

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2022.01.008

湿法炼锌赤铁矿法沉铁渣水热除杂

邓志敢, 杨源, 樊刚, 魏昶, 孙朴, 朱应旭

(昆明理工大学冶金能源与工程学院, 昆明 650093)

摘要:湿法炼锌过程赤铁矿法沉铁渣可通过高温水热反应制备高附加值的氧化铁红。为揭示赤铁矿沉铁渣在高温水热转化过程中氧化铁、碱式硫酸铁、铁矾等的行为特点,采用热力学计算与试验研究相结合的方式,对高温水热反应过程中各物质的热稳定性进行研究。结果表明,在温度180~260℃下,铁矾和碱式硫酸铁的热稳定性差,氧化铁的热稳定性强,高温水热条件有利于铁矾的分解、三价铁水解生成氧化铁、碱式硫酸铁转化为氧化铁。经220℃高温水热反应后,铁含量提高到了66.83%,其中97.79%的铁为氧化铁,氧化铁含量达到93.36%,但仍有0.79%的S以碱式硫酸铁的形式存在,0.18%的锌和小于0.002%的钾、钠以物理夹杂的形式存在。

关键词:湿法炼锌;热力学;碱式硫酸铁;氧化铁;水热反应

中图分类号:TF803.2⁺5

文献标志码:A

文章编号:2095-1744(2022)01-0051-06

Hydrothermal Removal Impurity from Hematite Residue in Zinc Hydrometallurgical Process

DENG Zhigan, YANG Yuan, FAN Gang, WEI Chang, SUN Pu, ZHU Yingxu

(Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The hematite precipitation residue in zinc hydrometallurgical process, which could be prepared to high added value iron oxide red via high temperature hydrothermal reaction method. In order to reveal the behavior characteristics of iron oxide, basic ferric sulfate and jarosite in high temperature hydrothermal transformation process, the thermal stability of various substances in high temperature hydrothermal reaction were studied by the thermodynamic calculation and experiment. The results show that the thermal stability of jarosite and basic ferric sulfate is poor, while that of ferric oxide is strong at the temperature of 180—260℃. The high temperature hydrothermal conditions are favorable for the decomposition of jarosite, the hydrolysis of Fe^{3+} to Fe_2O_3 , and the transformation of basic ferric sulfate to ferric oxide. After the high temperature hydrothermal reaction at 220℃, the iron content rise to 66.83%, in which 97.79% of the iron is ferric oxide and the content of ferric oxide reaches 93.36%. However, 0.79% of the S still exists in the form of basic ferric sulfate, 0.18% of the zinc and less than 0.002% of the potassium and sodium exist in the form of physical inclusion.

Key words: zinc hydrometallurgy; thermodynamics; basic ferric sulfate; iron oxide red; hydrothermal reaction

收稿日期:2021-05-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51964029,51804146);国家重点研发计划项目(2018YFC1900402);云南省应用基础研究计划项目(2020AT070079)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51964029,51804146); National Key Research and Development Program of China(2018YFC1900402); Yunnan Province Applied Foundation Research Programs(2020AT070079)

作者简介:邓志敢(1983—),男,讲师,博士,主要从事有色金属冶金及矿产资源清洁利用研究工作。

通信作者:樊刚(1962—),男,教授,博士,主要从事有色金属冶金研究工作。

引用格式:邓志敢,杨源,樊刚,等.湿法炼锌赤铁矿法沉铁渣水热除杂[J].有色金属工程,2022,12(1):51-56.

DENG Zhigan, YANG Yuan, FAN Gang, et al. Hydrothermal impurity removal of iron slag from hydrometallurgical process of zinc hematite[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(1): 51-56.

湿法炼锌赤铁矿法沉铁渣含铁量高,可作为炼铁、水泥、陶瓷等行业的原料。为了提高赤铁矿法沉铁渣的利用价值,以赤铁矿法沉铁渣为原料制备氧化铁红,可以实现赤铁矿法沉铁渣的高附加值应用^[1]。

赤铁矿法沉铁渣水热脱杂过程中主要为三价铁离子化合物的分解与转化。三价铁离子在高温热水条件下以八面体六水络合离子 $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ 的形式存在,随着体系温度的升高,水合氢离子被逐渐脱离^[2-3]。由于湿法炼锌赤铁矿法沉铁过程生成硫酸,随着沉铁反应的进行,反应体系的硫酸浓度增加,生成的 $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ 在硫酸溶液中易形成碱式硫酸铁 $(\text{Fe}(\text{OH})\text{SO}_4)^{[4-6]}$,与氧化铁共同沉淀^[7-9],同时使渣的表面吸附一定量硫酸根^[10-11],导致赤铁矿法沉铁渣中吸附硫酸根^[12-15]。除此之外,由于湿法炼锌溶液中含有 Na^+ 、 K^+ ,使得沉铁渣中含有少量铁矾^[16-19]。如何实现沉铁渣中杂质的脱除和非氧化铁相的转化,是实现赤铁矿法沉铁渣制备高附加值氧化铁红的关键。

在前期研究工作中^[1]发现,采用高温水热法可将沉铁渣杂质分离,实现铁矾和碱式硫酸铁在分解,并将溶解出的铁离子水解沉淀为氧化铁,从而实现沉铁渣转化为氧化铁红。本文针对上述过程,通过热力学计算及沉铁渣中铁、氧、锌等元素含量及铁物相含量的检测,揭示赤铁矿法沉铁渣在高温水热反应过程中碱式硫酸铁、氧化铁、铁矾的转化行为特征和热力学稳定性。

1 试验原料及研究方法

1.1 试验原料

试验原料为某冶炼厂湿法炼锌过程产出的赤铁矿法沉铁渣,成分如表1所示,为去除其中的可溶性硫酸盐,在90℃、液固比6 mL/g、电磁搅拌速度400 r/min条件下水洗0.5 h,水洗后的沉铁渣成分如表1所示,可以看出,69.90%的Zn、25%的S、57.14%的K以及55.74%的Na被脱除,渣中硫的洗脱较低,说明水洗过程未能分解铁矾、碱式硫酸铁等含钾、钠、硫的物相。

表1 沉铁渣中主要元素质量分数

Table 1 Main elements content in the iron precipitation

	/%				
Elements	Fe	Zn	S	K	Na
No washing	58.66	1.03	2.96	0.028	0.061
Washing	61.51	0.31	2.22	0.012	0.027

水洗后沉铁渣中铁物相分析如表2所示,结果显示,氧化铁为主要含铁物相,铁矾含量很低,碱式硫酸铁含量是影响铁红品质的关键因素。

水洗后沉铁渣的EDS检测结果及元素分布如图1

表2 沉铁渣中主要铁物相含铁质量分数占比

Table 2 The proportion of iron content in the main iron

phase of hematite residue			/%
Iron content in iron oxide	Iron content in ferroalumen	Iron content in ferric subsulfate	
94.05	0.19	5.76	

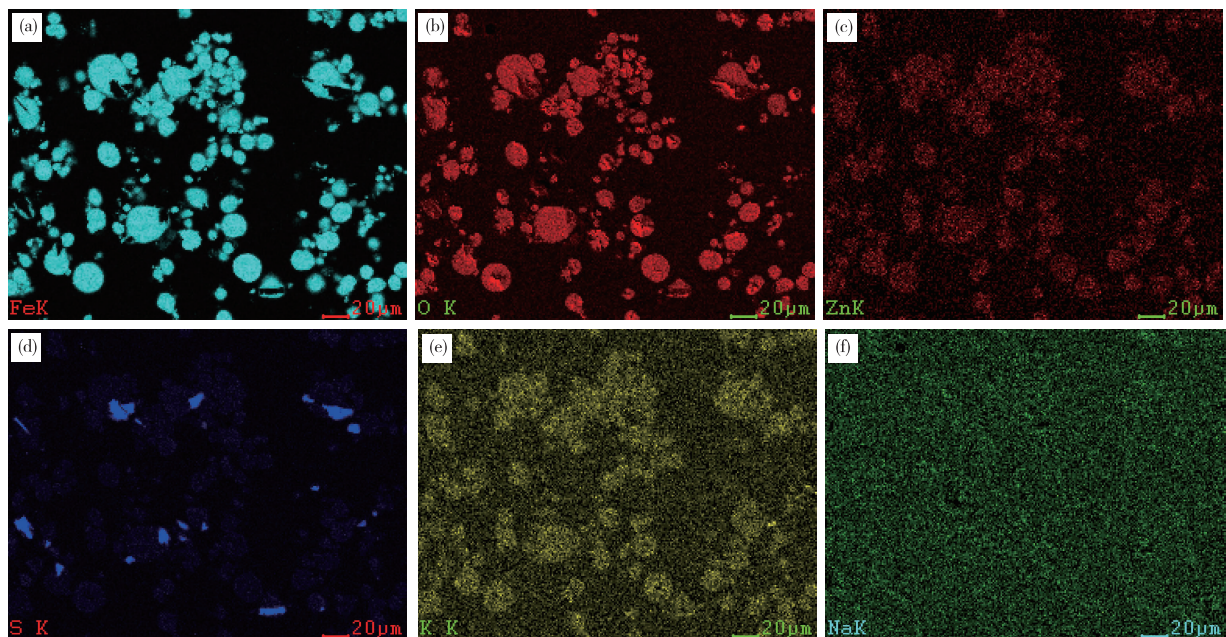


图1 赤铁矿渣中元素分布EDS图

Fig. 1 EDS diagrams of element distribution in hematite residue

所示,赤铁矿渣颗粒呈球状、大小不均匀,Fe、O 元素的分布具有一致性,Zn 主要分布在沉铁渣表面,大部分 Na、K 与 Zn 的分布类似,少部分 Na、K 与 S 的分布呈现小区域的集中,结合表 2 物相分析表明,S 主要以不溶性硫酸盐的形式存在。

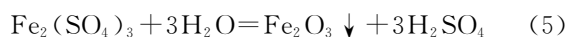
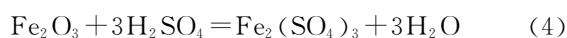
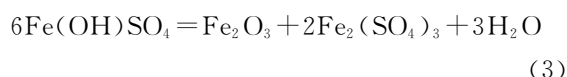
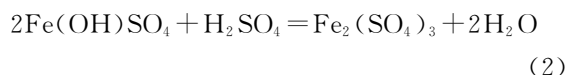
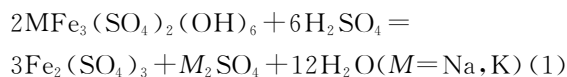
1.2 试验设备及方法

高温水热反应容器为容积 2 L 的 GSH2-00 型不锈钢高压反应釜。试验时称量水洗、烘干后的沉铁渣 200 g,放入釜胆底部;量取 1.2 L pH=1 的硫酸溶液,缓慢倒入釜胆内,用玻璃棒搅拌均匀,闭合釜盖,旋紧固定装置,启动搅拌,调节搅拌转速 400 r/min,启动加热,设置温度 220 ℃,保温 3 h。到达试验时间后,停止加热,打开釜内循环冷却水降至 70 ℃以下,打开高压釜,取出矿浆,液固分离,湿渣在真空烘干箱内 75 ℃恒温干燥 24 h,取出干渣称重记量,取样分析。

2 结果与讨论

2.1 沉铁渣中各物质反应 ΔG^θ 与 T 关系

赤铁矿法沉铁渣在高温水热处理过程中主要为铁矾与碱式硫酸铁的分解、微小颗粒氧化铁的返溶以及三价铁离子的水解反应等,化学方程如下:



上述反应式在 180~260 ℃下的理想热力学的 ΔH 、 ΔS 、 ΔG 值如表 3、表 4^[20-22] 所示(1 cal=4.18 J)。

表 3 铁矾与硫酸溶液分解反应热力学数据

Table 3 Thermodynamic datas for the decomposition of ferralumen and sulfuric acid solution

$2\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 + 6\text{H}_2\text{SO}_4 = 3\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + 12\text{H}_2\text{O}$			
$T/\text{℃}$	$\Delta H/\text{kcal}$	$\Delta S/(\text{cal} \cdot \text{K}^{-1})$	$\Delta G/\text{kcal}$
180	-80.176	53.325	-104.340
200	-80.018	53.668	-105.411
220	-79.851	54.012	-106.487
240	-79.563	54.584	-107.573
260	-76.445	60.632	-108.771

Note: 1 cal=4.18 J, the same below.

表 4 硫酸铁水解反应热力学数据

Table 4 Thermodynamic datas for the hydrolysis of ferric sulfate

$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}_2\text{O}_3 \downarrow + 3\text{H}_2\text{SO}_4$			
$T/\text{℃}$	$\Delta H/\text{kcal}$	$\Delta S/(\text{cal} \cdot \text{K}^{-1})$	$\Delta G/\text{kcal}$
180	-43.968	-14.184	-37.541
200	-44.144	-14.563	-37.253
220	-44.290	-14.867	-36.959
240	-44.399	-15.083	-36.659
260	-44.462	-15.204	-36.356

表 3 表明,在反应温度为 180~260 ℃时,铁矾反应熵值呈上升趋势,反应焐值为负数,铁矾分解反应吉布斯自由能值小于零,且随着反应温度的升高,吉布斯自由能的绝对值增大,有利于铁矾的分解。

表 4 表明,氧化铁的热稳定性强,但溶液酸度升高,氧化铁将会分解,尤其沉铁沉铁渣中细小的氧化铁颗粒易被返溶。高温高压的水热条件有利于三价铁水解生成氧化铁,提高温度可促进三价铁离子水解反应发生。同时也说明了碱式硫酸铁热稳定性差,高温水热环境可实现碱式硫酸铁转化为氧化铁。

2.2 高温下沉铁渣水热反应 ϵ -pH 关系

在 180~260 ℃的高温水热条件下,三价铁离子在酸性溶液中具有极强的络合能力^[22],溶液中各离子浓度值均低于 0.1 mol/kg,利用表 5 所示^[21-22]的 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ - H_2O 系基础热力学数据,计算在 pH=1,压力 0.1 MPa(忽略水蒸气压的影响)时,298、493、533 K 下的 ϵ -pH 值,其关系式如表 6 所示。表 6 结果表明,在 pH=1 的酸性溶液中,主要反应物的反应区间存在于水的热力学稳定区域内,影响水热反应的主要因素为反应温度与酸度,高温水热条件有利于矾钒的分解、三价铁水解生成氧化铁、碱式硫酸铁转化为氧化铁。

表5 Fe³⁺-SO₄²⁻-H₂O 系主要物质热力学数据(298~533 K)Table 5 Thermodynamic datas for major Substances of the Fe-SO₄²⁻-H₂O system(298—533 K)

Items	$\Delta G_{f,298}^{\theta}/$	$\Delta H_{f,298}^{\theta}/$	$S_{298}^{\theta}/$	$C_p^{\theta}/(J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1})$		
	(kJ · mol ⁻¹)	(kJ · mol ⁻¹)	(J · K ⁻¹ · mol ⁻¹)	A	B×10 ³	C×10 ⁵
H ⁺	0	0	0	0	0	0
OH ⁻	-157.29	-230.12	-10.88	506.38	-1 181.30	-246.02
H ₂ O	-237.18	-285.85	69.96	75.44	—	—
SO ₄ ²⁻	-744.63	-909.18	20.08	874.6	-1 759.70	-519.98
HSO ₄ ⁻	-756.01	-887.01	131.80	-547.29	1 342.10	266.78
Fe ³⁺	33.13	-48.50	-315.90	79.09	-219.35	15.40
FeOH ²⁺	-229.41	-290.80	-142.00	19.4	-21.22	29.40
Fe(OH) ₂ ⁺	-446.40	-543.80	-29.29	—	—	—
Fe(OH) ₃	-660.00	-795.73	75.40	—	—	—
FeSO ₄ ⁺	-772.80	-931.78	-129.70	37.70	317.00	-1.00
α-Fe ₂ O ₃	-744.27	-825.40	87.40	98.28	77.82	-14.85
Fe ₂ (SO ₄) ₃	-2676.32	-2 585.20	305.60	270.62	225.27	-59.79

表6 Fe-H₂O 系电位-pH 关系式(298 K,473 K,533 K,100 kPa)Table 6 The potential-pH relation of Fe-H₂O system(298 K,473 K,533 K,100 kPa)

No	Chemical reaction and ε-pH Relation	pH or ε		
		298 K	493 K	533 K
1	Fe(OH) ₂ + 2H ⁺ = Fe ²⁺ + 2H ₂ O pH = 0.5lgk ^θ - 0.5lga _{Fe²⁺}	0.010	0.007	0.006
2	Fe ³⁺ + e = Fe ²⁺ ε = ε ^θ + 1.984 × 10 ⁻⁴ Tlga _{Fe³⁺} - 1.984 × 10 ⁻⁴ Tlga _{Fe²⁺}	0.972	1.309	1.444
3	Fe(OH) ₃ + 3H ⁺ = Fe ³⁺ + 3H ₂ O pH = 0.333lgk ^θ - 0.333lga _{Fe³⁺}	0.120	0.008	0.007
4	2Fe(OH)SO ₄ + 2H ⁺ = 2Fe ³⁺ + 2SO ₄ ²⁻ + 2H ₂ O pH = 0.5lgk ^θ - lga _{SO₄²⁻} - lga _{Fe³⁺}	0.040	0.146	0.133
5	Fe(OH) ₃ + 3H ⁺ + e = Fe ²⁺ + 3H ₂ O ε = ε ^θ - 1.984 × 10 ⁻⁴ Tlga _{Fe²⁺} - 5.953 × 10 ⁻⁴ TpH	1.211 - 0.177pH	1.236 - 0.282pH	1.242 - 0.317pH
6	Fe(OH) ₂ + 2H ⁺ + 2e = Fe + 3H ₂ O ε = ε ^θ - 1.984 × 10 ⁻⁴ TpH	1.699 - 0.059pH	1.869 - 0.094pH	1.941 - 0.106pH
7	Fe(OH) ₃ + H ⁺ + e = Fe(OH) ₂ + H ₂ O ε = ε ^θ - 1.984 × 10 ⁻⁴ TpH	0.445 - 0.059pH	0.562 - 0.094pH	0.609 - 0.106pH
8	H ⁺ + e = 0.5H ₂ ε = ε ^θ - 1.984 × 10 ⁻⁴ TpH - 9.920 × 10 ⁻⁵ Tlg $\frac{P_{H_2}}{P^{\theta}}$	0.202 - 0.059 pH	0.327 - 0.094pH	0.372 - 0.106pH
9	O ₂ + 4H ⁺ + 4e = 2H ₂ O ε = ε ^θ - 1.984 × 10 ⁻⁴ TpH + 4.96 × 10 ⁻⁵ Tlg $\frac{P_{O_2}}{P^{\theta}}$	1.431 - 0.059 pH	1.415 - 0.094 pH	1.415 - 0.106pH

2.3 水热反应产物分析

沉铁渣经高温水热反应后,其主要元素质量分数及铁物相变化如表7、表8所示。由表7可知,相比于水洗后的沉铁渣(表1),Zn含量降低至0.18%、脱除了41.93%,S含量降低至0.82%、脱除了63.06%,说明高温水热法可进一步脱除以吸附形式存在的硫酸锌离子、分解的含硫的铁物相,随着杂质的脱除和铁矾及碱式硫酸铁的溶解与转化,Fe含量由61.51%提高到了66.83%。

由表8所示的铁物相检测数据可知,以氧化铁

形式存在的铁的质量分数由94.05%提高到了97.79%,以铁矾形式存在的铁减少了89.47%,以碱式硫酸铁形式存在的铁减少了61.98%,表明高温水热条件下含铁物相的热稳定性:氧化铁>碱式硫酸铁>铁矾,铁矾和碱式硫酸铁在高温水热反应过程中发生分解,且溶液中铁含量小于0.1 g/L、渣中铁回收率大于98.75%,氧化铁含量达到93.36%,说明分解出的Fe³⁺离子转变为氧化铁,从而实现了利用水热法将赤铁矿法沉铁渣制备成铁红产品。

表7 高温水热反应后铁红中主要元素含量

Table 7 Contents of main elements in iron red after high temperature hydrothermal reaction

/%

Elements	Fe	Zn	S	K	Na
Contents	66.83	0.18	0.82	<0.001	<0.001

表8 高温水热反应后铁红中主要铁物相含铁占比

Table 8 The proportion of iron content in the main iron phase in iron red

/%

Iron content in iron oxide	Iron content in ferroalumen	Iron content in ferric subsulfate
97.79	0.002	2.19

3 结论

1) 赤铁矿法沉铁渣颗粒呈球状、大小不均匀,主要物相为氧化铁,Zn 主要以吸附态的硫酸盐形式存在于赤铁矿法沉铁渣表面,少部分 Na、K 与 S 的以铁矾形式存在,S 主要以不溶性碱式硫酸盐的形式存在。

2) 高温水热条件下含铁物相的热稳定性:氧化铁>碱式硫酸铁>铁矾。在温度为 180~260 ℃下,铁矾和碱式硫酸铁热稳定性差,氧化铁的热稳定性强,高温水热条件有利于铁矾的分解、三价铁水解生成氧化铁、碱式硫酸铁转化为氧化铁。

3) 赤铁矿法沉铁渣经 220 ℃高温水热反应后,铁含量由 61.51% 提高到了 66.83%,其中 97.79% 的铁为氧化铁,氧化铁含量达到 93.36%,但仍有 0.79% 的 S 以碱式硫酸铁的形式存在,0.18% 的锌和小于 0.001% 的钾、钠以物理夹杂的形式存在。

参考文献:

- [1] 杨源,邓志敢,魏昶,等.利用湿法炼锌赤铁矿法沉铁渣制备铁红工艺[J].工程科学学报,2020,42(10):1325-1334.
YANG Yuan, DENG Zhigan, WEI Chang, et al. The process of preparing iron red by sinking iron slag in zinc smelting hematite process[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(10): 1325-1334.
- [2] 俞凌飞,朱北平,陈钢.湿法炼锌赤铁矿除铁工业实践的物理化学分析[J].有色金属(冶炼部分),2018(9):19-22.
YU Lingfei, ZHU Beiping, CHEN Gang. Physical and chemical analysis of wet zinc hematite iron removal industry practice[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2018(9): 19-22.
- [3] CHENG T C, DEMOPOULOS G P. Hydrolysis of ferric sulfate in the presence of zinc sulfate at 200 ℃: precipitation kinetics and product characterization[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2004,

43(20):6299-6308.

- [4] DENG Z G, ZHU B P, ZENG P, et al. Behaviour and characterization of hematite process for iron removal in hydrometallurgical production [J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2019, 58(2): 223-231.
- [5] 郑雅杰.用水热法从硫铁矿烧渣制备氧化铁红[J].金属矿山,2008,38(2):139-145.
ZHENG Yajie. Iron oxide red was prepared from pyrite cinder by hydrothermal method[J]. Metal Mine, 2008, 38(2): 139-145.
- [6] 黄孟阳,邓志敢,朱北平,等.湿法冶金工艺赤铁矿法除铁技术原理与应用[J].有色金属(冶炼部分),2019(6):1-6.
HUANG Mengyang, DENG Zhigan, ZHU Beiping, et al. Theory and application of iron removal with hematite precipitation in hydrometallurgy [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(6): 1-6.
- [7] 岳明,孙宁磊,邹兴,等.锌浸出液三价铁直接水解赤铁矿法除铁的探讨[J].中国有色冶金,2012,41(4):80-86.
YUE Min, SUN Ninglei, ZOU Xing, et al. Study on iron removal by direct hydrolysis of hematite in zinc leaching solution [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2012, 41(4): 80-86.
- [8] KOBAYLIN P, KASKIALA T, SALMINEN J. Modeling of H_2SO_4 - $FeSO_4$ - H_2O and H_2SO_4 - $Fe_2(SO_4)_3$ - H_2O systems for metallurgical applications[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(8): 13-19.
- [9] 邓志敢,杨源,魏昶,等.湿法炼锌赤铁矿法沉铁渣制备铁红[J].矿冶,2019,28(6):36-40.
DENG Zhigan, YANG Yuan, WEI Chang, et al. Preparation of iron oxide red by hematite precipitation residue from hydrometallurgical zinc process [J]. Mining and Metallurgy, 2019, 28(6): 36-40.
- [10] 叶大伦.实用无机物热力学数据手册[M].北京:冶金工业出版社,2001.
YE Dalun. Manual of thermodynamic data for practical inorganic materials[M]. Beijing: Metallurgical Industry

- Press, 2001.
- [11] 杨凡, 邓志敢, 魏昶, 等. 采用赤铁矿去除高铁闪锌矿浸出液中的铁[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(9): 2387-2391.
- YANG Fan, DENG Zhigan, WEI Chang, et al. Iron-removal by hematite from leaching liquor of high iron sphalerite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(9): 2387-2391.
- [12] CHENG T C M. Production of hematite in acidic zinc sulfate media [D]. Montreal: Materials Engineering McGill University, 2002.
- [13] TUENER L J, KRAMER J R. Sulfate ion binding on goethite and hematite[J]. Soil Science, 1991, 152(3): 226-230.
- [14] 杨凡, 邓志敢, 魏昶, 等. 高铁闪锌矿赤铁矿法除铁中锌离子和镁离子的影响及存在机理[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(11): 2906-2912.
- YANG Fan, DENG Zhigan, WEI Chang, et al. Effect and existence mechanism of zinc ion and magnesium ion in iron removal from high iron sphalerite by hematite process [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(11): 2906-2912.
- [15] XING Y B, LIU H Y, DENG Z G, et al. Dissolution behavior of ferrous sulfate in the hematite process[J]. Hydrometallurgy, 2021, 200: 105561. DOI: 10. 1016/j. hydromet. 2021. 105561.
- [16] 魏昶, 王吉坤. 湿法冶金理论与应用[M]. 昆明: 云南科学技术出版社, 2003.
- WEI Chang, WANG Jikun. Theory and application of hydrometallurgy [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2003.
- [17] LI C X, W C, YI S W, et al. Formation of iron hydroxysulphate phases in the hematite process by hydrolysis of ferric sulphate [J]. Hydrometallurgy, 2019, 189: 105112. DOI: 10. 1016/j. hydromet. 2019. 105112.
- [18] 邓志敢, 魏昶, 张帆, 等. 湿法炼锌赤铁矿法除铁及资源综合利用新技术[J]. 有色金属工程, 2016, 6(5): 38-41.
- DENG Zhigan, WEI Chang, ZHANG Fan, et al. New technology for iron removal and comprehensive utilization of resources in zinc hematite hydrometallurgy[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2016, 6(5): 38-41.
- [19] 王益昭, 李存兄, 魏昶, 等. 赤铁矿法沉铁过程中铁钒的形成及转化[J]. 有色金属工程, 2017, 7(2): 35-40.
- WANG Yizhao, LI Cunxiong, WEI Chang, et al. Formation and transformation of alum in hematite process [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2017, 7(2): 35-40.
- [20] 李存兄, 魏昶, 邓志敢, 等. $\text{FeSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系中水热赤铁矿沉铁及亚稳态铁物相转变行为[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(3): 628-636.
- LI Cunxiong, WEI Chang, DENG Zhigan, et al. The behavior of ferrous precipitation and metastable iron phase transition of hydrothermal hematite in $\text{FeSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ system[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(3): 628-636.
- [21] 杨显万, 邱定蕃. 湿法冶金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.
- YANG Xianwan, QIU Dingfan. Hydrometallurgy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998.
- [22] PAPANGELAKIS V G, DEMOPOLOUS G P. Acid pressure oxidation of arsenopyrite; Part I, Reaction chemistry[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 1990, 29(1): 1-12.

(编辑 崔 颖)