

基于 ANSYS 生死单元法的长脉冲激光金属打孔仿真

臧彦楠¹ 倪晓武¹ 陈彦北²

(¹ 南京理工大学理学院信息物理与工程系, 江苏 南京 210094; ² 株洲时代新材料科技股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要 以脉宽为毫秒量级的单脉冲激光逆重力方向对金属的打孔实验为模拟对象, 利用 ANSYS 软件并基于生死单元方法进行了数值仿真。根据靶材受热表面的气化压力反作用于熔融层的力学效应, 建立了熔融液体克服表面张力运动的喷溅模型; 分别用有限元法和有限差分法对二维轴对称的热传导方程和流体的一维欧拉运动方程进行耦合求解, 得到了不同时刻模型的温度场和流场; 应用生死单元法使发生喷溅的熔融液体单元在计算中失效, 并得到了孔洞内壁和洞口表面的形状, 其形貌与文献报道的实验结果相符合。数值结果显示出洞底附近的孔洞内壁具有不规则凹凸, 而洞口则呈喇叭状, 这是打孔过程中熔融液体在洞底附近的熔融层较薄处发生流动中断和位于洞口两侧的液体间张力作用所致。

关键词 激光技术; 激光打孔; 数值模拟; 生死单元; 熔融液体喷溅

中图分类号 TG665 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0603005

Simulation of Long Pulsed Laser Drilling on Metal Based on Birth and Death Method of ANSYS

Zang Yannan¹ Ni Xiaowu¹ Chen Yanbei²

¹ *Department of Information Physics & Engineering, School of Science, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China*
² *Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412007, China*

Abstract The simulation of long pulsed laser drilling process is done by using the element birth and death method of ANSYS. According to the recoil force of evaporation on the heated surface, a model of ejection of melted materials is built. After coupled solving the two-dimensional axisymmetric differential equation of heat conduction and one-dimensional Eulerian equation of fluid motion by finite element and finite difference method respectively, the results of temperature field and flow field with temporal variation are obtained. The whole shape of the hole will appear by excluding the expelled element during computation, and the result accords with the experiment in literature. The simulation result explains that the irregular shape at the bottom of the hole and a trumpet shaped entrance appearing in the experiment are induced by the interruption of melted liquid within the thin melted depth and the tension between ejected liquid and melted materials adjacent to entrance, respectively.

Key words laser technique; laser drilling; numerical simulation; element birth and death; ejection of melted materials

OCIS codes 140.6810; 140.3390; 260.2160; 350.3390; 350.5340

1 引 言

激光打孔是利用会聚的高能激光对金属靶材产生的热效应, 使材料在受辐照区域产生温升、熔融甚至气化等热物理现象, 从而达到加工的目的。与传统加工方法相比, 激光加工具有精度高、速度快、质量好、可进行远距离非接触式加工等优点。随着激光打孔技术在工业加工^[1]中日趋广泛的应用, 越来

越多的学者对这一物理过程进行了相应的研究, 其中不乏数值模拟的研究。

对激光打孔的数值模拟通常以被加工孔洞的深度、洞口的直径、洞壁的形状和移除速度等参数特征为主要研究对象, 考虑到不同特性和功率密度的激光作用下的打孔机制不尽相同, 因此孔洞的参数特征主要取决于作用的激光特性以及靶材的热物理属性。

收稿日期: 2012-12-03; **收到修改稿日期**: 2013-01-29

作者简介: 臧彦楠(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事长脉冲激光与金属材料相互作用等方面的研究。

E-mail: z911yn@sina.com

导师简介: 倪晓武(1955—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: nxw@mail.njust.edu.cn(通信联系人)

如脉宽为纳秒量级的高功率密度激光打孔以靶材的气化或升华^[2]为主要去除机制, Yilbas 等^[3]研究了此种机制下的钢材打孔, 建立了位于相变交界处的蠕变模型, 用有限差分法计算了脉宽为 24 ns 的激光作用下靶材蠕变区的温度场以及蠕变深度, 并比较了靶材各项热物理属性随温度变化时对打孔深度及重铸层厚度的影响。又如, 脉宽为毫秒量级的高能量激光以熔融液体的向外喷溅^[4]为主要打孔方式, Voisey 等^[5]指出: 熔融液体的喷溅是激光打孔的有效形式; 打孔中去除同等体积的金属材料, 比较不同机理所消耗的激光能量, 气化所消耗的能量是喷溅所消耗能量的四倍。Low 等^[6]是用解析计算法研究脉宽为毫秒量级的激光打孔的喷溅模型时, 得到了熔融液体形成稳态喷溅情况下的打孔速度以及材料气化对打孔深度的贡献, 并发现其贡献很小。He 等^[7]提出, 脉宽为毫秒量级的长脉冲激光由于具有合适的功率密度, 更适合于以熔融液体的喷溅为主要去除机理的加工方式, 因此对长脉冲激光打孔的数值模拟应主要研究靶材中熔融液体的运动。在以熔融液体的喷溅为主要去除方式的激光加工数值模拟中, Yilbas^[8]建立了脉宽为毫秒量级的长脉冲激光金属打孔模型, 用有限差分法计算了打孔过程中不同时刻材料表面的温度以及熔融波前的传播速度。Cho 等^[9]建立了基于菲涅耳吸收的孔壁实时多反模型, 计算了在长脉冲激光作用下熔融液体流出洞口后形成的洞形。有些学者则利用 ANSYS 数值计算软件并应用生死单元法模拟了激光加工过程。其中的生死单元法是通过选择模型中的某些网格单元并使其在计算中失效, 从而可以计算网格边界随时间变化的模型。Yu^[10]利用 ANSYS 软件建立了三维有限元模型, 模拟了激光切割的过程; 宋林森等^[11,12]利用 APDL (ANSYS Parametric Design

Language) 语言, 通过对每一时间步计算的温度场结果进行分析, 使节点平均温度超过熔点的单元在计算中失效, 从而得到了长脉冲激光打孔后的洞形; 褚庆臣等^[13]提出了靶材受热区一旦熔融即被去除的假设, 分析了长脉冲激光打孔金属靶材的洞形与激光参数的关系; 他们均以模型中网格单元的平均温度是否超过熔点作为判断单元在计算中失效的依据。

本文建立了长脉冲激光逆重力方向对金属铝打孔的二维轴对称模型, 考虑了气化反作用压力与靶材熔融区域表面张力之间的关系, 并以熔融液体在该压力作用下的运动状态作为判断单元计算是否失效的依据, 得到了打孔最终形成的洞形, 并与文献^[14]报道的实验结果进行了比较。

2 理论模型

2.1 实验的模拟

以文献^[14]中的实验为模板, 建立金属靶材受热的二维轴对称模型, 实验使用波长为 1064 nm 的长脉冲 Nd:YAG 激光作为加工热源, 激光束水平输出后经 45°全反镜向上沿重力的反方向传输, 再经焦距为 60 mm 的透镜聚焦并垂直辐照在铝块的下表面。激光束横截面为高斯型分布, 聚焦后的光束半径为 300 μm, 采用单个脉冲打孔, 脉宽为 3 ms, 能量为 18 J; 铝块取厚为 5 mm、半径为 2 mm 的轴对称圆柱体部分进行模拟, 以激光作用中心点沿激光辐照方向为对称轴, 并采用映射法划分网格单元, 在靠近对称轴附近区域用边长为 15 μm 的正方形划分网格单元, 较远处用长 25 μm 高 15 μm 的矩形划分, 铝的热物理性质如表 1 所示。计算的时间步长为 500 ns, 远小于熔融液体从孔洞底部流动至洞口所用的时间。

表 1 铝的热物理性质

Table 1 Thermal properties of aluminum material

| | Solid state | Liquid state |
|---|---|---|
| Density ρ / (kg/m ³) | 2700 | 2385 |
| Specific heat C / [J/(kg · K)] | 917 | 1080 |
| Heat conductivity k / [W/(m · K)] | 238 | 100 |
| Absorptivity ^[15] $A(T)$ | $354.67 \times 10^{-4} \sqrt{-1.0 + 1.25 \times 10^{-2} T}$ | $354.67 \times 10^{-4} \sqrt{10.7 + 1.45 \times 10^{-2} T}$ |
| Melting point T_m / K | | 933 |
| Boiling point T_b / K | | 2793 |
| Latent heat of fusion L_m / (J/kg) | | 3.88×10^5 |
| Latent heat of evaporation L_v / (J/kg) | | 9.466×10^6 |

数值模拟过程中, 对模型进行了如下假设:

1) 激光光束为基模, 且聚焦激光的透镜焦距很长, 使聚焦的激光束束腰较长, 因而可以打出细深孔。

2) 在金属靶材表面光斑半径范围内, 气态物质对激光是透明的; 在激光光斑半径范围外, 靶材表面是绝热的, 忽略热对流、热辐射等现象。

3)重力对熔融液体的喷溅有辅助作用^[14],并恰好抵消液体运动时的粘滞阻力。

2.2 金属靶材的气化

高能量密度的脉冲激光辐照金属靶材表面时,材料熔融后其温度会继续上升并开始蒸发,同时,液体表面也产生了气化反作用压力,由于气化潜热的存在,熔融液体的蒸发过程将继续吸收激光能量。由克拉伯龙-克劳修斯方程得知,在不同温度下,液体蒸发时的饱和蒸气压不同,因此不同温度下的气化速度不同。熔融液体在某一温度下蒸发为气体的质量变化率可由下式表示^[16]:

$$v_m = \frac{dm}{dt} = \frac{P_0 \exp\{-[L_v/R(1/T - 1/T_b)]\}}{\sqrt{2\pi RT/M_{\text{mol}}}}, \quad (1)$$

式中 v_m 表示单位面积上的液体蒸发为气态的质量变化率, P_0 为标准大气压强 (1.01×10^5 Pa), R 为普适气体常数 [8.31 J/(mol · K)], M_{mol} 为金属的摩尔

质量, T 为液体蒸发时的温度。由(1)式推断,在某一温度下,金属靶材熔融表面的气化速度 v_{dv} (m/s) 可以表示为

$$v_{\text{dv}} = \frac{v_m}{\rho}. \quad (2)$$

而单位时间、单位面积内的液体表面在某温度下发生气化所吸收的潜热为

$$I_{\text{eva}} = \rho L_v v_{\text{dv}}. \quad (3)$$

将(1)式代入到(2)式,再将(2)式代入到(3)式中,可得到 v_{dv} 和 I_{eva} 随温度的变化关系,图1为根据上述关系解析计算得到的熔融金属铝的变化曲线。图中, v_{dv} 和 I_{eva} 均随温度的增加而指数增长, v_{dv} 反映了靶材在不同温度下气液交界面的下降速度,是计算打孔中气化作用的重要参数,也决定了 I_{eva} 的大小; I_{eva} 则可理解为某温度下提供给靶材用于气化的激光功率密度,决定着热传导方程的边界条件。

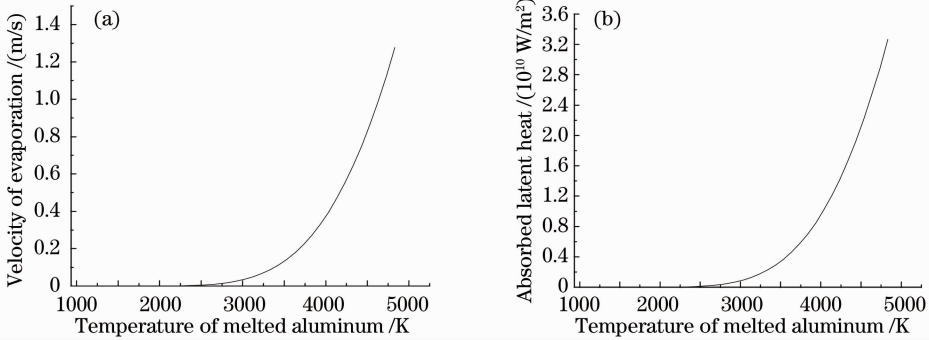


图1 在不同温度下熔融铝的气化速度和吸收的潜热。(a)气化速度;(b)潜热

Fig. 1 Temperature variation of absorbed latent heat and evaporation velocity.

(a) Evaporation velocity; (b) absorbed latent heat

2.3 熔融液体形成喷溅的条件

以熔融液体喷溅的方式打孔,要求金属靶材在某一功率密度的激光作用下产生特定的热渗透区域,在该区域内,受热表面的气化反作用压力足够大,而在表面下又有一定厚度的熔融液体可以喷溅。当金属材料以液体形式喷溅出洞口时,需要克服表面张力做功,表面张力的大小为 F_s ,可用下式表示^[7]:

$$F_s = 2\pi r_0 \sigma, \quad (4)$$

式中 r_0 是靶材表面熔融范围的半径; σ 表示液体边界上单位长度所受的张力(N/m),材料表面的气化反作用压力 R 可用下式表示^[7]:

$$R = \int_0^{r_b} 2\pi r \Delta P(r) dr, \quad (5)$$

式中 $\Delta P(r)$ 是靶材表面气化时的饱和蒸气压与标准大气压 P_0 的差值随半径变化的关系; r_b 是熔融表面上饱和蒸气压等于标准大气压处的半径。当气化

反作用压力较小时,表面张力足以抵消压力带来的流动趋势,液体表面只是形成了一个向下的凹坑;当气化反作用压力大于表面张力时,熔融液体才能形成喷溅;反作用压力 R 大于表面张力 F_s 也是打孔中熔融液体开始流动的标志,即

$$R > F_s. \quad (6)$$

2.4 熔融液体喷溅的数值模拟

对熔融液体喷溅的数值模拟应首先计算靶材的温度场并确定熔融范围,需要求解的二维轴对称热传导微分方程为^[17]

$$k_m \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho_m C_m \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (7)$$

式中下标 m 表示参数在不同状态下对应的下标(固相 s 或液相 l)。计算的初始和边界条件为

$$T(r, z) |_{t=0} = T_0 = 293, \quad (8)$$

$$-k_m \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial n} \Big|_{z=l(r, t)} = I_0 A(T) f(r) - I_{eva}, \quad r \leq a_0, \quad (9)$$

$$-k_m \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0, h} = 0, \quad r > a_0, z = 0 \text{ or } z = h, \quad (10)$$

$$-k_m \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=0, d/2} = 0, \quad r = 0 \text{ or } r = d/2, \quad (11)$$

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} \Big|_{z=s(r, t)} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial n} \Big|_{z=s(r, t)} = \rho L_m \frac{ds(r, t)}{dt}, \quad z = s(r, t). \quad (12)$$

以上诸式中, T_0 为初始温度, 等于室温 293 K; h, d 分别为金属靶材几何模型的高度和直径; n 表示曲线上某点指向靶材内部的法线方向; $l(r, t)$ 和 $s(r, t)$ 分别表示不同时刻、不同半径处, 靶材的受热表面和熔融层固液交界面的位置; I_0 为入射激光的峰值功率密度,

$$I_0 = \frac{2E}{\pi a_0^2 \tau}, \quad (13)$$

式中 a_0 为激光在靶材表面上的光斑半径, E 为激光脉冲的能量, τ 为激光脉宽; 激光功率密度所呈现的空间高斯分布函数:

$$f(r) = \exp\left(\frac{-2r^2}{a_0^2}\right). \quad (14)$$

在得到温度场结果后, 再计算熔融层的流场, 考虑到流场内的液体压强具有各项等值性, 同时重力与粘滞力相抵消, 因此液体将沿着压强梯度方向运动。熔融液体的运动可以看作是**不可压缩的牛顿流体**在每一计算时间步长内, 沿洞壁向外的一维恒定层流运动, 因此其欧拉运动方程为^[4]

$$a = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial S} = -\frac{1}{\rho_l} \frac{\partial}{\partial S} \left(p - \frac{\sigma}{R_s} \right), \quad (15)$$

式中 a 表示流体沿 S 方向一维运动的加速度, S 为流体沿洞壁的运动方向, u 是流场内某点的流速, p 为液体表面饱和蒸气压, R_s 是 S 上某点处的曲率半径。

$\frac{\sigma}{R_s}$ 反映了单位面积上位于不同位置的液体表面张力, 液体在这种张力梯度下的运动即为 Marangoni 效应^[18], 当靶材温升至满足(6)式时, 液体开始运动, 此时采用有限差分法对此微分方程进行数值计算, 可以得到每一时间步熔融液体的运动速度, 将此时间步内流出边界的熔融液体单元在计算中失效, 未失效的单元格就组成了这一时刻的孔洞形貌。

熔融液体的欧拉运动方程初始和边界条件分别为

$$u(S, t) \Big|_{t=t_p} = 0, \quad (16)$$

$$\frac{\partial u}{\partial S} \Big|_{S=0, r_0} = 0, \quad (17)$$

式中 t_p 为流体满足(6)式时的运动开始时刻。

3 计算结果及分析

当激光开始作用于金属靶材表面时, 表面温度逐渐上升, 随后激光作用中心区域出现熔融层并逐渐扩大, 也使洞口处的表面张力增大, 但这并不会减缓熔融液体发生喷溅的时间, 因为气化反作用压力的增速要大于表面张力的增速, 将计算(7)式得到的每一时间步温度场结果分别代入到(4)式和(5)式中, 得到反作用压力和张力随时间变化的关系曲线, 如图 2 所示。

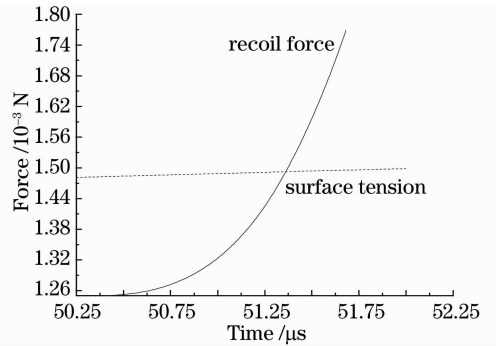


图 2 熔融液体的表面张力与气化反作用压力随时间的变化

Fig. 2 Evolution of surface tension and vapor recoil force on metal surface

图 2 中, 洞口表面张力缓慢增加, 增速远小于气化反作用压力的增速, 在激光作用时间为 51.38 μs 时, 气化反作用压力超过液体表面张力, 液面不再保持静止, 此时可视为熔融液体形成喷溅的开始时刻。熔融喷溅形成后, 液体不断地涌向洞口, 数值求解(15)式得到了每一时间步的流场, 流场流速的大小在 0~35 m/s 范围。用生死单元法使喷溅出边界的单元在计算中失效, 从而得到了不同时刻的打孔洞形。孔洞形成过程中的典型时间对应的温度场云图和形貌分别如图 3 和图 4 所示。图 3 中, 随着脉冲激光的持续作用, 孔洞深度和半径以及熔融层不断增加, 而熔融层厚度的分布并不均匀, 洞底较薄, 洞口较厚, 这是由于熔融液体在流动的同时, 通过热传导作用将热量更多地从洞底传递给了洞口, 并增加了洞口处的熔

融层厚度。洞口处高于初始表面的单元为恰好喷溅出洞口而又没有完全与靶材分离的熔融液滴。

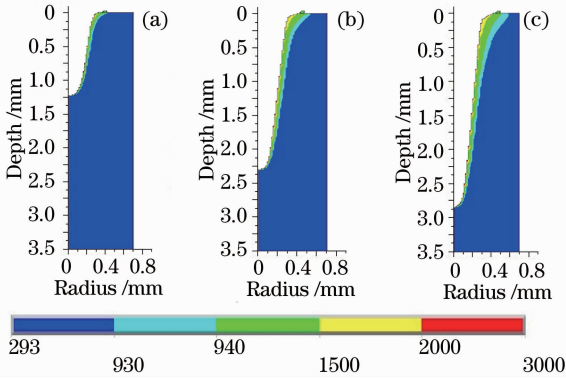


图3 孔洞形成的典型时间对应的温度场和洞深。

(a) 1 ms; (b) 2 ms; (c) 3 ms

Fig. 3 Shape and temperature field of drilled hole on typical time. Pulse laser durations are (a) 1 ms, (b) 2 ms, and (c) 3 ms

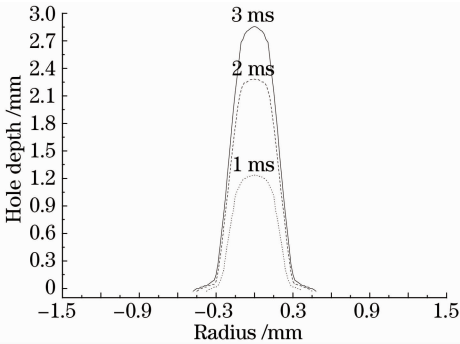


图4 孔洞形成的典型时间对应的形貌

Fig. 4 Shapes of drilled hole on different typical time

由图4可见,随着打孔的进行,孔洞深度和直径逐渐增加,而在洞底附近的内壁并不是处处都是平滑的,存在着不规则的凹凸,此现象在文献[5]中也被提出。将数值计算的典型时间对应熔融表面温度代入到克拉伯龙-克劳修斯方程中,可以得到熔融表面上的饱和蒸气压;由于熔融层的流动和沿半径变化的表面张力梯度,使熔融表面上的压强在沿半径方向上不单调变化,而是出现了不同数量的突变点,其位置正在洞底附近的凹凸处,并且数值大小通常小于该点周围的气压值。从(15)式中可以发现,压强的不单调变化影响了熔融液体流动的连续性。Low等^[6]估算了熔融液体喷溅情况下的平均熔融层厚度:

$$\delta_m \approx \frac{\kappa_m}{v_d}, \quad (18)$$

式中 κ_m 是热扩散系数, v_d 是打孔速度。文献[14]中打孔速度约为1 m/s,铝的热扩散系数为 $3.429 \times$

$10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$,根据(18)式可以估算得到熔融层平均厚度为 $34.29 \mu\text{m}$ 。从图3中可以看出,洞底附近的熔融层较薄,小于平均熔融层厚度,在流体运动时,熔融层厚度的水平分量或垂直分量在洞底附近小于 δ_m ,因此,反映在 $15 \mu\text{m}$ 的映射网格单元中,通常由一个处于熔融状态的流体边界单元和一个没有完全熔融的非流体内网格单元组成。在(15)式中,当等号右端的压力梯度在流动中随位置变化并减小到不足以提供当时流场的迁移加速度[(15)式等号左端的第二项]时,熔融液体将在此处发生流动中断,而此时的表面层单元下方的单元网格又不处于完全熔融的可流动状态,因此不能作为连接断裂处的流体单元而阻止流动中断的发生,从而在洞底附近形成了不规则的凹凸内壁。图4中的洞深曲线上,激光作用时间为1 ms时 $r = \pm 0.15 \text{ mm}$ 处,2 ms时 $r = \pm 0.075 \text{ mm}$ 处,3 ms时 $r = \pm 0.105 \text{ mm}$ 的洞底附近处均出现了这样的流动中断点。

作用激光脉冲结束后,表面的气化现象随着表面温度的降低迅速减少,反作用压力同样会迅速降低到无法维持喷溅的程度,表面张力却因熔融层增厚^[17]而增加,使得后续喷溅对孔洞的形状影响很小。图5所示为文献[14]报道的实验结果与本文数值模拟结果在最终洞形上的对比,图中黑色虚线表示本文的模拟结果,实物图为文献报道的实验结果。

数值计算得到的打孔深度为2.857 mm,孔直径为0.976 mm;与文献[14]中实验获得的洞深3.001 mm,孔直径0.936 mm相比较,相对误差分别为4.79%和4.27%。两者间尚存在一定的误差,造成这种误差的原因可能是:1)忽略了靶材吸收的激光功率密度随离焦量和洞深的变化;2)没有考虑金属靶材的热物理属性随温度的变化。由图5(b)中还可以发现,洞口呈喇叭状,这是因为喷溅的熔融液滴与洞口内液体之间存在张力作用。这一作用过程是:当熔融液体沿洞壁喷溅出洞口时,将在洞口处与洞内的熔融液体发生分离,形成在空中飞行的液滴。这一分离过程增加了液滴的表面能,同时克服了洞内熔融液体与飞行液滴间的表面张力做功。由于Marangoni效应,液滴会受阻而降低喷溅出洞口的速度,并由牛顿第三定律得知,张力对分离时的喷溅液滴表现为阻力,而对洞内熔融液体表现为指向洞外的拉力,拉力促使洞口处有更多的液体喷溅出来,因此增大了洞口的孔径,同时也增加了洞口外高于水平表面的重铸洞壁,Low等^[19]在实验中发现了同样的现象。

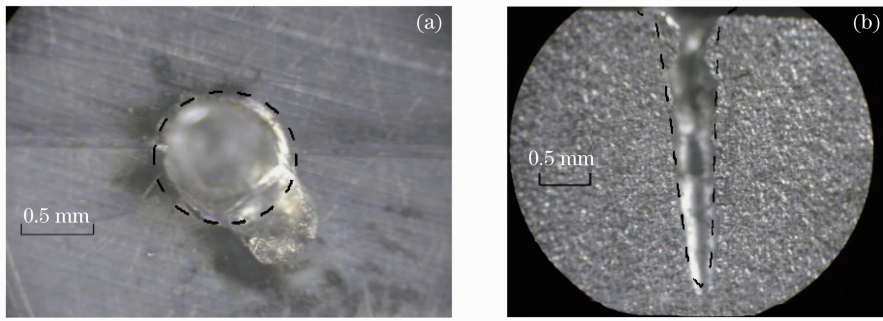


图5 数值结果与实验在洞口平面和剖面上的对比图。(a) 洞口平面图;(b) 纵向剖面图
Fig. 5 Comparison between the numerical result and the experiment result. (a) Entrance surface;
(b) longitudinal section of wall shape

4 结 论

利用 ANSYS 软件并基于生死单元方法对脉宽为毫秒量级的单脉冲激光逆重力方向对铝材打孔的实验进行了数值仿真,分别用有限元法和有限差分法耦合求解了二维轴对称的热传导方程和一维欧拉运动方程,计算了靶材发生熔融液体喷溅的过程。与以温度作为判断单元计算是否失效的方法不同,计算时使用生死单元法将流动出边界的单元视为失效,得到了成形的孔洞。该方法使得喷溅出洞口的材料先后经历了熔融和流动两个过程,因而更为准确地模拟了实验过程。计算时还考虑了熔融液体形成喷溅的条件,并计算了熔融液体形成喷溅前后的气化反作用压力与洞口表面张力的大小。模拟得到的打孔深度和直径分别为 2.857 mm 和 0.976 mm,与文献[14]报道的实验结果相符合。模拟结果表明:由于喷溅的液滴对洞口内熔融液体有张力作用,该张力对洞内的熔融液体表现为向外的拉力,促进了洞口处的喷溅,同时也增加了洞口的直径,并形成了喇叭状的洞口形貌。

参 考 文 献

- 1 A. K. Dubey, V. Yadava. Laser beam machining: a review[J]. *International J. Machine Tools and Manufacture*, 2008, **48**(6): 609~628
- 2 X. Y. Tan, D. M. Zhang, B. M. Yu *et al.*. Vaporization effect studying on high-power nanosecond pulsed laser deposition[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2005, **358**(1-4): 86~92
- 3 B. S. Yilbas, S. B. Mansoor. Laser pulse heating and phase changes in the irradiated region: temperature-dependent thermal properties case[J]. *International J. Thermal Sciences*, 2009, **48**(4): 761~772
- 4 P. Solana, P. Kapadia, J. Dowden *et al.*. Time dependent ablation and liquid ejection processes during the laser drilling of metals[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **191**(1-2): 97~112
- 5 K. T. Voisey, S. S. Kudesia, W. S. O. Rodden *et al.*. Melt ejection during laser drilling of metals[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, **356**(1-2): 414~424
- 6 D. K. Y. Low, L. Li, P. J. Byrd. Hydrodynamic physical modeling of laser drilling[J]. *J. Manufacturing Science and Engineering*, 2002, **124**(4): 852~862
- 7 X. He, J. T. Norris, P. W. Debroy *et al.*. Liquid metal expulsion during laser spot welding of 304 stainless steel[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2006, **39**(3): 525~534
- 8 B. S. Yilbas. Laser heating process and experimental validation [J]. *International J. Heat and Mass Transfer*, 1997, **40**(5): 1131~1143
- 9 J. H. Cho, S. J. Na. Implementation of real-time multiple reflection and Fresnel absorption of laser beam in keyhole[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2006, **39**(24): 5372~5378
- 10 L. M. Yu. Three-dimensional finite element modeling of laser cutting [J]. *J. Materials Processing Technology*, 1997, **63**(1-3): 637~639
- 11 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
- 12 Song Linsen, Shi Guoquan, Li Zhanguo. Simulation of laser drilling temperature field by using ANSYS[J]. *J. Changchun University of Science and Technology*, 2006, **29**(4): 19~21
宋林森, 史国权, 李占国. ANSYS 在激光打孔温度场仿真中的应用[J]. *长春理工大学学报*, 2006, **29**(4): 19~21
- 13 Chu Qingchen, Yu Gang, Lu Guoquan *et al.*. Two-dimensional numerical investigation for the effect 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
- 14 Y. Qin, G. Dai, B. Wang *et al.*. Investigating the effect of gravity on long pulsed laser drilling [J]. *Optics and Laser Technology*, 2011, **43**(3): 563~569
- 15 Chen Yanbei, Lu Jian, Ni Xiaowu *et al.*. Numerical simulation of laser heating of metal with three absorptivity models[J]. *Laser Technology*, 2009, **33**(6): 622~625
陈彦北, 陆 建, 倪晓武 等. 3种吸收率模型的金属激光加热数值研究比较[J]. *激光技术*, 2009, **33**(6): 622~625
- 16 Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi. Physics of Interaction between Laser and Materials[M]. Beijing: China Machine Press, 1996
陆 建, 倪晓武, 贺安之. 激光与材料相互作用物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996
- 17 Y. Qin, B. Wang, X. W. Ni *et al.*. Axisymmetric analytical solution for pulsed laser melting of metals[J]. *Computational Materials Science*, 2012, **54**: 1~6
- 18 G. K. L. Ng, P. L. Crouse, L. Li. An analytical model for laser drilling incorporating effects of exothermic reaction, pulse width and hole geometry[J]. *International J. Heat and Mass Transfer*, 2006, **49**(7-8): 1358~1374
- 19 K. D. Y. Low, L. Li, P. J. Byrd. The effects of process parameters on spatter deposition in laser percussion drilling[J]. *Optics and Laser Technology*, 2000, **32**(5): 347~354

栏目编辑:宋梅梅