

加载历史对循环硬化的影响

周春田 勾秋静

(清华大学工程力学系, 100084)

摘要 本文研究了 45# 钢和 LY-12CZ 铝合金在室温条件下拉扭复合比例及非比例加载时的循环硬化特性, 其结果表明不同加载路径循环硬化程度不同, 纯扭硬化程度最小, 圆形路径硬化程度最大。着重研究了不同循环历史对后面循环稳定应力幅值的影响。

关键词 循环加载, 循环路径, 循环硬化, 比例加载, 非比例加载

一、引言

作者曾在文献 [1], [2] 中研究了 45# 钢在室温条件下拉扭复合比例及非比例加载时的循环特性, 得出圆形路径循环硬化程度最大的重要结论。ETANAK^[3] 采用塑性应变控制对 316 不锈钢管进行了圆形、方形、星形、十字形和比例方式等不同路径加载试验, 得出比例路径硬化最小, 而圆形路径硬化最大的结论。而 K. KANAZAWA^[4] 对 1% Cr-Mo-V 钢在轴向和不同相位扭转载荷联合循环下做了一些试验。结果表明由于不同相位加载条件使疲劳寿命减少, 相位差为 90° 时疲劳寿命可降低一个数量级。由此可见, 只由单轴疲劳试验获得循环应力-应变曲线和疲劳寿命曲线来研究多轴应力场下的材料循环特性及寿命是远远不够的, 必然得出错误的结果。

本文的目的是研究常用的工业金属材料 (45# 钢, LY-12CZ 铝合金) 在拉扭复合比例及非比例加载时的循环特性。并着重研究 45# 钢不同的循环历史对后面循环稳定应力幅值的影响。

二、试验方法

采用 LY-12CZ 铝合金和 45# 钢圆管试样 (外径为 25mm, 内径为 20mm, 标长为 25mm), 在 INSTRON 1343 拉扭复合电液伺服疲劳试验机上进行拉扭复合比例及非比例加载试验。在室温下由总应变控制进行复合加载:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t, \quad \frac{\gamma}{\sqrt{3}} = \lambda \varepsilon_0 \sin(\omega t + \phi) \quad (1)$$

作用在试样上的轴力和扭矩由复合载荷传感器测量, 用双向引伸计从试样的标长上直接测量轴向伸长和相对扭角。同时由计算机对四个通道进行采样处理。

为了方便起见, 应变和应力状态分别在应变空间 $(\varepsilon, \frac{\gamma}{\sqrt{3}})$ 和应力空间 $(\sigma, \sqrt{3}\tau)$

本文于 1990 年 3 月 3 日收到第一稿, 1991 年 5 月 13 日收到修改稿。

用应变向量 $\mathbf{e}$ 和应力向量 $\boldsymbol{\sigma}$ 表示, 即:

$$\mathbf{e} = \varepsilon \mathbf{i} + \frac{\gamma}{\sqrt{3}} \mathbf{j}, \quad \boldsymbol{\sigma} = \sigma \mathbf{i} + \sqrt{3} \tau \mathbf{j} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{i}, \mathbf{j}$ 是单位向量, 而 $\varepsilon, \gamma, \sigma$ 和 τ 分别代表轴向应变、剪应变、轴向应力和剪应力. 可见 σ 的大小 $|\sigma|$ 是对应 Mises 的等效应力.

$$|\sigma| = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (3)$$

向量 $\mathbf{e}$ 的端点相对时间 t 的轨迹表示了应变循环路径历史, 而路径长度 s 对应了积累应变.

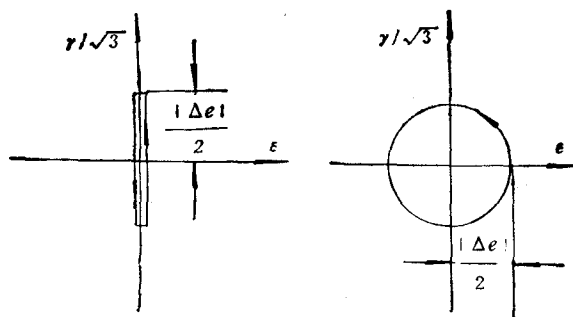
$$s = \int \left| \frac{d\mathbf{e}}{dt} \right| dt \quad (4)$$

对 LY-12CZ 铝合金试样进行了六种不同加载路径的试验, 如表 1 所示, 每种路径中采用的等效应变幅值为 $|\Delta \mathbf{e}|/2 = 0.6\%$, 加载频率为 0.5Hz. 对 45# 钢试样只进行了纯扭和圆形两种路径的试验(图 1), 但采用了不同应变幅值的历史, 如表 2 所示.

表 1 LY-12CZ 铝合金的六种加载路径

标 记	a	b	c	d	e	f
应变空间 循环路径						
λ	∞	1	2	0.5	1	1
ϕ	0°	0°	90°	90°	90°	30°

其中 $\lambda = \gamma_a / \sqrt{3} \varepsilon_a$ 为应变载荷比, ϕ 为相位差角



纯扭加载路径

圆形加载路径

图 1

在试验中由计算机对四个通道 ($\varepsilon, \gamma, \sigma, \tau$) 进行采样处理, 画出 Mises 等效应力 $|\sigma|$ 随积累应变 s 变化曲线, 以使用每个循环等效应力 $|\sigma|$ 的峰值随积累应变 s 变化来描述材料循环硬化的过程.

表 2 45# 钢的加载路径和不同应变幅值的历史

试验方式	试验	循环路径及应变幅值 $\Delta \epsilon /2(\%)$				
		1	2	3	4	5
常幅纯扭 循环	A	纯扭 (0.4%)				
	B	纯扭 (0.6%)				
常幅圆形 循环	C	圆形 (0.3%)				
	D	圆形 (0.6%)				
变幅 变路径 循环	E	纯扭 (0.4%)	纯扭 (0.6%)	圆形 (0.6%)	纯扭 (0.6%)	纯扭 (0.4%)
	F	圆形 (0.6%)	圆形 (0.3%)	纯扭 (0.6%)	纯扭 (0.4%)	
	G	圆形 (0.3%)	圆形 (0.6%)			
	H	纯扭 (0.6%)	纯扭 (0.3%)	纯扭 (0.4%)	圆形 (0.15%)	

三、试验结果

图 2 表示了 LY-12CZ 铝合金在六种不同加载路径情况下等效应力 $|\sigma|$ 与积累应变 S 的关系曲线, 可见:

(1) LY-12CZ 铝合金是一种循环硬化材料, 硬化的程度与加载路径有关, 由图中可以知道圆形路径硬化程度最高, 而纯扭最小。圆形路径比纯扭大 1.3 倍。

(2) 不论是哪种路径, 都是开始几周硬化明显, 然后转入一个稳定阶段。圆形路径在积累应变 S 大于 40% 后即可基本稳定, 而纯扭需 S 大于 400% 才能稳定。

图 3—10 是 45# 钢的等效应力 $|\sigma|$ 与积累应变 S 的关系曲线, 其中图 3、图 4 是常幅纯扭循环, 图 5、图 6 是常幅圆形路径循环时的 $|\sigma|$ - S 曲线, 而图 7~10 是变幅变路径循环时的 $|\sigma|$ - S 曲线。从中可以看出:

(1) 纯扭循环的基本特性

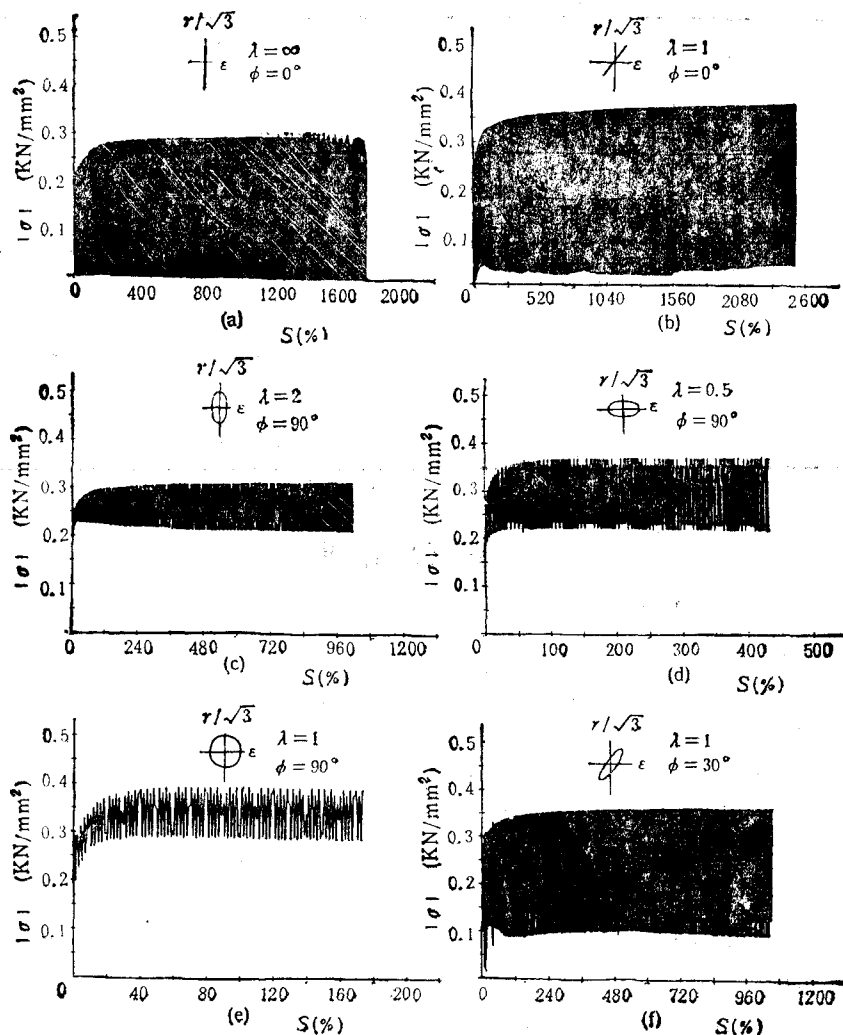
图 3 为应变幅值 $|\Delta\epsilon|/2 = 0.4\%$, 而图 4 为 $|\Delta\epsilon|/2 = 0.6\%$ 时的纯扭循环的 $|\sigma|$ - S 曲线。由图中可以看出此种材料基本上是循环软化材料。在 $|\Delta\epsilon|/2 = 0.6\%$ 的循环中开始几周表现出硬化然后转向软化。两者在积累应变 S 大于 40% 时的循环软化基本稳定。

(2) 圆形路径循环的基本特性

图 5 是 $|\Delta\epsilon|/2 = 0.3\%$, 图 6 是 $|\Delta\epsilon|/2 = 0.6\%$ 时圆形路径循环的 $|\sigma|$ - S 曲线。两种幅值情况是开始硬化然后转为软化。在 S 大于 60% 时基本稳定。在曲线上存在着周期的摆动, 但它们的幅值仅是平均值的 5% 左右 (对 $|\Delta\epsilon|/2 = 0.6\%$ 情况)。这说明材料循环硬化由 Mises 型的等效应变和等效应力近似控制着。和纯扭循环比较在相同的应变幅值情况下, 圆形路径表现出明显的硬化, 差不多要高出 30%。

(3) 小幅值循环对后面的循环稳定应力幅值的影响

在图 7 中从 $E1(|\Delta\epsilon|/2 = 0.4\%$ 纯扭) 到 $E2(|\Delta\epsilon|/2 = 0.6\%$, 纯扭) 循环加载和图 4 ($|\Delta\epsilon|/2 = 0.6\%$, 纯扭) 原始材料循环加载两种情况比较可以看出: 先前小的循

图 2 等效应力 $|\sigma|$ 积累应变 S 的关系曲线

环对后面的循环硬化稳定应力幅值几乎没有影响。可见提出非硬化应变范围概念是合理的。

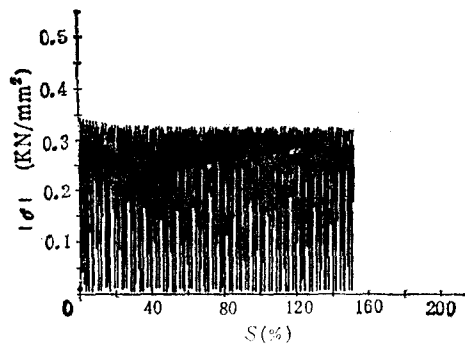
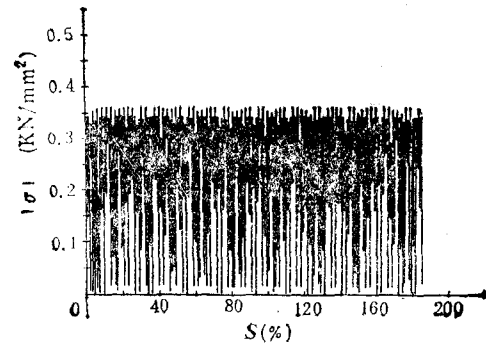
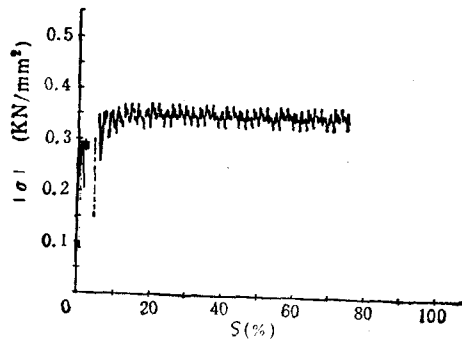
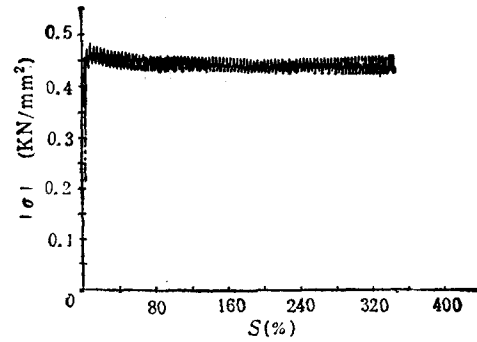
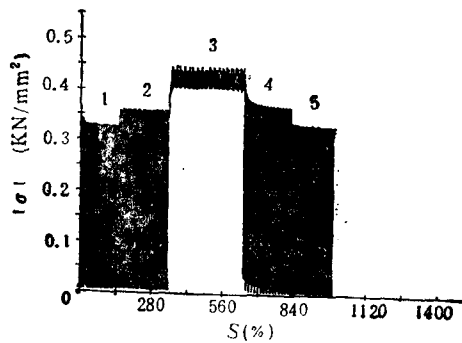
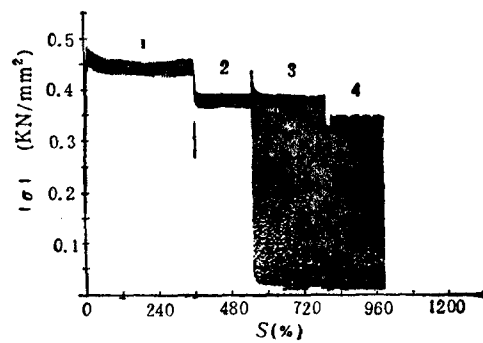
同样对圆形路径循环中也存在着这种规律,从图 9 的 G 1 到 G 2 和图 6 比较即可看出;只是略有误差,这是因为 G 2 试验还没有稳定。

(4) 先前大幅值循环对后来循环稳定应力幅值的影响

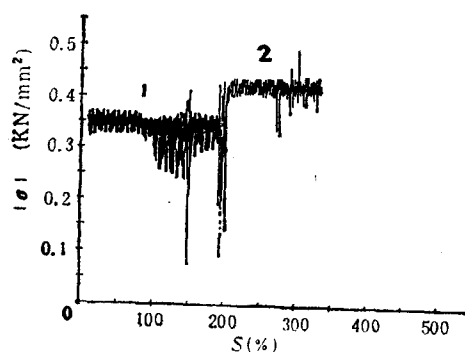
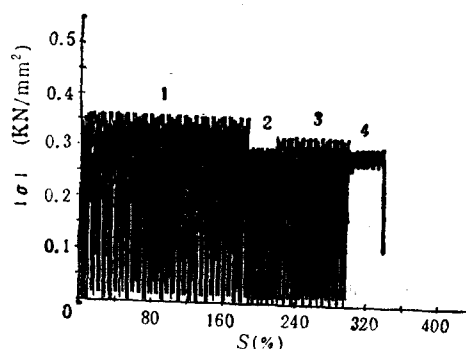
在图 10 中 H1 ($|\Delta e|/2 = 0.6\%$) 到 H3 ($|\Delta e|/2 = 0.4\%$) 的循环和图 3 中原始材料 ($|\Delta e|/2 = 0.4\%$) 的循环中比较可得,稳定值还是重合的。

(5) 不同路径循环对后面循环稳定应力幅值的影响

由图 7 的 E1 ($|\Delta e|/2 = 0.4\%$, 纯扭) 到 E2 ($|\Delta e|/2 = 0.6\%$, 纯扭) 再到 E3 ($|\Delta e|/2 = 0.6\%$, 圆形) 和原始材料图 6 ($|\Delta e|/2 = 0.6\%$, 圆形) 循环比较可知: 不管循环路

图 3 A型纯扭循环 $|\sigma|$ - S 曲线图 4 B型纯扭循环 $|\sigma|$ - S 曲线图 5 C型圆形循环 $|\sigma|$ - S 曲线图 6 D型圆形循环 $|\sigma|$ - S 曲线图 7 E型循环历史 $|\sigma|$ - S 曲线图 8 F型循环历史 $|\sigma|$ - S 曲线

径是什么样,前面硬化小的循环对后面硬化大的循环稳定应力幅值几乎没有影响,但硬化程度从大到小的时候影响较大,如图 7 中从 $E3(|\Delta e|/2 = 0.6\%$, 圆形)到 $E4(|\Delta e|/2 = 0.6\%$, 纯扭)及 $E5(|\Delta e|/2 = 0.4\%$, 纯扭)与原始材料纯扭循环比较可得上述结论。

图 9 G型循环历史 $|\sigma|$ - S 曲线图 10 H型循环历史 $|\sigma|$ - S 曲线

四、结 论

1. 用 Mises 等效应力幅值 $|\sigma|$ 的峰值随积累应变 S 的变化情况来描述非比例循环时的循环硬化是可行的。LY-12CZ 铝合金是循环硬化材料, 45# 钢是循环软化材料。

2. 不同的循环应变路径对应着一种稳定的循环硬化状态。LY-12CZ 和 45# 两种材料都是纯扭循环的硬化程度最小, 而圆形路径时硬化程度最大, 且两种材料都是圆形路径比纯扭路径大 1.3 倍左右。

3. 不管循环路径是否相互变化, 前面的硬化程度小的循环历史对后面硬化程度大的循环稳定应力幅值几乎没有影响。

4. 在循环路径相同时, 先前硬化程度大的循环历史对后面硬化程度小的循环稳定应力幅值也没有影响, 但是变路径时影响较大(如从圆形路径变到纯扭路径时)。

参 考 文 献

- [1] 周春田, 勾秋静, 王文彬. 拉扭复合应变疲劳下应力-应变曲线的试验研究. 全国第三届疲劳学术会论文集, 第三卷
- [2] 周春田, 华心, 阎淑茹. 45#钢非比例循环特性实验研究. 全国第四届疲劳学术会论文集
- [3] Tanaka E., Murakami S., and Ooka M., Effects of strain path shapes on non-proportional cyclic plasticity. *J Mech Phys Solids*, 1985, 33(6):559-575
- [4] Kanazawa K., Miller K J, Brown M.W. Low-cycle fatigue under out-of-phase loading conditions. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1977, 99:222-228

THE EFFECT OF LOADING HISTORY ON CYCLIC HARDENING

Zhou Chuntian Gou Qiujing

(Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, 100084, China)

Abstract In this paper, the cyclic hardening behavior of 45 # steel and LY-12CZ aluminum alloy under proportional and non-proportional combined loadings of tension and torsion at normal room temperature has been investigated.

The experimental results show that the cyclic hardening levels are different for different loading paths. The least is for the pure torsion, while the highest is for the circular path. The authors have especially investigated the effect of different cyclic history on the amplitudes of stabilized stresses.

Key words cyclic loading, cyclic path, cyclic harden, proportional loading, non-proportional loading