

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0445-05

# 光束聚焦特性对激光焊接的影响

陈虹<sup>1,2</sup>, 祁俊峰<sup>1,2</sup>, 吴世凯<sup>1,2</sup>, 张正伟<sup>1,2</sup>, 陈铠<sup>1,2</sup>, 肖荣诗<sup>1,2</sup>, 左铁钊<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>北京工业大学激光工程研究院 北京 100022  
<sup>2</sup>国家产学研激光技术中心, 北京 100022)

**摘要** 采用理论和实验两种方法研究了光束聚焦特性对激光焊接的影响。结果表明,获得足够高的功率密度是实现激光深熔焊接的前提条件,焊缝形状和深度、宽度取决于焊接能量的输入。在相同工艺参量条件下,焦斑大小决定了可以获得的功率密度;焦深决定了聚焦光束准直的范围;聚焦角影响到小孔壁的非涅耳吸收。可以说,光束聚焦特性反映了聚焦光束不同横截面处光束束宽,导致了可以获得的功率密度的不同,进而对激光焊接结果产生影响。实际应用中,应根据需求选择合适激光器、聚焦系统以及焦点位置,得到最优的聚焦状态,获得理想的加工质量。

**关键词** 激光技术; 激光制造; 光束质量; 聚焦; 激光焊接

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A

## Influence of Beam-Focusing Characteristics on Laser Welding

CHEN Hong<sup>1,2</sup>, QI Jun-feng<sup>1,2</sup>, WU Shi-kai<sup>1,2</sup>, ZHANG Zheng-wei<sup>1,2</sup>, CHEN Kai<sup>1,2</sup>,  
XIAO Rong-shi<sup>1,2</sup>, ZUO Tie-chuan<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)  
<sup>2</sup> National Center of Laser Technology (NCLT), Beijing 100022, China)

**Abstract** Focal spot shape and size, beam power intensity distribution, convergence angle and depth of focus which are determined by beam quality and focus system describe the characteristics of focal beam. The influences of these parameters on depth and width of weld seam are studied in theory and experiment. Results shown that enough power intensity is the precondition of realizing laser penetration welding. Depth and width of weld seam rely on energy penetrating into materials. With the same processing parameters, focal spot size decides the acquired power intensity, depth of focus decides the alignment distance and convergence angle has effect on Fresnel absorption in keyhol wall. All in all, beam-focusing characteristics have effect on results of laser welding with different energy acquired at different focus beam cross section. In reality application, laser system, focus system and focal spot position should be selected according to the practical requirements in order to acquire ideal quality of processing.

**Key words** laser technique; laser manufactur; beam quality, focus; laser welding

## 1 引言

通过聚焦获得高功率密度,激光可以对各种不同材料实现不同方式的加工。功率、加工速度、焦点位置等工艺参量对激光焊接影响的研究屡见不鲜<sup>[1~4]</sup>,但很少关注激光束的聚焦特性。实际上,为了得到更高的加工效率,更好的可靠性和可重复性,选择最佳的激光加工系统和聚焦系统是十分必要的。聚焦特性包括焦斑大小和形状、横截面能量密度分布、聚焦角和焦深,由光束质量和聚焦系统共同决定。本文首先测量了不同光束质量激光器采用不同焦距聚焦镜聚焦后得到的聚焦光束特性,然后逐一进行激光焊接实验,以非涅耳吸收作为主要的能量耦合机制,依据“小孔”内的能量平衡建立数学方程,研究光束聚焦特

性对激光焊接深度和宽度的影响。

## 2 方法

### 2.1 理论方法

激光深熔焊接过程中,激光与材料之间的能量耦合主要通过“小孔”来实现。能量耦合机制包括小孔壁的非涅耳吸收、等离子体逆韧致辐射吸收、等离子体中的热传导以及液态金属的对流和热传导等。其中,最主要的能量耦合机制是非涅耳吸收,尤其是前两次反射吸收,而不是中间的热量交换过程<sup>[5]</sup>。

激光入射到小孔内部,在孔壁上发生多次反射,每次反射都有部分激光能量被小孔孔壁吸收,从而使激光能量几乎全部被工件内部吸收,这个过程

**作者简介:** 陈虹(1977—),女,河北沙河市人,北京工业大学博士研究生,主要从事激光现代制造技术与工程的研究。

E-mail: yangwellhong@emails.bjut.edu.cn

叫作菲涅耳吸收。对于实际应用中采用的圆偏振光,孔壁每次反射时的反射率可以用菲涅耳公式来计算<sup>[5]</sup>

$$R(\phi) = \frac{1}{2} \left[ \frac{1 + (1 - \epsilon \cos \phi)^2}{1 + (1 + \epsilon \cos \phi)^2} + \frac{\epsilon - 2\epsilon \cos \phi + 2\cos^2 \phi}{\epsilon + 2\epsilon \cos \phi + 2\cos^2 \phi} \right], \quad (1)$$

式中  $\epsilon$  为介电常数,  $\phi$  为光束照射到小孔壁上的入射角。相应的菲涅耳吸收系数为

$$A(\phi) = 1 - R(\phi). \quad (2)$$

要保持焊接过程中小孔的稳定,就必须满足小孔内的能量平衡和压力平衡。采用圆柱坐标系( $r, \varphi, z$ )来描述工件中的温度场分布<sup>[6]</sup>

$$T(r, \varphi) = T_0 + \frac{P'(r, \varphi)}{2\pi\lambda_{th}} K_0(Pe'r) \times \exp(-Pe'rcos\varphi), \quad (3)$$

式中  $Pe' = v/(2\kappa)$ , 称为佩克莱特数;  $\kappa$  为材料的热扩散系数;  $T_0$  为室温;  $P'$  为单位深度吸收的激光功率;  $\lambda_{th}$  为材料的热传导系数;  $K_0(\cdot)$  为第二类零阶贝赛尔函数。假设小孔的温度是由室温上升到材料的蒸发温度,根据(3)式,  $P'(r, \varphi)$  可以表示为

$$P'(r, \varphi) = (T_v - T_0) 2\pi\lambda_{th} \frac{1}{K_0(Pe'r)} \times \exp(Pe'rcos\varphi). \quad (4)$$

单位深度小孔壁上菲涅耳吸收的功率表示为<sup>[5,6]</sup>

$$Q_F = I 2\pi r A(\phi) \frac{dr}{dz}, \quad (5)$$

式中  $I$  为入射到工件表面激光束的总功率密度。假设小孔内单位深度吸收的激光功率等于单位深度小孔壁上菲涅耳吸收的功率,即

$$I r A(\phi) \frac{dr}{dz} = (T_v - T_a) \lambda_{th} \frac{1}{K_0(Pe'r)} \times \exp(Pe'rcos\varphi), \quad (6)$$

$r$  为在深度  $z$  处小孔的半径,在工件表面( $z = 0$ ),“小孔”的宽度  $r_0$  与光束的束宽  $w_0$  相同,但随着小孔深度的加深,  $r$  不断减小,当  $r = 0$  时,小孔达到最大深度,认为是最大焊接熔深。

## 2.2 实验方法

实验选用了三种  $CO_2$  激光器和一种 YAG 固体激光器(型号如表 1 所示)。采用德国 PROMETEC 公司 LASERSCOPE UFF100 光束光斑质量诊断仪测量了聚焦光束不同横截面处的束宽,根据双曲线方程拟合得出焦斑半径、聚焦角和焦深。然后分别在不同离焦位置进行激光焊接实验,采用双层保护气体,中心保护气为 He 气(15 L/min),外层保护气为 Ar 气(6 L/min)。材料为普通低碳钢。

## 3 结 果

表 1 列出了实验采用的激光器类型、聚焦镜焦距以及光束的聚焦特性参量。表 2 列出了不同聚焦条件下理论计算和实验得到的焊接结果。






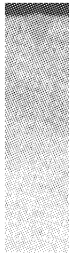
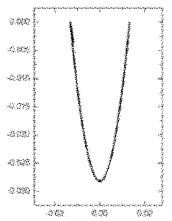
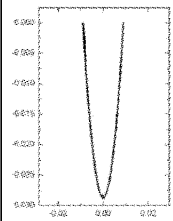
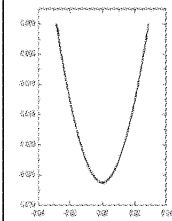
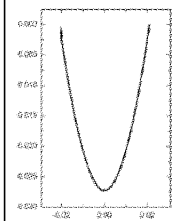
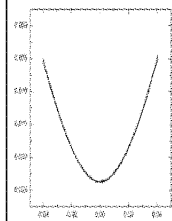
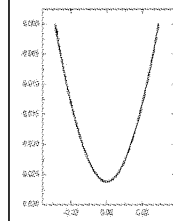
表 1 实验采用的不同激光器的类型、光束质量、聚焦镜焦距以及聚焦后光束的特性参量

Table 1 Type and beam quality of lasers and focal length and characteristics of focal beam

Laser processing system	CD035 slab $CO_2$ laser		TLF6000t $CO_2$ laser		SR 200 $CO_2$ laser	CW025 YAG laser
$K_f/mm \cdot mrad$	3.78		8.67		22.5	25
$f/mm$	300	200	200	150	250	200
$\theta_f/mrad$	29.1	42.5	29.9	39.4	50.0	86.2
$w_f/mm$	0.13	0.09	0.29	0.22	0.45	0.29
$z_R/mm$	4.47	2.14	9.63	5.58	9.00	3.36
Beam intensity profile at focal spot						

表 2 实验和理论计算得到的焊接结果

Table 2 Weld results with experiments and calculation

Laser processing system	CD035 slab CO <sub>2</sub> laser		TLF6000t CO <sub>2</sub> laser		SR 200 CO <sub>2</sub> laser	CW025 YAG laser
$K_f / \text{mm} \cdot \text{mrad}$	3.78		8.67		22.5	25
$f / \text{mm}$	300	200	200	150	250	200
$w_f / \text{mm}$	0.13	0.09	0.29	0.22	0.45	0.29
$P / \text{kW}$	3	3	3	3	5	2
$v / (\text{m}/\text{min})$	3	3	3	3	3	3
Weld seam shape (experiment)						
$h / \text{mm}$	4.38	2.75	1.99	2.63	1.63	1.38
$b / \text{mm}$	1.19	1.25	1.58	1.69	1.79	1.18
Weld seam shape (calculation)						

从表 1 可看出,相同激光器选用不同聚焦镜,或相同焦距聚焦镜用在不同光束质量激光器上时,得到的聚焦光束特性是不同的。聚焦光束的焦斑越小,获得的功率密度越高,得到的焊缝越深。但是,当聚焦光束足够小,以至于得到的功率密度超过  $10^7 \text{ W}/\text{cm}^2$  时,受到光致等离子体对激光的屏蔽的影响,焊接深熔反而降低。由于可以获得小聚焦光斑,短焦距聚焦镜在实际应用中更为普遍。但是,当聚焦镜焦距较短时,激光材料加工产生的飞溅物极易污染聚焦镜,引起聚焦性能变差,使用寿命降低,而且由于生产和技术方面的原因,聚焦镜焦距的减小是受到限制的,所以采用高光束质量激光源是获得小聚焦光斑更为有效的方法。由于理论计算没有考虑光致等离子体的作用,与实际焊接结果有一定的差异,但还是可以体现出焦斑大小对焊接结果的关键作用。

### 3.1 焦斑半径对深熔焊接的影响

激光焊接模式包括热传导模式、深熔模式以及两者之间的不稳定过渡区。改变入射光束的功率密

度,会出现三种模式的转变。当脱离不稳定焊接状态,焊接熔深突然加大时的功率密度称为阈值功率密度,范围在  $10^5 \sim 10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$ 。要获得稳定的激光深熔焊接过程,首先要保证的就是突破阈值功率密度。功率密度总是集中在束腰位置,焦斑半径正是决定聚焦光束功率密度的关键因素。图 1 为采用同一台激光器利用传输距离的改变获得大小不同的焦斑

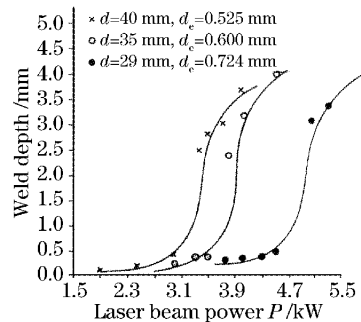


图 1 同一台激光器改变传输距离得到的阈值曲线  
Fig. 1 Threshold curves with different propagation distance with the same laser system

得出的阈值曲线。图 1 中三条曲线分别是在传输距离为 7 m, 9 m 和 11 m 处得到的<sup>[7]</sup>。图 2 为采用不同光束质量激光器获得不同焦斑半径得出的阈值曲线。板条 CO<sub>2</sub> 激光器 (F=18) 和 TLF6000t CO<sub>2</sub> 激光器 (F=17) 选择焦数相似的聚焦系统, SR200 CO<sub>2</sub> 激光器选择小焦数聚焦系统 (F=10)。焦斑半径  $w_f$  的计

算公式表示为

$$w_f = \frac{2K_f f}{D}, \quad (7)$$

式中  $K_f$  为光束质量,  $f$  为聚焦镜的焦距,  $D$  为到达聚焦镜处光束的直径。(7) 式表明, 焦斑半径随着传输距离的增大和光束质量的提高而减小, 可以在低功率下获得高能量密度。因此, 阈值曲线向着功率较低的方向移动。

### 3.2 聚焦角对深熔焊接的影响

激光束入射到小孔壁的入射角是由小孔壁的倾斜程度和聚焦角两个因素决定的。图 3 所示为根据文献[5]画出的简单锥形小孔壁上前两次菲涅耳反射几何光学示意图, 圆锥半角为  $\alpha$ 。入射到圆锥形小孔顶部的光线与圆锥轴线方向的夹角为  $\gamma$ 。其中图 3(a), (b) 分别表示激光束以会聚状态和发散状态入射到小孔壁时菲涅耳反射的情况, 图 3(c) 为光束在小孔壁上第二次反射的情况。

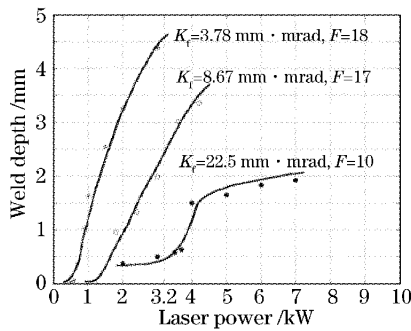


图 2 采用不同光束质量激光器得到的阈值曲线  
Fig. 2 Threshold curves with different laser system

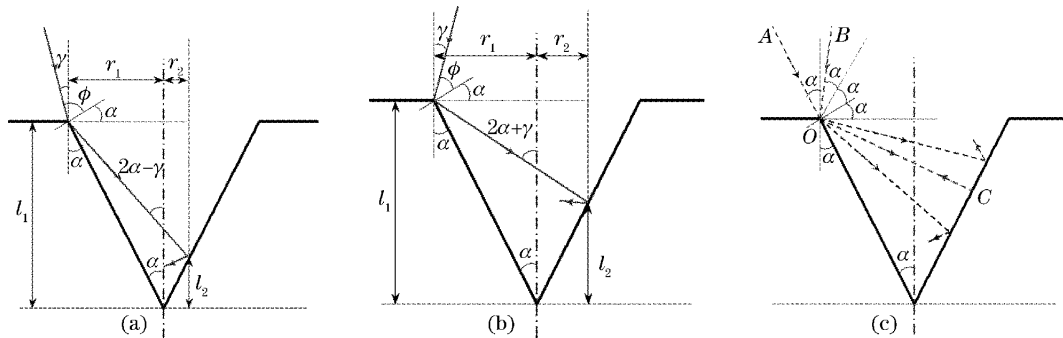


图 3 锥形小孔壁上前两次菲涅耳反射的几何光学示意图  
Fig. 3 Sketch map based on geometrical optics of the first two reflections in a cone

根据几何光学原理, 当入射光为会聚状态时, 光线入射到小孔壁的入射角  $\phi$  可以表示为

$$\phi = \frac{\pi}{2} - (2\alpha - \gamma) + \alpha = \frac{\pi}{2} - (\alpha - \gamma). \quad (8)$$

当  $\gamma$  接近  $\alpha$  时, 即当光束入射到小孔壁的方向与小孔壁相切时, 吸收率最高, 是理想的入射方向。当入射光为发散状态时, 相应的公式可以表示为

$$\phi = \frac{\pi}{2} - (2\alpha + \gamma) + \alpha = \frac{\pi}{2} - (\alpha + \gamma). \quad (9)$$

根据(9)式, 要获得高吸收率, 需要  $\alpha$  和  $\gamma$  尽可能小。当激光束在小孔壁上第二次反射时, 存在三种不同的情况, 即向小孔更深处反射、反射到小孔外以及两者之间的临界状态。如图 3(c) 所示, 可以发现, 无论是会聚状态还是发散状态, 经过小孔壁的两菲涅耳反射, 光束都有可能向小孔深处耦合。但当锥形小孔的圆锥半角  $\alpha \geq \pi/6$  时, 就只有会聚状态

的激光束可以完成在小孔壁上的多次反射了。如果将以上从几何光学角度分析的非涅耳反射结果与实际激光深熔焊接过程联系起来, 激光束处于会聚状态还是发散状态与焦点位置(离焦量)有关。离焦量为负时, 焦点位于工件表面以下, 激光束以会聚状态与工件进行耦合; 离焦量为正时, 焦点位于工件表面上, 激光束以发散状态与工件进行耦合。这样就可以解释为什么大多数情况下当离焦量为负时可以获得更深的焊缝。

表 2 所示结果中, YAG 激光聚焦后得到的焦斑半径与 TLF6000t CO<sub>2</sub> 激光器采用 200 mm 聚焦镜聚焦后得到的焦斑半径相同, 但焊接深度有很大差别, 除了功率密度影响外, 大聚焦角导致 YAG 聚焦光束迅速发散也是主要原因之一。

### 3.3 焦深对深熔焊接的影响











为了维持“小孔”的稳定, 激光功率密度还要求

能够传输到“小孔”内部,越能在“小孔”深处保证足够高的剩余功率密度,越能获得深的焊缝。焦深意

味着聚焦光束准直的范围。表3所示为离焦量不同时,两种激光器焊接结果的比较。

表3 两种激光加工系统在不同离焦位置得到的焊缝形状

Table 3 Weld seam at different defocus positions of two laser processing systems

Laser processing system	CD035 slab CO <sub>2</sub> laser					CW025 YAG laser				
	300					200				
$f$ /mm										
$\Delta f$ /mm	-4	-2	0	2	4	-4	-2	0	2	4
$P$ /kW	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2
$v$ / (m/min)	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1
Weld seam shape										
$h$ /mm	3.38	4.13	4.38	4.63	4.52	1.13	1.86	2.03	1.77	1.37
$b$ /mm	1.48	1.25	1.19	1.18	1.18	2.09	2.65	2.32	2.63	2.75

板条 CO<sub>2</sub> 激光器由于其高光束质量获得了小焦斑半径,又通过长焦距聚焦镜获得了小聚焦角和长焦深,即使离焦量达到 4 mm,仍然能够获得高深宽比焊缝。YAG 激光由于焦深短,不能在大离焦量下得到理想的焊缝,这样对焦点位置的精度要求较高。因此,当实际应用中有大范围、长距离激光焊接需求时,就需要具有长焦深聚焦光束来保证焊接结果的稳定性。

#### 4 结 论

焦斑半径、聚焦角和焦深这些与光束质量密切相关的聚焦光束特性都影响到激光与材料的能量耦合。焦斑半径决定了聚焦光束可以获得的功率密度;聚焦角影响到小孔壁上的菲涅耳吸收过程,聚焦角越小,激光束越可以深入到小孔内部;焦深决定了在小孔内部不同深度处光束的束宽,焦深越长,在小孔不同深度处光束束宽的变化越小,激光能量密度变化就越小,不仅可以保证在小孔内部一定深度处激光束的功率密度,还可以降低对焦点位置的精度要求,保证焊接结果的稳定性。实际应用中,应根据需求选择激光器和聚焦系统,以及合适的焦点位置,得到最优的光束聚焦状态,获得理想的加工质量。

#### 参 考 文 献

- Hu Xiyuan, Xiong Jianguang, Hu Lunji *et al.*. The influence of laser beam mode and thermal lens effect on laser welding of Tinplate [J]. *Applied Laser*, 1998, **18**(1): 38~40  
胡席远,熊建刚,胡伦骥等.薄板激光焊接质量影响因素研究[J].应用激光,1998,18(1):38~40
- Wang Tao, Zheng Qiguang, Tao Xingzhi *et al.*. Study of laser welding of thick steel plates [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(2): 179~184  
王涛,郑启光,陶星之等.厚钢板激光焊接的研究[J].中国激光,1997,24(2):179~184
- Xu Guoliang, Cheng Zhaogu, Xia Jin'an *et al.*. Study of processing parameters of CO<sub>2</sub> laser welding on aluminium alloys [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(2): 183~186  
许国良,程兆谷,夏金安等.CO<sub>2</sub>激光焊接铝合金工艺的研究[J].中国激光,2000,27(2):183~186
- Chen Wuzhu, Zhang Xudong, Ren Jialie *et al.*. Study on welding mode transition and stability of welding process in laser welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 1996, **A23**(7): 657~661  
陈武柱,张旭东,任家烈等.激光焊接时焊接模式转变规律及焊接过程稳定性的研究[J].中国激光,1996,23(7):657~661
- John Dowden, Phiroze Kepadia. A mathematical investigation of the penetration depth in keyhole welding with continuous CO<sub>2</sub> lasers [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1995, **28**: 2252~2261
- A. Kaplan. A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1994, **27**: 1805~1814
- Zuo Teichuan. Laser materials processing of high strength aluminum alloys [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 52  
左铁钊.高强铝合金的激光加工[M].第一版.北京:国防工业出版社,2002.52