

文章编号 1004-924X(2011)02-0340-08

毫秒激光金属打孔的解析和实验

秦 渊¹, 毕 娟², 倪晓武¹, 沈中华¹, 张喜和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. 长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022)

摘要:研究了用毫秒脉宽的长脉冲激光单个脉冲打深孔的成形过程和打孔速率。首先,由切割法得到了1 ms脉宽的Nd:YAG高斯激光对厚铝板打孔时孔的形貌,激光能量为7.9和28.9 J时,对应的孔深分别为1.849和2.975 mm。根据实验建立了轴对称模型,通过热传导方程得到了固相温度的解析解。然后,假设物质一旦熔融就离开孔,由能量平衡原理得到了孔形状的表达式。实验发现随激光能量增加,孔深增加,计算与实验结果差异也增大;进一步的计算显示,在其他条件不变时,光束半径的变化对孔深的影响较大。因此,引入离焦效应对算法进行了改进,改进后的计算结果与实验总体相符。最后,研究了长脉冲激光对铝、铜、银和钛4种金属的打孔速率,结果表明,钛对激光吸收最强、热传导率能力最弱,打孔速率最大。

关键词:激光打孔;毫秒激光;打孔速率;离焦效应

中图分类号: TG665 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111902.0340

Analysis and experiment on millisecond pulsed laser drilling of metals

QIN Yuan¹, BI Juan², NI Xiao-wu¹, SHEN Zhong-hua¹, ZHANG Xi-he²

(1. *Department of Information Physics & Engineering, School of Science,
Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;*

2. *School of Science, Changchun University of Science & Technology, Changchun 130022, China)*

Abstract: With the purpose of investigating the millimeter order hole's formation and the drilling speed drilled by a single millisecond pulse laser, the shapes of holes in an aluminium slab drilled by a Nd:YAG Gaussian laser with 1 ms pulse width were obtained with the cutting method in an experiment. The hole depth is 1.849 mm and 2.975 mm when the laser energy is 7.9 J and 28.9 J, respectively. A semi-infinite axisymmetric model was established according to the experiment and the analytical solution of temperature in a solid phase was derived based on the thermal conduction equation. Meanwhile, by assuming that material was removed from the hole once it was melted, the function describing the hole's shape was obtained with the energy balance theory. It was found that the difference between the calculation and the experimental results becomes larger as well as the hole's depth increases with the increase of laser energy. Further investigation indicates that the variation of beam radius af-

收稿日期:2010-10-08;修订日期:2010-10-31.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60778006);国防基础科研基金资助项目(No. A3620060122)

fects the hole's depth greatly under other unaltered conditions. Thus, the defocusing effect was induced to modify the analytical solution and obtained results are in agreement well with those of the experiments. Finally, the drilling speed of millisecond pulsed laser for aluminum, copper, silver and titanium were studied. The results show that drilling speed for titanium is the fastest one due to its high absorptivity for laser and poor heat conduction ability.

Key words: laser drilling; millisecond pulsed laser; drilling speed; defocusing effect

1 引 言

激光在加工和制造业等领域的应用日渐广泛。以打孔为例,喷嘴、过滤器^[1]和涡轮机叶片上的冷却孔^[2]的孔直径通常在百微米量级,采用传统工艺打孔困难并且成本较高^[3],激光打孔具有非接触、高效等特点,可以获得大深径比的孔,因而是一种有发展前景的加工方法。

在激光打孔中最受关注的是孔的具体形状和尺寸。实际上,不同参数激光的打孔深度也不相同。脉宽为 50 fs 且能量密度为 17.6 J/cm² 的单脉冲激光打孔深度约为 1.1 μm,当脉宽为 24 ps 时,对应的深度约为 0.8 μm^[4];脉宽为 15 ns 且能量密度为 800 J/cm² 的单脉冲激光打孔深度为 10 μm^[5];而脉宽为 1 ms,能量密度约为 5 846 J/cm² 的激光,打孔时物质逐渐熔融和汽化,当蒸汽引起的反冲压力超过液体表面张力时,熔融物被喷溅出来,激光打孔效率得到提高,打孔深度可达 2.5 mm^[6]。通过比较可知,在单脉冲激光打孔时,脉宽在毫秒量级的长脉冲激光打孔深度最深。

孔的实际形状和尺寸可由 X 光照相法、切割法、拼接打孔法^[6]和全息摄影法^[7]获得,也可以通过理论计算来预测。B. S. Yilbas^[8] 等人采用有限差分法计算了 24 ns 的脉冲激光打孔中涉及的熔融和汽化过程,得到了孔形状。Kwan-Woo Park 和 Suck-Joo Na^[9] 通过数值计算研究了等离子羽和激光束在孔内的多次反射对打孔深度的影响。Anoop N. Samant^[10] 等人根据已报道的一维的温度、汽化速率、喷溅速率和反冲压力解析形式,研究了多脉冲激光对碳化硅陶瓷的打孔过程。除了汽化和喷溅过程,G. K. L. Ng 等人^[11] 在求解打孔深度时还考虑了辅助气体氧气对打孔速率的影响。由此可见,孔的成形过程不仅仅涉及到相变和等离子体的产生,还与流体力学密切相关,

计算比较复杂。

长脉冲激光和物质的相互作用过程主要涉及温升、熔融和汽化等热学现象^[12-13],以及材料热膨胀引起变形而产生的热应力现象^[14-16],几乎没有等离子体出现。M. Von Allmen^[17] 指出当激光光强接近熔融物喷射的阈值时,以喷溅形式迁移的液体质量可能超过总迁移质量的 90%。C. L. Chan 和 J. Mazumder^[18] 的研究结果表明,功率为 10~20 kW,脉宽为 1 ms 的激光照射铝时,液体喷溅为主要的质量迁移形式。当激光功率密度为 4 MW/cm² 且脉宽为 0.1 ms 时,Vladimir Semak 和 Akira Matsunawa^[19] 也得到了类似的结果。根据这个特点,可假设长脉冲激光打孔时,物质一旦熔融就离开小孔,激光直接照射在孔壁上,固-液界面就是孔的轮廓,这将使孔外形的计算过程得到简化。

本文首先在实验中由切割法得到了不同能量的脉宽为 1 ms 的 Nd:YAG 高斯激光对厚铝板打孔时孔的形貌。根据实验建立了轴对称的半无限大模型,基于热传导理论和上述假设求得了孔形状的数学表达式,进而将离焦效应引入计算方法。最后,研究了长脉冲激光对铝、铜、银和钛 4 种金属的打孔速率。

2 实 验

2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示。实验采用型号为 Melar-50 的 Nd:YAG 长脉冲激光器,输出波长为 1 064 nm,脉宽 0.5~2.5 ms 可调,光束质量因子 M^2 约为 50。激光束经 45° 全反镜逆重力方向传输,再由透镜聚焦在 7.6 mm 厚的铝板上。图 1 中,为防止打孔时喷溅物破坏透镜,透镜上方放置了一块长度为 75.6 mm,厚度为 0.9 mm 的玻璃片。激光束横截面光强为高斯型空间分布,在铝

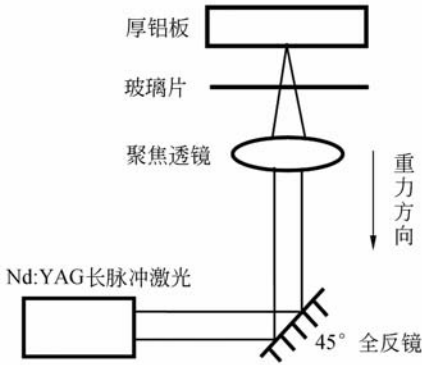


图 1 长脉冲激光对厚铝板打孔的实验装置图

Fig. 1 Experimental system of long pulsed laser drilling on an aluminum slab

板表面, 光束半径约为 $250\ \mu\text{m}$ 。采用单个脉冲

打孔, 脉宽取 $1\ \text{ms}$ 。打孔结束后, 用线切割法沿着孔的直径将铝板切开, 切割宽度为 $0.3\ \text{mm}$ 。最后, 由精度为 $0.01\ \text{mm}$ 的读数显微镜测得了孔的深度。

2.2 实验结果

图 2 为孔的纵截面的照片, 其中对应的激光能量是在激光束穿过 45° 全反镜和聚焦透镜以后测得的。由图 2 可见激光能量不同, 孔的形貌也不同, 在激光能量较小时, 孔半径随着深度的增加而不断减小, 从而呈现为锥形。随着激光能量的增加, 孔深增加, 孔半径在接近孔的底部时才随深度增加而减小。当激光能量为 $7.9\ \text{J}$ 时, 孔深为 $1.849\ \text{mm}$; 当能量达到 $28.9\ \text{J}$ 时, 孔深为 $2.975\ \text{mm}$, 均小于铝板的厚度。

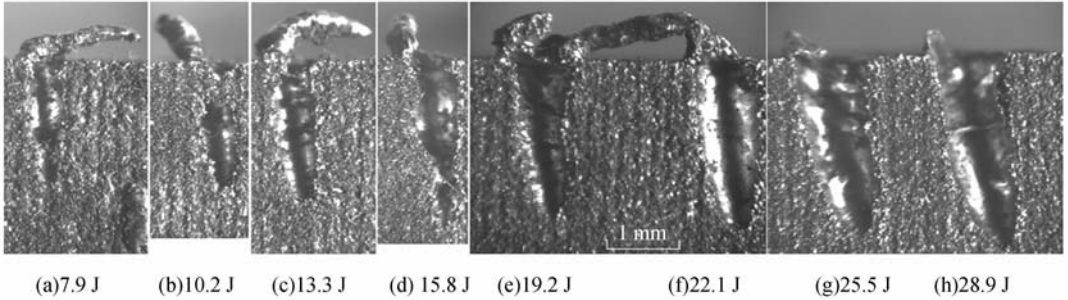


图 2 孔纵截面的照片

Fig. 2 Photographs of longitudinal sections of holes

3 计算方法

长脉冲激光激光打孔过程涉及到加热、熔融、气化和喷溅过程。这里将计算分为固相和熔融两个阶段。

3.1 固相阶段

根据实验时铝板厚度远大于孔深, 铝板各向同性, 且激光束横截面光强为轴对称空间分布等特性, 可在柱坐标系下建立半无限大轴对称模型, 如图 3 所示, 从而热传导方程为^[20]:

$$\frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial T_s(r, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial T_s(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_s(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T_s(r, z, t)}{\partial z^2}, \quad (1)$$

式中, $T_s(r, z, t)$ 为温度, α_s 为热扩散系数且 $\alpha_s = \kappa_s / (\rho_s c_s)$, κ_s 为热传导率, ρ_s 为密度, c_s 为比热。

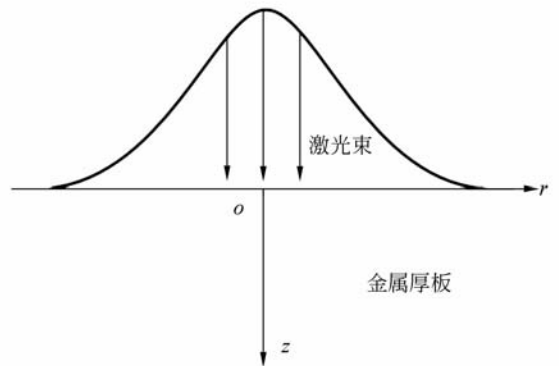


图 3 激光与金属厚板相互作用示意图

Fig. 3 Schematic diagram of laser-metal interaction

设激光能量被金属表面吸收, 那么边界条件为

$$-\kappa_s \frac{\partial T_s}{\partial z} = A_s I(r), z=0, \quad (2)$$

式中, A_s 为金属在固相对激光的吸收率, $I(r)$

为激光功率密度且

$$I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{a_0^2}\right), I_0 = \frac{2E}{\pi a_0^2 \cdot \tau}, \quad (3)$$

式中, a_0 为光束半径, E 为激光能量, τ 为激光脉宽。假设初始时刻的铝板温度分布均匀且为环境温度, 在激光照射时, 热传导决定了材料温度在深度上的分布形式^[21], 激光束横截面的光强空间分布决定了温度在表面的分布形式^[20], 可设温度的数学形式为

$$T_s(r, z, t) = T_w(t) \exp\left(-\frac{z}{\delta_s(t)}\right) \exp\left(-\frac{2r^2}{a_0^2}\right) + T_0, \quad (4)$$

式中, $T_w(t)$ 为板的表面中心 o 点的温度, T_0 为初始温度, $\delta_s(t)$ 为热渗透深度, 那么初始条件应为

$$T_s(r, z, 0) = 0. \quad (5)$$

将式(4)分别带入式(1)和式(2), 当 $r=0$ 且 $z=0$ 时得到中心点温度和热渗透深度的表达式:

$$T_w(t) = \sqrt{\frac{a_0^2 A_s^2 I_0^2}{8\kappa_s^2} + C_1} \exp\left(-\frac{16\alpha_s}{a_0^2} t\right), \quad (6)$$

$$\delta_s(t) = T_w(t) \frac{\kappa_s}{A_s I_0}. \quad (7)$$

再根据初始条件式(5)得到

$$C_1 = -\frac{a_0^2 A_s^2 I_0^2}{8\kappa_s^2}. \quad (8)$$

另外, 由式(6)还可得到板中心初始熔融的时间

$$t_m = -\frac{a_0^2}{16\alpha_s} \ln\left(1 - (T_m - T_0)^2 \frac{8\kappa_s^2}{a_0^2 A_s^2 I_0^2}\right). \quad (9)$$

式中, T_m 为熔点。

3.2 熔融阶段

由长脉冲激光打孔特点, 假设物质一旦到达熔点就转变成液体并离开孔, 后续激光束直接照射在孔的固壁面上, 根据能量平衡原理, 物质熔融消耗的能量与入射激光的能量需满足^[22]

$$A_s I(r) (t - t_m) = \int_0^{D(r,t)} \rho_s (c_s (T_m - T_s(r, z, t_m)) + L_m) dz, t > t_m, \quad (10)$$

式中, $D(r, t)$ 为孔的深度, L_m 为熔融潜热。将式(4)及式(6)~(7)带入式(10)可以得到

$$A_s I(r) (t - t_m) = \rho_s D(r, t) (L_m + c_s (T_m - T_0)) + \rho_s c_s T_m \delta_s(t_m) \exp\left(-\frac{2r^2}{a_0^2}\right) \left(\exp\left(-\frac{D(r, t)}{\delta_s(t_m)}\right) - 1\right). \quad (11)$$

根据第2节的实验参数, 由式(11)就可以计

算出孔在各个时刻的深度 $D(r, t)$ 。表1给出了铝的热物理性质。

表1 金属的热物理性质^[21]

Tab.1 Thermal properties of some metallic materials^[21]

	铝	铜	银	钛
密度 $\rho_s / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 700	8 960	10 500	4 500
比热 $c_s / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	917	386	235	528
热传导率 $\kappa_s / (\text{W} \cdot \text{m} \cdot \text{K}^{-1})$	238	401	429	21.6
熔点 T_m / K	933	1 358	1 234	1 940
吸收率 A_s	0.058 8	0.02	0.02	0.257
熔融潜热 $L_m / (10^5 \cdot \text{kg}^{-1})$	3.88	2.047	1.112	3.65

4 计算结果与讨论

4.1 孔的形状

由得到的解析式计算了不同能量激光照射下, 铝板内孔的形貌, 如图4所示。激光能量为7.9 J时, 孔深1.83 mm, 孔成锥形, 计算结果和实验一致。随着激光能量的增加, 孔不断扩展, 相对于孔的半径而言, 深度增加更为迅速, 当能量达到28.9 J时, 深度为6.62 mm, 大于实验结果, 并且孔形状仍然为锥形, 这也和实验结果不符。考虑到打孔深度随激光能量的增加而增加; 但由于离焦效应, 孔底部的光束半径扩大, 光强减小, 那么打孔速率会逐渐减小, 因此有必要检查光束半径对孔尺寸的影响, 从而决定是否应在关于激光打深孔时考虑离焦效应。

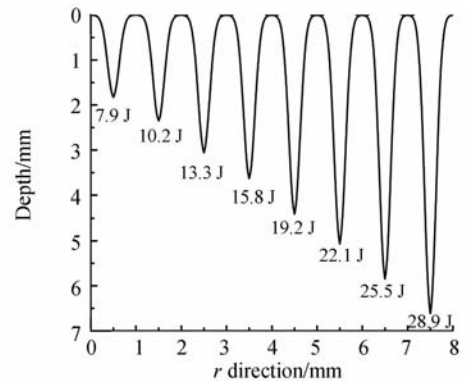


图4 当 $a_0 = 250 \mu\text{m}$, $\tau = 1 \text{ms}$ 时, 解析计算得到的孔形貌
Fig.4 Hole shape obtained by analyzing solution when $a_0 = 250 \mu\text{m}$, $\tau = 1 \text{ms}$

4.2 光束半径对孔尺寸的影响

图5描述了在能量为28.9 J的激光照射下,

孔深度和半径随激光光束半径的变化情况。光束半径增加而能量不变,激光能量密度减小,孔的深度也迅速减小。而铝板表面温度主要依赖于激光束横截面的光强空间分布,光束半径越大,铝板表面获得激光能量的范围越大,因此孔半径随光束半径增加而增大。

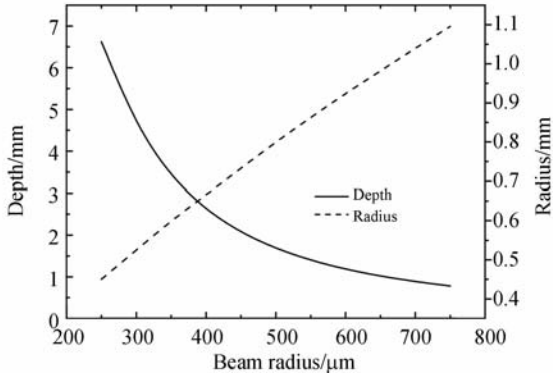


图 5 $E=28.9 \text{ J}$, $\tau=1 \text{ ms}$ 时,孔深度和半径随铝板表面的激光光束半径的变化

Fig. 5 Variation of holes' size with beam radius at surface of aluminium slab when $E=28.9 \text{ J}$, $\tau=1 \text{ ms}$

如图 5 所示,当激光能量为 28.9 J 且光束半径为 $250 \mu\text{m}$ 时,平均打孔速率为 6.62 m/s ,在 0.5 ms 时刻,打孔深度约为 3.31 mm 。实验中使用的长脉冲激光器的光束质量因子为 50 ,那么此时孔底部的光束半径约为 $336 \mu\text{m}$,对应的平均打孔速率为 3.7 m/s 。可估算在剩下的 0.5 ms 时间里,孔又加深了约 1.85 mm ,总的孔深为 5.16 mm ,小于计算得到的 6.62 mm ,可见对于激光打孔的计算,必须考虑离焦效应的影响。

5 考虑离焦效应的算法

本文引入了离焦效应对算法进行改进。如图 3 所示,在理想情况下,激光束聚焦在铝板表面,深度 z 处的光束半径应为^[23]:

$$a = a_0' \sqrt{1 + \left(M^2 \frac{\lambda z}{\pi a_0'^2} \right)^2}, \quad a_0' = a_0 / \sqrt{2}, \quad (12)$$

式中 λ 为激光波长。假设孔壁面上点 (r, z) 到深度 $(r, z + \Delta z)$ 处的物质温度为 $T_s(r, z, t_m)$, 将式 (12) 带入式 (10) 并写成离散形式

$$A_s \frac{E}{\pi a^2 \tau} \exp\left(-\frac{r^2}{a^2}\right) \Delta t =$$

$$\rho_s (c_s (T_m - T_s(r, z, t_m)) + L_m) \Delta z, \quad (13)$$

式中 Δz 为计算步长,由式 (13) 可以得到这部分物质温度上升到熔点所需要的时间 Δt , 如此循环,直到 $\sum \Delta t = \tau - t_m$ 时,计算结束,最终可求得打孔深度,在计算中取 $\Delta z = 1 \mu\text{m}$ 。

图 6 为计算和实验得到的打孔深度随激光能量的变化情况,在计算中考虑了离焦效应。孔深不再随着能量的增加而线性增加,在能量较大时,深度的增长速率逐渐变缓。计算结果和实验结果相符,证明计算方法是合理的。另外能注意到,虽然引入了离焦效应,在激光能量为 28.9 J 时,计算结果为 3.25 mm ,仍然大于实验结果。这是因为随着孔深度加深,反冲压力逐渐减小以至于不再能克服表面张力^[24],同时孔内的熔融层逐渐变厚,使得熔融物的喷溅更加困难,所以计算结果稍大于实验结果。

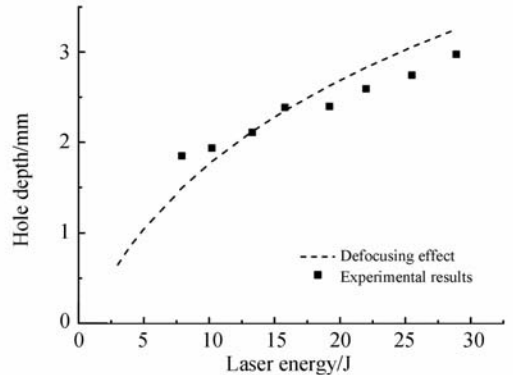


图 6 打孔深度随激光能量的变化

Fig. 6 Variation of hole depth with laser energy

6 毫秒激光对不同金属的打孔速率

厚板中心的激光最强(如图 3 所示),打孔速率也最大,由式 (13) 可得中心的打孔速率 $\Delta z / \Delta t$ 。图 7 为计算得到 1 ms 脉冲激光对铝、铜、银和钛 4 种金属打孔时厚板中心的打孔速率。随激光的持续辐照,孔加深且孔底部光束半径不断增加,打孔速率逐渐减小。钛的热传导率较低,对激光的吸收率大(表 1),大量热能集聚在钛板的表面,熔融所需的能量阈值低,从而打孔速率最大,孔最深。按打孔速率大小排列,在钛之后依次是铝、银

和铜。铜是一种良好的导热体,在激光照射时,铜板内部的温度分布较为均匀而表面温度上升较慢,熔融阈值高,因此打孔速率最小。Pablo Solana^[24]的计算结果也表明激光对钛的打孔速度大于对铝的打孔速度,这证明了图7得到的结果是合理的。

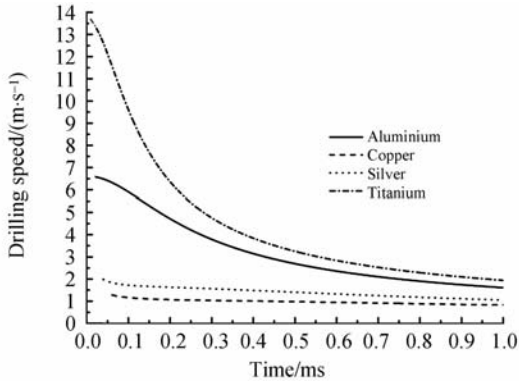


图7 $E=28.9\text{ J}$ 时,厚板中心的打孔速率随时间的变化
Fig.7 Evolution of drilling speed at center of slab when $E=28.9\text{ J}$

参考文献:

- [1] KAYULOV S V, GUSEV A A, ZAICHIKOV E G, *et al.*. Drilling of narrow holes in metals by millisecond pulses of Nd : YAG lasers [J]. *Laser Physics*, 1998,8(2):527-531.
- [2] BOSTANJOGLO G, SARADY I, BECK TH, *et al.*. Processing of Ni-based aero engine components with repetitively Q-switched Nd : YAG-lasers [J]. *SPIE*, 1996,2789:145-157.
- [3] YEO C Y, TAM S C, JANA S, *et al.*. A technical review of the laser drilling of aerospace materials [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1994,42(1):15-49.
- [4] YANG J, ZHAO Y, ZHU X. Transition between nonthermal and thermal ablation of metallic targets under the strike of high-fluence ultrashort laser pulses [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88: 094101-1-3.
- [5] TUNNA L, ONEILL W, KHAN A, *et al.*. Analysis of laser micro drilled holes through aluminium for micro-manufacturing applications [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005,43(9):937-950.
- [6] SCHNEIDER M, MULLER M, FABBRO R, *et al.*. Study of hole properties in percussion regime with a new analysis method [J]. *JLMN-Journal of Laser*

7 结 论

本文通过实验研究了脉宽为 1 ms 的单个脉冲激光对厚铝板的打孔过程。激光能量为 7.9 J 和 28.9 J 时,对应的孔深分别为 1.849 mm 和 2.975 mm。根据长脉冲激光的打孔特点,求得了孔形状的解析式。计算结果仅在孔较浅时与实验结果一致,因此在长脉冲激光打孔较深时,在算法中又考虑了离焦效应的影响,计算结果与实验结果总体相符。最后,比较了铝、铜、银和钛 4 种金属的打孔速率,结果表明钛的热传导率较低,对激光的吸收率大,熔融所需的能量阈值低,从而打孔速率最大,然后依次是铝、银和铜。所得结果为长脉冲激光打孔深度的研究提供了参考依据。

Micro/Nanoengineering, 2007,2(2):128-132.

- [7] YUAN C J, ZHAI H C, WANG X L, *et al.*. Lensless digital holography with short-coherence light source for three-dimensional surface contouring of reflecting micro-object[J]. *Optics Communications*, 2007,270(2):176-179.
- [8] YILBAS B S, MANSOOR S B. Laser pulse heating and phase changes in the irradiated region: temperature-dependent thermal properties case [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2009, 48(4):761-772.
- [9] PARK K W, NA S J. Theoretical investigations on multiple-reflection and Rayleigh absorption-emission-scattering effects in laser drilling [J]. *Applied Surface Science*, 2009,256(8):2392-2399.
- [10] SAMANT A N, DAHOTRE N B. Computational predictions in single-dimensional laser machining of alumina [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008,48(12-13):1345-1353.
- [11] NG G K L, CROUSE P L, LI L. An analytical model for laser drilling incorporating effects of exothermic reaction, pulse width and hole geometry [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006,49(7-8):1358-1374.
- [12] 穆景阳,万红,白书欣. 长脉冲激光辐照下环氧树

- 脂的热烧蚀规律[J]. 强激光与粒子束, 2008, 1(1):36-40.
- MU J Y, WAN H, BAI SH X. Thermal ablation law of cured epoxy under long pulse laser irradiation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 1(1):36-40. (in Chinese)
- [13] 蒋艳锋, 江东, 钟鸣, 等. 长脉冲激光对金属材料热破坏的分析[J]. 激光杂志, 2006, 27(2):75-76.
- JIANG Y F, JIANG D, ZHONG M, *et al.*. Theoretical research; the thermal damage of metal materials, under millisecond-pulsed laser irradiations [J]. *Laser Journal*, 2006, 27(2):75-76. (in Chinese)
- [14] ZHOU Y C. Reverse bulging and plugging in metal foil induced by high power laser [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 2003, 22(1):83-86.
- [15] BOLEY C D, CUTTER K P, FOCHS S N, *et al.*. Interaction of a high-power laser beam with metal sheets [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107:043016-1-5.
- [16] 吴东江, 马广义, 周秋菊, 等. 长脉宽脉冲激光硅片弯曲成形试验[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(9):1361-1365.
- WU D J, MA G Y, ZHOU Q J, *et al.*. Experimental study of bending silicon chip with long pulse width laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9):1361-1365. (in Chinese)
- [17] ALLMEN M V. 激光束与材料相互作用的物理原理及应用[M]. 北京:科学出版社, 1994.
- ALLMEN M V. *Laser-beam Interactions with Materials Physical Principles and Applications* [M]. Beijing: Science Press, 1994. (in Chinese)
- [18] CHAN C L, MAZUMDER J. One-dimensional steady-state model for damage by vaporization and liquid expulsion due to laser-material interaction [J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 62(11):4579-4586.
- [19] SEMAK V, MASUNAWA 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.
- [20] QIN Y, CHEN Y B, NI X W, *et al.*. Axisymmetric numerical simulation of plastic damage in aluminum alloy induced by long pulsed laser[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(3):361-367.
- [21] SHEN Z H, ZHANG S Y, LU J, *et al.*. Mathematical modeling of laser induced heating and melting in solids [J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, 33(8):533-537.
- [22] PELIGRAD A A, ZHOU E, MORTON D, *et al.*. A melt depth prediction model for quality of laser surface glazing of inhomogeneous materials [J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, 33(1):7-13.
- [23] SALONITIS K, STOURNARAS A, TSOUKANTAS G, *et al.*. A theoretical and experimental investigation on limitations of pulsed laser drilling [J]. *Journal of Material Processing Technology*, 2007, 183(1):96-103.
- [24] SOLANA P, KAPADIA P, DOWDEN J, *et al.*. Time dependent ablation and liquid ejection processes during the laser drilling of metals [J]. *Optics Communications*, 2001, 191(1-2):97-112.

作者简介:

秦 渊(1984—),女,江苏南京人,博士研究生,2006年于南京理工大学获得学士学位,主要从事长脉冲激光与金属相互作用机理方面的研究。E-mail: qinyuan.njust@gmail.com



毕 娟(1982—),女,吉林磐石人,讲师,2003年、2006年于长春理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。E-mail: cn.bijuan@yahoo.com.cn

倪晓武(1955—),男,江苏人,教授,博士生导师,1988年于华东工学院应用物理系获博士学位,长期从事激光武器毁伤机理、激光与物质相互作用机理、光子生物医学及其作用机理和测试方法等领域的教学和科研工作。E-mail: jsnjnxw@gmail.com

沈中华(1973—),女,江苏吴江人,教授,博士生导师。1999年于南京理工大学获博士学位,主要从事激光超声的激发机理及相关检测技术、激光超声在无损检测中的应用大能量和高功率激光与物质相互作用过程中涉及的热学、力学、等离子体和冲击波效应以及相关的光学测试技术和应用等方面的研究。E-mail: shenzh@mail.njust.edu.cn

张喜和(1954—),男,吉林农安人,教授,博士生导师,1999年于北京理工大学获得博士学位,现为长春理工大学理学院院长,主要从事高功率激光、激光与物质相互作用、纳米光子学和生物光子学等方面的研究。E-mail: xihezhang@sina.com

● 下期预告

基于侧向连接 Sanger 算法的 微钻头棱边投影拟合研究

葛动元^{1,2}, 姚锡凡¹, 向文江²

- (1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640;
2. 邵阳学院 机械与能源工程系, 湖南 邵阳 422004)

为了实现对微钻头的圆角、外径等的检测,首先采用 PCB 微钻头高精度自动化检测系统采集图像。在对微钻头棱边投影的椭圆方程进行拟合时,以由采样点得到的矢量坐标 $\omega_i = [X_i^2, X_i Y_i, Y_i^2, X_i, Y_i, 1]^T$ 到由拟合椭圆系数所决定的超平面距离的平方和为目标函数,然后根据求解目标,设计一个有侧向连接的 Sanger 网络,以采样点坐标组成的矢量坐标为 Sanger 网络的输入。采用自适应次分量的提取方法,以自相关矩阵的最小特征值所对应的特征向量为超平面的拟合系数,即椭圆方程拟合系数,据此得到微钻头的圆角、外径等技术指标。这种方法能满足微钻头检测的精度要求,也是自适应 Sanger 网络在形状误差检测中的创新性应用。