

# 电解锰渣中高温焙烧试验研究<sup>①</sup>

陈沪飞<sup>1,2</sup>

(1. 贵州金瑞新材料有限责任公司, 贵州 铜仁 554300; 2. 长沙矿冶研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012)

**摘要:** 为探索电解锰渣合理处置方法, 研究了中高温焙烧对电解锰渣中锰、硫、氨氮含量的影响。结果表明: 电解锰渣直接焙烧时, 焙烧温度 1 050 °C、焙烧时间 60 min 条件下, 电解锰渣直接焙烧样中 S 质量分数由 9.11% 降至 0.87%, 锰质量分数由 1.87% 增至 2.26%; 电解锰渣先经水洗再配煤焙烧, 焙烧温度 1 000 °C、焙烧时间 60 min、配煤量质量分数 3% 条件下, 水洗-配煤焙烧样中 S 质量分数降至 1.32%、锰质量分数降至 0.78%; 电解锰渣经中高温焙烧后可满足水泥掺合料对 S 质量分数的要求; 电解锰渣中高温焙烧脱氨氮效果较好, 其中氨氮基本脱除。

**关键词:** 电解锰渣; 中高温焙烧; 脱硫; 水泥; 脱氨; 脱氮

中图分类号: TF046

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.05.020

文章编号: 0253-6099(2024)05-0100-05

## Experimental Study on Roasting of Electrolytic Manganese Slag at Medium and High Temperature

CHEN Hufei<sup>1,2</sup>

(1. Guizhou Kingray New Materials Co., Ltd., Tongren 554300, Guizhou, China; 2. Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., Changsha 410012, Hunan, China)

**Abstract:** In order to find a reasonable disposal method for electrolytic manganese slag (EMS), effect of roasting at medium and high temperature on the content of manganese, sulfur and ammoniacal nitrogen in EMS was explored. The results show that after the EMS is directly roasted at 1 050 °C for 60 min, the mass fraction of S in the EMS sample falls from 9.11% to 0.87%, while the mass fraction of Mn goes up from 1.87% to 2.26%. After being washed with water, the EMS sample is then roasted with 3% coal (in mass fraction) at 1 000 °C for 60 min. As a result, the mass fractions of S and Mn in the obtained roasted sample drop down to 1.32% and 0.78%, respectively. It is found that after direct roasting process at medium and high temperature, EMS can meet the requirement of mass fraction of S for cement admixture, and also medium and high temperature roasting process can almost remove all ammoniacal nitrogen therein, presenting a good removal effect.

**Key words:** electrolytic manganese slag (EMS); roasting at medium and high temperature; desulfurization; cement; dehydrogenation; ammonia removal

电解金属锰是钢铁工业的重要原材料, 一是用作脱硫、脱氧, 二是用作合金的添加料, 以提高合金强度、硬度等性能。我国是钢铁生产和消费大国, 钢铁产量位居世界第一, 同时也是世界上最大的电解锰生产、出口和消费国<sup>[1-2]</sup>。电解锰渣是电解金属锰生产过程中产生的工业废渣, 每生产 1 t 电解锰产生 8~10 t 电解锰渣, 且随着锰矿石贫化, 伴随电解金属锰生产而产生

的电解锰渣量还将大幅增加<sup>[3-4]</sup>。因没有合理的处置方法, 目前我国电解锰渣主要以堆存处理为主, 目前我国电解锰渣堆存量已超 1 亿吨, 且每年还以超过 1 000 万吨的速度增长<sup>[5]</sup>。

电解锰生产属于“三高”行业, 产生的电解锰渣含有锰、氨氮、硫酸盐等复合污染物, 经雨水淋浸, 渗滤液易进入土壤、地表水、地下水, 存在较高的环境污染风

① 收稿日期: 2024-04-01

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3901204); 铜仁市科技计划项目([2023]71号)

作者简介: 陈沪飞(1993—), 男, 江西抚州人, 硕士, 工程师, 主要从事固废处理研究工作。E-mail: 792770026@qq.com

险<sup>[6]</sup>。锰渣浸出液中锰、氨氮浓度远高于 GB 8978—1996《污水综合排放标准》的要求<sup>[7]</sup>,电解锰渣中 As、Hg、Mn 等平均含量均超过土壤背景值<sup>[8]</sup>,其浸出液对白菜、小麦等的生长具有明显的抑制作用。

电解锰渣对环境的高危害性严重制约了锰企业的可持续发展,开发电解锰渣无害化资源化处置技术,使电解锰渣变废为宝,是保障锰企业高质量发展的关键。电解锰渣的主要成分为 CaO、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SO<sub>3</sub> 等,与普通硅酸盐水泥成分相似,因此,通过活化预处理、调质配方可制备性能合格的水泥掺合料<sup>[9-11]</sup>。相关研究学者对电解锰渣处理开展了大量工作,发现焙烧温度 900 °C、焦炭添加量(质量分数)4%时,锰渣中 SO<sub>3</sub> 质量分数可降至 2.17%,满足作为水泥原料要求<sup>[12]</sup>;电解锰渣经 600 °C 左右煅烧后,脱水石膏活性和火山灰活性显著,可作为水泥混合材<sup>[13]</sup>。基于电解锰渣理化特性,本文研究了电解锰渣中高温焙烧脱硫、脱氨氮规律,以期电解锰渣资源化用作水泥混合材提供参考。

## 1 试验原料及试验方法

### 1.1 试验原料

试验用电解锰渣取自贵州铜仁某电解锰企业渣场,电解锰渣是电解金属锰生产过程中产生的压滤渣,电解锰渣外观呈黑色,胶结成块状,含水率较高(21.64%),主要化学成分见表 1。由表 1 可知,电解锰渣主要成分为 SiO<sub>2</sub>、CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、S 等,其中 S 质量分数为 9.11%,超过 GB 175—2023《通用硅酸盐水泥》中规定的水泥中 SO<sub>3</sub> 含量低于 3.5%的要求;其余成分与水泥成分相近;有机质、水溶性盐含量较高。

表 1 电解锰渣原料主要化学成分(质量分数) %

Mn	NH <sub>3</sub> -N	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>
1.87	0.51	11.41	3.02	33.49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	有机质	水溶性盐
6.61	9.11	2.49	10.10	12.98

采用 X 射线衍射对原料电解锰渣进行物相分析,发现电解锰渣主要物相为石英(SiO<sub>2</sub>)和烧石膏(CaSO<sub>4</sub>·0.5H<sub>2</sub>O),与化学成分分析结果一致。

电解锰渣表面微观形貌如图 1 所示。由图 1 可知,电解锰渣原料表面形貌粒度有一定差异,粒状晶体和片状晶体交错堆积,杂乱无章分布,表面较粗糙。

### 1.2 试验方法

电解锰渣直接焙烧:取 100 g 经烘干破碎的电解

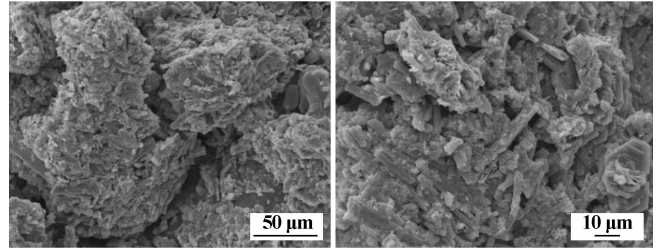


图 1 电解锰渣 SEM 图

锰渣原料装入刚玉坩埚中,将坩埚放入马弗炉中进行焙烧温度、时间条件试验,马弗炉升温速率 5~10 °C/min。电解锰渣经中高温焙烧后,石膏、硫酸铵等发生分解反应,渣中 S、NH<sub>3</sub>-N 等逸出,焙烧样中硫氮含量降低。

电解锰渣水洗渣配煤焙烧:电解锰渣先经水洗预处理脱除部分水溶锰、可溶盐等,获得电解锰渣水洗渣;随后取 100 g 电解锰渣水洗渣配入一定比例煤装入刚玉坩埚中,将坩埚放入马弗炉中进行中高温焙烧脱除硫氮,进行焙烧温度、时间、渣煤配比条件试验,马弗炉升温速率 5~10 °C/min。

试验设备包括 100-3 型磨机、101-3EBS 型电热鼓风干燥箱、SX2-8-13 型厢式电阻炉等。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 电解锰渣直接焙烧失重变化规律

电解锰渣中含有硫酸钙、硫酸铵等受热会分解的物质,而样品在焙烧过程中质量变化规律是指导工业生产的重要指标数据。首先考察了焙烧时间 120 min 条件下电解锰渣在不同焙烧温度下所得焙烧样失重率的变化规律,结果见图 2。电解锰渣直接焙烧温度达 1 100 °C 时样品出现熔融现象,所以只研究焙烧温度 1 050 °C 以下时焙烧样品的失重规律。由图 2 可知,随着焙烧温度增大,电解锰渣失重率逐渐增大,焙烧温度 1 050 °C 时,电解锰渣失重率超过 35%。电解锰渣焙烧过程中,硫酸盐发生分解生成 SO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub> 等不断逸出,使电解锰渣质量不断减小。

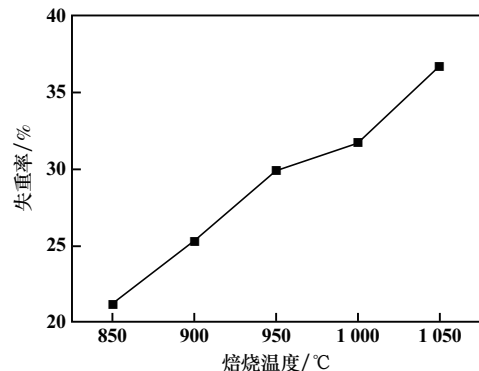


图 2 焙烧温度对电解锰渣直接焙烧样失重率的影响

## 2.2 电解锰渣直接焙烧对锰、硫、氨氮质量分数的影响

电解锰渣中锰、硫含量相对较高,锰、硫在水泥混合料中属于有害杂质,氨氮在建材中也属于有害物质,因此脱除电解锰渣中锰、硫、氨氮是制备合格建材掺合料的关键。考察了焙烧时间 120 min 条件下焙烧温度对电解锰渣直接焙烧样中锰、硫、氨氮质量分数的影响,结果见表 2。由表 2 可知,锰元素质量守恒,在焙烧过程中,样品中锰总量不会发生变化,一定焙烧时间下,随着焙烧温度升高,焙烧样品总质量逐渐减小,从而使焙烧样中锰质量分数随着焙烧温度升高呈增大趋势。随着焙烧温度升高,电解锰渣发生脱硫反应,焙烧样中硫质量分数逐渐降低,焙烧温度 1 050 ℃ 时,焙烧样中硫质量分数为 0.15%,满足水泥掺合料中 S 质量分数低于 1.4% 的要求。经中高温焙烧后,样品中氨氮质量分数很低,基本已分解脱除。

表 2 焙烧温度对电解锰渣直接焙烧样焙烧效果的影响

焙烧温度/℃	质量分数/%		
	Mn	S	NH <sub>3</sub> -N
850	2.09	6.38	0.005 7
900	2.17	4.61	0.005 9
950	2.21	3.67	0.007 1
1 000	2.38	2.42	0.002 8
1 050	2.55	0.15	0.004 4

焙烧温度 1 050 ℃,考察了电解锰渣直接焙烧时间对样品中锰、硫、氨氮质量分数的影响,结果见表 3。由表 3 可知,随着焙烧时间延长,锰质量分数呈增大趋势,硫质量分数逐渐降低,焙烧时间 60 min 时,硫质量分数降至 0.87%,满足水泥掺合料标准要求。焙烧温度 1 050 ℃ 条件下,焙烧样中氨氮质量分数均较低。

表 3 焙烧时间对电解锰渣直接焙烧样焙烧效果的影响

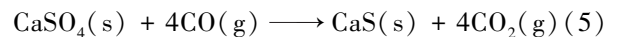
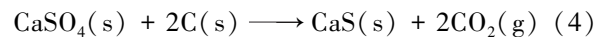
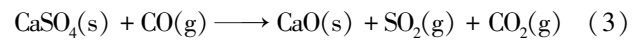
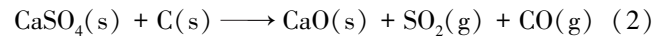
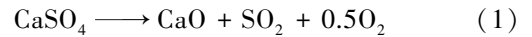
焙烧时间/min	质量分数/%		
	Mn	S	NH <sub>3</sub> -N
30	2.15	3.55	0.001 0
60	2.26	0.87	0.000 5
90	2.32	0.44	0.000 6
120	2.55	0.15	0.004 4
150	2.60	0.13	0.000 6

## 2.3 电解锰渣水洗渣配煤焙烧对锰、硫、氨氮质量分数的影响

### 2.3.1 焙烧温度试验

由于电解锰渣中含有一定量锰,可通过水洗等方式回收锰,一方面可以提高锰渣处置综合效益,另一方面可以预处理脱除部分锰,为锰渣进一步资源化利用

提供有利条件。虽然电解锰渣经直接焙烧后可作为水泥掺合料,但直接焙烧温度需 1 050 ℃,温度较高。有研究<sup>[14-15]</sup>表明,少量碳粉能有效降低 CaSO<sub>4</sub> 的分解温度,而电解锰渣中硫主要以硫酸盐形态存在,因此,加入一定量还原性碳可能可以降低电解锰渣脱硫焙烧温度,过程中可能发生的化学反应为:



电解锰渣先经液固比 4:1、时间 60 min 水洗处理,获得的电解锰渣水洗渣在焙烧时间 90 min、配煤量(质量分数)3% 条件下进行配煤焙烧,考察了焙烧温度对电解锰渣水洗-配煤焙烧样中锰、硫、氨氮质量分数的影响,结果如表 4 所示。试验过程中发现,电解锰渣水洗-配煤焙烧样在焙烧温度 1 050 ℃ 时出现熔融现象。由表 4 可知,焙烧时间 90 min、配煤量 3% 条件下,随着焙烧温度升高,水洗-配煤焙烧样中硫、氨氮质量分数逐渐降低,锰品位缓慢增大。焙烧温度 1 000 ℃ 时,样品中硫质量分数降至 0.49%,满足水泥掺合料标准要求。相比电解锰渣直接焙烧,样品硫质量分数达标的焙烧温度低了 50 ℃,因为碳与硫酸钙在相对较低的温度下能反应生成 SO<sub>2</sub> 逸出。

表 4 焙烧温度对水洗-配煤焙烧样焙烧效果的影响

焙烧温度/℃	质量分数/%		
	Mn	S	NH <sub>3</sub> -N
750	0.50	6.41	0.023
800	0.55	5.60	0.020
850	0.58	4.85	0.018
900	0.59	3.54	0.017
950	0.59	2.28	0.015
1 000	0.63	0.49	0.009

### 2.3.2 焙烧时间试验

焙烧温度 1 000 ℃、配煤量 3% 条件下,考察了焙烧时间对水洗-配煤焙烧样中锰、硫、氨氮质量分数的影响,结果如表 5 所示。由表 5 可知,随着焙烧时间延长,水洗-配煤焙烧样中硫质量分数逐渐降低,锰质量

表 5 焙烧时间对水洗-配煤焙烧样焙烧效果的影响

焙烧时间/min	质量分数/%		
	Mn	S	NH <sub>3</sub> -N
30	0.55	2.05	0.016 0
60	0.61	1.35	0.010 0
90	0.63	0.49	0.009 0
120	0.65	0.47	0.004 0
150	0.69	0.46	0.002 2

分数呈增大趋势,氨氮质量分数均较低;焙烧时间 60 min 时,硫质量分数降至 1.35%,锰质量分数降至 0.61%。

### 2.3.3 配煤量试验

焙烧温度 1 000 ℃、焙烧时间 60 min,考察了配煤量对水洗-配煤焙烧样中锰、硫、氨氮质量分数的影响,结果如表 6 所示。由表 6 可知,随着配煤量增大,水洗-配煤焙烧样中硫质量分数先降低后升高,配煤量 3% 时焙烧效果较好,因为配入过量的煤,副反应显著,样品中硫质量分数有所增加;锰质量分数先增大后减小,氨氮质量分数变化不明显。

表 6 配煤量对水洗-配煤焙烧样焙烧效果的影响

配煤量/%	质量分数/%		
	Mn	S	NH <sub>3</sub> -N
1	0.52	2.53	0.012
3	0.61	1.35	0.010
5	0.60	1.79	0.009
7	0.56	1.87	0.009
9	0.53	2.25	0.008

表 7 电解锰渣水洗-焙烧渣用作水泥熟料掺合料性能检测结果

水泥标号	物料配比(质量分数)/%					烧失量/ %	稠度	凝结时间/h		安定性	抗折强度/MPa			抗压强度/MPa		
	水泥熟料	石灰石	选锰尾矿	电解锰渣	石膏			初凝	终凝		1 d	3 d	28 d	1 d	3 d	28 d
PC32.5R	62	15	17	—	3	7.88	25.6	123	160	合格	2.6	4.7	7.4	12.9	22.7	41.2
	62	15	—	17	3	7.10	25.5	126	167	合格	2.3	4.6	6.8	9.9	21.4	37.4
PO42.5	85	5	6	—	4	3.45	24.7	121	162	合格	3.9	6.2	8.1	18.2	32.3	51.6
	85	5	—	6	4	3.21	24.6	126	169	合格	3.6	5.8	8.0	16.4	29.8	50.1
国标 PC32.5R											—	4.0	5.5	—	17.0	32.5
国标 PO42.5											—	4.0	6.5	—	17.0	42.5

## 3 结 论

1) 直接焙烧,焙烧温度 1 100 ℃ 时电解锰渣出现熔融现象;焙烧温度 1 050 ℃、焙烧时间 60 min 时,电解锰渣焙烧样中 S 质量分数降至 0.87%,达到水泥熟料掺合料中 S 质量分数低于 1.4% 的要求。

2) 电解锰渣水洗有利于降低锰渣中 Mn 质量分数,配煤焙烧有利于降低电解锰渣脱硫温度,但过量的配煤不利于电解锰渣脱硫。电解锰渣水洗渣配煤焙烧,焙烧温度 1 050 ℃ 时焙烧样出现熔融现象。电解锰渣水洗渣在焙烧温度 1 000 ℃、焙烧时间 60 min、配煤量 3% 条件下,水洗-配煤焙烧样中 S 质量分数降至 1.32%,满足水泥熟料掺合料中 S 质量分数的标准要求;电解锰渣水洗-配煤焙烧样在 PC32.5R 标号水泥熟料中添加量 17%、在 PO42.5 标号水泥熟料中添加量 6% 时,获得的水泥满足质量要求。

3) 中高温焙烧条件下,电解锰渣氨氮脱除效果较

好,氨氮基本被脱除干净。

### 2.4 电解锰渣焙烧渣做水泥熟料掺合料性能检测

为确保制备的批量焙烧样硫质量分数合格,在前期试验基础上,采用液固比 4 : 1、水洗搅拌时间 60 min、焙烧温度 1 000 ℃、焙烧时间 90 min、配煤量 3% 进行电解锰渣水洗预处理及中高温焙烧,制备数公斤电解锰渣水洗-配煤焙烧处理样,获得的样品大部分呈黄色,局部为灰色粘在黄色样上。对所得样品进行了水泥熟料掺合料性能检测,结果如表 7 所示。由表 7 可知,电解锰渣先经水洗再经焙烧后样品在 PC32.5R 标号水泥熟料中添加量 17%、在 PO42.5 标号水泥熟料中添加量 6% 时制备的水泥成品凝结时间、强度等相关性能均能达到国标要求,满足水泥质量要求;电解锰渣在水泥熟料中综合掺比达 11.5%。

好,氨氮基本被脱除干净。

4) 我国电解锰渣综合利用率较低,基本以堆存处理为主,本文研究结果可为电解锰渣资源化利用提供技术基础。

### 参考文献:

- [1] 郑宇,李炳震,刘长根,等. 软锰矿-硫铁矿协同浸出实验研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(5):103-105.
- [2] 阳大帅,苏向东,彭天剑,等. 电解锰渣无害化处理和资源化综合利用研究[J]. 化学工程与装备, 2022(2):264-265.
- [3] 蒙正炎,高遇事,贾韶辉,等. 电解锰渣综合治理技术研究应用现状和思考[J]. 中国锰业, 2022,40(2):1-5.
- [4] 钱振,谭杰,李重洋,等. 电解锰阳极液浸出菱锰矿的热力学和动力学研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(1):77-80.
- [5] DUAN N, DAN Z G, WANG F, et al. Electrolytic manganese metal industry experience based China's new model for cleaner production promotion[J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(17/18): 2082-2087.
- [6] 陈晓亮,王海峰,尤晓宇,等. 两矿法浸出电解锰阳极渣中锰的研

- 究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(3): 92-94.
- [7] 董馨予, 王海峰, 贺跃, 等. 电解锰渣的浸出毒性分析及无害化处理[J]. 无机盐工业, 2023, 55(5): 85-90.
- [8] 马先杰, 陈森, 陈兰兰, 等. 贵州典型电解锰企业锰渣重金属污染特征及对植物种子萌发和生长的影响[J]. 科技通报, 2019, 35(8): 190-196.
- [9] 蒋勇, 文梦媛, 贾陆军. 电解锰渣的预处理及对水泥水化的影响[J]. 非金属矿, 2018, 41(3): 49-52.
- [10] WU J F, SONG M S, XU X H, et al. Prospects and advances of comprehensive utilization of electrolytic manganese residue[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(7): 2645-2652.
- [11] 程淑君, 陶宗硕, 施学宝. 锰渣作水泥混合材的应用研究[J]. 中国建材科技, 2019, 28(4): 48-49.
- [12] 熊玉路, 徐子豪, 李英杰, 等. 惰性气氛下电解锰渣高温还原焙烧脱硫[J]. 化工进展, 2021, 40(增刊1): 319-325.
- [13] 王勇. 电解锰渣作水泥混合材的研究[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(5): 78-80.
- [14] LI C X, ZHONG H, WANG S, et al. Reaction process and mechanism analysis for CaS generation in the process of reductive decomposition of  $\text{CaSO}_3$  with coal[J]. Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2015, 50: 173-181.
- [15] ZHENG S C, NING P, MA L P, et al. Reductive decomposition of phosphogypsum with high-sulfur-concentration coal to  $\text{SO}_2$  in an inert atmosphere [J]. Chemical Engineering Research & Design, 2011, 89(12): 2736-2741.
- 引用本文: 陈沪飞. 电解锰渣中高温焙烧试验研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(5): 100-104.

(上接第95页)

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告 2022[M]. 北京: 地质出版社, 2022.
- [2] 湛宏海, 邓红飞, 罗立群, 等. 炼铜炉渣选铜尾矿制备矿微粉[J]. 化工进展, 2021, 40(8): 4616-4623.
- [3] 王明细, 陈荣升, 罗立群, 等. 炼铜尾渣提取重介质产品的特性及矿物学分析[J]. 中国矿业, 2021, 30(11): 109-114.
- [4] 王苗, 杨双平, 庞锦琨. 火法铜渣改质还原提铁试验研究[J]. 矿冶工程, 2019, 39(1): 98-101.
- [5] WANG H Y, SONG S X. Separation of silicon and iron in copper slag by carbothermic reduction-alkaline leaching process [J]. Journal of Central South University, 2020, 27(8): 2249-2258.
- [6] 李小凡, 豆志河, 张延安, 等. 铜冶炼渣综合利用进展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(4): 108-118.
- [7] 万新宇, 王锋, 高建军, 等. 铜渣还原-焙分过程中砷的行为特征[J]. 矿冶工程, 2021, 41(4): 96-99.
- [8] 董鑫江, 左宗良, 杨涵奇, 等. 铜渣氧载体煅烧改性及氧化还原特性研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(6): 107-111.
- [9] 张晓雪, 罗立群, 王洪阳. 铜渣碳热还原过程中铅锌脱离规律研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(2): 379-386.
- [10] 住房和城乡建设部. 铁矿球团工程设计标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [11] 李彩霞, 任瑞晨, 刘健, 等. 有机物/膨润土复合球团粘结剂的研究[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(4): 809-812.
- [12] 张元波, 欧阳学臻, 路漫漫, 等. 腐植酸改性膨润土在铁矿球团中的应用效果[J]. 烧结球团, 2018, 43(4): 27-32.
- [13] 蒋武锋, 李运刚, 赵利国, 等. 黏结剂对含碳球团还原的影响[J]. 钢铁研究学报, 2000(4): 1-4.
- 引用本文: 刘江, 罗立群, 刘成, 等. 铜渣尾矿团粒过程黏结剂筛选及黏结机理[J]. 矿冶工程, 2024, 44(5): 89-95.

(上接第99页)

- [10] 伍德佑, 刘志强, 饶帅, 等. 废旧磷酸铁锂电池正极材料回收利用技术的研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(10): 70-78.
- [11] 周吉奎, 刘牡丹, 刘勇, 等. 硫酸-双氧水浸出废弃磷酸铁锂中锂的实验研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(6): 79-81.
- [12] 姚送送, 吴国庆, 王浩, 等. 磷酸铁锂电池粉选择性提锂工艺[J]. 电池, 2021, 51(5): 538-541.
- [13] 王猛, 张家靓, 陈永强, 等. 退役磷酸铁锂电池回收技术综述[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(5): 100-110.
- [14] LI H, XING S Z, LIU Y, et al. Recovery of lithium, iron, and phosphorus from spent  $\text{LiFePO}_4$  batteries using stoichiometric sulfuric acid leaching system [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 5(9): 8017-8024.
- [15] 付中梦, 巩勤学, 王杜, 等. 从废旧磷酸铁锂正极片中回收铁、锂[J]. 矿冶, 2020, 29(5): 104-107.
- [16] 颜群轩, 罗碧云, 陈嘉鑫, 等. 废旧磷酸铁锂电池可持续回收技术研究进展[J]. 矿冶工程, 2023, 43(4): 174-177.
- [17] 中华人民共和国工业和信息化部. 电池用磷酸铁: HG/T 4701—2014[S]. 北京: 化工出版社, 2015.
- [18] JING Q, ZHANG J, LIU Y, et al. E-pH diagrams for the Li-Fe-P- $\text{H}_2\text{O}$  system from 298 to 473 K; thermodynamic analysis and application to the wet chemical processes of the  $\text{LiFePO}_4$  cathode material [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2019, 123(23): 14207-14215.
- [19] 韩梦莹. 电池级磷酸铁的制备工艺研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.
- [20] ZHENG R, ZHAO L, WANG W, et al. Optimized Li and Fe recovery from spent lithium-ion batteries via a solution-precipitation method [J]. Rsc Advances, 2016, 6(49): 43613-43625.
- 引用本文: 赵雨婷, 周自圆, 刘志启, 等. 废旧磷酸铁锂电池正极材料酸浸液除杂及同步回收  $\text{FePO}_4$  研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(5): 96-99.