新型捕收剂在尾矿中赤铁矿回收的应用试验

朱顺伟[1]，李孝龙[3]，李永利[1,2]，郭 强[1,2]，赵俊利[1]

(1. 郑州中科新兴产业技术研究院，河南 郑州 450000；2. 中国科学院过程工程研究所，北京 100190；
3. 鲁中矿业有限公司，山东 济南 250000)

摘要：采用强磁－正浮选工艺回收选矿尾矿中的赤(褐)铁矿，其所用浮选捕收剂对温度敏感，冬季需要对矿浆加温，且处理原料性质多变，现场浮选指标稳定性差。针对该问题，本文采用一种改性脂肪酸阴离子捕收剂 ZK-302 替代原有捕收剂，不改变原有调整剂种类及工艺流程，通过实验室小试确定可行性，并在此基础上进行工业试验验证。结果表明：经过 7 d 的工业试验，在浮选给料 TFe 平均品位为 32.23%、矿浆温度为 15 ℃的条件下，获得了精矿的 TFe 平均品位为 51.37% 和平均回收率为 64.21% 的综合指标。经 3 个月的连续生产，ZK-302 浮选指标稳定(精矿 TFe 品位不低于 50.63%，尾矿 TFe 品位不高于 21.07%，铁回收率在 61.62% 以上)，且用量比原有捕收剂减少 0.3 t/d，说明 ZK-302 是一种有效的耐低温型赤(褐)铁矿正浮选捕收剂。

关键词：赤铁矿；正浮选；捕收剂；工业试验

中图分类号：TD923+.13；TD912 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)04－0071－06

doi：10.13403/j.sjqt.2022.04.056

Experiment on hematite recovery from beneficiation tailings by a novel collector

ZHU Shunwei[1], LI Xiaolong[3], LI Yongli[1,2], GUO Qiang[1,2], ZHAO Junli[1]

(1. *Zhengzhou Zhongke Institute of Emerging Industrial Technology, Zhengzhou* 450000, *Henan*, *China*;
2. *Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*;
3. *Luzhong Mining Co., Ltd., Jinan* 250000, *Shandong*, *China*)

Abstract: A strong magnetic-direct flotation process is used to recover hematite (limonite) from beneficiation tailings. The flotation collector used in the flotation collector is sensitive to temperature. In winter, the pulp needs to be heated, the properties of the processed raw materials are changeable, and the stability of the on-site flotation index is poor. To address this problem, a modified fatty acid anion collector ZK-302 is adopted to replace the original collector, without changing the original adjuster type and process flow. The feasibility is determined through a small laboratory test, and on this basis, industrial test verification is carried out. The results show that after 7 d of industrial test, the comprehensive index of the average TFe grade of 51.37% and the average recovery of 64.21% of the concentrate are obtained under the conditions of the average TFe grade of 32.23% of the flotation feed and the pulp temperature of 15 ℃. After 3 months of continuous production, the flotation index of ZK-302 is stable (the TFe grade of the concentrate is not lower than 50.63%, the TFe grade of the tailings is not higher than 21.07%, and the iron recovery rate is above 61.62%), and the dosage reduces by 0.3 t/d compared with the original collector, indicating that ZK-302 is an effective direct flotation collector of low temperature-resistant hematite (limonite).

Key words: hematite; direct flotation; collector; industrial test

我国铁矿资源丰富，但因其贫、细、杂等特点[1-2]，导致国内铁矿回收利用较为困难，储量可观的难选铁矿没有得到充分的回收利用。2020 年，国内铁矿石精矿产量仅占消耗总量的

收稿日期：2021－09－22；**修回日期**：2021－12－09

作者简介：朱顺伟(1991—)，男，工程师，从事矿产资源综合利用方面的研究。

通信作者：赵俊利(1989—)，女，工程师，从事金属矿选矿方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

20%左右[3]，无法满足消费需求。国内研究人员一直致力于研究我国铁矿资源的开发利用，而在当前铁矿价格的驱动下，针对国内铁矿资源的开发利用技术正在不断落地转化，开发二次资源成为冶金工业可持续发展的重要途径之一[4]。浮选是赤铁矿常用的选别的方法之一[5]。某公司采用强磁－正浮选工艺回收选厂尾矿中的赤(褐)铁矿，所得浮选精矿掺入TFe质量分数为64%铁精矿，使最终产品品位不低于63%，浮选尾矿经强磁II再选，所得磁性矿物返回球磨，非磁性矿物直接抛尾。原浮选捕收剂为脂肪酸类捕收剂，对温度敏感，冬季浮选需对矿浆加温，能源消耗较大；且所用铁矿原矿性质多变，现场浮选指标不稳定，浮选精矿TFe质量分数最低时不足45%，导致浮选精矿无法掺入精矿。

当前多通过引入高极性的基团、不饱和键或有选择性作用的基团对脂肪酸试剂进行加工[6]，以改进其浮选性能，但其应用需进一步探索。本文采用改性脂肪酸阴离子捕收剂ZK-302替代现用捕收剂，从选厂尾矿中回收赤(褐)铁矿；并在实验室可行性试验的基础上，进行现场工业验证试验。验证ZK-302应用性能的同时，无需改动原有的调整剂种类和工艺流程，较低成本解决了现场浮选能耗大、指标不稳定的问题。

1 原料性质

1.1 粒度组成和化学成分

试验所用原料为选矿厂尾矿经强磁选I选别后的磁性产品。采用水析法对试验原料进行粒度分析，并测定各粒级的TFe质量分数，结果如表1所示。由表1可知，原料粒度较细，－0.074 mm粒级占比为88.70%，该细度条件下可直接进入浮选。原料中铁品位与矿样粒度呈负相关，粒度越细，铁品位越高，－0.045 mm粒级的平均铁品位可达43.12%，金属分布率为80.19%。

表1 原料粒度组成及金属分布(质量分数)

Table 1 Particle size composition and metal distribution of ore samples %

项目	+0.15 mm	0.15~0.074 mm	0.074~0.045 mm	0.045~0.038 mm	+0.038 mm	合计
粒级占比	0.19	11.11	30.64	21.58	36.48	100.00
TFe质量分数	5.31	10.64	16.30	39.07	45.51	31.22
金属分布率	0.03	3.79	15.99	27.01	53.18	100.00

对原料进行化学成分分析，结果如表2所示。由表2可知：矿样主要有价元素为铁，全铁品位为31.13%；脉石成分较为复杂，主要杂质成分SiO_2、MgO、Al_2O_3、CaO的质量分数均较高，主要有害元素S质量分数稍高，P_2O_5质量分数较低。

表2 试验原料的主要化学成分(质量分数)

Table 2 Main chemical analysis of ore samples %

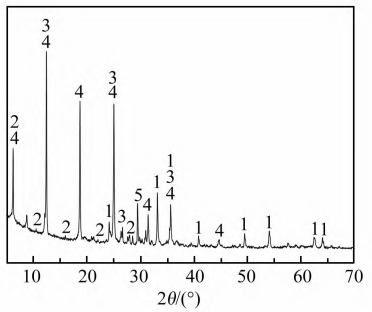
TFe	FeO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	S	MnO	P_2O_5	ZnO	CuO	Cl	V_2O_5
31.13	0.89	22.66	15.26	9.90	5.64	0.58	0.47	0.32	0.23	0.23	0.08	0.05	0.05	0.025	0.026

1.2 物相分析和矿物嵌布特征

对原料进行XRD分析，结果如图1所示。由图1可知，原料中赤铁矿是主要的金属矿物，脉石矿物组成较为复杂，除石英和方解石外，含有的黏土矿物高岭石以及易产生次生矿泥的绿泥石等矿物不利于赤铁矿的分选[7-8]。

为确定铁元素在不同物相中的分布，采用化学物相选择性溶解的方法测定原料中铁的化学物相及其分布，结果如表3所示。由表3可知，原料中的铁主要以赤(褐)铁矿的形式存在，占总铁的93.67%，与少量黄铁矿和假象赤铁矿的分布率达96.37%，这类铁是主要回收的目的矿物；而硅酸盐中的铁和绿泥石中的铁矿物则较难回收[9]。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



1—赤铁矿；2—石英；3—高岭石；4—绿泥石；5—方解石。

图 1　原料 X 射线衍射分析图谱

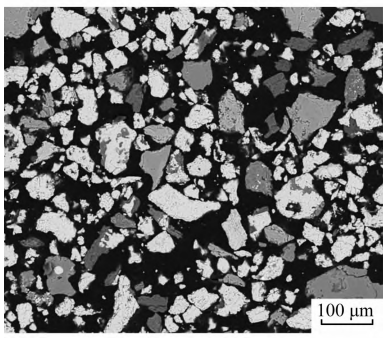
Fig. 1　XRD spectrum of ore samples

试验原料中主要目的矿物为赤铁矿，其 SEM 分析如图 2 所示。由图 2 可看出，矿石中存在部分解离度较高的大颗粒赤铁矿和脉石矿物，但有部分赤铁矿与脉石夹杂严重，脉石以微细粒嵌布在赤铁矿中，部分赤铁矿包裹于脉石中，不利于赤铁矿回收。因此，在浮选过程中应选择性浮选解离度较高和与脉石夹杂较少的赤铁矿，夹杂较为严重及被脉石包裹的赤铁矿，可经球磨解离后进行浮选。

表 3　原料中铁的化学物相及其分布(质量分数)

Table 3　Chemical phase and distribution of iron ore　　%

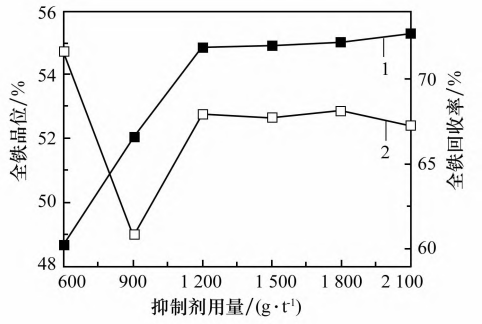
项目	黄铁矿中的铁	假象赤铁矿中的铁	赤(褐)铁矿中的铁	碳酸盐中的铁	硅酸盐中的铁	绿泥石中的铁	合计
质量分数	0.47	0.37	29.16	痕量	0.28	0.85	31.13
分布率	1.51	1.19	93.67	—	0.90	2.73	100.00



A—赤铁矿；B—脉石。

图 2　原料中赤铁矿及脉石矿物的微观形貌

Fig. 2　Micromorphology of hematite and gangue minerals in ore samples



1—全铁品位；2—全铁回收率。

图 3　氟硅酸铵用量对精矿指标的影响

Fig. 3　Influence of ammonium hexafluorosilicate dosage on concentrate index

2　试验结果与分析

2.1　实验室小试

因现场工艺流程限制，实验室小试仅研究抑制剂氟硅酸铵和捕收剂 ZK-302 的用量及浮选温度对赤铁矿回收的影响。

2.1.1　氟硅酸铵用量试验

铁矿正浮选抑制剂氟硅酸铵选择性抑制石英质脉石的同时，对赤铁矿具有活化作用[10-11]。在捕收剂 ZK-302 用量为 400 g/t 和浮选温度为 25 ℃的条件下，研究抑制剂氟硅酸铵用量对浮选指标的影响。试验结果如图 3 所示。

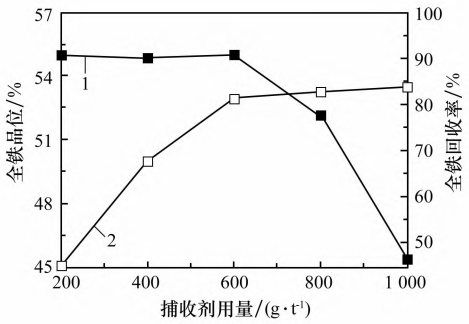
由图 3 可知，随着抑制剂用量的增加，精矿铁品位逐渐增大，铁回收率先降低后增大。分析原因认为：在氟硅酸铵为 600 g/t 条件下，因用量低对脉石矿物的抑制作用较弱，导致精矿品位较低；随着氟硅酸铵用量增至 900 g/t，其抑制作用增强，导致铁品位上升，但回收率下降；在氟硅酸铵用量增至 1 200 g/t 时，抑制作用更强，同时药剂用量达到活化区，氨在赤铁矿－水界面层中定向排列，降低了水化层的稳定性，使赤铁矿表面容易产生疏水化，从而使精矿铁品位、回收率增加；在氟硅酸铵用量为 1 200 g/t 以上时，活化作用有限，抑制作用

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

加强，精矿铁品位和回收率在小幅度波动。由于浮选精矿不作为产品直接出售，而是掺入64%铁精矿中售卖且最终产品的铁品位不低于63%。因此，考虑其产率、铁品位及药剂用量等因素的影响，最终选定抑制剂用量为1 200 g/t。

2.1.2 ZK-302用量试验

在抑制剂氟硅酸铵用量为1 200 g/t和浮选温度为25 ℃的条件下，研究捕收剂ZK-302用量对浮选指标的影响。试验结果如图4所示。由图4可知，随着ZK-302用量的增加，精矿的全铁品位逐渐降低，回收率先增加后趋于稳定。当ZK-302用量为600 g/t时，精矿全铁品位为55.02%，回收率达81.38%。因此，选定ZK-302用量为600 g/t。



1—全铁品位；2—全铁回收率。

图4 ZK-302用量对精矿指标的影响

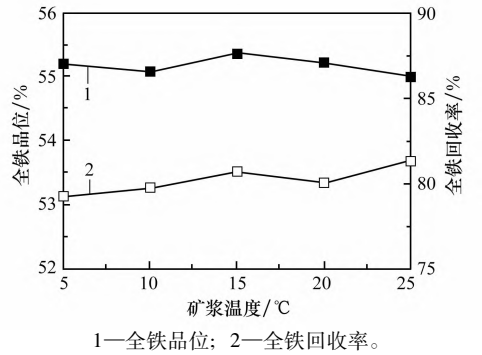
Fig. 4 Influence of ZK-302 dosage on concentrate index

2.1.3 矿浆温度试验

在抑制剂氟硅酸铵用量为1 200 g/t和捕收剂ZK-302用量为600 g/t的条件下，研究矿浆温度对浮选指标的影响。试验结果如图5所示。由图5可知，矿浆温度对ZK-302的浮选指标影响较小，在矿浆温度为5 ℃的条件下，精矿全铁品位可达55.21%，回收率为79.31%。表明该药剂耐低温性能良好。

2.1.4 捕收剂对比试验

在浮选温度分别为5、25 ℃、抑制剂氟硅酸铵用量为1 200 g/t和捕收剂用量为600 g/t条件下，研究现场捕收剂与ZK-302的对比试验，得到浮选指标如表4所示。由表4可知，现场捕收剂耐低温效果较差，5 ℃时获得的精矿品位仅为46.11%，铁回收率仅为30.03%；在25 ℃时精矿品位可提高至54.52%，铁回收率为69.34%。而ZK-302在25 ℃条件下获得的铁品位及铁回收率均优于现场捕收剂，且在5 ℃低温下效果仍保持相对稳定。因此，ZK-302可作为替代药剂使用。



1—全铁品位；2—全铁回收率。

图5 矿浆温度对精矿指标的影响

Fig. 5 Influence of the pulp temperature on concentrate index

表4 捕收剂对比试验结果(质量分数)

Table 4 Collector contrast test results %

试剂	温度/℃	精矿产率	精矿铁品位	铁回收率
现场捕收剂	5	20.24	46.11	30.03
	25	38.25	54.52	69.34
ZK-302	5	44.53	55.21	79.31
	25	45.85	55.02	81.38

2.1.5 精选试验

精选试验工艺流程和药剂制度如图6所示，试验结果如表5所示。采用该工艺流程和药剂制度最终可获得精矿产率为33.57%，全铁品位为64.12%，回收率为69.44%的良好指标。这表明ZK-302是一种有效的赤铁矿捕收剂。

2.2 工业试验

根据捕收剂ZK-302实验室小试结果，在矿浆温度低于15 ℃、矿浆质量分数为25%~35%、

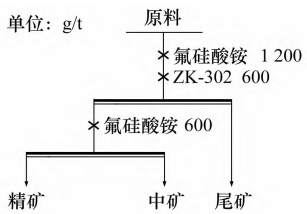


图6 精选试验工艺流程

Fig. 6 Process flow of selection test

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 5　精选试验结果(质量分数)

Table 5　Selected test result　　%

项目	产率	铁品位	铁回收率
精矿	33.57	64.12	69.44
中矿	12.28	30.14	11.94
尾矿	54.15	10.66	18.62
合计	100.00	31.00	100.00

氟硅酸铵用量为 1 750 g/t 和 ZK-302 用量为 483.33 g/t 的条件下，进行 7 d 天连续浮选工业试验，浮选为一次浮选。指标稳定后的 7 d 连续实验结果如表 6 所示。

由表 6 可知，经一次浮选可获得精矿 TFe 品位最低为 49.54%，最高为 53.82%，尾矿 TFe 品位小于 21.09%，精矿 TFe 回收率稳定在 60% 以上的选别指标；TFe 平均品位为 32.23% 的给矿经浮选后可获得 TFe 平均品位和回收率分别为 51.37% 和 64.21% 的精矿，尾矿 TFe 平均品位为 19.32%。7 d 连续工艺试验结果优于现场捕收剂获得的精矿铁品位为 45%～48% 和回收率为 30%～60% 的选别指标。

表 6　7 d 连续工业试验指标(质量分数)

Table 6　7 day continuous industrial experiment index　　%

项目	原料品位	精矿品位	尾矿品位	铁回收率
第 1 天	32.29	53.82	17.54	67.76
第 2 天	33.36	49.54	20.46	65.88
第 3 天	31.90	52.12	18.78	64.30
第 4 天	33.36	51.71	21.09	62.11
第 5 天	32.04	49.56	20.41	61.71
第 6 天	31.31	50.70	19.74	60.51
第 7 天	31.32	52.15	17.22	67.21
平均值	32.23	51.37	19.32	64.21

在 7 d 连续工业试验的基础上，使用 ZK-302连续生产 3 个月的平均指标如表 7 所示。

表 7　连续生产平均工业指标

Table 7　Average industrial index of continuous production

项目	质量分数/%				用量/t	
	原料品位	精矿品位	尾矿品位	铁回收率	抑制剂	捕收剂
第 1 月	32.16	51.01	19.96	62.31	62.10	17.60
第 2 月	31.91	50.63	20.02	61.62	60.80	17.90
第 3 月	34.45	51.48	21.07	65.75	63.60	18.10
平均值	32.84	51.04	20.35	63.23	62.17	17.87

由表 7 可知，连续 3 个月生产指标稳定，精矿 TFe 品位不低于 50.63%，尾矿 TFe 品位不高于 21.07%，铁回收率在 61.62% 以上。这表明 ZK-302 药剂浮选稳定性良好。

生产期间，采用 ZK-302 捕收剂浮选强磁选 I 精矿，抑制剂氟硅酸铵用量减少了 0.2 t/d，捕收剂 ZK-302 比现场捕收剂用量减少了 0.3 t/d，且 ZK-302 药剂比现场旧捕收剂低 5 000 元/t。按照每年运行 330 d，药剂成本和燃气费用共节约近 251 万元/年。

此外，ZK-302 耐低温、浮选泡沫丰富、易碎、不跑槽，加药方便，易于管理。综上所述，ZK-302 具有良好的应用前景。

2.3　工业试验结果分析

2.3.1　浮选精矿化学成分分析

对工业试验所得浮选精矿进行取样分析，结果如表 8 所示。

表 8　精矿的主要化学成分和烧损(质量分数)

Table 8　Main chemical analysis and burning loss of concentrate　　%

TFe	FeO	SiO_2	MgO	$Al2O_3$	CaO	S	TiO_2	MnO	K_2O	Na_2O	CuO	P_2O_5	ZnO	V_2O_5	烧损
51.92	1.67	8.72	7.24	5.02	2.70	0.47	0.24	0.22	0.12	0.079	0.058	0.050	0.043	0.029	0.84

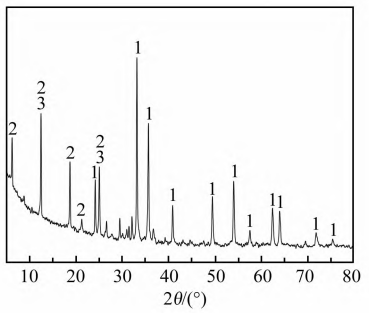
由表 8 可知，精矿铁品位达 51.92%，亚铁质量分数为 1.67%，表明主要捕收产物为赤铁矿。其主要杂质成分 Si、Mg、Al、Ca 较给料均得到大幅度降低，元素 S 与浮选给料相比有所

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

富集。给料中S元素主要以黄铁矿形式存在，表明ZK-302对黄铁矿具有一定的捕收性能。

2.3.2 浮选精矿XRD分析

对精矿进行XRD分析，结果如图7所示。由图7可知，精矿的主要成分是赤铁矿，脉石矿物以绿泥石和高岭石等易磨矿物为主，脉石石英及方解石均未测出。这表明在氟硅酸铵抑制剂作用下，ZK-302具有良好的选择性。



1—赤铁矿；2—绿泥石；3—高岭石。

图7 精矿X射线衍射分析图谱

Fig. 7 XRD spectrum of the concentrate

3 结 论

(1) 试验所用原料的全铁品位较低，为31.00%左右。目的矿物为赤铁矿，脉石矿物主要为绿泥石、石英、高岭石和方解石等，镜下大颗粒赤铁矿解离度较好。矿样粒度细，-0.074 mm粒级占比为88.70%。

(2) 以ZK-302替代现场捕收剂，氟硅酸铵为抑制剂，对原料进行一次正浮选试验。实验室小试可获得TFe品位为55.02%，回收率为81.38%的精矿。在给矿TFe平均品位为32.23%的条件下，连续7 d工业试验得到的指标：精矿TFe平均品位为51.37%，平均回收率为64.21%，尾矿TFe平均品位为19.32%，并在现场稳定生产3个月。

(3) ZK-302具有耐低温、对矿石适应性好、成本低和泡沫易碎的优势，替代现场捕收剂可节约成本约251万元/年，在赤铁矿正浮选上具有良好的应用前景。

参考文献:

[1] 许满兴. 中国鲕状赤铁矿资源的特征与开发利用[J]. 烧结球团,2011,36(3):24-27.
XU Manxing. Characteristics of oolitic hematite resources in china and its development and utilization[J]. Sintering and Pelletizing,2011,36(3):24-27.

[2] 高平. 巴基斯坦某铁矿反浮选试验研究[J]. 烧结球团,2020,45(4):65-70.
GAO Ping. Experimental research on reverse flotation of an iron ore in Pakistan[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(4):65-70.

[3] 伍红强,邱廷省. 不同粒度赤铁矿和石英的浮选行为研究[J]. 金属矿山,2021(4):101-105.
WU Hongqiang,QIU Yansheng. Study on flotation behavior of hematite and quartz with different particle sizes[J]. Metal Mine,2021(4):101-105.

[4] 赵祥栋. 铜渣硫化焙烧-磁选-浮选回收铜、钼和铁[J]. 烧结球团,2020,45(6):75-80;85.
ZHAO Xiangdong. Recovering copper, molybdenum and iron from copper slag by the process of sulphidizing roasting-magnetic separation-flotation[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(6):75-80;85.

[5] 祁忠旭,韩远燕,孙大勇,等. 提高云南某超贫微细赤铁矿选矿回收率的研究[J]. 烧结球团,2020,45(5):59-62.
QI Zhongxu,HAN Yuanyan,SUN Dayong,et al. Research on increasing the recovery ratio of an ultra-low-grade fine hematite[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(5):59-62.

[6] 张月. 几种新型脂肪酸类捕收剂改性药剂介绍[J]. 盐湖研究,2007,15(2):34-37.
ZHANG Yue. Introduction of new flotation collectors modified with fatty acid[J]. Journal of Salt Lake Research,2007,15(2):34-37.

[7] 陈雯,许海峰,周瑜林. 新型醚酸捕收剂CY-1对绿泥石的浮选作用机理及在铁矿反浮选中的应用[J]. 中国有色金属学报,2020,30(11):2714-2725.
CHEN Wen,XU Haifeng,ZHOU Yulin. Flotation mechanism of novel ether acid collector CY-1 to chlorite and its application in reverse floatation of iron ores[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2020,30(11):2714-2725.

[8] 王雪,唐云,陈淼,等. 赤铁矿与高岭石的浮选行为研究[J]. 矿业研究,2013,33(2):63-67.
WANG Xue,TANG Yun,CHEN Miao,et al. Research on the floataiton performances of hematite and kaolinite[J]. Mining Research and Development,2013,33(2):63-67.

[9] 高春庆,张凛,王海亮. 河北某铁矿工艺矿物学研究[J]. 金属矿山,2021(3):136-141.
GAO Chunqin, ZHANG Lin, WANG Hailiang. Study on process mineralogy of an iron ore in hebei province[J]. Metal Mine,2021(3):136-141.

(下转第98页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

SONG Yue. Study on the oxidation of semi-dried desulfurization ash and its applications[D]. Ma'anshan: Anhui university of technology,2019:4-5.

[24] 周臣,张子昕,谭文轶. 湿法脱硫工艺中 $MnSO_4$ 对 $CaSO_3$ 氧化与溶解速率的控制研究[J]. 环境工程,2017,35(7):106-109;80.

ZHOU Chen,ZHANG Zixin,TAN Wenyi. Study on oxidation rate of $CaSO_3$ with the catalyst of $MnSO_4$ in the process of wfgd[J]. Environmental Engineering,2017,35(7):106-109;80.

(上接第76页)

[10] 梅光军,余军,葛英勇,等. 降低包头铁精矿钾、钠含量的浮选试验研究[J]. 金属矿山,2006(2):31-35.

MEI Guangjun,YU Jun,GE Yingyong,et al. Reducing Na_2O and K_2O contents in baotou iron concentrate by flotation [J]. Metal Mine,2006(2):31-35.

[11] 梅光军,余军,葛英勇,等. 氟硅酸铵在赤铁矿与含铁硅酸盐浮选分离中的选择性抑制作用[J]. 矿冶工程,2005,25(4):24-26;29.

MEI Guangjun,YU Jun,GE Yingyong,et al. Selective depressive action of ammonium hexafluorosilicate in flotation separation of hematite and iron-containing silicate[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2005,25(4):24-26;29.

(上接第91页)

[7] 张晟,董辉. 环冷机内气固传热过程仿真及优化[C]//第十一届中国钢铁年会论文集. 北京:中国金属学会,2017:73-78.

ZHANG S,DONG H. Simulation and optimization of gas-solid heat transfer in sinter annular cooler[C]//Proceedings of the 11th China Iron and steel annual conference. Beijing: The Chinese Society for Metals,2017:73-78.

[8] 张小辉,张家元,戴传德,等. 烧结矿冷却过程数值仿真与优化[J]. 化工学报,2011,62(11):3081-3087.

ZHANG X H,ZHANG J Y,DAI C D,et al. Optimization and simulation of sinter cooling process[J]. CIESC Journal,2011,62(11):3081-3087.

[9] 张效鹏,周继良,潘文,等. 首钢京唐烧结 580 m^2 环冷机风量优化研究[C]//第十届全国能源与热工学术年会论文集. 杭州:中国金属学会,2019:300-309.

ZHANG X P,ZHOU J L,PAN W,et al. Study on air flow optimization of 580 m^2 circular cooler in jingtang sintering plant of shougang[C]//Proceedings of the 10th National Annual Conference on energy and thermal engineering. Hangzhou: The Chinese Society for Metals,2019:300-309.

[10] 陶文铨. 数值传热学(第2版)[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.

TAO W Q. Numerical Heat Transfer(Second Edition)[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press,2001.

[11] 唐家鹏. Ansys fluent 16.0 超级学习手册[M]. 北京:人民邮电出版社,2016.

TANG J P. Ansys fluent 16.0 Super learning manual[M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press,2016.

[12] 果晶晶,陈健,王书桓. 烧结矿余热罐内温度场的数值模拟研究[J]. 烧结球团,2019,44(3):64-67;72.

GUO J J,CHEN J,WANG S H. Study on numerical simulation of temperature field in waste heat tank of sinter[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(3):64-67;72.

[13] 潘鹤,金永龙,马洛文,等. 冷却制度对烧结矿性能的影响[J]. 钢铁,2007,42(11):5-8.

PAN H,JIN Y L,MA L W,et al. Study of influence of cooling conditions on properties of sinters[J]. Iron and Steel,2007,42(11):5-8.

[14] 侯向东. 影响烧结矿强度的因素及对策[J]. 科技情报开发与经济,2002(2):67-68.

HOU X D. Factors influencing the strength of agglomerate and countermeasures[J]. Sci/Tech Information Development & Economy,2002(2):67-68.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net