

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.06.016

含铅锌多金属固废的处理工艺创新及工业应用

吴卫国, 宋言

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要:针对我国含铅锌多金属固废存量、产量高、固废资源开发利用滞后等问题,通过总结整理我国铅锌产业发展前沿的相关资料,详细介绍了我国含铅锌多金属固废的处理工艺创新及工业应用,并对未来含铅锌多金属固废资源回收利用的工艺发展趋势进行了展望。现阶段,含铅锌多金属固废的处理工艺以直接熔池熔炼为主。未来短流程冶炼技术、射流熔炼电热还原一体化连续高效回收利用技术将成为趋势。

关键词:含铅锌多金属固废;熔池熔炼;金属再生;短流程;一体化连续冶炼

中图分类号:X758

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2021)06-0095-06

Treatment Process Innovation and Industrial Application of Lead-Zinc Polymetallic Solid Waste

WU Wei-guo, SONG Yan

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: To address large amount, high yield, and lagging development and utilization of lead-zinc polymetallic solid waste resources existing in China, relevant data of lead and zinc industry development frontier of China was summarized. Treatment process innovation and industrial application of lead-zinc polymetallic solid waste in China were introduced and future development trend of recycling and utilization of lead-zinc polymetallic solid waste resources was forecasted in detail. At present, the treatment process of lead-zinc polymetallic solid waste is mainly direct bath smelting. In future, short process smelting technology and integrated continuous high-efficiency smelting process will become the development tendency.

Key words: lead-zinc polymetallic solid waste; bath smelting; metal recycling; short process; integrated continuous smelting

我国十分重视铅锌等事关经济民生和国家战略的金属的生产。铅锌产量已经连续多年位居世界第一^[1-3]。近年来,我国铅锌产量已经超过世界总产能的40%^[4-6]。然而,在取得举世瞩目成就的同时,由于高品位铅锌矿产资源的枯竭、环保压力的增大以及产业成本的提高,我国传统铅锌产业的发展短板日益突出,发展后劲日渐不足。

含铅锌多金属固废在我国存量、产量高,如果不能及时处理,不仅会造成土地资源浪费,而且会严重污染环境^[7-9]。在我国,对于含铅锌多金属固废的回收水平较低,不足50%,美国、欧洲等发达国家已经达到80%以上,差距明显^[10-12]。在“十四五”规划的这一关键节点上,我国传统铅锌产业必须把握机会,在传统工艺流程和设备基础上进行革命与创新,

收稿日期:2020-12-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1903300,2019YFC1907300)

作者简介:吴卫国(1982-),男,湖北黄石人,硕士研究生,高级工程师;通信作者:宋言(1989-),男,河北邢台人,博士研究生,工程师

将含铅锌多金属固废“变废为宝”,从而实现我国传统铅锌产业的跨越式发展。

1 含铅锌多金属固废简介

现阶段,我国每年产生的含铅锌多金属固废种类主要包括^[13-21]:1)冶炼行业生产过程中产生的各种废渣、废料和低品位矿石,如有色冶炼行业产生的含铅烟尘、含铅锌废渣料和锌浸出渣,钢铁行业产生的含锌钢厂烟灰,铅锌氧化矿,低品位含铅锌尾矿等;2)铅锌加工消费时产生的含铅固废如废铅膏、铅玻璃和铅合金等,以及诸如黄铜、镀锌渣、锌材料加工半成品废料、化学工业锌废料等含锌二次物料。

我国是有色金属生产大国,有色金属冶炼过程中产出的含铅烟尘、含铅锌废渣料和锌浸出渣等含铅锌多金属固废每年可达百万吨。但是,由于产区分散,很难集中,加之成分复杂,有价元素含量较低,同时缺乏高效的处理方法和工艺,从而造成处理效率极低、成本较高、资源浪费和环境污染严重。钢铁行业产生的含锌钢厂烟灰,是在高炉炼铁和再生冶炼废钢铁时,其外表镀锌层中的锌元素以气态挥发而进入烟气,烟气经干法或湿法收尘而获得的锌再生资源。根据“全球废钢网”报道,仅2019年,我国废钢资源产生总量就高达2.4亿t,估算产生废钢烟尘量为200多万t,其中所含金属锌的量为40多万t。令人遗憾的是,我国在处理回收含锌钢厂烟灰方面与日本(73%)、西欧(87%)和美国(97%)等发达国家还存在较大差距。对于铅锌氧化矿、低品位含铅锌尾矿等,矿石性质复杂,极大增加了选冶难度,由于铅锌含量均较低,无法采用传统工艺进行直接冶炼,利用率较低。

我国每年含铅固废(废铅膏、铅玻璃和铅栅等)的产量高达500万t。但处理工艺落后,环境污染严重,无法满足现有的超低排放、大规模、低成本、高回收率的资源化利用要求。在全球范围来看,含锌二次物料(黄铜、镀锌渣、锌材料加工半成品废料、化学工业锌废料等)已成为锌生产的重要原料,全球30%的锌来源于含锌二次物料,但是,由于我国含锌二次物料利用起步较晚,再生锌供应水平较低,市场潜力巨大。

2 含铅锌多金属固废的处理工艺创新及工业应用

2.1 含铅锌多金属固废的底吹熔炼工艺

底吹熔炼技术首先在21世纪初被成功应用于

铅精矿冶炼^[22]。中国恩菲工程技术有限公司与国内冶炼企业合作,成功开发了“氧气底吹熔炼—底吹熔融还原—富氧烟化吹炼三连炉工艺”,采用该工艺可联合处理铅膏等含铅锌多金属固废和铅精矿。利用氧气底吹炉进行铅膏等含铅锌多金属固废的熔化脱硫造渣,底吹熔融还原炉进行还原,富氧烟化吹炼用于其他有价金属的回收。采用该工艺处理铅膏等含铅锌多金属固废,铅的回收率可达98.5%,烟尘率10%~13%,还原炉渣含铅1.5%,终渣含铅0.3%。

2.2 含铅锌多金属固废的侧吹熔炼工艺

侧吹浸没燃烧熔池熔炼法是由我国自主研发的一种采用多通道侧吹喷枪以亚音速向熔池中喷入富氧空气和燃料(天然气、煤气、粉煤等)来达到强化熔池熔炼目的的工艺^[23]。

2012年,湖北某铅锌冶炼企业与中国恩菲工程技术有限公司合作,成功设计并投产国内第一条用于处理未脱硫铅膏的连续熔化侧吹还原炉生产线。经过投产以来的不断摸索与改进,业已形成含铅锌多金属固废连续熔池熔炼技术。该技术主要包括配料系统、连续熔化侧吹还原熔炼系统、再生金属精炼系统和烟气环保回收系统。采用该工艺铅回收率大于98.5%,锑、锡回收率大于95%,硫利用率大于98.5%,弃渣含铅小于1%,属于一般固废。

目前国内已有多家知名大型企业升级改造项目采用侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术处理锌浸出渣、铅锌氧化矿等含铅锌多金属固废。

云南某冶炼厂采用该技术搭配处理铅锌氧化矿和锌浸出渣。该技术的优势主要表现在:1)侧吹喷枪可直接向熔体内部喷射燃料,富氧浓度高、热利用率高;2)作业率高,年作业时间可达300~330d;3)安全性好;4)喷枪寿命长;5)烟尘率低;6)环保好;7)有价金属综合回收率高,冶炼弃渣无害化。

甘肃某铅锌冶炼厂采用侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术进行渣处理,年处理由热酸浸出—黄钾铁矾除铁工艺产生的14万t含锌铅银渣,该工艺选用1台13m²侧吹浸没燃烧熔池熔炼炉,主要设计生产指标:工作时间310d/a、处理铅银渣(干基)~14万t/a、粉煤消耗量~3.8万t/a、浓度88%氧气消耗量~3540万m³/a、氧化锌烟尘产量1.23万t/a

2.3 含铅锌多金属固废回转窑挥发回收技术

回转窑具有生产能力大、机械化程度高、维护及操作简单等优点。冶金过程中的各种含铅锌及挥发性元素的渣料,如含锌氧化矿、含锌二次物料等,配以少量的还原剂在回转窑内进行还原挥发,以氧化

物形态提取铅、锌等^[24]。

2016年,中国恩菲工程技术有限公司为新疆某铅锌冶炼厂设计了60万t/a的铅锌冶炼项目。该项目根据某矿床碳酸盐型铅锌氧化矿中铅锌品位均较低(含锌25%左右,含铅5%左右)的特点,采用回转窑挥发,富集的铅锌氧化物烟尘选用湿法浸出—溶液净化—电解—熔铸后产出锌锭,设计规模为年生产50万t电锌和10万t电铅。该工艺共设置4台Φ6.2 m×85 m回转窑及其配套的余热锅炉及收尘系统。设计的主要生产指标:工作时间330 d/a、原矿处理量240.9万t/a(干基)、其他渣处理量19万t/a(干基)、窑头鼓风机富氧浓度26%、烟煤(干基)消耗量~51万t/a、焦炭(干基)消耗量~21.86万t/a、氧化锌烟尘产量~96.13万t/a、窑渣产量~108.9万t/a。

2.4 含铅锌多金属固废的新型烟化炉贫化工艺

传统烟化炉工艺存在能耗高、炉寿短、间断作业等问题^[25-26],中国恩菲工程技术有限公司为克服上述问题创新了烟化炉炉体结构,上部采用膜式壁结构,下部采用新型材料,底部采用炉缸结构。印度某厂将原有的热酸浸出—黄钾铁矾工艺改造为常规浸出工艺,浸出车间年处理焙砂37万t,产出的16万t(干基)含锌浸出渣采用新型烟化炉贫化工艺进行处理。该项目选用1台Φ2.2 m×18 m的干燥窑和2台18 m²烟化炉,其主要的设计生产指标如表1所示。

表1 印度某厂项目主要的设计生产指标

Table 1 Main design and production indexes of project in India

工序	指标名称	单位	指标	备注
干燥窑干燥	作业时间	d/a	350	
	浸出渣量	万t/a	16	
	粉煤消耗	kt/a	~6.4	干基
	粉煤率	%	4	干基
烟化炉烟化	作业时间	d/a	310	
	鼓风强度(标态)	m ³ /(m ² ·d)	34	
	粉煤量	t/a	~11.03	干基
	粉煤率	%	68.89	
	烟尘率	%	29.95	干基
	炉渣量	t/a	~12	

2.5 含铅锌多金属固废的转底炉直接还原技术

采用转底炉工艺将含铅锌多金属固废配加还原剂、添加剂等制成含碳球团,在1 200~1 400℃的还原气氛下将球团金属化并将其首先还原成金属单质,然后易挥发的金属单质如Pb、Zn等挥发后再氧化为对应的氧化物予以富集回收,不易挥

发的如Fe元素等留于渣中,可外售亦可磁选回收金属铁^[27]。

甘肃某厂含锌铜尾矿综合利用项目以含锌铜渣选尾矿为原料,采用上述工艺,设计年处理能力80万t,年产还原铁粉块27.6万t,氧化锌粉3.4万t,蒸气44.9万t。项目于2015年4月中旬开工建设,2016年12月底,工程主体建设完工,1[#]转底炉系统投料试生产。2017年6月,2[#]转底炉系统调试完成。2017年,进行多次试生产,试生产中暴露了系统存在的许多问题,并进行了相应的整改完善。2017年9月,配加天然气和淘洗磁选工艺改造后,转底炉实现了连续稳定生产,金属化率平均达到83.26%,铁粉全铁品位达到78%~84%,最高86.78%,高品位氧化锌粉含锌达63%以上,锌回收率可稳定控制在80%以上。

2.6 含铅锌多金属固废的CR(Comprehensive Recovery)炉短流程冶炼技术

“CR炉短流程冶炼技术”是由中国恩菲工程技术有限公司在第二代底吹炼铜技术基础上的再升级^[28]。通过1台熔炼炉、2台造铜炉和1台CR炉有机连接,形成铜冶炼与铅锌短流程回收的工艺。液态铜熔炼渣、碳质还原剂与添加剂一起进入CR炉进行还原熔炼,得到合金铜铈和无害尾渣。与此同时,锌、铅等易挥发金属被还原挥发进入烟气,形成含ZnO、PbO烟尘,从而得到富集并回收。目前,该技术的工业化进程正在稳步推进中,已经进行了150 kg级工业试验,尾渣中Cu含量可降至0.3%以下,Pb含量可降至0.02%以下,Zn含量可降至0.01%。

2.7 含铅锌多金属固废的射流熔炼电热还原处理工艺

射流熔炼电热还原处理工艺是通过整合现有最先进火法冶炼工艺的技术优势,提出的一种全新的处理含铅锌多金属固废的工艺方法^[29]。如图1所示,该方法创新了炉型结构,采用射流熔炼与电热还原分区冶炼但组合成一体的设计结构,通过在同一炉体中设立至少一个射流熔炼区和至少一个电热还原区,进行含铅锌多金属固废的高效冶炼。采用该工艺在射流熔炼区将含铅锌多金属固废进行熔化造渣,电热还原区则通过超高温及强还原气氛进行深度还原,所产终渣可以作为生产矿物纤维或建筑材料的原料,最终实现含铅锌多金属固废的完全、立体回收,达到“零排放”的目的。

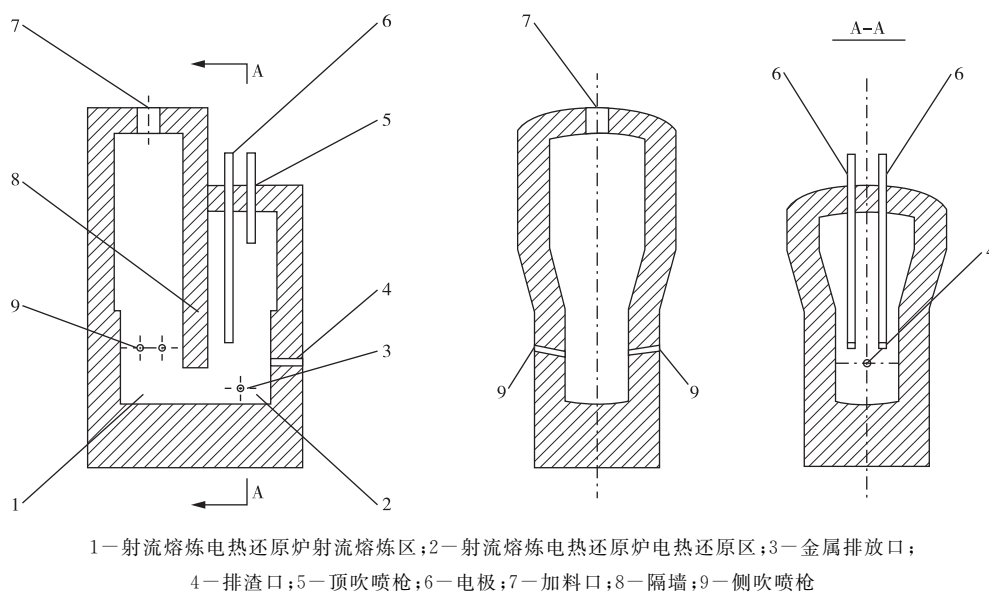


图1 射流熔炼电热还原炉

Fig. 1 Schematic diagram of injection smelting and electrothermal reduction furnace

2.8 含铅锌多金属固废的全湿法处理工艺

2.8.1 含铅锌多金属固废的氯盐体系全湿法处理工艺

含铅锌多金属固废的氯盐体系全湿法处理工艺以氯化钙和氯化钠为浸出剂,将硫酸铅转化为氯化铅,过滤分离后的氯化铅液用锌片置换得海绵铅。海绵铅压团送铅电解精炼。置换后液经萃取与反萃,反萃液返回锌电解,锌在系统中循环^[30-33]。

2016年7月,中国恩菲工程技术有限公司参与设计,云南某有色金属股份有限公司所建世界第一座产业化湿法炼铅厂顺利投产,标志着含铅锌多金属固废的氯盐体系全湿法处理工艺的产业化。该厂采用该工艺处理原堆存的锌浸出渣(含铅<20%)和钢厂烟灰浸锌后的浸出渣(含铅15%~20%),设计规模为年产粗铅3万t。采用该工艺,1t锌可置换3t海绵铅,每生产1t海绵铅耗电1200kWh,每吨海绵铅的加工成本为3200元。

2.8.2 原子经济法铅循环利用工艺

原子经济法铅循环利用工艺是由北京化工大学研发的一种处理铅废旧电池的铅膏泥,直接生产高纯氧化铅的工艺^[34-35]。2016年8月,开始了浙江某集团公司万吨级“原子经济法铅循环利用”中试线的设计评审工作。目前已完成实验室和半工业试验。

该工艺采用NaOH等碱性溶液将膏泥中的PbSO₄转化为氧化铅,并生成Na₂SO₄,其中部分以硫酸钠晶体析出,完成膏泥脱硫过程。最终能否与现有火法处理工艺竞争,还有待示范厂投产验证。

其他湿法处理含铅锌多金属固废工艺^[31,34-35],

诸如脱硫转化—还原浸出—电积工艺、硫化转化—氧化浸出—电积工艺、氯盐浸出—电积工艺、固相电解还原工艺、直接转化生产电池材料工艺等,一直是国内外的研究热点,但由于受生产规模和关键装备的限制,大规模工业生产及推广应用尚存在较大困难。

3 结语

1)含铅锌多金属固废存量高,产量高,以“十四五”规划为契机,创新并开发新的铅锌工业产业化工艺流程,实现含铅锌多金属固废的完全立体化回收已经迫在眉睫。

2)现阶段,含铅锌多金属固废的工业技术创新主要集中在以熔池熔炼(底吹、侧吹、烟化等)为代表的直接熔炼工艺。

3)针对铅锌氧化矿、含锌钢厂烟灰等含铅锌多金属固废,CR炉短流程冶炼技术具有较强技术创新与工业化应用潜力。

4)通过采用射流熔炼电热还原处理工艺将含铅锌多金属固废的熔池熔炼、氧化脱硫、深度还原与综合回收等工艺流程进行整体布局与设计,开发一体化连续高效处理含铅锌多金属固废的设备与工艺已经成为未来铅锌行业工艺技术创新的又一重要发展趋势。

5)随着湿法工艺的进步,硫酸铅等全湿法处理工艺取得阶段性突破。

参考文献

[1] 毛建素,陆钟武.关于铅产量变化对废铅资源的影响的

- 研究[J]. 中国资源综合利用, 2003, 21(7): 38-41.
- MAO J S, LU Z W. Study on the influence of lead production change on waste lead resources[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2003, 21(7): 38-41.
- [2] 张小红. 环保高压下铅锌产量增速放缓——2017年铅锌周 CEO 高峰论坛发言集锦[J]. 中国有色金属, 2017(24): 40-41.
- ZHANG X H. The growth rate of lead and zinc production slowed down under the high pressure of environmental protection: Summary of CEO summit forum on lead and zinc week in 2017 [J]. China Nonferrous Metals, 2017(24): 40-41.
- [3] 蒋绍平, 李星, 陈子聪. 中国锌资源供应形势及投资选区分析[J]. 云南冶金, 2019, 48(1): 9-13.
- JIANG S P, LI X, CHEN Z C. The supply situation and investment selection analysis of zinc resources in China[J]. Yunnan Metallurgy, 2019, 48(1): 9-13.
- [4] 代涛, 陈其慎, 于汶加. 全球锌消费及需求预测与中国锌产业发展[J]. 资源科学, 2015, 37(5): 951-960.
- DAI T, CHEN Q S, YU W J. Global zinc consumption and demand forecast and development of China's zinc industry[J]. Resources Science, 2015, 37(5): 951-960.
- [5] 鲁欣. 中国锌产业发展综述[J]. 中国贸易救济, 2010(12): 27-28.
- LU X. Summary of zinc industry development in China[J]. China Trade Remedy, 2010(12): 27-28.
- [6] 陈进, 吴爱祥, 王洪武. 世界与我国铅锌产量和消费量的重构相空间混沌预测[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2007, 21(3): 23-27, 32.
- CHEN J, WU A X, WANG H W. International and domestic lead-zinc output and consumption prediction on reconstructing phase space of chaos [J]. Journal of University of South China (Science and Technology), 2007, 21(3): 23-27, 32.
- [7] 刘晓媛, 刘品祯, 杜启露, 等. 地质高背景区铅锌矿废弃地土壤重金属污染评价[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(2): 76-82.
- LIU X Y, LIU P Z, DU Q L, et al. Evaluation of heavy metal pollution in soil of lead-zinc mine wasteland with geological high background [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(2): 76-82.
- [8] LIU Q, ZHAO G D, ZHAO Y C. Regeneration and purification of spent electrolyte from sodium hydroxide zinc metallurgy using causticisation[J]. Hydrometallurgy, 2014, 144(4): 107-113.
- [9] MUSHAK P. A brief early history of lead as an evolving global pollutant and toxicant[J]. Trace Metals & Other Contaminants in the Environment, 2011, 10(1): 23-39.
- [10] MITSUNE Y, SATOH S. Lead smelting and refining at Kosaka smelter[J]. Journal of Mining and Materials Processing Institute of Japan, 2007, 123(12): 630-633.
- [11] 李文昌, 彭宇伟, 王地, 等. 浅析中国再生锌现状及发展前景[J]. 资源再生, 2020(3): 40-41.
- LI W C, PENG Y W, WANG D, et al. Analysis of the current status and development prospects of recycled zinc in China[J]. Resource Recycling, 2020(3): 40-41.
- [12] 胡长平. 对疫情后主要有色金属产业发展的思考——梳理 2001 年~2018 年中国有色金属工业年鉴数据体会[J]. 中国有色金属, 2020(6): 42-47.
- HU C P. Thoughts on the development of major nonferrous metal industry after the epidemic review of China nonferrous metal industry yearbook data from 2001 to 2018[J]. China Nonferrous Metals, 2020(6): 42-47.
- [13] 刘大钧. 铅冶炼企业烟尘中铅的排放特性研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(10): 66-69.
- LIU D J. Study on lead emission characteristic from dust of lead smelter[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2016(10): 66-69.
- [14] 叶恒棣, 周志安, 范晓慧, 等. 一种市政及冶金难处理固废协同资源化利用的工艺: CN201710743661. 7[P]. 2019-03-05.
- YE H D, ZHOU Z A, FAN X H, et al. A process for coordinated resource utilization of municipal and metallurgical refractory solid waste; CN201710743661. 7[P]. 2019-03-05.
- [15] 李敦华. 火法富集—湿法分离工艺从固废资源中回收锌及其他有价金属的探究[J]. 中国有色冶金, 2020, 49(1): 8-12, 33.
- LI D H. Exploration of recovery of zinc and other valuable metals from solid waste resources by pyrometallurgy enrichment-hydrometallurgy separation process[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2020, 49(1): 8-12, 33.
- [16] 石升友, 马爱元, 李国江, 等. 锌冶金固废渣综合利用现状研究[J]. 世界有色金属, 2019(13): 7-8.
- SHI S Y, MA A Y, LI G J, et al. Research on comprehensive utilization status of zinc metallurgical solid waste slag[J]. World Nonferrous Metals, 2019(13): 7-8.
- [17] 韩健. 关于钢铁厂含锌固废处理工艺对比研究[J]. 冶金管理, 2020(1): 214, 216.
- HAN J. Comparative study on treatment process of solid waste containing zinc in iron and steel plant[J]. China Steel Focus, 2020(1): 214, 216.
- [18] 赵杰. 钢铁厂含锌固废处理工艺对比分析[J]. 世界有色金属, 2018(15): 283-285.
- ZHAO J. Process analysis of resource utilization on

- zinc-borne dust and sludge in iron and steel plant[J]. World Nonferrous Metals, 2018(15):283-285.
- [19] 王建国,李玮,张世珍. 柴北缘锡铁山矿区尾矿铅锌分布特征及污染防治探讨[J]. 有色金属(矿山部分), 2020,72(1):84-87.
- WANG J G, LI W, ZHANG S Z. Discussion on pollution control and distribution of lead and zinc in mine tailings in Xitieshan mining area, northern Qaidam[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2020, 72(1):84-87.
- [20] 冯朝晖,赵峰,吕敏敏,等. 环保新常态下锌冶炼行业应对措施[J]. 世界有色金属, 2020(2):27-28.
- FENG Z H, ZHAO F, LV M M, et al. Countermeasures of zinc smelting industry under the new normal environment[J]. World Nonferrous Metals, 2020(2): 27-28.
- [21] 唐朝波. 有色冶炼高铁含铅固废清洁处理与铁回收技术及示范[J]. 中国科技成果, 2015(6):17-18.
- TANG C B. Clean treatment of lead-containing solid waste and iron recovery technology and demonstration of non-ferrous smelting high iron[J]. China Science and Technology Achievements, 2015(6):17-18.
- [22] 李利丽,赵振波,陈选元. 双底吹熔炼铅膏生产再生铅的工业实践[J]. 资源再生, 2019(1):58-60.
- LI L L, ZHAO Z B, CHEN X Y. Industrial practice of producing recycled lead by double bottom blowing and smelting lead paste[J]. Resource Recycling, 2019(1):58-60.
- [23] 李东波,陈学刚,王忠实. 现代有色金属侧吹冶金技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 2019:1-38.
- LI D B, CHEN X G, WANG Z S. Modern Side-blown Smelting Technology for Nonferrous Metals [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2019:1-38.
- [24] 赵杨,邢杰,安俊菁,等. 回转窑还原焙烧锌冶炼污泥与烟尘回收研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2017(2):10-14.
- ZHAO Y, XING J, AN J J. et al. Study on reduction roasting of zinc-smelting-sludge in rotary kiln and dust recycling [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2017(2):10-14.
- [25] 蒋继穆. 我国锌冶炼现状及近年来的技术进展[J]. 中国有色冶金, 2006,35(5):19-23.
- JIANG J M. Current status and recent technical progress of zinc smelting in China [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2006,35(5):19-23.
- [26] 李东波,蒋继穆. 国内外锌冶炼技术现状和发展趋势[J]. 中国金属通报, 2015(6):41-44.
- LI D B, JIANG J M. Current status and development trend of zinc smelting technology in China and abroad[J]. China Metal Bulletin, 2015(6):41-44.
- [27] 曹晓恩,徐洪军,郭玉华,等. 铁矾渣直接还原—磁选—反浮选工艺探索[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(6):13-15.
- CAO X E, XU H J, GUO Y H, et al. Technical exploration of jarosite residue with direct reduction-magnetic separation-reverse flotation [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2016(6):13-15.
- [28] 李东波,梁帅表,郭亚光. 高效环保短流程炼铜新技术——“一担挑”炼铜法[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(3):1-5.
- LI D B, LIANG S B, GUO Y G. Yidantiao copper smelting process: A new, high-efficiency and eco-friendly short circuit copper production technology[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2018(3):1-5.
- [29] 李东波,黎敏,邓兆磊,等. 冶炼锌精矿和含锌二次物料的系统及方法:CN111424175A[P]. 2020-07-17.
- LI D B, LI M, DENG Z L, et al. System and method for smelting zinc concentrate and secondary materials containing zinc:CN111424175A[P]. 2020-07-17.
- [30] 舒毓璋. 湿法炼铅的创新和产业化应用[J]. 中国金属通报, 2016(12):48.
- SHU Y Z. Innovation and industrial application of lead hydrometallurgy[J]. China Metal Bulletin, 2016(12):48.
- [31] 蒋继穆. 中国铅锌冶炼技术盘点[J]. 中国有色金属, 2012(3):32-33.
- JIANG J M. The lead and zinc smelting technology inventory of China[J]. China Nonferrous Metals, 2012(3): 32-33.
- [32] 陈亚州,汤伟,吴艳新,等. 国内外再生铅技术的现状及发展趋势[J]. 中国有色冶金, 2017,46(3):17-22.
- CHEN Y Z, TANG W, WU Y X, et al. Present situation and development trend of secondary lead process at home and abroad [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2017,46(3):17-22.
- [33] 诸建平. 废铅酸蓄电池生产再生铅的工艺工程设计[J]. 杭州化工, 2011,41(3):31-35.
- ZHU J P. Process engineering design of regenerated lead from waste lead-acid battery [J]. Hangzhou Chemical Industry, 2011,41(3):31-35.
- [34] 王成彦,邱定蕃,徐盛明. 金属二次资源循环利用意义、现状及亟需关注的几个领域[J]. 中国有色金属学报, 2008,18(增刊1):359-366.
- WANG C Y, QIU D F, XU S M. Significance, status and important issues for recycling utilization of metal secondary resource in China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008,18(Z1):359-366.
- [35] 王海北. 我国二次资源循环利用技术现状与发展趋势[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(9):1-11.
- WANG H B. Status and prospect on recycling technologies of secondary resources in China[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(9):1-11.