

多轴疲劳裂纹扩展行为研究^X

BEHAVIOR OF MULTIAXIAL FATIGUE CRACK PROPAGATION

尚德广^{XX} 王大康 孙国芹 蔡 能

(北京工业大学 机电学院, 北京 100022)

SHANG De Guang WANG Da Kang SUN GuoQin CAI Neng

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology,

Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

摘要 利用扫描电镜对多轴比例和非比例加载下的疲劳试样的断口面和外表面进行扫描观测分析。根据薄壁管拉—扭复合加载试件断口附近表面观测结果,统计其裂纹扩展的位向,研究多轴疲劳裂纹萌生及扩展机理。研究表明,多轴疲劳裂纹主要是沿最大剪切平面或垂直于管形试样的轴线方向扩展。在多轴比例加载条件下,裂纹分布的分散性较小。在非比例加载条件下,随着相位差的增大,分散性增大。

关键词 多轴疲劳 疲劳裂纹萌生与扩展 比例加载 非比例加载

中图分类号 O346.2 TH114

Abstract The fracture surfaces of multiaxial fatigue specimens under proportional and nonproportional multiaxial loadings were observed and analyzed by using a scan electron microscope. According to the observed results near the fracture surfaces, the orientations of the fatigue crack initiation and propagation were investigated to study the mechanism of multiaxial fatigue crack propagation. The results showed that most multiaxial fatigue cracks were initiated and propagated along the direction of maximum shear plane or on the direction perpendicular to the tubular specimen's axis. For the multiaxial proportional loading, the dispersion degree of fatigue cracks was low. For the nonproportional loading the dispersion become larger with the phase difference increasing.

Key words Multiaxial fatigue; Fatigue crack initiation and propagation; Proportional loading; Nonproportional loading

Corresponding author: SHANG DeGuang, E-mail: shangdg@bjut.edu.cn, Fax: +86210267391617

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 1017210) and Foundation of Science and Technology Development Project of Education Committee of Beijing of China.

Manuscript received 20031222, in revised form 20040301.

1 引言

工程实际应用中,零部件在危险截面处往往承受多轴疲劳载荷作用,一方面是因为零部件本身几何形状比较复杂,即使在单轴外载作用下其局部仍为多轴应力状态;另一方面是零部件所承受的载荷为多轴组合载荷。因此现有的单轴疲劳研究结果已远远不能满足工程实际的需要。近些年来,由于新一代电液伺服多轴疲劳试验机的出现,使零构件在实际服役中受的复杂载荷历史可得到再现,为多轴疲劳研究提供了有力的手段,从而使人们能更深入地研究多轴疲劳机制,寻找提高多轴疲劳抗力的途径及精确地预测多轴疲劳寿命的方法。目前有关单轴疲劳裂纹萌生与扩展研究较多^[1,3],但关于多轴疲劳裂纹萌生与扩展形貌特性的研究还不多见。Kanazawa^[4]研究了 1Cr2Mo2V 钢疲劳试件表面的多轴疲劳行为,结果表明,非比例加载下,阶

段的疲劳裂纹萌生在最大剪切平面上。但对于工程中常用的中碳钢多轴疲劳裂纹萌生和扩展的形貌特性如何,还有待于研究。为了区分多轴疲劳裂纹萌生与扩展,并合理地定义多轴疲劳裂纹萌生尺寸,从而较为精确地预测工程零部件的疲劳萌生和扩展寿命,下面利用扫描电镜对国产中碳钢多轴疲劳试件的断口面和外表面进行扫描观测研究。通过观测结果研究多轴疲劳裂纹萌生及扩展机理。

2 多轴疲劳试验

试验选用工程常用的 45 中碳钢,取自直径为 60 mm 的热轧棒材,化学成分(重量百分比)如表 1。将棒材加工成毛坯后,对其进行正火处理。热处理工艺为,加热到 850℃,保温 50 分钟后空冷。材料经热处理后的力学性能为 $\sigma_s = 370 \text{ MPa}$, $\sigma_b = 610 \text{ MPa}$, $\delta = 28.4\%$ 。多轴疲劳试样采用薄壁管试样,其工作部分的外径为

X 20031222 收到初稿,20040301 收到修改稿。国家自然科学基金资助项目(10172010),北京市教委科技发展项目。

XX 尚德广,男,1963 年 1 月生,辽宁省昌图县人,汉族。北京工业大学机电学院教授,博士生导师,研究方向为机械结构强度。

表 1 45 钢化学成分

Tab.1 Chemical composition of 45 steel								%
C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Cu	
0.44	0.28	0.66	0.014	0.02	0.03	0.05	0.14	

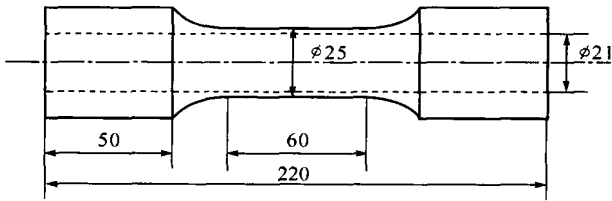


图 1 多轴疲劳试样形状及尺寸

Fig.1 Shape and dimensions of multiaxial fatigue specimen

25 mm,内径为 21 mm,其详细尺寸见图 1。

试验机为 MTS 8092250 kN 拉扭电液伺服材料试验机,所有试验均在室温空气介质下进行。选用轴向与剪切进行应变同时控制的方式,试样标距段上安装标距为 55 mm 的 MTS 632.68C201 型拉扭引伸仪。每隔一定的循环数对四个通道进行数据采集,并用 $X-Y$ 记录仪记录应力应变响应滞回线。试验频率为 0.08 Hz。

等效应力和等效应变分别定义如下

$$\sigma_{eq} = (\sigma^2 + 3\tau^2)^{1/2} \quad (1)$$

$$\epsilon_{eq} = (\epsilon^2 + 3\gamma^2)^{1/2} \quad (2)$$

试验采用正弦波加载

$$\sigma = \sigma_a \sin(\omega t) \quad (3)$$

$$\tau = \tau_a \sin(\omega t - \phi) \quad (4)$$

其中 σ_a 、 τ_a 分别为轴向和剪切应变幅。

试验主要过程如下

- (1) 选用正弦波加载,条件为室温空气介质。
 - (2) 对试验机输出的四个通道(σ , τ , σ , τ)信号进行数据采集,并用 $X-Y$ 记录仪每隔一定的循环周次记录 $\sqrt{3}\sigma-\sqrt{3}\tau$ 、 $-\sqrt{3}\sigma-\sqrt{3}\tau$ 和 $-\sqrt{3}\sigma-\sqrt{3}\tau$ 应力响应图。
 - (3) 当载荷下降至循环应力应变回线发生严重畸变时,此时试件即将完全断裂,试验机自动停机。
- 多轴疲劳试验所选用的应变加载路径如图 2,其加载控制参数如表 2。

试样断后,保存断口,然后在扫描电镜上对断口和试样表面进行观测。

3 表面多轴疲劳裂纹观测

3.1 多轴疲劳裂纹萌生位向

多轴疲劳试验中,试样断后在试样的应变范围之内取若干个面积约为 $(10 \times 10) \text{ mm}^2$ 的标样,然后利用 Philips505 扫描电镜对标样的外表面进行观察,发现所有标样表面均有裂纹存在,即试样整个应变规范范围之内均存在裂纹。靠近断口的标样表面裂纹密度明显

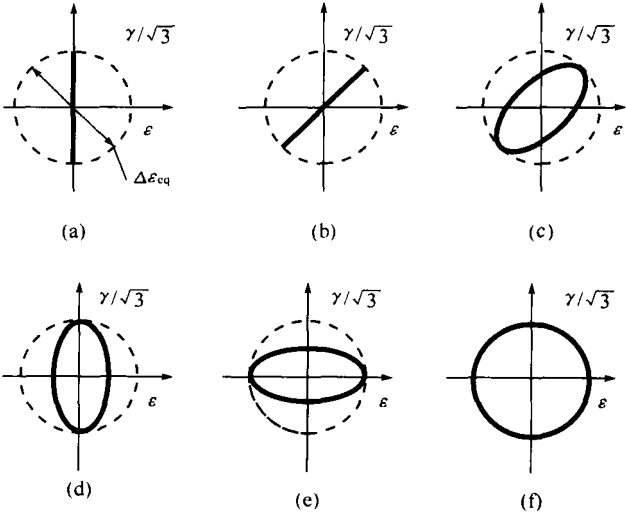


图 2 加载路径示意图

Fig.2 Schematic diagram of loading paths

表 2 多轴疲劳试验控制参数

Tab.1 Control parameters of multiaxial fatigue tests							
应变路径 Strain path	γ	$\frac{\sigma_a}{\sigma_y}$ %	$\frac{\tau_a}{\tau_y}$ %	R	$\frac{\sigma_a}{\sigma_y}$ %	R	N_f cycle
A	0	0.8	0	—	1.386	-1	1671
B	$\sqrt{3}$	0	0.8	0.566	-1	0.979	1085
C	$\sqrt{3}$	45	0.7	0.566	-1	0.979	681
D	$2\sqrt{3}$	90	0.8	0.400	-1	1.386	662
E	$\sqrt{3}P_2$	90	0.8	0.800	-1	0.693	440
F	$\sqrt{3}$	90	0.8	0.800	-1	1.386	384

注: $\sigma_a = P_a$

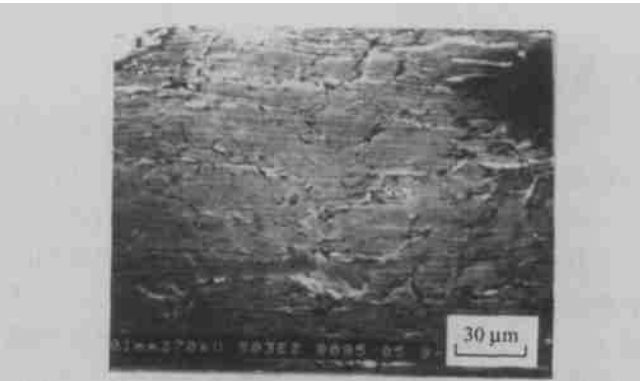


图 3 $\gamma = 45^\circ$ 非比例加载路径下表面裂纹形貌

Fig.3 Surface crack appearance under $\gamma = 45^\circ$ nonproportional loading path

增多。这说明对于光滑试样,疲劳过程初期裂纹在试样表面散布萌生,在疲劳过程的后期,便显示出损伤局部化现象,最后疲劳断裂便在此局部化区域内发生。为了在较小的扫描电镜视场内观测到更多的短裂纹,取靠近断口部位试样外表面 $(0.4 \times 0.4) \text{ mm}^2$ 的面积为视场,观测统计出表面裂纹的位向。图 3 为典型的多轴疲劳表面裂纹形貌。根据单轴疲劳短裂纹形成与扩展的分析经验,取长 $25 \mu\text{m}$ 左右的短裂纹为统计对象。

图 4 为纯扭加载下试样表面裂纹位向分布统计直

方图。从中可以看出,纯扭加载下裂纹萌生位向多数是在平行于试样轴线和垂直于试样轴线两个方向,其中平行于轴线的裂纹居多。通过计算纯扭下的最大剪切平面位向可以发现,与试样轴线的两个夹角 $=0^\circ$ 、 90° 正是两个最大剪切平面的位向(图中虚线表示最大剪切平面与试样轴线夹角的位置,以下同)。因而纯扭加载下的疲劳裂纹绝大多数萌生在两个互相垂直的最大剪切平面上。

图 5 为应变路径 B 比例加载下的裂纹分布情况,可以发现,试样表面所萌生的小裂纹比纯扭分散性要大一些,但小裂纹分布也主要在两个最大剪切平面的位向上。

图 6 为 $=\sqrt{3}$ 、 $=45^\circ$ 应变路径 C 非比例加载下的表面裂纹分布图。可以看出,此时表面裂纹位向分

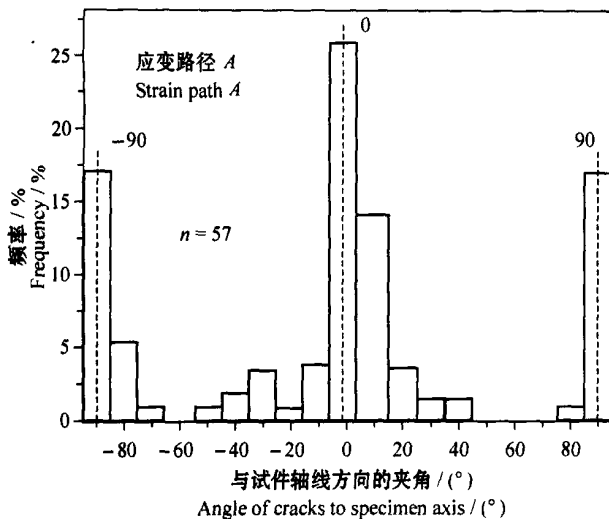


图 4 纯扭加载下(应变路径 A)表面裂纹位向分布直方图

Fig. 4 Distribution of surface fatigue crack orientations under pure loading (strain path A)

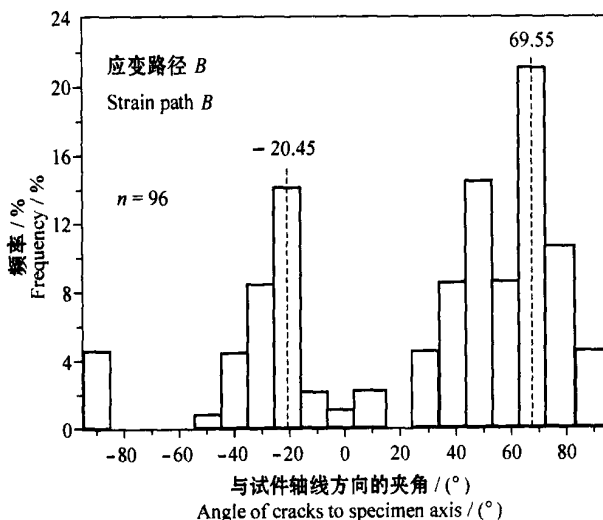


图 5 应变路径 B 比例加载下的表面裂纹位向的分布

Fig. 5 Distribution of the surface fatigue cracks directions under proportional loading (strain path B)

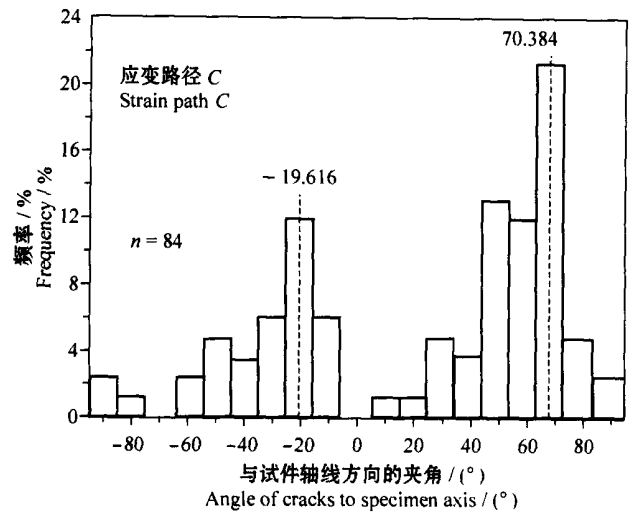


图 6 45° 非比例应变路径 C 加载下表面裂纹位向分布

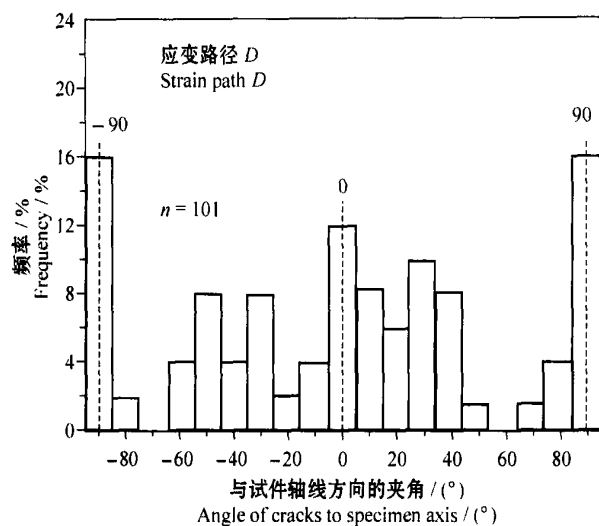
Fig. 6 Distribution of the surface fatigue crack orientations under 45° nonproportional loading (strain path C)

布的分散性也较大。在此情况下,最大剪切平面的位向为 -19.616° 、 70.384° 两个正交方向,但在 70.384° 的最大剪切平面上承受的法向应变值比另一个的法向应变值要大一些,尽管在 -19.616° 的方向上也分布较多的微裂纹,但与 70.384° 的最大剪切平面上的分布裂纹数量相比要少些。

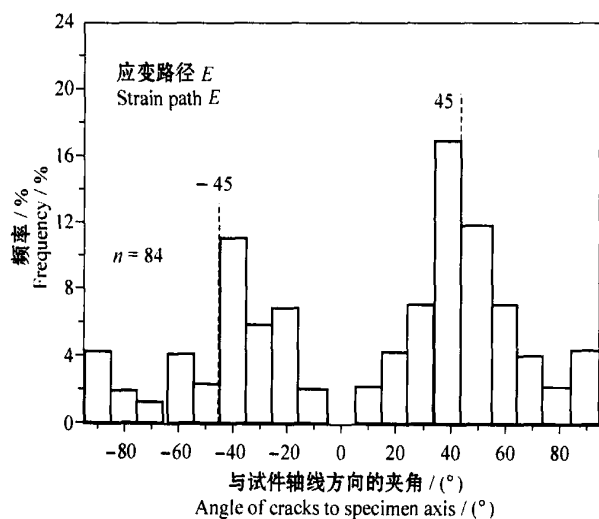
图 7 为 $=2\sqrt{3}$ 、 $\sqrt{3}P_2$ 、 $=90^\circ$ 两种非比例椭圆路径 D、E 下的表面裂纹位向分布图,其裂纹分布特性与 45° 非比例下(应变路径 C)的形式相比,分散性进一步增大,但特性还是相同的,即裂纹主要在两个最大剪切平面的位向上分布,且在具有较大法向应变的最大剪切平面上裂纹分布较多些。

这表明非比例加载下裂纹萌生的位向分布与比例加载和纯扭情况相比,其共同特点是裂纹均萌生在最大剪切平面的位向上,不同之处为,非比例加载下所萌生的裂纹分散性比较大,且多数裂纹萌生在具有较大法向应变的最大剪切平面上。主要原因为,比例加载下由于施加的拉扭应变为同相位,最大剪切应变 σ_{\max} 与主应变 ϵ_1 在循环加载过程中只改变值的大小,而不改变其方向,即 σ_{\max} 只在两个最大剪切平面上改变值的大小。而在非比例加载下,由于最大剪切应变 σ_{\max} 与主应变 ϵ_1 值不但在循环中改变值的大小,而且其方向也发生改变,即非比例加载使应力应变发生了旋转,使其他平面有时会经历最大剪切应变,从而成为裂纹萌生的有利面,导致非比例加载下裂纹萌生位向分散性增大。由于法向应变对裂纹萌生具有促进作用,使其在具有较大法向应变的最大剪切平面位向上萌生裂纹增多。通过比较也可以看出,裂纹分布的分散性的大小与相位差有关,相位差越大,其分散性越大。

对于 90° 非比例圆形加载 F 路径,其表面裂纹分



(a) D 路径
(a) Loading path D



(b) E 路径
(b) Loading path E

图 7 90° 非比例椭圆路径 D、E 下表面裂纹位向分布

Fig. 7 Distribution of the surface fatigue crack directions under 90° nonproportional loadings (D and E paths)

布如图 8 所示。可以发现,在这种情况下表面裂纹位向分布比较均匀,几乎每个方向都可以萌生裂纹,但相对比较而言,在 0 和 90° 方位上裂纹稍多。其原因是在这种路径下,每个方向几乎具有相同的剪切应变,都有利于裂纹萌生。在 0 和 90° 面上,由于剪切应变值稍大于其他方位上的剪切应变值,且在 0° 方位上,法向应变值最大,因而这两个方位上的裂纹分布较多,且 0° 方位上的裂纹分布稍多一些。从疲劳寿命试验结果可以发现,在相同等效应变幅下,该路径的疲劳寿命最短,表明该加载路径下疲劳损伤相对其他路径更严重。这种路径下的表面裂纹萌生机理的特点是导致疲劳寿命缩短的原因之一。

3.2 多轴疲劳裂纹扩展特性

在纯扭 A 路径加载条件下,裂纹在两个互相正交的最大剪切平面上萌生,并在这两个方位进行扩展,最

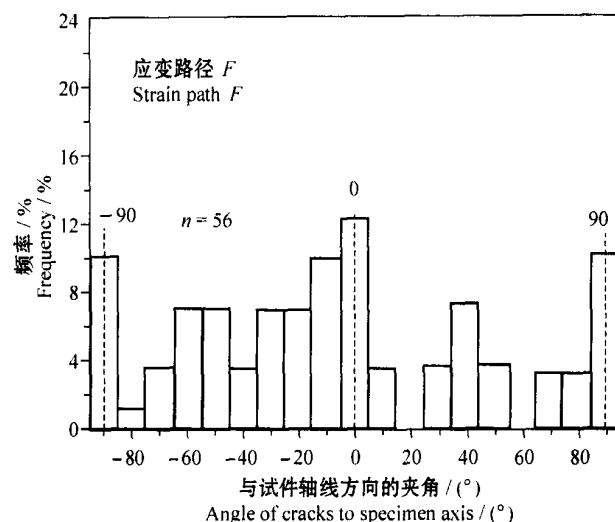


图 8 圆形路径下表面裂纹位向分布

Fig. 8 Distribution of the surface fatigue crack orientations under nonproportional circle loading

后连接成长裂纹导致疲劳断裂。图 9 为纯扭加载下的表面裂纹扩展形貌。从中可以明显地看出两组正交裂纹的连接特点,而其他角度的裂纹基本不发生扩展,即变成了非扩展裂纹。

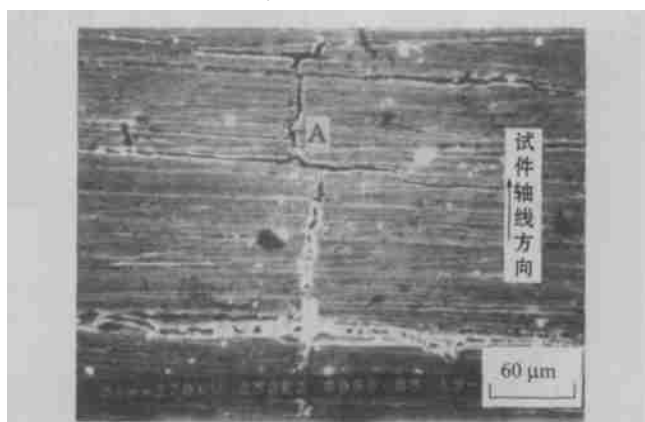


图 9 纯扭加载下裂纹扩展形貌

Fig. 9 Appearance of the surface crack propagation under pure torsional loading

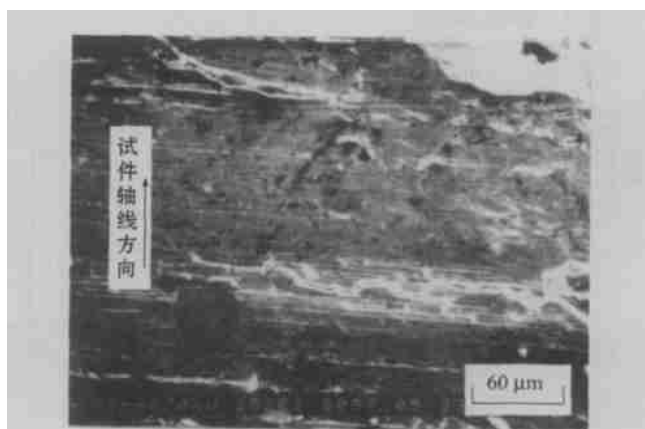


图 10 比例加载 B 路径下表面裂纹扩展形貌

Fig. 10 Appearance of the surface crack propagation under proportional loading (B strain path)

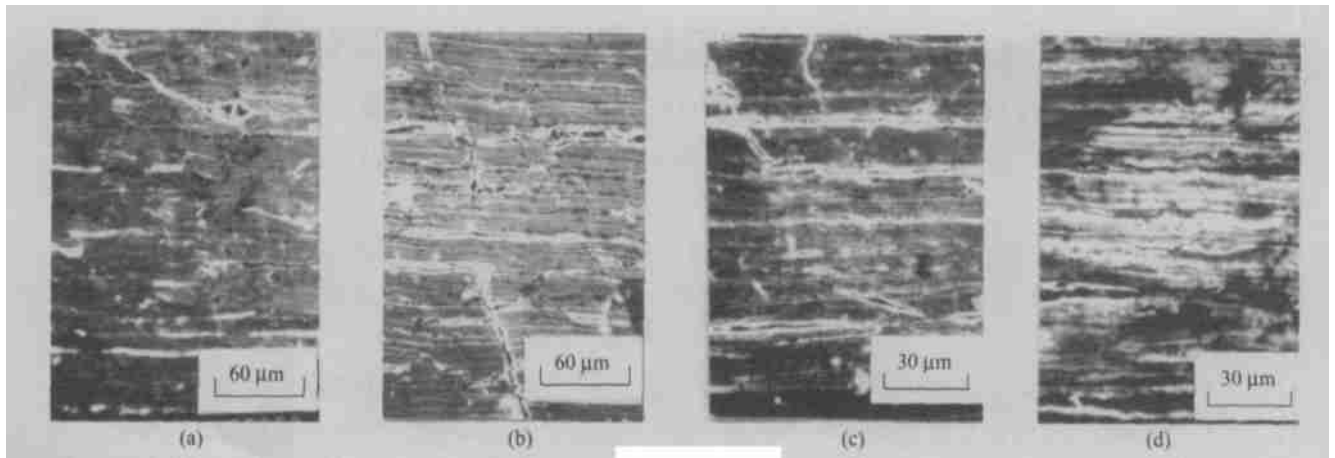


图 11 非比例加载下表面裂纹扩展形貌

Fig. 11 Appearance of the surface crack propagation under non-proportional loading

比例加载 B 路径下的表面裂纹扩展形貌如图 10, 可见微裂纹萌生后基本上沿着原来的方向扩展, 扩展到一定长度后与其他裂纹相互连接, 成为破坏性长裂纹, 其中也有一部分裂纹垂直于试样轴线扩展。这说明在比例加载下, 微裂纹萌生后也基本沿着最大剪切平面的方位扩展, 但扩展方向有向试样轴线垂直方位扩展趋势。

非比例加载下的表面裂纹扩展行为如图 11, 其中图 11a 为 $\gamma = \sqrt{3}$ 、 $\gamma = 45^\circ$ 的非比例椭圆路径, 图 11b、c 分别为 $\gamma = 2\sqrt{3}$ 、 $\gamma = \sqrt{3}P_2$ 下的 90° 非比例 D 、 E 椭圆路径, 图 11d 为圆形 F 路径。可以发现, 非比例加载下的表面裂纹主要是在垂直于试样轴线方位扩展, 同时也存在一些裂纹仍沿着最大剪切平面的方向扩展 (如图中的斜裂纹)。

4 结论

1) 对 45 钢材料的薄壁管试件, 在拉扭多轴加载下, 试件表面所形成的疲劳裂纹主要分布在两个最大剪切平面方向上。比例加载条件下裂纹分布的分散性小, 非比例加载条件下分散性大, 且随着相位差的增

大, 分散性进一步增大。

2) 非比例加载下, 在具有较大法向应变的最大剪切平面位向上, 所萌生的疲劳裂纹的数量要多于存在较小的法向应变的最大剪切平面位向上的裂纹。

3) 多轴疲劳裂纹主要是沿着最大剪切平面或垂直于最大正应变方向扩展。

References

- 1 Carstensen J V, Magnin T. Characterization and quantification of multiple crack growth during low cycle fatigue. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23, S(1): 195 ~ 200.
- 2 Goto M, David KM. Initiation and propagation behaviour of microcracks in Ni2base superalloy Udimet 720 Li. *Engineering Fracture Mechanics*, 1998, 60(1): 1 ~ 18.
- 3 Demulsant X, Mendez J. Microstructural effects on small fatigue crack initiation and growth in Ti6Al14V alloys. *Fatigue Fracture Engng Mater. Structures*, 1995, 18: 1 483 ~ 1 497.
- 4 Kanazawa K, Miller KJ, Brown M W. Low cycle fatigue under out of phase loading conditions. *Trans ASME, J Engng Mater. Tech.*, 1977, 99: 222 ~ 228.
- 5 Shang DeGuang. Research on multiaxial fatigue damage and life prediction [Ph D Thesis]. Shenyang: Northeastern University, 1996 (In Chinese) (尚德广. 多轴疲劳损伤与寿命预测研究 [博士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 1996).