

论文

激光打孔过程三维瞬态数值模拟

葛志福, 虞钢*, 何秀丽*, 卢国权, 李少霞

中国科学院力学研究所先进制造工艺力学实验室, 北京 100190

*联系人, 虞刚, E-mail: gyu@imech.ac.cn; 何秀丽, E-mail: xlhe@imech.ac.cn

收稿日期: 2011-12-28; 接受日期: 2012-04-18; 网络出版日期: 2012-07-17

国家自然科学基金资助项目(批准号: 10832011)

摘要 建立了激光打孔过程的固/液/气三相三维数值计算模型, 采用水平集(level-set)方法处理能量输入边界并追踪气液(L/V)界面发展, 从而对激光打孔过程中的孔壁变化进行描述. 模型综合考虑了材料气化、熔融液体溅射两种效应, 涉及熔化潜热、气化潜热吸收及辐射散热损失等因素. 基于有限体积法, 编制计算程序, 对激光打孔过程中的温度场、孔型演化过程进行了数值模拟, 探讨了不同激光参数对打孔过程的影响. 该模型对认识和研究激光打孔行为具有参考价值, 也可以扩展至其他高能束流在材料表面的打孔描述.

关键词 激光打孔, 数值模拟, 气/液界面, 水平集

PACS: 42.62.Cf, 44.05.+e, 05.70.Fh, 05.70.Np

doi: 10.1360/132011-1303

激光打孔是一种以高能量密度激光束为热源, 通过剧烈热效应去除材料而形成符合要求孔型的加工方法. 应用光学聚焦技术, 可以使激光获得 $10^5\text{--}10^{15}\text{ W/cm}^2$ 光照功率密度, 当其以 $\mu\text{s--ms}$ 的脉宽作用于材料表面, 将导致局部区域熔化、气化并伴随着等离子体的产生; 蒸气带着熔融液体向外飞溅, 气液(L/V)界面因材料损失向内凹陷, 待激光停止后熔融材料凝固, 形成特定形状的孔. 目前激光打孔的工艺参数选择很大程度上依赖于试验研究^[1-3], 而激光打孔数学模型的建立对减少成本, 缩短周期、优化参数有重要的意义.

激光打孔过程中存在剧烈的溅射与蒸发现象, 物理机制复杂, 其数值模型研究多集中于一维和二

维的描述, 或者在建模过程中简化, 假定材料全部以飞溅方式被去除, 不考虑蒸发引起质量、能量损失. Low 等人^[4]基于流体动力学, 建立一维解析模型, 研究蒸发、溅射两种因素在激光打孔过程中起到的作用; Ganesh 等人^[5]考虑打孔过程中固体区热传导和熔融金属对流换热, 结合简化的蒸发模型, 采用流体体积法(VOF)对二维孔边界发展进行追踪. Park 等人^[6]利用 VOF 方法, 假设无蒸发损失, 只考虑熔融液体飞溅建立打孔模型, 研究了硅片表面的激光打孔行为; 国内相关研究^[7]认为激光热打孔过程中, 材料达到熔点以上后, 熔融金属全以飞溅去除, 利用 ANSYS 生死单元建立了激光打孔的二维数值模型. 激光打孔过程是材料气液(L/V)界面的演化行为, 而激光与材

引用格式: 葛志福, 虞钢, 何秀丽, 等. 激光打孔过程三维瞬态数值模拟. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, 42: 869-876

Ge Z F, Yu G, He X L, et al. Three-dimensional transient numerical simulation of laser drilling process (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2012, 42: 869-876. doi: 10.1360/132011-1303

料作用中气液界面发展的三维数值表达多见于激光焊接中匙孔(Keyhole)现象及熔覆(Laser Cladding)过程的描述^[8-11], 与打孔相比, 上述过程所用的激光功率密度低, 作用时间长, 熔池内熔融金属流动速度小, 因而可以忽略液体溅射及材料蒸发所引起质量、能量损失. 在激光打孔过程中, 材料的蒸发和熔融液体溅射对能量的耗散有重要的影响, 同时由于工业应用中激光束的空间分布特性, 对考虑蒸发和溅射效应的孔型发展的三维数值表达提出了要求.

本文利用 level-set 方法, 建立激光打孔的三维数值模型, 综合考虑材料的蒸发和溅射, 对激光金属材料打孔过程中的气液界面进行了瞬态描述. 并运用有限体积法, 编制计算程序对激光打孔过程中的温度场及气液界面移动过程进行了模拟, 此外也研究了孔型随激光作用时间的变化及激光参数对打孔速度、孔底部最高温度的影响, 为认识激光打孔过程和实际工艺研究提供参考.

1 模型建立

1.1 基本假设

如图 1 所示, 在激光热打孔过程中, 材料首先发生熔化, 随后部分气化蒸发, 产生的反冲压力将熔融液体溅射, 进而驱动气液(L/V)界面向下运动. 激光打孔过程涉及的影响因素复杂, 为建立激光打孔的瞬态数值模型, 作以下假设:

(i) 激光光斑为圆形, 能量输出符合高斯分布, 在有限的打孔深度内, 沿光束传输方向, 激光有效半径不变.

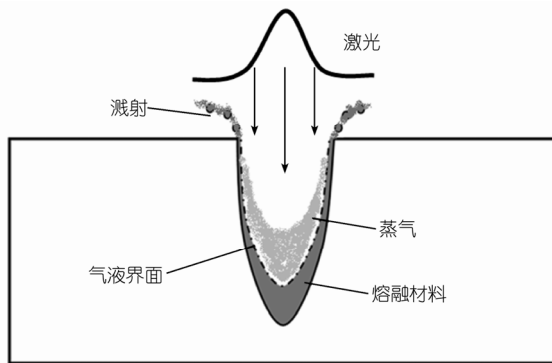


图 1 打孔过程示意图

Figure 1 Schematic representation of laser drilling process.

(ii) 激光能量直接作用于气液界面, 气液界面的移动由材料气化和熔融液体溅射去除驱动.

(iii) 忽略孔内激光多重反射效应导致的能量分布变化.

1.2 数学模型

Osher 和 Sethian^[12]于 1988 年提出了依赖时间的运动界面的水平集(level-set)描述, 是处理运动界面随时间演化过程中几何变化的有效计算工具^[13,14], 其主要思想是将移动的界面看成是其高一维的水平集函数中的零等值面. 如圆 $x^2 + y^2 = 1$, 可以看成是水平集函数 $\varphi(x, y) = x^2 + y^2 - 1$ 中 $\varphi = 0$ 的点的集合.

如图 2 所示, 为了描述孔型演化, 构造水平集函数 φ 为一个有符号的距离函数 $\varphi(x, y, z; t) = \pm d$, 其中 d 表示计算区域内点 (x, y, z) 到孔壁气液界面的距离, 使得任意时刻 L/V 界面 $\Gamma(t)$, 恰为 $\varphi(x, y, z; t)$ 的零等值面, 最终通过确定满足 $\varphi = 0$ 的点的位置, 对激光打孔过程 L/V 界面动态演化过程进行描述.

对于任意时刻 t , 相界面 $\Gamma(t)$ 上的任意点, 均满足 $\varphi(x, y, z; t) = 0$, 对其关于 t 求导, 根据链式法则, 从而有:

$$\varphi_t + \mathbf{U}(x, y, z; t) \cdot \nabla \varphi = 0, \quad (1)$$

$$\varphi_t + (\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}) |\nabla \varphi| = 0, \quad (2)$$

上式中, \mathbf{n} 为界面法线向量. 则 $F_p = \mathbf{U} \cdot \mathbf{n}$, 为相界面移动的速度函数. 激光打孔过程中, 材料去除效应造成气液界面的移动, 包括: 材料蒸发损失引起的界面移动速率 F_v 、熔融液体飞溅损失引起的界面移动速率 F_l . 则上式可以表示为

$$\varphi_t + (F_v + F_l) |\nabla \varphi| = 0. \quad (3)$$

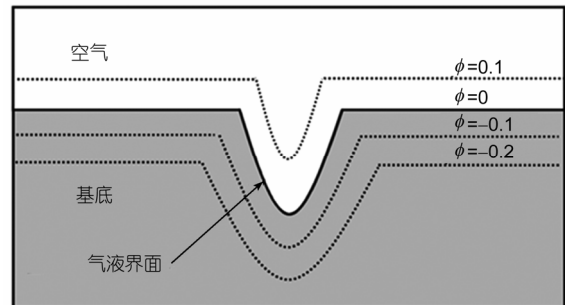


图 2 打孔界面演化 level-set 图示

Figure 2 Illustration of level-set.

激光作用下材料发生熔化并气化. 气液界面的蒸发是一个复杂的物理过程, 在气液界面之外存在极薄的 Knudsen 层^[15], Knudsen 层处, 温度、压力、密度等物理参数会发生突变, 通常将其处理为数学上的不连续. 根据 Knight 提出的间断条件^[9,16], 蒸发的质量损失可以由(4)式表示, 由此可得材料蒸发去除导致的界面移动速度 F_v .

$$\begin{aligned} \dot{m}_v &= \rho_{lv} \left(\frac{R_v T_{lv}}{2\pi} \right)^{1/2} - \rho_v \left(\frac{R_v T_v}{2\pi} \right)^{1/2} \beta F_-(m) \\ &= \rho_l F_v, \end{aligned} \quad (4)$$

上式中 T_{lv} 为 L/V 界面处的温度, 通过求解整个计算域内的热传导方程得到, ρ_{lv} , ρ_v , T_v , $m = u_v / \sqrt{2R_v T_v}$ 分别表示气液界面处的材料密度、Knudsen 层内蒸气密度、温度及无量纲蒸发率, 均可通过间断条件由 T_{lv} 导出, $R_v = R / M_{mol,1}$, R 为气体状态常数, $M_{mol,1}$ 为金属摩尔质量.

$$F_-(m) = \sqrt{\pi} m (-1 + \operatorname{erf}(m)) + \exp(-m^2),$$

其中

$$\operatorname{erf}(m) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^m e^{-t^2} dt.$$

激光作用下金属剧烈蒸发产生的界面压力可以近似表达如式(5)^[17], 其中 p_a 为大气压力, p_{sat} 为一个大气压下的材料饱和蒸气压, L_v 为材料气化潜热:

$$p_{lv} = 0.55 \cdot p_{sat} = 0.55 \cdot p_a e^{\frac{L_v(T_{lv}/T_b - 1)}{R_v T_{lv}}}, \quad (5)$$

激光打孔过程中, 熔融金属液体在孔内反冲压力的作用下发生飞溅, 对钻孔速度有重要的影响. 由于激光打孔过程中熔融液层薄($\sim 10 \mu\text{m}$)^[18], 液体溅射速度大($\sim 10 \text{ m/s}$)^[19], 在求解因熔融液体飞溅而引起的 L/V 界面演化速度函数 F_l 过程中, 可以采用以下近似方法.

物性参数下标 s 和 l 分别代表固相及液相. 取反冲压力为蒸发过程中界面压力的平均, $p_{recoil} = \overline{p_{lv}}$, 则根据伯努利方程, 反冲压力驱动下液体的溅射速度可以由(6)式进行计算:

$$p_{recoil} = \frac{1}{2} \rho_l V_l^2, \quad (6)$$

根据质量守恒, 孔底部固态材料的减少由材料蒸发和熔融液体飞溅去除两部分构成:

$$\frac{dm_s}{dt} = \frac{dm_v}{dt} + \frac{dm_l}{dt}. \quad (7)$$

如图 3, 假定孔的半径相当于激光有效半径 r , 则上式近似地写作:

$$A \rho_s (\overline{F}_v + \overline{F}_l) = A \rho_{liq} \overline{F}_v + 2\pi r \overline{\delta}_l \rho_l V_l, \quad (8)$$

其中 A 为由激光辐照的孔底部面积如图 3(b)所示, 熔化层厚度的平均值^[4]

$$\overline{\delta}_l \approx \alpha / \overline{F}_p = \alpha / (\overline{F}_v + \overline{F}_l),$$

其中 α 为液态材料的热扩散系数, $\alpha = K / \rho_l C_{pl}$, 通过(8)式求解 \overline{F}_l , 进而得到气液界面各点总的推进速度:

$$F_p \approx F_v + \overline{F}_l. \quad (9)$$

本文采用液体体积分数法处理材料固/液界面处的物性参数过渡. T_l 和 T_s 分别代表液相和固相温度, 液体分数 f_l 定义为

$$f_l = \begin{cases} 0, & T < T_s, \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s}, & T_s \leq T < T_l, \\ 1, & T_l \leq T < T_b. \end{cases} \quad (10)$$

在熔化过程中潜热的释放由材料热容的变化进行表达, 由下式给出, 其中 L_l 为熔化潜热:

$$C_p = \begin{cases} C_{ps}, & T < T_s, \\ (1-f)C_{ps} + fC_{pl} + \frac{L_l}{T_l - T_s}, & T_s \leq T < T_l, \\ C_{pl}, & T > T_l. \end{cases} \quad (11)$$

相应的, 在固液混合区材料密度和热导率的变化为

$$\rho = (1-f)\rho_s + f\rho_l, \quad (12)$$

$$K = (1-f)K_s + fK_l. \quad (13)$$

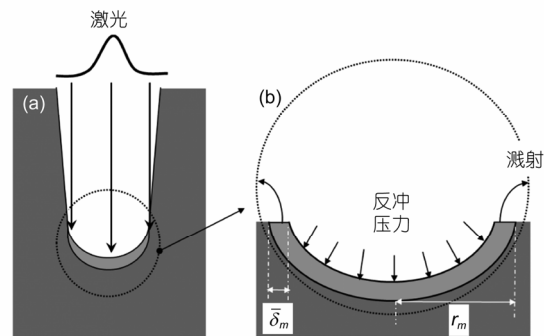


图 3 打孔过程中液体溅射
Figure 3 Melt ejection in laser drilling.

在气液界面处, 液态材料和环境气体的物性相差大, 为避免数值计算发散, 引入过渡函数对物性变化进行平滑处理:

$$H_\varepsilon(\varphi) = \begin{cases} 0, & \varphi < -\varepsilon, \\ 0.5 \left[1 + \frac{\varphi}{\varepsilon} \right], & |\varphi| < \varepsilon, \\ 1, & \varphi > \varepsilon. \end{cases} \quad (14)$$

ε 为过渡层厚度, 取能实现收敛条件下的最小值. 在整个计算域内的物性参数可表示为

$$\rho_\varepsilon = \rho_a H_\varepsilon(\varphi) + [1 - H_\varepsilon(\varphi)] \rho, \quad (15)$$

$$K_\varepsilon = K_a H_\varepsilon(\varphi) + [1 - H_\varepsilon(\varphi)] K, \quad (16)$$

$$C_{p\varepsilon} = C_{pa} H_\varepsilon(\varphi) + [1 - H_\varepsilon(\varphi)] C_p, \quad (17)$$

ρ_a, K_a, C_{pa} 为大气密度、热导率、热容.

假定激光能量呈高斯分布, P 为激光功率, r 为激光有效半径. 激光功率密度分布 $q''(r)_{\text{laser}}$ 可表示为

$$q''(r)_{\text{laser}} = \frac{2P}{\pi \cdot r^2} \exp\left(-\frac{2(x^2 + y^2)}{r^2}\right), \quad (18)$$

$\eta \cdot q(r)_{\text{laser}}$ 表示材料吸收的激光能量, η 为吸收率. 孔表面的能量损失包括: 界面处材料气化带走潜热 $\rho_l L_v F_v$ 、孔壁辐射散热损失 $\sigma \varepsilon (T^4 - T_a^4)$ 及熔融液体飞溅造成的能量损失 $(C_{ps} T_s + L_m) F_l$. 孔表面(气液界面处)的能量边界可以表示为

$$q''(r) = \eta \cdot q''(r)_{\text{laser}} - \rho_l L_v F_v - (C_{ps} T_s + L_m) F_l - \sigma \varepsilon (T^4 - T_a^4), \quad (19)$$

其中 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$ 为波尔兹曼常数, ε 为材料发射系数.

构造关于 level-set 值的 delta 函数:

$$\delta(\Phi) = \begin{cases} 1, & \text{if } \Phi = 0, \\ 0, & \text{elsewhere.} \end{cases} \quad (20)$$

则, 整个计算区域的能量方程可以表达如下

$$\frac{\partial(\rho_\varepsilon C_{p\varepsilon} T)}{\partial t} = K_\varepsilon \nabla^2 T + q'' \delta(\varphi). \quad (21)$$

通过 delta 函数, 实现在 L/V 界面单元处添加能量输入边界, 并将气液界面处的能量边界包含至能量方程的源项中进行考虑, 进而使能量输入边界的加载随孔型的变化而实时移动. 在整个求解域内求解能量方程, 可以得到其中各点的温度分布.

2 数值计算及分析

以低碳钢为对象, 对其进行了激光打孔的数值模拟, 计算中用到的参数由表 1 所示.

图 4 所示为计算采用的网格及边界条件. 考虑激光打孔过程中材料和激光能量分布的对称性, 以一半几何模型作为计算对象. 对称面($X-Z$ 面)设为绝热条件; 由于激光打孔过程发生迅速, 热量传播范围小, 所以其他网格边界均设为恒温边界. 初始条件下取材料温度为环境温度 300 K , 水平集函数 $\varphi = 0$ (L/V 界面)定位于 $Z = 0$ 处, $Z > 0$ 和 $Z < 0$ 分别代表空气和材料, 被赋予各自的物性参数.

表 1 材料参数

Table 1 Material properties

属性	符号	数值
液相温度(K)	T_l	1808
固相温度(K)	T_s	1770
沸点(K)	T_b	3133
大气温度(K)	T_a	300
固态密度(kg m^{-3})	ρ_s	7870
液态密度(kg m^{-3})	ρ_l	6518
熔化潜热(J kg^{-1})	L_m	2.72×10^5
气化潜热(J kg^{-1})	L_v	6.615×10^6
固态金属热导率(W (mK)^{-1})	K_s	40.96
液态金属热导率 (W (mK)^{-1})	K_l	43.99
固态金属热容 (J (kg K)^{-1})	C_{ps}	658.63
液态金属热容(J (kg K)^{-1})	C_{pl}	804.03
比热比	γ_v	5/3
金属摩尔质量(kg (mol)^{-1})	$M_{\text{mol},l}$	0.056

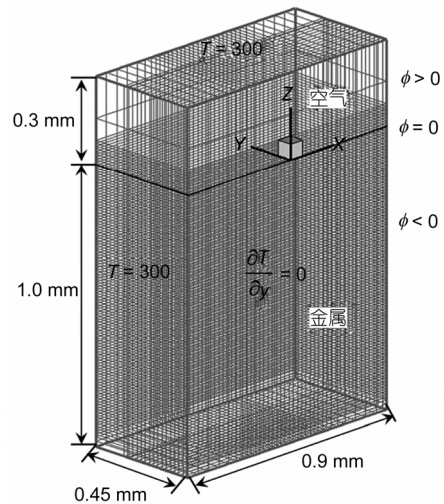


图 4 计算网格及边界条件

Figure 4 Mesh and boundary conditions.

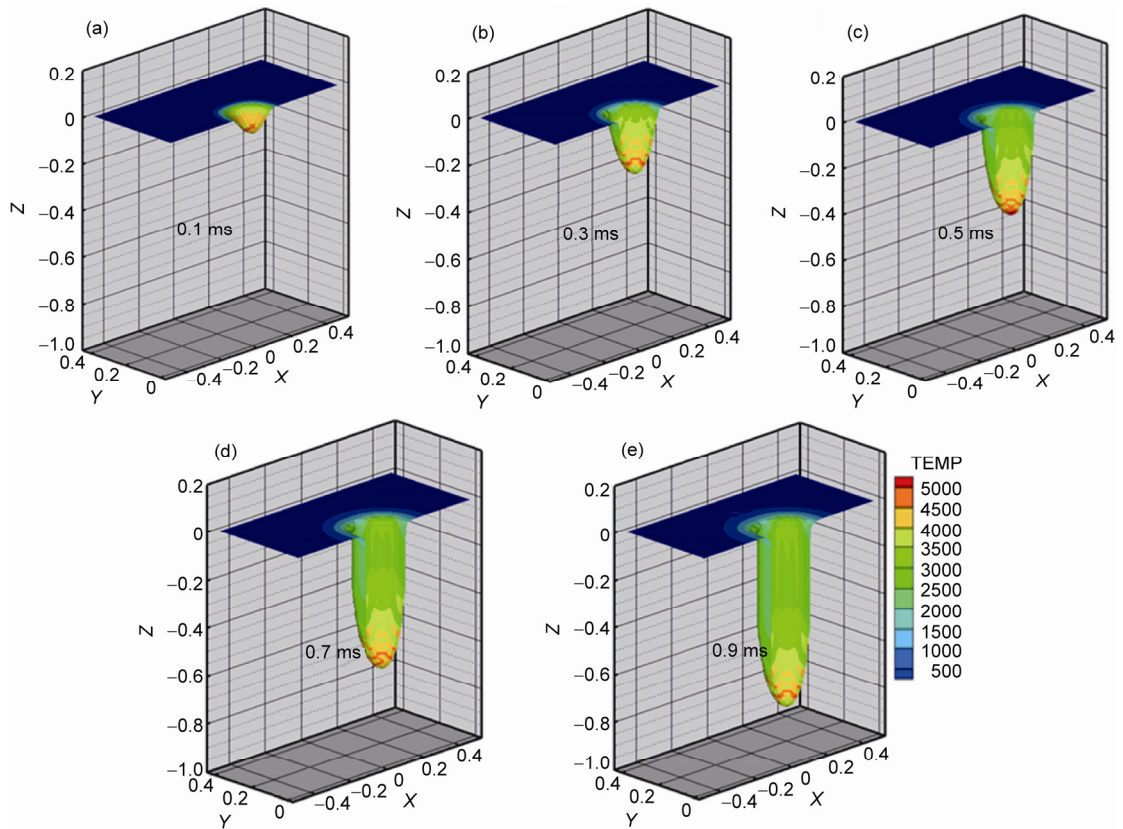


图5 激光打孔过程中孔型及温度场演化($\eta P=1000\text{ W}$, $r=0.1\text{ mm}$)

Figure 5 Hole geometry and temperature field evolution in laser drilling process ($\eta P=1000\text{ W}$, $r=0.1\text{ mm}$).

取吸收激光功率 $\eta \cdot q(r) = 1000\text{ W}$, 激光有效半径 $r=0.1\text{ mm}$, 激光作用时间 1 ms , 对激光打孔过程进行了模拟. 图5展示了 $0.1\text{--}0.9\text{ ms}$ 时(间隔 0.2 ms), 孔型随激光作用时间的连续演化过程. 激光作用下材料的蒸发及飞溅损失造成气液界面的向下运动. 等位面上的云图表征孔内气液界面处的温度分布. 由于激光能量的高斯分布形式, 在光束中心处激光功率密度最大, 相应的气液界面中心处(孔底部)温度最高, 达到 5000 K 以上, 远超过了材料的沸点, 打孔过程中, 材料在高密度激光作用下处于过热蒸发状态.

图6模拟不同功率所对应的孔底部中心处温度随时间的变化. 在特定吸收激光功率输入下, 孔底部温度迅速上升, 材料发生气化, 而在非常短的时间内, 孔底部温度基本趋于稳定值; 且功率越大, 孔底部温度达到稳定状态所需的时间越短. 孔底部中心温度值的相对恒定表明激光能量输入与材料蒸发、熔融液体飞溅、辐射、及材料内部热传导导致的能量散失达成平衡状态, 材料去除速率稳定, 打孔进入准稳

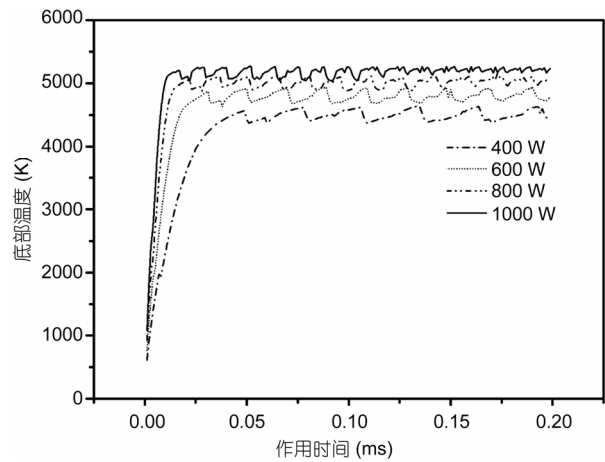


图6 孔底部中心处温度随吸收激光功率和时间的变化 ($r=0.1\text{ mm}$)

Figure 6 Maximum L/V interface temperature as a function of time at different laser powers ($r=0.1\text{ mm}$).

态过程.

取不同功率下趋于稳定的孔底部温度做比较,

如图 7 所示, 该温度随激光功率的增大而增大, 但温度上升的速率有所下降. 原因在于, 随功率上升, 界面处材料气化和溅射引起质量损失速率增加, 气化潜热吸收和熔融液体飞溅能量散失加大, 从而减缓了孔边界能量输入的提高.

在 0.1 mm 激光有效半径下, 以吸收的激光功率 $\eta \cdot q''(r)_{\text{laser}}$ 作为变量, 分析了不同吸收能量下孔的演化行为, 图 8 表示了孔深随激光作用时间及吸收功率的变化. 由图可得, 在计算范围内, 当孔内激光吸收能量恒定时, 孔深与激光作用时间基本呈正比例线性关系. 图中直线的斜率可以将其定义为钻孔速率, 也由此说明, 当能量输入为恒值时钻孔速率基本保

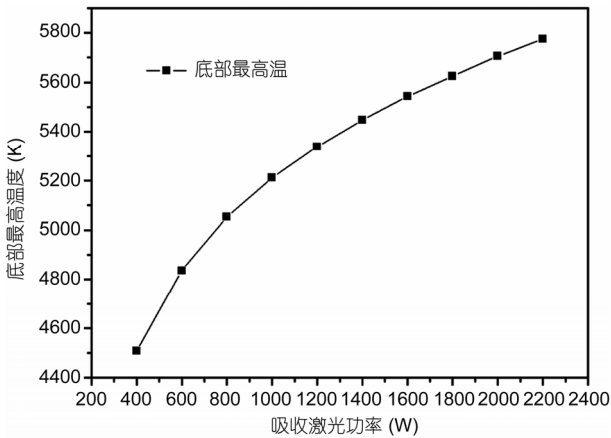


图 7 孔底部中心最高温度随吸收功率的变化($r=0.1$ mm)
Figure 7 Relationship between average highest L/V interface temperature and absorb laser power ($r=0.1$ mm).

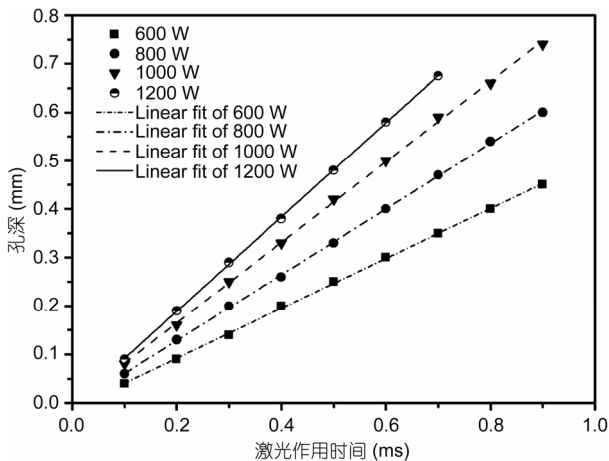


图 8 孔深随激光作用时间及吸收功率的变化($r=0.1$ mm)
Figure 8 Hole depth as a function of time at different laser powers ($r=0.1$ mm).

持不变, 即进入由上文提到准稳态过程, 孔深随时间以相对恒定的速率向下发展, 钻孔速率数值为 m/s 量级. 钻孔速率随着输入功率密度的增大而加大.

图 9 为 Nd: YAG 激光器单脉冲打孔实验结果和计算的对比, 实验激光功率 1018 W, 光斑半径 0.071 mm, 作用时间 1 ms, 计算的孔型和实验结果相吻合. 在孔的入口处, 因长脉宽激光烧蚀而造成扩张形态. 由于激光在孔内复杂的能量传递及熔融液体飞溅、重凝, 实际的孔壁处存在不规则的起伏形态, 而目前本文模拟结果不能很好的体现.

激光打孔过程中, 因蒸发和溅射导致材料损失比例, 随功率密度升高而增大^[4], 由于本文综合考虑了两种效应, 所以能在更广的激光功率密度范围内模拟打孔行为. 但由于激光打孔机理及过程的复杂性, 此模型依然忽略了许多影响因素, 包括孔内激光多重反射、等离子对激光的遮蔽、光束半径随传播距离的变化等, 对此可在本模型基础上做进一步的后续研究工作.

3 结论

(1) 利用金属材料激光打孔过程的固/液/气三相、三维数值模型, 结合 level-set 方法, 综合考虑激光打孔过程中蒸发和溅射引起的质量损失率作为气/液(L/V)界面移动的速度函数及由此带来的能量边界变化; 通过有限体积法对激光打孔过程进行数值瞬

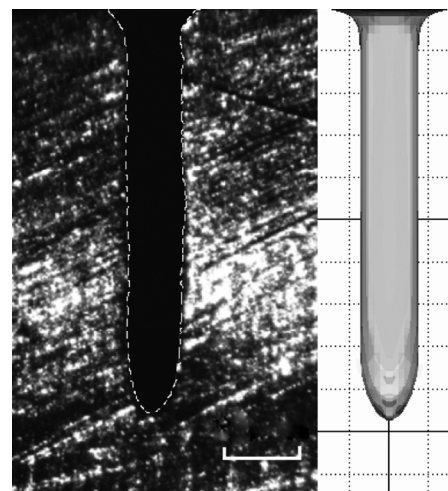


图 9 实验和计算结果对比
Figure 9 Comparison between experimental results and calculated one.

态计算求解,发现此模型可以有效地描述打孔的连续过程,动态展现激光作用下孔型的发展.

(2) 温度场模拟结果显示,打孔过程中孔底部中心处的温度最高.由于高功率密度激光的作用,底部温度超过材料的沸点,处于强过热蒸发状态.在恒定

激光能量输入下,较短的时间内孔底部温度趋于稳定值,钻孔速率基本不变,打孔过程进入准稳态过程.

(3) 打孔数值计算和实验结果进行了对比,两者吻合较好.

参考文献

- 1 Ng G K L, Li L. The effect of laser peak power and pulse width on the hole geometry repeatability in laser percussion drilling. *Opt Laser Technol*, 2001, 33: 393–402
- 2 Schneider M, Muller M, Fabbro R, et al. Study of hole properties in percussion regime with a new analysis method. *J Laser Micro Nanoen*, 2007, 2: 128–132
- 3 Dietrich J, Brajdic M, Walther K, et al. Investigation of increased drilling speed by online high-speed photography. *Opt Laser Eng*, 2008, 46: 705–710
- 4 Low D K Y, Li L, Byrd P J. Hydrodynamic physical modeling of laser drilling. *J Manuf Sci E-T ASME*, 2002, 124(4): 852–862
- 5 Ganesh R, Faghri A, Hahn Y. A generalized thermal modeling for laser drilling process-I. Mathematical modeling and numerical methodology. *Int J Heat Mass Transfer*, 1997, 40(14): 3351–3360
- 6 Park K W, Na S J. Theoretical investigations on multiple-reflection and Rayleigh absorption-emission-scattering effects in laser drilling. *Appl Surf Sci*, 2010, 256(8): 2392–2399
- 7 Chu Q C, Yu G, Lu G Q, et al. Two-dimensional numerical investigation for the effects of laser process parameters on hole type during laser drilling (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2011, 38(6): 0603001 [褚庆臣, 虞钢, 卢国权. 激光打孔工艺参数对孔型影响的二维数值模拟研究. *中国激光*, 2011, 38(6): 0603001]
- 8 Solana P, Ocana J L. A mathematical model for penetration laser welding as a free-boundary problem. *J Appl Phys*, 1997, 30: 1300–1313
- 9 Ki H, Mohanty P S, Mazumder J. Modeling of laser welding: Part I. Mathematical modeling, numerical methodology, role of recoil pressure, multiple reflections, and free surface evolution. *Metall Mater Trans A*, 2002, 33(6): 1817–1830
- 10 Cho J H, Na S J. Implementation of real-time multiple reflection and Fresnel absorption of laser beam in keyhole. *J Appl Phys*, 2006, 39: 5372–5378
- 11 Han L J, Liou F W, Musti S. Thermal behavior and geometry model of melt pool in laser material process. *J Heat Transfer*, 2005, 127(9): 1005–1014
- 12 Osher S, Sethian J. Fronts propagating with curvature dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi Formulations. *J Comput Phys*, 1988, 79(1): 12–49
- 13 Grooss J, Hesthaven J S. A level set discontinuous Galerkin method for free surface flows. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 2006, 195(1): 3406–3429
- 14 Wang S Y, Lim K M, Khoo B C. An extended level set method for shape and topology optimization. *J Comput Phys*, 2007, 221(1): 395–421
- 15 Knight C J. Theoretical modeling of rapid surface vaporization with back-pressure. *AIAA J*, 1979, 17: 519–523
- 16 Das S, Krishna P, Bruguier O, et al. Kinetic theory approach to interphase processes. *Int J Multiphase Flow*, 1996, 22(1): 133–155
- 17 Kelly R, Miotello A. Comments on explosive mechanisms of laser sputtering. *Appl Surf Sci*, 1996, 96(8): 205–215
- 18 Low D K Y, Li L, Byrd P J. The influence of temporal pulse train modulation during laser percussion drilling. *Opt Laser Eng*, 2001, 35(3): 149–164
- 19 Solana P, Kapadia P, Dowden J, et al. Time dependent ablation and liquid ejection processes during the laser drilling of metals. *Opt Commun*, 2001, 191(1-2): 97–112

Three-dimensional transient numerical simulation of laser drilling process

GE ZhiFu, YU Gang*, HE XiuLi*, LU GuoQuan & LI ShaoXia

Key laboratory of mechanics in advanced Manufacturing, institute of mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

A solid/liquid/gas three-phase numerical model is constructed to describe the progress of laser drilling by considering two main effects such as material evaporation and molten liquid ejection. The level set method is used to capture the liquid/vapor (L/V) interface and impose physical boundary conditions, making the model feasible to describe the evolution of the interface. By taking factors such as latent heat of vaporization and melt as well as energy lost due to the heat radiation etc. into account, a three-dimensional computer program based on finite volume method is developed for laser drilling, temperature field and the hole surface morphology evolution is simulated and the impact of different laser parameters on drilling are investigated.

laser drilling, numerical simulation, liquid/vapor interface, level-set

PACS: 42.62.Cf, 44.05.+e, 05.70.Fh, 05.70.Np

doi: 10.1360/132011-1303