

热活化超细铁尾砂制备充填胶凝材料^①

王峰¹, 夏豪杰², 梁民¹, 杨浩泉³, 董夔², 孔少奇²

(1.山西新元煤炭有限责任公司, 山西 晋中 045400; 2.太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 3.山西省应急管理厅, 山西 太原 030001)

摘要: 采用热活化方式对超细铁尾砂进行改性, 在铁尾砂中加入废石进行混合煅烧制备充填胶凝材料, 以铁尾砂与废石质量比、煅烧温度和煅烧时间为变量, 试件抗压强度和化学结合水含量为优化目标, 采用正交试验法研究各因素对目标值的敏感性以及影响趋势, 并对胶凝材料水化产物进行分析。结果表明, 随着废石质量增加, 试件抗压强度先增加后降低; 随着煅烧温度升高, 试件抗压强度单调降低; 随着煅烧时间增加, 试件抗压强度先降低后增加。综合考虑烧制成本及材料性能, 确定适宜的煅烧方案为: 铁尾砂与废石质量比 7:3, 煅烧温度 800 °C, 煅烧时间 2 h。在该条件下, 试件 3、7、28 d 抗压强度分别达到 4.18、6.36、9.87 MPa, 胶凝材料水化产物主要为水化硅酸钙凝胶、硅钙石、钙矾石和水滑石。

关键词: 充填材料; 铁尾砂; 废石; 正交试验; 热活化; 胶凝材料; 尾砂利用; 抗压强度; 结合水含量

中图分类号: TD853.34; TD861

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.02.007

文章编号: 0253-6099(2025)02-0041-06

Preparation of Cemented Tailings Backfill with Thermally Activated Ultrafine Iron Tailings Sand

WANG Feng¹, XIA Haojie², LIANG Min¹, YANG Haoquan³, DONG Kui², KONG Shaoqi²

(1. Shanxi Xinyuan Coal Co., Ltd., Jinzhong 045400, Shanxi, China; 2. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China; 3. Emergency Management Department of Shanxi Province, Taiyuan 030001, Shanxi, China)

Abstract: Ultra-fine iron ore tailings were modified through thermal activation, and then together with some waste rock were taken for mixed calcination. With the mass ratio of iron ore tailings to waste rock, calcination temperature and calcination time as variables, and the compressive strength of specimens and the content of chemically bound water as the objectives for optimization, an orthogonal experiment was carried out to analyze the sensitivity and influence trends of each factor on the target values, and the hydration products of the cemented materials were also analyzed. The results indicate that with an increase in the mass of waste rock, the specimen compressive strength initially increases and then decreases. As the calcination temperature rises, the specimen compressive strength monotonically decreases. As calcination time is prolonged, the specimen compressive strength first decreases and then increases. In consideration of both calcination cost and material performance, an optimal calcination scheme is finally determined, including iron ore tailings and waste rock in a mass ratio of 7:3, a calcination temperature of 800 °C, and a calcination time of 2 h. Under these conditions, the 3-day, 7-day and 28-day compressive strengths of the specimens can reach 4.18, 6.36 and 9.87 MPa, respectively. The main hydration products of the cemented materials are calcium silicate hydrate gel, rankinite, ettringite and hydrotalcite.

Key words: backfill material; iron tailings; waste rock; orthogonal experiment; thermal activation; cemented materials; tailings utilization; compressive strength; bound water content

据统计,我国铁尾砂年产量约 6 亿 t^[1]。尾砂中含大量土地,同时对周边环境造成污染^[2-3],有必要采用经济、安全、科学的方式进行尾砂处理。尾砂具有良好

① 收稿日期: 2024-10-16

基金项目: 山西省基础研究计划(自由探索类)-青年科学基金项目(2022SX09301223073)

作者简介: 王峰(1974—),男,山西沁县人,高级工程师,主要从事煤矿安全生产管理工作。E-mail: fengwang19740418@163.com

通信作者: 孔少奇(1989—),男,山西大同人,副教授,主要从事充填开采与二氧化碳储存利用与封存研究。E-mail: kongshaoqi@tyut.edu.cn

的均一性及惰性特质,处理后常用作建筑骨料、胶凝材料、充填骨料等^[4]。将尾砂制备成胶凝材料,不仅可以提高尾砂利用率,还可以提高矿山经济效益。一般尾砂越细,其潜在活性越高,将其制备成胶凝材料的潜力越大^[5]。众多学者对尾砂活性进行了大量研究,尾砂活化的主要方法^[6-9]有机械活化、热活化等。研究发现机械活化很难有效提升超细铁尾砂活性,而热活化可以使超细铁尾砂中黏土质分解,形成无定形相,从而提高其活性^[10]。然而,铁尾砂的热活化是多变量的,铁尾砂性质、混合料类型、煅烧温度、煅烧时间等因素都可能对其活性产生影响。鉴于此,本文通过在铁尾砂中添加废石,以铁尾砂与废石质量比、煅烧温度和煅烧时间为变量,以试件抗压强度和化学结合水(CBW)为优化目标,采用正交试验研究各因素对目标值的敏感性以及影响趋势,并对胶凝材料水化产物进行分析,以此研究铁尾砂热活化性能。

1 试验

1.1 试验材料

试验材料包括铁尾砂、采石场废石及矿渣。铁尾砂和废石均取自辽宁某铁矿,矿渣购自辽宁某钢铁厂。采用X射线荧光光谱仪、X射线粉末衍射仪和Mastersizer 2000激光粒度仪对原材料化学成分、矿物成分及粒径分布进行分析,检测结果如表1、图1及图2所示。铁尾砂主要元素组成为Si、Fe、Al、Mg、Ca,具备潜

表1 原材料主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of raw materials %

材料名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃
采石场废石	—	0.31	62.35	0.19	30.36	0.01	0.01	—	—
铁尾砂	75.76	2.43	3.17	11.54	6.10	0.21	0.49	0.09	0.09
矿渣	30.02	8.65	38.75	0.42	16.65	0.07	0.09	—	2.14

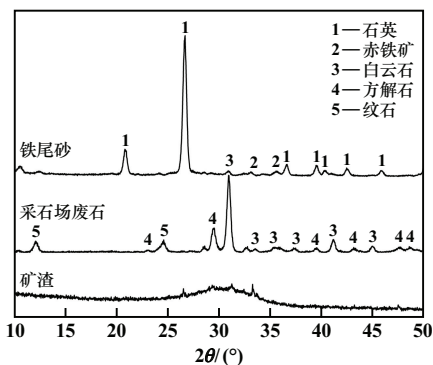


图1 原材料矿物成分分析结果

Fig. 1 Analysis results of mineral composition of raw materials

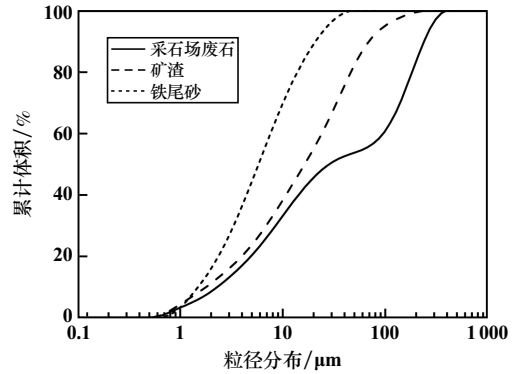


图2 原材料粒径分布图

Fig. 2 Particle size distribution of raw materials

在的反应活性;从矿物成分上看,铁尾砂中主要包含石英和赤铁矿两种结晶较好的惰性矿物,因此需要对制备胶凝材料的铁尾砂进行活化处理,铁尾砂中值粒径 $d_{50} = 18.6 \mu\text{m}$,粒径小于 $50 \mu\text{m}$ 的颗粒占比约48%, $(28 \sim 50) \mu\text{m}$ 粒级的颗粒占比约25.5%,粒径大于 $74 \mu\text{m}$ 的颗粒占比约8.5%,属于超细铁尾砂。废石主要化学成分为CaO、MgO以及少量 Al_2O_3 ,其矿物成分主要为白云石和方解石,还含有少量纹石等矿物。矿渣主要化学成分为 SiO_2 、CaO以及MgO,以非晶相为主,其粒度大于铁尾砂但小于废石。

1.2 试验方案

直接煅烧铁尾砂制备胶凝材料的煅烧温度高,生产成本较高;铁尾砂与废石混合后煅烧,可达到协同增效、降低煅烧温度的目的。预试验和相关研究发现,影响铁尾砂活性的关键因素为铁尾砂与废石质量比(因素A)、煅烧温度(因素B)、煅烧时间(因素C),设计三因素正交试验,如表2所示。混合料在完成煅烧后再与矿渣按1:1质量比球磨5 min制备干料,干料粒径小于 0.104 mm 。

表2 正交试验方案

Table 2 Orthogonal experimental design scheme

水平	因素 A	因素 B/°C	因素 C/h
1	8:2	800	1
2	7:3	900	2
3	6:4	1000	3

1.3 试验步骤

将制备的干料与水按质量比2:1混合搅拌成均匀料浆,注入直径5 cm、高5 cm的圆柱形模具中,在温度 $(20 \pm 1) \text{ } ^\circ\text{C}$,湿度不低于95%的标准养护环境中养护至目标龄期,脱模,测试试件力学性能。采用微机控制电子万能试验机检测抗压强度,每组试验共检测

3个试件,取其平均值作为该组最终抗压强度。

完成抗压强度测试后收集试件碎块,使用异丙醇浸泡12 h以终止碎块水化,在40 ℃下将碎块烘干,使用研钵将碎块研磨并通过0.074 mm筛网用于热重测试。采用综合热分析仪以10 ℃/min升温速率测试碎块在30~600 ℃范围内的热重曲线,根据式(1)计算碎块化学结合水(CBW)含量。

$$S_{CBW} = \frac{M_{50} - M_{550}}{M_{550}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: S_{CBW} 为碎块化学结合水含量(质量分数),%; M_{50} 和 M_{550} 分别为碎块在50 ℃和550 ℃时的质量,g。

部分试件被进一步磨细,过0.074 mm筛后,采用SmartLab X射线衍射仪以5 (°)/min的扫描速率测定试件在5°~50°范围内XRD图谱。

2 试验结果分析

2.1 胶凝材料抗压强度

2.1.1 抗压强度极差分析

按照正交试验设计,试件3、7、28 d抗压强度测试结果和极差分析结果如表3~4所示。

表3 抗压强度测试结果

Table 3 Compressive strength test results

编号	因素 A	因素 B/℃	因素 C/h	抗压强度/MPa		
				3 d	7 d	28 d
1	8:2	800	1	4.26	6.41	11.93
2	8:2	900	2	3.04	4.25	9.15
3	8:2	1000	3	0.23	0.38	0.51
4	7:3	800	2	4.18	6.36	9.87
5	7:3	900	3	4.45	6.51	11.65
6	7:3	1000	1	0.24	0.39	0.60
7	6:4	800	3	3.58	5.43	9.35
8	6:4	900	1	4.03	6.37	8.64
9	6:4	1000	2	0.28	0.39	0.56

表4 抗压强度极差分析结果

Table 4 Range analysis of compressive strength

特征项	单轴抗压强度/MPa								
	因素 A			因素 B			因素 C		
	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
\bar{K}_1	2.510	3.680	7.197	4.007	6.067	10.383	2.843	4.390	7.057
\bar{K}_2	2.957	4.420	7.373	3.840	5.710	9.813	2.500	3.667	6.527
\bar{K}_3	2.630	4.063	6.183	0.250	0.387	0.557	2.753	4.107	7.170
极差 R	0.447	0.740	1.190	3.757	5.680	9.826	0.343	0.723	0.643

各因素耦合作用对试件不同龄期抗压强度影响规律如图3所示。试件抗压强度均随着废石含量(质量

分数)增加先增大后减小,铁尾砂与废石质量比7:3时,试件抗压强度达到峰值。随着煅烧温度升高,试件抗压强度表现出单调下降的趋势,煅烧温度从800 ℃升至900 ℃时,试件抗压强度下降幅度较小;从900 ℃升至1000 ℃时,试件抗压强度下降明显,降幅较大。试件抗压强度随着煅烧时间延长先减小后增加,但整体相差不大。从极差结果来看,在各养护龄期内,煅烧温度对试件抗压强度影响最大,铁尾砂与废石质量比次之,煅烧时间对试件抗压强度影响最小。

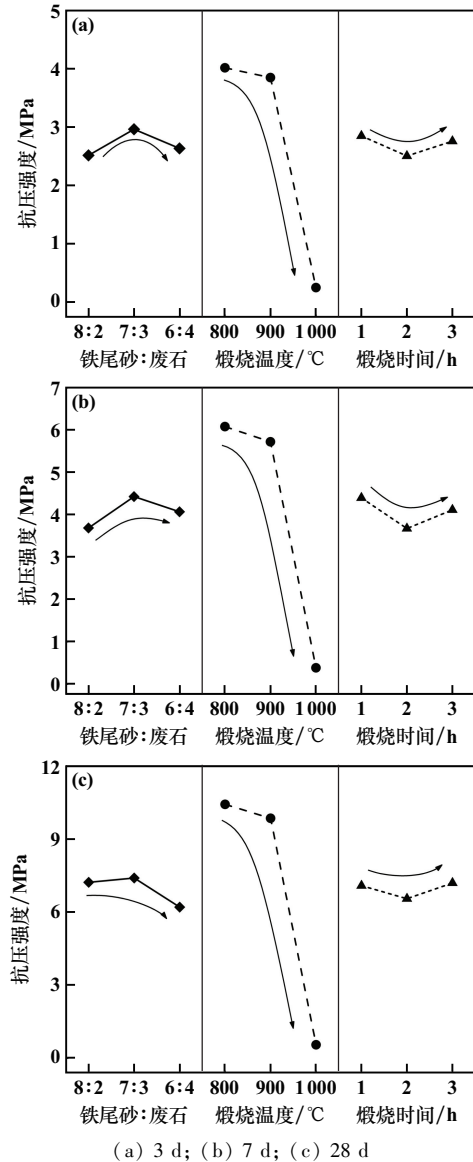


图3 各因素耦合作用对试件不同龄期抗压强度影响规律

Fig.3 Influence of various factors coupling on compressive strength of sample after different curing ages

综合考虑成本等因素,结合表3和图3,选择试件抗压强度适宜组合为A2B1C2,即铁尾砂与废石质量比7:3、煅烧温度800 ℃、煅烧时间2 h。

2.1.2 抗压强度方差分析

试件抗压强度与各因素 的方差分析结果如表 5 所示。3 个因素对试件抗压强度的影响规律在养护龄期上具有一致性。因素 B 对试件抗压强度的影响显著;因素 A 和因素 C 对试件抗压强度的影响不显著,且影响程度接近。因此,3 个因素影响程度排序为: B>A>C。综合来看,不同养护龄期下,煅烧温度对试件抗压强度的影响都显著高于铁尾砂与废石质量比和煅烧时间的影响。

表 5 各试验指标方差分析

Table 5 Analysis of variance of each test indices

性能指标	因素	偏差平方和	自由度	F 值	F 临界值	显著性
3 d 抗压强度	A	0.321	2	0.045	$F_{0.10}=3.110$ $F_{0.05}=4.460$	不显著
	B	27.028	2	3.813		显著
	C	0.190	2	0.027		不显著
	误差	28.35	8			
7 d 抗压强度	A	0.822	2	0.051	$F_{0.10}=3.110$ $F_{0.05}=4.460$	不显著
	B	69.727	2	3.792		显著
	C	0.797	2	0.044		不显著
	误差	64.54	8			
28 d 抗压强度	A	2.474	2	0.052	$F_{0.10}=3.110$ $F_{0.05}=4.460$	不显著
	B	182.574	2	3.814		显著
	C	0.708	2	0.015		不显著
	误差	191.49	8			

2.2 CBW 含量

2.2.1 CBW 含量极差分析

试件养护 3、28 d 时 CBW 含量与极差分析结果见表 6~7。

表 6 试件 CBW 含量

Table 6 CBW Content of specimen

编号	因素 A	因素 B/℃	因素 C/h	CBW 含量/%	
				3 d	28 d
1	8:2	800	1	8.31	12.86
2	8:2	900	2	6.85	11.98
3	8:2	1 000	3	3.01	5.16
4	7:3	800	2	8.24	12.71
5	7:3	900	3	8.46	13.01
6	7:3	1 000	1	3.06	5.23
7	6:4	800	3	7.38	12.34
8	6:4	900	1	7.56	12.62
9	6:4	1 000	2	3.12	5.36

各因素对不同龄期试件中 CBW 含量影响规律如图 4 所示。各因素对试件 CBW 含量影响规律与其对试件抗压强度影响规律一致。试件 CBW 含量随着废石含量增加先增大后减小;随着煅烧温度升高,CBW

表 7 CBW 含量极差分析结果

Table 7 Range analysis of CBW content

特征项	CBW 含量/%					
	因素 A		因素 B		因素 C	
	3 d	28 d	3 d	28 d	3 d	28 d
\bar{K}_1	6.057	10.000	7.977	12.637	6.310	10.237
\bar{K}_2	6.587	10.317	7.623	12.537	6.070	10.017
\bar{K}_3	6.020	10.107	3.063	5.250	6.283	10.170
极差 R	0.567	0.317	4.914	7.387	0.240	0.220

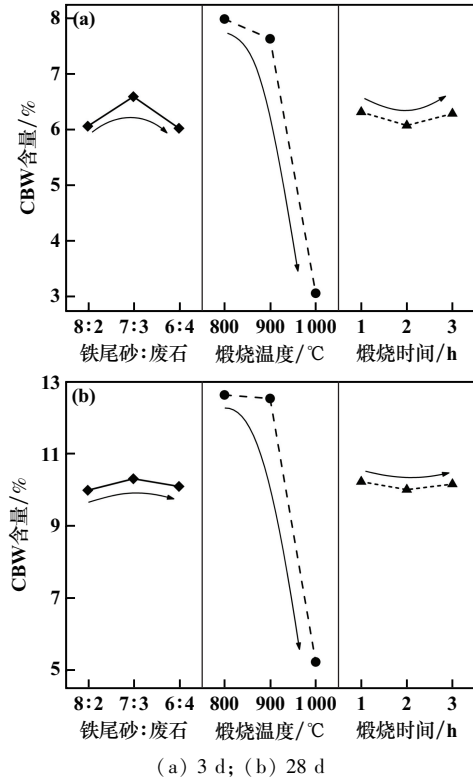


图 4 各因素对不同龄期试件中 CBW 含量影响规律

Fig.4 Influence of various factors on CBW content in sample after different curing ages

含量单调下降;随着煅烧时间延长,CBW 含量先减小后增加。养护龄期增至 28 d 时,煅烧温度和煅烧时间对试件 CBW 含量的影响程度降低,说明随着养护龄期增加,煅烧温度和煅烧时间对试件中 CBW 含量的影响不显著。比较各因素 R 值,各因素对试件 CBW 含量影响从大到小排序为: B>A>C, 适宜的组合为 A2B1C2, 即铁尾砂与废石质量比为 7:3, 煅烧温度为 800 °C, 煅烧时间为 2 h。

2.2.2 CBW 含量方差分析

CBW 含量方差分析如表 8 所示。在相同养护龄期下,因素 A 和因素 C 对 CBW 含量影响不显著,因素 B 对 CBW 含量影响显著。根据表 8 中的 F 值可得,因素 B 影响最大,因素 A 次之,因素 C 影响最小,与极差

分析结果一致。

表8 各试验指标方差分析

Table 8 Analysis of variance of test indices

性能指标	因素	偏差平方和	自由度	F 值	F 临界值	显著性
3 d CBW 含量	A	0.603	2	0.051	$F_{0.10} = 3.110$	不显著
	B	45.059	2	3.843		显著
	C	0.104	2	0.009	$F_{0.05} = 4.460$	不显著
	误差	46.9	8			
28 d CBW 含量	A	0.156	2	0.006	$F_{0.10} = 3.110$	不显著
	B	107.668	2	3.974		显著
	C	0.076	2	0.003	$F_{0.05} = 4.460$	不显著
	误差	108.37	8			

2.3 水化产物类型分析

根据试件抗压强度和 CBW 含量分析结果,确定热活化铁尾砂的适宜组合为 A2B1C2,即铁尾砂和废石质量比为 7:3,煅烧温度为 800 °C,煅烧时间为 2 h。为探明其水化机理,对不同龄期的水化样品进行了 XRD 测试,结果如图 5 所示。

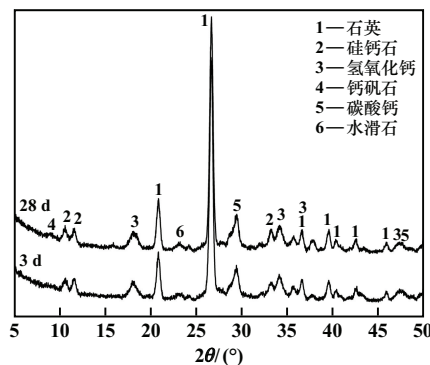
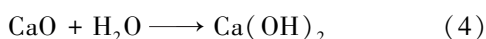
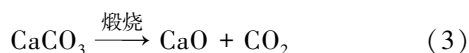
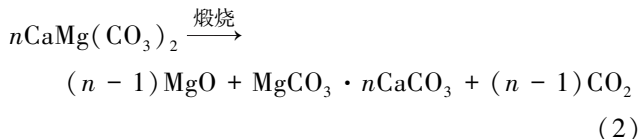


图5 不同龄期水化样品 XRD 图

Fig.5 XRD patterns of hydration product after different curing ages

由图 5 可知,煅烧后铁尾砂中存在大量惰性石英结晶,导致试件抗压强度较低。氢氧化钙是由废石煅烧分解形成的氧化钙与水反应形成,其连续反应如式(2)~(4)所示^[11]。



氢氧化钙不仅能提高溶液碱度,促进无定形相物质溶解,还能与煅烧铁尾砂发生火山灰反应,形成具有胶凝性质的水化硅酸钙凝胶^[12]。碳酸钙的存在说明废石中碳酸钙在高温煅烧下并没有完全分解,还存在

少量残留。钙矾石作为水化产物之一,仅在养护 28 d 后观察到微弱的衍射峰。这是由于矿渣含有少量硫酸根,不利于钙矾石的形成与结晶,因此经过较长反应时间才观察到少量钙矾石^[13]。矿渣和废石中含量较高的 MgO 有助于形成水滑石,因此观察到了水滑石的衍射峰,但可能由于结晶度较差,水滑石的衍射峰强度相对较低^[14-15]。

3 结论

1) 铁尾砂与废石质量比、煅烧温度和煅烧时间对铁尾砂试件抗压强度影响敏感性程度为:煅烧温度>铁尾砂与废石质量比>煅烧时间。适宜组合为铁尾砂与废石质量比 7:3,煅烧温度 800 °C,煅烧时间 2 h。在此条件下,试件 3、7、28 d 抗压强度分别达到了 4.18、6.36、9.87 MPa。

2) 各因素对 CBW 含量影响敏感性与其对抗压强度影响敏感性一致:煅烧温度>铁尾砂与废石质量比>煅烧时间,但随着养护时间延长,铁尾砂与废石质量比和煅烧时间对试件 CBW 含量影响逐渐减小。

3) 试件水化产物主要为水化硅酸钙凝胶、硅钙石、钙矾石和水滑石,其中钙矾石和水滑石随着养护时间延长结晶度逐渐增加,表明试件持续水化,不断完善和调整微观结构,在提高试件整体性能上起着关键作用。

参考文献 (References):

- [1] 张晓波,曹伟,姜群,等. 尾砂浓缩-脱水及废水零排放技术研究[J]. 采矿技术, 2022,22(2):181-184.
ZHANG Xiaobo, CAO Wei, JIANG Qun, et al. Tailings concentration-dehydration and zero wastewater discharge technology[J]. Mining Technology, 2022,22(2):181-184.
- [2] ZHANG X, YANG H, CUI Z. Evaluation and analysis of soil migration and distribution characteristics of heavy metals in iron tailings[J]. Journal of Cleaner Production, 2018,172:475-480.
- [3] 汪光德,原明亮,曾建红,等. 北洛河铁矿全尾砂胶结充填治理塌陷区的可行性研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(1):36-40.
WANG Guangde, YUAN Mingliang, ZENG Jianhong, et al. Feasibility study of cemented backfill with total tailings for management of land subsidence in Beiminghe Iron Mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(1):36-40.
- [4] 张静,刘再涛,李永新,等. 全尾砂和废石联合胶结充填体最佳配比及应用[J]. 矿冶工程, 2020,40(3):10-14.
ZHANG Jing, LIU Zaitao, LI Yongxin, et al. Optimum proportion of total tailings and waste rock for cemented backfill and its practical application[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(3):10-14.
- [5] 刘宝,潘钢华,高敏,等. 不同养护方式对铁尾砂制备的再生粗

- 骨料的性能影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024(6):1-10.
- LIU Bao, PAN Ganghua, GAO Min, et al. Effects of different curing methods on properties of recycled coarse aggregate prepared from iron tailings sand[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024(6):1-10.
- [6] 吴辉,倪文,伏程红,等. 机械粉磨对铁尾矿制备高强结构材料的影响[J]. 矿物学报, 2010,30(增刊1):72-73.
- WU Hui, NI Wen, FU Chenghong, et al. Effect of mechanical grinding on the preparation of high strength structural materials from iron tailings[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2010,30(S1):72-73.
- [7] 徐丽,吴辉,郭珍妮,等. 利用微磨球效应制备超高铁尾矿混凝土[J]. 金属矿山, 2010(12):162-166.
- XU Li, WU Hui, GUO Zhenmi, et al. Preparation for ultra-high strength concrete with tailings by using micro-ball effects[J]. Metal Mine, 2010(12):162-166.
- [8] 李北星,陈梦义,王威,等. 粉磨方式对铁尾矿-矿渣基胶凝材料的性能影响[J]. 硅酸盐通报, 2013,32(8):1463-1467.
- LI Beixing, CHEN Mengyi, WANG Wei, et al. Effect of grinding method on performance of iron tailings-slag based cementitious material[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013,32(8):1463-1467.
- [9] 冯向鹏,张娜,孙恒虎,等. 用赤泥提高铁尾矿热活化性能的试验研究[J]. 金属矿山, 2007(10):132-136.
- FENG Xiangpeng, ZHANG Na, SUN Henghu, et al. Study on heat-activation property of iron tailing by red mud[J]. Metal Mine, 2007(10):132-136.
- [10] 易忠来,孙恒虎,李宇. 热活化对铁尾矿胶凝活性的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2009,31(12):5-7.
- YI Zhonglai, SUN Henghu, LI Yu. Research on the influence of thermal activation for the cementitious activity of iron ore tailing[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009,31(12):5-7.
- [11] ZHANG S, REN F, ZHAO Y, et al. The effect of stone waste on the properties of cemented paste backfill using alkali-activated slag as binder[J]. Construction and Building Materials, 2021,283:122686.
- [12] LIU J, QIU J, WU P, et al. Calcined oil shale residue as a supplementary cementitious material for ordinary Portland cement[J]. Construction and Building Materials, 2021,306:124849.
- [13] LIU J, ZHAO J, ZHAO Y, et al. Resource utilization of solid waste from steel industries in cement-based cementitious materials: Mechanical properties, hydration behaviors, and environmental impact[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023,11(3):109882.
- [14] JIN F, GU K, AL-TABBAA A. Strength and hydration properties of reactive MgO-activated ground granulated blastfurnace slag paste[J]. Cement and Concrete Composites, 2015,57:8-16.
- [15] ADU-AMANKWAH S, ZAJAC M, STABLER C, et al. Influence of limestone on the hydration of ternary slag cements[J]. Cement and Concrete Research, 2017,100:96-109.
- 引用本文:**王峰,夏豪杰,梁民,等. 热活化超细铁尾砂制备充填胶凝材料[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):41-46.
- WANG Feng, XIA Haojie, LIANG Min, et al. Preparation of cemented tailings backfill with thermally activated ultrafine iron tailings sand[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):41-46.
- (上接第40页)
- [14] MEHMOODA R, BIE R F, JIAO L B, et al. Adaptive cutoff distance: Clustering by fast search and find of density peaks[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy System, 2016,31(5):2619-2628.
- [15] 陈莎莎,何理,李腾飞,等. 基于 ACO-BP 模型的岩石爆破破碎块度预测[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):12-16.
- CHEN Shasha, HE Li, LI Tengfei, et al. Prediction of rock blasting fragmentation based on the ACO-BP model[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(5):12-16.
- [16] 李屹,夏祥生,徐继业,等. 爆破振动作用下含断层边坡动力响应分析[J]. 矿冶工程, 2024,44(1):21-24.
- LI Yi, XIA Xiangsheng, XU Jiye, et al. Dynamic response analysis of a faulted slope under blasting vibration[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(1):21-24.
- 引用本文:**卢栋,富国凯,孙正军,等. 震后危岩体边坡力学参数反演及余震动力响应分析[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):34-40.
- LU Dong, FU Guokai, SUN Zhengjun, et al. Inversion of mechanical parameters and dynamic response analysis of dangerous rock mass slopes after earthquakes[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):34-40.