

引用格式:马鹏飞,黄剑龙,王天红,等.铜冶炼450 t倾动炉技术改进及应用效果[J].有色设备,2025,39(6):62-67.

MA Pengfei, HUANG Jianlong, WANG Tianhong, et al. Technical improvement and application effect of 450 t tilting furnace for copper smelting[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(6): 62-67.

铜冶炼450 t倾动炉技术改进及应用效果

马鹏飞,黄剑龙,王天红,徐帅

(广西金川有色金属有限公司,广西防城港538000)

[摘要] 广西某铜冶炼企业450 t倾动炉存在热利用率低、氧化还原区耐火砖寿命短(仅7个月)、排烟系统运行不畅及加料升温周期长(大于16 h)等问题,本研究结合冷料处理工艺特性,提出多维度优化方案并实证。本研究主要通过以下技术方案:1)按原料组分实施“配料单式”加料管控,优化双加料门分工;2)增加4支顶部燃烧枪,强化热场均匀性;3)配置稀氧燃烧枪,实现高低位切换;4)氧化还原区设铸造铜水套降温;5)排烟系统改铜水套烟道,新增水冷换热器。通过一系列优化改造,炉体耐火砖寿命延至11~13个月,热利用率提升20个百分点,加料升温周期缩短3.5~4 h,排烟温度系统运行通畅;同时阳极板合格率得到了提升、产渣量减少,作业效率与产能提高,维护成本降低。本方案通过工艺-设备-热工协同优化,解决倾动炉核心问题,降低能耗成本,为行业同类设备低碳改造提供实证参考。

[关键词] 倾动炉;顶部燃烧枪;铜水套;水冷换热器;铜冶炼;节能降耗

[中图分类号] TF811

[文献标志码] A

[文章编号] 1003-8884(2025)06-0062-06

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.06.008

0 引言

铜冶炼是国家战略性基础工业领域的重要组成部分,近年行业产能稳步增长,同时国家对能效的管控标准持续加严,精炼环节的运行效率已成为企业生产的关键关注点。在精炼生产中,残极、外购粗铜等固体冷料占企业原料总量的20%~40%,这类物料的熔化效率,直接影响精炼系统的产能释放与整体能耗。

倾动炉是处理这类冷料的核心设备,其运行状态直接影响企业生产成本控制与生产流程连续性。当前行业内不少倾动炉仍存在能源利用效率偏低、物料熔化周期较长的问题,与行业低碳转型的发展方向不匹配。

广西某铜冶炼企业的450 t倾动炉,采用加料车经双加料门投料的方式,但实际运行中存在天然气利用率不高、物料熔化速度慢的问题,热利用率仅仅达到70%,既形成精炼系统的生产瓶颈,也影响后

续电解工序的原料供应节奏。因此,对该倾动炉开展效率优化研究,不仅能解决企业当前的生产难题,也可为行业同类设备的改进提供实践参考,具备实际应用价值。

1 倾动炉结构与工艺流程

倾动炉炉顶设计为吊挂砖结构,东端墙配置有2套额定能力为570 Nm³/h的燃烧枪对炉体进行加热保温,北侧墙配置有7套氧化还原枪及眼砖,用于搅拌熔池及氧化、还原操作。倾动炉炉体结构如图1所示,倾动炉生产烟气工艺流程如图2所示。

2 倾动炉存在问题

2.1 入炉物料成分复杂

倾动炉主要用于处理电解产残极、高品位冷料及外购粗铜等,入炉物料成分复杂,每炉次工况波动较大。

1)高品位冷料及外购粗铜每批次成分不同,部

[收稿日期] 2025-08-03

[第一作者] 马鹏飞(1992—),男,甘肃会宁人,本科,工程师,主要从事铜火法冶炼工艺技术管理工作。

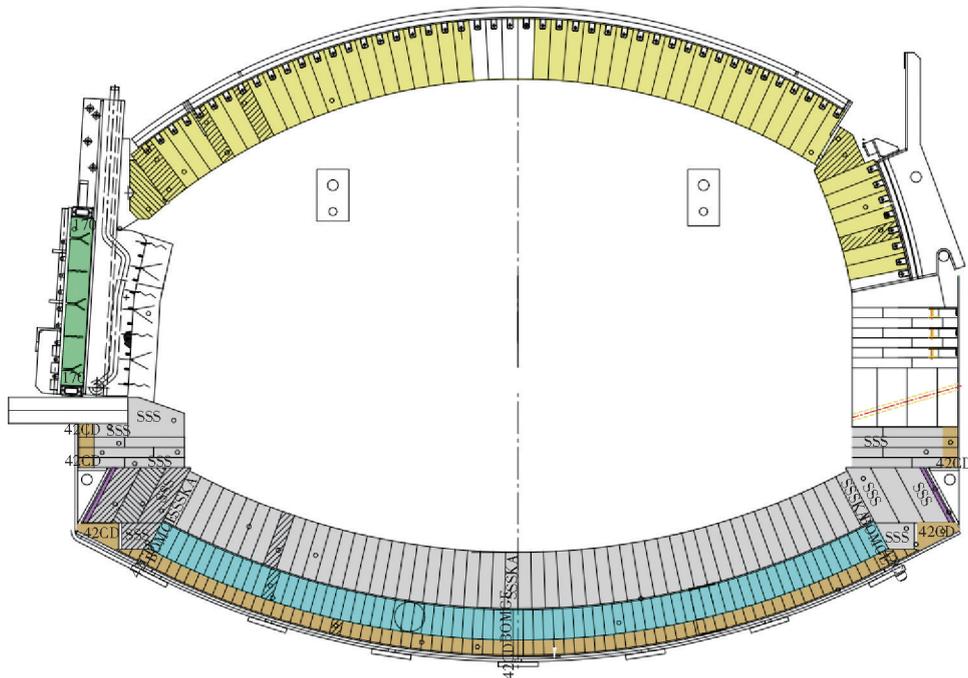


图 1 倾动炉炉体结构

Fig. 1 Tilt furnace body structure

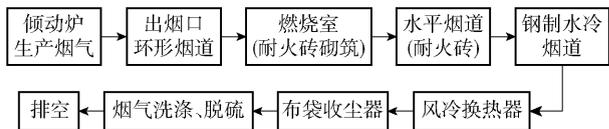


图 2 倾动炉生产烟气工艺流程

Fig. 2 Process flow of flue gas production in a tilting furnace

分批次含镍、铅、砷等元素超出阳极板化学品级指标,倾动炉目前无任何除杂能力,杂质元素沉积在炉膛内,造成炉膛粘接、渣量大且黏、熔体升温效率低等问题,只能通过加入大量石英、生铁造渣的方式降低对炉况的影响,导致倾动炉单炉作业时间延长,同时影响阳极板化学品合格率。

2) 倾动炉炉入炉物料成分复杂,而投产以来入炉物料全靠经验进行配料,未能做到精细化操作,有待通过合理的优化配料来提升生产效率。

3) 目前倾动炉系统的物料使用加料车经过东侧 1#炉门及西侧 2#炉门投入倾动炉内,这样导致物料在炉门周边堆积不能及时熔化,投加到一定程度只能停止加料,待物料熔化后有了空间后再加料,导致每炉次总的加料时间达到平均 12 h。

4) 由于稀氧燃烧枪的火焰方向为从东到西,因此火焰被 1 号炉门东侧堆积的物料阻挡,物料只能

从东到西依次熔化,降低了天然气的利用率以及热效率,物料熔化升温速率慢,每炉次仅升温期达到平均 7 h,导致倾动炉作业效率较低。

2.2 升温氧化时间长

倾动炉稀氧燃烧 A 枪及 B 枪总的天然气流量上限约为 $1\ 140\ \text{Nm}^3/\text{h}$,叠加加料问题,导致倾动炉加料和升温时间长达 16 h。历年来倾动炉生产实践表明,氧化还原区侧壁吊挂砖及炉墙砖结合部砖体为倾动炉最薄弱的环节,该部分砖体每炉均要经历长时间氧化升温及高温熔体的侵蚀,使用寿命只有 7 个月,对提高倾动炉效率制约性大。

2.3 出烟口环形钢水套烟道烧损变形

出烟口环形烟道分为两段,即出烟口水套和燃烧室水套,均分上下两个半圆拼装而成,出烟口水套嵌入燃烧室水套内 $100\sim 150\ \text{mm}$ 深,并留有旋转缝隙。环形钢水套烟道是倾动炉排烟系统的薄弱环节,每块环形钢水套烟道使用至中后期都会发生变形,导致两段水套结合部位出现宽缝而漏烟,使用周期 2~6 个月不等,不匹配倾动炉炉体检修周期,其检修更换对倾动炉生产扰动较大。

2.4 倾动炉排烟系统不满足高温烟气的处理需求

倾动炉烟气温度较高,与阳极炉相近^[1-2],依靠水平烟道的水冷盖板、水冷烟道和风冷换热器不能

将烟气调节至布袋能接受的温度条件^[3]。因此,强制采用兑冷风方式,使布袋入口烟气降温至 180 ℃ 以下。大量兑冷风后炉膛负压不足,造成倾动炉排烟不畅,炉口、渣口、出烟口等位置烟气大量逸散。

3 技术改进方案与实施

3.1 精细化管控加料过程

1) 为解决加料无固定配比、原料混合不均导致

的熔化周期过长问题,基于残极、外购粗铜及高品位冷料的成分差异(残极铜含量 98.5% ~ 99.1%,外购粗铜铜含量 97.0% ~ 98.0%、含杂率较高,高品位冷料铜含量 99.1% 以上、易熔),对倾动炉的入炉物料进行“配料单式”管理(表 1),提高配料的精细化管理,从源头管理粗铜品质,严格控制产渣量。每次加料前必须严格按照配料单要求进行配料,保证阳极板的化学成分。

表 1 倾动炉配料单
Table 1 Tilt furnace material list

物料名称	份数	百分比/%	加入量/t	Cu/%	As/%	Bi/%	Fe/%	Ni/%	Pb/%	Sb/%
残极	0.3	30.00	135	99.1	0.28	0.11	0.016	0.032	0.3	0.072
外购废板(杰拉德)	0	0.00	0	99.79	0.029	0.008	0.002	0.0064	0.05	0.02
外购废板(第一量子)	0.15	15.00	68	99.07	0.02	0.008	0.006	0.17	0.05	0.02
外购废板(hartree)	0.00	0.00	0	99.43	0.074	0.008	0.003	0.074	0.05	0.02
铜锭(易门)	0	0.00	0	98.71	0.17	0.012	0.082	0.12	0.05	0.046
铜锭(中色)	0	0.00	0	97.36	0.02	0.016	0.007	0.012	0.05	0.02
铜锭(金水)	0.4	40.00	180	98.62	0.023	0.0028	0.002	0.09	0.11	0.054
铜锭(中信)	0	0.00	0	98.76	0.02	0.008	0.22	0.12	0.17	0.02
脱铜板	0.05	5.00	23	98.6	1.15	0.053	0	0.039	0.01	
入炉量及成分	1	100.00	450	98.89	0.18	0.04	0.01	0.071	0.15	0.05
前一份配料单入炉成分				99.10	0.21	0.11	0.01	0.075	0.24	
成分要求				≥98.5	≤0.35			≤0.08		

备料岗位根据配料单核对物料储存情况进行备料,作业过程中条件允许的情况下全程低负压操作,以炉口少许窜出火苗为准。

除脱铜板以外,其余物料可根据现场备料情况入炉(偏差 ± 20 t),自产杂铜不足的情况下可配入残极。

2) 针对目前倾动炉热效率低的情况,优化加料方式,具体为:

第一次加入残极总加入量的 1/4,入炉结束后配入石英,第二次、第三次加料配入残极总加入量的 1/2 和碎铜及脱铜板,第四次加入铜铈粉 25 kg,第五次配入自产杂铜及外购粗铜,第六次加入铜铈粉 25 kg,第七次加入剩余的加料、残极及杂铜。

除第一、第二次料单次可加料量可达 90 t 以外,第三次开始单次加料量控制在 50 t 以内。为充分利用一号炉口区域化料快的优势,一、二号炉门加入的

物料占比,原“平均加入”调整为“一号炉门加入 70%、二号炉门加入 30%”。

通过对倾动炉入炉物料进行“配料单式”管理,进一步从源头管理粗铜品质,保障了阳极板化学品级指标,减少了炉膛粘接、渣量大、黏度大等问题。

3.2 新增顶部燃烧枪

设计 4 支双通道套管式喷枪,中心通天然气,套管层通氧气助燃。喷枪管外部自距枪头 1 200 ~ 1 400 mm 位置,枪体每间隔 100 ~ 150 mm 设置 1 处固定卡件。炉顶新增 4 块管座吊挂砖,喷枪伸出砖体 100 ~ 150 mm,每支喷枪出口设计天然气流量为 100 ~ 150 Nm³/h,氧气流量为 200 ~ 300 Nm³/h。该燃烧枪用于物料的快速熔化,熔化后关闭该燃烧枪。

通过在倾动炉顶部增加燃烧枪,在加料期对准加入物料燃烧,促进加料期加入的物料快速熔化,既实现了对表面熔体加热的效果,也促进了稀氧燃烧

枪的燃烧实现铜液保温及升温,热利用率提高了约20%,倾动炉加料等待时间缩短0.5~1 h,并实现了炉膛温度均匀,减少了砖体的烧损。

3.3 稀氧燃烧枪实现高低位操作

在倾动炉端墙上,较原烧嘴砖低400~500 mm位置再安装2套烧嘴砖,新烧嘴砖安装在渣线以上100~200 mm位置,在炉体中心线左右对称分布。燃烧枪、管道及阀门等设施保持原位。加料期使用原高处燃烧枪熔化物料,升温期使用新增的低处燃烧枪,使得燃烧热量在熔体表面释放,达到提高升温效率的目的。

在倾动炉加料期开始时,将稀氧燃烧枪安装入高位烧嘴砖使用,顶部燃烧枪投入使用,随着加料过程的进行,物料被炉内多支燃烧枪快速熔化,倾动炉可连续进行加料。加料结束后将稀氧燃烧枪安装入低位烧嘴砖使用,可快速对炉膛温度提升,进一步促进熔体温度的提升。

通过稀氧燃烧枪设置高低位切换操作,在加料期使用高位枪对物料快速熔化,加料结束后使用低位枪使火焰下移促进熔体温度进一步提升,缩短了倾动炉升温时间约3 h。

3.4 氧化还原区增加铜水套冷却

为了延长氧化还原区砖体寿命,在倾动炉氧化还原区侧壁吊挂架底部增加铸造铜水套冷却^[4]。铜水套的厚度与侧壁吊挂砖相同,先在直炉墙上方侧壁吊挂架底部安装倾斜的不锈钢托板,再将铜水套水平安装在不锈钢托板上方与侧壁吊挂砖之间,并采用螺栓固定的方式固定在侧壁吊挂架上,目的在于对直炉墙底部砖体及顶部吊挂砖进行冷却,同时也起到支撑上方吊挂砖的作用。

通过在氧化还原区侧壁吊挂砖及炉墙砖之间增加侧壁平水套及风冷件,有效减少了氧化还原过程中熔体喷溅对砖体的侵蚀,解决了氧化还原区砖体寿命过短导致倾动炉寿命较短的问题,氧化还原区砖体寿命由7个月延长至11~13个月以上。

3.5 倾动炉排烟系统改进

倾动炉近沉渣室一侧的出烟口区域,使用楔形砖砌筑成圆弧形烟道,炉体侧环形烟道改为铜水套结构,加强密封性,并在铜水套与圆弧形烟道旋转衔接部位增加小块钢水套,便于铜水套检修维护。

1) 靠近炉体侧水套采用铸造铜水套,分为上、下两半,内部捣打浇注料,水路设置为2进2回,延

长区域寿命,前端有200 mm伸入沉渣室水套内部,防止窜火。

2) 倾动炉近沉渣室一侧的出烟口区域,使用楔形砖砌筑成圆弧形烟道,砖体厚350 mm,拱脚位置采用工字钢支撑加固。靠近出烟口法兰水套的位置使用钢水套,能方便出烟口法兰水套的拆装,钢水套法兰连接。

3) 钢水套需要安装在法兰上,因此在环形砖烟道的头部将法兰焊接到烟道拱脚支撑梁上,既当作法兰使用起到连接钢水套的作用,也起到支撑砖体限制其无限膨胀作用。优化后环形烟道及出烟口衔接如图3所示。

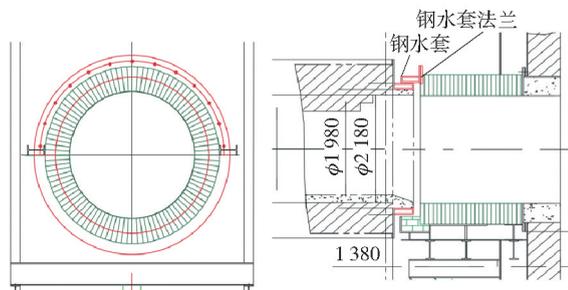


图3 优化后环形烟道及出烟口衔接

Fig. 3 Optimized annular flue and outlet connection diagram

4) 在倾动炉燃烧室出口的水平烟道上增加2组水冷换热器(分10个小模块)^[5],换热管采用 $\phi 32 \times 3$ 锅炉管制作,用炉体循环水作为冷却介质。水冷换热器如图4所示。水冷换热器将烟气温度从1100℃降低至400℃,所需计算换热面积为150 m²,按余量10%设计换热面积为162 m²。为防止烟气温度过低导致布袋结露,两组换热器进出口处均设置调节阀,根据现场作业环境,调整换热器出口流量,避免烟气温度过低。

通过对倾动炉排烟系统实施系列改造,有效解决了倾动炉生产烟气逸散问题,创造了良好作业环境。倾动炉水平烟道位置安装水冷换热器,消除了烟气温度过高和夹杂高温烟尘导致倾动炉布袋烧损的风险,倾动炉出烟口区域钢水套改造为铜水套与耐火砖相结合,减少了烟气泄漏,延长了水套使用寿命。倾动炉系统负压提高后,避免了炉内因正压造成炉体耐火砖寿命缩短,同时有助于Pb、Zn、As等杂质随烟气排出炉^[6],缩短了作业周期,提升了产品质量。

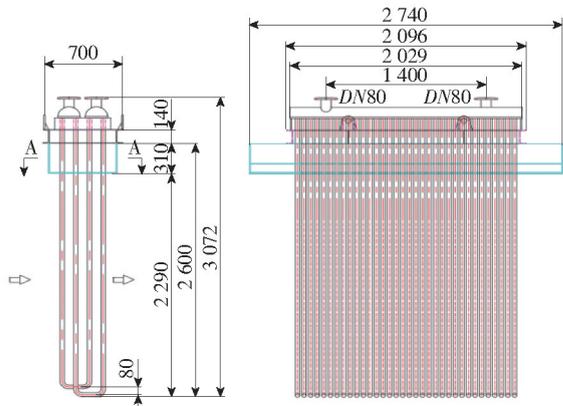


图 4 优化后倾动炉水冷换热器

Fig. 4 Optimized tilted furnace water-cooled heat exchanger

4 实施效果验证

为精准检验倾动炉改造实效,特针对热工与能耗指标、设备寿命与稳定性、物料处理与产能指标、产品质量等核心指标开展实施效果验证,结果见表 2。

通过表 2 验证,倾动炉改造实施效果显著,各核心指标均实现大幅优化。热工与能耗方面,热利用率提升至 90% 以上,天然气单耗下降 11% ~ 18%,布袋入口温度降至 160 °C 达标,熔渣黏度降低使排渣更顺畅;设备稳定性方面,氧化还原区增设冷却铜水套后,耐火砖寿命延至 11 ~ 13 个月,减少检修次数与生产中断;物料处理及产能方面,单炉作业周

表 2 实施效果验证

Table 2 Implementation effect verification

验证类别	改进前	改进后
热工与能耗指标	热利用率 < 70%; 天然气单耗无下降; 布袋入口温度 > 200 °C; 1 200 °C 时熔渣黏度 1.8 ~ 2.2 Pa·s, 排渣不畅	热利用率 > 90%; 天然气单耗下降 11% ~ 18%; 布袋入口温度降至 160 °C (满足 ≤ 180 °C 要求); 1 200 °C 时熔渣黏度 1.2 ~ 1.5 Pa·s, 排渣顺畅
设备寿命与稳定性	耐火砖寿命仅 7 个月; 每年外部检修挖补 2 次, 生产易中断	耐火砖寿命延至 11 ~ 13 个月; 仅年修期间更换砖体, 降低检修费用, 间接释放产能
物料处理与产能指标	单炉作业周期 30 ~ 33 h; 炉渣占比 8% ~ 10%, 回收率较低	单炉作业周期缩至 26 ~ 30 h, 产能提升; 炉渣占比 5% ~ 6.5%, 回收率提高
产品质量	阳极板化学品合格率 85% ~ 90%; 镍 > 0.1%、铅 > 0.35%、砷 > 0.35%, 超出企业阳极板质量标准	阳极板化学品合格率升至 91% ~ 93%; 镍、铅、砷等元素均达标

期缩至 26 ~ 30 h, 炉渣占比降至 5% ~ 6.5%, 产能与回收率均提升; 产品质量方面, 阳极板化学品合格率升至 91% ~ 93%, 镍、铅、砷等元素均达标, 整体提升生产效率、降低成本。

5 结论

针对广西某企业 450 t 倾动炉运行中存在热利用率偏低、关键设备寿命短、排烟系统运行不畅及作业效率不足等核心问题, 本研究通过设计并实施多维度协同技术改进方案, 实现了倾动炉系统综合性能的全面优化, 具体结论如下。

1) 本研究构建的“精细化加料管控 + 燃烧系统优化 + 冷却结构改进 + 排烟系统改造”技术体系, 针对性解决了倾动炉各环节运行瓶颈。其中, “配料单式”加料管理与双炉门差异化投料模式, 有效

改善了原料混合不均、堆积熔化滞后的问题; 炉顶新增燃烧枪与稀氧燃烧枪高低位切换运行相结合的方式, 显著提升了炉膛热场均匀性; 氧化还原区增设铸造铜水套冷却系统, 补齐了关键区域缺乏针对性冷却的短板; 铜水套烟道改造与水冷换热器新增配套, 彻底解决了烟气高温逸散的行业难题。各改进措施相互配合, 构建起贯穿“物料-燃烧-冷却-排烟”全流程的优化模式。

2) 工业实践数据显示, 技术改进后倾动炉关键运行指标均达成预设优化目标: 热利用率较改造前提升 20 个百分点, 作业效率从不足设计值 70% 升至 90% 以上; 氧化还原区耐火砖使用寿命从 7 个月延长至 11 ~ 13 个月, 单炉作业周期由 30 ~ 33 h 缩短至 26 ~ 30 h; 阳极板化学品合格率从 85% ~ 90% 提升至 90% ~ 93%, 各项指标均满足企业生产要求

与行业相关标准。

3)从环境效益来看,天然气消耗量降低11%~18%,结合烟气热量回收额外节省能耗5%~7%,减少了碳排放与烟气无组织逸散,与有色金属冶炼行业低碳转型的发展方向高度契合;从应用来看,方案充分适配倾动炉现有结构特性与生产实际,改造工艺成熟可靠,实施难度适中,无需大规模更换核心设备,具备较强的工程可操作性与落地性。

研究成果不仅适用于450 t倾动炉,其核心技术思路可推广至其他吨位、同类工艺的铜冶炼倾动炉,对助力有色金属冶炼行业设备高效化、低碳化升级具备重要的实践参考价值。

[参考文献]

- [1] 孙丽娜,王辉. 阳极炉精炼现状及发展趋势[J]. 铜业工程,2020(4):69-72.
- [2] 姜忠明. 延长ISA炉炉寿的操作实践[J]. 有色矿冶,2020,36(6):27-30,57.
- [3] 张殿印,张学义. 除尘技术手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2002.
- [4] 傅崇说. 有色冶金原理[M]. 北京:冶金工业出版社,1993.
- [5] 《有色冶金炉设计手册》编委会. 有色冶金炉设计手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2004.
- [6] 朱祖泽,贺家齐. 现代铜冶金学[M]. 北京:科学出版社,2003.

Technical improvement and application effect of 450 t tilting furnace for copper smelting

MA Pengfei, HUANG Jianlong, WANG Tianhong, XU Shuai

(Guangxi Jinchuan Nonferrous Metals Co., Ltd., Fangchenggang 538000, China)

Abstract: A copper smelting enterprise in Guangxi faced issues such as low thermal utilization efficiency of its 450 t tilting furnace, short service life of refractory bricks in the oxidation-reduction zone (only 7 months), poor operation of the exhaust gas system, and long material-adding and heating cycles (over 16 hours). The study, combining the characteristics of cold material processing technology, proposes a multi-dimensional optimization plan and verifies it through practical implementation. The main technical solutions focus on improving efficiency as follows: 1) implementing material-adding control based on raw material composition, optimizing the division of labor through dual material-adding doors; 2) adding 4 top combustion guns to enhance thermal field uniformity; 3) enabling high-low position switching of oxygen-deficient combustion guns; 4) installing cast copper water jackets for cooling in the oxidation-reduction zone; 5) modifying the exhaust gas system to use copper water jacket flues and adding water-cooled heat exchangers. Through a series of optimized modifications, the service life of the furnace refractory bricks was extended to 11~13 months, thermal utilization efficiency increased by 20 percentage points; the material-adding and heating cycle was shortened by 3.5~4 hours; the exhaust gas system operated smoothly. At the same time, the pass rate of anode plates was improved, slag production was reduced, operational efficiency and production capacity were increased, and maintenance costs were lowered. The study solves the core points of the tilting furnace through synergistic optimization of process, equipment and thermal engineering, reduces energy consumption costs, and provides empirical reference for low-carbon transformation of similar equipment in the industry.

Keywords: tilting furnace; top combustion gun; copper water jacket; water-cooled heat exchanger; copper smelting; energy saving consumption reduction ▲