

冶炼工艺

锌冶炼先进工艺技术及应用实践

宋言, 许良, 吴卫国

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 中国已经连续多年成为全球最大的锌生产国和消费国, 随着节能环保压力的增大与资源回收利用要求的提高, 推进锌行业技术进步与工艺创新已经势在必行。本文在系统概述我国锌工业冶炼工艺状况的基础上, 对近十年的锌冶炼工艺技术创新与应用实践成果进行了总结。目前现有的湿法炼锌工艺正逐步回归常规浸出流程, 朝着设备大型化、浸出渣无害化的方向发展, 侧吹浸没燃烧熔池熔炼等渣处理技术发展迅速; 热酸浸出-赤铁矿除铁工艺具有较大发展潜力, 已经实现工业化; 全湿法加压富氧浸出工艺生产成本仍然高于常规湿法工艺, 其适合于硫酸需求量小、运输成本高的企业; 新型高效火法炼锌工艺可以有效利用熔渣显热、降低能耗及碳排放, 同时工艺集中程度高, 缩短了工艺流程, 无论在原生矿冶炼方面还是在含锌二次物料的处理回收方面已经成为未来的发展趋势。

[关键词] 锌冶炼; 节能环保; 碳排放; 火法炼锌; 湿法炼锌; 含锌二次物料; 高效冶炼; 绿色冶金

[中图分类号] TF813

[文献标志码] A

[文章编号] 1672-6103(2022)01-0023-07

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2022.01.004

锌在我国有色金属消费中仅次于铜和铝^[1], 随着经济的进一步发展, 对金属锌的强劲需求还将持续相当长的一段时间^[2-3]。根据中国有色金属工业协会统计, 2020年我国金属锌总产量642.5万t, 已连续19年稳居世界第一。

2020年3月发布的《铅锌行业规范条件》中规定:“锌冶炼企业, 含浸出渣火法处理的电镀锌锭工艺综合能耗须低于860千克标准煤/吨, 阴极板面积为1.6m²及以下的电镀锌直流电耗应低于2900kW·h/t, 阴极板面积为1.6m²以上的电镀锌直流电耗应低于

2900kW·h/t。含锌二次资源企业, 火法富集工序综合能耗须低于1200千克标准煤/吨金属锌, 湿法锌冶炼工序电镀锌锭工艺综合能耗须低于900千克标准煤/吨。”该规范为现有锌冶炼企业的资源综合利用率和节能环保水平提出了更高的要求, 我国锌行业面临既要保证市场需求提高产能, 又要节能减碳降低污染的双重压力。加快锌产业转型升级, 推动锌行业高质量发展, 促进锌行业技术进步与工艺创新已经迫在眉睫。

本文对我国锌冶炼状况进行系统概述, 着重对近十年的工业技术创新与应用实践成果进行阐述, 并对锌冶炼工业技术创新方向和趋势进行了展望。

1 我国锌冶炼工艺概述

锌冶炼主要分为火法和湿法两种工艺^[4-6]。

火法工艺历史悠久, 我国古代便通过将炉甘石(菱锌矿)与炭一起混装在封闭的泥罐中的方法制取单体金属锌。近代以来, 多以竖罐蒸馏法炼锌。至现代, 竖罐蒸馏炼锌法已趋淘汰, 我国仅保留了葫

[收稿日期] 2021-10-12

[作者简介] 宋言(1989—), 男, 河北邢台人, 博士研究生, 工程师, 主要从事有色金属冶金领域设计及技术研发工作。

[通讯作者] 许良(1982—), 男, 湖南长沙人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事有色金属冶金领域咨询与设计工作。

[基金项目] 国家重点研发计划“复杂铅基多金属固废协同冶炼技术与大型化装备”(2019YFC1907300)和“危险渣尘综合利用与安全处置关键技术”(2018YFC1903304)联合资助。

[引用格式] 宋言, 许良, 吴卫国. 中国锌冶炼工业技术创新与应用实践[J]. 中国有色冶金, 2022, 51(1): 23-29.

芦岛锌厂等少数竖罐炼锌生产线,其工艺也被进行了大规模改进与创新,如开发了高温沸腾焙烧炉、自热焦结炉、大型蒸馏炉等新技术;电炉炼锌技术受限于电炉规模在我国应用较少;帝国熔炼法(ISP)又称密闭鼓风炉炼锌法,在我国曾是主要的火法炼锌技术,但由于环保能耗等问题也在逐步被淘汰,目前仅存4条ISP生产线。目前火法炼锌占我国锌总产能不足20%。

我国锌产能以湿法炼锌工艺为主,占总产量的80%以上^[7]。精矿焙烧→焙砂浸出→浸液净化→净液电积→铸锭为湿法炼锌主要工艺。根据浸出方法的不同分为传统低温浸出和热酸浸出,其中热酸浸出根据不同的除铁方式又分为黄钾铁矾工艺、针铁矿工艺、赤铁矿工艺、喷淋除铁工艺等^[8-9]。目前,湿法炼锌工艺还有全湿法炼锌工艺,包括常压富氧直接浸出工艺、加压富氧直接浸出工艺、氧化矿直接浸出-萃取工艺等^[10-12]。

2 常规湿法浸出先进工艺技术及应用实践

常规湿法浸出工艺的标准流程为精矿焙烧→浸出→净液→电积→电锌产品,根据湿法浸出方法的不同分为常规低温湿法浸出和高温高酸浸出。由于精矿中的ZnS在常温常压下难以直接用稀硫酸进行浸出,所以需要通过焙烧将其尽可能转化为易浸出的ZnO。

近年来,由于除铁技术的进步,湿法浸出工艺曾一度朝着高温高酸浸出工艺发展,但随着近几年国家对固体废弃物管理与回收要求的进一步提高,环保压力不断增大,高温高酸浸出工艺所产浸出渣(除赤铁矿工艺)被列为危险固废,不可直接堆存,必须采用火法工艺进行无害化处理。因此,现有锌冶炼行业正回归常规浸出工艺,并朝着设备大型化和浸出渣无害化处理方向发展。

2.1 锌精矿流态化焙烧设备大型化

流态化焙烧是一种强化焙烧过程的方法,是目前精矿焙烧应用最广泛的一项技术。流态化焙烧过程中,使空气自下而上地吹过固体炉料层,而且操作气流速度应大于全部正常颗粒的临界流化速度,小于物料中某一级细颗粒(按工艺过程对烟尘率的控制要求决定)的带出速度,即达到使固体物料被风吹动相互分离,并在一定的高度范围内作不停复

杂运动的状态^[13]。

锌精矿流态化焙烧炉具有气-固间传质传热速率快、层内温度均匀、产品质量好、流态化层与冷却器壁间的传热系数大、生产率高、操作简单、便于实现生产连续化和自动化等优点,是锌湿法冶炼的关键设备。现阶段,锌精矿流态化焙烧炉在工业上的创新与实践趋于大型化^[14-15]。

中国恩菲工程技术有限公司基于有限元分析和计算,设计研发了152 m²的锌流态化焙烧炉,炉体采用耐火材料整体浇筑,已于2016年底在甘肃白银某铅锌冶炼厂投产。152 m²锌流态化焙烧系统是目前世界锌冶炼领域规格最大的焙烧系统,设计年处理精矿最大量为36万t,焙烧矿产出率约90%,含锌约17万t,产出烟气流8.5×10⁴ m³/h。152 m²锌焙烧炉的主要技术参数如表1所示。

表1 152 m²锌焙烧炉的主要技术参数

参数项	参数值	参数项	参数值
焙烧强度/(t/m ² ·d ⁻¹)	7~8	拱顶面积/m ²	240
流化床段直径/m	14	炉膛面积扩大比	1.6
面积/m ²	152	流化床高度/m	1.2
炉膛直径/m	18		

2019年2月,由中国恩菲工程技术有限公司设计的2台152 m²的锌精矿流态化焙烧炉在湖南某冶炼厂投入生产,该项目年产锌30万t,配套建设副产硫酸60万t/a的两套硫酸系统,并综合回收各种有价金属。该工艺选用2台152 m²流态化焙烧炉,搭配4台流态化冷却器、3台220 m²多膛炉、1台Φ3 m×22 m干燥窑和2台Φ4.5 m×68 m回转窑。

2.2 锌冶炼新型电解槽极板大型化

锌的电解沉积是常规湿法浸出工艺的重要工序,该工序采用直流电将硫酸锌溶液中的锌离子电解沉积,在阴极板析出金属锌。受装备水平限制,最早用于工业化的阴极板有效面积为1.13 m²,二十世纪六十年代,比利时老山公司(Vieille-Montagne)下属的巴伦冶炼厂(Balen)(现属于新星公司(Nyrstar))投入使用了有效面积为2.6 m²的“大”(Jumbo)阴极板,七十年代末开始使用有效面积为3.2 m²的“超大”(Superjumbo)阴极板。自此,该技术在世界范围内得到应用推广。目前,墨西哥MMP公司(Mexico Peñoles New Lead Plant)锌电解槽阴极板有效面积已达6.4 m²,成为世界之最^[16]。

锌冶炼新型电解槽极板的大型化具有以下优势:①极大减少了电解槽数量,相同产能规模下电解槽数量减少60%;②极大减少了厂房的占地面积,降低了投资;③比较容易实现电解液深度净化、长周期电解与机械化剥锌;④改善了操作环境;⑤减少了劳动定员,劳动生产率成倍提高。

二十一世纪,我国逐步成为世界第一产锌大国,国内锌冶炼行业整体技术和装备水平不断提高,但与世界先进水平相比仍存在较大差距。二十一世纪初,有效面积为 $1.13 \sim 1.6 \text{ m}^2$ 的小极板、人工剥锌工艺依然在我国锌冶炼企业普遍应用。2005年,我国内蒙古紫金矿业有限公司、株洲冶炼厂相继引进了自动剥锌机,阴极有效面积提高到 2.6 m^2 。2007年,丹霞冶炼厂首先引进有效面积为 3.2 m^2 的大极板新型电解槽,并于2009年投产。随后,国内各大锌冶炼厂开始引进该技术。表2为我国引进有效面积为 3.2 m^2 的大极板新型电解槽的主要企业^[33-35]。

表2 我国引进有效面积为 3.2 m^2 的大极板新型电解槽的主要企业

企业名称	引入年份	行车/台	剥锌机/台套	刷洗机/套
中金岭南丹霞冶炼厂	2007	2+2	2	1(双片)
江铜九江铅锌冶炼厂	2009	2	2	2(单片)
驰宏锌铅会泽冶炼分公司	2009	2+2	3	1(双片)+1
驰宏矿业股份有限公司	2009	2+2	3	1(双片)+1
西部矿业股份有限公司	2011	2+2	3	1(双片)+1
云锡文山铅铜冶炼有限公司	2016	2+2	2	2

目前,我国锌冶炼的电解沉积工艺正朝着大极板、全自动化、全部国产化等方向稳步前进,截至2020年,我国采用 3.2 m^2 大极板电积工艺的产能已经超过70万t。

2.3 常规湿法浸出工艺浸出渣无害化处理技术

随着环保压力的增大,锌常规湿法浸出工艺所产生的浸出渣采用火法工艺进行无害化处理已经成为当前锌冶炼的工业化趋势。

2.3.1 奥斯麦特顶吹法

奥斯麦特顶吹法是近年来发展迅速的强化熔池熔炼技术,其在多种有色金属冶炼、钢铁冶炼及冶炼残渣回收处理生产方面都有涉及。该技术采用顶吹喷枪垂直插入熔池液面以下,通过喷吹空气或富氧空气、还原性气体、燃料和熔剂等方式使熔池剧烈搅动,加速熔池内的传热传质过程。该技术具有原

料适应性强、备料简单、操作灵活、维护方便等特点。

奥斯麦特技术处理锌浸出渣由韩国温山冶炼厂第一个投产使用。2013年内蒙古某锌冶炼有限公司成为我国第一个引进该技术处理锌浸出渣的企业,并在外方提供的炉型结构和基础上做了一定的改进,采用奥斯麦特顶吹法和烟化炉贫化工艺处理锌浸出渣。该项目入炉物料含锌在8%左右,已于2015年10月投产使用,年处理浸出渣规模16万t。该奥斯麦特炉是目前世界上处理锌浸出渣的最大顶吹炉,奥斯麦特顶吹工段主要技术经济指标如表3所示。

表3 奥斯麦特顶吹工段的主要技术经济指标

指标名称	数量	备注
年工作日/d	300	—
年处混合渣量/ $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$	161 000	干基
氧气浓度/%	90	单台
氧气消耗/ $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	15 000	—
渣含 Zn/%	3.0	—
渣含 Pb/%	0.2	—
耗煤率/%	66.24	—

2.3.2 烟化炉贫化法

烟化炉贫化法适用于从炉渣中提取锌、铅、锡等易挥发性金属。采用该方法在高温条件下,将熔融炉渣与空气和粉煤的混合物进行还原吹炼,得到易挥发的锌、铅、锡等金属的氧化物烟尘,从而进行富集回收。该方法具有投资成本低、热效率高、易操作维护等特点。

印度某公司计划将原有的黄钾铁矾工艺改造为常规浸出工艺,该公司委托中国恩菲工程技术有限公司为其改造项目及渣处理项目进行设计。改造后的项目采用烟化炉贫化工艺处理浸出车间产出的含锌浸出渣,选用1台干燥窑和2台烟化炉,年处理锌浸出渣16万t(干基)。2019年底项目完工,但受2020年新冠肺炎疫情影响,该项目截至论文发表日仍未投产^[36]。

2.3.3 侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术

侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术(Side-submerged combustion smelting process, SSC)是由中国恩菲工程技术有限公司开发的具有自主知识产权的一种强化熔池熔炼技术。该技术通过多通道侧吹喷枪以亚音速向熔池内喷入富氧空气和燃料(天然气、煤气、粉煤等),以剧烈搅动熔体和通过直接燃烧向熔体补热为

主要特征。与其他类型的侧吹工艺不同,SSC 工艺物料适应性广,特别适用于像锌浸出渣这样的不发热物料的处理。将炉料加入熔炼区后,碳酸盐或硫酸盐物料随熔体的搅动快速散布于熔体之中,与周围熔体发生快速传热、传质反应,促进炉料的加热、分解、熔化过程;同时,侧吹喷枪喷入燃料为物料提供热源。因此,SSC 炉系统是一个近似理想的热技术系统^[17-18]。

云南某冶炼厂在原有常规湿法浸出工艺的基础上进行技术改造,采用侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术处理锌浸出渣,且搭配处理铅锌共生氧化矿,该项目由中国恩菲工程技术有限公司进行设计。改造后的项目在原有烟化炉基础上,选用 1 台 16 m² 侧吹熔化炉替代电热前床,设计规模年处理锌浸出渣 115 500 t、铅锌氧化矿 82 500 t。该项目于 2019 年 7 月投产,目前已经初步达到设计指标。表 4 为该项目侧吹熔化炉工段的主要经济指标。

表 4 侧吹熔化炉工段主要经济指标

指标	数值	备注
工作时间/d·a ⁻¹	330	—
酸浸渣处理量/t·a ⁻¹	115 500	干基
氧化矿处理量/t·a ⁻¹	82 500	干基
块煤消耗量/t·a ⁻¹	21 135	—
石英消耗量/t·a ⁻¹	26 176	—
天然气消耗量/Nm ³ ·a ⁻¹	15 840 000	—
工业氧气消耗量/Nm ³ ·a ⁻¹	49 701 190	85% O ₂

3 热酸浸出-赤铁矿除铁工艺技术与应用实践

在锌焙砂的酸浸过程中,为使锌焙砂中的锌

充分浸出进入酸浸液中,工业上常采用热酸浸出的方法,但采用该方法的同时,锌焙砂中的铁也会大量浸出后进入含锌浸出液中,为避免后续锌电解时铁离子的干扰,因此采用赤铁矿除铁法将含锌浸出液中的铁离子以赤铁矿(Fe₂O₃)形态沉淀除去。热酸浸出-赤铁矿除铁的方法具有除铁效果好、锌回收率高、所得赤铁矿可作为炼铁原料回收再利用等特点。

在国外,锌的热酸浸出多采用黄钾铁矾法和针铁矿法。赤铁矿法仅在日本饭岛冶炼厂和德国的鲁尔公司得到应用。长期以来,我国锌的热酸浸出多采用黄钾铁矾法、低污染铁矾法和喷淋除铁法。近年来,随着环保压力和企业生产成本的不断增大,赤铁矿法的研发越来越受到重视,与其他除铁工艺相比,赤铁矿法最大优势在于终渣量少,所产赤铁矿中铁品位高,可以作为炼铁的原料实现资源综合利用,能提高企业经济效益,降低企业生产成本。

2018 年 8 月,由中国恩菲工程技术有限公司参与研发设计的无碳绿色湿法炼锌和赤铁矿工艺铁资源化项目在云南某锌钢冶炼厂投产,该项目突破了赤铁矿法除铁的工艺瓶颈,解决了高铁闪锌矿(铁含量>14%)单独冶炼开发利用的世界难题。该工艺中,原料高铁硫化锌精矿经过焙烧后进行中性浸出;浸出渣再进行 SO₂ 还原浸出得到铅银渣;浸出液则经过置换沉铜脱砷(得到富铜渣回收铜)后,采用石灰石预中和得到石膏渣,然后再用石灰石沉铜得到富铜渣,最终余液中的铁离子采用赤铁矿沉铁工艺(高温氧化沉铁)处理后得到赤铁矿渣回收铁资源,沉铁后液返回浸出工段。表 5 为该工艺的主要技术经济指标与其他锌冶炼技术的指标对比。

表 5 部分锌冶炼技术主要技术经济指标对比

指标	常规浸出-渣挥发法	热酸浸出-黄钾铁矾法	热酸浸出-针铁矿法	氧压浸出工艺	还原浸出-赤铁矿法(日本饭岛秋田冶炼厂)	还原浸出-赤铁矿法(云南某锌钢冶炼厂)
锌回收率/%	92~96	93~96	93~96	94~96	97~98	97~98
铜回收率/%	50~65	未回收	未回收	未回收	—	70~78
银回收率/%	45~55	50~60	65~70	65~70	80~90	85~90
铁回收率/%	60~75	70~80	70~80	约 85	—	95

4 加压富氧直接浸出工艺技术与应用实践

加压富氧直接浸出工艺采用高温加压设备,通

常为加压釜,在硫酸溶液体系下通入氧气将硫化锌中的硫离子直接氧化为硫单质进行回收,锌以锌离子的形式进入溶液后再进行电解。该工艺具有浸出速率快、锌浸出率高、产物回收利用率高等特点,由

于工艺中硫以单质的形式回收,特别合适硫酸需求量小、运输成本高的企业采用。

硫化锌精矿的加压富氧直接浸出工艺是中国锌冶炼近年来的重要技术进展之一。该技术具有以下优点:①流程短,省去了原工艺的干燥、焙烧、制酸等三个工序;②产品为单质硫,消除了SO₂污染,对硫酸无销路、运输困难的地区建厂有优势;③金属回收

率高,浸出率达到Zn 98%~99%、Cd 98%~99%、Cu 70%;④扩产改造容易,常压与加压浸出液可送酸浸工序并入老厂,也可送氧化槽并入主流程。

广东某冶炼厂采用加压富氧直接浸出工艺处理锌精矿,生产规模为10万t/a(锌锭),不需要建烟气制酸和尾气脱硫系统,锌精矿中的硫回收至硫磺,主要技术指标如表6所示。

表6 广东某冶炼厂锌精矿加压富氧直接浸出工艺主要技术指标

低温加压浸出		高温加压浸出	
指标	数值	指标	数值
精矿粒度/ μm	$P_{57} = -25^*$	氧分压/kPa	800
氧分压/kPa	250	温度/ $^{\circ}\text{C}$	150~160
温度/ $^{\circ}\text{C}$	110	反应时间/h	4
反应时间/h	2	锌总浸出率/%	93.12
锌浸出率/%	30~45	镓总浸出率/%	69
溶液铁浓度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	8~10	锗总浸出率/%	85.46
终酸(H ₂ SO ₄)浓度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	15	终酸(H ₂ SO ₄)浓度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	70

注: * 指标数值表示粒度 $<25\mu\text{m}$ 的物料占总量的57%

目前,加压氧浸工艺还存在工艺流程长、渣中硫有效分离困难、渣中银较分散、作业成本高等问题,后续研究应针对上述问题进行探索。

5 含锌氧化矿及含锌铅银渣处理工艺工业技术创新与应用实践

5.1 回转窑挥发回收锌技术

回转窑能适应多种工业原料,包括各种氧化矿、废渣料等的烧结、焙烧、挥发、煅烧、离析等过程,因而被广泛地应用于冶金领域。该方法具有工艺成熟、设备可靠、投资成本低、操作简单等特点。

2016年,新疆某铅锌冶炼厂委托中国恩菲工程技术有限公司设计规模为60万t/a的铅锌冶炼项目。该项目处理的铅锌氧化矿属于碳酸盐型,经过回转窑挥发处理后,铅锌富集于氧化烟尘,氧化烟尘经湿法处理可达到年生产电锌50万t和电铅10万t。该工艺共设置 $\Phi 6.2\text{m}\times 85\text{m}$ 的回转窑4台^[36],主要技术经济指标如表7所示。

5.2 侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术

甘肃某厂采用1台13m²侧吹炉处理 $14\times 10^4\text{t/a}$ 含锌铅银渣,该工艺的主要技术经济指标如表8所示。

其他的含锌氧化矿及含锌铅银渣处理工艺还包

括烟化炉贫化工艺、转底炉直接还原工艺和CR(Comprehensive Recovery)炉短流程冶炼工艺等^[19-20]。

表7 该项目设计的主要技术经济指标

指标	数值	备注
年工作时间/d	330	—
原矿处理量/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	2 409 000	干基
其他渣处理量/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	190 000	干基
窑头鼓风富氧浓度/%	26	—
烟煤消耗量(干基)/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	510 000	—
焦炭消耗量(干基)/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	218 600	—
氧化锌烟尘产量/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	961 300	—
窑渣产量/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	1 089 000	—

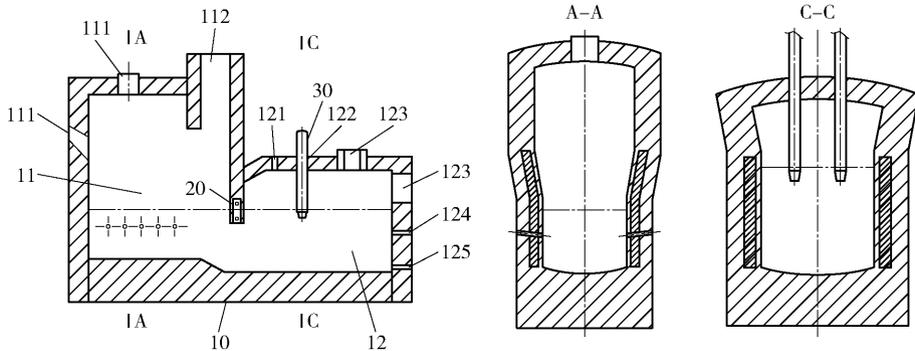
表8 该工艺的主要技术经济指标

指标	数值	备注
年工作时间/d	310	—
铅银渣处理量/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	140 000	干基
粉煤消耗量/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	38 000	—
氧气消耗量/ $10^3\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$	35 400	88% O ₂
氧化锌烟尘产量/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	12 300	—

6 新型高效火法炼锌技术

新型高效火法炼锌技术整合了现有侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术和电冶炼技术的优势,并将二者有机结合。图1为新型高效火法炼锌技术的冶金炉型,该冶金炉分为射流熔炼区和电热还原区,两区中间为负压水冷隔墙,底部相通,隔绝上部烟气。对于锌精矿,其在射流熔炼区被氧化脱硫形成高锌渣,高

锌渣由隔墙底部通道流入电热还原区,被还原直接产出锌蒸气。对于含锌氧化矿及含锌二次物料,其在射流熔炼区熔化形成含锌渣,进入电热还原区还原后产出锌蒸气。该技术优势有效利用了熔渣显热,降低了能耗及碳排放,同时工艺集中程度高,缩短了工艺流程^[21]。目前,该工艺已经完成300 kg级的扩大试验,并正在与河南某铅锌冶炼企业合作进行下一步的半工业化试验。



10 - 炉体;11 - 射流熔炼区;12 - 电热还原区;20 - 隔墙;30 - 加热电极;111 - 射流熔炼区进料口;112 - 射流熔炼区烟道;121 - 电热还原区进料口;122 - 电极孔;123 - 电热还原区烟道;124 - 排渣口;125 - 生铁放出口

图1 新型高效火法炼锌技术炉型结构

7 结论

本文在系统概述我国锌工业冶炼工艺状况的基础上,对近十年的锌冶炼工艺技术创新与应用实践成果进行了总结,并对锌冶炼工业技术创新方向和趋势进行展望。

1)目前,我国锌冶炼以传统湿法工艺为主,占总产量的80%以上,随着国家节能环保压力的增大与资源回收利用要求的提高,加快锌产业转型升级、推动锌行业高质量发展、促进锌行业技术进步与工艺创新已经势在必行。

2)随着国家对固体废弃物管理与回收要求的进一步提高,高温高酸浸出工艺所产浸出渣(除赤铁矿工艺)被列为危险固废,现有的湿法炼锌工艺正逐步回归常规浸出流程。

3)常规湿法炼锌工艺正朝着设备大型化、浸出渣无害化的方向发展,侧吹浸没燃烧熔池熔炼等渣处理技术发展迅速;热酸浸出-赤铁矿除铁工艺具有较大发展潜力,已经实现工业化。

4)全湿法加压富氧浸出工艺具有浸出速率快、锌浸出率高、产物回收利用率高等特点,较普通直接

浸出工艺在生产成本上有进一步的降低,但仍然无法与常规湿法工艺竞争。该工艺适合硫酸需求量小、运输成本高的企业采用。

5)新型高效火法炼锌工艺整合了现有侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术和电冶炼技术的优势,可以有效利用熔渣显热,降低能耗及碳排放,同时工艺集中程度高,缩短了工艺流程。该工艺无论在原生矿冶炼方面还是在含锌二次物料的处理回收方面均已成为未来的发展趋势。

[参考文献]

- [1] 于程福. 热镀锌工艺中锌渣的形成及其控制[J]. 数字化用户, 2019, 25(4):106.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 李东波, 蒋继穆. 国内外锌冶炼技术现状和发展趋势[J]. 中国铅锌, 2015(6):44-46.
- [5] 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.
- [6] 蒋继穆. 中国铅锌冶炼技术盘点[J]. 中国有色金属, 2012(3):32-33.
- [7] 赵律, 朱军, 蒋翔, 等. 湿法炼锌中浸出工艺优化试验与生产实

- 践[J]. 有色金属科学与工程, 2019,10(6):25-30.
- [8] 窦峰, 吴慧, 赵兵伍. 湿法炼锌高温净化渣资源化利用的研究[J]. 云南冶金, 2019, 48(4):47-51.
- [9] 林志富, 王健, 丁文涛, 等. 湿法炼锌两渣处理改造实践[J]. 中国有色冶金, 2019, 48(1):46-48.
- [10] 刘平, 赵景龙, 李辉. 富氧常压浸出设备的改进[J]. 湖南有色金属, 2019,35(3):38-40.
- [11] 苟永争. 锌氧压浸出过程 pH 值全自动在线检测装置研究[J]. 有色冶金设计与研究, 2019,40(3):24-26.
- [12] 魏志聪, 刘洋, 张文彬. 我国氧化锌矿直接浸出提锌技术研究现状及进展[J]. 矿业研究与开发, 2011,31(1):40-42.
- [13] 唐光其, 倪恒发. 流态化焙烧炉稳定运行的生产实践[J]. 中国有色冶金, 2009,38(6):15-17.
- [14] 薛炳福. 锌精矿沸腾焙烧的特点[J]. 内蒙古石油化工, 2014,40(8):29-30.
- [15] 安睿, 贾少文. 火法炼锌工艺沸腾焙烧炉高效燃耗智能控制技术浅析[J]. 内蒙古科技与经济, 2019(6):91-92.
- [16] 刘贤, 吴慧, 陈春林. 基于某厂长周期大极板锌电积生产实践分析[J]. 云南冶金, 2019, 48(4):44-46,51.
- [17] 吴卫国, 宋言. 含铅锌多金属固废的处理工艺创新及工业应用[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(6):95-100.
- [18] 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, 2019:1-60.
- [19] 祝丽萍. 中国再生锌产业 2014 运行概述及发展展望[J]. 中国铅锌, 2015(3):6.
- [20] 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.
- [21] 李东波, 黎敏, 邓兆磊, 等. 短流程火法炼锌装置及方法: CN201910473232.1[P]. 2019-05-31.

Advanced Industrial technological innovation and application practice of zinc smelting

SONG Yan, XU Liang, WU Wei-guo

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: For many years, China has been the world's largest producer and consumer of zinc. With the increasing pressure of energy conservation, environmental protection, and resource recycling requirements, it is imperative to promote technological progress and process innovation in the zinc industry. Based on a systematic overview of the status of zinc smelting process in China, this paper summarizes the technological innovation and application practice of zinc smelting process in the past decade. At present, the existing zinc hydrometallurgy process is gradually returning to the conventional leaching process, and is developing in the direction of large-scale equipment and harmless leaching slag, and slag treatment technologies such as side blowing submerged combustion bath smelting is developing rapidly. The hot acid leaching-hematite iron removal process has great development potential and has been industrialized. The production cost of the pressurized oxygen-enriched leaching process is still higher than that of the conventional process, which is suitable for enterprises with small demand for sulfuric acid and high transportation costs. The new high-efficiency zinc pyrometallurgical process has become the future development trend whether in primary ore smelting or in the recovery of zinc-containing secondary materials, because the high concentration and shortened flow, and it can effectively utilize the sensible heat of slag, reduce energy consumption and carbon emissions.

Key words: zinc smelting; energy conservation and environmental protection; CO₂ emissions; hydro-zinc smelting; pyro-zinc smelting; zinc-containing secondary materials; efficient smelting; green metallurgy