

2219 铝合金厚板 TIG 焊接头组织与力学性能研究

陈志元 张晓鸿 林鹏 范翼飞 黄色贤

(四川航天长征装备制造有限公司, 成都 610100)

文 摘 采用氦弧打底+氩弧填充、盖面的焊接工艺对 2219-T87 铝合金 15 mm 厚板进行 TIG 焊接试验, 研究其焊缝成形和组织力学性能。结果表明, 此工艺焊缝成形美观, 无可见焊接缺陷, 气孔抑制效果好, 接头平均抗拉强度为 278.22 MPa, 平均断后延伸率为 3.89%, 接头平均强度系数达到 58.94%。接头硬度整体表现为焊缝中心最低, 从焊缝中心到母材呈现先增大后局部降低再增大的趋势; 且焊缝中心填充层硬度高于打底层和盖面层。熔合区的微观组织为柱状树枝晶和胞状树枝晶, 且垂直于熔合线生长, 在靠近熔合区两侧出现了等轴细晶带。焊接接头断面有较多撕裂棱和韧窝, 局部发现第二相粒子和微孔, 其断裂机制为典型的韧性断裂。

关键词 2219 铝合金, 厚板 TIG 焊, 微观组织, 力学性能

中图分类号: TG444.2

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2023.01.009

Research on Joint Microstructure and Mechanical Properties of TIG Welding of 2219 Aluminum Alloy Thick Plate

CHEN Zhiyuan ZHANG Xiaohong LIN Peng FAN Yifei HUANG Sexian

(Sichuan Aerospace Changzheng Equipment Manufacturing Co., Ltd., Chengdu 610100)

Abstract In this paper, the welding process of helium arc bottoming + argon arc filling and covering was used to conduct TIG welding experiment on 15 mm thick plate of 2219-T87 aluminum alloy to study its weld formation, microstructure and mechanical properties. The results show that this process has good weld appearance, no visible welding defects, and good porosity inhibition effect. The average tensile strength of the joint is 278.22 MPa, the average elongation after fracture is 3.89%, and the average strength coefficient of the joint reaches 58.94%. The overall performance of the joint hardness is the lowest in the center of the weld. From the center of the weld to the base material, the hardness first increases, then decreases locally, and then increases; and the hardness of the filler layer in the center of the weld is higher than that of the bottom layer and the cover layer. The microstructure of the fusion zone is columnar dendrite and cellular dendrite, and grows perpendicular to the fusion line. Equiaxed fine grain bands appear on both sides of the fusion zone. There are many tearing edges and dimples on the cross section of the welded joint, and micropores and second phase particles are found locally. The fracture mechanism of the welded joint is typical ductile fracture.

Key words 2219 aluminum alloy, Thick plate TIG welding, Microstructure, Mechanical properties

0 引言

2219 (Al-Cu-Mn 系) 铝合金因比强度高、韧性好, 且具有较低的焊接热裂纹倾向、良好的低温力学性能和抗应力腐蚀性能, 常作为运载火箭贮箱的主要承力结构件材料被广泛应用于航天领域^[1-4]。

目前 2219 铝合金焊接制造过程中, 主要的焊接工艺为钨极氩弧焊 (TIG)、搅拌摩擦焊 (FSW) 和电子

束焊 (EBW) 方法^[5]。但受工艺成熟性、焊接条件、生产成本和效率的影响, 贮箱箱体、法兰等结构部件多采用 TIG 焊接工艺方法^[6-7]。2219 铝合金在 TIG 焊过程中容易出现熔合区气孔、焊接变形等缺陷^[8]。近年来, 相关学者对 2219 铝合金的不同 TIG 焊接工艺进行了深入研究, 以期消除缺陷, 获得更好的焊接接头性能。熊欢等^[9]人对 8 mm 厚的 2219 铝合金进行了

收稿日期: 2021-09-27

基金项目: 四川省科技计划重点研发项目 (2020YFG0197); 四川航天技术研究院重大工艺研究项目 (F70520)

第一作者简介: 陈志元, 1995 年出生, 硕士, 主要从事贮箱产品先进焊接工艺研究工作。E-mail: zhiyuan_c19@163.com

变极性TIG焊接,焊接接头的熔合区出现气孔缺陷,接头强度约为母材的50%。韩国良等^[10]人对8 mm厚的2219铝合金分别进行了单面两层和两面三层TIG焊接试验研究,发现单面两层比两面三层的焊接接头抗拉强度和断后伸长率提高了1.7%和33.3%。

随着产品结构对强度要求增大,铝合金板厚也随之增大到12 mm以上,但已有的2219铝合金的熔化焊接研究多集中在板厚10 mm以下,针对10 mm以上的厚板2219铝合金TIG焊接工艺的研究还较少。因此,开展厚板2219铝合金的TIG焊接工艺及接头性能研究变得十分必要。

本文选取T87态的2219铝合金开展变极性TIG自动焊接试验,通过设计焊接接头结构和焊接工艺,研究焊接接头的微观组织、力学性能及断裂机理,拟为航天用2219厚板铝合金TIG焊接工艺提供必要的试验基础和理论支撑。

1 试验

1.1 材料

材料为15 mm厚度2219铝合金试板,其化学成分如表1所示。热处理状态为T87态,即固溶处理后经7%~10%冷变形,然后进行人工时效的状态。

表1 2219铝合金的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of 2219 aluminum alloy% (w)

Cu	Mn	Ti	Mg	Zr	V	Fe	Si	Al
5.8~6.8	0.2~0.4	0.02~0.1	0.02	0.1~0.25	0.05~0.15	0.3	0.2	余量

1.2 焊接方法

自动TIG焊接,采用高纯的氩气和氦气为保护气体,焊接试件预先开置U型坡口,如图1所示。焊接试验在Dynasty 700脉冲变极性钨极氩弧焊机上进行,焊丝牌号为直径 $\Phi 1.6$ mm的ER2325铝合金。

设计3组焊接试件,每组为两块300 mm×175 mm×15 mm的2219铝合金试板对接,焊接方法为单面三层TIG焊,先采用直流氩弧打底焊接,再进行交流氩弧填充,最后一层为交流氩弧盖面焊,主要焊接参数见表2所示。

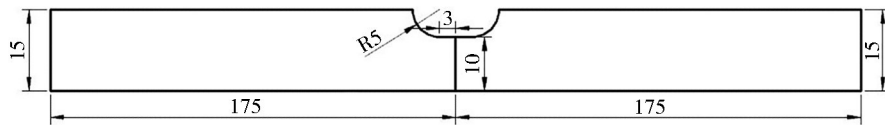


图1 2219铝合金焊接试样预置坡口示意图

Fig. 1 Diagram of preset groove of 2219 aluminum alloy welding sample

表2 15 mm厚板2219铝合金TIG焊接参数

Tab. 2 TIG welding parameters of 2219 aluminum alloy with 15 mm thick plate

焊接层数	焊接电流/A	送丝速度/mm·min ⁻¹	焊接速度/mm·min ⁻¹
第一层(打底焊)	290	20	180
第二层(填充焊)	400	1 200	115
第三层(盖面焊)	400	1 200	110

1.3 分析方法

焊接完成后,目视检查各试件焊缝成形情况,而后对试件进行X光射线探伤检测;确认合格后,根据GB/T 2651—2008,采用电火花线切割机截取2219铝合金焊接接头拉伸试样,其尺寸如图2所示。拉伸试验在CMT5105电子万能试验机上进行。拉伸试验设计3组焊接试板,每组焊接试板切割出3个拉伸试样,试验所得结果为9个试样平均值并计算误差。完成拉伸试验后,焊接接头断口在EVO/MA25扫描电子显微镜(SEM)上利用二次电子成像技术进行微观形貌观察,加速电压为20 kV。

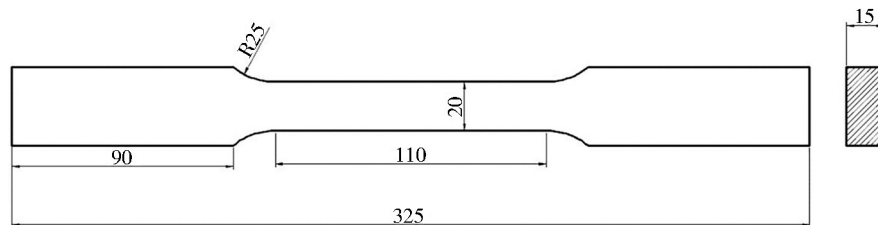


图2 拉伸试验尺寸

Fig. 2 Dimensions of the sample for tensile test

取样后对试件焊接接头进行光学显微镜观察和硬度测试;微观组织观察在DM2300M金相显微镜上进行。焊接接头硬度测试在KB30S-SA显微维氏硬度计上进行,试验压力为5 N,保压时间14 s,测试位置如图3所示,A、B、C三条直线上每间隔1 mm测试一个点,总共测试3个试样,硬度结果为各试样平均

硬度计上进行,试验压力为5 N,保压时间14 s,测试位置如图3所示,A、B、C三条直线上每间隔1 mm测试一个点,总共测试3个试样,硬度结果为各试样平均

值并计算误差。

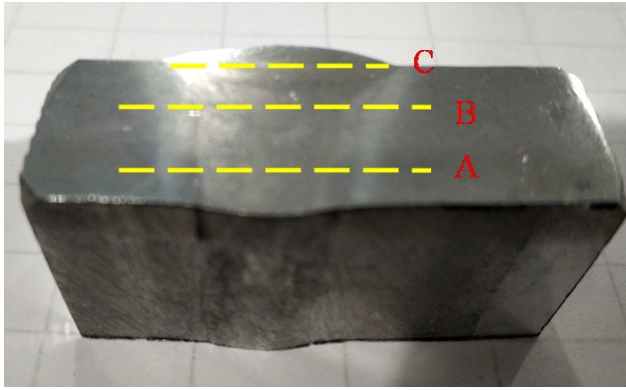


图3 硬度测试位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of hardness test location

2 结果与分析

2.1 接头探伤及微观组织

15 mm厚的2219铝合金TIG焊接接头经外观观察,焊缝成形美观,焊缝外表面鱼鳞纹均匀,焊漏饱满均匀,无目视可见缺陷,焊缝成形如图4所示。经X光射线探伤检查,焊缝质量符合航天行业I级焊缝标准。



图4 2219铝合金TIG焊缝外观形貌

Fig. 4 The appearance of TIG weld joint of 2219 aluminum alloy

图5为焊接接头的微观组织形貌。从图中可以看出,焊缝和整个熔合区出现少量的气孔缺陷,主要分布在熔合线两侧。有文献报道,由于氢在2219铝合金中的溶解度过低,造成TIG焊接接头的气孔为氢气孔^[11]。另外,由于接头熔池的固液界面上气孔形核能更大,熔合线处的液态金属存在时间短,以上因素不利于气泡的溢出,使得气孔多分布在熔合线周围。这些气孔的存在,一定程度上减少了焊缝的有效承载面积,同时在气孔处容易产生应力集中,从而降低接头的机械性能^[9]。此外,在靠近熔合区两侧出现了宽度约35 μm的等轴细晶带。这是因为焊缝中适当比例的Ti和Zr元素通过形成Al₃Zr和TiAl₃化合物的形式作为异质形核点,促进了非均匀形核,使晶粒发生细化^[12-13]。

如图5所示,从焊缝中心向外侧,焊接接头微观组织分为焊缝、熔合区和热影响区三个区域。焊缝区在冷却过程中以熔合线上局部半熔化的晶粒为核心向内生长,最终在焊缝中心生长为柱状晶粒,具有

典型铸造组织特征。熔合区的微观组织为胞状树枝晶和柱状树枝晶,且枝晶垂直于熔合线向焊缝中心生长。热影响区保留了母材的板条状组织形貌,但在一定程度上因为焊接热循环造成组织粗化。

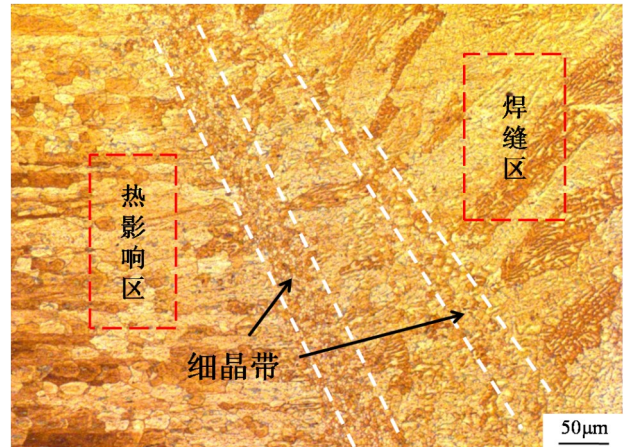


图5 2219铝合金焊接接头微观组织

Fig. 5 Microstructure of 2219 aluminum alloy welded joint

2.2 接头抗拉强度

图6给出了15 mm厚板2219铝合金TIG焊接接头的拉伸工程应力应变曲线。图中可以看出接头在拉伸初期弹性变形较快,随之增速变缓,表现弹塑性材料的特点。在拉伸过程中,存在明显的屈服现象,在强化阶段达到最大抗拉强度时直接断裂,断裂时未出现应力波动现象,这与2219铝合金的固有特性和焊接接头断裂形式有关。

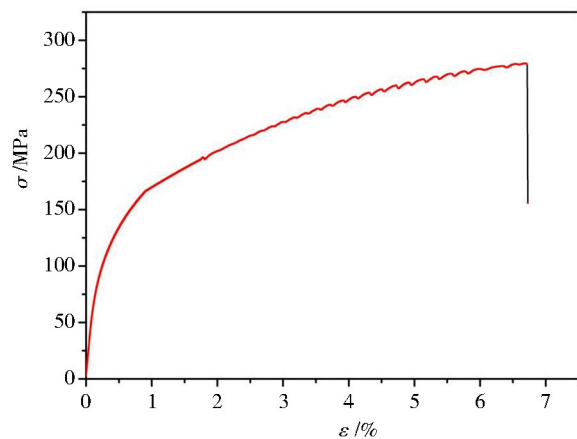


图6 2219铝合金焊接接头拉伸工程应力应变曲线

Fig. 6 Engineering tensile stress-strain curve of 2219 aluminum alloy welded joint

表3给出了15 mm厚板2219铝合金TIG焊接接头的力学性能结果。其焊接接头的平均抗拉强度 σ_b 达到了278.22 MPa,平均断后延伸率达到了3.89%。根据2219 T87铝合金母材的实测平均抗拉强度为472 MPa,则采用该焊接工艺方法下的2219厚板铝合金焊接接头平均强度系数可达到63.0%。通常,2219铝合金TIG焊接接头性能远低于母材的力学性能,焊接接头强度系数

为60%左右。田志杰等^[14]人对6 mm厚的2219-T87铝合金进行VPTIG焊接后接头的强度系数为0.6。与同类文献[9-10]对比发现,在2219铝合金板厚加大至15 mm的情况下,本文提供的单面三层TIG焊工艺可使焊接接头达到较好的力学性能。

表3 15 mm厚板2219铝合金焊接接头力学性能
Tab. 3 Mechanical properties of 2219 aluminum alloy welded joints with 15 mm thick plate

类别	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
母材	472±2.05	388±7.28	11.5±1.04
焊接	278.22±3.03	130.78±19.01	3.89±0.61

2.3 接头硬度

图7为15 mm厚2219铝合金焊接接头显微硬度分布曲线。由曲线可以看出焊接接头母材处的硬度值最高,为122 HV。打底、填充、盖面三层的硬度趋势基本相同,在焊缝中心处硬度值最低,到热影响区附近的硬度值出现局部增大,而后再下降,最后逐渐上升至母材硬度。在熔合区范围,不同焊接层的硬度分布呈现明显差异,该区域内填充层的硬度高于打底层和盖面层。这是填充层有焊丝填充,焊丝成分中的Ti,Zr等合金元素能够使焊缝金属产生异形形核点,增加了晶核数量,促进非均质形核,使晶粒更加细小的结果。

由于热影响区包含淬火粗晶区和过时效软化区,CuAl₂等强化相的形态和分布状态可能发生变化,使得该区域硬度呈现先上升后下降的现象。另外,焊接接头硬度最低值出现在盖面层焊缝中心,焊缝处受热影响软化,硬度值降低明显,维氏硬度HV为72。

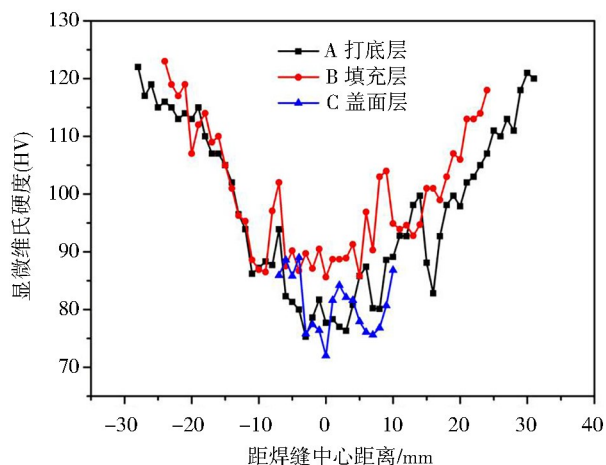


图7 2219铝合金焊接接头显微硬度

Fig. 7 Microhardness of 2219 aluminum alloy welded joint

2.4 接头断口形貌和断裂机制

在拉伸试验中,焊接接头拉伸断裂位置多出现在熔合线附近。熔合线附近作为焊接接头应力集中点,是造成熔合线处断裂的主要原因。同时从图5可

知,熔合线附近组织形貌变化急剧,熔合区晶粒粗大,熔合线周围存在的少量气孔缺陷加剧应力集中,形成裂纹源,最终形成在熔合线附近断裂这一现象。

15 mm厚2219铝合金焊接接头断口形貌如图8所示。图8(a)显示接头断口存在较多大小不同且交错分布的撕裂岭和韧窝。如图8(b)所示,韧窝呈现深、密集的特征。韧窝内部可以观察到夹杂物或第二相粒子。图8(c)可以看出,焊后在基体和断面的晶界处萌生许多微孔,微孔也可通过第二相粒子自身开裂形成,这些微孔在拉伸过程中生长和聚合,随着载荷的持续增大进而形成连续的断面。断面又会形成大量大小不同的韧窝,韧窝的大小和第二相粒子的大小呈正相关。在拉伸过程中,这些硬脆的第二相粒子率先开裂并扩展。单面三层TIG焊工艺下的2219铝合金焊接接头断裂具有典型的韧性断裂特征。

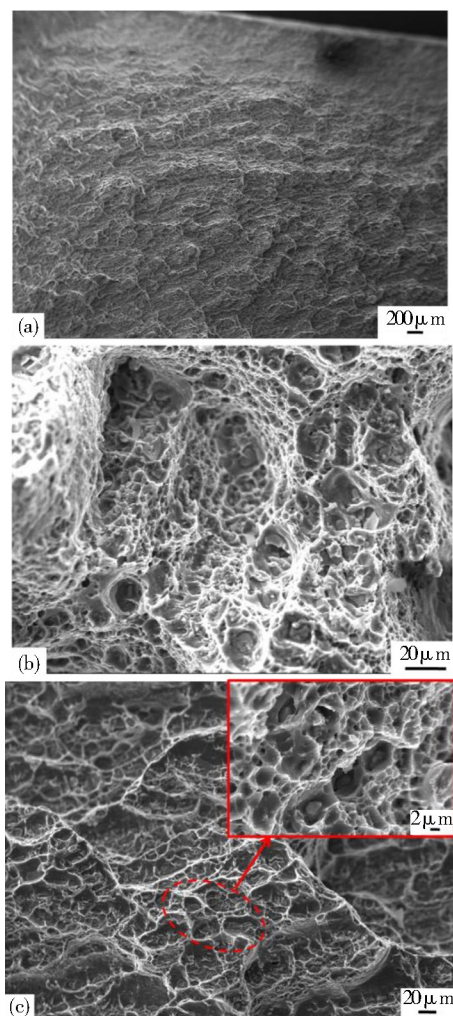


图8 2219铝合金焊接接头断口形貌

Fig. 8 Fracture morphology of 2219 aluminum alloy welded joint

3 结论

(1) 15 mm厚的2219-T87铝合金在单面三层自动TIG焊工艺下获得了成形美观、无可见焊接缺陷的焊接接头,焊缝质量符合航天行业I级焊缝标准;

(2)该工艺下的焊接接头试样平均抗拉强度达到278.22 MPa,平均断后延伸率为3.89%,焊接接头平均强度系数达63.0%;

(3)焊接接头熔合区的微观组织为柱状树枝晶和胞状树枝晶,且垂直于熔合线,在靠近熔合区两侧出现了宽度约35 μm的等轴细晶带;

(4)接头焊缝中心到母材硬度呈现先增大再局部减小再增大的趋势,填充层的硬度相较打底层和盖面层更高;

(5)2219-T87铝合金自动TIG焊接接头断裂机制为典型的韧性断裂。

参考文献

[1] 尹玉环,张聃,余果,等. 2219铝合金无气孔直流A-TIG焊接技术[J]. 焊接学报,2017,12(38):61-64.

YIN Y H, ZHANG D, YU G, et al. Porosity free direct current A-TIG welding of 2219 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 12(38): 61-64.

[2] 栗慧,邹家生,姚君山,等. 2219 高强铝合金活性TIG焊工艺[J]. 材料工程,2018,46(4):66-73.

LI H, ZOU J S, YAO J S, et al. Activating flux TIG welding technology of 2219 high strength aluminum alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(4): 66-73.

[3] 徐心宇,王祝堂. 长征五号火箭燃料箱铝合金打造[J]. 轻合金加工技术,2017,45(6):11-13,54.

XU X T, WANG Z T. Al-alloy-made fuel tank of the Long March 5 rocket[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2017, 45(6): 11-13, 54.

[4] 鄢东洋,郭彦明,董曼红,等. 贮箱结构用2A14和2219铝合金的特性研究与分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2019, 5(3): 102-107.

YAN D X, GUO Y M, DONG M H, et al. Analysis and discuss on the characteristics of 2A14 and 2219 aluminum alloy used in the rocket tank[J]. Missiles and Space Vehicles, 2019, 5(3): 102-107.

[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.

WANG C Y, QU W Q, YAO J S, et al. Microstructures and mechanical properties of friction stir welded 2219-T87 aluminum alloy joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(10): 77-80.

[6] 张勤练,李钊,杨春利,等. 铝合金TIG电弧横焊接头缺陷及控制[J]. 焊接学报,2017,38(2):28-32.

ZHANG Q L, LI Z, YANG C L, et al. Welding defects and its control in TIG arc welding of aluminum alloy in horizontal position[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(2): 28-32.

[7] 鄢东洋,吴会强,常志龙,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.

YAN D X, WU H Q, CHANG Z L, et al. Analysis on the properties of 2219 aluminum alloy joints with single-layer welding and single-sided double-layer welding process [J]. Aerospace Materials & Technology, 2013, 43(6): 79-83.

[8] 周万盛,姚君山. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京:机械工业出版社,2006:150-172.

ZHOU W S, YAO J S. Welding of aluminum and aluminum alloy[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006: 152-172.

[9] 熊欢,庄来杰,曲文卿,等. 2219-T87铝合金变极性TIG接头微观组织与力学性能[J]. 航空制造技术,2014,454(10):75-78.

XIONG H, ZHUANG L J, QU W Q, et al. Microstructures and mechanical properties of 2219-T87 aluminum alloy TIG welded joints [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 454(10): 75-78.

[10] 韩国良,王惠苗,刘含伟,等. 不同焊接工艺下2219铝合金TIG焊接头性能分析[J]. 焊接,2019(5):48-51.

HAN G L, WANG H M, LIU H W, et al. Performance analysis of 2219 aluminum alloy TIG welded joints under different welding processes [J]. Welding & Joining, 2019 (5) : 48-51.

[11] 李来平,刘学军,曲文卿. 2219铝合金VPTIG焊接接头拉伸性能分析[J]. 宇航材料工艺,2013,43(6):84-87.

LI L P, LIU X J, QU W Q, et al. Research on tensile properties of 2219 aluminum alloy VPTIG welding joint [J]. Aerospace Materials & Technology, 2013, 43(6): 84-87.

[12] 从保强,齐铂金,周兴国,等. 2219高强铝合金超快变换VPTIG焊缝组织和性能[J]. 焊接学报,2010,31(4):85-88.

CONG B Q, QI B J, ZHOU X G, et al. Microstructure and mechanical properties of ultrafast-convert VPTIG arc welding of 2219 high strength aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(4): 85-88.

[13] 张玉岐,杨春利,林三宝,等. 2195铝锂合金超声TIG焊的组织与性能分析[J]. 焊接学报,2015,36(10):53-56.

ZHANG Y Q, YANG C L, LIN S B, et al. Microstructure and mechanical properties of ultrasonic assisted TIG welding of 2195 Al-Li alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(10): 53-56.

[14] 田志杰,熊林玉,李迎,等. 2219铝合金VPTIG焊接接头的断裂韧性[J]. 机械工程材料,2017,41(12):54-58.

TIAN Z J, XIONG L Y, LI Y, et al. Fracture toughness of VPTIG welded joint of 2219 Al alloy [J]. Materials For Mechanical Engineering, 2017, 41(12): 54-58.