

纳秒激光单脉冲对阻尼橡胶材料的损伤特性

陈 列 王呈祥 汪 幸 翟中生 杨奇彪 娄德元 Peter Bennett 刘 顿*

湖北工业大学机械工程学院, 湖北 武汉 430068

摘要 为了研究阻尼橡胶材料与纳秒激光的相互作用,通过单脉冲激光进行刻蚀实验,观察了橡胶材料的损伤情况,分析了其损伤机理。结果表明,短脉冲激光能量作用于阻尼橡胶材料表面时,由于橡胶材料的热传导系数较低,激光能量所产生的热量将极大地集中在光斑区域内。在高温条件下,橡胶材料发生热裂解、老化等现象,所形成的孔洞内呈现出明显的蜂窝状的热烧蚀状态。随着单脉冲能量的增加,孔的深度和直径增大,且孔内的烧蚀状态更加明显。通过测量烧蚀直径和深度,计算了阻尼橡胶材料在 13 ns 激光单脉冲作用下的损伤阈值。利用有限元方法模拟了阻尼橡胶材料的单脉冲损伤过程,利用模拟结果再次计算了材料的单脉冲损伤阈值,与实验结果吻合较好。

关键词 激光光学; 激光材料加工; 脉冲激光; 阻尼橡胶; 损伤特性; 损伤阈值

中图分类号 TG665 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.081402

Damage Properties of Single Pulse of Nanosecond Laser on Damping Rubber Material

Chen Lie Wang Chengxiang Wang Xing Zhai Zhongsheng Yang Qibiao
Lou Deyuan Peter Bennett Liu Dun

School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China

Abstract To study the interactions of single nanosecond laser pulses with damping rubber materials, etch experiment is carried out by single pulsed laser. Damage situation of the material is observed and damage mechanism is analyzed. The results show that the heat generated by the laser energy is mostly focused on the spot area due to the low heat transfer coefficient of the damping rubber material, while short pulsed laser energy affects on the surface of damping rubber material. As a result, thermal cracking and ageing of the rubber are apparent and a thermal ablation like honeycomb in the holes are shown under the condition of high temperature. The diameter and the depth of the holes are increased with the increasing of the single pulse energy and the ablation state of the rubber in the holes is more significant. The damage threshold of the 13 ns single laser pulse on the damping rubber material is calculated by measuring the ablation diameter and depth. The damaging process of the damping rubber material by a single laser pulse is simulated by the finite element method, and single pulse damage threshold of the material is calculated again with the simulation results. The result shows good agreement with the experiment result.

Key words laser optics; laser material processing; pulsed laser; damping rubber; damage property; damage threshold

OCIS codes 140.3390; 140.3538; 160.5470; 140.3330

1 引言

橡胶作为吸声及阻尼降噪材料的重要组成部分,已被广泛地应用于航空、航天、航海、交通运输、建筑等

收稿日期: 2015-12-29; 收到修改稿日期: 2016-03-31; 网络出版日期: 2016-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(51405141)、湖北省教育厅项目(Q20151404、T201405)、国家科技支撑计划(2015BAF20B03)

作者简介: 陈 列(1983—),男,博士,讲师,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: cangn1983@163.com

* 通信联系人。E-mail: liudun98@163.com

领域^[1-2]。已有研究表明,在橡胶材料表面制备出多孔结构,通过设计和调整孔的大小、形状、通盲孔结构等参数来调整材料的有效弹性模量和损耗,是提高其吸声、减振效果的有效手段之一^[3]。

目前橡胶材料的加工方式主要有机械加工、硫化成型等。机械加工虽然效率较高、成本较低,但其加工的质量往往难以控制,而且对于小孔加工或者橡胶材料的表面加工一般难以实现;而对于硫化成型的方法,由于采用模具进行直接成型,在脱模时容易出现粘结或脱模困难的问题,而且存在生产周期长、成本高等问题,也限制了其实际应用。

针对阻尼橡胶材料的加工精度低、加工质量难以精确控制等缺点^[4],采用激光加工的方式可以有效地解决这些问题。纳秒激光由于具有稳定性强、脉冲能量高、加工热影响区小、加工方式可控性好等优势^[5-9],特别适合于此类高弹性材料的表面加工,当前在各类薄膜材料、工程塑料等多种材料上均取得了较好的应用效果^[10-12]。本文作者之前也尝试了采用波长 1064 nm 的短脉冲激光,开展了橡胶阻尼材料表面打孔的相关研究^[13],但根据相关文献,目前针对短脉冲激光条件下阻尼橡胶材料的损伤特性的研究较少,尤其尚未有针对激光与阻尼橡胶材料之间的作用机理的相关研究报道。在橡胶材料与激光相互作用和影响情况不明确的情况下,针对橡胶材料进行激光加工时,所采用的激光参数的选取只能依靠对各种参数组合条件下的加工情况进行判别和筛选,极大地影响了加工效率。针对该问题,本文将通过实验研究和数值分析的方法,讨论阻尼橡胶材料的短脉冲激光损伤机理,研究结果对于以后进一步开展阻尼橡胶材料的激光加工,具有重要的指导意义。

2 纳秒激光损伤阻尼橡胶材料的机理分析

2.1 实验设备与材料

实验中选用波长为 1064 nm 的激光器,其主要参数如表 1 所示。

表 1 纳秒激光器主要参数

Table 1 Main parameters of the nanosecond laser

Parameter	Range
Average output power /W	0~68
Maximum pulse energy /mJ	>1.0
Output repetition frequency /kHz	70~752
Pulse width range (pulse waveform table) /ns	10~240
Spot diameter / μm	50

所用的橡胶材料为丁腈橡胶,厚度 5 mm,打孔前研磨机和抛光机处理样品,酒精去除表面污垢后,采用超声波清洗机进一步洁净表面,处理后的橡胶材料表面粗糙度 R_a 小于 0.2 μm 。

2.2 单个脉冲对阻尼橡胶材料的损伤形貌及分析

本文作者之前采用短脉冲激光对橡胶材料进行了打孔实验^[13],实验结果表明,在采用较长脉宽的激光进行加工时,激光输入的能量会对橡胶产生明显的烧蚀作用,造成材料的龟裂、老化等问题。根据之前的实验结论和实际加工的需求,在实验和分析中,将采用 13 ns(所用激光器能提供的最短脉宽)的激光对橡胶材料进行刻蚀加工。为了清楚地观察和分析单个脉冲作用下橡胶材料的损伤情况,实验采用划线的方式控制激光扫描于橡胶材料表面,激光重复频率为 300 kHz,扫描速度 30 m/s,在此扫描速度下,每两个脉冲间隔之内,光斑相互之间不搭接,即可观察单个脉冲作用于橡胶材料表面的损伤形貌。

图 1 为不同单脉冲能量 E_p 条件下,通过扫描电镜(SEM)和显微镜观察橡胶表面的损伤情况,并测量孔径、孔深等参数。

如图 1 所示,激光损伤阻尼橡胶材料表面形成了凹坑,但并没有如同铝、铁等材料一样,产生液态物质的喷溅,在孔口处也没有因此而形成堆积层,孔的外表面仍然比较平整,但在孔的内部出现了很多的颗粒状物质。这主要是由于橡胶材料的热传导系数较低,短脉冲激光能量输入所产生的热量将极大地集中在光斑区域内,在热氧环境下,这部分橡胶材料迅速发生热氧老化,出现热裂解,其分子链发生断裂,生成各种碳素的裂解产物,并被高温产生的冲击波抛射至空气中,作者认为这是短脉冲激光损伤阻尼橡胶材料的主要机理。由于温度下降,孔内壁处的橡胶只能发生不完全的裂解,但在仍然较高的温度以及空气中氧的侵蚀作用下,

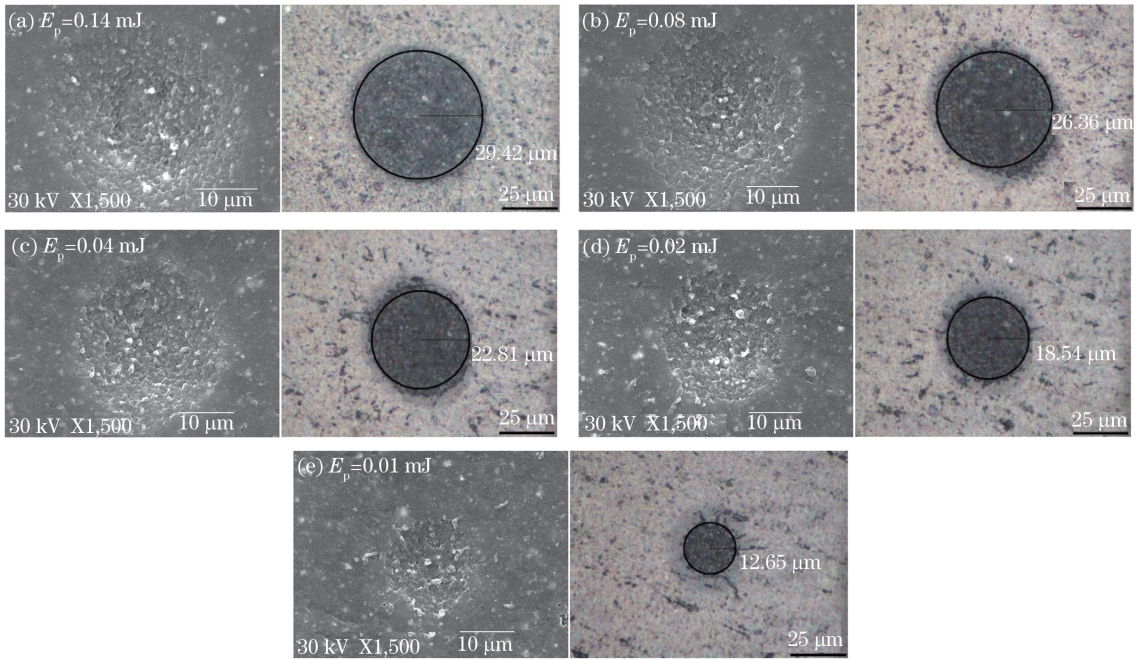


图 1 单个脉冲作用下橡胶表面损伤情况

Fig. 1 Condition of the rubber surface damage affected by single pulse

橡胶材料将迅速发生龟裂老化,从而出现了明显的颗粒状物质并附着在孔的内壁。

此外,从图示结果来看,在实验所采用的激光条件下,单脉冲能量 0.01 mJ 对橡胶表面形成了损伤,说明此时的能量密度已超过了橡胶材料的损伤阈值。随着单个脉冲能量的增加,所得到的孔径、孔深都明显增加,而且由于热量在光斑区域内集中程度的加剧,孔内材料的分解、老化和龟裂的程度更加剧烈,内壁上的颗粒状物质更为明显。

3 阻尼橡胶单脉冲激光损伤阈值

3.1 损伤阈值测定的依据

研究激光对材料作用的损伤阈值,可作为后续微加工应用时,激光能量选择的依据。损伤阈值是激光能够与材料产生作用的最小能量密度,是一个与激光束本身和材料有关的固有参数。短脉冲激光的能量在光斑内呈高斯分布状态,其能量密度与光斑半径的关系为

$$\varphi(r) = \varphi_0 \exp(-2r^2/\omega_0^2), \quad (1)$$

式中, r 为光斑内某点到光束中心的距离; φ_0 为激光束中心的能量密度; ω_0 为光束束腰半径。

激光的单个脉冲能量为

$$E_p = \int_0^{+\infty} 2\pi r \varphi(r) dr = \int_0^{+\infty} \varphi_0 \exp(-2r^2/\omega_0^2) 2\pi r dr = \frac{\pi\omega_0^2}{2} \varphi_0. \quad (2)$$

即中心能量密度与单脉冲能量的关系为

$$\varphi_0 = \frac{2E_p}{\pi\omega_0^2}. \quad (3)$$

而单个脉冲能量与激光平均功率之间有

$$E_p = \frac{P}{f}, \quad (4)$$

式中, f 为脉冲的重复频率; P 为激光输出功率。由此可得

$$\varphi_0 = \frac{2P}{f \cdot \pi\omega_0^2}. \quad (5)$$

设 φ_{th} 为激光对材料产生直径为 D 的损伤区域时, 损伤区域外轮廓处的能量密度, 则可认为 φ_{th} 就是该激光能量能够损伤材料的边界能量, 即材料的损伤阈值。

$$\varphi_{th} = \varphi_0 \exp(-D^2/2\omega_0^2), \quad (6)$$

即

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln\left(\frac{\varphi_0}{\varphi_{th}}\right). \quad (7)$$

根据损伤阈值的定义, 单个脉冲损伤直径为 0 时的能量密度即为材料的损伤阈值, 通过实验获得材料的损伤直径与激光能量的对应数据, 通过线性拟合就可以推算出材料的损伤阈值。

3.2 阻尼橡胶材料单脉冲损伤阈值的实验测定

实验中采用不同的激光单脉冲能量 E_p 对阻尼橡胶进行损伤, 测量所得孔径后, 得到结果如图 2(a) 所示。

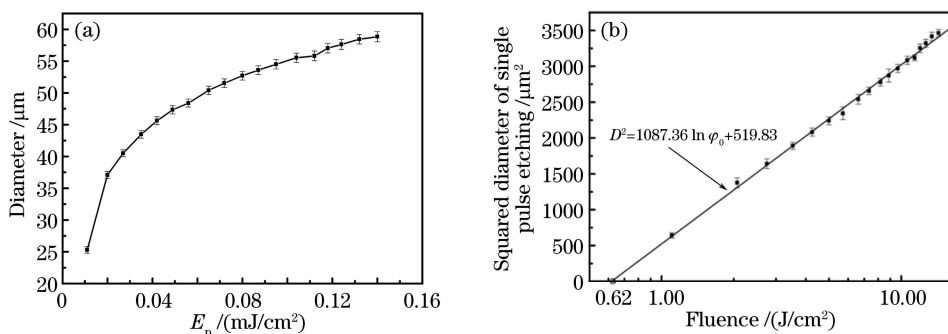


图 2 (a) 孔径大小随单脉冲能量的变化情况; (b) 单脉冲刻蚀直径的平方与能量密度的对数关系

Fig. 2 (a) Diameter of the holes varies with the energy of single pulse; (b) square of the holes diameters against the logarithm of the energy density

将单脉冲能量折算为激光的能量密度, 与烧蚀直径的平方的关系如图 2(b) 所示, 通过最小二乘法拟合可以得到烧蚀直径的平方 (D^2) 与能量密度的对数 ($\ln \varphi_0$) 满足线性关系, 其斜率 $k = 1087.36$, 拟合后的直线与激光束腰半径的关系为 $k = 2\omega_0^2$, 可以推断出激光束的束腰半径为 $23.32 \mu\text{m}$ 。根据拟合得到的线性方程, 当 $D = 0$ 时, 推算出丁腈橡胶的损伤阈值为 0.62 J/cm^2 。

为了进一步验证以孔径计算所得阻尼橡胶损伤阈值的准确性, 实验中采用表面轮廓仪测量了不同的激光单脉冲能量作用下, 所得孔的深度, 测量结果如图 3 所示。

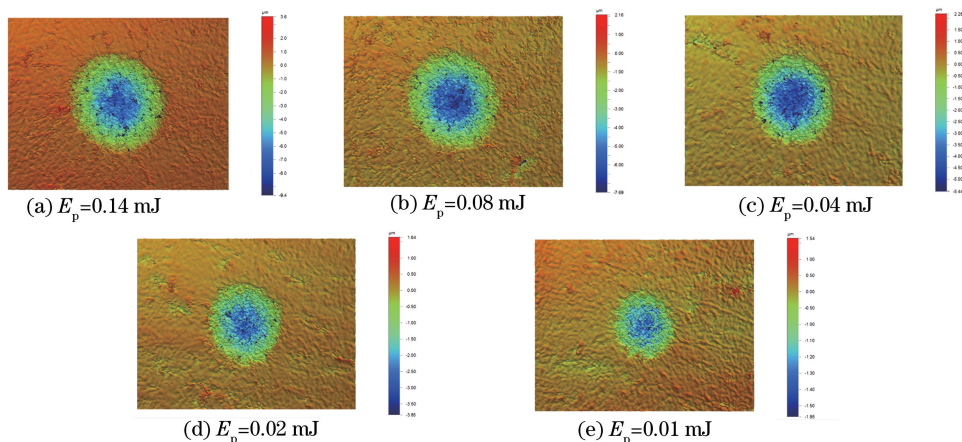


图 3 单个脉冲损伤橡胶表面孔深

Fig. 3 Depth of the holes on rubber surface generated by single pulse

将不同单脉冲能量作用下测量的孔深情况绘成图表, 如图 4(a) 所示。根据 Beer 定律^[14], 在激光损伤阈值附近, 激光烧蚀深度 L 与能量密度 φ_0 应当满足如下规律:

$$L = \alpha^{-1} \ln(\varphi_0 / \varphi_{th}), \quad (8)$$

式中, α 为吸收系数。

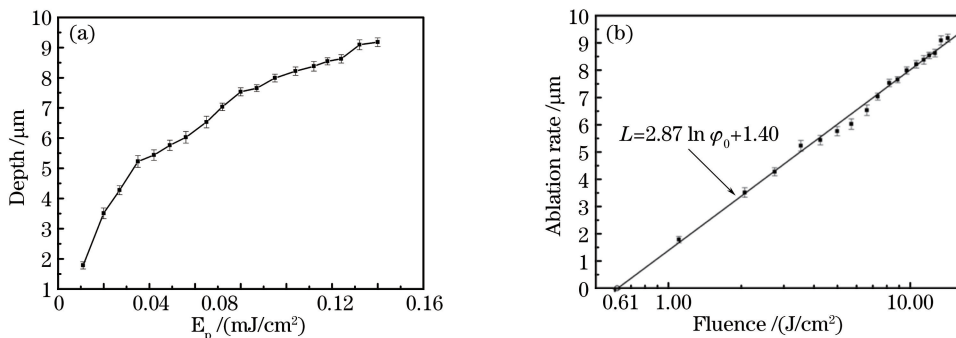


图 4 (a) 孔深随单脉冲能量的变化情况; (b) 单脉冲刻蚀深度与能量密度的对数关系

Fig. 4 (a) Depth of holes varies with different energies of single pulse; (b) ablation depth of single pulse against the logarithm of the energy density

可见, 激光烧蚀深度 L 与能量密度的对数 $\ln \varphi_0$ 成线性关系。将实验测得的各个激光脉冲能量作用下获得的孔深与能量密度的对数关系绘成曲线, 如图 4(b) 所示。

将实验结果拟合后, 发现 L 与 $\ln \varphi_0$ 与线性规律较好地吻合, 拟合后的直线与横坐标的交点, 即可视为通过刻蚀深度所测量计算的橡胶阻尼材料单脉冲损伤阈值 0.61 J/cm^2 , 该结果与之前通过测量孔径所计算得到的损伤阈值较好地吻合, 说明所采用的测量方法是有效且可靠的。

4 阻尼橡胶单脉冲激光损伤的模拟计算

4.1 计算模型及边界条件

根据实验现象, 单脉冲激光能量照射在橡胶材料表面, 主要是引起橡胶材料迅速升温、分解, 从而造成材料表面的损伤, 为了模拟该过程, 采用高斯函数分布的热源模型模拟激光能量, 利用 ANSYS 软件计算橡胶材料的温度场变化情况。

计算用的橡胶几何模型尺寸为 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$, 网格划分情况如图 5 所示。

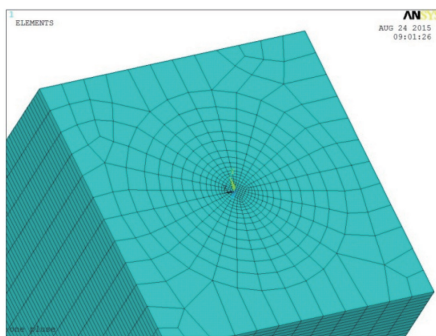


图 5 计算模型的网格划分情况

Fig. 5 Mesh of the calculation model

激光脉冲能量在空间上的高斯分布^[15-17]函数 $I(x, y)$ 可表示为

$$I(x, y) = I_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{r^2} - \frac{y^2}{r^2}\right), \quad (9)$$

式中, r 为光斑半径, I_{\max} 为最大中心热通量。 x, y 为光斑内一点距离光斑中心的距离。

采用表面热流形式^[18-19] $Q(x, y, t)$ 对橡胶材料表面进行加载:

$$Q(x, y, t) = P(t) \cdot (1 - R) / (\pi r^2) \cdot \exp[-a(x^2 + y^2) / r^2], \quad (10)$$

式中, R 是反射率, a 是热集中系数, $P(t)$ 为激光功率。

计算所用的橡胶阻尼材料的热物理参数如表 2 所示。

表 2 阻尼橡胶材料的热物性参数

Table 2 Thermal parameters of the damping rubber material

Parameter	Value
Density / (kg/cm^3)	1.4
Specific heat / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)	1700
Thermal conduction / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0.025
Convection or film coefficient / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	11.6
Decomposition temperature / $^{\circ}\text{C}$	175

模型上表面为激光能量输入状态,其他表面与环境(20°C)发生对流换热。

4.2 计算结果及分析

计算采用的单脉冲能量为 0.14 mJ ,计算所得橡胶材料的温度分布状态如图 6 所示。

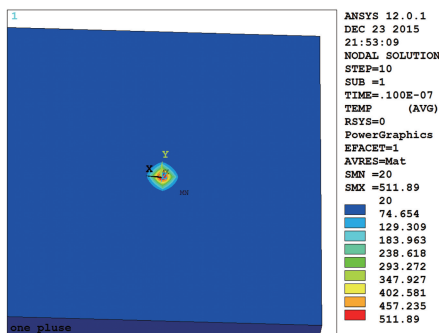


图 6 橡胶材料温度场计算结果

Fig. 6 Calculation results of the temperature field of rubber material

从结果可以看到,由于橡胶材料的热传导率较低,单脉冲激光能量照射在橡胶材料表面,能量极大地集中在光斑附近,光斑中心的温度迅速上升至 500°C 以上,高于橡胶材料的热分解温度^[20],意味着材料表面已经形成了损伤。为了更好地观察其损伤的状态,将模型沿光斑中心剖开,观察截面的等温线状态,如图 7(a)所示。

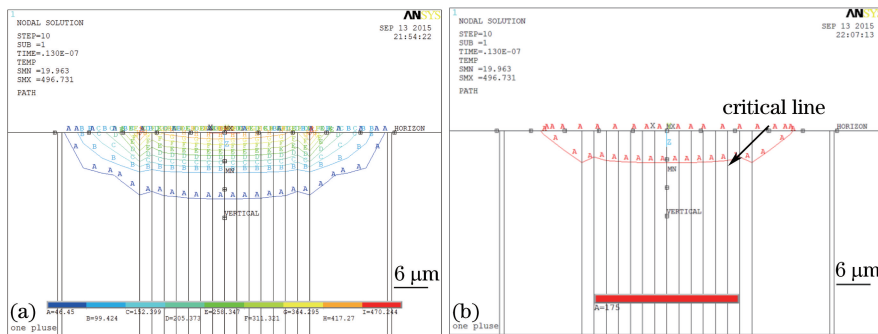


图 7 模型截面温度分布状态。(a) 等温线分布; (b) 分解温度对应的等温线

Fig. 7 Temperature distribution on the section of the model. (a) Distribution of isothermal lines; (b) isothermal line of decomposing temperature

在模型中定义橡胶分解温度 175°C 对应的等温线,即可分析橡胶表面损伤的深度与宽度,如图 7(b)所示。

根据橡胶材料的温度场分布,将分解温度 175°C 作为损伤的临界温度。为了更好地观察单脉冲能量对橡胶材料的损伤状况,针对各种激光单脉冲能量的情况进行了计算,并绘制橡胶表面和沿光斑中心的温度分布状态,如图 8 所示。

根据以上模拟结果,即可计算出各个单脉冲能量状态下,激光损伤橡胶材料的直径与深度按照烧蚀直径的平方(D^2)与能量密度的对数($\ln \varphi_0$)、激光烧蚀深度(L)与能量密度的对数($\ln \varphi_0$)的关系,绘制成相应的结果如图 9 所示。

从模拟计算的结果看,模拟计算所得橡胶表面的损伤直径和深度均小于实验测量的结果,相比较而言,

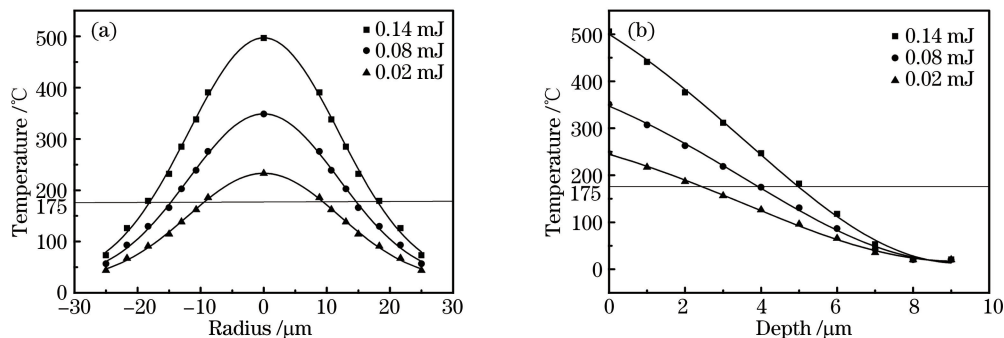


图 8 橡胶 (a) 表面径向和 (b) 深度方向的温度分布状态。

Fig. 8 Temperature distribution along (a) radial direction of the surface and (b) depth direction of rubber

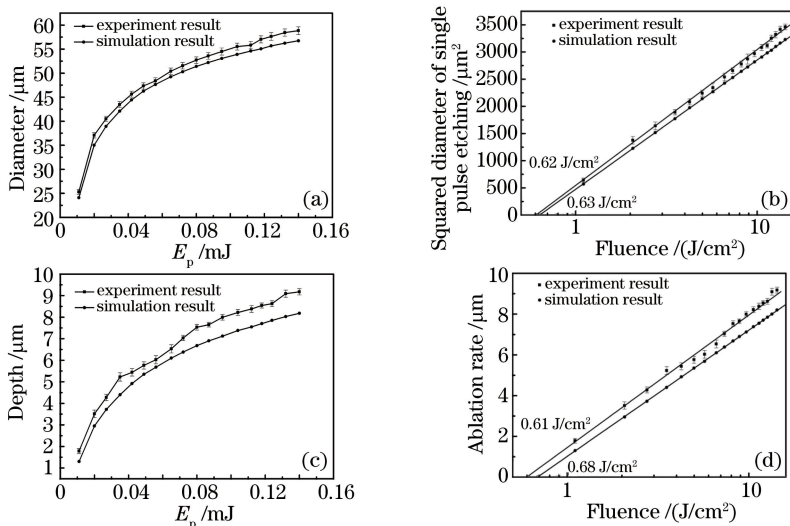


图 9 仿真与实验的结果对比。(a) 不同单脉冲能量下的烧蚀直径；(b) 不同能量密度下烧蚀直径的平方；(c) 不同单脉冲能量下的烧蚀深度；(d) 不同能量密度下的烧蚀深度

Fig. 9 Comparison of simulation result and experiment result. (a) Diameter of holes etched by different energies of single pulse; (b) squared diameter of holes etched by different energy densities;

(c) depth of holes etched by different energies of single pulse; (d) depth of holes etched by different energy densities

损伤直径的结果更加接近于实验测量结果。作者认为,根据实验现象分析可知,橡胶材料的表面损伤主要由激光产生的热效应引起,材料表面的热量输入和传导是影响损伤直径变化的主要原因,在以激光热量输入为计算条件的情况下,计算所得的损伤直径与实验测量是较为吻合的,所得到的材料损伤阈值 0.63 J/cm^2 与实验所得也基本符合。而在深度方向上,除了热量的传导造成橡胶材料分解、损伤以外,还有部分效果是由于激光能量产生的冲击、抛射作用而引起,这一部分作用在模拟中并没有体现,因此计算所得的损伤深度要小于实验测量,而据此计算所得的损伤阈值则偏大。但总体来说,模拟计算的结果与实验结果还是较好地吻合,说明所采用的模拟计算方法是可靠的。由于实际测量橡胶材料的损伤情况所需设备成本较高、测量过程繁杂,在简化实验过程的情况下,所采用的模拟计算方法可为后续研究提供良好的支持。

5 结 论

针对阻尼橡胶材料与短脉冲激光的相互作用,通过单脉冲激光进行了实验,观察了橡胶材料的损伤情况,分析了其损伤机理,测量了刻蚀直径与深度,并依此计算了阻尼橡胶材料短脉冲激光单脉冲损伤阈值,采用有限元计算的方法,对橡胶材料单脉冲温度场分布进行了模拟分析,利用模拟结果再次计算了材料的损伤阈值,得到以下结论:

1) 短脉冲激光能量作用于阻尼橡胶材料表面时,材料表现为明显的热烧蚀状态,由于橡胶材料的热传导系数较低,短脉冲激光能量输入所产生的热量将极大地集中在光斑区域内,橡胶材料在高温条件下,发生裂解、老化等现象,所形成的孔洞内呈现明显的蜂窝状烧蚀状态。随着单脉冲能量的增加,孔的深度和直径增加,且孔内的烧蚀状态更加明显。

2) 通过测量烧蚀直径和深度,计算了阻尼橡胶材料在 13 ns 激光单脉冲作用下的损伤阈值,分别为 0.62 J/cm^2 和 0.61 J/cm^2 ,两种方法所得结果较好地吻合,说明实验采用的观测手段是可靠的。

3) 利用有限元方法,模拟了阻尼橡胶材料单脉冲温度场分布,利用模拟结果再次计算了材料的单脉冲损伤阈值,与实验结果较好地吻合,说明所采用的实验方法和实际测量结果是有效、可靠的,在简化实验过程的情况下,可采用模拟计算的方法为后续研究提供支持。

参 考 文 献

- 1 Jia Huiqing, Yang Fang, Zhai Yueqin. Study on thermal stability and kinetics of NBR with antioxidant [J]. China Elastomerics, 2014, 24(1): 34-36.
贾慧青, 杨 芳, 翟月勤. 含抗氧剂的 NBR 热稳定性及热解动力学研究 [J]. 弹性体, 2014, 24(1): 34-36.
- 2 Zhou Hong, Huang Guangsu, Chen Xirong, *et al.* Advances in sound absorption polymers [J]. Progress in Chemistry, 2004, 16(3): 450-455.
周 洪, 黄光速, 陈喜荣, 等. 高分子吸声材料 [J]. 化学进展, 2004, 16(3): 450-455.
- 3 Mikami Daiji, Yokoyama Tomoki, Hasegawa Akio, *et al.* Sound power reduction of underwater array projector caused by mutual radiation impedance [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1997, 36(5B): 3340-3344.
- 4 Mannion P T, Magee J, Coyne E, *et al.* The effect of damage accumulation behaviour on ablation thresholds and damage morphology in ultrafast laser micro-machining of common metals in air [J]. Applied Surface Science, 2004, 233(1-4): 275-287.
- 5 Mc Nally C A, Folkes J, Pashby I R. Laser drilling of cooling holes in aero engines: state of the art and future challenges [J]. Materials Science and Technology, 2004, 20(7): 805-813.
- 6 Zhang Xuejiao, Ye Qing, Qu Ronghui, *et al.* Research on damage on transparent electro-optic ceramic surface induced by nanosecond and femtosecond pulses [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0706002.
张学娇, 叶 青, 瞿荣辉, 等. 纳秒激光和飞秒激光对透明电光陶瓷表面损伤研究 [J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0706002.
- 7 Yuan Ligang, Chen Guo, Hou Tianyu, *et al.* Damage threshold measurement of $2 \mu\text{m}$ laser on ZnGeP_2 crystal and its influencing factors [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0802001.
苑利刚, 陈 国, 侯天禹, 等. $2 \mu\text{m}$ 激光对磷锗锌晶体的损伤阈值测量及影响因素分析 [J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0802001.
- 8 Feng Yayun, Ye Yunxia, Lian Zuchang, *et al.* Experimental research on effect of surface quality of copper treated by laser shock peening [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 101401.
冯亚云, 叶云霞, 连祖焜, 等. 激光冲击强化对铜表面质量影响的实验研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 101401.
- 9 Cao Yupeng, Feng Aixin, Xue Wei, *et al.* Experimental research and theoretical study of laser shock wave induced dynamic strain on 2024 aluminum alloy surface [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0903004.
曹宇鹏, 冯爱新, 薛 伟, 等. 激光冲击波诱导 2024 铝合金表面动态应变特性试验研究及理论分析 [J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0903004.
- 10 Salonitis K, Stournaras A, Tsoukantas G, *et al.* A theoretical and experimental investigation on limitations of pulsed laser drilling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 183(1): 96-103.
- 11 Corsaro R D, Klunder J D, Jarzynski J. Filled rubber materials system: application to echo absorption in waterfilled tanks [J]. Journal of Acoustical Society of America, 1980, 68(2): 654-664.
- 12 Banks P S, Feit M D, Rubenchik A M, *et al.* Material effects in ultra-short pulse laser drilling of metals [J]. Applied Physics A, 1999, 69(s1): 377-380.
- 13 Chen Lie, Wang Jun, Liu Dun, *et al.* Experimental and mechanism analysis of holes drilling on rubber damping material

- using nanosecond laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(s2): s216004.
- 陈 列, 汪 军, 刘 顿, 等. 橡胶阻尼材料纳秒激光打孔实验及机理分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(s2): s216004.
- 14 Swinehar D Ft. The Beer-Lambert law[J]. *J Chem Educ*, 1962, 39(7): 333-335.
- 15 Cheng J, Perrie W, Sharp M, *et al.* Single-pulse drilling study on Au, Al and Ti alloy by using a picosecond laser[J]. *Applied Physics A*, 2009, 95(3): 739-746.
- 16 Chu Qingchen, Yu Gang, Lu Guoquan, *et al.* Two-dimensional numerical investigation for the effects of laser process parameters on hole type during laser drilling[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(6): 0603001.
- 褚庆臣, 虞 钢, 卢国权, 等. 激光打孔工艺参数对孔型影响的二维数值模拟研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 0603001.
- 17 Song Linsen, Shi Guoquan, Li Zhanguo. Simulation of laser drilling temperature field by using ANSYS[J]. *Acta Armamentarii*, 2006, 27(5): 879-882.
- 宋林森, 史国权, 李占国. 利用 ANSYS 进行激光打孔温度场仿真[J]. *兵工学报*, 2006, 27(5): 879-882.
- 18 Zang Yannan, Ni Xiaowu, Chen Yanbei. Simulation of long pulsed laser drilling on metal based on birth and death method of ANSYS[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0603005.
- 藏彦楠, 倪晓武, 陈彦北. 基于 ANSYS 生死单元法的长脉冲激光金属打孔仿真[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0603005.
- 19 Chen Lie, Gu Chengzhong, Xie Peilin. Numerical analysis of temperature field in laser cladding on tooth surface of helical gear shaft[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(3): 0303006.
- 陈 列, 古成中, 谢沛霖. 斜齿轮轴齿面激光熔覆过程中温度场的数值分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(3): 0303006.
- 20 Pielichowski Krzysztof, Njuguna James. Thermal degradation of polymeric materials[M]. UK: Rapra Technology Ltd, 2005: 51-53.