

DOI:10.16136/j.joel.2023.03.0173

超声振动辅助激光烧蚀铝表面形貌仿真分析

张明月¹, 王 岩^{1,2,*}, 殷 杰¹, 董颖怀^{1,2}, 李跃华³, 赵静楠^{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:为研究超声复合激光蚀除机理, 本文使用 COMSOL 软件对超声振动辅助激光烧蚀金属铝表面烧蚀过程进行仿真, 对比研究了超声振动对激光蚀除机理和过程的影响。研究发现, 激光烧蚀的开始阶段主要以高温汽化来去除材料。随着烧蚀时间的增加, 蚀除方式主要转变为熔融物飞溅蚀除, 这对烧蚀凹坑的形成起主要作用。并研究了不同频率下激光蚀除材料的速度, 研究发现, 引入超声振动后, 蚀除速度降低了 26.2%—39.43%。

关键词:激光烧蚀; COMSOL; 超声振动; 有限元仿真; 表面形貌

中图分类号:O53 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2023)03-0321-07

Simulation of ultrasonic vibration-assisted laser ablation of aluminum surface morphology

ZHANG Mingyue¹, WANG Yan^{1,2,*}, YIN Jie¹, DONG Yinghuai^{1,2}, LI Yuehua³, ZHAO Jingnan^{1,2}

(1. College 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: To investigate the mechanism of ultrasonic compound laser etching, this paper used COMSOL software to simulate ultrasonic vibration-assisted laser ablation of metallic aluminum surfaces. The effect of ultrasonic vibration on the laser alteration mechanism and process was studied in comparison. It was found that the beginning of the laser ablation phase material was removed mainly by high temperature vaporization. As the ablation time increased, the mode of etching changed mainly to melt splash etching, which played a major role in the formation of ablation craters. The speed of laser etching of the material at different frequencies was also investigated. It was found that the introduction of ultrasonic vibration reduced the etching rate by 26.2%—39.43%.

Key words: laser ablation; COMSOL; ultrasonic vibration; finite element simulation; surface morphology

0 引 言

激光加工是通过激光热源与材料间的相互作用, 对靶材进行热去除。由于脉冲激光具有作用时间短、热效应低, 加工精度高、可控性好^[1]等优点被广泛运用于工业生产中^[2,3]。尤其是近些年, 使用激光在金属表面构建特殊微结构^[4-7], 制备功能性表面^[8-10]逐渐成为了热点。但是单一激光

作用在工件表面时容易产生飞溅、熔渣、以及裂纹, 使工件的表面质量下降^[11]。尤其在一些尖端制造领域, 单一激光加工方式, 并不能满足这些特殊的需要。因此, 需要对传统的激光加工方式进行创新。

为了解决这一难题, 研究人员发现在激光加工的同时引入了超声振动^[12,13]可以优化加工质量。XIA 等^[14]研究发现超声震动可以增强激光

* E-mail: satansdestiny@163.com

收稿日期: 2022-03-17 修订日期: 2022-05-26

基金项目: 天津市自然科学基金项目(19JCZDJC33200, 18JCQNJC05200, 18JCYBJC88900)、天津市教委科研计划项目(2018KJ116)、2021 年天津市研究生科研创新项目(2021YJSS043)资助项目

打孔过程中孔内的内反射,在通孔打孔时有更高的轴向钻孔效率,并且较高的超声功率更有利于改善孔的圆度。ALAVI 等^[15]建立了超声辅助激光加工奥氏体表面熔体放电实验。许多实验都表明了超声复合激光加工,可以优化加工后的表面质量,以及制备特殊形貌等^[16]。

脉冲激光加工材料表面,是由多个相互叠加的单个凹坑构成。而单个凹坑作为材料去除的基本单元,其加工质量直接影响到整个表面的加工质量,因此其具有极其重要的研究价值。本文利用 COMSOL 仿真软件对超声振动辅助激光烧蚀铝表面进行仿真。分析了单一激光烧蚀铝表面的烧蚀机理,以及引入超声振动对激光加工材料表面的影响,并研究了不同脉冲频率对激光烧蚀过程的影响。

1 模型的建立

1.1 模型的基本假设

脉冲激光加工过程涉及到材料的熔化、汽化等复杂物理过程,涉及到包括光学、传热学、气体动力学、流体力学、传热学等众多交叉学科作用。然而,脉冲激光烧蚀的过程主要研究的是高能激光束产生的热力学效应以及材料的各项物理参数在空间上随温度的变化,详细的烧蚀过程较为复杂。因此,需要对模型进行一定程度的简化。为此针对仿真,提出如下假设:1) 假设材料为各向同性材料,即材料在各个方向上的热物理性质均相同,减小了计算过程中的非线性计算;2) 假设光束为理想的基模高斯光束;3) 假设流体之间不可相互渗透,液相区视为具有各向同性渗透率的过孔介质。

超声辅助激光加工材料去除的热-流耦合物理模型如图1所示,本文建立的模型为二维模型,包含空气介质和试样基材两个区域的计算,两个区域的计算尺寸分别为: $80\text{ }\mu\text{m}\times 30\text{ }\mu\text{m}$ 和 $80\text{ }\mu\text{m}\times 50\text{ }\mu\text{m}$ 。在试样基材表面施加高斯分布热源。

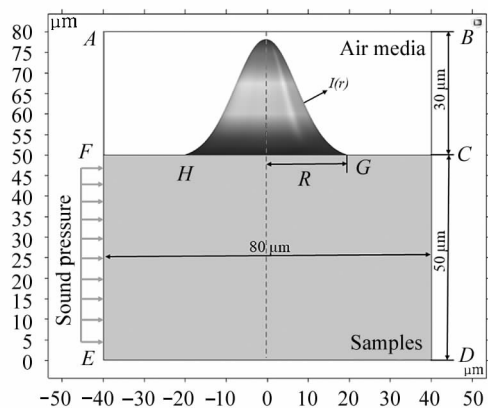


图1 超声辅助单脉冲激光热-流耦合模型

Fig. 1 Ultrasound-assisted single-pulse laser heat-fluid coupling model

1.2 模型建立

超声振动辅助激光烧蚀示意图如图2所示。在激光烧蚀的垂直方向添加超声振动。本次仿真主要使用 COMSOL 软件中的“压力声学”模块来仿真超声的声场分布。将层流模块、流体传热模块和压力声学模块进行耦合,求解得到的声压梯度以源项引入到 Navier-Stokes 方程,来求解超声振动辅助激光烧蚀数值模型。

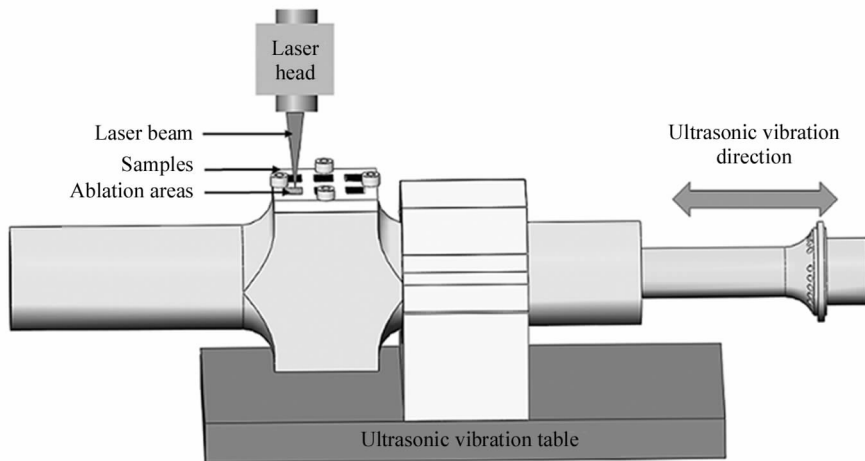


图2 超声振动辅助激光烧蚀示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ultrasonic vibration assisted laser ablation

本仿真分析计算量级为微米级别,为了提高精度,网格划分采用极细化网格划分方法。最大单元大小为 $0.8\text{ }\mu\text{m}$,最小单元大小为 $0.0016\text{ }\mu\text{m}$,最大单元增长率为 1.1。整个模型包含 14 330 个单元数,平均单元质量 0.942 5。求解仿真条件及试样材料(纯铝)的热物理属性参数如表 1 所示。

表 1 求解仿真条件及试样材料(纯铝)的热物理属性参数

Tab. 1 Simulation conditions and thermo-physical properties of sample materials(pure aluminum)

Parameters	Numerical values	Parameters	Numerical values
Ultrasonic vibration amplitude/ μm	6.58	Laser spot radius/mm	0.015
Ultrasonic vibration frequency/kHz	15	Laser pulse frequency/kHz	20 25 30
Laser power/W	10	Laser pulse interval/ μs	5
Solid/liquid/gas density/(kg/m^3)	2 700/2 385/30	Ambient temperature/K	273.15
Thermal conductivity of solid/liquid/gas/($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	238/100/-	Evaporation point/K	2 793
Solid/liquid/gas specific heat capacity/($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)	917/1 081/-	Darcy's law coefficient	$1\times 10^{-3}/1\times 10^{-6}$
Solid/liquid/gas dynamic viscosity/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	$100/10^{-3}/10^{-5}$	Absorption rate	0.25
Latent heat of melting/(J/kg)	3.98×10^5	Standard Atmospheric Pressure/Pa	101 325
Latent heat of evaporation/(J/kg)	1.09×10^7	Gas constants/($\text{J}/(\text{K}\cdot\text{mol})$)	8.314
Liquid phase line temperature/K	943	Boltzmann's constant/(J/K)	1.38×10^{-23}
Solid phase line temperature/K	923	Coefficient of thermal expansion/($1/\text{K}$)	8.4×10^{-6}
Melting point/K	933	Aluminum molecular weight/(kg/mol)	0.027

表 2 超声辅助单脉冲激光热-流耦合仿真模型的边界条件

Tab. 2 Boundary conditions of the ultrasonic-assisted single-pulse laser thermal-fluid coupling simulation model

Model boundaries	Boundary conditions	Equations
A-B、B-C、A-F	①Thermal fields: temperature boundaries ②Flow field: sliding wall boundary	$T=T_0(273.15\text{ K})$ $\boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{n}=0$
C-D、D-E、E-F	①Hot field: thermal insulation ②Flow field: fixed wall boundary	$\partial T/\partial N=0$ $\boldsymbol{u}=0$
C-G、F-H	①Thermal fields: thermal convection ②Flow fields: free boundaries	$\boldsymbol{k}\cdot\partial T/\partial N=h_c(T-T_0)$ —
E-F	①Sound field	$p_1=\sqrt{\frac{2\rho c}{A}}P_{us}$
G-H	①Thermal fields: heat transfer ②Flow fields: free boundaries	$\boldsymbol{k}\cdot\partial T/\partial \boldsymbol{y}=I(r)$ —

注:表 2 中“—”表示不涉及具体方程。

2 结果分析与讨论

2.1 脉冲激光蚀除过程分析

在脉冲激光烧蚀过程中,除烧蚀去除材料外,气/液界面由于液体表面张力的作用,在熔融界面会产生形变。对于激光烧蚀材料熔融层的界面力主要有两种:一是由于界面曲率变化引起的表面张力,主要作用在材料的法向方向上;二是由于熔融材料表面的温度梯度引起的热毛细剪切力,主要作用在材料的切向方向上,如图 3 所示。由于表面张力的作用引起的流体流动被称为马兰戈尼对流^[17],它使得

1.3 边界条件

在超声辅助单脉冲激光烧蚀模型中,激光烧蚀凹坑表面上的边界条件极其重要。在本模型中主要涉及到的物理场包括热场、流场以及声场,因此,表 2 中所列出的边界条件均是从以上 3 个物理场出发的。其中表 2 中所列出的字母与图 1 中相对应。

剪切力与表面温度梯度成正比。因为温度越高,表面张力越低,所以在激光烧蚀区域内,凹坑中心的温度最高,表面张力最低,而凹坑两侧的表面张力最高。因此,流体从凹坑的底部移动到凹坑的边缘。

表面张力 σ_n 和热毛细剪切力 σ_τ 计算公式如式(1)和式(2)所示:

$$\sigma_n = k\gamma n, \tag{1}$$

式中, k 为自由表面曲率(m^{-1}), γ 为表面张力系数(N/m), $\boldsymbol{n}$ 为自由表面单位法向量。

$$\sigma_\tau = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \nabla T \boldsymbol{\tau}, \tag{2}$$

式中, $\frac{\partial \gamma}{\partial T}$ 为表面张力的温度系数 ($-0.5 \times 10^{-3} \text{ N}/(\text{m} \cdot \text{K})$), ∇T 为沿表面切向的温度梯度 (K/m), τ 为自由表面单位切向量。

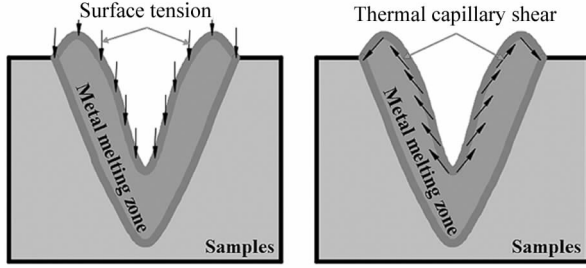


图3 熔融区表面力作用效果

Fig. 3 The effect of surface forces in the melting zone

所以, 熔融体材料表面上的界面力 F_{ts} 为式(3)。

$$F_{ts} = \sigma_n + \sigma_\tau = k\gamma n + \frac{\partial \gamma}{\partial T} \nabla T \tau. \quad (3)$$

最终, 气/液界面的动量方程 (Navier-Stokes 方程) 如式(4)所示:

$$\rho \frac{\partial \gamma}{\partial T} = F_{ts}. \quad (4)$$

激光烧蚀过程中, 凹坑内部因为受热不均匀的原因, 会产生不同的温度梯度, 温差的存在会使得熔融区产生自然对流。凹坑成型的关键力主要是体积力, 体积力的计算如式(5)所示, 因为熔融区主要受到浮力和重力的影响, 浮力和重力的计算如式(6)、(7)所示:

$$F_v = F_g + F_b, \quad (5)$$

$$F_g = \rho g, \quad (6)$$

$$F_b = -\rho \beta (T - T_m) g, \quad (7)$$

式中, F_v 为熔融材料体积力 (N), F_g 为重力 (N), F_b 为浮力 (N), g 为重力加速度 (9.8 m/s^2), β 为热膨胀系数 ($1/\text{K}$), T_m 为材料熔点 (K)。

受到激光烧蚀的材料会在固态和液态之间相互转换, 此时将达西阻力力 F_{Darcy} [18] (式(8)) 引入动量方程, 利用达西模型, 结合 Carman-Koseny 公式 [19] (式(9)), 来吸收固体材料的动量损失。使用混合边界法可以统一求解固体材料和熔融材料的速度, 以及固/液相的边界变化过程。

$$F_{\text{Darcy}} = -Ku, \quad (8)$$

$$K = \frac{K_{\text{mush}}(1 - g_1)^2}{(g_1^3 + \xi)}. \quad (9)$$

在 Carman-Koseny 公式中, K_{mush} 为 Carman-Koseny 系数, 该系数主要是多孔介质的等效系数, 该系数可以用来调节达西阻力的大小。同时为了使得等效系数有意义 (分母不为零), 引入一个新的参数 ξ , 它是一个极小值。在本模型中, 取 $K_{\text{mush}} = 10^6 \text{ (kg/m}^3 \cdot \text{s)}$, $\xi = 10^{-3}$ 。

通过上述分析整合, 得到最终固/液界面动量守恒方程如式(10)所示:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot (\nabla u) \right) = \nabla [-PI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)] - F_g + F_b + F_{\text{Darcy}}, \quad (10)$$

式中, P 为压力 (Pa), I 为单位矩阵, μ 为流体动力粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。

通过对上述公式进行总结, 对气/液相和固/液相所有的控制方程进行归纳总结, 整合出适用于整个求解域的总动量守恒方程, 如式(11)所示:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot (\nabla u) \right) = \nabla [-PI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)] - F_g + F_b + F_{\text{Darcy}} + F_{ts}. \quad (11)$$

选取的激光脉冲频率为 20 kHz, 材料的蚀除与烧蚀凹坑的形成过程的仿真结果如图 4 所示。图中上部分区域为空气介质部分, 下部分区域为试样基材部分。观察图 4 可知, 激光烧蚀凹坑出现的时间

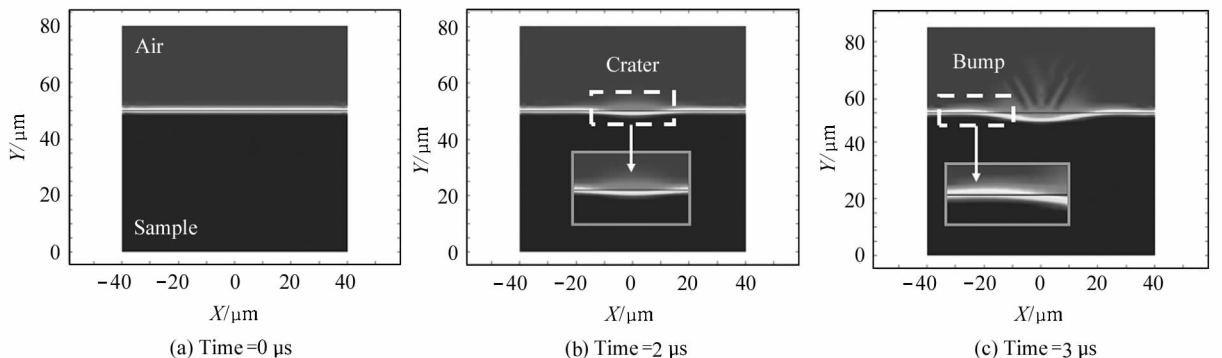


图4 单脉冲激光烧蚀材料蚀除与凹坑形成过程 (激光脉冲频率 20 kHz)

Fig. 4 Single-pulse laser ablation material ablation and crater formation process (laser pulse frequency 20 kHz)

在 $t=2\ \mu\text{s}$ 时,说明试样基体在激光烧蚀不久后就开始发生材料的蚀除,该时期下材料的蚀除主要是以汽化的形式进行的。因为激光烧蚀初期,激光的高斯热源具有极高的热流密度,能够产生极大的热量,这些热量会使得试样材料表面温度急剧升高,高温使得试样材料发生汽化,以蒸汽的形式脱离试样基体表面,这与 GRAGOSSIAN 等^[20]研究的激光烧蚀机制是一致的。

2.2 脉冲激光蚀除过程分析

对于单个超声辅助激光脉冲周期进行研究,选取的激光脉冲频率也为 20kHz,并对激光烧蚀添加超声振动辅助,材料的蚀除与烧蚀凹坑的形成过程的仿真结果如图 5 所示。观察图 5 并与图 4 对比可知,超声振动辅助激光烧蚀凹坑出现的时间大约在 $t=2.5\ \mu\text{s}$,说明超声振动的加入会使激光烧蚀凹坑的出现延迟。因为超声振动的作用会使激光烧蚀的位置发生变动,激光热流密度分散,能量降低,故

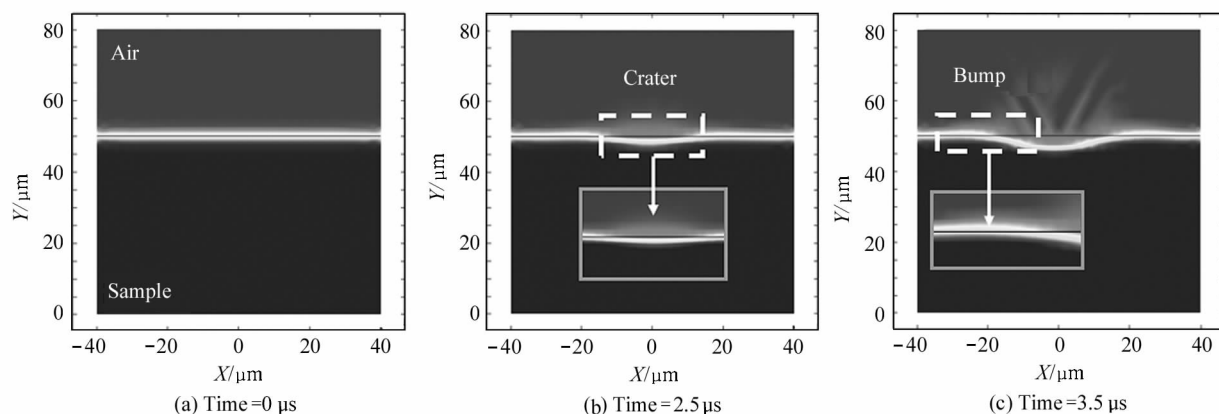


图 5 超声辅助脉冲激光烧蚀凹坑形成过程(激光脉冲频率 20k Hz)

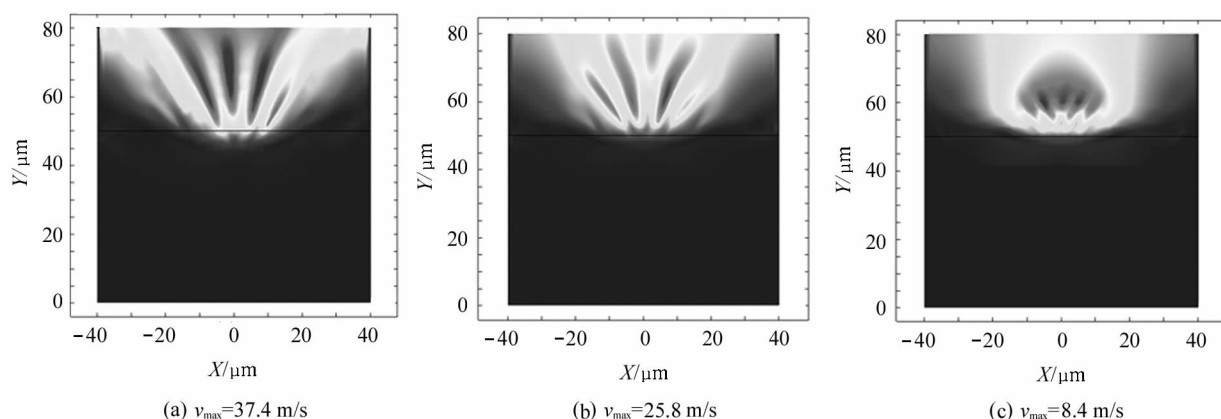
Fig. 5 Ultrasound-assisted pulse laser ablation crater formation process (laser pulse frequency 20 kHz)

而使激光烧蚀凹坑的出现延迟。

2.3 激光脉冲频率对激光烧蚀铝表面蚀除速度的影响

图 6 展示了有无超声振动辅助下,激光烧蚀材料蚀除速度的仿真图。仿真所用的激光频率分别为 20 kHz、25 kHz、30 kHz,图中(a)、(b)、(c)为单脉冲激光烧蚀材料蚀除速度图;图中(d)、(e)、(f)为超声振动辅助单脉冲激光烧蚀材料蚀除速度图。可以发

现,随着激光频率的增加,材料蚀除的速度均在减小。因为激光的频率增加以后,激光的热流密度减小,热流密度的降低使得激光烧蚀能力减弱,因而材料蚀除速度会降低。图 7 为激光蚀除速度曲线图。对比发现,超声振动辅助的加入会使激光烧蚀材料的蚀除速度降低,下降了 26.2%—39.43%。因为超声振动具有高频特性,使得激光烧蚀过程中,光斑位置时刻发生改变,光斑位置的移动使得相同时间下



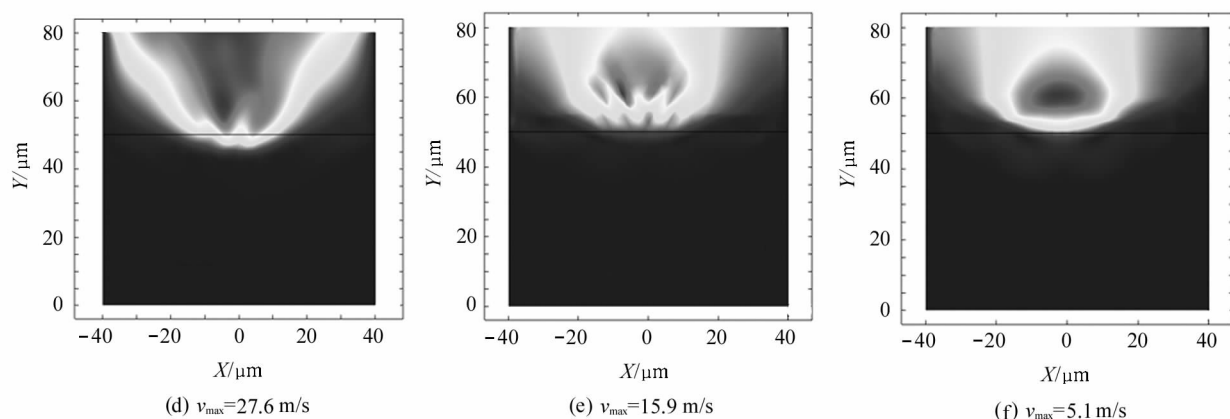


图6 单脉冲激光烧蚀材料蚀除速度图:(a)(b)(c)有超声振动;(d)(e)(f)无超声振动

Fig. 6 Diagram of single-pulse laser ablation material ablation speed: (a) (b) (c) With ultrasonic vibration; (d) (e) (f) Without ultrasonic vibration

激光能量被减弱,蚀除速度减小。

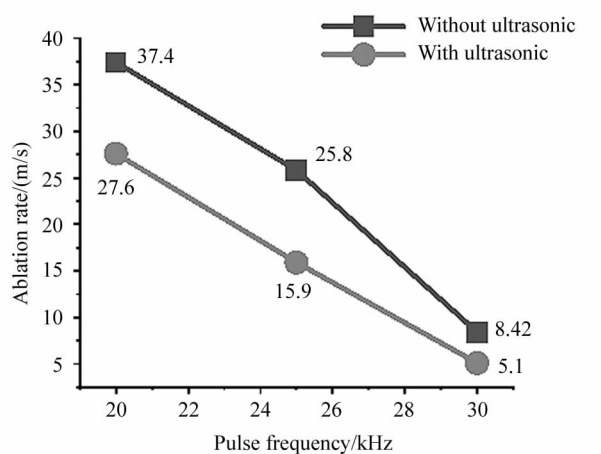


图7 激光蚀除速度曲线图

Fig. 7 Laser etching speed profile

3 结论

本文通过建立超声辅助激光加工热-流耦合模型,对单脉冲激光烧蚀金属材料的蚀除过程以及烧蚀凹坑的成形过程进行分析研究,结果表明:烧蚀开始阶段主要的蚀除方式是汽化蚀除,随着烧蚀时间的增加,之后的蚀除方式主要是熔融物飞溅蚀除,而且后者对于烧蚀凹坑的形成起到主要作用。对比研究了超声振动对激光烧蚀铝材料的影响,研究发现,引入超声振动后,激光对材料的蚀除速率降低了26.2%—39.43%。该研究对激光烧蚀金属材料的机理进行了补充,该模型具有一定的通用性。

参考文献:

[1] IINO T, HOSOKAWA Y. Controllability of femtosecond la-

ser-induced impulse in water evaluated by local force measurement system using atomic force microscopy[J].

Journal of Applied Physics, 2012, 112(6): 66106.

[2] JELVANI S, MALEKI M H, KHADIR S, et al. Laser cleaning on bronze artefacts by the XeCl laser[J]. Optik, 2021, 242: 167316.

[3] GUO S N, TANG S, SUN Q M, et al. Pulse photoacoustic detection technology for cracks in metal additive process [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2021, 32(12): 1307-1312.

郭帅男, 唐诗, 孙启明, 等. 金属增材工艺裂缝缺陷的脉冲光声检测技术[J]. 光电子·激光, 2021, 32(12): 1307-1312.

[4] JAGDHEESH R, PATHIRAJ B, KARATAY E, et al. Laser-induced nanoscale superhydrophobic structures on metal surfaces[J]. Langmuir, 2011, 27: 8464-8469.

[5] WU B, ZHOU M, LI J, et al. Superhydrophobic surfaces fabricated by micro structuring of stainless steel using a femtosecond laser[J]. Applied Surface Science, 2009, 256: 61-66.

[6] FENG X L, ZHANG X, JI J C, et al. Study on absorption characteristics of perovskite materials based on nanocone structure[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2020, 31(3): 293-298.

冯小路, 张旭, 姬进才, 等. 基于纳米锥结构的钙钛矿材料吸收特性研究[J]. 光电子·激光, 2020, 31(3): 293-298.

[7] LIANG W L, NGOI B K A, LIM L E N, et al. Micromachining of circular ring microstructure by femtosecond laser

- pulses[J]. Optics & Laser Technology, 2003, 35(4): 285-290.
- [8] ZAIFUDDIN A Q, AIMAN M H, QUAZI M M, et al. Effect of laser surface modification (LSM) on laser energy absorption for laser brazing[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, July 30-31, Kuantan, Malaysia. England: IOP Publishing, 2020, 788:12013.
- [9] RONG W, ZHANG H, MAO Z, et al. Stable drag reduction of anisotropic superhydrophobic/hydrophilic surfaces containing bioinspired micro/nanostructured arrays by laser ablation[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 622:126712.
- [10] MILLES S, VOISIAT B, NITSCHKE M, et al. Influence of roughness achieved by periodic structures on the wettability of aluminum using direct laser writing and direct laser interference patterning technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 270:142-151.
- [11] MOUAHARJAN N, ZHOU W, ZHOU Y, et al. Ablation morphology and ablation threshold of Ti-6Al-4V alloy during femtosecond laser processing[J]. Applied Physics A, 2018, 124(8):1-10.
- [12] KANG D, ZOU P, WANG W, et al. A lens ultrasonic vibration-assisted laser machining system for laser polishing and laser drilling of 304 stainless steel[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 144:107419.
- [13] YI Z, SONG C, ZHANG G, et al. Microstructure and wear property of ZrO_2 -added NiCrAlY prepared by ultrasonic-assisted direct laser deposition[J]. Materials, 2021, 14(19): 5785.
- [14] XIA K, REN N, WANG H, et al. Analysis for effects of ultrasonic power on ultrasonic vibration-assisted single-pulse laser drilling[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 110: 279-287.
- [15] ALAVI S H, HARIMKAR S P. Melt expulsion during ultrasonic vibration-assisted laser surface processing of austenitic stainless steel[J]. Ultrasonics, 2015, 59:21-30.
- [16] WANG Y, ZHANG M Y, YIN J, et al. Effect of ultrasonic vibration-assisted laser treatment on surface roughness and wettability of aluminum[J]. Optics and Laser Technology, 2022, 150:107969.
- [17] PANDA D K. Study of thermal stresses induced surface damage under growing plasma channel in electro-discharge machining [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 202(1-3):86-95.
- [18] BRENT A D, VOLLER V R, REID K T J. Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: application to the melting of a pure metal [J]. Numerical Heat Transfer, Part A Applications, 1988, 13(3):297-318.
- [19] ZHANG T, NI X, LU J. Modeling of dynamic process in the laser-off period during laser drilling [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(8):081403.
- [20] GRAGOSSIAN A, TAVASSOLI S H, SHOKRI B. Laser ablation of aluminum from normal evaporation to phase explosion [J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105: 103304.

作者简介:

王 岩 (1985—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事先进材料精密制造与特种加工方面的研究。