

前端细小部位（如嵌件与型腔的间隙处），出现缺胶现象，这是由于压力不足导致胶料流动动力不足；当压力提升至7-8MPa时，虽能充满型腔，但模具配合面溢胶量显著增加，飞边厚度超过0.3mm，且合模缝处出现胶料挤出不均的情况，分析其原因为过高压力导致模具微小变形，配合间隙增大。最终确定5-6MPa为最优压力区间，此时胶料既能完全填充型腔，飞边厚度控制在0.05-0.08mm，后续清理难度低。

温度参数的设定基于三元乙丙橡胶的硫化曲线。通过差示扫描量热法（DSC）测试可知，该橡胶的硫化起始温度为140℃，峰值温度为160℃，完全硫化温度为170℃。因此，模具预热温度设定为100-110℃（低于硫化起始温度），避免胶料在未充满型腔前提前硫化；注压阶段保持该温度，确保胶料流动性；硫化阶段升温至170℃，并保温2h，此时交联度可达90%以上，满足产品力学性能要求（拉伸强度 $\geq 8\text{MPa}$ ，扯断伸长率 $\geq 300\%$ ）。

注压行程的分段控制设计源于胶料流动特性。三元乙丙橡胶属于高黏度非牛顿流体，流动过程中易因剪切作用产

生温升，若一次性快速完成注压行程，可能导致局部胶料提前硫化，形成“冷料斑”。分5次走完20mm行程（每次4mm），中间间歇1min，可使胶料在流动过程中温度均匀分布，同时让前端胶料充分填充型腔细节，减少气泡产生。试验表明，该方式可使产品内部气孔率降低至0.5%以下，远低于模压工艺的3%-5%。

3 试验件性能检测与模压工艺对比

为验证注压工艺的优势，对试验件进行了系统性能检测，并与同规格模压产品对比。在合模缝强度测试中，采用拉伸试验机对合模缝处进行拉伸试验，注压产品的合模缝拉伸强度为8.3Mpa，而哈夫模模压产品的合模缝拉伸强度仅为5.1Mpa，提升约62.7%，且注压产品合模缝处未出现开裂现象，证明注压工艺的锁模状态有效解决了局部泄压问题。

3.1 注压工艺试验

经多次试验、调试，形成注压成型工艺参数见表1。

表 1

序号	工序名称	工艺内容	备注
1	注压前准备	1.1 模具清理； 1.2 组装模具，固定金属嵌件，预热模具，预热时间1.5h~2h； 1.3 三元乙丙橡胶压延出片，出片尺寸：325mm×130mm×5mm，数量：4片，重量：1.0kg。	
2	注压	2.1 装料，继续预热20min； 2.2 注压。在100t平板硫化机上进行操作，设置压力5Mpa~6Mpa，在模具装料行程内（装料高度20mm），点动控制平板硫化机升降，分5次走完行程，中间间歇1min。	
3	硫化	合模到位后，设置平板硫化机温度至硫化温度，待温度到达设定值后，保温2h，保温结束后，关闭加热开关，平板通水冷却或自然降温。	
4	脱模	当模具温度降至30℃以下时进行脱模	
5	清理飞边	成型件清理飞边	

3.2 试验效果

试验结束后，检查样件外观，外观平整，无缺胶、分层现象。三元乙丙橡胶厚度合格，均匀一致。

4 结语

通过开展三元乙丙橡胶注压成型模具设计、注压工艺试验，完成了三元乙丙橡胶注压成型工艺的探究与尝试，基本掌握了小型三元乙丙橡胶产品的注压成型工艺，初步解决了小型三元乙丙橡胶零件的合模缝易开裂，嵌件定位困难，装料不便等问题。

然而，本文所述的探究试验存在一定的局限性，目前仅适用于小型零件成型。此外，试验过程也存在一些小问题，例如型面存在注胶残痕，注胶速度慢，注胶孔难清理等问题，

后续需进一步优化注压模具结构，完善注压工艺。

参考文献

- [1] 张韶姣,刘林国,孙学红.聚乙二醇脂肪酸酯对三元乙丙橡胶胶料脱模效果的影响[J].橡胶工业,2025,72(07):539-544.
- [2] 侯兰杰,彭倩倩,刘宽,等.三元乙丙橡胶板式支座性能测试与有限元模型的二次开发[J/OL].橡胶工业,1-5[2025-08-18].https://link.cnki.net/urlid/11.1812.TQ.20250612.1441.002.
- [3] 黄辉龙,黄汉雄.注压成型纳米结构PP/POE共混物表面的液滴低温冲击行为[J].高等学校化学学报,2021,42(10):3195-3202.
- [4] 郭永娜,刘兆栋.V形橡胶弹簧注压成型工艺与模具设计[J].模具工业,2013,39(07):47-51.DOI:10.16787/j.cnki.1001-2168.dmi.2013.07.018.

Collaborative Development of Carbon Materials and Aluminum Electrolysis Process in the Context of Green and Low-Carbon Transformation

Weihong Wang

Zahanaoer Branch, Inner Mongolia Huomei Hongjun Aluminum and Electricity Co., Ltd., Huolinguo, Inner Mongolia, 029200, China

Abstract

In the context of global green and low-carbon transformation, the collaborative development of carbon materials and aluminum electrolysis processes has become a crucial pathway for promoting high-quality development in the aluminum industry. Aluminum electrolysis, as a high-energy-consuming industry, is closely linked to the consumption of anode carbon materials and carbon emissions during its production process. As a core component of electrolytic cells, the performance of carbon materials directly affects electrolysis efficiency, energy consumption, and pollutant emissions. By optimizing the preparation process of carbon materials, enhancing comprehensive resource utilization, and promoting technological innovations in the aluminum electrolysis process, deep collaboration can be achieved between the two in terms of energy conservation, carbon reduction, circular economy, and intelligent production.

Keywords

Green and low-carbon; Carbon materials; Aluminum electrolysis process; Collaborative development; Energy conservation and carbon reduction

绿色低碳背景下炭素材料与铝电解工艺的协同发展

王伟红

内蒙古霍煤鸿骏铝电有限责任公司扎哈淖尔分公司, 中国·内蒙古 霍林郭勒 029200

摘要

在全球绿色低碳转型背景下, 炭素材料与铝电解工艺的协同发展已成为推动铝工业高质量发展的关键路径。铝电解作为高能耗产业, 其生产过程中阳极炭素材料的消耗与碳排放密切相关。炭素材料作为电解槽的核心部件, 其性能直接影响电解效率、能耗及污染物排放。通过优化炭素材料制备工艺、提升资源综合利用率, 并推动铝电解工艺的技术革新, 可实现二者在节能降碳、循环经济及智能化生产中的深度协同。

关键词

绿色低碳; 炭素材料; 铝电解工艺; 协同发展; 节能降碳

1 引言

在全球应对气候变化与能源转型的背景下, 铝工业作为高能耗、高碳排放行业, 其绿色低碳发展面临巨大挑战。炭素材料(如阳极炭块)作为铝电解工艺的核心消耗品, 其生产与使用过程直接关联电解效率、能源消耗及碳排放。传统铝电解工艺依赖高能耗的炭素材料制备与电解过程, 导致资源浪费与环境污染。因此, 探索炭素材料与铝电解工艺的协同发展路径, 通过技术创新与产业升级实现节能降碳, 成为推动铝工业可持续发展的关键。本文从技术、资源、能源、

产业及政策五个维度, 分析绿色低碳背景下二者的协同发展机制。

2 技术协同: 创新驱动效率提升

2.1 炭素材料技术革新: 性能突破与绿色生产

炭素材料作为铝电解工艺的核心消耗品, 其性能与制备工艺的革新是推动铝工业绿色低碳发展的基础。传统炭素材料(如普通预焙阳极)存在导电性差、抗腐蚀性弱等问题, 导致电解过程中阳极消耗过快、电耗偏高, 同时生产环节的能源浪费与污染物排放也制约了行业的可持续发展。^[1]

针对上述问题, 高性能炭素材料的研发成为关键方向。石墨化阳极通过高温石墨化处理, 显著提升了材料的导电性与热稳定性, 可降低电解过程中的电阻损耗, 减少阳极过电

【作者简介】王伟红(1976-), 本科, 从事炭素, 铝电解研究。

压,从而降低吨铝电耗。惰性阳极则是另一项颠覆性技术,其采用非消耗性材料(如金属陶瓷复合材料),在电解过程中不参与化学反应,彻底消除了阳极消耗与二氧化碳排放,同时避免了传统阳极生产中的沥青烟气污染。尽管惰性阳极目前仍处于技术攻关阶段,但其潜在的环境效益与经济效益已引发广泛关注。

2.2 铝电解工艺技术升级: 高效节能与柔性适配

铝电解工艺的技术升级是降低能耗与碳排放的核心环节。传统电解槽存在电流分布不均、热平衡难以控制等问题,导致电解效率低下、电能损耗严重。高效节能电解槽通过优化槽体结构(如采用异型阴极、新型内衬材料)与磁场设计,改善了电流分布与热平衡,降低了槽电压与热损失,从而减少吨铝电耗。智能槽控系统则结合物联网与大数据技术,实时监测电解槽的运行参数(如槽温、铝液水平、分子比),并通过AI算法动态调整工艺参数,实现电解过程的精准控制。例如,通过智能调控加料量与电流强度,可避免阳极效应的发生,减少电能浪费与氟化盐消耗。^[1]

2.3 协同效应: 技术融合驱动绿色转型

炭素材料与铝电解工艺的技术协同,是推动铝工业绿色低碳发展的核心动力。新型炭素材料(如石墨化阳极、惰性阳极)与高效节能电解槽的结合,可显著提升电解效率,降低阳极消耗与电耗。例如,石墨化阳极的高导电性可减少电解过程中的电阻损耗,而高效电解槽的优化设计则进一步降低了槽电压,二者协同作用可使吨铝电耗降低10%以上。同时,惰性阳极与柔性电解技术的结合,可彻底消除阳极消耗与二氧化碳排放,并提升绿电在电解铝生产中的利用率,推动铝工业向零碳目标迈进。

3 资源协同: 循环经济与综合利用

3.1 炭素材料资源循环: 废旧再生与多元协同

炭素材料的资源循环是铝工业实现循环经济的重要抓手。废阳极作为铝电解过程中的主要固体废弃物,其回收再造可显著减少原生炭素材料的消耗。通过建立废阳极回收体系,利用破碎、筛分与二次成型技术,可将废阳极中的炭素成分与杂质分离,重新制备成符合电解需求的阳极炭块。这一过程不仅降低了炭素材料的生产成本,还减少了废阳极填埋或焚烧带来的环境压力。此外,炭素材料与其他工业固废的协同利用技术进一步拓展了资源循环的边界。例如,煤矸石等含碳固废可通过预处理与炭素材料混合,替代部分石油焦或煤沥青原料,既降低了对化石资源的依赖,又实现了固废的减量化与资源化。通过炭素材料资源循环的深化,铝工业可逐步构建起“资源-产品-再生资源”的闭环模式,推动产业链向绿色低碳方向转型。

3.2 铝电解工艺资源优化: 减量增效与固废治理

铝电解工艺的资源优化是降低生产成本与环境污染的关键环节。氟化盐作为电解过程中的关键辅助材料,其消耗

量直接影响原料成本与氟污染风险。通过优化电解槽设计(如采用新型内衬材料与槽体结构),可减少氟化盐的挥发与渗漏,降低单位产品的氟化盐用量。同时,智能槽控系统的应用可实时监测电解槽的分子比与氟化盐浓度,动态调整加料量,避免过量添加导致的资源浪费与环境污染。^[1]此外,铝灰作为电解铝生产的主要固废,其资源化利用技术已取得重要进展。通过高温熔炼、化学浸出或生物提取等方法,可从铝灰中回收铝、镁等有价金属,并将剩余残渣转化为建材原料或土壤改良剂。铝灰资源化利用不仅减少了固废排放,还创造了额外的经济价值,推动了铝电解工艺的资源高效利用。

3.3 协同效应: 闭环产业链与资源效率提升

炭素材料与铝电解工艺的资源协同,通过废阳极回收、固废协同利用与电解槽优化等措施,形成了紧密的闭环产业链。废阳极的循环再造为电解槽提供了再生炭素材料,而电解槽的优化设计又减少了辅助材料的消耗,进一步降低了废阳极的产生量。同时,炭素材料与其他工业固废的协同利用,拓展了原料来源,降低了对原生资源的依赖。铝灰的资源化利用则实现了固废的减量化与资源化,减少了环境污染。通过资源循环与综合利用的协同,铝工业的资源利用效率显著提升,单位产品的资源消耗与废弃物排放大幅降低,为行业的可持续发展提供了有力支撑。这种协同效应不仅体现在经济效益上,更推动了铝工业向绿色、低碳、循环的产业模式转型。

4 能源协同: 绿电替代与余热回收

4.1 绿电替代: 可再生能源深度耦合与新型能源探索

绿电替代是铝工业能源结构转型的核心路径。铝电解工艺作为高耗能产业,其电力消耗占生产总成本的30%以上,且传统化石能源发电导致高碳排放。推动铝电解工艺与风电、光伏等可再生能源的耦合,通过绿电直连模式,可实现电解铝生产的低碳化。例如,在风光资源丰富的地区建设“绿电铝”产业园,通过专用输电线路将风电、光伏电站与电解铝厂直接连接,减少电力传输损耗与碳排放。此外,绿电的波动性对电解槽稳定性提出挑战,需通过柔性电解技术(如动态功率调节、储能系统耦合)提升绿电利用率,确保电解过程的连续性与高效性。在新型能源替代方面,氢能的应用为铝工业提供了零碳能源解决方案。氢能可通过电解水制取,或利用工业副产氢,其燃烧产物仅为水,可替代部分化石能源用于炭素材料制备(如煅烧、焙烧环节)的加热过程。尽管氢能的大规模应用面临成本与技术瓶颈,但其清洁性与可再生性使其成为未来能源协同的重要方向。

4.2 余热回收: 能源梯级利用与系统效率提升

余热回收是提高铝工业能源综合利用率的关键手段。炭素材料制备过程中的煅烧与焙烧环节,需消耗大量热能,同时产生高温烟气与废渣余热。通过余热锅炉或热管技术,