TIG 与 FSW 焊接工艺下 2219 铝合金疲劳 裂纹扩展性能研究

杨子涵¹, 刘德博¹, 陈强^{2a}, 韩永典^{2a,2b}

(1.北京宇航系统工程研究所,北京 100076; 2.天津大学 a.材料科学与工程学院 b.天津市现代连接技术重点实验室,天津 300350)

摘要:目的 研究钨极惰性气体保护焊(TIG)和搅拌摩擦焊(FSW)对2219 铝合金焊接接头疲劳性能的影响,并探究这 2 种不同焊接技术条件下焊接接头疲劳裂纹的产生与裂纹扩展原理,了解 2 种焊接接头的抗裂纹扩展能力,为工程实践应用提供数据参考。方法 采用疲劳裂纹扩展试验方法,测试上述 2 种焊接工艺条件下焊缝金属和热影响区组织的疲劳裂纹扩展速率 da/dN 和阈值,使用光学显微镜和扫描电子显微镜观察并分析金相组织和疲劳断口形貌特征。结果 疲劳裂纹倾向于沿裂纹处萌生,裂纹的存在成为主要的裂纹扩展源头,有利于加速裂纹向前延伸。热影响区由于组织结构不均匀,不同位置的晶粒尺寸存在明显差异,疲劳裂纹扩展路径倾向于沿靠近焊缝一侧向靠近母材区域扩展。TIG 焊接工艺下焊缝金属和热影响区的裂纹 扩展速率明显低于 FSW 焊接工艺下的焊缝金属和热影响区,与此同时,TIG 焊接接头表现出优良的抗疲劳裂纹扩展性能。结论 通过此研究,建议 2219 铝合金焊接接头采用 TIG 焊接工艺,抗疲劳裂纹扩展效果更佳。 关键词: 2219 铝合金;阈值;疲劳裂纹扩展速率;焊接接头;断口形貌特征

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.04.008

中图分类号: TG405 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2023)04-0067-07

Fatigue Crack Growth Property of 2219 Aluminum Alloy under TIG and FSW Welding Process

YANG Zi-han¹, LIU De-bo¹, CHEN Qiang^{2a}, HAN Yong-dian^{2a,2b}

(1. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China; 2. a. School of Materials Science and Engineering, b. Tianjin Key Laboratory of Modern Connection Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effects of tungsten inert gas welding (TIG) and friction stir welding (FSW) on the fatigue properties of 2219 aluminum alloy welded joints, explore the principle of fatigue crack generation and crack growth of

- **Received:** 2022-10-29
- **基金项目:**国家自然科学基金(51974198)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51974198)

作者简介:杨子涵(1996—),女,硕士。

通讯作者:韩永典(1983—),男,博士,教授,主要研究方向为焊接结构疲劳、腐蚀及断裂。

收稿日期: 2022-10-29

Biography: YANG Zi-han (1996-), Female, Master.

Corresponding author: HAN Yong-dian (1983-), Male, Doctor, Professor, Research focus: fatigue, corrosion and fracture of welded structures.

引文格式:杨子涵,刘德博,陈强,等.TIG与FSW焊接工艺下2219铝合金疲劳裂纹扩展性能研究[J]. 精密成形工程,2023, 15(4): 67-73.

YANG Zi-han, LIU De-bo, CHEN Qiang, et al. Fatigue Crack Growth Property of 2219 Aluminum Alloy under TIG and FSW Welding Process[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(4): 67-73.

welded joints under these two different welding conditions, and understand the anti-crack growth ability of the two welded joints, so as to provide data reference for engineering practice. The fatigue crack growth rate da/dN and threshold value of the weld metal and heat affected zone under the two welding methods were tested by fatigue crack growth test. The metallographic structure and fatigue fracture morphology were observed and analyzed by optical microscope and scanning electron microscope. Fatigue cracks tended to initiate along the crack. The existence of cracks became the main source of crack growth, which was conducive to accelerating the forward extension of cracks. Due to the uneven structure of the heat affected zone, the grain size at different positions was obviously different and the fatigue crack growth path tended to expand from the side near the weld to the area near the base metal. The crack growth rate of weld metal and heat affected zone in TIG welding process was significantly lower than that in FSW welding process. Meanwhile, the TIG welded joints showed excellent anti-fatigue crack growth property. Through this study, it is recommended that 2219 aluminum alloy welded joints should be treated by TIG welding process, which will obtain better anti-fatigue crack growth effect.

KEY WORDS: 2219 aluminum alloy; threshold value; fatigue crack growth rate; welded joint; fracture morphology characteristics

2219 铝合金属于铝铜系强化铝合金,因其具有 相对密度较低、强度比高及在低温环境下性能较好的 特点,广泛应用于航空航天领域^[1-5]。2219 铝合金加 工制成的零部件广泛用于飞机侧翼等连接部位 ,经常 在循环和加载的工况条件下服役,对铝合金材料结构 的抗疲劳性能有较高要求。疲劳断裂变形是现代机械 零件主要的失效类型之一 ,为保障机械零件在循环载 荷下的安全运行,有必要对材料的疲劳和裂纹扩展机 理进行深入分析^[6-7]。1960年, Paris 等^[8]首次提出了 应力强度因子在疲劳裂纹扩展过程中的关键性作用, 并逐步尝试建立疲劳裂纹扩展速率的计算模型与应 力强度因子的振幅模型之间的关系,从而重新优化了 疲劳断裂理论。Xu 等^[9]根据非线性蠕变-疲劳交互损 伤的本构模型,对 P92 钢在蠕变-疲劳交互作用条件 下的裂纹扩展及损伤演化行为进行了系统性表征。结 果显示,随着裂纹扩展时间的不断延长,裂纹扩展速 率增大,蠕变损伤行为在裂纹扩展过程中扮演了重要 作用。Narasayya 等^[10]的进一步研究结果表明, T652 和 T6 2 种类型的 2219 铝合金断裂韧性相似, 且 2 种 合金的断裂韧性随着不同方向屈服极限的增大而增 强。Sharma 等^[11]研究了 2219 铝合金在不同时效环境 下的裂纹扩展行为。Kaibyshev 等^[12]分析了 2219 铝合 金应变速率在温度范围为 250~500 ℃的变形过程中 随温度的变化,得出了2219铝合金在热变形试验过 程中可能存在阈值压力。Tomasella等^[13]对HC340LA 钢进行了疲劳试验,得到了2219铝合金在变幅载荷 作用下的疲劳寿命。焊接接头作为结构件的薄弱位 置^[14-16],目前对于不同焊接工艺方法下焊接接头疲劳 性能对比的研究较少,而该研究对于产品的实际应用 有重要意义。

钨极惰性气体保护焊(TIG)^[17-20]和搅拌摩擦焊 (FSW)^[21-25]是目前铝合金焊接中较为成熟的焊接工 艺方法,其焊接接头表现出优异的力学性能。因为不 同的焊接工艺条件对服役过程中材料的疲劳性能有 明显影响,所以针对不同焊接工艺条件下材料疲劳断 裂行为的研究极其重要。因此,文中研究TIG和FSW 2 种焊接条件下 2219 铝合金板材的疲劳裂纹扩展行 为,同时对疲劳裂纹扩展的路径曲线和断口形貌进行 试验观察,研究不同焊接工艺条件下该合金材料的疲 劳断裂机理,为该合金后期工程应用实践的发展提供 重要的参考依据。

1 试验方法

1.1 试验材料和方法

试验的试样材料均采用 2219 铝合金板材,2219 铝合金的化学成分含量如表 1 所示。通过采用 TIG 和 FSW 2 种不同的焊接工艺方法对 2219 铝合金板材试 样进行对接焊接,同时采用线切割将试样进行剪切, 然后对试样母材(Base Matal,BM),焊缝区(Weld Zone,WZ)和热影响区(Heat Affected Zone,HAZ) 的疲劳裂纹扩展行为进行系统研究。图 1 显示了 2219 铝合金试样的加工尺寸示意图。测试试样宽度 W=50 mm,厚度 B=6 mm。试验前,在样品中心制作 一个深度 a_n =7.5 mm 的预制机械切口。使用型号为 SDS50 的电液伺服疲劳试验机在室温环境下进行试 验,通过采用 2 mm 预制疲劳尖端裂纹切口,模拟实 际工件结构中存在的裂纹模型。

在试验开始前,先使用400[#]、800[#]、1500[#]、2000[#] 的 SiC 砂纸将合金试样一侧的表面打磨光亮以方便

Tab.1 Composition of 2219 aluminum alloy										
Element	Cu	Mn	Si	Zr	Fe	Mg	Zn	V	Ti	Al
Mass fraction/%	5.8-6.8	0.2-0.4	0.2	0.10-0.25	0.3	0.02	0.1	0.05-0.15	0.02-0.10	Bal.

表 1 2219 铝合金成分组成



Fig.1 Schematic diagram of CT sample processing size (unit: mm)

观察裂纹扩展距离,然后用铅笔从预制疲劳裂纹尖端 划出一条间距为1mm的等比例线,以便记录试验过 程中裂纹扩展的向前位置。在测试过程中,需要逐个 记录裂纹长度 *a_i* 及其对应的载荷循环数 *N_i*,并且需 要使用放大 50 倍的数字显微镜观察和监测裂纹长度 *a_{io}* 负载的测试循环次数 *N_i* 可以自动显示在负载测试 机的显示器上。当裂纹长度达到 0.6*W*~0.7*W* 时,应 立即停止循环载荷试验。试验开始时的应力比设置为 *R*=0.1,测量精度值高达 0.01 mm,设定的最大加载 载荷为4kN,加载频率为20Hz。试验过程中的应力 保持恒定。从整个试验过程可以观察到,每个试样的 裂纹扩展路径都在焊缝范围内进行延伸,穿透裂纹与 试样的对称面偏差小于 5°。

1.2 试验原理及过程

疲劳裂纹扩展试验中,可用 Paris 公式确定材料常数 *C*、*m* 的值,见式(1)^[26]。

$$da / dN = C \times (\Delta K)^m \tag{1}$$

式中:*C、m* 分别为 2 个经验常数,用于描述材 料性能、微观组织结构、载荷频率、平均静态应力或 动态载荷之比、环境、加载方式、应力分布状态和加 载试验温度变化;da 为裂纹长度变化量;dN 为循环 次数变化量;ΔK 为应力强度因子范围。

$$\lg(\mathrm{d}a/\mathrm{d}N) = \lg C + m \lg(\Delta K) \tag{2}$$

在每个双对数坐标系中可以分别计算:x=lg(ΔK),y=lg(da/dN),如果可以分别计算一组(ΔK)_i和相应的(da/dN)_i,则可以使用线性回归方法绘制相应曲线,曲线斜率表示*m*的值。将*m*的值代入式(2),可以得到*C*的值。

从预制疲劳裂纹中的最后一级载荷降低载荷,并 进行恒定力值比的预制疲劳裂纹降 *K* 试验。降 *K* 试 验的基本方法:每个阶段的力跌落率 *R*₁=10%,力值 (应力)比保持不变。各级力 Δ*a* 作用下的裂纹扩展 变形为 1 mm。随着裂纹继续扩展,记录裂纹扩展长 度和加载循环次数 *N*;当裂纹扩展速率 $\Delta a / \Delta N$ 值接近 1×10^{-7} mm/cycle 时,降 *K* 试验过程结束。

 ΔK_{th} 的确定方法:将每级力的下降率设置为 10%,并保持应力比不变。在每一级力的作用下, Δa 比上一级的塑性区尺寸 r_y 大 4~6 倍,且裂纹扩展长度 不增加 0.1 mm,直到 N 值等于 1×10⁻⁶。然后记录裂 纹扩展长度 a_k 、 a_{k-1} 及最后 2 个阶段开始时的应力范 围 ΔP_k 、 ΔP_{k-1} ,通过 (a_k , ΔP_k)和 (a_{k-1} , ΔK_{k-1})分别 计算最后 2 个应力 ΔP_k 、 ΔP_{k-1} 开始时的 ΔK 值,即 ΔK_k 和 ΔK_{k-1} 2 个值。根据式 (3)计算裂纹扩展阈值。

$$\Delta K_{\rm th} = \left(\Delta K_k + \Delta K_{k-1}\right)/2 \tag{3}$$

在上述 *a*-*N* 曲线计算的基础上,可以使用不同 方法计算每个铝合金样品在每个测试点的疲劳裂纹 扩展速率 d*a*/d*N* 及相应的裂纹尖端应力强度因子范 围 Δ*K*。

割线法计算的裂纹扩展速率仅适用于计算相邻 两条连续裂纹长度的线性斜率和相应的循环数,通常 用式(4)表示。

$$da(j)_{avg} / dN = (a_j - a_{j-1}) / (N_j - N_{j-1})$$
(4)

式中:a_j-a_{j-1}为裂纹增量; N_J-N_{j-1}为循环增量。

同时,考虑了对应于相应 N_i 的拟合裂纹长度 a_i 和疲劳裂纹扩展速率 da/dN 的裂纹尖端处的应力强 度因子范围 ΔK_{\circ} ΔK 可通过标准 C(T)试样的应力 强度因子公式确定,见式(5)—(6)。

$$\Delta K = \Delta P / (BW^{1/2}) \times f(a/W)$$
(5)

其中
$$f(a/W) = \frac{(2+a/W)}{(1-a/W)^{3/2}} \times$$

$$\left(0.886 + 4.64 \left(\frac{a}{W}\right) - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W}\right)^4\right)$$
(6)

式中: ΔP 为载荷变化范围, $\Delta P = P_{max} - P_{min}$; ΔK 为应力强度因子范围; B 和 W 分别为试样厚度和宽度; a 为拟合裂纹长度。

2 结果与分析

根据上述步骤计算割线法所处理的铝合金试样 的 da/dN 值,试验及计算结果如表 2 所示,整体试验 结果拟合的 da/dN-ΔK曲线如图 2 所示。其中,2219

表 2	试样试验结果
Tab.2 Tes	st results of sample

Tuble Tobe Tebules of Sumpre									
Zone	С	т	$\Delta K/(MPa \cdot m^{1/2})$						
BM	3.858 5×10 ⁻⁹	3.939 24	2.480 0						
TIG-WZ	$1.017 \ 4 \times 10^{-10}$	5.663 18	3.376 1						
TIG-HAZ	2.960 5×10 ⁻⁹	4.361 05	2.241 4						
FSW-WZ	1.527 5×10 ⁻⁸	3.795 07	1.640 7						
FSW-AHAZ	6.211 8×10 ⁻⁹	4.224 28	1.930 5						
FSW-RHAZ	1.446 9×10 ⁻⁸	3.634 87	1.701 4						



Fig.2 da/dN- ΔK curve of 2219 aluminum alloy sample: a) base metal; b) TIG welded joints; c) FSW welded joints

铝合金母材的疲劳裂纹扩展速率在 Paris 表达式中的 参数及疲劳裂纹扩展的阈值分别为:m=3.93924、 $C=3.8585\times10^{-9}$ 、疲劳裂纹阈值 $\Delta K_{th}=2.48$ MPa·m^{1/2}; TIG 焊缝区域的相应参数 m=5.66318、 $C=1.0174\times$ 10^{-10} ,疲劳裂纹阈值 $\Delta K_{th}=3.3761$ MPa·m^{1/2}; TIG 热 影响区域的相应参数 m=4.36105、 $C=2.9605\times10^{-9}$, 疲劳裂纹阈值 $\Delta K_{th}=2.2414$ MPa·m^{1/2}; FSW 焊缝区域 的相应参数 m=3.79507、 $C=1.5275\times10^{-8}$,疲劳裂纹 阈值 $\Delta K_{th}=1.6407$ MPa·m^{1/2}; FSW 前进侧热影响区域 (Advancing Heat Affected Zone, AHAZ)的相应参 数 m=4.22428、 $C=6.2118\times10^{-9}$,疲劳裂纹阈值计算 结果为 $\Delta K_{th}=1.9305$ MPa·m^{1/2}; FSW 后退侧热影响区 域 (Retreating Heat Affected Zone, RHAZ)的相应参 数 m=3.63487、 $C=1.4469\times10^{-8}$,疲劳裂纹阈值计算 结果为 $\Delta K_{th}=1.7014$ MPa·m^{1/2}。

通过以上试验数据可以看出,2219 铝合金母材 的疲劳裂纹扩展速率高于 TIG 焊缝中心和热影响区, 说明 TIG 焊接接头的抗裂纹扩展性能明显优于母材。 与此同时,2219 铝合金母材的疲劳裂纹扩展速率低于 FSW 焊缝中心和热影响区,FSW 焊缝区的裂纹扩展阈值小于母材与热影响区,说明与母材、TIG 焊接接头相比,FSW 焊接接头更容易开裂。TIG 焊缝金属的疲劳裂纹扩展速率明显低于热影响区,对裂纹的延伸具有较强的抵抗性。FSW 焊缝金属的疲劳裂纹扩展速率远高于前进侧和后退侧的热影响区,表明其会促进裂纹的进一步扩展。

为了探究影响 2219 铝合金 TIG、FSW 焊接接头 疲劳裂纹扩展速率的因素,使用 SiC 砂纸对不同焊接 接头的不同区域进行打磨、抛光、腐蚀。腐蚀试剂为 凯勒试剂,其体积比为 $V(HNO_3)$: V(HCI): $V(H_2O)$ = 5:2:90。试样裂纹扩展部位的金相显微照片如图 3 所示。图 3a 显示了母材的金相组织,晶粒呈板条状, 主要的相组成结构为 α 固溶体、 θ 相(CuAl₂),其中 θ 相(黑色颗粒状)是合金主要的强化相。图 3b、e 分别为 TIG 和 FSW 焊缝金属组织,焊缝组织以 α (Al) 基体为主,在合金基体上和沿晶界分布有许多 CuAl₂



d FSW 前进侧热影响区 e FSW 焊缝中心 f FSW 后退侧热影响区 图 3 2219 铝合金 TIG/FSW 焊接接头各区域疲劳裂纹扩展试样金相图片 Fig.3 Metallographic images of fatigue crack growth samples in each region of 2219 aluminum alloy TIG/FSW welded joints: a) base metal; b) TIG weld center; c) TIG heat affected zone; d) heat affected zone in FSW advancing side; e) FSW weld center; f)

heat affected zone in FSW retreating side

强化相,其中CuAl2增强相有助于改善焊接接头的性 能。TIG 和 FSW 焊接热影响区存在尺寸较大的等轴 晶粒,热影响区由于温度没有达到固相线,所以这部 分金属不会发生溶解,但是因受到焊接过程中热循环 的影响,该部分晶粒会依次发生回复、再结晶及晶粒 长大,且作用时间较长,晶粒长大程度随着离焊接热 源距离的增大而减小。靠近焊缝中心的金属由于加热 速度快、峰值温度高,加之冷却速度较快,导致晶粒 长大的速度增大,晶粒尺寸比母材大得多,其形态表 现为粗大的等轴晶粒,如图 3c-f 所示。

图 4a—f 显示了不同焊接方法中不同部位的疲劳

裂纹扩展路径的显微金相组织 , 可以看出 , 裂纹的扩 展路径基本都是通过穿晶的方式进行扩展,成分均匀 的母材和焊缝的裂纹扩展路径近似表现为一条直线, 如图 4a、b、e 所示。热影响区由于靠近母材和焊缝 的组织形貌不同,其裂纹扩展路径表现为靠近焊缝区 域向靠近母材区域进行延伸。可见热影响区为裂纹扩 展的薄弱区域,晶粒形态的不均匀会导致裂纹扩展的 速率提升。FSW 焊缝金属在裂纹扩展路径周围中存在 较多的微裂纹,可见裂纹源处更容易引起裂纹的扩展。

图 5a—f 显示了不同焊接工艺条件下不同部位的 疲劳裂纹扩展路径的断口形貌。2219 铝合金母材中





d FSW 前进侧热影响区





f FSW 后退侧热影响区

50 µm



Fig.4 Microscopic images of crack areas of 2219 aluminum alloy TIG/FSW welded joints: a) base metal; b) TIG weld center; c) TIG heat affected zone; d) heat affected zone in FSW advancing side; e) FSW weld center; f) heat affected zone in FSW retreating side

50 µm 50 µm 50 µm c TIG 热影响区 a 母材 b TIG 焊缝中心 50 µm 50 um 50 µn d FSW 前进侧热影响区 f FSW 后退侧热影响区 e FSW 焊缝中心

图 5 2219 铝合金 TIG/FSW 焊接接头各区域疲劳裂纹扩展试样断口图像

Fig.5 Fracture images of fatigue crack growth samples in each region of 2219 TIG/FSW welded joints: a) base metal; b) TIG weld center; c) TIG heat affected zone; d) heat affected zone in FSW advancing side; e) FSW weld center; f) heat affected zone in FSW retreating side

存在微小的裂纹和气孔,如图 5a 所示。从图 5b 中可 以看到,TIG 焊缝金属中存在较大的气孔,但在其断 口中有明显的韧窝,在气孔附近没有明显的疲劳条纹 和脊线,可见其有良好的抗疲劳裂纹扩展性能,在 TIG 热影响区断口可以看到明显的疲劳条纹和脊线, 由于热影响区组织结构的不均匀有利于疲劳裂纹扩 展,表现出较差的抗疲劳裂纹扩展性能,如图 5c 所 示。由图 5d—f 可见,FSW 焊缝中存在较多明显的裂 纹,这些裂纹的存在成为主要的裂纹扩展源头,有利 于加速裂纹向前延伸;而 FSW 热影响区表现出较少 的短裂纹,这也是热影响区的疲劳裂纹扩展阻力显著 高于焊缝金属的主要原因。

3 结论

1)测试了 2219 铝合金 TIG/FSW 焊接接头焊缝金 属和热影响区的疲劳裂纹扩展速率 da/dN。结果表明, TIG 焊接工艺下焊缝金属和热影响区的裂纹扩展速率 明显低于 FSW 焊接工艺下的焊缝金属和热影响区。

2)疲劳裂纹倾向于沿裂纹处萌生。热影响区由 于组织结构不均匀,裂纹扩展路径倾向于由靠近焊缝 一侧向靠近母材区域扩展。

3) TIG 焊接接头的疲劳裂纹扩展速率低于 FSW 焊接接头。通过此研究,建议 2219 铝合金焊接接头 采用 TIG 焊接工艺,抗疲劳裂纹扩展效果更佳。

参考文献:

- GUAN Ren-guo, LOU Hua-fen, HUANG Hui, et al. Development of Aluminum Alloy Materials: Current Status, Trend, and Prospects[J]. Chinese Journal of Engineering Science, 2020, 22(5): 68.
- [2] CONG Bao-qiang, QI Bo-jin, ZHOU Xing-guo, 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: 85-88.
- [3] DING Ji-kun, WANG Dong-po, WANG Ying. Effect of Post Weld Heat Treatment on Properties of Variable Polarity TIG Welded AA2219 Aluminium Alloy Joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(5): 1307-1316.
- [4] EI-ATY A A, XU Yong, GUO Xun-zhong, 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.
- [5] BHATTA L, PESIN A, ZHILYAEV A P, et al. Recent Development of Superplasticity in Aluminum Alloys: A Review[J]. Metals, 2020, 10(1): 77.
- [6] TANG Zheng-xin, JING Hong-yang, XU Lian-yong, et al. Investigating Crack Propagation Behavior and Dam-

age Evolution in G115 Steel under Combined Steady and Cyclic Loads[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 100: 93-104.

- [7] 徐世伟,李茂林,张体明,等. 2219 铝合金搅拌摩擦 焊接头组织和性能的不均匀性研究[J].精密成形工程, 2021,13(6):145-150.
 XU Shi-wei, LI Mao-lin, ZHANG Ti-ming, et al. Non-Uniformity of Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welding Joints of 2219 Aluminum Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(6): 145-150.
- [8] PARIS P C, GOMEZ M P, ANDERSON W E. A Rational Analytic Theory of Fatigue[J]. The Trend in Engineering, 1961, 13: 9-14.
- [9] XU Lian-yong, ZHAO Lei, HAN Yong-dian, et al. Characterizing Crack Growth Behavior and Damage Evolution in P92 Steel under Creep-Fatigue Conditions[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 134: 63-74.
- [10] NARASAYYA C V A, RAMBABU P, MOHAN M K, et al. Tensile Deformation and Fracture Behaviour of an Aerospace Aluminium Alloy AA2219 in Different Ageing Conditions[J]. Procedia Materials Science, 2014, 6: 322-330.
- [11] SHARMA V M J, KUMAR K S, RAO B N, et al. Fatigue Crack Growth of AA2219 under Different Aging Conditions[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(12): 4040-4049.
- [12] KAIBYSHEV R, SITDIKOV O, MAZURINA I, et al. Deformation Behavior of a 2219 Al Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2002, 334(1/2): 104-113.
- [13] TOMASELLA A, WAGENER R, MELZ T. Influence of the Transient Material Behaviour in the Fatigue Life Estimation under Random Loading[J]. Procedia Engineering, 2015, 101: 485-492.
- [14] MIRANDA A C D O, GERLICH A, WALBRIDGE S. Aluminum Friction Stir Welds: Review of Fatigue Parameter Data and Probabilistic Fracture Mechanics Analysis[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 147: 243-260.
- [15] 封亚明,何柏林. 高速列车铝合金焊接接头疲劳性能的研究进展[J]. 热加工工艺,2017,46(11):5-8.
 FENG Ya-ming, HE Bo-lin. Research Progress on Fatigue Properties of Aluminum Alloy Welded Joint of High Speed Train[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(11):5-8.
- [16] 王池权,石亮,张祥春,等. 焊接缺陷对异种铝合金 TIG 对接接头疲劳行为的影响[J]. 北京航空航天大学 学报, 2021, 47(7): 1505-1514.
 WANG Chi-quan, SHI Liang, ZHANG Xiang-chun, et al. Influence of Welding Defects on Fatigue Behavior of Dissimilar Aluminum Alloy TIG Butt Joint[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(7): 1505-1514.
- [17] LI Hui, ZOU Jia-sheng, YAO Jun-shan, et al. The Effect

of TIG Welding Techniques on Microstructure, Properties and Porosity of the Welded Joint of 2219 Aluminum Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 727: 531-539.

- [18] SONG J L, LIN S B, YANG C L, et al. Spreading Behavior and Microstructure Characteristics of Dissimilar Metals TIG Welding-Brazing of Aluminum Alloy to Stainless Steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 509(1/2): 31-40.
- [19] ARUNKUMAR D, SUBBAIAH K. Effect of Continuous and Pulsed Current Tungsten Inert Gas Welding of Cast Al-Mg-Sc Alloy[C]//Vijay Sekar K, Gupta M, Arockiarajan A. Advances in Manufacturing Processes. Singapore: Springer, 2019: 653-662.
- [20] 陈澄, 薛松柏, 孙乎浩, 等. 5083 铝合金 TIG 焊接头 组织与性能分析[J]. 焊接学报, 2014, 35(1): 37-40.
 CHEN Cheng, XUE Song-bai, SUN Hu-hao, et al. Microstructure and Mechanical Properties of 5083 Aluminum Alloy Joint by TIG Welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(1): 37-40.
- [21] BHARDWAJ N, NARAYANAN R G, DIXIT U S, et al. Recent Developments in Friction Stir Welding and Resulting Industrial Practices[J]. Advances in Materials and Processing Technologies, 2019, 5(3): 461-496.
- [22] SQUILLACE A, FENZO A D, GIORLEO G, et al. A Comparison between FSW and TIG Welding Techniques: Modifications of Microstructure and Pitting

Corrosion Resistance in AA 2024-T3 Butt Joints[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 152(1): 97-105.

- [23] LIU Peng, SHI Qing-yu, WANG Wei, et al. Microstructure and XRD Analysis of FSW Joints for Copper T2/Aluminium 5A06 Dissimilar Materials[J]. Materials Letters, 2008, 62(25): 4106-4108.
- [24] 赵亚东,田龙,何强. 1060 铝搅拌摩擦焊与 TIG 焊接 头组织和性能分析[J]. 热加工工艺, 2014, 43(11): 41-44.
 ZHAO Ya-dong, TIAN Long, HE Qiang. Analysis on Microstructure and Properties for 1060 Al Alloy Friction Stir Welding and Argon Tungsten-Arc Welding Joints[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(11): 41-44.
- [25] BAGHERI B, ABBASI M, ABDOLLAHZADEH A. Microstructure and Mechanical Characteristics of AA6061-T6 Joints Produced by Friction Stir Welding, Friction Stir Vibration Welding and Tungsten Inert Gas Welding: A Comparative Study[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2021, 28(3): 450-461.
- [26] TANG Zheng-xin, JING Hong-yang, XU Lian-yong, et al. Investigating Crack Propagation Behavior and Damage Evolution in G115 Steel under Combined Steady and Cyclic Loads[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 100: 93-104.