

拉-扭复合加载下不锈钢的弹塑性 本构关系- I 实验¹⁾

赵社戌 匡震邦

(西安交通大学工程力学所, 西安 710049)

摘要 讨论了 1Cr18Ni9Ti 不锈钢薄壁圆管试件沿三段折线、不同曲率的圆形和椭圆应变路径承受拉-扭复合载荷的实验。在塑性应变空间中, 观察加载路径的内蕴几何参数对应力矢量大小、方向影响的规律。结果表明: 响应的延迟角、瞬时软化和重新强化性质与路径的内蕴几何学密切相关; Lensky 的“局部确定性”假设不完全符合事实; 变形历史和应变分量相互间的耦合效应对响应存在显著的影响。初步的电镜实验表明, 材料中的位错组态和塑性应变历史密切相关。

关键词 拉-扭复合加载, 延迟角, 位错

引 言

Ilyushin^[1]提出了一般加载条件下塑性不可压材料本构关系的五维全偏应变空间理论, 并设偏应力空间与偏应变空间同构, 认为应力是偏应变空间应变矢端曲线的内蕴几何学参数的泛函。随后进行了相关的实验研究。Lensky^[2]提出了局部确定性假设, 他认为: 响应的延迟角(应力矢量与应变增量矢量间的夹角)随应变弧长的变化是延迟角、加载路径的曲率及应力的确定的函数; Ohashi 等^[3,4]进行了一系列的实验, 并应用 Ilyushin 理论进行了初步计算; Zubchaninov 进行了实验和理论研究^[5]。在此理论的影响下, Pipkin 和 Rivlin 发展了“弧长理论”^[6], Valanis 发展了内时理论^[7]; 匡把此理论和简单物质理论联系起来, 并对塑性应变空间的刻划作了有价值的探讨^[8,9]。

在经典微分型本构关系方面更是作了大量的试验, 特别是对非比例加载路径下材料的力学行为, 进行了多方面的讨论^[10~13], 取得了一些进展, 这里不再重复。

本文对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢进行复合加载实验, 在塑性应变空间中, 考察应力响应和塑性应变空间内蕴几何学的关系, 得到了一些新的规律, 结果表明采用积分型本构关系描写材料的弹塑性行为是合适的。

1 实验方法

表 1 给出 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的化学成分, 表 2 给出其力学性质。将圆形棒材粗加工后, 在 1050 炉中保温 40 分钟后炉冷, 消除内应力。热处理后精加工成图 1 示标准薄壁圆管试件。

¹⁾国家自然科学基金资助项目

1995-04-03 收到第一稿, 1995-12-31 收到修改稿

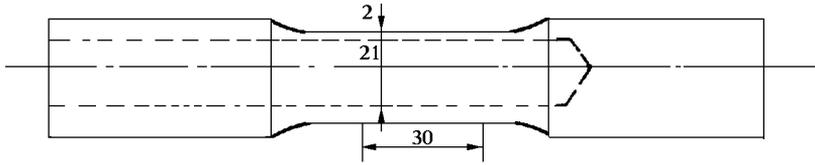


图 1 薄壁圆管试件

Fig 1 Thin-walled tubular specimen

表 1 化学成分(1Cr18Ni9Ti 不锈钢)

Table 1 Chemical composition of 1Cr18Ni9Ti S.S

Chemical composition	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	Ti	S	Fe
Weight percentage (%)	0.100	1.60	0.80	18.00	8.00	0.035	0.58	0.03	the rest

表 2 力学性能(1Cr18Ni9Ti 不锈钢)

Table 2 Mechanical properties of 1Cr18Ni9Ti S.S

σ_s / MPa	σ_b / MPa	$\Psi / \%$	$\delta / \%$	E / GPa	G / GPa
200	550	55	40	205	77

实验在 MTS809 试验机上进行, 采用总应变控制对试件施加轴向和扭转载荷, 加载速率为 $5 \times 10^{-4} s^{-1}$, 轴向和扭转应变由 MTS, 25mm 夹式轴-扭引伸仪测量。采用的应变路径如图 2 所示: 1) 预比例应变路径段相同, 如 OA 段或 OA_1 段, 在 A 或 A_1 点路径以不同的转折角 α_i ($30^\circ; 45^\circ; 60^\circ; 90^\circ; 135^\circ; 150^\circ$) 转折, 用以观测 α_i 的大小和转向对应力响应的影响; 2) 比例预应变路径长度相等 ($l_0 = 0.502\%$), 但与 ϵ_1 轴所夹初始角 α_0 不同 ($\alpha_0 = 0^\circ; 45^\circ; 90^\circ$); 3) 预比例应变路径段较长 (OA 和 OA'' 段), 观测路径长短的影响; 4) 从 A 或 A_1 点出发的第二段路径较长 ($l_1 = 1.3 \sim 1.5\%$), 中等 ($l_1 = 0.7 \sim 0.85\%$), 较短 ($l_1 = 0.5 \sim 0.6\%$), 观测第一和第二段路径对第三段响应的综合影响; 5) 不同半径的圆和不同椭圆路径, 考察路径曲率变化时的应力响应关系

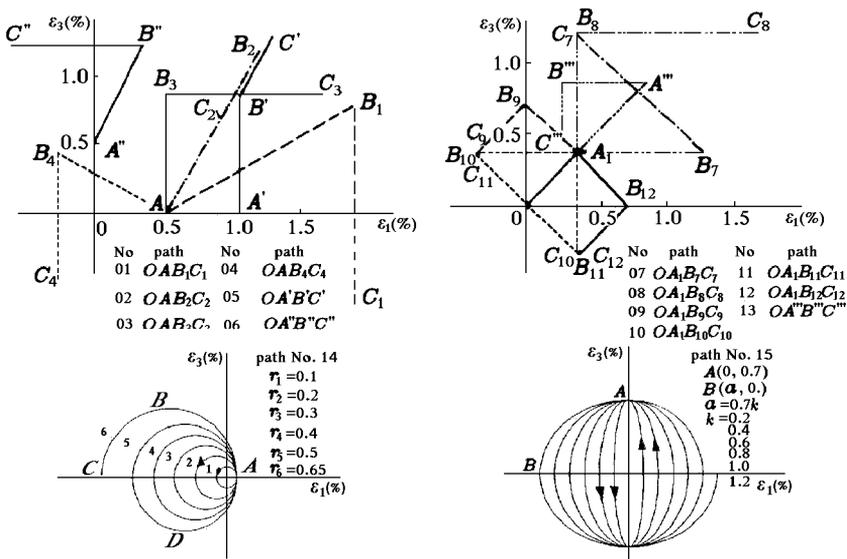


图 2 应变路径

Fig 2 Strain paths

记轴向和工程切应变分别为 ϵ_1 和 γ , 应力分别为 σ 和 τ 对应的塑性应变分别为 ϵ^p 和 γ^p , 其增量由总应变和应力增量的实验值按下式求得

$$d\epsilon^p = d\epsilon - \frac{d\sigma}{E}; \quad d\gamma^p = d\gamma - \frac{d\tau}{G} \quad (1)$$

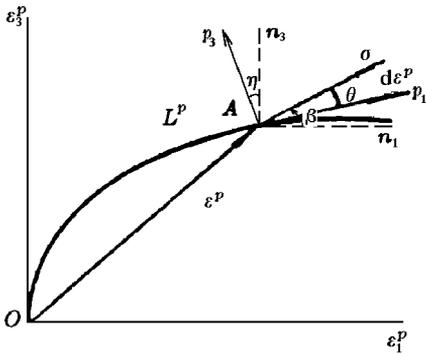


图 3 平面(塑性)应变空间

Fig. 3 Plane (plastic) strain space

推广 Ilyushin 假设, 设全应变、塑性应变和应力空间同构, 在该空间取一直角坐标系, 沿坐标轴的基矢记为 n_1 和 n_3 , 如图 3 所示, 应变矢量和应力矢量分别定义为

$$\left. \begin{aligned} \epsilon &= \epsilon_1 n_1 + \epsilon_3 n_3 \\ \epsilon^p &= \epsilon_1^p n_1 + \epsilon_3^p n_3 \\ \sigma &= \sigma_1 n_1 + \sigma_3 n_3 \\ \epsilon_3 &= \frac{\gamma}{\sqrt{3}}, \sigma_3 = \sqrt{3} \tau \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

全应变和塑性应变弧长的增量可分别表示为

$$dl = (d\epsilon^2 + d\epsilon^p)^{1/2} \quad dl^p = [(d\epsilon^p)^2 + (d\epsilon^p)^2]^{1/2} \quad (3)$$

应力矢量与全(及塑性)应变增量矢量间的夹角 θ 和 θ^p (即为延迟角) 定义为

$$\cos \theta = \frac{d \cdot \sigma}{|d| |\sigma|}, \quad \cos \theta^p = \frac{d^p \cdot \sigma}{|d^p| |\sigma|} \quad (4)$$

其 $|d\epsilon|$, $|d\epsilon^p|$ 和 $|\sigma|$ 分别表示全应变增量, 塑性应变增量和应力矢量的大小

2 实验结果及讨论

2.1 响应延迟特性的变化

沿复杂路径加载时, 材料响应出现延迟现象, 即应力矢量与(塑性)应变增量矢量出现不共轴的情况, 存在延迟角 θ 或 θ^p , 本节讨论加载历史及加载路径内蕴几何参数对 θ 及 θ^p 的作用规律

1) 图 4(a) 给出的是沿一些折线应变路径加载时, 第二段路径中 θ 随路径长度 $\Delta l_1 (= l - l_0)$ 的变化曲线。这些路径的预应变长度 l_0 相同, 但其与 ϵ_1 轴的夹角 α_0 不同。由图中比较知, 以相等转折角 α_1 转折后的 $\theta - \Delta l_1$ 曲线可纳入同一规律, 表明 α_0 对 θ 随 Δl_1 的变化影响较小。转折处 θ 即为转折角 α_1 , 之后随 Δl_1 增加, θ 按指数规律衰减并渐趋零值, 即经过一定应变弧长后, 应力便和应变增量的方向趋向一致; α_1 愈大, 在 Δl_1 的起始段 θ 衰减愈快, 即 $\Delta\theta/\Delta l_1$ 愈大。如果我们取用塑性应变屈服函数描述的加、卸载准则^[14], 即加、卸载的分界线为

$$(\epsilon_1 - \epsilon_1^p) d\epsilon_1 + (\epsilon_3 - \epsilon_3^p) d\epsilon_3 = 0 \quad (5)$$

如果路径转折前为比例加载, 此界线即为与原塑性应变路径垂直的增量塑性应变路径, 即转折后 $\alpha_1 < 90^\circ$ 为加载的情况, $\alpha_1 > 90^\circ$ 为卸载。由图可见, 大体上在 $\alpha_1 \leq 90^\circ$ 之前, $\theta - \Delta l_1$ 曲

线可用一个方程表示, 这和 Ohashi 等人^[3,4]的结果一致; 但在 $\alpha > 90$ 后, 由于卸载情况的出现, θ 随 Δl_1 的衰减比加载时要快 对逆向加载, 即 $\alpha = 180$ 的情况, 初始弹性卸载段 θ 保持 180 值不变, 当反向加载开始后 θ 由 180 迅速降至零值 上述性质表明 *Lesky* “局部确定性”假设必须修正, 应视加、卸载情况的不同, 用不同的方程来描写 θ 的变化

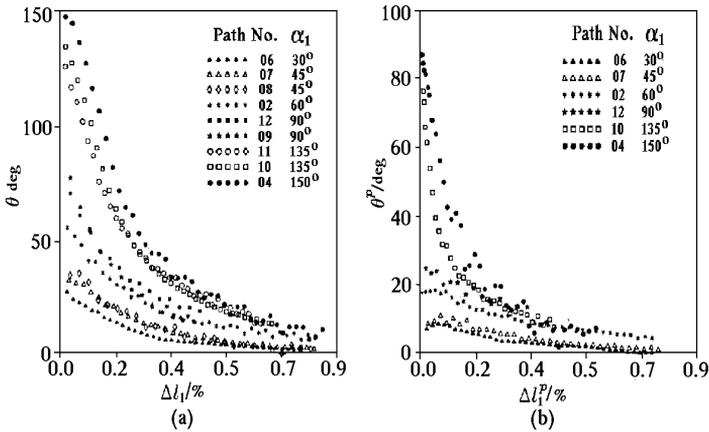


图 4 延迟角随转折后路径长度的变化(相同预应变长度, 不等转折角)
 Fig. 4 Variation of delay angle with the length of (plastic) strain path after turning point (equal pre-strain, different turning angle)

2) 图 5(a) 和图 6(a) 分别表示路径以相同角度 α_i (或 α_e) = 90 和 α_i (或 α_e) = 135° 第一次或第二次转折时, 第二段和第三段路径中的 θ 随 Δl_1 和 $\Delta l_2 (= l - l_0 - l_1)$ 变化的实验结果 图中比较表明, 当第二段路径较长, 特别是达 $\theta \rightarrow 0$ 的饱和长度时(本文实验值约为 0.8%~1.0%), 第三段中 θ 随 Δl_2 的变化规律和第二段中的基本一致; 反之, 对未达饱和和长度的路径, 在第二转折点处 $\theta = 0$, 即应力仍落后于增量应变一个角度, 这导致 $\theta \Delta l_2$ 曲线明显高于 $\theta \Delta l_1$, 不过此时 $\theta \Delta l_2$ 的关系仍可用相同的指数函数描写, 但需在第二个转折角 α_e 上加一残余的 θ 值 我们还可发现, 如应变路径非常长, 使塑性模量显著降低, 也会使 θ 的衰减减慢, 如图 6(a) 上路径 13 的结果, 但是这种差别实用上可略去

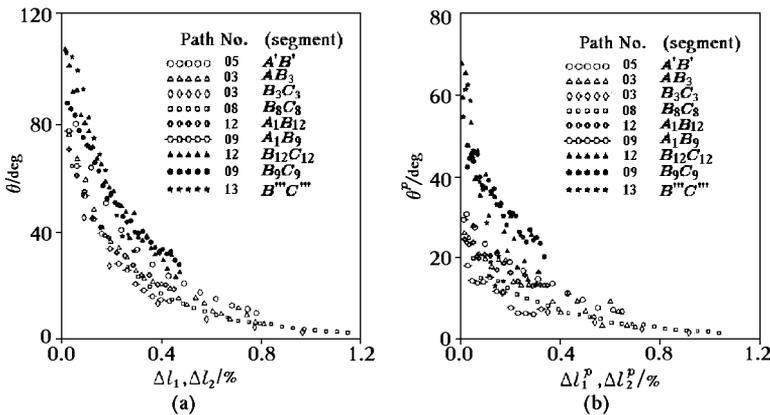


图 5 延迟角随转折后路径长度的变化(相同转折角 $\alpha = 90^\circ$; 不同先前应变历史)
 Fig. 5 Variation of delay angle with the length of (plastic) strain path after turning point (equal turning angle, different preceding strain history)

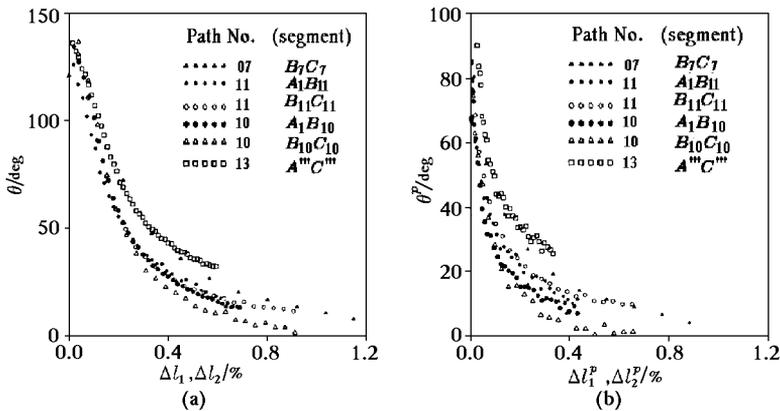


图 6 延迟角随转折后路径长度的变化 (相同转折角 $\alpha = 135^\circ$; 不同先前应变历史)
 Fig. 6 Variation of delay angle with the length of (plastic) strain path after turning point (equal turning angle, different preceding strain history)

3) 延迟角随变形路径的变化规律和材料内部组织的变化相关, 弹性变形不引起材料性质的变化, 因此采用塑性应变空间讨论更为合适. 由于塑性应变是计算值, 所以此空间中作出的图分散性要大一些, 如图 4(b)~6(b)所示. 在塑性应变空间中, 上述有关全应变空间的讨论, 在定性上是一致的, 但定量关系不同, 有关的变化规律更为明显. 描写 θ 变化的表达式将在本文第二部分中讨论.

2.2 响应标量特性的变化

当加载路径产生突然转折时, 实验表明: 应力矢量的大小 $|\sigma|$ 产生短时软化, 而后

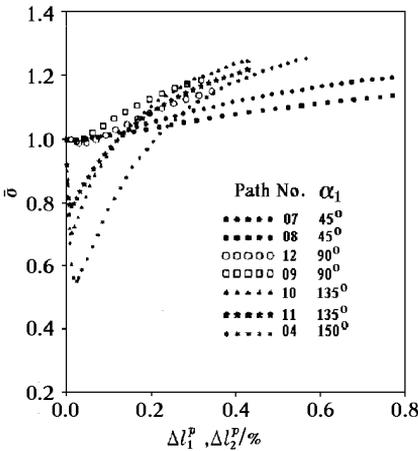


图 7 应力大小随转折后路径长度的变化 (相同预应变长度, 不等转折角)

Fig. 7 Variation of the magnitude of σ with Δl^p (equal pre-strain, different turning angle)

随转折后路径弧长的增加又逐渐恢复强化. 图 7 和图 8 给出了 $\bar{\sigma} = |\sigma|/|\alpha|$, (α 为转折处的应力矢量) 随塑性应变弧长 Δl^p 和 Δl^{β} 变化的比较, 结果表明:

1) l_0 相同, α_i 不同的路径下, 如果为加载的情况, 转折点处 $\bar{\sigma}$ 基本没有跌落, 随后的强化偏离转折前的强化曲线不多; 对中性变载, 这种跌落及强化的偏离已明显; 卸载情况下, 转折点处 $\bar{\sigma}$ 显著跌落, 随后的强化明显高于初始强化曲线, 如图 7 所示. 从此图中还可发现, 正应变的影响显著大于切应变; 10 号路径切应变不变, 正应变减小, 11 号路径正应变不变, 切应变减小, 前者引起 $\bar{\sigma}$ 的跌落明显大于后者.

2) 图 8(a) 表示 α_i 或 α_e 同为 90° ; 图 8(b) 表示 α_i 或 α_e 同为 135° 时, 不同的先前应变史对应力响应的影响. 对于两次转折角度相等的路径 (即 $\alpha_i = \alpha_e$), 如果第二段路径较短, 则第二次转折处 $\bar{\sigma}$ 的跌落较为显著, 特别对第三段与初始段逆相的情况, 这一现象更为突出; 相反, 若第二段路径较长, 第三段中 $\bar{\sigma}$ 的变化基本与第二段中的 $\bar{\sigma}$ 曲线一致. 对于 α_i 大

于 α 的路径, 即使第二段路径较长, 它们的 σ 在第三段起始的跌落大于前一段中的, 强化也明显些; 若 α_1 小于 α_2 , 这种差别不明显 这些性质说明, 第一个转折角对第三段响应的变化有一定的影响, 但当第一个转折角较小时, 这种影响较弱, 且随塑性应变弧长的增加, 先前变形史的影响逐渐消失

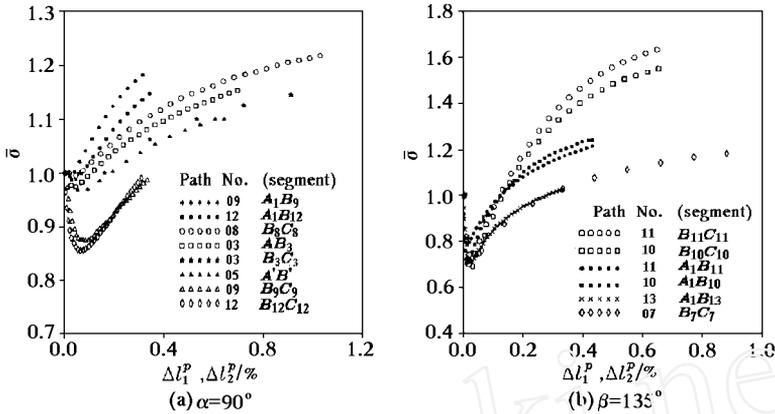


图 8 应力大小随转折后路径长度的变化(相等转折角, 不同先前应变历史)

Fig 8 Variation of the magnitude of stress vector with the length of (plastic) strain path after turning point (equal turning angle, different preceding strain history)

3) 图 8 中还给出了预比例应变长度不同, 转折角相同(03 与 05 号路径, $\alpha_1 = 90^\circ$; 10 和 13 号路径, $\alpha_1 = 135^\circ$) 时 σ 随 Δl^p 变化的比较, 发现预应变路径长度对 σ 的跌落没有影响, 但路径短的呈现较高的强化效应

上述实验结果表明, 变形历史和各应变分量相互间的耦合作用在应力响应中不容忽视

2.3 光滑加载路径下 θ 与 $|\sigma|$ 的变化

沿圆形和椭圆形应变路径加载时, 改变圆的半径或椭圆的长短轴之比, 便可讨论路径的曲率对应力响应的影响 对固定半径的圆路径, θ 或 θ 是常数 由此实验作出的 θ 随曲率 κ 变化的曲线示于图 9, 曲率愈大, θ 愈大, 原则上曲率为零时 $\theta = 0$ 一般情况下可取幂指数关系, 但也很接近直线; 当曲率不太小时, 实用上可用一不过原点的直线近似描写

沿椭圆路径加载时, 先从狭长椭圆开始, 逐步过渡到扁椭圆, 图 10 表示这种加载方式下, θ 和 $|\sigma|$ 随 l^p 变化的情形 当曲率由大变小时, θ 随 l^p 的增加而减小, 其变化趋势和折线路径类似, $|\sigma|$ 也存在和折

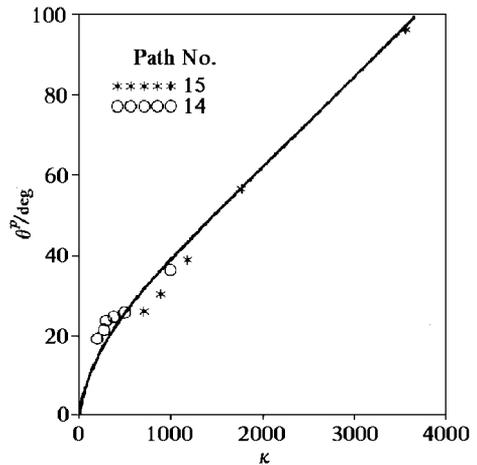


图 9 延迟角随路径曲率的变化

Fig 9 Variation of delay angle with the curvature of (plastic) strain path

线路径相类似的跌落和随后的强化现象, 折线路径的转折点可看成曲率很大的一段小圆弧的情形 曲率由小变大时, θ 随 l^p 的增加而变大, 其速率 $|\Delta\theta/\Delta l^p|$ 比曲率由大变小时

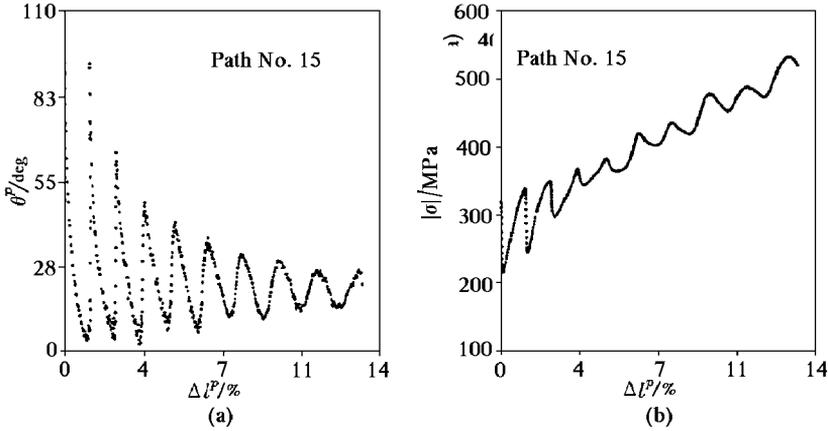


图 10 路径 15 下延迟角及应力大小随转折后路径长度的变化
 Fig 10 Variation of delay angle and the magnitude of stress vector with the lenth of (plastic) strain path for path 15

快得多, $|\sigma|$ 也不出现初始跌落的现象

2.4 微观组织和机理的初步分析

1Cr18Ni9Ti 不锈钢经 1050 °C × 40min 炉冷后, 典型的金相组织为 $\gamma + \alpha + k$, 即在奥氏体晶粒内分布有一些铁素体板条和析出的碳化物粒子, 属低层错能材料

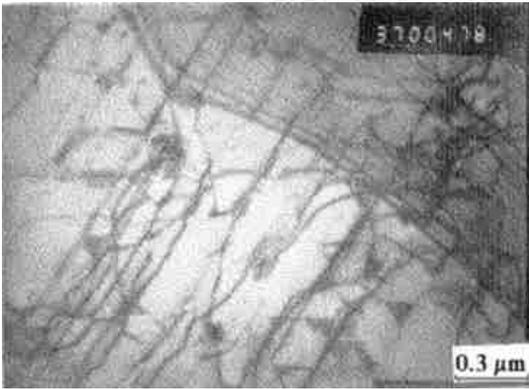


图 11 拉-扭比例加载后 TEM 观察 ($\alpha = \epsilon_3$)
 Fig 11 TEM observation for proportional tension-torsional loading

在比例加载条件下, 塑性变形是以少数滑移面为主的平面滑移模式, 不易产生交滑移, 图 11 是 $\alpha = \epsilon_3$ 双轴比例加载时的 TEM 照片, 可观察到试样内部主要存在着平行分布的长线位错及一些细碎的位错段, 这正是以平面滑移为主要特征的表现 图 12 所给出的是两条非比例复合加载路径下的 TEM 照片, 两条路径第一次转折时 $\alpha = 45^\circ$; 第二次转折时一条 $\alpha = 90^\circ$ (图 12(a)), 另一条 $\alpha = 135^\circ$ (图 12(b)).

由于这种转折, 奥氏体晶粒内部最大切应力平面产生旋转, 使得除原先的滑移面外, 其它的滑移面也同时开动, 从而有利于形成位错的胞状结构 由图可见, α 大于 90° 的路径比 α 等于 90° 的路径的胞状结构更为明显, 这是由于前者先卸载再进入加载状态产生新的塑性变形, 最大切应力平面产生较大角度的旋转, 更易产生交滑移而形成较明显的胞状结构

由于位错在滑移过程中容易在晶界、亚晶界, 障碍物粒子前产生塞积, 当加载改变方向后, 通过交滑移可部分解除先前过程中位错塞积引起的应力场, 宏观上便导致 σ 的起始跌落 由于塞积场的松弛是逐步进行的, 这便导致 θ 和 θ^p 的指数衰减 显然前面讨论过的宏观规律均可用这种微观机理定性地解释, 但要作定量的解释还需作大量的工作

3 结 论

本文详细讨论了沿三段折线应变路径加载下材料的塑性响应特性, 把加载与否首次引

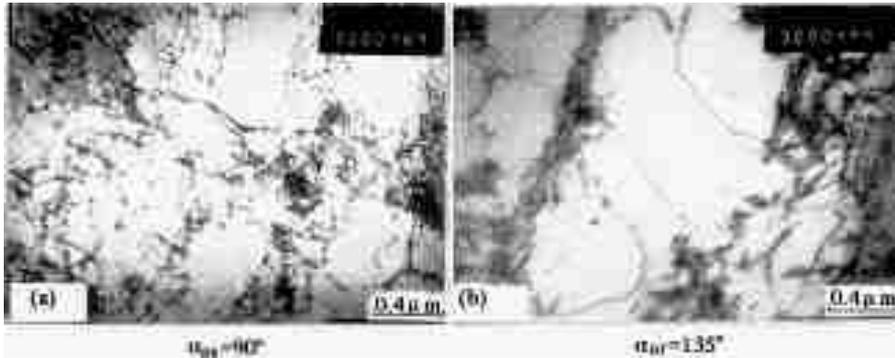


图 12 沿路径 07 和 08 加载后 TEM 观察
Fig. 12 TEM observation for loading along path 07 and path 08

入对延迟角的讨论, 结果表明 Lensky“局部确定性”假设修正的必要性。论文提出的在塑性应变空间讨论本构特性是合理的, 较以往作者在全应变空间讨论更符合问题的物理背景。塑性应变历史及应变分量相互间耦合效应对应力响应的影响规律表明, 采用 Ilyushin 的具有衰减记忆效应的积分型本构方程是合适的。文中所进行的实验是可靠的, 提出的关于 θ , σ 的变化规律的讨论是迄今最为详细的。这为第二部分的理论奠定了坚实的基础。

参 考 文 献

- 1 Ilyushin AA. *PriklMekhMat*, 1954, 18: 641
- 2 Lensky VS. *Izv Akad Nauk SSSR, Otd Tekhn Nauk Mekh Mashinostr*, 1962, 5: 154
- 3 Ohashi Y et al. *J Mech Phys Solids*, 1981, 29: 51
- 4 Ohashi Y et al. *J Mech Phys Solids*, 1981, 29: 69
- 5 Zubchaninov VG. *PriklMekh*, 1991, 27: 3
- 6 Pipkin AC, Rivlin RS. *ZAMP*, 1965, 16: 313
- 7 Valanis KC. *ArchMech*, 1971, 23: 517
- 8 Kuang ZB. *Acta Mechanica Sinica*, 1990, 3: 245
- 9 匡震邦. 非线性连续介质力学基础. 西安: 西安交通大学出版社, 1989
- 10 Phillips A, Tang JL. *Int J Solids Struct*, 1972, 8: 463
- 11 Helling DE et al. *J Engng Mat Tech*, 1986, 108: 313
- 12 Dvorak GJ et al. *J Mech Phys Solids*, 1988, 36: 655
- 13 McDowell DL. *J Engng Mat Tech*, 1992, 114: 297
- 14 Naghdi PM, Trapp JA. *Int J Engng Sci*, 1975, 13: 785

AN ELASTO-PLASTIC CONSTITUTIVE EQUATIONS FOR THE STAINLESS STEEL UNDER COMBINED AXIAL AND TORSIONAL LOADS PART—I EXPERIMENTS

Zhao Shexu Kuang Zhenbang

(*Institute of Engineering Mechanics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

Abstract In the present paper, a series of experiments were performed on the plastic deformation of a thin-walled tubular specimen of 1Cr18Ni9Ti S.S. along trilinear, circular and elliptical strain paths under combined loads of axial force and torque. The effects of intrinsic geometry of loading path on the magnitude and the direction of stress vector were investigated in plastic strain vectoral space. Experimental results show that the delay, the instantaneous softening and the recovery of hardening of stress response are related tightly to intrinsic geometry of loading path. Lensky's hypothesis of local deformability is not hold in general loading. The deformation history and the coupled effect among strain components have significant influences on the response. The preliminary TEM tests show that the dislocation substructures in the material are dependent on the plastic deformation history.

Key words combined axial-torsional loading, delay angle, dislocation