

激光切割模切板割缝垂直度问题研究

司立众

(江苏省南京工程高等职业学校电子工程系, 江苏 南京 211135)

摘要 采用 NEL-A 系列国产轴快流 CO₂ 激光器与 SLCM-1225 数控激光切割机联机切割模切板,研究了模切板割缝与板面不垂直问题的成因。运用几何光学原理对激光束入射到聚焦镜(凸透镜)的几种可能路径进行了讨论,分析认为设备在使用过程中造成光路的微小偏差是引起割缝与板面不垂直的主要原因,并提出可以通过调节聚焦镜和喷嘴相对于光路的位置来实现模切板割缝与板面垂直度的调整。实验结果表明,聚焦镜的水平位置调整可以改变激光束能量对称中心线在聚焦镜上的入射位置,从而改变经过聚焦后的光束能量中心线的方向,进而改变模切板割缝与板面所成的角度。

关键词 激光技术; 激光切割; 模切板; 几何光学; 垂直度

中图分类号 TG665; TN249; O435.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP48.071405

Research on Slotted Verticality of Die-Board Laser Cutting

Si Lizhong

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

Abstract Slotted verticality of the die-board laser cutting is studied by using the NEL-A series high-power fast-flow axis CO₂ laser and the SLCM-1225 numerical control machine. Based on geometric optics theory, possible paths of the incident light on the convex lens are discussed. The result shows that the small deviation of the optical path is the main cause of the non-vertical slot, and a view is given that the verticality of the slot can be improved by shifting the convex lens. The testing results show that the horizontal movement of the convex lens can change the position of the energy center lines of the laser beam, thus change the direction of the the energy center lines of the focused beam, and then change the angle between the slot and the board surface.

Key words laser technique; laser cutting; die-board; geometrical optics; verticality

OCIS codes 140.0140; 350.3390; 080.3630; 010.3310

1 引言

激光加工技术是融合了光、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、电子电气工业、航空航天等产业正发挥着不可替代的作用^[1]。在包装行业、电子行业,通常把用来模切纸盒、标签、保护膜等物品的模具称之为模切板,它是根据物品的外形展开图,在多层木质胶合板上切割出缝槽后,再嵌入相应的切断刀线和压痕线制作而成的^[2,3];20世纪80年代,开始出现了采用数控激光切割机在木质胶合板上切出缝槽来制作模切板的方法,到2007年,我国用于对外加工模切板的激光切割机约有300台^[4]。数控激光切割机切割模切板具有速度快、精度高和可重复性好等优点,因而在模切板行业得到了越来越广泛的应用^[5,6]。目前我国激光刀模企业总数超过100家,在这些刀模企业中,一个普遍存在的问题是模切板割缝与板面所成角度不垂直,这样装进去的刀线就不垂直于板面,进而影响模切的效果和精度,有时甚至还会损坏模切机。为此,本文采用国内激光刀模企业使用较为普遍的 NEL-A 系列轴快流 CO₂ 激光器与 SLCM-1225 数控激光切割机联机切割模切板,研究割缝与板面所成角度不垂直的原因,并给出了一种切实可行的调节方法。在讨论这一问题之前,先假设从激光器出来的激光束是光斑大小为 18

收稿日期: 2011-01-19; **收到修改稿日期:** 2011-03-18; **网络出版日期:** 2011-06-03

作者简介: 司立众(1968—),男,硕士,高级工程师,主要从事激光技术与自动化技术等方面的研究。

E-mail: threeman1968@163.com

mm,能量均匀分布、且发散角为零的圆光斑。

2 激光切割机外光路

所谓外光路,是指激光器外部的光路,它一般是由多块镀金全反射镜、一块圆偏振镜和一块聚焦镜组成。如上海团结普瑞玛公司的 SLCF-X 系列悬臂梁飞行光路激光切割机有 4 块镀金全反射镜、一块圆偏振镜和一块聚焦镜,而该公司的 SLCM-1225 固定光路激光切割机却只有一块圆偏振镜和一块聚焦镜。

2.1 理想外光路路径

在激光切割机投入生产运营前都要进行调试,调试过程中就包括对外光路所进行的调整。以 SLCM-1225 固定光路激光切割机床为例,如图 1 所示, x 轴方向是激光器出光方向,和机床工作台、工件表面平行; y 轴方向与 x 轴方向垂直,也和机床工作台、工件表面平行; z 轴在与 x 轴、 y 轴都垂直的方向上。切割头沿 z 轴方向上下移动;圆偏振镜位置固定不变;工件跟随机床工作台在 xy 平面内运动。在激光切割机使用前首先要将机床工作台调成水平,理想光路是从激光器发出的平行光束,沿与 x 轴平行的某水平线射出,以 45° 的入射角投射到以圆偏振镜圆心为对称中心的椭圆面内(半短轴为光束半径,半长轴是半短轴的 1.41 倍),再以 45° 角将光束(此时光束与 z 轴平行)反射出去,并最终垂直入射到以聚焦镜光心为心的圆面内(圆半径等于光束半径),经聚焦镜聚焦后的聚焦光束从喷嘴中心线射出,并垂直入射到工件表面。

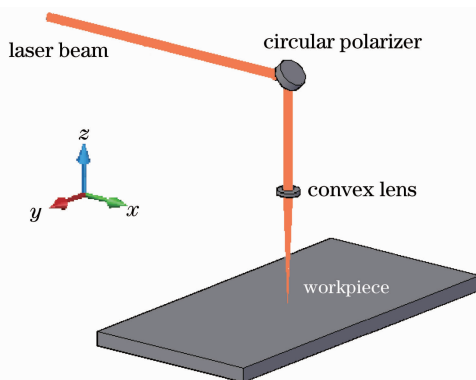


图 1 SLCM-1225 数控激光切割机外光路简图
Fig. 1 Outside optical path of SLCM-1225 laser numerical control cutting machine

2.2 实际的外光路路径

激光切割机在正常工作时,光路一般会偏离这条理想路径^[7,8],这就需调整。目前外光路的调整主要还是人工进行,即在光路中放入十字叉丝打光斑,凭肉眼判断十字叉丝在光斑中的位置,存在很大的偶然性误差;另外由于理想外光路实际上也很难调出,所以在工业生产中,光路总会存在一点小偏差。当这种小偏差经过聚焦镜后,往往会导致光路不垂直于板面,进而割缝不垂直板面^[9]。

2.3 外光路调节中容易忽视的问题

在外光路调节中,普遍存在着两大误区:1)只要入射光束相对于聚焦镜是垂直的,那么聚焦光束也是垂直的;2)只要入射光束相对于聚焦镜是不垂直的,那么聚焦光束也是不垂直的。直观上看这两点似乎都是正确的,而实际情况却不是这样。

3 实际外光路分析

要想把外光路调整到理想光路很难,总有偏差,最终这些偏差都会集中到外光路的最后一块镜片——聚焦镜上,假设激光束能量中心对称(即能量中心线与几何中心线重复),分析聚焦镜处的理想入射光路与几种偏差入射光路。

3.1 穿心垂直入射光路——理想入射光路

穿心垂直入射光路就是理想入射光路,如图 2(a)所示,激光束垂直入射到聚焦镜上,且激光束能量中心线穿过聚焦镜光心,经聚焦镜聚焦后的出射光束能量也同样呈中心对称分布,并垂直入射到板材表面,割缝垂直。

3.2 偏心垂直入射光路

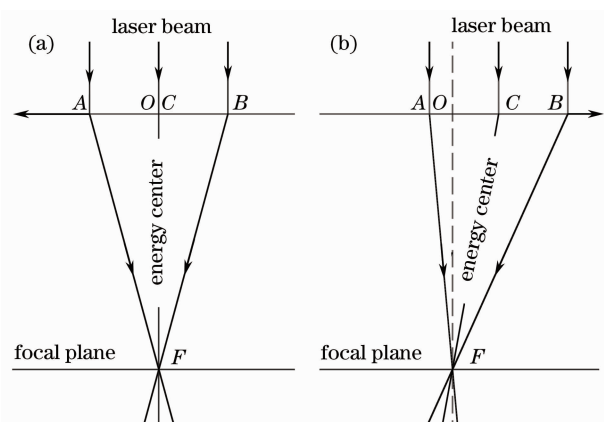


图 2 聚焦镜垂直入射光路

Fig. 2 Vertically incident light on the focusing mirror

激光束垂直入射到聚焦镜上,且激光束能量中心线不穿过聚焦镜光心,根据几何光学原理可以画出如图 2(b)所示的聚焦光。显然,聚焦光的能量中心线与铅垂线有一个不为 0 的夹角,可见,“只要入射光束相对于聚焦镜是垂直的,那么聚焦光束也是垂直的”是一个误区。

3.3 穿心斜入射光路

激光束(小角度)斜入射到聚焦镜上,且激光束能量中心线穿过聚焦镜光心,根据几何光学原理可以画出如图 3(a)所示的聚焦光。显然,聚焦光的能量中心线保持了原来的入射角度,割缝不垂直。

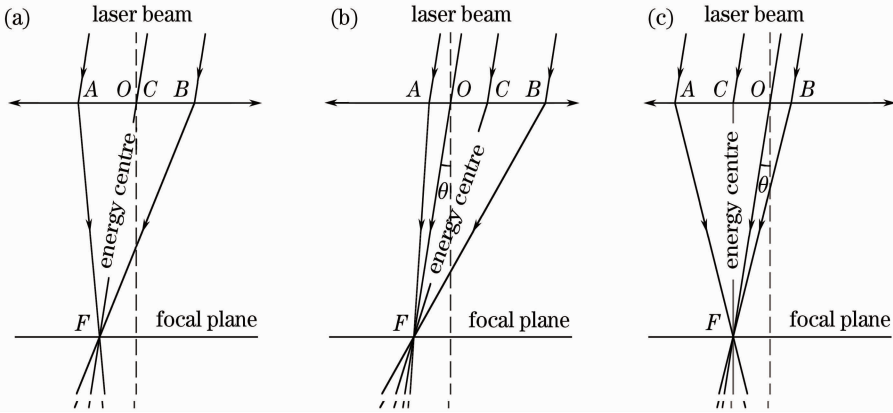


图 3 聚焦镜斜入射光路

Fig. 3 Slopingly incident light on the focusing mirror

3.4 不穿心斜入射光路

激光束(小角度)斜入射到聚焦镜上,但激光束能量中心线不穿过聚焦镜光心,根据几何光学原理可以画出如图 3(b)所示的聚焦光。显然,聚焦光的能量中心线与铅垂线也有一个不为零的夹角,割缝不垂直。不过有一种特殊的不穿心斜入射光路,如图 3(c)所示,假设激光束能量中心线入射角为 θ ,在聚焦镜上的入射点 C 与光心 O 的距离为 d ,聚焦镜焦距为 f ,若有关系式

$$\tan \theta = d/f \quad (1)$$

成立,则聚焦光的能量中心线垂直于焦平面,割缝垂直。可见,“只要入射光束相对于聚焦镜是不垂直的,那么聚焦光束也是不垂直的”说法也是一个误区。当然,并不是所有符合这一条件的入射光束聚焦后都垂直于焦平面。

4 光路偏差与割缝倾角的关系

由 3.4 节可知,对于一定范围内的光路偏差,总能通过平移聚焦镜来找到一个适当的位置,使其聚焦光束垂直于加工板面。为便于讨论对应的聚焦镜平移量和平移方向,用激光束和聚焦光束的能量中心线来代替光束,并把激光束和聚焦光束的能量中心线与聚焦镜主轴放在同一平面内。

4.1 光路数学模型的建立

由分析得知,能够影响聚焦光束方向的因素有以下几点:激光束入射角 θ ,激光束入射点 C 与光源 S(认为光源无限远)是否在聚焦镜光轴的同侧(或异侧),激光束入射点 C 到光心 O 的距离 d (称 d 为入射点位置特征值,显然过光心的光线位置特征值为 0),聚焦镜焦距 f 。经过分析前两个因素可以合并为一个,这是因为当激光束入射点 C 与光源 S 在聚焦镜光轴的同侧时[如图 3(b)] $\angle SCO - \theta = 90^\circ$,当激光束入射点 C 与光源 S 在聚焦镜光轴的异侧时 $\angle SCO + \theta = 90^\circ$ [如图 3(c)],这样上面的前两个因素就变成了入射激光束与射线 CO 的夹角 $\angle SCO$,称 $\angle SCO$ 为光路入射特征角,其变化范围从 $0^\circ \sim 180^\circ$,其中 90° 为理想光路入射特征角,于是就可以提出如图 4 所示的光路模型。

聚焦镜光心为 O,水平放置,聚焦镜下面焦点为 F,焦距 $OF = f$,设从聚焦镜上方光源 S 点向聚焦镜射出一条光线,其入射点为 C,入射角为 θ , $\angle SCO = \alpha$,C 到 O 点的距离 $CO = d$,经聚焦镜折射后的光线与过焦点

F 的焦平面相交于点 E , 称 $\angle ECO$ 为聚焦光束特征角, 显然理想聚焦光束特征角为 90° 。令光线 CE 与 CO 的夹角 $\angle ECO = \beta$ 。

4.2 聚焦光束特征角 β 计算

如图 4 所示, 在 4.1 节中设定的条件下, 过光心 O 点做一条平行于光线 SC 的辅助光线, 根据几何光学原理可知该光线必经过 E 点。

于是有: $OE \parallel SC$, $\angle EOF = \theta$, $\angle EOC = \alpha$

因为光轴 OF 垂直 EF , 所以

$$OE = OF / \cos \theta = f / \cos \theta,$$

$$\cos \alpha = (CO^2 + OE^2 - CE^2) / (2CO \cdot OE) = [d^2 + (f / \cos \theta)^2 - CE^2] / (2df / \cos \theta),$$

$$CE^2 = d^2 + f^2 / \cos^2 \theta - 2df \cos \alpha / \cos \theta,$$

$$\cos \beta = (CO^2 + CE^2 - OE^2) / (2CO \cdot CE),$$

$$\cos \beta = (d \cos \theta - f \cos \alpha) / (d^2 \cos^2 \theta + f^2 - 2df \cos \alpha \cdot \cos \theta)^{1/2},$$

$$\beta = \arccos [(d \cos \theta - f \cos \alpha) / (d^2 \cos^2 \theta + f^2 - 2df \cos \alpha \cdot \cos \theta)^{1/2}]. \quad (2)$$

由于焦距 f 是定值, 所以(2)式表示出了聚焦光束特征角 β 与光路入射特征角 α 、入射点位置特征值 d 以及入射角 θ 之间的关系。其中 α 与 θ 的关系还表示了入射点与光源相对于光轴的位置关系; 当 $\alpha = 90^\circ - \theta$ 时, 入射点与光源位于光轴的异侧; 当 $\alpha = 90^\circ + \theta$ 时, 入射点与光源位于光轴的同侧。

4.3 聚焦镜水平移动位移量计算

由(2)式知, 要使聚焦光束特征角 β 达到理想的 90° , 则必有

$$d \cos \theta - f \cos \alpha = 0. \quad (3)$$

4.3.1 光路入射特征角 $\alpha < 90^\circ$

当 $\alpha = 90^\circ - \theta$ 时, 有

$$d = f \tan \theta. \quad (4)$$

显然(4)式等同于(1)式, 它表明只要保持 $\alpha = 90^\circ - \theta$ 这一条件不变, 如果通过平移聚焦镜能使入射点位置特征值 $d = f \tan \theta$, 那么就能使聚焦光束特征角 β 达到理想的 90° 。 $d = f \tan \theta$ 称为相对于入射角 θ 的理想入射点位置特征值; 为与一般入射点位置特征值相区别, 用 D 来表示这一理想入射点位置特征值, 即 $D = f \tan \theta$, 仍用 d 表示一般入射点位置特征值, 当然它一般不等于 $f \tan \theta$ 。则当入射角为 θ 的激光束入射点位置特征值为 d 时, 如要想使聚焦光束特征角 β 达到理想的 90° , 则聚焦镜需平移的距离为

$$L = D - d. \quad (5)$$

若结果为正, 则需进行拉大 CO 距离的平移; 若结果为负, 则需进行缩小 CO 距离的平移。注意, 在聚焦镜平移过程中, 光心 O 必须一直保持在直线 CO 上。

4.3.2 光路入射特征角 $\alpha > 90^\circ$

再来讨论(3)式, 若 $\alpha = 90^\circ + \theta$, 则有

$$d = -f \tan \theta. \quad (6)$$

(6)式与(4)式相差一个负号, 此负号的含义在于指出理想入射点与现在的入射点分列光轴两侧。为讨论方便, 仍用 D 表示理想入射点位置特征值(即 $D = f \tan \theta$), 用 d 表示一般入射点位置特征值, 并约定字母均表示正数。那么, 在 $\alpha = 90^\circ + \theta$ 的情况下, 如要想使聚焦光束特征角 β 达到理想的 90° , 则聚焦镜需平移的距离为

$$L = D + d. \quad (7)$$

注意, 在聚焦镜平移过程中, 光心 O 是沿着直线 CO 向 C 点方向移动, 并需越过 C 点继续平移距离 D , 才能使入射光束符合理想入射点的位置。

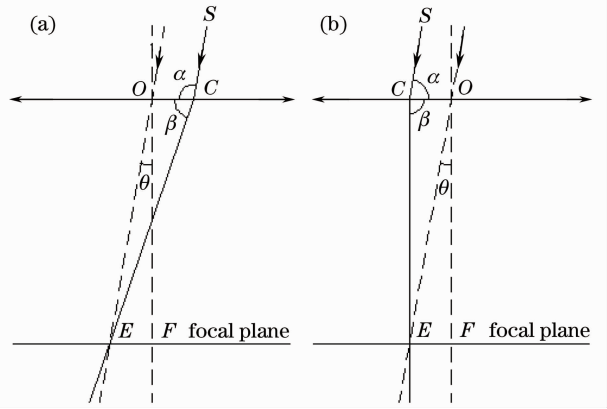


图 4 光路数学模型

Fig. 4 Mathematic Model of the optical path

4.3.3 光路入射特征角 $\alpha=90^\circ$

当光路入射特征角 $\alpha=90^\circ$ 时(即入射角 $\theta=0^\circ$, 此时光路垂直入射到聚焦镜上), 要想使聚焦光束特征角 β 达到理想的 90° , 则由(3)式知

$$D = 0. \quad (8)$$

这说明此时只需平移聚焦镜使入射点 C 与光心 O 重复即可。若仍用 d 表示一般入射点位置特征值, 那么, 当 $\alpha=90^\circ$ 时, 如要想使聚焦光束特征角 β 达到理想的 90° , 则聚焦镜需平移的距离为

$$L = d. \quad (9)$$

注意, 在聚焦镜平移过程中, 光心 O 是沿着直线 CO 向 C 点方向移动, 并最终到达 C 点, 才能使入射光束符合理想入射点的位置。

5 实验结果分析

根据以上讨论分析可知, 当激光束垂直入射到聚焦镜上后, 如果能量中心线偏离聚焦镜光心 O , 总可以通过聚焦镜的平移来实现能量中心线穿过聚焦镜光心 O , 从而使聚焦光束垂直射出, 割缝垂直。若激光束(小角度)斜入射到聚焦镜上, 也可以通过聚焦镜的平移来实现能量中心线的垂直射出, 从而使聚焦光束垂直射出, 割缝垂直。即不管激光束是否垂直入射到聚焦镜上, 总可以通过聚焦镜的平移来实现聚焦光束垂直射出, 割缝垂直。

图 5 为激光束垂直入射到聚焦镜如图 2(a), (b) 所对应的位置时的割缝。从图中可以看出, 即使激光束是垂直入射到聚焦镜上的, 但当激光束能量中心线偏离聚焦镜光心时, 割缝也不垂直。



图 5 光路垂直入射到聚焦镜的割缝示意图

Fig. 5 Slot with the vertically incident light on the focusing mirror

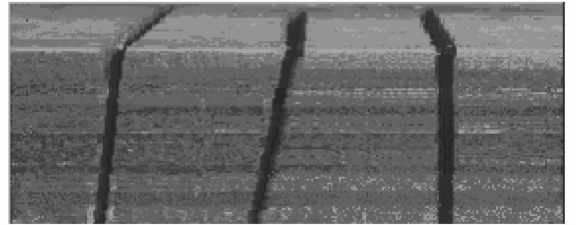


图 6 光路斜入射到聚焦镜的割缝示意图

Fig. 6 Slot with the slopingly incident light on the focusing mirror

图 6 为激光束斜入射到聚焦镜如图 3(a), (b), (c) 所对应位置时的割缝。经测量, 当激光束能量中心线穿过聚焦镜光心时, 模切板割缝倾角约等于入射角 θ ; 当激光束能量中心线从图 3(b) 所示位置穿过聚焦镜时, 模切板割缝倾角大于入射角 θ ; 当激光束能量中心线从图 3(c) 所示位置穿过聚焦镜时, 模切板割缝倾角小于入射角 θ , 特别是当入射角 θ 满足(1)式条件且入射特征角 $\alpha < 90^\circ$ 时, 聚焦光束特征角 $\beta=90^\circ$, 模切板割缝倾角为零, 割缝垂直于板面。

6 结 论

采用数控激光切割机切割模切板, 发现割缝倾角不仅与激光束入射到聚焦镜的入射特征角 α 有关, 而且还与激光束的入射点位置特征值 d 有关。给出了聚焦光束特征角 β 与入射特征角 α 、入射点位置特征值 d 以及入射角 θ 之间的关系; 另外还给出了不同情况下聚焦镜水平移动位移量的计算公式和聚焦镜的水平移动调整方法。通过讨论可知, 在模切板切割生产中, 在一定入射光路偏差范围内, 总可以通过平移聚焦镜来改善割缝的倾角和生产出质量更好的产品, 来满足具有更高要求的行业(如电子行业)或厂家的需要。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Fang Shiyin. Energy balanced equation of laser cutting die-boards[J]. *Packaging Engineering*, 2006, **27**(5): 142~161
方石银. 激光切割模切板的能量平衡方程[J]. 包装工程, 2006, **27**(5): 142~161
- 3 Xie Xiaozhu, Wei Xin, Hu Wei. Surface evaluation of CO₂ laser cutting die-board[J]. *Laser Technology*, 2009, **33**(1): 71~73
谢小柱,魏 昕,胡 伟. CO₂ 激光切割模切板的表面质量[J]. 激光技术, 2009, **33**(1): 71~73
- 4 Den Honglin. The technology, market and industry of the high power CO₂ NC laser cutting machine of China[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(7): 66~70
邓鸿林. 我国大功率 CO₂ 激光数控切割机技术、市场及产业[J]. 激光与光电子学进展, 2007, **44**(7): 66~70
- 5 Han Zhuping, Wang Dezhong, Liu Cheng. Development and research of the CAM system for making carton mould [J]. *Packaging Engineering*, 2001, **22**(2): 30~31
韩竹萍,王德忠,刘 乘. 纸盒模切板 CAM 系统的研究与开发[J]. 包装工程, 2001, **22**(2): 30~31
- 6 Qin Haizhong. Laser machines new situation about printing trade[J]. *China Packaging Industry*, 2005, (7): 22~23
秦海忠. 激光设备开创印刷行业新局面[J]. 中国包装工业, 2005, (7): 22~23
- 7 Zhou Wei, Hu Dongxia, Zhao Junpu *et al.*. Optimizing on algorithm and flow of beam alignment in high power solid-state laser driver[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 78~81
周 维,胡东霞,赵军普 等. 高功率固体激光器光路自动准直算法与流程优化[J]. 中国激光, 2010, **37**(1): 78~81
- 8 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
- 9 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