

# 用于快速修补的硫铝酸盐水泥基复合胶凝材料力学性能研究

张杰, 由宗国, 张广勇, 李威, 刘欣然

(北京建工新型建材有限公司, 100015, 北京)

**摘要:** 将普通硅酸盐水泥掺入硫铝酸盐水泥得到混合水泥, 研究了普通硅酸盐水泥掺量对其凝结时间、力学性能和干燥收缩性的影响。结果表明, 普通硅酸盐水泥掺量为10%时, 有效降低了混合水泥的凝结时间, 提高了混合水泥砂浆的各时期强度, 特别是大幅提高了后期强度, 满足快速修补的要求。研究了不同体积掺量的PP纤维对10%硫铝酸盐水泥的影响, 结果表明, 掺加体积掺量为0.2%的PP纤维时对该复合水泥抗折性能提升最佳。

**关键词:** 硫铝酸盐水泥; 聚丙烯纤维; 快速修补

**中图分类号:** TU5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-4726(2023)19-2313-04

## STUDY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF SULFOALUMINATE CEMENT COMPOSITE CEMENTITIOUS MATERIAL FOR RAPID REPAIR

ZHANG Jie, YOU Zong-guo, ZHANG Guang-yong, LI Wei, LIU Xin-ran

(BCEG Advanced Construction Materials Co., Ltd., 100015, Beijing, China)

**Abstract:** Mixed cement was prepared by mixing ordinary Portland cement with sulfoaluminate, and the influence of ordinary Portland cement on the setting time, mechanical properties and dry shrinkage was studied. Results show that when the content of ordinary Portland cement was 10%, the setting time of mixed cement was effectively reduced, and the strength of the mixed cement mortar in each stage was improved, and the strength in the late stage was greatly increased, meeting the requirements for rapid repair. The effect of PP fiber with different volume contents on 10% sulfoaluminate cement was studied. According to the test results, mixed cement had the best fracture resistance when the PP fiber content was 0.2% by volume.

**Keywords:** sulfoaluminate cement; polypropylene fiber; rapid repair

我国每年混凝土结构修补的费用约30亿元, 因

此研究人员对以硫铝酸盐水泥(SAC)作为基材的修补材料进行了研究。硫铝酸盐水泥因具有凝结时间短、早强高、水化可以产生微膨胀的特点, 而备受修补工程的关注。硫铝酸盐水泥具有良好的相容性以及优秀

收稿日期: 2023-06-28

作者简介: 张杰(1989—), 男, 河北张家口人, 工程师, e-mail: 331055274@qq.com.

混凝土的质量损失率有所增加。其中, 10%和15%含量的试件在300次循环时的质量损失率较大, 为0.4%, 而0%和5%石粉含量的试件在300次循环时的质量损失率则均为0.3%。从曲线的增长速度来看, 5%石粉含量的机制砂混凝土质量损失率的增长最慢, 15%石粉含量组的增长速率最大。

(3)通过对混凝土相对动弹性模量的测定发现, 随着冻融循环次数的增加, 不同石粉含量的C60机制砂混凝土的相对动弹性模量降低。其中15%石粉含量的机制砂混凝土下降幅度最大, 为7.64%, 另外3种石粉含量的相对动弹性模量下降幅度则均在5%左右。此外, 5%石粉含量混凝土相对动弹性模量下降趋势略缓于0%和10%石粉含量的混凝土。

## 参考文献

- [1] 王子明, 韦庆东, 兰明章. 国内外机制砂和机制砂高强混凝土现状及发展[C]//中国硅酸盐学会, 中国建筑材料科学研究总院. 中国硅酸盐学会水泥分会首届学术年会论文集. 2009: 139-144.
- [2] 高育欣. C80机制砂高强混凝土的研制及工程应用[J]. 混凝土. 2011(9): 99-101.
- [3] 王稷良. 机制砂特性对混凝土性能的影响及机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [4] 江均赞, 杨锋杰. C80高强高性能混凝土技术特点及工程应用[J]. 广东土木与建筑, 2012(3): 53-55.
- [5] 商怀帅, 宋玉普, 覃丽坤. 普通混凝土冻融循环后性能的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品. 2005(2): 9-11.
- [6] 朋改非, 高日, 刘叶锋, 等. 高抗冻性(F300)的C50和C60混凝土试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2004(2): 14-18.
- [7] 赵冬虹. 混凝土冻融破坏机理的研究[J]. 林业科技情报, 2002(3): 9-10.

的耐久性,可作为快速修补材料,但是存在后期强度发展不足、水化后期会产生强度倒缩等问题。

由于后期硫铝酸盐水泥会产生微膨胀,而导致基体产生微观裂纹。在外力的作用下,这些微观裂纹容易产生应力集中,从而导致裂缝的扩大,最终使基体发生破坏。因此修复材料的体积稳定性对于混凝土裂缝的修复尤为重要,因为修复材料的收缩或膨胀是材料开裂的根本原因。探索材料的体积稳定性,以防止混凝土裂缝的二次开裂。

修复材料固化后,影响修复的最重要因素是修复材料与基层混凝土之间的粘结性能,因此降低水泥结构的孔隙率,提高抗压抗折强度,是从根本上提高水泥基修补材料性能的关键。

## 1 原材料选择

硫铝酸盐水泥具有早期强度高、耐侵蚀、碱度低、抗冻融、抗渗等优点,但这种水泥制品在后期易出现强度倒缩的情况,且在建设工程中使用这种水泥的成本较高。虽然普通硅酸盐水泥前期强度增长较缓慢,但其性能稳定且生产成本低较硫铝酸盐水泥更低。

因此在考虑混凝土力学性能和成本的双重因素下,可以将两者相结合,充分发挥各自的优势。本次试验分别选择普通硅酸盐 P·O 42.5 水泥和硫铝酸盐 SAC 42.5 水泥,其主要物理-力学性能分别见表 1、表 2。

表 1 P·O 42.5 水泥的物理-力学性能

品种	比表面积	凝结时间 /min		抗折强度 /MPa		抗压强度 /MPa	
		初凝	终凝	3d	28d	3d	28d
P·O 42.5	382	172	236	6.1	9.2	29.3	50.6

表 2 SAC 42.5 水泥的物理-力学性能

品种	比表面积	凝结时间 /min		抗折强度 /MPa		抗压强度 /MPa	
		初凝	终凝	3d	28d	3d	28d
SAC 42.5	401	29	49	6.5	6.8	46.3	55.2

## 2 试验机理

硫铝酸盐水泥水化后的产物主要包括水化硅酸钙凝胶 (C-S-H)、铝胶 ( $\text{AH}_3$ )、单硫型水化硫铝酸钙 (AFm) 以及大量的钙矾石 (AFt)。其中,钙矾石在体系中起到骨架的作用,是硫铝酸盐水泥早期强度的主要来源,其大多以针棒状存在于水泥体系中;铝胶和 C-S-H 凝胶在水泥中起到填充空隙的作用,也是硫铝酸盐水泥后期强度的主要来源。而硫铝

酸盐水泥与普通硅酸盐水泥混合能加快水泥中硅酸钙的水化反应,使混凝土早期强度明显提高。因此将硫铝酸盐与普通硅酸盐水泥进行混合可得到具有优良性能的修补材料。

纤维增强硫铝酸盐水泥基胶凝材料粘结强度的机理如下。

(1) 应力传导作用。加入一定质量的纤维可在砂浆的浆体材料之间构建一种复杂无规则的网状结构,当受到外力时,这种网状结构可以将应力传导分散开,以此增加砂浆的抗折和粘结强度。

(2) 抑制开裂作用。加入纤维可以吸收一定的水分,在一定程度上减少砂浆的收缩,也会降低因砂浆收缩而导致的界面应力,从而抑制裂缝开裂。

本研究的技术路线为将硫铝酸盐水泥与普通硅酸盐水泥进行混合→确定硫铝酸盐水泥与普通硅酸盐水泥比例后进行纤维掺杂→确定硫铝酸盐水泥与普通硅酸盐水泥比例以及聚丙烯纤维掺量后,根据实际要求确定混凝土配合比,并测定该比例混凝土抗压强度与抗折强度,与标准要求进行对照评定。

## 3 实验与测试

参照 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法》,以新旧混凝土试件的抗折强度表征快速修补材料的粘结强度。参照 JC/T 603—2004《水泥胶砂干缩试验方法》进行水泥胶砂干燥收缩试验。参照 JC/T 2381—2016《修补砂浆》道路快速修补材料要求,总结了以下几点混凝土快速修补技术要求。

(1) 相容性。修补材料应尽可能与旧混凝土有良好的相容性,具体表现在弹性模量、颜色相近、平整度等方面。

(2) 凝结时间。为尽早开放交通,要求修补材料能够快速凝结硬化。将初凝时间控制在 20~30 min,终凝时间为 2~4 h。

(3) 早期强度。修补材料基本要求是确保其自身强度能达到规定的强度指标,1 h 抗压强度  $\geq 25.0 \text{ MPa}$ ,3 d 抗压强度  $\geq 35.0 \text{ MPa}$ 。

(4) 粘结强度。由于修补材料连接两种不同性质的材料,修补界面的粘结性能非常重要,修补材料对混凝土的粘结抗折强度  $\geq 2.8 \text{ MPa}$ 。

(5) 收缩性能。修补材料早期收缩比较严重,但旧混凝土已无收缩,在修补界面连接处很容易开裂。因此需要对修补材料的收缩性能进行控制,收缩率小,控制其 28 d 收缩率  $\leq 0.5\%$ 。

(6) 耐久性。修补材料和路面材料一样承受着

环境和荷载的综合作用,因此修补材料也应具有良好的耐磨性和耐久性。

(7) 抗扰动性能。在不中断交通对路面进行修补时,车桥耦合振动会对修补材料的强度形成过程造成影响,因此应对修补材料的抗扰动作出规定,抗扰动系数应 $\geq 30\%$ 。

(8) 环保性。减少环境污染,提倡使用环境友好型的“绿色材料”。

(9) 经济性。降低成本,在保证性能的基础上尽可能降低成本,便于推广。水泥砂浆配合比见表3。

表3 水泥砂浆配合比 质量分数/%

品种	S0	S1	S2	S3	S4
硫铝酸盐水泥	100	95	90	85	80
普通硅酸盐水泥	0	5	10	15	20

### 3.1 不同比例硫铝酸盐水泥与普通硅酸盐水泥试验与测试

在复合胶凝体系中,随着普通硅酸盐水泥掺量的不断增加,标准稠度用水量总体呈现出增加的趋势。随着水泥掺量的提高,复合胶凝体系的标准稠度用水量的增加,主要是因为掺加普通硅酸盐水泥后,复合水泥的水化反应速度有所提高。

在硫铝酸盐水泥(SAC)中掺入普通硅酸盐水泥(P·O)后,P·O-SAC复合胶凝体系的初凝、终凝时间均产生了较大幅度的缩短,且随着普通硅酸盐水泥掺量的逐渐增加,复合胶凝体系的初凝及终凝时间均逐渐减少。在硫铝酸盐水泥中掺入普通硅酸盐水泥后,明显加快了硫铝酸盐水泥的水化反应速度,降低了凝结时间。

试验发现,将低于20%掺量的普通硅酸盐水泥加入硫铝酸盐水泥中,其干燥收缩率变化不大。通过掺入不同比例的普通硅酸盐水泥制成复合胶凝砂浆,分别对不同掺量(0%、5%、10%、15%、20%及100%)及不同龄期(6h、1d、3d、7d及28d)的复合胶凝砂浆进行力学性能试验,得出以下实验结论。

(1) 在复合胶凝砂浆试件的6h抗压强度中,随着普通硅酸盐水泥掺量的增加,复合胶凝砂浆的抗压强度呈现出逐渐降低的趋势;1d、3d的抗压强度中,随着普通硅酸盐水泥掺量的提升,呈现先降低后增加再降低的趋势;在3d时普通硅酸盐水泥掺量为10%时,复合胶凝砂浆抗压强度最高;在7d、28d抗压强度中,硫铝酸盐水泥的强度增长较缓慢,但是添加了普通硅酸盐水泥后,7d、28d强度有明显提升。

(2) 通过抗压强度试验结果可知,硫铝酸盐水

泥强度增长主要集中在3d龄期之前,早期强度就能达到较高水平;通过掺加普通硅酸盐水泥之后,复合胶凝砂浆7d及28d龄期抗压强度的增长有所提高。

(3) 在复合胶凝砂浆抗折强度试验中,硫铝酸盐水泥砂浆均出现抗折强度后期倒缩的现象。而普通硅酸盐水泥能使复合胶凝体系砂浆的抗折强度实现再次增长,其趋势与抗压大致相同。

### 3.2 不同掺量聚丙烯纤维在复合胶凝体系的试验与测试

不同掺量聚丙烯纤维在复合胶凝体系的试验与测试如图1~图5所示,粘结温度见表4。

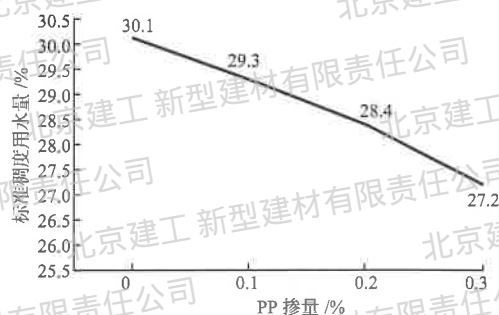


图1 标准稠度用水量

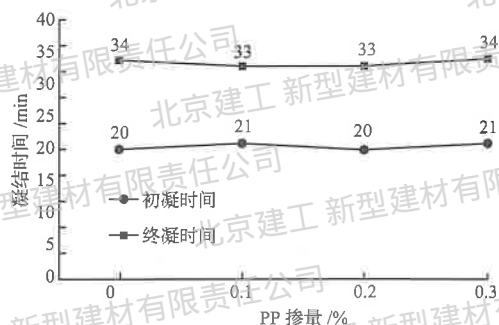


图2 凝结时间

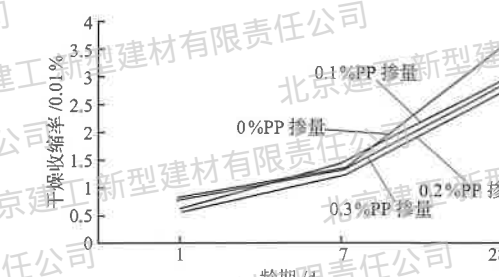


图3 干燥收缩

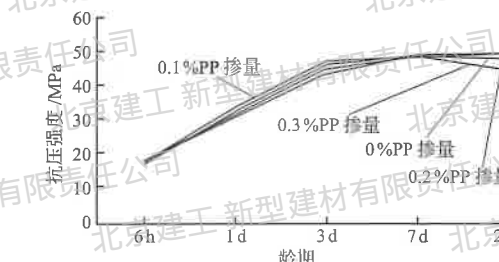


图4 抗压强度



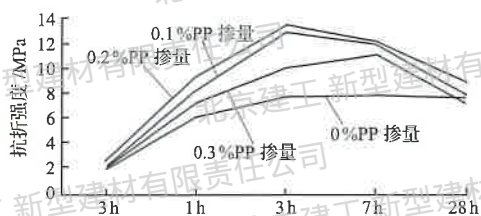


图5 抗折强度

表4 粘结强度

PP 掺量	3h	1d	3d	7d	28d	1h 粘结强度
0%	2.2	6.1	7.8	7.9	7.6	2.2
0.1%	2.3	8.2	12.8	11.8	7.9	2.6
0.2%	2.7	9.4	13.4	12.1	8.8	3.7
0.3%	2.1	7.2	10.0	11.1	7.2	3.1

### 3.3 确定复合水泥配合比及强度试验

依据标准规范 JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》进行配合比设计,要求设计强度为 C40,该混凝土用于路面修补,24h 内达到设计强度 80% 即可使用,符合早期强度高、早通车的要求。

因需要快速开放交通,优先考虑 3d 内水泥强度增长速度,因此综合对比不同比例的水泥基胶凝材料,选择 10%P·O+90%SAC 进行下一步试验。

混凝土试配强度计算:

$$f_{cu,0} \geq f_{cu,k} + 1.645\sigma \quad (1)$$

综上所述,设计出的配合比见表 5、表 6。

表5 硫铝酸盐水泥配合比 kg/m<sup>3</sup>

砂率/%	水胶比	胶材用量	水	硫铝酸盐水泥	普通硅酸盐水泥	粉煤灰	砂	石	外加剂	PP 纤维
41	0.31	516	160	416	46	52	707	1017	6.70	1.8

表6 普通硅酸盐水泥配合比 kg/m<sup>3</sup>

砂率/%	水胶比	胶材用量	水	普通硅酸盐水泥	粉煤灰	砂	石	外加剂	PP 纤维
41	0.31	516	160	462	52	707	1017	6.70	1.8

### 3.4 配合比验证

按设计配合比进行试拌,只做混凝土试件,养护到期后进行相关力学性能试验,试验结果见表 7。

## 4 分析与结论

(1) 随着 PP 纤维掺量的增加,砂浆的标准稠度用水量会有一定程度的降低,但对比分析表明,PP 纤维对砂浆凝结时间的影响较小。

表7 混凝土配合比

混凝土	抗压强度 / MPa					抗折强度 / MPa				
	6h	1d	3d	7d	28d	6h	1d	3d	7d	28d
聚丙烯纤维复合水泥基混凝土	23.1	33.6	50.4	63.1	59.2	2.1	3.4	5.2	5.4	5.8
聚丙烯纤维普通硅酸盐混凝土	—	20.1	33.9	58.2	69.3	1.3	2.2	5.1	6.2	—

(2) 随着  $V(PP)$  由 0.1% 提高到 0.3%, 试件各龄期抗压强度均无明显提升,但掺加 PP 纤维有利于试件早期抗折强度的发展。当  $V(PP)=0.2\%$  时,相对于不掺加纤维,试件各龄期抗折强度分别提高了 22.7%、54.1%、71.8%、40.5% 和 15.8%; 当  $V(PP)=0.3\%$  时,抗折强度因此出现降低趋势,可能是由于纤维过量导致纤维发生了纠缠,降低了网状结构的传导应力作用,降低了抗折强度。硫铝酸盐水泥基修补材料的抗压强度相对较高,纤维受到压力时,对裂纹的控制能力相对较小,因此对抗压强度影响很小。

(3) 相对于不掺纤维的砂浆,PP 掺杂的修补材料粘结强度得到了一定的提升。这是因为普通硫铝酸盐水泥基修补材料界面上的水灰比相对掺杂了 PP 纤维的修补材料较高,孔隙率也相对较高,而纤维的掺入不仅可以降低界面的水灰比,还可以减少收缩裂缝,因此提高了粘结强度。

通过研究不同比例硫铝酸盐水泥与普通硅酸盐水泥混合性能,确定了复合胶凝材料中性能较好的掺杂比例,并对其进行了性能测试,选择硫铝酸盐水泥:普通硅酸盐水泥=9:1,且聚丙烯纤维体积掺量为 0.2% 的胶凝材料,各项综合指标较好。

### 参考文献

- [1] 周胜波,梁军林,姚新宇,等.吸水树脂对降低早强高强快速修补混凝土自收缩优化微膨胀性的效应[J].混凝土,2018(6): 72-75.
- [2] 韩芳,代长福,付琼卿.硅酸盐水泥工艺流程探究[J].四川水泥,2020(7): 3-4.
- [3] 何欢,杨荣俊,文俊强,等.PVA 纤维增强快硬硫铝酸盐水泥基 ECC 材料性能的研究[J].硅酸盐通报,2019,38(5): 1484-1490.
- [4] 王敬宇,叶家元,程华,等.-10℃条件下缓凝剂对快硬硫铝酸盐水泥水化及强度的影响[J].硅酸盐学报,2020,48(8): 1285-1294.
- [5] 朱首宇.微波固化环氧树脂基快速修补混凝土研究进展[J].石化技术,2019,26(3): 97-99.
- [6] 李俊,李宝祥,包得祥.磷酸镁水泥-硫铝酸盐水泥复合胶凝材料的抗冻性[J].铁道建筑,2023,63(5): 154-157.
- [7] 林祥玲,苏敦磊,胡振文,等.高贝利特硫铝酸盐水泥-普通硅酸盐水泥复合胶凝材料体系性能研究[J].混凝土,2023(2): 100-104.
- [8] 桂雨,廖宜顺,徐鹏飞.外加剂对硫铝酸盐水泥基材料水化的影响研究[J].混凝土,2020(2): 111-113, 117.
- [9] 雷庆关,张城,潘崇根,等.水泥基复合胶凝材料改性聚合物修补砂浆的试验研究[J].安徽建筑大学学报,2023,31(3): 8-15.