

磁场耦合雾化放电除尘捕集机制研究综述

张思琪

辽宁石油化工大学机械工程学院, 辽宁 抚顺

收稿日期: 2026年8月31日; 录用日期: 2026年10月2日; 发布日期: 2026年10月10日

摘 要

针对传统除尘技术对工业微细粉尘治理效率低的问题, 本文针对磁场耦合雾化放电除尘技术进行了综合研究, 系统梳理了国内外研究现状、作用机理及运行参数, 明确了磁场强度(0.4~0.45 T)、电压(30~50 kV)、雾化工况(0.2~0.4 MPa)、温湿度(20℃~80℃, 30%~70%)等参数的最优运行区间, 为磁场雾化除尘技术的研究及推广奠定一定的理论基础。

关键词

多场耦合, 雾化放电, 运行参数, 除尘

Review on the Collection Mechanism of Magnetic Field Coupling Atomization Discharge for Dust Removal

Siqi Zhang

College of Mechanical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

Received: August 31, 2026; accepted: October 2, 2026; published: October 10, 2026

Abstract

Aiming at the low purification efficiency of traditional dust removal technologies for industrial fine dust, this paper comprehensively investigates the magnetic field coupled atomization discharge dust removal technology. It systematically summarizes the domestic and foreign research status, internal action mechanism and operating parameter characteristics of the technology, and clarifies the optimal operating ranges of key parameters, including magnetic field intensity (0.4~0.45 T), discharge voltage (30~50 kV), atomization pressure (0.2~0.4 MPa), flue gas temperature (20℃~80℃) and relative humidity (30%~70%). The research results can provide a certain theoretical basis for the further research and engineering promotion of magnetic field atomization dust removal technology.

文章引用: 张思琪. 磁场耦合雾化放电除尘捕集机制研究综述[J]. 应用物理, 2026, 16(10): 829-837.

DOI: 10.12677/app.2026.1610076

Keywords

Multi-Field Coupling, Atomization Discharge, Operating Parameters, Dust Removal

Copyright © 2026 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

近年来,国内工业对于大气排放及生态环保日益重视,大气细颗粒物污染治理这类课题已经成为生态环保与工业安全生产领域的重点研究内容。 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 等粒径的吸入性粉尘具有粒径小、疏水性强、大气悬浮周期长等特点,这些特性不仅会导致雾霾天气频发,同时也是煤矿、电力、化工等行业工人职业性尘肺及粉尘爆炸隐患的主要源头。目前应用的除尘工艺主要以惯性除尘、重力除尘为主,而微细颗粒物惯性及重力作用弱,传统重力及惯性除尘方式对微细颗粒物的拦截能力极差, $\text{PM}_{2.5}$ 去除效率普遍不足 50%;袋式除尘方式在长期运行的条件下其滤袋容易堵塞及磨损老化,运行维护及更换成本较高;传统湿式除尘耗水量大,除尘用水的排放极易产生废水二次污染;常规静电除尘工艺会受到反电晕及二次扬尘等固有问题制约影响其推广应用。各类除尘方式的性能对比见表 1。总体来看,各类单一除尘技术均存在明显短板,微细粉尘高效、低成本治理仍是当前工业环保领域亟待突破的共性难题[1]。

由表 1 可以看出,与传统除尘技术的作用场和除尘机制不同,磁场耦合雾化放电除尘技术在常规雾化除尘的基础上结合了电场电离、磁场改性、流体雾化、粉尘凝并等四个作用环节,在综合电、磁、流体等多场净化机理的基础上,构建了多场耦合的除尘机理,大幅度提高了疏水性粉尘的浸润能力,结合凝并效应,除尘效率可以达到 90%以上,具有一定的技术创新与工程应用能力[2]。

国外针对静电除尘与磁场辅助雾化除尘的研究开展时间较早,目前已经积累了相对完善的理论与试验体系。在静电除尘研究领域,国外学者大多围绕电极结构改造、放电参数调试、颗粒凝并等方向展开研究。研究人员通过优化设备结构与运行工况,提升常规粉尘的捕获效率,较好地解决了细颗粒荷电效果弱、难以聚集沉降等实际问题[3]。早在上世纪 90 年代,在磁场活化研究方面就已有试验证明,磁电耦合雾化电晕放电能够对水体起到活化改性作用。该方式能够打破水分子内部氢键结构,重构水体团簇形态,降低液滴表面张力,让水雾对粉尘的润湿吸附能力得到大幅提升[4]。但现有的国外相关研究主要集中于单一物理场的工艺优化研究,针对磁场、电场与流体雾化多场叠加后的协同作用原理、参数联动匹配规则等方面,仍然缺少完整、系统的研究体系,存在明显的研究空缺[5]。

国内学界也围绕磁场辅助雾化除尘技术开展了大量探索工作。2003 年,许德玄提出接地极雾化电晕放电除尘方法,正式开启了国内磁电耦合除尘技术的研究历程[6]。在此之后,国内多个科研团队也重点针对设备结构改造、运行参数调试、除尘作用机理验证等内容进行深入研究。其中,杜胜男等人对电极结构和设备集成方式进行优化,研制出螺旋布水电极以及旋风耦合雾化除尘设备,有效解决了传统除尘设备布水不均匀、高压绝缘难度大、微细粉尘分级净化效果差等行业难题[7]。米俊锋研究团队围绕磁场增效机制开展了系统性试验,确定了磁场强度、放电电压、喷雾流量等关键参数的合理适配范围。相关试验证实,磁场能够有效改善电晕放电状态,强化液滴雾化效果,促进微细粉尘聚集长大,当磁通密度达到 0.43 T 时,设备放电电流可达到峰值,进一步完善了磁场干预粉尘荷电、辅助电场放电的作用机制[8]。相关研究人员通过大量数值模拟与工业试验数据进行分析。分析结果表明,磁场雾化除尘技术对煤

矿呼吸性煤尘、电力行业高比电阻飞灰、化工粘性气溶胶等多种复杂微细粉尘都具有良好的脱除效果。同时，平行磁场结构能够提升设备的抗污染能力，搭配高梯度磁分离结构后，设备对细粉尘的捕获能力还能进一步提升[9]。综合现有研究来看，国内相关成果仍以局部机理验证和单一参数试验分析为主，针对磁场耦合雾化静电除尘的多场协同作用机制研究深度不足，缺少系统化的机理梳理和量化规律总结，这也是目前该领域亟待完善的研究短板[10]。

Table 1. Performance comparison of dust removal methods
表 1. 除尘方式性能对比

	工作原理	除尘效率	压力损失	主要特点	局限因素	适用粒径范围	能耗水平
惯性除尘	利用粉尘惯性力差异进行除尘	50%~70%	200~1000 Pa	结构简单，阻力较小，能耗低，无废水	除尘效率低，除粗颗粒，不适用于粘性、纤维性粉尘	>10~20 μm 粗颗粒	低
袋式除尘	截留粗颗粒，细颗粒经惯性碰撞、扩散、静电吸附除尘	99%~99.9%	1200~2000 Pa	过滤精度高，适用性强，处理风量范围广	受滤料耐温限制，不适用于粘结性强、吸湿性强的粉尘	0.1~100 μm 全粒径范围，擅长细粉尘脱除	中
湿式除尘	通过液滴、液膜、气泡与尘粒接触，借助惯性碰撞、扩散、凝并进行捕捉	60%~99%	300~8000 Pa	兼除尘、降温、增湿功能，无二次扬尘，设备相对简单	耗水量大，产生废水和污泥，易造成设备腐蚀，不适用憎水性和硬性粉尘	>1 μm 较有效；1 μm 以下靠扩散、凝并	中偏高
静电除尘	粉尘荷电后在电场力作用下向集尘极移动并被吸附	99%~99.9%	100~300 Pa	处理烟气体量大，阻力小，能耗低，耐高温，维护方便	初投资高，对粉尘比电阻敏感，高浓度粉尘易产生电晕闭塞	>1 μm 以上效率近 100%；0.5 μm 达 99%	低
雾化除尘	将水雾化成微米级超细雾滴，与粉尘碰撞、吸附、团聚沉降	85%~95%	较小	用水量极少，雾粒超细，悬浮时间长。	对大风量、高浓度有组织排放效果有限，喷嘴孔径小，水质差易堵塞。	1~50 μm 与雾滴粒径接近的颗粒效率最高	低
磁场雾化除尘	在雾化基础上磁化装置，改善水的湿润性能，增强雾滴对粉尘的捕捉能力	达 90% 以上	较小	磁化水增强湿润性，对疏水性粉尘、对呼吸性粉尘捕捉能力强，结构紧凑。	对非疏水性粉尘提升效果有限，磁场强度和磁化效果需根据水质、粉尘性质调整。	全尘，尤其对 <7 μm 呼吸性粉尘效果突出	低

结合现有研究进展可以看出，国内外对于雾化除尘技术的研究主要针对单一理论、单场机理进行参数试验，对于磁场耦合雾化的静电除尘技术缺乏多场协同的机理研究、参数分析及试验验证。在此基础上本文系统整理了磁场耦合雾化放电除尘技术的除尘机理、现有研究成果以及参数匹配规律，为后续的工艺优化、参数选择、实际工程落地应用提供一定的理论支撑。

2. 磁场雾化放电耦合捕集除尘作用机理

磁场耦合雾化放电除尘的核心优势在于多物理场协同增效，与传统单一电场、单一磁场相比，其除尘效果明显得到改善。该技术依托磁场改性、电场强化、精细化雾化、颗粒凝并、电极自清的多重协同效果有效地解决了微细疏水性粉尘、粘性粉尘润湿难度大、荷电不充分、难以捕集的技术难题。整体除

尘过程主要从放电特性优化、液滴雾化荷电增效、颗粒碰撞凝并捕集、电极长效自清四个环节进行机理研究及参数分析[2]。

2.1. 放电特性优化机理

常规单一雾化电晕放电模式存在起晕启动电压偏高、极板间电场分布不均匀、高压工作状态下容易出现击穿等问题,设备长时间运行后放电效果也会持续变差。这类问题使得设备运行状态很容易受现场工况变化影响,最终造成除尘效果忽高忽低、稳定性不足。在磁场耦合调控的雾化放电除尘系统中,极板间的自由电子、负离子与带电液滴均受洛伦兹力作用,原本的直线运动转变为以磁力线为轴的螺旋轨迹,其横向回旋尺度由拉莫尔半径直接决定;该半径与粒子质量、垂直磁场速度分量正相关,与电荷量、磁感应强度负相关,不同质量的粒子因此呈现差异化的回旋运动特征,通过调控磁场强度改变拉莫尔半径,可延长粒子运动路径、强化碰撞与荷电效果,进一步提高亚微米颗粒物收集效率。螺旋运动轨迹示意图可见图1。这一变化有效延长了带电颗粒在电晕区域的停留时间,让颗粒能更多地与空气、水分子发生碰撞,进一步加剧电子雪崩电离效果,从根源上改善了电晕放电的整体工作性能[11]。

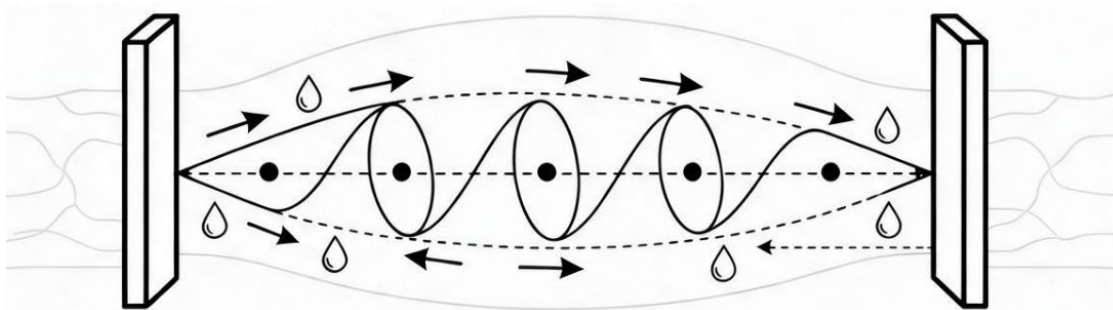


Figure 1. Schematic diagram of spiral motion of electrons and droplets between plates based on Lorentz force
图 1. 基于洛伦兹力的极板间电子、液滴螺旋运动示意图

在磁电耦合放电优化研究中,葛少成团队通过大量对照试验研究发现,将横向恒定磁场与负电晕放电技术相结合,能够切实改善设备的放电性能。磁场的介入有效降低了设备起晕门槛,让放电启动更加灵敏,整体放电电流与空气电离效果也得到明显增强。通过多组梯度试验比对,确定 0.4~0.45 T 是磁场增效的最佳强度区间,在该区间下设备放电综合性能最优。黄烜在其相关研究中也得出了一致结论,磁场能够约束带电电子的运动轨迹,延长电子在电离区域的运动路径,大幅提升粒子碰撞电离效率。实测数据显示,引入磁场后,起晕电压可从 10 kV 降到 8 kV,放电电流能够实现翻倍增长,设备电离工作性能得到提升[11]。除此之外,磁场的均衡调控作用可以改善极板间电场分布不均的问题,避免高压运行工况下局部电荷堆积、电荷反向中和等不良现象,有效拓宽了设备的稳定放电区间。改造后的设备击穿电压由原先的 28 kV 提升至 35 kV,从根本上减少了火花击穿、电弧异常放电等问题,大幅提升了整套除尘设备高压运行的安全性与稳定性[8]。

面对水温波动、粉尘浓度骤变、气流扰动等复杂现场工况,磁电耦合除尘体系的放电电流与电场强度都能保持相对稳定,设备抗干扰能力相较于传统工艺大幅提升。通过长期运行对比试验可以看出,普通雾化放电设备连续工作 30 分钟就会出现 12% 的电流损耗,而磁电耦合设备连续运行 50 分钟后,电流波动幅度仍控制在 3% 以内,彻底解决了传统电晕放电长期运行性能衰减的弊端,为微细粉尘持续、稳定荷电提供了可靠的电场环境[1]。同时,磁场能够抑制电晕区域内的粉尘电荷中和现象,稳定极板间荷电粒子浓度,让设备的除尘效果可以长期保持稳定状态[8]。

2.2. 液滴雾化改性与荷电增效机理

磁场和电场相互配合,能够同时改善水雾形态和电场工作状态。常规状态下的水分子分子氢键连接紧密,整体表面张力和黏度都比较大,很难充分附着、浸润疏水性的工业粉尘,除尘预处理效果稍差。引入磁场干预后,水分子内部的氢键结构被打散,原本聚集的大水分子团被拆解为小分子结构,水体表面张力和流动黏度都会下降,液滴自身的凝聚能力也会减弱,雾化过程效果提升,也大幅提升了粉尘表面的润湿覆盖能力,为后续粉尘捕集创造了良好的基础条件[2]。

在磁场改性的基础上,进一步使用高压电场能够使得液滴得到进一步细化,能够将液滴粒径控制在 $35\sim70\ \mu\text{m}$ 范围内,适用于大部分的工业粉尘、煤粉粒径[12]。在电学层面,磁场优化了极间电场分布,缓解了高压下电荷衰减、反向中和等问题,突破单一电场荷电的饱和局限,让雾化液滴始终保持高荷质比状态[2]。

彦鹏等人进行了多因素正交试验,试验结果表明,在磁化强度为 $300\sim350\ \text{mT}$ 、放电电压为 $9\sim14\ \text{kV}$ 、供水流量为 $16\ \text{mL/min}$ 的工况参数条件下,雾化放电电流能够提升 15.3% ,液滴静电吸附能力也显著增强[12]。经过磁场活化后的带电液滴荷质比更高,在电场环境下的移动速度也明显提升,能够快速吸附空气中漂浮的细小粉尘。针对难以处理的亚微米级细微颗粒,其捕捉效果明显高于常规的带电液滴,一定程度上解决了传统单一雾化方式电荷不足、细小粉尘容易逃逸流失的问题。除此之外,磁场在优化雾化均匀程度和电荷稳定状态的同时并不会改变液滴本身的粒径分布特征,能够让整套雾化除尘系统长期、稳定运行[2]。

2.3. 颗粒碰撞凝并与润湿捕集机理

粉尘和水雾液滴的微观碰撞、润湿贴合效果是决定整体除尘效果好坏的关键。传统除尘模式下,普通水雾液滴表面张力和黏度偏大,在接触疏水性煤尘、粘性微细粉尘时,很容易直接弹开,没办法充分润湿粉尘;单纯经过磁场处理的液滴,润湿能力提升有限,依旧会出现部分粉尘逃逸的情况;而单一带电液滴在碰撞过程中容易发生飞溅,导致大量微细粉尘持续悬浮在空气中,难以沉降收集[9]。

经过磁电耦合协同改性的水雾能够大幅降低液滴的表面张力,改善与固体表面碰撞时的回弹、飞溅问题。液滴能快速在粉尘表面形成均匀的润湿薄膜,完整包裹粉尘颗粒。相关试验研究结果表明,磁电耦合的液滴对煤尘颗粒实现包裹仅需 $5.0\ \text{ms}$, $20.0\ \text{ms}$ 后其铺展半径系数就可以达到 1.9634 ,包裹贴合的稳定性远远高于未经改性的液滴[9]。同时,多场耦合体系具备静电凝并、动力凝并双重功能,能够让 PM_{10} 以下的快速凝并抱团,形成大体积、可快速沉降的颗粒,解决了微细粉尘悬浮难捕捉的问题[1]。

在最佳运行工况下,该磁场雾化除尘技术的总粉尘去除效率最高能达到 97.79% ,呼吸性粉尘去除效率可达 96.75% ,与常规水雾除尘技术相比,除尘性能分别提升 15.74% 和 8.68% ,对高比电阻水泥粉尘、粘性油烟、疏水性煤尘等各类粉尘都有很好的处理效果。试验还发现,在低风速工况中,液滴与粉尘的粒径比值大于等于 0.8 能有效规避偏心碰撞问题,进而保证粉尘的捕集效果[9]。

2.4. 电极自清与持续净化机理

粘性粉尘、高比电阻飞灰极易附着于电极表面结垢,造成电场性能衰减甚至是设备停机,这些都是传统静电除尘技术的应用难题。而磁场耦合雾化放电系统具有优异的电极自主清洁、长期稳定运行的能力。经磁电耦合改性的荷电液滴雾化均匀性好,在磁场调控下可以形成轻薄、连续、动态流动的水膜,避免极板局部积水或完全干燥,能够较大程度上避免粉尘附着堆积[7]。

动态流动的极板水膜还可以持续冲刷表面微细粉尘、油污等,高速荷电液滴的冲击作用也能够清除极板上的顽固积尘,基本能够杜绝反电晕与二次扬尘,适用于高比电阻粉尘治理场合[13]。磁场调控下的

动态水膜与传统湿式静电除尘的厚重水膜相比,其耗水量仅为传统技术的 30%~50%,节水效果显著。研究人员试验数据表明,55 kV 电压、300 mm 极板间距工况条件下,磁电耦合模式启动 3 分钟即可实现极板大范围清洁,自清效果较好[1]。工程人员经过长时间的实际工况运行数据分析结果显示,传统干式电除尘设备开始运行 30 分钟其高比电阻粉尘净化效率就下降超过 20%;而磁电耦合除尘设备连续运行 50 天其各项性能基本没有衰减,可满足大部分工业场景的连续运行[14]。

3. 关键参数影响规律探究

磁场雾化放电耦合除尘依靠多物理场协同配合完成粉尘脱除,设备的除尘效率与运行稳定性会受到多种参数的共同影响,参数搭配是否合理,直接决定了整套设备的实际除尘效果。现阶段国内相关研究大多只针对单一参数开展试验分析,缺少多参数联动匹配的系统性研究。下面主要从电物理特性、流体雾化条件、磁场参数以及工况参数四个方面进行分析论述,为除尘结构、工艺参数优化和现场运行调控提供一定的理论支撑[1]。

3.1. 电物理参数对除尘性能的影响

在整套除尘系统中,电物理参数直接影响电晕放电强度及粉尘荷电效果,其中主要包括放电电压、极板间距和电极结构等参数,它们对设备运行性能都有着突出的影响。放电电压的大小能够直接改变极间电场强度与空气电离程度。适当提高电压,能够加快自由电子与空气分子的碰撞速率,提升负离子浓度,让细小粉尘的荷电效果更好。但电压值一旦超出极板击穿的临界值,就会导致极间击穿,不仅会降低除尘效率,还会大幅增加设备的运行能耗。通过整合研究人员的相关试验数据表明,处理 $\text{PM}_{2.5}$ 粉尘的最佳电压区间为 30~50 kV;当电压超过 50 kV 除尘效率的提升曲线会变缓,除尘效率增长幅度从 12%降至 2%以下,单位风量的处理能耗还会反向增加 40%以上[14]。

极板间距同样是影响电场分布均匀度与放电稳定性的关键参数,间距设置过小极容易造成极间击穿,间距过大又会削弱整体电场强度,导致粉尘荷电不充分、除尘效果变差,150~200 mm 是综合性能最优的极板间距区间[15]。对比传统金属板式电极,螺纹布水电极的布水效果更加均匀,能够在电极表面形成持续稳定的动态水膜,从源头避免粉尘堆积、极板结垢等问题。搭载该新型电极的设备,对 $\text{PM}_{2.5}$ 微细粉尘的分级去除效率比传统电极设备高出 8%~12%,设备长期运行的稳定性也得到了明显提升[7]。

3.2. 流体雾化参数对除尘性能的影响

流体雾化参数直接决定液滴粒径、空间液滴浓度与润湿性能,最终影响液-尘碰撞凝并与捕集效果,其中雾化压力与供水流量为核心调控参数。

3.2.1. 雾化压力

雾化压力决定了液滴破碎效果与平均粒径。适当提升雾化压力可细化液滴粒径进而增大液滴比表面积,提升微细粉尘碰撞率;但压力过高会加快液滴运动速度,使得液-尘接触时长缩短,反而会降低凝并捕集效率,同时也会增加设备能耗。针对磁场改性雾化体系,最优雾化压力为 0.2~0.4 MPa,对应液滴平均粒径为 50~100 μm ,在此工况下 $\text{PM}_{2.5}$ 灰尘的捕集效率可以达到峰值;压力超过 0.4 MPa 后,除尘效率基本不会再提升,设备运行能耗涨幅超过 30% [2]。

3.2.2. 供水流量

供水流量能够对电极自清效果与极间放电稳定性同时产生影响。适当提高供水流量能够使极板水膜更为完整,同时还能够提升空间液滴浓度,进一步增强除尘效果;但流量过高会增大极间导电率、降低击穿电压,容易引发放电击穿,同时也会增加耗水量。处理量和供水量的比例为 100:1 能够较好地提升除

尘效率和运行稳定性。比如处理量为 1000~3000 m³/h 的中型设备, 10~30 L/h 则为最优供水流量区间[12]。

3.3. 磁场参数对除尘性能的影响

磁场参数是磁电耦合除尘的核心变量, 它直接决定了磁场对放电、雾化、凝并过程的强化效果, 核心参数包含磁场强度与磁场方向。

3.3.1. 磁场强度

磁场强度是决定磁场耦合效应叠加的关键性参数。提升磁场强度能够有效提高对自由电子约束力, 使得电子在电晕区的停留时间变长, 提升碰撞电离概率, 同时还能够增强水分子团簇效果, 降低水雾表面张力、优化润湿性能。但磁场强度超过 0.5 T 之后, 各类除尘增效效果基本不会再有提升。试验证实, 磁通密度的最佳区间为 0.4~0.45 T。在此工况下电晕放电电流增长率达到峰值, PM_{2.5} 捕集效率与无磁场工况相比能够提升 15%~20% [1]。

3.3.2. 磁场方向

磁场方向能够控制电子运动轨迹, 与垂直电场布置的磁场相比, 平行电场布置的磁场会有更好的约束增效效果。平行磁场作用下, 自由电子洛伦兹力作用下的拉莫运动半径更小。自由电子能够均匀分布于整个电晕区域, 电离效率与放电稳定性都能够得到提升。磁场示意图见图 2。在电压、磁场强度一致的条件下, 平行磁场设备 PM_{2.5} 捕集效率比垂直磁场能够高出约 6% [11]。

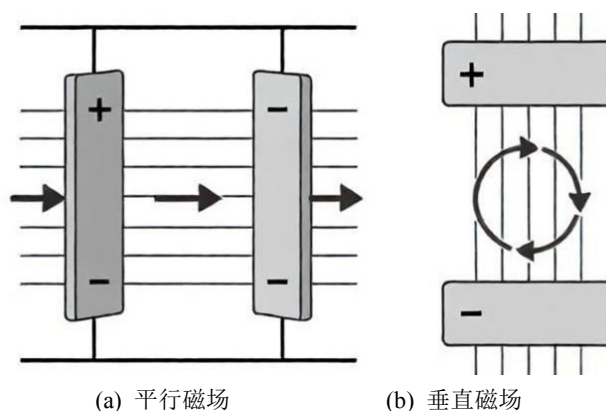


Figure 2. Schematic diagram of magnetic field direction
图 2. 磁场方向示意图

3.4. 工况参数对除尘性能的影响

除尘过程的工况参数是影响除尘设备长期稳定运行的关键因素, 其中烟气温湿度、入口粉尘浓度的影响最为显著, 是设备运行调控的核心指标。

3.4.1. 烟气的温度与湿度

烟气的温度和湿度的变化会对除尘设备的效果产生影响。随着烟气温度的升高, 空气黏度会下降, 电子运动路径变长, 设备起晕电压升高、放电强度衰减。也会对磁场的雾化改性作用造成负面影响, 降低水雾除尘效果。研究人员的测试结果表明, 磁场雾化静电除尘装置能够在 20℃~80℃ 的温度范围内稳定工作, 烟气温度超过 100℃, 该设备对 PM_{2.5} 的捕集效率会大幅下降(10%以上)。适当提高烟气湿度能够降低火花放电的启动电压, 让放电状态更加稳定; 但湿度过高会增强极板间的导电性能, 容易引发极间击穿。试验表明最佳烟气相对湿度区间为 30%~70% [13]。

3.4.2. 入口粉尘浓度

极间空间电荷分布与颗粒荷电效率受到入口粉尘浓度的影响。粉尘浓度升高会大量消耗空间自由电荷,从而导致后续进入到电场内的微细粉尘得不到充分的荷电,使得除尘效率降低。磁场雾化放电除尘技术对于粉尘浓度的适应性较强,能够稳定处理 $100\sim 5000\text{ mg/m}^3$ 浓度的含尘烟气,与传统除尘工艺相比其浓度耐受范围能够提升 1 倍以上,能够较好地适用于现场粉尘浓度波动较大的工业场所[5]。

4. 结论与展望

4.1. 结论

磁场耦合雾化放电除尘技术基于磁场、电场、流体雾化多场协同作用机理,改善了传统除尘技术对疏水性粉尘、粘性粉尘、高比电阻粉尘净化效率低、电极易结垢、长期运行稳定性差、运维成本高的问题。本文系统梳理了该技术的研发现状、多场耦合作用机理、核心参数,主要得出以下结论:

(1) 磁场耦合雾化放电除尘技术采用多场、多环节协同的除尘机制,在雾化除尘的基础上叠加了磁场,磁场能够优化雾化润湿效果并增强粉尘荷电作用。在最优工况条件下其总粉尘净化效率可达 97% 以上,吸入性粉尘的净化率也可达 96% 以上,微细粉尘的净化效果与传统除尘技术相比也能够提升 15% 以上,说明磁场耦合雾化放电除尘技术能够适用于各类粉尘治理场合。

(2) 磁场强度、电气参数、雾化参数和现场工况都会直接影响磁场耦合雾化放电除尘技术的除尘效果,而且参数提升到一定程度后,除尘效果就不会再明显提升,还会增加能耗。通过试验得出磁场耦合雾化放电除尘技术在磁通密度 $0.4\sim 0.45\text{ T}$ 、放电电压 $9\sim 14\text{ kV}$ 、供水流量 $10\sim 80\text{ mL/min}$ 、逆向进气风速 1 m/s 、搭配平行磁场布置、 $0.2\sim 0.4\text{ MPa}$ 雾化压力、 $30\%\sim 70\%$ 烟气湿度、 $20^\circ\text{C}\sim 80^\circ\text{C}$ 工作温度的条件下其工况稳定性、除尘效果及能耗控制都能达到最优。

(3) 研究同时证实,磁场强度超过 0.5 T 、电压参数超过 50 kV 、雾化压力超过 0.4 MPa 、烟气温度超过 100°C 后除尘性能不再显著增长,反而会造成能耗提升。

4.2. 展望

(1) 在微观模型研究方面,磁场耦合雾化放电除尘技术的微观模型还不够完善且全工况条件下的试验数据也稍显不足。因此后续的研究应该基于 CFD-DEM 模型进行多场耦合场景下粉尘颗粒、磁化雾滴的螺旋运动、碰撞凝并、捕集沉降的全动态过程模拟研究。

(2) 在实际应用方面,关键参数及工况对于实际运行的综合数据不足,可在微观模型模拟数据分析的基础上对运行参数进行优化,增加可分析的实际运行数据分析及试验研究,进一步完善试验数据并进行数据分析,反向优化除尘模型,推广实际工程应用。

基金项目

项目名称: 2025 年大学生创新创业训练计划项目——磁场雾化电晕放电除尘器优化设计与仿真;
项目编号: X202510148021。

参考文献

- [1] 段松江, 虞斌, 江超, 等. 复合湿式除尘器雾化吸附区除尘性能的研究[J]. 化工机械, 2025, 52(2): 261-267.
- [2] 荆德吉, 于涛, 张天, 等. 磁电耦合下喷嘴雾化特性及降尘效率研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(6): 1944-1951.
- [3] Wang, N., Ning, L.W., Fu, J., Ma, Y., Gu, S., Cheng, M.L., *et al.* (2025) Impact of Temperature on Electrostatic Precipitator Performance with Varying Electrode Configurations. *ACS Omega*, **10**, 21473-21485.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.5c00203>

-
- [4] Zhang, P.J., Zhang, J.P., Wang, J.Q., Zhao, D.W., Wang, L.Q. and Zha, Z.T. (2024) Influences of Voltage Allocation and Magnetic Field Introduced Position on the Dust Removal Performance of Multi-Electric Field Esp. *Chemical Engineering Science*, **285**, Article ID: 119565. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119565>
- [5] Wang, B., Wang, J. and Cao, Q. (2025) Effect of Electromagnetic Confinement on Three-Electrode ESP Dust-Removal Performance at Various Operating Parameters. *Powder Technology*, **453**, Article ID: 120629. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.120629>
- [6] 许德玄. 磁电雾化电晕放电低温等离子体及其应用[J]. 中原工学院学报, 2003(S1): 59-61.
- [7] 杜胜男, 潘一, 米俊锋, 等. 接地极雾化电晕放电旋风除尘器的实验研究[J]. 环境工程, 2016, 34(12): 78-82, 107.
- [8] 米俊锋, 商成宇, 杜胜男. 磁场对电晕放电电场及细小粉尘荷电的影响[J]. 科技导报, 2008, 26(16): 77-80.
- [9] 熊光婷, 葛少成, 刘硕, 等. 磁化荷电液滴除尘机理及碰撞浸润煤尘数值仿真[J]. 煤炭学报, 2023, 48(9): 3441-3450.
- [10] 陈琪, 夏诗杨. 雾化电晕放电净化粉尘颗粒物的研究进展[J]. 辽宁化工, 2023, 52(1): 108-112.
- [11] 黄烜. 磁场、雾化共同作用下电晕放电机理及对微小颗粒荷电与捕集的研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [12] 彦鹏, 葛少成, 刘旭东. 磁 - 电耦合喷雾降尘效果研究[J]. 煤矿安全, 2024, 55(11): 92-100.
- [13] 王天博. 低低温电除尘 SO_3 协同脱除特性试验研究[J]. 化工设计通讯, 2025, 51(11): 9-11.
- [14] 王健, 于靖尚, 米俊锋, 等. 静电除尘器除尘效率影响因素研究进展[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2021, 41(6): 36-41.
- [15] 许希, 徐甸, 严佩, 等. 高温线板式静电除尘器颗粒捕集[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(3): 487-493, 507.