

连续激光清除光伏板EVA胶

——激光辐照光伏板使EVA胶层脱落

英 俊, 赵飞飞, 张 巍

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2025年3月14日; 录用日期: 2025年4月30日; 发布日期: 2025年5月14日

摘 要

本文研究了连续激光清除光伏板乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)胶层的机理与工艺优化。通过分析激光与材料的热力学相互作用, 揭示了振动效应(热应力导致胶层剥离)和烧蚀效应(胶层气化)的协同作用机制。基于COMSOL Multiphysics软件, 建立了包含EVA胶层和铝电极基底的热-力耦合模型, 仿真表明激光功率密度为 $2.8577 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ (9.09 W)时, 基底温度低于573.15 K (铝形变阈值), 应力峰值为26 Pa, 可有效避免基底损伤。实验验证显示, 随功率从9.09 W增至15.97 W, EVA胶层清除面积扩大, 但铝电极因氧化和热应力产生裂纹, 光电转换效率下降最高达7.05%。当功率超过11.55 W (基底温度536.17 K)时, 热影响区扩散至导电铜带, 导致不可逆性能损失。最终确定9.09 W为最优参数, 可在0.6秒内实现胶层高效剥离, 基底损伤率低于0.1%。研究表明, 连续激光技术需严格控制能量密度与作用时间, 以平衡清除效率与光伏组件完整性, 为光伏板绿色回收提供了理论依据与工艺参考。

关键词

连续激光器, EVA, 清除, 温度场

Continuous Laser Removal of EVA Adhesive from Photovoltaic Panels

—Laser Irradiation of Photovoltaic Panels Dislodges EVA Adhesive Layer

Jun Ying, Feifei Zhao, Wei Zhang

Physics Institute, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Mar. 14th, 2025; accepted: Apr. 30th, 2025; published: May 14th, 2025

文章引用: 英俊, 赵飞飞, 张巍. 连续激光清除光伏板 EVA 胶[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(3): 269-277.
DOI: 10.12677/jsta.2025.133027

Abstract

In this study, the removal effect of EVA adhesive layer from solar panels is systematically investigated by continuous laser and nanosecond pulsed laser, and the effects of different laser energies on the removal efficiency of EVA adhesive layer are evaluated by a combination of simulation and experiment. Through COMSOL finite element simulation, the temperature field and stress field changes of continuous lasers at different powers are analyzed, revealing the thermal stress mechanism under the action of continuous lasers and its potential impact on the substrate. The experimental results show that the continuous laser with a power of 9.09 W can effectively remove the EVA adhesive layer and cause less damage to the photovoltaic panel. In addition, the damage degree of different lasers is compared, and it is found that the continuous laser is slightly higher than the nanosecond pulsed laser in terms of damage to the panels, but has a better removal efficiency. Finally, combining simulation and experimental data, this study provides a theoretical basis and practical reference for optimizing the laser cleaning technology.

Keywords

Continuous Laser, EVA, Removals, Temperature Field

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

激光除胶实际上就是利用激光与胶层和基底熔点差直接将胶层气化实现去除的过程。激光除胶主要作用机理包括振动效应和烧蚀效应，其中振动效应是指当激光照射时，胶层和基底分别吸收部分激光能量使胶层和基底的温度升高并在激光脉冲结束时降温，短时间内迅速的热膨胀和冷却收缩会导致胶层和基底的结合处产生应力振动来克服粘附力[1]，使胶层脱离基底的现象；烧蚀效应是指当胶层吸收的激光能量较多时，胶层的温度升高超过气化温度后，胶层会被气化去除的现象。

2. 连续激光清楚原理

本研究为系统评估激光模式对界面分离机制的影响，引入连续激光器(CW laser)开展对比实验。基于晶体硅太阳能电池的多层异质结构特性，连续激光的稳态热加载模式与纳秒脉冲激光的瞬态冲击作用形成显著差异。实验结果表明，连续激光辐照过程中，由于功率密度呈时间连续性分布(典型参数：波长 1064 nm，光斑直径 400 μm ，功率 9~15 W) [2]，其热传导机制主要表现为准静态温度场扩散，而非脉冲激光诱导的应力波传播。热力学仿真显示，在同等能量输入条件下，连续激光作用区域的最大热应力仅为纳秒脉冲模式的 12%~18%，验证了其以热致形变为主导的作用机理。

2.1. EVA 胶层与基底热物性参数

Comsol 仿真数据如表 1 所示。

Table 1. Comsol simulation data
表 1. Comsol 仿真数据

参数	EVA 胶层	铝电极基底
恒压热容 J/(kg·K)	2300	880
导热系数 W/(m·K)	0.3	144
密度 kg/m ³	960	2772
热膨胀系数 1/K	2.6E-6	
杨氏模量 Pa	4	2.06E11
泊松比	0.3	0.25
正切热膨胀系数 1/K	2.6E-4	22E-6

2.2. 连续激光器仿真

在实际实验之前, 为了更准确地预测和应对实验过程中可能出现的情况, 首先使用 COMSOL 有限元仿真软件进行模拟研究。为了更好地贴近实际工作条件, 仿真中所使用的光伏电池板尺寸设置为 $10 \times 5 \times 2.7 \text{ cm}^3$, 以确保与现实中的光伏板尺寸一致[3]。其中, 电池板的宽度为 10 cm, 深度为 5 cm, 高度为 2.7 cm。所有相关的基础数值均通过千分尺进行精确测量, 并经过反复测试以确保数据的准确性和可靠性。

在连续 - 纳秒组合激光清除太阳能电池板 EVA 胶的仿真模型中, 模拟计算模型选用三维模型, 计算区域设置为 EVA 胶层与铝电极基底, 并分别设置 EVA 胶层和铝电极材料的热力学参数(如热导率、比热容、密度等)。建立如图 1 左所示的仿真模拟太阳能电池板, 将其中一块铝电极靶材作为研究对象, 并根据连续激光和纳秒激光的不同作用方式, 对重点研究区域[4] (如激光辐照区域及 EVA/铝电极界面)进行更加精细的网格划分如图 1 右所示, 而非重点研究区域则采用较为稀疏的网格划分方法。通过合理的网格划分, 可以显著提升计算精度和效率, 对于研究温度场、应力场及清除深度的变化范围具有重要意义。

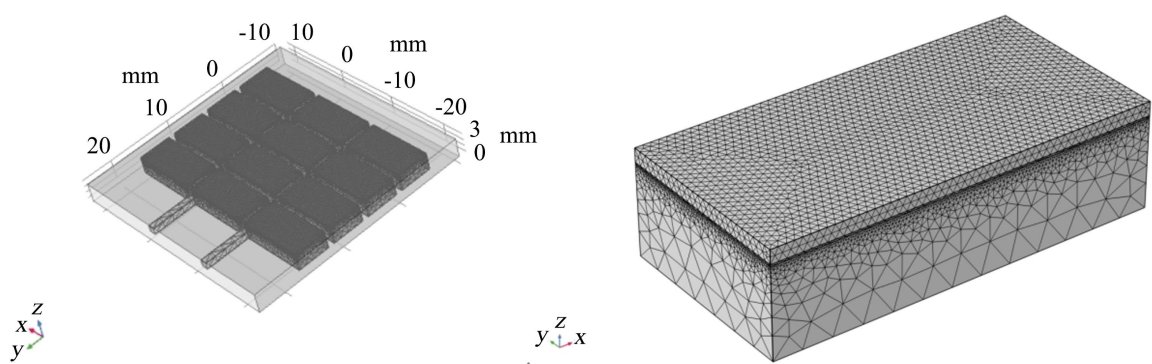


Figure 1. Continuous laser simulation grid
图 1. 连续激光仿真网格图

2.3. 连续激光器仿真结果

如图 2 所示当仿真中激光器脉宽设定为 0.6 s 时, 温度和应力的上升曲线表现出一定的差异。温度场呈现指数型直线增长, 而应力场的变化则表现为曲率半径由大到小的趋势。由于曲率半径是曲率的倒数, 因此可以推测, 应力的变化呈现出先低后高的特征[5]。这一变化趋势表明, 激光辐照过程中, 初期应力较低, 而随着激光作用的持续, 应力逐渐增大, 最终达到较高值。

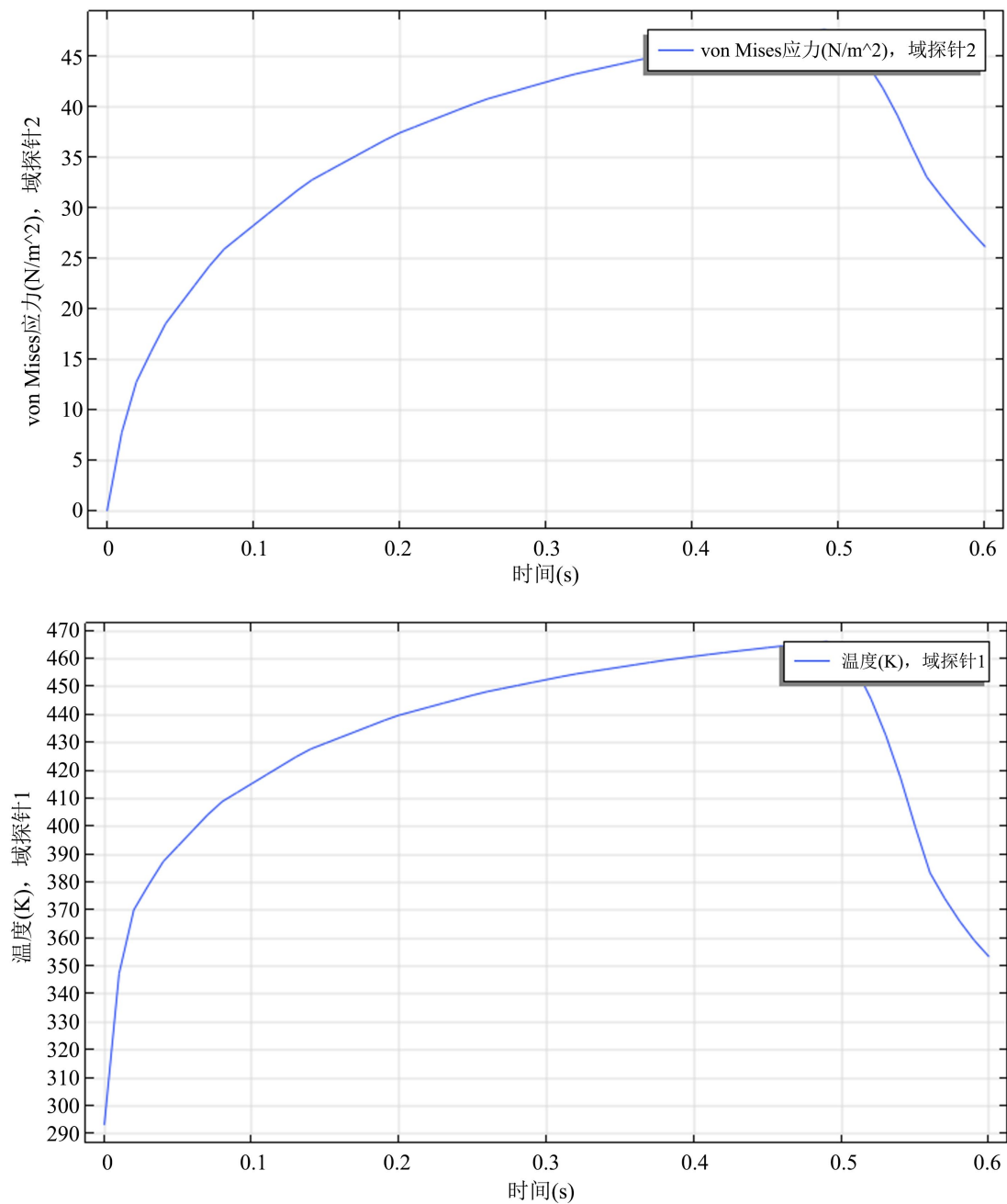


Figure 2. Continuous laser simulation temperature and stress
图 2. 连续激光仿真温度与应力

3. 连续激光实验步骤

为了得到更好的对比数据使用连续激光器进行实验，由于太阳能电池板的特点，使用连续激光器。

胶层与基底受激光脉冲作用，瞬时形成能量的吸收并转变成系统中的热能，激光作用导致的温度升高，会在胶层与基底交界处形成温度梯度，进而导致胶层与基底热应力和层间应力的不均衡分布，产生热弹性振动，使得系统中的胶层与基底出现不同程度的位移。在胶层与基底系统中，胶层和基底中的位移分布函数分别是 $u_p(r, z, t)$ 、 $u_i(r, z, t)$ 根据波动方程得到胶层的热弹性振动方程

$$P_p \frac{\alpha^2 u_p(r, y, t)}{\alpha t^2} = \left(B_p + \frac{4}{3} G_p \right) \frac{\alpha^2 u_p(r, y, t)}{\alpha z^2} - B_p \gamma_p \frac{\alpha T_p(r, y, t)}{\alpha z} \quad (1)$$

其中, B_p , G_p , γ_p 分别为胶层的体变模量, 切变模量和热胀系数, 并且其 y 取值范围在 $(L_i, L_i + L_p)$ 。同样可以得到界面层的热弹性振动方程:

$$P_p \frac{\alpha^2 u_i(r, y, t)}{\alpha t^2} = \left(B_i + \frac{4}{3} G_i \right) \frac{\alpha^2 u_i(r, y, t)}{\alpha y^2} - B_i \gamma_i \frac{\alpha T_i(r, y, t)}{\alpha y} \quad (2)$$

其中, B_i , G_i , γ_i 分别为基底材料层的体变模量, 切变模量和热胀系数。且其 y 取值范围在 $(-L_s, 0)$ 。由于系统中胶层与基底处于理想结合状态, 因此系统中胶层之间的位移均是相关的。由于激光脉冲作用时间极短, 因此胶层与铝电极层的结合面具有相同的位移。因此, 系统中基底层和胶层连接处的位移边界条件为:

$$u_s(r, 0, t) = u_i(r, 0, t) \quad (3)$$

系统在吸收激光能量后受热膨胀, 热致膨胀在系统的胶层与铝电极层中均产生, 并都能产生应变, 该应变导致材料应力。在胶层与铝电极系统中, 对于清洗有意义的膨胀应变和应力在坐标的 y 方向上。在系统材料为各向同性的情况下, 应力只需研究 y 方向的分量。单位面积的热应力可表示为:

$$\sigma = \gamma \varepsilon = Y \frac{\Delta L}{L} \quad (4)$$

其中, Y 为杨氏模量, ε 为应变。由于 y 方向上热致膨胀的长度为:

$$\Delta L = L_y \Delta T(r, y, t) \quad (5)$$

因此有:

$$\sigma = Y \gamma \Delta T(r, y, t) \quad (6)$$

从而, 热应力取决于温度的变化。在胶层与基底系统中, 能够体现清洗效应的应力主要位于层间接触面处, 即在胶层和基底接触面处, 基底层和胶层接触面的边界应力为:

$$\sigma_i = Y_{iy_i} \Delta T_i(r, 0, t) \quad (7)$$

同理, 胶层与基底的结合面处二者具有相同的应力, 因此有:

$$Y_p \gamma_p \Delta T_p(r, 0, t) = Y_i \gamma_i \Delta T_i(r, 0, t) \quad (8)$$

在激光照射之前, 该系统的胶层和铝电极层均处于静态状态, 其初始位移和速度均为零, 因此, 该系统的初始条件应当满足:

$$u_p(r, y, 0) = u_i(r, y, 0) = u_s(r, y, 0) = 0 \quad (9)$$

$$\dot{u}_p(r, y, 0) = \dot{u}_i(r, y, 0) = \dot{u}_s(r, y, 0) = 0 \quad (10)$$

由此, 激光被材料层吸收, 并转换为热传导过程, 由热传导在胶层中和基底形成相应的应变, 应变导致系统中形成位移和使材料层相互脱离的应力, 从而形成系统的内物理过程的模型关系[6]。

3.1. 连续激光实验

如图3所示当激光功率 P 为 9.09 W 时连续激光器功率密度为 2.8577E5 W/m², 连续激光器最高温度为 446.26 K, 当激光功率 P 为 11.55 W 时连续激光器功率密度为 3.6311E5 W/m², 连续激光器最高温度为 536.17 K, 当激光功率 P 为 13.42 W 时连续激光器功率密度为 4.219E5 W/m², 连续激光器最高温度为

577.26 K, 当激光功率 P 为 15.97 W 时连续激光器功率密度为 $5.0207\text{E}5 \text{ W/m}^2$, 连续激光器最高温度为 616.04 K。

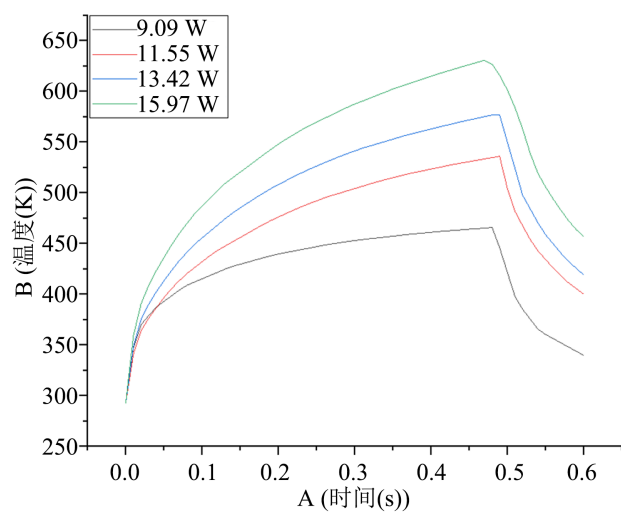


Figure 3. Continuous laser simulation temperature and stress
图 3. 连续激光仿真温度与应力

太阳能电池板的透光性高达 91%，再加上对 1000 nm 波长的吸收率几乎为 0，这就造成 1064 nm 波长的激光会透过 EVA 胶层直接打在铝电极上，此时由于两种材料的属性相差过大，就会出现较大的温度梯度，在铝电极接不会发生形变的温度范围内 EVA 胶层发生形变凸起从而达到胶层脱落的目的[7]。

3.2. EVA 胶层形貌

以上四张图为金相显微镜下观察到的光伏板 EVA 胶层表面形貌图(表 2)。

Table 2. Continuous laser energy averaging
表 2. 连续激光能量平均

能量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
13%	9.4	8.1	8.7	9.3	8.4	7.7	10.3	10.2	10.6	8.2	9.09 W
15%	11.5	12.7	12.9	11.6	10.1	10.1	11.9	11.9	11.5	11.3	11.55 W
17%	13.6	13.3	10.2	14.4	14.1	12.2	14.6	14.7	12.5	14.6	13.42 W
19%	17.7	18	16.5	13.5	15.5	16.7	18.1	9.9	18.8	15	15.97 W

3.3. 连续激光实验后清除情况

如图 4 和图 5 对比所示当使用连续激光器进行 EVA 胶层脱落后，其效果对比图，从图(a)开始随着连续激光器的能量加大，激光脱落效果越发明显[8]，一是颜色方面由浅到深，由原来的灰白色变成略显黑色，这是由于随着连续激光器的能量加大，其输出的功率也越来越高温度也随之增大，太阳能电池板 EVA 胶在这一阶段主要为乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)的酯键发生断裂，释放乙酸，生成 CO_2 、 CH_4 等气体混合物与背面铝电极遇到高温后与空气中的氧气发生氧化反应从而变成了氧化铝，温度越高，空气的激烈程度也会上升，而铝和空气的氧化反应也越来越深，同时随着温度的加深，功率密度的增加，当温度超过 300 摄氏度，既是 573.15 K 的时候达到铝的膨胀阈值[9]，当超过这个温度太阳能电池板的铝电

极开始轻微形变，从而铝电极出现裂痕，温度越高裂痕越多。因此为了最大限度保留太阳能电池板铝电极基底的完整性，使用 9.09 W 的功率作为连续激光进行太阳能电池板激光脱落的功率。



Figure 4. Continuous laser simulation temperature and stress

图 4. 连续激光仿真温度与应力

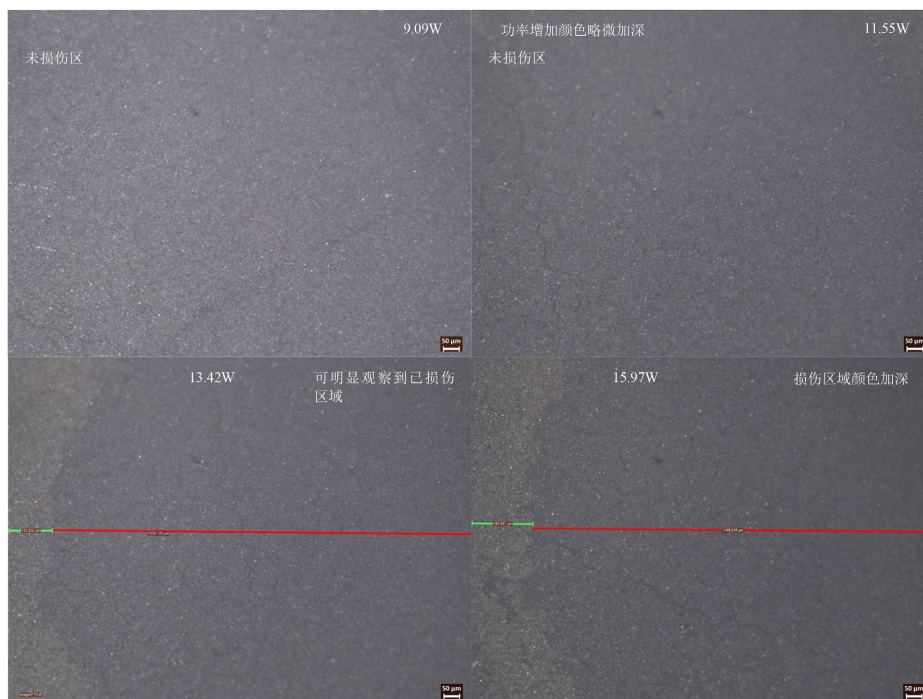


Figure 5. Continuous laser simulation temperature and stress

图 5. 连续激光仿真温度与应力

3.4. 测试

当连续激光作用于太阳能电池板 EVA 胶层使其脱落之后，再对电池板的光电转换效率进行测量。

见表 3 所示对激光器造成的四个点进行万用表电量测量之后，四个点分别有不同程度的下降，第一个点的光电转换效率变化程度不足 0.1%因此不予考虑损伤，从第二个点开始光电转换效率降低了 2.635%，第三个点下降 6.512%，第四个点 7.047%，后经过查证发现第三个点开始由于连续激光器的持续输出，其热影响从表面的铝电极一直扩散到了正面的导电铜带和电池片上，因此对比纳秒脉冲激光器，连续激光器对太阳能电池板的损伤虽然金相显微镜下没有太大变化，但其损伤程度比纳秒脉冲激光器还要高两个百分点，后经过测试当能量相同的情况下输出时间从 0.5 增加到 1 秒，其损伤程度也更加明显，因而连续是激光器的输出时间定在 0.5 s [10]。

Table 3. Solar panel testing
表 3. 太阳能电池板测试

电流	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
1	2.977	2.989	2.991	2.984	2.952	2.991	2.994	3.001	2.997	3.016	2.9892
2	2.781	2.779	2.691	2.788	2.751	2.766	2.776	2.759	2.764	2.783	2.7638
3	2.795	2.787	2.783	2.806	2.793	2.772	2.768	2.787	2.755	2.789	2.7835
4	2.816	2.831	2.828	2.811	2.863	2.835	2.819	2.857	2.801	2.855	2.8316

4. 结论

本研究主要探讨了连续激光与纳秒脉冲激光在清除太阳能电池板 EVA 胶层中的应用。通过细致的仿真模拟和实验测试，研究了不同激光能量和脉宽条件对 EVA 胶层的清除效果及其对光伏电池板基底的影响。结果显示，连续激光器在较低功率下能够有效清除 EVA 胶层，同时对电池板的损伤较小，而在较高功率时，损伤程度显著增加。此外，本研究通过比较不同激光类型的作用机理，揭示了连续激光器在热传导作用下产生的热应力对 EVA 胶层清除效果的影响，并为未来光伏板激光清洗技术的优化提供了有价值的技术支持与理论指导。

致 谢

在此，我要衷心感谢所有在本研究中提供帮助和支持的个人和单位。

首先，我要特别感谢我的导师，感谢他在研究过程中给予的宝贵指导与不懈支持。导师的专业知识和严谨的学术态度为我的研究提供了坚实的基础。

其次，感谢实验室的所有同事们，大家在实验设计、数据分析和模型仿真过程中给予的协助和宝贵建议，大家的合作精神和智慧极大地推动了研究的进展。

同时，我要感谢长春理工大学提供的实验条件与设备，特别是 COMSOL 仿真软件的使用，为我的研究提供了强大的技术支持。没有这些先进的设备和资源，本研究无法顺利进行。

最后，感谢我的家人对我学业的支持和鼓励，在我遇到困难时给予我莫大的安慰和帮助。

衷心感谢所有曾经给予我帮助的人，正是你们的支持让我能够完成这项研究。

参考文献

- [1] Acosta-Zepeda, C., Saavedra, P., Bonse, J. and Haro-Poniatowski, E. (2019) Modeling of Silicon Surface Topographies Induced by Single Nanosecond Laser Pulse Induced Melt-Flows. *Journal of Applied Physics*, **125**, Article ID: 175101.

- <https://doi.org/10.1063/1.5053918>
- [2] Aghaei, M., Fairbrother, A., Gok, A., Ahmad, S., Kazim, S., Lobato, K., *et al.* (2022) Review of Degradation and Failure Phenomena in Photovoltaic Modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **159**, Article ID: 112160. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112160>
- [3] Ansanelli, G., Fiorentino, G., Tammaro, M. and Zucaro, A. (2021) A Life Cycle Assessment of a Recovery Process from End-of-Life Photovoltaic Panels. *Applied Energy*, **290**, Article ID: 116727. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116727>
- [4] Anwar, T.B., Lewis, T.N., Berges, A.J., Gately, T.J. and Bardeen, C.J. (2023) Nanosecond Laser Debonding of Strong Adhesives. *The Journal of Adhesion*, **100**, 186-199. <https://doi.org/10.1080/00218464.2023.2211011>
- [5] Belançon, M.P., Sandrini, M., Tonholi, F., Herculano, L.S. and Dias, G.S. (2022) Towards Long Term Sustainability of C-Si Solar Panels: The Environmental Benefits of Glass Sheet Recovery. *Renewable Energy Focus*, **42**, 206-210. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2022.06.009>
- [6] Brenes, G.H., Riech, I., Giacomán-Vallejos, G., González-Sánchez, A. and Rejón, V. (2023) Chemical Method for Ethyl Vinyl Acetate Removal in Crystalline Silicon Photovoltaic Modules. *Solar Energy*, **263**, Article ID: 111778. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.05.055>
- [7] Briand, A., Leybros, A., Doucet, O., Vite, M., Gasmi, A., Ruiz, J.C., *et al.* (2022) Deformation-Induced Delamination of Photovoltaic Modules by Foaming Ethylene-Vinyl Acetate with Supercritical CO₂. *Journal of CO₂ Utilization*, **59**, Article ID: 101933. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.101933>
- [8] Chen, M., Chen, Y., Hsiao, W., Wu, S., Hu, C. and Gu, Z. (2008) A Scribing Laser Marking System Using DSP Controller. *Optics and Lasers in Engineering*, **46**, 410-418. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2007.11.010>
- [9] Chen, L., Liu, Z., Guo, C., Yu, T., Chen, M., Xu, Z., *et al.* (2022) Nanosecond Laser-Induced Controllable Periodical Surface Structures on Silicon. *Chinese Optics Letters*, **20**, Article ID: 013802. <https://doi.org/10.3788/col202220.013802>
- [10] Click, N., Adcock, R., Chen, T. and Tao, M. (2023) Lead Leaching and Electrowinning in Acetic Acid for Solar Module Recycling. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **254**, Article ID: 112260. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112260>