文章编号:1671-6833(2026)04-0033-09

含硅藻土的水下不分散灌浆材料配合比设计

孙 啸[1], 王相洋[1], 杨专家[2], 张鑫玉[1]

(1. 河海大学 水利水电学院,江苏 南京 210098;2. 延安水务(集团)延河供水有限责任公司,陕西 延安 716000)

摘 要:针对混凝土坝体水下裂缝修补材料的分散性问题,设计了一种含硅藻土的水下不分散灌浆材料。首先,通过压汞测试和单掺试验确定硅藻土的目数和掺量,并采用抗压强度和劈裂抗拉强度试验分析其对灌浆材料力学性能的影响;其次,采用截锥流动度法、目测法、pH 值法和质量损失法进一步研究羟丙基甲基纤维素絮凝剂(HPMC)和普通型 PCA®-Ⅰ型聚羧酸高性能减水剂对灌浆材料流动性和抗分散性影响;最后,基于正交试验方法,确定水下灌浆修复材料的具体配比。结果表明:水灰比为 0.50 时,硅藻土与浆液具有良好相容性,且加入 2%掺量(质量分数,下同)的 100 目硅藻土可以提高灌浆材料的抗压强度和劈裂抗拉强度;在此基础上添加 0.6%掺量的 HPMC 可以提高浆液抗分散性,再加入 0.10%掺量的减水剂可以改善其流动性。所确定的水下灌浆材料的硅藻土目数为 100 目、掺量为 2%,HPMC 掺量为 0.6%,PCA®-Ⅰ型聚羧酸高性能减水剂掺量为 0.10%。

关键词:水下修补灌浆材料; 多孔材料; 抗分散性; 流动性

中图分类号: TV543+.6;TV431+.9 **文献标志码**:A **doi**:10.13705/j.issn.1671-6833.2026.01.004

水下不分散灌浆材料因其优异的抗分散性,可应用于混凝土坝体水下裂缝的修补[1-2]。然而,现有研究多集中于铝酸盐水泥不分散灌浆材料的性能优化,其价格较高且反应速度过快。而基于流动性能更优的硅酸盐水泥的水下修补灌浆材料研究较为有限且不完善[3-5]。已有研究尝试通过添加抗分散剂、絮凝剂、减水剂来改善材料的强度和流动性。Yahia 等[6]制备 0.4 水灰比的水泥浆表现出良好的抗分散性和流动性。Sonebi[7]通过使用威兰胶优化水泥浆配合比,但水下抗分散剂在提高流动性的同时可能引发缓凝效应,进而影响早期强度。Khayat[8]发现,多聚糖类絮凝剂在提高混凝土抗压强度方面优于聚丙烯类材料。梁志林等[9]的研究表明,UWB-Ⅱ型絮凝剂可显著提升水泥基材料的抗分散性。然而,上述研究多聚焦于单一添加剂的作用,缺乏对多种添加剂协同效应的系统性探讨。硅藻土具有高孔隙率、分级孔道结构以及火山灰活性,能有效调控水泥基材料内部孔径分布,可用于改善材料的工作性能[10-12],且与环氧树脂类外加剂相比,其单价更低,显示出明显的成本优势。因此,本文对基于硅酸盐水泥体系的灌浆材料配合比进行优化,引入不同目数且适量的硅藻土,以明确其最佳目数和掺量。随后,进一步研究减水剂对浆液流动性的改善作用以及絮凝剂在增强抗分散性方面的影响,从而最终获得一种既满足水下修补施工对流动性和稳定性要求,又具备优异工程性能的不分散水泥基灌浆材料配合比。

1 试验

1.1 原材料

灌浆材料选用普通硅酸盐水泥(P·O 42.5)作为基材,比表面积为 367.9 m^2/kg。硅藻土作为一种无机多孔材料,具有高比表面积和化学稳定性的优点,其孔径分布曲线(图 1)显示 100 目硅藻土的孔径主要分布在 10~100 μm,600 目硅藻土在 1~10 μm;当孔径小于 2 μm 时,600 目硅藻土的累积孔体积高于 100 目硅藻土,可见 600 目硅藻土的平均孔径低于 100 目硅藻土。

抗分散剂是水下不分散材料的关键之一,可通过在新制水泥浆中形成絮凝结构,增加浆体黏度,避

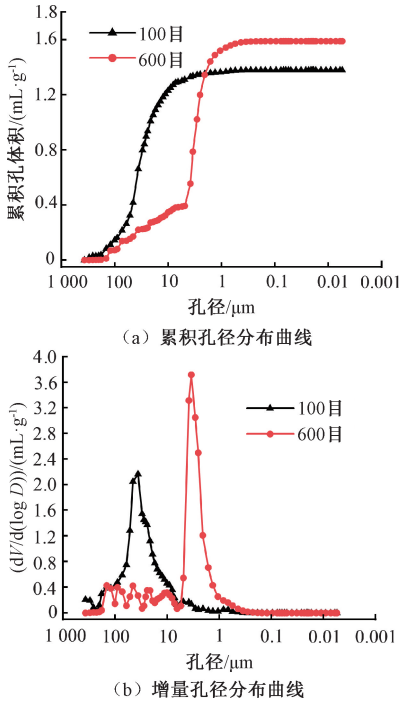
收稿日期:2025-11-05;**修订日期**:2025-12-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52279131)

作者简介:孙啸(1986—),男,浙江杭州人,河海大学副教授,博士,博士生导师,主要从事水利水电新材料研究,E-mail:xiaos@hhu.edu.cn。

引用本文:孙啸,王相洋,杨专家,等. 含硅藻土的水下不分散灌浆材料配合比设计[J]. 郑州大学学报(工学版),2026,47(4):33-41. [Sun Xiao, Wang Xiangyang, Yang Zhuanjia, et al. Mix proportion design of underwater non-dispersible grouting material containing diatomite[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science),2026,47(4):33-41.]

免材料在水中浇筑时分散。常用的絮凝剂为聚丙烯酰胺(PAM)和羟丙基甲基纤维素(HPMC)。截锥流动度试验结果显示,添加0.2%掺量(质量分数,下同)HPMC的浆液流动度优于添加PAM的浆液流动度(图2)。因此本文选择HPMC作为水下修补灌浆材料的抗分散剂。此外,加入PCA®-Ⅰ型聚羧酸高性能减水剂确保浆液的流动性,其固含量为23.3%,减水率≥25%。

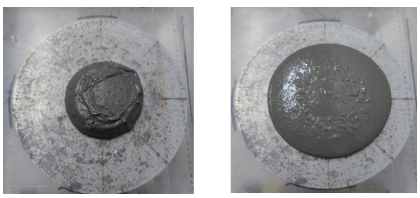


(a) 累积孔径分布曲线

(b) 增量孔径分布曲线

图1 不同目数硅藻土孔径分布曲线

Figure 1 Pore distribution curve of diatomite with different mesh numbers



(a) 0.2%PAM (b) 0.2%HPMC

图2 不同絮凝剂0.2%掺量下的流动度目测照片

Figure 2 Visual photos of flowability at 0.2% content of different flocculants

1.2 试验制备与测试

1.2.1 配合比方案

设定水泥浆液初始水胶比为0.5。内掺不同目数和掺量(质量分数,下同)的硅藻土,依照等质量比例替代水泥灰,试验配比方案见表1。

1.2.2 试件制备与养护

所有水泥基水下修补灌浆材料均用3 L的NJ-160搅拌机制备。将所有材料加入后开始搅拌:先慢速30 s,再快速120 s;停搅60 s,刮净搅拌叶和锅壁附着物,再快速90 s,整个过程持续约5 min。

表1 单掺硅藻土试验方案

Table 1 Single doped diatomite test scheme

试验编号	水胶比	硅藻土目数	硅藻土掺量/%
基准组	0.5		
100-1	0.5	100	2
100-2	0.5	100	4
100-3	0.5	100	6
100-4	0.5	100	8
100-5	0.5	100	10
600-1	0.5	600	2
600-2	0.5	600	4
600-3	0.5	600	6
600-4	0.5	600	8
600-5	0.5	600	10

参考DL/T 5117—2021《水下不分散混凝土试验规程》[13]:将搅拌后的浆液倒入模具,不进行振动成型,确保浆液与试模上边缘平齐。随后,覆盖薄膜,室温养护24 h后进行拆模,脱模试件置于温度为(20±1)℃的饱和氢氧化钙溶液中继续养护至相应龄期。

1.2.3 测试方法

水泥净浆的强度检测暂无专门国家标准,因此抗压强度参考GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》[14],试件尺寸为40 mm×40 mm×40 mm。试验过程中液压机以2 400 N/s匀速加荷直至破坏。

劈裂抗拉强度测试参照JTG 3420—2020《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》[15],试件为70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm,钢垫条直径4 mm,长75 mm。液压机以0.08 N/mm^{2}匀速加压至试件破坏。

流动性能测试依照GB/T 50448—2015《水泥基灌浆材料应用技术规范》[16]进行。

水泥净浆水下抗分散性能测试暂无专门国家标准,参考DL/T 5117—2021《水下不分散混凝土试验规程》[13],最终采用目测法、pH值法和质量损失法[17]作为抗分散指标。

(1)目测法。迅速称取灌浆材料300 g,倒入装有10 cm深蒸馏水的1 000 mL烧杯中后,观察水体的浑浊程度;静置3 min再次观察水体状态,若两次观察的水体均是澄清的,则认为该浆液具有良好的抗分散能力。

(2)pH值法。向1 000 mL烧杯中加入500 mL蒸馏水,称取搅拌均匀的300 g灌浆材料倒入烧杯中。静置3 min后收集400 mL上层清液,使用精度为0.01的台式酸度计测定其pH值。每组试验进

行 3 次独立测试,取平均值作为最终 pH 结果。

(3)质量损失法。采用称重法测量浆液流失量,使用 50 目黄铜网筛(直径 15 mm、高度 30 mm)作为浆液容器,250 mL 量筒作为冲刷水体容器。网筛由液面自由落体至筒底,静置 15 s 后,5 s 内匀速提升网筛至液面以上。采用质量损失率来表征水泥基水下修补灌浆材料的抗冲刷特性:

$$W = \frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_0} \times 100\%。\tag{1}$$

式中:W 为灌浆材料的质量损失率,%;M_0 为网筛容器质量,g;M_1 为原始灌浆材料与网筛容器的总质量,g;M_2 为冲刷后灌浆材料与网筛容器的总质量,g。

吸水率试验参照 GB/T 17431.2—2010《轻集料及其试验方法 第 2 部分:轻集料试验方法》[18]:称取一定质量硅藻土放入烘箱进行干燥处理,烘干后的样本浸水 1 h 和 24 h 后将水滤出,分别记录此时的质量 m_1,再次烘干后称取质量 m_2,吸水率计算公式如下所示:

$$W_a = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%。\tag{2}$$

式中:W_a 为试件 1 h 或 24 h 吸水率,%;m_1 为浸水 1 h 或 24 h 试件质量,g;m_2 为烘干试件质量,g。

正交试验方法参考 JB/T 7510—1994《工艺参数优化方法 正交试验法》[19],选用 4 因素 3 水平设计正交试验表($L_9 3^4$)。

2　分析与讨论

2.1　硅藻土单掺影响

2.1.1　流动度

图 3 为两种目数硅藻土在不同掺量下的水泥浆液流动度曲线,可以看出,100 目硅藻土对浆液流动度影响较小,具有良好相容性;600 目硅藻土显著降低了浆液流动度,在掺量达到 10%时,流动度较基准组下降 34.4%,主要归因于 600 目硅藻土含有约 78.1%的微小孔隙,这些孔隙可以物理吸附水分和水泥颗粒,抑制水泥颗粒流动性,导致浆液流动度下降[20]。不同目数 10%掺量下的水泥浆液流动度试验结果见图 4。

2.1.2　抗压强度

图 5 为抗压强度曲线,可以看出,随着 100 目硅藻土掺量的增加,试件在 3,7,28 d 的抗压强度都呈先略微提高后降低的趋势。其中,当掺量为 2%时,抗压强度达到峰值,主要原因在于天然硅藻土具有一定的火山灰活性[21],可与 $Ca(OH)_2$ 反应生成更多的 C—S—H 凝胶,增强了材料致密性。同时,硅藻土较高的吸水率(见表 2)降低了局部水胶比,进一步促进水泥水化过程并提升力学性能。当掺量超过 2%时,随着硅藻土掺量的进一步增加,硅藻土持续吸水使得实际水胶比降低,导致水化反应严重缺水,带来水化不足、干燥收缩等不利影响,由此产生内应力破坏[22],此时水胶比的降低带来了负面影响,并且火山灰反应不足以弥补这种损失,导致对试件力学性能产生不利影响。因此表现出随着硅藻土掺量增加,抗压强度先提高后降低的现象。

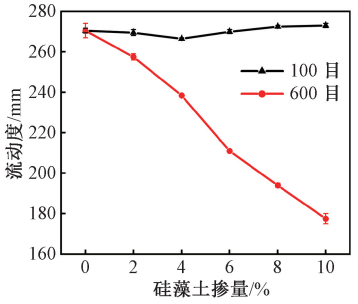
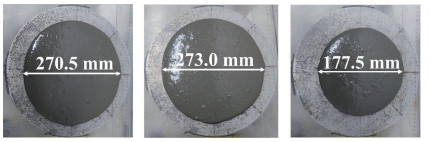


图 3　不同目数硅藻土各掺量下的水泥浆液流动度

Figure 3　Flowability of cement slurry with different diatomite contents and mesh numbers



(a) 基准组　(b) 100-5　(c) 600-5

图 4　不同目数 10%掺量下的水泥浆液流动度照片

Figure 4　Photographs of cement slurry flowability at 10% content of different mesh numbers

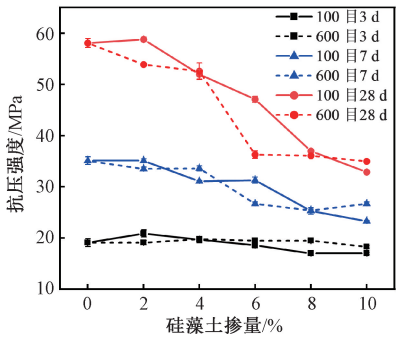


图 5　不同硅藻土掺量下的试件抗压强度

Figure 5　Compressive strength of specimens with different diatomite contents

相比之下,含 600 目硅藻土浆液试块在 3 d 各掺量下的抗压强度基本持平,而 7 d 和 28 d 在 10%掺量下的抗压强度下降约 20%和 40%,这是因为硅藻土大量替代部分水泥后,缺水导致水化产物减少,产生不利影响[23]。此外,由于 100 目硅藻土的吸水率较 600 目高出 34.2%,掺入 100 目硅藻土的试件

在各龄期的抗压强度整体上略高于掺入 600 目硅藻土的试件。

表 2 不同目数硅藻土吸水率对比

Table 2 Comparison of water absorption rate of diatomite with different mesh numbers

硅藻土目数	吸水率/%	
	处理时间 1 h	处理时间 24 h
100	125.2	122.4
600	94.5	91.2

2.1.3 劈裂抗拉强度

图 6 为不同目数硅藻土对水泥浆液劈裂抗拉强度的影响。在 3 d 和 7 d 龄期,随着 100 目硅藻土掺量的增加,虽然水化反应生成的胶凝体减少,但实际水胶比降低且伴随火山灰反应的增大,优化了颗粒间距离,从而弥补了胶凝体减少带来的不利影响,使得劈裂抗拉强度总体呈先下降后上升的趋势。在 28 d 龄期,随着硅藻土掺量的增加,火山灰反应生成的胶凝体增多,但是过多的 C—S—H 包裹了水化产物,导致试件出现较大的干燥收缩,产生微裂缝[22],此时水胶比降低以及火山灰反应无法弥补水化反应的胶凝体减少对劈裂抗拉强度的不利影响,该负面影响在硅藻土掺量为 6%时最为显著。当硅藻土掺量超过 6%后,火山灰反应进一步增强,C—S—H 生成量显著增加,劈裂抗拉强度再次出现上升。这一变化趋势表明,28 d 劈裂抗拉强度的“倒缩”现象与试件内部微裂缝的产生密切相关。600 目硅藻土浆液在各龄期的劈裂抗拉强度变化趋势与 100 目硅藻土相似,28 d 龄期同样出现强度“倒缩”现象。

2.2 HPMC 掺量对含硅藻土浆液性能影响

为确定 HPMC 对水下灌浆材料流动度的调控效果并确定其掺量,基于 2.1 节的试验,以水胶比 0.5、2%掺量 100 目硅藻土的水泥浆液作为基准,HPMC 采用外掺添加,设计 7 组试件。HPMC 掺量分别为 0、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%和 0.6%(质量分数,下同)。

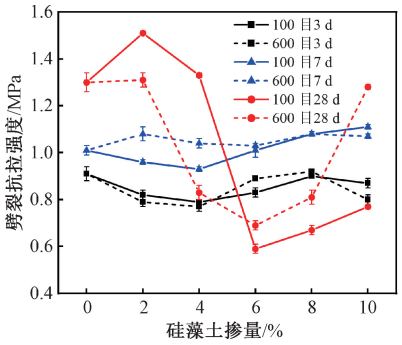


图 6 不同硅藻土掺量下的试件劈裂抗拉强度

Figure 6 Splitting tensile strength of specimens with different diatomite contents

2.2.1 流动度

不同 HPMC 掺量对水泥浆液流动度的影响如图 7 所示。HPMC 掺量为 0.1%和 0.2%时,浆液流动度较基准组分别降低了 14.5%和 25.1%,主要是由于 HPMC 分子功能团[24]吸附水泥颗粒形成较大絮凝团,阻碍颗粒运动,流动度降低。当 HPMC 掺量超过 0.2%时,流动度变化趋于平缓。

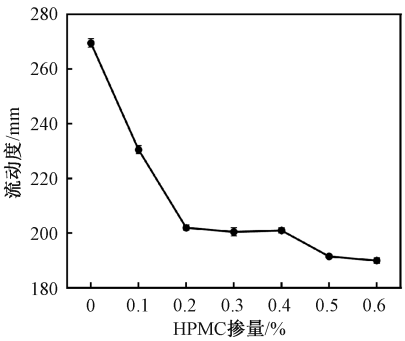


图 7 水泥浆液流动度随 HPMC 掺量变化曲线

Figure 7 Curve of flowability of cement slurry with HPMC contents

2.2.2 抗分散性能

(1)定性分析。图 8 展示了不同 HPMC 掺量下的水泥浆液在水下浇筑试验中的目测表现。

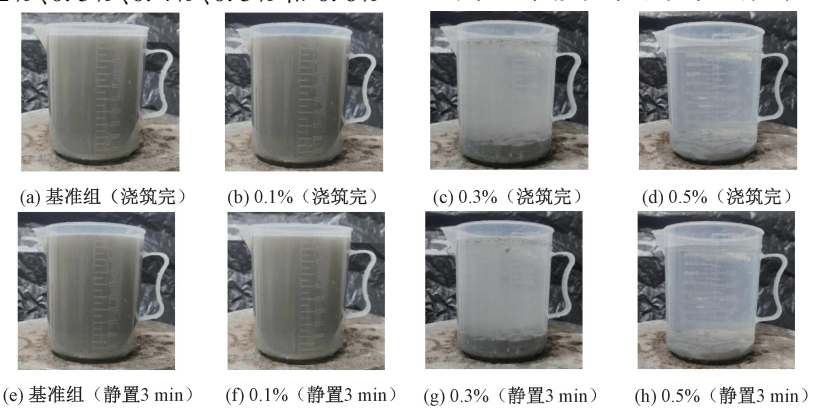


图 8 不同 HPMC 掺量下的水泥浆液目测照片

Figure 8 Photographs of visual inspection of cement slurry with different HPMC contents

随着 HPMC 掺量增加,水体由浑浊逐渐变为澄清,水下抗分散效果显著改善。HPMC 掺量为 0 和 0.1%时,浆液在水下浇筑后立刻分散;HPMC 掺量为 0.3%时,浑浊程度明显减轻,但仍有颗粒分散;掺量为 0.5%时,水体保持澄清,归因于 HPMC 在浆液体系中发挥的架桥作用和电荷中和作用,较小的水泥被凝聚成较大的絮凝团,水体的干扰无法破坏絮凝团之间的黏结作用力,从而使浆液具有良好的抗分散性能[25]。将浆液静置 3 min,大部分结果无明显变化,但 0.3%掺量静置后浑浊度增加。这是由于 HPMC 有一定的引气作用[26],静置过程中水体不断侵入,部分絮凝团被破坏,使得抗分散性能下降,并伴随气泡产生。当 HPMC 掺量持续增大后,絮凝团黏聚力增强,能够抵抗水的侵入,保证浆液抗分散性能。

(2)定量分析。图 9 展示了不同 HPMC 掺量下水泥浆液质量损失率和 pH 值试验结果。结果表明,随着 HPMC 掺量的增加,浆液流失量和 pH 值均显著降低。结合图 8 可以看出,当 HPMC 掺量为 0.5%时,水下浇筑及静置过程中水体保持澄清,表明此时浆液具有优良抗分散性,此时浆液 pH 值不到 11.6,浆液流失量计算的质量损失率为 2.5%。

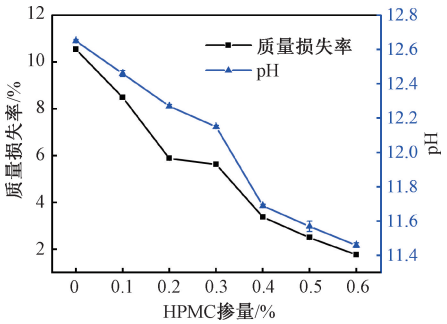


图 9　不同 HPMC 掺量下的水泥浆质量损失率和 pH 值试验结果

Figure 9　Mass loss rate and pH value test results of cement slurry with different HPMC contents

2.3　减水剂掺量对含硅藻土-HPMC 浆液性能的影响试验

研究不同掺量减水剂对浆液流动性和抗分散性能的影响。以 100 目硅藻土掺量 2%、HPMC 掺量 0.5%、水胶比 0.5 的水泥浆液为基准,高性能减水剂采用外掺法加入。共设置 6 组试件,减水剂掺量依次为 0、0.05%、0.10%、0.15%、0.20%、0.25%(质量分数,下同)。

2.3.1　流动度

从图 10 的水泥浆液流动度随减水剂掺量变化曲线可以看出,随着减水剂掺量增加,浆液流动度显著提高。其中掺入 0.05%的减水剂后流动度增速较快,后趋于平缓,近似线性,这使得灌浆材料具有良好的可操作性和流动性。

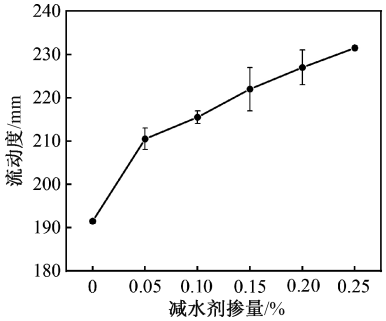


图 10　水泥浆液流动度随减水剂掺量变化曲线

Figure 10　Curve of flowability of cement slurry with diferrent water reducing agent contents

2.3.2　抗分散性能

(1)定性分析。图 11 为不同减水剂掺量下的水泥浆液目测照片。

从图 11 可以看出,随着减水剂掺量增加,水体状态无明显变化,均表现出良好抗分散性能。浇筑后水体浑浊程度在静置 3 min 后有所加强,且随着减水剂掺量的增加愈加明显,这是因为减水剂的解絮作用在静置过程中持续影响絮凝体结构[12],导致

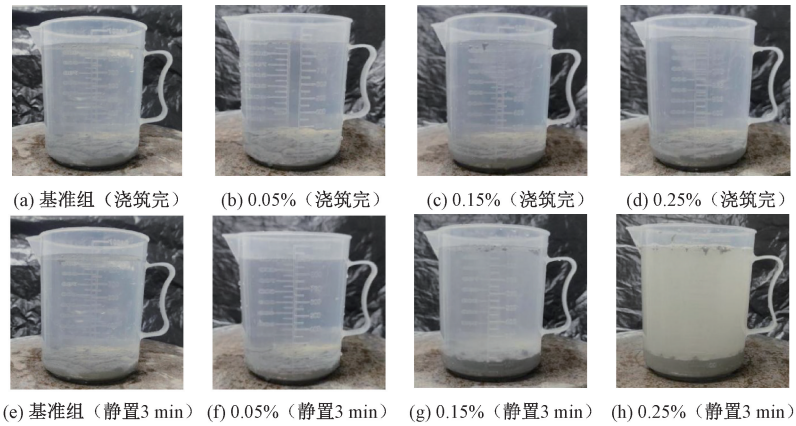


图 11　不同减水剂掺量下的水泥浆液目测照片

Figure 11　Photographs of visual inspection of cement slurry with different water reducing agent contents

更多颗粒分散析出。当减水剂掺量较小时,HPMC 分子链可重新吸附部分分散颗粒以维持抗分散性能。然而,当掺量较大时,HPMC 吸附饱和,多余颗粒无法絮凝,导致水体变浑浊。因此,减水剂掺量确定为 0.05%。

(2)定量分析。图 12 为不同减水剂掺量下的水泥浆液质量损失率和 pH 值试验结果。从图 12 可以看出,随着减水剂掺量的增加,浆液 pH 值和质量损失率逐渐增大。当减水剂掺量为 0.05%时,浆液在水下浇筑过程中保持澄清且静置后水体未变浑浊,说明其水下抗分散性能良好,此时浆液 pH 值不到 11.7,质量损失率为 2.9%。

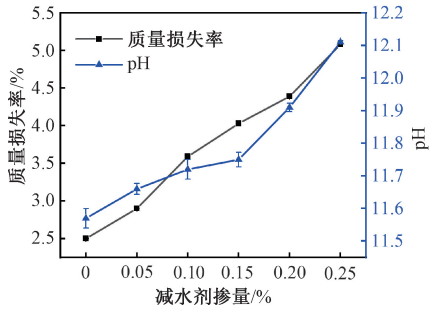


图 12 不同减水剂掺量下的水泥浆液质量损失率和 pH 值试验结果

Figure 12 Mass loss rate and pH value test results of cement slurry with different water reducing agent contents

2.4 基于正交试验的材料配方设计

根据上述试验结果,设置 100 目硅藻土、HPMC、普通型 PCA®-Ⅰ型聚羧酸高性能减水剂的临界掺量分别为 2%、0.5%、0.05%,并对每个因素设置 3 种不同掺量水平进行正交试验,研究多参数水平对水泥基水下修补灌浆材料流动度、抗分散性能及力学性能的影响,确定含硅藻土的水下修补灌浆材料的配合比。

2.4.1 正交试验方案设计

4 因素 3 水平正交试验方案设计表如表 3 所示,将水灰比、硅藻土、HPMC、减水剂依次设置为 A、B、C、D,各因素不同水平以数字 1、2、3 标注,如水灰比 3 种水平依次为 A_1、A_2、A_3。

2.4.2 正交试验结果

不同因素组合下的水下修补灌浆材料的流动度(初始流动度、30 min 后流动度)、pH 值、质量损失率和目测结果正交试验结果见表 4;不同龄期抗压强度、劈裂抗拉强度参数试验结果详见表 5。

2.4.3 极差分析

对外掺剂影响材料抗分散性和流动性正交试验结果展开极差分析,结果如表 6~8 所示。其中,k_i 为任意列水平号为 i 对应试验数据总和的平均值;R 为极差,数值上等于 k_i 最大值与最小值之差,某因素 R 值越大,说明该项试验对其敏感度越高。

表 3 正交试验方案设计表

Table 3 Orthogonal experimental design table

组号	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D
	水灰比	硅藻土掺量/%	HPMC 掺量/%	减水剂掺量/%
T1	0.45	2	0.5	0.05
T2	0.45	3	0.6	0.10
T3	0.45	4	0.7	0.15
T4	0.5	4	0.6	0.15
T5	0.5	2	0.7	0.05
T6	0.5	3	0.5	0.10
T7	0.55	2	0.7	0.10
T8	0.55	3	0.5	0.15
T9	0.55	4	0.6	0.05

表 4 工作性能正交试验结果

Table 4 Orthogonal test results of working performance

组号	流动度/mm		抗分散参数		目测结果	
	初始状态	静置 30 min	pH	质量损失率/%	浇筑完成	静置 3 min
T1	184.0	182.5	11.38	1.08	不浑	不浑
T2	186.5	194.5	11.31	0.84	不浑	不浑
T3	177.0	187.5	11.43	1.48	不浑	不浑
T4	212.0	210.0	11.49	1.94	不浑	不浑
T5	190.5	190.5	11.44	1.51	不浑	不浑
T6	215.5	213.0	11.92	1.62	不浑	浑浊
T7	213.0	218.5	11.52	2.48	不浑	不浑
T8	243.5	241.5	12.08	4.82	微浑	浑浊
T9	224.5	222.0	11.73	3.64	不浑	微浑

表 5 力学性能正交试验结果

Table 5 Orthogonal test results of mechanical properties

组号	抗压强度/MPa			劈裂抗拉强度/MPa		
	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
T1	12.5	14.3	21.0	0.97	1.15	0.99
T2	11.4	15.2	23.2	0.97	0.99	1.09
T3	10.9	13.5	20.0	0.88	0.97	0.97
T4	9.5	11.4	15.7	0.88	0.97	0.92
T5	8.9	10.7	17.2	0.79	0.92	0.93
T6	9.8	11.1	18.1	0.86	1.01	0.86
T7	8.1	8.8	14.4	0.74	0.81	0.81
T8	7.4	8.9	11.3	0.73	0.87	0.74
T9	7.7	9.7	10.3	0.70	0.86	0.82

由表 6~8 可知,对于 3、7 d 抗压强度,影响因素从大到小分别为 A、C、D、B;对于 28 d 的抗压强度,影响因素从大到小分别为 A、D、B、C。其中,水灰比均为第一影响因素,表明其对材料强度影响最大。

表 6　抗压强度极差分析

Table 6　Compressive strength range analysis　　MPa

指标	项目	因素 A 水灰比	因素 B 硅藻土掺量	因素 C HPMC 掺量	因素 D 减水剂掺量
3 d 抗压强度	k_1	11.6	10.0	9.9	9.7
	k_2	9.4	9.2	9.5	9.8
	k_3	7.7	9.5	9.3	9.3
	R	3.9	0.5	0.6	0.5
7 d 抗压强度	k_1	14.3	11.5	11.4	11.6
	k_2	11.1	11.6	12.1	11.7
	k_3	9.1	11.4	11.0	11.3
	R	5.2	0.2	1.1	0.4
28 d 抗压强度	k_1	21.4	17.0	16.8	16.2
	k_2	17.0	17.2	16.4	18.6
	k_3	12.0	16.1	17.2	15.7
	R	9.4	1.1	0.8	2.9

表 7　流动度极差分析

Table 7　Flowability range analysis　　mm

指标	项目	因素 A 水灰比	因素 B 硅藻土掺量	因素 C HPMC 掺量	因素 D 减水剂掺量
初始流动度	k_1	182.5	203.0	214.3	199.7
	k_2	206.0	206.8	207.6	205.0
	k_3	227.0	205.7	193.5	210.8
	R	44.5	3.8	20.8	11.1
30 min 后流动度	k_1	188.2	203.7	212.3	198.3
	k_2	204.5	208.8	208.8	208.7
	k_3	227.3	207.5	198.8	213.0
	R	39.1	5.1	13.5	14.7

表 8　质量损失率极差分析

Table 8　Mass loss rate range analysis　　%

项目	因素 A 水灰比	因素 B 硅藻土掺量	因素 C HPMC 掺量	因素 D 减水剂掺量
k_1	1.13	1.83	3.51	2.08
k_2	2.69	2.39	2.14	2.65
k_3	3.65	3.25	1.82	2.75
R	2.52	1.42	1.69	0.67

对于水泥浆初始以及 30 min 流动度,水灰比为第一影响因素。

水平 A_1 虽然提高了样本抗压强度,但降低了流动度,影响水泥的水下工作性能;水平 A_3 虽满足流动性要求,但会导致材料抗压强度有所下降。故认为因素 A 的最佳水平为 A_2。对于因素 B,极差分析表明,B_1 在兼顾抗压强度的同时使得材料具有良好的流动度及质量损失率,且 3 种水平下的极差 R 无明显差异,进一步说明其与水泥灰具有良好的相容性。因素 C_1 使得材料抗分散性降低,C_3 导致材料流动度降低,均不利于施工,因此认为水平 C_2 为理想选择。同样,水平 D_2 较 D_1 有更好的抗压强度,较 D_3 有更优良的水下抗分散性。

结合以上分析,确定含硅藻土的水下修补灌浆材料的合理因素水平组合为 $A_2B_1C_2D_2$,具体配比为水灰比 0.50、100 目硅藻土(内掺)掺量 2%、HPMC(外掺)掺量 0.6%、普通型 PCA®-Ⅰ型聚羧酸高性能减水剂(外掺)掺量 0.10%,即每立方米灌浆材料所需水泥 1 191.39 kg、水 607.85 kg、100 目硅藻土 24.31 kg、HPMC7.29 kg、PCA®-Ⅰ型聚羧酸高性能减水剂 1.22 kg。

3　结论

(1)浆液流动性在 100 目硅藻土掺加后基本不变,但随 600 目硅藻土掺量的增加不断衰减。这是由于 600 目硅藻土的孔径显著小于 100 目硅藻土的孔径。

(2)100 目硅藻土掺量为 2%时各龄期抗压强度略微上升,掺量超过 2%后,其吸水率较高,过量掺入导致水泥浆水化反应不充分,使得各龄期抗压强度呈下降趋势。含硅藻土试件的 3,7 d 劈裂抗拉强度总体先降低后提高,拐点出现在掺量 4%处。28 d 劈裂抗拉强度在掺量为 2%时先增大,随后呈先降低后升高趋势。其中,掺 100 目和 600 目硅藻土拐点均出现在 6%处,但超过 6%后劈裂抗拉强度出现“倒缩”。

(3)通过研究不同目数硅藻土及添加剂掺量对水泥浆液流动性与力学性能的影响,确定 100 目硅藻土、HPMC、普通型 PCA®-Ⅰ型聚羧酸高性能减水剂的临界掺量分别为 2%、0.5%、0.05%,此时材料抗分散达标准则 $W_{max}\leqslant 2.9\%$ 且 pH≤11.7。正交试验结果确定含硅藻土的水下不分散灌浆材料配合比为 100 目硅藻土掺量 2%、HPMC 掺量 0.6%、PCA®-Ⅰ型聚羧酸高性能减水剂掺量 0.10%。

参考文献:

[1] Huang Shuzhen, Lyu Ziyi, Zhou Bing, et al. A new type of high performance composite grouting for repairing cracks in underwater concrete structure[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2006, 40(12): 2142-2146. [黄淑贞, 吕子义, 周冰, 等. 适用于水下混凝土结构裂缝的高性能复合注浆修补材料[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(12): 2142-2146.]

[2] Gao Xin, Huang Jian, Xiong Jianbo. Research on properties of polymer modified grouting material for underwater

repair[J]. New Building Materials, 2017, 44(6): 90-94. [高鑫, 黄剑, 熊建波. 聚合物改性水下修补灌浆料的性能研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(6): 90-94.]

[3] Yi Xin, Kang Furu, Deng Jun, et al. Research and application on inorganic solidified foam filling material for mine[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(10): 136-142. [易欣, 康付如, 邓军, 等. 矿用无机固化泡沫充填材料研究及应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(10): 136-142.]

[4] Wang Bo, Yan Tiecheng. Study on preparation and properties of ordinary Portland sulphoaluminate cement composite gel system[J]. Journal of Functional Materials, 2021, 52(7): 79-84. [王博, 闫铁成. 普通硅酸盐-硫铝酸盐水泥复合凝胶体系的制备及性能研究[J]. 功能材料, 2021, 52(7): 79-84.]

[5] Zhang Decheng, Xu Dongyu, Cheng Xin. Research on high performance sulfoaluminate cement underwater non-dispersed concrete[J]. Advanced Materials Research, 2011, 306/307: 956-960.

[6] Yahia A, Khayat K H. Experiment design to evaluate interaction of high-range water-reducer and antiwashout admixture in high-performance cement grout[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(5): 749-757.

[7] Sonebi M. Factorial design modelling of mix proportion parameters of underwater composite cement grouts[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(11): 1553-1560.

[8] Khayat K H. Effects of antiwashout admixtures on properties of hardened concrete[J]. ACI Materials Journal, 1996, 93(2): 134-146.

[9] Liang Zhilin, Zhang Changmin, Lei Jingwei. Application of non-dispersible underwater concrete at Three Gorges Project[J]. Concrete, 2006(12): 78-80. [梁志林, 张长民, 雷敬伟. 水下不分散混凝土在三峡工程中的应用[J]. 混凝土, 2006(12): 78-80.]

[10] Hou Fuxing, Bai Yiming, Shen Di, et al. Research progress of carrier materials in microbial self-healing concrete[J]. Materials Reports, 2024, 38(13): 80-94. [侯福星, 白一鸣, 沈崠, 等. 微生物自修复混凝土载体材料研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(13): 80-94.]

[11] Chen Pu, Jiang Dahua, Xu Yuzhen, et al. Research progress on thermal and humid properties of diatomite based composite phase change materials[J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(12): 3721-3725. [陈璞, 蒋达华, 徐玉珍, 等. 硅藻土基复合相变材料的热湿性能研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(12): 3721-3725.]

[12] Tian Kun. Study and application on high property grouting material used in synchronous grouting of shield tunnelling[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007. [田焜. 高性能盾构隧道同步注浆材料的研究与应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.]

[13] DL/T 5117—2021 水下不分散混凝土试验规程[S].

[14] GB/T 17671—2021 水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)[S].

[15] JTG 3420—2020 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程[S].

[16] GB/T 50448—2015 水泥基灌浆材料应用技术规范[S].

[17] Sheng Chuanming, Ma Chao, Lian Jijian, et al. Washout resistance analysis of solidified silt in underwater applications[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(1): 181-189. [盛传明, 马超, 练继建, 等. 固废底泥水下应用抗分散性能研究[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(1): 181-189.]

[18] GB/T 17431.2—2010 轻集料及其试验方法 第2部分: 轻集料试验方法[S].

[19] JB/T 7510—1994 工艺参数优化方法 正交试验法[S].

[20] Liu Kaizhi, Long Yong, Chen Luyi, et al. Preparation of high stability ultra-high performance concrete matrix with calcined diatomite[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(6): 1888-1895. [刘开志, 龙勇, 陈露一, 等. 利用煅烧硅藻土制备高稳态超高性能混凝土基体研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(6): 1888-1895.]

[21] Qu Mengjiao, Tian Qing, Zhang Miao, et al. Review on activity evaluation methods of pozzolan materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(2): 376-389. [屈孟娇, 田青, 张苗, 等. 火山灰质材料活性评价方法研究综述[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(2): 376-389.]

[22] Yu Fang, Xiong Jianbo, Deng Chunlin, et al. Study on the influence of curing methods on compressive strength of C100 ultra-high strength concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(S1): 194-198. [于方, 熊建波, 邓春林, 等. 养护方式对C100超高强混凝土抗压强度的影响规律研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(增刊1): 194-198.]

[23] Feng Qi, Wang Yubin. Study on the durability of recycled fly ash concrete under the coupling condition of dry wet cycle and sulfate resistance[J]. Concrete, 2021(5): 42-45. [冯琦, 王宇斌. 粉煤灰再生混凝土在干湿循环-抗硫酸盐侵蚀耦合条件下的耐久性研究[J]. 混凝土, 2021(5): 42-45.]

[24] Bai Gang, Wang Li, Wang Fang, et al. Investigation of the printability and mechanical properties of 3D printing UHPC[J]. Materials Review, 2021, 35(12): 12063-12069. [白刚, 王里, 王芳, 等. 3D打印UHPC的制

备和力学性能试验研究[J]. 材料导报, 2021, 35(12): 12063-12069.]

[25] Wei Tong, Wang Mouhua, Wei Wei, et al. DMC synthesis by transesterification of propylene carbonate and methanol over CaO near room temperature[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2003, 24(1): 52-56. [魏彤, 王谋华, 魏伟, 等. 氧化钙室温催化碳酸丙烯酯和甲醇的酯交换合成碳酸二甲酯[J]. 催化学报, 2003, 24(1): 52-56.]

[26] Zhu Yanmei, Zhang Yi, Jiang Zhengwu. Effect of hydroxypropyl methylcellulose ether on properties of 3D printing mortar[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6): 1123-1130. [朱艳梅, 张翼, 蒋正武. 羟丙基甲基纤维素对 3D 打印砂浆性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6): 1123-1130.]

Mix Proportion Design of Underwater Non-dispersible Grouting Material Containing Diatomite

SUN Xiao[1], WANG Xiangyang[1], YANG Zhuanjia[2], ZHANG Xinyu[1]

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yan'an Water Affairs (Group) Yanhe Water Supply Company Limited, Yan'an 716000, China)

Abstract: Aiming at the dispersion problem of underwater crack repair materials for concrete dams, an underwater non-dispersible grouting material containing diatomite was designed. Firstly, the mesh number and content of diatomite were determined by mercury intrusion test and single mixing test, and the influence of diatomite on the mechanical properties of grouting materials was analyzed by compressive strength and splitting tensile strength tests. Secondly, the effects of hydroxypropyl methyl cellulose flocculant (HPMC) and ordinary PCA®-type Ⅰ polycarboxylic acid high performance water reducing agent on the flowability and anti-washout performance of grouting materials were further studied by cone flowability method, visual observation method, pH value method, and plunge test. Finally, based on the orthogonal test method, the specific ratio of underwater grouting repair materials was determined. The results showed that when the water-cement ratio was 0.50, the diatomite had good compatibility with the slurry, and the addition of 2% (mass fraction, the same below) 100 mesh diatomite could improve the compressive strength and splitting tensile strength of the grouting material. On this basis, the addition of 0.6% HPMC could improve the anti-washout performance of the slurry, and the addition of 0.10% water reducing agent could improve its flowability. The diatomite mesh of underwater grouting material was determined to be 100 mesh, the content was 2%, the content of HPMC was 0.6%, and the content of PCA®-type Ⅰ polycarboxylic acid high performance water reducing agent was 0.10%.

Keywords: underwater repair grouting material; porous material; anti-washout performance; flowability