



哈尔滨工业大学

Harbin Institute of Technology

考 核 科 目	大 学 物 理 X (1)		
学生所在院（系）	数 学 学 院		
学 生 所 在 专 业	数 学 与 应 用 数 学 （ 中 外 合 作 ）		
报 告 题 目	静 电 除 尘 中 的 理 论 分 析		
学 生 姓 名 及 学 号	黄一帆 2022112660 李开言 2022111221 张洪博 2022113421		
学 生 类 别	本 科 生		
人 员 分 工	黄一帆 应用前景部分研究 张洪博 原理溯源、原理应用部分研究 李开言 论文编排和撰写		
考 核 结 果		阅 卷 人	

摘要

本文深入探讨了静电除尘技术（ESP）的理论基础和应用前景。通过分析库仑定律、电势能、高斯定理以及泊松和电流连续性方程，揭示了 ESP 中电场分布和离子电荷密度的规律。通过文献阅读了解了不同线板距对电场强度和离子电荷密度的影响，发现离子电荷密度随线板距减小而增大；同时研究了线-管式双极预荷电器的极间电场分布，了解到新型电极结构有助于提高除尘效率和减少反电晕现象。最后，论文分析了静电除尘技术在工业中的应用现状和发展前景，强调了优化结构、节能技术和智能化控制的重要性，以期环境保护和能源效率提升做出贡献。

关键词：静电除尘技术, 静电除尘器, 电场分布, 电荷密度

一、引言

（一）背景与原理

静电除尘技术（Electrostatic Precipitation, ESP）是一种高效的除尘方法，是气体除尘方法的一种。含尘气体经过高压静电场时被电分离，尘粒与负离子结合带上负电后，趋向阳极表面放电而沉积。这项技术最早于 19 世纪末提出，并在 20 世纪初开始商业化应用。

静电除尘器通常由两个平行的电极板组成，一个是放电电极，另一个是集尘电极。当气体流经这些电极板时，放电电极会产生带电粒子，这些粒子与粉尘颗粒碰撞，使粉尘颗粒带电。带电的粉尘颗粒随后在电场力的作用下向集尘电极移动，并在表面沉积。定期清理集尘电极上的沉积物，以保持除尘器的效率。

（二）技术优势

在现存的工业、商业应用场景中，静电除尘技术相比于其他的气体除尘方法，具有如下优势：

(1)**高效** 静电除尘器能够捕集非常细小的粉尘颗粒，包括亚微米级别的颗粒，其捕集效率通常在 99% 以上，甚至可以达到 99.9%，这使得它成为处理细微粉尘的理想选择。

(2)**低成本** 静电除尘器运行成本相对较低，特别是后续处理粉尘所需的能源和资源较少，可降低长期运营成本。

(3)**低能耗** 与机械式除尘器（如旋风除尘器）相比，静电除尘器在捕集相同量的粉尘时所需的能耗更低。这是因为静电除尘器主要依赖电场力来移动粉尘，而不是依赖机械运动。

(4)**适用于大规模处理** 静电除尘器的设计可以适应大规模的气体处理需求，使其成为工业大规模排放控制的理想选择，尤其是在电力、水泥和钢铁等行业。

(5)**可调节** 静电除尘器的操作参数（如电压、电流和气流速度）可以根据具体的应用需求进行调整，以优化除尘效率和能耗。

(6)**易于集成** 静电除尘器可以与其他空气净化技术（如布袋除尘器或湿式除尘器）结合使用形成复合除尘系统，以满足更严格的排放标准。

这些优势使得静电除尘技术在工业和环境工程中得到了广泛的应用和认可。随着技术的不断进步，静电除尘器的性能和效率有望进一步提高。

二、原理溯源

（一）基础理论

1. 库仑定律

库仑定律描述了两个点电荷之间的相互作用力。其表达式为

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}.$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}. \quad \epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.854187817 \times 10^{-12} \text{C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}.$$

其中， \mathbf{F} 是两个点电荷之间的静电力， k 是静电力常数， q_1 和 q_2 是点电荷的电量， r 是它们之间的距离。

2. 电势能与电势差

电势能是带电粒子在电场中的能量。电势差（电压）是单位电荷在电场中移动时电势

能的变化。其中，电势差的表达式为： $V = \frac{W}{q}$

其中， V 是电势差， W 是电荷在电场中移动时所做的功， q 是电荷量。

3. 基础理论应用：

在静电除尘中，颗粒物被电极放电使其带电，库仑力使这些带电颗粒在电场作用下移动，并被收集极捕捉。具体来说，当粉尘颗粒带上电荷后，它们在电场中受到库仑力的作用，向收集极移动并沉积下来。

在静电除尘中，电场通过对带电颗粒施加力使其移动，这一过程涉及电势能的变化。例如，计算电除尘器中粉尘颗粒从电极到集尘电极的运动路径及其受力情况时，需要考虑电势差。

（二）理论优化

1. 静电场中的高斯定理

高斯定律指出，通过一个闭合曲面的电通量等于包围的电荷总和除以真空电容率,其数学表达式为：

$$\text{真空中} : \Phi_e = \oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i.$$

$$\text{电介质中: } \oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \sum_{(S \text{ 内})} q_0. \quad \mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P},$$

其中， \mathbf{E} 是电场强度， $d\mathbf{S}$ 是面积元， $\sum_{i=1}^n q_i$ 是闭合曲面包围的总电荷量， ϵ_0 是真空

电容率， \mathbf{D} 电位移矢量， \mathbf{P} 电极化强度矢量。

2. 高斯定理应用

电场分布是电除尘理论研究的核心问题之一，高斯定律用于计算电除尘器内的电场分布。例如，确定电极周围电场的分布情况，可以帮助设计电极形状和排列，以优化除尘效果。

3. 优化应用

(1) 泊松方程

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}, \text{ 其中 } \nabla^2 \text{ 是拉普拉斯算子, } \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

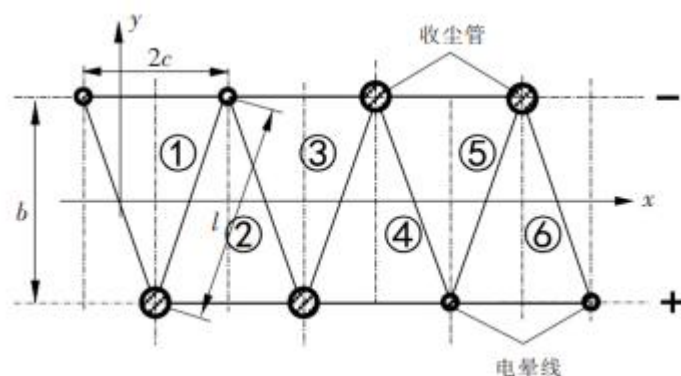
(2) 电流连续性方程

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0, \text{ 其中 } \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \nabla \cdot \text{ 是散度算子}$$

以泊松方程和电流连续性方程描述静电除尘器中电势和离子电荷密度,采用计算流体力学软件 FLUENT 对二维线板式静电除尘器内电场进行模拟。研究不同线板距对静电除尘器内电势,离子电荷密度,电场强度分布的影响。不同线板距静电除尘器内,电场强度分布形状相似,离子电荷密度随线板距的减小而增大。

为提高对微细颗粒物的捕集效率,拟从理论上明确,线-管式横向双极预荷电器这种新型电极结构的极间电场分布规律。基于高斯通量定律,建立了线-线电极的电场分布函数;根据电场叠加原理推导出,线-管式预荷电器极间电场分布模型;结合其电器电极结构对称分布特点,可划分为 6 个不同的荷电区域,分别采用线-管式预荷电器的极间电场

分布模型进行求解。线-管式双极预荷电器内正、负电场对称分布有利于提高静电凝聚速率和除尘效率,减少累积电荷和抑制反电晕烧袋现象。



三、原理应用

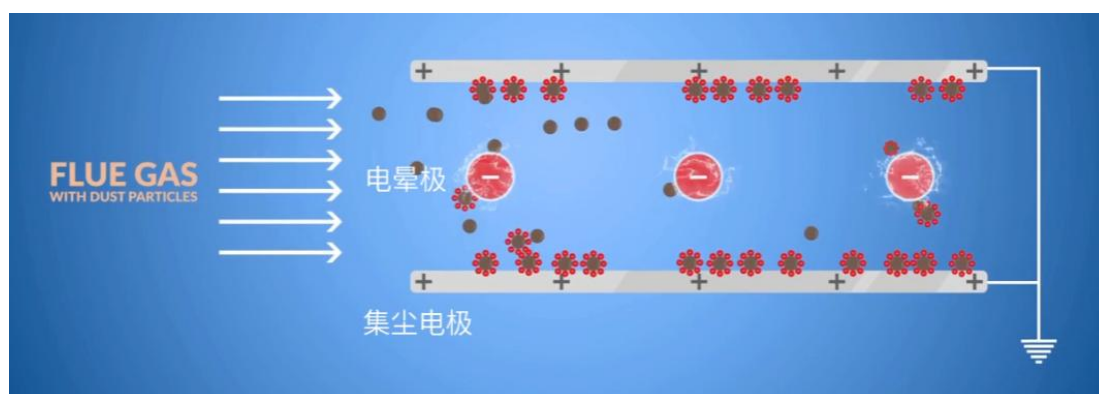
在理论原理的基础上，本部分简述静电除尘器的工作原理。静电除尘器（简称 ESP）由两大部分组成：一部分是电除尘器本体系统；另一部分是提供高压直流电的供电装置和低压自动控制系统。

高压直流供电装置的负极由不同断面形状的金属导线制成，叫做电晕极。正极由不同几何形状的金属板制成，叫集尘电极。

低压自动控制系统为自动振打装置，负责抖下集尘电极上的灰尘。



当烟气流经高压电场时，气体在高压电场作用下电离，产生阳离子和阴离子。灰尘颗粒吸附阴离子并带上负电，被阳极吸引，该过程称为粉尘颗粒捕集过程。

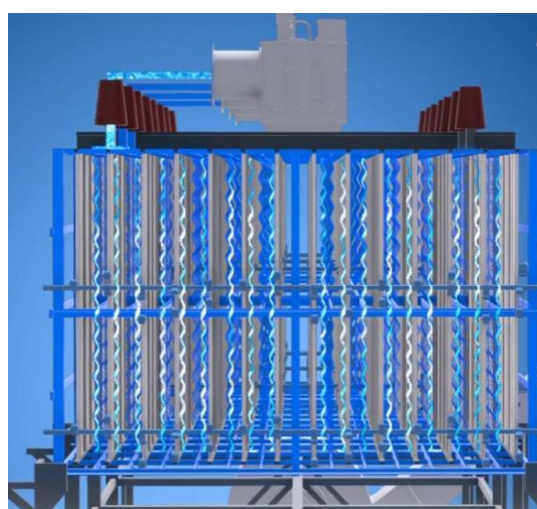
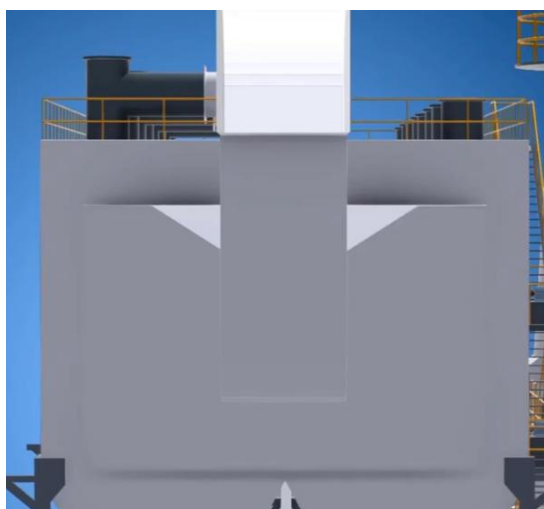


实际应用场景和步骤如图：

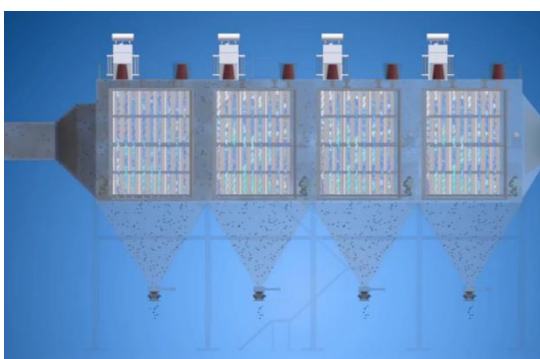
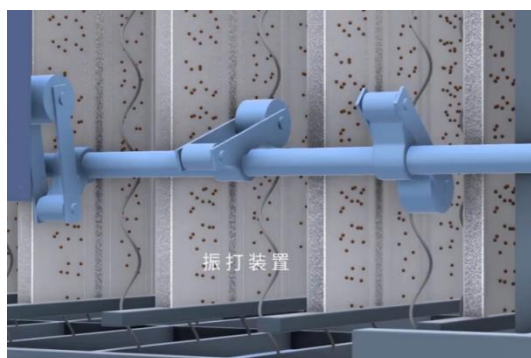
烟气均匀进入 ESP



粉尘颗粒与图中蓝色部分的电晕极接触带负电，被集尘电极收集吸引。



集尘电极在低压自动控制系统的震动下，将吸附在其表面的抖下，被灰斗收集。



四、技术应用现状和前景分析

（一）发展现状

自改革开放以来，我国的经济水平和科技水平飞速发展，但随着经济和工业化的持续发展，环境污染问题也日益严重。近年来，为响应祖国“绿水青山就是金山银山”的号召，各种环境保护相关技术也喷薄而出。除尘技术的发展，对环境的保护有着重大作用。目前，应用较为广泛的除尘技术为：机械式除尘、袋式除尘、湿式除尘、静电除尘。各除尘技术的对比见表 1：

除尘技术	工程应用	缺点	优点
机械式除尘技术	非黏性粉尘	①对于粒径小于5 μm 的粉尘颗粒均难以捕集； ②除尘效率低,无法满足排放标准	①工况适应性强;②维护耗资低
湿式除尘技术	温度、湿度较高的气流	①易发生污泥堵塞;②管道易腐蚀	①便于维护管理、成本费用低; ②结构简便,可降低爆炸事故的发生
袋式除尘技术	调节空气、通风等	①当烟气中水分大于25% 时易堵塞; ②清理难度大,易损坏	①除尘效率高达99% ; ②便于操作管理
静电除尘技术	温度较高,具有 腐蚀性的环境	①成本较大,对安装要求高; ②需对比电阻后进行调整	①集尘效率高;②气流阻力较小; ③耗能低

表 1：各除尘技术的对比

为了最大程度地利用粉尘产生的环境、设备动能及热能解决工业生产中粉尘的分离和捕集，发展静电除尘技术势在必行。

静电除尘技术广泛应用于煤矿、钢铁、水泥等行业。在煤矿行业中，井下煤矿是一个尘埃密集的环境，煤炭开采和运输过程中会产生大量的煤尘，煤尘不仅对工人的健康造成威胁，还容易引发火灾和爆炸等安全事故，电除尘系统通过收集和过滤煤尘，有效地减少了煤矿环境中的粉尘浓度，提高了工作场所的安全性；在钢铁行业中，钢铁生产过程中会产生大量的烟尘和有害气体，如二氧化硫、氮氧化物等，这些有害物质不仅对环境造成污染，还会对工人的健康造成严重影响，电除尘系统通过电场作用和过滤器的联合作用，高效地捕捉和去除烟尘和有害气体，净化烟气排放，达到环保要求；另外，在水泥行业、化工行业，生产过程中，会产生大量的粉尘烟气、废气和有害气体，对环境和人体健康有较大影响，电除尘系统可高效净化烟气、废气。电除尘系统还用于城市空气污染治理，包括汽车尾气排放、基础建设产生的扬尘等，具有除尘效率高、不易产生二次污染、操作便捷成本低等优点，且集尘极便于清理，重复利用率高。

（二）发展前景

传统的电除尘系统在工作过程中存在能源消耗较大的问题，为了提高电除尘系统的能源利用效率，降低能源消耗，节能技术的研究与应用势在必行，电除尘系统节能技术的应用对于降低能源消耗、减少环境污染、提高工业生产效率具有重要意义。为了降低静电除尘过程中的能源消耗，研究者可以从优化除尘器结构、优化电源系统、优化控制策略、优化能源回收系统等方面进行研究，以保证静电除尘设备稳定安全运行的同时，降低能耗。研究者也可以着手于挖掘新型能源，倡导可持续发展方针，以服务静电除尘技术，如风能等。此外，利用人工智能和机器学习等高新技术，对除尘过程进行智能化控制和管理，包括对除尘流程、电源控制的优化和自动调节，提高除尘处理效率，以适应不同的应用领域与场景。对电除尘过程中排放的废热、余热等回收再利用，可实现能源的循环使用，能够缓解能源危机，实现环保节能。

五、总结

静电除尘技术是一种成熟且有效的除尘方法，对于减少工业排放和改善空气质量具有重要意义。随着技术的不断进步，静电除尘器将在未来的环境保护和能源效率提升中发挥更大的作用。

静电除尘技术已经广泛应用于工业排放控制、室内空气净化、汽车尾气处理等领域。随着环保要求的提高，静电除尘技术也在不断发展和完善，以满足更严格的排放标准。现代静电除尘技术正朝着更高效、更节能、更智能的方向发展。例如，通过优化电场分布、改进电极材料和结构，以及集成智能控制系统，可以进一步提高除尘效率和降低能耗。

参考文献

- [1] 李玉贤. 库仑定律和在静电场中的金属导体内部的带电关系[J]. 物理, 1961(02):35-36.
- [2] 常玉锋, 李梦玲, 叶罗威, 等. 线-管式双极预荷电器的极间电场分布模型[J]. 江汉大学学报: 自然科学版, 2019, 47(6):7.
- [3] 陈献鹏, 张雨洁, 司胤兵, 等. 静电除尘器电场的 CFD 模拟[C]//2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集(第四卷). 2017.
- [4] 关玉华, 张伦秋, 米俊锋, 等. 静电除尘效率影响因素的研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(08).
- [5] 胡凯强. 粉煤灰分类资源化利用设计及其功能化应用研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2021.
- [6] 马雪. 专利视角解读静电除尘节能技术[J]. 中国科技信息, 2024, (11):20-22.