

文章编号: 0258-7025(2006)03-0417-06

激光深熔焊过程中保护区特征尺寸的数值模拟

王 宏^{1,2}, 史耀武¹, 巩水利², 段爱琴²

(¹ 北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100022; ² 高能束流加工技术国防科技重点实验室, 北京 100024)

摘要 小孔效应和小孔的周期性波动是激光深熔焊过程的重要特点。小孔的波动起伏与小孔内气流压力的不断变化密切相关。这一观点通过分析小孔喷发烟流(Plume)高速摄影图像得到了证实。在测定了小孔喷发烟流的速度后,利用流体力学商用软件 FLUENT 建立了由保护气体、小孔喷发烟流和空气组成的组分模型,模拟了组分气流的质量分数和流场。实验结果表明,小孔喷发烟流的速度并不是一个恒定值,其数值依气流粒子团和小孔出口位置的不同而不同。在小孔喷出气流速度一定的情况下,研究了侧吹气流的流量和输送角度与影响保护区特征尺寸之间的相互关系,给出了氩气保护区和氦气特征保护区随侧吹气流参数改变的变化规律。从组分气流模拟结果看,焊接区组分以辅助气流为主,但其组分质量分数低于 0.9。

关键词 激光技术;激光焊接;组分;模拟;保护区;小孔

中图分类号 TG 456.7 **文献标识码** A

Simulation of Shielding Zone Characteristic Size during Laser Deep Penetration Welding

WANG Hong^{1,2}, SHI Yao-wu¹, GONG Shui-li², DUAN Ai-qin²

(¹ College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)
(² Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

Abstract Keyhole effect and its periodical fluctuation are important characteristics of deep penetration laser welding processing. The plume fluctuation over laser keyhole arises from the pressure fluctuation of keyhole gas. It is validated by plume behavior obtained from a series of plume images by a high-speed videography system, and the expanding speed of hot gas emitted from laser keyhole in the workpiece is determined. Then, a mathematical model for the simulation of characteristic weld gas shield phenomena during deep penetration laser welding based on a numerical solution of the equations of species, mass, momentum and energy is presented. Important differences are observed between Ar gas shield and He gas shield. All these experiments are also simulated using the 3D hydrodynamic software Fluent. It is seen that the characteristic size of argon gas shield is larger than that of helium gas shield, and the smaller the nozzle inclination angle, the larger characteristic shield size of the assist gas. The effective protection zone will be increased when the flux rate of the nozzle assistant gas is increased. The expansion speed of the plume over laser keyhole is much smaller than 150 m/s. The maximum mass fraction in the species flow zone is smaller than 0.9.

Key words laser technique; laser welding; species; simulation; shielding zone; keyhole

1 引 言

当辐照到被焊金属表面的激光束流的功率密度大于 10^6 W/cm²时,激光和材料接触界面发生了根本性的变化,反应区的材料被迅速熔化并蒸发气化。

蒸发气流的反冲压力将熔化了了的金属挤压到加热中心的四周,凹陷表面对激光束流的自聚焦效应使得反应区激光的功率密度进一步提高,蒸发反冲压力进一步加大。这样,在极短的时间内,在材料中形成了一个细长充满了蒸气和等离子体混合体的小孔。

收稿日期:2005-07-08; 收到修改稿日期:2005-09-16

基金项目:武器装备重点基金(614010)资助项目。

作者简介:王 宏(1963—),男,山西怀仁县人,北京工业大学材料科学与工程学院副教授,博士研究生,主要从事焊接数值模拟方面的研究。E-mail: wanghongbjut@yahoo.com.cn

由于激光和被焊接材料耦合条件的变化,出现了小孔内气流压力不断波动的现象。当气流压力大于小孔张开的平衡压力时,有一部分热的气流从激光小孔中喷发出来。在小孔出口处,能够看到明显的小孔烟流(keyhole plume)。J. Greses 等^[1]应用透射电子显微镜(TEM)对小孔烟流中的超细粒子的产生进行了研究,发现脉冲 YAG 激光焊接时粒子的最大直径可以达到 150 nm,而且粒子之间互相连接,形成六角形或者八角形的粒子串,烟流的特点取决于所应用的激光束流的功率密度。由 CO₂ 激光焊接产生的小孔烟流的粒子平均尺寸小于 50 nm,但烟流中粒子的浓度很高,对入射激光功率的衰减量在 10%~70%之间。为了抑止烟流对入射激光束流的散射作用,激光深熔焊时常常采用侧吹管输送惰性气体到焊接区的措施。M. Hamadou 等^[2]研究了激光焊接过程辅助气流的流动行为,发现辅助气流输送管的几何参数和气流流动条件对焊缝表面的粗糙度、氧化、熔深、小孔烟流的大小和波动以及焊接熔池的形状都有影响。小孔烟流对保护气流的流动具有强烈的扰动作用。近年来,国内对激光小孔尺寸以及小孔等离子体的信号提取和分析也有报道^[3~5]。本文对在无保护气流情况下小孔烟流的波动行为进行了研究,然后模拟了组分气流的流场,确定了气流参数和保护区尺寸的关系。

2 实验方法及结果

实验采用的激光器为 AM356,连续激光的波长为 1.06 μm,激光功率为 1650 W,聚焦透镜的焦长为 200 mm。焊接时把高速摄影镜头正对激光小孔烟流。摄影设备的型号为 Phantom V4,采样频率为 50 kHz,图像分辨率为 512×512 像素,拍摄速度为 11000 帧/s。小孔烟流流动是气流粒子的集体行为,如果能够跟踪烟流中某个粒子的运动轨迹,那么就可以推算出烟流运动的大致速度。但由于粒子的运动规律不是很规则,在与空气粒子的碰撞中形态各异,所以,考察粒子团在某个连续时间段的膨胀速度作为组分计算小孔烟流的速度是合适的。从一系列的小孔烟流高速图像中选取几组具有代表性的图片,计量其体积的变化,同时记录其经历的时间,以烟流的平均直径作为它膨胀的当量直径,然后计算出烟流的膨胀速度。图 1 为 YAG 激光焊接时小孔烟流图像的一个例子。表 1 为小孔烟流膨胀速度的计算结果。从表中小孔烟流的膨胀速度可以看出,

不同时刻烟流的尺寸不同,其膨胀速度值大致在 21 m/s 和 40 m/s 左右。在进行组分气流流动的模拟时,就以此数据为参考。

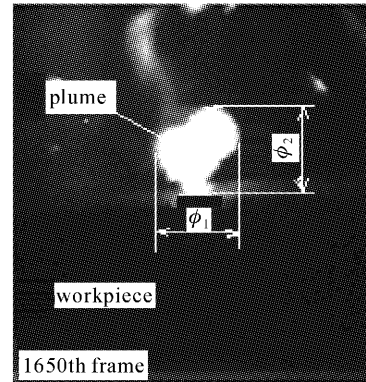


图 1 小孔烟流的例子(图像测量)

Fig. 1 An example of keyhole plume

表 1 YAG 激光焊接时小孔烟流的当量直径和当量膨胀速度

Table 1 Plume expanding calculation data when Nd:YAG laser welding

Plume group	Plume images /frame	Equivalent diameter /mm	Expanding speeds /(m/s)
(a)	No. 1550~No. 1551	12	21.0
(b)	No. 1584~No. 1585	14	26.3
(c)	No. 1633~No. 1635	15	31.2
(d)	No. 1650~No. 1651	14	39.6

3 组分气流流场的模拟

假定侧吹辅助气流输送管的直径为 8 mm,激光小孔烟流的喷发速度为 41 m/s,小孔直径为 0.5 mm。考虑到激光焊接的小孔壁接收激光能量的波动性、侧吹气流输送管壁的摩擦作用和小孔喷发气流的多变性,把组分气流作为湍流处理是合理的。

稳态组分对流和扩散的组分方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i m_i) = -\frac{\partial}{\partial x_i} J_{i,i} + R_i + S_i, \quad (1)$$

其中, $i = 1, 2, 3$ 分别为空气、侧吹惰性气体和小孔烟流, R_i 为由化学反应带来的质量产生率或是质量损失率, S_i 为源项,即由细小粒子给组分气流带入的附加质量率。 ρ 为组分密度, m_i 为组分质量, v_i 为组分速度, $J_{i,i}$ 为质量扩散率。如果组分流动为湍流,那么, $J_{i,i}$ 的表达式为

$$J_{i,i} = \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial m_i}{\partial x_i}, \quad (2)$$

其中, Sc_i 为湍流 Schmidt 数, $D_{i,m}$ 为组分中 i' 量的扩散系数, μ_t 为湍流粘度系数。

描述组分流动的质量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i) = S_m, \quad (3)$$

方程(3) 为质量守恒方程的一般形式, 对于可压缩流体或者不可压缩流体流动都是适用的。源项 S_m 反映的是来源于激光小孔或者焊接熔池飞溅液态小颗粒给组分附加的质量部分。

动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i v_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + F_i, \quad (4)$$

其中 p 为静态压力, τ_{ij} 为应力张量, $\rho g_i, F_i$ 分别为 i 方向重力和附加体积力的分量。应力张量 τ_{ij} 的表达式为

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \delta_{ij}, \quad (5)$$

其中 μ 为分子粘度系数, 方程右端第二项描述的是体积膨胀效应。

能量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [v_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j J_j + v_j \tau_{ij} \right) + S_h, \quad (6)$$

其中 E 为总能量, 方程右端前三项分别反映的是由传导、组分扩散和粘性扩散带来的能量传输, S_h 为体积热源产生的能量。

$k-\epsilon$ 湍流模型及参数见参考文献[6]。

模拟计算域 Ω 如图 2 所示:

$$\Omega: = \{P = (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : 0 \leq x \leq 0.4, 0 \leq y \leq 0.4, 0 \leq z \leq 0.2\}, \quad (7)$$

它由六个压力出口构成, 即 $\partial\Omega = \Gamma_{\text{left}} \cup \Gamma_{\text{right}} \cup \Gamma_{\text{bottom}} \cup \Gamma_{\text{top}} \cup \Gamma_{\text{fore}} \cup \Gamma_{\text{back}} \cup \Gamma_{\text{keyhole-inlet}} \cup \Gamma_{\text{nozzle-inlet}}$,

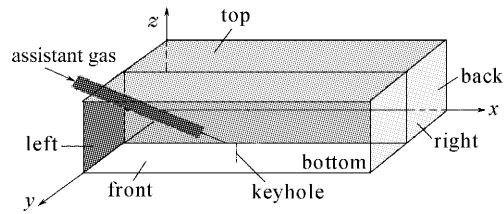


图 2 激光深熔焊过程组分气流流动计算域
Fig. 2 Calculation domain for species flow during deep penetration laser welding

Γ_{left} 代表左端压力出口, $\Gamma_{\text{right}}, \Gamma_{\text{bottom}}, \Gamma_{\text{top}}, \Gamma_{\text{fore}}, \Gamma_{\text{back}}$ 分别代表右端、底部、顶部、前端、后端压力出口, $\Gamma_{\text{keyhole-inlet}}, \Gamma_{\text{nozzle-inlet}}$ 代表激光小孔烟流速度和辅助气流速度入口。

计算域的划分采用有限容积法, 所取网格为结构性的均匀网格, 共有 231064 个节点, 21600 个六面体单元。图 3 是利用 GAMBIT 软件对计算域进行网格划分结果(局部放大)。其中, 垂直黑色的代表激光小孔, 正对小孔出口的侧吹输送管的倾斜角为 30° 。计算时考虑了重力、热扩散和组分之间的质量扩散。压力和速度的直接耦合采用了 SIMPLE 算法, 对流项采用一阶迎风格式, 求解迭代采用欠松弛的方法。组分物理参数及其确定方法如表 2 和表 3 所示。

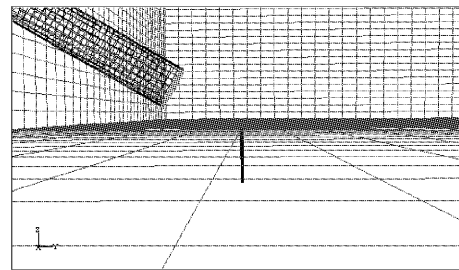


图 3 数值计算使用的计算网格
Fig. 3 Meshes for numerical solution

表 2 组分中各个组成部分的物理参数

Table 2 Physical parameters of the component gas

Species	Density / (kg/m ³)	C _p / (J/kg · K)	Conductivity / (W/m · K)	Viscosity / (kg · m · s)
Argon	1.6228	520.64	0.0158	2.125 × 10 ⁻⁵
Helium	0.1625	5193	0.1520	1.990 × 10 ⁻⁵
Air	1.2250	1006.43	0.0242	1.7894 × 10 ⁻⁵

表 3 组分气流物理参数的计算方法

Table 3 Calculation methods of species gas physical parameters

Items	Viscosity	Thermal conductivity	C _p	Diffusivity
Method	Mass-weighted-mixing-law	Mass-weighted-mixing-law	Mixing-law	Kinetic-theory

4 数值计算结果及讨论

把已经划分好的网格文件输送给计算流体力学软件 FLUENT 的求解器,确定组分中各个组成部分的成分,定义材料参数。之后,输入计算域的边界条件。目前,比较一致的看法认为小孔烟流的温度约为 10000 K。所以,将烟流入口的温度假定为 10000 K,烟流速度为 41 m/s。侧吹气流管的直径为 8 mm,气流成分或者是氩气,或者是氦气。假定小孔出口及侧吹管气流出口的保护气体的质量分数为 0.9。分别对四种情况进行了三维数值模拟研究:1) 侧吹角度分别为 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$; 2) 侧吹气流为氩气; 3) 侧吹气流为氦气; 4) 侧吹气流流量分别为 10.0 L/min, 12.5 L/min, 15.0 L/min, 17.5 L/min, 20.0 L/min。

4.1 组分质量分数

图 4 为采用氩气作为激光深熔焊的保护气体时,侧吹角度为 30° ,气流流量为 15.0 L/min 时组分中在 $x=0.2$ m 处 $y-z$ 平面上氩气的质量分数分布。图中,在小孔附近贴近被焊接工件的表面,氩气的质量分数为 0.83,明显低于侧吹管入口氩气的质量分数 0.9。这说明部分空气已经扩散到了小孔附近。如果被焊接的材料和空气具有较大的亲和力,加之激光深熔焊过程小孔内气流的强烈对流,侵入焊接区的空气就有可能进入焊缝金属。如果是部分激光深熔焊,焊缝中出现空气气孔的可能性就不能排除。出现这种情况,与组分的热扩散以及侧吹辅助气流在以较快的速度向焊接区输送的过程中将管四周的空气一起卷入有关。此时氩气质量分数为 0.83 区域在 y 方向的长度为 101.34 mm。模拟计算表明,在 x 方向保护区的形状随着侧吹气流流量的变化或者侧吹气流成分的不同而出现不同的形状。这给保护区大小的计算增加了难度。为了计算方便,把组分中保护气流质量分数为 0.83,在 y 方向的保护区长度定义为保护区特征长度。即侧吹角度为 30° ,侧吹

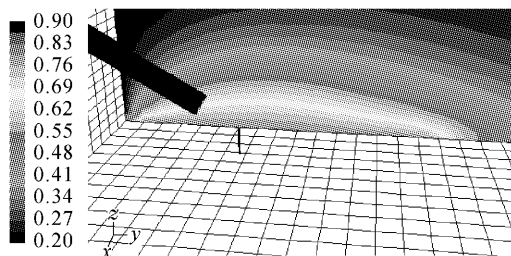


图 4 辅助气流为氩气时的质量分数
Fig. 4 Calculated mass fraction of argon

气流为氩气,气流量为 15.0 L/min 对应的保护区特征长度为 101.34 mm。此外,在组分气流的 z 方向,随着与小孔出口距离的增加,氩气质量分数逐渐减小。再比较一下在 $x=0.2$ m 处 $y-z$ 平面上 z 值达到最大时氩气的质量分数,可以看出,组分气流左上端的氩气质量分数低于其右上端的氩气质量分数。

图 5 是激光深熔焊过程中,侧吹气流为氩气时小孔附近 $x=0.2$ m 处 $y-z$ 平面、侧吹球路输送管为 45° 时组分气流的速度矢量。计算结果显示,除了小孔喷发气流的速度较大外,小孔附近的组分气流的流动速度都很小。仔细分析发现,小孔附近气流速度方向变化十分明显。组分气流流动的主导方向是朝着 y 的正方向。在离小孔较远的地方,速度的方向同水平面的夹角大约为 45° 。换言之,组分气流的速度矢量受侧吹气流的影响较大,受小孔气流的影响较小。小孔附近气流速度较小的原因,可能与几种不同方向气流流动相互扰动、不同气流分子之间动量相互传递有关。

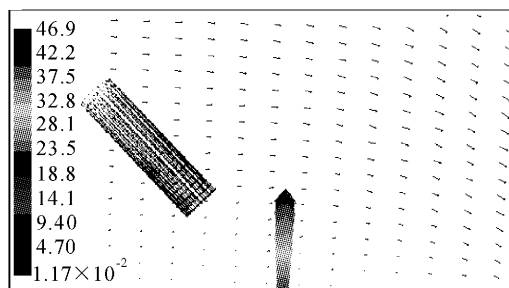


图 5 激光深熔焊过程中激光小孔附近的组分速度矢量
Fig. 5 Calculated velocity vectors of species (45°)

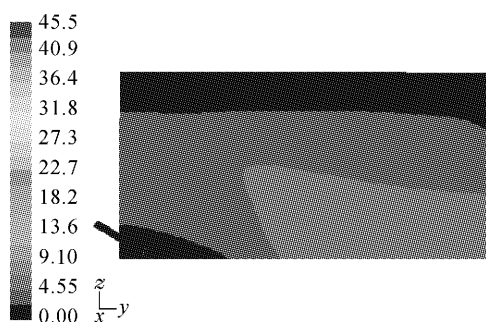


图 6 激光深熔焊过程组分气流流场
Fig. 6 Species velocity distribution during laser keyhole welding

图 6 是侧吹管为 30° ,氩气质量流量为 15.0 L/min 组分气流的流场。显然,小孔附近组分的流动速度很小,而图右下端速度较大。速度场中,

组分最大流速为6.95 m/s。

图 7 是侧吹氩气流量为 10 L/min, 保护气流输送管为 60°时, 组分气流中氩气的质量分数。图中显示, 保护区特征长度较小, 保护区中心位置偏离小孔中心, 但组分气流中氩气分布较为集中, 质量分数的梯度较大。

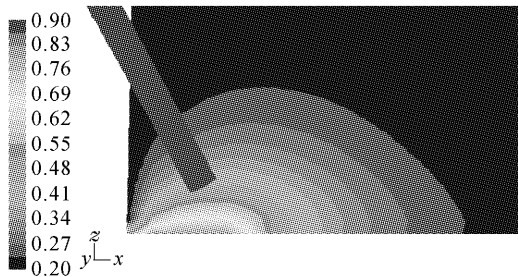


图 7 侧吹气流角度为 60°时的氩气质量分数分布
Fig. 7 Mass fraction of argon with 60 degrees inclination angle

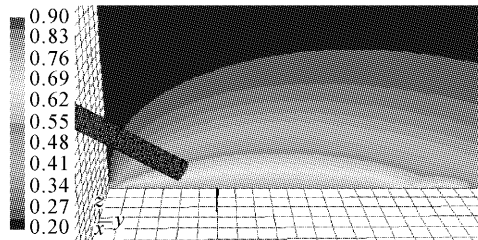


图 8 氦气质量分数的等值线
Fig. 8 Contours of mass fraction of helium gas

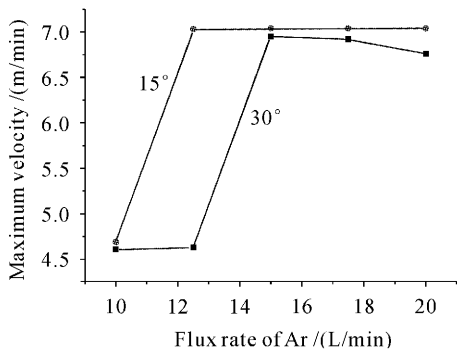


图 9 辅助气体流量变化时组分气流的最大速度
Fig. 9 Maximum speed of constituent gas flow for different assistant gas flow

图 8 是辅助气流为氦气、气流流量为 15 L/min, 侧吹角度为 30°时, 组分气流在达到平衡时氦气的质量分数分布。图 9 是气流流量增加时, 组分气流最大速度的变化规律。当辅助气流的输送角度为 15°时, 在侧吹气流流量从 10 L/min 增加到 12.5 L/min 时, 组分气流的最大速度值出现了较大

的跃迁。之后, 再增加侧吹气流的流量, 组分最大速度值几乎不再发生变化。侧吹角为 30°时也存在组分流动最大速度的跃迁现象, 但对应的气流流量在 12.5 L/min 和 15.0 L/min。

4.2 组分保护区特征长度

图 10 是辅助气流的参数发生变化时, 保护区特征长度的变化情况。很明显, 无论辅助气流输送角度是 15°, 30° 还是 45°, 60°, 随着辅助气流流量的增加, 保护区特征长度是增加的。除了 15° 倾角外, 其余三条斜线的斜率相差不多, 大致为 6.14 mm/(L/min)。如果辅助气体的流量相同的

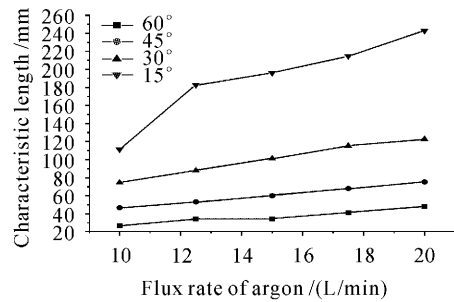


图 10 辅助气流参数变化时保护区特征长度的情况
Fig. 10 Characteristic length of shield size varied with gas flow parameters

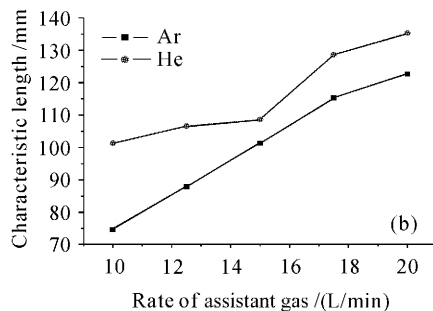
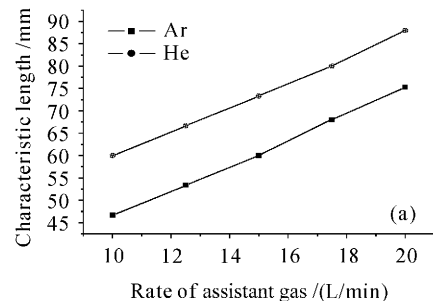


图 11 不同辅助气流输送角时氩气和氦气保护区大小的比较
(a) 45°; (b) 30°

Fig. 11 Characteristic length of shielding zone in dependence on the rate of assistant gas Ar and He for 45° inclination angle of side jet (a) and 30° inclination angle of side jet (b)

话,那么,气流输送角度不同,则保护区特征长度不一样。15°辅助气体输送角度对应的保护区特征长度最大,60°倾角时的保护区特征长度最小。换言之,从保护区大小的角度看,减小输送辅助气体侧吹角度,能够获得较大的保护区尺寸,对焊接区的保护有好处。

图 11 是在辅助气流流量相同的情况下,计算得到的氮气和氩气保护区特征长度大小的比较。图 11(a)是辅助气流输送管的倾斜角为 45°时氮气和氩气保护区特征长度的差异。图 11(b)是倾角为 30°时保护区大小的变化情况。从图中可以看出,在以氮气作为保护焊接区主要气氛时,随着输送气流流量的增加,保护区尺寸加大。与辅助气流为氩气的情况相比,氮气的保护区特征长度大一些。

5 结 论

1) 在激光深熔焊的组分气流中,辅助气流侧吹角、气流成分和气流流量是影响焊接保护区尺寸的三个重要因素。对于同氮气或者氧气较为敏感的焊接,空气对保护区的侵入问题应该给予足够的重视。

2) 随着辅助气体流量的增加,保护区特征长度增加。在辅助气流流量相同的情况下,降低侧吹气流输送角度,有利于焊接区的保护。

3) 在其他参数相同的情况下,氮气保护区的特

征长度大于氩气保护区的特征长度。

4) 小孔烟流的膨胀速度远低于大功率激光束流作用下材料的烧蚀速度 150 m/s。其主要原因是,前者为平衡过程,而后者为非平衡过程。

参 考 文 献

- 1 J. Greses, P. A. Hilton, C. Y. Barlow *et al.*. Plume attenuation under high power Nd: yttrium-aluminum-garnet laser welding [J]. *Journal of Laser Applications*, 2004, **16**(1): 9~15
- 2 M. Hamadou, R. Fabbro, G. Caillibotte *et al.*. Study of assist gas flow behavior during laser welding [C]. *Proceedings of ICALEO*, Section C, 2002. 1~10
- 3 Duan Aiqin, Hu Lunji, Wang Yajun. Research on weld penetration monitoring by laser plasma optical signal in laser welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1):131~134
段爱琴,胡伦骥,王亚军. 激光深熔焊缝的熔透性监测研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1):131~134
- 4 Qin Guoliang, Lin Shangyang. Radial dimension of keyhole and its dynamic characteristics in laser deep penetration welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4):557~561
秦国梁,林尚扬. 激光深熔焊接过程中小孔径向尺寸及其动特性[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4):557~561
- 5 Zhang Yi, Li Lijun, Jin Xiangzhong *et al.*. Diathermancy study on keyhole effects in laser deep penetration welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12):1538~1542
张屹,李力钧,金湘中等. 激光深熔焊接小孔效应的传热性研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12):1538~1542
- 6 Tao Wenquan. Number Heat Transfer [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Publishment Press, 1995. 18~23
陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1995. 18~23