

# 2219 铝合金单、双道焊接头性能分析

鄢东洋 吴会强 常志龙 郭彦明 黄诚

(北京宇航系统工程研究所,北京 100076)

**文 摘** 通过对比 2219 铝合金单道氩弧焊和氩弧打底+氩弧盖面双道焊接头的常温及液氮温度拉伸性能、显微硬度分布、单向拉伸过程的数字散斑测量(DIC)结果,发现在常、低温条件下双道焊接头的拉伸强度和延伸率均比单道焊接头高 10%~20%,单道焊接头焊缝及热影响区内材料的显微硬度值相比母材的降低程度比双道焊接头更为显著,其主要原因是单道焊接头的一次性热输入大于双道焊,材料受热影响更严重,焊漏高度及形状的可控性更差。

**关键词** 2219 铝合金,氩弧焊,拉伸强度,延伸率,显微硬度,数字散斑测量

## Analysis on The Properties of 2219 Aluminum Alloy Joints With Single-Layer Welding and Single-Sided Double-Layer Welding Process

Yan Dongyang Wu Huiqiang Chang Zhilong Guo Yanming Huang Cheng

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076)

**Abstract** The tensile properties under room temperature, and under liquid nitrogen temperature, and the distributing of micro-hardness, and the results with digital speckle correlation method were compared between 2219 aluminum alloy joints with single-layer welding and single-sided double-layer welding process. The comparison shows that the tensile strength, the elongation rate and the micro-hardness of the joint with single-sided double-layer welding is obviously better than the single-layer welding joint. This different is caused by the bigger heat input of single-layer welding than the double in one time. The materials in the single-layer welding joint was more badly influenced by welding heat input, and the height and figure of weld reinforcement on back side of joint is difficult to control.

**Key words** 2219 aluminum alloy, Argon arc welding, Tensile strength, Elongation rate, Micro-hardness, DIC

### 0 引言

2219 铝合金具有比强度高、比模量高、耐热性好和可焊性好等优点,在航空航天领域得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。和同属 Al-Cu 系的 2A14 铝合金相比,2219 铝合金在焊接过程中具有较低的热裂纹敏感性<sup>[3]</sup>,因而被选为我国新一代液体运载火箭推进剂贮箱的主体材料,取代传统的 2A14 铝合金。在贮箱制造的焊接工艺选择方面,虽然电子束焊和搅拌摩擦焊等先进工艺都开始应用于 2219 铝合金的焊接<sup>[4-5]</sup>,但从实际工艺成熟度、生产效率和生产成本考虑,常规的变极性氩弧焊目前仍然是 2219 铝合金贮箱制造中不可或缺的工艺方法。

在以 2A14 铝合金为主体材料的贮箱的焊接中,为解决焊接热裂纹问题,通常要采用单面两层焊,甚

至两面三层焊工艺,生产效率较低。2219 铝合金的焊接热裂纹敏感性较低,用单道焊也能得到外观成形良好、焊接缺陷满足质量要求的焊缝。同时,通过减少焊接道次能有效提高贮箱制造的生产效率,降低生产成本。单道焊工艺能否在 2219 铝合金贮箱制造中实现广泛的工程应用,除了焊缝的成形质量外,关键在于接头的力学性能能否满足要求。本文以贮箱结构中一条关键焊缝的焊接为例,研究和分析单道焊和单面双道焊接头在力学性能方面的差异,为 2219 铝合金贮箱制造选择合适的焊接工艺提供了数据支撑。

### 1 试验介绍

以某贮箱结构中叉形环与筒段对接的环焊缝作为试验对象,其理论直径为 3.35 m,剖面如图 1 所示。对接焊缝两侧的材料厚度略有差异,叉形环一侧

收稿日期:2013-03-20;修回日期:2013-07-23

作者简介:鄢东洋,1982 年出生,博士,主要从事运载火箭推进剂贮箱的设计与研究。E-mail: Bryan168. yan@gmail.com

的厚度为 5 mm, 材料为 MCS 状态的 2219 铝合金。筒段一侧的厚度为 4.3 mm, 材料为 C10S 状态的 2219 铝合金。实际焊接试验中, 将环焊缝按 180° 平均分为两段。一段采用单道氩弧焊方法进行焊接, 焊丝牌号为 2325, 工艺参数为: 焊接电流 260 A, 焊接速率 8.5 m/h。另一段采用氩弧打底+氩弧盖面的双道焊方法焊接, 焊丝同样采用 2325, 打底焊的工艺参数为: 焊接电流 180 A, 焊接速率 16 m/h; 盖面焊的工艺参数为: 焊接电流 240 A, 焊接速率 8.5 m/h。焊接完成后利用 X 射线对焊缝进行内部缺陷检查, 并按标准 QJ2698A—2011 进行焊接质量评判, 标示不合格焊缝的位置。后期进行力学性能检测取样时, 避开不合格焊缝的位置。

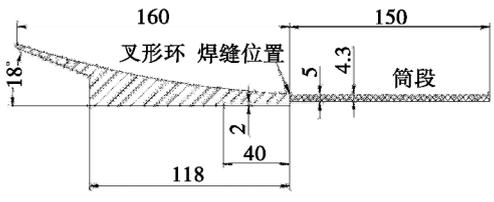


图1 叉形环与筒段焊接试验件剖面图  
Fig. 1 Cross-section of welding object

## 2 接头拉伸性能的测试与分析

在试验环件上分别对两种焊接接头取样进行常温 and 低温(-196℃)的拉伸性能检测。因为焊接试验件是实际贮箱结构的一部分, 结构局限导致难以制取标准的焊接接头拉伸性能检测试样, 所以本文中采用非标试样进行接头的拉伸性能检测, 试样规格如图2所示。由于在实际的贮箱结构中, 焊缝的余高和焊漏均保留, 只对高度过大的焊漏进行铣切和修形, 为获得焊接接头真实使用状态下的力学性能, 本文中制取的焊接接头拉伸力学性能检测试样保留焊漏和余高。

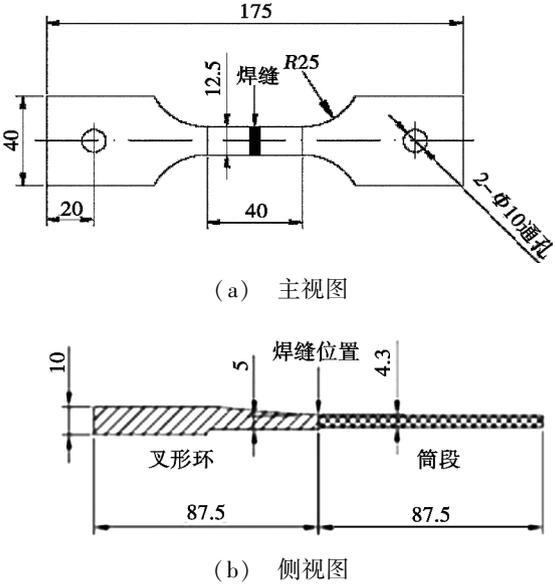


图2 焊接接头拉伸性能检测试样规格  
Fig. 2 Size of joints for properties test

在常温和低温对试样进行单向拉伸直至拉断。所有试样都断裂在焊缝熔合线附近(图3)。

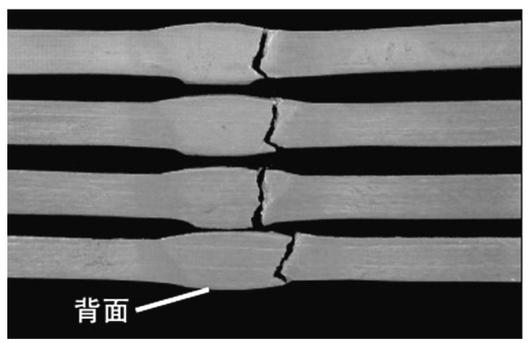


图3 试样断裂位置

Fig. 3 Photo showing the fracture of the joint

绝大多数接头试样都断裂在筒段一侧的焊缝熔合线附近, 少量断裂在叉形环一侧的熔合线附近(单道焊接头常温和低温试验中均有3个试样断在叉形环一侧)。由于实际焊接接头中叉形环一侧的厚度比筒段一侧大, 所以接头绝大多数断裂在筒段一侧的焊缝熔合线附近符合常理。试验只提取试样的拉断力和断后伸长量, 由此计算出接头的拉伸强度和延伸率。计算接头的拉伸强度时, 按实际断裂位置的厚度折算接头的受力面积, 而计算延伸率时, 用试样的断后伸长量除以标距长度 40 mm, 试验检测数据见表1。虽然采用非标试样得到的焊接接头力学性能数据不能作为技术要求或技术标准的参照数据, 但通过相同规格的非标试样获得试验数据, 并直接对比这些试验数据所得出的规律是客观存在的, 也具有参考价值。

表1 接头拉伸强度和延伸率测试结果

Tab. 1 Tensile strength and elongation of joints

试验类别	拉伸强度/MPa		延伸率/%	
	实测值	平均值	实测值	平均值
单道焊常温	177 ~ 319	242	2.1 ~ 6.0	3.7
双道焊常温	229 ~ 328	272	2.4 ~ 7.0	4.4
单道焊低温	199 ~ 340	279	2.0 ~ 6.0	3.4
双道焊低温	272 ~ 404	323	2.3 ~ 6.6	4.1

表1中的实测值显示两种接头的常、低温拉伸性能试验数据都存在一定的分散性, 其根本原因在于焊接接头试样没有去除余高和焊漏, 而焊接接头的余高和焊漏的高度和形状受焊接电流、速率、送丝速率、焊枪倾角、保护气参数等众多因素影响。因此, 即使是从同一条焊缝上提取的接头试样, 其余高及焊漏的高度和形状也存在一定差异性。存在一定分散性的试验数据也是焊缝不同位置承载能力的真实体现, 对掌宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2013年 第6期

握真实结构中焊缝承载能力的不均匀性,指导焊接结构设计都具有重要参考价值。

表 1 中的数据显示:2219 铝合金焊接接头,不论是单道焊还是双道焊,低温下的拉伸强度平均值均高于常温,而低温下的延伸率平均值均低于常温。这说明 2219 铝合金焊接接头在低温下强度更高但韧性更差,这与一般金属材料在低温条件下的力学表现一致。同时,在两种温度下,2219 铝合金双道焊接头的拉伸强度和延伸率均明显高于单道焊。比较试验数值,双道焊接头在常、低温条件下强度和延伸率平均值均比单道焊高 10% ~ 20%,且测试结果的分散性水平相当。

单、双道焊工艺的主要区别在于焊接电流大小不同。对于同一结构,在相同的焊接速度条件下,单道焊为了保证一次焊透,需要采用比双道焊更大的焊接电流。从第 1 节的工艺参数也可以看出,本文焊接试验中单道焊所用的焊接电流比双道焊中的每一道都大。根据电弧热计算公式,较大的焊接电流会在单位时间内生产更多的电弧热量。也就是说,对于同一被焊结构,单道焊接头的焊缝区在单位时间内接受了比双道焊更多的热量输入,那么单道焊接头的热影响区宽度会更大,等效位置经历的焊接温度也会更高。根据焊接热过程及特点<sup>[6]</sup>,单位时间的焊接热输入量不同,会导致焊缝组织形态、硬度分布、焊缝宽度、焊缝高度、焊漏形状等因素不同,这些可能是导致单道焊接头力学性能低于双道焊的直接原因。

### 3 接头显微硬度的测试与分析

对于单、双道焊接头,分别在如图 2(b)所示的纵截面上进行显微硬度检测。硬度检测点位于接头厚度方向的中部,相邻两个测点的间距为 0.5 mm,从一侧母材穿过焊缝区直至另一侧母材。接头的显微硬度检测结果如图 4 所示,MCS 和 C10S 状态的 2219 铝合金母材的显微硬度值约为 130,而焊接接头区域的显微硬度值明显降低。在焊缝熔合线附近,材料的显微硬度值最低,仅有约 65 ~ 80。接头材料的显微硬度值降低主要是受到焊接热影响。2219 铝合金是可热强化铝合金,MCS 和 C10S 均是淬火时效后的强化态,焊接过程中接头材料受热产生退火效应,原先析出的强化相消失,导致材料的显微硬度下降。在热影响区,随着到焊缝中心的距离增大,材料受电弧热影响逐渐减弱,显微硬度值也逐渐恢复至母材水平。单道焊接头的显微硬度值在焊缝区和热影响区均低于双道焊接头,说明单道焊接头中材料受焊接热影响的程度更大,证明单道焊接头单位时间内接受的焊接热输入量大于双道焊接头。同时,在接头显微硬度的测试过程中可以观察到焊缝熔合线的位置,如图 4 中

标示,单道焊接头两侧熔合线间的宽度为 9.5 mm,而双道焊接头仅为 8 mm。焊缝熔合区宽度的差异更直接地说明了单道焊单位时间内的热输入量大于双道焊。在焊缝及热影响区,单道焊接头的显微硬度值低于双道焊接头,这也是导致单道焊接头常温拉伸强度低于双道焊接头的原因之一。

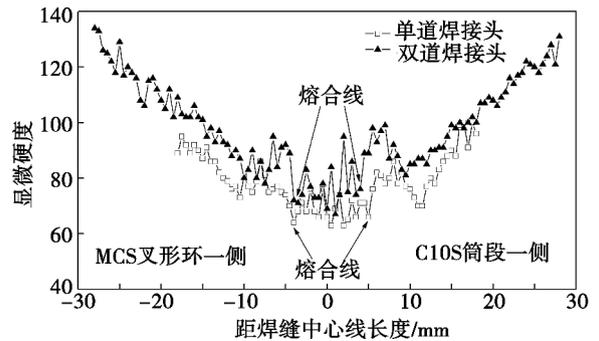


图 4 焊接接头的显微硬度检测结果

Fig. 4 Distribution of micro-hardness on welding joints

### 4 接头拉伸过程的数字散斑测量与分析

数字散斑相关技术的基本原理是匹配物体表面变形前后的数字化散斑图像上的几何点,跟踪点的运动以获得表面变形信息。在本文中,焊接接头单向拉伸载荷随时间线性增大,利用两个摄像头从试样的正面(焊缝余高一侧)和背面(焊漏一侧)同时监测试样表面散斑的运动,采样频率为 5 Hz。通过处理相邻两次采样得到的位移图像,可换算得到接头表面各几何点的应变信息,从而绘制接头表面在拉伸过程中某一时刻的应变场。试样规格见图 2,保留焊缝的余高和焊漏。图 5 ~ 图 8 是两种焊接试样在临近拉断时正、背面的应变场分布云图,图中的曲线反映了试样宽度中心线上的应变数值。其中单道焊接头的拉断力为 14.2 kN,折算接头拉伸强度为 264 MPa,双道焊接头的拉断力为 15.9 kN,折算拉伸强度为 296 MPa。

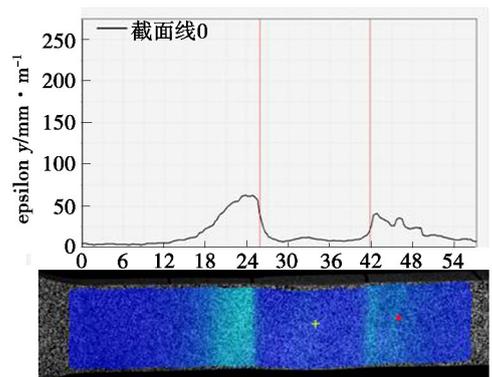


图 5 单道焊接头临近拉断时的正面应变场分布

Fig. 5 Distribution of strain on the front surface of single-layer joint approach tensile failure

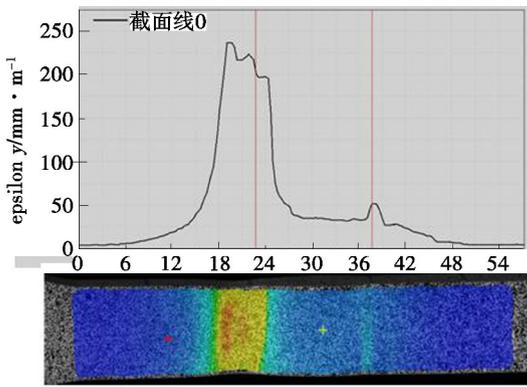


图6 双道焊接头临近拉断时的正面应变场分布

Fig.6 Distribution of strain on the front surface of single-sided double-layer joint approach tensile failure

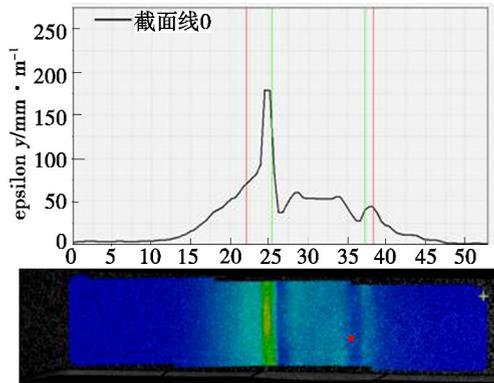


图7 单道焊接头临近拉断时的背面应变场分布

Fig.7 Distribution of strain on the back surface of single-layer joint approach tensile failure

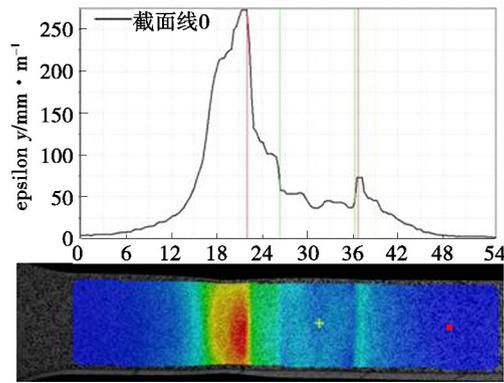


图8 双道焊接头临近拉断时的背面应变场分布

Fig.8 Distribution of strain on the back surface of single-sided double-layer joint approach tensile failure

图5~图8中的应变分布显示单、双道焊接头在单向拉伸过程中,发生较大应变的区域都集中在焊缝熔合线附近,因而最终试样断裂的位置也在焊缝熔合线附近。两种接头在临近拉断时,背面的应变峰值均高于正面,而且单道焊接头正、背面应变峰值的差距尤其显著,其主要原因是焊缝余高和焊漏形状不同。

贮箱上的焊缝在施焊完成之后,根据焊缝质量要求,需要将背面的焊漏铣切至高度<1 mm,而正面的余高一般都能满足高度要求,不用铣切。焊缝余高是熔化金属自然凝固形成的,与基体金属的过渡比较圆滑,而焊漏经过铣切之后容易产生棱角和台阶,从而在受力过程易造成应力集中。因此,在接头单向拉伸过程中,焊缝背面因应力集中现象更严重而出现应变峰值高于正面的情况。对于单道焊接头,由于焊缝一次成形,为保证焊透,焊接热输入一般都偏大,形成的焊漏高度也较大,过多地修整焊漏使得应力集中问题比较突出。在实际生产中,氩弧打底+氩弧盖面的工艺能更好地控制焊漏高度,减少焊漏铣切操作。

提取两种焊接接头在相同拉伸载荷下的应变场分布,如图9和图10所示,拉伸载荷均为14 kN。

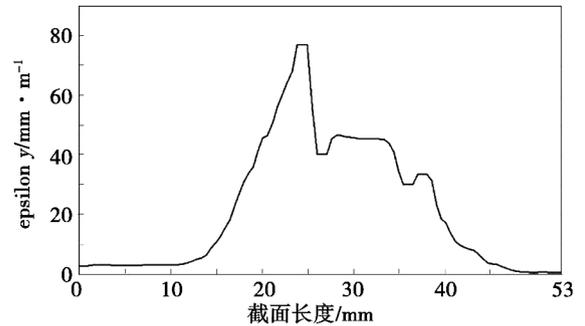


图9 单道焊接头在14 kN拉伸载荷下背面宽度中线上的应变分布

Fig.9 Distribution of strain on the width-midline of single-layer joint under 14 kN load

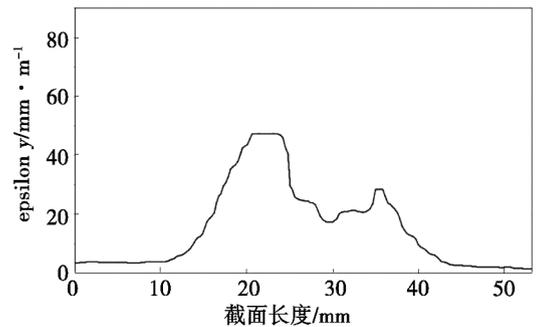


图10 双道焊接头在14 kN拉伸载荷下背面宽度中线上的应变分布

Fig.10 Distribution of strain on the width-midline of single-sided double-layer joint under 14 kN load

图中曲线显示:单道焊接头焊漏一侧的应变峰值显著大于双道焊接头,分布趋势也不相同。单道焊接头的应变峰值约7.8% (78000 微应变),且分布曲线存在变化急剧的尖峰区。而双道焊接头的应变峰值仅4.7%,且分布曲线变化比较平缓。上述差别说明

单向拉伸条件下单道焊接头在焊漏一侧的应力集中现象比双道焊更严重。同时比较图 7 和图 9, 可见载荷从 14 kN 增大到 14.2 kN, 单道焊接头焊漏一侧局部位置的应变值从 7.8% 迅速增大到约 17.5%, 而其他位置的应变值变化较小。对照图上标尺可知: 单道焊接头应变曲线的尖峰区以及应变发生突变的位置都位于焊漏边缘, 是焊漏形状因素导致应力集中的结果。

针对图 5 ~ 图 8 中的应变分布曲线, 统计应变值超过 6% 的区域的宽度, 发现双道焊接头的统计值明显大于单道焊接头, 数值见表 2。也就是说在临近拉断时, 双道焊接头正、背面发生较大应变的区域的宽度比单道焊接头大。值得注意的是此时双道焊接头承受的拉伸载荷大于单道焊接头。双道焊接头中发生较大应变的区域更宽说明其应力集中没有单道焊接头严重, 不会因局部区域的塑性过早耗尽而导致接头断裂, 因而在接头拉伸力学性能测量结果中, 双道焊接头的常温拉伸强度和延伸率均高于单道焊接头。

表 2 接头在拉伸过程中表面应变大于 6% 的区域宽度  
Tab.2 Width of the zone that surface strain bigger than 6% of joints during the tensile process

统计位置	区域宽度/mm
单道焊接头正面宽度中线	2.9
单道焊接头背面宽度中线	5.2
双道焊接头正面宽度中线	9.6
双道焊接头背面宽度中线	11.5

## 5 结论

(1) 2219 铝合金氦弧打底+氩弧盖面的双道焊接头在常、低温条件下的拉伸强度和延伸率均比单道焊接头高 10% ~ 20%。

(2) 受焊接热影响, 2219 铝合金接头焊缝区及热影响区内材料的显微硬度值较母材显著降低。单道焊接头焊缝及热影响区内等效位置的显微硬度值比双道焊更低, 证明单道焊接头焊缝区域单位时间内接受的焊接热输入量大于双道焊接头。

(3) 2219 铝合金单道焊接头中焊缝区域单位时间内接受的焊接热输入量大于双道焊接头, 导致接头余高和焊漏的高度更大, 因焊缝形状因素带来的应力集中更加显著。接头上应力集中严重的局部区域在单向拉伸过程中塑性过早耗尽导致接头断裂, 因而单道焊接头的常温拉伸强度和延伸率均低于双道焊接头。

## 参考文献

- [1] 刘春飞. 运载贮箱用 2219 类铝合金的电子束焊[J]. 航天制造技术, 2002(4): 3-9
- [2] 焦好军, 胡明臣, 周炼刚, 等. 新一代运载火箭 2219 铝合金配用焊丝研制[J]. 宇航材料工艺, 2007, 37(6): 61-64
- [3] 杨成刚, 钱百年, 国旭明. 高强铝合金 2219 液化裂纹研究[J]. 机械工程材料, 2005, 29(7): 14-16
- [4] 彭杏娜, 曲文卿, 张国华. 焊接方法对 2219 铝合金性能及组织的影响[J]. 航空材料学报, 2009, 29(2): 57-60
- [5] 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): 77-80
- [6] 武传松. 焊接热过程与熔池形态[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008