

激光打孔工艺参数对孔型影响的二维数值模拟研究

褚庆臣¹ 虞 钢¹ 卢国权¹ 何秀丽¹ 郑彩云¹ 许永泰²
〔¹ 中国科学院力学研究所先进制造工艺力学实验室, 北京 100190
² 中国北方发动机研究所, 河北 廊坊 065000〕

摘要 针对孔型随激光工艺参数变化的特点,建立了具有光束传输和强度分布的激光打孔瞬态二维有限元模型,对孔型演化进行了数值模拟研究。模型考虑了激光束空间分布和材料相变潜热对孔的影响,给出了小孔的温度场瞬态分布和界面演化过程。结果表明,打孔速度随激光与材料作用时间增加而增大,钻孔速度大约在 1 m/s 量级,而孔径在打孔初期增大之后变化不大。比较了不同参数下各种孔型,包括直筒型、倒锥型和正锥型等,横截面的仿真结果与试验观测值吻合较好。仿真方法可以准确地模拟激光打通孔的过程,为实际工艺研究提供参考。

关键词 激光技术;激光打孔;数值模拟;孔型

中图分类号 TG665; T N249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0603001

Two-Dimensional Numerical Investigation for the Effects of Laser Process Parameters on Hole Type during Laser Drilling

Chu Qingchen¹ Yu Gang¹ Lu Guoquan¹ He Xiuli¹ Zheng Caiyun¹ Xu Yongtai²
〔¹Key Laboratory of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
²China North Engine Research Institute, Langfang, Hebei 065000, China〕

Abstract For the hole type changing with laser process parameters, a two dimensional transient finite model with characteristics of transmission and distribution of beam intensity for laser drilling is established. Numerical simulation research on the hole development is done. The model accounts for the spatial distribution of laser beam and the latent heat of materials phase transformation. The transient thermal field and interface evolution of the hole are showed in the computational analyses. The results show that the depth of the hole increases with the time of laser material interaction, with the drilling velocity about 1 m/s magnitude, while the hole diameter changes little after the initial increase. The experimental results of various cross section of the hole type in different parameters are compared with the simulation ones, and they are in good agreement. The hole types include cylindrical type, positive cone type, and inverted cone type. The numerical simulation method calculates the penetration holes and helps to choose appropriate laser parameters.

Key words laser technique; laser drilling; numerical simulation; hole type

OCIS codes 140.3390; 350.3390

1 引言

随着航空航天、电子和医疗器械等工业的发展,许多产品的关键部件都需要设计大量精微孔,以完

成特定功能,从而提高产品的性能。比如航空发动机中的涡轮叶片、导流叶片和燃烧室需要微孔多达 10^4 个,以减小器件表面温度和气体湍流效应^[1]。

收稿日期: 2011-03-21; 收到修改稿日期: 2011-04-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(10832011)和面上项目(10972222)资助课题。

作者简介: 褚庆臣(1983—),男,博士研究生,主要从事激光焊接的实验和数值模拟等方面的研究。

E-mail: cq000@yahoo.com.cn

导师简介: 虞 钢(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光与材料相互作用和激光制造工艺力学等方面的研究。

E-mail: gyu@imech.ac.cn

激光打孔技术以其能量集中度高、可控性好和无材料局限性等优势,自 20 世纪 70 年代产生开始已经在工业生产中得到广泛应用,成为一种必不可少的加工手段。

激光打孔的质量包括孔的几何特征和冶金特征,影响因素涉及激光功率、脉宽、脉冲个数、光束质量与离焦量等,由于激光打孔物理过程复杂,其内部机理尚不明确^[2]。已有研究中多以试验为基础开展大量规律性研究^[3];在激光打孔的数学仿真方面,国内外学者开始了不少探索^[4~8],对激光打孔过程的温度场和小孔演化的物理过程进行了建模和分析。

然而由于激光打孔涉及参数众多,孔型随工艺参数不同而变化,在实际激光打孔加工中为了得到特定的孔型常常需要大量摸索性试验,目前鲜有对此方面的数值研究。本文建立了激光打孔瞬态二维有限元模型,对不同工艺参数下孔型的变化进行了预测,并对各种孔型的计算结果和试验观测值做了对比,可为实际工艺研究提供参考。

2 数学模型的建立

2.1 物理模型描述

图 1 是激光打孔试验装置示意图,激光打孔是一种以高能量密度激光束为热源,照射于相对静止的材料工件表面,通过剧烈热效应去除少量材料而形成符合要求孔型的激光加工技术。激光束是在空间和时间上高度集中的光子束,应用光学聚焦技术把它会聚在微米量级的极小范围内,从而可获得 $10^5 \sim 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 光照功率密度,产生瞬间高温,在此范围内的材料能在零点几秒甚至更短的时间内液化甚至气化喷出,从而达到加工目的。

激光打孔技术的原理是利用脉冲激光束直接照

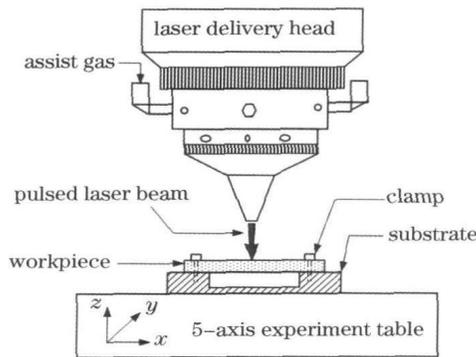


图 1 激光打孔试验装置示意图

Fig.1 Schematic of the laser drilling system used in the experiments

射在材料表面,首先对试样表面几十微米厚的材料静态加热,热量迅速向内部传导,形成大区域的材料升温直至熔化;随着照射时间的延长,由于温度升高材料吸收率增大,加热剧烈,部分熔融材料形成蒸气而去除,金属向内凹陷形成小孔;随后,伴随激光能量的持续加热,小孔内材料气化增加,金属蒸气带着熔融材料向外喷射,直至激光照射停止,小孔壁处熔化材料冷却凝固而形成特定形状的孔,如图 2 所示。一般激光打孔中材料的去除有两种主导模式:材料直接被加热至蒸气态而去除或熔融液体材料在小孔内外压力下喷射去除机制^[2,3,5]。本试验使用的激光器系统^[9]输出激光功率密度可达 10^6 W/cm^2 ,其材料去除以液态金属的喷射为主^[10]。

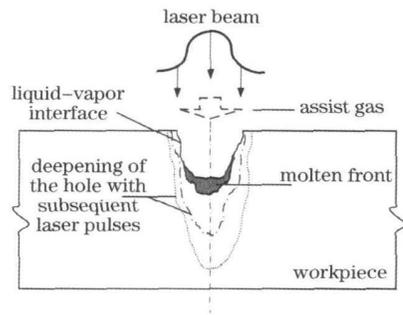


图 2 激光打孔过程示意图

Fig.2 Schematic representation for the process of laser drilling

2.2 基本假设

激光打孔常用的脉冲激光器,其激光束空间模式和时间模式是可以控制的^[11]。图 3 给出激光聚焦系统示意图,图中给出激光在传播方向上的分布特点,一般从激光焦点到光斑半径变为焦点半径 $\sqrt{2}$ 倍的距离,在这段长度范围内(称为瑞利长度 Z_R),激光束近似是平行的。在激光打孔工艺中为了使孔的深径比达到最大,充分利用激光在瑞利长度范围内光束高度集中的特性。在激光传播的横截面

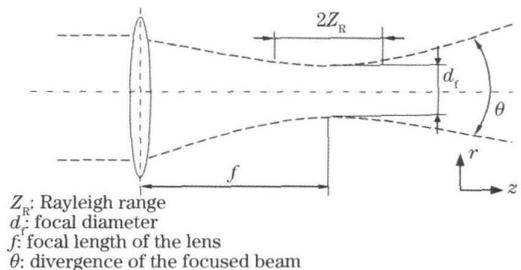


图 3 激光聚焦系统

Fig.3 Schematic of laser beam focus system

上,激光器输出模式一般为基模高斯光束,其光斑是一个圆斑,在圆斑内光强分布并不是均匀的,如图4所示。激光打孔涉及的工艺参数有脉冲能量、功率、激光强度的时空分布、脉宽、离焦量等参数,孔的形态特征是诸多参数相互影响共同作用的结果。

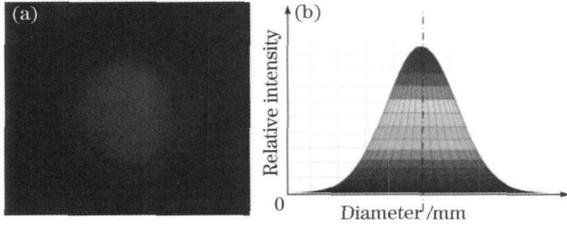


图4 高斯激光束

Fig.4 Gauss beam profile

由于高密度激光精微打孔涉及的影响因素繁多,为建立描述整个过程的数学模型,假设如下:

1) 激光束具有轴对称性,能量分布符合高斯分布;在传播方向上,瑞利长度内光强不变,其他位置随离焦量变化线性递减;

2) 材料去除以液态金属喷射为主,忽略蒸发潜热、等离子体对能量的耗散;仅考虑能量的变化,忽略材料去除的力学作用,温度达到熔点后表示材料被去除^[4];

3) 由于激光作用时间较短,热作用区域小,忽略热对流、辐射对能量的损失。

2.3 数学模型和计算方法

2.3.1 控制方程和边界条件

激光打孔是材料发生剧烈相变的热作用过程,本文的研究范围为图1所示工件的温度场变化。在轴对称性条件下,其控制方程为瞬态二维热传导方程

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (1)$$

式中 ρ 为密度, c 为比热容, k 为热传导系数。

激光打孔是非稳态的热传递过程,其初始条件和边界条件为:

初始条件取激光打孔初始时刻的温度分布,即为环境温度

$$T(x, y, 0) = T_0, \quad (2)$$

激光打孔过程中,随着孔深的加大,激光作用面逐渐下移,在加热表面

$$k \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{3\alpha P}{\pi R_0^2(y)} \exp\left[-\frac{3x^2}{R_0^2(y)}\right], \quad (3)$$

式中 P 为激光脉冲功率; $R_0(y)$ 为激光光束半径,在激光传播方向上随离焦量不同而变化,如图3所示; α 为材料对激光的吸收率。另外,除激光加热区域

外,其他界面绝热。

在激光打孔过程中存在材料的熔化,这将伴随着相变问题,相变时会吸收或放出潜热,即相变潜热。相变潜热在一定的程度上影响热作用。一般通过定义材料的焓值随温度变化来考虑潜热,即

$$H = \int \rho c dT, \quad (4)$$

式中 H 为热焓值。

2.3.2 有限元模型和计算方法

激光打孔试验材料为301不锈钢,厚1mm,材料的热物性参数见文献[12]。图5给出计算域和有限元网格。对激光光斑照射区域($-0.2 \text{ mm} \leq x \leq 0.2 \text{ mm}$)加密网格,以保证瞬态温度场计算的精度。整个计算域采用映射网格划分,以便在后续计算中方便单元选取。

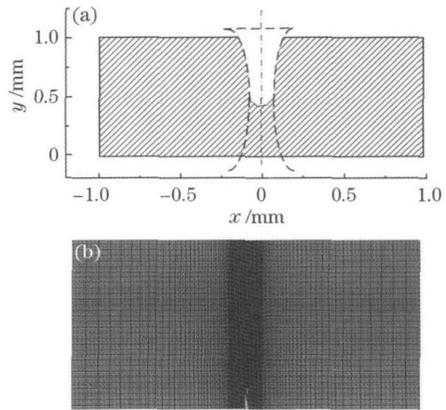


图5 (a) 计算域和(b)有限元网格

Fig.5 (a) Computational domain and (b) finite element mesh

在数值计算时对激光作用时间进行离散化,将激光打孔过程分成许多较短的时间步长,步长小于0.02ms;考虑到随着激光作用时间的增大,孔的自由界面发生变化,如图2所示。在计算中利用Ansys软件的生死单元技术,通过二次开发捕捉孔的界面变

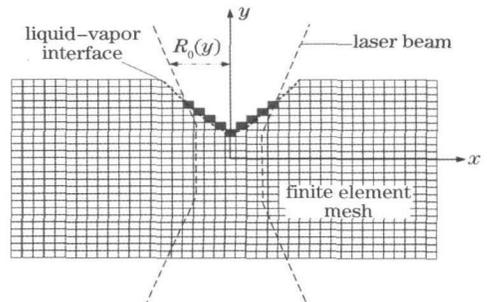


图6 界面捕捉示意图

Fig.6 Schematic of interface capturing

化,如图 6 所示;在每个时间步长内对(1)~(3)式进行耦合求解,在该时间步长结束后重新计算孔的界面和形状,直至打孔结束,整体计算流程图如图 7 所示。

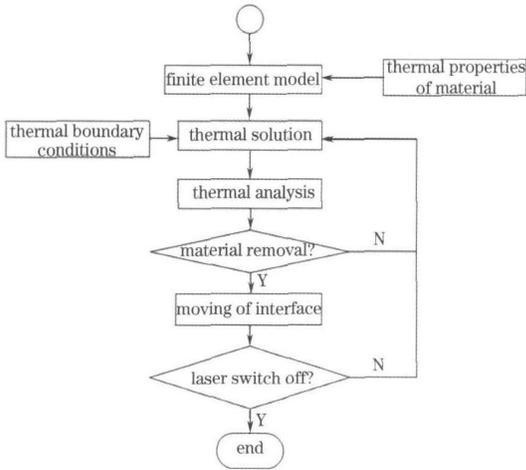


图 7 激光打孔仿真过程流程图

Fig. 7 Flow chart of the laser drilling simulation

3 计算结果及讨论

3.1 计算结果分析

把材料热物性参数和激光工艺参数带入模型,基于 Ansys 软件进行激光打孔的数值计算。图 8 为激光打孔两个典型过程,激光打孔发生复杂的物理过程,涉及了金属对激光吸收、金属的熔化、气化、蒸发以及液态金属的喷射等。图 8(a)表示材料吸收激光能量后温度升高,孔壁处温度超过材料熔点,孔底部部分材料达到了沸点成蒸气态;图 8(b)表示蒸气态的材料带着液态金属材料在外力作用下喷射出去形成新的界面。整个激光打孔过程重复图中两个过程,直至激光束移走,最终形成一定形状和尺寸

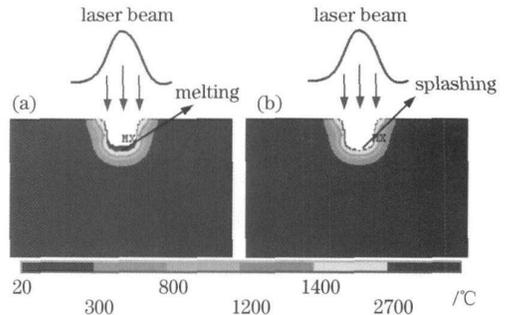


图 8 激光打孔典型过程。(a) 熔化,(b) 喷射

Fig. 8 Typical progresses in laser drilling. (a) melting, (b) splashing

的小孔。在激光单脉冲打孔或者多脉冲打孔中,以上两个过程是形成各种孔型的基本过程^[3]。

图 9 为激光打孔过程中温度场的瞬态分布(激光脉冲功率 1000 W,脉宽 2 ms,离焦量 0),图中给出了激光打孔过程中的材料内部温度场分布情况和各个时段温度场的演化。从图中可以看出,由于激光脉冲功率密度大,孔周围温度梯度变化剧烈,热影响区小。在打孔初期,材料吸收激光能量后迅速向内部传递,在小于 0.05 ms 的时间内,表层材料温度超过熔点,形成宽而浅的熔池;随着激光作用时间的延长,液态金属温度继续升高,部分材料达到沸点而成蒸气态,形成宽而浅的凹陷。随着孔深的增加,激光光斑直径开始小于小孔的宽度,大部分激光束能量照射在小孔底部的材料,小孔底部的温度不断升高,其他区域温度基本保持不变,促使小孔不断向下延伸,从而实现材料的去除,形成一定深度和形状的小孔。当材料被打穿之后,孔壁上处在激光照射区的材料继续升温而被去除,有利孔型的修整。

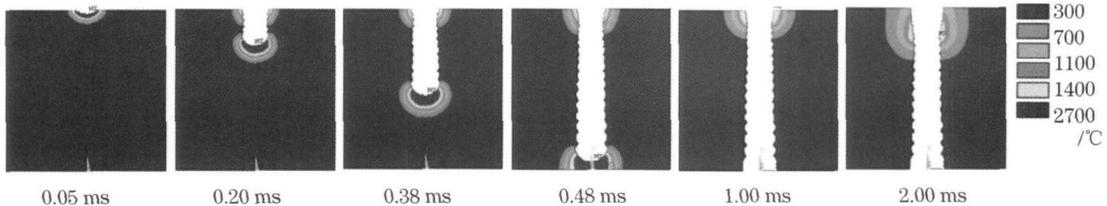


图 9 激光打孔温度场的瞬态分布

Fig. 9 Transient temperature distribution in laser drilling

对激光打孔过程中小孔界面进行捕捉,图 10 为小孔界面随激光作用时间的变化图。由图可见,孔径在激光照射的最初阶段 0.05 ms 内不断增大,随着时间的延续,孔径尺寸的增加速度明显减慢,而孔

深在激光束照射下持续增加。这是因为在最初很短的时间内材料在激光作用下产生的凹陷宽度开始大于激光束光斑直径,随着孔深的增加,大部分激光束直接照射在小孔底部,激光束能量主要被小孔底部

材料吸收,以增加孔深;而孔壁处的能量多来自光束在小孔内的多次反射吸收^[7, 14],温度增加较慢。

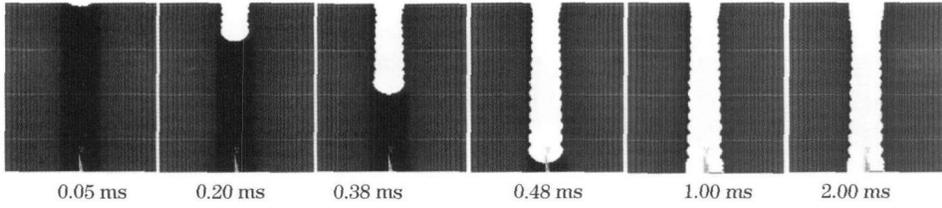


图 10 激光打孔中小孔演化

Fig. 10 Hole evolution process of the laser drilling

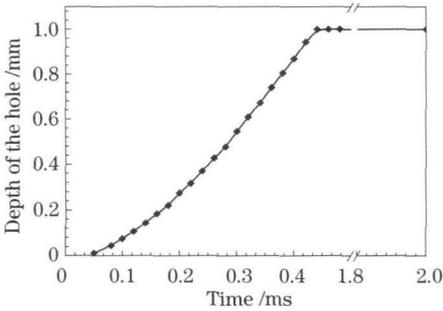


图 11 孔深随时间的变化曲线

Fig. 11 Depth of the hole as a function of time

对图 11 曲线方程进行求导给出激光打孔速度变化,如图 12 所示。由图可见,在激光未打透材料前约 0.5 ms 内,激光打孔速度从 1 m/s 增大到约 3 m/s,随着时间的变化,打孔速度缓慢增大,表明孔深增加速度在打孔后期有增大趋势。这主要是由于随着小孔深度的增加,孔壁开始变得陡峭,激光束中大部分能量直接照射在小孔底部,而孔周围由于能量的累积,温度逐渐提高,因此导致小孔底部材料升温速度越来越快,钻孔速度缓慢提高。在此激光参数下,钻孔速度处于 1 m/s 量级,对比文献[8]的试验结果,发现两者基本一致。

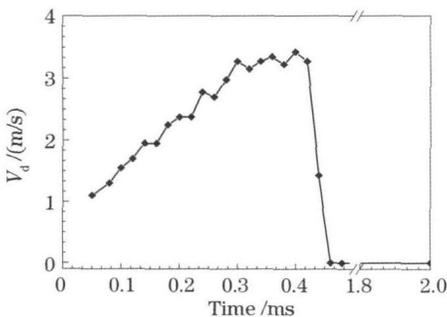


图 12 计算打孔速度随时间的变化曲线

Fig. 12 Drilling velocities V_d as a function of time

3.2 试验验证

对 1 mm 厚不锈钢板进行激光打孔试验,激光工

图 11 为孔深随时间的变化曲线,孔深在短时间内迅速增加,在约 0.5 ms 被打穿后保持不变。

艺参数如表 1 所示。对试验后的孔进行线切割,截取孔直径处的横截面图,用 Nephot II 型光学显微镜观测孔截面的形状和尺寸;同时,把材料热物性参数和激光工艺参数带入模型,基于本文的计算方法仿真得到孔的横截面,将试验结果和计算结果对比,如图 13 所示。

表 1 激光打孔参数

Table 1 Laser drilling variables for experiments

Data set	Laser power / W	Pulse width / ms	Defocusing distance / mm	Pulse numbers
(a)	1000	2	- 0.3	1
(b)	1000	2	+ 0.2	1
(c)	1000	2	0	1
(d)	1000	2	0	5
(e)	1000	4	0	1

由图 13 可见,计算结果和试验结果吻合较好;但计算所得的孔径比试验结果略大,原因可能是计算中未考虑材料去除引起的能量损失。另外,试验结果中孔的上口相比计算结果有较大倒角,主要是由于激光打孔过程中产生的等离子体云或金属蒸气在喷射时对材料上表面热辐射作用,造成激光入口处熔化区域扩大;本文计算模型中未考虑这种热效应。

对比图 13(a) ~ (c),在仅改变激光束的离焦量时,小孔形状表现出(a)正锥型,(b)倒锥型和(c)直筒型;由图 3 可知经过聚焦后激光束的光斑大小在传播方向上不一样,在瑞利长度内的光斑直径最小,离焦量正或负时激光光斑直径逐渐变大,由此造成孔型从负离焦变为正离焦时从正锥型变为倒锥型,通过调整合适的离焦量大小可以打出直筒型的孔。当改变脉宽[如图 13(d),(e)]或脉冲个数[如图 13(c),(d)]时,小孔孔型变化较小,都表现为直筒型,这是因为采用较小能量[如图 13(c)]已经把材料打

穿(由图 11 知约 0.5 ms 时材料被打透), 增大脉宽或增加脉冲个数只能对小孔壁做部分修整, 大部分能量从打透后的孔中传播出去。由此可以看出, 在

激光打孔涉及众多工艺参数中, 激光束离焦量的变化是决定孔型的主导因素。

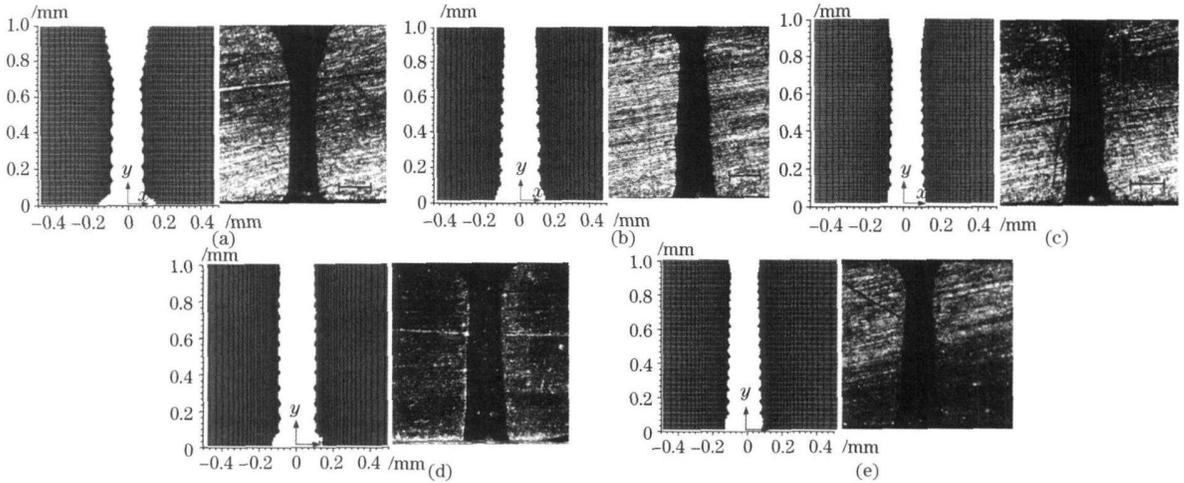


图 13 孔截面的试验和计算对比图

Fig. 13 Comparison of simulated and experimental hole cross section

4 结 论

在激光打孔过程中, 影响因素众多, 孔型的形状和尺寸难以确定, 通过对激光打孔二维瞬态过程的数值模拟研究, 发现:

1) 激光打孔整个过程中重复着熔化和喷射两个过程, 直至激光束移走, 最终形成一定形状和尺寸的小孔;

2) 温度场模拟结果显示, 孔周围温度梯度变化剧烈, 热影响区较小, 小孔底部温度最高。孔深增加速度随激光与材料作用时间增加而增大, 而孔径在打孔初期增大之后变化不大, 钻孔速度大约在 1 m/s 量级;

3) 孔型随激光参数从负离焦到正离焦时表现为从正锥型变为倒锥型, 通过调整合适的离焦量大小可以打出直筒型的孔。在小孔被打穿后, 脉宽和脉冲个数对孔型的影响较小。

参 考 文 献

- 1 C. A. McNally, J. Folkes, I. R. Pashby. Laser drilling of cooling holes in aeroengines: state of the art and future challenges [J]. *Materials Science and Technology*, 2004, **20**(7): 805~ 813
- 2 K. Voisey, C. Cheng, T. Clyne. Quantification of melt ejection phenomena during laser drilling[C]. *Laser Solid Interactions for Materials Processing*, Materials Research Society, San Francisco, 2000, J5. 6
- 3 K. T. Voisey, S. S. Kudesia, W. S. O. Rodden *et al.*. Melt ejection during laser drilling of metals[J]. *Materials Science and Engineering & Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2003, **356**(1-2): 414~ 424
- 4 C. F. Cheng, Y. C. Tsui, T. W. Clyne. Application of a 3 D heat flow model to treat laser drilling of carbon fibre composites [J]. *Acta Metall. & Mater*, 1998, **46**(12): 4273~ 4285

- 5 D. K. Y. Low, L. Li, P. J. Byrd. Hydrodynamic physical modeling of laser drilling [J]. *J. Manufacturing Science and Engineering*, 2002, **124**(12): 852~ 862
- 6 J. H. Cho, S. J. Na. Theoretical analysis of keyhole dynamics in polarized laser drilling[J]. *J. Phys. D-Appl. Phys.*, 2007, **40**(24): 7638~ 7647
- 7 K. W. Park, S. J. Na. Theoretical investigations on multiple reflection and Rayleigh absorption emission scattering effects in laser drilling [J]. *Applied Surface Science*, 2010, **256**(8): 2392~ 2399
- 8 Song Linsen, Shi Guoquan, Li Zhanguo. Simulation of laser drilling temperature field using ansys [J]. *Acta Armamen Tarü*, 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
- 9 Wang Henghai, Yu Gang, Pang Ming *et al.*. Cylinder welding control technology of integrated laser manufacturing system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1571~ 1576
- 王恒海, 虞 钢, 庞 铭 等. 集成化激光制造系统的软件焊接控制工艺[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1571~ 1576
- 10 D. K. Y. Low, L. Li, A. G. Corfe *et al.*. Spatter free laser percussion drilling of closely spaced array holes [J]. *International J. Machine Tools and Manufacture*, 2001, **41**(3): 361~ 377
- 11 Yu Gang, Wang Henghai, He Xiuli *et al.*. Laser surface hardening using determined intensity distribution [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 480~ 486
- 虞 钢, 王恒海, 何秀丽 等. 具有特定光强分布的激光表面硬化技术 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 480~ 486
- 12 Chu Qingchen, He Xiuli, Yu Gang *et al.*. Numerical simulation and analysis on temperature field for laser welded stainless steel lap joint [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3180~ 3186
- 褚庆臣, 何秀丽, 虞 钢 等. 不锈钢激光搭接焊接头温度场数值模拟及分析 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3180~ 3186
- 13 W. R. Smith. Models for solidification and splashing in laser percussion drilling [J]. *Siam J. Applied Mathematics*, 2002, **62**(6): 1899~ 1923
- 14 M. F. Modest. Effects of multiple reflections on hole formation during short pulsed laser drilling [J]. *J. Heat Transfer-Transactions of the Asme*, 2006, **128**(7): 653~ 661