

人工智能在铝冶炼能源管控中的应用

罗云

遵义铝业股份有限公司 贵州 遵义 563100

摘要: 铝冶炼作为典型的高耗能、高碳排工业过程,其能源消耗占全球工业总能耗的约3%,二氧化碳排放量亦十分可观。在全球“双碳”目标(碳达峰、碳中和)背景下,实现铝冶炼过程的绿色低碳转型已成为行业发展的核心议题。人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术凭借其强大的数据处理、模式识别与智能决策能力,为铝冶炼能源管控提供了全新的技术路径。本文从环境工程专业视角出发,系统梳理了铝电解槽、阳极焙烧、余热回收等关键环节的能耗特征与碳排放机制,深入探讨了机器学习、深度学习、强化学习及数字孪生等AI技术在铝冶炼能源优化中的具体应用场景,构建了“感知—分析—决策—执行”一体化的智能能源管控体系。通过案例分析与效益评估,验证了AI技术在降低单位铝能耗、减少碳排放、提升资源利用效率方面的显著成效。最后,本文对AI在铝冶炼绿色化进程中面临的挑战与未来发展方向进行了展望,旨在为推动铝工业的可持续发展提供理论支撑与实践参考。

关键词: 人工智能; 铝冶炼; 能源管控; 节能降耗; 绿色低碳; 环境工程; 碳减排

引言

铝工业是现代工业中使用范围广泛的主体金属之一,存在于众多领域当中,然而铝生产的能耗以电解铝生产最为巨大。电解铝1t原铝约耗13,000–15,000kWh,相当于一般居民数年用电量,铝冶炼释放的温室气体对全球大气环境影响重大。有数据显示,2022年全球原铝生产排放的CO₂高达11亿t以上,占世界工业碳排放量的2%以上。为此,我国《“十四五”工业绿色发展规划》提出要推进高能耗行业节能降碳,要加快推进智能化、绿色化改造进程,为此利用科学技术推动铝冶炼精细化管理、智能化,向精细化管理、高效化转型进行技术创新,是当今时代发展对环境工程和冶金工程这一交叉学科的新课题^[1]。人工智能作为中国科技革命的核心,也是促进中国科技革命发展的核心技术,已经在包括铝工业在内的众多产业中表现出节能减排方面的巨大潜力。在铝工业行业中,人工智能可以结合工艺机理与运行数据,实现对整个系统进行在线的感知、科学、精准的预测与动态优化,在某种程度上能够跨越传统控制的一些局限性和瓶颈,为建立绿色铝工业提供一定的技术支持。

1 铝冶炼工艺能耗特征与碳排放机制

1.1 铝冶炼主要工艺流程

传统的铝工业包括氧化铝生产(拜耳法)和电解生产(霍尔-埃鲁法),而电解生产是铝生产链能量消耗和碳排放的关键,约占整个铝生产过程的70%能量消耗。电解铝生产典型的过程如图1所示(说明:电解铝的原料氧化铝和电解质氟化钠即冰晶石混合加入到电解槽中,在950℃左右进行电解,在电解阴极处Al离子被还原为Al单

质,在电解槽的阳极进行CO₂的产生反应,阳极的材料一般是碳块)。



图1 电解铝工艺流程示意图

1.2 能耗构成与碳排放源

电解铝生产主要为电能消耗,其理论最小电耗约为6.3kWh/kg-Al,实际工业运行由于有热损失、电阻损耗、操作波动等原因电耗要高于理论电耗。电解反应热力学能耗(约50%)、电解槽热损失(约25%)、电解质电阻与导电部件损耗(约15%)、辅助(包括烟气净化、物料输送等)系统能耗(约10%)为主要的能耗构成。

碳排放主要来自:(1)阳极损耗:炭阳极在电解时被氧化产生CO₂,占60%以上;(2)电力间接排放:电网煤电为主时,电力消耗间接产生CO₂;(3)阳极效应:特殊工况

下产生强温室效应气体PFCs(全氟化碳),其全球变暖潜能值(GWP)是CO₂的数以千计倍。

表1 典型电解铝厂能耗与碳排放指标(以1吨铝计)

项目	数值	单位
直流电耗	13,200	kWh
综合能耗	14,500	kWh(折标煤)
CO ₂ 直接排放	1.5	吨
CO ₂ 间接排放(煤电)	10.5	吨
总碳排放	≈ 12	吨CO ₂ e

1.3 节能降碳的关键瓶颈

现行铝电解能源控制基于经验与静态控制,问题有以下几点:电解槽工况实时无法准确测量;工况变化相关工艺参数(槽电压、槽温、Al₂O₃浓度)间高度耦合,实时响应迟钝;工况异常(阳极效应、热行)的早期预警能力不足;能源余热未得到充分回收;能源系统整体协同控制能力差^[2]。因此亟待应用智能化系统实现整体协同控制优化。

2 人工智能在铝冶炼能源管控中的技术框架

为实现铝冶炼全过程的绿色低碳运行,本文提出基于AI的“四层一体”智能能源管控体系,如图2所示。

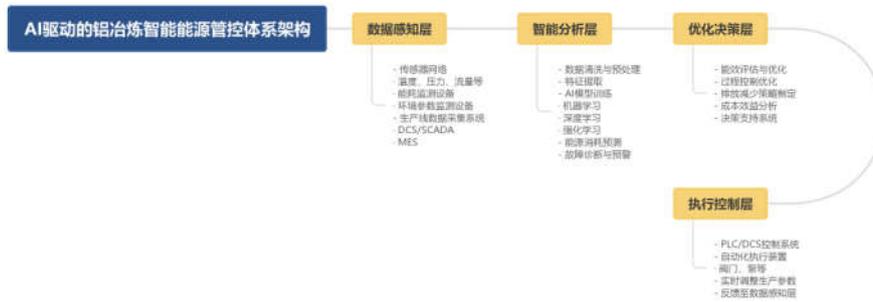


图2 AI驱动的铝冶炼智能能源管控体系架构图

2.1 数据感知层:多源异构数据融合

在电解槽上安装高温、电位差、气体分析及IIoT等相关传感器、DCS/SCADA系统,收集温度场、电压、电流、阳极、烟道气氛、环境温度等信息以及相关历史运行记录、设备参数及配置等历史记录、数据、能耗账单等海量、实时、异构信息,建立数据湖。

2.2 智能分析层:AI模型构建与状态识别

通过对实际采集数据进行分析,通过机器学习算法和深度学习算法实现如下的关键模型:(1)电解槽的运行工况评价模型,电解槽工况健康模型(LSTM、Transformer等时序模型),判断槽况异常(冷槽、热槽、压槽);(2)预判阳极效应模型(XGBoost、随机森林等分类模型),提前30-60分钟报警,判断是否有阳极效应的发生;(3)节能降碳模型(电耗/碳排与相关工艺参数的非线性模型),通过能量平衡模型分析节电指标。

2.3 优化决策层:动态能效优化与碳排调度

采用强化学习(RL)以及模型预测控制(MPC):(1)优化槽参数:确保槽电流效率的情况下,可自动动态设定氧化铝下料量、阳极高度、槽电压等槽内参数,控制槽在高效参数运行区间;(2)协同优化调度:多能互补中实现光伏、储能等清洁能源搭配,优化购电和负荷分配策略,减少对电网的依赖和碳排;(3)优化碳排放路线:综合考虑碳交易价格和生计划,做出低碳排放成本的调度方案^[3]。

2.4 执行控制层:闭环反馈与自适应调节

通过OPCUA、Modbus等工业通信协议,将优化指令下发至PLC/DCS系统,实现对电解槽、烟气净化、余热锅炉等设备的自动控制。同时,建立反馈机制,持续校正模型偏差,形成“感知—分析—决策—执行”的闭环优化。

3 AI在铝冶炼能源管控关键环节的应用实践

3.1 电解槽智能运行优化

铝电解槽是铝行业生产的主体装备,其稳定性决定了是否具备“高产低耗”的条件。铝电解采用的是人工经验控制设定“分子比”、“铝水平”等系数,无法与变工况的工艺条件相匹配。AI方案:大型铝厂借助DQN(深度Q网络),对基于状态的深度增强学习控制技术应用于铝电解过程的控制实现。以槽电压、温度、氧化铝浓度为系统状态输入,以电解生产中单位电流效率、单位电耗的改善作为奖励函数,通过算法进行在线强化学习,实现自主学习优化控制。应用成效:铝电解单系列铝直耗降低了85kWh/t;电解槽单槽电流效率提升了0.8%;每年可节电2,500万kWh,相当于减排2万吨的碳(依据煤电折算)^[5]。

3.2 阳极效应智能预警与抑制

阳极效应引发PFCs排放(一次效应可释放数kgCF₄/C₂F₆)、电耗升高及设备损害。AI方案:开发基于卷积神经网络(CNN)与注意力机制的多变量时序分类算法,整合槽电压异常、气体含氧量(CO₂/CO比值)、阳极电流分布特性等特征,预测阳极效应。应用结果:阳极效应发生提前预警准确率达92%,提前预警时长平均45min;

降低阳极效应发生概率60%；每年降低PFCs排放当量约5000tCO₂e^[6]。

3.3 余热回收系统智能调控

电解铝烟气温度120–180℃，含有大量的低品位热量，常规余热锅炉运行粗放，回收率仅有40%。AI：构建设备数字孪生，可模拟预测烟气流量、温度与锅炉换热效率关系，根据气象预测信息以及用电侧电价信号，以MPC算法调整风机转速、水泵流量以及蒸汽产量，力求做到基于收益最优来调整风机和水泵。^[4]应用成效：余热回收率增至65%；每年回收蒸汽12万吨，替换燃煤锅炉；节省标准煤量1.5万吨，减排CO₂3.8万吨^[7]。

3.4 全厂能源-碳排协同管理平台

整合各子系统数据，构建厂级“能源-碳排”数字驾驶舱。平台具备以下功能：实时碳排监测与核算（符合ISO14064标准）；能效对标分析（与行业标杆对比）；碳资产模拟交易；绿电消纳优化（如匹配光伏出力与电解负荷）。

4 环境效益与经济性分析

4.1 节能降碳效益量化

以年产40万吨电解铝企业为例，AI能源管控系统实施后，年效益如下：

表2 AI应用前后关键指标对比

指标	实施前	实施后	降幅/提升
单位铝电耗 (kWh/t)	13,500	13,200	-2.2%
电流效率 (%)	93.5	94.3	+0.8%
阳极效应频次 (次/槽·年)	1.8	0.7	-61%
余热回收率 (%)	40	65	+25%
综合碳排放 (吨CO ₂ e/吨铝)	12.0	11.2	-6.7%
年节电量 (万kWh)	—	1,200	—
年碳减排量 (万吨)	—	4.8	—

按当前碳价60元/吨计算，年碳收益约288万元；节电收益按0.4元/kWh计，约480万元。总投资约3,000万元，投资回收期约3.5年。

4.2 环境工程价值体现

综上，AI的使用，除了直面节能减排以外，在环境管理中还体现在：从末端控制转为过程控制——即不以减少污染量为目标，而以减少生产资源为目标；从被动式的静态监视到主动式的动态预测——即在源头避免环境风险，而不仅仅是事后治理，更不需形成再治理；从主观经验式管理到以数据分析为基础做出预测管理，将使得环境管理更加精准；从单一系统的管理，转而采取从能源流、物质流、信息流的系统整体方案等。

5 挑战与展望

虽然AI对铝冶炼能效管理能够发挥极大作用，但也

存在如下问题：(1)数据准确性和完整性，比如老旧的生产线传感器覆盖率不足，噪声大；(2)模型通用性，由于槽型、入炉物料和天气的不同，需不断对模型进行重复训练；(3)人与机器协同，一些操作人员不相信也不接纳机器的决策；(4)标准化及规范，没有一个通用的技术规范来指导AI冶金的相关技术工作。

未来发展方向包括：一是融合机理模型与数据驱动：构建“白箱+黑箱”混合模型，提升可解释性；二是边缘智能部署：在电解槽本地部署轻量化AI模型，降低通信延迟；三是绿电-电解深度耦合：发展“光伏+储能+智能电解”微电网系统；四是全生命周期碳足迹追踪：从矿山到再生铝，构建铝产品碳标签体系。

6 结语

人工智能技术为铝冶炼行业的节能降耗与绿色低碳转型提供了强有力的技术支撑。通过构建覆盖“感知—分析—决策—执行”全链条的智能能源管控体系，AI能够显著降低单位铝能耗、抑制阳极效应、提升余热利用效率，并实现碳排放的精准核算与优化调度。本文从环境工程专业视角出发，系统论证了AI在铝冶炼关键环节的应用逻辑与实践成效，验证了其在经济效益与环境效益上的双重价值。未来，随着AI算法持续演进、工业数据基础设施不断完善，以及“双碳”政策驱动日益增强，人工智能必将成为推动铝工业迈向绿色、智能、可持续发展的核心引擎。深化AI与环境系统工程的交叉融合，为构建资源节约型、环境友好型社会贡献专业力量。

参考文献

- [1]薛晗.清洁生产审核促进铝冶炼企业绿色化发展的应用研究[J].轻金属,2022,(08):51-54.
- [2]王攀.基于5G工业互联网铝冶炼智能运维技术研发及应用.贵州省,贵阳铝镁设计研究院有限公司,2023-08-28.
- [3]马恩杰.铝冶炼数字化交付与智能运维一体化集成平台的研发与应用.辽宁省,沈阳铝镁设计研究院有限公司,2022-09-14.
- [4]500kA绿色低碳铝冶炼创新技术工业化应用[J].云南科技管理,2021,34(04):70-71.
- [5]王浩,刘志峰,李建国.基于深度强化学习的铝电解槽运行参数优化[J].自动化学报,2023,49(7):1425-1436.
- [6]云南铝业股份有限公司.云南铝业股份有限公司2023年环境、社会及公司治理(ESG)报告[R].昆明:云南铝业股份有限公司,2023.
- [7]张伟,王磊,刘洋.基于MPC的铝电解烟气余热回收系统优化控制[J].节能技术,2023,41(4):512-518.