含锌尘泥火法挥发的次氧化锌制备硫酸锌研究

朱子康，刘国栋，骆桂远，陈伟伟，刘 众，梅如烟
(安徽工业大学 冶金工程学院,安徽 马鞍山 243002)

摘要: 为了实现含锌尘泥的高值化利用,本文以含锌尘泥火法处理挥发得到的次氧化锌为原料,开展了硫酸浸出次氧化锌制备硫酸锌的研究。结果表明:在硫酸质量分数为22.42%、浸出时间为20 min、液固比为2.5∶1、搅拌速度为300 r/min的条件下,滤渣中Zn质量分数由61.17%降低至2.61%,Pb质量分数由5.86%提高至34.24%,硫酸锌溶液中Zn离子质量浓度高达243.01 g/L,Pb离子质量浓度降低至1.50 g/L;试验得到的硫酸锌溶液在结晶温度为20 ℃,结晶时间为60 min条件下,得到纯度大于99%的硫酸锌产品,且该产品满足饲料添加剂硫酸锌的质量标准。

关键词: 含锌尘泥; 火法; 次氧化锌; 硫酸浸出; 硫酸锌
中图分类号: X757 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000－8764(2023)03－0014－06
doi: 10.13403/j.sjqt.2023.03.034

Research on preparation of zinc sulfate from volatile zinc hypoxide by pyrometallurgical zinc-containing dust sludge

ZHU Zikang, LIU Guodong, LUO Guiyuan, CHEN Weiwei, LIU Zhong, MEI Ruyan
(School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, Anhui, China)

Abstract: In order to realize the high-value utilization of zinc-containing dust and sludge, the zinc hypoxide volatiled from the pyrometallurgy of zinc-containing dust and sludge is used as raw material, and the research on preparation of zinc sulfate by sulfuric acid leaching zinc hypoxide is launched. The results show that, under the conditions of sulfuric acid mass fraction of 22.42%, leaching time of 20 min, liquid-solid ratio of 2.5∶1 and stirring speed of 300 r/min, the mass fraction of Zn in the residue decreases from 61.17% to 2.61%, the mass fraction of Pb increases from 5.86% to 34.24%, the mass concentration of Zn ions in zinc sulfate solution is as high as 243.01 g/L, and the mass concentration of Pb ions reduces to 1.50 g/L. The zinc sulfate solution obtained by the test obtains zinc sulfate products with purity greater than 99% under the conditions of the crystallization temperature of 20 ℃ and the crystallization time of 60 min, while the prepared zinc sulfate products meet the quality standards of feed additive zinc sulfate.

Key words: zinc-containing dust and sludge; pyrometallurgy; zinc hypoxide; sulfuric acid leaching; zinc sulfate

钢铁生产过程中产生的含锌尘泥不仅会对环境造成严重的污染，还会造成资源浪费。因此，对于含锌尘泥有价金属的回收利用已成为钢铁行业面临的共性难题[1-3]。目前，针对含锌尘泥的利用，钢铁企业一般都是将其返回烧结工序继续使用，由于含锌尘泥中有较高的含锌量，导致锌元素在钢铁生产流程中不断循环富集，加重高炉锌负荷，导致高炉上部结瘤，影响高炉正常顺行[4-5]。若将含锌尘泥进行堆存则会占用大量的土地，导致环境污染。因此，对含锌尘泥进行集中处理，提取有价金属，实现钢铁企业资源的循环利用是未来发展的趋势。

收稿日期: 2022－10－14; **修回日期:** 2022－12－30
基金项目: 大学生创新创业训练计划资助项目(202110360011)
作者简介: 朱子康(2002—),男,学士,从事固废资源综合利用方面的研究。

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

目前，国内外对于含锌尘泥处理主要采用湿法工艺和火法工艺，其中火法工艺主要包括回转窑工艺、转底炉工艺、熔融还原工艺[6-7]。火法工艺具有对原料要求低，脱锌效率高，处理量大等优点而备受青睐[8]。当前，钢铁企业火法工艺处理含锌尘泥得到的次氧化锌产品直接外卖，附加值较低。次氧化锌富含大量有价金属，是重要的二次资源，但其成分复杂，杂质较多且化学成分波动较大，分离回收成本较高等一系列问题使得次氧化锌的分离回收成为行业面临的关键共性难题。针对次氧化锌的回收利用问题，科研工作者一直开展相关的研究，如利用次氧化锌生产锌盐、回收次氧化锌中某单一或几种元素[9]等。此外，工业上对次氧化锌进行处理主要是采用酸浸技术或者氨浸技术[10]。氨法浸出处理次氧化锌主要原理是在浸出过程中氨水或氨化合物与锌形成稳定的络合物，经过过滤后以达到锌和渣分离的效果，在此过程中，铅、镉等也会以络合物的形式进入溶液，后续通过单质锌进行除杂处理得到合格的富锌溶液，但存在浸出效率较低，成本较高等不足。硫酸浸出技术具有浸出效率较高，成本较低等优势，且浸出后次氧化锌中 Pb 等元素主要留在渣中，有利于后续分离。浸出得到的硫酸锌产品常用作于制取颜料、饲料添加剂、农作物锌肥等，从而实现含锌尘泥的高附加值利用。因此，本文以某钢铁企业含锌尘泥火法挥发得到的次氧化锌为原料，采用硫酸浸出开展硫酸锌制备的研究，系统讨论硫酸浸出工艺参数对次氧化锌浸出指标的影响，以及硫酸锌结晶的工艺参数对硫酸锌产品质量的影响，为含锌尘泥的高值化利用提供技术支撑。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

试验所用原料为某钢铁企业火法处理含锌粉尘挥发收集得到的次氧化锌，首先将次氧化锌进行水洗处理，水洗前后次氧化锌粉尘的主要化学成分如表 1 所示。由表 1 可知：次氧化锌粉尘中 Zn、Pb 质量分数分别为 54.25%、5.08%，Cl 质量分数较高为 8.52%；经过水洗后次氧化锌中含 Zn 量富集至 61.17%，含铅量提高至 5.86%，K、Na 和 Cl 质量分数显著降低，分别由原来的 4.01%、0.38%、8.52% 降低至 0.69%、0、3.12%。

表 1　次氧化锌水洗前后主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of zinc hypoxide before and after washing　　%

项目	Zn	Pb	Fe	K	Na	Cl	S	P	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2
水洗前次氧化锌	54.25	5.08	4.09	4.01	0.38	8.52	1.95	0.01	0.54	0.16	0.18	0.55
水洗后次氧化锌	61.17	5.86	4.80	0.69	0	3.12	1.92	0.01	0.59	0.17	0.20	0.64

1.2　试验方法

试验包括次氧化锌水洗试验，硫酸浸出试验和硫酸锌结晶试验三部分。

(1) 次氧化锌水洗试验。由于原料中含氯量较高为 8.52%，为减少氯离子对后续硫酸锌结晶的影响，在硫酸浸出之前对次氧化锌原料进行氯元素的脱除试验。由于氯离子主要以氯化钾和氯化钠形式存在，在水洗过程中还可以有效地脱除氯化钾和氯化钠，从而实现对次氧化锌的初步除杂。水洗试验在常温常压(温度为 20 ℃)，液固比为 2.5∶1，搅拌转速为 300 r/min，搅拌时间为 20 min 的条件进行，水洗后经过滤实现固液分离，将得到的滤渣烘干后即为水洗后次氧化锌，其主要化学成分如表 1 所示。

(2) 硫酸浸出试验。每次取水洗后烘干的次氧化锌原料 20 g 放于容量为 300 ml 的烧杯中，将次氧化锌与一定浓度的硫酸搅拌混合后放置于预先设定好温度的恒温水浴锅内，恒速电动搅拌器搅拌浸出一定的时间后，用循环水式多用真空泵带热过滤得到硫酸锌溶液。分别研究硫酸质量分数、液固比、浸出温度、搅拌速度等酸浸工艺参数对硫酸锌浸出效果的影响，硫酸锌浸出的反应如式(1)所示。

$$ZnO + H_2SO_4 = ZnSO_4 + H_2O \quad (1)$$

(3) 硫酸锌结晶试验。取一定量硫酸锌溶液于烧杯中，经电炉快速蒸发至一定体积，当烧杯

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

中溶液达到目标值时，将烧杯取下空气中冷却30 s后放入恒温水浴锅内进行水浴蒸发结晶，结晶至设定时间后进行过滤，实现固液分离，分离出来的固体经过烘干后得到硫酸锌产品。

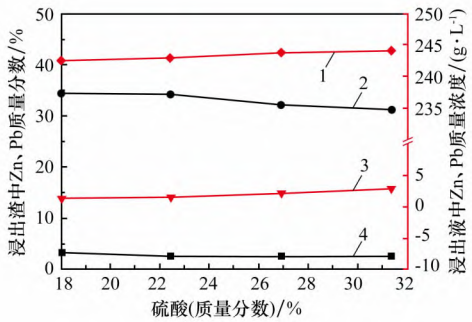
原料化学成分分析采用X射线荧光光谱仪进行检测，溶液元素浓度采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪进行检测，微观形貌检测采用扫描电镜。

2 结果与讨论

2.1 次氧化锌硫酸浸出铅锌分离

2.1.1 硫酸质量分数的影响

在浸出温度为60 ℃、浸出时间为20 min、液固比为2.5∶1、转速为300 r/min条件下，不同硫酸质量分数对锌浸出效果的影响如图1所示。由图1可知，随着硫酸质量分数由17.93%提高到22.42%，浸出渣中Zn质量分数由3.21%降低至2.61%，浸出液中Zn离子质量浓度由242.51 g/L升高到243.01 g/L，继续提高硫酸质量分数，浸出渣Zn质量分数降低幅度较小，浸出液Zn离子质量浓度提高缓慢。此外，值得注意的是，随着硫酸质量分数升高，浸出渣中Pb质量分数降低，进入溶液中Pb离子质量浓度升高。这是因为在液固比不变的情况下，硫酸质量分数越高，溶液中H^+的质量浓度越高，有利于浸出反应的进行，浸出渣中Zn质量分数降低。但是，过高的硫酸质量分数也使得溶液中Pb离子质量浓度有所升高，当硫酸质量分数由17.93%提高至31.38%时，浸出液中Pb离子质量浓度由1.34 g/L提高至2.86 g/L。



1—浸出液中Zn质量浓度；2—浸出渣中Pb质量分数；3—浸出液中Pb质量浓度；4—浸出渣中Zn质量分数。

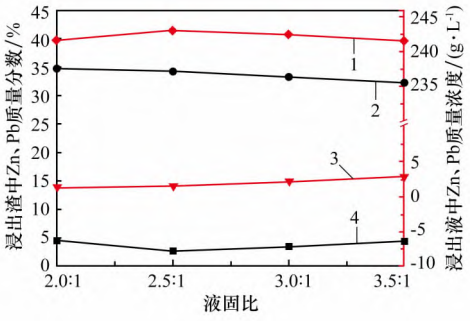
图1 硫酸质量分数对锌浸出效果的影响

Fig. 1 Effect of sulfuric acid concentration on zinc leaching

此外，硫酸质量分数越高，生产成本越高，同时对设备也产生腐蚀。因此，综合生产成本考虑，适宜的硫酸质量分数为22.42%，在此条件下，滤渣中Zn质量分数仅为2.61%，Pb质量分数为34.24%；对应浸出液中Zn离子质量浓度为243.01 g/L，Pb离子质量浓度为1.50 g/L。通过硫酸浸出，可以有效实现铅锌的分离。

2.1.2 液固比的影响

在浸出温度为60 ℃、硫酸质量分数为22.42%、浸出时间为20 min、转速为300 r/min条件下，不同液固比对锌浸出效果的影响如图2所示。由图2可知，当液固比由2.0提高至2.5时，浸出渣中Zn质量分数由4.56%降低至2.61%，这主要是因为液固比从2.0增大到2.5时，浸出反应生成的硫酸锌能够较快地扩散到溶液中，有利于浸出反应的进行，从而降低了浸出渣中的锌质量分数。继续提高液固比至3.5，浸出渣Zn质量分数又升高至4.39%。这主要是由于液固比过大，溶液pH升高，而此时溶液中pH值可能是浸出反应的限制环节，根据前面浸出反应式(1)，降低溶液中的H^+的质量浓度，阻碍了浸出反应的进行，从而导致浸出渣中Zn质量分数有所升高。在液固比为2.5∶1的条件下，渣中Zn质量分数相对较少为2.61%，对应浸出液中Zn离子质量浓度为243.01 g/L，Pb离子质量浓度为1.50 g/L。因此，液固比适宜的选择为2.5∶1。



1—浸出液中Zn质量浓度；2—浸出渣中Pb质量分数；3—浸出液中Pb质量浓度；4—浸出渣中Zn质量分数。

图2 液固比对锌浸出效果的影响

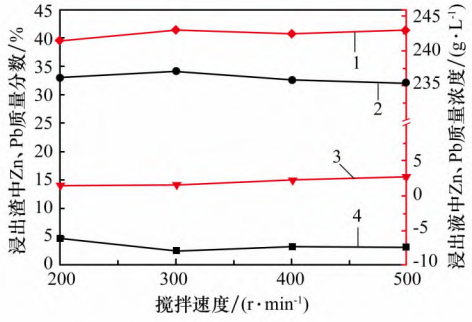
Fig. 2 Effect of liquid-solid ratio on zinc leaching

2.1.3 搅拌速度的影响

在浸出温度为60 ℃、硫酸质量分数为22.42%、浸出时间为20 min、液固比为2.5∶1的

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

条件下，不同搅拌速度对锌浸出效果的影响如图 3 所示。由图 3 可知，当转速由 200 r/min 提高至 300 r/min 条件下，浸出渣中 Zn 质量分数由 4.75% 降低至 2.61%，Pb 质量分数由 33.08% 提高到 34.24%。继续提高搅拌速度，浸出渣 Zn 质量分数有所升高，Pb 质量分数有所降低。这是由于当转速较低时，硫酸与氧化锌接触不够充分，浸出渣中 Zn 质量分数较高，提高转速有利于促进浸出反应的进行。当搅拌速度过大时，由于浸出所用的次氧化锌样品粒度较细，细颗粒很容易被搅拌所产生的漩涡带动高速旋转，导致作用在颗粒表面的相对搅拌速度降低，从而影响浸出反应的进行。因此，适宜的搅拌转速为 300 r/min。



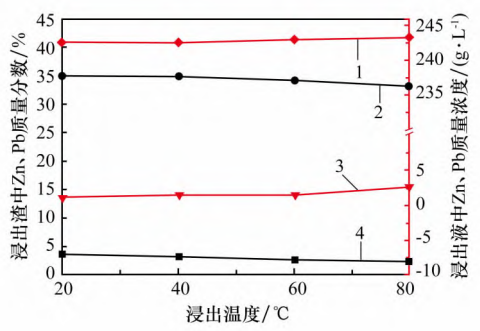
1—浸出液中 Zn 质量浓度；2—浸出渣中 Pb 质量分数；
3—浸出液中 Pb 质量浓度；4—浸出渣中 Zn 质量分数。

图 3　搅拌速度对锌浸出效果的影响

Fig. 3　Effect of stirring speed on zinc leaching

2.1.4　浸出温度的影响

在硫酸质量分数为 22.42%、浸出时间为 20 min、液固比为 2.5∶1、搅拌速度为 300 r/min 的条件下，不同浸出温度对锌浸出效果的影响如图 4 所示。由图 4 可知，随着温度由 20 ℃升高至 60 ℃，浸出渣中 Zn 质量分数由 3.69% 降低至 2.61%，Pb 质量分数由 35.03% 降低至 34.24%，浸出液 Zn 离子质量浓度由 242.64 g/L 提高至 243.01 g/L，Pb 离子质量浓度由 1.20 g/L 提高至 1.50 g/L。继续提高浸出温度至 80 ℃时，浸出渣中 Zn 质量分数降低至 2.34%，浸出液中 Zn 离子质量浓度提高至 243.29 g/L。可见，提高温度有利于促进氧化锌与硫酸的反应，浸出渣中 Zn 质量分数逐渐降低。但浸出温度升高，更多的 Pb 也进入了溶液，当温度由 20 ℃升高至 60 ℃时，浸出液中 Pb 离子质量浓度由 1.20 g/L 升高至 1.50 g/L。因此，综合考虑 Zn 和 Pb 的分离，适宜的浸出温度为60 ℃。



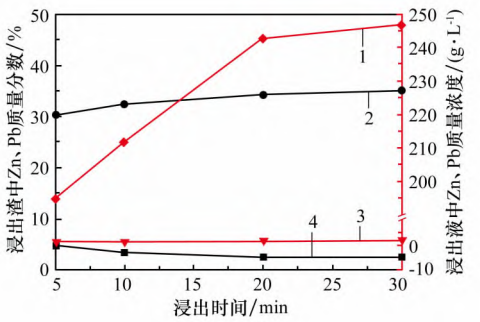
1—浸出液中 Zn 质量浓度；2—浸出渣中 Pb 质量分数；
3—浸出液中 Pb 质量浓度；4—浸出渣中 Zn 质量分数。

图 4　浸出温度对锌浸出效果的影响

Fig. 4　Effect of leaching temperature on zinc leaching

2.1.5　浸出时间的影响

在硫酸质量分数为 22.42%、浸出温度为 60 ℃、液固比为 2.5∶1、搅拌速度为 300 r/min 的条件下，不同浸出时间对锌浸出效果的影响如图 5 所示。由图 5 可知，随着浸出时间由 5 min 延长至 20 min，浸出渣中 Zn 质量分数由 4.85% 降低至 2.61%，Pb 质量分数由 30.25% 升高至 34.24%，浸出液 Zn 离子质量浓度由 195.02 g/L 提高至 243.01 g/L，Pb 离子质量浓度由 1.24g/L 提高至 1.50 g/L。继续延长时间至 30 min 时，浸出渣中 Zn 质量分数降低至 2.58%，浸出液中 Zn 离子质量浓度提高至 246.85 g/L，延长时间有利于促进氧化锌与硫酸的反应，浸出渣中 Zn 质量分数逐渐降低，Pb 质量分数逐渐提高。因此，综合考虑 Zn 和 Pb 的分离，适宜的浸出时间为 20 min。



1—浸出液中 Zn 质量浓度；2—浸出渣中 Pb 质量分数；
3—浸出液中 Pb 质量浓度；4—浸出渣中 Zn 质量分数。

图 5　浸出时间对锌浸出效果的影响

Fig. 5　Effect of leaching time on zinc leaching

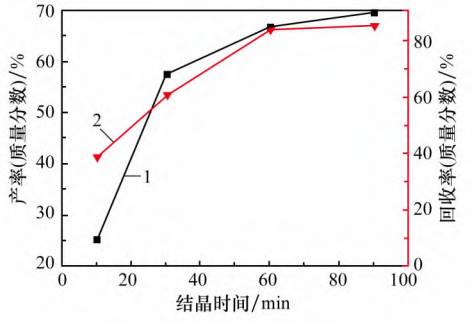
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.2 硫酸锌结晶

在硫酸质量分数为 22.42%，液固比为 2.5∶1，搅拌速度为 300 r/min，浸出时间为 20 min，浸出温度为 60 ℃条件下得到富含硫酸锌的浸出液进行硫酸锌结晶试验。

2.2.1 结晶时间的影响

在结晶温度为 30 ℃的条件下，不同结晶时间对硫酸锌产品产率及回收率的影响如图 6 所示。由图 6 可知，当结晶时间由 10 min 延长至 60 min 时，硫酸锌结晶产率和回收率逐渐增大，继续延长结晶时间至 90 min，结晶产率和回收率增加缓慢。这主要是由于随着结晶时间的延长，溶液中的硫酸锌不断结晶生成，从而提高硫酸锌的产率和回收率。不同结晶时间硫酸锌晶体照片如图 7 所示。由图 7 可知，制备的硫酸锌从宏观角度看颜色较白，说明其杂质含量较低。综合产率和回收率考虑，适宜的结晶时间为 60 min。



1—产率；2—回收率。

图 6 结晶时间对硫酸锌结晶效果的影响

Fig. 6 Effect of crystallization time on crystallization effect of zinc sulfate

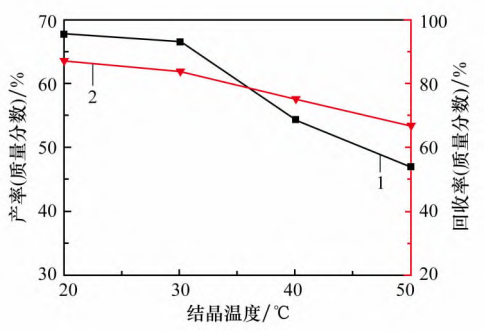


图 7 不同结晶时间下得到硫酸锌晶体

Fig. 7 $ZnSO_4$ crystals were obtained at different crystallization times

2.2.2 结晶温度的影响

在结晶时间为 60 min 的条件下，不同结晶温度对硫酸锌产品产率和回收率的影响如图 8 所示，不同结晶时间下得到硫酸锌晶体照片如图 9 所示。结合图 8 和图 9 可知，随着结晶温度升高，硫酸锌产率和回收率有所降低，这主要是由于温度越高，硫酸锌溶解度相对较大，导致结晶产率和回收率有所降低。因此，适宜的结晶温度为 20 ℃。



1—产率；2—回收率。

图 8 结晶温度对硫酸锌结晶效果的影响

Fig. 8 Effect of crystallization temperature on crystallization effect of zinc sulfate



图 9 不同结晶温度下得到 $ZnSO_4$ 晶体

Fig. 9 $ZnSO_4$ crystals were obtained at different crystallization temperatures

2.2.3 硫酸锌产品分析

在结晶温度为 20 ℃，结晶时间为 60 min 得到的硫酸锌产品进行化学成分分析，其结果如表 2 所示。由表 2 可知，硫酸锌纯度高达 99.09%，其余杂质质量分数均较低，满足饲料添加剂硫酸锌质量标准(GB/T 25865—2010)。试验制备的硫酸锌 XRD 及 SEM-EDS 分别如图 10、11 所示。由图

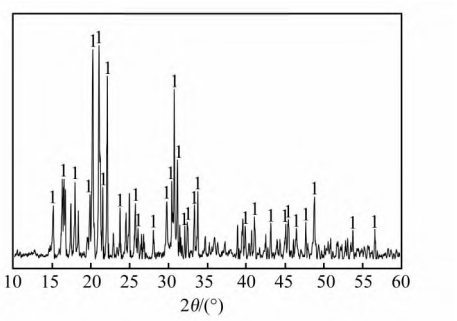
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

10、11 可知，硫酸锌纯度非常高，其结晶产品颗粒形貌为麦粒状，粒径尺寸约为 10 μm，其主要成分为 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$，说明此工艺下可制备得到较为纯净的硫酸锌晶体。

表 2　硫酸锌产品主要化学成分(质量分数)

Table 2　Main chemical composition of zinc sulfate products　%

$ZnSO_4$	Fe	K	Cl	Pb
99.09	0.07	0.02	0.01	0.02



1—$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$。

图 10　最终产品硫酸锌 XRD 图

Fig. 10　XRD pattern of zinc sulfate products

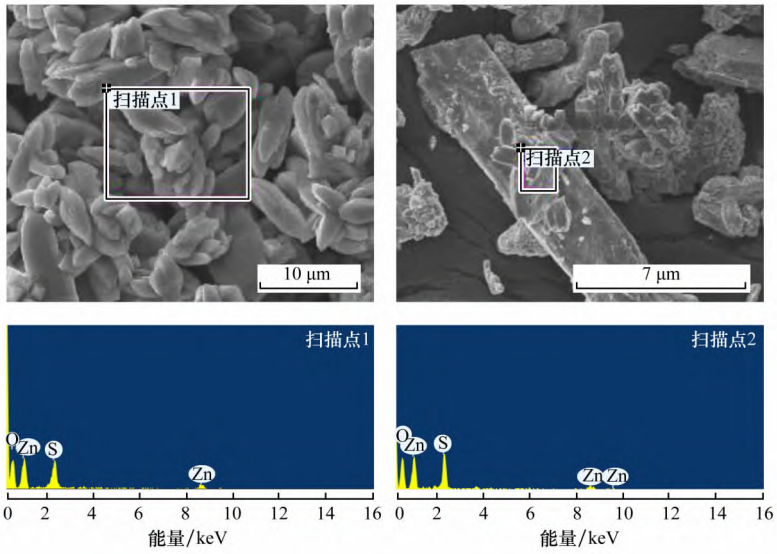


图 11　硫酸锌晶体 SEM-EDS 能谱图

Fig. 11　SEM-EDS of zinc sulfate products

3　结　论

(1) 水洗可以有效降低次氧化锌中 Cl 元素质量分数，提高 Zn 品位。经过水洗后次氧化锌中 Cl 元素质量分数由 8.52% 降低至 3.12%，Zn 质量分数由 54.25% 富集至 61.17%。

(2) 次氧化锌经过硫酸浸出结晶后可得到高品质的硫酸锌产品。在硫酸质量分数为 22.42%、浸出时间为 20 min、液固比为 2.5∶1、搅拌速度为 300 r/min的条件下，得到的硫酸锌溶液在结晶温度为 20 ℃，结晶时间为 60 min 条件下，制备的硫酸锌产品纯度大于 99%，满足饲料添加剂硫酸锌质量标准(GB/T 25865—2010)。

参考文献:

[1] 尚海霞，李海铭，魏汝飞，等. 钢铁尘泥的利用技术现状及展望[J]. 钢铁，2019，54(3)：9－17.
SHANG Haixia，LI Haiming，WEI Rufei，et al. Present situation and prospect of iron and steel dust and sludge utilization technology[J]. Iron and Steel，2019，54(3)：9－17.

[2] 佘雪峰，薛庆国，王静松，等. 钢铁厂含锌粉尘综合利用及相关处理工艺比较[J]. 炼铁，2010，29(4)：56－62.
SHE Xuefeng，XUE Qinguo，WANG Jingsong，et al. Comparison of comprehensive utilization and related treatment process of zinc dust in iron and steel works[J]. Ironmaking，2010，29(4)：56－62.

[3] 王子宏，阮志勇，墙蔷，等. 钢厂含锌尘泥锌铁火法分离研究[J]. 烧结球团，2021，46(5)：86－92；98.
WANG Zihong，RUAN Zhiyong，QIANG Qiang，et al. Research on pyrometallurgical separation zinc and iron from zinc-bearing dust in steel plant[J]. Sintering and Pelletizing，2021，46(5)：86－92；98.

(下转第 98 页)

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

BI Chuanguang, LONG Hongming, CHUN Tiejun, et al. Effect of MgO mass fraction on the properties of oxidized pellets [J]. Iron & Steel, 2017, 52(7): 22 – 26.

[9] 潘向阳,龙跃,李神子,等. w(MgO)对熔剂性球团矿冶金性能的影响[J]. 钢铁, 2019, 54(10): 17 – 22.
PAN Xiangyang, LONG Yue, LI Shenzi, et al. Influence of w(MgO) on the metallurgical properties of flux pellets [J]. Iron & Steel, 2019, 54(10): 17 – 22.

[10] 李神子,龙跃,潘向阳,等. MgO对酸性球团矿冶金性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(1): 113 – 118.
LI Shenzi, LONG Yue, PAN Xiangyang, et al. Influence of MgO on the metallurgical properties of acid pellets [J]. Iron, Steel, Vanadium and Titanium, 2020, 41(1): 113 – 118.

[11] 尹学,李绍铭,闫成忍. 基于GA-PSO-BP神经网络的烧结终点预测模型[J]. 烧结球团, 2020, 45(6): 35 – 39; 46.
YIN Xue, LI Shaoming, YAN Chengren. Prediction model of sintering end point based on GA-PSO-BP neural network [J]. Sintering and pelletizing, 2020, 45(6): 35 – 39; 46.

[12] 韩闯闯,李杰,杨爱民,等. 镁质熔剂性球团强度影响因素分析[J]. 烧结球团, 2018, 43(1): 50 – 56.
HAN Chuangchuang, LI Jie, YANG Aimin, et al. Analysis on influencing factors of magnesia fluxed pellets strength [J]. Sintering and pelleting, 2018, 43(1): 50 – 56.

[13] 张梦雨. 基于高斯分布模型的风电机组群尾流效应计算[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
ZHANG Mengyu. Calculation of wake effect of wind turbines based on Gaussian distribution model [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.

(上接第19页)

[4] 郭玉华,张春霞,樊波,等. 钢铁企业含锌尘泥资源化利用途径分析评价[J]. 环境工程, 2010, 28(4): 83 – 87.
GUO Yuhua, ZHANG Chunxia, FAN Bo, et al. Analysis and evaluation on utilization ways of zinc-bearing sludge and dust from iron and steel enterprises [J]. Environmental Engineering, 2010, 28(4): 83 – 87.

[5] 王雪松,付元坤,李肇毅. 高炉内锌的分布及平衡[J]. 钢铁研究学报, 2005(1): 68 – 71.
WANG Xuesong, FU Yuankun, LI Qinyi, et al. Zinc distribution and balance in blast furnace [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2005(1): 68 – 71.

[6] 王飞,毛瑞,茅沈栋,等. 含锌粉尘冷固结团块高温自还原过程分析[J]. 钢铁研究学报, 2020, 32(7): 626 – 632.
WANG Fei, MAO Rui, MAO Shendong, et al. Analysis of self-reduction process of cold-bonded briquettes made from zinc-bearing dust at high temperature [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32(7): 626 – 632.

[7] 朱德庆,侯明洲,杨聪聪,等. 复合黏结剂提高含锌尘泥团块干燥热稳定性能研究[J]. 烧结球团, 2022, 47(3): 73 – 82.
ZHU Deqing, HOU Mingzhou, YANG Congcong, et al. Research on composite binder to improve drying thermal stability performance of zinc-containing dust agglomerates [J]. Sintering and Pelletizing, , 2022, 47(3): 73 – 82.

[8] 张亚森,孟安. 转底炉处理含锌粉尘生产实践与探索[J]. 冶金设备, 2018(S1): 125 – 127; 71.
ZHANG Yasen, MENG An. The practice and exploration of zinc dust production in bottom furnace [J]. Metallurgical Equipment, 2018(S1): 125 – 127; 71.

[9] CHUN Tiejun, ZHU Deqing. New process of pellets-metallized sintering process(PMSP) to treat zinc-bearing dust from iron and steel company [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2015, 46(1): 1 – 4.

[10] 刘超,张玉柱,王峰,等. 多源冶金粉尘资源化研究现状及展望[J]. 中国冶金: 32(10): 38 – 44.
LIU Chao, ZHANG Yuzhu, WANG Feng, et al. Research status and prospect of multi-source metallurgical dust recycling [J]. China Metallurgy, 32(10): 38 – 44.

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