

文章编号:1007-9629(2023)06-0670-08

缓凝剂对 PC-CSA-FDG 三元胶凝体系修补砂浆性能的影响

张国防^{1,2,3,*}, 汪江福^{1,2}, 王向红^{1,2}, 王培铭^{1,2}

(1. 同济大学先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学材料科学与工程学院, 上海 201804; 3. 上海市水务局城市管网智能评估与修复工程技术研究中心, 上海 201900)

摘要: 利用硅酸盐水泥-硫铝酸盐水泥-脱硫石膏三元胶凝体系制备修补砂浆, 研究了酒石酸、硼砂及六偏磷酸钠等缓凝剂及其复掺时对修补砂浆性能的影响. 结果表明: 酒石酸在修补砂浆中无明显的缓凝作用, 并且显著降低了修补砂浆的流动度、力学性能和干燥收缩率; 硼砂和六偏磷酸钠均能有效延长修补砂浆的凝结时间, 改善其流动度; 硼砂虽能提高修补砂浆的强度, 但增大了干燥收缩率; 六偏磷酸钠有利于修补砂浆的中后期强度, 显著降低了干燥收缩率; 3 种缓凝剂均使得修补砂浆的拉伸黏结强度有所降低, 复掺缓凝剂的影响介于单掺 2 种相应缓凝剂的作用效果之间.

关键词: 修补砂浆; 缓凝剂; 三元胶凝体系; 凝结时间; 强度; 干燥收缩率

中图分类号: TU525.9

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.06.013

Effects of Retarders on the Properties of Repair Mortar with PC-CSA-FDG Ternary Binder

ZHANG Guofang^{1,2,3,*}, WANG Jiangfu^{1,2}, WANG Xianghong^{1,2}, WANG Peiming^{1,2}

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Research Center of Intelligent Evaluation and Restoration Engineering Technology of Urban Pipe Network of Shanghai Water Bureau, Shanghai 201900, China)

Abstract: Portland cement-calcium sulphoaluminate cement-flue gas desulfurization gypsum ternary binder (PC-CSC-FDG ternary binder) was used to prepare repair mortars, and the effects of tartaric acid, borax, sodium hexametaphosphate and their mixtures on the properties of the repair mortar were investigated. The results show that tartaric acid has no retardation effect, and can significantly reduce the fluidity, mechanical properties and drying shrinkage of the repair mortar. Borax and sodium hexametaphosphate can significantly prolong the setting time and improve the fluidity of repair mortar. Borax has negligible influence on the flexural strength, but can significantly increase the compressive strength and the drying shrinkage. Sodium hexametaphosphate can slightly reduce the early strength, but improve the strength at the middle and late ages, and significantly reduce the drying shrinkage. All these three retarders yield decrease of tensile bond strength to some extent. The effects of retarder double-mixture on properties are the effect superpositions of the corresponding retarders.

Key words: repair mortar; retarder; ternary binder; setting time; strength; drying shrinkage

收稿日期: 2022-08-04; 修订日期: 2022-11-29

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2018YFD1101003); 上海市住房和城乡建设委员会科研项目(2020-001-009, 2023-005-001); 固废资源化利用与节能建材国家重点实验室开放基金

第一作者(通讯作者): 张国防(1977—), 男, 河南鹿邑人, 同济大学副教授, 博士生导师, 博士. E-mail: zgftj@sina.com

由于具有较高的强度和优异的黏结性能,修补砂浆常用于混凝土结构的修复和修补^[1]。为实现快速高效修补,修补砂浆常采用硅酸盐水泥-硫铝酸盐水泥-脱硫石膏三元胶凝体系(PC-CSA-FDG三元胶凝体系)为胶凝材料^[2-3]。该三元胶凝体系使得修补砂浆具有较高的早期强度,但同时会导致凝结较快,可操作时间较短,不利于工程应用^[4-7]。因此,常用不同种类的缓凝剂来调节该三元胶凝体系的凝结时间^[8-15]。研究表明:柠檬酸和葡萄糖酸钠能延长水泥基材料的凝结时间,但使得强度尤其是早期强度明显降低^[8-12];硼砂^[11]、酒石酸^[13]和磷酸盐类缓凝剂^[14]均能显著延长水泥基材料的凝结时间。然而,鲜有文献报道缓凝剂对修补砂浆物理力学性能和体积稳定性的影响,更甚少涉及缓凝剂复掺的作用效果。

因此,本文以硅酸盐水泥-硫铝酸盐水泥-脱硫石膏三元胶凝体系为胶凝材料,掺入乳胶粉和复配化学

添加剂来制备修补砂浆,选用干混砂浆常用的酒石酸、硼砂和六偏磷酸钠缓凝剂,探究这3种缓凝剂及其复掺对修补砂浆性能的影响规律,以期缓凝剂在该三元胶凝体系修补砂浆中的合理应用提供技术参考。

1 试验

1.1 原材料

胶凝材料包括P·II 52.5硅酸盐水泥(PC)、72.5级硫铝酸盐水泥(CSA)和半水脱硫石膏(FDG),其化学组成(质量分数,文中涉及的组成、脱砂比等除特别说明外均为质量分数或质量比)如表1所示。缓凝剂为天津致远化学试剂有限公司生产的酒石酸(Tartaric acid)、六偏磷酸钠(SHMP)以及山东优索化工科技有限公司生产的硼砂(Borax)、EVA乳胶粉,化学添加剂由聚羧酸减水剂、纤维素醚和消泡剂按质量比6:2:1复配而成。砂为ISO标准砂,拌和水为自来水。

表1 胶凝材料的化学组成

Table 1 Chemical compositions of cementitious materials

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
PC	19.19	3.84	66.71	2.24	3.18	3.36	0.10	0.79	0.25
CSA	8.74	33.91	43.42	1.77	1.64	7.92	0.06	0.48	1.49
FDG	1.24	0.62	42.20	0.44	0.23	54.28	0.02	0.07	0.04

1.2 配合比

修补砂浆胶凝材料中的硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥和脱硫石膏按照质量比80:15:5配制三元胶凝体系;胶砂比(质量比)为1:3;EVA乳胶粉和化学添

加剂的掺量分别为胶凝材料质量的3.0%和0.8%;水灰比固定为0.35.3种缓凝剂单掺时,掺量分别为0.3%、0.6%和0.9%(以胶凝材料质量计),复掺时的掺量固定为0.6%,如表2所示。

表2 修补砂浆中的缓凝剂掺量

Table 2 Contents of retarders in repair mortars

Specimen No.	Tartaric acid	Borax	SHMP	Specimen No.	Tartaric acid	Borax	SHMP	Specimen No.	Tartaric acid	Borax	SHMP
Blank				B6		0.6		A3B3	0.3	0.3	
A3	0.3			B9		0.9		A3H3	0.3		0.3
A6	0.6			H3			0.3	B3H3		0.3	0.3
A9	0.9			H6			0.6				
B3		0.3		H9			0.9				

1.3 试验方法

凝结时间、初始流动度、30 min流动度、60 min流动度以及干燥收缩率参照JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》进行测试。其中:干燥收缩率是以试件在成型养护1 d后的长度为初始长度,测定并计算得到28 d龄期内的干燥收缩率。抗折强度、抗压强度和拉伸黏结强度参照GB/T 29756—2013《干混砂浆物理性能试验方法》,养护至规定龄期后进行测试。所有试件的成型与养护均在(20±2)℃、相对湿度(60±5)%的环境下进行。

2 结果与讨论

2.1 凝结时间

修补砂浆的凝结时间如图1所示。由图1可见:

(1)基准砂浆的凝结时间为83 min;随着酒石酸掺量的增大,修补砂浆的凝结时间几乎不变。文献[13]研究发现,当三元胶凝体系中采用硬石膏和高比例硫铝酸盐水泥时,酒石酸能明显延长其凝结时间。由此可以推断,当三元胶凝体系中石膏种类不同、组成材料比例不同时,酒石酸的缓凝效果可能并

不相同.此外,修补砂浆中还有多种会吸附在水泥颗粒表面的化学添加剂,而酒石酸也主要是通过吸附在水泥颗粒表面来发挥缓凝作用,因此酒石酸与这些添加剂的竞争吸附强弱差异也可能是其在修补砂浆中缓凝效果较差的原因之一.

(2)随着硼砂或六偏磷酸钠掺量的增大,修补砂浆的凝结时间逐渐延长,在掺量为0.6%时达到最大,当掺量增至0.9%时反而略微缩短,但仍高于基准砂浆.这与文献[11-12,14,16]的研究结论一致.硼砂通过阻碍水泥熟料矿物的溶解而发挥缓凝作用,其掺量达到饱和后继续增大,阻碍作用反而略微降低,致使其缓凝效果有所降低^[12].随着六偏磷酸钠掺量的增大,水泥水化诱导期先延长后缩短,从而宏观上表现为凝结时间先延长后缩短^[16].以上分析表明,硼砂和六偏磷酸钠对修补砂浆的缓凝效果较好,六

偏磷酸钠略优,而酒石酸基本无缓凝效果.

(3)相比于基准砂浆(Blank),复掺酒石酸和硼砂时砂浆(A3B3)的凝结时间略微缩短,二者复掺并未起到缓凝作用;复掺酒石酸和六偏磷酸钠时砂浆(A3H3)的凝结时间有所延长,介于单掺2种缓凝剂之间(A6和H6);复掺硼砂和六偏磷酸钠时砂浆(B3H3)的凝结时间则明显延长,与单掺0.6%六偏磷酸钠时砂浆(H6)的凝结时间相当.由此可见,修补砂浆中复掺酒石酸和六偏磷酸钠或者复掺硼砂和六偏磷酸钠,缓凝效果基本上是单掺相应2种缓凝剂的缓凝效果叠加;复掺酒石酸和硼砂的缓凝效果反而减弱,这可能是二者产生了一定程度的相互干扰,甚至是其他添加剂共同干扰,使得二者复掺的缓凝效果有所降低.以上分析表明,就缓凝效果而言,复掺硼砂和六偏磷酸钠的效果最好,而复掺酒石酸和硼砂的效果不佳.

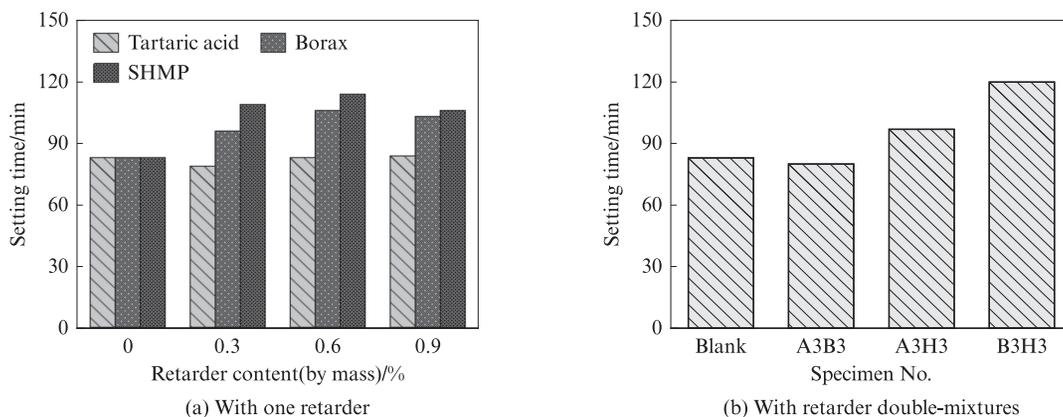


图1 修补砂浆的凝结时间
Fig. 1 Setting time of repair mortars

2.2 流动度

修补砂浆的流动度如图2所示.由图2可见:

(1)随着酒石酸掺量的增大,修补砂浆的初始流动度和60 min流动度几乎不变;30 min流动度由178 mm降低至145 mm,但酒石酸掺量变化的影响较小.随着硼砂掺量的增大,修补砂浆的初始流动度显著降低,30 min流动度略微降低,60 min流动度则是先增大后降低.原因可能在于硼砂优先吸附在水泥颗粒表面,降低了减水剂的吸附,导致减水剂的减水效果减弱,从而降低了修补砂浆的初始流动度;随着时间的延长,减水剂在水泥颗粒表面吸附量增大,使得修补砂浆的经时流动度明显增大^[11,15].随着六偏磷酸钠掺量的增大,修补砂浆的初始流动度基本不变,30 min和60 min流动度则均是逐渐增大.以上分析表明,酒石酸对修补砂浆流动度的影响较小;硼砂虽然降低了修补砂浆的初始流动度,但能明显改善经时流动度损失;六偏磷酸钠有利于提高修补砂浆

的流动度,尤其是经时流动度.

(2)相比于基准砂浆,砂浆A3B3的初始流动度和经时流动度均有所降低;砂浆A3H3的初始流动度和经时流动度均明显增大,且初始流动度最大;砂浆B3H3的初始流动度有所降低,低于其他各组,但30 min和60 min经时流动度最大,介于单掺硼砂和六偏磷酸钠之间(B6和H6).这表明,就流动度而言,复掺酒石酸和六偏磷酸钠或者复掺硼砂和六偏磷酸钠的效果较好,而复掺酒石酸和硼砂的效果不佳.

2.3 抗折强度

修补砂浆的抗折强度如图3所示.由图3可见:

(1)随着酒石酸掺量的增大,修补砂浆6 h~28 d各龄期的抗折强度均显著降低.这与文献[13]的研究结论一致.随着硼砂掺量的增大,修补砂浆各龄期的抗折强度基本不变,甚至略有提高,均不低于基准砂浆.随着六偏磷酸钠掺量的增大,修补砂浆3 d以内的抗折强度逐渐有所降低,但7、28 d抗折强度基

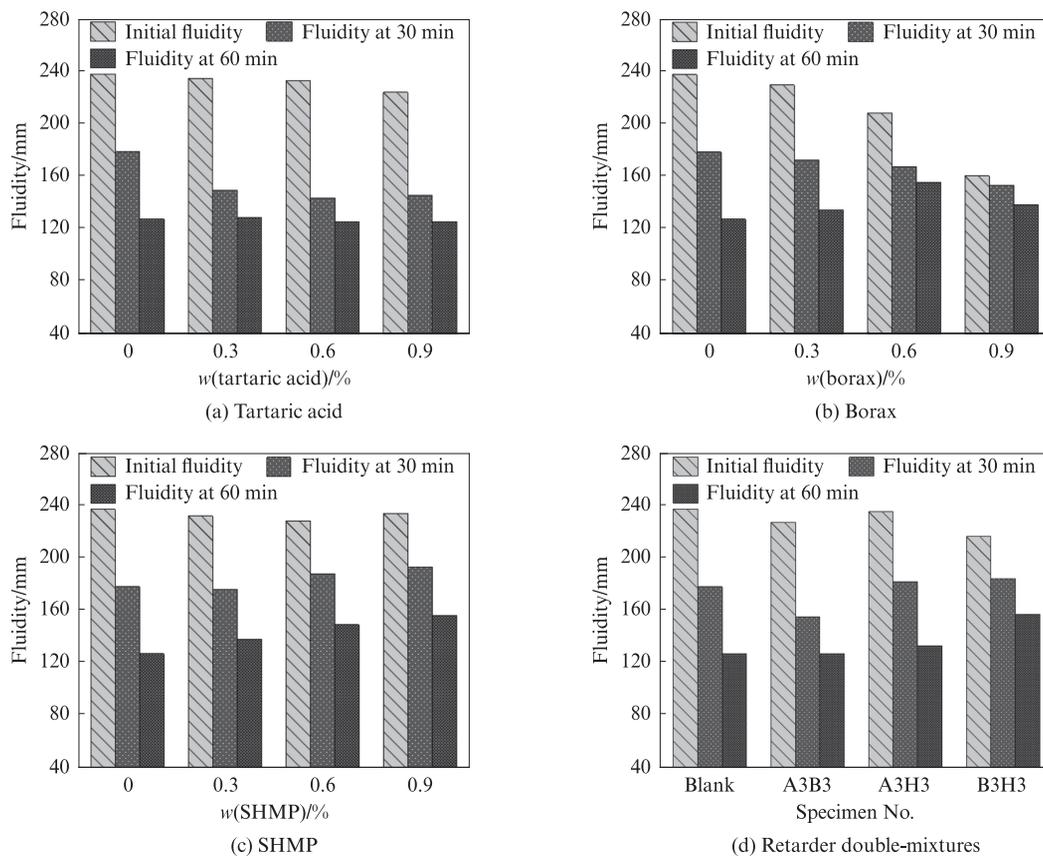


图2 修补砂浆的流动度
Fig. 2 Fluidity of repair mortars

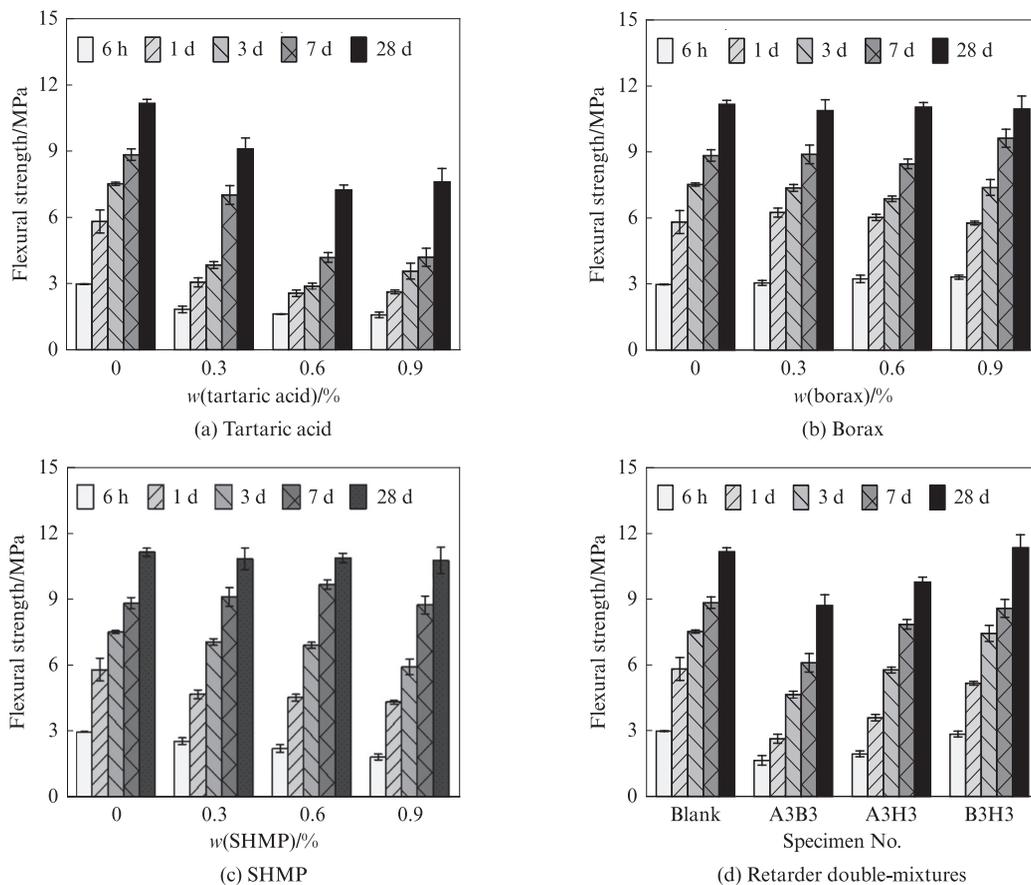


图3 修补砂浆的抗折强度
Fig. 3 Flexural strength of repair mortars

本不变,甚至有所增大.这表明,酒石酸不利于提高修补砂浆的抗折强度,硼砂对抗折强度的影响很小,六偏磷酸钠虽使得早期强度略微降低,但有利于中后期抗折强度发展.

(2)2种缓凝剂复掺时,相比于基准砂浆,砂浆A3B3的抗折强度均明显降低,28d降幅达25%;砂浆A3H3的抗折强度也均有所降低,降幅在12%~39%之间;砂浆B3H3各龄期的抗折强度与基准砂浆基本相同,变化规律与砂浆B6类似.这表明,就抗折强度而言,复掺硼砂和六偏磷酸钠时基本无负面影响,而复掺酒石酸和硼砂或者复掺酒石酸和六偏磷酸钠会导致抗折强度明显降低.

2.4 抗压强度

修补砂浆的抗压强度如图4所示.由图4可见:

(1)随着酒石酸掺量的增大,修补砂浆在6h~28d各龄期的抗压强度均显著降低.随着硼砂掺量的

增大,修补砂浆各龄期的抗压强度逐渐有所增大,增幅达10%以上.随着六偏磷酸钠掺量的增大,修补砂浆各龄期的抗压强度变化规律与抗折强度类似,6h~3d抗压强度有所降低,7d以后抗压强度有所提高.这表明,酒石酸不利于提高修补砂浆的抗压强度,硼砂能显著提高抗压强度,六偏磷酸钠虽使得早期强度略微降低,但有利于中后期抗压强度发展.

(2)2种缓凝剂复掺时,相比于基准砂浆,砂浆A3B3和A3H3的抗压强度变化规律与抗折强度类似,也是介于单掺2种缓凝剂之间;砂浆B3H3的3d内抗压强度与基准砂浆基本相同,7、28d抗压强度则比基准砂浆提高10%以上,但略低于砂浆B6.这表明,复掺硼砂和六偏磷酸钠对修补砂浆的早期抗压强度基本无负面影响,且有利于中后期抗压强度发展,而复掺酒石酸和硼砂或者复掺酒石酸和六偏磷酸钠会导致修补砂浆的抗压强度明显降低.

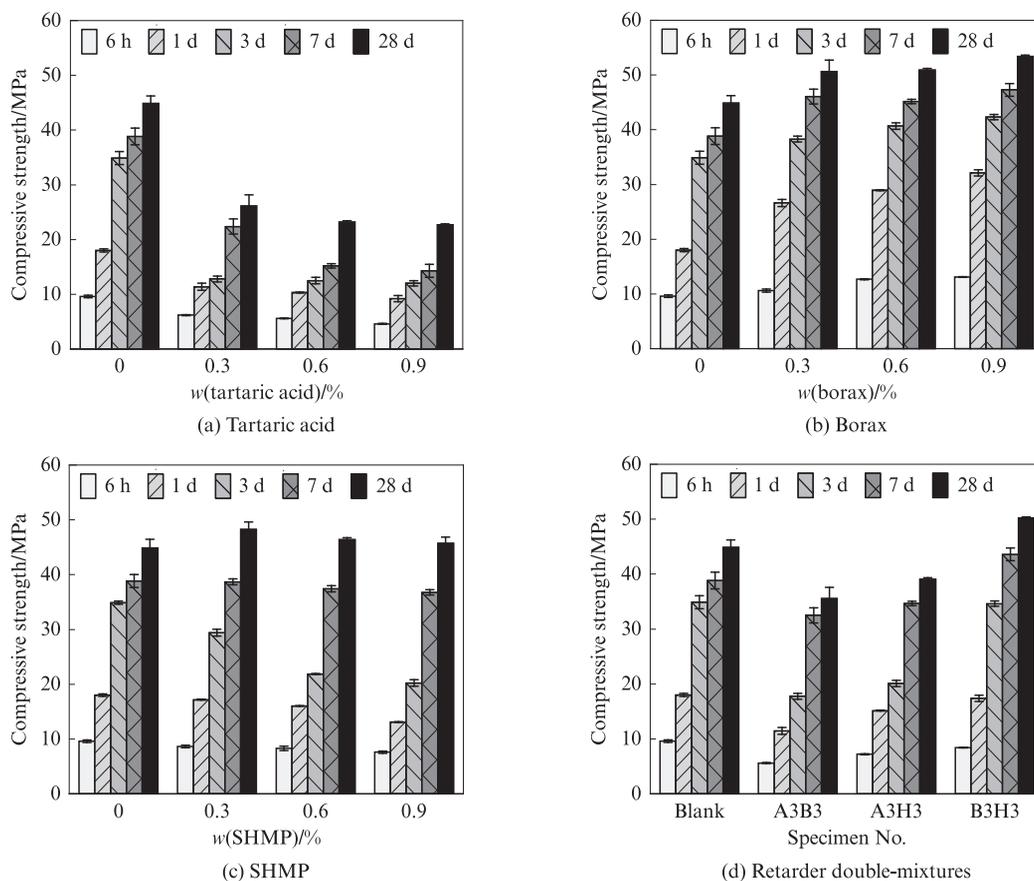


图4 修补砂浆的抗压强度
Fig. 4 Compressive strength of repair mortars

2.5 拉伸黏结强度

修补砂浆的拉伸黏结强度如图5所示.由图5可见:

(1)随着龄期的延长,修补砂浆的拉伸黏结强度逐渐增大.基准砂浆各龄期的拉伸黏结强度均最大.

相比于基准砂浆,单掺酒石酸的修补砂浆各龄期拉伸黏结强度显著降低,降幅在30%~56%之间;单掺硼砂时修补砂浆的拉伸黏结强度也有所降低,28d强度降幅仅为8.7%;单掺六偏磷酸钠时,修补砂浆的1、3d拉伸黏结强度显著降低,28d时降幅较小(为

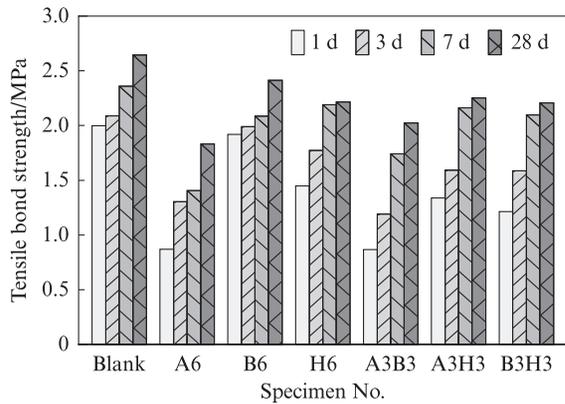


图5 修补砂浆的拉伸黏结强度
Fig. 5 Tensile bond strength of repair mortars

16%)。各组修补砂浆的28 d拉伸黏结强度均大于1.6 MPa,远超过JC/T 2381—2016《修补砂浆》的要求。这表明,3种缓凝剂使得修补砂浆的拉伸黏结强度出现不同程度降低;就拉伸黏结强度降幅而言,酒石酸>六偏磷酸钠>硼砂。

(2)2种缓凝剂复掺时,砂浆A3B3的1、3 d拉伸黏结强度与砂浆A6基本相同,随着龄期的延长,强度介于单掺酒石酸与单掺硼砂之间,但28 d强度为基准砂浆的76%;砂浆A3H3或B3H3的3 d以后

拉伸黏结强度与砂浆H6基本相同。这表明,复掺缓凝剂也均会导致修补砂浆各龄期拉伸黏结强度降低。其中,复掺酒石酸和六偏磷酸钠与复掺硼砂和六偏磷酸钠的强度基本相同,复掺酒石酸和硼砂时最低。

2.6 干燥收缩率

修补砂浆的干燥收缩率如图6所示。由图6可见:

(1)无论是否掺加缓凝剂,修补砂浆的干燥收缩率均是随着龄期的延长而逐渐变大。随着酒石酸掺量的增大,修补砂浆各龄期的干燥收缩率逐渐降低,酒石酸掺量为0.6%和0.9%时甚至使得修补砂浆3 d以内时产生微膨胀;0.9%酒石酸使得28 d干燥收缩率降幅高达84%。随着硼砂掺量的增大,干燥收缩率呈现出逐渐增大的趋势。随着六偏磷酸钠掺量的增大,干燥收缩率则呈现出逐渐降低的趋势;0.3%掺量时修补砂浆的干燥收缩率与基准砂浆基本一致,0.6%和0.9%掺量时则显著低于基准砂浆。这表明,酒石酸和六偏磷酸钠能显著降低修补砂浆的干燥收缩率,酒石酸的影响作用更为明显;硼砂则增大了修补砂浆的干燥收缩率。

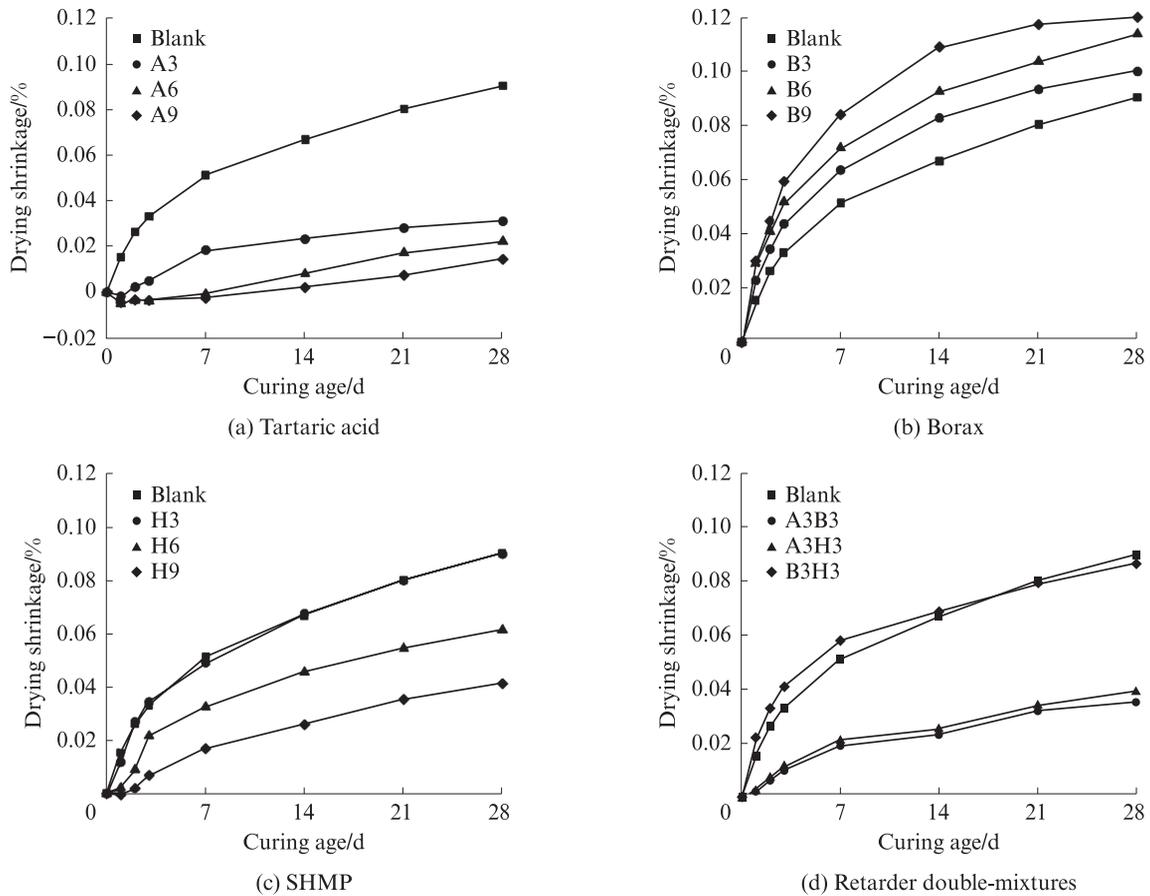


图6 修补砂浆的干燥收缩率
Fig. 6 Drying shrinkage of repair mortars

(2)2种缓凝剂复掺时,相比于基准砂浆,砂浆A3B3与A3H3的干燥收缩率均明显降低,28d时降幅分别达61.3%和56.8%,介于单掺2种相应缓凝剂之间;砂浆B3H3在14d内干燥收缩率略高于基准砂浆,介于单掺硼砂和六偏磷酸钠组(B6和H6)之间,但28d干燥收缩率已低于基准砂浆.这表明,复掺酒石酸和硼砂或者复掺酒石酸和六偏磷酸钠能显著降低修补砂浆的干燥收缩率,而复掺硼砂和六偏磷酸钠则提高了干燥收缩率.

酒石酸会导致修补砂浆的抗折强度和抗压强度降低,主要在于其能增大水泥砂浆的总孔隙率^[13];酒石酸能降低修补砂浆的干燥收缩率,原因可能在于其虽然导致总孔隙率增大,但能显著降低毛细孔的数量,优化孔径分布^[13].硼砂能导致修补砂浆的抗折强度和抗压强度提高,主要在于硼砂能使得水泥水化产物钙矾石晶体生长更短粗,相互搭接更紧密^[12,17];但随着龄期的延长,钙矾石会逐渐转变为单硫型水化硫铝酸钙,从而导致修补砂浆的干燥收缩率增大.六偏磷酸钠能有效延缓水泥的水化,使得早期水化产物尤其是钙矾石的生成量有所减少,从而导致早期强度降低^[14];随着养护龄期的延长,六偏磷酸钠缓凝效果消失,水泥水化产物尤其是钙矾石的生成量逐渐增多,修补砂浆结构也更致密,从而有利于中后期强度的发展以及干燥收缩率的降低.

3 结论

(1)3种缓凝剂对PC-CSA-FDG三元胶凝体系修补砂浆的性能具有显著而不同的影响.酒石酸无明显的缓凝作用,硼砂和六偏磷酸钠能显著延长修补砂浆的凝结时间,六偏磷酸钠的缓凝效果略优于硼砂.

(2)酒石酸使修补砂浆的经时流动度、力学性能与干燥收缩率显著降低;硼砂和六偏磷酸钠能显著改善修补砂浆的流动度;硼砂对修补砂浆的抗折强度影响较小,能显著提高抗压强度,但导致干燥收缩率增大;六偏磷酸钠虽使得修补砂浆的早期强度略微降低,但有利于中后期强度的发展,且能显著降低干燥收缩率.3种缓凝剂均在一定程度上降低了修补砂浆的拉伸黏结强度.

(3)2种缓凝剂复掺时,复掺硼砂和六偏磷酸钠的作用效果最佳,具体表现为其能有效延长修补砂浆的凝结时间,并有利于改善经时流动度和中后期强度,干燥收缩率也仅略微增大;作用效果介于单掺硼砂和六偏磷酸钠之间.而复掺酒石酸和硼砂或者

复掺酒石酸和六偏磷酸钠的作用效果不佳.

参考文献:

- [1] GUO T X, WENG X Z, LIU C, et al. Evaluation of the bonding and fatigue properties of an innovative rapid repair structure for concrete pavement [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 235:117484.
- [2] 孙科科. 硅酸盐水泥—硫铝酸盐水泥基修补材料及防腐抗渗性能研究[D]. 济南: 济南大学, 2017.
SUN Keke. Study on anticorrosion and impermeability of repaired materials with blending ordinary Portland cement and calcium sulphoaluminate cement[D]. Jinan: University of Jinan, 2017. (in Chinese)
- [3] PELLETIER-CHAIGNAT L, WINNEFELD F, LOTHENBACH B, et al. Influence of the calcium sulphate source on the hydration mechanism of Portland cement-calcium sulphoaluminate clinker-calcium sulphate binders[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33(5):551-561.
- [4] 廖宜顺, 桂雨, 柯福隆, 等. 温度对硫铝酸盐水泥抗压强度、电阻率与化学收缩的影响[J]. *建筑材料学报*, 2018, 21(3):478-484.
LIAO Yishun, GUI Yu, KE Fulong, et al. Effect of temperature on compressive strength, electrical resistivity and chemical shrinkage of calcium sulphoaluminate cement [J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(3):478-484. (in Chinese)
- [5] 徐玲琳, 杨晓杰, 王培铭, 等. 养护温度对硫铝酸盐水泥基三元体系微结构演变的影响[J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(6):983-988.
XU Linglin, YANG Xiaojie, WANG Peiming, et al. Influence of curing temperature on the microstructure evolution of calcium sulfoaluminate cement based ternary blends [J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19(6):983-988. (in Chinese)
- [6] BERTOLA F, GASTALDI D, IRICO S, et al. Influence of the amount of calcium sulfate on physical/mineralogical properties and carbonation resistance of CSA-based cements[J]. *Cement and Concrete Research*, 2022, 151:106634.
- [7] ZHANG G F, QIU D W, WANG S X, et al. Effects of plastic expansive agent on the fluidity, mechanical strength, dimensional stability and hydration of high performance cementitious grouts [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 243:118204.
- [8] BELHADI R, GOVIN A, GROSSEAU P. Influence of polycarboxylate superplasticizer, citric acid and their combination on the hydration and workability of calcium sulfoaluminate cement [J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 147:106513.
- [9] ZOU D H, ZHANG Z J, WANG D N. Influence of citric acid and sodium gluconate on hydration of calcium sulfoaluminate cement at various temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 263:120247.
- [10] TAN H B, ZOU F B, MA B G, et al. Effect of competitive adsorption between sodium gluconate and polycarboxylate superplasticizer on rheology of cement paste[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 144:338-346.
- [11] ZAJAC M, SKOCEK J, BULLERJAHN F, et al. Effect of

- retarders on the early hydration of calcium-sulpho-aluminate (CSA) type cements[J]. *Cement and Concrete Research*, 2016, 84(6):62-75.
- [12] 王琴,李时雨,潘硕,等.不同缓凝剂对高贝利特硫铝酸盐水泥性能的影响及机制[J].*建筑材料学报*,2020,23(2):239-247. WANG Qin, LI Shiyu, PAN Shuo, et al. Influence and mechanism of different retarders on the performance of high belite sulphoaluminate cement[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(2):239-247. (in Chinese)
- [13] TELESCA A, MARROCCOLIM, COPPOLA L, et al. Tartaric acid effects on hydration development and physico-mechanical properties of blended calcium sulphoaluminate cements[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 124:104275.
- [14] TAN H B, ZOU F B, LIU M, et al. Effect of the adsorbing behavior of phosphate retarders on hydration of cement paste[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(9):04017088.
- [15] TAN H B, GUO Y L, ZOU F B, et al. Effect of borax on rheology of calcium sulphoaluminate cement paste in the presence of polycarboxylate superplasticizer[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 139:277-285.
- [16] PANG X Y, BOONTHEUNG P, BOUL P J. Dynamic retarder exchange as a trigger for Portland cement hydration[J]. *Cement and Concrete Research*, 2014, 63:20-28.
- [17] BULLERJAHN F, ZAJAC M, SKOCEK J, et al. The role of boron during the early hydration of belite ye'elite ferrite cements [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 215:252-263.

(上接第 669 页)

- A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 186:933-942.
- [51] SALAS D A, RAMIREZ A D, RODRIGUEZ C R, et al. Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: A literature review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 113:114-122.
- [52] HUIJBRETS M A J. Application of uncertainty and variability in LCA. Part I: A general framework for the analysis of uncertainty and variability in life cycle assessment[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1998, 3(5):273-280.
- [53] 刘兵.基于机器学习的再生混凝土强度预测和LCA-LCC生态效率评价[D].北京:北京交通大学,2021.
- LIU Bing. Recycled aggregate concrete strength prediction and eco-efficiency evaluation of LCA-LCC based on machine learning [D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2021. (in Chinese)