

基于线性匹配方法的核电站弯管 在循环载荷下的安定性分析

陈小辉¹ 陈浩峰² 陈旭³

1. 东北大学秦皇岛分校控制工程学院, 秦皇岛, 066004

2. 思克莱德大学机械与航空工程系, Glasgow UK, G1 1XJ

3. 天津大学化工学院, 天津, 300072

摘要:进行了核电站 90°弯管在内压和面内弯曲载荷作用下的棘轮效应试验, 并采用数值方法研究了 90°弯管的极限载荷、安定载荷和棘轮边界。利用理想弹塑性有限元分析, 基于两倍弹性斜率准则和切线相交准则分别确定了 90°弯管单独承受内压和弯曲载荷的极限载荷; 利用线性匹配方法确定了 90°弯管在单独内压和弯曲载荷以及两者共同作用下的极限载荷和安定载荷; 利用 Ohno-Wang 模型, 结合 C-TDF 弹塑性有限元分析方法和线性匹配方法分别确定了 90°弯管的棘轮边界; 最后, 对弹塑性有限元方法和线性匹配法确定的棘轮边界进行了比较。结果表明: 两倍弹性斜率准则、切线相交准则和线性匹配方法确定的极限载荷误差为 10.78%, 其中弹性迭代的线性匹配法能高效、快速地进行计算。比较 C-TDF 法和线性匹配法确定的棘轮边界, 结果发现: 当内压在 20~35 MPa 之间时, 两种方法确定的棘轮边界吻合很好; 当内压小于 20 MPa 时, 两种方法的预测结果呈现不同的趋势。

关键词: 90°弯管; 弹塑性有限元分析; 线性匹配法; 极限载荷; 棘轮边界

中图分类号: TB302.3; TH123.4

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2019.19.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Shakedown Analysis of Elbow Pipes of Nuclear Power Plants under Cyclic Loading Based on LMM

CHEN Xiaohui¹ CHEN Haofeng² CHEN Xu³

1. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao, Hebei, 066004

2. Department of Mechanical & Aerospace Engineering, University of Strathclyde, Glasgow UK, G1 1XJ

3. School of Chemical Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072

Abstract: Ratcheting effect experiments of 90° elbow pipes under internal pressure and in-plane bending were carried out for nuclear power plants herein, and then the limit load, shakedown load and ratcheting boundary of 90° elbow pipes were studied by numerical method. First, based on twice elastic slope criterion and tangent intersection criterion, limit load of 90° elbow pipes under internal pressure or in-plane bending was determined by ideal elastic-plastic finite element analysis. Meanwhile, limit load and shakedown load of 90° elbow pipes under internal pressure alone or in-plane bending alone and the interaction between them were determined by LMM. Again, ratcheting boundary of 90° elbow pipes was determined by Ohno-Wang model combining with C-TDF and LMM. Finally, ratcheting boundaries of 90° elbow pipes determined by two methods were compared. The results indicate that the errors of limit load determined by twice elastic slope criterion, tangent intersection criterion and LMM are as 10.78%. It is also showed the efficiency and rapidity of LMM. The ratcheting boundary determined by both methods were compared, the results are well consistent when internal pressures are in the range of 20 MPa and 35 MPa, the trends of predicted results of both methods are different when internal pressures are less than 20 MPa.

Key words: 90° elbow pipe; elastic-plastic finite element analysis; linear matching method (LMM); limit load; ratcheting boundary

收稿日期: 2018-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51435012); 河北省自然科学基金资助项目(E2018501022); 中国博士后科学基金资助项目(2017M610171); 辽宁省博士启动基金资助项目(201601017); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N182304009)

0 引言

工程结构/构件在交变载荷作用下可能出现三种状态, 分别是累积塑性应变(棘轮效应)、塑性安定和弹性安定。美国规范 ASME、德国规范

KTA、欧盟规范 EN13445 和法国规范 RCC-MR 等已引进结构/构件的安定理论,并广泛应用于工程结构/构件的安全可靠设计和安全评估,如航空航天、压力容器管道等领域。安定分析主要用于研究结构/构件在交变载荷作用下的塑性行为。到目前为止,安定评估方法主要有直接循环法、弹性补偿法和非线性叠加法等,它们均能对复杂结构的塑性行为进行评估。郑晓涛^[1]研究了热机载荷共同作用下多层结构和厚壁开孔圆筒的安定极限载荷。CHEN 等^[2]综述了国内外关于管道在内压和位移或载荷控制下棘轮边界的研究。安定分析的实质是确定结构/构件在交变载荷作用下的临界安全载荷,为工程的设计和安全评估提供重要的理论依据。国内外没有任何一种确定棘轮边界的方法被列入规范,而试验方法也不能确定弯管的棘轮边界。到目前为止,结构/构件棘轮边界的确定采用最多的方法是 Ohno-Wang 模型结合 C-TDF 方法和线性匹配方法两种。

本文探讨的 90°弯管是压水堆核电站主管道,它是反应堆一回路系统中主循环泵与压力容器相连接的管道部件,属安全一级,其设计温度为 343 °C 以上,设计压力为 17.23 MPa。本文研究 90°弯管在内压和循环面内弯曲载荷作用下的极限载荷、安定极限和棘轮边界,采用 Ohno-Wang 模型结合 C-TDF 方法以及线性匹配方法两种方法来确定结构/构件的棘轮边界。本文研究的主要目的是比较两种方法确定棘轮边界的一致性。

1 弯管试样

本文以 Z2CND18.12N 奥氏体不锈钢材料的 90°弯管为研究对象,其中弯头选用 GB12459—90 标准弯头。试验在 Letry 电液伺服疲劳试验机上进行,控制部分采用高精度测量放大电路和数据采集系统。弯管在内压和循环弯曲载荷作用下的棘轮效应试验采用三角波控制方式。棘轮效应试验设备及两向应变片粘贴位置见图 1。弯管试样外径 $D_o=76$ mm,壁厚 $t=4.5$ mm,弯曲半径 $R=95$ mm,特征参数是 tR/r_m^2 (r_m 表示弯管中径的一半)。弯头两端分别焊接长度为 100 mm 的直管,两直管段再与管堵焊接,管堵与连接块通过螺纹连接。内压是通过液压泵站的另一套油路来实现的。连接块上的加载杆分别与试验机的上下夹头相连,以实现循环弯曲载荷的施加,如图 2 所示。

2 试验分析

CHEN 等^[2]综述了弯管在内压和弯曲载荷

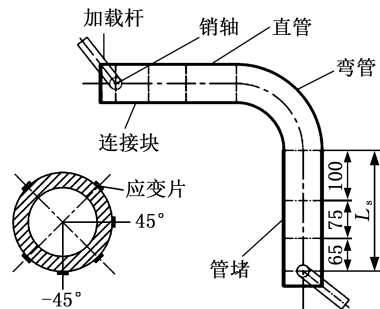


图 1 试验装备及应变片位置的示意图

Fig.1 Sketch of test apparatus and strain gauge positions



图 2 试验装备安装图

Fig.2 Setup of test apparatus

作用下的棘轮效应,发现弯管棘轮效应主要发生在顶线,偶尔也发生在内缘线。

图 3 给出了 90°弯管在内压 17.5 MPa 和面内循环载荷 15 kN 作用下顶线、45°线、内缘线和外缘线 4 个位置处环向应变,可以看出,最大棘轮应变发生在顶线位置处,因此,本文主要研究在内压和面内弯曲载荷作用下 90°弯管顶线位置处的棘轮应变。图 4a 所示为 90°弯管在内压 17.5 MPa 和面内循环载荷 15 kN 作用下顶线位置处环向应变和轴向应变的历程。图 4b 所示为轴向应变与环向应变的关系。从图 4 中可以看出,顶线位置处环向棘轮应变比轴向棘轮应变大。环向棘轮应变率随着循环的进行逐渐减小,但未见安定。棘轮效应会缩减管道的疲劳寿命,为了防止棘轮效应的发生,采用安定理论对弯管的安全性

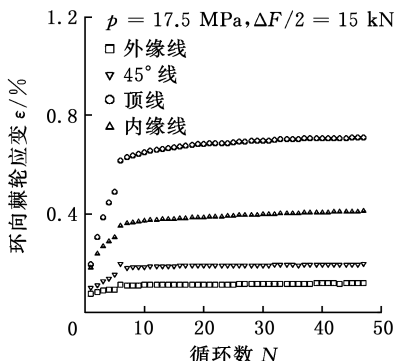
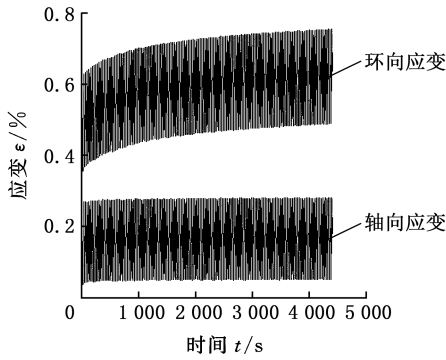
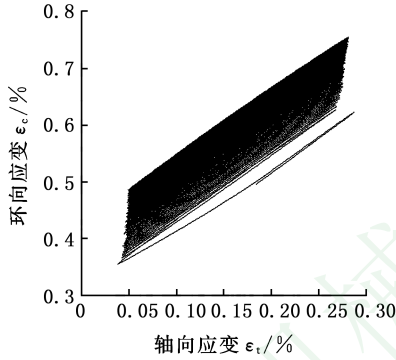


图 3 环向棘轮应变

Fig.3 Ratchet hoop strain



(a) 应变历程



(b) 环向应变和轴向应变间的关系

图 4 棘轮效应

Fig.4 Ratcheting effect

进行评估。

3 数值方法

本文采用数值方法对 90°弯管在内压和循环面内弯曲载荷作用下的安定性进行研究。

3.1 Ohno-Wang 模型

1993 年, OHNO 和 WANG^[3] 建议将总背应力分为几个背应力分量的形式, 再在每个动态恢复项中引进一个临界值, 表达式为

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \sum_{i=1}^M \alpha_i \\ d\alpha_i &= \frac{2}{3} C_i d\epsilon_p - \gamma_i \left(\frac{\bar{\alpha}_i}{r_i} \right)^{m_i} \langle d\epsilon_p : \frac{\alpha_i}{\alpha_i} \rangle \alpha_i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $\langle \rangle$ 表示 Macauley 计算符号, 即 $\langle x \rangle = \frac{(x + |x|)}{2}$;

“:” 表示两个张量双点击积运算; α 为背应力张量; α_i 为背应力分量张量; $\bar{\alpha}_i = \sqrt{\frac{2}{3} \alpha_i : \alpha_i}$; C_i, γ_i, m_i 为材料参数, 具体确定方法见文献[4], 本文这两个参数的具体数值见文献[5]; $d\epsilon_p$ 为塑性应变张量。

3.2 C-TDF

C-TDF(committee of three dimensional finite element stress evaluation)^[6] 是根据有限元计算结果提出的一种用以确定棘轮边界的准则, 其内容为: 如果结构每一塑性循环的等效塑性应变增量递减, 且等效塑性应变增量不大于 10^{-4} , 则

结构安定。该准则存在一缺点: 未规定达到 10^{-4} 这一数值的循环数, 而通常情况需要 5 到 10 次。本文取 10 个循环进行弹塑性有限元计算。

根据 ASME 规范与 RCC-MR 规范中给出的确定棘轮边界的方法, 通过量纲一参数 X, Y 来确定结构的棘轮边界:

$$X = \frac{p_1}{p_{sy}} \quad (2)$$

或

$$X = \frac{p_m + p_b}{p_{sy}} \quad (3)$$

$$p_{sy} = \frac{K^2 - 1}{K^2 + 1} \sigma_y \quad (4)$$

$$K = \frac{r_o}{r_i} \quad (5)$$

$$p_m = \frac{K p_1}{K - 1} \quad (5)$$

$$Y = \frac{\Delta F}{F_{sy}} \quad (6)$$

$$F_{sy} = \frac{\pi(r_o^4 - r_i^4)\sigma_y}{4r_o L_s \sin \frac{\beta}{2}} \quad (7)$$

式中, p_1 为一次薄膜应力; p_{sy} 为与本文弯管具有相同直径和壁厚的直管内壁达到屈服时所对应的内压; p_b 为一次弯曲应力; r_o, r_i 分别为管子的外径和内径; σ_y 为屈服应力; F_{sy} 为与本文弯管具有相同直径和壁厚的直管外壁弯曲正应力达到屈服时所对应的循环弯曲载荷; ΔF 为二次应力幅值; L_s 为面内弯曲载荷加载点到弯管与直管相连接边界的距离(图 1), 即弯曲载荷的力臂; β 为弯管的角度, 本文 $\beta = 90^\circ$ 。

3.3 线性匹配方法

假设一结构 / 构件的体积为 V , 表面积为 S , 如图 5 所示。该结构承受的循环温度为 $\theta(x_i, t)$, 在表面 S_T 处承受循环机械载荷 $P(x_i, t)$, 表面 S_u 处位移速率为零, 即该处固定。这些约束和载荷的作用时间为 $0 \leq t \leq \Delta t$ 。

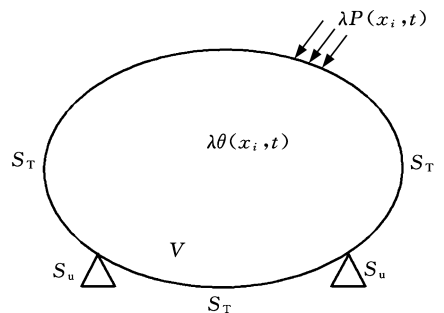


图 5 结构具有弹性理想塑性材料特性的结构

Fig.5 A structure with elastic-perfectly plastic material characteristics

为了确定类似这种复杂载荷条件下结构 / 构件的安定和棘轮边界, PONTNER 和 CHEN 提出了线性匹配方法^[7-9]。该方法将载荷分为恒定载

荷和循环载荷两种,即

$$F(x_i, t) = \lambda \bar{F}(x_i) + \theta(x_i, t) + P(x_i, t) \quad (8)$$

式中, λ 为恒定载荷的系数; $\bar{F}(x_i)$ 为恒定载荷。

这些载荷作用下结构 / 构件的线弹性应力为

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{ij}^F(x_i, t) &= \lambda \hat{\sigma}_{ij}^{\bar{F}} + \hat{\sigma}_{ij}^{\Delta}(x_i, t) \quad (9) \\ \hat{\sigma}_{ij}^{\Delta} &= \hat{\sigma}_{ij}^P + \hat{\sigma}_{ij}^{\theta} \end{aligned}$$

式中, $\hat{\sigma}_{ij}^P$ 、 $\hat{\sigma}_{ij}^{\theta}$ 分别为由循环机械载荷 $P(x_i, t)$ 和循环温度载荷 $\theta(x_i, t)$ 引起的变化的弹性应力; $\hat{\sigma}_{ij}^{\bar{F}}$ 为恒定载荷引起的应力。

对于图 5 描述的循环问题的定义, 应力率和应变率近似为稳态循环:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij}(t) &= \sigma_{ij}(t + \Delta t) \\ \dot{\epsilon}_{ij}(t) &= \dot{\epsilon}_{ij}(t + \Delta t) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

基于经典上限安定理论, 文献[7-9] 推导了恒定载荷系数的表达式, 即

$$\lambda = \frac{\int_V \sum_{n=1}^N \sigma_{ij}^{\bar{F}}(\Delta \epsilon_{ij, t_n}) dV - \int_V \sum_{n=1}^N (\hat{\sigma}_{ij}^{\Delta}(t_n) + \rho_{ij}(t_n)) \Delta \epsilon_{ij, t_n} dV}{\int_V \hat{\sigma}_{ij}^{\bar{F}}(\sum_{n=1}^N \Delta \epsilon_{ij, t_n}) dV} \quad (11)$$

式中, 交变载荷分为 N 个时间点; $\Delta \epsilon_{ij, t_n}$ 为时间 t_n 时的塑性应变增量; $\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \Delta \epsilon_{ij, t_n}^2}$, $\bar{\epsilon}$ 为等效塑性应变; $\rho_{ij}(t_n)$ 为弹性迭代 n 次后剩余的残余应力。

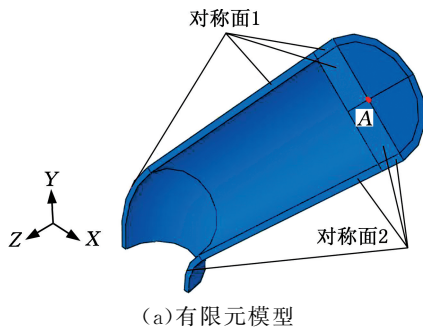
4 分析与讨论

根据弯管试样几何尺寸和载荷条件的对称性, 建立四分之一有限元模型, 如图 6a 所示。在对称面 OXZ 、对称面 1 和对称面 2 上施加对称约束, 弯管中心处 XZ 对称面的顶线位置所对应的节点上施加 X 方向位移; 直管和管堵内表面施加内压, 管堵中心 A 点处施加循环弯曲载荷。图 6b 和图 6c 分别为内压 20 MPa 和弯曲载荷 20 kN 作用下弯管的等效应力和等效应变云图。从图 6 中可以看出, 最大等效应力和等效应变均发生在弯管的顶线位置。分别通过弹塑性有限元分析和弹性迭代技术(即线性匹配法)来预测弯管在内压和弯曲载荷作用下的极限载荷和棘轮边界。

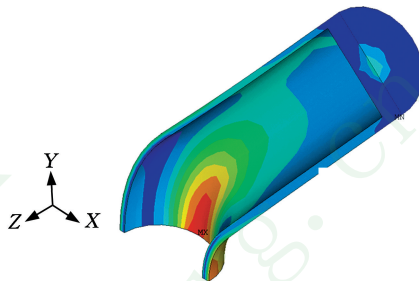
4.1 极限载荷

4.1.1 仅内压作用下弯管的极限载荷

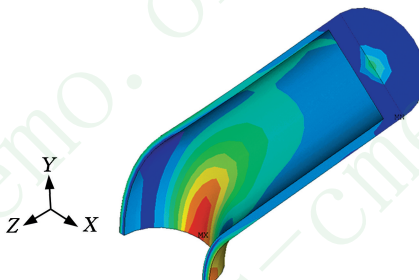
图 7 所示分别为两倍弹性斜率和切线相交准则确定的仅承受内压的 90° 弯管的极限载荷。表 1 给出了两倍弹性斜率准则、切线相交准则和线性匹配法确定的仅内压作用下弯管极限载荷。



(a) 有限元模型



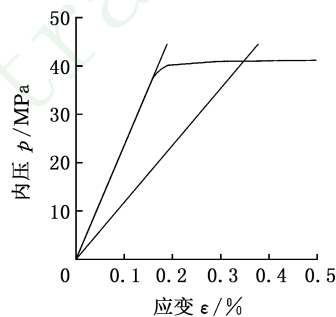
(b) 等效应力云图



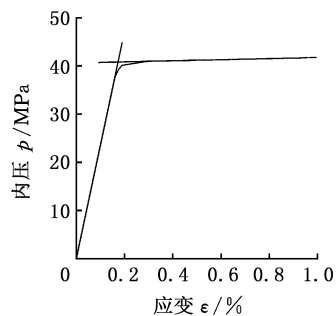
(c) 等效应变云图

图 6 有限元模型和应力应变

Fig.6 Finite element model of elbow pipe and stress-strain



(a) 两倍弹性斜率准则



(b) 切线相交准则

图 7 90° 弯管仅在内压下的极限载荷

Fig.7 Limit load of 90° elbow pipe under internal pressure alone

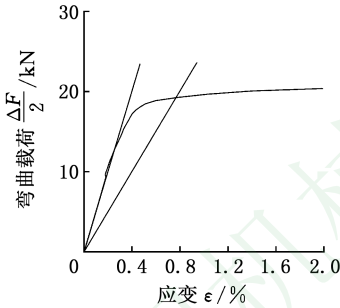
表 1 90°弯管仅在内压下的极限载荷

Tab.1 Limit load of 90° elbow pipe under internal pressure alone

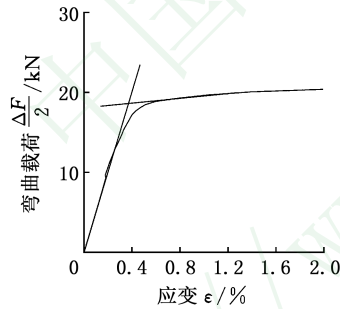
方法	极限载荷 (MPa)	误差 (%)
两倍弹性斜率准则	41.00	0
切线相交准则	40.96	0.098
线性匹配法	45.42	10.780

4.1.2 仅弯曲载荷作用下弯管的极限载荷

图 8 所示分别为两倍弹性斜率和切线相交准则确定的仅承受弯曲载荷的 90°弯管的极限载荷。表 2 给出了两倍弹性斜率准则、切线相交准则和线性匹配法确定的仅弯曲载荷作用下弯管极限载荷。



(a) 两倍弹性斜率准则



(b) 切线相交准则

图 8 90°弯管仅在弯曲载荷下的极限载荷

Fig.8 Limit load of 90° elbow pipe under bending load alone

表 2 90°弯管仅在弯曲载荷下的极限载荷

Tab.2 Limit load of 90° elbow pipe under bending load alone

方法	极限载荷 (MPa)	误差 (%)
两倍弹性斜率准则	19.234	0
切线相交准则	19.000	1.22
线性匹配法	18.420	4.23

4.1.3 内压和弯曲载荷联合作用下弯管的极限载荷

目前,已工程应用的塑性极限载荷确定法,如两倍弹性斜率和切线交点准则等,大都是针对简单工况下的结构而言,因而只适用于拉、压、弯曲和内压等单一载荷极限值的确定。实际工程结构/构件承受的是复杂载荷,线性匹配法^[7-9]能确

定复杂结构和复杂载荷工况的极限载荷,如图 9 所示。图 10 所示为基于上限和下限安定理论的线性匹配法确定的极限载荷系数 λ 随着迭代次数的变化情况。

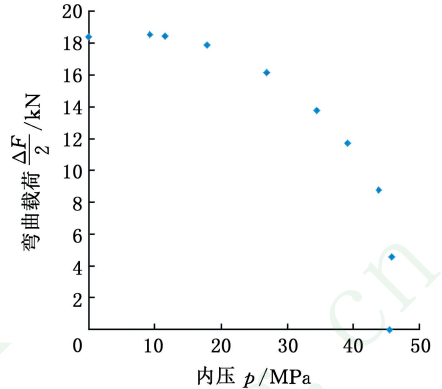


图 9 线性匹配法确定的极限载荷

Fig.9 Limit load determined by LMM

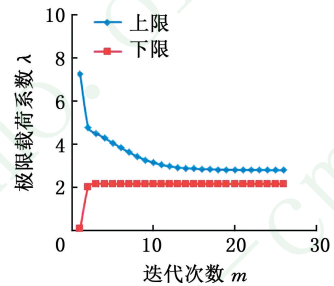


图 10 极限载荷系数与迭代次数的关系

Fig.10 The relationship between limit load coefficient and iteration number

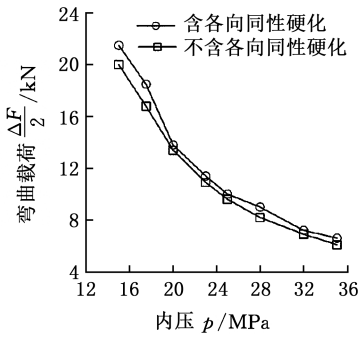
4.2 棘轮边界

4.2.1 弹塑性有限元方法确定棘轮边界

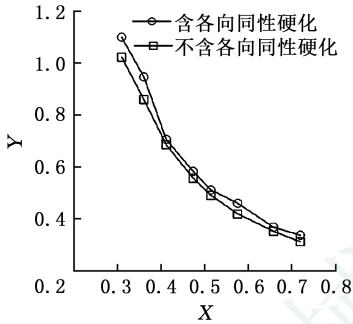
利用 Ohno-Wang 随动强化模型,再结合 C-TDF 提出的等效塑性应变增量控制法确定 90°弯管的棘轮边界,如图 11 所示。图 11 还给出了 Ohno-Wang 随动强化模型各项同性硬化特性对弯管棘轮边界的影响。从图 11 中可以看出,当考虑各项同性硬化时,相同压力或量纲 X 下,所对应的弯曲载荷或 Y 比不考虑各项同性硬化特征的偏大。这说明,各项同性硬化特性对材料或结构的承载能力是有影响的。

4.2.2 线性匹配法确定棘轮边界

Ohno-Wang 模型结合 C-TDF 方法(简称“C-TDF”)需要大量的、反复的弹塑性有限元计算才能获得一个内压所对应的弯曲载荷边界,因此,本文利用弹性迭代的线性匹配法来快速地确定 90°弯管的棘轮边界。C-TDF 和线性匹配法确定的棘轮边界如图 12 所示,图 12 还比较了未考虑各项同性硬化的两种方法所确定的棘轮边界。从图 12a 中可以看出,当内压在 20 MPa 和 35 MPa 之间时,两种方法确定的棘轮边界吻合很好;当内压小于



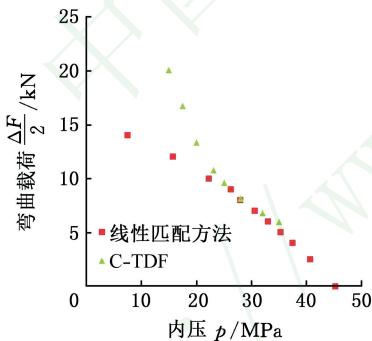
(a) 内压与弯曲载荷之间的关系



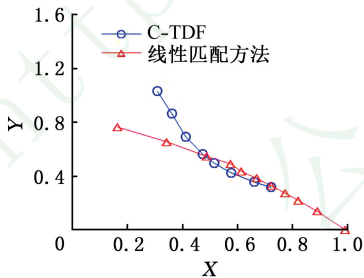
(b) 量纲一棘轮边界

图 11 Ohno-Wang 模型有无各项同性硬化确定的棘轮边界

Fig.11 Ratchet limit determined by Ohno-Wang model with and without isotropic hardening



(a) 内压与弯曲载荷之间的关系



(b) 量纲一棘轮边界

图 12 C-TDF 与线性匹配法确定的棘轮边界的对比

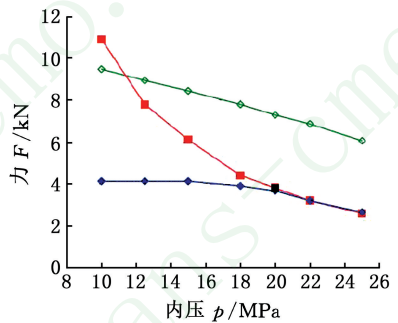
Fig.12 Comparison of ratchet limit determined by C-TDF and LMM

20 MPa 时,两种方法的预测结果开始分叉,呈现不同的走向趋势。同样,从图 12b 中也可以看出类似的现象,当 $0.45 < X < 0.75$ 时,两种方法确定的棘轮边界吻合很好;当 $X \leq 0.45$ 时,两种方法

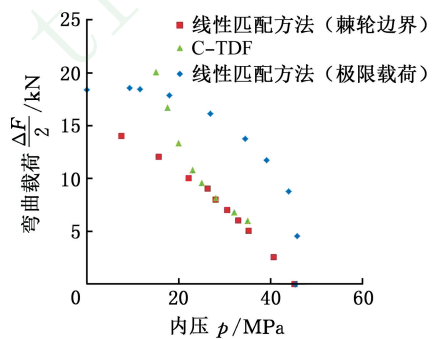
的预测结果开始分叉,呈现不同的走向趋势。

4.2.3 分析与讨论

文献[10]与线性匹配法确定的棘轮边界的对比如图 13 所示。ABALLA 等^[10]基于类似线性匹配的简单方法确定弯管的棘轮边界时也发现了与图 12a 同样的现象。从图 13 中还可以看到,按照 C-TDF 确定的棘轮边界比极限载荷值还大。ABALLA 等^[10]认为按照 C-TDF 确定的应该是安定区。为了解决弯管在较小内压作用下的棘轮边界问题,ABALLA 等^[10]建议通过弯管棘轮效应试验来确定其弹性安定边界和塑性安定边界。目前来看,Ohno-Wang 模型结合 C-TDF 进行弹塑性有限元分析确定的棘轮边界,根据 C-TDF 的说法,该棘轮边界是安定区域;而线弹性迭代线性匹配法所得结果应该是棘轮边界。具体哪种方法更接近实际情况,需要未来学者进行更多的试验验证。



(a) 内压与弯曲载荷之间的关系^[10]



(b) 线性匹配法确定的棘轮边界

图 13 文献[10]与线性匹配法确定的棘轮边界的对比

Fig.13 Comparison of ratchet limit determined by the reference[10] and LMM

4.3 安定分析

到目前为止,研究人员^[7-8]对线性匹配法进行了大量的拓展研究,发现该方法是一种高效、快捷的安定评估方法。同时,线性匹配方法已被欧盟的 R5 标准引入,并建议用于确定高温结构的完整性评估。因此,本文利用线性匹配法确定了 90°弯管的弹性安定边界,如图 14 所示。

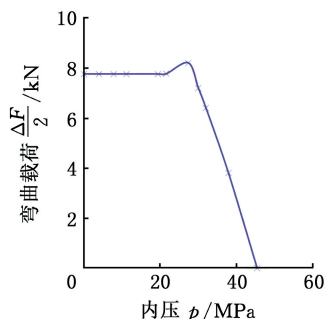


图 14 90°弯管的安定极限

Fig.14 Shakedown limit of 90° elbow pipe

5 结论

本文首先进行了 90°弯管在内压和面内弯曲载荷作用下的棘轮效应试验,结果发现最大棘轮应变发生在弯管的顶线位置处,且环向棘轮应变比轴向棘轮应变大。棘轮应变会缩减弯管的疲劳寿命,为了防止棘轮效应,本文分别基于 Ohno-Wang 模型结合 C-TDF 的弹塑性有限元分析和线弹性迭代的线性匹配法,预测了核电站 90°弯管在内压和面内弯曲载荷作用下的极限载荷、安定载荷和棘轮边界,得到以下几点结论:

(1)比较两倍弹性斜率准则、切线相交准则和线性匹配法确定的极限载荷,最大误差为 10.78%,发现线性匹配方法是一种高效、快捷的简单方法。

(2)比较 Ohno-Wang 模型结合 C-TDF 的弹塑性有限元分析和线弹性迭代的线性匹配法确定的棘轮边界,结果发现:当内压在 20~35 MPa 之间时,两种方法确定的棘轮边界吻合的很好;当内压小于 20 MPa 时,两种方法的预测结果开始分叉,呈现不同的趋势。同样,当 $0.45 < X < 0.75$ 时,两种方法确定的棘轮边界吻合很好;当 $X < 0.45$ 时,两种方法的预测结果开始分叉,呈现不同的趋势。

(3)按照 C-TDF 方法确定的棘轮边界应该是安定边界。为了解决弯管在较小内压作用下的棘轮边界问题,ABALLA 等^[10]建议通过弯管棘轮效应试验来确定其弹性安定边界和塑性安定边界。

(4)按照线性匹配法确定了 90°弯管在内压和面内弯曲载荷作用下的安定边界和棘轮边界,便于工程应用。

参考文献:

[1] 郑小涛. 复杂条件下结构的安定分析与评价方法研究[D]. 上海:华东理工大学,2011.
ZHENG Xiaotao. Investigation on Shakedown Anal-

ysis and Evaluation Method of Structures under Complicated Conditions[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2011.

[2] 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.

[3] OHNO N, WANG J D. Kinematic Hardening Rules with Critical State of Dynamic Recovery, Part II: Application to Experiments of Ratchetting Behavior [J]. International Journal of Plasticity, 1993, 9: 391-403.

[4] BARI S, HASSAN T. Anatomy of Coupled Constitutive Models for Ratchetting Simulation [J]. International Journal of Plasticity, 2000, 16: 381-409.

[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 Xiaohui. A Study on the Ratchetting and Shakedown Behavior of Pressurized Piping Components under Cyclic Loading [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.

[6] ASADA S, YAMASHITA N, OKAMOTO A, et al. Verification of Alternative Criteria for Shakedown Evaluation Using Flat Head Vessel [J]. ASME PVP, 2002, 439:17-23.

[7] YAMAMOTO Y, YAMASHITA N, TANAKA M. Evaluation of Thermal Stress in Plastic FEA [J]. ASME PVP, 2002, 439:3-10.

[8] PONTER A R S, CHEN H F. A Minimum Theorem for Cyclic Load in Excess of Shakedown, with Application to the Evaluation of a Ratchet Limit [J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2001; 20 (4): 539-553.

[9] CHEN H F, PONTER A R S. A Method for the Evaluation of a Ratchet Limit and the Amplitude of Plastic Strain for Bodies Subjected to Cyclic Loading [J]. European Journal of Mechanics A/Solids, 2001, 20(4): 555-571.

[10] ABDALLA H F, MEGAHED M M, YOUNAN M Y A. Comparison of Pipe Bend Ratchetting/Shakedown Test Results with the Shakedown Boundary Determined Via a Simplified Technique [C] // Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Division Conference. Prague, 2009:77403.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:陈小辉,女,1982年生,副教授、博士。研究方向为压力容器及管道循环塑性行为和可靠性。发表论文 50 余篇。
E-mail:chenxh@neuc.edu.cn。