

# 现代铜冶炼工艺的节能降耗优化路径与实践

严来鑫

(贵溪冶炼厂, 江西 贵溪 335400)

**摘要** 本文着眼于现代铜冶炼工艺存在的高能耗、高排放等难点,以推动铜冶炼行业绿色低碳转型发展为目的,立足于现代铜冶炼工艺的主要能耗环节与瓶颈,从工艺革新、余热循环、智能赋能和设备迭代四个方面,积极探讨并总结现代铜冶炼工艺的节能降耗优化路径,包括熔炼强化与流程精简、梯级回收与高效利用、精准调控与操作优化、升级改造与淘汰落后。之后,结合实际案例,通过具体工艺参数、设备型号、能耗数值的对比,进一步验证了工艺革新缩短流程、余热循环梯级利用、智能赋能精准调控以及设备迭代淘汰落后的有效性,以期显著降低冶炼过程能耗,推动铜冶炼行业绿色化、高效化发展提供借鉴。

**关键词** 铜冶炼工艺; 节能降耗; 余热循环; 智能赋能; 设备迭代

中图分类号: TF81

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.022

## 0 引言

新时代,铜冶炼行业面临能源消耗、环境污染的双重压力。在“双碳”目标持续推进以及能源成本不断攀升的背景下,节能降耗俨然成为铜冶炼企业提升竞争力的关键手段。近年来,铜冶炼行业对铜冶炼工艺的研究多局限于单一环节改进,缺乏全流程系统性优化方案。基于此,本文拟从现代铜冶炼工艺的主要能耗环节切入,研究现代铜冶炼工艺的节能降耗优化路径。

## 1 现代铜冶炼工艺的主要能耗环节与瓶颈分析

### 1.1 主要能耗环节

现代铜冶炼工艺的主要能耗环节,主要体现在熔炼阶段、吹炼与精炼阶段、电解精炼阶段。其中熔炼阶段的能耗占比为50%,为最高能耗环节。该阶段的主要能源为煤炭、天然气,对温度的要求为1 200~1 300℃,且以富氧熔炼、悬浮熔炼技术为主。吹炼与精炼阶段的能耗占比为25%~30%,该阶段的主要能源为氧气、电力,温度需保持在1 200℃左右,依赖连续吹炼、自动化控制技术。电解精炼阶段的能耗占比为15%~20%,该阶段的主要能源为电力,电解液的温度需保持在55~65℃,主要依赖高效电解槽、电流优化技术。

### 1.2 主要能耗瓶颈

当前,现代铜冶炼工艺能耗方面,面临热效率损失严重、电解效率不足以及装备技术滞后等困境<sup>[1]</sup>。

从热效率损失严重的维度来看,熔炼环节约30%热能随烟气散失,传统余热回收率仅40%~50%,回收效率较低。同时,受间歇作业的影响,吹炼工序会致使炉体蓄热浪费,从而增加能耗。从电解效率不足的维度来看,电解液杂质会令无效电耗升高,且通常情况下,每降低1%电流效率,便会增加电耗100 kW·h/t铜。同时,电解槽的落后设计,也导致吨铜电耗较大。从装备技术滞后的维度来看,鼓风机、反射炉等落后装备,也在一定程度上增加了粗铜综合能耗<sup>[2]</sup>。

## 2 现代铜冶炼工艺的节能降耗优化路径

### 2.1 工艺革新: 熔炼强化与流程精简

在熔炼环节,传统工艺受到反应速率不足、物料停留时间长等因素的影响,致使燃料、电力消耗居高不下<sup>[3]</sup>。故而,需要从熔炼和流程两方面着手,对工艺进行革新,从而降低冶炼基础能耗、减少无效能量投入。

首先要积极推广短流程连续冶炼技术,即要加强对“双侧吹熔炼+多强顶吹连续吹炼”一体化工艺的应用,取消传统转炉吹炼环节,达到缩短流程、减少热损失的目的。同时,要主动采用旋浮熔炼炉代替反射炉,提高氧气浓度和熔炼强度,并在最终切实降低燃料消耗;其次要优化熔炼过程反应,即可以在阳极精炼阶段利用纯氧替代空气燃烧,减少氮气带走的热量,并降低烟气量以及天然气单耗。针对铜铈吹炼环节,则可以利用连续吹炼技术实现24小时不间断生产,且充分保证烟气SO<sub>2</sub>浓度稳定,并显著提升硫回收率,降

作者简介: 严来鑫(1997-),男,本科,助理工程师,研究方向: 冶金工程。

低无组织排放风险。针对含铅铜精矿，则可以直接采用直接还原工艺，避免渣冷却再熔的二次能耗，提升金属回收率。

## 2.2 余热循环：梯级回收与高效利用

传统工艺因余热回收装置不完善、梯级利用不足，致使较大比例的可用热能被直接排放<sup>[4]</sup>。因此，应从梯级回收和高效利用两方面入手，促进余热循环，将原本浪费的热能转化为电能、余热能等，从而切实提升能源自给率、减少化石燃料消耗。

第一，要加强烟气余热梯级回收系统应用。具体来说，可在 400 ~ 600 °C 高温烟气驱动余热锅炉的条件下，耦合有机朗肯循环（ORC）发电技术，进一步提高低温烟气效率以及吨铜发电量。在此基础上，也应积极优化烟道结构设计，即加强对“一进二出”汽化烟道分流技术的有效应用，切实提升粉尘适应性和余热转化效率。夏季还可以利用余热驱动溴化锂机组制冷，替代传统电制冷能耗。冬季则可以将 10 ~ 200 °C 烟气用于厂区供暖。第二，要实现工艺热耦合。例如：可利用高温焙烧余热直接加热浸出液，降低湿法炼锌能耗。还可以利用熔炼段高温蒸汽预热电解液至 60 °C，从而切实减少电解槽外部蒸汽消耗。江西铜业主动将闪速熔炼炉 1 200 °C 高温余热引入制氧系统中，实现对电加热再生吸附剂的有效替代，年节电 8 000 万度、制氧成本降 40%。

## 2.3 智能赋能：精准调控与操作优化

传统铜冶炼主要以人工经验调节工艺参数为主，所以，十分容易因操作偏差而致使局部过热、反应不完全等情况出现<sup>[5]</sup>。针对此种情况，可以以精准调控、操作优化为目的，实现智能赋能，切实解决人为因素导致的能源浪费。

从工艺参数的角度来看，可以积极部署电流密度自适应系统，使其可以依据电解液杂质浓度，对槽电压进行动态调整，并切实降低吨铜电耗。在此基础上，也要加强对在线成分分析仪（LIBS）的应用，进而动态调节氧气、精矿比例，减少因过剩氧导致的烟气热损失。从设备管理和维度的角度来看，可以积极打造冶炼炉数字模型，并利用该模型模拟温度场、流场分布，从而实现对炉衬侵蚀的提前预警，减少非计划停炉次数<sup>[6]</sup>。例如：可利用数字化技术改造构建全流程智能管控系统，并有机集成熔炼、电解工序数据，实现阳极板质量自动检测和搬运，切实降低综合能耗。同时，对关键设备的振动数据、温度数据等进行实时分析，提高预测准确率、降低维修成本。例如：可利用 AI 巡检系统对皮带运输机堵料、跑偏等工况进行监测，实现年增经济效益，并显著降低维修成本。

## 2.4 设备迭代：升级改造与淘汰落后

老旧设备电力转换效率低、传统耐火材料保温性能差，导致各环节的实际能耗相对较高。所以，要积极对设备开展升级改造和淘汰落后工作，进而能从生产工具层面消除能源浪费，并满足国家能效标准。

针对在基准水平以下的鼓风机、反射炉等，将其替换成旋浮熔炼炉、双熔池连续炼铜炉，进而实现连续化生产，并切实减少热能损失。同时，为能进一步降低阴极剥离能耗、备件成本，并提升电流效率和阴极铜合格率，则还可以将电解槽升级为永久阴极不锈钢电解槽。在新的时期，也要用倾动式精炼炉替代固定式阳极炉，提高倾转出铜速率，降低天然气单耗。除此之外，还要加快淘汰高耗能、低效率的传统电炉、敞口式熔炼炉等落后工艺设备，积极推广使用高效、节能的短流程冶炼技术、装备，切实降低传输过程中的电力消耗。同时，这也可以充分彰显企业践行绿色低碳发展的责任担当。

## 3 典型案例分析

本文从工艺革新、余热循环、智能赋能和设备迭代四个维度出发，选取具有代表性的铜冶炼企业，对本文提出的节能降耗优化路径进行分析。

### 3.1 工艺革新案例

某企业原本采取的是反射炉熔炼 + 转炉吹炼的传统工艺。其中，熔炼环节燃料消耗占吨铜总能耗的比例较大，约 60%，烟气余热回收率也相对较低，约 45%。同时，转炉每 2 小时需要换炉一次，这增加了炉体蓄热损失。故而，该企业选择对工艺进行革新：积极引进双侧吹熔炼和闪速吹炼短流程工艺，实现了对传统转炉环节的有效替代。且在新工艺的支持下，熔炼流程也从原本的熔炼、吹炼、精炼三段式，有效缩短为熔炼、直吹精炼两段式。该工艺下，中间物料转运次数从每日 12 次减至 3 次，切实降低了热损失，约为 20%。此外，该企业还利用旋浮熔炼炉替换反射炉，进一步提高了富氧浓度、优化了喷嘴结构使熔炼强度，使得天然气单耗从 180 m<sup>3</sup>/t 降至 129.6 m<sup>3</sup>/t，熔炼温度稳定性也从 ±20 °C 提升至 ±10 °C。综合所述，该企业通过革新工艺，使得吨铜综合能耗从 380 kgce 降至 285 kgce、硫捕集率从 98.5% 提升至 99.6%、烟气 SO<sub>2</sub> 浓度从 800 mg/Nm<sup>3</sup> 降至 50 mg/Nm<sup>3</sup>。

### 3.2 余热循环案例

某企业熔炼炉烟气流量为 120 万 Nm<sup>3</sup>/h、为温度 1 200 °C，但原有余热锅炉在回收热量方面稍微逊色，仅能回收 400 ~ 600 °C 区间热量，且 100 ~ 300 °C 低

温烟气直接排放,导致热效率损失超50%。同时,该企业冬季厂区供热主要依靠2台20 t/h燃煤锅炉,使得能耗成本占辅助生产成本的18%。针对该实际情况,该企业选择对系统进行优化设计,并实现多能利用。首先,打造三级回收系统,即针对400~600℃高温段,科学配套2台35 MW余热锅炉,用回收烟气热量产生的3.82 MPa饱和蒸汽,驱动25 MW汽轮机组年发电;针对150~300℃中温段,加强有机朗肯循环(ORC)技术利用,并实现氟利昂工质发电;针对80~150℃低温段,利用板式换热器将电解液预热至50℃,切实降低了20%蒸汽消耗。同时,还实现了季节性多能联供,即夏季利用余热驱动2台2 000 kW溴化锂机组制冷,满足办公楼空调需求。冬季将10~200℃烟气接入厂区供暖管网,替代原燃煤锅炉。综合所述,该企业通过对系统进行优化设计,使得余热综合利用率从55%提升至82%、年节约标煤5.6万吨,且减少了外购电1 200万kW·h。

### 3.3 智能赋能案例

某企业在电解工序环节,主要以利用人工经验调节电流密度、槽电压为主,致使电流效率波动大,且吨铜电耗偏高。同时,该企业还存在熔炼炉炉衬侵蚀无实时监测、非计划停炉次数年均8次的情况,使得维修成本占比占据较大比例。针对该实际情况,该企业主动加强数字技术应用:首先利用数字技术构建覆盖熔炼炉、电解槽的能源管理中心,并依托该中心,对熔炼氧料比、电解液As/Sb杂质浓度等2 000+参数进行实时采集,并基于采集到的数据,协同AI算法,对熔炼氧料比、电解液杂质控制阈值等进行动态优化。同时,该企业还积极打造了精准调控系统,即在电解环节,科学部署电流密度自适应系统,由该自适应系统依据实时杂质浓度,自动调节槽电压,以此达到将电流效率稳定在98.5%以上、降低铜电耗的目的;在熔炼环节利用数字模型,模拟温度场、流场分布,并实现对炉衬侵蚀速率的有效预测,旨在达到降低非计划停炉次数的目的。并且,该企业也在风机、泵类等关键设备上合理部署了振动传感器、温度监测模块,实现了对机械故障的提前预测,这切实降低了维修成本。综合所述,该企业通过加强数字化技术应用,使得吨铜电耗从310 kW·h降至295 kW·h、电流效率稳定在98.5%~99%区间、设备运维效率提升40%。

### 3.4 设备迭代案例

某企业原有2台鼓风机、3台反射炉,且综合能耗350 kgce/t阴极铜、烟气中颗粒物(PM)浓度150 mg/Nm<sup>3</sup>、

SO<sub>2</sub>浓度600 mg/Nm<sup>3</sup>。同时,该企业的电解槽为传统始极片工艺,电流效率仅97%。基于该情况,该企业选择对设备进行升级:将鼓风机、反射炉全部替换为旋浮熔炼炉、双熔池连续炼铜炉,切实降低了燃料消耗、提高了熔炼强度,令天然气单耗从180 m<sup>3</sup>/t降至126 m<sup>3</sup>/t、日处理量从1 500 t增至2 250 t;将电解槽升级为永久阴极不锈钢电解槽,且在阴极剥离采用液压机械手作业,实现对手工作业的有效替代,这切实降低了剥离能耗、提升了电流效率;利用倾动式精炼炉代替固定式阳极炉,提高了出铜速率,降低了天然气单耗;同时,对风机、泵类等积极开展变频改造工作,进一步减少了电力传输损耗。综合所述,该企业通过积极落实设备升级工作,使得吨铜综合能耗从350 kgce降至260 kgce、年减少碳排放12万t、烟气颗粒物浓度降至10 mg/Nm<sup>3</sup>、SO<sub>2</sub>浓度降至20 mg/Nm<sup>3</sup>。

## 4 结束语

本研究通过工艺革新、余热循环、智能赋能、设备迭代,积极总结了现代铜冶炼工艺的节能降耗优化路径,这既可以有效回应“双碳”战略,也可以推动铜冶炼行业绿色低碳发展。未来,在全球能源格局加速重构的背景下,铜冶炼行业需进一步突破传统生产模式的惯性依赖,持续通过技术创新、管理优化、模式变革,包括引入电炉熔炼、氧气底吹等先进工艺降低综合能耗,积极借鉴能效“领跑者”企业的余热梯级利用经验,加强低品位铜矿的浮选工艺优化与资源闭路循环体系建设,推动铜冶炼行业走上绿色低碳的高质量发展道路。

## 参考文献:

- [1] 金钊,李春雷,杨顺贵,等.粗铜冶炼企业提升能效水平降低碳排放的研究与应用[J].低碳世界,2026,16(01):107-109.
- [2] 许英豪.基于浮选药剂回用技术在铜冶炼厂节能减排中的应用[J].中国金属通报,2025(09):171-173.
- [3] 郝晓东.铜冶炼烟气制酸系统中污酸污水装置节能增效改造实践[J].硫酸工业,2024(06):38-41.
- [4] 谢钿生.大型铜冶炼高效节能铜电解新技术研究[J].有色金属(冶炼部分),2025(03):97-104.
- [5] 陈薪光.浅谈海外铜冶炼企业节能减排降碳管理实践与探索[J].有色矿冶,2024,40(03):58-60.
- [6] 林世凡,自振华.铜冶炼烟气制酸系统浓酸泵变频器节能改造实践[J].硫酸工业,2024(04):34-37.