

# 平均应变对多轴循环特性 及疲劳寿命的影响<sup>X</sup>

尚德广 王德俊 王章海

(东北大学机械工程与自动化学院,沈阳 110006)

**摘要** 以拉扭薄壁疲劳试样为研究对象,对正火45号钢在控制总应变拉扭循环加载下进行了试验研究.分别测试存在平均应变情况下,比例加载与非比例加载时,拉与扭的应力响应值变化规律.结果表明,低周多轴疲劳加载下,平均应变使其应力响应值有所降低,且拉与扭应力响应值的变化规律不一致.此外平均应变对多轴疲劳寿命也有一定的影响.

**关键词** 多轴低周疲劳,比例加载,非比例加载,平均应变,循环硬化与软化.

**分类号** TG 115, TH 114

工程零部件多数是承受多轴循环载荷作用<sup>[1]</sup>,多疲劳破坏是其失效的主要形式,而平均应力(应变)对其疲劳寿命有较大影响<sup>[2]</sup>.在单轴低周疲劳情况下,由于塑性应变的较大平均应力很快被松弛掉,因而可以忽略平均应力的影响.在多轴循环加载条件下,由于存在多向应力或应变,与单轴情况相比较,其循环特性会发生变化<sup>[3]</sup>.特别是在多轴低周加载条件下,平均应变对多轴疲劳特性影响如何,这方面有待于进一步研究,寻找其规律性,为多轴疲劳寿命估算提供重要信息.

## 1 疲劳试验

试验选用工程常用的45号钢,取自直径为60 mm的热轧棒材,化学成分(质量百分数/%)为C 0144, Si 0128, Mn 0166, S 01014, P 0102, Ni 0103, Cr 0105, Cu 0114.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 min后空冷.其屈服强度 $\sigma_s$ 为370 MPa,抗拉强度 $\sigma_b$ 为610 MPa,延伸率 $\delta_5$ 为2814%,面缩率 $\psi$ 为64%.材料经热处理后,加工成薄壁管试样,其工作部分外径为25 mm,内径为21 mm.试验在MTS8092250 kN拉扭电液伺服材料试验机上进行,试验频率为0108 Hz.

对于拉扭试样所受的应力应变状态分别在应

变空间 $(\epsilon_1, \epsilon_2/\sqrt{3})$ 和应力空间 $(\sigma_1, \sigma_2/\sqrt{3})$ 用应变矢量 $\epsilon$ 和应力矢量 $\sigma$ 来表示:

$$\epsilon = n_1 + \frac{1}{\sqrt{3}} n_3 \quad (1)$$

$$\sigma = n_1 + \sqrt{3} n_3 \quad (2)$$

其中, $n_1, n_3$ 为单位矢量,即为二维矢量空间中的正交基矢量; $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 分别为轴向应变、剪切应变、轴向应力和剪切应力.

$\sigma_{eq}$ 与 $\epsilon_{eq}$ 的大小与Von Mises等效应力和等效应变相一致.等效应力和等效应变分别定义如下:

$$\sigma_{eq} = (\sigma_1^2 + 3\sigma_2^2)^{1/2} \quad (3)$$

$$\epsilon_{eq} = (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2/3)^{1/2} \quad (4)$$

试验采用正弦波加载:

$$\sigma = a \sin t \quad (5)$$

$$\tau = a \sin(t - \phi) \quad (6)$$

其中, $\phi = \phi_1/a, a, a$ 分别为轴向和剪切应变幅; $\phi$ 为 $\sigma, \tau$ 之间的相位差.

试验过程中每隔一定的循环周次对试验机输出的四个通道 $(\sigma_1, \sigma_2, \tau_1, \tau_2)$ 信号进行数据采集,并用X2Y记录仪记录 $\sqrt{3} - \sqrt{3}$ ,  $\sigma_1 - \tau_1$ 以及应力响应图.疲劳破坏定义为拉伸或扭转载荷下降25%时的循环数,此时滞回环已发生严重畸变,试件表面已出现可见裂纹.

多轴疲劳寿命试验所选用的应变加载路径如图1,其加载控制参数如表1.

X 1997203203 收到. 男,34,博士,现为南京航空航天大学博士后; 男,62,教授,博士生导师.  
国家自然科学基金(编号:59775030)和高等学校博士点基金(编号:9414501)资助项目.

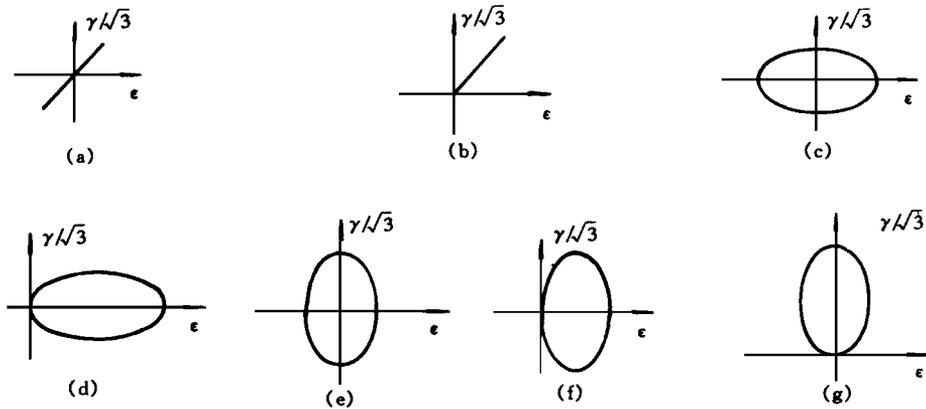


图 1 加载路径示意图

(a) —A; (b) —B; (c) —C; (d) —D; (e) —E; (f) —F; (g) —G.

表 1 多轴疲劳试验条件及结果

试样号	应变路径代号	$\beta$	$\gamma$ (°)	$\frac{\sigma}{\sigma_0}$ (%)	R	$\frac{\tau}{\tau_0}$ (%)	R	$\frac{N_f}{N_{f0}}$ cycles
33	A	$\sqrt{3}$	0	01566	- 1	01979	- 1	1 085
27	B	$\sqrt{3}$	0	01566	0	01979	0	1 279
34	C	$\sqrt{3}/2$	90	01800	- 1	01693	- 1	448
38	D	$\sqrt{3}/2$	90	01800	0	01693	- 1	460
5	E	$2\sqrt{3}$	90	01400	- 1	11386	- 1	662
12	F	$2\sqrt{3}$	90	01400	0	11386	- 1	670
21	G	$2\sqrt{3}$	90	01400	- 1	11386	0	650

## 2 结果分析及讨论

### 2.1 平均应变对应力响应及疲劳寿命的影响

图 2 为 45 比例加载下的应力响应最大值与寿命之间的关系,图中  $\sigma$ 、 $\tau$  为对称 45 比例路径的等效应力与寿命的关系,符号  $\sigma$ 、 $\tau$  为存在拉与扭平均应变的 45 比例路径的情况.二者相比,发现存在拉与扭平均应变的路径,其拉应力响应最大值有较大幅度的降低,而剪应力响应最大值(图中已转换为等效应力,即为  $\sqrt{3}$ )基本上未有太大

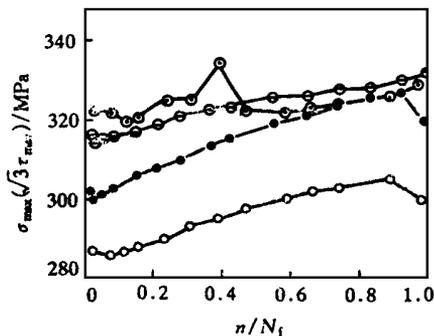


图 2 比例加载下平均应变的影响 ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\beta = \sqrt{3}$ )

对称加载:  $\sigma$ —拉压,  $\tau$ —扭转;  
存在平均应变:  $\sigma$ —拉压,  $\tau$ —扭转.

的变化.两者疲劳寿命对比可以发现,存在拉与扭平均应变的加载路径,由于拉应力响应值有较大的降低,使其寿命有所提高(见表 1 中 A, B 路径寿命结果).

图 3a 为  $\gamma = 90^\circ$ ,  $\beta = \sqrt{3}/2$  非比例椭圆加载路径下,对称加载与存在平均拉应变(平均拉应变为 014%)加载下的拉与扭各自应力响应最大值随循环数比的变化情况(表 1 中 C, D 路径).可以看出,存在拉平均应变的加载路径的轴向和剪切应力响应与对称加载情况相比,其值均有不同程度的降低,其中轴向应力响应值的降低幅度较大.对比二者的疲劳寿命可以发现,由于轴向应力响应值的大幅度降低,结果导致疲劳寿命略有提高.

对于  $\gamma = 90^\circ$ ,  $2\sqrt{3}$  非比例椭圆加载路径情况如图 3b、图 3c 所示,其中图 3b 为存在平均拉应变(平均拉应变为 012%)路径与对称加载路径下应力响应最大值的比较情况(表 1 中 E, F 路径),可以发现,存在平均拉应变的路径,由于平均拉应变值相对较小,其轴向应力响应值与对称情况相比基本没有变化,尽管剪切应力响应值有所降低,但降低幅度也不大.对比疲劳寿命可以发现,由于轴向应力响应值变化很微小,导致二者疲劳寿命相

差也很小.图 3c 为存在平均剪应变(其等效应变为 0.14%)路径与对称加载路径下的应力响应值的比较情况(表 1 中 E, G 路径),此时平均剪切应变也会使轴与剪切应力响应值降低,且由于平均剪应变较大,导致剪切应力响应值有较大幅度的降低,而轴向应力响应值降低幅度较小.对比二者的疲劳寿命可以看出,尽管剪切应力响应值降低幅度较大,但由于轴向应力响应值降低幅度较小,使其寿命变化也不大.

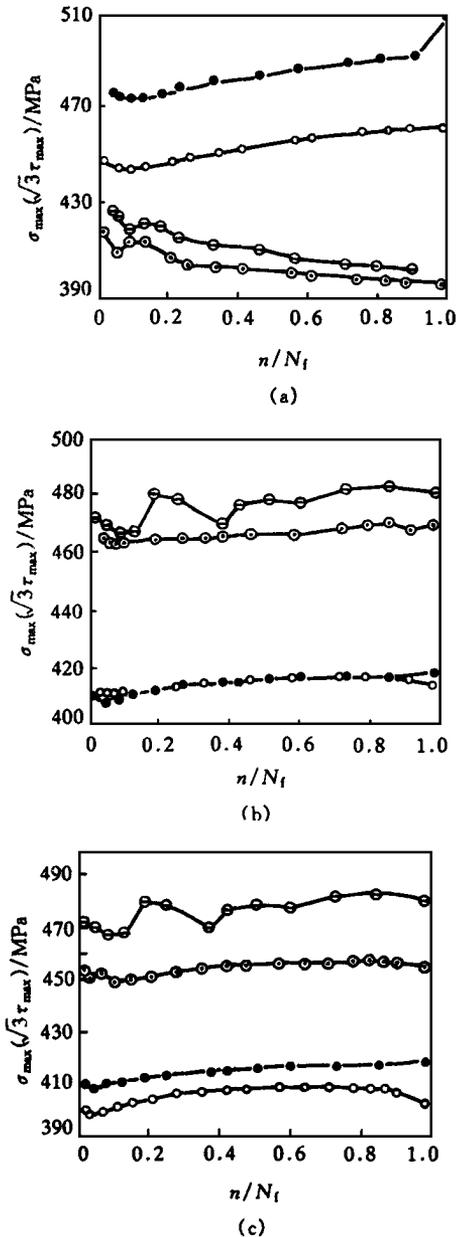


图 3 非比例加载下平均应变的影响

(a) —  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\beta = \sqrt{3}/2$ ; (b) —  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\beta = 2\sqrt{3}$ ;  
 (c) —  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\beta = 2\sqrt{3}$ .  
 对称加载: — 拉压,  $\beta$  — 扭转;  
 存在平均应变: — 拉压, — 扭转.

### 2.12 平均应变对循环特性的影响

比例加载情况下(如图 2),无论有无平均应变,拉与扭的应力响应值最初表现出循环软化,而后都表现出循环硬化现象,直至硬化到断裂.其中存在平均应变的加载路径(图 2 中的符号  $\circ$ ,  $\square$ ),其硬化程度比对称加载路径要弱些.

非比例加载路径下(如图 3),可以发现,存在较大轴向应变的加载路径(图 3a),不管是否存在平均应变,其应力响应的变化规律是一致的,但拉与扭的应力响应并不是同时硬化,而是拉应力响应循环硬化,扭转应力响应却循环软化,且硬化与软化程度比较明显.存在较小轴向应变的非比例加载路径(图 3b,图 3c),其拉与扭的应力响应均为循环硬化,但硬化程度均较小,且在对称加载路径中的扭转应力值硬化规律不稳定,存在波动现象.

由此可见,非比例加载下的应力响应值的硬化与软化规律随着加载路径的不同变得相当复杂起来.这方面有待于进一步进行大量研究.

## 3 结 论

(1) 在多轴比例与非比例低周加载条件下,存在轴向与剪切平均应变都会对应力响应值产生一定的影响,其结果也会对疲劳寿命产生一定的影响.

(2) 比例加载条件下,平均应变对疲劳寿命的影响较为明显.非比例加载条件下,如果存在的轴向平均应变较大,则会使其轴向应力响应值大大降低,从而会使疲劳寿命有所提高;如果存在的剪切平均应变较大,则会使其剪切应力响应值大大降低,但对其疲劳寿命影响较小.

(3) 比例加载情况下,拉与扭应力响应均为循环硬化;非比例加载条件下,存在较大轴向应变的加载路径,其拉应力响应为循环硬化,扭转应力响应值为循环软化.存在较小轴向应变的加载路径,其循环特性与比例加载情况相似.

### 参考文献

- 1 Brown M W, Miller K J. Multiaxial fatigue, ASTM STP 853. Philadelphia:ASTM,1985
- 2 Fatemi A, Kurath P. Multiaxial fatigue life predictions under the influence of mean stress. ASME Transaction J Engng Mater Tech,1988,110:380~388
- 3 尚德广. 多轴疲劳损伤与寿命预测研究:[学位论文]. 沈阳:东北大学,1996

## Effects of Mean Strain on Multiaxial Cyclic Behaviour and Fatigue Life

Shang Deguang, Wang Dejun, Wang Zhanghai

**ABSTRACT** Steel 45 in the normalized condition was used. The thin walled tubular specimens were used for the tension-torsion fatigue test. All tests were carried out under the total strain controlled condition, and the mean tension or torsion strains were included in some tests. The varying behavior of the stress response values for tension and torsion was measured under proportional and nonproportional loading. The results show that the stress response values are decreased by the mean strain and the varying characteristic does not agree with the stress response values of tension and torsion under multiaxial low-cycle fatigue loading. In addition, multiaxial fatigue life is also affected by the mean strain.

**KEY WORDS** multiaxial low-cycle fatigue, proportional cyclic loading, nonproportional cyclic loading, mean strain, cyclic hardening and softening.

(Received March 3, 1997)

待发表文章  
摘要预报

### 轧制计划的优化模型及其应用

吕振辽 樊治平 杨伟智

对于钢铁企业热轧生产控制计算机系统在实际轧制计划初选问题,即板坯库倒垛问题,提出了一个新的非线性 0-1 整数规划数学模型,通过实际应用表明,该数学模型与原有的启发式经验模型相比,效果显著。

### 轧钢厂的生产计划与调度的结构和优化模型

唐立新

轧钢厂生产作业管理是钢铁企业生产管理系统的-一个重要组成部分.分析了轧钢厂生产作业计划的结构,构造了适合带钢、型钢和钢管的生产计划问题的通用的旅行商模型。

### 一类不确定线性组合系统的输出跟踪

刘新宇 高立群 张文力

针对两种不确定线性组合系统提出了存在分散鲁棒反馈控制器和输出跟踪器的充分条件.系统中不确定项具有数值界,可不满足所谓的匹配条件.对于第一种系统,其不确定项可以是时变的,其受控系统能以任意给定的收敛率指数渐近稳定;第二种系统中的不确定项是时不变的,文中给出的鲁棒跟踪器可使受控系统渐近跟踪给定的参考输入。