



含锌钢铁冶金渣尘处理技术现状

马爱元, 郑雪梅, 李松, 朱山, 张绪勇

(六盘水师范学院化学与材料工程学院, 贵州 六盘水 553004)

摘要: 结合含锌钢铁冶金渣尘碱性脉石含量高、多金属共生、一种金属以多矿相赋存的矿物学特性, 简述了近年来国内外含锌钢铁冶金渣尘资源化综合利用现状和研究进展, 着重介绍了氨法配位浸出工艺的研究与发展前景, 并对微波、超声波强化浸出技术进行了展望, 指出微波-超声波强化处理研究是钢铁冶金渣尘高效提锌技术发展的重要方向。

关键词: 锌; 钢铁冶金渣尘; 资源综合利用; 微波; 超声波

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2020.04.001

中图分类号: TD 989; TF09 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2020) 04-0001-07

锌是重要的有色金属, 可制备防腐镀层(如镀锌板)、铸造锌合金、加工氧化锌粉等, 是国防建设的关键材料、高技术发展的支撑材料和国民经济的基础材料, 在国民经济与国防建设中具有重要的战略地位。随着经济的发展, 锌金属资源需求越来越大, 锌精矿资源日益枯竭, 锌资源逐渐出现短缺、品位低、自给率逐年下降等问题, 低品位难处理含锌资源逐渐成为锌冶炼的重要原料。近年来, 我国钢产量出现阶梯增长, 钢铁工业飞速发展, 钢铁冶炼含锌固体废弃物产量也逐年增加, 给生产、环境带来了巨大压力, 且钢铁冶炼含锌固体废弃物种类繁多: 高炉粉尘(瓦斯灰和瓦斯泥)、转炉粉尘、电炉(EAF)粉尘、其他粉尘等, 其含锌量约占8%~12%, 回收价值显著^[1]。

在钢铁冶炼流程中, 锌经过长时间循环会大量

沉积在炉墙上改变炉型结构, 进而影响煤气流的运行, 间接对高炉顺行造成影响和破坏。因此, 面对含锌矿物资源短缺、品位低、成分复杂且难以提取等问题, 进一步加大含锌钢铁冶金渣尘资源化利用。本文系统介绍并总结归纳了含锌钢铁冶金渣尘处理技术现状及其发展趋势, 为缓解我国战略有色金属锌资源紧缺的窘境以及加速锌行业的发展具有重要意义^[2-5]。

1 含锌钢铁冶金渣尘处理现状

与国外相比(美国、日本等), 国内含锌固体废物资源化利用率较低, 处理技术起步较晚, 多数停留在半生产化研究阶段。

含锌钢铁冶金渣尘含有大量Fe、C、CaO、MgO等有利于烧结的成分, 国内诸多钢铁企业将其作为烧结配料进行循环烧结处理, 在高炉内实

收稿日期: 2019-01-30; 改回日期: 2019-03-15

基金项目: 贵州省科技厅技术基金重点项目(黔科合基础[2019]1444); 贵州省教育厅科技拔尖人才支持项目(黔教合KY字[2018]066); 六盘水市科技计划项目(52020-2018-0304; 52020-2019-05-08, 52020-2019-05-09); 六盘水师范学院科技创新团队(LPSSYKJTD201801, LPSSYKJTD201905); 六盘水师范学院重点学科建设项目(LPSSYZDPYXK201708); 卓越工程师培养计划项目(LPSSYZjyypjh201801)

作者简介: 马爱元(1988-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为冶金固体废弃物资源综合利用。

通讯作者: 郑雪梅(1987-), 女, 讲师, 研究方向为资源综合利用。

现循环再利用^[6-7]。该方法成本低、见效快、工艺简单,但粉尘中的锌在循环利用过程中不断富集导致这类粉尘难以直接用作烧结配料。

另一方面,含锌钢铁冶金渣尘可固化填埋,用于铺路、生产水泥等用途的原材料^[8-10]。

总体来看,以上处理方法未对锌金属进行有效的循环利用,填埋、铺路、用作水泥原料等无疑是对二次含锌资源的再次浪费。

基于含锌钢铁冶金渣尘有价金属锌赋存的特点,目前含锌钢铁冶金渣尘资源化利用处理方法可分为两大类:火法处理及湿法处理。

1.1 火法处理

火法处理,主要基于锌易挥发的性质,在高温炉窑中加入一定的还原剂促进锌化合物形成单质锌挥发进入烟尘,采用布袋收尘等装置进行收尘处理,在此过程中锌金属氧化成氧化锌,得到锌含量较高的氧化锌粉,窑渣则可返回作为烧结配料回收铁用。目前较为成熟的工艺有回转窑工艺、冷固结球团法、及环形炉工艺等^[11-13]。回转窑处理工艺^[11],除处理温度高(1000~1300℃),处理时间长(30~50 min)外,该工艺需将含锌渣尘烧制成次氧化锌粉,且次氧化锌粉中氟、氯等有害杂质元素含量高,通常不能直接用于后续锌、铅等有价金属提取。环形炉工艺、冷固结球团法^[12-13]主要将还原剂和粘结剂(如碳粉)与含锌粉尘按一定比例混合后制成球团,高温加热条件下通过碳粉还原铅、锌氧化物,金属蒸汽随烟气排出环形炉并收集,由于球团抗压强度偏低,该方法对含锌较低或全铁较高的粉尘不适用。

总体来说,火法处理工艺未能得到普遍应用,一方面由于应用具有一定的局限性,另一方面因其还原温度较高导致能耗及对设备的维修、管理等成本偏高,且易造成二次污染。

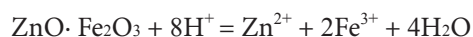
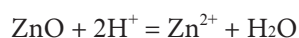
1.2 湿法处理

钢铁渣尘中锌主要以氧化物的形式为主,少量

呈铁酸锌、硅酸锌等形态存在。氧化锌是两性氧化物,可溶于酸或碱溶液,因此,可采用湿法工艺选取合适的浸出剂将锌和其他杂质分离。现阶段较为成熟的技术主要有酸法浸出、碱法浸出和氨法浸出三大类。

1.2.1 酸法浸出

原理即氧化锌易溶于一定浓度的酸并以 Zn^{2+} 形态进入溶液,达到提锌的目的。一般分为强酸浸出和弱酸浸出。反应方程式如下:



黄平等^[14]用硫酸从高炉瓦斯泥中浸出锌,控制浸出时间 90 min、温度 90℃、液固比 5:1、硫酸浓度 4.5 mol/L,锌浸出率可达 87.03%。浸出过程中,铁、铜、镍、镉、钴、砷、锑等元素也进入溶液,首先需调节溶液 pH 值使铜和其他金属分离,沉铜后的滤液加入高锰酸钾氧化沉淀除铁,再通过锌粉置换除去铜、钴、镍等等杂质离子,最终获得含锌溶液。该方法能较好的提取有价金属锌,但具有浸出温度高、工艺复杂等缺点。

Tomáš Havlík 等^[15]用 0.5 mol/L 的硫酸在 70~90℃下从含 Zn33%、Fe 26.5% 的电弧炉烟尘(EAF)中提取锌,锌提取率为 75% 左右,而铁则留在固态渣中。研究表明,硫酸浓度和浸出温度对锌、铁的溶出具有显著影响,浸出液中铁含量随酸浓度增加而增加,较低的酸浓度可抑制铁的溶出,但锌的浸出率随之降低。

研究诸多的酸法提锌工艺发现,强酸浸出可提高锌浸出率,但基于钢铁冶金渣尘碱性脉石成分高、氟氯含量高(Cl 最高达 12%,F 最高达 2%)等特点,强酸浸出势必增加钙镁、氟氯等杂质元素的溶出^[16-17],同时强化铁酸锌、硅矿物的溶解增加酸耗^[18],极易危害后续的净化、过滤和萃取等工艺过程,另外强酸对设备有强烈腐蚀。相反弱酸浸出能降低铁等杂质元素的溶出同时减轻设

备腐蚀，但缺点是锌溶出率低，渣含锌高，造成资源浪费。

1.2.2 碱法浸出

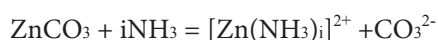
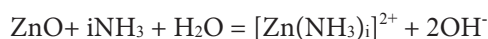
碱法即用碱溶液对钢铁渣尘进行锌和其他杂质的分离，与酸法相比，其对设备的腐蚀相对较小。

Orhan G^[19]利用 NaOH 浸出 - 锌粉置换 - 碱法电积工艺回收钢铁烟尘中的锌，锌浸出率达 85%，浸出液通过锌粉置换，除去 Pb、Cu、Cd 等杂质，净化后液含 Fe < 0.01 g/L，Cd < 0.001 g/L，Pb < 0.12 g/L，符合碱法电积对杂质的要求。Xia D K 和 Pickles C A^[20]研究微波辅助 NaOH 浸出工艺回收烟尘中的锌，采用微波强化浸出工艺锌的浸出率可达 80%，微波辅助浸出速度明显加快，且由于微波辐射可以在原子或分子层面加热反应物质，使 Zn 的浸出率提高 5% ~ 10%。Dutra A J B 等^[21]通过采用 6 mol/L NaOH 作为浸出剂从含锌 12.2%、含铁 37.08%、含钙 2.19% 的 EAF 烟尘中提取锌，浸出 4 h 后锌提取率达 74%，对浸出渣做 XRD、SEM-EDS 分析显示 ZnFe₂O₄、钙均残留在渣中。

碱法工艺处理钢铁烟尘可避免大量 Fe、Ca 的溶出，同时减轻设备的腐蚀，适合处理高碱性脉石矿物，但浸出剂的消耗量较大、浸出温度较高，碱条件下锌酸钠电解只能得到海绵锌粉，得不到阴极锌板。

1.2.3 氨法配位浸出

氨法处理钢铁渣尘回收锌工艺基于氧化锌能与一些浸出剂配离子形成可溶性的配合物进入浸出液，而铁、铝、硅、钙等不能与浸出剂反应留在渣中，从而实现有价金属锌和杂质分离，主要化学反应：

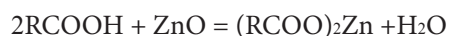


近几年 Zn-NH₃-NH₄Cl-H₂O^[22-23]、Zn-NH₃-(NH₄)₂SO₄-H₂O^[24-25]、Zn-NH₃-NH₄HCO₃-H₂O 等体系^[26]被广泛的用于研究含锌矿相矿物（如氧化锌、

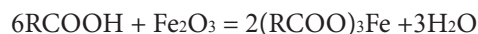
菱锌矿、水锌矿、钢铁含锌烟尘等）的提取，为含锌冶金渣尘资源的高效利用提供了技术途径。

诸荣孙等^[23]研究 NH₄Cl-NH₃ 体系浸出高炉瓦斯灰，锌浸出率为 88.90%，在不同浸出剂条件下锌的溶出效果顺序为：NH₄Cl-NH₃ > (NH₄)₂SO₄-NH₃ > (NH₄)₂CO₃-NH₃ > NH₄F-NH₃ > NH₃；Duchao Zhang 等^[27]研究了高炉灰（含锌 5.1%，主要以氧化锌、铁酸锌、硅酸锌、硫化锌形式存在）在 Ida-NH₄Cl-NH₃-H₂O 体系中的浸出行为，结果显示锌浸出率为 65.58%，铁基本未浸出，残余锌主要以铁酸锌、硅酸锌、硫化锌形式残留在浸出渣中；陆凤英等^[28]采用 NH₃-NH₄HCO₃ 作为浸出剂处理含锌 8.75% 的高炉粉尘，NH₃、NH₄HCO₃ 用量为理论值的 1.5 倍，Zn 浸出率为 90.97%，浸出渣含 Zn 0.8% 左右，含 Fe 22.34%，返回烧结配料，该工艺的原材料消耗低、浸出液氨可回收利用。

亦有文献报道，Julian M. Steer^[29]研究了丙二酸（HOOC-CH₂-COOH）、丙烯酸（CH₂=CH-COOH）、柠檬酸（三羧基有机酸）、乙酸（H₃C-COOH）、草酸（HOOC-COOH）、苯甲酸（C₆H₅-COOH）对高炉瓦斯泥中锌和铁浸出率的影响，结果发现 Zn 的提取符合路易斯酸碱理论（Lewis acid/base theory）- 酸碱电子理论，羧酸基团可接收电子对：



Fe 的提取符合布朗斯特 - 劳里酸碱理论（Bronsted-Lowry theory）- 酸碱质子理论，羧酸基团给质子：



研究表明，羧酸根阴离子可结合有价金属锌形成稳定的配合物促进锌的溶出^[30-32]，采用丙二酸作为配位剂，锌浸出率可高达 93.9%，而铁的浸出率为 16.9%（丙二酸）；同时发现 pH 值对铁的浸出率有重要的影响，pH < 1.5 时，铁的浸出率较高，如 pH 值 = 1.0 时，采用 1 M 的柠檬

酸浸出高炉粉尘, 锌浸出率为 82.6%, 铁浸出率为 32.2%。因此, 控制合适的 pH 值, 采用有机羧酸作为配位提取剂亦能有效的进行锌铁分离, 达到高效提锌的目的。

诸多复杂含锌资源的氨法提锌研究表明, 氨法浸出工艺可避免铁、铝、硅、氟氯、碱性脉石等杂质进入浸出液。另外, 由于氨法电积基本不存在析氢反应, 其电流效率明显高于酸法电积, 且避免了酸法电积的返溶现象, 同时, 氨法电解可避免硫酸电解液中氟氯含量高对电解造成的极板腐蚀和损耗、烧板、电锌质量下降等诸多影响, 可大大简化作业流程。

2 含锌冶金渣尘资源化利用技术发展方向

氨法提锌工艺在诸多方面表现出较酸法工艺优越, 但铁酸锌、硫化锌和硅酸锌等一类含锌矿物在氨性体系下难以同步、高效溶出, 严重制约锌的提取, 因此, 开发高效、清洁的分离提取新方法是有效利用非传统锌资源的必由之路。

近年来, 基于微波独特的体积和选择性加热方式, 微波冶金技术被广泛用于多种金属的回收处理, 包括重金属 (Fe、Ni、Co、Cu、Pb 和 Zn) [33-37], 轻金属 (Al 和 Mg) [38-39], 稀有金属 (Ti 和 Mo) [40-41], 贵金属 (Au) [42], 以及核能原料铀 [43] 等, 辅助还原或强化矿物的浸出等一系列冶金处理过程。在微波强化还原冶金物料过程中, 由于有用矿物与杂质成分吸波特性和有显著差异, 微波独特选择性加热方式造成多元多相复杂矿石体系温度在微观上分布不均, 从而促使有用矿物与杂质之间产生热应力, 强化有用矿物与杂质的解离, 进而将难处理包裹型矿物转化为易于处理的形态, 同时还还原过程产生高温热点实现节能降耗。

利用微波加热的这些优点, 目前国内外关于微波强化矿物相转化改善锌资源中锌浸出率的研究

有文献报道, 如: Yan Huan 等采用还原性气氛对浸出渣中锌铁尖晶石进行矿相转化, 在优化条件下 61.38% 的锌被浸出 [44]; Zhang Yucheng 等研究了焙烧条件下复杂锌矿中菱锌矿向氧化锌的转化, 结果显示 400 °C 条件下矿相转化彻底, 低品位复杂锌矿的浸出率可以达到 92% [45]。因此, 进行微波强化含锌资源矿物相的预处理对锌的提取具有重要意义。

此外, 超声波辅助强化在一定程度上可以替代固体样品的预处理 [46-49]。究其原因主要有两方面: 一方面因为在足够超声声强作用下会产生超声波空化效应, 即形成数以万计的气泡, 溶液介质中的气泡历经形成、振荡、生长、收缩、崩溃等过程, 尤其崩溃过程在极小空间产生高温和高压可辅助加速溶解、熔化、浸出等反应步骤; 另一方面, 在超声声强不足以产生空化效应时, 其机械效应可起到强化搅拌, 降低溶剂扩散阻力, 加速传质、传热的目的。

目前, 国内外关于超声强化处理含锌物料的研究有文献报道, 如: 张玉梅等 [50] 研究超声波辐射对兰坪低品位氧化锌矿氨浸过程的影响规律, 研究表明: 超声波辐射可显著降低氨浸低品位氧化锌矿的反应温度和浸出所需 NH_4OH 浓度, 大幅缩短浸出时间, 同时, 超声强化氨浸对锌的浸出具有较高选择性。王欣 [51] 进行了超声强化浸出富镉锌渣新工艺研究, 发现常规浸出过程中不溶物 PbSO_4 、脉石等成分包裹原料阻碍浸出反应的进行, 超声可强化锌、镉的提取, 通过对浸出渣物相、微观结构和微区元素分析, 超声可打开包裹层强化有价金属快速溶出。郑雪梅 [52] 进行了含锌、镉复杂物料的常规与超声波强化浸出对比试验研究发现, 与常规浸出相比, 采用超声强化浸出可促进锌镉提取, 大大缩短反应时间, 同时降低反应温度。Brunelli 等 [53] 对比研究了常规与超声波强化处理含锌电弧炉烟尘, 超声波可强化锌的溶出。超声波强化冶金反应显示了良好的工业应用前景。

因此,微波、超声波一类特种场冶金技术的发展有可能实现锌资源中锌的快速、高效溶出,另外,在面对多矿相锌金属难以同步溶出的难题上,可联合多种非常规冶金技术手段形成复杂含锌资源的同步、快速、高效、绿色提取锌的新方法。

3 结 论

钢铁冶金尘渣是一种典型的含锌非传统资源,其除具有碱性脉石含量高的特点外,还具有多金属共生、锌以多矿相赋存的矿物学特点。综合以上冶金渣尘处理方法及研究进展分析,寻找合适的氨法配位浸出体系以及开发一系列强化非传统锌资源浸出锌的方法,如微波活化预处理技术、超声波强化浸出技术、微波-超声波联合技术等,对解决锌金属多矿相的同步提取、高效利用问题具有十分重要的意义。充分利用此类非传统资源可进一步缓解我国战略有色金属紧缺的状况,为国家国防建设和经济发展提供资源保障。

参考文献:

- [1] 张建良, 闫永芳, 徐萌, 等. 高炉含锌粉尘的脱锌处理[J]. 钢铁, 2006(10): 78-81.
- Zhang J L, Yan Y F, Xu Y M, et al. Research on Removal of Zn From Blast Furnace Dust[J]. Iron and Steel, 2006(10): 78-81.
- [2] 王 龙, 张晋霞, 牛福生, 等. 含锌瓦斯泥资源化回收利用研究进展[J]. 金属矿山, 2017(4):182-186.
- Wang L, Zhang J X, Niu F S, et al. Research development of recovery and utilization of zinc-bearing blast furnace sludge[J]. Metal Mine, 2017(4):182-186.
- [3] Antrekowitsch J, Steinlechner S. The recycling of heavy-metalcontaining wastes: mass balances and economical estimations [J]. JOM, 2011 (1): 68-72.
- [4] 杨金福, 王霞, 张英才, 等. 高炉中有害元素的平衡分析及其脱除[J]. 中国冶金, 2007(11):35-40.
- Yang J F, Wang X, Zhang Y C, et al. Equilibrium analysis and elimination of harmful element in blast furnace[J]. China Metallurgy, 2007(11):35-40.
- [5] 童晓忠, 马黎阳, 李永华, 等. 高炉瓦斯灰中有价金属回收及无害化处理技术[J]. 中国金属通报, 2016(4):35-37.
- Tong X Z, Ma N Y, Li Y H, et al. Valuable metal recovery and harmless treatment of blast furnace ash[J]. China Metal

Bulletin, 2016(4):35-37.

- [6] 白仕平, 张丙怀, 伍成波, 等. 高炉瓦斯泥高效利用的试验研究[J]. 中国冶金, 2007 (6): 40-44.

Bai S P, Zhang B H, Wu C B, et al. Study on Efficient Utilization of BF Gas Slime[J]. China Metallurgy, 2007(11):35-40.

- [7] 魏礼明, 黎燕华, 胡晓洪. 高炉瓦斯泥的综合利用探讨及应用[J]. 金属矿山, 2004 (z1): 493-495.

Wei L M, Ni Y H, Hu X H. Exploration on Comprehensive Utilization of Blast-furnace Flue Slime and Its Application[J]. Metal Mine, 2004 (z1): 493-495.

- [8] Hamilton I W, Sammes N M. Encapsulation of steel foundry bag house dusts in cement mortar [J]. Cement and concrete research, 1999 (1): 55-61.

- [9] 罗文群. 低锌高炉瓦斯泥的资源化研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2011.

Luo W Q. Study on reclamation of blast furnace sludge with low zinc[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2011.

- [10] 张荣良, 李夏. 钢铁厂含锌粉尘综合处理途径分析[J]. 烧结球团, 2013(5): 48-51,59.

Zhang R L, Analysis on comprehensive treatment ways of zinc-containing dust in iron and steel plant[J]. Sintering and Pelletizing, 2013(5): 48-51,59.

- [11] 彭开玉, 周云, 王世俊, 等. 钢铁厂高锌含铁尘泥二次利用的发展趋势[J]. 安徽工业大学学报: 自科版, 2006 (2): 127-131.

Peng K Y, Zhou Y, Wang S J, et al. Development trend of comprehensive utilization of the high-zinc and ferric dust in steel and iron plants[J]. Journal of Anhui University of Technology:Natural Science, 2006 (2): 127-131.

- [12] 曾丹林, 刘胜兰, 张崎, 等. 从高炉粉尘中回收锌的工艺现状[J]. 中国有色冶金, 2014 (6):57-60.

Zeng D L, Liu S L, Zhang Q, et al. Statu of zinc recovery process from blast furnace dust[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2014 (6):57-60.

- [13] 周渝生, 陈亮, 张美芳. 用转炉红热钢渣处理宝钢高锌含铁尘泥[J]. 安徽工业大学学报: 自科版, 2003 (s1):161-165.

Zhou Y S, Chen L, Zhang M F. Recovery and utilization of Baosteel dust and sludge with high zinc and iron content by BOF hot slag method[J]. Journal of Anhui University of Technology: Natural Science, 2003 (s1):161-165.

- [14] 黄平, 吴恩辉, 侯静, 等. 用硫酸从高炉瓦斯灰(泥)中浸出锌、镉试验研究[J]. 湿法冶金, 2014(5):365-367.

Huang P, Wu E H, Hou J, et al. Leaching of zinc and indium from blast furnace gas ash (mud) using sulfuric acid[J]. Hydrometallurgy of China, 2014(5):365-367.

- [15] Havlík T, Souza B V E, Bernardes A M, et al. Hydrometallurgical processing of carbon steel EAF dust[J].

Journal of Hazardous Materials, 2006 (1-3):311-318.

[16]Tsakiridis P E, Oustadakis P, Katsiapi A, et al. Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD). Part II: Downstream processing and zinc recovery by electrowinning [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010 (1): 8-14.

[17]Barrett E C, Nenniger E H, Dziawinski J. A hydrometallurgical process to treat carbon steel electric arc furnace dust[J]. Hydrometallurgy, 1992 (1-3):59-68.

[18]Montenegro V, Agatzini-Leonardou S, Oustadakis P, et al. Hydrometallurgical Treatment of EAF Dust by Direct Sulphuric Acid Leaching at Atmospheric Pressure[J]. Waste & Biomass Valorization, 2016 (6):1-18.

[19]Orhan G. Leaching and cementation of heavy metals from electric arc furnace dust in alkaline medium [J]. Hydrometallurgy, 2005 (3): 236-245.

[20]Xia D K, Pickles C A. Microwave caustic leaching of electric arc furnace dust [J]. Minerals Engineering, 2000 (1): 79-94.

[21]Dutra A J B, Paiva P R P, Tavares L M. Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust [J]. Minerals Engineering, 2006 (5):478-485.

[22]Ding Z Y, Yin Z L, Wu X F et al. Leaching kinetics of willemite in ammonia-ammonium chloride solution [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2011 (4): 633-641.

[23] 诸荣孙, 柏小彤, 汪玲玲, 等. 高炉瓦斯灰氨浸脱锌 [J]. 有色金属工程, 2015 (4):35-39.

Zhu R S, Bo X T, W L L, et al. Blast furnace gas ashes dezincification by ammonia leaching process[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2015 (4):35-39.

[24]Ma A Y, Zhang L B, Peng J H, et al. Extraction of zinc from blast furnace dust in ammonia leaching system [J]. Green Processing and Synthesis, 2016, 5(1):23-30.

[25] 唐谟堂, 张鹏, 何静, 等. Zn-(NH₄)₂SO₄-H₂O 体系浸出锌烟尘 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007 (5):867-872.

Tang M T, Zhang P, He J, et al. Leaching zinc dust in system of Zn(II)- (NH₄)₂SO₄-H₂O[J]. Journal of Central South University(Natural Science), 2007 (5):867-872.

[26] 蒋崇文, 罗艺, 钟宏. 低品位氧化锌矿氨-碳酸氢铵浸出制备氧化锌工艺的研究 [J]. 精细化工中间体, 2010 (3): 53-56.

Jiang C W, Luo Y, Zhong H. Study on leaching low-grade zinc oxide ore in the system of NH₃-NH₄HCO₃-H₂O for preparing zinc oxide[J]. Fine Chemical Intermediates, 2010 (3): 53-56.

[27] 张保平, 杨芳. 氨法处理高炉瓦斯灰制取等级氧化锌研究 [J]. 武汉科技大学学报, 2014, 37(2):125-129.

Zhang B P, Yang F. Preparation of grade zinc oxide from blast furnace dust by using ammonia process[J]. Journal of

Wuhan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 37(2):125-129.

[28] 陆凤英, 魏庭贤. 从低品位含锌瓦斯泥制备活性氧化锌的研究 [J]. 浙江化工, 1999 (2): 47-48.

Lu F Y, Wei T X. Study on preparation of active zinc oxide from low grade zinc-containing gas mud[J]. Zhejiang Chemical Industry, 1999 (2): 47-48.

[29]Steer J M, Griffiths A J. Investigation of carboxylic acids and non-aqueous solvents for the selective leaching of zinc from blast furnace dust slurry [J]. Hydrometallurgy, 2013(11): 34-41.

[30]Ma A Y, Zheng X M, Li S, et al. Zinc recovery from metallurgical slag and dust by coordination leaching in NH₃-CH₃COONH₄-H₂O system[J]. Royal Society Open Science, 2018, 5(7): 180660.

[31]Ma A Y, Zheng X M, Zhang L B, et al. Clean recycling of zinc from blast furnace dust with ammonium acetate as complexing agents[J]. Separation Science & Technology, 2018,53(9): 1327-1341.

[32] 马爱元, 郑雪梅, 张利波, 等. 乙酸铵浸出高炉瓦斯灰中的锌 [J]. 环境工程学报, 2018, 12(5): 1547-1556.

Ma A Y, Zheng X M, Zhang L B, et al. Leaching zinc from blast furnace dust with ammonium acetate[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(5): 1547-1556.

[33]Vere J, Jakabsky T, and Lovás M, Zinc recovery from iron and steel making wastes by conventional and microwave assisted leaching [J]. Acta Montanistica Slovaca, 2011, 16(3): 185-191.

[34]Zhao Y, Gao J M, Yue Y, et al. Extraction and separation of nickel and cobalt from saprolite laterite ore by microwave-assisted hydrothermal leaching and chemical deposition [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2013, 20(7): 612-619.

[35]Samouhos M, Hutcheon R, and Paspaliaris I, Microwave reduction of copper(II) oxide and malachite concentrate [J]. Minerals Engineering, 2011, 24(8): 903-913.

[36]Hua Y, Cai C, and Cui Y, Microwave-enhanced roasting of copper sulfide concentrate in the presence of CaCO₃ [J]. Separation and Purification Technology, 2006, 50(1): 22-29.

[37]Schmuhl R, Smit J T, and Marsh J H, The influence of microwave pre-treatment of the leach behaviour of disseminated sulphide ore [J]. Hydrometallurgy, 2011, 108(3-4): 157-164.

[38]Lu T, Pickles C A, and Kelebek S, Carbothermal Reductive Upgrading of a Bauxite Ore Using Microwave Radiation [J]. High Temperature Materials and Processes, 2014, 31(2): 139-148.

- [39]Yoshikawa T, and Morita K, Carbothermic Reduction of MgO by Microwave Irradiation [J]. Materials Transactions, 2003, 44(4): 722-726.
- [40]Li W, Peng J H., Guo S H, et al. Pilot-scale production of titanium-tich materials using ilmenite concentrates as raw mateials by microwave reduction [J]. Metalurgia International, 2012, 17(7): 68-73.
- [41] 蒋永林, 刘秉国, 彭金辉, 等. 辉钼矿在微波场中的升温特性及焙烧测试 [J]. 矿冶, 2017, 26(3):40-45.
- Jiang Y L, Liu B G, Peng J H, et al. Test on temperature-rising behavior of molybdenite in microwave fields [J]. Mining and Metallurgy, 2017, 26(3):40-45.
- [42]Huang J H, and Rowson N A, An Application of Microwave Pre-oxidation in Improving Gold Recovery of a Refractory Gold Ore [J]. Rare Metals, 2000, 19(3): 170-171.
- [43]Madakkaruppan V, Pius A, Sreenivas T, et al. Influence of microwaves on the leaching kinetics of uraninite from a low grade ore in dilute sulfuric acid [J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 313: 9-17.
- [44]Yan H L, Chai B, Peng M, et al. A novel method to recover zinc and iron from zinc leaching residue [J]. Minerals Engineering, 2014, 55: 103-110.
- [45]Zhang Y C, Deng, J X. Chen J, et al. Leaching of zinc from calcined smithsonite using sodium hydroxide [J]. Hydrometallurgy. 2013, 131-132: 89-92.
- [46]彭万金. 超声波在冶金中的应用研究 [J]. 上海有色金属, 2008, 29(3):135-139.
- Peng W J. Application research of ultrasonic wave in metallurgy[J]. Shanghai Nonferrous Metals, 2008, 29(3):135-139.
- [47]Cravotto G., Gaudino E.C., and Cintas P., On the mechanochemical activation by ultrasound [J]. Chemical Society Reviews, 2013, 42(18): 7521-34.
- [48]Li J, Zhang L B, Peng J H, et al. Removal of Uranium from Uranium Plant Wastewater Using Zero-Valent Iron in an Ultrasonic Field [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2016, 48(3):744-750.
- [49]Yang K, Zhang L B, Lv C, et al. The Enhancing Effect of Microwave Irradiation and Ultrasonic Wave on the Recovery of Zinc Sulfide Ores [J]. High Temperature Materials and Processes, 2016, 36(6): 587-591.
- [50] 张玉梅, 李洁, 陈启元, 等. 超声波辐射对低品位氧化锌矿氨浸行为的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(5):960-966.
- Zhang Y M, Li J, Chen Q Y, et al. Influence of ultrasonic irradiation on ammonia leaching of zinc from low-grade oxide zinc ore[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(5):960-966.
- [51] 王欣. 微波碳热还原 - 超声波强化浸出富镉锌渣的研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- Wang X. Study on leaching rich indium and zinc slag by microwave carbon thermal reduction - ultrasonic[D]. Kunming :Kunming university of science and technology, 2013.
- [52] 郑雪梅. 超声波强化处理含锌、镉复杂物料的新工艺研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- Zheng X M. Study on new technology of ultrasonic treatment of complex materials containing zinc and indium[D]. Kunming :Kunming university of science and technology, 2015.
- [53]Brunelli K, and Dabalà M. Ultrasound effects on zinc recovery from EAF dust by sulfuric acid leaching [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2015, 22(4): 353-362.

Present Situation of Zinc Metallurgical Slags and Dusts Treatment Technology

Ma Aiyuan, Zheng Xuemei, Li Song, Zhu Shan, Zhang Xuyong

(School of Chemistry and Materials Engineering, Liupanshui Normol University, Liupanshui, Guizhou, China)

Abstract: The technologies in treating process and application of zinc metallurgical slags and dusts were summarized according to their characteristics of having high content of basic gangue and multi-metal symbiosis as well as one kind of metal with multi mineral phase, mainly emphasizing on the research and development prospects of the process of ammonia coordination leaching. Microwave and ultrasonic enhanced leaching technology was forecasted. It was pointed out that the development and research on microwave - ultrasonic enhanced treatment processing is an important developing direction of the high efficiency zinc extraction technology from steel metallurgy slag and dust.

Keywords: Zinc; Steel metallurgy slag and dust; Comprehensive utilization; Microwave; Ultrasonic