

高功率光纤激光和 CO₂ 激光焊接熔化效率对比

邹江林 吴世凯 肖荣诗 张心怡 牛建强

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 采用 IPG YLS-6000 光纤激光器和 Slab DC035 CO₂ 激光器, 在近似相同的工艺条件下进行平板扫描焊接, 通过 Olympus 光学显微镜测量焊缝横截面积, 并计算熔化效率。结果表明: 两种激光器焊接的熔化效率均随焊接速度先增加后减小, 但是光纤激光焊接熔化效率峰值所对应的焊接速度要远远高于 CO₂ 激光焊接。进一步分析表明两种激光焊接熔化效率的差异与激光能量耦合的固有规律不同有关。因此, 从焊接效率上考虑, 光纤激光器更适用于高速焊接, 而 CO₂ 激光器更适用于低速焊接。

关键词 激光技术; 光纤激光焊接; CO₂ 激光焊接; 熔化效率; 吸收率

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0803002

Comparison of Melting Efficiency in High Power Fiber Laser and CO₂ Laser Welding

Zou Jianglin Wu Shikai Xiao Rongshi Zhang Xinyi Niu Jianqiang

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract Bead-on-plate welding is carried out with an IPG YLS-6000 fiber laser and a slab DC035 CO₂ laser under the similar conditions. The melting efficiencies are calculated based on the measured weld cross-sectional areas with an Olympus microscope. The results show that the melting efficiency increases firstly and then decreases with welding speed increasing in both cases. However, the welding speed corresponding to the maximum melting efficiency is far greater in fiber laser welding than that in CO₂ laser welding. Further analysis demonstrates that the difference of the melting efficiency is relevant to the inherent difference of the energy coupling. Therefore, from the viewpoint of welding efficiency, fiber laser is more suitable for high-speed welding, while CO₂ laser is more suitable for low-speed welding.

Key words laser technique; fiber laser welding; CO₂ laser welding; melting efficiency; absorptivity

OCIS codes 140.3390; 060.2310; 140.3510; 350.3850; 350.4600

1 引言

高功率光纤激光器与 CO₂ 激光器相比, 具有更高的加工柔性^[1], 与 Nd:YAG 激光器相比具有更高的功率和更好的光束质量, 与 Disc 激光器相比结构更加紧凑、成本更低, 因此受到了全世界加工行业的广泛关注^[2]。

在光纤激光焊接研究中, 当前广泛关注的是与焊接过程稳定性及缺陷相关的物理现象, 譬如羽辉特性^[3-5], 焊接气孔、驼峰和飞溅^[6-7], 熔深波动^[8]

等。光纤激光与 CO₂ 激光的波长存在明显差异, 将光纤激光焊接与 CO₂ 激光焊接进行对比时, 檀财旺等^[9]发现在激光镁合金对接焊接中, 光纤激光在焊缝成形、工艺适应性和接头强度方面均优于 CO₂ 激光焊接。Hitoshi 等^[10]认为这种差异与不同波长激光和材料间的耦合特性相关。因此, 了解不同波长激光与材料间耦合特性, 对于获得优良焊缝具有重要的指导作用。

激光焊接中, 激光与材料间的耦合特性可通过

收稿日期: 2013-02-01; 收到修改稿日期: 2013-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(51175008)

作者简介: 邹江林(1982-), 男, 博士研究生, 主要从事激光与材料相互作用方面的研究。E-mail: zoujianglin1@163.com

导师简介: 肖荣诗(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光先进制造理论与技术方面的研究。

E-mail: rsxiao@bjut.edu.cn (中国光学学会会员号: S040111702)

熔化效率来表征。一般认为,金属对波长更短的光纤激光的吸收率高于 CO₂ 激光,但在实验中却发现,光纤激光焊接的焊缝熔化效率并非总是比 CO₂ 激光焊接的高,而产生该现象的原因尚缺乏详细研究。

本实验采用 IPG YLS-6000 光纤激光器和 Slab DC035 CO₂ 激光器,在近似相同的工艺条件下进行焊接实验,对比研究了两种激光器在不同焊接速度下的焊缝熔化效率,并分析其物理机制。

2 实验条件

本文所用的光纤激光器为 IPG YLS-6000 光纤激光器,采用芯径为 200 μm 的光纤传输,输出耦合准直镜焦距为 200 mm,经焦距为 300 mm 的透镜聚焦,聚焦光束的瑞利长度为 3.08 mm,焦点直径为 0.3 mm。所用的 CO₂ 激光器为 Slab DC035 CO₂ 激光器,采用焦距为 300 mm 的旋转抛物铜镜聚焦,聚焦光束的瑞利长度为 3.45 mm,焦点直径为 0.27 mm。实验材料为工业纯铁,尺寸为 100 mm×50 mm×10 mm。运行系统为德国 Arnold 公司生产的六轴联动机床。保护喷嘴内径为 7 mm,与光轴夹角为 45°,保护气流方向与焊接方向相同。同时,为了尽可能减小激光焊接过程中羽辉或等离子体的影响,在距离板面 5 mm 高处设置超音速横向气帘,其气流方向垂直于焊接方向。实验布置如图 1 所示。

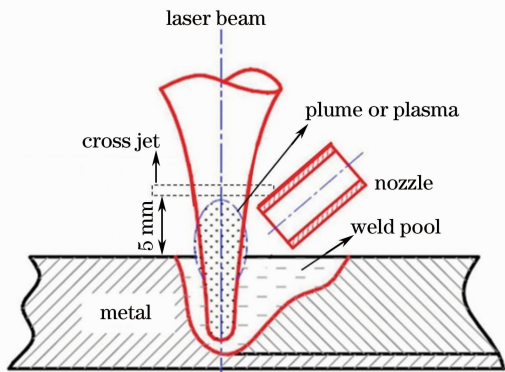


图 1 实验布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

采用平板焊接方式,激光输出功率固定为 2.8 kW,离焦量为零,保护气采用流量为 15 L/min 的纯氮,焊接速度从 1 m/min 到 13 m/min 变化,每组参数重复 3 次。每道焊缝中心区域截取 6 个横截面,通过 Olympus 光学显微镜测量焊缝横截面积,并求平均值。

3 实验结果和分析讨论

焊缝的熔化效率 η 为焊缝熔化所需要的功率 P_F 与激光输出功率 P 之比^[11],即

$$\eta = P_F/P, \quad (1)$$

式中焊缝熔化所需功率 P_F 可用下式进行计算:

$$P_F = \bar{\rho}_s S v [\bar{c}_s (T_m - T_0) + \Delta H_F], \quad (2)$$

式中 $\bar{\rho}_s = 7.62 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 为铁从室温至熔点的平均密度, $\bar{c}_s = 660 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 为铁从室温至熔点的平均比热容。在计算中,热物理参数均用平均值代替。 S 为焊缝横截面积, $T_m = 1808 \text{ K}$ 为铁的熔点, $T_0 = 300 \text{ K}$ 为室温, v 为焊接速度, $\Delta H_F = 2.5 \times 10^5 \text{ J/kg}$ 为铁的熔化潜热。

将实验获取的焊缝横截面积平均值和其对应的焊接速度代入(1)式和(2)式中,可算得熔化效率随焊接速度的变化规律,如图 2 所示。可见两种激光焊接的熔化效率均随着焊接速度的增加先增大后减小,光纤激光焊接的熔化效率在焊接速度约为 10 m/min 时达到最大值,而 CO₂ 激光焊接的熔化效率在约 4 m/min 时达到最大值。

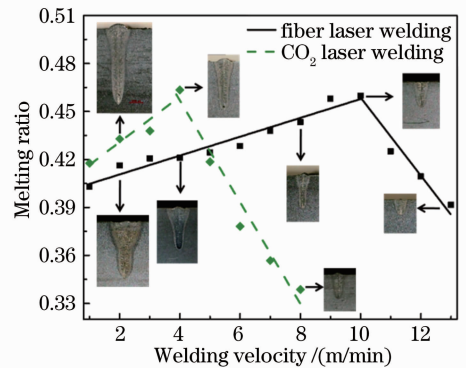


图 2 熔化效率随焊接速度的变化关系

Fig. 2 Melting ratio versus welding velocity

熔化效率随焊接速度的变化规律,与激光焊接中的能量耦合行为有关。根据能量守恒原理,深熔小孔对入射激光的总吸收率 A_K 可表示为

$$A_K = (P_F + P_{EV} + P_O + P_L)/P, \quad (3)$$

式中 P_{EV} 为焊接时部分金属蒸发所需的功率, P_O 为熔池金属过热消耗功率, P_L 为热传导损失功率。其中 P_{EV} 可表示为

$$P_{EV} = \frac{1}{2} m_{EV} V_{EV}^2 + m_{EV} \Delta H_{EV}, \quad (4)$$

式中 m_{EV} 为蒸发材料的质量, V_{EV} 为蒸发原子的喷发初速度, ΔH_{EV} 为材料的蒸发潜热。根据 Chen 等^[12] 的研究,激光焊接蒸发的质量 m_{EV} 非常小,因此 P_{EV} 可忽略。

(3)式中,熔池金属熔液过热消耗功率 P_o 可表示为

$$P_o = \bar{\rho}_1 S v \bar{c}_1 (\bar{T} - T_m), \quad (5)$$

式中 $\bar{\rho}_1 = 6.51 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 为熔池金属的平均密度, $\bar{c}_1 = 744 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ 为熔池金属的平均比热容, T 为熔池的平均温度。熔池中小孔处的温度最高,约为沸点。假设熔池的温度分布从中心处的沸点开始,呈高斯分布递减至熔池边沿的熔点,因此可求得熔池内的平均温度 $\bar{T} \approx 2400 \text{ K}$ 。将测量的焊缝横截面积和其对应的焊接速度代入(5)式,算得 P_o 随焊接速度的变化规律如图 3 所示。可见熔池过热功率随焊接速度的变化规律与熔化效率的规律类似,但过热功率在激光输出功率中所占的比例较小。

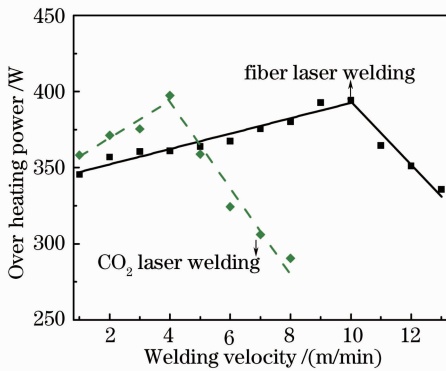


图 3 熔池过热功率随焊接速度的变化规律

Fig. 3 Overheating power versus welding velocity

(3)式中,热传导损失功率 P_L 与熔池吸收的激光功率在熔化前沿上的热传导有关。以光束中心为 z 轴,并使 x 轴和 y 轴在试样表面上,建立直角坐标系,熔化前沿如图 4 所示。

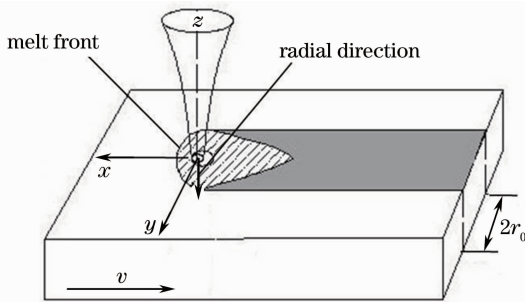


图 4 激光焊接示意图

Fig. 4 Schematic diagram of laser welding

假设热传导功率仅沿 r 的径向传输, $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ 。焊接中,激光主要辐照在小孔的前壁上^[13],则通过小孔前壁吸收的热传导功率主要沿熔化前沿方向传输。通过熔化前沿的热传导功率一部分用于板材熔化,另一部分向母材中因热传导而损失。经过熔化前沿热传导损失的功率可表示为^[14-16]

$$P_L = \bar{\rho}_s \bar{c}_s (T_m - T_0) S v \left(\frac{r_0 v}{2 \bar{\kappa}_s} \right)^{-0.7}, \quad (6)$$

式中 $2r_0$ 为熔宽, $\bar{\kappa}_s = \bar{\lambda}_s / \bar{\rho}_s \bar{c}_s$ 为板材的平均热扩散率, $\bar{\lambda}_s = 40 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 为板材的平均热导率。将实验测得的焊缝横截面积和熔宽代入(6)式中,可得 P_L 随焊接速度的变化规律如图 5 所示。由此可见,热传导损失的功率 P_L 将随着焊接速度的增加而减小,且在低焊速时减小的幅度较大,而高焊速时较小。

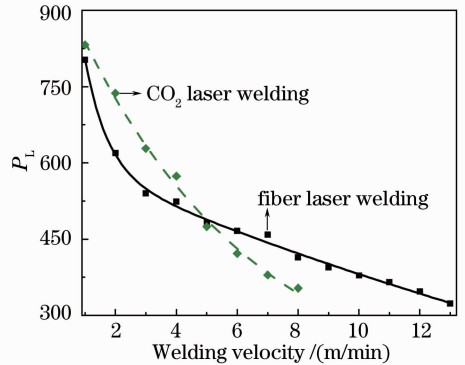


图 5 热传导损失功率随焊接速度的变化关系

Fig. 5 Heat conduction power loss versus welding velocity

将以上近似计算的结果代入(3)式,可得深熔小孔分别对两种激光的总吸收率 A_K 随焊接速度的变化规律如图 6 所示。

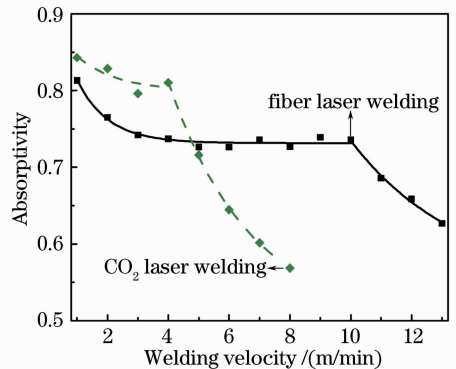


图 6 总吸收率随焊接速度的变化关系

Fig. 6 Total absorptivity versus welding velocity

可见两种激光焊接中总吸收率随焊接速度的变化规律是相似的,均是先缓慢减小,然后快速减小。但总吸收率由缓慢减小转变为快速减小的临界速度不同,光纤激光焊接时为 10 m/min ,而 CO_2 激光焊接时为 4 m/min 。两种激光焊接中总吸收率呈现出的差异与焊接中整个光束是否完全进入深熔小孔有关,如图 7 所示。当焊接速度较低时,激光光束完全进入深熔小孔内,所以总吸收率受焊接速度的影响较小;当焊接速度较高时,光斑前沿部分不再能够使小孔口前点气化,因此该部分光束不再能够进入小

孔内,从而导致小孔对入射激光的总吸收率 A_k 随着焊接速度的增加而快速减小。

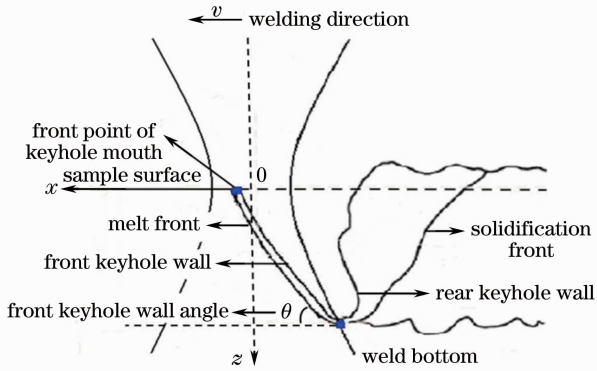


图 7 激光焊接小孔示意图

Fig. 7 Schematic diagram of keyhole in laser welding

对于临界速度,可根据整个激光束均进入小孔口的条件进行理论计算:

$$AI(x,0,0) \geq q_v(x,0,0), \quad (7)$$

即小孔口前点吸收的激光能量大于或等于该点气化所需要的能量。(7) 式中 A 为小孔口前点对垂直入射激光的吸收率, $q_v(x,0,0)$ 表示小孔口前点的热流。在图 7 中,小孔前壁上任意一点的热流方程为^[17]

$$q_v(r, \varphi) = (T_v - T_0) \lambda P'_e \left[\cos \varphi + \frac{K_1(P'_e r)}{K_0(P'_e r)} \right], \quad (8)$$

式中 $P'_e = v/(2\kappa)$ 为沛克莱数, κ 为熔池的热扩散率, λ 为熔池的热导率, φ 为 r 与 x 轴之间的夹角, $T_v = 3003 \text{ K}$ 为铁的沸点, $K_0(\cdot)$ 和 $K_1(\cdot)$ 为第二类贝塞尔函数的 0 级和 1 级近似,且 $\frac{K_1(P'_e r)}{K_0(P'_e r)} = 1 + (P'_e r)^{-0.7}$ 。

考虑到小孔口前点的状态涉及到从固态变为液态、再到沸点的过程,取 $r = x$, 此时 $\varphi = 0$, 利用(8)式,可将 $q_v(x,0,0)$ 转化为

$$q_v(x,0,0) = (T_m - T_0) \frac{v \bar{\rho}_s \bar{c}_s}{2} \left[2 + \left(\frac{v \bar{\rho}_s \bar{c}_s x}{2 \lambda_s} \right)^{-0.7} \right] + (T_v - T_m) \frac{v \bar{\rho}_1 \bar{c}_1}{2} \left[2 + \left(\frac{v \bar{\rho}_1 \bar{c}_1 x}{2 \lambda_1} \right)^{-0.7} \right], \quad (9)$$

式中 $\lambda_1 = 35 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 为熔池中熔液的平均热导率。假设试样表面的激光能量为高斯分布,则 x 轴上分布的光强可表示为

$$I(x,0,0) = \frac{2P}{\pi r_z^2} \exp\left(-\frac{2x^2}{r_z^2}\right), \quad (10)$$

式中 r_z 为光斑半径。在小孔口的前点,取 $x = r_z$ (由

于实验中采用零离焦,所以此时为焦点半径),该点对垂直入射光纤激光的吸收率 A 为 0.38,对 CO_2 激光为 0.124^[18]。联立(7)式、(9)式和(10)式,并利用两激光器的参数,可算得光纤激光焊接工业纯铁中,光束前沿不再能够使小孔口前点气化时的临界速度 $v = 10.49 \text{ m}/\text{min}$;对于 CO_2 激光, $v = 4.13 \text{ m}/\text{min}$ 。

由此可见,理论计算的光斑前沿部分即将移出小孔口前点的临界速度,与总吸收率随焊接速度从缓慢减小到快速减小的临界速度吻合较好。因此可说明:当焊接速度小于临界速度时,整个激光束均能进入小孔内,此时深熔小孔对整个光束的吸收率受焊接速度的影响较小,而热传导损失功率随着焊接速度的增加而快速减小,所以熔化效率反而随着焊接速度的增加而增大;当焊接速度高于临界速度时,由于激光束不再能够完全进入小孔内,深熔小孔对整个光束的吸收将随着焊接速度的增加而急剧减小,所以熔化效率随着焊接速度的增加而减小。

此外,金属板材对垂直入射光纤激光的吸收率高于 CO_2 激光,这是光纤激光的光束前沿能够气化小孔口前点、保证整个激光束均进入小孔内所对应的临界速度高于 CO_2 激光的原因;这也是光纤激光焊接熔化效率最高值所对应的焊接速度远高于 CO_2 激光焊接的原因。

4 结 论

1) 光纤激光和 CO_2 激光焊接焊缝熔化效率均随着焊接速度的增加先增大后减小,但光纤激光焊接熔化效率最高值所对应的焊接速度 $10 \text{ m}/\text{min}$ 远高于 CO_2 激光焊接的 $4 \text{ m}/\text{min}$ 。

2) 近似计算表明,深熔小孔对光纤激光和 CO_2 激光总吸收率随焊接速度的变化规律均是先缓慢减小,然后快速减小,且其临界速度与熔化效率最大值所对应的焊接速度是一致的。总吸收率和热传导损失功率是决定熔化效率的主要因素。

3) 从熔化效率上判断,当焊接工艺基本相同时,光纤激光器更适合中、高速焊接,而 CO_2 激光器更适合低速焊接。

参 考 文 献

- Mei Lifang, Chen Genyu, Jin Xiangzhong, et al.. Study on fiber laser overlap welding of automobile aluminum alloy[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2091-2097.
梅丽芳,陈根余,金湘中,等. 车用铝合金光纤激光搭接焊的研究[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2091-2097.
- W Penn. Trends in laser material processing for cutting, welding, and metal deposition using carbon dioxide, direct diode.

- and fiber lasers[C]. SPIE, 2005, 5706: 25—37.
- 3 Y Kawahito, N Matsumoto, M Mizutani, *et al.*. Characterisation of plasma induced during high power fibre laser welding of stainless steel[J]. *Sci Technol Weld Join*, 2008, 13(8): 744—748.
 - 4 Y Kawahito, K Kinoshita, N Matsumoto, *et al.*. Effect of weakly ionised plasma on penetration of stainless steel weld produced with ultra high power density fibre laser[J]. *Sci Technol Weld Join*, 2008, 13(8): 749—753.
 - 5 J Wang, C Wang, X Meng, *et al.*. Study on the periodic oscillation of plasma/vapour induced during high power fibre laser penetration welding[J]. *Opt Laser Technol*, 2012, 44(1): 67—70.
 - 6 Y Kawahito, M Mizutani, S Katayama. Elucidation of high-power fibre laser welding phenomena of stainless steel and effect of factors on weld geometry[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2007, 40(19): 5854—5859.
 - 7 Y Kawahito, M Mizutani, S Katayama. High quality welding of stainless steel with 10 kW high power fibre laser[J]. *Sci Technol Weld Join*, 2009, 14(4): 288—294.
 - 8 J Cho, D F Farson, M J Reiter. Analysis of penetration depth fluctuations in single-mode fibre laser welds[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2009, 42(11): 115501
 - 9 Tan Caiwang, Li Liqun, Chen Yanbin, *et al.*. Characteristics of fiber laser and CO₂ laser welding of AZ31B magnesium alloys[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(6): 0603015.
檀财旺, 李俐群, 陈彦宾, 等. AZ31B 镁合金的光纤激光与 CO₂ 激光焊接特性[J]. *中国激光*, 2011, 38(6): 0603015.
 - 10 H Hitoshi, I Takashi, K Shigeharu, *et al.*. Effect of shielding gas and laser wavelength in laser welding of magnesium alloy sheet[J]. *Quarterly J Japan Welding Society*, 2001, 19(4): 591—599.
 - 11 Zhao Yaobang, Lei Zhenglong, Chen Yanbin. Analysis of melting characteristics of laser-arc double-sided welding for stainless steel[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(2): 0203001.
赵耀邦, 雷正龙, 陈彦宾. 不锈钢激光电弧双面焊接头熔化特征分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(2): 0203001.
 - 12 X Chen, H Wang. A calculation model for the evaporation recoil pressure in laser material processing[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2001, 34(17): 2637—2642.
 - 13 V V Semak, R J Steele, P W Fuerschbach, *et al.*. Role of beam absorption in plasma during laser welding[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2000, 33(10): 1179—1185.
 - 14 W Schulz, D Becker, J Franke, *et al.*. Heat conduction losses in laser cutting of metals[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1993, 26(9): 1357—1363.
 - 15 T J Collat, M Vicanek, G Simon. Heat transport in melt flowing past the keyhole in deep penetration welding[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1994, 27(10): 2035—2040.
 - 16 M G Galushkin, V S Golubev, R V Grishaev, *et al.*. The comparison of models for calculating heat conduction losses in laser cutting of metals[C]. SPIE, 2011, 7994: 79941Y.
 - 17 A Kaplan. A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1994, 27(9): 1805—1814.
 - 18 A Mahrle, E Beyer. Theoretical aspects of fibre laser cutting[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2009, 42(17): 175507

栏目编辑：宋梅梅