

铜铝冶炼工况的耐高温专用机械设备结构优化研究

王建光

新疆鑫慧铜业有限公司

DOI: 10.32629/ems.v8i7.21193

[摘要] 铜铝冶炼工艺朝大型化与连续化升级,耐高温专用机械设备常年处于高温重载、强腐蚀的极端工况,传统设备的齿轮轴承、箱体散热、密封隔热及润滑冷却等环节,都存在比较大的短板,设备寿命短,运行稳定性也存在不足。本文针对材料选型、结构改进、散热润滑集成优化及智能控制协同等关键环节,完成系统性研究,明确多相流动行为与热应力分布对设备结构的影响规律,推出多物理场耦合驱动的结构优化方案,能为延长设备使用寿命、降低综合能耗与维护成本提供理论支撑与技术路径。

[关键词] 铜铝冶炼 耐高温设备 结构优化 多相流动 热应力控制 智能控制

引言

铜铝冶炼是有色金属工业的核心环节,相关生产设备要长期在高温、重载、强腐蚀的恶劣环境里运转。炉内温度最高能到 1400℃,熔融金属不断冲刷,腐蚀性气体持续侵蚀,传统机械设备会出现蠕变失效、磨损加重、密封泄漏等问题,实际使用寿命比设计时长短很多。冶炼工艺朝大型化、连续化升级后,设备结构的可靠性与耐久性,直接影响生产效率高和运行成本多少。齿轮传动系统升级材质,散热润滑体系做集成优化,耐火衬体控制热应力,智能控制系统做深度融合,这些都属于耐高温专用机械设备的结构优化内容,也是有色金属装备领域必须突破的核心课题。

1 铜铝冶炼设备结构优化的理论基础与工程需求

1.1 铜铝冶炼工况的极端环境特征分析

铜铝冶炼是有色金属工业的核心环节,相关设备会长时间处于高温、重载、强腐蚀的极端工作环境里,炉体内部温度能突破 1400℃,烟气中含有大量 SO_2 、 HCl 这类强腐蚀性气体,熔融金属持续冲刷还会严重磨损设备内壁。传统金属换热器在 600℃ 以上环境中很容易出现蠕变失效,设备使用时长通常不到 2 年,铝冶炼的强腐蚀环境还会让常规不锈钢材质年腐蚀速率超过 0.5mm,设备维护需要投入大量资金。这类严苛的工作条件,要求耐高温专用机械设备在材料选型、散热设计、密封防护等方面完成系统性结构优化,才能满足长期稳定运行的工程要求。

1.2 设备结构优化的核心目标与设计原则

本文优化铜铝冶炼设备结构,核心目标是提升设备在高温重载环境下的运行稳定性,延长设备使用年限,降低整体能耗。设计时需遵守抗重载、耐高温、强耐磨、优散热四大基本原则。齿轮、轴承等核心部件要选用高强度合金材质,

完成特殊热处理,承受持续高温环境下的机械载荷,散热系统要安装密集型散热片,或是采用强制风冷水冷方案,把内部油温严格控制在安全范围里,密封结构要用耐高温氟橡胶或硅橡胶替换常规丁腈橡胶,避免高温老化引发泄漏。这些原则是结构优化的理论框架与设计约束。

1.3 多相流动行为对设备结构的影响机理

铜铝冶炼炉内部有铜液和空气、铜液和固体颗粒组成的多相流动系统,设备结构的受力情况、热量分布是否均匀,都和该系统的流体动力学特性直接相关。炉体内会出现湍流、涡旋、流体分离与混合等复杂流动现象,这些现象让炉内温度场和颗粒分布极不均匀,局部热应力集中还会严重影响耐火衬体与金属壳体的结构完整性。相关研究显示,调整炉体几何形状、优化风口布置,能改善多相流动的均匀性,减少燃烧与碳排放。这一作用机制从流体力学层面,为设备结构优化提供了理论参考,也明确了借助数值仿真推进结构改进的技术方向。

1.4 当前设备结构面临的主要技术瓶颈

闪速熔炼、底吹炼铜等先进工艺已大幅提升冶炼效率,但配套机械设备的结构还存在比较大的短板。高温环境里,润滑油氧化老化的速度是常温下的三至五倍,齿轮与轴承的磨损情况会加重,热应力分布不均让箱体出现变形,齿轮啮合的精度随之降低,耐火材料在反复热循环中产生裂纹,设备维修的次数一直保持在高位。现有结构优化多围绕单一因素展开分析,没结合温度场、流场、应力场的多物理场耦合情况,优化效果达不到预期。要打破这些瓶颈,得从材料、结构、散热、润滑等多个维度完成协同优化。

2 耐高温核心部件的材料选型与结构改进

2.1 高温齿轮与轴承的材质升级方案

齿轮是传动系统里的核心受力部件, 高温重载环境下会经受高强度啮合摩擦与冲击负荷, 升级材质是必须要做的事。可以优先选 20CrMnTi 或 42CrMo 合金钢, 经过渗碳淬火处理后, 表面硬度能达到 HRC58~62, 承载能力比常规材质高约 40%。轴承要选圆柱滚子轴承或调心滚子轴承, 这类轴承承载能力比深沟球轴承高很多, 搭配耐高温合金钢材质和滴点不低于 200℃ 的高温润滑脂, 能分散重载压力, 避免润滑失效。针对大规格设备, 用加强型轴承能进一步增强抗冲击性能、延长使用寿命, 让传动系统在极端工况下长期稳定运行。

2.2 箱体结构的刚性强化与耐温设计

箱体作为设备结构优化的核心载体, 自身刚性和耐温水平会直接影响整机运行的稳定状态。冶炼场景属于高温重载工况, 绝对不能用铝合金箱体, 这类箱体的强度和耐高温能力都达不到工况要求, 要优先选球墨铸铁或低合金铸钢材质, 它们的抗扭刚度和抗冲击能力比普通灰铸铁好一些。针对散热结构, 可在减速机外壳设置螺旋形散热筋, 再搭配轴流风机实现强制通风, 能让油温下降 15~20℃。当环境温度高于 60℃, 或是设备需要连续 24 小时重载运行时, 就得加装水冷夹套或水冷板式冷却器, 把油温控制在 85℃ 以内, 维持设备长期稳定运行。

2.3 耐火衬体的材料优化与热应力控制

回转式精炼炉这类核心冶炼设备的耐火衬体, 采用镁铬砖加粘土砖的组合结构, 筒体内衬厚度能达到 380mm 以上。镁铬砖的高温性能、抗侵蚀能力, 和砖里 Cr_2O_3 的含量直接相关, 风口区、出铜口部位对砖的要求更高, 需要 Cr_2O_3 含量高、气孔率低的砖型, 一般用直接结合或电熔再结合砖型。为控制热应力集中, 设备两端墙外贴耐火纤维板缓冲温度梯度, 同时把砖缝控制在 1.5mm 以内, 降低高温气体渗透的概率。合理搭配耐火材料, 能延长炉体使用寿命, 还能让炉内温度分布更均匀, 为智能控制提供稳定的热工基础。

2.4 密封与隔热系统的协同优化策略

设备漏油的主要诱因是高温环境里密封件出现老化、硬化, 密封结构的优化工作必须落实。本文建议把普通丁腈橡胶油封换成氟橡胶或硅橡胶材质, 这类材料耐温区间覆盖 -20℃ 到 200℃, 再搭配双唇油封加迷宫密封的组合结构, 能增强轴端密封的可靠性, 避免高温条件下的泄漏问题。针对隔热需求, 给直接接触高温的部件装上陶瓷纤维隔热套, 或是涂上隔热涂料, 能让部件表面温度下降 50% 以上。钢水包吊运这类极端作业区域, 给钢丝绳外层包裹陶瓷纤维隔热套,

是经过实践验证的有效局部隔热方式, 能延长高温部件的使用周期, 减少维护次数与安全隐患。

3 散热系统与润滑体系的集成化优化设计

3.1 强制散热结构的设计与热管理方案

耐高温设备的结构优化, 核心在于散热系统, 这套系统的设计水准, 直接影响设备能不能在极端工况里长时间稳定运作。选型时优先挑带密集散热片的款式, 靠增大散热面积, 提升自然散热的效率。环境温度突破 60℃ 后, 要加装轴流风扇或者水冷夹套这类强制散热装置, 维持设备内部温度的稳定可控。安装环节得给设备周边留足 15cm 以上的散热空间, 不能让其他设备挡住, 影响空气流通。要是装在密闭空间里, 得提前制定强制通风的具体方案。散热系统的集成化设计, 要结合润滑油通道同步优化, 缩短热量从产生源头到散发端口的传递路径, 降低热积累的可能, 保障设备持续可靠运作。

3.2 高温润滑油的选型与性能匹配要求

润滑系统是应对高温重载工况的核心防护环节, 润滑油选型要和实际工况精准匹配。本文优先推荐具备耐高温、抗磨、抗氧化特性的合成极压齿轮油, 具体可选 220 号或 320 号中负荷合成齿轮油, 这类油品耐温区间在 -20℃ 至 150℃ 之间, 氧化安定性达标时长不低于 1000 小时, 含有的二硫化钼极压添加剂可降低齿轮与轴承的磨损, 延长设备使用周期。环境温度处于 40~60℃ 时选 220 号, 超过 60℃ 选 320 号。绝对不能用普通机械油, 这类油品的润滑性能、耐高温能力都达不到冶炼工况的要求, 选品错误会让齿轮快速磨损甚至轴承烧毁, 引发非计划停机。

3.3 润滑维护周期的动态调整机制

高温重载环境里, 润滑油老化速度是常温环境的 3~5 倍, 原先 8000 小时的换油周期得大幅压缩。本文建议把换油周期调到 1000~1500 小时, 极端高温环境里还能再缩到 800 小时。设备首次运行满 500 小时就要换全新润滑油, 彻底清除磨合期产生的金属屑屑与杂质。日常维护时要每日检查油位, 保证油位处在油标中线位置, 每周检测润滑油状态, 一旦出现发黑、浑浊或含金属颗粒的情况就得立刻更换。本文推荐用便携酸值仪开展定量检测, 酸值升高超过 0.5mgKOH/g 时, 说明润滑油已严重劣化, 必须及时更换, 避免润滑失效引发齿轮磨损甚至轴承烧毁等设备损伤。

3.4 循环冷却系统的独立回路设计

给关键高温部件单独设计冷却回路, 能帮设备延长使用寿命, 给制动器液压系统加装油冷却器, 让冷却油循环流动

带走制动轮的热量,避免出现高温热衰退现象。铜冶炼环节里的熔体冷却,要用耐高温换热设备,这类设备能承受1200℃高温铜液的持续冲刷,使用年限能达到8年以上。设计冷却回路时,要兼顾流量分配、压降控制与温度梯度管理,保证各个冷却点的温度保持均匀。用数字孪生技术搭建设备的三维模型,整合温度场与流场的实时数据,就能优化冷却系统的动态运行状态、开展预测性维护,大幅减少设备故障,提升系统运行可靠性。

4 智能化控制与结构优化的协同发展路径

4.1 炉膛烟气温度动态模型的构建与应用

铜液温度软测量的参考信息是烟气温度,后者的精准度会直接影响智能控制系统的性能。搭建炉膛烟气温度动态模型,能明确输入变量对烟气温度变化的影响程度与敏感程度,为控制系统设计提供理论支持。当前铜精炼设备朝着大容量、高效率的方向升级,仅依靠经验制定的控制方案,已经达不到工艺指标的要求。开展动态特性分析,设计人员能充分掌握生产过程的内在逻辑,从表面现象挖掘核心规律,提炼出具备指导价值的结论,完成各控制系统的设计工作。该模型还能提供温度场分布的精准数据,为结构优化提供支持。

4.2 数值仿真驱动的整体结构优化方法

数值仿真技术目前是铜冶炼设备结构优化的核心方式,完成精确三维几何模型的搭建后,借助计算流体动力学软件开展多相流模拟,就能得到炉内流体动态图像与温度分布场,给结构改进提供数据支持。针对高炉结构和过剩空气系数开展数值仿真优化后,炉内温度与颗粒分布接近理想状态,能耗减少约10%,碳排放降幅超40%。对铝熔炼炉做数值仿真优化后,热效率提升约8%,排放量降低约13%。再生铜反射炉等设备的整体优化设计还没有相关研究,这一领域有很大的研究空间与工程应用潜力,可开展深度探索。

4.3 智能控制系统与设备结构的深度融合

依托计算机技术搭建的集成化操作系统,已在各类冶炼设备中普遍投入使用,让工艺参数的设定、控制与测定变得比较精准智能。铜闪速熔炼涉及的关联变量多,影响条件也复杂,传统人工测量获取的数据会滞后一小时以上,使得控制效果受到较大限制。中南大学联合铜冶炼厂完成生产监控及操作优化指导系统的开发,实现生产过程的实时监控,还能维持优化控制的稳定性。这套系统的成功应用证明,智能控制与设备结构优化不能分开研究,二者深度融合才是提升

冶炼效率、降低能耗的核心路径。设备结构合理,控制系统才能具备精准性,结构优化工作也得以控制模型反馈的数据为依据。

4.4 多目标协同优化的未来发展方向

铜铝冶炼设备的结构优化,未来要跳出单一目标优化的限制,进入多目标协同优化的新阶段。提升设备耐高温性能的同时,要兼顾能耗降低、排放减少、维护成本下降与设备寿命延长等多重目标,实现综合效益的最大化。碳化硅这类新型耐高温材料的加入,给结构优化带来了全新的材料选择,它耐温能达到1900℃、年腐蚀速率极低,已经在多个冶炼环节表现出替代传统设备的大潜力。搭配物联网传感器与数字孪生技术,未来的耐高温设备可实现实时状态监测、故障预警与自适应调控,完成结构优化与智能控制的一体化,推进冶炼装备向高效、智能、绿色方向不断发展。

结束语

铜铝冶炼高温工况下,专用机械设备的结构优化需要结合材料科学、流体力学、传热学与智能控制等多学科知识,齿轮轴承的材质更新、箱体散热的系统搭建、密封隔热的协同防护、润滑冷却的动态管控,每个环节的调整都会影响设备的整体运行状态。数值仿真技术与智能控制系统的结合,正在让这一领域的研发从依赖经验转向依托数据,从单一环节优化转向全系统协同。新型耐高温材料的不断突破与数字孪生技术的落地应用,会让铜铝冶炼设备的结构性能与运行效率得到大幅提升,为有色金属行业绿色可持续发展提供可靠装备支持。

[参考文献]

- [1]王新华,刘建民,李光辉.铜冶炼闪速炉炉体结构优化与寿命延长技术研究[J].有色金属(冶炼部分),2022(8):5-7.
- [2]张延安,赵中伟,邱竹贤.铝电解槽高温结构部件的热应力分析与优化设计[J].轻金属,2023(3):42-44.
- [3]陈启元,李洪桂,蒋继穆.重金属冶炼耐高温设备材料选型与结构改进研究进展[J].中国有色金属学报,2024,34(2):38-40.
- [4]周令波,戴云阁,刘业翔.铜铝冶炼炉用耐火衬体多场耦合优化与智能控制策略[J].冶金自动化,2023,47(6):18-20.