

DP590 双相钢焊接的数值模拟与试验测试

李慧琴, 刘轶暄, 韩 强, 麻永林

(内蒙古科技大学 材料与冶金学院, 包头 014010)

摘 要: 采用 ANSYS 大型通用有限元分析软件, 利用 APDL 语言对 3.8 mm 厚 DP590 双相钢板对接焊的焊接温度场进行了模拟计算, 将生死单元技术和体生热率相结合来模拟焊缝的逐步填充过程和焊接热输入。为了验证模拟计算结果的准确性, 进行了 3.8 mm 厚 DP590 双相钢板的对接焊试验, 焊接方法选用焊条电弧焊, 利用热电偶、XSR30 无纸记录仪测定了距离焊缝不同位置处的温度变化。结果表明, 计算的温度场和试验测得的温度场变化规律基本一致。利用 ANSYS 计算焊接温度场来预测实际焊接过程中焊件的温度变化是可行的。

关键词: DP590 双相钢; 焊接; 数值模拟; 温度场

中图分类号: TG457.19 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2011)10-0009-04



李慧琴

0 序 言

随着现代工业的不断发展, 传统的奥氏体不锈钢在焊接过程中具有良好的塑性和韧性, 但由于导热系数差, 线膨胀系数较大, 导致焊后残余应力和焊件变形较大, 并且焊接接头对热裂纹比较敏感^[1]。文中分析的材料 DP590 双相钢是铁素体加马氏体两相组成的双相钢。

为了测试该钢的焊接性及其焊后残余应力的, 首先对 DP590 双相钢两块钢板对接焊的单道次焊接温度场进行了数值模拟计算, 为了验证计算结果的准确性, 对其进行了焊接试验, 通过试验测试和模拟结果的对比分析, 得出了模拟计算的准确性。

1 有限元模型的建立

分析的材料 DP590 双相钢的热物理性能参数见表 1。该双相钢的密度为 $7\,812\text{ kg/m}^3$, 不随温度变化而变化, 泊松比为 0.3。

实体模型尺寸为 $200\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 3.8\text{ mm}$, 两块钢板进行焊缝坡口底部为 0.658 mm 的打底焊, 焊接方法为焊条电弧焊。焊材选用 $\phi 3.2\text{ mm}$ 的 E4303(J422) 钛钙型药皮碳钢焊条, 焊接道次为一道次, 焊接速度为 4.55 mm/s , 实体模型如图 1 所示。

表 1 DP590 的热物理性能参数

Table 1 Thermophysical properties of DP590

温度 $T/^{\circ}\text{C}$	热导率 $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	比热容 $c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	线膨胀系数 $\alpha_l / 10^{-6} \text{K}^{-1}$
25	65.3	460	—
100	54.9	485	12.76
200	45.2	519	13.66
300	36.4	552	14.27
400	28.5	586	15.17
500	—	—	15.52
600	—	—	15.64
700	—	—	15.41
800	—	—	12.73

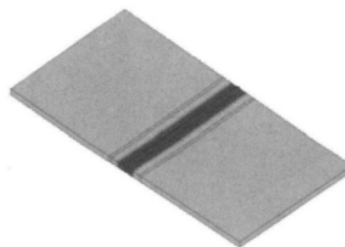


图 1 实体模型

Fig. 1 Solid model

为了节省计算时间, 把实体模型分成 3 个区: 焊缝区、热影响区和母材区, 其中母材区距离焊缝较远, 并且对母材区进行线性化处理, 即远离焊缝的母材区的热物理性能参数为常数, 不随温度变化而变。

化,只有焊缝区和热影响区在焊接过程中的温度较高,热物理性能参数变化较大^[2]。

对整个实体模型进行网格划分如图 2 所示。焊缝区和过渡区划分网格时较细密(网格尺寸一般应在 2 mm 左右),母材区相对稀疏一些,以便节省计算时间。采用映射方法划分网格。整个模型的单元数为 21 852 个,节点数为 25 839。

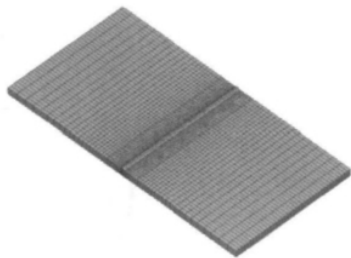


图 2 有限元网格模型

Fig. 2 Model of finite element mesh

2 理论基础

焊接是一个局部快速加热到高温,并随后快速冷却的过程。随着热源的移动,整个焊件的温度随时间和空间急剧变化,材料的热物理性能也随温度剧烈变化,同时还存在熔化和相变潜热现象。因此,焊接温度场分析属于典型的非线性瞬态热传导问题。非线性瞬态热传导问题的控制方程为

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

式中: c 为材料比热容; ρ 为材料密度; λ 为热导率; T 为温度场分布函数; t 为传热时间; \bar{Q} 为内热源强度。这些参数中 λ 、 ρ 、 c 都随温度变化^[3]。

3 加载计算

在模拟计算过程中,采用完全的牛顿-拉夫森法进行瞬态热分析。设置母材区的初始温度为环境温度 25℃,整个模型的外表面施加对流边界条件,由于文中焊后钢板处于自然冷却状态,对流换热系数取 10 W/(m²·℃)^[4]。

热源的移动依靠分布循环加载来实现^[5]。文中热源的移动是通过 ANSYS 的 APDL 语言的循环语句 DO-ENDDO 来实现。而模拟焊接电弧生热是通过生热率作为体载荷施加于单元上实现的。生热率,即单位体积施加热流量,其计算公式为

$$Q = UI\eta/V_0 \quad (2)$$

式中: Q 为热流量; U 为电弧电压; I 为焊接电流; η 为焊接热效率; V_0 为焊接材料的体积。计算中, $U = 24$ V, $I = 180$ A, $\eta = 0.70$ 。初始条件: $T|_{t=0} = 25$ ℃(预热温度),第三类边界条件: 对流系数 $\alpha = 10$ W/(m²·℃)。

4 计算结果及分析

4.1 不同时间下的温度场分布云图

在整个模拟计算过程中,焊接时间为 22 s,焊接完成以后,自然冷却时间约为 628 s。图 3 为开始焊接时的温度场分布云图。此时,焊接最高温度在焊缝处,为 1 467℃,而母材区温度基本没有变化,为环境温度 25.183℃。

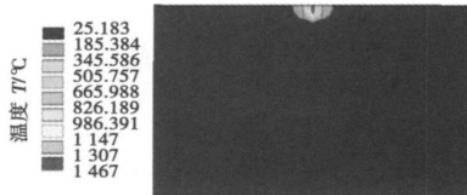


图 3 焊接时间 1 s 时的温度场

Fig. 3 Temperature field at 1 s

图 4 为 11 s 时整个模型的温度场分布云图。由图 4 可以看出,焊缝熔池中部(热源中心)温度最高为 1 704℃,而热影响区温度显著升高,并且焊缝两侧的温度呈对称分布,此时母材区最高温度已经达到 460.607℃,母材区最低温度也已经升高到 93.740℃。

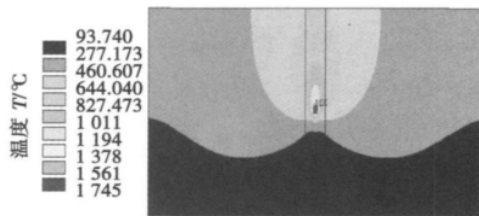


图 4 焊接时间 11 s 时的温度场

Fig. 4 Temperature field at 11 s

图 5 为焊接完成后整个焊件的温度场分布云图。由图 5 看出,焊缝熔池中部(热源中心)最高温度为 1 601℃,并且热影响区的温度也达到 1 000℃以上,焊缝两侧母材区的温度达到 450.120℃。

图 6 为焊接完成后进行自然冷却时间约 628 s

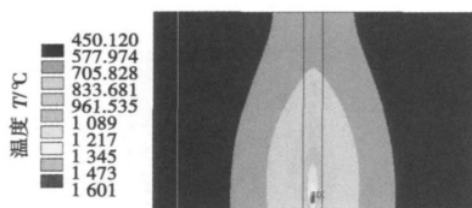


图 5 焊接时间 22 s 时的温度场

Fig. 5 Temperature field at 22 s

后的整个焊件的温度分布云图. 由图 6 看出, 焊缝温度比其两侧温度稍高, 焊缝处温度为 28.293 °C, 焊件两端温度为 26.825 °C, 整个模型的温度趋于环境温度 25 °C.

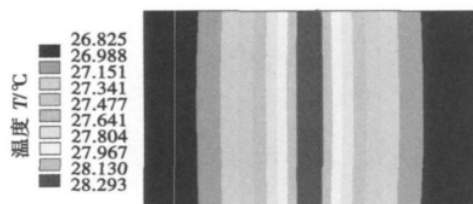


图 6 冷却时间 628 s 时的温度场

Fig. 6 Temperature field at 628 s

4.2 离焊缝不同距离处的节点温度分布

在焊件中间截面的上表面选取 5 个节点, 见图 7. 节点 1 在焊缝中心线上, 另 4 个节点距离焊缝依次为 3.5, 7, 11, 14 mm, 这 5 个节点的热循环曲线见图 8.

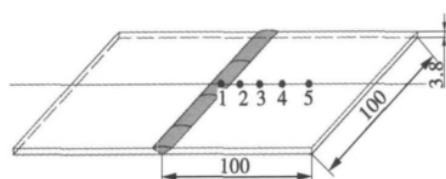


图 7 5 个节点的位置 (mm)

Fig. 7 Location of five nodes

从图 8 可以看出, 刚开始时 5 个节点的温度相同都为 25 °C, 与环境温度相同. 时间从 10 s 开始, 节点 1 的温度急速上升, 温度梯度较大, 11 s 时达到最高为 1350 °C, 然后开始缓慢下降, 直到和其它节点温度一致. 节点 2 所在位置的温度上升的梯度相对节点 1 较小, 而比其它节点上升的温度梯度要大, 温度最高达到 990 °C, 在高温停留时间大约为 4 s. 节点 3 的最高温度达到 650 °C. 节点 5 在 16 s 时温度达到最高 350 °C 后, 然后缓慢下降. 焊接完成

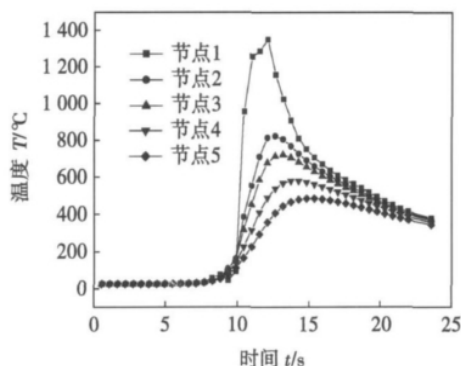


图 8 5 个节点的热循环曲线

Fig. 8 Thermal cycling curves of five nodes

(22 s) 以后 5 个节点的温度趋于相同, 大约在 25 s 时温度均为 300 °C. 可见, 靠近焊缝处的温度梯度最大, 热影响区次之, 母材区的温度梯度最小.

5 焊接温度场的试验测定

5.1 焊接温度场测定试验

为了检验计算结果的准确性, 进行了焊接试验. 在试验过程中, 在焊缝一侧打 4 个孔, 这 4 个孔的位置与模拟计算所取的 4 个节点所处位置相同, 见图 7. 试验焊接方法选用焊条电弧焊, 电弧电压为 24 V, 焊接电流为 180 A, 焊接速度为 4.55 mm/s. 在进行焊接的同时, 利用热电偶、XSR30 无纸记录仪及计算机系统实现对 DP590 双相钢 3.8 mm 钢板对接焊接热循环曲线的测定, 测出的温度变化曲线如图 9 所示.

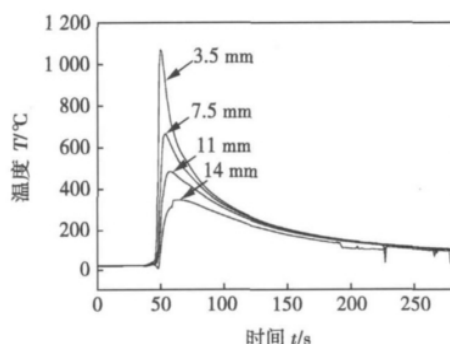


图 9 试验测得的距离焊缝不同位置的温度变化

Fig. 9 Temperature diversification of different position from weld measured by experiment

由图 9 看出, 从开始到大约 33 s 时温度均为 25 °C, 此段时间内, 还没有进行焊接, 从 33 s 时开始进行焊接, 经过约 11 s 时, 节点 2 的温度陡然上升, 最高达到 1070 °C, 节点 3 最高温度达 650 °C, 节点 4

达到最高温度所需时间明显比节点 3 要晚,最高温度为 480 ℃,而远离焊缝区的母材区,即离焊缝 14 mm 处的节点 5 最高温度约 300 ℃,节点 5 和节点 2 的最高温度相差约为 800 ℃,而图 8 中节点 5 和节点 2 的最高温度相差 730 ℃. 可见试验值和模拟计算的值相差不大. 由图 8 和图 9 的对比可以看出,模拟计算和试验测定的温度变化规律基本一致.

5.2 试验结果及分析比较

图 10 为取同一位置上节点(离焊缝中心 3.5 mm 处)的试验值和模拟值的比较. 试验测定的最高温度为 1 070 ℃,而模拟的最高温度为 990 ℃,相差 80 ℃,误差为 7.47%. 在冷却阶段,试验值和模拟值基本吻合,即试验值和模拟值的温度变化规律基本一致.

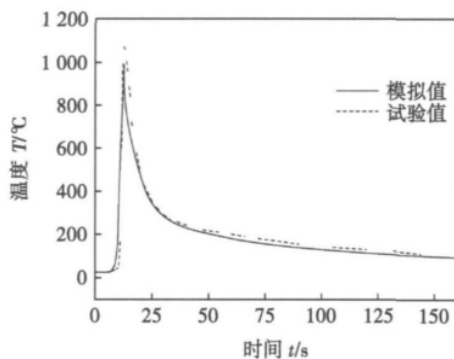


图 10 试验值和模拟值对比

Fig. 10 Comparison of experimental value and simulation value

由图 10 可以看出试验值温度下降较快,温度梯度大,模拟值温度下降较慢,温度梯度小. 出现这种情况的原因有两个:一是计算时的高温热物理性能参数是通过 ANSYS 有限元软件的外推法算出来的,和实际值有偏差;另一个是在模拟计算过程中,作了一些假设,如室温为 25 ℃,焊接速度均匀,焊缝和母材热物理性能参数相同,这些和实际的焊接过程不同.

综上所述,通过对 DP590 双相钢焊接温度场的

模拟计算,可以预测在实际焊接过程中整个焊件的温度变化,对通过调整工艺参数在实际焊接过程中的温度测定有一定的指导意义.

6 结 论

(1) 靠近焊缝处的节点温度梯度最大,热影响区次之,母材区的温度梯度最小.

(2) 利用 ANSYS 有限元软件计算的温度场和试验测得的温度场变化规律基本一致. 可见,利用 ANSYS 计算焊接温度场来预测实际焊接过程中焊件的温度变化是可行的.

(3) 利用生热率来模拟焊接热源的施加可以有效地模拟焊接温度场.

参考文献:

- [1] 尤广伟,董安霞. 双相钢的特性及焊接要点[J]. 现代焊接, 2006, 43(7): 17-21.
You Guangwei, Dong Anxia. The characteristics and welding main points of the duplex steel[J]. Modern Welding, 2006, 43(7): 17-21.
- [2] 董巷海,刘建华,杜汉斌,等. 激光薄板拼焊过程温度场和应力应变场的数值模拟[J]. 电焊机, 2004, 34(9): 21-24.
Dong Xianghai, Liu Jianhua, Du Hanbin, et al. The numerical simulation of welding temperature fields and stress strain fields on laser thin plate[J]. Electric Welding Machine, 2004, 34(9): 21-24.
- [3] 张文钺. 焊接传热学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [4] 陈家权,沈炜良,尹志新,等. 基于单元生死的焊接温度场模拟计算[J]. 热加工工艺, 2005(7): 64-65.
Chen Jiaquan, Shen Weiliang, Yi Zhixin, et al. Simulation of welding temperature distribution based on element birth and death[J]. Hot Working Technology, 2005(7): 64-65.
- [5] 龚曙光,谢桂兰. ANSYS 操作命令与参数化编程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

作者简介: 李慧琴,女,1963 年出生,教授,硕士. 主要从事材料加工与控制研究. 发表论文 30 余篇. Email: lihuiqin42@163.com

MAIN TOPICS ABSTRACTS & KEY WORDS

Analysis on microstructure and mechanical properties of aluminum alloy/stainless steel joint made with flux-cored filler metal

DONG Honggang¹, YANG Liquan¹, ZHAI Nan², DONG Chuang³ (1. Department of Materials Processing Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China; 2. Shenyang Aircraft Industry Corporation LTD, Shenyang 110034, China; 3. Key Laboratory of Materials Modification, Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China) . p 1 - 4

Abstract: Dissimilar metal joining between 5A02 aluminum alloy and AISI 304 stainless steel was conducted by gas tungsten arc welding with ZnAl15 and AlSi12 flux-cored filler metals, and the effect of the filler metal composition on the microstructures and mechanical properties of the joints were investigated. The results revealed that the tensile strength of as-welded joints made with ZnAl15 and AlSi12 flux-cored filler metals was 121 MPa and 162 MPa respectively. After annealed at 280 °C for 30 min, the tensile strength of joints made with ZnAl15 flux-cored filler metal reached 180 MPa, while that with AlSi12 flux-cored filler metal was 166 MPa. The interfacial layer in the weld made with ZnAl15 filler metal was comprised of $[\text{FeAl}_3]\text{Zn}_x$ and $[\text{Fe}_2\text{Al}_5]\text{Zn}_x$, and ternary intermetallic compound $\text{Al}_{7.4}\text{Fe}_2\text{Si}$ was found in the interfacial layer in the joint made with AlSi12 flux-cored filler metal. The thickness of the interfacial layers made with both filler metal was less than 10 μm .

Key words: aluminum alloy; stainless steel; flux-cored filler metal; microstructure; mechanical properties

Analysis on electromagnetic heat strengthening of welded joint with embedding crack and mechanical performance testing

ZHENG Lijuan, CHAI Xuan, HAN Xiaojuan, FU Yuming (School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China) . p 5 - 8

Abstract: Numerical simulation on welded joint of 45 steel using electromagnetic heating was made by ANSYS. The temperature and residual stress field were analysed. The result showed that the crack tip in the welded joint melted and dulled after discharge, the stress concentration also was reduced, in addition, the three residual compressive stress field around welded crack tip was appeared. The tensile properties were tested to compare the mechanical performance before and after pulsed current discharges. The result indicated that tensile strength and elongation were improved. Numerical analysis and experimental research confirmed the feasibility of applying electromagnetic heat strengthening technology into welding field.

Key words: welded joint; embedding crack; electromagnetic heat strengthening; numerical analysis; mechanical properties

Numerical simulation and experimental test of DP590 dual-phase steel welding

LI Huiqin, LIU Yixuan, HAN Qiang, MA Yonglin (School of Material and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China) . p 9 - 12

Abstract: DP590 dual-phase steel weld temperature field was analyzed by using ANSYS software. A program was developed with APDL language supported by the ANSYS, combining the body heat rate and element birth and death technology to simulate the welding filling process and heat input. A butt welding experiment with the DP590 dual-phase steel (3.8 mm thickness) was done in order to verify the accuracy of the simulation calculation. It is verified that numerical simulation is feasible.

Key words: DP590 dual-phase steel; numerical simulation; temperature field

Effects of laser shock processing on H₂S stress corrosion fractures of X70 pipeline steel welded joints

KONG Dejun, WU Yongzhong, LONG Dan (College of Mechanical & Energy Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016, China) . p 13 - 16

Abstract: The surfaces of X70 pipeline steel welded joints were processed with laser shock and its stress corrosion sensitivity was investigated in NACE saturated H₂S solutions by slow strain rate testing (SSRT) . The fracture surfaces were analyzed with scanning electric microscope (SEM) . The results show that the X70 pipeline steel welded joints in primitive state is brittle fracture. The cracks of tensile fracture is stress corrosion cracking. The mechanical properties of the X70 pipeline steel welded joints after laser shock processing is enhanced, its dimple dimension and depth becomes smaller, and the fracture mode is ductile fracture. SCC is the main mechanism of X70 pipeline steel welded joint stress corrosion cracking. Laser shock processing reduces the tendency of SCC and improves stress corrosion resistance H₂S of the welded joint.

Key words: X70 pipeline steel; welded joint; laser shock processing; stress corrosion

Analysis on corrosion behavior of welded joint of A7N01S-T5 aluminum alloy for high-speed train

GOU Guoqing¹, HUANG Nan¹, CHEN Hui¹, LI Da¹, MENG Lichun² (1. College of Materials Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. CSR Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China) . p 17 - 20

Abstract: Salt fog corrosion tests were employed to observe the corrosion behavior of welded joint of A7N01S-T5 aluminum alloy for high-speed train. The results showed that many corrosion products and pits distributed on the surface of the wel-