

# 基于袋式除尘的电解铝工艺含氟烟气控制 用清洁技术实践应用

樊立

(陕西美鑫产业投资有限公司, 陕西 铜川 727100)

**摘要:** 电解铝企业生产中会排出粉尘颗粒污染物和有毒气体, 若相关污染物的治理效果不理想, 将会对周围环境与人们的健康造成威胁。本文基于袋式除尘技术, 对电解铝含氟烟气的控制技术进行了研究。首先对技术特征进行研究, 分析模拟浓度场、导流结构与相关控制策略; 其次对技术应用效果进行评价, 评价项目包括吸附时长、分布情况与整体有效性; 最后结合案例, 说明电解铝工艺的技术要点, 并对治理效果与应用效能进行总结。

**关键词:** 电解铝工艺; 袋式除尘器; 含氟烟气; 清洁控制

**中图分类号:** X758

**DOI:** 10.12230/j.issn.2095-6657.2022.24.012

**文献标识码:** A

电解铝是高耗能、高污染行业, 在经济发展中占有重要地位, 我国现已成为电解铝产业大国。虽然该行业能够推动经济发展, 却也造成了较为严重的环境污染问题, 要想对含氟烟气进行控制, 推广最新的电解铝工艺, 使用清洁技术十分重要, 是落实环保发展理念的关键环节。基于此, 本文研究了袋式除尘技术在电解铝行业中的应用价值, 为电解铝行业的环保发展奠定了基础。

## 1 项目背景

近几年, 袋式除尘器在冶炼铝等领域得到了广泛运用。该设备不仅是组成干法净化体系极为重要的一环, 还对加工铝制品的工作具有重要意义, 可彻底打破传统除尘器所受到的功能制约。由于本文所讨论的除尘器与传统除尘器存在明显区别, 对二者进行研究时的落脚点、路线及措施自然也有所不同, 研究开始前, 先要明确研究的重点, 具体阐述如下。

其一, 颗粒到达设备内部后的运动情况、整体规律。要想通过干法净化方式除氟, 关键要确保烟气所含颗粒始终处于悬浮状态, 为吸附净化预留充足的时间。因此, 在对相关设备进行研究时, 应重点分析颗粒悬浮时长。

其二, 不同设备颗粒存在差别。该设备内部颗粒直径并不统一, 初期颗粒直径在  $80\mu\text{m}$  左右, 经过循环处理的颗粒直径在  $40\mu\text{m}$  左右, 而包括燃煤锅炉在内的多数锅炉所产生的颗粒直径均不会超过  $4\mu\text{m}$ , 对颗粒分布情况加以控制的难度有目共睹<sup>[1]</sup>。

其三, 设备固气流场构造。该设备兼具除尘、净化功能, 只有保证固气充分混合, 才能使设备价值得到最大程度的发挥。以往的除尘器普遍更注重颗粒分布是否均匀、捕集颗粒速度是否能进一步提升, 而该设备需要颗粒长期处于高浓度悬浮状态, 因此, 调整其内部流场势在必行。

其四, 过滤技术。受干法净化特征影响, 设备内部  $\text{PM}_{2.5}$  浓度将随着颗粒使用频次的增加而增加, 只有改善设备的过滤性、对滤袋表面所形成的粉尘吸附层进行调整, 才能达到除氟的目的。鉴于此, 有关人员指出, 在选择设备所用滤料时, 应对多方面因素加以考虑, 保证所选用滤料既能加快颗粒沉积的

速度, 又能使粉尘层的均匀程度得到改善。

## 2 技术研发

研究证实, 提高设备内固气分布的均匀程度, 一方面能够保证烟气、颗粒充分混合, 在改善净化效率的同时, 使颗粒悬浮时长得到调整; 另一方面能确保滤袋表面形成颗粒沉积层, 使固定床反应达到预期效果。考虑到设备内部流场会对颗粒烟气分布情况产生直接影响, 仅控制烟气分布并不能达到协同控制的目的, 只有引入数值模拟法, 对导流结构和浓度场、速度场的关系进行研究, 进而确定控制固气分布的技术, 才能使设备优势得到最大程度发挥。

### 2.1 技术特征

本文所讨论的清洁技术具有以下特征: 首先, 清洁技术和生产工艺充分融合, 该设备的治理对象以氧化铝颗粒、氟化物为主, 可通过闭式循环的方式, 使经济、环保效益达到预期水平; 其次, 对既有技术进行了拓展与升级, 该设备以原有粉尘治理手段为基础, 通过对一体化除尘相关技术进行升级的方式, 使其适用范围得到拓展, 对日后全面清洁等工作的开展具有重大意义; 最后, 能够做到循环利用, 该技术的循环性主要体现在四个方面, 分别是原料-污染物(氟平衡+氟回收)、原料-吸附剂(氧化铝)、治理对象(氧化铝)、颗粒控制<sup>[2]</sup>的循环。原有除尘器仅能对粉尘进行一次过滤, 而该设备可多次过滤粉尘, 使治理污染物的过程变得更加无害。

### 2.2 研发要点

#### (1) 模拟浓度场

在对流体力学进行计算时, 研究人员往往更倾向于利用欧拉法、拉格朗日法对颗粒的运动状态、分布情况加以模拟, 考虑到净化含氟烟气所用除尘器的性能极易被氧化铝颗粒所影响, 要想保证研究所得结果具有实际意义, 可选择借助拉格朗日法, 对设备内颗粒的分布特征、浓度等情况进行研究, 如公式(1)所示。

$$C_j = \frac{M \sum_{i=1}^n d\tau_{i,j}}{V_j} \quad (1)$$

在公式(1)中,  $C_j$  代表单元格  $j$  内部颗粒浓度的平均值,  $M$  代表轨道流量,  $d\tau_{i,j}$  代表颗粒停留在单元格  $j$  对应轨道  $i$  上的时长,  $V_j$  代表单元格实际体积。研究证实, 跟踪轨道达到一定数量后, 颗粒浓度场便会趋于稳定。基于此, 有关人员以公式(1)为依据, 对颗粒浓度、轨道数量进行了转换, 由此判断二者存在关联。

## (2) 导流结构影响分析

作为袋式除尘器不可或缺的一部分, 导流结构往往会对颗粒分布状况产生巨大影响, 要想使流场更加科学, 关键是要对结构位置、整体形态及相关参数加以控制。其中, 导流翼板对应结构参数有三个, 分别是长度、偏转角度、长度增长数值。研究人员以上述参数的特征为依据, 选取 9 个水平并建立相应空白列, 确保试验误差可得到如实反映。随后, 通过正交试验对翼板结构、固气分布关系进行说明。

## 2.3 控制策略

### (1) 导流板

在确定了均流板使用模式、相关参数后, 便可着手对浓度、速度分布均方根进行计算。结果表明, 速度均方根仍未达到理想数值, 故以既有均布控制方案为基础对控制技术进行调整很有必要。均流板的运行模式为先竖直后水平, 在加入导流结构期间, 应重点关注烟气进入灰斗后的流动状态, 确保新增导流结构不会影响烟气正常流动。受烟道阻挡影响, 烟气通过竖直弯管到达设备内部后, 通常会先扩散到烟道边壁, 再向中轴聚集, 使设备中轴四周颗粒浓度自然大于边壁浓度, 固气均布效果也能够得到一定程度的改善。鉴于此, 研究人员制定了以下方案: 以灰斗、烟道交点为依托对分流板进行设置, 在维持气流状态的前提下, 控制中轴附近的烟气浓度, 通过分散气流的方式使烟气湍流度得到控制, 在保证烟气均布的同时纠正颗粒浓度, 确保烟气到达灰斗内部后, 均流板可实时控制颗粒浓度。

事实证明, 合理运用灰斗均流、出口分流等手段, 能够使分流板功能得到充分发挥, 先分散烟气, 再将烟气输送至灰斗内, 确保汇聚作用可得到有力控制。现将试验结果总结如下: 其一, 由于烟道侧烟气的转弯角度相对较小, 灰斗内烟气多聚集在另一侧, 随着分流板的加入, 烟道侧颗粒浓度大幅度提高, 多数颗粒均能够沉积在前区滤袋内, 各区域沉积程度更加均匀; 其二, 灰斗内部颗粒的混合程度较以往有所提高, 提高幅度能够达到 20% 左右。

### (2) 循环利用颗粒

结合模拟结果能够发现, 导流装置更适用于气流控制, 这是因为进入除尘器后, 烟气、颗粒将发生快速分离, 直径不同的颗粒分离的区域往往有所不同, 均布控制难度不言而喻。针对该情况, 研究人员制定了以下方案: 调整颗粒循环次数, 对导流装置给颗粒浓度产生的影响进行分析。结果表明, 循环次数为 3 时, 直径分布范围处于 2 ~ 40  $\mu\text{m}$  间, 中位直径是 12  $\mu\text{m}$ , 此时颗粒密度在 3600  $\text{kg}/\text{m}^3$  左右, 对应固气比约为 45  $\text{g}/\text{m}^3$ 。

综上, 循环使用氧化铝可使直径分布范围得到减小, 同时使颗粒分布更加均匀, 在此过程中, 烟气速度所受到的影响可忽略不计。这是因为减小颗粒直径能够在极大程度上改善颗粒

跟随性, 避免烟气、颗粒快速分离, 颗粒运动对气流产生的影响随之弱化。由此可见, 净化期间应严格控制颗粒直径, 优先选择直径相近的颗粒, 通过增加颗粒使用频次、调整固气比的方式, 使颗粒分布更加均匀, 在促使颗粒均匀沉积的同时, 使其吸附能力得到增强, 为除氟效率提供保障。

### (3) 进气烟道

烟气往往要通过进气烟道到达除尘器内部, 在此过程中, 极易由于弯管的影响发生偏流或是回流的情况, 从而增加管壁分离、二次回流问题的出现概率。要想解决这个问题, 应保证弯管内侧气流速度高于外侧, 同时准确把握离心力、惯性对颗粒移动产生的影响, 改善固气分离程度, 使均布控制所取得的成效达到预期效果。考虑到进气弯管会对固气分布产生直接影响, 研究人员决定以弯管为载体, 通过增设导流板的方式, 降低偏流、回流问题发生的概率, 使烟气速度更加均匀。

此外, 导流板还具有分割的作用, 可通过分割弯管流道的方式, 使颗粒扩散速度、距离得到控制, 颗粒浓度也将随着浓度梯度的减小而变得更加均匀。若仅考虑导流板因素, 则导流板数量越多, 固气分布越均匀, 但增设大量导流板会影响管道压强、阻力损失, 缩短管材的使用寿命。对多方面因素加以考虑后, 研究人员最终制定了以下方案: 以进气烟道整体形态为依据, 在弯管指定位置安装两块导流板。随着导流板的加入, 气流速度较以往变得更加均匀, 与此同时, 灰斗内部气流分散程度也变得更加理想。试验证实, 该做法不仅能够控制气流速度, 还能够改善颗粒混合程度, 解决气流、颗粒快速分离的问题, 净化效果自然能够得到有力保证。

## 3 效果评价

本文所讨论的除尘器不仅突破了功能的限制, 还使相关技术的适用范围得到了拓展。换言之, 沿用传统的评价指标及方法, 并不能保证评价结果与设备情况完全契合。除尘器运行主要分为三个阶段, 首先是输送床反应, 其次是固定床反应, 最后是固气分离, 只有保证固气接触充分, 才能做到混合均匀, 后续操作的效果才能达到预期。由此可见, 对除尘器进行评价时, 应重点关注吸附时长、分布情况和整体效果, 从不同层面给出相应的评价, 确保除尘器潜在缺陷能够被及时弥补, 促使其优势得到最大程度的发挥。

### 3.1 评价吸附时长

在判断设备综合性能前, 先要对流场构造与干法净化除氟的契合程度进行评价。一般情况下, 输送床反应时长均长于其他阶段, 该阶段除氟效果自然更加明显。鉴于此, 研究人员决定将重心放在颗粒悬浮时长上, 根据所掌握的资料推出公式(2):

$$\bar{t} = \frac{\sum tE(t)}{\sum E(t)} > 1.0s \quad (2)$$

在该公式中,  $\bar{t}$  代表颗粒停留时长的平均值, 单位是  $s$ ;  $E(t)$  代表停留时长对应的分布密度。随后, 分别对基础袋式除尘器、增设多重导流板的设备、使用多重导流袋的设备进行分析, 结果证实, 使用多重导流除尘器可缩短颗粒停留时长, 同时保证停留时长得到集中分布, 这说明该除尘器能够抑制颗粒回流次数, 对颗粒进行均匀分布。控制颗粒直径所带来

的连锁反应主要是使设备内颗粒浓度更加均匀、停留时长缩短,而停留最短时长并未出现明显改变,仍在1s以上。综上,袋式除尘器内部流场均符合系统吸附的时间要求,可酌情加以使用。

### 3.2 评价分布情况

事实证明,颗粒停留时长达到除氟需求,可保证含氟烟气、颗粒得到充分接触。随后,研究人员应将重心转向固气分布,围绕如何保证固气分布均匀展开讨论,并给出相应的评价,只有保证颗粒分布均匀,才能使除氟效率得到大幅度提高。目前,关于颗粒分布的研究,落脚点主要集中在两个方面:一是气流速度、颗粒浓度,二是流量分配、沉积量分布。在评价固气分布情况前,先要了解浓度场、速度场的状态,确保所选择评价指标均能够满足以下要求:第一,指标可量化,能够以指标大小为依据判断固气均匀程度;第二,指标无量纲,能够分别针对浓度场、速度场的情况,给出相应的结论。

现阶段,评价速度场所使用的主流方法为相对均方根法,该方法既符合无量纲、可量化要求,还对不均值具有极强的影响,相关公式如下:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \bar{x}}{\bar{x}} \right)^2}$$

在该公式中, $\sigma_x$ 代表评价对象相对均方根; $n$ 代表测点总数; $x_i$ 代表测点浓度/气流速度; $\bar{x}$ 代表浓度/气流速度的平均值。研究证实,对多重导流板加以运用,可使固气分布更加均匀,颗粒分布范围将随着直径的增大而增大。与此同时,颗粒分布均匀程度将受到一定影响。

### 3.3 评价整体效果

一般情况下,可利用除氟模型评价净化效果,进而选择除氟所用吸附剂类型。通过分析可知,只需掌握固气比、粒径分布和烟气情况,便可根据停留时长评估设备的除氟效果,明确所选用的吸附剂是否科学,为日后工作的开展提供理论依据。如果固气接触时长未达到1s,则要严格控制固气比,只有这样才能保证除氟效率达到或超过95%。假设烟气浓度是 $100\text{mg}/\text{m}^3$ ,对应固气比是 $35\text{g}/\text{m}^3$ ,既有颗粒直径平均在 $35\mu\text{m}$ 左右,要想将除氟效率维持在98%,需要保证固气接触时长达到0.95s。由此可见,在固气均匀分布的前提下,袋式除尘器在除氟方面表现极为突出。换言之,只有严格控制两相分布情况、固气比,才能使固气接触时长得到压缩,同时保证净化效果达到预期。

## 4 实践应用

### 4.1 案例说明

随着铝工业的发展,各地电铝企业规模持续扩大,铝工业生产所使用的常规技术通常会产生大量有害粉尘和气体,对现场人员、周围环境造成不利影响。为解决该问题,越来越多的电铝企业选择以自身需求为依据,对烟气净化相关技术加以运用。本项目为某电铝企业烟气净化,现场烟气温度约为 $80^\circ\text{C}$ ,总流量为 $150\text{万}\text{m}^3/\text{h}$ ,入口处烟尘浓度在 $50\text{g}/\text{m}^3$ 左右,

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度约为 $165\text{mg}/\text{m}^3$ ,气氟+固氟总浓度在 $200\text{mg}/\text{m}^3$ 左右。

### 4.2 技术介绍

项目固气比约为 $50\text{g}/\text{m}^3$ ,既有氧化铝颗粒均要循环利用3~4次,颗粒直径偏小,除尘器内颗粒分布相对集中,同时 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度也相对较高。有关人员决定使用侧壁下进风的除尘器对现场烟气进行净化,在此基础上,以项目特征为依据,对导流模式、灰斗内布局加以调整,使固气两相得到有效控制。

### 4.3 治理效果

项目正式投运后,工作人员将设备运行阻力调整至 $400\text{Pa}$ 。此时,该系统所排放粉尘的浓度在 $5.15\text{mg}/\text{m}^3$ 左右,排放氟化氢的浓度在 $0.15\text{mg}/\text{m}^3$ 左右,均未超过行业规定限值。

### 4.4 效能分析

对上文所介绍的技术加以运用,可将每年回收粉尘的总量增加到 $400\text{t}$ ,同时将氟化盐用量减少到 $120\text{t}$ ,为企业带来215万元以上的收入,使经济、环保效益得到显著提高。该技术的本质是依托袋式除尘器,对不同类型污染物进行干法净化,对袋式除尘器加以运用,可使脱硫效率得到显著提高,保证所排放颗粒物、二噁英和汞浓度均在允许范围内。由此可见,对上述技术加以推广很有必要,这样做既能使颗粒物得到协同治理,又能使除尘器潜能得到充分挖掘,通过升级相关除尘技术的方式,使除尘器适用范围得到扩大<sup>[3]</sup>。

## 5 结语

综上所述,本文分析了含氟烟气的控制方法,对清洁技术方案进行了应用,通过使用袋式除尘设备,促使颗粒与烟气充分混合,确保滤袋表面形成沉积层,使除尘效果达到预期。在技术应用的过程中,本文分析了模拟浓度场、导流结构的影响,在此基础上,对电解铝环保技术进行说明,确保烟气处理效果达到清洁要求,并与目前环保发展的理念相符合。上述技术的落实能够最大程度降低成本、提升净化吸附效果。由此可见,对除尘技术的升级可提高自动化水平,减少劳动力投入,使电解铝杂质含氟烟气控制符合环保要求。

### 参考文献:

- [1] 王明年,郭晓晗,于丽,等.空气幕对城际铁路地下车站火灾烟气控制数值分析[J].中国安全生产科学技术,2019,15(09):63-69.
- [2] 刘兴成.基于袋式除尘的电解铝工艺含氟烟气控制用清洁技术研究[D].上海:东华大学,2019.
- [3] 杨钊.袋式除尘技术在冶金行业的应用分析[J].世界有色金属,2020,(18):130-131.

作者简介:樊立(1989-),男,陕西镇安人,大学本科,助理工程师,主要从事铝液铸造、液压支架生产管理、精益管理研究。