

2A12-T4 铝合金搅拌摩擦焊多区域疲劳裂纹扩展行为

王磊¹, 付强², 安金岚¹, 周松²

(1. 沈阳航空航天大学, 航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 沈阳, 110136; 2. 沈阳航空航天大学, 沈阳, 110136)

摘要: 疲劳裂纹扩展速率是材料内在组织性能的宏观外在表现, 显微组织和残余应力对宏观疲劳裂纹的扩展有显著的影响。文中研究了 2A12-T4 铝合金搅拌摩擦焊不同区域的疲劳裂纹扩展速率。结果表明, 在焊缝区域, 由于搅拌针强烈的机械和焊接热作用, 材料组织发生变化, 并伴有残余应力的产生, 导致不同区域裂纹的扩展速率存在明显差异。在低应力强度因子范围 (ΔK) 时, 热影响区和垂直于焊缝方向的疲劳裂纹扩展速率基本相同, 并且都高于沿焊缝方向裂纹的扩展速率; 在高应力强度因子范围 (ΔK) 时, 垂直于焊缝方向的扩展速率逐渐高于热影响区速率, 此时这两个区域的裂纹扩展速率仍然高于沿焊缝方向裂纹的扩展速率。

创新点: (1) FSW 焊接过程会使材料显微组织和残余应力发生变化, 进而导致不同区域的裂纹扩展速率有明显差异。

(2) 由于 FSW 接头为非均匀组织, 通过对比 2024-T4 不同区域的裂纹扩展行为, 进而精确评定 FSW 焊接结构强度与寿命。

关键词: 搅拌摩擦焊; 2A12 铝合金; 残余应力; 显微组织

中图分类号: TG 405 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20200724001

0 序言

铝及其合金在轨道交通、航空工业等领域的应用日益广泛^[1-4]。由于搅拌摩擦焊接 (friction stir welding, FSW) 对铝合金的良好适应性, 已经在航空航天等装备制造领域获得广泛应用, 在国内多个型号的军用与民用机型中也均已获得应用^[5-6]。与传统的焊接方法相比, FSW 接头缺陷少、质量高、变形小。

焊接过程复杂的冶金、物理与化学过程导致焊接结构不连续、微观组织非均匀和力学性能非线性。力学性能不均匀对外载所引起的接头区裂纹扩展驱动力亦有较大影响, 这种现象称为焊缝的失配效应。确定考虑焊缝失配效应的疲劳断裂分析具有重要意义^[7-9]。焊接过程导致的力学失配对 FSW 接头的力学性能将产生显著影响。Trudel 等人^[10]研究了焊缝的裂纹扩展速率, 发现当裂纹闭合时, 热影响区表现出较低的近门槛值裂纹扩展阻力, 且焊

缝强度失配导致裂纹向软材料 (母材) 区域扩展。吴圣川等人^[11]采用数值模拟结合试验的方法, 对铝合金 MIG 复合焊接头进行了寿命预测, 模拟预测的寿命结果与试验结果相一致。John 等人^[12]发现铝合金 FSW 接头疲劳裂纹扩展行为, 在 HAZ 中的残余应力对沿焊缝方向的裂纹扩展起着关键作用。Bussu 等人^[13]发现铝合金 FSW 接头的显微结构和硬度变化对裂纹扩展速率的影响较小, 残余应力占主导地位。Muzvidziwa 等人^[14]研究了 FSW 非均匀组织的疲劳裂纹扩展行为, 发现失配接头拥有显著的微观结构演变特性。孟金奎等人^[15]研究了焊接残余应力 7N01 铝合金疲劳裂纹扩展影响, 发现残余应力对裂纹扩展存在尺度效应: CT 试样裂纹长度小于 2 mm 时, 残余应力场明显影响疲劳裂纹扩展速率; 当裂纹长度大于 2 mm, 外载荷为主导因素。凌堃等人^[16]通过研究焊接接头热影响区裂纹启裂行为, 发现高匹配焊缝促进热影响区裂纹启裂, 低匹配焊接接头, 增加热影响区宽度促进热影响区裂纹启裂; 热影响区硬化时, 减小热影响区宽度促进热影响区裂纹启裂。

由力学失配导致的铝合金 FSW 焊接接头对其疲劳与断裂过程的影响及其机制机理分析, 目前为

收稿日期: 2020-07-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51775355); 辽宁省自然科学基金资助项目 (20180550713)。

止还缺乏深入而细致的研究. 因此, 针对由力学失配导致的铝合金 FSW 焊接接头疲劳与断裂行为展开研究, 可以深入了解非均匀焊接组织对其力学性能的影响, 为精确评定 FSW 焊接结构强度与寿命, 进而对航空装备的安全性及可靠性进行精确评估, 具有重要的理论研究和工程应用价值.

文中针对 2A12-T4 铝合金 FSW 接头焊核、热影响区和垂直焊缝方向的裂纹扩展行为进行对比分析, 详细讨论了 FSW 不同区域疲劳断口形貌及

破坏机理.

1 试验方法

1.1 试验材料

试验材料采用 4 mm 厚的 2A12-T4 航空铝合金板, 材料化学成分如表 1 所示. 搅拌摩擦焊接设备为北京赛福斯特公司的 FSW-3LM-4012 宽幅小型 FSW 系统.

表 1 2A12-T4 合金的化学成分 (质量分数, %)
Table 1 2A12-T4 alloy chemical composition

Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Ti	Mn	其它元素	Al
0.5	0.5	3.8~4.9	1.2~1.8	0.3	0.15	0.3~0.9	Ni:0.1, (Fe+Ni):0.5	余量

搅拌头轴肩直径为 14 mm, 搅拌针形状为圆锥螺旋, 平均直径 5 mm, 针长 2.7 mm, 倾角为 2°, 搅拌头下压量为 0.2 mm. 裂纹扩展速率试验采用紧

凑拉伸 (CT) 试样, 分别预制裂纹于焊核 (NZ 试样)、热影响区 (HAZ 试样) 和垂直焊缝方向 (PWZ 试样), 形式及尺寸如图 1 所示.

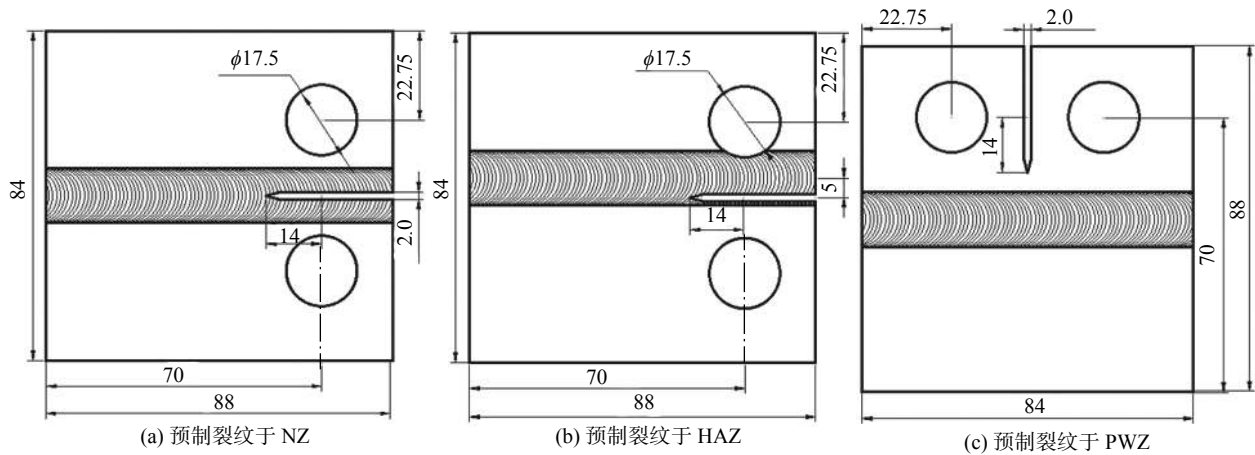


图 1 预制裂纹于不同区域的裂纹扩展试样 (mm)

Fig. 1 Crack propagation samples of prefabricated cracks in different regions. (a) in NZ; (b) in HAZ; (c) in PWZ

1.2 试验内容

采用 MTS 810 疲劳试验机进行拉-拉疲劳裂纹扩展速率试验, 试验条件为室温空气, 选取应力比 $R=0.1$, 采用正弦波的加载方式, 试验频率为 20 Hz, 测试预制不同位置缺口 CT 试样的疲劳裂纹扩展速率, 并分析断口形貌. 在进行疲劳裂纹扩展速率试验之前, 所有试样均采用 400 号~3000 号砂纸打磨两个表面.

采用 SEM 系统的附属电子背散射衍射系统 (electron back-scattered diffraction, EBSD) 来观测焊接试样不同选区的微观组织形貌. 采用 Rigaku Smartlab X 射线衍射仪 (XRD) 对焊接接头的残余

应力进行测定. 每个测量点间隔 2 mm, 测量线如图 2 所示.

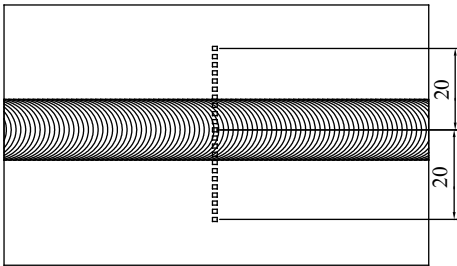


图 2 残余应力测量位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of residual stress measurement

2 结果与分析

2.1 试验结果

图 3 为 2A12-T4 接头预制裂纹于不同区域 (NZ, HAZ, PWZ) 的裂纹扩展速率曲线. 在 $\Delta K < 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, HAZ 和 PWZ 试样的裂纹扩展速率基本保持一致, 均高于 NZ 试样的裂纹扩展速率. 在 $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} < \Delta K < 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, PWZ 试样裂纹扩展速率明显加快, 高于 NZ 和 HAZ 试样裂纹扩展速率. NZ 试样的裂纹扩展速率在整个应力范围内均低于 HAZ 和 PWZ 试样的裂纹扩展速率. 而且在 $\Delta K = 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 时, PWZ 试样的裂纹扩展速率有一个明显的减缓过程, 出现短平台, 此时正对应于裂纹从母材穿过焊缝, 导致速率有所减缓, 之后加速扩展.

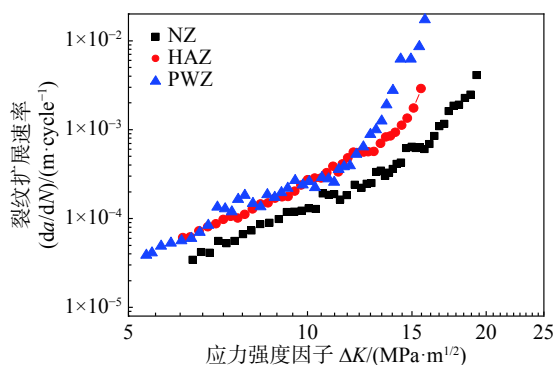


图 3 裂纹预制于不同区域的裂纹扩展速率曲线

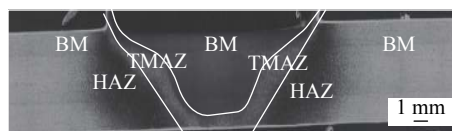
Fig. 3 Crack growth rate curves of cracks prefabricated in different regions

2.2 分析与讨论

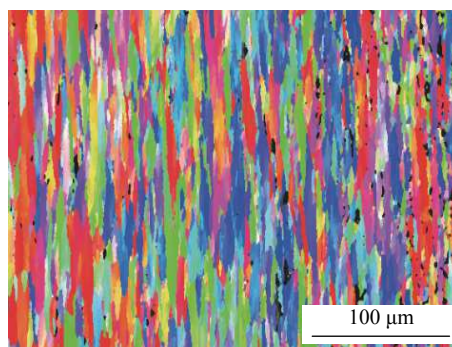
疲劳裂纹扩展速率是材料内在组织性能的宏观外在表现, 显微组织和残余应力对宏观疲劳裂纹的扩展有显著影响. 在 FSW 焊接过程中接头区域材料除了经受焊接热循环影响, 还受搅拌头的旋转与顶锻作用, 导致焊接区形成大小分布不均匀的微观组织结构, 如图 4 所示. 整个接头可分为焊核区 (NZ)、热力影响区 (TMAZ)、热影响区 (HAZ) 和母材 (BM). NZ 区由经动态再结晶形成的细小等轴晶粒组成, TMAZ 区较狭窄, 晶粒受机械搅拌作用被拉长变形, HAZ 区晶粒受热循环影响而长大.

通常, 材料晶粒越细小, 裂纹的扩展速率越快^[15]. 焊核区的裂纹扩展速率理应高于热影响区和垂直于焊缝区域的扩展速率. 但试验结果表明, 焊核区的裂纹扩展速率明显低于热影响区和垂直于焊缝区域. Jata 等学者提出, 搅拌摩擦焊不同区域

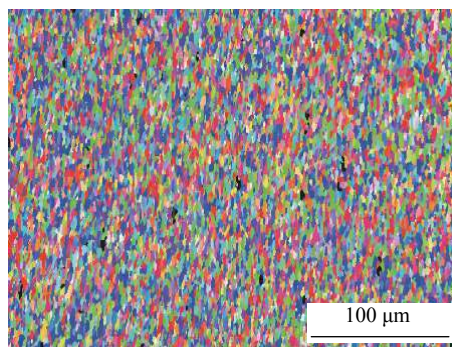
的裂纹扩展速率不仅由晶粒尺寸决定, 还取决于有效的残余压缩应力^[16]. 搅拌摩擦焊接区存在着 10~18 MPa 的横向压缩残余应力, 由于搅拌摩擦焊接过程在前进侧和返回侧的不对称性, 使得残余应力沿焊缝也呈非对称分布, 如图 5 所示.



(a) 宏观光学显微镜



(b) 热影响区附近 EBSD 图像



(c) 焊核区的 EBSD 图像

图 4 焊缝微观组织

Fig. 4 Microstructure of welding joint. (a) macroscopic optical micrograph; (b) EBSD images near the heat affected zone; (c) EBSD images near the weld nugget

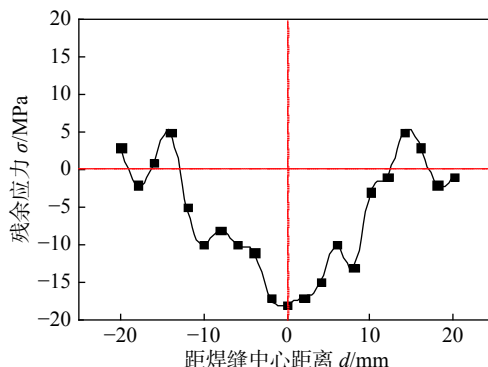


图 5 2A12-T4 搅拌摩擦焊缝横向残余应力分布

Fig. 5 2A12-T4 Friction stir welding lateral residual stress distribution

2A12-T4 FSW 试样的 NZ 平均晶粒尺寸比 BM 和 HAZ 的平均晶粒尺寸小, 这一定程度降低了焊核区的裂纹扩展抗力. 但由于焊核残余压应力的影响, 降低了疲劳裂纹扩展驱动力, 导致焊核区的裂纹扩展速率明显低于热影响区和垂直于焊缝方向. 在低应力强度因子范围内, 裂纹扩展较慢, HAZ 裂纹扩展速率与 PWZ 裂纹扩展速率相差不大. 随着 PWZ 裂纹从母材扩展进入焊缝, 由于焊核区存在一定的残余压应力, PWZ 的扩展速率出现明显的减缓, 裂纹扩展速率出现一段小平台. 在裂纹从焊缝重新进入母材时, 由于母材处的残余应力主要以拉应力为主, 导致裂纹扩展速率加快.

为了更深刻地揭示出 FSW 接头不同区域裂纹扩展速率差异的原因, 选取相同应力强度水平下的疲劳断口进行对比观察, 以便从微观的角度分析断裂机理. 分别选取了 $\Delta K = 6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (裂纹低速扩展)、 $\Delta K = 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (裂纹中速扩展)、 $\Delta K = 16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (裂纹高速扩展) 以及瞬断区的微观断口进行分析.

当 $\Delta K = 6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 时, 不同区域断口形貌如图 6 所示. 此时预制缺口于 NZ, HAZ, PWZ 试样的裂纹扩展速率分别为 1.48×10^{-5} , 5.54×10^{-5} , $5.29 \times 10^{-5} \text{ m/cycle}$, 3 个区域呈现了不同的断裂特征. NZ 区由于晶粒细小, 裂纹以沿晶扩展为主, 而 HAZ, PWZ 晶粒较粗大, 裂纹以穿晶扩展为主. HAZ 试样和 PWZ 试样可以观察到明显的疲劳条带, 而且疲劳条带间距相近, 如图 6b, 6c, 表明此时的裂纹扩展速率相近. 而在 NZ 区并未观察到明显疲劳条带, 如图 6a. 此外, 在 3 个区域还观察到了部分二次裂纹, HAZ, NZ 区二次裂纹明显多于 PWZ 试样.

当 $\Delta K = 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 时, 断口形貌如图 7 所示, 此时为裂纹中速扩展阶段, NZ, HAZ, PWZ 试样的裂纹扩展速率分别为 2.25×10^{-4} , 5.06×10^{-4} , $5.87 \times 10^{-4} \text{ m/cycle}$. HAZ 试样疲劳条带间距和 PWZ 试样条带间距仍然保持相近, 如图 7b, 7c, 表明此时 PWZ 试样疲劳裂纹扩展速率和 HAZ 试样的扩展速率相近. 此时的疲劳条带间距明显大于 $\Delta K = 6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 时的疲劳条带间距, 表现出更高的裂纹扩展速率. NZ 疲劳条带仍不明显, 如图 7a 所示.

当 $\Delta K = 16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 时, 断口形貌如图 8 所示, 此时 NZ, HAZ, PWZ 试样的裂纹扩展速率分别为 6.48×10^{-4} , 3.61×10^{-3} , $1.89 \times 10^{-2} \text{ m/cycle}$, 为

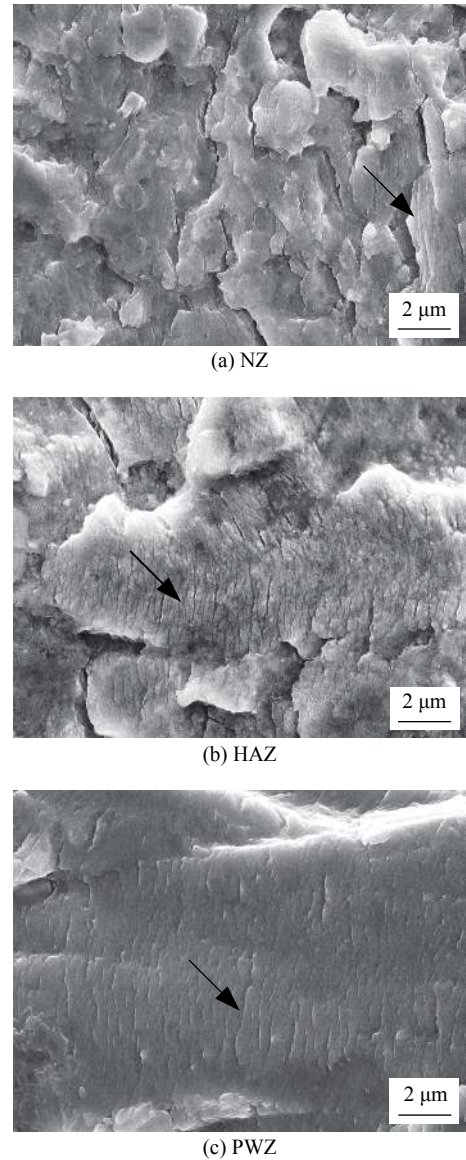


图 6 裂纹低速扩展阶段断口 SEM 组织形貌

Fig. 6 SEM microstructure of fracture at low-speed crack propagation stage. (a) NZ; (b) HAZ; (c) PWZ

裂纹扩展的高速阶段, 疲劳条带间距进一步增大, 其中 HAZ 试样疲劳条带间距较大, 展现了更高的裂纹扩展速率, 如图 8b, 8c. NZ 疲劳条带形貌仍然不明显, 如图 8a.

3 个扩展阶段, NZ 区均未观察到明显疲劳条带, 这主要是由于 NZ 区由动态再结晶组成的细晶组成.

图 9 为预置于 HAZ, NZ, PWZ 试样的瞬断区形貌. NZ 区断口成细小韧窝, HAZ 与 PWZ 试样韧窝深且大, PWZ 试样韧窝较 HAZ 试样密度大, 主要是由于 PWZ 试样最终断裂于母材, 而 HAZ 试样断裂于热影响区, 母材表现出比热影响区更好的韧性.

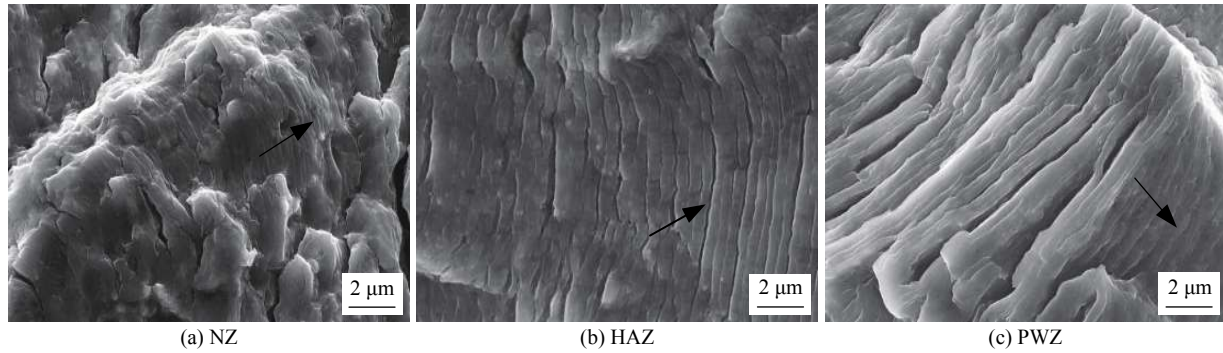


图 7 裂纹中速扩展阶段断口 SEM 组织形貌

Fig. 7 SEM microstructure of fracture at the stage of medium-speed crack growth. (a) NZ; (b) HAZ; (c) PWZ

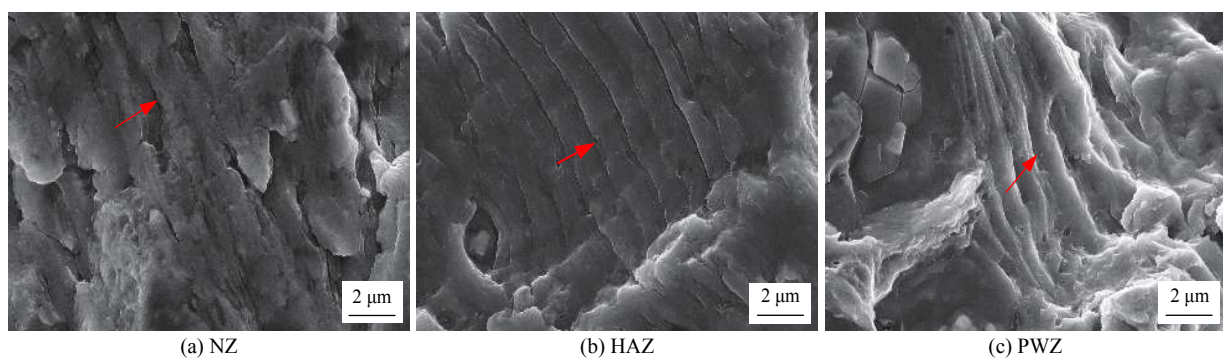


图 8 裂纹高速扩展阶段断口 SEM 组织形貌

Fig. 8 SEM microstructure of fracture at high-speed crack growth stage. (a) NZ; (b) HAZ; (c) PWZ

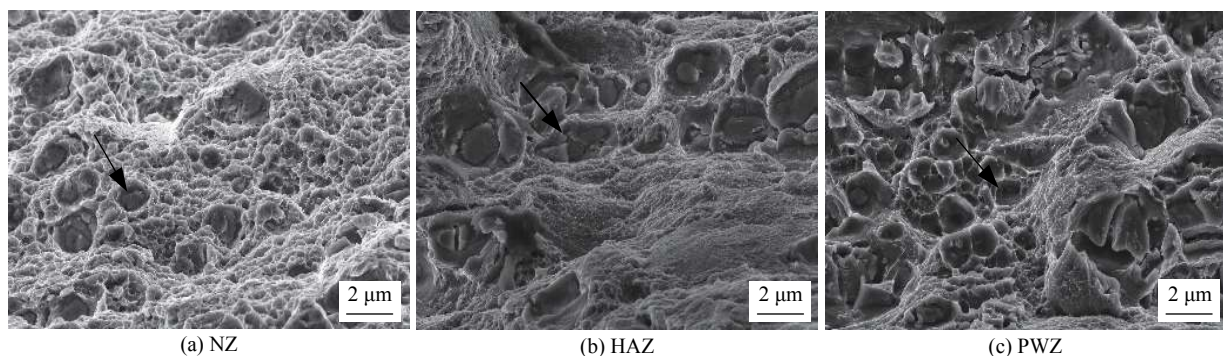


图 9 疲劳断口瞬断区 SEM 组织形貌

Fig. 9 Microstructure of SEM in the transient fracture zone of fatigue fracture. (a) NZ; (b) HAZ; (c) PWZ

3 结论

(1) 在低应力强度因子范围 (ΔK) 时, HAZ 和 PWZ 试样的扩展速率基本相同; 在高应力强度因子范围 (ΔK) 时, PWZ 试样的扩展速率逐渐高于 HAZ 试样. 在整个应力强度因子变化范围内, NZ 试样的扩展速率都低于 HAZ 和 PWZ 试样的扩展速率.

(2) 晶粒细化会降低 2A12-T4 FSW 铝合金抵

抗裂纹扩展的能力, 但由于焊接区残余压应力的存在, NZ 试样裂纹扩展速率的较低.

参考文献

- [1] 栾国红, 郭德伦, 关桥, 等. 飞机制造工业中的搅拌摩擦焊研究 [J]. 航空制造技术, 2002(10): 43 - 46.
Luan Guohong, Guo Delun, Guan Qiao. Research on friction stir welding in aircraft manufacturing industry[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2002(10): 43 - 46.

- [2] Kar-Erik K, Pekari B. Friction stir welding process goes commercial[J]. *Welding Journal*, 1997, 76(9): 55 – 56.
- [3] 徐春容, 王世忠, 徐蒋明. 搅拌摩擦焊技术在核工业中的应用[J]. *金属铸锻焊技术*, 2008(7): 122 – 124.
- Xu Chunrong, Wang Shizhong, Xu Jiangming. Application of friction stir welding technology in nuclear industry[J]. *Metal Casting and Forging Welding Technology*, 2008(7): 122 – 124.
- [4] Gerlich A, Su P, North T H. Tool penetration during friction stir spot welding of Al and Mg alloy[J]. *Journal of Materials Science*, 2005(40): 6473 – 6481.
- [5] Wang L, Hui L, Zhou S, *et al.* Effect of corrosive environment on fatigue property and crack propagation behavior of Al 2024 friction stir weld[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26: 2830 – 2837.
- [6] Besel Y, Besel M, Mercado U A, *et al.* Influence of local fatigue damage evolution on crack initiation behavior in a friction stir welded Al-Mg-Sc alloy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 99: 151 – 162.
- [7] 张海泉, 张彦华, 李刘合, 等. 力学失配对电子束焊接接头疲劳裂纹扩展行为的影响[J]. *焊接学报*, 2000, 21(3): 40 – 43.
- Zhang Haiquan, Zhang Yanhua, Li Liuhe, *et al.* Effect of mechanical mismatch on fatigue crack growth behavior of electron beam welded joints[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2000, 21(3): 40 – 43.
- [8] Yang J, Wang G Z, Xuan F Z, *et al.* Unified correlation of in-plane and out-of-plane constraint with fracture resistance of a dissimilar metal welded joint[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2014, 115(1): 296 – 307.
- [9] Zhu L, Tao X Y. The study of weld strength mismatch effect on limit loads of part surface and embedded flaws in plate[J]. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, 2016, 139–140: 61 – 68.
- [10] Trudel A, Sabourin M, Lévesque M, *et al.* Fatigue crack growth in the heat affected zone of a hydraulic turbine runner weld[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 66: 39 – 46.
- [11] 吴圣川, 周鑫森, 张卫华, 等. 激光-电弧复合焊接 7075-T6 铝合金裂纹扩展分析[J]. *焊接学报*, 2013, 34(2): 5 – 8.
- Wu Shengchuan, Zhou Xinmiao, Zhang Weihua, *et al.* Analysis of crack propagation in laser-arc hybrid welding 7075-T6 aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(2): 5 – 8.
- [12] John R, Jata K V, Sadananda K. Residual stress effects on near-threshold fatigue crack growth in friction stir welds in aerospace alloys[J]. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25: 939 – 948.
- [13] Bussu G, Irving P E. The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024-T351 aluminium joints[J]. *Scripta Materialia*, 2004, 51(3): 237 – 248.
- [14] Muzvidziwa M, Okazaki M, Suzuki K, *et al.* Role of microstructure on the fatigue crack propagation behavior of a friction stir welded Ti-6Al-4V[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2016, 652: 59 – 68.
- [15] 孟金奎, 王苹, 马健瀟, 等. 焊接残余应力对 7N01 铝合金疲劳裂纹扩展影响[J]. *焊接学报*, 2019, 40(9): 25 – 29.
- Meng Jinkui, Wang Ping, Ma Jianxiao, *et al.* Influence of welding residual stress in fatigue crack growth of 7N01 aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(9): 25 – 29.
- [16] 凌堃, 黄笑梅. 焊接接头热影响区裂纹启裂行为的探讨[J]. *焊接学报*, 2019, 40(1): 124 – 130.
- Ling Kun, Huang Xiaomei. Discussion of HAZ crack initiation behaviour of mismatched welded joints[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(1): 124 – 130.

第一作者: 王磊, 博士, 教授, 博士研究生导师; 主要从事航空材料及焊接结构强度评定、损伤修复与寿命分析的研究工作; Email: leiwang@sau.edu.cn

(编辑: 杨婉春)