

型加载对 型疲劳裂纹扩展速率的影响

王 娜¹, 王建国²

(1. 中国科学院力学研究所科技二处, 北京 100081; 2. 北京科技大学新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)

摘要:通过有限元数值模拟和疲劳裂纹扩展试验,研究了 型加载对 型加载的疲劳裂纹扩展速率的影响。计算结果表明,在 型加载的基础上进行 型加载,应力强度因子 K_I 随着 型加载的增大而减小; K_{III} 随着 型加载的增加而增大。在相同边界条件下,裂纹前缘所在直线上,越接近中性面, K_I 的值越小。为了验证有限元数值分析结果,对铝合金材料进行了疲劳裂纹扩展速率试验。试验结果表明,在 型加载的基础上进行 型加载会使疲劳裂纹扩展速率减小;在一定范围内,疲劳裂纹扩展速率随着 型加载的增加而减小。

关键词:应力强度因子;裂纹;I型加载;III型加载;疲劳裂纹扩展

中图分类号:O346.2⁺3

文献标识码:B

doi:10.3969/j.issn.1674-3407.2009.z1.004

Influence of -mode Loading on the Growth Velocity of -mode Fatigue Crack

Wang Na¹, Wang Jianguo²

(1. Technology Section No. 2, Mechanics Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100081, China; 2. National Keystone New Metal Material Laboratory of Beijing Science and Technology University, Beijing 100083, China)

Abstract: Finite element simulation and fatigue crack growth experiment are done to study the influence of -mode loading on the -mode loading fatigue crack. The numerical result shows that under the condition of -mode loading on the basis of -mode loading, K_I decreases with the increase of -mode loading, at the same time, K_{III} increases with the increase of -mode loading. Under the same boundary condition, on the line of the crack leading edge, K_I becomes lower and lower when it is near the neutral surface. Then the numerical result is subjected to a test experiment by using MTS809 tension-torsion fatigue test system. The experiment result shows that the growth velocity of fatigue crack decreases due to -mode loading on the basis of -mode only loading. To some extent, the growth velocity of fatigue crack decreases with the increase of -mode loading.

Keywords: stress intensity factors; crack; Fmode loading; III mode loading; fatigue crack growth

1 引言

工程实际中发生的疲劳断裂破坏占全部破坏的 50%~60%,是工程结构件失效的最常见形式。从大量断裂事故分析中发现,断裂皆起源于构件本身的缺陷以及工作过程中产生的裂纹^[1-2]。自二次世

界大战以来,对疲劳断裂事故的分析与研究愈来愈得到重视。分析结果表明,一些重大事故皆缘自于疲劳裂纹的扩展。如 1967 年 12 月 15 日美国西弗吉尼亚的 Point Pleasant 桥突然毁坏,造成 46 人死亡,事故是由于一根带环拉杆中的缺陷在疲劳、腐蚀的作用下扩展到临界尺寸而引起的^[3]。20 世纪 80 年代初,美国众议院科技委员会委托国家标准局进

[收稿日期] 2009-11-6

[作者简介] 王娜(1983-),女,工学硕士,毕业于北京科技大学,现在中国科学院力学研究所工作。

行了一次关于断裂所造成损失的大型综合调查。调查结果表明,由于疲劳断裂而使美国一年损失高达1190亿美元,占1982年美国国家总产值的4%。1993年,美国政府发表的1973-1990年飞机飞行故障统计结果也显示,4种常用的机型疲劳裂纹扩展仍然是值得密切关注的问题^[4]。

因此,研究材料和工程零部件的疲劳裂纹扩展速率具有重要的工程意义。但是,受条件所限,目前的研究多限于对单纯的 I、II 型疲劳裂纹扩展的研究,其研究也较为深入。但是在实际的工程构件中,产生的裂纹往往都是复合型的。例如,航空与船舶结构中的加筋和壳体,其裂纹往往是张开型和滑开型(II-III 型)并存的复合型裂纹,大型旋转构件(如发电机轴等)的裂纹往往是张开型和扭转形成的撕开型(II-III 型)并存的复合型。

关于复合型裂纹扩展的研究现处于起步阶段。Savaidis 等采用弹塑性有限元分析了带有环向表面缺口的圆截面材料在双轴的载荷作用下,裂纹尖端应力和应变的变化特征^[5]; K. C. Liu 和 J. A. Wang 使用 VSE 能量法对多轴载荷作用下裂纹扩展的方向和疲劳寿命进行预测^[14]; Forth 等采用表面积分的方法对非平面内裂纹的扩展进行了深入的研究^[6]; Yates 对 II 型、III 型载荷组合作用下(即 II-III 复合型裂纹)的三维环向裂纹扩展进行了讨论^[15]; 田常海等人提出主应力强度因子下的复合型裂纹初始扩展准则及扩展的静态断裂模型,并进行 II-III 复合型裂纹扩展试验^[7-8]; 杨凤鹏等人通过对圆柱体前缘表面裂纹在循环拉伸与循环扭转载荷共同作用下的扩展规律进行试验研究^[9]。

尽管国内外对复合型疲劳裂纹扩展的研究均已展开,但还不够深入,所能检索到的相关文献较少,至今也未发现就标准 CT 试样在 II 型动态加载的基础上进行 II 型静态加载研究报道。为此,本文以此为研究对象,采用有限元数值模拟和疲劳裂纹扩展试验来研究 II 型加载对 II 型加载的疲劳裂纹扩展规律的影响。

2 数值模拟计算

2.1 有限元模型

本文采用 solid 45 和 solid 95 单元建立有限元的模型,整个模型共划分了 21357 个单元和 82792 个节点,单元尺寸为 2.94mm。在划分单元过程中,将对裂纹尖端单元进行奇异化处理,即裂纹前缘奇异单元半径为 0.1mm,并且从前缘向四周按倍数关

系增加。为了提高计算精度,在划分完成后对整个模型的单元(尤其是裂纹尖端)进行细化处理。最后的有限元模型如图 1 所示。

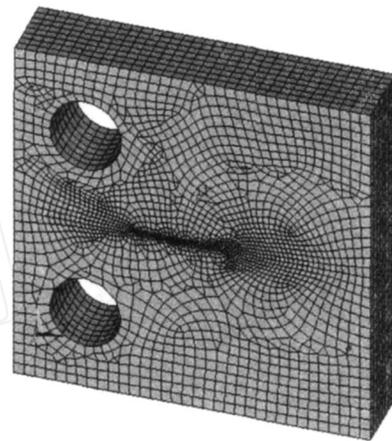


图 1 单元网格

2.2 边界条件

模型受到外界不同方向和大小的力的作用,会产生不同形式的裂纹^[16]。II 型加载、III 型加载和 II-III 复合型加载分别如图 2 的(a)、(b)、(c)所示。边界条件是实现外部作用的最直接的表现形式,主要分为位移边界条件、力边界条件和混合边界条件三种,由于试验条件等因素的限制,本文数值模拟计算主要采用力边界条件。

在进行只有 II 型载荷作用下的应力强度因子计算时,在模型边界的局部坐标系上施加 $P = 16\text{kN}$ 的集中力,使其产生 II 型裂纹的加载效果,如图 2(a)所示;当研究在 II 型加载的情况下,II 型加载对 II 型裂纹应力强度因子的计算结果影响的时候,边界局部坐标系上施加的边界条件为 $P = 16\text{kN}$ 和相应的扭矩 ($T = 50\text{Nm}, 100\text{Nm}, 150\text{Nm}, 200\text{Nm}, 250\text{Nm}$),使其产生 II 型加载和 III 型加载同时作用下的裂纹的加载效果,如图 2(c)所示。

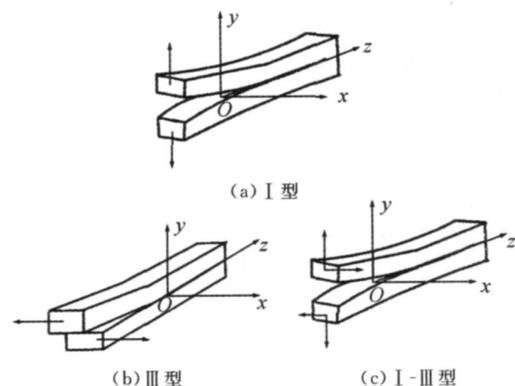


图 2 I 型加载、II 型加载和 II-III 复合型加载示意图

2.3 数值模拟结果

2.3.1 型载荷下数值模拟结果

在 型载荷作用下, $P = 16\text{kN}$, 用有限元数值模拟计算得到的裂纹尖端平面应变云图如图 3 所示。

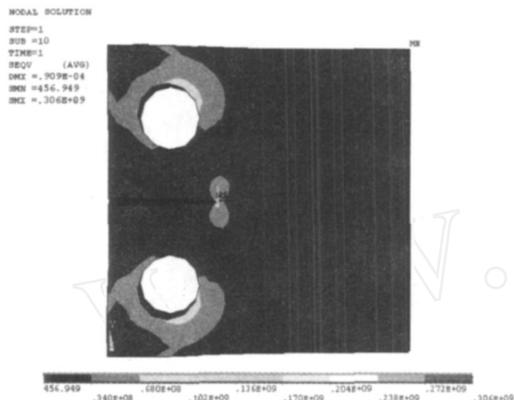


图 3 裂纹尖端平面应变云图

分别取 $a/W = 0.25, 0.30, 0.40, 0.50$ 四组不同数据, 由此计算出的 型应力强度因子的理论值 K_I 列于表 1 中。继续采用以上 4 组数据, 在 型裂纹扩展情况下, 用有限元数值模拟计算 型应力强度因子 K_I , 离裂纹尖端最近的区域附近的 K_I 值列于表 1 中, 并且与由理论公式计算出的 型应力强度因子 K_I 相比较, 误差均在 5% 之内, 说明有限元数值模拟的计算结果比较准确。

表 1 有限元结果 K_I 与理论结果 K_I

试样号	P/kN	a/W	有限元结果 $K_I/\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$	理论结果 $K_I/\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$	误差 / %
1	16	0.25	13.27	13.93	4.74
2	16	0.30	15.32	15.72	2.54
3	16	0.40	19.87	20.59	3.50
4	16	0.50	26.03	27.36	4.86

2.3.2 型加载影响下的裂纹应力强度因子数值模拟结果

仍采用以上 4 组数据所建立的模型, 在 型加载的基础上, 对以上模型进行 型加载, 分别施加 $50\text{Nm}, 100\text{Nm}, 150\text{Nm}, 200\text{Nm}$ 和 250Nm 的扭矩。观察 型裂纹应力强度因子和 型裂纹应力强度因子的变化。图 4 给出了在 型加载的基础上进行 型加载, 型加载的增加与 K_I 的变化曲线。

从图 4 的有限元模拟结果可以看出, 在 型加载的基础上进行 型加载, 应力强度因子 K_I 会随着 型加载的增加而减小, 但是减小的幅度并不大。这说明在一定程度上, 型加载会阻碍 型裂纹的

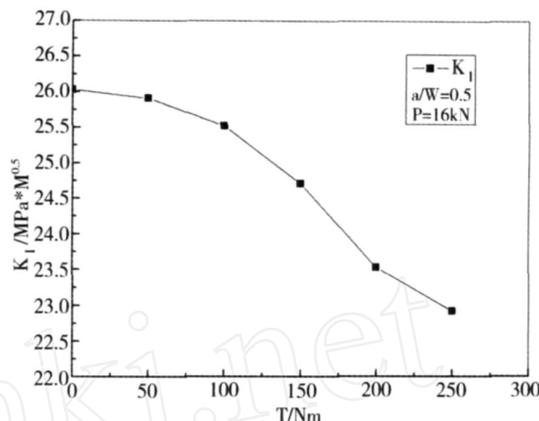


图 4 $a/W = 0.5$ 时, K_I 随 型加载的变化曲线

扩展速率, 使之减小。

在 型加载的基础上进行 型加载, 型加载的增加与 K_{III} 的变化曲线如图 5 所示。在 型加载保持不变的基础上, 逐渐改变 型加载的大小, 使 型加载的数值逐渐增加, 分别为 $50\text{Nm}, 100\text{Nm}, 150\text{Nm}, 200\text{Nm}$ 和 250Nm 。观察应力强度因子 K_{III} 随着 型加载的增加而变化的曲线, 找出其中的规律。

从图 5 的有限元模拟结果可以看出, 在 型加载的基础上进行 型加载, 并且保持 型加载的大小不变, 逐渐增加 型加载的大小, 应力强度因子 K_{III} 会随着 型加载的增加而增加。这说明 型加载对于应力强度因子 K_{III} 的影响是比较明显的。

2.3.3 裂纹前缘的应力强度因子

在建立的数值模型中, 裂纹前缘(图 6)所在直线的应力强度因子随着 Z 值的不同而变化。继续采用上述 4 组不同的 a/W 值, 在 型加载的条件下, K_I 沿着数值模拟的 CT 试样模型厚度方向 B 的分布情况如图 7 所示。

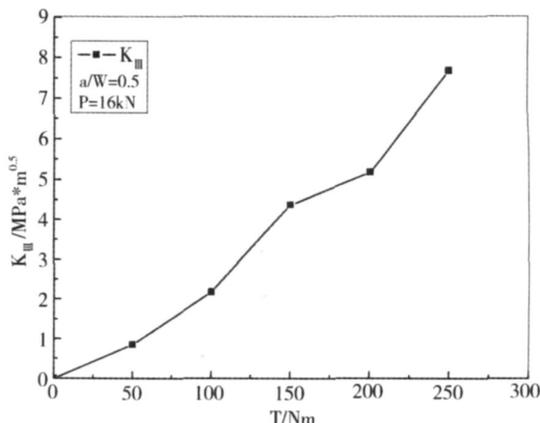


图 5 $a/W = 0.5$ 时, K_{III} 随 型加载的变化曲线

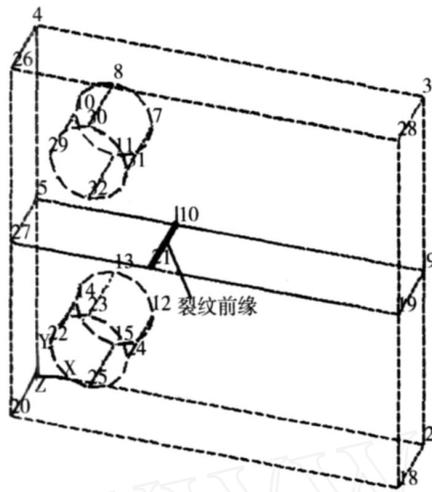


图 6 裂纹前缘

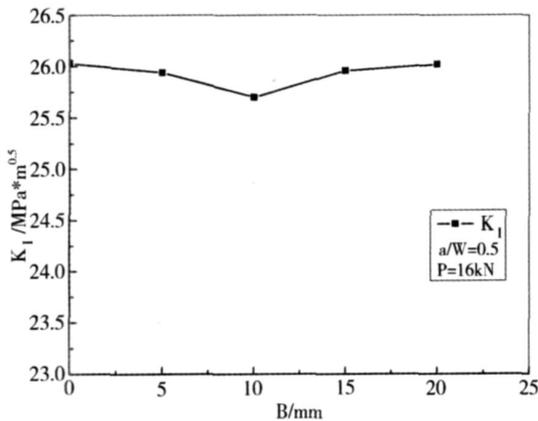


图 7 $a/W=0.5$ 时, K_I 沿 B 的变化

从图 7 的有限元模拟结果可以看出,应力强度因子 K_I 在厚度 B 的方向上,沿着中心呈对称分布,在边缘处 K_I 的值最大,在中心处 K_I 的值最小。这是因为在试样的外表面是平面应力问题,而在试样的内部接近中心的部分属于平面应变问题。

3 试验验证

3.1 试样材料及其力学性能

试验选取 2124 铝合金和 7050 铝合金。2124 铝合金的化学成分构成如表 2 所示。在 7050 铝合金中,锌、镁、铜的含量较高,其化学成分的构成如表 3 所示。两种铝合金的常规力学性能分别列入表 4 和表 5 中^[10]。

试验所采用的铝合金试样为标准 CT(紧凑拉伸)试样,并且带有预置疲劳裂纹。其厚度 $B = 20\text{mm}$,长度 $W = 80\text{mm}$,裂纹长度为 a 。

表 2 2124 铝合金的化学成分

成分	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
含量/ %	0.2	0.3	3.8~4.9	0.3~0.9	1.2~1.8	0.1	0.25	0.15	Balance

表 3 7050 铝合金的化学成分

成分	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
含量/ %	0.12	0.15	2.0~2.6	0.1	1.9~2.6	0.04	5.7~6.7	0.06	Balance

表 4 2124 合金的常规力学性能

温度 /	弹性模量/ GPa	泊松比/	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	延伸率 / %	断面收缩率/ %
20	72	0.33	480	445	8.5	19.2

表 5 7050 合金的常规力学性能

温度 /	弹性模量/ GPa	泊松比/	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	延伸率 / %	断面收缩率/ %
20	70	0.33	485	415	5	16.2

3.2 试验装置与方法

(1) 试验装置

试验采用 MTS809-250kN/2000Nm 电液伺服拉-扭低周疲劳试验机^[11],如图 8 所示。MTS809 疲劳试验机可以对试样同时施加轴向载荷(型加载)和扭转载荷(型加载),而且轴向和扭转方向的加载通过计算机自动控制,可以同时进行型加载和型加载。

此外,该试验机系统配置了 MTS632.02F-20 引伸计和 MTS Flex GT 数字控制系统^[12-13]。在试样的两侧分别放置两台相同型号的显微镜,在试验进行用来读取两边的疲劳裂纹长度,如图 9 所示。

(2) 试验方法

在室温下,各组试验均在 MTS809 试验机上进行,控制方式为载荷控制,包括型加载和复合型加载。载荷比为 $R = 0.06$,加载频率为 10Hz。裂纹每扩展大约 0.5mm 就在前后两架显微镜上分别读出前后裂纹的长度,并且做好记录。

首先,进行型加载,观察 K 与 da/dN 的变化关系。

其次,在型加载的基础上进行型固定加载,型加载的载荷保持不变,观察型加载对型加载的疲劳裂纹扩展速率的影响以及 K 与 da/dN 的变化关系。

接着,在型加载的基础上进行型变化加载,型加载的载荷逐渐增加,观察型加载对型加载的疲劳裂纹扩展速率的影响以及 K 与 da/dN

的变化关系。

最后,在 型加载的基础上进行 型反复变化加载, 型加载的载荷先增大后减小,观察 型加载对 型加载的疲劳裂纹扩展速率的影响以及 K 与 da/dN 的变化关系。

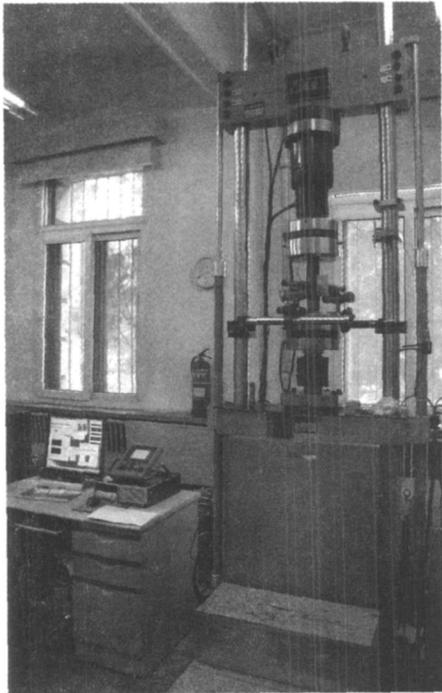


图 8 MTS809 电液伺服材料试验机

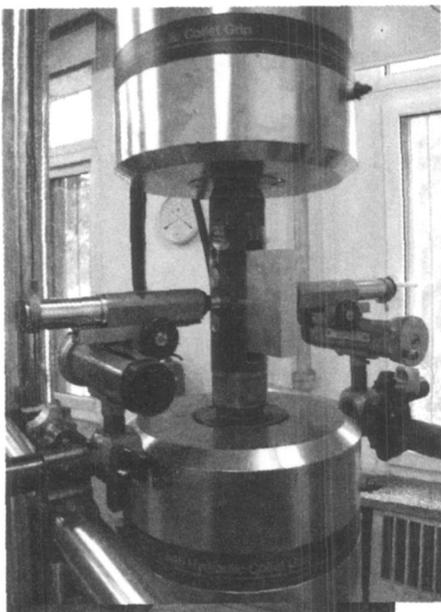


图 9 在试样两侧放置的显微镜

3.3 试验结果与分析

(1) 型加载的情况下,观察 K 与 da/dN 的变化曲线(如图 10 所示)。

从图 10 的试验结果来看,在只有 型载荷作用的

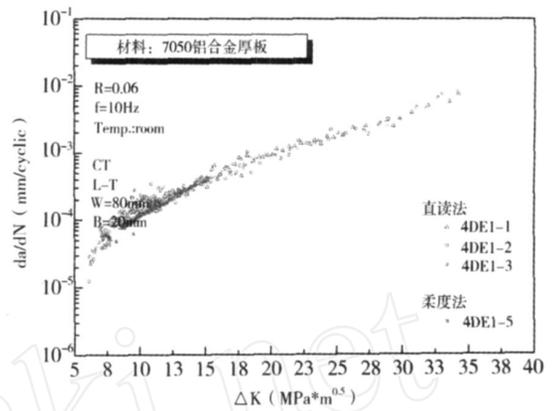


图 10 型加载下 K 与 da/dN 的变化曲线

情况下, da/dN 与 K 的变化趋势接近成一条直线,这说明疲劳裂纹扩展速率随着 K 的增加而增大。

(2) 为了便于观察在 型加载的基础上, 型加载对 型加载的疲劳裂纹扩展速率的影响,把二者的拟合曲线画在同一坐标系内。在 型动态加载的情况下, 型静态加载载荷保持不变,此时 K 与 da/dN 的变化曲线如图 11 所示。

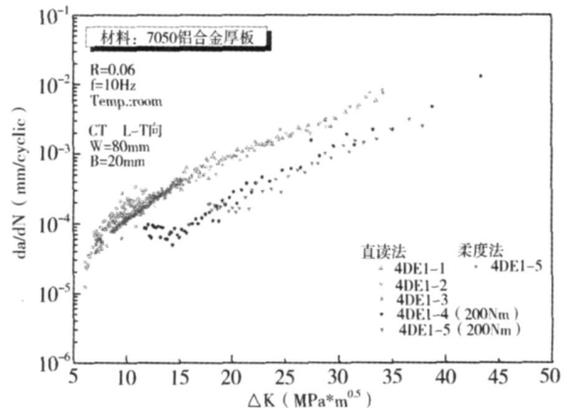


图 11 - 复合型加载下 K 与 da/dN 的变化曲线

从图 11 的试验结果来看,在 型动态载荷作用的基础上进行 型静态加载,对试样施加 $T = 200Nm$ 的 型载荷,与只有在 型载荷作用下的裂纹扩展速率相比,此时的裂纹扩展速率减小。

(3) 在 型动态载荷作用的基础上,保持 型动态加载载荷的值不变,改变 型静态加载载荷的大小,使 型静态加载的载荷越来越大,此时 K 与 da/dN 的变化曲线如图 12 所示。

从图 12 的试验结果来看,在 型动态载荷作用的基础上进行 型静态加载,并且 型加载逐渐增加(即分别对试样施加 $T = 50Nm, 100Nm, 150Nm$ 的 型静态载荷),与只有在 型动态载荷作用下的

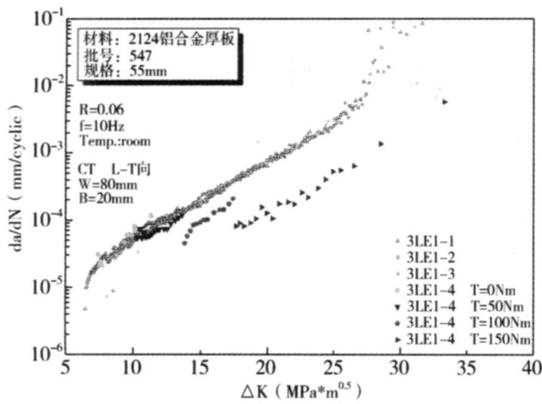


图 12 - 复合型加载 K 与 da/dN 的变化曲线

裂纹扩展速率相比,此时的疲劳裂纹扩展速率会随之相应地减小。在一定范围内,疲劳裂纹扩展速率随着 型载荷的增加而减慢。

(4)在 型动态载荷作用的基础上,保持 型动态加载载荷的值不变,改变 型静态加载载荷的大小,使 型静态加载的载荷先增大后减小,此时 K 与 da/dN 的变化曲线如图 13 所示。

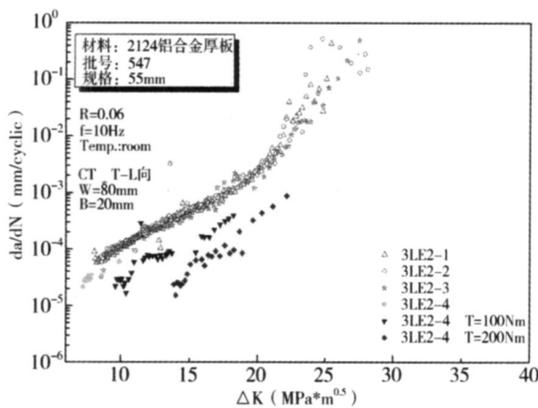


图 13 - 复合型加载下 K 与 da/dN 的变化曲线

从图 13 的试验结果来看,在 型动态载荷作用的基础上进行 型静态加载,并且使 型静态加载的载荷先增大后减小(即分别对试样施加 T = 100Nm, 200Nm, 100Nm 的 型静态载荷)。当 型载荷 T = 100Nm 时,疲劳裂纹的扩展速率减慢;当 型载荷增大到 T = 200Nm 时,疲劳裂纹的扩展速率进一步减慢;而当 型载荷又降低到 T = 100Nm 时,疲劳裂纹的扩展速率会相应地增大,回到最初的 型载荷为 T = 100Nm 时的曲线上。

4 结论

有限元数值模拟结果表明, - 复合型载荷作

用下, 型加载会使原来的 型裂纹应力强度因子 K_I 减小。裂纹前沿所在直线上 K_I 在中性面两侧几乎成对称分布,在边缘处 K_I 的值最大,在中心处 K_I 的值最小,但是整体上看相差并不明显。

疲劳裂纹扩展速率试验结果表明,试样在 - 复合型加载的作用下,由于 型加载的出现会使原来仅在 型载荷作用下的疲劳裂纹扩展速率降低。即在一定的范围内,在 型加载的基础上, 型加载会阻碍疲劳裂纹的扩展速率。试样在 - 复合型加载的作用下, 型加载载荷的大小会影响疲劳裂纹的扩展的速率。如果 型加载载荷增加,那么疲劳裂纹的扩展的速率就会随之减慢;如果紧接着减小 型加载载荷,那么疲劳裂纹的扩展的速率就会随之增快。如此反复,结果亦然,这说明疲劳裂纹的扩展速率与 型加载的路径无关。

参考文献

- [1] 张安哥,朱成九,陈梦成. 疲劳、断裂与损伤[M]. 成都:西南交通大学出版社,2006:25 - 32.
- [2] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2005:4 - 28.
- [3] 程靳,赵树山. 断裂力学[M]. 北京:科学出版社,2006:1 - 2.
- [4] 王国军,等. 疲劳分析理论与应用实例指导教程[M]. 北京:机械工业出版社,2007:1 - 2.
- [5] A. Savaidis, G. Savaidis, Ch. Zhang. FE fatigue analysis of notched elastic-plastic shaft under multiaxial loading consisting of constant and cyclic components [J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23 (4): 303 - 315.
- [6] S. C. Forth, W. D. Keat, L. H. Favrow. Experimental and computational investigation of three-dimensional mixed-mode fatigues[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2002, 25 (1): 3 - 15.
- [7] 田常海,任明法. - 复合型裂纹疲劳扩展门槛值[J]. 机械强度,2004,26:180 - 183.
- [8] 田常海,崔光镇,王德俊. , 复合型裂纹扩展速率的柔度测量方法[J]. 物理测试,1995,1:32 - 34.
- [9] 杨凤鹏,林卓英. 多轴载荷作用下表面裂纹的疲劳扩展[J]. 实验室研究与探索,2007,26(10):260 - 263.
- [10] 变形高温合金、铸造高温合金[M]. //北京航空材料研究院. 中国航空材料手册第2版. 北京:中国标准出版社,2002.
- [11] 赵志岗. 基础力学实验[M]. 北京:机械工业出版社,2004:24 - 26.

(下转第 71 页)

而进行不同的试验,例如在对夹夹具(如图5)中,斜齿钳口可以做木材、橡胶等材料的拉伸及剥离试验,波浪型齿形可做土工布等柔性材料的拉伸试验,平面钳口可做纸张、塑料薄膜等材料的拉伸试验。总之,判定附具是否适用,可以参考以下几点:

(1) 附具是否使用方便、安全。(2) 夹持是否可靠,试样不能有打滑、夹伤。(3) 试验过程中,试样断点好,数据离散性小(即试样断点不在钳口、钳口内、平行段或标距外)。

6 选用附具的方法

(1) 根据用户提供试样的形状、试样性质、标准,选择合适的夹持方式。不同的试样材料性质决定了附具的结构形式。如在木材顺纹抗拉强度试验中,根据标准 GB 1938-91《木材顺纹抗拉强度试验方法》要求,夹具的钳口尺寸为 10mm - 20mm,因此可选用杠杆自紧式拉伸附具,而非金属小负荷拉伸附具齿间距为 5mm,则只可以做橡胶、塑料、纸张等非金属拉伸试验。

(2) 根据试样最大试验力选择合适承载力的附具。目前国内最大的电子式万能试验机试验力为 1200kN,试样所能承受的试验力小到几十牛,大到几十兆牛;主机最大试验力和附具要相辅相成。

(3) 根据试样直径选择适合的夹持范围。试样尺寸小到直径 0.006mm 的金丝,大到直径 1000mm 的 PVC 管材,需要根据试样的形状大小设计不同的附具。如直径小于 1mm 的绳类试样,包括钢丝、铁丝、细线等,楔形钳口不适合,只能采用缠绕式夹持

方法,其缺点是试样延伸率误差大。

7 附具设计中存在的难点

(1) 硬度高的材料,因为加工刀具限制,无法做成标准试样,附具夹持试样易出现夹持损伤,导致试验过程中试样根部断裂,试验无效。

(2) 对于结构不均匀的试样(如钢绞线),在拉伸试验过程中受力不均匀,断点不规则,夹持试样的钳口易磨损,此类附具一直未得到好的解决。

(3) 大试验力、大直径的尼龙绳,由于变形过大,夹持困难,附具的设计也是一个难点。

8 结束语

试验机的发展方向是由制样检测向制品(即成品、半成品)检测方向发展,这就要求与之相适应的附具由原用于标准试样试验的附具向用于成品检测的附具转变。随着科学技术的发展,特殊行业用试验附具增多,例如要求附具结构小、无磁性、耐腐蚀(在溶液中做试验)等。新兴的行业对试验用附具也提出了新的要求,所以,附具设计任重道远。

参考文献

- [1] 王建国. 材料力学性能测试与评价技术进展[J]. 工程与试验, 2008, 48(增刊).
- [2] GB/T16491-2008 电子式万能试验机[S].

(上接第 23 页)

- [12] 钱士强,等. 35CrMo 钢回火组织(+)复合型疲劳裂纹的扩展特性研究[C]. 第 15 届华东地区热处理年会暨华东地区热处理年会周年纪念活动论文摘要集, 2006:36.
- [13] 董平,李瑞文. 紧凑拉伸试样裂纹尖端应力分布研究[J]. 稀有稀有金属材料与工程, 2007, 36(8).
- [14] K. C. Liu, J. A. Wang. An energy method for predicting fatigue life, crack orientation, and crack

growth under multiaxial loading conditions[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23: 129 - 134.

- [15] J. R. Yates, K. J. Miller. Mixed mode (+) fatigue thresholds in a forging steel[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1989, 12: 259 - 270.
- [16] 王永伟. 结构疲劳裂纹扩展的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.