

文章编号:1674-8190(2013)01-060-06

# 基于形状改变比能和材料属性离散的 焊接残余应力估算

林鸿志,薛彩军,张俊苗

(南京航空航天大学 飞行器先进设计技术国防重点学科实验室,南京 210016)

**摘要:** 为了提高焊接残余应力测量精度,在 2219-T87 铝合金 TIG 焊接接头残余应力测定试验基础上,通过离散接头材料属性并利用形状改变比能对焊接残余应力进行塑性修正,分别研究孔边塑性变形和接头强度不匹配对焊接残余应力估算的影响。结果表明:同时考虑孔边塑性变形和接头强度不匹配因素的焊接残余应力估算方法,比线弹性残余应力计算方法能最大减小 39.8% 的误差;当测量点距焊缝距离小于 8 mm 时,在考虑孔边塑性变形的情况下,同时考虑接头不匹配的影响相比不考虑其影响可最大减小 40.6% 的误差;当测量点距焊缝距离大于 8 mm 时,可忽略接头强度不匹配对焊接残余应力估算的影响。

**关键词:** 焊接残余应力;孔边塑性变形;接头强度不匹配;形状改变比能;材料属性离散

**中图分类号:** TG404; TG407

**文献标识码:** A

## Welding Residual Stress Estimation Based on the Shape-changed Strength Ratio and Material Property Discretization

Lin Hongzhi, Xue Caijun, Zhang Junmiao

(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-advanced Design Technology of Flight Vehicle,  
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In order to improve the measurement accuracy of welding residual stress, welding residual stress is corrected by using shape-changed strength ratio and the method of discretizing joint material property on the base of residual stress test of 2219-T87 aluminum alloy TIG welding joint. Simultaneously, the effects of plastic deformation around holes and joint strength mismatch on welding residual stress estimation are studied separately. The results show that the method of estimating welding residual stress which considers both plastic deformation around hole and joint strength mismatch can reduce 39.8% error through contrasting with linear elastic estimation method; the way of considering the effect of joint strength mismatch and plastic deformation can reduce 40.6% error when the distance between the measuring point and welding seam is less than 8 mm; and the joint strength mismatch effect on welding residual stress estimation can be ignored when the distance between the measuring point and welding seam is more than 8 mm.

**Key words:** welding residual stress; plastic deformation around hole; joint strength mismatch; shape-changed strength ratio; material property discretization

收稿日期:2012-05-07; 修回日期:2012-06-29

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助南京航空航天大学

大学开放基金(kfj20110201)

江苏省自然科学基金(BK2012795)

通信作者:林鸿志, hongzhi\_lin@126.com

## 0 引言

2219-T87 铝合金在 -250~250 °C 温度范围内具有良好的低温性能、焊接性能和力学性能,在航空航天领域得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。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能力,最终影响设备的性能与使用寿命<sup>[3]</sup>。因此,测量并计算焊接接头的残余应力是很有必要的。

小孔法测量残余应力是工程中较为常用的残余应力测定方法<sup>[4]</sup>。然而采用小孔法测量残余应力时,由于孔边应力集中的影响,造成孔周围产生一定的塑性变形。根据 ASTM 标准 E837-81 和 E837-85,小孔法测量残余应力的范围是应力值不超过材料屈服强度的一半,即钻孔后材料应处于弹性范围内<sup>[5-6]</sup>。当采用小孔法测量较高残余应力时,如按  $\sigma \leq \frac{1}{2}\sigma_s$  时确定的应变释放系数计算,则得到的残余应力大于真实值<sup>[7-8]</sup>。

焊接时由于接头处材料受热不均匀,导致焊缝和母材的塑性延伸强度存在较大的差异<sup>[9]</sup>。文献[10]通过借用与焊缝塑性延伸强度相近材料的标定关系进行残余应力计算,此方法不仅在实际情况中实施较为困难,且计算所得残余应力与真实值之间存在较大误差。

本文采用小孔法对 2219-T87 铝合金 TIG 焊接接头进行残余应力测定,综合考虑钻孔产生的孔边塑性变形和接头材料强度不匹配对焊接残余应力计算的影响,通过离散接头材料属性并利用形状改变比能对焊接残余应力进行塑性修正。

## 1 试验方法

### 1.1 残余应力测定试验

试验材料选用 4 mm 厚的 2219-T87 铝合金 TIG 焊接接头,如图 1 所示,其化学成分如表 1 所示,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。

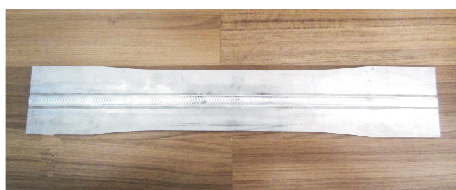


图 1 焊接接头残余应力测试试样

Fig. 1 Residual stress test sample of welding joint

表 1 2219-T87 铝合金 TIG 焊接接头的化学成分

Table 1 Chemical composition of 2219-T87 TIG welding joint

| 化学成分 | 质量分数/%    | 化学成分 | 质量分数/% |
|------|-----------|------|--------|
| Si   | 0.20      | Mn   | 0.30   |
| Fe   | 0.30      | Zr   | 0.18   |
| Cu   | 5.80~6.80 | Al   | 其余     |

采用钻孔法进行残余应力测定试验。在接头试样上预先标记测量点位置,钻孔中心距焊缝的距离如表 2 所示,粘贴应变片;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。钻孔后的焊接接头如图 2 所示。

表 2 测量点具体位置

Table 2 Locations of measure point

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

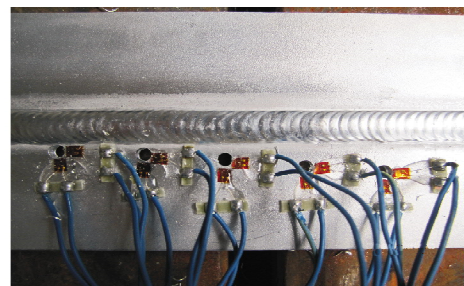


图 2 钻孔后的焊接接头

Fig. 2 Welding joint after drilling

### 1.2 局部力学性能试验

试验材料选用 4 mm 厚的 2219-T87 铝合金 TIG 焊接接头拉伸试样,如图 3 所示。



图 3 焊接接头拉伸试样

Fig. 3 Tensile test sample of welding joint

焊接接头局部力学性能试验步骤:首先在金相试验的基础上确定接头局部不同组织区域(详见2.1节)的尺寸,然后在试样不同组织区域处布置应变片,最后使用电测法得到接头中不同组织区域的力学性能。焊接接头不同区域应力-应变曲线如图4所示。

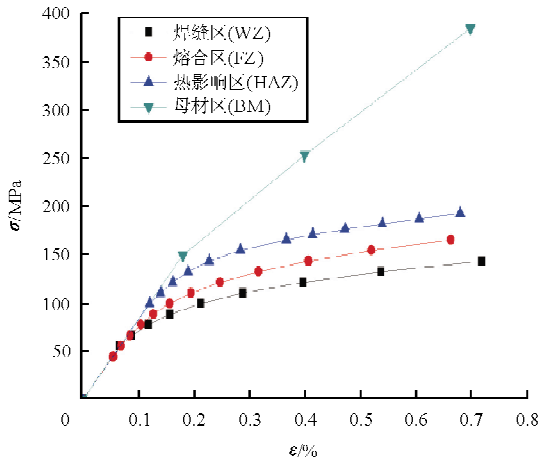


图4 焊接接头不同区域应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of welding joint in different regions

## 2 焊接残余应力塑性修正

由孔边屈服条件可推导出

$$S = (1 + \mu^2 - \mu)(\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2) - (1 + \mu^2 - 4\mu)\epsilon_x\epsilon_y \quad (1)$$

式中: $S$ 为相应的应力或应变状态下结构的形状改变比能; $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$ 为试验中电阻应变片测得的应变; $\mu$ 为材料泊松比。

### 2.1 接头材料属性离散

基于焊接接头局部力学性能试验获得的应力-应变曲线,采用材料属性离散思想,将接头根据微观组织形貌进行分区。分别计算不同区域属性情况下测量点处的残余应力,根据测量点处不同区域属性所占比例,按式(2)计算得到接头的焊接残余应力分布。

$$\sigma_{res} = \sum_{i=1}^n \sigma_i w_i \quad (2)$$

式中: $\sigma_i$ 为根据 $i$ 区域属性计算所得的残余应力; $w_i$ 为钻孔区域 $i$ 区域属性所占比例。

本文基于2219-T87铝合金TIG焊接接头力

学试验数据,考虑焊缝和母材强度不匹配对残余应力的影响,将接头划分为四个区域:焊缝区(WZ)、熔合区(FZ)、热影响区(HAZ)和母材区(BM)。焊接接头不同区域示意图如图5所示,不同区域属性的弹性模量如表3所示。

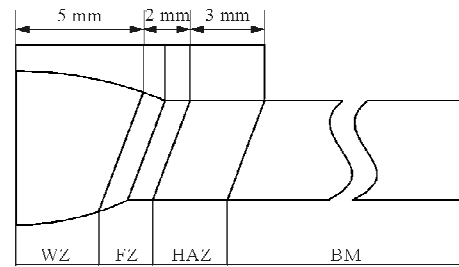


图5 焊接接头不同区域示意图

Fig. 5 Sketch of different regions of welding joint

表3 不同区域的弹性模量

Table 3 Elastic modulus of different regions

| 区域 | 弹性模量/GPa | 区域  | 弹性模量/GPa |
|----|----------|-----|----------|
| WZ | 83.51    | HAZ | 82.14    |
| FZ | 81.71    | BM  | 82.58    |

### 2.2 焊接接头有限元分析

由于试样接头焊缝外形的应力集中作用与钻孔产生的应力集中相对释放应变影响较小,同时由于接头厚度方向尺寸相对较小,因此可忽略接头外形的影响,将接头简化为薄板,采用壳单元进行数值模拟。考虑结构对称性及薄板边界效应的影响,选取接头的1/4结构建立有限元模型,模型尺寸为30 mm×30 mm,钻孔直径 $\phi=4$  mm,材料泊松比 $\mu=0.33$ ,接头薄板有限元模型如图6所示。

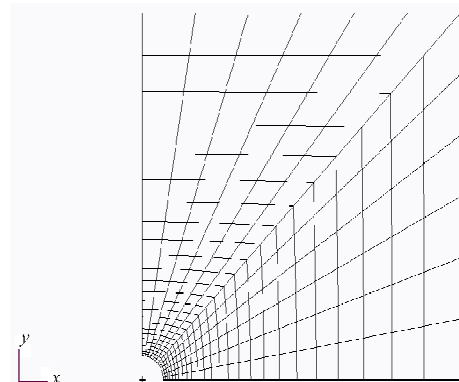


图6 接头薄板有限元模型

Fig. 6 2D finite element model of joint

通过提取与应变片粘贴位置对应的网格节点处(如图 7 所示)的位移,根据应变的物理定义,将计算所得的应变值作为应变片的显示应变。

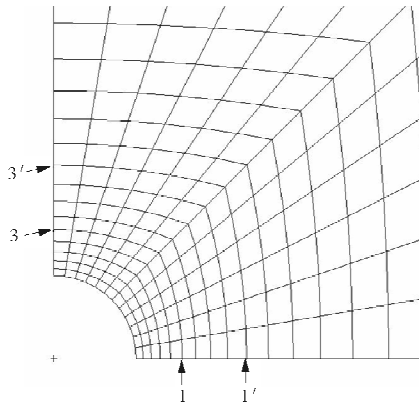


图 7 有限元模型中的位移提取点  
Fig. 7 Nodes for extracting displacement in finite element model

有限元模型的边界条件,即约束钻孔前后接头模型  $yOz$  面所有节点  $x$  方向的位移和三个方向的转角、 $xOz$  面所有节点  $y$  方向的位移和三个方向的转角,在右端面上施加的均布压强  $\sigma$ ,如图 8 所示。

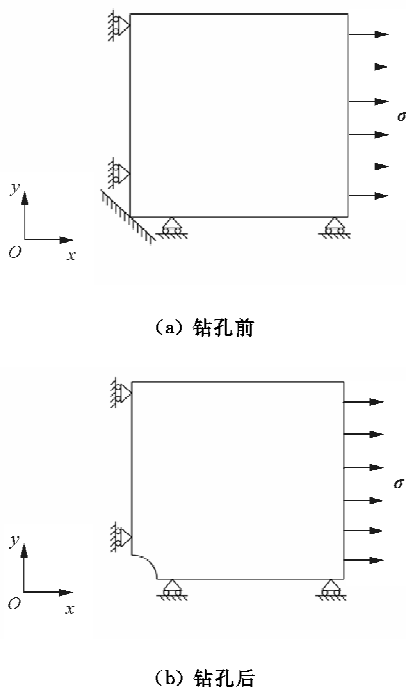


图 8 有限元边界条件

Fig. 8 Boundary conditions in finite element model

当  $\sigma \leq \frac{1}{2}\sigma_s$  时,形状改变比能  $S$  为一常数,因此在进行数值计算时,为了减少计算量,可在  $\sigma \leq \frac{1}{2}\sigma_s$  的范围内仅取若干应力水平进行数值分析。

### 2.3 焊接残余应力计算结果

通过有限元非线性静力分析,结合式(1)可得到不同区域属性情况下孔边发生塑性变形后应变释放系数的修正公式,如式(3)~式(6)所示,其中应变释放系数的单位为  $\mu\epsilon/\text{MPa}$ ,形状改变比能的单位为  $(10^{-7}\epsilon)^2$ 。

(1) 焊缝区

$$A' = \begin{cases} -2.155 0 & S \leq 0.33 \\ -0.215 6S - 2.522 8 & S > 0.33 \end{cases}$$

$$B' = \begin{cases} -4.624 4 & S \leq 0.33 \\ -0.208 1S - 5.179 3 & S > 0.33 \end{cases} \quad (3)$$

(2) 熔合区

$$A' = \begin{cases} -2.211 9 & S \leq 0.35 \\ -0.159 4S - 2.282 7 & S > 0.35 \end{cases}$$

$$B' = \begin{cases} -4.714 6 & S \leq 0.35 \\ -0.144 6S - 5.158 0 & S > 0.35 \end{cases} \quad (4)$$

(3) 热影响区

$$A' = \begin{cases} -2.207 1 & S \leq 0.61 \\ -0.142 0S - 1.721 2 & S > 0.61 \end{cases}$$

$$B' = \begin{cases} -4.666 2 & S \leq 0.61 \\ -0.092 5S - 4.473 8 & S > 0.61 \end{cases} \quad (5)$$

(4) 母材区

$$A' = \begin{cases} -2.193 0 & S \leq 2.40 \\ -0.022 8S - 1.934 6 & S > 2.40 \end{cases}$$

$$B' = \begin{cases} -4.646 6 & S \leq 2.40 \\ -0.027 7S - 4.528 9 & S > 2.40 \end{cases} \quad (6)$$

根据式(2)~式(6),结合残余应力测试结果,计算测量点处的焊接残余应力,计算结果如表 4 所示。

表4 接头焊接残余应力分布

Table 4 Welding residual stress distribution of joint

| 距焊缝<br>距离/mm | 释放应变<br>$\epsilon_x/\mu\epsilon$ | 释放应变<br>$\epsilon_y/\mu\epsilon$ | 纵向残余<br>应力 $\sigma_x/\text{MPa}$ |
|--------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 2            | -1 520                           | 218                              | 134                              |
| 4            | -860                             | 338                              | 118                              |
| 6            | -515                             | 198                              | 74                               |
| 8            | -205                             | 56                               | 31                               |
| 10           | -90                              | -39                              | -13                              |

### 3 分析与讨论

#### 3.1 孔边塑性变形的影响

为了考虑由孔边应力集中造成的孔周围塑性变形对焊接残余应力计算的影响,分别采用残余应力塑性修正方法和线弹性残余应力计算方法,得到焊接接头的残余应力分布如图9所示。两种计算方法所得的残余应力偏差均随着测量点距焊缝距离的减小而增大,最大偏差可达39.8%。

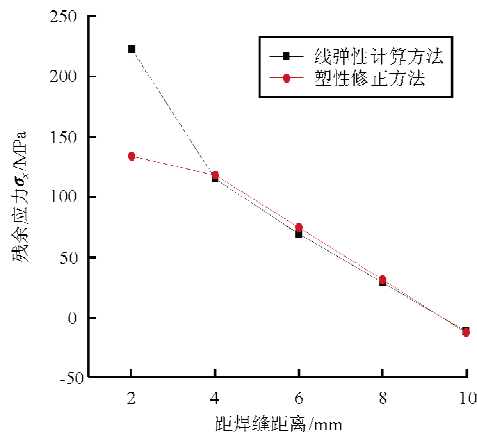


图9 考虑孔边塑性变形的焊接残余应力分布

Fig. 9 Distribution of welding residual stress by considering plastic deformation around hole

熔合区的屈服强度与热影响区、母材区相比较小,仅有137 MPa。焊接时焊缝区局部受热严重,导致靠近焊缝处残余应力较大,由于钻孔应力集中的影响,加剧了熔合区孔边塑性变形,使得考虑孔边塑性变形的焊接残余应力小于采用线弹性残余应力计算方法所得的残余应力。随着测量点距焊缝距离的增大,材料屈服强度升高,计算所得残余应力偏差减小。

#### 3.2 接头强度不匹配的影响

为了考虑接头材料强度不匹配对焊接残余应力计算的影响,采用残余应力塑性修正方法分别计算不同区域属性情况下的残余应力,计算结果如图10所示。当测量点距焊缝的距离大于8 mm时,接头材料强度不匹配对残余应力计算影响较小;当测量点距焊缝的距离小于8 mm时,在不同区域属性情况下,残余应力计算结果有较大偏差,若不考虑接头强度不匹配的影响,则最大偏差可达40.6%。

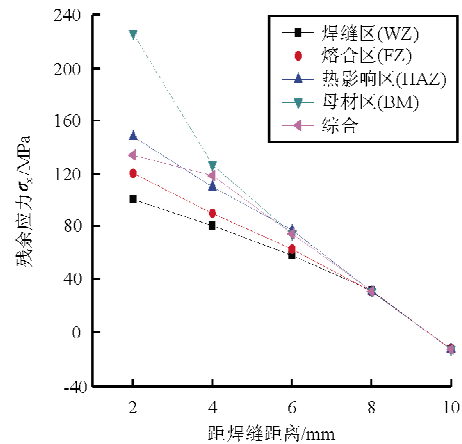


图10 考虑接头强度不匹配的焊接残余应力分布

Fig. 10 Distribution of welding residual stress by considering joint's strength mismatching

焊接时焊缝处受热不均匀导致靠近焊缝处残余应力较大,而钻孔的应力集中作用使得孔边在低应力水平时就发生屈服。结合图4可知,不同区域的屈服强度差别较大,因此在靠近焊缝处时,采用不同区域属性计算所得残余应力有较大偏差。

### 4 结论

(1) 考虑接头材料强度不匹配的情况下,采用形状改变比能对焊接残余应力进行塑性修正,相比采用线弹性残余应力计算方法最大可减小39.8%的误差。

(2) 考虑孔边塑性变形的情况下,当测量点距焊缝距离小于8 mm时,考虑接头材料强度不匹配因素的影响相比不考虑其影响可最大减小焊接残余应力计算40.6%的误差。

(3) 对于2219-T87铝合金TIG焊接接头,当测量点距焊缝距离大于8 mm时,可忽略接头材料

强度不匹配对焊接残余应力计算的影响;反之,则必须考虑其对焊接残余应力计算的影响。

### 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(5): 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 Wenqing, Yao Junshan, et al. Microstructures and mechanical properties of friction stir welded 2219-T87 aluminum alloy joints[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 and Electrical Engineering, 2011, 28(1): 11-15. (in Chinese)
- [4] 刘信倩, 刘兆山, 宋森, 等. 残余应力测量研究现状综述[J]. 机床与液压, 2011, 39(11): 135-138.  
Liu Qianqian, Liu Zhaoshan, Song Sen, et al. Research status of measurement for residual stress[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2011, 39(11): 135-138. (in Chinese)
- [5] ASTM E837-81, Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method[S]. USA: American Society for Testing and Materials, 2001.
- [6] 赵海燕, 裴怡, 史耀武, 等. 用小孔释放法测量焊接高残余应力时孔边塑性变形对测量精度的影响及修正方法[J]. 机械强度, 1996, 18(3): 17-26.  
Zhao Haiyan, Pei Yi, Shi Yaowu, et al. The influence and
- correction to the measuring error of high welding residual stress when using hole-drilling method[J]. Journal of Mechanical Strength, 1996, 18(3): 17-26. (in Chinese)
- [7] 王江超, 周方明. 小孔法测量焊接残余应力[J]. 电焊机, 2008, 38(2): 64-66.  
Wang Jiangchao, Zhou Fangming. Research about measure of weld residual stress with little hole method[J]. Electric Welding Machine, 2008, 38(2): 64-66. (in Chinese)
- [8] Masubuehi K. Prediction and control of residual stresses and distortion in welded structures proe[J]. Theoretical Prediction in Joining and Welding, 1996, 16(2): 71-88.
- [9] 蒋文春, 冯晓亮, 石风涛, 等. 焊缝强度不匹配对焊接残余应力的影响[J]. 热加工工艺, 2010, 39(5): 155-157, 160.  
Jiang Wenchun, Feng Xiaoliang, Shi Fengtao, et al. Effect of strength mismatching on welding residual stress[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(5): 155-157, 160. (in Chinese)
- [10] GB/T 24179-2009, 金属材料残余应力测定压痕应变变法[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2010.  
GB/T 24179-2009, Metallic materials-residual stress determination-the indentation strain-gage method[S]. Beijing: Standardization Administration of the People's Republic of China, 2010. (in Chinese)

### 作者简介:

林鸿志(1988—),男,硕士研究生。主要研究方向:焊接结构疲劳强度。

薛彩军(1973—),男,博士,副教授。主要研究方向:结构优化、结构疲劳强度。

张俊苗(1981—),男,博士研究生。主要研究方向:结构疲劳强度。

(编辑:马文静)