DOI: 10.3901/JME.2020.20.088

30Cr2Ni4MoV 转子钢 II 型裂纹的疲劳扩展行为

祁 爽 蔡力勋 包 陈 刘晓坤
(西南交通大学力学与工程学院 成都 610031)

摘要: 材料疲劳裂纹扩展(Fatigue crack propagation, FCP)速率是表征材料抗疲劳破坏的重要力学性能指标, 是对核反应堆工程、化工、航空、航天、高铁等关键工程进行结构完整性评价的重要依据。采用 Arcan 试样对 30Cr2Ni4MoV 转子钢的 II 型裂纹疲劳扩展行为进行研究, 结合已有裂纹扩展方向预测准则对 II 型裂纹疲劳扩展方向进行预测, 结果表明, 最大周向应力准则可以较好地预测 II 型裂纹疲劳扩展方向。采用紧凑拉伸(Compact tension, CT)试样获取 30Cr2Ni4MoV 转子钢的 I 型裂纹疲劳扩展速率, 对比 I 型裂纹和 II 型裂纹的疲劳扩展试验获得的 FCP 速率与 J 积分范围关系趋势, 二者较为接近。针对 30Cr2Ni4MoV 转子钢, 依据 Arcan 试样获得的 II 型裂纹疲劳扩展速率试验结果可用于结构裂纹扩展剩余寿命的预测。

关键词: 疲劳裂纹扩展; II 型裂纹; 有限元分析; 最大周向应力准则; J 积分

中图分类号: O346

Fatigue Propagation Behavior of Mode II Crack of 30Cr2Ni4MoV Rotor Steel

QI Shuang CAI Lixun BAO Chen LIU Xiaokun

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

Abstract: The fatigue crack propagation(FCP) rate is important index of mechanical properties for characterizing the fatigue failure of materials, they are the important basis for structural integrity assessment of key projects such as nuclear reactor engineering, chemical engineering, aeronautics and astronautics, and high-speed railway, etc. The Arcan specimens are used to study the FCP behavior of mode II crack of 30Cr2Ni4MoV rotor steel. The fatigue propagation direction of mode II crack is predicted by the existing crack propagation criterion. The results show that the maximum circumferential stress criterion can predict the fatigue propagation direction of mode II crack. The compact tension(CT) specimens are used to study the FCP behavior of mode I crack of 30Cr2Ni4MoV rotor steel. The relationship between the FCP rates and the range of J integral obtained from the fatigue growth tests of mode I crack and mode II crack are compared, and they are very close. Therefore, for the 30Cr2Ni4MoV rotor steel, the results of the mode II crack fatigue growth rates obtained according to the Arcan specimens tests can be used to predict the remaining life of the cracked structures.

Key words: fatigue crack propagation; mode-II crack; finite element analysis; maximum circumferential stress criterion; J -integral

0 前言

一般地, 裂纹构元有 3 类变形模式: I 型(张开型)裂纹、II 型(滑开型或面内剪切型)裂纹和 III 型(撕开型或面外剪切型)裂纹。II 型裂纹疲劳扩展(Fatigue crack propagation of mode II crack, FCP_{II})行为是指在循环剪切载荷作用下在裂纹前缘平行于裂纹面的

方向产生与最大切应力相对应的塑性变形, 从而引起裂纹面内相互滑动的疲劳裂纹扩展(Fatigue crack propagation, FCP)行为。航空、高铁等工程领域结构或部件常受到剪切交变载荷的作用而发生 FCP_{II} 行为, II 型裂纹的断裂和疲劳失效问题逐渐引起学者们的关注。

ERDOGAN 等^[1]最早从理论和试验两方面研究了 II 型裂纹扩展问题, 并针对脆性材料有机玻璃, 采用图 1 所示^[1]中心裂纹板试样和含周向裂纹薄壁圆筒试样的纯 II 型裂纹扩展, 两种试样构型的裂纹

均发生偏折扩展, 且扩展方向与初始裂纹面间夹角约为 70.5° 而并未实现 II 型裂纹扩展, 同时从理论上证明该现象的合理性。POOK 等^[2]针对低碳钢材料, 采用含裂纹薄壁圆筒试样通过共振扭转疲劳机在 30 Hz 频率下进行疲劳试验, 发现薄壁圆筒试样在疲劳载荷下会发生屈曲而对 FCP 速率产生影响。

图 1 II 型裂纹扩展试样

ROBERTS 等^[3]利用图 2 所示的试验装置对 2024-T3 材料的中心裂纹板试样施加 I 型静载和 II 型循环载荷, 以实现该条件下裂纹的疲劳扩展。

图 2 II 型裂纹疲劳扩展试验装置

LIU 等^[4-5]针对 2024-T3 和 7075-T7651 两种铝合金材料的中心 45° 斜裂纹板试样, 设计了图 3^[4-5]所示“画框”式夹具来完成 II 型断裂试验。TOOR^[6]也采用该种类型夹具实现 I-II 型裂纹扩展。

JONES 等^[7]针对 2024-T4 铝合金材料, 采用图 4 所示双边裂纹紧凑剪切试样, 对 II 型裂纹断裂性能进行试验研究, 结果表明 II 型裂纹临界应力强度因子 (Stress intensity factor, SIF) 较 I 型裂纹临界 SIF 大 5%。HOYNIK 等^[8]对试验结果进行有限元分析, 结果表明 II 型裂纹临界 SIF 较 I 型裂纹临界 SIF 大 44%, 采用 2024-T4 铝合金材料的双边裂纹紧凑剪

切试样, 对 II 型裂纹疲劳萌生进行研究, 观测到裂纹有偏折扩展趋势。

图 3 “画框”式夹具加载示意

图 4 双边裂纹紧凑剪切试样

POOK 等^[9]试图对纯 II 型循环位移加载下低碳钢双边裂纹紧凑剪切试样的 FCP_{II} 驱动力门槛值进行研究, 但最终发现很难实现 FCP_{II} , 因为裂纹扩展方向总会偏离初始裂纹面转变为 I 型裂纹扩展, 甚至出现 III 型裂纹扩展。

OTSUKA 等^[10]针对 7075-T6、2024-T4 两种铝合金材料和一种低碳钢材料, 开展 FCP_{II} 试验研究, 结果表明 II 型裂纹疲劳扩展与试验材料、试样构型以及加载载荷等多个因素相关。1986 年 SMITH^[11]采用轴承钢开展 FCP_{II} 试验研究, 亦未观测到 FCP_{II} 现象。SMITH 等^[12-13]针对 BS 4360 SOB 结构钢, 选用 RICHARD^[14]在 1985 年提出的紧凑拉剪 (Compact-tension-shear, CTS) 试样构型, 开展 FCP_{II} 试验, 结果表明, 裂纹面间的相互作用使得裂纹尖端的有效剪切 SIF 范围 ΔK_{II} 降为接近 0, 从而阻止了 FCP_{II} 的增长。

1984 年, BANKS-SILLS 等^[15]提出图 5 所示的 Arcan 试样和夹具装配, 该夹具和 CTS 试样类似, 亦可实现 Arcan 试样 I 型疲劳裂纹预制、不同角度下 I-II 混合型裂纹加载以及 II 型裂纹加载试验^[16-20], 相对而言该试样需要的试验机量程较小, 便于实现。

图5 Arcan 试样夹具装配示意图

CARLSSON 等^[21]提出 Arcan 试样的拉伸应力强度因子 K_I 与剪切应力强度因子 K_{II} 表达式

$$\begin{cases} K_I = \frac{P\sqrt{\pi a} \cos \alpha}{WB} f_I(a/W) \\ K_{II} = \frac{P\sqrt{\pi a} \sin \alpha}{WB} f_{II}(a/W) \end{cases} \quad (1)$$

式中 W ——Arcan 试样的宽度;

B ——Arcan 试样的厚度;

a ——裂纹长度;

α ——加载线与裂纹面垂线之间的夹角;

P ——加载载荷。

$f_I(a/W)$ 和 $f_{II}(a/W)$ 需要通过有限元计算获得^[21], 表示为

$$\begin{cases} f_I(a/W) = 1.12 - 0.231(a/W) + 10.55(a/W)^2 - \\ \quad 21.27(a/W)^3 + 30.39(a/W)^4 \\ f_{II}(a/W) = \frac{1.122 - 0.561(a/W) + 0.085(a/W)^2 + 0.180(a/W)^3}{[1 - (a/W)]^{1/2}} \end{cases} \quad (2)$$

QIAN 等^[22]认为 FCP_{II} 的失效行为非常复杂, 且 FCP_{II} 现象很难被捕捉到, 交变载荷下的 II 型裂纹一旦开始扩展, 裂纹尖端首先会沿着最大剪切面发生 FCP_{II} 行为, 但由于裂纹面间的相互作用, 如摩擦、机械咬合、裂纹闭合等因素的影响, 裂纹很快就转变成 I 型裂纹继续向前扩展。后续很多研究工作^[23-27]也都支持了 QIAN 的观点。

由于裂纹面间的相互作用, 导致 II 型裂纹在疲劳过程中发生偏折扩展, 裂纹面间产生错动导致裂纹嘴张开位移与载荷之比的当量柔度变化不敏感, 因此 II 型裂纹疲劳扩展的实时长度难以通过柔度法获取, 需要借助更加精确的裂纹长度测量技术, 要选用便于获取实时裂纹长度的 FCP_{II} 试样构型。目前针对 FCP_{II} 试验研究已有 CTS 试样^[28]、含裂纹的薄壁圆管试样^[29]、三点弯曲试样^[30]、Arcan 试样^[15]等。

本文采用 Arcan 试样对 30Cr2Ni4MoV 转子钢的

II 型裂纹疲劳扩展行为进行研究, 结合已有裂纹扩展方向预测准则对 II 型裂纹疲劳扩展方向进行预测, 结果表明, 最大周向应力准则可以较好地预测 II 型裂纹疲劳扩展方向。采用紧凑拉伸(Compact tension, CT)试样获取 30Cr2Ni4MoV 转子钢的 I 型裂纹疲劳扩展速率, 对比 I 型裂纹和 II 型裂纹的疲劳扩展试验获得的 FCP 速率与 J 积分范围关系趋势, 进而获得可用于含裂纹结构剩余寿命预测的一般性规律。

1 研究条件

1.1 材料

汽轮机低压转子是大型核电机组的关键零部件之一, 其转速通常在 3 000~3 600 r/min, 运行过程中不仅会承受较大的离心力和自重所产生的弯矩, 还要传递扭矩, 因此汽轮机低压转子在运行过程中处于复杂应力状态。30Cr2Ni4MoV 钢具有较好的淬透性、焊接性能、断裂韧度和抗应力腐蚀性能, 主要用于制造强度、韧性要求较高的大型汽轮机整锻低压转子体、低压焊接转子轴头、轮盘、中间轴等。

用于 FCP_I 试验和 FCP_{II} 试验的 Arcan 试样材料均取自厚度为 25 mm、均匀材质的 30Cr2Ni4MoV 钢板材, 其化学成分的质量分数如下: $w_C \leq 0.35\%$, $w_{Si} \leq 0.10\%$, $w_{Mn} = 0.20\% \sim 0.40\%$, $w_{Mo} = 0.25\% \sim 0.60\%$, $w_{Ni} = 3.25\% \sim 3.75\%$, $w_{Cr} = 1.50\% \sim 2.00\%$, $w_V = 0.07\% \sim 0.15\%$, $w_P \leq 0.01\%$; $w_S \leq 0.005\%$ 。

室温下 30Cr2Ni4MoV 转子钢单轴拉伸力学性能参数通过等直段长度为 30 mm、直径为 6 mm 的等直圆棒试样单轴拉伸试验获得, 图 6 给出单轴拉伸应力-应变关系曲线, 力学性能参数由表 1 给出。可见, 30Cr2Ni4MoV 钢材料均匀性良好。

图6 30Cr2Ni4MoV 钢单轴拉伸应力-应变关系曲线

表 1 30Cr2Ni4MoV 钢单轴拉伸试验结果

试样 编号	弹性模量 E/GPa	屈服应力 σ_s/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa
1#	202	796	888
2#	202	792	886

1.2 试验设备

FCP_I 和 FCP_{II} 试验的设备为 MTS809 25 kN/200 N m 电液伺服材料试验机, 控制系统为 TestStar II, 载荷传感器为 MTS662.02B-01, 试验机的静载荷检定满足 JJG 556 要求, 其系统误差不大于 $\pm 1\%$, 偏差不大于 1%。

FCP_I 试验所用裂纹嘴张开位移(Crack mouth opening displacement, CMOD)引伸计为 MTS632.02 F-20, 其标距为 5 mm、量程为 $-1\sim 4$ mm, 通过计算机对试验过程进行控制和数据采集。FCP_{II} 试验过程中监测拉伸静载所用载荷传感器量程为 5 kN。载荷传感器、应变引伸计和 CMOD 引伸计的精度均为 0.5 级。

1.3 试样与夹具

用于获取 30Cr2Ni4MoV 钢室温下 FCP_I 力学性能的 CT 试样构型和尺寸如图 7 所示, 其宽度 W 和厚度 B 分别为 50 mm 和 10 mm; 裂纹初始长度 a_0 为 10 mm。图 8 为 CT 试样 FCP_I 试验加载装置。

图 7 CT 试样构型及尺寸

图 8 FCP_I 用 CT 试样与 CMOD 引伸计

用于获取 30Cr2Ni4MoV 钢室温条件下 FCP_{II} 速率的 Arcan 试样构型和尺寸如图 9 所示, 其宽度 W 和厚度 B 分别为 30 mm 和 1 mm; 初始裂纹长度 a_0 为 4 mm。

图 9 Arcan 试样几何尺寸

图 10 为 Arcan 试样夹具装配图, 该夹具可实现 Arcan 试样 I 型疲劳裂纹预制、FCP_{II} 试验加载以及不同角度下 FCP_{I-II} 试验加载。为了尽可能消除 FCP_{II} 试验过程中裂纹面之间的摩擦, 设计了施加及监测 I 型静载荷的装置, 通过螺栓锁紧实现 I 型静载荷的施加, 同时在螺栓底部装有量程为 5 kN 的载荷传感器以监测试验过程中 I 型静载荷的大小。Arcan 试样通过与夹具的密切配合嵌入夹具中, 然后通过使试样厚度方向对中的盖板及两个螺栓把 Arcan 试样固定在夹具上。

图 10 FCP_{II} 试验装配图

通过图 11b 所示 Arcan 试样完成 FCP_{II} 试验, 施加 II 型交变载荷, R 和 f 与预制裂纹条件相同, 同时施加 I 型轴向静载荷 F_1 , 以获得 FCP_{II} 速率 da/dN , 表 2 列出 Arcan 试样的加载工况。试验过程中裂纹实时扩展长度通过图 11b 所示显微镜法获得。

图11 Arcan 试样预制裂纹和 FCP_{II} 试验现场

表2 Arcan 试样的加载工况

试样 编号	加工裂纹 a_0/W	预制裂纹 后 a_0/W	加载 比 R	频率 f/Hz	II 型交变 载荷最大 值 $F_{II-\max}/\text{N}$	I 型轴向 静载 F_I/N
1#	0.133 3	0.167 6	0.1	20	3 200	1 200
2#	0.133 3	0.166 1	0.1	20	3 200	1 200
3#	0.133 3	0.220 0	0.1	20	3 250	0
4#	0.133 3	0.169 0	0.1	20	3 250	0
5#	0.133 3	0.167 7	0.1	20	3 500	1 750

2 裂纹扩展方向研究

2.1 有限元分析

有限元分析(Finite element analysis, FEA)软件采用 ANSYS R14.5, 如图 12 所示平面应力条件下 Arcan 试样网格模型共含 38 647 个平面 Plane 183 单元, 裂纹尖端网格进行加密处理, 采用刚性梁约束实现试样销钉孔等效加载。

图12 Arcan 试样的有限元网格模型

为分析网格密度对计算结果的影响, 预制裂纹后初始裂纹长度为 5.029 mm, 将不同网格密度下的有限元分析结果和试验结果进行对比, 本文分别使用的网格密度和 2 倍、4 倍的网格密度下 FEA 得到的 K_I 、 K_{II} 和 J_e 相对误差均不超过 0.2%。

2.2 裂纹扩展方向预测理论

裂纹扩展方向预测是研究 FCP 行为的重要内容, 比例加载下裂纹扩展方向研究已有诸多文献报道^[31-44], 主要有以下几种开裂准则。

20 世纪 50 年代后, 线弹性断裂力学的不断发

展和完善以及弹塑性断裂力学的兴起均为断裂动力学提供了新的理论分析方法, 进一步促进了裂纹扩展理论的研究。依据线弹性断裂力学, 图 13 所示 I-II 型裂纹裂尖区应力状态^[31]表示为

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \left(1 + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) + \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta - 2 K_{II} \tan \frac{\theta}{2} \right] \\ \sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right) \\ \tau_{r\theta} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} [K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1)] \end{cases} \quad (3)$$

式中, σ_{rr} 、 $\sigma_{\theta\theta}$ 、 $\tau_{r\theta}$ 均为极坐标下 I-II 型裂纹尖端应力分量。

图13 极坐标下 I-II 型裂纹裂尖单元应力分量

1963 年, ERDOGAN 等^[32]提出最大周向应力 (Maximum circumferential stress, MCS) 准则: ① I-II 型裂纹从裂纹尖端沿垂直于最大周向应力方向扩展; ② 当最大周向应力 $\sigma_{\theta\theta}$ 达到其临界值(即单轴拉伸条件下的破断应力)时裂纹向前扩展。则 I-II 型裂纹扩展方向表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} = 0 \\ \frac{\partial^2 \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta^2} < 0 \\ \beta = -\arccos \left(\frac{3K_{II}^2 + K_I \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}}{K_I^2 + 9K_{II}^2} \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中 β ——裂尖极坐标下裂纹扩展角度;

K_I ——裂纹拉伸 SIF;

K_{II} ——裂纹剪切 SIF。

当 $K_{II}=0$, $K_I \neq 0$ 时, $\beta=0^\circ$; 当 $K_I=0$, $K_{II} \neq 0$ 时, β 为 70.5° 。MCS 准则因其表述简单、便捷而被广泛应用于 I-II 型裂纹扩展研究^[33-42]。1982 年, TIAN 等^[43]将该理论从平面状态推广并应用到了三维构件。

1985 年, RICHARD^[44]提出了 I-II 型裂纹扩展方向可由以下公式给出

$$\beta = \mp 155.5^\circ \frac{|K_{II}|}{|K_I| + |K_{II}|} - 83.4^\circ \left[\frac{|K_{II}|}{|K_I| + |K_{II}|} \right]^2 \quad (5)$$

当 $K_{II} > 0$ 时, $\beta < 0$, 反之亦然, 该式即 Richard 准则^[45]。

20 世纪 50 年代以来, ESHELBY^[46-47]、GURTIN 等^[48]在构型力(Configurational force, C-force)及守恒积分的各个研究领域取得了诸多进展。2017 年 GUO 等^[49]提出了构型力准则, 即: ① C-force 合力 P_C 达到临界值时, 裂纹扩展开始发生; ② 裂纹扩展方向沿着 C-force 合力的方向, 表示为

$$\begin{cases} \beta = \arctan \frac{P_{C1}}{P_{C2}} \\ P_{C1} = \frac{K_I^2 + K_{II}^2}{E} \\ P_{C2} = \frac{2K_I + K_{II}}{E} \end{cases} \quad (6)$$

式中 P_{C1} ——C-force 在平行裂纹面方向的分力;

P_{C2} ——C-force 在垂直裂纹面方向的分力。

该模型不仅可以预测 I-II 型疲劳裂纹扩展, 还适用于纯 I 型疲劳裂纹扩展。

TANAKA^[50]指出在比例加载下, 驱动脆性断裂的裂纹尖端附近的应力最大值与作为疲劳裂纹扩展控制参数的应力最大值成正比, 尽管裂纹萌生和扩展的微观机制在准静态载荷和交变载荷两种加载条件下存在显著差异, 上述准则的使用并未对其进行区分, 故以上准则也可用于疲劳裂纹扩展方向预测。

2.3 裂纹扩展方向预测结果

针对 30Cr2Ni4MoV 转子钢, 采用 Arcan 试样, 完成了 FCP_{II} 试验, 图 14 示出不同加载条件下 FCP_{II} 试样裂纹扩展方向。纯 II 型疲劳载荷下(未施加 I 型静载)Arcan 试样的裂纹扩展方向不再沿原裂纹面方向扩展, 在较大范围内以恒角度近似沿直线向前扩展; 对 Arcan 试样施加纯 II 型疲劳载荷, 同时给定不同的 I 型静载, 裂纹扩展方向依旧较大范围内以恒角度近似沿直线向前扩展。一旦裂纹扩展方向发生偏转, 便转为 I-II 型裂纹, 此时可等同 I-II 型裂纹进行处理。

通过 FEA 计算得到含初始水平裂纹长度为 a_0 的 Arcan 试样 ΔK_I 和 ΔK_{II} , 进而依据 MCS 准则、Richard 准则和构型力准则对裂纹扩展角度进行预测, 结果列于表 3。

图 14 Arcan 试样裂纹扩展角度

表 3 Arcan 试样裂纹扩展角度的试验结果和不同开裂准则下预测结果对比

试样 编号	试验		MCS 准则		Richard 准则		构型力准则	
	$\alpha/(^\circ)$	$\beta/(^\circ)$	预测 $\beta/(^\circ)$	相对误差(%)	预测 $\beta/(^\circ)$	相对误差(%)	预测 $\beta/(^\circ)$	相对误差(%)
1#	90	57.4	57.63	0.404 4	62.27	8.745	43.45	24.3
2#	90	58.8	58.5	0.505 8	63.3	7.654	42.67	27.4
3#	90	70.4	70.53	0.182 9	72.01	2.415	0	100
4#	90	70.1	70.53	0.607 9	72.01	2.774	0	100
5#	90	55.6	55.11	0.874 4	59.25	6.168	0	19.54

由表 3 可知, RICHARD 准则针对 FCP_{II} 角度预测结果与试验结果最大相对误差达到 8.7%, 可见误差较大; GUO 和 LI 提出的构型力准则在 FCP_{II} 角度预测时失效。ERDOGAN 和 SIH 提出的 MCS 准则针对 FCP_{II} 角度预测结果与试验结果之间相对误差均在 0.9% 以内。相较 Richard 准则和构型力准则, MCS 准则对 FCP_{II} 角度的预测

精度更高。

3 疲劳裂纹扩展速率结果

图 15 示出室温下 30Cr2Ni4MoV 钢 FCP_I 试样的 $a-N$ 关系曲线。图 16 示出室温下 30Cr2Ni4MoV 钢稳定扩展阶段 $da/dN-\Delta J_e$ 关系趋势。

图 15 30Cr2Ni4MoV 钢 FCP_I 条件下 $a-N$ 试验结果

由图 16 可知,通过 3 个 CT 试样获得 30Cr2Ni4MoV 转子钢 FCP_I 条件下 $da/dN-\Delta J_e$ 关系趋势基本重合。结合前文单轴拉伸试验结果可知,该材料均匀、分散性较小。

图 16 30Cr2Ni4MoV 钢 FCP_I 条件下 $da/dN-\Delta J_e$ 试验结果

针对 30Cr2Ni4MoV 转子钢,采用 Arcan 试样,完成了 FCP_{II} 试验,根据显微镜测试得到循环次数 N_i 对应的裂纹扩展长度 a_i ,记录 FCP 过程中一系列 (N_i, a_i) ,从而获得图 17 所示 Arcan 试样 FCP_{II} 条件下 $a-N$ 关系曲线。各试样试验加载工况列于表 2。

图 17 30Cr2Ni4MoV 钢 FCP_{II} 条件下 $a-N$ 试验结果

由图 17 所示 $a-N$ 关系曲线通过割线法获得裂纹扩展长度为 a_i 时所对应的裂纹扩展速率 da_i/dN_i 。

应用图 12 所示 Arcan 试样的网格模型进行 FEA 获得循环加载条件下裂纹扩展长度为 a_i 时所对应的 J_e 积分范围 ΔJ_{ei} ,进而获得 30Cr2Ni4MoV 钢 FCP_{II} 稳定阶段 $da/dN-\Delta J_e$ 关系趋势,如图 18 所示。

图 18 30Cr2Ni4MoV 钢 FCP_{II} 条件下 $da/dN-\Delta J_e$ 试验结果

由图 18 可知,针对 30Cr2Ni4MoV 钢,在 FCP_{II} 条件下,不同加载条件下试验获得 $da/dN-\Delta J_e$ 关系趋势分散性较小。结合表 3 分析可知,I 型方向上的静载荷影响裂纹初始启裂方向,但对 $da/dN-\Delta J_e$ 关系影响较小。由于 30Cr2Ni4MoV 钢在 II 型加载下,裂纹扩展方向发生偏折扩展,裂纹发生偏折扩展转的 Arcan 试样在原加载条件下为 I-II 型裂纹,此时可视为 I-II 型裂纹扩展。QI 等^[51-52]研究工作表明,针对 30Cr2Ni4MoV 钢的 I-II 型裂纹,各加载角度下裂纹疲劳扩展速率亦在同一分散带内。与 30Cr2Ni4MoV 钢在 FCP_{II} 条件下,不同加载条件下试验获得 $da/dN-\Delta J_e$ 关系趋势分散性较小的结论吻合。

图 19 将 FCP_I 和 FCP_{II} 试验获得 $da/dN-\Delta J_e$ 关系趋势进行对比,由图 19 可获得重要结论:针对 30Cr2Ni4MoV 转子钢,I 型裂纹和 II 型裂纹的 FCP 速率 $da/dN-\Delta J_e$ 试验关系趋势较为接近。针对 30Cr2Ni4MoV 转子钢依据 CT 试样获得的 FCP_I 试验结果可用于结构裂纹扩展剩余寿命的预测。

图 19 30Cr2Ni4MoV 钢 $da/dN-\Delta J_e$ 试验结果

4 结论

(1) 30Cr2Ni4MoV 钢在 II 型加载下, 裂纹扩展方向发生偏转。最大周向应力准则对 FCP_{II} 方向预测相对误差在 0.9% 以内, 具有较好的预测精度。

(2) 对于纯 II 型加载下的 FCP 行为, 在 I 型方向上施加静载荷会影响裂纹初始启裂方向, 但 I 型静载对 30Cr2Ni4MoV 钢的 $da/dN-\Delta J_e$ 关系趋势影响较小。

(3) 针对 30Cr2Ni4MoV 转子钢, 依据 CT 试样或 Arcan 试样获得的 FCP 速率试验结果均可用于结构裂纹扩展剩余寿命的预测。

参 考 文 献

- [1] ERDOGAN F, SIH G C. On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear[J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85(4): 519-525.
- [2] POOK L P, DENTON K. Fatigue crack growth in thin walled mild steel cylinders loaded in torsion[J]. International Journal of Fracture, 1972, 8(1): 118-120.
- [3] ROBERTS R, KIBLER J J. Mode II fatigue crack propagation[J]. Journal of Basic Engineering, 1971, 93(4): 671-680.
- [4] LIU H W. Shear fatigue crack growth: A literature survey[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1985, 8(4): 295-313.
- [5] LIU A F. Crack growth and failure of aluminum plate under in-plane shear[J]. AIAA Journal, 1974, 12(2): 180-185.
- [6] TOOR P M. On fracture mechanics under complex stress[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1975, 7(2): 321-329.
- [7] JONES D L, CHISHOLM D B. An investigation of the edge-sliding mode in fracture mechanics[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1975, 7(2): 261-270.
- [8] HOYNIAK D, CONWAY J C. Finite element analysis of the compact shear specimen[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1979, 12(2): 301-306.
- [9] POOK L P, DENTON K. Fatigue crack growth in thin walled mild steel cylinders loaded in torsion[J]. International Journal of Fracture, 1972, 8(1): 118-120.
- [10] OTSUKA A, MORI K, OHSHIMA T, et al. Mode II fatigue crack growth in aluminium alloys and mild steel[C]//ICF5, Cannes (France) 1981, 1981.
- [11] SMITH R A. Fatigue crack growth in hard steels[C]//ECF4, Leoben 1982, 1986.
- [12] SMITH M C, SMITH R A. Toward an understanding of mode II fatigue crack growth[M]//Basic Questions in Fatigue: Volume I. ASTM International, 1988.
- [13] SMITH M C. Some aspects of mode 2 fatigue crack growth[D]. Cambridge: University of Cambridge, 1984.
- [14] RICHARD H A. A new compact shear specimen[J]. International Journal of Fracture, 1981, 17(5): R105-R107.
- [15] BANKS-SILLS L, ARCAN M, BORTMAN Y. A mixed mode fracture specimen for mode II dominant deformation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1984, 20(1): 145-157.
- [16] BANKS-SILLS L, BORTMAN Y. A mixed-mode fracture specimen: Analysis and testing[J]. International Journal of Fracture, 1986, 30(3): 181-201.
- [17] BANKS-SILLS L, ARCAN M, GABAY H. A mode II fracture specimen: Finite element analysis[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1984, 19(4): 739-750.
- [18] BANKS-SILLS L, SHERMAN D. Elasto-plastic analysis of a mode II fracture specimen[J]. International Journal of Fracture, 1990, 46(2): 105-122.
- [19] HALLBACK N, NILSSON F. Mixed-mode I/II fracture behaviour of an aluminium alloy[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1994, 42(9): 1345-1374.
- [20] CHAO Y J, LIU S. On the failure of cracks under mixed-mode loads[J]. International Journal of Fracture, 1997, 87(3): 201-223.
- [21] CARLSSON L A, ADAMS D F. Experimental characterization of advanced composite materials[M]. Boca Raton: CRC Press, 2002.
- [22] QIAN J, FATEMI A. Mixed mode fatigue crack growth: A literature survey[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1996, 55(6): 969-990.
- [23] MATSUNAGA H, MAKIZAKI M, SOCIE D F, et al. Acceleration of fatigue crack growth due to occasional mode II loading in 7075 aluminum alloy[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 123: 126-136.
- [24] ENDO M, OKAZAKI S, MATSUNAGA H, et al. A new fatigue testing machine for investigating the behavior of small shear-mode fatigue cracks[J]. Experimental Techniques, 2016, 40(3): 1065-1073.
- [25] AYATOLLAHI M R, RAZAVI S, CHAMANI H R.

- Fatigue life extension by crack repair using stop-hole technique under pure mode-I and pure mode-II loading conditions[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 74: 18-21.
- [26] MATSUBARA G, ONO H, TANAKA K. Mode II fatigue crack growth from delamination in unidirectional tape and satin-woven fabric laminates of high strength GFRP[J]. *International Journal of Fatigue*, 2006, 28(10): 1177-1186.
- [27] OTSUKA A, FUJII Y, MAEDA K. A new testing method to obtain mode II fatigue crack growth characteristics of hard materials[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2004, 27(3): 203-212.
- [28] BUZZARD R J, GROSS B, SRAWLEY J E. Mode II fatigue crack growth specimen development[M]//*Fracture Mechanics: Seventeenth Volume*. ASTM International, 1986.
- [29] POOK L P, DENTON K. Fatigue crack growth in thin walled mild steel cylinders loaded in torsion[J]. *International Journal of Fracture*, 1972, 8(1): 118-120.
- [30] NAYEB-HASHEMI H, TASLIM M E. Effects of the transient Mode II on the steady state crack growth in mode I[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1987, 26(6): 789-807.
- [31] SIH G C, PARIS P C, IRWIN G R. On cracks in rectilinearly anisotropic bodies[J]. *International Journal of Fracture Mechanics*, 1965, 1(3): 189-203.
- [32] ERDOGAN F, SIH G C. On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1963, 85(4): 519-525.
- [33] GDOUTOS E E, BROCK L M. Problems of mixed mode crack propagation[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1985, 52: 242.
- [34] YOKOBORI Jr A T, YOKOBORI T, SATO K, et al. Fatigue crack growth under mixed modes I and II[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1985, 8(4): 315-325.
- [35] POOK L P. The fatigue crack direction and threshold behaviour of mild steel under mixed mode I and III loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 1985, 7(1): 21-30.
- [36] LOUAH M, PLUVINAGE G, BIA A. Mixed mode fatigue crack growth using the Brazilian disc[J]. *Virginia Univ, Fatigue* 87, 1987, 2: 969-977.
- [37] NAYEB-HASHEMI H, HWANG S S, POLES P G. Crack closure phenomena in modes I and II interactions[J]. *Fatigue* 87, 1987, 2: 979-996.
- [38] HYDE T H, CHAMBERS A C. A compact mixed-mode (CMM) fracture specimen[J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 1988, 23(2): 61-66.
- [39] CHAMBERS A C, HYDE T H, WEBSTER J J. Mixed mode fatigue crack growth at 550 C under plane stress conditions in Jethete M152[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1991, 39(3): 603-619.
- [40] MAHAJAN R V, RAVI-CHANDAR K. An experimental investigation of mixed-mode fracture[J]. *International Journal of Fracture*, 1989, 41(4): 235-252.
- [41] BROWN M W. Analysis and design methods in multiaxial fatigue[M]//*Advances in Fatigue Science and Technology*. Springer, 1989: 387-401.
- [42] ABDEL MAGEED A M, PANDEY R K. Fatigue crack closure in kinked cracks and path of crack propagation [J]. *International Journal of Fracture*, 1990, 44(3): R39-R42.
- [43] TIAN D, LU D, ZHU J. Crack propagation under combined stresses in three-dimensional medium[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1982, 16(1): 5-17.
- [44] RICHARD H A. Bruchvorhersagen bei überlagerter normal-und schubbeanspruchung von rissen[J]. *VDI-Forschungsheft*, 1985, 631: 1-60.
- RICHARD H A. Fracture predictions with superimposed normal and shear stress on cracks[J]. *VDI-Forschungsheft*, 1985, 631: 1-60.
- [45] RICHARD H A. Major aspects of mixed-mode problems [C/CD]//*Proceedings of ICF10, Honolulu, USA*, 2001.
- [46] ESHELBY J D. The elastic energy-momentum tensor[J]. *Journal of Elasticity*, 1975, 5(3-4): 321-335.
- [47] ESHELBY J D. The continuum theory of lattice defects[M]//*Solid State Physics*. Academic Press, 1956, 3: 79-144.
- [48] GURTIN M E, PODIO-GUIDUGLI P. Configurational forces and the basic laws for crack propagation[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1996, 44(6): 905-927.
- [49] GUO Y, LI Q. Material configurational forces applied to mixed mode crack propagation[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2017, 89: 147-157.
- [50] TANAKA K. Fatigue crack propagation from a crack inclined to the cyclic tensile axis[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1974, 6(3): 493-507.

- [51] QI S, CAI L X, BAO C, et al. Analytical theory for fatigue crack propagation rates of mixed-mode I-II cracks and its application[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 119: 150-159.
- [52] QI S, CAI L X, BAO C, et al. The prediction models for fatigue crack propagation rates of mixed-mode I-II cracks[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 205: 218-228.

作者简介: 祁爽, 女, 1990 年出生, 博士研究生。主要研究方向为结构疲劳与安全评估。

E-mail: daisy_qishuang@126.com

蔡力勋(通信作者), 男, 1959 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为结构疲劳与安全评估。

E-mail: lix_cai@263.net

包陈, 男, 1982 年出生, 副教授。主要研究方向为结构完整性评价。

E-mail: bchxx@163.com

刘晓坤, 男, 1991 年出生, 博士研究生。主要研究方向为材料断裂行为。

E-mail: liuxiaokuunn@163.com