

2195 铝锂合金氩弧焊接头组织分析及力学性能研究

温斯涵 焦好军 李启军 李海刚 吕宏军

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

文 摘 针对T8态2195铝锂合金在氩弧焊时接头裂纹敏感性高、接头力学性能差等问题,开展2195铝锂合金焊丝研制工作,对接头的显微组织、抗裂性能及综合力学性能进行了研究。结果表明,2195铝锂合金熔焊接头主要由 α -Al、 Al_2Cu 、 $Al_3(Ti, Zr)$ 相组成,具备优异的抗裂性及力学性能,其裂纹敏感性 $K_1 < 1\%$, $K_2 = 0\%$,接头常温抗拉强度约为390 MPa,延伸率为6.3%。BJ-4505焊丝的研制为2195铝锂合金工程应用提供技术支持。

关键词 铝锂合金, 裂纹敏感性, 接头, 力学性能, 微观组织, 结构件

中图分类号: TG4

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2024.02.016

Study on the Microstructure and Mechanical Properties of 2195 Al-Li Alloy Tungsten Inert Gas Welded Joints

WEN Sihan JIAO Haojun LI Qijun LI Haigang LYU Hongjun

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

Abstract In response to the high sensitivity of joint cracks and poor mechanical properties of T8 2195 Al-Li alloy during argon arc welding, the development of 2195 Al-Li alloy welding wire was carried out, and the microstructure, crack resistance, and comprehensive mechanical properties of the joint were studied. The results indicate that the 2195 Al-Li alloy fusion welding joint is mainly composed of α -Al, Al_2Cu and $Al_3(Ti, Zr)$ phases, it has excellent crack resistance and mechanical properties. Its crack sensitivity K_1 is less than 1%, K_2 is 0%, and the tensile strength of the joint at room temperature is about 390 MPa, and elongation is 6.3%. The development of BJ-4505 welding wire provides technical support for the engineering application of 2195 Al-Li alloy.

Key words Al-Li alloy, Crack sensitivity, Joint, Mechanical property, Microstructure, Structural component

0 引言

航天推进剂贮箱作为运载火箭的重要部件,贮存燃料并承受大量的结构载荷。随着航天飞行器的不断发展,研制可重复使用航天飞行器得到各国高度重视。可重复使用贮箱是天地往返飞行器系统的最大部件之一,因而研制轻质、高强、高可靠性的贮箱材料至关重要。2195铝锂合金具备密度低、比强度高、比模量高和低温性能良好等优点,代替常规的Al-Mg系合金、Al-Cu系合金后可使构件质量减轻10%~15%,结构刚度提高15%~20%,现已成功应用在“奋进号”及“X”系列火箭贮箱结构上,被认为是21世纪航天领域的主要结构材料之一^[1-4]。

铝锂合金的焊接技术是其工程应用所需要解决的关键技术之一,各国研究人员主要采用搅拌摩擦焊、氩弧焊、激光焊接、电子束焊接等焊接方法对铝锂合金实施焊接^[5-8]。激光焊接及电子束焊接具有

能量密度集中、热影响区较窄等优点,但是由于焊接工件的尺寸、结构及设备成本等因素影响了其应用。搅拌摩擦焊作为一种新型的固相连接技术,具有焊接性好、焊接强度高、焊接变形小等优点,适用于可焊性差铝合金的连接,但是搅拌摩擦焊对于装配要求严格,在许多结构上无法应用,仍需采用氩弧焊接方法进行连接。研究表明,2195铝锂合金在氩弧焊接时主要存在热裂纹敏感性高、焊接接头性能下降、气孔敏感性高、焊接氧化等问题^[9-13]。目前,通过焊接过程控制可以解决气孔敏感性高及焊缝易氧化的问题^[14],还需要研制新型配用焊丝同时提高熔焊接头的抗裂性和综合力学性能。

本文通过设计2195铝锂合金配用焊丝成分,改善熔焊接头的显微组织结构,提高熔焊接头的抗裂性及力学性能,完成焊丝性能综合评价以及结构模拟件焊接等。

收稿日期:2023-11-05

第一作者简介:温斯涵,1991年出生,博士,主要从事高强铝合金线材研制及熔焊工艺研究工作。E-mail:shwenbuaa@163.com

1 实验

1.1 材料

氩弧焊接试验所用试板由T8态(6%冷变形+160℃×15h)2195铝锂合金板材加工而成,试板厚度为6mm,母材常温抗拉强度标称值为560MPa,其化学成分见表1。焊接试验选用自主研发的BJ-4505光亮焊丝,是为2195铝锂合金而设计的配用焊丝,焊丝主要成分为Al-6Cu-0.25Ti-0.25Zr,焊丝直径为1.6mm。

表1 2195铝锂合金化学成分

Tab. 1 Chemical composition of 2195 Al-Li alloy % (w)

Cu	Li	Mg	Ag	Zr	Al
3.7~4.3	0.8~1.2	0.25~0.8	0.25~0.6	0.08~0.1	余

1.2 焊接实验

氩弧焊接试板的尺寸为300mm×100mm×6mm,焊接试板机加工出“V型”焊接坡口,单边坡口角度为60°,钝边高2mm。将试板的正反两面分别去除0.2mm后进行除油和酸洗,然后对焊口表面进行打磨刮削处理,焊接前将试板放入烘箱内烘干。利用BJ-4505焊丝对2195铝锂合金试板进行焊接,使用自动焊方法进行焊接,焊接试验设备为米勒焊机,主要采用单面双层成形工艺,保护气体为纯度为99.999%的高纯氩气。焊接参数包括焊接电流、送丝速度、焊接速度及氩气流量,各道次焊接参数如表2所示。焊接后目视检查焊缝外观,结果显示自动焊接头成形良好,表面质量满足QJ2698A—2011 I级焊缝要求。

表2 熔焊工艺参数

Tab. 2 Processing parameters of the fusion welding

层数	焊接电流 /A	焊接速度 /mm·min ⁻¹	送丝速度 /mm·min ⁻¹	气流量 /L·min ⁻¹
打底	260	130	100	12
盖面	240	150	100	12
圆环	120	120	70	12
结构	120	100	70	12

1.3 组织分析与性能表征

利用德国生产的AXS-D8射线衍射仪分析焊缝组织及母材组织,工作电压为40kV,工作电流为200mA,扫描速度6°/min,扫描范围为10°~90°。利用徕卡生产的DM4000M金相显微镜观察接头组织形貌、晶粒尺寸及分布。使用FEI公司生产的Quanta 200F场发射扫描电镜(SEM)对2195/BJ-4505接头的微观组织进行分析,通过背散射图像确定焊缝中析出相的分布,并对析出相进行能谱分析(EDS)。为进一步确定2195/BJ-4505接头焊缝内的微观组织结构,对焊缝中心区域进行透射电子显微分析(TEM)。选用环形焊缝试验方法对2195/BJ-

4505接头的裂纹敏感性进行评价,包括其一次补焊及二次补焊的裂纹敏感性。环形焊缝试验法模拟贮箱法兰焊接结构。内外圆盘为2195铝锂合金板材,内盘外沿和外盘内沿可开坡口,用于调整熔合比,加工、装配压紧后对环形焊缝实施焊接,焊后分别测量结晶裂纹长度和液化裂纹长度。

对熔焊接头进行拉伸、冲击、弯曲等试验。拉伸试样由带余高的焊接头试样沿横向截取制备,试样总长175mm,标距为45mm,拉伸试验在国产CMT5105电子万能试验机上进行,实验温度包括-253、-196、-150、-20、20(常温)、100、200、300℃,每种拉伸试样至少取5个子样,计算其拉伸强度及延伸率的平均值作为该状态下的拉伸性能。利用德国生产的HIT 50. PC型冲击试样机和国产CMT5105电子万能试验机对熔焊接头的冲击及弯曲性能进行测试,测量其冲击韧性及冷弯角。

2 结果与分析

2.1 显微组织分析

2195铝锂合金熔焊接头的焊缝组织及母材组织见图1。结果显示2195铝锂合金熔焊接头主要由 α -Al及Al₂Cu相组成。图2为2195铝锂合金单面双层焊接后的接头金相组织。

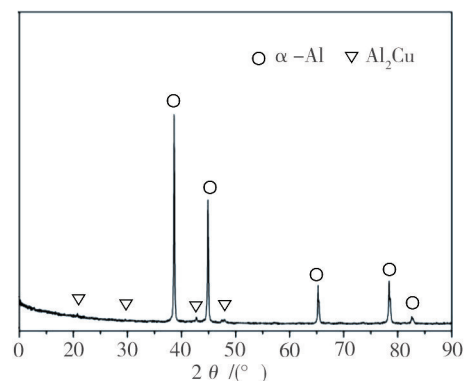
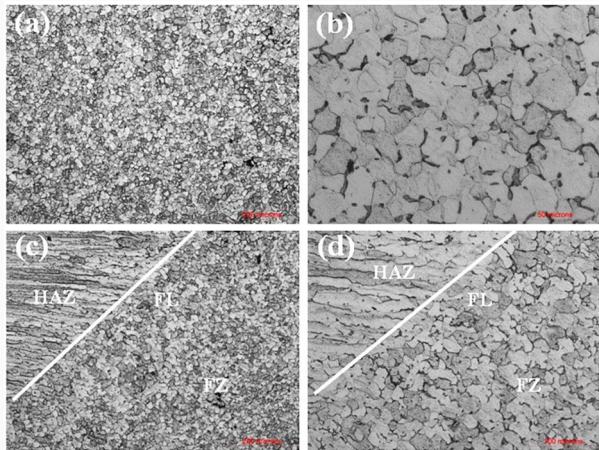


图1 BJ-4505接头X射线衍射图谱

Fig. 1 X-ray diffraction pattern of BJ-4505 welded joint

2195/BJ-4505焊接头由焊缝熔化区(FZ)、熔合线(FL)、热影响区(HAZ)组成。2195/BJ-4505接头晶粒细小均匀,尺寸一般为15~50μm,与一般铝合金熔焊缝熔合线晶粒形貌不同,接头从熔合线到焊缝中心组织均为细小等轴晶粒,无柱状树枝晶组织。与2195/2325接头的组织进行对比可知,提高焊丝内Ti、Zr等合金化元素的质量分数可以显著降低焊缝组织的晶粒尺寸,有助于熔合线细小晶带的形成。

图3为2195/BJ-4505接头微观组织,可见焊缝组织较为均匀,白色短棒状相、晶界半连续白色相及晶内白色颗粒相分布在 α -Al基体上,结合能谱分析可知,焊缝内沿晶界分布白色析出相及晶内颗粒状析出相为

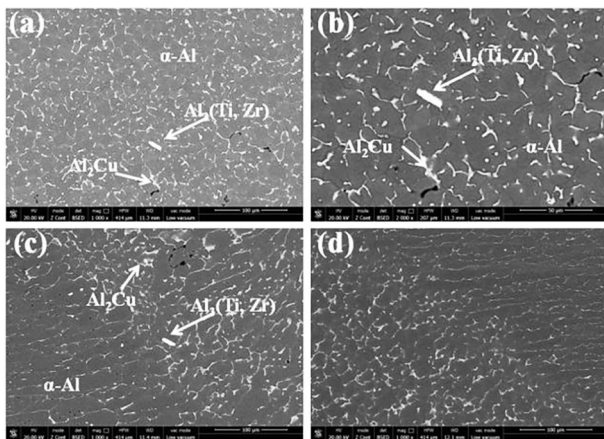


注: (a)-(b)焊缝中心金相组织; (c)-(d)熔合线金相组织。

图2 2195/BJ-4505接头金相组织

Fig. 2 Microstructure of the 2195/BJ-4505 welded joint

Al_2Cu , 白色短棒状相为 $Al_3(Ti, Zr)$ 相, 主要含 Al、Zr、Ti 等元素, 尺寸为 $5\sim 15\ \mu m$, 是焊缝内 Ti、Zr 含量提高到一定程度, 在凝固过程析出的强化相。熔合线附近的显微组织显示, 热影响区晶界处出现局部液化现象, 但是由于 BJ-4505 的抗裂性能优异, 焊接应力没有将液化晶界拉开, 导致液化裂纹的产生。



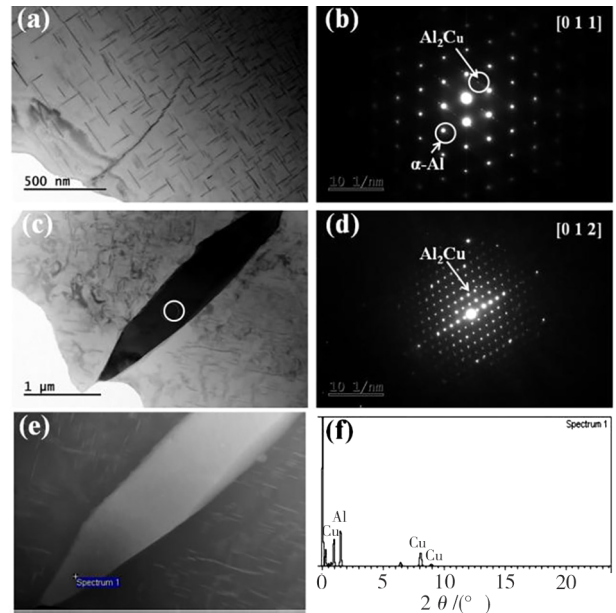
注: (a)-(b)焊缝中心背散射图; (c)-(d)熔合线背散射图。

图3 2195/BJ-4505接头背散射图

Fig. 3 Backscattered electron images of the 2195/BJ-4505 welded joint

在 $[011]$ 晶带轴下析出相形貌、选区电子衍射图像见图 4(a)-(b), 根据衍射斑点可以判断, 在 $\alpha-Al$ 基体上分布的针状析出相为 Al_2Cu 相, 相尺寸为 $100\sim 200\ nm$, 在晶内分布数量较多。晶界处 Al-Cu 相的微观形貌、电子衍射花样及能谱分析见图 4(c)-(f)。晶界分布的 Al-Cu 相厚度较薄, 尺寸在 $1\ \mu m$ 以内, 利用能谱分析确定该相由 Al、Cu 组成, 比例约为 $2:1$ (原子数分数比), 初步判断为 Al_2Cu 相, 结合 XRD 衍射图及微区电子衍射花样图谱最终确定该相为 Al_2Cu 相, 经计算图中衍射斑点晶带轴为 $[012]$ 。因此根据 XRD、SEM 及 TEM 分析结果可知, 2195/BJ-4505 接头主要由 $\alpha-Al$ 固溶体、 $Al_3(Ti, Zr)$

(Zr) 相及 Al_2Cu 组成。



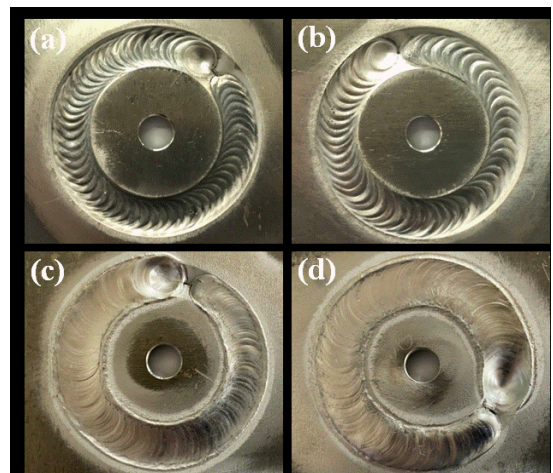
注: (a)-(b)焊缝晶粒内部形貌及其衍射斑点; (c)-(d)焊缝晶间形貌及其衍射斑点; (e)-(f)焊缝晶间能谱。

图4 2195/BJ-4505接头熔化区 TEM 图

Fig. 4 TEM images of the fusion zone in the 2195/BJ-4505 welded joint

2.2 抗裂性能

BJ-4505 焊丝焊接裂纹敏感性试验结果见图 5。



注: (a)-(b)一次焊接; (c)一次补焊; (d)二次补焊。

图5 2195/BJ-4505接头环形焊缝抗裂试验

Fig. 5 The circular patch specimen of the 2195/BJ-4505 welded joint

在利用 4505 焊丝进行一次焊接及一次补焊时, 均没有出现结晶裂纹和液化裂纹, 一次焊接裂纹敏感性 $K_1=0\%, K_2=0\%$, 见图 5(a)-5(b); 一次补焊裂纹敏感性为 $K_1=0\%, K_2=0\%$, 见图 5(c)。进行二次补焊时出现少量结晶裂纹且没有出现液化裂纹, 经统计二次补焊裂纹敏感性为 $K_1=0.8\%, K_2=0\%$, 见图 5(d)。切取 2195/BJ-4505 圆环焊缝接头截面进行金相显微组织观察, 研究焊缝内微裂纹情况, 在圆环焊接条件

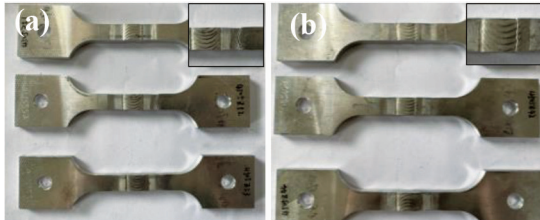
下,2195/BJ-4505焊缝组织均匀且致密,在焊缝中心、熔合线半熔化区及热影响区均无微裂纹产生。抗裂性能试验结果表明焊丝的抗裂性能优异,可以满足使用要求。

2.3 综合力学性能

拉伸后的抗拉强度及延伸率数据统计在表3内。低温及常温拉断试样宏观形貌如图6所示。

表3 2195/BJ-4505接头拉伸性能

温度/℃	σ_b /MPa	Error bar/MPa	δ /%	Error bar/%
-253	532.1	±20	3.1	±0.5
-196	510.5	±20	3.7	±0.5
-150	437.7	±20	4.1	±0.5
-20	390.8	±15	5.5	±0.5
20	388.4	±10	6.3	±0.5
100	331.7	±10	4.4	±0.5
200	248.0	±10	5.1	±0.5
300	139.6	±5	7.4	±0.5



注:(a)常温断裂宏观形貌;(b)低温断裂宏观形貌。

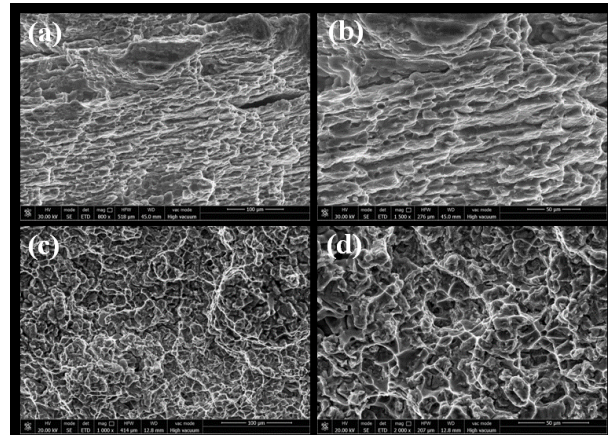
图6 拉伸断裂试样宏观形貌

Fig. 6 Macroscopic morphology of tensile fracture

BJ-4505自动焊接接头在-196℃下的拉伸强度为510.5 MPa,延伸率为3.7%,在-253℃下拉伸强度为532.1 MPa,延伸率为3.1%,低温拉伸性能显示该接头满足低温使用要求。低温断口均分布在焊缝熔合线内侧,见图6(a),说明在低温条件下,带余高焊缝为熔焊接头最薄弱区域,即Al₂Cu相在低温下的强化效果远低于热影响区及母材内的T1或TB强化相^[15-16]。2195/BJ-4505自动焊接接头常温拉伸强度超过385 MPa,强度系数超过0.69,且延伸率可达到6.3%,具备优异的拉伸性能。常温拉伸后试样多断裂在热影响区位置,见图6(b),说明在常温下,热影响区位于熔焊接头最薄弱区域,仅仅通过焊丝成分的改变已无法再提高接头的强度。2195/BJ-4505熔焊接头在自动焊接接头在200℃下的拉伸强度为248 MPa,延伸率为5.1%,在300℃下拉伸强度仅为139.6 MPa,延伸率为7.4%,高温下拉伸性能均低于常温下的拉伸性能,且随着拉伸试验温度的提高,熔焊接头的强度有逐步下降的趋势(表3)。

图7为2195/BJ-4505焊接接头常温及低温下的拉伸断口形貌。由于常温下断裂位置发生在热影响

区,因此断口呈现板材断口形貌,见图7(a)-7(b),呈典型的韧性断裂特征,图中可见较深较密的韧窝,与其延伸率较高相符。在低温下2195/BJ-4505接头具备韧性断裂特征,图中可见韧窝形貌,见图7(c)-7(d),表明接头在断裂前有大量的塑性变形,2195/BJ-4505接头在低温下的塑性较好。



注:(a)-(b)常温断口形貌;(c)-(d)低温断口形貌。

图7 接头常温及低温断口形貌

Fig. 7 Tensile fracture morphology of the welded joint at room temperature and low temperature

冲击韧性及弯曲性能结果见表4。2195/BJ-4505熔焊接头的冲击韧性为18.5 J/cm²,具有良好的韧性。2195/BJ-4505熔焊接头的冷弯角平均值为35.0°,接头的塑性较好。根据2195/BJ-4505熔焊接头在不同温度下测试的抗拉强度及延伸率数据、常温下测试的冲击韧性及冷弯角数据可知,BJ-4505焊丝综合力学性能优异,兼顾了接头强度、塑性、韧性等指标,可满足工程应用要求。

表4 熔焊接接头冲击韧性及弯曲性能

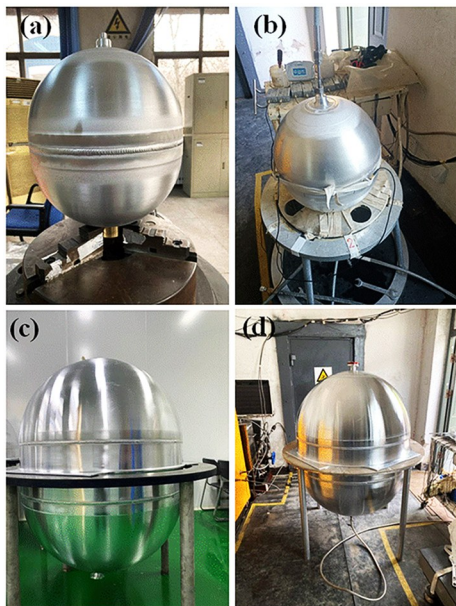
Tab. 4 Impact and bending properties of the welded joints

冲击韧性/J·cm ⁻²	冷弯角/(°)
18.5	35.0

2.4 结构件焊接

采用手工氩弧焊接方法对Φ400 mm贮箱及Φ960 mm贮箱结构件进行焊接,考察BJ-4505焊丝在结构件上的适应性及焊接性,结构件均由2个半球对接构成,焊接部位包括法兰和环焊缝,焊口厚度为3.0 mm。通过酸洗、焊前打磨、装配、定位焊后,实施一次焊接,完成Φ400 mm贮箱及Φ960 mm贮箱结构件的焊接。焊接后目视检查焊缝的外观质量,焊缝成形良好,焊缝表面不存在咬边、低于母材的凹陷,未见超过QJ2698A—2011 I级焊缝要求的表面气孔及裂纹等表面缺陷,且余高可以圆滑过渡至母材表面,焊缝成形质量良好。对通过X光检测的贮箱进行水压测试,首先将去离子水注入贮箱内,水压从0升至0.5 MPa后保压5 min,再升

至0.8 MPa保压10 min,在保压期间未见明显压降及泄露现象,通过水压测试。研究表明BJ-4505焊丝可完成球形结构件法兰及环缝的焊接。



注:(a)-(b) $\Phi 400$ mm贮箱结构件;(c)-(d) $\Phi 960$ mm贮箱结构件。

图8 2195铝锂合金贮箱宏观形貌及液压测试

Fig. 8 Morphology of 2195 Al-Li alloy tank and hydraulic test

3 结论

(1)2195/BJ-4505接头显微组织细小且均匀,接头从熔合线到焊缝中心均为等轴晶,熔化区主要由 α -Al基体、 Al_2Cu 及 $Al_3(Ti, Zr)$ 相组成。

(2)2195/BJ-4505接头抗裂性能优异。一次焊接熔焊接头裂纹敏感性 $K_1=0\%$, $K_2=0\%$;一次补焊接头裂纹敏感性为 $K_1=0\%$, $K_2=0\%$;二次补焊接头裂纹敏感性为 $K_1=0.8\%$, $K_2=0\%$ 。

(3)2195/BJ-4505接头综合力学性能优异,接头常温抗拉强度超过385 MPa,延伸率为6.3%,接头-196℃下低温抗拉强度超过510 MPa,延伸率为3.7%,接头冲击韧性为18.5 J/cm²,冷弯角为35.0°。

(4)利用BJ-4505焊丝完成贮箱结构法兰及环焊缝的焊接,并进行了水压测试,满足工程使用需求。

参考文献

[1] RIOJA R J, LIU J. The evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications [J]. Metall. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012(43): 3325-3337.

[2] RIOJA R J. Fabrication methods to manufacture isotropic Al-Li alloys and products for space and aerospace applications[J]. Materials Science and Engineering A, 1998, 257(1): 100-107.

[3] 李劲风, 郑子樵, 陈永来, 等. 铝锂合金及其在航天工业上的应用[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(1): 13-19.

LI Jinfeng, ZHENG Ziqiao, CHEN Yonglai, et al. Al-Li alloys and their application in aerospace industry [J]. Aerospace Materials & Technology, 2012, 42(1): 13-19.

[4] 张文毓. 铝锂合金的研究与应用进展[J]. 装备机械,

2017(1):72-75.

ZHANG Wenyu. Development in research and application of Al-Li alloys [J]. The Magazine on Equipment Machinery, 2017(1): 72-75.

[5] 李红萍, 叶凌英, 邓运来, 等. 航空铝锂合金研究进展[J]. 中国材料进展, 2016, 35(11): 856-862.

LI Hongping, YE Lingying, DENG Yunlai, et al. Progress of aircraft Al-Li alloys [J]. Materials China, 2016, 35(11): 856-862.

[6] EL-ATY A A, XU Y, GUO X, et al. Strengthening mechanisms, deformation behavior, and anisotropic mechanical properties of Al-Li alloys: A review [J]. Journal of Advanced Research, 2018(10): 49-67.

[7] 周利, 李高辉, 刘朝磊, 等. 铝锂合金焊接技术的研究现状[J]. 焊接, 2017(1): 7-12.

ZHOU L, LI G H, LIU C L, et al. Research progress in welding technology of Al-Li alloy [J]. Welding Technology, 2017(1): 7-12.

[8] DECREUSA B, DESCHAMPSA A, et al. The influence of Cu/Li ratio on precipitation in Al-Cu-Li-X alloys [J]. Acta Materialia, 2013, 61(6): 2207-2218.

[9] 温斯涵, 周炼刚, 程昊, 等. 2195铝锂合金弧焊技术研究现状[J]. 宇航材料工艺, 2021, 51(3): 1-7.

WEN Sihan, ZHOU Liangang, CHENG Hao, et al. Arc welding technology of 2195 Al-Li alloy [J]. Aerospace Materials & Technology, 2021, 51(3): 1-7.

[10] 陈国庆, 尹乾兴, 司晓庆, 等. 铝锂合金焊接技术的研究现状分析[J]. 焊接学报, 2019, 40(8): 155-160.

CHEN Guoqing, YIN Qianxing, SI Xiaoqing, et al. Research status analysis of aluminum-lithium alloy welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(8): 155-160.

[11] 狄欧. 铝锂合金的焊接技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2006(9): 90-93.

OU Di. Progress in Welding Technology of Al-Li Alloy [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006(9): 90-93.

[12] KOSTRIVAS A, LIPPOLD J. Weldability of Li-bearing aluminium alloys [J]. International Materials Reviews, 1999, 44(6): 217-237.

[13] 温斯涵, 周炼刚, 孙建秋, 等. TiB₂颗粒对2195铝锂合金焊接接头焊接性的影响[J]. 宇航材料工艺, 2021, 51(4): 131-135.

WEN Sihan, ZHOU Liangang, SUN Jianqiu, et al. The effect of TiB₂ particles on the welding properties of 2195 aluminum-lithium alloy [J]. Aerospace Materials & Technology, 2021, 51(4): 131-135.

[14] 温斯涵, 朱文俐, 孙建秋, 等. 2195铝锂合金钨极氩弧焊接工艺研究[J]. 宇航材料工艺, 2023, 53(1): 69-74.

WEN Sihan, ZHU Wenli, SUN Jianqiu, et al. Study on the TIG welding crafts of 2195 aluminum-lithium alloy [J]. Aerospace Materials & Technology, 2023, 53(1): 69-74.

[15] WEN S H, JIAO H J, ZHOU L G, et al. Effect of Ti, Zr, and Cu content on the microstructure and properties of 2195 Al-Li alloy weldment [J]. Welding in the World, 2023(67): 1181-1192.

[16] CHEN D L, CHATURVEDI M C. Effects of welding and weld heat-affected zone simulation on the microstructure and mechanical behavior of a 2195 aluminum-lithium alloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011(32): 2729-2741.