

◀石油管工程▶

双金属复合管屈曲失效机理及临界载荷研究*

肖世轩 吕志阳 朱学铭 曲琳 梁学泉

(中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院)

肖世轩, 吕志阳, 朱学铭, 等. 双金属复合管屈曲失效机理及临界载荷研究 [J]. 石油机械, 2024, 52 (5): 138-144.

Xiao Shixuan, Lü Zhiyang, Zhu Xueming, et al. Research on buckling failure mechanism and critical load of bimetallic composite pipe [J]. China Petroleum Machinery, 2024, 52 (5): 138-144.

摘要: 为探究双金属复合管的屈曲失效机理, 利用 ABAQUS 软件建立了双金属复合管有限元模型, 考虑成型残余应力的存在, 分析了弯曲过程中弯矩、椭圆度和内衬褶皱幅值随曲率的变化规律; 研究了内衬管屈服强度、内衬管径厚比以及外基管径厚比对双金属复合管屈曲失效的影响, 并进一步给出了临界弯矩和临界曲率的预测公式。分析结果表明: 屈服强度更高的内衬管可提高复合管的临界弯矩, 但会降低复合管的临界曲率; 更小的内衬管径厚比和外基管径厚比均可提高复合管的临界弯矩和临界曲率; 相较于临界弯矩, 内衬管屈服强度和径厚比的改变对临界曲率影响更为明显, 外基管径厚比的改变则对两者均具有十分明显的影响; 临界弯矩和临界曲率公式预测结果与有限元计算结果的相对误差不超过 4% 和 12%。所得结论可为双金属复合管的设计和安全评价提供参考依据。

关键词: 双金属复合管; 屈曲失效; 内衬褶皱; 径厚比; 临界弯矩; 临界曲率

中图分类号: TE832 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2024.05.018

Research on Buckling Failure Mechanism and Critical Load of Bimetallic Composite Pipe

Xiao Shixuan Lü Zhiyang Zhu Xueming Qu Lin Liang Xuequan

(College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum (Beijing))

Abstract: In order to investigate the buckling failure mechanism of bimetallic composite pipe, the ABAQUS software was used to build a finite element model of it. Then, considering the existence of residual stresses during forming, the variation laws of bending moment, ellipticity and inner lining wrinkling amplitude with curvature during the bending process were analyzed. Finally, the influence of yield strength and radius-thickness ratio of inner lining pipe as well as the radius-thickness ratio of outer base pipe on the buckling failure of bimetallic composite pipe was studied, and the prediction formulas for critical bending moment and critical curvature were further presented. The analysis results show that the inner lining pipe with higher yield strength can increase the critical bending moment of the composite pipe, but will reduce the critical curvature of it. Smaller radius-thickness ratios of inner lining pipe and outer base pipe all can increase the critical bending moment and critical curvature of the composite pipe. Compared to the critical bending moment, the changes in the yield strength and radius-thickness ratio of the inner lining pipe have a more obvious influence on the critical curvature, while the changes in the radius-thickness ratio of the outer base pipe have a very obvious influence on both of them. The relative errors between the

* 基金项目: 中国石油天然气集团有限公司-中国石油大学(北京)战略合作专项“‘一带一路’海外长输管道完整性关键技术研究与应用”(ZLZX2020-05)。

predicted results of the critical bending moment and critical curvature formulas and the finite element calculation results do not exceed 4% and 12% respectively. The conclusions provide a reference for the design and safety evaluation of bimetallic composite pipe.

Keywords: bimetallic composite pipe; buckling failure; inner lining wrinkling; radius-thickness ratio; critical bending moment; critical curvature

0 引 言

双金属复合管作为一种兼具优异耐蚀性能和良好力学性能的管道, 在目前的海洋油气勘探开发中得到了较为广泛的应用。其一般由高强度外基管和耐腐蚀性内衬管组成, 按界面结合形式有冶金结合复合管和机械结合复合管之分^[1]。不同于普通的单层管道, 机械结合复合管在受到海底坍塌、泥石流等产生的载荷作用时, 不仅存在承载能力失效的风险, 还存在因内衬褶皱造成运输能力下降的问题。因此, 对双金属复合管进行屈曲失效分析具有重要的现实意义。

在双金属复合管的成型方法中, 使用较多的为液压成型法。袁林等^[2]建立了三维有限元模型, 对复合管液压成型工艺进行了研究, 指出初始间隙的增大会降低复合管的结合强度; 陈俊文等^[3]则考虑整个复合管制管过程, 包括复合管液压成型后的升温防腐工艺等, 指出升、降温后内外管紧密度会存在一定程度的下降。双金属复合管在服役过程中可能会由于载荷作用而发生屈曲失效。E. S. FOCKE 等^[4]通过试验研究了不同管径的双金属复合管在轴压下的屈曲失效机理; WANG F. C. 等^[5]建立了轴压作用下双金属复合管的有限元模型并进行了参数讨论, 得到了外管可以防止或延缓衬管的局部屈曲, 增强外管厚度或强度可增强复合管承载性能等结论; YUAN L.等^[6-7]考虑了内衬管的初始缺陷, 研究了双金属复合管在受到轴压和弯矩作用时的屈曲失效问题, 并通过参数分析指出了延缓内衬管塌陷的几种方法; ZHAO T. F.等^[8]针对机械复合管卷筒安装问题进行研究, 并分析了不同壁厚下复合管的临界卷绕曲率, 指出复合管的临界卷绕曲率不仅要考虑外管的累计等效塑性应变, 还要考虑内衬管的褶皱分离; I. GAVRIILIDIS 等^[9]研究了循环弯矩作用下复合管的结构响应, 指出不同制造工艺对复合管的不稳定性有明显影响; 郭奕蓉等^[10-11]使用有限元方法研究了复杂载荷作用下双金属复合管的屈曲失效问题, 得到了热载荷会软化内衬管, 从而抑制屈曲等结论; YUAN L.等^[12]和谭丁森^[13]等分别研究了纯弯曲和复杂载荷作用下

带环焊缝双金属复合管的屈曲问题, 研究结果表明, 环焊缝的存在会使内衬管褶皱更早出现; YUAN L.等^[14-15]通过试验和有限元的方法, 研究了弯曲作用下含凹陷复合管的屈曲失效问题, 指出内衬厚度越厚, 基衬分离程度越小, 但当厚度大于 3 mm 时, 这种影响效果变小; P. BARNES 等^[16]通过有限元方法, 研究了双金属复合管的弯曲问题, 指出复合管总体弯矩和曲率对内外管之间的摩擦因数并不敏感。

综上所述, 目前的研究主要关注双金属复合管在受到载荷作用时的内衬褶皱问题和复合管的承载力失效问题, 研究各个因素对双金属复合管屈曲失效的影响, 但是鲜有研究提出对双金属复合管临界弯矩和临界曲率进行预测的公式。本文拟在双金属复合管屈曲失效研究的基础上, 通过有限元模拟并进行大量计算, 拟合出双金属复合管临界弯矩和临界曲率的预测公式, 同时对拟合公式进行了验证。所得结果可为双金属复合管的设计、安全评价提供参考依据。

1 有限元模型建立

采用 ABAQUS 进行双金属复合管的屈曲失效研究。考虑到管道的对称性, 建立 $\frac{1}{2}$ 双金属复合管模型进行数值分析。双金属复合管模型的外基管材料为 X65 管线钢, 内衬管材料为 SS304 不锈钢。内、外管的材料本构关系如图 1 所示, 材料参数及几何尺寸参数如表 1 所示。

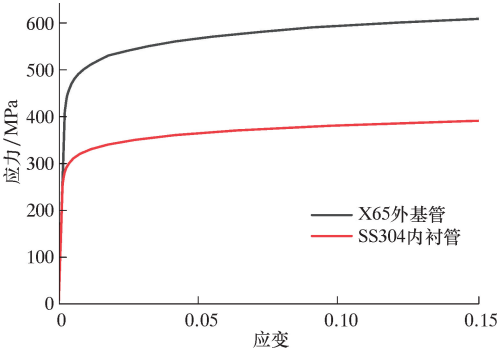


图 1 双金属复合管内、外管材料本构曲线
Fig. 1 Constitutive curves of inner and outer pipe materials of bimetallic composite pipe

表 1 双金属复合管材料参数及几何尺寸参数

Table 1 Material and geometry parameters of bimetallic composite pipe

复合管	钢材	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	直径/mm	壁厚/mm	径厚比	长度/m
外基管	X65	465	210	0.3	323.6	14.3	22.6	1.6
内衬管	SS304	277	198	0.3	291.0	3.0	98.3*	1.6

注：* 指成型后的管道径厚比。

在网格划分上，内、外管均采用三维实体单元 C3D8R 进行网格划分，且内、外管网格划分策略一致。管道径向划分为 4 个单元，环向划分为 60 个单元，轴向划分为 152 个单元；在管道变形较为严重的中心处，划分更为密集的网格。管道内外管之间的接触设置为法向硬接触，采用有限滑移的方式，忽略两管之间的摩擦力。所建立的有限元模型如图 2 所示。

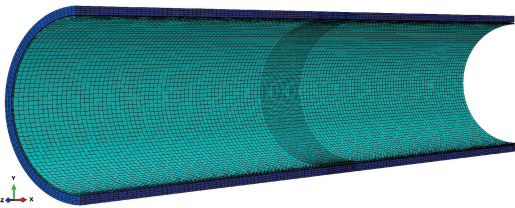


图 2 双金属复合管有限元模型

Fig. 2 Finite element model of bimetallic composite pipe

机械式双金属复合管内外管之间通常会存在一定的残余应力，有关研究表明，残余应力对复合管的力学性能存在一定的影响^[17-20]。因此，在研究含凹陷的双金属复合管屈曲失效前，需先对双金属复合管成型过程进行模拟。这里选用液压成型法：首先将内外管套在一起，且两者之间存在一定的初始间隙；然后对内衬管内壁施加均布压力，使内衬管发生膨胀变形后与外基管紧密接触；继续施加压力，使内外管一起发生膨胀变形；压力卸载后，外基管的恢复量大于内衬管，从而使两者之间存在一定的接触应力。成型过程示意如图 3 所示。

完成双金属复合管成型模拟后，需将复合管的应力状态导入到有限元模型中。为此，采用 ABAQUS

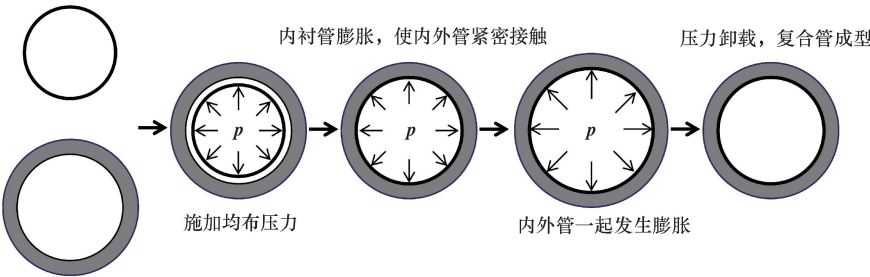


图 3 双金属复合管成型过程示意

Fig. 3 Schematic diagram for forming process of bimetallic composite pipe

预定义场中初始状态的方式引入复合管的成型残余应力，然后再设置边界条件进行双金属复合管载荷施加^[21]。边界条件加载示意如图 4 所示。

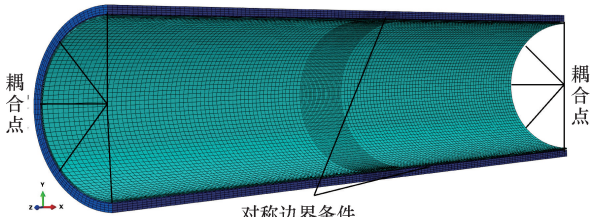


图 4 双金属复合管边界条件

Fig. 4 Boundary conditions of bimetallic composite pipe

首先将有限元模型 $x=0$ 平面设置对称约束，然后在 $z=0$ 和 $z=L$ 面中心建立 2 个参考点，使用运动耦合的方式约束复合管端面节点与参考点的自由度，使用在参考点施加转角的方式实现弯矩加载。

2 结果与讨论

图 5 为双金属复合管在载荷作用下弯矩-曲率和椭圆度-曲率关系曲线。这里对弯矩和曲率进行了无量纲化处理， $M_0 = \sigma_{cy} D_0^2 t_c$ ， $\kappa_0 = t_c / D_0^2$ ， $D_0 = D_c - t_c$ 。其中： M_0 、 κ_0 、 D_0 分别为双金属复合管无量纲弯矩、曲率和中性层直径； D_c 、 t_c 、 σ_{cy} 分别为外基管的直径、壁厚和屈服强度。图 5 中 M 为计算的真实弯矩， κ 为计算的真实曲率。由图 5 可知：在曲率较小时，复合管的弯矩随曲率先近似线性增加，随着弯矩的增大，曲线的变化率逐渐降低，说明复合管此时的刚度开始逐渐下降；曲率达到 $0.90\kappa_0$ 弯矩达到最大值，最大弯矩约为

1.24 M_0 , 随后复合管的承载能力开始下降, 复合管发生屈曲失效, 极限弯矩对应的曲率即为复合管的临界曲率。由复合管的椭圆度-曲率关系曲线可知, 随着曲率的增加, 外基管的椭圆度不断增加, 且变化率也在不断增加; 当曲率大于复合管的临界曲率后, 椭圆度的变化率再次明显增加, 说明此时复合管发生了屈曲失效, 对应的管道椭圆度为 5.14%。为保证管道的安全运行, 应限制管道的椭圆度在安全范围以内。

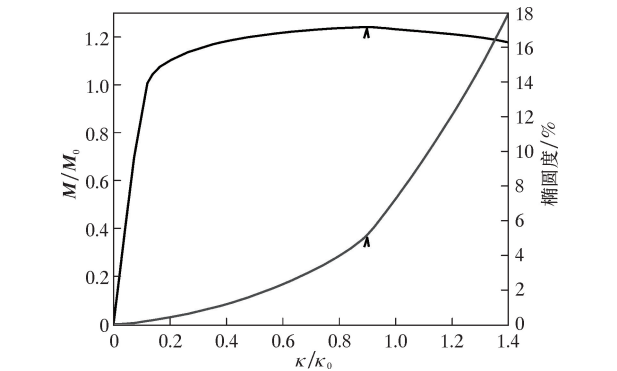


图 5 双金属复合管弯矩-曲率和椭圆度-曲率关系曲线
Fig. 5 Bending moment-curvature and ellipticity-curvature relation curves of bimetallic composite pipe

双金属复合管在承受弯矩等载荷作用时, 不仅有复合管屈曲失效的风险, 还存在内衬褶皱等问题。内衬褶皱是内衬管在载荷作用下发生变形所致, 内衬褶皱不仅会影响管道检测的进行, 还会大大影响管道的运输能力。这里取横向截面, 显示在弯曲过程中内衬管褶皱的产生过程, 并绘制了褶皱幅值随曲率的变化曲线, 如图 6 所示。图 6 中 $\delta_{\max}$ 为内衬管褶皱幅值, R_L 为管道内衬处半径。由图 6 可知: 在曲率较小时, 褶皱幅值保持不变, 说明此时内外管之间贴合良好; 当曲率增加, 内衬管褶皱幅值开始出现微小变化, 此时内衬褶皱开始缓慢产

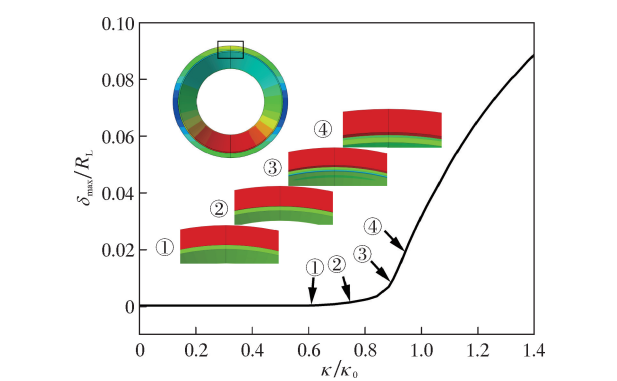


图 6 内衬褶皱幅值-曲率关系曲线与褶皱变化情况
Fig. 6 Inner lining wrinkling amplitude-curvature relation curve and changes in wrinkles

生; 随着曲率的继续增大, 褶皱幅值缓慢增大, 且变化率持续增大, 说明内衬管发生的变形愈加严重, 从管道横截面可以观察到这一变化; 在复合管发生屈曲失效后, 内衬褶皱快速增长。

3 参数分析

3.1 内衬管屈服强度的影响

分别取内衬管屈服强度 σ_{Ly} 为 207、242、277、312 和 347 MPa。绘制双金属复合管在不同内衬管屈服强度下的弯矩-曲率关系曲线和内衬褶皱幅值-曲率关系曲线, 如图 7 所示。由图 7 可知: 随着内衬管屈服强度的不断提高, 复合管的临界弯矩在逐渐增大, 临界弯矩由 1.21 M_0 增长至 1.27 M_0 , 增长幅度约为 5%; 但临界曲率却在不断减小, 临界曲率由 0.98 κ_0 减小至 0.81 κ_0 , 减小幅度约为 17%; 且内衬管屈服强度越高, 内衬管褶皱发生的曲率越小。这说明内衬材料越硬, 越能提高复合管的承载力, 但会使复合管更早的发生屈曲失效和内衬褶皱, 并且相较于对临界弯矩的影响, 内衬管屈服强度的改变对临界曲率的影响更大。因此, 在实际应用中, 可适当选取屈服强度较低的内衬材料。

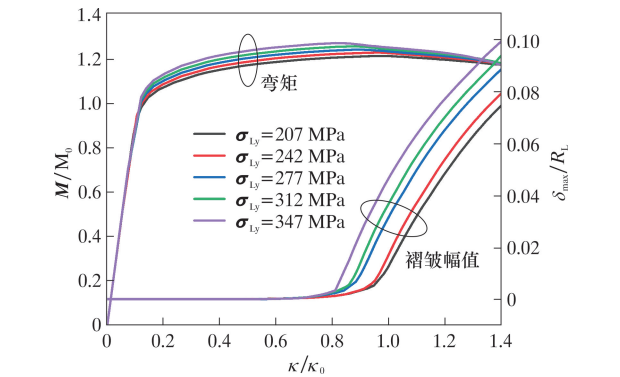


图 7 内衬管屈服强度对弯矩和内衬褶皱幅值影响曲线
Fig. 7 Influential curves of inner lining pipe yield strength on bending moment and inner lining wrinkling amplitude

3.2 内衬管径厚比的影响

分别取内衬管径厚比 D_L/t_L 为 147.5、118.0、98.3、84.3 和 73.8, 绘制双金属复合管在不同内衬管径厚比下的弯矩-曲率关系曲线和内衬褶皱幅值-曲率关系曲线, 如图 8 所示。图 8 中 D_L 和 t_L 分别为衬管的直径和壁厚。由图 8 可知: 随着内衬管径厚比的不断降低, 复合管的临界弯矩在不断增大, 临界弯矩由 1.19 M_0 增长至 1.28 M_0 , 增长幅度约为 8%; 复合管的临界曲率也在不断增大, 临界曲率由 0.81 κ_0 增长至 0.96 κ_0 , 增长幅度约为

19%；且内衬管径厚比越小，发生内衬褶皱的曲率越大。这说明降低内衬管径厚比可以提高双金属复合管的承载能力，延缓复合管的屈曲失效和内衬褶皱的发生，且相较于临界弯矩，内衬管径厚比的变化对临界曲率的影响更为明显。

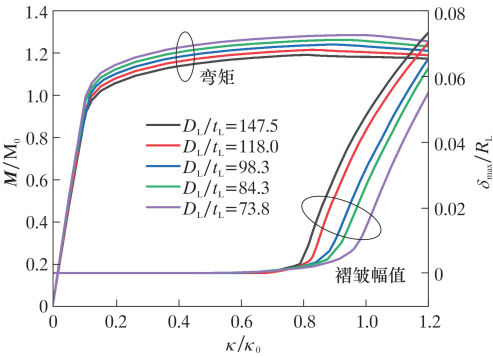


图 8 内衬管径厚比对弯矩和内衬褶皱幅值的影响

Fig. 8 Influential curves of inner lining pipe radius-thickness ratio on bending moment and inner lining wrinkling amplitude

3.3 外基管径厚比的影响

分别取外基管径厚比 D_c/t_c 为 28.6、22.6、18.7、15.9 和 13.9，绘制双金属复合管在不同外基管径厚比下的弯矩-曲率关系曲线和内衬褶皱幅值-曲率关系曲线，如图 9 所示。

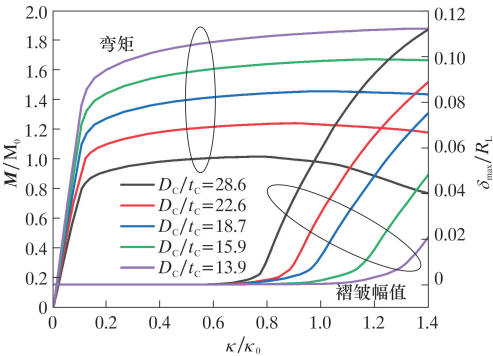


图 9 外基管径厚比的影响

Fig. 9 Influential curves of outer base pipe radius-thickness ratio on bending moment and inner lining wrinkling amplitude

由图 9 可知：随着外基管径厚比的降低，复合管的临界弯矩逐渐增大，临界弯矩由 $1.01M_0$ 增长至 $1.88M_0$ ，增加幅度约为 86%；临界曲率也在不断增大，临界曲率由 $0.77\kappa_0$ 增长至 $1.37\kappa_0$ ，增加幅度约为 80%；且内衬发生褶皱时的曲率也在不断增加。这说明降低外基管的径厚比可提高管道的承载能力，同时延缓复合管的屈曲失效和内衬褶皱的发生，且外基管径厚比的变化对复合管临界弯矩和临界曲率的影响均非常明显。

4 临界弯矩与临界曲率预测公式

在建立的数值模型的基础上，通过控制变量法对单一变量进行分析，并进行了大量计算，观察了内衬屈服强度、内衬管径厚比和外基管径厚比与双金属复合管临界弯矩和临界曲率之间的函数关系，采用非线性回归对这 3 个变量与临界弯矩和临界曲率的关系进行了拟合，得到了双金属复合管临界弯矩和临界曲率的预测公式。双金属复合管临界弯矩的预测公式为：

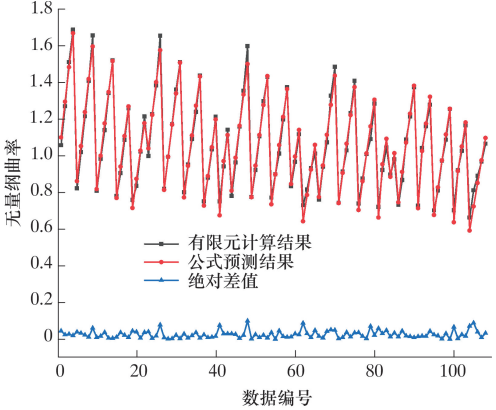
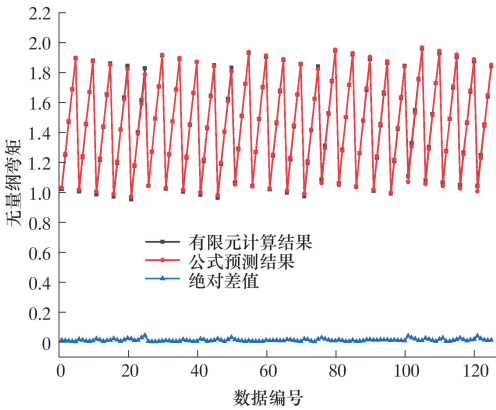
$$\overline{M} = 26.77 \left(\frac{\sigma_{Ly}}{\sigma_{Cy}} \right)^{0.07} \left(\frac{D_L}{t_L} \right)^{-0.09} \left(\frac{D_c}{t_c} \right)^{-0.84} \tag{1}$$

双金属复合管临界曲率的预测公式为：

$$\overline{\kappa} = 48.93 \left(\frac{\sigma_{Ly}}{\sigma_{Cy}} \right)^{-0.36} \left(\frac{D_L}{t_L} \right)^{-0.33} \left(\frac{D_c}{t_c} \right)^{-0.85} \tag{2}$$

式中： $\overline{M}$ 、 $\overline{\kappa}$ 分别为双金属复合管的无量纲弯矩和无量纲曲率。

将有限元计算结果与预测公式计算结果进行对比，结果如图 10 所示。由图 10 可知，有限元计算结果与预测公式计算结果较为接近，说明拟合结果较好。图 11 为临界弯矩和临界曲率预测公式的相对误差。由图 11 可知，临界弯矩预测公式的相对



a. 临界弯矩结果对比

b. 临界曲率结果对比

图 10 公式预测结果与有限元计算结果对比

Fig. 10 Formula prediction results and finite element calculation results

误差在 4% 以下, 临界曲率预测公式的相对误差在 12% 以下。从误差分析结果来看, 预测公式拟合程度较好, 回归公式的准确性较高, 所提出的预测公

式可以用于双金属复合管临界弯矩和临界曲率的计算。

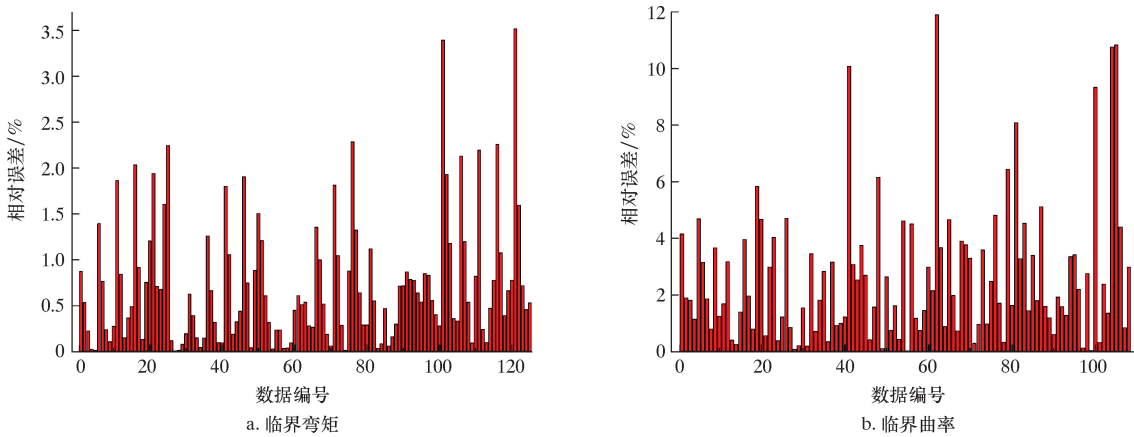


图 11 临界弯矩和临界曲率预测公式相对误差
Fig. 11 Relative errors of critical bending moment and critical curvature prediction formulas

5 结 论

(1) 内衬管屈服强度可以提高复合管的临界弯矩, 但会降低复合管的临界曲率, 且对临界曲率的影响更大: 内衬管屈服强度在 207~347 MPa 的变化范围中, 临界弯矩提高了 5%, 临界曲率降低了 17%。

(2) 内衬管径厚比的降低可以提高复合管的临界弯矩和临界曲率, 且对临界曲率的影响更大: 内衬管径厚比在 147.5~73.8 的变化范围中, 临界弯矩和临界曲率分别提高了 8% 和 19%。

(3) 外基管径厚比的降低同样可以提高复合管的临界弯矩和临界曲率, 且对两者的影响效果都非常明显: 外基管径厚比在 28.6~13.9 的变化范围中, 临界弯矩和临界曲率分别提高了 86% 和 80%。

(4) 在有限元模拟的基础上提出了复合管临界弯矩和临界曲率的预测公式, 预测公式的相对误差分别小于 4% 和 12%, 预测效果良好, 可为复合管的设计和安全评价提供参考依据。

参 考 文 献

[1] 史君林, 练章华, 谷天平, 等. 双金属复合管液压成形力学模型与数值模拟研究 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (5): 161-169.
SHI J L, LIAN Z H, GU T P, et al. Mechanical model and numerical simulation study on hydroforming of bimetal composite pipe [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (5): 161-169.

[2] 袁林, 刘浩伟, 余志兵. 双金属复合管液压成形 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (1): 26-34.
YUAN L, LIU H W, YU Z B. Hydroforming of bimetallic composite pipes [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (1): 26-34.

[3] 陈俊文, 于浩, 张玉明, 等. 双金属衬里复合管制管过程紧密度影响因素研究 [J]. 石油机械, 2021, 49 (2): 133-142.
CHEN J W, YU H, ZHANG Y M, et al. Study on the influencing factors of compactness of bimetal-lined composite pipe during forming process [J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49 (2): 133-142.

[4] FOCKE E S, GRESNIGT A M, HILBERINK A. Local buckling of tight fit liner pipe [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2011, 133 (1): 011207.

[5] WANG F C, LI W, HAN L H. Interaction behavior between outer pipe and liner within offshore lined pipeline under axial compression [J]. Ocean Engineering, 2019, 175: 103-112.

[6] YUAN L, KYRIAKIDES S. Liner wrinkling and collapse of bi-material pipe under bending [J]. International Journal of Solids and Structures, 2014, 51 (3/4): 599-611.

[7] YUAN L, KYRIAKIDES S. Liner wrinkling and collapse of bi-material pipe under axial compression [J]. International Journal of Solids and Structures, 2015, 60-61: 48-59.

[8] ZHAO T F, HU Z H. Numerical analysis of detaching and wrinkling of mechanically lined pipe during its spooling-on stage to the reel [J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2015, 5 (5): 205-209.

[9] GAVRIILIDIS I, KARAMANOS S A. Structural re-

- sponse of steel lined pipes under cyclic bending [J]. International Journal of Solids and Structures, 2022, 234–235: 111245.
- [10] 郭奕蓉, 张建勋, 谭丁森, 等. 力-热载荷下双金属复合管的屈曲失效研究 [J]. 计算力学学报, 2020, 37 (2): 137–144.
GUO Y R, ZHANG J X, TAN D S, et al. Research on liner buckling and collapse of bi-material metal pipes subjected to mechanical-thermal loading [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2020, 37 (2): 137–144.
- [11] 郭奕蓉, 张建勋, 秦庆华, 等. 复杂载荷下双金属复合管的屈曲失效研究 [J]. 固体力学学报, 2019, 40 (4): 342–353.
GUO Y R, ZHANG J X, QIN Q H, et al. Liner buckling and collapse of bi-material metal pipes subjected to combined loading [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2019, 40 (4): 342–353.
- [12] YUAN L, KYRIAKIDES S. Liner wrinkling and collapse of girth-welded bi-material pipe under bending [J]. Applied Ocean Research, 2015, 50: 209 – 216.
- [13] 谭丁森, 张建勋, 秦庆华. 带环形焊缝双金属复合管屈曲失效研究 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (2): 154–161.
TAN D S, ZHANG J X, QIN Q H. Research on buckling failure of bi-material metal pipe with girth weld [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (2): 154–161.
- [14] YUAN L, ZHOU J S, LIU H W, et al. Buckling of dented bi-material pipe under bending Part I: Experiments and simulation [J]. International Journal of Solids and Structures, 2022, 257: 111705.
- [15] YUAN L, ZHOU J S, YU Z B, et al. Numerical investigation of buckling behavior of dented lined pipe under bending [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2023, 205: 104997.
- [16] BARNES P, HEJAZI R, KARRECH A. Instability of mechanically lined pipelines under large deformation [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2018, 146: 62–69.
- [17] 李科, 唐力, 陶科宇, 等. UNS N08825 合金复合管环焊缝根焊关键质量验收准则探讨 [J]. 天然气与石油, 2023, 41 (6): 8–13.
- LI K, TANG L, TAO K Y, et al. Discussion on the key acceptance criteria for the root girth weld of UNS N08825 alloy lined or clad pipes [J]. Natural Gas and Oil, 2023, 41 (6): 8–13.
- [18] 黄贤滨, 曾熠, 张伟亚, 等. 连续纤维增强复合管接头设计 [J]. 油气储运, 2023, 42 (5): 570–576.
HUANG X B, ZENG Y, ZHANG W Y, et al. Design of reinforced thermoplastic pipe joint [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42 (5): 570–576.
- [19] 徐广丽, 秦绪, 陈全, 等. 钢丝缠绕增强聚乙烯复合管集输服役后的承压性能 [J]. 油气储运, 2022, 41 (10): 1168–1174.
XU G L, QIN X, CHEN Q, et al. Pressure bearing capacity of polyethylene composite pipe reinforced by steel wires after gathering service [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41 (10): 1168 – 1174.
- [20] 张春迎, 余建星, 余杨, 等. 复杂载荷作用下双金属复合管的屈曲失效模拟分析 [J]. 中国海上油气, 2020, 32 (5): 168–173.
ZHANG C Y, YU J X, YU Y, et al. Analysis of buckling failure simulation of bi-metal lined pipe under complex loading [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32 (5): 168–173.
- [21] 陈严飞, 侯富恒, 黄俊, 等. 外压和力偶荷载组合作用下含凹陷缺陷海底管道的局部屈曲和极限弯矩承载力 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2022, 46 (3): 166–173.
CHEN Y F, HOU F H, HUANG J, et al. Local buckling and ultimate moment capacity of subsea pipelines with dent defects under combined loads including external pressure and couple [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46 (3): 166–173.

第一作者简介: 肖世轩, 生于 1999 年, 现为在读硕士研究生, 研究方向为完整性管理及装备可靠性。地址: (102249) 北京市昌平区。email: 1558372023@qq.com。
通信作者: 吕志阳, email: lvzhiyang@cup.edu.cn。

收稿日期: 2023–11–14

(本文编辑 王刚庆)