

一种新型高分子注浆材料的试验研究

李利平¹, 李术才¹, 张庆松¹, 崔金声², 许振浩¹, 李 钊²

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 2. 浩珂伟博矿业工程有限公司, 山东 兖州 272104)

摘要: 在深部岩土工程实体加固及涌水封堵治理的基础上, 分析一种新型高分子注浆材料反应机制的可行性, 就浆材的黏结性、凝胶性、固体抗压抗折强度等进行详细的室内试验研究工作, 并在模拟的砂卵砾石层中开展渗透注浆模拟试验研究, 分析注浆压力、注浆时间、浆液温度、围岩渗透系数等主要因素对浆液扩散半径和注浆后结石体抗压强度的影响规律以及其相互关系。结合现场工程实例, 进一步验证该化学浆液在工程加固及涌水封堵治理上的实用性和优越性。试验结果表明: 注浆材料的流动性、黏结性、早强性及耐久性较好, 具有储存运输方便、工艺简单实用、遇水急速膨胀、固结体无毒环保等优点。浆液扩散半径随注浆压力、注浆时间、渗透系数的增大而增大, 随浆液温度的升高而减小, 最显著的影响因素是注浆压力和渗透系数, 其次是浆液温度和注浆时间; 注浆后结石体的抗压强度随注浆压力、浆液温度、孔隙度以及注浆时间的增大而增大, 注浆压力和孔隙度对结石体抗压强度有较大影响, 浆液温度次之, 注浆时间对结石体强度的影响最小。研究结果表明该高分子注浆材料具有良好的工程加固和封堵性能, 与传统固化材料相比, 具有凝胶快、强度高、膨胀性好等优点, 是一种比较理想的高分子加固材料和堵水剂。

关键词: 岩石力学; 新型高分子注浆材料; 室内试验; 现场试验; 扩散半径; 抗压强度

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)增 1 - 3150 - 07

EXPERIMENTAL STUDY OF A NEW POLYMER GROUTING MATERIAL

LI Liping¹, LI Shucai¹, ZHANG Qingsong¹, CUI Jinsheng², XU Zhenhao¹, LI Zhao²

(1. The Research Center of Geotechnical Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China;

2. Hock-weber Mining and Engineering Co., Ltd., Yanzhou, Shandong 272104, China)

Abstract: In order to find the proper grouting material for treatment of water inrush and rock reinforcement in deep underground engineering, the feasibility of a new polymer grouting material is analyzed. The experimental properties of cohesion, gelation, strength and virulence of the new polymer grouting material are studied in the laboratory. It shows that this new polymer grouting material is of high fluidity, strong adhesion and durability, comparing with other types of grouting material. It has advantages on convenient storage and transportation, simple and practical grouting technology, non-poisonous and water-expanding property. In addition, by the grouting simulation test in sandy gravels, the influences of grouting pressure, grouting time, permeability coefficient, porosity upon grout diffusion radius, concretion strength and their correlation were analyzed. The grout diffusion radius increased with the increasing of grouting pressure, grouting time and permeability coefficient, and decreased with grout temperature. Distinct influencing factors on grout diffusion radius were grouting pressure and permeability, but the influences of grout temperature and grouting time were small. Strength of grouted gravels increased with the increasing of grouting pressure, grouting time, porosity and grout temperature. The results show that the new polymeric grouting material has rapid gelation, high strength and effective dilation, comparing with

收稿日期: 2009 - 10 - 01; **修回日期:** 2009 - 12 - 11

基金项目: 西部交通建设科技资助项目(2009318000008); 国家自然科学基金资助项目(5087406); 中国博士后科学基金面上资助项目(20090461235); 山东大学自主创新基金资助项目

作者简介: 李利平(1981 -), 男, 博士, 2004年毕业于山东科技大学资源与环境工程学院工程力学专业, 现任讲师, 主要从事地下工程突水机理与灾害防治技术方面的教学与研究工作。E-mail: yuliyangfan@163.com

traditional solidified ones, which is a better polymeric grouting material for the treatment of water inrush and engineering reinforcement.

Key words: rock mechanics; a new polymeric grouting material; laboratory test; field test; grout diffusion radius; compressive strength

1 引言

高分子注浆材料具有传统固化材料所不具备的优越性质, 在砂砾、黄土、碎石等散体类介质的加固治理上应用广泛, 对于渗漏水、裂隙水等散状水也能实现快速封堵的目的^[1~3]。由于深部开采及地下交通、水利等设施埋深的不断增加, 暴露的工程地质条件日趋复杂, 崩塌、突水、涌泥等地质灾害愈演愈烈, 现有注浆材料难以完全满足深部工程高压突水及加固治理的需求。目前, 注浆材料约有百余种, 分别属于粒状浆材、化学浆材及其组成的复合材料, 诸如硅酸钠(俗称水玻璃)、丙烯酰胺、环氧树脂类、无铬盐木素类以及水泥浆类等^[4~6]。但粒状浆材的缺点是其较差的可灌性, 在封堵水流时极易被水稀释或冲走, 对于复杂松散类岩土介质, 不能形成连续、稳定的胶结体。而化学浆材的价格高、注浆工艺复杂、具有蠕变特征, 某些化学浆材还具有水质毒理特征, 造成大面积地下水污染。对于深部地下工程, 注浆材料需具备加固和堵水双重性能, 灌浆工艺简单易行, 反应时间可依据需要进行调整, 同时要具备良好的抗渗性、耐久性、膨胀性等。目前的化学注浆材料中, 还没有能较好地满足上述要求的。鉴于此, 拟对一种新型高分子注浆材料进行试验研究, 力求获得一种更理想的化学浆材, 以满足各种水利、交通枢纽和设施治理工程的广泛需求。

2 高分子注浆材料试验研究

本试验主要研究不同配比条件下马丽散固化浆液结石体的反应状态和力学性能, 包括化学浆液的凝胶快慢、浆液反应膨胀性能以及其无侧限抗压强度。同时配制了砂砾层相似材料, 进行注浆模拟试验, 以分析浆液的扩散半径、结石体抗压强度的影响因素及其相互关系^[7~9]。

2.1 高分子固化浆液材料分析

(1) 原料分析

试验使用的原料为树脂 M 和催化剂 N 两种,

均由山东兖州浩柯伟博矿业工程公司提供。在室温条件下, 树脂 M 为淡黄色透明液体, 密度约为 1.03 g/cm³, 黏度为 200 mPa·s; 催化剂 N 为深棕色半透明液体, 密度约为 1.23 g/cm³, 黏度为 210 mPa·s。材料反应时膨胀倍数为 1~2 倍, 氧指数约为 19%~20%。

(2) 浆液的配制

将树脂 M 和催化剂 N 溶液从冷库中取出, 放置实验室升温至 20 °C 左右, 试验前将其摇匀并测试其黏度。待仪器设备调试完毕后, 按不同比例将树脂和催化剂均匀倒入试验容器中, 并用搅拌器充分搅拌使其快速反应。

(3) 试块的制作

树脂 M 和催化剂 N 完全反应后, 将其固体取出放置 3 h 以上, 然后采用特制的试验模具将其套牢固, 通过车床将固体加工成标准试件。试块最终成型尺寸为 $\phi 5 \times 10$ cm 的圆柱体, 并对试块采取一定的养护措施, 在测试前, 依据试验要求对其进行筛选。

2.2 高分子固化浆液性能指标测试

(1) 无侧限抗压强度的测定

采用无侧限抗压仪对不同配比(树脂 M 和催化剂 N)、不同龄期的材料进行无侧限抗压强度的测试, 每个强度值取 3 块试块强度值的平均值, 所得数据见图 1。

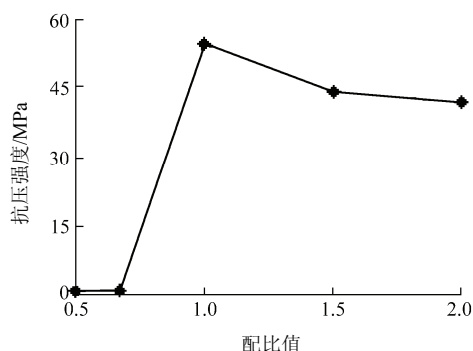


图 1 不同配比材料的无侧限抗压强度

Fig.1 Unconfined compressive strength of materials of different proportions

材料按等体积配比时, 树脂和催化剂反应所得固体体的抗压强度最高, 约为 55 MPa, 但随着催化

剂的不断增加，反应所得固结体的质地逐渐松软，直至无法取样测试。

(2) 浆液凝胶时间的测定

树脂 M 和 N 按照不同配比反应测试时，采取单项多组方式测试其凝胶时间和整体反应时间，测试结果如图 2 所示。

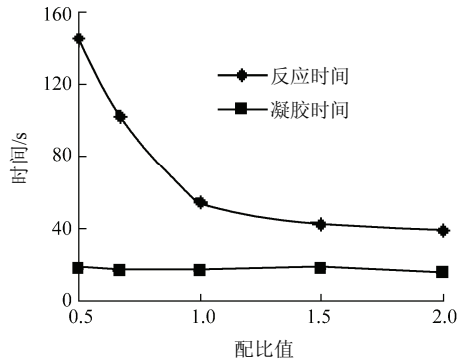


图 2 不同配比的浆液凝胶时间和整体反应时间
Fig.2 Reaction and condensation times of different proportions

配比不同时，材料的整体反应时间变化比较大，随着催化剂的增大反应越来越慢，但其凝胶时间基本维持在 17 s 左右，浆液按等体积配比时的凝胶时间大约为 55 s，随着树脂含量的增大，材料的凝胶时间仅呈小幅度变化。

(3) 浆液膨胀性能的测定

该浆液的最大特点就是遇水快速膨胀，而当用于工程加固未遇到水时也具有一定的膨胀性能，能快速地封闭裂隙和水流，对不同配比的浆液进行对比分析，其膨胀性能测试数据见图 3。

根据测试结果，当等体积配比时，材料开始发生明显的体积膨胀现象，尤其在遇到水时表现更为剧烈。

(4) 材料的综合指标分析

基于马丽散浆材各项指标的测试结果，结合普

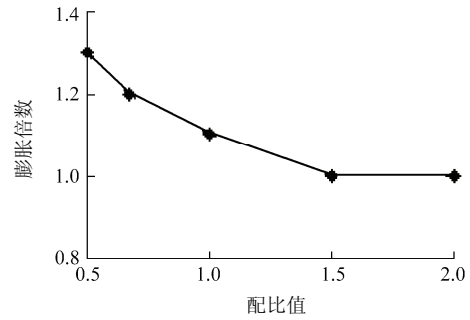


图 3 不同配比材料的膨胀性能

Fig.3 Expansive properties of materials of different proportions

通水泥、超细水泥、HSC 水泥等普通灌浆材料进行综合性能对比分析，见表 1。

水泥类浆液固化失水后干缩，受压不均匀容易产生裂纹，而马丽散则具有一定的弹性，允许 10% 以内的变形，不产生裂纹，越压越密实，与加固地层有相同的寿命。由于水泥具有一定的粒径，在以往注浆实践中，发现无法注入宽度小于其 3 倍粒径的空隙，对于密实岩体加固效果一般。马丽散属真溶液，相对于水泥类悬浮液的黏度要小很多，在很多无法实施煤层注水的矿区，马丽散可以顺利注入进行加固，由于该材料具有较强的渗透性，对于密实岩土介质的加固具有较大的优势。

在材料强度方面，水泥类注浆材料随时间的增长表现为初期强度和早期强度，而马丽散在成型 3 h 后强度不再发生变化，强度值也明显高于水泥类材料。对于某些风化比较严重的岩体地段，诸如花岗岩、砂岩遇水易迅速崩解，类似岩体的加固治理对灌浆材料的凝结时间和早期强度要求比较高，显然马丽散具有明显的优势。同时，马丽散自身具有膨胀性能，尤其是遇到水膨胀倍数可高达 25 倍，其凝胶速度也比较快，不超过 1 min，最终固结时间也明显低于其他材料。因此，该材料更适用于地下工程

表 1 浆材性能综合指标对比

Table 1 Synthetic indexes comparison of different grouting materials

注浆材料	抗压强度 /MPa	凝结时间	膨胀系数	渗透性	价格 / (元 · t ⁻¹)	综合性能
普通水泥	31.25	3 h55 min	<1		<1 000	早强性差，适用于劈裂注浆或者一般的围岩裂隙加固注浆
超细水泥	51.58	3 h40 min	<1	>3 d		早强性差，适用于一般的细密裂隙围岩加固注浆
HSC 特种水泥	25.61	31 min(含水玻璃)	<1		<10 000	早强性好、强度高、凝结时间可控，适用于非急速涌水封堵和加固治理
马丽散	65.75	132 s	1~2	<3 d 亦可注入	<35 000	凝胶快、强度高、膨胀性好，具有极强的渗透性，适用于急速涌水封堵和加固治理

的涌水封堵和加固治理。

2.3 渗透注浆模拟试验

该高分子化学浆液作为一种新型注浆堵水加固材料, 其材料性能受诸多因素的影响, 除材料本身因素外, 还与被加固体的渗透系数、孔隙度等结构参数有关^[10~12]。当浆液用来加固砂砾石层、破碎岩层等孔隙度较大松散类介质时, 往往要求浆液注入时能形成连续、稳定的胶结体, 浆液的扩散距离和结石体的抗压强度主要取决于介质的结构参数、浆液的性质及注浆的工艺参数。本文通过注浆模拟均匀试验, 获得浆液的扩散距离、结石体强度与其影响因素之间的相互关系, 以便现场注浆的参数确定。

(1) 试验装置及原理

渗透注浆试验装置经自行设计后, 委托试验原料厂加工而成, 该装置主要由钢结构容器、试验振动台、可移动板、注浆设备和量测系统等组成。试验装置见图 4。

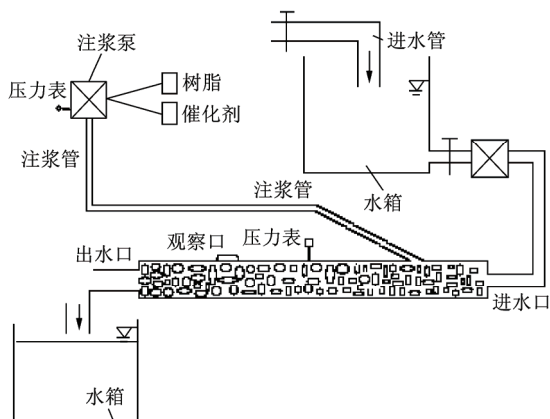


图 4 试验装置图

Fig.4 Diagram of test device

钢结构长方体容器工作间由钢结构架、孔板、可移动板、钢底板等组成, 宽和高均为 1.2 m, 长可在 0~1.5 m 内调节, 以满足不同的试验要求; 孔板位于顶面和背面, 用于注浆管和渗流管的安装; 可移板由数根弹簧和偏心振动机器组成; 注浆设备包括微型注浆泵、双筒灌浆杆、缓冲器、搅拌桶等; 量测系统由压力表、秒表、料桶等组成。

(2) 试验材料及均匀设计

试验模型主要由砂子、卵砾石按不同的配比组合而成, 以模拟不同渗透系数的砂卵石层。经试验台振动密实后, 模型试验分两组进行。每组试验模型由不同配比的模拟材料组成 7 种不同渗透系数 K 的砂卵石层, 注浆浆液的温度 T 、注浆压力 p 也分别选取 7 个值, 如表 2, 3 所示。

表 2 第一组试验各因素取值情况表

Table 2 Values of experimental factors in the first set of test

序号	渗透系数 $K/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	注浆压力 p/MPa	注浆温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	0.201	0.025	11
2	0.282	0.035	13
3	0.311	0.045	15
4	0.391	0.055	17
5	0.465	0.065	19
6	0.520	0.075	21
7	0.570	0.085	23

表 3 第二组试验各因素取值情况表

Table 3 Values of experimental factors in the second set of test

序号	渗透系数 $K/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	注浆压力 p/MPa	注浆温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	0.219	0.02	12
2	0.261	0.03	14
3	0.344	0.04	16
4	0.401	0.05	18
5	0.490	0.06	20
6	0.535	0.07	22
7	0.590	0.08	24

试验设计采用均匀试验设计法, 较正交试验设计更为精简实用^[13~17], 选用 3 种因素 7 个取值的均匀设计使用表 $U_7^*(7^4)$ 进行试验设计, 见表 4, 当试验为 3 因素时, 采用表中的 2, 3, 4 列来安排试验。试验安排如表 5, 6 所示。

表 4 均匀设计表 $U_7^*(7^4)$ 使用表

Table 4 Utilization table of uniform design $U_7^*(7^4)$

因素个数	选用因素列			偏差 D
2	1	3		0.158 2
3	2	3	4	0.313 2

表 5 第一批试验安排表

Table 5 Plan of the first set of test

试验编号	试验因素		
	渗透系数 $K/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	注浆压力 p/MPa	注浆温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	0.311(3)	0.06(5)	24(7)
2	0.520(6)	0.03(2)	22(6)
3	0.201(1)	0.08(7)	20(5)
4	0.391(4)	0.05(4)	18(4)
5	0.570(7)	0.02(1)	16(3)
6	0.282(2)	0.07(6)	14(2)
7	0.465(5)	0.04(3)	12(1)

注: ()中数据代表均匀试验设计因素的排列顺序, 下同。

表6 第二批试验安排表

Table 6 Plan of the second set of test

试验 编号	试验因素		
	渗透系数 $K/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	注浆压力 p/MPa	注浆温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	0.344(3)	0.065(5)	23(7)
2	0.535(6)	0.035(2)	21(6)
3	0.219(1)	0.085(7)	19(5)
4	0.401(4)	0.055(4)	17(4)
5	0.590(7)	0.025(1)	15(3)
6	0.261(2)	0.075(6)	13(2)
7	0.490(5)	0.045(3)	11(1)

(3) 试验观察分析

在注浆过程中，注浆压力恒定时浆液渗入模拟材料的速率呈波动趋势，一方面是材料快速凝胶增大了后续浆液渗透的阻力，另一方面是浆液在砂卵石层中流动时，不断碰到骨架孔隙和接触面小缝隙，导致浆液渗透力或大或小，从而引起注浆压力的交替波动。

注浆结束后，从观察口观测沿弱面渗出浆液的反应情况，待完全反应后拆模取样观察，测量浆液扩散半径，并取出测试试块。大多数结石体为环绕注射花管的圆柱体或圆台体形，并附带一个不规则的沿弱面渗透生成的面状结石体，见图5。



图5 注浆结石体图

Fig.5 Grouted gravel

当注浆压力偏小时，注浆材料的凝结范围明显较小，浆液在各种情况下的扩散比较均匀，并且在扩散范围内浆液充填密实，与砂卵石凝结良好。

(4) 试验数据处理

对两组试验 14 次注浆模拟试验提取浆液的扩散半径以及结石体取样试块的抗压强度值进行优化回归分析，测试数据见表7，8。

表7 第一批试验结果

Table 7 Results of the first set of test

试验 序号	渗透系数 $K/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	注浆压力 p/MPa	注浆 温度 $/^{\circ}\text{C}$	注浆 时间 $/\text{s}$	孔隙 度 $/\%$	扩散 半径 $/\text{cm}$	注浆后 强度 $/\text{MPa}$
1	0.311(3)	0.06(5)	24(7)	106	32.6	26	15.68
2	0.520(6)	0.03(2)	22(6)	77	33.6	16	10.50
3	0.201(1)	0.08(7)	20(5)	59	22.5	21	7.61
4	0.391(4)	0.05(4)	18(4)	71	31.2	20	6.88
5	0.570(7)	0.02(1)	16(3)	36	42.0	9	5.12
6	0.282(2)	0.07(6)	14(2)	47	29.6	20	8.13
7	0.465(5)	0.04(3)	12(1)	28	46.0	12	6.33

表8 第二批试验结果

Table 8 Results of the second set of test

实验 序号	渗透系数 $K/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	注浆 压力 p/MPa	注浆 温度 $/^{\circ}\text{C}$	注浆 时间 $/\text{s}$	孔隙 度 $/\%$	扩散 半径 $/\text{cm}$	注浆后 强度 $/\text{MPa}$
1	0.344(3)	0.065(5)	23(7)	81	35.6	30	16.23
2	0.535(6)	0.035(2)	21(6)	69	41.9	18	13.66
3	0.219(1)	0.085(7)	19(5)	66	22.9	24	8.55
4	0.401(4)	0.055(4)	17(4)	74	39.9	22	9.31
5	0.590(7)	0.025(1)	15(3)	19	45.8	7	7.66
6	0.261(2)	0.075(6)	13(2)	54	27.7	23	9.32
7	0.490(5)	0.045(3)	11(1)	24	42.3	15	7.66

扩散半径 R 与注浆压力 p 、渗透系数 K 、浆液温度 T 、注浆时间 t 之间的关系式为

$$\left. \begin{aligned} R &= 472p + 49.7K - 0.17T + 0.195t - 34.1 \\ b_p &= 1.55, \quad b_m = 1.04, \quad b_T = -0.106 \\ b_t &= 0.745, \quad r = 0.968 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： t 为注浆时间(s)； b_p, b_k, b_T, b_t 分别为浆液的扩散半径 R 对注浆压力 p 、渗透系数 K 、浆液温度 T 、注浆时间 t 的标准回归系数，该系数越大，所对应的因素扩散半径 R 的影响就越大； r 为复相关系数。

由式(1)可知注浆压力和地层的渗透系数对浆液的扩散半径有较大的影响，浆液温度次之，注浆时间对扩散半径的影响相对较小。

注浆后结石体的抗压强度 P 与地层孔隙度 n 、注浆压力 p 、注浆温度 T 、注浆时间 t 之间的关系为

$$\left. \begin{aligned} P &= 116p + 37.9n - 0.506T + 0.05t - 21.7 \\ b_p &= 0.710, \quad b_n = 0.881, \quad b_T = 0.620 \\ b_t &= 0.363, \quad r = 0.884 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由式(2)可知注浆后结石体的抗压强度随注浆

压力、浆液温度、孔隙度、注浆时间的增加而增大, 最显著的影响因素是注浆压力和地层的孔隙度, 其次是浆液温度, 而注浆时间对结石体抗压强度的影响则相对较小。因此, 注浆压力和注浆介质结构(渗透系数 m 、孔隙度 n) 是决定注浆效果的主要参数。

3 工程应用

采用新型高分子注浆材料对新疆八十一大坂引水隧洞和厦门东通道海底隧道分别进行了加固和涌水封堵治理, 并对注浆效果进行检验, 分析高分子注浆材料的加固和堵漏的双重作用, 验证其可行性。

3.1 引水隧洞加固治理试验

八十一大坂隧洞位于新疆伊犁哈萨克自治州境内, 总长 31 km, 为新疆恰甫其海综合利用水利枢纽二期工程南岸干渠段的重点工程。

隧洞开挖采用常规钻爆法与 TBM 掘进, 由于隧洞围岩多为膨胀性泥岩, 并夹杂有炭质泥岩、粉沙质泥岩, 遇水迅速膨胀崩解, 导致掌子面岩体失稳、塌方, TBM 掘进机刀盘及护盾被泥岩膨胀力所压制卡死, 不易采用含水注浆材料进行加固治理。在进行注浆材料优选后, 拟采用高分子化灌材料进行掌子面松散泥岩的固结灌浆。

掌子面围岩松散破碎, 浆液渗透性较好, 但受 TBM 设备限制, 布置钻孔及注浆作业极不方便, 经护盾钢板开口, 布置 5 个钻孔, 孔深 7~10 m, 倾角向上约 17°, 钻孔孔口间距 300 mm 左右, 终孔间距 3~5 m, 呈梅花型布置。注浆管长 7 m, 前方打 2 m 花眼, 采用 3 m 短管在棉纱的缠绕下通过定量注浆封堵钻孔。注浆压力控制在 2 MPa 左右, 由于浆液的扩散, 注浆压力逐渐减小。前期单孔注浆量约 220~280 kg, 由于浆液逐步扩散将裂隙充填, 随后单孔注浆量有所降低。

注浆结束后, 掌子面附近围岩形成稳定性较高的固结体, 注浆区域内浆液扩散半径大约 1.5~2.0 m, 启动 TBM 可正常掘进, 未出现刀盘被卡、围岩坍塌的现象。

3.2 海底隧道涌水治理试验

厦门东通道(翔安)隧道位于厦门岛东北端的湖里区与翔安区之间, 具有公路和城市道路双重功能, 是我国大陆第一条大断面海底隧道。

隧道采用钻爆暗挖法修建, 其右线采用双侧壁导坑法施工。在里程 YK7+335 处, 右导洞掌子面土体渗水, 拱部坍塌严重, 施工至 YK7+320.5 处, 两侧边墙开始有水涌入, 并具有一定水头压力, 该段围岩收敛达 300 mm。为加固围岩防止大面积坍塌, 并对出水进行封堵治理, 拟采用高分子注浆材料进行松散段实施注浆, 然后分台阶进行帷幕注浆。

在里程 YK7+312~335 范围内, 根据围岩情况分 5 段进行治理, 注浆压力保持在 0.5~1.0 MPa, 单孔注浆液量约 110 kg。共布置 8 排钢花管, 管长 3 m, 直径为 42 mm, 各排注浆管位置视各段围岩破碎程度和出水点而定。

掌子面挂网锚喷后, 布置 3 m 长 ϕ 42 mm 的注浆花管, 呈梅花型分布, 靠近周边轮廓的注浆管外倾角 10°左右, 待喷射混凝土达到一定强度后, 开始注浆, 固结掌子面松散土体并封闭水流。

注浆完毕后, YK+335 附近土体整体固结, 立即停止渗水, YK+320.5 处出水点被完全封堵, 浆液遇水膨胀填充了裂隙和孔隙, 不但达到了快速封闭水流的目的, 同时也提高了掌子面附近围岩的整体强度, 有效抑制了围岩坍塌。

4 结 论

(1) 注浆材料的可行性经室内试验研究证明是正确的、合理的, 材料的流动性、渗透性、黏结性及膨胀性均较好, 并具有较高的强度, 高分子注浆材料具有传统注浆材料所不具备的优越性质。

(2) 注浆材料凝胶速度快, 从几秒钟到几分钟可控; 浆液可快速渗入微小孔隙, 膨胀 1~2 倍, 遇水则膨胀 25 倍左右, 且固结体柔韧性好、可持续, 与围岩相同寿命。

(3) 渗透注浆模拟试验表明: 浆液的扩散半径随注浆压力、渗透系数、注浆时间的增加而增大, 随浆液温度的升高而减小; 注浆后结石体的抗压强度随注浆压力、浆液温度、地层孔隙比、注浆时间的增大而增大; 影响扩散半径和结石体抗压强度的显著因素均为注浆压力和注浆介质结构参数(渗透系数 m 、孔隙度 n), 其次为浆液温度, 注浆时间的影响则相对较小。

(4) 现场试验表明: 注浆材料用于工程加固和堵水治理, 具有运输快捷、工艺简单、操作方便的优点。较其他传统注浆材料, 具有高膨胀、快反应、高强度以及可泵性良好的显著特点, 是一种具有广泛

应用前景的新型高分子化学注浆加固材料和堵水剂。

参考文献(References):

- [1] 胡安兵, 徐会文, 杨敏. 新型注浆材料试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 210 - 213.(HU Anbing, XU Huiwen, YANG Min. Experiments on a new type of grout[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(2): 210 - 213.(in Chinese))
- [2] 王银梅, 韩文峰, 谏文武. 新型高分子固化材料与水泥加固黄土力学性能对比研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1 761 - 1 765.(WANG Yinmei, HAN Wenfeng, CHEN Wenwu. Research on comparison between mechanical behaviors of loess solidified with new polymer material and cement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1 761 - 1 765.(in Chinese))
- [3] 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 Fengjun, CHEN Xiaoming, 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.(in Chinese))
- [4] 阮文军, 王文臣, 胡安兵. 新型水泥复合浆液的研制及其应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 212 - 216.(RUAN Wenjun, WANG Wenchen, HU Anbing. Development and application of new kind of cement composite grout[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 212 - 216.(in Chinese))
- [5] 倪宏革, 孙峰华, 杨秀竹, 等. 采用黏土固化浆液进行岩溶路基注浆加固试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 27(7): 1 242 - 1 247.(NI Hongge, SUN Fenghua, YANG Xiuzhu, et al. Experimental study of clay hardening grouts for roadbed reinforcements[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 27(7): 1 242 - 1 247.(in Chinese))
- [6] 张继红, 顾国荣, 陈晖. 砂质粉土中浅部侧向注浆浆液流向的开挖观测与研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 105 - 107.(ZHANG Jihong, GU Guorong, CHEN Hui. Observation and research of fluidity of side grouting in shallow sandy silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1): 105 - 107.(in Chinese))
- [7] 邹金峰, 李亮, 杨小礼. 劈裂注浆扩散半径及压力衰减分析[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 314 - 319.(ZOU Jinfeng, LI Liang, YANG Xiaoli. Penetration radius and pressure attenuation law in fracturing grouting[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(3): 314 - 319.(in Chinese))
- [8] 阮文军. 浆液扩散与浆液若干基本性能研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 69 - 73.(RUAN Wenjun. Research on diffusion of grouting and basic properties of grouts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 69 - 73.(in Chinese))
- [9] 杨坪, 唐益群, 彭振斌, 等. 砂卵(砾)石层中注浆模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2 134 - 2 138.(YANG Ping, TANG Yiqun, PENG Zhenbin. Study on grouting simulating experiment in sandy gravels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2 134 - 2 138.(in Chinese))
- [10] 郝哲, 王介强, 刘斌. 岩体渗透注浆的理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 491 - 496.(HAO Zhe, WANG Jieqiang, LIU Bin. Experimental study of clay hardening grouts for roadbed reinforcements[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 491 - 496.(in Chinese))
- [11] 李哲, 仵彦卿, 张建山. 高压注浆渗流数学模型与工程应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1 972 - 1 976.(LI Zhe, WU YANqing, ZHANG Jianshan. Mathematical model of high pressure injection cement liquid and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12): 1 972 - 1 976.(in Chinese))
- [12] 郝哲, 王英刚, 刘斌. 岩体注浆堵水的可靠性设计[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 592 - 595.(HAO Zhe, WANG Yinggang, LIU Bin. Reliability design of grouting for stopping up water in rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 592 - 595.(in Chinese))
- [13] 吕爱钟, 蒋斌松. 岩石力学反问题[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998.(LU Aizhong, JIANG Binsong. Inverse problem of rock mechanics[M]. Beijing: China Coal Industry Press, 1998.(in Chinese))
- [14] 张小平, 刘艳华, 张小蒙. 泡沫轻质材料试验研究的均匀设计方法及配方优化[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1 323 - 1 326.(ZHANG Xiaoping, LIU Yanhua, ZHANG Xiaomeng. Uniform design method and mix proportion optimization for experimental research on foam lightweight material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(8): 1 323 - 1 326.(in Chinese))
- [15] 杨林德, 朱合华, 冯紫良, 等. 岩土工程问题的反演理论与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 1998.(YANG Linde, ZHU Hehua, FENG Ziliang, et al. The theory and practice of back analysis in geotechnical engineering[M]. Beijing: Science Press, 1998.(in Chinese))
- [16] 汤华, 史贵才, 葛修润, 等. 均匀设计原理在地下工程位移反分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2 017 - 2 022.(TANG Hua, SHI Guicai, GE Xiurun, et al. Application of uniform design to displacement back analysis in underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2 017 - 2 022.(in Chinese))
- [17] 李端有, 甘孝清, 周武. 基于均匀设计及遗传神经网络的大坝力学参数反分析方法[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 125 - 130.(LI Duanyou, GAN Xiaoping, ZHOU Wu. Back analysis of mechanical parameters of dams based on uniform design and genetic neural network[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 125 - 130.(in Chinese))