

# AISI 304钢-铌异种金属激光焊 温度场及残余应力研究\*

施超<sup>1</sup>, 石铭霄<sup>1</sup>, 赵健<sup>2</sup>, 陈书锦<sup>1</sup>, 杨志东<sup>1</sup>

(1. 江苏科技大学材料科学与工程学院, 镇江 212003;

2. 上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620)

**[摘要]** 采用 SYSWELD 软件, 对 AISI 304 钢-铌异种金属激光焊接过程进行动态模拟, 在研究了 AISI 304 钢-铌异种金属激光焊接接头温度场的基础上, 分析了焊后薄板的残余应力分布。结果表明: 异种金属焊接温度场呈不对称分布, 铌侧高温区域比不锈钢侧要宽; 沿焊接方向上, 无论是横向残余应力还是纵向残余应力, 焊缝中部区域都存在最大残余拉应力; 而垂直于焊缝方向上, 横向残余应力和纵向残余应力在焊缝及焊缝附近区域应力梯度都比较大, 分布形态都呈“M”状, 纵向残余应力在焊缝区表现为残余拉应力, 而横向残余应力在焊缝中心处出现了压应力。

**关键词:** 铌; AISI 304 钢; 激光焊; 温度场; 残余应力

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.23/24.059



施超

硕士研究生, 研究方向为异种材料焊接, 参与国家自然科学基金“钢/铌电子束焊接接头金属间化合物生长机制及调控项目”研究。

不锈钢具有高的强度和韧性, 优良的加工性能以及良好的抗腐蚀性能等特点, 广泛用于航空、汽车、船舶制造等领域<sup>[1]</sup>。而铌具有比强度高、高温耐蚀性好、熔点高、密度低, 以及中子俘获截面低等优点, 在航空、核能、电子领域具有较大发展潜力<sup>[2]</sup>。对于航空发动机, 采用铌局部代替不锈钢, 可以减轻其重量, 提高其工作温度, 所以不锈钢与铌的连接具有广阔的发展前景<sup>[3-4]</sup>。在钢与铌焊接中, 两者熔点、导热系数等都有很大差异, 不利于二者的焊接, 一般传统的焊接方法不能保证焊接质量。激光焊接作为先进的焊接方法, 具有焊接热源能量密度高、焊接速度快、适应性强等优点, 广泛应用于异种材料的焊接<sup>[5-6]</sup>。焊接是一个快速而不均匀的热循环过程, 容易在焊接接头处产生较大的温度梯度, 从而产生应力。异种材料的焊接, 由于材料之间热物

理性能和力学性能的差异, 加大了焊接接头的残余应力和变形<sup>[7]</sup>。焊接的残余应力和变形是影响焊件质量的重要因素, 而通过试验手段只能测得局部数据, 无法从整体把握焊件热过程以及应力变化规律。因此本文建立合适的三维有限元数值分析模型, 对厚度都为 2mm 的不锈钢-铌异种金属激光对接焊进行模拟计算, 得出焊接过程瞬态温度场和热循环曲线, 分析焊接残余应力的分布规律, 通过残余应力角度评价异种材料焊接接头的质量, 对于工艺的选择和优化具有重要意义。

## 试验及方法

### 1 试验材料及设备

本试验焊接母材分别为 AISI 304 不锈钢与纯铌, 尺寸均为 50mm × 50mm × 2mm, 母材的化学成分见表 1<sup>[8-9]</sup>。

\* 基金项目: 国家自然科学基金 (51605205)。

表1 母材的化学成分(质量分数)  
Table 1 Chemical composition of base metal

母材	C	Mn	Nb	Fe	Ni	Mo	Cr	Si	N	P	S
Nb	≤ 0.01	—	余量	≤ 0.005	≤ 0.005	≤ 0.01	≤ 0.002	≤ 0.005	≤ 0.015	—	—
AISI 304	≤ 0.08	≤ 2.0	—	余量	8~11	—	18~20	≤ 1.0	—	≤ 0.045	≤ 0.03

焊接试验设备是德国 IPG 公司生产的 YLS-6000-S2-TR 光纤激光器,额定功率为 6kW,执行系统为 ABB 六轴关节型机械手。测温装置是 K 型(镍铬—镍硅型)热电偶,温度记录仪是 YOKOGAWA 横河无纸记录仪。焊后残余应力测试装置是加拿大 Proto 公司生产的 iXRD 便携式应力仪,测不锈钢侧残余应力的靶材为 Mn 靶,铌侧靶材为 Cr 靶。

## 2 试验方法

采用平板对接焊焊接方法,试验过程中,激光焊接功率为 2kW,激光束聚焦于不锈钢侧,偏束距离为 0.5mm,焊接速度为 25mm/s,试验中采用氩气作为保护气,前保护气流量为 15L/min,背保护气流量为 8L/min。

焊接过程中,为研究不同位置的温度变化以及残余应力分布规律,需要选取具有代表性区域的特征点,焊接路径和选取特征点位置分布如图 1 所示。

## 有限元模型

### 1 几何模型与网格划分

图 2 是钢—铌激光对接焊的几何模型示意图。模型成对称分布,且母材的尺寸都为 50mm × 50mm × 2mm。将创建好的几何模型进行网格划分,采用非均匀网格过渡划分方法,将焊缝及焊缝附近区域网格细分,远离焊缝区域则划分为较粗的网格。这是因为焊缝区域受激光束作用,能量梯度较大,网格划分精细有利于提高计

算精度。而远离焊缝区域,温度变化不大,为了提高计算时间,将网格粗化。图 3 为网格模型示意图。

### 2 热源模型

在温度场模拟计算中,忽略熔池内流体的流动,只考虑固态传热。三维非线性热传导方程如式(1)所示:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + \bar{Q} \quad (1)$$

式中,  $\rho$ 、 $c$ 、 $\lambda$  分别为材料的密度、比热容和导热系数;  $T$  为温度场分布函数;  $t$  为传热时间;  $\bar{Q}$  为内部热源强度。

合适的热源模型对模拟计算精度至关重要,根据激光焊接的光斑功率密度分布特点,本次试验采用 3D 高斯热源进行模拟计算<sup>[10]</sup>。3D 高斯热源作用模式是将平面高斯热源沿工件厚度方向叠加的立体作用,热流分布在每一垂直  $z$  轴截面上,沿着  $z$  向厚度方向线性衰减,很好地体现了热源在熔深方向上的变化,随着熔深的增加,能量明显减小,符合了激光焊接深宽比较大的特点。

### 3 材料属性及边界条件

焊接是一个高度非线性的过程,焊件被焊区域温度变化非常大,金属

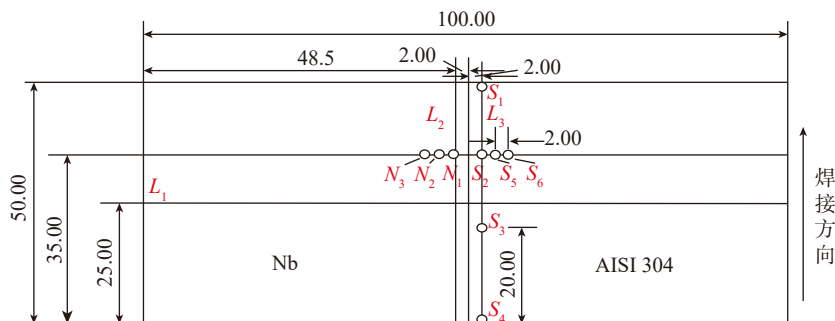


图1 焊接路径和特征点位置的布置

Fig.1 Arrangement of welding path and feature point position

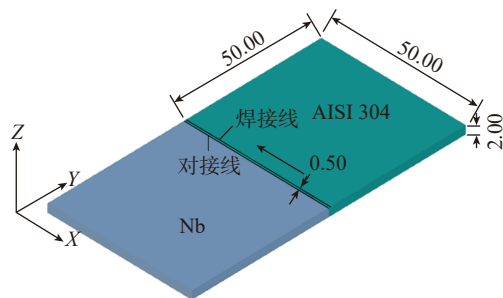
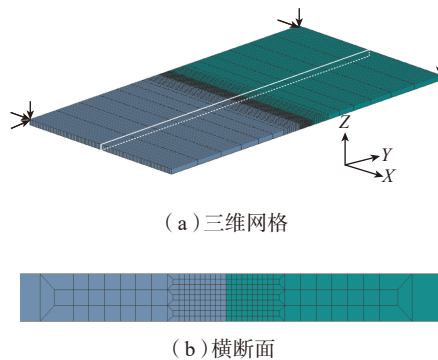


图2 几何模型

Fig.2 Geometric model



(a) 三维网格

(b) 横断面

图3 网格划分

Fig.3 Mesh generation

力学性能参数和热物性参数一般伴随着温度变化而持续不断地变化。因此在数值模拟中,必须考虑材料物理性能的变化从而减少计算误差。通过查阅相关文献<sup>[3-4]</sup>, AISI 304 不锈钢和铌的热物理性能如图 4 所示。

焊接边界条件分别为温度场的热边界条件和应力场的力学边界条件两类。其中热边界条件包含焊件的初始条件和表面换热条件。本文采用周围环境温度作为数值计算的初始条件,  $T_0=20^{\circ}\text{C}$ , 焊件表面换热问题考虑了对流换热和辐射换热。应力场计算中,需要对焊件加载约束条件,既要限制焊件在焊接过程中产生刚性移动,又不能影响应力的分布和变形。故本文采用三点约束法,约束条件如图 3 (a) 所示。

### 模拟结果与分析

#### 1 温度场

图 5 是 AISI 304 钢-铌激光焊接过程中 0.1s、1.5s、1.7s、2.5s 时刻的三维瞬态温度场分布云图。如图

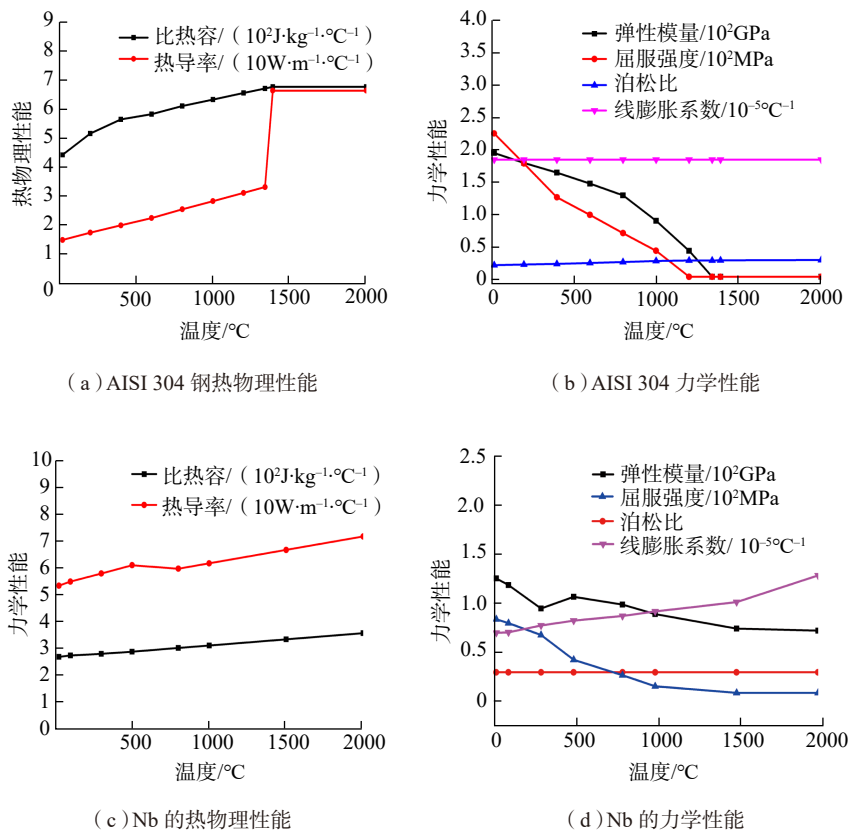


图4 母材的物理性能

Fig.4 Physical properties of base metal

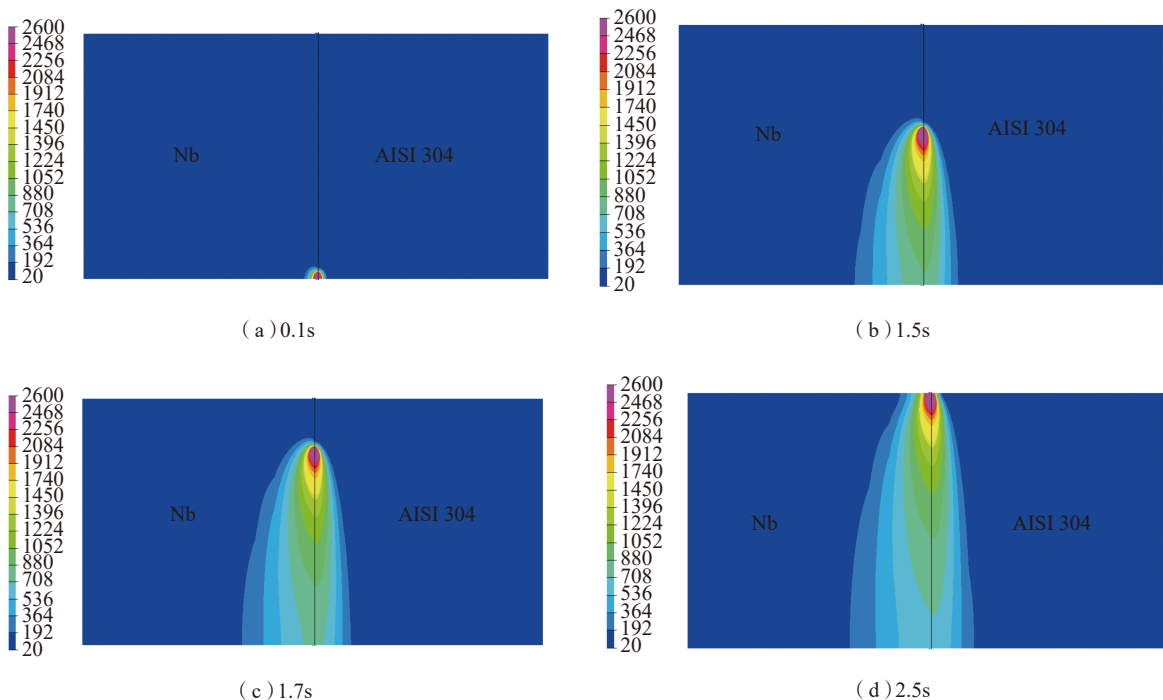


图5 不同时刻焊接接头温度场分布

Fig.5 Temperature field distribution of welded joints at different times

5(a)所示,刚开始焊接时,熔池形貌是一个很小的圆形,随着焊接时间的推移,熔池的长度与宽度逐渐增大。图5(b)、(c)显示,当 $t=1.5\sim 1.7s$ 时焊接已经处于准稳态,热源周围的节点随热源的移动而逐渐向前推移,熔池形状呈椭圆状且基本保持不变。图6是熔池达到准稳态时的等温线图,可以清楚看到熔池前方温度梯度比较大,等温线比较密集,而熔池后方等温线比较稀疏。由于不锈钢和铌是异种材料焊接,钢和铌的热导率不同,所以熔池的温度分布关于焊缝不对称。铌的导热率高于不锈钢,传热较快,故焊缝铌侧高温区域比不锈钢侧要宽。

图7是AISI 304钢-铌异种材料激光焊接接头在准稳态时横截面

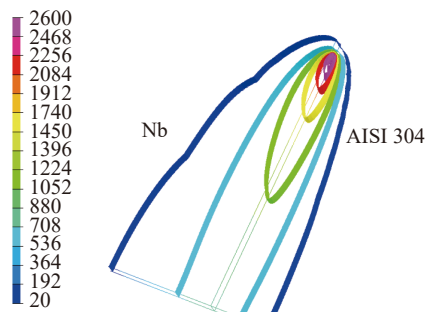


图6 准稳态下熔池的等温线

Fig.6 Isothermal line of molten pool in quasi-steady state

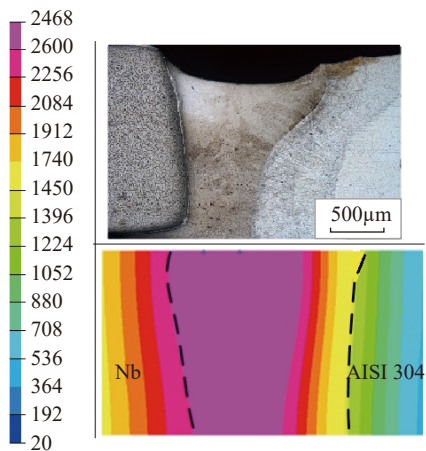


图7 熔池实际形貌与模拟值比较

Fig.7 Comparison of actual morphology and simulation value of melting pool

宏观熔池形貌实际值与模拟值比较。考虑实际焊接时熔池自由变形等引起的误差,模拟结果与实际结果基本吻合,从而验证了计算的准确性。

为了便于分析与比较,在焊件上表面分别取特征点,特征点位置分布如图1所示。图8是所取特征点 $S_1\sim S_4$ 的焊接热循环曲线。由图8可知,初始温度较低,接近于室温,随着热源沿焊缝方向移动,热源作用区域的节点温度急剧上升达到了最高值,而随着热源的离开,节点温度缓慢下降。 $S_1$ 点是起焊区域处取的特征点,焊接过程还未达到稳定态, $S_1$ 曲线的峰值较小,点 $S_2$ 和点 $S_3$ 所取区域处于焊接稳定状态,两点热循环曲线峰值和变化趋势都一样。而在焊接结束时,由于焊件末端没有新的材料去导热,导致热量瞬时集中,造成焊接末端区域最高温度大于准稳态时的最高值,表现为点 $S_4$ 的热循环曲线峰值最高。

图9是所取特征点 $S_2、S_5、S_6、N_1、N_2、N_3$ 的焊接热循环曲线。比较不锈钢侧点 $S_2、S_5、S_6$ 可以得出,三点热循环曲线变化规律是一致的,但是距离焊缝中心线越近,温度上升越快,峰值越高;远离焊缝中心线则相反,距离越远温度上升越慢,峰值越低。这是因为,在未加载热源时,各节点都处于室温,当激光束照射到焊缝中心处,焊缝处急剧升温,通过热

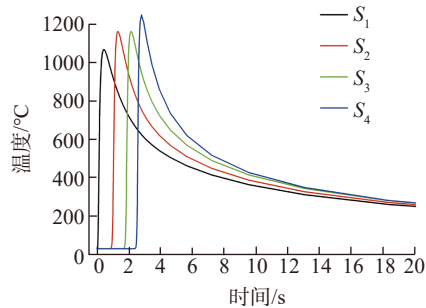


图8 沿焊缝方向上特征点的热循环曲线

Fig.8 Thermal cycle curve of feature points along weld direction

传导方式间接对远离焊缝处加热,但是在焊接过程中,存在周围环境对流散热造成的热量损失,于是离焊缝越远,热量损失越多,峰值越低。比较铌侧点 $N_1、N_2、N_3$ 的热循环曲线,得出相同结论。

比较 $S_2$ 与 $N_1$ ,两点分布于焊接线两侧且至焊接线距离一致。在同一时刻里,两点温度值不一样,特征点 $N_1$ 的热循环曲线峰值高于点 $S_2$ 曲线的峰值。这是因为,两侧材料不一样,即两边导热性能也不一样,铌的导热性要高于不锈钢。所以在相同时间相同距离下,铌测传热快,温度较不锈钢侧高。此时,由于对流散热造成的热量损失差异对传热性不同造成的温度差异影响较小,可忽略不计。分别比较点 $S_5$ 与点 $N_2$ 、点 $S_6$ 与点 $N_3$ 两组热循环曲线数据,得出相同的结论。图9给出了特征点 $N_3$ 和 $S_6$ 试验结果与模拟结果的比较,同样吻合性较好,进一步验证了温度场计算结果的正确性。

## 2 残余应力

通常称焊件完全冷却至室温后仍残留的应力为残余应力,平行于焊缝方向的称为纵向残余应力,垂直于焊缝方向上的称为横向残余应力。图10、11是AISI 304钢-铌异种接头在焊后冷却至室温后的纵向残余应力分布云图和曲线图。由图10知,铌和不锈钢在力学性能上的差异,造成了残余应力的分布关于焊

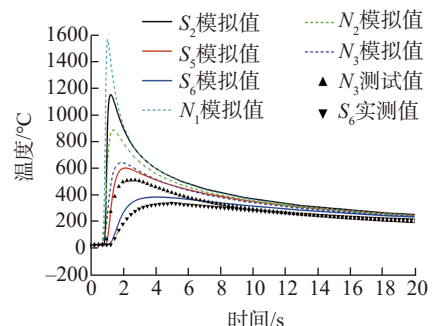


图9 垂直焊缝方向上特征点的热循环曲线

Fig.9 Thermal cycle curve of feature points perpendicular to direction of weld

缝中心是不对称的,残余应力分布趋势为焊缝及近缝区表现较大的拉应力,远离焊缝区域,纵向拉应力逐渐减小至转为压应力。这是因为距离焊缝越远,焊接热影响越小,由温度梯度造成的热应力也越小。焊接过程中,热源作用区域受热熔化,应力值为零,焊接结束后,熔融金属冷却凝固收缩,周围区域阻碍其收缩从而产生拉应力。因此,焊缝及近缝区的残余应力为拉应力,远离焊缝的区域则是残余压应力。图 11 (a) 为线  $L_2$  和  $L_3$  处纵向残余应力的分布曲线图。铌侧  $L_2$  处纵向残余应力呈驼峰状分布,最大残余拉应力在焊缝中部区域,约为 100MPa 左右,略高于母材的室温屈服强度 85MPa。不锈钢侧  $L_3$  纵向残余应力呈帽状分布,也是在焊缝中部区域残余应力值最大,且最大值分布比铌侧宽,表现为沿焊缝方向 15~35mm 之间均值保持在 325MPa 上下,高于母材的室温屈服强度 230MPa。焊缝两侧纵向残余应力最大值在焊缝中部区域,是因为在焊接过程中,当热源逐渐远离焊缝中部区域,熔融金属冷却凝固收缩受到工件两端拉应力作用。图 11 (b) 是在焊件中心部位,垂直于焊缝方向上线  $L_1$  的纵向残余应力分布曲线,并与试验结果比较,计算结果与检测结果吻合较好,验证了模型的正确性。曲线在焊缝及近缝区分布形态呈近似“M”状,残余应力在焊缝中心线处略有下降,焊缝两侧纵向残余应力关于焊缝中心线不对称,不锈钢侧不仅纵向残余拉应力峰值高于铌侧,且高应力区也明显宽于铌侧区。这是由于 AISI 304 不锈钢与铌两种材料在力学性能上的差异造成的,钢的线膨胀系数大于铌,导致焊接加热和冷却过程中两种材料的收缩不同,钢的收缩大于铌,产生较大的残余应力。

图 12、13 是 AISI 304 钢-铌异种接头在焊后冷却至室温后横向残

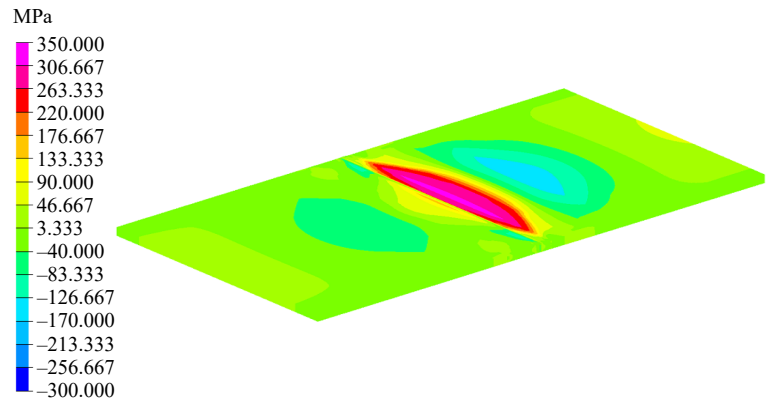
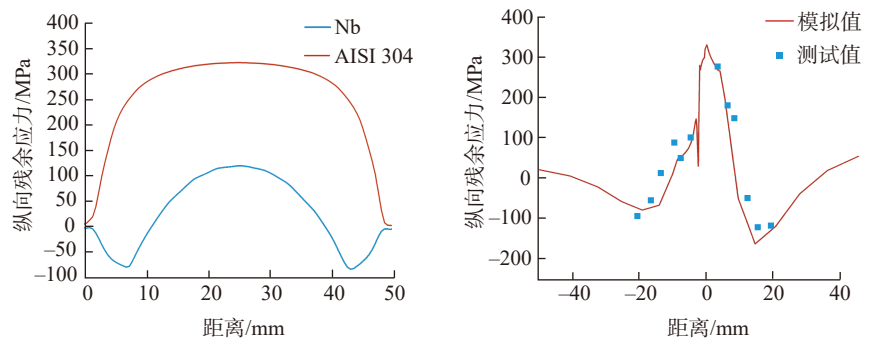


图10 纵向残余应力分布云图

Fig.10 Color cloud chart of longitudinal residual stress distribution



(a) 沿焊缝方向两侧纵向残余应力曲线图

(b) 垂直于焊缝方向纵向残余应力

图11 纵向残余应力曲线图

Fig.11 Longitudinal residual stress diagram

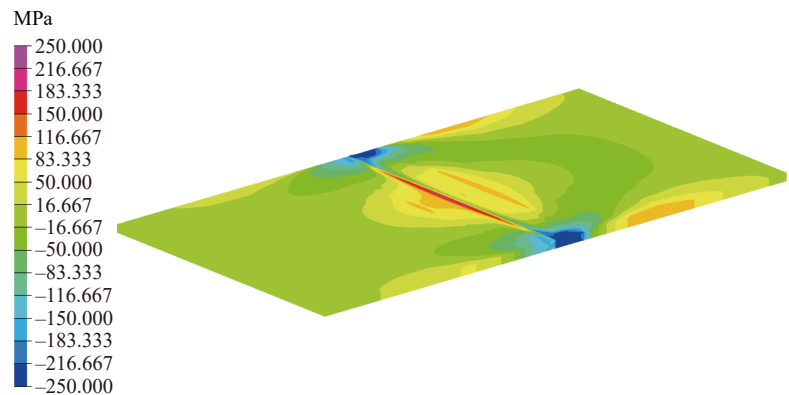


图12 横向残余应力分布云图

Fig.12 Color cloud chart of transverse residual stress distribution

余应力分布云图和曲线图,横向残余应力主要是由焊缝横向收缩引起。由图 12 知,焊缝中部区域存在最大残余拉应力,而焊缝两端即焊接开始和结束处,存在残余压应力。如图 13 (a) 所示,无论是铌侧还是不

锈钢侧,沿焊缝方向的横向残余应力的分布趋势是相似的,都是呈驼峰状分布,且在焊缝中部横向残余应力值最大。铌侧最大横向残余应力为 120MPa 左右,略高于铌的室温屈服强度,不锈钢侧为 80MPa 左

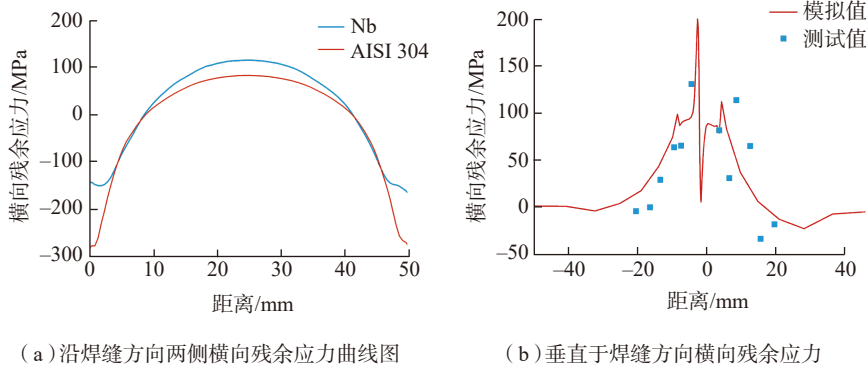


图13 横向残余应力分布曲线图  
Fig.13 Transverse residual stress distribution diagram

右,小于不锈钢的室温屈服强度。图13 (b)给出了垂直于焊缝方向上的横向残余应力分布,可以看出,计算结果与检测结果同样吻合较好,进一步验证模型正确性。由于影响横向残余应力大小的因素比较多,垂直于焊缝方向的中部区域应力变化较为复杂,应力分布形态与纵向残余应力相似,都是呈“M”状,焊缝区域基本为拉应力,但在焊缝中心处拉应力急剧下降直至转为压应力,应力梯度较大,而在自由端应力趋于零。

### 结论

(1) 由于 AISI 304 不锈钢与铌的热物理性能差异,导致焊接接头的温度场关于焊缝中心不对称。铌的导热系数高于不锈钢,两侧至焊接线距离一致时,铌测热循环曲线达到的峰值温度高于不锈钢侧。

(2) 焊接接头纵向残余应力计算结果显示,沿焊接方向上的应力分布,无论是不锈钢侧还是铌测,焊缝中部区域存在最大残余拉应力;而在焊件中间处垂直于焊缝方向上,最大纵向残余应力出现在焊缝及焊缝附近区域,焊缝中心处残余拉应力急剧下降,应力分布不连续。

(3) 焊接接头横向残余应力计算结果显示,沿焊缝方向的横向残余应力分布形貌与纵向残余应力分布相似,焊缝中部存在最高残余拉应

力;而垂直于焊接方向的横向残余应力分布,虽然焊缝及近缝区应力分布形态与纵向残余应力分布形态相似,呈“M”型,但在焊缝中心处拉应力急剧下降直至转为压应力。

### 参考文献

[1] ARIVAZHAGAN N, SINGH S, PRAKASH S, et al. Investigation on AISI 304 austenitic stainless steel to AISI 4140 low alloy steel dissimilar joints by gas tungsten arc, electron beam and friction welding[J]. *Materials and Design*, 2011, 32(5): 3036–3050.

[2] GUPTA R K, ANIL KUMAR V, KARTHIKEYAN M K, et al. Investigation of cracks generated in columbium alloy (C-103) sheets during deep drawing operation[J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2010, 10(3): 228–232.

[3] 石铭霄, 赵健, 胡庆贤, 等. 焊接工艺参数对钢/铌激光焊接头性能的影响[J]. *焊接学报*, 2017, 38(4): 72–76.

SHI Mingxiao, ZHAO Jian, HU Qingxian, et al. Influence of the parameters of welding procedure on the mechanical properties of laser welded 304 SS/Nb joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(4): 72–76.

[4] LU Z L, LU F, CAO J W, et al. Fabricating hollow turbine blades using short carbon fiber-reinforced SiC composite[J]. *The International Journal of Advanced*

*Manufacturing Technology*, 2013, 69(1–4): 417–425.

[5] 李鑫, 郑剑平, 赵俊. Nb–1Zr 合金与 304 不锈钢熔钎焊的接头特性[J]. *焊接学报*, 2011, 32(3): 105–108.

LI Xin, ZHENG Jianping, ZHAO Jun. Characteristics of welding-brazed joint between Nb–1Zr alloy and 304 stainless steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(3): 105–108.

[6] 檀财旺, 巩向涛, 李俐群, 等. 镁/钛异种金属预置 Al 夹层光纤激光熔钎焊接特性[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 1–8.

TAN Caiwang, GONG Xiangtao, LI Liqun, et al. Laser welding-brazing characteristics of dissimilar metals Mg/Ti with Al interlayers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(1): 1–8.

[7] LEE C H, CHANG K H. Temperature fields and residual stress distributions in dissimilar steel butt welds between carbon and stainless steels[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 45–46: 33–41.

[8] 黄伯云, 李成功. 中国材料工程大典: 5 卷, 有色金属材料工程(下)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

HUANG Boyun, LI Chenggong. *China materials engineering canon: Volume 5, Non-ferrous metal material project*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.

[9] BRICKSTAD B, JOSEFSON B L. A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes[J]. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, 1998, 75(1): 11–25.

[10] 李振江. 基于 SYSWELD 的焊接接头温度场和残余应力场研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.

LI Zhenjiang. *Research of temperature and residual stress fields of weld joint based on simulation with SYSWELD*[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.

通讯作者: 石铭霄, 副教授, 研究方向为异种材料焊接, E-mail: smx\_just@163.com.

## Temperature Fields and Residual Stress of Laser Welded AISI 304 Steel-Niobium Dissimilar Joint

SHI Chao<sup>1</sup>, SHI Mingxiao<sup>1</sup>, ZHAO Jian<sup>2</sup>, CHEN Shujin<sup>1</sup>, YANG Zhidong<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;  
2. School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**[ABSTRACT]** The dynamic simulation of AISI 304 steel–Nb dissimilar metal laser welding process is carried out by using SYSWELD software. On the basis of studying the temperature field of laser welded AISI 304 steel–Nb dissimilar joint, the residual stress distribution of welded sheet is analyzed. The results show that the temperature field of dissimilar metal welding is asymmetrical, and the high temperature region of Nb side is wider than that of stainless steel side. And there is the maximum residual tensile stress in the middle of weld along the welding direction, whether transverse residual stress or longitudinal residual stress. Perpendicular to the weld direction, the transverse residual stress and longitudinal residual stress are larger in the welding line near line section, and the distribution pattern is “M”. The longitudinal residual stress is residual tensile stress in the weld zone, and the transverse residual stress appears compressive stress in the center of the weld.

**Keywords:** Niobium; AISI 304 steel; Laser welding; Temperature field; Residual stress

(责编 阳光)

---

(上接第45页)

## Study on Typical Laser Processing Technologies and Applications in Aeronautical Manufacturing

LI Xing<sup>1,2</sup>, GUAN Yingchun<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100083, China;  
2. Hefei Innovation Research Institute, Beihang University, Hefei 230012, China;  
3. National Engineering Laboratory of Additive Manufacturing for Large Metallic Components,  
Beihang University, Beijing 100083, China)

**[ABSTRACT]** Because of the extreme and complex working environment, the aviation industry has very strict requirements for the processing quality and accuracy of material. Compared to traditional manufacturing technology, laser processing technology has the characteristics of small heat-affected zone, high efficiency and easy automation, therefore it has broad application prospects in the field of aeronautical manufacturing. Combining with the characteristics of aviation industry, the applications of laser cladding, drilling, cleaning and processing functional surface structures have been reviewed in the study. The mechanisms of laser processing have been clarified, and the roles of laser processing on improving surface properties and processing quality have been analyzed. Finally, we summarized and prospected the outlet of laser processing in the field of aviation.

**Keywords:** Laser processing; Aeronautical manufacturing; Laser cladding; Laser drilling; Laser cleaning; Functional micro-structure

(责编 阳光)