

文章编号 1004-924X(2012)03-0534-07

## 脉冲激光焊接 Hastelloy C-276 合金的熔池 流动传热特性分析

吴东江, 王占宏\*, 马广义, 杨义彬, 郭玉泉, 郭东明

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 基于流体动力学方程和传热方程建立了三维瞬态模型, 用于研究脉冲激光焊接 0.5 mm 厚 Hastelloy 薄板时熔池的流动行为及传热特性。应用 Fluent 软件, 采用有限容积法(FVM)求解控制方程, 用 SIMPLE 算法处理速度与压力的耦合。引入  $P_e$  来衡量焊接熔池中对流传热与传导传热的相对强弱, 并以此分析焊接熔池的传热特性。结果表明: 沿焊接方向, 焊接熔池的流动速度随着离熔池中心距离的增加先增加后减小; 在给定试验条件下, 熔池流动速度在离熔池中心 0.2 mm 左右时出现最大值, 且沿焊接方向前方稍大于后方, 而后迅速减小为零; 焊接熔池中对流的存在使得焊接熔池熔深较小而熔宽较大; 最终的焊接形貌由对流传热与传导传热相互作用而成。对焊缝形貌的数值模拟结果与实验结果进行了比较, 计算结果与实验结果吻合较好。此模型可为脉冲激光焊接 Hastelloy C-276 薄板时熔池流体流动行为的分析提供理论依据。

**关键词:** 激光焊接; 脉冲激光器; 流体流动; 数值模拟; 焊缝形貌

**中图分类号:** TG456.7; TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122003.0534

## Analysis of fluid flow and heat transfer in weld pool during pulsed laser welding Hastelloy C-276 alloy

WU Dong-jiang, WANG Zhan-hong\*, MA Guang-yi, YANG Yi-bin,  
GUO Yu-quan, GUO Dong-ming

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of  
Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

\* Corresponding author, E-mail: dgzhw@mail.dlut.edu.cn

**Abstract:** A 3D transient model was established based on the theories of fluid dynamics and heat transfer to analyze the fluid flow and the heat transfer characteristics in the liquid pool when a pulse laser was used to weld the Hastelloy C-276 alloy. On the basis of software Fluent, the Finite Volume Method (FVM) was employed to solve the control equations and the algorithm of SIMPLE was adopted to deal with the coupling of velocity and pressure. The  $P_e$  number was induced to evaluate the relative importance of convection and conduction then to analyze the heat transfer characteristics of welding pool. The research indicates that fluid flow velocities along the welding direction in the liquid pool increase with the increasing of the distance from the melting pool center, and then decrease. Under

收稿日期: 2011-11-01; 修订日期: 2011-11-24.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2009CB724307), 国家自然科学基金资助项目 (No. 51175061)

the given conditions, the maximum flow velocity is firstly found at the 0.2 mm from the melting pool center, then it reduces to zero rapidly and velocities in front of the melting pool along the welding direction are slightly larger than that of in the rear ones. Furthermore, The convection leads the melting pool to wider and shallower and the interaction of convection and conduction decides the final weld joint morphology. The numerical simulation is in good agreement with the experimental results, Which proves that the model can provide a theoretical basis for the analysis of the fluid flow in the weld pool during pulsed laser welding thin Hastelloy C-276 alloy.

**Key words:** laser welding; pulsed laser; fluid flow; numerical simulation; weld joint morphology

## 1 引言

第三代核主泵 AP1000 以其安全性和经济性得到广泛关注。Hastelloy C-276 镍基合金以其良好的耐蚀性被选为 AP1000 屏蔽式电动主泵屏蔽套材料<sup>[1-3]</sup>。激光加工制造技术作为一种绿色制造技术,具有高精密、高质量、高效率、高度柔性自动化等优点,被广泛应用于焊接、打孔、热处理、切割、熔覆等领域<sup>[4-5]</sup>。本文采用脉冲激光对屏蔽套进行焊接成形。传统焊接的研究主要以焊后焊缝性能分析、焊接工艺及特种材料焊接为主,对于焊接熔池流动的分析较少<sup>[6-7]</sup>。但焊接熔池的流动对焊接温度场和流场有很大影响,进而会对屏蔽套的焊接质量产生影响,因此分析焊接熔池流动行为及传热特性十分必要。直接通过实验手段对焊接熔池中的流体流动及传热进行观测、分析难度较大,而用数值模拟的方法研究焊接熔池中的流体流动一直是焊接领域的一个重要手段。美国宾夕法尼亚大学的 T. DebRoy 等人研究了焊接熔池形成及凝固特征,计算了焊接熔池的各种凝固参数,并研究了其对焊接头微观组织的影响<sup>[8-10]</sup>。美国威斯康辛大学麦迪逊分校的 S. Kou 等人建立模型模拟了激光部分深熔焊熔池的流动过程,综合考虑浮力和表面张力梯度作为液体金属流动的驱动力,并讨论了表面张力温度系数对焊接流场的影响及熔池流动对焊缝熔深的影响<sup>[11-12]</sup>。国内,山东大学的武传松等用数值模拟的方法研究了运动电弧作用下脉冲 TIG 焊接熔池流场与热场动态变化。并基于自由表面变形方程,对全熔透 GTAW 焊接熔池中的流体流动与传热过程和熔池形状的动态变化过程进行了数值模拟<sup>[13-14]</sup>。中国科学院金属研究所的陆善平等人

基于 Fluent 软件研究了焊缝活性元素对熔池流动及焊缝成形的影响<sup>[15]</sup>。上述研究主要集中于熔池的熔凝过程、熔池流动的驱动力及自由表面变形等,对于熔池中流场的分布及传热特性分析较少,而这些因素对焊缝成形及温度场分布有较大影响。因此,本文基于 Fluent 软件,建立了三维传热、流动模型,研究了焊接熔池流场分布及焊接熔池的传热特性。

## 2 模型建立

### 2.1 基本假设

根据脉冲激光焊接实际物理过程,作如下基本假设:(1)模型焊接熔池自由表面为平面;(2)焊接熔池中的流体为不可压缩牛顿流体;(3)工件表面的焊接热源符合高斯分布;(4)材料密度采用 Boussinesq 假设;(5)不考虑焊接时引入元素对焊缝的影响;(6)不考虑熔池内溶质的扩散与迁移。

### 2.2 控制方程

焊接过程主要考虑液态金属在熔池中的流动和温度的扩散,根据流体力学和传热学基本定律,控制方程可用如下通式表示<sup>[16]</sup>

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{U}\varphi) = \text{div}(\Gamma_{\varphi}\text{grad}\varphi) + S_{\varphi}, \quad (1)$$

式中: $\varphi$ 为通用变量, $\Gamma_{\varphi}$ 为广义扩散系数, $\mathbf{U}$ 为速度矢量, $S_{\varphi}$ 为广义源项(包括动量守恒方程中糊状区的达西项、 $z$ 轴方向的浮力项以及能量方程中的潜热项等), $\rho$ 为材料的密度。

### 2.3 边界条件处理

图1所示为焊接模型的边界条件。其中, $a$ 为热源集中系数, $k$ 为热扩散系数, $\eta$ 为激光吸收系数, $P$ 为激光功率, $r$ 为激光光斑半径, $\epsilon$ 为材料表面发射率, $\sigma$ 为 Stefan-boltzmann 常数, $h_c$ 为



熔池流动速度达到最大值,为 0.14 m/s,且沿焊接方向前方流动速度稍大于后方。分析认为,对于热源前端的冷金属而言,Marangoni 对流传输过来的热量使固体金属熔化,温度梯度较大;对于热源后部来说,Marangoni 流将高温处的液态金属带给还处于液态的焊接熔池,温度梯度较小;因此,由式(2)可知,前方流体流动速度大于后方。当速度达到最大值后,随着距离熔池中心的距离增加,温度梯度减小,流动速度迅速减小。但当靠近焊缝边缘附近的“糊状区”时,出现了波动,这是由于模型的物理参数假设在液相线附近发生突变,进而引起流动速度在小范围内波动。距离熔池中心距离继续增加,流动速度为  $v=0$  m/s,这是由于此区域距离激光作用区域较远固态金属没有熔化。

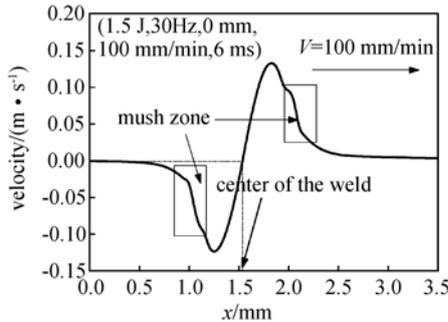


图3 沿  $x$  方向的速度分布 ( $t=0.93$  s)

Fig. 3 Velocities distribution along  $x$  direction ( $t=0.93$  s)

### 4.2 熔池中的对流与传导

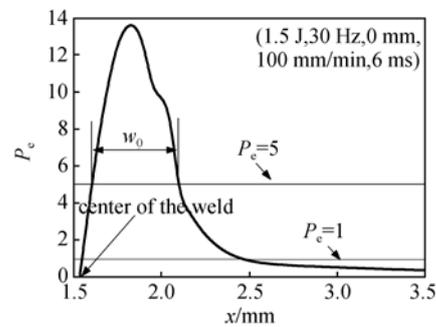
脉冲激光焊接时虽然形成的熔池较小,但焊接熔池的流动对熔池中热量扩散的影响不可忽略。考虑焊接熔池中流体的流动时,焊接熔池中的热量扩散主要有两种方式:对流和传导。这两种传热方式的相对强弱由  $P_e$  数来衡量(式3)。根据 T. DebRoy 等人的研究<sup>[8-9]</sup>,当  $P_e > 5$  时认为熔池中的热传导以对流为主,  $P_e < 5$  时熔池中传热以传导为主。

$$P_e = \frac{v \rho C_p L_R}{k} \quad (3)$$

式中:  $P_e$  为 Peclet 数,表征对流和传导的相对强度,  $v$  为熔池特征速度,  $C_p$  为材料比热容,  $L_R$  熔池特征长度,一般取熔池半径。

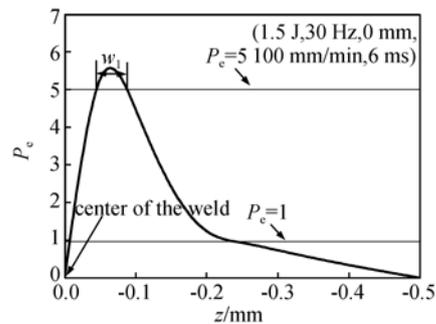
图4(a)所示为  $P_e$  沿  $x$  轴方向的变化(焊接时间  $t=0.93$  s),  $x$  为工件长度,激光光斑中心位

于  $x=1.55$  mm 处。由图可知:在熔池中心区域附近,由于温度梯度较小,速度较小,最终使得  $P_e < 5$ ,此区域熔池传热以传导为主;随着距离熔池中心距离增加,由于熔池流动速度增加,  $P_e$  迅速增大,传热以对流为主;距离进一步增加,到达熔池边缘时,  $P_e$  迅速减小,这一区域传热以传导为主。距离熔池中心距离继续增加达到固相区,传热以传导为主。图4(b)为  $P_e$  沿  $z$  轴方向的变化。熔池中心  $P_e=0$ ,此区域传热以传导为主;随着距离熔池表面距离的增加,  $P_e$  迅速增大,传热以对流为主;距离进一步增加,  $P_e$  急剧减小,传热以传导为主。



(a)  $x$  方向

(a) Along  $x$  direction



(b)  $z$  方向

(b) Along  $z$  direction

图4  $P_e$  沿  $x, z$  轴方向变化( $t=0.93$  s)

Fig. 4 Variation of  $P_e$  along  $x, z$  directions( $t=0.93$  s)

$W_0, W_1$  分别为熔池表面和  $z$  方向对流传热为主的区域(图4 a、b),因此,由图4可知:熔池中的热量传输主要靠对流传热,且上表面的  $P_e$  较之  $z$  方向较大,进而上表面对流传热作用比沿  $z$  方向对流传热作用大的多。由于  $\partial\gamma/\partial T < 0$ ,在 Marangoni 对流作用下,在熔池上表面强烈的对流把大量高温液态金属带到了熔池边缘,同时大

量的热量也随对流传递到熔池边缘区域,加速了该区域固态金属的熔化,形成了较宽的焊缝。而沿  $z$  方向熔池对流传热相对于上表面较弱,传输的热量较少,形成的中部的焊缝熔宽较窄,加之脉冲激光焊接时焊缝的每一区域都会受到相邻几个脉冲的重复作用,热量积累作用使得焊缝中心的正下方出现了向下凸出现象(图 5b)。

#### 4.3 模型验证

图 5 为给定试验条件下( $E=1.5\text{ J}$ ,  $f=30\text{ Hz}$ ,  $\tau=6\text{ ms}$ ,  $d=0\text{ mm}$ ,  $v=100\text{ mm/min}$ )焊缝形貌模拟结果(图 5a)与实验结果(图 5b)的对比。可以看出,计算得到的熔点温度等温线与实际熔池形貌虽有一定的误差,但变化趋势基本一致,说明模型具有一定的准确性。

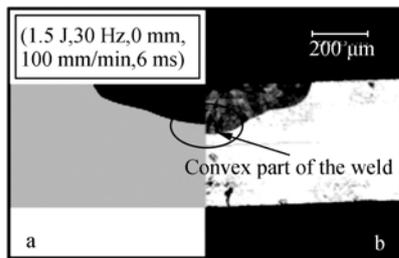


图 5 模拟与实验对比

Fig. 5 Comparison between calculation and experiment

#### 参考文献:

- [1] 李力松. 哈氏合金 C276 材料在化工压力容器中的应用[J]. 石油化工设计, 2003, 20(1): 36-38.  
LI L S. Application of Hastelloy C-276 in pressure vessel [J]. *Petrochemical Design*, 2003, 20(1): 36-38. (in Chinese)
- [2] 包国平. Hastelloy C-276 合金的焊接[J]. 大型锻铸件, 2008 (4): 33-35.  
BAO G P. The welding process of Hastelloy C276 alloy [J]. *Heavy Casting and Forging*, 2008 (4): 33-35. (in Chinese)
- [3] 张明乾, 刘昱, 李承亮, 等. 浅谈压水堆核电站 AP1000 屏蔽式电动主泵[J]. 水泵技术, 2008, (4): 1-5.  
ZHANG M Q, LIU Y, LI CH L. A brief talk on the shielding pump of AP1000 PWR [J]. *Technology of Water Pump*, 2008, (4): 1-5. (in Chinese)
- [4] 秦渊, 毕娟, 倪晓武, 等. 毫秒激光金属打孔的解析和实验[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 340-347.  
QIN Y, BI J, NI X W, *et al.*. Analysis and experiment on millisecond pulsed laser drilling of metals [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 340-347. (in Chinese)
- [5] 单肖楠, 刘云, 曹军胜, 等. 808 nm 千瓦级高效大功率半导体激光光源[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 452-456.  
SHAN X N, LIU Y, CAO J SH, *et al.*. 808 nm Kw-output high-efficiency diode laser sources [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 452-456. (in Chinese)
- [6] 吴东江, 尹波, 周秋菊, 等. 用 Nd:YAG 激光焊接殷钢薄板材料[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 557-562.  
WU D J, YIN B, ZHOU Q J, *et al.*. Nd:YAG laser beam welding invar36 alloy sheet [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 557-562. (in Chinese)
- [7] 郑权, 李永正. 微型桥带的成型与焊接工艺研究

- [J]. 光学精密工程, 2000, 8(3): 265-268.
- ZHENG Q, LI Y ZH. Producing and welding thin bridge-belt [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3): 265-268. (in Chinese)
- [8] X HE, FUERSCHBACH P W, DEBROY T. Heat transfer and fluid flow during laser spot welding of 304 stainless steel [J]. *Journal of Physics D*, 2003, 36(12):1388-1398.
- [9] X HE, ELMER J W, DEBROY T. Heat transfer and fluid flow in laser micro welding [J]. *Journal of Physics*, 2005, 97:084909-1-9.
- [10] ZHANG W, ROY G G, ELMER J W, *et al.*. Modeling of heat transfer and fluid flow during gas tungsten arc spot welding of low carbon steel [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 935: 3022-3033.
- [11] KOU S, WANG Y H. Computer simulation of convection in moving arc weld pools [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1986, 17A: 2271-2277.
- [12] KOU S, SUN D K. Fluid flow and weld penetration in stationary arc welds [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1985, 16A: 203-213.
- [13] 武传松, 郑炜, 吴林, 等. 脉冲电流作用下 TIG 焊接熔池行为的数值模拟[J]. 金属学报, 1998, 34(4): 416-421.
- WU CH S, ZHENG W, WU L. Numerical simulation of TIG weld pool behavior under the action of pulsed current [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1998, 34(4): 416-421. (in Chinese)
- [14] 赵明, 武传松, 孙永兴, 等. 全熔透钨极惰性气体保护电弧焊熔池流动与传热动态过程的数值分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(9): 266-271.
- ZHAO M, WU CH S, SUN Y X *et al.*. Numerical analysis of dynamic fluid flow and heat transfer in fully-penetrated GTAW weld pool [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(9): 266-271. (in Chinese)
- [15] 董文超, 陆善平, 李殿中, 等. 微量活性组元氧对焊接熔池 Marangoni 对流和熔池形貌影响的数值模拟[J]. 金属学报, 2008, (2)44:249-256.
- DONG W CH, LU SH P, LI D ZH, *et al.*. Numerical simulation of effects of the minor active-element oxygen on the Marangoni convection and the weld shape [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2008, (2):249-256. (in Chinese)
- [16] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2004.
- TAO W Q. *Numerical heat transfer* [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2004. (in Chinese)
- [17] 王西昌, 左从进, 柴国明, 等. 活性剂对 GH4169 薄板电子束焊接焊缝成形的影响[J]. 焊接学报, 2009, 30(2):83-87.
- WANG X C, ZUO C J, CHA G M, *et al.*. Effect of activating fluxes on appearance of weld in thin plate electron beam welding of nickel-base super alloy GH4169 [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 30(2):83-87. (in Chinese)
- [18] SHAOO T, DEBROY T, MCNALLAN. Surface tension of binary metal-surface active solute systems under conditions relevant to welding metallurgy [J]. *Metall Trans*, 1998, 19B:483-491.

#### 作者简介:



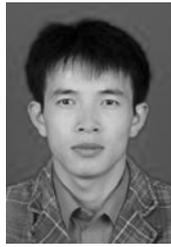
吴东江(1964—),男,山东昌邑人,博士,教授,博士生导师,1987年于大连理工大学获得学士学位,2000年于中科院长春光学精密机械与物理所获博士学位,目前主要从事激光与材料相互作用机理及激光精密微细加工领域的研究。E-mail: djwudut@dlut.edu.cn



王占宏(1985—),男,河北唐山人,硕士研究生,主要从事激光精密制造方面的研究。E-mail: dgzhw@mail.dlut.edu.cn



马广义(1982—),男,辽宁大连人,博士研究生,主要从事激光精密制造方面的研究。E-mail: gyma@mail.dlut.edu.cn



郭玉泉(1981—),男,黑龙江密山人,博士研究生,主要从事激光精密制造工艺及数值模拟方面的研究。E-mail: guoyuquan2009@163.com



杨义彬(1987—),男,河南商丘人,硕士研究生,主要从事激光精密制造方面的研究。E-mail: yangyibin06@163.com



郭东明(1959—),男,辽宁大连人,博士,教授,中国工程院院士,1982 于大连工学院机械制造专业获工学学士学位,1992 年于大连理工大学机械制造专业获工学博士学位,目前主要从事精密与特种加工等方面的研究。E-mail: guodm@dlut.edu.cn

● 下期预告

## 小型可见光双视场光学系统研制

魏 群,艾兴乔,贾宏光

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

通过光学设计基本理论,设计了一种体积小,跟踪范围可以达到整个前半球的可见光双视场光学系统。光学系统由 3 部分组成:前部集束系统,中间光路转折系统及后部成像系统。前部集束系统采用望远镜式结构,主要用于改变光束的口径;中间的光路转折系统采用库德光路,由 4 片反射镜组成,用于转折光路及扫描;后部成像系统由长焦成像系统和短焦成像系统组成,分别形成两个视场的像,用于识别与跟踪。光学系统焦距分别为 60 mm 和 120 mm,设计传递函数在 58 lp 处均大于 0.5。在加工装调后,通过成像试验验证,光学系统完成了前半球的可视范围,在可视范围内成像质量满足系统总体要求。