

速凝浆液抗分散性质与凝胶性能试验研究

袁敬强¹, 陈卫忠^{1,2}, 谭贤君¹, 郑朋强¹, 于建新¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘要: 为了科学评价注浆浆液的抗分散性质与凝胶性能, 设计速凝浆液抗分散性质试验装置, 能够模拟浆液在未凝胶之前即受到动水冲刷的关键过程。利用该装置开展水泥水玻璃浆液与改性聚氨酯浆液的抗分散性质试验, 并定义浆液留存率指标, 对速凝浆液在动水条件下的抗分散性质进行定量评价。试验表明: 水泥水玻璃浆液在较小动水流速条件下抗分散性能较好, 随着动水流速的增大, 浆液留存率迅速减小, 其抗分散性质还受到水灰比、水泥浆与水玻璃体积比等因素的影响; 改性聚氨酯浆液在较大动水流速条件下仍具有较高的浆液留存率, 较水泥水玻璃浆液具有更为优良的抗分散性质和凝胶性能。根据速凝浆液抗分散性质与凝胶性能的试验分析结果, 提出突水灾害治理注浆浆液的选择原则与综合治理措施。

关键词: 地下工程; 突水治理; 速凝浆液; 抗分散性质; 凝胶性能; 浆液留存率

中图分类号: TU 94

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2015)05-0960-08

EXPERIMENTAL STUDY OF ANTI-WASHOUT PROPERTY AND GELLING PERFORMANCE OF FAST-GELLING GROUT

YUAN Jingqiang¹, CHEN Weizhong^{1,2}, TAN Xianjun¹, ZHENG Pengqiang¹, YU Jianxin¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

Abstract: Grouting technique is widely used to control the water inrush hazards and increase the strength in tunneling and underground engineering. Therefore, the anti-washout property of grout under the flowing water condition is the key factor that determines the grouting effect. In order to evaluate the anti-washout property and the gelling performance of the fast-gelling grout, a specific test apparatus was designed to simulate the vital process of the grout being flushed by the flowing water before gelled. With this device, a series tests were carried out by controlling the velocity of water flow and the mixing proportion of grout. The grout retention ratio(GRR) index was proposed to evaluate the anti-washout property quantitatively. The test results showed that the grout of cement-sodium silicate achieved a large grout retention ratio when the water flow velocity was small, however, the grout retention ratio decreased significantly with the increasing of the velocity of water flow. The GRR of the grout of cement-sodium silicate was influenced by the mass ratio of water to cement and the volume ratio of cement to sodium silicate of the grout. The modified polyurethane grout had a larger GRR under the fast water flow condition and the gel was more compact, which meant that the modified polyurethane grout had the better anti-washout property and the gelling performance. According to the different anti-washout property and gelling performance of

收稿日期: 2014-03-24; **修回日期:** 2014-06-30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB036006); 国家自然科学基金杰出青年基金项目(51225902)

作者简介: 袁敬强(1985-), 男, 2009年毕业于中国矿业大学地质工程专业, 现任助理研究员, 主要从事隧道突水灾害与注浆机制方面的研究工作。E-mail: jqyuan@whrsm.ac.cn. 通讯作者: 陈卫忠(1968-), 男, 现任研究员、博士生导师。E-mail: wzchen@whrsm.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0328

grout, a method of choosing grout materials reasonably to dealing with the water inrush was proposed.

Key words: underground engineering; treatment of water inrush; fast-gelling grout; anti-washout property; gelling performance; grout retention ratio

1 引言

在岩溶或富水地区隧道与地下工程建设过程中,经常面临着突水、突泥的风险^[1-4],注浆是工程实践中广泛采用的堵水加固措施^[5-8]。而在高压大流量突水灾害治理工程中,浆液注入后将面临复杂的水力环境,在动水条件下传统水泥单液浆容易被冲刷稀释,甚至丧失堵水加固作用。因此,突水灾害治理的工程实践对浆液性能也提出更高的要求,浆液的抗分散性质与凝胶性能对于注浆成功与否至关重要。

目前,在动水注浆理论与试验方面已有许多研究成果,任克昌^[9]采用流场叠加原理,分析了动水作用下浆液扩散形态,获得了化学浆液在动水中流动的扩散图像方程;湛铠瑜等^[10-11]设计了单一裂隙动水注浆试验装置,对动水条件下改性脲醛树脂浆液的扩散规律进行了研究;张 霄^[12]设计了准三维裂隙动水注浆试验平台,研究了水泥浆与聚丙烯酰胺浆液在动水条件下的扩散规律与沉积封堵机制;李利平等^[13-14]针对马丽散浆液的流动性、渗透性、抗冲刷性以及固结体的强度等性能,开展了室内试验研究。

在浆液材料抗分散性质评价方面,相关研究成果较少,K. H. Khayat 和 A. Yahia^[15-16]提出了一种简易试验测量方法,但试验中的水流条件与实际动水条件存在较大差异;刘人太等^[17-18]设计了动水冲刷试验装置,对比分析已经初凝的浆液凝胶体在静水与动水条件下的质量变化,该试验为科学评价浆液抗分散性质提供了很好的思路,但未能反映浆液在未凝胶之前即面临动水冲刷的关键过程。

为了科学评价浆液抗分散性质与凝胶性能,模拟浆液在未凝胶之前即受到动水冲刷的关键过程,本文设计了速凝浆液抗分散性质试验装置,能够模拟浆液在动水条件下的凝胶沉积过程,为速凝浆液的抗分散性质和凝胶性能的科学评价提供了一种简便、有效的思路。

2 速凝浆液抗分散性质试验

2.1 试验设计

速凝浆液抗分散性质试验装置如图 1 所示,其

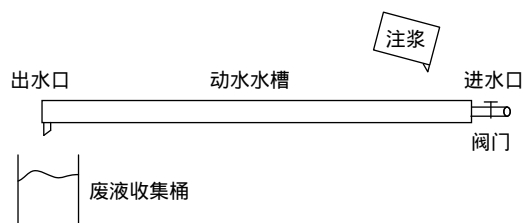


图 1 浆液抗分散性质试验装置示意图

Fig.1 Sketch of anti-washout property test apparatus

中动水水槽长 200 cm、宽 10 cm、高 5 cm。水槽两端分别设置进水口与出水口,进水口设有流速调节阀。动水水槽内的水流流速可以在 0.0 ~ 0.6 m/s 范围调节,出水口设置浆液收集桶,混合均匀的浆液从距离水槽进水口 20 cm 位置处注入。

试验过程中分别设定不同的动水流速条件,将一定体积的浆液混合均匀后注入到水槽中,待出水口处流出的液体基本为清水时,关闭进水口阀门,然后收集凝胶沉积在水槽内的凝胶体并称重。定义浆液留存率 GRR (grout retention ratio)为动水条件下沉积在水槽内的浆液凝胶体质量 m_s 与注入浆液质量 m_0 之比,用于定量评价速凝浆液在动水条件下的抗分散性质。

2.2 试验材料

突水灾害治理常用的注浆材料主要为水泥基速凝浆液和各类化学浆液,特别是水泥水玻璃浆液在堵水加固工程中得到广泛应用,而新型改性聚氨酯浆液因堵水性能优异、安全环保的优点也在隧道、煤矿、水利水电、市政等地下工程中有着较广泛的应用^[19]。因此采用水泥水玻璃浆液与改性聚氨酯浆液作为研究对象,主要试验材料及性能如下:

(1) 水泥

试验采用华新堡垒牌 P. C. 32.5 复合硅酸盐水泥,水泥品质符合《通用硅酸盐水泥》(GB175—2007)标准。

(2) 水玻璃

选用工业级改性水玻璃,水玻璃原液浓度为 40 °Bé、模数 3.16,根据工程中经常采用的配比方案,试验时将水玻璃原液稀释配制 30 °Bé 的浆液。

(3) 水泥水玻璃浆液

采用上述水泥和水玻璃配制而成的水泥水玻璃浆液由于浆液配比的不同,浆液凝胶时间(倒杯法测

得)也有所不同,凝胶时间为 20 ~ 60 s,水泥浆与水玻璃混合 10 s 内黏度可增加至 1 000 MPa · s。

(4) 改性聚氨酯浆液

改性聚氨酯浆液选用米诺桦有限公司生产的 Carbopur WF,属于硅酸盐改性聚氨酯浆液,由 A, B 双组分组成,主要性能参数如表 1^[19]所示。

2.3 试验方案

分别开展了不同配比的水泥水玻璃浆液及改性聚氨酯浆液的抗分散性质试验,其中,水泥水玻璃浆液 27 组,改性聚氨酯浆液 3 组,试验方案如下:

(1) 根据注浆工程中常用的浆液配比方案,水泥水玻璃浆液的水灰比 W/C 分别为 0.8, 1.0, 1.2, 水泥浆与水玻璃体积比 C/S 分别为 1 : 1, 2 : 1, 3 : 1, 改性聚氨酯浆液 A, B 双组分的体积比为 1 : 1。

(2) 采用浮标法测定动水流速,通过调节进水口处流速控制阀,使得动水水槽内流速分别为 0.2, 0.4, 0.6 m/s。

(3) 每次注入浆液总体积为 480 mL,并称量浆液质量(m₀),在烧杯中把浆液搅拌混合均匀,搅拌时间为 20 s。

(4) 采用浆液直接倒入的方法模拟动水注浆过程,把浆液注入到动水水槽靠近进水口 20 cm 处,注入过程保持匀速。

(5) 待出水口处流出液体基本为清水后,关闭进水口处阀门,并将水槽内的水排出,采用游标卡尺测量沿水流方向不同位置的浆液凝胶厚度,收集沉积于水槽内的浆液凝胶并称量记录(m_s)。

3 试验结果与分析

3.1 水泥水玻璃浆液抗分散性质试验结果分析

采用全面试验法对水泥水玻璃浆液抗分散性质进行试验分析,试验中设置不同的 W/C, C/S 及动水流速 v,共进行 27 组试验,分别测定注入之前的浆液质量 m₀和动水条件下浆液凝胶沉积质量 m_s,计算得到浆液留存率 GRR,见表 2。

(1) 动水流速 v 的影响

动水流速 v 对浆液留存率影响的试验曲线如图 2 所示。可以看出,当动水流速 v = 0.2 m/s 时,浆液留存率较高,绝大部分配比浆液的 GRR 值均大于 80%;随着 v 的增大,浆液留存率减小,v = 0.4 m/s 时,各配比浆液的 GRR 值均小于 80%,仅有 W/C = 0.8 且 C/S = 2, 3 的水泥水玻璃浆液的 GRR 值能够达到 70%以上;当 v 继续增大至 0.6 m/s 时,各配比浆液的 GRR 值降至 35%以下,最低仅为 5%左右。

随着动水流速 v 增大,浆液留存率 GRR 迅速减小,其主要原因是水泥水玻璃浆液黏度变化具有明显的时变特性^[20],在富水环境下浆液低黏度期较长,受到动水冲刷作用时,浆液注入后来不及形成凝胶体便被冲刷、稀释,造成浆液留存率在高流速条件下会非常低,难以起到堵水加固的效果。

(2) W/C 的影响

不同动水流速条件下,W/C 对浆液抗分散性质影响曲线如图 3 所示,可以看出,随着浆液 W/C 的增大(即浆液越稀),浆液留存率呈减小趋势,W/C 较小的浓浆液抗分散性质相对较好。

出现上述现象的原因是:浆液 W/C 越大,水泥水化产物总量将相应减少,与水玻璃反应生成水化硅酸钙凝胶的总量也将减少,浆液凝胶过程减缓,在水下需要经历更长的低黏度期,这一阶段更容易被水冲刷;此外,由于 W/C 较大时浆液中自由水含量相对较多,降低了离子浓度,也相应降低了水泥水玻璃浆液化学反应速度。在动水条件下进行注浆时,浆液 W/C 越大,其抗分散性质越差,不利于形成有效凝胶体。因此,在保证浆液可泵性的前提下,需要考虑使用 W/C 较低、抗分散性质好的浆液配比方案。

(3) C/S 的影响

对 C/S = 1, 2 和 3 的水泥水玻璃浆液抗分散性质试验数据进行统计、分析,如表 3 所示。

由表 3 可知,在水玻璃添加量较大,即 C/S = 1 时,浆液留存率均比较低,这是由于水泥水化生成的 Ca²⁺含量是一定的,因此过多的水玻璃对凝胶过

表 1 改性聚氨酯浆液性能参数^[19]
Table 1 Parameters of modified polyurethane grout^[19]

项目	外观	黏度((23±2))/ (MPa · s)	密度((23±2))/ (kg · m ⁻³)	使用配比 (体积比)	反应终止时 间((23±2))/s	10 s 内黏度 增加情况	发泡特性	单轴抗压 强度/MPa	与干混凝 土面黏结 强度/MPa	与湿混凝 土面黏结 强度/MPa
A 组分	淡黄色或无色 透明液体	100 ~ 200	1 030±10	1 : 1	15 ~ 40	可从 100 MPa · s 增加 至 5 000 MPa · s	遇水有一定 发泡	> 50	> 4.0	> 1.0
B 组分	深褐色液体	100 ~ 200	1 240±10							

表 2 水泥水玻璃浆抗分散性质试验结果

Table 2 Results of anti-washout property test on grout of cement-sodium silicate

试验序号	$v/(m \cdot s^{-1})$	W/C	C/S	GRR/%
1	0.2	0.8	1	86.2
2	0.2	0.8	2	94.1
3	0.2	0.8	3	97.9
4	0.2	1.0	1	67.3
5	0.2	1.0	2	78.9
6	0.2	1.0	3	96.0
7	0.2	1.2	1	33.2
8	0.2	1.2	2	86.2
9	0.2	1.2	3	94.4
10	0.4	0.8	1	32.2
11	0.4	0.8	2	70.2
12	0.4	0.8	3	73.0
13	0.4	1.0	1	18.6
14	0.4	1.0	2	45.2
15	0.4	1.0	3	40.2
16	0.4	1.2	1	5.4
17	0.4	1.2	2	47.8
18	0.4	1.2	3	26.5
19	0.6	0.8	1	12.4
20	0.6	0.8	2	32.5
21	0.6	0.8	3	21.6
22	0.6	1.0	1	4.7
23	0.6	1.0	2	15.4
24	0.6	1.0	3	15.1
25	0.6	1.2	1	4.9
26	0.6	1.2	2	9.3
27	0.6	1.2	3	10.2

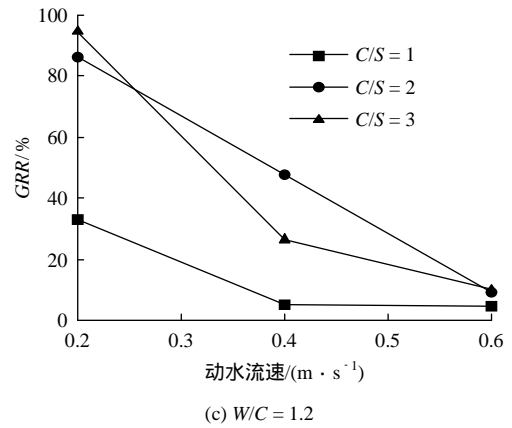
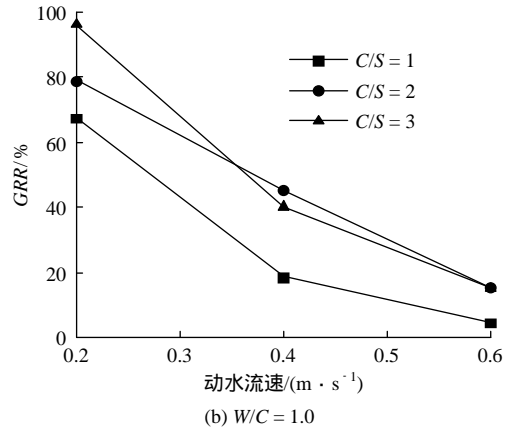
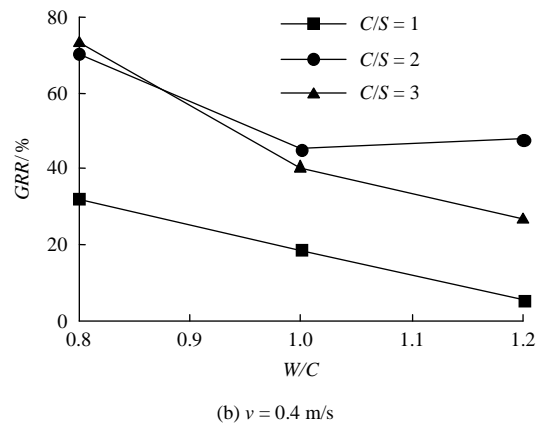
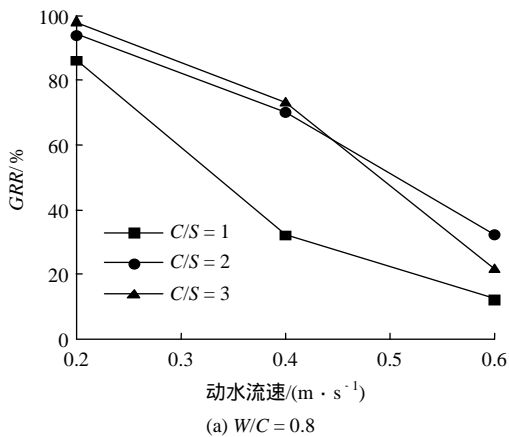
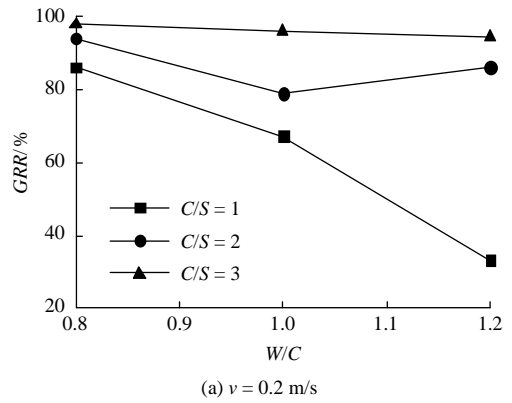


图 2 动水流速对浆液留存率影响试验曲线

Fig.2 Experimental curves of GRR under different water flow velocities



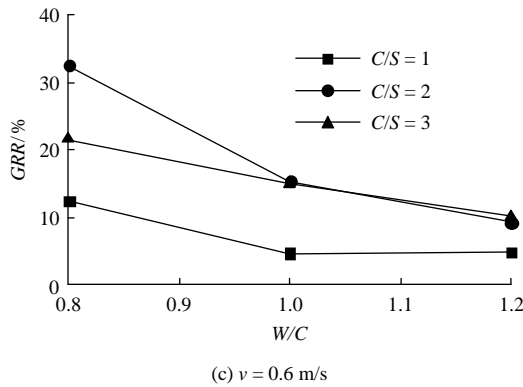


图3 水灰比 W/C 对浆液留存率 GRR 影响曲线

Fig.3 Experimental curves of GRR under different ratios of water to cement

表3 不同 C/S 条件下浆液 GRR 值统计表

Table 3 Statistical results of GRR under different C/S values

C/S	GRR/%			
	最大值	最小值	平均值	标准差
1	86.2	4.7	29.4	29.3
2	94.1	9.3	53.3	30.8
3	97.9	10.2	52.8	37.2

程并无益处，反而可能会使体系稀释而导致凝胶过程减缓^[21]，使得浆液黏度增长缓慢，在动水作用下容易被稀释、冲蚀。随着 C/S 增大，混合浆液中的水泥浆比例增大，水泥水化生成的 Ca²⁺含量相应增加，并迅速与水玻璃溶液中的硅酸根结合，生成水化硅酸钙凝胶，并交联形成连续的空间网状结构^[22]，使浆液较快达到凝胶状态，增强浆液抗分散特性。

值得注意的是，浆液 W/C 越小，所需添加的水玻璃较少便可达到较好的抗分散效果，而 W/C 较大的浆液，需要在水玻璃添加比例适宜时才能使得抗分散性能最优。

3.2 浆液抗分散性质影响因素多元回归分析

为了定量评价水灰比 W/C、水泥浆与水玻璃体积比 C/S 及动水流速 v 等因素对水泥水玻璃浆液抗分散性质的影响规律，首先按照如下方法对 W/C，C/S 和 v 进行数据标准化处理^[23]：

$$y_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (1)$$

其中，

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中：y_i 为标准化处理后的数据值，x_i 为初始数据值， \bar{x} 为样本平均值，s 为样本标准差，n 为样本数量。

采用多元回归分析方法，得到浆液留存率 GRR 与标准化处理之后的各影响因素之间的关系式为

$$GRR = 45.64 - 9.35[W/C] + 9.71[C/S] - 28.11[v] \quad (3)$$

式中：[W/C]，[C/S]，[v] 分别为标准化处理之后的水灰比、水泥浆与水玻璃体积比以及动水流速。多元回归分析的复相关系数 r² = 0.874。

由式(3)可知：浆液留存率与动水流速 v，W/C 均呈负相关关系，而与 C/S 呈正相关关系；并且动水流速对浆液留存率影响作用最大，v 越大，浆液留存率越小；C/S 次之，对于不同 W/C 的水泥浆液，存在适合的 C/S 使得浆液留存率最大，浆液抗分散性质最好；W/C 影响权重较小，W/C 越大，浆液留存率越小。

3.3 改性聚氨酯浆液抗分散性质试验结果分析

根据工程中采用的配比方案，试验中改性聚氨酯浆液 A，B 组分体积比固定为 1 : 1，不同流速条件下改性聚氨酯浆液抗分散性质试验结果见表 4。

表4 改性聚氨酯浆液抗水分散试验结果

Table 4 Results of anti-washout property test on modified polyurethane grout

序号	v/(m · s ⁻¹)	A, B 组分体积比	GRR/%
1	0.2	1	99.6
2	0.4	1	98.0
3	0.6	1	90.7

试验表明：在动水条件下，改性聚氨酯浆液依然具有较高的浆液留存率，当动水流速达到 0.6 m/s 时，改性聚氨酯浆液 GRR 值仍然可以达到 90% 以上。改性聚氨酯浆液的浆液留存率明显高于水泥水玻璃浆液，且在高流速条件下，改性聚氨酯浆液具有更为优异的抗分散性质。

3.4 动水条件下浆液凝胶性能分析

图 4 为水泥水玻璃浆液在不同动水流速条件下的凝胶沉积形态。

由于动水的冲刷作用，浆液被稀释、冲蚀，凝胶体沉积范围较大，靠近进水口的位置被冲蚀严重，且随着动水流速的增大，浆液被冲蚀更加剧烈，动水水槽内浆液被完全冲蚀的范围逐渐增大。对动水水槽内的凝胶体进行观察发现，浆液凝胶体结构较为致密，但凝胶体与动水水槽黏结效果不够牢固，抵抗较大流速动水冲刷的能力有限。

采用游标卡尺对不同位置处的浆液凝胶体沉积厚度进行测量，得到沿水流方向凝胶厚度分布，如图 5 所示。

可以看出，凝胶体厚度呈现先增大后减小的规律，浆液注入位置 20 cm 处，逆水流方向(0 ~ 20 cm

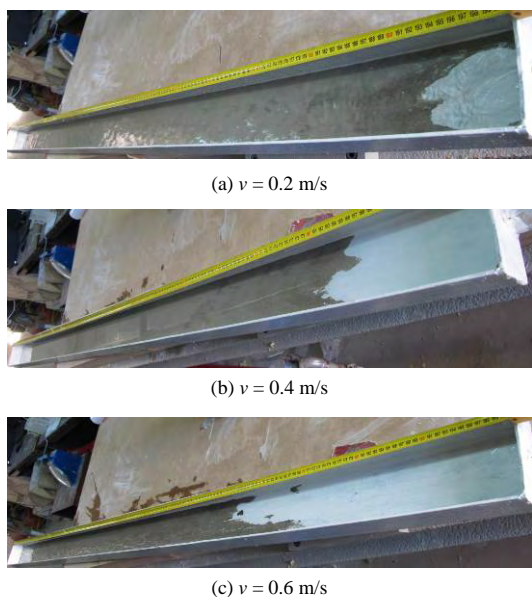


图 4 水泥水玻璃浆液凝胶沉积形态

Fig.4 Morphology of the grout of cement-sodium silicate in the water flow channel

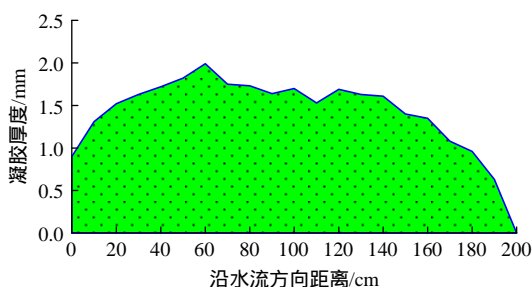


图 5 水泥水玻璃浆液沿水流方向凝胶厚度分布(v = 0.2 m/s)
Fig.5 Thickness distribution of the grout of cement-sodium silicate in the direction of water flow(v = 0.2 m/s)

范围)浆液厚度较小,表明浆液受到较为严重的动水冲刷作用。在顺水流方向浆液凝胶分布范围较大,整体厚度较小,动水水流使得浆液凝胶被冲刷、稀释而大量流失。

图 6 为改性聚氨酯浆液在不同动水流速下的凝胶沉积形态。由于聚氨酯浆液在动水条件下仍能够较快凝胶,生成具有较大黏度和黏结力的凝胶体,能够较好地抵抗动水冲刷作用,因此凝胶体沉积范围较为集中,主要分布在水槽靠进水端。随着水流速度的增大,浆液凝胶沉积范围也相应增大,当动水流速增大至 0.6 m/s 时,被水流冲刷携带的浆液在水槽出水口处聚集并形成凝胶。

对改性聚氨酯浆液凝胶取样观察发现,凝胶体与动水水槽黏结牢固。通过对不同位置处浆液凝胶体沉积厚度测量,绘制了动水流速为 0.2 m/s 条件下改性聚氨酯浆液凝胶体厚度沿水流方向的分布,如图 7 所示。

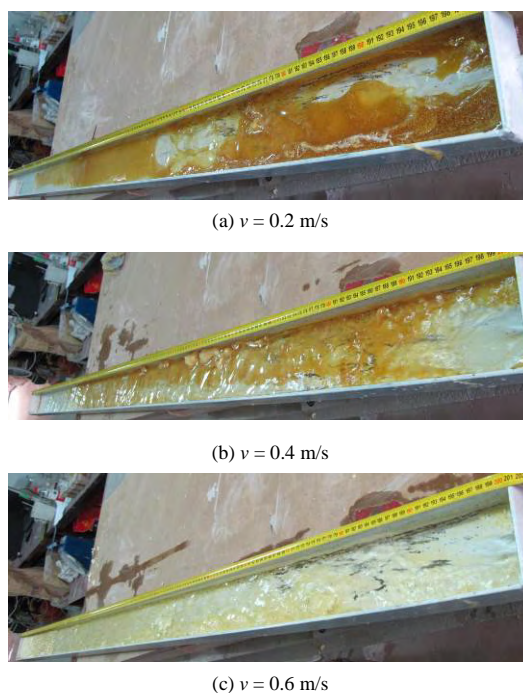


图 6 改性聚氨酯浆液凝胶沉积形态

Fig.6 Morphology of modified polyurethane grout in the water flow channel

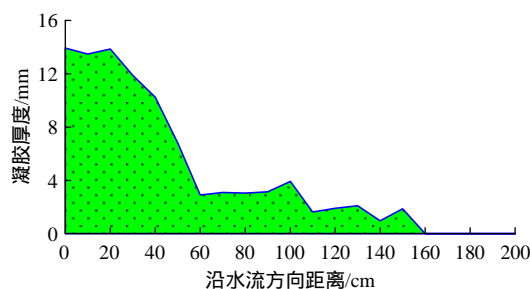


图 7 改性聚氨酯浆液沿水流方向凝胶厚度分布(v = 0.2 m/s)
Fig.7 Thickness distribution of modified polyurethane grout gel in the direction of water flow(v = 0.2 m/s)

可以看出,改性聚氨酯浆液沿水流方向凝胶体沉积厚度逐渐减小,对比分析可知,改性聚氨酯浆液凝胶体厚度明显大于水泥水玻璃浆液凝胶,且凝胶体分布更为集中,主要分布在动水水槽进水口附近,表明改性聚氨酯浆液在动水作用下仍然具有较好的抗分散性质与凝胶性能。

4 速凝浆液适用性分析

在突水灾害治理过程中,由于动水条件下不同浆液的抗分散性质和凝胶性能等存在差异,且经济环保性能也有所不同,因此需要综合考虑浆液的技术经济指标对浆液适用性。

根据本文试验结果,提出突水治理时浆液材料

的选择原则：在地下水流速较小($v < 0.4$ m/s)时，通过调整水泥水玻璃浆液的 W/C 和 C/S 来达到较高的浆液留存率，能够满足注浆堵水加固的要求，实现较好的注浆效果；在高流速($v > 0.4$ m/s)条件下，水泥水玻璃浆液留存率显著降低，通过调整 W/C 和 C/S 无法满足堵水加固的要求，而改性聚氨酯浆液在较高流速条件下仍然具有良好的抗分散性能，凝胶体强度高且具有较强的黏结效果，适用于在较高流速条件下进行突水通道的封堵。

同时，注浆材料的选择还应该与科学、合理的注浆工艺相结合。一般而言，对于隧道或地下工程中的集中突涌水灾害，可以采用分层次、多手段相结合的治理措施。如首先采用粗骨料封堵集中突水点，然后使用抗分散性质与凝胶性能较好的化学浆液进行渗流通道的快速封堵，待渗流速度减小后，采用水泥水玻璃浆液进行充填封堵，形成“粗骨料封堵集中突涌水点+化学浆液快速封堵渗流通道+水泥基浆液充填”的综合治理措施，以达到科学有效、经济环保的堵水加固效果。

5 结 论

为了科学评价注浆浆液的抗分散性质与凝胶性能，设计了动水流速可调的速凝浆液抗分散性质试验装置，能够模拟浆液在未凝胶之前即受到动水冲刷的关键过程，并定义浆液留存率(GRR)指标对浆液抗分散性质进行了定量评价，通过系统开展水泥水玻璃浆液与改性聚氨酯浆液的抗分散性质试验，得到以下主要结论：

(1) 水泥水玻璃浆液的抗分散性质与水灰比 W/C 、水泥浆与水玻璃体积比 C/S 及动水流速 v 等密切相关。在 $v < 0.4$ m/s 时，通过调整 W/C ， C/S 可以使浆液留存率 GRR 达到 70% 以上；在 $v > 0.4$ m/s 时， GRR 值迅速降低，改变浆液配比也不能保证浆液的凝胶沉积效果。

(2) 采用多元回归分析方法定量分析了 W/C ， C/S 以及动水流速 v 对于水泥水玻璃浆液动水抗分散性质的影响规律。其中动水流速影响最大， v 越大， GRR 越低； W/C 越小(即浆液越稠)，浆液留存率越高；而 C/S 越小(即水玻璃添加量越多)反而会使浆液稀释而导致凝胶体强度下降。

(3) 改性聚氨酯浆液在动水流速条件下浆液留存率高，且凝胶体与壁面黏结牢固，较水泥水玻璃浆液具有更好的抗分散性质和凝胶性能，特别是在

高流速条件下其优越性更为明显。

(4) 根据不同速凝浆液抗分散性质和凝胶性能试验结果，提出突水治理时浆液材料的选择原则：当 $v < 0.4$ m/s 时，可以采用水泥水玻璃浆液，当 $v > 0.4$ m/s 时，需采用抗分散性质与凝胶性能较好的化学浆液，并需配合采用分层次、多手段相结合的治理措施，如“粗骨料封堵集中突涌水点+化学浆液快速封堵渗流通道+水泥基浆液充填”的综合治理措施。

参考文献(References)：

- [1] 黄雄军. 岩溶隧道突水突泥影响因素及对策[J]. 铁道工程学报, 2013, (1): 45-48.(HUANG Xiongjun. Influence factors of water bursting and mud bursting of karst tunnels and its countermeasures[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, (1): 45-48.(in Chinese))
- [2] 王秀英, 谭忠盛, 王梦恕, 等. 宜万铁路岩溶隧道防排水原则及技术研究[J]. 中国工程科学, 2010, 12(8): 107-112.(WANG Xiuying, TAN Zhongsheng, WANG Mengshu, et al. Study on the waterproof and drainage principle and technology for karst tunnels on Yichang—Wanzhou railway[J]. Engineering Sciences, 2010, 12(8): 107-112.(in Chinese))
- [3] 王媛, 陆宇光, 倪小东, 等. 深埋隧洞开挖过程中突水与突泥的机理研究[J]. 水利学报, 2011, 42(5): 595-601.(WANG Yuan, LU Yuguang, NI Xiaodong, et al. Study on mechanism of water burst and mud burst in deep tunnel excavation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(5): 595-601.(in Chinese))
- [4] 张民庆, 黄鸿健, 张生学, 等. 宜万铁路马鹿箐隧道 1·21 突水突泥抢险治理技术[J]. 铁道工程学报, 2008, (11): 49-56.(ZHANG Minqing, HUANG Hongjian, ZHANG Shengxue, et al. Treatment technology for water and mud bursting on 1·21 in Maluqing tunnel of Yichang—Wanzhou railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008, (11): 49-56.(in Chinese))
- [5] 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): 1 728-1 734.(LIU Zhaowei, ZHANG Dingli, ZHANG Minqing. Grouting technique for high-pressure and water-rich area in Maoba syncline at Yuanliangshan tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1 728-1 734.(in Chinese))
- [6] 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): 2 377-2 396.(LI Shucai, ZHANG Xiao, ZHANG Qingsong, 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): 2 377-

- 2 396.(in Chinese))
- [7] 王 乾, 曲立清, 郭洪雨, 等. 青岛胶州湾海底隧道围岩注浆加固技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 790–802.(WANG Qian, QU Liqing, GUO Hongyu, et al. Grouting reinforcement technique of Qingdao Jiaozhou Bay subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 790–802.(in Chinese))
- [8] 李治国, 孙振川, 王小军, 等. 厦门翔安海底服务隧道 F1 风化槽注浆堵水技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 2): 3 841–3 848.(LI Zhiguo, SUN Zhenchuan, WANG Xiaojun, et al. Grouting technology for water blockage of weathered slot F1 in Xiamen Xiang'an subsea service tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.2): 3 841–3 848.(in Chinese))
- [9] 任克昌. 在动水中化学浆液的流动规律和灌浆方法[J]. 水利水电技术, 1982, (7): 57–61.(REN Kechang. Diffusing and grouting method of chemical grout under flow water[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1982, (7): 57–61.(in Chinese))
- [10] 湛铠瑜, 隋旺华, 高 岳. 单一裂隙动水注浆扩散模型[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1 659–1 663.(ZHAN Kaiyu, SUI Wanghua, GAO Yue. A model for grouting into single fracture with flowing water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1 659–1 663.(in Chinese))
- [11] 湛铠瑜, 隋旺华, 王文学. 裂隙动水注浆渗流压力与注浆堵水效果的相关分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2 650–2 655.(ZHAN Kaiyu, SUI Wanghua, WANG Wenxue. Correlation analysis of seepage pressure and water plugging effect during grouting into a fracture with flowing water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2 650–2 655.(in Chinese))
- [12] 张 霄. 地下工程动水注浆过程中浆液扩散与封堵机理研究及应用[博士学位论文][D]. 济南: 山东大学, 2011.(ZHANG Xiao. Study on mechanism of slurry diffusion and sealing at the Process of underground engineering moving water grouting and its application[Ph. D. Thesis][D]. Jinan: Shandong University, 2011.(in Chinese))
- [13] 李利平, 李术才, 崔金声. 岩溶突水治理浆材的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3 642–3 648.(LI Liping, LI Shucai, CUI Jinsheng. Experimental research on chemical grout for treating water inrush in rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3 642–3 648.(in Chinese))
- [14] 李利平, 李术才, 张庆松, 等. 一种新型高分子注浆材料的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增 1): 3 150–3 156.(LI Liping, LI Shucai, ZHANG Qingsong, et al. Experimental study of a new polymer grouting material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Supp.1): 3 150–3 156.(in Chinese))
- [15] KHAYAT K H, YAHIA A. Simple field tests to characterize fluidity and washout resistance of structural cement grout[J]. Cement Concrete Aggregates, 1998, 20(1): 145–156.
- [16] KHAYAT K H, YAHIA A. Effect of welan gum-high-range water reducer combinations on rheology of cement grout[J]. ACI Materials Journal, 1997, 94(5): 365–372.
- [17] 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): 1 454–1 459.(LIU Rentai, LI Shucai, ZHANG Qingsong, 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): 1 454–1 459.(in Chinese))
- [18] 刘人太. 水泥基速凝浆液地下工程动水注浆扩散封堵机理及应用研究[博士学位论文][D]. 济南: 山东大学, 2012.(LIU Rentai. Study on diffusion and plugging mechanism of quick setting cement based slurry in underground dynamic water grouting and its application [Ph. D. Thesis][D]. Jinan: Shandong University, 2012.(in Chinese))
- [19] 吴怀国. 改性聚氨酯化学灌浆材料在煤矿等复杂地质灾害处理中的应用技术[J]. 新型建筑材料, 2008, (11): 67–70.(WU Huaiguo. Application technique of modified polyurethane chemical grouting material in complicated geologic hazard treatment of coal mine etc.[J]. New Building Materials, 2008, (11): 67–70.(in Chinese))
- [20] 李术才, 韩伟伟, 张庆松, 等. 地下工程动水注浆速凝浆液粘度时变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 1–7.(LI Shucai, HAN Weiwei, ZHANG Qingsong, et al. Research on time-dependent behavior of viscosity of fast curing grouts in underground construction grouting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(1): 1–7.(in Chinese))
- [21] 王红喜. 高性能水玻璃悬浊型双液灌浆材料研究与应用[博士学位论文][D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.(WANG Hongxi. Research on high performance sodium-silicate suspension two-shot grouting materials and its application[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.(in Chinese))
- [22] 袁润章. 胶凝材料学[M]. 2 版. 武汉: 武汉理工大学出版社, 1996: 94–97.(YUAN Runzhang. Cementitious material science[M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 1996: 94–97.(in Chinese))
- [23] 何少华, 文竹青. 试验设计与数据处理[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002: 182–192.(HE Shaohua, WEN Zhuqing. Experimental design and data processing[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2002: 182–192.(in Chinese))