

A6N01S-T5 铝合金焊接软化行为及数值模拟

樊元英¹, 徐济进¹, 孟立春², 孙晓红²

(1. 上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200240;
2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 青岛 266111)

摘 要: 基于 A6N01S-T5 铝合金焊接接头显微硬度试验和微观组织分析, 研究 A6N01S-T5 铝合金焊接接头软化特征, 根据焊接接头不同区域的焊接温度及显微硬度, 建立了 A6N01S-T5 铝合金软化模型. 针对高速列车车顶焊接过程数值模拟, 开发了基于平均温度曲线法的焊接快速数值模拟方法, 并通过典型焊接接头试验验证. 结果表明, 平均温度曲线法可以替代移动热源进行焊接过程模拟. 基于 A6N01S-T5 铝合金软化模型及平均温度曲线法, 模拟高速列车车顶焊接过程, 计算的车顶焊接变形与实测值比较吻合.

关键词: 软化模型; 数值模拟; 平均温度曲线法; 高速列车车顶

中图分类号: TG 404 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20150730003

0 序 言

车辆轻量化是高速列车发展的一个重要方向. 为了减重提速, 高速列车车体一般采用铝合金板材和型材焊接而成. 然而铝合金焊接应力、变形问题比较突出, 导致焊接结构尺寸不稳定、焊接错边等问题. 近年来, 数值模拟越来越受到高度的重视, 被广泛地应用到焊接领域的理论研究和实际应用中^[1], 特别是焊接应力与变形的数值模拟和预测对于优化结构设计与制造工艺, 确保焊接制造质量, 节约设计成本等方面具有重要的意义^[2].

铝合金焊接接头发生软化, 为了准确地模拟焊接过程的应力应变行为, 需研究焊接接头软化分布特征及软化机理, 建立可靠的铝合金软化本构关系. Feng 等人^[3]发现 6061-T6 铝合金搅拌摩擦焊残余应力的分布主要与焊接参数和材料软化程度有关. Richards 等人^[4]针对 AA2024 和 AA7449 铝合金, 通过强化状态和完全软化状态两种极限状态的性能, 进行插值, 建立了软化模型. 宋奎晶等人^[5]建立了与焊接热循环温度和热变形相关的铝合金本构关系. 焊接过程数值模拟常用的方法为基于移动热源的热弹塑性有限元法, 但对于复杂的焊接结构, 采用移动热源模拟焊接过程, 虽然计算精度比较高, 但给数值模拟在计算速度和计算容量上提出苛刻条件. 蔡志鹏等人^[6]开发了焊接串热源模型. 邓德安等人^[7]开发了可变步长热源模型, 在保证一定计算精

度的同时提高了计算效率.

文中开展 A6N01S-T5 铝合金焊接接头软化行为的研究, 基于焊接接头不同区域的焊接温度及显微硬度, 建立 A6N01S-T5 铝合金软化模型; 建立以平均温度曲线作为热源模型的焊接快速数值模拟方法, 基于典型焊接接头焊接试验验证该方法的可靠性, 最终模拟高速列车车顶的焊接过程.

1 焊接试验

高速列车车顶由 7 块 A6N01S-T5 型材拼接而成, 每块型材的长度为 25 m, 坡口形式为带趾扣的对接接头, 坡口角度为 60°. 典型接头焊接试验选用两块 A6N01S-T5 型材, 坡口形式、焊接工艺与车顶一致, 单块试样尺寸为 350 mm × 150 mm × 40 mm.

焊前采用钢丝刷清理焊缝坡口表面, 去除表面的氧化膜, 用丙酮进行擦洗, 去除表面油污, 然后用 C 形夹将试样固定在焊接平台上, 如图 1 所示.

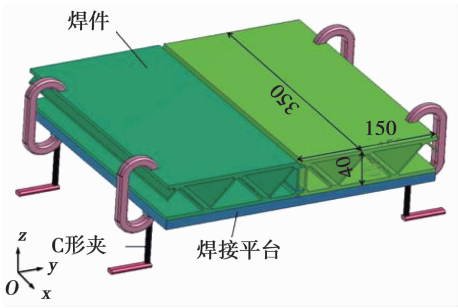


图1 焊接试样(mm)

Fig. 1 Welding samples

焊接方法为自动 MIG 焊接,焊接电源为 DIGI@WAVE 500. 焊丝采用 ER5356,直径为 1.2 mm,保护

气体为 99.999% 氩气. A6N01S-T5 和 ER5356 的化学成分见表 1,焊接工艺参数见表 2.

表 1 A6N01S-T5 铝合金和 ER5356 焊丝化学成分(质量分数%)
Table 1 Chemical compositions of A6N01S-T5 aluminum alloy and ER5356 filler metal

材料	Mg	Si	Zn	Fe	Cu	Mn	Cr	Ti	Al
A6N01S-T5	0.4 ~ 0.8	0.4 ~ 0.9	≤0.25	≤0.35	≤0.35	≤0.30	≤0.30	≤0.35	余量
ER5356	4.5 ~ 5.5	≤0.25	≤0.10	≤0.40	≤0.10	0.05 ~ 0.20	0.05 ~ 0.20	0.06 ~ 0.20	余量

表 2 焊接工艺参数
Table 2 Welding processing parameters

焊道	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 v/(mm·s ⁻¹)	气体流量 q/(L·min ⁻¹)
1	175	20	12.5	30
2	176	20	12.5	30

焊接过程中采用热电偶温度传感器测量焊接温度变化曲线,采用固定点法测量每道焊缝焊后的横向收缩变形. 焊后冷却至室温,采用盲孔法测量试样上下表面的残余应力.

2 材料软化行为表征

为了建立 A6N01S-T5 铝合金的软化模型,首先对焊接接头的软化分布特征进行分析.

2.1 显微硬度

沿焊缝横向截取一段焊接接头,采用 402SXV 维氏硬度计,从焊缝中心到母材沿一条直线测试焊接接头各区域的显微硬度.

图 2 为 A6N01S-T5 铝合金焊接接头的显微硬度分布. 可以看出,A6N01S-T5 铝合金焊缝的显微硬度远低于母材,焊缝中心的显微硬度最低,约为 59 HV,这是因为焊材选用的是 ER5356,其强度低

于母材. 距离焊缝中心 2.3 mm 为焊缝熔合线位置,显微硬度随距离焊缝中心的增大而上升. 距离焊缝中心 2.5 ~ 5 mm 热影响区的硬度比焊缝中心提高约 10 HV,达到母材的 70% 左右. 距离焊缝中心 5 ~ 7 mm,显微硬度又有所下降. 距离焊缝中心 11 mm 的区域,硬度基本恢复到母材硬度,约为 101 HV. 根据硬度分布,A6N01S-T5 铝合金焊接接头的 HAZ 宽度约为 9 mm.

2.2 显微组织

截取焊接接头头横截面,表面用 7000 号的金刚石砂纸抛光,再用粒度为 0.1 μm 的 MgO 溶液抛光,之后用 KELLER 试剂腐蚀,在光学显微镜下观察其微观组织.

图 3 是焊缝中心、熔合区、热影响区以及母材的显微组织. 图 3a 为焊缝中心组织,可以看出焊缝金属为铸态组织,呈等轴状. 图 3b 为焊缝熔合区金相组织,可见焊缝边缘的熔合区很窄,熔合区形成了垂直于焊缝熔合线的柱状晶组织. 热影响区分为淬火区和过时效区,分别见图 3c 和图 3d. 图 3e 是母材的金相组织,母材晶粒较小,强化相粒子分布比较均匀. 与母材相比,热影响区晶粒明显粗大,晶粒大小不均,析出相分散不均匀,并且出现明显的偏聚长大,从而导致热影响区软化. 而过时效区相对于淬火区,析出相分布更加不均匀,偏聚长大更明显,从而导致过时效区的显微硬度低于淬火区.

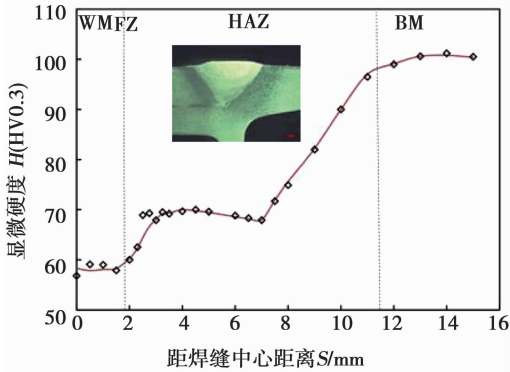
2.3 软化模型的建立

铝合金由于自身强度低,需要进行强化技术处理以提高其强度. A6N01S-T5 为固溶处理(淬火) + 不完全人工时效,焊后热影响区发生了明显软化. 为了准确模拟焊接残余应力,需要建立铝合金软化模型. 铝合金冷却过程中的屈服强度与温度的关系可以根据原始状态和完全固溶状态下的数值进行线性插值来获得^[8],即

$$H = (H_{\max} - H_{\min}) \frac{f}{f_0} + H_{\min} \tag{1}$$

$$R_{eL} = (R_{eL_1} - R_{eL_2}) \frac{f}{f_0} + R_{eL_2} \tag{2}$$

图 2 焊缝显微硬度分布
Fig. 2 Distribution of weld hardness



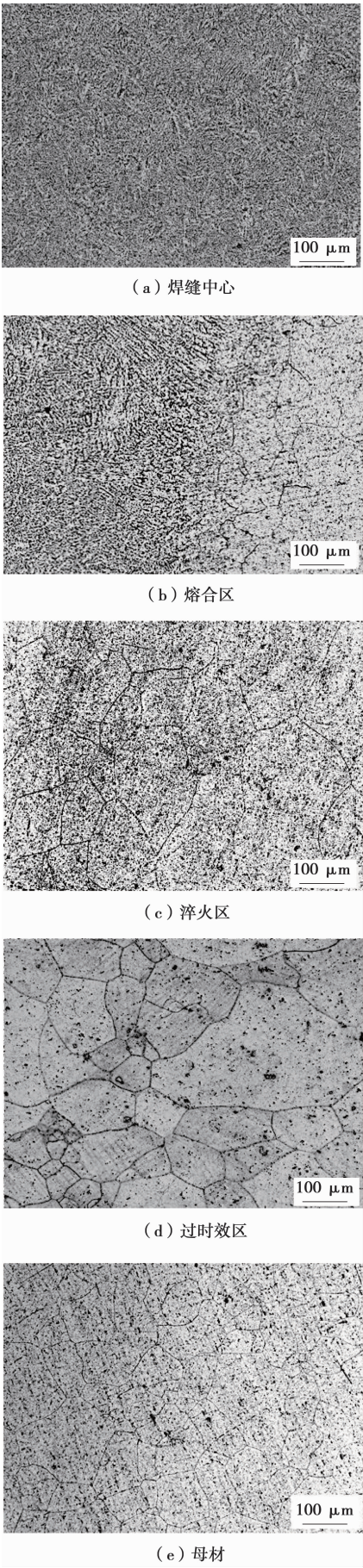


图3 焊接接头显微组织
Fig. 3 Microstructure of weld joint

式中: $H_{\max}$ 和 R_{eL1} 是 A6N01S-T5 母材的硬度和屈服强度; $H_{\min}$ 和 R_{eL2} 是完全固溶热处理态的硬度和屈服强度; $\frac{f}{f_0} = 1 - X_d$, X_d 为强化相粒子固溶分数。

根据式(1),式(2)通过插值计算获得 A6N01S-T5 的软化模型,如图 4 所示,实线为铝合金焊接加热过程的屈服强度与温度的关系,虚线为冷却过程屈服强度与温度的关系。

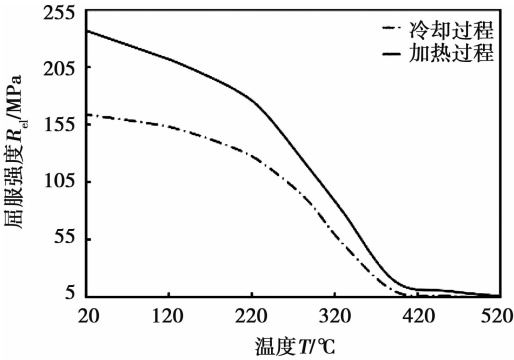


图4 屈服强度与温度的关系
Fig. 4 Relationship between yield strength and temperature

3 焊接数值模拟

为验证软化模型准确性,模拟典型接头焊接过程,计算的残余应力与实测值比较,同时研究平均温度曲线法的可行性. 焊接数值模拟采用间接耦合的三维热弹塑性有限元法,计算软件为 SYSWELD v2012.

3.1 几何模型的建立

图 5 是典型焊接接头有限元模型,选择六面体单元,焊缝及附近区域网格较细,远离焊缝的网格逐渐变大,三维单元数为 19 072 个,节点数为26 223个。



图5 有限元模型
Fig. 5 Finite element model

3.2 热源模型的建立

焊接过程的有限元计算首先进行温度场的计算. 热源模型选择双椭球体热源模型, 双椭球体热源模型分为前半球和后半球, 分别用式(3), 式(4)表示^[9], 即

$$q(x,y,z,t)=\frac{6\sqrt{3}f_1Q}{ab\,c_1\pi^{3/2}}e^{-3x^2/a^2}e^{-3y^2/b^2}e^{-3[z+v(\tau-t)]^2/c_1^2}$$

(3)

$$q(x,y,z,t)=\frac{6\sqrt{3}f_2Q}{ab\,c_2\pi^{3/2}}e^{-3x^2/a^2}e^{-3y^2/b^2}e^{-3[z+v(\tau-t)]^2/c_2^2}$$

(4)

式中: a, b, c_1, c_2 分别是双椭球体热源模型的尺寸参数; f_1 和 f_2 是前后半球能量分布比例, $f_1 + f_2 = 2$; Q 是有效功率, 热源模型参数通过热源校核工具获得. 焊接热模拟所需母材和焊材热物理性能参数见文献[1, 10].

3.3 力学模型的建立

焊接力学计算中所需母材和焊材的弹性模量、屈服强度、泊松比、线膨胀系数见文献[1, 10].

由于焊接过程中, 试样被 C 形夹固定在焊接平台上, 施加的边界拘束条件除了保证结构在空间地稳定性之外, 将 C 形夹位置的节点施加 z 方向的约束, 模拟焊件固定形式.

3.4 平均温度曲线

根据移动热源温度场计算结果, 获得焊缝某个截面节点的平均温度曲线作为热源模型模拟典型焊接接头焊焊过程. 图 6 是平均温度曲线.

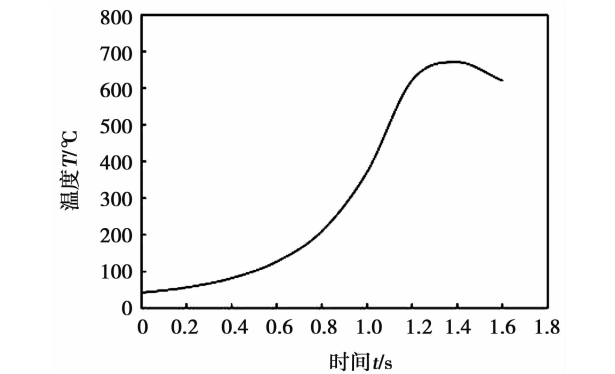


图 6 平均温度曲线
Fig. 6 Average temperature curves

在焊接数值模拟中, 将每道焊缝均分 4 段, 然后

将平均温度曲线按焊接顺序施加在每段焊缝单元的节点上, 模拟焊接热过程, 然后根据焊接热过程模拟结果计算焊接残余应力和变形, 并与移动热源计算的结果进行比较.

4 结果及讨论

4.1 焊接温度场比较

图 7 为距离焊缝中心 7, 10 和 15 mm 各点实测值和模拟值的比较结果. 可以看出, 离焊缝中心越远, 温度的峰值越小. 温度模拟值与实测值非常吻合, 距离焊缝中心 7, 10 和 15 mm 温度峰值的实测值分别为 373, 272 和 224 °C, 模拟值分别为 362, 280 和 210 °C, 误差范围在 10% 以内.

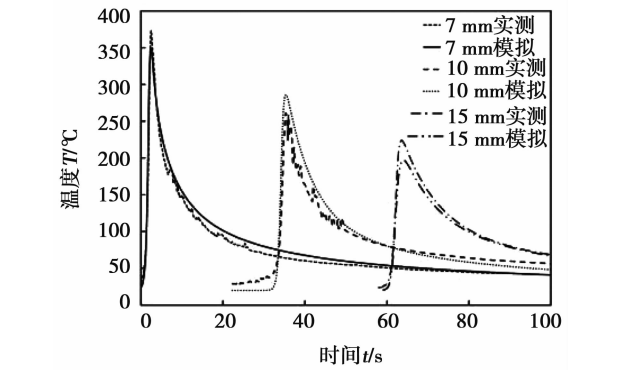


图 7 温度场比较结果
Fig. 7 Comparison of measured and simulated welding temperature

4.2 焊接变形比较

表 3 是移动热源和平均温度曲线法模拟的横向收缩变形值与实测值的比较, 可以看出两种计算方法的模拟结果与实测值比较接近, 因此, 从焊接变形预测角度考虑可以采用平均温度曲线法替代移动热源.

表 3 横向变形模拟值与实测值比较 (mm)
Table 3 Comparison of simulated transverse deformation with measured values

项目	第一道	第二道
移动热源	0.60	0.51
平均温度曲线法	0.63	0.52
实测值	0.68	0.55

4.3 残余应力比较

图 8 是移动热源、平均温度曲线法模拟的焊接残余应力与实测值的比较. 可以看出,横向应力和纵向应力的最大值分布在热影响区,这主要是由铝合金焊后接头发生软化造成的. 横向应力较小,纵向应力较大,表面最大纵向拉应力在 130 MPa 左右.

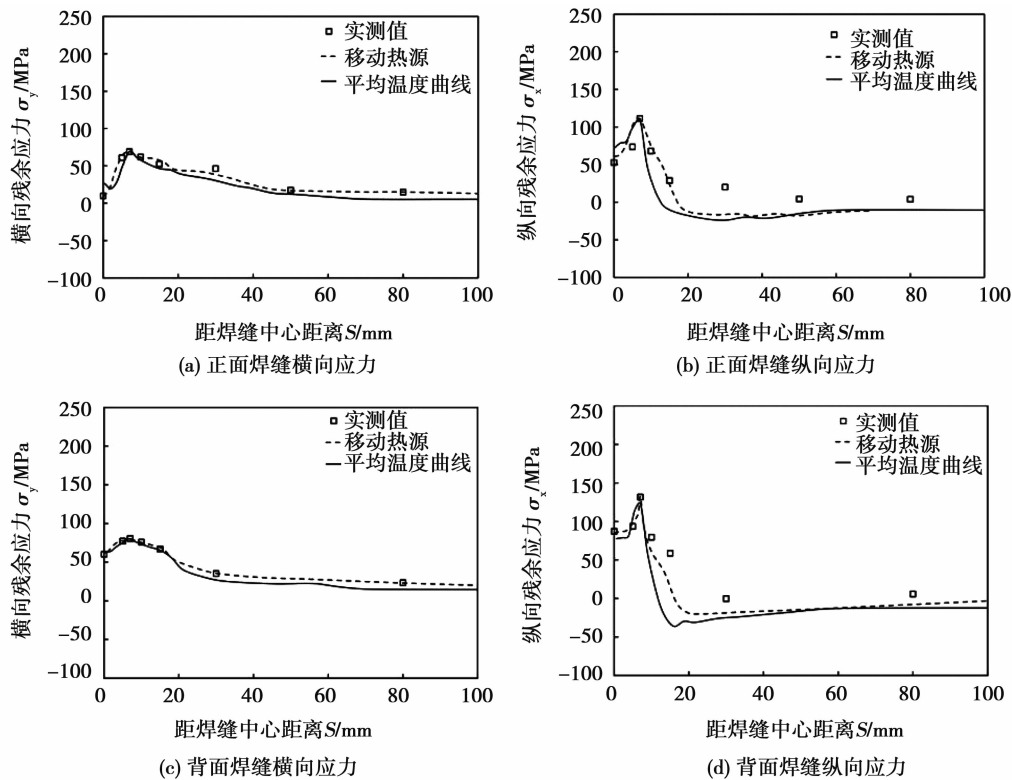


图 8 残余应力模拟结果与实测结果比较
Fig. 8 Comparison of simulated and measured residual stresses

5 车顶焊接过程模拟

车顶是高速列车车体结构的关键零部件,它的质量稳定性及可靠性是列车高速安全运行的首要条件. 高速列车车顶由 7 块 A6N01S-T5 型材焊接而成,共 12 条焊缝,上下各 6 条,每条焊缝长度为 25 m. 先焊上表面,再焊下表面,焊接过程中在车顶两侧分别使用 7 个 F 形卡钳夹紧车顶板,焊后释放约束. 有限元模型如图 9 所示,三维单元数共 105 300 个,节点数为 167 512 个. 焊接数值模拟过程按照车顶的实际焊接顺序进行模拟,热源模型采用平均温度曲线法.

图 10 是车顶焊后的变形分布云图,可以看出车顶焊后变形主要表现为纵向挠曲变形,车顶两端上

计算的残余应力与实测值非常吻合,说明建立的软化模型是可靠的.

两种焊接数值模拟方法的残余应力计算结果与实测值比较吻合,因此,可以采用平均温度曲线法替代移动热源进行焊接过程的数值模拟.

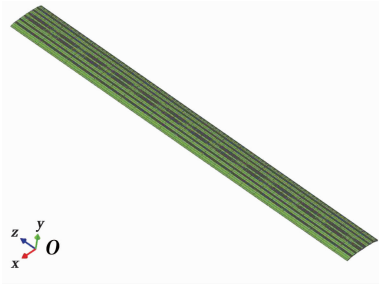


图 9 车顶有限元模型
Fig. 9 Finite model of roof

翘,变形量约为 19 mm; x 方向为焊缝横向,上表面膨胀,下表面收缩,导致车顶弧度减小,变化趋势与实际相符; z 方向为焊缝的纵向,纵向收缩量约为 8.1 mm,而实测值在 7 ~ 9 mm 范围内,因此模拟值与实测值比较接近.

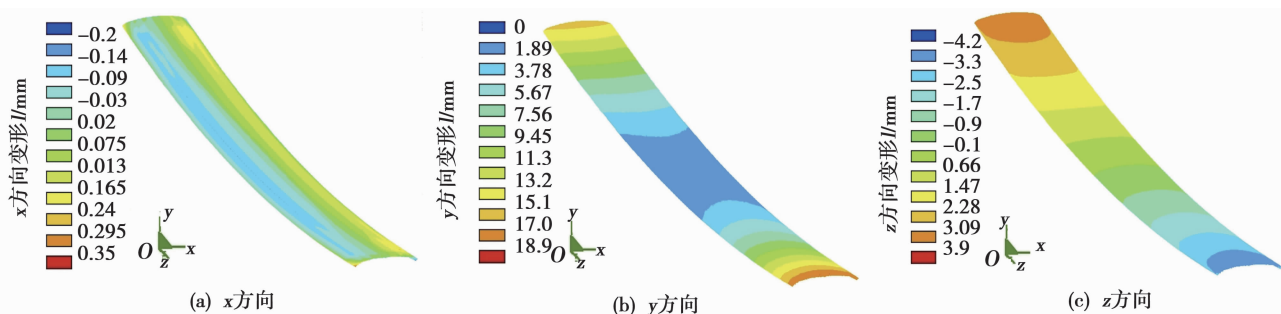


图 10 车顶焊接变形分布云图

Fig. 10 Welding deformation contours of roof

6 结 论

(1) 通过对焊接接头显微组织和硬度的观测,焊接热影响区出现明显的软化,主要是由组织晶粒大小、强化相特征所决定的。

(2) 建立 A6N01S-T5 铝合金软化模型,比较平均温度曲线法和移动热源模型,通过典型焊接接头模拟模拟与测试比较,验证了软化模型的准确性,同时可以采用平均温度曲线法替代移动热源模拟复杂结构焊接过程。

(3) 采用平均温度曲线法模拟了车顶的焊接变形,模拟值与实测值比较吻合。

参考文献:

- [1] 徐济进. 材料硬化模型对 316L 不锈钢焊接残余应力的影响[J]. 焊接学报, 2014, 35(3): 97-100.
Xu Jijin. Effect of material hardening model on welding residual stresses of 316L stainless steel[J]. Transactions of the China Welding, 2014, 35(3): 97-100.
- [2] 闫德俊, 刘雪松, 周广涛, 等. 大型底板结构焊接顺序控制变形数值分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(6): 55-58.
Yan Dejun, Liu Xuesong, Zhou Guangtao, *et al.* Numerical analysis on optimizing welding sequence of large sized bottom structure for controlling welding distortion[J]. Transactions of the China Welding, 2009, 30(6): 55-58.
- [3] Feng Z, Wang X L, David S A, *et al.* Modeling of residual stresses and property distributions in friction stir welds of aluminum alloy 6061-T6[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2007, 12(4): 348-356.
- [4] Richards D G, Prangnell P B, Williams S W, *et al.* Global mechanical tensioning for the management of residual stresses in welds[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 489(1): 351-362.

- [5] 宋奎晶, 魏艳红, 董志波, 等. 焊接热循环和变形历史相关的 A7N01-T6 本构关系[J]. 焊接学报, 2014, 35(4): 87-90.

Song Kuijing, Wei Yanhong, Dong Zhibo, *et al.* Visco-elastic-plastic constitutive model for welding of A7N01-T6 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding, 2014, 35(4): 87-90.

- [6] 蔡志鹏, 赵海燕, 吴 甦, 等. 串热源模型及其在焊接数值模拟中的应用[J]. 机械工程学报, 2001, 37(4): 25-28.

Cai Zhipeng, Zhao Haiyan, Wu Su, *et al.* Model of string heat source in welding numerical simulations[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(4): 25-28.

- [7] 邓德安, 青岛祥一. 用可变长度热源模拟奥氏体不锈钢多层焊对接接头的焊接残余应力[J]. 金属学报, 2010, 46(2): 195-200.

Deng Dean, Kiyoshima Shoichi. 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, 2010, 46(2): 195-200.

- [8] Sonne MR, Tutum C C, Hattel J H, *et al.* The effect of hardening laws and thermal softening on modeling residual stress of aluminum alloy 2024-T3[J]. Journal of Materials Processing Technology, 213(2013): 477-486J.

- [9] Goldak A Chakravarti M Bibby. A new finite element model for welding heat sources[J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 299-305.

- [10] 朱瑞栋, 董文超, 陆善平, 等. 基于 SYSWELD 的 A7N01 铝合金缓冲梁结构焊接过程数值模拟[J]. 焊接, 2014(3): 42-47.

Zhu Ruidong, Dong Wenchao, Lu Shanping, *et al.* Welding process numerical simulation of A7N01 aluminum alloy buffer beam based on SYSWELD[J]. Welding & Joining, 2014(3): 42-47.

作者简介: 樊元英, 女, 1989 年出生, 硕士研究生. 主要研究方向为铝合金焊接过程数值模拟. Email: yuanyinglisa@sjtu.edu.cn

通讯作者: 徐济进, 男, 博士, 助理研究员, 硕士研究生导师. Email: xujijin_1979@sjtu.edu.cn