

# 比例及非比例路径下 16Mn 钢的应力控制循环加载实验

向阳开<sup>1</sup>, 郑 怡<sup>2</sup>, 周志祥<sup>1</sup>, 李书芳<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学 土木建筑学院 重庆 400074; 2. 辽宁省建筑材料监督检验院 辽宁 沈阳 110032)

**摘要:**应用 MTS809 系列电液(elec-hydraulic)伺服实验机及 Teststar 控制系统,对 16Mn 进行了应力控制的单轴及多轴非比例循环实验。研究了应力幅值大小及其历史对单轴及多轴棘轮效应的影响,结果表明,随着应力幅值的增加,棘轮应变增加,并逐步趋于稳定;同时,先前较大的应力幅值历史遏止了后继较小应力幅值下的棘轮效应。

**关键词:**非比例循环;棘轮效应;加载历史

中图分类号: TG113.26; U214.8

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2010)02-311-04

## Experiment Researches for 16Mn Steel under Proportional and Non-proportional Stressing

XIANG Yang-kai<sup>1</sup>, ZHENG Yi<sup>2</sup>, ZHOU Zhi-xiang<sup>1</sup>, LI Shu-fang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Liaoning Supervision and Test Institute for Construction Materials Quality, Shenyang 110032, Liaoning, China)

**Abstract:** The experiments for 16Mn steel under uniaxial and multiaxial cyclic stressing were performed by using MTS809 testing system and teststar control system, the influences of stress amplitude and its history on ratcheting were investigated. The larger the stress amplitude, the larger the ratcheting strain, and the ratcheting strain stabilized gradually. Meanwhile, the stress history of previous larger amplitude made the subsequent ratcheting shakedown.

**Key words:** non-proportional cycle; ratcheting; loading history

在公路桥梁领域,由于通常只关心承载能力和安全使用等极限状态,对金属材料的本构研究大多只局限在弹性范围和单调加载状况。随着对地震等自然灾害抵抗能力研究的逐步深入,金属材料的延性性能特别是在循环荷载作用下的弹塑性性能也越来越引起人们的关注。

钢筋混凝土构件的抗震延性主要来自结构钢筋承受周期反复大塑性变形的能力。事实上,钢筋混凝土构件大多是在应力控制的循环荷载下工作的,而材料在非对称循环应力作用下发生的塑性应变累积现象(即棘轮效应<sup>[1-2]</sup>)的本构关系研究已成为国内外固体力学领域目前的热点之一。由于材料的不同、加载路径的不同、加载历史的不同,棘轮效应的特征都会明显不同<sup>[3-5]</sup>,因此,为研究桥梁工程中普遍使用的金属材料的本构关系,从而为结构计算、抗震设计、寿命评估、安全评定等工作服务,有必要开展比例及非比例路径下 16Mn 钢的应力控制循环加载实验研究。

## 1 实验

### 1.1 轴扭子空间的定义

目前,在国内外的研究工作中,几乎所有的非比例循环加载路径都是由轴向和扭转两方面组合而成。Ilyushin<sup>[2,6]</sup>引入了五维偏应变和偏应力矢量空间,对于拉扭组合加载,可以在五维偏量空间中引入轴-扭子空间。

在这个子空间中,定义应力矢量和等效应力为:

$$\vec{\sigma} = \sigma_1 \vec{n}_1 + \sigma_3 \vec{n}_3 \quad (1)$$

$$\sigma_{eq} = (\sigma_1^2 + \sigma_3^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_1 = \sigma$ ;  $\sigma_3 = \sqrt{3}\tau$ ;  $\sigma$  和  $\tau$  分别为轴向应力和剪向应力。式(2)与 von Mises 等效应力有相同的定义。

定义应变矢量和塑性应变矢量为:

$$\vec{\varepsilon} = \varepsilon_1 \vec{n}_1 + \varepsilon_3 \vec{n}_3 \quad (3)$$

$$\vec{\varepsilon}^p = \varepsilon_1^p \vec{n}_1 + \varepsilon_3^p \vec{n}_3 \quad (4)$$

式中:  $\varepsilon_1 = \varepsilon$ ;  $\varepsilon_3 = \gamma/\sqrt{3}$ ;  $\varepsilon$  和  $\gamma$  分别为轴向应变和

扭转剪应变;  $\varepsilon_1^p = \varepsilon^p$   $\varepsilon_3^p = \gamma^p / \sqrt{3}$ ,  $\varepsilon_1^p$  和  $\varepsilon_3^p$  分别为  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_3$  的塑性分量。

定义应变率矢量和塑性应变率矢量为:

$$\dot{\vec{\varepsilon}} = \dot{\varepsilon}_1 \vec{n}_1 + \dot{\varepsilon}_3 \vec{n}_3 \quad (5)$$

$$\dot{\vec{\varepsilon}}^p = \dot{\varepsilon}_1^p \vec{n}_1 + \dot{\varepsilon}_3^p \vec{n}_3 \quad (6)$$

定义等效应变和等效塑性应变为:

$$\bar{\varepsilon} = (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_3^2)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$\bar{\varepsilon}^p = [(\varepsilon_1^p)^2 + (\varepsilon_3^p)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

定义等效应变率和等效塑性应变率为:

$$\dot{\bar{\varepsilon}} = (\dot{\varepsilon}_1^2 + \dot{\varepsilon}_3^2)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$\dot{\bar{\varepsilon}}^p = [(\dot{\varepsilon}_1^p)^2 + (\dot{\varepsilon}_3^p)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

定义轴向棘轮应变  $\varepsilon_r$  和扭转棘轮应变  $\gamma_r$  分别为:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2}(\varepsilon_l + \varepsilon_s) \quad (11)$$

$$\gamma_r = \frac{1}{2}(\gamma_l + \gamma_s) \quad (12)$$

式中:  $\varepsilon_l$  和  $\varepsilon_s$  分别为一个循环中最大和最小的轴向应变值;  $\gamma_l$  和  $\gamma_s$  分别为一个循环中最大和最小的剪应变值。

定义轴向棘轮应变率为:

$$\dot{\varepsilon}_r = \frac{d\varepsilon_r}{dN} \quad (13)$$

式中:  $N$  为循环次数。

## 1.2 实验设备和试件

采用 MTS 809 系列 250 kN 拉-扭电液伺服材料试验机,在单轴和拉-扭组合加载的情形下,分别在试样圆柱标距段安装标距为 25 mm 的单轴和多轴拉-扭引伸仪,通过引伸仪和 MTS 809 材料试验机的应变传感器的连接进行应变测量。利用 Teststar 控制系统对整个实验过程进行闭环控制和数据采集。试件材料为 16 Mn 钢单轴试样和多轴薄壁管试样。

## 1.3 实验内容

### 1.3.1 单轴加载实验 ( $\dot{\sigma} = 200$ MPa/s)

恒定平均应力: 150 MPa。

应力幅值有 5 个工况, 即:  $\pm 300$  MPa (100c)  $\rightarrow$   $\pm 350$  MPa (100c)  $\rightarrow$   $\pm 400$  MPa (100c)  $\rightarrow$   $\pm 350$  MPa (50c)  $\rightarrow$   $\pm 300$  MPa (50c)。

其  $\sigma - \varepsilon$  滞回曲线如图 1。

### 1.3.2 多轴加载实验 ( $\dot{\sigma} = 200$ MPa/s)

#### 1) 菱形应力循环加载路径

扭向为对称应力循环, 等效应力幅值为  $\pm 200$  MPa (100c)  $\rightarrow$   $\pm 250$  MPa (50c)  $\rightarrow$   $\pm 200$  MPa (50c); 轴向平均应力为 40 MPa, 轴向应力幅值为  $\pm$

400 MPa (100c)  $\rightarrow$   $\pm 500$  MPa (50c)  $\rightarrow$   $\pm 400$  MPa (50c)。

即, 一一对应的扭向和轴向应力幅值组成了 3 个工况。图 2 为其  $F - T$  的加载路径。

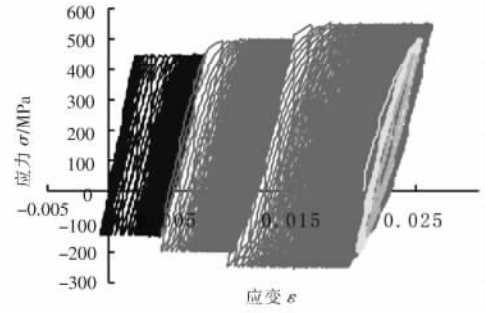


图 1  $\sigma - \varepsilon$  滞回曲线

Fig. 1 The  $\sigma - \varepsilon$  hysteresis loops

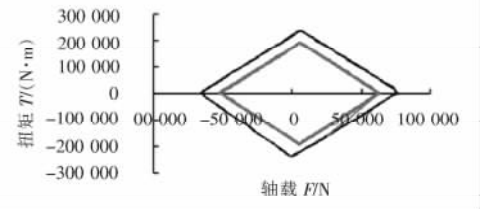


图 2  $F - T$  加载路径

Fig. 2 The  $F - T$  loading path

### 2) 椭圆形应力循环加载路径

扭向为对称应力循环, 等效应力幅值为  $\pm 200$  MPa (100c)  $\rightarrow$   $\pm 225$  MPa (50c)  $\rightarrow$   $\pm 200$  MPa (50c);

轴向平均应力为 40 MPa, 轴向应力幅值的加载历史:

$\pm 400$  MPa (100c)  $\rightarrow$   $\pm 450$  MPa (50c)  $\rightarrow$   $\pm 400$  MPa (50c)。

可见, 一一对应的扭向和轴向应力幅值共组成了 3 个工况。

图 3 为其  $F - T$  的加载路径。

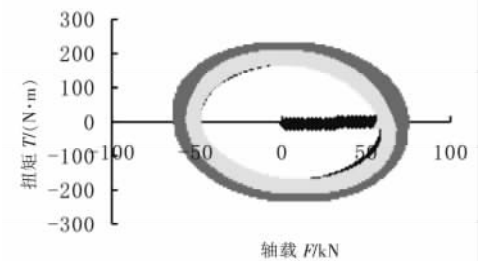


图 3  $F - T$  加载路径

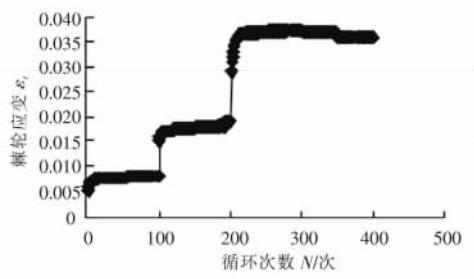
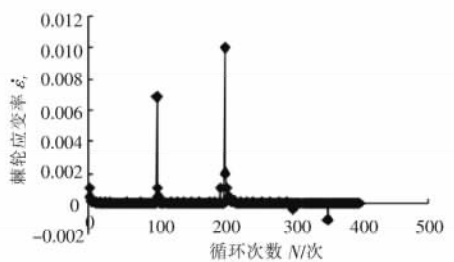
Fig. 3 The  $F - T$  loading path

## 2 实验数据处理及分析研究

### 2.1 单轴加载实验时

图 4 为各圈棘轮应变  $\varepsilon_r$  与循环次数  $N$  的关系曲线图, 图 5 为棘轮应变率  $\dot{\varepsilon}_r$  与循环次数  $N$  的关系

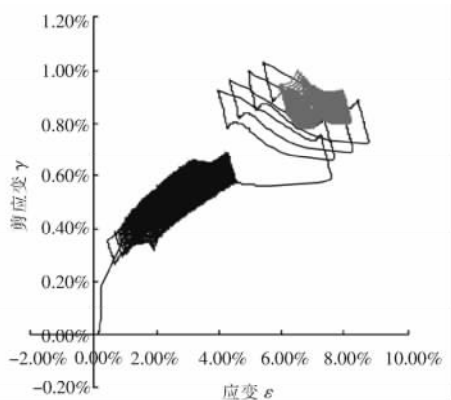
曲线。在图4中可见,当应力幅值发生变化时, $\varepsilon_r$ 有一个明显的较大增加,而循环趋于饱和的速率却变小。在前3种工况的最初几个循环圈,棘轮应变率较大,但随着循环的进行,都最终趋于某个恒定值。在工况4、工况5中棘轮应变率几乎为0。由此可见,先前较大的应力幅值历史遏止了后继较小应力幅值循环下的棘轮效应。

图4  $\varepsilon_r - N$  关系曲线图Fig. 4 The  $\varepsilon_r - N$  relationship图5  $\dot{\varepsilon}_r - N$  关系曲线Fig. 5 The  $\dot{\varepsilon}_r - N$  relationship

## 2.2 多轴加载实验时

### 1) 菱形应力循环加载路径时

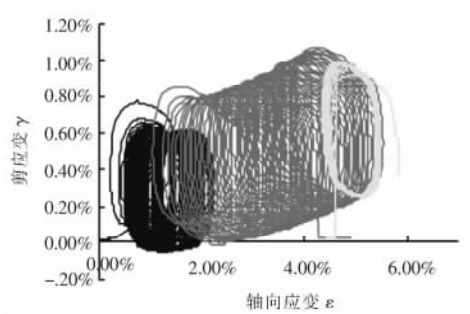
图6为 $\gamma - \varepsilon$ 的关系曲线。

图6  $\gamma - \varepsilon$  的关系曲线Fig. 6 The  $\gamma - \varepsilon$  relationship

由图6可以看出:随着应力幅值的增加,棘轮应变有大幅度的增加,但随着循环的进行,棘轮应变逐渐达到稳定;同时,先前较大应力幅值循环遏止了后继较小应力幅值下的棘轮效应。

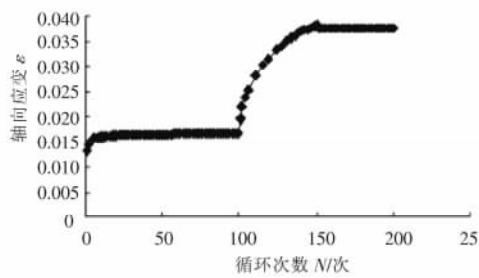
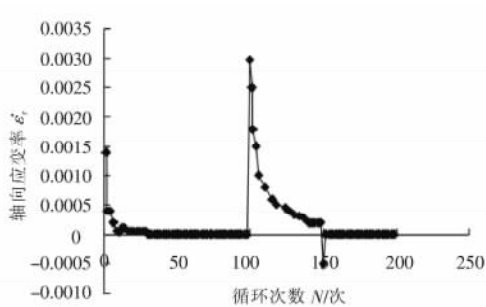
### 2) 椭圆形应力循环加载路径时

图7为 $\gamma - \varepsilon$ 的关系曲线。

图7  $\gamma - \varepsilon$  的关系曲线Fig. 7 The  $\gamma - \varepsilon$  relationship

由图7可以看出:随着应力幅值的增加,棘轮应变有大幅度的增加,但随着循环的进行,棘轮应变逐渐达到稳定;同时,先前较大应力幅值循环遏止了后继较小应力幅值下的棘轮效应。

对应于图7的 $\varepsilon_r - N$ 关系曲线和 $\dot{\varepsilon}_r - N$ 曲线分别见图8和图9。

图8 The  $\varepsilon_r - N$  曲线Fig. 8 The  $\varepsilon_r - N$  relationship图9 The  $\dot{\varepsilon}_r - N$  曲线Fig. 9 The  $\dot{\varepsilon}_r - N$  relationship

由图8可见,当轴向应力幅值发生改变时,轴向棘轮应变 $\varepsilon_r$ 有一个较大的变化,工况1和工况2都产生了很明显的棘轮效应现象,而工况3则几乎没有发生轴向应变累积。这表明,先前工况2,即较大轴向应力幅值的循环遏止了后继工况3较小轴向应力幅值的循环下的棘轮效应。从图9可知,在各种工况下,初始若干循环圈内 $\dot{\varepsilon}_r$ 变化较大,而后很快趋于一个稳定值。说明,随着应力幅值的增加,棘轮应变有大幅度的增加,但随着循环的进行,棘轮应变逐渐达到稳定。

### 3 结 论

由 16Mn 钢实验结果分析,可以得到如下几点结论:

1) 在单轴应力不对称循环情况下:随着应力幅值的增加,棘轮应变有大幅度的增加,但随着循环的进行,棘轮应变逐渐达到稳定;先前较大应力幅值循环遏止了后继较小应力幅值下的棘轮效应。

2) 在多轴非比例应力控制循环情况下:棘轮应变及棘轮应变率随着应力幅值(非对称循环的方向)的增加而增加但随着循环的进行,棘轮应变逐渐达到稳定;先前较大的轴向应力幅值循环遏止了后继较小的轴向应力幅值的扭转对称循环的棘轮效应。

#### 参考文献:

[1] Ohno N, Abdel Karim M. Uniaxial ratchetting of 316FR steel at

room temperature - Part II: constitutive modeling and simulation [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2000, 122 (1): 35-41.

- [2] 向阳开,高庆,杨显杰,等. 1Cr18Ni9Ti 不锈钢多轴非比例棘轮行为及其影响因素研究[J]. 固体力学学报, 2000(2): 183-187.
- [3] Colak OU, Krempl E. Modeling of uniaxial and biaxial ratcheting behavior of 1026 varbon steel using the simplified viscoplasticity [J]. Theory Based on Overstress (VBO) Acta Mechanica, 2003, 160(1/2): 51-55.
- [4] Xia Z, Shen X, Ellyin F. Biaxial cyclic deformation of an epoxy resin: Experiments and constitutive modeling [J]. Journal of Materials Science, 2005, 40(3): 102-106.
- [5] Fernand E, Folarin O. The effect of material model in describing mechaniam of plasticity - induced crack closure under variable cyclic loading [J]. International Journal of Fracture, 2007(143): 37-42.
- [6] 陈敬虞,龚晓南,邓亚虹. 基于内变量理论的岩土材料本构关系研究[J]. 浙江大学学报:理学版, 2008, 35(3): 355-360.

(上接第 264 页)

测试结果为:终端识别率 100%,生成轨迹准确率 100%,达到了对高速路网车辆行驶轨迹监控的目的。

### 7 结 语

采用基于 LBS 的高速路网车辆行驶轨迹监控系统,实现了对路网车辆行驶轨迹全程监控,从而可以实现高速公路联网精确收费和精确清分目标,有效解决因二义性或多义性路径引起的收费和清分问题,大大减少了高速公路联网收费作弊途径。通过对移动终端定位,还可以为高速路网抢险救援提供准确的位置信息;可以通过车辆间的位置信息,提供事故预警,减少交通事故发生;可以进行信息数据挖掘,提供便民服务等功能。基于 LBS 的高速路网车辆行驶轨迹监控系统,完全兼容现有收费和管理模式,设备设施改造小,投资成本低,不影响现有收费方式、习惯和效率,可操作性强。随着我国高速路网规模,联网范围的不断扩大,采用基于 LBS 的高速路网车辆行驶轨迹监控系统,将具有重要的现实意义和巨大的经济、社会效益。

#### 参考文献:

[1] 刘振华,曹沫,杨新征. 我国高速公路联网收费数据现状分析 [J]. 交通标准化, 2008(11): 88-90.

- [2] 童剑军. 问题的提出——“二义性路径”[J]. 中国交通信息产业, 2006(3): 1-3.
- [3] Steiniger S, Moritz N, Alistair E. Foundations of Location Based Services [EB/OL]. Zurich: University of Zurich, 2001 [2009-10-28]. [http://www.geo.unizh.ch/publications/cartouche/lbs\\_lecturenotes\\_steinigeretal2006.pdf](http://www.geo.unizh.ch/publications/cartouche/lbs_lecturenotes_steinigeretal2006.pdf).
- [4] 李彬,杨春,张功国. LBS 定位技术分析比较及其系统设计 [J]. 广东通信技术, 2005(3): 47-49.
- [5] SULAIR. What is GIS [EB/OL]. CA: Stanford University, 2006-03-21 [2009-10-28]. <http://www-sul.stanford.edu/depts/gis/whatgis.html>.
- [6] 李建. 浅谈 IC 卡的分类及其安全 [J]. 大众科技, 2006(2): 68.
- [7] 百度. 经纬度 [EB/OL]. 2009-08-06 [2009-10-28]. <http://baike.baidu.com/view/61394.htm>.
- [8] 百度. 数据挖掘 [EB/OL]. 2009-08-03 [2009-10-28]. <http://baike.baidu.com/view/7893.htm>.
- [9] Embedded Technology Network. 中国无线电频率划分及主要用途 [EB/OL]. 2007-11-06 [2009-10-28]. <http://www.icembed.com/info-20954.htm>.
- [10] 闪光科技. Mifare one 卡性能简介 [EB/OL]. 2008-03-04 [2009-10-28]. <http://www.shanguangkj.com/sgkj2008/article/2008-03-04/151-1.htm>.
- [11] 百度. 双界面卡 [EB/OL]. 2009-09-24 [2009-10-28]. <http://baike.baidu.com/view/369695.html?fromTaglist>.
- [12] 王璇,翁小雄. 基于模糊 C 均值聚类的快速路交通流相态划分 [J]. 交通信息与安全, 2009, 27(1): 149.