

文章编号: 1007-2993(2025)01-0139-11

# 考虑黏度时变性的粉砂土地层高压旋喷材料研究

董道卫<sup>1</sup> 王德才<sup>1</sup> 宋力强<sup>2</sup> 史长远<sup>3</sup> 李建伟<sup>1</sup> 董政<sup>1</sup> 孙明美<sup>1</sup> 姚凯<sup>3</sup>

(1. 济南城市建设集团有限公司, 山东济南 250014; 2. 济南黄河路桥建设集团有限公司, 山东济南 250002;

3. 山东大学 齐鲁交通学院, 山东济南 250100)

**【摘要】** 高压旋喷技术在水利工程、基础工程、地下工程、深基坑工程中应用广泛。然而在粉砂土地层条件下, 由于土颗粒的黏聚力差, 采用常规水泥基固化剂进行施工时, 浆液在高喷浆压力下难以聚集、极易流失, 导致旋喷桩施工质量差。针对上述问题研发高效的速凝材料, 使得浆液快速凝结固化, 解决粉砂土地层中浆液难以聚集的问题。研究基于高压旋喷侵蚀理论模型, 提出考虑黏度时变性的浆液扩散距离计算方法, 并对不同配比下的水泥-水玻璃浆液开展黏度试验, 研究了各组别黏度随时间变化规律, 在考虑凝胶时间、材料强度及浆液扩散距离的前提下, 综合优化了粉砂土地层下水泥-水玻璃速凝材料配比, 最终给出粉砂土地层水泥-水玻璃浆液推荐配比为石灰质量比 1.0~1.2、水泥与水玻璃体积比为 1:0.1。本研究对于速凝浆液在高压旋喷法中的理论分析及工程配比优化具有参考意义。

**【关键词】** 速凝材料; 水玻璃; 黏度时变性; 浆液扩散距离

**【中图分类号】** TV543+1

**【文献标识码】** A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2024-0007

## Jet grouting materials in sandy silt soil layer considering the time-dependent behavior of viscosity

Dong Daowei<sup>1</sup> Wang Decai<sup>1</sup> Song Liqiang<sup>2</sup> Shi Changyuan<sup>3</sup> Li Jianwei<sup>1</sup> Dong Zheng<sup>1</sup>  
Sun Mingmei<sup>1</sup> Yao Kai<sup>3</sup>

(1. Jinan City Construction Group, Jinan 250014, Shandong, China; 2. Jinan Huanghe Road and Bridge Construction Group, Jinan 250002, Shandong, China; 3. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250100, Shandong, China)

**【Abstract】** Jet grouting technology is widely used in hydraulic engineering, foundation engineering, underground engineering, and deep excavation engineering. However, in fine sandy silt soil strata, conventional cement-based solidifiers result in poor construction quality due to the slurry's tendency to disperse under high pressure. To address this, an efficient rapid-setting material was developed, enabling faster slurry solidification and improved performance in fine sand soils. Based on a theoretical model of jet grouting erosion, a method for calculating slurry diffusion distance that considers viscosity changes over time was proposed. Viscosity tests were conducted on cement-water glass slurries at various ratios, analyzing how viscosity evolved with time. Considering gelation time, material strength, and slurry diffusion distance, the study optimized the mix ratio of cement-water glass rapid-setting materials for fine sand soil layers. The recommended mix ratio was determined to be a water-cement ratio of 1.0 to 1.2 and a volume ratio of 1:0.1. This research provides references for optimizing rapid-setting slurries for jet grouting applications, offering practical guidance for enhancing construction practices in challenging soil conditions.

**【Key words】** rapid-setting material; sodium silicate; time-dependent behavior of viscosity; diffusion distance of slurry

### 0 引言

高压旋喷法是常用的土体加固施工技术<sup>[1-3]</sup>。它利用高压喷射的水泥浆的冲击作用来破坏原位土, 通过喷射杆的旋转和提升, 将加固材料与土颗粒搅拌混合, 通过水泥浆的水化作用, 形成具有一定强

度及抗渗能力的水泥土加固桩<sup>[4-7]</sup>。与其他方法相比, 高压旋喷作业场地要求小, 设备灵活, 便于移动<sup>[8-9]</sup>。然而在粉砂土地层条件下, 由于土颗粒的黏聚力差, 在采用常规水泥基固化剂进行施工时, 浆液在高喷浆压力下极易流失, 浆液较难聚集, 导致旋喷桩施工质

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2021QE254); 山东省优秀青年科学基金项目(海外)(2022HWYQ-016)

作者简介: 董道卫, 男, 1979 年生, 大学本科, 高级工程师。研究方向: 建设工程施工技术。E-mail: 1150966460@qq.com

通信作者: 姚凯, 男, 1988 年生, 博士(后), 教授。研究方向: 地基加固处理。E-mail: yaokai@sdu.edu.cn

量差。如果使用速凝材料进行施工,使得浆液在喷射入土体后迅速凝固固化,就能增强浆液聚集效果,有效提升桩体水泥掺量。

水泥-水玻璃浆液由于材料易得、速凝效果好、无毒环保,成为了高压旋喷速凝材料的良好选择<sup>[10]</sup>。目前速凝注浆材料的应用较多集中于动水注浆治理方面<sup>[11-13]</sup>,研究多聚焦于材料改性及注浆工艺方面。如陈 沅等<sup>[14]</sup>研究了钢渣掺量、单浆液水胶比、双浆液体积比对钢渣改性硅酸盐水泥-水玻璃双液注浆复合材料工作性能影响规律;宋雪飞<sup>[15]</sup>采用理论分析、实验室试验和现场观测的手段进行了双液体系中活性工业废渣粉煤灰部分替代水泥的试验,研究了掺入不同量的粉煤灰对浆液凝胶时间及结石体抗压强度的改性作用。工艺及装备方面,沈水龙等<sup>[16]</sup>针对水泥-水玻璃速凝材料在高压旋喷法中的应用,研发了相应的双射流系统,主要在工艺方面进行了改进。然而目前对于速凝材料相关的基础研究相对滞后,特别是针对高压旋喷法在黏度快速变化情况下的浆液扩散距离,其对应的计算分析方法及工程应用缺乏科学的指导。

由于速凝材料的黏度会在短时间内发生较大的变化,材料混合后的凝胶时间一般在几十秒至几分钟,因此在进行相应的扩散距离计算时应当考虑黏度时变性带来的影响。目前已有相当多的较为成熟的注浆理论,且其中不乏有一些涉及到了黏度量,但在理论公式中的考虑多为常量,并未考虑黏度时变性的影响,这与速凝材料的实际注浆过程差别较大,存在着相对的局限性,如隆巴迪等<sup>[17]</sup>建立的注浆理论以及 Shen 等<sup>[18]</sup>针对高压旋喷注浆距离建立的理论公式中,均未考虑黏度时变性对于浆液扩散距离的影响;李术才等<sup>[19-20]</sup>针对掺加水玻璃及高聚物改性材料的水泥基速凝材料的黏度时变性以及注浆特性进行了相关研究,并通过平板裂隙注浆模拟试验分析了定注浆流量条件下的 C-S 浆液扩散的压力场分布规律;运用数值计算方法,研究了定注浆速率条件下的浆液扩散形态及压力场时空变化规律。刘 强等<sup>[21]</sup>为研究不同土体中水泥-水玻璃浆液扩散规律,基于浆液劈裂土体形成的裂缝形状和宾汉流体在平板裂缝中的流变方程,推导出了不同土体中水泥-水玻璃浆液黏度、流量、注浆压力差、浆液扩散距离的计算公式。查丽娟等<sup>[22]</sup>基于双液浆的流变方程,推导得到了表征双液浆黏度增长时间与浆液扩散半径之间关系的表达式。然而目前鲜有考虑黏度时变性的高压旋喷法浆液扩散距离计算方法的报道,而该种计算方法对于水

泥-水玻璃材料工程性能分析及速凝材料注浆理论建立具有重要意义。

本文通过设置不同配比下的水泥-水玻璃材料,在评价分析了各组别速凝材料的凝胶时间及强度特性后,基于现有高压旋喷浆液扩散距离理论公式,在考虑黏度时变性的前提下对其进行了修正;同时开展黏度试验,分析了各组别浆液的黏度及温度变化规律;结合修正公式对各配比下水泥-水玻璃浆液的扩散距离进行了计算,并讨论了不同水灰质量比及体积比对于速凝材料扩散距离的影响,最终综合优化出适用于粉砂土地层的水泥-水玻璃速凝注浆材料的配比,对于速凝浆液在高压旋喷法中的理论分析及工程配比优化具有一定的参考意义。

## 1 试验方案及依据

### 1.1 试验材料

#### (1) 水泥

试验所用水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,其基本性能见表 1,化学成分见表 2。

表 1 水泥基本参数

检测项目	技术指标	检测结果
初凝时间/min	≥60	176
终凝时间/min	≤600	310
3 d 抗折强度/MPa	≥3.5	4.2
28 d 抗折强度/MPa	≥6.5	7.1
3 d 抗压强度/MPa	≥17	22.3
28 d 抗压强度/MPa	≥42.5	48.2

表 2 水泥化学成分

成分	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
含量/%	22	4.2	5.2	63	1.5	2.2

#### (2) 水玻璃

试验所用水玻璃模数  $M = 3.0$ , 水玻璃浓度  $Be' = 40$ , 密度为  $1.38 \text{ g/cm}^3$ 。

### 1.2 试验仪器

黏度试验仪器选用 GB-VTZ 振动式在线黏度计(见图 1),其主要适用于管路、开阔的罐体容器和封闭的罐体容器中的介质黏度检测。流体黏度直接由传感器插入介质中探头收到的振动频率计算转换,能适用于任何液体和量程。传感器内置温度传感器为其提供温度补偿。GB-VTZ 振动式在线黏度计测量原理为:物体在流体中做扭转振动时,由于受到黏性力矩作用,物体振幅会衰减,衰减的程度与物体所受

到的黏性力矩有对应关系,由外界来提供由于黏性阻尼所消耗的能量,使物体的运动状态维持在衰减前的状态,根据一定关系式就能计算出被测物体黏度值。



图1 GB-VTZ 振动式在线黏度计

### 1.3 试验组配比设置

对于水泥-水玻璃浆液的试验组配比设置,主要设置的变量为水灰质量比及水泥与水玻璃掺配体积比。根据高压旋喷法实际施工的常用水灰质量比,设置试验组水灰质量比为 0.6~1.2。对于体积比的设置主要参考动水注浆的水泥与水玻璃体积比设置<sup>[12]</sup>,试验组配比设置见表 3。

表 3 试验组配比设置

组别	水灰质量比	水泥:水玻璃(体积比)
1	0.6	1:0.1
2		1:0.3
3		1:0.6
4		1:1
5	0.8	1:0.1
6		1:0.3
7		1:0.6
8		1:1
9	1	1:0.1
10		1:0.3
11		1:0.6
12		1:1
13	1.2	1:0.1
14		1:0.3
15		1:0.6
16		1:1

## 2 试验及分析方法

### 2.1 凝胶时间及强度试验

水泥-水玻璃的凝胶时间主要是指自水泥浆液与水玻璃相互混合起,混合浆液不再具有流动性对应的时间。工程中常用的凝胶时间测定方法为倒杯法,其操作简单且实用性高,适用于多种注浆材料。在进行倒杯法测试前,根据表 3 所设置的各试验组水泥-

水玻璃配比制备不同水灰质量比的水泥浆。试验时量取不同体积比的水泥浆液和水玻璃并进行混合,直至浆液无法进一步流动,记录下对应的凝胶时间。

水泥-水玻璃强度主要采用按照设计水灰质量比及水泥与水玻璃体积比配制好浆液后,倒入 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 模具形成试块,静置 24 h 成型后脱模处理。而后将试块在标准养护箱内分别养护 3, 7, 14, 28 d 后测定试块抗压强度。

### 2.2 黏度时变性试验

主要采用 GB-VTZ 振动式在线黏度计对各配比水泥-水玻璃浆液黏度时变曲线进行测定。将水泥浆液和水玻璃溶液按照相应体积比称量后,在烧杯内混合,快速搅拌后将黏度计探头伸入混合液内,探头通过显示器与计算机直接连接,通过探头振动实时监控黏度,并将数据通过转接口实时传输至计算机内,测量时间间隔设置为 1 s。绘制黏度-时间曲线并进行拟合,得到相应的黏度-时间关系式<sup>[23]</sup>:

$$\mu = at^b \quad (1)$$

式中: $\mu$  为浆液黏度; $t$  为时间; $a, b$  为拟合参数。

### 2.3 考虑黏度时变性的浆液扩散距离计算

对于高压旋喷浆液扩散距离计算,主要参考了 Shen 等<sup>[18]</sup>的侵蚀模型公式。该公式中涉及到了黏度相关参量,可进行考虑黏度时变性的修正。公式基于侵蚀模型进行表述,总表达式如下:

$$D_0 = 2\eta x_L + D_r \quad (2)$$

式中: $D_r$  为钻杆直径; $\eta$  为喷射时间折减系数,主要与喷嘴移动速度  $v_m$ 、回归参数  $a_0, a_1, a_2, v_{m0}$  及重复喷射次数  $N$  有关:

$$\eta = a_0 \left( \frac{v_{m0}}{v_m} \right)^{a_1} N^{a_2} \quad (3)$$

在浆液喷射过程中,当速度衰减为一定值时,土体不再被侵蚀,侵蚀距离达到最大值  $x_L$ 。此时对应的速度为临界侵蚀速度  $v_L$ ,最大侵蚀距离为:

$$x_L = \frac{\alpha d_0 v_0}{v_L} \quad (4)$$

式中: $d_0, v_0$  为喷口直径与浆液出口速度;临界侵蚀速度  $v_L$  主要通过土体抵抗力  $q_u$ , 大气压  $p_{atm}$ , 特征速度  $\beta$  以及回归参数  $k$  进行计算:

$$v_L = \beta \left( \frac{q_u}{p_{atm}} \right)^k \quad (5)$$

式中: $\alpha$  为浆液衰减系数,主要与喷射浆液的性质相关,它是水的衰减系数  $\alpha_w$  为基准,通过转换系数  $B$

求得浆液得转换系数:

$$\alpha_g = \frac{\alpha_w}{B} \quad (6)$$

转换系数  $B$  主要通过水和浆液的黏度  $\mu_w, \mu_g$  和密度  $\rho_w, \rho_g$  求出:

$$B = \sqrt{\frac{\mu_g/\rho_g}{\mu_w/\rho_w}} \quad (7)$$

这里将浆液的黏度  $\mu_g$  作为常量代入计算, 对于水泥-水玻璃体系在考虑黏度时变性的前提下, 结合黏度试验所得到的黏度-时间关系式, 转换系数求解公式中的黏度, 即等于瞬时黏度关于时间  $t$  的积分比上达到最大侵蚀距离的时间:

$$\mu_d = \frac{\int \mu dt}{t} = \frac{\int at^b dt}{t} \quad (8)$$

对于积分时间  $t$ , 主要参考 G. Modoni 等<sup>[24]</sup> 侵蚀模型的侵蚀时间计算公式:

$$t = \frac{m\Delta s}{v_s} \frac{2(r_{eq}/x)}{2\pi} \quad (9)$$

式中:  $M$  为喷嘴数量;  $v_s$  为钻杆平均提速;  $\Delta S_t$  为旋喷施工时的提升间隔(一般取 5 cm);  $r_{eq}$  及  $x$  分别为侵蚀模型圆锥形射流区的轴线长度及圆截面半径, 其表达式如式(10)所示:

$$r_{eq}/x = \sqrt{\frac{R}{1.33\alpha_w^2} \left( \sqrt{\frac{1}{\xi}} - 1 \right)} \quad (10)$$

式中:  $\alpha_w$  为水射流衰减系数;  $\xi$  为射流平均速度与轴线平均速度之比, 一般取 0.5;  $R$  为浆液与水的黏度比。则当喷射浆液为速凝材料时,  $R$  对应的浆液黏度即为黏度计算参考值  $\mu_d$ , 将式(10)代入式(9), 并与式(8)联立, 即可得出黏度计算参考值  $\mu_d$  表达式, 如式(11)所示:

$$\mu_d = \sqrt[2-b]{\frac{0.76a^2}{(b+1)^2} \cdot \left( \frac{M\Delta S_t}{v_s \pi \alpha_w \sqrt{\mu_w}} \right)} \quad (11)$$

至此便可得出黏度计算参考值  $\mu_d$ , 将其代入式(7)进行转换系数  $B$  的计算, 即可在考虑黏度时变性的前提下计算速凝材料浆液在粉砂土地层条件下的理论成桩半径。

### 3 结果分析

#### 3.1 凝胶时间及强度分析

根据倒杯法测定结果, 各水灰质量比及水泥与水玻璃体积比下水泥-水玻璃浆液凝胶时间如图 2

所示。可以看出, 整体凝胶时间随着水玻璃掺量增加先减小后增大, 这主要是由于水玻璃是以溶液形式掺入浆液体系中, 当水玻璃掺量增加, 水泥浆液与水玻璃的体积比超过 1 : 0.3 时, 继续增加水玻璃的掺量, 会使得整体的反应体系被稀释, 反应物浓度降低, 对应的凝胶时间变长, 而当水玻璃掺入量过低, 水泥浆液与水玻璃体积比不足 1 : 0.3 时, 对应的反应体系中水玻璃作为催化剂的量不足, 也使得反应较慢, 在体积比 1 : 0.3 时体系反应速度最快, 其在水灰质量比为 0.6 时对应的凝胶时间最短, 仅为约 23 s。同时凝胶时间随水灰质量比的增大而增大, 这是由于浆液水灰质量比直接决定了反应体系中水泥的浓度, 水灰质量比越大, 体系中水泥的浓度就越低, 反应速度越慢, 因此对应的凝胶时间就越长。

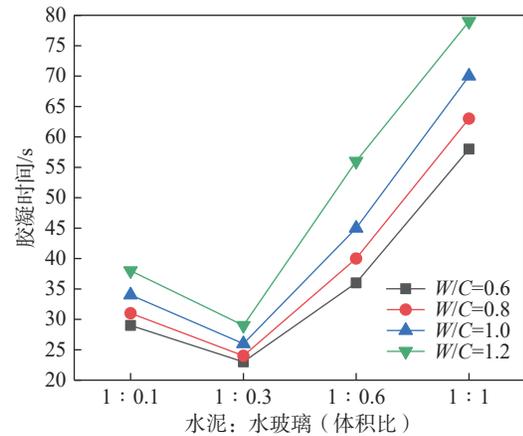


图 2 各水灰质量比及体积比水泥-水玻璃浆液凝胶时间

根据强度试验, 各组别水泥-水玻璃浆液不同龄期的试件强度如图 3 所示。可以看出, 与常规水泥净浆试件相同, 水泥-水玻璃浆液各龄期试件抗压强度随着水灰质量比的增大而减小, 这是因为水灰质量比的增大降低了浆液体系中水泥的浓度, 使得水化反应后生成的结石体更少, 整体的试件强度随之降低。关于水泥浆液与水玻璃体积比对试件强度的影响, 可以看出对于 3 d 及 7 d 的早期强度随体积比的变化趋势与凝胶时间测试结果相对应, 随着水玻璃掺量的增加, 试件早期强度先增大后减小, 水泥-水玻璃材料在体积比为 1 : 0.3 时的早期强度最高, 结合对于凝胶时间的测试结果的分析, 这主要是由于此体积比下体系反应物浓度最高, 反应速度快, 使得该体积比下反应体系中早期迅速生产较多的结石体, 使得试件整体呈现出了较大的强度。随着龄期的增加, 在 14 d 及 28 d 龄期时, 体积比 1 : 0.1 试验组试件强度出现了较大增幅, 并在 28 d 龄期时超过了 1 : 0.3 组。这

是由于随着龄期的增加, 该组在水化反应不断完善, 由于其加入的水玻璃的量最少, 体系水泥的浓度最高, 尽管在前期反应较慢, 没有迅速生成较多的结石体,

早期强度表现一般, 但由于整体水泥含量高, 最终生成的结石体含量最高, 使得其后期的强度在各组别中最高。

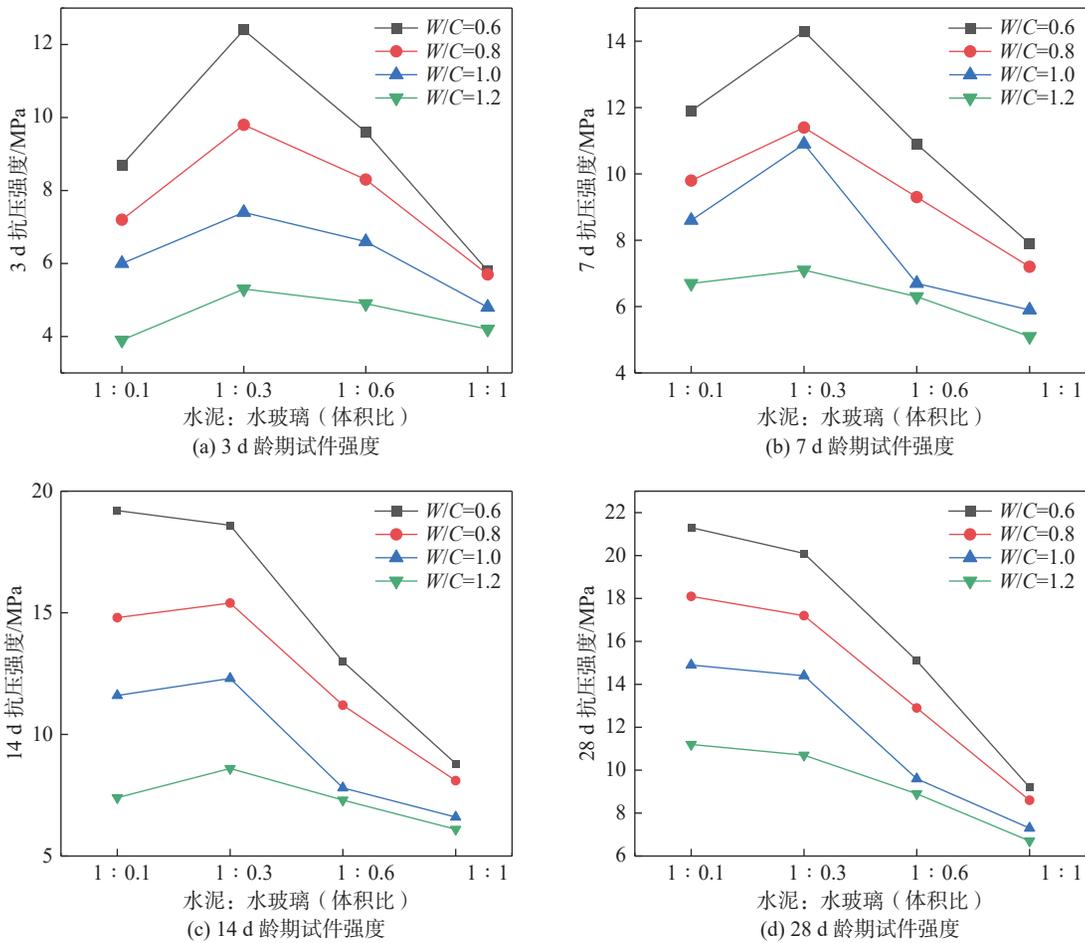


图3 各水灰质量比及体积比水泥-水玻璃试件不同龄期强度

### 3.2 黏度时变性曲线分析

通过黏度试验, 测得了各组别不同水灰质量比、水泥-水玻璃体积比混合后材料的黏度和温度随时间变化的数据曲线(见图4—图7), 其中黑色曲线代表黏度-时间变化曲线, 红色曲线代表温度-时间变化曲线。

在水泥水玻璃掺配混合后, 黏度随时间呈现出规律的上升, 其变化可大致分为3个阶段, 即低黏期、上升期和固化期, 在按照体积比进行混合后, 黏度在前期增长速度较慢, 且黏度值较低, 一段时间后开始迅速上升, 此时浆液开始由原有的纯液态开始转变成固液混合态, 将呈现出黏稠的糊状, 此时浆液仍然具有流动扩散性, 一段时间后浆液彻底丧失流动性, 此时对应的黏度计数值迅速上升并达到设定的最大量程, 黏度值已经无实际意义。

从黏度曲线也可以看出, 对于浆液的低黏期而

言, 水灰质量比越大, 低黏期越长, 随着水泥与水玻璃体积比的增加, 低黏期先减小后增大, 体积比为1:0.3时对应的低黏期最短; 在上升期黏度变化速率方面, 混合浆液的黏度变化速率随着水灰质量比的升高而降低, 即水灰质量比越大浆液黏度变化越缓慢, 水泥与水玻璃体积比从1:0.1开始, 随着体积比的增加, 浆液黏度变化速率先增加后减小, 同样在1:0.3体积比下黏度变化速率最快; 而对于固化时间方面, 水灰质量比越大, 固化时间就越长, 水泥与水玻璃体积比在1:0.3时固化时间最短。

温度变化方面, 由于水玻璃的加入, 使得整个体系在较短的时间内水化, 并释放出大量的水化热, 因此对于所有的组别来说, 浆液温度均有一定程度的升高, 升高范围在1℃~3℃。因此温度变化在一定程度上反映了水化的程度, 而水化程度又与黏度相关, 因此, 温度变化与黏度变化均呈现出上升趋势。同时,

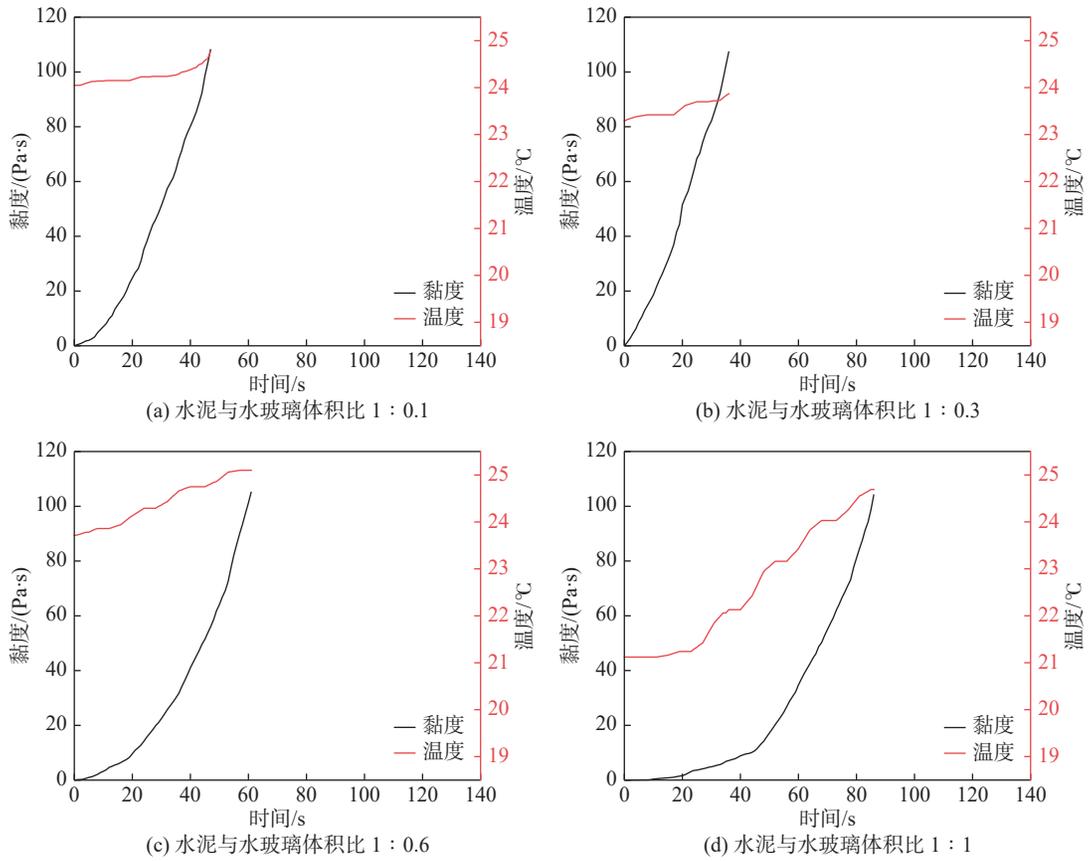


图4 水灰质量比 0.6 浆液黏度-时间曲线

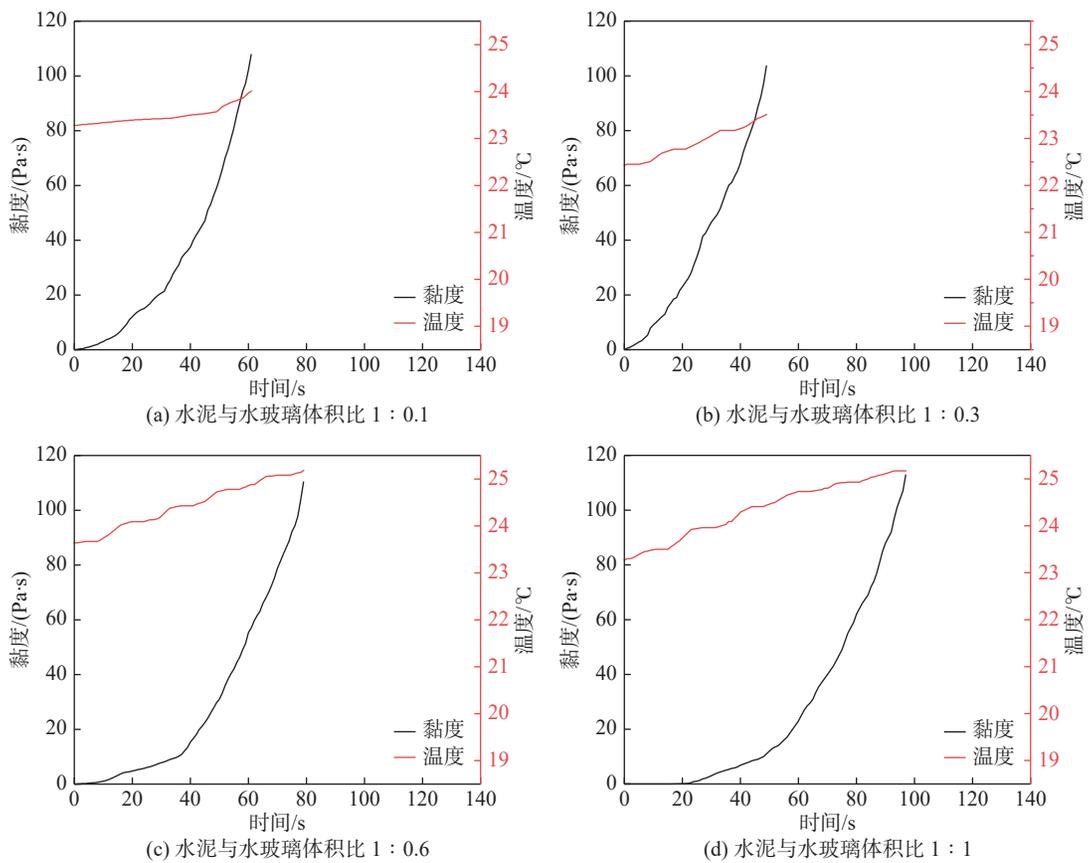


图5 水灰质量比 0.8 浆液黏度-时间曲线

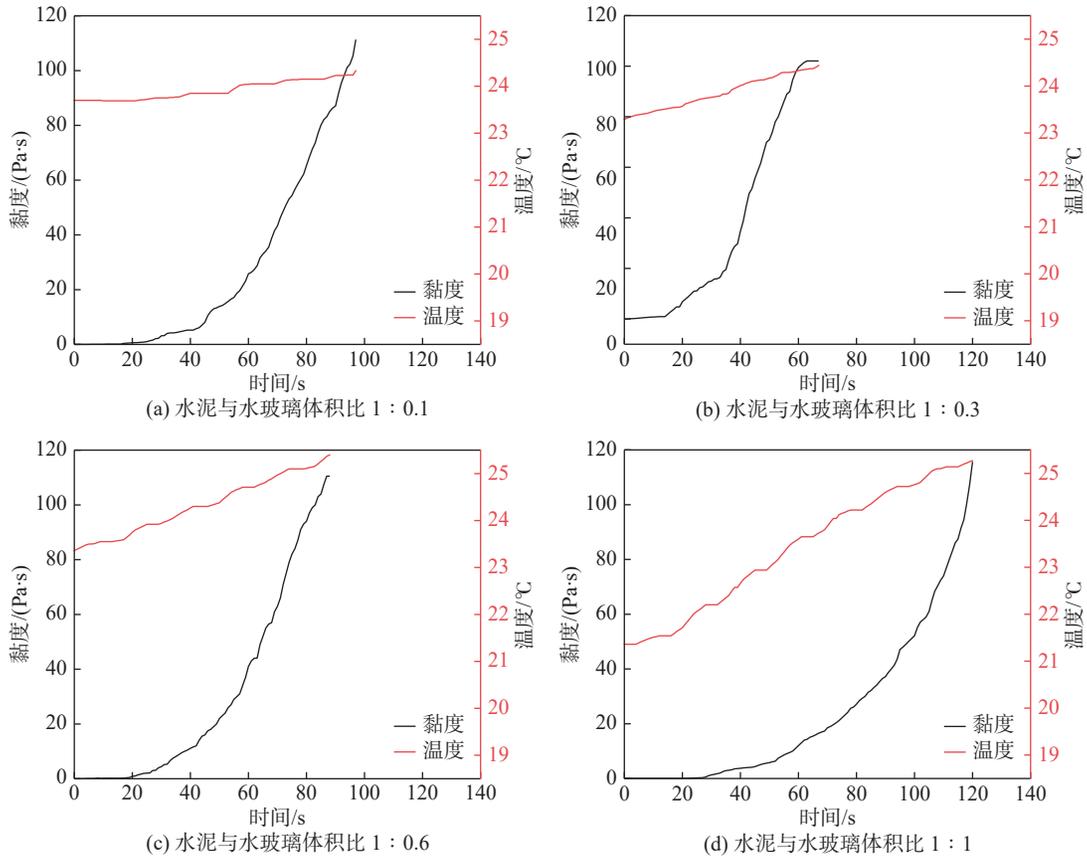


图 6 水灰质量比 1.0 浆液黏度-时间曲线

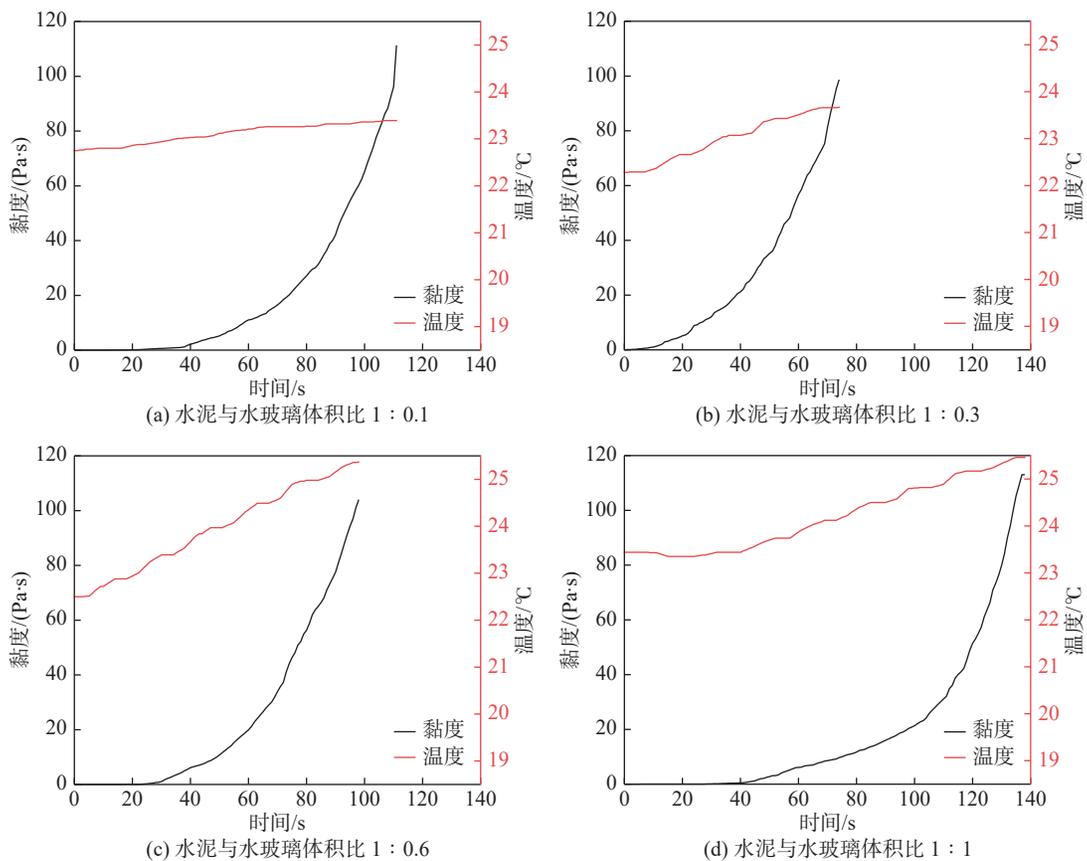


图 7 水灰质量比 1.2 浆液黏度-时间曲线

从温度变化曲线可以看出,在水泥与水玻璃体积比大于等于 1 : 0.3 时,温度上升量仅与反应时间有关,即反应时间越长温度上升越多,因此对应的水玻璃掺量越大,体系温度上升量也越多。水泥与水玻璃体积比为 1 : 0.1 时虽然反应时间不是最短,但其温度上升量往往最少,这可以在一定程度上说明此掺量下反应并没有被充分激化。

### 3.3 黏度-时间曲线拟合分析

对黏度试验所得到的黏度-时间曲线进行拟合(见图 8),即可得到式(1)所示的黏度-时间表达式,由于试验曲线中黏度随时间的变化体现出了较好的规律性,因此拟合精度较高,可以满足考虑黏度变化的扩散距离的计算要求。

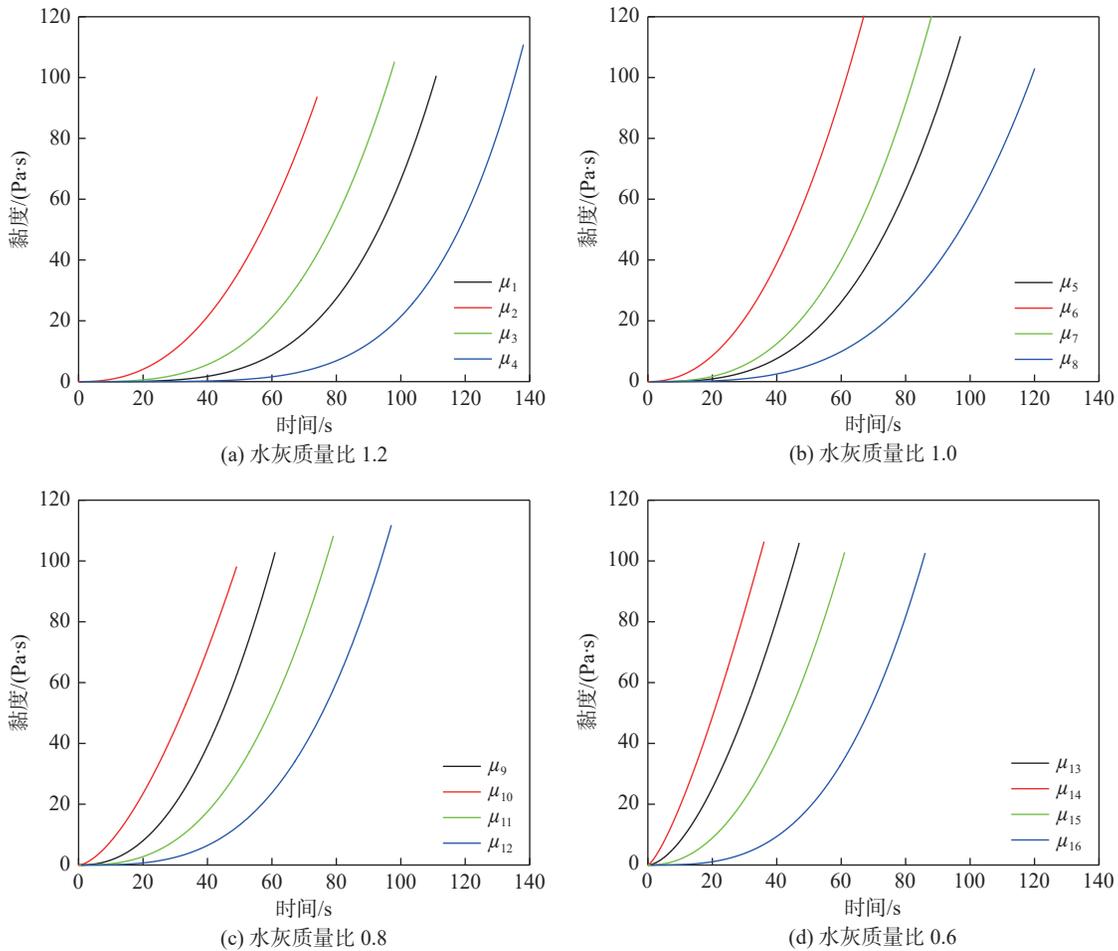


图 8 各组别黏度-时间拟合曲线

图 8 所示的各组别拟合曲线分别对应黏度-时间表达式,所有拟合公式汇总于表 4。

### 3.4 考虑黏度时变性的浆液扩散距离计算

将各组别的黏度-时间拟合公式代入式(8)积分,分别计算各配比下的浆液扩散距离,则旋喷直径预测计算结果如图 9 所示。

从图 9 计算结果可以看出,不同水灰质量比、水泥与水玻璃体积比的浆液成桩直径与黏度试验结果有着很强的相关性。随着水灰质量比的增大,成桩直径逐渐增大,这主要是由于随着水灰质量比的增大,浆液整体的黏度变化速率不断减缓,浆液固化时间增大,因此黏度变化对于浆液扩散距离的影响逐渐减小,

对应的扩散距离越来越大。

水泥与水玻璃体积比对于成桩直径的影响也与黏度试验中的黏度变化速率与固化时间密切对应。在黏度试验中,随着体积比由 1 : 0.1 变至 1 : 1,黏度变化速率先增大后减小,固化时间先减小后增大,在体积比 1 : 0.3 时对应的黏度变化最快,固化时间最短。相应地,黏度的快速变化使得 1 : 0.3 体积比下的浆液扩散距离最短,其中在水灰质量比 0.6 时浆液的扩散距离只有约 0.51 m,这主要是由于体积比 1 : 0.3 时,对应的水泥-水玻璃浆液体系的反应物浓度最高,因此浆液的黏度变化最快,在喷射入土体之后,浆液迅速由液态变化为固液混合的黏稠状态,在

表4 各组别黏度-时间拟合公式

水灰质量比	水泥与水玻璃体积比	编号	拟合公式
1.2	1 : 0.1	$\mu_1$	$\mu_1 = 7.514 \times 10^{-7} t^{3.973}$
	1 : 0.3	$\mu_2$	$\mu_2 = 0.00306 t^{2.399}$
	1 : 0.6	$\mu_3$	$\mu_3 = 3.237 \times 10^{-5} t^{3.270}$
	1 : 1	$\mu_4$	$\mu_4 = 1.359 \times 10^{-9} t^{5.099}$
1.0	1 : 0.1	$\mu_5$	$\mu_5 = 9.654 \times 10^{-5} t^{3.056}$
	1 : 0.3	$\mu_6$	$\mu_6 = 0.0121 t^{2.189}$
	1 : 0.6	$\mu_7$	$\mu_7 = 3.111 \times 10^{-4} t^{2.873}$
	1 : 1	$\mu_8$	$\mu_8 = 9.735 \times 10^{-6} t^{3.378}$
0.8	1 : 0.1	$\mu_9$	$\mu_9 = 0.00841 t^{2.290}$
	1 : 0.3	$\mu_{10}$	$\mu_{10} = 0.19911 t^{2.428}$
	1 : 0.6	$\mu_{11}$	$\mu_{11} = 9.263 \times 10^{-4} t^{2.860}$
	1 : 1	$\mu_{12}$	$\mu_{12} = 4.452 \times 10^{-5} t^{3.220}$
0.6	1 : 0.1	$\mu_{13}$	$\mu_{13} = 0.16657 t^{1.677}$
	1 : 0.3	$\mu_{14}$	$\mu_{14} = 0.91846 t^{1.326}$
	1 : 0.6	$\mu_{15}$	$\mu_{15} = 0.01241 t^{2.194}$
	1 : 1	$\mu_{16}$	$\mu_{16} = 9.379 \times 10^{-5} t^{3.121}$

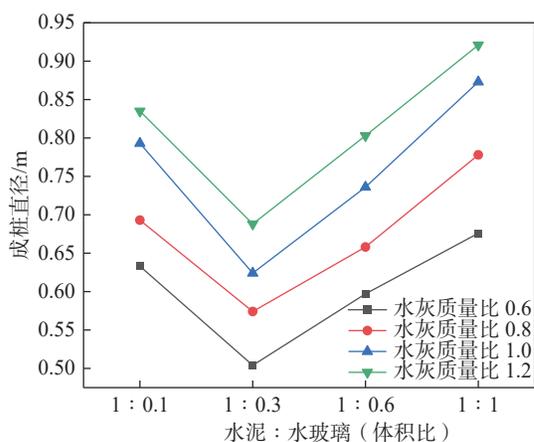


图9 各组别浆液扩散距离计算结果

土体中的扩散速度也由出口速度快速衰减为0,此时的浆液扩散距离就较短,较短的浆液扩散距离会增大布桩的密度,降低施工效率,且增加不必要的注浆材料用量,而在选择较大水灰质量比及水泥与水玻璃体积比时,固化时间会比较长且桩体水泥掺量也会相应降低,在选择中间位置的水灰质量比及1:0.1的体积比时,固化时间及成桩直径较为合理。因此,在实际工程中进行配比时,除了考虑增强浆液聚集作用的固化时间以外,还应当考虑黏度快速变化下的扩散距离,从而进行综合优化。

#### 4 粉砂土地层水泥-水玻璃材料配比综合优化

由上述试验结果可以看出,尽管研发速凝材料的初衷是使得材料快速固化,降低浆液流失造成的不

良影响,但实际配比优化过程中需要综合考虑凝胶时间、浆体强度及扩散距离,从而更好地满足实际工程的需求。

从试验结果中不难得出,在水泥-水玻璃体积比为1:0.3时,对应的凝胶时间最短,其初凝及终凝强度也较为理想,但浆液黏度的快速变化对其浆液扩散范围产生了较大的影响,其中水灰质量比0.6时该配比下浆液扩散范围仅为约0.5m,这将使得实际施工过程中的材料成本提升,施工效率降低,因此并不是最佳配比的选择。在体积比继续增大后,凝胶时间有所降低,仍然保持在100s之内,对于浆液的快速固化依然有效,同时黏度的变化速率降低,这使得浆液具有了更大的扩散范围,对应更大的浆液扩散范围,但过多的水玻璃的加入稀释了原有的水泥浆液体系,这使得终凝时的强度发生了折减,并且较多的水玻璃掺量也增加了实际的施工成本。

在水泥于水玻璃体积比为1:0.1时,对应的凝胶时间为25~40s,能够满足浆液快速固化的需求,浆液扩散范围略大于1:0.6组别,在所有组别中较为理想,且在浆体强度方面,由于对于原体系的稀释程度较低,使得其终凝时间在所有组别中最高,而较低的水玻璃掺量有效地控制了成本。结合该体积比下不同水灰质量比的浆液扩散范围,最终给出水泥-水玻璃浆液水灰质量比为1.0~1.2,水泥与水玻璃体积比为1:0.1。

#### 5 结论

通过设置不同配比下的水泥-水玻璃材料,在分析评价各组别速凝材料与粉砂地层中的凝胶时间及浆体强度特性后,基于现有高压旋喷浆液扩散距离理论公式,在考虑黏度时变性的前提下对其进行了修正,并开展黏度试验,得到了不同水灰质量比及水泥与水玻璃体积比下浆液的黏度-时间曲线,分析了各组别浆液的黏度变化规律;结合修正公式对于各配比下水泥-水玻璃浆液的扩散距离进行了计算;综合材料凝胶时间、强度及扩散距离因素,优化了粉砂土地层水泥-水玻璃高压旋喷速凝材料的配合比。具体研究结论如下:

(1)水泥-水玻璃浆液凝胶时间随着水玻璃掺量增加先减小后增大,随水灰质量比的增大而增大,水泥浆液与水玻璃体积比为1:0.3时,凝胶时间最短。

(2)水泥-水玻璃浆液各龄期试件抗压强度随着水灰质量比的增大而减小,3d及7d早期强度随着水玻璃掺量的增加先增大后减小,而在14d及28d龄期时,水泥与水玻璃体积比1:0.1试验组试件强

度出现了较大增幅,并且其最终强度在各组别中最高。

(3)浆液黏度在前期的上升速度缓慢,中后期黏度迅速上升并最终固化,混合浆液的黏度变化速率随着水灰质量比的升高而降低,随着水泥与水玻璃体积比的增加,先增加后减小,水泥与水玻璃体积比为1:0.3时变化速率最快,通过浆液-时间曲线拟合得到了浆液-时间拟合公式。

(4)浆液扩散范围随着水灰质量比的增大而增大,随着水泥与水玻璃体积比的增大,先增大后减小,在体积比为1:0.3时浆液扩散范围最小。

(5)水泥-水玻璃浆液在水灰质量比为1.0~1.2、水泥与水玻璃体积比为1:0.1时,在粉砂地层中具有最佳的浆液扩散、凝固及强度性能,推荐作为施工用配比。

#### 参 考 文 献

- [1] 徐平,张敏霞,丁亚红. 高压旋喷注浆加固设计及应用[J]. *山西建筑*, 2009, 35(13): 94-95. (XU P, ZHANG M X, DING Y H. Design and application of high pressure rotating grouting reinforcement[J]. *Shanxi Architecture*, 2009, 35(13): 94-95. (in Chinese))
- [2] 胡奇凡,张继清. 超高压旋喷注浆法在卵石地层的应用试验研究[J]. *铁道工程学报*, 2017, 34(12): 13-17. (HU Q F, ZHANG J Q. Experimental study of super high pressure jet grouting in gravel stratum[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2017, 34(12): 13-17. (in Chinese))
- [3] 徐有前. 高压喷射灌浆技术在大坝防渗加固中的应用[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2003, 26(3): 436-440. (XU Y Q. On the application of the jet grouting technique in the construction of the Longhekou Dam's diaphragm-wall[J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 2003, 26(3): 436-440. (in Chinese))
- [4] 徐华,张瑜,郭国和,等. 隧道地表高压旋喷加固的浆液渗透范围计算方法[J]. *岩土力学*, 2023, 44(7): 2064-2072,2128. (XU H, ZHANG Y, GUO G H, et al. Method for calculating penetration range of grouting slurry in the reinforced tunnel by high-pressure rotary jet grouting from ground[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(7): 2064-2072,2128. (in Chinese))
- [5] 肖雪茹. 高压旋喷注浆法加固土质地基机理研究[J]. *水利技术监督*, 2007(6): 52-54. (XIAO X R. Mechanism study on high-pressure rotary jet grouting method for strengthening soil foundation[J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2007(6): 52-54. (in Chinese))
- [6] 魏平. 高压旋喷注浆在立井井筒堵水施工中的应用[J]. *煤炭工程*, 2009(8): 48-50. (WEI P. Application of high-pressure rotary jet grouting in vertical shaft water blocking construction[J]. *Coal Engineering*, 2009(8): 48-50. (in Chinese))
- [7] WU Y X, SHEN S L, XU Y S, et al. Characteristics of groundwater seepage with cut-off wall in gravel aquifer. I: Field observations[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, 52(10): 1526-1538.
- [8] BARBU C Ș, SABĂU A D, MANOLI D M, et al. Water/cement/bentonite ratio selection method for artificial groundwater barriers made of cutoff walls[J]. *Water*, 2022, 14(3): 376.
- [9] MANNE A, PRASAD P V S R, ANNAM M K. Application of jet grouting for geotechnical challenges[C]//Construction in Geotechnical Engineering. Singapore: Springer, 2020: 565-577.
- [10] 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 X H, YU Y H. Application of cement-silicate double solution grouting in loess tunnel construction[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2004, 17(2): 68-72. (in Chinese))
- [11] 李术才,孙子正,刘人太,等. 基于裂隙动水注浆的水泥-水玻璃浆液相界面特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(8): 1640-1646. (LI S C, SUN Z Z, LIU R T, et al. Research on phase interface characteristics of cement-silicate grout based on crack grouting with dynamic water[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(8): 1640-1646. (in Chinese))
- [12] 郭金敏,汪建立,张超. 水泥-水玻璃双液注浆在饱和动水砂层隧道施工中的应用研究[J]. *煤炭工程*, 2005(8): 33-36. (GUO J M, WANG J L, ZHANG C. Research on application of cement and water glass double grouts to tunnel construction in dynamic water saturated sands[J]. *Coal Engineering*, 2005(8): 33-36. (in Chinese))
- [13] 张雷. 动水大高程地面双液注浆堵水关键技术浆液凝固性能试验研究[J]. *四川建材*, 2014, 40(1): 93-95. (ZHANG L. Study for the test of slurry coagulability about double liquid grouting water shutoff key technology on the dynamic water high elevation[J]. *Sichuan Building Materials*, 2014, 40(1): 93-95. (in Chinese))
- [14] 陈洋,黄蓓丽,巴明芳,等. 钢渣改性硅酸盐水泥-水玻璃双液注浆复合材料的试验研究[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(6): 139-145. (CHEN F, HUANG B L, BA M F, et al. Experimental study on dual-fluid-grout composite materials with slag steel modified Portland cement and sodium silicate[J]. *Acta Materiae*

- Compositae Sinica, 2013, 30(6): 139-145. (in Chinese))
- [15] 宋雪飞. 粉煤灰改性水泥-水玻璃双液注浆性能试验研究 [J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(1): 143-145,150. (SONG X F. Study on performance experiment of fly ash modified cement-sodium silicate double liquid grouting[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 143-145,150. (in Chinese))
- [16] SHEN S L, LUO C Y, BAI Y, et al. Instant solidification of soft ground horizontally using jet-grouting[C]// International Foundation Congress & Equipment Expo. Orlando: ASCE, 2009: 257-264.
- [17] 隆巴迪 G, 郭玉花. 水泥灌浆浆液是稠好还是稀好?[C]//现代灌浆技术译文集. 1991. (LOMBARDI G, GUO Y H. Is cement grouting slurry thick or thin?[C] Translation Collection of Modern Grouting Technology. 1991. (in Chinese))
- [18] SHEN S L, WANG Z F, YANG J, et al. Generalized approach for prediction of jet grout column diameter[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(12): 2060-2069.
- [19] 李术才, 韩伟伟, 张庆松, 等. 地下工程动水注浆速凝浆液黏度时变特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 1-7. (LI S C, HAN W W, ZHANG Q S, 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))
- [20] 李术才, 刘人太, 张庆松, 等. 基于黏度时变性的水泥-玻璃浆液扩散机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2415-2421. (LI S C, LIU R T, ZHANG Q S, et al. Research on C-S slurry diffusion mechanism with time-dependent behavior of viscosity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(12): 2415-2421. (in Chinese))
- [21] 刘强, 张可能, 陈宾, 等. 不同土体中水泥-水玻璃浆液的扩散规律 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2015, 46(1): 255-260. (LIU Q, ZHANG K N, CHEN B, et al. Diffusion law of cement-sodium silicate grout in different soils[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(1): 255-260. (in Chinese))
- [22] 查丽娟, 马智永. 考虑水泥-水玻璃双液浆黏度时空效应的隧道预注浆研究 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2021, 53(4): 594-601. (ZHA L J, MA Z Y. Study on pre-grouting of tunnel considering time and space effect of viscosity of cement-water glass slurry[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2021, 53(4): 594-601. (in Chinese))
- [23] 张庆松, 张连震, 刘人太, 等. 水泥-水玻璃浆液裂隙注浆扩散的室内试验研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36(8): 2159-2168. (ZHANG Q S, ZHANG L Z, LIU R T, et al. Laboratory experimental study of cement-silicate slurry diffusion law of crack grouting with dynamic water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(8): 2159-2168. (in Chinese))
- [24] MODONI G, CROCE P, MONGIOVI L. Discussion: Theoretical modelling of jet grouting[J]. Géotechnique, 2008, 58(6): 533-535.

收稿日期: 2024-01-03