

1Cr18Ni9Ti 不锈钢的非比例循环 特性实验研究

杨显杰 高庆 孙训方

(西南交通大学应用力学研究所, 成都, 610031)

AN EXPERIMENTAL STUDY ON NONPROPORTIONAL CYCLIC PROPERTIES OF 1Cr18Ni9Ti STAINLESS STEEL

Yang Xianjie, Gao Qing, Sun Xunfang

(Institute of Applied Mechanics, Southwestern Jiaotong University, Chengdu, 610031)

摘要 在高温多轴非比例循环加载下, 对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢进行了在单轴和圆形应变路径下的循环试验、非比例循环加载历史试验以及在圆形应变路径下的应变幅值历史效应的试验。研究了非比例循环附加硬化、应变幅值历史效应、循环加载历史效应及这些效应的温度依赖性, 得到了若干有意义的结果。

关键词 高温, 非比例循环加载, 温度依赖性

中图分类号 V250.2, V252.1

Abstract A series of tests was performed for 1Cr18Ni9Ti stainless steel under the complex uniaxial and multiaxial nonproportional cyclic loadings at elevated temperatures. These tests include the ones under uniaxial and circular strain paths, the tests of the effects of strain amplitude histories along circular strain path and the ones under nonproportional cyclic loading histories. The effects and their temperature dependence of cyclic additional hardening, strain amplitude histories, and path histories for nonproportional cyclic loading are investigated, and some significant experimental results obtained.

Key words high temperature, nonproportional cyclic loading, temperature dependence

近 20 年来, 在高温环境下金属材料的变形行为受到了广泛重视^[1]。对于层错能较低的金属材料, 由于非比例循环加载将导致材料产生比相同等效应变幅值下比例路径强得多的附加硬化^[2], 研究非比例加载下材料的变形行为具有重要意义。高温下的非比例循环加载历史对材料变形行为的影响是目前研究得很不深入, 需要更进一步加以实验研究的课题。因此, 本文针对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢进行了高温环境下非比例应变路径历史效应、圆形应变路径应变幅值历史效应及这些效应的温度依赖性的试验, 得到了若干有意义的结果。

1 实验方法

1.1 材料和试样

1993 年 9 月 30 日收到, 1994 年 1 月 27 日收到修改稿

国家自然科学基金资助课题

将材料进行粗加工后热处理。即 1 050℃ 保温 40min, 空冷。再将材料精加工成直径为 14mm 的圆柱试样以及标距段外径为 25mm、内径为 21mm 的薄壁管试样。实验所用材料为 1Cr18Ni9Ti 耐热不锈钢。

对于比例加载情形, 其非弹性应变分量增量之间在加载过程中始终保持一定的比例关系, 如单轴循环; 若不能满足此条件, 则称为非比例加载, 如椭圆形、圆形应变路径; 其示意图如图 1 所示。等效应力幅值 $\Delta\bar{\sigma}/2$ 和等效应变幅值 $\Delta\bar{\varepsilon}/2$ 以及等效应力 $\bar{\sigma}$ 被定义如下

$$\Delta\bar{\varepsilon}/2 = [(\Delta\varepsilon_1/2)^2 + (\Delta\varepsilon_3/2)^2]^{1/2} \quad (1)$$

$$\Delta\bar{\sigma}/2 = [(\Delta\sigma_1/2)^2 + (\Delta\sigma_3/2)^2]^{1/2}, \quad \bar{\sigma} = [(\sigma_1)^2 + (\sigma_3)^2]^{1/2} \quad (2)$$

$$\sigma_1 = \sigma, \quad \sigma_3 = \sqrt{3}\tau, \quad \varepsilon_1 = \varepsilon, \quad \varepsilon_3 = \gamma/\sqrt{3} \quad (3)$$

其中, σ 和 τ 分别为轴向应力和剪应力, ε 和 γ 分别为轴向应变和剪应变。

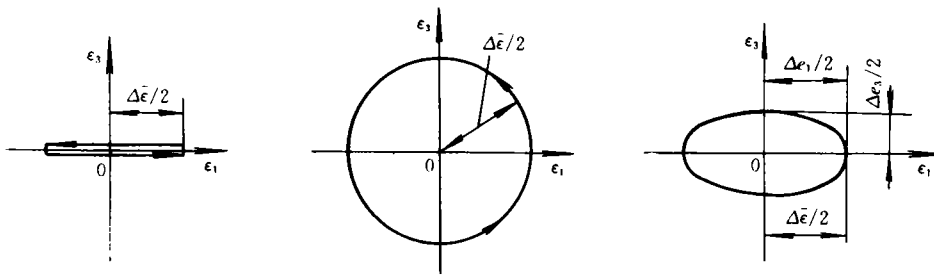


图 1 加载路径示意图

1.2 试验设备及方法

试验是在 MTS809 系列 250kN 电液伺服材料试验系统上完成的。试样的加热是由高频感应加热装置 Lepel 通过感应线圈来实现的。将点焊在试样测点上的 Chromel-Alumel 热电偶用导线接到 West 和 OMEGA 上, 实现自动测温显示和自动控温。在试样标距段内以及试验的时间内对试验给定温度的温度波动分别小于 $\pm 5^\circ\text{C}$ 和 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。

在单轴加载下, 试样的应变测量是通过轴向高温引伸计连接 MTS809 试验机的应变传感器进行测量的, 该应变测量分辨率为 $50\mu\varepsilon$ 。对于拉-扭组合加载, 试样的应变测量是通过 MTS809 试验机上的轴向位移和扭角传感器分别测定轴向位移和扭角来进行间接位移测量的。为了保证其测量的准确性, 在室温下还用拉伸应变引伸计对冲程控制下的应变-位移关系进行了标定。实验数据的记录通过 HP7046B X-Y 函数记录仪来实现。在单轴加载时, 采用 IBM 计算机进行实时控制。对于拉-扭组合加载情形, 通过函数发生器实现本文的椭圆形和圆形应变路径加载。

2 实验结果及其讨论

材料在较低层错能下非比例循环加载将产生较比例加载循环硬化大得多的材料附加硬化, 这种附加硬化亦依赖于加载路径的形状^[3], 因此, 一般引入非比例度来表征材料在非比例加载路径下附加硬化程度^[4]。根据文献[4]的定义, 圆形应变路径下的非比例度水平大于椭圆形应变路径下的非比例度水平, 比例加载路径下的非比例度为零, 即为比例加载。

2.1 非比例循环附加硬化的温度依赖性

作者在等效应变幅值 $\Delta\bar{\epsilon}/2$ 为 0.60%, 等效应变率为 $3 \times 10^{-3}/s$ 的圆形应变路径下分别进行了室温至 700℃ 下的循环实验。将该实验结果与单轴循环的实验结果进行比较, 如图 2 所示。从该图可以看出, 单轴循环饱和应力幅值 $\Delta\sigma/2$ 比单轴单调加载下在应变为 0.60% 处的流动应力 σ_0 要大, 材料产生循环硬化。圆形应变路径循环饱和应力幅值 $\Delta\bar{\sigma}_s/2$ 比单轴循环饱和应力 $\Delta\sigma/2$ 要大, 将 $\Delta\bar{\sigma}_s/2$ 与 $\Delta\sigma/2$ 的差称为材料的循环附加硬化。在 650℃ 温度以下, 材料有明显的附加硬化效应; 高于该温度时, 随着温度的升高, 其附加硬化效应明显减小。其趋势是: 高于某一温度时, 该材料将没有附加硬化效应发生。

温度较低时, 1Cr18Ni9Ti 不锈钢层错能较低, 单轴循环时, 其位错结构以阶梯状占主导地位, 而在圆形应变路径下, 由于多个滑移系开动, 位错结构主要是胞状结构^[5]。由于胞状结构的变形阻力比阶梯状大, 在宏观上就是在低于 650℃ 时, 该材料产生明显的附加硬化。温度升高, 层错能也升高, 位错的滑移模式也将从平面滑移转变为波状滑移^[6]。温度高于 650℃ 时, 易于螺型位错的交滑移以及刃型位错的攀移, 即使在单轴循环时亦可能形成大部分与圆形应变路径时相同的位错结构。随着温度升高, 这两种路径下材料所形成的位错结构差别越来越小, 直到温度达到某一临界值时位错结构几乎没有差别。在宏观上反映出高于 650℃ 时该材料的循环附加硬化随温度升高而减小, 直到某一临界温度时附加硬化消失。

2.2 圆形应变路径下的应变幅值历史效应

在 200℃、650℃ 的圆形应变路径下的应变幅值历史为: 0.60%→0.75%→0.90%→0.75%→0.60%, 其实验结果如图 3~图 4 所示。该图中, N 为循环圈数, $\bar{\sigma}_{\max}$ 为第 N 次循环圈时在加载路径中的最大等效应力。图中的水平虚线代表对应于无先前历史的某一等效应变幅值下的最大循环饱和应力值。在 200℃ 下, 当应变幅值为上升的历史时, 先前历史的循环对后继较大应变幅值下的最大循环饱和应力值没有影响, 而当应变幅值从 0.90% 降到 0.75% 以及 0.60% 时, 此时的最大循环饱和应力比无先前历史的该应变幅值下的最大循

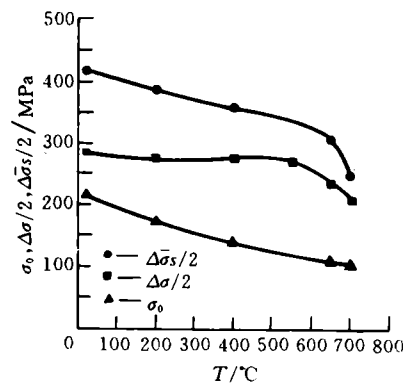


图 2 循环硬化的温度依赖性

环饱和和应力大。因此，材料的应变幅值历史效应表现为对先前最大应变幅值的部分衰减记忆；对于图 4，由于在各应变幅值下的最大循环饱和应力与无先前历史时的基本相同，在 650℃ 下这种应变幅值历史效应基本消失。

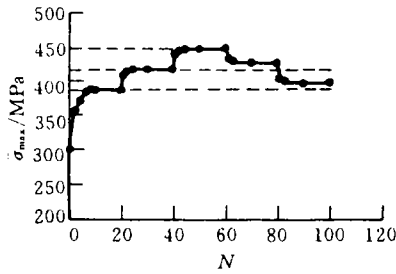


图 3 200℃ 下圆形路径应变幅史

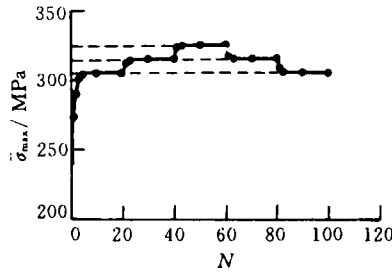


图 4 650℃ 下圆形路径应变幅史

在圆形应变路径下，材料在较小等效应变幅值下就形成了以胞状结构占主导地位的位错结构^[5]。随着等效应变幅值增加，其胞状尺寸变小^[5]。当胞状尺寸由大变小时，位错结构的演化无加载历史效应；然而，当在较高等效应变幅值下循环稳定之后，再将等效应变幅值降低时，在后继循环中胞状尺寸将由小到大。当温度较低时，这种演化将使先前一部分较小尺寸的胞状位错结构保留下来，它不能完全回复到无先前较大应变幅值历史下的胞状结构，材料在宏观上就表现为对最大应变幅值历史的部分衰减记忆。当温度高于某一温度时，随着温度升高，由于热激活作用，位错运动阻力减小，当循环加载条件改变时，先前所形成的位错结构分解的比例越大，且位错密度要相应地变化，分解的位错结构将更多地重排为与当前循环条件相适应的位错结构，在宏观上反映出的就是随着温度升高，循环应变幅值历史效应减小。正如图 4 所示，650℃ 时这种应变幅值历史效应基本消失。

2.3 多种恒定温度下非比例循环加载历史效应

作者分别在 200℃、400℃、650℃、700℃ 恒温下进行了最大等效应变幅值为 0.60%，应变率为 $3 \times 10^{-3} / s$ ，其非比例循环加载历史为轴向拉压→椭圆($\Delta\epsilon_3 / \Delta\epsilon_1 = 0.50$)→圆形($\Delta\epsilon_3 / \Delta\epsilon_1 = 1.0$)→椭圆($\Delta\epsilon_3 / \Delta\epsilon_1 = 0.50$)→轴向拉压的实验。实验结果如图 5~ 图 8 所示。

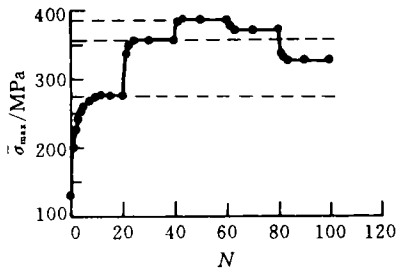


图 5 200℃ 下非比例加载史效应

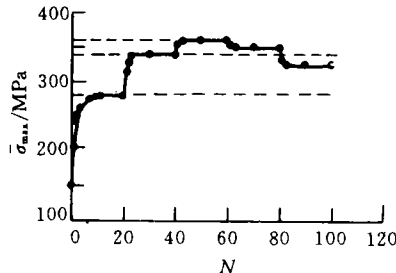


图 6 400℃ 下非比例加载史效应

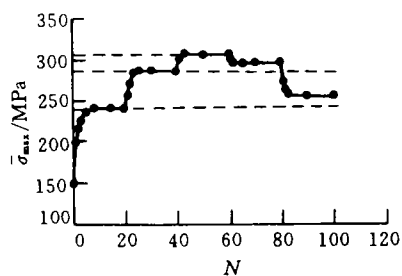


图 7 650℃ 下非比例加载历史效应

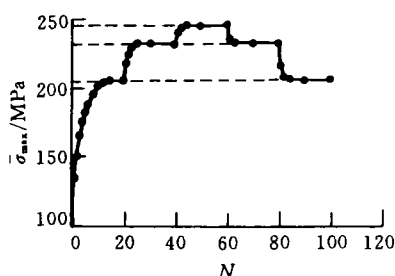


图 8 700℃ 下非比例加载历史效应

由图 5~图 6 所示的实验结果可以看出: 在 200℃ 和 400℃ 下, 该材料有非常明显的非比例循环加载历史效应。即随着非比例度的增加, 材料的附加硬化效应增强; 先前较小非比例度下的循环历史对后继较大非比例度下的循环饱和和特性几乎没有影响; 随着循环加载的非比例度的减小, 材料产生循环软化现象, 这种软化是不完全的。也就是说, 该材料的最大循环饱和应力仍比同等非比例度下无先前非比例度历史的最大循环饱和应力大。因此, 表现为对材料先前加载历史中最大非比例度循环历史的部分衰减记忆。

由图 7 所示, 在 650℃ 下非比例循环加载时材料的附加硬化就要小得多了。随着温度升高, 材料对先前最大非比例度下循环历史的记忆效应与 200℃ 和 400℃ 比明显减弱。在 700℃ 下材料的非比例附加硬化效应已经很小, 材料的非比例循环加载历史效应消失。如图 8 所示, 此时, 非比例循环饱和行为与先前不同非比例度下的循环历史无关。

考虑到从胞状结构向阶梯状演化时对胞状结构的记忆特性^[7]及其温度依赖性, 利用与应变幅值历史效应相似的微观解释, 就比较容易理解: 1Cr18Ni9Ti 不锈钢在低于某一临界温度下, 其非比例循环加载历史效应非常明显; 高于某一临界温度时, 随着温度的升高, 其非比例循环加载历史效应减小; 700℃ 时, 其历史效应消失。

3 结 论

- (1) 在恒定等效应变幅值下, 非比例循环加载时硬化效应强烈地依赖于温度, 低于 650℃ 时, 材料有明显的附加硬化效应, 当温度高于 650℃ 时, 随着温度升高, 其附加硬化明显减小。直到某一临界温度时材料无附加硬化效应产生。
- (2) 在圆形应变路径下, 应变幅值历史效应强烈地依赖于温度; 在给定应变幅值历史下, 后继循环受到先前历史最大应变幅值下循环特性的影响, 表现为对先前历史中最大应变幅值的衰减记忆。在温度低于某临界温度(650℃)时, 这种衰减记忆效应比较明显; 而在该温度以上时, 其应变幅值历史效应基本消失。
- (3) 在恒温 and 恒定等效应变幅值情形, 在非比例循环加载历史下, 材料的循环饱和行为受到先前最大非比例度下的循环饱和和特性的影响; 这种影响在低于 650℃ 时是非常明显的, 而温度高于 650℃ 时, 随着温度升高, 这种影响明显减弱, 在 700℃ 时这种影响消失。

参 考 文 献

- 1 Ohno N. Recent topics in constitutive modeling of cyclic plasticity and viscoplasticity. *ASME Appl Mech Rev*, 1990;43(11): 283-295
- 2 Lamba H S, Sidebottom O M. Cyclic plasticity for nonproportional paths: part 1-cyclic hardening erasure of memory and subsequent strain hardening experiments, *ASME J Eng Mat Tech*, 1978;100:96-103
- 3 Benallal A, LeGallo P, Marquis D. An experimental investigation of cyclic hardening of 316 stainless steel and of 2124 aluminium alloy under multiaxial loadings. *Nucl Eng Des*, 1989;114:345-353
- 4 杨显杰. 金属材料循环塑性和循环粘塑性本构关系研究. 西南交通大学博士论文, 1992
- 5 Doong S H, Socie D F, Robertson I M. Dislocation substructures and nonproportional hardening. *ASME J Eng Mat Tech*, 1990; 112:456-464
- 6 Marshall P. Austenitic stainless steels: microstructure and mechanical properties. London: Elsevier Applied Science Publishers, 1984: 196-200
- 7 Nishino S, Hamada N, Sakane M, Ohnami M, Matsumura N, Tokizane M. Microstructural study of cyclic strain hardening behavior in biaxial stress states at elevated temperature. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1986; (9):65-77