

面向低能耗电解槽的阴极炭块成型工艺优化与综合性能提升

井启鹏

中国铝业股份有限公司青海分公司

摘要：面向低能耗铝电解槽对低阴极压降与长寿命的需求，围绕阴极炭块成型工艺开展优化研究。以颗粒级配连续化、混捏温度与沥青用量窗口化、成型增密与排气制度优化、焙烧分段控裂以及浸渍—二次焙烧补孔增密为主线，构建“工艺参数—孔隙结构—导电网络—综合性能”关联框架。结果表明：合理级配与混捏均匀化可提高绿体密度并削弱连通孔形成；成型与焙烧制度匹配可显著降低裂纹与密度梯度；浸渍补孔可进一步降低开放孔率与体积电阻率，提升抗压强度与抗渗透能力，从而增强阴极炭块电性能与结构稳定性的寿命保持性。研究为低能耗电解槽阴极材料的工艺窗口确定与质量控制提供参考。

关键词：低能耗电解槽；阴极炭块；成型工艺优化；孔隙结构；体积电阻率

低能耗电解槽以降低槽电压、减少热损失和延长槽寿命为核心目标，其中阴极系统的欧姆压降与结构稳定性是决定电耗水平的重要环节。阴极炭块既承担电流传导与热量输运，又承受高温电解质侵蚀、钠渗透和热循环应力耦合作用，其体积电阻率、体积密度、开放孔率、抗压强度与抗渗透能力共同影响阴极压降与服役可靠性。工程上常见的“电阻偏高、焙烧裂纹、孔隙连通、渗透加剧”等问题，往往并非单一原料导致，而与混捏润湿不足、颗粒级配不合理、成型增密不充分或应力分布不均、焙烧升温失控等工艺因素密切相关。尤其在低能耗路线下，阴极压降对整体能耗敏感度更高，要求炭块实现“高致密低电阻、孔道不连通、结构少裂纹、性能稳定离散小”的综合提升。因此，面向低能耗电解槽，需要以成型工艺为主线，协同优化级配、混捏、成型、焙烧与浸渍致密化过程，构建可工业复制的参数窗口与质量控制指标体系。

本文以“致密化与导电网络连续化”为主线，提出“级配连续化→混捏均匀化→成型增密与排气→焙烧控裂→浸渍补孔与二次焙烧”的工艺路线，并以综合性能提升为评价目标。方法上，从颗粒堆积理论出发，调整粗中细多粒径配比以提高堆积密度并削弱连通孔形成；在混捏环节通过温度与时间窗口控制沥青黏度与润湿行为，提高包覆均匀性并降低干团缺陷；在成型环节通过压力、保压、振动或预压排气等制度组合，提升绿体密度并抑制密度梯度；在焙烧环节采用分段升温与关键温区保温策略，降低挥发应力与收缩差引发的裂纹；最后通过沥青浸渍与二次焙烧实现补孔增密，进一步降低体积电阻率并提升抗渗透能力。基于上述路线，形成“过程参数—组织结构—性能指标”

的闭环优化框架，为低能耗电解槽阴极炭块制造提供可执行的工艺优化方案。

1 阴极炭块成型工艺优化方法

1.1 原料体系与颗粒级配优化

阴极炭块通常由煅烧无烟煤或石油焦骨料、细粉与中温沥青黏结剂构成。低能耗电解槽更强调低电阻与抗渗透的兼顾，因此骨料需控制灰分与杂质，细粉需保证分散性与反应活性适中，沥青需具备合适软化点与结焦值以形成连续黏结碳网络。级配优化的核心是构建粗—中—细的连续分布，使细料逐级填充骨料空隙并减少大孔比例，同时避免细粉过量导致比表面积过大、沥青需求上升与流动性恶化。工艺上可将骨料按粒径分档，采用“提高中细级占比、保留适量粗粒级骨架、配置少量超细粉补微孔”的策略，使堆积密度接近峰值并降低孔道连通性。评价上以绿体密度、成形表面缺陷率与焙烧后开放孔率变化作为约束，确保级配优化既增密又可成型，避免出现离析、边角缺料或内部疏松带。

1.2 混捏均匀化与沥青窗口控制

混捏质量决定沥青对颗粒的润湿包覆程度与细粉分散状态，是减少缺陷与提升一致性的关键步骤。混捏温度过低时沥青黏度大、润湿差，易形成干团与颗粒裸露；温度过高又会造成沥青老化与轻组分挥发，增加焙烧收缩差与裂纹风险。本文采用“骨料预热→沥青分段加入→高剪切混捏→保温均化→出料控温”的流程，通过稳定料温、控制混捏时间与剪切强度，使沥青在最佳黏度区间内充分包覆颗粒并填充细孔。过程控制可引入扭矩或电流曲线作为间接指标，结合出料塑性与团聚观察判定混捏终点，避免单纯依赖固

定时间导致批次波动。沥青加入量应与级配比表面积匹配,偏低会导致黏结相不连续、强度不足与电阻偏高;偏高会加剧挥发收缩并可能形成二次孔隙。通过确定“沥青含量-混捏温度-成型流动性”的耦合窗口,可在较低缺陷率下获得更高绿体密度与更稳定的焙烧后组织。

1.3 成型增密、排气与应力均化策略

成型环节直接决定绿体密度、孔隙初始形貌与内部应力分布。若成型不足或排气不良,夹气孔与连通孔增多,焙烧后开放孔率偏高,抗参与电性能受限;若成型压力过高且制度不当,卸载回弹与剪切应力集中会形成隐性裂纹,焙烧后演化为贯通裂纹并导致局部电阻升高。针对大尺寸炭块,本文采用“分层加料+预压排气+主压成型+合理保压”的制度,必要时配合振动成型实现颗粒重排与排气增强,从而降低密度梯度并提升整体均匀性。成型参数优化的目标不是追求单一最高密度,而是获得“高密度且低梯度、缺陷少且离散小”的结构状态。质量控制可通过绿体密度抽检、外观与超声或电阻扫描趋势判断均匀性,及时识别边角疏松、分层或中心疏松等典型问题,为后续焙烧控裂提供稳定前提。

1.4 焙烧控裂与浸渍二次致密化路线

焙烧阶段沥青经历软化、挥发、缩聚与结焦,若升温过快或关键温区停留不足,内部气体逸出受阻与收缩不均会诱发鼓泡、裂纹或分层。本文采用分段升温策略,在挥发与缩聚显著的温区设置适当保温,使挥发物充分排出并降低内外温差应力,从而减少宏观裂纹并提升黏结碳连续性。为进一步降低开放孔与连通孔,采用沥青浸渍-二次焙烧的补孔增密路线:在负压或加压条件下使沥青进入孔道,二次焙烧后形成补孔黏结碳,增强导电网络连续性并提高抗渗透能力。浸渍过程需控制增重率与均匀性,避免局部富沥青导致二次焙烧收缩差与微裂纹增加,最终以体积密度、体积电阻率、开放孔率与强度综合验收,形成可复制的工业参数窗口。

2 综合性能提升结果与机理分析

2.1 致密化对电性能与能耗的贡献

经级配连续化、混捏均匀化与成型增密优化后,绿体密度提高且密度梯度降低,焙烧后体积密度同步提升,导电相的有效截面积增大,孔隙引起的电流绕行效应减弱,从而降低体积电阻率。进一步实施浸渍-二次焙烧后,开放孔被补孔黏结碳填充,导电桥更连续,电阻率通常出现二次下降。对低能耗电解槽而言,阴极炭块体积电阻率下降会直接降低欧姆压降,进而

降低槽电压组成中的阴极部分损失;同时裂纹减少与结构均匀性提高,可避免局部电流集中与热点形成,有利于维持稳定运行电压并减少异常波动带来的额外能耗。更重要的是,优化工艺提升的是电性能的寿命稳定性,能在较长运行周期内保持低压降状态,体现为低能耗路线下更可持续的节能收益。

2.2 孔隙结构调控对抗渗透与寿命的作用

阴极炭块失效常与钠渗透、电解质侵入及其引发的膨胀、强度衰减和界面破坏相关。孔隙不仅决定渗透“入口”,更决定渗透“通道”:当大孔与连通孔比例高时,渗透路径连续,侵入速度快;当孔径细化且连通性下降时,渗透受到显著阻滞。本文通过级配优化减少大孔形成,通过成型排气与焙烧控裂降低贯通缺陷,再通过浸渍补孔削弱连通孔网络,使孔隙由“连通为主”向“分散为主”转变,从结构上抑制钠与电解质的深度侵入。随着渗透通道被截断,炭块内部反应与膨胀被减缓,强度保持性更好,边角崩裂与局部脱落风险下降,进而延长阴极系统的有效寿命并降低维护频次,这对低能耗电解槽的长周期稳运行具有直接价值。

2.3 裂纹控制与热震稳定性的协同提升

裂纹是影响阴极炭块可靠性的高风险缺陷,既削弱力学承载与热循环稳定性,也会造成局部接触与电流路径变化,导致电压波动与局部过热。本文的控裂机理主要体现在两方面:其一,通过成型阶段的应力均化与密度梯度抑制,降低焙烧收缩差引发的应力集中;其二,通过焙烧分段升温与关键温区保温,使气体逸出与结构收缩更充分、更均匀,减少宏观裂纹与分层。裂纹减少后,导电网络连续性更稳定,材料在启停与温度波动工况下的热震损伤累积速度降低;同时浸渍补孔可在一定程度上“钝化”微裂纹尖端并增强基体连续性,进一步提升热循环耐受能力。综合表现为强度离散减小、结构完整性提高以及电性能在热循环中的稳定性增强。

3 讨论与结论

3.1 工业化实施要点与质量控制指标体系

为保证优化方案在批量生产中的可复制性,需要建立从原料到成品的过程质量控制链。原料端重点控制粒度分布、灰分与挥发分波动,避免级配与沥青需求被动变化;混捏端以料温、扭矩或电流曲线、出料塑性和团聚情况作为过程判据,确保润湿包覆稳定;成型端重点监控压力或振动参数、保压时间与分层加料制度,并以绿体密度及其梯度抽检作为一致性指标;焙烧端严格执行升温曲线与关键温区保温策略,控制

炉内温差与装炉方式,减少裂纹源;浸渍端以增重率、渗透均匀性与二次焙烧后缺陷率为核心指标,最终以体积密度、体积电阻率、开放孔率、抗压强度与抗渗透表征进行综合验收。通过“过程参数窗口化+指标可测化+批次可追溯化”,可实现低能耗电解槽对阴极炭块性能稳定性的要求。

3.2 结论与展望

本文围绕“面向低能耗电解槽的阴极炭块成型工艺优化与综合性能提升”,构建了以级配连续化、混捏窗口化、成型增密与排气、焙烧控裂以及浸渍二次致密化为核心的系统优化路线。研究表明,级配与混捏的协同优化能够显著改善颗粒堆积与黏结相连续性,为低电阻与高致密奠定基础;成型制度优化可降低密度梯度与隐性裂纹风险,提升大尺寸炭块的均匀性与一致性;焙烧分段控裂与浸渍补孔可进一步降低开放孔与连通孔比例,增强抗渗透能力并提升电性能与力学性能的寿命稳定性,从而支撑低能耗电解槽的低压降、长寿命与稳运行目标。后续可结合孔隙连通性定量表征与电导网络建模,建立“工艺参数—孔隙结构—压降演化”的预测关系,并引入在线监测与数据驱动优化实现混捏、成型与焙

烧的自适应控制,以进一步降低离散性并提升工业稳定性。

参考文献:

- [1] 万时云. 中国再生铝工业发展前景展望 [J]. 轻合金加工技术, 2004, (03): 1-4.
- [2] 张宏忠, 王利, 刘晴, 等. 废阴极炭块中氟化物的回收利用 [J]. 无机盐工业, 2017, 49(05): 56-60.
- [3] 冷正旭, 代军, 冯乃祥. 铝电解槽破损机理及槽寿命若干问题的探讨 [J]. 矿冶, 2002, (01): 62-66.
- [4] 刘庆生, 许真铭, 汤卫东. 基于细观结构的铝电解阴极炭块钠扩散过程的数值分析和实验研究 [J]. 材料研究学报, 2017, 31(03): 233-240.
- [5] 方钊, 武小雷, 俞娟, 等. 铝电解过程中碱金属的电化学插层及渗透迁移行为 [J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(06): 1746-1756.
- [6] 王维, 谷万铎. 阴极材料组织对铝电解钠渗透过程的影响 [J]. 材料热处理学报, 2014, 35(07): 146-150.
- [7] 刘志东. 铝电解槽废旧阴极综合利用研究 [D]. 昆明理工大学, 2012.
- [8] 邱竹贤, 翟秀静, 卢惠民, 等. 铝工业废旧碳阴极材料的综合利用 [J]. 轻金属, 1999, (11): 42-44.