

引用格式:武战强,梁帅表,李鸿飞. 双侧吹熔炼-多枪顶吹连续吹炼技术的发展及应用[J]. 有色设备,2025,39(4):100-105.
WU Zhanqiang, LIANG Shuaibiao, LI Hongfei. Development and application of technology of double-side blowing smelting-multi-lance top-blowing continuous converting[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(4): 100-105.

双侧吹熔炼-多枪顶吹连续吹炼技术的发展及应用

武战强¹, 梁帅表², 李鸿飞²

(1. 侯马北铜铜业有限公司, 山西 侯马 043000; 2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 连续炼铜技术近年来发展迅速,其中双侧吹熔炼-多枪顶吹连续吹炼技术逐渐成为新建铜冶炼项目采用的主流工艺流程之一。本文系统梳理该工艺最新发展和应用状况,全面解析该技术的特点及优势,详细论述了该工艺在侯马北铜改造项目中的设计创新理念和生产技术指标。侧吹炉余热锅炉烟道免维护技术、烟尘喷吹、多枪顶吹炉双模式操作、APC 智能控制技术在侯马北铜项目中得到了应用,投产后连续稳定运行一年多,系统作业率大于 98.5%,年产量从 8 万 t 提高到 20 万 t,单位产品指标能耗降低 50%。该项目的应用实践使得双侧吹熔炼-多枪顶吹连续吹炼工艺解决了以往的生产难题,进一步提升该工艺的安全性、自动化水平、生产指标、环保指标。

[关键词] 侧吹;多枪顶吹连续吹炼;喷枪;烟尘喷吹;APC

[中图分类号] TF811 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)04-0100-06

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.04.012

近年来,连续炼铜技术发展迅速,形成了“双闪”连续炼铜和“三连炉”连续炼铜 2 类主流工艺^[1-3]。“双闪”连续炼铜(也称“旋浮熔炼—旋浮吹炼”)单线规模可达 40 万 t/a,其工艺特点是将铜钼粒化后经磨矿干燥进入闪速吹炼炉。“三连炉”连续炼铜属于熔池冶炼工艺,其中,熔炼环节主要采用底吹或侧吹熔炼,吹炼环节分底吹连续吹炼和多枪顶吹连续吹炼 2 类工艺。熔炼炉、吹炼炉、精炼炉采用阶梯式配置,熔体由高到低自流,形成“三连炉”连续炼铜工艺。“双侧吹熔炼—多枪顶吹连续吹炼”形式的“三连炉”工艺应用最为广泛,单线规模已达到 40 万 t/a 阴极铜产量。相比“双闪”连续炼铜工艺,“三连炉”工艺热能利用率高,减少吨铜能耗约 60 kgce。近 3 年在国兴铜业、南国铜业、侯马北铜、金川有色及西南铜业等企业陆续投产,在节能减排、自动化水平提升和环境保护等方面表现突出,成为铜冶炼领域的主流工艺。

1 双侧吹熔炼工艺

双侧吹熔炼工艺主要由加料系统、双侧吹熔炼

炉、渣排放系统、铜钼虹吸和烟气系统组成。熔炼炉由炉缸区、反应区、二次燃烧区组成。原料不需预处理,直接从熔炼炉的炉顶加料口加入。物料和鼓入的富氧空气在反应区内完成氧化反应,铜钼和渣在炉缸区完成沉淀分层,经放渣和铜钼系统分别排放,烟气经上升烟道排出^[4]。

1.1 工艺特点

双侧吹熔炼工艺是一种高效的冶炼技术,其核心在于,通过向熔渣层中喷入高浓度的富氧空气,剧烈搅拌熔池,促使风口区域的熔体转变为乳浊液状态。在此过程中,炉渣构成了熔池的基础相(基体),硫化物熔体则作为分散相散布其中。硫化物与燃料在富含氧气的熔渣基体中发生氧化反应,形成了 1 个包含气态、液态乃至固态多相共存的复杂反应体系,这一特性也使其被称为鼓泡熔炼工艺。

该工艺原理最初由冶金学者瓦纽科夫教授提出,熔炼炉因此得名“瓦纽科夫炉”。该技术的实践应用始于 1968 年,当时在诺里尔斯克炼铜厂建立了 1 座 4 m²的半工业试验炉,1977 年建成 1 座更大规模的 20 m²侧吹炉并投入生产,标志着双侧吹熔炼工

[收稿日期] 2025-03-26

[第一作者] 武战强(1972—),男,山西临猗人,高级工程师,主要从事有色冶炼生产技术管理工作。

艺从实验室走向工业化生产的重要一步。此后,其他冶炼厂相继采用了该技术分别建成了 25 m²、38 m²及 48 m²的侧吹炉^[5]。

国内铜冶炼工业的应用实践中,在瓦纽科夫炉的基础上进行改进优化,炉身结构采用铜水套,能够形成稳定挂渣操作,虹吸道形式放铜,操作更加连续、稳定,富氧浓度可达到 85%,操作温度高,熔渣含铜低。单炉阴极铜生产规模从 10 万 t/a 提升至 40 万 t/a,并广泛应用于铅、镍和固废冶炼领域,生产操作指标也赶超同类型熔炼工艺。

随着双侧吹熔炼技术的广泛应用,相关研究逐渐深入。刘冠廷^[6]通过数值模拟研究发现,在确保铜铕区稳定的前提下,适当增加气体流量可强化熔炼过程。研究表明,风口喷吹角度对熔池搅拌强度和含气率有显著影响,喷吹角度较小时,增大角度有助于气体分散并提高含气率,但角度过大则会缩短气体停留时间,导致含气率下降,模拟结果最佳喷吹角度为 7°~12°。陈朝辉等^[7]进一步研究了不同送风流量(1 300、1 500、1 700 m³/h)对气体贯穿深度和喷溅高度的影响,发现正常操作工况下熔炼效率更高,且熔体喷溅和铜铕相扰动较小。研究指出,1 300 m³/h 流量对应的 38 mm 风口尺寸下,风速达 320 m/s,压力损失较大,而其他炉型风速通常为 260 m/s。数值模拟显示,最大贯穿深度为 0.9 m,对于 2.5 m 宽熔池,有 0.7 m 区域处于未穿透状态,这与生产中的观察情况吻合。

近年来双侧吹熔炼炉的数值模拟研究取得了显著进展,给炉体的设计提供了重要的参考依据。但一些模拟研究成果在实践应用中尚未推进,如炉体宽度长期以来沿用了瓦纽科夫炉的设计标准 2.5 m,该尺寸在一定程度上限制了炉体大型化发展。双侧吹熔炼炉的风口尺寸和间距等关键参数则在设计中有新的优化和调整,不同的风口尺寸和间距对侧吹炉炉内的工况影响十分明显。

1.2 应用情况

双侧吹熔炼炉在国内得到了广泛应用,其应用领域不仅限于铜冶炼,还扩展至再生铅、固废处理、镍冶炼、锌渣处理等多个领域。根据处理物料的不同,炉型和喷枪结构也不同。表 1 为国内铜冶炼企业双侧吹熔炼炉的应用情况表。

表 1 铜冶炼企业双侧吹熔炼炉应用情况

Table 1 Application status of double-side blowing smelting furnaces in copper smelting plant

冶炼企业	侧吹炉规格/m ²	产量/(万 t·a ⁻¹)
赤峰云铜	42	20
南国铜业(一期)	50	28
南国铜业(二期)	70	40
恒邦股份	25	10
富春江冶炼	25.5	10
黑龙江紫金	30	15
吉林珲春紫金	20	10
侯马北铜	38	20
国兴铜业	45	25
赤峰金通(一期)	42	27
赤峰金通(二期)	52	28~30
威海恒邦	30	15
富邦铜业	26	15
西南铜业	60	35
广西金川	54	30
金川集团	60	30

2 多枪顶吹连续吹炼工艺

2.1 工艺特点

2.1.1 炉体结构

多枪顶吹连续吹炼工艺采用一个椭圆形或方形结构的炉体。通过炉顶多只升降式氧枪向熔体表面喷吹富氧空气,多只氧枪可交替更换,实现稳定、连续送风。设计氧枪具备旋转功能以防止溅渣和粘结。

多枪顶吹连续吹炼炉有 2 种结构形式:①椭圆形(类似于三菱吹炼工艺的 C 炉);②上大下小的方形结构。椭圆形炉体结构形式相对简单,无拉杆和钢骨架;方形炉体采用弹簧骨架,通过弹簧和拉杆调节炉体变形,结构复杂,但炉体更为稳定。2 种炉型均在炉体薄弱且容易受损的部位,包括熔体区、炉墙喷溅区、炉顶、烟道入口、铜铕入口以及排放口处,设置铜水套^[8-9]。

2.1.2 氧枪

吹炼炉的氧枪有单排和双排 2 种布置形式,最

早三菱 C 炉采用双排氧枪。于海波等^[10-11]的仿真模拟结果表明,单排布置的吹炼渣层整体速度更大,能量更强有利于渣相的运动;双排交错式布置不利于渣层的动量收束,减少排与排之间的相互影响,提高了喷吹效率。因实际设计受制于炉顶空间,双排氧枪更容易布置,在实际生产中尚未发现单排和双排的明显区别,后续需要进一步研究。氧枪高度与喷出的富氧空气速度也是关键参数,氧枪距渣面高度宜为 200~250 mm,富氧空气的喷出速度宜为 300~450 m/s,喷出速度越大,熔池的穿透深度越大,但引起的喷溅也会变严重。

吹炼炉的氧枪为自耗式,需要根据消耗情况定期更换,氧枪更换采用焊接或者螺纹连接的方式。其中,焊接方式容易浪费且耗时较长,氧枪的更换时间目前通常靠操作经验评估。在氧枪系统上也设置了编码器和失重测量等手段,但由于氧枪端部烧损导致测量失真,氧枪的枪位测量仍然需要进一步研究。

2.1.3 烟道

氧枪顶吹吹炼炉烟道主要有膜式壁烟道和砌砖烟道 2 种结构形式。膜式壁烟道可增加冷却强度,但容易造成喷溅粘结。砌砖烟道可避免膜式壁烟道漏水和喷炉带来的风险,同时减少了喷溅引起的粘结现象的发生。目前以砌砖烟道为主要应用形式,侯马北铜项目采用该设计。

2.2 应用情况

2017 年,赤峰云铜和烟台国润先后实现了多枪顶吹连续吹炼炉的工业化应用。截至 2024 年底,国内已有 12 台多枪顶吹连续吹炼炉投入应用。表 2 为目前多枪顶吹连续吹炼炉应用情况。

3 双侧吹熔炼-多枪顶吹连续吹炼技术的应用实践

3.1 项目背景

侯马北铜公司于 1999 年 11 月建成投产,是我国早期建设的铜冶炼企业之一,也是国内引进奥斯麦特顶吹熔炼和顶吹吹炼技术的企业。由于工艺装备的产能规模局限在 10 万 t/a 阴极铜以下,单位产品能耗偏高、作业环境差、生产成本低,亟需进行技术升级改造。根据企业的现有特点,最终采用中国恩菲“富氧侧吹熔池熔炼+多枪顶吹连续吹炼+回转式阳极炉精炼+不锈钢永久阴极电解精炼+熔炼

表 2 多枪顶吹连续吹炼炉应用情况
Table 2 Application status of multi-lance top-blown converter

冶炼企业	多枪顶吹炉规格/m ²	产量/(万 t·a ⁻¹)	备注
赤峰云铜	50	20	单条生产线
南国铜业(一期)	67.5	28	
南国铜业(二期)	120	40	
侯马北铜	68	20	
国兴铜业	65.7	25	
恒邦(二期)	68	20~25	设计阶段
赤峰金通(二期)	108	28~30	设计阶段
威海恒邦	40	15	
葫芦岛铜业	56	15	
富邦铜业	46	15	
西南铜业	100	35	
广西金川	76	30	
金川集团	108	30	

渣选矿”工艺技术进行改造,生产规模为 20 万 t/a 阴极铜,制酸选用预转化高浓度制酸工艺流程。

3.2 工艺和装备设计创新

侯马北铜项目采用的主要工艺和装备创新如下。

1) 采用侧吹炉扩大段免维护上升烟道。针对侧吹炉上升烟道容易粘结、需要定期停炉爆破、降低侧吹炉作业率、对生产安全造成重大隐患等问题,通过炉体结构、炉口尺寸、上升烟道结构形式的设计优化结合气体流态模拟,增大截面积,降低上升段高度。实际生产证明,第 1 年运行上升烟道未出现明显粘结现象,侧吹炉作业率和安全性大幅提高。

2) 侧吹炉烟尘喷吹入炉技术。电除尘器收集的烟尘收集后就近处理,采用喷吹装置直接喷入炉内。与烟尘运往精矿仓进行配料后再通过皮带加入炉内相比,显著提升了自动化水平,改善了操作环境,降低了烟尘的机械损失,提高了回收率。

3) 多枪顶吹连续吹炼炉技术。在多枪顶吹连续吹炼炉的基础上,增大了炉体面积,增设了全自动残极加料设施,并在炉体水冷元件上融合强水冷技术,适应炉内熔体液面波动的需要,显著延长了关键

薄弱部位的炉寿。此外,在氧枪系统上采取了计量、枪位监控等措施。

4)采用“双侧吹熔炼-多枪顶吹连续吹炼”APC专家控制系统。“三连炉”工艺对系统的连续性提出了更高要求,尤其是双侧吹熔炼炉和多枪顶吹连续吹炼炉联动性强,系统的自动化和智能化控制十分关键。系统配置了在线铜硫成分和温度监测装备,及时发现炉况波动并调整生产参数,配合APC系统快速调节,稳定炉况。实践证明,该系统对稳定生产起到了至关重要的作用。

3.3 生产技术经济指标

3.3.1 产量

侯马北铜项目于2023年10月投产,投产前2个月为设备磨合的试生产期,产量未统计在内。2024年生产运行十分顺利,月均阳极板产量达到18000 t,因配料加入约20%金精矿,入炉物料含铜品位相比设计值降低15%左右,但投料量已达到设计值。图1为2024年全年各月阳极铜产量趋势。

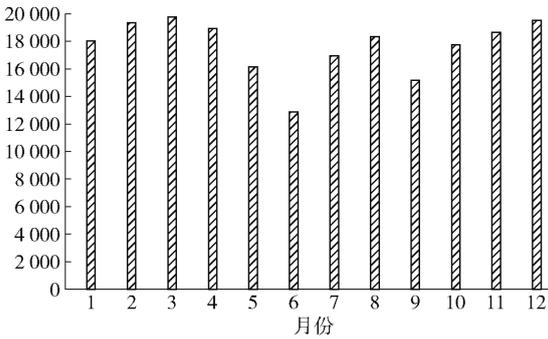


图1 2024年阳极铜产量

Fig. 1 Anode copper production in 2024

3.3.2 双侧吹熔炼炉的生产参数

熔炼采用1台38 m²的双侧吹熔炼炉,目前生产指标折合床能力66 t/m²·d,仍有一定的扩产潜能,主要生产参数见表3。

从表3中看出,熔炼富氧浓度为85%,此时熔炼炉已达到自热平衡,根据烟气和熔池温度调整二次风的氧浓度,二次风基本为空气,有时配入少量氧气,得到的熔炼渣含铜量为1.58%,已达到甚至优于设计指标,铁硅比为1.85~2.0,可有效降低渣量。

3.3.3 多枪顶吹连续吹炼炉的生产参数

多枪顶吹连续吹炼炉的规格为68 m²,配置8只氧枪,主要生产参数见表4。

表3 侧吹炉典型生产参数

Table 3 Typical operating parameters of side-blown furnaces

生产参数	取值	备注
处理精矿量/(t·d ⁻¹)	2 523.29	干基
精矿成分 Cu/%	20.66	
S/%	29.10	
Fe/%	27.65	
SiO ₂ /%	7.56	
熔炼富氧空气/(Nm ³ ·h ⁻¹)	24 940	
富氧浓度/%	85	
二次风/(Nm ³ ·h ⁻¹)	11 240	
二次风氧浓/%	20.67	
铜流量/(t·d ⁻¹)	670	
熔炼渣含 Cu/%	1.58	
熔炼渣中 Fe/SiO ₂	1.85	
熔炼烟尘率/%	1.5	

表4 多枪顶吹连续吹炼炉生产参数

Table 4 Production parameters of multi-lance top-blown continuous converting furnace

生产参数	取值	备注
铜流量/(t·d ⁻¹)	670	
吹炼富氧空气/(Nm ³ ·h ⁻¹)	20 677	
吹炼氧浓/%	28.6	
吹炼氧气/(Nm ³ ·h ⁻¹)	2 453	
吹炼空气/(Nm ³ ·h ⁻¹)	18 244	
空气压力/MPa	0.2~0.3	
粗铜含 Cu/%	98.50	
粗铜含 S/%	0.2~0.3	
吹炼渣 Fe/CaO	2.8	
吹炼烟气含 SO ₂ /%	20.7	
吹炼烟尘率/%	0.2	相对铜流量

多枪顶吹连续吹炼生产的核心问题是粗铜质量的控制、渣含铜的控制和喷枪的操作控制。侯马北铜项目采用薄厚渣层双模式操作,探索了不同渣层操作对粗铜质量和渣含铜的影响,以确定最优的渣层厚度。在渣层厚度为约300 mm操作时,粗铜含

硫降低至 0.1% 以内,但渣含铜增加较多,并对操作带来不确定性。经过多次尝试,粗铜指标确定为含铜 98.5%,含硫 0.2%~0.3%,渣含铜 15%~18%。吹炼渣采用铁钙渣,铁钙比为 2.8,可大量溶解渣中的磁性铁,保证炉渣良好的流动性,降低渣的黏度,使渣含铜保持较低水平。

多枪顶吹连续吹炼炉烟尘率为 0.2%,明显低于行业均值,与设计采用较低烟气流速相关,同时与出烟口位置设置关系密切,生产中基本未发生上升烟道粘结和喷溅状况。多枪顶吹炉处理残极量 11.5 t/d,采用单片间断加料方式。

3.4 实施效果

1) 侧吹炉烟尘率相对较低,为 1.5%。余热锅炉上升烟道振打和清理次数比其他同类企业相比明显降低。某铜冶炼企业因侧吹炉上升烟道粘结曾导致生产一度中断,需 1~3 个月停炉爆破检修,本项目从投产后 1 年多时间中未采取爆破措施。

2) 多枪顶吹连续吹炼炉氧枪消耗为 11 mm/t 粗铜,好于预期,烟尘率低于设计值,通过双模式操作模式明显提高了粗铜质量,优于设计值。

3) 侧吹炉渣含铜 1.58%,指标优于设计值,渣尾矿含铜达 0.19%,低于同类企业(0.25%)和设计指标(0.22%)。

侯马北铜扩产改造,改造后阴极铜产量得到了大幅度提高,从原有年产 8 万 t 提高到 20 万 t,同时污染物排放降低 40%,单位产品指标能耗降低 50%。具体数据见表 5。

表 5 扩建改造前后部分关键指标对比

Table 5 Comparison of key indicators before and after expansion and renovation

指标	改造前	改造后
阴极铜产量/(t·a ⁻¹)	80 000	200 000
工厂人员/人	1 040	780
单位人员产值/(万元·人 ⁻¹)	292.4	2 010.4
阴极铜吨铜能耗/(kgce·t ⁻¹)	405.2	215.3

4 结论

1) 双侧吹熔炼-多枪顶吹连续炼铜工艺近 5 年

的工业应用发展迅速,在生产成本、能耗指标、自动化程度方面显示出较大优势,但在双侧吹熔炼炉炉型大型化、余热锅炉上升烟道粘结、喷溅,多枪顶吹连续吹炼炉喷枪寿命和操作方式,系统自动化程度等方面仍存在较大提升空间。

2) 侯马北铜改造项目通过“三连炉”配置方式改进、多枪顶吹连续吹炼炉炉体结构和冷却元件优化、锅炉上升烟道设计优化、烟尘喷吹入炉及 APC 智能化控制等设计创新,使该工艺的渣含铜 1.58% 以下、烟尘率 1.5% 以下,生产作业率、安全性、能耗指标得到了明显提升,对双侧吹熔炼-多枪顶吹连续炼铜工艺的进步起到重要推进作用,并可推广至同类企业。

[参考文献]

- [1] 孙聪,余群波,袁朝新. 火法连续炼铜的生产实践[J]. 有色矿冶,2020,36(5):28-30.
- [2] 叶峰,罗永春,蔡兵. 新型铜顶吹吹炼喷枪头材料工业化应用研究[J]. 云南冶金,2019,48(1):57-60.
- [3] 高永亮,张哲铠. 富氧侧吹熔炼+多枪顶吹连续吹炼炼铜工艺炉渣元素分布及其矿相特征[J]. 中国有色冶金,2021,50(6):49-55,102.
- [4] 郭江,刘国辉,张石平. 富氧顶吹熔炼炉上部结渣形成的原因与控制实践[J]. 云南冶金,2021,50(5):50-55.
- [5] 杨晋国. 瓦纽科夫熔池熔炼技术综述[J]. 新疆有色金属,2009,32(4):42-44.
- [6] 刘冠廷. 铜富氧双侧吹熔炼炉中多相流的数值模拟[D]. 沈阳:东北大学,2015.
- [7] 陈朝辉,赵升辉,赵明杰,等. 双侧吹熔池熔炼炉内气液两相流数值模拟[J]. 有色金属(冶炼部分),2024(12):8-16.
- [8] 崔大韡. 铜硫多枪顶吹连续吹炼炉设计与展望[J]. 有色设备,2021,35(3):89-91.
- [9] 袁精华. 多喷枪顶吹吹炼炉的现状与发展[J]. 有色设备,2024,38(4):107-112.
- [10] 于海波,罗劲松,邓戈,等. 多枪顶吹连续吹炼过程中喷枪排布方式的数值模拟[J]. 有色金属(冶炼部分),2024(8):1-9.
- [11] WAN Zhanghao, YANG Shiliang. Numerical modelling of stirring characteristics of gas-slag-copper matte Multiphase flow in bath with top submerged lance[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2023(33):2231-2244.

Development and application of technology of double-side blowing smelting-multi-lance top-blowing continuous converting

WU Zhanqiang¹, LIANG Shuaibiao², LI Hongfei²

(1. Houma North Copper Industry Co. , Ltd, Houma 043000, China;

2. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: The continuous copper smelting technology has developed rapidly in recent years, among which the double-side blowing smelting multi-lance top blowing continuous converting technology has gradually become one of the mainstream process flows adopted in new copper smelting projects. The article systematically reviews the latest development and application status of the process, comprehensively analyzes the characteristics and advantages of the technology, and elaborates in detail on the design innovation concept and production technology indicators of the process. Reduction of adhesion and maintenance of the side blowing furnace waste heat boiler flue, smoke and dust injection, multi-mode operation of multi-lance top blowing furnace, and APC intelligent control technology have been successfully applied in the Houma North Copper Project. After being put into operation, it has been continuously and stably running for more than a year, with a system operating rate of over 98.5%. The annual output has increased from 80 000 tons to 200 000 tons, and the energy consumption per unit product indicator has been reduced by 50%. The application practice of this project has solved the previous production problems of the double-side blowing smelting multi-lance top blowing continuous converting process, and further promoted and improved the safety, automation level, production indicators and environmental protection indicators of the process.

Keywords: side-blowing smelting; multi-lance top-blowing continuous converting; lance; dust injection; APC

