

基于 J 积分的复合型疲劳裂纹扩展分析

吴鹏飞, 杨邦成

(昆明理工大学 建筑工程学院, 昆明 650504)

摘要:为研究 I 型(张开型)、II 型(剪开型)复合裂纹的扩展行为,通过数值方法结合试验数据分析 I-II 复合型(30° 、 45° 、 60°)加载下 AA7075 材料高周疲劳裂纹扩展,分别利用等效应力强度因子幅值(ΔK^*)和循环 J 积分(ΔJ)描述疲劳裂纹扩展速率,给出相应的 Paris 公式表达式;推导 ΔK^* 与 ΔJ 在线弹性断裂力学理论下两者之间的关系式。结果表明:所推导的 ΔK^* 与 ΔJ 理论关系式可以提供与数值方法相同的结果;由于等效应力强度因子均需经验公式复合获得,利用 ΔJ 能有效代替 ΔK^* 作为参数描述高周复合型疲劳裂纹扩展速率。

关键词:复合型裂纹;高周疲劳;等效应力强度因子幅值;循环 J 积分;裂纹扩展速率

中图分类号:O346.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)06-0326-08

在断裂力学中通过试验研究结构疲劳破坏主要分为高周和低周疲劳裂纹扩展,高周疲劳破坏由于低应力高频率的特点裂纹尖端塑性区较小通常按照线弹性断裂力学(LEFM)的方法研究,疲劳裂纹扩展速率常采用著名的 Paris 公式表示。苏少普等^[1]研究了紧凑拉伸剪切结构的复合型疲劳裂纹扩展,利用多种等效应力强度因子幅公式预测材料疲劳寿命;熊勋等^[2]通过实验及有限元仿真研究了 CT 试件疲劳裂纹扩展及利用 Paris 进行寿命预测。Sajith 等^[3]利用多种等效应力强度因子幅经验公式研究了复合疲劳裂纹扩展。在 I-II 复合型加载下由于裂纹尖端有 K_I 、 K_{II} ,研究者们通过实验方法给出了多种求解裂纹尖端等效应力强度因子幅值(ΔK^*)的经验公式,对于准确描述裂纹扩展速率存在一定的缺陷。

J 积分作为弹塑性断裂力学中十分重要的参量,同线弹性断裂力学中应力强度因子一样,能够准确描述裂纹尖端区域的应力应变场常被用于高应力低循环的低周疲劳裂纹扩展中^[4]。由于 J 积分表达式分为线弹性部分和弹塑性部分表明 J 积分不仅能用于弹塑性,在小范围屈服状态下也能很好地作为线弹性疲劳裂纹扩展参量并避免了在复

合加载下 K 因子需要等效的劣势。Tanaka 等^[5-6]首先提出了以循环 J 积分作为疲劳裂纹扩展的判断并利用 J 积分方法研究了扭转荷载下钢材的疲劳裂纹扩展;Li 等^[7]利用 J 积分研究了钢材在不同应力比下的疲劳裂纹扩展规律;Wang 等^[8]利用循环 J 积分预测了疲劳裂纹扩展速率得到了较好的结果。 J 积分用于高周疲劳裂纹扩展学者们主要集中在中低强度材料弹塑性裂纹扩展速率的研究中,对于复合型加载下利用 J 积分描述疲劳裂纹扩展速率鲜有研究。

本文将结合试验数据利用有限元软件 ABAQUS、FRANC3D 联合模拟疲劳裂纹扩展过程,计算裂纹尖端应力强度因子及 J 积分,分别采用 ΔK^* 和 ΔJ 描述 I 型及 I-II 复合型加载下高周疲劳裂纹扩展速率,分析使用 ΔK^* 和 ΔJ 近似在描述 Paris 公式中的应用,并简单推导 ΔK^* 与 ΔJ 关系的表达式,利用有限元结果给予验证。

1 基础理论

1.1 J 积分理论

断裂力学中, I-II 复合型裂纹尖端应力和应变场可以组合为

收稿日期:2022-01-26

作者简介:吴鹏飞(1997—),男,湖北孝感人,昆明理工大学建筑工程学院,硕士研究生,研究方向为材料疲劳与断裂分析;通信作者杨邦成(1965—),男,四川成都人,昆明理工大学建筑工程学院,教授,硕士,研究方向为损伤与断裂。

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\right) \\ \sigma_{\theta\theta} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \sigma_{r\theta} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \\ u_r = \frac{(1+\mu)}{2E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left\{ K_I \left[(5-8\mu) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right] + K_{II} \left[(9-8\mu) \sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \right] \right\} \\ u_\theta = \frac{(1+\mu)}{2E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left\{ K_I \left[(7-8\mu) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right] + K_{II} \left[(8\mu-3) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right] \right\} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_r 、 u_θ 分别为裂纹尖端处径向和切向应变分量; K_I 和 K_{II} 分别为张开型和滑开型应力强度因子。 J 积分定义式为

$$J = \int_{\Gamma} (W dx_2 - T_m \partial u_m / \partial x_1 ds) \quad (2)$$

式中: Γ 为始于裂纹下表面终于上表面的积分回路; W 为回路上任一点的应变能密度; T_m 为回路上任一点应力分量; u_m 为回路上任一点位移分量; ds 为回路上的弧元。

将复合型裂纹尖端应力应变场代入应变能密度公式, 取以裂纹尖端为中心半径为 r 的圆周进行积分化简得到线弹性状态下 J 积分与应力强度因子的关系式:

$$J = \frac{(1-\mu^2)(K_I^2 + K_{II}^2)}{E} = \frac{K_I^2 + K_{II}^2}{E'} \quad (3)$$

平面应力状态下 $E' = E$ 。

1.2 循环 J 积分

将循环 J 积分用于描述疲劳裂纹扩展速率一直都是困扰研究者的一个难题, 目前主要的循环 J 积分定义主要有: 实用 J 积分及等线积分 ΔJ 。实用 J 积分由于其需要对每一种结构进行定义, 很难应用到工程上。Tanaka^[5]在 1983 年利用形变功理论给出了循环 J 积分理论公式:

$$\Delta J_{j/i} = \int_{\Gamma} (\Delta W dx_2 - \Delta T_m \partial \Delta u_m / \partial x_1 ds) \quad (4)$$

循环 J 积分只与加载从 i 到 j 的变化有关, 与积分路径无关。式(4)中, ΔW 、 ΔT_m 、 Δu_m 分别为给定的两种状态对应值的相对变化, 分别为

$$\Delta W = \int_{(\epsilon_{mm})_i}^{(\epsilon_{mm})_j} [\sigma_{kl} - (\sigma_{mm})_i] d\epsilon_{kl} \quad (5)$$

$$\Delta T_m = (T_m)_j - (T_m)_i \quad (6)$$

$$\Delta u_m = (u_m)_j - (u_m)_i \quad (7)$$

当结构在线弹性状态下即小范围屈服时弹性裂纹的循环 J 积分具有以下形式:

$$\Delta J_{j/i} = \int_{\Gamma} (\Delta \sigma_{mm} \Delta \epsilon_{mm} / 2 dx_2 - \Delta T_m \partial \Delta u_m / \partial x_1 ds) \quad (8)$$

并得到其与应力强度因子幅值的关系:

$$\Delta J_{j/i} = \frac{\Delta K_{j/i}^2}{E} (\text{平面应力}) \quad (9)$$

式中, $\Delta K_{j/i} = K_j - K_i$ 。

式(9)基于纯 I 型加载条件下推导出来, 对于复合型加载条件下未做说明, 蔡永梅等^[9]将式(9)应用于纯 I 型和纯 II 型加载条件下的推导, 并利用有限元软件验证了结果与理论推导的正确性。

I-II 复合型加载下, 结合 J 积分和循环 J 积分理论及其与应力强度因子的关系, 将循环 J 积分用于复合型加载下的疲劳裂纹扩展中。类似于应力强度因子将 ΔJ 人为分成 ΔJ_I 和 ΔJ_{II} :

$$\Delta J_I = \frac{(1+r) \Delta K_I^2}{(1-r)E}, \quad \Delta J_{II} = \frac{(1+r) \Delta K_{II}^2}{(1-r)E} \quad (10)$$

$$\Delta J = \Delta J_I + \Delta J_{II} = \frac{(1+r)(\Delta K_I^2 + \Delta K_{II}^2)}{(1-r)E} \quad (11)$$

式中: $\Delta K_I = K_{I \max} - K_{I \min}$; $\Delta K_{II} = K_{II \max} - K_{II \min}$; r 为交变荷载的应力比。

工程中在复合加载下由于应力强度因子分为 I 型和 II 型, 表示起来较为复杂, 通常将其利用经验公式等效为等效应力强度因子进行计算。本文采用了 Irwin^[10]的等效应力强度因子幅值模型:

$$\Delta K^* = \sqrt{\Delta K_I^2 + \Delta K_{II}^2} \quad (12)$$

综合 ΔJ 与 ΔK^* 等式得到线弹性复合型疲劳裂纹循环 J 积分与等效应力强度因子表达式:

$$\Delta J = \frac{(1+r) \Delta K^{*2}}{(1-r)E} \quad (13)$$

1.3 基于 J 积分的 Paris 公式

在高周恒幅荷载下, 通过 $\lg da/dN - \lg \Delta K^*$ 曲

线(图 1)可以准确描述裂纹 3 个阶段。在第 I 阶段内 ΔK^* 小于门槛值,裂纹基本不扩展;第 II 阶段为裂纹稳定扩展阶段,曲线几乎呈一条直线,这一阶段也是裂纹扩展主要研究的部分;第 III 阶段为裂纹快速扩展阶段,裂纹扩展速率急剧增快直至断裂。

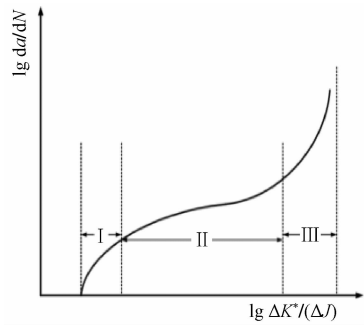


图 1 lg da/dN-lg ΔK* 曲线

在裂纹稳定扩展阶段,为了描述疲劳裂纹扩展速率,Paris 提出了应用最为广泛的 Paris 公式^[11]:

$$\frac{da}{dN} = C_k (\Delta K)^{m_k} \tag{14}$$

类似于使用应力强度因子幅值描述裂纹扩展速率,尝试使用循环 J 积分代替应力强度因子幅值描述裂纹扩展速率,写成如下类似 Paris 公式的形式:

$$\frac{da}{dN} = C_j (\Delta J)^{m_j} \tag{15}$$

式(14)、式(15)中, C_k 、 m_k 、 C_j 、 m_j 分别为基于 ΔK 、 ΔJ 表示的 Paris 公式的材料常数。

2 试验方案及有限元建模

试验中采用的材料为 4 mm 厚 AA7075-T6 合金板材,材料的尺寸如图 2 所示;力学性能已根据国家标准在室温下进行单轴拉伸实验测得,如图 3、

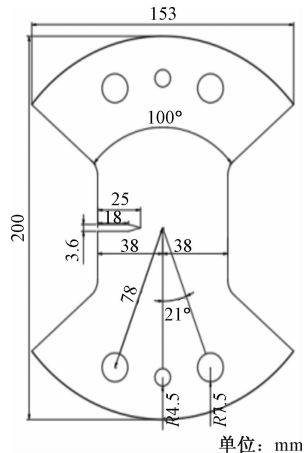


图 2 试件尺寸

表 1 所示。试验夹具为自行设计改进的 Arcan 夹具利用 MTS809 试验机完成材料疲劳裂纹扩展试验,试验装置如图 4 所示。经过多次验证给出加载方式及边界条件,施加的正弦交变荷载, $P_{max} = 3 \text{ kN}$ 、 $P_{min} = 0.3 \text{ kN}$,应力比 R 为 0.1, $f = 10 \text{ Hz}$,周期为 $T = 0.1 \text{ s}$ 。在每次实验开始前预制 1 mm 的疲劳裂纹。

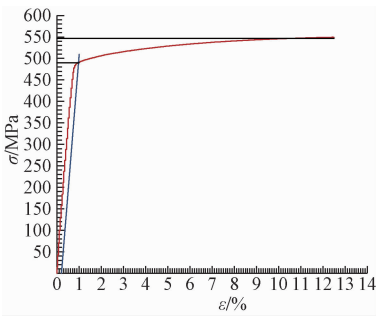


图 3 材料应力-应变曲线

表 1 AA7075-T6 材料力学性质

抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	弹性模量 E /MPa	伸长率 δ /%
547	490	71 523	11

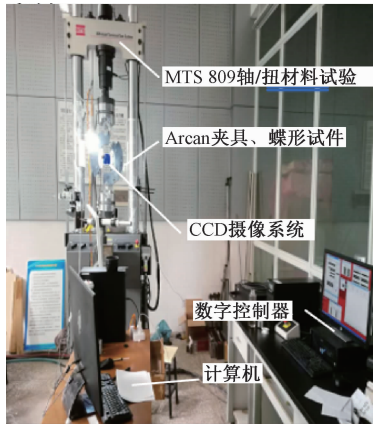


图 4 试验装置

依据试验条件,利用 ABAQUS 建立与试验最大程度吻合的不含初始裂纹的三维有限元模型,固定模型一端的加载孔,在另一端施加循环交变荷载,导入 FRANC3D 中截取裂纹扩展范围并在机械切口尖端插入 $a = 1 \text{ mm}$ 、 $b = 3 \text{ mm}$ 长轴与机械切口尖端重合的椭圆形初始裂纹并划分网格,FRANC3D 由于其自适应网格划分方法在裂纹尖端形成一圈半径为 0.1 mm 规则的四面体网格用于解决裂纹尖端的奇异性,如图 5、图 6 所示。

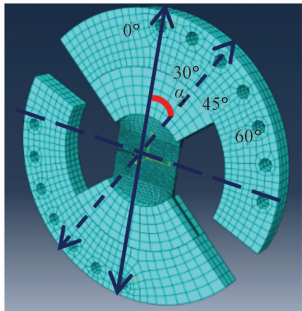


图 5 有限元模型

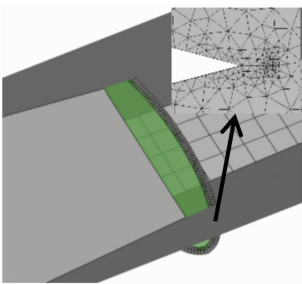


图 6 初始裂纹及尖端网格

3 有限元计算结果验证

利用对纯 I 型加载条件下疲劳裂纹扩展有限元计算结果与理论值进行对比验证有限元计算的正确性。分别在 ABAQUS 中采用围线积分进行准静态分析得到裂纹扩展到指定长度时的裂纹尖端应力强度因子、FRANC3D 中采用 M -积分计算裂纹尖端应力强度因子,输入通过实验获得的 Paris 公式材料常数,扩展门槛值 K_{th} 、材料断裂韧性 K_C ,使用最大周向应力裂纹扩展准则,指定裂纹扩展长度,裂纹扩展每一步裂纹区域将重新更新网格,始终保证裂纹尖端周围为一圈四面体网格,实现动态裂纹扩展,得到裂纹扩展到指定长度时裂纹尖端应力强度因子值(括号中为 ABAQUS 中围线积分计算应力强度因子值),并与理论值进行比较,见表 2。并可从 ABAQUS 中提取裂纹扩展指定长度时裂纹尖端 Mises 应力,如图 7 所示,裂纹尖端第一圈灰色区域为裂尖塑性区。

表 2 应力强度因子解析解与数值解对比

$\Delta a/\text{mm}$	0	0.5	1	2.5	5	7.5	10
解析解/ $(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	5.43	5.54	5.68	6.13	6.97	7.95	9.12
数值解/ $(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	5.44(5.38)	5.51(5.58)	5.72(5.69)	6.16(6.17)	6.98(6.96)	8.02(7.91)	9.21(9.01)
相对误差/%	0.29(0.92)	0.54(0.72)	0.79(0.18)	0.49(0.65)	0.10(0.10)	0.92(0.5)	0.98(1.21)

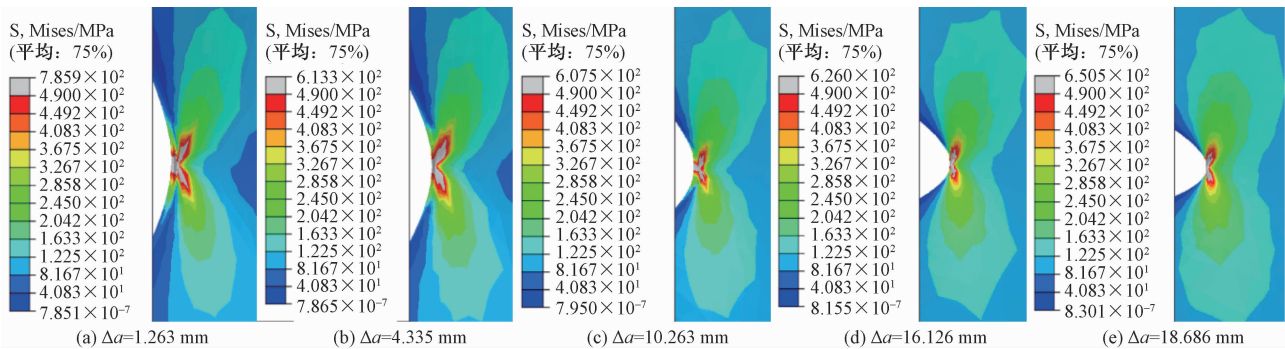


图 7 I 型加载下裂纹扩展尖端 Mises 应力图

利用 FRANC3D 计算了纯 I 型加载下疲劳裂纹扩展过程中循环应力强度因子和循环 J 积分,并给出了 ΔK 与 ΔJ 关系曲线,如图 8、图 9 所示。为了准确描述疲劳裂纹扩展,分别利用 ΔK 和 ΔJ 描述了直线段裂纹扩展速率,得到了纯 I 型加载下基于 ΔK 和 ΔJ 的 Paris 公式,如图 10 所示。

由表 2 看出,有限元计算结果与理论值进行对比计算的应力强度因子相对误差均小于 1.5%,验证了 ABAQUS、FRANC3D 计算应力强度因子具有较好的可靠性, M -积分计算结果更加精确。从应力场中可看出裂纹尖端塑性区相对于线弹性范围很小,可视为

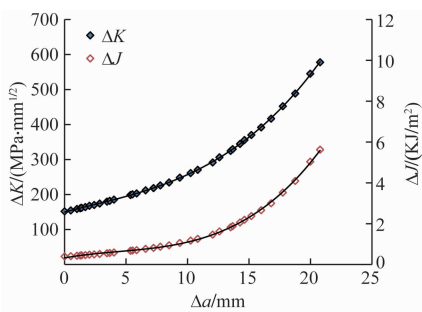


图 8 I 型加载 ΔK - Δa 、 ΔJ - Δa 曲线

小范围屈服,符合高周疲劳裂纹扩展的规律。

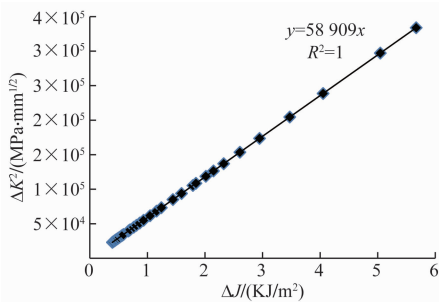


图 9 I 型加载 ΔK^2 - ΔJ 曲线

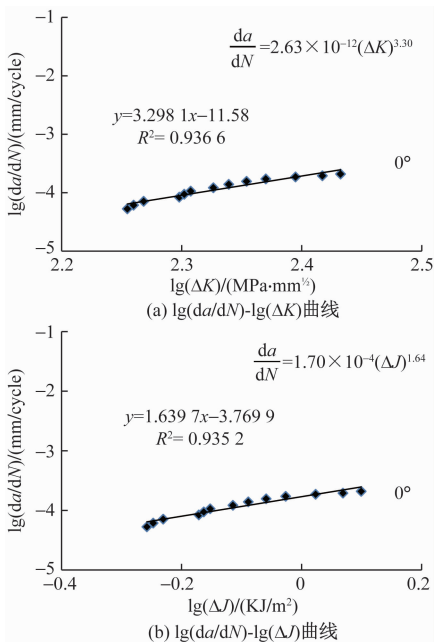


图 10 直线段 $\lg(da/dN)$ - $\lg(\Delta K)$ 、 $\lg(da/dN)$ - $\lg(\Delta J)$ 曲线

图 9、图 10 的结果表明，循环应力强度因子与循环 J 积分具有相同曲线的增长趋势，且应力强度因子幅值的平方与循环 J 积分呈线性关系，这与线弹性断裂力学理论相一致。

4 复合疲劳裂纹扩展

按照前面有限元模拟模型与方法，转动有限元模型，改变参考点与加载孔的耦合接触实现 I-II 复合型疲劳裂纹扩展。在复合疲劳裂纹中，计算应力强度因子分为 ΔK_I 、 ΔK_{II} 并通过式 (12) 组合成等效应力强度因子幅进行分析，上一节中得到循环 J 积分与等效应力强度因子幅存在一定的线性关系，并将结论推广到复合型加载下探索使用 J 积分描述裂纹扩展速率。

根据实验测量结果在复合型加载下将裂纹扩展分为 30~40 个扩展分析步，步长与实验扩展长度相同，如图 11 所示，裂纹扩展每一步裂纹前沿都呈现曲线形状随着裂纹扩展速率的加快曲线在后期

呈现出不规则变化。图中黑点为裂纹前沿曲线中点也即应力强度因子取值点，各点的连线为裂纹扩展方向。取裂纹扩展 0.1 mm 处测量裂纹开裂角。

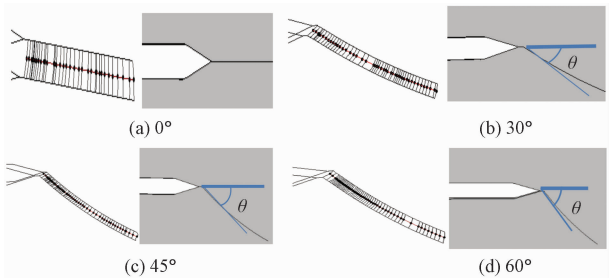


图 11 裂纹扩展方向

将试验开裂角与 FRANC3D 模拟结果对比 (表 3)，两者相对误差均低于 10%，说明利用 FRANC3D 模拟疲劳裂纹扩展方向具有很好的有效性。从图 10 中可以发现，在纯 I 型加载下疲劳裂纹沿着预制裂纹方向扩展且垂直于加载方向与理论与实验相符；复合型加载下疲劳裂纹并没有沿着直线扩展而是一条曲线，本试验及其他学者的研究^[12]也存在此现象。这种现象是由于裂纹启裂后 II 型荷载的存在， K_{II} 与 K_I 存在一定的比例，导致裂纹的扩展偏离原裂纹面，从开裂角的结果中也可以发现，裂纹开裂方向并不是垂直于加载方向。提取各加载角度下每一个扩展步裂纹尖端的 ΔK^* 与 ΔJ 积分值，如图 12 所示；建立了 ΔK^* 与 ΔJ 的关系曲线，如图 13 所示；结合疲劳裂纹扩展速率，绘制不同加载角度下裂纹稳定扩展阶段裂纹扩展速率与 ΔK^* 、 ΔJ 曲线，得到了复合型加载条件下的 Paris 表达式，如图 14 所示。

表 3 不同加载角度下裂纹开裂角 单位：(°)

加载角度	0	30	45	60
实验开裂角	0	27.0	37.0	50.0
模拟开裂角	0	27.4	40.0	50.6

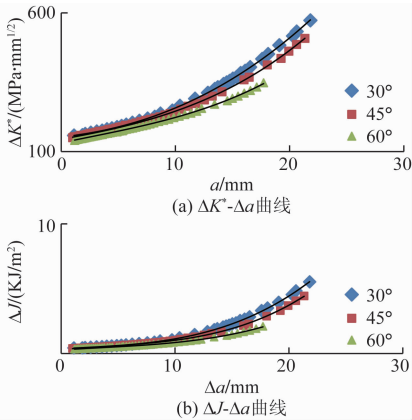


图 12 ΔK^* - Δa 、 ΔJ - Δa 曲线

通过结合 ABAQUS 和 FRANC3D 对复合型加载(30°、45°、60°)进行了模拟,在此以 $\alpha=45^\circ$ 为例给出了 AA7075-T6 试件疲劳裂纹扩展中 Mises 应力图,如图 15 所示。

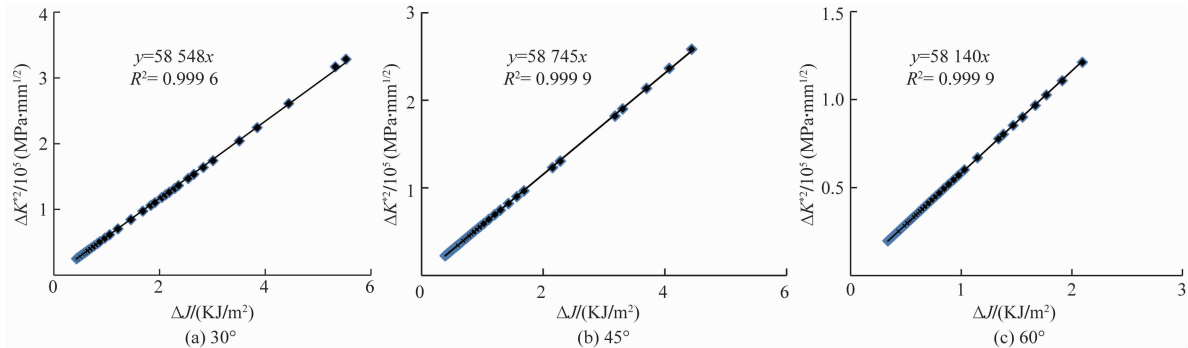


图 13 不同加载角度 ΔK^2 - ΔJ 关系曲线

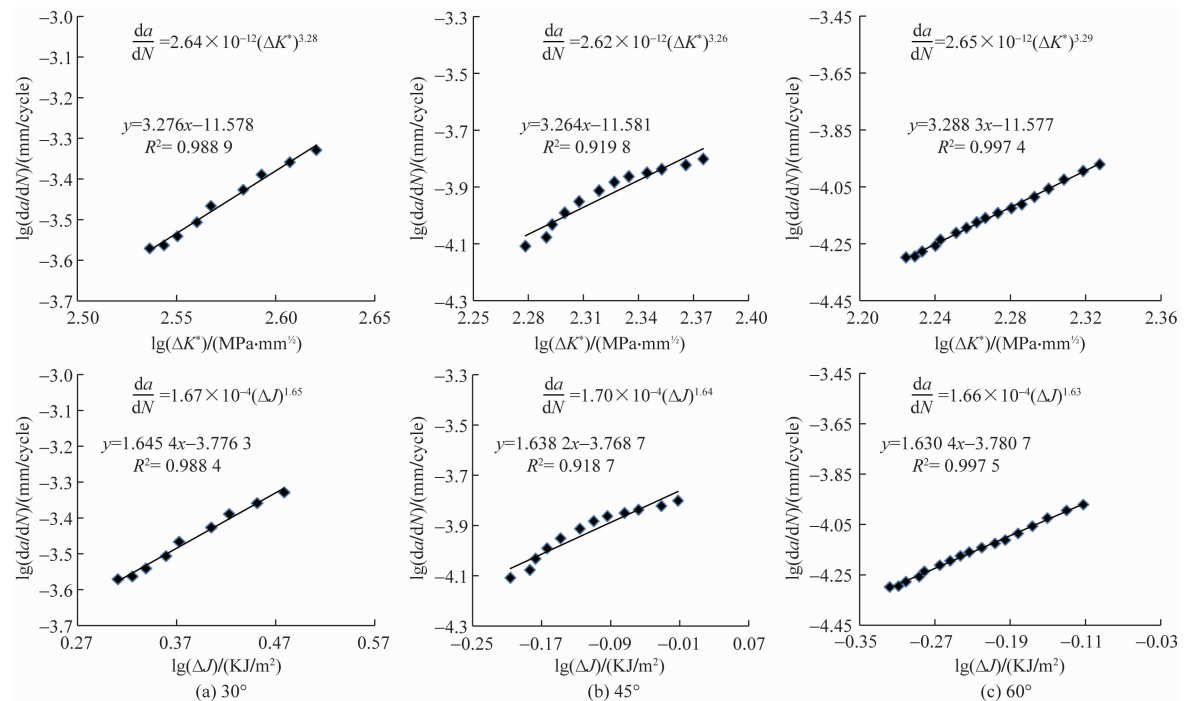


图 14 不同加载角度直线段 ΔK^2 、 ΔJ - da/dN 曲线

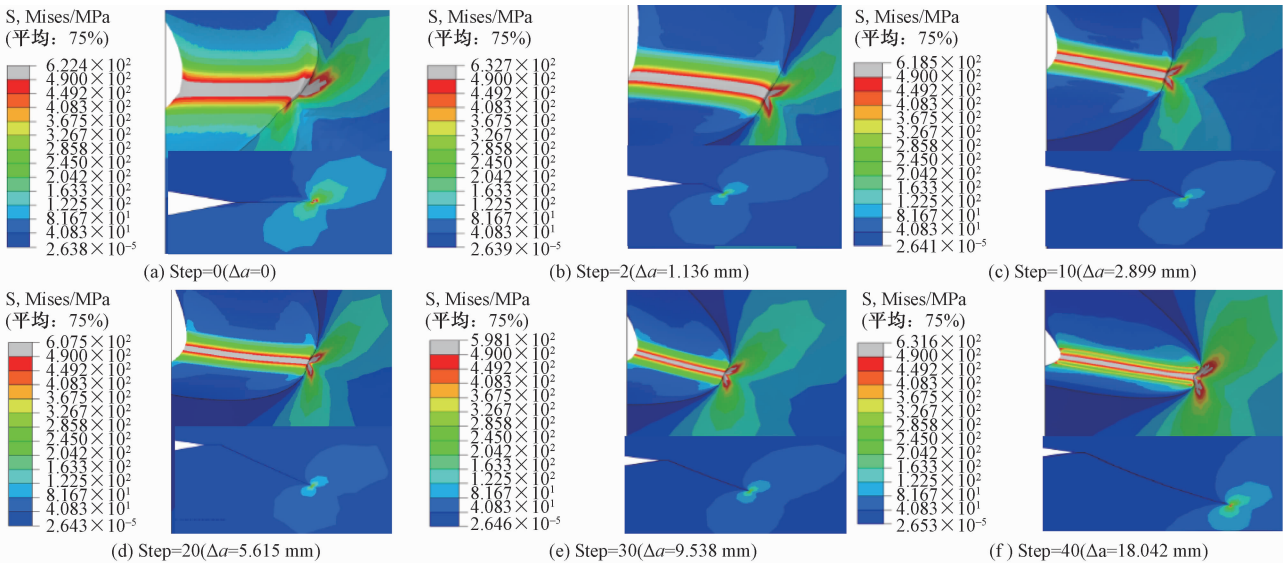


图 15 I - II 复合型加载(45°)疲劳裂纹扩展中 Mises 应力

从图12可以看出,等效应力强度因子幅值和循环 J 积分同I型具有相同的增长趋势;加载角度的增大导致等效应力强度因子幅值和循环 J 积分显著降低,这是由于在裂纹扩展后由于扩展角度的变化实际有效承载面积不同,加载角度越大实际承载面积越大导致等效应力强度因子幅值及循环 J 积分减小。

由图13可以发现,复合型加载下 ΔK^{*2} 与 ΔJ 同纯I型一样符合线性关系,且斜率几乎相同,接近于理论值58 519,表明在线弹性范围内利用循环 J 积分也可以很好地代替等效应力强度因子幅值描述疲劳裂纹扩展,使得避免了利用经验公式进行计算等效应力强度因子幅造成的误差。将图14与图10进行对比发现,不同加载角度下,基于等效应力强度因子幅和循环 J 积分描述的Paris公式材料常数 c 、 m 与纯I型基本一致,裂纹扩展速率仍然满足Paris公式。

由图15可看出,复合型疲劳裂纹扩展在裂纹尖端沿厚度方向上应力与中性层对称分布,两侧表面应力略大于中间面;在裂纹未扩展时,裂纹尖端一侧应力大于另外一侧,导致裂纹沿着较大应力方向进行扩展;在裂纹扩展后一小段时间内,裂纹尖端应力场沿扩展方向呈蝶形对称分布,裂纹几乎沿直线扩展;这与大量研究中裂纹尖端应力强度因子在裂纹扩展后由I型控制相符合^[13];在扩展一段时间后裂纹由于II型荷载的影响,裂纹尖端应力一侧略大于另一侧,导致裂纹扩展偏离原始方向沿曲线扩展,这与实验结果一致。在整个疲劳裂纹扩展过程中裂纹尖端塑性区尺寸均小于1 mm,满足高周疲劳小范围屈服条件。

5 结论

通过利用有限元方法结合实验数据对AA7075-T6高周疲劳裂纹稳定扩展进行数值模拟,得到如下结论:

1)纯I型加载下利用FRANC3D中 M -积分计算应力强度因子较ABAQUS中围线积分计算应力强度因子精度高。I-II复合型加载条件下,随着复合角度增大等效应力强度因子幅值和循环 J 积分降低

2)利用FRANC3D中最大环向拉应力准则模拟I-II复合型裂纹开裂角与实验结果误差小于10%;且裂纹扩展中前期几乎呈一条直线,当扩展

到一定长度后裂纹明显呈曲线扩展,与实验结果相符。

3)复合型加载条件下相较于等效应力强度因子幅,使用循环 J 积分能避免因经验公式复合引起的误差,可以更加简单、高效地作为Paris公式的参数描述疲劳裂纹扩展速率,为今后工程中研究高强度铝合金构件高周复合疲劳裂纹扩展提供参考。

参考文献

- [1] 苏少普,曹淑森,廖江海,等.基于紧凑拉伸剪切结构的复合型疲劳裂纹扩展研究[J].应用力学学报,2020,37(1):85-90,474.
- [2] 熊勋,杨莹,汪舟,等.基于FRANC3D和ABAQUS联合仿真三维疲劳裂纹扩展分析及寿命预测[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2020,44(3):506-512.
- [3] SAJITH S, SHUKLA S S, MURTHY K S R K, et al. Mixed mode fatigue crack growth studies in AISI 316 stainless steel[J]. European Journal Mechanics, 2020, 80:103898.
- [4] 吴圣川,李存海,张文,等.金属材料疲劳裂纹扩展机制及模型的研究进展[J].固体力学学报,2019,40(6):489-538.
- [5] TANAKA K. The cyclic J -integral as a criterion for fatigue crack growth[J]. International Journal of Fracture, 1983,22(2):91-104.
- [6] TANAKA K, AKINIWA Y, NAKAMURA H. J -integral approach to mode III fatigue crack propagation in steel under torsional loading[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1996,19(5):571-579.
- [7] Li L, Yang Y H, Xu Z, et al. Fatigue crack growth law of API X80 pipeline steel under various stress ratios based on J -integral[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2014,37(10):1124-1135.
- [8] WANG J, JIANG W, LI Y Y, et al. Numerical assessment of cyclic J -integral ΔJ for predicting fatigue crack growth rate[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 205:455-469.
- [9] 蔡永梅,谢禹钧.三维裂纹 J -积分分析[C]//第21届全国结构工程学术会议论文集第I册.北京:中国力学学会工程力学编辑部,2012:120-125.
- [10] IRWIN G R. Fracture mechanics, in the book of structural mechanics[M]. New York: Pergamon Press, 1958.
- [11] 高庆.工程断裂力学[M].重庆:重庆大学出版社,1986.
- [12] 彭博.含三维内裂纹试件单轴拉伸裂纹扩展数值模拟研究[J].水资源与水工程学报,2019,30(1):226-231.
- [13] 王连庆,可进,王红缨.7050铝合金I-II复合型疲劳裂纹研究[J].中国测试,2021,47(1):139-146.

Analysis of Mix-mode Fatigue Crack Growth Based on J -Integral

WU Pengfei, YANG Bangcheng

(School of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China)

Abstract: In order to study the growth behavior of type I (opening) and type II (shearing type) compound cracks, numerical methods and experimental data are used to analyze the height of AA7075 material under I-II compound type (30°, 45°, 60°) loading. Cycle fatigue crack growth, the equivalent stress intensity factor amplitude (ΔK^*) and cyclic J integral (ΔJ) are used to describe the fatigue crack growth rate, and the corresponding Paris formula expression is given. ΔK^* is derived the relationship between the two and ΔJ under the theory of linear elastic fracture mechanics. The results show that the derived theoretical relationship between ΔK^* and ΔJ can provide the same results as the numerical method; since the equivalent stress intensity factors need to be obtained by empirical formulas, using ΔJ can effectively replace ΔK^* as a parameter that describes the growth rate of high-cycle composite fatigue cracks.

Keywords: mix-mode crack; high cycle fatigue; equivalent stress intensity factor amplitude; cyclic J integral; crack growth rate