

综合节能技术在铝电解槽上的应用分析

马文军

青海西部水电有限公司 青海 海东 810800

摘 要: 随着社会发展、经济进步与时代变迁, 电解铝工业面临着日益严峻的环境与能源压力, 节能减排已成为当前行业发展的主旋律。由于电解铝属于高能耗行业, 许多企业在生产运营中难以保障经济效益。尽管部分节能技术的创新应用已取得较为显著的成效, 但电能利用率仍未得到有效提升, 这在一定程度上推动了铝电解综合节能技术的发展。基于此, 本文探讨了铝电解槽节能技术的应用与发展, 重点介绍了全石墨化阴极磷铁浇铸技术。该技术通过优化钢棒与炭块的形状、尺寸及组装方式, 采用电阻率较低的磷生铁以浇铸工艺替代阴极捣固糊, 从而降低钢棒与炭块之间的接触压降, 使电解槽水平电流与炉底压降大幅降低。本文为铝电解槽节能技术及电解铝工业的可持续发展提供了相关见解。

关键词: 铝电解槽; 节能技术; 应用与发展

1 全石墨化磷铁浇铸阴极技术

近年来, 电解铝行业持续开展节能降碳技术研发与产业升级改造, 在低电压节能领域已取得显著技术进步, 全石墨化磷铁浇铸阴极技术便是代表性成果之一。

磷铁浇铸工艺的具体流程及参数控制如下: 首先对阴极炭块进行预热, 使炭块顶部温度大于 $(500 \pm 20)^{\circ}\text{C}$, 炭块侧上部温度大于 $(450 \pm 20)^{\circ}\text{C}$, 同时需将炭块横向温差控制在 40°C 以内, 纵向温差控制在 100°C 以内; 其次, 阴极钢棒的预热温度需大于 600°C 。当预热达到目标温度后恒温保持 30 min, 保证炭块受热均匀, 且整体升温总时长不得少于 5h; 预热完成后摆放铁水挡块, 随后开展浇铸作业, 最终完成浇铸料施工。电解槽阴极磷铁浇铸技术通过优化阴极钢棒与阴极炭块的形状、尺寸及二者的组装方式, 采用电阻率较低的磷生铁以浇铸工艺替代阴极捣固糊, 从而降低钢棒与炭块之间的接触压降^[1]。

技术创新点:

(1) 基于双钢棒结构并结合磷铁浇铸技术, 通过优化钢棒与炭块的形状、尺寸及组装形式, 并采用磷生铁进行浇铸, 阴极的平均组装压降为 30-35 mV, 而采用捣固糊组装的压降则在 70-80 mV 左右。

(2) 降低铝液水平电流, 提高磁流体稳定性; 根据初步统计, 采用磷铁浇铸阴极技术及侧部氮化硅材料的试验槽, 铝液水平电流有明显降低。当水平电流降低 15% 时, 试验槽运行电压可长期稳定在 3.88 V 左右;

(3) 电解槽炉底压降进一步降低, 相较于双钢棒槽炉底压降降低 80-100 mV。同时, 试验槽侧部散热能力增

强, 有助于形成规整炉帮及炉膛内型, 底部增设物理防渗层, 从而降低铝液水平电流与阴极压降, 有效降低了铝液直流电单耗。

2 综合节能技术的应用

2.1 分段高导电阴极钢棒

国内为提升电解槽运行稳定性, 从阴极钢棒入手开展研究, 开发出异型阴极钢棒; 某公司用特种合金生产分段高导电阴极钢棒, 通过调整材质导电性能降低铝液水平电流, 优化炉底电流分布等参数, 实现低电压生产, 降低铝液直流电耗。

沿钢棒长度方向设置上厚下薄的分割缝, 在保证阴极炭块组装质量与使用寿命的前提下, 将阴极棒厚度从 450mm 增至 480mm, 燕尾槽宽度以中心线为基础从 90mm 扩大至 95mm。分段高导电阴极钢棒的分割缝用绝缘糊填充, 阴极炭块与钢棒用石墨粉连接, 钢棒间借助冷捣糊连接: 未分割端头整体连接, 分割部分侧面上半部连接^[2]。经不同温度下仿真计算与实践验证, 800°C 条件下, 传统阴极钢棒炉底压降 350mV、平均水平电流 $0.635\text{A}/\text{cm}^2$, 分段高导电阴极钢棒对应指标为 260mV、 $0.750\text{A}/\text{cm}^2$, 压降降低 90mV, 水平电流提升 $0.115\text{A}/\text{cm}^2$, 可提升电解槽稳定性。

2.2 全部用石墨做的阴极炭块和冷捣糊技术

这种全部用石墨做的阴极炭块本身性能就很好, 特别是抗钠和抗腐蚀方面, 优点更突出。而且它导电性也强, 所以对降低炉底的电压降很有帮助。冷捣糊技术呢, 环保性好, 捣得结实, 而且烧的时候收缩得少。研

究发现，全石墨阴极炭块的电阻率差别不大，所以用全石墨的效果更好。

2.3 改进阴极组装工艺

组装阴极的时候，首先应该铺一层石墨粉，这样能让钢板和炭块接触得更充分，更好地控制阴极钢棒和炭块之间的接触电压降。具体做法是，在炭块的钢棒槽底部铺上适量的石墨粉，并把垫层刮平。另外，炭块钢棒槽的两端还要用一些糊料封堵，这样可以减少石墨粉的损失。为了更好地掌握阴极炭块的组装效果，可以采用专业的铁碳压降测试仪，提高测量的准确度。组装好之后，阴极的温度要保持在室温左右，并且规定测量的标准值要在 40mV 以内。

3 电解槽的焙烧启动和后期生产管理

3.1 焙烧启动管理分析

实际工作中，不仅要按照标准和要求来完成焙烧启动的操作流程，同时根据槽实际情况增加分流片，提高

分流效果。还要更科学地控制电解槽的通电瞬时冲击电压，以减少热冲击对阴极的损害，避免电流分布不均，导致局部热量过剩。值得注意的是，普通槽的冲击电压是 3.2V，试验槽的是 2.37V。这种电解槽启动初期的电压要求不能超过 6.5V，电解质温度小于 1020℃，同时，严格控制电解质高度。每隔 4h 测量一次钢棒、炉底、钢窗和电解质的温度，如果电解质温度超过 1020℃，要及时灌入一定量的铝液来降低槽温。在非正常期，槽电压、铝水平和电流效率这些参数，都要按照优化后的方案来处理，这样也能有效避免因为操作不科学给试验槽带来的不利影响。

为了保证 420kA 全石墨化磷铁浇铸电解槽能安全平稳地生产，装炉的时候调整了一部分物料的使用量。

3.2 非正常生产期工艺参数管理分析

全石墨化磷铁浇铸电解槽设定非正常期为 90 天，其钢棒横截面积为 240*200 较双钢棒技术有明显变化，钢棒温度和炉底温度较双钢棒高（详见下表）。

表 1 实验槽非正常期阴极数据

槽号	阴极钢棒数据（℃）		钢窗温度（℃）		炉底温度（℃）	
	平均	峰值	平均	峰值	平均	峰值
3420#	304	B4(323)	384	B17(392)	94	A4-B4 中（101）
3216#	298	B17(300)	354	B1(372)	95	A4-B4 中（104）
3317#	295	B6(297)	357	A1(368)	93	A3-B3 中（103）

试验槽是采用用磷铁浇铸的办法把钢棒和阴极炭块连在一起的。但是，磷铁冷却后会收缩，导致刚开始 Fe-C 压降有点不稳。等开始通电焙烧后，随着温度上升，磷铁一受热膨胀，阴极压降就慢慢下降，最终就趋于稳定。该槽的设计思路，主要是加强炉底保温，同时优化侧面的散热。把侧面的炭块从原来的碳化硅材料，换成了散热能力更强的氮化硅侧块。所以，在非正常期，设定电压可以一步步降到 3.880V 左右，铝水平控制在 25cm 以内。为形成坚固的理想槽膛内型，要求运行三个月后开始添加氟化铝。这些做法，都很好体现了这种槽型的优点：阴极导电性能好，炉底压降低，而且能长期保持稳定。

4 依靠技术进步，以促进铝电解槽节能技术应用的可持续发展

4.1 铝电解槽阴极电流均流全息仿真技术研究

在铝电解槽中，电流由阳极自上而下进入槽内，依次穿过熔融电解质层与铝液层后抵达阴极炭块表面，

再经阴极炭块及汇流钢棒从电解槽两侧导出，最终由阴极母线系统输送至下一台电解槽。在该电流路径中，由于电流会优先选择电阻最小的通道，靠近钢棒出电侧约三分之一长度的区域承载了绝大部分电流，进而在铝液层中诱发了明显的水平电流，导致铝液层与阴极炭块间的电流分布严重不均衡，分布规律为越接近电流输出端，电流密度越高，梯度越大。过度集中的水平电流不仅会降低电流效率、增加电能消耗，还会加剧阴极炭块的电化学腐蚀与侵蚀，是缩短电解槽使用寿命的关键因素之一。

4.2 降低水平电流优化方案

（1）方案一仅调整钢棒电阻分布，引导电流流向，通过改变钢棒特定区域导电截面积或引入局部电阻梯度，在不改变钢棒宏观形态的前提下削弱水平电流峰值；优点是不改动钢棒尺寸与安装定位，改造实施简便，对槽体结构侵入性小；缺点是改变导电路径电阻特性，会升高阴极系统总压降，增加电能损耗。

(2) 方案二不局限于单一部件调整, 基于多物理场耦合仿真结果构建电流分布预测模型, 系统性优化钢棒的截面形状、长度、埋入深度, 同时调整钢棒沿长度的电阻分布, 实现电流负载均衡, 拉平电流密度峰值, 缓解局部过热与电化学腐蚀, 属于整体性综合改良方案。

(3) 方案三为最高层级优化策略, 对钢棒与阴极炭块开展系统性协同优化, 从阴极系统整体结构设计和材料配置入手优化, 目标是实现阴极区域电流分布最优, 从根源抑制有害水平电流, 提升电流效率、降低能耗、延长电解槽寿命, 是该技术的前沿发展方向^[4]。

4.3 抗扰稳流母线技术应用

通过应用抗扰稳流母线技术, 能够有效重新矫正由阳极大母线、阳极组装配以及铝液层波动所带来的电流分布偏差。该技术的关键作用在于, 它阻断了非稳定工况下——包括停槽检修期间、阳极效应发生期间、槽况异常摆动期间等——电流分布不均衡性在上下游电解槽之间的传导与放大, 从而显著提升了单台电解槽以及整个系列的生产操作稳定性与对外界干扰的抵抗能力。

4.4 电解槽综合新技术应用

(1) 实施电解槽精准出铝项目。通过引入高精度的称量与控制系统, 提升单槽出铝作业的精准度, 有效避免了因操作人员对出铝量判断偏差所引发的槽况波动与技术条件失控。同时, 建立了专门的出铝数据管理系统, 对每一次出铝操作的时间、重量、槽号等关键数据进行完整记录与深度分析, 以便于实时监测生产状态, 及时发现并处理出铝过程中的异常趋势与潜在问题。

(2) 在全系列推广使用涂层阳极。涂层能够减少阳极在电解过程中的过度消耗与粉化, 从而显著降低槽内炭渣的生成量, 降低电解质体系的电阻, 达到降低工作电压的目的。在推广过程中, 需加强对涂层材料的研发与筛选, 着重选择那些兼具高导电性、优异耐腐蚀性以及良好抗氧化性的复合涂层材料; 并持续优化阳极涂层的制备与喷涂工艺, 确保涂层厚度均匀、附着牢固, 以

保障其长期使用的效果与寿命。

(3) 应用多功能天车集成的阳极自动测高技术。该技术实现了阳极安装高度的自动化、精确化测量与调整, 不仅大幅提升了阳极更换作业的工作效率与精度, 还减少了人为操作误差。为确保系统长期可靠运行, 需对阳极自动测高系统执行定期的校准与维护规程, 保证其测量精度持续满足严苛的生产要求, 从而避免因阳极安装位置不当导致的电流分布恶化、额外电耗增加以及槽况不稳定等问题。

(4) 应用保温料自动上料系统。该系统实现了电解槽上部保温覆盖料添加作业的自动化与机械化, 达成了“机械化换人”的目标, 切实降低了操作人员的劳动强度。同时, 系统能够确保添加的保温料在粒度配比与铺设厚度上保持均匀一致, 减少了因保温效果不均而产生的局部热量散失, 有助于维持电解槽的热平衡状态。

(5) 在 420kA 系列电解槽上探索应用结构优化型钢爪。通过对阳极钢爪的结构进行重新设计, 降低其自身的电阻与接触压降, 从而降低整个阳极组的电压降, 为最终降低槽电压、实现节能目标提供新的技术路径。

综上所述, 这一系列综合节能技术在实践中展现了良好的应用效果与经济效益。对于电解铝行业而言, 必须对这些技术革新保持高度的关注与重视, 并通过持续的技术迭代、工艺优化与实际应用, 将其转化为核心的竞争力, 从而有效推动整个行业向更高效、更节能、更可持续发展的方向稳步发展。

参考文献

- [1] 王刚, 李贤. 综合节能技术在 240kA 铝电解槽上的应用 [J]. 有色金属 (冶炼部分), 2017, 3 (1).
- [2] 新型阴极结构铝电解槽系列生产工艺系统重大节电示范工程 [Z]. 浙江华东铝业股份有限公司, 2014.
- [3] 李方义. 铝电解槽内衬热阻与电流效率的关系 [J]. 轻金属, 2002(4).
- [4] 沈阳铝镁设计研究院有限公司. 铝电解槽磁流体稳定技术与新式阴极钢棒结构研究研制报告. 2010-12