

含内局部减薄缺陷高温弯管蠕变极限载荷及其安全评定*

CREEP LIMIT LOAD AND SAFETY ASSESSMENT OF PIPE BENDS WITH INNER LOCAL WALL THINNING DEFECT AT HIGH TEMPERATURE

李 建** 周昌玉 薛吉林

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 南京 211816)

LI Jian ZHOU ChangYu XUE JiLin

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

摘要 根据 P91 材料高温等时应力应变本构关系,对高温含内局部减薄缺陷弯管的蠕变极限载荷进行了研究。研究表明,高温蠕变极限载荷在蠕变初期急剧下降,之后下降趋缓,该现象反映了高温下材料蠕变劣化过程。不同应变准则下蠕变极限载荷变化规律一致。根据有限元计算结果,提出了与蠕变时间无关的蠕变极限载荷计算方法,得到了含内局部减薄缺陷高温弯管的安全评定方法。

关键词 高温 局部减薄 弯管 蠕变极限载荷 有限元

中图分类号 O346.1

Abstract Based on high temperature isochronous stress-strain curves of P91 steel, the creep limit load of pipe bends with inner local wall thinning defect was studied by finite element analysis. The results show that at the beginning of the creep stage, the creep limit load has a sharp drop, afterwards, and it then declines gently, which shows creep degradation process of high temperature material. The trends of the creep limit load variation according to different strain criteria are basically agreement. Based on the finite element results, the time-independent creep expressions are proposed, and the safety assessment method of pipe bends with inner local wall thinning defect at high temperature is acquired.

Key words High temperature; Local wall thinning; Pipe bends; Creep limit load; Finite element

Corresponding author: ZHOU Changyu, E-mail: cy_zhou@njtech.edu.cn, Tel: /Fax: +86-25-58139951

The project supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK2008373).

Manuscript received 20131225, in revised form 20140516

引言

高温弯管广泛地应用于石油化工及核电等行业^[1]。弯管是压力管道系统中较为脆弱的结构,很多管道系统事故是由弯管部位的破坏引起的。弯管可以改变管线走向、吸收系统中由热膨胀^[2]而产生的力与力矩并释放能量^[3],是管道系统正常运行必不可少的元件。由于腐蚀、侵蚀以及机械损伤,弯管部位存在各种缺陷,对管道运行带来很大的安全隐患。另外,对于高温下长期服役的弯管,还会发生蠕变、热疲劳等现象,使得弯管材料性能不断劣化^[4],降低高温弯管的承载能力^[5]。针对含缺陷高温弯管的极限载荷开展研究,显然是十分有意义的。

多年来国内外研究人员进行了很多关于弯管的极限载荷研究,特别是常温下弯管的极限载荷研究。国

内的郭茶秀等^[6],国外的 Chattopadhyay J 等^[7]、Kim Y J 等^[8]、Michael T C^[9]等人对无缺陷弯管极限载荷作了深入细致的研究。国内的段志翔等^[10]、陈刚等^[11]、张藜等^[12]等人,国外的 Yun-Jae Kim 等^[13]、J. Chattopadhyay 等^[14]对含缺陷弯管的极限载荷作了大量研究,包含平面裂纹、凹坑以及局部减薄等不同缺陷形式。目前,国内外关于高温弯管的研究多集中于承载情况下的寿命预测问题^[15-16],有关高温弯管的极限载荷问题则还需要系统深入的探讨。与常温有所不同,高温下弯管有两种可能失效模式,一是完全由于弯管蠕变导致的失效,二是弯管发生蠕变之后由于塑性变形导致的失效。当弯管失效模式表现为蠕变失效时,用蠕变极限载荷表示失效载荷;当弯管失效模式为塑形失效时,用塑形极限载荷表示失效载荷。孙志刚等^[17]基于高温 P91 钢材料的高温蠕变本构方程,通过

* 20131225 收到初稿, 20140516 收到修改稿。江苏省自然科学基金资助项目 (BK2008373) 资助

**李 建,男,1989 年 9 月生,江苏扬州人,汉族。硕士研究生,主要研究方向为高温管道可靠性,安全评价及寿命预测研究。

有限元分析方法对含体积型缺陷直管蠕变极限载荷开展了研究与探讨,提出了含缺陷高温压力管道的安全评定方法。由于弯管与直管结构上的差异,弯管蠕变极限载荷比直管复杂,直管的研究结果不能适用于弯管。本文根据 P91 钢蠕变本构方程,考虑到结构进入到大范围蠕变,通过三维非线性有限元分析研究内压与弯矩组合下含内局部减薄缺陷高温弯管的蠕变极限载荷,在此基础上提出含内缺陷高温弯管的安全评定方法。

1 有限元分析

1.1 模型尺寸

本文研究工作对象包括无缺陷弯管与含局部减薄弯管。无缺陷弯管尺寸见表 1。含缺陷弯管尺寸统一取为外径 $D_o=323.9\text{ mm}$,弯曲角度为 90° ,厚度 $T=28.6\text{ mm}$,弯曲半径 $R=438.05\text{ mm}$ 。为了降低直管长度对蠕变极限载荷的影响,直管应足够长($L>3r$)^[11], L 选取 $1\ 000\text{ mm}$ 。 r 表示弯管截面的平均半径, L 表示相连直管的长度。本文的局部减薄缺陷为外拱内壁减薄,无量纲的缺陷尺寸参数为 $a=\gamma/45^\circ$, $b=\phi/180^\circ$, $c=C/t$,弯管模型见图 1。根据 L16(4^5) 正交设计表选取 16 个计算模型,见表 2。

表 1 无缺陷弯管尺寸

弯管尺寸		弯曲半径	
Dimensions/(mm×mm)	Bend radius/mm	R/r	r/T
$\Phi 323.9\times 21.45$	438.05	2.90	7.05
$\Phi 323.9\times 28.6$	438.05	2.97	5.16
$\Phi 323.9\times 21.45$	638.05	4.22	7.05
$\Phi 323.9\times 28.6$	638.05	4.32	5.16

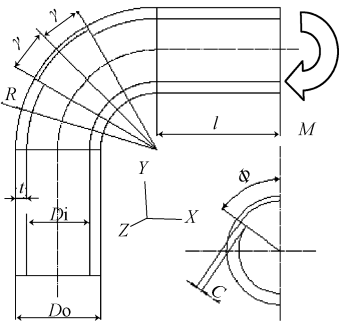


图 1 含局部减薄缺陷弯管模型

Fig. 1 Model of pipe bend with local wall thinning defect

1.2 有限元计算模型

有限元计算采用 Abaqus 软件。由于几何及载荷的对称性,建模时取 1/2 结构作为计算模型,内表面施加一定的内压 P ,在右端面施加对应的轴向力 P_1 。右端面施加沿 Z 轴负方向的弯矩。对称面上采用 XOY

面内的对称约束(约束 Z 方向的位移, X 和 Y 方向的转动),左端面为固定约束(约束 6 个方向的自由度)。有限元网格划分所用的单元为六面体 20 节点二次减缩单元(C3D20R),如图 2 所示。经过网格无关性验证,有限元结果变化小于 0.02% ,满足精度要求。

表 2 含局部减薄缺陷弯管的尺寸(蠕变时间, $t=100\ 000\text{ h}$)

Tab. 2 Dimension parameters of pipe bends with local wall thinning defects (creep time, $t=100\ 000\text{ h}$)

管号 Number	管子规格尺寸 Dimensions			蠕变极限内压归一化 Normalized creep limit pressure P_{10}/P_0	蠕变极限弯矩归一化 Normalized creep limit moment M_{10}/M_0
	a	b	c		
1#	0.05	0.1	0.1	0.993	0.978
2#	0.05	0.25	0.25	0.989	0.964
3#	0.05	0.5	0.5	0.985	0.901
4#	0.05	0.75	0.75	0.571	0.625
5#	0.125	0.1	0.25	0.991	0.965
6#	0.125	0.25	0.1	0.992	0.974
7#	0.125	0.5	0.75	0.473	0.648
8#	0.125	0.75	0.5	0.790	0.865
9#	0.25	0.1	0.5	0.726	0.954
10#	0.25	0.25	0.75	0.730	0.924
11#	0.25	0.5	0.1	0.982	0.959
12#	0.25	0.75	0.25	0.844	0.870
13#	0.375	0.1	0.75	0.398	0.935
14#	0.375	0.25	0.5	0.643	0.931
15#	0.375	0.5	0.25	0.882	0.897
16#	0.375	0.75	0.1	0.973	0.917

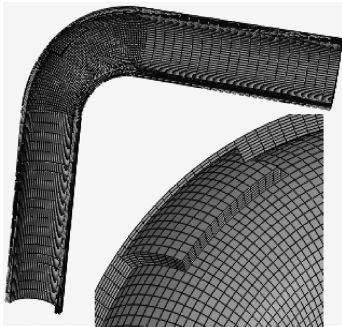


图 2 有限元网格

Fig. 2 Finite element mesh

1.3 高温弯管蠕变极限载荷确定方法

高温条件下,材料性质的劣化与时间相关,因此材料本构关系也是随时间不断变化的。将某一特定时间下材料的应力-应变曲线定义为该时刻的等时应力-应变曲线。彭剑在前人所做的 P91 蠕变断裂实验基础上,结合了 P91 的高温本构方程,采用 2% 的应变控制^[18]。将等时应力应变曲线 2% 应变所对应的应力值定义为材料等效屈服强度 σ_t ,2% 应变所对应的载荷定义为蠕变极限载荷。根据文献^[19] P91 钢在 600°C 下高温蠕变本构方程得到 P91 钢等时应力应变曲线,

如图 3 所示。

根据常温下弯管弹塑性极限载荷的研究经验,弯管的刚度低于直管,因此弯曲部位更易发生局部失稳,截面椭圆化变形,使得大变形效应对结构极限载荷影响不容忽视^[3]。本文采用大变形分析方法,结合等时应力应变曲线研究含局部减薄缺陷弯管的高温蠕变极限载荷。

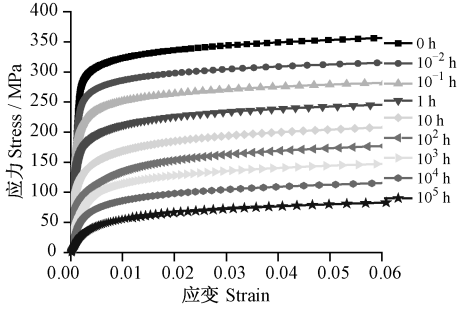


图 3 P91 钢的等时应力应变曲线(600℃)

Fig.3 Isochronous stress-strain curves of P91 steel(600℃)

2 结果与讨论

2.1 无缺陷高温弯管的蠕变极限载荷

对于内压与弯矩单独作用下的无缺陷弯管,通过有限元分析得到规定时间下蠕变极限载荷,将结果按照 $P_0(t)/P_0(0)$, $M_0(t)/M_0(0)$ 归一化形式处理,见图 4。其中所选模型尺寸为 $\Phi 329 \times 28.6$, 弯曲半径 $R = 438.05 \text{ mm}$, t 表示蠕变时间, $\sigma_f(t)$ 表示 t 时刻的等效屈服强度, $P_0(t)$ 表示 t 时刻的极限压力, $M_0(t)$ 表示 t 时刻的极限弯矩, $\sigma_f(0)$ 表示 $t = 0$ 时刻的等效屈服强度, $P_0(0)$ 表示 $t = 0$ 时刻的极限压力, $M_0(0)$ 表示 $t = 0$ 时刻的极限弯矩。

从图 4 中可以发现不同时刻极限压力比与等效屈服强度比吻合,而极限弯矩比与等效屈服强度比近似吻合,结果略小。考虑工程问题的误差,可以假设

$$\frac{M_0(t)}{M_0(0)} \approx \frac{P_0(t)}{P_0(0)} \approx \frac{\sigma_f(t)}{\sigma_f(0)} \tag{1}$$

于是

$$\frac{M_0(t)}{\sigma_f(t)} \approx \frac{M_0(0)}{\sigma_f(0)}, \frac{P_0(t)}{\sigma_f(t)} \approx \frac{P_0(0)}{\sigma_f(0)} \tag{2}$$

因此

$$P_0(t) \approx f(r, T, R) \sigma_f(t), M_0(t) \approx h(r, T, R) \sigma_f(t) \tag{3}$$

图 4 结果还说明,不同的应变控制下蠕变极限载荷规律相同。根据有限元分析结果可以认为,内压、弯矩单独作用下的计算公式可以适用于任意蠕变时间下。

如果采用线性坐标,可以看出蠕变初期 ($0\text{h} \leq t \leq$

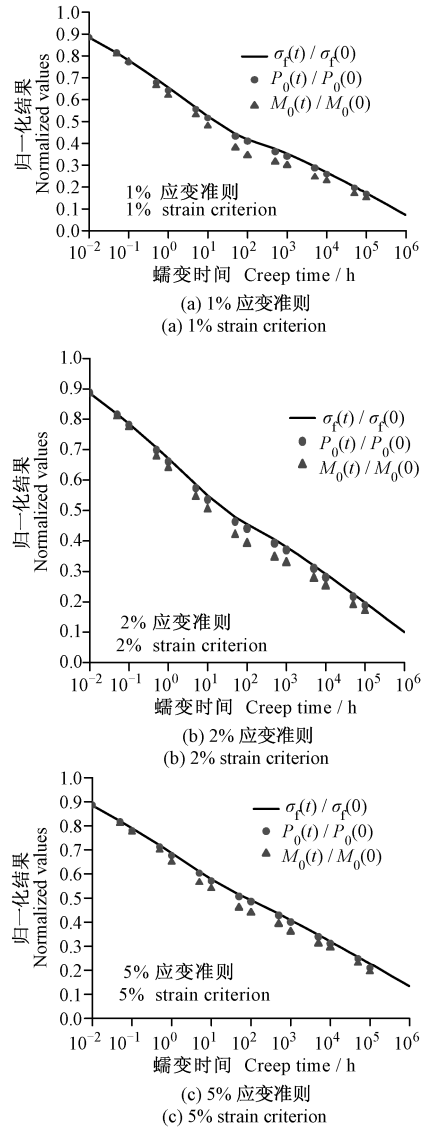


图 4 无缺陷弯管蠕变极限载荷归一化结果

Fig.4 Normalized values of pipe bend without defects with the creep time changes

1 000 h), 蠕变极限载荷急剧下降, 约 63%; 之后 ($1\ 000\text{ h} < t \leq 100\ 000\text{ h}$), 蠕变极限载荷缓慢下降, 至 $t = 100\ 000\text{ h}$ 时, 下降了 80%, 这反映了材料的蠕变劣化过程。

对于内压和弯矩组合时的蠕变极限载荷,通过有限元分析得到一些特定时间下蠕变极限载荷,将结果按照 $M_L(t)/M_0(t)-P_L(t)/P_0(t)$ 归一化形式处理,其中, $P_L(t)$ 表示内压弯矩组合载荷下 t 时刻的蠕变极限压力, $M_L(t)$ 表示内压弯矩组合载荷下 t 时刻的蠕变极限弯矩,所选模型尺寸见表 1。

计算结果发现,不同时间下各蠕变极限载荷曲线几乎重合在一起,由此可得如下简式

$$m = \frac{M_L(t)}{M_0(t)} \approx L(p, r, T, R) \tag{4}$$

其中,

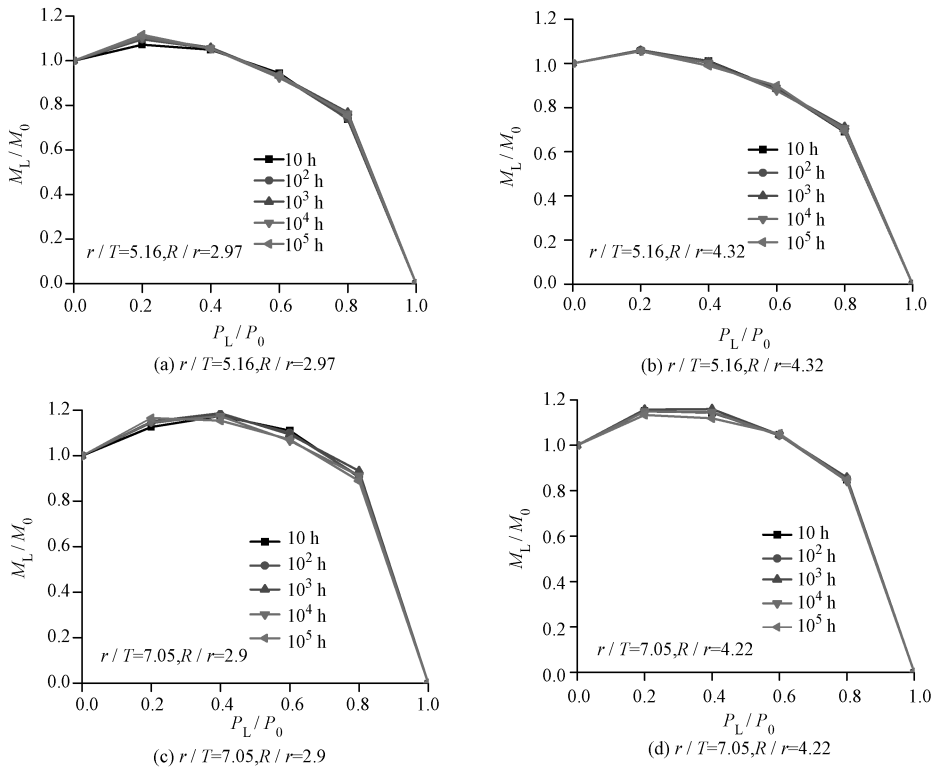


图 5 无缺陷弯管在内压与弯矩组合载荷下蠕变极限载荷归一化结果

Fig. 5 Normalized values of pipe bend under combined pressure and bending moment without defects with the creep time changes

$$p = \frac{P_L(t)}{P_0(t)} \quad (0 \leq p \leq 1) \quad (5)$$

m 表示极限弯矩的归一化形式, p 表示极限内压归一化形式。说明式(4)中 m 与蠕变时间无关, 只与弯管几何尺寸相关, 内压弯矩组合时的研究结果同样适用于任意蠕变时间下。

2.2 含局部减薄缺陷高温弯管的安全评定

对于内压与弯矩单独作用下的有缺陷弯管, 同样通过有限元分析得到特定时间下蠕变极限载荷, 按照 $P_0(t)/P_0(0), M_0(t)/M_0(0)$ 归一化形式处理, 见图 6。图 6 结果与图 4 结果一致, 由此可以得到与公式(1)相同的结论。

根据含局部减薄缺陷高温弯管有限元分析, 得到 4 个不同模型在特定时间下蠕变极限载荷, 将结果按照 $M_{LL}(t)/M_{L0}(t) - P_{LL}(t)/P_{L0}(t)$ 归一化形式处理, 如图 7 所示, 其中, $P_{L0}(t)$ 表示含局部减薄缺陷弯管内压载荷下 t 时刻的蠕变极限压力, $M_{L0}(t)$ 表示含局部减薄缺陷弯管弯矩载荷下 t 时刻的极限弯矩, $P_{LL}(t)$ 表示含局部减薄缺陷弯管压力弯矩组合载荷下 t 时刻的蠕变极限压力, $M_{LL}(t)$ 表示含局部减薄缺陷弯管内压弯矩组合载荷下 t 时刻的蠕变极限弯矩。可以发现当减薄深度很浅时, 不同时间下各曲线基本吻合在一起, 和无缺陷时曲线规律相同; 当减薄深度很深时, 蠕变时间较长 ($t = 100\,000\text{ h}$) 时, 蠕变极限载荷曲线与其它时间下的曲线有一定的分散性。若忽略这种差异

性, 同样可以近似认为

$$m_L = \frac{M_{LL}(t)}{M_{L0}(t)} \approx L(p_L, r, T, R, a, b, c) \quad (6)$$

其中,

$$p_L = \frac{P_{LL}(t)}{P_{L0}(t)} \quad (0 \leq p_L \leq 1) \quad (7)$$

m_L 表示含局部减薄缺陷极限弯矩的归一化形式, p_L 表示含局部减薄缺陷极限内压的归一化形式。

内压及弯矩单独作用下含缺陷弯管蠕变极限载荷见表 2。需要指出, 表 2 中的蠕变极限载荷计算结果只是在特定时间 $t = 100\,000\text{ h}$ 下的。表中的结果通过了简单的归一化处理。通过方差分析还可以发现, 对于内压作用下的局部减薄弯管, 减薄的深度 c 对蠕变极限载荷的影响作用特别显著, 而轴向减薄长度 a 及环向减薄长度 b 影响很小; 对于弯矩作用下的局部减薄弯管, 减薄深度 c 及环向减薄长度 b 对蠕变极限载荷的影响很显著, 而轴向减薄长度 a 影响很小。由于时间与本文提出的蠕变极限载荷形式无关, 根据表 2 中的数据可以回归得到如下公式:

含局部减薄缺陷弯管蠕变极限压力

$$P_{L0}/P_0 = 1 - 1.4a^{0.306}b^{0.1}c^{1.624} \quad (8)$$

其中, $P_0/P_0^s = \sqrt{3}/\sqrt{\left(\frac{R}{R-r}\right)^2 + \frac{R}{R-r} + 1}$ (9)

$$P_0^s = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_f \frac{T}{r} \quad (10)$$

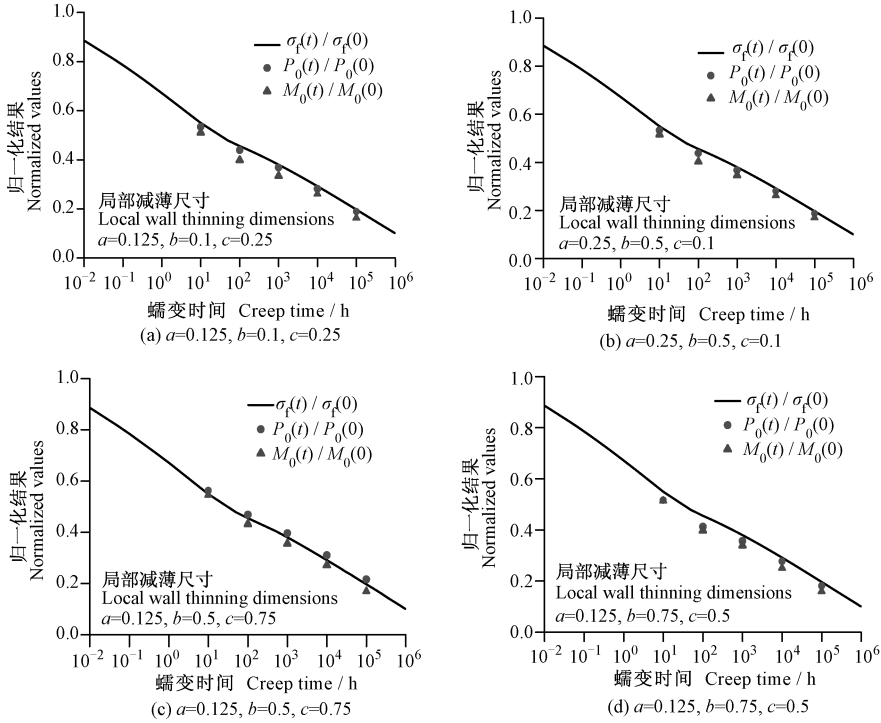


图 6 含局部减薄缺陷弯管蠕变极限载荷归一化结果

Fig. 6 Normalized values of pipe bend with local wall thinning defect with the creep time

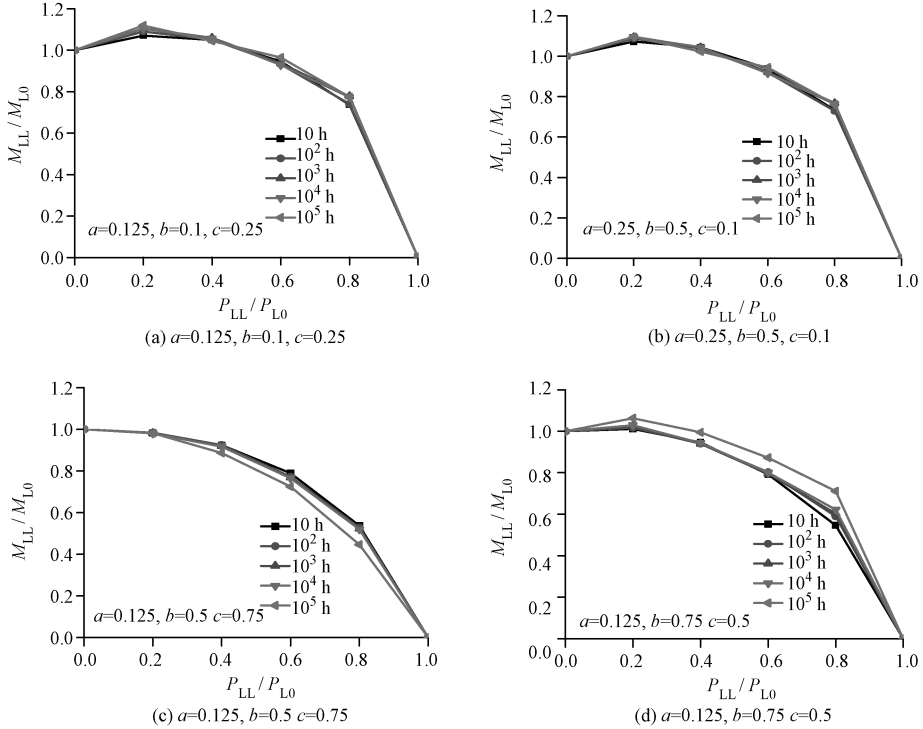


图 7 含局部减薄缺陷弯管在内压与弯矩组合载荷下蠕变极限载荷归一化结果

Fig. 7 Normalized values of pipe bend with local wall thinning defect under combined pressure and bending moment with the creep time changes

含局部减薄缺陷弯管的蠕变极限弯矩

$$M_{L0}/M_0 = 1 - 1.02a^{0.115}b^{1.03}c^{1.38} \quad (11)$$

其中, $M_0/M_0^S = A_c (\lambda + k_c)^{n_c}$ (12)

$$M_0^S = 4r^2 T \sigma_f \quad (13)$$

$$\begin{cases} A_c = 0.800 (r/t)^{-0.017} \\ k_c = 1.460 (r/t)^{-0.911} \\ n_c = 0.423 (r/t)^{0.127} \end{cases} \quad (14)$$

蠕变时间 $t = 100\,000$ h 时内压弯矩组合下蠕变极

限载荷结果见图 8,可以看出当缺陷减薄深度特别深时(4#管),极限弯矩随着压力的增加几乎接近直线下降,因此根据图中结果取公式(15)所表示的曲线作为蠕变极限载荷曲线。

$$M_{LL}/M_{L0} = 1 - P_{LL}/P_{L0} \tag{15}$$

当弯管所载荷在图中对应的点在该曲线下方时,认为弯管是安全的,而所载荷在图中对应的点在该曲线上方时,认为此时弯管是不安全的。结合上一小节不同时间下不同应变准则的分析结果,可以将此极限曲线应用于其他蠕变时间。

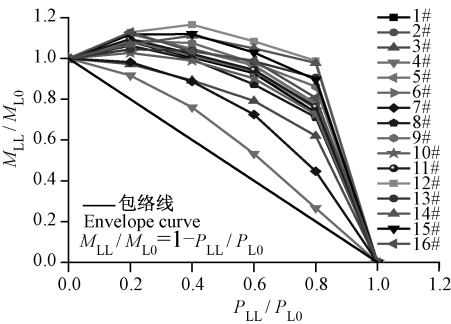


图 8 内压弯矩组合载荷下含局部减薄缺陷弯管蠕变极限载荷 (蠕变时间, $t = 100\,000\text{ h}$)

Fig. 8 The creep limit load curves of local wall thinning pipe bends under combined pressure and bending moment (creep time, $t = 100\,000\text{ h}$)

3 结论

根据本文的无缺陷弯管和含局部减薄缺陷弯管归一化蠕变极限载荷研究,可以得到如下结论:

1) 蠕变初期蠕变极限载荷急剧下降,长期蠕变下蠕变极限载荷下降缓慢。该结果反映了材料高温蠕变下的劣化过程。

2) 不同高温蠕变时间下,蠕变极限压力比、弯矩比和等效屈服强度比近似相等,根据有限元分析结果可以认为蠕变极限载荷计算公式可以适用于任意蠕变时间,不同蠕变应变控制准则对蠕变极限载荷规律没有影响。

3) 对含减薄缺陷弯管,内压下减薄厚度 c 对蠕变极限载荷的影响作用特别显著;弯矩下减薄厚度 c 以及环向减薄长度 b 对蠕变极限载荷影响特别显著。

4) 在内压与弯矩组合载荷条件下,减薄深的弯管蠕变极限弯矩随着内压的增加几乎呈直线下降,由此,得到高温弯管的安全评定方法。

参考文献 (References)

[1] 李兴华, 曹雷生, 聂林成. 基于 ANSYS 的高温高压管道弯头塑性极限分析[J]. 核动力工程, 2011, 32(1): 120-124.
LI XingHua, CAO LeiSheng, NIE LinCheng. Analysis of plastic

limit on pipe elbow unde high temperature and pressure based on ansys[J]. Nuclear Power Engineering, 2011, 32(1): 120-124 (In Chinese).
[2] 段志祥, 沈士明. 内压与弯矩联合作用下局部减薄弯管的塑性极限载荷[J]. 核动力工程, 2007, 28(6): 87-91.
DUAN Zhixiang, SHEN Shiming. Plastic limit load of elbows with local thinned area under combined internal pressure and in-plane closing bending moment[J]. Nuclear Power Engineering, 2007, 28(6): 87-91 (In Chinese).
[3] Jin-Weon Kim, Man-Gyun Na, Chi-Yong Park. Effect of local wall thinning on the collapse behavior of pipe elbows subjected to a combined internal pressure and in-plane bending load[J]. Nuclear Engineering and Design, 2008, 238: 1275-1285.
[4] 凌 祥, 涂善东. 高温构件寿命评价技术研究现状和进展[J]. 机械工程材料, 2002, 26(10): 4-6; 2002, 26(10): 43.
LING Xiang, TU ShangDong. Status and development of life assessment techniques for high temperature components [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2002, 26(10): 4-6; 2002, 26(10): 43 (In Chinese).
[5] J. P. Rouse, M. Z. Leom, W. Suna, T. H. Hyde, A. Morris. Steady-state creep peak rupture stresses in 90° power plant pipe bends with manufacture induced cross-section dimension variations [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2013, 105-106: 1-11.
[6] 郭茶秀, 魏新利, 刘 宏, 李培宁. 内压及扭矩载荷下无缺陷弯管的应力分析[J]. 机械强度, 2002, 24(3): 391-393.
GUO ChaXiu, WEI XinLi, LIU Hong, LI PeiNing. Stress analysis of undefected pipe bends under the loads of internal pressure of torsion[J]. Journal of Mechanical Strength, 2002, 24(3): 391-393 (In Chinese).
[7] Chattopadhyay J, Nathani D K, Dutta B K, et al. Closed-Form Collapse Moment Equations of Elbows Under Combined Internal pressure and In-Plane Bending Moment [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, 2002, 122: 431-436.
[8] Kim Y J, Oh C S. Closed-form plastic collapse loads of pipe bends under combined pressure and in-plane bending [J]. Engng Fract Mech, 2006, 73: 1437-1454.
[9] Michael T C, Veerappan A R, Shanmugam S. Effect of ovality and variable wall thickness on collapse loads in pipe bends subjected to in-plane bending closing moment [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 79: 138-148.
[10] 段志祥, 沈士明. 外拱内壁局部减薄弯管极限内压有限元分析[J]. 核动力工程, 2006, 27(6): 52-55.
DUAN ZhiXiang, SHEN ShiMing. Finite element analysis of plastic limit pressure of elbows with local thinned area on inner wall of extrados [J]. Nuclear Power Engineering, 2006, 27(6): 52-55 (In Chinese).
[11] 陈 钢, 张传勇, 刘应华. 内压和面内弯矩作用下含局部减薄弯头塑性极限载荷的有限元分析[J]. 工程力学, 2005, 22(2): 43-49.
CHEN Gang, ZHANG ChuanYong, LIU YingHua. Finite element analysis of plastic limit loads of locally thinned elbows under internal pressure and in-plane bending moment[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(2): 43-49 (In Chinese).

- [12] 张 黎, 柳曾典. 内压作用下局部减薄弯头的极限载荷的有限元分析[J]. 压力容器, 2000, 17(3): 29-33.
ZHANG Li, LIU CengDian. Finite element analysis on the collapse load of local thinned pressurized elbow[J]. Chinese Pressure Vessel Technology, 2000, 17(3): 29-33 (In Chinese).
- [13] Yun-Jae Kim, Jonghyun Kim, Joonghyuk Ahn, Seok-Pyo Hong, Chi-Yong Park. Effects of local wall thinning on plastic limit loads of elbows using geometrically linear FE limit analyses[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008(75): 2225-2245.
- [14] J. Chattopadhyay, A. K. S. Tomar. New plastic collapse moment equations of defect-free and throughwall circumferentially cracked elbows subjected to combined internal pressure and in-plane bending moment[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006 (73): 829-854.
- [15] T. H. Hyde, W. Sun, J. A. Williams. Life estimation of pressurised pipe bends using steady-state creep reference rupture stresses[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2002(79): 799-805.
- [16] A. H. Yaghi, T. H. Hyde, A. A. Becker, W. Sun. Parametric peak stress functions of 90° pipe bends with ovality under steady-state creep conditions[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2009(86): 684-692.
- [17] 孙志刚, 贺小华, 周昌玉. 含内双凹坑高温压力管道面内极限弯矩[J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2013, 35(2): 91-94.
SUN ZhiGang, HE XiaoHua, ZHOU ChangYu. In-plane limit bending moment analysis of pressure pipe with internal double pits at high temperature[J]. Journal of Nanjing University of Technology: Natural Science Edition, 2013, 35(2): 91-94 (In Chinese).
- [18] Jian PENG, Changyu ZHOU, Jilin XUE, Xiaohua HE, Qiao DAI. Finite Element Simulation of Limit Load of Components at High Temperature[J]. Materials Science Forum Vols, 2012; 704-705: 1291-1297.
- [19] Theofel H. Investigations on matching P91 welds under creep loading, AIF project No. 9300 [R]. Stuttgart: Material Testing Institute University of Stuttgart, 1997.