

TiB₂颗粒对2195铝锂合金焊接头焊接性的影响

温斯涵^{1,2} 周炼刚¹ 孙建秋¹ 焦好军¹ 吴素君²

(1 航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

(2 北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191)

文 摘 为了解决2195铝锂合金在焊接时裂纹敏感性高、焊接头软化等问题,通过调整焊丝的化学成分,添加微米级原位自生TiB₂颗粒,制备出BJ-4210焊丝,并对焊接头的抗裂性、力学性能及显微组织进行了研究。研究表明,TiB₂颗粒在熔池中作为形核质点,能够降低焊缝晶粒尺寸并且改变晶粒形态,从而有效的降低接头的裂纹敏感性,提高接头的力学性能,其拉伸强度达到370 MPa,延伸率为3.1%。BJ-4210焊丝的研制可为2195铝锂合金的工程应用提供技术支撑。

关键词 铝锂合金,焊丝,裂纹敏感性,力学性能,微观组织

中图分类号: TG442

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.04.016

The Effect of TiB₂ Particles on the Welding Properties of 2195 Aluminum-lithium Alloy

WEN Sihan^{1,2} ZHOU Liangang¹ SUN Jianxiu¹ JIAO Haojun¹ WU Sujun²

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

(2 School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract The BJ-4210 wire was prepared by adjusting the chemical composition and adding micron in-situ TiB₂ particles to solve the problems of high crack sensitivity and softening of welding joint during welding of 2195 aluminum-lithium alloy. In this paper, the crack sensitivity, mechanical properties and microstructure of joint were investigated. The results show that the TiB₂ particles, as the nucleation point, can reduce the size of weld grain and changes the morphology of the grain, which can effectively reduce crack sensitivity of the joint and improve its mechanical properties. The tensile strength of joint is 370 MPa, while the elongation of joint is 3.1%. The research of BJ-4210 wire provides technical support for the engineering application of 2195 aluminum-lithium alloy.

Key words Al-Li alloy, Weld filler wire, Crack sensitivity, Mechanical property, Microstructure

0 引言

2195铝锂合金是一种低密度、高比强度、高比模量、具备较好抗腐蚀性能及良好低温性能的铝合金,在航空航天领域中具有巨大的应用价值。使用铝锂合金代替常规铝合金,在强度提高15%~20%的同时能够减重10%~20%,可以有效减轻航空航天推进器结构质量,提升其运载能力^[1-8]。

随着2195铝锂合金的不断应用,其焊接性能得到相关研究人员的广泛关注。研究表明采用传统熔焊工艺焊接铝锂合金时,主要存在焊接气孔敏感性高、焊缝易氧化、热裂纹敏感性高、焊接头软化等问题^[9-12]。铝锂合金焊接缺陷产生的主要原因包括:(1)合金中含有Li、Mg等化学活泼性强的合金元素,

合金表面形成的氧化物易吸收水分,且Li对H的亲合力强,已在浇铸过程吸H,导致焊接气孔产生^[13];(2)Li元素化学性质活泼,在焊接时极易被氧化;(3)合金的热膨胀系数大、冷却零塑性温度低、脆性温度区间大,导致合金的热裂纹敏感性高^[14];(4)焊缝中的金属熔化并重新凝固,焊缝区为铸态组织,焊缝内析出的强化相少于母材中的强化相,接头力学性能下降。目前,通过焊接工艺及过程控制可以解决气孔敏感性高及焊缝易氧化的问题,还需要研制铝锂合金配用焊丝以改善其抗裂性和焊接力学性能。

本文针对2195铝锂合金的特点,通过调整焊丝的化学成分从而改善焊缝的微观组织,降低接头的裂纹敏感性,提高焊缝的力学性能。

收稿日期:2020-10-29

第一作者简介:温斯涵,1991年出生,博士,主要从事铝合金焊丝研制及焊接工艺研究工作。E-mail:shwenbuaa@163.com

1 实验

1.1 材料

所用母材为西南铝生产的T8态2195铝锂合金板材,厚度为8 mm,将其加工为6 mm厚的焊接试板,合金为Al-Cu-Li系合金,具体成分见表1。焊接试验共选用2种焊丝,焊丝直径为3.0 mm,其中BJ-380D焊丝是2A14铝合金配用焊丝,为成熟牌号焊丝;BJ-4210是为2195铝锂合金而设计的配用焊丝。

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 实验方法

将焊接试板和焊丝进行除油、酸洗及打磨刮削处理,保证清除铝合金表面氧化膜,防止焊接气孔缺陷的产生,焊接过程在焊接区域实施Ar保护措施,避免焊缝被氧化。焊接试验设备为奥地利生产的Fronius MW 4000型焊机,在AR保护下进行TIG手工焊接,采用单面双层焊接工艺,焊接电流为200 A,焊接速度为100 mm/min,Ar流量为12 L/min。焊接后对试板进行X光检测,X光底片显示焊缝内部质量满足QJ 2698A—2011 I级焊缝要求。

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175 mm,标距为45 mm,拉伸试验在国产CMT5105电子万能试验机上进行,每种拉伸试样取3个子样,取其拉伸强度及延伸率的平均值作为该状态下的力学性能。

利用德国生产的AXS-D8射线衍射仪进行X射线衍射分析测试,将焊缝截面切割成长方形样品,要求测试面平整,实验条件:Cu-K α 辐射,加速电压40 kV,扫描速度6°/min。金相试样采用混合酸溶液侵蚀,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。在Quanta-650扫描电镜进行接头显微组织分析、能谱分析(EDS)及拉伸断口分析。在美国沃特仕生产的STDQ-600差式扫描量热仪上测量焊缝及2195铝锂合金母材的DSC曲线,获得合金在凝固过程的初始结晶温度、最终结晶温度及凝固温度区间。

2 结果与分析

2.1 焊丝设计

使用BJ-380D及BJ-4210焊丝都是Al-Cu-Si系焊丝,其中BJ-380D焊丝添加Ti、Zr等微合金化元素作为晶粒细化剂,BJ-4210焊丝的化学成分是在BJ-

380D的基础上进行调整,将晶粒细化剂改变为微米级的原位自生TiB₂颗粒,以改善焊缝的微观组织,提高焊缝的抗裂性及力学性能,两种焊丝的成分对比见表2。根据优化后焊丝成分,通过熔铸、挤压和拉拔等工序,制造出适合于手工氩弧焊接的小样焊丝实物,丝径为3.0 mm。

表2 焊丝化学成分

Tab. 2 Chemical composition of weld filler wire % (w)				
焊丝	Cu	Ti/TiB ₂	Zr	Si
380D	1.5~2.5	0.10~0.20	0.10~0.25	3.0~4.0
4210	1.5~2.5	0.5~3.0	-	3.0~4.5

2.2 抗裂性能

选用环形焊缝试验方法对2195铝锂合金及其配用焊丝的焊接裂纹敏感性进行评价。环形焊缝试验法,类似于法兰焊接结构。内外圆盘为母材,加工、装配压紧后进行对接焊接,试片厚度不限,适合于手工焊和自动焊。焊后分别测量结晶裂纹长度和液化裂纹长度,测量单条焊缝上的裂纹长度时应从正、反两面进行,取数值较大者计算。

对母材环形试样进行自熔焊接,焊缝中心存在大量结晶裂纹,结晶裂纹敏感性 $K_1 > 14%$,沿裂纹纵向方向制备金相试样,观察裂纹的扩展途径及裂纹与焊缝微观组织的关系。焊接热裂纹的宏观及微观形貌如图1所示,2195铝锂合金在焊接时,会产生结晶裂纹及液化裂纹,在金相显微镜下观察其微观形貌,焊缝中心的结晶裂纹在柱状晶间及枝晶间形成,并沿晶界扩展,而熔合线外侧生成的液化裂纹沿母材HAZ粗晶区晶界扩展,利用机械法将焊接热裂纹打开,在扫描电镜下观察热裂纹断口形貌,见图2,热裂纹断口主要呈现光滑颗粒特征(“鹅卵石”状或“土豆”状),且表面可见晶间低熔点共晶物或液膜褶皱,说明焊接热裂纹与晶界上的低熔点共晶物相关。研究表明,自熔焊接结果说明材料本身的抗裂性能较差,需要添加合适的焊丝降低其裂纹敏感性。

利用BJ-380D及BJ-4210焊丝对圆盘试样进行填丝氩弧焊接,环形焊缝抗裂试验结果见图3。BJ-380D焊丝圆环试样的热裂纹出现在起弧处焊缝中心(结晶裂纹),裂纹长度约为5 mm,未发现液化裂纹,经计算裂纹敏感性 $K_1 = 3.2%$, $K_2 = 0%$,与母材自熔焊接相比,抗裂性显著提高。BJ-4210焊丝圆环试样未发现焊接热裂纹的存在,裂纹敏感性 $K_1 = 0%$, $K_2 = 0%$,表明焊丝的抗裂性能优异,可以满足使用要求。

为进一步研究BJ-4210焊丝的抗裂性能,对其焊接头的DSC曲线进行测量,根据温度与热流之间的关系,

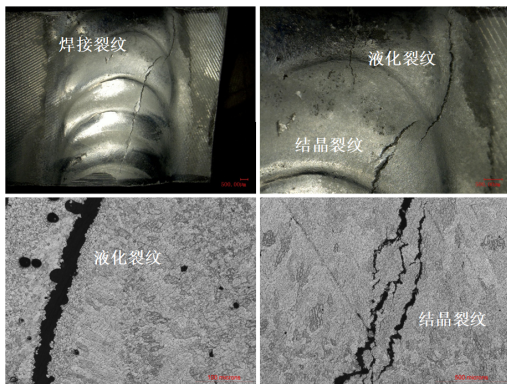


图1 焊接热裂纹的宏观及微观形貌

Fig. 1 Macro and micro morphology of welding hot crack

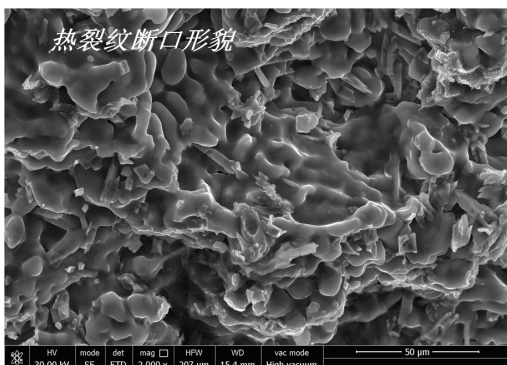


图2 焊接热裂纹断口形貌

Fig. 2 Fracture morphology of welding hot crack

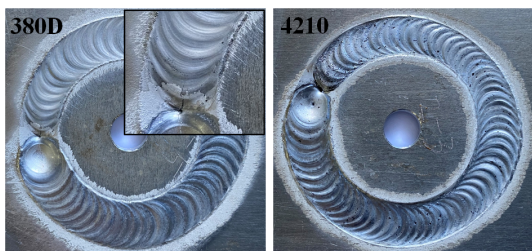


图3 BJ-380D及BJ-4210焊丝抗裂试验

Fig. 3 Anti-crack experiment of BJ-380D and BJ-4210

得到焊接头在凝固过程的初始结晶温度、最终结晶温度及凝固温度区间,实验结果见图4。4210接头在熔化后凝固的过程,初始结晶温度为607.2℃,最终结晶温度为499.6℃,凝固温度区间为107.6℃。与2195铝锂合金母材的DSC数据进行对比,合金初始结晶温度为628℃,最终结晶温度为511.6℃,凝固温度区间116.4℃。结果显示,4210接头具备更低的最终结晶温度,结合焊接时的热场分布,在热影响区熔合线外侧晶界液化临近结束前,焊缝内金属仍存在流动性较好的液态低熔点相,有利于抑制液化裂纹的产生。同时4210接头初始结晶低于铝锂合金初始结晶温度,具有更小的固-液态结晶温度区间,在脆性温度停留时间短,应变量积累量减少,结晶裂纹倾向降低。该研究表明BJ-4210焊丝通过调整焊缝内部化学成分,降低了合金的热裂纹敏感性。

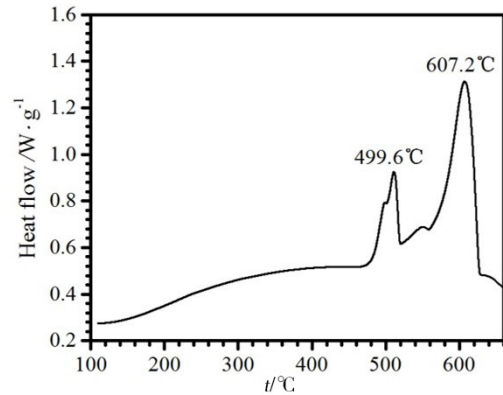


图4 BJ-4210接头DSC曲线

Fig. 4 DSC curve of BJ-4210 welded joint

2.3 力学性能

利用两种不同焊丝对2195铝锂合金进行单面双层焊接后,试板厚度为6.0mm,对接头进行室温拉伸试验,测量、统计抗拉强度及延伸率,并计算其平均值,结果记录在表3内。两种接头的拉伸断口位置都处于熔合线内侧,其中BJ-4210接头的拉伸强度可达到379MPa,延伸率为3.1%,其强度达到使用需求;BJ-380D接头的拉伸强度超过350MPa,延伸率为2.3%。结果显示BJ-4210接头的力学性能超过BJ-380D接头,说明TiB₂颗粒增强可以大幅提高焊接头拉伸强度的同时,提高一定的延伸率,但是由于添加了3%~4.5%的Si元素,在接头熔化再凝固的过程中会形成脆性相,导致BJ-4210接头的延伸率数值仍然偏低,接头塑性仍有待提高。

表3 2195铝锂合金焊接头拉伸性能

Tab. 3 Tensile properties of 2195 Al-Li welded joint

焊丝	σ_b /MPa	δ /%
4210	379	3.1
380D	352	2.3

2.4 显微组织分析

将焊接头截面切割成长方形样品,利用X衍射仪分析焊缝组织,使用jade衍射特征峰进行标定分析后,在Origin中绘制X射线衍射分析图谱,见图5,对比XRD图谱与标准衍射卡片库可以发现,接头的主要相组成为 α -Al(PDF#04-0787)及Al₂Cu(PDF#25-0012),由于其余相含量过低,因此未能体现在XRD图谱上。

对BJ-4210及BJ-380D焊接头的显微组织进行分析,图6为两种焊丝对2195铝锂合金进行单面焊接后的接头组织。焊接头由焊缝熔化区(FZ)、熔合线半熔化区(FL)、热影响区(HAZ)组成。2195/BJ-

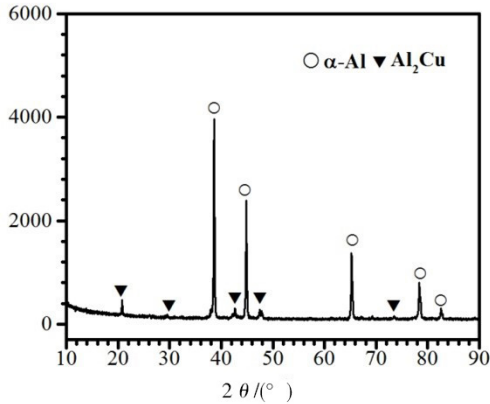


图5 BJ-4210接头X射线衍射图谱

Fig. 5 X-ray diffraction pattern of BJ-4210 welded joint

380D接头焊缝中心晶粒也较为均匀,尺寸为40~50 μm,熔合线内侧出现较粗大的柱状树枝晶。2195/BJ-4210接头晶粒细小均匀,尺寸一般为25 μm左右,与一般铝合金熔焊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,熔合线内侧无柱状晶组织。这是因为BJ-4210焊丝含有原位自生的TiB₂微米级颗粒,在焊接过程中,难熔固态质点TiB₂随焊丝进入熔池中,悬浮在熔池的液体空间或空隙中,凝固过程液态金属依附悬浮质点的表面析出固态晶粒,最终形成全焊缝区域等轴晶。

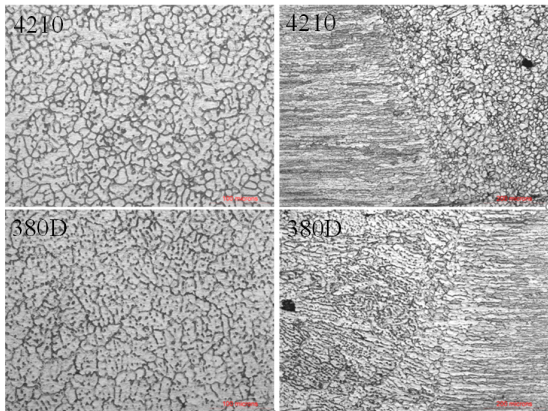


图6 BJ-4210和BJ-380D接头金相组织

Fig. 6 Metallographic structure of BJ-4210 and BJ-380D welded joint

使用扫描电镜(SEM)对BJ-4210和BJ-380D的微观组织进行进一步分析,通过背散射图像确定焊缝中的相分布,并利用能谱分析(EDS)对组织进行分析。图7为2195/BJ-4210及2195/BJ-380D接头微观组织,焊丝内添加Si后,焊缝内沿晶界分布白色低熔点共晶相,经过EDS分析可知(图8),共晶相主要包含Al、Cu以及少量的Si,晶粒内含Si量很少,绝大多数Si富集到晶界处,降低了最低结晶温度,有益于抑制液化裂纹,但是晶界处富集的Si会导致焊缝的脆

性,体现在其焊接头延伸率偏低,仅高于同样为Al-Cu-Si系的BJ-380D焊接头。2195/BJ-4210接头内还存在一定量的微米级TiB₂颗粒,细化了晶粒尺寸,在晶间低熔点共晶物较少的情况下,破坏液态薄膜的连续性,降低了焊缝的热裂倾向。

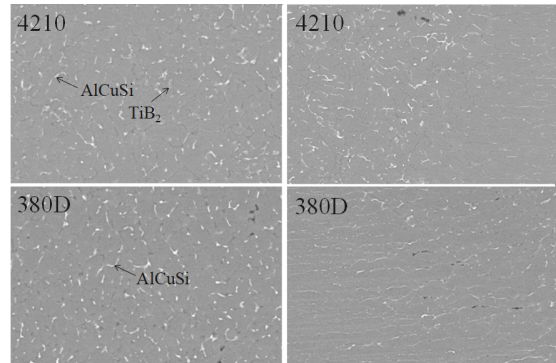


图7 BJ-4210和BJ-380D接头显微组织

Fig. 7 Microstructure of BJ-4210 and BJ-380D welded joint

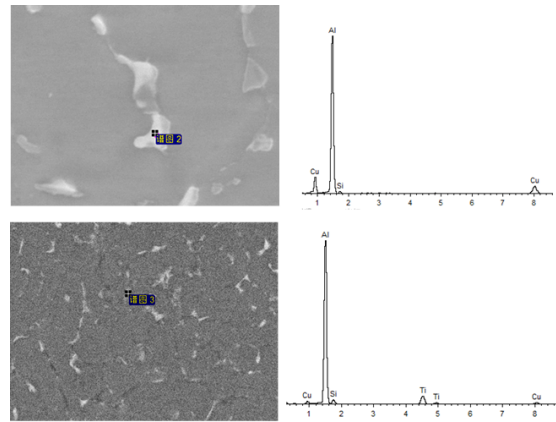


图8 BJ-4210和BJ-380D焊缝组织能谱分析

Fig. 8 EDS analysis of BJ-4210 and BJ-380D welded joint

BJ-380D及BJ-4210焊接头拉伸的断口位置处于熔合线内侧,说明接头熔合线内侧区域为接头最薄弱的位置,而TiB₂颗粒作为非自发形核质点,降低晶粒尺寸的同时,改变了焊缝在凝固过程中的结晶行为,避免在熔合线内侧形成粗大的柱状树枝晶,使全焊缝区域形成细小等轴晶,可以有效提高接头的强度及塑性,此外TiB₂颗粒自身作为合金中的硬质强化相可以阻碍焊接头受力时的位错移动,提高了接头的强度,因此BJ-4210接头具有更高的拉伸强度及延伸率。综上所述,TiB₂颗粒增强可以改善接头的微观组织,提高接头的强度及塑性。

对2195/BJ-4210及2195/BJ-380D焊接头断口形貌进行分析,结果见图9。2195/BJ-380D断口主要呈岩石状,为典型沿晶断裂特征,其延伸率指标低;2195/BJ-4210接头断口呈现混合断裂特征,具有一定塑性变形能力,其塑性强于380D接头,断口形貌与力学性能结果相符。

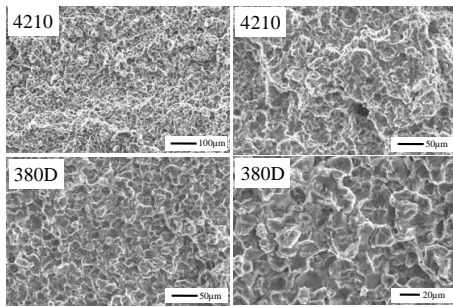


图9 BJ-4210和BJ-380D接头常温断口

Fig. 9 Tensile fracture morphology of BJ-4210 and BJ-380D welded joint at room temperature

2.5 结构件焊接

采用手工氩弧焊接方法及BJ-4210焊丝对结构模拟件进行焊接,考察焊丝在结构件上的适应性及焊接性,结构模拟件由2个半球对接构成,焊接部位包括1个直径为100 mm的嘴子和一个直径为1 000 mm的环焊缝,焊口厚度为3.0 mm,如图10所示。通过酸洗、装配、定位焊后,实施一次焊接,焊接后的结构模拟件焊缝成形良好,未出现氧化及开裂现象,说明BJ-4210焊丝可完成球形结构件嘴子及大环缝的焊接。

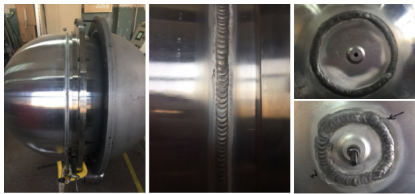


图10 结构模拟件焊接

Fig. 10 Welding of simulation structure

3 结论

- (1)新研制BJ-4210焊丝抗裂性优异, $K_1=0\%$, $K_2=0\%$ 。
- (2)BJ-4210焊丝的力学性能优异,拉伸强度最高为379 MPa,延伸率为3.1%。
- (3)焊丝中添加Si元素后,在焊缝晶界处会形成Al-Cu-Si低熔点共晶相,有利于降低焊接头的热裂纹敏感性,但是晶界处富集的Si会导致焊缝脆性,体现在其焊接接头延伸率偏低,且断口呈沿晶断裂特征。
- (4)BJ-4210焊丝内的原位自生TiB₂颗粒,在熔池中作为形核质点,可以降低晶粒尺寸,使焊缝形成均匀细小等轴晶,提高接头的抗裂性和力学性能。
- (5)BJ-4210焊丝可以完成嘴子及环焊缝的焊接,证明其在结构模拟件的适应性及可焊接性。

参考文献

[1] 吴国华,孙江伟,张亮,等. 铝锂合金材料研究应用现状与展望[J]. 有色金属科学与工程, 2019, 10(2):31-46.
WU G H, SUN J W, ZHANG L, et al. Current status and prospects of research and application of aluminum-lithium alloy[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2019, 10(2):31-46.
[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 J F, ZHENG Z Q, CHEN Y L, 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 W Y. 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 H P, YE L Y, DENG Y L, 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] RIOJA R J, LIU J. The evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012, 43(9): 3325-3337.

[8] DECREUSA B, DESCHAMPS 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] 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.

[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 G Q, YIN Q X, SI X Q, 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 D. Progress in welding technology of Al-Li alloy [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006(9): 90-93

[12] 黄燕,王少刚,赵雅萱,等. 新型铝锂合金焊接技术研究现状[J]. 有色金属加工, 2016, 45(5): 40-43.

HUANG Y, WANG S G, ZHAO Y X, et al. Microstructure and mechanical properties of Al-Li alloy electron beam welded joint [J]. Hot Working Technology, 2016, 45(5): 40-43.

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

[14] 焦好军,周炼刚,王明正,等. 航天用铝合金/焊丝焊接性研究[J]. 宇航材料工艺, 2013,43(3):66-70.

JIAO H J, ZHOU L G, WANG M Z, et al. Weldability of aluminum alloys/filler for aerospace [J]. Aerospace Materials & Technology, 2013,43(3):66-70.