

# 铝电解烟气净化系统能耗分析与节能改造技术探讨

赵毅

包头铝业有限公司 内蒙古 包头 014046

**【摘要】**：铝电解烟气净化系统能耗高的问题制约行业可持续发展。能耗高的主要原因是系统阻力高以及动力设备不匹配造成低效运行所致。那么，均衡集气技术应用、管道弯头优化、永磁电机替换、风机变频改造以及 AI 智能控制等措施，可显著降低系统能耗。中铝郑州研究院在某厂的均衡集气改造实践证明，优化槽盖板密封、电解槽出口阀门定孔均衡烟气改造、氧化铝均匀分配以及电机风机节能改造等措施，能够有效降低系统阻力，同步降低风机能耗与氟盐消耗。对于法氧化铝脱氟与半干法氢氧化钙脱硫系统综合实施管网阻力优化，系统综合能耗可显著降低。参照兰州铝业电解烟气深度治理改造项目，改造后排放指标不仅实现超低排放要求，而且节能效果显著，该方案也为铝电解烟气净化系统节能提供了可行的解决方案。

**【关键词】**：铝电解；烟气净化；能耗分析；节能改造；脱氟脱硫

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.007

## 引言

铝电解是铝冶炼过程中的关键步骤，但其能耗问题长期困扰着行业的可持续发展。烟气净化系统作为铝电解工艺中的重要组成部分，净化动力电耗占整个分厂动力电耗的 60% 以上，消耗大量能源，影响电解生产效益。如何降低烟气净化系统的能耗，成为行业关注的焦点。通过对当前系统能耗的全面分析，并结合先进的节能改造技术，能够在保障净化效果和环保排放指标达标的同时，实现节能降耗是当前亟待解决的问题。

## 1 铝电解烟气净化系统的应用现状及能耗现状

### 1.1 干法与半干法工艺的应用现状

干法氧化铝脱氟工艺和半干法氢氧化钙脱硫工艺在铝电解行业中已被广泛应用，成为标准的烟气净化技术<sup>[1]</sup>。干法氧化铝脱氟工艺凭借其高效的氟化物去除能力，已成为铝电解生产中的重要环节，但其能耗较大，且对设备的要求较高。半干法氢氧化钙脱硫工艺则具备较强的灵活性，可以应对不同硫化物浓度的变化，适应性强，操作简便，已成为多数铝电解厂的主要选择。两者在节能方面仍然存在改进空间，尤其是在工艺串联的优化与技术集成上，仍需进一步探索降低能耗的途径。

### 1.2 铝电解烟气净化系统的组成与功能

铝电解烟气净化系统主要由多个设备组成，包括烟气冷却装置、脱氟反应器、脱氟除尘器、脱硫除尘器及脱硫塔、引风机等主要设备。这些设备协同工作，电解原烟气进入干法氧化铝脱氟装置，利用氧化铝吸附烟气中的氟化物，随后进入半干法氢氧化钙脱硫装置，通过氢氧化钙与烟气中的硫化物发生化学反应，形成硫酸钙，从而清除有害物质。整个系统的核心任务是实现电解生产烟气的有害物净化回收，同时污染物满足达标排放，对环境起到保护作用。

### 1.3 现有净化工艺的能耗问题分析

铝电解烟气净化工艺普遍存在能耗高的问题，尤其在干法与半干法工艺中。能耗高的具体原因并非化学反应过程本身，

而是动力设备效率低下与管网系统阻力偏高所致。以某 30 万吨 400KA 电解铝生产线为例，单台引风机功率约 900kW，三套系统共 9 台，改造前长期工频运行，通过电机改造为永磁同步电机以及变频控制改造后节电率达 16%，年节电 1135 万度，吨铝单耗降低 28kwh，表明引风机能耗是净化系统的主要矛盾，占整个净化系统电耗的 95%。武汉科技大学对某铝厂 350kA 槽下部烟气集气系统进行均衡集气改造、电解槽出口阀变径管改造以及将净化系统部分烟道 90°弯头改为 45°弯头等一系列优化后，经检测数据证实：系统阻力降低 10%-15%，风机能耗同步降低 10% 以上。因此通过案例分析，净化系统能耗过高的根源在于：动力设备选型偏大、管网阻力设计不合理、风机运行工况偏离设计点，系统漏风等因素。

## 2 干法氧化铝脱氟工艺的特点及节能优势

### 2.1 干法氧化铝脱氟工艺特点及能效表现

干法氧化铝脱氟工艺主要通过氧化铝吸附烟气中的氟化物，此工艺的关键在于氧化铝的高吸附能力，能够有效去除烟气中的氟化物。在运行过程中，烟气首先经过汇集烟道，然后进入氧化铝脱氟装置，在较高的温度下，氧化铝通过表面吸附和化学反应将烟气中氟化物从烟气中吸附反应而去除。干法脱氟工艺的一个突出特点是能够处理含氟浓度较高的烟气，并且在满足环保排放标准的同时，有效降低了氟化物的排放。

干法氧化铝脱氟工艺的能效表现主要体现在其较低的能源消耗和高效的污染物去除能力。在与湿法脱硫相比，干法工艺能够在减少能耗的同时，保持较高的脱氟效率。该工艺在烟气脱氟的过程中不需要大量的水蒸气或化学药剂，能有效避免了能源的消耗。干法工艺还可以通过优化氧化铝的循环使用量和二次反应时间，进一步提高能效<sup>[2]</sup>。通过对工艺参数的精确调整和控制，如温度、氧化铝添加量等，能有效降低能耗，减少废气排放，从而在节能和环保方面具有显著优势。总体而言，干法脱氟工艺提供了一种能效较高且环保性强的解决方案。

## 2.2 改进干法脱氟工艺的节能潜力

改进干法氧化铝脱氟工艺的节能潜力体现在几个方面。首先通过增加设备的热能回收系统,可以在烟气冷却过程中回收部分热量,用于厂区供暖和供应热水甚至发电等余热利用项目,减少外部能源的需求。其次在氧化铝的使用上,采取更高比表面积和流动性的氧化铝,实时调节,能使工艺过程更加高效,减少能量浪费,提高氟化物综合回收利用,从而降低电解整体的能耗。这些改进不仅能提高系统的综合能效,还能为铝电解行业的整体节能减排做出积极贡献。

## 3 半干法氢氧化钙脱硫工艺的特点与优化

### 3.1 半干法氢氧化钙脱硫工艺概述

半干法氢氧化钙脱硫工艺主要通过氢氧化钙与烟气中的二氧化硫反应,在反应过程中加入适当的雾化水,促进化学反应,生成硫酸钙固体,进而去除烟气中的硫化物。在该工艺中,氢氧化钙粉末与烟气充分混合后,发生气固反应,形成硫酸钙颗粒,随后通过过滤装置将硫酸钙从烟气中分离。与传统的湿法脱硫工艺相比,半干法脱硫无需使用大量水资源,同时不会有废水处理的压力。工艺设备结构相对简单,操作维护方便。该技术具有较强的适应性,可根据烟气中的二氧化硫浓度变化灵活调整氢氧化钙的用量和喷水量,从而实现较高的脱硫效率。

### 3.2 半干法工艺的节能效果分析

半干法氢氧化钙脱硫工艺在节能方面表现突出。与湿法脱硫相比,半干法工艺无需使用大量水源,避免了水大量消耗及废水的处理过程,大大降低了水处理设施的能耗。同时,由于脱硫反应是固体与气体的相互作用,不需要额外的加热设备,能量消耗相对较低<sup>[3]</sup>。该工艺的能效表现得到了充分的验证,尤其在处理低浓度二氧化硫的情况下,能够以较小的能量投入达到较高的脱硫效果。通过对反应过程的温度和氢氧化钙投以及水的填充量进行精确控制反应过程,能进一步优化能耗,减少无效的能源浪费,从而提高整体节能效果。

### 3.3 提升半干法脱硫效率的技术方案

提高半干法脱硫效率的技术方案首先在反应工艺过程的优化。通过增加脱硫剂循环量,提升氢氧化钙的粒径分布,增加反应表面积,精准控制反应温度在 65-75℃ 之间,进而提升脱硫效率和脱硫剂使用效率,通过高效反应实现水、电以及脱硫剂的节约,实现节能效果。设备方面,通过改进喷雾方式和反应器均布投料装置改进,增强烟气与氢氧化钙的接触效果,进而提升反应效率。优化反应温度和氢氧化钙的投加量,能够在保证脱硫效果的同时,降低能耗。通过这些技术改进,半干法脱硫工艺的能效和脱硫效率得到了显著提升,同时实现了更好的经济效益和环保效果。

## 4 干法氧化铝脱氟与半干法氢氧化钙脱硫工艺串联节能应用分析

### 4.1 串联工艺在烟气净化中的能效提升

干法氧化铝脱氟与半干法氢氧化钙脱硫工艺的串联应用在烟气净化中具有显著的能效提升效果。通过两种工艺的串联,可以更高效地去除烟气中的有害物质,降低了单一工艺中存在的能耗浪费问题。干法氧化铝脱氟工艺能在较低温度下进行脱氟,避免了能量的过度消耗,并减少了系统的复杂性<sup>[4]</sup>。接着,烟气进入半干法脱硫工艺,利用氢氧化钙的高效脱硫特性,反应过程中不需要大量的外部热源,能够以较低的能源消耗去除二氧化硫。通过两者的串联,能够最大限度地减少烟气处理中的能量损失,在保证脱硫脱氟效果的同时,降低了整体能耗,提高了系统的能效比。工艺的串联还通过充分利用脱硫与脱氟工艺的协同效应,增强了两种反应过程的稳定性和反应速率,从而进一步提升了能效。

### 4.2 串联工艺对节能改造的作用与效果

干法氧化铝脱氟与半干法氢氧化钙脱硫工艺的串联应用对节能改造至关重要。基于行业实际改造数据,可采取以下量化节能措施:负压管道改造,减少系统漏风 5%;电耗可降低 8kWh/t.al;优化烟道阻力和除尘器运行阻力后,系统综合能耗可降低 3%,电耗可降低 4kWh/t.al;引风机变频及永磁电机节能改造后,电耗可降低 15kWh/t.al;

## 5 铝电解烟气净化系统的节能改造与发展方向

### 5.1 节能改造的实际应用案例

铝电解烟气净化系统的节能改造已在多个铝冶炼厂成功实施。以云南宏泰新型材料有限公司为例,该企业针对管网阻力损失和风机运行偏离设计点两大能耗根源,实施了脱硫系统管道优化与净化风机 AI 智能控制两项改造,合计年节电 3300 万度,折合标煤 4056 吨,年创效超 400 万元。该案例表明,精准识别能耗根源并采取针对性措施,可在保障净化效果的同时实现显著节能。

### 5.2 未来技术与工艺优化

铝电解烟气净化系统的未来技术发展将集中在提高能效和减少污染物排放方面。随着新型材料和智能控制技术的不断发展,未来的烟气净化工艺将更加高效和智能化。采用新型高效氧化铝材料与氢氧化钙改性剂,能够在降低能耗的同时,提升脱氟脱硫效果<sup>[5]</sup>。结合先进的人工智能与数据分析技术,工艺过程中的各项参数如温度、湿度和反应速度将得到精确控制,从而降低不必要的能量浪费。未来的技术还可能在烟气净化系统中引入多层级的废热回收技术,提升能源利用率,实现几乎零能耗的循环系统。工艺优化也将通过降低设备运行压力,减少机械磨损,延长设备寿命,从而达到节能和减少维护成本的双重目标。

### 5.3 节能改造的经济性与推广前景

节能改造技术的经济性是铝电解烟气净化系统在实现绿色转型过程中的重要考量。节能改造初期可能需要一定的资金投入,但随着改造后能源消耗的降低,企业能够显著减少能源费用支出。随着市场对环保标准要求的提高,企业通过节能改造不仅能获得经济效益,还能够符合日益严格的环保法规。节能改造的技术已经成熟,且具备较强的推广性,不仅适用于大型铝冶炼厂,也适合中小型企业进行技术升级。未来,随着国家对节能减排政策的持续支持与资金扶持,节能改造的推广前景广阔。行业内企业如果能够率先实施这一改造,不仅能够提升市场竞争力,还能在行业中树立绿色环保的良好形象。

#### 参考文献:

- [1] 宋海琛,李传富,胡红胜.铝电解车间环境优化与净化系统节能降耗的分析与建议[J].轻金属,2025(11):46-50.
- [2] 彭传斌.烟气净化技术在垃圾焚烧发电厂烟气处理中的实践应用[J].资源节约与环保,2025(3):36-40.
- [3] 雪保武,丁泰仁,王小康.240kA 铝电解槽天然气焙烧启动的实践应用[J].甘肃冶金,2025,47(4):83-85.
- [4] 陈丽新,袁永健,黎衡慧,张海龙.基于相间传质理论的铝电解烟气高效吸附净化技术[J].轻金属,2024(6):21-25.
- [5] 李雪娇,赵鹤飞,张国权.铝电解烟气净化系统减污降碳技术措施[J].轻金属,2024(9):27-31.

### 6 结语

铝电解烟气净化系统能耗高的根源在于动力设备选型偏大、管网阻力设计不合理、风机运行工况偏离设计点等。通过风机变频改造、均衡集气技术应用、管道弯头优化及 AI 智能控制等针对性措施,可显著降低系统能耗。干法氧化铝脱氟与半干法氢氧化钙脱硫工艺的串联应用,结合负压管道治漏改造,能够在保障净化效果的同时实现节能降耗,改造后排放指标可满足超低排放要求。未来,随着新型高效材料、人工智能控制及废热回收技术的不断发展,烟气净化系统的能效将进一步提升,节能改造将在更多铝冶炼厂推广应用,为行业绿色低碳转型提供有力支撑。