

Ti6Al4V 合金毫秒激光打孔重铸层的形成机制

张廷忠^{1,2}, 张 冲¹, 李 晋², 张宏超^{1*}, 陆 健¹

¹南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094;

²周口师范学院机械与电气工程学院, 河南 周口 466001

摘要 Ti6Al4V 合金在毫秒激光打孔过程中, 沿孔壁会形成严重影响成品性能的重铸层。考虑熔体受到的热学和力学等方面的影响, 基于修改的流体力学方程和改进的水平集法, 建立了激光打孔的固/液/气三相二维数值计算模型, 在单脉冲能量为 3 J 的条件下, 对不同脉宽参数的激光打孔进行数值研究。运用后处理技术提取了打孔过程中重铸层的温度场、流场和厚度分布情况。结果表明, 蒸发和喷溅是熔体排除的主要方式, 重铸层是在热-力耦合作用下形成的。重铸层的厚度随激光脉宽的增大而增加, 并呈现从孔口到孔底逐渐变薄的特征。

关键词 激光技术; 激光打孔; 重铸层; 水平集法; Ti6Al4V 合金; 毫秒激光

中图分类号 O437 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0214001

Formation Mechanism of Recast Layer in Millisecond Laser Drilling of Ti6Al4V Alloys

Zhang Tingzhong^{1,2}, Zhang Chong¹, Li Jin², Zhang Hongchao¹, Lu Jian¹

¹School of Science, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

²College of Mechanical and Electrical Engineering, ZhouKou Normal University, Zhoukou, Henan 466001, China

Abstract During the process of millisecond laser drilling of Ti6Al4V alloys, the recast layer forms along hole walls, which is a serious detriment to hole quality. In consideration of the thermal and mechanical parameters influencing melt and based on the modified equations of fluid mechanics and improved Level-Set method, a solid/liquid/gas three-phase two dimensional numerical model is constructed used for laser drilling. The numerical investigation of laser drilling with different pulse widths and with single pulse energy of 3 J is conducted. The temperature field, flow field, and thickness distribution of recast layer during the drilling process are obtained by using the post-processing technology. The results indicate that molten liquid is discharged mainly by means of evaporation and ejection and the recast layer is formed under the coupling effect of heat and force. The recast layer thickness increases with the increment of laser pulse width, which possesses a characteristic of recast layer becoming thin slowly from top hole to bottom hole.

Key words laser technique; laser drilling; recast layer; Level-Set method; Ti6Al4V alloy; millisecond laser

OCIS codes 140.3390; 140.6810

1 引 言

Ti6Al4V(TC4, 6%、4%分别指对应组分所占的质量分数)合金具有比强度高、耐腐蚀性好、耐高温性强等优点, 广泛应用于航空发动机叶片等高温零部件的制造。由于零部件工作时需要承受几百摄氏度的高温,

收稿日期: 2016-07-15; **收到修改稿日期:** 2016-10-01

基金项目: 国家自然科学基金(61405147)、江苏省自然科学基金(BK20130751)、江苏省普通高校研究生科研创新计划(KYLX_0341)

作者简介: 张廷忠(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事脉冲激光打孔过程数值模拟方面的研究。

E-mail: zhangtingzhong0814@126.com

导师简介: 陆 健(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: lujian@njjust.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: hongchao163@163.com

因此需要通过大量冷却孔使其降温。TC4 合金是一种典型的难加工材料,传统打孔工艺容易导致刀具严重磨损,在钻孔过程中还会引起母材抗疲劳性能和抗应力腐蚀性能降低。激光打孔具有非接触、零磨损、高效节能等优点。毫秒长脉冲激光^[1-2]具有单脉冲能量大、能量耦合效率高和加工速度快等优点,适用于工业 TC4 合金的加工。在毫秒激光脉冲打孔过程中,母材受到高能量激光束的辐照,受辐照区域材料出现升温、熔化、蒸发及喷溅等现象,继而成孔,整个过程中几乎没有等离子体产生^[1]。

在毫秒激光脉冲打孔过程中,孔内金属蒸气和熔融液体(熔体)存在着剧烈而复杂的质量、能量传递及耦合作用。一部分熔体在金属蒸气的反冲压力作用下以喷溅方式排除,喷溅物直接影响小孔表面光洁度;未被完全排除的熔体黏附在孔壁上形成重铸层^[3],并产生热应力诱发微裂纹,微裂纹向母体蔓延最终导致叶片整体断裂,造成十分严重的后果。因此,开展喷溅和重铸层的形成机理研究对于提高打孔质量至关重要。有关喷溅研究的报道^[4-5]较多,理论和实验研究也较为成熟。Low 等^[6]预先在母材表面涂抹一层复合材料,有效地减弱了喷溅及堆积程度。国内外学者开展了诸多关于合金毫秒脉冲激光打孔过程中重铸层的实验研究^[6-7],探讨了各类辅助气体对毫秒激光作用过程的辅助作用^[8]、成孔机制^[9],以及毫秒激光打孔过程中重铸层的去除方法等^[10-11]。Bandyopadhyay 等^[12]运用田口法开展了 Nd:YAG 激光打孔 TC4 合金板的系列研究,认为脉宽对重铸层的形成起关键作用,激光束聚焦在工件上表面时成孔质量最理想。宋林森等^[13-15]基于热传导方程建立了激光打孔的数值模型,分析了小孔的温度场,认为母材热传导造成的能量损失对重铸层厚度的减小有积极影响,但建立的数值模型没有考虑熔体的流动。文献^[16]显示熔体的流动特性对重铸层的形成有重要影响。Ki 等^[17]通过水平集(Level-Set)法建立了连续激光辐照薄铁板的数学模型,提出了液化层的概念,并认为液化层厚度随激光能量密度的提高而变薄。Otto 等^[18]基于流体力学方程建立了纳秒激光焊接不锈钢的流体动力学模型,并分析了熔体的动力学特性。Pang 等^[19-21]基于改进的反冲压强模型,模拟和讨论了连续激光深熔焊接过程中环境气压和焊接速度对熔体流动及熔池形貌的影响。然而,毫秒激光打孔过程中重铸层的形成机理尚不清楚,有待进一步研究。

本文基于改进的流体力学方程和 Level-Set 法建立了毫秒激光打孔的二维数值模型,采用后处理技术展示了毫秒激光打孔过程中重铸层的形成过程。以 TC4 合金为试件进行了激光打孔的相关研究,并验证了模型的准确性。温度场的实验测量结果与数值模拟结果相吻合,进一步证明了理论分析的可靠性。研究结果对更加全面地理解和优化激光加工工艺具有一定的参考意义。

2 物理模型

建立物理模型时,假设流动的熔体及气体分别是不可压缩的牛顿流和层流;流体密度在浮力项中采用布辛涅斯克近似,其余项为常数。为进一步简化模型,忽略等离子体的产生,金属蒸气被认为是理想气体且对入射光束透明,可以忽略光束在孔内的多重反射。

激光打孔过程如图 1 所示。打孔过程中激光束辐照到 TC4 合金母材表面,母材吸收激光脉冲能量后温度升高,固态金属熔化形成熔体,熔体继而发生对流、辐射、热传导和气化现象。在反冲压力、表面张力、马兰戈尼力等耦合作用下,熔体发生流动、外溢和喷溅等现象,由此形成小孔。为了揭示激光与母材的作用机制,修改的控制方程如下。

连续性方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \dot{m} \delta(\varphi) \left(\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_l} \right), \quad (1)$$

式中 \mathbf{u} 为速度矢量, \dot{m} 为与压强和温度相关的蒸发率^[22], $\delta(\varphi)$ 为单位冲击函数, ρ_v 和 ρ_l 分别为气体和液体密度。传统的连续性方程右端为 0,修改后的连续性方程考虑了蒸发造成的质量损失,在右端引入了源项,单位冲击函数作用是保证气相为 1,固、液两相及糊状区均为 0。

纳维-斯托克斯方程:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot \{-p\mathbf{I} + \mu[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T]\} - \rho \mathbf{g} + \rho(T - T_m) \mathbf{g} \beta + K \mathbf{u} - \delta(\varphi)(P_s \mathbf{n} + P_m \hat{\boldsymbol{\omega}} + P_r \mathbf{n} + P_l \mathbf{n}), \quad (2)$$

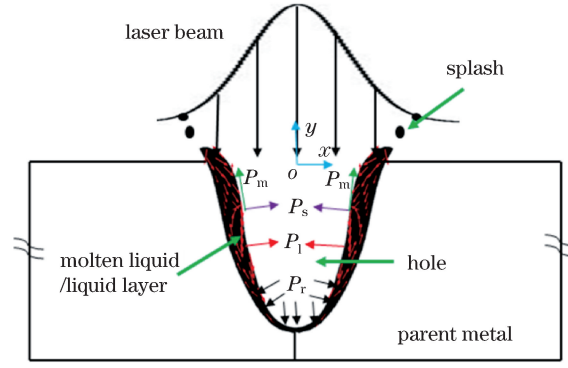


图 1 激光打孔过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser drilling process

式中 ρ 为流体混合密度, μ 为动力学黏度, p 为压强, \mathbf{I} 为单位矩阵, \mathbf{g} 为重力加速度矢量, K 为糊状区摩擦耗散系数, β 为热膨胀系数, T 为温度, T_m 为熔点温度, \mathbf{n} 和 $\hat{\boldsymbol{\omega}}$ 分别为液/气交界面的法向和切向矢量; 表面张力 $P_s = \sigma\kappa$, 马兰戈尼力 $P_m = -\frac{\partial\sigma}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial|\hat{\boldsymbol{\omega}}|}$, 反冲压力 $P_r = 0.54P_{sat}$, 流体静压力 $P_l = \rho_l|\mathbf{g}| \times |y|$, 其中 σ 为表面张力系数, κ 为表面曲率, P_{sat} 为饱和蒸气压强^[22], y 为纵坐标。 $\rho(T - T_m)\mathbf{g}\beta$ 、 $K\mathbf{u}$ 、 $\delta(\varphi)(P_s\mathbf{n} + P_m\hat{\boldsymbol{\omega}} + P_r\mathbf{n} + P_l\mathbf{n})$ 分别表示浮力, 固、液糊状区耗散力和液/气交界面作用力, 通过在控制方程中添加源项的方法使仿真更接近激光与物质实际作用过程。

能量方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + \delta(\varphi) [\alpha Q - \dot{m} L_v - h_c (T - T_0) - \epsilon k_b (T^4 - T_0^4)], \quad (3)$$

式中 k 为导热系数, α 为激光吸收, L_v 为气化潜热, h_c 为对流传热系数, ϵ 为表面发射率, k_b 为玻尔兹曼常数, C_p 为等效比热容, Q 为激光热源。(3)式右端第二项是新增源项, 包含吸收的激光光束能量、蒸发物质带走的热量损失、对流和黑体辐射造成的热量损失。

Level-Set 方程:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \varphi = \gamma_{ls} \left\{ \nabla \cdot \left[\varphi(1 - \varphi) \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \right] - \epsilon_{ls} \nabla \cdot \nabla \varphi \right\} + \dot{m} \delta(\varphi) \left(\frac{\varphi}{\rho_l} + \frac{1 - \varphi}{\rho_v} \right), \quad (4)$$

式中 φ 为 Level-Set 变量, γ_{ls} 为边界层厚度, ϵ_{ls} 为初始化值, t 为时间。 $\dot{m} \delta(\varphi) \left(\frac{\varphi}{\rho_l} + \frac{1 - \varphi}{\rho_v} \right)$ 是考虑蒸气喷射造成的质量损失而引入的源项, 源项的引入有利于液/气交界面更精确的追踪。

实验中激光聚焦在母材上表面, 激光能量可看作面热源且呈空间高斯分布:

$$Q = \frac{2I_0}{\pi r_b^2} \exp\left(-\frac{2x^2}{r_b^2}\right) g(t), \quad (5)$$

式中 I_0 是激光峰值功率; $r_b = r_0 \sqrt{1 + [y\lambda / (\pi r_0^2)]^2}$ 是光斑半径, 其中 r_0 是焦斑半径, λ 是激光光束波长, 其值为 1064 nm; 时间函数 $g(t)$ 为顶帽型分布, 满足

$$\begin{cases} g(t) = 1, & t \leq \tau \\ g(t) = 0, & t > \tau \end{cases}, \quad (6)$$

式中 τ 是激光脉宽。

在气、液交界自由表面上, 考虑蒸发、对流以及辐射造成的热量损失, 有

$$-k \nabla T = \alpha Q - \dot{m} L_v - h_c (T - T_0) - \epsilon k_b (T^4 - T_0^4), \quad (7)$$

计算区域的其他边界因远离热源而认为绝热, 则 $-k \nabla T = 0$ 。

在气、液交界面区域, 流体动力学边界条件为:

$$-p\mathbf{I} + 2\mu \nabla \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = P_s \mathbf{n} + P_m \hat{\boldsymbol{\omega}} + P_r \mathbf{n} + P_l \mathbf{n}. \quad (8)$$

在其他计算区域, 母材和空气的初始压强分别为 $P = 0$ 和 $P = P_0$, 初始速度 $\mathbf{u} = 0$ 。

3 结果与讨论

实验运用单脉冲能量为 3 J 的毫秒激光对 TC4 合金试件进行沿 $-y$ 方向的打孔,如图 1 所示。TC4 合金化学成分见表 1。选用分区域划分网格技术进行网格剖分,网格大小分布如图 2 所示,其中空气-母材初始界面(作用过程的自由表面)网格最密,最大网格尺寸为 0.01 mm;空气和母材中间区域网格稍密,最大网格尺寸分别为 0.02 mm 和 0.03 mm;其他远处区域网格稀疏。计算区域大小为 2 mm \times 2 mm,总的计算自由度为 48956,设置计算时间步长和求解时间分别为 0.001 ms 和 1 ms,利用计算机运行计算所用时间约为 70 h。计算中用到的具体物性参数和模拟中采用的毫秒激光参数分别见表 2、3。

表 1 TC4 合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical elements of TC4 alloy (mass fraction, %)

Element	Al	C	V	H	Fe	N	O	Ti
Content	6.0900	0.0100	4.0200	0.0100	0.0022	0.0070	0.1170	Bal.

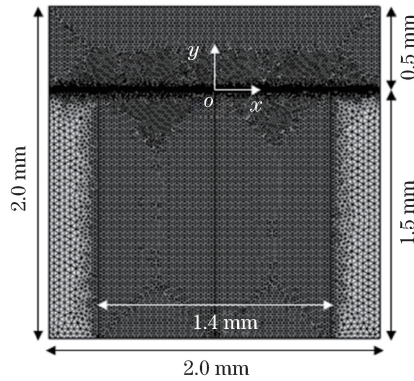


图 2 计算区域的网格剖分

Fig. 2 Mesh generation of computational domain

表 2 TC4 合金物性参数

Table 2 Physical parameters of TC4 alloy

Property	Content
Melting point T_m / K	1928
Boiling point T_v / K	3315
Liquid density $\rho_l / (kg \cdot m^{-3})$	4000
Latent heat of fusion $L_m / (J \cdot kg^{-1})$	2.86×10^5
Latent heat of evaporation $L_v / (J \cdot kg^{-1})$	2.84×10^7
Thermal conductivity of solid $k_s / (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	21
Thermal conductivity of liquid $k_l / (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	29
Heat capacity of solid $/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	670
Heat capacity of liquid $/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	730
Absorption coefficient of laser beam α	0.24
Surface emissivity ϵ	0.80
Heat convection coefficient $h_c / (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	10
Atmospheric pressure p_0 / Pa	1.01×10^5
Boltzmann constant $k_b / (J \cdot K^{-1})$	1.38×10^{-23}
Dynamic viscosity $\mu / (Pa \cdot s)$	0.005
Coefficient of thermal expansion β / K^{-1}	8×10^{-6}
Coefficient of surface tension $\sigma / (N \cdot m^{-1})$	$1.557 - 1.5 \times 10^{-4} \times (T - T_m)$

表 3 激光参数

Table 3 Laser parameters

Parameter	Content				
	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5
Pulse width τ /ms	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
Pulse energy /J	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Spot radius /mm	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

3.1 打孔温度场、流场、孔的演化及重铸层的生长过程

当脉宽为 1 ms 时,毫秒激光打孔过程中模拟得到的孔及母材的温度场变化情况如图 3、4 所示。当激光作用时间为 0.1 ms 时,母材受辐照区域温度升高至熔点、沸点,材料发生熔化、气化和喷溅等现象;金属蒸气在内外压强差的作用下迅速膨胀并逆着激光入射方向传播使母材凹陷,初步形成如图 3(a)、4(a)所示的小孔。当激光作用时间为 0.5 ms 时,小孔形成并已经向母材纵深处延伸了一定距离,孔内及孔口外围充斥着图 3(b)所示的大量高温高压的金属蒸气,从图 4(b)中可以看出喷溅持续进行。激光持续辐照使得金属气化持续进行,因此孔内金属蒸气一直维持在沸点附近;溢出孔外的金属蒸气受到对流和辐射等冷却作用,因此温度由远及近逐渐降低;因为孔壁熔体的质量和热量发生剧烈传递,而温度一直维持在沸点 3300 K 附近,所以母材也有不同程度的温升,此实验现象与文献[19-20]报道一致。当激光作用结束时,孔深及母材热影响区域达到最大,如图 4(c)所示;气化的高温高压金属蒸气不但充斥了整个小孔,而且也弥漫到图 3(c)所示的整个计算区域。整个激光作用过程中金属蒸气迅速膨胀,发生质量、热量传递作用后,孔壁周围毗邻区域温度超过沸点、熔点,孔壁一直黏附着一层过热熔体并逐渐变厚。一部分熔体在金属蒸气的反冲压力作用下以喷溅方式排除,未被排除的熔体冷却后会黏附在孔壁形成重铸层。

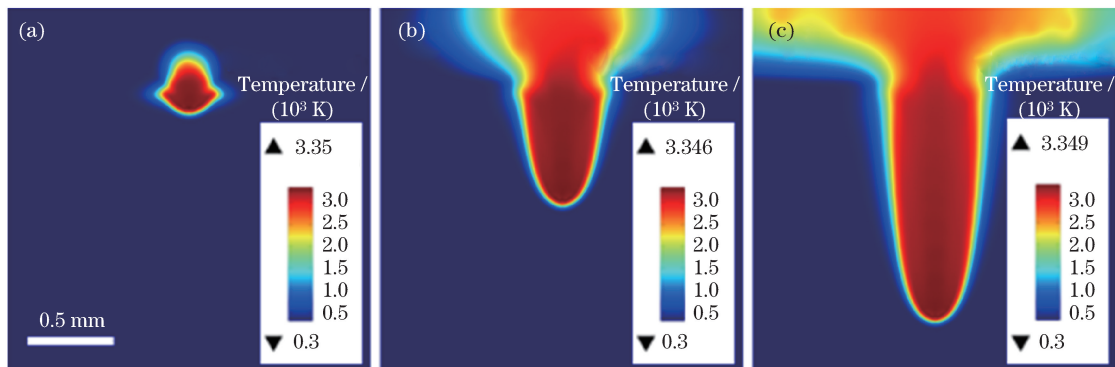


图 3 当脉宽为 1.0 ms 时,毫秒激光打孔过程孔温度场。(a) $t=0.1$ ms; (b) $t=0.5$ ms; (c) $t=1.0$ ms

Fig. 3 Temperature field of hole during millisecond laser drilling process with pulse width of 1.0 ms.

(a) $t=0.1$ ms; (b) $t=0.5$ ms; (c) $t=1.0$ ms

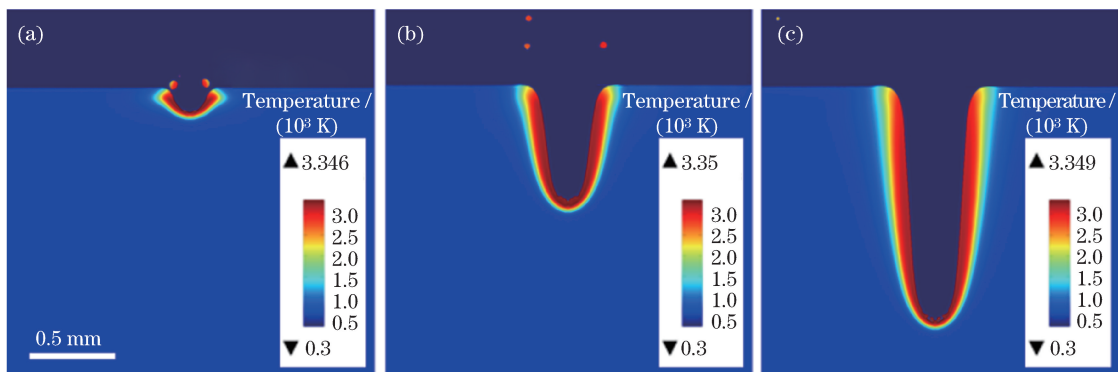


图 4 当脉宽为 1.0 ms 时,毫秒激光打孔过程母材温度场。(a) $t=0.1$ ms; (b) $t=0.5$ ms; (c) $t=1.0$ ms

Fig. 4 Temperature field of parent metal during millisecond laser drilling process with pulse width of 1.0 ms.

(a) $t=0.1$ ms; (b) $t=0.5$ ms; (c) $t=1.0$ ms

当脉宽为 1 ms 时,模拟得到的毫秒激光打孔过程中孔内熔体流场的变化情况如图 5 所示。当激光作用时间为 0.1 ms 时,熔池初步形成,熔体厚度和流速分布不均匀。底部最薄和顶部最厚处熔体厚度约为 $10\ \mu\text{m}$ 和 $36\ \mu\text{m}$,且伴有熔体外溢和喷溅现象(白色点线为母材上表面);液滴喷溅速度约为 $100\ \text{mm/s}$,熔体最大流速达到了 $274\ \text{mm/s}$ 。当激光作用时间为 0.5 ms 时,熔体厚度差异减小,可分为弧状熔体和线状熔体。底部弧状熔体平均厚度约为 $16\ \mu\text{m}$,流动速度约为 $100\ \text{mm/s}$;两壁线状熔体平均厚度约为 $38\ \mu\text{m}$,流动速度约为 $312\ \text{mm/s}$ 。当激光作用结束时,熔体厚度和流速均达到最大,两壁线状熔体平均厚度达到 $50\ \mu\text{m}$,流动速度最大达到 $397\ \text{mm/s}$;底部弧状熔体平均厚度约为 $18\ \mu\text{m}$,流动速度约为 $150\ \text{mm/s}$ 。激光作用过程中熔体厚度和流动速度一直递增,得益于激光光束的持续辐照和热腐蚀的持续作用;当无后续激光能量输入时,熔体很快冷却,厚度不再变化^[15]。因此,此时熔体厚度可认为是重铸层的厚度,熔体流速可表征脉宽参数对熔体流动的影响。

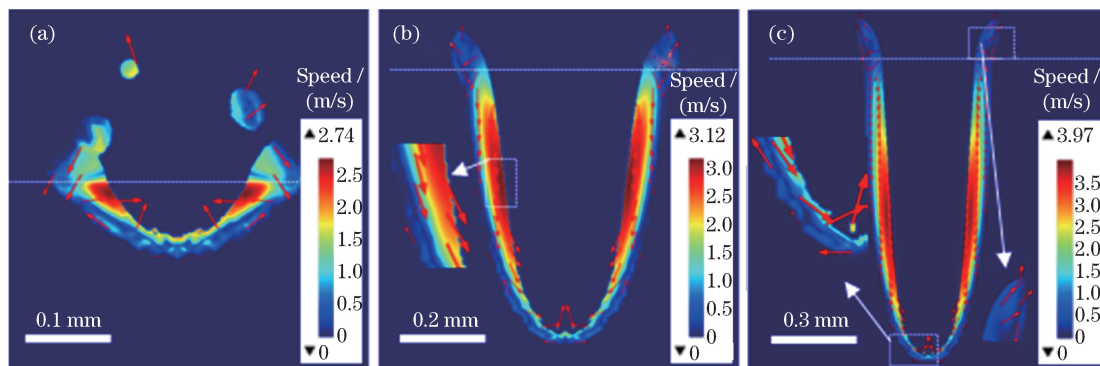


图 5 当脉宽为 1.0 ms 时,毫秒激光打孔过程熔体流场。(a) $t=0.1\ \text{ms}$; (b) $t=0.5\ \text{ms}$; (c) $t=1.0\ \text{ms}$

Fig. 5 Flow field of melt during millisecond laser drilling process with pulse width of 1.0 ms.

(a) $t=0.1\ \text{ms}$; (b) $t=0.5\ \text{ms}$; (c) $t=1.0\ \text{ms}$

熔体的流动特性受多重因素影响。底部弧状熔体直接受到激光辐照产生的蒸气喷射的反冲压力作用并沿孔壁上流,当反冲压力大于表面张力时依次发生破碎、分离、喷溅现象^[23],如图 4、5 所示,孔壁线状熔体在力耦合作用下沿壁下流。由于温度梯度较大,因此孔口溢出的熔体主要受马兰戈尼力和表面张力的作用,在马兰戈尼力作用下溢出熔体的端部较尖,在表面张力作用下其收缩于孔外形成环形堆积。熔体的速度受耗散力影响表现为熔体内层速度大,外层速度小;熔体厚处速度大,薄处速度小。这主要是因为熔体所受耗散力与液体体积分数紧密相关。

当脉宽为 1 ms 时,模拟得到的毫秒激光打孔过程中孔的变化情况如图 6 所示。当激光作用时间为 0.1 ms 时,小孔初步形成,小孔的直径和深度分别为 0.3 mm 和 0.1 mm。当激光作用时间为 0.5 ms 时,小孔直径达到了 0.5 mm,深度增大到 0.65 mm。当激光作用结束时,孔径为 0.6 mm,孔深为 1.35 mm 左右,小

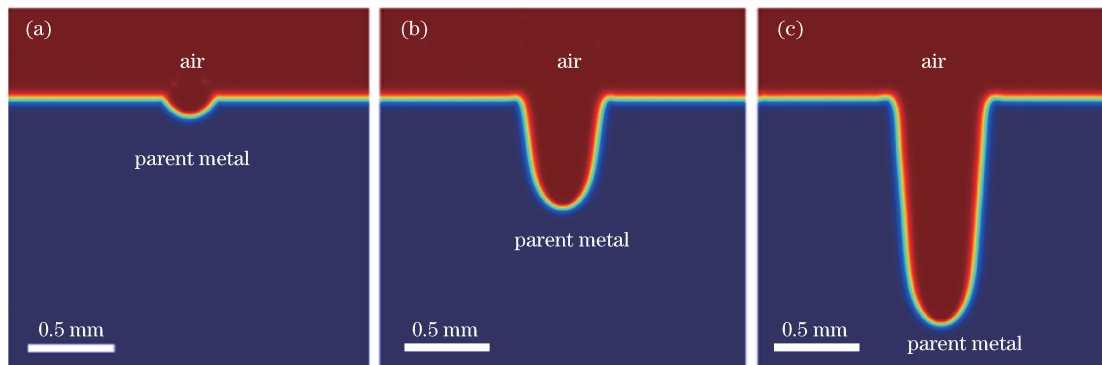


图 6 当脉宽为 1.0 ms 时,毫秒激光打孔过程孔的形貌。(a) $t=0.1\ \text{ms}$; (b) $t=0.5\ \text{ms}$; (c) $t=1.0\ \text{ms}$

Fig. 6 Morphology of hole during millisecond laser drilling process with pulse width of 1.0 ms.

(a) $t=0.1\ \text{ms}$; (b) $t=0.5\ \text{ms}$; (c) $t=1.0\ \text{ms}$

孔基本稳定。由此可以看出,在激光作用过程中,孔径和孔深逐渐增加。综合分析温度场和流场的模拟结果可知,激光打孔过程中材料主要是通过蒸发和喷溅两种方式排除,未完全排除的熔体黏附在孔壁形成重铸层。熔体受到力耦合作用而流动平缓、延展性好,孔壁较为平滑,从而避免了凸起或塌陷现象的产生^[24]。

3.2 脉宽对脉冲激光打孔过程的影响

3.2.1 脉宽对熔体速度的影响

图 7 是不同脉宽下单脉冲作用结束时熔体的流场,脉宽为 0.5, 1.5, 2.5 ms 时,熔体最大速度分别为 334, 408, 385 mm/s。结合图 7 和图 5(c)可以看出,熔体的最大流速与脉宽关系复杂。一方面,脉宽越短,脉冲峰值功率越高,熔体获得的反冲动量越大,流速就越大;另一方面,脉宽越短,作用越急促,熔体的质量和热量传递受限制,热腐蚀区域越小,熔体层就越薄;液体体积分数越小且流体速度梯度越大,液体所受耗散力及流体粘性力越大,速度就越小。可见,熔体的流速是受热和力共同作用的。

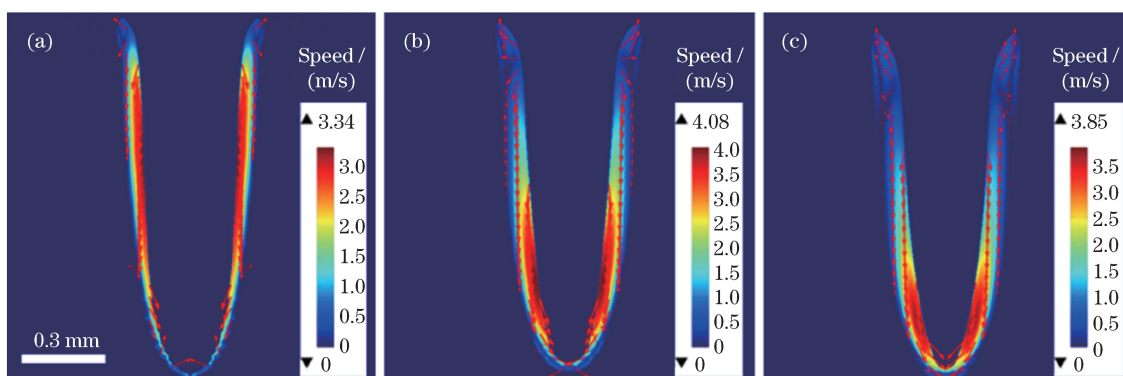


图 7 在不同脉宽下,单脉冲作用结束时的流动场。(a) $\tau=0.5$ ms; (b) $\tau=1.5$ ms; (c) $\tau=2.5$ ms

Fig. 7 Flow field after single pulse action under different pulse widths. (a) $\tau=0.5$ ms; (b) $\tau=1.5$ ms; (c) $\tau=2.5$ ms

3.2.2 脉宽对重铸层厚度的影响

在不同脉宽下,打孔模拟结束后残余熔体的形貌如图 8 所示,脉宽为 0.5, 1.5, 2.5 ms 时孔壁线状熔体平均厚度分别为 42, 64, 75 μm , 下部弧状熔体平均厚度分别约为 15, 20, 32 μm 。脉宽对熔体厚度的影响如图 9 所示,由于残余熔体冷却凝固后会形成重铸层,因此残余熔体的厚度反映了打孔后形成的重铸层的厚度。可以发现,脉宽越小,打孔后形成的重铸层厚度就越薄。

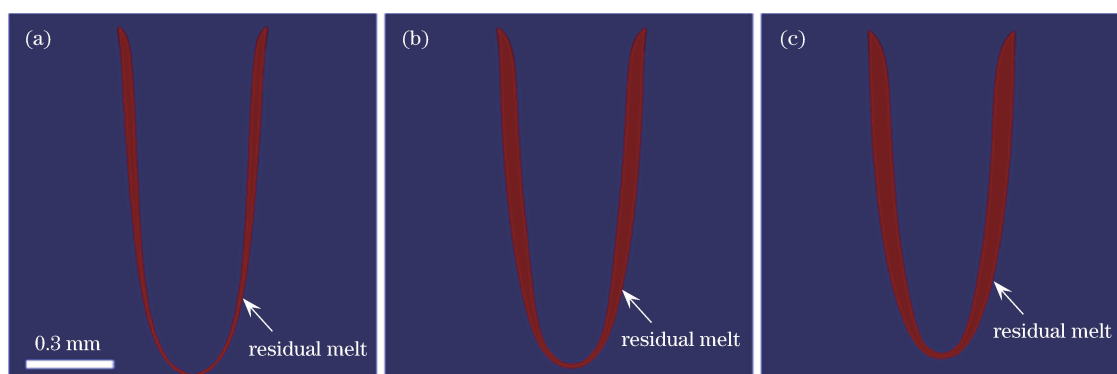


图 8 在不同脉宽下,打孔后的残余熔体。(a) $\tau=0.5$ ms; (b) $\tau=1.5$ ms; (c) $\tau=2.5$ ms

Fig. 8 Residual melt after drilling under different pulse widths.

(a) $\tau=0.5$ ms; (b) $\tau=1.5$ ms; (c) $\tau=2.5$ ms

3.3 实验验证

选取 1.5 mm 厚的 TC4 合金作为试件,用脉宽为 1.0 ms 的激光脉冲进行打孔实验。样品经过线切割、砂纸打磨、超声波清洗和机械抛光等技术处理后,分别采用光学显微镜和电子显微镜进行取样观测,图 10 为实验结果与模拟结果的比较。由图 10(a)中的模拟结果可得,孔开口处(标 2)重铸层的厚度约为 51 μm ,孔

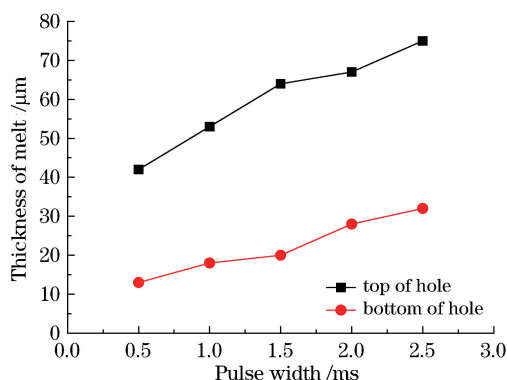


图 9 残余熔体厚度

Fig. 9 Thickness of residual melt

底部(标 1)重铸层厚度约为 18 μm。实验所测得的孔开口处和孔底部重铸层的厚度约为 50 μm 和 20 μm。数值仿真结果和实验结果吻合较好,从而证明了分析结果的可靠性,研究结果同样与文献[25]报道相一致。实验中因无法测量孔内温度而无法通过实验验证模拟结果,但是通过使用高速测温仪测量了靶材上表面中心位置(坐标原点 O)的温度,并与数值模拟结果相比较,结果如图 11 所示(实验中设置的测温仪发射率与模拟相同)。实验过程中会出现蒸发、液滴或粒子喷溅排除,所以测量的温度有些波动,但总体趋势与数值结果吻合,验证了上述温度场仿真并进一步证明了模拟结果的正确性。

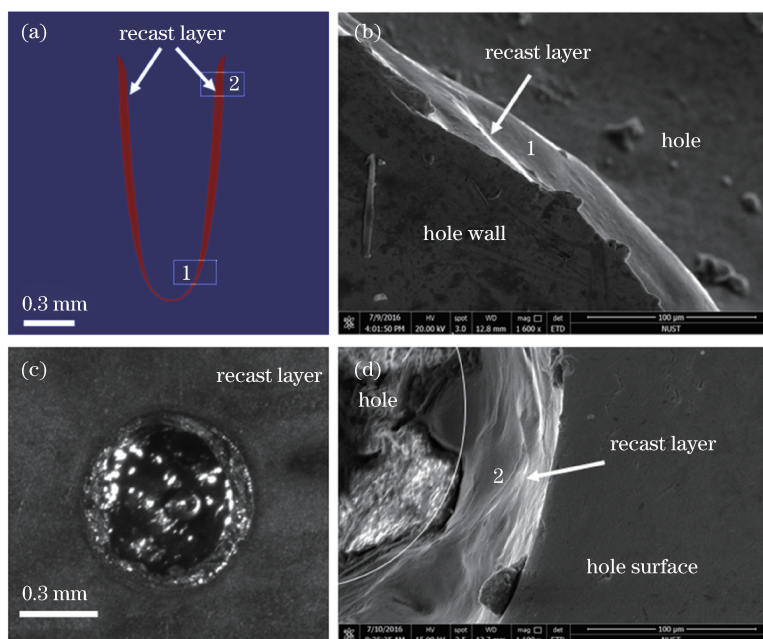


图 10 脉宽为 1.0 ms 时的重铸层形貌。(a) 模拟结果; (b)(c)(d) 实验结果

Fig. 10 Morphology of recast layer with pulse width of 1.0 ms. (a) Simulation result; (b)(c)(d) experimental results

3.4 分析与讨论

综上所述,在毫秒激光脉冲打孔过程中,受辐照区域材料吸收激光光束能量后温度升高;当材料温度达到熔点时,熔化现象发生,熔体出现;随着激光能量的进一步积聚,熔体发生气化现象,蒸气产生的反冲压力作用于熔体使其排除,小孔形成。在小孔形成过程中,部分熔体通过蒸发方式排除,部分熔体通过喷溅方式排除;未被完全排出的熔体受马兰戈尼力、耗散力、浮力、流体静压力和金属蒸气反冲压力的耦合作用及高温高压金属蒸气的热传递作用,流动平缓,温度恒定于 3300 K 左右。这部分细薄的过热熔体作为新的恒温热源对孔壁毗邻材料持续进行热腐蚀,使其产生温升继而熔融,这导致熔体层进一步增厚并最终冷却形成重铸层。基于热腐蚀理论,重铸层厚度近似满足关系式

$$L = 2\sqrt{Dt}, t \leq \tau, \quad (9)$$

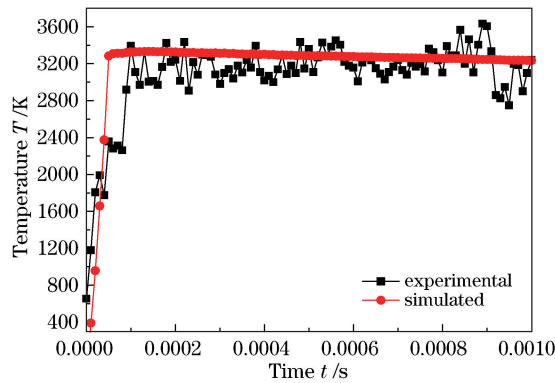


图 11 激光打孔过程中,靶材上表面中心处的模拟温度与实验温度对比

Fig. 11 Comparison between simulated temperature and experimental temperature at the center of top surface of target material during laser drilling process

式中 L 为重铸层厚度, D 为材料热扩散系数。由(9)式可以看出,在材料参数 D 相同的情况下,脉宽 τ 越大,激光作用过程热腐蚀时间 t 越长,形成的重铸层厚度 L 就越大,且孔壁周围黏附的重铸层厚度分布不均匀。打孔过程是激光光束由孔口向孔底部逐渐传输的过程,孔壁上部熔体因热腐蚀时间长而较厚,孔底部熔体因热腐蚀时间短而较薄,所以熔体冷却后形成的重铸层表现出从孔入口到孔底部逐渐变薄、孔底部最薄的特征。

4 结 论

采用数值模拟和实验相结合的方法,分析了重铸层的形成机制,研究表明,蒸发和喷溅是熔体排除的两种主要方式,重铸层是在热-力耦合作用下形成的。

在毫秒激光打孔过程中,熔体受力耦合作用,流动平缓,孔壁平滑,无凸起或塌陷现象。TC4 合金在毫秒激光脉冲打孔过程中孔壁熔体温度高达 3300 K 左右,过热熔体的热腐蚀作用使得熔体层逐渐增厚,激光作用结束时熔体层最厚并形成重铸层。孔壁重铸层厚度分布不均,重铸层呈现从孔口到孔底逐渐变薄特征,且重铸层厚度随激光脉冲宽度的增大而增加。

参 考 文 献

- [1] 徐至展, 李弘毅, 徐毓光, 等. 强激光束在等离子体中的自聚焦[J]. 中国科学, 1983, (1): 52-56.
- [2] Zhao Shiqiang, Li Ling. Numerical investigation of phase change during thermal ablation of gold films induced by femtosecond laser[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1214001.
赵士强, 李 凌. 飞秒脉冲激光烧蚀金膜的相变传热研究[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1214001.
- [3] Leigh S, Sezer K, Li L, *et al.* Statistical analysis of recast formation in laser drilled acute blind holes in CMSX-4 nickel superalloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 43(11-12): 1094-1105.
- [4] Zhang T Z, Jia Z C, Cui H C, *et al.* Analysis of melt ejection during long pulsed laser drilling[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(5): 054206.
- [5] Voisey K T, Klocker T, Clyne T W. Measurement of melt ejection velocities during laser drilling of steel, using a novel droplet stream interception technique[J]. Acta Materialia, 2002, 50(17): 4219-4230.
- [6] Low D K Y, Li L, Byrd P J. Spatter prevention during the laser drilling of selected aerospace materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 139(1-3): 71-76.
- [7] Duan W Q, Wang K D, Dong X, *et al.* Experimental characterizations of burr deposition in Nd:YAG laser drilling: A parametric study[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(9-12): 1529-1542.
- [8] Yilbas B S, Karatas C, Uslan, *et al.* CO₂ laser gas assisted nitriding of Ti-6Al-4V alloy[J]. Applied Surface Science, 2006, 252(24): 8557-8564.
- [9] Yilbas B S, Sami M. Liquid ejection and possible nucleate boiling mechanisms in relation to the laser drilling process [J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 1997, 30(14): 1996-2005.
- [10] Yang C J, Mei X S, Wang W J, *et al.* Recast layer removal using ultrafast laser in titanium alloy[J]. International

- Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(9-12): 2321-2327.
- [11] Duan W Q, Dong X, Wang K D, *et al.* Effect of temporally modulated pulse on reducing recast layer in laser drilling [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(5): 1641-1652.
- [12] Bandyopadhyay S, Gokhale H, Sundar J K S, *et al.* A statistical approach to determine process parameter impact in Nd:YAG laser drilling of IN718 and Ti-6Al-4V sheets[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2005, 43(2): 163-182.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Zhang Y W, Faghri A. Vaporization, melting and heat conduction in the laser drilling process[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42(10): 1775-1790.
- [16] Hirano K, Fabbro R. Experimental investigation of hydrodynamics of melt layer during laser cutting of steel [J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2011, 44(10): 105502.
- [17] Ki H, Mohanty P S, Mazumder J. Modelling of high-density laser-material interaction using fast level set method[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2001, 34(3): 364-372.
- [18] Otto A, Koch H, Leitz K H, *et al.* Numerical simulations-A versatile approach for better understanding dynamics in laser material processing[C]. Physics Procedia, 2011, 12: 11-20.
- [19] Pang S Y, Chen X, Zhou J X, *et al.* 3D transient multiphase model for keyhole, vapor plume, and weld pool dynamics in laser welding including the ambient pressure effect[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 74: 47-58.
- [20] Pang S Y, Hirano K, Fabbro R, *et al.* Explanation of penetration depth variation during laser welding under variable ambient pressure[J]. Journal of Laser Applications, 2015, 27(2): 022007.
- [21] Fabbro R, Hirano K, Pang S Y. Analysis of the physical processes occurring during deep penetration laser welding under reduced pressure[J]. Journal of Laser Applications, 2016, 28(2): 022427.
- [22] Courtois M, Carin M, Masson P L, *et al.* A new approach to compute multi-reflections of laser beam in a keyhole for heat transfer and fluid flow modelling in laser welding [J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2013, 46(50): 505305.
- [23] Riveiro A, Quintero F, Lusquiños F, *et al.* Study of melt flow dynamics and influence on quality for CO₂ laser fusion cutting[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2011, 44(13): 135501.
- [24] Wei P S, Wu J H, Chao T C, *et al.* Keyhole collapse during high intensity beam drilling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 79: 300-308.
- [25] Bandyopadhyay S, Sundar J K S, Sundararajan G, *et al.* Geometrical features and metallurgical characteristics of Nd:YAG laser drilled holes in thick IN718 and Ti-6Al-4V sheets [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 127(1): 83-95.