

2219 T852 过渡环与 T87 箱筒段电子束焊接接头性能

胡正根¹ 黄 诚¹ 常志龙¹ 刘德博¹ 王明正²

(1 北京宇航系统工程研究所,北京 100076)

(2 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 基于贮箱用 2219 T852 整体过渡环与 T87 箱筒段的电子束环焊缝,开展了部段级电子束焊接接头常、低温力学性能测试,同时对焊接接头错缝量、断裂类型及金相组织进行了分析。研究表明:部段级常、低温 2219 T852 与 T87 电子束焊接接头的强度影响系数为 0.63,低温状态下焊接接头的力学性能比室温状态下有所提高;错缝量与焊接接头力学性能成反比,其中对延伸率影响最为显著,低温有助于缓解错缝对焊接接头力学性能的弱化影响;电子束焊接接头组织不均匀性和结构形貌上的不连续性,特别是 T852 侧热影响区晶粒粗大,导致 T852 侧热影响区和焊缝接头根部为电子束焊缝的薄弱区域,焊接接头极易在该区域发生断裂。

关键词 2219,T852 过渡环,T87 箱筒段,电子束焊接,错缝,接头性能

中图分类号: TG14, TG4

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2017.01.015

Mechanical Properties of Electron Beam Welded Joints on 2219 T852 Transition Ring and T87 Shell Section

HU Zhenggen¹ HUANG Cheng¹ CHANG Zhilong¹ LIU Debo¹ WANG Mingzheng²

(1 Beijing Institute of Astronautic Systems Engineering, Beijing 100076)

(2 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract Based on the electron beam circular weld on 2219 T852 transition ring and T87 shell section used for tank, the normal and low mechanical properties of the electron beam welded joints in the segment level were tested, and the staggered amount, fracture types and microstructure of the welded joints were analyzed. The following conclusions can be drawn. The normal and low strength effect coefficient of the segment level electron beam welded joints on 2219 T852 transition ring and T87 shell section are 0.63, and relative to the normal temperature, the low temperature mechanical properties of welded joints have been improved. The staggered amount is inversely proportional to the mechanical properties of welded joints, and it has the most significant effect to elongation, and low temperature should help to ease the weakening effect of staggered to the mechanical properties of welded joints. Because of the uneven tissue and the discontinuous structure of the electron beam welded joints, especially T852 side heat affected zone with coarse grains, the T852 side heat affected zone and the roots of welded joints are the weak area of the electron beam weld, and welded joint is easy to fracture in the area.

Key words 2219, T852 transition ring, T87 shell section, Electron beam weld, Staggered, Mechanical property

0 引言

在铝锂合金和复合材料贮箱研制取得重大进展的今天,2219 铝合金仍然是国内外航天运载器贮箱结构的主流材料^[1],因为其具有低成本、良好的可焊接性、抗应力腐蚀性以及优良的力学性能和断裂韧度等特点^[1-2]。

国外在研制运载火箭 2219 铝合金贮箱时,曾采用过多种焊接方法,包括钨极气体保护焊、熔化极气体保护焊、钨极气体保护脉冲焊、熔化极脉冲气体保护焊、变极性等离子焊、电子束焊接、激光焊接、搅拌摩擦焊等,各种焊接方法在不同国家、不同技术发展时期的运载火箭贮箱研制生产中,都分别因其自身特

收稿日期:2016-11-30

第一作者简介:胡正根,1988 年出生,硕士,工程师,主要从事箭体结构设计工作。E-mail: firezhenggen@163.com

点而得到了应用^[1]。国内在航天器 2219 贮箱结构上普遍采用氩弧焊、搅拌摩擦焊和电子束焊接,其中电子束焊接因其能量密度高,焊接热输入低,焊接热影响区小,焊接变形小,能有效防止裂纹、气孔、未熔合、夹杂等缺陷出现,明显提高焊接强度和焊接效率而在贮箱焊接中发挥了重要作用^[3-7]。

以往在研究贮箱焊接接头力学性能时,比较注重平板试片级别的设计验证,但是针对贮箱部段级的焊接接头验证却很少。实际上,部段级焊接试片和平板级焊接试片的力学性能数据往往差异较大,这主要是因为平板级焊接时,焊接装配条件简单,平板之间贴合均匀,焊接接头的形成没有过大的装配预应力,而真实贮箱焊接时,为保证焊接接头贴合均匀,需要专门工装进行内撑外压,预加较大装配内应力,焊接接头形成后即受到较大内应力作用^[8],不均匀的内应力迫使部分焊接区域产生塑性变形,消耗焊接接头原有的延伸率,起到冷作硬化的作用,导致最后真实贮箱的焊缝上力学性能较低,且分布不均匀,故平板级焊接试片接头并不能真实完全反映贮箱焊缝接头的力学性能。

本文以贮箱常用 2219 T852 整体过渡环与 T87 箱筒段焊接连接为背景,开展 2219 异种热处理状态下的部段级电子束焊接接头的常、低温力学性能研究,同时对部段级焊接接头错缝量、断裂类型及金相组织进行分析,为电子束焊接技术在贮箱焊接上的全面应用提供参考。

1 试验

1.1 材料

材料均为 2219 铝合金,焊接边厚度为 4 mm,其中过渡环为 T852 态,箱筒段为 T87 态,为贮箱上普遍采用的热处理状态。实验件结构截面如图 1 所示,过渡环由 T852 态整体锻环机械加工得到,箱筒段由两块 T87 态铝板滚弯再拼焊得到。

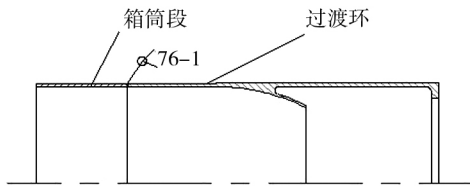


图 1 过渡环与箱筒段组件

Fig.1 Component of transition ring and shell section

1.2 焊接

试验件所有对接焊缝均采用电子束焊接 (EBW),利用工装在真空室完成箱筒段纵缝、过渡环与箱筒段环缝的电子束焊接,焊接完成后的试验件结构如图 2 所示。



图 2 过渡环与箱筒段电子束焊接

Fig.2 Electron beam weld on transition ring and shell section

1.3 性能测试

焊接完成后,对试验件所有焊缝进行 X 射线检测,均达到 GJB 1718A—2005 I 级焊缝要求。为保证焊接接头的完整性,利用激光切割方法切割过渡环与箱筒段试验件,按照 GB 2651—2008 加工焊接接头标准试件 80 件,同时为研究错缝量的影响,测量所有试件焊缝的错缝量。

2 结果与分析

2.1 接头力学性能

焊接接头的性能需要与母材的性能数据进行对比分析,在试验件本体取样测试,2219 T852 过渡环和 2219 T87 箱筒段母材室温和低温 (液氮温度, -196℃) 力学性能数据见表 1。由表 1 可知,相对于常温, T87 母材低温强度极限提高 23.4%, T852 母材低温强度极限提高 24.7%,延伸率差异不大; 2219 T87 母材的力学性能优于 2219 T852,特别 2219 T87 延伸率是 2219 T852 的 2 倍。

表 1 2219 T852 和 T87 母材性能数据

Tab.1 Performance data of 2219 T852 and T87 base metal

状态	温度	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	$\delta_5/\%$
2219 T87	室温	372	458	12.5
	-196℃	-	565	12.5
2219 T852	室温	334	445	6.6
	-196℃	-	555	6.7

为保证常温试验和低温试验的可对比性,利用相邻试片分别做常温 (40 件) 和低温 (40 件) 拉伸试验 (-196℃),试验结果如表 2 所示。

表 2 2219 T852 和 T87 电子束焊接接头性能

Tab.2 Performance of electron beam welded joints on 2219 T852 and T87

温度	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	$\delta_5/\%$
室温	156.8	281.1	3.8
-196℃	186.3	350.6	4.3

由表 2 可知,与母材类似,低温焊接接头的力学性能均比室温有所提高,其中屈服强度提高 18.8%,强度极限提高 24.7%,延伸率提高 12.4%,这与其他焊接方法规律一致。

焊缝金属两端母材金属性能存在差异时,焊接接头强度影响系数应为焊接接头拉伸强度与性能较低的母材金属拉伸强度的比值。因此,根据表1的母材数据,2219 T852+2219 T87 电子束焊接接头强度影响系数应为焊接接头拉伸强度与2219 T852 铝合金母材拉伸强度的比值。根据表1和表2的数据,部段级常温和低温2219 T852+2219 T87 电子束接头的强度影响系数分别为0.6316和0.6317,两者基本一致,比平板级试片得到电子束接头强度影响系数(0.7~0.8)^[1,4,9-10]低,这个数据更能准确反映结构部段的实际承载能力。

2.2 错缝对焊接接头力学性能影响

贮箱焊接完成后,在环缝部位极易产生错缝,特别是焊接条件最差的封箱焊缝,这主要由三方面原因造成:(1)零件整体焊接装配不到位,形成焊接错缝;(2)零件存在局部变形,局部焊接装配不到位的地方无法通过焊接工装夹具调整,形成焊接错缝;(3)焊缝两端的零件加工尺寸匹配性差,形成焊接错缝^[8,11-12]。根据航天器贮箱焊接的一般要求,箱体的环向对接焊缝的局部错位高度一般不允许超过材

料厚度的30%~35%,以每条焊缝计,局部错位的总长度不超过焊缝长度的8%~10%。根据对焊接试片的实际测量结果,接头错缝量平均值约为0.19~0.20 mm,为基体厚度的4.75%~5%,接头错缝量最大值为0.60 mm,为基体厚度的15%,试验件焊接满足技术要求。图3为错缝对电子束焊接接头室温力学性能的影响。由图3可知,由于错缝量小,试验数据有一定的离散性,但总体趋势上,错缝量与室温力学性能成反比,错缝量越大,室温力学性能越低,特别是对延伸率的影响最为显著。错缝量(0.60 mm)最大的情况下,相较错缝量最小(0.05 mm)的情况,屈服强度下降15.7%,强度极限下降12.8%,延伸率下降44.4%。图4为错缝对电子束焊接接头低温力学性能的影响。由图4可知,低温试验数据相较室温数据离散性更大,但总体趋势上,错缝量与低温力学性能数据的关系和错缝量与常温力学性能数据的规律一致。错缝量(0.50 mm)最大的情况下,相较错缝量最小(0.05 mm)的情况,屈服强度下降5.2%,强度极限下降8.0%,延伸率下降36.4%。在等比例的情况下,相较室温而言,错缝量对低温力学性能的影响减少。

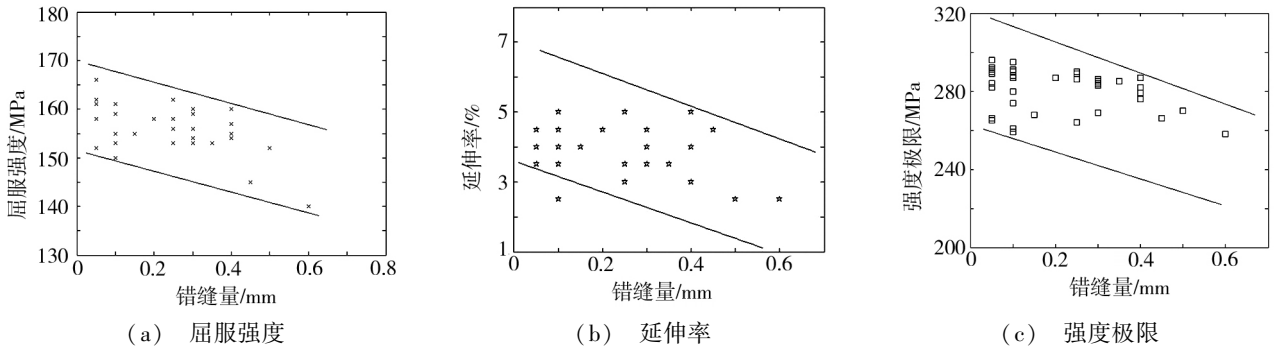


图3 错缝对电子束焊接接头的室温性能的影响

Fig.3 Impact of staggered to normal properties of the electron beam welded joints

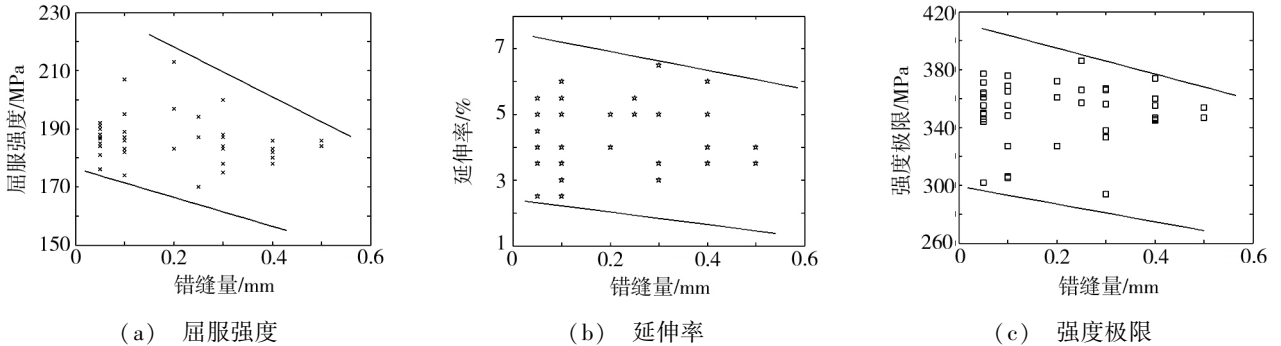


图4 错缝对电子束焊接接头的低温性能的影响

Fig.4 Impact of staggered to low property of the electron beam welded joints

综上所述,电子束焊接接头错缝将明显导致焊接接头力学性能下降,其中对延伸率影响最为显著。相对于室温,低温有助于缓解错缝量对接头力学性能的弱化影响。

2.3 焊接接头断裂类型

电子束焊接接头的组成一般如图5所示,主要由焊缝区、熔合区、热影响区、母材区等组成。过渡环与箱筒段环缝为不填丝真空电子束焊接,焊缝金属正面与母材金属持平或略微下凹,没有焊缝余高,焊缝金属背面存在焊漏。焊接接头的焊缝金属为铸态组织,

母材金属为轧制态组织,焊接热影响区内的金属组织受焊接热循环影响发生长大与再结晶,组织构成比较复杂,整个焊接接头组织构成上存在不均匀性,此外焊接接头正面存在焊缝余高(电子束接头无焊缝余高或略微下凹),背面存在焊漏,焊接接头在截面形貌上也存在不连续性。根据焊接接头的组成,T852过渡环与T87箱筒段电子束焊接接头可能存在7种断裂类型,如图6所示。由表1可知,T852铝合金的室温及低温力学性能均低于T87,此外电子束焊接接头还具有结构形貌不连续性,焊缝背面焊漏部位与母材之间过渡不平滑,接头根部在接头拉伸过程中产生

应力集中,这表明电子束焊接接头的断裂类型理论上应集中在A、B、G三种类型。

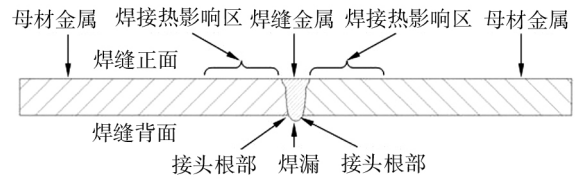


图5 电子束焊接接头组成

Fig.5 Composition of the electron beam welded joints

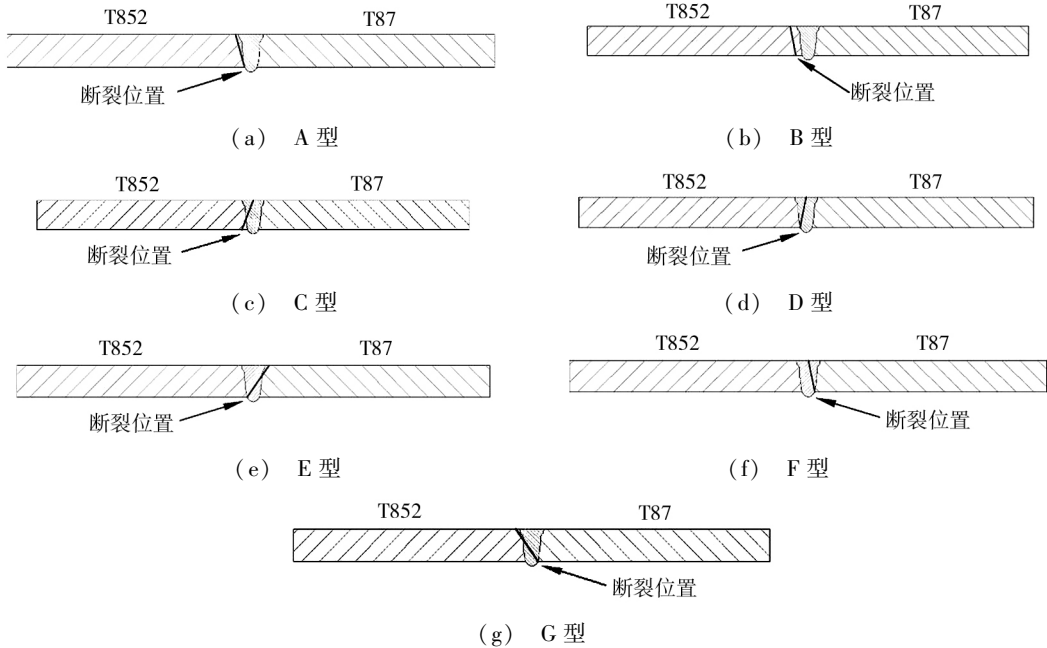


图6 电子束焊接接头断裂类型

Fig.6 Fracture types of the electron beam welded joints

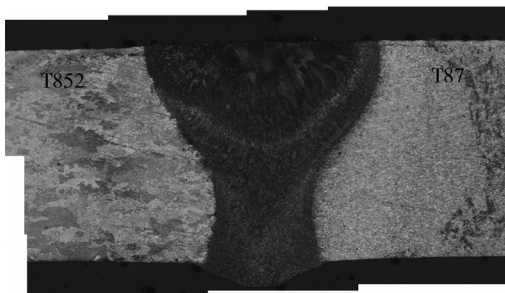
表3给出了所有2219 T852和T87电子束焊接接头试件的断裂类型数量分布,其中常温试件40件,低温试件40件。由表3可知,焊接接头室温条件下的断裂类型主要集中在B和G两种类型,占室温试件数量的82.5%,低温条件下断裂类型主要集中在A和B两种类型,占低温试件数量的87.5%。综合室温和低温断裂类型数据,A、B、G三种断裂类型占试件总数的87.5%。为进一步分析接头组织不均匀性对

焊接接头断裂类型的影响,对电子束焊接接头金相组织进行观察,结果见图7。

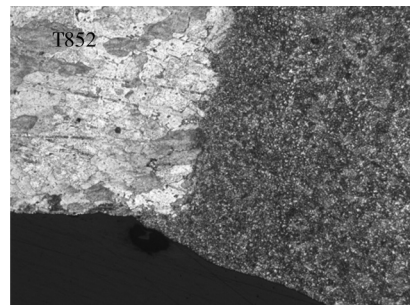
表3 2219 T852和T87电子束焊接接头断裂类型数量分布

Tab.3 Fracture type amount distribution of electron beam welded joints on 2219 T852 and T87

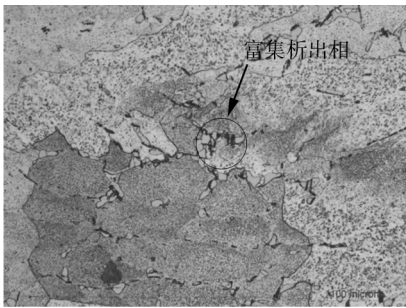
环境	A	B	C	D	E	F	G
室温	2	14	1	2	2	0	19
-196℃	8	27	0	3	0	2	0



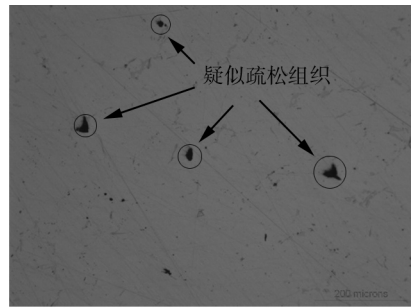
(a) 电子束焊接接头金相组织



(b) 焊缝根部金相组织



(c) T852 侧热影响区晶界处析出相



(d) T852 侧热影响区疑似疏松组织

图 7 电子束焊接接头金相组织

Fig.7 Metallography test of the electron beam welded joints

由图 7(a)可知,T852 侧焊接热影响区组织晶粒明显大于 T87 侧焊接热影响区组织晶粒,这与宋建岭等人^[13]研究 T852 锻件熔焊的结果一致;由图 7(b)可知,焊缝根部与母材之间过渡不平滑,在接头受力过程中会造成应力集中;由 7(c)可知,受焊接热循环影响,T852 侧热影响区部位的第二相颗粒在晶界处富集析出,颗粒尺寸较大,对断裂的小平面进行能谱分析,发现其组成为 Al_2Cu 相析出物,为脆性相;由图 7(d)可知,T852 侧热影响区部位组织存在大量疑似疏松组织的不规则黑色显示,亦有可能为 T852 侧热影响区粗大第二相颗粒脱落造成。综合接头金相组织观察表明,T852 侧热影响区晶粒相对于 T87 侧热影响区晶粒粗大,存在 Al_2Cu 脆性相析出,且同时存在较多疑似疏松组织,同时接头根部结构形貌及晶粒过渡不均匀、不连续,故 2219 T852 和 T87 电子束焊接接头的薄弱区域为 T852 侧热影响区及接头根部,这与电子束焊接接头断裂类型分布是一致的。

综上所述,由于电子束焊接接头的组织不均匀性和结构形貌上的不连续性,特别是 T852 侧热影响区晶粒粗大,导致 T852 侧热影响区和接头根部为电子束焊缝的薄弱区域,接头易在该区域发生断裂。

3 结论

(1) 部段级常、低温 2219 T852 和 2219-T87 电子束焊接接头的影响系数为 0.63,比平板级试片得到电子束接头影响系数低,低温状态下焊接接头的力学性能比室温状态下有所提高。

(2) 错缝将导致电子束焊接接头力学性能下降,其中对延伸率影响最为显著,低温有助于缓解错缝对焊接接头力学性能的弱化影响。

(3) 电子束焊接接头组织不均匀性和结构形貌上的不连续性,特别是 T852 侧热影响区晶粒粗大,导致 T852 侧热影响区和接头根部为电子束焊缝的薄弱区域,焊接接头极易在该区域发生断裂。

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):2-9.
- [2] 鄢东洋,吴会强,等. 2219 铝合金单、双道焊接头性能分析[J]. 宇航材料工艺,2013,43(6):79-83.
- [3] 刘春飞,益坤. 电子束焊接技术发展、历史现状及展望[J]. 航天制造技术,2003(1):33-34.
- [4] 张聃. 2219 铝合金电子束焊接工艺及焊接接头性能与机理研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
- [5] 熊然,韩冬,等. 基于正交试验的 2219 铝合金电子束焊接工艺参数优化[J]. 热加工工艺,2013(9):217-219.
- [6] 董吉凯. 2219 铝合金焊接接头韧性评估方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.
- [7] 王海波. 2219 铝合金电子束焊缝成形及特征区域研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2005.
- [8] 孙忠绍,杨雅昆,白景彬. 低温贮箱环缝焊接工艺[J]. 航天工艺,2000,8(4):4-7.
- [9] 张聃,陈文华,等. 焊接方法对 2219 铝合金焊接接头力学性能的影响[J]. 航空材料学报,2013,33(1):45-49.
- [10] SCHWARTZ M M. Metals joining manual [M]. Mc Graw Hill Higher Education,1979:50-56.
- [11] 张万春. 大型容器封头环缝焊接错缝的控制[J]. 焊接技术,1999,28(5):37-38.
- [12] 胡明华,徐爱杰出,杨学勤. 一级燃料箱后底环缝错位的研究[J]. 上海航天,2003(2):60-63.
- [13] 宋建岭,孙志鹏,等. 2219 铝合金锻件焊接接头组织与性能[J]. 焊接,2014(7):51-54.