



硅灰-黄磷渣-高钛型高炉渣三元复合掺合料的制备与性能研究

苏达刚¹, 鲁莉², 龙钊永³, 周孝军^{2*}, 周贤良², 敖进清²

(1. 攀枝花环业冶金渣开发有限责任公司, 四川 攀枝花 617062; 2. 西华大学建筑与土木工程学院, 四川 成都 610039; 3. 攀枝花钢城集团有限公司工程技术中心, 四川 攀枝花 617099)

摘要:高钛型高炉渣活性较低是限制其在混凝土中单独作为掺合料应用的主要因素之一。为解决这一问题, 制备了硅灰-黄磷渣-高钛型高炉渣三元复合掺合料, 研究其对水泥胶砂流动度比与活性指数的影响。结合 XRD、SEM-EDS 微观测试手段, 分析了不同掺合料对水泥胶砂性能的影响机理。结果表明: 随着硅灰-黄磷渣的掺入, 水泥胶砂的流动度比会下降, 且硅灰的影响大于黄磷渣。三元复合掺合料的活性指数较高钛型高炉渣单独作为掺合料时得到了明显的提升。高钛型高炉渣: 硅灰: 黄磷渣占比为 5:2:3 时 7 d 和 28 d 龄期的活性指数最优, 分别达到了 76.9% 和 100.2%, 满足 II 级掺合料对活性指数的要求。微观测试表明, 硅灰-黄磷渣的掺入能消耗片状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 生成更多絮凝状胶体 C-S(A)-H 与针棒状 Aft 的水化产物, 形成相互交错、致密的网状结构, 从而增强水泥胶砂的强度。

关键词:高钛型高炉渣; 硅灰; 黄磷渣; 复合掺合料; 流动度比; 活性指数

中图分类号: TF09, TU528.041 文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)04-0080-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.04.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Preparation and properties study of ternary composite admixture consisting of silica fume, yellow phosphorus slag, and high titanium blast furnace slag

SU Dagang¹, LU Li², LONG Zhaoyong³, ZHOU Xiaojun^{2*}, ZHOU Xianliang², AO Jinqing²

(1. Panzhihua Huanye Metallurgical Slag Development Co., Ltd., Panzhihua 617062, Sichuan, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan, China; 3. Panzhihua Gangcheng Group Co., Ltd., Engineering Technology Center, Panzhihua 617099, Sichuan, China)

Abstract: The low reactivity of high titanium blast furnace slag is one of the main factors limiting its application as a sole admixture in concrete. To address this issue, a ternary composite admixture consisting of silica fume, yellow phosphorus slag, and high titanium blast furnace slag was prepared, and its effects on the flow ratio and activity index of cement mortar were investigated. Combined with microscopic testing methods such as XRD and SEM-EDS, the influence mechanism of different admixtures on the performance of cement mortar was analyzed. The results indicate that the incorporation of silica fume and yellow phosphorus slag leads to a decrease in the flow ratio of cement mortar, with the silica

收稿日期: 2025-03-11

基金项目: 四川省自然科学基金项目(2024 NSFSC0163)。

作者简介: 苏达刚, 1976 年出生, 男, 四川盐边人, 本科, 工程师, 主要从事冶金固废资源开发与推广应用研究, E-mail: LL-PQ6873@163.com; * 通讯作者: 周孝军, 1985 年出生, 男, 湖北监利人, 博士, 副教授, 主要从事高性能混凝土与绿色低碳掺合料研发及其工程应用研究, E-mail: xjzhouedu@163.com。

fume having a greater impact than the yellow phosphorus slag. The activity index of the ternary composite admixture is significantly improved compared to when high titanium blast furnace slag is used alone as an admixture. The optimal activity indices at 7 days and 28 days of curing are achieved when the ratio of high-titanium blast furnace slag: silica fume: yellow phosphorus slag is 5:2:3, reaching 76.9% and 100.2%, respectively, which meets the requirements for the activity index of Grade II admixtures. Microscopic testing reveals that the incorporation of silica fume and yellow phosphorus slag consumes flaky $\text{Ca}(\text{OH})_2$, generating more flocculent colloidal C-S(A)-H and needle-like Aft hydrates, which form an interlaced and dense network structure, thereby enhancing the strength of cement mortar.

Key words: high-titanium blast furnace slag, silica fume, yellow phosphorus slag, composite admixture, flow ratio, activity index

0 引言

混凝土是全球建筑行业中用量最多的建筑材料^[1]。混凝土的制备离不开水泥和骨料^[2]。我国是水泥生产大国,水泥的生产占比达到了全球的56.1%^[3]。水泥在“两磨一烧”的过程中,石灰石(CaCO_3)会分解成石灰(CaO)并产生较多的 CO_2 ,导致大量的碳排放^[4]。同时,我国工业技术的迅猛发展导致堆积了大量的工业固体废物。工业固体废物的堆积问题,一方面给相关城市和企业带来了困扰,另一方面占用了大量的土地,成为了“放错地方的资源”,造成了环境污染和资源浪费^[5-7]。为实现我国绿色可持续发展和解决工业固体废物的堆积问题,将其作为掺合料替代水泥是当下的研究热点。

四川攀枝花地区的含钛高炉渣是冶炼生铁时所产生的典型工业固体废物,其含有的 TiO_2 含量超过15%,属于高钛型高炉渣^[8]。我国高钛型高炉渣的年产量约300多万t,历史堆积量已达7000~8000万t^[9-10],寻找高钛型高炉渣的有效处理方式显得尤为紧迫。在混凝土中,高钛型高炉渣可以作为骨料或掺合料使用。王伟等^[11]研究发现,高钛型高炉渣骨料的针片状含量远低于石灰岩及玄武岩,磨耗值与压碎值鉴于两者之间,具有粗糙多孔状、高吸水率的特点,应用于沥青混凝土具有良好的可行性。LI等^[12]研究指出,多孔状的高钛型高炉渣骨料能吸附自由水,加速混凝土早期的水化反应,改善浆体与骨料之间的界面结构。然而,TAO等^[13]使用矿渣掺合料与高钛型高炉渣掺合料分别替代50%的水泥时发现,高钛型高炉渣掺合料几乎没有活性。更为重要的是,WANG等^[14]针对高钛型高炉渣掺合料进行了60 min的机械研磨,发现其28 d龄期的活性指数仅为63.75%。说明高钛型高炉渣单独作为掺合料时活性较低。因此,为了高钛型高炉渣能更好地在混凝土中应用,需对高钛型高炉渣掺合料的活性进行提升。

研究表明,复合掺合料能改善单一掺合料独自使用的缺点^[15-17]。复合掺合料主要通过各单一掺合料之间的颗粒级配、活性物质含量等的不同所产生“协同耦合效应”来提升活性。硅灰是铁合金厂在冶炼硅铁合金或工业硅时,通过烟道收集的一种极细颗粒工业固体废物,具有的平均粒径范围为0.1~0.3 μm ,这有助于发挥良好的填充效应^[18]。硅灰主要由无定形的 SiO_2 组成,具有较高的火山灰活性,可以与水泥的水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 迅速发生反应,生成大量的絮凝状胶体水化硅(铝)酸钙(C-S(A)-H)^[19]。黄磷渣是用高温电炉在1350~1400 $^{\circ}\text{C}$ 下提炼黄磷时所产生的工业固体废物,通常每生产1 t黄磷会产生8~10 t的黄磷渣,其中四川、贵州、云南和湖北是黄磷渣的主要排放区^[20-21]。黄磷渣含有大量的 CaO 、 SiO_2 ,内部玻璃体成分达80%~90%,可以较好地促进水化反应,具有巨大的应用价值^[22]。

基于此,为了提升高钛型高炉渣掺合料的活性,使高钛型高炉渣能更好地应用于混凝土。笔者利用硅灰-黄磷渣协同强化高钛型高炉渣活性的方式制备三元复合掺合料,研究不同掺合料的流动度比与活性指数,并结合X射线衍射(XRD)、扫描电镜-能谱(SEM-EDS)微观测试手段,分析不同掺合料水泥胶砂的水化产物类型及微观结构特征。

1 试验原材料和制备方法

1.1 试验原材料

水泥采用都江堰拉法基水泥有限公司生产的P·O42.5R普通硅酸盐水泥,比表面积为404.0 m^2/kg ,45 μm 方孔筛筛余量为7.6%;掺合料为高钛型高炉渣、硅灰和黄磷渣均由攀枝花环业冶金渣开发有限责任公司所提供,高钛型高炉渣和黄磷渣比表面积分别为392.2、445.1 m^2/kg ,45 μm 方孔筛筛余量分别为5.9%、1.7%,硅灰比表面积大于18000.0 m^2/kg ,45 μm 方孔筛筛余量小于5.0%;砂采用厦门艾思欧标准砂有限公司生产的0.08~2.00 mm中国ISO标

准砂;水取自实验室自来水。

部分原材料主要化学成分及含量如表 1 所示,粒径分布曲线如图 1 所示,XRD 图谱如图 2 所示。由图 2 可知,水泥的主要矿物组成为四大熟料矿物与石膏。高钛型高炉渣的主要矿物组成为 CaTiO_3 和 $\text{Ca}(\text{Mg},\text{Al},\text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$ 。黄磷渣没有明显的衍射峰,

在 2θ 为 $25^\circ \sim 35^\circ$ 处有一个主要的宽峰。硅灰没有明显的衍射峰,主要矿物是无定形的 SiO_2 。部分原材料的扫描电镜如图 3 所示。由图 3 可知,高钛型高炉渣和黄磷渣在 $10\ \mu\text{m}$ 下能清晰地看到颗粒表面均较为致密光滑,呈棱角分明的多面体状,而硅灰在 $1\ \mu\text{m}$ 下才能较为清晰地看清颗粒形貌为极细小的球形。

表 1 部分原材料主要化学成分及含量

Table 1 The main chemical compositions and content of some raw materials

%

Some raw materials	CaO	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	F	Other
Cement	63.09	18.84	1.15	5.07	2.04	3.52	4.42	0.95	0.34	0.15	0.00	0.43
High titanium blast furnace slag	28.43	23.1	21.79	13.56	6.98	1.87	1.56	0.74	0.83	0.02	0.00	1.12
Silica fume	0.90	95.59	0.00	0.40	0.19	0.26	2.03	0.42	0.09	0.08	0.00	0.04
Yellow phosphorus slag	47.58	36.9	0.22	3.63	2.67	0.65	0.74	0.79	0.55	2.86	3.18	0.23

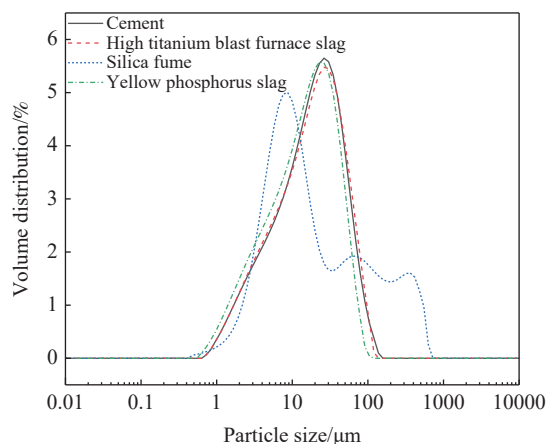


图 1 部分原材料粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution curves of some raw materials

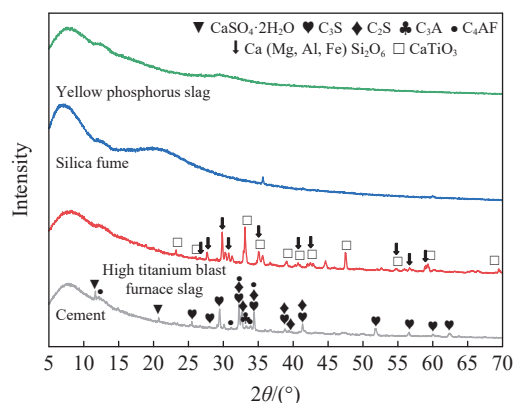
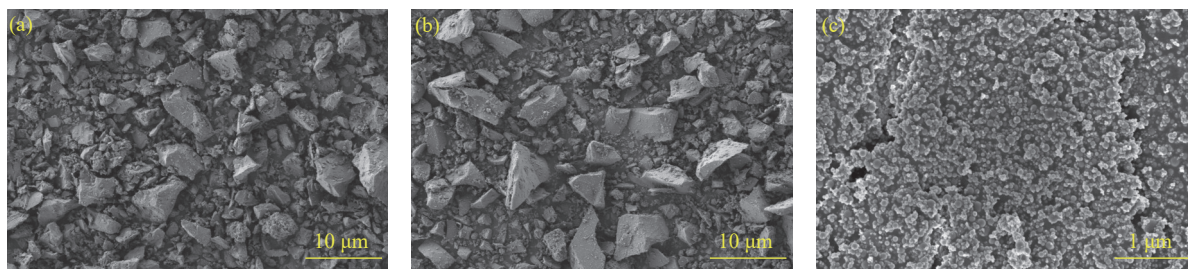


图 2 部分原材料 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of some raw materials



(a) 高钛型高炉渣; (b) 黄磷渣; (c) 硅灰

图 3 部分原材料扫描电镜形貌

Fig. 3 SEM images of some raw materials

1.2 试样制备与测试方法

1.2.1 样品制备方法

依据《混凝土用复合掺合料》(JG/T 486-2015)设置水泥胶砂的水胶比为 0.5, 胶砂比为 1:3, 分别制备无掺合料的对比胶砂、单掺高钛型高炉渣及硅灰-黄磷渣-高钛型高炉渣三元复合掺合料的试验胶砂。将材料按配合比称好于搅拌锅中搅拌, 搅拌完成后测试水泥胶砂的流动度。随后, 将水泥胶砂置于尺

寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ 的试模中进行自然养护 24 h。脱模后, 将试样放入温度为 $(20.0 \pm 2.0)^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $\geq 96.0\%$ 的恒温恒湿标准养护箱养护至 7 d 和 28 d 龄期后进行强度和微观特征测试。不同掺合料水泥胶砂样品配合比如表 2 所示。

1.2.2 样品测试方法

流动度测试参照《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419-2005), 使用水泥胶砂流动度测定仪跳

动 25 次后进行流动度测试, 按式(1)计算得到水泥胶砂流动度比。

$$F = \frac{L}{L_0} \times 100 \tag{1}$$

式中, F 为水泥胶砂流动度比, %; L 为试验胶砂流动度, 单位为 mm; L_0 为对比胶砂流动度, 单位为 mm。

强度测试参照《水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法)》(GB/T 17671-2021), 使用深圳万测试验

设备有限公司的 ETM305F-2 型微机控制电子压折一体试验机进行水泥胶砂 7 d 和 28 d 龄期的抗折强度、抗压强度测试, 按式(2)计算得到水泥胶砂活性指数。

$$A = \frac{P_t}{P_0} \times 100 \tag{2}$$

式中, A 为水泥胶砂活性指数, %; P_t 为试验胶砂相应龄期的抗压强度, 单位为 MPa; P_0 为对比胶砂相应龄期的抗压强度, 单位为 MPa。

表 2 不同掺合料水泥胶砂样品配合比
Table 2 Mix proportions of cement mortar samples with different admixtures

Number	Group	Cement/g	Admixture/g			Standard sand/g	Water/mL	Admixture type	Type of cement mortar
			High titanium blast furnace slag	Silica fume	Yellow phosphorus slag				
A	DB	450	0	0	0	1 350	225	Admixture-free Single-blended admixture	Comparison mortar
B	T	315	135	0	0	1 350	225		
C	T7S1H2	315	94.5	13.5	27	1 350	225		
D	T7S1.5H1.5	315	94.5	20.25	20.25	1 350	225		
E	T7S2H1	315	94.5	27	13.5	1 350	225		
F	T6S1H3	315	81	13.5	40.5	1 350	225	Ternary composite admixture	Test mortar
G	T6S1.5H2.5	315	81	20.25	33.75	1 350	225		
H	T6S2H2	315	81	27	27	1 350	225		
I	T5S1H4	315	67.5	13.5	54	1 350	225		
J	T5S1.5H3.5	315	67.5	20.25	47.25	1 350	225		
K	T5S2H3	315	67.5	27	40.5	1 350	225		

Note: In the group designations, T represents high-titanium blast furnace slag, S denotes silica fume, and H indicates yellow phosphorus slag. T7S1H2 signifies the proportions of each material in the admixture (e.g., T:S:H = 7:1:2), and other groups follow the same naming convention.

1.3 微观特征测试

选取少量水泥胶砂压碎样品于研磨皿中研磨至粉末, 并过 80 μm 方孔筛后制样于载玻片上, 使用丹东浩元仪器有限公司的 DX-2800 型 X 射线衍射仪, 在 30 mA/40 kV, 扫描角度 5°~70°, 扫描速度 3°/min, 步宽角度 0.02°的条件下对样品进行 XRD 测试。选取部分水泥胶砂压碎样品于无水乙醇中浸泡以终止水化, 微观结构测试前取出置于 60 ℃ 烘箱中干燥 48 h, 并对样品进行喷金, 使用德国 ZEISS Sigma 360 型扫描电子显微镜仪进行 SEM-EDS 测试。

2 结果与分析

2.1 流动度与流动度比

不同掺合料水泥胶砂流动度及流动度比测试结果如图 4 所示。

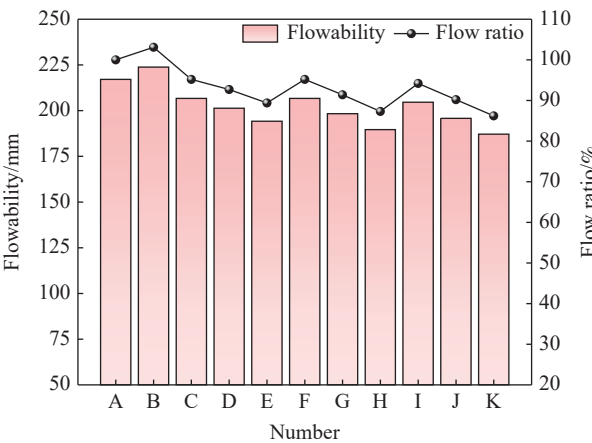


图 4 水泥胶砂流动度及流动度比
Fig. 4 Flowability and flow ratio of cement mortar

由图 4 可知, 无掺合料的对比胶砂流动度为 217.1 mm; 单掺高钛型高炉渣的试验胶砂的流动度与流动度比得到了提升, 流动度为 223.8 mm, 流动

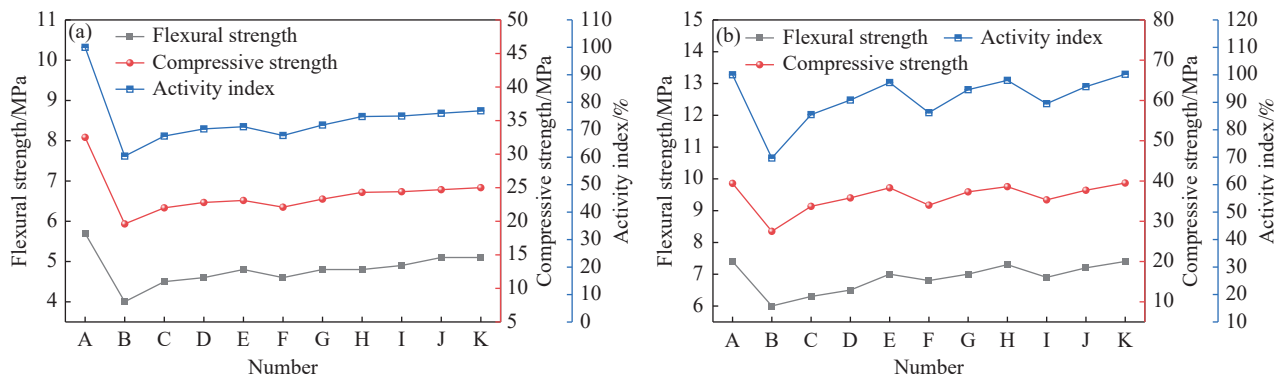
度比为 103.1%。掺三元复合掺合料的试验胶砂中:当固定高钛型高炉渣掺量为 70% 的 T7S1H2 组 ~ T7S2H1 组,流动度与流动度比呈下降趋势,流动度分别为 206.7、201.3、194.2 mm,流动度比分别为 95.2%、92.7%、89.4%;当固定硅灰的掺量为 10% 的 T7S1H2 组 ~ T5S1H4 组,流动度与流动度比也呈下降趋势,流动度分别为 206.7、206.7、204.6 mm,流动度比分别为 95.2%、95.2%、94.2%。

因此,高钛型高炉渣单独作为掺合料时具有改善流动度的效果。掺三元复合掺合料相比高钛型高炉渣单独作为掺合料时,水泥胶砂的流动度有所降低。其中,高钛型高炉渣掺量保持不变时,随着硅灰掺量增加、黄磷渣掺量减少,流动度与流动度比都表现为逐渐降低趋势,且降低幅度较为明显;硅灰掺量不变时,随着高钛型高炉渣掺量减少、黄磷渣掺量增加,流动度与流动度比同样会降低,但降低幅度并不显著。说明硅灰对流动度的影响大于黄磷渣对流动度的影响,这主要是因为硅灰的颗粒形貌为极细小的球形,吸附了浆体中的自由水分,增大了水泥胶砂的需水量,因此需控制多元复合掺合料中硅灰

组分的用量。

2.2 强度与活性指数

不同掺合料水泥胶砂 7 d 和 28 d 龄期的抗折强度、抗压强度与活性指数如图 5 所示。由图 5 可知,不同掺合料水泥胶砂 7 d 和 28 d 龄期的抗折强度、抗压强度与活性指数变化趋势大体相似。单掺高钛型高炉渣的 T 组试验胶砂 7 d 和 28 d 龄期的抗折强度和抗压强度最低,活性指数分别为 60.4% 和 69.7%,无法达到 III 级掺合料的活性指数要求。而随着硅灰-黄磷渣的掺入,试验胶砂的抗折强度、抗压强度与活性指数均得到了有效的提升。掺三元复合掺合料的试验胶砂中,高钛型高炉渣掺量保持不变时,随着硅灰掺量增加、黄磷渣掺量减少,抗折强度、抗压强度与活性指数逐渐提升。硅灰掺量不变时,随着高钛型高炉渣掺量减少,黄磷渣掺量增加,抗折强度、抗压强度与活性指数同样有一定程度的提升。掺三元复合掺合料的试验胶砂中,最优的 T5S2H3 组试验胶砂 7 d 和 28 d 龄期的活性指数分别为 76.9% 和 100.2%,已高于 II 级掺合料的活性指数要求。



(a) 7 d 龄期; (b) 28 d 龄期

图 5 水泥胶砂 7 d 和 28 d 龄期的强度与活性指数

Fig. 5 Strength and activity index of cement mortar after 7 days and 28 days of curing

2.3 微观机理分析

2.3.1 XRD 分析

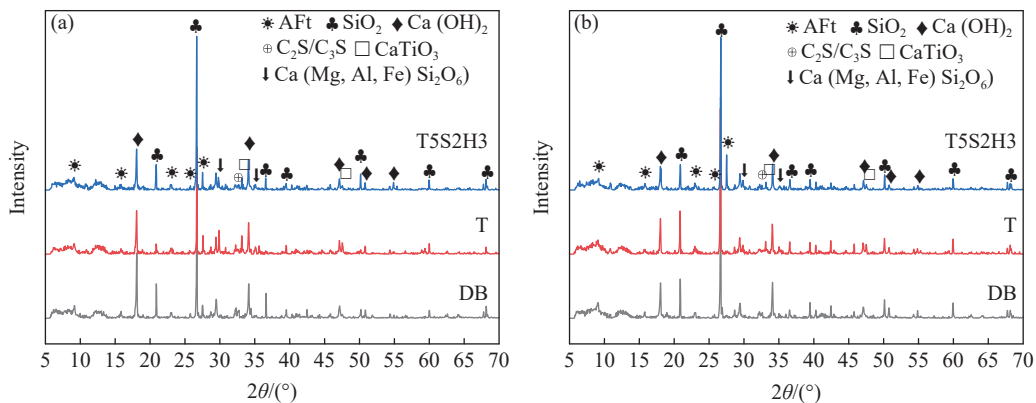
对 7 d 和 28 d 龄期的对比胶砂、单掺高钛型高炉渣及强度最优的 T5S2H3 组试验胶砂进行 XRD 测试分析,结果如图 6 所示。由图 6 可知,水泥胶砂的 XRD 图谱 7 d 和 28 d 龄期均表现出相似类型的水化产物,但含量有所不同,主要包括 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、钙矾石 (AFt)、未完全水化的硅酸二钙 (C_2S)、硅酸三钙 (C_3S) 及大量由标准砂引入的 SiO_2 。此外,在 2θ 为 $25^\circ \sim 35^\circ$ 衍射角之间的底部存在很多无定形的

弥漫杂峰,说明水化产物中存在 C-S(A)-H 产物。其中,试验胶砂还含有未能完全反应的稳定内部矿物相 CaTiO_3 和 $\text{Ca}(\text{Mg},\text{Al},\text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$ 衍射峰。

另外,由图 6(a)可知,水化产物在 7 d 龄期时,对比胶砂中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 C_2S 、 C_3S 及 AFt 衍射峰均高于试验胶砂。上述现象是因为试验胶砂替代了 30% 的水泥,所含 C_2S 、 C_3S 含量低于对比胶砂,使得水化反应生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 低于对比胶砂。而试验胶砂中,单掺高钛型高炉渣的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰相对较高,稳定内部矿物相 CaTiO_3 和 $\text{Ca}(\text{Mg},\text{Al},\text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$

衍射峰最高。主要原因在于掺合料中仅有高钛型高炉渣时,掺合料的活性较低,消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 进而生成 C-S(A)-H 和 AFt 的能力较弱。随着硅灰-黄磷渣的掺入, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰逐渐降低,稳定内部矿物相 CaTiO_3 和 $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$ 衍射峰也相对降低,而 AFt 衍射峰相对增加。说明三元复合掺合料能消耗更多的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生二次水化反应,生成更多的 C-S(A)-H 和 AFt。由图 6(b)可知,水化产物在 28 d 龄期时,对比胶砂与试验胶砂的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射

峰与 C_2S 、 C_3S 衍射峰随试验龄期的延长而降低。而试验胶砂中,稳定内部矿物相 CaTiO_3 和 $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$ 衍射峰变化规律不明显。但随着硅灰-黄磷渣的掺入,相比于单掺高钛型高炉渣的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰也有所降低,AFt 衍射峰也逐渐增加。由此可知,硅灰-黄磷渣的掺入能提升高钛型高炉渣的水化产物品质,进而提升其活性,该结果与宏观强度相符合。



(a) 7 d 龄期; (b) 28 d 龄期

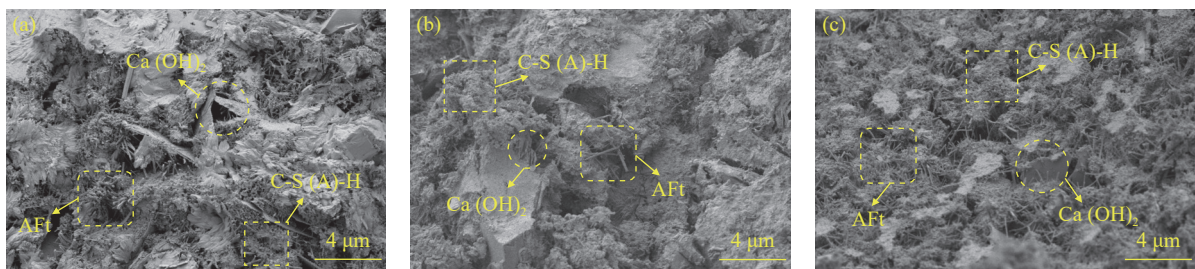
图 6 水泥胶砂 7 d 和 28 d 龄期的 XRD 图谱

Fig. 6 XRD patterns of cement mortar after 7 days and 28 days of curing

2.3.2 SEM-EDS 分析

对 7 d 和 28 d 龄期的对比胶砂、单掺高钛型高

炉渣及强度最优的 T5S2H3 组试验胶砂进行 SEM-EDS 的测试分析,结果如图 7、8 所示。



(a) DB; (b) T; (c) T5S2H3

图 7 水泥胶砂 7 d 龄期的微观结构

Fig. 7 Microstructure products of cement mortar after 7 days of curing

由图 7、8 可知,7 d 和 28 d 龄期的水泥胶砂微观结构主要由针棒状、絮凝状胶体及包裹在其中的片状水化产物相互交错在一起,形成网状结构。28 d 龄期时,各水泥胶砂的内部结构相较于 7 d 龄期时更加饱满。无掺合料的 DB 组对比胶砂与试验胶砂相比,内部结构的孔洞较少,水化产物较多,更为紧实、致密。试验胶砂中,单掺高钛型高炉渣的 T 组试验胶的内部结构疏松多孔,孔隙数量最多,水

化产物最少。随着硅灰-黄磷渣的掺入, T5S2H3 组试验胶砂内部结构的孔隙有所改善,水化产物增多,增强了体系的密实程度。由于各龄期形成的水化产物形貌相似,因此仅对 28 d 龄期部分典型的水化产物进行 EDS 测试,EDS 测试结果表明:图 8(a)样品中针棒状产物主要由 Ca、O、Si、Al、S 元素组成,推测其为 AFt。图 8(b)样品中片状产物主要由 Ca、O 元素组成,推测其为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。图 8(c)样品中絮

凝状胶体产物主要由 Ca、Si、O、Al 组成, 推测其为 C-S(A)-H。该结果与 XRD 含有的水化产物结果相符。可见, 掺三元复合掺合料改善了单掺高钛型高

炉渣时内部结构的孔隙, 增强了体系的致密程度, 能为活性的提升提供骨架的支撑。

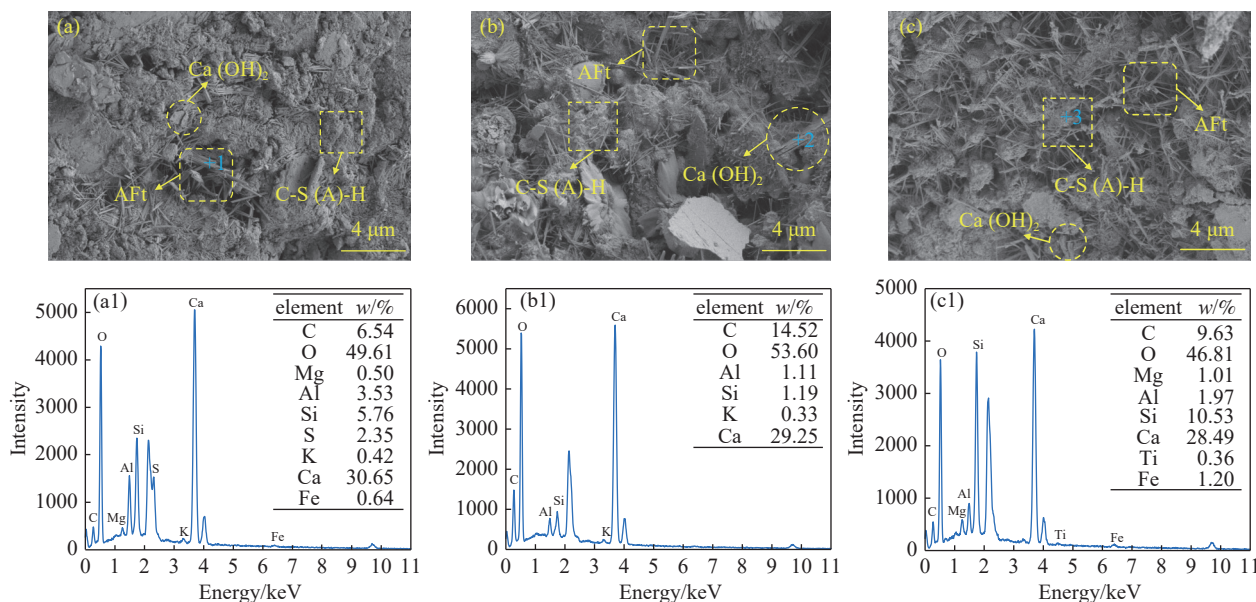


图 8 水泥胶砂 28 d 龄期的微观结构和 EDS 图

Fig. 8 Microstructure products and EDS patterns of cement mortar after 28 days of curing

3 结论

1) 单掺高钛型高炉渣能较好地改善水泥胶砂的流动度, 而掺三元复合掺合料呈相反效果, 且硅灰对流动度的负面影响大于黄磷渣, 需控制多元复合掺合料中硅灰组分的用量。

2) 高钛型高炉渣单独作为掺合料时活性最低。三元复合掺合料的活性得到了显著提升。28 d 龄期

时, T5S2H3 组试验胶砂强度能达到对比胶砂相当的效果, 满足 II 级掺合料的活性指数要求。

3) 单掺高钛型高炉渣的试验胶砂内部结构疏松多孔, 孔隙数量最多。硅灰-黄磷渣的掺入消耗了片状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 生成了更多絮凝状胶体 C-S(A)-H 与针棒状 AFt, 形成了相互交错、致密的网状结构, 从而增强了水泥胶砂的强度。

参考文献

- [1] ZHAO Y, SHEN G H, ZHU L L, *et al.* Fractal dimension-based fine-scale damage law for uniaxial compression test of 3D printed steel slag cementitious materials[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 42(4): 1-10.
(赵宇, 沈光海, 朱伶俐, 等. 基于分形维数的 3D 打印钢渣水泥基材料单轴压缩试验的细观破坏规律[J]. *复合材料学报*, 2024, 42(4): 1-10.)
- [2] SONG Q, YANG Y X, XU S P, *et al.* Research progress in performance and enhancement of coal gangue concrete[J]. *Coal Science and Technology*, 2025, 53(2): 402-420.
(宋强, 杨玉鑫, 许世鹏, 等. 煤矸石混凝土性能及提升研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2025, 53(2): 402-420.)
- [3] GUO Y, LUO L, LIU T, *et al.* A review of low-carbon technologies and projects for the global cement industry[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2024, 136: 682-697.
- [4] BENHELAL E, SHAMSAEI E, RASHID M I. Challenges against CO_2 abatement strategies in cement industry: A review[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, 104: 84-101.
- [5] ZHENG Y L, JI S, LU C H, *et al.* Preparation technology and mechanism of cementitious material based on solid waste phosphogypsum[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(3): 1436-1446.

- (郑玉龙, 嵇帅, 陆春华, 等. 基于固废磷石膏制备胶凝材料的工艺与机制[J]. 复合材料学报, 2024, 41(3): 1436-1446.)
- [6] GU X W, ZHANG Y N, ZHANG W F, *et al.* Research status and prospect of high value building materials utilization of bulk industrial solid waste[J]. *Metal Mine*, 2022, 51(1): 1-13.
(顾晓薇, 张延年, 张伟峰, 等. 大宗工业固废高值建材化利用研究现状与展望[J]. 金属矿山, 2022, 51(1): 1-13.)
- [7] WU J, ZHANG J S, TAN Y Z, *et al.* Mechanical properties and microscopic mechanism of phosphogypsum-slag-lime solidified sediment[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2024, 32(5): 1360-1373.
(吴军, 张金生, 谈云志, 等. 磷石膏-矿渣-石灰固化底泥力学性能及微观机理[J]. 应用基础与工程科学学报, 2024, 32(5): 1360-1373.)
- [8] LI M Y, ZHANG C, LIANG R, *et al.* Research progress of blast furnace slag based photocatalytic materials in wastewater treatment[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 51(1): 270-282.
(李明阳, 张晨, 梁锐, 等. 高炉渣基光催化材料在废水处理领域的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(1): 270-282.)
- [9] LIU Z, LAI Z Y, LUO X Z, *et al.* Effect of titanium slag on the properties of magnesium phosphate cement[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 343.
- [10] JING J F, GUO Y F, ZHENG F Q, *et al.* Development status on comprehensive utilization of Ti-bearing blast furnace slag[J]. *Metal Mine*, 2018, 47(4): 185-191.
(景建发, 郭宇峰, 郑富强, 等. 含钛高炉渣综合利用的研究进展[J]. 金属矿山, 2018, 47(4): 185-191.)
- [11] WANG W, WANG J, LIANG Y H. Feasibility analysis of high-titanium heavy slag as aggregate for asphalt mixture[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2022, 43(4): 87-93.
(王伟, 汪杰, 梁月华. 高钛重矿渣作为集料用于沥青混合料的可行性分析研究[J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(4): 87-93.)
- [12] LI X Y, LI J, LU Z Y, *et al.* Preparation and properties of reactive powder concrete by using titanium slag aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 234.
- [13] TAO M, LU D M, SHI Y, *et al.* Utilization and life cycle assessment of low activity solid waste as cementitious materials: A case study of titanium slag and granulated blast furnace slag[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 849: 157797.
- [14] WANG S P, LI J J, YUN X X, *et al.* Effect of extracted titanium tailing slag on the properties of alkali-activated fly ash-ground blast furnace slag binder[J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 8.
- [15] WANG J, LIANG Y H. Study on the effect of electric furnace steel slag-fly ash compound admixture on the properties of cement mortar[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2022, 43(5): 123-128.
(汪杰, 梁月华. 电炉钢渣-粉煤灰复合掺合料水泥胶砂性能研究[J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(5): 123-128.)
- [16] MING Y, WEI Y, LI L, *et al.* Preparation and properties of ultra-fine mineral admixtures with high activity by steel slag-mineral slag-fly ash[J]. *Highway*, 2023, 68(5): 289-295.
(明阳, 卫煜, 李玲, 等. 钢渣-矿渣-粉煤灰制备高活性超细矿物掺合料及性能研究[J]. 公路, 2023, 68(5): 289-295.)
- [17] LI Y Q, NI Y J, LI F F, *et al.* Properties of tailings powder-fly ash-cement composite cementitious system[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2024, 43(1): 236-245.
(李永清, 倪勇军, 李芳芳, 等. 尾泥微粉-粉煤灰-水泥复合胶凝体系性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(1): 236-245.)
- [18] JIAO D W, SHI C J, YUAN Q, *et al.* Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 83: 146-159.
- [19] HARBECK D, ZIDOL A, TAGNIT-HAMOU A, *et al.* Mechanical and durability properties of high performance glass fume concrete and mortars[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 134: 142-156.
- [20] SHAN Y C, ZHANG L H, LIU L B. Study on the macroscopic properties of phosphorus slag composite cementitious materials based on hydration perspective[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 78.
- [21] CHEN M, SUN Z P, LIU J S. State of the art review on activating techniques and mechanism of phosphorus slag[J]. *Materials Reports*, 2013, 27(21): 112-116.
(陈明, 孙振平, 刘建山. 磷渣活性激发方法及机理研究进展[J]. 材料导报, 2013, 27(21): 112-116.)
- [22] LIU X Y, LIU X M, ZHANG Z Q. Recycling and comprehensive utilization of yellow phosphorus slag in building materials: A review[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 396.