

# 适用于光伏板静电除尘的 纳米银线-环氧树脂透明导电薄膜研究

李乐<sup>1</sup>, 尹晓萱<sup>1</sup>, 武文华<sup>2</sup>, 李浩义<sup>1</sup>, 杨磊<sup>2</sup>, 刘逸飞<sup>1</sup>, 孟娟<sup>3</sup>, 刘云鹏<sup>1\*</sup>

(1. 河北省绿色高效电工新材料与设备重点实验室(华北电力大学), 河北省 保定市 071003; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 湖北省 武汉市 430070; 3. 国网荆州供电公司, 湖北省 荆州市 433200)

## Research on Silver Nanowire-epoxy Resin Transparent Conductive Film for Electrostatic Dust Removal Technology of Solar Photovoltaic Panel

LI Le<sup>1</sup>, YIN Xiaoxuan<sup>1</sup>, WU Wenhua<sup>2</sup>, LI Haoyi<sup>1</sup>, YANG Lei<sup>2</sup>, LIU Yifei<sup>1</sup>, MENG Juan<sup>3</sup>, LIU Yunpeng<sup>1\*</sup>

(1. Hebei Key Laboratory of Green and Efficient New Electrical Materials and Equipment (North China Electric Power University), Baoding 071003, Hebei Province, China; 2. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430070, Hubei Province, China; 3. State Grid Jingzhou Power Supply Company, Jingzhou 433200, Hubei Province, China)

**ABSTRACT:** Electrostatic dust removal technology based on transparent conductive film is becoming a research hotspot in the field of photovoltaic panel dust removal in recent years, and the dust removal effect is closely related to the performance of transparent conductive film. In order to meet the application requirements of photovoltaic panel electrostatic dust removal technology, transparent conductive thin films with conductive fillers of silver nanowires (AgNWs) are prepared by using epoxy resin (EP) as substrate. Based on the prepared AgNWs-EP transparent conductive films, photovoltaic panel electrostatic dust removal experiments are carried out. The experimental results show that the electrostatic dust removal rate increases with the increase of the AgNWs parts per hundred parts of resin. When the AgNWs parts per hundred parts of resin is 80 000 phr, the dust removal rate can reach 95.67%, and the photovoltaic panel power generation efficiency can be relatively increased by 40.84%. Under this condition, the square resistance is  $10^7 \Omega/\square$ , and the dust removal applicability index is 0.42. The results of the 600 h artificial ultraviolet aging test and mechanical durability test show that the film has excellent aging resistance. The research results are of great significance for expanding the application scene of AgNWs-EP transparent conductive film and promoting the development of photovoltaic panel electrostatic

dust removal technology.

**KEY WORDS:** silver nanowire; epoxy resin; transparent conductive film; electrostatic dust removal; photovoltaic power generation

**摘要:** 基于透明导电薄膜的静电除尘方法近年来已成为光伏板除尘领域的研究热点, 除尘效果与透明导电薄膜的性能紧密相关。针对光伏板静电除尘技术的应用需求, 以环氧树脂(epoxy resin, EP)为基体, 制备得到导电填料为纳米银线(silver nanowires, AgNWs)的透明导电薄膜, 并基于制备得到的纳米银线-环氧树脂(AgNWs-EP)透明导电薄膜进行光伏板静电除尘实验。结果表明, 静电除尘率随着 AgNWs 质量份比例增大而升高, 在 AgNWs 的质量份为 80 000 phr 时, 除尘率最大可达到 95.67%, 光伏板的发电效率可相对提升 40.84%。此时, 薄膜的方阻为  $10^7 \Omega/\square$ , 除尘适用性指标为 0.42。600 h 人工加速紫外老化和机械耐久性测试表明, 薄膜具有优异的耐老化特性。研究结果对于拓展 AgNWs-EP 透明导电薄膜的应用场景、推动基于透明导电薄膜的光伏板静电除尘技术的发展具有重要意义。

**关键词:** 纳米银线; 环氧树脂; 透明导电薄膜; 静电除尘; 光伏发电

## 0 引言

太阳能的合理开发和利用是能源结构调整的主要依托方式, 同时是如期实现“双碳”目标的重要保障<sup>[1-4]</sup>。光伏发电是利用太阳能的重要方式, 近年来迎来了新一轮的快速发展机遇<sup>[5-6]</sup>。光伏板作为光伏发电产业的核心组件, 其运行场景为露天环

**基金项目:** 国家自然科学基金(青年科学基金项目)(52207023); 中央高校面上科研项目(2022MS075)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (Young Scientific Program) (52207023); General Scientific Research Project of Central Universities (2022MS075).

境,大型光伏电站通常位于光照充足的西北地区,因而沙尘颗粒积聚在光伏板表面对光伏组件造成的光学、电学和热学影响不可忽视。已有研究表明,太阳能组件暴露于室外环境下1天、1周和1个月的平均效率损耗率分别可达6.24%、11.8%和18.74%<sup>[7]</sup>。此外,积尘会导致光伏板功率不平衡进而产生“热斑效应”,加剧能量损失的同时不可逆地缩短光伏电池寿命。相关数据表明,在21.6倍太阳光强照射下,表面积聚有不规则粉尘的光伏板热点温度相较于板面洁净状态高24℃<sup>[8]</sup>。光伏板表面的积尘问题已成为阻碍光伏发电行业更好更快发展的重要因素。

光伏板表面有效除尘是提升光伏发电效率的重要途径,对提高清洁能源利用率具有重要意义。除仅依靠降雨等自然条件进行除尘,光伏板表面传统除尘方式还包括采用滚刷、风吹、水冲、振动、超声波驱动等方式进行的机械除尘和纳米膜自洁除尘等<sup>[9-10]</sup>,普遍存在着成本高、效率低、易磨损光伏组件等问题<sup>[11-12]</sup>,尤其在水资源紧缺的西北地区,采用传统方式除尘的难度较大。近年来,借助静电力进行无水化、无接触式除尘渐渐成为光伏除尘领域的研究热点<sup>[13-14]</sup>。2022年,Panat等<sup>[15]</sup>提出一种基于透明导电薄膜的光伏板静电除尘方法,该方法在光伏板玻璃表面构筑透明导电层,板面上方放置施加有一定电压的金属极板从而形成电场。由于光伏板表面灰尘颗粒的主要成分为二氧化硅(30%至75%)<sup>[16-17]</sup>,灰尘颗粒吸附水分后电阻率降低<sup>[18]</sup>,在导电层的辅助下得以发生场致荷电。若荷电后的颗粒受到的静电力大于垂直于板面向下的

合力(范德华力、双电层静电力、毛细作用力和重力),则颗粒能够从光伏板表面起跳<sup>[19]</sup>,并在与金属极板碰撞的过程中远离除尘区域从而被清除,静电除尘模型及灰尘颗粒除尘过程中不同位置的受力情况如图1所示。该方法具有水资源消耗小、人力成本低、能有效减少光伏组件磨损等优点,可高效经济地实现光伏板的无尘、无损维护,对提高发电收益、充分利用太阳能具有重要作用。

已有研究表明,基于透明导电薄膜的静电除尘技术的除尘效果与透明导电薄膜的性能紧密相关,薄膜应满足除尘应用及光伏板户外运行的需求<sup>[19]</sup>。当前,氧化铟锡(indium tin oxide, ITO)<sup>[20-21]</sup>、透明导电氧化物<sup>[22]</sup>、碳纳米管、金属纳米线<sup>[23]</sup>、导电聚合物和石墨烯<sup>[24]</sup>,及由这些材料复合杂化制成的透明导电薄膜已经得到广泛研究。其中,纳米银线(silver nanowires, AgNWs)透明导电薄膜<sup>[25]</sup>由于光电性能和弯曲特性优异,且能够兼容溶液态卷对卷制程,被认为是主流透明导电薄膜ITO的理想取代物之一。Chen等<sup>[26]</sup>通过浸涂工艺和机械压制处理法制备的AgNWs双面透明导电膜两侧方阻可达60Ω/□,透光率为84.55%,且具备良好的弯曲特性。Bai等<sup>[27]</sup>制备水性AgNWs导电油墨,采用Mayer棒涂布制备的透明导电膜方阻可达12Ω/□,表面粗糙度为7.28nm,弯曲1000次后仍保留原有的光电性能,在可穿戴设备和柔性有机发光二极管领域具有一定的应用潜力。

尽管目前通过溶液态制程已经可以制备获得性能良好的AgNWs透明导电薄膜,但光伏板静电除尘的应用场景对薄膜材料的性能要求与光电器

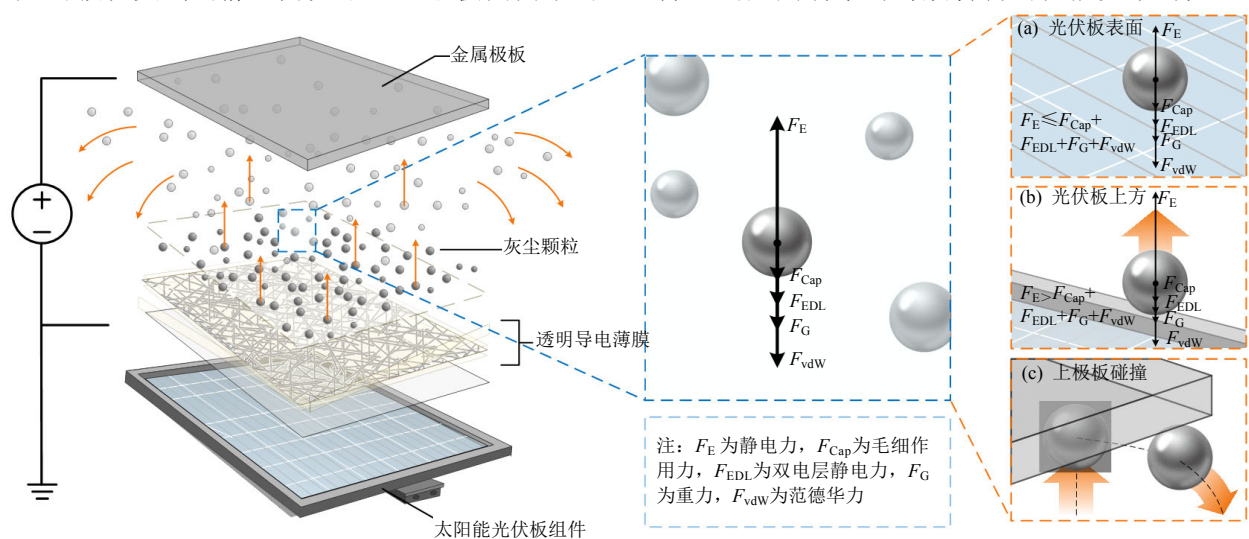


图1 基于透明导电薄膜的光伏板静电除尘示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electrostatic dust removal of photovoltaic panels based on transparent conductive film

件领域有所不同,溶液态制程薄膜在此应用场景的适用性较低<sup>[19]</sup>。作为除尘过程中辅助颗粒荷电的关键结构,透明导电薄膜应具备良好的透光率和雾度值,对其导电性能及机械强度的要求反而较低。此外,溶液态制程存在黏附基底能力差、稳定性不高等缺点,导电层极易因风沙刮蹭摩擦等物理原因损伤,金属纳米线在紫外线高温下也会发生不可逆的老化损伤,使得常规 AgNWs 透明导电薄膜在实际光伏板运行环境中导电性急剧下降,难以满足光伏板的使用年限要求,因此亟需开展适用于光伏板静电除尘的透明导电薄膜制备及应用效果研究。环氧树脂(epoxy resin, EP)作为常见的树脂材料<sup>[28]</sup>,具备透光率高、黏粘性强等优点,将其作为导电墨水基体填充 AgNWs 之间的空隙,可以在导电层固化过程中将 AgNWs 部分嵌入并固定 EP 之中,进而增强黏附力、减少纳米线裸露面积、降低粗糙度,实现提高薄膜机械耐久性和化学稳定性的性能优化需求,获得与光伏板静电除尘应用场景的契合度更高的透明导电薄膜。

基于以上需求,本文首先以 AgNWs 为导电填料进行 EP 基导电墨水的配置,通过刮涂法制备获得适用于光伏板表面静电除尘应用场景的纳米银线-环氧树脂(AgNWs-EP)透明导电薄膜;随后,分析薄膜的固化反应、微观形貌及光电性能;最后,对制备所得的薄膜进行紫外老化特性和机械耐久性的验证,通过光伏板静电除尘实验评估光伏板除尘效果及发电功率提升程度,获得除尘应用的综合评估结果。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料及设备

实验材料:溶剂为乙醇的 AgNWs( $D=50\text{ nm}$ ,  $L=20\text{ }\mu\text{m}$ , 广州纳诺化学技术); 3-氨丙基三乙氧基硅烷(3-aminopropyltriethoxysilane, APTES, 上海麦克林生化科技); 双酚 A 型环氧树脂(E-51, 上海树脂厂); 固化剂甲基六氢苯酐(methyl hexahydrophthalic anhydride, MHHPA, 上海阿拉丁生化科技); 促进剂 2, 4, 6-三(二甲氨基甲基)苯酚(dimethyl phthalate, DMP-30, 上海麦克林生化科技); 乙酸乙酯(ethyl acetate, EtOAc, 上海麦克林生化科技); PET 基底(polyethylene terephthalate,  $d=175\text{ }\mu\text{m}$ , 华南湘城); 沙漠原沙(140 目, 内蒙古库布齐)。

实验设备:行星式搅拌/脱泡装置(MV300, 麦力西);真空干燥箱(DZF-6020, 上海一恒科学仪器);超声波清洗机(GW0610, 冠博仕);高速离心机(TG16WS, 长沙湘智);加热型平板涂敷机(MSK-AFA-HC100, 深圳市科晶智达科技);刮刀(KTQ-80F, 深圳市科晶智达科技);高精度电子分析天平(AUW220, 岛津);光伏板(XY-18 V 20 W, 山东探越信息);高压直流电源(DW-P503-1ACDFO, 东文高压);光伏板 MPPT 测试仪(PVT801, 武威博领);投射式聚光灯(L1.36700.B-5510, 德国 ARRI);辐照度测试仪;空气相对湿度测试仪。

### 1.2 薄膜制备

AgNWs-EP 透明导电薄膜的制备流程见图 2。

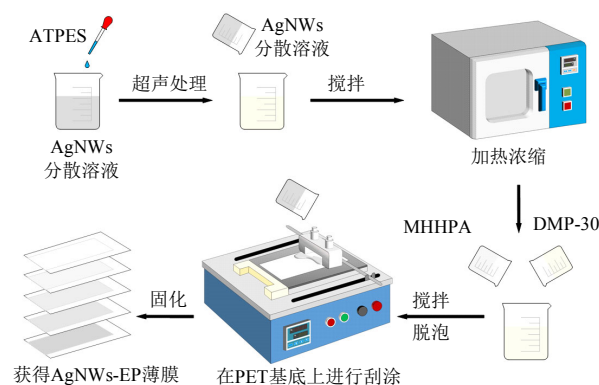


图 2 AgNWs-EP 透明导电薄膜的制备流程

Fig. 2 Preparation process of AgNWs-EP transparent conductive film

使用 0.1% 质量分数的 AgNWs 乙醇分散液,按照 20:1 的比例添加分散剂 APTES 后,超声处理 30 min 以减少 AgNWs 的团聚。按照设定的浓度梯度,向 E-51 中按照质量份添加 AgNWs 分散液,置于行星式搅拌仪中充分搅拌至混合均匀,并将混合液转移至 75℃ 烘箱内加热浓缩 6 h。室温冷却后,分别按 80 和 0.5 phr 的质量份向混合液中添加固化剂 MHHPA 和促进剂 DMP-30,置于行星式搅拌仪中充分搅拌至混合均匀,将混合液转移至 25℃ 真空干燥箱内脱泡 10 min,即获得可以进行薄膜涂布分散性能良好的导电墨水。通过刮涂的方式在真空吸附的 PET 基底上进行涂布,湿膜置于烘箱内加热固化,制备获得 AgNWs-EP 透明导电薄膜。考虑到 AgNWs 对固化速度的影响,适当调整高 AgNWs 质量份比例导电墨水中固化剂及促进剂的比例。

### 1.3 材料性能表征

#### 1.3.1 固化特性

差示扫描量热法(differential scanning

calorimeter, DSC)作为一种热分析法,是研究环氧树脂固化过程最有效的方法之一<sup>[29]</sup>。由差示扫描量热仪(DSC 3500,德国耐驰)测量导电墨水的DSC曲线,确定其固化温度。将树脂基体与固化剂促进剂等充分混合后,称取5~15 mg进行制样放入穿孔坩埚内。在仪器扫描量热的过程中,开启流量为40 mL/min的N<sub>2</sub>氛围,设定4种温度区间在25~250℃但升温速率 $\beta$ 不同的温度曲线进行检测,升温速率 $\beta$ 分别设定为5、10、15以及20 K/min<sup>[30-31]</sup>。

### 1.3.2 微观形貌

扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)是对材料微观形貌进行表征的常用手段,采用扫描电子显微镜(日本Hitachi SU8000)对透明导电薄膜形貌进行拍摄。测试时,将适当大小的薄膜样品通过导电胶固定在测试平台上并在其表面上喷金,电子束加速电压设为10.00 kV,放大倍数为10 000及20 000倍。

### 1.3.3 光电性能

采用方块电阻 $R_s$ 表征透明导电薄膜的导电性,由高精度四探针法电阻率测试仪(HPS2663,常州海尔帕电子科技)测量。采用透光率 $T$ 和雾度 $H$ 进行薄膜光学性能的表征<sup>[32]</sup>,选取制备实验获得薄膜成品中表面厚度均匀、无气泡或圈状缺陷、无划痕的试样,通过透光率雾度测试仪(TH-100,杭州彩谱科技)进行测试,测试结果为可见光波段(400~750 nm)透光率及雾度的均值。

## 1.4 光伏板静电除尘效果评估

### 1.4.1 实验方法

采用沙漠原沙模拟光伏板表面的灰尘颗粒,将表面覆有AgNWs-EP透明导电薄膜的光伏板通过支架固定于电子分析天平上,金属极板通过绝缘支架固定于光伏板表面上方1 cm处,绝缘支架另一端固定于电子分析天平同一平面。光伏板表面薄膜样品接地,金属极板通过高压直流电源提供电压,通过光伏板MPPT测试仪测量光伏板功率。采用投射式聚光灯模拟自然光源,通过辐照度测试仪测量光伏板表面的辐照度,确保静电除尘实验中到达光伏板表面的辐照度相同。采用空气相对湿度测试仪测量实验进行时的空气相对湿度。光伏板静电除尘实验平台布置如图3所示。

静电除尘实验前,采用电子分析天平称取已覆膜光伏板及固定支架在内的装置整体重量(记为 $M_0$ )。通过筛网将沙漠原沙均匀筛至覆有AgNWs-

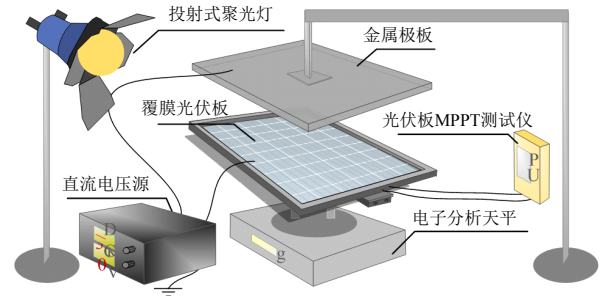


图3 光伏板静电除尘实验平台

Fig. 3 Photovoltaic panel electrostatic dust removal experiment platform

EP薄膜的光伏板表面模拟自然情况下的积灰,实验中的积灰密度为5 mg/cm<sup>2</sup>,采用电子分析天平称取已洒沙漠原沙后的装置整体重量(记为 $M_q$ )。实验中,采用高压直流电源为金属极板提供电压,电压首先从0 kV以0.2 kV/s的速度升压至2 kV,之后以0.05 kV/s的速度升压至6 kV,维持最高电压6 kV一段时间直至灰尘不再起跳并被清除,再次记录除尘后装置整体重量(记为 $M_h$ )。实验前后,采用光伏板MPPT测试仪测量光伏板表面积灰密度为5 mg/cm<sup>2</sup>时及除尘后的光伏板最大功率 $P_{max}$ 。

### 1.4.2 评价指标

1) 最终除尘率 $\omega$ :对于光伏板的静电除尘,除尘率是评价除尘效果的核心指标,通过式(1)可计算得到光伏板表面覆有不同AgNWs-EP薄膜时的最终除尘率 $\omega$ ,并以此进行除尘效果评估。

$$\omega = \frac{M_q - M_h}{M_q - M_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $M_q$ 为除尘前的整体质量; $M_h$ 为除尘后的整体质量; $M_0$ 为未均匀撒沙前的整体质量。

2) 光伏板发电效率 $\eta^*$ :评价光伏板发电情况的最常用指标是光伏板的发电效率 $\eta$ ,以光伏板产生的最大功率占光伏板总入射太阳能的百分比来衡量<sup>[33]</sup>,可通过式(2)、(3)计算<sup>[34]</sup>:

$$\eta = \frac{P_{max}}{E_{TOT} \cdot A_{PV}} \times 100\% \quad (2)$$

$$P_{max} = U_{max} \cdot I_{max} \quad (3)$$

式中: $P_{max}$ 为最大功率点的发电功率; $U_{max}$ 为最大功率点对应的电压; $I_{max}$ 为最大功率点对应的电流; $A_{PV}$ 为光伏板面板面积, m<sup>2</sup>;  $E_{TOT}$ 为测试条件下的总入射辐照度, W/m<sup>2</sup>。

记表面材料为AgNWs-EP透明导电薄膜的光伏板在表面清洁状态时的发电效率为 $\eta_{com}$ ,除尘后

的发电效率为  $\eta_{\text{ele}}$ , 则光伏板发电效率的归一化值  $\eta^*$  如式(4), 通过  $\eta^*$  值将光伏板发电效率进行归一化, 得到使用不同质量比例薄膜样品的光伏板除尘前后的发电效率的对比情况。

$$\eta^* = \frac{\eta_{\text{ele}}}{\eta_{\text{com}}} \times 100\% \quad (4)$$

## 1.5 材料应用耐候性能评估

### 1.5.1 紫外老化性能

采用紫外老化试验箱进行 AgNWs-EP 透明导电薄膜的紫外人工加速老化实验, 实验模拟的紫外光波段为 280~400 nm, 实验箱内保持恒温 60°C, 薄膜导电面向上依次放置, 到达薄膜表面辐照强度为 50 W/m<sup>2</sup>, 老化时间为 600 h, 辐照剂量为 30 kW·h/m<sup>2</sup>。

### 1.5.2 机械老化性能

采用胶带剥离实验测试 AgNWs-EP 薄膜对基底的粘附力, 将 3M 胶带粘在薄膜导电层表面上, 以 1 kg 的负载在胶带表面上滚动, 然后将胶带从薄膜表面上剥离。每 5 次剥离循环后, 根据光电性能评估 AgNWs-EP 薄膜与基底的粘附力。采用 600 目砂纸(接触面积为 12.5 cm<sup>2</sup>)对薄膜表面进行磨损, 薄膜在 500 g(或压强 4 kPa)的载荷下每个循环移动 20 cm。每 10 次磨损循环后, 根据光电性能评估 AgNWs-EP 薄膜的耐磨损性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 固化特性

热固性材料的性能不仅取决于树脂的化学结构, 还与固化工艺等密切相关。导电墨水基体材料为环氧树脂体系, 根据已有实验经验, 随着在混合溶液中添加的 AgNWs 质量分数的增加, 在加热浓缩过程中会产生凝胶状半固体, 此外添加 MHHPA 后导电墨水在成膜过程中粘度明显变大, 同时固化速度显著加快, 甚至在搅拌过程中就已经完全固化, 难以进行后续薄膜成型。因此, 为使得后续制备中较高 AgNWs 质量分比例的导电墨水粘度适中, 固化速度满足薄膜刮涂条件, 在墨水配置过程中适量减少固化剂 MHHPA 及促进剂 DMP-30 的比例。对不同配比的导电墨水进行环氧树脂的固化反应动力学分析, 可以揭示混合液体系内部的部分反应变化, 确定后续薄膜制备的最优固化工艺参数。

图 4 为升温速率为 20 K/min 时的 DSC 曲线, 可见对比于未添加 AgNWs 的纯环氧树脂体系,

AgNWs 质量份比例为 1 000 phr 的导电墨水固化开始的温度相对较低, 放热峰峰值也更高, 说明 AgNWs 对于树脂体系具有一定提高交联反应活性和降低固化温度的能力, 在环氧固化反应中可以起到催化剂的作用。

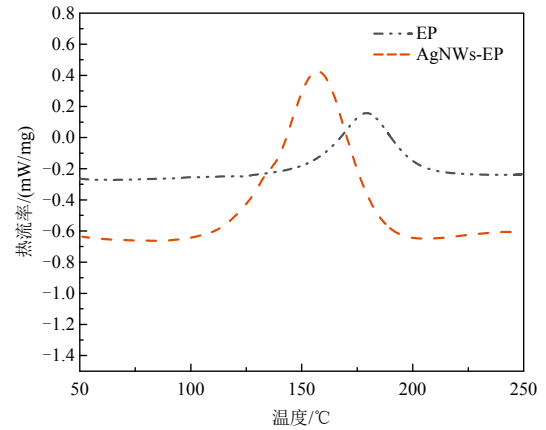
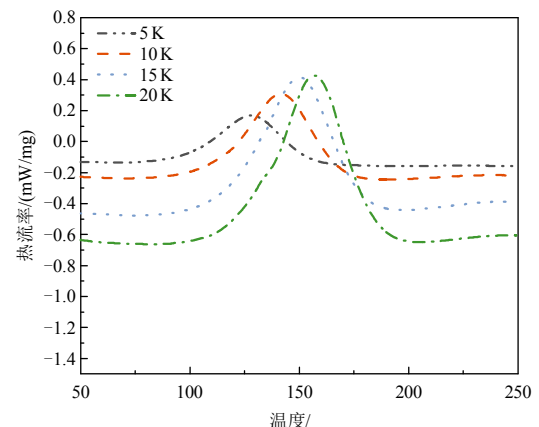


图 4 升温速率为 20 K/min 的 DSC 曲线

Fig. 4 DSC curve with heating rate of 20 K/min

采用非等温差示扫描量热法研究 AgNWs-EP 透明导电薄膜的湿膜固化反应动力学, 导电墨水中固化速度开始有明显变化的 AgNWs 质量份比例为 1 000 phr, 最大的 AgNWs 质量份比例为 80 000 phr, 以此为例进行固化工艺分析。上述两种导电墨水在 4 种不同升温速率下的 DSC 曲线如图 5 所示。环氧树脂 E-51/固化剂 MHHPA 的固化反应中只包含单一放热峰, 随着升温速率  $\beta$  的升高, DSC 曲线峰值对应的温度右移, 放热峰峰值提高, 且宽度变窄, 说明固化反应放热更加集中。随着峰值右移, 固化反应的固化起始温度  $T_i$ 、固化峰值温度  $T_p$  以及固化终止温度  $T_f$  随之升高, 固化特征温度对升温速率  $\beta$  有较大的依赖性。因此, 可通过  $T$ - $\beta$  外推法获得升温速率为 0°C 时的最佳固化温度条件(凝胶温度  $T_{\text{gel}}$ 、固化温度  $T_{\text{cure}}$ 、后处理温度  $T_{\text{treat}}$ ), 从而对固化工艺进行初步拟定。



(a) 1 000 phr 试样

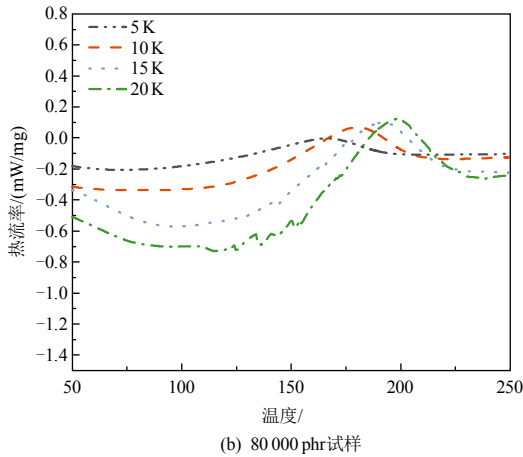


图5 导电墨水试样在不同升温速率 $\beta$ 下的DSC曲线

Fig. 5 DSC curve of conductive ink sample at different heating rates  $\beta$

固化特征温度  $T$  与升温速率  $\beta$  有如下关系:

$$T = A + B\beta \quad (5)$$

式中:  $A$  为直线截距;  $B$  为直线斜率。  $T$  与  $\beta$  变化规律符合线性关系。

导电墨水试样的  $T$ - $\beta$  线性拟合曲线如图6所示, 最佳固化温度条件如表1所示, 据此确定 AgNWs

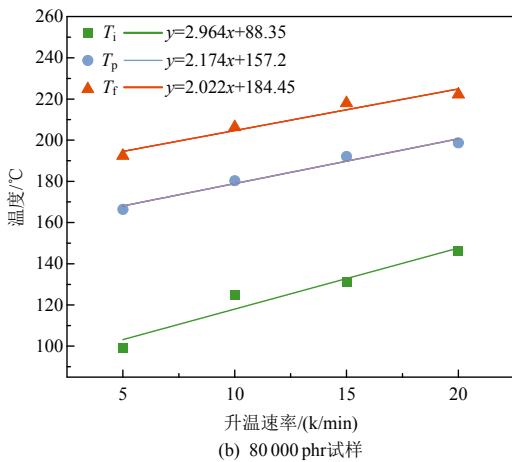
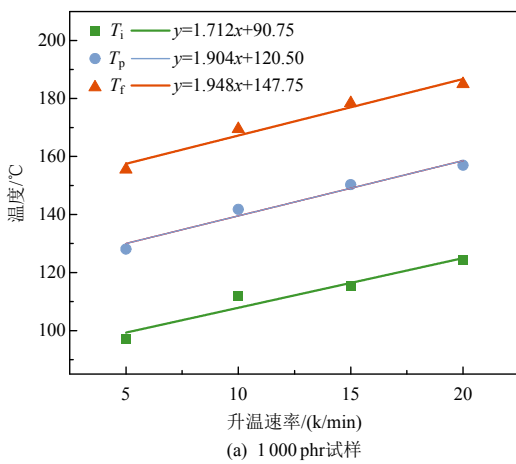


图6 导电墨水试样的  $T$ - $\beta$  线性拟合曲线

Fig. 6  $T$ - $\beta$  linear fitting curve of conductive ink sample

表1 导电墨水试样的最佳固化温度条件

Table 1 Optimum curing temperature conditions for scraped ink samples

质量份比例	$T_{gel}/^{\circ}\text{C}$	$T_{cure}/^{\circ}\text{C}$	$T_{treat}/^{\circ}\text{C}$
1 000 phr	90.75	120.50	147.75
80 000 phr	88.35	157.2	184.45

质量份比例为 1 000 phr 与 80 000 phr 的导电墨水固化工序分别  $90^{\circ}\text{C}/2\text{h}+120^{\circ}\text{C}/2\text{h}+150^{\circ}\text{C}/3\text{h}$  和  $90^{\circ}\text{C}/2\text{h}+150^{\circ}\text{C}/2\text{h}+180^{\circ}\text{C}/3\text{h}$ , 据此调整薄膜制备过程中湿膜的固化温度和时间。

2.2 微观形貌

实验中通过搅拌、超声分散和刮涂最大限度地提高 AgNWs 的均匀分布程度。图7为放大 10 000 倍和 20 000 倍后 AgNWs-EP 薄膜的表面形貌 SEM 表征, 制备薄膜所用导电墨水的 AgNWs 质量份比例为 80 000 phr。

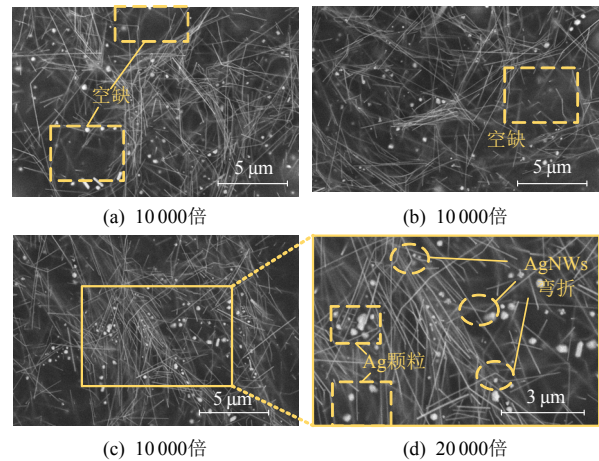


图7 AgNWs-EP 薄膜的 SEM 图像

Fig. 7 SEM image of AgNWs-EP film

图7中亮色线状物即为 AgNWs 纳米线, 观察可知 AgNWs 分布较为均匀, 线条交叠重复, 搭建成网络状, 可以构成导电通路。但膜表面的 AgNWs 仍有小面积团聚和空缺, 主要是因为 AgNWs 比表面积大, 具有较高的表面能, 在墨水中发生随机布朗运动碰撞时易发生团聚<sup>[35]</sup>, 这种现象在一定程度上会对透明导电薄膜的导电性产生影响。同时, 发现膜表面部分 AgNWs 纳米线长度比实际的  $20\mu\text{m}$  要小, 这是由于纳米线在导电墨水搅拌或超声的过程中发生折断, 或剩余部分固化在树脂内部, 裸露在膜表面的仅为纳米线的一部分。因此, 在进一步研究中仍需通过调整分散剂的种类比例, 优化墨水制备工艺等途径改善 AgNWs 的分散均匀性。膜表面分散的较多圆形颗粒, 是制备所用 AgNWs 原料中掺杂着的银颗粒。

### 2.3 光电性能

对于光伏板静电除尘的应用场景，透明导电薄膜需在一定方阻范围内具有较高透光率，然而透光率与导电性一般呈现相互制约关系。定义透明导电薄膜的除尘适用性指标  $K_N$  衡量材料的除尘适用程度及光电性能优劣，其计算式为：

$$K_N = T \cdot N_\omega \quad (6)$$

$$N_\omega = \frac{(A_2 - A_1) \cdot p}{1 + 10^{[h_1(L_1 - R_s)]}} + \frac{(A_2 - A_1) \cdot (1 - p)}{1 + 10^{[h_2(L_2 - R_s)]}} \quad (7)$$

式中  $N_\omega$  为以除尘率  $\omega$  为考核标准拟合得到的方阻  $R_s$  评价函数，其相关推导过程及参数取值详见附录 A。

从图 8 所示的 AgNWs-EP 薄膜的实物图中可见，随着导电墨水中 AgNWs 质量份比例的增加，呈透明银灰色的薄膜颜色逐渐加深，透光率逐渐降低。图 9 为 AgNWs-EP 薄膜的透光率  $T$  及雾度  $H$ 。随着 AgNWs 质量份比例的增加， $T$  值逐渐下降，纯 EP 薄膜的  $T$  值较 PET 基底的稍有升高，质量份数为 80 000 phr 的 AgNWs-EP 薄膜  $T$  值为 43.41%，较 EP 薄膜下降 51.88%。反之，随着 AgNWs 质量份比例的增加，AgNWs-EP 薄膜的  $H$  值逐渐下降，EP 薄膜  $H$  值较 PET 基底的稍有降低，质量份数为 80 000 phr 的 AgNWs-EP 薄膜  $H$  值为 47.14%，较 EP 薄膜提高 87.93%。在光伏板静电除尘过程中，需将透明导电薄膜覆在光伏板表面辅助灰尘颗粒

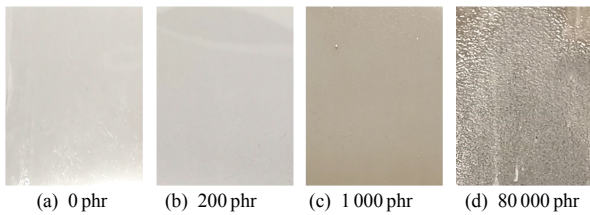


图 8 AgNWs-EP 薄膜的实物图

Fig. 8 Physical picture of AgNWs-EP film

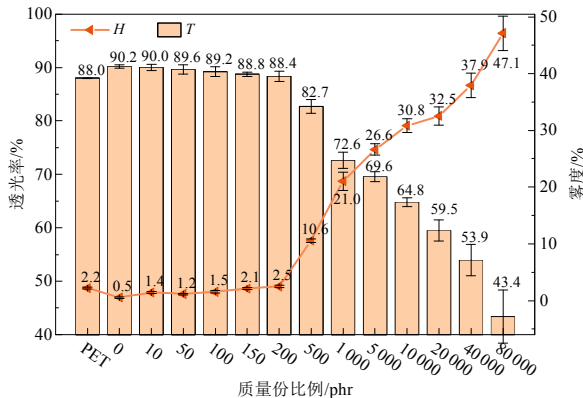


图 9 AgNWs-EP 薄膜的光学性能

Fig. 9 Optical properties of AgNWs-EP film

荷电从而顺利起跳及清除，低透光率的薄膜会阻碍太阳光向光伏板内透射，光伏电极接受到的光辐射量降低，光伏电池的发电功率下降。

雾度是光透过介质后发生散射的程度，光的散射会提高光在薄膜光伏器件中太阳能转化层的传播路径，有助于太阳能电池对光的吸收，使得太阳能电池的能量转化效率提高<sup>[36]</sup>。导电墨水中 AgNWs 质量份比例较高的时，薄膜的  $H$  值显著增加，从雾度的角度来看，将 AgNWs-EP 薄膜覆在光伏板表面对太阳能光伏板的正常使用有利。因此，适用于光伏板表面除尘应用的薄膜应当兼具高透光率和一定的雾度。

薄膜的方阻  $R_s$  测量结果以及根据式(6)、(7)计算得到的除尘适用性指标  $K_N$  如图 10 所示，其中  $R_s$  值随 AgNWs 的质量分比例升高而降低，最低在 80 000 phr 时可达到  $10^7 \Omega/\square$ ，相较于常规的透明导电薄膜而言，导电性并不突出。然而，已有研究表明，在光伏板的静电除尘过程中，透明导电薄膜起辅助灰尘颗粒荷电的作用，对导电性的要求较低<sup>[19]</sup>，需结合静电除尘实验结果对其应用效果进行综合评估。除尘适用性指标  $K_N$  与  $R_s$  值、 $T$  值趋势相反，整体随着 AgNWs 的质量份比例增加而增大，可见 AgNWs-EP 薄膜的光电性能随之增强，在静电除尘领域的适用性逐渐增强，并在 40 000 phr 处取得最大值，此时薄膜最适用于光伏板静电除尘。

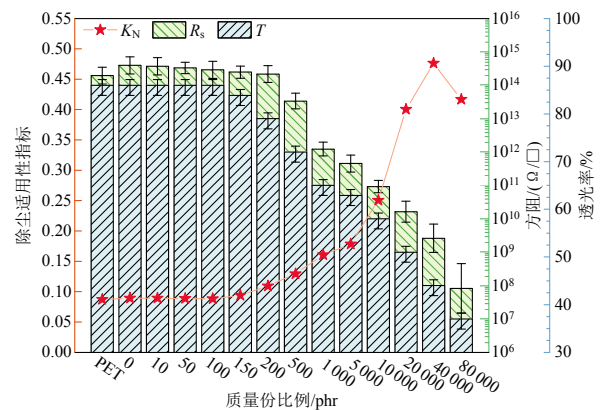


图 10 AgNWs-EP 薄膜的方阻  $R_s$  及除尘适用性指标  $K_N$

Fig. 10 Square resistance and dust removal suitability index  $K_N$  of AgNWs-EP film

### 2.4 光伏板静电除尘效果评估

光伏板表面采用不同 AgNWs 质量份比例的薄膜，在温度为 25℃、相对湿度 50%的环境下进行静电除尘实验后，由式(1)计算得到 AgNWs-EP 薄膜的光伏板静电最终除尘率  $\omega$ ，如图 11 所示。最终除尘率  $\omega$  总体随着 AgNWs 质量份比例的增大而升高，

在质量份比例较低时 $\omega$ 值较低；在质量份比例达到10 000 phr 后有较明显的提升，最大可在质量份比例为80 000 phr 时达95.67%。

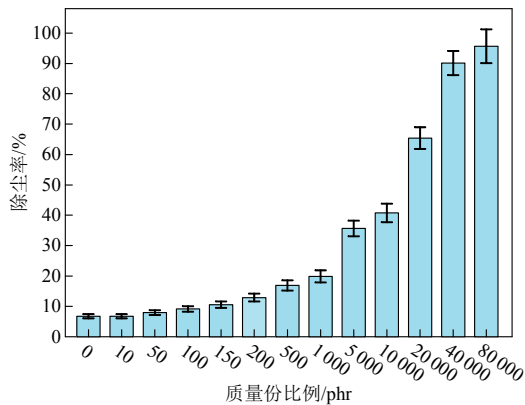


图 11 AgNWs-EP 薄膜的光伏板静电除尘率  
Fig. 11 Electrostatic dust removal rate of photovoltaic panel with AgNWs-EP film

由式(2)–(4)计算得到，表面材料为 AgNWs-EP 薄膜的光伏板在除尘后的发电效率 $\eta^*$ 。表 2 所示为光伏板静电除尘前后的发电效率。作为对照组，表面材料为纯 EP 薄膜的光伏板在积灰密度为 5 mg/cm<sup>2</sup> 时的 $\eta^*$ 值为 54.84%，采用 AgNWs 质量份比例为 80 000 phr 的薄膜样品除尘后可相对提高发电效率 40.84%。尽管高质量份比例的薄膜样品的透光率较低，但通过实现优异的除尘效果可以有效提高光伏板的发电效率。

表 2 静电除尘前后的光伏板发电效率

Table 2 Power generation efficiency of photovoltaic panels before and after electrostatic dust removal

质量份比例/phr	发电效率		
	$\eta_{com}/W$	$\eta_{ele}/W$	$\eta^*/\%$
≤5 000	≤13.03	≤4.02	≤30.81
10 000	12.13	4.36	35.92
20 000	11.14	6.89	61.82
40 000	9.90	8.42	85.08
80 000	8.87	8.67	97.77

综上，光伏板的发电效率与其表面覆盖的透明导电薄膜的光电性能密切相关，对于 AgNWs-EP 透明导电薄膜而言，后续研究中应关注薄膜与基底之间的粘接强度的提升、薄膜导电性以及透光率的提高，从而进一步满足光伏板静电除尘的应用需求。

## 2.5 材料应用耐候性能评估

### 2.5.1 紫外老化性能

环氧树脂在紫外光照下存在老化加速的问题，不仅影响材料的透光性能，还会产生黄化和光衰减等现象。针对 AgNWs-EP 透明导电薄膜适用的光伏

板除尘应用场景，对薄膜进行紫外加速老化实验，探究和验证材料的稳定性具有一定的必要性。选择除尘适用性指标  $K_N$  数值较高的质量份比例，即 20 000、40 000 和 80 000 phr，进行老化实验样品制备，此外将 AgNWs 质量份比例为 0 phr 的薄膜作为对照组。

图 12 为老化后 AgNWs-EP 薄膜的光电性能、除尘适用性指标  $K_N$  及除尘率 $\omega$ ，经过累计辐射量为 30 kW·h/m<sup>2</sup> 的紫外老化，透光率  $T$  平均下降 4.96%，雾度  $H$  平均上升 7.20%，上升比例较透光率  $T$  更大，老化后薄膜对光伏板光吸收的影响尚在可控范围内；紫外老化对薄膜方阻的影响较小，除尘适用性指标  $K_N$  总体下降，质量份比例为 80 000 phr 的薄膜  $K_N$  值最高，在光伏板表面静电除尘的应用场景中具有最高的适用性；除尘率 $\omega$ 平均下降 12.84%，质量份比例为 80 000 phr 的薄膜除尘率 $\omega$ 仍可达 88.35%，AgNWs-EP 薄膜在紫外老化实验后仍具备有效的除尘应用效果。综上，虽然长时间的紫外照射会不可避免地对 AgNWs-EP 薄膜的光电性能和除尘应

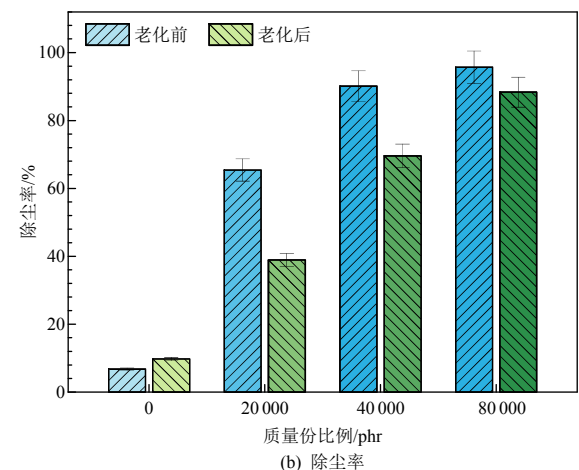
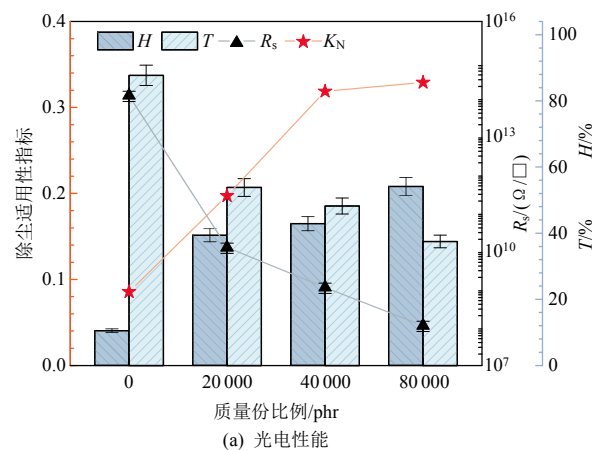


图 12 紫外老化后 AgNWs-EP 薄膜的光电性能及除尘率  
Fig. 12 Photoelectric properties and dust removal effect of AgNWs-EP films after ultraviolet aging



用效果产生一定的负面影响,但薄膜在 600 h 老化后依旧能够适用于光伏板静电除尘,满足应用需求,具备良好的工程应用可行性。

### 2.5.2 机械耐久性

AgNWs 透明导电薄膜往往存在易脱落的问题,兼之光伏电站常选址于风沙天气频发的西北地区,薄膜的基底粘附力及磨损性问题不可忽视。选择除尘适用性指标  $K_N$  最优的质量份比例,即 40 000 phr 的 AgNWs-EP 薄膜进行机械耐久性测试,采用归一化的透光率  $T^*$  和方阻  $R_s^*$  以及除尘适用性指标  $K_N$  进行表征。

图 13 所示为质量份比例 40 000 phr 的薄膜粘附力及耐磨损性测试结果。随着胶带剥离次数和磨损循环周期的增加,薄膜的光电性能均稍有下降。在胶带剥离 70 次后薄膜的透光率  $T$  基本不变,归一化的方阻  $R_s^*$  上升 2.63%,与 Jing 等<sup>[37]</sup>制备的 CNT/AgNW 薄膜相比,优于其一次压制薄膜胶带粘附实验后方阻上升 459.81%,二次压制薄膜实验后上升 9.31%的结果。在磨损循环 150 个周期,即在砂纸

移动 3 000 cm 后,薄膜的透光率  $T$  仅下降 1.41%,归一化的方阻  $R_s^*$  上升 1.99%。环氧树脂与 AgNWs 间的强粘接力使所制得的 AgNWs-EP 薄膜有着极强的基底粘附力和耐磨损能力,有效改善 AgNWs 薄膜易脱落的缺陷,提高薄膜在光伏板静电除尘应用中的适应性,实验结果验证 AgNWs-EP 薄膜工程应用的可行性。

## 3 结论

本文研究银纳米线-环氧树脂薄膜的刮涂制备方法,基于光伏板的静电除尘应用场景给出薄膜的性能表征结果并评估除尘效果,得到主要结论如下:

1) 文中给出 AgNWs-EP 透明导电薄膜的刮涂制备方法。配置黏度适中、刮涂质量优、固化稳定的导电墨水,需考虑在 AgNWs 高质量份比例时适度减小固化剂和促进剂的比例,此外导电墨水在包括 PET、玻璃、硅片等不同基底上皆可以取得较好的固化效果。制备获得的 AgNWs-EP 薄膜样品中,随着 AgNWs 质量份比例的增大,薄膜方阻  $R_s$  以及透光率  $T$  呈减小趋势,雾度  $H$  与除尘适用指标  $K_N$  增大,在质量份比例为 40 000 phr 时  $K_N$  达到最大值。此时  $R_s$  的数量级为  $10^8 \Omega/\square$ ,  $T=53.93\%$ ,  $H=37.94\%$ ,  $K_N=0.48$ 。

2) 经过时长为 600 h,辐射剂量为  $30 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$  的人工紫外老化后,透光率  $T$  下降 4.96%,除尘率  $\omega$  下降 12.84%,薄膜仍适用于光伏板静电除尘;在机械耐久性测试中,薄膜的光电性能仅稍有下降,环氧树脂的强粘接力使所制得的 AgNWs-EP 薄膜有着极强的基底粘附力和耐磨损能力。

3) 基于透明导电薄膜的光伏板静电除尘试验中,除尘率  $\omega$  随着 AgNWs 质量份比例的增大而升高,在质量份比例不小于 20 000 phr 时具有明显的除尘效果,除尘率最高可达 97.77%。尽管高质量份比例的薄膜样品的透光率较低,但在静电除尘中能够获得良好的除尘效果。

4) AgNWs-EP 透明导电薄膜具备良好的应用可行性,但考虑到薄膜适用的静电除尘应用场景,仍需进一步开展试点应用测试其实际除尘效果及后续耐候性能。后续研究中透明导电薄膜的性能衰减问题也将是下一步拟解决的关键问题,一是可以对树脂基体进行耐候性改性,采用脂环族环氧树脂、氟碳树脂等耐候性强的树脂基体或者进行树脂基体共混等,在一定程度上减缓环氧树脂的光衰减

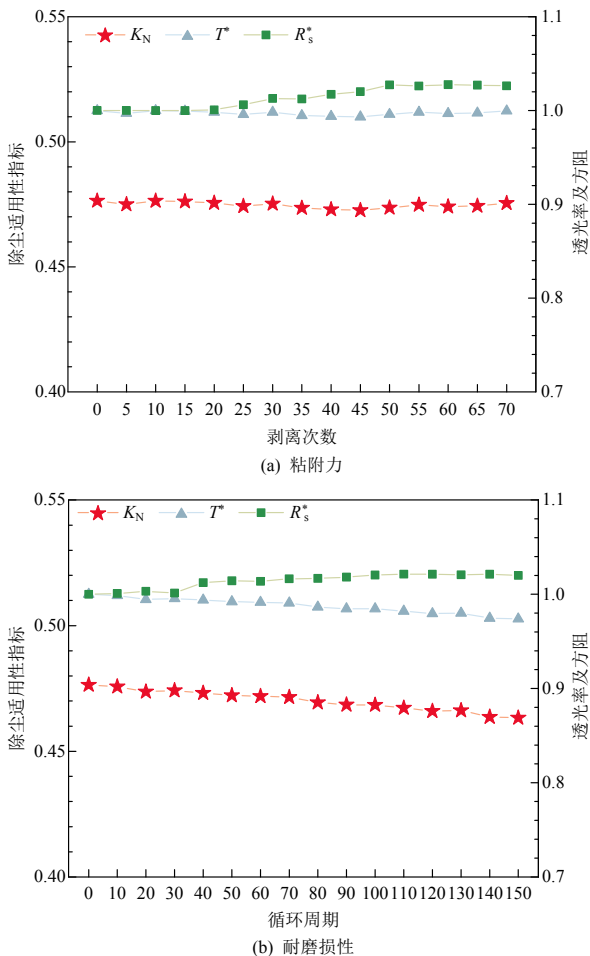


图 13 AgNWs-EP 薄膜的机械耐久性

Fig. 13 Mechanical durability of AgNWs-EP film

过程；二是针对 AgNWs 裸露在树脂外的面积存在易氧化损伤，同时表层导电薄膜易受风沙刚蹭摩擦损伤等问题，考虑通过表面处理或者镀膜来解决，进一步提高透明导电薄膜的耐候性。

## 参考文献

- [1] 董存, 王铮, 白捷予, 等. 光伏发电功率超短期预测方法综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2938-2951.  
DONG Cun, WANG Zheng, BAI Jieyu, et al. Review of ultra-short-term forecasting methods for photovoltaic power generation[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2938-2951(in Chinese).
- [2] 蒋超凡, 易陈谊. 半透明钙钛矿太阳能电池关键技术及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1739-1754.  
JIANG Chaofan, YI Chenyi. Key technologies and applications of translucent perovskite solar cells [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1739-1754(in Chinese).
- [3] 殷豪, 张铮, 丁伟锋, 等. 基于生成对抗网络和 LSTM-CSO 的少样本光伏功率短期预测[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4342-4351.  
YIN Hao, ZHANG Zheng, DING Weifeng, et al. Short-term prediction of small-sample photovoltaic power based on generative adversarial network and LSTM-CSO [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4342-4351(in Chinese).
- [4] 滕陈源, 丁逸超, 张有兵, 等. 基于 VMD-Informer-BiLSTM 模型的超短期光伏功率预测[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2961-2971.  
TENG Chenyuan, DING Yichao, ZHANG Youbing, et al. Ultra-short-term photovoltaic power prediction based on VMD-informer-BiLSTM model[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2961-2971(in Chinese).
- [5] 肖佳, 梅琦, 黄晓琪, 等. “双碳”目标下我国光伏发电技术现状与发展趋势[J]. 天然气技术与经济, 2022, 16(5): 64-69.  
XIAO Jia, MEI Qi, HUANG Xiaoqi, et al. Status quo and development trend of photovoltaic power-generating technology under the dual-carbon goal[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2022, 16(5): 64-69(in Chinese).
- [6] 国家能源局. 2023 年三季度网上新闻发布会文字实录 [EB/OL]. (2023-07-31)[2023-07-31]. [https://www.nea.gov.cn/2023-07/31/c\\_1310734825.htm](https://www.nea.gov.cn/2023-07/31/c_1310734825.htm).  
National Energy Administration. Transcript of online press conference in the third quarter of 2023 [EB/OL]. (2023-07-31)[2023-07-31]. [https://www.nea.gov.cn/2023-07/31/c\\_1310734825.htm](https://www.nea.gov.cn/2023-07/31/c_1310734825.htm).
- [7] SAIDAN M, ALBAALI A G, ALASIS E, et al. Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panels in desert environment [J]. Renewable Energy, 2016, 92: 499-505.
- [8] WANG Ao, XUAN Yimin. Close examination of localized hot spots within photovoltaic modules[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 234: 113959.
- [9] FAN Siyuan, LIANG Wenshuo, WANG Gong, et al. A novel water-free cleaning robot for dust removal from distributed photovoltaic(PV) in water-scarce areas [J]. Solar Energy, 2022, 241: 553-563.
- [10] APPASAMY J S, KURNIA J C, ASSADI M K. Synthesis and evaluation of nitrogen-doped titanium dioxide/single walled carbon nanotube-based hydrophilic self-cleaning coating layer for solar photovoltaic panel surface[J]. Solar Energy, 2020(196): 80-91.
- [11] YAZDANI H, YAGHOUBI M. Dust deposition effect on photovoltaic modules performance and optimization of cleaning period: a combined experimental - numerical study[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022(51): 101946.
- [12] KAZEM H A, CHAICHAN M T. The effect of dust accumulation and cleaning methods on PV panels' outcomes based on an experimental study of six locations in Northern Oman[J]. Solar Energy, 2019(187): 30-38.
- [13] 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.
- [14] HORENSTEIN M N, MAZUMDER M, SUMNER JR R C. Predicting particle trajectories on an electrodynamic screen-theory and experiment[J]. Journal of Electrostatics, 2013, 71(3): 185-188.
- [15] 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.
- [16] YILBAS B S, ALI H, AL-AQEELI N, et al. Characterization of environmental dust in the Dammam area and mud after-effects on bisphenol-A polycarbonate sheets[J]. Scientific Reports, 2016(6): 24308.
- [17] HUSAR R B. Intercontinental transport of dust: historical and recent observational evidence[M]//STOHL A. Intercontinental Transport of Air Pollution. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004: 277-294.
- [18] ANDERSON JR J H, PARKS G A. Electrical conductivity of silica gel in the presence of adsorbed water[J]. The Journal of Physical Chemistry, 1968, 72(10): 3662-3668.
- [19] LIU Yunpeng, LI Haoyi, LI Le, 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.
- [20] LIU Yunpeng, LI Haoyi, LI Le, et al. Preparation and photoaging resistance of single-walled carbon nanotubes transparent conductive thin films for electrostatic dust removal of photovoltaic panels[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 37: 107512.
- [21] 史月艳, 潘文辉, 殷志强. 氧化铟锡(ITO)膜的光学及电学性能[J]. *真空科学与技术*, 1994, 14(1): 35-40. SHI Yueyan, PAN Wenhui, YIN Zhiqiang. The optical and electrical properties of the ITO films[J]. *Vacuum Science and Technology(China)*, 1994, 14(1): 35-40(in Chinese).
- [22] GUILLÉN C, HERRERO J. TCO/metal/TCO structures for energy and flexible electronics[J]. *Thin Solid Films*, 2011, 520(1): 1-17.
- [23] PARK S, VOSGUERICHIAN M, BAO Zhenan. A review of fabrication and applications of carbon nanotube film-based flexible electronics[J]. *Nanoscale*, 2013, 5(5): 1727-1752.
- [24] LEE Y, AHN J H. Graphene-based transparent conductive films[J]. *Nano*, 2013, 8(3): 1330001.
- [25] ZILBERBERG K, GASSE F, PAGUI R, et al. Highly robust indium-free transparent conductive electrodes based on composites of silver nanowires and conductive metal oxides[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(12): 1671-1678.
- [26] CHEN Cuiyu, JING Maoxiang, PI Zhichao, et al. Preparation and properties of double-sided AgNWs/PVC/AgNWs flexible transparent conductive film by dip-coating process[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2015, 10(1): 315.
- [27] 白盛池, 杨辉, 汪海风, 等. 水基银纳米线导电墨水和大尺寸柔性透明导电薄膜的制备[J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49(4): 1282-1287. BAI Shengchi, YANG Hui, WANG Haifeng, et al. Fabrication of water base silver nanowire conductive ink and large scale flexible transparent conductive film[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(4): 1282-1287(in Chinese).
- [28] 张跃, 苏淮北, 何明鹏, 等. 工频双极性方波电场下环氧树脂的空间电荷特性[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(13): 5294-5302. ZHANG Yue, SU Huaibei, HE Mingpeng, et al. Space charge characteristics of epoxy resin under Power frequency bipolar square Wave electric Field [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(13): 5294-5302(in Chinese).
- [29] 李恒, 王德海, 钱夏庆. 环氧树脂固化动力学的研究及应用[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2013(4): 43-50. LI Heng, WANG Dehai, QIAN Xiaqing. Research of epoxy resin curing kinetics and its application[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2013(4): 43-50(in Chinese).
- [30] 张锋锋, 侯莹莹, 王凤玲, 等. 双酚 A 型环氧树脂/芳香胺固化体系的固化动力学研究[J]. *中国胶粘剂*, 2023, 32(3): 7-15. ZHANG Fengfeng, HOU Yingying, WANG Fengling, et al. Study on curing kinetics of bisphenol A epoxy resin/aromatic amine curing system[J]. *China Adhesives*, 2023, 32(3): 7-15(in Chinese).
- [31] 陈勇, 吴喜兵, 谭晓明, 等. 活性聚醚增韧改性环氧树脂复合材料及其固化动力学研究[J]. *中国胶粘剂*, 2021, 30(4): 15-20. CHEN Yong, WU Xibing, TAN Xiaoming, et al. Study on epoxy resin composites toughened by active polyether and its curing kinetics[J]. *China Adhesives*, 2021, 30(4): 15-20(in Chinese).
- [32] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 透明塑料透光率和雾度的测定: GB/T 2410—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of the luminous transmittance and haze of transparent plastics: GB/T 2410—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009(in Chinese).
- [33] LOTSCH H K V, GOETZBERGER A, HOFFMANN V U. Photovoltaic solar energy generation[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005.
- [34] GOSWAMI D Y, KREITH F. Handbook of energy efficiency and renewable energy[M]. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [35] 王海涛, 丁栋梁, 刘乾, 等. 聚酰亚胺基导热复合材料研究进展[J]. *高分子材料科学与工程*, 2019, 35(8): 159-166. WANG Haitao, DING Dongliang, LIU Qian, et al. Advances in polyimide based thermal conductive composites[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2019, 35(8): 159-166(in Chinese).
- [36] 方志强. 高透明纸的制备及其在电子器件中的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2014. FANG Zhiqiang. Highly transparent paper for electronic devices[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014(in Chinese).
- [37] JING Maoxiang, HAN Chong, LI Min, et al. High performance of carbon nanotubes/silver nanowires-PET hybrid flexible transparent conductive films via facile pressing-transfer technique[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2014, 9(1): 588.

#### 附录 A

品质因数作为用于衡量透明导电薄膜光电性能的指标,

常用2种计算方式:

1) 在研究透明导电薄膜性能过程中,通常选择直流电导率与光学传导率的比值 $\sigma_{dc}/\sigma_{op}$ 作为衡量不同材料光电性能的指标,即品质因数 $K_{FoM}$ ,其计算式如下:

$$K_{FoM} = \frac{Z_0}{2R_s(T^{-1/2} - 1)} \quad (A1)$$

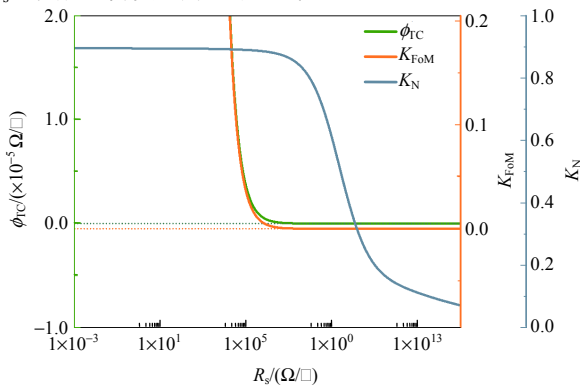
式中 $Z_0$ 为自由空间阻抗,值为 $377\Omega$ 。

2) 由G.Haacke提出,将透光率及方阻值作为参数,计算式如下:

$$\phi_{TC} = T^x/R_s \quad (A2)$$

式中 $T$ 的指数 $x$ 值取为10,此时 $\phi_{TC}$ 取得最大值处透光率 $T=90\%$ ,满足绝大多数透明导体得光传输要求。

图A1(a)所示为 $T=90\%$ 时 $K_{FoM}$ 和 $\phi_{TC}$ 的变化曲线,可见上述两种光电性能评价指标针对材料的导电性能要求基本一致,此时数值上 $K_{FoM}$ 为 $\phi_{TC}$ 的 $10^4$ 倍。然而文中薄膜材料适用的应用场景,光伏板静电除尘技术,对方阻 $R_s$ 的要求局限在区间 $R_{smin} \sim R_{smax}$ 内:当 $R_s < R_{smin}$ 时除尘率 $\omega$ 不再随着导电性的增强而大幅升高,逐渐趋于定值;当 $R_s > R_{smax}$ 时除尘率 $\omega$ 很低,薄膜几乎不具备除尘应用效果,除尘效果随 $R_s$ 的变化趋势实际为S形曲线。



图A1  $T=90\%$ 时除尘适用性指标 $K_N$ 与 $K_{FoM}$ 、 $\phi_{TC}$ 对比  
Fig. A1 Comparison of dust removal suitability index  $K_N$  with  $K_{FoM}$  and  $\phi_{TC}$  when  $T=90\%$

定义除尘适用性指标 $K_N$ 为针对此应用场景下薄膜材料的评价指标,衡量该薄膜光电性能优劣及除尘适用程度,筛选具备较高 $T$ 值且导电性能在有效区间内的透明导电薄膜, $K_N$ 的表达式如下:

$$K_N = T \cdot N_\omega \quad (A3)$$

$$N_\omega = A_1 + S_{part1} + S_{part2} \quad (A4)$$

$$S_{part1} = \frac{S_{pan} \cdot p}{1 + 10^{(h_1(L_1 - R_s))}} \quad (A5)$$

$$S_{part2} = \frac{S_{pan} \cdot (1 - p)}{1 + 10^{(h_2(L_2 - R_s))}} \quad (A6)$$

$$S_{pan} = A_2 - A_1 \quad (A7)$$

式中: $T$ 为可见光范围内的透光率; $N_\omega$ 为以除尘率 $\omega$ 为考核标准的方阻 $R_s$ 评价函数,表达式中的参数取值如表A1所示。

方阻评价函数 $N_\omega$ 以取值为0~100%的除尘率 $\omega$ 作为对应

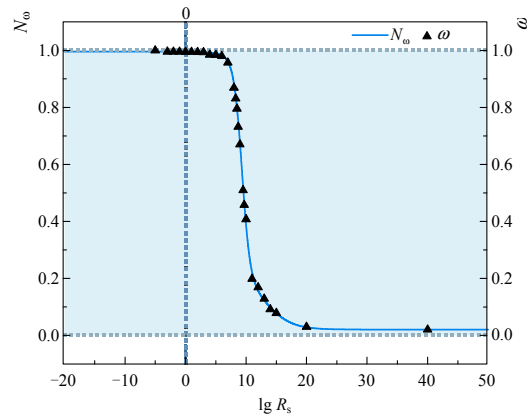
表A1 方阻评价函数 $N_\omega$ 表达式中参数的取值

Table A1 Parameter values of the square resistance evaluation function  $N_\omega$  expression

参数	取值
$A_1$	0.020 5±0.012 95
$A_2$	0.995 45±0.010 41
$L_1$	9.328 01±0.079 43
$L_2$	13.058 56±2.442 18
$h_1$	-0.648 71±0.088 91
$h_2$	-0.197 51±0.074 65
$p$	0.797 8±0.111 67

方阻 $R_s$ 值在静电除尘应用中有效与否的评价指标,为根据实测不同薄膜材料获得的 $\omega$ 与 $R_s$ 对应关系,通过BiDoseResp模型进行S曲线拟合得到的。 $\omega$ 与 $R_s$ 对应关系数据点及 $N_\omega$ 拟合曲线如图A2所示。

此评价指标 $K_N$ 在透光率 $T=90\%$ 的情况下与品质因数 $K_{FoM}$ 、 $\phi_{TC}$ 的对比如图A1所示,可见针对适用于静电除尘领域的薄膜而言,评价指标 $K_N$ 对光电性能的评价结果更加合理。



图A2  $\omega$ 与 $R_s$ 对应关系的数据点及 $N_\omega$ 拟合曲线  
Fig. A2 Data points of correspondence between  $\omega$  and  $R_s$ ,  $N_\omega$  fitting curve



李乐

在线出版日期: 2024-08-26。

收稿日期: 2023-12-25。

作者简介:

李乐(1993),男,博士,主要从事轻质高绝缘电工复合材料研究、新型复合绝缘电工装备研发及应用方面的研究工作, lile@ncepu.edu.cn;

\*通信作者: 刘云鹏(1976),男,博士,教授,博士生导师,主要从事特高压输电技术、电气设备在线检测和对外绝缘方面的研究工作, liuyunpeng@ncepu.edu.cn。

(编辑 胡琳琳, 张蕾)