



## 耦合激发炉渣基水泥净浆力学性能研究

赵灿濠, 李犇\*, 徐虎, 张雨, 厉凯航

(佛山大学 土木与交通学院, 广东 佛山 528225)

**摘要:** 炉渣是煤炭燃烧后产生的残留物,大量堆放不仅占用土地资源,还对环境造成负面影响。炉渣富含二氧化硅和氧化铝等活性物质,常被用作矿物掺合料以改善混凝土性能。然而,炉渣基胶凝材料的研究仍然处于起步阶段,尤其在激发机制、力学性能影响因素及微观结构演变规律等方向研究相对缺少。重点分析了机械-化学耦合激发作用下炉渣基水泥净浆的力学性能及微观结构演变规律。首先,研究了研磨参数对炉渣粒径分布的影响;然后,探讨了耦合激发参数及养护龄期等因素对炉渣基水泥净浆的抗压和抗折强度及其力学活性的影响;最后,通过SEM、XRD、FTIR等微观表征手段分析了炉渣基水泥净浆的水化产物、官能团和微观结构的变化以期揭示耦合激发途径对炉渣基水泥净浆力学性能的影响机制。结果表明,在最佳的耦合激发条件下,炉渣基水泥净浆在标准养护28 d后,抗折和抗压强度分别比水泥净浆(基准组)提升了19.8%和29.1%,I型和II型C-S-H凝胶物相含量分别比基准组增加了71.4%和58.3%。最佳激发条件为球料比18:1、球磨时间20 min、碱激发剂总掺量1.5%、Ca(OH)<sub>2</sub>与Na<sub>2</sub>(SO)<sub>4</sub>的摩尔比2:3。耦合激发后的炉渣促进了水泥基材料的水化反应,生成了更多的C-S-H凝胶并形成致密的微观组织结构,有效提升了炉渣的力学活性和再生利用率。本研究为制备低碳环保的可持续胶凝材料提供了新的思路和方法。

**关键词:** 炉渣;水泥净浆;机械研磨;耦合激发;力学性能;微观结构;粒径分布;活性

中图分类号:TU528

文献标志码:A

文章编号:1673-9981(2024)05-0841-08

**引文格式:**赵灿濠,李犇,徐虎,等.耦合激发炉渣基水泥净浆力学性能研究[J].材料研究与应用,2024,18(5):841-848.

ZHAO Canhao, LI Ben, XU Hu, et al. Study on the Mechanical Properties of Slag-Based Cement Paste under Coupled Excitation[J]. Materials Research and Application, 2024, 18(5):841-848.

### 0 引言

燃煤发电是我国能源的重要组成部分,占中国总发电量的66.5%。然而,在燃煤发电过程中会产生大量炉渣废弃物,其长期堆存将引起严重的环境污染与生态问题<sup>[1-2]</sup>。因此,合理高效地且充分地再利用炉渣,对于创造经济价值、消纳工业固体废弃物和保障生态环境可持续发展等方面具有重要意义。目前,利用炉渣制备新型建筑材料成为解决上述问题的有效途径之一<sup>[3-5]</sup>。研究表明<sup>[6-9]</sup>,炉渣具有稳定性高、级配好等特点,可提升混凝土的抗压强度与抗渗性能。同时,炉渣具有一定的火山灰活性,能够制备新型胶凝材料,成为建材领域研究的热点<sup>[10-12]</sup>。申屠倩芸<sup>[13]</sup>研究了养护方式和胶凝材料组分对炉渣基聚合物力学性能和收缩性能的影响规律,发现

采用加热养护方式可以提高炉渣基聚合物的激发活性和力学强度,但其干燥收缩和变形较大。沈立峰<sup>[14]</sup>在液固比1:2、KOH质量分数为6%和激发剂模数为1.2的条件下制备炉渣基聚合物,其28 d抗压强度为84.4 MPa,且地聚物材料以稳定的无定形结构为主。Prinyf<sup>[15]</sup>研究了Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>和NaOH作为碱激发剂对炉渣基聚合物力学性能的影响。结果表明,炉渣基聚合物的力学性能和NaOH浓度主要相关,当NaOH溶液浓度为10 mol·L<sup>-1</sup>时,抗压强度达35 MPa。Ilker Bekir<sup>[16]</sup>利用比表面积较大的细炉渣制备地聚合物混凝土,在温度80℃、湿度40%的环境中养护20 h,研究了激发剂对地聚合物早期抗压强度的影响。发现加入Na<sub>2</sub>O和SiO<sub>2</sub>分别为胶凝材料质量分数的12%和8%时,早期抗压强度高达

收稿日期:2024-05-23

基金项目:广东省基础与应用基础研究基金重点项目(2022B1515120007);黑龙江省自然科学基金重点项目(ZD2022E001);广东省基础与应用基础研究基金青年基金项目(2022A1515110380)

作者简介:赵灿濠,硕士研究生,研究方向为新型土木工程材料研究与应用。E-mail:15217165203@163.com。

通信作者:李犇,博士,特聘教授,研究方向为新型土木工程材料研究与应用。E-mail:liben89@fosu.edu.cn。

25.83 MPa。尽管炉渣可以作为掺入料和制备地聚物的材料,但由于炉渣活性激发难度高,激发方式不同,导致炉渣基材料的力学性能有较大的差异,因此寻找合理激发途径是当前亟需解决的问题。

目前,采用炉渣基胶凝材料的研究刚起步,特别是激发途径、力学性能影响因素、微观结构演变规律等方向研究相对缺少。本文采用机械-化学耦合激发方法提升炉渣的活性,探讨球料比、研磨时间、激发剂和养护龄期等因素对炉渣基水泥净浆的抗压-抗折强度及力学活性的影响,通过SEM、XRD和FTIR等表征手段研究了炉渣基水泥净浆的水化产物、官能团和微观结构的变化情况,揭示了耦合激发途径对炉渣基水泥净浆力学性能的影响机制。

## 1 试验部分

### 1.1 原材料

使用中国广州石井水泥公司生产的P.O42.5R普通硅酸盐水泥,符合我国现行标准GB 175—2021《通用硅酸盐水泥标准》的使用要求<sup>[17]</sup>。炉渣由佛山顺德新业公司提供,符合GB/T 180462017《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》要求<sup>[18]</sup>。水泥和炉渣的主要化学成分组成列于表1。氢氧化钙(95%)和无水硫酸钠(99%)购自天津市华盛化学试剂有限公司。

**表1 原材料化学成分**  
Table 1 Chemical compositions of raw material

化学成分	含量w/%						
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	其它
水泥	5.80	60.93	3.24	4.04	21.47	2.08	2.44
炉渣	23.51	2.53	1.62	3.61	60.68	1.49	6.56

### 1.2 激发设计

采用机械-化学耦合激发制备炉渣基水泥净浆。机械激发采用QM-DK12行星式球磨机对炉渣进行物理研磨,球料比(钢球与炉渣的质量比)分别设置为15:1和18:1、研磨转速250 r·min<sup>-1</sup>、研磨时间分别为0、5、10、15、20和25 min。化学激发使用氢氧化钙和硫酸钠作为化学激发剂,激发剂掺量为胶凝材料质量分数的1.5%和3%,*n*(氢氧化钙):*n*(硫酸钠)=2:1,2:2,2:3。

### 1.3 试样制备

考虑炉渣基水泥净浆流动度及凝结时间,选择水胶比为0.4、炉渣替代率为20%按相关规定进行配比设计(见表2)<sup>[19]</sup>。按照配比制备40 mm×40 mm×160 mm标准试样,通过标准养护方式分别养护至7、14和28 d等龄期(湿度大于95%,温度20±2℃)。

**表2 试样配合比**  
Table 2 Mix ratios of different compositions

试验组编号	水/g	水泥/g	炉渣/g	氢氧化钙/g	无水硫酸钠/g	激发剂掺量/%
JZS <sup>①</sup>	260.48	651.20	0	0	0	0
FSS <sup>②</sup>	260.48	520.96	130.24	0	0	0
FSGS <sup>③</sup>	260.48	520.96	130.24	0	0	0
FSG1.5-C	260.48	520.96	130.24	9.77	0	1.5
FSG1.5-N	260.48	520.96	130.24	0	9.77	1.5
FSG1.5-N1	260.48	520.96	130.24	4.99	4.78	1.5
FSG1.5-N2	260.48	520.96	130.24	3.35	6.42	1.5
FSG1.5-N3	260.48	520.96	130.24	2.53	7.24	1.5
FSG3-N1	260.48	520.96	130.24	9.97	9.57	3
FSG3-N2	260.48	520.96	130.24	6.70	12.84	3
FSG3-N3	260.48	520.96	130.24	5.06	14.48	3

注:① JZS为水泥净浆基准组。

② FSS为普通炉渣替代水泥试验组。

③ FSGS为机械激发炉渣替代水泥试验组。

### 1.4 抗压-抗折强度

参照标准GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法》<sup>[20]</sup>测定各养护龄期作用下试样的抗折-抗压强度,抗折试验的加载速度为20.1 N·s<sup>-1</sup>、抗压试验的加载速度为2.4 kN·s<sup>-1</sup>。

### 1.5 微观结构分析与表征

SEM测试采用GeminiSEM300型扫描电镜仪(蔡司)观察炉渣基水泥净浆的微观形貌。采用X射线衍射仪(布鲁克AXS公司)进行XRD测试研究水化产物的演变规律。采用FTIR-960型红外光谱仪

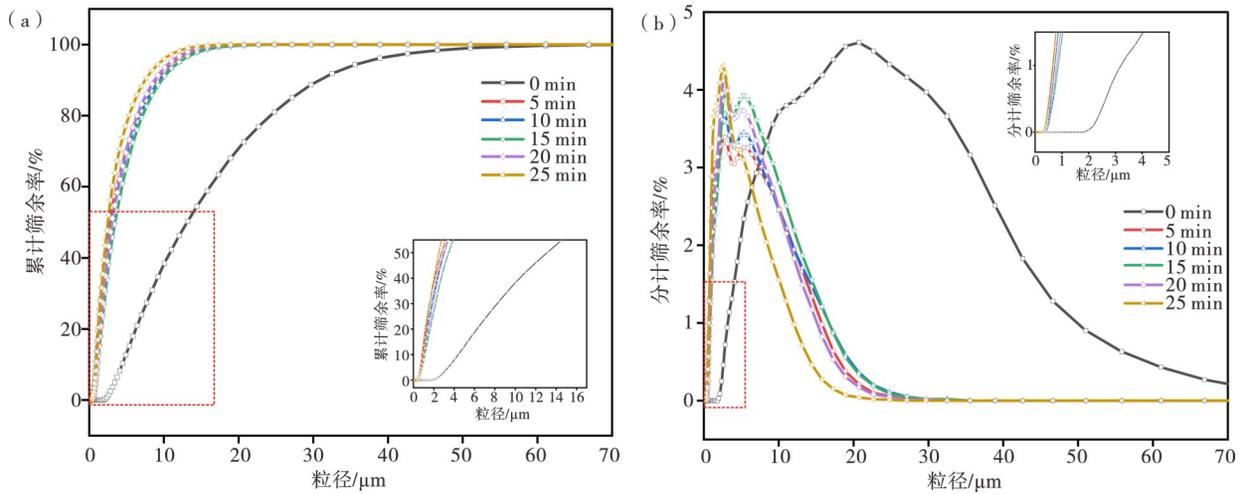
(天光)研究官能团变化。

## 2 结果与分析

### 2.1 机械激发对炉渣粒径的影响

图1为在球料比15:1研磨条件下的炉渣粒度分布图。累计筛余率在50%时粒径称为中值粒径,是表述材料粒度大小的典型值。从图1(a)可见:当研磨时间为5 min时,炉渣中值粒径由13.19  $\mu\text{m}$  缩小至3.12  $\mu\text{m}$ ;当研磨时间为10—20 min时,粒径的变化幅度较小,表明研磨效率较为稳定;在研磨时间为

25 min时,粒径持续变小,表明炉渣仍未达到研磨极限。同时,从分记筛余率的粒径分布情况可见:当研磨5 min时,粒径分布峰值由20.70  $\mu\text{m}$  缩小至1.97  $\mu\text{m}$ ,粒径分布峰值变化幅度最大;当研磨时间在10—20 min时粒径分布峰值变化幅度较低,说明炉渣在球料比15:1、研磨时间为10—20 min时研磨效率较为稳定;当研磨时间为25 min时,粒径分布峰值仍在缩小,说明在该条件下,炉渣的研磨仍未到达极限。



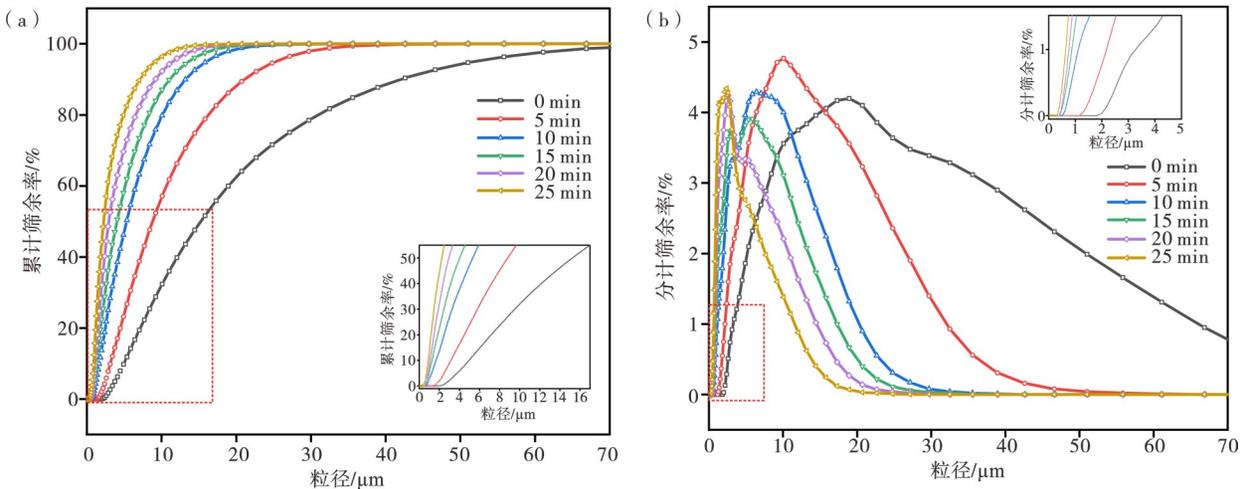
(a)—累计筛余率;(b)—分计筛余率。  
(a)—cumulative sieve rate; (b)— subtotal sieve residue.

图1 球料比15:1下炉渣的激光粒度分析

Figure 1 Laser particle size analysis of slag at material ratio 15:1

图2为在球料比18:1的研磨条件下的炉渣粒度分布图。从图2(a)可见,在研磨前期,球料比18:

1与15:1的变化规律相似,随着研磨时间的增加,炉渣的粒径曲线整体向左下移动,研磨效率较为稳定,



(a)—累计筛余率;(b)—分计筛余率。  
(a)—cumulative sieve rate; (b)— subtotal sieve residue.

图2 球料比18:1下炉渣的激光粒度分析

Figure 2 Laser particle size analysis of slag at material ratio 18:1

硅灰的粒径逐渐减小。在5—20 min时间段内,粒径随着时间的增加逐渐变小,当研磨时间为25 min时,粒径分布与研磨20 min时较为相似。结合分级筛余率可见,研磨时间5—20 min时粒径变化较大,而继续研磨至25 min时,粒径分布峰值与20 min相近。研磨25 min处的峰值出现上升的情况,可能是炉渣因为研磨时间过长,导致一些较小颗粒团聚,导致粒径的增大。最后综合考虑时间和能耗因数,确定炉渣的最佳球磨参数为球料比18:1,球磨时间20 min。

## 2.2 炉渣基水泥净浆抗折强度

图3为不同养护龄期下炉渣基水泥净浆试样的

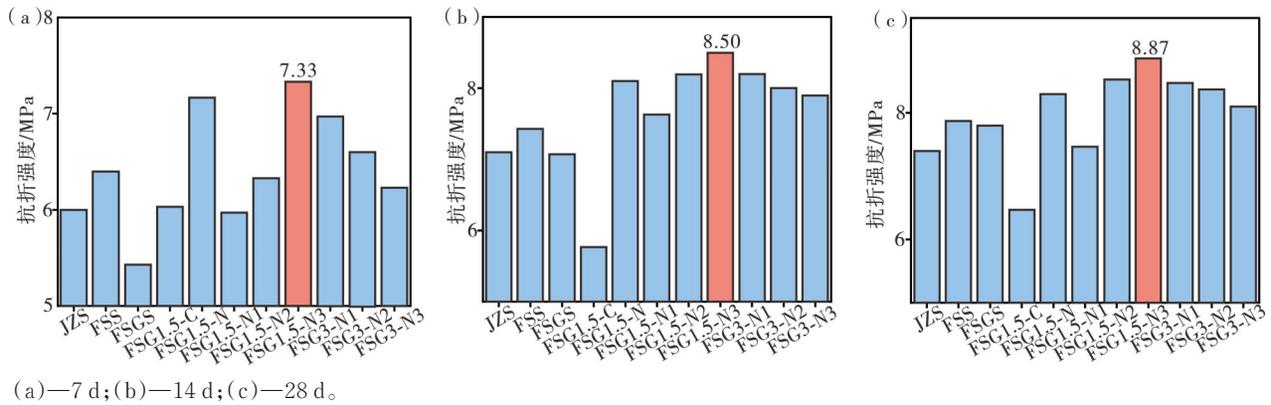


图3 炉渣水泥净浆抗折强度

Figure 3 Flexural strengths of slag-based cement net slurry

## 2.3 炉渣基水泥净浆抗压强度

图4为不同养护龄期下炉渣基水泥净浆试样的抗压强度。与抗折强度变化规律相似,耦合激发炉渣基水泥净浆抗压强度的主要提升也是在7—14 d。这可能是由于炉渣微观形貌为平整的多层片状结构,研磨能够破坏其平整的空间结构为其与水泥基材料的结合提供空间,从而能在早期提高抗压强度。从图4(c)可见,经过28 d养护,试验组FSG1.5-N3

抗折强度。从图3可见,化学试剂有利于提高试样的抗折强度。其中,试验组FSG1.5-N3在7 d抗折强度为7.33 MPa,比JZS和FSS分别高出22.2%和14.5%。经过标准养护28 d后,掺入硫酸钠的FSG1.5-N抗折强度强于掺入氢氧化钙的FSG1.5-C以及未掺入激发剂的JZS,表明硫酸钠对试样的抗折强度提高作用显著。但单独使用硫酸钠并不是最优的激发方式,使用硫酸钠和氢氧化钙共同激发的试样FSG1.5-N3抗折强度最佳,在养护28 d后达到8.87 MPa。而当激发剂掺量为3%时,试验组FSG3-N1—FSG3-N3的抗折强度持续下降,表明掺入过量硫酸钠会降低试样的抗折强度。

的抗压性能最好,其抗压强度比JZS高29.1%。当激发剂掺量为1.5%时,试样抗压强度随着硫酸钠所占质量比升高而提高,但激发剂掺量为3%时,试样抗压强度随着硫酸钠的质量比升高而降低。这是因为当硫酸钠的含量低于一定值时,硫酸盐会促进聚合反应,使凝胶量增加。随着硫酸盐含量的增加,硫酸盐的胶凝作用逐渐减弱,过量的硫酸盐会产生弱水泥效应和粒间力,且氢氧化钙的减少使水泥净浆生成的水化产物的减少,导致材料的稳定性下降,

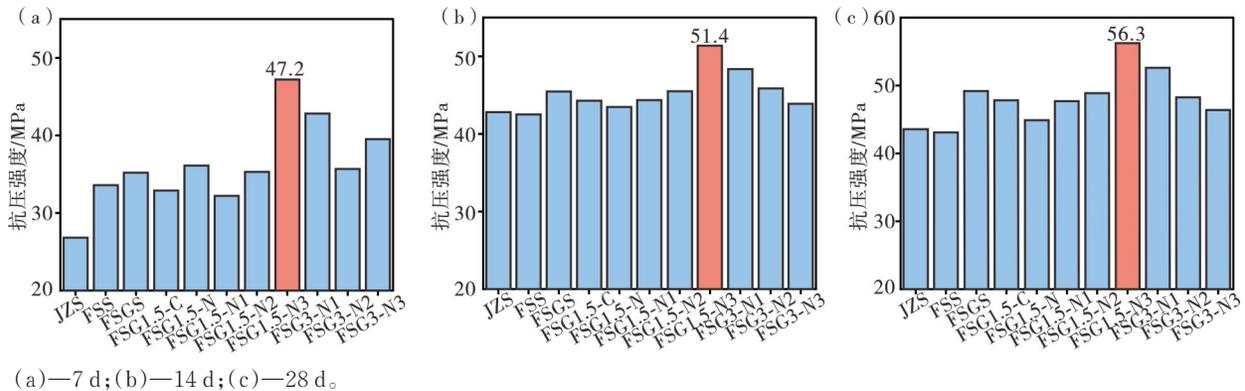


图4 炉渣基水泥净浆抗压性能

Figure 4 Compressive properties of slag-based cement net slurry

试样强度下降<sup>[21]</sup>。综上所述,将FSG1.5-N3视为炉渣的最佳机械-化学耦合激发配比方案。

### 2.4 炉渣基水泥净浆活性系数

耦合激发方式对炉渣基水泥净浆的力学性能有提升效果,采用活性系数作为评价炉渣作为掺合料的性能,进一步量化分析效果。

$$k=R_0/R_n \times 100\%$$

式中: $k$ —活性系数(%); $R_0$ —基准组的抗压强度(MPa); $R_n$ —试验组的抗压强度(MPa)。

图5为炉渣基水泥净浆活性指数。从图5可见,养护龄期7 d时试样的活性指数均高于养护龄期14

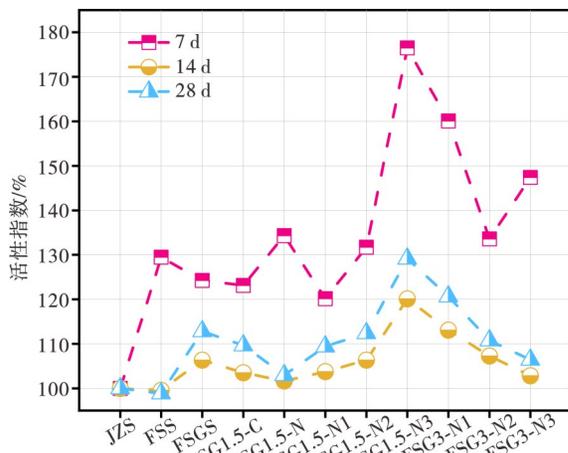
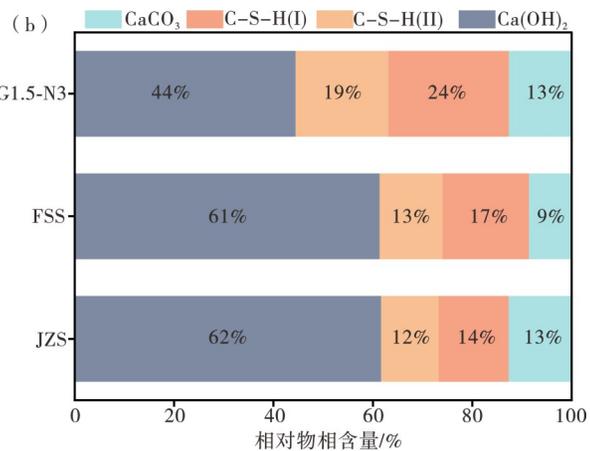
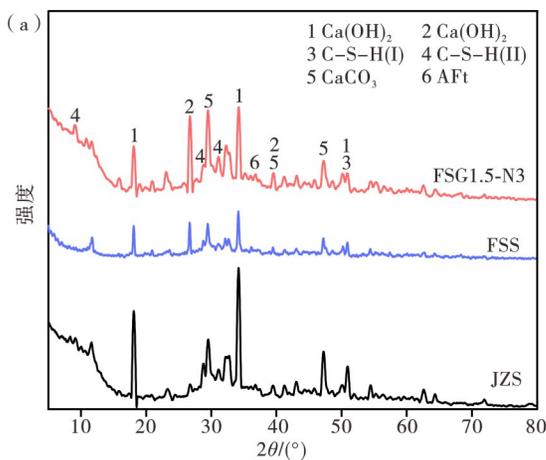


图5 炉渣基水泥净浆活性指数

Figure 5 Slag-based cement net slurry activity index



(a)—XRD 对比图;(b)—相对物相含量百分比图。

(a)—XRD plots;(b)—plot of relative percent physical phase content.

图6 炉渣基水泥净浆水化产物的XRD及相对物相含量图

Figure 6 Hydration products of slag-based cement net slurry

### 3.2 官能团的变化规律

使用FTIR对耦合激发炉渣对水泥净浆的化学键位与官能团的影响进行表征,结果如图7所示。

和28 d的活性指数,表明通过耦合激发的炉渣基水泥净浆在早期就具有较高的活性。试验组FSG1.5-N1—FSG1.5-N3的活性指数呈逐渐增大的趋势,FSG1.5-N3的活性指数最高,在标准养护28 d后其活性指数比FSS提高36.3%。这说明经过机械-化学耦合激发的炉渣活性显著提高,且复掺激发的效果优于单独激发,但对于提升的机理仍需要微观进行解释。

## 3 炉渣基水泥净浆的微观结构分析

### 3.1 水化产物的演变规律

标准养护28 d后炉渣基水泥净浆的水化产物演变规律如图6所示。FSG1.5-N3中C-S-H凝胶的峰强度和峰面积显著提升、Ca(OH)<sub>2</sub>的相对物相含量降低。耦合激发作用下炉渣能够进一步消耗Ca(OH)<sub>2</sub>,进而促进I型和II型C-S-H凝胶的生成与转化。试验组FSG1.5-N3的I型和II型C-S-H凝胶分别比JZS增多了71.4%和58.3%。另外,普通炉渣虽然可以在一定程度上消耗水泥净浆中的Ca(OH)<sub>2</sub>并促进I型C-S-H凝胶的生成,然而对于促进II型C-S-H凝胶生成作用效果较低。基于水化产物的演变结果发现,耦合激发后的炉渣主要通过加速消耗水泥净浆中Ca(OH)<sub>2</sub>并促进I型和II型C-S-H凝胶的生成等方式,实现材料的微观结构优化与宏观力学性能增强等效果。

相较于JZS和FSS,FSG1.5-N3在3 641 cm<sup>-1</sup>附近的吸收峰较低,经过耦合激发的炉渣水泥净浆,有利于Ca(OH)<sub>2</sub>的消耗以及O-H官能团的转变。同时,

FSG1.5-N3中 $\text{SO}_4^{2-}$ 对称伸缩振动峰( $1120\text{ cm}^{-1}$ )的振动明显,这说明碱激发剂能够促进钙矾石的生成并提升炉渣基水泥净浆的早期强度。此外,FSG1.5-N3的Si-O吸收峰( $974\text{ cm}^{-1}$ )包络面积大于FSS和JZS,耦合激发能够有效促进水化反应的

进行,生成更多具有较高聚合度的Si-O四面体。综上所述,机械-化学耦合激发的炉渣基水泥净浆能够有效促进水泥基材料的水化反应,增加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的消耗并生成更多的II型C-S-H凝胶,有利于力学性能的提升。

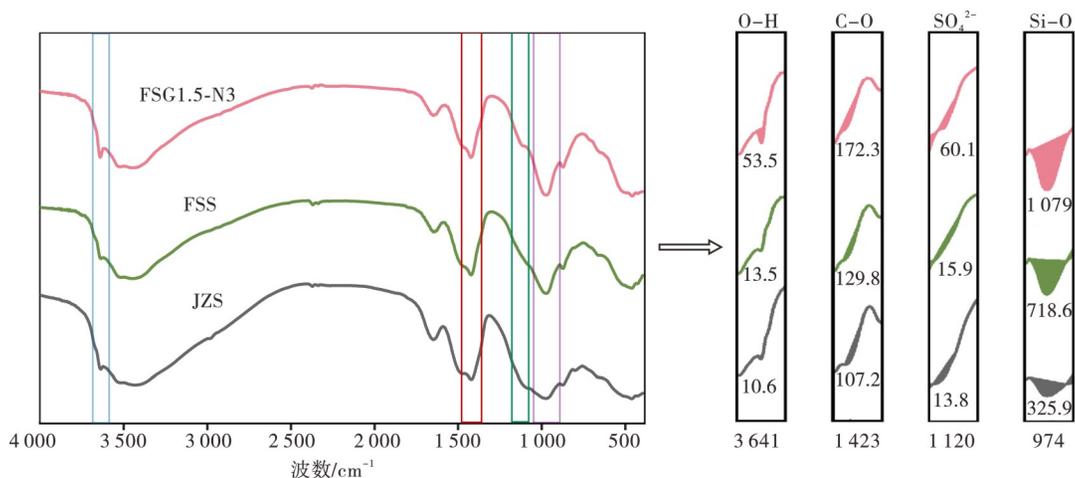


图7 炉渣基水泥净浆官能团分析

Figure 7 Functional group analysis of slag-based cement net slurry

### 3.3 微观形貌分析

图8为JZS、FSS和FSG1.5-N3的SEM图。从图8可见,JZS主要由低密度的I型C-S-H凝胶和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 构成,存在明显的孔隙结构与微裂纹,且

材料整体的密实程度较低。普通炉渣有利于水泥净浆生成C-S-H凝胶及片状的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,能够填充孔隙结构并形成较为致密的层状结构。然而,仍有较多的I型C-S-H凝胶与未水化的水泥熟料,普通炉

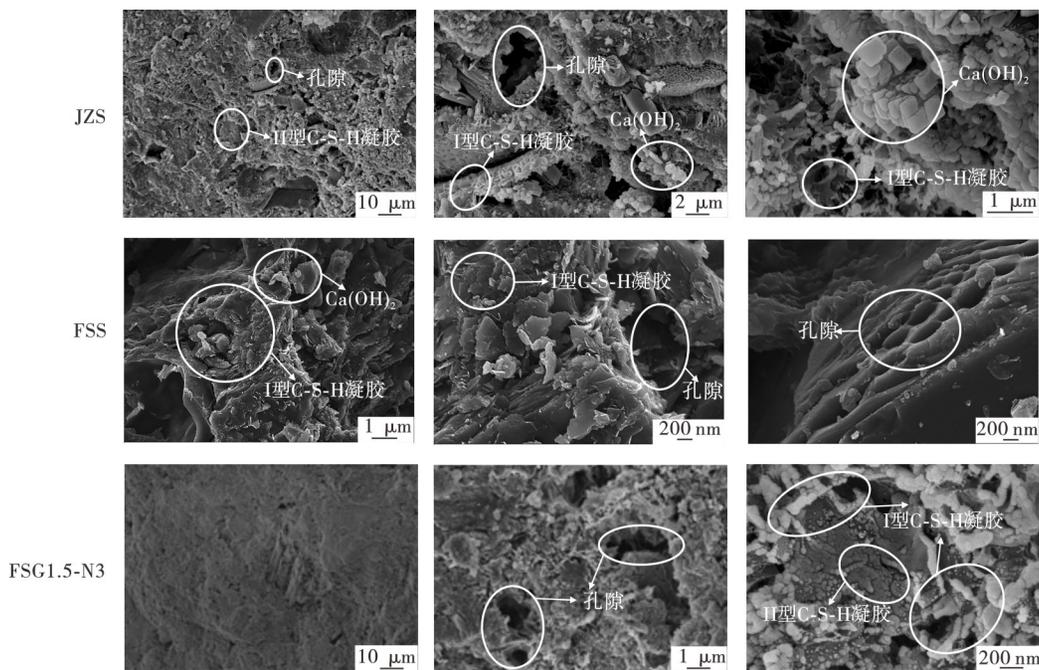


图8 炉渣基水泥净浆微观形貌

Figure 8 Microscopic of slag-based cement mortar

渣对力学性能增长的效果不明显。耦合激发作用下炉渣能够促进水泥净浆中低密度I型C-S-H凝胶向高密度II型C-S-H凝胶转换、改善孔隙结构分布、延缓微裂纹的成核与发展,最终致使材料处于密实稳定的状态,提升宏观力学性能。

#### 4 结论

通过机械-化学耦合激发的方式提升炉渣的火山灰活性,用其替代20%的水泥制备炉渣机水泥净浆,对试样力学性能和微观形貌进行分析,得到结论如下。

(1) 球料比18:1,研磨时间20 min,激发剂掺量为1.5%, $n(\text{氢氧化钙}):n(\text{无水硫酸钠})=2:3$ 时,炉渣基水泥净浆的激发效果最好,试样在标准养护28 d后的抗折和抗压强度达到了8.87和56.3 MPa,比基准组提高了19.8%和29.1%。

(2) 耦合激发后的炉渣会促进水泥基材料的水化反应,FSG1.5-N3中I型和II型C-S-H凝胶物含量比基准组分别增多71.4%和58.3%,更多C-S-H凝胶填充于样品的缝隙之中,使试样结构更加致密,提升水泥净浆的力学性能。

(3) 通过耦合激发制备炉渣基水泥净浆能够有效减轻固废对环境的影响,并且能在一定程度内提升水泥净浆的力学性能,炉渣水泥净浆可以用于混凝土结构的修补和加固,并提高混凝土的整体性能。

#### 参考文献:

- [1] 张云飞,姚华彦,扈惠敏,等.燃煤电厂炉渣综合利用现状分析[J].中国资源综合利用,2020,38(11):72-74.
- [2] 刘猛,黄忠源,张杰.高炉渣的处理技术现状及趋势[J].冶金设备,2021(2):1-4.
- [3] 高雪峰,张海英,杨向阳,等.燃煤炉渣作为新型掺合料在预拌混凝土中的应用[J].四川水泥,2016(3):311-313.
- [4] 赵训,朱跃华,王晗,等.燃煤炉渣在蒸压加气混凝土砌块中的应用研究[J].砖瓦,2023(12):27-30.
- [5] 王卉.高炉熔渣形成过程及性能研究[D].北京:北京工业大学,2013.
- [6] 张锐,张涛.垃圾焚烧炉渣的性质及对混凝土抗压强度影响[J].公路,2010(7):145-148.
- [7] 印杰,谢吉星,陈俊静,等.利用粉煤灰和高炉渣制备地聚合材料的研究[J].中国资源综合利用,2009,27(1),6-8.
- [8] 高仁辉,曹巍缤,庞超明,等.电厂燃煤炉渣在预拌砂浆中的应用技术研究[J].混凝土与水泥制品,2023(9):80-85.
- [9] 陈忠清,陈文清,吴早生,等.炉渣-粉煤灰地质聚合物的制备及性能研究[J].非金属矿,2022,45(1):98-101.
- [10] 廖桥,彭博,李碧雄.炉渣建材资源化利用现状[J].重庆建筑,2018,17(3):53-57.
- [11] 李奎.生活垃圾焚烧炉渣在透水水泥混凝土中应用研究[J].福建建设科技,2021(6):75-77.
- [12] 何晶晶,宋立群,章骅,等.垃圾焚烧炉渣的性质及其利用前景[J].中国环境科学,2003(4):60-63.
- [13] 申屠倩芸.磨细炉渣地聚合物抗压强度及收缩性能研究[D].杭州:浙江大学,2018.
- [14] 沈立锋,徐辉,万小娇,等.循环流化床燃烧底渣制备地聚合物的试验研究[J].粉煤灰综合利用,2009(6):28-31.
- [15] CHINDAPRASIRT P, CHAI J, CHALEE W, et al. Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers [J]. Waste Management, 2009, 29(2): 539-543.
- [16] FLKER B T, MEHMET U T, TAYFUN U. Durability and microstructure characteristics of alkali activated coal bottom ash geopolymer cement [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 81(81):211-217.
- [17] 中华人民共和国工业和信息化部.通用硅酸盐水泥:GB 175-2020 [S].北京:中国标准出版社,2020.
- [18] 全国水泥标准化技术委员会.用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉:GB/T 18046-2017 [S].北京:中国标准出版社,2017.
- [19] 福建省建筑科学研究院.水泥净浆材料配合比设计与试验规程:DBJ/T 13-196-2014 [S].福州:福建省建筑科学研究院,2014.
- [20] 国家市场监督管理总局.水泥胶砂强度检验方法(ISO法):GB/T 17671-2021 [S].北京:中国标准出版社,2021.
- [21] LV Q F, WANG Z S, GU L Y, et al. Effect of sodium sulfate on strength and microstructure of alkali-activated fly ash based geopolymer [J]. Journal of Central South University, 2020, 27(6):1691-1702.

## Study on the Mechanical Properties of Slag-Based Cement Paste under Coupled Excitation

ZHAO Canhao, LI Ben\*, XU Hu, ZHANG Yu, LI Kaihang

(School of Civil Engineering and Transportation, Foshan University, Foshan 528225, China)

**Abstract:** Slag, a byproduct of coal combustion, occupies significant land area when piled in large quantities, leading to land resources wastage and landscape degradation. Rich in silica, alumina and other active substances, slag is often used as mineral admixtures in concrete to enhance its performance. However, research on slag-based cementitious materials is still in its early stages, particularly in areas such as excitation pathways, factors influencing mechanical properties, and microstructural evolution. Therefore, this paper investigates the mechanical properties and microstructural evolution of slag-based cement mortar under coupled mechanical-chemical excitation. Firstly, the influence of grinding parameters on the particle size distribution of slag is discussed. Then, the effects of coupled excitation parameters and curing age on the compressive and flexural strength and mechanical activity of slag-based cement mortar are investigated. Finally, SEM, XRD and FTIR are used to study the changes in hydration products, functional groups, and microstructures of slag-based cement paste, aiming to elucidate the mechanism by which coupled excitation pathways influence mechanical properties. Under optimal coupled excitation conditions, the compressive and flexural strengths of slag-based cement paste, after 28 d of standard curing, increased by 19.8% and 29.1%, respectively, compared to the benchmark cement mortar. The contents of type I and type II C-S-H gel phases increased by 71.4% and 58.3%, respectively, compared to the benchmark cement mortar. Indicating more C-S-H gel formation. The optimal conditions were a material ratio of 18:1, ball milling time of 20 min, total alkali exciter dosage of 1.5%, and a molar ratio of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and  $\text{Na}_2(\text{SO})_4$  of 2:3. This coupled excitation promotes the hydration reaction of the cementitious materials, enhances C-S-H gel generation and forms a denser microstructure, thereby significantly improving the mechanical activity and regeneration efficiency of slag. This study offers new insights and methods for preparing low-carbon, environmentally friendly and sustainable cementitious materials.

**Keywords:** slag; cement net paste; mechanical grinding; coupled excitation; mechanical properties; microstructure; particle size distribution; activity

(学术编辑:孙文)