

10497-501

304 不锈钢非比例循环棘轮行为的实验研究 *

康国政 高庆 蔡力勋 杨显杰 孙亚芳

(西南交通大学应用力学与工程系, 成都 610031)

摘要 在室温下对 304 不锈钢在非比例循环加载下的棘轮行为进行了实验研究。在圆形、菱形和直线形状的非比例双轴循环加载路径下, 研究不同轴向平均应力、等效应力幅值大小及其历史下材料的棘轮行为特征。为了比较, 还进行了单轴加载下该材料的循环棘轮行为实验。实验表明, 304 不锈钢的室温非比例循环棘轮行为明显地依赖于加载路径的形状; 与单轴循环棘轮行为一样, 非比例循环棘轮行为也明显地依赖于轴向平均应力和等效应力幅值的大小及其历史。

关键词 304 不锈钢, 非比例加载, 棘轮行为, 循环塑性

中图分类号 O344.1, TG146.1

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2000)05-0497-05

79142

EXPERIMENTAL STUDY FOR NONPROPORTIONAL CYCLIC RATCHETING OF 304 STAINLESS STEEL

KANG Guozheng, GAO Qing, CAI Lixun, YANG Xianjie, SUN Yafang

Department of Applied Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031

Correspondent: KANG Guozheng, lecturer, Tel: (028)7600799, Fax: (028)7600797,

E-mail: gzhkang01@yahoo.com

Manuscript received 1999-09-09, in revised form 2000-01-10

ABSTRACT An experimental study was carried out on the cyclic ratcheting of 304 stainless steel subjected to nonproportional cyclic loading at room temperature. The cyclic ratcheting tests were conducted for the circular, rhombic and linear paths of nonproportional loading with different axial mean stresses, equivalent stress amplitudes and their histories. To compare, the uniaxial cyclic ratcheting was also tested. The experimental result shows that, at room temperature, the nonproportional ratcheting of 304 stainless steel depends significantly on the shape of load path, and on the values of axial mean stress, equivalent stress amplitude and their histories as uniaxial ratcheting does.

KEY WORDS 304 stainless steel, nonproportional loading, ratcheting, cyclic plasticity

金属材料在非对称应力循环载荷作用下将会产生循环蠕变, 这种塑性变形的循环累积现象称为棘轮效应 (ratcheting)。这一效应对承受非对称应力循环的结构寿命是非常重要的, 目前已引起人们的广泛重视^[1-5], 并已得到了一些描述循环棘轮行为的本构模型^[6-8]。然而, 金属材料的非比例循环棘轮行为要比单轴加载下的循环棘轮行为复杂得多, 目前对多轴非比例循环棘轮行为的实验结果还很少, 对其棘轮变形特征远未了解清楚, 有必要对其进行较为深入的研究。因此, 本文将在 304 不锈钢单轴循环棘轮行为研究的基础上, 研究该材料在非比例循环加载 (拉-扭组合加载) 下的棘轮行为, 并比较两者的行

为特征。研究将重点讨论非比例循环棘轮行为与非比例加载路径的形状、轴向平均应力和等效应力幅值大小及其历史的关系, 揭示材料的非比例循环棘轮效应特征, 为完善非比例循环加载下的本构描述提供实验基础。

1 实验方法

本文采用的试验材料为 304 不锈钢, 其成分 (质量分数, %) 为: C 0.03, Ni 9.8, Cr 18.0, Mn 1.7, P<0.05, S<0.05。将不锈钢棒热锻后, 经 1150℃保温 60 min 再水冷, 即固溶处理后, 加工成实心圆棒试样和薄壁圆管试样。实心圆棒中心标距段的直径为 10 mm; 而薄壁圆管试样的工作段内径为 21 mm, 外径为 25 mm。应变通过标距为 25 mm 的拉扭引伸仪进行测量, 在 MTS809-250 KN 电液伺服控制试验机上通过 Teststar 实验控制系统对整个实验过程进行闭环控制数据采集。轴向棘轮应变 ϵ_r 和扭转棘轮应变 γ_r 定义为:

* 国家自然科学基金 19772041 和四川省跨世纪青年学科带头人培养基金资助项目

收到初稿日期: 1999-09-09, 收到修改稿日期: 2000-01-10

作者简介: 康国政, 男, 1969 年生, 讲师, 工学博士

$$\epsilon_r = \frac{1}{2}(\epsilon_{max} + \epsilon_{min}) \quad (1)$$

$$\gamma_r = \frac{1}{2}(\gamma_{max} + \gamma_{min}) \quad (2)$$

式中, ϵ_{max} 和 ϵ_{min} 分别为一个循环中最大和最小轴向应变, γ_{max} 和 γ_{min} 分别为一个循环中最大和最小剪切应变. 轴向和扭转棘轮应变率分别定义为每一个加载循环下轴向和扭转棘轮应变的增量.

在单轴循环和非比例循环加载下棘轮行为的研究中, 本文采用图 1 所示的 5 种形状的加载路径. 图中 σ 和 ϵ 分别为轴向应力和应变, $\sqrt{3}\tau$ 和 $\gamma/\sqrt{3}$ 分别为等效扭转剪应力和剪应变.

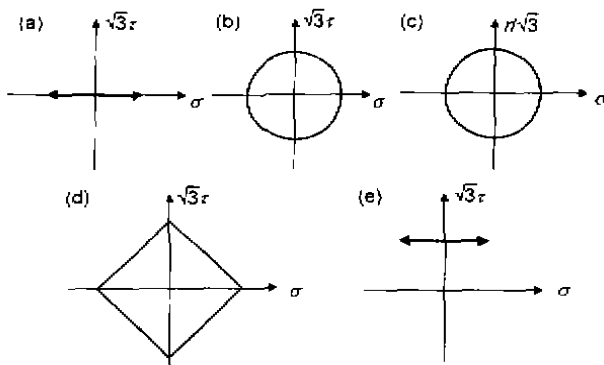


图 1 单轴循环和非比例循环加载路径形状示意图

Fig.1 Shapes of uniaxial cyclic and nonproprtional cyclic loading paths

(a) uniaxial cycling (b) path A (c) path B
(d) path C (e) path D

2 单轴循环棘轮行为

首先, 按图 1a 所示的单轴加载路径, 对 304 不锈钢进行不同平均应力和应力幅值及其历史下的循环棘轮实验, 研究其棘轮行为特征.

2.1 平均应力大小及其历史效应

在恒定应力幅值 (± 208 MPa) 下, 对 304 不锈钢进行了棘轮行为的平均应力及其历史效应的实验. 在加载过程中, 平均应力的大小按加载顺序依次为: ① 26 MPa(20c) \rightarrow ② 78 MPa(20c) \rightarrow ③ 117 MPa(20c) \rightarrow ④ 0 MPa(20c) \rightarrow ⑤ 78 MPa(20c) \rightarrow ⑥ 117 MPa(20c), 这里 20c 表示在某一加载情形下的循环次数为 20 周. 其 $\epsilon_r - N$ 关系如图 2a 所示, N 表示循环周次.

由图可见: (1) 当平均应力较小时 (情形①), 尽管有平均应力存在, 在循环过程中仍没有棘轮应变产生. 当平均应力增加到一定值时 (情形②), 棘轮应变出现, 并随循环周次的增加而增加, 但其增加的速率 (即棘轮应变率) 逐渐下降. (2) 从情形②到情形③, 随平均应力的增加, 棘轮应变和棘轮应变率都增加, 但在同一加载情形下, 随循环周次的增加, 棘轮应变率仍逐渐下降, 为渐近型棘轮效应. (3) 比较情形⑤和情形②的 $\epsilon_r - N$ 关系可以发现, 尽管它们的加载条件相同, 但它们的棘轮行为却明显不同. 虽然情形⑤时的平均应力也为 78 MPa, 但在此情形下除了在循环的前一、二个周次有一定的棘轮应变率外, 其棘轮应变率基本为零. 这说明, 在经历了先前较大平均应力的应力循环 (情形③) 后, 后续较小平均应力的应力循环下的棘轮行为将受到抑制. 微观实验研究表明: 经过较大平均应力的应力循环后, 材料内部的位错密度升高, 位错组态也逐渐变成较为稳定的位错胞状结构, 材料产生了较大的循环硬化, 变形阻力增加, 不易产生新的塑性变形, 从而使后续较小平均应力的应力循环下的循环棘轮应变率明显下降. 应力控制循环加载下材料内部位错演变的微观机理有待以后研究. (4) 比较情形⑥和情形③可见, 尽管情形⑥之前经历了 2 种较小平均应力水平的循环, 它的棘轮应变率却基本上与情形③结束时的相同. 这说明, 先前较小平均应力的应力循环对后续较大平均应力下应力循环的棘轮应变行为基本没有影响.

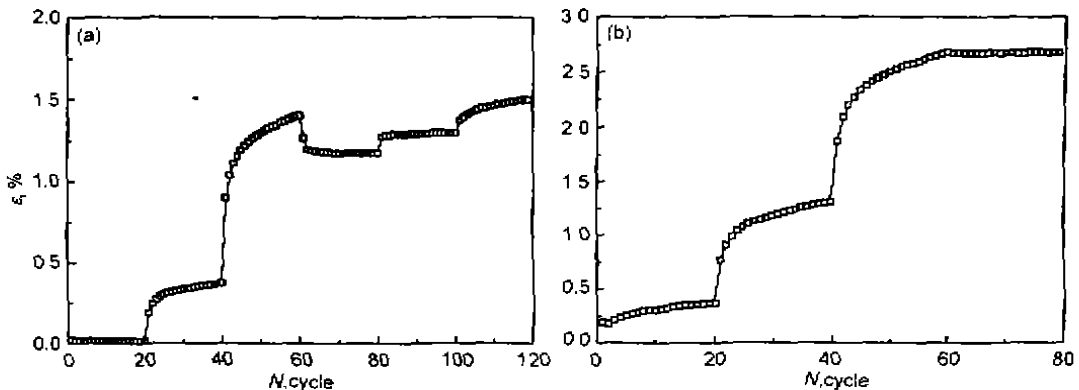


图 2 不同平均应力与不同应力幅值及其历史下的 $\epsilon_r - N$ 关系曲线

Fig.2 Diagrams of ϵ_r vs N showing the history effect under different mean stresses (a) and stress amplitudes (b)

2.2 应力幅值大小及其历史效应

在恒定平均应力 (52 MPa) 下, 对 304 不锈钢进行不同应力幅值下的循环实验. 在加载过程中, 应力幅值的大小按加载顺序依次为: ① ± 221 MPa(20c) \rightarrow ② ± 247 MPa(20c) \rightarrow ③ ± 273 MPa(20c) \rightarrow ④ ± 221 MPa(20c), 其 ε_r-N 关系如图 2b 所示.

从图示实验结果可以看出: (1) 随应力幅值的增加, 棘轮应变和棘轮应变率都增加, 但在同一加载情形下, 随循环周次的增加, 棘轮应变率逐渐下降, 也表现为渐近型棘轮行为. (2) 比较情形④和情形②的 ε_r-N 关系可以发现, 尽管它们的加载条件相同, 但它们的棘轮行为却明显不同. 情形④的棘轮应变率基本为零, 这说明, 在经历了先前较大应力幅值的应力循环 (情形③) 后, 后续较小应力幅值的应力循环下的棘轮行为也将受到抑制. 这也是因为经过较大应力幅值的应力循环后, 材料内部的位错密度升高, 位错组态变为较为稳定的胞状结构, 材料产生了较大的循环硬化, 变形阻力增加, 从而使后续较小应力幅值的应力循环下的循环棘轮应变率明显下降.

上述分析表明, 单轴循环加载下材料的棘轮行为与平均应力和应力幅值的大小密切相关, 并对平均应力和应力幅值的历史具有明显的依赖性.

3 多轴非比例循环棘轮行为

按图 1b—e 所示 4 种的双轴非比例加载路径, 对 304 不锈钢进行不同轴向平均应力和等效应力幅值及其历史下的循环棘轮实验, 研究其棘轮行为特征及其与非比例加载路径的关系.

3.1 圆形路径下的棘轮行为

在路径 A 下, 对 304 不锈钢进行了具有轴向恒定平均应力 (52 MPa), 扭转方向的平均等效剪应力为零, 不同等效应力幅值的拉扭循环试验. 按加载顺序, 等效应力幅值的大小依次为: ① ± 221 MPa(20c) \rightarrow ② ± 247 MPa(20c). 其轴向棘轮应变 ε_r 和扭转棘轮应变 $\gamma_r/\sqrt{3}$ 与循环周次 N 的关系如图 3 所示. 此时, 扭转方向实际为对称应力循环.

由图可见: (1) 对轴向来说, 由于有平均应力的存在, 在循环过程中有棘轮应变产生, 并且随等效应力幅值的增加而增加. 但在同一加载情形下, 除了在循环一、二周次有明显的棘轮应变变化外, 棘轮应变率基本为零, 呈现出瞬态型棘轮效应的特征, 这与图 2b 所示的单轴棘轮行为是不同的. (2) 对扭转方向来说, 尽管其平均应力为零, 在循环过程中却仍有棘轮应变产生, 也随等效应力幅值的增加而增加, 棘轮应变率的变化与轴向棘轮应变率相同. 这说明, 轴向的非对称应力循环不仅会在轴向产生棘轮应变, 同样也会导致扭转方向的棘轮应变产生. 在实验过程中发现, 在圆形加载路径下, 每一种加载情形的开始

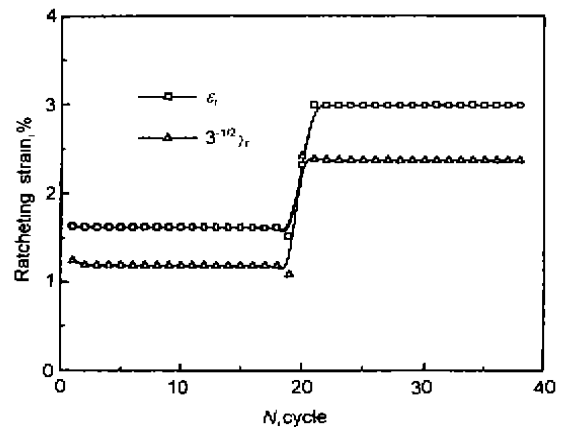


图 3 路径 A 下不同幅值时 ε_r-N 和 $\gamma_r/\sqrt{3}-N$ 关系曲线
Fig. 3 Curves of ε_r vs N and $\gamma_r/\sqrt{3}$ vs N with different stress amplitudes under path A

均会产生一个很大的过渡圈, 导致较大的轴向和等效扭应变产生 (这里将该类应变也记为棘轮应变), 相当于材料经历了一个很大等效应力幅值的循环. 与单轴情况类似, 材料在该次循环中产生的循环硬化将抑制第二圈以及后续循环中棘轮应变的产生, 因此体现出瞬态棘轮效应特征. (3) 比较图 2b 还可发现, 经过同样两种加载情形 (② \rightarrow ③) 后, 圆形路径下非比例循环在轴向产生的棘轮应变值 (约为 3.0%) 要高于单轴循环产生的棘轮应变 (约为 1.5%). 这说明, 在路径 A 的多轴非比例加载循环下, 平均应力的存在引起的棘轮应变要高于单轴循环棘轮应变.

由于圆形加载路径 A 的非比例度较大, 在上述变应力幅值的循环加载过程中, 其扭转方向响应的扭应变较大, 很容易超过拉扭引伸计所能测量的扭应变极限值. 因此, 为了研究平均应力历史对多轴循环下棘轮行为的影响, 本文采用图 1c 所示的圆形加载路径 B 进行循环试验. 此加载路径实际上限制了扭转方向棘轮应变的产生, 即扭转棘轮应变 $\gamma_r/\sqrt{3}$ 为零.

在路径 B 下进行等效应力幅值 (± 247 MPa) 恒定, 而轴向平均应力的加载顺序为: ① 0 MPa(20c) \rightarrow ② 26 MPa(20c) \rightarrow ③ 52 MPa(20c) \rightarrow ④ 78 MPa(20c) \rightarrow ⑤ 117 MPa(20c) \rightarrow ⑥ 0 MPa(20c) \rightarrow ⑦ 117 MPa(20c) 的棘轮行为实验, 此时扭转方向实为对称应变循环 (等效剪应变幅值为 $\pm 0.3\%$), 其轴向棘轮应变 ε_r 与循环周次 N 的关系如图 4 所示. 与图 2b 比较可见, 此时轴向棘轮应变及棘轮应变率随轴向平均应力大小变化的规律与单轴循环一样, 并且对平均应力历史也具有明显的依赖性. 与圆形路径 A 下的棘轮行为比较可以看出, 两者的棘轮行为明显不同: 路径 A 时, 为瞬态型棘轮效应; 而在路径 B 时, 为渐近型棘轮效应. 这表明, 多轴非比例循环棘轮行为明显地依赖于加载路径.

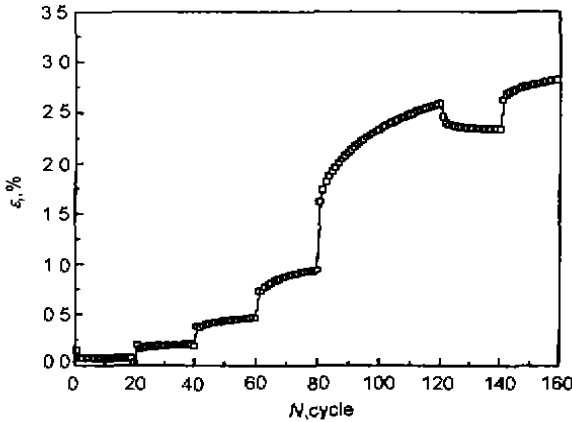


图4 路径B下不同平均应力时 ϵ_r-N 关系曲线

Fig.4 Diagram of ϵ_r vs N with different mean stresses under path B

3.2 菱形路径下的棘轮行为

在菱形路径 C 下, 对 304 不锈钢进行了具有恒定等效应力幅值 (± 208 MPa), 扭转方向的平均等效剪应力为零, 不同的轴向平均应力拉扭循环实验. 轴向平均应力大小依次为: ① 0 MPa(20c) → ② 26 MPa(20c) → ③ 52 MPa(20c) → ④ 78 MPa(20c) → ⑤ 117 MPa(40c) → ⑥ 0 MPa(20c) → ⑦ 117 MPa(20c). 其轴向棘轮应变 ϵ_r 和扭转棘轮应变 $\gamma_r/\sqrt{3}$ 与循环周次 N 的关系如图 5a 所示.

由图可见: (1) 在菱形路径下, 拉扭循环的轴向和扭转方向均产生了棘轮应变, 尽管扭转方向为对称应力循环. 这说明, 在该路径下, 轴向的应力循环也会引起扭转方向的棘轮应变. (2) 随轴向平均应力的增加, 轴向棘轮应变 ϵ_r 和扭转棘轮应变 $\gamma_r/\sqrt{3}$ 均增加. 但在同一加载情形下也体现为瞬态型棘轮效应. 其原因与圆形路径时相同. (3) 棘轮行为对轴向平均应力的历史仍具有明显的依赖性. (4) 与图 2a 所示的单轴循环棘轮行为比较可

得, 在相同的轴向平均应力大小及其历史下, 路径 C 下的非比例循环后产生的轴向棘轮应变 (约为 2.6%) 要较单轴循环时的大 (约为 1.5%).

在菱形路径 C 下, 还进行了具有恒定轴向平均应力 (52 MPa), 扭转方向的平均等效剪应力为零, 不同等效应力幅值的拉-扭循环实验. 等效应力幅值大小依次为: ① ± 221 MPa(20c) → ② ± 247 MPa(20c) → ③ ± 273 MPa(40c) → ④ ± 221 MPa(20c) → ⑤ ± 273 MPa(20c). 轴向棘轮应变 ϵ_r 和扭转棘轮应变 $\gamma_r/\sqrt{3}$ 与循环周次 N 的关系如图 5b 所示. 从实验结果可以看出: (1) 随等效应力幅值的增加, 轴向棘轮应变 ϵ_r 和扭转棘轮应变 $\gamma_r/\sqrt{3}$ 均增加, 且也体现为瞬态型棘轮效应. (2) 棘轮行为对等效应力幅值的历史也具有明显的依赖性. (3) 与图 3 所示路径 A 下的循环棘轮行为比较可见, 经过同样两种加载情形 (① → ②) 后, 圆形路径下非比例循环在轴向产生的棘轮应变值 (约为 3.0%) 要高于路径 C 下的非比例循环后产生的棘轮应变 (约为 1.5%). (4) 与图 2b 所示的单轴循环棘轮行为比较可得, 在相同的等效应力幅值大小及其历史下, 路径 C 下的非比例循环后产生的棘轮应变 (约为 1.5%) 却要较单轴循环的小 (约为 2.6%), 具体原因有待进一步探讨.

3.3 直线路径下的棘轮行为

在直线路径 D 下, 进行了具有恒定等效应力幅值, 不同的轴向平均应力拉扭循环实验. 此时, $\sqrt{3}\tau$ 等效剪应力恒定 (208 MPa), 轴向应力幅值也恒定 (± 208 MPa), 而轴向平均应力大小依次为: ① ± 0 MPa(20c) → ② 26 MPa(20c) → ③ 78 MPa(20c) → ④ 117 MPa(20c) → ⑤ 0 MPa(20c) → ⑥ 78 MPa(20c) → ⑦ 117 MPa(20c). 其轴向棘轮应变 ϵ_r 和扭转棘轮应变 $\gamma_r/\sqrt{3}$ 与循环周次 N 的关系如图 6a 所示.

由图可见: (1) 在直线路径 D 下, 对轴向来说, 当平均应力为零时, 循环中基本没有棘轮应变产生; 而当平

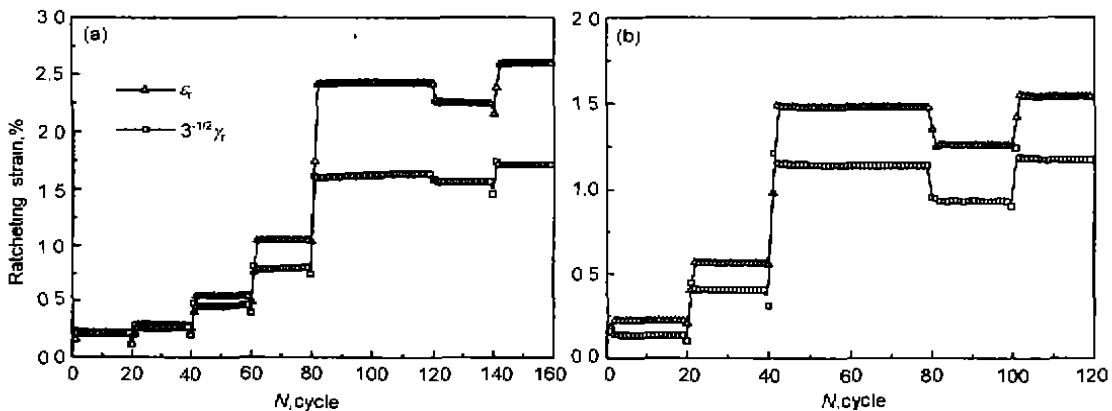


图5 路径C下不同平均应力和不同幅值时 ϵ_r-N 和 $\gamma_r/\sqrt{3}-N$ 关系曲线

Fig.5 Curve of ϵ_r vs N and $\gamma_r/\sqrt{3}-N$ with different mean stresses (a) and different stress amplitudes (b) under path C

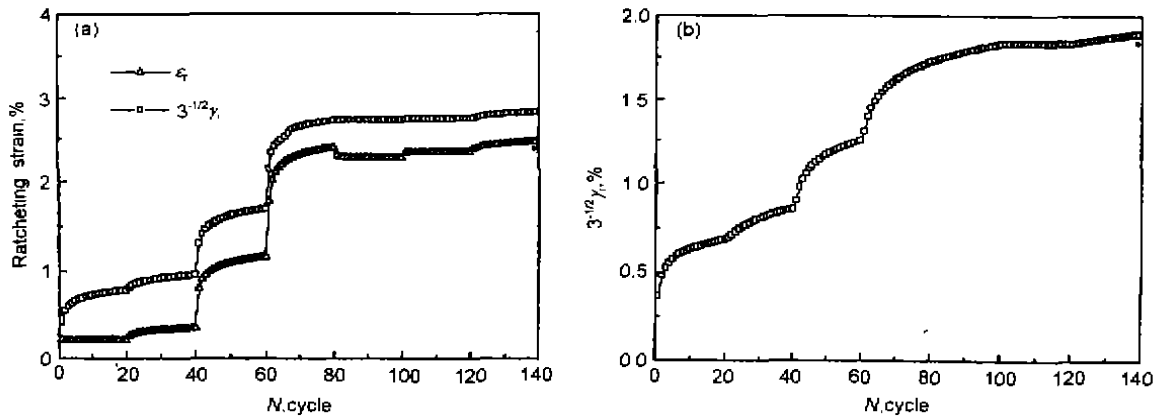


图 6 路径 D 下不同平均应力和不同幅值时 ε_r-N 和 $\gamma_r/\sqrt{3}-N$ 关系曲线

Fig. 6 Curve of ε_r vs N and $\gamma_r/\sqrt{3}-N$ with different mean stresses (a) and different stress amplitudes (b) under path D

均应力为一定值时(情形②),棘轮应变出现,并随平均应力和循环周次的增加而增加,但在同一加载情形下,其增加的速率(即棘轮应变率)逐渐下降,为渐近型棘轮效应。

(2)对扭转方向来说,尽管剪应力恒定,仍有扭转棘轮应变 $\gamma_r/\sqrt{3}$ 产生(即使是轴向平均应力为零时),并且随循环周次和轴向平均应力的增加而增加,也为渐近型棘轮效应。这说明,轴向的循环加载将会在恒定剪应力的扭转方向引起扭转棘轮应变,而且轴向平均应力的大小也会对扭转棘轮应变的大小产生影响。(3)轴向棘轮应变 ε_r 和扭转棘轮应变 $\gamma_r/\sqrt{3}$ 均与轴向平均应力的历史有明显的依赖性。(4)比较图 2a 可得,在相同的轴向平均应力大小及其历史下,路径 D 下的非比例循环后产生的轴向棘轮应变(约为 2.5%)要较单轴循环时的大(约为 1.5%)。

在直线路径 D 下,对 304 不锈钢还进行了 $\sqrt{3}\tau$ 等效剪应力恒定(208 MPa),轴向平均应力为零,不同轴向应力幅值的拉扭循环试验。轴向应力幅值大小依次为:① ± 208 MPa(20c) \rightarrow ② ± 221 MPa(20c) \rightarrow ③ ± 247 MPa(20c) \rightarrow ④ ± 273 MPa(40c) \rightarrow ⑤ ± 208 MPa(20c) \rightarrow ⑥ ± 273 MPa(20c)。实验发现,其轴向棘轮应变 ε_r 基本为零,而扭转棘轮应变 $\gamma_r/\sqrt{3}$ 与循环周次 N 的关系如图 6b 所示。

由图可见:(1)轴向的对称应力循环使等效剪应力恒定的扭转方向产生了扭转棘轮应变,扭转棘轮应变值随轴向应力幅值的增加而增加。扭转方向表现为渐近型棘轮行为。(2)扭转棘轮应变对轴向应力幅值的历史也具有明显的依赖性,较大轴向应力幅值的循环对后续较小幅值循环的棘轮行为有抑制作用。

4 结论

(1)在单轴循环和多轴非比例循环加载中,当在某一

方向存在恒定应力值时,该方向上和另一方向上的循环加载均会在恒定应力方向引起棘轮行为的出现。另外,即使扭转方向为对称应力循环(扭转平均应力为零),轴向的应力循环也将会导致扭转棘轮应变的产生。

(2)304 不锈钢在单轴非对称应力循环下表现为渐近型棘轮行为。在多轴非比例循环加载下,棘轮行为特征与加载路径密切相关:在圆形路径 A 和菱形路径 C 下为瞬态型棘轮行为;而在圆形路径 B 和直线路径 D 下为渐近型棘轮行为。

(3)在单轴循环和所研究的几种非比例循环加载中,棘轮应变(轴向棘轮应变 ε_r 和扭转棘轮应变 $\gamma_r/\sqrt{3}$)的大小与引起棘轮行为的平均应力以及等效应力幅值的大小密切相关,并对它们的加载历史有明显的依赖性:棘轮应变随轴向平均应力和等效应力幅值的增加而增加;较大轴向平均应力或等效应力幅值下的循环将对后续较小循环的棘轮行为有抑制作用。

参考文献

- [1] Chaboche J L, Nouailhas D. *ASME J Eng Mater Technol*, 1989; 111: 384
- [2] Hassan T, Kyriakides S. *Int J Plast*, 1992; 8: 91
- [3] Hassan T, Kyriakides S. *Int J Plast*, 1994; 10: 149
- [4] Yang X J, Gao Q, Cai L X. *Acta Aeronaut Astronaut Sin*, 1997; 18(4): 395
(杨显杰,高庆,蔡力勋.航空学报.1997;18(4):395)
- [5] Yang X J, Kang G Z, Gao Q, Sun Y F. *Acta Metall Sin*, 1999; 35(7): 698
(杨显杰,康国政,高庆,孙亚芳.金属学报.1999;35(7):698)
- [6] Jiang Y, Sehitoglu H. *Int J Plast*, 1994; 10: 579
- [7] McDowell D L. *Int J Plast*, 1995; 11: 397
- [8] Yoshida F. *Eur J Mech A/Solids*, 1995; 14(1): 97