基于有限元的激光烧蚀棉花顶芽温度场模型与试验

吴天舒1,许 燕1,2**,周建平1,2,蔡新亮1,吴宣睿1,左佳伟1,徐 翔1

(1. 新疆大学机械工程学院,乌鲁木齐 830017; 2. 新疆维吾尔自治区农牧机器人及智能装备工程研究中心,

乌鲁木齐,830017)

摘 要:为探究激光烧蚀过程中温度对棉花顶芽的影响,该研究通过试验测定棉花的热物性参数,在传热理论模型基础 上,借助有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 建立随时间变化的激光烧蚀棉花顶芽温度场模型,并实现模型求解,根 据激光烧蚀作用下的棉花顶芽温度分布,分析棉花顶芽在直径方向和深度方向的温度场变化,以及不同功率激光对棉花 顶芽表面区域的烧蚀效果。研究结果表明:所构建的温度场数值模型可用于激光烧蚀棉花顶芽的模拟分析。与30W功 率激光相比,40和50W功率激光的烧蚀时间分别缩短了45.55%和67.36%;棉花顶芽区域最高温度随激光光斑的增大 而降低,2.5 mm光斑,可在0.50 s内达到烧蚀温度,相比3.5 mm光斑,时间缩短了76.85%;含水率的升高会减少棉花 顶芽的烧蚀时间,含水率为95%时,达到烧蚀温度的时间为0.52 s,相较含水率75%时缩短了17%。在一定激光功率 下,温度沿直径方向的扩散速度明显高于深度方向。激光功率50W、烧蚀时间1s未对棉花顶芽产生实质性的抑制作用, 激光功率100W、烧蚀时间1s可烧蚀顶芽,能够有效抑制棉花顶芽生长,且碳化烧蚀的程度越强,抑制效果越明显。 研究结果可为棉花激光打顶理论研究和实际应用提供借鉴价值。

关键词:棉花;温度;数值模型;顶芽;激光烧蚀

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202409110

中图分类号: S126 文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2025)-08-0001-10

吴天舒, 许燕, 周建平, 等. 基于有限元的激光烧蚀棉花顶芽温度场模型与试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(8): 1-10. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202409110 http://www.tcsae.org

WU Tianshu, XU Yan, ZHOU Jianping, et al. Finite element-based modeling and testing of temperature field in laser ablated cotton terminal buds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(8): 1-10. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202409110 http://www.tcsae.org

0 引 言

棉花是重要的纺织原料,中国在全球棉花市场拥有 3个世界第一:产量第一,消费量第一,进口量第一^[1-3]。 中国棉花产量巨大,但由于中国纺织业规模巨大,所以 每年还要进口 180万 t 以上的棉花。同时棉花也是生产 军工弹药的基本原料之一,国家棉花的总储备量,关系 到军工生产和国家安全^[4-5]。棉花与大部分植物不同,它 有着无限生长的特点,对棉花进行打顶是限制其生长高 度和防治病虫害的有效物理手段,也是提高棉株产量和 质量的重要措施^[6-8]。现有棉花打顶方式主要有人工打顶、 机械打顶和化学打顶^[9-11]。人工打顶耗时长、效率低, 化学打顶需要多次喷施药液,受外界条件影响较大,并 对环境造成一定程度污染,机械式打顶技术尚未成熟^[12-13]。 因此,找到一种新型、高效、环保的棉花打顶方式是亟 待解决的问题。

激光具有易操作、非接触、高柔性、高效率、高质

收稿日期: 2024-09-14 修订日期: 2025-02-06

基金项目: 新疆维吾尔自治区科技创新领军人才项目(2022TSYCLJ0044); 新疆农机研发制造推广应用一体化项目(2022D14002)

作者简介:吴天舒,研究方向为农业机器人与智能装备。

Email: wts sai@163.com

※通信作者:许燕,教授,博士生导师,研究方向为农牧机器人及智能装备工程。Email: lilixiu_z@163.com

量和节能环保等突出优势^[14-15],激光烧蚀可以将高密度 能量传递给植物,促使植物细胞中水分迅速减少,生成 细胞死亡,使植物生长延迟或完全停止^[16]。随着人工智 能及各种目标检测技术在农业领域广泛应用,可用于定 位和识别杂草植物^[17-19],配合激光控制技术可将激光束 引导至目标以高热量将其灭活^[20-21]。

近年来,国内外学者对激光烧蚀、激光切割在农业 领域的应用方面进行了大量研究。HEISEL等^[22]应用 CO, 激光切断杂草的茎杆, 证实波长为 10 600 nm 的光 波除草效果最为明显。OSADČUKS^[23]等研究结果表明, 使用 450 nm 蓝光半导体激光器可有效抑制杂草的生长, 增加处理时间和激光总能量可以对生长起到更好的抑制 效果,对植物冠层区域进行激光处理时,能量有效性最 好。徐涛等^[24]研究了 CO2 激光器对农作物组培苗进行无 接触式切割的方法,并对比激光切割和机械剪切后组培 苗的生长情况,发现激光切割组培苗的效果各方面优于 机械剪切方式。刘继展等[25]应用激光进行黄瓜果梗切断, 为果梗的切割提供了一种新的解决方法。目前对激光烧 蚀技术研究主要是探究激光加热对金属温度场分布及表 面质量产生的影响。高辽远^[26]通过 COMSOL 软件建立 了一个移动纳秒脉冲激光清洗模型,对清洗过程中温度 场和位移场进行了可视化模拟与分析,并探讨激光工艺 参数对温度场分布以及清洗后基体表面微坑宽度的影响。 历波等[27]利用激光热传导理论建立了激光加热过程中材 料温度场对激光参数变化响应的仿真模型。史新灵等^[28] 采用 ANSYS 有限元软件对复合结构的激光切割过程进 行了模拟,分析不同激光切割工艺参数对温度分布的影 响。仿真模拟在探究激光与材料的相互作用机理、预测 烧蚀形貌特征及优化工艺参数方面具有不可替代的作用。

综上,目前对于激光烧蚀农作物的模拟研究仍不全 面,本文在已有研究基础上,建立激光烧蚀棉花顶芽温 度场模型,并通过试验验证模型的准确性;对激光烧蚀 棉花顶芽机理进行阐述和解释,分析不同激光参数条件 下的棉花顶芽烧蚀效果,以期为棉花机械化激光打顶提 供基础和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2024年4月在新疆大学工程训练中心实验室种植一 批棉花,棉花品种为新陆早65号,种植株距为23~ 26 cm,行距为36~40 cm,符合棉田实际种植情况,这 种密度可以确保棉花植株之间有足够的间距进行通风和 光照,便于打顶期时用于激光烧蚀试验。

1.2 试验设备及方法

本研究采用的激光系统为长春新产业光电 OEM-I-450-100W 型光纤耦合半导体蓝光激光器(功率 100 W, 中心波长 450 nm±5 nm,离焦量为0时光斑半径 2.5 mm); 选用海康威视 E09Pro 红外热像仪测定激光烧蚀光斑中心 温度^[29];选用电热恒温培养箱(北京欧尼斯科技发展 有限公司)测定样品含水率;选用密度天平法(德国 DZD 公司 0.0001 精度电子天平)测定棉花顶芽的密度。

图 1 为试验中所使用的设备及试验台架,试验分为 试验组和对照组进行。



试验台架(上) 试验台架(下) b. 试验台架 b. Test bench



图1 试验设备示意图 in 1 Formanian and a surface of the second 试验组: 顶芽直径均为8mm左右的棉花植株,将 顶芽置于激光器出光口30~35mm处用激光器对棉花顶 芽中心区域烧蚀,使用红外热像仪进行激光烧蚀棉花顶 芽中心温度测定,并记录数据,设置激光器输出的功率 为10、20、30、40、50、和100W,烧蚀时间为1s,每 隔1d记录一次棉花株高。所有激光烧蚀试验重复3次, 结果取平均值。

对照组选用相同条件棉花植株,分为空白对照组与 人工打顶对照组。

1.3 评价指标

1.3.1 温度

为了实时获取激光烧蚀时顶芽温度的变化,采用红 外热像仪(帧频 25 Hz)测定实际烧蚀温度,以视频帧 率 60 帧/s 记录激光烧蚀过程,将烧蚀时间固定为1s, 秒表计时,通过调整激光器输出功率,得到不同激光功 率下棉花顶芽温度变化。

1.3.2 棉花株高

棉花打顶作业前后,每个处理选取长势分布均匀且 具有代表性的10株棉花,每隔1d记录1次棉花株高 (子叶节至顶端),重复测量3次,取平均值。

2 激光烧蚀仿真

激光烧蚀棉花顶芽仿真的目的是探究激光对棉花顶 芽的热效应及其对生长发育的影响,通过建立数值模型 模拟不同激光参数对棉花组织温度场和损伤范围的影响, 为实际应用中优化激光参数及调控棉花生长提供理论依据。

2.1 仿真模型建立及网格划分

在激光烧蚀棉花顶芽数值模拟过程中,利用 COMSOL Multiphysics 软件,通过引入固体传热和变形几何物理场,采用广义热通量加载方式对材料表面进行分析,采取瞬态方法分析不同参数激光热源的温度场变化,构建图 2 所示的有限元模型。



c. 网格局部细节 c. Grid local detail

图 2 模型构建及网格划分 Fig.2 Model building and meshing

Fig.1 Experimental equipment diagram

图 2a 为激光烧蚀棉花顶芽过程中可视化综合示意图, 建立一个与实际棉花顶芽相似尺寸的 10 mm×10 mm× 10 mm 的立方体作为研究对象。为了提高数值模拟的精 确性,对三维模型进行合理的网格划分(图 2b),由于 烧蚀过程中主要关注激光热源直接烧蚀区域,因此对顶 部中心区域进行自由三角形网格划分,定制网格大小; 对于其他部分使用扫掠方式划分网格,使用软件内细化 网格方式划分,固定单元数为 25。

经多次数值仿真验证发现,在非中心区域实施网格 粗化处理时,中心区域的温度分布变化并不显著。尽管 全局采用更细化的网格和更小求解器容差可提升温度预 测精度,但会引发收敛性不足问题。这表明,通过合理 的网格优化策略,可在维持关键区域计算精度的同时有 效节省计算资源。中心区域的单元尺寸如表1所示。

表1 单元尺寸参数

Table 1 Element size	e parameters
参数	数值
Parameter	Value
最大单元尺寸/mm	0.12
最小单元尺寸/mm	0.008
最大单元增长率	1.04
曲率因子	0.4
狭窄区域分辨率	0.7

2.2 有限元模型假设

为了简化模型以及降低数据的计算复杂度,对所建 立的模型进行假设:

(1)假设热源模型激光能量分布相同,且激光所有 能量只作用在表面;

(2) 假设物料内部的初始含水率和温度均匀分布;

(3)假设棉花顶芽材料为各向同性,传热过程中不 考虑内部结构相互作用,且不考虑烧蚀时间变化对其性 质的影响;

(4) 忽略温度变化对材料光学参数的影响。

2.3 激光热源高斯模型

本研究激光热源模型选择高斯热源分布模型,该分 布形状类似于钟形曲面,即在中心位置激光强度最高, 向边缘逐渐衰减。

图 3 为高斯分布的激光热源模型示意图,入射热通量设为广义向内热通量 *Q*^[30] 可表示为





$$Q = \frac{2P_{\max}\eta}{\pi R_0^2} e^{-\frac{2(x^2+y^2)}{R_0^2}}$$
(1)

式中 η 为吸收率; P_{max} 为激光功率, W; R_0 为激光光斑半径, mm; $x \pi y$ 分别表示激光光斑在横向平面上的坐标。

2.4 热传导方程

通常采用傅立叶定律对烧蚀过程中热传导现象进行 定量描述,即单位时间内通过给定截面上的热量与垂直 于该截面的温度变化率和截面面积成正比。热量传递的 方向由高温区域指向低温区域,即^[31]:

$$q = -k\frac{dT}{dn} \tag{2}$$

式中q为热流密度, W/m²; k为给定方向上的导热系数, W/(m·K); T为材料表面温度, K; n为沿外表面法向方向。

根据傅里叶定律和能量守恒定律推导出热传导矢量 方程为

$$\nabla[k\nabla T] + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \tag{3}$$

为了便于实际计算与应用,对于笛卡尔坐标系下的 固体,可表示为

$$\frac{\partial}{\partial x}(k\frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k\frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k\frac{\partial T}{\partial z}) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$
(4)

式 (3) 和式 (4) 中 ρ 为材料密度, kg/m³; c 为材料比 热容, J/(kg·K); t 为时间, s。

2.5 初始条件与边界条件

物质初始时刻温度 T₀通常是已知且确定的不变量, 表示为

$$T(x, y, z)|_{t=0} = T_0$$
(5)

由于材料表面设置的是持续的热源,材料温度会一 直甚至超过材料的烧蚀温度,在数值模拟激光烧蚀棉花 顶芽材料时,为防止材料温度超过烧蚀温度,本文引入 了限制条件,激光烧蚀的热边界条件可以视为入射热通 量与施加于边界的烧蚀热通量的综合效应。这一效应可 以转化为边界温度恒定的狄利克雷边界条件,并引入边 界上的烧蚀热通量,其数学表达式为^[32]

$$q_{\rm a} = h_{\rm a}(T_{\rm a} - T_0) \tag{6}$$

式中 q_a 为材料吸收的热通量, W/m^2 ; T_a 为烧蚀温度,K; h_a 为模型与空气介质的对流换热系数。

考虑边界对环境的辐射,所以模型各边界的热辐射 表达式为

$$-n \cdot q = \varepsilon \sigma (T_{\rm amb}^4 - T_0^4) \tag{7}$$

式中 ε 为表面发射率; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数; T_{amb} 是周围环境温度, K。

2.6 材料烧蚀速度

当温度达到材料的烧蚀阈值时,部分材料将发生相变,转化为气态,从而导致表面质量损失。为此,采用变形几何模块对材料去除过程进行数值模拟,以准确描述这一物理现象,通过施加定义的变形速度实现给定区域的变形,本文模型中采用的材料烧蚀速度v为^[33]

$$v = \frac{q_{\rm a}}{\rho H_{\rm s}} \tag{8}$$

式中H_s为蒸发潜热,J。

2.7 热物性参数的获取

COMSOL Multiphysics 有限元分析需要热物性参数 尽可能准确可靠,本研究通过试验及数值拟合方式获取 相关数据:

(1)打顶期是棉花生长的关键阶段,此时棉花植株的顶芽和叶片含有较高的水分,通过烘干法测得棉花顶芽平均质量含水率为84%(图4)。



图 4 打顶期棉花顶芽的含水率

Fig.4 Moisture content of cotton terminal buds at heading stage

(2)农业物料的热容与比热受到物料组成成分、含水量及温度等因素的影响。大量试验结果表明,农业物料的恒温热容随其含水量的变化而变化,而恒压热容与含水率之间通常呈线性关系:

$$C_{\rm p} = (C_{\rm w} - C_{\rm d})M + C_{\rm d} \tag{9}$$

式中 C_p 为农业物料恒压热容,J/(kg·℃); C_w 为水的比热, J/(kg·℃); C_d 为固体干物质比热,J/(kg·℃);M为质量含 水率,%。

在激光烧蚀过程中,物料温度变化范围很大,因此有 必要考虑物料料比热容随着与温度的关系。由于打顶期 棉花顶芽含水率高,采用常温下水的比热(4.2×10³J/(kg·℃))、 固体干物质比热(0.84×10³J/(kg·℃))近似计算。

为了进一步求取任意温度下棉花顶芽比热容,通过 不同温度下水的比热容和顶芽平均含水率平均关系获得 近似顶芽比热容变化趋势,采用拟合曲线获得比热容 C_p 与温度 T 的关系,如图 5 所示由拟合结果可知,比热容 C_p 与温度 T 的关系可以表示为

$$C_{\rm p} = 3562.89 - 1.11T + 0.0116803T^2 \tag{10}$$

(3)农业物料导热系数与比热一样可以根据含水率 和固体干物质导热系数进行估算^[34]:

$$K = MK_{\rm w} + (1 - M)K_{\rm d} \tag{11}$$

式中M为含水率,%; K_w 为水的导热系数,W/(m·K); K_d 为固体干物质的导热系数,W/(m·K)。农业物料固体 干物质的导热系数为 0.26 W/(m·K)^[35],水的导热系数为 0.6 W/(m·K),通过不同温度下水的导热系数和顶芽含水 率平均值关系获得近似顶芽导热系数变化趋势,如图 6 所示。由拟合结果可知,导热系数K与温度T的关系可 以近似表示为



图 5 棉花顶芽的 C_p 与 T 拟合曲线 Fig.5 Fitting C_p versus T curves for cotton terminal buds



图 6 棉花顶芽的 K 与 T 拟合曲线 Fig.6 Fitting K versus T curves for cotton terminal buds

$$K = 0.5068 + 0.00223T \tag{12}$$

(4) 对于体积较小的农业物料,采用密度天平法^[36] 测量密度,当物料密度小于液体的密度,则把另一个比 液体密度大的物料作为配重附加到待测物料上,物料密 度由式(13)求出。

$$\rho_{\rm s} = \frac{(m_{\rm s} - m_{\rm o})\rho_1}{(m_{\rm s} - m_{\rm sl}) - (m_{\rm o} - m_{\rm ol})}$$
(13)

式中 ρ_s 为物料密度, kg/m³; ρ_1 为液体密度, kg/m³; m_s 为物料和配重总质量, g; m_o 为配重质量, g; m_{sl} 为物 料和配重在液体中的总质量, g; m_{ol} 为配重在液体中的 质量, g。

数值模拟相关参数见表 2。

	表	2	数	值	模拟相	关参数	
 •	3.7		1		1	1 . 1	

Table 2 Numerical simulation related parameters					
参数	数值	参考文献			
Parameter	Value	Reference			
密度 p _s /(kg·m ⁻³)	615	本文			
比热容 C _p /(J·kg·K ⁻¹)	$3562.89 - 1.11T + 0.0116803T^2$	本文			
导热系数	0.5068 + 0.00223T	本文			
烧蚀温度 T/K	503.15	[38]			
吸收系数 η	0.9	[39]			
初始温度 T ₀ /K	293.15	本文			
环境温度 T _{amb} /K	293.15	本文			
蒸发潜热 H _s /(J·kg ⁻¹)	2.257×10^{6}	[40]			

2.8 误差分析

采用决定系数 R² 对模型进行评价^[37]。

3 结果与分析

3.1 数值模型验证

为确保模型能够精确分析激光与材料相互作用下的

温度分布,并验证模拟结果的可靠性,将模拟值与试验 值进行比较。图 7a 中 10、20 和 30W 功率下物料烧蚀前 温度的模拟值与实测值的 R²分别为 0.946,0.975,0.967; 不同激光功率下光斑中心最高温度的模拟值与实测值的 R²为 0.978。本研究构建的数值模型和使用的模拟方法 能够用于激光烧蚀棉花顶芽的模拟分析。





根据图 7a 和图 7c 所示的棉花顶芽激光烧蚀前后的 温度变化和温度上升速率,将激光烧蚀过程分为 3 个阶 段,分别为急速升温阶段、缓速升温阶段以及烧蚀阶段。 由图 7 d、图 7e、图 7f 可知,急速升温阶段随着激光功 率的增大,急速升温阶段占比也逐渐增大,此阶段温度 的模拟值与实测值一致性最好,缓速升温阶段模拟值逐 渐大于实测值,直到达到烧蚀温度,进入烧蚀阶段。与 30 W 激光功率相比,40 和 50 W 激光功率,烧蚀时间分 别缩短了 45.55% 和 67.36%。模拟与实测产生误差的原 因可能是物料具有的个体差异性、测温设备性能以及拟 合参数均存在一定量的偏差,以及设备在测试过程中产 生的热损失和样品质量损失,其次,环境温度与光照条 件以及假定的条件均会对试验造成影响。

3.2 不同参数对数值模拟结果的影响

图 8、图 9、图 10 分别展示了 50 W 激光功率下, 不同光斑半径(2.5、3 和 3.5 mm)、2.5 mm 光斑半径 下不同环境温度(20、25、30 和 35℃),以及顶芽在同 含水率(75%、85%、95%)条件下的光斑中心温度曲线。 可以看出,随着光斑半径从 2.5 mm 逐渐增大至 3.5 mm, 升温速率逐渐降低,所需时间随之增加。例如,在 3.5 mm 光斑半径下,达到烧蚀温度需要 2.16s,而在 2.5 mm 光斑半径下,达到烧蚀温度需要 2.16s,而在 2.5 mm 光斑下仅需 0.50s,缩短了 76.85%。在不同环境 温度下,达到烧蚀温度所需的时间也有所变化:当环境 温度为 20 ℃时,需要 0.50s;而在 35 ℃时,仅需 0.42s, 缩短了 16%。根据前期试验,测得含水率分布在 75%~95%之间,当质量含水率为 95%时,达到烧蚀温 度需要 0.61s;而在含水率为 75%时,仅需 0.52s,缩短 了 17%。



图 8 不同激光光斑半径的光斑中心温度曲线 Fig.8 Spot center temperature profiles for laser spots with





3.3 温度场深度方向以及直径方向随时间变化的研究

图 11 为 50 W 激光功率、2.5 mm 激光光斑半径条件下,烧蚀时间 1 s 内,0.1、0.2、0.3、0.7、0.8 和 0.9s 时激光烧蚀温度场在深度方向上的变化。









图 12 为 50 W 激光功率、2.5 mm 光斑半径条件下, 烧蚀时间 1s 内,0.1、0.2、0.3、0.7、0.8 和 0.9s 时激光 烧蚀温度场在径向的变化。随着烧蚀时间增加,光斑中 心在直径方向的温度场持续扩散。

当热量累积一定程度时,光斑中心温度到达烧蚀温 度,产生烧蚀现象,棉花顶芽表面出现微小凹坑。物料 在吸收足够激光能量后,固体干物质碳化散落在物料表 面,水分则转化为气体蒸发。

图 13 为激光功率为 50 W 时,顶芽表面凹坑和深度 随时间变化的曲线,激光作用约 0.50 s 时,物料开始发 生烧蚀和形变;当激光作用时间达到 1.03 s 时,顶芽表 面凹坑的直径和深度分别为 11.42 和 0.36 µm。对于激光 功率 100 W 的情况,激光作用约 0.12 s 时,物料开始烧 蚀和形变;当激光作用 1.06 s 时,顶芽表面凹坑的直径 和深度分别为 64.96 和 6.85 µm。分析认为,棉花顶芽结 构相对松散且含水率较高,热传导效率较低。在激光照 射下,热量主要在表面区域迅速扩散,导致表面温度急 剧上升,从而使得沿直径方向的热扩散速度较快。同时, 激光烧蚀过程中会产生气体和微小颗粒,这些气体和颗 粒主要向外扩散,进一步加快了沿直径方向的热扩散。 而在深度方向,物料需要更多的时间和能量才能被烧蚀 和去除,导致深度方向的热传导速度较慢。



图 12 不回时刻温度功治直径方回时分布 Fig.12 Distribution of temperature field along the diameter at different moments



图 13 不同激光功率下棉花顶芽表面凹坑直径与深度变化曲线 Fig.13 Variation curves of pit diameter and depth on the surface of cotton terminal buds under different laser powers

顶芽直径/mm

8.95±1.84

3.4 不同激光功率下棉花株高的变化

为了进一步验证不同激光功率对棉花顶芽温度场分 布及对棉花生长的影响,进行激光烧蚀棉花顶芽试验, 测试前对棉花植株每个指标重复测量3次取平均值,记 作 *X*±SD,结果如表3所示。

Table 3Some parameters of cotton plants						
参数	数值	均值				
Parameter	Value	Mean				
植株高度/cm	72.1~78.8	76.24±2.37				

8.26~9.44

表 3 棉花植株部分参数

将棉花植株置于试验台架,根据 1.2 节试验方法进 行试验。设置激光器的输出功率为 30、50 和 100 W,烧 蚀时间为 1 s,每隔 1 d 记录一次棉花株高,所有试验重 复 3 次,结果取平均值。

图 14 为不同处理方式对棉花株高的影响。可以发现 空白对照组(不进行打顶)与激光功率 30 W 和激光功 率 50 W 处理方式下,棉花植株的生长速率基本一致, 在 1 d~3 d 时间中,激光功率 30 W 处理后的株高生长速 度优于空白对照组,通过观察对比人工打顶与激光功率 100 W 处理方式后的棉株生长情况,人工打顶后植株基 本停止生长,激光功率 100 W 处理后,植株继续生长直 至 1 d 后才基本停止生长。图 15 为不同激光功率烧蚀后 的棉花顶芽效果,经激光烧蚀作用后,棉花顶芽表面发 生明显碳化,随着激光功率的增加,碳化面积明显增加, 烧蚀深度增加有限。试验结果表明烧蚀碳化的区域面积 越大,烧蚀程度越强,对棉花生长的抑制效果越好。



图 14 不同处理方式对棉花株高的影响





图 15 不同激光功率烧蚀效果 Fig.15 Ablation effect of different laser powers

4 结 论

本研究建立了激光烧蚀棉花顶芽的数值模型,并使 用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 实现模型的边 界条件设置和求解。通过不同功率下最高温度和温升速 率的试验,验证了模型的可靠性。利用该模型模拟光斑 半径、环境温度、顶芽含水率等因素对烧蚀结果的影响, 以及温度场在深度方向和直径方向上的变化情况,进一 步探讨激光烧蚀对棉花生长的影响。具体研究结论如下:

1) 与 30 W 激光功率相比,40 和 50 W 功率的烧蚀 时间分别缩短 45.55% 和 67.36%。随着激光功率的增大, 棉花顶芽的最高温度持续上升,达到烧蚀温度的时间逐 渐缩短。

2) 与 3.5 mm 光斑相比, 2.5 mm 光斑可在 0.50 s 内 达到烧蚀温度,比 3.5 mm 光斑缩短了 76.85%。在环境 温度为 35 ℃时,可在 0.42 s 内达到烧蚀温度,比 20 ℃ 时缩短了 16%。顶芽含水率为 95%时,达到烧蚀温度的 时间为 0.52 s,比含水率 75% 时缩短了 17%。研究表明, 激光烧蚀时,棉花顶芽的最高温度随着光斑半径的增大 而降低,烧蚀时间也随之增加,而环境温度与顶芽含水 率的升高则会减少烧蚀时间,但对烧蚀速率的提升作用 较为有限。

3)在激光功率一定时,温度沿径向扩散速度远高于 深度方向扩散速度,通过激光烧蚀试验发现,当激光功 率为50W及以下时,烧蚀1s并未对棉花顶芽产生实质 性的抑制作用。而当激光功率为100W时,能够有效抑 制棉花顶芽的生长。另外,本研究主要集中于激光烧蚀 过程中棉花顶芽温度的分布,而顶芽结构特性、棉花品 种及激光器参数等因素对烧蚀效果的影响并未涉及。因 此,未来研究应考虑更多影响因素,如激光光斑的离焦 量、激光入射角度等,并进一步探索这些因素之间的交 互作用。

[参考文献]

- [1] 卢秀茹,贾肖月,牛佳慧.中国棉花产业发展现状及展望
 [J].中国农业科学,2018,51(1):26-36.
 LU Xiuru, JIA Xiaoyue, NIU Jiahui, et al. The present situation and prospects of cotton industry development in china[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(1):26-36. (in Chinese with English abstract)
- [2] 祁洋,李亚楠,孙明,等.基于特征融合的棉花幼苗计数 算法[J].农业工程学报,2022,38(9):180-186.
 QI Yang, LI Yanan, SUN Ming, et al. Cotton seedling counting algorithm using feature fusion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE),

2022, 38(9): 180-186. (in Chinese with English abstract)

- [3] 侯慧杰.新疆棉花生育期气象灾害对棉花生长的影响及应 对措施研究[J].农业灾害研究, 2023, 13 (1): 22-24.
 HOU Huijie. Effects of meteorological disasters on cotton growth in Xinjiang and countermeasures[J]. Agricultural Disaster Research, 2019, 13(1): 22-24. (in Chinese with English abstract)
- [4] 宋龙飞. 国家战略物资储备立法研究 [J]. 北京交通大学学报 (社会科学版), 2020, 19 (1): 123-130.
 SONG Longfei. Research on legislation of national strategic material reserve[J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition) 2020, 19(1): 123-130. (in Chinese with English abstract)
- [5] RIDLEY W, DEVADOSS S. Competition and trade policy in the world cotton market: Implications for US cotton exports[J]. American Journal of Agricultural Economics, 2023, 105(5): 1365-1387.
- [6] LLANDRES A L, Verdeny-Vilalta O, BREVEAULT T, et al. Cotton topping reduces the performance of aphids on topped and neighbor plants under greenhouse conditions[J]. Arthropod-Plant Interactions, 2023, 17(2): 173-184.
- [7] 韩鑫,韩金鸽,陈允琳,等.基于顶芽智能识别的棉花化学打顶系统研究[J].农业机械学报,2024,55(3):145-152.
 HAN Xin, HAN Jinge, CHEN Yunlin, et al. Research on cotton chemical topping system based on terminal bud intelligent recognition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 145-152. (in Chinese with English abstract)
- [8] 钟信念. 蕾期低温胁迫对棉花生长发育、光合及叶绿素荧光特性的影响[D]. 石河子:石河子大学,2021.
 ZHONG Xinnian. Effects of Low Temperature Stress On Growth, Photosynthesis and Chlorophyll Fluorescence Characteristics of Cotton at Bud Stage[D]. Shihezi: Shihezi University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [9] 潘俊杰. 基于图像识别的棉花顶检测方法的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2022.
 PAN Junjie. Research on Cotton Top Detection Method Based on Image Recognition[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [10] 彭强吉,康建明,宋裕民,等. 3MDZ-4 型自走式棉花打顶喷 药联合作业机设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 30-38. PENG Qiangji, KANG Jianming, SONG Yumin, et al. Design of 3MDZ-4 self-propelled cotton topping and spraying combined machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(14): 30-38. (in Chinese with English abstract)
- [11] 韩长杰,燕长辉,仇世龙,等.基于机器视觉的双圆盘式棉花打顶装置设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(5):36-46. HAN Changjie, YAN Changhui, QIU Shilong, et al. Design and experiment of double disc cotton topping device based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 36-46. (in Chinese with English abstract)
- [12] 谢庆,孔凡婷,石磊,等.棉花机械打顶关键技术研究进展[J].中国农机化学报,2023,44(3):28-34.

Xie Qing, Kong Fanting, ShiLei, et al. Research progress on key technologies of cotton mechanical topping[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(3): 28-34. (in Chinese with English abstract)

- [13] 甄畅. 基于光电识别的棉花打顶机控制系统的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2022.
 ZHEN Chang. Research on Control System of Cotton Topper Based on Photoelectric Recognition[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2022. (in Chinese with English abstract)
 [14] 朱家健. 激光技术在农业中的应用及其展望[J]. 农机化研究,
- [14] 禾豕健. 激尤技木住农业中的应用及其展望[J]. 农机化研先, 2009, 31(4): 222-225.
 ZHU Jiajian. The prospect and applation of laser technology in agriculture[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(4): 222-225. (in Chinese with English abstract)
- [15] ANDREASEN C, VLASSI E, SALEHAN N. Laser weeding of common weed species[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 151375164-1375164.
- [16] 吴旺旺, 戈振扬, 于英杰, 等. 激光除草技术在陆稻田间的应用研究[J]. 农业工程, 2013, 3(S1): 5-7,25.
 WU Wangwang, GE Zhenyang, Yu Yingjie, et al. Application of Laser Weeding Techniques in Upland Rice[J]. Agricultural Engineering, 2013, 3(S1): 5-7,25. (in Chinese with English abstract)
- [17] 彭炫,周建平,许燕,等.改进YOLOv5 识别复杂环境下 棉花顶芽[J].农业工程学报,2023,39(16):191-197.
 PENG Xuan, ZHOU Jianping, XU Yan, et al. Cotton top bud recognition method based on YOLOv5-CPP in complex environment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(16): 191197. (in Chinese with English abstract)
- [18] 陈柯屹,朱龙付,宋鹏,等.融合动态机制的改进型 Faster R-CNN 识别田间棉花顶芽[J].农业工程学报,2021, 37(16): 161-168.
 CHEN Keyi, ZHU Longfu, SONG Peng, et al. Recognition of cotton terminal bud in field using improved Faster R-CNN by integrating dynamic mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(16): 161-168. (in Chinese with English abstract)
- [19] SONG P, CHEN K, ZHU L, et al. An improved cascade R-CNN and RGB-D camera-based method for dynamic cotton top bud recognition and localization in the field[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 202: 107442.
- [20] 董洋. 基于扫描振镜的光束指向控制系统精度分析与误差 补偿[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
 DONG Yang. Accuracy Analysis and Error Compensation of Beam Direction Control System Based on Scanning Galvanometer[D]. Xian: Xidian University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [21] 韩静,石玗,张刚,等.功率调制对激光振镜焊接铝合金的影响[J].焊接学报,2024,45(8):70-78.
 HAN Jing, SHI Yu, ZHANG Gang, et al. Influence of power modulation on laser oscillating welding of aluminum alloys[J].
 Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(8):70-78. (in Chinese with English abstract)

- [22] HEISEL T, SCHOU J, CHRISTENSEN S, et al. Cutting weeds with a CO2 laser[J]. Weed Research, 2001, 41(1): 19-29.
- [23] OSADČUKS V, KOSTROMINS A, PECKA A, et al. Experimental efficiency evaluation of 445 nm semiconductor laser for robotized weed control applications[J]. 2020.
- [24] 徐涛,段宏兵,蔡兴奎,等.激光切割对马铃薯组培苗移栽后生长指标的影响[J]. 华中农业大学学报,2021,40 (4):80-84.
 XU Tao, DUAN Hongbing, CAI Xingkui, et al. Effect of laser cutting on growth indexes of potato tissue cultured seedlings after transplanting[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 45(1): 2021, 40(4): 80-84. (in Chinese with English abstract)
- [25] 刘继展,徐秀琼,李萍萍.果实采摘中果梗激光切割分析 与实验[J].农业机械学报,2014,45(1):59-64.
 LIU Jizhan, XU Xiuqiong, LI Pingping, et al. Analysis and Experiment on Laser Cutting of Fruit Peduncles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(1):59-64. (in Chinese with English abstract)
- [26] 高辽远. 纳秒脉冲激光清洗铝合金表面漆层数值模拟与实验研究[D]. 南京: 江苏大学, 2020.
 GAO Liaoyuan. Numerical Simulation and Experimental Study of Aluminum Alloy Paint Layer Cleaned by Nanosecond Laser[D]. Nanjing: Jiangsu University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [27] 历波,薛勃,张津铭,等.激光辅助加热 2024 铝合金温度 场的仿真研究[J].应用激光,2022,42(11):121-128.
 LI Bo, XUE Bo, ZHANG Jinming, et al. Simulation of laser assisted heating 2024 aluminum alloy temperature field[J].
 Applied Laser, 2022, 42(11): 121-128. (in Chinese with English abstract)
- [28] 史新灵,肖魏魏,宋妮妮,等. UO2 陶瓷芯块-316Ti 不锈 钢复合结构激光切割温度场仿真研究[J]. 激光与光电子学 进展,2021,58(17): 334-343.
 SHI Xinlin, XIAO Weiwei, SONG Nini, et al. Temperaturefield simulation of UO2 ceramic pellets-316Ti stainless steel composite structure during laser cutting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 334-343. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王涛,刘明明,王浩,等.激光红外无损检测 TC4 钛合金 时激光激励时间对缺陷温阻效应的影响[J].激光与光电子 学进展,2021,58(23):230-238.
 WANG Tao, LIU Mingming, WANG Hao, et al. Numerical Simulation of Laser Ablation of 45 Steel[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(23):230-238. (in Chinese with English abstract)
- [30] 王义军,朱丰林,姚康林. 激光烧蚀 45 钢的数值模拟研究[J]. 工具技术, 2021, 55(10): 63-69.
 WANG Yijun, ZHU Fenglin, Yao Kanglin, et al. Influence of laser excitation time on thermal resistance effect of TC4 titanium alloy in laser infrared nondestructive testing[J]. Tool Engineering, 2021, 55(10): 63-69. (in Chinese with English abstract)

 [31] 薛彪. 激光热处理金属材料温度场特性研究[D]. 西安:西安 建筑科技大学,2021.
 XUE Biao. Study on Temperature Field Characteristics of Laser Heat Treatment Metal Materials[D]. Xi'an: Xi'an

University of Architecture and Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)

- [32] 施舜泽,张梦伢,李凌.激光烧蚀材料过程中的热效应分析[J].光学学报,2024,44(17):1714001.
 SHI Shunze, ZHANG Mengya, LI Ling, et al. Analysis of thermal effects during laser ablation of materials[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(17):1714001. (in Chinese with English abstract)
- [33] 冯俊华,毕思源,雷正龙,等.海洋微生物膜层激光清洗表面轮廓有限元计算[J].中国科学:技术科学,2024,54(1):165-178.
 FENG Junhua, BI Siyuan, LEI Zhenglong, et al. Finite element calculation for the surface profile of marine microbial lavers

calculation for the surface profile of marine microbial layers after laser cleaning[J]. Sci Sin Tech, 2024, 54(1): 165-178. (in Chinese with English abstract)

- [34] WU Y, GUO Y, ZHANG D. Study of the effect of high-pulsed electric field treatment on vacuum freeze-drying of apples[J]. Drying Technology, 2011, 29(14): 1714-1720.
- [35] 马云海.农业物料学[M].北京:化学工业出版社,2015:108-112.
- [36] 陈进,练毅,李耀明,等.联合收获机粮箱内稻谷含杂率 传感器采样盒设计(英文)[J].农业工程学报,2019, 35(5): 18-25.
 CHEN Jin, LIAN Yi, LI Yaoming, et al. Design of sampling device for rice grain impurity sensor in grain-bin of combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(5): 18-25. (in Chinese with English abstract)
- [37] 李孟卿,张小强,朱丽春,等.基于数值模拟的红枣片不同干燥方式热质传递仿真与试验[J].农业工程学报,2024,40(6):50-59.

LI Mengqing, ZHANG Xiaoqiang, ZHU Lichun, et al. Numerical simulation and experiment on heat and mass transfer in different drying modes of red jujube slices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(6): 50-59. (in Chinese with English abstract)

[38] 陶骏骏,王海晖,姚奉奇,等.木本植物叶片热值测试和 分析[J].林业科学研究,2018,31(2):48-54.
TAO Junjun, WANG Haihui, YAO Fengqi, et al. Heating value of woody plant foliage and its correlations with the property parameters[J]. Forest Research, 2018, 31(2):48-54. (in Chinese with English abstract)

- [39] MOSS R A, LOOMIS W E. Absorption spectra of leaves. I. the visible spectrum[J]. Plant Physiology, 1952, 27(2): 370-391.
- [40] SWASDISEVI T, DEVAHASTIN S, SA-ADCHOM P, et al. Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 92(1): 100-106.

Finite element-based modeling and testing of temperature field in laser ablated cotton terminal buds

WU Tianshu¹, XU Yan^{1,2}^{*}, ZHOU Jianping^{1,2}, CAI Xinliang¹, WU Xuanrui¹, ZUO Jiawei¹, XU Xiang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China; 2. Engineering Research Center of Agricultural and Animal Husbandry Robots and Intelligent Equipment, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830017, China)

Abstract: Cotton plays a critical role in both the global and Chinese agricultural sectors. As one of the most widely cultivated cash crops, cotton is a major source of livelihood for millions of farmers worldwide. It is an essential crop in agricultural practices, fulfilling domestic textile needs while also contributing significantly to the export economy. In China, cotton is not only a key agricultural product but also a crucial component of the nation's textile industry, making its cultivation and management a vital concern for farmers and policymakers alike. In recent years, innovative agricultural techniques have emerged to enhance cotton production efficiency. One such method is the use of laser ablation technology in treating cotton terminal buds, which represents a promising advancement in modern agricultural management. By applying laser ablation to cotton terminal buds, terminal dominance can be suppressed, leading to the desired topping effect. This process redirects the plant's energy and resources towards the development of cotton bolls, which can improve both the yield and quality of the cotton crop. Laser ablation technology offers several distinct advantages over traditional mechanical pruning methods. For one, it minimizes the risk of mechanical damage to the plant, which often occurs during physical pruning and can open the plant to pests and diseases. Moreover, laser ablation eliminates the need for the extensive use of chemical growth regulators, which are commonly employed in traditional agricultural practices to control plant growth. This not only reduces the environmental impact but also supports the sustainable development of agriculture by promoting healthier crop production methods. The significance of laser ablation in cotton terminal bud treatment lies not only in its ability to enhance cotton production but also in its potential to revolutionize agricultural practices. This makes it an important step forward in the quest for modern, sustainable agricultural solutions. To examine the impact of temperature on cotton terminal buds during the laser ablation process, this study conducted a series of experiments to determine the thermal properties of cotton. Building on heat transfer theory, the study used the COMSOL Multiphysics finite element analysis software to develop a time-varying temperature field model for the laser ablation process. The model was used to simulate the temperature distribution in cotton shoot terminal meristems during laser ablation, focusing on the variations in temperature both along the diameter and depth directions of the cotton shoot terminal meristem. Additionally, the study investigated how laser ablation affects the surface erosion of cotton shoot terminal meristems. The results from the model verification indicate that the numerical model is highly effective for simulating laser ablation of cotton shoot terminal meristems. At laser powers of 40W and 50W, the ablation time was reduced by 45.55% and 67.36%, respectively, compared to the standard 30W laser power. Furthermore, the maximum temperature of the cotton shoot terminal meristems decreased with an increase in the laser spot size. Specifically, at a 2.5mm spot size, the ablation temperature was reached in just 0.50 seconds, a time reduction of 76.85% compared to a 3.5mm spot size. The study also revealed that higher water content could further reduce the ablation time. For instance, at a water content of 95%, the time to reach the ablation temperature was 0.52 seconds, 17% faster than at 75% water content. In terms of heat diffusion, the model indicated that, under constant laser power, the heat diffusion speed along the diameter direction was significantly higher than that along the depth direction, highlighting the directional heat transfer characteristics of the laser ablation process. Experimental results showed that, for cotton shoot terminal meristems, a 50W laser power with a 1-second ablation time did not significantly inhibit the growth of the shoot terminal meristems. However, at a 100W laser power with 1 second of ablation, the growth of the cotton shoot terminal meristems was effectively suppressed. Moreover, the greater the degree of carbonization and ablation, the more pronounced the inhibitory effect on shoot growth. This study provides valuable insights into the theoretical and practical applications of laser ablation technology in cotton cultivation.

Keywords: cotton; temperature; numerical modeling; terminal bud; laser ablation