

扫描速度对1 μm 连续激光清除不同颜色聚乙烯薄膜的影响特性研究

王莹, 董渊*

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2024年4月4日; 录用日期: 2024年5月4日; 发布日期: 2024年5月14日

摘要

本研究基于热传导理论, 结合扫描速度, 建立了1 μm 连续激光扫描清除聚乙烯薄膜的三维物理模型, 开展了1 μm 连续激光扫描清除聚乙烯薄膜的数值模拟与实验研究, 获得了聚乙烯薄膜的温度分布规律和烧蚀形貌变化。分析聚乙烯薄膜的清除速度区间以及对应的清除速率, 进一步得到了不同颜色聚乙烯薄膜的最佳清除参数。研究结果表明: 当激光功率密度一定时, 激光扫描速度对聚乙烯薄膜的清除速率具有显著影响, 随着扫描速度的提高, 聚乙烯薄膜的清除速率逐渐增大。在保证扫描过程中不产生明火的前提下, 激光功率密度800 W/cm²时蓝色、粉色、紫色、绿色、黄色和红色聚乙烯薄膜的最佳清除速度分别为6.8 mm/s、3.9 mm/s、1.4 mm/s、1.3 mm/s、0.3 mm/s、0.3 mm/s。

关键词

连续激光, 聚乙烯薄膜, 扫描速度, 清除参数

Study on the Influence of Scanning Speed on the Removal of Polyethylene Films with Different Colors by 1 μm Continuous Laser

Ying Wang, Yuan Dong*

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

Received: Apr. 4th, 2024; accepted: May 4th, 2024; published: May 14th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 王莹, 董渊. 扫描速度对 1 μm 连续激光清除不同颜色聚乙烯薄膜的影响特性研究[J]. 现代物理, 2024, 14(3): 90-100. DOI: 10.12677/mp.2024.143011

Abstract

Based on the theory of heat conduction and the scanning speed, a three-dimensional physical model of 1 μm continuous laser scanning to remove polyethylene film was established. The numerical simulation and experimental study of 1 μm continuous laser scanning to remove polyethylene film were carried out, and the temperature distribution and ablation morphology of polyethylene film were obtained. The removal rate interval of polyethylene film and the corresponding removal rate were analyzed, and the optimal removal parameters of polyethylene films with different colors were further obtained. The results show that when the laser power density is constant, the laser scanning speed has a significant effect on the removal rate of the polyethylene film. As the scanning speed increases, the removal rate of the polyethylene film gradually increases. Respectively, under the condition that no open flame is generated during the scanning process, the optimal removal speeds of blue, pink, purple, green, yellow and red polyethylene films at laser power density of 800 W/cm² are 6.8 mm/s, 3.9 mm/s, 1.4 mm/s, 1.3 mm/s, 0.3 mm/s and 0.3 mm/s.

Keywords

Laser, Polyethylene Film, Scanning Speed, Remove Parameters

Copyright © 2024 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

聚乙烯是一种由乙烯单体聚合而成的聚合物, 具有无臭、无毒、良好的耐低温性能及化学稳定性, 因此常用于制造薄膜、包装材料、容器、管道等产品。由于以聚乙烯为原料制成的塑料薄膜极易附着在高压输电线路路上, 导致输电线路发生故障[1] [2] [3], 而激光凭借能量高、时空可控性好、非接触、高精度等特点, 可以有效的清除输电线路上的塑料薄膜, 所以在电网清障方面有广阔的应用前景。

激光与聚合物相互作用的研究可以追溯到 20 世纪 60 年代。当时美国科学家 T. H. Maiman 发明了第一台红宝石激光器, 自此开创了激光技术的新纪元。随后, 激光技术被应用于改性[4]-[9]、焊接[10]-[15]等领域, 而激光与聚合物的相互作用机理和影响因素逐渐成为研究热点。

关于聚乙烯材料的激光损伤机制, L. Torrisi 等[16]进行了波长为 438 nm 的脉冲激光定点照射聚乙烯的实验。结果显示: 当激光束照射到聚乙烯表面上时, 激光的能量与聚乙烯的电子能级或分子能级相匹配, 材料吸收激光能量发生强烈的脱氢和分子发射, 导致局部温度升高, 从而使材料熔化或气化, 进而实现去除的目的。在静态辐射过程中, 烧蚀深度取决于激光能量。除激光能量外, 脉冲重复频率和激光波长也被选为要探索的影响因素。A. J. Lee 等[17]研究发现光热烧蚀机制有助于在激光高能量下去除材料。将聚乙烯材料分别暴露在紫外飞秒激光和红外飞秒激光下, 在相同的能量密度和低脉冲重复频率下, 红外飞秒激光烧蚀材料的总体积是紫外飞秒激光烧蚀的 4 倍。针对红外飞秒激光, 激光脉冲重复频率对于烧蚀速率没有明显影响。此外, 聚乙烯材料对激光辐照响应的重要参数是烧蚀阈值, 即激光能量达到一定阈值时材料才能发生烧蚀。M. Okoshi 和 N. Inoue [18]研究发现聚乙烯材料在不同激光波长下的烧蚀阈值不同。随着激光波长的降低, 聚乙烯的烧蚀阈值也随之降低。可以看出, 目前的研究主要围绕静态条

件下脉冲激光对聚乙烯材料的定点作用, 而且只考虑了激光能量、激光波长和脉冲重复频率对材料损伤的影响。然而, 在实际工作中, 需要激光以一定速度动态清除聚乙烯薄膜, 激光的扫描速度对清除效果有明显影响。静态下激光辐照聚乙烯材料的模型不能够准确的描述完整的清除过程, 因此不再适用。

本研究将基于热传导理论建立移动状态下 $1\ \mu\text{m}$ 连续激光清除聚乙烯薄膜的物理模型, 并通过数值模拟和实验研究来探索激光清除过程中薄膜表面温度和烧蚀形貌的变化。改变激光扫描速度, 确定了聚乙烯薄膜的清除速度区间和清除速率, 因此获得聚乙烯薄膜的最佳清除参数。研究结果可为 $1\ \mu\text{m}$ 连续激光扫描清除聚乙烯薄膜的实际工作提供参数选择, 以提高清除速率。

2. 理论

2.1. 物理模型

激光清除过程是光热和化学反应相结合的过程。对于吸收性能差的聚乙烯材料来说, 在这两种机制中, 光热机制起着重要作用。热的吸收、转换和传递以及温度的变化和分布对聚乙烯的烧蚀和分解有着重要的影响[19]。本研究选用 $1\ \mu\text{m}$ 连续激光对聚乙烯薄膜进行作用。由于激光波长远小于薄膜厚度, 而且聚乙烯对激光能量的吸收发生在表面, 因此可以将 $1\ \mu\text{m}$ 连续激光热源视为面热源。假设聚乙烯薄膜各向同性, 即 $k_x(T) = k_y(T) = k_z(T) = k(T)$, 此时, 根据热传导理论, 二维非稳态导热微分方程表示为:

$$k(T) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q(x, y, t) = \rho(T) C(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $k(T)$ 、 $\rho(T)$ 、 $C(T)$ 、 T 和 t 分别为导热系数、密度、恒压比热容; 温度分布和激光作用时间; $Q(x, y, t)$ 为单位面积、单位时间内聚乙烯吸收激光能量所产生的热量。

在 $1\ \mu\text{m}$ 连续激光的光斑中心扫描路径上截取单位区域面积:

$$ds = dx \cdot dy \quad (2)$$

则作用在此区域上的 $1\ \mu\text{m}$ 连续激光功率为:

$$dP = ds \frac{2\alpha P}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{2(x^2 + y^2)}{r^2}\right) \quad (3)$$

光斑完成此区域的扫描所需要的时间为:

$$dt = \frac{dx}{V} \quad (4)$$

式中: V 为扫描速度。

则作用在此区域的 $1\ \mu\text{m}$ 连续激光总能量为:

$$E_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2\alpha P}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{2(x^2 + y^2)}{r^2}\right) ds \frac{dx}{V} \quad (5)$$

假设 $1\ \mu\text{m}$ 连续激光清除聚乙烯薄膜的温度需要 T , 此区域材料被分解所需要的能量为:

$$E_2 = \rho C D \Delta T ds \quad (6)$$

式中: ρ 、 C 和 D 分别为密度、比热容和扫描深度;

根据能量守恒定律:

$$E_1 = E_2 \quad (7)$$

则:

$$D = \frac{\frac{2\alpha P}{V\pi r^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{2(x^2 + y^2)}{r^2}\right) dx}{\rho C \Delta T} \quad (8)$$

当光斑沿着 X 方向做直线运动时, 认为 Y 坐标始终为 0, 此时可以得到:

$$D = \frac{\sqrt{2}\alpha}{\rho C \Delta T r \sqrt{\pi}} \left(\frac{P}{V}\right) \quad (9)$$

由公式(9)可知, 聚乙烯的基本物理参数确定以后, 清除深度受激光功率、光斑半径和扫描速度等激光参数影响。当激光功率和光斑半径一定, 即功率密度一定时, 扫描速度成为影响清除深度的唯一参数。

以 $1 \mu\text{m}$ 连续激光的扫描速度为变量, 研究了去除聚乙烯薄膜的速度阈值和清除机理。 $1 \mu\text{m}$ 连续激光的功率密度 Q 可以表示为:

$$Q(x, y) = \frac{2\alpha P}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{2(x^2 + y^2)}{r^2}\right) \quad (10)$$

式中: α 为能量吸收系数; P 为激光功率; r 为激光光斑半径。

2.2. 仿真模型

聚乙烯薄膜的仿真模型如图 1 所示。在有限元软件中建立三维模型, 利用固体传热模块模拟清除区域的温度分布。设定模型尺寸为 $100 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 。在激光清除过程中, 激光束模拟为平面上呈高斯分布的稳定热源。激光沿横坐标单道单次匀速扫描聚乙烯薄膜, 激光功率转化为热载荷进入材料。为了提高计算的精度, 使有限元网格的最小单元尺寸不大于激光半径。

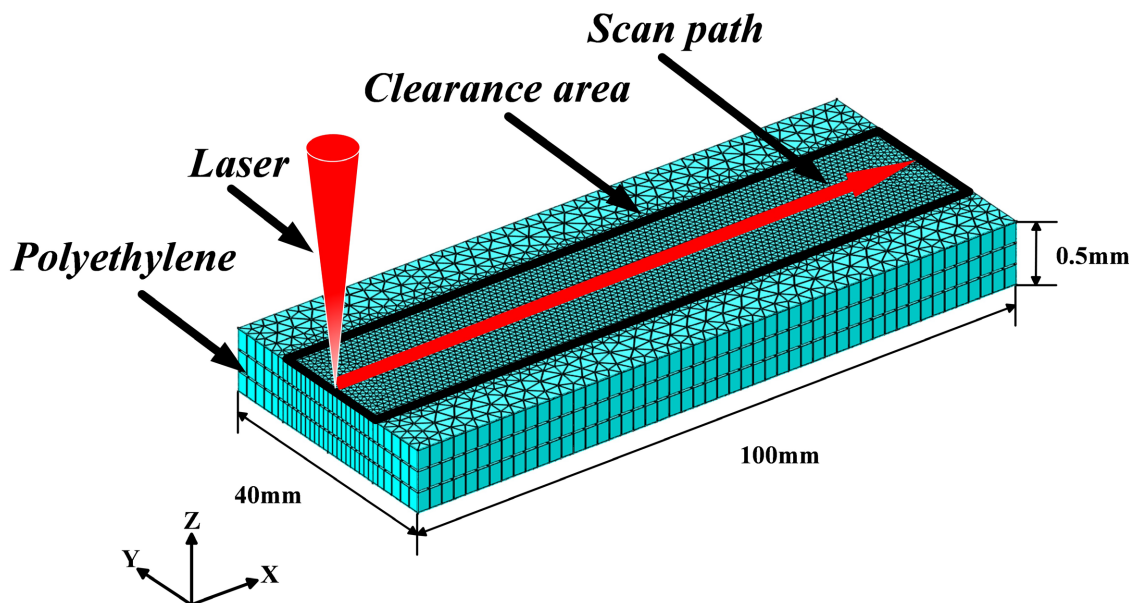


Figure 1. Simulation model

图 1. 仿真模型

聚乙烯的物理参数如表 1 所示。

Table 1. Basic physical parameters of polyethylene film
表 1. 聚乙烯薄膜的基本物理参数

| Simulation parameter | Values |
|---|--------|
| Polyethylene density (kg/m ³) | 940 |
| Polyethylene specific heat capacity[J/(kg·K)] | 2300 |
| Polyethylene thermal conductivity[W/(m·K)] | 0.44 |
| Polyethylene melting point(K) | 378.15 |
| Polyethylene burning point(K) | 623.15 |
| Laser absorption coefficient(%) | 34 |

为了能够更准确的计算激光扫描清除聚乙烯薄膜的温度场分布, 建立合理的热传导模型, 所以对实际问题进行一定的假设和简化:

- 1) 1 μm 连续激光垂直扫描材料过程中, 材料吸收系数不变;
- 2) 扫描过程中聚乙烯薄膜的比热容、热传导系数和激光吸收系数不受温度变化的影响;
- 3) 扫描过程中不产生内热源;

激光扫描清除聚乙烯薄膜时满足初始条件为 $T_0 = 20^\circ\text{C}$, 相应的边界条件为:

$$\begin{cases} q_r = h \cdot (T_{ext} - T) \\ q_b = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{amb}^4 - T^4) \end{cases} \quad (11)$$

式中: q_r 为对流热通量; h 为对流传热系数; T_{ext} 为外部温度; q_b 为表面辐射热通量; ε 为发射率; σ 为斯蒂芬 - 玻尔兹曼常数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$); T_{amb} 为边界初始温度。

聚乙烯薄膜的清除速率为:

$$\eta = \frac{L}{t} \quad (12)$$

式中: L 为聚乙烯长度; t 为清除时间。

2.3. 清除速度临界值设定

为了有效确定聚乙烯薄膜的清除速度, 本文临界值设定条件如下: 当激光扫描速度为一定值时, 材料下表面各点最高温度的最小值达到熔点时为最大清除速度, 材料上表面各点最高温度的最大值最接近燃点却未超过燃点时为最小清除速度。

在激光辐照过程中, 薄膜表面温度达到熔点时, 融化前的等温面就会以一定的速度向材料内部传递, 等温面传播的最大距离被定义为烧蚀深度, 它是评估激光与聚乙烯相互作用的重要参数之一。因此, 本研究将通过观察聚乙烯薄膜的温度演变和烧蚀深度, 确定清除效果。

2.4. 当激光功率密度为 $800 \text{ W}/\text{cm}^2$ 时聚乙烯薄膜的仿真结果及现象分析

当激光功率密度为 $800 \text{ W}/\text{cm}^2$ 时, 聚乙烯薄膜在不同扫描速度下的温度演变和烧蚀形貌如图 2 所示。根据图 2(a), 当扫描速度为 $5.1 \text{ mm}/\text{s}$ 时, 聚乙烯上表面在 $X = 97 \text{ mm}$ 处出现温度最大值为 626.17 K , 此时, 温度超过薄膜燃点 T_m , 从而导致聚乙烯燃烧, 并形成了 7.932 mm 的烧蚀宽度。从图 2(b)中可以看出, 当扫描速度增加至 $5.2 \text{ mm}/\text{s}$ 时, 聚乙烯上表面在 $X = 97 \text{ mm}$ 处温度出现最大值为 617.29 K , 小于燃点 T_m 。由于扫描速度的增加, 烧蚀宽度缩小为 7.86 mm 。进一步观察图 2(c), 当扫描速度为 $6.8 \text{ mm}/\text{s}$ 时, 聚乙烯下表面 $X = 100 \text{ mm}$ 处的温度最大值为 391.15 K , 上下表面温度刚好全部超过薄膜熔点 T_a , 此时

聚乙烯恰好能够完全被穿透。从图 2(d)中可以看出,当扫描速度增加至 6.9 mm/s 时,聚乙烯下表面 $X = 100$ mm 处的温度最大值为 377 K, 未超过薄膜熔点 T_a 。该处聚乙烯未被熔断是因为 $X = 100$ mm 处为激光辐照的起点。由于扫描速度过快,导致此处材料吸收的激光能量不足以使薄膜升高温度超过熔点,因此聚乙烯薄膜未被完全清除。

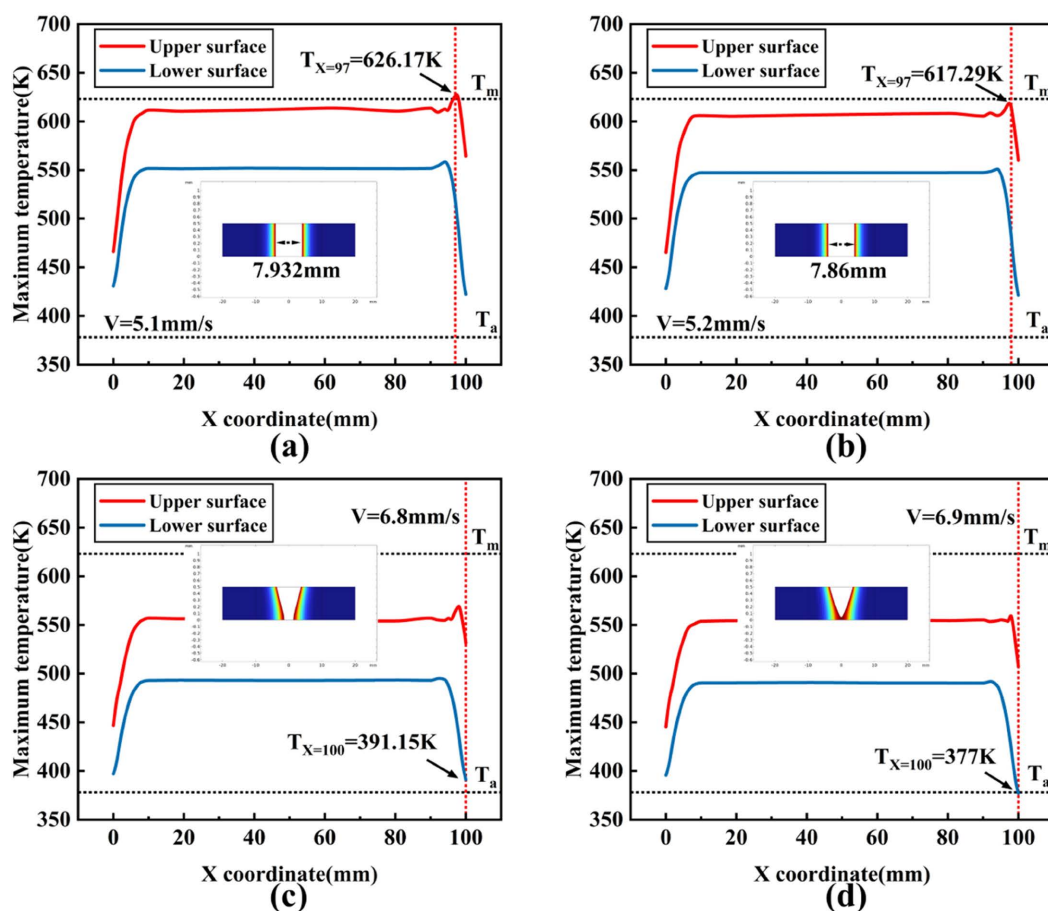


Figure 2. Temperature evolution and ablation morphology of polyethylene films at laser power density of 800 W/cm^2
图 2. 激光功率密度为 800 W/cm^2 时聚乙烯薄膜的温度演变和烧蚀形貌

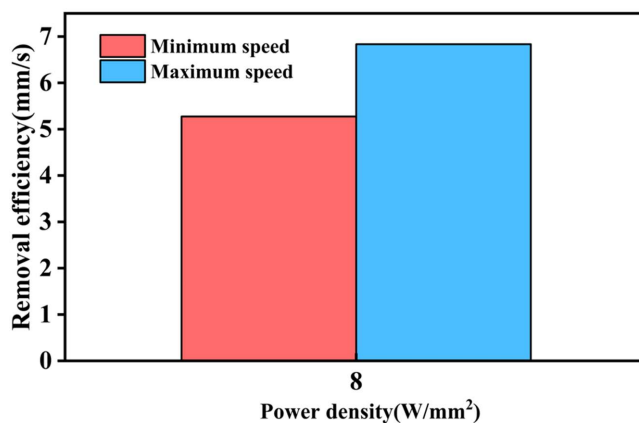


Figure 3. Removal efficiency of polyethylene films at different scanning speeds
图 3. 不同扫描速度下聚乙烯薄膜的清除速率

图3为激光功率密度为800 W/cm²时, 聚乙烯薄膜的最小和最大速度阈值所对应的清除速率, 分别为5.274 mm/s和6.835 mm/s。结果显示: 聚乙烯薄膜的清除速率随着扫描速度的增加而增加。这是因为提高了激光扫描速度, 聚乙烯单位区域也能吸收到所需的最小熔融能量, 从而减少了清除薄膜所需的时间, 提升了清除速率。综上所述, 当激光功率密度为800 W/cm²时, 最小清除速度为5.2 mm/s, 最佳清除速度为6.8 mm/s。

2.5. 不同颜色聚乙烯薄膜的最佳清除参数

本文针对八种颜色(黑色、蓝色、粉色、紫色、绿色、黄色、红色和白色)的聚乙烯薄膜进行研究。当激光功率密度为800 W/cm²时, 不同颜色聚乙烯薄膜的速度阈值和清除速率如表2所示。从表中数据可以看出, 黑色和白色聚乙烯薄膜不能被清除, 蓝色、粉色、紫色、绿色、黄色和红色聚乙烯薄膜均能找到最大、最小速度阈值。其中, 对于黑色聚乙烯薄膜来说, 激光功率密度仍然过大; 对于白色聚乙烯薄膜来说, 由于激光功率密度仍然过小; 蓝色、粉色、紫色和绿色聚乙烯薄膜的最大、最小速度阈值分别为6.8 mm/s和5.2 mm/s、3.9 mm/s和1.9 mm/s、1.4 mm/s和0.5 mm/s、1.3 mm/s和0.4 mm/s, 对应的清除速率分别为6.835 mm/s和5.274 mm/s、3.909 mm/s和1.956 mm/s、1.406 mm/s和0.522 mm/s、1.301 mm/s和0.42 mm/s、黄色和红色聚乙烯薄膜的最大、最小速度阈值相同, 分别为0.3 mm/s和0.1 mm/s, 清除速率不同, 分别为0.304 mm/s和0.105 mm/s、0.302 mm/s和0.104 mm/s。

Table 2. Speed thresholds and removal rates of polyethylene films of different colors at laser power density of 800 W/cm²
表 2. 激光功率密度 800 W/cm² 时不同颜色聚乙烯薄膜的速度阈值和清除速率

| 颜色 | 最大速度阈值(mm/s) | 清除速率(mm/s) | 最小速度阈值(mm/s) | 清除速率(mm/s) |
|----|--------------|------------|--------------|------------|
| 蓝色 | 6.8 | 6.835 | 5.2 | 5.274 |
| 粉色 | 3.9 | 3.909 | 1.9 | 1.956 |
| 紫色 | 1.4 | 1.406 | 0.5 | 0.522 |
| 绿色 | 1.3 | 1.301 | 0.4 | 0.42 |
| 黄色 | 0.3 | 0.304 | 0.1 | 0.105 |
| 红色 | 0.3 | 0.302 | 0.1 | 0.104 |

3. 实验

3.1. 实验设计

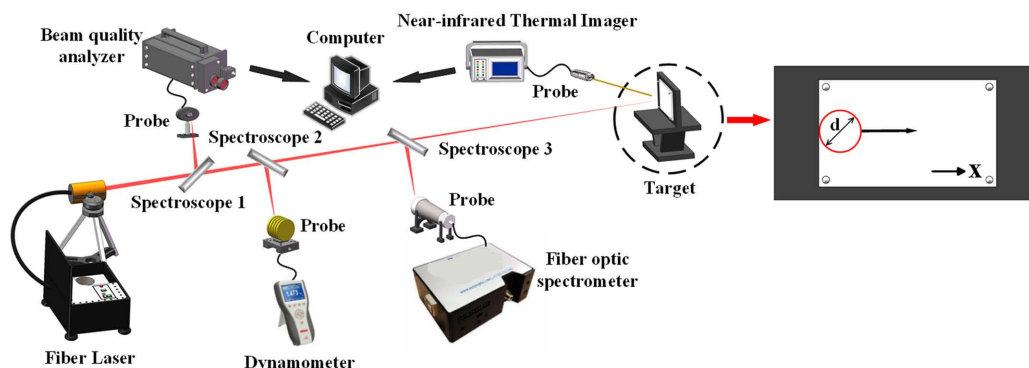


Figure 4. Schematic diagram of the experimental apparatus
图 4. 实验装置示意图

以商用聚乙烯薄膜为实验材料, 裁剪成尺寸为 $100\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 的试样。实验装置和激光光斑运动示意图如图 4 所示。其中, 光纤光谱仪、光束质量分析仪和功率计可以测定激光器的基本参数, 经测定, 连续光纤激光器的输出波长稳定控制在 1080 nm , 其最大输出功率为 315 W , 光束质量为 1.13。近红外热成像仪可以将物体表面的红外辐射转化为可见光图像, 通过对红外辐射的检测与分析, 可以得到物体表面不同位置的热特征和温度分布规律。激光光束沿着 X 方向扫描靶材中心, 激光光束的扫描速度可调, 范围为 $0\sim 10\text{ mm/s}$, 同时确保激光到达靶材上的光斑直径为 10 mm 。实验参数见表 3。

Table 3. Main parameters

表 3. 主要参数

| Simulation parameter | Values |
|--|--------|
| Ambient temperature ($^{\circ}\text{C}$) | 20 |
| Ambient humidity (%) | 55 |
| Wavelength (nm) | 1080 |
| Laser power (W) | 0~315 |
| Laser spot diameter (mm) | 10 |
| Laser scanning speed (mm/s) | 0~10 |

3.2. 当激光功率密度为 800 W/cm^2 时聚乙烯薄膜的实验结果及现象分析

在激光功率密度为 800 W/cm^2 时, 聚乙烯薄膜在不同扫描速度下的温度演变和烧蚀形貌如图 5 所示。根据图 5(a) 可以看出, 当扫描速度为 5.1 mm/s 时, 聚乙烯薄膜表面的最高温度超过了燃点 T_m , 在 $X = 100\text{ mm}$ 处的最高温度达到 638.68 K 。温度最大值大于仿真值。这是因为实验中聚乙烯吸收了足够的激光能量, 引发热效应并导致薄膜燃烧。燃烧过程中会释放大热量, 进一步加热燃烧区域, 导致温度升高。此外, 环境中的氧气供应充足, 可以维持燃烧反应的进行并释放更多的热量, 从而导致温度升高。在激光作用下, 薄膜表面受热与氧气发生反应后引起了强烈的燃烧, 扫描过程中产生了明显的明火和烟雾, 并释放大热分解气体。同时, 燃烧导致薄膜表面出现了急剧的材料卷曲和熔融现象。扫描后聚乙烯薄膜的烧蚀宽度达到 20 mm , 明显大于仿真中的烧蚀宽度。主要原因是聚乙烯是一种塑料, 具有较高的热膨胀系数。在熔融过程中材料受到高温作用发生热胀冷缩效应, 导致薄膜发生膨胀和收缩。这种膨胀和收缩使材料内部产生应力, 从而导致薄膜发生卷曲, 形成了较大的烧蚀宽度。当扫描速度增加至 5.2 mm/s 时, 从图 5(b) 中可以看出, 聚乙烯薄膜表面的最高温度为 613.58 K , 低于燃点 T_m 。在扫描过程中, 没有明火的出现, 但是薄膜表面受热变软并发生了明显的熔融现象, 同时产生大量的烟雾和热分解气体。由于扫描速度的增加, 熔融后聚乙烯薄膜的烧蚀宽度减小到了 17 mm 。进一步观察图 5(c), 当扫描速度为 6.8 mm/s 时, 聚乙烯薄膜表面温度最小值为 399.15 K , 刚好超过了薄膜的熔点 T_a 。在扫描过程中, 薄膜表面发生了熔融现象, 但没有明显的明火及烟雾。熔融后, 薄膜表面呈现出前窄后宽的形貌, 最窄处的烧蚀宽度为 9 mm , 聚乙烯薄膜恰好能够被完全清除。最后, 当扫描速度增加至 1.9 mm/s 时, 从图 5(d) 中可以看出, 聚乙烯薄膜表面温度最小值为 375.72 K , 未超过熔点 T_a , 虽然薄膜在此处受热变形, 但并未熔断, 因此聚乙烯薄膜未被完全清除。

根据图 6 中的数据可以看出, 激光功率密度为 800 W/cm^2 时, 聚乙烯薄膜的最小和最大速度阈值所对应的清除速率分别为 5.218 mm/s 和 6.811 mm/s 。结果显示: 随着扫描速度的增加, 聚乙烯薄膜的清除速率也随之增加。实验证明: 激光功率密度为 800 W/cm^2 时, 聚乙烯薄膜的最佳清除速度为 6.8 mm/s 。实验结果与仿真结果保持一致。

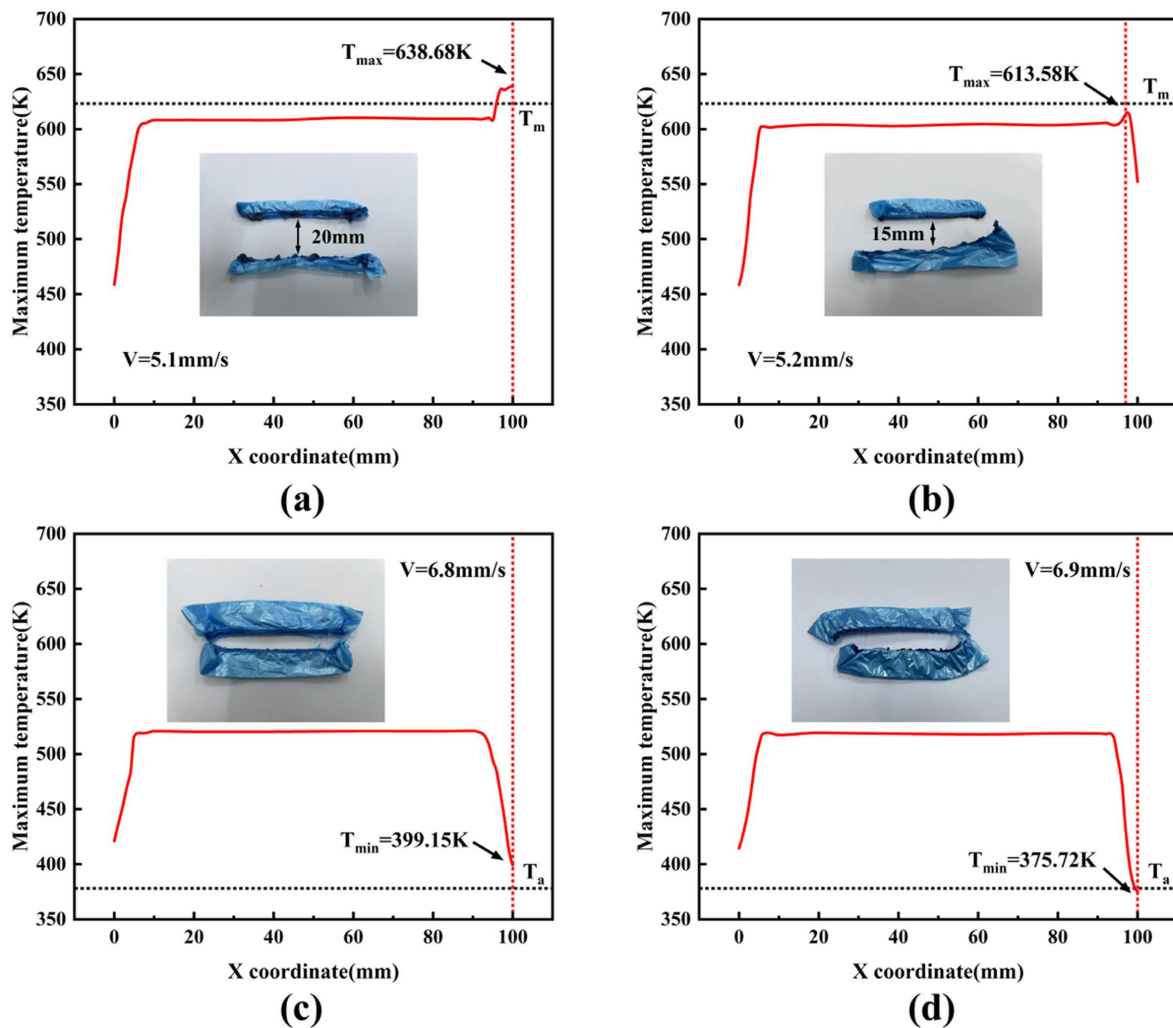


Figure 5. Temperature evolution and ablation morphology of polyethylene films at laser power density of 800 W/cm^2
图 5. 激光功率密度为 800 W/cm^2 时聚乙烯薄膜的温度演变和烧蚀形貌

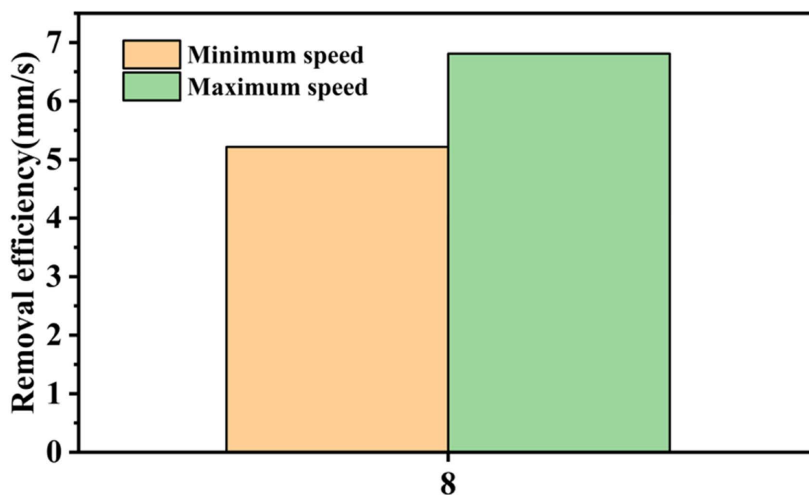


Figure 6. Removal efficiency of polyethylene film
图 6. 聚乙烯薄膜的清除速率

3.3. 不同颜色聚乙烯薄膜的最佳清除参数

当激光功率密度为 800 W/cm^2 时, 不同颜色聚乙烯薄膜的速度阈值和清除速率如表 4 所示。从表 4 中可以看出, 黑色和白色聚乙烯薄膜不能被清除, 蓝色、粉色、紫色、绿色、黄色和红色聚乙烯薄膜均能找到最大、最小速度阈值。其中, 对于黑色聚乙烯薄膜来说, 激光功率密度仍然过大; 对于白色聚乙烯薄膜来说, 由于激光功率密度仍然过小; 蓝色、粉色、紫色和绿色聚乙烯薄膜的最大、最小速度阈值分别为 6.8 mm/s 和 5.2 mm/s 、 3.9 mm/s 和 1.9 mm/s 、 1.4 mm/s 和 0.5 mm/s 、 1.3 mm/s 和 0.4 mm/s , 对应的清除速率分别为 6.811 mm/s 和 5.218 mm/s 、 3.882 mm/s 和 1.936 mm/s 、 1.39 mm/s 和 0.511 mm/s 、 1.278 mm/s 和 0.402 mm/s 、黄色和红色聚乙烯薄膜的最大、最小速度阈值相同, 分别为 0.3 mm/s 和 0.1 mm/s , 清除速率不同, 分别为 0.289 mm/s 和 0.093 mm/s 、 0.286 mm/s 和 0.09 mm/s 。

Table 4. Speed thresholds and removal rates of polyethylene films of different colors at laser power density of 800 W/cm^2
表 4. 激光功率密度 800 W/cm^2 时不同颜色聚乙烯薄膜的速度阈值和清除速率

| 颜色 | 最大速度阈值(mm/s) | 清除速率(mm/s) | 最小速度阈值(mm/s) | 清除速率(mm/s) |
|----|--------------|------------|--------------|------------|
| 蓝色 | 6.8 | 6.811 | 5.2 | 5.218 |
| 粉色 | 3.9 | 3.882 | 1.9 | 1.936 |
| 紫色 | 1.4 | 1.39 | 0.5 | 0.511 |
| 绿色 | 1.3 | 1.278 | 0.4 | 0.402 |
| 黄色 | 0.3 | 0.289 | 0.1 | 0.093 |
| 红色 | 0.3 | 0.286 | 0.1 | 0.09 |

4. 结论

本文基于热传导理论, 建立了 $1 \mu\text{m}$ 连续激光扫描清除聚乙烯薄膜的三维物理模型, 开展了 $1 \mu\text{m}$ 连续激光扫描清除聚乙烯薄膜的数值模拟与实验研究。结论如下:

1) $1 \mu\text{m}$ 连续激光辐照后, 聚乙烯吸收激光能量发生热效应, 导致局部熔化或气化。当功率密度一定时, 聚乙烯薄膜的清除速率随着扫描速度的增加而逐渐增加。

2) 在保证扫描过程中不产生明火的前提下, 激光功率密度为 800 W/cm^2 时蓝色、粉色、紫色、绿色、黄色和红色聚乙烯薄膜的最佳清除速度分别为 6.8 mm/s 、 3.9 mm/s 、 1.4 mm/s 、 1.3 mm/s 、 0.3 mm/s 、 0.3 mm/s 。

在 $1 \mu\text{m}$ 连续激光清除聚乙烯薄膜的过程中, 通过固定激光功率密度并选择合适的扫描速度, 能够明显提高清除速率。研究结果可为 $1 \mu\text{m}$ 连续激光扫描清除聚乙烯薄膜的实际工作提供数据参考。

参考文献

- [1] Sawada, J., Kusumoto, K., Maikawa, Y., Munakata, T. and Ishikawa, Y. (1991) A Mobile Robot for Inspection of Power Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **6**, 309-315. <https://doi.org/10.1109/61.103753>
- [2] Liang, Y.H. and Yang, F. (2019) Development and Application of Foreign Objects Removal Device for High Voltage Transmission Line. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **631**, Article 042023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/631/4/042023>
- [3] Zhang, Y.D., Li, J.B., Li, C., et al. (2019) Development of Foreign Matter Removal Robot for Overhead Transmission Lines. *Journal of Physics: Conference Series*, **1303**, Article 012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1303/1/012021>
- [4] Moraczewski, K., Mróz, W., Budner, B., et al. (2016) Laser Modification of Polylactide Surface Layer Prior Autocatalytic Metallization. *Surface and Coatings Technology*, **304**, 68-75. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.06.085>
- [5] Zhang, H.B., Yuan, Z.J., Ye, R., et al. (2017) Filamentation-Induced Bulk Modification in Fused Silica by Excimer Laser. *Optical Materials Express*, **7**, 3680-3690. <https://doi.org/10.1364/OME.7.003680>

-
- [6] Cutroneo, M., Torrisi, L., Havranek, V., *et al.* (2019) Localized Modification of Graphene Oxide Properties by Laser Irradiation in Vacuum. *Vacuum*, **165**, 134-138. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.04.012>
- [7] Wang, X.Y., Yu, X.M., Shi, H.Y., *et al.* (2019) Characterization and Control of Laser Induced Modification inside Silicon. *Journal of Laser Applications*, **31**, Article 022601. <https://doi.org/10.2351/1.5096086>
- [8] Pereira, H., Carvalho, O., Miranda, G., *et al.* (2020) Pure Magnesium Laser Surface Modification Using Nd:YAG Laser. *Materials Technology*, **36**, 811-815. <https://doi.org/10.1080/10667857.2020.1797326>
- [9] Pu, Z.H., Jing, X.B., Yang, C.J., *et al.* (2020) Wettability Modification of Zirconia by Laser Surface Texturing and Silanization. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, **17**, 2182-2192. <https://doi.org/10.1111/ijac.13579>
- [10] Torkamany, M.J., Malek Ghaini, F., Poursalehi, R., *et al.* (2016) Combination of Laser Keyhole and Conduction Welding: Dissimilar Laser Welding of Niobium and Ti-6Al-4V. *Optics and Lasers in Engineering*, **79**, 9-15. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2015.11.001>
- [11] Lakemeyer, P., Schoeppner, V., Bates, P., *et al.* (2017) Matching of Laser Intensity Distribution for Laser Transmission Welding of Thermoplastics. *Welding in the World*, **61**, 1247-1252. <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0501-6>
- [12] Li, S.C., Xu, W., Xiao, G., *et al.* (2018) Weld Formation in Laser Hot-Wire Welding of 7075 Aluminum Alloy. *Metals*, **8**, Article 909. <https://doi.org/10.3390/met8110909>
- [13] Kumar, C.D., Das, M., Paul, C.P., *et al.* (2019) Weld Quality Assessment in Fiber Laser Weldments of Ti-6Al-4V Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **28**, 3048-3062. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04073-4>
- [14] Zhang, S.W., Sun, J.H., Zhu, M.H., *et al.* (2020) Fiber Laser Welding of HSLA Steel by Autogenous Laser Welding and Autogenous Laser Welding with Cold Wire Methods. *Journal of Materials Processing Technology*, **275**, Article 116353. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116353>
- [15] Zhang, J.Q., Huang, T., Mironov, S., *et al.* (2021) Laser Pressure Welding of Copper. *Optics & Laser Technology*, **134**, Article 106645. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106645>
- [16] Torrisi, L., Gammino, S., Mezzasalma, A.M., *et al.* (2004) Laser Ablation of UHMWPE-Polyethylene by 438 Nm High Energy Pulsed Laser. *Applied Surface Science*, **227**, 164-174. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2003.11.078>
- [17] Lee, A.J., Dawes, J.M. and Withford, M.J. (2008) Investigation of Femtosecond Laser Induced Thermal Ablation of Polyethylene. *Journal of Laser Applications*, **20**, 154-159. <https://doi.org/10.2351/1.2955561>
- [18] Okoshi, M. and Inoue, N. (2003) Femtosecond Laser Ablation of Polyethylene. *Japanese Journal of Applied Physics*, **42**, L36-L38. <https://doi.org/10.1143/JJAP.42.L36>
- [19] Xu, J., Rong, Y.M., Liu, W.N., *et al.* (2021) Temperature Field-Assisted Ultraviolet Nanosecond Pulse Laser Processing of Polyethylene Terephthalate (PET) Film. *Micromachines*, **12**, Article 1356. <https://doi.org/10.3390/mi12111356>