆液和GT-1浆液变化规律不完全相同,GT-1在整个注浆段内压力值普遍低于C-S浆液,说明GT-1浆液黏度增长速率较低,具有良好的流动度,能够确保足够的扩散范围,同时避免注浆压力增长过快对围岩稳定造成不利影响。

综上所述,基于模型试验分析认为,本工程适用GT-1浆液。注浆设计如下:

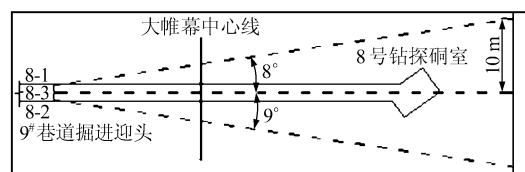
注浆治理设计如图6所示,注浆钻孔设计参数见表1,注浆钻孔采用 $\phi 113$ mm钻头开孔,安装3 m孔口管,孔口管封闭技术采用孔口管内注浆返浆方法,孔口管封闭完成后使用 $\phi 89$ mm钻头钻进至终孔,结合4.1节前期注浆压力容许试验所得注浆容许压力为3 MPa,现场注浆参数选取综合考虑静水注浆模型试验中GT-1浆液性质特征,即在水泥浆与外加剂比例为2:1时,压力与扩散半径比值与现



(a) 掘进迎头注浆孔布置示意图



(b) 8号钻探洞室注浆孔设计剖面图



(c) 8号钻探洞室注浆孔设计俯视图

图6 注浆治理设计平面图

Fig.6 Layout of grouting government design

表 1 注浆钻孔设计参数表
Table 1 Design parameters for grouting hole

孔号	开孔坐标		方位角 /(°)	倾角 /(°)	设计深度 /m
	X/m	Y/m			
8-1	4 988	9 612	309	9	64
8-2	4 988	9 612	317	9	64
8-3	4 988	9 612	325	8	63
合计					191

场工况较为贴近,故注浆选用水灰比为 1:1,水泥浆与外加剂比例为 2:1 的 GT-1 浆液,注浆终压为 3 MPa。

4.4 注浆效果验证

针对铁矿破碎围岩渗漏水,开展了 12 d 的连续施工治理,共施工注浆钻孔 3 个,钻探进尺累计 191 m,消耗速凝类水泥基注浆材料 275 t,注浆结束后,对注浆段及巷道开拓段开展了地质雷达探测检验和钻探检验,如图 7 所示,地质雷达探测检验通过注浆治理前后探测图片对比,钻探检验通过施工检查钻孔,根据相关规范规定,检查孔数量不少于注浆孔数 5%,根据地质勘探资料及前期水文资料,布置探查钻孔 2 个,探查孔主要通过涌水量及裂隙充填程度进行评价。

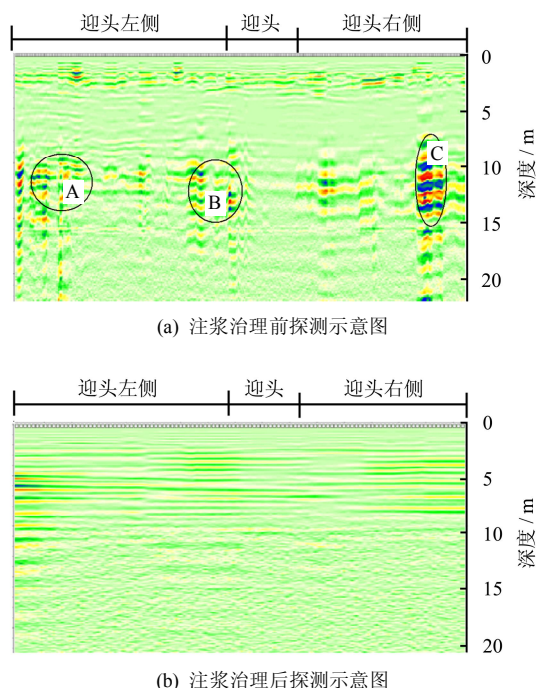


图 7 雷达信号示意图

Fig.7 Sketches of the radar signal

雷达探测显示,前期显示围岩破碎及富水区域已得到有效治理,取芯岩样显示围岩仍具有一定富水性,岩芯湿润,围岩已不存在渗漏水现象,其中 2.5~4.0 m 及 10.0~11.0 m 处揭露注浆结石体,证

实注浆封堵了含导水通道。通过采用水泥基速凝浆液 GT-1 开展裂隙注浆,加固了破碎围岩,封堵了地下水流通道,为矿方顺利掘进提供了便利条件,注浆治理前后对比如图 8 所示。



图 8 注浆治理前后对比图

Fig.8 Effects before and after grouting government

5 结 论

(1)水泥-水玻璃浆液和高聚物改性浆液在同等水灰比和外加剂配比条件下扩散形态相近,由于两种浆液黏度增长较快后期浆液扩散形态呈现不均匀性。且材料具有一定抗分散性,静水扩散中浆-水交界面清晰,无浆、水混合区。

(2)注浆模拟试验压力随时间扩散曲线显示,高聚物改性浆液初期黏度较大,但在 30 s 之后,黏度增长较为均匀,塑性转化过程较慢,有利于注浆封堵,适用于富水区域裂隙注浆,对比 C-S 浆液具有显著工程优点。

(3)静水条件下注浆模拟试验测点压力变化显示,水泥-水玻璃浆液和高聚物改性浆液在相同配比条件下,同一测点高聚物改性浆液压强较水泥-水玻璃浆液低约 47%,这一特性将有助于延长注浆达到终止压力的时间,有利于增大浆液扩散距离,并降低压力增长对围岩稳定性造成的不利影响。

(4)系统研究了裂隙渗漏水注浆治理的注浆参数选取依据、治理方法优化和注浆治理关键技术,并在张马屯铁矿巷道围岩渗漏水治理工程中取得了成功应用,能够为类似工程提供借鉴。

参 考 文 献

- [1] 关宝树. 软弱围岩隧道变形及其控制技术[J]. 隧道建设, 2011, (1): 1-17.
GUAN Bao-shu. Deformation of tunnels with soft surrounding rocks and its control[J]. Tunnel Construction, 2011, (1): 1-17.
- [2] 邓之友, 彭立敏, 刘正初. 浅埋偏压隧道围岩渐进破坏机制分析[J]. 隧道建设, 2012, (2): 150-155.
DENG Zhi-you, PENG Li-min, LIU Zheng-chu. Study on progressive failure mechanisms of rock mass of

- asymmetrically-loaded tunnel under shallow cover[J]. **Tunnel Construction**, 2012, (2): 150—155.
- [3] 余林辉. 隧道涌突水的原因和预测预报方法[J]. 隧道建设, 2012, (2): 164—168.
SHE Lin-hui. Causes for water inflow/bursting in tunneling and its prediction methods[J]. **Tunnel Construction**, 2012, (2): 164—168.
- [4] 王玉钦, 冀焕军, 杨永利. 煤矿井下动水注浆堵水实践[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(2): 30—33.
WANG Yu-qin, JI Huan-jun, YANG Yong-li. Practices on dynamic water grouting and sealing in coal mine[J]. **Coal Science and Technology**, 2007, 35(2): 30—33.
- [5] 冯志强, 康红普, 杨景贺. 裂隙岩体注浆技术探讨[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(4): 63—66.
FENG Zhi-qiang, KANG Hong-pu, YANG Jing-he. Discussion on grouting technology for crack rock mass[J]. **Coal Science and Technology**, 2005, 33(4): 63—66.
- [6] 石少帅, 李术才, 李利平, 等. 岩溶区隧道暗河的综合预报及治理方案研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 227—233.
SHI Shao-shuai, LI Shu-cai, LI Li-ping, et al. Comprehensive geological prediction and management of underground river in karst areas[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(1): 227—233.
- [7] 张霄. 地下工程动水注浆过程中浆液扩散与封堵机制研究与应用[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [8] 张霄, 李术才, 张庆松, 等. 矿井高压裂隙涌水综合治理方法的现场试验[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1314—1318.
ZHANG Xiao, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song, et al. Field test of comprehensive treatment for high pressure dynamic grouting[J]. **Journal of China Coal Society**, 2010, 35(8): 1314—1318.
- [9] 阮文军. 基于浆液黏度时变性的岩体裂隙注浆扩散模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2709—2714.
RUAN Wen-jun. Spreading model of grouting in rock mass fissures based on time-dependent behavior of viscosity of cement-based grouts[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(15): 2709—2714.
- [10] 郑玉辉. 裂隙岩体注浆浆液与注浆控制方法的研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2005.
- [11] 罗平平, 李志平, 范波, 等. 倾斜单裂隙宾汉浆液流动模型理论研究[J]. 山东科技大学学报, 2010, 29(1): 43—47.
RUO Ping-ping, LI Zhi-ping, FAN Bo, et al. Theoretical study on flow model for tilted single fracture Binghamian grout[J]. **Journal of Shandong University of Science and Technology**, 2010, 29(1): 43—47.
- [12] 李术才, 张霄, 张庆松, 等. 地下工程涌突水注浆止水浆液扩散机制和封堵方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2377—2396.
LI Shu-cai, ZHANG Xiao, ZHANG Qing-song, et al. Research on mechanism of grout diffusion of dynamic grouting and plugging method in water inrush of underground engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(12): 2377—2396.
- [13] 张改玲, 湛铠瑜, 隋旺华. 水流速对单裂隙化学注浆浆液扩散影响的试验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 403—406.
ZHANG Gai-ling, ZHAN Kai-yu, SUI Wang-hua. Experimental investigation of the impact of flow velocity on grout propagation during chemical grouting into a fracture with flowing water[J]. **Journal of China Coal Society**, 2011, 36(3): 403—406.
- [14] 李虎军, 王琪. 水溶性聚合物改性水泥的研究[J]. 功能高分子学报, 1999, 12(3): 276—280.
LI Hu-jun, WANG Qi. Study on the cement modified by water-soluble polymers[J]. **Journal of Functional Polymers**, 1999, 12(3): 276—280.
- [15] 冯爱丽, 覃维祖, 王宗玉. 絮凝剂品种对水泥不分散混凝土性能影响的比较[J]. 石油工程建设, 2002, 28(4): 6—10.
FENG Ai-li, QIN Wei-zu, WANG Zong-yu. Comparison of some kinds of wadding congeal that influence the property of non-scattering concrete[J]. **Petroleum Engineering Construction**, 2002, 28(4): 6—10.
- [16] ANAGNOSTOPOULOS COSTAS A. Laboratory study of an injected granular soil with polymer grouts[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2005, 20(6): 525—533.
- [17] 刘瑾, 张峰君, 陈晓明, 等. 新型水溶性高分子土体固化剂的性能及机制研究[J]. 材料科学与工程, 2001, 19(4): 62—65.
LIU Jin, ZHANG Feng-jun, CHEN Xiao-ming, et al. Study on the soil hardening properties and mechanism of a new water soluble polymeric soil hardening agent[J]. **Materials Science and Engineering**, 2001, 19(4): 62—65.
- [18] 杨晓华, 俞永华. 水泥-水玻璃双液注浆在黄土隧道施工中的应用[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2): 68—72.
YANG Xiao-hua, YU Yong-hua. Application of cement-silicate double solution grouting in loess tunnel construction[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2004, 17(2): 68—72.
- [19] 刘人太, 李术才, 张庆松, 等. 一种新型动水注浆材料的试验与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1454—1459.
LIU Ren-tai, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song, et al. Experiment and application research on a new type of dynamic water grouting material[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(7): 1454—1459.
- [20] 全国水泥标准化技术委员会. GB175—2007/XG1—2009 通用硅酸盐水泥[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.