

# 核电站内压直管道在位移控制下的棘轮效应

陈小辉<sup>1</sup>, 陈旭<sup>2</sup>

(1. 东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 天津大学 化工学院, 天津 300072)

**摘 要:** 研究核电站直管道在恒定内压和循环位移作用下的棘轮效应, 分析了内压、循环位移和多步载荷对内压管道棘轮应变的影响。结果表明, 最大棘轮应变发生在直管的环向方向, 轴向棘轮应变与环向棘轮应变相比小得多。在相同内压下, 棘轮应变随着循环位移的增大而增大, 在相同位移下, 棘轮应变随内压的增大而增大。采用多步加载时, 前一步棘轮变形会降低后一步应有的棘轮应变率, 尤其前一步具有较大的位移作用下发生棘轮应变后, 这种现象十分明显。根据直管试验装置特点, 确定了内压直管在位移控制下的棘轮边界。

**关键词:** 压力直管; 位移控制; 试验研究; 棘轮应变; 棘轮边界

中图分类号: TB 302.3; TH 123.4 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)07-0990-04

## Ratcheting Effect of Pressurized Straight Pipe Under Displacement Control

CHEN Xiao-hui<sup>1</sup>, CHEN Xu<sup>2</sup>

(1. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China; 2. School of Chemical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China. Corresponding author: CHEN Xiao-hui, E-mail: chenxh@neuq.edu.cn)

**Abstract:** The ratcheting effect of pressurized straight pipe was studied for nuclear power plant. The effect of internal pressure, displacement and multistep loading on ratcheting strain was mainly studied. The results indicated that ratcheting strain occurs mainly in hoop direction and it's not evident in axial direction. Ratcheting strain increases with the increasing of displacement at the same pressure. At the same displacement, ratcheting strain increases with the increasing of internal pressure. For multi-step loading, ratcheting strain rate in the next step would be decreased by ratcheting deformation in the preceding step. The effect of ratcheting history at higher level loading on ratcheting strain is larger than that at lower level loading. According to the quasi-three-point-bending apparatus, ratcheting boundary was determined.

**Key words:** pressurized straight pipe; displacement control; experimental study; ratcheting strain; ratcheting boundary

棘轮效应是在非对称循环载荷作用下材料或结构发生塑性应变累积的一种现象, 它会缩减材料或结构的疲劳寿命。在工程中, 非对称循环载荷可能由开停车或正常操作中的振动等各种复杂载荷工况组成。压力管道广泛应用于核行业、化工工业和电力工业等, 它用于输送室温和高温流体, 将承受内压和温度波动等这些载荷工况, 会导致材料或结构发生棘轮效应, 严重影响压力管道的安

全可靠性<sup>[1-2]</sup>。高炳军等<sup>[3-4]</sup>和陈小辉<sup>[5]</sup>分别研究了20#钢和Z2CND18.12N奥氏体不锈钢直管在内压和循环弯曲载荷作用下的棘轮行为, 结果都发现环向棘轮应变比轴向棘轮应变大得多, 随着载荷的增加而增大, 轴向也有一定的棘轮变形, 但其值较小。Chen等<sup>[6]</sup>综述了国内外关于管道在内压和位移或载荷控制下的棘轮行为、棘轮变形对疲劳寿命的缩减以及棘轮边界的研究。尽管美

收稿日期: 2015-04-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51435012); 东北大学秦皇岛分校博士基金资助项目(XNB2015001); 河北省高等学校科学技术研究项目(QN2015336); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(L1523001)。

作者简介: 陈小辉(1982-), 女, 河北秦皇岛人, 东北大学秦皇岛分校讲师, 博士; 陈旭(1963-), 男, 浙江衢州人, 天津大学教授, 博士生导师。

国 ASME 规范<sup>[7]</sup>和法国 RCC - MR 规范<sup>[8]</sup>等相关标准不断更新,对于棘轮损伤引起的结构失效仍然是难以捉摸的,导致目前压力容器及管道的设计明显保守和昂贵.因此,本文对奥氏体不锈钢 Z2CND18.12N 内压直管在位移控制下的棘轮行为进行研究.

## 1 试验设备

### 1.1 直管试样

本文选用 Z2CND18.12N 奥氏体不锈钢材料的直管进行试验研究,Z2CND18.12N 钢的化学成分(质量分数,%)为 C 0.03, Cr 17.14, Ni 11.45, Si 0.37, Mn 1.64, S 0.001, P 0.03, V 0.087, Mo 2.43, N 0.064.

### 1.2 试件

图 1 为内压直管在位移控制下的棘轮效应试验设备及两向应变片粘贴位置的示意图.位移以三角波形方式施加.直管试样长 1.20 m,外径为 0.076 m,壁厚为 0.004 5 m.

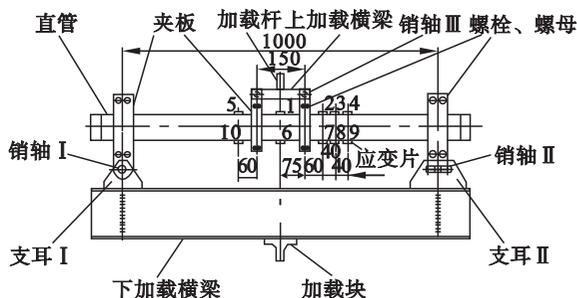


图 1 试验装备及应变片位置的示意图

Fig. 1 Sketch of test apparatus and strain gauge positions

图 2 为直管准三点弯曲试验安装图.从图中可以看出,利用刚度足够大的夹板、销钉等组件将直管通过简支方式笃定在下横梁上.上加载横梁和加载杆相连,加载杆与试验机的上夹头相连,通过试验机的上夹头的移动来实现力控制的循环载荷施加到直管上.下加载横梁通过加载块和试验机的下夹头相连.在试验过程中忽略内压对管道棘轮效应的影响,这归因于压力波动范围很小,所以认为内压是恒定的.试验加载波形为三角波,位移控制方式为对称循环,循环周期为 30 s.

## 2 试验结果分析与讨论

### 2.1 直管棘轮效应的试验结果

直管道在内压  $p = 20 \text{ MPa}$  和位移幅值

$\Delta d/2 = 5 \text{ mm}$  下的棘轮应变如图 3 和图 4 所示,图中给出的是位置 6 处的轴向和环向棘轮应变.本文棘轮应变是取一次循环中的最大和最小应变的平均值.



图 2 试验装备安装图

Fig. 2 Setup of experiment apparatus

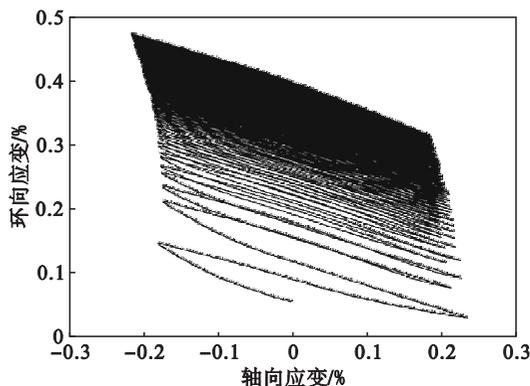


图 3 轴向 - 环向应变关系

Fig. 3 The relationship of axial-hoop strain

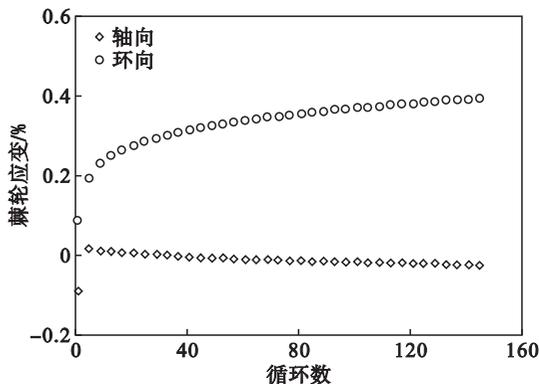


图 4 轴向 - 环向棘轮应变随循环数的变化

Fig. 4 The variation of axial-hoop ratcheting strain with number of cycles

由图 3 和图 4 可以看出,内压直管在循环位移作用下棘轮应变主要发生在环向,而轴向棘轮应变不明显.环向棘轮应变随循环次数的增加而增大,但未见安定现象.

### 2.2 相同内压、不同位移时的棘轮效应

图 5 给出相同内压下( $p = 17.5 \text{ MPa}$ )直管在位移控制方式下不同试件的棘轮行为.结果发现

直管的环向棘轮应变比轴向的棘轮应变相比大得多,内压相同时,随循环位移载荷的增大棘轮应变增加,这说明直管在内压和循环载荷作用下的循环弯曲载荷对棘轮效应有明显的影响。

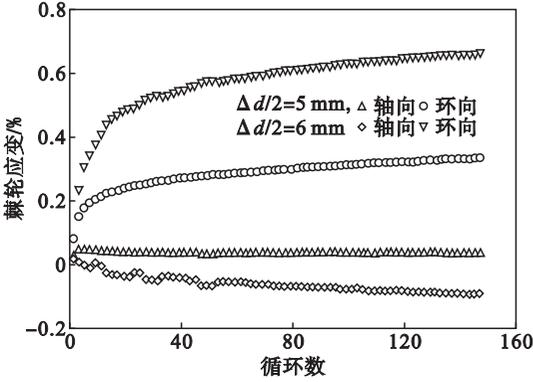


图 5 压力相位移不同下的轴向-环向棘轮应变  
Fig. 5 Axial-hoop ratcheting strain under the same internal pressure and different displacement

### 2.3 不同内压、相位移时的棘轮效应

图 6 给出了在位移控制方式下,直管道在相同位移  $\Delta d/2 = 6 \text{ mm}$  和不同内压作用下的棘轮应变的演化规律。环向棘轮应变比轴向棘轮应变显著得多,随着内压的增大,环向棘轮应变增大。

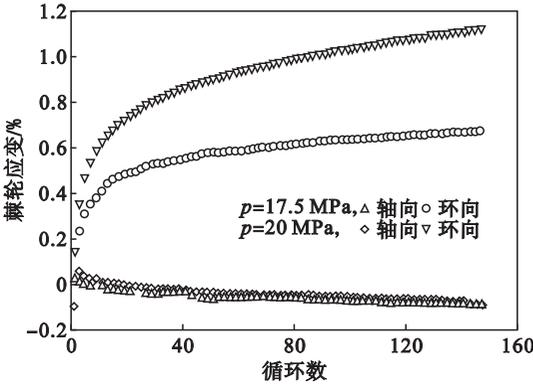


图 6 相同位移不同压力下的轴向-环向棘轮应变  
Fig. 6 Axial-hoop ratcheting strain under the same displacement and different internal pressure

### 2.4 多步载荷棘轮效应

图 7 给出的是同一试件位移幅值为  $\Delta d/2 = 6 \text{ mm}$ ,内压分别为 17.5, 20, 23, 17.5 及 25 MPa,在多步载荷连续加载条件下图 1 中位置 6, 7, 8 和 9 处的棘轮应变。由图中可以看出,棘轮应变最大值发生在位置 6 处。当内压由第一步的 17.5 MPa 增加到下一步的 20 MPa 时,发现棘轮应变率明显增加;内压再增到 23 MPa 时,棘轮应变率更加显著,但第三步的 23 MPa 降回 17.5 MPa 时,棘轮应变率与第一步的 17.5 MPa 时的棘轮应变率相比显著降低;后续内压再由 17.5 MPa 增加至

25 MPa,棘轮应变率明显增加。因此,从试验结果可以看出,预应变的存在有利于降低棘轮应变率。

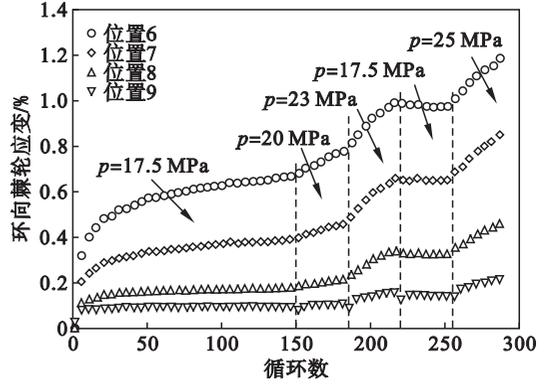


图 7 位移恒定多步加载下的环向棘轮应变  
Fig. 7 Hoop ratcheting strain under constant displacement and multi-step loading

图 8 是同一试件内压为  $p = 17.5 \text{ MPa}$ ,位移幅值分别为 5, 6, 7, 5, 7 及 7.5 mm 时不同位置上的环向棘轮应变。由图中可以看出,位移幅值由 5 mm 增加至 6 mm 时,棘轮应变率明显增加;再增加至 7 mm 时,棘轮应变率比前一步 6 mm 时更加显著,但是随着下一步位移幅值变为 5 mm 后,发现与第一步 5 mm 时的棘轮应变率相比明显降低。多步加载过程说明,预应变能够降低棘轮应变率,它的存在对于压力管道是有利的。后续循环弯曲载荷再增大至 7 mm 时,棘轮应变率有所增加,但明显低于上一个 7 mm 加载时的棘轮应变率;当循环弯曲载荷增加到 7.5 mm 时,棘轮应变率才再次明显增加。这也说明,塑性应变历史对棘轮应变率有影响。

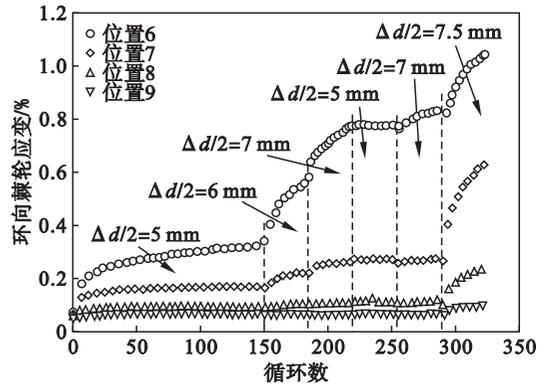


图 8 内压恒定多步位移下的环向棘轮应变  
Fig. 8 Hoop ratcheting strain under constant internal pressure and multi-step displacement

综上所述,对于同一根压力直管道在相同内压和位移作用下,位置 6, 7, 8 和 9 处的弯矩不同,则产生的棘轮应变率不同;而对于同一位置棘轮应变率,随着位移的增大而增大。另外,从试验结

果可以推测, 预应变的存在有利于降低棘轮应变率, 塑性应变历史对棘轮应变率有明显影响。

## 2.5 直管的棘轮边界

根据图7和图8可得出, 直管道在相同内压和相同位移作用下, 不同位置棘轮应变率是不一

样的, 这归因于各处的弯矩不相同; 在相同位置处, 随着位移的增大棘轮应变率增加。在多载荷步下, 可根据图8中的平均棘轮应变率和Moreton<sup>[9]</sup>提出的最小二乘法, 来确定直管的棘轮边界, 见图9。

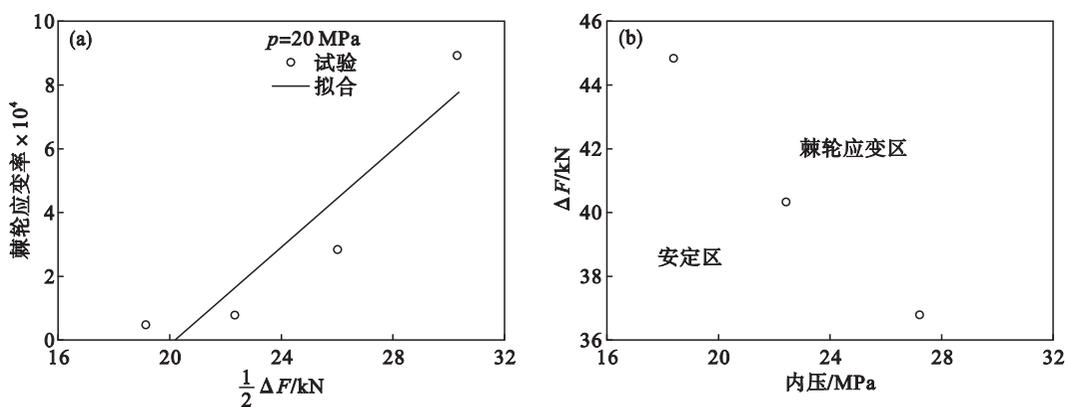


图9 棘轮边界

Fig. 9 Ratcheting boundary

(a)—棘轮边界的确定;(b)—内压直管的棘轮边界。

## 3 结 论

1) 奥氏体不锈钢 Z2CND18.12 内压直管在位移控制下, 棘轮应变主要发生在环向, 轴向棘轮应变并不明显。

2) 对于不同试样, 当内压相同, 位移不同时, 棘轮应变随着位移增大而增大; 当位移相同, 内压不同时, 棘轮应变随着内压的增大而增大。

3) 当采用多步加载时, 预应变的存在有利于降低棘轮应变率。

4) 直管道在内压和循环位移作用下的棘轮边界通过试验数据和最小二乘法来确定, 为相关标准的制定提供了依据。

## 参考文献:

- [1] Boussa D, Van Dang K, Labbe P, et al. Fatigue-seismic ratcheting interaction in pressurized elbows [ J ]. *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, 1994, 116 ( 4 ) : 396 - 402.
- [2] Van Dang K, Moumni Z. Evaluation of fatigue-ratcheting damage of a pressurized elbow undergoing damage seismic inputs [ J ]. *Nuclear Engineering and Design* 2000, 196 ( 1 ) : 41 - 50.
- [3] 高炳军. 材料多轴棘轮效应本构描述及压力管道棘轮效应预测 [ D ]. 天津: 天津大学, 2005.  
( Gao Bing-jun. Modeling of material multiaxial ratcheting

and ratcheting prediction of pressure piping [ D ]. Tianjin : Tianjin University, 2005. )

- [4] 高炳军, 陈旭, 陈刚. 内压直管对称循环弯曲棘轮效应实验研究 [ J ]. *机械强度* 2005, 27 ( 2 ) : 246 - 250.  
( Gao Bing-jun, Chen Xu, Chen Gang. Experimental study on the ratcheting of pressurized straight pipes subjected to reversed bending [ J ]. *Journal of Mechanical Strength* 2005, 27 ( 2 ) : 246 - 250. )
- [5] 陈小辉. 循环载荷作用下压力管道棘轮效应及安定性研究 [ D ]. 天津: 天津大学, 2013.  
( Chen Xiao-hui. A study on the ratcheting and shakedown behavior of pressurized piping components under cyclic loading [ D ]. Tianjin : Tianjin University, 2013. )
- [6] Chen X H, Yu D J, Gao B J, et al. Recent progresses in experimental investigation and finite element analysis of ratcheting in pressurized piping [ J ]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 2013, 101 : 113 - 142.
- [7] American Society of Mechanical Engineers. ASME boiler and pressure vessel code, section III [ S ]. New York : American Society of Mechanical Engineers, 2010.
- [8] French Association for Design, Construction and inservice Inspection rules for Nuclear Island Components. RCC-MR RB 3000 : Design rules for class 1 equipment [ S ]. Paris : French Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Island, 2007.
- [9] Moreton D, Yahiaoui K, Moffat D. Onset of ratcheting in pressurized piping elbows subjected to in-plane bending moments [ J ]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1996, 68 : 73 - 79.