

2219 铝合金 TIG 焊接头残余应力分布

天津航天长征火箭制造有限公司(300462) 李庆庆 宋建岭 彭江涛 肖 宏 耿玉龙

摘要 利用钨极氩弧焊获得了 2219 铝合金焊接接头,分析了接头力学性能和微观组织。采用 X 射线衍射法对 2219 铝合金 TIG 焊接头进行表面残余应力测试,获得了焊接接头表面残余应力分布,并对 2219 铝合金焊接接头表面残余应力分布的规律进行了分析。结果表明,该工艺条件下接头力学性能稳定。接头纵截面上存在横向应力及纵向应力稳定区,最大横向拉应力和压应力分别为 55 MPa 和 114 MPa,分别位于焊缝中部和起弧点;最大纵向拉应力为 165 MPa,位于焊缝中部热影响区。接头横截面上,仅在焊缝及靠近焊缝区域存在纵向拉应力,远离焊缝的区域处于压应力状态。

关键词: 铝合金 焊接 残余应力

中图分类号: TG442

0 前 言

2219 铝合金具有良好的焊接性和高低温力学性能,断裂韧度高且抗应力腐蚀性能好,是大型运载火箭贮箱结构制造的理想材料^[1]。

钨极氩弧焊(TIG)作为贮箱焊接中广泛应用的一种熔焊方法,焊接过程中不均匀的温度分布、焊缝金属热胀冷缩及相变等因素必然导致焊接残余应力的产生。残余应力的存在直接影响铝合金焊接结构的力学性能、疲劳强度、抗应力腐蚀能力、尺寸稳定性与使用寿命^[2-3],因此研究 2219 铝合金 TIG 焊接头的残余应力分布对指导工程应用具有重要意义。

残余应力的测试方法主要分为有损检测和无损检测两大类。无损检测的方法主要有 X 射线衍射法、中子衍射法、磁性法和超声波法。其中,X 射线衍射法因其理论推导严谨,测试结果可靠,已被广泛应用于科学研究和工业生产的各个领域^[4]。文中采用 X 射线衍射法对 2219 铝合金 TIG 焊接头表面残余应力进行测试,并分析其分布规律。

1 X 射线应力测试原理与方法

图 1 为 X 射线原理图。当多晶体材料受到宏观应力时,不同晶粒的同族晶面间距随晶面方位及应力大小发生规律性的变化。面间距相对于无应力时的变化,反映了在应力作用下面法线方向上的弹性应变。

面间距随方位的变化率与作用应力之间存在一定的函数关系,残余应力的测试正是通过建立应力与空间某方位上的应变之间的关系来完成的,式(1)为应力计算公式^[5]:

$$\sigma_{\phi} = K \cdot M = -\frac{E}{2(1+\nu)} \cot \theta_0 \frac{\pi}{180^\circ} \frac{\partial 2\theta_{\phi\psi}}{\partial \sin^2 \psi} \quad (1)$$

其中, K 为 X 射线应力常数,取决于测试晶面 $\{hkl\}$ 的弹性模量 E 、泊松比 ν 和衍射角 θ_0 ; M 为在不同 ψ 方向测定的衍射角 2θ 与 $\sin^2 \psi$ 直线的斜率。

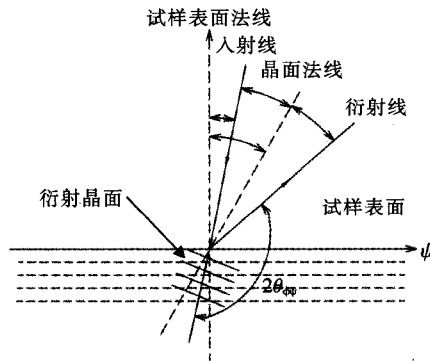


图1 X射线应力测试原理示意图

2 试样焊接及接头应力测试

2.1 试样焊接

采用尺寸为 300 mm × 150 mm × 6 mm 的 2219 铝合金板材,材料状态为 C10S,常温力学性能见表 1。2219 铝合金化学成分见表 2。焊缝长 300 mm, I 形坡口,选用直径为 1.6 mm 的 2325 焊丝。焊前采用化学清理方法去除试片表面油污和机械方法去除待焊部位表面氧化层。

表1 2219 铝合金板材常温力学性能

抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{e10.2}$ /MPa	断后伸长率 A (%)
440	360	6

表2 2219 铝合金化学成分(质量分数,%)

Cu	Mn	Ti	Mg	Zr	Fe	Si	Al
5.8~6.8	0.2~0.4	0.02~0.10	0.02	0.10~0.25	0.3	0.2	余量

表3 焊接参数

电流 I /A		交流平衡 (%)	峰值时间 (%)	基值 (%)
正半波	负半波			
300	240	65	55	60

冲频率 1 Hz。

2.2 焊接接头 X 射线应力测试方案

测试方法为双探测器固定 ψ_0 法(ψ_0 为射线与试样

试验采用低频脉冲氩弧焊,焊接过程为自动焊,单面焊双面成形。试板正面由夹具压紧保证间隙小于 0.5 mm、错缝小于 0.5 mm。主要焊接参数选用见表 3。其他焊接参数为:焊接速度 8 m/h、保护气体氩气 12 L/min 和氦气 3 L/min、弧压 17 V、变极性频率 65 Hz、脉

表面法线之间的夹角),通过改变射线入射方向与试样法线之间夹角测量不同倾角的晶面间距。

选择铝合金 $\{311\}$ 晶面作为测试晶面,被测晶面及相关计算参数见表 4。选用 Cr 靶 $K\alpha$ 射线, ψ_0 位置 $\pm 28^\circ$, $\pm 20.5^\circ$, $\pm 16.21^\circ$, $\pm 8.71^\circ$, $\pm 0.31^\circ$, 0° 。选用 2 mm 直径的光栅、计数时间选 2 s、计数次数选 10 次,摇摆角选 3° 。确定衍射峰位置后通过最小二乘法的椭圆拟合确定 $2\theta - \sin^2\psi$ 斜率。

表4 晶面及相关计算参数^[6]

发射源	$\{hkl\}$	$E^{[hkl]}/(10^3 \cdot N \cdot mm^{-2})$	$\nu^{[hkl]}/[]$	$2\theta(^{\circ})$	X 射线深度($\psi=0$)/ μm
Cr-K α	$\{311\}$	69	0.35	139	11.5

接头表面测点分布在 A-A, B-B 两条纵截面以及 C-C, D-D 两条横截面上。A-A 纵截面为焊缝中心纵截面, B-B 纵截面距 A-A 截面 20 mm。两条横截面距中间横截面距离分别为 0 mm, 30 mm。A-A 截面上有 17 个测点,测试起点和终点距起熄弧点 20 mm,测点间距为 15 mm。B-B 截面与 A-A 截面相同。C-C, D-D 截面上均为 10 个测点,测点距焊缝中心截面距离依次为 0 mm, 12 mm, 17 mm, 27 mm, 剩余测点之间间距 15 mm。具体分布如图 2 所示。

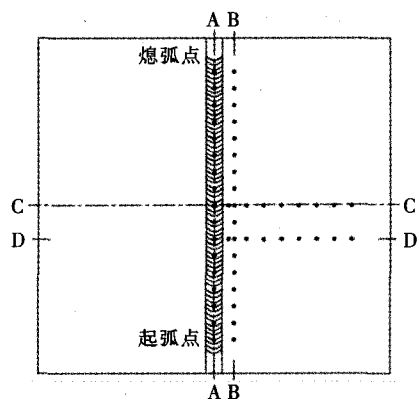


图2 表面测点分布示意图

表面应力测试结束后,对焊接接头沿焊接方向取 6 组试样进行常温力学性能测试,并制备金相试样以观察焊缝组织。

3 试验结果分析

3.1 接头力学性能测试结果

焊接接头正面成形良好,无表面缺陷,背部焊漏均匀一致。焊缝经 X 射线探伤检测,内部无气孔夹杂等缺陷。表 5 为接头沿焊缝方向常温力学性能。

由沿焊缝方向的力学性能分布可知,该焊接工艺条件下接头强度系数约为 0.66,且接头沿焊缝方向的力学性能保持一致。

表5 接头力学性能

编号	抗拉强度 R_m /MPa	断后伸长率 A (%)
1	290	7.0
2	295	7.0
3	295	7.0
4	290	7.0
5	290	7.0
6	295	6.5

3.2 接头微观组织分析

图3为2219铝合金焊接接头不同区域的显微组织,依次为母材区、热影响区、熔合区和焊缝区组织形貌。

由图3a母材区显微组织可知,母材组织呈典型轧制板条状态。图3b为热影响区显微组织,可以看出其组织形态接近母材区组织,但在焊接热循环影响下,部分晶粒已发生再结晶。由图3c熔合区显微组织可以看出,靠近焊缝区晶粒为柱状晶,在向热影响区过渡区域呈现细小的等轴晶组织。焊缝区组织形貌为熔化后凝固形成的树枝晶及细小的等轴晶状态,如图3d所示。

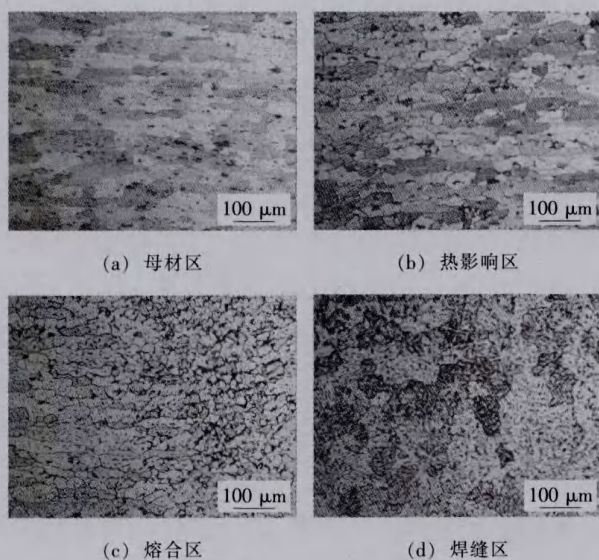


图3 焊接接头微观组织

3.3 横向应力测试结果分析

3.3.1 纵截面横向应力分布

图4为焊缝纵截面上横向应力分布,由图4中A-A和B-B纵截面的横向应力分布可知,两纵截面的横向应力分布规律基本一致且应力绝对值相近。在距中间横截面-60~60 mm范围内为应力稳定区域,应力稳定区内横向应力处于拉应力状态,最大应力约55 MPa。

在焊缝起熄弧区域内,横向应力均表现为压应力状态。起弧区域横向应力变化速度较快,起弧区压应力大于熄弧区。

3.3.2 横截面横向应力分布

C-C和D-D横截面的横向应力分布如图5所示,两横截面的横向应力分布规律一致,在距A-A纵

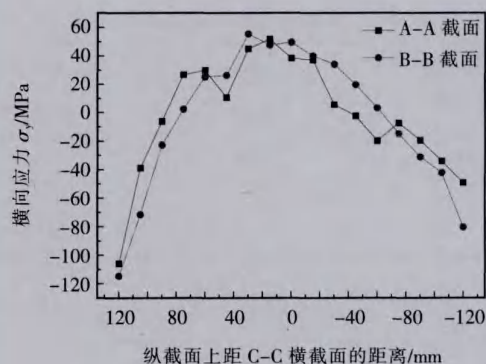


图4 焊缝纵截面上横向应力分布规律

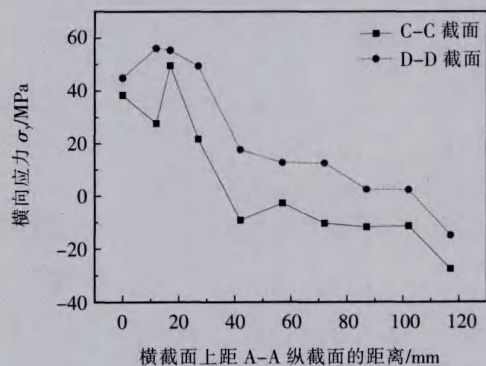


图5 焊缝纵截面上纵向应力分布规律

截面20 mm的范围内应力幅值相近,与两纵截面应力幅值吻合。D-D截面应力幅值略高于C-C截面,与纵截面分布规律相吻合,起弧区为最大横向拉应力区。

在距A-A纵截面40 mm的区域内处于拉应力状态,20~40 mm范围内横向应力由最大值降至零应力,40 mm至试样边缘范围内处于零应力状态。

3.4 纵向应力测试结果分析

3.4.1 纵截面纵向应力分布

由图6中两纵截面的纵向应力分布规律可知,焊接接头的起熄弧位置靠近端面为自由边界,起熄弧点

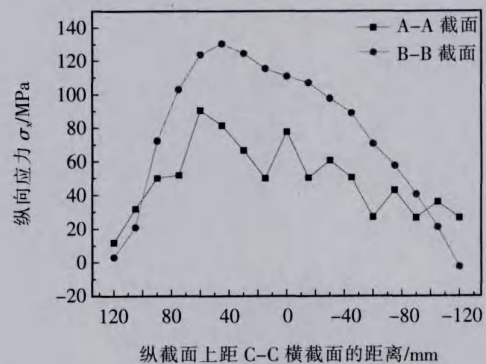


图6 焊缝纵截面上纵向应力分布规律

纵向应力均处于为零应力状态。

纵向应力在两纵截面上均表现为拉应力状态,两纵截面上的应力变化趋势一致。A-A 截面上的应力显著小于 B-B 截面纵向应力幅值,A-A 截面上最大拉应力为 77 MPa,B-B 截面上最大拉应力为 130 MPa。

与横向应力在纵截面的分布规律类似,起弧阶段纵向应力变化剧烈,起弧约 70 mm 后纵向应力达到最大值。

3.4.2 横截面纵向应力分布

由两横截面的纵向应力分布可知,在横截面上 C-C 和 D-D 截面的分布规律和幅值基本一致,两横截面上纵向应力最高点均位于热影响区,如图 7 所示。

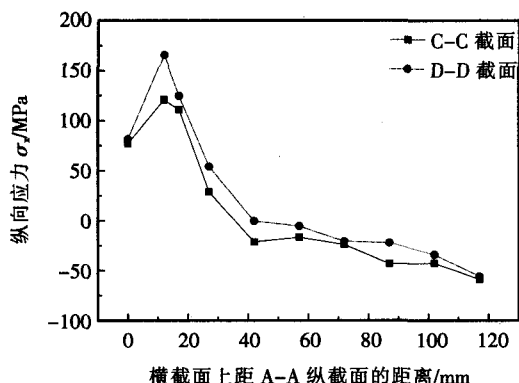


图7 焊缝横截面上纵向应力分布规律

距焊缝中心 30 mm 范围内,纵向应力处于拉应力状态。外侧均处于压应力状态,最大压应力位于最外侧测点,约 50 MPa。在距焊缝中心 10~30 mm 范围内,纵向应力由最大值迅速降至零应力。

综合纵截面与横截面的纵向应力分布可知,接头在焊缝及靠近焊缝两侧区域内处于拉应力状态,其他区域均处于压应力状态。

4 结 论

(1)该工艺条件下获得的 2219 铝合金焊接接头强度系数约为 0.66,力学性能稳定。接头表面残余应力分布规律可靠,对指导工程应用具有重要参考意义。

(2)横向应力在焊缝中部为拉应力状态,起熄弧区均处于压应力状态,最大横向压应力位于起弧点。

(3)纵向应力在焊缝及焊缝两侧区域内均为拉应力。最大纵向拉应力为 165 MPa,最大纵向应力位于热影响区。

(4)接头在起熄弧阶段残余应力变化剧烈,在距焊缝 20~40 mm 的母材区域内,残余应力下降速度较快。

参 考 文 献

- [1] 薛彩军,许江波,梁 珩,等. 2219 铝合金焊缝组织及其对力学性能的影响[J]. 南京理工大学学报,2013,37(1): 145-149.
- [2] 王秋成. 航空铝合金残余应力消除及评估技术研究[D]. 杭州:浙江大学硕士学位论文,2004.
- [3] Withers P J, Bhadeshia H K D H. Residual stress. Part 1 - measurement techniques[J]. Materials Science & Technology, 2001,17(4):355-365.
- [4] 宋天民. 焊接残余应力的产生与消除[M]. 北京:中国石化出版社,2010.
- [5] 张 玉. 材料分析方法[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- [6] Normung D D I F, GmbH B V. Non-destructive testing - test method for residual stress analysis by X-Ray diffraction [M]. DIN Deutsches Institut für Normung E. V., Beuth Verlag GmbH, Germany, 2009.

作者简介: 李庆庆,1988 年出生,助理工程师。主要从事焊接工艺和焊接应力等研究工作。

焊接技术问题征集

《焊接》杂志的“焊接技术问答”栏目,将邀请业内资深专家为读者解答一些焊接的基本知识、技术操作要点、安全操作常识及必要措施等问题。如果你在焊接生产中遇有暂时难以解决的技术方面问题,请发邮件至 hjbjb@126.com 或寄至“150028 哈尔滨市松北区创新路 2077 号 焊接编辑部”收,请注明“焊接技术问答”字样。