

# 细粒级铁尾矿粉的性能与改性机理研究

Research on the Performance and Modification Mechanism of Fine-grained Iron Tailings Powder

王欢<sup>1</sup>, 翁金红<sup>1</sup>, 王嘉昊<sup>2</sup>, 冯建<sup>1</sup>, 刘娟红<sup>2</sup>, 韩方晖<sup>2</sup>

(1. 安徽马钢矿业资源集团姑山矿业有限公司, 安徽 马鞍山 243000;  
2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 本文选取细粒级铁尾矿粉, 并加入改性剂对其进行改性, 研究改性铁尾矿粉的化学及矿物成分、细度、烧失量、需水量比及活性指数等相关性能, 并与 II 级粉煤灰性能进行比较, 探究改性剂对铁尾矿粉的改性效果和改性机理。研究结果表明: 细粒级铁尾矿粉的化学与矿物组成与粉煤灰相近, 细粒级铁尾矿粉 >45 μm 的颗粒含量为 17.7%、烧失量为 6.5%、改性后需水量比为 97.2%, 均满足国家 II 级粉煤灰相关标准。碱类复合改性剂改性效果最好, 改性铁尾矿粉 3 d、7 d 和 28 d 活性指数分别为 95.6%、95.7% 和 89.3%, 均高于 II 级粉煤灰。随着改性铁尾矿粉比表面积增加, 净浆抗压强度提高。铁尾矿粉经过改性处理后, 界面处的 SiO<sub>2</sub> 中的硅氧键会出现重组现象, 发生重聚反应, 宏观表现为抗压强度的提高。且铁尾矿粉颗粒粒径越小, 这种重聚反应越显著, 抗压强度的提升越明显。

**关键词:** 铁尾矿粉; 粉煤灰; 改性剂; 强度; 改性机理

**中图分类号:** X752 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 05-0071-06

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.05.012

WANG Huan<sup>1</sup>, WENG Jinhong<sup>1</sup>, WANG Jiahao<sup>2</sup>, FENG Jian<sup>1</sup>; LIU Juanhong<sup>2</sup>, HAN Fanghui<sup>2</sup>

(1. Anhui Masteel Mining Resources Group Gushan Mining Co., Ltd., Ma'anshan 243000, China;  
2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In this paper, fine-grained iron tailings fines were selected and modified with modifiers. The chemical and mineral composition, fineness, burn-off, water demand ratio and activity index of the modified iron tailings powder were studied. The properties are compared with those of Class II fly ash to investigate the modification effect and modification mechanism of the modifier on the iron tailing powder. The results of the study show that the chemical and mineral composition of fine-grained iron tailings fines is similar to that of fly ash. The fine-grained iron tailings fines have a particle content of >45 μm of 17.7% and a burn-off of 6.5%. The water demand ratio after modification was 97.2%, all of which met the relevant national standards for Class II fly ash. The best modification effect was achieved by the alkali composite modifier, with the activity index of modified iron tailing powder being 95.6%, 95.7% and 89.3% at 3 d, 7 d and 28 d respectively, all of which were higher than that of Class II fly ash. As the specific surface area of modified iron tailing powder increased, the compressive strength of net slurry increased. After the modified iron tailing powder is treated, the silica-oxygen bonds in SiO<sub>2</sub> at the interface will be reorganised and reunification reaction will occur, which is macroscopically manifested as an increase in compressive strength. The smaller the particle size of iron tailing powder, the more significant this reunification reaction is, and the more obvious the increase of compressive strength.

**Keywords:** iron tailings; fly ash; modifier; strength; modification mechanism

作者简介: 王欢 (1989—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 矿物加工工程。

收稿日期: 2022-04-08

## 材料科学

## 0 引言

铁尾矿目前已经是全世界范围内最为典型的产量大、堆存量高的大宗工业固体废料,非常大量的尾矿被堆积在尾矿库里不能被利用,占用了大量的国土面积并且产生了大量的资源浪费以及安全隐患和环境隐患<sup>[1-4]</sup>。在当前形势下,2018年铁尾矿年产出量约4.76亿吨,但利用率却仅有27.69%<sup>[3]</sup>。因此,铁尾矿仍急需资源化利用,同时也是全社会关注的工业固废资源循环利用的重点方向。

针对于将铁尾矿应用于混凝土中的资源利用方式,近年来在这一领域国内外学者做了一些深入的研究。宋少民等<sup>[5-8]</sup>学者研究了以水泥-铁尾矿粉为胶凝材料对于混凝土的性能影响,发现当铁尾矿微粉掺量在20%以下时,与单一水泥作胶凝材料相比,混凝土的抗压强度并不会存在降低的现象,并且还还对混凝土后期的强度发展具有促进作用;从长期性能角度讲,掺入一定量的铁尾矿粉的混凝土后期抗碳化、抗氯离子渗透能力还有提升;适量铁尾矿粉的加入使得硬化体内部缺陷减少,整体更加密实。侯云芬等<sup>[9-12]</sup>学者研究发现不大于50%掺量范围内,不同细度的铁尾矿粉都可以提高水泥砂浆的流动性;且随着铁尾矿粉掺量的增加,水泥砂浆的强度增大,当未磨细铁尾矿粉掺量超过10%,磨细铁尾矿粉掺量超过20%时强度开始降低,低于纯水泥砂浆。刘娟红、韩方晖等<sup>[13-16]</sup>学者研究发现铁尾矿微粉与矿粉复掺制备的混凝土与粉煤灰混凝土相比较来说,强度有明显提高。改性后铁尾矿微粉混凝土的碳化深度基本上与粉煤灰混凝土接近,对耐久性基本没有影响。

由于未改性前的铁尾矿粉活性极低,需水量比较高,作为掺合料应用于混凝土中会导致混凝土强度降低。为了提高铁尾矿粉的利用率,本文采用改性剂对铁尾矿粉进行改性,研究铁尾矿粉改性前后的性能,包括化学矿物组成分析、基本性质和活性指数并与Ⅱ级粉煤灰性能进行对比,研究改性铁尾矿粉作为混凝土掺合料替代Ⅱ级粉煤灰的可行性。并探究改性剂对铁尾矿粉的改性机理。

## 1 原材料与试验方法

## 1.1 原材料

本试验所使用的细粒级铁尾矿粉取自马钢(集团)控股有限公司姑山矿业公司白象山选矿厂,其外观为灰色。细粒级铁尾矿粉以及济南鲁新新型建材股份有限公司生产的Ⅱ级粉煤灰,主要化学组成见表1;试验中采用符合GB/T 14684-2022《建设用砂》<sup>[17]</sup>中规定的机制砂,机制砂的含泥量少且不含有害杂质;试验所用减水剂为含固量为10%的聚羧酸减水剂;选用5种复合改性剂:改性剂1-硫酸盐类、改性剂2-碱类、改性剂3-碱性氧化物类、改性剂4-碱性氧化物分析纯类、改性剂5-聚合物类。

表1 细粒级铁尾矿粉及粉煤灰化学组成  
Table 1 Chemical composition of fine iron tailing powder and fly ash

组成成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	其他
粉煤灰	53.91	31.32	4.28	1.95	1.43	1.46	5.65
铁尾矿粉	34.59	9.74	20.93	10.85	14.93	1.38	7.58

## 1.2 试验方法

采用X射线衍射分析仪(XRD)、X射线荧光光谱分析仪(XRF)分别测定铁尾矿粉和粉煤灰的矿物组成和化学组成。

按照GB/T2419-2016《水泥胶砂流动度测定方法》<sup>[18]</sup>测定试验胶砂和对比胶砂的流动度,以二者流动度达到130mm~140mm时的加水量之比确定铁尾矿粉与粉煤灰的需水量比。

按照GB/T 17671-2020《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》<sup>[19]</sup>测定试验胶砂和对比胶砂的抗压强度,以二者抗压强度之比确定试验胶砂的活性指数。具体配比如表2所示。

将铁尾矿粉磨成400m<sup>2</sup>/kg和600m<sup>2</sup>/kg两种比表面积微粉,选取Ca(OH)<sub>2</sub>作改性剂,并且加入适当比例的水制成净浆试块,并利用XRD、红外光谱手段来分析。

表2 活性指数试验胶砂配比  
Table 2 Activity index test cement sand ratio

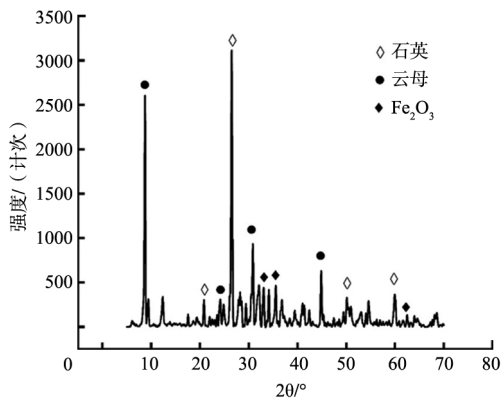
胶砂种类	水泥/g	铁尾矿粉/g	粉煤灰/g	标准砂/g	加水量/mL
水泥对照组	450	0	0	1350	225
铁尾矿粉组	315	135	0	1350	225
Ⅱ级粉煤灰组	315	0	135	1350	225

## 2 试验结果与分析

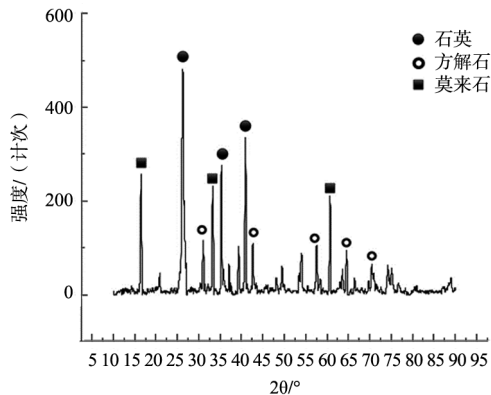
### 2.1 细粒级铁尾矿粉基本性质

#### 2.1.1 细粒级铁尾矿粉与 II 级粉煤灰化学及矿物成分对比分析

通过表 1 成分对比分析可知, 铁尾矿粉与 II 级粉煤灰主要化学成分组成相似, 均为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{CaO}$  等, 其中铁尾矿粉中含量最高的  $\text{SiO}_2$  在 II 级粉煤灰中也是含量最高。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{CaO}$  两种氧化物在铁尾矿粉中占比分别达到了 9.74% 与 10.85%, 相比粉煤灰, 这两种氧化物在铁尾矿粉中含量较低, 铁尾矿粉中  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的含量较高。



(a)



(b)

图 1 白象山细粒级铁尾矿粉 (a) 及 II 级粉煤灰 (b) XRD 图谱  
Fig. 1 XRD patterns of fine-grained iron tailing powder from Baixiang Mountain (a) and grade II fly ash (b)

图 1 为两种粉体的 XRD 图谱, 从图 1 可以看出, 石英都是两种粉体最为主要的矿物成分。除

石英外, 铁尾矿粉中含量较高的矿物成分还有云母, 粉煤灰中有方解石和莫来石。综上分析白象山细粒级铁尾矿粉在组成方面亦与粉煤灰相近。

#### 2.1.2 细度

先将干燥的铁尾矿至于球磨机中物理改性 15 min 左右后进行细度, 粒径及比表面积试验, 具体试验结果见表 3 和图 2 所示。

表 3 铁尾矿粉和 II 级粉煤灰细度  
Table 3 Fineness of iron tailings and grade II fly ash

材料	细度 (>45 μm)/%	比表面积/(m <sup>2</sup> /kg)
粉煤灰	18.4	389
细粒级铁尾矿粉	17.7	412

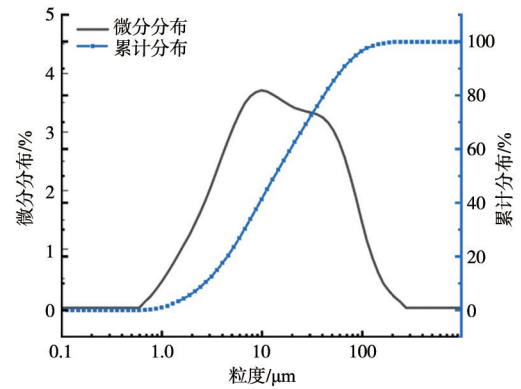


图 2 白象山细粒级铁尾矿粉粒径分布

Fig. 2 Particle size distribution of fine iron tailings in Baixiang Mountain

由表 3 和图 2 可以看出, 白象山铁尾矿粉 > 45 μm 的颗粒含量为 17.7%, 要低于 II 级粉煤灰的 18.4%, 且比表面积为 412 m<sup>2</sup>/kg, 大于 II 级粉煤灰, 这说明铁尾矿粉细度更细, 颗粒更小。根据标准粉煤灰细度采用 45 μm 筛余量为细度指标, 规定 I 级灰不大于 12%, II 级灰不大于 20%, 故细粒级铁尾矿粉在粒径上已达到甚至略有超出 II 级粉煤灰性能指标, 可以更好地替代 II 级粉煤灰发挥微集料及形态效应。

#### 2.1.3 烧失量

烧失量是评价粉煤灰性能的重要指标之一。粉煤灰中的未燃碳是有害成分, 烧失量越大, 含碳量越高, 混凝土的需水量就越大, 从而导致水胶比提高, 严重影响了粉煤灰效用的充分发挥, 同时粉煤灰烧失量过高会严重影响对混凝土中含气量的控制。试验测得白象山细粒级铁尾矿粉烧失量试验结果见表 4。从表 4 可以看出四组烧失量分别为 6.2%、6.7%、6.3%、6.9%, 取算数平均

## 材料科学

值为 6.5%，符合 II 级粉煤灰烧失量不大于 8% 的标准规定。

表 4 铁尾矿粉烧失量试验结果  
Table 4 Burning loss test results of iron tailing

组别	坩锅质量 /g	粉体质量 /g	煅烧前总质量/g	煅烧后总质量/g	烧失量/%
1	28.36	1.196	29.555	29.499	6.2
2	28.45	1.062	29.512	29.452	6.7
3	28.229	2.974	31.203	31.101	6.3
4	27.686	3.096	30.779	30.634	6.9

### 2.1.4 需水量比

需水量比是评价粉煤灰品质优劣及其在工程应用影响的重要物理指标，粉煤灰的需水量比越小，其品质以及工程利用价值就越高。根据试验所得结果，白象山铁尾矿粉需水量比为 112%，标准规定 II 级粉煤灰需水量比不得大于 105%，故未改性的铁尾矿粉需水量比不能满足要求，需要进行改性处理。

### 2.2 细粒级铁尾矿粉抗压强度与活性指数

表 5 为胶砂各龄期抗压强度及活性指数。由表 7 可以看出，细粒级铁尾矿粉虽然在 3 d 龄期时抗压强度可以达到 28.3 MPa，但后期强度增长相比粉煤灰组明显不足，活性指数随着龄期增长反而逐渐减小，到 28 d 龄期抗压强度仅比 3 d 龄期时增长约 4 MPa，活性指数仅为 59%。但是，粉煤灰对照组虽然在 3 d 龄期时强度仅有 21 MPa，活性指数仅有 64.9%，但 II 级粉煤灰活性指数随龄期增长显著，后期强度增长明显，在 28 d 龄期时抗压强度能达到 48.5 MPa，活性指数达到了 88.2%。从以上结果可以看出，若直接利用铁尾矿粉替代粉煤灰制备混凝土必然会发生后期强度增长不足的情况，且需水量比也不达标，故须进行改性处理方可使用。

表 5 胶砂各龄期抗压强度及活性指数  
Table 5 Compressive strength and activity index of mortar at different ages

组别	抗压强度/MPa			活性指数/%		
	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
水泥对照组	32.4	46.9	55.1	100	100	100
铁尾矿粉组	28.3	31.6	32.5	87.4	67.4	59
粉煤灰组	21	34.5	48.5	64.9	73.5	88.2

### 2.3 改性后细粒级铁尾矿粉抗压强度、活性指数与需水量比

铁尾矿粉的活性指数明显低于 II 级粉煤灰，

故选取五种改性剂对铁尾矿粉进行改性，对改性铁尾矿粉的活性指数进行研究，并且设置一组未加改性剂仅加入 5.5% 表面活性剂的对照组，其余五组改性试验组在加入等量表面活性剂基础上再加入复合改性剂，其具体掺量及改性剂种类为：2.5% 改性剂 1、0.5% 改性剂 2、0.5% 改性剂 3、0.5% 改性剂 4 和 2% 改性剂 5，其中掺量为铁尾矿粉质量的百分比；表面活性剂的掺量是铁尾矿粉质量的百分比，试验数据如表 6 所示。

表 6 改性后胶砂各龄期抗压强度及活性指数  
Table 6 Compressive strength and activity index of modified mortar at different ages

组别	表面活性剂/%	抗压强度/MPa			活性指数/%		
		3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
水泥组	—	32.4	46.9	55.1	100	100	100
对照组	5.5	26.6	33.9	39.9	82.1	72.3	72.4
硫酸盐类改性剂 2.5%	5.5	31.3	43.3	45.9	96.3	92.3	83.3
碱类改性剂 0.5%	5.5	31	44.9	49.2	95.6	95.7	89.3
碱性氧化物改性剂 0.5%	5.5	34.1	43.2	48.1	105	103.7	103.3
碱性氧化物分析纯类改性剂 0.5%	5.5	33.6	42.1	45.8	92.1	90	91.7
聚合物类改性剂 2%	5.5	33.5	43	44.6	87.3	83	80.9

根据表 6 可以得出，仅加入表面活性剂的铁尾矿粉 28 d 活性指数达到了 72.4%，加入表面活性剂后使活性指数提升了 13.4%，但与 II 级粉煤灰的活性指数仍有些差距。掺入的五种改性剂均能在不同程度上提高铁尾矿粉的活性指数，其中改性剂 3、改性剂 4 和改性剂 5 早期效果好，3 d 活性指数分别为 105%、103.7% 和 103.3%，甚至已经超过了纯水泥组，但加入这三种改性剂的铁尾矿粉组 28 d 的活性指数分别为 87.3%、83% 和 80.9%，均低于 II 级粉煤灰组的 88.2%。改性剂 1 组 3 d 活性指数低于上述三组，28 d 活性指数也低于 II 级粉煤灰组，故认为改性剂 1 改性效果有限。改性剂 2-碱类组 3 d、7 d 和 28 d 活性指数分别为 95.6%、95.7% 和 89.3%，均高于 II 级粉煤灰组。综上分析改性剂 2-碱类改性效果最好。对于未改性铁尾矿粉、II 级粉煤灰以及使用碱类复合改性剂改性后的铁尾矿粉分别进行需水量比试验，结



果如图 3 所示。从图 3 可以看出，碱类复合改性后的铁尾矿粉需水量比为 97%，已满足 II 级粉煤灰需水量比应低于 105% 的国家标准。

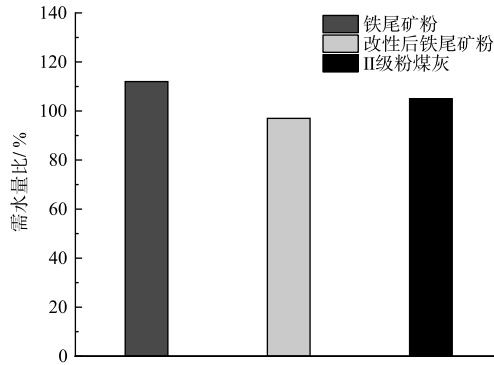


图 3 需水量比  
Fig. 3 Water demand ratio

#### 2.4 细粒级铁尾矿粉改性机理

通过抗压强度与活性指数实验可以得出，改性后的细粒级铁尾矿粉会发生类似水化反应导致强度增加。为了探究这种强度增长的机理，利用两种不同比表面积的铁尾矿粉（400 m<sup>2</sup>/kg、600 m<sup>2</sup>/kg）制备净浆试块，对所得试块进行分析。

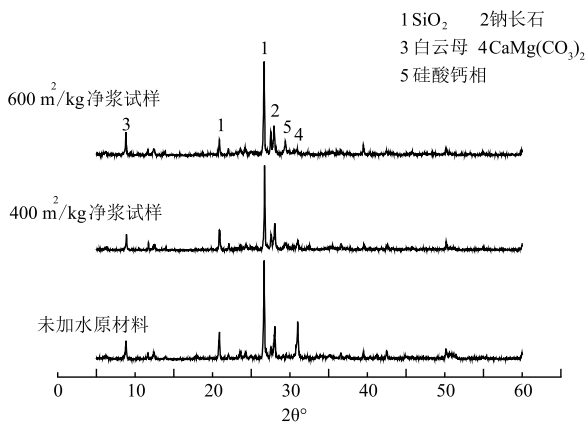


图 4 铁尾矿粉净浆试块 XRD 图谱  
Fig. 4 XRD pattern of iron tailing powder clean pulp test block

图 4 为铁尾矿粉净浆试块 XRD 图谱。由图 4 可知，两种不同的比表面积的铁尾矿粉净浆试块 XRD 图谱中二氧化硅的衍射峰都要比反应前原材料的二氧化硅衍射峰低，这可以说明铁尾矿粉中的二氧化硅成分发生了反应被消耗。另外，在反应后的 XRD 图谱中还发现了类似钠长石和类似白云母的物质，这种物质来自于铁尾矿粉中 SiO<sub>2</sub> 中的硅氧键重组，组成 Si-O 四面体，其中部分 Si 又

被 Al 代替，Ca 离子、Na 离子、K 离子等平衡负电荷，最终形成类似钠长石和白云母的矿物成分。在 600 m<sup>2</sup>/kg 比表面积下的铁尾矿粉净浆试块 XRD 图谱中还发现了新的硅酸钙相，这种硅酸钙相来自于铁尾矿粉硅氧断键在氢氧化钙的反应下重组，可以说明铁尾矿粉表面 Si-O 断键确实发生了重聚反应。这些产物反应后可以在铁尾矿颗粒之间的絮状连接物，形成非常致密的结构，从而导致宏观抗压强度的增加。并且铁尾矿粉净浆试块强度比表面积 600 m<sup>2</sup>/kg 组大于比表面积 400 m<sup>2</sup>/kg 组，这说明铁尾矿粉比表面积越大，界面处断键数量越多，断键重聚的数量也越大。

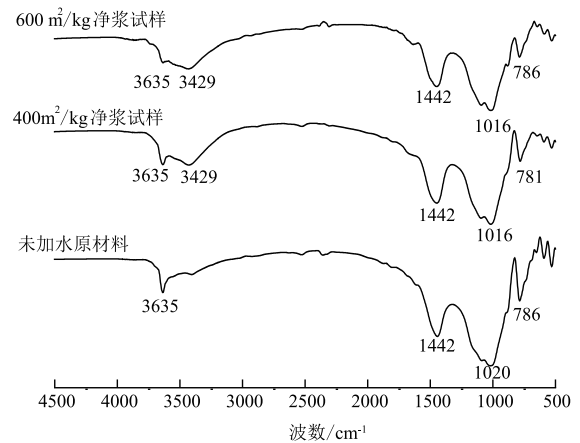


图 5 铁尾矿粉净浆试块红外光谱  
Fig. 5 Infrared spectrum of iron tailing powder clean pulp test block

图 5 为铁尾矿粉净浆试块的红外光谱，由图 5 可以看出，三种试样在波数 1440 cm<sup>-1</sup> 处存在 C-O 的伸展震动，3625 cm<sup>-1</sup> 和 3429 cm<sup>-1</sup> 处是 O-H 键的拉伸吸收，在波数为 779 cm<sup>-1</sup> 左右位置是 Si-O 对称伸缩振动峰，1031 cm<sup>-1</sup> 位置左右强而宽的吸收带是 Si-O 的特征峰，这说明存在不同结构形式的 SiO<sub>2</sub> 晶体。

在约 3643 cm<sup>-1</sup> 处的条带为 Ca(OH)<sub>2</sub>，3429 cm<sup>-1</sup> 处的条带为结晶水。在铁尾矿粉样品中，Ca(OH)<sub>2</sub> 在铁尾矿石粉净浆中部分转化为有结晶水的化合物。如图 5 所示，Si-O 键的两条带都向低波数方向移动，这表明部分 Si-O 键的键力常数与原材料相比有所降低。同时，这些 Si-O 键的长度有所增加，Si-O 键之间的电子云转移到化学键的中间。断裂的 Si-O 键中 Si 原子与高电负性原子

## 材料科学

相连, Si-O 断键的 O 原子与电负性低于 Si 原子相连。与 Si 相连的是电负性高的 O, 与 O 相连的是来自原材料中的 Ca。综合来看铁尾矿的硅铝氧键不存在解聚现象, 是表面的硅铝氧断键在弱碱性环境下发生了一定的重聚, 从而提高抗压强度 (见表 6)。

### 3 结论

(1) 细粒级铁尾矿粉在化学与矿物组成方面与粉煤灰相近; 铁尾矿粉  $>45 \mu\text{m}$  的颗粒含量为 17.7%, 比表面积为  $412 \text{ m}^2/\text{kg}$ ; 细粒级铁尾矿粉烧失量为 6.5%; 经改性后的需水量比为 97.2%, 均满足 II 级粉煤灰国家标准。

(2) 加入碱性氧化物类、碱性氧化物分析纯类、聚合物类改性剂能显著提升铁尾矿粉早期活性指数, 3 d 活性指数分别为 105%、103.7% 和 103.3%, 但 28 d 的活性指数低于 II 级粉煤灰组; 加入硫酸盐类改性剂对活性指数提高效果非常有限; 加入碱类改性剂后铁尾矿粉 3 d、7 d 和 28 d 活性指数分别为 95.6%、95.7% 和 89.3%, 均高于 II 级粉煤灰组。碱类改性剂作为铁尾矿的改性剂改性效果最好。

(3) 改性后的铁尾矿粉界面处  $\text{SiO}_2$  的硅氧键会发生重组现象, 发生重聚反应, 这些产物反应后可以在铁尾矿颗粒之间生成絮状连接物, 形成非常致密的结构, 从而提高抗压强度, 且随铁尾矿粉比表面积增大净浆抗压强度增加。

### 参 考 文 献

- [1] 黄晓燕, 倪文, 李克庆. 铁尾矿粉制备高延性纤维增强水泥基复合材料 [J]. 工程科学学报, 2015, 37 (11): 1491-1497.
- [2] 王海军, 王伊杰, 李文超, 等. 《全国矿产资源节约与综合利用报告 (2019)》 [J]. 中国国土资源经济, 2020, 33 (2): 2-3.
- [3] 张广田, 刘娟红, 孔丽娟, 等. 石英岩型铁尾矿机制砂中石粉的吸附特性及机理 [J]. 材料导报, 2021, 35 (6): 6071-6077.
- [4] 刘文博, 姚华彦, 王静峰, 等. 铁尾矿资源化综合利用现状 [J]. 材料导报, 2020, 34 (S1): 268-270.
- [5] 宋少民, 陈泓燕. 铁尾矿微粉对低熟料胶凝材料混凝土性能的影响研究 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39 (8): 2557-2566.
- [6] 宋少民, 张乐义, 李紫翼. 铁尾矿微粉对水泥混凝土后期性能的影响 [J]. 混凝土, 2019 (1): 128-131.
- [7] 黄泽轩, 侯义辉, 宋少民. 铁尾矿微粉对混凝土收缩及耐久性能的影响 [J]. 混凝土, 2020 (5): 56-59.
- [8] 宋少民, 闫少杰, 刘小端. 铁尾矿微粉对大流态混凝土性能的影响研究 [J]. 混凝土, 2017 (11): 77-80.
- [9] 侯云芬, 刘锦涛, 赵思儒, 等. 铁尾矿粉对水泥砂浆性能的影响及机理分析 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27 (5): 1149-1157.
- [10] 侯云芬, 赵思儒, 王婧婷. 铁尾矿粉的组成及其物理性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2015 (2): 26-28.
- [11] 王营, 顾晓薇, 张延年, 等. 铁尾矿砂水泥砂浆抗压强度及微观结构分析 [J]. 金属矿山, 2022 (1): 60-64.
- [12] 侯云芬, 赵思儒. 铁尾矿粉对混凝土性能的影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2015 (3): 17-19.
- [13] 刘娟红, 吴瑞东, 李生丁. 改性铁尾矿微粉混凝土的性能研究 [J]. 江西建材, 2014 (12): 92-96.
- [14] HAN F H, LUO A, LIU J H, et al. Properties of high-volume iron tailing powder concrete under different curing conditions [J]. Construction and Building Materials, 2020, 241: 118108.
- [15] 普少昌, 周喻, 张宏博, 等. 含铁尾矿粉和粉煤灰混凝土强度和耐久性研究 [J]. 非金属矿, 2021, 44 (6): 84-87.
- [16] HAN F H, SONG S M, LIU J H, et al. Effect of water/binder ratio and temperature on the hydration heat and properties of ternary blended cement containing slag and iron tailing powder [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2021, 144: 1115-1128.
- [17] GB/T 14684-2022, 《建设用砂》 [S].
- [18] GB/T 2419-2016, 《水泥胶砂流动度测定方法》 [S].
- [19] GB/T 17671-2020, 《水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法)》 [S].