

连续激光清除杂草马齿苋的理论实验研究

纪禹¹, 韩少晖¹, 董渊¹, 金光勇²

¹长春理工大学物理学院, 吉林省固体激光技术与应用重点实验室, 吉林 长春

²长春工业大学材料科学与工程学院, 吉林 长春

收稿日期: 2024年4月23日; 录用日期: 2024年5月22日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

针对受激光辐照的杂草茎部区域, 结合多孔介质传热理论与Stefan条件, 建立了激光与杂草相互作用的理论模型。对受到激光辐照后的杂草茎部的凹陷深度与温度开展了实验与仿真研究。结果表明: 在连续激光辐照下, 杂草茎部的凹陷深度随着功率密度的增加近似线性增长, 且随着激光功率密度的增加, 杂草中心区域的最高温度能更快的达到平台期。该模型能够模拟激光辐照杂草过程中杂草的最高温度与损伤程度, 为研究激光与杂草的相互作用提供了一定的理论基础。

关键词

多孔介质, 除草, 温度场, 激光辐照

Theoretical and Experimental Studies on Continuous Laser Removal of the Weed *Amaranthus vulgaris*

Yu Ji¹, Shaohui Han¹, Yuan Dong¹, Guangyong Jin²

¹School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Jilin Key Laboratory of Solid State Laser Technology and Application, Changchun Jilin

²College of Materials Science and Engineering, Changchun University of Technology, Changchun Jilin

Received: Apr. 23rd, 2024; accepted: May. 22nd, 2024; published: May. 31st, 2024

Abstract

A theoretical model of laser-weed interaction was developed by combining the theory of heat transfer through porous media and the Stefan condition for the region of weed stems irradiated by

the laser. Experimental and simulation studies have been carried out to investigate the depression depth and temperature of weed stems after laser irradiation. The results show that under continuous laser irradiation, the depression depth of weed stems increases approximately linearly with the increase in power density, and the maximum temperature in the central region of the weed can reach the plateau more quickly with the increase in laser power density. The model can simulate the maximum temperature and damage degree of weeds during laser irradiation of weeds, which provides a certain theoretical basis for the study of the interaction between laser and weeds.

Keywords

Porous Media, Weed Control, Temperature Field, Laser Irradiation

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

农业生产中严重依赖除草剂来清除杂草[1], 除草剂的滥用使得大量除草剂及其代谢产物进入生态循环中, 这些有毒物质会经过食物链逐级传递并不断蓄积, 最终进入人体, 对人类健康构成威胁。为了保护生态环境与维护人体健康, 人们开始研究替代性杂草清除方法。

热除草是替代方法之一, 其主要通过高温破坏杂草组织来抑制杂草生长。与其他热源(火焰、蒸汽、阳光等)相比, 激光能够更好的聚集能量精确的作用于杂草的某一部位, 为热除草提供了新的发展方向[2]。

Heisel T 使用 CO₂ 激光器对三种杂草的茎部进行了辐照, 研究表明激光作用于杂草茎部可对杂草生长产生抑制效果[3]。Solvejg K 等人使用连续激光对三种杂草的顶端分生组织进行了辐照, 实验结果表明通过将激光束更精确地指向作用位置, 可以提高激光抑制杂草生长的效果[4]。C. Wöltjen 和 T. Rath 等人分别使用了二极管激光器与 CO₂ 激光器, 对两种杂草进行了辐照研究, 发现激光的波长是影响激光处理杂草效果的主要因素, 且处理不同生长阶段的杂草所需的激光能量也不同[5]。Marx Christian 分别使用了连续激光器与脉冲激光器对杂草反枝苋的分生组织进行了辐照。研究表明, 对杂草造成致命损伤所需的激光能量取决于能量耦合效率与激光的精度[6]。Yu-Pin Lan 使用了二极管激光器对薇甘菊茎部进行辐照, 研究表明, 杂草茎部的凹陷深度取决于激光的功率密度, 且高功率密度的单光束激光对于抑制杂草的生长更加有效[7]。Guy Coleman 等人对于激光清除一年生黑麦草进行了研究[8]。研究发现, 杂草的生长阶段和杂草的大小对激光功效的影响很大。需要针对不同生长阶段的杂草采用不同的功率, 并且要根据杂草植株的大小来调整激光光斑的大小。Ya Xiong 等人为了证明激光除草的可行性, 建造了一个机器人[9], 并且他们开发利用了多种算法来进行分析与研究。为了评估机器人的性能, 在室内进行了一组除草实验。测试结果表明, 对杂草进行 640 ms 的 90 W、810 nm 激光照射可有效控制杂草, 该机器人具有高达 97% 的命中率。

上述研究主要对激光清除杂草的效果以及影响因素进行了研究, 证实了激光清除杂草的可行性, 但在相互作用过程中, 缺少对激光与杂草温度与损伤程度的变化规律的研究。针对这一问题, 本文建立了一种包含了杂草受激光辐照升温与杂草受热相变的理论模型, 并以杂草马齿苋为研究对象, 开展了模拟仿真研究, 同时设计与开展了激光辐照杂草马齿苋茎部的实验, 研究了杂草马齿苋在受到不同功率密度

激光辐照下的杂草温度与损伤程度的变化规律。研究结果可为激光除草的参数选择提供一定的参考。

2. 模型

根据杂草茎部侧面形状，建立二维矩形模型，同时将激光视为一个位置固定的高斯热源作用于杂草茎部。杂草茎部受到激光辐照后，吸收激光能量温度升高，同时受激光辐照区域发生相变形成损伤区域，杂草的物理模型如图1所示。

设定如下：(1) 杂草的组成成分为水与纤维素[10]，其内部孔隙被液体充满，故将其视为饱和多孔介质；(2) 由于激光辐照杂草的时间很短，因此将内部水分视为不动流体。

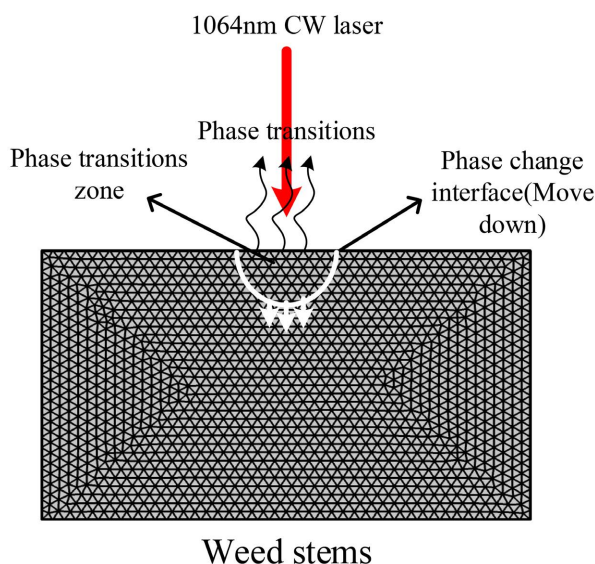


Figure 1. Physical model
图1. 物理模型

3. 控制方程

(1) 能量方程：

$$(\rho C)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) + Q \quad (1)$$

其中：

$$(\rho C)_{eff} = (1 - \varepsilon) \rho_s C_{p,s} + \varepsilon \rho_f C_{p,f} \quad (2)$$

$$\lambda_{eff} = (1 - \varepsilon) \lambda_s + \varepsilon \lambda_f \quad (3)$$

上面两个参数分别为多孔介质恒定压力下的有效体积热容与有效导热系数。

式子， T 为多孔介质温度(K)， t 为时间(s)， Q 为热源(W/m³)， ε 为孔隙率， ρ 为密度(s 为固体基质， f 为液体) (kg/m³)， C_p 为恒压热容(s 为固体基质， f 为液体) (J/(kg·K))， λ 为导热率(s 为固体基质， f 为液体) (W/(m·K))。

(2) 边界条件

① 热对流

$$q_{conv} = h(T - T_0) \quad (4)$$

式中, q_{conv} 为对流热通量(W/m^2), h 为传热系数($W/(m^2 \cdot K)$), T 为表面温度(K), T_0 为环境温度(K)。

② 热辐射

$$q_{rad} = \epsilon \sigma (T^4 - T_0^4) \tag{5}$$

式中, q_{rad} 为表面向环境辐射的热通量(W/m^2), ϵ 为表面发射率, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数($5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^2)$)。

(3) Stefan 条件

$$v_n = \frac{q}{\rho_{eff} L_{s,eff}} \tag{6}$$

其中

$$\rho_{eff} = (1 - \epsilon) \rho_s + \epsilon \rho_f \tag{7}$$

$$L_{s,eff} = (1 - \epsilon) L_{s,f} + \epsilon L_{s,s} \tag{8}$$

上面两个参数分别为多孔介质的有效密度与多孔介质的有效潜热。

式中, q 是界面处法向热通量的突变, 在激光与杂草相互作用的过程中, q 为激光通过杂草表面向杂草内部传递的能量(W/m^2)。 L_s 为潜热(s 为固体基质, f 为液体) (J/kg), v_n 为相变界面速度(m/s)。

(4) 激光热源

激光的光强分布在二维模型中为:

$$Q = \frac{2P}{\pi r^2} \exp\left(-2 \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{r^2}\right) \tag{9}$$

式中, Q 为激光热源(W/m^2), P 为激光功率(W), (x_0, y_0) 为激光焦点位置坐标, r 为激光光斑半径(m)。

4. 实验研究

Table 1. Laser parameters

表 1. 激光参数

激光波长(nm)	激光光斑直径(mm)	激光辐照时间(s)	激光功率(W)	激光功率密度(W/mm^2)
1064 nm	2.5	2	136	27.706
1064 nm	2.28	2	136	33.310
1064 nm	2.5	2	195	39.720
1064 nm	2.28	2	195	47.761

使用 1064 nm 连续激光辐照杂草茎部, 研究激光功率密度大小(表 1)对杂草马齿苋温度以及凹陷程度的影响, 实验装置图如图 2 所示。整个实验系统由 1064 nm 连续激光器、分光镜、激光功率计、聚焦透镜、热像仪、数字延时发生器以及控制电脑组成。将热像仪与激光器连接到数字延时发生器, 控制两者同时开启, 使用激光功率计测量激光的功率, 并使用热像仪记录杂草茎部中心区域的最高温度。实验结束后, 对杂草的损伤程度进行测量。

5. 仿真与实验结果分析

(1) 凹陷程度

图 3 为激光辐照时间为 2 s 时, 受到不同功率密度激光辐照后的杂草茎部的凹陷深度。从图 3 中可以

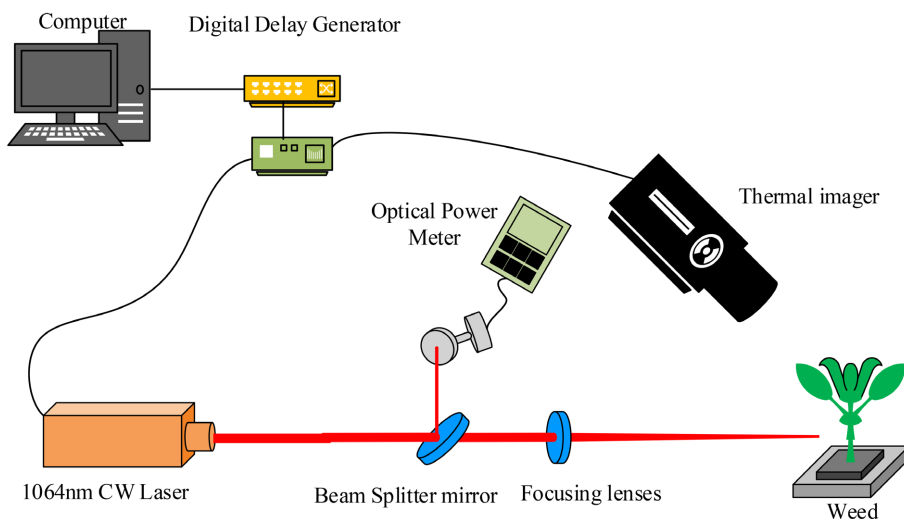


Figure 2. Experimental setup
图 2. 实验装置图

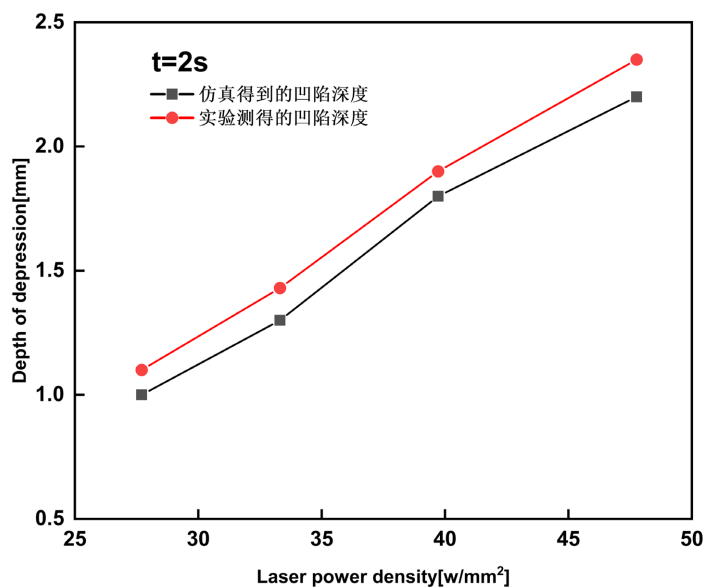


Figure 3. The depth of the depression in the central area of the weed stem
图 3. 杂草茎部中心区域的凹陷深度



Figure 4. Stems of purslane irradiated by laser
图 4. 受激光辐照后的马齿苋茎部

看出, 实验测得的凹陷深度与仿真模拟得到的凹陷深度的变化趋势相同。整体变化趋势为杂草茎部的凹陷深度随着激光功率密度的增加而不断加大, 当激光功率密度为 33.310 W/mm^2 与 39.720 W/mm^2 时, 曲线上升速度略有提高, 凹陷深度随着功率密度的变化近似线性增长。这说明在相同时间的激光辐照下, 提升激光功率密度可有效的提升激光对杂草的破坏效果。

此外, 实验测得的凹陷深度比仿真得到的凹陷深度更深。从图 4 可以看出, 杂草茎部除了因受到激光辐照而直接损伤的区域外, 受激光辐照的边缘区域也会发生轻微萎缩。仿真仅对激光与杂草相互作用的过程进行了研究, 对植物组织的后续变化没有进行进一步的研究, 因此实验测得的值比仿真得到的值更大。用实验所得深度减去仿真所得深度后, 将所得差值除以实验值, 计算得到误差为 $5\% \sim 10\%$, 表明仿真结果与实验结果具有较好的一致性, 该模型可为激光的参数选择提供一定的参考作用。

(2) 温度变化

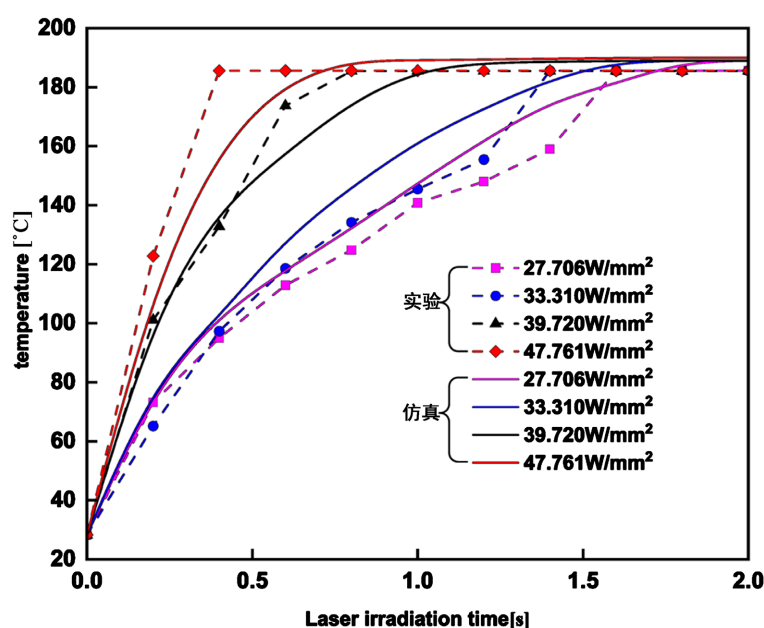


Figure 5. Variation of maximum temperature in the central region of weed stems with laser irradiation time
图 5. 杂草茎部中心区域最高温度随激光辐照时间的变化

图 5 为在受到不同功率密度的连续激光辐照下, 激光辐照时间为 $0 \sim 2 \text{ s}$ 的杂草茎部中心区域最高温度变化曲线图。所有曲线均可分为两个阶段, 一为温度上升阶段, 二为温度稳定阶段。当激光功率密度为 47.761 W/mm^2 与 39.720 W/mm^2 , 辐照时间为 $0 \sim 0.5 \text{ s}$ 时, 杂草茎部中心区域最高温度快速上升; 辐照时间为 $0.5 \sim 1 \text{ s}$ 时, 温度上升速度变缓; 辐照时间为 $1 \sim 2 \text{ s}$ 时, 温度趋于稳定, 进入平台期。当激光功率密度为 33.310 W/mm^2 与 27.706 W/mm^2 , 激光辐照时间为 $0 \sim 1.5 \text{ s}$ 时, 杂草茎部中心区域最高温度开始逐渐上升; 辐照时间为 $1.5 \sim 2 \text{ s}$ 时, 温度趋于稳定, 进入平台期。

根据上述曲线变化规律可知, 杂草温度上升的速度与激光功率密度成正比, 当激光功率密度提升了 1.72 倍时, 杂草温度达到平台期所需时间缩短了 3 倍, 说明高功率密度的激光可以更加快速地使杂草温度达到平台期。当所有温度变化曲线达到平台期后, 杂草茎部温度所能达到的最高值相同, 这说明一味地增加激光功率密度无法使杂草温度突破平台期。

从图 5 中还可以看出, 仿真与实验所得变化曲线图总体趋势相同。在相同功率密度的激光辐照下, 实验与仿真结果在杂草茎部中心区域最高温度进入平台期的时间上略有差异, 实验比仿真达到平台期的

时间更短。当杂草茎部中心区域最高温度趋于稳定时，仿真所得温度略高于实验测得的温度。将仿真温度与实验温度的差值除以实验值，得到其误差约为 2%，说明仿真与实验结果吻合良好。该模型可用于预测杂草受激光辐照后，杂草茎部中心区域最高温度随时间的变化。

6. 结论

本文建立了激光与杂草相互作用的物理模型，基于该模型开展了数值模拟研究，并使用 1064 nm 连续激光器开展了不同功率密度的激光辐照杂草马齿苋茎部的损伤实验，获得了不同激光功率密度下，杂草中心区域最高温度和损伤程度的变化规律。杂草茎部的凹陷深度随着功率密度的变化近似线性增长，增加激光的功率密度可有效地提升激光对杂草的破坏效果。随着激光功率密度的增加，杂草中心区域的最高温度能更快的达到平台期，但无法使杂草温度突破平台期。

通过对比仿真与实验结果可知，二者吻合良好。表明该模型可用于预测激光辐照杂草茎部后，杂草茎部的凹陷深度与中心区域最高温度，为激光辐照杂草的结果预测提供了一定的参考作用。

参考文献

- [1] Kudsk, P. and Streibig, J.C. (2003) Herbicides—A Two-Edged Sword. *Weed Research*, **43**, 90-102. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2003.00328.x>
- [2] Bauer, M.V., et al. (2020) Thermal Weed Control Technologies for Conservation Agriculture—A Review. *Weed Research*, **60**, 241-250. <https://doi.org/10.1111/wre.12418>
- [3] Heisel, et al. (2001) Cutting Weeds with CO₂ laser. *Weed Research*, **41**, 19. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2001.00212.x>
- [4] Mathiassen, S.K., et al. (2006) The Effect of Laser Treatment as a Weed Control Method. *Biosystems Engineering*, **95**, 497-505. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.08.010>
- [5] Wöltjen, C., Rath, T., and Herzog, D. (2007) Investigations about the Technical Basics of Laser Beam Use for Plant Manipulation. *Acta Horti*, **801**, 587-594. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.801.66>
- [6] Marx, C., et al. (2012) Investigations on the Absorption and the Application of Laser Radiation for Weed Control. *Landtechnik*, **67**, 95-101.
- [7] Lan, Y.P. (2022) Laser-Optics-Based Method to Suppress *Mikania micrantha* Growth. *Scientific Reports*, **12**, Article ID: 19864. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24451-8>
- [8] Coleman, G., Betters, C., Squires, C., et al. (2021) Low Energy Laser Treatments Control Annual Ryegrass (*Lolium rigidum*). *Frontiers in Agronomy*, **2**, Article ID: 601542. <https://doi.org/10.3389/fagro.2020.601542>
- [9] Xiong, Y., Ge, Y., Liang, Y., et al. (2017) Development of a Prototype Robot and Fast Path-Planning Algorithm for Static Laser Weeding. *Computers and Electronics in Agriculture*, **142**, 494-503. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.11.023>
- [10] Marx, C., et al. (2012) Design and Application of a Weed Damage Model for Laser-Based Weed Control. *Biosystems Engineering*, **113**, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.07.002>