

激光与光电子学进展

大功率激光作用下光学系统轴向焦移仿真

丁伟, 王菲*, 王孟洁, 翁宁直

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 在大功率的光学切割系统中, 激光经过光学系统聚焦会产生热量, 造成光学系统元件发生热形变和折射率的改变, 从而导致镜片焦距发生改变, 影响加工效果。利用 COMSOL 软件对光学系统进行多物理场模型建模, 仿真得到连续激光和准连续激光作用下的镜面形变量和折射率改变情况, 将镜片受热后数据导入 ZEMAX 中进行光束追迹, 仿真计算出光学系统焦点的轴向偏移量。功率越大, 焦点偏移量越大; 脉宽越大, 焦点偏移量越小; 重复频率越高, 焦点偏移量越小。最后通过引入对流系数对焦点偏移进行补偿, 同时改变对流系数可以控制焦点的位置。该研究解决了大功率激光加工过程中的轴向焦点偏移量测量难的问题, 为大功率激光切割设备的焦点控制提供理论依据。

关键词 激光光学; 大功率激光; 焦点位移; COMSOL; 光束追迹; 焦移补偿

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1114011

Simulation of Axial Focal Shift of Optical System Under High-Power Laser

Ding Wei, Wang Fei*, Wang Mengjie, Weng Ningzhi

School of Opto-Electronics Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In a high-power optical cutting system, the laser is focused by the optical system to generate heat, which causes the optical system components to undergo thermal deformation and change in refractive index, which changes the focal length of the lens and affects the processing effect. COMSOL software is used to model the optical system in a multi-physics field, the shape of the mirror and the change of refractive index under the action of continuous laser and quasi-continuous laser are obtained by simulation. The heated data of the lens is imported into ZEMAX for beam tracing, and the axial offset of the focal point of the optical system is calculated by simulation. The higher the power, the greater the focal shift; the larger the pulse width, the smaller the focal shift; the higher the repetition frequency, the smaller the focal shift. Finally, the focus shift is compensated by introducing the convection coefficient, and the position of the focus can be controlled by changing the convection coefficient. This research solves the problem of difficult measurement of the axial focus offset during high-power laser processing and provides a theoretical basis for the focus control of high-power laser cutting equipment.

Key words laser optics; high-power laser; focal shift; COMSOL; tracking beam; focal shift compensation

OCIS codes 140.6810; 230.2285; 140.3390

收稿日期: 2020-11-15; 修回日期: 2020-12-03; 录用日期: 2020-12-14

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1107500); 吉林省科技发展计划(20190302095GX)

*E-mail: feeewang@163.com

1 引言

激光切割是激光加工中发展较为成熟的技术之一,由于其精度高、效率高、切割质量好、加工范围广等诸多优点,被广泛应用于汽车、航空、钢铁、船舶等领域^[1-8]。随着激光切割技术在工业领域应用范围的不断增加,该技术目前正朝着高功率方向迈进^[9]。高功率激光切割系统的出现,不断打破激光切割厚度的极限^[10]。

高功率激光切割技术能够大大提高加工速度,且拥有更高的切割质量^[11-12]。但是在大功率激光作用下,光学系统的热透镜效应明显,在镜片表面存在温度梯度,使折射率发生改变,温度的增加也会产生热应力,折射率的改变和热应力的存在会降低光学系统的正确聚焦能力,导致焦点沿轴向漂移。焦点的改变将对切缝的宽度、坡度、切割面的粗糙度、熔渣的粘着状态、切割速度等几乎所有加工参数产生影响^[13-14]。目前已有学者对此开展了相关研究,田凤杰等^[15]进行了焦点不重合对加工结果影响的研究,结果表明,焦点位置的不重合将直接影响零件的成形质量,难以获得理想的加工效果。叶畅等^[16]对气体激光器的焦点偏离量进行了理论分析,得出结论:激光功率越大,工作时间越长,输出窗的热透镜效应越严重,离焦量变化越大。Miyamoto等^[17]针对高功率 CO₂ 激光器聚焦过程中热透镜效应导致焦距变化这一现象进行了研究,通过热传导理论和物理光学的知识确定了焦点位置,并用自主开发的光学诊断系统对光束进行测量,测得的瞬态焦点偏移与计算值非常吻合,得出:高斯光束引起的光学畸变会降低焦点处的功率密度。Faas等^[18]使用 CCD 相机通过接收反射光测量热致超快激光加工系统焦点偏移量,得出了平均功率为 525 W 时的焦点位移和功率密度的关系曲线,功率密度越大,焦点偏移量越大。

目前对于大功率激光切割技术中焦点偏移量的定量分析较少,本文通过 COMSOL 软件对光学系统进行建模仿真。通过改变激光的功率、脉宽和重复频率,获得焦点位置偏移规律。同时为了解决热致焦移这一情况,通过改变对流系数来模拟制冷量大小,对焦点偏移量进行补偿,从而控制焦点位置,获得最佳的激光切割效果,为大功率激光切割设备的焦点控制提供理论依据。

2 模型建立

2.1 几何模型的建立

将光学系统等效为一个凸透镜,将准直后的激

光作用在一个凸透镜上,分析单透镜的受热影响规律,使模型简化。设置透镜的曲率半径 $R=75\text{ mm}$,中心厚度 $T_c=7.5\text{ mm}$,半径 $r=25\text{ mm}$ 。材料定义为硅玻璃,热膨胀系数 $\alpha=5.5\times 10^{-5}\text{ K}^{-1}$,恒压热容 $C_p=703\text{ J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$,导热系数 $k=1.38\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$,折射率 $n_0=1.45$ 。折射率受温度的影响^[19], $n=n_0+\frac{dn}{dT}\cdot(T-T_0)$, $\frac{dn}{dT}=10^{-5}\text{ K}^{-1}$,其中, $\frac{dn}{dT}$ 为折射率热变化率, T 为实况温度, T_0 为初始温度。

2.2 多物理场的耦合

分别使用大功率的连续激光和准连续激光作为光源进行仿真,将激光视为高斯分布的面热源^[20]辐照在光学系统上。

连续激光的热源公式为

$$Q_1 = \left(\frac{2P}{\pi R^2} \right) \exp \left\{ -2 \left[\left(\frac{y-y_0}{R} \right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{R} \right)^2 \right] \right\} \quad (1)$$

准连续激光的热源公式为

$$Q_2 = Q_1 \times p(t), \quad (2)$$

式中: P 为激光功率,分别模拟连续激光功率在不同功率的情况下光学系统的温度分布、折射率改变量和热应力导致的形变量; $p(t)$ 为复合脉冲重复频率的周期函数; τ 为脉冲宽度。使用单一变量法,分别改变光源参数,研究准连续激光的功率、脉宽、重复频率对焦点偏移量的影响规律。

图 1 是 0~0.005 s 的脉冲周期图。周期 $T'=1000\text{ }\mu\text{s}$,脉冲宽度 $\tau=100\text{ }\mu\text{s}$ 。

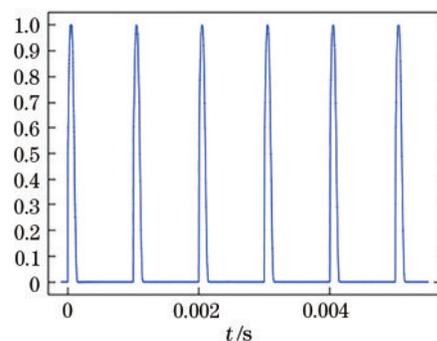


图 1 脉冲函数周期图

Fig. 1 Pulse function of period diagram

计算方法如下:将光源作为热源,采用 COMSOL 中固体传热接口的三维傅里叶导热方程^[21]来计算,即

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \nabla T - \nabla \cdot (kT) = Q + Q_{\text{ted}} \quad (3)$$

对于固体传热接口,设置光学镜片的对流热通

量 $q_0 = h \cdot (T_{\text{ext}} - T)$, $h = 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ (空气在自然状态下), T_{ext} 为实时温度。透镜各位置的热膨胀量为 $\epsilon_{\text{th}} = \alpha(T)(T - T_{\text{ref}})$ 。

2.3 网格划分

为了使仿真更为准确,将三维几何模型进行超细化划分^[22-23],将热通量通过热传导的方式传递给周围的网格^[24]。 $r=x=0$ 处,为激光光斑中心,靠近热源区域处温度变化较大,因此将中心区域网格细化。网格划分如图 2 所示,采用自由四

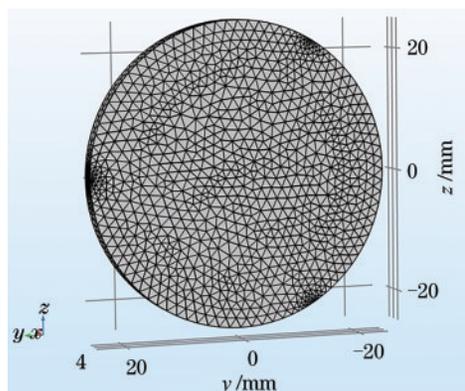


图 2 网格划分图

Fig. 2 Mesh generation

面体对网格进行剖分,最大单元大小为 1.88 mm,最小单元大小 0.0806 mm。由于透镜边缘有三处固定约束,将其同样进行细化。同时考虑计算时间,将时间步长设置为 0.1 s,进行瞬态^[25-26]仿真计算。

3 仿真结果与分析

3.1 光学系统在大功率激光作用下的物理场分布

大功率激光经过光学系统后,透镜内部会形成温度分布,主要分为两个区域:激光辐照的高温区和辐照外的低温区域。本文模拟了不同功率激光作用下,不同时间的光学系统受热分布情况、各个位置折射率改变状况和各处的位移量。图 3(a)~(c)分别描述了功率为 1000, 3000, 5000 W 的连续激光作用了 5 s 时,光学透镜的瞬态温度分布立体图、温升的等值线和二维等温截面图^[27]。从这三幅图中可以看出,在连续激光工作 5 s 后,透镜表面及内部的温升变化状况,从作用中心点一直向中心轴向深度和半径径向方向传递热量,中心温度最高,逐渐向边缘扩散,呈高斯分布^[28-29]。

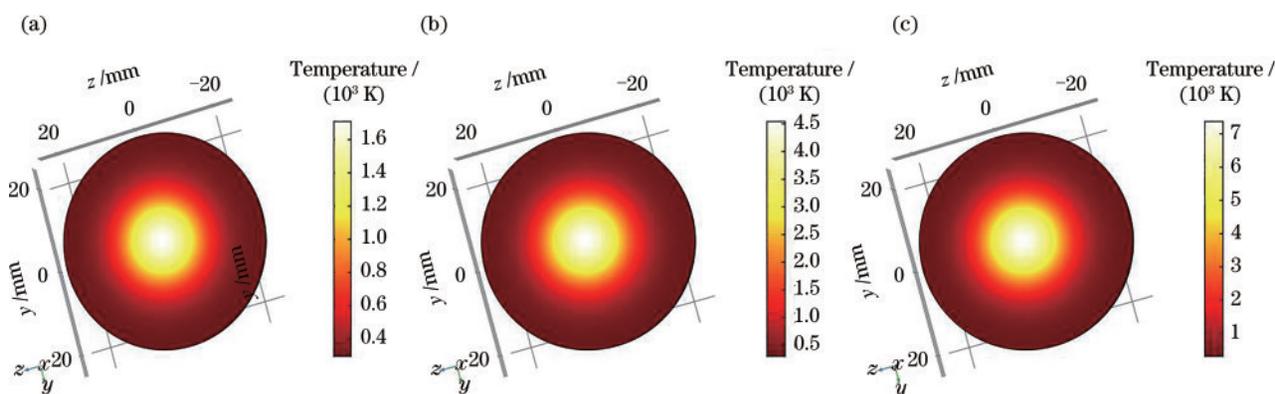


图 3 连续激光作用下的光学透镜热分布情况。(a) 1000 W; (b) 3000 W; (c) 5000 W

Fig. 3 Heat distribution of optical lens under continuous laser action. (a) 1000 W; (b) 3000 W; (c) 5000 W

光学透镜温度的变化,引起折射率的改变。图 4 显示了折射率的实部 n 与室温下的折射率 n_0 之间的差异。图 4(a)~(c)分别对应 1000, 3000, 5000 W 激光工作 5 s 时光学系统各点的折射率变化情况。折射率的变化在中心处达到最大值,比边缘处折射率的改变量变化大约 50%。

镜片吸收热量产生的 von Mises 应力和变形如图 5 所示,可以清晰地从颜色分布看出应力分布,形变量主要集中在中间部分的高

温区。

将光学系统受热形变后的坐标数据导入到 ZEMAX 中,受热后的折射率 n 赋值到材料上,加入无能量的光束进行光路追迹,设置入瞳直径 $D_{\text{EP}} = 20 \text{ mm}$,如图 6 所示。仿真计算得到光学系统焦点轴向位置,与未受热时焦点位置做差,得到光学系统受到大功率脉冲激光作用后焦点的轴向位移情况,最终得到焦点轴向位移量为 $\Delta l = l_1 - l_2$,即焦距缩短了 Δl 。

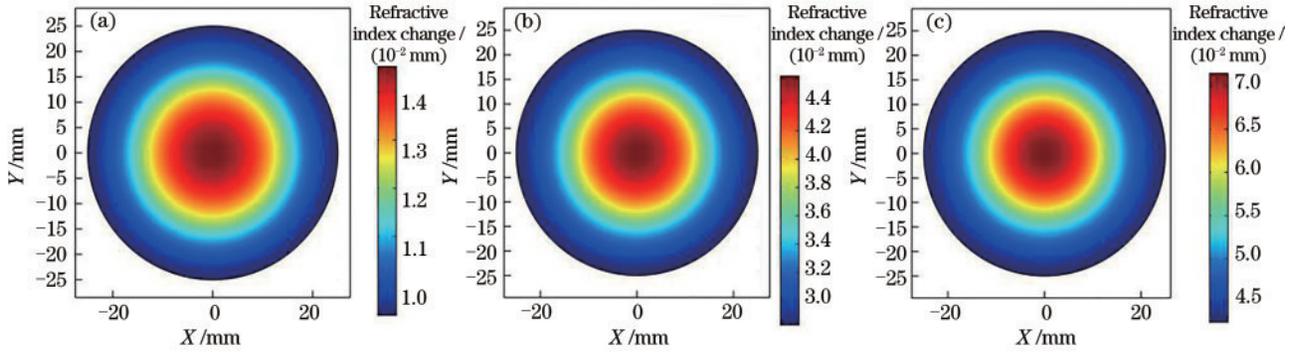


图 4 光学透镜的折射率的变化。(a) 1000 W; (b) 3000 W; (c) 5000 W

Fig. 4 Changes in refractive index of optical lens. (a) 1000 W; (b) 3000 W; (c) 5000 W

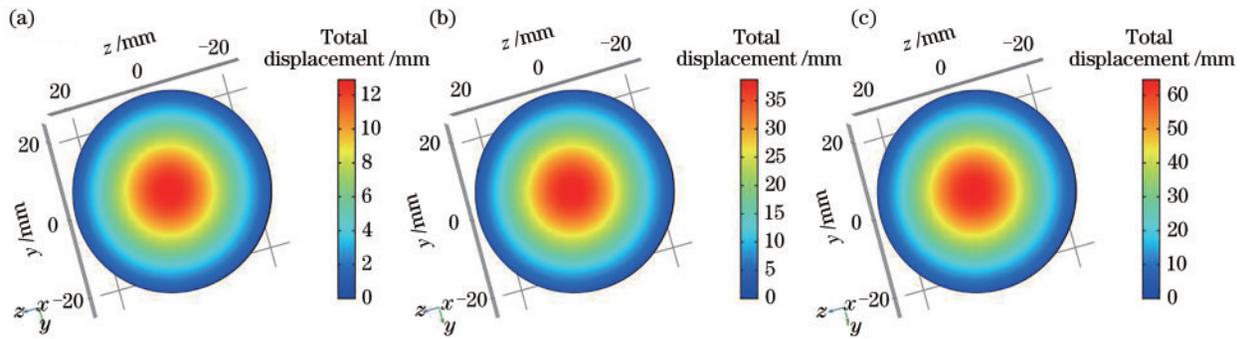


图 5 光学透镜受热 5 s 的变形情况。(a) 1000 W; (b) 3000 W; (c) 5000 W

Fig. 5 Deformation of optical lens when heated for 5 s. (a) 1000 W; (b) 3000 W; (c) 5000 W

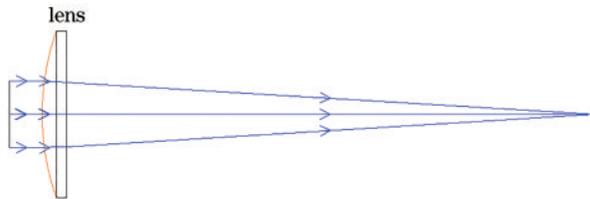


图 6 光束经过受热后光学系统的聚焦情况

Fig. 6 Focus of optical system after beam is heated

3.2 激光参数和焦点偏离关系

对每一个激光参数仿真得到了其焦点位置,与未受热时的光学系统焦点做差得到连续激光在不同功率作用下的光学系统焦点偏离量,绘制成曲线关系图如图 7 所示。可以看出,随着功率的增加,焦点偏离量越来越大。从 1000 W 开始光学系统的热透镜效应已经很严重,焦点轴向距离缩短了 5.06 mm。

图 8 是在脉冲宽度 $\tau = 100 \mu\text{s}$ 、重复频率 $P_{\text{PRF}} = 10 \text{ kHz}$ 的条件下,分别使用不同功率的激光作为光源。在低于 1000 W 功率时,轴向焦点位移较小;随着功率的增加,轴向焦点位移量也越大。

图 9 是在脉冲功率 $P = 3000 \text{ W}$ 、重复频率 $P_{\text{PRF}} = 10 \text{ kHz}$ 的条件下,脉冲宽度和轴向焦点偏离

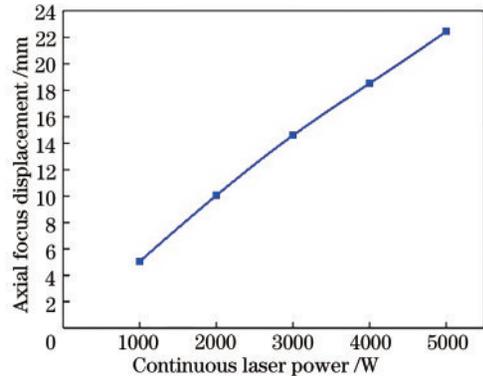


图 7 连续激光功率和轴向焦点偏离量关系

Fig. 7 Relationship between continuous laser power and axial focus displacement

情况的关系图。可以看出,随着脉冲宽度的增加,轴向焦点位移越小。

图 10 是在脉冲功率 $P = 3000 \text{ W}$ 、脉冲宽度 $\tau = 100 \mu\text{s}$ 的条件下,对不同的重复频率的焦点偏移量进行仿真。得出结论重复频率越高,轴向焦点偏移量越小。

3.3 对光学系统进行降温

通过上述仿真可知,连续激光作用在光学系统的时候,焦点偏移量较大,严重影响切割系统的切

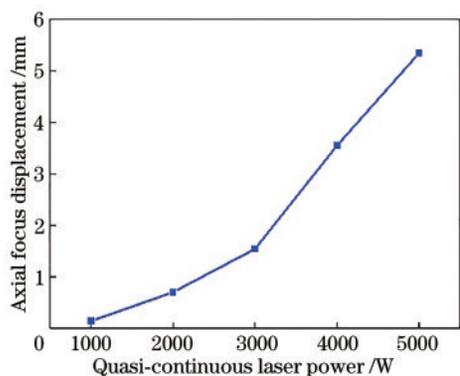


图 8 准连续激光的功率和轴向焦点偏离量关系

Fig. 8 Relationship between quasi-continuous laser power and axial focus displacement

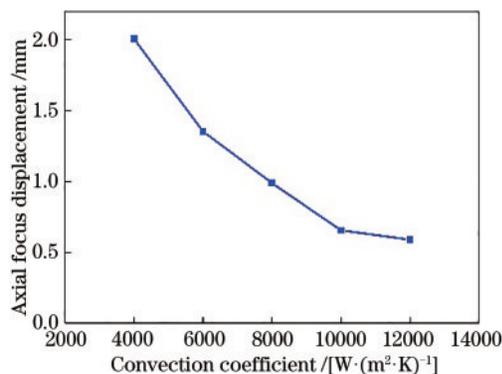


图 11 对流系数和轴向焦点偏离量关系

Fig. 11 Relationship between convection coefficient and axial focus displacement

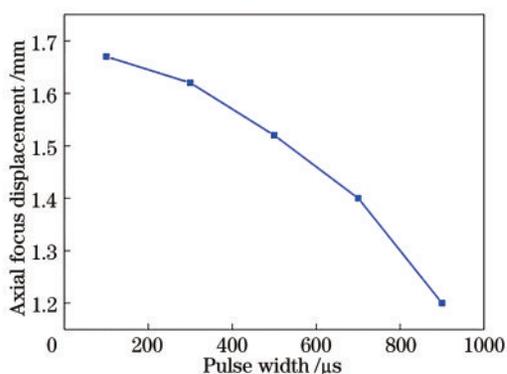


图 9 脉冲宽度和轴向焦点偏离量关系

Fig. 9 Relationship between pulse width and axial focus displacement

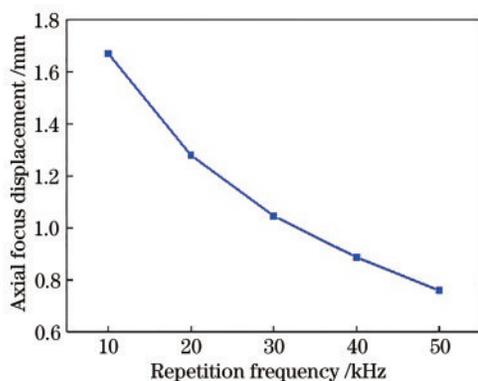


图 10 重复频率和轴向焦点偏离量关系

Fig. 10 Relationship between repetition frequency and axial focus displacement

割质量,因此需要对光学系统表面进行冷却。针对连续激光,选取 3000 W 这一功率,修改对流系数 h 这个参数,来模拟光学系统在强气流的风冷下的焦点轴向位置。

从图 11 可以看出,对流系数 h 越大,轴向焦点

位移越小,透镜表面热透镜效应越小。当对流系数 $h = 10000 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 时,功率为 3000 W 的连续激光作用在光学系统 5 s 时,轴向焦点偏离量为 0.668 mm。因此可以通过改变对流系数来控制焦点位置。且 $h = 10000 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 在水的强制对流范围内 $[1000 \sim 15000 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}]$,具有实用性,可根据实际情况中激光的参数与焦点偏离量需求来控制制冷量的大小。例如,以功率为 3000 W 的连续激光作为光源,切割时间为 5 s,焦点偏离距离要求 $\Delta l \leq 1 \text{ mm}$,对流系数为 $8000 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 即可。

4 结 论

本文对大功率激光切割系统中焦点偏移进行了研究,利用 COMSOL 软件建立了光学系统模型,将光-热-力物理场接口进行了耦合,模拟计算了不同功率、脉冲宽度、重复频率的激光作用下的光学系统温度改变引起的折射率变化情况及热致形变量,结合 ZEMAX 软件进行光束追迹,获得焦点的轴向偏移量。在光学系统受热后,影响焦点位移的主要影响因素导致热致折射率的改变,且轴向偏移量与激光功率成正比,与脉冲宽度、重复频率成反比。最后通过引入对流系数对焦点偏移进行补偿,随着对流系数的增加,焦点轴向偏移减小,因此通过改变对流系数,能够实现焦点偏移量的有效补偿。

参 考 文 献

- [1] Li X Y, Zeng X Y, Liu Y, et al. Study of YAG laser cutting process with stainless steel sheet[J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(12): 1125-1129.
李祥友,曾晓雁,刘勇,等.激光精密切割不锈钢薄

- 板的工艺研究[J]. 中国激光, 2001, 28(12): 1125-1129.
- [2] Zhang T Z, Zhang C, Li J, et al. Formation mechanism of recast layer in millisecond laser drilling of Ti_6Al_4V alloys[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0214001.
张廷忠, 张冲, 李晋, 等. Ti_6Al_4V 合金毫秒激光打孔重铸层的形成机制[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0214001.
- [3] Jia B S, Tang H P, Su C Z, et al. Removal of surface coating of resin matrix composites by pulsed laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1202010.
贾宝申, 唐洪平, 苏春洲, 等. 脉冲激光去除树脂基复合材料表面涂层[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1202010.
- [4] Hu X D, Li Y L, Bai S Z, et al. Research progress of laser application in material removal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0500008.
胡晓冬, 李元龙, 白少状, 等. 激光在材料去除加工中应用的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0500008.
- [5] Ding Y, Xiong X, Zhao X Q. Quantitative analysis of laser-induced breakdown spectroscopy of P and S in steel sample based on internal standard method[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(8): 0847011.
丁宇, 熊雄, 赵兴强. 基于内标法的钢铁中硫和磷激光诱导击穿光谱定量分析[J]. 光子学报, 2018, 47(8): 0847011.
- [6] Sun P F, Zhang L X, Li J, et al. Influence of polishing slurry viscosity on the material removal function for fluid jet polishing[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1222003.
孙鹏飞, 张连新, 李建, 等. 射流抛光中抛光液黏度对材料去除函数的影响[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1222003.
- [7] Guo L B, Li X Y, Xiong W, et al. Recent technological progress in Asia from the first Asian symposium on Laser-induced Breakdown Spectroscopy [J]. Frontiers of Physics, 2016, 11(6): 1-7.
- [8] Li X H, Garner S. Laser cutting of flexible glass[C]// CLEO: Applications and Technology 2014, June 8-13, 2014, San Jose, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2014: ATu3L.1.
- [9] Zhang X C, Qian J, Liu J, et al. Recent process in laser processing of fiber-reinforced composites[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 111432.
张学聪, 钱静, 刘军, 等. 激光加工纤维增强复合材料研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 111432.
- [10] Wu Y P. High-power laser cutting machine and its application[J]. Metal Forming, 2020(7): 24-26.
武亚鹏. 大功率激光切割机及其应用[J]. 金属加工(热加工), 2020(7): 24-26.
- [11] Miraoui I, Boujelbene M, Zaied M. High-power laser cutting of steel plates: heat affected zone analysis[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2016: 1-8.
- [12] Harada Y, Nakama G, Kozu S, et al. Damage evaluation of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) by high power laser cutting[J]. The Proceedings of Ibaraki District Conference, 2016, 24: 904.
- [13] Lu P H, Wang R W. Three-dimensional temperature distribution analysis and thermal lens effect calculation for high power laser windows[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(8): 965-969.
陆培华, 王润文. 高功率激光器窗口三维温度场分析及其热透镜研究[J]. 光学学报, 2001, 21(8): 965-969.
- [14] Song X Y, Qi J B, Duan X L, et al. Structure analysis and maintenance of X-axis laser focus system in laser welder[J]. Metallurgical Equipment, 2016(6): 48-50, 47.
宋锡友, 齐杰斌, 段新丽, 等. 激光焊机 X 轴激光焦点系统结构分析与维护[J]. 冶金设备, 2016(6): 48-50, 47.
- [15] Tian F J, Shang X F, Han H. Study on misalignment of focus position in laser metal deposition shaping processing[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2015(3): 26-29.
田凤杰, 尚晓峰, 韩辉. 激光金属沉积成形中焦点位置不重合研究[J]. 制造技术与机床, 2015(3): 26-29.
- [16] Ye C, He S J. Study on influence of laser beam focus on position fluctuation[J]. Coal Mine Machinery, 2013, 34(5): 60-62.
叶畅, 何时剑. 激光束焦点位置波动的影响因素研究[J]. 煤矿机械, 2013, 34(5): 60-62.
- [17] Miyamoto I, Nanba H, Maruo H. Analysis of thermally induced optical distortion in lens during focusing high-power CO_2 laser beam[J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1276: 112-121.
- [18] Faas S, Foerster D J, Weber R, et al. Determination of the thermally induced focal shift of processing optics for ultrafast lasers with average powers of up to 525 W[J]. Optics Express, 2018, 26

- (20): 26020-26029.
- [19] Xu X Y, Quan Y K, Tao K M, et al. Variation of the refractive indices of the plate glass after heat treatment[J]. *Forensic Science and Technology*, 2006 (2): 11-14.
胥晓燕, 权养科, 陶克明, 等. 平板玻璃受热后折射率的变化规律初探[J]. *刑事技术*, 2006(2): 11-14.
- [20] Taylor L L, Qiao J, Qiao J. Optimization of femtosecond laser processing of silicon via numerical modeling[J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(9): 2745-2758.
- [21] Li S J, Wang H Q, Zhao W Y, et al. Multiphysics coupling simulation modeling methods based on COMSOL[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2014(4): 19-20, 23.
李淑君, 王惠泉, 赵文玉, 等. 基于 COMSOL 多物理场耦合仿真建模方法研究[J]. *机械工程与自动化*, 2014(4): 19-20, 23.
- [22] Zhang H M. Heat accumulation model and experimental study of TC4 titanium alloy by femtosecond laser machining[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2018.
张寒墨. 飞秒激光加工 TC4 钛合金的热积累模型及实验研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2018.
- [23] Ji L P, Song Z Y, Sun Y P, et al. Single-shot picosecond laser ablation of copper based on COMSOL[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10): 101402.
纪利平, 宋梓钰, 孙亚萍, 等. 基于 COMSOL 的皮秒激光单脉冲烧蚀铜片[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(10): 101402.
- [24] Jin F Y, E S L, Wang H F, et al. Calculation of an optimized two temperature model for ultra-short laser ablation[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, 33(10): 1143-1148.
金方圆, 鄂书林, 王海峰, 等. 短脉冲激光加工双温方程的优化运算[J]. *发光学报*, 2012, 33(10): 1143-1148.
- [25] Wang J S, Cheng Y, Huang Q J, et al. Finite element analysis of laser-induced transient surface grating fields of diamond/ZnSe[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(s1): 138.
王敬时, 程营, 黄巧建, 等. 金刚石/ZnSe 结构中瞬态热栅场的有限元法分析[J]. *光学学报*, 2008, 28(s1): 138.
- [26] Cao L P, Chen Z D, Wu Q, et al. Effect of annealing on transient photoluminescence properties of microstructured black silicon[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0530001.
曹丽萍, 陈战东, 吴强, 等. 退火对微构造黑硅光致发光瞬态性质的影响[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0530001.
- [27] Bauer F, Michalowski A, Kiedrowski T, et al. Heat accumulation in ultra-short pulsed scanning laser ablation of metals[J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1035-1043.
- [28] Lopez J. Parameters of influence in surface ablation and texturing of metals using high-power[J]. *Journal of Laser Micro*, 2015, 10(1): 1-10.
- [29] Li Y M, Zhan J. Extraction algorithm of laser stripe on metallic surface based on double-Gaussian fitting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(17): 171204.
李叶萌, 詹军. 基于双高斯拟合的金属表面光条提取算法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(17): 171204.