

空间参数对毫秒 - 纳秒组合激光烧蚀铝合金的影响

蔡源成, 苑博识, 张珑宝

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2024年3月8日; 录用日期: 2024年4月23日; 发布日期: 2024年4月30日

摘要

烧蚀形貌反映了激光加工的质量。因此, 研究组合激光在加工时的温度及形貌十分重要。本文主要研究了空间参数(光斑大小及组合方式)对铝合金烧蚀形貌及温度的影响。实验结果表明, 在毫秒激光作用后, 铝合金表面温度逐渐升高到1800 K左右出现平台期。在纳秒激光作用后, 铝合金表面温度瞬间升高到3200 K左右并快速下降, 纳秒激光的作用有助于熔融物的迁移。当纳秒光斑大时, 烧蚀形貌呈碗状, 深径比较小, 边缘基本没有飞溅物。当纳秒光斑较小时, 烧蚀形貌接近于孔状, 深径比较大, 边缘飞溅物较多。通过对物理模型的分析 and 仿真, 探讨了空间参数对熔池影响的物理机制。本文的研究成果对激光加工效果的控制有重要的指导意义。

关键词

组合激光, 空间参数, 深径比, 烧蚀形貌

Effect of Spatial Parameters on Combined Millisecond-Nanosecond Laser Ablation of Aluminium Alloys

Yuancheng Cai, Boshi Yuan, Longbao Zhang

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

Received: Mar. 8th, 2024; accepted: Apr. 23rd, 2024; published: Apr. 30th, 2024

Abstract

The morphology of ablation is indicative of the quality of laser processing. Therefore, it is crucial

*通讯作者。

文章引用: 蔡源成, 苑博识, 张珑宝. 空间参数对毫秒-纳秒组合激光烧蚀铝合金的影响[J]. 应用物理, 2024, 14(4): 230-242. DOI: 10.12677/app.2024.144028

to examine the temperature and morphology of combined laser processing. This paper investigates the impact of spatial parameters, such as spot size and combination mode, on the ablation morphology and temperature of aluminium alloy. The experimental results indicate that following millisecond laser action, the surface temperature of the aluminium alloy gradually increases to approximately 1800 K, and a plateau period ensues. Following nanosecond laser action, the surface temperature of the aluminium alloy instantaneously increases to approximately 3200 K, before decreasing rapidly. The nanosecond laser action facilitates the migration of the melt. When the nanosecond spot is large, the ablation pattern takes on a bowl shape, with a relatively small depth-to-diameter ratio and no spatter at the edge. Conversely, when the nanosecond spot is small, the ablation pattern is more hole-like, with a relatively large depth-to-diameter ratio and more spatter at the edge. The influence of spatial parameters on the molten pool is explored through the analysis and simulation of the physical model. The research findings in this paper are significant for guiding the control of laser processing effects.

Keywords

Combination Laser, Spatial Parameter, Depth-to-Diameter Ratio, Ablation Morphology

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

铝合金是工业中的重要金属材料之一。铝合金以其轻量化、高强度、良好的导热性和导电性、耐腐蚀性以及可加工性等特点,在许多领域都具有广泛的应用前景。铝合金被广泛用于船舶制造、军事工业、化工设备、家具制造和艺术品制作等领域。总体而言,铝合金的多样特性使其成为一种重要的工程材料,在现代社会中扮演着重要的角色。毫秒激光是激光加工中常见的加工源。然而,处理结果却不如意。毫秒激光加工中存在着表面飞溅、热影响区大等问题。组合激光加工在各种工业领域中都有广泛的应用,包括金属加工、汽车制造、电子设备制造、光学器件加工、医疗器械制造和 3D 打印等。这种技术的优势在于提高加工效率、精度和质量控制,为各种工业应用提供了更多的可能性[1]-[6]。激光加工技术具有非接触、高精度、高速、可编程、材料广泛、热影响小等优点,使其成为现代制造领域中应用广泛的加工技术之一。在组合激光的加工中,首要关注的是更快的速率和更好的质量。Fox, Jay A [1]等人首次将二氧化碳连续激光和 25 ns 脉冲激光相结合,使得穿透钢材的时间缩短了两倍以上,且在组合后,击穿的时间更短,孔洞更清晰,加工效果更好。A. C. Forsman [2]的研究也证实了应用双脉冲技术可以提高材料去除率和钻孔质量。该技术采用两个纳秒脉冲激光,相隔几十纳秒进行作用。基于一个实验,可以解释组合激光与材料之间的相互作用。Brajdic M [3] [4]和 Walther K 等人[5]通过将 0.5 毫秒脉冲激光和 17 纳秒脉冲激光在空间和时间上叠加辐射,可以获得更高的打孔效率。预处理脉冲提供了适当的热预处理,为后续的短脉冲激光提供了更好的加工条件。短脉冲激光的高能量密度和短时间作用使得打孔更加高效。C. Lehane 等[6]通过将 3.5 毫秒激光和 0.15 毫秒激光相结合,研究人员对不锈钢的激光打孔进行了研究。他们系统地研究了两个激光脉冲之间的间隔时间对钻削效率的影响,并揭示了一个最佳的延迟时间。

在激光加工领域,前人已经进行了大量相关研究,利用延迟时间效应来提高激光加工的效率和质量。然而,组合激光器中还存在另一个特殊的激光参数,即空间参数,也就是两束激光的光斑尺寸组合方式。

光斑尺寸会影响激光照射到靶材上的区域大小，进而影响物理模型和作用机理。光斑尺寸对激光与物质相互作用过程的影响也已经得到广泛的研究。Brandi F [7]等人研究了纳秒级准分子激光在硅片通孔加工中光斑直径的影响。根据实验结果，在保持辐照能量密度在 7.5 J/cm^2 至 13.2 J/cm^2 范围内不变的情况下，将光斑直径从 220 微米减小到 9 微米可以使烧蚀效率增加十倍。然而，当使用 60 皮秒的深紫外激光脉冲时，并未观察到这种效应。S. S. Harilal [8]等人研究了对超快激光在烧蚀金属靶材过程中光斑尺寸对光斑形貌的影响进行了调查。他们的研究表明，羽流的空间特征强烈依赖于聚焦光斑的大小，而与激光脉冲宽度无关。这意味着，当改变光斑大小时，羽流的形态也会随之变化。正如之前提到的，光斑大小在激光作用中起着重要的作用。Eyett M [9]等人在观察脉冲激光加工过程中，注意到光斑大小对烧蚀率有影响，并认为这种影响是由于材料运输的变化所引起的。具体而言，这种变化受被加工区域大小的影响。Fan X [10]等人提出了一种超快激光在厚玻璃上切割内孔的新方法，利用二氧化碳激光器和皮秒激光器对玻璃进行切割，切割速度为 150 毫米/秒，最小直径为 60 毫米，两个表面的边缘崩边低于 3.5 微米，侧壁最大粗糙度为 1.03 微米。李隆[11]等人对毫秒脉冲 - 连续激光组合激光辐照铝合金材料的温度场进行数值模拟，得出结论：组合激光辐照铝合金的温度场主要由连续激光决定，选择合适的脉冲激光进行预热会提高靶材中心点的温度。杨诗瑞[12]等人提出一种基于组合激光加工的陶瓷金属复合材料打孔方法，能够有效防止小孔周围涂层的脱落，提高加工效率。他们采用了毫秒激光对复合材料进行初步的加工，再利用超快激光进行高效高质量加工。潘虎[13]等人公开一种组合式高功率激光加工装置，装置为组合式高功率激光加工装置，通过采用多束激光汇聚在一处形成高功率激光束，可解决现有高功率激光加工装置中元器件损伤的问题。吕雪明[14]等人研究组合脉冲激光与单晶硅材料的相互作用过程，采用两束脉宽分别为 7 ns 和 1 ms 的脉冲激光复合作用的方式，结果表明，组合脉冲激光的损伤效应更为严重，表面损伤半径主要取决于入射毫秒脉冲激光的能量密度。然而，关于空间参数对烧蚀形貌的报道寥寥无几。

本次研究了空间参数对铝合金烧蚀形貌和温度的影响。结果表明，空间参数的改变对温度的影响不大，但是烧蚀形貌存在着明显的差异。空间参数实质上是改变了熔池上表面的边界条件，同时，也改变了后续脉冲激光作用的初始条件。分析了光斑尺寸对烧蚀形貌的影响，揭示其物理机制。

2. 实验方法与材料

2.1. 实验方法

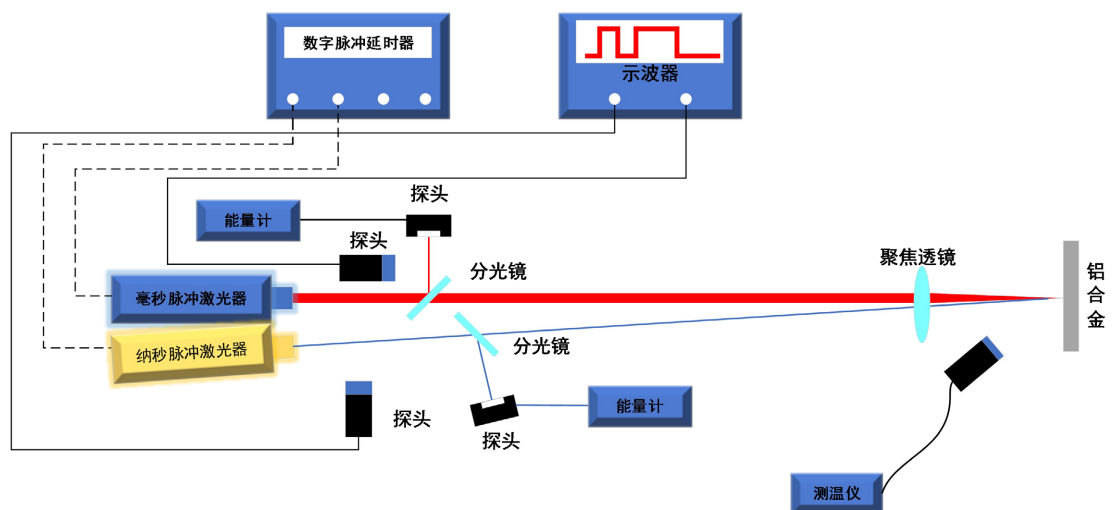


Figure 1. Diagram of the experimental set-up for combined millisecond-nanosecond laser ablation of aluminium alloys
图 1. 毫秒 - 纳秒组合激光烧蚀铝合金的实验装置图

实验装置图见图 1。实验由激光发射与监测、温度测量和表面形貌测量三部分组成。

在毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照铝合金的实验中,利用激光辐照铝合金表面后,铝合金温升产生的红外辐射,实验中通过高速测温仪的探头,测量铝合金激光辐照表面中心点的温度随时间的变化曲线,从而定量分析毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照铝合金的温度演化过程。实验装置主要由毫秒脉冲激光器、纳秒脉冲激光器、激光能量计、示波器、聚焦凸透镜(焦距为 500 mm)、三维位移平台和高速测温仪(KMGA 740)和数字脉冲延时器(DG645)等组成。实验所用毫秒脉冲激光器的输出波长为 1064 nm,脉冲宽度 2 ms,纳秒脉冲激光器的输出波长也为 1064 nm,脉冲宽度为 10 ns,两束激光的空间分布均为高斯型。脉冲延时由数字脉冲延时发生器控制。

2.2. 材料

实验中,将样品固定在三维位移平移台上,实验条件在大气环境下进行。实验靶材选用同一批次的 7A04 铝合金,切割后尺寸为 $25 \times 25 \times 1$ mm。属于 Al-Zn-Mg-Cu 系超高强 7A04 铝合金。

3. 实验结果

实验中,脉冲延时是组合激光一个重要的影响参数。为了获得更大的熔池以及明显的效果,根据反复实验,脉冲延时选择 800 μs ,脉冲延时为毫秒激光器启动后纳秒激光器开始工作的延迟。毫秒激光脉宽为 2 ms,所以纳秒激光与铝合金相互作用发生在毫秒脉宽持续时间内。激光参数见表 1。

Table 1. Experimental parameters of millisecond-nanosecond combined pulsed laser with different spot size combinations
表 1. 不同光斑尺寸组合方式的毫秒-纳秒组合脉冲激光实验参数

参数名称(单位)	a	b	c
光斑组合方式	$r_{ms} < r_{ns}$	$r_{ms} = r_{ns}$	$r_{ms} > r_{ns}$
毫秒激光半径(mm)	0.44	0.44	0.44
纳秒激光半径(mm)	0.5	0.44	0.3
毫秒激光能量密度(J/cm^2)	2092	2092	2092
纳秒激光能量密度(J/cm^2)	31.12	31.12	31.12

表中 r_{ms} 为毫秒激光光斑半径, r_{ns} 为纳秒激光光斑半径。

3.1. 温度实验结果

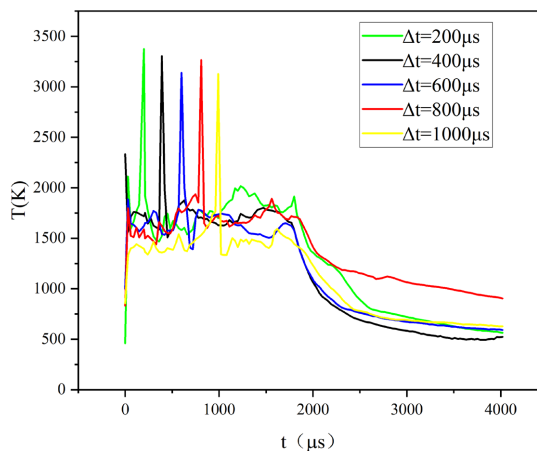


Figure 2. Nanosecond spot large-time combination of laser pulse delay with different temperatures over time
图 2. 纳秒光斑大时组合激光脉冲延时不同温度随时间变化图

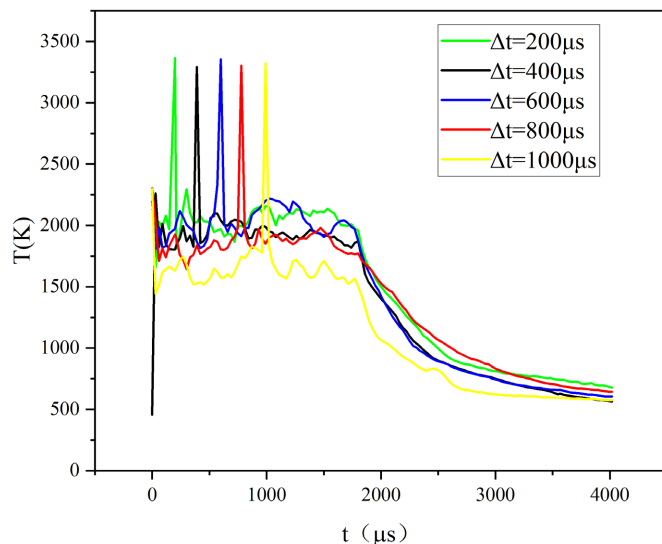


Figure 3. Combined laser pulse delay with different temperatures as a function of time when the spots are equal
图 3. 光斑相等时组合激光脉冲延时不同温度随时间变化图

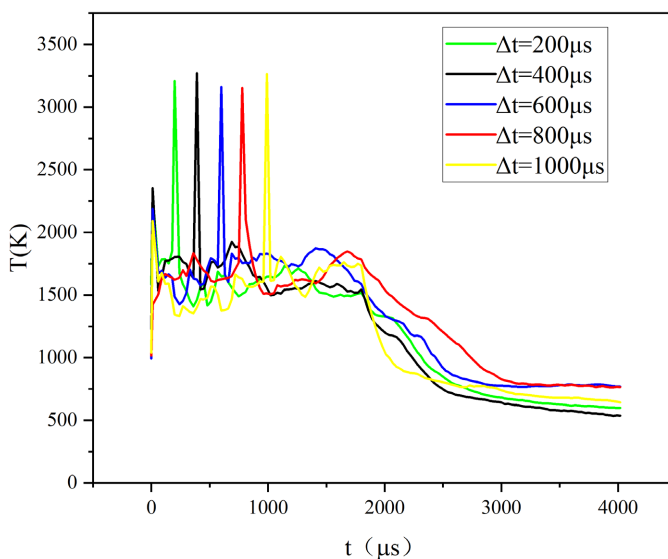


Figure 4. Millisecond spot large time combination laser pulse delay with different temperatures over time
图 4. 毫秒光斑大时组合激光脉冲延时不同温度随时间变化图

图 2 为纳秒光斑大时组合激光脉冲延时不同温度随时间变化图。图 3 为光斑相等时组合激光脉冲延时不同温度随时间变化图。图 4 毫秒光斑大时组合激光脉冲延时不同温度随时间变化图从图中可以看出，在毫秒激光能量不变和光斑大小不变的情况下，纳秒光斑的大小对铝合金中心点的温度影响并不大，且无论哪个光斑大，在毫秒激光作用结束后，脉冲延时为 800 μs 时温度下降较为缓慢，这是因为无论光斑大小如何，在 800 μs 时熔池内熔融物较少，热对流更为不明显，所以温度下降的缓慢。其中，温度变化极其相似，在毫秒激光作用时，温度均在 1800 K 左右上下浮动，在纳秒激光介入后，温度升高到 3200 K 并快速下降。这是因为虽然光斑大小不同，但是每平方厘米的激光能量密度并没变化，而高速测温仪探头主要是对铝合金中心点温度进行测量，所以温度大概相同。当光斑变大后，主要影响熔池以及温度场的大小，对铝合金中心点温度影响不大。

3.2. 烧蚀形貌实验结果

铝合金在毫秒单脉冲激光作用和纳秒单脉冲激光作用下，烧蚀形貌存在明显差异。毫秒脉冲激光持续时间长，热作用为主，作用过程中热累积效果较为明显，可以通过热传导作用将能量向材料内部传递，热影响更大；纳秒激光作用时间短，虽然功率密度很大，但是总能量小，作用有限，能量主要集中于材料浅层。

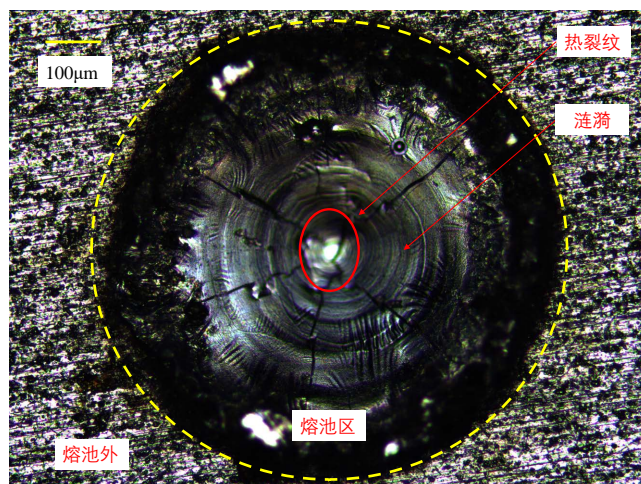


Figure 5. Surface ablation of aluminium alloy by nanosecond laser action
图 5. 纳秒激光作用铝合金表面烧蚀图

我们展示了铝合金在毫秒单脉激光作用下发生熔融相变后再凝固形成的烧蚀形貌，见图 5。该形貌可被分为熔池区和熔池外两个区域。在熔池区域靠近中心的位置，存在许多裂纹。这些裂纹是由于激光停止作用后，熔池表面迅速从高温状态冷却凝固，凝固时产生的收缩应力超过了塑性变形的结合力而形成的热裂纹。由于高温环境，裂纹周围还伴随着氧化特性，使得颜色发生变化。因此，熔池区域呈现银灰色，与其他区域有所区别。在熔池形成过程中，熔融的铝合金表面张力等作用导致熔池区域表面出现涟漪。在铝合金重新凝固的过程中，熔池表面形成了环形涟漪状结构。

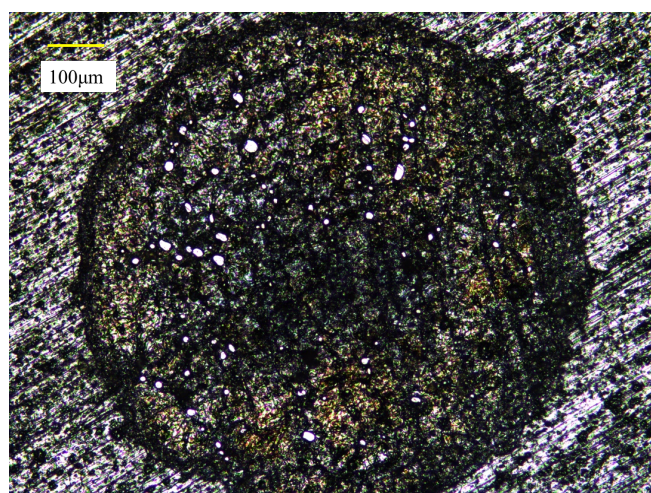


Figure 6. Surface ablation of aluminium alloy by nanosecond laser action
图 6. 纳秒激光作用铝合金表面烧蚀图

纳秒单脉冲烧蚀形貌见图 6。在纳秒单脉冲激光作用下，铝合金表面发生了烧蚀，并显示出明显的颜色变化。这种颜色变化是由热烧蚀引起的。其中，纳秒脉冲激光的能量迅速转化为热能，导致材料表面温度升高。随着温度的上升，热烧蚀或蒸发等现象发生。这些过程导致了材料表面的颜色变化。其原理见图 7。

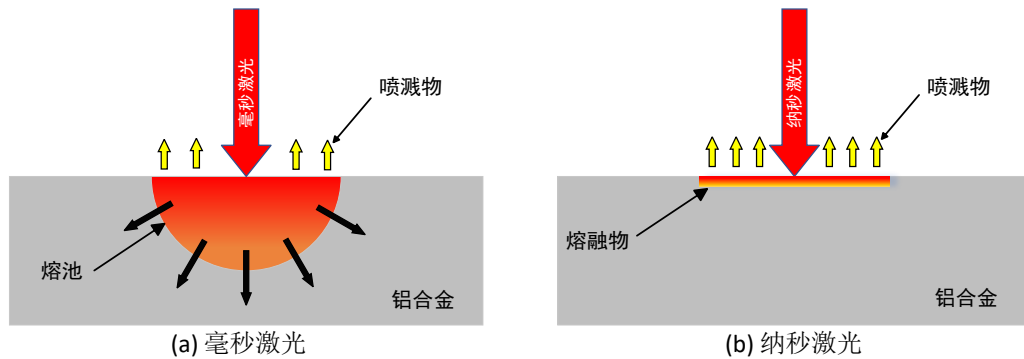


Figure 7. Schematic representation of the effects of different laser ablations

图 7. 不同激光烧蚀影响的原理示意图

根据表 1 中的数据，对不同光斑尺寸组合方式下烧蚀铝合金进行实验研究。通过铝合金的烧蚀形貌，可以直观的观察光斑尺寸大小组合方式对烧蚀形貌的影响。

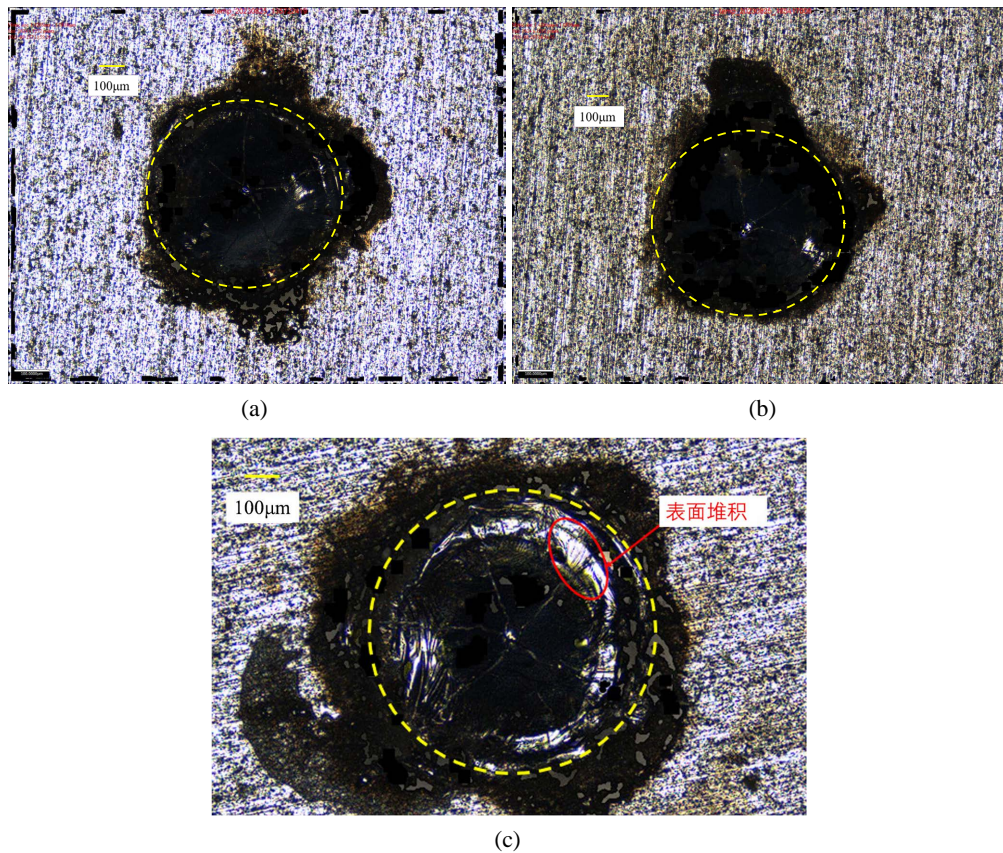


Figure 8. External view of ablation under different spot size conditions

图 8. 在不同光斑尺寸条件下烧蚀外貌图

图 8(a)是纳秒光斑大时烧蚀形貌图, (b)为光斑相等时烧蚀形貌图, (c)为毫秒光斑大时烧蚀形貌图。由图可见图 8(a)和图 8(b)烧蚀形貌相似, 在熔池中心存在裂纹, 裂纹是熔池表面从高温状态迅速冷却凝固时, 产生的收缩应力大于塑性变形的结合力, 从而产生的热裂纹。且烧蚀表面较为干净, 很少有挂渣等残留物。而图 8(c)中表面有一圈喷溅物。由此可见, 光斑大小对烧蚀形貌有着影响。

图 9 为三维自聚焦表面测量仪测出来的铝合金烧蚀形貌剖面图, 可以对形貌有个更直观展示:

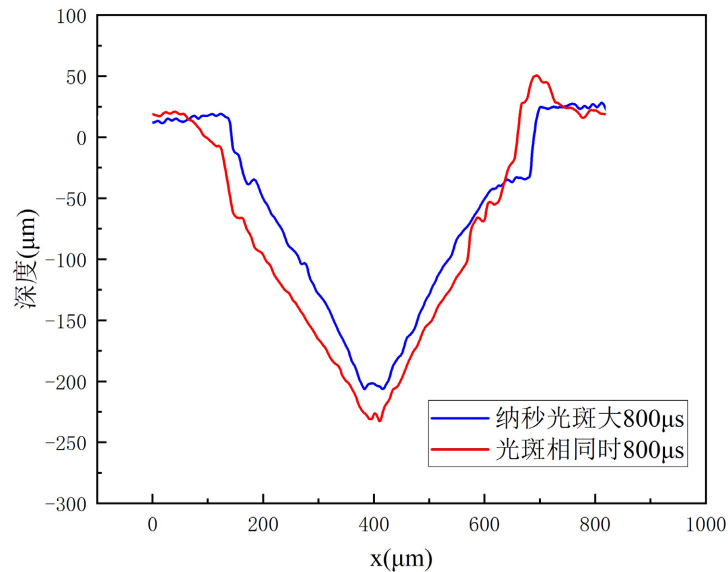


Figure 9. Ablation profiles under different spot size conditions

图 9. 在不同光斑尺寸条件下烧蚀剖面图

图 9 中可以看到不同光斑尺寸下的烧蚀剖面图。我们发现, 纳秒光斑较大时和光斑相等时烧蚀形貌较为相似, 坑的形状接近于激光的高斯分布。

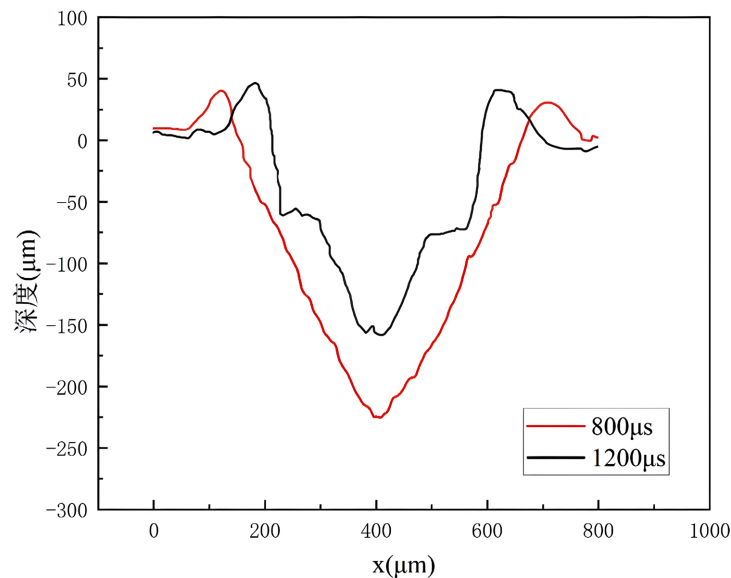


Figure 10. Ablation profiles with different pulse delays at large millisecond spot sizes

图 10. 毫秒光斑大时不同脉冲延时烧蚀剖面图

图 10 中为毫秒光斑大时不同脉冲延时烧蚀剖面图。在脉冲延时为 $800\ \mu\text{s}$ 时，烧蚀坑的形状接近于激光的高斯分布。而在脉冲延时为 $1200\ \mu\text{s}$ 时，烧蚀形貌明显发生了改变，烧蚀形貌中心区域的坑状边缘斜率较大，比较接近垂直。可以得出结论，光斑尺寸大小对烧蚀形貌有着重要的影响。

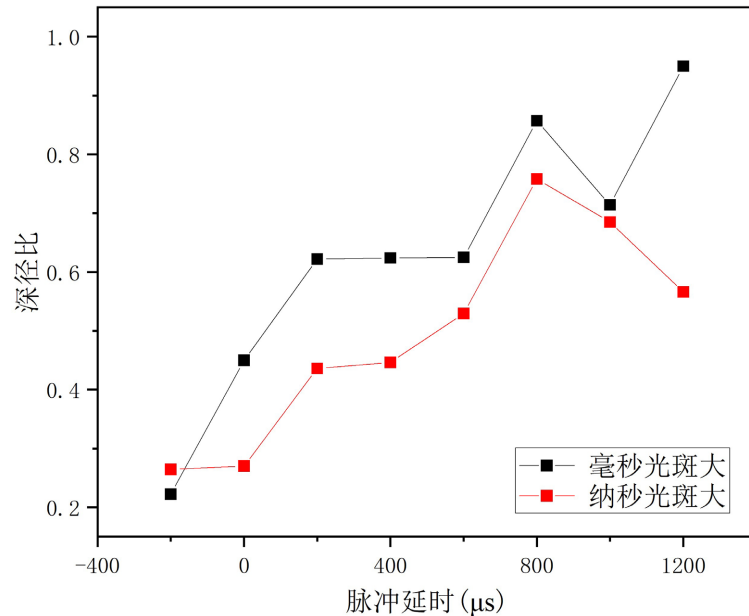


Figure 11. Comparison of depth-to-diameter ratio at millisecond spot size and nanosecond spot size

图 11. 毫秒光斑大时和纳秒光斑大时深径比对比

通过图 11 明显地看出，毫秒光斑大时和纳秒光斑大时的规律接近。但是，在 $1200\ \mu\text{s}$ 时突然升高，分析其原因是因为烧蚀形貌明显发生了改变，烧蚀形貌中心区域的坑状边缘斜率较大，比较接近垂直造成的。由图可知，毫秒光斑大时坑的深径比明显高于纳秒光斑大时，也同样说明了虽然空间参数对温度的影响不大，但是空间参数明显对抗的烧蚀形貌，坑内的深径比有着至关重要的影响。

4. 分析与讨论

4.1. 机理分析

通过实验数据的对比，毫秒 - 纳秒组合脉冲激光作用铝合金过程中，光斑尺寸组合方式的不同，烧蚀形貌会产生明显的差异。结合理论仿真模型的分析，可以发现光斑尺寸的改变，实质上是改变了熔池上表面的边界条件，同时，也改变了脉冲延时时刻，后续脉冲激光作用的初始条件。熔池上表面在激光作用过程中，表面张力、反冲压力和 Marangoni 效应对熔融物的流动产生了不同程度的影响，从而改变了熔融物的运动形式及重分布，最终造成了烧蚀形貌的差异。其原理示意图见图 12。

对于毫秒 - 纳秒组合激光与铝合金相互作用的情况，热效应主要是由毫秒激光引起的。当温度超过铝合金的熔点时，铝合金将发生熔融相变，形成熔池并产生内部对流。熔池内的对流与熔池内的温度梯度直接相关。由于激光强度分布为高斯光束，即光束中心的能量密度高于光束边缘的能量密度，因此在径向方向存在温度梯度。表面温度梯度导致表面张力梯度的产生，而表面张力梯度会导致熔池表面的流体从表面张力较低的区域流向表面张力较高的区域，使得熔融物质沿径向从熔池中心流向边缘。当纳秒激光作用于金属时，熔池表面会产生反冲压力，加剧熔池的运动，帮助熔融的铝合金克服表面张力的限制，从而导致喷溅现象的发生。当反冲压力大于表面张力时，熔池发生质量迁移。整个过程是在热和力

的共同作用下完成的，热是现象发生的根本原因，而力则是促使烧蚀发生的因素。通过考虑不同的时间参数和空间参数，可以建立毫秒-纳秒组合激光作用于铝合金的烧蚀型。该模型将综合考虑热效应和力效应，并结合不同的时间和空间参数，可以更好地描述毫秒-纳秒组合激光与铝合金相互作用时的烧蚀现象。

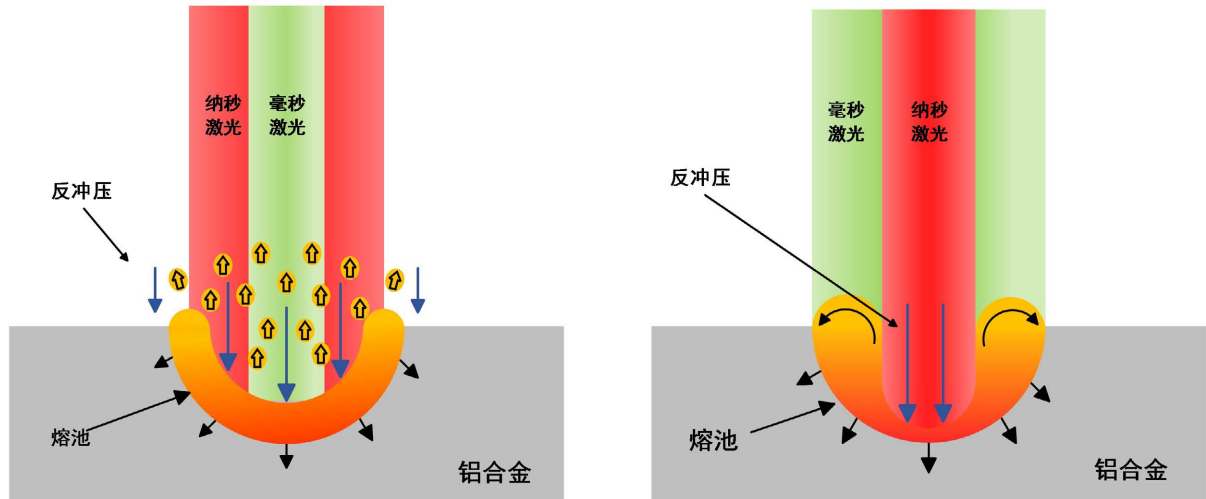


Figure 12. Schematic diagram of the principle of the effect of the way of combining the spot size on the ablation morphology

图 12. 光斑尺寸组合方式对烧蚀形貌影响的原理示意图

4.2. 物理模型及分析

毫秒-纳秒组合激光作用铝合金烧蚀模型见图 13，材料为各向同性均匀的材料，计算模型为二维轴对称模型，激光光束为高斯光束，毫秒脉宽 2 ms，纳秒脉宽为 10 ns，计算区为长度 10 mm、厚度 1 mm 的矩形。

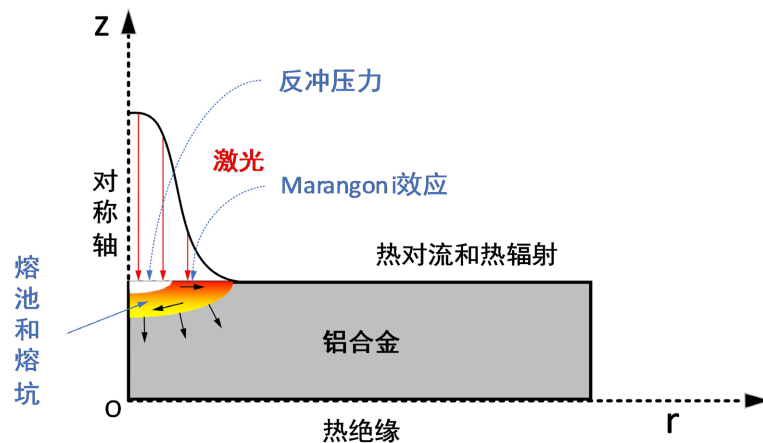


Figure 13. Schematic of ablation model

图 13. 烧蚀模型示意图

为了更好的分析激光作用过程中的温度变化及特性。采用能量守恒(傅里叶定律)、质量守恒(连续性方程)、动量守恒(N-S 方程)等描述该模型，控制方程如下：

$$\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right] - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \quad (1)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + F_v \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3)$$

其中, ρ 是材料密度, p 是压强, \mathbf{u} 是金属熔化速度, C_p 是材料比热容, F_v 是体积力, μ 是动态粘度, k 是热导率, T 是绝热温度。

$$-k \nabla T = I_0 \alpha e^{-\frac{2r^2}{r_0^2}} \quad (4)$$

由于金属的激光吸收深度小, 激光只是在表面吸收, 因此可以定义一个边界热流代替热源项。上式中 I_0 为激光能量密度, α 是铝合金对 1064 nm 波长激光的吸收系数, r_0 为激光半径, 激光分布为高斯型。

在顶部和侧面边界, 边界条件为对流, 顶部条件还包括热辐射, 底部为热绝缘[11]。

对流边界条件:

$$-k \nabla T = h(T - T_0) \quad (5)$$

热辐射边界条件:

$$-k \nabla T = \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (6)$$

热绝缘边界条件:

$$\nabla T = 0 \quad (7)$$

其中, h 为对流传热系数, ε 为表面辐射系数, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数。

此外, 熔融金属被认为是层流, 而固体的动态粘度非常高。蒸发之前熔融金属只受张力和重力, 表面的张力的影响是通过在顶部边界上使用弱约束条件来实现的, 这取决于熔体的切向速度。

$$\sigma_n = \kappa \gamma \mathbf{n} \quad (8)$$

此外, 当达到蒸发温度时, 反冲压力作用于蒸汽液体界面, 其表达式为

$$R_p = 0.54 \times P_a \times \exp\left(\frac{L_v(T - T_v)}{RTT_v}\right) \times \exp\left(-\frac{2r^2}{r_0^2}\right) \quad (9)$$

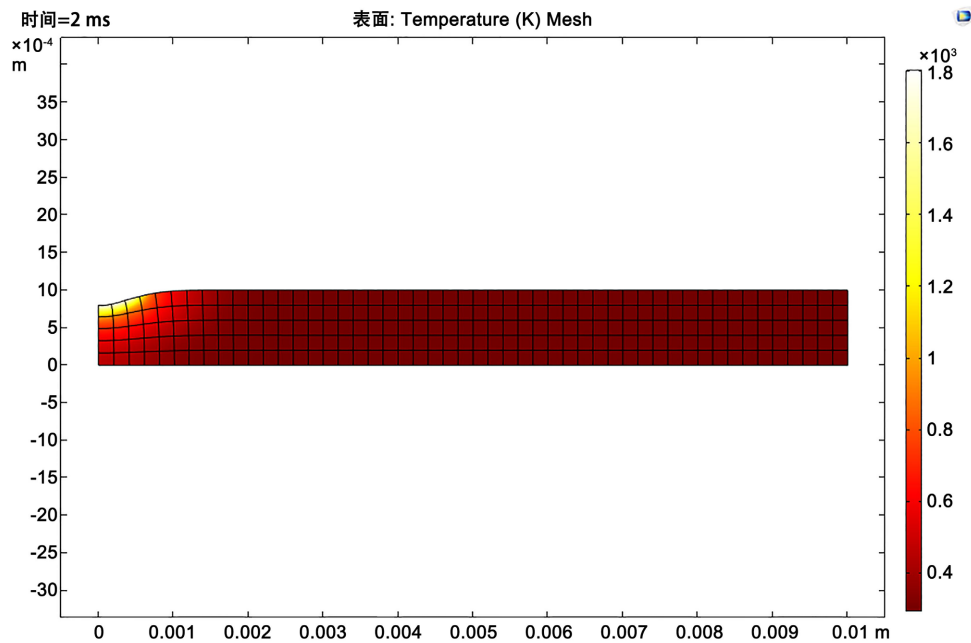
其中, κ 为曲率, γ 为表面张力系数, P_a 为大气压强, L_v 为蒸发潜热, T_v 为蒸发温度, R 为通用气体常熟。激光强度的分布确保了反冲压力作用在激光辐照区域内, 而不是整个几何模型边界。反冲压力是利用开放边界条件施加的, 而反冲压力只在温度达到其蒸发点的区域有效。此外, 表面还存在等离子体羽及激光支持吸收波等产生的反冲压。

在熔池中, 温度变化引起热 - 毛细管对流(Marangoni 效应)。Marangoni 效应影响了熔体再分布过程。特别是熔池不喷溅的条件下起到了很大的作用。在模型中, 在顶部弱约束采用的 Marangoni 效应。

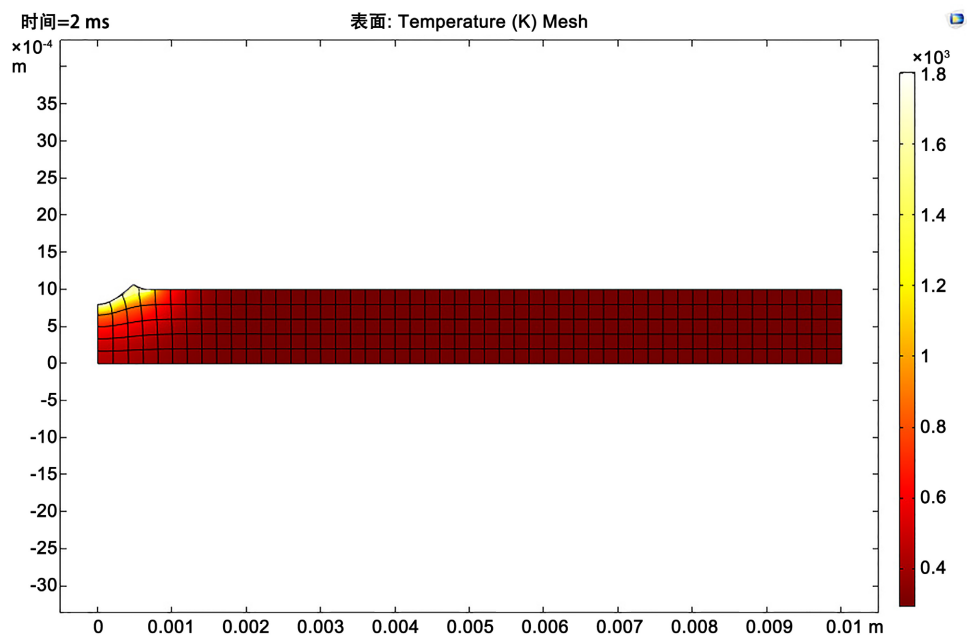
$$\sigma_t = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \nabla T \cdot \mathbf{t} \quad (10)$$

其中, ∇T 是表面温度梯度。

基于物理模型, 模拟了不同激光光斑尺寸组合方式下的烧蚀形貌, 烧蚀形貌见图 14。当纳秒激光光斑较大时(图 14(a)), 反冲压力覆盖整个熔池。随着温度升高, 材料的表面张力变小。熔池表面承受很高的反冲压力。熔池中 Marangoni 很弱, 烧蚀和飞溅已成为主导。大量的材料去除使得烧蚀形貌出现。



(a) 纳秒光斑大



(b) 毫秒光斑大

Figure 14. Melt pool ablation morphology with different spot size combinations**图 14.** 不同光斑尺寸组合方式下, 熔池烧蚀形貌

当纳秒激光光斑较小时(图 14(b)), 纳秒激光光斑中心区域的温度和反冲压力变化较大。熔池内存在较大的温度梯度。这使得 Marangoni 变得更加重要在 Marangoni 效应的帮助下, 熔体从中心流向边缘, 并在型腔边缘附近形成突起。模拟结果也显示出明显的突起。这与实验结果是一致的。从上述定性分析可以看出, 激光光斑尺寸组合方式会影响烧蚀形貌。激光光斑尺寸改变了边界条件。

5. 结论

综上所述,通过对毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照铝合金的温度分析,空间参数对温度影响不大。通过对毫秒-纳秒组合脉冲激光辐照铝合金的烧蚀形貌分析,空间参数对烧蚀形貌的形成起着关键作用。空间参数影响热过程和流动过程对熔体分布的影响。纳秒激光光斑半径越大,熔体越容易发生烧蚀和飞溅。纳秒光斑越小,Marangoni 变得愈加重要,在 Marangoni 效应的帮助下,熔体从中心流向边缘,并在型腔边缘附近形成突起。且空间参数对孔的深径比有着一定的影响,纳秒光斑越小,孔的深径比越大,烧蚀形貌越接近于孔状。本文的研究成果对于激光加工效果的控制具有重要的指导意义。

参考文献

- [1] Fox, J.A. (1975) A Method for Improving Continuous Wave Laser Penetration of Metal Targets. *Applied Physics Letters*, **26**, 682-684. <https://doi.org/10.1063/1.88024>
- [2] Forsman, A.C., Banks, P.S., Perry, M.D., et al. (2005) Double-Pulse Machining as a Technique for the Enhancement of Material Removal Rates in Laser Machining of Metals. *Journal of Applied Physics*, **98**, 474-477. <https://doi.org/10.1063/1.1996834>
- [3] Brajdic, M., Walther, K. and Eppelt, U. (2008) Analysis of Laser Drilled Deep Holes in Stainless Steel by Superposed Pulsed Nd:YAG Laser Radiation. *Optics & Lasers in Engineering*, **46**, 648-655. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2008.04.017>
- [4] Walther, K., Brajdic, M. and Kreutz, E.W. (2008) Enhanced Processing Speed in Laser Drilling of Stainless Steel by Spatially and Temporally Superposed Pulsed Nd:YAG Laser Radiation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **35**, 895-899. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0768-z>
- [5] Wang, X.D., Michalowski, A., Walter, D., et al. (2009) Laser Drilling of Stainless Steel with Nanosecond Double-Pulse. *Optics & Laser Technology*, **41**, 148-153. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2008.05.021>
- [6] Lehane, C. and Kwok, H.S. (2001) Enhanced Drilling Using a Dual-Pulse Nd:YAG Laser. *Applied Physics A*, **73**, 45-48. <https://doi.org/10.1007/s003390100819>
- [7] Brandi, F., Burdet, N., Carzino, R., et al. (2010) Very Large Spot Size Effect in Nanosecond Laser Drilling Efficiency of Silicon. *Optics Express*, **18**, 23488-23494. <https://doi.org/10.1364/OE.18.023488>
- [8] Harilal, S.S., et al. (2015) Morphological Changes in Ultrafast Laser Ablation Plumes with Varying Spot Size. *Optics Express*, **23**, 15608-15615. <https://doi.org/10.1364/OE.23.015608>
- [9] Eyett, M. and Buerle, D. (1987) Influence of the Beam Spot Size on Ablation Rates in Pulsed-Laser Processing. *Applied Physics Letters*, **51**, 2054-2055. <https://doi.org/10.1063/1.98290>
- [10] Fan, X., Rong, Y., Zhang, G., et al. (2023) Combined Laser Cutting Process for Interior Holes in Thick Glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, **621**, Article ID: 122647. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2023.122647>
- [11] 李隆, 杨建花, 张春玲. 毫秒脉冲-连续组合激光辐照铝合金温度场分析[J]. 应用激光, 2022, 42(7): 112-117.
- [12] 杨诗瑞, 郭鹏, 蔺晓超, 等. 基于组合激光加工的陶瓷金属复合材料打孔方法[P]. CN202211647866.2. 2024-03-18.
- [13] 潘虎. 一种组合式高功率激光加工装置[P]. CN202320308055.3. 2024-03-18.
- [14] 吕雪明, 李泽文, 张检民, 等. 不同延时的组合脉冲激光致硅表面损伤研究[J]. 激光技术, 2020, 44(6): 695. <https://doi.org/10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2020.06.008>