

用于 GFRP 筋的高强低碱砂浆涂层制备及性能分析

吴亚月¹, 商怀帅^{1,*}, 王春增²

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 青岛市房地产业事业发展中心, 青岛 266000)

摘要: 利用矿物掺合料制备了用于玻璃纤维增强复合材料(GFRP)筋表面的高强低碱砂浆涂层, 测取了所制涂层的耐碱性、pH 值、抗压强度、抗折强度以及微观组分, 并分析了不同矿物掺合料掺量和不同胶凝材料用量对所制涂层 pH 值、抗折强度及抗压强度的影响。试验结果表明: 所制涂层耐碱性良好, 在耐碱性测试中没有出现剥落、失去黏结性等现象; 胶凝材料用量为 250 kg/m³, 水泥掺量为 40%, 硅灰掺量为 60% 的配比最适宜配制 GFRP 筋表面砂浆涂层; 砂浆涂层 pH 值随着矿物掺合料掺量的增加不断降低, 砂浆抗折、抗压强度随着单掺硅灰掺量的增大呈现先增大后减小的变化趋势, 而随着复掺粉煤灰掺量的增加不断减小; 当龄期达到 28 d 时, 砂浆涂层中仍存在未反应的 SiO₂ 和硅酸盐, 后期可以与浇筑在涂层 GFRP 筋表面的混凝土共同水化, 提高 GFRP 筋与混凝土间的黏结强度。

关键词: 矿物掺合料; 玻璃纤维增强复合材料(GFRP); 高强低碱; 砂浆涂层; 微观组分

中图分类号: TU502⁺.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)06-0051-08

Preparation and performance analysis of high-strength and low-alkali mortar coating for GFRP bars

WU Yayue¹, SHANG Huaishuai^{1,*}, WANG Chunzeng²

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;
2. Qingdao Real Estate Development Center, Qingdao 266000, China)

Abstract: High-strength and low-alkali mortar coating for glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars was prepared using mineral admixture. The alkali resistance, pH value, compressive strength, flexural strength and micro-component of the coatings were measured, and the effects of the different contents of mineral admixture and different amounts of cementitious materials on the pH value, flexural strength and compressive strength of the coatings were analyzed. The test results showed that the coating had good alkali resistance, and phenomena like spalling and loss of adhesion did not occur in the alkali resistance test. The ratios of 250 kg/m³ of cementitious material, 40% of cement and 60% of silica fume were most suitable for the GFRP bars' surface mortar coating. The mortar coating's pH value decreased with the increase of the content of mineral admixture, and the flexural and compressive strength of the mortar showed a trend of increasing and then decreasing with the increase of the content of single silica fume, and decreased with the increase of the content

收稿日期: 2023-10-24

基金项目: 山东省自然科学基金重大基础研究项目(ZR2022ZD33); 青岛市科技惠民示范专项项目(23-2-8-cspz-9-nsh)

作者简介: 吴亚月(1999—), 女, 安徽池州人。硕士, 研究方向为混凝土结构。E-mail: wyy18756648062@163.com。

* 通信作者: 商怀帅(1980—), 男, 山东潍坊人。博士, 教授, 主要从事混凝土结构方面的研究。E-mail: shanghuaishuai@163.com。

of compound fly ash. When the age reached 28 days, there were still unreacted SiO_2 and silicate in the mortar coating, which can react with the concrete poured on the GFRP bar surface later, thereby improving the bond strength between the GFRP bar and concrete.

Key words: mineral admixture; glass fiber reinforced polymer (GFRP); high strength and low alkali; mortar coating; micro component

纤维增强复合材料(FRP)筋虽具有轻质、高强、经济、耐疲劳、耐酸盐等诸多优点,但玻璃纤维增强复合材料(GFRP)筋和玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)筋耐碱性能较差^[1]。GFRP筋在水环境和碱环境侵蚀作用下的损伤主要包括纤维侵蚀^[2]、基质断裂^[3]及界面脱粘^[4],而BFRP筋主要是树脂-纤维界面的破坏^[5]。张新越等^[6]将GFRP筋分别浸渍在酸、碱、盐溶液中,发现4周后碱环境下的GFRP筋强度损失更为严重。因此,寻找一种能解决碱环境下GFRP筋耐久性差的方法至关重要。

根据DUO等^[5]的研究,当pH值从13.2降到12.3时可以大大降低碱化引起的树脂降解和纤维降解,同时还可以减轻纤维-基体界面的劣化^[7]。WANG等^[8]发现将试件在相同条件下放置12个月后,GFRP在低碱混凝土(pH=11)中的强度保持率比普通混凝土(pH=13)中提高了17%。另外,GFRP筋抗剪强度较低,碱性溶液也会使GFRP筋的剪切强度出现较大幅度的降低^[9],但在GFRP筋表面涂上砂浆涂层可以减小GFRP筋剪切强度的降低幅度^[10],并且能限制GFRP筋的膨胀,对其起到保护作用^[11]。

砂浆涂层目前多被用于钢筋的防锈蚀,相较于环氧涂层等其他涂层,砂浆涂层具有良好的耐候性以及与混凝土良好的结合性。但目前砂浆涂层多采用硅酸盐水泥及聚合物等材料制成,其碱度较高,无法使GFRP筋免受碱环境侵蚀。因此,制备低碱度的砂浆涂层至关重要。对于防腐砂浆涂层,强度被认为是衡量其能否被用于实际工程的重要指标之一^[12],但目前的低碱混凝土或砂浆的强度并不高^[13-15],因此还应在低碱度的基础上提高砂浆涂层的强度。

为降低碱环境对GFRP筋的影响,以水泥、硅灰、粉煤灰、石灰石粉以及外加剂为原料设计制备14种不同的砂浆涂层。对涂层的耐碱性能、pH值、抗压强度、抗折强度以及微观组分进行测试,并分析所用材料对涂层性能的影响,找到最适宜用于GFRP筋表面的高强低碱砂浆涂层,提高GFRP筋在混凝土强碱环境下的耐久性。

1 试验材料及方法

所制备的高强低碱砂浆是在传统砂浆的基础上以石灰石粉为填料,添加一定量的硅灰、粉煤灰、聚羧酸高效减水剂制得。相关研究^[16]表明,硅灰对水泥砂浆pH值的降低以及强度的提高优于其他矿物掺合料,且硅灰掺量需在40%以上。复掺矿物掺合料能使所制混凝土或净浆pH值更低^[17],同时提高材料的环保性^[18],故本研究选用硅灰、粉煤灰2种矿物掺合料。考虑硅灰比表面积较大,需水量较高,且本试验所采用的水胶比较低,故选用石灰石粉作为填料,同时添加聚羧酸高效减水剂,改善拌合物的和易性。

1.1 试验材料

水泥采用P·O 42.5R普通硅酸盐水泥,主要性能指标见表1;砂选用天然河砂,属Ⅱ区中砂,细度模数为2.5;硅灰选用 SiO_2 含量为97%的高含量微硅粉,主要性能指标见表2;粉煤灰采用Ⅰ级粉煤灰,主要性能指标见表3;水为普通自来水;减水剂采用聚羧酸高性能减水剂,减水率为30%;石灰石粉为325目, CaCO_3 含量为98%。

表1 P·O 42.5R水泥主要性能指标

比表面积/ %	初凝时间/ min	终凝时间/ min	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
			3 d	28 d	3 d	28 d
360	183	233	28.4	50.6	5.4	7.9

表2 硅灰主要性能指标

SiO_2 含量/%	烧失量/%	需水量/%	比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	活性指数(7 d)/%
97.8	1.3	109	20	132

表3 粉煤灰主要性能指标

细度	烧失量	需水量	含水量	SO_3	游离CaO
8.0	2.0	80	0.1	1.5	0.2

1.2 试件制备与配合比设计

最优涂层配合比设计思路是在保证砂浆涂层具有一定流动性的前提下,尽可能地降低水灰比,减小涂层孔隙率,同时提高涂层强度^[19],并且所掺矿物掺合料用量应该能最有效地降低 C-S-H 凝胶中的钙硅比^[20]。本研究采用 0.2 水胶比^[21]。在此水胶比下,各配比的砂浆涂层均具有良好的流动扩展度,流动扩展度均在 230 mm 左右。具体设计配合比见表 4。

表 4 高强低碱水泥砂浆配合比设计

编号	水泥	硅灰	粉煤灰	石灰石粉	砂	减水剂	水灰比	胶凝材料
C10-250	250	—	—					
C6S4F0-250	100	150	—					
C5S5F0-250	125	125	—					
C4S6F0-250	100	150	—	319	625.9	5	0.2	250
C5S4F1-250	125	100	25					
C4S4F2-250	100	100	50					
C4S5F1-250	100	125	25					
C10-300	300	—	—					
C6S4F0-300	180	120	—					
C5S5F0-300	150	150	—					
C4S6F0-300	120	180	—	269	625.9	6	0.2	300
C5S4F1-300	150	120	30					
C4S4F2-300	120	120	60					
C4S5F1-300	120	150	30					

注:编号中 C 为水泥,S 为硅灰,F 为粉煤灰。C10-250 表示水泥掺量为 100%,胶凝材料用量为 250 kg/m³;C6S4F0-250 表示水泥掺量为 60%,硅灰掺量为 40%,粉煤灰掺量为 0,胶凝材料用量为 250 kg/m³;C5S4F1-300 表示水泥掺量为 50%,硅灰掺量为 40%,粉煤灰掺量为 10%,胶凝材料用量为 300 kg/m³。

根据《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671—2021)^[22],使用行星式搅拌机制得砂浆涂层及砂浆试块。

1.3 物理性能测试

1.3.1 耐碱性测试

参照《环氧树脂涂层钢筋》(JG/T 502—2016)^[23],采用饱和 Ca(OH)₂ 溶液模拟混凝土孔隙溶液,每 3 d 换 1 次新的溶液以维持溶液的 pH 值。取 GFRP 筋,用浸渍法涂覆涂层后在恒温恒湿条件下放置 3 d,将试件浸入饱和 Ca(OH)₂ 溶液中,30 d 后观察涂层表面状况。

1.3.2 pH 值测试

本试验根据《Standard Test Methods for pH of Soils》(ASTM D 4972-19)^[24]非地浸法测取砂浆 pH 值。将破碎的砂浆试件充分研磨制成粉末,过 0.075 mm 筛,取 10 g 粉末和 10 g 蒸馏水,在烧杯中充分混合获得均匀液体,用酸度计 pH S-3C 测取溶液 pH 值。对每种配比的砂浆孔隙溶液测取 3 次 pH 值,最后取其平均值,精度为 0.01。

1.4 力学性能测试

抗压、抗折强度试验按照《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671—2021)^[22]进行,结果精确至 0.1 MPa。

1.5 微观结构测试

采用 X 射线衍射(X-Ray Diffraction, XRD)仪进行微观试验。将砂浆试件研磨成粉末,压制成均匀薄片,然后加载到 X 射线衍射仪的样品台上,对其进行扫描,观察试件的内部组成。

2 结果与讨论

2.1 不同配比下砂浆涂层耐碱性测试结果

图1为4组不同配比涂层的GFRP筋在饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中浸泡30d后的典型外观。通过观察GFRP筋表面涂层发现:各配比涂层的耐碱性良好,在饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中浸泡30d后涂层表面不存在坑蚀、剥落、失去黏结性等现象。这说明本研究所制涂层具有良好的耐碱性。大量矿物掺合料的掺入会使砂浆的微观结构更加致密^[17],同时会使砂浆渗透性降低,从而减缓碱离子的渗透作用^[25]。

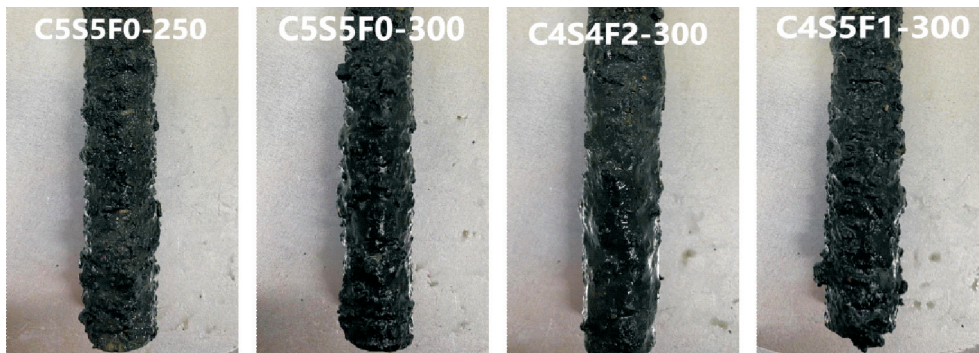


图1 饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中浸泡30d后的涂层GFRP筋

2.2 不同配比下砂浆涂层pH值测试结果

不同胶凝材料用量(250、300 kg/m^3)下不同矿物掺合料添加比例(C10、C6S4F0、C5S5F0、C4S6F0、C5S4F1、C4S4F2、C4S5F1)的砂浆涂层pH值随龄期的变化规律如图2所示。通过比较C10、C6S4F0、C5S5F0和C4S6F0可知,随着硅灰掺量的增加,砂浆涂层pH值逐渐降低,且28d内的降低幅度不断增大,在硅灰掺量为60%时pH值降低幅度最大,28d pH值较基准组降低了1.41。砂浆涂层中的碱除了来自于孔隙溶液中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,还来自于孔隙溶液中 Na^+ 、 K^+ 等的氢氧化物^[20],火山灰反应生成的C-S-H凝胶具有一定的持碱能力,并且C-S-H凝胶中钙硅比越低,其持碱能力越强^[14,26]。水泥浆体孔隙溶液的pH值由C-S-H凝胶的溶解控制^[27],硅灰掺量越大,砂浆中活性 SiO_2 含量也越大,C-S-H凝胶中的钙硅比也越低,因此,硅灰掺量越大pH值降低幅度也越大。另外,通过比较C6S4F0、C5S4F1和C4S4F2可以发现,在硅灰掺量保持一定时,复掺粉煤灰没有对砂浆涂层水化早期pH值起到降低作用,甚至会使早期pH值有所升高,但28d后两种胶凝材料用量的砂浆pH值均低于不掺粉煤灰的砂浆。这是因为粉煤灰

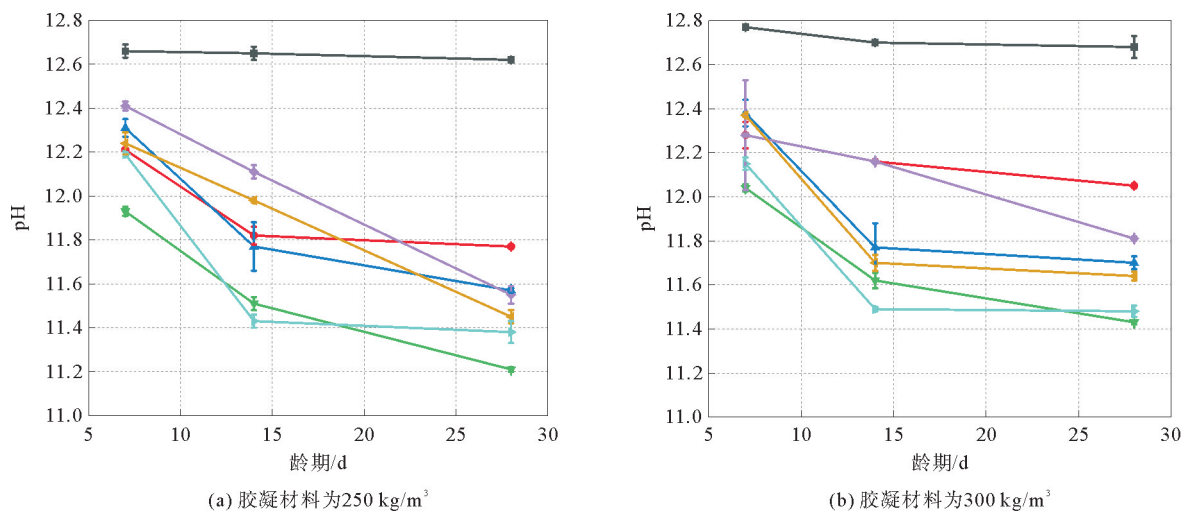


图2 不同矿物掺合料添加比例下砂浆涂层pH值随龄期变化曲线

—■— C10; —●— C6S4F0; —▲— C5S5F0; —○— C4S6F0; —◇— C5S4F1; —□— C4S4F2; —△— C4S5F1

属慢速反应火山灰材料^[16],早期反应速率较慢,后期反应速率有所提高,在龄期到达 28 d 时,粉煤灰的火山灰反应已非常显著,部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 被消耗,并且孔隙溶液中 Na^+ 、 K^+ 和 OH^- 的含量减少^[28]。粉煤灰对水泥浆体碱度的降低作用受很多因素的影响,例如粉煤灰的性质(烧失量、粒径)^[29]、替代水平、硅酸盐水泥碱含量等,并且火山灰反应产物组成也会因粉煤灰组成存在很大差异^[30]。

通过比较相同龄期下不同胶凝材料用量的砂浆涂层 pH 值可以看出胶凝材料用量的增加会提高砂浆涂层的 pH 值。胶凝材料用量的增加一方面会使砂浆中含有更多的碱性离子,另一方面会使石灰石粉掺量减少,这就会使石灰石粉置换出的自由水含量降低^[31],使整个砂浆中水的含量相对较低,进而使碱性离子浓度较高,从而使 pH 值升高。本研究中当胶凝材料用量为 250 kg/m^3 ,水泥掺量为 40%且硅灰掺量为 60%时,砂浆涂层的 28 d pH 值最低,为 11.21。

2.3 不同配比下砂浆抗压强度测试结果

不同龄期下不同配比的砂浆抗压强度如图 3 所示。通过比较 C10、C6S4F0、C5S5F0 以及 C4S6F0 可以发现,当胶凝材料用量一定时,随着硅灰掺量的增加,砂浆的抗压强度呈现先升高后降低的变化趋势,在硅灰掺量为 40%时,不同胶凝材料用量(250 和 300 kg/m^3)的砂浆 28 d 抗压强度均达到峰值,分别为 82.4 和 97.9 MPa,相较于基准组砂浆分别提高了 34.3%和 27.3%。当硅灰掺量超过 40%后,继续增大硅灰掺量,砂浆抗压强度逐渐降低,但 28 d 抗压强度仍高于基准组。硅灰属于火山灰材料,这类材料除了可以优化水泥颗粒级配,细化水泥浆体孔隙度^[16]外,其火山灰效应还能在反应过程中生成高密度 C-S-H 凝胶,填充浆体孔隙,提高浆体强度。但是当硅灰掺量过大时,水泥掺量就会相应减小,水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 不足,从而生成的 C-S-H 凝胶总量也会相应减少,抗压强度降低^[20]。由于硅灰粒径较小,比表面积过大^[32],当硅灰掺量过大时会出现吸水过度现象,水泥水化所需的搅拌水不足,水化不完全,也会导致抗压强度有所降低。通过比较 C6S4F0、C5S4F1 以及 C4S4F2 可知,当胶凝材料用量和硅灰掺量一定时,随着复掺粉煤灰掺量的增加,砂浆抗压强度逐渐降低,并且掺有粉煤灰的砂浆 28 d 抗压强度与不掺矿物掺合料的基准组差别不大,有的甚至略低于基准组。这说明当硅灰掺量在 40%以上时,复掺 10%以上的粉煤灰并不能提高砂浆的抗压强度,甚至会使强度有所降低。另外,在同一矿物掺合料比例下,当胶凝材料用量增大时,砂浆抗压强度有所提高。当胶凝材料用量增多时,其水化产生的 C-S-H 或 C-S-A 凝胶也会增多,浆体变得更加密实,从而强度有所提高。本研究中当胶凝材料用量为 300 kg/m^3 ,水泥掺量为 60%,硅灰掺量为 40%时,砂浆的 28 d 抗压强度最高,为 97.9 MPa。

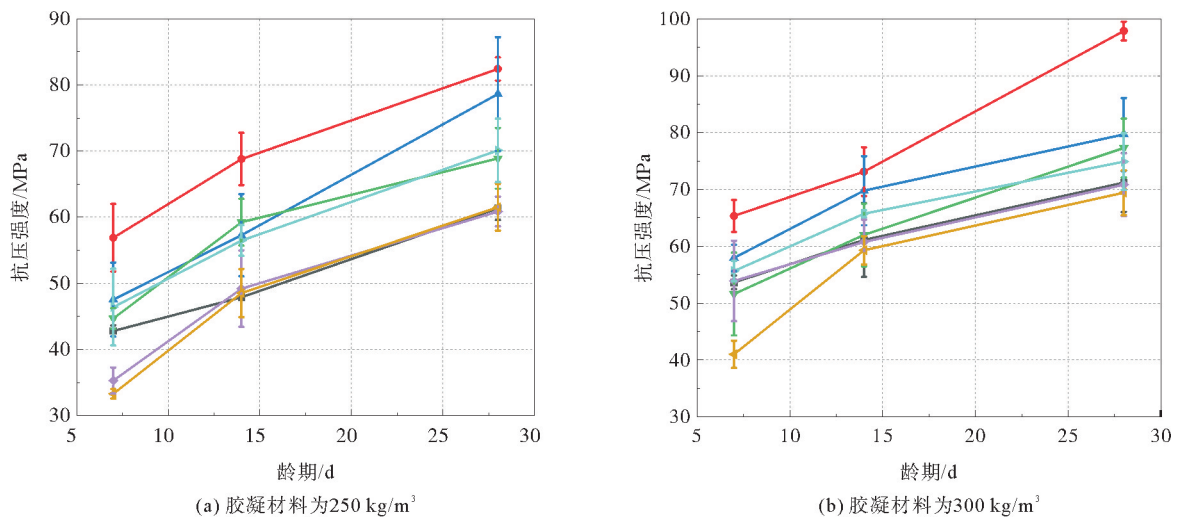


图 3 不同矿物掺合料添加比例下砂浆抗压强度随龄期变化曲线

—■— C10; —●— C6S4F0; —▲— C5S5F0; —◆— C4S6F0; —▼— C5S4F1; —◇— C4S4F2; —◇— C4S5F1

2.4 不同配比下砂浆抗折强度测试结果

不同龄期下不同配比的砂浆抗折强度如图 4 所示。对于胶凝材料用量为 250 kg/m^3 的砂浆,当龄期从 7 d 增长到 14 d 时,基准组砂浆抗折强度增加了 13.0%,仅掺 40%、50%、60%硅灰的砂浆抗折强度分

别增加了39.0%、37.5%和18.8%；而龄期从14 d增长到28 d时，基准组砂浆抗折强度增加了42.3%，仅掺40%、50%、60%硅灰的砂浆抗折强度分别增加了35.5%、8.1%和4.2%。这说明对于未掺硅灰的砂浆，其抗折强度后期增长较快，而添加一定量的硅灰后，其抗折强度后期增长减慢，因此，硅灰掺量过多不利于抗折强度的增长。对于复掺硅灰和粉煤灰的砂浆，在硅灰掺量保持不变时，龄期从7 d增长到14 d、14 d增长到28 d时，掺有10%和20%粉煤灰的砂浆抗折强度分别增加了18.2%和33.1%、16.3%和7.2%。这说明粉煤灰对砂浆后期抗折强度贡献不大。当硅灰掺量超过60%或粉煤灰掺量超过10%时，砂浆28 d抗折强度均低于基准组。单掺条件下硅灰掺量不宜超过60%，复掺时粉煤灰不宜超过10%。在本研究中，当胶凝材料用量为 300 kg/m^3 ，水泥掺量为60%，硅灰掺量为40%时，砂浆28 d抗折强度达到最高，为14.2 MPa。

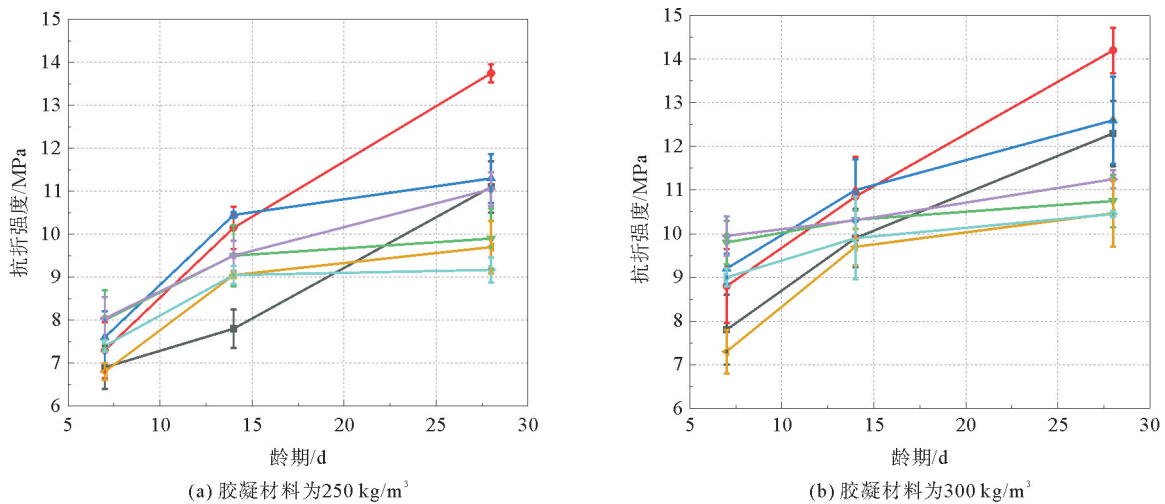


图4 不同矿物掺合料添加比例下砂浆抗折强度随龄期变化曲线

—■— C10; —●— C6S4F0; —▲— C5S5F0; —◆— C4S6F0; —▼— C5S4F1; —◀— C4S4F2; —▶— C4S5F1

2.5 微观结构分析

本研究选取了2组pH值最低(11.21、11.38)的砂浆涂层(C4S6F0、C4S5F1)进行XRD衍射分析，从微观角度分析矿物掺合料降低pH值、提高强度的原因。图5为养护28 d后C4S6F0(胶凝材料用量为 250 kg/m^3)和C4S5F1(胶凝材料用量为 250 kg/m^3)试件的XRD图。可见：28 d后，低碱砂浆涂层试件中含有大量 SiO_2 、C-S-H以及未水化的硅酸盐，C4S6F0试件水化生成的C-S-H位于 29.6 及 $45.0 \sim 50.0^\circ$ 的衍射角度，C4S5F1试件水化生成的C-S-H位于 31 及 41.1° 的衍射角度。矿物掺合料掺入引起的火山灰反应能生成额外的C-S-H凝胶，降低砂浆涂层pH值的同时提高砂浆强度。从图中可以得出28 d后火山

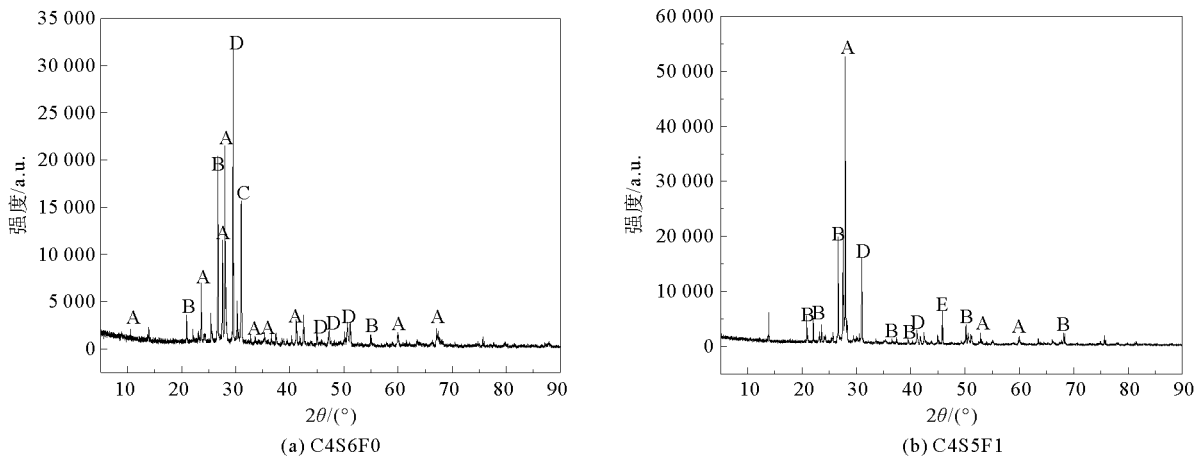


图5 高高低碱砂浆涂层的XRD图

A—硅酸盐; B— SiO_2 ; C—白云石; D—C-S-H; E— CaCO_3

灰反应并未完成,试件中仍含有大量 SiO_2 ,而 28 d 后试件中的硅酸盐也未能反应完全^[33-34],这也从微观角度解释了涂层的高强低碱存在一定的限值。另外,涂层中未反应的硅酸盐后期可以与浇筑的混凝土共同水化,提高涂层 GFRP 筋与混凝土间的握裹力,从而提高涂层 GFRP 筋与混凝土间的黏结力。

3 结论

1) 综合考虑 pH 值和强度对砂浆涂层的影响,试验中最适合作 GFRP 筋涂层的砂浆配合比为胶凝材料用量为 250 kg/m^3 ,水泥掺量为 40%,硅灰掺量为 60%。

2) 砂浆涂层 pH 值随着矿物掺合料掺量的增大呈现逐渐降低的趋势,在单掺硅灰掺量为 60%时 pH 值最低。

3) 抗压、抗折强度随着硅灰掺量的增加呈现先增大后减小的变化趋势,但随着粉煤灰掺量的增加而不断降低。

4) 龄期到达 28 d 时,砂浆涂层中仍含有大量 SiO_2 ,水化反应和火山灰反应均未进行完全,28 d 后试块 pH 值仍会继续降低,强度也会继续升高。

后续将继续对涂层的微观性能以及涂层 GFRP 筋与混凝土的黏结性能展开研究。

参考文献(References):

- [1] 董志强. FRP 筋增强混凝土结构耐久性能及其设计方法研究[D]. 南京:东南大学,2018.
DONG Zhiqiang. Study on the durability of FRP bars reinforced concrete structures and its design method[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [2] LIU M Y, ZHU H G, SIDDIQUI N A, et al. Glass fibers with clay nanocomposite coating: Improved barrier resistance in alkaline environment[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42(12): 2051-2059.
- [3] LEDJANE L S, MARYSILVIA F, LUIZ B F. The effects of water absorption on an ester vinyl resin system[J]. Materials Research, 2009, 12: 353-361.
- [4] WANG X Q, JIAN W, BUYUKOZTURK O, et al. Degradation of epoxy/glass interface in hygrothermal environment: An atomistic investigation[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 206: 108534.
- [5] DUO Y, LIU X, LIU Y, et al. Environmental impact on the durability of FRP reinforcing bars[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 43: 102909.
- [6] 张新越, 欧进萍. FRP 筋酸碱盐介质腐蚀与冻融耐久性试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(1): 33-36.
ZHANG Xinyue, OU Jinping. Durability experimental research on resistance of acidic, alkali, salt solutions and freeze-thaw properties of FRP bar[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(1): 33-36.
- [7] YI Y, GUO S, LI S, et al. Effect of alkalinity on the shear performance degradation of basalt fiber-reinforced polymer bars in simulated seawater sea sand concrete environment[J]. Construction and Building Materials, 2021, 299: 123957.
- [8] WANG P, WU H L, LEUNG C K Y. Mechanical and long-term durability prediction of GFRP rebars with the adoption of low-pH CSA concrete[J]. Construction and Building Materials, 2022, 346: 128444.
- [9] 李文超, 周广发, 温福胜, 等. 混凝土环境中 GFRP 筋性能衰退的规律及机理[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(2): 156-162.
LI Wenchao, ZHOU Guangfa, WEN Fusheng, et al. Degradation law and mechanism of GFRP bars in concrete environment[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(2): 156-162.
- [10] LU Z, SU L, TAN S, et al. Long-term shear performance of bare and cement mortar-coated BFRP bars in corrosive environments[J]. Construction and Building Materials, 2020, 237: 117658.
- [11] DONG Z Q, WU G, ZHAO X L, et al. Long-term bond durability of fiber-reinforced polymer bars embedded in seawater sea-sand concrete under ocean environments[J]. Journal of Composites for Construction, 2018, 22(5): 04018042.
- [12] 廖文宇, 石宪, 黄泽峰, 等. 植生混凝土的降碱技术及种植效果研究[J]. 混凝土, 2013(7): 155-158.
LIAO Wenyu, SHI Xian, HUANG Zefeng, et al. Study on decreasing alkalinity of planting concrete and the resulting planting effect[J]. Concrete, 2013(7): 155-158.
- [13] 王凤池, 孙畅, 丁向群, 等. 植生再生混凝土降碱技术及其对抗压强度的影响[J]. 混凝土, 2020(3): 160-163.
WANG Fengchi, SUN Chang, DING Xiangqun, et al. Alkalinity reduce technology of plant-growing recycled concrete and the effect of compressive strength[J]. Concrete, 2020(3): 160-163.
- [14] WANG W C, XUE J C, HUANG W H. Study of engineering properties of low-pH self-compacting concrete for concrete plug[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e01060.

- [15] 何岩东. 建筑钢筋用聚合物防腐砂浆的研究[D]. 海口:海南大学,2018.
HE Yandong. Study on polymer anticorrosive mortar used for building reinforcement[D]. Haikou:Hainan University,2018.
- [16] COUMES C C D,COURTOIS S,NECTOUX D,et al. Formulating a low-alkalinity,high-resistance and low-heat concrete for radioactive waste repositories[J]. *Cement and Concrete Research*,2006,36(12):2152-2163.
- [17] CALVO J L G,HIDALGO A,ALONSO C,et al. Development of low-pH cementitious materials for HLRW repositories;Resistance against ground waters aggression[J]. *Cement and Concrete Research*,2010,40(8):1290-1297.
- [18] 郭伟娜,张鹏,鲍玖文,等. 粉煤灰掺量对应变硬化水泥基复合材料力学性能及损伤特征的影响[J]. *建筑材料学报*,2022,25(6):551-557.
GUO Weina,ZHANG Peng,BAO Jiuwen,et al. Effect of fly ash content on mechanical properties and damage characteristics of strain-hardening cementitious composites[J]. *Journal of Building Materials*,2022,25(6):551-557.
- [19] 柳嘉伟,焦宝祥,周启兆,等. 乙烯-醋酸乙烯共聚物改性水泥基防锈涂料的研究[J]. *涂料工业*,2019,46(4):39-44.
LIU Jiawei,JIAO Baoxiang,ZHOU Qizhao,et al. Preparation of EVA-modified cement-based antirust coatings[J]. *Paint & Coatings Industry*,2019,46(4):39-44.
- [20] 魏凤艳. 高性能水泥中低 Ca/Si 的 C-S-H 凝胶形成及其抑制 ASR 机理[D]. 南京:南京工业大学,2005.
WEI Fengyan. Formation of low Ca/Si ratio C-S-H gel and its mechanism in controlling ASR in highperformance cement[D]. Nanjing:Nanjing Tech University,2005.
- [21] 王军委. 超高强水泥基复合材料制备技术研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2014.
WANG Junwei. The research on preparation technologies of ultra-high-strength cementitious composites[D]. Qingdao:Qingdao University of Technology,2014.
- [22] GB/T 17671—2021,水泥胶砂强度检验方法[S].
GB/T 17671—2021,Test method of cement mortar strength[S].
- [23] JG/T 502—2016,环氧树脂涂层钢筋[S].
JG/T 502—2016,Epoxy resin coated steel reinforcing bars[S].
- [24] ASTM D4972-19,Standard test methods for pH of soils[S].
- [25] DUVAL R,KADRI E H. Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes[J]. *Cement and Concrete Research*,1998,28(4):533-547.
- [26] KLUR I,POLLET B,VIRLET J,et al. C-S-H structure evolution with calcium content by multinuclear NMR[M]//COLOMBET P,ZANNI H,GRIMMER A R,et al. Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy of Cement-Based Materials. Heidelberg:Springer Berlin Heidelberg,1998:119-141. DOI:10.1007/978-3-642-80432-8_8.
- [27] CODINA M,CAU-DIT-COUMES C,LE B P,et al. Design and characterization of low-heat and low-alkalinity cements[J]. *Cement and Concrete Research*,2008,38(4):437-448.
- [28] 张建亮,邓敏. 粉煤灰水泥浆体孔溶液中 K^+ , Na^+ 和 OH^- 离子的表征[J]. *混凝土*,2010(11):5-9.
ZHANG Jianliang,DENG Min. Characterization of Na^+ , K^+ and OH^- ions in the pore solutions of cement pastes with fly ashes[J]. *Concrete*,2010(11):5-9.
- [29] 毕雯惠,朱亚光,徐培秦,等. 浮选脱碳粉煤灰砂浆性能试验研究[J]. *青岛理工大学学报*,2023,44(2):1-8.
BI Wenhui,ZHU Yaguang,XU Peizhen,et al. Study on the performance of flotation decarburized fly ash mortar[J]. *Journal of Qingdao University of Technology*,2023,44(2):1-8.
- [30] SHEHATA M H,THOMAS M D A,BLESZYNSKI R F. The effects of fly ash composition on the chemistry of pore solution in hydrated cement pastes[J]. *Cement and Concrete Research*,1999,29(12):1915-1920.
- [31] 彭小东. 石灰石粉低熟料胶凝材料混凝土性能研究[D]. 北京:北京建筑大学,2018.
PENG Xiaodong. Cementitious material with low clinker content[D]. Beijing:Beijing University of Civil Engineering and Architecture,2018.
- [32] 霍俊芳,李晨霞,侯永利,等. 石灰石粉硅粉复掺对混凝土抗冻耐久性的影响研究[J]. *硅酸盐通报*,2015,34(S1):132-135.
HUO Junfang,LI Chenxia,HOU Yongli,et al. Effect of concrete frost resistance with limestone powder and silicon fume[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*,2015,34(S1):132-135.
- [33] TORII K,TANIGUCHI K,KAWAMURA M. Sulfate resistance of high fly ash content concrete[J]. *Cement and Concrete Research*,1995,25(4):759-768.
- [34] PAPADAKIS V. Effect of fly ash on Portland cement systems Part I:Low-calcium fly ash[J]. *Cement and Concrete Research*,1999,29(11):1727-1736.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)