

深冲钢激光拼焊板焊缝形状与晶粒尺寸预测模型*

李新城¹ 冯晓天¹ 朱伟兴² 陈 炜¹ 李大东³

(1. 江苏大学机械工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013;
3. 攀枝花钢铁(集团)公司, 攀枝花 617000)

【摘要】 针对 St12、St16 深冲钢激光拼焊板的焊接温度场分布对焊缝形状影响较大的问题,在分析试验钢板温度相关性、熔化潜热、对流及辐射对激光焊接温度场影响规律的基础上,建立了焊缝形状预测模型。在模型节点选取时提出了首尾节点控制法,使焊接温度场模拟时的节点选取具有更高精度,所得预测焊缝形状与实际焊缝形状吻合度高。提出了一种基于偏最小二乘回归(PLS)的焊缝及其热影响区晶粒尺寸预测模型。焊缝及其热影响区晶粒尺寸的预测精度均达 95%,充分表明该模型与工艺试验结果吻合良好,验证了该预测模型的合理性及适用性。

关键词: 激光拼焊板 焊缝形状预测 晶粒尺寸预测 首尾控制法 偏最小二乘回归
中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)06-0222-05

Weld Shapes Prediction and Grain Size Prediction of Deep-drawing Laser Tailor-welded Blank

Li Xincheng¹ Feng Xiaotian¹ Zhu Weixing² Chen Wei¹ Li Dadong³

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
2. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
3. Panzhihua Iron & Steel Group, Panzhihua 617000, China)

Abstract

The weld shapes of St12 and St16 deep-drawing steels were influenced by transient temperature distributions. Based on the influence of temperature dependence, latent heat of fusion, convection and radiation, the weld shapes prediction model was built. Additionally, the first and last nodes control method was used in heat loading in order to make sure all nodes could be selected. Experimental results showed that there were no significant differences between the predictive and actual weld shapes. Furthermore, multiple regression prediction models of grain size in weld and heat affected zone (HAZ) were put forward based on PLS. The prediction accuracy of grain size in weld and HAZ was above 95%. Therefore, the proposed models are reasonable and applicable to examine deep-drawing steel for demonstrative purposes.

Key words Laser tailor-welded blank, Weld shapes prediction, Grain size prediction, First and last nodes control method, PLS

引言

长期以来,各种板材的激光焊接工艺优化及其组织控制主要通过实物试验来确定,势必耗费大量人力、物力和时间。若能利用计算模拟技术和预测

技术,则可及时调整和优化工艺,继而实现对板材焊缝及其热影响区的晶粒尺寸控制。然而,此类研究目前大多局限于对温度场的模拟,而关于焊缝及其热影响区晶粒尺寸预测的研究成果则鲜见报道^[1-3]。

收稿日期: 2009-04-09 修回日期: 2009-07-01
* 国家自然科学基金资助项目(50775102)和江苏大学模具创新团队资助项目
作者简介: 李新城,教授,主要从事钢铁材料组织细化技术与组织性能预测及控制研究, E-mail: lixincheng@ujs.edu.cn

为此,建立深冲钢激光拼焊板 (laser tailor-welded blank, 简称 LTWB) 焊缝形状预测模型,并提出基于偏最小二乘回归 (partial least-squares regression, 简称 PLS) 的焊缝及其热影响区晶粒尺寸预测模型,以实现焊缝形状、焊缝及其热影响区晶粒尺寸的预测。

1 三维瞬态温度场模块的建立

1.1 建模及划分网格

焊接设备为 PRC - Laser 2.5 kW 快速轴流 CO₂ 激光拼焊设备(0 模输出),采用单面焊双面成形,焊接工艺参数为: $P = 1\,525\text{ W}$, 吸收率为 0.7, 气体压力为 0.2 MPa, 焊接速度为 2 m/min, $\Delta F = 0$, 光斑直径为 1 mm, 焊接用透镜的焦距为 127 mm, 所有焊缝均垂直于板材轧制方向。金相制样时,将热模拟变形后的试样从 1/3 直径处沿压缩轴方向剖开,用 2% ~ 4% 硝酸酒精溶液侵蚀,由 Leica 光学显微镜、SISCAC V6.0 图像分析仪进行组织观察与测试。

试验材料为 St12、St16 深冲钢激光拼焊板,厚度为 1.2 mm, 试件尺寸为: 500 mm × 270 mm。建立三维有限元模型,选择三维热分析单元 SOLID70。为方便建模,提高计算效率,减少不必要的计算量,截取原试件中关键区域(焊缝附近一小块)建立有限元模型,模型的取样尺寸为 25 mm × 5 mm × 1.2 mm。

考虑到焊缝形状的异样性和所建系统的适用性,为避免形成较大系统误差,本文对远离焊缝区域用粗略网格划分,焊缝及其热影响区用细化网格划分,其尺寸小于光斑直径,为 0.1 mm × 0.1 mm × 0.2 mm(以免出现温度负值)。鉴于焊缝形状具有平面对称性,建模时只需建立单侧模型,如图 1 所示。

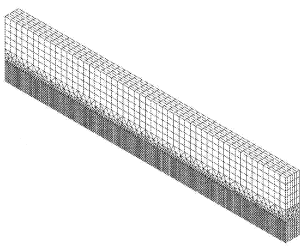


图 1 有限元模型

Fig.1 Finite element model

1.2 焊接热源

对于薄板激光焊接,由于采用的输出功率较低,故认为是传导焊,采用高斯热源模型,表示为

$$q = \frac{3P}{\pi R^2} \exp\left(-3 \frac{x^2 + y^2}{R^2}\right) \quad (1)$$

式中 q ——热流率 P ——激光功率

R ——激光光斑半径

$x^2 + y^2$ ——光斑内点到光斑中心距离的平方
($x^2 + y^2 \leq R^2$)

光源的移动方式由 APDL 编程实现,通过 DO-LOOP 循环,将热源加载设置成 100 个载荷步来完

成。需要注意的是在下一个载荷加载时必须将前一个载荷去除,通过这种重贴加载方法实现的移动热源加载基本上满足了实际的移动热源特性。

1.3 边界条件

边界条件是指试件在焊接过程中与周围环境的对流换热和辐射换热。

对流换热用牛顿冷却方程计算

$$q'' = h(T_s - T_n) \quad (2)$$

式中 h ——对流换热系数

T_s ——固体表面的温度

T_n ——周围流体的温度

辐射换热用斯蒂芬-波尔兹曼方程计算

$$q = \varepsilon \sigma A_1 T_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

式中 ε ——辐射率(黑度)

σ ——斯蒂芬波尔兹曼常数,约为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

A_1 ——辐射面 1 的面积

T_{12} ——由辐射面 1 到辐射面 2 的形状系数

T_1 ——辐射面 1 的绝对温度

T_2 ——辐射面 2 的绝对温度

1.4 相变潜热

鉴于焊缝区焊接时液化吸热,一次结晶时放热,故计算温度场时也要考虑相变潜热的影响,定义不同温度下的热焓为

$$\Delta H(T) = \int_0^T \rho c(\tau) d\tau \quad (4)$$

式中 H ——热焓 ρ ——材料密度

T ——绝对温度

$c(\tau)$ ——材料的比热容

$c(\tau)$ 是温度的分段线性函数,在相变区变化较大,将其考虑为等效比热容来处理相变潜热。

1.5 热物理性能参数

金属的热物理参数(比热容、导热系数)均为温度敏感参数,其常用温度范围内的热物理参数由文献[4]确定,而高温条件下的热物理参数则需通过插值法与外推法进行计算。

在建立三维瞬态温度场模块时,所有输入参数、输出参数均以矩阵形式表示。

1.6 热源加载及其求解的首尾控制方法

鉴于热源加载时,网格划分后各节点之间仍有一定间距,为了保证热源加载对所有节点的均匀性(包含首尾节点),提出了一种热源加载及其求解的首尾节点控制方法。该方法是将首节点坐标减去一个预留量(1×10^{-6}),尾节点坐标加上一个同值预留量,由此就可保证首节点和尾节点的精确选定,继而保证所建模型对节点选取的完整性。

2 焊缝形状的预测模型

2.1 焊接温度场与厚度方向上的温度分布

应用有限元模型中的三维热分析单元 SOLID70 对 St12 试验钢的焊接温度场进行工艺模拟,其结果如图 2 所示(St16 焊件厚度方向上的温度分布与 St12 焊件一致)。图 2 中,热源前面的温度场分布梯度比较大,后面的温度场分布比较缓和。这是因为热源前面还处于未加热状态,温度比较低,而后面部分已被加热,相比之下温度较高,温度梯度较小。

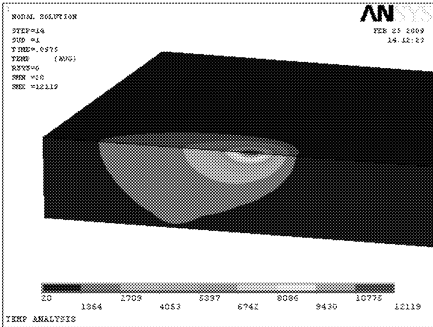


图 2 St12 深冲钢激光焊接温度场模拟模型
Fig.2 Temperature distribution model of LTWB in St12 type

由于温度场的连续分布模型可用更加直观的焊件厚度截面上各个层面的节点温度模型加以描述,为此,应用三维热分析单元 SOLID70 对 St12 焊件各个层面的节点温度进行了工艺模拟,其节点温度模型如图 3 所示。由图 3 可见,除 1.2 mm 层(表层)的温度分布梯度与其他各层有较大差别外,焊件厚度方向上的其他各层温度分布曲线基本一致,0(底层)、0.2 与 0.4 mm 层的温度分布曲线尤为接近(几乎重合)。分析认为,这是因为焊缝表层处金属被加热气化,使得焊缝表层处于被金属蒸气覆盖的状态,这些金属蒸气阻碍了表面热量的散发,起到了保温的作用,从而导致焊缝表层温度因热量积聚而比其他层面高出很多。另外,距离焊件表层越远则温

度越低,这是因为焊接时热量在由表层向底层传递的同时向介质散热。在远离焊缝的平面区域,各个层面的温差减小,最后趋于一致。

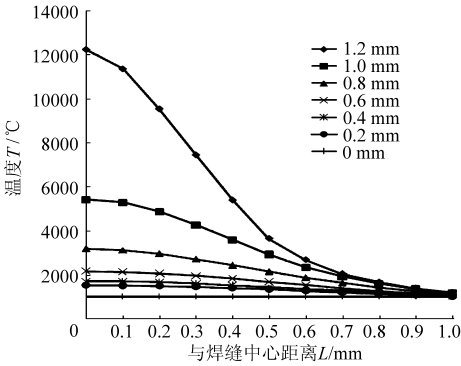


图 3 St12 焊件厚度方向上的温度分布
Fig.3 Temperature distribution in weld thickness direction of LTWB in St12 type

2.2 模型预测结果与分析

通过对 20 个试验焊件厚度方向上 7 个等距层面的温度进行选取分析可知一定数量节点上的温度。在此基础上,根据试验钢的熔点利用插值法计算得出了焊件各层面的焊缝宽度(如表 1 所示),继而得到焊缝的模拟形状。在本文试验条件下,焊接功率、速度及光斑直径分别为 1 525 ~ 1 850 W、1.6 ~ 2.0 m/min 及 0.3 ~ 1.0 mm。各焊接参数对温度场、焊缝总的影响规律为:焊接功率越大,速度越慢,光斑直径越大,则温度场温度越高,焊缝宽度越大。通过不同焊接参数正交试验的焊缝宽度预测值与实际值的对比,得出其相对误差范围为 3.55% ~ 7.78%,表明了所建预测模型的合理性及适用性。

由表 1 可见,St12 的焊缝宽度预测值与实际值的相对误差为 5.80% ~ 7.63%,St16 的焊缝宽度预测值与实际值的相对误差为 4.55% ~ 7.41%,由此充分说明所建模型对焊缝形状的预测结果与实际焊件焊缝形状相当吻合,对深冲钢激光焊件实际焊缝与预测焊缝的比较(图 4)进一步验证了上述结论。

表 1 St12、St16 拼焊板焊缝宽度预测值与实际值
Tab.1 Predictive and actual weld widths of LTWB in St12、St16 type

试验材料	参数	与底面距离/mm						
		0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
St12	预测值/mm	0.65	0.80	1.09	1.39	1.62	1.75	1.80
	实际值/mm	0.69	0.86	1.18	1.50	1.72	1.88	1.92
	相对误差/%	5.80	6.98	7.63	7.33	5.81	6.91	6.25
St16	预测值/mm	0.63	0.75	1.05	1.35	1.60	1.74	1.77
	实际值/mm	0.66	0.81	1.12	1.43	1.71	1.85	1.91
	相对误差/%	4.55	7.41	6.25	5.59	6.43	5.95	7.33

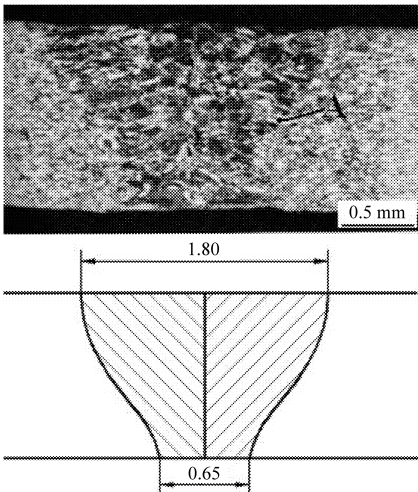


图 4 St12 激光焊的实际焊缝及其热影响区 (HAZ) 与预测焊缝

Fig. 4 Actual weld, HAZ and predictive weld of LTWB in St12 type

3 焊缝及其热影响区晶粒尺寸的预测模型

焊接后拼焊板的焊缝及其热影响区晶粒尺寸对拼焊板的成形性能极为重要,对拼焊板的晶粒尺寸必须通过焊接工艺加以控制。为了克服物理试验的弊端(大量人力、物力及时间的消耗)以及焊接工艺参数之间的多重相关性问题,在组织预测工作的基础上^[5],将偏最小二乘回归方法用于焊缝及其热影响区晶粒尺寸预测工作,建立了相应的预测模型。试验材料为 20 个 St12 焊件(11 个用于建立模型,其余 9 个用于模型检验)。

3.1 晶粒尺寸预测模型的建立

为精确预测焊缝及其热影响区晶粒尺寸,必须考虑试验钢焊接过程中的工艺参数对焊后晶粒尺寸的映射关系。鉴于激光焊接热影响区的物理空间尺寸较小,为清晰表述其不同位置的晶粒尺寸差异,特做了专门的细化处理:在焊件中间层(距底面 0.6 mm 的层面)及其他各层,以焊缝与热影响区分界面为起点(如图 4 中 A 点),50 μm 为间距测取晶粒尺寸,作为预测模型的样本数据(表 2),工艺参数:焊接功率 1 525 W,焊接速度 1.8 m/min,光斑直径 0.6 mm。由表 2 可见,与焊缝中心的距离和晶粒尺寸为显著的线性负相关。

为了简化预测模型,首先应用模式识别最优判别平面方法分析工艺参数中影响焊缝及其热影响区的主要因素及其权重,按照权重值找出了 3 个主要影响因素:焊接功率(x_1)、焊接速度(x_2)、光斑直径(x_3),为简化模型,只考虑上述 3 个输入变量与输出变量——焊缝区晶粒尺寸(y_1)、热影响区晶粒尺寸(y_2)的映射关系。然后利用 Matlab 软件对已经确

表 2 St12 拼焊板中间层热影响区晶粒尺寸
Tab. 2 HAZ grain size in intermediate layer of LTWB in St12 type

与焊缝中心距离/μm	750	800	850	900	950	1 000
晶粒尺寸/μm	52.5	37	28	23	20.5	19

定的 3 个主要影响因素进行 PLS 线性回归计算。通过交叉有效性原则,当选取主成分个数为 3 时,均方差最小。故当选取 3 个主成分时,所建预测模型对输入变量和输出变量的累计解释能力最高。最后,求解得偏最小二乘多元回归方程的系数矩阵,建立晶粒尺寸预测模型

$$y_1 = 0.0479x_1 - 39.8773x_2 + 9.3420x_3 + 45.6778 \tag{5}$$

$$y_2 = 0.0329x_1 - 30.0656x_2 + 5.0932x_3 + 30.7255 \tag{6}$$

3.2 模型预测结果与分析

由预测模型可见,无论是焊缝区或热影响区晶粒尺寸与激光功率、光斑直径均为显著的线性正相关关系,而与焊接速度为显著的线性负相关关系。将 9 组试验工艺参数代入预测模型进行焊缝区与热影响区晶粒尺寸预测,并将预测值与实物试验值进行了对比,其结果如表 3 所示。

表 3 St12 钢焊缝区、热影响区晶粒尺寸预测值与实际值
Tab. 3 Predictive and actual grain sizes in weld and HAZ of LTWB in St12 type

试验 焊件 序号	焊缝区晶粒尺寸		焊缝区 相对误 差/%	热影响区晶粒尺寸		热影响区 相对误差 /%
	预测值 /μm	实际值 /μm		预测值 /μm	实际值 /μm	
1	64.264	63	2.006	37.886	37	2.395
2	60.527	62	2.376	35.849	37	3.111
3	52.551	53	0.098	29.836	30	0.547
4	60.934	60	1.556	35.593	35	1.695
5	60.934	61	0.108	35.593	36	1.130
6	50.156	50	0.312	28.052	28	0.187
7	60.143	62	2.995	34.515	36	4.124
8	57.341	57	0.598	32.987	33	0.039
9	57.341	56	2.394	32.987	32	3.085

由表 3 可见,焊缝区及热影响区晶粒尺寸的预测值与实际值的吻合度均较高,焊缝区晶粒尺寸相对误差为 0.098%~2.995%,热影响区晶粒尺寸预测相对误差为 0.039%~4.124%。由此表明,所建预测模型具有良好工业实用价值,可以推广用于工业生产中其他激光拼焊板材的晶粒尺寸预测。

4 结 论

(1) 在对深冲钢激光拼焊板焊接温度场进行动态模拟的基础上,建立了焊缝形状预测模型。为了保证焊接温度场模拟时的节点选取具有更高精度,在节点数据选取过程中提出了一种首尾节点控制方法。运用该模型所得预测焊缝形状与实际焊缝形状吻合度高,最大相对误差为 7.63%。

(2) 利用偏最小二乘回归方法建立晶粒尺寸预测模型实现了对焊缝及其热影响区晶粒尺寸预测,所得到的焊缝及其热影响区晶粒尺寸的预测精度均达 95%,焊缝区晶粒尺寸相对误差为 0.098% ~ 2.995%,热影响区晶粒尺寸预测相对误差为 0.039% ~ 4.124%。充分表明所建模型与实际值一致性良好,验证了该预测模型的合理性及适用性。

参 考 文 献

1 Grf T, Staufer H. Laser hybrid welding drivers VW improvements[J]. Welding Journal, 2004, 83(9): 43 ~ 47.

2 Farzadi A, Serajzadeh S, Kokabi A H. Prediction of solidification behaviour of weld pool through modelling of heat transfer and fluid flow during gas tungsten arc welding of commercial pure aluminium[J]. Materials Science and Technology, 2008, 24(6): 1 427 ~ 1 432.

3 Zhang Z L, Silvanus J, Li H K, et al. Sensitivity analysis of history dependent material mechanical models for numerical simulation of welding process[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2008, 13(8): 422 ~ 429.

4 谭真,郭广文. 工程合金热物性[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.

5 Li Xincheng, Luo Guanghong, Zhu Weixing, et al. The design and application of microstructure control system applied to vehicles using sheet[C]// International Technology & Innovation Conference 2006, 2006, (CP524): 1 034 ~ 1 038.

6 陈伟,李卫国,杨继昌,等. 曲线焊缝布置对激光拼焊板成形性能的影响[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 170 ~ 173.
Chen Wei, Li Weiguo, Yang Jichang, et al. Influence of non-linear weld line arrangement on laser tailor-welded blanks forming performances[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 170 ~ 173. (in Chinese)

(上接第 207 页)

态模型较为准确,适用于第 4 节各项动态特性仿真分析。实验结果响应时间滞后、没有超调是由于实际关节样机的粘性阻尼较大;仿真曲线与实验数据阶跃响应稳态存在误差的原因是仿真采用的扭转关节 FPA 弹性模量与实际系统的弹性模量存在误差。

程建立了气动柔性扭转关节的动态模型,描述该关节的充放气动态过程和特性。

(2) 仿真分析表明 FPA 初始壁厚、平均半径和初始角度对扭转关节转角大小和动态过程影响较大,管接头出口面积对扭转关节转角和动态过程没有影响。

(3) 实验证明了所建立的气动柔性扭转关节动态模型和动态特性仿真分析的准确性。

6 结 论

(1) 基于力矩平衡原理和绝热气体能量守恒方

参 考 文 献

1 张立彬,鲍官军,杨庆华,等. 气动柔性驱动器及其在灵巧手中的应用研究综述[J]. 中国机械工程, 2008, 19(23): 2 891 ~ 2 897.
Zhang Libin, Bao Guanjun, Yang Qinghua, et al. Review on flexible pneumatic actuator and its application in dexterous hand [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(23): 2 891 ~ 2 897. (in Chinese)

2 Yang Qinghua, Zhang Libin, Bao Guanjun. Research on novel flexible pneumatic actuator FPA[C]// 2004 Proceedings of IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, Singapore, 2004: 385 ~ 389.

3 张立彬,鲍官军,杨庆华,等. 气动柔性扭转关节静态模型[J]. 机械工程学报, 2008, 44(7): 134 ~ 138.
Zhang Libin, Bao Guanjun, Yang Qinghua, et al. Static model of flexible pneumatic torsion joint[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(7): 134 ~ 138. (in Chinese)