

文章编号: 1001-4888(2013)01-0087-07

考虑塑性和刚度不匹配的焊接残余应力估算

薛彩军*, 林鸿志, 张俊苗

(南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

摘要: 现有残余应力计算方法未能考虑材料塑性变形和焊接接头刚度不匹配的影响, 使得焊接残余应力计算结果和实际残余应力存在较大偏差。在 2219-T87 铝合金钨极氩弧焊焊接接头残余应力测试基础上, 提出一种基于非线性有限元和材料弹性模量分区的残余应力一释放应变曲线的残余应力计算方法, 研究了材料塑性变形和接头刚度不匹配对焊接残余应力计算的影响。结果表明, 焊接接头中非均质材料塑性不匹配可以引起对于残余应力计算的较大误差; 材料塑性变形对残余应力的影响大于接头刚度不匹配对残余应力的影响。所提出方法修正了传统方法在焊接接头的残余应力计算中由于未考虑接头非均质材料塑性不匹配而引起的误差。

关键词: 2219 铝合金; 焊接接头; 残余应力; 残余应力一释放应变曲线法; 材料塑性变形; 刚度不匹配

中图分类号: V414.4+1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-11-163

0 引言

2219 铝合金在 $-250 \sim 250^{\circ}\text{C}$ 温度范围内具有良好的低温性能、焊接性能和力学性能, 在航天领域受到广泛的应用^[1-2]。在焊接过程中, 由于铝合金受热不均匀使得焊接接头产生残余应力, 造成焊接结构承载时接头区域的应力应变重新分配, 影响构件的尺寸和形位精度, 降低构件的抗疲劳强度、抗应力腐蚀及抗蠕变开裂的能力, 最终影响到设备的性能与使用寿命^[3]。因此, 测量并计算焊接接头的残余应力是很有必要的。

现有残余应力测试方法包括有损检测中的钻孔法、压痕法, 以及无损检测的 X 射线法、中子衍射法等^[4-7]。这些方法基本都是通过测量待测试件表面或内部的应变, 并根据一定的计算方法将应变转换为残余应力。残余应力计算方法主要有基于线弹性力学的计算方法^[8]和塑性修正计算方法^[9-12]。

基于线弹性力学的残余应力计算方法虽然计算方便, 但是没有考虑孔边应力集中造成的塑性变形, 因此当塑性变形占总变形量的比例较大时就会导致残余应力计算值与真实值有较大的误差。塑性修正计算方法在基于线弹性力学的残余应力计算方法基础上考虑了孔边塑性变形的情况, 但是没有考虑由于焊接造成的接头和母材刚度不匹配的情况和两者塑性延伸性能的差别, 导致接头和母材的残余应力计算值有较大的偏差。

本文采用钻孔法对 2219-T87 铝合金钨极氩弧焊焊接接头进行残余应力测试, 综合分析焊接受热不均匀造成的材料塑性变形以及接头和母材刚度不匹配对残余应力计算结果的影响。

* 收稿日期: 2011-11-02; 修订日期: 2012-11-13

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2012795); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(NO2012081); 江苏高校优势学科建设工程资助项

通讯作者: 薛彩军(1973-), 男, 博士, 副教授, 主要从事结构优化、结构疲劳强度方向研究。E-mail: cjxue@nuaa.edu.cn

1 试验方法

1.1 残余应力测试试验

试验材料选用 4mm 厚的 2219-T87 铝合金钨极氩弧焊焊接头,接头试样如图 1 所示,其化学成分见表 1,热处理状态为:固溶化处理+断面收缩率为 7%的冷作加工+人工时效处理。



图 1 焊接接头残余应力测试试样

Fig. 1 Residual stress test sample of welding joint



图 2 测量点位置及布片图

Fig. 2 Measure point position and strain gauge arrangement

表 1 2219-T87 铝合金钨极氩弧焊焊接头的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of 2219-T87 welding joint

化学成分	Si	Fe	Cu	Mn	Zr	Al
质量分数	0.2	0.3	5.8~6.8	0.3	0.18	其余

表 2 测量点具体位置

Tab. 2 Accurate positions of measure point

测量点编号	1	2	3	4	5
孔中心距焊缝距离(mm)	2	4	6	8	10

根据文献[4]采用钻孔法进行残余应力测试试验。在接头试样上预先标记测量点位置(见表 2),粘贴应变(如图 2 所示);将应变片与导线接入静态电阻应变测量仪,平衡并清零应变测量仪;试样钻孔,待其冷却至室温(如图 3 所示);应变测量仪测量并保存数据。



图 3 钻孔后的焊接接头

Fig. 3 The welding joint after drilling



图 4 焊接接头拉伸试样

Fig. 4 Tensile sample of welding joint

1.2 局部力学性能试验

试验材料选用 4mm 厚的 2219-T87 铝合金钨极氩弧焊焊接头拉伸试样,接头试样如图 4 所示。

焊接接头局部力学性能试验在金相试验的基础上确定接头局部不同组织区域的尺寸,将接头分为四个区域:焊缝区(WZ)、熔合区(FZ)、热影响区(HAZ)和母材区(BM),如图 5 所示;在接头试样上的不同组织区域布置应变片;使用电测法得到接头中不同组织区域的力学性能,如图 6 所示。不同区域属性的弹性模量见表 3。

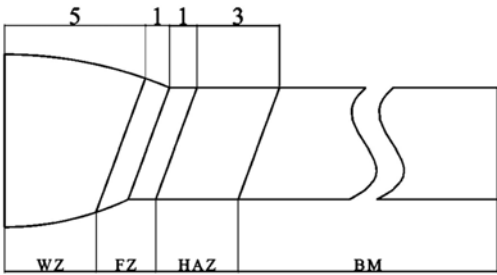


图 5 焊接接头不同区域示意图
WZ 为焊缝区, FZ 为熔合区,
HAZ 为热影响区, BM 为母材区

Fig. 5 Different region scheme of welding joint
WZ: Weld Zone, FZ: Fusion Zone,
HAZ: Heat Affected Zone, BM: Base Metal

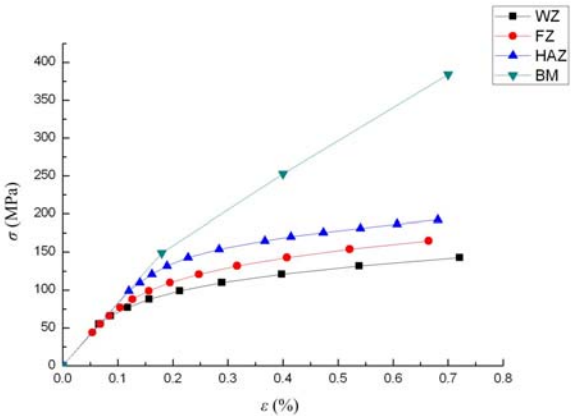


图 6 焊接接头不同区域应力—应变曲线
Fig. 6 The stress-strain curve of welding
joint in different region

2 残余应力—释放应变曲线法

2.1 基本原理

基于焊接接头局部力学性能试验获得的应力应变曲线,采用材料弹性模量分区思想,将接头根据实际情况进行分区处理。建立接头有限元模型,分别赋予不同的区域属性,进行非线性静力分析,得到不同区域属性的残余应力—释放应变曲线。结合残余应力测试数据,采用线性插值法计算不同区域属性测量点的残余应力。根据测量点处不同区域属性所占比例,按式(1)计算得到焊接接头的残余应力。

$$\sigma_{rs} = \sum_{i=1}^n \sigma_i \omega_i \tag{1}$$

式中, σ_i 为 i 区域属性的残余应力; ω_i 为测量点处 i 区域属性所占比例。

表 3 不同区域的弹性模量

Tab. 3 Elastic modulus of different region

区域	WZ	FZ	HAZ	BM
弹性模量 $E(\text{GPa})$	83.51	81.71	82.14	82.58

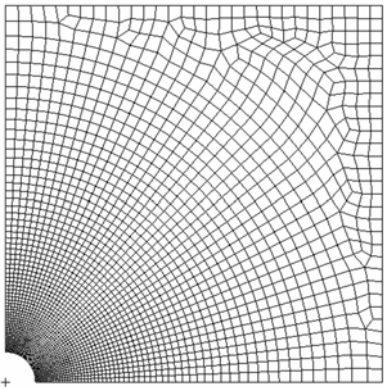


图 7 二维有限元网格划分
Fig. 7 2D element division

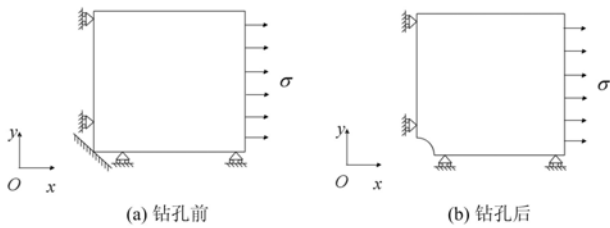


图 8 有限元边界条件

Fig. 8 Boundary condition of the finite element model

2.2 焊接接头有限元分析

由于接头试样厚度方向尺寸相对较小,认为其近似满足平面应力状态。考虑对称性,建立接头的 1/4 有限元模型,模型尺寸为 $25\text{mm} \times 25\text{mm}$, 钻孔直径 $\phi=4\text{mm}$, 如图 7 所示。不同区域弹性模量见表 3, 材料泊松比 $\mu=0.33$ 。

如图 8 所示, 钻孔前后接头模型 yOz 面所有的节点约束 x 方向的位移和三个方向的转角为 0; xOz

面所有节点约束 y 方向的位移和三个方向的转角为 0; 右端面施加 σ 的均布压强。钻孔前模型对称轴 Oz 所有节点约束三个方向的位移和转角都为 0。

有限元中通过建立材料场函数定义焊接接头不同组织区域的本构关系, 包括线弹性阶段性能和塑性阶段性能。采用 Von Mises 准则为非线性有限元计算中的材料屈服准则, 用于确定应力属于弹性还是塑性, 通过求解非线性基本方程, 获得焊接接头的应力应变分布。

通过有限元非线性静力分析, 得到不同区域属性的焊接接头在分级载荷作用下的应力应变结果。如图 9 所示, 当接头边界施加 $\sigma=25\text{MPa}$ 的载荷时, 孔边最大应力为 $\sigma=71.8\text{MPa}>\sigma_e$, 孔边出现塑性变形。



图 9 打孔后接头 25MPa 工况的应力云图

Fig. 9 Stress of drilled joint in 25MPa load case

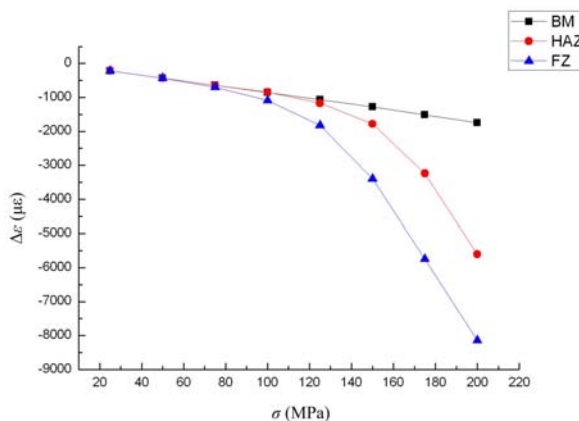


图 10 不同区域属性接头残余应力—释放应变曲线

Fig. 10 Residual curve of joint's different region

读取分级载荷下焊接接头的释放应变, 建立不同区域属性情况下接头的残余应力—释放应变曲线, 如图 10 所示。

如图 9、10 所示, 当残余应力 $\sigma_{res}<25\text{MPa}$ 时, 母材、热影响区和熔合区属性的释放应变近似相等; 当 $25\text{MPa}<\sigma_{res}<70\text{MPa}$ 时, 三种区域属性的释放应变相差较小; 当 $\sigma_{res}>70\text{MPa}$ 时, 三种区域属性的释放应变有较大区别, 相同的残余应力, 熔合区属性释放应变最大, 母材属性释放应变最小。

由图 6 可知, 当 $\sigma_{res}<25\text{MPa}$ 时, 三种区域属性的残余应力 $\sigma_{res}<\sigma_e$, 材料处于线弹性阶段, 由于三种区域属性的弹性模量近似相等, 因此相同残余应力情况下, 三种区域属性的释放应变也近似相等; 当 $25\text{MPa}<\sigma_{res}<70\text{MPa}$ 时, 虽然三种区域属性的残余应力 $\sigma_{res}>\sigma_e$, 但是塑性应变占总应变比例较小, 材料近似处于线弹性阶段, 因此相同残余应力情况下, 三种区域属性的释放应变相差不大; 当 $\sigma_{res}>70\text{MPa}$ 时, 由材料应力应变曲线可知, 熔合区属性最早出现屈服。受到同样的载荷时, 由于熔合区属性屈服最早, 因此其材料内部储存的应变能最多。故钻孔时, 同样的残余应力水平下, 熔合区属性的释放应变最大。同理, 母材属性释放应变最小。

表 4 不同方法测量点残余应力

Tab. 4 Residual stress on measuring points by different methods

距离 $L(\text{mm})$	释放应变 $\Delta\epsilon(\mu\epsilon)$	$\sigma_{res}-\Delta\epsilon$ 曲线法 $\sigma_{res}(\text{MPa})$	基于线弹性力学的残余应力 计算法 $\sigma_{res}(\text{MPa})$
2	-1520	127.0	242.8
4	-860	100.6	137.4
6	-515	60	82.5
8	-205	23.9	32.8
10	90	-10.5	-14.4

分别采用残余应力一释放应变曲线法和基于线弹性力学的残余应力计算方法计算测量点处残余应力,结果如表4所示,由于焊接残余应力的特点即平行于焊缝方向的残余应力远大于垂直于焊缝方向的应力,因此表4中仅列出平行于焊缝方向上的残余应力计算结果。

如表4所示,采用不同的残余应力计算方法所得到的残余应力有较大的偏差。当测量点距焊缝距离小于10mm时,残余应力表现为拉应力,且随着距离的减小,残余应力逐渐增大;当测量点距焊缝距离大于10mm时,残余应力表现为压应力。分析认为,焊接过程中焊缝局部产生大量的热,使得焊缝处周围金属体积急剧膨胀,但这种膨胀受到周围金属的束缚,限制其膨胀。冷却之后,焊缝处周围金属体积收缩,但受到周围金属的束缚,因此产生了残余拉应力。远离焊缝的金属由于之前焊缝处金属膨胀未能由于冷却而完全恢复,因此产生了残余压应力。

3 分析与讨论

3.1 材料塑性变形的影响

为了考虑材料塑性变形对残余应力的影响,分别对母材属性的接头采用残余应力一释放应变曲线法和基于线弹性力学的残余应力计算方法,得到接头残余应力分布如图11所示。

由图11可见,单纯考虑材料塑性变形的残余应力一释放应变曲线法和基于线弹性的残余应力计算方法计算所得的残余应力偏差随着测量点距焊缝距离的减小而增大,偏差最大达到27.6%。

分析认为由于焊接时焊缝处局部受热严重,因此靠近焊缝处残余应力较大,超过材料的弹性极限。由图5可知,此时考虑材料塑性变形影响产生的释放应变大于只考虑线弹性影响产生的释放应变,且随着残余应力的增大,两种方法产生的释放应变偏差会越大。

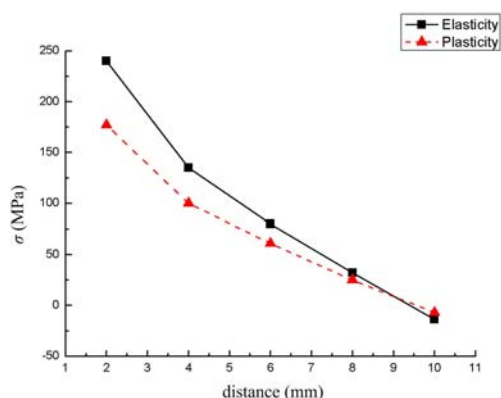


图11 考虑材料塑性变形的接头残余应力分布
Fig. 11 Residual stress distribution of welding joint considering material plastic deformation

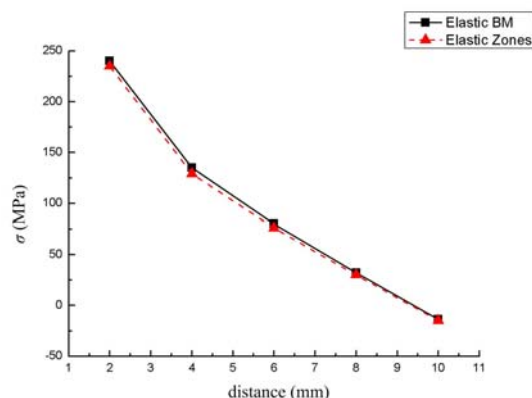


图12 考虑接头刚度不匹配的接头残余应力分布
Elastic BM 为线弹性母材, Elastic Zones 为线弹性分区
Fig. 12 Residual stress distribution of welding joint considering rigidity mismatched

3.2 接头刚度不匹配的影响

采用基于线弹性力学的残余应力计算方法,考虑接头刚度不匹配和母材属性情况下计算得到的接头残余应力分布如图12所示。

由图12可见,单纯考虑接头刚度不匹配和母材属性情况下计算所得的残余应力几乎相同。分析认为单纯考虑接头刚度不匹配对残余应力计算结果影响时,采用的是基于线弹性力学的残余应力计算方法,而接头分区时三种区域属性的弹性模量几乎相同,因此单纯考虑接头刚度不匹配和母材属性情况下计算所得的残余应力几乎相同。

3.3 塑性变形和接头刚度不匹配的综合影响

为了综合考虑材料塑性变形和接头刚度不匹配对残余应力计算的影响,分别对接头采用残余应力一释放应变法和基于线弹性力学的残余应力计算方法,得到接头残余应力分布如图13所示。

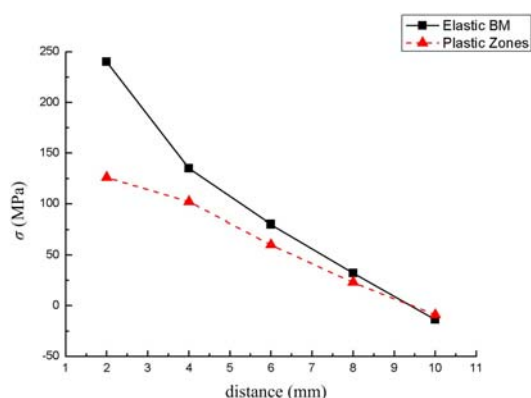


图 13 综合考虑两种因素的接头残余应力分布
Elastic BM 为线弹性母材, Plastic Zones 为塑性分区
Fig. 13 Residual stress distribution of welding joint considering two factors

由图 13 可见,采用残余应力一释放应变曲线法和基于线弹性力学的残余应力计算方法计算所得的残余应力偏差随着测量点距焊缝距离的减小而增大,偏差最大达到 47%。

分析认为由于熔合区和热影响区属性与母材属性相比屈服的较早,故相同应力条件下,综合考虑材料塑性变形和接头刚度不匹配影响情况,测量点储存的应变能大于单纯考虑材料塑性变形影响的情况,因此相同测量点处综合考虑材料塑性变形和接头刚度不匹配计算得到的残余应力大于单纯考虑材料塑性变形或接头刚度不匹配计算得到的残余应力。

4 结论

基于非线性有限元和材料弹性模量分区思想,提出了一种新的残余应力估算方法,综合考虑了材料塑性变形和接头刚度不匹配对残余应力计算的影响。焊接接头中非均质材料塑性不匹配可以引起对于残余应力计算的较大误差。材料塑性变形对残余应力计算的影响大于接头刚度不匹配对残余应力计算的影响。因此对于高残余应力计算,必须要考虑材料塑性变形才能有效的减小残余应力计算误差。

参考文献:

- [1] Malarvizhi S, Balasubramanian V. Effect of welding processes on AA2219 aluminium alloy joint properties [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21:962—973.
- [2] 王春炎, 曲文卿, 姚君山 等. 2219-T87 铝合金搅拌摩擦焊接头组织与力学性能 [J]. 焊接学报, 2010, 31(10): 77—84 (WANG Chunyan, QU Wenqin, YAO Junshan, et al. 2219-T87 aluminum alloy friction stir welding head organization and mechanical properties [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(10): 77—84 (in Chinese))
- [3] 王庆明, 孙渊. 残余应力测试技术的进展与动向 [J]. 机电工程, 2011, 28(1): 11—15 (WANG Qingming, SUN Yuan. Research development on the test methods of residual stress [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2011, 28(1): 11—15 (in Chinese))
- [4] 王柞基, 黄兰林, 李广铎. CB 3395—92 残余应力测试方法钻孔应变释放法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1992 (WANG Zhaji, HUANG Lanlin, LI Guangduo. Residual stress determination method hole-drilling-strain-release method [S]. Beijing: Standards Press of China, 1992 (in Chinese))
- [5] 陈怀宁, 李荣峰, 陈静 等. GB/T 24179—2009 金属材料残余应力测定压痕应变法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009 (CHEN Huaining, LI Rongfeng, CHEN Jing, et al. Metallic materials-Residual stress determination [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009 (in Chinese))
- [6] 金春玲, 徐辉. QJ2916—97 铝及铝合金表面残余应力的 X 射线测试方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1997 (JIN Chunling, XU Hui. X-Ray method of residual stress in al and al alloy surface [S]. Beijing: Standards Press of China, 1997 (in Chinese))
- [7] 陈波, 孙光爱, 黄朝强 等. GB/T 26140—2010 无损检测测量残余应力的中子衍射方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010 (CHEN Bo, SUN Guangai, HUANG Zhaoqiang, et al. Non-destructive testing-Standards test method for determining residual stresses by neutron diffraction [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010 (in Chinese))
- [8] 闫淑芝, 于向军, 王玉梅. 残余应力测试中释放系数标定的新方法 [J]. 吉林工业大学学报, 1995, 25(2): 49—53 (YAN Shuzhi, YU XiangJun, WANG Yumei. The new method of release calibration coefficient in residual

- stress test [J]. Journal of Jilin University of Technology, 1995, 25(2): 49—53(in Chinese))
- [9] 施彦彬, 何闻, 郑建毅. Q235 钢应变释放系数塑性修正问题的研究 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(11): 2083—2087 (SHI Yanbin, HE Wen, ZHENG Jianyi. Research on plasticity modification of strain relief coefficients in Q235 steel [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(11): 2083—2087 (in Chinese))
- [10] 马雯波, 陈曙光, 刘荟琼 等. 盲孔法中应变释放系数的有限元模拟 [J]. 焊接学报, 2011, 32(2): 97—100 (MA Wen-bo, CHEN Shu-guang, LIU Hui-qiong, et al. Finite element simulation of strain energy release coefficient in blind-hole method [J]. Transaction of the China Welding Institution, 2011, 32(2): 97—100(in Chinese))
- [11] 侯海量, 朱锡, 刘润泉. 盲孔法测量 921A 钢焊接残余应力的应变释放系数研究 [J]. 船舶工程, 2003, 25(1): 57—60 (HOU Hailiang, ZHU Xi, LIU Runquan. The strain release factors study for measuring 921A steel's welding residual stresses using blind-hole method [J]. Journal of Ship Engineering, 2003, 25(1): 57—60 (in Chinese))
- [12] 侯海量, 朱锡, 刘润泉. 盲孔法测量焊接残余应力应变释放系数的有限元分析 [J]. 机械强度, 2003, 25(6): 632—636 (HOU Hailiang, ZHU Xi, LIU Runquan. FEM analysis on the strain release factors for measuring welding residual stresses using blind-hole method [J]. Journal of Mechanical Strength, 2003, 25(1): 57—60(in Chinese))

Estimation of Welding Residual Stress by Taking into Account the Mismatch of Material Plasticity and Joint Stiffness

XUE Cai-jun, LIN Hong-zhi, ZHANG Jun-miao

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In existing residual stress calculation, there is a big deviation between the calculation results and actual residual stress of welding residual stress, due to not taking into account the effects of material plastic deformation and welded joint stiffness mismatch. Based on residual stress test of 2219-T87 TIG welded joints, a residual stress calculation method is put forward in this paper to study the effect of material plastic deformation and joint stiffness mismatch on the welding residual stress by using nonlinear finite element and the residual stress-release strain curve in material elastic modulus partition. Results show that the mismatch of non-homogeneous material plasticity in welded joints may cause large error in residual stress calculation, and the impact of the residual stress of plastic deformation is greater than that of the joint stiffness mismatch. The proposed method may modify the error due to taking into account the mismatch of non-homogeneous material plasticity in welded joints.

Keywords: 2219 Aluminum alloy; welded joints; residual stress; method of residual stress-release strain curve; plastic deformation of material; stiffness mismatch