

激光填丝多层焊温度场和应力场的数值模拟

李俐群¹ 张亮¹ 戴景明²

(¹哈尔滨工业大学现代先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)
²哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 基于有限元计算软件 MARC, 对 16 mm 厚低合金高强度钢激光填丝多层焊温度场和应力场进行了三维数值模拟。利用生死单元法, 采用热流密度线性衰减高斯圆柱热源模拟匙孔效应, 双椭球模型模拟焊丝受热过程。计算结果与实际结果对比, 两者基本吻合。计算结果表明, 层间保温能够有效降低接头冷却速度, 减小激光填丝焊残余应力, 改善厚板多层焊接头性能; 多层焊应力集中主要位于中下部焊道及其热影响区; 焊接中坡口有收缩趋势, 焊后工件有一定角变形。

关键词 激光技术; 激光焊接; 温度场; 数值模拟; 应力场; 热源模型

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.1003002

Numerical Simulation of Temperature and Stress Fields in Wire Filling Laser Multilayer Welding

Li Liqun¹ Zhang Liang¹ Dai Jingming²

(¹ State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China
² School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract A three-dimensional model is developed for numerical analysis of the temperature and stress fields in wire filling laser multilayer welding on high strength steel of 16 mm in thickness by the MARC software. During the calculation, with the technique of element birth and death, the Gaussian cylindrical heat source of heat flux linear attenuation and the double ellipsoid heat source are used to simulate the keyhole effect and the filler wire heating process, respectively. Predicted results are in good accordance with the experimental data. The results show that interlayer heat insulation can effectively reduce the cooling rate of the welded joint and decrease the residual stress, which improves the properties of welded joint. The stress concentration is mainly located in the lower part of the weld; the groove tends to shrink in welding and the work piece exhibits a certain angular distortion after welding.

Key words laser technique; laser welding; temperature field; numerical simulation; stress field; heat source model

OCIS codes 140.3390; 120.6780; 120.6810; 160.3900

1 引言

激光焊接具有功率密度高、热输入小、热影响区 (HAZ) 窄、焊接变形小、焊接速度快和易于实现自动化等优点。利用中等功率激光实现中厚钢板单道多层焊可以达到减小变形、降低成本的效果。但是由于激光焊接冷却速度很快, 易产生焊缝凝固裂纹、热影响区裂纹和软化等问题, 而多层焊过程中的多次热循环必然会使焊缝组织变得极为复杂, 由此形

成的焊接残余应力将难以预测^[1,2]。因此, 开展厚板激光焊接过程的温度场与应力应变场模拟是一项非常有意义的工作。建立合适的热源模型是进行激光焊接模拟的关键, Swift-Hook 等^[3]最早提出激光焊接的线热源模型, 并对激光焊接过程进行了解析求解。之后在激光焊接模拟中, 根据匙孔及熔池形状, 出现了点-线状、指数衰减柱状、锥状、旋转高斯状、面-柱状等热源形式^[4,5]。在现有的多层焊模拟

收稿日期: 2011-05-10; 收到修改稿日期: 2011-06-13

作者简介: 李俐群(1970—), 女, 博士生导师, 副教授, 主要从事激光加工方面的研究。E-mail: liliquan@hit.edu.cn

研究中,一般不考虑熔滴过渡过程,而是将焊丝预置于焊缝中,采用生死单元法,随热源移动逐步激活。中厚板的应力场计算是一个非常耗费时间的过程,多采用单向热-力耦合方式,而单一热源时,可采用集中分段热源节省计算时间,但采用较大分段长度时必将降低计算精度^[6]。因本文所研究的激光热源的特殊性,不宜采用分段热源,而是用三维过渡网格以减少计算时间。

目前针对激光填丝多层焊的温度场及应力应变场的模拟研究较少。本文基于大型有限元软件MARC模拟中厚板激光填丝多层焊三维瞬态热-力过程,分析不同工艺条件(冷丝、层间保温等)下熔池及热影响区温度分布和热循环特征,以及激光填丝多层焊应力应变分布特征,为高强钢厚板激光焊接的工艺优化提供指导。

2 有限元模型

2.1 几何模型

三维几何模型及网格划分如图1所示,两板厚16 mm,采用2 mm间距垂直坡口,坡口底部预留1 mm钝边,所有单元均为八节点六面体单元,为减少计算时间,采用三维网格过渡,焊缝及热影响区网格尺寸为0.5 mm,远离焊缝区域增大到2 mm。实际焊接中填丝6层,模拟中不考虑焊丝熔滴过渡过程,采用生死单元法随热源移动逐步激活。模型关于焊缝中心面对称,因此取一半模型进行计算以节省计算时间。

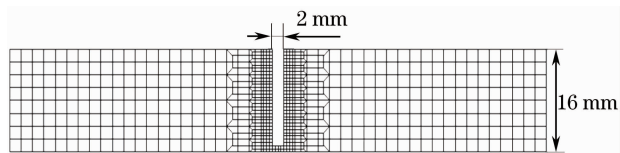


图1 几何模型

Fig.1 Geometric model

2.2 热源模型

与传统电弧焊相比,激光焊热源模型还要考虑等离子体与匙孔效应的作用。因为填丝焊熔池尺寸相对较大,激光填丝焊热源模型又与普通激光深熔焊有所不同。在试验中采用间距0.6 mm,有效热源直径0.8 mm,能量比为1:1的并行激光双光束进行焊接。因为双光束距离极近,所以在焊接过程中仅形成一个较大匙孔,光束在匙孔内部发生反射,近似为一个体积热源。将激光能量分成两部分:熔化焊丝的能量 Q_1 和形成匙孔的能量 Q_2 。计算中焊丝采用生死单元法逐步激活,这样熔化焊丝的能量 Q_1

需以体热源的形式作用在焊缝中,这是与不填丝激光深熔焊热源的主要差别。针对激光填丝焊热能分布特征,提出双椭球热源+热流密度线性衰减高斯圆柱热源的复合热源形式,如图2所示。

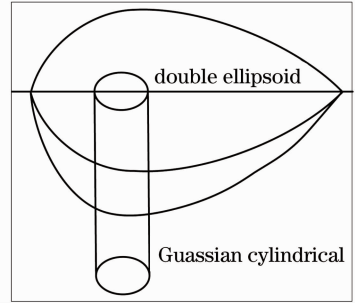


图2 复合热源示意图

Fig.2 Schematic diagram of composite heat source

激光能量分配可表示为

$$Q = \eta(1 - k)P = Q_1 + Q_2, \quad (1)$$

式中 η 为激光效率, k 为材料对激光束的反射率, P 为入射激光功率, Q_1 为双椭球热源能量, Q_2 为高斯圆柱热源能量。

双椭球热源用来模拟熔化焊丝的能量,热流密度公式为

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_l Q_1}{ab_f c \pi \sqrt{\pi}} \times \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2} - \frac{3y^2}{b_f^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), \quad (2)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q_1}{ab_r c \pi \sqrt{\pi}} \times \exp\left(-\frac{3x^2}{a^2} - \frac{3y^2}{b_r^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), \quad (3)$$

式中 q_f 为前半椭球热流密度, q_r 为后半椭球热流密度, a 为双椭球半宽, b_f 为双椭球前长, b_r 为双椭球后长, c 为双椭球深度。

热流密度线性衰减高斯圆柱热源用来模拟形成匙孔的能量。热流密度公式为

$$q_v(r, h) = \frac{6Q_2}{2\pi r_0^2 H + m\pi r_0 H^2} \times \exp\left(-\frac{3r^2}{r_0^2}\right) \left(\frac{mh + r_0}{r_0}\right), \quad (4)$$

式中 h 为圆柱热源内计算节点所处深度, r 为圆柱内计算节点与轴心间的距离, r_0 为圆柱热源作用半径, H 为体热源作用深度, m 为线性衰减系数。

2.3 材料特性及边界条件

试验所用低合金高强钢泊松比为0.33,密度为7800 kg/m³,熔点为1400 ℃,假设填充材料与母材具有相同性能,满足各向同性,其他热物理和机械性

能参数随温度变化的情况参见文献[7]。模型对称面设为绝热,其余表面考虑辐射和热交换的共同影响,采用一种复合的热导系数公式,参见文献[8]。焊接和冷却过程中在工件外缘施加刚性约束,冷却至室温后采用自由约束模拟夹具卸载过程。采用试验中得到的良好成形的工艺参数,激光功率为2500 W,焊接速度为0.36 m/min。环境温度设为20 ℃,层间停留时间与每层焊接时间相等,焊接结束后冷却时间为5000 s。另外,还对辅助层间保温工艺的情况进行模拟,焊接时层间保温150 ℃,焊接结束冷却时环境温度回归20 ℃。

3 温度场计算结果及分析

3.1 温度场分布特征

图3为第6层某时刻熔池中心横截面温度云图与实验宏观截面的对比。虚线为第6层加热时的熔池界面,可以看出本文建立的复合热源计算的熔池形态与实际基本一致。

层间保温对温度分布的影响如图4所示。由于

每层焊接参数一致,熔池截面基本一致,选取第4层进行比较,黑框内表示待填充焊道。两种情况下熔池横截面均呈宽度由上至下骤减的“心”形,在焊接中容易引起层间束腰。无层间保温时熔池最宽处2.8 mm,伸入上一层1.1 mm;层间保温150 ℃时熔池最大宽度增加了0.2 mm,深度增加0.1 mm,截面面积略有增加,可见从改善侧壁层间熔合性来看,层间保温作用并不明显。

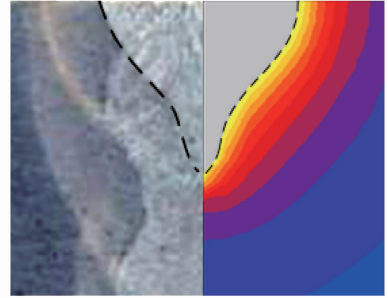


图3 熔池截面与实验对比

Fig. 3 Comparison of pool cross-section between experiment and simulation

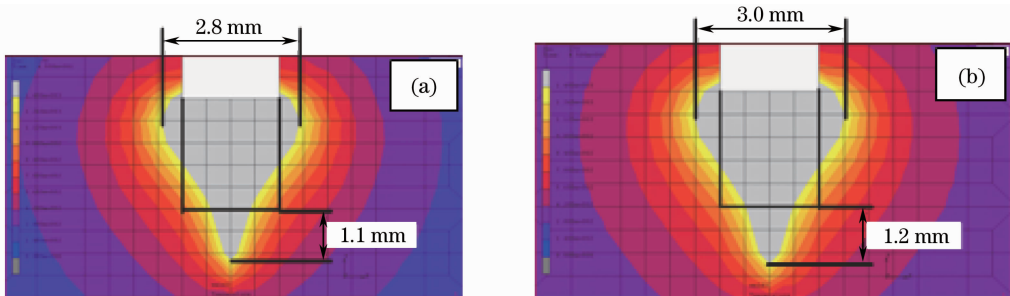


图4 温度场云图。(a)无层间保温;(b)层间保温150 ℃

Fig. 4 Temperature field cloud chart. (a) No interbedded heat preservation; (b) interbedded heat preservation at 150 ℃

3.2 焊接热循环特征

在焊缝和热影响区不同位置分别选取4个特征点,提取温度-时间曲线,如图5所示。4点均位于与第5层上表面平行的直线上,为使曲线更清晰,省略了前4层焊接时距离热源较远的时刻。点1经历了两次熔化过程,处于重熔区;点2经历了一次熔化和一次1000 ℃以上的过热;点3经历了两次1000 ℃以上的过热;点4最高的两次波峰在800 ℃左右,处于热影响区边缘。可以看出,激光填丝多层焊焊缝和热影响区热循环差异极大,导致其组织呈现明显的区域化和复杂化^[9]。

相同工艺参数下辅助层间保温150 ℃情况的计算结果中,提取图5所示分别位于焊缝和热影响区的1、3两点的热循环数据,与无层间保温情况进行对比。如表1和表2所示,以第5层和第6层加热

的波峰温度和其后的从800 ℃到500 ℃冷却速度为比较内容。显然,层间保温时工件峰值温度只是稍有提高,但冷却速度降低了40%以上,可以有效改善焊缝组织,缓和残余应力的作用。对比两表还可

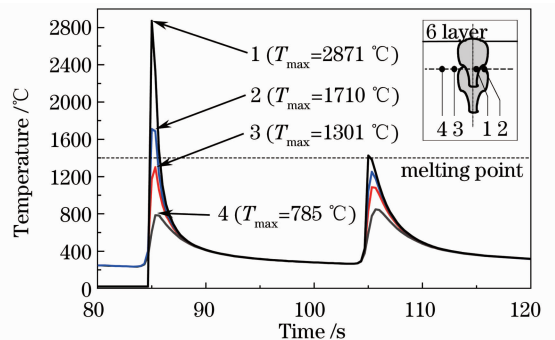


图5 不同位置热循环曲线

Fig. 5 Thermal cycle curves at different locations

以看出,相同条件下第 6 层的冷却速度比第 5 层也有明显的降低。

表 1 第 5 层加热热循环特征对比

Table 1 Comparison of thermal cycling characteristics of the fifth pass heating

	No interbedded heat preservation		150 °C interbedded heat preservation	
	$T_{max}/^{\circ}\text{C}$	$v/(^{\circ}\text{C}/\text{s})$	$T_{max}/^{\circ}\text{C}$	$v/(^{\circ}\text{C}/\text{s})$
Weld	2871	147	2951	75
HAZ	1301	132	1381	76

表 2 第 6 层加热热循环特征对比

Table 2 Comparison of thermal cycling characteristics of the sixth pass heating

	No interbedded heat preservation		150 °C interbedded heat preservation	
	$T_{max}/^{\circ}\text{C}$	$v/(^{\circ}\text{C}/\text{s})$	$T_{max}/^{\circ}\text{C}$	$v/(^{\circ}\text{C}/\text{s})$
Weld	1425	115	1501	60
HAZ	1087	98	1166	49

4 应力应变场计算结果及分析

应力应变场计算服从米赛斯屈服条件,可以表述为在一定的变形条件下,当受力物体内一点的等效应力达到屈服极限时,该点就开始进入塑性状态。等效应力的计算式为

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (5)$$

式中 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为三向主应力。

4.1 模型验证

采用盲孔法对试件表面进行了应变的测量,测量点位于工件上表面中间区域。由于盲孔法对表面粗糙度的要求,从距离焊缝 5 mm 处开始测量。根据应变计算出表面主应力,再由(5)式计算出等效应力,与模拟得到的结果进行比较,如图 6 所示,模拟值与盲孔法测量值趋势基本一致。

4.2 残余应力分布

图 7 为等效残余应力分布云图,焊缝中下部焊道及其热影响区有较大残余应力,最大值位于第一层焊道上部,达 800 MPa,接近材料的屈服强度 850 MPa。前一层焊道未冷却至室温即开始下一层焊接,起到了预热的作用,所以焊缝中上部应力小于下部。

图 8 所示为层间保温对焊缝应力分布情况的影响,两条路径分别位于工件表面和内部垂直于焊缝方向。显然,层间保温 150 °C 作用下的应力值低于

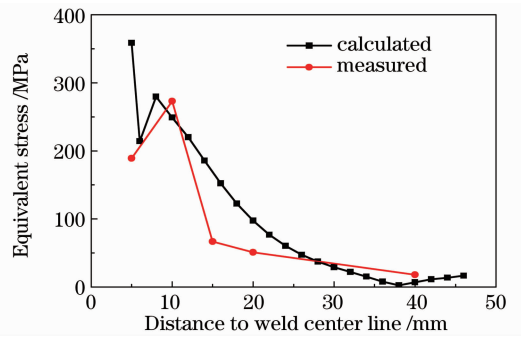


图 6 工件表面应力测量值与模拟值的对比
Fig. 6 Comparison of surface stress between measurement and simulation

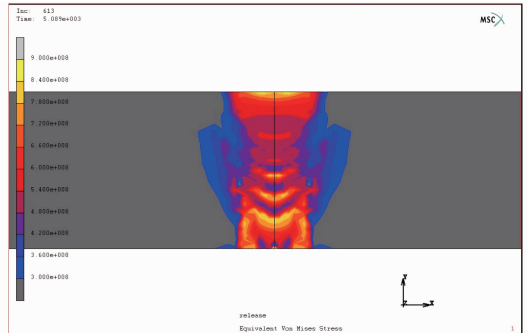


图 7 焊缝横截面残余应力分布云图
Fig. 7 Residual stress distribution contours of weld transverse

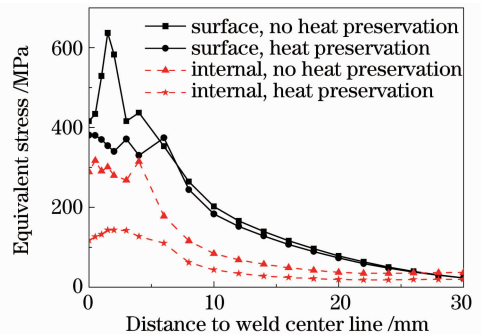


图 8 层间保温对残余应力的影响
Fig. 8 Influence of the interbedded heat preservation on residual stress

无层间保温时,在工件内部尤为明显。

4.3 焊接过程应力变化情况

分别选取位于工件内部第 3 层表面热影响区和焊缝中心的两点,提取等效应力-时间曲线,如图 9 所示。焊接过程中应力经历了多次波动,最终在冷却到室温时达到最大。从第 3 个波峰开始分析焊接过程的应力变化,曲线下沿为焊接过程,上升沿为冷却过程,可以看出,同样的冷却时间应力峰值逐渐降低,其原因如 3.2 节所述,后焊道对本层焊道再热后的冷却速度低于本层焊接时的冷却速度。

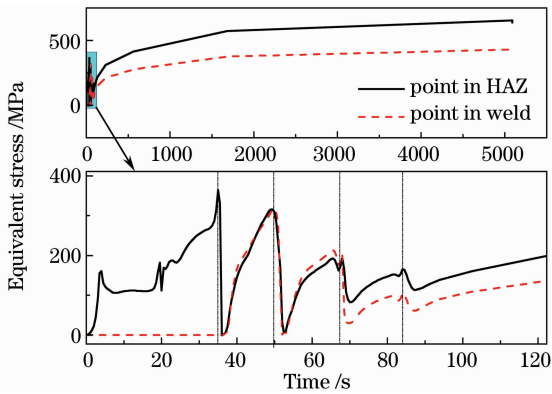


图9 工件内部应力变化

Fig. 9 Stress changes inside the work piece

4.4 焊接变形

图10为坡口间隙随时间的变化曲线。无层间保温时坡口间隙从焊接开始前的2 mm变为第6层开始时的1.74 mm,收缩率达13%;层间保温150℃时坡口收缩率为11.5%,略有降低。还可以看出,曲线斜率随时间有所减小,这是因为前面焊道的填充增大了焊缝继续收缩的阻力。图11为无层间保温情况下工件最终变形放大3倍的情况,工件外缘卸载刚度约束后有1°左右的角变形,在焊接生产中应引起注意。

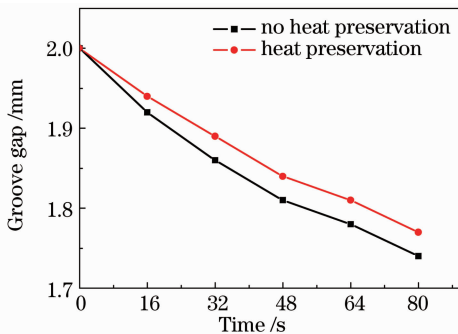


图10 坡口间隙变化曲线

Fig. 10 Curve of groove gap changing

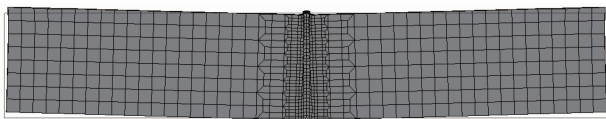


图11 工件变形情况(3×)

Fig. 11 Deformation of the work piece (3×)

5 结论

建立了双光束激光填丝多层焊热-力耦合有限元模型,温度场和应力场计算结果与实验结果基本相符。并行双束激光填丝焊形成“心”形熔池截面,容易引起层间束腰;层间保温工艺对熔池尺寸影响不大,但是能有效降低接头冷却速度,下降幅度达40%以上。多层焊应力集中主要位于接头中下部焊道及其热影响区,最大应力位于第一层焊道上部,接近材料的屈服强度;层间保温能有效降低激光填丝焊残余应力。焊接中坡口有收缩趋势,焊接后工件有一定的角变形,在焊接生产中应引起注意。

参考文献

- Z. Cao, P. Dong, F. Brust. A fast thermal solution procedure for analyzing 3D multi-pass welded structure[J]. *Weld. Res. Counc. Bull.*, 2000, **455**: 12~21
- Li Liqun, Tao Wang, Zhu Xianliang. Wire filling laser multilayer welding of high strength steel thick plate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1251~1255
李俐群,陶汪,朱先亮. 厚板高强度激光填丝多层焊工艺[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1251~1255
- D. T. Swif-Hook, A. E. F. Gick. Penetration welding with lasers-analytical study indicates that present laser beam welding capabilities may be extended tenfold[J]. *Welding Journal*, 1973, **52**(11): 492~499
- N. Sonti, M. F. Amateau. Finite-element modeling of heat flow in deep-penetration laser welds in aluminum alloys[J]. *Numerical Heat Transfer, Part A*, 1989, **16**(3): 351~370
- Xiong Zhijun, Zhao Xihua, Li Yongqiang et al.. Research states and development of heat source model on laser deep penetration welding[J]. *Welding*, 2006, (12): 12~16
熊智军,赵熹华,李永强等. 激光深熔焊热源模型的研究进展[J]. *焊接*, 2006, (12): 12~16
- Deng Dean, S. Kiyoshima. Numerical simulation of welding residual stresses in a multi-pass butt-welded joint of austenitic stainless steel using variable length heat source [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2009, **46**(2): 195~200
邓德安,青岛祥一. 用可变长度热源模拟奥氏体不锈钢多层对接接头的焊接残余应力[J]. *金属学报*, 2009, **46**(2): 195~200
- J. F. Hu, J. G. Yang, H. Y. Fang et al.. Numerical simulation on temperature and stress fields of welding with weaving[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2006, **11**(3): 358~365
- M. Abid, M. Siddique. Numerical simulation to study the effect of tack welds and root gap on welding deformations and residual stresses of a pipe-flange joint [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2005, **82**(11): 860~871
- Yin Jie, Li Liqun, Tao Wang et al.. Weld microstructure characteristics of dual laser beam multi-layer welded high strength steel with filler wire [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1361~1367
尹杰,李俐群,陶汪等. 高强度双光束填丝多层焊的焊缝组织特征[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1361~1367