

多脉冲飞秒激光深小孔的加工

胡梦宁 葛励成 张晋平 陈玉萍 陈险峰

上海交通大学物理与天文系, 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

摘要 利用改进的双温模型理论, 表征了多脉冲飞秒激光对厚的金属铝的烧蚀情况, 并在实验上予以验证。用有限差分法对飞秒激光在金属铝表面烧蚀过程的温度场进行了三维数值模拟, 预测了孔在激光能量密度、脉冲个数、激光束腰半径等不同激光参数作用下的孔径与深度。实验发现, 激光能量密度和脉冲个数是影响小孔形貌的主要因素, 且多脉冲烧蚀阈值明显低于单脉冲烧蚀阈值。讨论了准贝塞尔光束在最大准直距离内无衍射的特性, 分析了贝塞尔光束对于深小孔加工的提升特性。

关键词 激光光学; 激光加工; 高深径比; 双温模型; 贝塞尔光束

中图分类号 TN23

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0403006

Hole-Drilling with High Depth-Diameter Ratio Using Multi-Pulse Femtosecond Laser

Hu Mengning Ge Licheng Zhang Jinping Chen Yuping Chen Xianfeng

State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Network, Department of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract An improved two-temperature model is proposed to characterize the ablation of thick metal aluminum by multi-pulse femtosecond laser, and the model is proved in experiments. In order to achieve hole-drilling with high ratio of depth-diameter, three dimensional numerical simulation to the temperature field in the process of femtosecond laser ablation on metal aluminum surface is carried out. The aperture and depth of hole are predicted with different laser parameters, such as laser energy density, pulse number, laser waist radius and so on. The experiments show that the laser energy density and pulse number are the main factors affecting the morphology of holes, and the multi-pulse ablation threshold is much lower than that of the single-pulse one. The non-diffraction characteristics of aquasi Bessel beam within the maximum collimating distance are discussed and the enhancement on hole-drilling processing of Bessel beams is analyzed.

Key words laser optics; laser processing; high ratio of depth to diameter; two-temperature model; Bessel beam

OCIS codes 130.3730; 320.2250; 320.7090

1 引 言

由于激光加工能够克服传统机械加工和 X 射线加工等加工技术的一些缺点, 加上飞秒激光技术具有精度高、热效应小、加工范围广等优点, 使得激光微加工备受人们的青睐^[1-4], 尤其是针对直径为 20 μm 以下的深孔加工技术。随着高功率激光器在过去 20 年间的飞速发展, 围绕飞秒激光与材料的相互作用展开了非常深入的研究。飞秒激光与金属相互作用具有能量沉积快和热扩散面积小^[5-7]等优势而受到广泛关注。人们提出了诸如相爆^[8]、库伦爆炸^[9]等理论来解释超短脉冲加工的特点。在飞秒激光加工过程中, 飞秒激光和物质的相互作用有 3 个阶段: 1) 材料通过光子与电子的相互作用吸收激光的能量使电子跃迁到较高的能态; 2)

收稿日期: 2015-12-16; 收到修改稿日期: 2015-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(11174204, 61125503, 61235009, 11574208)

作者简介: 胡梦宁(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事飞秒激光微加工方面的研究。E-mail: mengning.hu@foxmail.com

导师简介: 陈玉萍(1974—), 女, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事非线性光学、微纳光子学和超快激光微纳加工制造方面的研究。E-mail: ypch@sjtu.edu.cn(通信联系人)

高能量的电子将能量通过电子声子的耦合传播到晶格中;3)在材料中通过声子与声子的相互作用将能量传遍整个作用区域^[10]。电子与声子的耦合有着至关重要的作用,也就是能量从电子传播到晶格的过程是整个加工的核心过程^[11]。电子声子的耦合时间约为几个皮秒,飞秒激光的脉冲宽度约为几百飞秒,正因为飞秒激光的脉冲宽度小于电子声子的耦合时间,使得飞秒激光加工具有热作用区域小的优势。

目前人们采用双温模型^[12]来描述飞秒激光与材料的相互作用。双温模型是利用2个耦合的热传导方程描述了电子与晶格的温度变化关系,给出了超短脉冲加工的微观图像。人们已经在实验和理论上充分地研究了加工材料较薄时飞秒激光与材料的作用过程,比如不同的单脉冲能量对材料烧蚀的影响。然而,多脉冲加工的深层次物理图像还没有完全建立起来。利用双温模型来表征飞秒激光微加工时,一般认为激光的束腰半径是不变的^[13],这对于薄的材料来说是没有问题的,但对于在厚材料上加工高深径比的小孔,这种近似显然是不够准确的。本文提出了一种改进的双温模型,该模型中激光的束腰半径随着加工深度变化,提高了双温模型的准确性。分析了不同激光能量、脉冲个数、束腰半径等参数对微加工小孔深度和半径的影响,更好地预测了飞秒激光在加工较厚金属材料的深小孔过程中所需的参数,并且在实验上进行了验证。讨论了准贝塞尔光束的飞秒激光深小孔微加工。有在最大准直距离内准贝塞尔光束的中心光束能量和大小不随距离改变,因此适用于激光深小孔加工。利用轴棱锥透镜产生贝塞尔光束,轴上光强会因干涉产生剧烈振荡,本文分析了不同底角及不同入射光束半径对轴棱锥透镜轴上光强产生的影响。

2 改进的双温模型

已有双温模型成功表征了单脉冲飞秒激光与材料的相互作用过程。在此基础上,为了研究在较厚材料上加工高深径比的小孔,提出了适用于多脉冲加工的“改进的双温模型”。作如下假设:当前一个脉冲作用于材料产生的热效应完全结束后,后一个脉冲才能到达并对材料进行加工,也就是说脉冲之间不相互影响。此假设的前提是:激光作用在材料5 ps内,电子和晶格的温度才能达到热平衡,也就是说材料的去除是在几个皮秒内完成的^[13]。实验中使用的激光器重复频率为1 kHz,即每个脉冲之间的时间间隔为1 ms,远远大于5 ps的时间尺度,因此上述假设是完全可以接受的。

飞秒激光脉冲与金属材料的相互作用可以用热传导偏微分方程来描述,表示为

$$\begin{aligned} C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} &= k_e \left(\frac{\partial^2 T_e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_e}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_e}{\partial z^2} \right) - g(T_e - T_l) + Q(x, y, z, t), \\ C_l \frac{\partial T_l}{\partial t} &= g(T_e - T_l) \end{aligned} \quad (1)$$

式中下标e和l分别代表电子和晶格的参数。 C 代表热容, T 代表温度,电子的比热容 $C_e = \gamma T_e$,电子比热系数 $\gamma = 134.5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-2}$, K_e 是电子热导率, g 是电子晶格耦合系数。光源项 $Q(x, y, z, t)$ 可表示为

$$Q(x, y, z, t) = S(x, y, z)T(t), \quad (2)$$

$$S(x, y, z) = \frac{1-R}{\delta + \delta_b} F \exp \left[-\frac{z-z_s}{\delta + \delta_b} - \frac{2(x-x_0)^2 + 2(y-y_0)^2}{w_0^2} \right], \quad (3)$$

$$T(t) = \frac{1}{t_p} \sqrt{\frac{4 \ln 2}{\pi}} \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{t-2t_p}{t_p} \right)^2 \right], \quad (4)$$

式中, z_s 为加工平面的位置, R 为材料的反射率, δ 为光在铝片中的穿透深度, δ_b 是弹道长度, F 为激光的能量密度。此处激光光束无论在时间上还是空间上都是呈高斯分布的。 (x_0, y_0, z_0) 是激光束腰中心的坐标原点, w_0 是激光强度下降到中心强度1/e时的束腰半径, t_p 是激光的半峰全宽。对于多脉冲加工,假设当第1个脉冲到达加工平面,也就是 $z = z_s = 0$ 时,激光与材料发生相互作用,此后,脉冲的工作平面将会随着材料的去除而逐渐改变,在(3)式中体现为 z_s 随着脉冲数目的增加而减小。

对于高深径比的小孔,材料厚度比激光的瑞利长度 Z_R 更大,即

$$Z_R = \frac{n\pi w_0^2}{\lambda}, \quad (5)$$

式中 n 为媒介的折射率。为了更好地理解这个关系,举个例子:波长为 1064 nm 的光束,在空气中的束腰半径大约为 4.5 μm ,瑞利长度 Z_R 用(5)式可以推导出大约为 60 μm 。对于金属厚铝片,其厚度往往大于瑞利长度 Z_R ,所以高斯光束不能近似为平行,必须对原有双温模型的束腰半径进行修正。将束腰半径由定值 w_0 改变为随加工深度而变化的函数 $w(z)$,即

$$w(z) = w_0 \sqrt{\left(1 + \frac{z^2}{z_R^2}\right)}. \quad (6)$$

为了弥补由于加工深度引起的束腰半径的变化,将(6)式代入双温模型的光源项,可以得到

$$S(x,y,z) = \frac{1-R}{\delta + \delta_b} F \frac{w_0^2}{w^2(z)} \exp\left[-\frac{z-z_s}{\delta + \delta_b} - \frac{2(x-x_0)^2 + 2(y-y_0)^2}{w_0^2}\right]. \quad (7)$$

与(3)式相比,增加了 $w(z)$ 的变化项,从而使双温模型也能适用于多脉冲激光烧蚀。图 1 为传统的和改进的双温模型中聚焦区域激光光束的比较,可看出,图 1(a)中传统双温模型光束的束腰半径近似平行,而图 1(b)中改进双温的模型光束的束腰半径会随着加工距离的变化而变化。

利用有限元差分法来计算(1)式,模拟从 $t=0$ 时刻开始,电子和晶格的初始温度都设定为环境温度。当烧蚀时间由飞秒(fs)向皮秒(ps)过渡时,合理地假设忽略能量与周围环境的交换过程,所以初始条件和边界条件可表示为

$$T_c(x,y,z,t=0) = T_l(x,y,z,t=0) = 300 \text{ K}, \quad (8)$$

$$\left. \frac{\partial T_c}{\partial n} \right|_{\Omega} = \left. \frac{\partial T_l}{\partial n} \right|_{\Omega} = 0, \quad (9)$$

积分的计算区域为 100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 。其他的参数设定: $k_e = 235 \text{ J}/(\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{s})$, $g = 5.69 \times 10^{17} \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{s})$, $R = 0.88$, $\lambda = 800 \text{ nm}$, $C_l = 2.42 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$, $\delta = 20 \text{ nm}$, $\delta_b = 100 \text{ nm}$, $T_0 = 300 \text{ K}$, $t_p = 100 \text{ fs}$ 。

在上述加工过程中,假设铝片的温度超过其热力学平衡阈值(5720 K)时,材料会被去除。

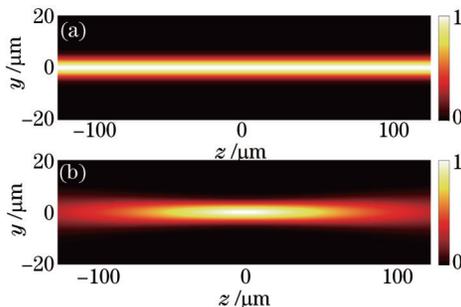


图 1 聚焦区域激光光束的比较。(a) 传统双温模型; (b) 改进的双温模型

Fig.1 Comparison of laser beams in the focal region. (a) Conventional two-temperature model; (b) improved two-temperature model

3 改进的双温模型理论模拟

研究激光参数的影响,包括激光能量密度、脉冲个数、束腰半径等。利用有限元分析法去解双温模型的热传导方程,模拟结果如图 2~4 所示。

不同激光能量密度的模拟情况如图 2 所示。改变激光的能量密度 F 分别为 4、8、12 J/cm^2 , 脉冲个数($N=50$)和束腰半径($w_0 = 4.5 \mu\text{m}$)固定,从图 2(d)所示的中心线横断面形貌可知,更大的激光能量对应着更大的孔径以及更深的小孔深度,但是深度变化明显比孔径变化快。

不同脉冲个数的加工模拟情况如图 3 所示。改变脉冲个数 N 分别为 150、200、300,激光能量密度($F = 3 \text{ J}/\text{cm}^2$)和束腰半径($w_0 = 4.5 \mu\text{m}$)固定,从中心线横断面形貌图 3(d)可以看出,随着脉冲个数的增加,小孔的深度有明显增加,但是孔径只有轻微程度的增加。

不同束腰半径的加工模拟情况如图 4 所示。改变束腰半径 w_0 分别为 4、8、12 μm ,激光能量密度

($F = 2 \text{ J/cm}^2$) 和脉冲个数($N=500$)固定,从中心线横断面形貌图4(d)可以看出,当激光的束腰半径增加时,孔径相应地增加,并且当束腰半径达到一定大小时,孔的深度几乎维持不变。

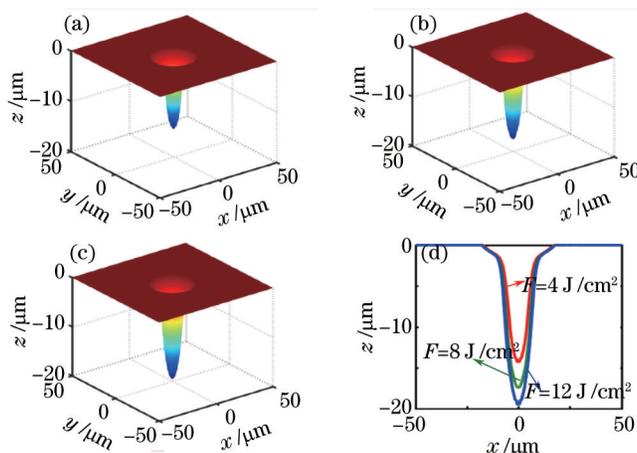


图2 不同激光能量密度烧蚀小孔的模拟图。(a) $F = 4 \text{ J/cm}^2$; (b) $F = 8 \text{ J/cm}^2$; (c) $F = 12 \text{ J/cm}^2$; (d) 小孔中心线横截面示意图
Fig.2 Simulated ablation holes with different laser energy densities. (a) $F = 4 \text{ J/cm}^2$; (b) $F = 8 \text{ J/cm}^2$; (c) $F = 12 \text{ J/cm}^2$; (d) center-line profiles of the ablation holes

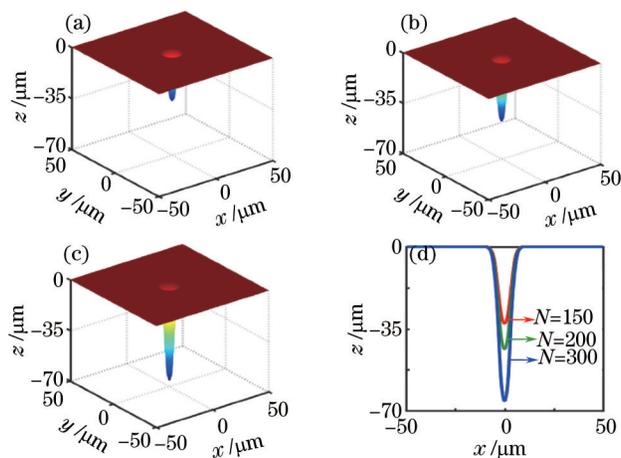


图3 不同脉冲个数烧蚀小孔模拟图。(a) $N = 150$; (b) $N = 200$; (c) $N = 300$; (d) 小孔中心线横截面示意图
Fig.3 Simulated ablation holes with different pulse numbers. (a) $N = 150$; (b) $N = 200$; (c) $N = 300$; (d) center-line profiles of the ablation holes

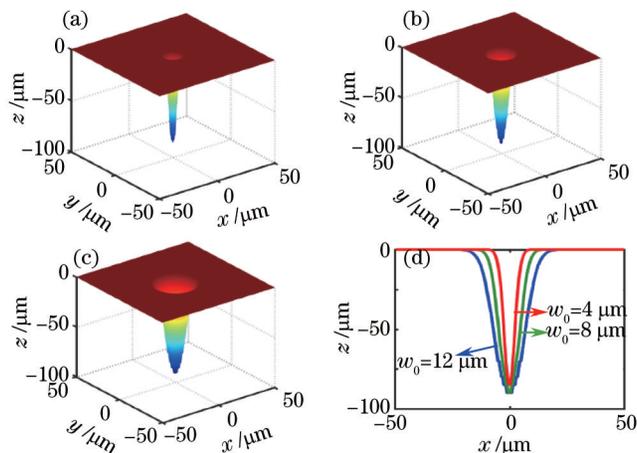


图4 不同束腰半径烧蚀小孔模拟图。(a) $w_0 = 4 \mu\text{m}$; (b) $w_0 = 8 \mu\text{m}$; (c) $w_0 = 12 \mu\text{m}$; (d) 小孔中心线横截面示意图
Fig.4 Simulated ablation holes with different beam waist radii. (a) $w_0 = 4 \mu\text{m}$; (b) $w_0 = 8 \mu\text{m}$; (c) $w_0 = 12 \mu\text{m}$; (d) center-line profiles of the ablation holes

从图2~4可以得出结论:激光的能量密度和加工的激光脉冲数目主要影响孔的深度,而激光的束腰半径主要影响孔的直径。

4 激光加工深小孔实验结果与讨论

使用波长 800 nm、重复频率 1 kHz 的掺钛蓝宝石激光器来加工 100 μm 厚的铝片。整套加工系统能产生能量 1 mJ、脉宽 100 fs 的单脉冲激光。脉冲的数目可以通过 1 个电子快门来控制。实验中使用 20× 的物镜(NA 为 0.25)将激光聚焦到高精度移动平台的铝片上,同时使用电荷耦合元件(CCD)观察烧蚀的过程。

激光能量密度分别为 1 J/cm² 和 3 J/cm² 的激光加工形成的孔的扫描电镜(SEM)图像如图 5 所示。当激光能量增加时,热辐射影响区域明显增大,但是孔径并不随之变化,所以使用相对较低能量的激光来加工有利于孔周围干净度的提升。烧蚀小孔的阈值在此就显得尤为重要。

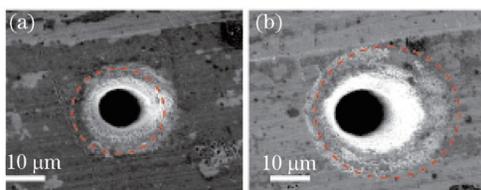


图5 不同激光能量密度、不同脉冲个数形成的孔正面的SEM图像。(a) $F = 1 \text{ J/cm}^2$, $N = 1100$; (b) $F = 3 \text{ J/cm}^2$, $N = 500$
Fig.5 SEM images of the front of holes formed by different laser energy densities and number of pulses. (a) $F = 1 \text{ J/cm}^2$, $N = 1100$; (b) $F = 3 \text{ J/cm}^2$, $N = 500$

铝片的烧蚀阈值可表示为^[13]

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln(F/F_{th}), \quad (10)$$

式中 F 表示入射激光的能量密度, F_{th} 表示单脉冲烧蚀阈值, D 为小孔孔径。当激光能量密度比烧蚀阈值大时,可用单脉冲烧蚀深度来表示烧蚀速率 h_a ^[14],而后者可用原子力显微镜(AFM)测量,即

$$h_a = \alpha_{eff}^{-1} \ln\left(\frac{F_0^{av}}{F_{th}^{N>1}}\right), \quad (11)$$

式中 α_{eff}^{-1} 是铝片的有效穿透深度, F_0^{av} 表示单位面积脉冲能量的平均值, $F_{th}^{N>1}$ 为多脉冲烧蚀的烧蚀阈值。

图 6 显示了烧蚀速率与激光能量密度的线性关系,实线为拟合曲线,其斜率可以由穿透深度得出,利用外推法将拟合曲线调整为经过坐标原点,从而推测多脉冲烧蚀阈值。可以得到多脉冲烧蚀阈值 $F_{th}^{N>1} = (0.52 \pm 0.01) \text{ J/cm}^2$ 。由此可见,多脉冲烧蚀阈值比单脉冲烧蚀阈值^[13] $F_{th}^{N=1} = 0.9 \text{ J/cm}^2$ 要低,这可能是由于孵化效应造成的^[15]。

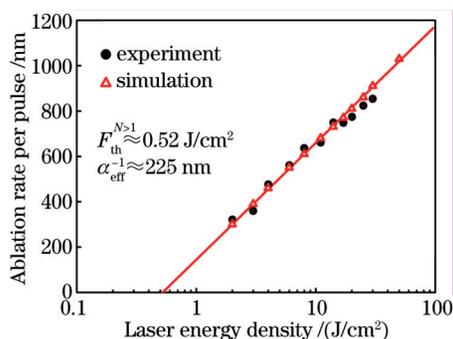


图6 铝片烧蚀速率与激光能量密度的关系
Fig.6 Ablation rate of aluminum versus laser energy density

5 贝塞尔光束理论研究

以上讨论都是针对高斯型脉冲展开的研究,实际上通过一定的方法,可以改变加工脉冲的形状,从而进一步探究不同形貌的光束对加工材料的影响。1987年 Durnin 等^[16]首次提出“无衍射光束”的概念,并在实验中得以实现,随后很多研究将零阶贝塞尔光束在最大准直距离内无衍射的特性应用于激光加工。

利用锥形透镜产生贝塞尔光束,当高斯光束入射到锥形透镜上时,其后产生的光束成为高斯-贝塞尔光束, ρ_1 是原点径向坐标, n 为轴棱锥透镜折射率, φ 是轴棱锥透镜底角,入射光束的半径为 a ,可以得到轴上光强随传播距离的关系为

$$I_2(0,z) = \left(\frac{ikE_0}{z} \right)^2 \left| \int_0^a J_0 \left(\frac{k\rho_1\rho_2}{z} \right) \exp \left[\frac{ik\rho_1^2}{2z} - ik(n-1)\varphi\rho_1 \right] \rho_1 d\rho_1 \right|^2 \quad (12)$$

针对不同的参数数值进行了模拟分析,首先考虑底角对轴上光强的影响,设 $a = 5 \text{ mm}$, $\lambda = 1030 \text{ }\mu\text{m}$, $n = 1.45$, $E_0 = 1$,底角 φ 分别为 0.5° 、 1.0° 、 1.5° 、 2.0° 、 2.5° 时,由(12)式计算得出在最大准直距离内轴上光强的变化曲线,如图7所示。从图7可以看出,随着锥形透镜底角的增大,最大准直距离逐渐减小,并且轴上光强最强处的位置也逐渐靠近透镜。

同时,还计算了入射半径与最大准直距离的关系,假设 $\varphi = 2.0^\circ$, $\lambda = 1030 \text{ nm}$, $n = 1.45$, $E_0 = 1$ 。当入射光束半径 a 分别为 6 、 7 、 8 、 9 mm 时,探究其轴上光强分布规律,如图8所示。从图8可以看出,随着入射半径的增大,轴上光强的聚焦深度几乎不变,但是聚焦位置距离锥形透镜越来越远。

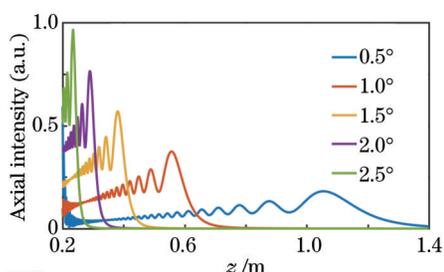


图7 不同底角下轴上光强与传输距离的关系

Fig.7 Relationship between on-axis intensity and propagation distance with different angles

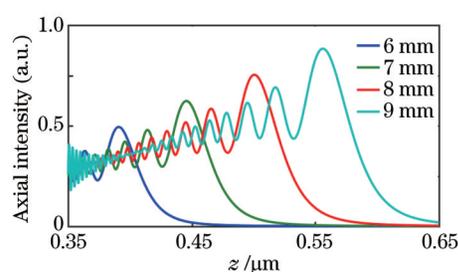


图8 轴上光强与不同入射半径之间的关系

Fig.8 Relationship between on-axis intensity and different beam radii

当入射光波长 $\lambda = 1030 \text{ nm}$,半径 $a = 5 \text{ mm}$,锥形透镜 $\varphi = 2.0^\circ$, $n = 1.45$ 时,利用(12)式画出贝塞尔光束横向光强分布,如图9所示,此时中心光斑半径约为 $50 \text{ }\mu\text{m}$,最大准直距离约为 31.8 mm ,此时深径比大于 500 ,远远大于直接利用高斯光束进行深小孔加工的深径比。实际加工中,由于贝塞尔光束旁瓣能量(第1旁瓣就占到 16% ^[17])可能会对材料造成损伤,可以采用在材料上覆盖保护掩模仅使主峰能量通过等措施^[17]。

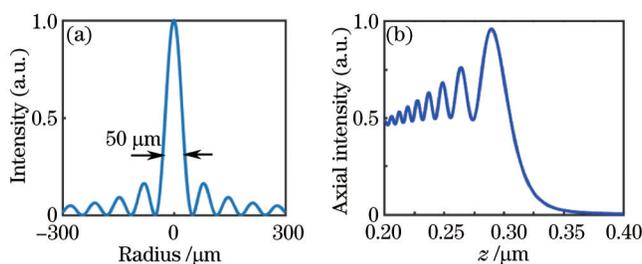


图9 (a) 贝塞尔光束横向光强分布; (b) 入射半径为 5 mm 时轴上光强分布

Fig.9 (a) Transverse intensity distribution of Bessel beam; (b) on-axis intensity distribution with incident beam radius of 5 mm

6 结 论

提出了改进的双温模型,适用于多脉冲深小孔加工,通过数值模拟,发现多脉冲损伤阈值 $F_{th}^{N>1} = (0.52 \pm 0.01) \text{ J/cm}^2$,比单脉冲损伤阈值要低。在模拟和实验过程中,发现激光能量密度和加工脉冲个数是影响小孔深度的主要因素,而脉冲的聚焦半径是影响小孔孔径的主要因素。可以利用上述模型来寻找加工较厚材料的最为合适的激光参数。除此之外,还理论探究了不同形貌激光光束加工的情况,理论分析了贝塞尔光束在不同条件下的轴上光强分布,得出当入射光波长 $\lambda = 1030 \text{ nm}$ 、半径 $a = 5 \text{ mm}$ 、锥形透镜底角 $\varphi = 2.0^\circ$ 、折射率 $n = 1.45$ 时,深径比大于 500 ,远远大于直接利用高斯光束进行深小孔加工的深径比,为之后的实验提供了理论依据,这些工作对飞秒激光深小孔微加工技术有着重要的影响。

- 1 He Fei, Cheng Ya. Femtosecond laser micromachining: Frontier in laser precision micromachining[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(5): 595–622.
何 飞, 程 亚. 飞秒激光微加工: 激光精密加工领域的新前沿[J]. 中国激光, 2007, 34(5): 595–622.
- 2 Xing Songling, Liu Lei, Zou Guisheng, *et al.*. Effects of femtosecond laser parameters on hole drilling of silica glass[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0403001.
邢松龄, 刘 磊, 邹贵生, 等. 飞秒激光参数对石英玻璃微孔加工的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0403001.
- 3 Fan Wenzhong, Zhao Quanzhong. Recent progress in ultrashort pulsed laser microwelding of glasses[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 080001.
范文中, 赵全忠. 超短脉冲激光微焊接玻璃进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 080001.
- 4 Fan Zongxue, Feng Jie, Liu Ang, *et al.*. Study of buried waveguide written in LiNbO₃ crystal by high repetition rate femtosecond laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 091403.
范宗学, 冯 杰, 刘 昂, 等. 高重复频率飞秒激光刻写铌酸锂光波导的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(9): 091403
- 5 Chichkov B N, Momma C, Nolte S, *et al.*. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. Applied Physics A, 1996, 63(2): 109–115.
- 6 Shaheen M, Gagon J, Fryer B. Laser ablation of iron: A comparison between femtosecond and picosecond laser pulses[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(8): 083110.
- 7 Chen A, Jiang Y, Sui L, *et al.*. Thermal behavior of thin metal films irradiated by shaped femtosecond pulse sequences laser[J]. Optics Communications, 2011, 284(8): 2192–2197.
- 8 Lorazo P, Lewis L J, Meunier M. Short-pulse laser ablation of solids: From phase explosion to fragmentation[J]. Physical Review Letters, 2003, 91(22): 225502.
- 9 Roeterdink W, Juurlink L, Vaughan O, *et al.*. Coulomb explosion in femtosecond laser ablation of Si (111)[J]. Applied Physics Letter, 2003, 82(4): 4190–4192.
- 10 Du G, Chen F, Yang Q, *et al.*. Ultrafast temperature relaxation evolution in Au film under femtosecond laser pulses irradiation[J]. Optics Communications, 2010, 283(9): 1869–1872.
- 11 Wellershoff S S, Hohlfield J, Güdde J, *et al.*. The role of electron-phonon coupling in femtosecond laser damage of metals[J]. Applied Physics A, 1999, 69(1): 99–107.
- 12 Yang Qing, Du Guangqing, Chen Feng, *et al.*. Ultrafast thermal relaxation characteristics in gold film excited by shaped femtosecond laser pulses[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0502005.
杨 青, 杜广庆, 陈 烽, 等. 飞秒激光整形脉冲激发金膜的超快热弛豫特性[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0502005.
- 13 Q Li, H Lao, J Lin, *et al.*. Study of femtosecond ablation on aluminum film with 3D two-temperature model and experimental verifications [J]. Applied Physics A, 2011, 105(1): 125–129.
- 14 Ben-Yakar A, Byer R L. Femtosecond laser ablation properties of borosilicate glass[J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(9): 5316–5323.
- 15 Srinivasan R, Braren B, Casey K G. Nature of “incubation pulses” in the ultraviolet laser ablation of polymethyl methacrylate[J]. Journal of Applied Physics, 1990, 68(4): 1842–1847.
- 16 Durmin J, Miceli J J, Eberly J H. Diffraction-free beams[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(15): 1499–1501.
- 17 Mori S. Side lobe suppression of a Bessel beam for high aspect ratio laser processing[J]. Precision Engineering, 2015, 39: 79–85.

栏目编辑: 宋梅梅