

# 湍流作用下光伏面板粘附颗粒脱离的 Monte Carlo 模拟

杜小强<sup>1,2</sup>, 刘恩晓<sup>1</sup>, 武传宇<sup>1,2</sup>, 许南南<sup>1</sup>

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018)

**摘 要:** 针对目前光伏板表面清洁问题, 提出采用高频气流技术去除积尘颗粒。通过借鉴经典固体表面吸附力学基础理论及JKR模型, 分别建立不同湿度条件下光伏板表面颗粒吸附的力学模型。通过分析并检测典型光伏板的积尘环境, 确定颗粒与光伏板表面各物理特性参数值及参数分布特征, 并将各参数分布引入模型中。根据湍流场作用时颗粒脱离表面时的运动方式, 建立湍流作用下粘附颗粒脱离表面的计算模型, 最终采用 Monte Carlo 模拟方法计算得到使积尘脱离光伏板表面的临界气流剪切速度。

**关键词:** 灰尘; 粘附; 太阳能; 湍流; Monte Carlo 方法

**中图分类号:** TM914.4

**文献标识码:** A

## 0 引 言

近年来, 光伏发电技术发展迅速, 商用化速度惊人。截至 2018 年底, 中国光伏发电累计超过 170 GW, 继续位居全球首位。影响光伏设备转换效率的因素主要包括光伏设备的朝向、安装角度以及板间阴影<sup>[1]</sup>。另一方面, 光伏板长期置于室外接收太阳辐射, 空气中的灰尘等杂质会大量沉积在玻璃表面。国内外学者对于光伏板上积累灰尘对光伏设备转换效率的影响已做了大量研究<sup>[2-7]</sup>, 光伏板表面清洁问题也得到各国研究学者的高度重视, 学者们相继提出纳米自清洁薄膜、电除尘技术、机械除尘技术等自洁和清洁技术<sup>[8,9]</sup>。机械除尘是目前应用最为广泛的除尘方式, 但除尘部件与光伏板表面接触易损伤表面, 导致光伏板的光电转换效率降低。为实现玻璃表面微米级颗粒的非接触式去除, 文献[10,11]设计一种两级扩张腔体喷头, 压缩空气经两级相连的扩张腔体时会产生高频湍流, 实现对微米级颗粒的有效去除, 并且该喷头可通过加长喷头尺寸增大清洁面积, 有望用于大面积光伏板表面的除尘, 最大程度避免损伤光伏板表面, 减小

清洁除尘能耗。

前期对高频气流除尘的研究主要是进行定性研究, 缺乏相关定量研究, 有关除尘机理、最佳喷头结构等尚不确定, 需进一步深入研究。积尘颗粒与表面之间的粘附作用受颗粒与表面的物料特性、颗粒形状、尺寸、接触面积以及表面粗糙度等参数影响, 而这些参数均非定值, 一般为随机分布, 导致颗粒表面的粘附作用力并非单一值。因此, 采用统一参数模型分析得到的结果与实际试验结果存在多种差异, 计算机模拟在此显示其优越性。本文基于随机特性, 采用 Monte Carlo 方法模拟光伏板表面积尘参数分布以及湍流场对粘附颗粒的作用, 构建以此为分析变量的湍流作用下粘附颗粒计算模型, 求出不同情况下使积尘脱离光伏板表面的临界气流剪切速度, 以期后续高频气流除尘装置的设计提供基本参数。

## 1 积尘颗粒在光伏板表面的粘附机理及力学模型

固体表面之所以能吸附粉尘, 其主要原因是固体表面能对粉尘产生一定的吸引力, 宏观上看, 一

收稿日期: 2017-07-13

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY17E050029); 浙江理工大学 521 拔尖人才培养计划; 浙江省高校中青年学科带头人培养项目; 浙江理工大学研究生创新项目(YCX16025)

通信作者: 杜小强(1978—), 男, 博士、教授、硕士生导师, 主要从事机械设计及理论、现代设计方法方面的研究。xqiangdu@zstu.edu.cn

方面决定于它们之间的相互作用力,另一方面取决于固体表面的表面能高低<sup>[12]</sup>。下文对积尘颗粒在光伏板表面的受力情况进行分析并建立积尘颗粒粘附的力学模型。

### 1.1 积尘颗粒的复合力学模型

从 1882 年 Hertz 创建接触力学开始,微米级颗粒在固体表面粘附的模型已有长足的进步和发展,相继出现了 JKR 模型、DMT 模型和 MD 模型<sup>[13~15]</sup>,且每种理论模型都有其特定的理论基础和适用范围。Salazar-Banda<sup>[16]</sup>指出,通常情况下微颗粒与固体表面之间的相互作用力主要包括范德华力、静电力、毛细力等。由于颗粒性质、表面状态以及环境状况的不同,总粘附力可能是以上中的一个或几个力的合成。因此,假设光滑积尘颗粒吸附于光滑光伏板表面时,两者之间的总粘附力为:

$$F_a = F_w + F_e + F_c \quad (1)$$

式中,  $F_w$  —— 范德华力, N;  $F_e$  —— 静电力, N;  $F_c$  —— 毛细力, N。

积尘颗粒所受的作用力除范德华力、静电力、毛细力外,还包括颗粒本身的重力和空气浮力。积尘颗粒所受重力和浮力的表达式为:

$$G = \frac{4\pi R^3}{3}(\rho_p - \rho_a)g \quad (2)$$

式中,  $G$  —— 积尘颗粒的净重力, N;  $R$  —— 积尘颗粒的半径, m;  $\rho_p$  —— 积尘颗粒的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_a$  —— 空气密度, kg/m<sup>3</sup>;  $g$  —— 重力加速度, m/s<sup>2</sup>。

毛细力需在湿润环境下才会存在,而湿润环境中静电力会消失或大大减小。本文根据力的发生条件,在考虑积尘颗粒接触变形情况下,建立干燥环境下和湿润环境下积尘颗粒的复合力学模型,如图 1 所示。图中,  $\varphi$  为光伏板表面与水平面的夹角。

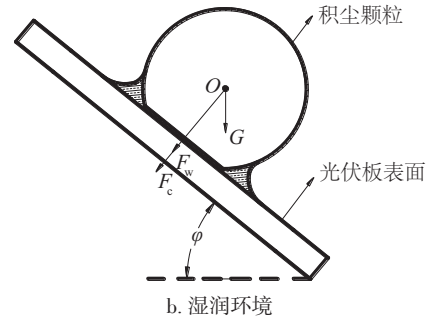
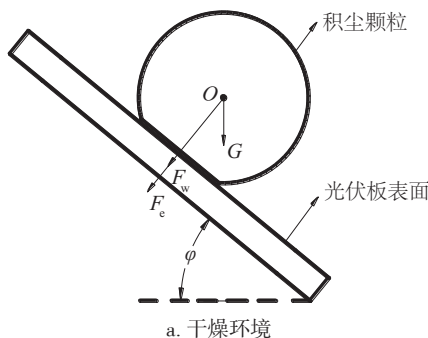


图 1 干燥和湿润环境下积尘颗粒的复合力学模型

Fig. 1 Compound mechanics model of dust particles in dry and moist environment

在干燥环境下积尘颗粒受范德华力、静电力和净重力的作用,而湿润条件下的受力包括范德华力、毛细力、净重力。在本文分析中,空气的干燥或湿润程度通过相对湿度(即空气中实际水汽压强与该温度下饱和水汽压强比值的百分数( $RH\%$ ))来衡量。对于干燥环境与湿润环境的划分,一般将空气相对湿度未超过 60% 时视为干燥环境,将空气相对湿度大于 60% 时视为湿润环境<sup>[17]</sup>。

### 1.2 基于表面能的积尘颗粒粘附力分析

表面能是创造物质表面时对分子间化学键破坏的度量。在固体物理理论中,表面原子比物质内部的原子具有更多能量,因此材料表面相对于材料内部具有更多能量。物体通过表面原子重组和相互间反应,或对周围其他分子或原子的吸附,从而使表面能量降低。物质能量都有自动趋向降低,保持稳定的特点,所以光伏板表面通过吸附周围的积尘颗粒来减小自身表面积,从而降低表面能,保持表面的相对稳定<sup>[12]</sup>。

表面能机理直观揭示积尘颗粒在固体表面粘附的原因,Johnson 等<sup>[13]</sup>在经典 Hertz 接触模型基础上考虑表面能对表面变形的影响,建立 JKR 模型,给出微米级颗粒与其粘附表面的分离力,即微米级颗粒所受的粘附力:

$$F_a = \frac{3}{2}\pi RW_a \quad (3)$$

对于粘附颗粒与表面接触的热力学功  $W_a$ ,求解方程为<sup>[18]</sup>:

$$W_a = \sqrt{\gamma_1 \gamma_2} \quad (4)$$

式中,  $\gamma_1$  —— 接触前微米级颗粒单位面积的表面能, J/m<sup>2</sup>;  $\gamma_2$  —— 接触前物体表面单位面积的表面能, J/m<sup>2</sup>。

能,  $\text{J/m}^2$ 。

热力学功  $W_a$  在不同条件下的取值也各不相同, 积尘颗粒和光伏板表面玻璃大部分物质由  $\text{SiO}_2$  组成, 因此积尘颗粒粘附在光伏板表面可视为两玻璃表面的接触, 并且干燥环境和湿润环境中两玻璃表面间的热力学功  $W_a$  具有不同的取值<sup>[19]</sup>。将颗粒参数代入式(2)中, 求得积尘颗粒所受净重力的数量级为  $10^{-16} \sim 10^{-8} \text{ N}$ , 远小于通过式(3)计算出的积尘颗粒所受的粘附力, 又因为除净重力外其他力的方向都是垂直于光伏组件表面的, 因此图 1 中光伏组件表面与水平面的夹角  $\varphi$  对积尘颗粒的受力并无影响, 在后续分析可将光伏组件表面看作与水平面平行。

在考虑积尘颗粒接触变形的情况下, 颗粒与光伏板表面的接触半径为<sup>[13]</sup>:

$$a = \left( \frac{F_a d}{2K} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

式中,  $d$  —— 积尘颗粒的直径,  $\text{m}$ ;  $K$  —— 复合杨氏模量,  $\text{N/m}^2$ 。

真实环境中的积尘颗粒和光伏板表面并非完全光滑, Greenwood 等<sup>[20]</sup>最早研究粗糙表面接触问题, 将表面粗糙特征简化为多个半球体, 半球体直径相同, 高度为高斯分布。研究结果表明, 即使表面粗糙度很小, 也会使颗粒与平面间的粘附力急剧减小, 因为表面粗糙度会显著减小颗粒与平面间的接触面积, 使粘附力显著降低。根据 Soltani 等<sup>[21]</sup>建立的颗粒从粗糙表面脱离的表达式得考虑粗糙度因素时积尘颗粒粘附力:

$$F_{Ra} = n f_p \pi a_r^2 \exp[-0.6/\Delta_c^2] \quad (6)$$

式中,  $n$  —— 接触面积上的微凸体的数量;  $f_p$  —— 根据 JKR 粘附模型计算的每个表面微凸体的粘附力,  $\text{N}$ ;  $a_r$  —— 考虑粗糙度影响的颗粒与表面之间的接触半径,  $\text{m}$ ;  $\Delta_c$  —— 粗糙度参数。

考虑粗糙度影响时颗粒与表面之间的接触半径的计算公式为:

$$a_r = \frac{1}{2K} n f_p \pi d \exp[-0.6/\Delta_c^2] \quad (7)$$

Fuller 等<sup>[22]</sup>研究粗糙度因素对于橡胶颗粒从硬质基底脱离的影响, 并提出单位面积上的总接触力是两表面间接触的微凸体产生的粘附力的总和, 其中单个微凸体的粘附力  $f_p$  可由式(8)求出:

$$f_p = \frac{3}{2} \pi W_a \beta_r \quad (8)$$

式中,  $\beta_r$  —— 微凸体的半径,  $\text{m}$ 。

积尘颗粒与光伏板接触面积上微凸体的数量与微凸体半径的关系为:

$$n = \left( \frac{0.0029 K^2}{d W_a^2 \beta_r^3} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

根据 JKR 粘附模型, 复合杨氏模量  $K$  的计算公式为:

$$K = \frac{4}{3} \left[ \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right]^{-1} \quad (10)$$

式中,  $\nu_1$ 、 $\nu_2$  —— 积尘颗粒和光伏板表面的泊松比;  $E_1$ 、 $E_2$  —— 积尘颗粒和光伏板表面的杨氏模量,  $\text{N/m}^2$ 。

将式(7)~式(9)代入式(6)中, 则考虑粗糙度因素的积尘颗粒粘附力公式可写为:

$$F_{Ra} = \left( \frac{d}{2K} \right)^2 \left[ 1.5 \pi^2 \left( \frac{0.0029 K^2}{d W_a^2} \right)^{\frac{1}{3}} W_a \exp(-0.6/\Delta_c^2) \right]^3 \quad (11)$$

积尘颗粒的直径是影响颗粒粘附力的重要参数, 孟广双<sup>[23]</sup>指出光伏板表面积尘粒径范围为  $0.355 \sim 126.191 \mu\text{m}$ , 并统计不同粒径范围内积尘粒径的分布规律, 如表 1 所示。

表 1 积尘粒径的分布规律

Table 1 Distribution of dust particle size

范围/ $\mu\text{m}$	比例/%
$0.355 \leq d < 40.00$	80
$40.000 \leq d < 50.000$	10
$50.000 \leq d < 80.000$	7
$80.000 \leq d \leq 126.191$	3

由于光伏板表面积尘粒径跨度较大 ( $0.355 \sim 126.191 \mu\text{m}$ ), 因此需考虑光伏板表面粗糙度的尺寸与积尘颗粒尺寸之间的大小关系。徐则川等<sup>[24]</sup>指出, 如果基体表面具有微观粗糙, 即当凸出部分的高度比粒径小一个数量级时, 真实的颗粒与表面接触面积减小, 附着力相应降低; 当基体表面凸出高度可与粒子大小相比拟时, 这时的真实接触面积再次增大, 导致粒子的附着力增大。王 晶等<sup>[25]</sup>利用原子力显微镜测量了单个玻璃珠颗粒在不同材料

(普通玻璃、硅橡胶、瓷、钢化玻璃)表面的粘附力,并检测这些材料的表面形貌,得到在  $20\ \mu\text{m}\times 20\ \mu\text{m}$  的扫描范围内,钢化玻璃粗糙度均方根值为  $6.85\ \text{nm}$ ,并发现由于钢化玻璃存在大于  $10\ \mu\text{m}$  的大尺度粗糙结构和小于  $10\ \mu\text{m}$  的小尺度粗糙结构,导致该粒径范围内的颗粒与钢化玻璃之间的接触面积增大,粘附力较大。因此,在粒径  $0.355\sim 15.000\ \mu\text{m}$  范围内的积尘颗粒,由于与光伏板表面钢化玻璃的粗糙结构尺寸相当,使二者之间的真实接触面积并未因为粗糙度因素的存在

而减小,在模拟过程中忽略粗糙度因素的影响;而在粒径  $15.000\sim 126.191\ \mu\text{m}$  范围内的积尘颗粒,与光伏板表面钢化玻璃之间的粘附需考虑粗糙度因素的影响。

根据积尘粒径的分布规律,在采用 Monte Carlo 方法模拟计算时将积尘颗粒的直径设置为在特定范围内均匀分布,并参照其分布比例设置不同范围内的颗粒数量,以获得最接近真实积尘环境的颗粒直径分布。积尘颗粒与光伏板表面的其他物理特性参数及其分布特征如表 2 所示。

表 2 积尘颗粒与光伏板表面各参数及其分布特征<sup>[19,21,26]</sup>

Table 2 Parameters and their distribution characteristics of dust particles and photovoltaic panels<sup>[19,21,26]</sup>

参数	分布特征	备注
积尘颗粒杨氏模量 $E_1/\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$	高斯分布	$(69\times 10^9, 3.45\times 10^9)$
光伏板表面杨氏模量 $E_2/\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$	高斯分布	$(69\times 10^9, 3.45\times 10^9)$
积尘颗粒的泊松比 $\nu_1$	高斯分布	$(0.22, 0.011)$
光伏板表面的泊松比 $\nu_2$	高斯分布	$(0.22, 0.011)$
粗糙度参数的倒数 $(1/\Delta_c)$	对数正态分布	$(2.5, 0.2)$

## 2 湍流对于积尘颗粒的气流作用力与力矩

湍流是流体的一种流动状态。流速很小时,流体分层流动,互不混合,称为层流。随着流速的不断增大,其流场中有许多小漩涡,层流被破坏,相邻流层间不但有滑动还有混合。这时的流体做不规则运动,有垂直于流管轴线方向的分速度产生,这种流动称为湍流,又称为乱流、扰流或紊流。

湍流的发生会造成气流的不稳定状态,破坏粘附表面的黏性边界层,并且使气流以最大作用力冲击粘附颗粒。引入系数  $\Gamma$  来表征湍流猝发时气体流速峰值的增量,并且  $\Gamma$  服从均值为 1.84、标准差为 0.135 的高斯分布<sup>[27]</sup>。Ahmadi<sup>[28]</sup>给出湍流场当中粘附颗粒所受的气流曳力:

$$F_h = \frac{C_D \pi f \rho_a d^2 u_M^2}{8C_c} \quad (12)$$

式中,  $C_D$  ——曳力系数,无量纲;  $f$  ——近壁效应校正因子,取  $f=1.7009$ ;  $\rho_a$  ——空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $u_M$  ——积尘颗粒中心处气流速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $C_c$  ——考虑非连续体因素的 Cunningham 校正因子。

Friedlander 给出考虑非连续体因素的 Cunningham 校正因子  $C_c$  的表达式<sup>[29]</sup>:

$$C_c = 1 + K_n [1.257 + 0.4 \exp(-1.1/K_n)] \quad (13)$$

克努森数  $Kn$  的定义式为:

$$Kn = \frac{2\lambda}{d} \quad (14)$$

式中,  $\lambda$  ——空气的平均自由程,取  $\lambda = 6.9 \times 10^{-8}\ \text{m}$ 。

曳力系数可通过 Hinds 给出的方程求得<sup>[30]</sup>:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.678}), & Re \leq 1000 \\ 0.44, & 1000 \leq Re \leq 2 \times 10^5 \end{cases} \quad (15)$$

雷诺数  $Re$  可由气流剪切速度  $u$  求得:

$$Re = \frac{\Gamma \left( \frac{du}{\nu} \right)^2}{2} \quad (16)$$

式中,  $\nu$  ——空气的运动粘度,取  $25\ ^\circ\text{C}$  时空气的运动粘度为  $1.525 \times 10^{-5}\ \text{m}^2/\text{s}$ 。

由于积尘颗粒中心处气流速度  $u_M$  与气流剪切速度  $u$  具有如式(17)所示转换关系:

$$u_M = \frac{\Gamma du^2}{2\nu} \quad (17)$$

将式(13)~式(17)代入式(12),可得气流曳力  $F_h$  与气流剪切速度  $u$  的关系:

$$F_h = \frac{3}{2} \left\{ 1 + 0.15 \left[ \frac{\Gamma}{2} \left( \frac{du}{\nu} \right)^2 \right]^{0.678} \right\} \frac{\Gamma \pi f \rho_a d^2 u^2}{C_c} \quad (18)$$

O'Neill<sup>[31]</sup>建立气流力矩  $M_h$  与气流剪切速度  $u$  之间的关系式:



$$M_h = \frac{\Gamma \pi \rho_a f_m d^3 u^2}{C_c} \quad (19)$$

式中,  $f_m$ ——近壁效应校正因子, 取值为 0.943993。

积尘颗粒在湍流场中的受力除气流曳力  $F_h$ 、气流力矩  $M_h$  外, 还受到气动升力  $F_L$  的作用, Ahmadi 等<sup>[19]</sup>指出气动升力对于粒子分离的影响非常小, 因此本文分析中忽略气动升力的作用。建立气流剪切速度  $u$  与气流曳力  $F_h$  和气流力矩  $M_h$  之间的关系式, 并将其代入积尘颗粒的脱离模型, 可求得积尘颗粒脱离的临界气流剪切速度。

### 3 湍流作用下积尘颗粒的脱离模型

粘附颗粒从物体表面脱离一般有 3 种运动方式, 即拉升、滑动和滚动, 分别对应拉升、滑动和滚动脱离模型。由前文分析可知, 湍流作用下积尘颗粒会受到气流曳力  $F_h$ 、气流力矩  $M_h$  以及粘附力  $F_{Ra}$  的作用(如图 2), 气动升力  $F_L$  对于颗粒脱离的影响可忽略不计, 则积尘颗粒脱离光伏板表面的运动方式只能为滑动或滚动, 分别对应滑动和滚动 2 种脱离模型, 而 Ibrahim 等<sup>[32]</sup>指出, 当微米级颗粒通过滑动方式脱离物体表面时, 接触面之间的静摩擦系数应小于 0.03, 但这个条件是无法达到的。因此, 积尘颗粒是以滚动方式脱离光伏板表面的, 下文建立湍流作用下积尘颗粒的滚动脱离模型。

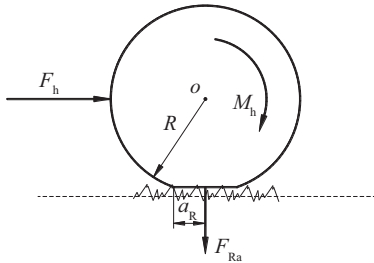


图2 湍流对于积尘颗粒的作用示意图

Fig. 2 Schematic diagram of effect of turbulence on dust particles

根据 Soltani 等<sup>[21]</sup>研究, 粘附颗粒滚动去除的条件为:

$$F_h \frac{d}{2} + M_h \geq F_{Ra} a_R \quad (20)$$

式(20)左侧的气流曳力  $F_h$  和气流力矩  $M_h$  均为气流剪切速度  $u$  的函数; 右侧  $F_{Ra}$  和  $a_R$  跟积尘颗粒与光伏板表面的材料特性有关, 因此能建立起气流剪切速度与光伏板表面积尘特性之间的联系, 得到

湍流作用下积尘颗粒脱离光伏板的临界气流剪切速度。

### 4 积尘颗粒脱离的 Monte Carlo 模拟与讨论

通过分析典型光伏板的积尘环境, 确定积尘颗粒与光伏板表面各随机变量的分布特点, 根据随机变量分布特点(见表 1、表 2)产生随机数, 并将各随机数引入建立的积尘颗粒脱离模型中, 最终采用 Monte Carlo 方法对脱离模型重复进行  $10^4$  次模拟计算, 每次模拟计算均依照设定的概率分布函数对模型中的随机变量进行抽样, 最后对模拟结果进行统计得到不同条件下积尘颗粒脱离光伏板表面的临界气流剪切速度。

将在湍流冲击下脱离光伏板表面的积尘颗粒数量与湍流冲击前光伏板表面上的总颗粒数之比定义为去除率, 分别以积尘颗粒脱离的临界气流剪切速度和去除率为横、纵坐标, 得出不同湿度环境下气流剪切速度与积尘颗粒去除率的关系, 如图 3 所示。

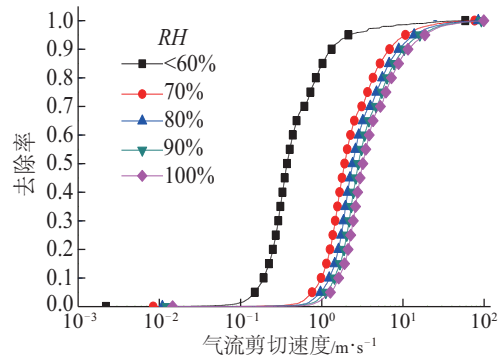


图3 不同湿度环境气流剪切速度与积尘颗粒去除率的关系

Fig. 3 Relationship between shear velocity of airflow and removal rate of dust particles in different humidity environments

根据 Nitschke 等<sup>[33]</sup>得出的微米级颗粒所受粘附力与空气相对湿度的关系, 结合本文中积尘颗粒的粘附力公式(式(3)), 采用线性插值法计算得到空气相对湿度在小于 60%、等于 70%、80%、90% 和 100% 时接触表面的热力学功  $W_a$  分别取 0.0141、0.2007、0.3105、0.4202、0.5300 J/m<sup>2</sup>。由图 3 可得, 不同湿度条件下积尘颗粒脱离光伏板表面的临界气流剪切速度也不同。在干燥条件下, 积尘颗粒脱离

的临界气流剪切速度范围为 0.0022~58.4598 m/s,并且要实现 90%积尘颗粒去除率,所需的气流剪切速度为 1.3223 m/s;在湿润条件下,积尘颗粒脱离的临界气流剪切速度范围为 0.0084~98.9093 m/s,并且要实现 90%积尘颗粒去除率,所需的气流剪切速

度分别为 6.8462、8.8530、10.2938、11.5258 m/s。因此,随着空气相对湿度的增加,光伏板表面的积尘颗粒更难以去除,需使颗粒脱离的临界剪切流速显著提高。在同等去除率前提下不同湿度环境所需气流剪切速度如表 3 所示。

表 3 同等去除率前提下不同湿度环境所需气流剪切速度  
Table 3 Shear velocity of air flow required for different humidity environments when removal rate is equal

去除率	<i>RH</i> <60%所需 气流剪切速度 $u_1/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	<i>RH</i> =70%所需 气流剪切速度 $u_2/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	<i>RH</i> =80%所需 气流剪切速度 $u_3/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	<i>RH</i> =90%所需 气流剪切速度 $u_4/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	<i>RH</i> =100%所需 气流剪切速度 $u_5/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
0.1	0.1924	0.9843	1.2390	1.4321	1.6172
0.2	0.2501	1.2648	1.6063	1.8769	2.1063
0.3	0.2908	1.4682	1.8567	2.1775	2.4409
0.4	0.3287	1.6621	2.0869	2.4534	2.7719
0.5	0.3739	1.9125	2.4014	2.8234	3.2095
0.6	0.4413	2.2560	2.8626	3.3805	3.8411
0.7	0.6103	3.1073	3.9589	4.6570	5.2573
0.8	0.8492	4.2836	5.5569	6.3727	7.2130
0.9	1.3223	6.8462	8.8530	10.2938	11.5258
1.0	58.4598	76.3062	84.5900	92.3761	98.9093

显然,积尘颗粒脱离光伏板表面所需临界气流剪切速度会随着环境湿度的增大而增大。在相同去除率的前提下,湿润条件下颗粒脱离的临界气流剪切速度是干燥条件下的 1.31~8.72 倍,说明湿润环境下产生的毛细力对积尘颗粒与光伏板表面之间的粘附作用影响巨大,也验证了 Ahmadi<sup>[19]</sup>得出的“颗粒与平面间存在毛细作用力时,颗粒脱离的临界剪切流速显著提高”的实验结论。

## 5 结 论

基于 Monte Carlo 分析方法,以积尘颗粒脱离光伏板表面吸附的临界气流剪切速度为研究主线,建立积尘颗粒的吸附模型和脱离模型。通过研究,得到以下主要结论:

1)在积尘颗粒脱离光伏板表面吸附的临界气流剪切速度计算过程中存在诸多随机变量,而且各变量的取值不同会对模拟结果造成较大的影响。由于光伏板表面的积尘颗粒直径跨度较大,导致临界气流剪切速度在较大范围内波动,在干燥条件下即不存在毛细力时为 0.0022~58.4598 m/s,湿润条

件下为 0.0084~98.9093 m/s。

2)同等去除率要求下,湿润环境中积尘颗粒脱离所需的临界气流剪切速度约为干燥环境中的 1.31~8.72 倍,说明湿润环境下积尘颗粒与光伏板表面之间的粘附作用主要表现为毛细力,即毛细力的出现会使颗粒脱离的临界气流剪切速度显著增大。

3)利用 Monte Carlo 方法来确定颗粒脱离的临界气流剪切速度可充分考虑湿度环境和积尘颗粒与光伏板表面的物理特性参数的随机变化,较之定性分析方法更具说服力,因而有助于建立基于高频气流的光伏组件表面除尘装置开发的相关理论。

### [参考文献]

[1] 桂 宁,董彦松,蒋米敏,等.基于建筑信息模型的光伏设备自动优化铺设研究[J].浙江理工大学学报:自然科学版,2016, 35(3): 403—408.  
[2] Gui Ning, Dong Yansong, Jiang Mimin, et al. Research on automatic optimization and laying of BIM-based PV equipment[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University: Natural Science, 2016, 35(3): 403—408.  
[2] Mekhilef S, Saidur R, Kamalisarvestani M. Effect of

- dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(5): 2920—2925.
- [3] Jiang H, Lu L, Sun K. Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic (PV) modules [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(25): 4299—4304.
- [4] 居发礼. 积灰对光伏发电工程的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [4] Ju Fali. Study on the effect of photovoltaic power generation project by dust [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [5] Kaldellis J K, Fragos P. Ash deposition impact on the energy performance of photovoltaic generators [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2011, 19(4): 311—317.
- [6] 张 风, 白建波, 郝玉哲, 等. 光伏组件表面积灰对其发电性能的影响[J]. *电网与清洁能源*, 2012, 28(10): 82—86.
- [6] Zhang Feng, Bai Jianbo, Hao Yuzhe, et al. Effect of airborne dust deposition on PV module surface on its power generation performance [J]. *Power System and Clean Energy*, 2012, 28(10): 82—86.
- [7] Mazumder M, Horenstein M, Stark J, 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.
- [8] 孟伟君, 朴铁军, 司德亮, 等. 灰尘对光伏发电的影响及组件清洗研究[J]. *太阳能*, 2015, (2): 22—27, 34.
- [8] Meng Weijun, Piao Tiejun, Si Deliang, et al. Study on the influence of dust on photovoltaic power generation and component cleaning [J]. *Solar Energy*, 2015, (2): 22—27, 34.
- [9] 刘 锋, 孙 震, 姚春利, 等. 光伏电池板清洁技术研究综述[J]. *清洗世界*, 2016, 32(5): 26—29.
- [9] Liu Feng, Sun Zhen, Yao Chunli, et al. Review on clean technology research of photovoltaic panels [J]. *Cleaning World*, 2016, 32(5): 26—29.
- [10] Soemoto K, Wakimoto T, Katoh K. Removal of fine particles on a wall by high-frequency turbulence added air flow [J]. *International Journal of Flow Control*, 2013, 5(1): 47—57.
- [11] Song S, Soemoto K, Wakimoto T, et al. A study on removal of infinitesimal particles on a wall by high speed air jet [J]. *Journal of JSEM*, 2014, 14(Special): s94—s100.
- [12] 李 明. 固体微颗粒粘附与清除的机理及表面保洁技的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [12] Li Ming. Research on mechanism of solid particle adhesion and remove from surface and dustproof technology of surface [D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [13] Johnson K L, Kendall K, Roberts A D. Surface energy and contact of elastic solids [J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 1971, 324(1558): 301—313.
- [14] Derjaguin B V, Muller V M, Toporov Y P. Effect of contact deformation on the adhesion of particles [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1975, 53(2): 314—326.
- [15] Maugis D. Adhesion of spheres: The JKR- DMT transition using a Dugdale model [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1992, 150(1): 243—269.
- [16] Salazar-Banda G R, Felicetti M A, Gonçalves J A S, et al. Determination of the adhesion force between particles and a flat surface, using the centrifuge technique [J]. *Powder Technology*, 2007, 173(2): 107—117.
- [17] 周 环. 潮湿环境土遗址的加固保护研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [17] Zhou Huan. Study on consolidation and conservation of earthen sites in moisture circumstances [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [18] Israelachvili J N. Intermolecular and surface forces [M]. London: Academic Press, 1992, 212—215.
- [19] Ahmadi G, Guo S, Zhang X. Particle adhesion and detachment in turbulent flows including capillary forces [J]. *Particulate Science and Technology*, 2007, 25(1): 59—76.
- [20] Greenwood J A, Williamson J B P. Contact of nominally flat surfaces [J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1966, 295(1442): 300—319.
- [21] Soltani M, Ahmadi G. On particle adhesion and removal mechanisms in turbulent flows [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 1994, 8(7): 763—785.
- [22] Fuller K N G, Tabor D. The effect of surface roughness on the adhesion of elastic solids [J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1975, 345(1642): 327—342.
- [23] 孟广双. 荒漠光伏太阳能电池板表面灰尘作用机理及其清洁方法研究[D]. 西宁: 青海大学, 2015.
- [23] Meng Guangshuang. Research on mechanism of dust

- particle adhesion and removal from solar panel surface in desert area[D]. Xining: Qinghai University, 2015.
- [24] 徐则川, 吴志明. 减少涂层表面粉尘附着的初步探索(二)[J]. 红外技术, 1997, 19(3): 22—24.
- [24] Xu Zechuan, Wu Zhiming. A primitive investigation of reducing dust adhesion on surfaces( II ) [J]. Infrared Technology, 1997, 19(3): 22—24.
- [25] 王 晶, 李 燕, 梁曦东, 等. 利用原子力显微镜探究污秽颗粒在绝缘子表面的粘附力[J]. 高电压技术, 2013, 39(6): 1352—1359.
- [25] Wang Jing, Li Yan, Liang Xidong, et al. Research of adhesion force between dust and insulator surface using atomic force microscope[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1352—1359.
- [26] Ibrahim A H, Dunn P F, Qazi M F. Experiments and validation of a model for microparticle detachment from a surface by turbulent air flow [J]. Journal of Aerosol Science, 2008, 39(8): 645—656.
- [27] Soltani M, Ahmadi G. Direct numerical simulation of particle entrainment in turbulent channel flow[J]. Physics of Fluids, 1994, 7(3): 647—657.
- [28] Ahmadi G, Guo S. Bumpy particle adhesion and removal in turbulent flows including electrostatic and capillary forces[J]. Journal of Adhesion, 2007, 83(3): 289—311.
- [29] Friedlander S K. Smoke, dust and haze: Fundamentals of aerosol behavior[M]. New York: Wiley- Interscience, 1977, 95—98.
- [30] Hinds W C. Aerosol technology, properties behavior and measurement of airborne particles[M]. New York: John Wiley and Sons, 1982, 55—65.
- [31] O'Neill M E. A sphere in contact with a plane wall in a slow linear shear flow [J]. Chemical Engineering Science, 1968, 23(11): 1293—1298.
- [32] Ibrahim A H, Dunn P F, Brach R M. Microparticle detachment from surfaces exposed to turbulent air flow: Controlled experiments and modeling [J]. Journal of Aerosol Science, 2003, 34(6): 765—782.
- [33] Nitschke D, Schmidt E. A new approach to model there-entrainment of settled particles based on film theory of fluidmass transfer processes [J]. Particle and Particle Systems, 2009, 26(1-2): 58—68.

## MONTE CARLO SIMULATION OF PARTICLE ADHESION ON SURFACE OF PV PANELS UNDER TURBULENT FLOWS

Du Xiaoqiang<sup>1,2</sup>, Liu Enxiao<sup>1</sup>, Wu Chuanyu<sup>1,2</sup>, Xu Nannan<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of the surface cleaning of solar panels, a high frequency air flow technique was proposed to remove dust particles. By using the classical adsorption mechanics theory and JKR model, the mechanics model of particle adsorption on the photovoltaic plate surface under different humidity conditions were established. By analyzing and examining the dust environment of typical photovoltaic panels, the physical parameters of particles and photovoltaic panels and their distributions were determined. Then the parameter distributions were introduced into the mechanics model. According to the motion of the particles being detached from the surface under turbulent flows, a computational model for the detachment of particles from the surface under turbulence was established. Finally Monte Carlo simulation method was used to calculate the critical shear velocity of the flow to remove the dust from the photovoltaic panels.

**Keywords:** dust; adhesion; solar energy; turbulent flow; Monte Carlo methods