

# 氟化铝生产过程中的能耗分析与成本优化路径

陈鹏飞（湖南中蓝新材料科技有限公司，湖南 郴州 424200）

**摘要：**氟化铝生产能耗高、成本大是制约企业竞争力的重要因素。为降低氟化铝生产能耗，研究以某年产 5 万 t 氟化铝企业为对象，建立能耗核算指标体系，分析生产过程能耗分布特征，设计成本优化路径。通过对原料处理、化学反应、干燥包装等环节的能耗监测，识别出关键能耗节点。从工艺参数优化、设备节能改造、能源管理优化和原料循环利用四个维度制定改进方案。实施后企业单位产品综合能耗降低 8.5%，成本大幅降低。研究为氟化铝生产企业节能降耗提供了技术路径和管理策略。

**关键词：**氟化铝；能耗分析；成本优化；节能改造；循环利用

**中图分类号：**TQ133.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-5167（2025）028-0052-03

## Energy consumption analysis and cost optimization path in the production process of aluminum fluoride

Chen Pengfei (Hunan Zhonglan New Material Technology Co., Ltd., Chenzhou Hunan 424200, China)

**Abstract:** The high energy consumption and high cost in the production of aluminum fluoride are important factors that constrain the competitiveness of enterprises. To reduce energy consumption in the production of aluminum fluoride, a study was conducted on a company with an annual output of 50000 tons of aluminum fluoride to establish an energy consumption accounting index system, analyze the distribution characteristics of energy consumption in the production process, and design a cost optimization path. By monitoring energy consumption in raw material processing, chemical reactions, drying and packaging, key energy consumption nodes can be identified. Develop improvement plans from four dimensions: process parameter optimization, equipment energy-saving renovation, energy management optimization, and raw material recycling. After implementation, the comprehensive energy consumption per unit product of the enterprise decreased by 8.5%, and the cost was significantly reduced. The research provides a technical path and management strategy for energy conservation and consumption reduction in aluminum fluoride production enterprises.

**Keywords:** aluminum fluoride; Energy consumption analysis; Cost optimization; Energy saving renovation; recycling utilization

氟化铝生产需消耗大量能源。随着能源价格持续上涨和环保要求日益严格，氟化铝生产企业面临着降低能耗的迫切需求。氟化铝生产过程的能耗主要集中在反应热控制、物料输送、干燥脱水等环节。由于生产工艺的连续性和复杂性，各环节能耗相互关联，单一环节的优化往往难以实现整体能效的显著提升<sup>[1]</sup>。因此，建立系统的能耗分析方法，准确识别关键能耗节点，制定综合性的优化策略，成为提升氟化铝生产企业竞争力的重要途径。研究通过建立能耗核算指标体系，识别主要能耗环节及其影响因素。在此基础上，从工艺参数、设备效率、能源管理和资源循环利用等维度设计成本优化路径，并通过实施验证了优化效果。研究成果可为氟化铝生产企业提供切实可行的节能降耗管理策略。

### 1 案例概况

#### 1.1 企业基本情况

案例企业位于我国中部地区，是一家专业从事氟化铝生产的化工企业，设计年产能为 5 万 t。企业占地面积 12 万 m<sup>2</sup>，其中生产区域 8.5 万 m<sup>2</sup>，拥有员工

186 人，技术人员占比达到 22%。企业主要产品为冶金级氟化铝，产品纯度达到 90% 以上，主要供应周边电解铝企业。企业采用湿法生产工艺，以氢氧化铝和氢氟酸为主要原料，配备 2 条生产线，单线产能 2.5 万 t/a。

#### 1.2 生产工艺流程

企业采用的氟化铝生产工艺主要包括原料处理、化学反应、结晶分离、干燥包装四个主要环节，如图 1 所示。原料处理环节将固体氢氧化铝研磨至要求粒度后，配制成质量分数为 25% 的浆料。氢氟酸经稀释调配至质量分数 20% 后进入储罐备用。

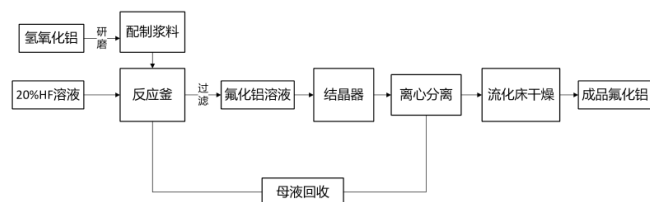


图 1 氟化铝生产工艺

化学反应环节在搪瓷反应釜中进行，氢氧化铝浆料与氢氟酸按照摩尔比 1 : 6.2 的比例加入，控制反

应温度在 95–105℃ 范围内, 反应时间约为 2.5h。结晶分离环节通过控制降温速率使氟化铝从溶液中析出, 结晶温度控制在 35–40℃, 结晶时间约为 4h。干燥包装环节采用流化床干燥器, 以天然气燃烧产生的热风为热源, 进风温度控制在 550–600℃, 出料温度控制在 110–120℃, 将氟化铝含水率降至 0.5% 以下。

## 2 氟化铝生产过程能耗核算与关键环节识别

### 2.1 能耗核算方法与指标体系

研究采用分环节、分能源品种的核算方法, 将生产过程划分为原料处理、化学反应、结晶分离、干燥包装四个主要环节<sup>[2]</sup>, 分别统计各环节的电力、天然气和蒸汽消耗量。能耗核算指标体系包括总量指标和效率指标两大类。总量指标主要统计各环节的能源消耗绝对量, 以标准煤当量进行折算, 其中电力按 0.1229kg 标准煤 /kWh、天然气按 1.33kg 标准煤 /m<sup>3</sup>、蒸汽按 0.1286kg 标准煤 /kg 进行换算。效率指标则重点关注单位产品能耗和单位工序能耗, 用于评价能源利用效率。

### 2.2 主要生产环节能耗分布

通过对企业全年生产数据的统计分析, 得出了各生产环节的能耗分布情况。为更直观地展示能耗构成, 将各环节的能耗数据整理如表 1 所示。

表 1 氟化铝生产各环节能耗分布

生产环节	电力消耗(万 kWh/年)	天然气消耗(万 m <sup>3</sup> /年)	蒸汽消耗(万 t/年)	折标煤(t/年)	占比(%)
原料处理	588	0	0.72	815	12.8
化学反应	924	0	2.16	1,413	22.2
结晶分离	476	0	0.36	631	9.9
干燥包装	812	420	0.36	6,576	55.1
合计	2,800	420	3.60	9,435	100.0

从能耗分布数据可以看出, 干燥包装环节是最大的能耗节点, 占总能耗的 55.1%, 这主要是由于流化床干燥需要消耗大量天然气来产生高温热风。化学反应环节位居第二, 占总能耗的 22.2%, 主要能耗来源于反应温度控制所需的蒸汽和搅拌设备的电力消耗。

## 3 基于能耗分析的成本优化路径

### 3.1 工艺参数优化

干燥环节的优化目标是在保证产品含水率低于 0.5% 的质量要求下, 通过科学调整干燥工艺参数实现能耗降低。优化的核心原理是根据干燥过程的不同

阶段特性采用分段控制策略。在高含水率阶段, 蒸发速率主要受传热控制, 需要较高温度; 在低含水率阶段, 内部水分扩散成为限制因素, 过高温度反而造成能源浪费<sup>[3]</sup>。基于上述原理, 企业设计了三阶段干燥工艺。第一阶段为快速脱水期, 物料含水率从 35% 降至 10%, 保持进风温度 520℃, 流化风速 2.4m/s。第二阶段为减速干燥期, 含水率从 10% 降至 2%, 进风温度降至 480℃, 风速降至 2.0m/s。第三阶段为深度干燥期, 含水率从 2% 降至 0.5% 以下, 温度进一步降至 420℃。实施的关键是含水率在线检测和参数自动切换。在干燥器进料口、中部和出料口安装微波水分仪, 实时监测物料含水率。DCS 系统根据检测值自动调整燃烧器负荷和引风机频率。

### 3.2 设备升级与节能改造

干燥系统排放的 180℃ 高温尾气携带大量余热, 设备改造的目的是回收这部分热量用于预热新鲜空气, 从根本上提高能源利用效率。余热回收基于换热原理, 通过换热器将尾气余热传递给新鲜空气。选择管壳式换热器, 尾气走壳程便于清灰, 空气走管程获得较高传热系数<sup>[4]</sup>。根据热负荷计算, 尾气流量 12000m<sup>3</sup>/h, 温度从 180℃ 降至 95℃, 需要传热面积 450m<sup>2</sup>。换热器采用单壳程双管程结构, 使用  $\phi 25 \times 2.5\text{mm}$  的 316L 不锈钢管 420 根, 按正三角形排列。壳体直径 1200mm, 设置 5 块弓形折流板。为防止露点腐蚀, 增加旁通调节系统, 确保尾气出口温度保持在 100℃ 以上。改造采用模块化施工, 换热器厂外预制, 现场利用 5 天检修期完成安装: 第一天拆除原烟道, 第二天吊装换热器, 第三四天进行管道连接和保温, 第五天系统调试。

### 3.3 能源管理优化

能源管理优化通过建立智能控制系统, 根据实时工况自动调整操作参数, 实现能耗动态最优, 克服人工控制难以应对动态变化的缺陷。控制系统基于干燥过程模型, 核心是物料含水率预测方程<sup>[5]</sup>:

$$W(t) = W_0 \times \exp(-K \times A \times t) \quad (1)$$

其中 K 为综合传质系数。采用模型预测控制策略, 每 5min 采集工况数据, 预测未来 30min 含水率变化趋势, 提前调整操作参数。硬件配置包括西门子 S7-1500 PLC 主控制器、3 台在线水分分析仪、18 个温度测点、2 台质量流量计, 通过 Profinet 总线连接。软件分三层: 底层数据采集和预处理, 中层模型计算和优化求解, 上层人机界面和报表系统。为确保系统稳定运行并防止参数超限, 制定了详细的控制参数范围。表 2 列出了智能控制系统的主要控制变量及其正常运行范围、约束条件和调节速率限制。

表 2 智能控制系统主要控制参数范围

控制变量	正常范围	约束条件	调节步长
进风温度	420-520℃	≤ 540℃	5℃ /min
流化风速	1.8-2.4 m/s	≥ 1.8 m/s	0.1 m/s/min
加料速率	1.2-1.8 t/h	与风速匹配	0.05 t/h/min
床层压降	800-1200 Pa	≤ 1500 Pa	监测参数

3.4 原料与副产品循环利用

母液循环利用旨在回收结晶母液中的氟化铝和氢氟酸，减少原料消耗和废物排放。关键是建立分级处理机制，解决组分波动和杂质累积问题。根据溶解度分析，当母液氟化铝浓度高于 60g/L 时直接回用，低于此浓度时先浓缩处理。母液处理系统包括四个单元：收集均质单元设 3 个 100m³ 储罐，通过循环管路连通；浓度调节单元采用三效蒸发器，将低浓度母液浓缩至 120g/L；净化单元使用陶瓷膜过滤和离子交换树脂；精确配料单元根据反应需要计量加入。三效蒸发器采用降膜式结构，第一效使用 0.4MPa 新鲜蒸汽，蒸发温度 105℃；第二效利用一效二次蒸汽，温度 85℃；第三效温度 65℃，连接真空系统。蒸发器采用钛材制造确保耐腐蚀性。母液成分检测采用在线离子选择电极监测氟离子、电导率仪监测总离子强度、pH 计监测酸度，三参数相互验证。加料控制采用比值调节，根据新鲜氢氟酸加入量自动计算母液补充量，通过变频泵精确控制。

4 优化效果

4.1 能耗降低效果分析

为准确评估优化措施的节能效果，企业收集了优化前后各 12 个月的生产运行数据，如表 3 所示。数据来源包括：能源管理信息系统的实时监测记录、DCS 系统的历史数据库、生产运行月报、设备运行台账以及第三方能源审计机构出具的审计报告。

表 3 优化前后主要能耗指标对比

能耗指标	优化前	优化后	降幅 (%)	数据来源
天然气单耗 (m³/t)	84.0	52.3	37.7	流量计实时数据
蒸汽单耗 (t/t)	0.72	0.59	18.1	蒸汽流量计月报
电力单耗 (kWh/t)	560	525	6.3	电能管理系统
综合能耗 (tce/t)	0.189	0.173	8.5	能源审计报告
干燥系统热效率 (%)	62	78	25.8	热平衡测试
氢氟酸利用率 (%)	94.0	97.8	4.0	化验分析记录

从表 3 可以看出，天然气单耗降幅最为显著，这主要归因于干燥环节的系统性优化。三阶段控制、余热回收和智能控制三项措施产生了叠加效应，每项措施都在前一项的基础上进一步挖掘节能潜力。干燥系统热效率的大幅提升验证了技术改造的成功。

4.2 成本节约效果评估

成本分析基于企业财务部门提供的 2024 年度能源和原料采购数据、生产成本核算报表以及产品销售台账。能源价格采用全年加权平均价格，原料成本按实际采购价格计算，如表 4 所示。

表 4 年度成本节约明细

项目类别	节约量	单价	节约金额 (万元)	数据来源
天然气	156 万 m³	2.8 元 /m³	437	采购发票汇总
蒸汽	0.67 万 t	180 元 /t	121	锅炉房结算单
电费 (峰谷优化)	-	-	85	电费账单分析
氢氟酸	195 t	8000 元 /t	156	原料库存系统
氟化铝增产	2100 t	3000 元 /t	630	销售收入报表
废水处理	2.3 万 m³	18 元 /m³	40	环保处理台账
合计	-	-	1469	-

成本节约结构分析显示，能源类节约和原料类节约基本持平，体现了优化方案的全面性。天然气节约额最高，占总节约额的 30%，印证了干燥环节优化的重要性。氟化铝增产带来的收益占比达 43%，说明提高收率对企业效益的贡献甚至超过了直接的能源节约。

5 结论

研究针对氟化铝生产过程的高能耗问题，通过建立系统的能耗核算体系，准确识别了干燥环节为关键能耗节点，并从工艺参数优化、设备节能改造、能源管理优化和原料循环利用四个维度制定实施了综合性改进方案。研究为传统化工企业的节能改造提供了可操作的技术路径。实践证明，即使是工艺成熟的传统化工生产过程，通过精细化的能耗分析和针对性的技术改造，仍有较大的节能潜力。研究对促进化工行业能源利用效率提升有积极的借鉴意义。

参考文献：

[1] 何武. 无水氟化铝和干法氟化铝的生产工艺技术研究 [J]. 中阿科技论坛 (中英文), 2025(05):42-46.  
[2] 令晓强. 无水氟化铝生产工艺能源综合利用及相关技术改造 [J]. 化工管理, 2023(18):143-146.  
[3] 李婷婷. 干燥预处理联合湿法纯化氟化铝残渣工艺研究 [J]. 化学工程, 2022, 50(09):68-73.  
[4] 周文水. 浅析无机化工生产中余热利用 [J]. 山东化工, 2022, 51(17):146-147.  
[5] 宋德雄. 无水氟化铝生产尾气处理技术研究与实际应用 [J]. 甘肃科技, 2020, 36(08):53-54+32.

作者简介：

陈鹏飞 (1991-)，男，汉族，湖南永州人，大学本科，工程师，研究方向：无机氟化工。