

# 摆动焊接对异种热处理状态 2219 铝合金焊接接头性能的影响

蒙丹阳<sup>1</sup> 王惠苗<sup>1</sup> 丁吉坤<sup>1</sup> 张登魁<sup>2,3</sup> 刘飞<sup>1</sup>

(1 天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462)

(2 清华大学机械工程学院, 北京 100084)

(3 天津职业技术师范大学机械工程学院, 天津 300222)

**文 摘** 针对 2219 异种热处理状态 C10S+CYS 铝合金进行钨极氩弧焊接试验, 对比研究了常规焊接与摆动焊接接头的力学性能、微观组织、硬度分布等。分析结果表明, 相较常规接头, 采用摆动焊接工艺的接头其力学性能有所提高, 同时接头中下部 PMZ、OAZ 的硬度有所下降, 宽度范围有所增加。应变分布结果表明, 断裂前常规接头最大应变沿对角线分布, 而摆动接头呈近似 W 型分布; 对微观组织及断口观察可知, 摆动接头 CYS 侧的 PMZ、OAZ 中连续第二相的数量及尺寸有所降低, 接头呈韧性为主的混合型断裂特征。

**关键词** 2219 铝合金, 异种热处理状态, 钨极氩弧焊, 力学性能

中图分类号: TG 407

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.02.010

## Effect of Weaving Welding on Properties of Dissimilar Heat Treated 2219 Aluminum Alloy Welded Joint

MENG Danyang<sup>1</sup> WANG Huimiao<sup>1</sup> DING Jikun<sup>1</sup> ZHANG Dengkui<sup>2,3</sup> LIU Fei<sup>1</sup>

(1 Tianjin Long March Launch Vehicle Manufacturing Co. Ltd, Tianjin 300462)

(2 Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

(3 School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222)

**Abstract** The effect of weaving welding on the joint of a 2219 aluminum alloy with dissimilar heat treatment, C10S+CYS, was investigated. Comparison was made with the conventional tungsten inert gas arc welding, focusing on the mechanical properties, microstructures and hardness distribution of the joints. Analysis exhibits that the weaving-welding improves the mechanical properties of the joint compared with the conventional welding. Meanwhile, the hardness of the joint in the middle and lower region of the partially-melted zone (PMZ) and over-aged zone (OAZ) decreases and the width range increases. The strain distribution before the onset of the fracture at the joint shows a W-shape pattern when the joint is weaving welded. In contrast, the peak strain is along the diagonal direction for a conventionally welded joint. Microscopic observation of the fracture reveals that weaving welding led to a reduction in the amount and size of the second continuous phase in the partially-melted zone (PMZ) and over-aged zone (OAZ), in the CYS side of the joint, and that fracture is caused by a ductile-rupture-dominated mixed fracture mode

**Key words** 2219 aluminum alloy, Dissimilar heat treatment, Tungsten inert gas arc welding, Mechanical properties

### 0 引言

2219 可热处理强化铝合金由于其良好的可焊性及优良的焊后性能, 被广泛用于航天火箭产品贮箱的生产制造中。2219 铝合金被广泛用于美国的土星 V 号、前苏联的能源号、日本的 H-2 系列、欧洲航空局

的 Ariane V 等运载火箭贮箱和美国航天飞机的外贮箱上。我国也将 2219 铝合金选为新一代运载火箭贮箱的主体材料<sup>[1]</sup>, 贮箱作为典型薄壁压力容器, 是由箱底、叉形环和中间筒段的焊接组装而成<sup>[2]</sup>, 作为贮箱重要部件的叉形环通常采用 2219-CYS 态铝合金(

收稿日期: 2020-08-02

第一作者简介: 蒙丹阳, 1987 年出生, 工程师, 主要从事运载火箭贮箱制造及焊接技术研究。E-mail: mengdanyang3@163.com

固溶处理+冷锻+人工时效),而中间筒段则采用2219-C10S态铝合金(固溶处理+10%冷变形+人工时效),叉形环与筒段焊缝的焊接质量非常重要。

国内外针对2219铝合金材料的研究有许多,包括钨极氩弧焊(TIG)、搅拌摩擦焊、变极性等离子焊、电子束焊、电阻点焊、激光焊接等在内的诸多焊接方法均有涉及<sup>[3-6]</sup>,其中TIG焊接方法应用较为广泛,也是目前国内新一代运载火箭贮箱生产的主力焊接方法。摆动焊接可以获得更宽的焊缝,提高焊接效率,在焊接中研究应用同样广泛,如胡军峰等人研究了电弧摆动对20 mm厚钢材焊接应力场的影响,指出由于电弧摆动引起更大的横向温度梯度导致摆动焊接横向残余应力比无摆动焊接的横向残余应力大<sup>[7]</sup>。罗雨等人研究了窄坡口MAG焊摆动参数对X65管线钢焊缝成形的影响<sup>[8]</sup>。铝合金方面,为解决相应铝合金激光焊接气孔问题,祁小勇等人<sup>[9]</sup>和余世文等人<sup>[10]</sup>分别针对6 mm 5083铝合金摆动激光电弧复合焊和6 mm 5183铝合金激光摆动焊进行了工艺研究,结果显示采用特定摆动工艺可使气孔显著减少。KOU等人研究了低频横向电弧摆动对1.5 mm 2014铝合金接头显微组织的影响,分析指出低频横向摆动可减小枝晶间距<sup>[11]</sup>。国内外的研究主要集中在厚板钢材和同种热处理状态的中薄板铝合金,针对异种热处理状态2219铝合金厚板的摆动TIG焊接研究较少。

本文以C10S+CYS异种热处理状态2219铝合金厚板摆动TIG焊接接头为研究对象,研究摆动TIG对接头组织和性能的影响,对贮箱焊接质量的提升有

重要意义。

## 1 试验

### 1.1 材料

试验材料选取2219 Al-Cu系高强度铝合金试片,母材成份见表1,试片尺寸为300 mm×150 mm×10 mm,铝合金试片热处理状态分别为C10S状态和CYS状态,采用牌号2325的 $\Phi$ 1.6 mm光亮焊丝进行焊缝填充,保护气采用99.999%的高纯氦气和氩气。

表1 2219铝合金主要化学成分

Cu	Mn	Fe	Si	Zr	Zn	Mg	Ti	Al
5.8~6.8	0.2~0.4	0.3	0.2	0.1~0.25	0.10	0.02	0.02~0.1	余量

### 1.2 试验方案

试验采用AMET VPC450焊接电源进行焊接,采用无坡口对接接头形式进行TIG焊。分别采用两种自动焊接工艺,一类采用常规焊接工艺,即直流氦弧打底焊+交流氩弧盖面焊;另一类采用摆动焊接工艺,即在常规焊接工艺的基础上增加一层摆动盖面焊,并在摆动盖面前将焊枪中心略偏向CYS侧,实际使摆动中心与原焊缝中心偏移3 mm。焊接过程中焊枪垂直焊缝水平往复运动,配合工件按一定焊接速度移动完成焊接,摆动幅值8 mm,摆动周期0.2 s。另外常规焊接工艺为保证正面余高,盖面送丝速度一般采用1 000 mm/min,He保护气流量采用1~1.5 L/min,摆动焊接工艺中盖面层焊接时送丝速度一般采用700~800 mm/min,He保护气流量采用2.5~3 L/min,其余参数相同见表2。

表2 焊接参数表

Tab. 2 Welding parameters

焊接工艺	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/m·h <sup>-1</sup>	送丝速度/mm·min <sup>-1</sup>	保护气流量/L·min <sup>-1</sup>
打底	285~295	17.5	14	-	12He
盖面	320~330	19~19.5	7	700~1000	1~3He+11Ar
摆动盖面	300~315	18~19	6	700~800	1He+11Ar

焊前采用汽油酒精清理工件表面,然后采用刮削打磨的机械方法去除焊接区氧化膜,直至露出金属光泽。焊接完成后进行X光无损检测,确认焊缝内部无超标缺陷后沿垂直焊缝方向切取拉伸试样进行常温力学性能拉伸测试,加工试样尺寸见图1。

试验方法按GB/T228.1—2010《金属材料室温拉伸试验方法》执行,获得接头常温拉伸试验性能数据,并利用数字图像相关(DIC)技术监测拉伸过程中的应力分布;同时使用“1.0%HF+1.5%HCL+宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2021年 第2期

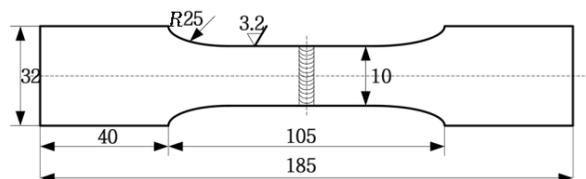


图1 接头加工试样尺寸

Fig. 1 Dimension of tensile specimen

2.5%HNO<sub>3</sub>+95%H<sub>2</sub>O”的混合试剂腐蚀金相试样,利用光学显微镜和扫描电镜分别观察接头焊缝宏观形貌、显微组织及断口形貌。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 焊缝成型及力学性能

根据所经历的热循环不同,可将时效强化2219铝合金熔化焊接头分为焊缝区WZ、部分熔化区PMZ、过时效区OAZ、热影响区HAZ及母材等区域<sup>[12]</sup>。2219铝合金异种热处理状态的常规焊接与摆动焊接接头焊缝成型如图2所示,焊缝接头呈T字型,摆动焊接接头焊缝宽度宽于常规接头,焊缝宽度可达20~22 mm,较常规焊缝接头的16~18 mm宽度增大了约25%;并且由于摆动盖面时焊枪偏向CYS侧,盖面焊缝略偏向CYS侧,一般而言焊缝宽度增大有利于接头拉伸性能提升。

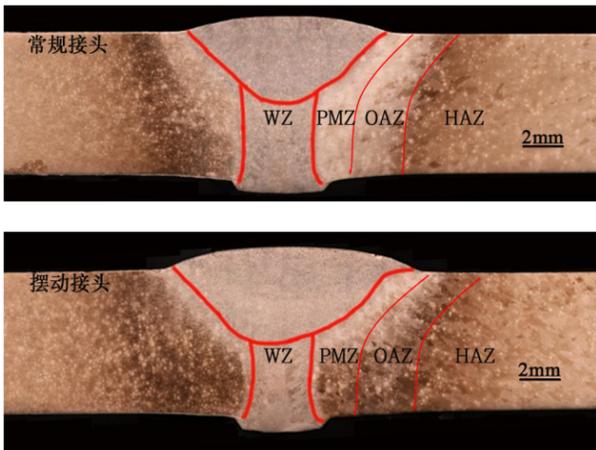


图2 接头焊缝成型

Fig. 2 Welding seam forming of two kinds joints

表3为摆动接头与常规接头抗拉强度、断后伸长率的对比。可以看到,摆动焊接接头平均抗拉强度为288.9 MPa,较常规接头抗拉强度的276.6 MPa提

高约4.4%,摆动接头断后伸长率为6.1%,较常规接头的4.5%提高约35.6%。可见对于2219异种热处理状态铝合金接头,摆动焊接接头力学性能优于常规焊接接头力学性能,断后伸长率提高幅度要明显高于抗拉强度提高幅度,接头力学性能满足结构设计要求。

表3 两种焊接工艺接头力学性能  
Tab. 3 Tensile test results of two kinds joints

试样	抗拉强度 $R_m$ /MPa		断后伸长率 $A$ /%	
	摆动接头	常规接头	摆动接头	常规接头
1	276.5	270.5	7.0	5.3
2	301.7	276.2	7.7	5.2
3	290.5	275.0	5.1	4.5
4	288.0	285.5	6.7	4.2
5	293.0	282.0	5.5	3.5
6	283.5	270.5	4.5	4.0
均值	288.9	276.6	6.1	4.5

### 2.2 硬度分布

图3为两类接头横截面显微硬度分布。显微硬度测试时均测试了接头横截面上、中、下三个位置的硬度分布,上、下两个位置分别距上、下表面各1 mm,中间位置为距上表面5 mm。由图可知,焊缝硬度均明显低于母材硬度,常规、摆动接头的横向硬度分布由小到大均依次为焊缝区WZ、过时效区OAZ、部分熔化区PMZ、热影响区HAZ。接头各个区域中,CYS侧不同区域的宽度总体略大于C10S侧的,且对上、中、下三层硬度值而言,PMZ和OAZ上层的均高于下层区域的硬度。

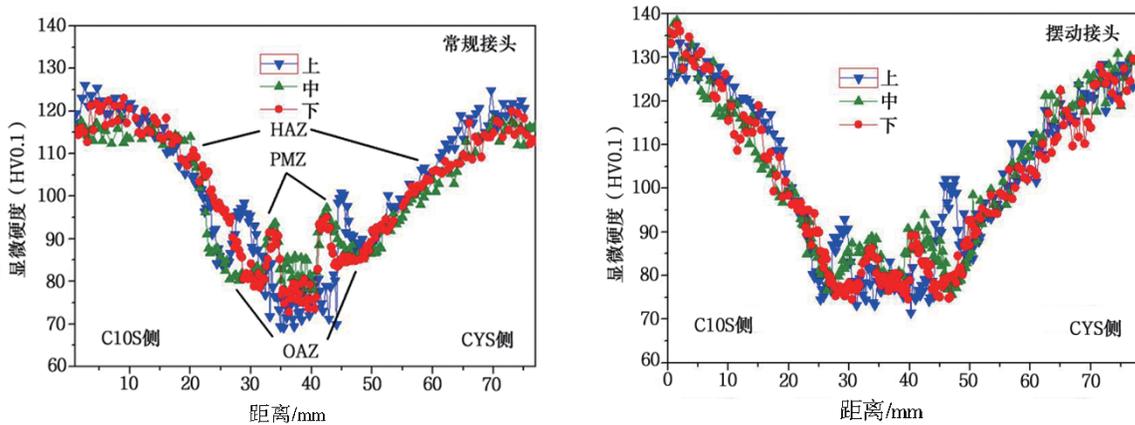


图3 接头横截面显微硬度分布

Fig. 3 Microhardness distribution on transverse cross-section of two kinds joints

对比常规接头与摆动接头硬度分布,摆动接头的中下部PMZ、OAZ的硬度有所下降,宽度范围也有

所增加,且底层宽度范围增加较为明显。这是由于摆动焊的增加使得接头中下层OAZ经历1次过时效

温度,过时效导致该区大量细小 $\theta'$ 相转成 $\theta$ 相,且使其粗化,热影响使剩余 $\theta'$ 相发生明显粗化,该区域合金随即软化,最终导致硬度下降、宽度增加。

### 2.3 应变分布

接头的拉伸过程中的侧面应变分布见图4。可知,在拉伸过程中,常规接头较低应力时应变分布较均匀;随着应力增大,接头最大应变先从焊缝中心和C10S侧正面焊趾处萌生,C10S侧的焊趾处最先出现了最大应变值,但裂纹最终启裂于CYS侧的焊趾处。而摆动接头较大的应变最先萌生于背面焊趾处,较

低应力时较集中的变形出现在CYS侧。当应力继续上升时,较集中的变形逐渐聚集在C10S侧的过时效区,变形较为充分,但接头最终启裂于变形相对较弱的CYS侧的焊趾处,与常规接头启裂位置一致,均说明CYS侧焊趾处力学性能弱于C10S侧的。此外,常规接头拉伸启裂前的最大应变沿着对角线分布,而摆动接头启裂前的最大应变分布呈近似W型;同时可以看到,断裂前的摆动接头的侧面应变值要大于常规接头,说明摆动接头的力学性能要优于常规接头,与前面得到的力学性能结果规律一致。

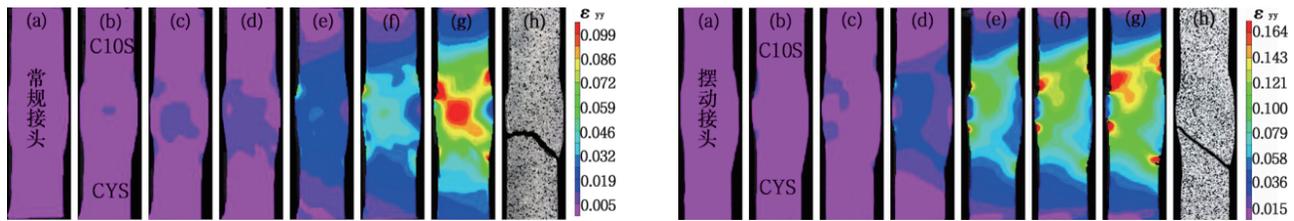


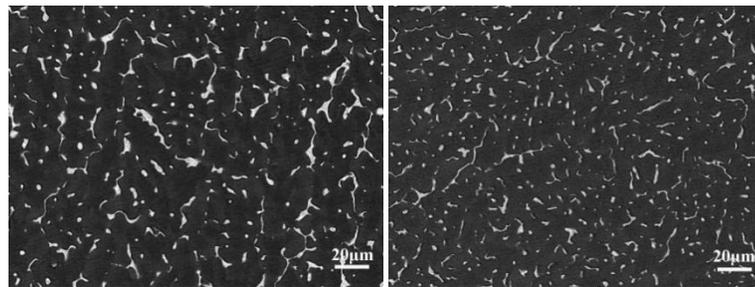
图4 接头在拉伸过程中的侧面应变分布

Fig. 4 Contours of the strain in the transverse section during the tensile test for the two joints

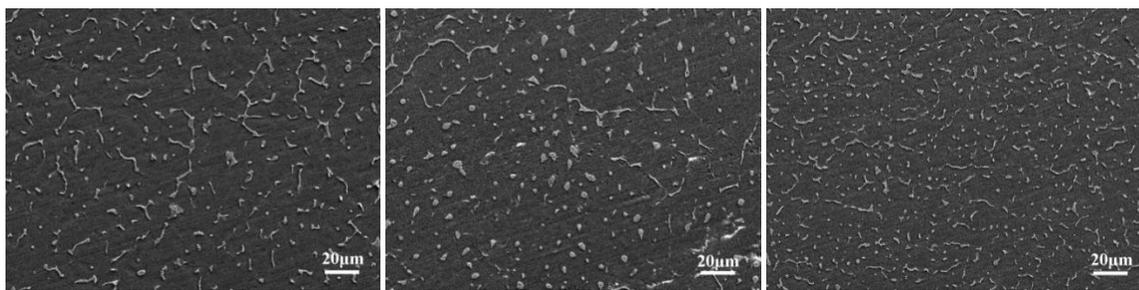
### 2.4 微观组织

图5是接头横截面焊缝区域的扫描电子像,图中常规接头依次为盖面WZ、打底WZ,摆动接头依次为盖面WZ、紧邻盖面焊缝位置的打底WZ、打底WZ。由图可

知,打底焊缝中的共晶相 $\theta$ 较为细小、致密,盖面焊缝中的共晶相 $\theta$ 较为粗大、稀疏。这是由于盖面焊热输入相对较大,温度梯度较大,冷却速度快,第二相来不及析出即发生凝固,导致盖面焊缝中共晶相较为稀疏。



(a) 常规焊接接头



(b) 摆动焊接接头

图5 接头横截面焊缝区域扫描电子像

Fig. 5 Microscopic observation of the welding zone (WZ) in the joint cross sections

相对于常规焊接接头,摆动焊接接头盖面焊缝中共晶相 $\theta$ 的数量较稀疏,远离盖面的打底焊缝中共晶相 $\theta$ 较致密,而紧邻盖面的打底焊缝中共晶相 $\theta$ 则较稀疏。这是由于盖面焊对打底焊具有固溶作用,使得

该位置原部分析出的第二相重新固溶于基体中,造成共晶相减少;而增加摆动焊对远离盖面的打底焊缝具有时效作用,该位置由于距盖面焊热源距离增加,温度相对较低,使得许多固溶于基体中的第二相在摆动焊热输

入的作用下又重新析出,造成共晶相的增加。

图6依次为两类接头CYS侧PMZ、OAZ、HAZ的扫描电子像。对比来看组织差异不大,但摆动接头的PMZ、OAZ中第二相数量略有降低,且第二相的尺寸相对细小,HAZ中的差异不大。由于接头一般沿

CYS侧PMZ区域断裂,故该区域性能对接头力学性能有重要影响,常规接头PMZ区域第二相的尺寸相对较大且部分连续,对接头力学性能不利;而摆动焊接头PMZ区域连续第二相的数量及尺寸均有所降低,对接头力学性能的提高有益。

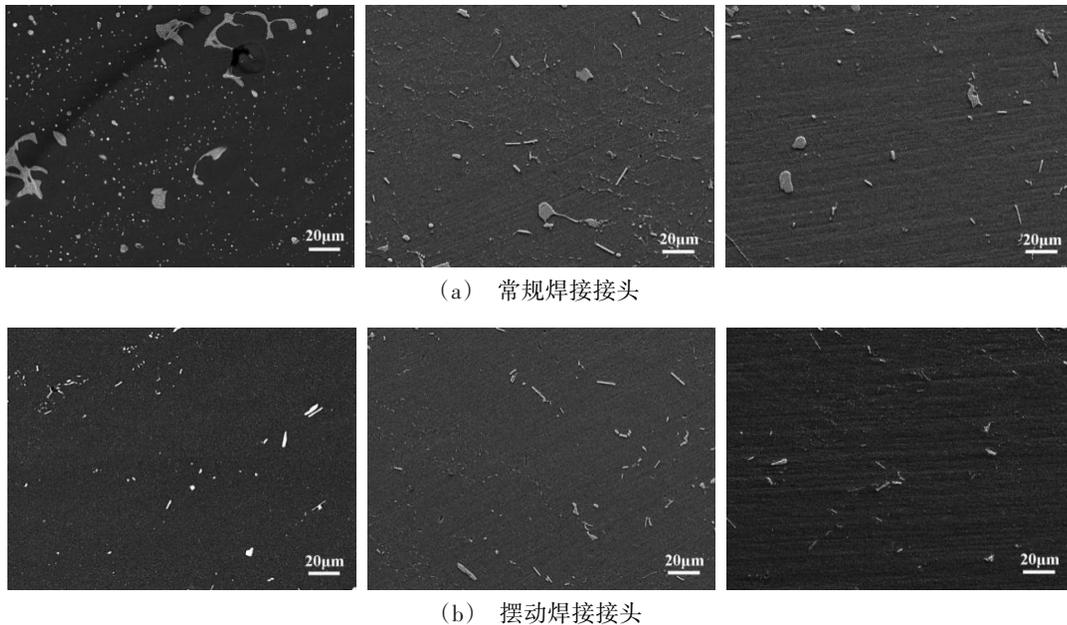


图6 接头横截面CYS侧PMZ、OAZ、HAZ扫描电子像

Fig. 6 Microscopic observation of PMZ, OAZ and HAZ in the CYS side of joint cross section

一般而言,接头的断裂一方面与断裂位置的组织性能有关,一方面与应力状态有关。由于焊接接头熔合线区域两侧组织性能差异较大,同时常规接头包含熔合线在内的PMZ区域内共晶相等第二相组织粗大且连续,裂纹易萌生于粗大连续的脆性共晶相上,造成接头熔合线区域性能薄弱;同时接头断裂侧的应力集中区域基本与熔合线区域重合,故接头易沿熔合线附近断裂。而摆动接头PMZ区域内共晶相等第二相组织尺寸减小、连续性降低,故裂纹启裂于焊趾位置后,由于无连续的晶界共晶相扩展路径,裂纹不易沿晶界扩展,此时倾向沿PMZ应力集中的路径断裂,摆动接头断裂侧的应力集中区域呈一定

宽度的斜直线状,故摆动接头最终断裂呈沿应力集中的斜线状。另外由于摆动焊接头中下部的PMZ宽度增加,硬度下降,该区域塑性变形能力增强,塑性变形能力的增加也易使接头以塑性材料剪切断裂的方式发生断裂,导致图4中两接头断裂路径的差别。

## 2.5 断口形貌

图7为接头启裂区断口形貌。常规接头启裂区的断口有较多脆性断裂条纹,韧窝较少,具有沿晶断裂特征。摆动焊接头启裂区断口呈韧性为主的混合型断裂特征,可观察到许多大小不一的撕裂棱和韧窝,撕裂棱较多,韧窝较深,微区同时可观察到沿晶断裂条纹和第二相等颗粒,析出的脆性第二相等粒

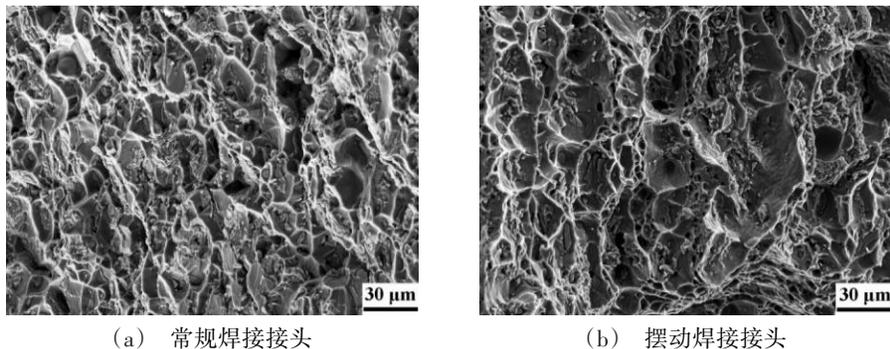


图7 接头启裂区断口形貌

Fig. 7 Morphology of fracture in the crack zone

子通常会成为局部微裂纹的起源,随着拉伸过程的进行易导致接头局部出现裂纹。

相较常规接头断口,摆动焊接头的启裂区断口中韧窝的数量较多,且韧窝的深度较深,说明断裂前接头启裂区经历了大量的变形,反应出摆动焊接头的塑性要优于常规接头,这与前面力学性能的结果一致。

### 3 结论

(1)针对10 mm厚2219铝合金C10S+CYS异种热处理状态接头,摆动焊接工艺接头其平均抗拉强度较常规焊接工艺接头提高约4.4%,断后伸长率较常规接头提高约35.6%。

(2)两种焊接工艺接头的横向硬度分布由小到大都依次为WZ、OAZ、PMZ、HAZ;摆动接头的中下部PMZ、OAZ的硬度有所下降,宽度范围也有所增加,且底层宽度范围增加较为明显。

(3)两类接头最终启裂于CYS侧的焊趾处,说明CYS侧焊趾处力学性能弱于C10S侧,常规接头拉伸启裂前的最大应变沿着对角线分布,而摆动接头启裂前的最大应变呈近似W型分布。

(4)两类接头打底焊缝中的共晶相 $\theta$ 较细小、致密,盖面焊缝中的共晶相 $\theta$ 较为粗大、稀疏,摆动接头CYS侧的PMZ、OAZ中连续第二相的数量及尺寸有所降低。

(5)常规接头启裂区的断口具有沿晶断裂特征,摆动焊接头启裂区断口呈韧性为主的混合型断裂特征,存在许多大小不一的撕裂棱和韧窝。

### 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):3-9.

LIU C. Electron beam welding of Al-alloy 2219 family for launch vehicle tanks[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2002(4):3-9.

[2] 熊焕. 低温贮箱及铝锂合金的应用[J]. 导弹与航天运载技术,2001(6):33-40,46.

XIONG H. Cryogenic tank and application of aluminum-lithium alloy[J]. Missiles and Space Vehicles, 2001(6):33-40,46.

[3] 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, WU H, CHANG Z, 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.

[4] 田志杰,李蕊,杨君,等. 2219铝合金VPPA焊缝断裂

韧性研究[J]. 航天制造技术,2016(4):21-24.

TIAN Z, LI R, YANG J, et al. Fracture toughness research of 2219 aluminum alloy VPPA weld [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2016(4):21-24.

[5] 郝云飞,王国庆,周庆,等. 运载火箭铝合金贮箱全搅拌摩擦焊焊接工艺及应用[J]. 宇航材料工艺,2016,46(6):11-20.

HAO Y, WANG G, ZHOU Q, et al. Application of all friction stir welding technology on the launch vehicle tank [J]. Aerospace Materials & Technology, 2016,46(6):11-20.

[6] 胡正根,黄诚,常志龙,等. 2219T852过渡环与T87箱筒段电子束焊接接头性能[J]. 宇航材料工艺,2017,47(1):72-76.

HU Z, HUANG C, CHANG Z, et al. Mechanical properties of electron beam welded joints on 2219 T852 transition ring and T87 shell section[J]. Aerospace Materials & Technology, 2017, 47(1):72-76.

[7] 胡军峰,方洪渊,杨建国,等. 电弧摆动对焊接应力场的影响[J]. 焊接学报,2007,28(1):65-68.

HU J, FANG H, YANG J, et al. Influence of arc weaving on welding residual stress field [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2007,28(1):65-68.

[8] 罗雨,张中亮,周灿丰,等. 窄坡口MAG焊摆动参数对焊缝成形的影响[J]. 河北科技大学学报,2017,38(1):7-12.

LUO Y, ZHANG Z, ZHOU C, et al. Effect of narrow groove MAG welding oscillation parameters on weld formation [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2017,38(1):7-12.

[9] 祁小勇,周京,刘硕夫,等. 5083铝合金摆动激光电弧复合焊工艺研究[J]. 航空制造技术,2019,62(6):71-78.

QI X, ZHOU J, LIU S, et al. Research on wobbling laser-arc hybrid welding of 5083 aluminum alloy [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019,62(6):71-78.

[10] 余世文,周昆,张威,等. 6.0mm厚5183铝合金激光摆动焊接工艺研究[J]. 激光技术,2018,42(2):254-258.

YU S, ZHOU K, ZHANG W, et al. Laser-weaving welding of 5183 aluminum alloy plate with 6.0mm thickness [J]. Laser Technology, 2018,42(2):254-258.

[11] KOU S, LE Y. Improving weld quality by low frequency arc oscillation [J]. Welding Journal, 1985, 64(3):51-55.

[12] 李权. 2219铝合金熔化焊接头力学性能薄弱区研究[D]. 北京:清华大学. 2015.

LI Q. Investigation on the weakness region of the fusion welded joints of 2219 aluminum alloy [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.