

韧性纤维增强聚合物砂浆的粘结修复与收缩耐久性能

李 贺¹ 罗健林^{1,2*} 李秋义^{2,3} 刘 超¹ 陈帅超¹

(1.青岛理工大学土木工程学院,青岛 266033;2.蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心,青岛 266033;3.青岛农业大学建筑工程学院,青岛 266109)

摘 要 为有效解决严酷环境侵蚀引起的混凝土结构保护层脱落及钢筋锈蚀问题,亟待研制高性能防护砂浆。本研究采用 $L_9(3^3)$ 的正交实验法来研究聚胶比、砂胶比和 PVA 纤维掺量 3 个变量对修补砂浆的抗折强度、抗压强度、粘结强度和收缩率的影响。综合考虑各种因素对修补砂浆粘接强度的影响和实际应用,确定优化配合比:聚胶比为 15%,砂胶比为 1.5:1,纤维掺量为 1.5 kg/m³。

关键词 聚合物砂浆,纤维分散,正交实验,粘结强度,收缩性能

Bonding repair and shrinkage durability of ductile fiber-reinforced polymer mortar

Li He¹ Luo Jianlin^{1,2} Li Qiuyi^{2,3} Liu Chao¹ Chen Shuaichao¹

(1.School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033;2.Collaborative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao Technological University, Qingdao 266033;3.School of Architecture Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109)

Abstract In order to effectively solve the problems on protection layer shedding and steel corrosion of concrete structure aroused by harsh environmental erosion, the development of high-performance protection mortar has become a major issue. The orthogonal experiment of $L_9(3^3)$ was used to study the effects of three factors, including polymer/cement ratio (P/C), sand/cement ratio (S/C) and PVA fiber loading (w_{PVA}), on the flexural strength, compressive strength, bond strength and shrinkage rate of repaired mortar. Comprehensively considering various factors on bond strength and practical application of the repair mortar, given optimal mix ratio was: P/C, S/C, w_{PVA} was at 15%, 1.5:1, 1.5 kg/m³, respectively.

Key words polymer mortar, fiber dispersion, orthogonal experiment, bond strength, shrinkage durability

随着国家“一带一路”中的海洋大战略及沿海经济快速发展,一些诸如桥墩、烟囱、水塔等工业构筑物不断兴建,混凝土材料成为用量最大、适用范围最广的建筑材料^[1]。随着应用范围的扩大,各类工程对于混凝土材料的性能要求越来越高,混凝土防护问题成为热门课题。特别是在恶劣的高温高湿、高盐污、高酸雾结露环境下,相应结构常发生混凝土保护层脱落及钢筋锈蚀的问题。这些问题不仅会破坏混凝土结构,导致使用寿命急剧下降,甚至还会引发

灾难性的后果^[2-5]。

为了改善混凝土侵蚀破坏失去其本身性能的这一缺点,国内外众多学者进行了修补砂浆的探索,并且对改性修补砂浆进行了大量的理论分析和实验研究,研究发现利用聚合物和韧性纤维改性砂浆可以提高修补砂浆的使用效果^[6]。我国真正研究聚合物砂浆始于 20 世纪 70 年代中期。时至今日,丁苯胶乳、氯偏乳液、聚醋酸乙烯乳液、丙苯乳液和丙烯酸酯共聚乳液等适用水泥基复合材料的聚合物已经研

基金项目:国家自然科学基金(51578297,51878364,51878366);山东省自然科学基金重大基础研究项目(ZR2017ZC0737);山东省自然科学基金面上项目(ZR2018MEE043);青岛市政府采购项目(402019201700013);受高等学校学科创新引智计划国家“111”项目资助

作者简介:李贺(1993-),男,硕士研究生,主要从事建筑材料方面的研究。

联系人:罗健林(1979-),男,博士,副教授,主要从事复合材料与结构的研究。

发出来,并广泛应用于混凝土修补、防水、防腐等工程领域^[7-8]。近年来,众多发达国家也开始大量使用纤维来代替钢筋网片来控制混凝土的收缩,并且应用在水泥基材料里的纤维已开发出了许多种类,主要分为合成纤维和天然纤维^[9-11]。

同时,国内外众多学者对纤维和聚合物分别加入到砂浆进行了研究,并且取得了一定成效。为了更好地发挥修补砂浆的使用性能,提高其对混凝土的保护能力,进而提高混凝土的耐久性和使用性。本研究将聚乙烯醇(PVA)纤维和聚苯丙乳液协同加入快硬修补砂浆,制备出一种韧性纤维增强聚合物修补砂浆,并尝试将其涂覆于恶劣环境下的构筑物表面,有效延缓了结构钢筋腐蚀及防护层剥蚀问题。

1 实验部分

1.1 原料及仪器

1.1.1 原料

水泥(C)采用山水水泥厂生产的 42.5 级快硬硫铝酸盐水泥,其化学组成见表 1。

表 1 水泥的主要化学成分 %

水泥品种	CaO	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	R ₂ O	Loss
SAC	42.13	34.29	13.02	1.61	1.26	0.84	0.15

砂(S):普通河砂,细度模数 2.5,符合《聚合物改性水泥砂浆实验规程》(DL/T 5126—2001)的要求。

高效减水剂(Sup):山东省建科院生产的聚羧酸高效减水剂,减水率为 30%。

聚合物(P):聚苯丙乳液,乳白色液体,带蓝光。固体含量为 40%~50%,粘度为 80~2000MPa,单体残留量为 0.5%,pH=8~9。苯丙乳液附着力好,胶膜透明,耐水、耐油、耐热、耐老化性能良好。

聚乙烯醇纤维(F):高强高模 PVA 纤维,上海影佳实业发展有限公司生产,性能指标如表 2 所示。

表 2 PVA 纤维物理性能指标

密度/ (g·cm ⁻³)	抗拉强度/ MPa	纤维直径/ μm	抗拉弹性 模量/GPa	长度/ mm	断裂延伸 率/%
0.90	515	40	35	12	20

1.1.2 仪器

水泥胶砂搅拌机(JJ-5 型),无锡建筑材料仪器机械厂;标准恒温恒湿养护箱(YH-42B 型),无锡建

筑材料仪器机械厂;微机控制电子万能试验机(WDW-3C 型),上海华龙测试仪器有限公司;SANS 电子万能试验机(CMT-5504 型),美特斯工业系统有限公司;立式砂浆收缩仪(SP-175 型),河北晟兴仪器设备有限公司。

1.2 实验配合比及制备工艺

为测试聚胶比(P/C)、砂胶比(S/C)、纤维掺量(ω_{PVA})对修补砂浆力学性能的影响,本研究采用正交实验设计来得到最优的配合比。配合比如表 3 所示, $L_9(3^3)$ 正交设计如表 4 所示。

表 3 实验配合比正交设计表

因素	水平		
	1	2	3
A 聚胶比/%	0	8	15
B 砂胶比	1:1	1.5:1	2:1
C 纤维掺量/(kg·m ⁻³)	0	1.5	3

表 4 $L_9(3^3)$ 正交试验设计

实验 编号	影响因素		
	A 聚胶比/%	B 砂胶比	C 纤维掺量/(kg·m ⁻³)
FPM1	0	1:1	0
FPM2	0	1.5:1	1.5
FPM3	0	2:1	3.0
FPM4	8	1:1	1.5
FPM5	8	1.5:1	3.0
FPM6	8	2:1	0
FPM7	15	1:1	3.0
FPM8	15	1.5:1	0
FPM9	15	2:1	1.5

聚合物砂浆的搅拌采用静浆裹砂工艺。具体按照 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》中规定的搅拌方法搅拌^[12];掺加聚合物乳液和韧性纤维时,先把聚合物乳液加入到搅拌好的砂浆内,低速搅拌 30s;再加入韧性纤维,低速搅拌 60s;然后再快速搅拌 30s,装入试模在振动台上振实成型。

抗折、抗压强度试块养护 12h 拆模,拆模后把试块放在砂浆养护箱当中养护,达到龄期后分别测试其性能。

1.3 砂浆性能测试

按《聚合物改性水泥砂浆试验规程》(DL/T 5126—2001)的规定成型和养护 40mm×40mm×160mm 的试件,并依照 GB/T 17671—1999 规范规

定方法测试其各个龄期的抗折、抗压强度值,其试件抗压强度测试装置及典型断裂面如图 1 所示。

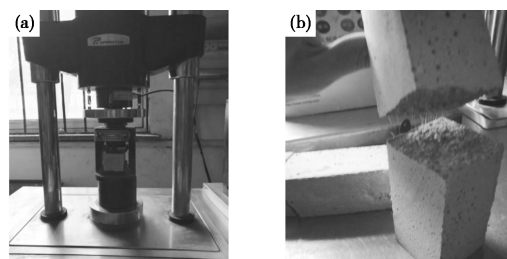


图 1 砂浆试件抗压强度测试装置(a)及典型断裂面(b)

按 DL/T 5126—2001 的规定成型和养护粘结抗拉试件,试件上部为聚合物改性砂浆,尺寸为 $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 10\text{mm}$;下部为基体砂浆,尺寸为 $70\text{mm} \times 70\text{mm} \times 20\text{mm}$,试件如图 2(a)所示。其中,基体砂浆配合比 $C:S:W:\text{Sup}=1:2:0.4:0.008$,平均抗压强度 $\geq 60.0\text{MPa}$ 。

粘结试件 9 个为一组,利用电子万能实验机施加拉力,记下试件被拉坏值。拉断过程如图 2(b)所示,当有效值不足 5h 时,重新做该实验。相应典型拉断面如图 2(c)所示。

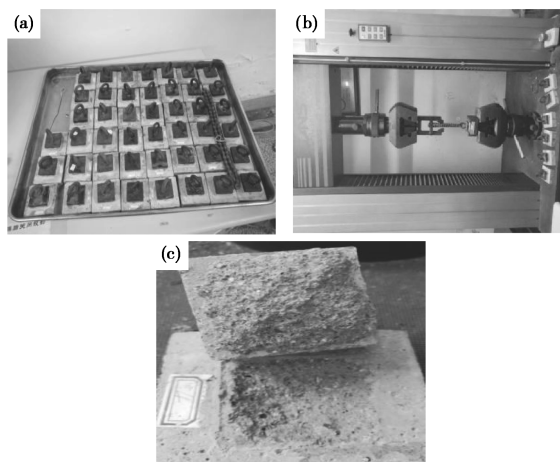


图 2 砂浆试件粘接强度实验
[(a)试件;(b)测试装置;(c)试件拉断面]

按 DL/T 5126—2001 的规定成型和养护砂浆收缩变形试件,试件采用 40mm 型号的养护砂浆收缩变形试的棱柱体。取 3 个试件的长度方向变化率平均值作为实验结果。

2 结果与讨论

2.1 抗折、抗压强度研究

表 5 为 9 组砂浆的抗折强度及其方差分析。由表可见,3 个因素对砂浆的抗折强度影响程度为 $P/C > S/C > \omega_{\text{PVA}}$ 。

表 5 9 组 FPM 砂浆的抗折强度及其方差分析

水平	因素			抗折强度/ MPa
	A 聚胶比 (P/C)	B 砂胶比 (S/C)	C 纤维掺量 (ω_{PVA})/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	
FPM1	1(0%)	1(1:1)	1(0)	8.5
FPM2	1(0%)	2(1.5:1)	2(1.5)	7.6
FPM3	1(0%)	3(2:1)	3(3)	5.8
FPM4	2(8%)	1(1:1)	2(1.5)	10.2
FPM5	2(8%)	2(1.5:1)	3(3)	9.4
FPM6	2(8%)	3(2:1)	1(0)	7.3
FPM7	3(15%)	1(1:1)	3(3)	11.6
FPM8	3(15%)	2(1.5:1)	1(0)	10.9
FPM9	3(15%)	3(2:1)	2(1.5)	9.9
T1	21.9	30.3	26.7	$T=81.2$
T2	26.9	27.9	27.7	
T3	32.4	23	26.8	
t1	7.3	10.1	8.9	
t2	9.0	9.3	9.2	
t3	10.8	7.7	8.9	
最优水平	A3	B1	C2	
R	10.5	7.3	1	
主次顺序	$A > B > C$			

聚合物乳液的加入对砂浆的抗折强度有提高作用,原因是聚合物乳液加入到砂浆中并且逐渐分散于砂浆中,当水泥水化时,水耗尽之后聚合物乳液形成丝状的薄膜贯穿于水泥浆中,从而提高了砂浆的抗折强度。由表可见,随着 P/C 从 $0\% \rightarrow 8\% \rightarrow 15\%$,砂浆的抗折强度从 $7.3\text{MPa} \rightarrow 9.0\text{MPa} \rightarrow 10.8\text{MPa}$ 。 S/C 对水泥胶砂试块的抗折强度的影响与拌合物的密实程度有关, S/C 较小时,平均浆体厚度增加,整个拌合物连接为一个有效的整体,砂粒与浆体间的黏结力大大增加,抗折强度就会明显增大。反之, S/C 较大时,抗折强度则降低。但这并不意味着 S/C 越小抗折强度越高。在砂浆中砂可以起到很好的骨架作用,并传递应力,故 S/C 过小也会影响抗折强度。韧性纤维的断裂伸长率远大于砂浆的断裂伸长率,因此在砂浆受力时通过韧性纤维可以有效地抑制大面积裂缝的出现,并且减轻微裂缝的应力集中而提高砂浆的抗折强度。由表可见,随着 ω_{PVA} 从 $0\text{kg}/\text{m}^3 \rightarrow 1.5\text{kg}/\text{m}^3 \rightarrow 3\text{kg}/\text{m}^3$,抗折强度从 $8.9\text{MPa} \rightarrow 9.2\text{MPa} \rightarrow 8.9\text{MPa}$,呈现先增大后减小的趋势。综合考虑各种因素对砂浆抗折强度的影响和经济性等因素,选择 P/C 、 S/C 和 ω_{PVA} 的最佳用量分别为 15% 、 $1.5:1$ 和 $1.5\text{kg}/\text{m}^3$ 。

表 6 为 9 组砂浆的抗压强度及其方差分析。由

表可见,3 个因素对砂浆的抗压强度影响程度为 $P/C>S/C>\omega_{PVA}$ 。

表 6 9 组 FPM 砂浆的抗压强度及其方差分析

水平	因素			抗压强度/ MPa
	A 聚胶比 (P/C)	B 砂胶比 (S/C)	C 纤维掺量 (ω_{PVA})/(kg·m ⁻³)	
FPM1	1(0%)	1(1:1)	1(0)	71.2
FPM2	1(0%)	2(1.5:1)	2(1.5)	61
FPM3	1(0%)	3(2:1)	3(3)	38.7
FPM4	2(8%)	1(1:1)	2(1.5)	45.4
FPM5	2(8%)	2(1.5:1)	3(3)	44.3
FPM6	2(8%)	3(2:1)	1(0)	31.1
FPM7	3(15%)	1(1:1)	3(3)	35.1
FPM8	3(15%)	2(1.5:1)	1(0)	35.6
FPM9	3(15%)	3(2:1)	2(1.5)	34.4
T1	170.9	151.7	137.9	$T=396.8$
T2	120.8	140.9	140.8	
T3	105.1	104.2	118.1	
t1	57.0	50.6	46.0	
t2	40.3	47.0	46.9	
t3	35.0	34.7	39.4	
最优水平	A1	B1	C2	
R	65.8	47.5	22.7	
主次顺序	$A>B>C$			

由表可见,聚合物乳液的掺加量 P/C 从 $0\% \rightarrow 8\% \rightarrow 15\%$ 变化时,砂浆的抗压强度变化趋势为 $57.0\text{MPa} \rightarrow 40.3\text{MPa} \rightarrow 35.0\text{MPa}$,明显看出随着聚合物乳液用量的增加,砂浆的抗压强度逐渐减小。说明聚合物乳液的加入对砂浆的抗压强度不利,因此在应用中必须控制聚合物乳液用量。 S/C 对砂浆抗压强度的影响与抗折强度的影响机理相同,随着 S/C 从 $1:1 \rightarrow 1.5:1 \rightarrow 2:1$ 的变化,抗压强度由 $50.6\text{MPa} \rightarrow 47.0\text{MPa} \rightarrow 34.7\text{MPa}$,可见砂浆抗压强度随 S/C 的增大而减小。在一定的掺量范围内掺加韧性纤维对抗压强度略有提高,体现了韧性纤维的填充作用,可限制砂浆内部裂缝的形成与发展,从而提高砂浆的密实度,增大抗压强度;但是,若 ω_{PVA} 过大,界面上会出现很多微小的裂缝,这些微小的裂缝使混凝土中产生内部缺陷,使抗压强度变小^[13-16]。综上所述,随着 P/C 的增大和 S/C 的增大,砂浆的抗压强度呈下降趋势;而随着 ω_{PVA} 的增加,砂浆抗压强度先上升后下降。综合考虑各种因素对砂浆抗压强度的影响和经济性等因素, P/C 、 S/C 和 ω_{PVA} 的最佳用量分别取 0% 、 $1.5:1$ 和 1.5kg/m^3 。

2.2 各影响因素对砂浆粘结强度的研究

表 7 为 9 组砂浆的粘结强度及其方差分析。由表可见,3 个因素对砂浆的粘结强度影响程度为 $P/C>S/C>\omega_{PVA}$ 。

表 7 9 组 FPM 砂浆的粘结强度及其方差分析

水平	因素			粘结强度/ MPa
	A 聚胶比 (P/C)	B 砂胶比 (S/C)	C 纤维掺量 (ω_{PVA})/(kg·m ⁻³)	
FPM1	1(0%)	1(1:1)	1(0)	1.33
FPM2	1(0%)	2(1.5:1)	2(1.5)	1.28
FPM3	1(0%)	3(2:1)	3(3)	1.23
FPM4	2(8%)	1(1:1)	2(1.5)	2.41
FPM5	2(8%)	2(1.5:1)	3(3)	2.48
FPM6	2(8%)	3(2:1)	1(0)	2.05
FPM7	3(15%)	1(1:1)	3(3)	2.46
FPM8	3(15%)	2(1.5:1)	1(0)	2.58
FPM9	3(15%)	3(2:1)	2(1.5)	2.13
T1	3.84	6.2	5.96	$T=17.95$
T2	6.94	6.34	5.82	
T3	7.17	5.41	6.17	
t1	1.28	2.07	1.99	
t2	2.31	2.11	1.94	
t3	2.39	1.80	2.06	
优水平	A3	B2	C3	
R	3.33	0.93	0.35	
主次顺序	$A>B>C$			

通过标准实验方法,测得砂浆的粘结强度数据并进行了分析,由表 7 可以看出,掺加聚合物乳液可大幅提高砂浆的粘结强度,充分发挥了聚合物乳液自身带有粘结性能的优点,粘结强度最大可达到 2.39MPa ;随着 S/C 的增大,粘结强度先增加后减小;而掺入韧性纤维,则随 ω_{PVA} 的增加粘结强度呈现先减小后增大的趋势。综合考虑各种因素对修补砂浆粘接强度的影响和实际应用等因素, P/C 、 S/C 和 ω_{PVA} 的最佳用量分别取 15% 、 $1.5:1$ 和 1.5kg/m^3 。

2.3 各影响因素对砂浆收缩率的研究

修补材料需要填补混凝土破坏所留下的伤疤^[17-19]。若要将砂浆更好地应用到实际结构修补工程中,必须保证砂浆的收缩率符合规定。由于混凝土基体体积已经稳定,而修补砂浆则需要收缩,这就会导致砂浆与被修补结构表面产生界面应力,从而影响粘结强度,进而影响被修补结构的耐久性,失去了使用修补砂浆的意义^[20-21]。

聚合物乳液修补砂浆干缩实验结果如图 3 所示。从图中可以看出,随着时间的增加,收缩率曲线

在 1~14d 变化幅度比较大;14~28d,折线图变化趋势趋于平缓,说明砂浆的收缩主要集中在前 14d。从 9 条曲线可以看出,随着 P/C 和 S/C 的增加,收缩率呈现降低趋势;而随着 ω_{PVA} 的增加,砂浆的收缩率呈现先减小后增大的趋势;在没有掺加聚合物乳液和韧性纤维时的砂浆收缩率最大,28d 达到 0.023%;当 S/C 为 1.5:1 时,掺加 15% 聚合物乳液和 1.5kg/m³ 韧性纤维时收缩率最小,为 0.009%。综合考虑各种因素对砂浆修补防渗和耐久性等因素,P/C、S/C 和 ω_{PVA} 的最佳掺量分别取 15%,1.5:1 和 1.5kg/m³。

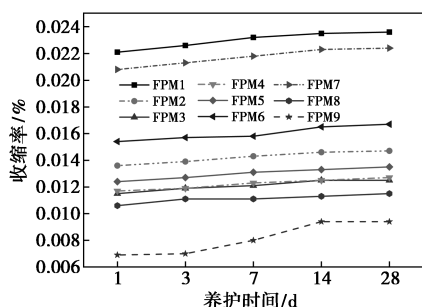


图 3 龄期 1~28d 内 9 组砂浆的长度收缩率变化曲线

3 结论

(1) 聚合物乳液加入到砂浆中时,当水泥水化后,聚合物乳液形成丝状薄膜,从而提高了砂浆的抗折强度;在一定范围内,随着 S/C 的增大,砂浆的抗折强度有减小趋势;随着纤维掺量的增加,砂浆的抗折强度则先增大后减小。

(2) 随着 P/C 和 C/S 的增大,砂浆的抗压强度呈现下降趋势,在聚合物乳液掺量为 0 的时候最大;随着纤维用量的增加,砂浆的抗压强度呈现先增加后减小的趋势。综合考虑各种因素对砂浆抗压强度的影响和经济性等因素,P/C、S/C 和 ω_{PVA} 的最佳用量分别为 0%,1.5:1 和 1.5kg/m³。

(3) P/C 越大,砂浆的粘结强度越大,可见聚合物乳液对砂浆的粘结强度有大幅度的提高作用;随着 S/C 的增大,粘结强度先增加后减小;而随着纤维用量的增加,砂浆粘结强度则呈现先减小后增大的趋势。

(4) 随着 P/C 和 S/C 的增加,砂浆的长度收缩率呈现降低趋势;而随着 ω_{PVA} 的增加,砂浆的收缩率呈现先减小后增大的趋势。综合考虑各种因素对砂浆修补防渗和耐久性等因素,P/C、S/C 和 ω_{PVA} 的最佳用量分别为 15%、1.5:1 和 1.5kg/m³。

(5) 综合考虑各种因素对修补砂浆粘接强度的

影响和实际应用等,本研究给出的最佳 P/C、S/C 和 ω_{PVA} 分别为 15%、1.5:1 和 1.5kg/m³。

参考文献

- [1] 郑高锋,郑水蓉,南博华.聚合物水泥基复合防水涂料的研究进展[J].涂料工业,2005,35(12):31-34.
- [2] Luo J L, Li Q Y, Zhao T J, et al. Bonding and toughness properties of PVA fibre reinforced aqueous epoxy resin cement repair mortar [J]. Construction and Building Materials, 49 (2013):766-771.
- [3] 张磊,张小冬,黄莹,等.高性能聚合物修补砂浆的研究[J].硅酸盐通报,2010(8):988-991.
- [4] 王玲玲,陈彦文,潘文浩.聚丙烯纤维砂浆抗裂性能研究[J].混凝土,2011(12):113-115.
- [5] 马哲,张晓红,乔金樑.聚合物改性水泥基材料研究进展[J].化工新材料,2014,42(3):7-9.
- [6] Schulze J, Killermann O. Long-term performance of redispersible powders in mortars [J]. Cement and Concrete Research, 2001,31:357-361.
- [7] 宣卫红,刘建忠,李骁春,等.聚丙烯纤维与水泥砂浆粘结性能实验[J].江苏大学学报:自然科学版,2010,(11):726-730.
- [8] Wan Y Z, Wang Y L, He F, et al. Mechanical performance of hybrid bismaleimide composites reinforced with three-dimensional braided carbon and kevlar fabrics [J]. Composites Part B, 2007,38(2):495-504.
- [9] 滕朝辉,王勤旺.加水量对聚合物干混砂浆的影响[J].中国胶粘剂,2010,(1):44-46.
- [10] 刘纪伟,周明凯,陈潇,等.丁苯乳液改性硫铝酸盐水泥修补砂浆性能研究[J].人民长江,2013,44(13):51-54.
- [11] Fowler D W. Polymers in concrete: a vision for the 21st century [J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 21(2): 449-452.
- [12] 中华人民共和国国家标准.《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T17671-1999).
- [13] 谭明轮. PVA 纤维长度与掺量对工程水泥基复合材料性能影响实验研究[J].铁道建筑,2014,(3):115-117.
- [14] 王永波. PVA 纤维增强水泥基复合材料的性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2005.
- [15] 高嵩,李秋义.纤维-水泥浆界面区对 FA-SHCC 力学性能的影响[J].河北工业大学学报,2014,43(6):58-61.
- [16] 张鹏. PVA 纤维混凝土弯曲韧性和动态压缩性能实验研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2014.
- [17] 张磊. 高性能聚合物修补砂浆的研究[J]. 硅酸盐通报, 2010, 29(4):988-991.
- [18] 农金龙. 聚合物改性水泥基粘结复合材料的粘结性能研究[D]. 湖南:湖南大学,2013.
- [19] 王培铭. 聚合物对 PVA 纤维水泥砂浆粘结强度的影响[J]. 新型建筑材料, 2011, (2):15-18.
- [20] 苗苗. 水胶比和粉煤灰掺量对补偿收缩混凝土自收缩特性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2012, (11):109-115.
- [21] 王甲春. 硅酸盐水泥-粉煤灰复合胶凝材料体系的干燥收缩开裂分析[J]. 沈阳建筑大学学报, 2005, 21(5):519-522.

收稿日期:2018-03-23