

切割烟气除尘装置设计

张心怡*, 孟令启#

广州科技职业技术大学自动化学院, 广东 广州

收稿日期: 2025年3月2日; 录用日期: 2025年3月25日; 发布日期: 2025年4月3日

摘要

在金属加工行业中, 切割是一种常见的加工工艺, 如火焰切割、等离子切割等。然而, 在切割过程中会产生大量的高温烟气, 其中含有金属氧化物、粉尘颗粒等有害物质。通过对现有除尘技术的分析和对比, 结合切割工艺的特点, 本文确定了采用袋式除尘与旋风除尘相结合的复合式除尘方案。并详细阐述了该装置的结构设计及关键部件的选型计算, 并对其除尘效果进行了理论分析和实验验证。

关键词

切割烟尘, 烟气除尘, 空气污染

Design of Cutting Smoke Dust Removal Device

Xinyi Zhang*, Lingqi Meng#

School of Automation, Guangzhou Vocational University of Science and Technology, Guangzhou Guangdong

Received: Mar. 2nd, 2025; accepted: Mar. 25th, 2025; published: Apr. 3rd, 2025

Abstract

In the metal processing industry, cutting is a common processing technique, such as flame cutting, plasma cutting, etc. However, a large amount of high-temperature smoke is generated during the cutting process, which contains harmful substances such as metal oxides and dust particles. Through analysis and comparison of existing dust removal technologies, combined with the characteristics of cutting processes, this article has determined a composite dust removal scheme that combines bag dust removal and cyclone dust removal. And the structural design of the device and the selection calculation of key components were elaborated in detail, and the dust removal effect was theoretically analyzed and experimentally verified.

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 张心怡, 孟令启. 切割烟气除尘装置设计[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(2): 91-98.

DOI: 10.12677/met.2025.142009

Keywords

Cutting Smoke and Dust, Smoke Dust Removal, Air Pollution

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

空气颗粒物是影响我国空气质量的重要污染源。我国是制造业大国, 在一些重工业制造区空气污染[1]更为严重, 这些烟气会对操作人员的身体健康造成危害。在激光切割机[2]中所释放的烟尘按照烟尘颗粒大小分为两种类型, 分别是尘埃和气溶胶, 其中尘埃的颗粒大小一般超过 $1\ \mu\text{m}$, 气溶胶的颗粒大小一般不超过 $1\ \mu\text{m}$, 并且气溶胶含有固体或者液体两种类型的气体, 其中, 大约有 96% 的颗粒不超过 $5.6\ \mu\text{m}$, 由于气溶胶的颗粒小, 因此, 很容易被从业人员吸入肺中, 引起从业人员的呼吸道疾病。传统的单一除尘方式往往难以满足对切割烟气中各种粒径颗粒物的高效去除要求。旋风式除尘器对大粒径颗粒物具有较好的分离效果, 但对小粒径颗粒物的去除效率较低; 袋式除尘器虽能高效捕集小粒径颗粒物, 但对于大粒径颗粒物的处理容易导致滤袋堵塞, 且不耐高温, 影响使用寿命。因此, 设计一种将袋式除尘和旋风式除尘相结合的复合装置[3], 选用新型合金梯度滤料, 以提高对切割烟气的除尘效果具有重要意义。本方案是对在切割过程中产生的高温烟气在集气罩的作用下被收集, 通过管道系统进入旋风除尘器。在旋风除尘器内, 烟气做高速旋转运动, 利用离心力使较大粒径的粉尘从烟气中分离出来, 落入灰斗。经过旋风除尘器初步净化后的烟气进入袋式除尘器, 在滤袋的过滤作用下, 微细粉尘被截留在滤袋表面, 净化后的气体从滤袋内部排出, 通过风机排入大气。当滤袋表面的粉尘积累到一定程度时, 脉冲喷吹系统启动, 对滤袋进行清灰, 使滤袋恢复过滤性能。清灰下来的粉尘落入灰斗, 通过卸灰装置排出。

1.1. 各种除尘器的特点

各种烟尘除尘器都有各自的优缺点, 首先机械除尘器的特点为: 重力沉降室结构简单, 投资小, 维修管理方便, 但缺点是: 体积大, 气流速度低, 一般只能捕集粒径大于 $50\ \mu\text{m}$ 的尘粒, 除尘效率低, 干式沉降室为 50%~60%, 湿式沉降室为 60%~80%。惯性除尘器结构相对简单, 可用于多级除尘的第一级, 缺点是: 压力损失大, 除尘效率较低, 一般为 50%~70%, 适用于捕集粒径大于 $20\ \mu\text{m}$ 的尘粒。旋风除尘器造价较低, 占地面积小, 操作维护方便, 对大于 $5\ \mu\text{m}$ 的粉尘有较高的除尘效率, 可用于高温、高压及有腐蚀性气体的除尘。缺点是对微细粉尘的除尘效率较低, 一般在 80% 左右, 阻力较大, 且随着入口风速的增加, 阻力呈平方关系增加, 磨损较严重, 尤其是对含尘浓度高、硬度大的粉尘。

袋式除尘器能适应各种粉尘特性烟气, 除尘效率高, 可达到 99% 以上, 结构紧凑, 占地面积小, 布置灵活, 滤袋拆装方便, 清灰高效彻底, 设备运行稳定可靠。缺点是运行阻力较高, 超负荷通过能力较差, 运行时阻力能耗比电除尘器大, 普通滤袋耐低温能力差, 耐高温滤料成本高, 滤袋易破损, 寿命较短, 受烟气湿度影响大。折叠滤筒除尘过滤面积大, 气流通量高, 过滤风速低, 过滤效率高, 可确保出口排放达标, 能降低设备运行阻力, 其缺点是对烟气湿度、粉尘粘性等工况有一定限制, 滤筒折叠结构可能导致清灰难度增加, 制作工艺要求较高。

电除尘器性能可靠, 除尘效率高, 可达到 99% 左右, 抗高温, 二次扬尘小, 易于维护。缺点是对粉

尘的比电阻有严格要求, 受气体的温度、湿度等条件的影响较大, 设备比较复杂, 造价高, 对运行、安装以及维护管理水平要求较高。

云式除尘技术新突破: 兰州大学 GEE 团队的“异质凝并强化脱除细颗粒物技术” [4], 针对铅锌烧结冷却圆筒烟气温度高、成分复杂、颗粒物粒径小等难题, 采用计算流体力学(CFD)方法进行数值模拟, 通过“云雾发生器”快速降温烟气, 提高水汽湿度并增加饱和蒸汽压, 促进颗粒的核化和长大, 除尘效率达到 99%以上, 出口浓度能达到 10 mg/m^3 以下。

超声雾化与旋风脱水结合: 三钢闽光的转炉湿法除尘烟气超净排放[5]设备专利, 将原挡板式旋转脱水器改为下沉式旋风脱水器, 新增金属过滤网, 采用双介质超音速气雾水喷枪, 加强了烟气中微细颗粒的捕捉, 延长了过滤网的使用寿命, 还通过筒体加高, 增加了气雾捕捉粉尘颗粒的有效时间。

旋转式颗粒层除尘: 南通理工学院和江苏鹏飞集团的高温回转窑烟气中旋转式颗粒层[6]除尘装置及方法专利, 通过在滤筒底部转动连接集灰杯, 利用离心力使颗粒层吸附的粉尘脱离进入集灰杯, 解决了颗粒层饱和问题。

1.2. 除尘器的发展趋势

其发展趋势从以下方面发展:

- 1) 高效低耗化: 开发新型高效的除尘技术和材料, 如纳米纤维、活性炭纤维等, 以进一步提高除尘效率, 同时降低能耗和运行成本。
- 2) 多污染物协同控制[7]: 烟气除尘将与脱硫、脱硝等污染物治理技术更紧密结合, 实现多种污染物的协同去除, 以满足更严格的环保要求。
- 3) 智能化自动化: 利用大数据、物联网、人工智能等技术, 实现对烟气除尘设备的远程监控、故障诊断、智能调节和预防性维护, 提高设备运行的稳定性和可靠性。
- 4) 绿色环保化: 注重开发绿色、环保型除尘技术, 减少二次污染, 如改进湿式除尘技术, 降低废水排放, 或研发生物除尘技术等。

经过文献参考及技术分析对比, 对于切割烟气而言, 其粉尘粒径分布较广, 既有较大粒径的颗粒, 也有大量的微细粉尘, 在查询资料中也得知大多过滤器被堵塞和压扁的原因主要是因为大颗粒机械杂质存在于管道内造成的, 单一的除尘技术往往难以满足高效除尘的要求, 且要考虑到经济性。因此, 综合考虑各种除尘技术的优缺点, 本文选择采用袋式除尘与旋风除尘相结合的复合式除尘方案。

2. 除尘装置设计

结构原理和设计

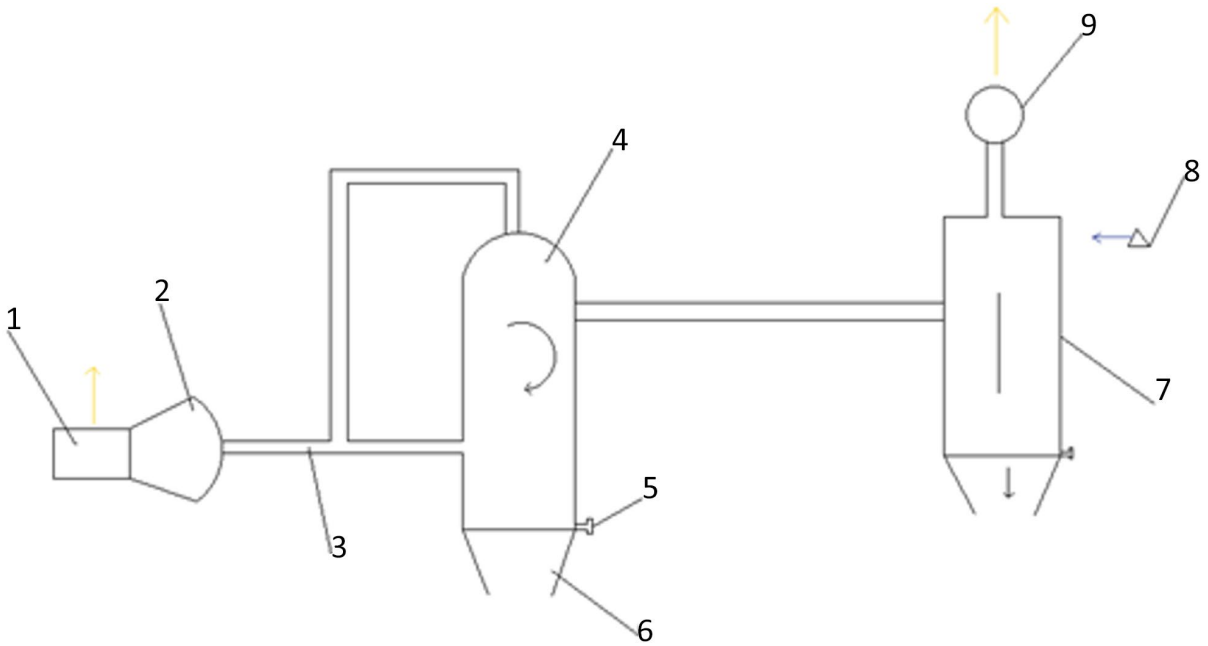
切割烟气除尘装置主要由集气罩、管道系统、旋风除尘器、袋式除尘器、风机、清灰系统和控制系统等部分组成。

系统流程图:

切割源→集气罩→旋风预处理→袋式再除尘→风机→净化排放。

本复合装置将旋风除尘和袋式除尘相结合, 充分发挥两者的优势。含尘烟气首先进入旋风除尘部分, 大粒径颗粒物在旋风除尘器的离心力作用下被初步分离并落入灰斗, 减轻了后续袋式除尘部分的负担。经过旋风除尘后的烟气中主要是小粒径颗粒物, 再进入袋式除尘部分, 通过滤袋的过滤作用将小粒径颗粒物捕集, 从而实现对切割烟气中不同粒径颗粒物的高效去除。使用智能清灰系统, PLC 控制脉冲阀[8], 根据压差动态调整清灰频率, 减少人员出入, 在尽量封闭的空间设计[9], 确保烟尘不外溢, 所产生的烟尘能够在封闭空间内最终达到 95%收集处理, 同时降低烟尘风量, 达到降低能耗的作

用。如图 1 所示。



注: 1: 切割台; 2: 集气罩; 3: 管道系统; 4: 旋风除尘器; 5: 卸灰装置; 6: 灰斗; 7: 袋式除尘器; 8: 脉冲喷吹系统; 9: 风机。

Figure 1. System diagram of the integrated cutting smoke dust removal device

图 1. 切割烟气除尘复合装置系统图

3. 关键部件选型计算

3.1. 烟气量的确定

根据切割工艺的特点和集气罩的设计参数, 采用经验公式法计算除尘系统的风量。计算公式为: $Q = A \cdot V$, 其中 Q 为风量 Q (m^3/h), V 为集气罩开口处的平均风速(m/s), 根据切割工艺的产尘量和车间环境要求, 此处取 0.5 m/s ; A 为集气罩开口面积(m^2)。假设集气罩开口面积为 20 m^2 , 则计算得到风量 $Q = 20 \times 0.5 = 10 \text{ m}^3/\text{s} = 36,000 \text{ (m}^3/\text{h)}$ 。此通风换气量用于维持集气罩内的负压环境, 防止烟尘外溢。

设乙炔切割枪直径 8 mm ; 切割每消耗 1 m^3 乙炔的通风换气量 $5000 \text{ m}^3/\text{h}$; 烟气含尘浓度: $<5 \text{ g/m}^3$ 、烟尘颗粒: $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 占 50% 。乙炔切割过程中, 烟尘生成量 C 可通过公式: $C = Q \times c$, Q 为通风换气量 ($5000 \text{ m}^3/\text{h}$); c 为烟尘含尘浓度($<5 \text{ g/m}^3$), 则计算得出 $C = 5000 \times 5 = 25000 \text{ g/h} = 25 \text{ kg/h}$ 。

3.2. 旋风除尘器选型

根据计算得到的 $36,000 \text{ (m}^3/\text{h)}$ 风量和旋风除尘器的性能参数, 选择合适型号的旋风除尘器。旋风除尘器的主要性能参数包括处理风量、除尘效率、压力损失等。在选型时, 应确保所选旋风除尘器的处理风量能够满足系统要求, 同时除尘效率和压力损失也在合理范围内。旋风除尘器的除尘效率主要与粉尘粒径、进口风速、筒体直径等因素有关。根据效率公式, 旋风除尘器对粒径为 dp 的粉尘的分级效率可表示为:

$$\eta_1 = 1 - \exp\left(-2\left(\frac{dp}{d}\right)^n\right)$$

其中, η_1 为分级效率, dp 为颗粒直径(m), d 为切割粒径(不同分离效率对应的粒径 m), n 为经验系数(通常取 1.5)。

压力损失计算 $\Delta P = \frac{1}{2} \rho v^2 \left(\frac{K}{D} \right)$; ρ 为气体密度(kg/m^3); v 为入口风速(m/s); K 为阻力系数; D 为旋风除尘器直径(m)。

3.3. 袋式除尘器选型

袋式除尘器的选型主要依据过滤风速、滤袋面积[10]和处理风量等参数。过滤风速是影响袋式除尘器性能的重要因素之一, 进风口因风速过高形成高速射流[11], 部分颗粒直接穿透布袋逃逸(降低过滤效率), 另一部分冲击箱体壁面导致结构性磨损, 二者共同影响设备性能及寿命。一般根据粉尘性质、含尘浓度、清灰方式[12]等因素确定。对于切割烟气, 采用脉冲喷吹清灰方式, 过滤风速可选取 1.0~1.5 m/min, 此处取 1.2 m/min。滤袋面积计算公式为: $A = Q/(60 \times v_f)$, 其中 A 为滤袋面积(m^2), Q 为风量(m^3/h), v_f 为过滤风速(m/min)。根据滤袋面积 A 选择合适规格的滤袋和袋式除尘器。根据效率公式, 旋风除尘器对粒径为 dp 的粉尘的分级效率可表示为:

$$\eta_2 = 1 - \exp\left(-\frac{v_f \cdot t}{L}\right)$$

其中, v_f 为过滤风速(m/s); t 为过滤时间(s); L 为滤袋长度(m)。

压力损失: $\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2$; ΔP_1 为清洁滤袋压力损失(通常为 100 Pa); ΔP_2 为粉尘层损失。

传统的滤料分为三层, 以基部为基础, 加上上面层及底层成为夹心对称结构, 通过针刺或者水刺作用形成密实的滤料结构。

新型合金纤维梯度滤料[13]强度高, 透气性能优, 耐高温, 孔径分布均匀。合金滤料是由微米级丝径的合金纤维经过无纺铺置后烧结而成, 合金梯度滤料采用合金纤维毡作为基础, 外侧采用金属网作为支撑, 提高合金滤料的整体强度。除此之外, 可以选择 PTFE 覆膜滤筒进行过滤。

3.4. 风机选型

风机主要用于传送气体, 它的选型需要考虑系统的风量、风压和风机的效率等因素。系统的风压损失包括管道阻力、旋风除尘器阻力和袋式除尘器阻力等。考虑到风机的运行效率和节能要求, 风机的轴功率与风机转速的立方也成正比, 这意味着改变风机就可以改变其功率, 可以为风机配备一台节能系统, 在原有风机上运用节能系统[14], 减少人力消耗, 以自动化控制[15]的方式改造车间的抽风口阀门。

4. 实验分析

为了验证旋风除尘器的除尘原理、结构特点及应用场景。掌握除尘器性能测定的主要内容和方法, 包括管道中气体流量、压力损失、阻力系数以及除尘效率的测定。

探究影响除尘器性能的主要因素, 如入口风速、粉尘浓度、气体温度等对除尘效率和压力损失的影响。

实验原理: 含尘空气由除尘器的进口切线方向进入除尘器的内外筒之间, 由上向下作旋转运动, 形成外涡旋, 逐渐到达锥体底部。气流中的灰尘在离心力的作用下被甩向外壁, 由于重力作用以及向下气流的带动而落入底部集尘斗。向下的气流到达锥体的底部后, 沿除尘器的轴心部位转而向上, 形成旋转上升的内涡旋, 并由除尘器的出口排出。

4.1. 实验装置

1) 供风系统: 包括风机、风量调节阀等, 风机用于提供含尘气体的动力, 风量调节阀可以调节气体

流量, 模拟不同的工况。

- 2) 粉尘发生装置: 如振动给料器和粉尘储料仓, 通过控制振动给料器的频率和振幅, 可以调节粉尘的供给量。
- 3) 旋风除尘器: 实验研究的对象, 其结构参数如直径、高度、入口宽度等会影响除尘效果。
- 4) 测量系统: 包含毕托管和微压计, 用于测量气体流速和压力; 粉尘采样器用于采集进出除尘器的粉尘样本。

4.2. 实验步骤

系统检查与调试: 检查实验装置各部件连接是否紧密, 确保无漏气现象。开启风机, 调节风量调节阀, 使供风系统稳定运行, 记录初始的风量和风速等参数。

粉尘添加与稳定运行: 启动粉尘发生装置, 逐渐增加粉尘供给量, 直到达到实验设定的粉尘浓度。让系统稳定运行一段时间, 使除尘器内的气流和粉尘分布达到稳定状态。

数据采集: 使用毕托管和微压计测量除尘器进出口的气体流速和压力, 计算除尘器的阻力。通过粉尘采样器在除尘器进出口同时采集粉尘样本, 采集时间要根据粉尘浓度和采样器的流量等因素确定, 以确保采集到足够用于分析的粉尘量。

样本分析: 对采集的粉尘样本进行称重和粒度分析等。用重量法计算除尘效率。

改变工况重复实验: 调节风量调节阀改变气体流量, 或者改变粉尘供给量改变粉尘浓度等工况, 重复上述步骤, 获取不同工况下除尘器的性能数据。

4.3. 数据处理与分析

计算除尘效率: 基于所采集的粉尘样本重量, 运用公式 $\eta = (m_{进} - m_{出})/m_{进}$ 精准计算除尘效率。其中, η 为除尘效率, 代表设备对粉尘的过滤能力; $m_{进}$ 是进入除尘器的粉尘总量, 即进口粉尘质量; $m_{出}$ 是经除尘后排出的粉尘量, 即出口粉尘质量。通过这一计算, 能直观了解除尘设备对粉尘的去除效果。

计算压力损失: 依据除尘器进出口的压力测量数据, 利用公式 “ $P_{压力损失} = P_{进} - P_{出}$ ”, 其中, $P_{进}$ 为进口压力, $P_{出}$ 为出口压力。该压力损失数值 P 能够反映出气体通过除尘器时所消耗的能量, 对评估除尘器运行能耗及阻力特性意义重大。

绘制关系图: 分析除尘效率与气体流量、粉尘浓度等因素的影响(见表 1), 绘制时间变化下对压力损失的影响规律(见图 2)。

设集气罩尺寸 10 m × 5 m × 5 m, 开口面积 20 m², 风速 0.5 m/s。旋风除尘器: 直径 1 m, 入口风速 15 m/s。布袋除尘器: 过滤面积 100 m², 清灰周期 4 h。

基准工况: 乙炔每消耗 1 m³, 通风换气量 5000 m³/h, 风速 0.5 m/s。

对比工况: 风速梯度: 0.3 m/s、0.5 m/s、0.8 m/s。

Table 1. Dust removal efficiency and pressure loss at different wind speeds

表 1. 不同风速下的除尘效率与压力损失

风速(m/s)	入口浓度(g/m ³)	出口浓度(g/m ³)	总除尘效率(%)	总压力损失(Pa)
0.3	5	0.02	99.6	800
0.5	5	0.01	99.8	1200
0.8	5	0.05	99.0	2000

由表 1 可以看出, 当风速在 0.5 m/s 时, 总除尘率高达 99.8%。

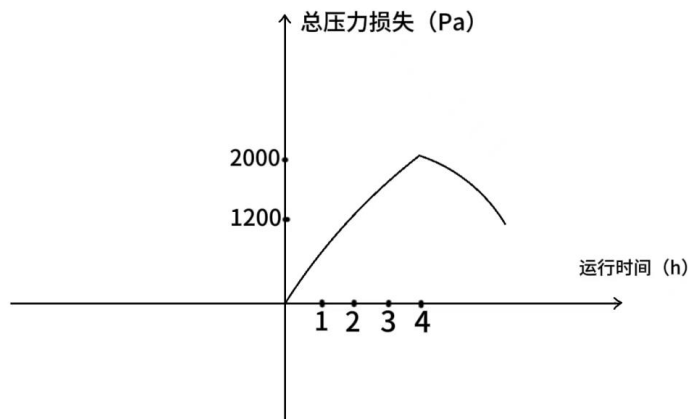


Figure 2. Variation of total pressure loss with operating time
图 2. 总压力损失随运行时间的变化

结论: 运行 4 h 后压力损失升至 2000 Pa, 清灰后恢复至 1200 Pa。

5. 结语

本文设计的切割烟气除尘装置采用袋式除尘与旋风除尘相结合的复合式除尘方案, 通过合理的结构设计和关键部件选型计算, 实现了对切割烟气中颗粒物的高效去除。理论分析和实验验证结果表明, 该除尘装置具有良好的除尘性能, 能够有效降低切割烟气中的粉尘浓度, 改善切割作业环境, 保护操作人员的身体健康, 同时也符合环保法规的要求。该装置结构简单、运行稳定、维护方便, 具有较高的推广应用价值。

复合型除尘方案的提出, 源于现有除尘方式存在除尘不彻底的问题, 且在高温环境下, 除尘效果会受到显著影响。若能研发新型滤材, 提高过滤效果和耐温, 除尘效果会更彻底, 烟尘对于人们的影响就会变小。除此之外, 我们可以开发高效热化学储能系统, 将回收的烟气余热转化为稳定热能, 用于车间供暖或工艺预热。在实际应用中, 可根据不同的切割工艺和工况条件, 对除尘装置的参数进行优化调整, 以进一步提高其除尘效果和运行经济性。

参考文献

- [1] 梁杰, 史帅. 关于输煤系统粉尘综合治理的研究与应用[J]. 中国设备工程, 2024, 24(3): 248-250.
- [2] 陈超, 陈再良. 激光切割烟尘及除尘系统研究[J]. 中国标准化, 2019(20): 247-248.
- [3] 贾宝山, 陈鑫. 旋风滤布除尘器的除尘性能研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(8): 3089-3096.
- [4] 吴征东. 雾化降温强化旋风分离器去除颗粒物研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- [5] 福建三钢闽光股份有限公司. 一种转炉湿法除尘烟气超净排放设备[P]. 中国专利, 202410721190.X. 2024-09-18.
- [6] 南通理工学院, 江苏鹏飞集团股份有限公司. 一种高温回转窑烟气中旋转式颗粒层除尘装置及方法[P]. 中国专利, 202411110728.X. 2024-11-08.
- [7] 边瑶, 王博. 钢铁烧结烟气多污染物协同控制研究进展[J]. 现代化工, 2022, 42(12): 24-29.
- [8] 乔根, 马一波. 大型铸造工厂除尘系统设计与应用[J]. 中国铸造装备与技术, 2024, 59(2): 7-9.
- [9] 田学智, 万晓慧. 铸造车间烟尘和粉尘的收集及除尘方案设计[J]. 铸造设备与工艺, 2019(5): 1-5.
- [10] 刘亦歌, 陈雅. 基于流量分配的金属粉尘除尘器多孔介质滤袋结构优化研究[J]. 金属矿山, 2024(12): 258-268.
- [11] 殷启军, 高浩军. 颗粒粒径与速度场对布袋除尘器性能影响研究[J]. 徐州工程学院学报, 2024, 39(4): 75-85.
- [12] 孔文源. 煤矿布袋除尘优选研究与应用[J]. 能源与环保, 2024, 46(7): 82-86.

- [13] 郑龙星. 高温烟气除尘用新型合金梯度滤料性能研究[J]. 中国设备工程, 2024(24): 109-111.
- [14] 赵永福. 探究节电系统在工业除尘风机上的应用[J]. 中国设备工程, 2024(19): 113-115.
- [15] 姚关雄, 王力. 太阳能板除尘机器人设计研究[J]. 机械工程与自动化, 2023(2): 94-96.