

TC4 钛合金激光深熔焊小孔形貌特征的有限元精细分析

张可荣, 张建勋

(西安交通大学, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对 TC4 钛合金激光深熔焊接的特点, 建立了适合小孔尺寸精度的微米级精细计算模型。结合 TC4 钛合金材料属性, 利用能量分布与小孔形貌特点相类似的高斯旋转曲面体热源进行加载, 得到了随激光焊接工艺参数改变而变化的小孔形貌及瞬态温度分布特征。通过分析瞬态过程小孔前后沿、小孔径向以及小孔深度方向的特征尺寸及温度分布, 得出了对 TC4 钛合金激光焊接小孔形貌影响最大的工艺参数。通过分析各工艺参数的影响规律, 提出了 TC4 钛合金激光焊接得到最佳小孔形貌或温度分布的工艺参数取值范围。

关键词: 激光焊接; 工艺参数; 温度分布; 小孔形貌

中图分类号: TG 146.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)06-0987-04

激光深熔焊具有能量高、焊速快、变形小等优点, 在钛合金焊接领域具有显著的优势。激光焊中, 能量密度很高的激光束使材料局部熔化、汽化, 形成小孔, 其内部和孔壁液相存在着剧烈且复杂的物质能量流动, 随激光束移动热源后面的熔化金属冷却形成焊缝。小孔形貌直接影响着焊缝的温度分布, 并间接影响着残余应力的形成与分布^[1]。

在已凝固焊道上并不能观察到小孔。文献[2]利用玻璃的透光性, 采用高速摄影记录了激光焊接小孔的形貌。同样利用摄影方法研究小孔形貌的学者还有法国的 Remy Fabbro 等^[3], 其所拍摄的小孔照片, 有效反映了小孔及熔池的形貌特征。除高速摄影外, 利用实验研究小孔形貌的方法还有 X 射线透视法^[4]和热电偶测温法^[5]等。

实验对于大多数不透明的金属材料, 并不能直接反映小孔形貌。利用数值方法, 采用适合的小孔热源模型, 建立符合小孔尺寸参数级别的离散单元, 成为研究小孔现象的有效方法。Kaplan 等^[6]建立了激光焊接小孔数学模型, 有效地计算了小孔特征。文献[7~9]利用数值模拟方法, 得到了符合实际小孔形貌的温度分布云图。

部分学者利用试验方法对小孔特性与激光焊接工艺参数间的定量关系进行了研究^[8,10]。但利用数值方法描述工艺参数对小孔瞬态行为影响的文献还较少。

因此本实验以 TC4 钛合金激光深熔焊小孔附近局部区域为研究对象, 建立有限元精细计算模型, 进行激光焊瞬态过程数值模拟, 并分析工艺参数对小孔形貌的影响规律。

1 计算模型

激光深熔焊小孔形貌特征参量见图 1^[10]。其中: r 为小孔半径; a_1 为小孔前沿半径; a_2 为小孔后沿半径; h 为小孔穿透深度; v 为焊接速度, 且箭头指示焊接方向。

模拟所需激光工艺参数及取值范围见表 1^[11,12]。

激光焊中小孔与周围区域形成交互影响。为了准确描述小孔的真实分布, 选取能较好描述小孔及熔池形状的旋转高斯曲面体热源进行热量加载^[13,14]。

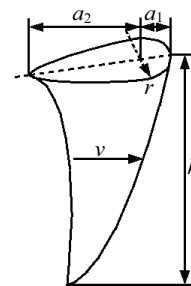


图 1 小孔形貌特征参量示意图

Fig.1 Sketch of keyhole profile parameter

收稿日期: 2008-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50475093)

作者简介: 张可荣, 女, 1979 年生, 博士生, 西安交通大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710049, 电话: 029-82663115, E-mail: zhkr2001@163.com

表 1 工艺参数及取值范围

Table 1 Processing parameter and value range	
Parameter	Parameter value
Laser power, P/W	1500~3000
Welding speed, $v/mm \cdot s^{-1}$	100~360
Spot diameter, R/mm	0.35~0.7
Defocusing amount, $\Delta z/mm$	0
Material	TC4
Workpiece dimension, $l \times b \times h (mm^3)$	20×20×2.5

热源模型见图 2。热源高度 H 及开口半径 R_0 ，与小孔深度 h 及半径 r 有着直接关联。经计算，在本实验各工艺参数下，选用旋转高斯曲面体热源进行热量加载，可得到最大小孔深度 H 为 0.4 mm， R_0 为 0.25 mm。

旋转高斯曲面体热源模型表达式为

$$q(x, y, z) = q(0, 0) \exp\left[-\frac{3C_s}{\ln\left[\frac{H}{z}\right]}(x^2 + y^2)\right] \quad (1)$$

$$q(0, 0) = \frac{3C_s Q}{\pi H \left[1 - \frac{1}{e^3}\right]}, \quad C_s = \frac{3}{R_0^2} \quad (2)$$

式中， Q 为热输入功率； H 为热源高度； C_s 为热源形状参数； R_0 为热源开口端面半径。

2 计算结果及分析

对 2.5 mm 常用厚度 TC4 钛合金平板激光深熔焊过程进行分析，利用 ANSYS 有限元软件建立精细计算模型，实体模型及小孔区域单元尺寸为 250 μm 的网格划分见图 3 所示。TC4 钛合金热物理性能参数见图 4^[15]。

2.1 小孔深度方向形貌分析

图 5 为不同参数下小孔深度方向形貌。图中深度方向有限元网格尺寸约为 0.31 mm。由图可见，随激光功率增大，小孔穿透力逐渐增强，但在大功率下，小孔穿透能力增长变慢，因此如要显著提高小孔的穿透深度，增大可焊深度，单纯靠提高激光功率将是有限的。

随焊接速度变化，小孔深度方向形貌的最典型现

象就是存在临界焊速。中低速时，随焊速增大小孔深度增大，但焊速增加到临界值以上，小孔穿透深度反而又有所减小。可见激光焊接，找到并保持焊速在临界值附近，对于提高焊接效率，增大焊接深度有积极的作用。

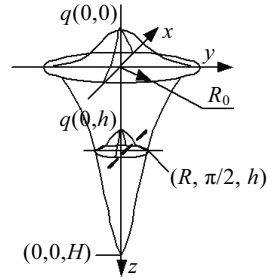


图 2 旋转高斯曲面体热源示意图

Fig.2 Sketch of gauss rotary curved face body heat source

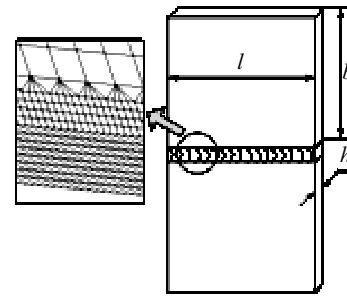


图 3 计算模型与有限元网格

Fig.3 Numerical model and finite element grid

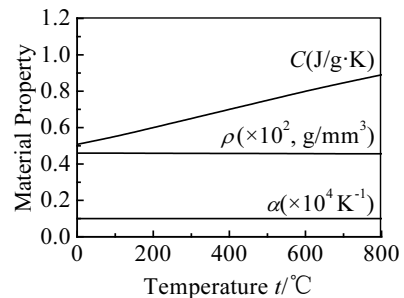


图 4 TC4 钛合金热物理性能参数

Fig.4 Temperature dependent material properties for alloy TC4

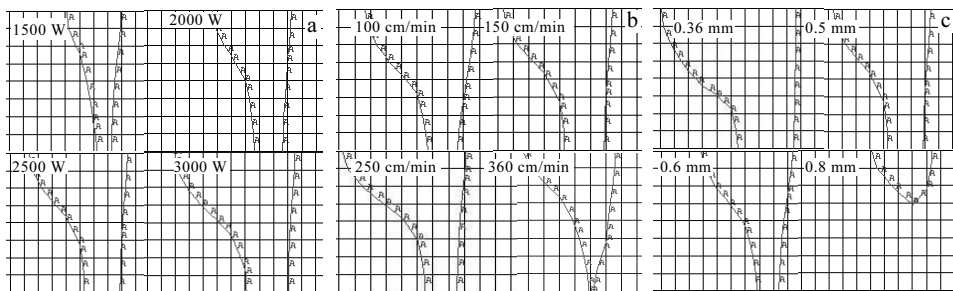


图 5 焊接参数功率(a)、焊速(b)和光斑直径(c)对小孔深度形貌的影响

Fig.5 Keyhole profile in depth variation with (a) power, (b) welding speed, and (c) spot diameter

随光斑直径增大,小孔深度显著减小,可见对小孔深度及穿透能力影响最大的参数是激光的光斑直径。

2.2 小孔径向形貌分析

图 6 为不同参数下小孔上下端面的径向形貌,直径方向网格尺寸约 0.25 mm。由图可知,激光焊接小孔径向尺寸一般大于光斑直径,且光斑越小径向尺寸相对越大。图 7 表示小孔上端面径向尺寸随各参数变化的趋势。可知随功率增大,小孔半径和前沿尺寸都有所增大,且半径尺寸始终大于小孔前端,说明小孔前端存在着最大温度梯度及物质能量传导力。而功率越高小孔尾部越狭长。

由图可见,焊速变化存在一个临界焊速值。低于此临界值,随焊速增加,滞后热作用增大,延长了小孔后端崩溃凝固时间,因此小孔更加狭长。而当焊速处于临界值以上,热源移动速率增加,小孔受热时间更短,冷凝作用超过滞后热的影响,小孔快速的前移还是促使了小孔后沿尺寸的不断减小。

随光斑直径增大,小孔半径和前沿尺寸线性下降。从图中可知,小孔尺寸大于光斑直径 0.1~0.2 mm。随光斑直径增加小孔后沿尺寸减小,虽然光斑作用面积加大,但其能量密度下降,使处于崩溃状态的小孔后沿能量显著下降。所以随光斑加大小孔尺寸反而减小。

综上所述,对小孔径向尺寸影响最大的工艺参数是激光能量密度。增大功率或减小光斑直径,都相当于增大激光束能量密度,从而显著增大小孔径向尺寸。

2.3 小孔圆锥度分析图

图 8 表示小孔上下端面半径随激光功率、焊接速度及光斑直径变化的趋势。结合图 5、图 6 可知,功率较小时,小孔下端面尺寸随功率增大而扩大的幅度超过上端面,因此小孔在功率较低时随功率增大是渐趋圆柱型的。而随着功率进一步增大,小孔上下端面尺寸同步扩大,形状几乎再无变化。

当焊速 ≤ 175 cm/min,处于低速状态时,随焊速增大,小孔整体变细。而中速焊接阶段,小孔整体

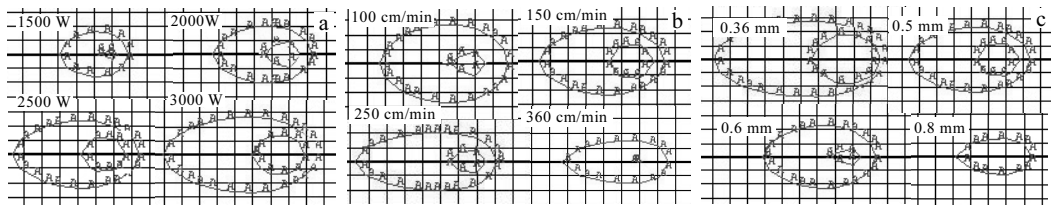


图 6 焊接参数功率(a)、焊速(b)和光斑直径(c)对小孔上下端面径向形貌的影响

Fig.6 Keyhole profile in radial variation with (a) power, (b) welding speed, and (c) spot diameter

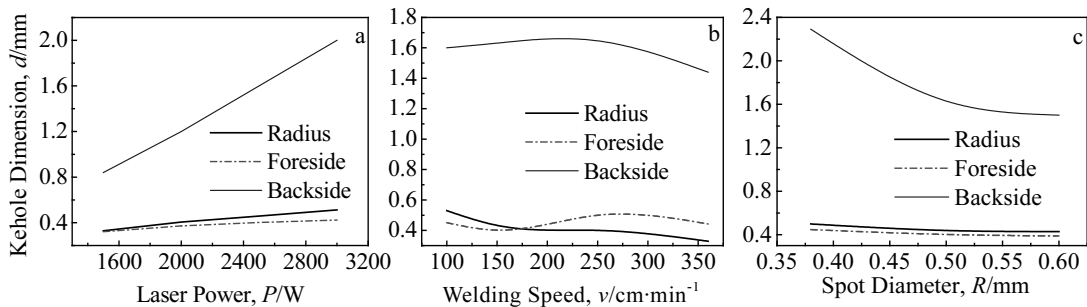


图 7 焊接参数功率(a)、焊速(b)和光斑直径(c)对小孔上端面各尺寸的影响

Fig.7 Radial dimension on top of the keyhole variation with (a) power, (b) welding speed, and (c) spot diameter

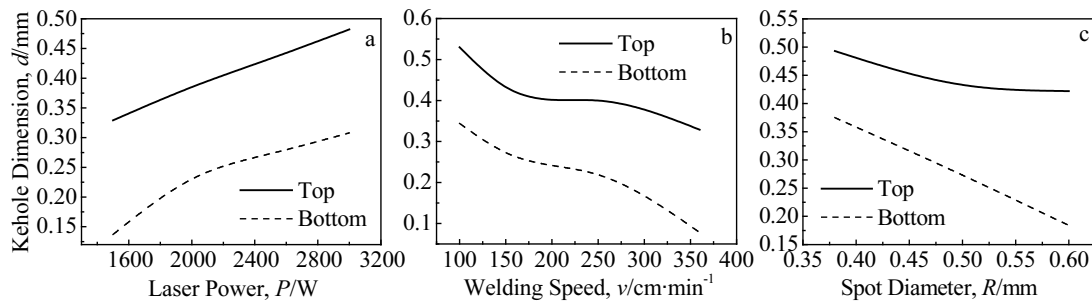


图 8 焊接参数功率(a)、焊速(b)和光斑直径(c)对小孔上下端面半径的影响

Fig.8 Radius on top and bottom of the keyhole variation with (a) power, (b) welding speed, and (b) spot diameter

尺寸变化不大, 但更趋圆锥型。高速焊接时, 小孔下表面尺寸减幅加大, 也更趋圆锥型。

随光斑直径增大, 小孔下表面尺寸迅速减小, 小孔锥度逐渐加大。

综上可知, 对小孔锥度影响最大的工艺参数为光斑直径。低速焊状态, 随焊速改变小孔变细的趋势最大。功率增大对小孔圆锥度影响较小, 只会使小孔整体变粗。

3 结 论

1) 当激光能量密度增大, 随激光功率增大或光斑直径减小, 小孔深度加大, 尺寸变宽。

2) 激光能量密度处于略大于深熔焊形成临界值 10^6 J/cm^2 的较低状态时, 随功率增大小孔锥度变小, 而功率继续增大时, 小孔锥度几乎不变。随光斑直径加大小孔锥度显著增大, 光斑较大时, 变化尤为明显。

3) 焊接中存在特征焊速, 此时小孔径向尺寸最小。中低速时随焊速增大小孔深度增大。但焊速增加到临界值以上, 小孔深度反而减小。在激光功率一定的情况下, 为保证焊接深度, 选择中低线能量最为适合。

4) 光斑直径是对 TC4 钛合金激光焊接小孔形貌影响最大的工艺参数。激光焊接, 找到并保持焊速在临界值附近, 对提高焊接效率, 改善接头质量有积极的作用。

参考文献 References

- [1] Zhang Jianxun *et al.* *Science and Technology of Welding and Joining* [J], 2005, 10(6): 643
- [2] Xiangzhong Jin *et al.* *Optics and Lasers in Engineering*[J], 2004(4): 779
- [3] Remy Fabbro1 *et al.* *J Phys D: Appl Phys*[J], 2006, 39: 394
- [4] Jouvard J M *et al.* *J Phys D: Appl Phys*[J], 2001, 34: 2894.
- [5] Robert Ducharm *et al.* *J Phys D: Appl Phys*[J], 1994, 27: 1619
- [6] Kaplan A *et al.* *J Phys D: Appl Phys*[J], 1994, 27: 1805
- [7] Xiangzhong Ji *et al.* *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2003, 46: 15
- [8] Wu Chuansong(武传松) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2006, 42(3): 311
- [9] HongWang *et al.* *J Phys D: Appl Phys*[J], 2006, 39: 4722
- [10] Qin Guoliang(秦国梁) *et al.* *Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)*[J], 2006, 27(1): 81
- [11] Tsirkas S A *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2003, 134: 59
- [12] Zhang Li *et al.* *Journal of Materials Processing Technology* [J], 1997, 65: 203
- [13] Wang Xichang(王西昌)*et al.* *Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)*[J], 2005, 26(12): 81
- [14] Wu Su(吴 甦) *et al.* *Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)*[J], 2004, 25(1): 91
- [15] Koichi Masubuchi. *Analysis of Welded Structures*[M]. England: Pergamon Press Ltd, 1980: 219

Numerical Simulation for Keyhole Profile and Their Effect of TC4 Titanium Alloy during Laser Welding

Zhang Kerong, Zhang Jianxun

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: According to the characteristics of the existence of keyhole phenomena on TC4 titanium alloy during laser welding, a precise calculation model fitting to the keyhole size in micron dimension has been developed. Using the Gaussian rotating curved body heat source fitting for the keyhole profile and combining the material property of TC4 titanium alloy, the distribution characteristics of keyhole profile and transient welding temperature varying with the laser parameters have obtained. The greatest influences of laser welding parameters on keyhole profile of TC4 titanium alloy have been found out by analyzing the specificity size and temperature distribution in front and back edge of the keyhole and in radial and depth direction of the keyhole. The optimal range of laser welding parameters to obtain the best keyhole profile and temperature distribution of TC4 titanium alloy during laser welding has been found out by analyzing the influence of every welding parameter.

Key words: laser welding; laser parameter; temperature distribution; keyhole profile

Biography: Zhang Kerong, Candidate for Ph. D., School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China, Tel: 0086-29-82663115, E-mail: zhkr2001@163.com