

透镜聚焦数控激光切割机聚焦光束方向研究

司立众

(南京工程高等职业学校电子工程系, 江苏 南京 211135)

摘要 研究了数控激光切割机在进行金属板切割时激光束经凸透镜聚焦的聚焦光束传播方向的偏转问题。找出了当激光束中心入射线与聚焦镜(凸透镜)光轴异面时影响聚焦光束方向的几个入射物理量,并运用几何光学原理给出了聚焦光束方向与它们之间的关系式,同时提出了一个调节聚焦光束方向并使聚焦光束垂直于待切割板材板面的方法。切割实验表明,在一定的调节范围内,采用此方法可以方便地调整聚焦光束方向。这一方法也适用于其他采用透镜聚焦的激光加工设备,并为此类设备的聚焦光束方向调节设计提供了一个新的选择和依据。

关键词 激光技术;聚焦光束方向;几何光学;聚焦镜

中图分类号 O435.1;TN249;TG665 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.011403

Research on the Direction of Focused Beam of Numerical-Control Laser Cutting Machine by Focusing Lens

Si Lizhong

(Electronic Engineering Department, Nanjing Engineering Vocational College, Nanjing, Jiangsu 211135, China)

Abstract The deflection of focused beam propagation direction when the metal plate is cutting by numerical-control (NC) laser cutting machine is studied. Several incidence physical parameters affecting the direction of focused beam when the energy center lines of the laser beam and the optical axis of the convex lens are in different planes are found out. The relationship between them is given by geometrical optics. It is found that we can change the direction of focused beam by shifting the convex lens. The testing results show that the horizontal movement of the convex lens can change the direction of focused beam. This method is also applicable to other laser processing equipments which use convex lens. It provides a new selection on the direction-adjusting design of focused beam.

Key words laser technique; direction of focused beam; geometrical optics; focusing lens

OCIS codes 140.3390; 010.3310; 080.3630

1 引言

激光加工技术是涉及光、机、电、材料加工及检测等学科的复合型先进制造技术。在能源、交通运输、钢铁冶金、船舶与汽车制造等国民经济支柱产业,激光加工技术正发挥着不可替代的作用^[1]。激光切割是激光加工中最主要的一项应用技术,占整个激光加工业产值的70%以上^[2]。激光切割加工过程非常复杂,影响因素又很多,如果加工工艺参数选择不当,切割质量必然会受到很大影响^[3]。在采用透镜聚焦的数控激光切割机中,聚焦光束入射到板面的角度是切割过程中最重要的参数之一^[4,5],在一般的激光切割工艺研究中,如无特别说明^[6],都默认了聚焦光束是垂直入射到被加工板材表面的^[7,8]。然而,在实际生产过程中这一条件很难精确满足,即使经过精心调整的光路也仍然存在不可忽略的偏差,这给激光切割工艺研究用于指导生产实践带来了一定的障碍。本文以 SLCM-1225 数控激光切割机^[9]为例,从聚焦镜光路分析入手来研究与聚焦光束方向有关的因素。

2 聚焦镜光路分析

在进行聚焦镜光路分析之前,先假设激光器送到数控激光切割机的激光束是发散角为零且能量均匀呈轴对称分布的圆光斑;另外,考虑到激光热加工的特点,可以用入射激光束与聚焦光束的能量中心线走向来

收稿日期: 2011-09-02; **收到修改稿日期**: 2011-10-12; **网络出版日期**: 2011-11-22

基金项目: 江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金(2010-GZ-003)资助课题。

作者简介: 司立众(1968—),男,高级工程师,主要从事激光技术与自动化技术方面的研究。E-mail: threeman1968@163.com

指示激光束和聚焦光束方向,分别称为入射激光束方向线与聚焦光束方向线。显然,符合假设条件的入射激光束能量中心线就是其几何中心线。

2.1 数控激光切割机外光路概述

如图 1 所示^[9],SLCM-1225 数控激光切割机在工作过程中,最理想的外光路是从激光器出来的激光束几何能量中心线以 45° 角入射到圆偏振镜的圆心,并以 45° 角反射出来,垂直入射到聚焦镜以光心为圆心的圆面内,并最终垂直入射到被切割板材表面。然而,在实际生产中,光路总会有偏差,当然,这些偏差最终都会集中在最后一块镜片聚焦镜上,于是入射到聚焦镜上的入射激光束方向与经聚焦镜聚焦后的聚焦光束方向便成了本文的主要研究对象。

2.2 聚焦镜入射光路分类

为研究方便,依据入射激光束方向线与聚焦镜主轴所在直线的关系可将入射光路分为共面入射光路和异面入射光路。其中共面入射又包含垂直入射和斜入射^[9],它们也可看作是异面入射的特殊情况,即当入射角为零时就变成了垂直入射,当入射角不为零但两异面直线距离为零时就变成了斜入射。关于共面垂直入射和斜入射光路的问题此处不再深入讨论,而是重点研究激光束异面入射聚焦镜后影响聚焦光束方向的因素。

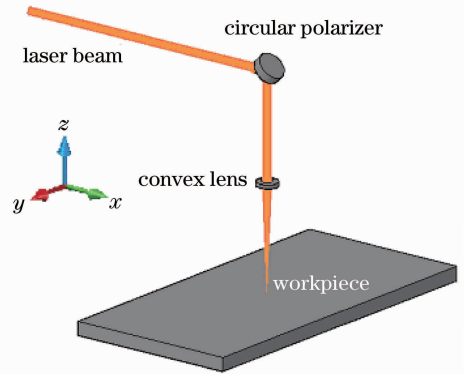


图 1 SLCM-1225 数控激光切割机外光路简图
Fig. 1 Outside optical path of SLCM-1225 laser numerical-control cutting machine

3 聚焦光束方向与入射激光束关系分析

3.1 建立异面入射时的空间关系图

由上述分析可知,入射激光束与聚焦镜最一般的关系是入射激光束方向线与聚焦镜主轴异面。如图 2(a) 所示,图中圆代表聚焦镜, O 点为聚焦镜光心, C 为光源 S 点发出的激光束能量中心线在聚焦镜上的入射点, F 为聚焦镜焦点,焦距为 f 。以 OC 所在直线为 x 轴,在聚焦镜(厚度忽略不计)所在平面内建立如图所示平面直角坐标系,再辅以聚焦镜光轴为 z 轴建立空间立体坐标系。令 C 点坐标为 $(d, 0, 0)$,则当 $d < 0$ 时就表明 C 点在 x 轴负半轴上。在图 2(b) 中,添加了一条光线 S_1O ,这是一条过光心 O 并且平行于 SC 的光线,则光线 S_1O 与聚焦镜光轴的夹角 θ_1 就是光线 SC 的入射角。由几何光学知,经过聚焦镜后,该光线将按原来的方向前进,并且它将与光线 SC 经聚焦镜折射后的光线相交于一点,设该交点为 E ,则 E 点是所有平行于 SC 的入射光线的聚焦点,它在过焦点 F 的焦平面上(是 S_1O 延长线与焦平面的交点)。显然,若入射激光束的几何能量中心线为 SC ,则其聚焦光束几何能量中心线便为 CE ;若入射激光束的几何能量中心线为 S_1O ,则其聚焦光束几何能量中心线为 OE ;可见当入射激光束入射角不变时,聚焦光束方向与入射激光束几何能量中心线在

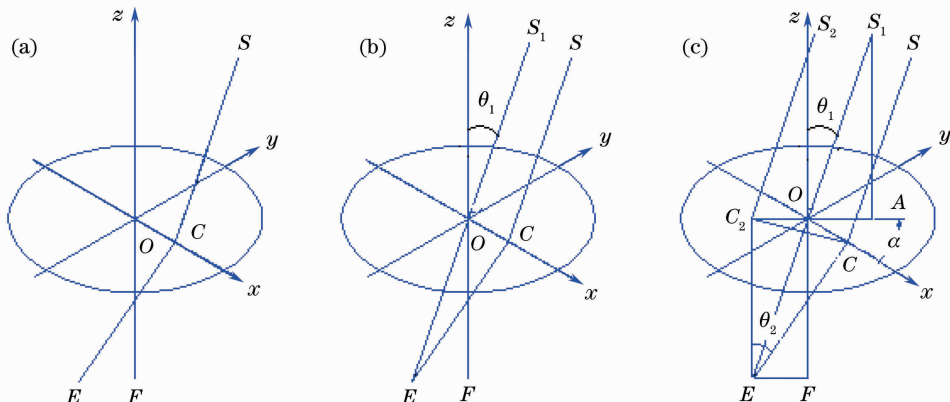


图 2 异面斜入射光路图

Fig. 2 Oblique incident light in different planes on the convex lens

聚焦镜上的落点位置有很大的关系。下面就来寻找聚焦光束方向与入射激光束入射角以及其几何能量中心线在聚焦镜上的落点位置的关系。

如图 2(c)所示,在图 2(b)的基础上过 E 点做聚焦镜所在平面垂线,垂足为 C_2 ,设 $\angle C_2EC = \theta_2$,由立体几何可以证明 θ_2 的大小等于光线 SC 的折射角,同样可以证明 $\angle C_2EO = \theta_1$ 。过 S_1 点做聚焦镜所在平面垂线,垂足为 A ,连接 AO 。过 C_2 点做 S_2C_2 平行于 SC ,显然,若入射激光束的几何能量中心线为 S_2C_2 ,则其聚焦光束几何能量中心线便为 C_2E 。至此,已建立起起了一个较为完整的异面入射聚焦光束光路模型,如图 2(c)所示。

3.2 聚焦光束折射角 θ_2 的表达式推导

如图 2(c)所示,因为 S_1A 与 C_2E 都垂直于聚焦镜平面,所以有 $S_1A \parallel C_2E$,则 S_1A 与 C_2E 共面;又因 S_1 、 O 、 E 三点共线,且 $S_2C_2 \parallel S_1O$,所以点 S_1 、 A 、 C_2 、 E 、 O 均在同一平面内,且点 A 、 C_2 、 O 共线。设入射线 SC 在 xy 平面上的投影与 x 轴方向的夹角(等于图中的 $\angle AOC$)为 α ,考虑到入射角为 θ_1 ,光心 O 到入射点 C 的距离为 d ,则入射线便唯一地确定了。具体过程如下:

因为 C_2E 垂直于聚焦镜平面

所以 $C_2E \perp C_2C$, $C_2E \perp C_2O$

则在 $\triangle C_2CE$ 和 $\triangle C_2OE$ 中,有 $\tan \theta_2 = C_2C/C_2E = C_2C/f$ 和 $\tan \theta_1 = C_2O/f$

又因为 $\angle AOC = \alpha$

所以 $\angle C_2OC = 180^\circ - \alpha$

则在 $\triangle C_2OC$ 中,由余弦定理得:

$$C_2C^2 = OC^2 + C_2O^2 - 2 \cdot OC \cdot C_2O \cdot \cos(180^\circ - \alpha) = d^2 + f^2 \cdot \tan^2 \theta_1 + 2d \cdot f \cdot \tan \theta_1 \cdot \cos \alpha$$

则

$$\tan \theta_2 = C_2C/f = (d^2 + f^2 \cdot \tan^2 \theta_1 + 2d \cdot f \cdot \tan \theta_1 \cdot \cos \alpha)^{1/2}/f, \quad (1)$$

$$\theta_2 = \arctan[(d^2 + f^2 \cdot \tan^2 \theta_1 + 2d \cdot f \cdot \tan \theta_1 \cdot \cos \alpha)^{1/2}/f]. \quad (2)$$

(1),(2)式给出了聚焦光束折射角与入射激光束入射参数 d 、 θ_1 、 α 以及聚焦镜焦距 f 之间的关系式。

3.3 聚焦光束方向垂直控制

研究聚焦光束方向是为了工业应用,前面的分析已经告诉我们,作为激光切割机的最后一块镜片,在设备工作的某一个阶段,到达聚焦镜的激光束的方向可以认为是不变的。为方便调节,不再改变其他镜片的位置,只平移聚焦镜(在聚焦镜所在平面内平移),这样(2)式中的 θ_1 和 α 值便固定了。下面来分析当 d 为何值时聚焦光束才能垂直射出(这是激光加工技术中的一个主要的控制目标),当然此时必有 $\theta_2 = 0^\circ$ 。

若要 $\theta_2 = 0^\circ$,根据(1)式可得

$$d^2 + f^2 \cdot \tan^2 \theta_1 + 2d \cdot f \cdot \tan \theta_1 \cdot \cos \alpha = 0,$$

则有

$$\begin{aligned} d &= -f \cdot \tan \theta_1 \cdot \cos \alpha \pm f \cdot \tan \theta_1 \cdot (\cos^2 \alpha - 1)^{1/2} = \\ &= -f \cdot \tan \theta_1 \cdot \cos \alpha \pm f \cdot \tan \theta_1 \cdot (1 - \cos^2 \alpha)^{1/2} j = \\ &= -f \cdot \tan \theta_1 \cdot \cos \alpha \pm f \cdot \tan \theta_1 \cdot |\sin \alpha| \cdot j, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 j 为虚数单位。

经过综合分析知,当 $0^\circ \leq \alpha < 180^\circ$ 时,(3)式中的“ \pm ”应取“ $-$ ”;当 $180^\circ \leq \alpha < 360^\circ$ 时,应取“ $+$ ”。为区别于原入射光路入射点的坐标,用 D 来表示当 θ_1 和 α 值不变时能够使 $\theta_2 = 0^\circ$ 的激光束入射点的位置;再考虑到当 $0^\circ \leq \alpha < 180^\circ$ 时, $\sin \alpha \geq 0$,当 $180^\circ \leq \alpha < 360^\circ$ 时, $\sin \alpha \leq 0$;于是有

$$D = -f \cdot \tan \theta_1 \cdot \cos \alpha - f \cdot \tan \theta_1 \cdot \sin \alpha \cdot j. \quad (4)$$

(4)式是依据原入射点建立起来的立体坐标系推导出来的结论。这一结果说明,当激光束异面入射时,能使折射角 θ_2 为零的入射点并不在 x 轴上。(4)式的实部表明了该点的 x 坐标值,其虚部则代表了该点的 y 坐标值,即能使 $\theta_2 = 0^\circ$ 的激光束入射点的坐标为 $(-f \cdot \tan \theta_1 \cdot \cos \alpha, -f \cdot \tan \theta_1 \cdot \sin \alpha, 0)$ 。

求出了能使聚焦光束折射角 $\theta_2 = 0^\circ$ 的激光束入射点的坐标,就可以计算出聚焦镜在 x 、 y 轴上的平移量。即用原入射点 C 的 x 坐标值减去该点的 x 坐标值,可得聚焦镜沿 x 轴正向应平移 $d + f \cdot \tan \theta_1 \cdot \cos \alpha$;用原入射点 C 的 y 坐标值减去该点的 y 坐标值,可得聚焦镜沿 y 轴正向应平移 $f \cdot \tan \theta_1 \cdot \sin \alpha$ 。这就是生产

中用聚焦镜平移来调节聚焦光束方向的理论依据。

3.4 特殊入射激光束

显然,当 α 为 0° 或 180° 时, D 等于 $-f \cdot \tan \theta_1$ 或 $f \cdot \tan \theta_1$,入射激光束方向线与聚焦镜光轴共面,如图3所示,这就变成了共面斜入射的情形。图3(a)和(b)分别为激光束几何能量中心线穿过和不穿过光心的斜入射光路聚焦示意图。

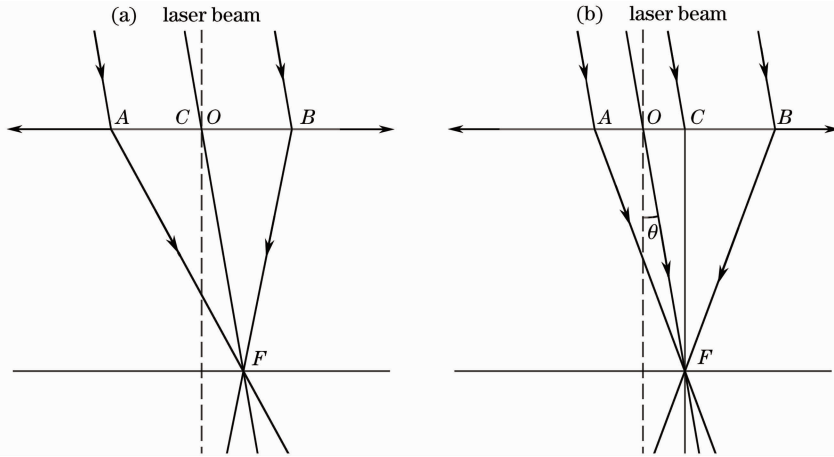


图3 共面斜入射光路图

Fig. 3 Oblique incident light in the same plane on the convex lens

若入射角 $\theta_1 = 0^\circ$,则入射激光束方向线与聚焦镜垂直,如图4所示,这就变成了共面垂直入射的情形。图4(a)和(b)分别为激光束几何能量中心线穿过和不穿过光心的垂直入射光路聚焦示意图。

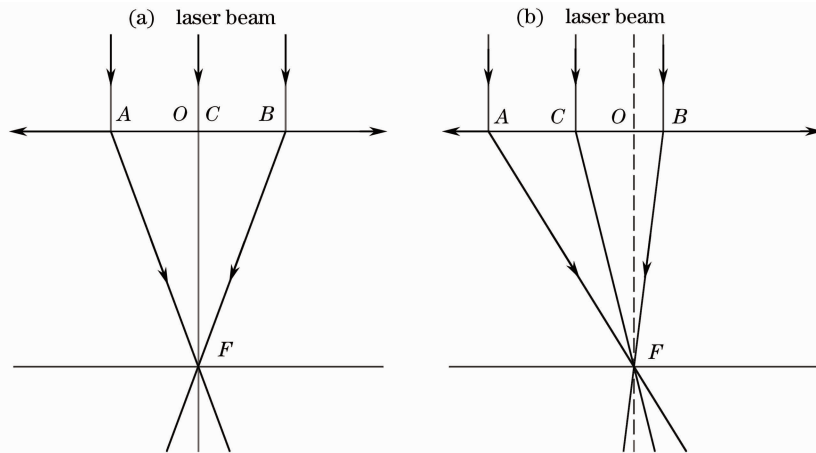


图4 垂直入射光路图

Fig. 4 Vertical incident light on the convex lens

4 实验验证

4.1 聚焦镜的热效应影响

SLCM-1225 数控激光切割机一般配用美国 II-VI 公司生产的焦距为 190 mm 的平凸透镜,镜座有水冷等散热设计,因而在使用过程中能够使镜片保持良好的工作状态,实现激光束的有效聚焦,进而完成数控激光切割机的切割加工工作。在此过程中,散热设计很好地消除了大功率激光束对聚焦镜的热影响。当然,即使存在一点热影响,也只能是其焦距大小有一点变化,而不会是其聚焦性能有变化(如散焦等),否则数控激光切割机便不能正常工作。也就是说,在激光切割过程中,聚焦镜的热影响可以忽略。

4.2 实验光源选择

由于用于加工的激光束功率很高,不便于采用仪表对入射激光束和聚焦激光束进行测量;另外,如配套

使用的激光器是 CO_2 激光器, 则其发出的 $10.6 \mu\text{m}$ 的激光是不可见的, 也不便于测量。为此, 采用 650 nm 的红色可见激光作为实验光源。由 4.1 分析知, 可以用此光源代替大功率激光光源进行实验, 来验证能使聚焦光束折射角 $\theta_2 = 0^\circ$ 的聚焦镜的平移量。

4.3 实验结果

如图 5 所示, 选用三轴位置控制系统承载聚焦镜和光源, 以聚焦镜初始位置的光心 O 点为原点建立空间立体坐标系, 实验中选择几个特定的光源坐标位置和入射角度, 则激光束在聚焦镜上的入射点 C 的坐标位置不变, 聚焦镜在 x 轴、 y 轴方向上的位移量分别由 x 轴、 y 轴方向上的丝杠旋转角度与丝杠螺距决定。在焦平面位置放置带刻度的光屏, 于是便建成了我们所需要的实验装置。这个实验装置能够使聚焦镜在 xy 平面内做平移运动, 从而使聚焦光束落在焦平面上的光点在焦平面内跟着平移; 由于入射点 C 的坐标位置不变, 所以聚焦光束方向也就因此而发生了变化。

经实验验证, 由(4)式得出的 x 轴位移量 $d + f \cdot \tan \theta_1 \cdot \cos \alpha$ 、 y 轴位移量 $f \cdot \tan \theta_1 \cdot \sin \alpha$ 的计算值与实验结果基本相符, 如表 1 所示。

表 1 理论计算与实验结果比较

Table 1 Comparison between theoretical values and experimental results

Focal length		Incident parameters				Displacement			
f / mm	d / mm	$\theta_1 / (^\circ)$	$\alpha / (^\circ)$	Calculated values of x axis /mm	Measured values of x axis /mm	Calculated values of y axis /mm	Measured values of y axis /mm		
190	3	2	30	8.7	8.5	3.3	3.5		
190	3	2	225	-1.7	-1.6	-4.7	-4.5		
190	3	5	30	17.4	17.1	8.3	8.0		
190	3	5	225	-8.8	-8.9	-11.8	-11.6		
190	6	2	30	11.7	12.0	3.3	3.3		
190	6	2	225	1.3	1.2	-4.7	-4.6		
190	6	5	30	20.4	20.2	8.3	8.5		
190	6	5	225	-5.8	-5.5	-11.8	-11.9		

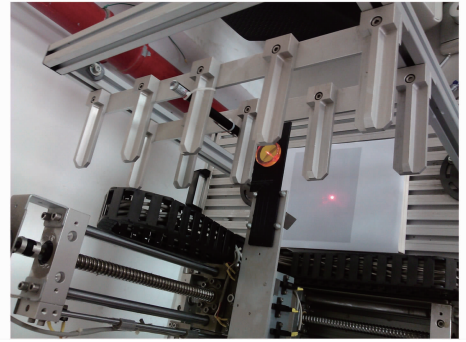


图 5 实验平台

Fig. 5 Experimental platform

5 结 论

根据讨论分析及实验可知, 聚焦光束方向(聚焦光束折射角)与入射激光束入射参数 d 、 θ_1 、 α 以及聚焦镜焦距 f 有关, 控制聚焦光束方向可以通过聚焦镜的平移来实现。在切割钢板时, 主要靠视觉观察打孔时火花向四周溅射是否均匀来判断光束是否垂直于被切割板材表面。当采用系统控制自动平移凸透镜来调节聚焦光束方向时, 应当考虑凸透镜的光学误差对凸透镜平动位移量的影响。

本文根据入射激光束方向线与聚焦镜主轴异面导出的公式也包含了激光束方向线与聚焦镜主轴共面的斜入射和垂直入射情况。从理论上讲, 对于所有用到透镜聚焦的激光加工设备(如激光热处理机、激光焊接机、激光成形机等), 都可以通过聚焦镜的平移来实现对聚焦光束方向的控制。只要偏差不大, 使用这一方法进行聚焦光束方向的修正是既方便又快捷的, 当然, 这也需要设计并使用相应的调节机构才能实现。

参 考 文 献

- Deng Jiake, Wang Zhong, Zhu Fujin *et al.*. Developing tendency and market analysis for CNC laser cutting technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(5): 59~63
- 邓家科, 王中, 朱付金等. 数控激光切割技术发展趋势与市场分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(5): 59~63
- Zhang Yongqiang, Wu Yanhua, Chen Wuzhu *et al.*. Study on relationship between radiation and quality for laser cutting

- [J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(4): 397~399
张永强,吴艳华,陈武柱 等. 激光切割光辐射与切割质量关系的研究[J]. 激光技术, 2007, **31**(4): 397~399
- 3 Yan Qi, Liu Feng. Influence of technology parameters on the laser cutting quality[J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(3): 151~153
阎 启,刘 丰. 工艺参数对激光切割工艺质量的影响[J]. 应用激光, 2006, **26**(3): 151~153
- 4 Chen Jimin, Zuo Tiechuan. Effect of laser beam incident angle on laser cutting quality[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(11): 1037~1040
陈继民,左铁钊. 激光切割中入射角对切割质量的影响[J]. 中国激光, 2001, **A28**(11): 1037~1040
- 5 Chen Hong, Wu Shikai, Zhang Zhengwei *et al.*. The effect of laser beam characteristics on laser processing[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(6): 834~837
陈 虹,吴世凯,张正伟 等. 高功率激光光束特性对激光加工的影响[J]. 光学技术, 2006, **32**(6): 834~837
- 6 Zhang Yongqiang, Wu Yanhua, Chen Wuzhu *et al.*. Effect of laser beam attitude on 3D laser cutting quality[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 124~127
张永强,吴艳华,陈武柱 等. 激光束姿态对三维激光切割质量的影响[J]. 中国激光, 2006, **33**(1): 124~127
- 7 Xie Xiaozhu, Li Lijun. Mechanism of CO₂ laser cutting nonmetallic materials[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(s1): 254~258
谢小柱,李力钧. CO₂ 激光气化切割非金属材料的机制分析[J]. 中国激光, 2007, **34**(s1): 254~258
- 8 Deng Qiansong, Tang Xiahui, Qin Yingxiong *et al.*. Technological study on high power CO₂ laser cutting of small hole on middle-thick steel plates[J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(5): 554~557
邓前松,唐霞辉,秦应雄 等. 中厚钢板小圆孔的高功率 CO₂ 激光切割工艺研究[J]. 激光技术, 2008, **32**(5): 554~557
- 9 Si Lizhong. Research on slotted verticality of die-board laser cutting[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(7): 071405
司立众. 激光切割模切板割缝垂直度问题研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(7): 071405