

综 合 评 述

铁矾渣综合利用技术进展*

朱林, 韩俊伟, 刘维, 张添富, 李琛

(中南大学 资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 在有色冶炼的沉铁过程中会产生大量的铁矾渣, 直接堆存处理不仅会对环境造成危害, 也是一种资源的浪费。目前国内外对于铁矾渣的处理处置方法, 主要是通过火法工艺、湿法工艺、选矿工艺及联合工艺等回收 Zn、Pb、Ag、In、Fe 等有价金属, 其次利用铁矾渣制作功能材料和建筑材料, 以及最终无害化固化处置。认为在铁矾渣处置过程中减少二氧化硫和废水排放, 避免重金属污染, 实现主要有价金属回收的同时减少尾渣数量是今后研究的热点。

关键词: 铁矾渣; 综合利用; 火法工艺; 湿法工艺; 功能材料; 建筑材料; 固化

中图分类号: TF813 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0076(2018)04-0124-06

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2018.04.013

Progress of Comprehensive Utilization Technology of Jarosite

ZHU Lin, HAN Junwei, LIU Wei, ZHANG Tianfu, LI Chen

(School of Minerals Processing & Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In the deironing process of non-ferrous metallurgy, a large amount of jarosite residue has been produced, which is not only harmful to the environment, but also a waste of resources if directly deposited. At present, the main treatment and disposal of jarosite residues, include the pyrometallurgical process, hydrometallurgy process, beneficiation process and the joint process for the recovery of valuable metals such as Zn、Pb、Ag、In、Fe, or using jarosite residues to make functional materials and building materials, and the final solidification treatment. It is considered that reducing the discharge of sulfur dioxide, wastewater and tailings, and avoiding the heavy metal pollution while achieving and the recovery of valuable metals are the focus of research in the future.

Key words: jarosite; comprehensive utilization; pyrometallurgical process; hydrometallurgy process; functional material; building material; solidification

铁矾渣是锌、铜、镍、钴、锰等有色金属在湿法冶炼过程中采用铁矾法除铁所产生的沉铁渣^[1], 以锌冶炼过程中的产量最大。我国从 1973 年开始研究铁矾法, 自 1985 年应用于工业生产以来, 广西柳州市有色金属冶炼厂、陕西商洛冶炼厂、西北铅锌冶炼厂以及广西来宾冶炼厂等 10 多个厂家相继采用铁矾法进行锌冶炼除铁。目前我国铁矾渣堆存量超过

3 500 万 t, 并以每年超过 100 万 t 的速度增长, 数量极其庞大^[2-3]。

铁矾渣主要成分为 $\text{AFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ (A 代表 K^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 Pb^{2+} 、 Ag^+ 、 Rb^+ 、 H_3O^+), 铁矾渣(湿基)通常含有 25%~30% 的 Fe 和 8%~12% 的 S, 除此之外还含有一定量的 Zn、Pb、Cu、Ni、Cd、Ag、In 等有价金属^[4]。其含量视原料成分及沉铁条件

* 收稿日期: 2018-04-16

基金项目: 中南大学 2018 研究生自主探索创新项目(2018zzts792)

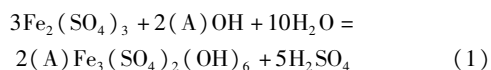
作者简介: 朱林(1994-), 男, 湖北襄阳人, 硕士研究生, 主要从事二次资源综合利用研究。

不同波动较大,通常有价金属总量在 5% ~ 12%,主要以硫酸盐及氧化物的形式存在。如此复杂的铁矾渣直接堆存不仅环境危害大,而且资源浪费严重。铁矾渣为典型危废,对渣库的要求十分严格,渣库建设和管理已成为冶炼企业的巨大开支,并且近期实施的《环保税法》第七条明确表明,应税固体废物的计税依据,按照固体废物的排放量确定,堆存的数量巨大的铁矾渣需按危废缴税。环保、资源综合利用以及企业自身效益多方面均要求对铁矾渣进行有效处理。本文通过对比国内外铁矾渣现有处理工艺,对铁矾渣的资源化利用进行了探讨。

1 铁矾渣的产生及危害

在锌冶炼过程中,硫化锌精矿经氧化焙烧,其中的杂质铁会和生成的氧化锌反应生成结构稳定的铁酸锌^[5],引起锌浸出率低、浸出渣量大及伴生贵金属难以回收等问题。铁酸锌在常规浸出法中不溶于稀酸,为了使铁酸锌溶解,减少浸出渣数量,使渣中铅、银等有价金属得到富集有利于回收,同时提高锌的浸出率,开发了高温高酸浸出技术^[6-7]。但该过程使浸出液中 Fe 的含量升高,高达 30 g/L,严重影响了锌的冶炼^[8]。

目前为了解决上述问题,大多数企业采用铁矾法除铁,即通过加入沉矾离子 A,使溶液中的 Fe^{3+} 离子形成铁矾复盐晶体从弱酸溶液中沉淀下来,同时还会有其它元素 (Ag、Sb 等) 以类质同象的形式进入沉铁渣,锌浸出液中的一些杂质元素也通过这样的方式除去。残存的 Fe 进一步以 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体析出,故在沉铁过程中会使铁矾中夹杂吸附一定量的有色金属离子,如 Cu、Co、Ni、Cd、Ag 等^[9]。铁矾晶体呈明矾石结构,不溶于硫酸,也便于洗涤和过滤^[10]。其生成总反应可写成:



数量巨大的铁矾渣不经处理直接堆存,一方面会占用大量的土地资源,另一方面,铁矾渣仅在酸性 (pH 值约为 1.5 ~ 2.5) 条件下才具有一定的稳定性,受热或改变 pH 值很容易分解释放出 Pb、Zn、As、Cu、Ag、In 等重金属和有毒元素,给生态环境带来巨大危害^[11-12]。重金属不能被生物降解,在人体内富集会破坏人体机能,引起中毒,对土壤的污染也具有不可逆转性,被污染的土壤难以治理。2016 年修订通过的《国家危险废物名录》将铁矾渣列为危险废物,2017 年修订的《危险废物经营许可证管理

办法》也对铁矾渣的处理处置进行了严格规定,以减少其对环境造成的污染。此外,铁矾渣中含有一定量的 Zn、Pb、Fe、In 等有价元素,未合理利用对于资源日益匮乏的今天,也是一种资源的浪费。

2 铁矾渣回收利用方法

目前铁矾渣的综合回收利用主要以回收有价金属为主,在制作功能材料、建筑材料及固化处置等方面也有一定的研究。

2.1 有价金属综合回收

2.1.1 火法工艺

火法处理技术具有原料适应性强、工艺简单、可操作性强及金属综合回收率高等优点,是国内外冶炼废渣的主要处理方法^[13-14]。然而火法工艺能源消耗大,操作环境差,还会产生大量有害粉尘和气体,如何避免这些问题,也是现在研究的热点。火法回收的主要影响因素是温度和焙烧环境,据此,火法工艺按处理温度可分为低温焙烧、中低温焙烧、高温焙烧;按处理条件可分为还原焙烧、氯化焙烧、微波焙烧、磁化焙烧、纯碱焙烧等^[15-17]。

火法工艺中较为常用的是高温铁还原及有价金属烟化法,即在 1 150 ~ 1 350 °C 高温下有大量还原剂和熔剂存在时在烟化炉内分别发生硫酸盐分解和氧化物还原挥发等反应,将铁矾渣中易于挥发的 Pb、Zn、In 等元素挥发进入到烟尘中的方法^[18-19]。挥发过程中几乎全部的硫以 SO_2 形式进入烟气中,铁被还原为单质,难于挥发的 Cu、Ag、Ni、Co 等则进入还原铁和还原渣中。由于铁矾渣中 S 含量高,烟化烟气 SO_2 浓度高,脱除压力大,且处理过程需要消耗大量的燃料和还原剂,能耗高成本大。另一方面,由于难于挥发的 Cu、Ag、Ni、Co 等元素进入到还原铁中,不仅损失了大量有价金属,还使得回收的铁不能作为理想的炼铁原料。正是由于上述问题,高温烟化法处理铁矾渣技术没有得到很好的推广,仅仅是在用烟化法处理别的物料时配入少量铁矾渣,主要利用铁矾渣中的铁元素参与配渣型,同时回收部分有价金属,配入量十分有限,远远不能满足铁矾渣大规模消纳的要求。

曹晓恩等^[20]采用底炉内铁矾渣含碳球团直接还原—熔炼回收铁、烟气回收锌的联合工艺,在配碳比 1.4、碱度 2.5、还原温度 1 300 °C、还原时间 30 min 的条件下,锌金属化率达到 98.47%,铁回收率为 95%,在还原阶段锌的挥发率达到 94%。

李俞良等^[21]采用造钼熔炼工艺流程综合回收处理铁矾渣,在 1 250 ℃ 的条件下焙烧 2 h,还原剂碳添加量占炉料质量的 10%,黄铁矿、石英和石灰石添加量分别占铁矾渣质量的 22%、20% 和 0.5% 条件下,铜、镍等有价金属能较好的富集在镍钼中。通过造钼熔炼试验表明:采用造钼熔炼工艺综合回收处理铁矾渣,镍回收率可达到 90% 以上,铜回收率可达到 91% 以上。

火法处理工艺在 In 等元素含量很高的时候有一定应用,但由于没有很好的解决铁的资源化、其他有价金属高效回收以及过程中产生 SO₂、二次尾渣等问题,存在一定的局限性。

2.1.2 湿法工艺

湿法回收工艺是通过添加酸、碱、盐等试剂,有时伴以高温、高压、添加微生物、催化剂等方式,使铁矾渣中的有价金属溶解于浸出液,再通过萃取、电积、选择性沉淀等方法,使浸出液中的有价金属得到富集^[22, 23]。湿法处理技术相对于火法具有更好的选择性,能耗低,污染小,但流程繁杂。铁矾渣的湿法处理工艺一般采用氨水、盐酸、硫酸等作为浸出剂。

刘鹏飞等^[24]分别用硫酸和盐酸浸出黄钾铁矾渣中 Fe、Si、Zn 和 Pb。结果在浸出温度 95 ℃、液固质量比 100 : 5、硫酸和盐酸浓度分别为 1.2 mol/L 和 2.8 mol/L 的条件下,Fe、Zn 的浸出率均达 80% 以上,用盐酸基本可以将其中的 Pb 完全浸出。

樊丽丽等^[25]用 6 mol/L 的 NH₄Cl 浸出铁矾渣中的 Cd、Pb、Zn 等有价金属,通过加温搅拌的方式,在温度 105 ℃、液固比 10 : 2、搅拌浸出 2 h 的条件下,Cd、Pb 和 Zn 的浸出率均达 95% 以上。

陈永明等^[26]采用碱溶的方法处理铁矾渣,铁矾渣的分解率达到 98.03%,Sn、Sb、Zn、In、Cu、Cd、Pb 和 Ag 等绝大部分留在分解渣中,As 则以 AsO₄³⁻ 的形态大部分进入溶液,浸出率达到 83.36%,铁主要以 Fe₃O₄ 形式沉淀入分解渣,分解渣中 Fe、In 和 Zn 的含量分别为 38.81%、0.23% 和 12.89%,再采用稀盐酸选择性浸出铜和锌后,尾渣进一步富集可作为炼铁原料。

湿法处理工艺具有良好的选择性和可操作性,在有色金属的回收方面应用广泛,但浸出过程中会产生大量的废渣和浸出废液,其含有的大量不稳定形态的重金属元素会对环境造成危害,需要进一步处理。

2.1.3 火法—选矿联合工艺

高温可以破坏铁矾的晶体结构,释放有价金属,同时,可以利用高温条件下发生的反应,改变铁矾渣中不同组分的物理化学性质,便可利用焙烧产物表面性质、磁性差异等采用浮选或磁选等方式回收,是回收利用铁矾渣中有价元素较为有效的一种处理方法^[27, 28]。

铁矾渣中含有一定量的银,具有一定的回收价值。由于铁矾渣是由溶液中的沉矾离子沉淀所得,各元素达到了原子层面的均匀混合,有价金属主要以硫酸盐或氧化物的形式存在,难以直接浮选。而银大多在沉矾过程中被包裹在铁矾渣中,浮选回收银之前需要通过焙烧或者加入强酸强碱等方式破坏铁矾的结构释放银。Han 等^[29]用硫化钠硫化焙烧后的铁矾渣,之后进行浮选回收,Pb 的浮选精矿品位和回收率分别达 43.89% 和 66.86%,银的精矿品位和回收率分别达 1.3 kg/t 和 81.60%,实现了其中铅和银的综合回收利用。但由于铁矾渣粒度较细,会吸附大量药剂,而银含量较少,大部分渣都没有得到处理,环境问题没有得到缓解,仅有一定的经济价值。

磁化焙烧后磁选主要适用于铁矾渣中的铁,大多是用来处理弱磁性矿物,通过在还原气氛中焙烧,将其转变为强磁性物质^[30-31]。路殿坤等^[32]对铁矾渣进行了粉煤还原焙烧—磁选试验研究,产出含铁 58.72% 的磁铁矿,金属锌在精矿与尾矿中分散,硫则在焙烧气、磁选精矿及磁选尾矿中分散。磁化焙烧—磁选既没能解决铁、锌的资源化问题,还产生了 SO₂ 尾气和磁选尾矿的二次污染。

2.1.4 火法—湿法联合工艺

采用火法—湿法联合工艺可以比单一的火法、湿法工艺更为有效的回收有价金属,但一般工艺过程较为复杂^[33-34]。联合工艺中通常火法处理温度低于 1 000 ℃,也可以根据产品需求,选择不同于常规焙烧的氯化焙烧、微波焙烧、加碱焙烧等处理方式^[35]。

薛佩毅等^[36]研究了在 650 ℃ 条件下黄钾铁矾的热分解行为,在焙烧 1 h 后,焙烧渣先在 105 ℃ 条件通过 NH₄Cl 浸出,再于 160 ℃ 条件下用 NaOH 浸出,得到的产品 Fe 品位达 54%,可作为铁精矿使用,Zn、Pb、Cd 的浸出率均达 95% 以上,且 As 含量低于 0.1%。

张魁芳等^[37]采用“焙烧—水浸法”从铁矾渣中

回收 In、Zn。该方法主要利用了在中低温焙烧后,铁矾渣分解生成易于浸出的 ZnSO_4 和 $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$,而生成的 Fe_2O_3 则难以浸出,夹带 Ag 和 Pb 进入渣中。通过控制浸出时间、温度、固液比,Zn 和 In 浸出率分别为 72.02% 和 78.73%。

火法—湿法联合处理工艺虽然能更为全面的回收利用铁矾渣中的有价金属元素,但该工艺会产生 SO_2 、二次尾渣以及浸出液的污染,成本较高,难以在实际工业中大面积推广应用。

2.2 制作功能材料

综合利用铁矾渣,不仅可以回收利用其中的有价金属,还可以将其制成具有特殊价值的功能材料^[38-39]。王继鑫等^[40]利用铁矾渣制备 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$,作为光助—芬顿氧化技术的催化剂,其氧化处理迅速、适用范围广,被广泛应用于有机废水处理当中。侯新刚等^[41]在硫酸锰中加入黄钾铁矾,通过热酸浸出、净化除杂、共沉淀和铁氧体工艺等过程,制备出锰锌铁氧体产品,产品的磁性能够达到日本 TDK 公司 PC30 指标。陶长元等^[42]以正丁胺为沉淀剂,在室温条件下,通过共沉淀铁、镍、锌(镍、锌由硫酸锌、硫酸镍按 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{FeO}_4$ 比例补加)制备的镍锌铁氧体样品,具有软磁材料的低比剩余磁化强度和低矫顽力的特性。M. Pelino^[43]提出将铁矾渣、碎玻璃、花岗岩和泥土分别按一定比例混合制成玻璃微晶材料,但制作成本较高,经济效益较低。

2.3 用作建筑材料

生产建筑材料的过程中一般不会产生二次污染,需求量大且对原料的性质要求较低,因此是固体废渣消纳的重要途径之一^[44]。P. Asokan 等^[45]将铁矾渣与黏土按 1:1 混合,并加入 15% 的煤渣,放入模具中在 960 °C 烧结 90 min,升温速率控制在 6 °C/min,烧结产物具有良好的强度和稳定性,不仅满足做建筑材料的强度要求,而且烧结块的浸出试验表明,其中的重金属等有害元素以稳定的形式固定下来,基本消除了对环境的危害。但生产的建材在风化作用、酸雨侵蚀等方式破坏下,也可能会释放重金属,对生态环境造成危害,无法达到废渣完全稳定无害化的要求。建材的生产技术还需要进一步改进完善,在满足建筑材料性能要求的同时,尽量提高其中有害成分的稳定性。

2.4 固化处理

固体废弃物的处理应遵循减量化—资源化—无害化的原则,首先应从源头上尽量减少废渣的产生,

其次考虑其资源化利用,在无法经济有效的资源化利用时,才考虑将其固化处置^[46-47]。固化处置是在废渣中加入试剂,使其转变为低溶解性、低毒性、具有一定稳定性的固化体,可用作填料使用^[48,49]。侯小强等^[50]在硅酸盐水泥熟料中加入质量为 60% 的铁矾渣,以废石、硫化钠为稳定剂,可提高重金属离子的稳定性,加入沸石和硫化钠的固化体的浸出毒性值均低于国家标准。可见,通过无害化固定处理工艺可以实现铁矾渣最终安全处置^[51,52]。但该法仅适于处理有价金属含量少、回收价值低的铁矾渣,其产品低值、处理成本高,目前尚未得到推广应用。

3 结语

(1)针对铁矾渣的处理处置方法,火法处理主要存在 SO_2 排放污染的问题;湿法工艺相比火法能耗低,选择性好,但有浸出液等废水需要处理;选矿法工艺过程简单,成本低,但浮选法主要针对铁矾渣中的银,仍有大量尾渣,磁选回收的铁难以达到冶炼要求;制作材料成本高;而固化处理虽然铁矾渣得到了安全处置,有价元素未得到合理回收。

(2)对于铁矾渣的综合回收利用,不仅要结合铁矾渣的性质,同时要考虑处理工艺对环境的影响,尽量减少 SO_2 以及废水排放,避免重金属污染,减少废渣的堆存数量。在不带来二次污染的条件下回收利用铁矾渣,综合考虑资源、环境和经济的问题,也是现在研究的热点。

参考文献:

- [1] 马菲菲. 湿法炼锌浸出沉矾沉铁工艺探讨[J]. 中国有色冶金, 2017(2): 19-22.
- [2] 王成彦, 陈永强. 中国铅锌冶金技术状况及发展趋势: 锌冶金[J]. 有色金属科学与工程, 2017(1): 1-7.
- [3] 刘群. 铅锌冶炼渣的资源化研究进展[J]. 河南化工, 2017(2): 11-15.
- [4] Mymrin V A, Ponte H A, Impinnisi P R. Potential application of acid jarosite wastes as the main component of construction materials[J]. Construction and Building Materials, 2005, 19(2): 141-146.
- [5] 王浩宇, 龙双. 锌精矿原料处理工艺探索[J]. 世界有色金属, 2017(18): 38-40.
- [6] 王顺才, 张豫. 热酸浸出黄钾铁矾工艺的生产实践[J]. 有色冶炼, 2001(2): 19-22.
- [7] 李夏湘, 何醒民. 论常规法与热酸浸出黄钾铁矾法炼锌工艺流程的选择[J]. 湖南有色金属, 2000(6): 15-16.
- [8] 窦明民, 周德林. 湿法炼锌除铁新工艺研究[J]. 有色冶炼, 2000(3): 27-30.

- [9] 邹学功. 黄钾铁矾除铁理论分析[J]. 冶金丛刊, 1998 (6): 18–20.
- [10] Spratt H, Rintoul L, Avdeev M, et al. The thermal decomposition of hydronium jarosite and ammoniojarosite [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2014, 115(1): 101–109.
- [11] Reyes I A, Patino F, Flores M U, et al. Dissolution rates of jarosite – type compounds in H_2SO_4 medium: A kinetic analysis and its importance on the recovery of metal values from hydrometallurgical wastes [J]. *Hydrometallurgy*, 2017, 167: 16–29.
- [12] Kerolli – mustafa M, Mandic V, Curkovic L, et al. Investigation of thermal decomposition of jarosite tailing waste [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2016, 123(1): 421–430.
- [13] Warchulski R, Gaweda A, Janeczek J, et al. Mineralogy and origin of coarse – grained segregations in the pyrometallurgical Zn – Pb slags from katowice – wenowiec (Poland) [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2016, 110(5): 681–692.
- [14] Mocellin J, Mercier G, Morel J L, et al. Factors influencing the Zn and Mn extraction from pyrometallurgical sludge in the steel manufacturing industry [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 158: 48–54.
- [15] Liu C, Ju S H, Zhang L B, et al. Recovery of valuable metals from jarosite by sulphuric acid roasting using microwave and water leaching [J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2017, 56(1): 1–9.
- [16] 彭兵, 林冬红, 刘恢, 等. 高铁焙砂还原焙烧—碱浸工艺[J]. 中国有色金属学报, 2017(2): 423–429.
- [17] 车欣. 浸锌渣氯化焙烧工艺实验研究[D]. 唐山: 河北理工大学, 2010.
- [18] 蒋荣生, 柴立元, 贾著红, 等. 烟化法处理铅锌冶炼渣的生产实践与探讨[J]. 云南冶金, 2014(1): 58–61.
- [19] 王振东. 烟化法处理鼓风炉炼铅炉渣试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2006.
- [20] 曹晓恩, 洪陆阔, 齐洪渊, 等. 转底炉煤基直接还原铁矾渣回收铁锌联合工艺[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(4): 4–7.
- [21] 李俞良, 朱来东, 鲁兴武. 造锍熔炼法从黄钠铁矾渣中回收铜、镍工艺技术研究[J]. 云南冶金, 2015(4): 30–33.
- [22] Wang F, Yu J, Xiong W, et al. A two – step leaching method designed based on chemical fraction distribution of the heavy metals for selective leaching of Cd, Zn, Cu, and Pb from metallurgical sludge. [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017.
- [23] Kim E, Horckmans L, Spooren J, et al. Selective leaching of Pb, Cu, Ni and Zn from secondary lead smelting residues [J]. *Hydrometallurgy*, 2017, 169: 372–381.
- [24] 刘鹏飞, 张亦飞, 游韶玮, 等. 热酸浸出回收黄钾铁矾渣中有价元素[J]. 过程工程学报, 2016(4): 584–589.
- [25] 樊丽丽, 曾钦, 薛佩毅. 某黄钾铁矾渣浸出多种有价金属试验研究[J]. 内蒙古科技与经济, 2012(1): 62–64.
- [26] 陈永明, 唐谟堂, 杨声海, 等. NaOH 分解含钢铁矾渣新工艺[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(7): 1322–1331.
- [27] Liu Y, Wang A. Dehydration of Na – jarosite, ferricopiapite, and rhomboclase at temperatures of 50 and 95 degrees C: implications for martian ferric sulfates [J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2015, 46(5): 493–500.
- [28] Chowdhury F, Ojumu T V. Investigation of ferrous – iron biooxidation kinetics by *Leptospirillum ferriphilum* in a novel packed – column bioreactor: effects of temperature and jarosite accumulation [J]. *Hydrometallurgy*, 2014, 141: 36–42.
- [29] Han H, Sun W, Hu Y, et al. Anglesite and silver recovery from jarosite residues through roasting and sulfidization – flotation in zinc hydrometallurgy [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 278: 49–54.
- [30] Yu J, Han Y, Li Y, et al. Beneficiation of an iron ore fines by magnetization roasting and magnetic separation [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2017, 168: 102–108.
- [31] Guo C, Wang H, Fu J, et al. Recovery a refractory oolitic hematite by magnetization roasting and magnetic separation [M]. *Advanced Materials Research*, 2012: 305–310.
- [32] 路殿坤, 金哲男, 谢峰, 等. 铁矾渣还原焙烧制备磁铁矿的研究[J]. 铜业工程, 2013(1): 6–11.
- [33] Xu C, Cheng H, Li G, et al. Extraction of metals from complex sulfide nickel concentrates by low – temperature chlorination roasting and water leaching [J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2017, 24(4): 377–385.
- [34] Ju S, Zhang L, Peng J, et al. Thermodynamics of leaching roasted jarosite residue from zinc hydrometallurgy in NH_4Cl system [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23(4): 1179–1183.
- [35] 许孙曲. 用氯化法从黄钾铁矾渣中回收锌[J]. 矿产保护与利用, 2003(4): 52.
- [36] 薛佩毅, 巨少华, 张亦飞, 等. 焙烧—浸出黄钾铁矾渣中多种有价金属[J]. 过程工程学报, 2011(1): 56–60.
- [37] 张魁芳, 刘志强, 戴子林, 等. 含钢铁矾渣焙烧水浸法回收锌和铜[J]. 中国有色金属学报, 2017(5): 1045–1050.
- [38] Vithana C L, Sullivan L A, Shepherd T. Effect of schwertmannite and jarosite on the formation of hypoxic black-

water during inundation of grass material[J]. Water Research, 2017,124:1-10.

[39] Lakshman S V, Dreizin E L, Schoenitz M. Evaluation of K-H₃O jarosite as thermal witness material[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2014,117(1):141-149.

[40] 王继鑫,翁孙贤,郑祖阳,等. 铁矾渣制备 α -Fe₂O₃及其降解石化废水性能研究:第十三届全国太阳能光化学与光催化学术会议[C]. 武汉:中国化学学会、中国太阳能学会,2012

[41] 侯新刚,魏继业,苏瑞娟. 利用黄钾铁矾渣制备软磁锰锌铁氧体工艺研究[J]. 中国有色冶金,2012,41(4):72-76.

[42] 陶长元,曾强,刘作华,等. 黄钠铁矾渣制备镍锌铁氧体及其表征[J]. 功能材料,2016(1):1183-1185.

[43] Pelino M. Recycling of zinc-hydrometallurgy wastes in glass and glass ceramic materials[J]. Waste Management, 2000, 20(7):561-568.

[44] Ali M M, Agarwal S K, Pahuja A, et al. Utilisation of by-product jarosite in the manufacture of ordinary Portland cement[J]. Advances in Cement Research, 2014, 26(1):41-51.

[45] Pappu A, Saxena M, Asolekar S R. Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials[J]. Building and Environment, 2007, 42(6):2311-2320.

[46] 胡跃平,汤颖,范铭芳,等. 中国的固体废物处理与资源化利用[J]. 能源与节能,2014(8):103-105.

[47] 杜艳丽,高原,荆涛,等. 浅谈固体废物处理处置现状[J]. 绿色科技,2013(7):226-227.

[48] Huang X, Zhuang R, Muhammad F, et al. Solidification/stabilization of chromite ore processing residue using alkali-activated composite cementitious materials[J]. Chemosphere, 2017, 168:300-308.

[49] Travar I, Kihl A, Kumpiene J. Utilization of air pollution control residues for the stabilization/solidification of trace element contaminated soil[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(23):19101-19111.

[50] 侯小强,郑旭涛,郭从盛,等. 外加剂对水泥固化铁矾渣性能的影响[J]. 上海有色金属,2014(3):123-127.

[51] Agarwal S K, Pahuja A, Ali M M, et al. Mineralising effect of jarosite: a zinc industry by-product in the manufacturing of cement[J]. Advances in Cement Research, 2015, 27(5):248-258.

[52] 侯小强,郑旭涛,郭从盛,等. 极端环境对铁矾渣水泥固化体的影响[J]. 有色金属科学与工程,2014(3):56-59.

引用格式:朱林,韩俊伟,刘维,等. 铁矾渣综合利用技术进展[J]. 矿产保护与利用,2018(4):124-129.

ZHU Lin, HAN Junwei, LIU Wei, et al. Progress of comprehensive utilization technology of jarosite[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018(4):124-129.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net> E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn

《无机盐工业》2019 年征订启事

《无机盐工业》(月刊)是全国中文核心期刊,是国家科委批准的无机化工行业公开发行的科技刊物,1960 年创刊,国内外公开发行,主要报道国内外无机化工行业最新科技成果与技术进展,以及新技术、新工艺、新设备、新产品、新用途等方面的动态及商品信息、市场行情等。内设综述与专论、研究与开发、工业技术、环境·健康·安全、化工分析与测试、化工标准化、化工装备与设计、催化材料、电池材料、综合信息等栏目,是无机化工行业必不可少的良师益友。

本刊印刷精美、质量上乘、影响面广,是您在无机化工行业扩大产品影响的最佳选择。欢迎来函来电洽谈广告业务。同时,热诚欢迎您在本刊刊登新产品、新技术广告及企业、公司形象宣传广告。

《无机盐工业》月刊,80 页,单价 20.00 元,全年共 240.00 元,邮发代号:6-23。

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系。编辑部订价 288.00 元/年(含邮费)。

地址:天津市红桥区丁字沽三号路 85 号《无机盐工业》编辑部
电话:022-26658343; 26689072; 26658341
E-mail: book@wjgy.com.cn

邮编:300131
传真:022-26658343
<http://www.wjgy.com.cn>