

镍基高温合金纳秒激光脉冲制孔再铸层形成过程数值模拟

罗 垚¹ 庞盛永¹ 周建新¹ 李怀学²

(¹ 华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

² 北京航空制造工程研究所, 北京 100024

摘要 镍基高温合金纳秒脉冲激光制孔过程中, 会沿孔壁形成一层再铸层, 严重影响合金的使用寿命。考虑了熔体内热对流和热传导作用, 以及反冲压力、表面张力、热毛细力等因素的影响, 建立了镍基高温合金纳秒脉冲激光制孔的三维数学模型。开展了脉冲能量为 24 mJ 时, 各脉宽参数下纳秒脉冲激光制孔的数值模拟研究。模拟结果与实验吻合较好。结果表明再铸层是由热和力共同作用下形成的。制孔过程中, 孔壁温度很高, 最高温度达到 3200 K 以上, 孔壁温度分布不均匀; 反冲压力是引起熔体流动的重要因素, 反冲压力导致的熔体流动速度很大, 脉宽 200 ns 时, 最大可达到 60 m/s; 并且由于表面张力的影响, 孔壁会出现许多不规则的凹陷和凸起。由于熔体在孔开口处的对流作用, 导致再铸层厚度在开口处最大。脉宽对熔体流动和再铸层的形成具有重要影响, 脉宽越小, 熔体速度越大, 流动越剧烈, 制孔后形成的再铸层厚度越薄。

关键词 激光技术; 再铸层形成过程; 数值模拟; 纳秒脉冲激光制孔; 镍基高温合金

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201441.0403007

Numerical Simulation of Recast Layer Formation in Nanosecond Pulse Laser Drilling on Nickel-Based High-Temperature Alloy

Luo Yao¹ Pang Shengyong¹ Zhou Jianxin¹ Li Huaixue²

(¹ State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China
² Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

Abstract During nanosecond pulse laser drilling, recast layer will form along the hole wall, which has a great effect on the quality of nickel-based high-temperature alloy. By considering the heat convection, the heat conduction, and the influence of recoil pressure, surface tension and thermal capillary force, a three dimensional mathematical model of nanosecond pulse laser drilling on nickel-based high-temperature alloy is established. Different pulse parameters of nanosecond pulse laser drilling are simulated when the pulse energy is 24 mJ. The simulated results agree with experimental results. The research shows that the thermal and mechanical effect are all very important to the formation of recast layer. During the drilling process, the temperature of keyhole wall is very high, the maximum of which can reach over 3200 K, and temperature distribution of keyhole wall is not uniform. Besides, recoil pressure is an important factor to cause the melt flow, and the velocity of melt flow caused by recoil pressure is very large, which can come to 60 m/s at peak. Due to the convection of melt in the keyhole's opening, recast layer in this place is the thickest. Laser width has a great effect on the formation of recast layer, the greater pulse width makes the

收稿日期: 2013-08-14; 收到修改稿日期: 2013-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(51105153)、高校博士学科点专项科研基金(20100142110079)、中央高校基本科研业务费专项资金(2011QN082)、华中科技大学人才引进基金(0124110034)

作者简介: 罗 垚(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事脉冲激光制孔过程数值模拟方面的研究。

E-mail: 675285064@qq.com

导师简介: 庞盛永(1982—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师。主要从事材料加工过程数值模拟等方面的研究。

E-mail: spang@hust.edu.cn

bigger recast layer thickness, and the greater melt velocity.

Key words laser technology; recast layer formation process; numerical simulation; nanosecond laser drilling; nickel-based high-temperature alloy

OCIS codes 010.3310; 320.4240

1 引 言

镍基高温合金具有高温性能好、耐热和耐腐蚀等优点,广泛应用于航空发动机涡轮叶片等高温工作零部件的制造^[1-2]。由于发动机涡轮叶片工作温度很高,通常需要在叶片上加工大量的孔以增强叶片的散热性能^[3]。而镍基高温合金是一种典型的难加工材料^[4],采用传统切削工艺进行制孔时,对刀具的切削性要求很高,且加工表面残余应力通常很大。纳秒脉冲激光具有超高速和超高强度的特征^[5],作为制孔热源具有制孔速度快、成本低、效率高、变形小、适用性广等特点,非常适合用于航空工业中加工镍基高温合金。纳秒脉冲激光制孔是通过纳秒脉冲激光与靶材直接作用,利用激光的超高强度,使靶材超过蒸发温度,产生蒸发以及熔体流动,从而达到制孔目的工艺^[6-7]。

纳秒脉冲激光制孔过程中,孔壁上会残留一部分熔体,冷却凝固后会形成再铸层。再铸层冷却速度很快,易导致内部产生微裂纹^[8]。再铸层属于材料上的薄弱环节,再铸层上的微裂纹会降低材料的使用寿命。因此,开展再铸层的研究对于改善制孔工艺具有重要的意义。目前,国内外关于纳秒脉冲激光制孔的实验研究报道较多,开展了各类合金纳秒脉冲激光制孔的实验研究^[9-14],探讨了纳秒脉冲激光的制孔机制^[15-17],各工艺参数对纳秒脉冲激光制孔的影响^[18-19],以及纳秒脉冲激光制孔过程中再铸层的祛除方法^[20]等。但是,关于脉冲激光制孔过程数值模拟方面的研究报道较少,现有数值模拟研究中关于纳秒脉冲激光烧蚀方面的较多^[21-26],相较于制孔过程,烧蚀过程的作用机制相似,只是作用深度较浅,只有几十微米。国内,华中科技大学的赵学民^[27]等研究了膏药在线激光制孔技术,该技术不仅能够实现群孔的加工,而且孔的大小、形状和疏密均可调整。北京航空制造研究所的巴瑞璋^[28]等研究了激光加工密集群孔技术,主要介绍了混合器壳体上孔的激光加工方法和激光制孔工艺参数的选择,对激光工艺的加工效果进行了分析。

激光制孔的速度很快,物理机制复杂,通过实验只能得到制孔结束后孔的形貌,难以准确获得再铸层形成的具体过程。为了更好地研究纳秒脉冲激光

制孔的再铸层形成过程,本文采用数值模拟的方法研究纳秒脉冲激光制孔再铸层形成过程,建立纳秒脉冲激光制孔的数学模型,模拟讨论纳秒脉冲激光制孔中孔和再铸层的形成,以及脉宽参数对制孔过程的影响。该研究可为研究人员更加全面地理解和优化纳秒脉冲激光制孔工艺提供科学的指导。

通常航空发动机上散热的孔是深宽比很大的通孔,但是利用数值模拟技术模拟打这样的通孔时,计算深度较大,计算时间很长,并且通孔击穿过程的模型较为复杂。所以,为了简化模型、减少计算时间,首先建立的模型为盲孔模型。该模型对于研究脉冲激光制孔过程具有一定的指导意义,并且为后续建立深宽比很大的通孔模型提供了理论和实践基础。

2 模型的建立

2.1 物理模型及假设

建立模型时,假设熔体为不可压缩流体,固-液相变时密度不发生显著变化。为了进一步简化模型,无保护气体的吹入,并忽略相爆炸的影响。制孔过程中,镍基高温合金吸收激光脉冲能量,温度升高,固态金属熔化、蒸发,熔体发生热对流和热传导作用。在反冲压力、表面张力、热毛细力的综合作用下,金属熔体发生流动。在蒸发和流动的综合影响下,金属熔体被排出孔外,达到制孔的目的。

2.2 热源模型

由于制孔过程模拟深度较深,若采用面热源,计算时间会非常长。因此,热源采用在深度方向上不断衰减的旋转高斯体热源模型^[29],形状如图1(a)所示。热源功率空间分布 $q(r, z)$ 表达形式为

$$q(r, z) = \frac{9P}{\pi R_0^2 h (1 - e^{-3})} \exp\left[\frac{-9(r^2)}{R_0^2 \ln(h/z)}\right], \quad (1)$$

式中 h 为热源高度, P 为激光热源有效功率, R_0 为热源开口半径, e 为自然常数, r 为点到 z 轴的距离。

热源的时间分布形式如图1(b)所示。有效功率 P 随时间 t 的变化规律为

$$P(t) = \begin{cases} P_0 \exp[-(t - t_0)^2 / \tau^2], & 0 < t < \tau \\ 0, & \tau \leq t \leq c \end{cases} \quad (2)$$

式中 t_0 为初始时间, τ 为脉宽, c 为脉冲激光的周期。

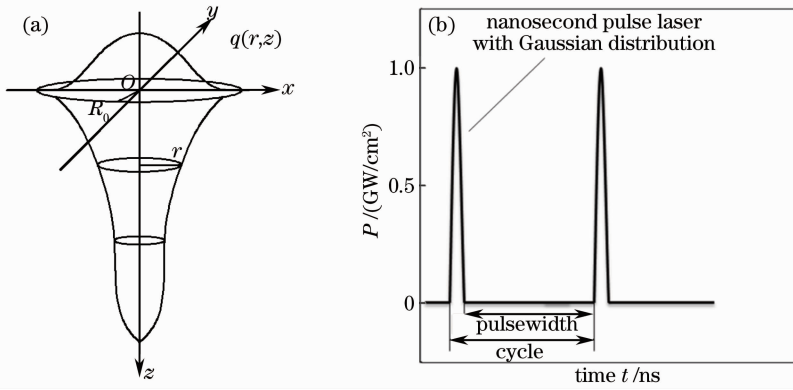


图 1 旋转高斯体模型。(a) 空间分布；(b) 时间分布

Fig. 1 Rotated Gauss body heat source model. (a) Spatial distribution; (b) time distribution

2.3 温度场模型

纳秒脉冲激光制孔过程中,热对流和热传导是影响熔体温度演化的两个非常重要的因素。因此,耦合考虑熔体对流和传导传热的影响,描述制孔过程中的能量守恒方程为

$$\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) T \right] = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q, \quad (3)$$

式中 ρ 为密度, C_p 为比热, k 为导热系数, T 为温度^[30-31], ∇ 是哈密顿算子, \mathbf{U} 为三维速度矢量^[32], Q 为热源项。

2.4 流动场模型

假设纳秒脉冲激光制孔过程中金属熔体为不可压缩流体,并假设固-液相变时密度不发生显著变化,则质量守恒方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0. \quad (4)$$

耦合考虑熔化区域的相间作用力、熔体的粘性力以及浮力等因素,描述熔体单元的动量守恒方程为

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} \right] =$$

$$\nabla \cdot (\mu_1 \nabla \mathbf{U}) - \nabla p - \frac{\mu_1}{K} - \frac{C_p}{\sqrt{K}} |\mathbf{U}| \mathbf{U} + \rho \mathbf{g} \beta (T - T_{\text{ref}}), \quad (5)$$

式中 μ_1 为流体的运动粘度, p 为压力, \mathbf{g} 为三维的重力加速度矢量, β 为热膨胀系数, T_{ref} 为参考温度, K 为混合相模型中的 Carman-Kozeny 系数,即渗流系数,它与当前网格单元的液相质量分数 f_1 密切相关^[31]。

2.5 自由界面运动方程

本文采用 Level Set 方法来追踪孔自由界面运动。Level Set 方法采用一个隐式标量函数来描述运动界面的位置。该标量函数通常为有符号的距离场函数。文中,Level Set 函数 $\phi(\mathbf{x}): R^3 \rightarrow R$ 定义为

$$\phi(\mathbf{x}) = \begin{cases} -d(\mathbf{x}, \Omega), & \mathbf{x} \in \Omega_{\text{in}} \\ 0, & \mathbf{x} \in \Omega \\ d(\mathbf{x}, \Omega), & \mathbf{x} \in \{R^3 - \Omega - \Omega_{\text{in}}\} \end{cases}, \quad (6)$$

式中 Ω 为金属蒸气-熔体自由界面, Ω_{in} 为熔体所占据的区域, $\{R^3 - \Omega - \Omega_{\text{in}}\}$ 为金属蒸气所在的区域, \mathbf{x} 为确定点的位置, d 是计算点到自由界面距离的函数。采用 Level Set 方法描述自由界面,可以很方便地计算出孔表面上任意位置的精确法向量和曲率值^[33]。基于距离场函数,法向量 \mathbf{n} 和曲率 κ 的计算公式分别为

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}, \quad (7)$$

$$\kappa = \nabla \cdot \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}. \quad (8)$$

在金属蒸气-熔体之间的自由界面上,由于热对流、辐射和蒸发的作用,存在下面的温度边界条件:

$$k \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = q - h(T - T_{\infty}) - \xi_r \sigma (T^4 - T_{\infty}^4) - \rho V_{\text{exp}} T_v, \quad (9)$$

在计算区域的其他边界上,存在下列的温度边界条件:

$$k \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = -h(T - T_{\infty}) - \xi_r \sigma (T^4 - T_{\infty}^4), \quad (10)$$

式中 h 为对流系数, ξ_r 为黑体辐射系数, σ 为波尔兹曼常数, q 为激光能量密度, T_v 为蒸发潜热, V_{exp} 为因蒸发所引起的孔界面后退速度^[34-35]。

2.6 力学边界条件

在脉冲激光制孔过程中,孔壁面受到反冲压力、热毛细力以及表面张力的作用。充分考虑气液界面的间断边界条件,同时忽略气体粘性的影响,则孔壁面因表面张力和反冲压力等作用产生的压力边界条件 p_f 为^[31]

$$p_f = p_r + \sigma\kappa + 2\mu\mathbf{n} \cdot \nabla\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}, \quad (11)$$

式中下标 f 表示自由界面, σ 为金属熔液的表面张力系数, κ 、 \mathbf{n} 分别为孔壁面的曲率和单位法向量, μ 为熔池内金属液体的粘度, \mathbf{U} 为金属熔液的速度, p_r 为反冲压力。

本文中, 采用 Semak 等^[36-37] 提出的反冲压力模型, p_r 可写为

$$p_r = 0.54AB_0(T)^{-1/2}\exp\left(-\frac{Q_v}{k_B T}\right), \quad (12)$$

式中 A 、 B_0 均是与材料相关的常数, Q_v 是每个原子的蒸发潜热, k_B 为波尔兹曼常数。

孔壁面因热毛细力的作用产生的粘性应力边界条件为^[38]

$$\begin{aligned} (\mu \nabla\mathbf{U})_f = & \mu(\mathbf{n} \quad \mathbf{t}_1 \quad \mathbf{t}_2)(\mathbf{n} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0})^T(\nabla\mathbf{U}) \cdot (\mathbf{n} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0})(\mathbf{n} \quad \mathbf{t}_1 \quad \mathbf{t}_2)^T \mu(\mathbf{n} \quad \mathbf{t}_1 \quad \mathbf{t}_2)(\mathbf{0} \quad \mathbf{t}_1 \quad \mathbf{t}_2)^T(\nabla\mathbf{U}) - \\ & \mu(\mathbf{n} \quad \mathbf{t}_1 \quad \mathbf{t}_2)(\mathbf{n} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0})^T(\nabla\mathbf{U})(\mathbf{n} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0})(\mathbf{n} \quad \mathbf{t}_1 \quad \mathbf{t}_2)^T + (\mathbf{n} \quad \mathbf{t}_1 \quad \mathbf{t}_2) \begin{pmatrix} 0 & \nabla_s\sigma \cdot \mathbf{t}_1 & \nabla_s\sigma \cdot \mathbf{t}_2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (\mathbf{n} \quad \mathbf{t}_1 \quad \mathbf{t}_2)^T. \end{aligned} \quad (13)$$

式中 μ 为金属熔体的粘度, \mathbf{t}_1 、 \mathbf{t}_2 为垂直于孔壁面法向的单位正交切向量, \mathbf{U} 为金属熔体的速度, ∇_s 为数学算子。

3 结果与讨论

采用 DD3 镍基高温合金作为试件模型, 采用脉冲能量为 24 mJ 的纳秒脉冲激光对其进行制孔。DD3 镍基高温合金的化学成分如表 1 所示。选用均匀网格划分, 网格步长为 0.02 mm。沿 Z 方向进行制孔, 如图 2 所示。计算中用到的具体物性参数

如表 2 所示。模拟中采用的纳秒脉冲激光参数如表 3 所示。

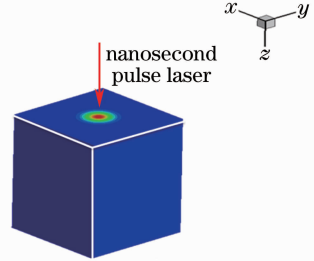


图 2 几何模型

Fig. 2 Geometrical model

表 1 DD3 镍基高温合金的成分(质量分数, %)

Table 1 Component of DD3 nickel-based high-temperature alloy (mass fraction, %)

Cr	Co	Mo	W	Ta	Re	Hf	Al	Ti	Ni
9.5	5	3.8	5.2	—	—	—	5.9	2.1	Remain

表 2 镍基高温合金物性参数

Table 2 Physical parameters of nickel-based high-temperature alloy

Physical parameters	Value
Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	8908
Specific heat capacity $C_p / [\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$	440
Thermal conductivity $k / [\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	71.4
Melting latent $C_f / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	1.75×10^4
Vaporizing latent $C_e / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	3.7×10^5
Melting point T_s / K	1728
Vaporizing point T_l / K	3186
Surface tension $\epsilon_s / (\text{N/m})$	1.77
Boltzmann constant $\sigma / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$	5.67×10^{-8}

表 3 激光参数

Table 3 Laser parameters

Laser parameters	Value 1	Value 2	Value 3	Value 4
Peak power density / (W/cm ²)	10 ⁹	10 ⁹	10 ⁹	10 ⁹
Pulse length / ns	20	50	100	200
Period cycle / ms	0.04	0.04	0.04	0.04
Spot radius / mm	0.2	0.2	0.2	0.2
Pulse energy / mJ	24	24	24	24

3.1 制孔温度场、流动场的演化及孔的形成过程

3.1.1 制孔温度场演化过程

图 3 是脉宽为 200 ns 时,纳秒脉冲激光制孔过程中模拟得到的孔壁及孔壁周围区域温度场的演变情况。当脉冲列数为 1000 个时,在制孔方向上形成一个圆弧体孔。孔深为 0.06 mm,孔径约为 0.4 mm。孔壁温度很高,达到了 3200 K 以上。当脉冲列数为 3000 个时,孔深和孔径变大,此时孔深约为 0.8 mm,孔径约为 0.4 mm。孔壁上温度分布

不均匀,最高温度达到 3200 K 以上,最低温度约为 2700 K。当脉冲列数为 5000 个时,孔深约为 1 mm,孔径约为 0.7 mm。孔壁上温度分布不均匀更加明显,最高温度达到 3200 K,最低温度约为 2600 K。从图 3 中可以发现:制孔过程中孔壁的温度非常高,最高温度达到了 3200 K 以上;孔壁上的温度分布不均匀;虽然孔壁温度很高,但制孔过程中,沿着孔壁仍存在一层细薄的高温过热熔体。

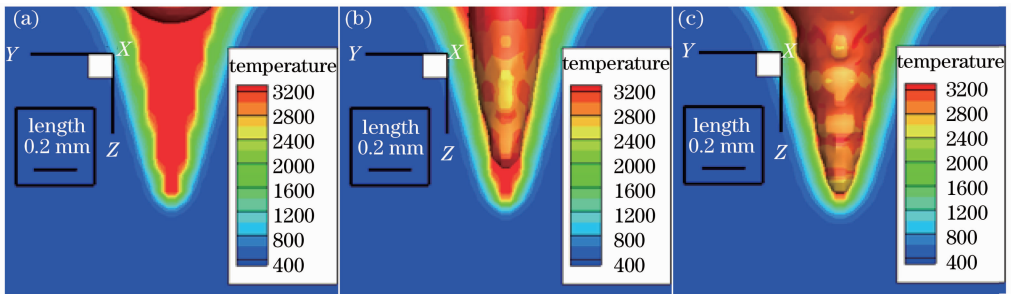


图 3 纳秒脉冲激光制孔温度场(脉宽 200 ns)。(a) 1000 个脉冲; (b) 3000 个脉冲; (c) 5000 个脉冲

Fig. 3 Temperature field of nanosecond pulse laser drilling (pulse width 200 ns). (a) 1000 pulses;

(b) 3000 pulses; (c) 5000 pulses

3.1.2 制孔流动场演化过程

图 4 为脉宽 200 ns 时,纳秒脉冲激光制孔过程中模拟得到的孔内熔体流动场演变情况。当脉冲列数为 1000 个时,熔体发生流动。此时,熔体流动速度较小,速度最大约为 30 m/s。当脉冲列数为 3000

个时,熔体的流动速度很大,速度最大达到 60 m/s,大部分区域速度均超过 50m/s,并且孔内部速度方向与孔壁表面的外法向方向一致,开孔处速度方向与孔壁切向一致并指向孔外。此时,熔体沿着孔壁向孔外流动。当脉冲列数为 5000 个时,制孔结束,

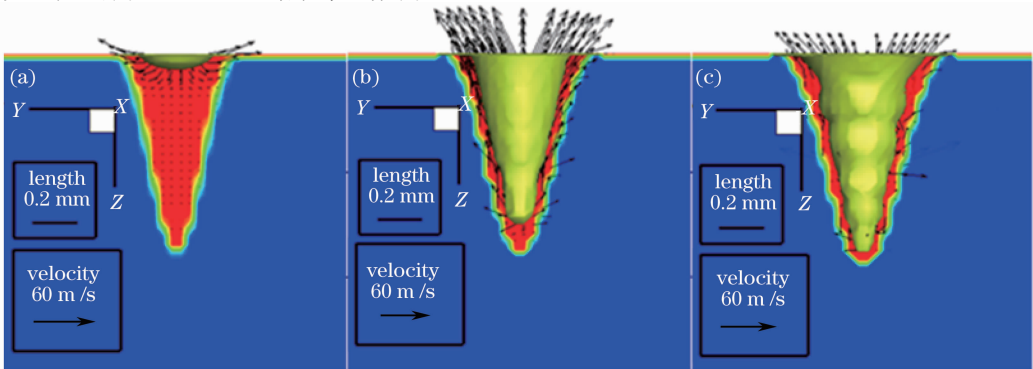


图 4 纳秒脉冲激光制孔流动场(脉宽 200 ns)。(a) 1000 个脉冲; (b) 3000 个脉冲; (c) 5000 个脉冲

Fig. 4 Flow field of nanosecond pulse laser drilling (pulse width of 200 ns). (a) 1000 pulses;

(b) 3000 pulses; (c) 5000 pulses

此时,熔体的速度减小,速度最大约为 30 m/s。测量图 4(c)中熔体厚度,开口处熔体厚度约为 0.08 mm,下部熔体厚度约为 0.06 mm。从图 5 中可以发现:制孔过程中,熔体的流动很剧烈,脉宽为 200 ns 时,速度最大时达到了 60 m/s;熔体的流动速度,在开口处较大,孔内部速度方向与孔壁表面的外法向方向一致,开孔处速度方向与孔壁切向一致并指向孔外;制孔过程中,孔壁上出现许多凸台;熔体在开口处富集,厚度较大。

3.1.3 孔形成过程

综合分析流动场和温度场的模拟结果,可以推导出纳秒脉冲激光制孔中孔的形成过程。制孔开始时,脉冲激光照射在材料上,镍基高温合金温度升高,开始熔化并蒸发,金属熔体在反冲压力和热毛细力的综合作用下发生流动。由于此时反冲压力较小,熔体的流动速度较小,熔体排出孔外的速度也较小。随着脉冲列数的增大,镍基高温合金大量蒸发,反冲压力急剧增大,引起熔体流动速度的快速增大,熔体沿孔壁向外流动,脉宽 200 ns 时速度最大可达 60 m/s,熔体大量排出孔外,孔径和孔深快速增大。相较于约 1 mm 的孔深,如此大的流动速度可能会

导致熔体挣脱表面张力的束缚,产生飞溅。模拟过程接近结束时,孔形貌趋于稳定,形成一个圆锥形的孔,熔体流动减弱。最后,熔体冷却凝固,制孔过程结束。通过分析可以看出熔体排出的方式主要有两种:熔体的蒸发以及熔体的流动。

3.2 脉宽参数对脉冲激光制孔过程的影响

3.2.1 脉宽参数对熔体速度的影响

由图 4 可知,制孔过程中熔体流动速度的变化趋势为先升高后降低。这是由于选取了高斯体热源模型,使热源作用区域整体升温、熔化,并逐渐蒸发。模拟结果中,各脉宽参数下起始时刻和结束时刻的熔体速度相差不大,因此,选取制孔中间时刻,即脉冲列数为 3000 时的熔体速度作为判断脉宽参数对熔体速度影响的依据。图 5 是脉宽分别为 20、50 和 100 ns 时,脉冲列数为 3000 个时熔体流动场。通过图 5 和图 4(b)可以看出,熔体最大速度在开口处。脉宽为 200 ns 时,脉冲列数为 3000 个时熔体最大速度为 60 m/s;脉宽为 100 ns 时,脉冲列数为 3000 个时熔体最大速度为 80 m/s;脉宽为 50 ns 时,脉冲列数为 3000 个时熔体最大速度为 110 m/s;脉宽为 20 ns 时,脉冲列数为 3000 个时熔体最大速度为 150 m/s。

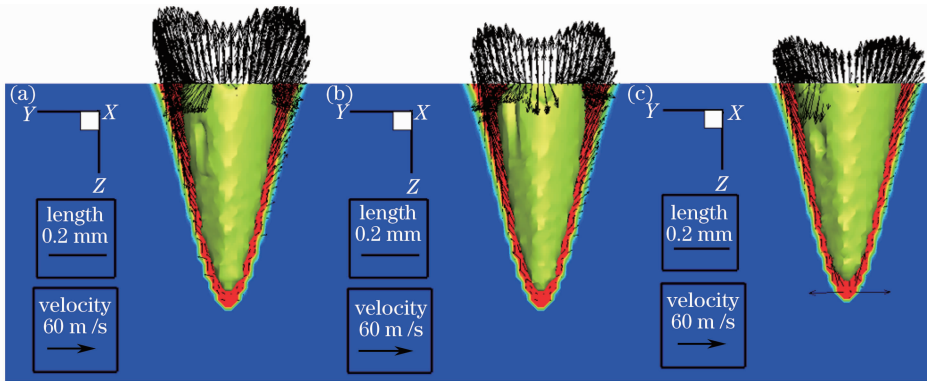


图 5 各脉宽参数下脉冲列数为 3000 时流动场。(a) 20 ns; (b) 50 ns; (c) 100 ns

Fig. 5 Flow field of nanosecond pulse laser drilling at 3000 pulses. (a) 20 ns; (b) 50 ns; (c) 100 ns

图 6 为脉宽对熔体流动速度的影响。从图 6 中可以发现,脉宽越小,熔体的速度越快,流动越激烈。

3.2.2 脉宽参数对制孔再铸层的影响

图 7 为脉宽分别为 20、50 和 100 ns 时,制孔模拟结束时残余熔体的形貌。从图 7 和图 4(c)中可知,脉宽为 20 ns 时,开口处熔体厚度约为 0.03 mm,下部熔体平均厚度约为 0.01 mm;脉宽为 50 ns 时,开口处熔体厚度约为 0.05 mm,下部熔体平均厚度约为 0.02 mm;脉宽为 100 ns 时,开口处熔体厚度约为 0.07 mm,下部熔体平均厚度约为 0.04 mm;脉宽为 200 ns 时,开口处熔体厚度约为

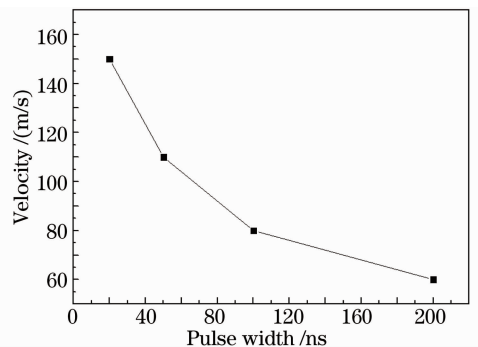


图 6 脉冲列数为 3000 个时的熔体最大速度

Fig. 6 Max velocity of melt at 3000 pulses

0.08mm,下部平均熔体厚度约为 0.06 mm。脉宽对于熔体厚度的影响如图 8 所示。由于残余熔体冷却凝固后会形成再铸层,所以残余熔体的厚度反映

了制孔后形成再铸层的厚度。可以发现,再铸层在孔开口处分布较厚,并且脉宽越大,制孔后形成的再铸层厚度越厚。

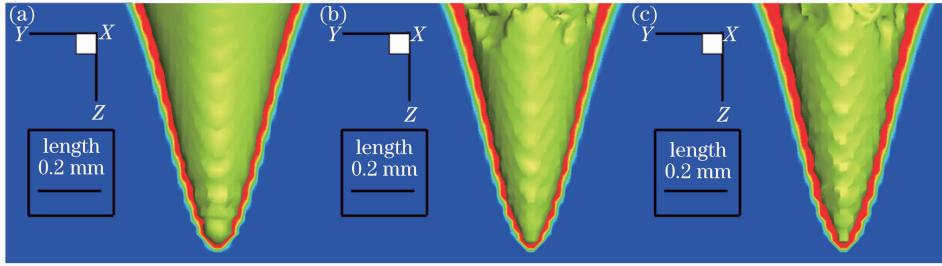


图 7 制孔后残余熔体。(a) 20 ns; (b) 50 ns; (c) 100 ns

Fig. 7 Residual melt after drilling. (a) 20 ns; (b) 50 ns; (c) 100 ns

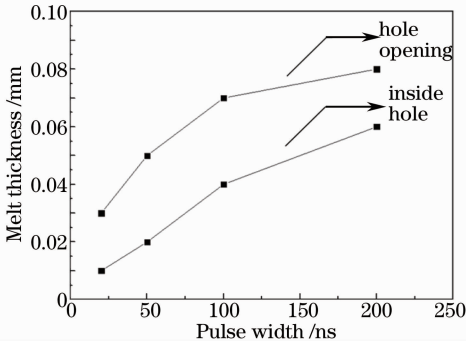


图 8 残余熔体厚度

Fig. 8 Thickness of the residual melt

3.3 实验结果对比

选取 5 mm 厚的 DD3 镍基高温合金板材作为靶材,采用脉宽为 200 ns 时开展纳秒脉冲激光制孔实验。制孔后进行线切割取样;磨光、抛光和腐蚀后,进行金相观测。如图 9 所示,将实验所得再铸层与模拟所得结果进行比较。图 9(a)中的红色区域即为再铸层区域。由模拟结果测量可得,孔开口处再铸层的厚度约为 60~80 μm,孔径约为 0.3~0.4 mm。实验所测得的孔开口处再铸层的厚度约为 80 μm,孔径约为 0.4 mm。两者基本相符,验证了模拟结果的可靠性。

率密度,导致孔壁温度十分高,最高时达到 3200 K 以上。但是,尽管温度很高、熔体流动速度很大,在制孔整个过程中,孔壁周围始终存在熔体,制孔结束后,孔壁周围仍然残留着一层细薄的熔体,这部分未能通过蒸发和流动排出孔外的熔体可能会导致再铸层的形成。

纳秒脉冲激光制孔过程中,孔壁上出现了许多凸台,主要由受表面张力引起的。表面张力使熔体有呈圆球状的趋势,使得熔体表面出现许多圆球状的凸起。熔体表面上的凸起会引起反冲压力的分布不均匀以及温度分布的不均匀,从而导致了孔内熔体流动速度方向不一致。

从图 4 中可以发现,制孔过程中孔壁温度变化较小,而热毛细力与孔壁的温度变化有关,所以,纳秒脉冲激光制孔过程中,热毛细力的影响较小,反冲压力是引起熔体流动的重要因素。纳秒脉冲激光制孔过程中,由于激光的超高功率密度,金属大量蒸发,在孔内形成很大的反冲压力,导致熔体的流动速度很大,脉宽为 200 ns 时,熔体最大速度达到了 60 m/s 以上,熔体将有可能挣脱表面张力的束缚,引起熔体的飞溅。

熔体厚度在开口处的富集,会导致冷却后开口处再铸层厚度较大,与 Chien^[18] 的实验研究结果相吻合。熔体流动速度开口处较大,其横向分量也较大。此时,熔体会在开口处形成对流,受对流影响,导致熔体会在开口处富集,因此,开口处再铸层厚度最大。

脉宽对于熔体流动具有重要的影响,脉冲能量一定时,脉宽越小,熔体速度越快,流动越剧烈。脉冲能量一定时,脉宽越小,脉冲峰值功率越大,单位时间输入的能量越高,熔体升温蒸发越快,产生的反冲压力越大,导致熔体的速度越大,流动越激烈。

脉宽对于再铸层的形成也具有重要的影响,脉

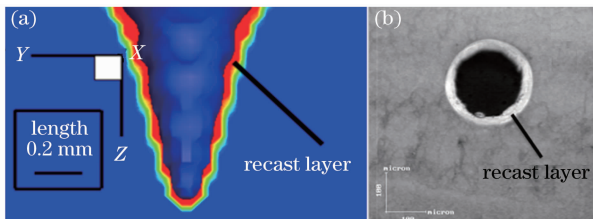


图 9 (a)模拟结果与(b)实验结果对比

Fig. 9 Comparison of (a) simulated results and (b) experimental results

3.4 讨 论

纳秒脉冲激光制孔过程中,由于激光的超高功

宽越小,形成的再铸层厚度越薄,与 Ghoreishi^[39]的研究结果相吻合。脉冲能量一定时,脉宽越小,脉冲峰值功率越大,激光作用时间越短。因此,脉宽越小时,激光加热材料后,材料升温越快,材料更易达到沸点而蒸发;同时,激光和熔体对材料的作用时间越短,材料受到的侵蚀越弱,这些因素综合导致残余熔体的减少,冷却凝固后产生更薄的再铸层。

目前,国内外关于纳秒脉冲激光制孔的报道主要以实验研究为主,数值模拟方面关于脉冲激光制孔过程的研究报道较少,现有数值模拟研究中关于纳秒脉冲激光烧蚀方面的报道较多,只是烧蚀的作用深度较浅,只有几十微米。相较于以往的研究,本文首次采用数值模拟的方法研究纳秒脉冲激光制孔再铸层形成过程,模拟的制孔深度达到了0.8 mm,并且计算速度较快,能够非常直观的再现纳秒脉冲激光制孔过程中再铸层及孔的形成过程,并展现了脉宽对于再铸层形成的影响。

4 结 论

1) 建立了镍基高温合金纳秒脉冲激光制孔模型,模拟了纳秒脉冲激光制孔过程中的三维温度场、流动场的演化过程,以及孔和再铸层的形成过程。模拟结果与实验基本吻合。

2) 镍基高温合金纳秒脉冲激光制孔过程中,孔壁温度很高,最高温度可达到 3200 K 以上,孔壁温度分布不均匀,并且在孔壁上存在一层细薄的高温熔体。

3) 镍基高温合金纳秒脉冲激光制孔过程中,反冲压力是引起熔体流动的重要因素,且流动速度很大,激光的脉冲能量为 24 mJ、脉宽为 200 ns 时,流动速度最大可达到 60 m/s 以上。受表面张力影响,熔体表面会出现凸台和凹陷,导致制孔结束后孔壁不光滑。

4) 脉宽参数对于脉冲激光制孔过程具有重要的影响。镍基高温合金纳秒脉冲激光制孔过程中,受开口处熔体对流作用的影响,熔体会在开口处富集,导致再铸层在开口处较厚。脉宽对熔体流动和再铸层的形成有重要的影响。脉冲能量一定时,脉宽越小,熔体速度越大,流动越激烈,制孔过程中残余熔体越少,制孔结束后形成的再铸层厚度越小。

5) 脉冲激光制孔过程中熔体排出的方式主要有两种:熔体的蒸发以及熔体的流动。再铸层的形成是由热和力共同作用下形成的。

参 考 文 献

- 1 Ezugwu E Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(12-13): 1353-1367.
- 2 Su Hansheng, Wu Zhongtang. Creep-fatigue behaviour of a Ni-base single crystal alloy DD3 and its life prediction[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1993, 29(1): 25-32.
苏翰生, 吴仲棠. DD3 单晶镍基合金蠕变-疲劳及寿命预测[J]. 金属学报, 1993, 29(1): 25-32.
- 3 Hu Jiankai, V Levin. Acoustic microscopic testing around laser-made holes on engine blade[J]. Applied Acoustics, 1999, 18(6): 15-17.
胡建恺, 瓦基姆. 发动机叶片激光打孔的声显微检测[J]. 应用声学, 1999, 18(6): 15-17.
- 4 Peng Ruitao, Liao Miao, Tan Yuanqiang, et al.. Experimental study on prestressed cutting of nickel based superalloys[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(19): 186-191.
彭锐涛, 廖 妙, 谭援强, 等. 预应力切削镍基高温合金的试验研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(19): 186-191.
- 5 Xu Bing, Song Renguo, Dai Lina, et al.. Research status and development of pulsed laser ablation technology [J]. Photo electronic Technique, 2006, 26(2): 138-142.
徐 兵, 宋仁国, 戴丽娜, 等. 脉冲激光烧蚀技术的研究现状及进展[J]. 光电子技术, 2006, 26(2): 138-142.
- 6 Yuan H, Tong H, Li M, et al.. Computational study of nanosecond pulsed laser ablation and the application to momentum coupling[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 112(2): 023105.
- 7 Chichkov B, Momma C, Nolte S, et al.. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. Applied Physics A, 1996, 63(2): 109-115.
- 8 Li Zhiyou, Wang Li. Laser surface to cast layer structure on the properties of directional solidification alloy DZ22 fatigue effect [J]. Materials Engineering, 1994, (8): 31-32.
李志友, 王 理. 激光表面再铸层结构对 DZ22 定向凝固合金疲劳性能的影响[J]. 材料工程, 1994, (8): 31-32.
- 9 Tan B. Deep micro hole drilling in a silicon substrate using multi-bursts of nanosecond UV laser pulses [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2006, 16(1): 109-112.
- 10 Garofano J K, Marcus H L, Aindow M. Nanoscale carbide precipitation in the recast layer of a percussion laser-drilled superalloy[J]. Scripta Materialia, 2009, 61(10): 943-946.
- 11 Ihlemann J, Wolff B, Simon P. Nanosecond and femtosecond excimer laser ablation of fused silica[J]. Applied Physics A, 1992, 54(4): 363-368.
- 12 Weck A, Crawford T, Wilkinson D, et al.. Laser drilling of high aspect ratio holes in copper with femtosecond, picosecond and nanosecond pulses[J]. Applied Physics A, 2008, 90(3): 537-543.
- 13 Li Ping, Wang Yu, Feng Guojin, et al.. Study of silicon micro-structuring using ultra-short laser pulses[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(12): 1688-1691.
李 平, 王 煜, 冯国进, 等. 超短激光脉冲对硅表面微构造的研究[J]. 中国激光, 2006, 33(12): 1688-1691.
- 14 Wang Meng, Liu Tiegeng, Xu Baozhong, et al.. Sound controlled focus system for laser drilling system [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(8): 1277-1280.
王 萌, 刘铁根, 许宝忠, 等. 基于声波控制激光焦点的打孔系统[J]. 中国激光, 2008, 35(8): 1277-1280.
- 15 Luft A, Franz U, Emsermann L, et al.. A study of thermal and mechanical effects on materials induced by pulsed laser drilling [J]. Applied Physics A, 1996, 63(2): 93-101.
- 16 Bugayev A, Gupta M, El-Bandrawy M. Dynamics of laser hole drilling with nanosecond periodically pulsed laser[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2006, 44(8): 797-802.

- 17 Yilbaş B S, Şahin A Z, Davies R. Laser heating mechanism including evaporation process initiating laser drilling [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1995, 35(7): 1047-1062.
- 18 Chien W T, Hou S C. Investigating the recast layer formed during the laser trepan drilling of Inconel 718 using the Taguchi method [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 33(3): 308-316.
- 19 Khan A, Celotto S, Tunna L, et al. Influence of microsupersonic gas jets on nanosecond laser percussion drilling[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(6): 709-718.
- 20 Wang K D, Duan W Q, Mei X S, et al.. Technology to drill micro-holes without recast layer by laser on nickel-based alloy [J]. Advanced Materials Research, 2012, 459: 303-307.
- 21 Bogaerts A, Chen Z, Bleiner D. Laser ablation of copper in different background gases; comparative study by numerical modeling and experiments[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2006, 21(4): 384-395.
- 22 Gusarov A, Smurov I. Near-surface laser - vapour coupling in nanosecond pulsed laser ablation[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, 36(23): 2962.
- 23 Gusarov A V, Smurov I. Thermal model of nanosecond pulsed laser ablation: Analysis of energy and mass transfer[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(1): 014307.
- 24 Lu Q. Thermodynamic evolution of phase explosion during high-power nanosecond laser ablation[J]. Physical Review E, 2003, 67(1): 016410.
- 25 Clair G, LHermitte D. 1D modelling of nanosecond laser ablation of copper samples in argon at $P=1$ atm with a wavelength of 532 nm[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(8): 083307.
- 26 Jiang L, Tsai H L. Improved two-temperature model and its application in ultrashort laser heating of metal films[J]. Journal of Heat Transfer, 2005, 127(10): 1167-1173.
- 27 Zhao Xuemin, Wang Shenglie, Yang Hai, et al.. Study on dynamic laser drilling for sticking plaster[J]. Laser Technology, 2006, 30(3): 308-310.
赵学民, 汪盛烈, 杨海, 等. 膏药在线激光制孔的研究[J]. 激光技术, 2006, 30(3): 308-310.
- 28 Ba Ruizhang, Zhang Xiaobing. Laser machining closely spaced holes[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2003, (7): 68-71.
巴瑞璋, 张晓兵. 激光加工密集群孔技术[J]. 航空制造技术, 2003, (7): 68-71.
- 29 Wu Su, Zhao Haiyan, Wang Yu, et al.. High energy beam welding numerical simulation of the new model of the heat source [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(1): 92-94.
吴甦, 赵海燕, 王煜, 等. 高能束焊接数值模拟中的新型热源模型[J]. 焊接学报, 2004, 25(1): 92-94.
- 30 Long Risheng, Liu Weijun. Numerical simulation of multi-track and multi-layer temperature field on laser direct metal shaping [J]. 1st International Symposium on Digital Manufacture, 2006, 1-3: 1111-1116.
- 31 Pang Shengyong. A Study on the Transient Keyhole and Moving Weld Pool Behaviors and Mechanisms of Deep Penetration Laser Welding [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
庞盛永. 激光深熔焊接瞬态孔和运动熔池行为及相关机理研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- 32 Voller V, Prakash C. A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1987, 30(8): 1709-1719.
- 33 Osher S, Fedkiw R. Level Set Methods and Dynamic Implicit Surfaces[M]. Springer Verlag, 2003.
- 34 Ki H, Mazumder J, Mohanty P S. Modeling of laser keyhole welding: part I. Mathematical modeling, numerical methodology, role of recoil pressure, multiple reflections, and free surface evolution [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33(6): 1817-1830.
- 35 Ki H, Mazumder J, Mohanty P S. Modeling of laser keyhole welding: part II. Simulation of keyhole evolution, velocity, temperature profile, and experimental verification [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33(6): 1831-1842.
- 36 Semak V, Matsunawa A. The role of recoil pressure in energy balance during laser materials processing[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1997, 30(18): 2541-2552.
- 37 Matsunawa A, Semak V. The simulation of front keyhole wall dynamics during laser welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1997, 30(5): 798-809.
- 38 Pang S, Chen L, Zhou J, et al.. A three-dimensional sharp interface model for self-consistent keyhole and weld pool dynamics in deep penetration laser welding [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44(2): 025301.
- 39 Ghoreishi M, Low D, Li L. Comparative statistical analysis of hole taper and circularity in laser percussion drilling [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(9): 985-995.

栏目编辑: 宋梅梅