DOI: 10.3901/JME.2020.16.084

异种铝合金电阻点焊接头全场残余应力研究

毛镇东¹ 阚盈² 姜云禄² 韩晓辉¹ 陈怀宁²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司 青岛 266111;

2. 中国科学院核用材料与安全评价重点实验室(中国科学院金属研究所) 沈阳 110016)

摘要: 基于仪器化压入试验和有限元理论, 建立考虑接头微区力学性能的热-电-力耦合的异种铝合金电阻点焊有限元模型, 并用该模型模拟 5083 与 7N01 铝合金电阻点焊接头截面上的整体残余应力场分布。用金相显微镜、硬度测试仪和全释放应变法获得点焊接头的熔核形貌、硬度分布及上下表面的残余应力, 探讨点焊前后微区力学性能变化对接头残余应力大小及分布的影响。试验结果表明, 5083 与 7N01 铝合金进行电阻点焊后, 熔核和热影响区材料发生软化, 其硬度和流动应力与 7N01 母材相比明显降低。模拟结果表明, 接头微区力学性能变化对残余应力分布规律的影响较小, 对残余应力的峰值影响较大, 熔核处于三向拉应力状态且熔核心部的残余应力最大。考虑微区力学性能的有限元模型计算得到的残余应力与试验测试结果一致, 证明模型的有效性。

关键词: 电阻点焊; 铝合金; 残余应力; 仪器化压入; 数值模拟

中图分类号: TG453

Overall Residual Stresses in the Resistance Spot Welding Joint of Dissimilar Aluminum Alloys

MAO Zhendong¹ KAN Ying² JIANG Yunlu² HAN Xiaohui¹ CHEN Huaining²

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111;

2. CAS Key Laboratory of Nuclear Materials and Safety Assessment, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

Abstract: A thermal-electric-mechanical coupling finite element model is established based on the instrumented indentation test and the finite element theory. The resistance spot welding (RSW) process of 5083 and 7N01 aluminum alloy is simulated. The distribution of the residual stress in the joint is obtained. The experiment of resistance spot welding is carried out. The morphology of the nugget, the distribution of hardness and residual stresses on upper and lower surfaces are obtained by using the metallographic microscope, the hardness tester and the sectioning relaxation stain-gage method, respectively. The influences of mechanical properties on values and distributions of the residual stress are discussed. The experimental results show that the nugget and the heat affected zone(HAZ) are softened after RSW. Compared with the 7N01 base metal, the hardness and flow stress of the nugget and the HAZ significantly decreased. The simulation results show that the influence of mechanical properties on the distribution of residual stresses is small. The mechanical properties mainly influence the values of the residual stresses. The residual stress in the nugget is a three dimensional stress of tension. The peak value of the residual stress appears at the center of the nugget. The predicted residual stresses from the developed finite element model agree well with experimental results.

Key words: resistance spot welding; aluminum alloy; residual stress; instrumented indentation; numerical simulation

0 前言

随着轨道交通产业的迅猛发展, 能源消耗问题日益突出, 实现车体轻量化是节能减排的有效方法

之一^[1-2]。铝合金具有密度小、比强度高等优点, 近年来正被逐渐应用于车体的设计和开发中。考虑到结构强度和轻量化等因素, 需要对异种铝合金进行电阻点焊连接。电阻点焊涉及电场、传热、力学和冶金耦合过程, 在此过程中产生的残余拉应力会降低点焊接头的力学性能^[3]。因此, 研究异种铝合金点焊接头中的残余应力大小及分布规律, 特别是

点焊接头内部残余应力水平,对调节点焊工艺参数、预测接头服役性能具有指导意义。

由于电阻点焊熔核中心最后凝固的特性,点焊接头残余应力最大值往往在熔核内部。现有测量残余应力的方法多为表面应力测量,内部应力测试技术十分稀少,较为适合的中子衍射法设备昂贵成本高^[4],可利用率极低。用数值模拟的方法计算焊接残余应力可以节约时间,降低成本,近年来许多学者利用数值模拟技术对电阻点焊接头中的残余应力进行了研究^[5-6]。AFSHARI 等^[7]建立 6061 铝合金电阻点焊过程的二维轴对称有限元模型,研究点焊接头残余应力分布规律。MOSHAYEDI 等^[8]通过有限元模拟分析焊接时间和焊接电流对 304 不锈钢点焊残余应力的影响,结果表明,提高焊接电流残余应力的最大值升高,而延长焊接时间对残余应力影响较小。采用有限元模拟研究异种铝合金电阻点焊接头残余应力还鲜有报导。

有研究认为,焊接前后焊缝处材料力学性能变化对残余应力影响较大^[9-11]。在异种铝合金电阻点焊过程中,熔核处材料的成分和热处理状态都可能发生变化,导致其力学性能与母材不同。因此,获得接头微区的力学性能是用有限元法准确预测异种铝合金电阻点焊接头残余应力的关键之一。然而,点焊熔核尺寸较小,难以制成拉伸试样测试熔核材料的力学性能,这为预测点焊接头中残余应力带来了困难。仪器化压入测试技术是近年来发展起来的一种材料微区力学性能测试技术^[12],这种技术的优点是可在小尺寸材料上进行测试,因此可借助该方法获得点焊熔核微区的力学性能。

为了准确预测异种铝合金电阻点焊接头内部残余应力,基于仪器化压入测试技术和有限元理论,建立了考虑熔核微区力学性能的异种铝合金电阻点焊有限元模型。通过比较残余应力的数值计算与试验测试结果,验证了有限元模型的有效性,得到了异种铝合金电阻点焊接头残余应力分布规律。

1 试验方法

使用 6 mm 厚的 5083-O 铝合金和 4 mm 厚的 7N01-T6 铝合金板材进行电阻点焊试验。5083 铝合金的主要化学成分(质量分数)为 Mn 0.70%, Mg 4.54%, Fe 0.15%, Si 0.12%, Cr 0.095%, Al 余量。7N01 铝合金的主要化学成分为 Zn 3.65%, Mg 0.90%, Cu 0.12%, Cr 0.15%, Fe 0.15%, Si 0.05%, Al 余量。利用线切割沿板材轧制方向切取母材拉伸

试样,试样的直线段长 40 mm,宽 10 mm。在 Instron 5582 试验机上进行拉伸试验,应变速率 0.002 s^{-1} 。电阻点焊前对待焊板材进行机械打磨以去除氧化膜。采用直径 19 mm 的圆柱形电极进行电阻点焊,焊接工艺参数如下:电极压力 18 kN,焊接电流 47 kA,预压、通电和保持时间分别为 40 ms、25 ms 和 40 ms。

点焊完成后,依据 GB/T 31218—2014《金属材料残余应力测定全释放应变法》测量点焊接头中的残余应力。用线切割截取点焊接头的金相试样,试样经打磨、抛光后用 Keller 试剂进行腐蚀,采用 Leica MeF-4 型金相显微镜观察和测量熔核截面形貌及尺寸。将金相试样用于微区力学性能测量,采用 LECO-247AT 型硬度计测量焊接接头的显微硬度,载荷 0.98 N,加载时间 15 s。根据 GB/T 21838.1—2008《金属材料硬度和材料参数的仪器压痕试验第 1 部分:试验方法》测量点焊接头微区的压入载荷-位移曲线,试验设备为 Shimadzu AG-X 试验机,压头直径 0.5 mm,压入速度 0.01 mm/s。

2 数值模拟

由于实际电阻点焊过程的对称性,采用二维轴对称有限元模型进行模拟。建立的有限元几何模型如图 1 所示,模型中最大网格边长为 0.3 mm,为了保证模拟的准确性,将上下板接触处的网格细化至 0.05 mm。网格为二维四节点四边形单元(Quads(10)),总数约为 4 万个。模拟过程中,下电极固定,在上电极施加压力及电流。在工件表面设置工件与空气的对流换热边界条件。环境温度设置为 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$,对流换热系数为 $12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ^[7]。模拟在有限元软件 Simufact Forming 中进行。点焊电极和待焊铝合金母材的力学性能和热物性参数见表 1、2^[13-14]。5083 和 7N01 铝合金室温力学性能如图 2 所示,高温下的流动应力分别用式(1)和式(2)计算^[15-16]

$$\sigma_1 = 81.96 \ln \left\{ \left(\frac{Z}{1.40 \times 10^{10}} \right)^{0.21} + \left[\left(\frac{Z}{1.40 \times 10^{10}} \right)^{0.42} + 1 \right]^{0.5} \right\} \quad (1)$$

$$\sigma_2 = 61.51 \ln \left\{ \left(\frac{Z}{2.491 \times 10^{10}} \right)^{0.11} + \left[\left(\frac{Z}{2.491 \times 10^{10}} \right)^{0.22} + 1 \right]^{0.5} \right\} \quad (2)$$

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (3)$$

式中, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, R 为气体常数, T 为绝对温度, Q 为变形激活能, 5083 和 7N01 铝合金的变形

激活能分别为 164 kJ/mol 和 152 kJ/mol。

图1 异种铝合金电阻点焊有限元几何模型

表1 铝合金的热物性及力学性能参数

参数	温度/℃				
	20	300	500	700	900
电阻率/ $\times 10^{-8}(\Omega \cdot \text{m})$	2.11	3.87	5.43	6.99	9.81
热导率/ $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	326	291	281	310	268
比热容/ $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	390	395	400	482	494
热膨胀系数/ $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	16.6	17.5	18.4	18.5	19.3
弹性模量/GPa	124	82.7	38.6	15.8	13.8

表2 铜电极的热物性及力学性能参数

参数	温度/℃				
	20	200	300	500	570
电阻率/ $\times 10^{-8}(\Omega \cdot \text{m})$	3.40	5.19	6.33	9.10	10.79
热导率/ $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	158	163	163	154	183
比热容/ $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	886	936	947	1 018	1 042
热膨胀系数/ $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	22.7	24.7	25.7	26.9	27.4
弹性模量/GPa	69.3	49.7	30.2	10.9	1

图2 5083和7N01铝合金室温应力应变曲线

点焊残余应力用式(4)进行计算^[14]

$$\Delta\sigma = -D\Delta\varepsilon + C\Delta T \quad (4)$$

式中, $\Delta\sigma$ 和 $\Delta\varepsilon$ 分别是应力和应变增量, D 是弹塑性矩阵, C 是与热膨胀系数相关的系数, ΔT 是温度增量。

为了比较点焊前后微区力学性能变化对残余应力的影响, 设定了两个算例, 算例1在电阻点焊全过程中使用点焊前的母材力学性能进行模拟, 算

例2在预压和通电阶段使用点焊前母材的力学性能, 在保持和冷却阶段使用通过仪器化压入测试得到的焊后力学性能进行模拟。两个算例中使用的点焊工艺参数与试验一致。

3 结果与分析

3.1 接头微区力学性能

图3是点焊熔核截面形貌及硬度测试位置。图4为沿图3中Line1线进行硬度测试得到的硬度分布图。从图4中可以看到, 7N01和5083母材(Base metal, BM)的硬度较高, 分别为115 HV和79 HV, 熔核部位的硬度较低, 约为65 HV, 热影响区(Heat affected zone, HAZ)的硬度大小介于熔核和母材之间。

图3 熔核截面形貌及硬度测试位置

图4 接头硬度分布

硬度是反映材料综合性能的一种指标。根据点焊接头硬度的分布规律, 在接头的熔核中心(Center of nugget, CN)、热影响区和母材上选取5个典型位置进行仪器化压入测试, 得到的载荷-位移(p - h)曲线如图5所示。可以看到, 不同区域的压入曲线差别较明显, 对比图4可以发现, 硬度越高则对应的压入载荷越大, 因此, 根据硬度分布情况确定微区力学性能测试位置是较为合理的。本文采用文献[17]中的方法将 p - h 曲线转化为应力应变曲线。不同压入深度 h 下的应变 ε 和应力计算式分别为^[17]

$$\varepsilon = 0.033 \times h/r + 0.00616 \quad (5)$$

$$\frac{W}{h^3 \sigma (1 + sn)} = \left(\frac{1}{m_e \frac{\bar{E}}{\sigma (1 + sn)}} + \frac{1}{m_p} \right)^{-1} \quad (6)$$

式中, r 为压头半径, W 为压入深度为 h 时对应的压入功, 其他参数用式(7)计算^[17]

$$s = -5.31 \times (h/r)^2 + 4.02 \times h/r + 0.604 \quad (7)$$

$$\bar{E} = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (8)$$

$$m_e = \frac{8}{15} \sqrt{\frac{r}{h}} \quad (9)$$

$$m_p = 13.27 \frac{r}{h} - 7 \quad (10)$$

式中, ν 为泊松比, 取 0.3, E 为弹性模量, 取 70 GPa, n 为应变硬化指数。假设待测材料的应力应变关系符合幂率硬化方程

$$\sigma = R \varepsilon^n \quad (11)$$

式中, R 为常数。

图 5 接头典型位置的压入曲线

从压入曲线上获取压入深度和对应的压入功数据, 联立式(5)、(6)和(11), 求解式(11)中的 R 和 n , 即可得到待测微区材料的应力应变曲线。本文计算得到的应力应变曲线如图 6 所示, 可以看到, 通过仪器化压入得到的母材应力应变曲线与拉伸得到的应力应变曲线基本一致, 证明了仪器化压入测试结果的有效性, 与母材相比, 点焊熔核和热影响区的流动应力有所降低, 经计算, 5083HAZ、CN 和 7N01HAZ 的流动应力分别为母材的 94%、90%和 80%。在点焊保持和冷却过程的模拟中, 将位于 5083HAZ、CN 和 7N01HAZ 材料的室温力学性能用如图 6 所示的应力应变曲线替换, 高温下的力学性能用式(1)和式(2)乘以相应的系数进行计算, 分别为 $0.94 \sigma_1$ 、 $0.90 \sigma_1$ 和 $0.80 \sigma_2$, 以考察微区力学性能变化对残余应力的影响。

图 6 仪器化压入及拉伸应力应变曲线对比

3.2 接头中的残余应力

图 7 为模拟与试验得到的熔核形貌对比, 模拟中设定的材料熔点为 645 °C, 可以看到模拟得到的熔核形貌与金相照片基本一致, 从熔核尺寸及形貌的角度初步验证了有限元模型的有效性。

图 7 熔核尺寸对比

为了验证残余应力计算结果并细致比较两种模型的差异, 分别提取了算例 1 和算例 2 上、下表面的残余应力并与试验结果进行对比, 结果如图 8 和图 9 所示, 可以看到, 算例 2 的计算结果与实测值更接近, 因此算例 2 残余应力计算结果是有效的。在图 8 中, 算例 1 和算例 2 的计算结果相差较小, 这主要是因为上板材料 5083 铝合金是一种不可热处理强化铝合金, 经过焊接热循环后其力学性能改变较小, 所以是否考虑微区力学性能对残余应力计算结果影响不大。而在图 9 中, 算例 1 和算例 2 计算结果差别较大, 这主要是由于下板材料 7N01 铝合金是一种可热处理强化铝合金, 在经历了焊接热循环后, 其热处理状态改变, 导致材料发生软化, 因此产生的残余应力也较低。

(a) 径向残余应力

图8 上表面残余应力对比

图9 下表面残余应力对比

图10和图11分别为算例1和算例2计算得到的残余应力分布云图。在图10中可以看到,在上下板接触的界面处,残余应力出现了不连续的现象,这主要是由于在算例1中,没有考虑材料力学性能的变化,在计算时仍以焊接前母材的力学性能为基础计算残余应力,而母材5083与7N01的力学性能相差较大,导致界面处应力不连续。在算例2中,由于对熔核及热影响区材料赋予了通过仪器化压入试验测得的力学性能,因此得到的上下板界面处的残余应力连续。此外,在图11中可以看到,熔核中(A区域)出现了径向和切向残余应力的最大值,约为100 MPa。在图11a中,接头上表面B区域和下表面C区域分别出现了径向残余应力的最大值,但

其对应位置没有出现切向残余应力(图11b)最大值。

图10 算例1残余应力计算结果

图11 算例2残余应力计算结果

已有的对铝合金电阻点焊接头残余应力的研究中^[18-20],板厚组合通常较薄,可以忽略板厚方向(Z方向)的残余应力,而本研究使用的板材厚度之和达到10 mm,属于中厚板铝合金^[21],因此需要对厚度方向的残余应力进行研究。图12是板厚方向的残余应力分布云图,可以看到,板厚方向残余应力较小,最大值约为15 MPa,出现在熔核中心(A区域)。

图12 算例2板厚方向残余应力分布

综合以上分析可知, 点焊熔核处于三向拉伸残余应力状态点焊, 熔核中心处的残余应力最大, 是点焊接头最为薄弱的位置。

4 结论

(1) 5083 与 7N01 铝合金进行电阻点焊后, 接头微区力学性能分布规律为熔核区的硬度及流动应力最低, 热影响区的硬度及流动应力介于母材和熔核之间。

(2) 数值模拟结果表明, 接头微区力学性能对异种铝合金电阻点焊接头残余应力峰值影响较大, 对残余应力分布规律影响较小, 熔核处于三向拉应力状态, 熔核心部的残余应力最大。

(3) 采用考虑微区力学性能的有限元模型计算的残余应力与实测值吻合较好, 相比于不考虑微区力学性能的有限元计算方法, 残余应力预测的准确性提高。

参 考 文 献

- [1] 王海波, 门明良, 阎昱, 等. 比例/非比例加载路径下 5754O 汽车用铝合金板各向异性变形行为的精确解析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(24): 77-87.
WANG Haibo, MEN Mingliang, YAN Yu, et al. Accurate analysis of anisotropic deformation behavior of 5754O aluminum alloy sheet under proportional/non-proportional loading paths[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(24): 77-87.
- [2] TURNAGE S A, DARLING K A, RAJAGOPALAN M, et al. Influence of variable processing conditions on the quasi-static and dynamic behaviors of resistance spot welded aluminum 6061-T6 sheets[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 724: 509-517.
- [3] MOHARRAMI R, HEMMATI B. Numerical stress analysis in resistance spot-welded nugget due to post-weld shear loading[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 27: 284-290.
- [4] JIANG W, CHEN W, WOO W, et al. Effects of low-temperature transformation and transformation-induced plasticity on weld residual stresses: numerical study and neutron diffraction measurement[J]. Materials & Design, 2018, 147: 65-79.
- [5] LIU X, WEI Y, WU H, et al. Effect of stamping dimensional deviations on residual stresses and deformation of resistance spot welded steel sheets[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 272: 149-162.
- [6] SADIGH M A S, MARAMI G, PAYGOZAR B. Failure simulation in resistance spot-welded lap-joints using cohesive zone modeling[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(11): 2567-2577.
- [7] AFSHARI D, SEDIGHI M, KARIMI M R, et al. On residual stresses in resistance spot-welded aluminum alloy 6061-T6: Experimental and numerical analysis[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22(12): 3612-3619.
- [8] MOSHAYEDI H, SATTARI-FAR I. Resistance spot welding and the effects of welding time and current on residual stresses[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11): 2545-2552.
- [9] 邓德安, 张彦斌, 李索, 等. 固态相变对 P92 钢焊接接头残余应力的影响[J]. 金属学报, 2016, 52(4): 394-402.
DENG Dean, ZHANG Yanbin, LI Suo, et al. Influence of solid-state phase transformation on residual stress in P92 steel welded joint[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(4): 394-402.
- [10] 梁伟, 郭科峰, 龚毅, 等. 考虑铝合金接头软化的焊接变形及残余应力预测方法[J]. 焊接学报, 2017, 38(5): 58-62.
LIANG Wei, GUO Kefeng, GONG Yi, et al. High precision method of residual stress and welding distortion of aluminum alloy sheet[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(5): 58-62.
- [11] PAKKANEN J, VALLANT R, KIČIN M. Experimental investigation and numerical simulation of resistance spot welding for residual stress evaluation of DP1000 steel[J]. Welding in the World, 2016, 60(3): 393-402.
- [12] LI Y G, KANOUTÉ P, FRANÇOIS M, et al. Inverse identification of constitutive parameters with instrumented indentation test considering the normalized loading and unloading P-h curves[J]. International Journal of Solids and Structures, 2019, 156-157: 163-178.
- [13] TUCHTFELD M, HEILMANN S, FÜSSEL U, et al. Comparing the effect of electrode geometry on resistance spot welding of aluminum alloys between experimental results and numerical simulation[J]. Welding in the World, 2019, 63(2): 527-540.
- [14] WANG J, WANG H, LU F, et al. Analysis of Al-steel resistance spot welding process by developing a fully coupled multi-physics simulation model[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 89: 1061-1072.

- [15] 刘君城, 金龙兵, 何振波, 等. 7N01 铝合金热压缩流变行为研究[J]. 稀有金属, 2011, 35(6): 812-817.
- LIU Juncheng, JIN Longbing, HE Zhenbo, et al. Hot deformation behavior of 7N01 aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2011, 35(6): 812-817.
- [16] 高文理, 关宇飞. 5083 铝合金热压缩应力-应变曲线修正与热加工图[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(9): 1737-1745.
- GAO Wenli, GUAN Yufei. Correction of flow stress-strain curve and processing maps of 5083 aluminum alloy during hot compression[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(9): 1737-1745.
- [17] OGASAWARA N, CHIBA N, CHEN X. A simple framework of spherical indentation for measuring elastoplastic properties[J]. Mechanics of Materials, 2009, 41(9): 1025-1033.
- [18] FLOREA R S, HUBBARD C R, SOLANKI K N, et al. Quantifying residual stresses in resistance spot welding of 6061-T6 aluminum alloy sheets via neutron diffraction measurements[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(11): 2358-2370.
- [19] MOSHAYEDI H, SATTARI-FAR I. Resistance spot welding and the effects of welding time and current on residual stresses[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11): 2545-2552.
- [20] SEDIGHI M, AFSHARI D, NAZARI F. Investigation of the effect of sheet thickness on residual stresses in resistance spot welding of aluminum sheets[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2016, 232(4): 621-638.
- [21] 胥国祥, 郭庆虎, 胡庆贤, 等. 中厚板铝合金光纤激光+MIG 复合热源焊残余应力的数值分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(2): 77-83.
- XU Guoxiang, GUO Qinghu, HU Qingxian, et al. Numerical analysis of welding residual stress in laser+MIG hybrid butt welding of medium-thick aluminum alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(2): 77-83.

作者简介: 毛镇东, 男, 1987 年出生。主要研究方向为轨道车辆车体焊接制造技术及工艺。

E-mail: mzdzhejiang@163.com

阚盈(通信作者), 男, 1984 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方向为焊接过程数值模拟及力学性能评价。

E-mail: ykan@imr.ac.cn