

基于针-板电极的光伏组件静电吸附式 除尘方法研究

王悦如, 刘云鹏, 李 乐, 刘逸飞, 李浩义, 尹晓萱

(华北电力大学河北省绿色高效电工新材料与设备重点实验室, 保定 071003)

摘 要: 为实现光伏组件静电吸附式高效除尘, 该文设计一种底面带有针刺的铝材质针-板电极型式。在明确静电吸附式除尘机理的基础上, 采用 COMSOL Multiphysics 软件建立静电-荷电-粒子追踪的数值模拟模型, 对除尘装置内的电场分布、灰尘颗粒荷电量和除尘率进行定量模拟和分析, 并搭建静电吸附式除尘实验平台, 验证数值模拟模型的可靠性。结果表明, 多针式铝材质针-板电极型式显著提升静电吸附式除尘的效率, 装置运行 3 s 后除尘率可达 96.84%, 光伏组件的发电效率达无尘状态下的 93.89%, 且相较于普通铝板, 采用针-板电极型式可使得黏附于光伏组件表面的小粒径颗粒明显减少。

关键词: 光伏组件; 静电装置; 电极; 多物理场仿真; 除尘

中图分类号: TU834.6+32

文献标志码: A

0 引 言

在“碳达峰”、“碳中和”的战略背景下, 中国正在向可再生能源转变^[1]。太阳能因其分布广泛、安全清洁成为新能源系统的重要组成部分。作为太阳能利用的主要方式, 近年来光伏发电技术发展迅速^[2]。

光伏电站通常建立在光照充足的沙漠地区, 因此光伏组件表面易积灰, 导致透光率显著降低并产生局部热斑, 严重制约其输出功率^[3-4]。Paudyal 等^[5]在尼泊尔加德满都的实验数据表明, 暴露于自然环境 5 个月后的光伏组件, 输出功率损失高达 29.76%; 王海东等^[6]在中国上海的实验结果显示, 光伏组件表面 30.18 g/m² 的积尘密度导致其最大功率下降 35.23%, 最大发电效率下降 5.55%。由此可见, 光伏组件表面积尘对其输出功率产生极为不利的影响。因此, 光伏组件表面有效除尘是提高发电效率、降低发电成本的关键。

静电除尘是一种非接触式除尘方法, 通过外加电场使灰尘颗粒获得电荷, 并在静电力驱动下离开除尘区域。近年来静电除尘技术因除尘率高、能耗低受到广泛关注^[7]。美国航空航天局最早提出电帘除尘, 并成功运用于月球和火星上的光伏组件表面除尘^[8]。然而, 在地球潮湿环境下, 水分会逐渐侵入并导致电极短路, 且电帘除尘所需的氧化铜锡微电极阵列价格昂贵, 无法大规模推广应用^[9]。为克服电帘除尘的缺点, 2022 年 Panat 等^[10]提出一种静电吸附式除尘方法。在光伏组件上方放置可移动铝板作为顶部电极, 在光伏玻璃表面

构筑掺铝氧化锌(aluminum-doped zinc oxide, AZO)透明导电薄膜作为底部电极。装置运行时, 向顶部电极施加直流高压, 底部电极接地。处于电场中的灰尘颗粒在导电薄膜辅助下充分荷电, 受静电力作用从光伏组件表面起跳并最终被清除。刘云鹏等^[11]的实验表明, 相较于 AZO 透明导电薄膜, 透光率高、耐候性好、制备工艺成熟的碳纳米管(carbon nanotubes, CNT)透明导电薄膜更适用于光伏组件静电吸附式除尘。

然而, 目前对静电吸附式除尘的研究匮乏。采用普通的长方体铝板作为顶部电极, 灰尘颗粒离开除尘区域速度慢, 且细小的灰尘颗粒因荷电量低无法满足除尘条件。因此, 有必要开发新的顶部电极型式以提高除尘效率和除尘率, 从而改善除尘效果。此外, 数值模拟因其高度可视化、低成本而广泛应用于除尘研究。但现有的仿真模型无法模拟静电吸附式除尘全过程。有必要深入分析静电吸附式除尘机理, 从而建立完善的数值模拟模型。

电流体动力干燥器中广泛采用针-板电极提高干燥速率^[12], 因此本文设计一种底面带有针电极的铝板作为顶部电极。在 COMSOL Multiphysics 软件中建立静电、电荷传输、带电粒子追踪的数值模拟模型, 对除尘装置内的电场分布、灰尘颗粒荷电量和除尘率进行定量模拟, 并评估多种铝板型式的除尘效果。搭建基于 CNT 透明导电薄膜的光伏组件静电吸附式除尘实验平台, 对各铝板进行实验, 证明数值模拟结果的可靠性, 并得出最佳铝板型式。

收稿日期: 2025-01-20

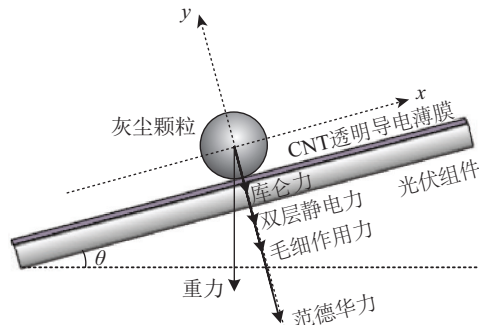
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(52207023)

通信作者: 李 乐(1993—), 男, 博士、讲师, 主要从事光伏组件新型除尘技术、新型电工装备研发及应用等方面的研究。lile@ncepu.edu.cn

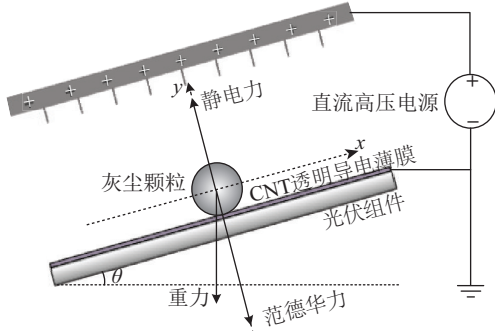
1 数学模型

1.1 颗粒黏附

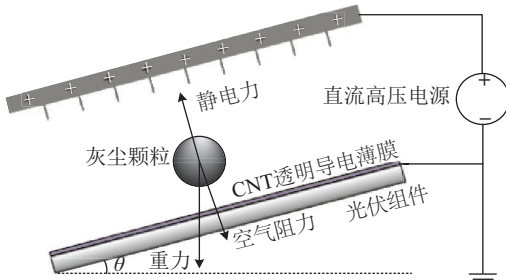
灰尘颗粒在重力耦合作用下黏附于光伏组件表面,其受力模型如图 1a 所示^[13]。其中,范德华力具有固有性,其值取决于颗粒与光伏组件表面的距离,为颗粒所受黏附力的主要部分。与范德华力相比,双层静电力、毛细作用力和库仑力很小,对灰尘颗粒的影响可忽略不计^[14]。因此,本文认为灰尘颗粒是通过重力和范德华力黏附于光伏组件表面的。



a. 黏附于光伏组件表面的灰尘颗粒



b. 静电吸附式除尘装置中起跳前的灰尘颗粒



c. 静电吸附式除尘装置中起跳后的灰尘颗粒

图 1 灰尘颗粒受力模型

Fig. 1 Dust particle force model

令灰尘颗粒所受垂直于光伏组件表面的合力为 F_y , 其表达式为:

$$F_y = F_{vdW} + G_y \quad (1)$$

$$F_{vdW} = \frac{AR}{6D^2} \quad (2)$$

$$G_y = \rho \frac{4}{3} \pi R^3 g \cos \theta \quad (3)$$

式中: F_{vdW} ——范德华力, N; G_y ——灰尘颗粒重力的垂直分量, N; A ——Hamaker 常数, J; R ——灰尘颗粒半径, m; D ——灰尘颗粒与光伏组件表面的距离, m; ρ ——灰尘颗粒密度, kg/m³; g ——重力加速度, m/s²; θ ——光伏组件倾斜角, (°)。

1.2 颗粒荷电

向作为顶部电极的铝板施加直流高压, 光伏组件表面灰尘颗粒在静电场作用下荷电。颗粒荷电过程受场致荷电和扩散荷电的耦合作用, 两种荷电机理无法独立分开或简单相加^[15]。Lawless 综合荷电模型因其准确性和简单性被广泛使用, 其无量纲形式为^[16]:

$$\frac{dq}{dt} = \begin{cases} \frac{q_s}{\tau} \left(1 - \frac{q}{q_s} \right) + \frac{4\pi\alpha\rho_{ion}k_{ion}k_B R}{e}, & q \leq q_s \\ \frac{\alpha}{4\tau} \cdot \frac{(q - q_s)}{\exp\left[\frac{e(q - q_s)}{4\pi\epsilon_0 k_{ion} k_B T R}\right] - 1}, & q > q_s \end{cases} \quad (4)$$

式中: q ——灰尘颗粒荷电量, C; q_s ——灰尘颗粒饱和荷电量, C; τ ——时间常数, s; α ——荷电模型常数; ρ_{ion} ——电荷密度, C/m³; k_{ion} ——离子迁移率, cm²/(V·s); k_B ——玻尔兹曼常数, J/K; e ——单位电子电荷, C; ϵ_0 ——真空介电常数, F/m; T ——环境温度, K。

光伏组件上带电的灰尘颗粒相互碰撞, 由于两颗粒表面存在接触电势差, 电子发生转移^[17]。因此, 本文采用 Schein 等^[18]提出的碰撞荷电模型对 Lawless 模型进行补充。当两灰尘颗粒 i 和 j 发生碰撞, 颗粒 i 的荷电量随碰撞次数的变化为:

$$\frac{dq_i}{dn} = \left[\frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{z_0} \phi_{ij} - \frac{1}{4\pi R_i^2} q_i + \frac{1}{4\pi R_j^2} q_j + \epsilon_0 \epsilon_r (E \cdot \mathbf{k}) \right] \cdot k_c k_s (c_{ij} \cdot \mathbf{k})^{4/5} \quad (5)$$

$$k_s = 2.32 \left(\frac{2R_i R_j}{R_i + R_j} \right)^{4/5} \left(\frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \cdot \frac{1 - v_p}{E_p} \right)^{2/5} \quad (6)$$

式中: k_c ——荷电效率; ϵ_r ——相对介电常数, F/m; z_0 ——电子转移的临界间隙, μm; ϕ ——功函数差, eV; E ——电场强度, V/m; $\mathbf{k}$ ——两碰撞颗粒中心线方向的单位矢量, μm; m ——灰尘颗粒质量, kg; v_p ——灰尘颗粒的泊松比; E_p ——灰尘颗粒的杨氏模量, Pa。

假设电场强度为 E 时, 灰尘颗粒荷电量为 q 。考虑到镜面电荷的影响, 灰尘颗粒所受静电力为:

$$F_E = k_m q E \quad (7)$$

式中: F_E ——静电力, N; k_m ——镜面修正系数。

灰尘颗粒起跳前受力模型如图 1b 所示。当 $F_E > F_y$ 时, 灰尘颗粒可从光伏组件表面起跳并最终被清除。因此, 除尘条件为:

$$k_m q E > \rho \frac{4}{3} \pi R^3 g \cos \theta + \frac{AR}{6D^2} \quad (8)$$

1.3 颗粒迁移

灰尘颗粒从光伏组件表面起跳后,范德华力随距离增加而急剧下降。颗粒在运动过程中主要受静电力、重力和空气阻力的作用,其他力可忽略不计^[19]。灰尘颗粒起跳后受力模型如图 1c 所示。颗粒在除尘区域的运动遵循牛顿第二定律,通过求解颗粒位置矢量分量的二阶运动方程来计算其位置:

$$m \frac{du_p}{dt} = F_E + G + F_d \quad (9)$$

$$F_d = \frac{18\mu}{\rho R^2} m(u_p - u) \quad (10)$$

式中: u_p ——灰尘颗粒速度, m/s; F_d ——空气阻力, N; μ ——空气动力黏度, Pa·s; u ——空气流速, m/s。

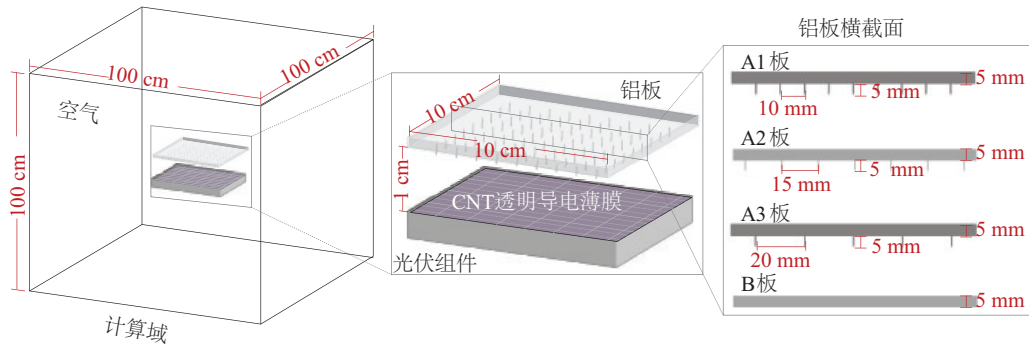


图2 除尘装置的几何模型

Fig. 2 Geometric model of dust removal device

本文仿真采用以下假设^[21-22]: 1) 计算域外部条件不影响仿真过程和结果; 2) 灰尘颗粒均为标准球型。

2.2 边界条件

荷电区电场的控制方程为:

$$\begin{cases} \nabla \cdot D_v = \rho_v \\ E = -\nabla V \\ D_v = \epsilon_0 \epsilon_r E \end{cases} \quad (11)$$

式中: D_v ——位移矢量, C/m²; ρ_v ——空间电荷密度, C/m³; V ——电势, V。

数值模拟中的边界条件为:

$$\begin{cases} V|_{\Phi_0} = 0 \\ V|_{\Phi_k} = U_0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: Φ_0 ——光伏组件表面和计算域边界; Φ_k ——铝板表面; U_0 ——铝板电压, kV。

2.3 网格剖分及网格独立性测试

本文采用物理场控制网格,将计算域划分为自由四面体网格和自由三角形网格。为提高数值模拟的精度,对针电极进行极细化网格剖分处理。对 A1 板仿真模型分别采用 85777、116474、167080、351421、385603、408246 和 419661 个

2 仿真

2.1 几何模型

在 SOLIDWORKS 中构建光伏组件静电吸附式除尘装置的几何模型,并导入 COMSOL Multiphysics 的计算域中。如图 2 所示,铝板为顶部电极,尺寸为 10.0 cm×10.0 cm×0.5 cm,对其施加直流高压;光伏组件为底部电极,尺寸为 10.0 cm×10.0 cm×1.5 cm,在其表面构筑 17 μm 厚的 CNT 透明导电薄膜并接地。针电极垂直于光伏组件表面,直径为 0.3 mm,长度为 5 mm。铝板下表面与光伏组件表面距离为 1 cm。根据相邻针电极间距分别为 10、15 和 20 mm,将铝板分为 A1 板、A2 板和 A3 板。设置普通铝板(下表面无针电极)为对照组,记为 B 板。计算域尺寸为 100 cm×100 cm×100 cm,域内材料为空气,采用 SiO₂ 模拟灰尘颗粒和光伏玻璃^[20]。

网格单元进行剖分,并计算粒径为 160 μm 的灰尘颗粒荷电量,以测试网格独立性,计算结果如图 3 所示。

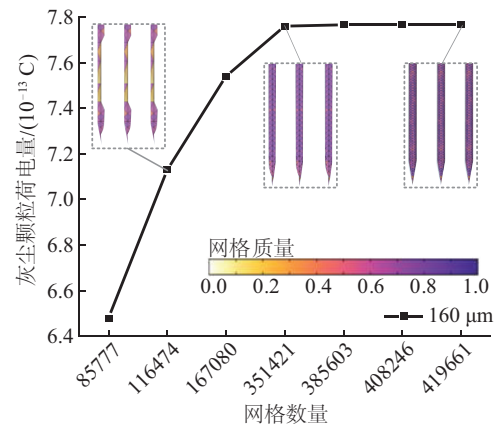


图3 网格独立性测试结果

Fig. 3 Grid independence test results

在 351421、385603、408246 和 419661 个网格单元下,灰尘颗粒荷电量的相对误差小于 0.72%。为了在保证计算精度的同时减少计算时间,本文选择 351421 个网格单元对 A1 板模型进行剖分,其网格质量大于 0.5。该网格剖分方法同样

应用于其他模型中。

2.4 评价指标

仿真中除尘率的计算公式为:

$$\omega = \frac{\sum_{i=1}^{160} \rho \frac{4}{3} \pi R_i^3 N_i - \sum_{i=1}^{160} \rho \frac{4}{3} \pi R_i^3 N_i^*}{\sum_{i=1}^{160} \rho \frac{4}{3} \pi R_i^3 N_i} \times 100\% \quad (13)$$

式中: ω ——除尘率; N ——灰尘颗粒总数量; N^* ——除尘区域中的灰尘颗粒数量。

3 实 验

3.1 实验材料和设备

本文采用内蒙古库布奇沙漠原沙模拟光伏组件表面积尘,其微观表征如图4所示。在光伏组件表面构筑 CNT 透明导电薄膜(CNTs-500,湖南纳昇电子)。A1板、A2板、A3板及B板由实验室自制。

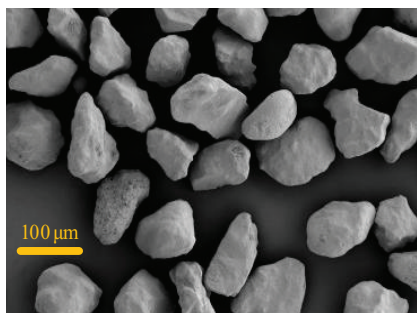
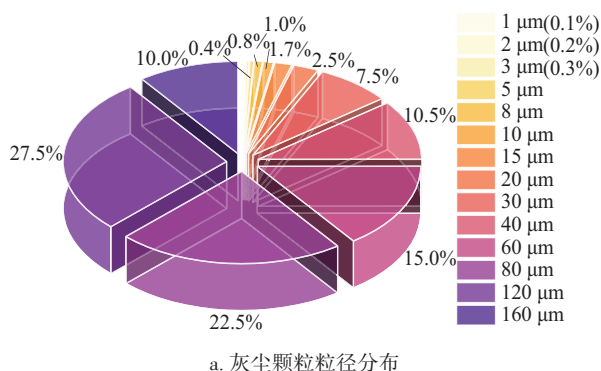


图4 灰尘颗粒的微观表征

Fig. 4 Microscopic characterisation of dust particles

实验中所用设备如下:光伏组件(JY-100×100,宁波佳耀光伏,额定电压为5V,峰值功率为1.5W),高压直流电源(DW-P503-1ACDFO,天津东文高压,输出电压范围为0~50kV),ARRILITE聚光灯(L1.36700.B-5510,德国ARRI),电子分析天平(XPR5003SC,梅特勒托利多科技,精度为0.001g),光伏组件最大功率点追踪测试仪(PVT801,江门博领电子),辐照度测试仪(SM206E-SOLAR,西安欣宝科仪,辐照度测试范围为0.1~1999.9W/m²)。

3.2 实验平台和方法

在温度为25℃、相对湿度为50%的实验室中,搭建除尘实验平台,如图5所示。

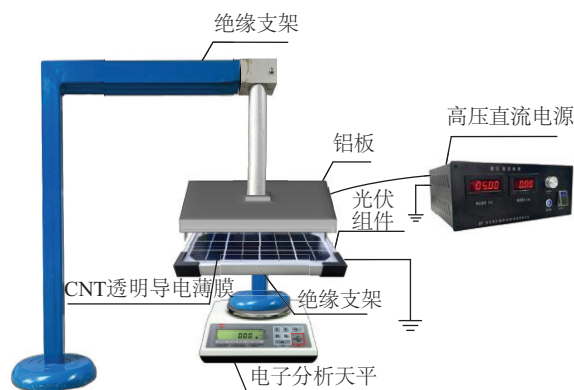
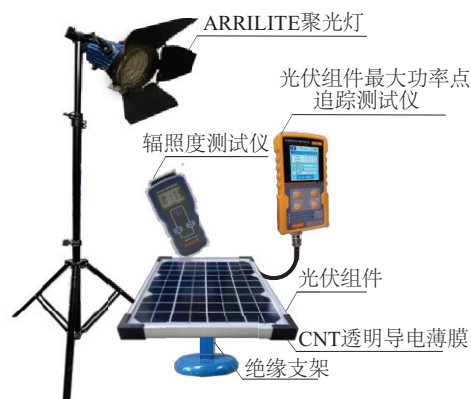


图5 除尘实验平台

Fig. 5 Dust removal test platform

采用ARRILITE聚光灯模拟自然光,用辐照度测试仪多次测量,确保光伏组件表面各位置的辐照度相同。在光伏组件无尘状态下,使用最大功率点追踪(maximum power point tracking, MPPT)测试仪测得其最大发电功率 P_a 。实验前,借助网筛在光伏组件表面均匀积尘,且积尘密度为5mg/cm²,并测量此时的最大发电功率。用电子分析天平测定除尘前光伏组件和沙子总质量 M_a 和沙子质量 M_s 。实验中,使用高压直流电源向铝板施加电压。对铝板施加5kV电压3s后认为除尘结束,将电源电压恢复至0kV。记录下除尘过程中各时刻光伏组件和沙子总质量 M_b 。在除尘结束后测量光伏组件的最大发电功率。

3.3 评价指标

实验中除尘率的计算公式为:

$$\omega = \frac{M_a - M_b}{M_s} \times 100\% \quad (14)$$

式中: M_a ——除尘前光伏组件和沙子总质量,mg; M_b ——除尘后光伏组件和沙子总质量,mg; M_s ——除尘前沙子质量,mg。

光伏组件发电效率的归一化值 η^* 为:

$$\eta^* = \frac{P_b}{P_a} \times 100\% \quad (15)$$

式中: P_a ——无尘状态下光伏组件的最大发电功率, W;
 P_b ——某状态下光伏组件的最大发电功率, W。

4 结果与讨论

4.1 电场强度分布

除尘区域和光伏组件表面的电场强度是分析灰尘颗粒荷电和除尘效果的基础,因此有必要深入研究静电吸附式除尘装置内的电场强度分布。当施加电压为 5 kV 时,各铝板型式下除尘区域及光伏组件表面的电场分布如图 6 所示。

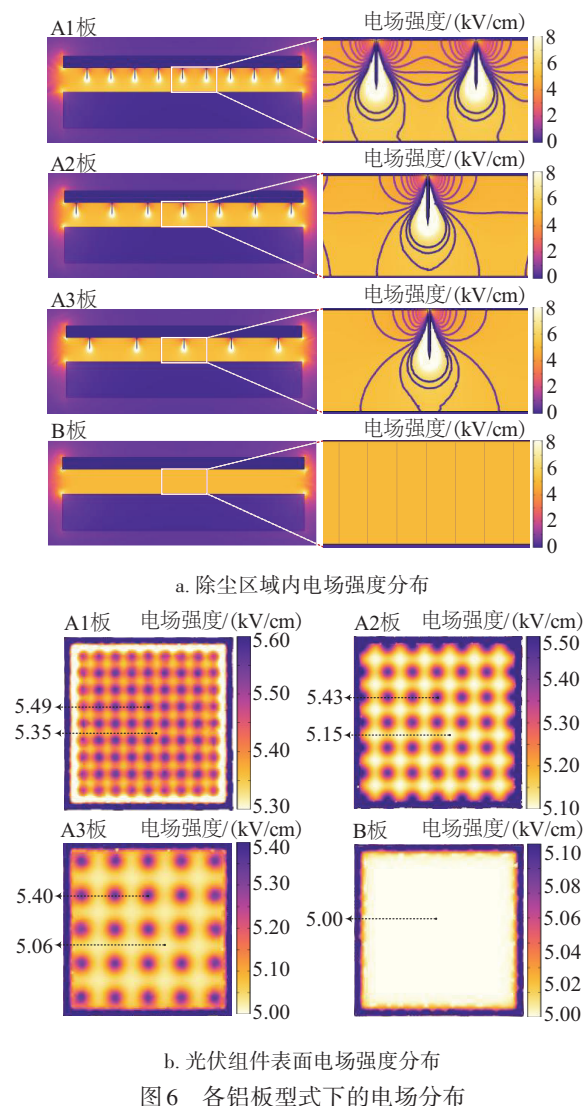


Fig. 6 Electric field distribution under each aluminum plate type

首先分析除尘区域内电场强度分布。B 板下,除尘区域内近似匀强电场,且场强为 5 kV/cm。A1 板、A2 板和 A3 板下,除尘区域内电场强度极不均匀,电场分布与针电极位置密切相关。这是因为针电极尖端表面锋利,电荷在针电极尖

端聚集,从而在针电极周围形成高场强区。

进一步分析光伏组件表面电场强度分布,忽略边缘效应。B 板下,光伏组件表面电场强度均为 5 kV/cm。A1 板、A2 板和 A3 板在光伏组件表面针电极尖端对应位置产生高场强区,峰值分别为 5.49、5.43 和 5.40 kV/cm。该现象可用场强叠加原理解释,光伏组件表面各点的电场强度是铝板下表面各点电荷激发的场强矢量和。由于针电极尖端电荷聚集,光伏组件表面针电极尖端对应位置离这些电荷最近,因此受影响最大,形成高场强区。其他位置受针电极尖端电荷影响较小,形成低场强区。

仿真结果表明,相较于普通铝板 B 板,多针式铝板能提高除尘区域及光伏组件表面的电场强度,其中针电极间距最小的 A1 板效果最佳。

4.2 灰尘颗粒荷电

在仿真模型中引入 500 个灰尘颗粒,其粒径分布如图 4a 所示。当铝板电压为 5 kV,各铝板型式下灰尘颗粒荷电量随粒径的变化情况如图 7 所示。

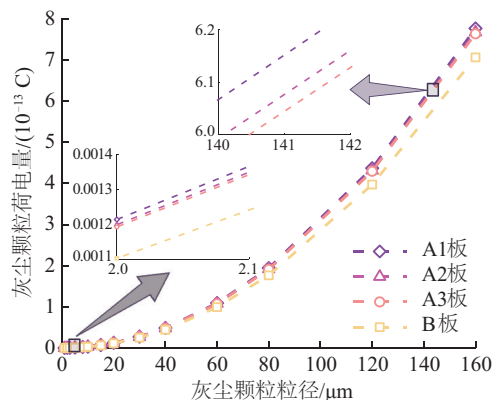


图7 各铝板型式下灰尘颗粒的荷电量

Fig. 7 Charge of dust particles under each aluminum plate type

在 4 种型式的铝板下,小粒径颗粒荷电量极小,粒径小于 2 μ m 的灰尘颗粒荷电量小于 0.12×10^{-15} C。随粒径增加,灰尘颗粒荷电量呈平方增加。粒径为 160 μ m 的灰尘颗粒在 A1 板下荷电量为 7.76×10^{-13} C,在 A2 板、A3 板和 B 板下荷电量分别为 7.67×10^{-13} 、 7.63×10^{-13} 和 7.06×10^{-13} C。相同粒径的颗粒在 A1 板下荷电量最高,其次是 A2 板和 A3 板,在 B 板下荷电量最小,且差距随粒径增大而逐渐增加。

该现象可用 Lawless 综合荷电模型和碰撞荷电模型解释。在多针式铝板下,光伏组件表面高场强区的灰尘颗粒表面电荷密度大,随后通过颗粒间碰撞,实现电荷向低场强区的弱荷电颗粒迁移。然而,在 B 板下,光伏组件表面为匀强电场,且场强值小于多针式铝板下低场强区的场强,因此灰尘颗粒饱和荷电量较小。此外,不同粒径的灰尘颗粒达到饱和荷电量后表面电荷密度非常接近,且处于相同的外加电场下,所以碰撞导致的颗粒荷电量变化可忽略不计^[17]。在 A1 板下,高场强区最多且场强峰值最大,因此各粒径灰尘颗粒

荷电量最大。

4.3 除尘效果

为分析多针式铝板对静电吸附式除尘的提升效果,利用仿真模拟各铝板型式下的除尘全过程。除尘 3 s 内,各铝板型式下残余灰尘颗粒数量随时间的变化如图 8 所示。当除尘时间分别为 0、1、2 和 3 s 时,各铝板型式下残余灰尘颗粒数量随粒径的变化如图 9 所示。

由图 8 可知,灰尘颗粒在 A1 板下离开除尘区域的速度最快,3 s 后未清除颗粒仅剩 33 个;A2 板和 A3 板其次,3 s 后未清除颗粒分别为 41 个和 66 个;B 板下离开除尘区域的速度最慢,3 s 后未清除颗粒为 134 个。由图 9 可知,除尘装置运行时,大粒径颗粒首先离开除尘区域,小粒径颗粒离开除尘区域时间较长。在各除尘时刻,A1 板下除尘区域内各粒径灰尘颗粒数量明显少于其他 3 种铝板。此外,A1 板下,粒径小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的灰尘颗粒粘附于光伏组件表面;而 B 板下,粒径小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的灰尘颗粒均无法被清除。

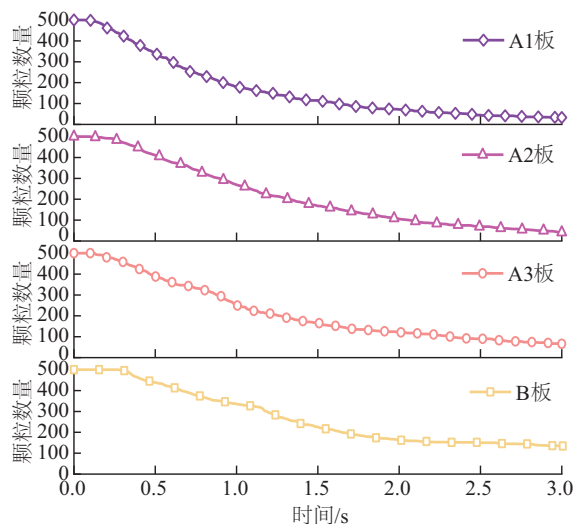
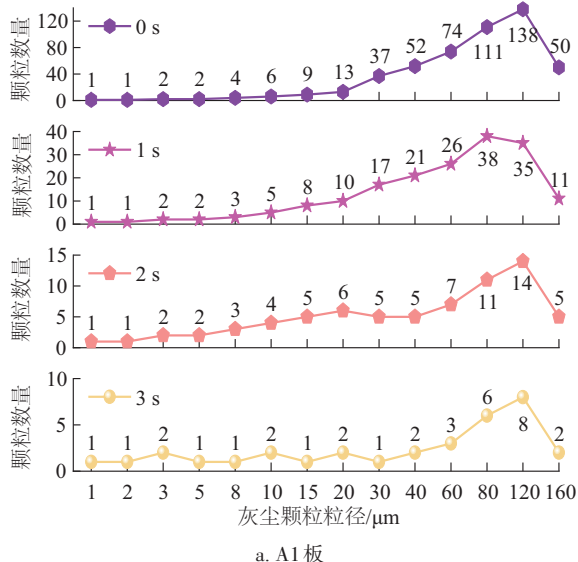
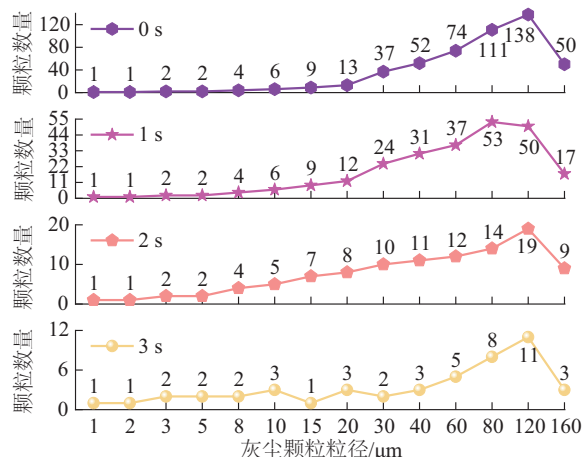


图 8 残余灰尘颗粒数量随时间的变化

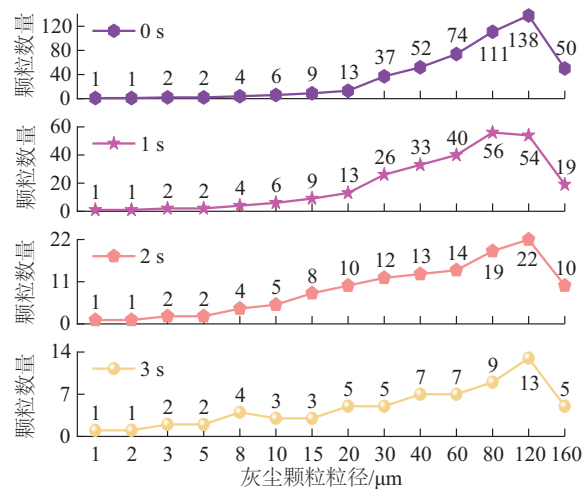
Fig. 8 Number of residual dust particles over time



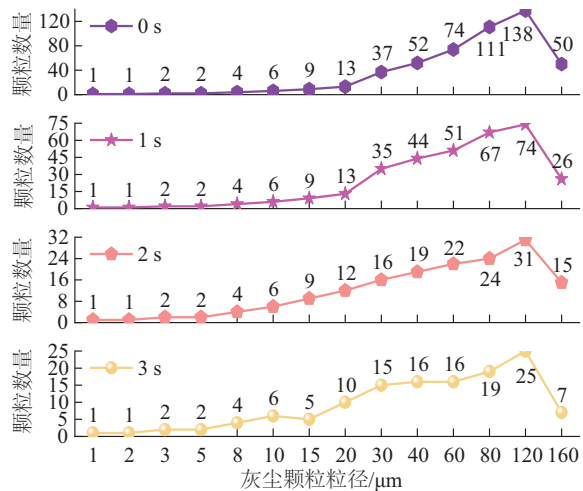
a. A1 板



b. A2 板



c. A3 板



d. B 板

图 9 残余灰尘颗粒数量随粒径的变化

Fig. 9 Number of residual dust particles versus size

本文认为原因如下:由 4.2 节可知,A1 板下相同粒径的灰尘颗粒荷电量最大,因此这些颗粒在静电场中所受的静电力也最大,且大于黏附力,使得这些颗粒能起跳并被清除,减

少了表现为黏附的小粒径颗粒数量。同时,更大的静电力也加快了灰尘颗粒的运动速度,提升了相同时间内离开除尘区域的颗粒数量。此外,由图 6a 可知,在多针式铝板 A1 板、A2 板和 A3 板下,电场线有一定曲率,沿电场线运动的灰尘颗粒与铝板碰撞后以较大的角度反弹,促进了颗粒的横向运动,有利于颗粒离开除尘区域。然而,在普通铝板 B 板下,电场线垂直,沿电场线运动的灰尘颗粒与铝板碰撞后反弹角度很小,显著增加了颗粒离开前的碰撞次数。

根据式(13)计算得到数值模拟中 0~3 s 的除尘率。并开展 3.2 节所述的静电吸附式除尘实验,根据式(14)计算得实验中的除尘率,以证明仿真模型的可靠性。除尘率的仿真与实验值对比曲线如图 10 所示。

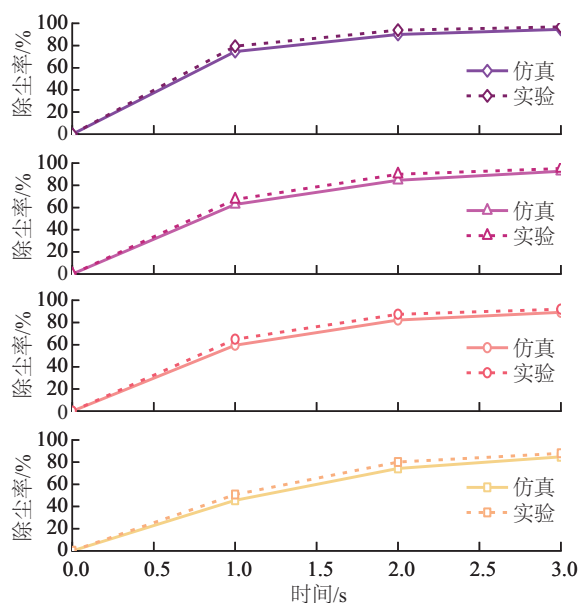


图 10 除尘率的仿真与实验值对比曲线

Fig. 10 Comparison curves of simulated and experimental dust removal rates

仿真模型中,当除尘时间为 3 s 时,A1 板、A2 板、A3 板和 B 板下除尘率分别为 94.61%、92.72%、89.19% 和 84.85%。实验中,当除尘时间为 3 s 时,A1 板、A2 板、A3 板和 B 板下除尘率分别为 96.84%、95.14%、92.02% 和 87.98%。实验测得的除尘率略优于模拟结果,原因是真实的灰尘颗粒几何形状不规则(图 4b),这增加了颗粒与铝板碰撞后的横向位移,推进了除尘过程。仿真结果与实验结果高度吻合,验证了仿真模型的可靠性。

由上述分析可知,相较于普通铝板 B 板,多针式铝板显著提高了单位时间内的除尘率,减少了黏附于光伏组件表面的小粒径颗粒数量,其中 A1 板除尘率最高,表现出最佳的除尘效果。

4.4 发电效率

光伏组件的发电效率与除尘效果密切相关,因此有必要

比较各铝板型式下除尘前后的光伏组件发电效率,以进一步证实多针式铝板对除尘效果的提升作用。在 A1 板、A2 板、A3 板和 B 板下采用 5 kV 电压除尘 3 s 后,光伏发电效率如图 11 所示。

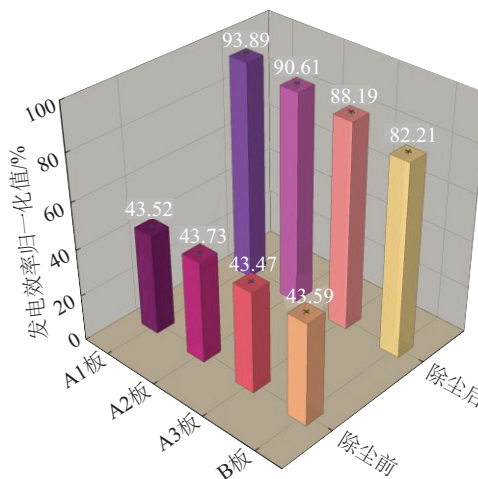


图 11 光伏发电效率的恢复情况

Fig. 11 Recovery of photovoltaic power generation efficiency

除尘前,光伏组件的发电效率归一化值约在 43.52%,造成发电效率微小差异的原因是:灰尘颗粒由人工通过网筛撒到光伏组件表面,光伏组件上不同位置的灰尘密度不可能完全相同。除尘后,A1 板下光伏组件的发电效率归一化值达 93.89%,较 A2 板、A3 板和 B 板分别高 3.28%、5.70% 和 11.68%。发电效率与 4.3 节的除尘率相符合,进一步证实了多针式铝板优异的除尘效果,其中 A1 板表现最佳。

5 结 论

为实现光伏组件表面高效除尘,同时减少小粒径颗粒黏附,本文提出一种底面带有针电极的铝板作为光伏组件静电吸附式除尘装置的顶部电极。对优化后的除尘装置进行数值模拟和实验验证,主要结论如下:

- 1) 多针式铝板能提高各粒径灰尘颗粒的荷电量,其中 A1 板提升效果最明显。粒径为 160 μm 的灰尘颗粒在 A1 板下荷电量比在 B 板下高 9.02%,有利于灰尘颗粒起跳并被清除。
- 2) 多针式铝板能显著提升光伏组件静电吸附式除尘的效果,其中 A1 板表现最佳。向 A1 板施加 5 kV 电压,3 s 后除尘率高达 96.84%。且相较于普通铝板 B 板,黏附于光伏组件表面的小粒径颗粒显著减少。

- 3) 采用 A1 板除尘后,光伏组件的发电效率达无尘状态下的 93.89%,较 B 板高 11.68%,发电效率提升显著。

基于针-板电极的光伏组件静电吸附式除尘装置在光伏电站的实际应用需一个由步进电机、微控制器和传动装置组成的移动平台,以控制铝板的定向移动。该移动平台的搭建和实现可作为后续研究重点。

[参考文献]

- [1] 朱继忠, 周迦琳, 张迪. 清洁能源和电力系统碳足迹全生命周期核算综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(4): 1323-1343.
- ZHU J Z, ZHOU J L, ZHANG D. Review of full life-cycle carbon footprints accounting of clean energy and power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(4): 1323-1343.
- [2] LIU Y P, LI H Y, LI L, et al. A new electrostatic dust removal method using carbon nanotubes transparent conductive film for sustainable operation of solar photovoltaic panels[J]. Energy conversion and management, 2024, 300: 117923.
- [3] 陈宇翔, 崔凝, 李斌, 等. 积灰性质对光伏组件输出性能影响研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(1): 11-19.
- CHEN Y X, CUI N, LI B, et al. Research on effect of dust deposition properties on output performance of photovoltaic modules [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(1): 11-19.
- [4] 宁会峰, 程荣展, 王伟志, 等. 积灰对光伏发电的影响及除尘效果实验研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(11): 120-125.
- NING H F, CHENG R Z, WANG W Z, et al. Experimental study on influence of dust accumulation on photovoltaic power generation and dust removal effect [J]. Acta energiae solaris sinica, 2020, 41(11): 120-125.
- [5] PAUDYAL B R, SHAKYA S R. Dust accumulation effects on efficiency of solar PV modules for off grid purpose: a case study of Kathmandu [J]. Solar energy, 2016, 135: 103-110.
- [6] WANG H D, MENG X Z, CHEN J B. Effect of air quality and dust deposition on power generation performance of photovoltaic module on building roof[J]. Building services engineering research and technology, 2020, 41(1): 73-85.
- [7] 沈振兴, 刘百诚, 庄建宏, 等. 三相行波电帘的电场分布及除尘机理研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(7): 152-158.
- SHEN Z X, LIU B C, ZHUANG J H, et al. Study on electric field distribution and dust removal mechanism of three-phase traveling-wave electric curtain [J]. Acta energiae solaris sinica, 2022, 43(7): 152-158.
- [8] SAYYAH A, HORENSTEIN M N, MAZUMDER M K, et al. Electrostatic force distribution on an electrodynamic screen[J]. Journal of electrostatics, 2016, 81: 24-36.
- [9] MAZUMDER M, HORENSTEIN M N, STARK J W, et al. Characterization of electrodynamic screen performance for dust removal from solar panels and solar hydrogen generators[J]. IEEE transactions on industry applications, 2013, 49(4): 1793-1800.
- [10] PANAT S, VARANASI K K. Electrostatic dust removal using adsorbed moisture-assisted charge induction for sustainable operation of solar panels [J]. Science advances, 2022, 8(10): eabm0078.
- [11] LIU Y P, LI H Y, LI L, et al. Research on the electrostatic dust elimination method for solar panels [J]. CSEE journal of power and energy systems, 2024, 11(6): 2684-2695.
- [12] ZHONG C S, MARTYNENKO A, WELLS P, et al. Numerical investigation of the multi-pin electrohydrodynamic dryer: effect of cross-flow air stream [J]. Drying technology, 2019, 37(13): 1665-1677.
- [13] 赵伟萍. 太阳能光伏组件表面污染机理及其减缓策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- ZHAO W P. Dust pollution mechanism on solar photovoltaic module surfaces and its mitigation strategies [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [14] VISSER J. The adhesion of colloidal polystyrene particles to cellophane as a function of pH and ionic strength [J]. Journal of colloid and interface science, 1976, 55(3): 664-677.
- [15] 王伊凡. 颗粒静电脱除的电荷效应及调控研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- WANG Y F. Fundamental research of charge effects and regulation in electrostatic precipitation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [16] WANG Y F, GAO W C, ZHANG H, et al. Significance of ionic wind propulsion on charged particle removal during flue gas purification [J]. Powder technology, 2022, 410: 117804.
- [17] 胡驾纬. 运动颗粒荷电特性及静电效应研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- HU J W. Investigation on frictional charging and electrostatic effects of moving granular materials [D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [18] SCHEIN L B, LAHA M, NOVOTNY D. Theory of insulator charging [J]. Physics letters A, 1992, 167(1): 79-83.
- [19] LI H Y, LIU Y P, LI L, et al. New anhydrous de-dusting method for photovoltaic panels using electrostatic adsorption: from the mechanism to experiments [J]. Energy conversion and management, 2024, 308: 118399.
- [20] HUANGFU Y B, HANG L B, QIN W, et al. Simulation and research of dust deposition on the surface of solar panels [J]. Power system clean energy, 2016, 32(4):

- 106-111.
- [21] 李浩义, 刘云鹏, 李乐, 等. 基于静电吸附机理的光伏组件无水化除尘方法研究[J]. 太阳能学报, 2025, 46(7): 606-613.
- LI H Y, LIU Y P, LI L, et al. Research on dehydration dust removal method for photovoltaic modules based on electrostatic adsorption mechanism [J]. Acta energiae solaris sinica, 2025, 46(7): 606-613.
- [22] DONG M, ZHOU F, ZHANG Y X, et al. Numerical study on fine-particle charging and transport behaviour in electrostatic precipitators [J]. Powder technology, 2018, 330: 210-218.

RESEARCH ON ELECTROSTATIC ADSORPTION DUST COLLECTION METHOD FOR PV MOUDULES BASED ON NEEDLE-PLATE ELECTRODES

Wang Yueru, Liu Yunpeng, Li Le, Liu Yifei, Li Haoyi, Yin Xiaoxuan

(Hebei Key Laboratory of Green and Efficient New Electrical Materials and Equipment, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to realize efficient electrostatic adsorption dust removal for photovoltaic modules, the paper designs an aluminum needle-plate electrode type with a needle on the bottom surface. On the basis of clarifying the mechanism of electrostatic adsorption dust removal, COMSOL Multiphysics software is used to establish a coupled simulation model of electrostatic force, charge transfer and charged particle tracking, calculating the distribution of electric field strength, the amount of charge of the dust particles and the dust removal rate in the dust removal device, and setting up an experimental platform for electrostatic adsorption dust removal to verify the reliability of the simulation model. The results show that the multi-needle aluminum needle-plate electrode type significantly improves the efficiency of electrostatic adsorption dust removal, the dust removal rate can reach 96.84% after 3 s of device operation, and the power generation efficiency of photovoltaic modules can reach 93.89% under the state of no dust. Compared with the ordinary aluminum plate, the use of needle-plate electrode type can make the small-sized particles adhered to the surface of the photovoltaic module significantly reduced.

Keywords: photovoltaic modules; electrostatic devices; electrodes; multi-physics field simulation; dust removal