

比例与非比例加载下 30CrMnSiA 钢多轴高周疲劳失效分析

亓新新¹, 张 婷², 时新红¹, 张建宇³, 费斌军¹

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191;

3. 重庆大学 航空航天学院, 重庆 400044)

摘 要: 为了分析比例与非比例加载下, 30CrMnSiA 钢的多轴高周疲劳的失效规律。通过对 30CrMnSiA 钢材料开展比例与非比例($\delta=90^\circ$)加载下的多轴高周疲劳试验, 研究了应力幅比和相位差对疲劳寿命、断口特征及裂纹起裂角度的影响。试验结果表明, 对于比例与非比例加载, 随着应力幅比的增大, 多轴疲劳寿命逐渐增加。对疲劳断口分析发现, 裂纹萌生于试件表面, 断口有明显的疲劳源区、扩展区和瞬断区, 不同加载路径下的试件断口形式有明显差异。通过对起裂角度的分析发现, 应力幅比大于 0.25 时表面裂纹有明显的第 I 阶段向第 II 阶段的转变, 且第 I 阶段沿着接近最大剪应力幅值平面方向扩展, 第 II 阶段沿着接近最大正应力平面方向扩展。此外, 对典型试件的疲劳断口及表面扩展路径进行了分析, 研究表明多轴疲劳试验试件裂纹的特征比值在 0.3~0.5 之间, 且裂纹沿深度方向扩展至 300 μm 时占总寿命的 85% 以上。

关 键 词: 多轴疲劳; 30CrMnSiA 钢; 应力幅比; 相位差; 裂纹扩展路径; 断口特征

中图分类号: V215.5⁺4; O346.2⁺3

文献标志码: A

Analysis on multiaxial high-cycle fatigue failure of 30CrMnSiA steel under proportional and non-proportional loading

QI Xinxin¹, ZHANG Ting², SHI Xinhong¹,

ZHANG Jianyu³, FEI Binjun¹

(1. School of Aeronautic Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

3. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To analyze the failure law of high cycle multiaxial fatigue of 30CrMnSiA steel under proportional and non-proportional loading, multiaxial fatigue tests were carried out using 30CrMnSiA steel specimens under proportional and non-proportional ($\delta=90^\circ$) loading. The effects of stress amplitude ratio and phase angle on the fatigue life, fracture characteristics and crack initiation angle were analyzed. The results showed that the multiaxial fatigue life increased with the growing stress amplitude ratio for both proportional and non-propor-

收稿日期: 2019-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(11172021)

作者简介: 亓新新(1991—), 女, 博士生, 主要从事多轴疲劳失效研究。

通讯作者: 张婷(1986—), 女, 博士后, 主要研究方向为飞行器结构强度。E-mail:13466380139@163.com

引用格式: 亓新新, 张婷, 时新红, 等. 比例与非比例加载下 30CrMnSiA 钢多轴高周疲劳失效分析[J]. 航空动力学报, 2019, 34(6): 1237-1245. QI Xinxin, ZHANG Ting, SHI Xinhong, et al. Analysis on multiaxial high-cycle fatigue failure of 30CrMnSiA steel under proportional and non-proportional loading[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(6): 1237-1245.

tional loadings. The fatigue source region, propagation region and final fracture region can be clearly observed. The transition of crack from stage I to stage II was observed when stress amplitude ratio was greater than 0.25 through analysis of crack initiation angles. And the stage I propagation of the main crack was approximately along the maximum shear stress amplitude plane. Stage II propagation of the main crack was approximately along the maximum normal stress plane. In addition, the crack aspect ratios of multiaxial fatigue test specimen were between 0.3 and 0.5, and the fatigue life corresponding to a 300 μm depth occupied more than 85% of the total fatigue life through analysis of fracture and surface crack path.

Key words: multiaxial fatigue; 30CrMnSiA steel; stress amplitude ratio; phase angle; crack path; fracture characteristics

在航空航天领域,许多零部件都承受着多轴疲劳载荷,例如机翼、起落架、发动机叶片等同时承受着拉压、扭转和弯曲等复杂载荷的相互作用。由于 30CrMnSiA 钢具有较高的强度、良好的韧性和抗疲劳性能好等优点,已广泛应用于航空航天等领域。

多轴疲劳问题自提出以来,对于金属材料多轴疲劳的研究,不同学者已经提出了许多失效准则^[1-3],其中临界面法因为具有一定的物理含义,可以很好的解释疲劳失效的过程。一般情况下,临界面法认为裂纹萌生于某个特定的平面,且该平面上的应力分量对疲劳失效均有影响。Ohkawa 和 Vu 等^[4-5]采用裂纹复型技术分别研究了 S45C 钢和 C35 钢的裂纹萌生和扩展行为,发现在多轴加载下,裂纹扩展第 I 阶段沿着最大剪应力平面,裂纹由扩展第 I 阶段向第 II 阶段的转变长度受加载的应力幅比和相位差的影响。Miller 等^[6]认为裂纹沿试件深度方向的扩展也同样重要,提出裂纹沿深度方向的扩展长度是一个重要的损伤参量。Hua 等^[7]将裂纹的特征比值定义为裂纹沿深度方向的扩展长度与表面裂纹扩展长度比值,通过对 1045 钢开展多轴低周疲劳试验研究表明应力幅比对裂纹的特征比值影响很大。Verreman 等^[8]采用 Hua 等对特征比值的定义,通过对 1045 钢开展多轴高周疲劳试验,研究发现应力幅比对裂纹沿深度方向的扩展形状影响很大,且对于单轴加载、比例拉扭复合加载、非比例应力幅比为 2 时拉扭复合加载下的裂纹扩展形状均为半圆形。Campagnolo、Meneghetti 等^[9-10]采用电位法对 Ti-6Al-4V 合金疲劳裂纹沿试件深度方向进行测量,认为对于纯扭和弯扭复合加载,裂纹为圆环形;对于单轴加载,裂纹为椭圆形;对于单弯加载,裂纹为双椭圆形。此外,许多学者^[11-17]还对其他材料在多轴疲劳加载下的裂纹萌生与扩

展进行了研究。
本文通过开展 30CrMnSiA 高强度钢在比例与非比例加载下的多轴高周疲劳试验,得到了应力幅比和相位差对多轴高周疲劳寿命的影响;通过对断口及表面扩展路径的分析与计算,研究了应力幅比和相位差对裂纹扩展角度、裂纹的特征比值的影响。

1 多轴高周疲劳试验和试件

试验所采用的材料为 30CrMnSiA 高强度钢,材料化学成分及质量分数如表 1 所示,基本力学性能如表 2 所示^[18-19],其中 E 为弹性模量, G 为

表 1 30CrMnSiA 钢的化学成分及质量分数
Table 1 Chemical composition and mass fraction of 30CrMnSiA steel

化学成分	质量分数/%	化学成分	质量分数/%
C	0.31	W	0.01
Mn	0.85	Mo	0.02
Si	0.99	V	0.01
P	0.01	Cu	0.18
Ni	0.05	Ti	0.003
Cr	0.87	Fe	余量

表 2 30CrMnSiA 钢的基本力学性能
Table 2 Mechanical properties of 30CrMnSiA steel

力学性能参数	数值
E	207 GPa
G	77.2 GPa
σ_y	1 196 MPa
σ_u	1 334 MPa
τ_y	825 MPa
τ_n	1 040 MPa

切变模量, σ_y 为拉伸屈服强度, σ_u 为拉伸强度, τ_y 为扭转屈服强度, τ_u 为扭转强度。

多轴高周疲劳试验所采用的试件尺寸如图 1 所示。

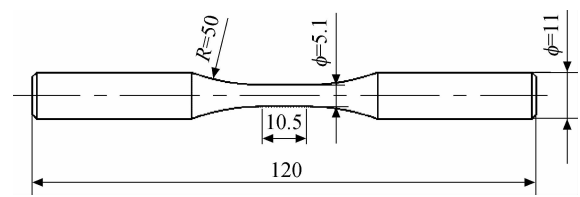


图 1 疲劳试件尺寸和形状(单位:mm)
Fig. 1 Shape and dimensions of the fatigue test specimens (unit:mm)

多轴疲劳试验在 MTS 858 电液伺服拉扭组合试验机上进行开展,试验环境为室温大气,试验采用载荷和扭矩控制、正弦波加载,加载频率为 $f=6\text{ Hz}$,疲劳寿命定义为试件完全断裂。加载波形如下:

$$\sigma_x(t) = \sigma_{x,a} \sin \omega t \tag{1}$$

$$\tau_{xy}(t) = \tau_{xy,a} \sin(\omega t - \delta) \tag{2}$$

$$\lambda = \tau_{xy,a} / \sigma_{x,a} \tag{3}$$

式中 $\sigma_x(t)$ 为轴向应力, $\sigma_{x,a}$ 为轴向应力幅; $\tau_{xy}(t)$ 为切应力, $\tau_{xy,a}$ 为切应力幅; δ 为相位差, λ 为应力幅比, ω 为角频率, t 为加载时间。

Mises 应力幅 $\sigma_{eq,a}$ 为

$$\sigma_{eq,a} = \sqrt{\sigma_{x,a}^2 + 3\tau_{xy,a}^2} \tag{4}$$

取恒定等效应力幅 $\sigma_{eq,a}=700\text{ MPa}$,开展六种应力幅比 $\lambda=0, 0.25, 0.5, 1.0, \sqrt{3}, \infty$ 和两种相位差 $\delta=0^\circ$ (比例加载)、 $\delta=90^\circ$ (非比例加载) 下的多轴疲劳试验。试验加载路径如图 2 所示,每种加载路径下的应力幅值大小和相位差如表 3 所示。

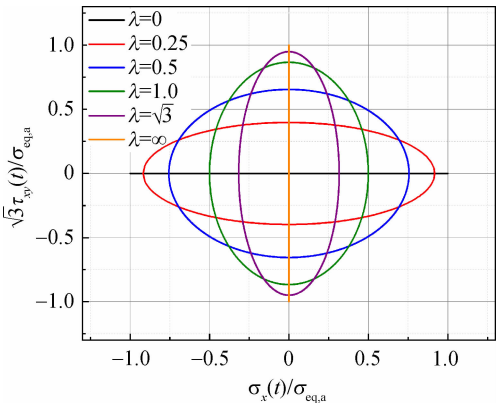


图 2 多轴疲劳试验加载路径
Fig. 2 Loading paths used in the multiaxial fatigue test

表 3 多轴疲劳试验中施加的应力幅值
Table 3 Stress amplitude applied in multiaxial fatigue test

λ	$\delta/(^\circ)$	$\sigma_{x,a}/\text{MPa}$	$\tau_{xy,a}/\text{MPa}$
0		700	0
0.25	0		
	90	642.36	160.59
0.5	0		
	90	529.15	264.58
1.0	0		
	90	350	350
$\sqrt{3}$	0		
	90	221.36	383.41
∞		0	404.15

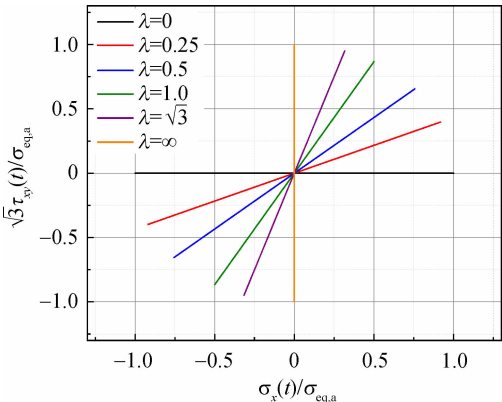
2 分析与讨论

2.1 疲劳寿命试验结果分析

比例与非比例加载下,30CrMnSiA 钢的多轴疲劳寿命随应力幅比的变化如图 3 所示。从图中可以得出:在等效 Mises 应力为 700 MPa 下,单拉 ($\lambda=0$) 疲劳寿命最短,而纯扭 ($\lambda=\infty$) 疲劳寿命最长,且纯扭寿命约为单拉寿命的 21.6 倍;对于比例加载与非比例加载,多轴疲劳寿命均随着应力幅比 λ 的增大而明显增加;在应力幅比相同时,非比例加载下的疲劳寿命略高于比例加载的情况。

2.2 断口分析

疲劳断裂后的断口采用 JSM-6010LA 扫描电镜进行观测,获得多轴疲劳试件断口的宏观形貌及疲劳源区微观形貌。为了便于比较断口特



(a) 比例加载($\delta=0^\circ$)

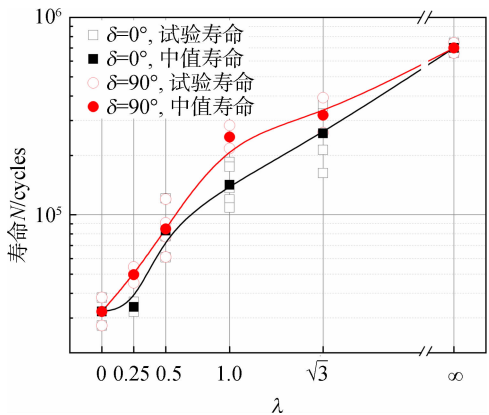


图 3 应力幅比对多轴疲劳寿命的影响
Fig. 3 Effect of stress amplitude ratios on multiaxial fatigue life

征,宏观断口的放大倍率为 14~16,源区微观形貌的放大倍率为 500 和 1000。

对于比例加载,不同应力幅比下多轴疲劳试件的断口宏观全貌如图 4 所示。从图中可以看出,断口上有明显的疲劳起源、扩展和瞬断特征,裂纹起源于试件表面,如图中箭头所示。当 $\lambda=0$ 即单拉加载时,断口存在多个源区,断口表面有明显的台阶特征,该特征由相邻但不在同一平面上的源区在裂纹扩展过程中汇合时所形成。当 $\lambda=\infty$ 即纯扭加载时,由于承受反复的扭转载荷,断口表面有明显的摩擦痕迹。随着应力幅比的增加,断口台阶特征逐渐消失,指向源区的放射线越来越不明显,瞬断区域面积减小,且摩擦的痕迹越来越明显。

比例加载下,疲劳源区的微观形貌如图 5 所

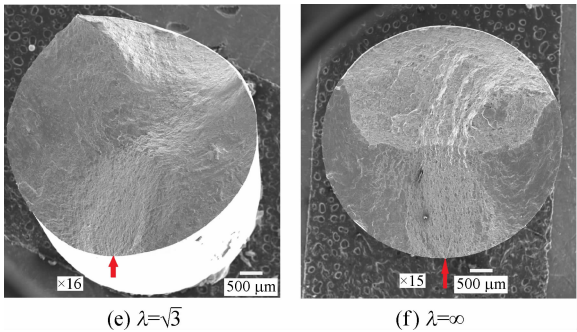
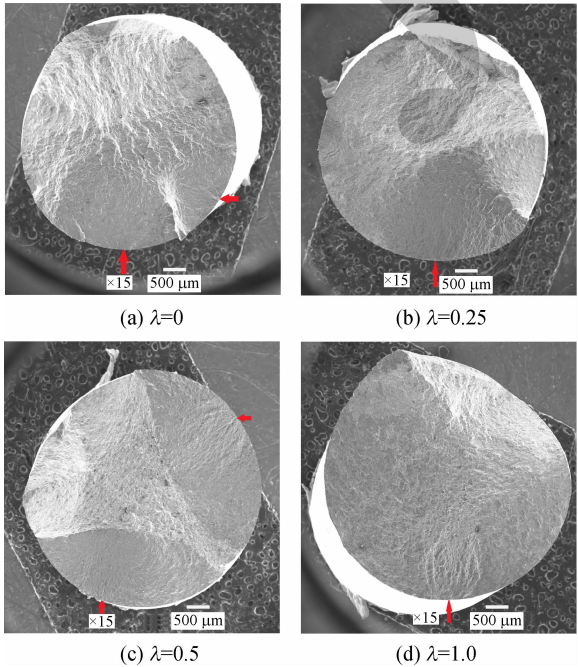


图 4 比例加载时不同应力幅比下的宏观断口
Fig. 4 Macroscopic fracture morphologies at different stress amplitudes ratios under proportional loading

示。可以看出,侧面存在明显的滑移特征,随着循环次数的增加,在滑移带处出现明显的“挤入挤出”现象,形成凹坑,如图中箭头所示。随着 λ 的增加,扭转载荷比例增加,蛇形滑移特征越来越明显;而对于应力幅比 $\lambda=0, 0.25$ 的情况,蛇形滑移特征不明显,究其原因,可能是由于在缺陷处起裂引起的。此外,随着应力幅比的增加,源区由位错引起的撕裂棱特征越来越明显。

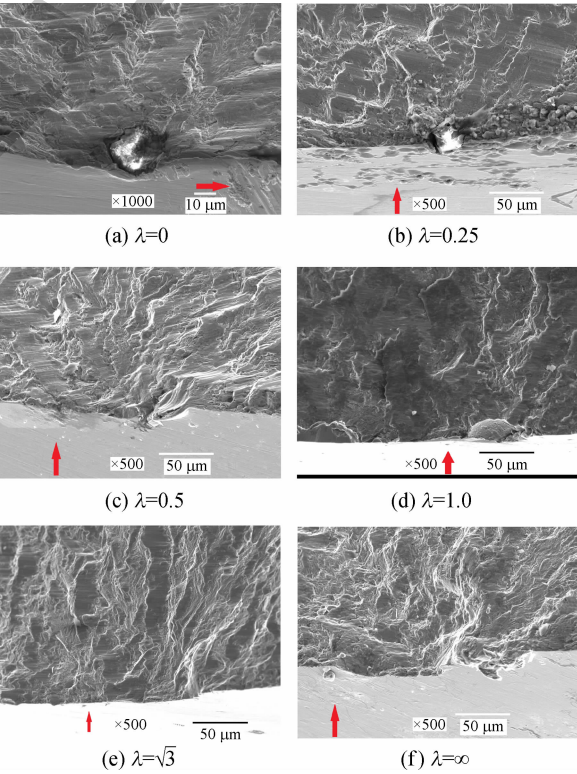


图 5 比例加载时不同应力幅比下的疲劳源区微观特征
Fig. 5 Microscopic characteristics of fatigue origin at different stress amplitudes ratios under proportional loading

对于非比例加载,不同应力幅比下多轴疲劳试件的断口宏观全貌如图 6 所示。断口有明显的疲劳源区、扩展区和瞬断区,裂纹起源于试件表面,如图中箭头所示。非比例加载下,断口呈现河床特征,且指向源区的放射线不明显。随着应力幅比的增加,由于承受反复的扭转载荷,摩擦的痕迹越来越明显。

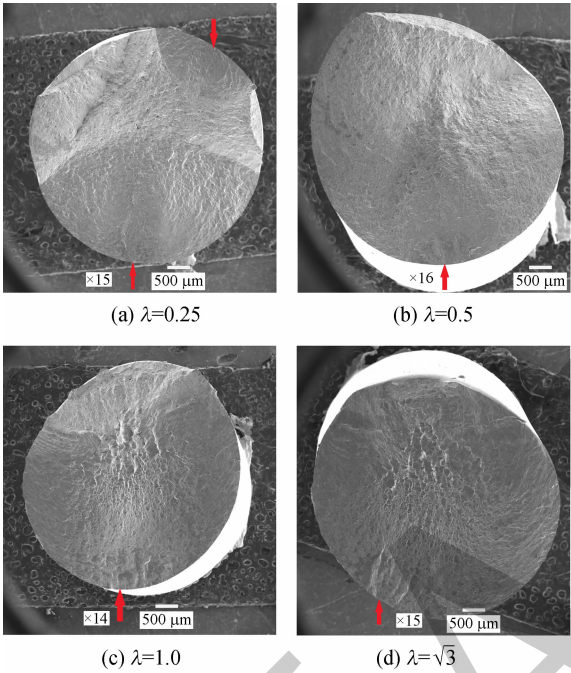


图 6 非比例加载时不同应力幅比下的宏观断口
Fig. 6 Macroscopic fracture morphologies at different stress amplitudes ratios under non-proportional loading

非比例加载下,疲劳源区的具体形貌如图 7 所示。与比例加载情况类似,侧面存在明显的滑移特征,在图 7(a)中可以看到明显的由滑移引起的“挤入挤出”现象,如图中箭头所示。非比例加载情况下,断口未出现滑移引起的蛇形滑动特征,而是出现了较多的二次裂纹,究其原因可能是拉伸载荷与扭转载荷施加过程中的时间延迟造成的。与其他加载情况相比,应力幅比 $\lambda=0.5$ 的微观形貌剪切特征明显,可能是由于载荷特征引起的。

2.3 初始裂纹扩展角度分析

对试件表面扩展路径进行观测,测得裂纹法线与试件轴向之间的夹角为裂纹扩展角度,测量方法如图 8 所示,图中,对于第 I 阶段、第 II 阶段分别用 α 、 β 表示。

比例与非比例加载时,不同应力幅比下的最大剪应力幅值平面(MSSA)与最大正应力平面

(MN)的方向角 θ_{MSSA} 、 θ_{MN} 如表 4 所示。对于比例与非比例加载,不同应力幅比下多轴疲劳试件典型表面扩展路径分别如图 9、图 10 所示。

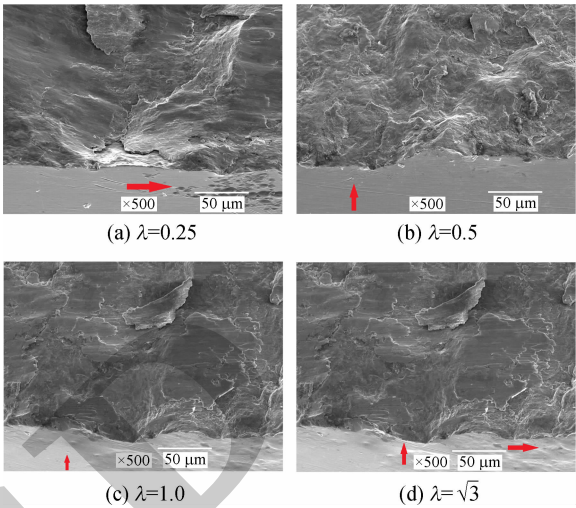


图 7 非比例加载时不同应力幅比下的疲劳源区微观特征
Fig. 7 Microscopic characteristic of fatigue origin at different stress amplitudes ratios under non-proportional loading

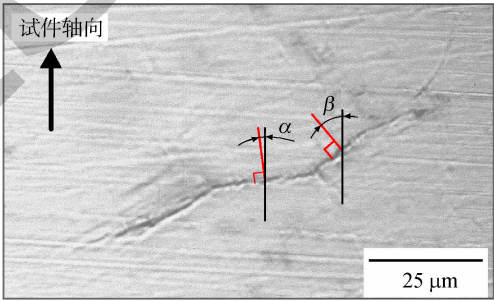


图 8 裂纹起裂扩展角测量示意图
Fig. 8 Schematic diagram of crack initiation angle

表 4 最大剪应力幅值平面和最大正应力平面方向角
Table 4 Calculated MSSA and MN orientations

λ	$\delta/(^{\circ})$	$\theta_{MSSA}/(^{\circ})$	$\theta_{MN}/(^{\circ})$
0.25	0	-31.7/58.3	13.3
	90	± 45	0
0.5	0	-22.5/67.5	22.5
	90		0
1.0	0	-13.3/76.7	31.7
	90	0/90	± 35.3
$\sqrt{3}$	0	-8/82	37
	90	0/90	± 42.4

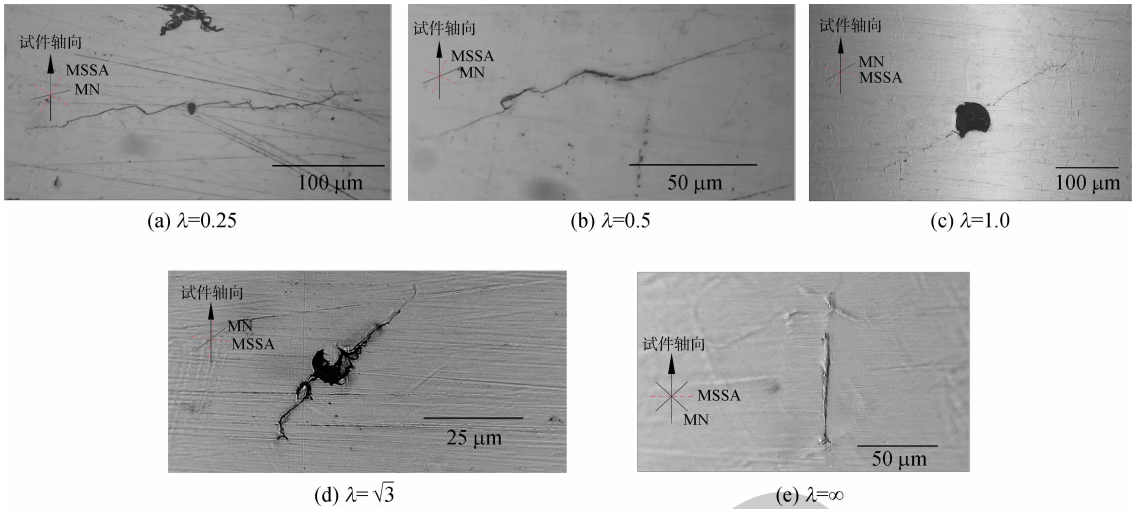


图 9 比例加载时不同应力幅比下的试件表面裂纹扩展路径

Fig. 9 Crack path of the multiaxial fatigue test specimens at different stress amplitudes ratios under proportional loading

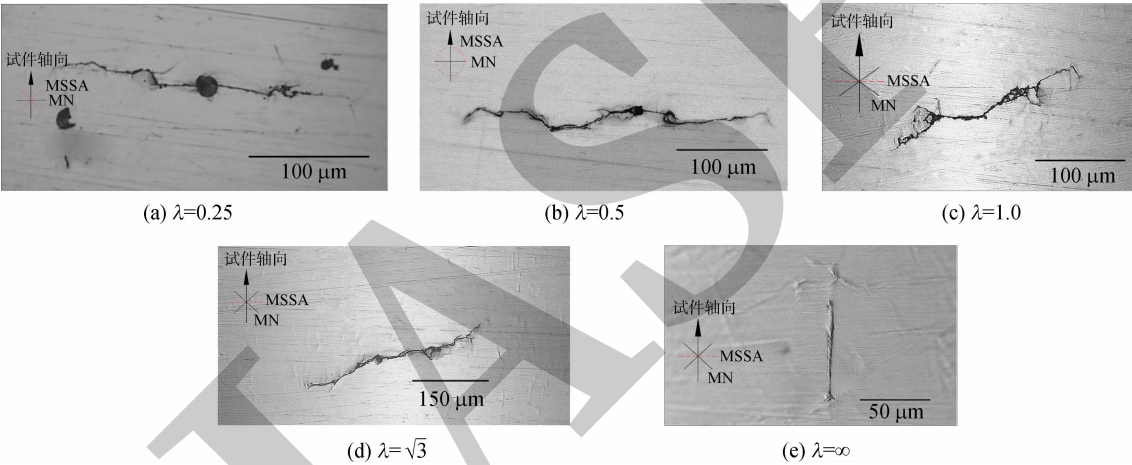


图 10 非比例加载时不同应力幅比下的试件表面裂纹扩展路径

Fig. 10 Crack path of the multiaxial fatigue test specimens at different stress amplitudes ratios under non-proportional loading

由表 4 可知,除 90° 非比例、 $\lambda=0.5$ 的加载外,其他加载条件下均存在两个最大剪应力幅值平面。对于 90° 非比例、 $\lambda=0.5$ 的情况,最大剪应力幅值在任意平面上为恒值,其中垂直于试件轴向的平面承受最大的正应力,因此为危险平面,如图 10(b)所示,裂纹扩展主要沿着最大正应力平面方向附近,但整个扩展过程方向是一直变化的,无明显的第 I 阶段向第 II 阶段的转变,这也是可能导致图 7 中断口源区微观特征差异的原因。在比例加载下,只存在一个最大正应力平面。对于非比例加载, $\lambda=0.25, 0.5$ 时,仅存在一个最大正应力平面且该平面垂直于试件轴向;而 $\lambda=1.0, \sqrt{3}$ 时,存在两个最大正应力平面,且这两个平面关于试件轴向对称。

比例与非比例加载下,多轴疲劳试件裂纹扩

展方向随应力幅比的变化如图 11 所示。对于 $\lambda=0$ 即单轴拉压加载时,裂纹为 I 型裂纹,沿着最大正应力平面方向扩展;对于 $\lambda=\infty$ 即为纯扭加载时,裂纹主要沿着两个最大剪应力幅值平面方向扩展。

由图 11(a)可知,比例加载下, $\lambda=0.25$ 拉扭复合加载时,裂纹无明显的第 I 阶段向第 II 阶段的转变,沿着接近最大正应力平面方向扩展;应力幅比大于 0.25 时,裂纹有明显的扩展第 I 阶段向第 II 阶段的转变,且第 I 阶段主要沿着两个接近最大剪应力幅值平面方向扩展,第 II 阶段沿着接近最大正应力平面方向扩展。

由图 11(b)可知,非比例加载下,对于 $\lambda=0.25$ 拉扭复合加载时,裂纹无明显的第 I 阶段向第 II 阶段的转变,沿着接近最大正应力平面方向扩展;当 $\lambda=1.0, \sqrt{3}$ 时,裂纹有明显的扩展第 I 阶

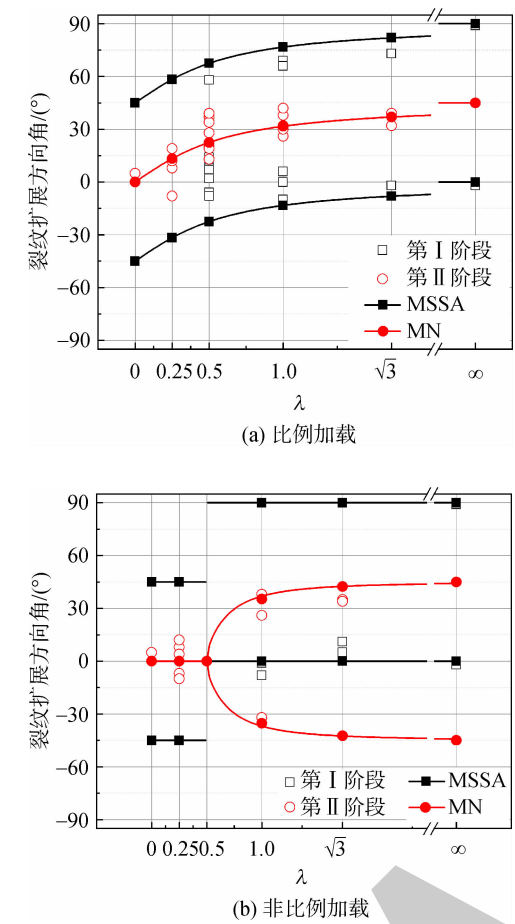


图 11 多轴疲劳试验试件裂纹扩展方向
Fig. 11 Crack initiation direction of the multiaxial fatigue test specimens

段向第Ⅱ阶段的转变,且第Ⅰ阶段主要沿着接近 0° 的最大剪应力幅值平面方向扩展,第Ⅱ阶段沿着接近最大正应力平面方向扩展。

2.4 裂纹特征比值分析

Hua 和 Verreman 等^[7-8]采用裂纹复型技术,可通过最终裂纹来确定裂纹起裂位置,将扩展阶段裂纹的特征比值定义为裂纹扩展深度 a 与裂纹扩展路径长度 $2c$ 的比值,如图 12 所示。

比例与非比例加载下,30CrMnSiA 钢的多轴

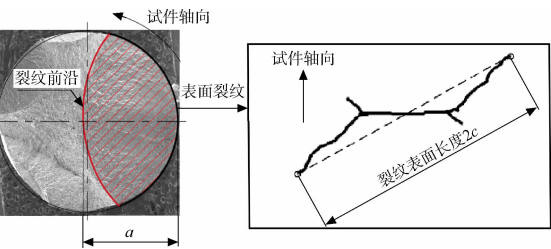


图 12 裂纹扩展深度及表面裂纹长度测量示意图
Fig. 12 Schematic diagram of crack growth depth and surface crack length measurement

疲劳裂纹的特征比值 $\bar{R}$ 随应力幅比的变化如图 13 所示。从图中可以看出,对于多轴疲劳试验试件裂纹的特征比值基本上在 0.3~0.5 之间。

比例与非比例加载下,多轴疲劳裂纹扩展深度随疲劳寿命的变化如图 14 所示。多轴疲劳裂

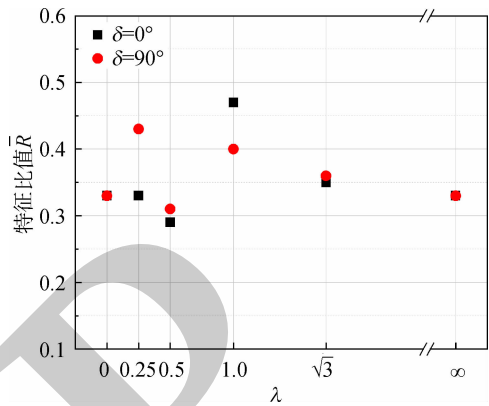


图 13 多轴疲劳试验试件裂纹的特征比值
Fig. 13 Aspect ratios of the multiaxial fatigue test specimens

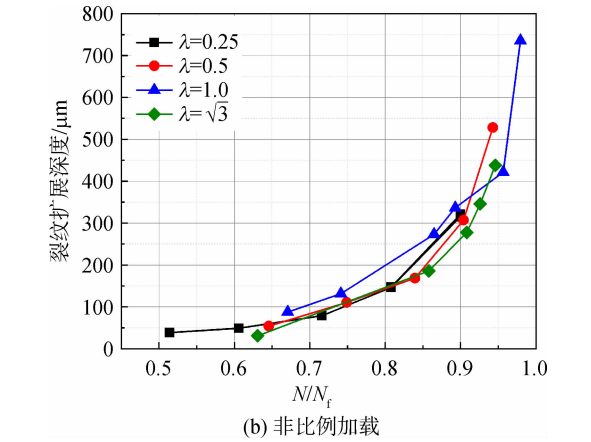
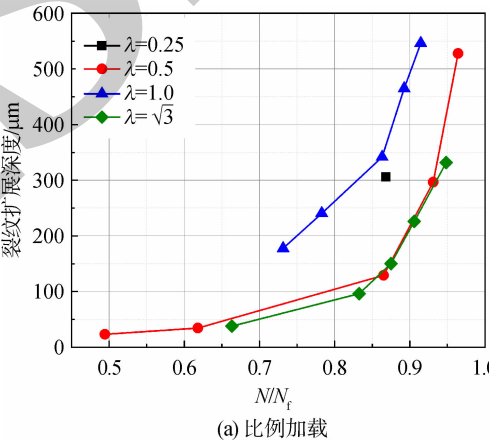


图 14 多轴疲劳试验试件裂纹扩展深度
Fig. 14 Crack growth depth of the multiaxial fatigue test specimens

纹扩展深度至 $300\ \mu\text{m}$ 时,当前寿命与总寿命的比值(N/N_f)在 85% 以上。在比例加载下,应力幅比对裂纹扩展深度的影响较非比例加载下更加明显。

3 结 论

通过开展比例与非比例加载下,应力幅比对 30CrMnSiA 钢多轴高周疲劳试验研究与分析,可以得到以下结论:

1) 疲劳试验结果表明,等效 Mises 应力为 $700\ \text{MPa}$ 时,对于比例加载与非比例加载,疲劳寿命随着应力幅比的增加而增加;相同应力幅比下,非比例加载时的疲劳寿命略高于比例加载;

2) 通过断口分析发现,疲劳裂纹萌生于试件表面,断口有明显的疲劳源区、扩展区和瞬断区;对于比例加载与非比例加载,不同应力幅比下的试件断口宏观形貌和疲劳源区微观形貌均有明显差异;

3) 对试件表面扩展路径进行初始裂纹扩展角度分析,在比例加载与非比例加载下,当 $\lambda \leq 0.25$ 时,裂纹无明显的第 I 阶段向第 II 阶段的转变; $\lambda > 0.25$ 时,裂纹有明显的第 I 阶段向第 II 阶段的转变,且第 I 阶段沿着接近最大剪应力幅值平面方向扩展,第 II 阶段沿着接近最大正应力平面方向扩展;

4) 对于比例加载与非比例加载,多轴疲劳试验试件裂纹的特征比值在 $0.3 \sim 0.5$ 之间,裂纹扩展深度至 $300\ \mu\text{m}$ 时占总寿命的 85% 以上。

参考文献:

[1] KAROLCZUK A, MACHA E. A review of critical plane orientations in multiaxial fatigue failure criteria of metallic materials[J]. *International Journal of Fatigue*, 2005, 134(3): 267-304.

[2] WANG C, SHANG D G, WANG X W. A new multiaxial high-cycle fatigue criterion based on the critical plane for ductile and brittle materials[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 24(2): 816-824.

[3] KAROLCZUK A, KLUGER K, ŁAGODA T. A correction in the algorithm of fatigue life calculation based on the critical plane approach[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 83(2): 174-183.

[4] OHKAWA I, TAKAHASHI H, MORIWAKI M. A study on fatigue crack growth under out-of-phase combined loadings[J]. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1997, 20: 929-940.

[5] VU Q H, NADOT Y, HALM D. High cycle fatigue crack paths in C35 steel under complex loading[R]. Vicenza, Ita-

ly: International Conference of Crack Paths, 2009.

[6] MILLER K J, IBRAHIM M F E. Damage accumulation during initiation and short crack growth regimes[J]. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1981, 4(3): 263-277.

[7] HUA C T, SOCIE D F. Fatigue damage in 1045 steel under constant amplitude biaxial loading[J]. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1985, 8(2): 101-114.

[8] VERREMAN Y, GUO H. High-cycle fatigue mechanisms in 1045 steel under non-proportional axial-torsional loading[J]. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2007, 30(10): 932-946.

[9] CAMPAGNOLO A, MENEGHETTI G, BERTO F. Calibration of the potential drop method by means of electric FE analyses and experimental validation for a range of crack shapes[J]. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2018, 41(11): 2272-2287.

[10] MENEGHETTI G, CAMPAGNOLO A, BERTO F. Notched Ti-6Al-4V titanium bars under multiaxial fatigue: Synthesis of crack initiation life based on the averaged strain energy density[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2018, 96: 509-533.

[11] 陈亚军, 王先超, 王付胜. 不同应力幅比加载下 2A12 铝合金的多轴疲劳性能[J]. *材料工程*, 2017, 45(9): 136-142.

CHEN Yajun, WANG Xianchao, WANG Fusheng. Multiaxial fatigue properties of 2A12 aluminum alloy under different stress amplitude ratio loading[J]. *Journal of Material Engineering*, 2017, 45(9): 136-142. (in Chinese)

[12] 陈亚军, 王先超, 王付胜. 2A12 铝合金的多轴加载疲劳行为[J]. *材料工程*, 2017, 45(8): 68-75.

CHEN Yajun, WANG Xianchao, WANG Fusheng. Fatigue behavior of 2A12 aluminum alloy under multiaxial loading[J]. *Journal of Material Engineering*, 2017, 45(8): 68-75. (in Chinese)

[13] 陈亚军, 王先超, 王付胜. 相位角加载条件下 2A12 铝合金的多轴疲劳失效行为[J]. *材料导报*, 2017, 31(14): 147-152.

CHEN Yajun, WANG Xianchao, WANG Fusheng. Failure behavior of multiaxial fatigue for 2A12 aluminum alloy subject to different angle loading conditions[J]. *Materials Review*, 2017, 31(14): 147-152. (in Chinese)

[14] YANG F P, YUAN X G, KUANG Z B. Influence of loading path on fatigue crack growth under multiaxial loading condition[J]. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2012, 35(5): 425-432.

[15] NAKAMURA H, TAKANASHI M, ITOH T. Fatigue crack initiation and growth behavior of Ti-6Al-4V under nonproportional multiaxial loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 2011, 33(7): 842-848.

[16] ZHANG J, SHI X, BAO R. Tension-torsion high-cycle fatigue failure analysis of 2A12-T4 aluminum alloy with different stress ratios[J]. *International Journal of Fatigue*,

2011,33(8):1066-1074.

[17] AGBESSI K, SAINTIER N, PALIN-LUC T. Microstructure based study of the crack initiation mechanisms in pure copper under high cycle multiaxial fatigue loading conditions[J]. Procedia Structural Integrity, 2016, 2: 3210-3217.

[18] 刘天奇,时新红,张建宇. 平均应力对 30CrMnSiA 钢多轴疲劳失效的影响[J]. 航空动力学报,2018,33(12):2972-2980.

LIU Tianqi,SHI Xinhong,ZHANG Jianyu. Effect of mean stress on multiaxial fatigue failure of 30CrMnSiA steel[J]. Journal of Aerospace Power,2018,33(12):2972-2980. (in Chinese)

[19] 时新红,鲍蕊,张建宇. 多轴高周疲劳失效准则的对比分析[J]. 航空动力学报,2008,23(11):2007-2015.

SHI Xinhong, BAO Rui, ZHANG Jianyu. Comparative study of multiaxial high-cycle fatigue prediction criteria [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23 (11): 2007-2015. (in Chinese)

(编辑:李岩梅、张 雪)