

室温下 20 钢高周次单轴棘轮行为的实验研究 *

董亚伟 康国政 刘宇杰 王 弘 程晓娟

(西南交通大学力学与工程学院, 成都 610031)

摘 要 通过对 20 钢的单轴应变控制循环和应力控制循环实验研究, 揭示了 20 钢在室温下的循环变形特性, 讨论了材料的循环软/硬化特性和材料的屈服平台以及平均应力、应力幅值和应力比对材料高周次棘轮行为的影响. 研究表明: 20 钢表现出弱的、与应变幅值相关的循环硬化特性; 其棘轮行为依赖于平均应力、应力幅值和应力比的大小, 在高应力水平时的高周次循环后期, 棘轮变形会出现再次增长的现象; 材料的屈服平台对棘轮行为有明显的影晌, 在对 20 钢的棘轮行为进行本构描述时需要加以合理考虑.

关键词 20 钢, 棘轮行为, 屈服平台, 室温, 单轴加载

中图法分类号 O344.1, TG146.1 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2009)07-0826-04

EXPERIMENTAL STUDY ON UNIAXIAL RATCHETING OF 20 STEEL WITH HIGH NUMBER OF CYCLES AT ROOM TEMPERATURE

DONG Yawei, KANG Guozheng, LIU Yujie, WANG Hong, CHENG Xiaojuan

School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031

Correspondent: KANG Guozheng, professor, Tel: 028(87603794), E-mail: guozhengkang@yahoo.com.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.10772153)

Manuscript received 2008-11-17, in revised form 2009-03-13

ABSTRACT Ratcheting is a cyclic accumulation of inelastic strain occurred under the stress-controlled cyclic loading with non-zero mean stress, it is very important in assessing the fatigue life and safety of the structure subjected to cyclic loading. The existed results showed that different materials presented different ratcheting features, and the results were obtained from the cyclic tests with a small number of cycles (less than 200 cyc). Therefore, based on the uniaxial strain-controlled and stress-controlled cyclic tests with high number of cycles (more than 2000 cyc), the cyclic deformation features of 20 steel were observed at room temperature. The effects of the cyclic softening/hardening feature and yielding plateau of the steel and the applied mean stress, stress amplitude and stress ratio on the ratcheting of the steel with high number of cycles were studied. The results show that the 20 steel presents a weak and stain-amplitude-dependent cyclic hardening, and the ratcheting of the steel depends greatly on the applied mean stress, stress amplitude and stress ratio. The ratcheting strain increases monotonically with the increase of applied mean stress and stress amplitude, but decreases with the increase of stress ratio. A re-speeded ratcheting will occur at the end of cycling with high number of cycles when the applied stress levels are high enough. More importantly, the yielding plateau of the steel greatly influences the evolution of the ratcheting. It is concluded that the effect of yielding plateau on the ratcheting should be reasonably considered in constructing the cyclic constitutive model of the ratcheting for the 20 steel.

KEY WORDS 20 steel, ratcheting behavior, yielding plateau, room temperature, uniaxial loading

棘轮效应是材料在平均应力不为零的非对称应力循环下产生的一种塑性变形的循环累积现象. 棘轮变形的产生将导致附加损伤的产生, 从而降低材料的疲劳寿命, 因

此在估算材料或构件的疲劳寿命时, 需要考虑棘轮变形的影响. 近 20 年来, 已有大量文献^[1-10]对金属材料的棘轮行为进行了实验研究和理论描述, 揭示了材料棘轮变形的一些基本特征, 发展了一些能够较为合理的描述棘轮行为的循环本构模型. 然而, 已有的研究基本上只关心材料的循环变形行为, 涉及的加载循环次数较少 (几百次以内), 没有考虑高循环周次 (上千次) 下棘轮行为的演化特

* 国家自然科学基金资助项目 10772153

收到初稿日期: 2008-11-17, 收到修改稿日期: 2009-03-13

作者简介: 董亚伟, 男, 1984 年生, 硕士生

征. 另外, 尽管目前已有一些研究^[11-15]考虑了 304 不锈钢和 42CrMo 合金钢等金属材料的全寿命棘轮行为以及棘轮-疲劳交互作用, 但对于一些具有明显屈服平台的材料, 都没有考虑屈服平台对材料棘轮行为的影响. 为了更好地揭示材料的棘轮变形特征, 更全面地了解影响棘轮行为的因素, 有必要开展高周次下不同材料的棘轮演化特征的研究, 研究材料的屈服平台对棘轮行为的影响. 因此, 本文对在汽车工业和机械制造业中广泛使用的优质碳素结构钢 (20 钢) 进行高循环周次下的循环变形实验, 讨论 20 钢的循环软/硬化特性、施加的平均应力、应力幅值和应力比以及材料的屈服平台对其棘轮变形行为的影响.

1 实验方法

实验材料为供货态正火空冷处理的 20 钢 (铁素体和珠光体组织), 其化学成分 (质量分数, %) 为: C 0.19, Si 0.22, Mn 0.46, P 0.021, S 0.007, Cr 0.04, Ni 0.01, Cu 0.02, Fe 余量. 将 20 钢棒材加工成中心标距段长度为 30 mm, 直径为 10 mm 的实心圆棒试样. 实验设备为 MTS809-250kN 试验机, 轴向应变通过标距为 25 mm 的引伸计来测量, 使用 TestStar-II 控制系统进行闭环控制和数据采集. 加载波形采用三角波. 对 20 钢进行了单轴拉伸、对称应变循环和非对称应力循环实验. 若无特殊说明, 单轴拉伸和应变循环中的应变加载速率为 $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 应力循环中的应力加载速率为 400 MPa/s. 循环周次最高为 $2.5 \times 10^3 \text{ cyc}$, 实验温度为室温. 本文中, 由于在一些加载工况的高循环周次实验中产生的棘轮变形较大, 不宜再采用常规的、基于名义应变的棘轮应变定义, 因此, 需要采用真应变形式的棘轮应变 ε_r , 其定义为

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2} [\ln(1 + \varepsilon_{\max}) + \ln(1 + \varepsilon_{\min})] \quad (1)$$

式中, ε_{\max} 和 ε_{\min} 分别为一个循环中测得的最大和最小的轴向名义应变. 式 (1) 定义的棘轮应变实则为每一个循环中真应变的平均值. 棘轮应变率定义为每一个加载循环时间内轴向棘轮应变的增量.

2 实验结果与讨论

2.1 单轴拉伸行为

为了确定循环实验中的加载水平, 首先通过单轴拉伸实验来了解 20 钢的一些基本力学性能. 20 钢室温下的拉伸曲线如图 1 所示. 可见, 20 钢的单轴拉伸曲线存在明显的屈服平台 (屈服平台长度约为 2% 轴向应变), 且其上屈服点 (约为 400 MPa) 和下屈服点 (约为 300 MPa) 所对应的应力值差别较大. 抗拉强度约为 500 MPa; 材料延性较好, 延伸率可达 35% 左右.

2.2 应变循环特性

对 20 钢进行了 2 种应变幅值 ($\pm 0.7\%$ 和 $\pm 0.5\%$) 下的单轴对称应变循环实验, 所得的响应应力幅值与循环周次之间的关系曲线如图 2 所示. 可见, 20 钢在不同的应

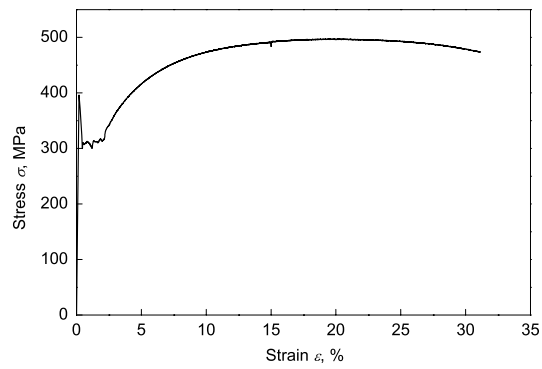


图 1 20 钢的单轴拉伸曲线

Fig.1 Uniaxial tensile stress-strain curve of 20 steel

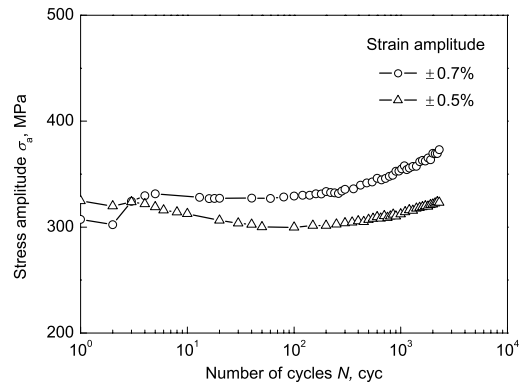


图 2 20 钢应变控制循环的应力幅值响应

Fig.2 Stress amplitude response curves of 20 steel under uniaxial strain-controlled cycling

变幅值下体现出不同的循环软/硬化特性: 在较低应变幅值 ($\pm 0.5\%$) 下, 在循环的开始阶段, 20 钢表现出明显的循环软化现象, 但经过一定的循环周次 (100 cyc) 后, 响应应力幅值又逐渐增加, 表现出一定的循环硬化现象; 当应变幅值增大 ($\pm 0.7\%$) 时, 20 钢则从一开始就表现出明显的循环硬化特性, 在循环过程中响应应力幅值逐渐增大. 相对而言, 20 钢在不同应变幅值下表现出的循环软/硬化程度都不大, 最大仅为 10% 左右.

2.3 高循环周次棘轮行为

研究了 20 钢在高循环周次下棘轮行为的演化特征以及平均应力、应力幅值、应力比和材料的屈服平台对棘轮行为的影响. 图 3 给出了材料在应力幅值为 250 MPa, 不同平均应力加载工况下棘轮应变随循环周次的演化规律. 图 4 给出了材料在平均应力为 100 MPa, 不同应力幅值加载工况下棘轮应变随循环周次的演化规律.

从图 3 和 4 可以看出, 除应力水平特别小 ($(100 \pm 200) \text{ MPa}$) 的加载工况之外, 20 钢在单轴非对称应力循环下均产生了明显的棘轮变形, 且其棘轮行为依赖于当前的平均应力和应力幅值水平. 随平均应力或应力幅值的增大, 棘轮应变和棘轮应变率均增大. 当外加应力水平较高时, 在一定的循环周次后会出现棘轮应变率再次迅速增大的现象, 导致棘轮变形快速增长, 如载荷条件为 $(150 \pm$

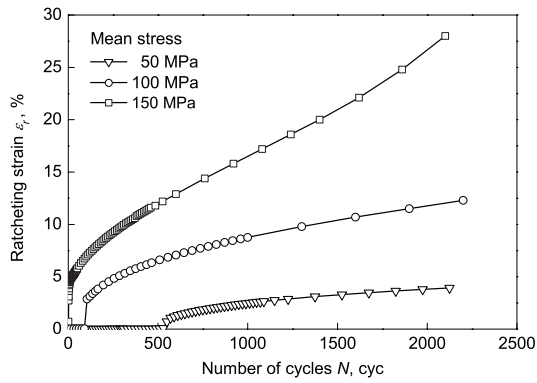


图3 恒定应力幅值为 250 MPa 和变平均应力下的棘轮应变演化

Fig.3 Evolution of ratcheting strain under the stress cycling with a constant stress amplitude (250 MPa) and various mean stresses

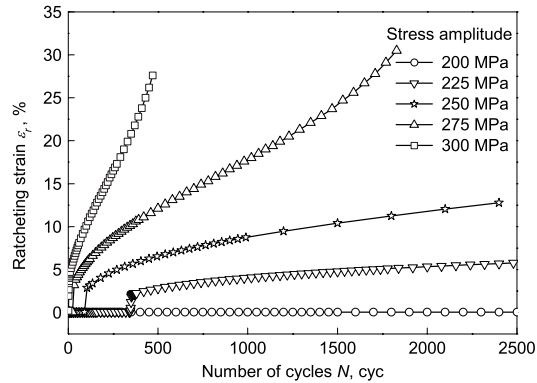


图4 恒定平均应力为 100 MPa 和变应力幅值下的棘轮应变演化

Fig.4 Evolution of ratcheting strain under the stress cycling with a constant mean stress (100 MPa) and various stress amplitudes

250) MPa(图 3), (100±300) 和 (100±275) MPa(图 4) 的情形. 此时, 试样会因棘轮变形过大而发生塑性破坏. 实验结果还表明, 在整个循环过程中, 20 钢都没有出现棘轮安定状态. 值得注意的是, 由于 20 钢存在明显的屈服平台, 并且其上屈服点 (约为 400 MPa) 要比下屈服点 (约为 300 MPa) 高很多, 而实验采用的加载工况中的峰值拉应力正好处在 300—400 MPa 之间, 这必将引起其棘轮变形行为随加载水平的变化有较大改变.

由图 3 和 4 可见: (1) 当施加的峰值拉应力等于或高于材料的上屈服点时, 在循环的一开始材料就产生明显的棘轮变形, 然后随循环周次的增加继续发展. 在整个循环过程中, 棘轮应变率先逐渐下降, 进而达到一个稳定的棘轮应变率, 但最后经过一定的循环周次后棘轮应变率又会快速增大, 如 (150±250) MPa(图 3) 和 (100±300) MPa(图 4) 2 种情形. (2) 当施加的峰值拉应力低于上屈服点而高于材料的下屈服点时, 在循环的开始阶段由于材料还处于弹性变形阶段, 没有棘轮变形产生, 棘轮应变值接近于零. 经过一定的循环周次, 由于材料弹性变形的不稳定, 在外加应力作用下容易产生塑性变形, 导致棘轮变形的产生. 出现棘轮变形后, 棘轮应变的演化与前文类似, 棘轮

应变率同样逐渐减小, 最后达到一个稳定值. 与前文不同的是, 除 (100±275) MPa 工况外, 在循环后期没有棘轮应变率再次迅速增长的现象, 如 (50±250) MPa(图 3), (100±225) 和 (100±250) MPa(图 4) 3 种情形. (3) 当应力水平较低时, 如 (100±200) MPa 工况, 由于此时的峰值应力低于或接近材料的下屈服点, 处于稳定的弹性变形阶段, 因此, 在给定的循环周次中没有棘轮变形产生.

图 5 给出了峰值应力为 350 MPa 时, 不同应力比 R 的加载过程中棘轮应变的演化情况. 可见, 其棘轮演化的过程与图 3 和 4 所体现的规律大致相同. 在应力比 R 不等于 -1 的工况中, 棘轮应变和棘轮应变率均随应力比 R 的增大而减小; 应力比 $R=-1$ 时, 在整个循环过程中没有棘轮应变产生.

由此可知, 材料屈服平台以及过大的上、下屈服点差值导致了棘轮行为的差异. 为了进一步讨论屈服平台对棘轮行为的影响, 设计了一种实验方案来区分有、无屈服平台的影响.

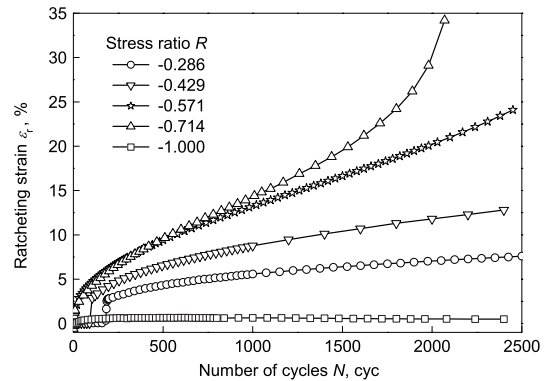


图5 恒定峰值应力为 350 MPa 和变应力比 R 时的棘轮应变演化

Fig.5 Evolution of ratcheting strain under the stress cycling with a constant peak stress (350 MPa) and various stress ratios R

2.4 屈服平台对棘轮行为的影响

为了分析屈服平台对材料棘轮行为的影响, 进行了将试样由应变控制的单轴拉伸至屈服平台上和拉过屈服平台后再进行峰值应力为拉伸停止点应力值的非对称应力循环实验, 研究其棘轮变形的异同. 拉过屈服平台的加载工况为: (1) 单轴拉伸至 2.2%(应变率 $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 对应应力为 325 MPa)→(50±275) MPa 应力循环 ($2.5 \times 10^3 \text{ cyc}$). 以下 (2)—(4) 均为拉至屈服平台的加载工况: (2) 单轴拉伸至 0.5%(应变率 $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 对应应力为 300 MPa)→(50±250) MPa 应力循环 ($2.0 \times 10^3 \text{ cyc}$); (3) 单轴拉伸至 1%(应变率 $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 对应应力为 300 MPa)→(50±250) MPa 应力循环 ($2.0 \times 10^3 \text{ cyc}$); (4) 单轴拉伸至 2%(应变率 $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 对应应力为 300 MPa)→(50±250) MPa 应力循环 ($2.0 \times 10^3 \text{ cyc}$). 还和没有初始拉伸应变的循环棘轮实验 ((50±275) MPa, $2.5 \times 10^3 \text{ cyc}$; (50±250) MPa, $2.2 \times 10^3 \text{ cyc}$) 进行对比.

实验结果分别如图 6 和 7 所示。

由图 6 可见,材料在通过预拉伸 2.2% 应变而避开上屈服点后,在应力循环实验一开始就产生明显的棘轮变形;而没有经历初始拉伸时,由于加载的峰值应力处在材料的上、下屈服点之间,前几百周内材料处于不稳定的弹性变形阶段,几乎没有棘轮变形产生。但是,当产生明显的棘轮变形后两者的演化规律一致。由此可见,当外加峰值应力高于下屈服点而低于上屈服点时,上屈服点仅对循环开始阶段的棘轮变形产生抑制作用,而对棘轮变形出现后的后续棘轮应变的演化规律没有明显影响。图 7 中所示的拉伸预应变为 0 和 2% 时的结果也显示了相同的规律。

值得注意的是,图 7 中当初始拉伸应变为 0.5% 和 1% 时,其棘轮演化表现出一种不同于已有的棘轮变形演化特征,即在循环的开始阶段棘轮应变率随循环周次的增加而增加,再经过一定的循环后,当棘轮应变值达到 2% 左右时,棘轮应变率才随循环周次的增加而逐渐下降。并且,初始拉伸应变较小时,棘轮应变率的增长速率更快,但是最后达到的稳定的棘轮应变率两者基本相同。这说明在初始拉伸应变处在屈服平台上、拉过屈服平台和没有初始

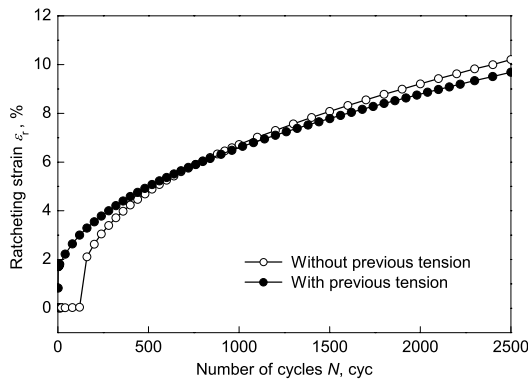


图 6 (50±275) MPa 有、无初始拉伸应变的棘轮应变演化

Fig.6 Evolution of ratcheting strain under the stress cycling of (50±275) MPa with and without previous strain-controlled tension

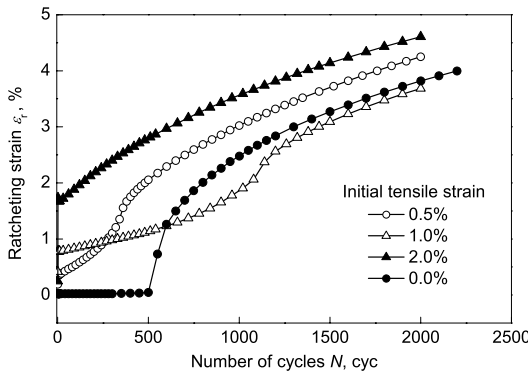


图 7 (50±250) MPa 不同初始拉伸应变下的棘轮应变演化

Fig.7 Evolution of ratcheting strain under the stress cycling of (50±250) MPa with various pre-strain by strain-controlled tension

拉伸应变 3 种情况下,材料所表现出的棘轮演化规律有很大的不同。当非对称应力循环的峰值应力处于屈服平台上时,由于此时材料表现出一种无硬化的理想塑性变形,在循环过程中易于产生塑性的累积现象,即棘轮变形,因此,只要变形仍处在屈服平台上,在循环过程中其棘轮变形率就会不断增大。只有当棘轮应变值高于其屈服平台的长度(约为 2%)时,由于材料后续的应变强化行为出现才会使棘轮变形率随循环而不断减小。

上述屈服平台对棘轮变形的影响表明,在对 20 钢的棘轮行为进行实验和理论研究时必须对此类影响加以合理的考虑,这样才能更好地揭示和模拟材料的棘轮行为。

3 结论

(1) 20 钢表现出弱的循环硬化特性,并且其循环硬化特性依赖于应变幅值。应变幅值越大,材料的循环硬化特性越明显。20 钢的单轴棘轮行为明显依赖于平均应力和应力幅值的水平。平均应力或应力幅值越大,棘轮应变和棘轮应变率越大,并且在棘轮变形过程中,没有出现棘轮安定现象。

(2) 当外加峰值应力高于下屈服点而低于上屈服点时,上屈服点仅对循环开始阶段的棘轮变形产生抑制作用,而对后续棘轮应变的演化规律没有明显影响。

(3) 屈服平台对材料棘轮行为有明显影响。在屈服平台上时,循环过程中棘轮变形率不断增大,只有当棘轮应变值高于屈服平台的长度(约为 2%)时,由于后续的应变强化行为出现才会使棘轮变形率随循环而不断减小。

参考文献

- [1] Ohno N. *Mater Sci Res Int*, 1997; 3: 1
- [2] Bari S, Hassan T. *Int J Plast*, 2002; 18: 873
- [3] Chen X, Jiao R. *Int J Plast*, 2004; 20: 871
- [4] Chen X, Jiao R, Kim K S. *Int J Plast*, 2005; 21: 161
- [5] Kang G Z. *Int J Fatigue*, 2008; 30: 1448
- [6] Kang G Z, Sun Y F, Zhang J, Kan Q H. *Acta Metall Sin*, 2005; 41: 277
- [7] Kan Q H, Kang G Z, Zhang J, Liu Y J. *Acta Metall Sin*, 2005; 41: 963
- [8] Kang G Z, Liu Y J. *Acta Metall Sin*, 2006; 42: 59
- [9] Lissenden C J, Doraiswamy D, Arnold S M. *Int J Plast*, 2007; 23: 1
- [10] Chen G, Chen X, Kim K S, Abdel-Karim M, Sakane M. *J Electron Packag*, 2007; 129: 278
- [11] Kang G Z, Liu Y J, Li Z. *Mater Sci Eng*, 2006; A435-436: 396
- [12] Kang G Z, Liu Y J, Ding J. *Int J Fatigue*, 2008; 30: 2104
- [13] Kwofie S, Chandler H D. *Int J Fatigue*, 2007; 29: 2117
- [14] Satyadevi A, Sivakumar S M, Bhattacharya S S. *Mater Sci Eng*, 2007; A452-453: 380
- [15] Kang G Z, Liu Y J. *Mater Sci Eng*, 2008; A472: 258