

文章编号: 0258-7025(2004)12-1538-05

激光深熔焊接小孔效应的传热性研究

张 屹¹, 李力钧¹, 金湘中¹, 洪 蕾²

(¹ 湖南大学机械与汽车工程学院, 湖南 长沙 410082; ² 上海海运学院机械系, 上海 200135)

摘要 激光焊接由于其焊缝深宽比高、热影响区小以及高的焊接速度而在工业上得到越来越广泛的应用。激光深熔焊接的本质特征就是存在着小孔效应。采用高速摄影的方法清晰、完整地观测了激光深熔焊接 GG17 玻璃时的小孔, 实验研究了离焦量、焊接速度对小孔和熔池形状、尺寸的影响。在分层假设的基础上建立了激光深熔焊接小孔效应的传热模型, 并根据观测到的小孔形状和尺寸, 用有限元法计算了小孔周围的温度场和流场。实验与模拟计算结果表明, 小孔前沿的温度梯度比后沿的大; 焊接熔池中的最大对流速度达到了焊接速度的 10 倍左右; 小孔形状和尺寸的实验观测为系统研究激光深熔焊接时的小孔效应提供了一种新的方法。

关键词 激光技术; 激光焊接; 小孔效应; 深熔焊接

中图分类号 TG 456.7 **文献标识码** A

Diathermancy Study on Keyhole Effects in Laser Deep Penetration Welding

ZHANG Yi¹, LI Li-jun¹, JIN Xiang-zhong¹, HONG Lei²

(¹ College of Mechanical and Automotive Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)
(² Department of Mechanical Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China)

Abstract Laser beam welding has gained increasing application in the industry, because of its high ratio of penetration deep to weld width, low heat effects and high welding speed. Keyhole effects are the essential characteristic in laser deep penetration welding. A clear stable keyhole was observed with a high-speed camera in laser welding of GG17 glass. The effects of defocus and welding speed on the size and the appearance of the keyhole and the welding pool were experimentally studied. Under the assumption of the keyhole per thin layer being cylindrical, a heat transfer model was proposed to obtain the temperature distribution and the fluid velocity distribution around the keyhole by a finite element method based on the keyhole observed. Experimental study and simulation show that temperature gradient on the front keyhole wall is steeper than that on the rear, the mass flow rate in the welding pool is about ten times the welding speed, and a new technology for quantitative study of keyhole effects in deep penetration laser welding is developed.

Key words laser technique; laser welding; keyhole effects; deep penetration welding

1 引 言

激光深熔焊接的本质特征就是存在着小孔效应。目前, 国内外对小孔效应作了大量研究工作, 并建立了一些描述小孔效应的模型, 以期能够更好地了解激光深熔焊接的过程。Peretz^[1]在考虑固/液相变影响的前提下, 建立了二维移动线热源模型。Kaplan^[2]则建立了基于计算小孔形状的激光深熔焊

接数学模型。Steen 等^[3], Akhter 等^[4], 刘建华等^[5]建立了点线组合移动热源模型。Simon 等^[6]在假设小孔为圆柱体且孔壁各处的热流密度相等(不假设孔壁的温度为气化温度)的前提下, 建立了移动圆柱体热源激光深熔焊接数学模型。叶晓虎等^[7,8]则模拟计算了激光深熔焊接中马兰哥尼对流与焊接速度对熔池及其温度分布的影响。强宏亮等^[9~11]则研究了激光扫描速度、离焦量以及激光束的能量密度

收稿日期: 2004-01-13; 收到修改稿日期: 2004-06-14

作者简介: 张 屹(1976—), 男, 湖南湘潭人, 湖南大学机械与汽车工程学院博士研究生, 主要研究方向为大功率激光焊接及其在难焊接材料中的应用。E-mail: zy2100_hn@yahoo.com.cn

对焊接质量的影响。

然而很少有人用实验直接验证其假设和模型，原因是对于大多数工程材料而言很难在焊接过程中直接观察小孔的形状和尺寸。

本文采用激光焊接 GG17 玻璃新方法，可以清晰、完整地观测激光深熔焊接时小孔的形状；同时采用高速摄影的方法拍摄到小孔及其周围热影响区清晰的照片，最后建立了相应的传热模型，并采用 ANSYS 软件对模型进行了数值求解。

2 小孔和熔池的实验观测

日本的 Arata 等^[12] 最先用实验研究来观察小孔。图 1(a)是他们焊接钠玻璃时拍摄的小孔照片。因为激光焊接的功率只有 150 W，焊接速度只有 1 mm/s，所以从图上看到的小孔不够稳定，效果不佳。他们还采用 X 射线拍摄了激光焊接金属时小孔的照片，如图 1(b)所示^[13]，但“由于 X 光照片的反差太小，所以也很难分析深熔焊接的机理”，图 1(c)是我们采用高速摄影方法拍摄到的小孔及其周围热影响区的照片^[14]。

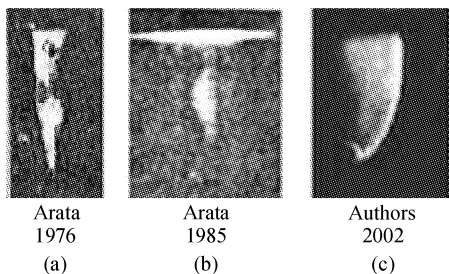


图 1 不同年代的小孔照片
Fig. 1 Composite photograph of keyholes taken by different authors in different ages

本文的实验装置如图 2 所示。激光经焦距为 100 mm 的 GaAs 透镜聚焦后入射到工件表面上，工件放在工作台上并随之以速度 U 移动。采用同轴压缩空气保护聚焦镜，并采用 45°斜吹 Ar(流量为 1.5 m³/h)，以吹走焊接过程中产生的喷溅物。采用高速摄影方法来观测小孔形状，曝光时间为 1/1000 s。为了衰减焊接过程中所产生的强光以便于摄像，在工件与摄像机之间放置一滤光片。实验用激光器为自行研制的 PHC-1000 折叠式准封离型 CO₂ 激光器。

2.1 离焦量对小孔轮廓的影响

图 3 是不同离焦量下的小孔组合照片，焦距深

入工件内部为负焦距，反之为正焦距。实验时，激光功率为 340 W，焊接速度为 600 mm/min。从照片上可以测量出沿焊接方向小孔的直径和深度，结果发现，当焦平面位于工件表面时小孔最深；当激光功率密度高时，小孔直径与高斯光斑直径相近或略为偏大；而密度较低时，小孔直径则小于光斑直径，这是因为只有激光功率密度足够高时才能将工件材料熔化、气化从而形成小孔。

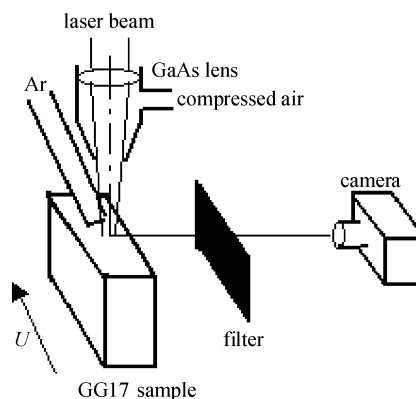


图 2 实验装置图
Fig. 2 Experimental setup

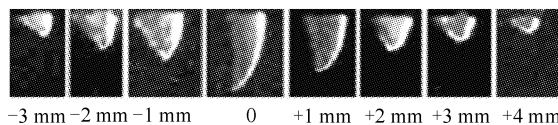


图 3 不同离焦量下的小孔照片
Fig. 3 Photographs of keyholes with different defocuses

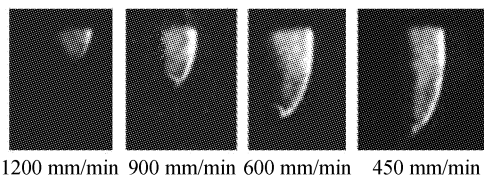


图 4 不同焊接速度下的小孔照片
Fig. 4 Photographs of keyholes at different welding speed

2.2 焊接速度对小孔轮廓的影响

图 4 为不同焊接速度下小孔轮廓的组合照片，所有实验焦平面均位于工件表面。由图 4 可以看出，随着焊接速度的增大，小孔变浅，但小孔直径没有明显变化。

3 激光深熔焊接时的传热模型

首先作如下假设：

1) 假设每一层内小孔的形状均为圆柱形，但不同深度圆柱体形的半径(即小孔半径)和中心位置均

可改变;

2) 不考虑小孔深度方向的热传导及对流^[15,16];

3) 由于气化部分的材料所占的比重极小,忽略材料气化的影响和工件表面对流损失;

4) 假设小孔孔壁的温度为材料的气化温度;

5) 熔池内的熔融材料为不可压缩牛顿型流体。此外,由于熔池内熔融材料流动速度约为焊接速度的1~10倍,所以对于大多数金属材料和玻璃等非金属材料的焊接而言,雷诺数远小于2000,流动状态为层流;

6) 待加工材料被视为均匀的,各向同性的,热物理性质随温度变化的,但在液相区材料的密度为常值;

7) 考虑准稳定状态。

根据以上假设,每一薄层熔池中流体的流动和传热可以简化为二维准稳态移动热源问题。图5给出了激光焊接时的物理模型, R_v 为小孔的半径, $\delta\Omega_{vl}$ 为小孔边界, $\delta\Omega_{ls}$ 为固液分界线, \vec{n} 为固液分界线的法矢量,采用随热源移动的运动坐标系。其数学描述为

$$\frac{\partial(\rho u_x C_p \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y C_p \phi)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi \quad (1)$$

式中, C_p 为广义比热值; ϕ 为具体的约束; Γ_ϕ 为广义热耗散系数; S_ϕ 为广义源项, u_x 和 u_y 分别表示 x 方向和 y 方向的速度。 C_p , ϕ , Γ_ϕ 以及 S_ϕ 的具体定义如表1所示。表中 μ 为材料的动力粘度, T_x , T_y 为由于粘度而引起的损失项

$$T_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)$$

$$T_y = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u_y}{\partial y} \right)$$

表1 方程参数表

Table 1 Parameter lists in the equations

Constrain equation	ϕ	C_p	Γ_ϕ	S_ϕ
Continuity equation	1	1	1	0
X-momentum equation	u_x	1	μ	$-\frac{\partial P}{\partial x} + T_x$
Y-momentum equation	u_y	1	μ	$-\frac{\partial P}{\partial y} + T_y$
Energy equation	T	C_p	K	0

边界条件^[17]为:

1) 在 $y=0$ 处

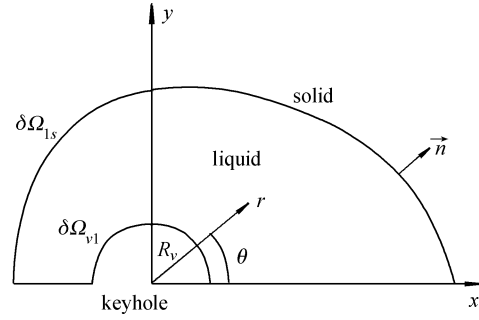


图5 激光焊接小孔的单层模型

Fig. 5 A thin layer of keyhole

$$\frac{\partial u_x}{\partial y} = 0 \quad u_y = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

2) 在 $x \rightarrow +\infty$ 和 $y \rightarrow \pm \infty$ 处

$$T = T_a \quad (3)$$

其中 T_a 为环境温度。

3) 在 $r = (x^2 + y^2)^{1/2} = R_v$ 处

$$u_r = u_x \cos \theta + u_y \sin \theta = 0 \quad (4)$$

其中, r 和 θ 为图5中极坐标系中的径向和轴向坐标。

4) 在 $r = R_v$ 处

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u_\theta}{r} \right) = 0 \quad (5)$$

其中 u_θ 为流体的切向速度。

5) 在 $r = R_v$ 处

$$T_{vl} = T_b \quad (6)$$

在 $\delta\Omega_{ls}$ 处

$$T_{ls} = T_m \quad (7)$$

其中 T_b 为材料的气化温度, T_m 为材料的熔化温度。

6) 在 $\delta\Omega_{ls}$ 处

$$u_x = U \quad u_y = 0 \quad (8)$$

$$7) \quad q_L = -\lambda \frac{\partial T_L}{\partial n} + \rho u_x h_g \cos \theta_n \quad (9)$$

$$q_S = -\lambda \frac{\partial T_S}{\partial n} \quad (10)$$

$$q_L = q_S \quad (11)$$

然而在实际计算中,对于任一假定的固液分界面的位置,(11)式很难满足,故需对固液分界面的位置进行修正。记固液分界面的位置修正系数为 ω_i ,则有

$$r_i^N = r_i (1 + \omega_i) \quad (12)$$

其中

$$\omega_i = \frac{q_L - q_S}{|q_L| + |q_S|} \quad (13)$$

ω_i 应能满足 $|\omega_i| \leq 0.001$ 。

4 计算结果的分析

利用(1)式和边界条件(2)~(13)式,使用 ANSYS 有限元分析软件可以得到温度场和流场的数值解。图 6 为工件表面处的温度分布和速度分布。由于 GG17 玻璃的导热系数很小,而小孔的移动速度相对较快,小孔周围的温度梯度比远离小孔处大,小孔前沿的温度梯度比后沿的大。在激光深熔焊接过程中,除极少量的材料穿过小孔孔壁发生气化以提供小孔形成和存在所需要的气化膨胀压力外,绝大部分熔融材料是通过小孔外部绕流到小孔后沿的。由图 6 可以发现,激光深熔焊接熔池的最大流动速度达到了焊接速度的 10 倍左右。

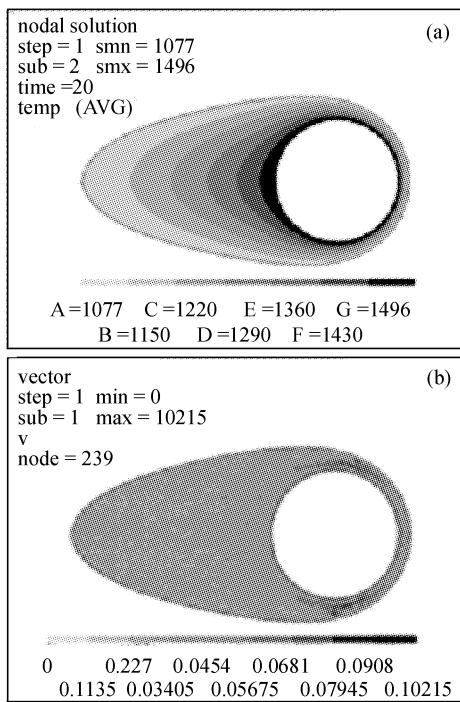


图 6 工件表面温度分布(K)和速度分布(m/s)
Fig. 6 Temperature (K) and velocity (m/s) distribution on the workpiece surface

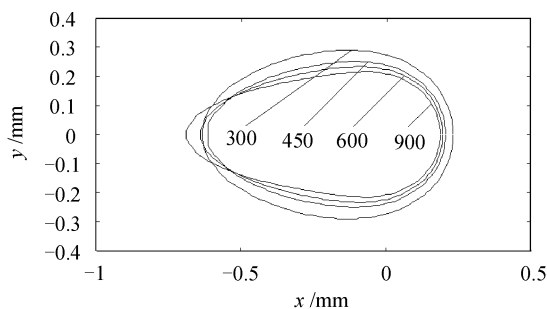


图 7 熔池形状随焊接速度的变化
Fig. 7 Appearance of welding pool at different welding speed

利用该模型,对不同焊接速度下熔池形状计算的结果如图 7 所示,小孔直径为 0.32 mm。图中数字表示焊接速度(单位为 mm/min)。由图 7 可以看出,随着焊接速度的增大,小孔前沿的熔池厚度将变薄,熔池长度略有增大。计算结果与实验测定结果的比较见图 8,二者差异的主要原因是实验测定熔池长度和宽度的误差。受实验条件的限制,拍摄的小孔照片没有将其灰度值经标定后转换为温度值,而是认定照片中小孔周围的次亮区为熔池。由于该次亮区包括了熔池和部分热影响区,因此实验测定熔池的长度和宽度较计算值偏大。

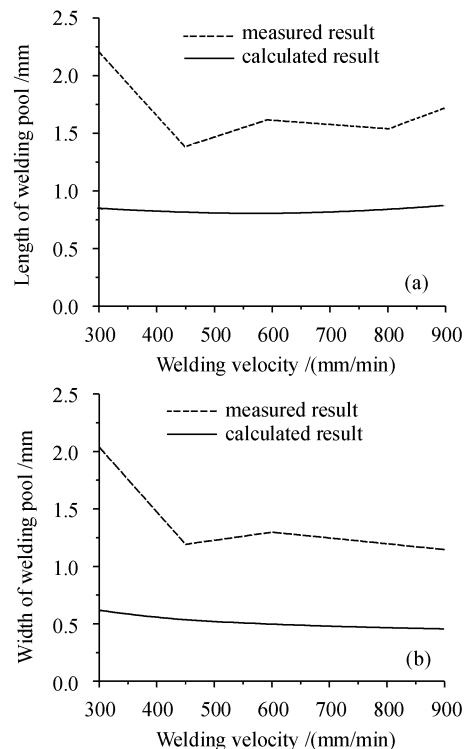


图 8 不同焊接速度下熔池长度、宽度与实验值的比较
Fig. 8 Comparison between calculated and measured results at different welding speed

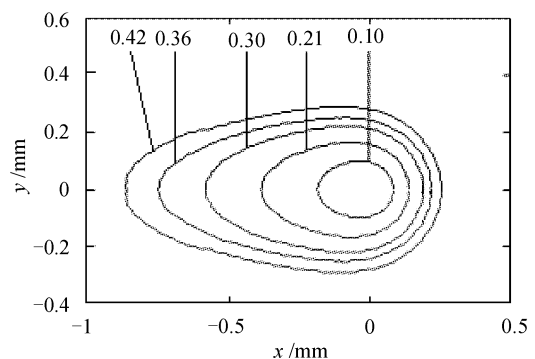


图 9 不同小孔直径下的熔池形状
Fig. 9 Welding pool in different diameter keyhole

不同小孔直径下熔池形状的计算结果如图 9 所示。焊接速度为 600 mm/min。图中数字表示小孔直径。由图可以看出,随着小孔直径的增大,不仅熔池长度增大,熔池宽度也增大。计算值与实验测定的结果对比如图 10。同样的原因,实验测定的结果较计算值偏大。

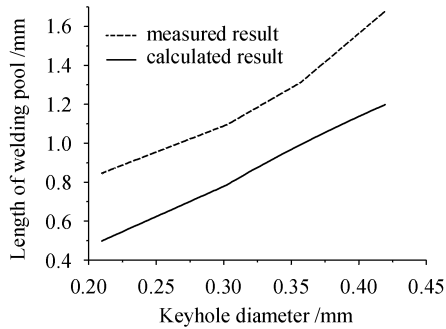


图 10 不同小孔直径下的熔池长度与实验值的比较

Fig. 10 Comparison between calculated and measured results in different diameter keyhole

5 结 论

1) 采用 GG17 玻璃和高速摄影方法可以清晰而完整地观测到激光深熔焊接时的小孔形状,为实验研究激光焊接提供了一种有效的方法。

2) 理论分析得知,由于焊接速度的存在,小孔周围的温度梯度分布是不均匀的,小孔周围的温度梯度比远离小孔处要大,小孔前沿的温度梯度比后沿的大;同时,熔池将沿焊接速度的反方向拉长,焊接速度增大,熔池长度略有增大,而熔池宽度减小。焊接熔池中的最大对流速度达到了焊接速度的 10 倍左右。

3) 建立了激光深熔焊接小孔效应的数学模型,并采用 ANSYS 软件对模型进行了数值求解。

参 考 文 献

- R. Peretz. Workpiece temperature distribution for deep penetration welding with high energy focused beams [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1986/1987, **7**(2):69~81
- 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
- W. M. Steen, J. Dowden, M. Davis *et al.*. A point and line source model of laser keyhole welding [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1988, **21**(8):1255~1260
- R. Akhter, M. Davis, J. Dowden *et al.*. A method for calculating the fused zone profile of laser keyhole welds [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1989, **22**(1):23~28
- Liu Jianhua, Li Zhiyuan, Hu Lunji *et al.*. Conduction model for laser deep penetration welding [J]. *Laser Technology*, 1995, **19**(1):10~13
刘建华,李志远,胡伦骥等. 激光深熔焊传热模型的研究[J]. *激光技术*, 1995, **19**(1):10~13
- G. Simon, U. Gratzke, J. Kroos. Analysis of heat conduction in deep penetration welding with a time-modulated laser beam [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1993, **26**(5):862~869
- Ye Xiaohu, Chen Xi. Three-dimensional modelling of heat transfer and fluid flow in laser full-penetration welding [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2002, **35**(10):1049~1056
- Chen Xi, Ye Xiaohu. A numerical simulation study of laser full-penetration welding [J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(2):185~202
陈 熙,叶晓虎. 激光穿透焊的数值模拟研究[J]. *应用激光*, 2002, **22**(2):185~202
- Qiang Hongliang, Cheng Zhaogu, Luo Jiangtao *et al.*. Influencing factors on topography of weld in deep penetration laser welding [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9):1289~1295
强宏亮,程兆谷,雒江涛等. 激光深熔焊焊缝表面形状的影响因素[J]. *光学学报*, 1999, **19**(9):1289~1295
- Wang Jiachun, Wang Xizhe, Hui Songxiao. Research of linear heat input and laser focus position for laser welding HE130 titanium alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2):179~184
王家淳,王希哲,惠松骁. HE130 合金激光焊接线能量与焦点位置研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2):179~184
- Liqun Li, Yanbin Chen, Xiaosong Feng. Characteristic of energy input for laser forming sheet metal [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(10):606~608
- Y. Arata, H. Maruo, I. Miyamoto *et al.*. Dynamic behavior of laser welding and cutting [C]. Proceeding of 7th International Conference on Electron and Ion Beam Science and Technology, 1976. 111~129
- Y. Arata, N. Abe, T. Oda *et al.*. Fundamental phenomena in high power CO₂ laser welding [J]. *Transactions of JWRI*, 1985, **14**(1&2):5~22
- Jin Xiangzhong, Zhang Yi, Li Lijun. A theoretical and experimental investigation on keyhole effects in deep penetration laser welding [J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(2):193~198
金湘中,张 屹,李力钧. 激光深熔焊接小孔效应的理论和试验研究[J]. *应用激光*, 2002, **22**(2):193~198
- K. N. Lankalapalli, J. F. Tu, M. Gartner. A model for estimating penetration depth of laser welding processes [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1996, **29**(7):1831~1841
- Y. F. Hsu, B. Rubinsky. Two-dimensional heat transfer study on the keyhole plasma arc welding process [J]. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 1988, **31**(7):1409~1421
- Xiangzhong Jin, Lijun Li, Yi Zhang. A heat transfer model for deep penetration laser welding based on an actual keyhole [J]. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 2003, **46**(1):15~22