

新一代运载火箭 2219铝合金配用焊丝研制

焦好军 胡明臣 周炼刚 常志龙 张志勇

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 针对新一代运载火箭贮箱材料 2219 铝合金,研制出了适用于常、低温贮箱焊接的焊丝。综合评价结果表明,新研制的焊丝具有良好的制造工艺性能、成分稳定;焊接 2219 铝合金裂纹敏感性低、气孔敏感性低、焊接工艺性好,接头性能满足指标要求,焊缝组织正常,补焊性能良好,拉伸、冲击均呈韧性断裂特征;接头综合性能优于 2A14/BJ-380 接头。

关键词 铝合金,焊丝,性能

Welding Wire Matched 2219 Aluminum Alloy in New Generation Launch Vehicle

Jiao Haojun Hu Mingchen Zhou Liangang Chang Zhilong Zhang Zhiyong

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 10076)

Abstract The welding wire used in welding lanch tank of normal temperatures and low temperatures are manufactured considering 2219 aluminum alloy which will be used in new generation launch vehicle. The integrated results show that the new welding wire has well manufactured properties and components are stability. The weldability of 2219 aluminum alloys which have low crack sensitivity, low air hole sensitivity, are fairly good, and the properties of welded joints which have normal microstructures and good properties of renewed welding can satisfy employed request. The integrated properties of welded joints are more excellent than welded joints of 2A14/BJ-380.

Key words Aluminum alloy, Welding wire, Mechanical properties

0 前言

新一代运载火箭贮箱材料用 2219 铝合金,研制其配用焊丝成为新一代运载火箭贮箱焊接的关键技术之一。研制的焊丝应适用于 2219 铝合金常、低温贮箱焊接,低温贮箱包括液氢贮箱和液氧贮箱(工作温度分别为 -253、-183)。

2219 铝合金配用焊丝应达到的技术指标为:(1)化学成分合理,具有良好的制造工艺性;(2)焊接裂纹敏感性满足 $K_1 < 10\%$, $K_2 = 0$;(3)焊接工艺性良好,包括焊缝成形,表面质量,焊接缺陷等;(4)常低温焊接接头强度系数 > 0.5 ,即接头强度应超过 220.5 MPa;(5)焊接接头伸长率 $\geq 3\%$;(6)和液氢、液氧相容。

2219 铝合金配用焊丝已有国产 720 焊丝和进口 2319 焊丝^[1-4]。720 焊丝和仿制国外的 2319 焊丝(称为 F2319)均不能满足新一代运载火箭贮箱焊接

使用要求,主要表现为接头伸长率较低。进口 2319 焊丝若用于航天产品则易受制于人,焊丝国产化具有重要意义。

焊丝研制分为焊丝初步设计阶段和焊丝改进设计阶段,评价结果表明,新研制的焊丝所焊接头性能优异,满足新一代运载火箭贮箱焊接使用要求。

本文为这一工作的简要总结。

1 试验材料及方法

采用 T87 态的 2219 铝合金板材,厚度为 2.6 和 6.0 mm,复验合格,裂纹敏感性试样厚度为 2.6 mm,尺寸 300 mm \times 100 mm,纤维方向为 100 mm 长度方向。拉伸强度试样厚度为 2.6 和 6.0 mm,尺寸 300 mm \times 100 mm,纤维方向为 300 mm 长度方向,焊前酸洗。焊丝采用新炼制的焊丝。

采用 TIG 和变极性 TIG 焊接方法,十字搭接裂纹敏感性试验方法,X 射线检测缺陷,力学性能采用相

收稿日期:2007-09-30

作者简介:焦好军,1962 年出生,研究员,主要从事焊接材料研制、金属材料构件交钥匙工程、激光焊接工艺研究

宇航材料工艺 2007 年 第 6 期

— 61 —

应的标准试验方法。子样数为 7 个。

2 焊丝成分初步设计和评价

2.1 初步设计

由于 2219 铝合金的主成分为 Al-Cu-Mn, 配用焊丝主成分选用 Al-Cu-Mn, 晶粒细化剂选用 Ti+B 或 Ti+Zr+V, 其他元素选用 Sc、Y、Ce。Ti 和 B 是微合金化元素, Ti 和 Al 形成 $TiAl_3$ 相, 成为结晶时的非自发结晶核心, 细化焊缝组织。B 可以加强 Ti 的晶粒细化效果。Zr 是微合金化元素, Zr 和 Al 形成 $ZrAl_3$ 化合物, 细化再结晶晶粒, 同时细化铸造组织, 但比 Ti 的效果小。有 Zr 存在时, 会降低 Ti+B 的晶粒细化效果。一般不采用 Zr+Ti+B 作晶粒细化剂。V 是微合金化元素, 和 Al 形成 VA_3 难溶化合物, 可以细化焊缝组织, 但比 Ti 和 Zr 的作用小, V 也可以细化再结晶组织。Y 在铝合金中起细化晶粒和减少低温脆性倾向的作用。Y 细化晶粒的机理是降低液体金属形核的表面能促使液体金属大量形核。同时 Y 和 H 有较强的亲和力, 相互作用形成稳定的 YH_2 , 改变 H 在铝液中的状态, 降低铝液中游离 H 的含量, 降低焊缝气孔倾向性。Sc 具有强烈细化晶粒的效果, 对 H 的作用更强烈。Ce 对氧的亲合力大于铝对氧的亲合力, 可还原 Al_2O_3 , 减少氧化膜夹杂, 同时具有晶粒细化作用^[5]。Na 在 Al-Cu 系中是杂质元素, 熔点低 (97.8 °C), 在 Al 中几乎不溶解, 最大固溶度小于 0.0025%, 在凝固过程中吸附在枝晶表面或晶界, 形成液态钠吸附层, 产生脆性开裂。

初步设计的焊丝合金系见表 1。

表 1 焊丝合金系初步设计

Tab 1 Design of alloy series

焊丝编号	主成分	晶粒细化剂
2301	Al-Cu-Mn	Ti+Zr+Sc
2302	Al-Cu-Mn	Ti+B
2303	Al-Cu-Mn	Ti+Zr+V+Ce
2304	Al-Cu-Mn	Ti+Zr+Y+Sc
2305	Al-Cu-Mn	Ti+B+Y
2306	Al-Cu-Mn	Ti+B+Sc

由表 1 可知, 2301 焊丝主成分为 Al-(9.5~10.5)Cu-(0.15~0.25)Mn, 晶粒细化剂采用 Ti+Zr+Sc, 目的是降低焊接裂纹敏感性, 提高接头性能。2302~2306 焊丝主成分为 Al-(6.0~6.8)Cu-(0.2~0.4)Mn。2302 焊丝的晶粒细化剂为 Ti+B, 目的是以最少的合金元素数量达到既满足裂纹敏感性要求又满足接头力学性能要求。2303 焊丝的晶粒细化剂为 Ti+Zr+V+Ce, 在仿制的 2319 焊丝基础上加 Ce, 目的是改进接头性能。2304 焊丝的晶粒细化剂为 Ti+Zr+Y+Sc, 希望发挥 Y 和 Sc 的各自优势, 进一步改进接头性能。2305 焊丝的晶粒细化剂

为 Ti+B+Y, 在 2302 焊丝的基础上加 Y, 进一步改进接头性能。2306 焊丝的晶粒细化剂为 Ti+B+Sc, 在 2302 焊丝的基础上加 Sc, 进一步改进接头性能。

2.2 评价

初步设计的焊丝成分稳定性和焊接工艺性良好, 焊缝气孔敏感性低。从工艺角度讲适合于 2219 铝合金的焊接。

表 2 为初步设计焊丝焊接裂纹敏感性试验结果。2301、2302、2303、2305、2306 焊丝的裂纹敏感性均优于 720 焊丝和美国产的 2319 焊丝。除 2304 外, 所有焊丝均满足 $K_1 < 10\%$ 、 $K_2 = 0$ 的要求。比较 2302、2305、2306 焊丝可知, 晶粒细化效果从高到低排列为: Ti+B+Sc > Ti+B+Y > Ti+B, 说明 Sc 的晶粒细化效果优于 Y, Sc、Y 都强化了 Ti+B 的晶粒细化效果。比较 2302、F2319 焊丝可知, Ti+B 的晶粒细化效果优于 Ti+Zr+V。比较 F2319、720 焊丝可知, Ti+Zr+V 的晶粒细化效果优于 Ti+Zr+V+B, 说明 Ti+B 和 Zr 同时存在时会降低晶粒细化效果。比较 F2319、2303 焊丝可知, Ti+Zr+V+Ce 的晶粒细化效果明显优于 Ti+Zr+V, 说明 Ce 的晶粒细化效果明显。2304 焊丝的 $K_1 = 23.3\%$, 结晶裂纹敏感性较大, 说明 Ti+B+Y+Sc 组合不适合 Al-Cu-Mn 系合金的合金化元素。

表 2 初步设计焊丝焊接裂纹敏感性

Tab 2 Crack sensitivity of welding wire

焊丝编号	$K_1 / \%$	$K_2 / \%$
2301	1.4	0
2302	3.7	0
2303	1.5	0
2304	23.3	0
2305	2.3	0
2306	0.5	0
720	5.7	0
2319 (美国)	3.8	0
F2319	5.3	0

所有焊丝焊接 2219 铝合金时的 $K_2 = 0$, 说明焊接液化裂纹敏感性较低, 在工程上易于应用。原因是若焊接液化裂纹敏感性较高, 焊接生产时若出现需要补焊时, 补焊将变得非常困难, 会在补焊焊缝边沿产生新的液化裂纹, 结晶裂纹则不会出现这种情况。

表 3 为 2.6 mm 板焊接接头常、低温性能试验结果。由表可知, 所有焊丝所焊接头强度均满足设计要求, 但接头伸长率差异较大, 只有 2219/2305、2219/2306 接头伸长率满足指标要求, 2219/2306 接头性能略优于 2219/2305 接头, 其他焊丝所焊接头伸长率均偏低, 平均值 < 3%, 进一步试验结果表明, 2219/2306 接头高温性能较差, 惟有 2219/2305 接头满足指标要求。

表 3 初步设计焊丝所焊接头力学性能

Tab 3 Mechanical properties of welded joints

焊丝 编号	厚度 /mm	室温		- 196	
		σ_b /MPa	/%	σ_b /MPa	/%
2301	2.6	261	2.7	313	2.9
2302	2.6	274	2.8	318	3.5
2303	2.6	293	2.8	353	3.1
2304	2.6	286	3.9	333	2.6
2305	2.6	278	3.8	318	3.3
2306	2.6	284	3.8	365	4.1
720	2.6	298	2.8	326	3.3
2319(美国)	2.6	264	4.6	320	4.0

表 4 为 2219/2305 扩大试验结果。由表可知,手工 VPTIG 焊接薄板时接头性能良好,焊接厚板时接头强度性能良好,塑性数据较低。自动 VPTIG 接头性能良好。手工 VPTIG 和手工 TIG 相比,手工 VPTIG 焊接薄板时接头性能较好,手工 TIG 焊接厚板时

接头综合性能较好。厚板时手工 TIG 采用双层焊,热输入量较大,热影响区受热软化较严重,手工 VPTIG 采用单层焊,热影响区受热软化较轻,故厚板焊接时手工 TIG 塑性较好,常温强度稍低。

表 4 初步设计焊丝扩大试验

Tab 4 Magnified experimentation of welding wires

焊接 方法	板厚 /mm	室温		- 196	
		σ_b /MPa	/%	σ_b /MPa	/%
手工	2.6	287	3.6	361	3.9
VPTIG	6	285	2.6	334	2.4
自动 VPTIG	4	303	4.7	-	-
手工 TIG	2.6	274	3.8	336	2.9
	6	271	3.7	346	3.8

2305 焊丝焊接 2219 铝合金适用于手工氩弧焊,但采用变极性氩弧焊焊接 6.0 mm 板时接头性能较差,由于新一代运载火箭贮箱决定采用变极性氩弧焊接方法,为此应对焊丝成分进行改进设计,以适应焊接方法的要求。

3 焊丝成分改进设计和评价

3.1 改进设计

焊丝主成分保留选用 Al-Cu-Mn。由于 2219 合金的晶粒细化剂为 Ti+Zr+V,为保证焊缝和母材过渡界面的良好结合,将主晶粒细化剂改为 Ti+Zr+V,为提高晶粒细化效果,再分别添加 Y、Sc、Cr、B。同时为改善 2305 焊丝的性能,将其 Ti 质量分数从 0.05%~0.15% 改为 0.1%~0.2%。设计的焊丝合金系见表 5。

表 5 焊丝合金系改进设计

Tab 5 Amendatory design of alloy series

焊丝编号	合金系
2321	Al-Cu-Mn-Ti-Zr-V-B
2322	Al-Cu-Mn-Ti-Zr-V-Y
2323	Al-Cu-Mn-Ti-B-Y
2324	Al-Cu-Mn-Ti-Zr-V-Sc
2325	Al-Cu-Mn-Ti-Zr-V-Cr

3.2 评价

改进设计的焊丝易熔铸,成分稳定性和焊接工艺性良好,焊缝气孔敏感性低。从工艺角度讲适合于 2219 铝合金的焊接。

表 6 为 2219 合金焊接裂纹敏感性试验结果。由表可知,2321、2322、2324、2325 焊丝的焊接裂纹率较低,说明 Ti+Zr+V+Me 的晶粒细化效果良好。所有焊丝的裂纹敏感性均优于 720 焊丝和美国产的 2319 焊丝。

表 6 2219 合金焊接裂纹敏感性

Tab 6 Welded crack sensitivity of 2219 aluminum alloy

焊丝编号	K_1 /%	K_2 /%
2321	1.1	0
2322	1.4	0
2323	2.7	0
2324	1.1	0
2325	1.8	0
720	5.7	0
2319(美国)	3.8	0

表 7 为改进设计焊丝所焊接头力学性能试验结果。2321~2325 焊丝全部满足指标要求,强度和塑性均有明显提高,2325 焊丝所焊接头性能最好,性能全面超过 720 焊丝,综合性能超过美国产的 2319 焊

丝。说明在 Al - Cu - Mn系中 Ti + Zr + V + Cr的作用效果优于 Ti + Zr + V + B、Ti + Zr + V + Y、Ti + Zr + V + Sc。

表 8为 2325焊丝焊接 2219铝合金的扩大试验结果,所用焊丝为一次生产量为 1 t的中试焊丝。由表可知,2325焊丝具有良好的制造工艺性能、成分稳

定;焊接 2219铝合金裂纹敏感性低、气孔敏感性低、焊接工艺性好,接头性能满足指标要求,焊缝组织正常,补焊性能良好,拉伸、冲击均呈韧性断裂特征;和 2A14/BJ - 380接头相比,2219/2325接头综合性能较好。

表 7 改进设计焊丝所焊接头力学性能

Tab 7 Mechanical properties of welded joints after amendatory design

焊丝 编号	厚度 /mm	室温		- 196	
		b /MPa	/%	b /MPa	/%
2321	2.6	316	5.4	361	3.8
	6.0	281	3.7	352	3.7
2322	2.6	306	4.3	346	3.3
	6.0	282	4.1	338	3.1
2323	2.6	274	3.8	336	2.9
	6.0	271	3.7	346	3.8
2324	2.6	311	5.4	350	3.4
	6.0	282	4.1	353	3.7
2325	2.6	313	4.5	371	4.3
	6.0	293	4.0	345	3.5
720	2.6	298	2.8	326	3.3
	6	270	3.2	319	2.9
2319(美国)	2.6	264	4.6	320	4.0
	6	287	4.2	352	4.0

表 8 改进设计焊丝扩大试验

Tab 8 Magnified experimentation of welding wires after amendatory design

接头	焊丝熔炼性	裂纹敏感性	气孔敏感性	焊缝组织	拉伸性能		
					常温	- 196	- 253
2219/2325	好	低 ($K_1 = 1.8\%$, $K_2 = 0$)	低	正常	$b = 272$ MPa = 4.7%	$b = 347$ MPa = 4.3%	$b = 368$ MPa = 3.5%
2A14/BJ - 380	差 (存在 Ti、Zr偏析)	高 ($K_1 = 7.2\%$, $K_2 = 3.4\%$)	较高	存在微裂纹	$b = 323$ MPa = 3.3%	$b = 365$ MPa = 2.3%	$b = 427$ MPa = 2.3%
焊缝常温 k /J·cm ⁻²		冷弯角 / (°)	补焊性能	焊缝断裂韧性 K_{Ic} /MPa·m ^{-1/2}			
常温	- 196			常温	- 196	- 253	
26	20	55	好	7.3			
-	-	35	差 (存在液化裂纹)	12.9			

4 结论

新研制的焊丝具有良好的制造工艺性能,成分稳定;焊接 2219铝合金裂纹敏感性低、气孔敏感性低、焊接工艺性好,接头性能满足指标要求,焊缝组织正常,补焊性能良好,拉伸、冲击均呈韧性断裂特征;接头综合性能优于 2A14/BJ - 380接头。

参考文献

- 1 粟山良员等. 液氢液氧火箭贮箱用高强度铝合金及其焊接接头的机械性能. 国外导弹, 1980: 3
- 2 刘春飞. 新一代运载火箭箱体材料的选择. 航空制造技

术, 2003; (2): 22 ~ 27

3 Nunes A C et al Variable polarity plasma arc welding on the space shuttle external tank Welding Journal SEP, 1984: 27 ~ 35

4 Belmonto A et al Application of variable polarity plasma arc welding to space modules fabrication. In: Proc conference on spacecraft structure, materials & mechanical testing, Netherlands 1996

5 张伟成等. 稀土在铝合金中的行为. 北京:兵器工业出版社, 1992

(编辑 任涛)