



·强激光物理与技术·

## 不同功率密度 1064 nm 激光辐照下 小鼠皮肤热损伤研究\*

刘智搏, 马琼, 周巡, 隗雨, 康宏向

(中国人民解放军军事科学院 军事医学研究院 辐射医学研究所, 北京 108502)

**摘 要:** 通过实验和理论分析研究 1064 nm 激光不同输出功率对小鼠皮肤的热损伤规律。利用皮肤镜与光学相干断层成像(OCT)评估小鼠皮肤组织热损伤程度;参考 Arrhenius 热损伤方程进行理论分析,并与实验结果对比。结果显示,当激光连续辐照时间为 400 ms 时,激光输出功率密度小于 958 W/cm<sup>2</sup> 时,激光辐照处泛红;激光输出功率密度为 958~1160 W/cm<sup>2</sup> 时,损伤呈白色水疱状;激光输出功率密度为 1160~1370 W/cm<sup>2</sup> 时,损伤呈浅坑状焦黄斑,损伤斑周围伴一圈鼓起的白色皮肤水疱;激光的功率密度在 1370~2190 W/cm<sup>2</sup> 时,损伤呈红色坑状斑,损伤斑周围伴黑黄色焦痂。

**关键词:** 1064 nm 激光;皮肤热损伤;Arrhenius 热损伤方程;热损伤模型;热损伤分级

中图分类号: Q361

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220292

## Skin damage in mice induced by different power densities of 1064 nm laser

Liu Zhibo, Ma Qiong, Zhou Xun, Wei Yu, Kang Hongxiang

(Institute of Radiation Medicine, Academy of Military Medical Science, Academy of Military Science PLA China, Beijing 108502, China)

**Abstract:** The thermal damage of mouse skin under different output power of 1064 nm laser was studied by experiment and theoretical analysis. The degree of thermal injury of mouse skin tissue was evaluated by dermoscope and optical coherence tomography (OCT), and the theoretical analysis was made according to Arrhenius thermal damage equation, and the results were compared with the experimental results. The results show that when the laser's continuous irradiation time is 400 ms and the laser output power density is less than 958 W/cm<sup>2</sup>, there is no obvious damage; when the laser output power density is 958–1160 W/cm<sup>2</sup>, the damage is white blister-like; when the laser output power density is 1160–1370 W/cm<sup>2</sup>, the damage is a shallow pit-like macula with a circle of bulging white skin blisters around the damage spot; when the laser power density is at 1370–2190 W/cm<sup>2</sup>, the damage is a red pit-like spot, and there is black-yellow eschar around the injury spot.

**Key words:** 1064 nm laser, cutaneous thermal injury, Arrhenius heat damage equation, thermal injury model, thermal injury grading

21 世纪初以来,激光技术发展很快,现已广泛应用于工业、军事、医学及科研等各个领域<sup>[1-2]</sup>。预防激光应用中潜在的安全风险,保障相关领域从业人员的安全,是激光应用的基本要求。研究激光致热损伤规律与作用机制,对激光安全应用有参考意义,同时有助于提高激光对临床诊断、治疗的安全性。长脉宽 1064 nm 激光是一种能被色素良好吸收,对生物组织穿透较深的激光,因此被应用于激光辅助药物、激光辅助外科手术治疗黄褐斑、光老化、瘢痕等皮肤疾病<sup>[3-6]</sup>,取得较好治疗效果。在 1064 nm 激光临床应用的一系列研究中,针对 1064 nm 激光致皮肤损伤效应的研究较少<sup>[7-8]</sup>,损伤机制及损伤规律尚不明确。激光辐照生物组织后,迅速发生光热效应<sup>[9]</sup>,其热效应与功率密度、曝光范围和持续时间密切相关。针对光热效应,陈安宇、朱光明等人<sup>[10-11]</sup>基于热传递与热损伤数学模型,利用计算机软件辅助分析,从理论层面分析了激光参数对组织温度分布与热损伤的影响。开展激光与组织相互作用的理论与实验研究,将有助于进一步阐明激光对生物组织的作用机制与量效关系<sup>[12-13]</sup>。

\* 收稿日期:2022-09-17; 修订日期:2023-01-11

联系方式:刘智搏, lz45612@163.com。

通信作者:康宏向, khx007@163.com。

本文目的是研究 1064 nm 激光致小鼠皮肤热损伤的特征、量效关系, 探讨激光致生物皮肤组织的热损伤规律, 有望为 1064 nm 长脉宽激光的应用提供更多的生物学依据, 推动激光在临床医学及其他领域的应用发展。

## 1 实验装置与方法

### 1.1 实验动物

SPF 级健康昆明小鼠 14 只, 雌雄各半, 雌鼠未孕, 8~9 周龄, 体重 30 g 左右, 购自北京斯贝福生物技术有限公司, 动物许可证 SCXK(京)2018-0010, 饲养于军事医学研究院实验动物中心; 实验前常规饲养 3 d, 观察无异常者方可进行实验。本实验通过动物实验伦理审查(审查编号为: IACUC-DWZX-2021-611), 动物操作完全符合动物实验伦理要求。

### 1.2 实验装置

1064 nm 连续光纤激光器(CW-R-C-A-200, 深圳市杰普特光电股份有限公司); OCT 系统为扫频 OCT, 主要包括: 基于 MEMS 的 Santec 扫频光源(中心波长 1310 nm, 主频扫频 100 kHz, 可调带宽 91.5 nm), 平衡探测器(INT-MSI-1300B, Thorlabs 公司), 数据采集板卡(ATS9350, Alarztec 公司), 成像深度大约为 3 mm; 红外热像仪(FOTRIC 225 s, FOTRIC 公司), 皮肤镜(Miis Horus Scope DSC100, MIIS 公司)。

### 1.3 激光辐照方法

激光辐照前, 小鼠使用 1% 戊巴比妥钠腹腔注射进行麻醉, 对其背部皮肤脱毛备皮, 在背部皮肤画定一个边长为 1 cm 的 2×5 方格阵列作为辐照区域。小鼠背部划定的 10 个辐照方格, 从左到右、从上到下依次增大辐照功率密度, 光电快门控制持续辐照时间为 400 ms, 激光经凸透镜聚焦后垂直辐照在小鼠皮肤, 光斑直径为 3 mm, 辐照过程中用红外热像仪监测并记录温度值, 每一只小鼠均按照相同的辐照方法进行辐照。激光辐照小鼠皮肤实验操作如图 1 所示。

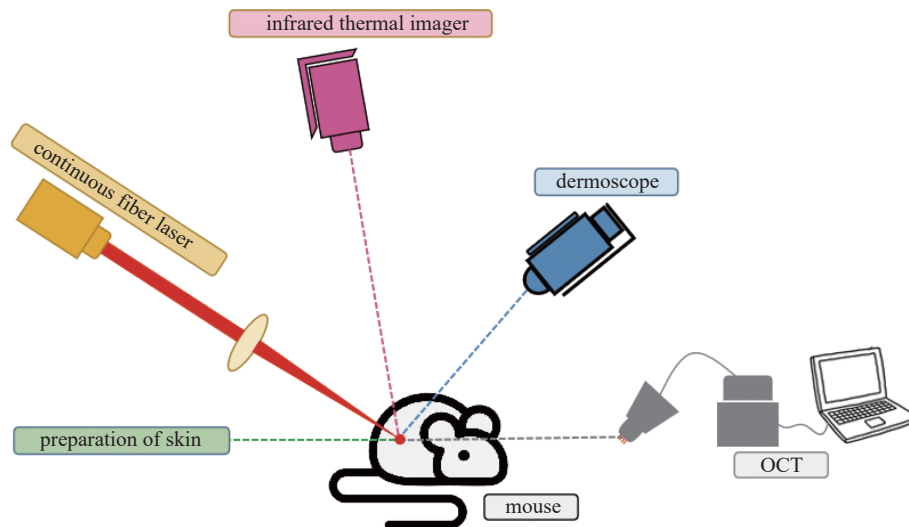


Fig. 1 Experimental diagram of laser irradiation on the skin of mouse

图 1 激光辐照小鼠皮肤实验的示意图

### 1.4 实验数据处理

#### 1.4.1 损伤面积计算

激光辐照后 30 min, 采用皮肤镜拍照记录皮肤创面损伤情况。通过对小鼠皮肤创面的数字图像处理, 区分皮肤损伤区域和未损伤区域, 并计算损伤区域的像素点得到损伤斑面积。

#### 1.4.2 损伤深度计算

激光辐照后 1 h, 采用 OCT 扫描系统对皮肤损伤创面进行无创扫描成像。选取 OCT 扫描图像中的皮肤损伤区域进行数字图像处理, 并计算损伤区域的像素点得到损伤深度

#### 1.4.3 皮表温度监测

采用红外热像仪实时监测记录小鼠表面皮肤温度的变化, 测温区间为 0~350 ℃, 记录温度场的的数据。

#### 1.4.4 病理学形态分析

完成上述图像采集工作后, 采用颈椎脱臼法处死实验小鼠, 制作皮肤创面组织标本, 然后进行石蜡切片和苏木

精-伊红(hematoxylin-eosin staining, HE)法染色,光镜下观察皮肤创面组织的病理形态学变化,包括皮肤表皮层、真皮层和皮下组织层,以及毛囊的结构变化等。

### 1.5 统计学分析

采用 SPSS20.0 软件分析,检验水准  $P=0.05$ ,采用多组均数间比较的方差分析进行统计学分析。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 皮肤镜图像分析

1064 nm 激光辐照 400 ms 后小鼠皮肤创面的皮肤镜观察结果(图 2)显示:功率密度为 958.32 W/cm<sup>2</sup>,皮肤损伤呈现水疱型损伤斑且伴有一周白色凝固斑(图 2(a));功率密度为 1330.92 W/cm<sup>2</sup>,呈现焦黄色损伤斑周边伴有肉眼可见的白色凝固斑,且白色凝固斑一段时间后缓慢消失(图 2(b));功率密度为 1550.4 W/cm<sup>2</sup>,呈现淡红色焦斑周边伴有黄褐色焦斑与红色凝固斑(图 2(c));功率密度为 1767.92 W/cm<sup>2</sup>,呈现红褐色焦斑,且损伤面积增大明显(图 2(d));功率密度为 1984.44 W/cm<sup>2</sup>,呈现红色凝固斑,皮肤创面边缘周围有黑色焦痂,溢出少量组织液及脂肪滴,部分组织汽化(图 2(e));激光辐照功率密度为 2196.76 W/cm<sup>2</sup>,呈现血红色凝固斑,皮肤创面边缘黑色焦痂增多,损伤斑内组织汽化明显,且皮下组织暴露、损伤斑周围渗出组织液及脂肪滴,甚至可见皮下肌肉(图 2(f))。

对皮肤镜结果分析:(1)随着激光输出功率的升高,小鼠皮肤损伤呈现由轻至重的损伤变化,在该功率密度区间内作用于小鼠皮肤后温度的变化,引起激光热致生物组织凝固、热致生物组织汽化的现象,符合强激光对生物组织作用的一般规律;(2)在较高激光功率密度辐射后立即观察,可见损伤斑周围有组织液及脂肪滴渗出,损伤斑边缘少量棕黑色干性坏死的组织,产生不可逆损伤;(3)在高激光功率密度辐射作用下,损伤贯穿表皮层与真皮层深达皮下,引起皮肤组织及组织中的血液发生凝固,实验过程中并未出现出血情况。

皮肤镜图像进行数字图像处理得到损伤斑面积,以激光输出功率为横坐标,以损伤斑面积为纵坐标,并利用 Origin 软件进行方程拟合,结果显示在本实验条件下激光小鼠的皮肤损伤面积与辐照功率密度呈现良好的线性关系,且线性相关系数  $R^2=0.9908$ ,如图 3 所示。同一辐照时间下,随着激光功率密度的增加,皮肤损伤面积呈线性增加。

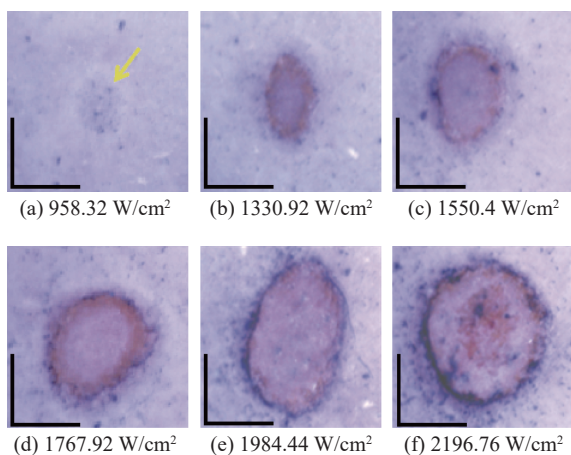


Fig. 2 Dermoscope images of injury in mice skin at different duration of 1064 nm laser irradiation (400 ms after irradiation; scale bar of dermoscope images: 1 mm)

图 2 1064 nm 激光辐照 400 ms 后小鼠皮肤创面的皮肤镜影像

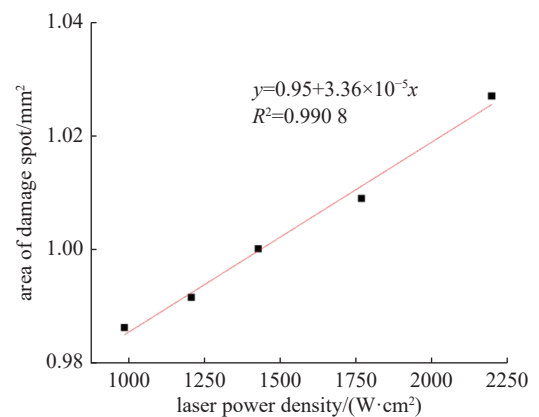


Fig. 3 Effect of different power density laser irradiation on the skin lesion area of mice

图 3 不同功率密度激光辐照对小鼠皮肤损伤面积的影响

### 2.2 OCT 扫描图像分析

利用光学相干断层扫描技术,在激光辐照时间 400 ms 的情况下,改变激光输出功率,采集 1064 nm 激光辐照后小鼠皮肤损伤 OCT 扫描图像结果显示:如图 4(a)、(b),激光输出功率密度分别为 770.04 W/cm<sup>2</sup>、958.32 W/cm<sup>2</sup>,损伤周围组织增厚变性但皮肤分层较清晰,损伤呈隆起状;如图 4(c)~图 4(f)所示,激光输出功率密度分别为 985.88 W/cm<sup>2</sup>、1206.28 W/cm<sup>2</sup>、1427.64 W/cm<sup>2</sup>、1550.4 W/cm<sup>2</sup>,表皮损伤且分层模糊,损伤周围组织增厚变性;如图 4(g)~图 4(i)所示,激光输出功率密度分别为 1767.92 W/cm<sup>2</sup>、1984.44 W/cm<sup>2</sup>、2196.76 W/cm<sup>2</sup>,表皮与部分真皮汽化,组织增厚变性,损伤周围皮肤分层混乱,损伤呈坑状。

对 OCT 图像分析可得: (1)随着激光输出功率的增加,小鼠皮肤损伤纵向深度逐渐加深; (2)当功率密度大于 2190 W/cm<sup>2</sup>, 可见最深处击穿皮下脂肪层, 深达肌肉层。

OCT 扫描图像进行二值化处理得到损伤深度后的结果如图 5 所示, 可见损伤深度与功率密度呈良好的幂函数关系, 同一辐照时间下, 随着激光输出功率的增加, 损伤深度增加趋势呈指数型。

### 2.3 病理学形态分析结果

小鼠经 1064 nm 激光照射后皮肤创面的病理学观察结果显示, 正常的皮肤结构完整, 皮肤表皮厚度均匀, 表皮、真皮乳突明显, 表皮、真皮和皮下组织分层清晰, 含有皮肤附件如汗腺、皮脂腺等(图 6(a)); 照射后 1 h, 各剂量组表皮坏死脱落, 表皮下组织变性坏死、结构不清, 皮肤附件消失, 且随着剂量增加, 皮肤损伤程度加重, 呈良好的剂量效应关系。

### 2.4 激光致皮肤损伤分级

以上述实验为基础, 参考美国烧伤协会(American Burn Association, ABA)发布的烧伤标准<sup>[14]</sup>中的损伤表征, 并根据重复实验结果, 综合分析损伤面积与损伤深度的变化规律, 将不同激光功率密度下小鼠皮肤损伤大致分为四级, 如表 1 所示: 激光输出功率密度在 950 W/cm<sup>2</sup> 以下时, 定义为一度, 为短时间可恢复损伤; 激光输出功率密度为 958~1160 W/cm<sup>2</sup> 时, 定义为二度, 损伤呈白色水疱, 损伤周围皮肤变形鼓起; 激光输出功率密度为 1160~1370 W/cm<sup>2</sup> 时, 定义为三度损伤, 皮肤表层少量汽化, 损伤斑周围伴一圈鼓起的变白皮肤水疱, 浅坑状焦黄斑; 激光的功率密度为 1370~2190 W/cm<sup>2</sup> 时, 定义为四度(深层)损伤, 损伤达脂肪层, 表层汽化严重, 脂肪融化溢出。

## 3 理论分析

### 3.1 Arrhenius 热损伤方程

在数学上, 光热作用可以被建模为具有两个实验导出系数的一阶速率过程。这种损伤与温度呈指数关系, 与

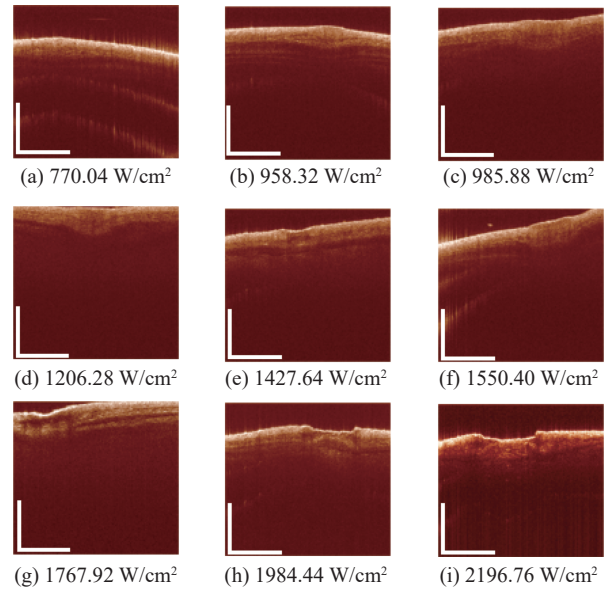


Fig. 4 OCT images of injury in mice skin at different duration of 1064 nm laser irradiation(400 ms after irradiation; scale bar of OCT images: 1 mm)

图 4 1064 nm 激光辐照损伤后 OCT 结果观察 (辐照 400 ms, 标尺: 1 mm)

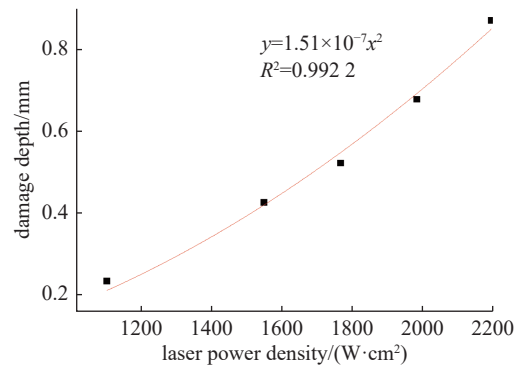


Fig. 5 Effect of laser irradiation with different power density on the depth of the skin damage in mice

图 5 不同功率密度激光辐照对小鼠皮肤损伤深度的影响

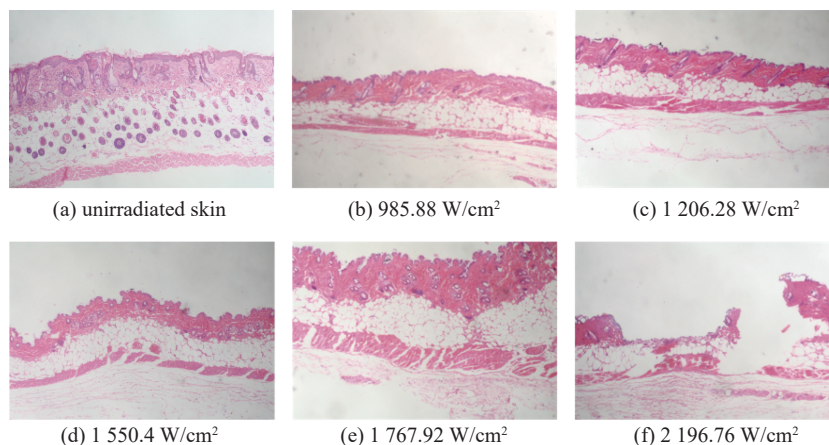


Fig. 6 Pathomorphological changes of skin wounds in mice irradiated by 1064nm laser (hematoxylin-eosin staining ×100)

图 6 小鼠经 1064 nm 激光照射后皮肤创面的病理形态学变化(HE 染色, ×100)

表 1 1064 nm 激光致生物皮肤组织皮肤损伤分级  
Table 1 Grading of skin lesions in biological skin tissue by 1064 nm laser

laser irradiation power density/(W·cm <sup>-2</sup> )	damage	appearance
<958	first-degree injury	Redness at laser irradiation, recovered after some time.
958~1160	second-degree injury	White blisters, deformed and bulging (crumpled) skin around the injury.
1160~1370	third-degree injury	Vaporization of small amounts (or few lesions) on the superficial layer of the skin, blanching skin blisters with a bulging circle around the injury spot, and a shallow pit like focal macule.
1370~2190	fourth-degree injury	Through the skin up to the fat layer, superficial vaporization was severe, splashing oil droplets, and around the injury with dark yellow eschar as red pit like spots.

暴露时间呈线性关系。这是由 Moritz 和 Henriques 首次提出<sup>[15]</sup>。他们使用 Arrhenius 方程

$$\Omega = \int_0^t A e^{-\frac{E_a}{RT(t)}} dt \quad (1)$$

计算参数  $\Omega$  来量化损伤。式中,  $A=3.1 \times 10^{98}$  为材料参数(频率因子);  $E_a=6.28 \times 10^5$  (J·mol<sup>-1</sup>) 为活化能;  $T$  (K) 为热力学温度,  $R=8.214$  J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup> 为普适气体常数。

### 3.2 激光诱导生物皮肤组织热损伤模型

用红外热像仪实时监测并记录实验过程中皮肤表面温度变化。记录辐照时间内绝对最高温度, 拟合不同功率密度下, 温度变化曲线, 如图 7 所示; 不同功率密度引起绝对最高温度的变化呈较好的线性关系, 如图 8 所示。

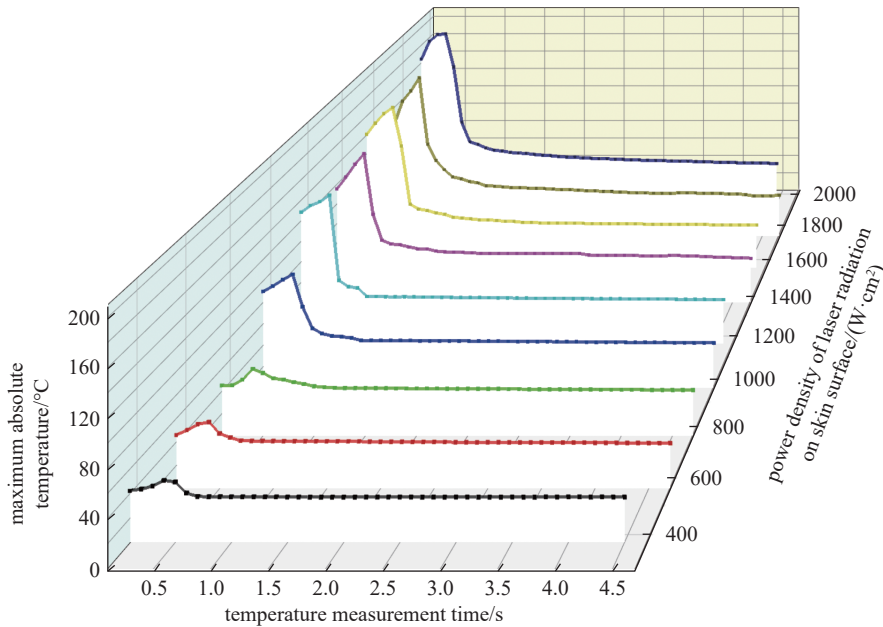


Fig. 7 Temperature-time fitting curve

图 7 激光辐照 400 ms 后不同功率密度下温度时间拟合曲线图

### 3.3 热损伤参数与激光功率密度的拟合分析

将温度-时间拟合函数代入式(1)中  $T(t)$  处, 并用 MATLAB 拟合得到  $\Omega$  的值, 结果如表 2 所示。在同一辐照时间下, 随着激光功率密度增加, 损伤程度增加。当功率密度超过 1554 W/cm<sup>2</sup> 时, 损伤程度呈明显指数增长。

以 Arrhenius 热损伤方程中热损伤参数  $\Omega$  作为评价指标, 0.5、1、10 和 100 是不同损伤程度的临界点。激光辐照时间为 400 ms, 当激光功率密度小于 762 W/cm<sup>2</sup>,  $\Omega$  略大于 1, 小鼠皮肤组织未出现明显损伤, 符合  $\Omega=0.5$  以及  $\Omega=1$  时的热损伤现象, 表现为可恢复损伤; 激光辐照功率密度为 958~1163 W/cm<sup>2</sup>,  $\Omega$  在 10~27 之间, 小鼠皮肤组织出现热凝固损伤和水肿现象, 符合  $\Omega=10$  时的热损伤现象, 属于一级损伤; 当功率密度为 1163~1369 W/cm<sup>2</sup> 时, 小鼠皮肤组织出现更为明显的表皮坏死性热凝固损伤以及水肿现象, 符合  $\Omega$  在 27~111 之间时的热损伤现象, 属于二级损伤; 当功率密度为 1369~1934 W/cm<sup>2</sup>,  $\Omega$  远大于 100, 小鼠皮肤组织表皮层和真皮层汽化严重, 创面边缘有明显的焦痂, 符合  $\Omega=100$  对应的热损伤现象, 属于三级损伤。热损伤参数与激光功率密度的拟合分析结果与实验

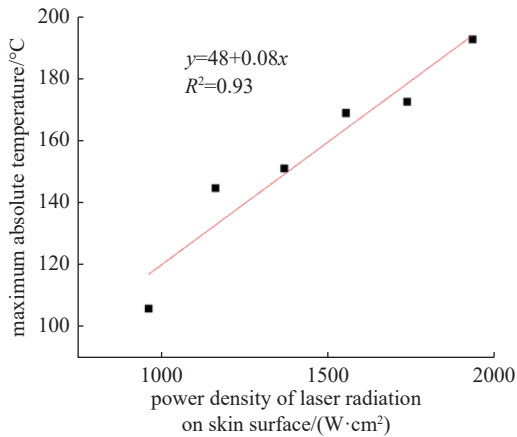


Fig. 8 Temperature-time fitting curve

图 8 激光辐照 400 ms 温度-功率密度拟合线性图

表 2 皮肤热损伤程度与激光辐照功率对应关系  
Table 2 The corresponding relationship between the degree of skin thermal injury and laser irradiation power

laser irradiation power density/(W·cm <sup>-2</sup> )	$\Omega$
374	$1.80 \times 10^{-5}$
561	$3.00 \times 10^{-4}$
762	1.9
958	14
1163	27
1369	111
1554	1200
1738	$1.90 \times 10^8$
1934	$5.50 \times 10^{14}$

结果基本一致。对于部分不符合预期的分析结果来讲,分析原因可能为本次选择激光持续辐照时间为 400 ms,激光辐照时间较短、激光功率密度区间较宽、功率密度区间较宽导致温度区间较宽,这些原因均会引起拟合结果误差,本模型待后续实验研究优化。

#### 4 结 论

本文通过实验探究得到了 1064 nm 连续激光不同输出功率密度对小鼠皮肤组织的损伤规律,损伤面积与损伤深度均与激光输出功率密度呈高度正相关,且各组数据均在误差范围内,具有统计学意义。根据实验结果,对损伤面积与损伤深度进行分析,依据生物效应热损伤特征,对 1064 nm 连续激光不同输出功率密度下对小鼠皮肤造成的损伤进行热损伤程度评估,由轻到重可分为四级。并利用经典的 Arrhenius 热损伤方程进行理论分析,理论分析结果与实验结果基本相符,初步建立功率密度诱导的热损伤模型。

#### 5 讨 论

明确激光致皮肤组织光热效应规律是激光技术应用的重要内容之一。本实验通过电脑精确控制激光输出功率密度、光电快门精确控制辐照时间,1064 nm 连续激光器辐照小鼠皮肤 400 ms,采集皮肤损伤部位图像,损伤面积与激光输出功率密度、损伤深度与激光输出功率密度、激光输出功率密度与损伤部位温度,均呈高度正相关。同时激光辐照后显示的热损伤效应宏观观察结果与病理学 H&E 染色结果观察均呈较好的剂量效应关系,与结果相一致。

激光持续辐照时间作为变量在同一激光输出功率密度下的损伤规律实验研究结果与时间( $t$ )、温度( $T$ ) Arrhenius 热损伤方程损伤模型,二者拟合结果良好在之前的研究中已经被证实。在此研究基础上,开展同一持续辐照时间在不同激光输出功率密度下损伤规律研究,并拟合不同功率密度(W/cm<sup>2</sup>)下温度( $T$ )-时间( $t$ ) Arrhenius 热损伤方程损伤模型,拟合结果良好。

综上所述,由于激光辐射对生物组织的热作用涉及诸多学科领域,是一个交叉学科的难题,建立新的更完善的激光致生物组织热损伤模型,并在此基础上进一步研究激光对在体组织的热损伤,不断满足激光在临床应用的要求,这是研究强激光作用下生物组织热损伤的最终目的。

#### 参考文献:

- [1] 激光军事应用[J]. 中国光学与应用光学文摘, 2001, 15(5): 31-33. (Laser military application[J]. Chinese Optics, 2001, 15(5): 31-33)
- [2] 张延令. 激光在外科中的应用[J]. 国外医学. 外科学分册, 1984(3): 143-146. (Zhang Yanling. Application of laser in surgery[J]. Foreign Medical Sciences. Surgery Section, 1984(3): 143-146)
- [3] 宋秋伦, 洪伟, 王倩. 逍遥丸联合调Q Nd: YAG 1064 nm激光治疗黄褐斑疗效分析[J]. 中国美容医学, 2022, 31(4): 114-116. (Song Qiulun, Hong Wei, Wang Qian. Effect of Xiaoyao pill combined with Nd: YAG 1064 nm laser on chloasma[J]. Chinese Journal of Aesthetic Medicine, 2022, 31(4): 114-116)
- [4] 左娜, 陶凯. 1064 nm Nd: YAG激光联合水光注射治疗面部皮肤老化疗效观察[J]. 中国美容医学, 2022, 31(5): 23-25. (Zuo Na, Tao Kai. Efficacy of 1064 nm Nd: YAG laser combined with hyaluronic acid injection in the treatment of facial rejuvenation[J]. Chinese Journal of Aesthetic Medicine, 2022, 31(5): 23-25)
- [5] 施添霖. 积雪苷联合长脉宽1064 nm激光治疗瘢痕疙瘩的疗效观察[D]. 杭州: 浙江中医药大学, 2019. (Shi Tianlin. The therapeutic effect of asiaticoside

- ointment combined with long pulse 1064 nm laser on keloid[D]. Hangzhou: Zhejiang Chinese Medical University, 2019)
- [6] 冯微, 冯啸, 陈燕, 等. 长脉宽1064 nm激光在整形美容应用中的进展[J]. 中国美容整形外科杂志, 2021, 32(11): 696-698. (Feng Wei, Feng Xiao, Chen Yan, et al. Development of a 1064 nm long pulse width laser for cosmetic and cosmetic applications[J]. Chinese Journal of Aesthetic and Plastic Surgery, 2021, 32(11): 696-698)
- [7] 李忠明, 骆清明. 激光对生物组织热和热致机械损伤的物理分析[J]. 激光生物学报, 2000, 9(2): 81-84. (Li Zhongming, Luo Qingming. Physical analysis on tissues' heat and heatinduced injury for laser irradiation[J]. Acta Laser Biology Sinica, 2000, 9(2): 81-84)
- [8] 王振华, 单健, 陈轴, 等. 激光对生物组织的热损伤机理研究及临床应用探讨[J]. 激光杂志, 2003, 24(1): 60-62. (Wang Zhenhua, Shan Jian, Chen You, et al. A study on thermal damage of laser tissue and clinical application[J]. Laser Journal, 2003, 24(1): 60-62)
- [9] 吕晨阳, 战仁军. 激光-生物组织光热效应模型综述[J]. 激光杂志, 2021, 42(1): 17-24. (Lv Chenyang, Zhan Renjun. Model review of laser-biological tissue photo-thermal effect[J]. Laser Journal, 2021, 42(1): 17-24)
- [10] 陈安宁, 吴家辉, 李希靖. 激光对生物组织热损伤的计算机模拟[J]. 光电子·激光, 2001, 12(2): 212-214. (Chen Anning, Wu Jiahui, Li Xijing. Computer simulation of thermal damage to biological tissue during laser irradiation[J]. Journal of Optoelectronics-Laser, 2001, 12(2): 212-214)
- [11] 朱光明, 朱丹, 骆清铭, 等. 激光热疗中生物组织的光热特性响应以及动态热损伤研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2004, 23(2): 157-162. (Zhu Guangming, Zhu Dan, Luo Qingming, et al. Study on the optical-thermal response and dynamic thermal damage of bio-tissue during laser thermotherapy[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2004, 23(2): 157-162)
- [12] 吴秀山, 侯宇, 李希靖. 强激光作用下生物组织热损伤问题的研究[J]. 中国计量学院学报, 2002, 13(2): 135-138. (Wu Xiushan, Hou Yu, Li Xijing. The research on thermal damage in biological tissues induced by high-irradiance-laser[J]. Journal of China Jiliang University, 2002, 13(2): 135-138)
- [13] 周巡, 马琼, 刘智搏, 等. 1064 nm激光不同辐照时间对小鼠皮肤热损伤的实验与理论研究[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34: 011012. (Zhou Xun, Ma Qiong, Liu Zhibo, et al. 1064 nm laser induced thermal injure in mice skin with different laser duration[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34: 011012)
- [14] Kagan R J, Peck M D, Ahrenholz D H, et al. Surgical management of the burn wound and use of skin substitutes: an expert panel white paper[J]. Journal of Burn Care & Research, 2013, 34(2): e60-e79.
- [15] Ganguly M, Mitra K. A modeling study to analyze thermal and mechanical effects of pulsed laser irradiation on tissues[J]. Computational Thermal Sciences: an International Journal, 2015, 7(5/6): 459-465.