富氧焙烧技术在 109 m^2 锌精矿流态化焙烧炉上的应用实践

皮忠斌[1]，张振国[1]，王卡卡[1]，柴 伟[1]，许 良[2]
（1. 云南驰宏锌锗股份有限公司会泽冶炼分公司，云南 会泽 654211；
2. 中国恩菲工程技术有限公司，北京 100038）

［摘 要］ 多年来，国内富氧焙烧技术在锌精矿焙烧炉上的应用始终停留在试验阶段，驰宏会冶首次实现了锌精矿富氧焙烧规模化生产。该公司通过在原鼓风系统管道上增加富氧分布装置，配套有高浓度氧气调节阀组及流量、压力监测仪表等设施，同时，配套改进流态化冷却器、高温引风机和鼓风机等设备，实现了富氧焙烧技术在锌精矿焙烧炉上的应用。生产实践表明，在适当的工艺参数下，富氧焙烧技术可以充分释放产能，流态化焙烧炉床能率提升到 8.03 t/m^2·d；焙烧矿质量得到有效改善，烟尘含硫下降至 3.5%；生产吨锌能耗大幅降低，空压风单耗 194.0 Nm^3/t，电单耗 135.80 kW·h/t，高浓度氧气的单耗为 81 Nm^3/t。综上，109 m^2 焙烧炉采用富氧焙烧技术后获得了较好的经济效益，另外，还提高了焙烧系统、硫酸系统装置的利用率，降低了鼓风量，有效防止了烟尘的无组织排放，改善了现场生产环境。

［关键词］ 锌精矿；富氧焙烧；109 m^2 流态化焙烧炉；床能率；焙烧矿质量；吨锌能耗；焙尘含硫；生产环境
［中图分类号］ TF813；TF803.11 ［文献标志码］ B ［文章编号］ 1672-6103(2021)05-0044-05
DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2021.05.009

关于锌精矿的富氧焙烧，国外做过许多试验和实践。1937 年，加拿大特雷尔厂首先在工业上实现了锌精矿富氧焙烧。1969 年，澳大利亚电锌公司里斯顿进行了锌精矿流态化焙烧研究，鼓风含氧浓度增加到 24.5%，精矿处理量由原来的 363 t/d 提高到 450 t/d。1961 年，乌斯季卡明诺戈尔斯克铅锌厂进行了锌精矿富氧流态化焙烧工业试验。试验结果证明，使用富氧空气，床能率增加到 8.4～8.8 t/m^2·d。芬兰 Kokkola 锌厂，在 1999 年到 2000 年之间进行了 70 m^2 流态化焙烧炉的富氧焙烧试验，通过富氧焙烧，锌精矿处理能力最大提高约 15%，并且焙砂含硫有所降低。在试验结束后，Kokkola 锌厂针对试验结果进行了一些列的改进，包括在原有焙烧系统上增加供氧系统[1]。

国内长沙矿冶研究院对锌精矿富氧流态化焙烧进行过两次实验室扩大试验。两次试验分别于 1976 年 12 月和 1978 年 7 月在 0.18 m^2 的流态化焙烧炉中进行，富氧空气含氧分别为 26.4% 和 24.7%，沸腾层温度为 910～923 ℃，其床能率分别比使用空气焙烧提高 0.43 t/(m^2·d) 和 0.16 t/(m^2·d)。株冶集团于 2005 年 8 月 24 日至 8 月 26 日在 6# 流态化焙烧炉进行富氧焙烧试验，试验过程中平均富氧浓度为 22.7%，比空气含氧高 1.7%。采用富氧焙烧后，锌精矿处理量为 240 t/d，比普通空气焙烧处理量 225 t/d 提高了约 15 t/d。焙砂和烟尘中的可溶锌、可溶硫略有增加，焙砂和烟尘中的总硫有所降低[2]。

通过以上试验及实践得出，锌精矿的富氧焙烧是可行的。但是，由于国内很多锌冶炼厂缺乏氧气制备系统，且受限于焙烧炉沸腾层的冷却能力，富氧焙烧在大规模工业生产上没有得到应用。

云南驰宏锌锗股份有限公司会泽冶炼分公司（以下简称“驰宏会冶”）选择火湿法联合工艺，冶炼

［收稿日期］2021-03-26 ［修订日期］2021-04-29
［录用日期］2021-05-01 ［出版日期］2021-10-28
［作者简介］皮忠斌(1985—)，男，云南禄劝人，大学本科，工程师，从事锌冶炼技术管理工作。
［引用格式］皮忠斌，张振国，王卡卡，等. 109 m^2 锌精矿流态化焙烧炉富氧焙烧生产实践[J]. 中国有色冶金，2021，50(5)：44-48.

流程为“109 m²流态化焙烧炉焙烧→两段浸出→三段净化→电解→铸锭”。其中，109 m²锌精矿沸腾焙烧炉由中国恩菲工程技术有限公司（以下简称“中国恩菲”）设计，于 2013 年 11 月建成投产，自试车投运至今运行稳定，各项运行指标良好。2019 年，因外部锌市场价格持续利好，驰宏会冶增加了锌电解产能，为缓解湿法冶炼系统与焙烧矿含锌供给不足的矛盾，驰宏会冶联合中国恩菲，在原设计的基础上，对 109 m²锌精矿流态化焙烧炉的装置和工艺进行了优化改进，于 2019 年 4 月在该焙烧炉实施富氧焙烧工艺。本文对该 109 m²锌精矿流态化焙烧炉改进后的焙烧工艺、设备及生产实践情况进行阐述，为锌精矿富氧焙烧工艺在更大型焙烧炉工业化应用提供参考。

1　锌精矿流态化焙烧简介

1.1　富氧流态化焙烧工艺原理及流程

锌精矿富氧焙烧是基于富氧燃烧技术和硫化锌精矿氧化焙烧技术建立的一种改进工艺，其利用氧气浓度高于 21% 的富氧空气促使锌精矿在焙烧炉中进行流态化焙烧[3]。流态化焙烧是指具有一定气流速度的空气自下而上通过炉内矿层，使锌精矿固体颗粒相互分离而呈悬浮状态，达到固体颗粒（锌精矿）与气体氧化剂（空气）充分接触，促进化学反应的进行。焙烧炉内主要化学反应见式（1）~（5）[4]。

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

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

$$2SO_2 + O_2 \rightleftharpoons 2SO_3 \quad (3)$$

$$4FeS + 7O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 + 4SO_2 \quad (4)$$

$$ZnO + Fe_2O_3 \rightleftharpoons ZnFe_2O_4 \quad (5)$$

硫化锌精矿主要以闪锌矿（ZnS）的形态存在，其反应过程主要是金属硫化物（如 ZnS、FeS）和氧气之间的反应。为满足湿法炼锌工艺对焙烧矿质量的要求，在焙烧时，尽可能将锌精矿中的硫化物氧化成氧化物并生成少量硫酸盐，尽量减少铁酸锌、硅酸锌的生成；同时得到较高浓度的二氧化硫烟气以便于生产硫酸。

锌精矿焙烧系统由备料工序和焙烧工序两部分组成。备料工艺包括锌精矿贮存、配料、筛分、破碎（松散）等作业，目的是为 109 m²锌精矿沸腾焙烧炉提供合格精矿。焙烧工艺包括富氧焙烧、烟气余热回收、焙砂冷却、焙砂球磨等工艺过程，目的是产出符合湿法炼锌要求的焙烧矿。

锌精矿经检验合格入仓后，采用桥式抓斗起重机人工进行三级配料，再经定量给料机、皮带输送机、振动筛分等设备，将锌精矿送至焙烧炉前仓。精矿由仓下调速胶带给料机输送至电子皮带称，再经电子皮带秤计量后，由分配圆盘分别加到两台抛料机上，抛料机将混合精矿抛入焙烧炉内。产出的焙砂经两台流态化冷却器、高效圆筒冷却机降温后，经埋刮板运输机送到球磨机室进行球磨，磨后焙砂由仓式泵分别送到焙烧矿浸出工序和焙砂贮仓储存备用。焙烧炉产出的烟气经余热锅炉回收余热，再经两段旋涡收尘器、电收尘器收尘后送制酸系统。工艺流程如图 1 所示。

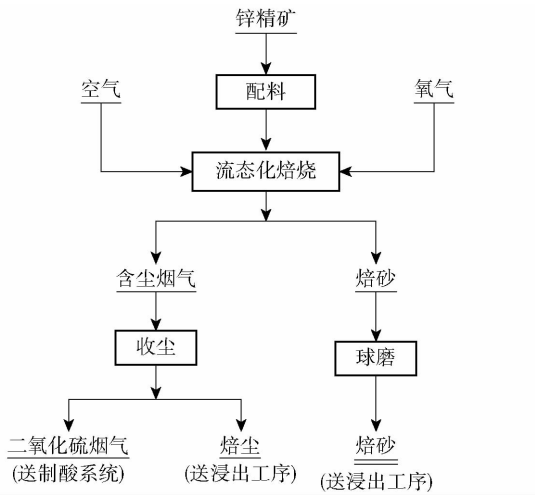


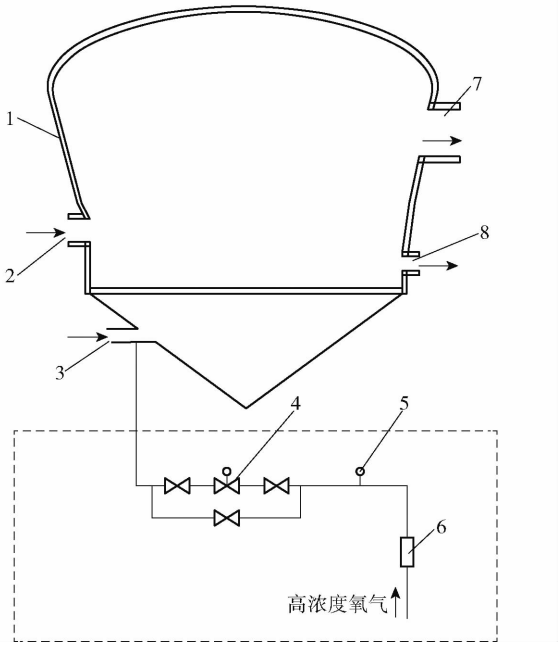
图 1　锌精矿富氧焙烧工艺流程简图

1.2　主要工艺设备

1）焙烧炉。该 109 m² 锌精矿流态化焙烧炉简要结构见图 2[5]，如图 2 所示，该炉型有一个锥型的扩大段，采用无前室锌精矿加料系统，设有焙砂排出口及直通式风帽。与传统道尔式流态化焙烧炉相比，该流态化焙烧炉具有两大优点[6]：一是炉床面积大，炉内热容量大且均匀，温差小，物料与空气接触表面积大，反应速度快，传质传热效率高；二是上部增加了扩大段，使得烟气流速和烟尘率降低，延长了烟气在炉内的停留时间，烟气中的烟尘得到充分焙烧，烟尘中的含硫量降低，提高了烟尘的质量。

2）富氧供给系统。在原鼓风系统管道上增加富氧分布装置，配套有高浓度氧气调节阀组及流量、

压力监测仪表等设施。流量、压力的控制及检测采用集中4～20 mA信号,引进Delta V控制系统,采用DCS系统进行准确调整及监控。



1－流态化焙烧炉炉体;2－锌精矿抛料口;3－鼓风口;4－富氧调节阀组;5－富氧压力变送器;6－富氧供给流量计;7－含尘二氧化硫烟气出口;8－焙砂溢流口

图2 109 m^2锌精矿沸腾焙烧炉简图

3)流态化冷却器。富氧流态化焙烧系统选用Q=8.1～9.4 t/h流态化冷却器2台,正常生产时,两台流态化冷却器同时工作。其参数为:焙砂入口温度为950±30 ℃;焙砂出口温度500～550 ℃;软化冷却水用量24 t/h,回水最高温度小于55 ℃;空气量125 Nm^3/h,压力为90～100 kPa。

4)高温引风机。富氧流态化焙烧系统选用高温风机2台,型号:离心式风机AII4500－0.7836/0.7206。其参数为:处理风量260 000 m^3/h;风机全压6 300 Pa,入口压力－6 000 Pa,出口300 Pa;电动机功率800 kW;风机转速970 r/min;耐热温度≥350 ℃。风机采用变频器控制转速,可根据生产实际需要调整风机频率以保障系统负压。

5)鼓风机。富氧流态化焙烧系统选用离心式鼓风机2台,型号为单级叶轮AII1600－1.04/0.77。其参数为:处理风量1 600 m^3/min;风机升压26.5 kPa;电动机功率1 120 kW;风机转速2 980 r/min。风机入口配套有自洁式空气过滤器,可对空气中的灰尘及杂物进行有效过滤。

2 锌精矿富氧流态化焙烧生产实践

2.1 富氧流态化焙烧生产控制要素

锌精矿富氧焙烧日常生产管控的重点主要是入炉锌精矿配料,均衡控制各成分;稳定控制流态化焙烧炉鼓风量、炉温、流态化床层压力、系统负压等关键点;强化对进料系统、出料系统、收尘系统、烟气制酸系统及关键重点设备运行稳定性的管理,减少因设备异常导致炉况的波动,保障流态化焙烧炉长期稳定连续运行,以达到提质降耗的目的。

1)配料。该企业锌精矿大部分来自于企业内部矿山自给原料,少部分锌精矿外购。为获得稳定的入炉精矿成分,日常采取堆式配料法及三级配料法,合理搭配物料,重点控制锌精矿水分、SiO_2、Fe、Pb、S等对炉况影响较大的因素,控制入炉精矿的粒度及杂物分捡,入炉锌精矿成分控制标准见表1;锌精矿富氧焙烧与传统空气焙烧在原料成分控制上无差异。

表1 锌精矿富氧焙烧入炉精矿控制标准(干基) %

成分	Zn	H_2O	S	Fe	Pb	SiO_2	F	Cl	Hg	Ge*
含量	49～54	9～10.5	28～33	<8.0	<3.0	<2.0	<0.05	<0.20	<0.015	70～150

注:*元素单位为g/t

2)鼓风量。实际生产控制中,为获得较稳定沸腾层,须采取稳定入炉鼓风量的措施,以控制稳定的操作气速及床层压力。正常生产时,受气温、气压影响,需动态微调鼓风机入口调节阀和放空阀,以维持稳定的入炉鼓风量;因设备设施异常需减风操作时,宜根据床压力、溢流口出砂量等综合情况逐步平缓加减鼓风量。装置原设计焙烧鼓风量为55 106.97 m^3/h,实际生产中鼓风量可达63 000 m^3/h。根据系统鼓风机、烟气制酸二氧化硫风机、整系统设备的负荷及焙烧矿的质量等实际情况,经生产实践摸索,富氧焙烧系统较适宜的鼓风量为58 000～60 000 m^3/h,较传统焙烧鼓风量下降了1 000～5 000 m^3/h,鼓风量的减少降低了烟气系统的负荷,提高了烟气中SO_2浓度。富氧焙烧工艺一方面要控

制稳定的沸腾层；另一方面要保障投入锌精矿强化焙烧足够的氧气。根据工况，富氧浓度控制在 22% ~ 30% 可获得良好的焙烧效果。

3）焙烧温度。焙烧温度受鼓风量（氧气）、投料量、入炉精矿成分及系统负压综合影响。通过试验摸索，控制流态化焙烧炉投料量与鼓风量（氧气）比例，富氧焙烧按照传统空气焙烧将沸腾层温度稳定在 950 ± 30 ℃，炉顶温度 900 ± 30 ℃不变化。正常操作时，采取稳定鼓风量（氧气）量、床压力、系统负压，通过调整投料量将温度稳定在操作区间；低负荷生产时，需同步动态调整自然鼓风和高浓度氧气的调配比例，以达到炉内热量平衡及焙烧温度稳定的目的。

4）床压力。流态化焙烧炉床压力是沸腾层高度和炉床阻力情况的反映，受鼓风量、沸腾层厚度及风帽堵塞等情况综合影响。实际生产中，富氧焙烧床压力控制在 16 ~ 22 kPa，与传统空气焙烧床压力控制标准无差异。随着流态化焙烧炉长期连续运行，床压力会因大颗粒焙砂沉积致床压力增加，日常严格控制精矿粒度措施，尤其要防止硬块、石块、金属杂物等进入炉内；短期可采取降低鼓风量持续低负荷运行一定时间可进行改善，若需排除全部沉积，则需每连续运行 1 ~ 2 年流态化焙烧炉进行周期扒炉，并人工对风帽进行清理。若因风料控制不当或是鼓风量波动等原因，致使沸腾层稳定性破坏，床压力降低，可采取在溢流口增设一定高度的挡板增加沸腾层高度进行调整。

2.2　富氧焙烧与传统焙烧指标对比

改进后的 109 m^2 锌精矿焙烧炉增加了富氧鼓风装置，强化锌精矿焙烧过程，通过约 1 年的连续生产实践，富氧焙烧工艺相较于传统空气焙烧具有以下优点：一是在相同烟气量的情况下，充分释放了焙烧炉产能，床能率有较大提升；二是提高烟气中 SO_2 浓度，增加了烟气制酸系统的硫酸产量；三是降低了焙烧矿含硫，使得焙烧矿质量有较大改善；四是提高焙烧系统设备利用率，降低了焙烧矿电单耗（按含锌量计算）。

1）床能率。焙烧炉床能率是衡量炉子生产能力的一个重要参数，标志着炉子处理精矿能力的大小。流态化焙烧炉床能率受入炉锌精矿含硫量、焙烧炉操作温度、鼓风线速度及鼓风量影响[7]。富氧焙烧工艺与传统焙烧工艺床能率对比情况见表 2。

表 2　锌精矿富氧焙烧与传统焙烧床能率对比表

年份	全年生产天数	精矿投入量/t	床能率/t·(m^{-2}·d^{-1})	备注
2018	364	284 052.35	7.21	传统空气焙烧
2019	343	289 002.62	8.03	富氧焙烧

从表 2 可以看出，富氧焙烧全年累计 8.03 t/m^2·d，比传统空气焙烧 7.21 t/m^2·d 增加了 11.37%，比设计值 5.8 t/m^2·d 增加了 38.45%。

2）焙烧矿质量。硫化锌精矿焙烧目的是将锌精矿中的硫化锌转为氧化锌，并脱除锌精矿中的汞、氟、氯等伴生金属。焙烧矿质量可通过焙砂、焙尘含硫物相中硫化锌含量进行判断。富氧焙烧工艺与传统焙烧工艺产出的焙砂、焙尘含硫情况见表 3。

表 3　富氧焙烧与传统焙烧产物残硫对比

焙烧方式	焙砂含硫/%	焙尘含硫/%
富氧焙烧	1.59	3.50
传统空气焙烧	1.62	4.23

从表 3 数据可知，锌精矿富氧焙烧焙砂、焙尘含硫分别是 1.59%、3.50%，比传统空气焙烧焙砂、焙尘含硫 1.62%、4.23% 分别降低了 0.03%、0.73%。从焙烧矿硫物相分析情况看，富氧焙烧焙烧矿中硫化锌物相硫占焙烧矿总硫的 20%，明显优于传统空气焙烧的 30%。提升了焙烧矿的质量，为提升湿法直收率创造了有利条件。

3）能耗。焙烧矿主要能耗包括焙烧矿输送压缩空气、运转电、氧气，锌精矿富氧焙烧与传统焙烧焙烧矿（按金属锌核算）压缩空气单耗、运转电单耗、氧气对比见表 4。

表 4　富氧焙烧工艺与传统焙烧工艺能耗对比

焙烧方式	压缩空气单耗（吨锌）/Nm^3	运转电单耗（吨锌）/kW·h	高浓度氧气单耗（吨锌）/Nm^3	备注
传统焙烧	240.0	147.56	—	2018 年
富氧焙烧	194.0	135.80	81.27	2019 年

由表 4 数据可知，富氧焙烧工艺生产吨锌空压风单耗 194.0 Nm^3，比传统焙烧下降了 46 Nm^3；电单耗 135.80 kW·h，比传统焙烧下降 11.76 kWh/t·Zn；高浓度氧气的单耗为 81 Nm^3/t·Zn。

3 效益情况分析

锌精矿富氧焙烧工艺投运后,按照每年 330 d 生产周期、床能率 8.03 t/m²·d 测算,富氧焙烧工艺年处理锌精矿 288 839.1 t(干基),比传统焙烧工艺可多处理锌精矿 29 495.4 t/a(干基);按 85% 烧成率计算,可多产焙烧矿 25 071.09 t;按焙烧矿含锌 60% 计算,年产焙烧矿含锌 147 307.94 t,可多为湿法冶炼浸出提供 15 042.65 t 锌金属。另外,除增加焙烧矿产能外,还增加硫酸的产量,若按照锌精矿含硫 32%,每年可多产硫酸 2.7 万 t。富氧焙烧产生的经济效益测算如下所述。

1)增加产能提升的利润。每吨锌外卖价格按照 400 元/t 计算,每年多产焙烧矿含锌金属 15 042.65 t,每年利润为:15 042.65 ×400 =601.706 万元。

2)节约运转电成本。按照内部市场电费价格 0.38 元/kW·h 计算,每年节约运转电成本为:147 307.94 ×11.76 ×0.38 =65.83 万元。

3)节约压缩空气成本。按照内部市场压缩空气价格 0.13 元/Nm³ 计算,每年节约成本为:147 307.94 ×46 ×0.13 =88.09 万元。

4)增加硫酸产量提升的利润。按照每吨硫酸内部市场价格 265 元计算,每年硫酸增加效益为:265 ×2.7 =715.5 万元。

5)增加氧气成本。按照每立方米氧气内部市场价格 0.41 元计算,每年增加氧气费用为:147 307.94 ×81 ×0.41 =489.21 万元。

6)投资成本。富氧焙烧装置改造总投资为 61.17 万元。

综上 1)~6)项,每年富氧焙烧产生的经济效益为 920.746 万元。

富氧焙烧工艺除具有良好的经济效益之外,还具有以下优点:提高焙烧系统、硫酸系统装置的利用率;降低鼓风量保障系统负压,有效防止烟尘无组织排放,改善现场环境。另外,富氧焙烧的成功投运,推动了锌焙烧工艺技术的发展,带动了产业技术进步和技术创新。

4 结语

109 m² 锌精矿沸腾焙烧炉富氧焙烧生产投运以来,焙烧炉的床能率和产品质量得到有效提升,并提升了烟气中 SO_2 的浓度,更有利于整个系统硫的回收,由此获得良好的经济效益。生产实践证明,锌精矿富氧焙烧生产工艺还可以改善环境,提升锌精矿焙烧工艺技术,有良好的推广应用前景。锌精矿富氧焙烧技术将是未来锌冶炼的发展方向,同时也是各个企业进行老厂改造或者扩大产能的较优选择之一。

[参考文献]

[1] NYBERG J, METSARINTA M-L, ROINE A. Recent process improvements in the Kokkola Zinc Roaster[EB/OL]. https://doi.org/10.1002/9781118805558.ch25. (2000-08-01)[2021-01-12].

[2] 周述勇. 锌精矿沸腾炉富氧焙烧工业试验的研究[J]. 湖南有色金属,2007(2):33-36.

[3] 邓蕊,曾鹏,陈国木,等. 锌精矿富氧焙烧工业试验[J]. 有色金属(冶炼部分),2019(6):11-14.

[4] 徐鑫坤,魏昶. 锌冶金学[M]. 昆明:云南科技出版社,1996.

[5] 郑丽. 109 m² 焙烧炉工艺改进创新与实践[J]. 甘肃冶金,2013,35(2):5-7.

[6] 袁富明. 鲁奇式大型焙烧炉的参数分析与结构改进[J]. 湖南有色金属,2010,26(6):39-41.

[7] 许良,陈向强. 锌精矿富氧流态化焙烧工艺研究[J]. 中国有色冶金,2014,43(6):28-31.

Application of oxygen enriched air roasting technology in 109 m² fluidized-bed roaster for zinc concentrate

PI Zhong-bin, ZHANG Zhen-guo, WANG Ka-ka, CHAI Wei, XU Liang

Abstract: Application of oxygen enriched air roasting technology in zinc concentrate roaster has stayed in the experimental stage in China over the years. Chihong Zn & Ge is the first to have realized large-scale production of zinc concentrate by oxygen enriched air roasting. The company adds oxygen-enriched air distribution device on the original blast system piping, provided with fittings such as high concentration oxygen regulating valve group and instrumentations for flow and pressure monitoring, along with equipment optimization to fluidizing cooler, high-temperature ID fan and blower. Production practice shows that under proper process parameters, the production capacity of

(下转第 53 页)