

旱区光伏组件疏水性表面自清洁研究与参数优选

张 东^{1,2}, 俞 凯^{1,2}, 闫承涛^{1,2}, 刘 畅^{1,2}, 申永前^{3,4}, 安周建^{1,2}

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2. 甘肃省生物质能与太阳能互补供能系统重点实验室, 兰州 730050;
3. 兰州理工大学材料科学与工程学院, 兰州 730050; 4. 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与
再利用国家重点实验室, 兰州 730050)

摘 要: 表面积尘会严重影响光伏组件的发电效率, 可涂覆疏水性涂层提高其自清洁能力来降低积尘量。该研究将灰尘颗粒视为规则球体, 基于颗粒接触力学理论, 建立光伏组件表面与灰尘颗粒的黏附力学模型, 简化光伏组件自清洁时灰尘的受力模型。采用不同疏水性涂层来改变光伏组件表面参数, 计算得到光伏组件的自清洁性能与灰尘粒径、表面性能间的关系。研究表明: 1) 光伏组件表面自清洁性能与表面材料弹性模量和摩擦系数相关。2) 清洁 200 μm 粒径以下的灰尘, 光伏组件的表面弹性模量对自清洁性能起主要作用; 清洁 200 μm 粒径以上的灰尘, 表面摩擦系数起主要作用。3) 涂覆不同的疏水性涂层, 光伏组件可自清洁不同粒径范围的灰尘。4) 以中国西北地区为例, 灰尘粒径分布为 250~500 μm , 可选择涂覆弹性模量在 0~2 700 MPa 内, 摩擦系数为 0.1 的疏水性涂层以提高光伏组件的自清洁能力。研究结果可为旱区光伏电站制备及涂覆疏水性涂层除尘提供理论依据。

关键词: 太阳能电池; 灰尘; 疏水性; 涂层; 自清洁; 参数优选

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.17.025

中图分类号: TK519

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-17-0232-08

张东, 俞凯, 闫承涛, 等. 旱区光伏组件疏水性表面自清洁研究与参数优选 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 232-239.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.17.025 <http://www.tcsae.org>

Zhang Dong, Yu Kai, Yan Chengtao, et al. Hydrophobic surface self-cleaning investigation and parameter selection of PV modules in arid areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(17): 232-239. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.17.025 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

为实现碳达峰碳中和, 中国提出要在“十四五”期间把光、风、水、核等清洁能源供应体系建设好, 加快实施可再生能源替代行动^[1]。太阳能作为可再生能源中的主力军, 截至 2021 年底国内的太阳能光伏发电并网装机容量达到 3.06 亿 kW^[2], 稳居全球首位。中国光伏电站主要建在光照资源丰富的沙漠地区, 光伏组件表面极易沉积灰尘, 减少了太阳光的透射, 严重影响发电效率, 造成能量损失^[3-7]。研究表明, 灰尘沉积造成的光伏组件日平均发电损失率可超过 1%^[4], 光伏电站一年不除尘会造成发电量损失 12%^[7]。

为解决光伏组件表面积尘问题, 学者针对灰尘在光伏组件表面的黏附机理做了大量理论和试验研究^[8-10], 发现清除光伏组件表面的灰尘颗粒需克服颗粒与表面间的黏附作用力, 且黏附作用力与表面的物理属性密切相关。现有清灰方式主要为定期用水清洁组件表面的灰尘^[11-12], 该方式耗水量大, 不适合荒漠地区的光伏电站。有研究发现在光伏组件表面涂覆一层疏水性涂层会减少灰尘的沉积^[13-18]。由

于物体表面涂覆一层疏水性涂层后, 材料表面的基本形貌特征和表面性能特性发生改变^[19-23], 表面灰尘颗粒的黏附力也发生了改变, 影响了物体表面的自清洁能力。研究表明, 疏水性涂层能明显降低光伏组件表面的灰尘沉积^[18]。在相同环境条件下, 具有疏水性涂层的光伏组件的可见光透过率和发电效率与无涂层的相比分别提高了 20.3%, 10.1%^[24]。与定期用水清洁相比, 光伏组件涂覆疏水性涂层减少灰尘沉积的方法更适合荒漠光伏电站。现有研究主要为涂层前后光伏组件的可见光透过比和输出功率^[14, 17-18, 24], 有关疏水性涂层表面性能对灰尘黏附力的影响研究还十分匮乏。

基于以上分析, 该文结合颗粒接触力学理论研究疏水性涂层表面性能对光伏组件表面自清洁能力的影响, 得到表面性能与灰尘间的黏附规律, 拟为不同地域特征的光伏电站选择表面性能合适的疏水性涂层, 为提高光伏组件的自清洁能力提供理论依据。

1 光伏组件表面灰尘颗粒的力学模型

灰尘颗粒依靠与光伏组件表面间的作用力静止在表面, 故清灰的实质就是克服灰尘与表面的作用力, 使灰尘颗粒脱离表面。光伏组件的自清洁就是灰尘颗粒依靠自身重力克服光伏组件表面的作用力, 使其脱离表面。光伏组件的自清洁能力与表面灰尘颗粒的受力密切相关。

1.1 灰尘颗粒在光伏组件表面的力学分析

灰尘颗粒静止在光伏组件表面的受力分析如图 1a 所

收稿日期: 2022-07-01 修订日期: 2022-08-21

基金项目: 甘肃省教育厅青年博士基金项目 (2021QB-046); 甘肃省教育厅产业支撑计划项目 (2021CYZC-27); 兰州理工大学红柳优秀青年教师支持计划 (201809)

作者简介: 张东, 博士, 副教授, 研究方向为太阳能利用。

Email: zhdgn@126.com

示。干旱地区气候干燥，光伏组件表面上的灰尘含水率低。以西北地区为例，仅为 0.26%，可认为光伏组件表面始终保持干燥，故灰尘颗粒与光伏组件表面之间的毛细作用力暂不考虑^[8]。孟广双等^[8]研究发现灰尘颗粒所受的静电力远小于范德华力，因此，灰尘颗粒与光伏组件表面间的作用力主要考虑范德华力。

颗粒间的分子间范德华力^[25]为

$$F_{VDW} = -\frac{dU}{dz} \quad (1)$$

式中 U 为分子间的 Lennard-Jones 势：

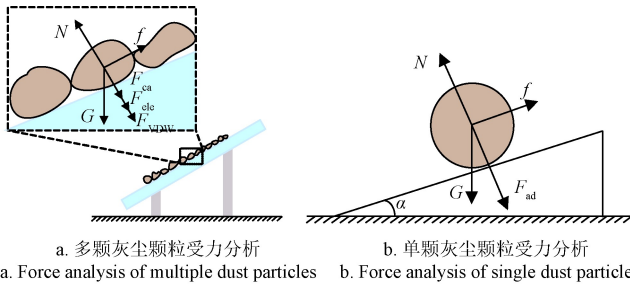
$$U = \frac{A}{z^{12}} - \frac{B}{z^6} = 4U_0 \left[\left(\frac{a}{z} \right)^{12} - \left(\frac{a}{z} \right)^6 \right] \quad (2)$$

其中

$$U_0 = -U_{\min} = \frac{B}{2z_0^6} \quad (3)$$

$$z_0 = \left(\frac{2A}{B} \right)^{1/6} = 2^{1/6} a \approx 1.12a \quad (4)$$

式中 a 为分子半径，m； z 为分子间距，m； A 为分子势参数，J·m¹²， B 为 London 常数，取值为 10⁻⁷⁹ J·m⁶。



注：G 为灰尘颗粒的重力，N；N 为灰尘颗粒受到的支持力，N；f 为灰尘颗粒受到的摩擦力，N；F_{ca} 为灰尘颗粒受到的毛细作用力，N；F_{de} 为灰尘颗粒受到的静电力，N；F_{VDW} 为灰尘颗粒受到的范德华力，N；F_{ad} 为黏附力，N， α 为斜面倾角，(°)。
Note: G is the gravity of dust particles, N; N is the supporting force on dust particles, N; f is the friction on dust particles, N; F_{ca} is the capillary force on dust particles, N; F_{de} is the electrostatic force on dust particles N; F_{VDW} is the Van der Waals force on dust particles, N; F_{ad} is the adhesion force, N; α is the inclination angle of the inclined plane, (°).

图 1 灰尘颗粒静止在光伏组件表面的受力分析

Fig.1 Force analysis of static dust particles on the surface of photovoltaic module

前文已分析在干旱地区的灰尘颗粒与光伏组件表面间主要考虑范德华力。为便于分析，取单颗灰尘颗粒并将其视为规则的球体。颗粒间的接触区域形状常常未知，无法将颗粒间的分子间范德华力直接积分得到颗粒间的总黏附力^[25]。依据已有的颗粒接触力学模型，例如 Hertz 理论^[26]、Johnson-Kendall-Roberts(JKR)理论^[26]、Derjaguin-Müller-Toporpv(DMT)理论^[26]等，将灰尘颗粒与光伏组件表面间的分子间范德华力简化为颗粒接触力，得到颗粒与表面间的总黏附力 F_{ad} 。因此，灰尘颗粒与光伏组件表面间的主要作用力为支持力 N 、摩擦力 f 和黏附力 F_{ad} 。

由图 1b 的受力分析可知，光伏组件表面的自清洁过程就是灰尘颗粒的重力分力 G_{down} (方向为平行斜面向下)

克服摩擦力 f 将灰尘颗粒带离光伏组件表面的过程。摩擦力 f 的大小与灰尘颗粒受到的支持力 N 和摩擦系数 μ 密切相关。由于灰尘颗粒在垂直斜面方向上受力平衡，即其受到的支持力 N 、黏附力 F_{ad} 和重力分力 G_{ver} (方向为垂直斜面向下) 三者平衡，通过黏附力 F_{ad} 和重力分力 G_{ver} 可求得支持力 N 。影响光伏组件自清洁的主要因素可认为是灰尘颗粒的黏附力 F_{ad} 、重力分力 G_{ver} 和表面的摩擦系数 μ 。其中，灰尘颗粒的重力分力 G_{ver} 与表面倾角 α 和灰尘重力 G 有关，但光伏组件的倾角一般保持不变。以兰州地区为例，倾角一般为 36°^[27]。

1.2 灰尘颗粒与光伏组件表面之间的黏附力模型

上述提及的颗粒接触力学模型，理论严谨但求解过程繁琐。在保证较小误差的前提下，实际应用中会对模型进行简化。软球模型就是常用的简化模型之一^[26]，其把颗粒间的接触类比成弹簧振子的阻尼运动，运动方程^[26]为

$$m\ddot{x} + \eta\dot{x} + kx = 0 \quad (5)$$

式中 x 为偏移平衡位置的位移，m； m 是弹簧振子的质量，kg； η 和 k 分别为弹簧阻尼系数和弹性系数。软球模型将颗粒间的法向和切向接触力简化为弹簧、阻尼器和滑动器等，如图 2 所示。

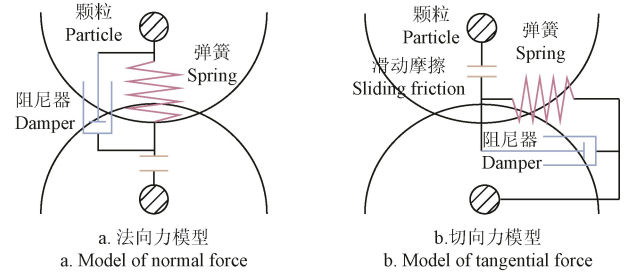


图 2 颗粒间法向接触力和切向接触力的简化模型

Fig.2 Simplified model of normal force and tangential force between particles

颗粒间的法向接触力 F_n 和切向接触力 F_t ^[26]可表示为

$$F_n = -k_n x_n - \eta_n v_n \quad (6)$$

$$F_t = -k_t x_t - \eta_t v_t \quad (7)$$

式中 x_n 和 x_t 分别为接触点的法向位移和切向位移，m； v_n 和 v_t 分别为接触点的法向速度和切向速度，m/s； k_n 和 k_t 分别为颗粒的法向弹性系数和切向弹性系数； η_n 和 η_t 分别为颗粒的法向阻尼系数和切向阻尼系数。

本文主要研究灰尘颗粒静止在光伏组件表面上的情况，不考虑颗粒切向运动，颗粒法向弹性系数 k_n 可通过 Hertz 接触理论^[26]确定：

$$k_n = \frac{4}{3} \left(\frac{1-\nu_i^2}{E_i} + \frac{1-\nu_j^2}{E_j} \right)^{-1} \left(\frac{R_i + R_j}{R_i R_j} \right)^{-1/2} \quad (8)$$

式中 E 为颗粒材料的弹性模量，MPa； ν 为颗粒材料的泊松比； R 为颗粒半径，m；下标 i 、 j 分别为发生接触的颗粒 i 和颗粒 j 。

当弹簧振子 (颗粒) 处于临界阻尼状态，颗粒的动能会以最快速度衰减，此时的法向阻尼系数 η_n ^[26]为

$$\eta_n = 2\sqrt{mk_n} \quad (9)$$

若颗粒与平板接触, 平板半径可近似为无穷大, 法向弹性系数 k_n 可简化为

$$k_n = \frac{4}{3} \left(\frac{1 - \nu_{\text{plane}}^2}{E_{\text{plane}}} + \frac{1 - \nu_{\text{particle}}^2}{E_{\text{particle}}} \right)^{-1} \left(\frac{1}{R_{\text{particle}}} \right)^{-1/2} \quad (10)$$

式中 E_{plane} 和 E_{particle} 分别为平板和颗粒材料的弹性模量, MPa; ν_{plane} 和 ν_{particle} 分别为平板和颗粒材料的泊松比; R_{particle} 为颗粒半径, m。

光伏组件表面与灰尘颗粒之间的黏附力 F_{ad} 可通过软球模型的法向接触力 F_n 求得, 即:

$$F_{\text{ad}} = -\frac{4}{3} \left(\frac{1 - \nu_{\text{plane}}^2}{E_{\text{plane}}} + \frac{1 - \nu_{\text{particle}}^2}{E_{\text{particle}}} \right)^{-1} \left(\frac{1}{R_{\text{particle}}} \right)^{-1/2} x_n - 2\sqrt{mk_n} \nu_n \quad (11)$$

灰尘颗粒的黏附力 F_{ad} 和表面的摩擦系数 μ 与光伏组件表面的性质相关。从式 (11) 可知, 表面材料的弹性模量 E_{plane} 和泊松比 ν_{plane} 是影响黏附力 F_{ad} 的主要表面性能。现有疏水性涂层的常用制备方法主要为涂覆法, 其原理是在基底表面喷涂或者沉积一层具有低表面能的疏水性涂料, 使表面具备超疏水效果^[28]。涂覆法会降低基底表面能, 改变灰尘颗粒与表面间的黏附作用使颗粒不易黏附在表面。为提高涂层的疏水性, 涂覆的疏水性涂料含有纳米颗粒会在表面产生微观结构的疏水性涂层, 改变表面粗糙度, 影响表面摩擦系数。本文建立的模型式 (11) 适用于对涂覆法制备得到的疏水涂层进行参数优选。研究表面的弹性模量 E_{plane} 、泊松比 ν_{plane} 和摩擦系数 μ 对光伏组件自清洁的影响, 为制备疏水性涂层提供理论依据。

1.3 模型验证及参数设置

根据相关文献^[9]得到无疏水性涂层光伏组件表面与灰尘颗粒之间的相关参数, 如表 1 所示。

表 1 无疏水性涂层光伏组件表面与灰尘颗粒间的相关参数
Table 1 Relevant parameters between the surface of dust particles and photovoltaic module without hydrophobic coating

参数 Parameter	数值 Values
灰尘颗粒弹性模量 Elastic modulus of dust particles E_{particle} /MPa	5 300
光伏组件表面弹性模量 Surface elastic modulus of photovoltaic (PV) module E_{plane} /MPa	5 500
灰尘颗粒泊松比 Poisson's ratio for dust particles ν_{particle}	0.42
光伏组件表面泊松比 Poisson's ratio of PV module surface ν_{plane}	0.25
灰尘颗粒密度 Dust particle density ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 000
重力加速度 Gravity acceleration g /($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	9.78
光伏组件表面摩擦系数 Surface friction coefficient of PV module μ	0.40

依据表 1 参数和式 (11), 计算得到不同粒径灰尘静止在无涂层光伏组件表面上所受到的黏附力。并与柳冠青^[25]、Wang 等^[29]测量得到粒径为 6×10^{-6} 、 13.4×10^{-6} 和 16.9×10^{-6} m 颗粒的黏附力进行对比, 结果如图 3 所示, 由于灰尘颗粒实际是非规则球体、受力点多且复杂, 而本文模型对灰尘的形状和受力均进行了简化, 模型模拟的黏附力结果与文献中测量结果^[25, 29]的误差为 20%~

40%, 范围虽偏大, 但均在同一数量级。故本文建立的光伏组件表面灰尘颗粒力学模型具有一定的可靠性。

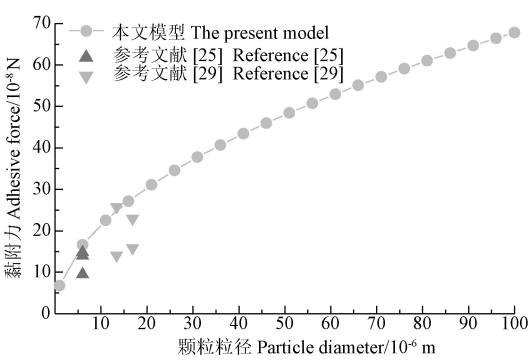


图 3 颗粒粒径与黏附力之间的关系
Fig.3 Relationship between particle size and adhesion force of particles

表面涂覆上疏水性涂层后, 表面属性会变小、不变或变大, 弹性模量 E_{plane} 、泊松比 ν_{plane} 和摩擦系数 μ 选择符合 3 种情况的属性数值作为典型情况, 研究具有疏水性涂层的光伏组件的自清洁能力。

陶氏环球技术公司^[30]研发的一种疏水涂料的弹性模量仅为 100 MPa。近年来为了提高疏水性都会在疏水涂层里加入纳米二氧化硅^[19], 而二氧化硅的弹性模量高达 73 000 MPa。表面弹性模量的三种典型数值可选为 100、5 500 和 73 000 MPa。有关于疏水性涂层的泊松比少有研究, 通常认为材料泊松比的范围在 0~0.5 之间^[31], 疏水性涂层的泊松比选择 0.1、0.25 和 0.5 作为 3 种典型数值。王金燕^[19]研究和制备疏水性涂层时发现其摩擦系数的范围在 0.1~0.4 之间。为了使研究疏水性涂层摩擦系数对自清洁的影响结果更具对比性, 将摩擦系数范围从 0.1~0.4 扩大为 0.1~0.6, 并以等距离选择 0.2, 0.4 和 0.6 作为 3 种典型值进行对比分析。

2 结果与分析

2.1 涂层表面属性对灰尘黏附力的影响

光伏组件表面积尘的粒径均小于 $500 \mu\text{m}$ ^[32], 但在 0~ $500 \mu\text{m}$ 范围内黏附力变化不显著, 为使研究结果更直观, 将粒径研究范围扩大到 0~ $1\,000 \mu\text{m}$ 。

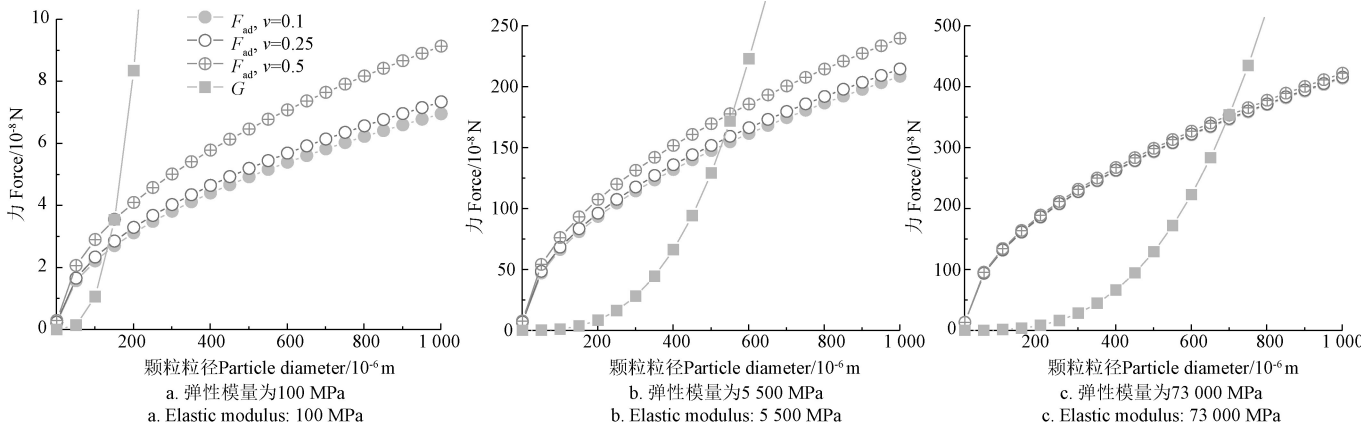
表面弹性模量 E_{plane} 、泊松比 ν_{plane} 在 3 种不同的典型情况下, 计算得到黏附力和重力与灰尘颗粒粒径之间的关系, 如图 4 所示。

由图 4 可知, 在不论何种弹性模量、泊松比的情况下, 随着灰尘粒径的增加, 黏附力的增加趋势越来越平缓, 重力的增加趋势越来越陡峭。当灰尘粒径增加到某一值时, 重力将大于灰尘颗粒的黏附力, 即 $G > F_{\text{ad}}$ 。若灰尘粒径远大于该粒径, 需主要考虑重力与斜面之间的相互作用, 符合颗粒物质间的力学规律^[26]。该粒径值越大, 表明满足 $G < F_{\text{ad}}$ 的灰尘粒径范围越广, 说明表面能黏附更大粒径的灰尘颗粒, 即对灰尘颗粒的黏附作用更强。可根据重力基本计算法和式 (11) 得到灰尘颗粒的临界半径为

$$R_{\text{particle}} > \left[\left(\frac{1 - \nu_{\text{plane}}^2}{E_{\text{plane}}} + \frac{1 - \nu_{\text{particle}}^2}{E_{\text{particle}}} \right)^{-1} x_n / (\rho \pi g) \right]^{\frac{2}{5}} \quad (12)$$

式中 x_n 取灰尘和表面分子间平均间距, 取 $2.343 \times 10^{-8} \text{m}$ ^[8]。
根据式 (12) 计算不同表面性能下, 灰尘颗粒不同的临界粒径, 如表 2 所示。表面弹性模量越大, 重力大于黏附力的灰尘颗粒临界粒径越大, 说明灰尘的黏附效

果好, 且与表面弹性模量成正相关。在同一弹性模量下, 表面泊松比的改变对该临界粒径影响不大。由图 4 可知, 同一粒径下, 表面弹性模量和泊松比越小, 灰尘颗粒的黏附力越小。与弹性模量相比, 泊松比对灰尘颗粒黏附力的影响极小。表面弹性模量是影响灰尘颗粒黏附力大小的主要原因, 弹性模量越大, 灰尘黏附力越大, 不利于光伏组件表面的自清洁。



注: F_{ad} 为灰尘颗粒受到的黏附力, N; G 为灰尘颗粒的重力, N; ν 为表面泊松比。
Note: F_{ad} is the adhesion force on dust particles, N; G is the gravity of dust particles, N; ν is the surface Poisson ratio.

图 4 不同表面性能对灰尘颗粒粒径与黏附力和重力之间的关系
Fig.4 The relationship between particle size and adhesion and gravity under different surface properties

表 2 重力大于黏附力的灰尘颗粒临界粒径		
Table 2 Critical particle size of dust particles with gravity greater than adhesion		
表面弹性模量 Surface elastic modulus/MPa	表面泊松比 Surface Poisson's ratio	灰尘颗粒临界粒径 Critical particle size of dust particles/ 10^{-6} m
100	0.1	136
	0.25	139
	0.5	151
5 500	0.1	529
	0.25	535
	0.5	559
73 000	0.1	696
	0.25	697
	0.5	701

2.2 涂层表面属性对灰尘摩擦力的影响

光伏组件的自清洁能力与灰尘颗粒受到的摩擦力 f 和重力分力 G_{down} 的平衡关系相关, 即 $G_{\text{down}} > f$ 时光伏组件自清洁。灰尘颗粒粒径越小, 对应的重力分力 G_{down} 大于摩擦力 f , 说明光伏组件的自清洁能力越强, 即可清洁大于该粒径的所有灰尘颗粒。根据重力、摩擦力基本计算法和式 (11), 得到重力分力 G_{down} 大于摩擦力 f 的灰尘临界半径为

$$R_{\text{particle}} > \left[\frac{\mu \left(\frac{1 - \nu_{\text{plane}}^2}{E_{\text{plane}}} + \frac{1 - \nu_{\text{particle}}^2}{E_{\text{particle}}} \right)^{-1} x_n}{(\rho \pi g \sin \alpha - \mu \rho \pi g \cos \alpha)} \right]^{\frac{2}{5}} \quad (13)$$

由式 (13) 可知, $G_{\text{down}} > f$ 时的灰尘临界半径与摩擦

系数, 表面弹性模量和泊松比相关。由上文分析已知, 泊松比对灰尘颗粒与光伏组件表面间的相互作用影响不大, 可忽略其影响。式 (13) 中的泊松比取最大值 0.5, 保证其计算得到的灰尘临界半径为同等条件下最大的。根据式 (13) 计算在不同表面性能下, 灰尘颗粒不同的临界粒径, 如表 3 所示。由表 3 可知, 表面弹性模量越小, 摩擦系数越小, $G_{\text{down}} > f$ 时的灰尘临界粒径越小, 光伏组件的自清洁能力越强。

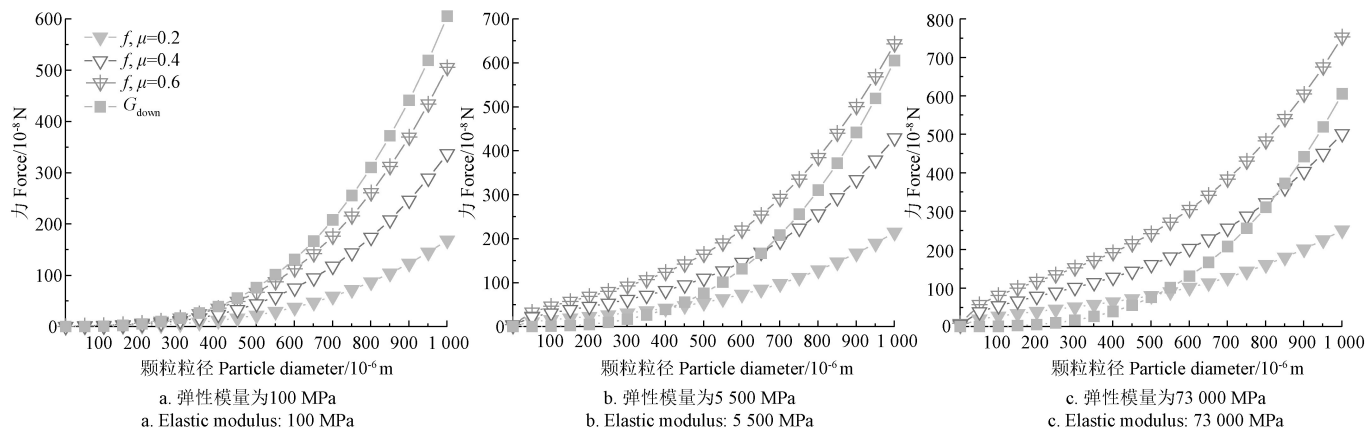
表 3 重力分力大于摩擦力的灰尘颗粒临界粒径		
Table 3 Critical particle size of dust particles with gravity component greater than friction		
表面弹性模量 Surface elastic modulus/MPa	摩擦系数 Friction coefficient	灰尘颗粒临界粒径 Critical particle size of dust particles/ 10^{-6} m
100	0.2	112
	0.4	179
	0.6	307
5 500	0.2	413
	0.4	660
	0.6	1 134
73 000	0.2	518
	0.4	828
	0.6	1 422

灰尘颗粒粒径与摩擦力和重力分力 G_{down} 之间的关系如图 5 所示。从表 3 和图 5 中可知, 无论摩擦系数为何值, 当表面弹性模量为 100 MPa 时, 重力分力 G_{down} 均能克服摩擦力 f 将 $300 \mu\text{m}$ 粒径的灰尘颗粒带离表面, 故表面能自清洁 $300 \mu\text{m}$ 及以上粒径的灰尘颗粒。在表面弹性模量为 5 500 和 73 000 MPa 的情况下, 摩擦系数为 0.2

时, 表面能依靠重力分力 G_{down} 自清洁 $500\ \mu\text{m}$ 粒径以上的灰尘颗粒; 摩擦系数为 0.4 时, 表面能自清洁 $800\ \mu\text{m}$ 粒径以上的灰尘颗粒; 摩擦系数为 0.6 时, 表面对小粒径灰尘的清洁能力最差, 但能清洁粒径 $1\ 400\ \mu\text{m}$ 以上的大粒径灰尘颗粒。

表面弹性模量为 $5\ 500\ \text{MPa}$, 摩擦系数为 0.4 为无涂

层光伏组件的表面属性, 可清洁粒径 $\geq 660\ \mu\text{m}$ 粒径的灰尘颗粒。与其相比, 无论何种表面弹性模量的情况下, 摩擦系数为 0.2, 表面均可清洁粒径 $\geq 518\ \mu\text{m}$ 粒径的灰尘颗粒, 比无涂层光伏组件可清洁的灰尘粒径范围要广, 有较好的自清洁能力。说明涂层表面摩擦系数越小, 涂层表面的自清洁能力越强。



注: f 为灰尘颗粒受到的摩擦力, N; G_{down} 为灰尘颗粒的重力分力, N; μ 为摩擦系数。

Note: f is the friction force on dust particles, N; G_{down} is the gravity component of dust particles, N; μ is the friction coefficient.

图 5 不同表面性能对灰尘颗粒粒径与摩擦力和重力分力之间的关系

Fig.5 The relationship between dust particle size and friction and gravity component under different surface properties

2.3 自清洁疏水性涂层表面参数优选

涂层表面属性在典型情况下对光伏组件自清洁的影响表明, 表面弹性模量和摩擦系数是影响表面自清洁的主要因素。为进一步分析, 选取 200 、 500 和 $800\ \mu\text{m}$ 三种灰尘粒径研究表面弹性模量和摩擦系数两者共同变化时, 对光伏组件自清洁的影响。

上文选择摩擦系数的 3 个典型数值为 0.2、0.4 和 0.6, 表面弹性模量的 3 个典型数值为 100 、 $5\ 500$ 和 $73\ 000\ \text{MPa}$, 与摩擦系数相比表面弹性模量的范围跨度更广, 计算量大。从表 3 中可知, 表面弹性模量为 $5\ 500$ 和 $73\ 000\ \text{MPa}$ 时, 两者表面上 $G_{\text{down}} > f$ 的灰尘颗粒临界粒径相差不大, 说明弹性模量虽相差大但对于影响光伏组件

自清洁的效果变化并不明显。可将表面弹性模量范围缩小至 $0 \sim 7\ 000\ \text{MPa}$, 摩擦系数范围取 $0.1 \sim 0.6$, 便于计算观察, 结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 在 $200\ \mu\text{m}$ 粒径的情况下, 摩擦力沿弹性系数方向上的变化幅度要大于摩擦系数方向上的变化幅度。但在 500 和 $800\ \mu\text{m}$ 粒径的情况下, 摩擦力在摩擦系数方向上的变化幅度显著, 说明摩擦系数比表面弹性模量更易影响摩擦力的大小。这是由于 $500\ \mu\text{m}$ 粒径以上的灰尘主要受到重力的作用而非黏附力, 只需改变表面摩擦系数就能保证重力分力 G_{down} 大于摩擦力, 易提高表面自清洁能力。在 $200\ \mu\text{m}$ 小粒径的情况下, 要提高表面自清洁能力, 需同时满足低弹性模量和低摩擦系数的条件。

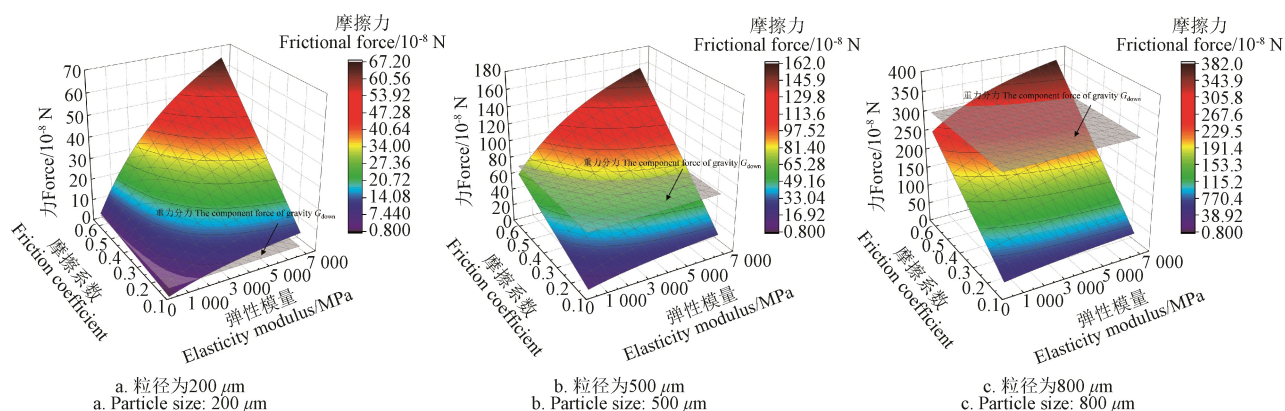


图 6 表面弹性模量和摩擦系数对摩擦力的影响

Fig.6 Effect of surface elastic modulus and friction coefficient on friction

基于以上分析可知, 在灰尘颗粒不同的粒径范围内, 表面弹性模量和表面摩擦系统对光伏组件自清洁能力的

影响程度不同。

表面要自清洁某一粒径范围内的灰尘颗粒, 不仅表

面弹性模量要在特定范围，摩擦系数也要在该表面弹性模量范围所对应的参数范围内。因此，表面参数需同时满足在表面弹性模量和摩擦系数两者的参数范围内才能清洁该范围的灰尘颗粒。

一般土壤粒径可分为细砂（100~250 μm）、中砂（250~500 μm）、粗砂（500~1 000 μm）、极粗砂（1 000~2 000 μm）和砾石（>2 000 μm）^[33]。根据所需清洁灰尘粒径范围，利用式（13）计算得到疏水涂层需满足的弹性模量范围、以及所对应摩擦系数范围。其中，弹性模量可选范围设定在 0~73 000 MPa，摩擦系数可选范围设定在 0.1~0.6，结果如表 4 所示。

表 4 光伏组件自清洁疏水涂层表面参数优选表
Table 4 Optimization table of surface parameters of self-cleaning hydrophobic coating on photovoltaic module

灰尘颗粒粒径范围 Dust particle size range/10 ⁻⁶ m	弹性模量范围 Elastic modulus range/MPa	摩擦系数最大值 Maximum of friction coefficients
100~250	0~100	0.15
	0~100	0.50
	100~200	0.40
	200~300	0.35
	300~400	0.30
	400~500	0.25
	500~800	0.20
	800~1 300	0.15
250~500	1 300~2 700	0.10
	100~300	0.60
	300~500	0.55
	500~800	0.50
	800~1 200	0.45
	1 200~1 700	0.4
	1 700~2 600	0.35
	2 600~4 100	0.30
500~1 000	4 100~7 900	0.25
	7 900~29 100	0.20
	29 100~73 000	0.15
	100~3 000	0.60
	3 000~6 900	0.55
	6 900~24 400	0.50
	24 400~73 000	0.45
1 000~2 000		
>2 000	100~73 000	0.6

在表 4 中，以 250~500 μm 粒径范围为例，弹性模量可选范围为 0~2 700 MPa，在该范围内普遍适用的摩擦系数为 0.1。进一步对弹性模量可选范围为 0~2 700 MPa 进行细分，对应的摩擦系数可选范围会变多，如可选的弹性模量范围在 0~100 MPa，对应可选的摩擦系统范围为 0.1~0.5。

在 500~1 000 μm、1 000~2 000 μm 和>2 000 μm 粒径范围内，虽可选表面弹性模量范围均为 100~73 000 MPa，但普遍适用的摩擦系数可选范围分别为 0.1~0.15、0.1~0.45 和 0.1~0.6，摩擦系数可选范围逐步扩大。所以，需自清洁的灰尘颗粒粒径越大，表面对应可选择的参数范围越广。

因此，结合光伏电站当地灰尘主要分布粒径范围并依据参数优选表，选择符合表面性能要求的疏水性涂层进行制备。

中国光伏电站主要建在光照资源西北地区中，其灰尘颗粒以中砂（250~500 μm）为主^[33]。依据表 4 所给出的表面参数范围，可知制备疏水涂层的弹性模量最大范围为 0~2 700 MPa，该范围内对应可选的摩擦系数为 0.1。涂覆到光伏组件表面减少表面灰尘沉积以提高光伏电站的光电效率。

3 结 论

1) 光伏组件表面自清洁能力与表面弹性模量和表面摩擦系数密切相关。清洁 200 μm 粒径以上灰尘颗粒，表面摩擦系数对光伏组件自清洁能力的影响更大；而 200 μm 粒径以下灰尘，表面弹性模量对光伏组件自清洁能力的影响更大。

2) 涂覆不同表面参数的疏水涂层光伏组件可自清洁不同粒径范围的灰尘颗粒，需清洁的灰尘粒径越小，疏水涂层表面参数的可选范围也越小。如清洁 100~250 μm 粒径内的灰尘颗粒，表面可选弹性模量范围为 0~100 MPa，普遍适用的摩擦系数可选范围为 0.1~0.15；清洁 500~1 000 μm 粒径内的灰尘颗粒，表面可选弹性模量范围为 100~73 000 MPa，对应可选摩擦系数范围为 0.1~0.15。

3) 以中国西北地区为例，灰尘颗粒粒径范围为以 250~500 μm，可选择制备弹性模量范围在 0~2 700 MPa 内、摩擦系数为 0.1 的疏水性涂层。

[参 考 文 献]

[1] 国家能源局. “十四五”现代能源体系规划[Z/OL]. (2022-03-22)[2022-04-22].http://www.nea.gov.cn/2022-03/22/c_1310525569.htm.
[2] 国家能源局. 2021 年光伏发电建设运行情况[Z/OL]. (2022-03-09)[2022-04-22].http://www.nea.gov.cn/2022-03/09/c_1310508114.htm.
[3] Gholami A, Khazaei I, Eslami S, et al. Experimental investigation of dust deposition effects on photo-voltaic output performance[J]. Solar Energy, 2018, 159: 346-353.
[4] Hussein A K, Miqdam T C, Ali H A A, et al. A review of dust accumulation and cleaning methods for solar PV systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276: 123187.
[5] Wang H D, Meng X Z, Chen J B. Effect of air quality and dust deposition on power generation performance of PV module on building roof[J]. Building Services Engineering Research & Technology, 2020, 41(1): 73-85.
[6] Prasanth K E, Ankur B, Aritra G, et al. Experimental investigations for dust build-up on low-iron glass exterior and its effects on the performance of solar PV systems[J]. Energy, 2022, 239: 122213.
[7] Chen Y Y, Wang D J, Liu Y F, et al. Research on PV performance reduction due to dust deposition: modelling and experimental approach[J]. Journal of Thermal Science, 2019, 28(6): 1186-1194.

- [8] 孟广双, 高德东, 王珊, 等. 荒漠环境中电池板表面灰尘颗粒力学模型建立[J]. 农业工程学报, 2014, 30(16): 221-229.
Meng Guangshuang, Gao Dedong, Wang Shan, et al. Mechanics modeling of dust particle on solar panel surface in desert environment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(16): 221-229. (in Chinese with English abstract)
- [9] 江平. 高海拔荒漠地区太阳能电池板表面灰尘粘附接触力学分析[D]. 西宁: 青海大学, 2019.
Jiang Ping. Contact Mechanics Analysis of Dust Adhesion on Solar Panels in High Altitude Desert Area[D]. Xining: Qinghai University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [10] 袁博. 光伏面板表面积尘机理研究及清洁喷头的设计[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017.
Yuan Bo. Study on the Mechanism of Dust Accumulation on the Surface of Photovoltaic Panel and Design of Cleaning Nozzle[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [11] 陈利, 杨若朴. 光伏组件清洁工作对光伏发电成本的经济性分析[J]. 国网技术学院学报, 2015, 18(1): 33-35, 61.
Chen Li, Yang Ruopu. Analysis of the economic impact of PV module cleaning work on the cost of PV power generation[J]. Journal of State Grid Technology College, 2015, 18(1): 33-35, 61. (in Chinese with English abstract)
- [12] 吴颖超. 积尘对光伏电站发电量的影响及清洁方式分析[J]. 太阳能, 2021(9): 47-51.
Wu Yingchao. Influence of dust accumulation on power generation of pv power station and analysis of cleaning methods[J]. Solar Energy, 2021(9): 47-51. (in Chinese with English abstract)
- [13] 吴延鹏, 雷晓宇, 陆禹名, 等. 太阳能利用透光表面超疏水增透膜研究进展[J]. 化工学报, 2021, 72(S1): 21-29.
Wu Yanpeng, Lei Xiaoyu, Lu Yuming, et al. Research progress of superhydrophobic anti-reflection films applied on transparent surfaces of solar devices[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2021, 72(S1): 21-29. (in Chinese with English abstract)
- [14] 谢解解. 超疏水薄膜对改善光伏组件覆灰特性及光伏输出特性的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
Xie Jiejie. Study on the Improvement in Characteristics of Sand Coating and Output Characteristics of PV Modules by Super-Hydrophobic Films[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [15] 沈军, 吴筱娴, 谢志勇, 等. 用于太阳电池的 SiO_2 增透膜的制备及性能研究[J]. 太阳能学报, 2007(9): 943-946.
Shen Jun, Wu Xiaoxian, Xie Zhiyong, et al. Sol-Gel derived SiO_2 antireflective film used in solar cells[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2007(9): 943-946. (in Chinese with English abstract)
- [16] Styszko K, Jaszczur M, Teneta J, et al. An analysis of the dust deposition on solar PV modules[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(6): 8393-8401.
- [17] Tanesab J, Parlevliet D, Whale J, et al. The contribution of dust to performance degradation of PV modules in a temperate climate zone[J]. Solar Energy, 2015, 120: 147-157.
- [18] Ehsan R M, Simon S P, Sundareswaran K, et al. Effect of soiling on pv modules and its mitigation using hydrophobic nanocoatings[J]. IEEE Journal of PVs, 2021, 11(3): 742-749.
- [19] 王金燕. PMMA- SiO_2 、环氧树脂- SiO_2 复合超疏水薄膜的制备及浸润性研究[D]. 开封: 河南大学, 2011.
Wang Jinyan. Preparation of PMMA- SiO_2 , Epoxy - SiO_2 Composite Superhydrophobic Films and Investigation of Wettability[D]. Kaifeng: Henan University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [20] 李怡雯, 郝丽琴, 王红宁, 等. 有机硅烷共缩合制备抗紫外超疏水减反射涂层[J]. 化工进展, 2019, 38(8): 3829-3837.
Li Yiwen, Hao Liqin, Wang Hongning, et al. Preparation of anti-ultraviolet superhydrophobic anti-reflective coatings by co-condensation of organosilanes[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(8): 3829-3837. (in Chinese with English abstract)
- [21] 郭明杰. 轻合金表面疏水/超疏水薄膜的制备及功能特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
Guo Mingjie. Researches on Fabrication and Functional Properties of Hydrophobic/Superhydrophobic Films on Light Alloy Surface[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [22] 连峰, 项秋宽, 臧路苹, 等. 不同润湿性钛合金表面在不同介质中的摩擦学行为[J]. 功能材料, 2016, 47(6): 130-135.
Lian Feng, Xiang Qiukuan, Zang Luping, et al. Tribological behaviors of titanium alloy surface with different wettability in different mediums[J]. Journal of Functional Materials, 2016, 47(6): 130-135. (in Chinese with English abstract)
- [23] 徐喆. Al-Mg 合金表面润湿性及其水润滑摩擦学特性的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
Xu Zhe. The Study of Surface Wettability and Tribological Characteristics in Water Lubricate of Al-Mg Alloy[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [24] Pan A J, Lu H, Zhang L Z. Experimental investigation of dust deposition reduction on solar cell covering glass by different self-cleaning coatings[J]. Energy, 2019, 181: 645-653.
- [25] 柳冠青. 范德华力和静电力下的细颗粒离散动力学研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
Liu Guanqing. Discrete Element Methods of Fine Particle Dynamics in Presence of van der Waals and Electrostatic Forces[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [26] 孙其诚, 王光谦. 颗粒物质力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [27] 杨金焕, 毛家俊, 陈中华. 不同方位倾斜面上太阳辐射量及最佳倾角的计算[J]. 上海交通大学学报, 2002(7): 1032-1036.
Yang Jinhuan, Mao Jiajun, Chen Zhonghua. Calculation of solar radiation on variously oriented tilted surface and optimum tilt angle[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2002(7): 1032-1036. (in Chinese with English abstract)
- [28] 赵美蓉, 周惠言, 康文倩, 等. 超疏水表面制备方法的比

- 较[J]. 复合材料学报, 2021, 38(2): 361-379.
- Zhao Meirong, Zhou Huiyan, Kang Wenqian, et al. Comparison of methods for fabricating superhydrophobic surface[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2021, 38(2): 361-379. (in Chinese with English abstract)
- [29] Wang K Y, Yu S Y, Wu Y G, et al. Measurements and analysis of adhesive forces for micron particles on common indoor surfaces[J]. Indoor and Built Environment, 2019, 29(7): 931-941.
- [30] 陶氏环球技术公司. 疏水性涂料[P]. CN101952326A. 2011-01-19.
- [31] 凌斌. 泊松比可控多孔超材料结构设计与分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- Ling Bin. Design and Analysis of Cellular Metamaterials and Metastructures with Tailorable Poisson's Ratio[D]. Changsha: Hunan university, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [32] 牛海明, 崔青汝, 刘厚旭. 积灰对光伏电池板输出特性影响研究[J]. 热力发电, 2021, 50(2): 110-117.
- Niu Haiming, Cui Qingru, Liu Houxu. Effect of ash accumulation on output performance of photovoltaic panels[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(2): 110-117. (in Chinese with English abstract)
- [33] 党梦娇, 蒙仲举, 斯庆毕力格, 等. 库布齐沙漠南缘光伏电站内表层沉积物粒度特征[J]. 土壤通报, 2019, 50(2): 260-266.
- Dang Mengjiao, Meng Zhongju, Siqing Bilige, et al. Particle characteristics of surface sediment in the photovoltaic power station in the South Margin of the Kubuqi desert[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(2): 260-266. (in Chinese with English abstract)

Hydrophobic surface self-cleaning investigation and parameter selection of PV modules in arid areas

Zhang Dong^{1,2}, Yu Kai^{1,2}, Yan Chengtao^{1,2}, Liu Chang^{1,2}, Shen Yongqian^{3,4}, An Zhoujian^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Complementary Energy System of Biomass and Solar Energy of Gansu Province, Lanzhou 730050, China; 3. School of Material Science and Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 4. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Photovoltaic (PV) power generation can convert sunlight into electrical energy. There is an ever developing rapidly industry under the background of carbon peak and carbon neutrality. However, dust accumulation on the surface of PV modules can pose a serious threat to the efficiency of power generation. A hydrophobic coating with low surface energy can be expected to form on the surface, in order to reduce the dust accumulation for better self-cleaning of the PV module. In this study, a mechanical model of the adhesion between the surface of PV modules and dust particles was established to clarify the effect of hydrophobic coating surface properties on the self-cleaning ability of PV modules. The particle contact mechanics was selected to determine the adhesion force of dust particles, particularly with the elastic modulus, Poisson's ratio, and friction coefficient of surface materials. The simulation showed that the surface self-cleaning performance of PV modules was closely related to the elastic modulus and friction coefficient of surface materials, as well as the particle size of dust particles. There was also a strong relationship among the self-cleaning performance of PV modules, dust particle size, and surface performance. The surface elastic modulus played a major role in the self-cleaning performance of PV modules in the range of small particle size dust below 200 μm . With a larger particle size than 200 μm , the friction coefficient was dominated in the self-cleaning performance of PV modules. The self-cleaning of the PV modules varied in the different hydrophobic coatings, and the performance parameters of the PV module surface. The self-cleaning dust particles above 100 μm performed the best using the hydrophobic coating with the friction coefficient of 0.1-0.15 and elastic modulus of 0-100 MPa, whereas the self-cleaning dust particles above 500 μm were required for the hydrophobic coating with the friction coefficient of 0.1-0.15 and elastic modulus of 100-73 000 MPa. The hydrophobic coating with a friction coefficient of 0.1-0.45 and elastic modulus of 100-73 000 MPa was suitable for the PV modules to self-clean dust particles above 1 000 μm . The general soil particle size was divided into fine (100-250 μm), medium (250-500 μm), coarse (500-1 000 μm), very coarse sand (1 000-2 000 μm), and gravel (>2 000 μm). The optimal surface properties of hydrophobic coatings were obtained for the self-cleaning in the different dust particle sizes range. Specifically, the larger the particle size of dust was, the wider the range of elastic modulus and friction coefficient of the hydrophobic coating were. Consequently, the better surface properties of hydrophobic coatings were achieved in the elastic modulus of 0-100 MPa and the friction coefficient of 0.1-0.15, in order to clean the fine sand. The elastic modulus of 100-73 000 MPa and the friction coefficient of 0.1-0.6 were to clean the gravel. The PV power stations can be expected to select the hydrophobic coating for the self-cleaning requirements. The local dust particles can be optimized to reduce the loss of power generation efficiency for the cost saving of PV power stations. For example, once the dust of PV power plants was mainly medium sand (250-500 μm) in Northwest China, the surface properties of hydrophobic coatings can be the elastic modulus of 0-2 700 MPa and the friction coefficient of 0.1.

Keywords: solar cells; dust; hydrophobicity; coating; self-cleaning; parametric optimization