

铝合金搅拌摩擦焊接头服役孔洞裂纹扩展规律

胡志力^{1,2}, 李 锦^{1,2}, 万心勇^{1,2}, 庞 秋³

(1. 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

(2. 汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430070)

(3. 武汉东湖学院, 湖北 武汉 430212)

摘 要: 以不同尺寸孔洞缺陷的 2024 铝合金搅拌摩擦焊接头为研究对象, 在对接头进行分区建模基础之上, 通过试验和有限元数值模拟研究了接头孔洞大小对接头服役裂纹扩展的影响规律。研究表明, 接头在准静态服役条件下, 力学性能随孔洞减小而不断提高; 孔洞直径减小至 0.1 mm 时, 接头力学性能与无缺陷接头相同, 断裂于热影响区; 而当孔洞直径大于 0.1 mm 时, 接头均断裂于含有孔洞缺陷的焊核区。在交变载荷服役条件下, 接头疲劳力学性能随孔洞减小而不断提高, 随孔洞增大对载荷的敏感性逐渐降低; 断裂的瞬间断口会有温升现象且均断裂于有孔洞缺陷的焊核区。

关键词: 铝合金搅拌摩擦焊接头; 裂纹扩展规律; 分区建模; 温升

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)03-0892-06

近年来, 为了实现汽车轻量化, 铝合金在汽车车身上得到了广泛应用, 成为了一种典型的轻量化材料^[1,2]。研究表明, 若汽车整车质量降低 10%, 燃油效率可提高 6%~8%, 排放降低 13%, 轻量化是节能减排最有效的途径之一。铝合金由于其有极强的氧化能力、较大的导热系数和比热容、线膨胀系数大、容易产生气孔等因素导致铝合金连接困难, 应用受限。为了解决铝合金连接难题, 国外通常采用搅拌摩擦焊(FSW)的方式, 这种固态连接方式具有优质、高效、焊接变形小、无污染等优点。目前, 关于铝合金 FSW 的研究主要集中在旋转速度、移动速度、顶端压力、压入深度等工艺参数的研究, 而在铝合金服役性能评价方面研究较少, 尤其是铝合金构件 FSW 过程中, 焊缝根部容易出现孔洞、微裂纹等缺陷^[3,4], 这些缺陷在服役过程中容易导致裂纹进一步扩展, 从而降低了力学性能和疲劳性能。因此, 研究铝合金 FSW 接头服役裂纹扩展规律, 对于铝合金 FSW 拼焊板在实际工程中的应用显得非常关键。

在断裂力学方面有很多学者对其进行了研究, 1913 年, Unger^[5]求解了无限大板中有一个椭圆孔的弹性力学精确分析。1921 年, 英国学者 Griffith^[6]最先应用能量法对玻璃、陶瓷等脆性材料进行了断裂分析。1948 年, Irwin^[7]对 Griffith 的理论进行了修正, 引进了能量释放率; 能量释放率理论适用于金属材料的准

脆性破坏。2013 年, 宋占勋^[8]研究了钢 T 形焊接接头根部裂纹应力强度因子。结果表明, 几何参数与应力强度因子有关。2015 年, 樊俊铃^[9]研究了 Ti-6Al-4V 合金的弹塑性疲劳裂纹扩展行为。结果表明, 温升信号和裂纹扩展速率、应力强度因子之间存在幂函数关系。目前, 关于断裂力学方面的研究主要是岩石、玻璃等脆性材料的断裂或者铝、钢等金属材料的准脆性断裂。目前, 金属材料的弹塑性破坏由于数值模拟收敛性差的原因研究较少。在拼焊建模上也有部分学者对其进行了研究, 2004 年, 加拿大的 Raymond 等人^[10]研究了不同焊缝建模方式对数值模拟结果的影响。研究发现, 建模方式对拼焊板冲压成形过程的数值模拟精度有很大的影响。2007 年, 印度的 Panda 等人^[11]直接用刚性节点将两侧的焊缝连接起来, 忽略了焊缝的性能和尺寸, 结果发现模拟的结果不够准确。2003 年, 日本学者 Fujii^[12]研究了不同焊接参数下拼焊接头的力学性能和断口位置。结果表明, 焊接参数对拼焊接头的力学性能和断口位置影响很大。2010 年, 美国的 Garware^[13]等人研究了 5754 铝合金 FSW 接头的静拉伸和拉伸疲劳行为, 发现拼焊接头的高周疲劳周期高于母材。2014 年, 法国的 Jolu^[14]等人研究了铝合金表面氧化物和初始间距对 2198 铝合金拼焊接头的拉伸和疲劳性能的影响。发现当铝合金氧化物在特殊位置和初始间距对拼焊接头力学性能有影响。目前, 关于

收稿日期: 2018-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(51405358); 中国汽车产业创新发展联合基金(U1564202); 新能源汽车科学与关键技术学科创新引智基地(B17034); 上海市复杂薄板结构数字化制造重点实验室开放课题(2017002)

作者简介: 胡志力, 男, 1983 年生, 博士, 副教授, 武汉理工大学汽车工程学院, 湖北 武汉 430070, 电话: 027-87856733, E-mail: zhilihuhit@163.com

铝合金 FSW 研究主要对象是焊接工艺参数和组织对性能的影响，内部孔洞缺陷对于拼焊接头的裂纹扩展规律未见研究。

传统金属整体板进行裂纹扩展分析主要是基于线弹性的疲劳裂纹扩展分析，没有考虑塑性参数的影响。因此，不能用于铝合金准静态裂纹扩展分析；与传统钢拼焊板建模相比，由于钢的激光拼焊板主要将接头分为 3 个区域不能适用于铝合金拼焊板，而铝合金拼焊板高速拼焊时容易导致形状不规则的孔洞缺陷，孔洞缺陷对力学性能的影响极大，因此迫切需要建立精准的带有孔洞的拼焊接头模型来研究裂纹扩展规律；为了解决上述难题，以带有孔洞缺陷的铝合金 FSW 拼焊板为研究对象，在对带有孔洞的拼焊接头进行合理的简化和分区基础之上，建立了精准的带有孔洞的拼焊接头分区有限元模型，通过所建立有限元模型研究了孔洞大小对于接头处裂纹扩展规律的影响。从而指导后期铝合金 FSW 拼焊板在实际工程中的使用。

1 裂纹扩展路径理论分析

采用最大主应力准则来计算不同裂纹长度裂纹尖端的应力强度因子。最大主应力准则的基本假设是^[15]：第 1，裂纹沿最大周向力的方向开裂；第 2，当此方向的周向应力达临界值时，裂纹失稳扩展。最大主应力断裂准则为：

$$\sigma_r = \frac{\cos \frac{\theta}{2}}{2\sqrt{2r}} K_I (3 - \cos \theta) \tag{1}$$

$$\sigma_\theta = \frac{\cos \frac{\theta}{2}}{2\sqrt{2r}} K_I (1 + \cos \theta) \tag{2}$$

$$\tau_\theta = \frac{\cos \frac{\theta}{2}}{2\sqrt{2r}} K_I \sin \theta \tag{3}$$

根据上述的假定，可用：

$$\frac{\partial_{\sigma_\theta}(K_I, \theta)}{\theta} = 0 \tag{4}$$

裂纹的开裂方向与裂纹面的夹角，即开裂角 θ_0 。将 σ_θ 的表达式 (10) 代入到上式 (12) 计算得到：

$$K_I \sin \theta = 0 \tag{5}$$

式中， r 为径向坐标， θ 为角坐标， K_I 为 I 型的应力强度因子。

当裂纹为纯 I 型时，则 $\theta=0$ 。裂纹的开裂方向与裂纹面的夹角为 0。因此，通过理论计算可得当裂纹为纯 I 型时其将沿着水平方向开裂。

2 实验

2.1 实验材料

进行准静态裂纹扩展分析时，选取的研究对象是在焊速为 1000 mm/min，搅拌头转速分别为 1400、1500 和 1600 r/min 的焊接工艺参数下焊接的 3 种 2024 铝合金拼焊板，在此工艺参数下接头出现孔洞缺陷，其孔洞直径分别为 0.5、1.0 和 0.4 mm，拼焊接头孔洞大小如图 1 所示。试样通过线切割加工得到，拉伸试样如图 2 所示。疲劳试验选取的试验对象是孔洞尺寸最大的拼焊接头，疲劳试样如图 3 所示。

疲劳试验采用 INSTRON1341 电液伺服材料试验机，疲劳试验施加载荷应力比为 $R=0.1$ ，频率为 12 Hz，应力大小分别为 70 和 60 MPa，研究接头疲劳力学性能。采用 Fotric 红外热像仪检测试验中试样断裂瞬间能量的释放，研究断裂处的温升现象。

2.2 有限元模拟

2.2.1 有限元建模

由于拼焊接头具有非常明显的力学性能不均匀特点，因此接头有限元建模时将 FSW 接头划分为焊核区 (WNZ)、热机影响区 (TMAZ)、热影响区 (HAZ) 以及母材区 (BM) 4 个区域并赋予不同的材料属性。WNZ、TMAZ 和 HAZ 的宽度分别为 8、1 和 3 mm，分区模型以及孔洞与拉伸方向的位置关系如图 4 所示。单向

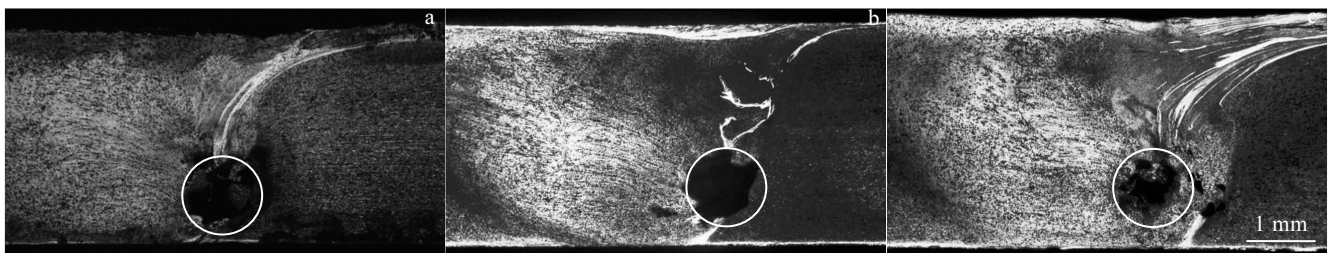


图 1 FSW 接头孔洞大小

Fig.1 FSW hole size: (a) 0.5 mm, (b) 1.0 mm, and (c) 0.4 mm

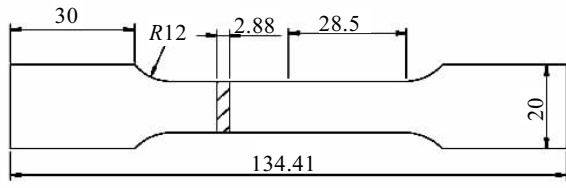


图 2 拉伸试样尺寸图

Fig.2 Tensile specimen dimensions

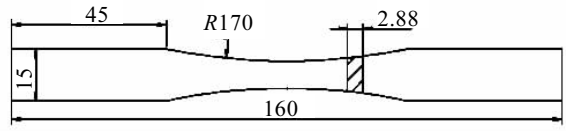


图 3 疲劳试样尺寸图

Fig.3 Fatigue specimen dimensions



图 4 有限元分区模型与孔洞与拉伸方向的位置

Fig.4 Finite element partition model and relationship between hole and direction of the drawing

表 1 焊接接头力学性能

Table 1 Mechanical properties of welded joints

Alloy	E/GPa	σ_s/MPa	σ_b/MPa	ν
WNZ	72.4	108	378	0.33
TMAZ	72.4	99	359	0.33
HAZ	72.4	72	293	0.33
BM	72.4	90	338	0.33

拉伸试验参考的是 GB/T228-2002 《金属材料室温拉伸试验方法》，在各个区域取样进而做各分区材料微拉伸试验，测得的 2024 铝合金 FSW 接头各区域力学性能如表 1 所示。

2.2.2 准静态裂纹扩展数值模拟

采用 ABAQUS 对孔洞直径分别为 0、0.1、0.4、0.5、和 1.0 mm 拼焊接头进行准静态裂纹扩展数值模拟分析。采用实际模型的 1/2 进行准静态裂纹扩展数值模拟。有限元模型的网格尺寸为 0.1 mm，网格类型为

C3D8R，为了提高计算的准确性，在裂纹扩展区域加大网格密度，网格数量为 22 038 个。具体研究了不同孔洞大小时最大载荷值、内能值及其规律和断口位置。

2.2.3 疲劳裂纹扩展数值模拟

选择孔洞直径为 1.2、1.0 和 0.8 mm 拼焊接头进行疲劳裂纹扩展数值模拟分析，具体分析了拼焊接头在施加载荷的应力比为 $R=0.1$ ，频率为 12 Hz，大小为 60、62、64、66、68、70 MPa 情况下所能承受载荷次数、断裂瞬时能量的释放和断口位置。进行疲劳裂纹扩展分析时，Paris 公式中 C 和 n 2 个基本参数如表 2 所示。

能量释放率值通过能量释放率 G 和应力强度因子 K_I 之间的关系来确定。具体关系如下：

$$G = \frac{(\kappa + 1)K_I^2}{4\nu} \quad (6)$$

式中，当为平面应变时：

$$\kappa = 3 - 4\nu \quad (7)$$

式中，当为平面应力时：

$$\kappa = \frac{3 - \nu}{1 + \nu} \quad (8)$$

可以写成：

$$G = \frac{K_I^2}{E'} \quad (9)$$

当为平面应变时：

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (10)$$

当为平面应力时：

$$E' = E \quad (11)$$

式中， E 为弹性模量(MPa)， ν 为泊松比， G 为能量释放率(N/mm)， K_{IC} 为强度因子($\text{MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$)。

通过查阅文献可知^[16]，铝合金 2024 的断裂韧度 $K_{IC}=788.9 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ 。根据公式(8)、(9)：

$$G_{IC} = \frac{(1 - 0.33^2)788.9^2}{72400} = 7.66 \text{ N/mm}$$

稳态扩展区的疲劳裂纹扩展速率方程一般都是基于能量释放率和应力强度因子 2 种形式的，其具体关系式如下所示，采用能量释放率的方式来确定裂纹扩展的速率。

$$da/dN = C_3 \Delta G^{N_4} \quad (12)$$

$$da/dN = C_1 \Delta K^{N_2} \quad (13)$$

将 (8)、(9) 代入公式 (11) 中可得：

表 2 Paris 参数

Table 2 Paris parameters

Alloy	E/GPa	ν	C	n
2024	72.4	0.33	3.45×10^{-7}	8

$$da/dN = C_3 \left[\left(\frac{1-\nu^2}{E} \right) K^2 \right]^{N_4} \quad (14)$$

然后将公式 (13) 代入到 (12) 可得:

$$C_3 = \left(\frac{1-\nu^2}{E} \right) C_1 \quad N_4 = \frac{N_2}{2} \quad (15)$$

因此: $C_3=0.028, N_4=4$ 。

3 结果与分析

3.1 准静态裂纹扩展数值模拟和单向拉伸试验讨论

图 5 给出了单向拉伸试验和数值模拟下载荷-位移关系和断口图。在 FSW 接头孔洞直径为 0.4、0.5 和 1.0 mm 时, 拼焊板实际所能承受的最大载荷分别为 7764、7060、6098 N; 模拟结果所得到的载荷值分别为 8890、7706、6947 N。结果发现, 数值模拟得到的最大载荷值与试验的实际值相比, 实际的载荷数值偏小; 这是由于在进行准静态裂纹扩展分析时, 没有考虑由于受热不均而导致的残余应力的影响。但是试验和模拟均表明在孔洞直径为 1.0 mm 的 FSW 接头所能承受的载荷值最低, 其次是孔洞直径为 0.5 mm 的 FSW 接头, 性能最好的是孔洞直径为 0.4 mm 的 FSW 接头。其次观察断口可知, 在 FSW 接头孔洞直径为 0.4、0.5 和 1.0 mm 时, 断裂均发生在有孔洞缺陷的 WNZ, 且都是一条水平线, 准静态模拟结果与试验所得到吻合。根据数值模拟结果 (图 5), 发现接头力学性能随孔洞直径减小而不断提高, 孔洞直径降低至 0.1 mm 时, 接头力学性能与无缺陷接头基本相同, 最后断裂于 HAZ。而当孔洞直径大于 0.1 mm 时, 接头均断裂于有孔洞缺陷的 WNZ。

图 6 给出了接头孔洞直径为 0.1、0.4、0.5 和 1.0 mm 时数值模拟得到的位移-能量图。根据数值模拟结果发现 FSW 拼焊板断裂能量随孔洞直径减小而不断提高,

当能量达到最大值时, 随着位移进一步增加, 能量有轻微的下降; 这主要是由于当模型断裂时, 其外力逐渐减小, 模型会释放出储存的弹性应变能, 因而当模型完全断裂时, 能量会有一定的下降。

结合图 5 和图 6 进行分析, 在搅拌头转速不同的工艺参数下拼焊板所能承受的最大载荷和断裂能量有较大的不同, 原因在于: 在拼焊接头处产生贯穿孔越大, 贯穿孔区域的应力集中现象越明显, 其他区域材料未发生屈服或者较大屈服, 试件已经完全断裂。因此, 试验伸长率、最大载荷和断裂能量均会越小。根据上述准静态裂纹扩展数值模拟和单向拉伸试验发现, 数值模拟的不同焊接工艺参数下, 最大载荷值及其规律、断口位置与试验得到的实际情况均吻合。

3.2 疲劳裂纹扩展数值模拟和疲劳试验

当接头承受应力比为 0.1 (疲劳试验中一个载荷循环内的最小应力与最大应力之比), 频率为 12 Hz, 应力分别为 60 和 70 MPa 时, 试验测得循环次数分别为 2672 和 641 次; 数值模拟所对应的循环次数分别为 2684 和 771 次, 两者较为吻合, 如图 7 所示。接头疲劳循环次数随孔洞直径减小而不断提高, 对疲劳应力的敏感性也越强。对比图 7 中试样疲劳断口和图 8 中数值模拟疲劳断口结果, 发现接头在承受交变载荷时, 断于 WNZ 孔洞缺陷处, 未见明显的颈缩现象, 断口为一条水平的直线。

疲劳试验的温升结果如图 9 所示, 室温为 25.2℃, 试样断口温度为 28℃, 试样断口表面温升为 2.8℃。根据图 10 疲劳数值模拟内能图, 在裂纹没有扩展时, 内能释放很少, 随着裂纹扩展, 内能缓慢增加, 当试样完全断裂时, 大量内能释放, 因此试样断口表面会产生温升现象。

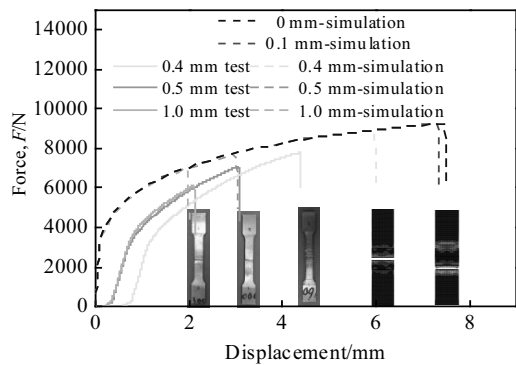


图 5 模拟和试验载荷-位移曲线和断口对比图

Fig.5 Simulation and test force-displacement curves and fracture image of the FSW joint

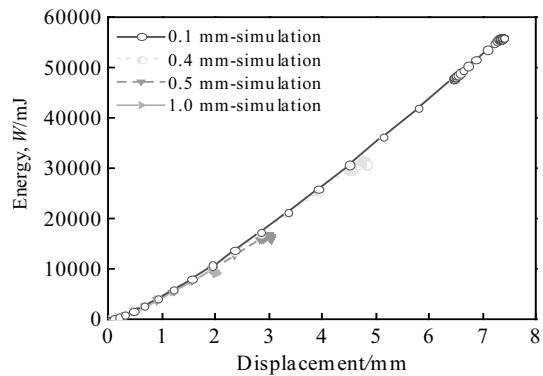


图 6 准静态数值模拟能量-位移图

Fig.6 Energy-displacement curves of quasi-static numerical simulation

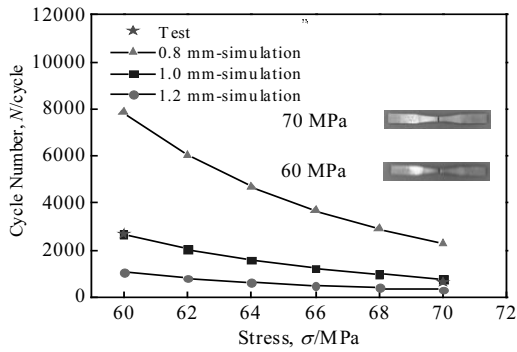


图 7 拼焊接头循环次数与疲劳应力的关系

Fig.7 Relationship of cycle number and fatigue stress of the joints



图 8 疲劳裂纹扩展图

Fig.8 Fatigue crack propagation process

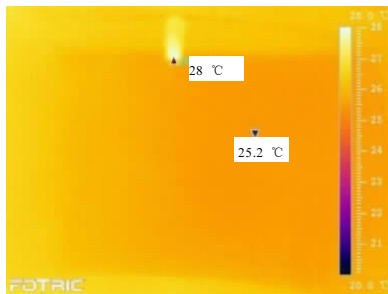


图 9 疲劳试验断口温升

Fig.9 Temperature rise of the fatigue test fracture

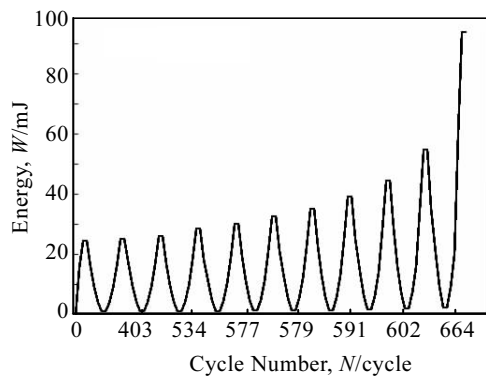


图 10 疲劳数值模拟内能图

Fig.10 Fatigue numerical simulation of energy curve

4 结 论

1) 建立的铝合金 FSW 拼焊板分区有限元模型能准确预测拼焊板接头在服役期间的力学性能和裂纹扩展规律。

2) 在准静态服役条件下, 接头力学性能随孔洞直径减小而不断提高, 孔洞直径降低至 0.1 mm 时, 接头力学性能与无缺陷接头基本相同, 最后断裂于 HAZ; 而当孔洞直径大于 0.1 mm 时, 接头均断裂于有孔洞缺陷的 WNZ; 断裂能量也随孔洞直径减小而不断提高, 当能量达到最大值时, 随着位移进一步增加, 能量有轻微的下降。

3) 接头疲劳力学性能随孔洞直径减小而不断提高。接头的疲劳性能随孔洞直径增大对载荷的敏感性也逐渐降低, 均断裂于含有孔洞缺陷的 WNZ, 断裂口为一条水平的直线且没有明显的颈缩现象。

4) 在铝合金 FSW 拼焊板疲劳断裂瞬间, FSW 接头断口会释放大量的能量, 宏观上表象为温升现象且温升值为 2.8 °C。

参考文献 References

[1] Borrisutthekul R, Miyashita Y *et al. Science & Technology of Advanced Materials*[J], 2005, 6(2): 199

[2] Pickett A K, Pyttel T, Payen F *et al. International Journal of Impact Engineering*[J], 2004, 30: 853

[3] Ma Guodong(马国栋). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Beijing: Beijing Jiao Tong University, 2016

[4] Chen Zhiying(陈志英). *Thesis for Doctorate(博士论文)*[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009

[5] Unger D J. *Journal of Elasticity*[J], 2014, 117 (2) : 139

[6] Griffith A A. *Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences*[J], 1921, A221: 163

[7] Irwin G R. *Journal of Applied Mechanics*[J], 1957, 24: 361

[8] Song Zhanxun(宋占勋), Fang Shaoxuan(方少轩), Xie Jilong(谢基龙). *Journal of Mechanical Engineering(机械工程学报)*[J], 2013 (2): 87

[9] Fan Junling(樊俊铃), Guo Xinglin(郭杏林). *Journal of Mechanical Engineering(机械工程学报)*[J], 2015(10): 33

[10] Raymond S D, Wild P M, Bayley C J. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2004, 147 (1) : 28

[11] Panda S K, Kumar D R, Kumar H *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2007, 183(2): 321

[12] Liu H, Maeda M, Fujii H *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2003, 22(1): 41

- [13] Garware M, Kridli G T, Mallick P K. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2010, 19(8): 1161
- [14] Jolu T L, Morgeneyer T F, Denquin A *et al. International Journal of Fatigue*[J], 2015, 70: 463
- [15] Zhong Jifa(钟继发). *Thesis for Master(硕士学位论文)*[D]. Changsha: Central South University, 2014
- [16] Gao Yunzhen(高云震). *Fracture Toughness of Aluminum Alloy(铝合金的断裂韧性)*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1980

Crack Propagation Law of Holes in Aluminum Alloy Friction Stir Welding Joint

Hu Zhili^{1,2}, Li Jin^{1,2}, Wan Xinyong^{1,2}, Pang Qiu³

(1. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan 430070, China)

(2. Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology, Wuhan 430070, China)

(3. Wuhan Donghu University, Wuhan 430212, China)

Abstract: Based on the partition modeling of the FSW joint with holes for 2024 aluminum alloy, the influence of the joint hole size on crack propagation was studied by experiments and finite element simulation. The results show that the mechanical properties of the joint increase with the decrease of the hole size under quasi-static service conditions. When the hole diameter is less than 0.1 mm the mechanical properties of the joint are basically the same as those without the defect and the fracture occurs in the heat affected zone. The weld nugget zone (WNZ) with hole defect fractures when the diameter of the hole is larger than 0.1 mm. The fatigue properties of the joint increase with the decrease of the hole size under the condition of fatigue load, and the sensitivity to the load decreases gradually with the increase of the hole size; there will be a temperature rise in the fracture and the fracture always takes place in the WNZ with the hole defect.

Key words: aluminum alloy FSW joint; crack propagation; partition modeling; temperature rise

Corresponding author: Pang Qiu, Ph. D., Wuhan Donghu University, Wuhan 430212, P. R. China, Tel: 0086-27-87856733, E-mail: pquhit@126.com