



超声振动对于激光烧蚀铝表面温度场仿真分析*

王岩^{1,2}, 殷杰¹, 董颖怀^{1,2}, 李跃华³, 程子政¹, 赵静楠^{1,2}, 杨硕^{1,2}

(1. 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222; 2. 天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室, 天津 300222; 3. 天津航天机电设备研究所, 天津 300301)

摘要: 针对超声振动对于激光烧蚀铝表面温度场的影响, 建立了三维数值模型, 利用 ANSYS 软件对超声振动辅助激光烧蚀金属铝的温度场进行了数值模拟。通过对比不同激光扫描速度、超声振动频率下激光相邻两个光斑温度场随时间的变化, 发现相邻光斑的温度、尺寸以及位置均发生改变。数值研究表明, 随着激光扫描速度的增加, 激光扫描到相同位置的最大温度降低, 而且凹坑的深度逐渐变浅; 由于超声振动引起的介质分子位移, 当超声振动频率为 15 kHz 时, 凹坑温度发生了明显的下降且凹坑位置在振动方向发生了错位, 这有利于产生新的激光作用轨迹。

关键词: 激光烧蚀; ANSYS; 超声振动; 温度场; 有限元仿真

中图分类号: O53

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210160

Simulation analysis of ultrasonic vibration for laser ablation of aluminum surface temperature field

Wang Yan^{1,2}, Yin Jie¹, Dong Yinghuai^{1,2}, Li Yuehua³, Cheng Zizheng¹, Zhao Jingnan^{1,2}, Yang Shuo^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-line Monitoring for Light Industry & Food Machinery and Equipment, Tianjin 300222, China;

3. Tianjin Institute of Aerospace Mechanical and Electrical Equipment, Tianjin 300301, China)

Abstract: In view of the influence of ultrasonic vibration on the temperature field of laser ablation of aluminum surface, a three-dimensional numerical model was established, and the temperature field of ultrasonic vibration assisted laser ablation of metal aluminum was numerically simulated by using ANSYS software. By comparing the change of temperature field of two adjacent spots with time under different laser scanning speed and ultrasonic vibration frequency, it is found that the temperature, size and position of adjacent spots all change. The numerical results show that with the increase of laser scanning speed, the maximum temperature of laser scanning to the same position decreases, and the depth of craters becomes shallow. Due to the displacement of medium molecules caused by ultrasonic vibration, when the ultrasonic vibration frequency is 15 kHz, the temperature of the crater decreases significantly and the crater position is misplaced in the direction of vibration, which is conducive to the generation of a new laser action trajectory. These experimental results have a certain guiding effect on the design of ultrasonic vibration assisted laser control parameters.

Key words: laser ablation; ANSYS; ultrasonic vibration; temperature field; finite element simulation

超声波是一种物理波, 它在不同介质中的传播取决于材料的弹性性质和密度^[1-2]。由于超声产生的机械振动可以导致介质在其静止位置产生一个非常微小的位移, 故被广泛用于辅助加工。超声振动辅助激光加工技术已经成熟的应用于钻孔^[3-5]和表面熔覆^[6-8]等方面。虽然超声振动辅助激光加工技术已经应用于制造行业的各个领域, 但是超声振动对加工过程微观作用的理论研究很少。因此, 利用仿真和建模工具模拟加工过程就显得尤为重要。

激光加工的去机理主要是热传导, 通过加热作用区域材料, 达到熔化去除效果, 因此激光与材料相互作用

* 收稿日期: 2021-04-25; 修订日期: 2021-08-26

基金项目: 天津市自然科学基金项目(18JCQNJC05200); 天津市教委科研计划项目(2018KJ116); 天津市自然科学基金青年项目(18JCQNJC75300)

联系方式: 王岩, satansdestiny@163.com。

通信作者: 董颖怀, dongyh@tust.edu.cn。

的热效应具有重要的研究价值。为此许多实验方法用来进行相关研究。2010年,张朋波等^[9]利用有限差分法对纳秒激光烧蚀铝靶进行了数值模拟,计算分析了不同脉宽激光作用下光斑大小对铝靶温度和烧蚀形貌的影响。2014年,龙城德等^[10]利用二维辐射流体程序Flash模拟研究小焦斑、纳秒激光烧蚀铝平面靶的相互作用过程,模拟给出了这一过程中密度、温度分布。同时,为了简化实验过程得到更加直观的实验结果,更多学者选择通过有限元仿真软件进行数值模拟。2017年,闫晓东等^[11]利用COMSOL有限元分析软件,分析了金属铝薄膜和双层金属膜在移动脉冲激光作用下的温度变化规律。2020年,文康等^[12]利用ANSYS有限元分析软件,反演计算了激光辐照过程中6061铝合金靶材温度吸收率的动态变化情况以及温升特点。尽管前人做了大量工作,也取得诸多成果,但是现有研究多为单一激光加工温度场的仿真,对于超声振动对激光加工温度场的影响研究较少。超声产生的机械振动引起介质分子从静止位置发生微小位移,改变激光与被加工金属材料之间的接触行为,使得激光束在空间的位置随时间的变化而改变。同时超声振动产生的声流效应^[13]、空化效应^[14]和热效应^[15]也会影响液态熔融材料凝固过程和传热过程。因此,超声振动对于激光烧蚀铝表面的温度场有显著影响。这使得该研究具有重要的意义。本文采用ANSYS仿真软件对超声振动辅助激光加工铝表面温度场进行仿真,探究超声振动频率对于激光加工铝表面温度以及凹坑分布的影响规律,其研究结果可为工程上超声振动辅助激光加工铝表面工艺优化提供支持。

1 模型的建立

1.1 物理模型的建立

基于热传导和热对流传热机制的非线性瞬态有限元分析,利用ANSYS软件对超声振动辅助激光烧蚀铝表面温度场进行仿真分析。根据实际试验情况进行模型建立,由于激光光斑作用材料表面范围较小,故对激光光斑作用材料过程分析时,将激光作用材料尺寸设定为 $0.16\text{ mm}\times 0.08\text{ mm}\times 0.05\text{ mm}$,在其表面施加两个激光热源,模拟激光的实际加工过程。在进行超声振动辅助激光加工过程仿真分析时,需要对模型添加一个位移约束,从而模拟工件在超声振动工作台上的运动状态,而对于仿真分析来说,可以将运动添加到热源模型中,使工件与热源模型产生相对的正弦曲线运动,从而代替工件的运动。在实际的激光加工过程中,给定激光的频率 f_1 ,就可以得到激光的脉冲周期 T 。

同时对于激光的一个脉冲周期来说,分为脉宽和脉间,即在一个脉冲周期内,可以通过系统设定来控制作用时间的长短,对于本文中的仿真以及实验设定,作用时间为 $5\text{ }\mu\text{s}$,脉冲周期为 $50\text{ }\mu\text{s}$,也就是说两个激光光斑之间的时间间隔为 $50\text{ }\mu\text{s}$,根据时间间隔可以计算出两个激光光斑之间的位置距离,即

$$L = vT \quad (1)$$

式中: L 为激光光斑间的位置距离(mm); v 为激光扫描速度(mm/s)。

本仿真分析计算量级为微米级别,为了提高仿真精度,将网格尺寸定为 $1.5\text{ }\mu\text{m}$,模型划分网格数为89780。在此模型上赋予铝的材料属性,模拟实际加工中所用的铝材料,铝的热物性参数见表1。

表1 铝的热物参数表

Table 1 Thermophysical parameters of aluminum

temperature/ $^{\circ}\text{C}$	specific heat capacity/(J/(kg·K))	thermal conductivity/(W/(m·K))	density/(kg/m ³)	liquidus temperature/ $^{\circ}\text{C}$	solidus temperature/ $^{\circ}\text{C}$
20	899.56	236.57	2700	660.2	660.2
200	983.24	238.66	2700	660.2	660.2
500	1121.3	221.49	2700	660.2	660.2
660	1196.6	212.7	2700	660.2	660.2

1.2 边界条件

根据实际加工环境进行初始温度及边界条件的设定,设定初始温度为 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$,由于除热源模型作用表面(上表面)外,其他5个面由于温度传导范围较小,在整个分析过程中几乎无温度变化,故将其他5个面的温度设定为初始温度。对于模型上表面,由于激光热源大部分热量都被其吸收,使得热量开始由表面向模型内部传导,在作用过程中,由于与空气接触,一部分热量也会被流动的空气带走,从而产生对流换热现象。表2为常见的对流换热系

表 2 常用对流换热系数范围
Table 2 Common convection heat transfer coefficient range

condition	forced convection of gas/(W/(m ² ·℃))	natural air convection/(W/(m ² ·℃))	forced convection of water/(W/(m ² ·℃))	kerosene natural convection/(W/(m ² ·℃))
coefficient values	20-100	3-10	1000-1500	500-1000

数, 由于实际实验时, 工件与激光器处于相对密闭的环境中, 无强制气体流动, 无冷却液体干预, 故将对流换热系数设定为 5 W/(m²·℃)。

2 结果分析与讨论

2.1 激光扫描速度与超声振动频率之间的关系推导

对于激光轨迹的形状以及热影响区之间的位置关系, 可以通过搭接率进行表示, 同时也可将激光和超声振动参数与轨迹形状联系起来。传统的搭接率模型通常应用于激光涂覆, 用来表示两个相邻的凹坑之间的位置关系。其定义为: 相邻凹坑之间的搭接宽度 D_0 与单个凹坑宽度 W 之比。如图 1 所示, 用公式表示为

$$\eta = \frac{D_0}{W} \quad (2)$$

引入超声振动后, 由于光斑分布位置发生变化, 传统激光搭接率计算公式已经不再适用, 需要建立新的搭接率计算模型。采用搭接面积与热影响区面积之比, 可更准确地反应各个热影响区之间的关系。通过改变超声振动频率和激光扫描速度, 确定热影响区分布位置, 计算搭接率。复合超声振动后的热影响区搭接率示意图如图 2 所示。

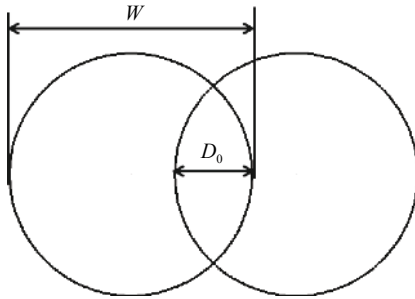


Fig. 1 Schematic diagram of conventional laser lap rate calculation

图 1 传统激光搭接率计算示意图

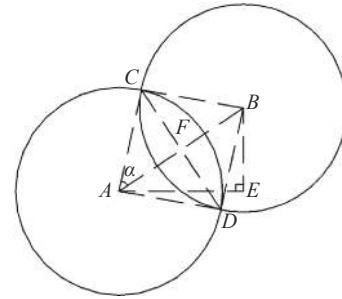


Fig. 2 Schematic diagram of lap joint of ultrasonic vibration composite laser heat affected zone

图 2 超声振动复合激光热影响区搭接示意图

设热影响区半径为 r , l_{AB} 为两个热影响区中心距离, l_{AE} 为 l_{AB} 在 x 方向上的分量, l_{BE} 为 l_{AB} 在 y 方向上的分量, 则有

$$l_{AE} = v \times T \quad (3)$$

$$l_{BE} = A \sin[2\pi f(t + T) + \phi] - A \sin(2\pi f t + \phi) \quad (4)$$

式中: A 为超声振幅 (mm); f 为超声振动频率 (kHz); ϕ 为超声振动相位角 (rad)。

$$l_{AB} = \sqrt{l_{AE}^2 + l_{BE}^2} \quad (5)$$

可求得直线 AC 与直线 AB 的夹角 α :

$$\alpha = \arccos(l_{AB}/2r) \quad (6)$$

设 S_1 为扇形 ACD 面积; S_2 为三角形 ACD 面积; S_3 为激光热影响区面积, 则

$$S_1 = \pi r^2 \times 2\alpha / 2\pi = \alpha r^2 \quad (7)$$

$$S_2 = l_{AB} \times r \times \sin \alpha / 2 \quad (8)$$

$$S_3 = \pi r^2 \quad (9)$$

搭接率 η 用公式表示为

$$\eta = 2(S_1 - S_2) / S_3 = (2\alpha r^2 - l_{AB} \times r \times \sin\alpha) / \pi r^2 = (2\alpha r - l_{AB} \sin\alpha) / \pi r \quad (10)$$

根据此搭接率模型将表 3 中的六组数据进行搭接率计算, 具体参数及计算结果如表 3 所示。由表 3 可知, 当扫描速度为 200 mm/s 时, 无超声振动时的热影响区搭接率为 74.71%, 而引入超声振动后, 搭接率减小到 64.47%, 并且随着扫描速度的增大, 搭接率不断减小, 直到扫描速度为 1000 mm/s 时, 搭接率减少到 0, 这时表明两个热影响区之间基本无搭接。

表 3 搭接率计算参数及结果

Table 3 Calculation parameters and results of lap joint rate

scanning speed/(mm/s)	amplitude/ μm	frequency/kHz	initial phase angle/($^\circ$)	diameter of heat affected zone/ μm	overlap rate/%
200	0	0	0	50	74.71
200	10	15	0	50	64.47
400	10	15	0	50	45.02
600	10	15	0	50	25.22
800	10	15	0	50	8.58
1000	10	15	0	50	0

2.2 超声振动频率对激光烧蚀铝表面温度场的影响

图 3 为无超声振动时两个激光光斑作用材料表面时引起的温度变化, 随着扫描速度的增加, 两个凹坑之间的距离逐渐变大。同时材料表面的最高温度较单个激光光斑有所增加, 并且随着扫描速度的增大, 最高温度上升幅度降低。这是因为两个激光光斑之间存在相互作用, 前一个光斑所产生的温度场使得下一个光斑作用位置的温度升高, 下一个光斑所形成的温度场也会反过来影响到前一个光斑形成的温度场, 从而形成温度叠加效果, 使得最高温度数值增大。随着扫描速度的增加, 两个光斑作用位置的距离不断增大, 使得温度叠加效果不断减弱, 并且所形成的两个凹坑不断分离, 当扫描速度为 1000 mm/s 时, 凹坑之间没有重叠, 凹坑之间相对独立。在扫描速度为 200 mm/s 时, 材料表面最高温度为 3591.5 $^\circ\text{C}$, 并且随着扫描速度的增大, 温度不断降低, 整体降低幅度趋于平缓。这是因为随着扫描速度的增加, 两个光斑之间的作用位置距离不断增大, 当速度达到一定值时, 光斑之间互不干扰, 形成两个独立的凹坑, 从而最高温度相对于单个激光光斑来说, 增加量趋近于 0, 演变成多个凹坑的线性阵列。

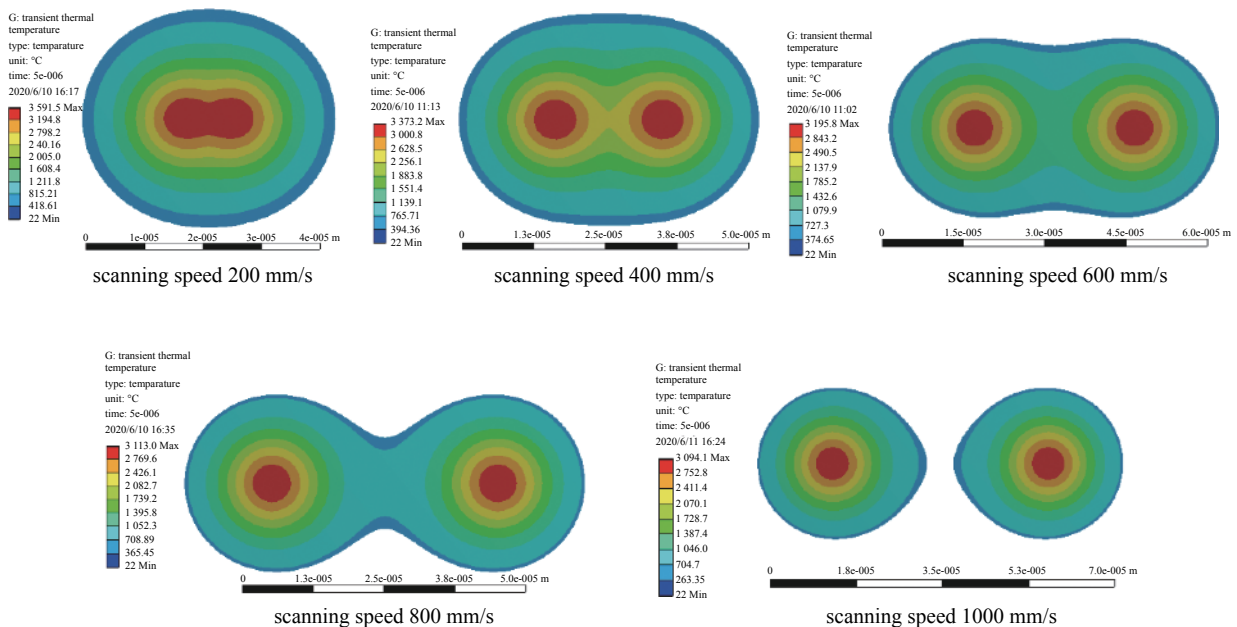


Fig. 3 The temperature distribution and pit morphology of the double laser spot

图 3 双激光光斑所成温度分布及凹坑形貌图

如图 4 所示,复合超声振动后,双凹坑温度发生了变化,并且在不同的振动频率下,变化幅度也不同。当振动频率为 10 kHz 时,各扫描速度下的凹坑温度都高于无超声振动时;当振动频率为 15 kHz 时,各扫描速度下的凹坑温度均出现一定程度的下降,且低于相同扫描速度下的无超声振动凹坑温度;当振动频率为 20 kHz 时,凹坑温度相对于无超声振动时基本没有变化,同时温度变化趋势与振动频率为 10 kHz 时基本相同。

观察图 4 发现,复合超声振动后,不同振动频率对温度的影响趋势不同,当振动频率为 15 kHz 时,凹坑温度发生了明显的下降,而当振动频率为 10 kHz 和 20 kHz 时,温度变化并不明显,所以超声振动频率对温度的影响不是线性关系。

图 5 分别列举了不同振动频率,不同扫描速度下两个凹坑的位置关系,由图可以看出,当振动频率为 10 kHz 和 20 kHz 时,两个凹坑在振动方向没有位移,而当振动频率为 15 kHz 时,凹坑位置在振动方向发生了错位,同时凹坑重叠面积也在减小,改变了原有的激光光斑作用路径。因此,当振动频率为 15 kHz,两个凹坑之间的位置距离变大,凹坑之间的温度影响也随着距离的变大而逐渐衰减,故最高温度较其它振动频率有所下降。

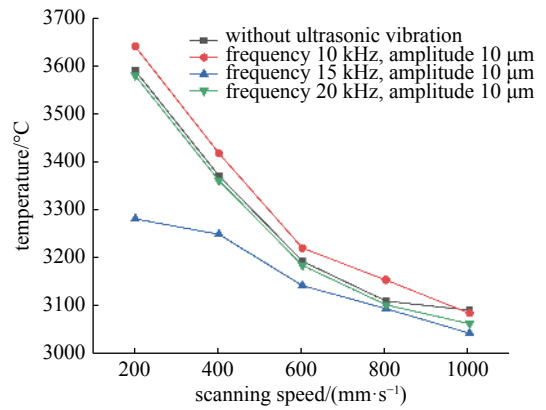


Fig. 4 Composite ultrasonic vibration double pit temperature line diagram

图 4 复合超声振动双凹坑温度折线图

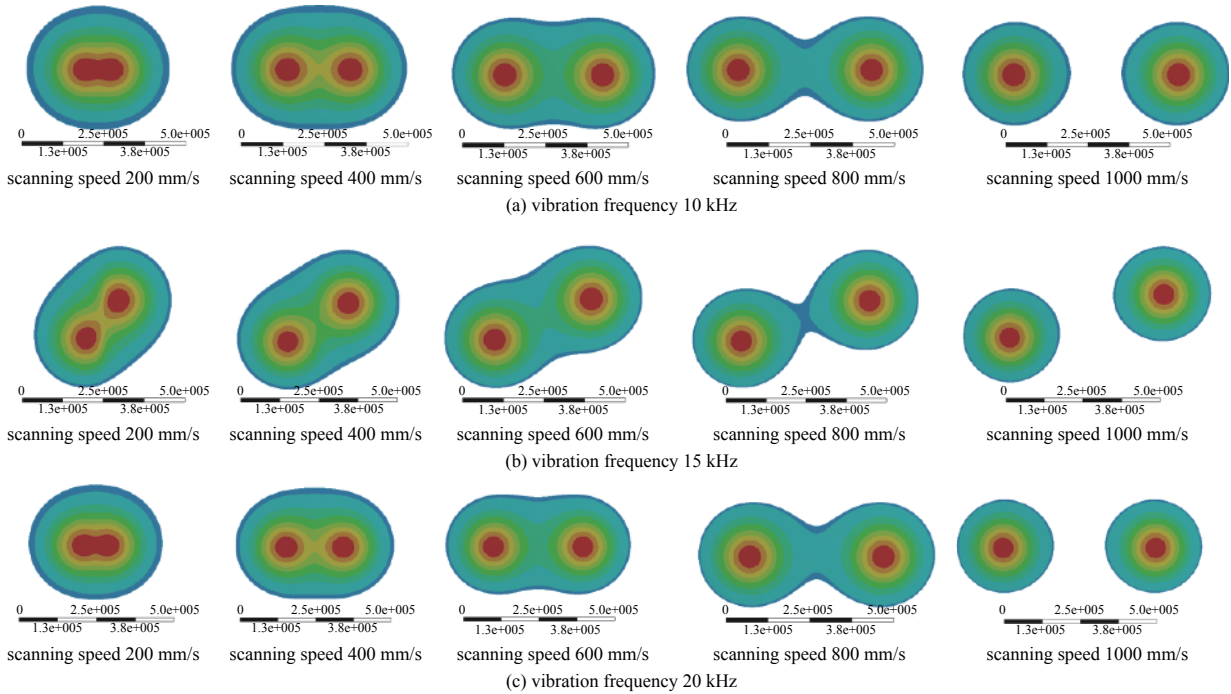


Fig. 5 Double pit location map at different frequencies

图 5 不同频率下双凹坑位置图

根据此现象可知,超声振动对凹坑之间的作用效果较为明显,而且不同频率对温度的影响也不同,当振动频率处于特殊值时,可以改变激光光斑的作用路径,从而产生新的激光作用轨迹。

3 结 论

本文提出一种超声振动辅助激光加工的热影响区搭接率模型,研究了搭接率与激光扫描速度,超声振动频率加工参数之间的关系。同一速度下,引入超声振动辅助会降低搭接率;随着扫描速度的增大,搭接率会减小。同时利用 ANSYS 有限元仿真研究了超声振动辅助激光加工中激光扫描速度和超声振动频率对铝表面温度场的影响。计算结果表明:(1)无超声振动时随激光扫描速度的增加,激光扫描到相同位置的最大温度降低;(2)在超声振动辅助激光加工过程中,不同振动频率对温度的影响趋势不同,当振动频率为 15 kHz 时,凹坑温度发生了明显的下降

且凹坑位置在振动方向发生了错位,而当振动频率为 10 kHz 和 20 kHz 时,温度变化并不明显且凹坑位置在振动方向亦没有位移。本文建立的模型具有一定的通用性。

参考文献:

- [1] Martin D J, Wells I T, Goodwin C R. Physics of ultrasound[J]. *Physics*, 2015: 132-135.
- [2] Marvin C, Ziskin M M. Fundamental physics of ultrasound and its propagation in tissue[J]. *Radio Graphics*, 1993, 13: 705-709.
- [3] 沈诚, 邹平, 康迪, 等. 超声振动透镜辅助激光打孔实验研究[J]. *中国机械工程*, 2020, 31(21): 2542-2546. (Shen Cheng, Zou Ping, Kang Di, et al. Experimental study on laser drilling assisted by ultrasonic vibrating lens[J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(21): 2542-2546)
- [4] Wang Houxiao, Zhu Sukai, Xu Guoxiang, et al. Influence of ultrasonic vibration on percussion drilling performance for millisecond pulsed Nd: YAG laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 104: 133-139.
- [5] Alavi S H, Harimkar S P. Ultrasonic vibration-assisted continuous wave laser surface drilling of materials[J]. *Manufacturing Letters*, 2015, 4: 1-5.
- [6] Li Meiyang, Zhang Qi, Han Bin, et al. Microstructure and property of Ni/WC/La₂O₃ coatings by ultrasonic vibration-assisted laser cladding treatment[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 125: 105848.
- [7] Wu Dongjiang, Guo Minhai, Ma Guangyi, et al. Dilution characteristics of ultrasonic assisted laser clad yttria-stabilized zirconia coating[J]. *Materials Letters*, 2015, 141: 207-209.
- [8] 徐家乐, 周建忠, 谭文胜, 等. 超声振动辅助激光熔覆钴基合金涂层的抗高温氧化性能[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0102006. (Xu Jiale, Zhou Jianzhong, Tan Wensheng, et al. High temperature oxidation resistance of laser cladding cobalt-based alloy coating assisted by ultrasonic vibration[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0102006)
- [9] 张朋波, 秦颖, 赵纪军, 等. 纳秒激光烧蚀铝材料的二维数值模拟[J]. *物理学报*, 2010, 59(10): 7120-7128. (Zhang Pengbo, Qin Ying, Zhao Jijun, et al. Two-dimensional numerical simulation of nanosecond laser ablation of aluminum materials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(10): 7120-7128)
- [10] 龙城德, 赵斌, 袁鹏, 等. 小焦斑纳秒激光烧蚀铝平面靶的数值研究[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 102005. (Long Chengde, Zhao Bin, Yuan Peng, et al. Numerical study of nanosecond laser ablation of aluminum target with small focal spot[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 102005)
- [11] 闫晓东, 任妮, 汤富领, 等. 移动脉冲激光刻蚀金属/聚酰亚胺数值模拟[J]. *中国激光*, 2017, 44: 0402001. (Yan Xiaodong, Ren Ni, Tang Fuling, et al. Numerical simulation of metal/polyimide etching with moving pulse laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44: 0402001)
- [12] 文康, 李和章, 马壮, 等. 光斑尺寸对连续激光辐照铝合金温度响应影响研究[J]. *中国光学*, 2020, 13(5): 1023-1031. (Wen Kang, Li Hezhang, Ma Zhuang, et al. Effects of spot size on the temperature response of an aluminum alloy irradiated by a continuous laser[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2020, 13(5): 1023-1031)
- [13] 胡仕成, 夏晨希, 邵高建, 等. 铝熔体中超声声流的数值模拟[J]. *铸造技术*, 2010, 31(12): 1609-1613. (Hu Shicheng, Xia Chenxi, Shao Gaojian, et al. Numerical simulation of Ultrasonic streams in pure aluminum melts[J]. *Foundry Technology*, 2010, 31(12): 1609-1613)
- [14] Tonry C E H, Djambazov G, Dybalska A, et al. Acoustic resonance for contactless ultrasonic cavitation in alloy melts[J]. *Ultrason Sonochem*, 2020, 63: 104959.
- [15] 李玉海, 张乐, 卢伦, 等. 超高强度马氏体时效不锈钢超声疲劳过程中的热效应[J]. *金属热处理*, 2015(9): 55-58. (Li Yuhai, Zhang Le, Lu Lun, et al. Heat effect of ultra high strength maraging stainless steel during ultrasonic fatigue test[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2015(9): 55-58)