

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0259-05

# 激光-MIG 复合热源焊接熔滴过渡力学行为分析

雷正龙, 李俐群, 陈彦宾

(哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 针对激光等离子体和电弧等离子体共同作用下的熔滴过渡, 根据气体动力学和静态力学平衡理论, 对 CO<sub>2</sub> 激光-惰性气体金属弧焊(MIG)复合焊接过程中熔滴的复杂受力状态及其力源的产生与作用原理进行了深入分析。结果表明, 一方面由于激光焊接过程中材料剧烈气化时产生的大量金属蒸气射流, 对熔滴形成了巨大的反冲作用力, 阻碍了熔滴过渡; 另一方面, 由于激光焊接产生的等离子体改变了原有惰性气体金属弧焊电弧等离子体形成路径, 从而改变了原有焊接熔滴中的电流密度分布和流向而形成了一个新的复合电弧收缩力。两者综合作用降低了复合焊接熔滴过渡频率, 破坏了焊接稳定性。在此基础上, 进一步研究了焊接参数对金属蒸气反作用力、复合电弧收缩力等的影响规律, 并采用数值分析的方法推导出了它们的数学描述; 定量分析了复合热源作用下熔滴的受力机制, 揭示了复合热源焊接过程中熔滴受力状态与焊接稳定性之间的内在关系。

**关键词** 光学设计与制造; 激光-MIG 复合焊接; 熔滴过渡; 受力机制; 数值分析

**中图分类号** TG456.7; TG403 **文献标识码** A

## Study on Droplet Transfer Mechanical Behavior in Laser-MIG Hybrid Welding Process

LEI Zheng-long, LI Li-qun, CHEN Yan-bin

(State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** Aiming at the droplet transfer behavior under actions of laser plasma and arc plasma together, the origin and action principle produced the force on droplet are profoundly analyzed according to the theory of gas dynamics and the static force balance. The experimental results indicate that the rejecting force caused by metal vapour prevents the droplet from detaching when the material evaporates at the high power density of laser. On the other hand, the laser plasma from laser-induced keyhole changes the original path of MIG arc plasma, which results in that the current density distribution and flow of conventional MIG arc are varied, and produces a new hybrid electromagnetic force in the CO<sub>2</sub> laser-MIG hybrid welding process. As a result, the droplet transfer frequency is decreased, and the welding process becomes unstable. Furthermore, the influence of welding parameters on vaporization-induced recoil force and the hybrid electromagnetic force caused by laser plasma and arc plasma together are also studied, and the mathematical descriptions is deduced by adopting numerical analysis, which consequently analyzes the force mechanism of droplet quantitatively, and discloses the internal relationship between the force state of droplet and welding stability in CO<sub>2</sub> laser-MIG hybrid welding process.

**Key words** optical design and fabrication; laser-MIG hybrid welding; droplet transfer; force mechanism; numerical analysis

## 1 引 言

与传统惰性气体金属弧焊(MIG)电弧焊接相比, 受激光等离子体和金属蒸气的影响, CO<sub>2</sub> 激光的引入致使熔滴在过渡过程中向激光束方向偏移, 降低了熔滴过渡频率和过渡稳定性, 改变了熔滴稳定过渡区间, 导致复合焊接焊缝成形差, 熔深

浅<sup>[1~3]</sup>。而复合焊接的熔滴过渡行为对取得好的复合焊接效果至关重要。关于熔滴过渡有许多理论研究, 目前应用较广泛的主要是静态力平衡理论和液柱不稳定理论<sup>[4~7]</sup>。很多人利用这两个理论对预测熔滴尺寸、熔滴过渡速度以及熔滴过渡方式转变等问题进行了研究, 并取得了一定成果。为了揭示复

合热源焊接过程中熔滴受力状态与焊接稳定性之间的内在关系,本文以 CO<sub>2</sub> 激光-MIG 复合热源焊接 LF6 铝合金过程中的熔滴过渡为研究对象,根据气体动力学和静态力学平衡理论,对熔滴的复杂受力状态及其力源的产生与作用原理进行了定量分析。

## 2 复合焊接熔滴过渡力学分析

在常规 MIG 焊接过程中,当引入激光之后,MIG 焊接的熔滴过渡向激光束方向偏移,其复合焊接熔滴过渡及其受力如图 1 所示。根据熔滴过渡的静态力学平衡学理论,与单 MIG 焊接的熔滴过渡受力相比,复合焊接的熔滴过渡除了受到重力  $F_g$ ,表面张力  $F_\gamma$  和等离子流力  $F_p$  之外,激光的加入一定引入或者改变了其他力才有可能将熔融金属推向斜上方。据分析认为,复合焊接熔滴过渡又新引入了金属蒸气反作用力  $F_{RL}$  和复合电弧收缩力  $F_{hem}$  两个力的作用。当复合焊接的熔滴过渡处于平衡状态时,这一理论在沿焊丝轴线方向上可表示为

$$F_\gamma + F_{RL} \cos \alpha = F_{hem} \cos \theta + F_g \cos \alpha + F_p, \quad (1)$$

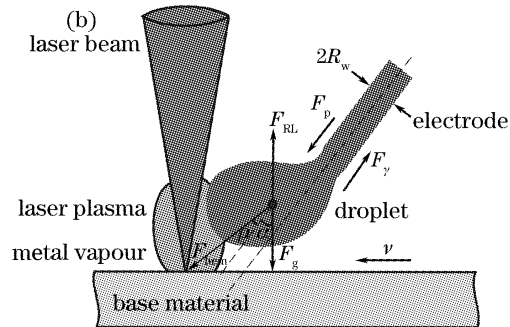
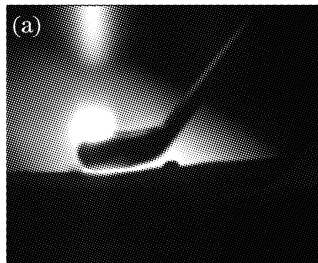


图 1 复合焊接熔滴过渡示意图。(a) 复合焊接熔滴过渡; (b) 复合焊接熔滴过渡示意图

Fig. 1 Schematic of droplet transfer in hybrid welding process, droplet transfer of hybrid welding (a) and schematic of droplet transfer of hybrid welding (b)

### 2.1 金属蒸气反作用力的作用力源及大小

激光焊接形成锁孔时向外喷发出大量的金属蒸气,形成一种气体射流,对 MIG 焊接熔滴产生了反作用力。其激光焊接过程熔池锁孔动力学行为的物理模型如图 2 所示。对于光束模式为 TEM<sub>01</sub> 的 CO<sub>2</sub> 激光束,可以简化为假设在半径为  $R_f$  的圆形光斑内能量分布均匀,即  $I_{abs}(r) = I_{abs}$ 。与电弧等离子流力的作用原理一样,熔滴上所受到的金属蒸气反作用力实际上可以看作浸没在运动流体中的物体受到了物体与流体间相对运动而产生的绕流阻力。在均速流体中,金属蒸气对熔滴的反作用力可以根据斯托克斯理论表示为

$$F_{RL} = C_D A_v \frac{\rho_g v_g^2}{2}, \quad (6)$$

在垂直于焊丝轴向方向,其受力应满足

$$F_{hem} \sin \theta + F_{RL} \sin \alpha = F_g \sin \alpha, \quad (2)$$

在复合焊接过程中,对于熔滴过渡所受到的重力  $F_g$ ,表面张力  $F_\gamma$  以及等离子流力  $F_p$  可按照常规 MIG 焊接的熔滴受力进行计算,其计算方法分别为

$$F_\gamma = \pi \gamma R_w, \quad (3)$$

$$F_g = \frac{4}{3} \pi R_d^3 \rho_m g, \quad (4)$$

$$F_p = C_D A_p (\rho_i v_i^2 / 2), \quad (5)$$

式中  $\gamma$  为表面张力系数,  $R_w$  为焊丝半径,  $R_d$  为熔滴半径,  $\rho_m$  为液态金属密度。对于熔滴所受到的等离子流力,  $C_D$  为取决于保护气体的雷诺(Reynold)数,可根据等离子流的流速来确定。目前还没有关于 MIG 焊接的等离子流流速的数据,这里将 MIG 焊接的等离子流流速  $v_i$  取为 TIG 焊的等离子流流速,即 100 m/s,对应的雷诺数为 0.44,等离子体流的密度  $\rho_i$  取氩气的密度为  $6.6 \times 10^6 \text{ kg/cm}^3$  [7]。  $A_p$  为等离子体流的作用面积,其大小为  $A_p = \pi(R_d^2 - R_w^2)$ 。

式中  $C_D$  为与金属蒸气雷诺数有关的绕流阻力系数,与(5)式一样取 0.44;  $\rho_g$  为金属蒸气流体的密度,  $v_g$  为金属蒸气流体的流动速率。

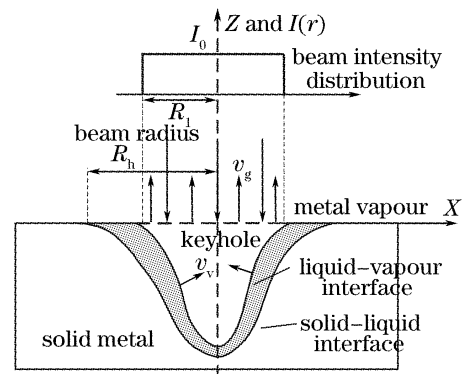


图 2 激光焊接锁孔内金属蒸气流动物理模型示意图  
Fig. 2 Physical model of metal vapor jet in laser welding

假设激光焊接喷发的金属蒸气为不可压缩的流体,则按照气体动力学理论,熔融体蒸发和金属蒸气的流动应满足质量流动守恒条件<sup>[8]</sup>,即

$$\rho_m v_v = \rho_g v_g \quad (7)$$

若金属蒸气可以看作为理想气体,则首先根据理想气体的克拉贝龙方程和 Semark 模型,可以推出金属蒸气流体的密度和流动速率

$$\rho_g = \left( \frac{M_a}{N_a k_B} \right) \frac{P_s}{T_s} \quad (8)$$

$$v_g = \rho_m v_v \left( \frac{N_a k_B T_s}{M_a P_s} \right) = \rho_m V_0 \left( \frac{N_a k_B T_s^{3/2}}{M_a B_0} \right) \quad (9)$$

其中  $P_s = P_s(T_s) = B_0 T_s^{-1/2} \exp(-U/T_s)$ ,  $M_a$  为气体分子量,  $N_a$  为阿伏加德罗常数,  $k_B$  为玻尔兹曼常数。  $T_s$  为熔融体表面温度,和工件吸收的激光束入射强度  $I_{\text{abs}}$  有关,其近似关系可从文献<sup>[9]</sup>获得。因

此,在激光焊接锁孔所产生的金属蒸气均速流动中,金属蒸气对熔滴的最大反作用力可表示为

$$F_{\text{RL}} = \frac{1}{2} C_D A_v \rho_m^2 V_0^2 \frac{N_a k_B T_s^{3/2}}{M_a B_0} \exp\left(-\frac{M_a L_v}{N_a k_B T_s}\right) \quad (10)$$

但是,由于激光焊接锁孔和焊缝表面熔池尺寸都非常小,金属蒸气流动必然受到周围环境气压的影响;并且在激光-MIG 复合焊接过程中,激光束与焊丝之间存在一定间距  $D_{\text{LA}}$ 。考虑到激光焊接产生的金属蒸气气流对熔滴的实际作用情况,对金属蒸气反作用力作出如下合理的假定:以激光入射的中心轴为峰值,在激光焊接锁孔及其熔池产生金属蒸气最大径向尺寸  $R_h$ (见图 2) 范围内呈现高斯分布,而焊缝熔池以外为 0,则

$$F_{\text{RL}} = \begin{cases} \frac{1}{4\pi R_h^2} C_D A_v \rho_m^2 V_0^2 \left( \frac{N_a k_B T_s^{3/2}}{M_a B_0} \right) \exp\left(-\frac{M_a L_v}{N_a k_B T_s}\right) \exp\left(-\frac{D_{\text{LA}}^2}{2R_h^2}\right), & (D_{\text{LA}} \leq R_h), \\ 0, & (D_{\text{LA}} > R_h) \end{cases} \quad (11)$$

## 2.2 复合电弧收缩力的作用力源及大小

在 MIG 电弧焊接铝合金过程中,电弧主要靠场致发射来维持,电弧稳定性较差,而且能量被广泛地分散。而复合焊接过程中由于激光锁孔的作用使其等离子体中的电子密度可达到  $10^{17} \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 。而且锁孔周围区域为产热最集中的地方,导致热电子发射变得非常容易,改变了电弧等离子体的形成路

径,金属蒸气电离产生的电子便成为流向弧柱的电子供给源。因此复合焊接过程中电弧放电主要来自于  $\phi 1 \text{ mm}$  左右的激光辐射点和激光等离子体。激光加入前后 MIG 焊接的电弧形态及其放电机理如图 3 所示。MIG 焊接熔滴中原有沿焊丝轴向的电流流向和其电流密度分布就被改变了,即改变了原有 MIG 焊接熔滴中促使熔滴过渡的电磁收缩力的大小和方向,形成了一个由激光等离子体和电弧等离子体共同导致的新的复合电弧收缩力  $F_{\text{hem}}$ ,其作用方向与焊丝轴线的延长线成  $\theta$  角,其受力示意图如图 1 所示。

目前,单 MIG 焊接熔滴中的电流密度分布规律尚无法通过实验来直接确定。特别是引入激光之后,熔滴由球状变成了不规则的椭圆形,且电流密度分布极不规则。这样直接测量或者计算复合焊接过程中的复合电弧收缩力就变得更加复杂。但是,在其他受力已知的情况下,根据熔滴过渡的静态力平衡原理,利用数值分析的方法就可以求出熔滴过渡所受到的复合电弧收缩力大小  $F_{\text{hem}}$  和方向  $\theta$ 。

在复合焊接熔滴过渡前瞬间,假设熔滴为不可压缩流体的条件下,其熔滴等效半径  $R_d$  与复合焊接的熔滴过渡平均频率  $f$  有关。利用质量守恒的原理

$$R_d = \left( \frac{3\rho_s R_w^2 v_w}{4\rho_m} \times \frac{1}{f} \right)^{1/3} \quad (12)$$

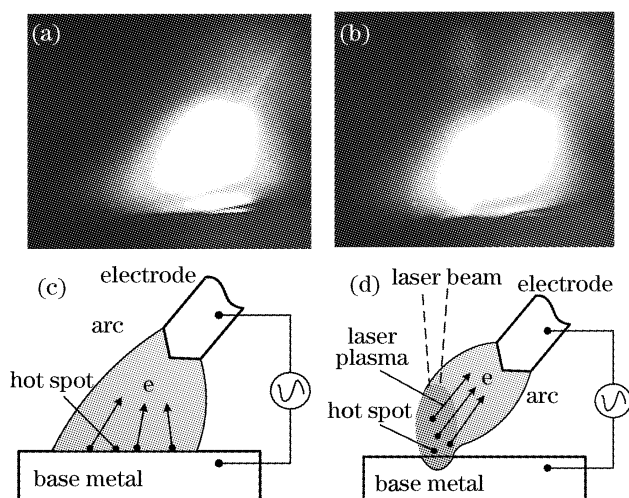


图 3 激光加入前后电弧形态的变化和物理机制  
(a)MIG 焊接电弧形态;(b)复合焊接电弧形态;  
(c)电弧放电;(d)激光辅助的电弧放电

Fig. 3 Arc shape of MIG welding (a), arc shape of hybrid welding (b), arc discharge (c), laser-assisted arc discharge (d)

其中  $\rho_s$  为焊丝密度,  $v_w$  为送丝速度。  $f$  为与焊接电流  $I$  和激光功率  $P$  有关。通过复合焊接实验得到其关系如图 4 所示。将  $R_d$  和表 1 所示的计算参数分别代入(3)式~(5)式和(11)式中就可以求出复合焊接过程中熔滴所受到的表面张力、重力、等离子流力和金属蒸气反作用力。然后利用(1)式和(2)式就可以求出复合电弧收缩力的大小和方向。

表 1 铝合金的计算参数

Table 1 Calculation parameters of aluminum alloys

Calculation parameters	Values
Solid density $\rho_s$ / (kg/m <sup>3</sup> )	$2.7 \times 10^3$
Melt density $\rho_m$ / (kg/m <sup>3</sup> )	$2.35 \times 10^3$
Melting point $T_m$ / K	933
Surface tension factor $\gamma$ / (N/m)	0.857
Vaporization constant $B_0$ / [kg/(m · s <sup>2</sup> )]	$2.05 \times 10^{12}$
Latent heat of evaporation $L_v$ / (J/kg)	$1.0785 \times 10^4$
Laser beam radius $R_l$ / mm	0.10
Acceleration of gravity $g$ / (m/s <sup>2</sup> )	9.8

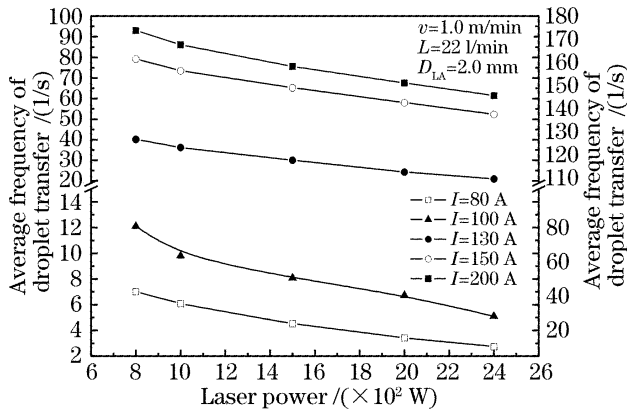


图 4 复合焊接熔滴过渡平均频率与激光功率的关系

Fig. 4 Relationships between the average frequency of droplet transfer and laser power

图 5 和图 6 分别显示了激光-MIG 复合焊接过程中熔滴过渡所受的复合电弧收缩力大小及其角度与焊接电流和激光功率的二维和三维曲线图。可以看出,复合电弧收缩力随着激光功率和焊接电流的增大而增大,在激光功率和焊接电流都最大时达到最高值;而复合电弧收缩力与焊丝轴线之间的夹角随着激光功率的增大或者焊接电流的减小而增大,在焊接电流最小、激光功率最大时达到最高值。利用图中各组曲线的实验数据,采用二元多项式拟合方法就可以得到复合电弧收缩力及其作用角度与

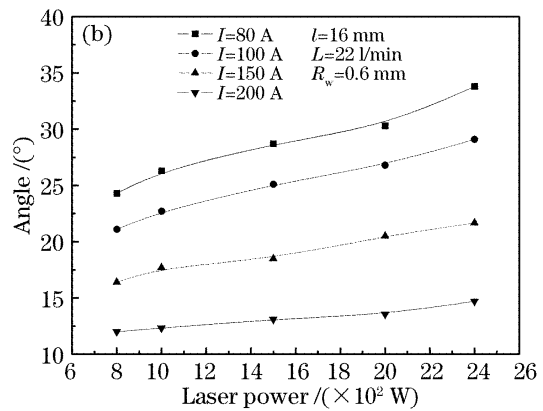
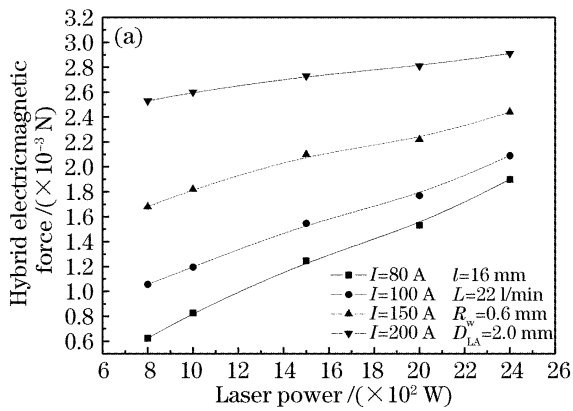


图 5 激光功率对复合电弧收缩力(a)及其角度(b)的影响

Fig. 5 Effect of laser power on hybrid electromagnetic force (a) and angle (b) in laser-MIG hybrid welding

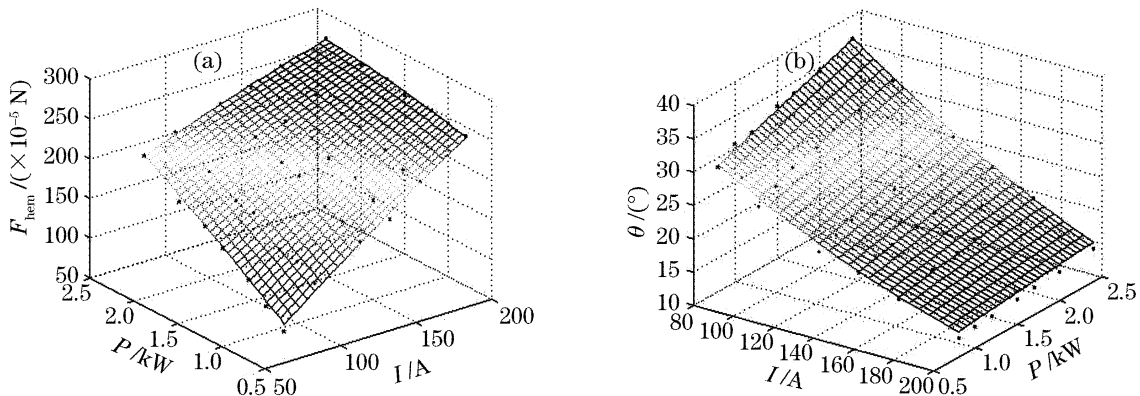


图 6 复合电弧收缩力(a)及其角度(b)与电流和功率之间的三维关系

Fig. 6 Three-dimensional relationships between hybrid electromagnetic force (a) or angle (b) and laser power or current

激光功率和焊接电流三者之间的函数关系式

$$\begin{aligned} F_{\text{hem}} &= -152.6308 + 2.0481I + 128.4058P - 0.4618I \cdot P - 0.0011I^2 - 5.196P^2, \\ \theta &= 36.52 - 0.2145I + 7.4152P - 0.029I \cdot P + 0.0004I^2 - 0.106P^2, \end{aligned} \quad (13)$$

式中  $F_{\text{hem}}$  的单位为  $10^{-5}$  N;  $\theta$  的单位为 ( $^{\circ}$ );  $P$  的单位为 kW;  $I$  的单位为 A。根据复合焊接过程中熔滴所受到的重力、表面张力、等离子流力、金属蒸气反作用力和复合电弧收缩力的计算方法就可以定量地研究各参数对焊接稳定性的影响规律,从而揭示复合热源焊接过程中熔滴受力状态与焊接稳定性之间的内在关系。

### 3 结 论

基于对复合焊接熔滴过渡形态分析,结合传统 MIG 焊接熔滴过渡受力的理论分析与激光焊接过程熔池锁孔动力学行为,建立了复合焊接熔滴过渡受力的力学物理模型。

在激光焊接过程中,材料剧烈气化蒸发产生的大量金属蒸气射流阻碍了熔滴过渡。根据激光焊接产生金属蒸气的物理模型,采用气体动力学理论,确定了金属蒸气反作用力与激光功率之间的函数关系。

基于静态力学平衡理论,采用数值分析的方法获得了由激光等离子体与电弧等离子体共同作用的复合电弧收缩力大小及其作用角度同激光功率和焊接电流之间的函数关系。从而揭示复合热源焊接过程中熔滴受力状态与焊接稳定性之间的内在关系。

### 参 考 文 献

- 1 Lei Zhenglong, Chen Yanbin, Li liquan *et al.*. Characteristics of droplet transfer in CO<sub>2</sub> laser-MIG hybrid welding with projected mode[J]. *Applied Laser*, 2004, **24**(6): 361~364  
雷正龙, 陈彦宾, 李俐群等. CO<sub>2</sub>激光-MIG 复合焊接射滴过渡的熔滴特性[J]. *应用激光*, 2004, **24**(6): 361~364
- 2 Lei Zhenglong, Chen Yanbin, Li Liquan *et al.*. Characteristics of droplet transfer in CO<sub>2</sub> laser-MIG hybrid welding with short-circuiting mode[J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2006, **19**(2): 172~175
- 3 Yanbin Chen, Zhenglong Lei, Liquan Li *et al.*. Influence of shielding gas pressure on welding characteristics in CO<sub>2</sub> laser-MIG hybrid welding process [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(1): 33~35
- 4 K. Warsz. Pulsed arc welding; Practical specifications [J]. *Welding International*, 1995, (10): 761~766
- 5 S. K. Choj, Y. -S. Kim, C. D. Yoo. Dimensional analysis of metal transfer in GMA welding[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1999, **32**: 326~334
- 6 F. Wang, W. K. Hou, S. J. Hu *et al.*. Modelling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding[J]. *Welding J.*, 1993, (6): 269~277
- 7 Chen Maoai, Wu Chuansong, Lian Rong. Numerical analysis of dynamic process of metal transfer in GMAW [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2004, **40**(11): 1227~1232  
陈茂爱, 武传松, 廉荣. GMAW 焊接熔滴过渡动态过程的数值分析[J]. *金属学报*, 2004, **40**(11): 1227~1232
- 8 Sun Chengwei. The Effect of Laser Irradiation [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002  
孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- 9 Vcidimir Semark, Akira Matsunawa. The role of recoil pressure in energy balance during laser materials processing[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1997, **30**: 2541~2552