

文章编号: 1001-4888(2022)03-0315-08

表层压应力设计提升水泥砂浆的抗折强度*

李维红¹, 向忆寒¹, 包亦望²

(1. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁大连 116000; 2. 中国建筑材料科学研究总院, 北京 100024)

摘要: 表层压应力可以抵消部分外荷载引起的拉应力, 同时阻碍表面裂纹的生成与扩展, 从而提升构件抗折强度。本文通过在水泥砂浆试件表面涂覆膨胀剂与水泥混合而成的涂层实现了这种增强方式, 同时推导了涂层材料性能及厚度与表层压应力之间的关系, 并研究了不同配比涂层对水泥砂浆抗折强度的影响规律。结果表明: 为获得足够的表层压应力, 涂层的横截面积应尽可能小; 表层压应力随基体与涂层弹性模量比值的减小而增大, 随涂层与基体收缩率比值的减小而增大。随着涂层中膨胀剂掺量的增加, 水泥砂浆试件的早期与后期抗折强度呈现先增大后减小的趋势, 膨胀剂掺量为 30% 的混合涂层对水泥砂浆试件的早期抗折强度提升幅度最大, 强度提升率为 41.9%; 膨胀剂掺量为 40% 的混合涂层对水泥砂浆试件的后期抗折强度提升幅度最大, 强度提升率为 34.1%。

关键词: 表层压应力; 水泥砂浆; 涂层; 抗折强度; 收缩率; 弹性模量

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-21-187

0 引言

水泥基材料因具有抗压强度较高、成本低廉等优点而被广泛应用于建筑工程, 但它的高脆性、易开裂、低韧性和低抗折强度等缺点也一直是导致其耐久性差和维护成本高的主要问题^[1-3]。抗折强度是水泥基材料的一项重要力学指标, 如何提升其抗折强度一直是学者们研究的重点。

相关研究表明, 添加纤维^[4-6]、矿物掺合料^[7,8]、外加剂^[9,10]、纳米材料^[11-13]、聚合物^[14,15]等均可提升水泥基材料的抗折强度。除此之外, 在构件承受外部荷载前, 通过张拉钢筋使受拉区的混凝土产生预压应力, 也可达到提高构件抗折强度的目的。上述方法目前已较成熟且提升效果显著, 但预压应力混凝土生产工艺较复杂, 而在水泥基材料中添加新材料还存在与外加剂相容性欠佳、成本较高等问题。

近年来, 一种类似于钢化玻璃预压应力分布的高强度高损伤容限复合陶瓷的预压应力设计^[16,17]产生了良好的效果, 它通过优化表层预压应力设计, 在陶瓷构件表面形成一层高度压缩应力, 以达到提高陶瓷的强度及损伤容限的目的。水泥砂浆与陶瓷均属于脆性材料, 具有抗压不抗拉的属性, 因此本研究将表层预压应力设计进行构件强化这一思路引入到水泥砂浆之中, 通过将膨胀剂与水泥混合而成的涂层涂覆于水泥砂浆试件表面, 利用涂层与基体收缩率的差异形成表层压应力, 用以减小外荷载引起的拉应力, 同时阻碍表面裂纹的生成与扩展, 从而提升水泥砂浆的抗折强度, 延长其使用寿命。此方法操作简单, 不受构件尺寸和形状的限制, 且较为经济, 具有较好的应用前景。

* 收稿日期: 2021-08-19; 修回日期: 2021-10-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52032011); 国家重点研发计划(2018YFF0214500); 省部共建粉体材料与特种陶瓷重点实验室项目(1903); 辽宁省教育厅科学研究经费项目(LJKZ1177)

通信作者: 李维红(1971-), 女, 博士, 副教授, 主要从事土木工程材料及结构特性方向的研究。Email: liweihong714@163.com

1 材料及方法

1.1 试验原材料

水泥选用大连水泥厂生产的 P·O42.5R 及 P·O52.5R 普通硅酸盐水泥(其中, P·O42.5R 用于制备水泥砂浆基体, P·O52.5R 用于制备涂层); 砂为 ISO 标准砂; 水为实验室自来水; 膨胀剂选用江苏博特新材料股份有限公司生产的 HME[®]-IV 混凝土高效膨胀剂。水泥及膨胀剂的化学组成见表 1, 膨胀剂的性能指标见表 2。

表 1 水泥及膨胀剂的化学组成($w/\%$)

Tab. 1 Chemical composition of cement and expansive agent($w/\%$)

品种	MgO	SO ₃	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
P·O42.5R	3.73	1.94	56.78	22.61	7.01	2.89
P·O52.5R	3.91	2.17	57.74	22.39	6.19	3.20
HME [®] -IV	1.81	28.33	52.56	1.03	13.61	0.66

表 2 膨胀剂的性能指标

Tab. 2 Performance indicator of expansive agent

细度		凝结时间/min		限制膨胀率/%		抗压强度/MPa	
1.18mm 筛筛余/%	比表面积/(m ² /kg)	初凝	终凝	水中 7d	空气中 21d	7d	28d
0	390	175	213	0.102	0.034	40.0	53.4

1.2 试件的制备及试验方法

将膨胀剂与 P·O52.5R 水泥按一定比例加水混合后, 涂覆于水泥砂浆基体的底面与顶面, 制备具有双面涂层的水泥砂浆试件, 以使样品获得对称的表层压应力。试验时, 将底面涂层直接涂覆于试模底部后, 立即浇筑水泥砂浆基体。为提升顶面涂层与基体之间的黏结力, 在基体临近初凝时, 用带有一定硬度的刷子进行拉毛处理后再涂覆顶面涂层。水泥砂浆基体的水灰比为 0.5, 水泥与标准砂的质量比为 1:3。基体尺寸为 40mm×40mm×160mm, 涂层厚度 $h < 1\text{mm}$, 涂层与基体结构示意图如图 1 所示。

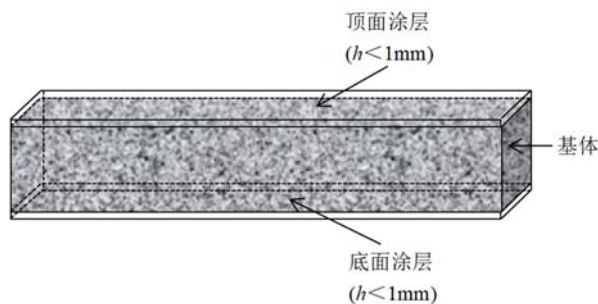


图 1 涂层与基体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coating and substrate configurations

试件带模在标准养护箱($(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, $\text{RH} > 90\%$)中养护 24h, 脱模后放入温度为 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的水中养护至预定龄期(7d、28d), 依据《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T17671-1999)测定其抗折强度(以顶面涂层作为受拉面)、抗压强度。使用 JSM-6360LV 型扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观察涂层与基体之间的界面形态及微观形貌。

2 理论分析与试验结果

2.1 表层压应力的设计与理论分析

水泥砂浆的抗折强度通过三点弯曲试验来确定, 当试件受外荷载作用时, 底部处于受拉状态。水泥砂浆在硬化过程中会产生收缩, 若硬化前在其表面涂覆收缩率小于基体收缩率的涂层, 则基体在硬化过程中的收缩会使收缩量小的涂层产生表层压应力, 这种表层压应力可以抵消部分外荷载引起的拉应力, 同时增强试件抵抗表面裂纹扩展的能力, 从而提升其抗折强度。

为确定表层压应力提升水泥砂浆抗折强度这一思路的可行性, 本文对表层压应力的设计进行了理论分析。首先设涂层的收缩率(单位长度在固化过程中的长度变化量)为 α_c , 水泥砂浆基体的收缩率为

α_s , 涂覆涂层前后试件长度方向横截面示意图如图2所示。假设在理想的自由收缩情况下界面没有约束存在, 涂层与基体的各自收缩如图2虚线部分所示, 收缩率可分别由式(1)与式(2)表示:

$$\alpha_c = \frac{\delta_1}{L} \tag{1}$$

$$\alpha_s = \frac{\delta_2}{L} \tag{2}$$

式中: δ_1 是涂层沿长度方向的自由收缩量; δ_2 是基体沿长度方向的自由收缩量; L 是样品的初始长度。

实际上, 由于界面的紧密结合会使得涂层与基体存在相同的变形, 所以涂层与基体的变形驱动由两部分组成: (1) 材料固化的收缩; (2) 由应力造成的弹性变形。假设复合样品整体的协同变形量为 δ , 则可认为样品整体的收缩率为 α , 收缩后的长度变为 $L - \delta$, α 可由式(3)表示:

$$\alpha = \frac{\delta}{L} \tag{3}$$

整体收缩率 α 的值介于基体和涂层的收缩率之间, 它是个变量, 取决于涂层与基体横截面积之比。涂层与基体中的应力互为平衡, 假设涂层中产生的表层压应力为 σ_c ,

基体中用以平衡表层压应力的拉应力为 σ_s , 在应力的作用下, 涂层发生的线性变形为 d_1 , 基体发生的线性变形为 d_2 , 根据应力应变的关系, 可得到式(4)与式(5):

$$d_1 = \frac{\sigma_c}{E_c} \times L \tag{4}$$

$$d_2 = \frac{\sigma_s}{E_s} \times L \tag{5}$$

E_c 与 E_s 分别是涂层与基体的弹性模量, 为已知或通过测试得到。由截面中的基体拉应力与涂层压应力平衡可知:

$$\sigma_c S_c = -\sigma_s S_s \tag{6}$$

式中: S_c 与 S_s 分别为涂层与基体的横截面积。结合式(6)与式(4)可知

$$d_1 = \frac{\sigma_s}{E_c} \times \left[\frac{S_s}{S_c} \right] \times L \tag{7}$$

由图2可知, d_1 、 d_2 、 δ_1 、 δ_2 存在下述几何关系:

$$d_1 = \delta - \delta_1 \tag{8}$$

$$d_2 = \delta_2 - \delta \tag{9}$$

将式(7)代入式(8)、将式(5)代入式(9)可以得到

$$\delta_1 = \delta - \frac{\sigma_s}{E_c} \left[\frac{S_s}{S_c} \right] L \tag{10}$$

$$\delta_2 = \frac{\sigma_s}{E_s} L + \delta \tag{11}$$

结合式(2)、式(3)、式(11)可得到式(12):

$$\sigma_s = E_s (\alpha_s - \alpha) \tag{12}$$

将式(12)与式(6)结合可知:

$$\sigma_c = \left[\frac{S_s}{S_c} \right] \cdot E_s \cdot (\alpha_s - \alpha) \tag{13}$$

由式(13)可以看出, 表层压应力并非一个材料常数, 它与涂层和基体的横截面积比有关。为更加直

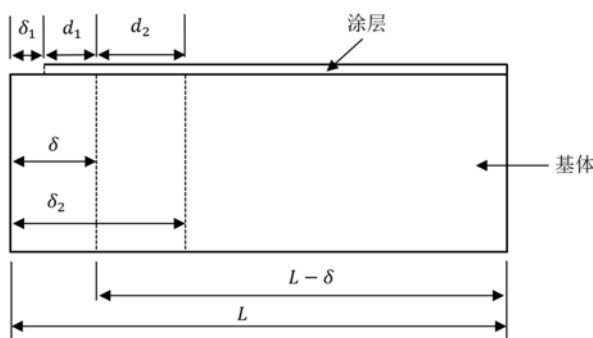


图2 涂层试件长度方向横截面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the cross-section of the coated specimen in the length direction

观地对各种形状和尺寸构件的表层压应力进行评价,可以采用材料常数来代替未知量,即采用基体与涂层的收缩率 α_s 与 α_c 来代替非常数参数 α 。涂层的收缩率 α_c 可结合式(1)、式(2)、式(3)、式(10)、式(11)表示为

$$\alpha_c = \alpha - \frac{E_s S_s}{E_c S_c} (\alpha_s - \alpha) \quad (14)$$

根据式(14),涂层试件的非常数收缩率可以表示为

$$\alpha = \left[\frac{E_s S_s}{E_c S_c} \alpha_s + \alpha_c \right] / \left[1 + \frac{E_s S_s}{E_c S_c} \right] \quad (15)$$

结合式(13)与式(15)可得到表层压应力的计算公式:

$$\sigma_c = \left(\frac{S_s}{S_c} \right) \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{E_s S_s}{E_c S_c} + \frac{\alpha_c}{\alpha_s} \right] / \left[1 + \frac{E_s S_s}{E_c S_c} \right] \right\} E_s \cdot \alpha_s \quad (16)$$

由式(16)可知,表层压应力的大小与涂层和基体的横截面积比值、弹性模量比值及收缩率比值密切相关,因而可通过这些参数调整表层压应力的大小,达到优化设计的效果。本研究中水泥砂浆基体的横截面积已确定,其弹性模量与收缩率也为固定值(根据文献[18,19]假设 $E_s = 28.46 \times 10^3$ MPa, $\alpha_s = 2 \times 10^{-3}$)。为对表层压应力的影响因素进行定性分析,假设收缩率比($\alpha_c/\alpha_s = 0.5$)为固定值,基体与涂层的弹性模量比值 E_s/E_c 分别为 0.6、0.9、1.2、1.5 时,表层压应力 σ_c 随基体与涂层横截面积比值(S_s/S_c)的变化趋势如图 3(a)所示。再假设弹性模量比($E_s/E_c = 0.9$)为固定值,涂层与基体的收缩率比值 α_c/α_s 分别为 0.3、0.5、0.7、0.9 时,表层压应力随基体与涂层横截面积比值的变化趋势如图 3(b)所示。

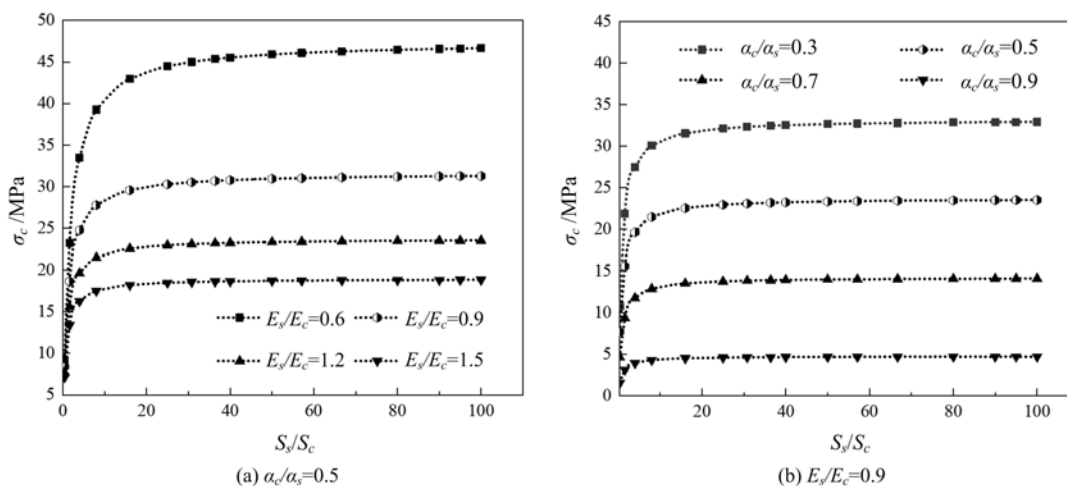


图3 表层压应力与横截面比值、弹性模量比值、收缩率比值之间的理论关系

Fig. 3 Theoretical relationship between surface compressive stress and cross section ratio, elastic modulus ratio, and shrinkage ratio

由图 3 可知,表层压应力随 S_s/S_c 增大急剧上升,当 $S_s/S_c > 20$ 时趋于平稳,这表明为获得足够的表层压应力,基体与涂层的横截面积比应尽可能大。此外,当 α_c/α_s 固定时,表层压应力随 E_s/E_c 减小而增大;当 E_s/E_c 为固定值时,表层压应力随 α_c/α_s 增大而减小。由此可知,涂层的收缩率越小,表层压应力越大;涂层的弹性模量越大,表层压应力越大。

根据表层压应力影响因素的定性分析结果,可以得到以下结论:若采用弹性模量高、收缩率低,同时厚度小的涂层材料作为表层增强材料,便可获得足够的表层压应力,从而有效提升水泥砂浆的抗折强度。然而,制备同时具有高弹性模量与低收缩率特性的涂层材料较难实现。本研究采用的涂层是由膨胀剂与 P·O52.5R 水泥混合而成的,涂层中膨胀剂掺量过低不利于降低涂层的收缩率,而掺量过高会导致涂层的弹性模量减小,这都将对表层压应力的优化设计造成不利影响,进而降低水泥砂浆抗折强度的提升效果,因此,涂层中的膨胀剂应存在一个最优掺量范围,在这一范围内,涂层的弹性模量较高,同时收缩率较低,表层压应力达到最优值。

2.2 表层压应力设计提升水泥砂浆抗折强度的试验验证

为验证 2.1 中的理论分析与推导,并获得涂层中膨胀剂的最优掺量范围,本研究共设计了 10 组试验方案(P0~P9),其中,P0 组为无涂层的空白对照组,P1~P9 组分别为涂覆了由水泥与膨胀剂共同组成的不同配比双面涂层试验组,涂层中膨胀剂掺量依次为水泥质量的 10%~90%,按 10%的比例递增。由 2.1 节中定性分析所得结论可知,为获得足够的表层压应力,涂层的厚度 h 应尽可能小,因此本试验中各组带涂层试件的涂层厚度均控制在 1mm 以内。图 4 所示为各组试件的抗折强度、抗压强度及压折比值与涂层中膨胀剂掺量的关系。

由图 4(a)可以看出,在试件表面涂覆不同配比的涂层对水泥砂浆的抗折强度均有不同程度的提升且具有规律性。在同一龄期下,随着涂层中膨胀剂掺量的增加,试件抗折强度呈现先快速上升后缓慢下降的变化趋势。当涂层中膨胀剂掺量低于 30%时,因其掺量较低,对涂层弹性模量影响较小,由式(16)可知,随膨胀剂掺量的增加,涂层的收缩率降低,涂层与基体的收缩率比值 α_c/α_s 减小,表层压应力 σ_c 随之增大,试件抗折强度得到提升。膨胀剂掺量为 30%时,水泥砂浆试件的 7d 抗折强度提升效果最为显著,达到 8.8MPa,与无涂层试件相比,抗折强度提升了 41.9%。膨胀剂掺量为 40%时,水泥砂浆试件的 28d 抗折强度达到最大值 11.4MPa,抗折强度提升率为 34.1%。当涂层中膨胀剂掺量高于 40%时,因其掺量较高,对涂层弹性模量影响较大,随膨胀剂掺量的增加,涂层的弹性模量降低,基体与涂层弹性模量的比值 E_c/E_s 增大,表层压应力 σ_c 随之减小,试件抗折强度缓慢下降。

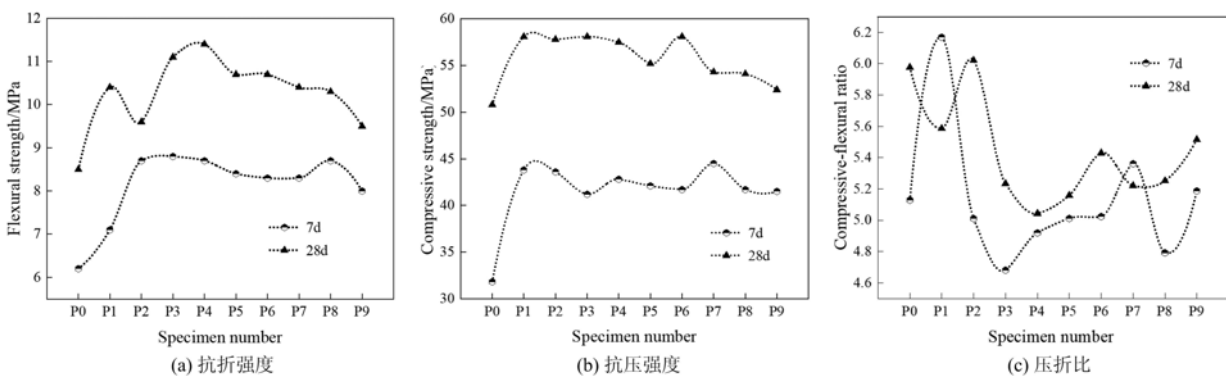


图 4 试件的强度及压折比值与涂层中膨胀剂掺量的关系

Fig. 4 Relationship between strength and compressive-strength ratio to flexural strength of specimen and amount of expansive agent in the coating

图 4(b)所示结果表明,通过涂覆低收缩率涂层于水泥砂浆试件表面进而产生表层压应力的方法,对水泥砂浆的抗压强度有不同程度的提升,7d 抗压强度提高了 9.4~12.7MPa,最大提升率为 39.9%;28d 抗压强度提高了 1.6~5.7MPa,最大提升率为 11.2%。水泥砂浆抗压强度的提升可能是因为涂层中产生压应力的同时,基体内部存在与之平衡的拉伸预应力抵消了部分外荷载引起的压应力造成的。

压折比是表征水泥砂浆韧性的指标之一,它可以反映材料抵抗裂纹产生和扩展的能力,压折比越低,材料韧性越高。由图 4(c)可知,相比于无涂层试件,涂层中膨胀剂掺量过低或过高均会导致试件的压折比增大,韧性减小,进而降低水泥砂浆抗折强度的提升效果。当涂层中膨胀剂掺量为 30%时,试件 7d 压折比最低;当涂层中膨胀剂掺量为 40%时,试件 28d 压折比最低。这一结论与图 4(a)所示的抗折强度提升规律相吻合,也说明表层压应力的产生有助于试件韧性的提升。

通过上述分析可以说明,当涂层中膨胀剂掺量为 30%~40%时,涂层材料的弹性模量较高且收缩率较低,在这一掺量范围内,表层压应力达到最优值,该压应力抵消部分外荷载引起的拉应力的同时,也提高了基体抵抗表面裂纹产生及扩展的能力,从而使水泥砂浆抗折强度的提升效果处于最佳状态。

2.3 微观分析

涂层与水泥砂浆基体间具有良好的黏结性是表层压应力产生的前提,也是保证涂覆涂层后构件形成整体、共同受力的关键。图 5 为 28d 时涂层与基体之间的微观界面形态,由图可以观察到涂层与基体分界明显并且紧密结合,这说明将掺有膨胀剂的水泥浆作为涂层,能较好地与水泥砂浆基体黏结并可进

一步产生表层压应力。

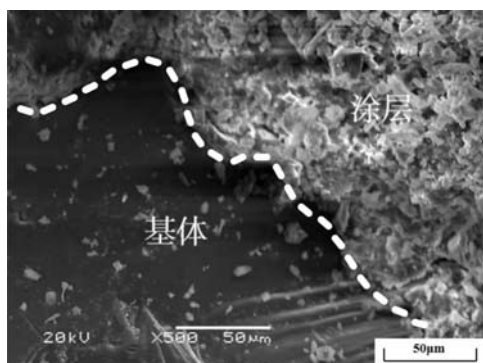
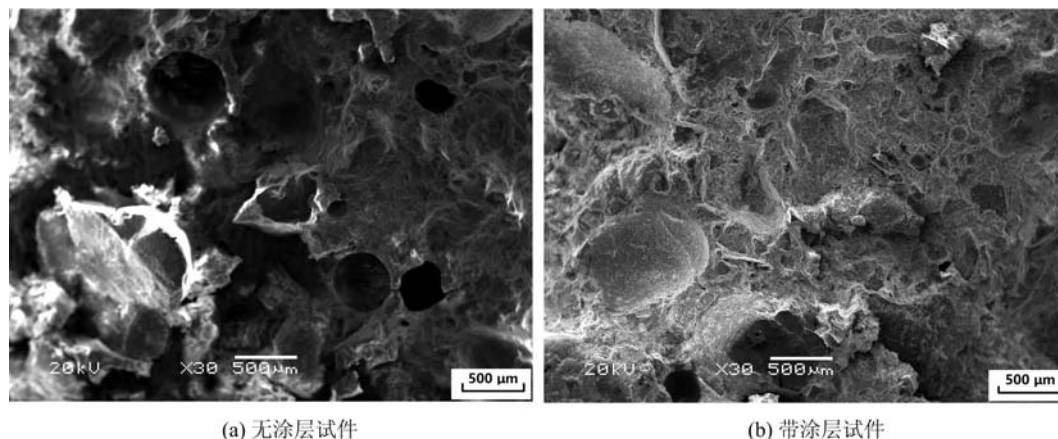


图5 涂层与基体之间的界面形态

Fig. 5 Interface morphology between coating and substrate. 涂层对界面处孔隙结构的改善降低了试样整体水分的散失,进而降低毛细孔因水分散失引起的收缩应力,有利于减少水泥砂浆的收缩开裂,另外,表层的内压应力本身受压而致密化并阻碍表面微裂纹的扩展,均可以提高水泥砂浆的抗折强度^[21]。

图6为28d时带涂层与无涂层试件界面处水泥砂浆基体的SEM对比结果。图6(a)显示无涂层水泥砂浆基体内部具有明显的孔洞,且整体结构高低不平、不规则;相比于无涂层试件,图6(b)中有涂层水泥砂浆基体的整体结构密实规则,内部孔洞较少。该现象可能是由于涂层增加了基体表面的湿润度,改善了涂层与基体之间界面水灰比,从而促进了界面水泥水化造成的;同时,膨胀剂反应生成大量AFt晶体相互交织,填充、切断毛细孔隙,使大孔减小,总孔隙率下降,从而提高了界面处微观结构的密实度^[20]。而涂层对界面处



(a) 无涂层试件

(b) 带涂层试件

图6 界面处水泥砂浆基体的内部形貌

Fig. 6 Internal morphology of cement mortar substrate at interface

上述微观分析结果表明,低收缩率涂层对水泥砂浆抗折强度的提升作用,一方面是由于产生的表层压应力减小了外荷载引起的拉应力并抑制了表面裂纹的生成与扩展,另一方面则归功于涂层对界面处孔隙结构的优化。

3 结论

(1) 涂覆膨胀剂与水泥混合而成的涂层于水泥砂浆试件表面,在养护过程中由于涂层材料收缩率小于基体收缩率而产生的表层压应力,可有效提升其早期及后期抗折强度,最大提升率分别为41.9%、34.1%。

(2) 理论分析表明,涂层的膨胀或基体的收缩均可产生表层压应力从而提高断裂强度,表层压应力的大小与基体和涂层的横截面积比值、弹性模量比值以及收缩率比值有关,因而通过这些参数可以调节表层压应力的大小,达到优化设计的效果。

(3) 表层压应力随基体与涂层弹性模量比值的减小而增大,随涂层与基体收缩率比值的增大而减小。当涂层中膨胀剂掺量在30%~40%范围时,产生的表层压应力达到最优值。

(4) 微观结构分析表明,膨胀剂与水泥混合而成的涂层能安全稳定地附着于水泥砂浆基体上。涂层可改善与基体界面处的密实度,阻碍表面裂纹的生成与扩展,同时可降低表层压应力被界面处的孔隙稀释或释放的可能性。

(5) 引入表层压应力在提升水泥砂浆抗折强度的同时,对抗压强度也有提升效果,7d 抗压强度提高了 29.6%~39.9%,28d 抗压强度提高了 3.1%~11.2%。

参考文献:

- [1] Gangnant A, Saliba J, La Borderie C, et al. Modeling of the quasibrittle fracture of concrete at meso-scale: effect of classes of aggregates on global and local behavior[J]. *Cement & Concrete Research*, 2016, 89:35-44.
- [2] 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 A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, 38(2):495-504.
- [3] 梅迎军,王培铭,李志勇. 聚丙烯纤维和丁苯乳液对水泥砂浆性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2006(5):613-618 (MEI Yingjun, WANG Peiming, LI Zhiyong. Effect of polypropylene fiber and styrene butadiene emulsion on properties of cement mortar[J]. *Journal of Building Materials*, 2006(5):613-618 (in Chinese))
- [4] 于婧,翟天文,梁兴文,等. 钢-PVA 纤维混凝土流动性及力学性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2018, 21(3):402-407 (YU Jing, ZHAI Tianwen, LIANG Xingwen, et al. Study on fluidity and mechanical properties of steel-PVA fiber reinforced concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(3):402-407 (in Chinese))
- [5] 马一平,谈慕华. 陶瓷纤维水泥基复合材料力学性能及耐久性研究[J]. *硅酸盐学报*, 2000(2):105-110 (MA Yiping, TAN Muhua. Study on mechanical properties and durability of ceramic fiber cement based composites[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2000(2):105-110 (in Chinese))
- [6] 王中坤,范杰,李庚英. 碳纳米管/聚乙烯醇对混凝土力学和干缩性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2020, 48(10):1653-1658 (WANG Zhongkun, FAN Jie, LI Gengying. Effect of carbon nanotubes/polyvinyl alcohol on mechanical properties and drying shrinkage of concrete[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 48(10):1653-1658 (in Chinese))
- [7] 邢亚兵,王毅,胡凯伟. 超细矿渣粉对硅酸盐水泥性能和微观结构的影响[J]. *材料导报*, 2017, 31(S1):402-405 (XING Yabing, WANG Yi, HU Kaiwei. Effect of superfine slag powder on properties and microstructure of Portland cement[J]. *Materials Review*, 2017, 31(S1):402-405 (in Chinese))
- [8] Feng J J, Sun J W, Yan P Y. The influence of ground fly ash on cement hydration and mechanical property of mortar[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 2018(PT. 3):1-7.
- [9] Wyrzykowski M, Terrasi G, Lura P. Expansive high-performance concrete for chemical-prestress applications[J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 107:275-283.
- [10] 杨易灵,马芹永,费厚乾,等. 含水率和膨胀剂对预拌补偿收缩混凝土抗折性能影响的试验与分析[J]. *混凝土*, 2015(2):128-131 (YANG Yiling, MA Qinyong, FEI Houqian, et al. Test and Analysis on the influence of moisture content and expansion agent on the flexural properties of ready mixed shrinkage compensating concrete [J]. *Concrete*, 2015(2):128-131 (in Chinese))
- [11] Saafi M, Tang L, Fung J, et al. Enhanced properties of graphene/fly ash geopolymeric composite cement[J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 67:292-299.
- [12] Pan Z, He L, Qiu L, et al. Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide-cement composite[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 58:140-147.
- [13] 杨凌俊,袁小亚. 氧化石墨烯复掺石墨烯对水泥砂浆力学性能的提升及机理研究[J]. *功能材料*, 2019, 50(12):12089-12096 (YANG Lingjun, YUAN Xiaoya. Improvement of mechanical properties of cement mortar by adding graphene oxide and graphene and its mechanism[J]. *Journal of Functional Materials*, 2019, 50(12):12089-12096 (in Chinese))
- [14] 王毓发,崔鑫,王龙志,等. 苯丙乳液与 PVA 纤维对水泥砂浆力学性能的影响及增强机理研究[J]. *材料导报*, 2013, 27(S2):307-310 (WANG Yufa, CUI Xin, WANG Longzhi, et al. Effect of styrene acrylic emulsion and PVA fiber on mechanical properties of cement mortar and strengthening mechanism[J]. *Materials Review*, 2013, 27(S2):307-310 (in Chinese))
- [15] 刘方,王宝民,袁晓洒,等. 丁苯胶乳改性水泥混凝土的力学性能及耐久性实验分析[J]. *功能材料*, 2019, 50(6):6167-6173 (LIU Fang, WANG Baoming, YUAN Xiaosa, et al. Experimental analysis on mechanical properties and durability of styrene butadiene latex modified cement concrete[J]. *Journal of Functional Materials*,

- 2019, 50(6):6167—6173 (in Chinese))
- [16] 包亦望, 孙熠, 旷峰华, 等. 高强度预应力陶瓷的发展与探索[J]. 无机材料学报, 2020, 35(4):399—406 (BAO Yiwang, SUN Yi, KUANG Fenghua, et al. Development and exploration of high strength prestressed ceramics [J]. Journal of Inorganic Materials, 2020, 35(4):399—406 (in Chinese))
- [17] Bao Y W, Kuang F H, Sun Y, et al. A simple way to make pre-stressedceramics with high strength[J]. Journal of Materiomics, 2019, 5(4):657—662.
- [18] 聂光临, 包亦望, 田远, 等. 水泥砂浆弹性模量随温度的演化规律[J]. 材料导报, 2019, 33(1):251—256 (NIE Guanglin, BAO Yiwang, TIAN Yuan, et al. Evolution of elastic modulus of cement mortar with temperature[J]. Materials Review, 2019, 33(1):251—256 (in Chinese))
- [19] 郑小青, 周泽友. 矿物掺和料与再生骨料对水泥强度和收缩性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(1):191—196 (ZHENG Xiaoqing, ZHOU Zeyou. Effect of mineral admixture and recycled aggregate on strength and shrinkage of cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(1):191—196 (in Chinese))
- [20] 黄璐, 卓卫东, 谷音, 等. 界面剂对新旧混凝土界面粘结性能影响的试验研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2018, 46(3):396—402 (HUANG Lu, ZHUO Weidong, GU Yin, et al. Experimental study on the effect of interfacial agent on the interfacial bonding properties of new and old concrete[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2018, 46(3):396—402 (in Chinese))
- [21] 钱觉时, 乔墩, 石亮, 等. 减缩剂外涂对混凝土性能的影响及作用机理[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(12):2090—2096 (QIAN Jueshi, QIAO Dun, SHI Liang, et al. Effect of shrinkage reducing agent on concrete performance and its mechanism[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2009, 37(12):2090—2096 (in Chinese))

Improving flexural strength of cement mortar by surface compressive stress design

LI Weihong¹, XIANG Yihan¹, BAO Yiwang²

(1. College of Architectural Engineering, Dalian University, Dalian 116000, Liaoning, China;

2. China General Research Institute of Building Materials, Beijing 100024, China)

Abstract: The surface compressive stress can offset the tensile stress caused by some external loads, and hinder the generation and propagation of surface cracks, so as to improve the flexural strength of members. In this paper, the reinforcement method is realized by coating the surface of cement mortar specimen with the coating mixed with expansive agent and cement. At the same time, the relationship between the performance and thickness of coating material and the surface compressive stress is deduced, and the influence of different proportion coatings on the flexural strength of cement mortar is studied. The results of the study indicate that in order to obtain enough surface compressive stress, the cross-sectional area of the coating should be as small as possible. The surface compressive stress increases with the decrease of the elastic modulus ratio of the substrate to the coating, and increases with the decrease of the shrinkage ratio of the coating to the substrate. With the increase of the expansion agent content in the coating, the early and late flexural strength of the cement mortar specimens increases at first and then decreases. The composite coating with 30% expansive agent has the greatest improvement on the early flexural strength of cement mortar specimens, and the strength improvement rate is 41.9%. The composite coating with 40% expansion agent has the largest improvement range of the late flexural strength of cement mortar specimens, and the strength improvement rate is 34.1%.

Keywords: surface compressive stress; cement mortar; coating; flexural strength; shrinkage; elastic modulus