大型流态化焙烧炉的开发与应用

李若贵
（中国恩菲工程技术有限公司，北京 100038）

［摘 要］ 焙烧炉是锌冶炼的核心设备，国内最早引进国外 109 m^2 焙烧炉进行生产。中国恩菲在消化吸收该技术的基础上，进行了多项改进优化，开发出国内第一台具有自主知识产权的大型 152 m^2 流态化焙烧炉，此后，在国内建成投产多套焙烧系统，实现了国产大型焙烧炉技术的推广和普及。该 152 m^2 流态化焙烧炉根据温度场模型和应力场模型对炉顶进行优化设计，采用了特殊设计的炉栅风帽，炉顶采用整体捣打专利技术，焙烧炉下段采用新型捣打料代替砌砖。生产实践表明，优化设计后的焙烧炉具有焙烧矿残硫低、产品质量好、建设投资低、占地面积小、生产运行稳定、便于集中智能控制与信息化管理的优势，焙烧炉大型化是锌冶炼工艺装备的发展趋势。

［关键词］ 锌冶炼；焙烧炉；152 m^2 流态化焙烧炉；优化设计；整体捣打；炉栅风帽；配套装备
［中图分类号］ TF813；TF806.1 ［文献标志码］ B ［文章编号］ 1672-6103(2021)05-0040-04
DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2021.05.008

锌冶炼工艺技术繁多，大部分工艺技术均需要焙烧工序，但凡采用焙烧工艺，焙烧炉就是最关键的核心设备之一。早期焙烧炉形式分为道尔式与鲁奇式，鲁奇式焙烧炉相比于道尔式焙烧炉具有结构简单、易于实现过程自动化、床能力大、产品质量好等优势[1]。1991 年，西北冶炼厂引进第一台 109 m^2 焙烧炉，也是亚洲单系列最大的锌冶炼配置炉体，带动了我国整体锌冶炼技术水平的快速发展。该焙烧炉在运行至二十多年时，已经属于超期服役，设备运行故障率逐年增加，安全隐患加大，产品质量在不断下降，系统小修小改无法从根本上解决问题。中国恩菲工程技术有限公司（以下简称“中国恩菲”）在消化吸收该技术的基础上，进行了多项改进优化，为西北冶炼厂开发了 1 台新型 152 m^2 流态化焙烧炉，用以替换原 109 m^2 老焙烧炉。此后，又先后在国内建成投产多套焙烧系统，实现了大型焙烧炉技术的推广和普及[2-4]。

152 m^2 流态化焙烧炉是目前世界上最大的焙烧炉，该成果打破鲁奇公司（现为 OT 公司）123 m^2 焙烧炉的长期技术垄断，形成中国具有自主知识产权的新一代冶金炉技术。该焙烧炉制定了安全可靠的炉顶设计方案，完成了 152 m^2 焙烧炉炉型的热力学、动力学数据建模，优化完善了工程结构设计。因此 152 m^2 流态化焙烧炉不仅仅是焙烧炉截面积加大和简单的体量放大，而是整体焙烧炉设计技术的革新。本文对焙烧炉发展概况进行介绍，并对 152 m^2 焙烧炉的设计特点及应用情况进行详细阐述，以期为同行业技术改造提供参考。

1 焙烧炉发展概况

自从我国自主开发焙烧炉设计后，不再称道尔式焙烧炉、鲁奇式焙烧炉等外来名称，国家标准化管理委员会于 2002 年规定统一称国内设计的这类焙烧炉为流态化焙烧炉，或简称焙烧炉。

流态化焙烧技术发展很快，种类繁多，也非常成熟，根据工艺特点要求及适用范围，可以大致归纳为表 1 中的几种类型[5]。

在锌冶炼领域，适用的焙烧技术包括氧化焙烧技术和硫酸化焙烧技术。目前，流态化焙烧已不再严格区分硫酸化焙烧与氧化焙烧界限，仅把 1 000 ℃以上的焙烧称高温焙烧；原料含铅高时采用制粒焙烧技术；另外，焙烧炉的加料方式有干式加料和湿式加料

［收稿日期］2021-04-21 ［修订日期］2021-06-01
［录用日期］2021-06-04 ［出版日期］2021-10-28
［作者简介］李若贵（1951—）男，浙江苍南人，教授级高级工程师，全国有色金属行业设计大师，长期从事锌冶炼设计工作，并主持国内多项大型锌冶炼厂的设计。
［引用格式］李若贵. 大型流态化焙烧炉的开发与应用[J]. 中国有色冶金，2021，50(5)：40-43.

之分。

流态化焙烧技术也在不断地更新换代，国外在这方面的研究成果主要包括双炉串联二次焙烧（小规模）、锌再生（焙烧脱硫）冶炼等，许多研发成果还处于试验阶段，尚不成熟，但这些成果都为我国流态化焙烧技术的发展起到了良好的推动作用。

表 1　焙烧技术类型

序号	焙烧种类	工艺技术要求	适用范围	备注
1	氧化焙烧	全氧化焙烧	火法炼锌	焙烧矿含硫低
2	硫酸化焙烧	半氧化焙烧	湿法炼锌	焙烧矿中只需约 3% ~4% S（可溶硫）就完全足以补偿硫酸的损失
3	浆化焙烧	炉顶加料	黄金冶炼，铜冶炼	发热值高原料
4	制粒焙烧	制粒、陈化	原料含铅过高或原料过细	—
5	富氧焙烧	原有焙烧炉改造提高产能	富氧浓度 24% 左右	利用本厂富裕氧气
6	还原焙烧	要求脱除有害杂质	应用于稀有金属	有报道，尚未有工业推广
7	稀相焙烧	无沸腾床	不产焙砂，全部产烟尘	常见硫铁矿焙烧
8	稀土矿焙烧	分别选择不同炉温：高温焙烧 950 ℃、中温焙烧 680 ℃、低温焙烧 350 ℃	—	规模普遍很小
9	管道焙烧	粉体物料悬浮态热处理	铝土矿	高硫铝土矿开展焙烧脱硫
10	串联焙烧	有除杂需求，特别要求既除 As，又须脱 S 等	二次焙烧	—
11	其他焙烧	搭配浸出渣处理	—	确保渣无害化资源化

2　流态化焙烧技术及工艺流程

2.1　流态化焙烧技术

锌精矿流态化焙烧利用具有一定气压的空气，自下而上通过炉内原料层，经由风帽的高速气流对固体颗粒进行喷吹，使焙烧炉内沸腾层呈悬浮状态，达到固体颗粒（锌精矿）与气体氧化剂（空气）的充分接触，以利于化学反应的进行。焙烧炉内主要的化学反应见式（1）~（6）[5]。

$$2ZnS + 3O_2 = 2ZnO + 2SO_2 \uparrow \quad (1)$$

$$ZnS + 2O_2 = ZnSO_4 \quad (2)$$

$$3ZnSO_4 + ZnS = 4ZnO + 4SO_2 \uparrow \quad (3)$$

$$2SO_2 + O_2 = 2SO_3 \uparrow \quad (4)$$

$$ZnO + SO_3 = ZnSO_4 \quad (5)$$

$$XZnO + YFe_2O_3 = XZnO \cdot YFe_2O_3 \quad (6)$$

湿法炼锌采用的原料是经焙烧后的硫化锌精矿，在焙烧过程中，可形成少量硫酸盐以补偿电积与浸出循环系统中硫酸的缺失，但焙烧矿中的可溶硫还不能平衡系统所需酸量，须在浸出系统中补酸。为了减少补酸量、提高锌浸出率，应减低焙烧矿中的不溶硫，选择合理的焙烧工艺和焙烧炉可以达到这一目的[5,7]。

2.2　工艺流程

焙烧工艺发展到目前已经非常成熟，比较完整的焙烧工艺流程见图 1。

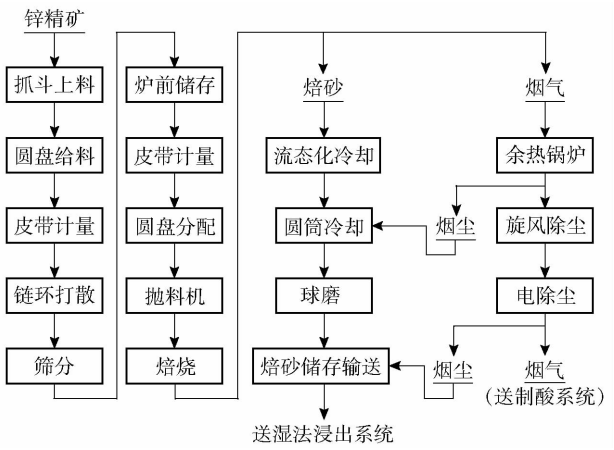

图 1　流态化焙烧工艺流程简图

3　大型流态化焙烧炉设计特点及技术优势

3.1　设计特点

早期，硫化锌精矿平均粒度在 200 目①左右，现在各选矿厂为了提高金属回收率，硫化锌精矿平均粒度普遍低于 200 目，进口硫化锌精矿原料更细，平均粒度达到 400 目①左右，因此对焙烧炉的设计提出新的要求。尽量考虑延迟细颗粒粉尘在炉膛停留

① 200 目 = 0.074 mm；400 目 = 0.035 mm。

时间,促使焙烧反应更彻底。

1)优化炉顶设计。152 m^2 流态化焙烧炉是在 109 m^2 焙烧炉的基础上进行优化改进的,设计之初,构建了温度场模型和应力场模型,并根据模型数据,对炉子采用不同的砖体、炉壳、拱顶中心角、炉顶厚度各种组合方案的力学性能进行了比较分析,最终确定了较为安全、可靠、合理的炉顶设计方案。

2)采用炉顶整体捣打专利技术。大型焙烧炉的炉顶跨度大,重量也大,设计与建造大型焙烧炉的炉顶是关键难点与核心技术所在。以往小炉子(包括早期大部分 109 m^2 焙烧炉)均采用拱形砖砌筑,但大炉子采用砌筑在技术上就更难。中国恩菲与洛阳市洛华粉体工程特种耐火材料有限公司共同开发了焙烧炉炉顶整体捣打专利技术,该技术使得焙烧炉的整体稳定性与安全性问题得以有效解决,消除了炉顶掉砖的危险现象,而且炉顶整体重量减轻,施工进度快,造价比砌筑更低。现有运行的 3 台 152 m^2 焙烧炉,包括后期建设的 109 m^2 焙烧都采用炉顶整体捣打技术。

3)采用特殊设计的炉栅风帽。焙烧炉的设计在不断更新换代,近年来设计的炉栅风帽均采用直通型,摒弃蘑菇型,原来的蘑菇型风帽存在清炉、清理风帽孔困难的问题。有些民营小企业采用一个直管上部焊接多个风帽开口的结构替换原有的蘑菇型风帽。中国恩菲对风帽进行了特别设计,使得其阻力更小,更不易堵塞。炉栅捣打料与风帽在同一平面,焙烧形成的颗粒在沸腾层可滚动至底排料口排出。

4)焙烧炉下段采用新型捣打料代替砌砖。焙烧炉下段部位开口较多,大焙烧炉开口接近 20 个(测温小开口不包括在内)。如果采用传统的异型砖砌筑,存在异型砖的设计难、制造难、砌筑难等问题,更关键的是沸腾层段由于长期受焙砂冲刷,砖体之间的缝隙部位损坏比较快,如不及时更换,焙烧炉寿命及生产安全都会受到严重威胁。焙烧炉下段全部采用捣打材料,不但节省工时、降低工程造价,更减少了砌体缝隙被焙砂冲刷的危害。

3 种大型焙烧炉型典型设计参数见表 2。

表 2 3 种大型焙烧炉型典型设计参数

设计参数	109 m^2 焙烧炉	138 m^2 焙烧炉	152 m^2 焙烧炉
流化床段直径/mm	11 800	13 292	13 900
扩大段(拱顶)直径/mm (面积/m^2)	16 300 (208.5)	16 942 (225.3)	17 580 (240)
炉膛面积扩大比	1.91	1.63	1.61
流化层高度/mm	1 000	—	1 000
炉腹角/(°)	20	20.1	16
单体炉子重量/t	1 680	—	2 530

3.2 技术优势

焙烧过程的风料比(鼓风量与加料量)、温度、热平衡、残硫率等是衡量焙烧运行的关键指标,如果操作不当,会造成沸腾层炉结、堆料、穿孔沟流等故障而停炉。152 m^2 流态化焙烧炉及配套系统使焙烧单系列建设规模提高至 15 万 t 以上,这种特大型焙烧炉使得生产运行更加稳定,焙烧矿质量更好。中国恩菲通过创新设计相应的配套设施,特别是余热锅炉、上料加料系统、焙砂冷却系统等设备,确保 152 m^2 流态化焙烧炉一次性投产成功,而且自投产以来,生产运行稳定,焙烧矿平均不溶硫低,产品质量较好。该 152 m^2 焙烧炉在工艺上合理、技术上可靠,而且投资、管理、运行费用合理,主要的技术优势如下所述。

1)152 m^2 流态化焙烧炉是目前世界上焙烧炉面积最大的炉型,年生产金属锌的能力达 180 kt,焙烧床能力可达 7.5 t/m^2·d。

2)152 m^2 流态化焙烧炉焙烧矿残硫低,产品质量好。焙烧矿平均不溶硫含量为 0.4% ~0.5%,提高了浸出工序锌回收率。

3)大型焙烧炉规模大、单系列,比小焙烧炉单位吨锌建设投资相对要低,另外还具有操作人员成本低、效益高的优势。针对株洲冶炼集团(以下简称"株冶")30 万 t 锌冶炼规模,选择 3 台 109 m^2 焙烧炉与 2 台 152 m^2 焙烧炉进行比较,可节约 2 000 万元工程建设费。

4)大型焙烧炉厂房配置面积相对较小,规模大的焙烧炉在厂房配置方面优势更大。设计 30 万 t 规模厂房选择 152 m^2 焙烧炉比 109 m^2 焙烧炉,焙烧厂占地面积可减少 40% 以上,节省大约 10 000 m^2 占地。

5)大型焙烧炉生产运行稳定,且安全、环保,产品质量较好。

6)使用大型焙烧炉处理相同规模原料,被控能源及物料等参与自动控制的工艺参数数量降低,减

少了人为因素影响，为冶炼生产的进一步工艺优化创造了条件，便于集中智能控制与信息化管理。

4　大型流态化焙烧炉的应用情况

152 m^2 流态化焙烧炉及配套系统使焙烧单系列建设规模提高至 15 万 t 以上，这种特大型焙烧炉使得生产运行更加稳定，焙烧矿质量更好。由于单系列焙烧系统变大，相应的配套设施，特别是余热锅炉、上料加料系统、焙砂冷却系统等设备均需要借鉴其他工程的经验，确保新流态化焙烧车间一次投产成功。

西北冶炼厂 152 m^2 流态化焙烧炉建成后于 2017 年 11 月初试运行，2018 年 1 月 13 日正式投料生产。经过近半年的生产运行，并不断改进，才使该焙烧炉逐渐正常运行，各项生产指标也不断得到优化。株冶搬迁 30 万 t 锌冶炼工程也采用 2 台 152 m^2 流态化焙烧炉，由于吸取西北冶炼厂的经验教训，所以设计、施工、投产都比较顺利，2019 年 2 月投产，实现一次投料成功，并迅速达产达标。152 m^2 流态化焙烧炉的主要生产技术指标见表 3。

表 3　152 m^2 流态化焙烧炉的主要生产技术指标

序号	技术指标	单位	数值
1	焙烧炉面积	m^2	152
2	金属锌生产能力	kt/a	170
3	年作业天数	d	345
4	正常处理原料量	t/a	354 000
5	焙烧需要鼓风量	m^3/h	91 000
6	焙烧线速度	m/s	0.7
7	焙烧床能力	$t/m^2 \cdot d$	7.5

5　结语

152 m^2 流态化焙烧炉是我国自主研发且目前世界上最大的锌冶炼焙烧炉，其在工艺上合理、技术上先进、运行更加稳定、产品质量更好，在投资、管理、运行费用等方面更具优势，而且在节能与环保方面，单台焙烧炉比多台运行优势更加明显。152 m^2 焙烧炉或更大的焙烧炉将会是锌冶炼工艺装备技术的发展趋势。

中国恩菲近期正在开发 186 m^2 流态化焙烧炉，确保单系列焙烧系统生产能力可达 200 kt/a，还开发了包括焙烧余热锅炉、抛料机、流态化冷却器、高效冷却圆筒等专利设备，保障焙烧系统各项配套设备的更新换代，确保特大型焙烧系统的整体稳定运行。

［参考文献］

［1］ 黄忠民，刘卫平，肖康，等. 大型流态化焙烧炉改进研究和生产实践［J］. 世界有色金属，2021(12)：7－9.

［2］ 周钢. 大型锌精矿流态化焙烧炉的技术发展［J］. 中国有色冶金，2021，50(3)：39－42.

［3］ 魏甲明，杨斌，李若贵. 西北铅锌冶炼厂 109 m^2 焙烧炉的改进及经济性分析［J］. 中国有色冶金，2011，40(6)：34－37.

［4］ 魏甲明，杨斌，李若贵. 西北铅锌厂 152 m^2 流态化焙烧炉与改良黄钾铁矾法炼锌项目的创新［J］. 中国有色冶金，2018，47(2)：11－13，83.

［5］ 梅炽. 铅锌冶金学［M］. 北京：科学出版社，2003.

［6］ 白桦，李阳. 双室流态化焙烧炉的设计［J］. 有色冶金节能，2012，28(6)：21－22，30.

［7］ 吴仲. 锌精矿沸腾焙烧过程中砷锑杂质的脱除［J］. 无机盐工业，2006(5)：43－44.

Development and application of large fluidized-bed roaster

LI Ruo-gui

Abstract: Roaster is the core piece of equipment for zinc smelting and was initially introduced into China from abroad. Based on absorption of the associated technology, China ENFI made multiple optimizations and developed the first 152 m^2 large fluidized roaster of independent intellectual property rights in China. Thereafter, a number of roasting systems have been up and run in China, realizing the promotion and penetration of technology for Chinese-made large roaster. Design features of the 152 m^2 large fluidized roaster include optimized design of roaster roof in accordance with temperature field model and stress field model, grate hood of special design, roof of integral tamping patented technology and new ramming materials to replace brickwork for the lower part of roaster. Production practices prove that roaster of optimized design is advantageous in low residual sulfur, good product quality, low capital cost, small footprint, stable production operations and convenient for centralized intelligent control and information management. Large roaster is the future trend of zinc smelting equipment.

Key words: zinc smelting; roaster; 152 m^2 large fluidized roaster; optimized design; integral ramming; grate hood; associated equipment