

基于 DIC 技术的 6005A – T6 铝合金焊接接头 非均匀循环变形实验研究

黄 琰, 丁 立, 罗会亮, 阚前华

(西南交通大学力学与工程学院, 成都 610031)

摘 要:采用三维数字图像相关(DIC)技术揭示了 6005A 铝合金激光 – MIG 混合焊对接头的焊缝、热影响区和母材的循环变形行为特征。实验结果表明:6005A 铝合金焊缝、热影响区和母材的单轴拉伸应力 – 应变曲线差别较大,母材的屈服强度和抗拉强度明显高于焊缝和热影响区,即热影响区是焊接接头最薄弱的区域。焊接接头焊缝、热影响区在非对称应力循环加载下表现出循环安定状态,而纯母材产生了明显的棘轮变形,因为焊接接头母材一直处于弹性变形状态,焊接接头的棘轮变形主要由焊缝和热影响区主导。

关键词:6005A 铝合金;焊接接头;循环安定;棘轮变形;热影响区

中图分类号:U448.13

文献标志码:A

引 言

6005A 铝合金焊接接头广泛应用于轨道列车车体制造中^[1]。其服役过程中,铝合金焊接接头构件不可避免地承受交变循环荷载作用,导致车体焊接构件疲劳失效。目前国内外学者对铝合金焊接接头的循环行为研究主要集中于应变控制循环加载下的循环软化特征^[2]、疲劳寿命预测^[3]和疲劳裂纹扩展方面^[4]。但针对铝合金焊接接头在非对称应力循环加载下的循环累积现象,即棘轮行为研究较少。

陈荣康^[5]对 6005A 铝合金搅拌摩擦焊焊接接头试样进行了疲劳性能试验,并与母材试样做了对比,得到了接头构件的疲劳强度。王敏等^[6]对 6005A 铝合金双丝

MIG 焊接接头组织与性能进行了详细研究。Xu 等^[7]研究了 7075 铝合金焊接接头在对称应变控制循环荷载下的循环变形行为,发现 7075 铝合金焊接接头表现出明显的循环硬化行为,且随着应变幅值增加,硬化越明显。何如^[8]等研究了铝合金焊接接头疲劳裂纹萌生、裂纹扩展以及瞬间断裂机理。He 等^[9]和 Stinville 等^[10]分别研究了铝合金和钛合金焊接接头应变积累演化与疲劳破坏机制之间的关系,发现低周疲劳载荷作用时焊接接头疲劳失效主要由累积塑性变形造成。

近年来,DIC(Digital Image Correlation)技术在焊接接头应变分布观测中获得了越来越广泛的应用^[11-13]。它通过分析变形前后图像的系统相关性,计算得到位移场和应变分布场,从而实现对非均匀应变场的实时观

收稿日期:2018-03-14

基金项目:国家重点研发计划(2017YFB0304500);国家自然科学基金面上项目(11572265)

作者简介:黄 琰(1991-),男,甘肃定西人,硕士生,主要从事焊接接头循环变形行为方面的研究,(E-mail)hy20114546@163.com

测。Nakata 等^[14]利用 DIC 观测了应变控制疲劳载荷下试样的局部非均匀应变分布及其演变规律,进而研究了焊接接头的断裂机理。Luo 等^[15]使用 DIC 观察了 SUS301L 不锈钢焊接接头各微区的循环变形行为,并获得了焊接接头试件实验过程的变形图像,非常直观的观察到焊接接头在单轴拉伸和循环加载过程的应变演化规律。

本文基于 DIC 方法研究 6005A 铝合金激光 - MIG 复合焊接接头试样和母材试样在单轴非对称应力循环加载下的非均匀应变分布和演化规律。首先观察了焊接接头焊缝、热影响区和母材在微观结构和硬度方面的不均匀性;其次通过单轴拉伸实验研究了焊接接头和母材的基本力学性能;最后研究了焊接接头在单轴非对称应力循环加载下的变形行为,并与母材试样进行对比。

1 实验

1.1 实验材料

试验材料为高速列车车体常用的 6005A - T6 铝合金型材,焊丝选用直径为 1.2 mm 的 ER5356 焊丝。

1.2 焊接过程

激光 - MIG 复合焊接技术作为一种逐渐发展成熟的新兴焊接技术在列车制造、航空航天等领域得到了大量应用^[16]。6005A - T6 型材采用激光 - MIG 复合焊接技术焊接,焊接方向垂直型材轧制方向,保护气为 Ar(5%)和 CO₂(5%)。型材规格为 1000 mm × 500 mm × 120 mm,焊接区域的板厚为 4 mm,坡口形状、尺寸和型材的截面形貌如图 1 所示。

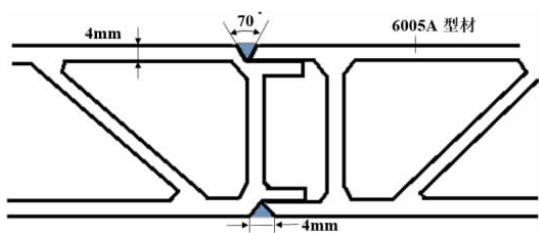


图 1 6005A - T6 型材坡口形状和尺寸

试验所用激光器为额定功率 4.2kW 的光纤激光器。焊机采用 KmpArc - 450 脉冲焊机,焊机通过控制送丝速度确定焊接电流和电压。主要焊接工艺参数见表 1。

表 1 激光 - MIG 复合焊接工艺参数

焊接速度 /(m · min ⁻¹)	送丝速度 /(m · min ⁻¹)	激光功率 /kW	电流 /A	电压 /V
1.20	8	2.2	127	21.5

1.3 拉伸和循环实验试样制备

在焊接性能良好的型材上加工试验试样。接头试样为 70 mm × 8 mm × 3.1 mm 的直边切片试样,因为焊接接头强度低于纯母材,该直边切片同狗骨式试样设计类似,可确保焊接试样失效位置发生在标距段^[15]。纯母材试样则专门设计了宽 14 mm 厚 3.1 mm 的夹持端,标距段尺寸为 40 mm × 8 mm × 3.1 mm,保证横截面积与接头试样相同。单轴拉伸和循环加载实验时,DIC 统计的应变区域可代表焊接接头整体应变分布,进而在 DIC 统计区域内分区处理得到焊缝(WZ)、热影响区(HAZ)、母材(BM)的应变变化。硬度测试沿垂直于焊道方向的焊接接头试样上表面进行,即 DIC 统计区域面进行,如图 2 所示。

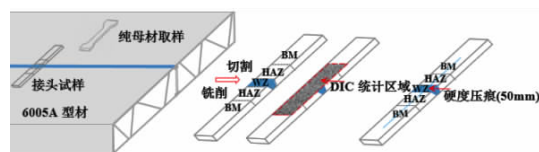


图 2 焊接接头取样示意图

1.4 金相和显微硬度测试试样制备

焊接接头的金相试样经砂纸研磨后抛光、腐蚀。腐蚀液为新配的体积比为 HF:HCl:HNO₃:H₂O = 2:3:5:90 的混合酸,使用 OLYMPUS BX51 金相显微镜进行显微组织观察。根据 GB/T4342 - 1991《金属显微维氏硬度试验方法》使用 HVS - 30 型显微硬度计进行硬度试验,在板厚中间位置沿焊缝中心向母材进行硬度测试,焊缝和热影响区位置 10 mm 测点间隔 0.5 mm,其他测试点间隔 1 mm。

1.5 拉伸和循环实验工况

实验开始前在试样表面喷制白底黑漆且分布随机

的散斑点,作为 DIC 测量的参考点。

单轴拉伸和循环变形实验在 MTSBionix858 试验机上进行,最大载荷量程为 -15kN,实验控制系统为 Flex-Test 40。DIC 测量系统为 GOM 公司的 ARAMIS5M,实验温度为室温。分别对接头试样和纯母材试样进行拉伸速率为 0.14 mm/s 的单轴拉伸实验,通过 DIC 处理得到焊接接头焊缝、热影响区、母材区和纯母材的单轴拉伸应力-应变曲线。

材料在非对称应力循环作用下会产生循环塑性变形的累积,这种塑性变形的累积现象称为棘轮效应,棘轮效应可通过棘轮应变 ε_r 度量^[15]:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2}(\varepsilon_{\max} + \varepsilon_{\min}) \quad (1)$$

其中, ε_{\max} 和 ε_{\min} 分别为每一个循环中响应的最大应变和最小应变值。

基于单轴拉伸实验结果,制定非对称应力循环实验工况(表 2)。

表 2 非对称应力循环实验工况

	应力幅值 /MPa	平均应力 /MPa	应力率 /(MPa/s)	循环圈数/ N
接头试件	140	45	20	160
纯母材	210	45	20	160

2 实验结果与分析

2.1 金相组织和显微硬度

6005A 激光-MIG 复合焊焊接接头区域沿焊缝方向分为母材区(BM)、焊缝(WZ)、热影响区(HAZ)。接头区域观察到的显微组织如图 3 所示。图 3(d)为焊缝-热影响区交界处,即焊缝融合线形貌。

由图 3 可知,6005A-T6 型材焊接接头焊缝区为典型的铸态组织,中心部位晶粒粗大,呈等轴晶组织,边部则呈柱状晶组织;半熔化区晶粒非常细小,呈细小的等轴晶组织;6005A 基材为完全再结晶组织,晶粒非常细小,化合物被破碎并沿型材挤压方向(纵向)成行排列;热影响区内晶粒明显粗化;熔合区靠基材一侧组织呈等轴晶组织,靠焊缝一侧晶粒沿

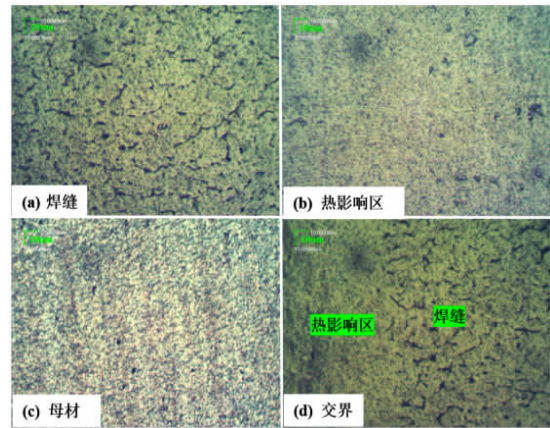


图 3 激光-MIG 焊接接头金相组织

散热方向呈柱状晶;焊接接头的焊缝区为典型的树枝状晶的铸造组织。

6005A 激光-MIG 复合焊焊接接头试样的显微硬度测试结果如图 4 所示。焊接接头显微硬度沿着焊缝中心线呈对称分布。焊缝中心处和热影响区软化区硬度较低,热影响区硬度变化较大,最低硬度为约为 HV63,最高约为 HV99。

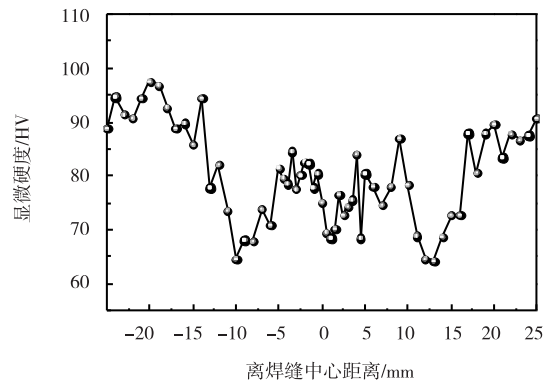


图 4 焊接接头显微硬度

2.2 单轴拉伸实验结果

焊接接头的焊缝、热影响区、母材区域可通过观察接头的金相组织和显微硬度分布来区分。文献[17-18]通过硬度分布划分焊缝、热影响区和母材。Saranath^[19]和 Luo^[15]提出了利用 DIC 实测应变场表征接头区域(焊缝、热影响区、母材)的方法。如图 5(a)所示,焊接接头被近似分成焊缝、热影响区和母材三部分,在单拉应变场中选择线段(L1)单拉过程的轴向应变与该位置硬度测试段 L2 的显微硬度做比较,可以发现硬度值与应变

变化的对应性,如图5(b)所示。

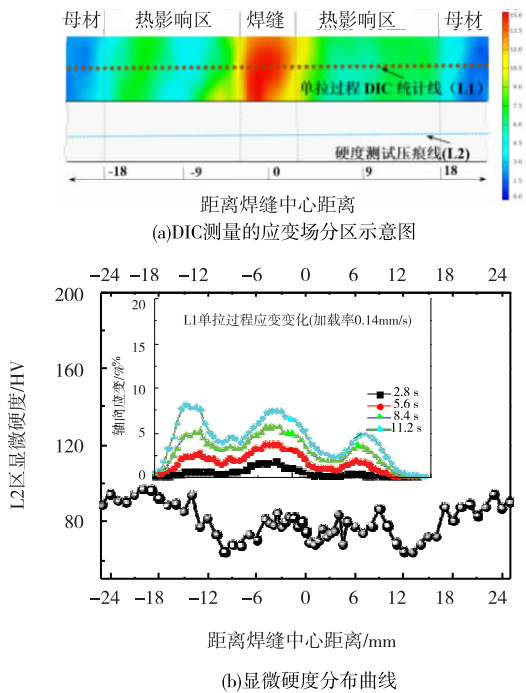


图5 焊接接头应变场分布与显微硬度的对应关系

焊缝和热影响区的显微组织、显微硬度和应变场不均匀将导致热影响区(淬火区和软化区)内软化行为的不均匀^[20]。通过 DIC 实测应变场表征的接头区域(焊缝、热影响区、母材)应变值实际上为焊缝、热影响区和母材的平均应变,即对焊缝、热影响区的应变场数据进行了平均化处理。

6005A-T6 铝合金焊接接头整体、焊缝、热影响区与纯母材试件单轴拉伸应力-应变曲线如图6所示,加载速率为0.14 mm/s。焊接接头和纯母材拉伸性能见表3。由表3可知,铝合金母材的屈服强度、抗拉强度远高于焊缝和热影响区,直至接头试件在断裂前,母材一直处于弹性变形阶段。

表3 6005A-T6 铝合金焊接接头的拉伸性能

区域	弹性模量 /GPa	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 %
焊缝	43	100	190	14
热影响区	41	108	195	10.5
接头整体	46	112	192	11.4
母材	71	205	272	6.2

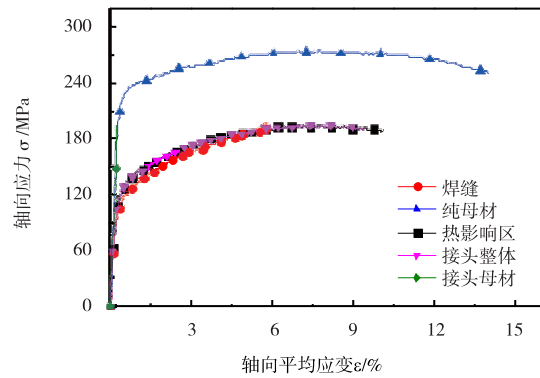


图6 焊接接头微区和纯母材单拉应力应变曲线

接头拉伸应力不到100 MPa时,焊接接头各微区都处于弹性变形阶段。拉伸应力在100 MPa~190 MPa之间时,焊缝和热影响区承担该阶段拉伸过程的主要变形,随着拉伸进行,热影响区应变场急剧变化,直至断裂。焊接接头组织和硬度分布的不均匀性与之对应,接头单轴拉伸过程中应变演化也呈现出非均匀性,热影响区和焊缝是焊接接头的薄弱区域,拉伸断裂发生在热影响区内,如图7所示。

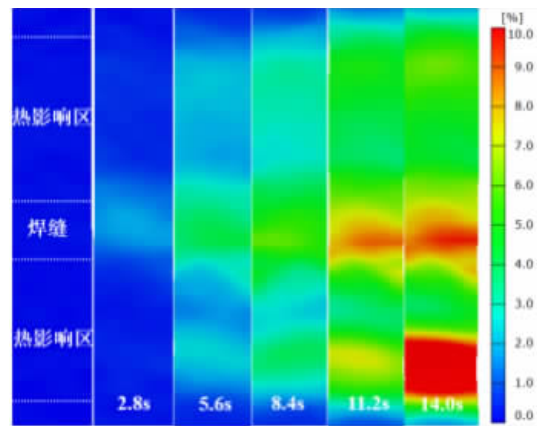


图7 单调拉伸时焊接接头应变场分布

2.3 单轴非对称应力循环

6005A-T6 铝合金焊接接头在 45 ± 140 Pa 加载水平、纯母材在 45 ± 210 MPa 加载水平的非对称应力循环实验结果如图8所示。根据单轴拉伸实验结果,接头试样微区在 45 ± 140 Pa 加载水平下进入塑性变形阶段,母材在 45 ± 140 MPa 时仍处于弹性变形阶段,不能揭示母材进入塑性屈服后的循环变形特征。因此,补充了纯母材试件在 45 ± 210 MPa 加载水平下的循环变形实验。由图8可知,接头试件随着循环周次的增加,应力-应变循环滞回环基本保持不变,一直保持循环安定状态,

几乎没有棘轮变形。而纯母材在非对称应力循环加载 下塑性累积十分明显。

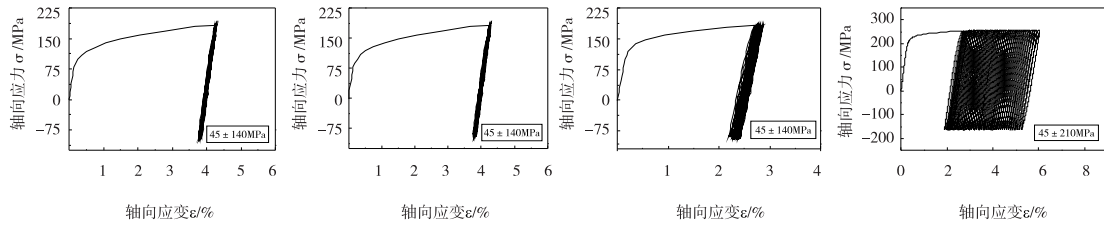


图 8 焊接接头和纯母材非对称应力循环实验结果

进一步提取棘轮应变随循环周次演化曲线,如图 9 所示。

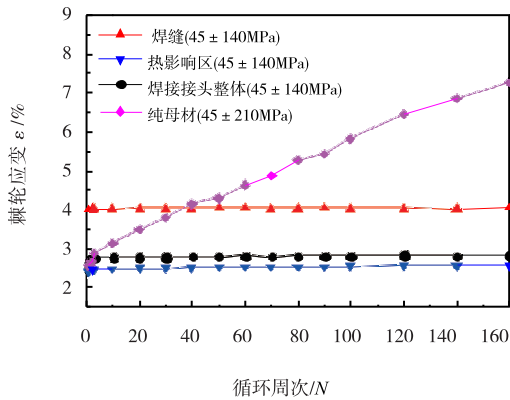


图 9 棘轮应变随循环周次演化

由图 9 可知,焊缝、热影响区和焊接接头整体上均表现出棘轮安定状态,即棘轮应变随循环周次的增加几乎不增加。纯母材在非对称应力循环下的棘轮应变则随着循环周次的增加迅速增加。观察非对称应力循环加载下焊接接头应变场分布可知,应力循环加载条下热影响区和焊缝主导了焊接接头的塑性变形。同单轴拉伸结果类似,热影响区、焊缝区内的应变场分布不均匀,焊缝和热影响区的应变明显高于母材区,如图 10 所示。

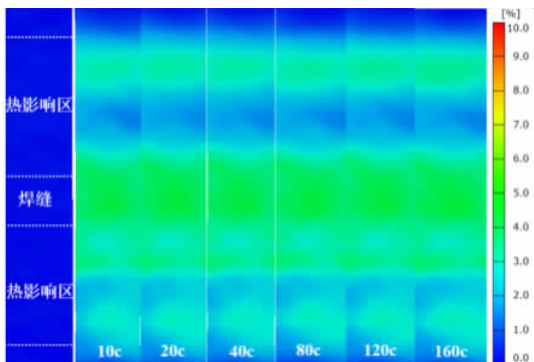


图 10 非对称应力循环加载下焊接接头应变场分布

Luo^[15]研究应力循环下载 SUS301L 不锈钢激光 - MIG 复合焊接接头的棘轮行为时发现,焊缝主导了焊接接头的塑性变形。在以 ER308L 做填充焊缝的条件下,焊缝区、热影响区和焊接接头整体上都产生了明显的棘轮变形。然而,对于 6005A - T6 铝合金焊接接头,以 ER5356 为填充焊料,在焊缝和热影响区为主导作用下的接头整体上表现出循环安定特征。这意味着,对于焊接接头这类异质材料,焊接接头的循环塑性累积取决于填充焊料。选取合适的填充焊料,焊接接头将出现棘轮安定现象。对于疲劳失效而言,棘轮安定现象抑制了循环塑性变形的累积,不仅可以保证焊接件尺寸不超标,而且可以降低疲劳损伤的累积,间接提升焊接接头的抗疲劳能力。

3 结束语

结合焊接接头的显微组织和显微硬度分析结果,验证了 DIC 应变场测量方法可用于测量出 6005A - T6 铝合金焊接接头各分区的平均应变分布,可直观地观察到焊接接头焊缝、热影响区、母材在单调拉伸和应力循环加载下的应变场演化。6005A - T6 铝合金焊接接头焊缝、热影响区、母材单调拉伸应力 - 应变曲线差异较大,母材屈服应力和抗拉强度均远高于焊缝和热影响区。6005A - T6 铝合金焊接接头焊缝、热影响区在非对称应力循环加载下均表现出循环安定特征,纯母材则具有明显的棘轮变形行为。作为一种异质结构件,母材屈服强度较焊缝和热影响区大,应力循环加载条下热影响区和焊缝主导了焊接接头的塑性变形,焊接接头整体上表现出循环安定状态,这为进一步研究焊接接头的疲劳失效提供了重要参考。下一步的研究工作将重点考虑不同填充焊料的焊接接头疲劳失效寿命,揭示焊接接头结构疲劳与焊接工艺和加载条件的联系。

参考文献:

- [1] 谷晓燕,刘亚俊,孙大千,等.S355 钢/6005A 铝合金瞬间液相扩散连接接头组织与性能[J].吉林大学学报:工学版,2017,47(5):1534-1541.
- [2] FENG A H, CHEN D L, MA ZY. Microstructure and Cyclic Deformation Behavior of a Friction-Stir-Welded 707 Al Alloy[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2010, 41(4): 957-971.
- [3] KIM S J, CHOI P H, DEWA R T, et al. Low Cycle Fatigue Properties of Alloy 617 base Metal and Weld Joint at Room Temperature[J]. Procedia Materials Science, 2014, 3: 2201-2206.
- [4] 常丽艳,宋西平,张敏,等.基于原位 SEM 的激光-MIG 复合焊接 7075-T6 铝合金疲劳裂纹扩展行为[J].焊接学报,2016,37(5):85-88.
- [5] 陈荣康,孙春方,戴瑛.6005A 铝合金型材搅拌摩擦焊接头疲劳性能研究[J].力学季刊,2012,33(3):443-448.
- [6] 王敏,王海东.6005A 铝合金双丝 MIG 焊接接头组织与性能研究[J].热加工工艺,2011,40(9):144-145.
- [7] XU W F, LIU J H, CHEN D L, et al. Change of microstructure and cyclic deformation behavior along the thickness in a friction-stir-welded aluminum alloy [J]. Scripta Materialia, 2012, 66(1): 5-8.
- [8] 何如.高速列车铝合金焊接接头疲劳性能研究[D].北京:北京交通大学,2008.
- [9] HE C, HUANG C, LIU Y, et al. Effects of mechanical heterogeneity on the tensile and fatigue behaviours in a laser-arc hybrid welded aluminium alloy joint[J]. Materials & Design (1980-2015), 2015, 65: 289-296.
- [10] STINVILLE J C, BRIDIER F, PONSEN D, et al. High and low cycle fatigue behavior of linear friction welded Ti-6Al-4V [J]. International Journal of Fatigue, 2015, 70(70): 278-288.
- [11] 胡浩,梁晋,唐正宗,等.数字图像相关法测量金属薄板焊接的全场变形[J].光学精密工程,2012,20(7): 1636-1644.
- [12] 孙向伟,殷咸青,王江超,等.采用三维光学测量技术对薄板焊接失稳变形的分析[J].焊接学报,2013,34(6):109-112.
- [13] TIWARI V, SUTTON M A, MCNEILL S R, et al. Application of 3D image correlation for full-field transient plate deformation measurements during blast loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(6): 862-874.
- [14] NAKATA T, TANIGAWA H. Evaluation of local deformation behavior accompanying fatigue damage in F82H welded joint specimens by using digital image correlation[J]. Fusion Engineering & Design, 2012, 87(5-6): 589-593.
- [15] LUO H L, KANG G Z, KAN Q H, et al. Experimental investigation on the heterogeneous ratcheting of SUS301L stainless steel butt weld joint during uniaxial cyclic loading [J]. International Journal of Fatigue, 2017, 105: 169-179.
- [16] 王旭友,雷振,张健,等.高速列车 6005A-T6 铝合金型材激光-双丝 MIG 复合焊[J].焊接学报,2012,33(7):9-12.
- [17] KONG L, SHUAI J, ZHOU X, et al. A Universal Method for Acquiring the Constitutive Behaviors of API-5LX90 Welds[J]. Experimental Mechanics, 2016, 56(2): 165-176.
- [18] LING Z, MIN J, WANG B, et al. Constitutive Model of Friction Stir Weld with Consideration of its Inhomogeneous Mechanical Properties[J]. Chinese Journal of

Mechanical Engineering,2016,29(2):357-364.

Engineering,2014,63(4):30-42.

[19] SARANATH K M, SHARMA A, RAMJI M. Zone wise local characterization of welds using digital image correlation Technique [J]. Optics & Lasers in

[20] 吕晓春,雷振,张健,等.高速列车 6005A-T6 铝合金焊接接头软化分析[J].焊接学报,2014,25(8):25-29.

Experimental Study on Non-uniform Cyclic Deformation of 6005A-T6 Aluminum Alloy Welded Joint Based on the DIC Technology

HUANG Yan, DING Li, LUO Huiliang, KAN Qianhua

(School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The three-dimensional digital image correlation (DIC) technology was used to reveal the cyclic deformation characteristics of weld zone, heat-affected zone and base metal of 6005A-T6 aluminum alloy welded joint by the method of laser-MIG hybrid welding. The experimental results show that the uniaxial tensile stress-strain curves of weld zone, heat-affected zone and base metal of 6005A-T6 aluminum alloy welded joint have great differences. The yield and tensile strengths of base metal are much higher than the weld zone and the heat-affected zone, which implies that the heat-affected zone becomes the weakest zone of welded joint. The weld and heat-affected zone of welded joint exhibit cyclic shakedown state under the asymmetrical cyclic stressing. However, the base metal exhibits obvious ratcheting deformation. The ratcheting deformation of welded joint is mainly dominated by the weld zone and the heat-affected zone since the base metal in welded joint has always been in the state of elastic deformation.

Key words: 6005A aluminum alloy; welded joint; cyclic stability; ratcheting deformation; heat-affected zone