

(4) 17-25

40CrA 钢在非比例循环载荷下塑性的研究

Experimental Investigation to Nonproportional Cyclic Plasticity of 40CrA steel

彭向和 高芝晖

Peng Xianghe Gao Zhihui

(重庆大学工程力学系, 重庆, 630044)

马鸣图 颜在先

Ma Mingtu Yan Zaixian

(重庆汽车研究所)

TG115.5

A 摘要 采用 MTS 材料试验机对正火状态的 40CrA 钢在二维循环复杂应变路径下的流动特性和强化进行了系统的实验研究。对于特定的循环应变路径, 当应变幅值较小时, 材料多表现为循环弱化; 随着应变幅值的增加, 循环弱化的现象逐渐消失, 在某些路径下甚至表现为循环强化。当从一种比例路径下的循环稳定状态进入另一种比例路径下循环时, 存在瞬时附加强化并随之产生缓慢的弱化。在非比例循环加载条件下, 材料的强化与路径形状密切相关。不发生卸载的圆形路径未表现出最显著的强化, 而应变路径方向的改变及其频率成为影响强化的主要因素。实验表明对于所采用的材料, 应变的幅值和方向的变化所造成的强(弱)化间存在耦合。另外在材料对非比例加载史的记忆和 Lensky 局部确定性假设的适用性方面也进行了研究。

关键词 金属材料; 非比例循环载荷; 塑性流动; 强化; 实验研究

40CrA 钢

中国图书资料分类法分类号 O344.4

ABSTRACT A systematic experimental research on the flow and hardening properties of normalized 40CrA steel subjected to biaxially nonproportional cyclic loading was conducted on MTS 809 material testing machine. In most cases, the material performs cyclic softening for the given cyclic strain path when the strain amplitude is small, and this kind of softening decreases and even changes to hardening as the strain amplitude increases. Instantaneous hardening occurs and is followed by a transient, but subsiding softening when the cyclic strain path changes. It was observed that the hardening of the material depends strongly on the shape of cyclic strain path. An interesting phenomenon is that the 90° out-of-phase strain path, that involves no unloading, does not yield marked hardening. The variation of the strain path direction and its frequency were observed as the main factor to determine the material hardening. The coupling between the hardening induced by strain amplitude and that by strain path was detected. The memory of the material to the nonproportional cyclic loading history and the validity of Lensky's hypothesis of local determinability were also investigated.

KEYWORDS metallic materials; nonproportional cyclic loading; plastic flow; hardening;

* 收文日期 1993-02-15

experimental research

0 引 言

材料的非比例循环塑性是分析材料在复杂加载条件下的行为以及多轴疲劳和失效的基础,其研究具有重要的理论意义和工程价值。近年来由于疲劳引起的大量事故加速了人们对多轴循环塑性,复合疲劳以及混合性断裂条件的研究^{*},发现在非比例循环载荷条件下的材料的响应特性远比单调和比例循环载荷下复杂,它导致了损伤发展加快,疲劳寿命降低等值得注意的倾向^[1]。

由于非比例循环载荷下的材料响应与比例循环载荷下材料响应的基本特征有很大的差异,它难以用简单的材料实验进行描述^[2]。近15年来,国际和国内许多研究者对SS304和SS316不锈钢,OFHC铜,1CrMoV钢,TB451-63车轴钢等的非比例循环塑性进行了大量的研究^[1~4],主要结果如下:

1) 在非比例循环过程中卷入了由应变幅值变化和塑性应变路径方向变化造成的附加强化及其耦合。当应变路径不变而幅值变化时,可以观察到附加循环强化,即通过反复变形达到循环稳定状态后,如果增加应变幅值,则原有的稳定状态被破坏,材料发生新的强化并趋于与外加应变幅值相对应的稳定状态;当塑性应变幅值保持不变而加载路径发生变化时,可以观察到附加交错强化,这种附加强化与一个循环中塑性应变方向的变化及其频率密切相关,并在圆形路径下达到最大。即使从一种比例路径下的循环稳定状态进入另一种比例路径下循环时,也伴随着瞬时附加交错强化以及随后发生的缓慢弱化直至先前的瞬时附加交错强化消失。

2) 在非比例循环过程中涉及了对非比例循环加载史的记忆,主要表现为对最大塑性应变幅值和路径的最大非比例度及其效果的记忆。实验还表明,材料对先前较小的塑性应变幅值和非比例度下的循环史没有或仅有微弱的记忆。

3) 在一般情况下,Lensky局部确定性假设^{**}不成立。

通过对具有不同滑移模式的金属材料在非比例循环加载过程中的位错子结构及其变化的分析^{***}^[9],发现非比例循环强化主要由三部分构成:

- 1) 与循环塑性应变幅值相联系的循环强化,
- 2) 对应于塑性应变路径方向改变的瞬时交错强化,
- 3) 与非比例加载史相联系的遗传附加交错强化。

其中第一部分是波状滑移材料的主要强化机制,而在平面滑移材料和波状/平面滑移材料中,上述三种机制都起重要作用。

作为重要的工程结构材料,低合金钢在机器制造、汽车等众多的工业部门中被广泛的应用,而绝大部分构件工作在非比例循环载荷条件下。由于微缺陷的存在使得应力集中,变形

* Miller K J, Brown M W. Multiaxial Fatigue, A Brief Review. Invited report, Proc. 6th Int. Conf. Fracture Mech., New Delhi, 1984

** 参考文献11.

*** 原参考文献12.

局部化,在许多场合下材料的应力状态虽然表现为宏观弹性,但其局部不可避免地产生非比例循环塑性变形,对这一类材料的非比例循环特性尚未见系统的研究。本工作研究了40CrA在非比例循环载荷下的塑性流动与强化及其主要影响因素,它将有助于合理地使用材料和设计结构,对于完善非比例循环载荷下材料的本构描述,进行疲劳和寿命分析也具有重要意义。

1 试验方法和条件

试件材料为40CrA 无缝钢管,其化学成份为0.40%C,1.10%Cr,0.71%Mn,0.34%Si,0.04%Cu,0.016%Ni,0.04%Ti,0.23%S和0.01%P。为消除制管过程中产生的残余应力和织构,保证试件材料的初始各向同性以及性能的稳定与一致,在加工试样前,按标准工艺对材料进行了再结晶处理。

采用薄壁管状试件,其几何形状与尺寸见图1,其中标距长度和标距内的外径尺寸由MTS 拉扭应变仪的标距尺寸决定。

试验机为 MTS809 500KN-5KNM 液压伺服拉扭低周疲劳材料试验机。试验过程的控制、数据采集与处理均由拉扭复合加载试验控制程序^[10]完成。试验在室温环境下进行,采用应变控制,试件的应变和载荷分别由固定在试件标距段的 MTS 拉扭应变仪和试验机的载荷传感器输出,由于标距内中径与壁厚之比 $D:t \approx 24$,可以认为标距内的材料处于均匀变形状态,其应力分量由下式决定

$$\sigma = P/\pi Dt \quad \tau = 2M/\pi D^2 t$$

其中 P 与 M 分别为轴向载荷与扭矩。为避免卷入应变率的影响或蠕变,单调加载时的应变速率取为 10^{-3}s^{-1} ,循环加载频率采用 0.1 Hz(对应的应变速率约在 $4 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ 之间)。

为便于讨论,应变矢量 $\vec{\epsilon}$ 和应力状态矢量 $\vec{\sigma}$ 分别在应变和应力矢量空间中表示如下

$$\vec{\epsilon} = \epsilon \vec{n}_1 + (\gamma/\sqrt{3}) \vec{n}_2 \quad \vec{\sigma} = \sigma \vec{n}_1 + \sqrt{3} \tau \vec{n}_2$$

式中 \vec{n}_1 和 \vec{n}_2 为矢量空间中的一组单位正交基矢, ϵ 和 γ 分别为正应变和工程剪应变,而 Von Mises 意义上的等效应变和等效应力即可表示为 $\vec{\epsilon}$ 和 $\vec{\sigma}$ 的模

$$\epsilon_e = |\vec{\epsilon}| = \sqrt{\epsilon^2 + \gamma^2/3} \quad \sigma_e = |\vec{\sigma}| = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

应变路径即为 $\vec{\epsilon}$ 的端点轨迹,为便于描述变形历史,引入对应于累积应变的路径弧长作为广义时间,定义如下

$$s = \int_0^t |\dot{\vec{\epsilon}}| dt$$

其中 $\dot{\vec{\epsilon}}$ 为应变矢量对时间的变化率。为便于分析材料的流动特性,引入应力矢量与应变率矢

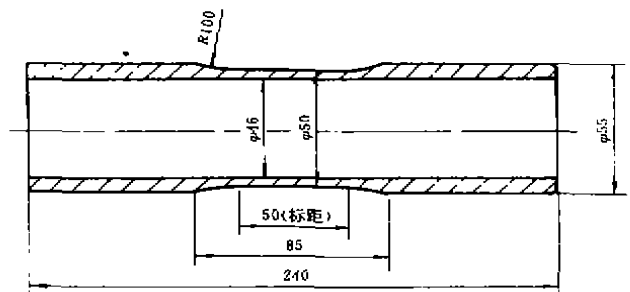


图1 试件几何形状与尺寸

量间的夹角

$$\theta = \cos^{-1}(\vec{\sigma} \cdot \vec{\epsilon} / |\vec{\sigma} \cdot \vec{\epsilon}|)$$

表 1 二维应变路径

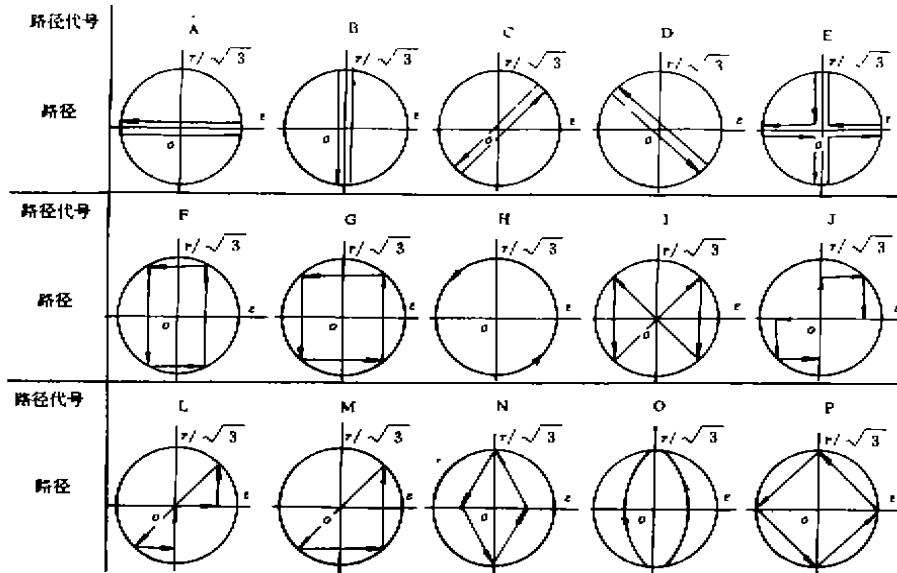


表 2 试验控制参数

试验编号	控制参数(路径代号 × 应变幅值(%) × 循环次数*)
R011	A * 0.2 * 50 → A * 0.4 → A * 0.6 → A * 0.8 → A * 0.6 → A * 0.4 → A * 0.2
R022	B * 0.2 * 50 → B * 0.4 → B * 0.6 → B * 0.8 → B * 0.6 → B * 0.4 → B * 0.2
R031	C * 0.2 * 50 → C * 0.4 → C * 0.6 → C * 0.8 → C * 0.6 → C * 0.4 → C * 0.2
R041	C * 0.4 * 100 → D * 0.4 * 100
R051	A * 0.4 * 100 → B * 0.4 * 100
R062	E * 0.2 → E * 0.6 → E * 0.8 → E * 0.6 → E * 0.4 → E * 0.2
R071	F * 0.34 * 30 → F * 0.67 * 30 → F * 0.34 * 30
R082	G * 0.2 → G * 0.4 → G * 0.6 → G * 0.4 → G * 0.2
R091	H * 0.14 * 50 → H * 0.28 → H * 0.42 → H * 0.28 → H * 0.14
R101	I * 0.2 → I * 0.4 → I * 0.6 → I * 0.4 → I * 0.2
R112	J * 0.2 → J * 0.4 → J * 0.6
R131	L * 0.2 → L * 0.4 → L * 0.6 → L * 0.4
R141	M * 0.2 → M * 0.4 → M * 0.6 → M * 0.4 → M * 0.2
R151	N * 0.3 → N * 0.6 → N * 0.3
R161	O * 0.3 * 30 → O * 0.6 * 30
R171	A * 0.4 * 50 → C * 0.4 → D * 0.4 → B * 0.4 → P * 0.4 → H * 0.4 → A * 0.4

* 此项空白表示循环 20 次

为了对材料的非比例循环塑性进行系统的分析,采用了表 1 的 15 种二维应变路径。其中路径 A~D 及其组合可用于分析应力响应的各向同性和瞬时交错强化;路径 F,G,O,H,N,

P 代表了不经过原点的一类循环应变路径, 在试验过程中不卸载或不完全卸载, 已有的研究表明它们可能导致较剧烈的强化; 而路径 B 和 $I \sim M$ 为一类由折线构成的路径, 其中部分路径段过应变空间原点。根据这些路径在不同应变幅值下的试验, 可以分析应变幅值, 路径形状, 路径方向的变化及其频率, 路径曲率及其变化等因素对材料的流动特性及强化的影响。实验安排见表 2。由于大量试验表明^[5~7], 先前较小的应变幅对当前循环稳定状态的影响可以忽略, 因此对同一路径在不同应变幅值下的循环采用递增的应变幅在一个试件上完成。而在经历了较大应变幅值的循环后, 又安排了较小应变幅的实验以分析对最大应变幅历史的记忆, 这对分析材料在过载后的行为具有实际意义。此外还安排了应变幅不变而路径变化的实验以考察交错强化以及材料对非比例循环加载史的记忆。

2 非比例循环载荷下材料的塑性流动与强化

2.1 比例循环载荷下的材料特性

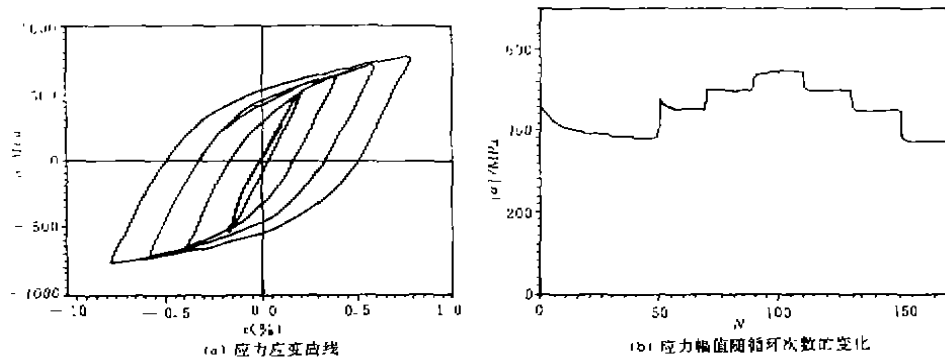


图 2 控制条件 R011 下的试验结果

图 2(a)(b) 分别为材料在 R011 的控制参数下的 σ - ε 曲线和 $|\sigma|_a$ (应力幅值) $\sim N$ (循环次数) 曲线。可以看出在对称应变循环条件下, 材料的应力响应基本上保持对称。当 $\varepsilon_s = 0.2\%$ 时 σ_s 随着 N 的增加而缓慢地减少并逐渐趋于一稳定值。当 $N = 50$ 时, 材料基本上达到循环稳定状态, 这时增加应变幅值, σ_s 迅速上升, 进而发生新的循环弱化并在少数几次循环中达到稳定值。在后续 $\varepsilon_s = 0.6\%$ 和 0.8% 的循环过程中, 材料不再发生新的循环弱化, σ_s 基本保持不变或略有增加。这时如果减小应变幅值, σ_s 迅速达到稳定值, 该值近似等于经历较大应变幅值前的相同应变幅值所对应的 σ_s 的稳定值, 由此可以认为在单轴拉/压循环中, 材料对最大应变幅值的历史没有记忆。

在剪切循环(编号 R022)和 $\varepsilon = \gamma / \sqrt{3}$ 的比例循环(编号 R031)中, 观察到完全类似的现象。差别在于当 ε_s 相同时, 剪切循环给出了较拉压循环偏低的等效应力幅值, 而比例路径循环对应的等效应力幅值居中(见图 6)。这说明对所研究的材料在 Von Mises 意义上的等效应力应变关系存在轻微的各向异性。

2.2 非比例循环应变路径下的材料特性

图 3(a) 给出了在编号为 R062 的控制参数下当 $\varepsilon_s = 0.2, 0.1, 0.6, 0.8\%$ 时达到循环稳定状态的 $\sigma \sim \sqrt{3} \tau$ 关系, 过程中的 σ_p (峰值等效应力) 随 N 的变化见图 3(b), 除 $\varepsilon_s = 0.2\%$

的循环中存在弱化外,在其余变幅值下的循环均未见明显的强弱化。在这种路径下材料亦未表示出对最大应变幅值历史的记忆。尽管应变路径是对称的,且实际应变路径与控制路径间的误差很小,可以忽略,但应力路径中显示了轻微的不对称, $(\sqrt{3}\tau)_{max}$ 略大于 σ_{max} , 在图 3(b) 中表现为曲线波动,考虑到前面讨论过的材料各向异性,可以认为在路径 B 下,由非比例加载导致的强化也存在轻微的各向异性,即在剪切方向上表现出较拉伸方向略强的强化。

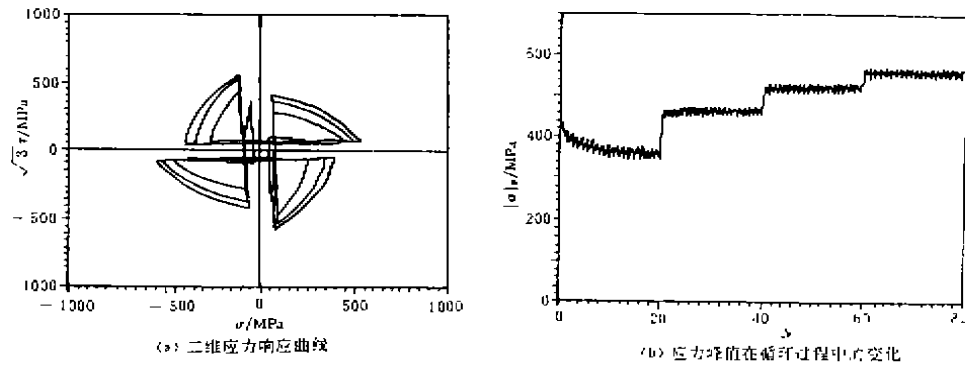


图 3 控制条件 R062 下的试验结果

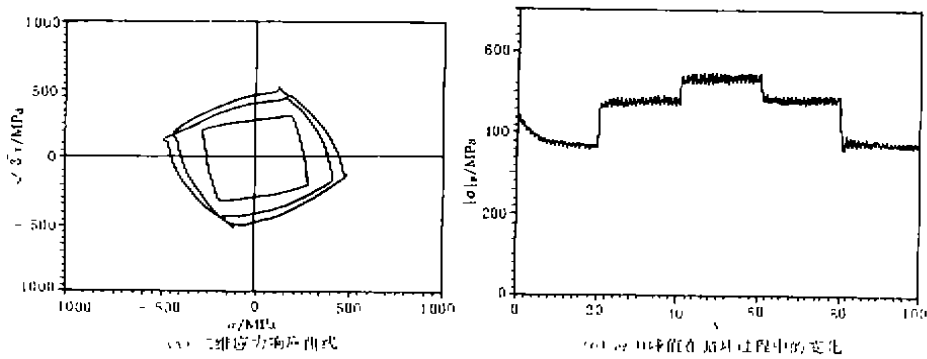


图 4 控制条件 R082 下的试验结果

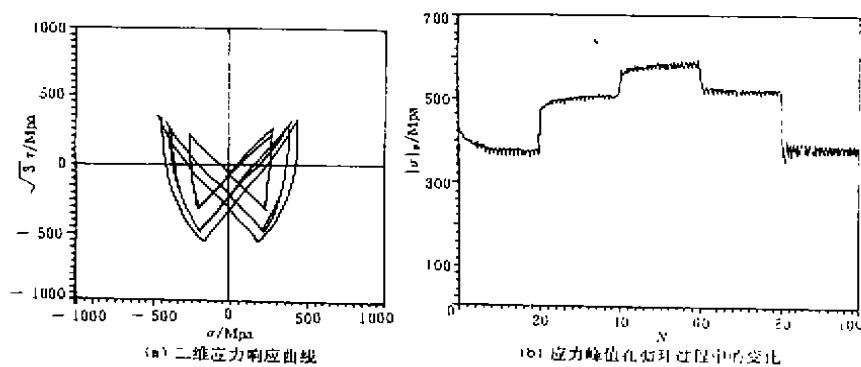


图 5 控制条件 R101 下的试验结果

图 4(a) 是编号为 R082 的控制参数下当 $\epsilon_s = 0.2, 0.4, 0.6\%$ 时达到循环稳定状态的 $\sigma \sim \sqrt{3}\tau$ 曲线, 图 4(b) 为全过程中的 σ 随 N 的变化, 除在 $\epsilon_s = 0.2\%$ 下的循环中表现了循环弱化外, 在 $\epsilon_s = 0.4\%$ 和 0.6% 的循环中表现出的轻微的强化并迅速趋于循环稳定状态。从图 4(b) 可以观察到在路径 G 下材料对较大应变幅值下的循环所造成的强化具有微弱的记忆。分析图 4(a) 还可以发现, 当应变路径经过折点时, 应力出现瞬态松弛(卸载), $(\sqrt{3}\tau)_{max}$ 亦略大于 σ_{max} , 考虑到应变路径的对称性以及拉压和剪切方向上材料响应的差异, 可以认为材料在剪切方向上的强化较拉伸方向略强。

图 5(b) 和 (a) 分别是编号 R101 的控制参数下的试验中 σ 随 N 的变化和各应变幅下最后一次循环的 $\sigma \sim \sqrt{3}\tau$ 关系。实验表明在路径 I 下材料表现出很强的循环交错强化, 当 $\epsilon_s = 0.2\%$ 时材料最初的几次循环表现为循环弱化并很快达到稳定状态, 当应变幅值增加到 0.4% 时, 材料表现出循环强化并逐渐地趋于稳定, 如再增加应变幅值, 这种过程重复发生。而当应变幅值减小后, 虽有轻微的弱化发生, 但很快地趋于稳定并保持了对较大应变幅值下的强化历史的记忆。 $\sigma \sim \sqrt{3}\tau$ 曲线(图 5(a)) 的上端存在微小曲边三角形, 分析知它可归因于实际应变路径在折点处略微偏离控制路径而造成的瞬时卸载。

图 6 给出了各种循环路径下的循环应力应变关系, 从中可以看出对应于不同路径的强化程度。总的来说, 比例路径对应的应力幅值较小, 而带折点的路径表现出了较大的强化, 其强化的程度又与路径方向变化的大小和频率有关, 一般地路径角点处的折角越大, 频率越高则强化越大, 这可以解释为什么路径 I 在所有路径中对应着最强的强化。值得注意的是, 在已有的研究中关于圆形路径交错强化最剧烈的结论对 40CrA 钢并不成立, 从图 6 中可以见圆形路径 H 下循环的应力幅仅略高于拉压循环, 而沿椭圆形路径 O 循环时的饱和应力幅值亦仅介于拉压循环和剪切循环的应力幅值之间。

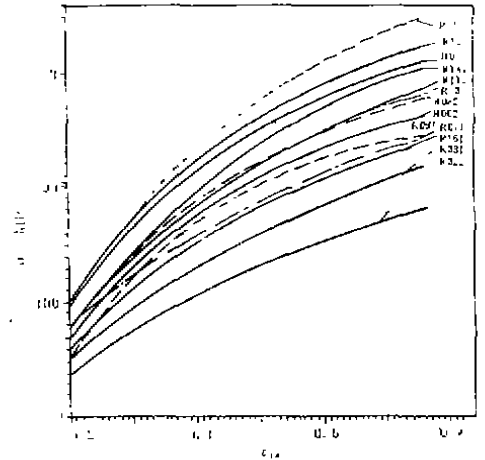


图 6 不同路径下的循环应力应变曲线

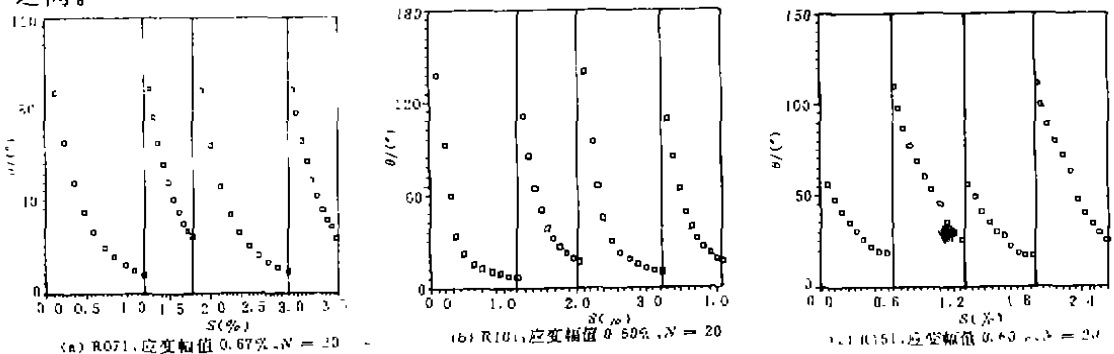


图 7 一个循环中角 θ 随弧长 s 变化

对材料的塑性流动行为, Lensky 曾经提出局部确定性假设: 在经历了任意路径的变形后, 若材料的当前变形沿应变空间中的某一路径, 则应力矢量与应变路径切向间的夹角(滞后角) θ 的变化仅仅依赖于 θ 的当前值、应变路径长度 s 和当前的应变路径曲率 k , 即

$$d\theta/ds = f(\theta, s, k)$$

图7(a)(b)和(c)分别为在编号为R071, R101和R151的控制参数下当 ϵ_s 分别为0.67%(R071), 0.6%(R101和R151)达到循环稳定时之 θ 角随 s 的变化, 由于过折点后, 应变路径曲率为零, 因此角 θ 的变化应为 θ 与 s 的函数, 分析可知在路径F和I下, Lensky局部确定性假设近似成立, 但在路径N的场合下, Lensky假设与实验结果间存在较大误差。可见在一般情形下, Lensky假设不成立。

2.3 应变路径变化时的响应特性

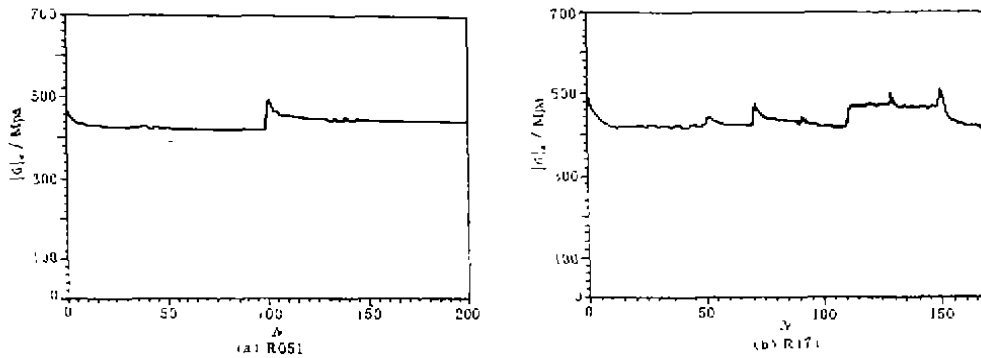


图8 应力幅值随循环次数的变化

图8(a)是以编号R051的控制参数下的实验中 σ_e 随 N 的变化, 材料经历对称拉压循环变形达到稳定状态后, 进入相同应变幅下的对称剪切应变循环, 其应力幅值有一陡升随之在循环过程中缓慢下降并趋于一稳定值。这说明当循环应变路径变化时, 材料发生瞬时强化, 而这种瞬时强化在后续的剪切循环变形中被缓慢的遗忘。类似的结果在编号为R041的控制参数的实验中亦可以被观察到, 图8(b)则对应于编号R171的控制条件下试验的 σ_e 随 N 的变化, 从中可以看出瞬时强化伴随着每一次循环路径的变化而出现, 而且先后两条路径间的夹角越大则瞬时强化越强。有趣的是在经历了一系列较复杂的变形历史后, 对应于先后两个路径A的循环应力幅值却趋于相等。

3 讨论和结论

对40CrA钢在非比例循环载荷下的本构响应的研究, 可以得到下列基本特点:

1) 就 Von Mises 意义上的等效应力应变关系而言, 单轴或比例路径的循环试验结果表明材料存在轻微的各向异性。当应变幅值相同时, 等效应力幅依剪切循环、比例路径循环和拉压循环的次序渐强。

2) 当应变幅值较小时, 在各种路径下的循环中, 材料都表现出了循环弱化, 这种弱化依应变幅值的增加而减弱, 当应变幅值较大时, 对于某些路径甚至反过来表现为循环强化。

3) 不同应变路径下材料的强化特性有很大的差异。路径方向变化的大小和频率是影响材料强化的重要因素。方向变化大, 频率高, 则强化较大。在不锈钢、OFHC铜等材料的试验中关于圆形路径卷入最大交错强化的结论对于40CrA钢一类的材料不再适用, 这也许可以

归因于材料的细观结构,这种结构使得滑移抗力与滑移方向间的交角成为影响附加交错强化的主要因素。

4) 在非比例循环过程中,材料的附加交错强化存在轻微的各向异性,在剪切方向较拉压方向表现出了更明显的强化。

5) 在一维或比例路径下循环时,材料对最大应变幅值所造成的强化没有记忆,而在非比例路径下循环时,对最大应变幅值的记忆依路径不同而变化,一般地当附加强化较大时,记忆也越强。

6) 当从一种应变路径下的循环稳定状态转入另一种应变路径下循环时,伴随有瞬时附加强化和随后发生的缓慢弱化,强化程度与路径变化的剧烈程度有关。对这种强化的记忆较为复杂,它可能与路径变化导致的瞬时多滑移的及由此产生的位错的交割和割阶等在后续循环过程中能否完全消失密切相关。

7) 在非比例加载条件下 Lensky 局部确定性假设一般不成立。

致谢 本课题得到中汽总公司的资助,试验工作得到重庆汽车研究所 MTS 试验室的大力支持,在此谨表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 Lamba H S, Sidebottom O M. Cyclic Plasticity for Nonproportional Paths. *J. Engng. Materials and Technology*, 1978, 100: 96~111
- 2 Ohashi Y, et al. Plastic Deformation Behavior of Type 316 Stainless Steel Subjected to Out-of-Phase Strain Cycles. *J. Engng. Materials and Technology*, 1985, 107: 286~292
- 3 Krempl E, Lu H. The Hardening and Rate-Dependent Behavior of Fully-Annealed AISI Type 304 Stainless Steel under Biaxial In-Phase Strain Cycling at Room Temperature. *J. Engng. Materials and Technology*, 1979, 106: 376~382
- 4 Tanaka E, et al. Effect of Strain Path Shape on Nonproportional Cyclic Plasticity. *J. Mech. Phys. Solids*, 1985, 33: 559~575
- 5 Tanaka E, et al. Effect of Strain Amplitudes on Nonproportional Cyclic Plasticity. *Acta Mechanica*, 1985, 57: 167~182
- 6 McDowell D L. An Experimental Study of the Structure of Constitutive Equation for Nonproportional Cyclic Plasticity. *J. Engng Materials and Technology*, 1985, 107: 307~315
- 7 Benallal A, Marquis D. Constitutive Equations for Nonproportional Cyclic Elasto-Viscoplasticity. *J. Engng. Mat. Tech.*, 1987, 109: 307~315
- 8 Nin J, Chen X. On the Properties of Plastic Flow of Materials under Nonproportional Cyclic Loading. *Int. J. Solids and Structures*, 1991, 128(4): 403~412
- 9 Peng X, et al. Constitutive Modelling of Nonproportional Cyclic Plasticity. *ACTA Mechanica Sinica*, 1992, 8(3): 244~252
- 10 马鸣图, 李小宁, 颜在先. 拉扭复合加载计算机控制程序. 全国第一届 MTS 材料试验会议论文集, 1990