

钛矿渣-磷石膏复合制备超硫酸盐水泥试验研究

董丽卿¹, 蒋勇^{1,2*}, 王国敏¹, 王宗义¹

(1. 绵阳职业技术学院, 四川 绵阳 621000; 2. 西南科技大学, 环境友好能源材料国家重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘要:采用磷石膏、钛矿渣、熟料和硅酸钠配制了10组超硫酸盐水泥,对基体的抗压强度、水化放热、水化产物进行了研究,并对纤维增强后的抗折强度、拉伸强度和抗冲击强度进行测试。结果表明,熟料和钛矿渣均能有效提升超硫酸盐水泥的抗压强度,并能促进水化放热和二次水化反应。较优的水泥配比为磷石膏:钛矿渣:熟料:硅酸钠=25:60:13:2,此时抗压强度达到42.1 MPa。玄武岩纤维可显著提高超硫酸盐水泥的抗折强度和抗冲击强度,表现为:当掺入0.3% 6 mm纤维时,试件的抗折强度提升了27.0%;掺入0.6%的12 mm纤维时,抗冲击强度提高了120.3%。拉伸试验结果表明,玄武岩纤维对提升水泥的极限拉伸强度不利,但能提高水泥的拉伸应变能力。

关键词:超硫酸盐水泥; 钛矿渣; 磷石膏; 玄武岩纤维; 抗折强度; 拉伸强度

中图分类号:X757

文献标志码:A

文章编号:1004-7638(2023)02-0124-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.02.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



与作者互动
听语音 聊科研

Study on preparation of super sulfate cement by titanium slag and phosphogypsum

Dong Liqing¹, Jiang Yong^{1,2*}, Wang Guomin¹, Wang Zongyi¹

(1. Mianyang Polytechnic, Mianyang 621000, Sichuan, China; 2. State Key Laboratory of Environment-friendly Energy Materials, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, Sichuan, China)

Abstract: Ten groups of super sulfate cement (SSC) were prepared by phosphogypsum, titanium slag, clinker and sodium silicate. The compressive strength, hydration heat release and hydration products of the matrix were studied, and the flexural strength, tensile strength and impact strength after fiber reinforcement were tested. The results show that both clinker and titanium slag can effectively improve the compressive strength of SSC, and promote hydration exothermic and secondary hydration reaction. The optimal cement ratio is phosphogypsum 25%, titanium slag 60%, clinker 13%, sodium silicate 2%, and the compressive strength reaches 42.1 MPa. Basalt fiber can significantly improve the flexural strength and impact strength of SSC. Specifically, with an addition of 0.3% 6-mm fiber, the flexural strength of the specimen increases by 27.0%. The impact strength increases by 120.3% when 0.6% 12-mm fiber is added. The tensile test results show that basalt fiber is disadvantageous to the improvement of the ultimate tensile strength of cement, but can enhance the tensile strain capacity of cement.

收稿日期:2022-12-29

基金项目:四川省功能复合材料产教融合示范基地建设项目;达州市玄武岩纤维产业研究院开放基金项目;绵阳职业技术学院自然科学重点项目(MZ22ZD02、MZ22ZD01)。

作者简介:董丽卿,女,1984年出生,四川绵阳人,硕士,讲师,主要从事新型建筑材料和工业固废利用研究, E-mail: 123862036@qq.com; *通讯作者:蒋勇,男,1988年出生,四川南充人,博士,讲师,主要从事工业固废处理和化学外加剂研发, E-mail: jiangyong7586@163.com。

Key words: super sulfate cement, titanium slag, phosphogypsum, basalt fiber, flexural strength, tensile strength

0 引言

利用工业副产物制备低碳水泥是当下新型建筑材料研发的重点方向。超硫酸盐水泥是一种由工业副产石膏、矿渣和少量熟料配制而成的新型低碳胶凝材料^[1-3], 它可以大量消纳固废, 并且具有水化放热量低, 后期力学性能高的特点。但它的早期强度较低, 易碳化, 并且表现出较大的脆性, 使得这种水泥还未得到广泛应用^[4-6]。Gao Y X^[7]用玻璃微珠改性超硫酸盐水泥, 制备出了抗压强度高达 60 MPa 的混凝土。Nguyen H A^[8]等学者采用低钙粉煤灰、循环流化床固硫灰、矿渣等原料配制了超硫酸盐水泥, 并发现用低钙粉煤灰替代 10%~30% 的矿渣可以有效提升水泥的力学性能, 当取代量达到 30% 时, 硬化浆体 28 d 抗压强度超过了 60 MPa。Yu B Y^[9]针对超硫酸盐水泥的韧性问题开展了研究, 采用矿渣、工业副产石膏、碱性激发剂和人工砂配制了超硫酸盐水泥, 并掺入 PVA 纤维改善基体韧性。结果表明经纤维增强的基体具有多次开裂特点, 极限挠度达到 20 mm, 极限抗弯承载力大于 13 MPa。武双磊^[10]的研究表明, 掺入 0.25% 的乳酸钠可以有效提高超硫酸盐水泥的力学性能。大量的研究表明, 科学地进行配比设计, 可以制备出性能优良的超硫酸盐水泥。然而以产量巨大的钛矿渣和磷石膏复合制备超硫酸盐水泥的相关研究还未见报道, 有必要开展可行性研究。

钛矿渣是以钒钛铁矿石为原料冶炼生铁时所排放的工业废渣, 由于含惰性的钙钛矿相, 所以反应活

性较低, 难以有效利用。但钛矿渣中含有较多的玻璃体, 在水泥熟料和硅酸钠提供的碱性环境中具有潜在的火山灰活性^[11-13]。磷石膏是湿法磷酸工艺排放的一种工业副产石膏, 通常每生产 1 t 磷酸会产生大约 5 t 磷石膏, 我国是磷化工大国, 每年产生的磷石膏超 5 000 万 t^[14]。目前, 磷石膏主要依靠堆存或填埋处理, 不仅浪费土地资源, 还对环境造成巨大污染^[15-16]。磷石膏中 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的含量超过 85%^[17], 用来制备超硫酸盐水泥具有可行性, 在超硫酸盐水泥中的利用研究有助于促进磷石膏的资源化利用。

笔者以磷石膏、钛矿渣、熟料、硅酸钠配制了超硫酸盐水泥, 研究了基体的抗压强度、水化放热情况和水化产物, 得到最佳的配合比; 随后将玄武岩纤维掺入超硫酸盐水泥中, 以期通过纤维增强的方法提升水泥的韧性。

1 试验部分

1.1 原材料

钛矿渣取自攀枝花地区某钢铁企业; 磷石膏由四川德阳某磷化工公司提供, 在 $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干; 熟料由四川绵阳某水泥公司提供。三种原料均在实验室球磨机中粉磨, 钛矿渣、磷石膏和熟料的比表面积分别为 480.4 、 $539.6\text{ m}^2/\text{kg}$ 和 $378.4\text{ m}^2/\text{kg}$, 密封保存备用。五水硅酸钠为市售分析纯, Na_2O 含量 28.6%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 为 1.03。

原材料的 XRF 分析结果如表 1 所示, XRD 分析结果如图 1 所示。

表 1 原材料的 XRF 分析结果
Table 1 XRF analysis results of raw materials

成分	CaO	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	MnO
钛矿渣	27.06	28.76	16.69	12.57	7.13	3.22	2.31	0.05	0.81	0.75	0.45
磷石膏	36.48	10.48	0.22	1.52	0.37	0.95	46.83	1.97	0.09	0.27	
熟料	68.17	18.54	0.67	4.44	1.40	3.57	1.68	0.12	0.31	0.83	0.10

1.2 试验方法

试验配合比如表 2 所示, PS 组的变量为磷石膏与钛矿渣的质量比例, PK 组的变量为钛矿渣与熟料的质量比例。检测各组的抗压强度和水化放热情况,

并对水化 56 d 的样品进行 XRD 和 SEM 分析。采用美国 TA 公司 TAMair8 通道水泥水化热自动测定仪检测各组的水化放热速率和放热量。

参照标准 GB/T 17671《水泥胶砂强度检测方法

(ISO 法)》检测超硫酸盐水泥基体各龄期的抗压强度和掺玄武岩纤维试件的 56 d 抗折强度。在模具中浇筑成型 40 mm×40 mm×160 mm 的净浆试块,标准养护 3 d 后拆模,再标准养护至指定龄期测试抗压强度。测试完抗压强度后,取破碎试块中间部分进行微观分析。

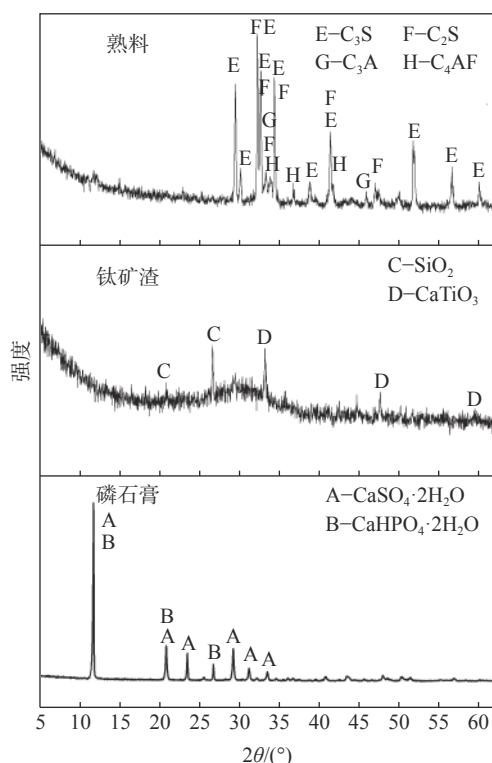


图 1 原材料的 XRD 分析结果

Fig. 1 XRD analysis results of raw materials

表 2 试验配合比
Table 2 Experimental mix proportion %

组号	磷石膏	钛矿渣	熟料	硅酸钠	水灰比
PS1	5	90	3	2	45
PS2	25	70	3	2	45
PS3	45	50	3	2	45
PS4	65	30	3	2	45
PS5	85	10	3	2	45
PK1	25	70	3	2	45
PK2	25	65	8	2	45
PK3	25	60	13	2	45
PK4	25	55	18	2	45
PK5	25	50	23	2	45

综合考虑磷石膏和钛石膏的利用率以及力学性能,选择 PK3 组试验条件,分别掺入 6 mm 和 12 mm

短切玄武岩纤维,掺量分别为 0、0.15%、0.3% 和 0.6%,试件养护 56 d 后用万能试验机测试拉伸强度,用摆锤式冲击试验机测试抗冲击强度。测试方法参照标准 GB/T 15231-2008《玻璃纤维增强水泥性能试验方法》进行,拉伸试件尺寸为 250 mm×30 mm×10 mm,抗冲击试件尺寸为 110 mm×50 mm×13 mm。

2 结果及讨论

2.1 超硫酸盐水泥基体性能

2.1.1 抗压强度

各组的抗压强度测试结果如图 2 所示。在 PS 组各试验中抗压强度随着养护龄期的延长而逐渐增加。区别于普通硅酸盐水泥 28 d 以后抗压强度增长缓慢的特点,各组在中后期的抗压强度增加趋势明显,特别是在 PS1 组中,56 d 强度相比于 28 d 增长了 63%。随着磷石膏与钛矿渣比例的增大,试验各龄期抗压强度逐渐下降。磷石膏掺量从 5% 到 45% 范围内强度急剧下降,从 45% 到 85% 范围内下降趋势变平缓。

在 PK 组各试验中,抗压强度随着养护龄期的延长而增大,28 d 以后仍然具有较高的强度增长率。随着钛矿渣与熟料比例的减小,抗压强度逐渐提高,熟料掺量在 15% 以内时,各龄期强度增长较明显,超过 15% 时,强度变化不大。养护 56 d 强度最高为 PK3,强度达到了 42.1 MPa。

2.1.2 水化热

PS 组的水化放热速率和放热量如图 3 所示。从图 3(a)放热速率曲线可以观察到,PS1 和 PS3 峰形类似,水泥与水接触后不久即出现明显放热峰,这一阶段的放热量主要来源于水泥中 C₃A 与石膏相的水化反应。随后放热速率减慢,形成峰谷,进入诱导期,且 PS1 的诱导期短于 PS3。经历诱导期后,放热速率加快,形成较大的放热宽峰,这一阶段放热速率 PS1<PS3。在第 40 h 以后放热速率趋于平缓,后期的放热速率 PS1>PS3,说明钛矿渣和熟料掺量较高的试验组二次水化反应更显著。PS5 的峰形与 PS1 和 PS3 差异较大,没有明显诱导期,且后期放热速率低于 PS3 和 PS1,趋近于 0,主要是因为 PS5 中磷石膏掺量较高,钛矿渣和熟料掺量较低,而磷石膏胶凝性不强,所以后期发生二次水化反应不明显。从图 3(b)放热量的曲线可以观察到,反应早期 PS1 组总放热量低于 PS3 和 PS5,大约 60 h 以后,PS1

的总放热量明显高于 PS1 和 PS5。

观察图 4(a) PK 组的放热速率知, 熟料掺量最低的 PK1 组诱导期峰谷比 PK3 和 PK5 更明显, 而第二放热峰峰高 $PK5 > PK3 > PK1$, 从约 60 h 以后, PK3 的放热速率高于 PK5 和 PK1, 说明熟料掺量越

高的试验组诱导期越短, 而后期放热速率的大小与钛矿渣和熟料的整体比例有关。从图 4(b) 水化放热量曲线可知, 按熟料掺量高低顺序, 放热总量 $PK5 > PK3 > PK1$, 表明熟料可以良好的激发体系的反应活性。

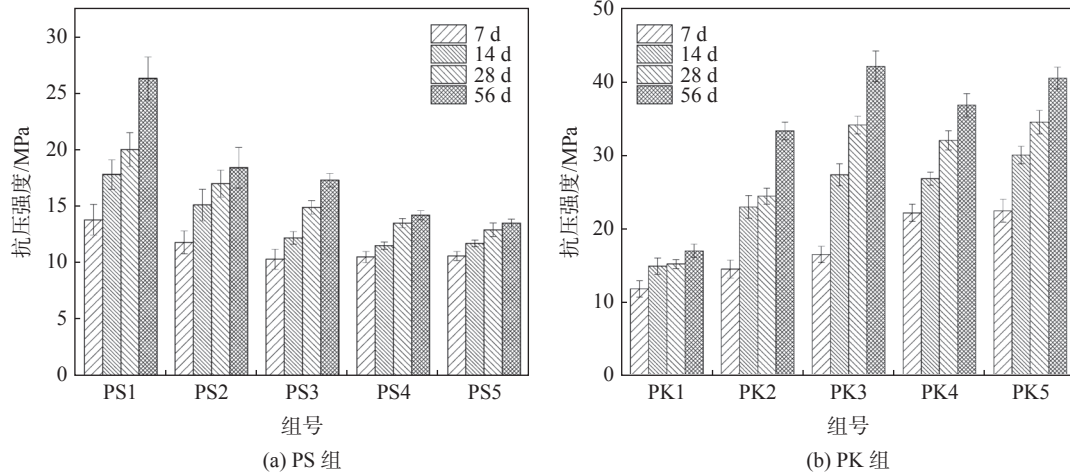


图 2 抗压强度测试结果
Fig. 2 Compressive strength test results

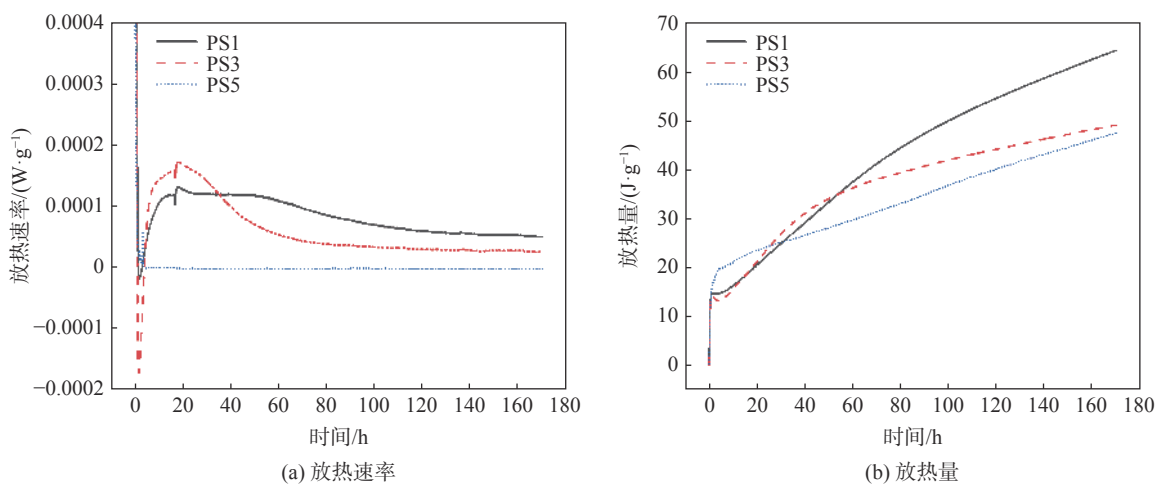


图 3 PS 组水化放热情况
Fig. 3 Hydration heat release in PS group

2.1.3 水化产物

养护 56 d 样品的 XRD 分析结果如图 5 所示。PS 组(图 5(a))中可以观察到二水石膏、二水磷酸氢钙、石英、钙矾石和水化硅酸钙的衍射峰。二水石膏和二水磷酸氢钙由磷石膏引入, 钛矿渣中含有少量石英, 引入到了体系中。钙矾石由熟料中的铝酸三钙与二水石膏反应得到, 熟料的水化和与钛矿渣发生的二次水化会生成大量的水化硅酸钙。钙矾

石和水化硅酸钙是主要的水化产物, 是体系强度的主要来源。由于 PS5 的磷石膏掺量高于 PS1 组, 所以二水石膏的衍射峰更为明显。

PK 组中(图 5(b))仍然可以观察到二水石膏、二水磷酸氢钙、石英、钙矾石和水化硅酸钙的衍射峰。由于 PK5 组的熟料掺量高于 PK1 组, 所以钙矾石和水化硅酸钙各处的衍射峰更为明显, 这有利于提高体系的抗压强度。

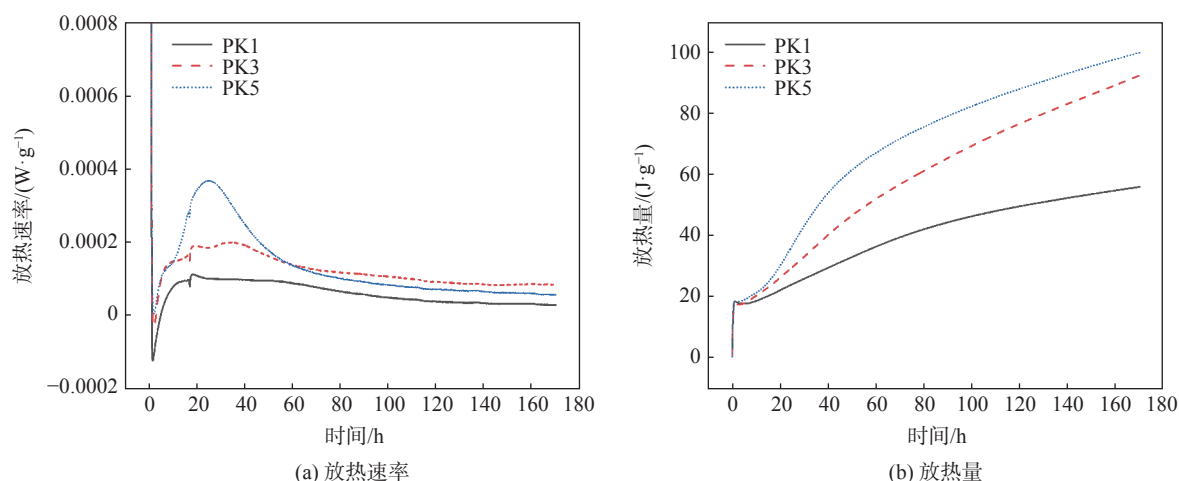


图 4 PK 组水化放热情况
Fig. 4 Hydration heat release in PK group

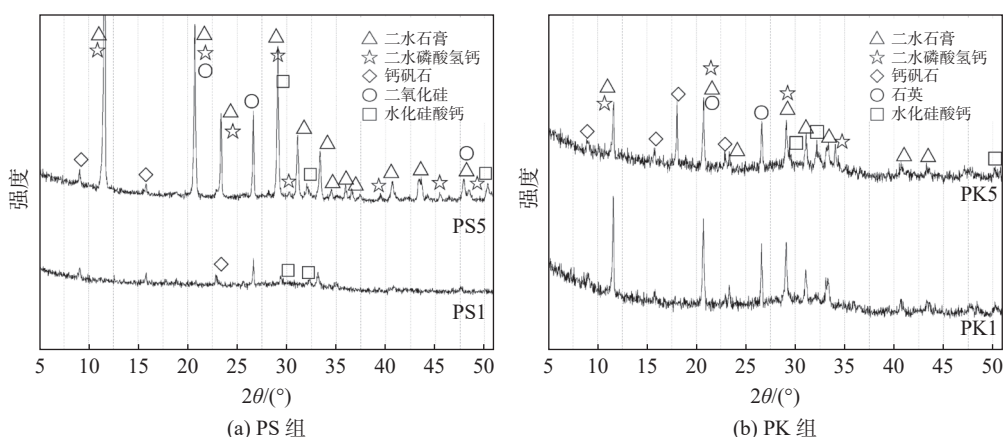


图 5 养护 56 d 样品的 XRD 分析图谱
Fig. 5 XRD analysis pattern of the sample for curing 56 days

养护 56 d 样品的 SEM 结果如图 6 所示。在 PS 组中可以观察到呈褶皱状的水化硅酸钙和呈纤维状或短柱状的钙矾石, 以及颗粒较大的钛矿渣颗粒。钛矿渣颗粒表面粗糙, 有颗粒状水化产物分布, 说明在熟料和硅酸钠提供的碱性环境下, 钛矿渣的反应活性受到了激发。对比 PS1 和 PS5 发现, PS1 中分布了较多的钛矿渣颗粒和钙矾石, 而 PS5 中钙矾石相对较少, 主要以无定形水化硅酸钙为主, 两组中均存在较多的孔洞, 结构较疏松。在 PK 组中可以观察到钙矾石、水化硅酸钙、裂缝、钛矿渣和熟料颗粒。PK1 中钙矾石主要呈零散分布状, 少量集中分布于孔隙和裂缝之中, 并且结构较疏松。PK5 组中钙矾石生成量较少, 主要呈集中分布, 同时生成了大量的水化硅酸钙, 也存在有裂缝, 但整体结构比较致密。

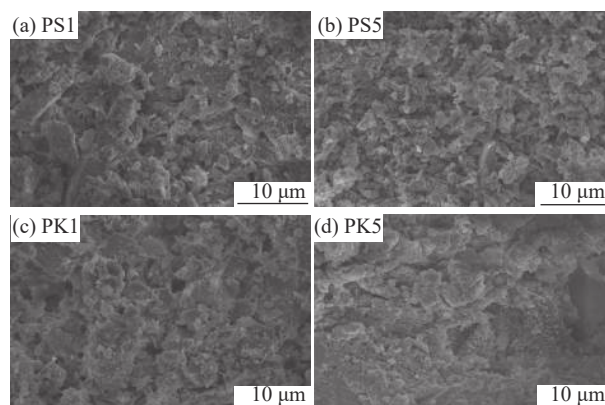


图 6 养护 56 d 样品的 SEM 形貌
Fig. 6 SEM images of different samples for curing 56 days

2.2 纤维增强超硫酸盐水泥的力学性能

2.2.1 抗折强度

抗折强度测试结果如图 7 所示, 根据拟合曲线

可知抗折强度与纤维掺量密切相关。随着 6 mm 和 12 mm 纤维掺量的增加,超硫酸盐水泥的抗折强度出现了先上升后下降的趋势,较优掺量为 0.3%,此时掺 6 mm 纤维的试件抗折强度达到 4.7 MPa,相比空白组提高了 27.0%。当纤维掺量达到 0.6% 时,试件的抗折强度出现了明显下降,并且掺 12 mm 纤维的试件降幅更为明显。纤维的分散状态对抗折强度的影响较大^[18],玄武岩纤维呈集束状生产出来并被切成特定长度,掺入水泥后难以分散成单丝状。当纤维掺量较高时,束状的玄武岩纤维难以在基体中均匀分散,造成受力不均,当纤维长度较长时,在搅拌过程中容易集聚成团形成缺陷,从而对抗折强度造成不利影响。

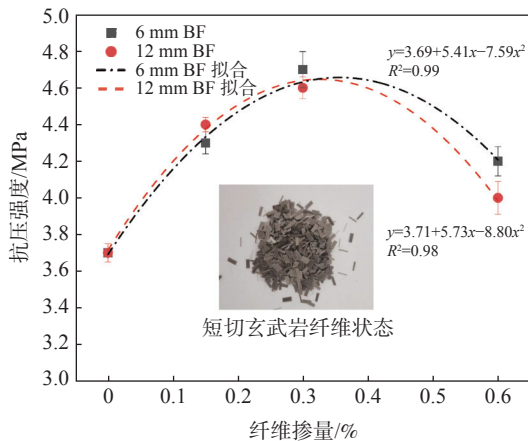


图7 抗折强度测试结果
Fig. 7 Flexural strength test results

2.2.2 拉伸强度

拉伸强度的测试结果如图8所示。从测试结果可知,随着两种长度的纤维掺量从0.15%增加至0.6%,拉伸强度呈现出上升趋势,但均低于空白组。说明玄武岩纤维对提高超硫酸盐水泥的拉伸强度无明显作用。从图9的典型应力应变曲线可以看出,虽然掺入玄武岩纤维后试件的极限应力低于空白组,但曲线上升段的斜率却比空白组小,说明变形能力优于空白组。由于玄武岩纤维的弹性模量较高,属于刚性纤维^[19],在受拉过程中无法通过自身的弹性变形消耗拉伸应力,表现出了明显的脆断现象。而水泥基体的抗拉能力明显高于纤维的抗拉能力,所以纤维的掺入对提高极限拉伸强度无明显作用。但大量的纤维嵌入基体后,在受拉过程中可以通过产生一定的滑移消耗部分应力^[20],延迟开裂出现的时间,所以有助于改善基体的变形能力。

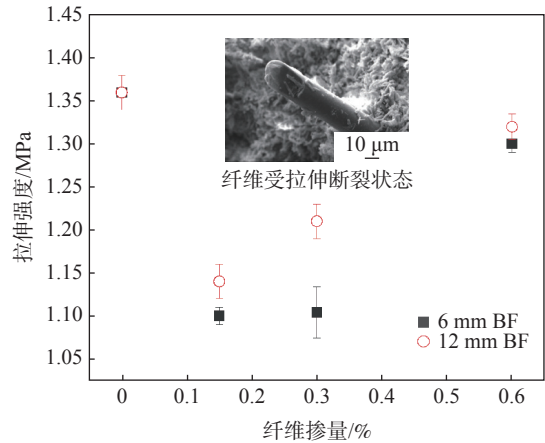


图8 拉伸强度测试结果
Fig. 8 Tensile strength test results

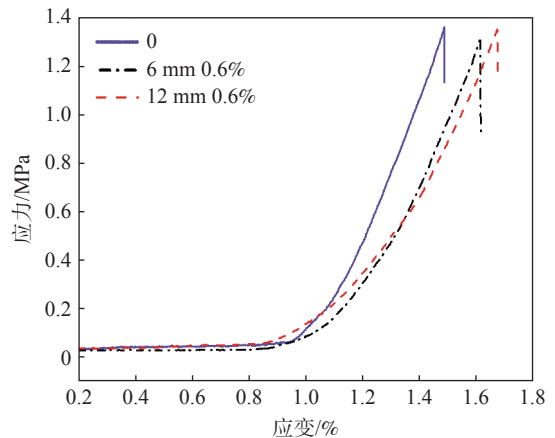


图9 典型的应力-应变曲线
Fig. 9 Typical stress-strain curves

2.2.3 抗冲击强度

抗冲击强度的测试结果如图10所示,从拟合曲线可以看出抗冲击强度与纤维掺量具有较高的相关性。结果表明,玄武岩纤维的掺入可以有效提高基体的抗冲击能力。随着 6 mm 和 12 mm 纤维掺量的增加,基体的抗冲击强度逐渐提高,当掺量达到 0.6% 时,抗冲击强度分别达到 0.24 kJ/m² 和 0.32 kJ/m²,相比于空白组分别提高了 66.4% 和 120.3%。并且从增长趋势来看,12 mm 纤维对提升抗冲击能力效果更好。纤维在基体中的乱向分布可以缓和裂纹扩展时产生的应力集中现象,延缓裂缝的扩展速率,并且在基体受到冲击时,纤维的脆断必然会消耗部分冲击力,所以有助于提高水泥基体的抗冲击能力^[21-22]。

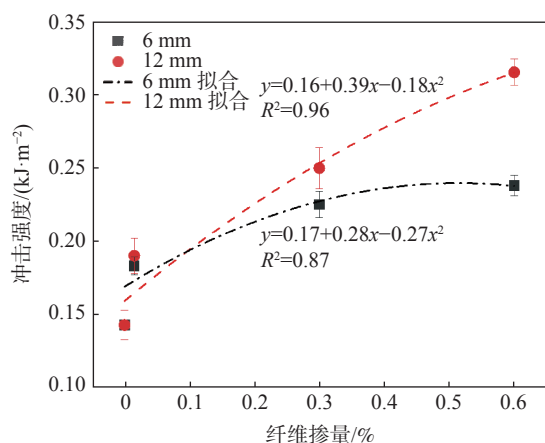


图 10 抗冲击强度测试结果
Fig. 10 Impact strength test results

3 结论

采用磷石膏、钛矿渣、熟料和硅酸钠配制了超

硫酸盐水泥,研究了基体的力学性能、水化放热情况和水化产物,确定了较优的配合比。在此基础上研究了不同长度玄武岩纤维对超硫酸盐水泥力学性能的影响。得到的主要结论如下:

水泥的抗压强度随着磷石膏掺量的升高而下降。熟料和钛矿渣均能提升超硫酸盐水泥的抗压强度,并能促进水化放热和二次水化反应。水泥的水化产物主要是水化硅酸钙、钙矾石。较优的水泥配比为磷石膏:钛矿渣:熟料:硅酸钠=25:60:13:2。

玄武岩纤维可以有效提升超硫酸盐水泥的抗折和抗冲击性能,当掺入 0.3% 的 6 mm 纤维时,试件的抗折强度提升了 27.0%;掺入 0.6% 的 12 mm 纤维时,抗冲击强度提高了 120.3%。掺玄武岩纤维的各组试件拉伸强度均低于对照组,但拉伸应变能力有所提升。力学性能测试结果说明玄武岩纤维可以有效改善超硫酸盐水泥的韧性。

参考文献

- [1] Liu Shuhua, Wang Lu, Yu Baoying. Review on hydration mechanism and engineering application of supersulfate cement[J]. *China Concrete*, 2018, (10): 46–51.
(刘数华, 王露, 余保英. 超硫酸盐水泥的水化机理及工程应用综述[J]. *混凝土世界*, 2018, (10): 46–51.)
- [2] Dvorkin L, Nihaveva L. Modified supersulfated cements[J]. *Zaštita Materijala*, 2021, 62(4): 340–348.
- [3] Wang Liang, Zhou Yang, Peng Zechuan, *et al.* Study on the strength and carbonation resistance of desulfurized gypsum-based supersulfate cement concrete[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2022, (3): 85–90.
(王亮, 周扬, 彭泽川, 等. 脱硫石膏基超硫酸盐水泥混凝土强度和抗碳化性能研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2022, (3): 85–90.)
- [4] Wu Q, Xue Q, Yu Z. Research status of super sulfate cement[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 294: 126228.
- [5] Chen Yu, Ji Junrong, Zhou Zhou, *et al.* Influencing factors and enhancement methods of early strength of supersulfated cement[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 40(5): 1413–1419.
(陈宇, 季军荣, 周洲, 等. 超硫酸盐水泥早期强度影响因素及提高途径[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(5): 1413–1419.)
- [6] Chen Yitao, Ge Xuexiang, Li Jie, *et al.* Preparation and mechanical properties of concrete of titanium gypsum persulfate cement & coal gangue[J]. *Journal of Anhui University of Technology(Natural Science)*, 2021, 38(4): 373–378.
(陈儀涛, 葛雪祥, 李杰, 等. 钛石膏基过硫酸盐水泥煤矸石混凝土的制备及力学性能[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2021, 38(4): 373–378.)
- [7] Gao Y X, Xiang J Y, Wang J, *et al.* Study on mechanical properties of microbead modified super sulfate cement concrete[C]//The 10th International Symposium on High Performance Concrete-Innovation & Utilization. Beijing: Trans Tech Publications Ltd, 2014.
- [8] Nguyen H A, Chang T P, Chen C T, *et al.* Engineering and creep performances of green super-sulfated cement concretes using circulating fluidized bed combustion fly ash[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 346: 128274.
- [9] Yu B Y, Wang J, Gao Y X, *et al.* Studies on key technology and toughness of super sulfate cement-based compound materials[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 665: 151–154.
- [10] Wu Shuanglei, Ji Junrong, Zhou Weijie, *et al.* Effect and mechanism of sodium lactate on strength of supersulfate cement[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 41(9): 3008–3015.
(武双磊, 季军荣, 周威杰, 等. 乳酸钠对超硫酸盐水泥强度的影响及作用机理[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(9): 3008–3015.)
- [11] Du Huihui, Ni Wen, Gao Guangjun, *et al.* Research on application of vanadium-titanium slag in fabricated precast concrete slab[J]. *New Building Materials*, 2021, 48(10): 172–177.

- (杜惠惠,倪文,高广军,等. 钒钛矿渣在装配式预制板材中的应用研究[J]. *新型建筑材料*, 2021, 48(10): 172-177.)
- [12] Wang Shuai, Lv Shuzhen, Zhao Jie, *et al.* Preparation of mineral admixture for concrete with high titanium slag[J]. *Journal of Southwest University of Science and Technology*, 2021, 36(1): 28-34.
(王帅,吕淑珍,赵杰,等. 高钛矿渣制备混凝土用矿物掺合料研究[J]. *西南科技大学学报*, 2021, 36(1): 28-34.)
- [13] Liu Shuxian, Su Yan, Yang Min, *et al.* Experimental study on preparation of the steel slag and slag composite cementitious material and its gelling activity inspiration[J]. *Metal Mine*, 2022, (11): 252-258.
(刘淑贤,苏严,杨敏,等. 钢渣-矿渣复合胶凝材料的制备及胶凝活性激发试验研究[J]. *金属矿山*, 2022, (11): 252-258.)
- [14] Zhou Miaoqin, Tao Xue, Liao Xun, *et al.* Production and discharge of phosphogypsum and research progress on its resource utilization[J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2022, 49(12): 4-8.
(周妙琴,陶雪,廖迅,等. 磷石膏产排情况及资源化利用研究进展[J]. *云南化工*, 2022, 49(12): 4-8.)
- [15] Rutherford P M, Dudas M J, Samek R A. Environmental impacts of phosphogypsum[J]. *Science of the Total Environment*, 1994, 149(1-2): 1-38.
- [16] Chernysh Y, Yakhnenko O, Chubur V, *et al.* Phosphogypsum recycling: a review of environmental issues, current trends, and prospects[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(4): 1575.
- [17] Jiang Yong, Li Liangjing, Li Wei, *et al.* Properties of calcined phosphogypsum composite modified cementitious materials[J]. *Sichuan Building Materials*, 2021, 47(6): 1-3.
(蒋勇,李靓婧,李伟,等. 煅烧磷石膏复合改性胶凝材料的性能[J]. *四川建材*, 2021, 47(6): 1-3.)
- [18] Wu Lei, Zhao Zhiman, Zhu Weimin, *et al.* Effect of chopped basalt fiber on the bending strength of phosphogypsum[J]. *Non-Metallic Mines*, 2017, 40(6): 9-11.
(吴磊,赵志曼,朱伟民,等. 短切玄武岩纤维对磷石膏抗折强度影响研究[J]. *非金属矿*, 2017, 40(6): 9-11.)
- [19] Li Nianhua, Liu Yuankun, Cui Zhenghao, *et al.* Properties and applications of basalt fibers[J]. *Synthetic Fiber in China*, 2022, 51(12): 16-23.
(李年华,刘元坤,崔正浩,等. 玄武岩纤维的性能及其应用[J]. *合成纤维*, 2022, 51(12): 16-23.)
- [20] Victor C Li. Engineered cementitious composites (ECC)[M]. Springer, 2019: 43-44.
- [21] Curosu I, Mechtcherine V, Forni D, *et al.* Performance of various strain hardening cement-based composites (SHCC) subject to uniaxial impact tensile loading[J]. *Cement and Concrete Research*, 2017, (102): 16-28.
- [22] Chen Pengfei. Research and numerical analysis on impact resistance of basalt fiber and polypropylene fiber reinforced concrete[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2021.
(陈鹏飞. 玄武岩纤维和聚丙烯纤维混凝土抗冲击性能研究与数值分析[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.)

编辑 唐肖

攀钢攻克强磁尾矿超细粒级钛铁矿高效回收难题

(3月13日消息)继普通超细粒级钛铁矿高效回收技术实现产业化后,强磁尾矿超细粒级钛铁矿科技攻关再传捷报。攀钢矿研院与长沙矿冶研究院合作,历时一年半开发出全新分级浮选工艺,可实现强磁尾矿中超细粒级钛铁矿的高效回收。

当前,攀西地区钒钛磁铁矿选矿产生的超细粒级钛铁矿,主要在斜板溢流和强磁尾矿工序中,其中强磁尾矿中的超细粒级钛铁矿占70%以上。斜板溢流中,超细粒级钛铁矿二氧化钛品位较高,达15%以上。

在强磁尾矿中,各级粒度的钛铁矿分布范围广,二氧化钛品位极低,只有4%左右,回收难度极大,是一项世界性难题。从2021年7月起,攀钢矿研院与长沙矿冶研究院合作,开展“强磁尾矿中超细粒级钛铁矿深度回收技术研究”项目攻关,在2022年底开发出全新分级浮选工艺,攻克了强磁尾矿中极低二氧化钛品位的超细粒级钛铁矿富集难题。据测算,应用此项成果后,每年能从强磁尾矿中至少回收5万t以上的超细粒级钛精矿。

目前,该项目研发团队在做好技术保护的同时,正抓紧进行强磁超细粒级钛铁矿回收工程建设的初步设计,以确定经济、高效超细粒级钛铁矿选矿工艺并产业化。初步设计预计在今年6月底完成。

(张龙君 供稿)