

阳极泥侧吹还原炉的设计及应用

李 栋, 曹珂菲

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘 要] 2019年10月投产的湖南某企业铅电解改造及稀贵综合回收项目,设计电解系统年处理粗铅10万t,综合回收系统选用一台2 m²圆形竖式侧吹还原炉,用于处理粗铅电解产生的阳极泥及部分外购阳极泥,阳极泥规模年处理约为6 000 t。该项目是中国恩菲专利SSC技术(侧吹浸没燃烧熔池熔炼)在稀贵领域的一次拓展,2 m²圆形竖式侧吹还原炉的设计及应用取得了处理量大、能耗低、成本低、环保好等实际效果。本文对该炉的设计情况进行了介绍,并结合生产运行对一些问题进行了分析和探讨。

[关键词] 阳极泥; 侧吹; 浸没燃烧; 圆形竖式; 还原炉

[中图分类号] TF815

[文献标志码] A

[文章编号] 1003-8884(2022)06-0071-04

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2022.06.011

0 引言

SSC技术(侧吹浸没燃烧熔池熔炼)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集群^[1],其核心特点是多通道侧吹喷枪直接向熔池内部喷入燃料和高富氧空气,将燃烧热量和还原剂送入熔池并搅动之,可加速熔池内部理化反应的发生。该技术热利用率高、物料适应性广,特别适用于不发热物料的处理,可以有效调控熔池温度,利于金属与炉渣的澄清分离,提高有价金属的回收率。之前,该技术已应用于液态铅渣还原、再生铅处理、锌浸渣处理、固危废处置等领域,本次处理铅阳极泥是该技术在稀贵领域的一次拓展。

铅阳极泥陈化后其大部分杂质主要以氧化物形态存在,阳极泥经过配料后连续进入侧吹还原炉。在高温和还原性气氛的作用下,部分砷、锑以低价氧化物的形态挥发进入烟尘,部分与加入的熔剂作用而造渣;部分铅、铋、铜等被还原成金属,熔融的铅、铋、铜是金、银的良好捕集剂,在沉降过程中大量捕

集金、银等贵金属,形成贵铅而使金、银与大部分杂质分离。侧吹还原炉产出的贵铅通过流槽流入低温跑烟转炉,通过空气氧化挥发,除去大部分的砷和锑。合金中的金、银品位进一步提高,达到 $\geq 70\%$ 的水平。侧吹还原炉产出的稀渣经过流槽进入渣沉淀转炉保温,使渣中夹杂的贵铅进一步沉降分离,产出次贵铅,再加入跑烟转炉中处理;炉渣放出冷却后送到配料仓,在锑系统中进一步回收有价金属。

本项目选用圆形竖式结构侧吹还原炉,炉床面积为2 m²,设计年处理铅阳极泥约6 000 t。设计圆形竖式结构,主要原因:一是炉床面积小,方便做成圆形,其承压性也好;二是在熔池面积和炉膛高度相同的情况下,圆形炉的表面积最小,即热量散失最小、热效率更高,同时需要设置水套的面积也最小,投资相对更省。该侧吹还原炉的设计及应用取得了处理量大、能耗低、成本低、环保好等实际效果。本文将对该炉的设计情况进行介绍,并结合生产运行分析和探讨一些问题。

1 阳极泥侧吹还原炉设计

1.1 工艺条件

侧吹还原炉年有效工作时间5 760 h,处理阳极泥量约6 000 t/a(干基),炉床面积为2 m²,3支侧喷枪供入天然气量130 Nm³/h,富氧空气量600 Nm³/h,富氧浓度50%。熔池温度1 000~1 100 ℃,烟气温度1 050 ℃,微负压操作。稀渣打眼排放,量约8.5 t/

[收稿日期] 2022-08-22

[作者简介] 李栋(1978—),男,河北辛集人,教授级高级工程师,硕士,主要从事有色金属冶炼/工业炉咨询与设计工作。

[引用格式] 李栋,曹珂菲.阳极泥侧吹还原炉设计及应用[J].有色设备,2022,36(6):71-74.

d, 贵铅虹吸排放, 量约 16 t/d, 周期排放。

1.2 阳极泥侧吹还原炉设计

现代熔池熔炼技术的特点之一是熔池搅动剧烈, 因而生产时炉体会对土建基础产生一个基础扰动力, 根据实践经验扰动频率普遍在 6 ~ 10 Hz 之间。因此, 要求土建基础的自振频率避开这个区间, 一般需增加基础墩的重量。本项目中, 要求土建基础做成实心圆台形, 其自振频率可限制在 2 ~ 4 Hz 之间, 基本可避开炉体的扰动频率, 因此后期投产之后共振情况不甚明显。

炉体最下部为支撑裙座, 它与土建基础之间用地脚螺栓相连接。裙座周圈上开有 6 个 $\Phi 400$ mm 通风口, 可以对炉壳的球缺底进行自然通风或者强制通风冷却。球缺底由裙座支撑, 之所以采用球缺底而非平底, 是由于平底容易因热膨胀而造成周边翘曲现象, 而球缺底则自然适应热膨胀的趋势, 热稳定性好。

再往上为高约 2 900 mm 的直段炉体, 由直段炉壳、直段砌体、虹吸口、上下渣口、3 个喷枪座组成。圆形竖式炉的底部炉壳受力最大, 经核算之后取直段炉壳厚度为 25 mm, 材质为 Q345R。直段炉壳内部首先砌筑一圈耐火粘土砖, 然后再砌筑一圈半再结合镁铬砖, 最终形成的炉膛内径为 $\Phi 1\ 600$ mm, 炉底采用十字砌。虹吸道与水平面夹角 40° , 断面尺寸为 150×150 mm。3 个喷枪座沿圆周方向均匀布置, 喷枪向下倾斜 5° , 喷枪口的高度介于上下渣口之间。上下渣口采用铜水套冷却, 正常放出用上渣口, 需要换枪时用下渣口放出, 将枪口露出液面。

锥段炉体高度约 3 300 mm, 由锥段炉壳、锥段砌体、人孔门、扩大段组成。锥段的锥角为 8° , 锥角和扩大段的设置, 一方面满足降烟速、降烟尘的需要, 另一方面满足炉顶出烟口、加料口等开口的布置。锥段炉壳厚度为 20 mm, 材质为 Q345R。锥段炉壳内部砌筑一圈直接结合镁铬砖, 承重在锥段炉壳底部的一圈托砖板上。人孔门布置在合适的高度上, 既便于筑炉时人员和物资的出入, 又满足生产时上部炉膛区域的观察操作。

直段及锥段炉壳采用外通水冷却, 用扣板将整个炉壳外露面隔成 72 条水路, 再用联箱组成 12 个进水点、12 个出水点, 下进上出。这种结构形式对于耐材起到一定的冷却作用, 同时对于操作环境的改善是显而易见的。

炉顶为钢架支撑箱式水套、底部捣打浇注料结构, 划分为 3 块水套, 隔出 4 个进水点、4 个出水点。箱式水套内部的加强槽钢特殊设计, 保证水套强度的同时, 还使得冷却水按预定的水路行进, 不会发生短路现象。炉顶上设有出烟口、加料口、探测孔、测温孔和测压孔。

根据工艺条件, 单支侧喷枪设计天然气量 $45\text{ Nm}^3/\text{h}$, 富氧空气量 $200\text{ Nm}^3/\text{h}$, 富氧浓度 50%。根据同类型侧吹炉喷枪的经验数据, 两种介质的压力按 0.3 MPa 设计。天然气走外环通道, 寄希望起到自冷却喷枪的作用, 富氧空气走中心通道。

图 1 为侧吹还原炉简图, 该炉申报的实用新型专利已于 2022 年 3 月 11 日获得授权, 授权公告号为 CN 216011710 U。

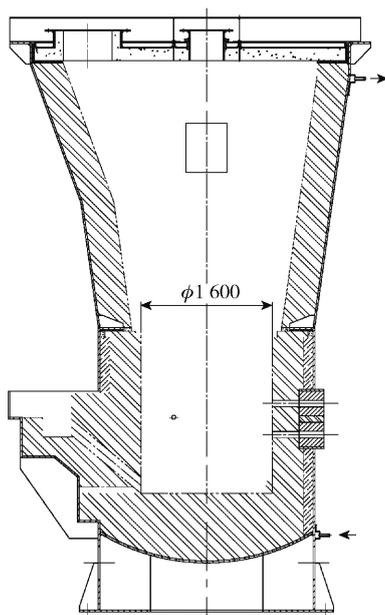


图 1 2 m²侧吹还原炉简图

2 投产运行与分析探讨

阳极泥侧吹还原炉于 2019 年 8 月中旬点火烘炉, 8 月下旬投料并产出合格产品, 正式进入试生产阶段。期间, 暴露出一些问题, 总结归纳如下。

2.1 生产指标

设计床能力仅为 $12.5\text{ t}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$, 实际后期阳极泥处理量在 $3 \sim 3.5\text{ t}/\text{h}$, 床能力超过 $35\text{ t}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$, 如果配套系统的能力跟得上, 床能力还可以更大。可以说最初选定的炉床面积 2 m^2 的确太大了, 但是尺寸太小的侧吹炉在熔体搅动、炉顶开口布置等方面存在

困难。同时天然气耗量仅 $90 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ，富氧空气 $160 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ，氧浓 80%，单耗远比设计值小很多。对比传统贵铅炉，贵金属物料周转速度加快很多，可以处理更多外购阳极泥，增加企业经济效益，这是侧吹浸没燃烧熔池熔炼技术优越性的体现。

2.2 侧喷枪及枪口上方耐材寿命

单支侧喷枪设计气量太小，天然气量 $45 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 、富氧空气量 $200 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 、富氧浓度 50%，而实际运行中数据更低。使得侧喷枪枪口喷出速度达不到设计值 $280 \sim 290 \text{ m/s}$ 的亚音速，尤其对于走外环通道起自冷却作用的天然气更是如此。喷枪压力从开炉起至今始终徘徊在 $0.1 \sim 0.15 \text{ MPa}$ ，远低于设计压力。这导致喷枪损坏速度较快，同时喷枪口外的涡旋距离炉墙太近，严重冲刷枪口上方耐材。图 2 为开炉一周、处理完首批存料之后炉内耐材的侵蚀状况，据测绘枪口砖下方炉衬内径侵蚀较轻约 50 mm ，枪口砖向上 10 层砖侵蚀严重呈弧形凹坑状态，最深处位于枪口砖向上第 4、5 层，侵蚀约 190 mm 。



图 2 开炉一周处理完首批存料之后炉内耐材的侵蚀状况

从理论上讲，喷枪制作完成之后，由于孔道面积无法在线调节，其对于气量和压力的大幅变化是没有适应能力的，即单支枪有额定气量和压力的要求。当总气体需要量较少时，可以减少喷枪的支数，以增大单支气量。从长远考虑，对于走外环通道起自冷却作用的天然气，应在阀站设置氮气兑入保证外环气量的稳定。再者，从增强对侧喷枪及其上方耐材冷却的角度来讲，应设置枪座水套及炉身冷却水套，可以从根本解决侧喷枪及枪口上方耐材寿命短的问题。

2.3 炉顶加料管

由于炉膛断面较小，尽管设计了锥段和扩大段，

一定程度拉开了出烟口和加料口之间的距离，但仍然不够，试生产初期大量物料短路被直接吹走，造成烟尘率超高。试生产后期，在炉顶加料口内内设了一根约 2 m 长的耐热料管，降低了物料入炉的高度，增加了入炉点与出烟口的距离，最终将烟尘率控制在了 15% 左右。图 3 为从人孔门看到的耐热料管。



图 3 从人孔门看到的耐热料管

熔池熔炼加料即被部分吹走的情况普遍存在，耐热料管工作环境的温度在 $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右，因此建议在加料口之内设置风冷加料管。将加料管做成套管形式，底部用钢板环封住，钢板环上开一圈小孔。接一股压缩风，先顺行往下冷却加料管，再通过钢板环一圈小孔吹入炉内形成环状气帘，保护入炉物料尽可能降低入炉点高度，这样最大限度减少了入炉物料直接被烟气带走的比例，吹入的压缩风入炉之后兼做二次风。

3 总语

本项目阳极泥侧吹还原炉的设计及应用是成功的，取得了处理量大、能耗低、成本低、环保好等实际效果，它将中国恩菲专利 SSC 技术（侧吹浸没燃烧熔池熔炼）拓展至稀贵金属领域。本文介绍了该炉的设计情况，并结合生产运行实际，对生产指标、侧喷枪及枪口上方耐材寿命、炉顶加料管等问题进行分析和探讨，并给出相应建议。

[参考文献]

- [1] 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.

Design and Application of Anode Slime Side-Blowing Reduction Furnace

LI Dong, CAO Ke-fei

Abstract: A project of lead electrolytic transformation and comprehensive recovery of rare, precious metals of a Hunan enterprise was put into operation in October 2019. The designed electrolysis system treats 100 000 t of crude lead per year, and the comprehensive recovery system adopts a 2 m² circular vertical side-blowing reduction furnace to treat 6 000 t/a anode slime generated from crude lead electrolysis and partially from outsourcing. This project is an extension of China ENFI's patented SSC (Side-blowing Submerged Combustion Bath Smelting) technology in the field of rare and precious metal recovery. The design and application of the 2 m² circular vertical side-blowing reduction furnace have yielded practical results of large processing capacity, low energy consumption, low cost, and environmental friendliness. This paper presents the design of the furnace and analyzes and discusses some issues in the context of its production operation.

Key words: anode slime; side-blowing; submerged combustion; circular and vertical; reduction furnace



(上接第 70 页)

Selection and Efficiency Analysis of Phosphorus Removal Agents in a Typical Urban Sewage Treatment Plant

MA Yong-ming, LI Wei

Abstract: Based on the AAO treatment process of a typical urban sewage treatment plant in the north, the phosphorus removal effects of ferrous chloride, ferric chloride and polyaluminum chloride were compared through a pilot test. The results showed that when the coagulant dosage was 30mg/L, the removal rate of total phosphorus (TP) by ferrous chloride was the highest, which could reach about 91%. Based on the results of the pilot test, 30 mg/L ferrous chloride was added to the aeration tank at the production site. It was found that after continuously adding ferrous chloride for 58 h, TP in effluent was maintained at 0.37 – 0.44 mg/L, and the water quality was stable and up-to-standard. After 68h of stopping dosing, TP in effluent went back to about 2.07 mg/L, indicating that ferrous chloride is an effective phosphorus removal agent.

Key words: sewage treatment plant; discharge of water with up-to-standard quality; biological phosphorus removal; chemical phosphorus removal

