

引文格式: 谷天平, 练章华, 王 斌, 等. 双金属衬里复合管内衬弹塑性失稳有限元分析 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (2): 177-184.
GU Tianping, LIAN Zhanghua, WANG Bin, et al. Finite element analysis of elastic-plastic instability of liner for bimetallic lined composite pipe [J].
Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (2): 177-184.

双金属衬里复合管内衬弹塑性失稳有限元分析

谷天平¹, 练章华¹, 王 斌², 史君林¹, 陈俊文³

(1. 西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500;

2. 西安向阳航天材料股份有限公司, 陕西 西安 710025;

3. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041)

摘 要: 采用数值模拟的方法建立了含初始缺陷的受限衬管失稳力学模型, 重点研究了受限衬管的临界失稳载荷和后屈曲构型之间的相互作用行为, 并讨论了临界失稳载荷的缺陷敏感性, 最后通过试验验证了仿真结果的计算精度。结果表明, 相对于衬管半径 1% 幅度的内衬不圆度缺陷会使内衬的临界失稳载荷下降约 65%; 在相同的初始椭圆度缺陷 δ_0 前提下, 随着内衬径厚比的增大, 其临界失稳载荷不断减小; 复合管内衬临界失稳载荷的有限元计算结果与试验结果的相对误差为 1.82%。建立的平面应变有限元力学模型不仅可以准确求解出受限内衬的临界失稳载荷, 还能够大量节约试验成本。

关键词: 双金属衬里复合管; 内衬失稳; 临界失稳载荷; 有限元

中图分类号: TE973 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012 (2023) 02-0177-08

doi: 10.3969/j.issn.1007-2012.2023.02.021

Finite element analysis of elastic-plastic instability of liner for bimetallic lined composite pipe

GU Tian-ping¹, LIAN Zhang-hua¹, WANG Bin², SHI Jun-lin¹, CHEN Jun-wen³

(1. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Xi'an Sunward Aeromat Co., Ltd., Xi'an 710025, China;

3. China Petroleum Engineering & Construction Corporation Southwest Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: The instability mechanical model of confined liner pipe with initial defects was established by means of numerical simulation, the interaction behavior between critical instability load and post-buckling configuration of confined liner pipe was studied emphatically, and the defect sensitivity of critical instability load was discussed. Finally, the calculation accuracy of the simulation results was verified by tests. The results show that the non-roundness defect of liner with the amplitude of 1% relative to the liner pipe radius can reduce the critical instability load of liner by about 65%; with the premise of the same initial ellipticity defect δ_0 , with the increase of the diameter-thickness ratio of liner, its critical instability load decreases constantly; the relative error of critical instability load of composite pipe liner between the finite element calculation results and the test results is 1.82%. The established plane strain finite element mechanical model not only can solve the critical instability load of the confined liner, but also save a large number of test cost.

Key words: bimetallic lined composite pipe; liner instability; critical instability load; finite element

引言

双金属衬里复合管由主要起承载作用的基管和

起防腐作用的不锈钢衬管通过机械工艺制造而成^[1-4]。因其兼顾了管线建设的经济性和耐腐蚀性, 近年来被广泛应用于高腐蚀性环境油气集输系统中^[5-6]。然而, 双金属衬里复合管在实际应用过程

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (51974271); 中石油 CPECC 项目 (CPECC2019KJ13)

第一作者: 谷天平 (通信作者), 男, 1994 年生, 博士研究生, 主要从事双金属衬里复合管失效机理与控制研究, E-mail: gutianping005@163.com

收稿日期: 2022-03-17; **修订日期:** 2022-12-13

中遇到了很多问题,最为严重的就是内衬的失稳问题,即衬管的鼓包和坍塌现象^[7]。国内外用于酸性油气田集输系统中的双金属复合管均出现过内衬鼓包坍塌问题的报道^[8-9]。我国西部某油田集输系统双金属复合管内衬鼓包形貌如图 1 所示,其失稳形貌特征为典型的“单耳坠”型失稳。

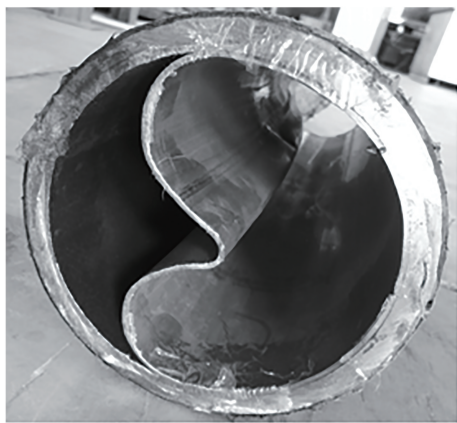


图 1 某油田集输系统中双金属衬里复合管内衬鼓包形貌
Fig. 1 Morphology of liner collapse for bimetallic lined composite pipe in oilfield gathering system

内衬发生鼓包失稳变形后会影响到管线的运载能力和管内检测设备的通过性能,同时也对衬管材料的疲劳性能和应力腐蚀开裂性能提出了考验^[10]。这使得油气田集输系统对双金属衬里复合管的安全性提出了质疑。因此,研究双金属复合管的内衬失稳机理,提出科学合理的防止内衬失稳措施对复合管线的安全稳定服役至关重要。

双金属复合管的内衬失稳属于典型的限制失稳问题。限制失稳是指构件失稳时其屈曲变形不能自由发展而受到某种限制性约束的失稳,有时又称单向失稳、接触失稳、约束失稳^[11]。限制失稳涉及接触问题、单向屈曲、非保守问题等而显得十分复杂,一直没有得到很好的解决。工程结构中圆管限制失稳问题十分普遍,如用于管道修复的柔性衬里、隧道建设中的衬砌结构和油气井中的套管等受限的圆管(圆拱)结构^[12-16]。双金属衬里复合管的内衬稳定性研究就是在圆管结构限制失稳问题的研究基础上发展而来。

在衬里复合管线运行阶段,管内流体在腐蚀和应力腐蚀等因素作用下形成的泄漏通道会进入基衬之间的环形间隙,使得环形间隙内存在一定体积和压力的流体,管线在压力波动或停输检修操作时导致的管内压力变化,当衬管外壁的流体净压力大小超过临界值时,内衬就会出现坍塌。魏帆等^[7]通过试

验确定了结合强度和运行温度对衬管临界失稳载荷的影响,并提出了从控制成形质量角度来防止内衬屈曲的建议。YUAN L 等^[17]使用增量理论和有限元方法研究了双金属复合管成形阶段的力学响应,从优化制管参数的角度提出了增大基衬管之间的结合强度可以提高衬管的稳定性(即止屈能力)。练章华等^[18]设计了塌陷内衬的管道修复机器人结构,并使用有限元方法确定了不同塌陷位移所需的修复载荷。GU T P 等^[19]建立了在役双金属复合管道系统轴向受力模型,并使用有限元方法分析了温压耦合作用下受限衬管的轴向稳定性。以往的研究成果对于认识复杂载荷作用下内衬的失稳行为起到了积极的作用。然而,这些研究主要集中于得到了受限内衬的临界失稳载荷,对于内衬的后屈曲行为却鲜见公开的文献报道,特别是屈曲变形后的构型与外载荷之间的相互关系还不明确,该过程中内衬的屈曲响应问题亟待解决。

因此,本文采用数值模拟的方法建立了含初始缺陷的受限衬管失稳力学模型,重点研究了其临界失稳载荷和后屈曲构型之间的相互作用行为,并讨论临界失稳载荷的缺陷敏感性,最后通过试验验证验证仿真结果的计算精度,为双金属复合管的内衬止屈设计提供理论依据。

1 内衬弹塑性失稳有限元模型建立

1.1 材料本构

以国内某厂家生产的 $\Phi 168.3 \text{ mm} \times (14.2+2) \text{ mm}$ X60-825 双金属复合管为研究对象,其中基管材质为 X60,衬管材质为 825 镍基合金,通过在 MTS 单轴拉伸试验机上测量获得基管和衬管材料的应力-应变曲线,如图 2 所示。

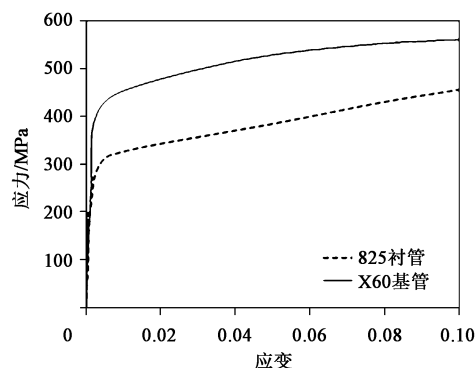


图 2 X60-825 双金属衬里复合管基衬材料的应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves of matrix and liner materials of X60-825 bimetallic lined composite pipe

衬管在鼓包与塌陷过程中会经历较大的应变水

平, 其材料屈服后的强化行为对后屈曲行为影响较大, 不能仅由一个材料的屈服强度值来定义^[20]。为此, 采用 Ramberg-Osgood (R-O) 本构模型对基衬材料的应力-应变关系进行拟合, 其中 R-O 本构模型表达式为:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left(1 + \frac{3}{7} \left| \frac{\sigma}{R_{el}} \right|^{n-1} \right) \quad (1)$$

式中: ε 为应变; σ 为应力; R_{el} 为材料的屈服强度; n 为材料应变硬化指数; E 为弹性模量。拟合后得到两种材料的参数, 如表 1 所示。

表 1 X60-825 双金属衬里复合管材料力学性能参数

Tab. 1 Material mechanical property parameters of X60-825 bimetallic lined composite pipe

名称	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	应变硬化指数 n	泊松比 ν
基管	207	435	10.0	0.30
衬管	197	275	8.6	0.27

1.2 边界条件与有限元力学模型

根据双金属复合管的结构和载荷特点, 假定载荷和变形沿圆管轴向不发生变化, 从而考虑将复合管的内衬稳定性问题简化为平面应变力学问题, 从受限圆管屈曲形状的对称性出发, 建立双金属复合管的 1/2 平面应变有限元力学模型。

为了避免因模型网格疏密原因造成计算误差, 在保证求解精度与效率兼顾的前提下, 对复合管模型进行了网格无关性试算, 获得了最优的网格密度为: 基衬环向的单元数量相同, 都是均布 180 个单元, 基管径向均布 14 个单元, 衬管径向均布 4 个单元。模型共计 3240 个单元。基衬均采用 CPE4R 四节点平面应变单元建模。复合管有限元力学模型边界条件与网格划分如图 3 所示。

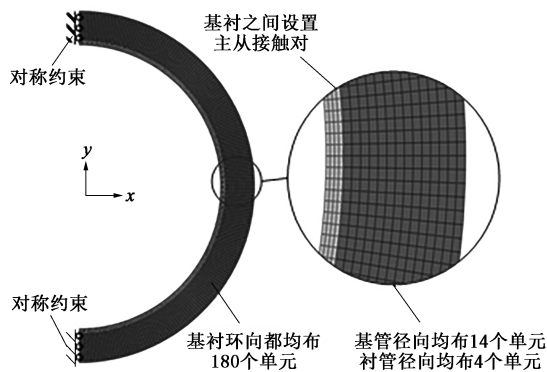


图 3 复合管有限元力学模型边界条件与网格划分

Fig. 3 Boundary conditions and meshing of finite element mechanical model of composite pipe

1.3 初始缺陷与加载方式

初始缺陷的定义在结构的稳定性分析过程中非常重要。通过对国内外文献进行调研, 结合双金属复合管的实际失稳特征, 引入了一个小的初始几何缺陷 δ_0 定义内衬的初始不圆度, 即在初始缺陷弧长对应的圆心角 $\theta=0^\circ$ 位置施加一个小的局部位移 δ_0 , 使衬管外壁与基管内壁分离, 并将变形后的节点位置参数作为新模型的初始节点位置, 从而消除因位移 δ_0 引起的初始应力。为了真实地模拟衬管的受压失稳过程, 采用流体体积加载控制技术, 该方法可以评价结构变形与内部流体压力变化之间的耦合作用^[21]。通过在基衬的环形空间定义封闭的流体腔的区域, 并生成静水流体单元 F2D2 指定注入流体的体积变化区域边界, 通过控制注入腔内流体的体积来增压。初始缺陷定义与流体腔加载方式如图 4 所示。其中 R 为衬管的外半径, r 为衬管的内半径。

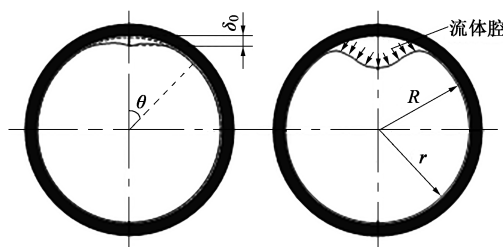


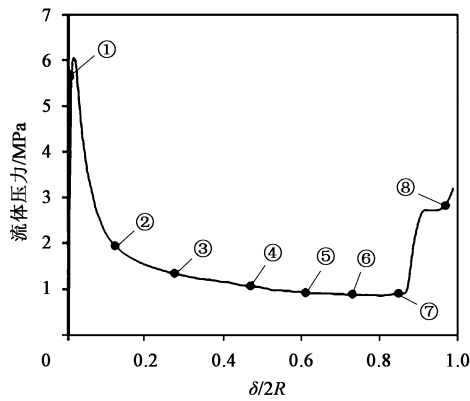
图 4 初始缺陷定义 (a) 与流体腔加载方式 (b)

Fig. 4 Initial defect definition (a) and fluid cavity loading method (b)

2 有限元计算结果

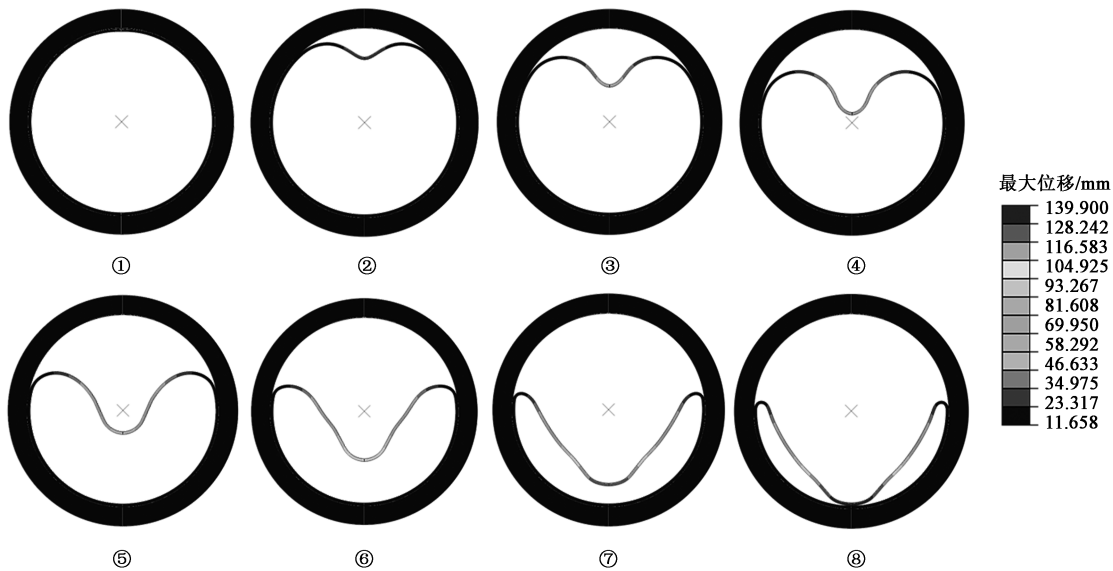
2.1 受限衬里失稳全过程 $P-\delta$ 响应

以 $\Phi 168.3 \text{ mm} \times (14.2+2) \text{ mm}$ 的 X60-825 双金属复合管为研究对象, 添加初始几何缺陷 $\delta_0 = 0.005R$, 通过获取流体注入参考点的流体压力 P 和内衬变形的冠顶的最大位移 δ 得到 $P-\delta$ 响应, 对横坐标的最大位移 δ 进行数据处理 ($\delta/2R$), 以便对比内衬的变形程度, 如图 5 所示。为了更加直观地获取内衬在弹塑性失稳全过程中压力变化引起的构型变化, 在图 5 中 $P-\delta$ 响应过程中选取 8 个典型的时刻 (①~⑧) 进行了标记, 并提取出了对应时刻的内衬变形云图, 如图 6 所示。由图可知, 开始加载时, 流体腔内压力急剧上升到 6.04 MPa 时达到最大值, 若继续加载, 内衬材料的非弹性行为开始导致衬管的失稳。则 6.04 MPa 即为该复合管内衬的临界失稳载荷值。②~⑥时刻, 内衬的上半部分 ($\theta \leq$

图 5 体积加载控制下流体压力和 $\delta/2R$ Fig. 5 Relationship between fluid pressure and $\delta/2R$ under volume loading control

90°) 开始明显从外管内壁脱离, 此时加载压力迅速下降到 0.88 MPa 附近, 并在⑥时刻附近趋于稳定。

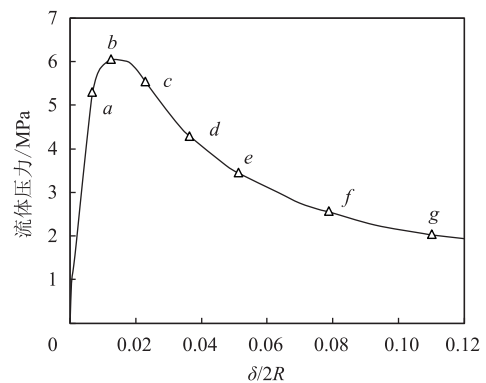
内衬在这一阶段中, 发生失稳后继续加载, 即使小于临界载荷的压力也会使得内衬继续迅速变形 (图 6 中②~⑥云图), 这说明受限衬里管一旦发生失稳, 其承载能力会迅速下降, 并且在一个值附近趋于稳定。而在接近⑦时刻时, 进一步的变形需要压力小幅增加, 从对应⑦时刻云图可以看出, 这是由于衬管与基管接触还未脱离的部分形成了局部的塑性铰, 提高了变形内衬的局部刚度。而超过⑦时刻以后, 观察到加载压力急剧增加, 对应云图中观察到内衬的脱落部分逐渐向衬管下半部分 ($90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$) 靠近, 局部塑性铰程度更加严重。在⑧时刻时, 坍塌后衬管的冠尖已经与衬管内壁接触, 若继续加载, 流体压力会略有增加, 衬管上半部分的脱落部分与下半部分未脱落部分的接触, 整个复合管受限内衬的失稳加载过程结束。

图 6 P - δ 响应过程中典型时刻的内衬变形云图Fig. 6 Cloud diagrams of liner deformation at typical moments during P - δ response

2.2 受限衬里临界失稳状态分析

为了更加精细地描述临界失稳前后受限内衬的力学响应, 进一步分析了图 5 中 P - δ 响应在内衬发生临界失稳前后的参数, 选取了 7 个典型时刻 ($a \sim g$) 的 P - δ 响应进行标记, 如图 7 所示。将对应时刻局部变形内衬的位置坐标提取出来, 绘制出内衬变形的轮廓, 并对 x 和 y 轴坐标进行归一化处理, 如图 8 所示。

从图 7 中对应的 P - δ 响应和图 8 中的变形后位置坐标可知, 开始加载时流体压力 P 急剧上升, 达到 a 点时内衬还未到达失稳分叉点, 继续加载到 b

图 7 受限内衬临界失稳状态 P - δ 响应Fig. 7 P - δ response of confined liner in critical instability state

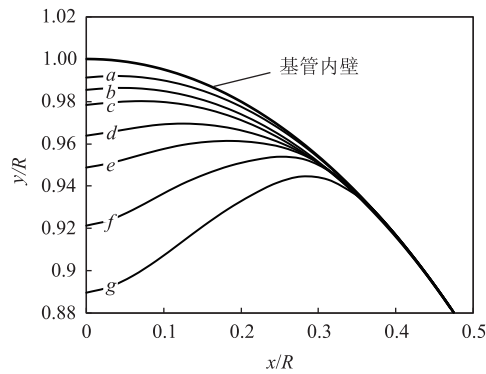


图8 局部变形内衬轮廓坐标曲线

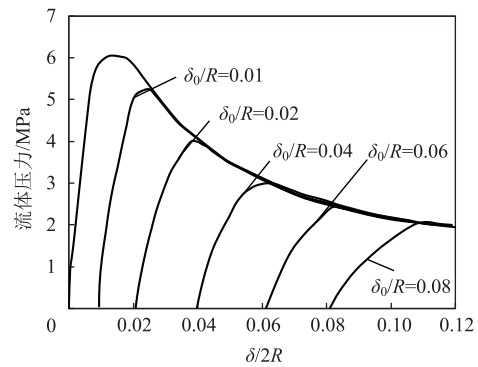
Fig. 8 Coordinates curves of local deformation liner contour

点时达到衬管的临界失稳载荷值 6.04 MPa, 此时对应的 $\delta_0/2R=0.014$, 即在 $\theta=0^\circ$ 位置内衬脱离了基管内壁 1.013 mm 时衬管达到了临界失稳状态。可以看出, 双金属复合管内衬失稳临界载荷值对内管的不圆度缺陷十分敏感。

若继续加载, 由 c 点到 g 点, 加载压力不断下降, 内衬的变形程度却逐渐增大, 内衬环向脱离基管的区域 (θ 范围) 也不断增大。在 g 点时, 对应的流体压力 $P=2.028$ MPa, 此时, 在 $\theta=0^\circ$ 位置内衬脱离基管内壁 7.710 mm。若继续加载, 流体压力与最大位移 $P-\delta$ 响应可参考图 5 中的计算结果。

2.3 初始不圆度缺陷对临界失稳载荷的影响

由 2.2 节分析可知, 双金属复合管内衬的临界失稳载荷 P_c 对初始不圆度缺陷 δ_0 十分敏感, 为了研究两者之间的关系, 将本次内衬失稳有限元模型的初始不圆度 ($\theta=0^\circ$ 处) 进行了调整, 将 $\delta_0/R=0.005$ 的 $P-\delta$ 响应计算结果作为对比分析项, 将该曲线的起点的横坐标设为零点。令 δ_0/R 分别为 0.01、0.02、0.04、0.06 和 0.08。对不同初始椭圆度下的 $P-\delta$ 响应进行分析, 结果如图 9 所示。由图可知, 随着初始不圆度 δ_0/R 的增加, 受限衬里的临界失稳载荷明显下降, 但是下降幅度逐渐变缓。当 $\delta_0/2R=0.08$ 时, 临界失稳载荷为 2.06 MPa, 相比于 $\delta_0/2R=0.005$ 时的临界失稳载荷 6.04 MPa 下降了约 65.9%。由此可见, 衬管的初始不圆度缺陷对临界失稳载荷值有关键的影响。以本次计算使用的双金属复合管的规格和材质为例, 存在相对于衬管半径 1% 幅度的初始不圆度缺陷都会使其失稳载荷下降约 65%, 大大减弱了内衬的环向载荷承受能力。因此建议厂家在生产制造复合管阶段严格控制衬管的不圆度参数, 避免因为不圆度缺陷而降低衬

图9 流体压力与初始不圆度 δ_0/R 的 $P-\delta$ 响应Fig. 9 $P-\delta$ response of fluid pressure and initial ellipticity δ_0/R

管的环向稳定性。

2.4 衬管径厚比 (D/t) 对临界失稳载荷的影响

衬管径厚比 D/t 对临界失稳载荷影响也不容忽视, 因此, 选取同上文中相同材质的复合管, 通过调整内衬壁厚来确定径厚比。选取 4 个典型的径厚比值, 分别为 $D/t=70$ 、100、150 和 200, 分别提取临界失稳载荷 P_c 和内衬初始不圆度 ($0.005 \leq \delta_0/2R \leq 0.08$) 的变化关系, 如图 10 所示。由图可知, 在相同的初始不圆度缺陷下, 随着内衬径厚比由 70 增加到 200, 其临界失稳载荷 P_c 不断减小。当 $\delta_0/2R=0.005$ 时, D/t 值由 70 增加到 200 时, 其对应的 P_c 值由 6.04 MPa 下降到 2.24 MPa, 下降幅度为 62.8%; 而当 $\delta_0/2R=0.08$ 时, 同样的 D/t 值变化范围内, P_c 值由 2.03 MPa 下降到 0.65 MPa, 下降幅度为 68.1%。此时, $D/t=70$ 和 200 两种规格的 P_c 值的下降幅度几乎相同, 均在 62%~70%。该规律在本次计算分析的 4 种 D/t 值中均有出现, 即: 对于不同 D/t 的受限内衬, 初始不圆度 δ_0/R 的变化对临界失稳载荷 P_c 的影响程度是几乎相同的。

为了更加直观地描述这一规律, 将初始不圆度 δ_0/R 对不同径厚比衬管临界失稳载荷下降幅度影响进行总结, 如表 2 所示。由表 2 可知, 以 $D/t=70$ 时的临界失稳载荷值作为对比项, 当 $D/t=100$ 时, 相同 δ_0/R 条件下 P_c 的下降幅度在 30%~43%; 同理, 当 $D/t=150$ 时, 下降幅度在 50%~61%; 当 $D/t=200$, 下降幅度在 62%~70%, 由此可见, 当以初始不圆度 δ_0/R 的变化为评价指标时, 对每一种径厚比的受限衬管 P_c 值的影响程度是有一定的幅度区间的, 可以根据这一规律, 预测固定 D/t 的受限内衬在不同 δ_0/R 下的 P_c 值范围, 可以为实际工程中衬管稳定性设计提供理论参考。

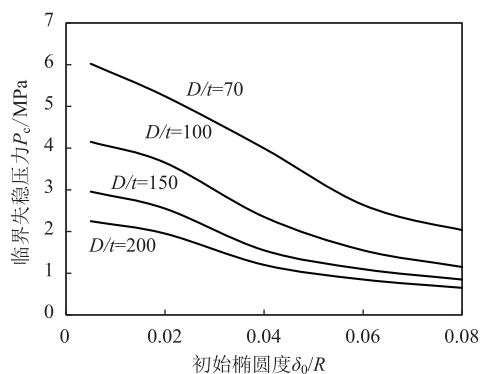


图 10 不同径厚比内衬临界失稳载荷与初始不圆度的关系

Fig. 10 Relationship of critical instability load and initial ellipticity with different diameter-thickness ratios

表 2 初始不圆度 δ_0/R 对不同径厚比衬管临界失稳载荷 P_c 下降幅度的影响 (%)

Tab. 2 Influence of initial ellipticity δ_0/R on decrease amplitude of critical instability load of liner with different diameter-thickness ratios (%)

D/t	δ_0/R				
	0.005	0.02	0.04	0.06	0.08
70	0	0	0	0	0
100	31.06	30.36	41.15	41.27	43.48
150	50.89	51.35	61.19	58.32	58.23
200	62.68	62.80	69.95	67.79	68.06

3 试验结果对比

对国内某复合管生产厂家采用液压胀接法制造的双金属衬里复合管进行基衬间隙耐水压试验，复合管的规格和材料为： $\Phi 168.3 \text{ mm} \times (14.2+2) \text{ mm}$ X60-825，每根复合管在居中部位的基管上加工孔径为 $\Phi 6 \text{ mm}$ 注水孔。为了达到实验目的，复合管试样的管端均采用了堆焊处理来密封基衬之间的间隙，确保注水过程中可以准确的监测复合管层间环空的流体压力值。依据国标 GB/T241—2007^[22] 进行基衬间隙耐水压力试验，监测内衬发生鼓包失稳的流体压力值。

3.1 试验设备和试验条件

双金属复合管内衬失稳静水压试验在国内某金属管液压爆破试验平台进行。双金属复合管内衬失稳试验设备及组成部件如图 11 所示。

试验设备为国产静水压爆破试验机；温度为室温 25°C ；压力介质为清水；试验条件为对基衬间隙加压至内衬发生鼓包坍塌失稳后，即压力曲线达到

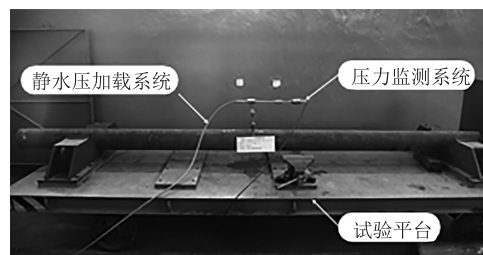


图 11 双金属复合管内衬失稳试验设备及组成部件

Fig. 11 Liner instability test equipment and components of bimetallic composite pipe

峰值开始下降时，停止加压观察鼓包形貌。然后以原加载速率继续加压 5 min 后，停止试验，再次观察鼓包形貌，记录分析实验数据，试验结束。

加载时必须注意通过调节增压的速度保证流体加载的均匀性和稳定性，避免有压力冲击的现象产生从而影响内衬失稳临界载荷的测量精度。

3.2 试验结果分析

试验结束后观察到基管与衬管发生局部分离，内衬出现典型的“单耳坠”型失稳模式，内衬失稳形貌如图 12 所示，由图可知，衬管变形严重，出现严重的鼓包失稳。

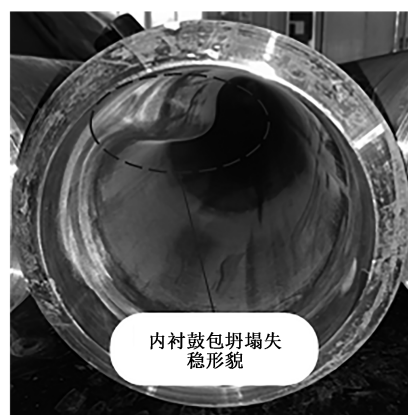


图 12 试验后双金属复合管内衬失稳形貌

Fig. 12 Liner instability morphology of bimetallic composite pipe after test

分析加载过程中的压力随加载时间的变化，获得加载压力随时间的变化关系，如图 13 所示。由图可知，试验获得该复合管试样内衬失稳的最大流体压力为 5.93 MPa，而根据图 5 中有限元计算最大失稳压力为 6.04 MPa，两者的相对误差为 1.82%。由此可见，在受限内衬弹塑性失稳分析过程中，使用本文中的设计的有限元力学模型，不仅可以准确求解出受限内衬的临界失稳载荷值，而且能够大量节约实物试验成本，提高双金属复合管内衬稳定性分析效率。

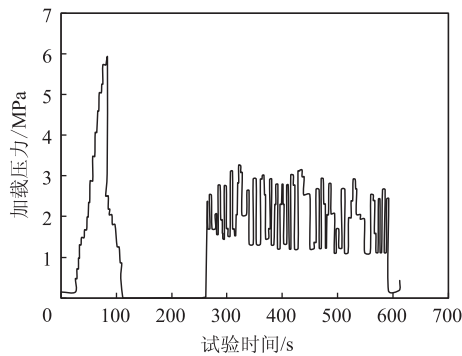


图13 试验全过程加载压力随时间的变化

Fig. 13 Variation of loading pressure with time in whole test process

然而,在图13中试验全过程加载压力随时间的变化关系可知,在试验后半段维持原加载速率的加载过程中,流体压力值稳定在一定压力区间范围内(1.11~3.25 MPa)上下波动,此时内衬的鼓包变形正在沿着轴向和环向稳定扩展,内衬变形的区域和体积正在不断地扩大,该压力值称为内衬变形扩展的坍塌传播压力。本次试验中测得该样品双金属复合管的内衬坍塌传播压力约为2.00 MPa,而其初次失稳时的临界失稳压力为5.93 MPa,下降了66.3%。由此可见,一旦受限内衬发生初次失稳,内衬的稳定性大大降低,对于本次试验的样品参数,其坍塌传播压力值约为初次失稳值的1/3。因此,在双金属复合管应用过程中应严格避免内衬发生初次失稳,避免坍塌传播现象的发生。

4 结论

(1) 双金属复合管内衬的初始不圆度缺陷对临界失稳载荷影响很大,相对于衬管半径1%幅度的初始不圆度缺陷会使内衬临界失稳载荷值下降约65%。

(2) 在相同的初始椭圆度下,随着内衬径厚比的增大,临界失稳载荷值不断减小。

(3) 使用本文中建立的复合管内衬失稳临界载荷有限元计算结果与试验测得失稳载荷值的相对误差为1.82%。验证了本文建立的有限元模型计算精度,为双金属复合管的内衬止屈设计提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 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 Lin, LIU Haowei, YU Zhibing. Hydroforming of bimetallic

- composite pipes [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (1): 26-34.
- [2] 谷天平,练章华,陈俊文,等. 双金属复合管线应力分析中当量折算模型的建立与应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18 (10): 123-129.
- GU Tianping, LIAN Zhanghua, CHEN Junwen, et al. Establishment and application of equivalent conversion model in stress analysis of bimetal clad pipeline [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18 (10): 123-129.
- [3] 朱英霞,施伟,涂文斌,等. 不同试样对TA2/T2双金属复合管绕弯成形回弹模拟的适用性研究[J]. 锻压技术, 2020, 45 (12): 102-109.
- ZHU Yingxia, SHI Wei, TU Wenbin, et al. Research on applicability of different specimens to springback simulation of rotary-draw bending for TA2/T2 bimetal composite tube [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (12): 102-109.
- [4] 陈庆龙,刘静,吕志勇,等. 模具参数对液压胀形双层异质波纹管波形轮廓的影响研究[J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (2): 70-78.
- CHEN Qinglong, LIU Jing, LÜ Zhiyong, et al. Influence of die parameters on convolution profile of bilayered nonhomogeneous bellows in hydroforming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (2): 70-78.
- [5] 杨专钊. 油气集输用双金属复合管[M]. 北京: 石油工业出版社, 2018.
- YANG Zhuanzhao. Bimetallic composite pipe for oil and gas gathering and transportation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.
- [6] 杨专钊,李安强,魏亚秋. 双金属复合管标准发展现状及存在的问题[J]. 油气储运, 2020, 39 (4): 395-399.
- YANG Zhuanzhao, LI Anqiang, WEI Yaqiu. Development status and existing problems of standards for bimetal composite pipe [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39 (4): 395-399.
- [7] 魏帆,姜义,吴泽,等. 双金属复合管鼓包机理分析和试验研究[J]. 天然气与石油, 2017, 35 (5): 6-11.
- WEI Fan, JIANG Yi, WU Ze, et al. Mechanism analysis and testing research on the buckling of the bimetal lined pipe [J]. Natural Gas And Oil, 2017, 35 (5): 6-11.
- [8] 李循迹,王福善,李发根,等. 机械复合管衬层塌陷失效分析及对策研究[J]. 金属热处理, 2019, 44 (S1): 545-548.
- LI Xunji, WANG Fushan, LI Fagen, et al. Liner collapse failure analysis and control measures research on bimetallic lined pipes [J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44 (S1): 545-548.
- [9] 李发根,杨家茂,冯泉,等. 在役双金属复合管道失效机制及控制措施分析[J]. 焊管, 2019, 42 (9): 64-68.
- LI Fagen, YANG Jiamao, FENG Quan, et al. Failure mechanism and control measures analysis of bimetal composite pipelines [J]. Welded Pipe and Tube, 2019, 42 (9): 64-68.
- [10] 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 Dingsen, ZHANG Jianxun, QIN Qinghua. Research on buckling failure of bi-material metal pipes with girth weld [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (2): 154-161.
- [11] 郭英涛, 任文敏. 关于限制失稳的研究进展 [J]. 力学进展, 2004, (1): 41-52.
- GUO Yingtao, REN Wenmin. Some advances in confined buckling [J]. Advances in Mechanics, 2004, (1): 41-52.
- [12] 李兆超. 地下管道屈曲稳定研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- LI Zhaochao. Investigation on buckling mechanics of buried pipes [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [13] 张建兵, 孔德涛, 蒋成银, 等. 工具锥角对膨胀套管环向残余应力的影响 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (1): 155-161.
- ZHANG Jianbing, KONG Detao, JIANG Chengyin, et al. Effect of tool cone angle on circumferential residual stress of expansion casing [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (1): 155-161.
- [14] 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 Junlin, LIAN Zhanghua, GU Tianping, et al. Mechanical model and numerical simulation study on hydroforming of bimetal composite pipe [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (5): 161-169.
- [15] 田野, 朱丽霞, 罗金恒, 等. X80 管道划伤复合凹陷区的应力应变特征研究 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (3): 177-182.
- TIAN Ye, ZHU Lixia, LUO Jinheng, et al. Study on stress and strain characteristics of composite scratch dent zone of X80 pipeline [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (3): 177-182.
- [16] 余建星, 卞雪航, 李智博, 等. 国外海底管道屈曲传播及止屈试验技术综述 [J]. 船舶工程, 2012, 34 (4): 1-3, 13.
- YU Jianxing, BIAN Xuehang, LI Zhibo, et al. Overview of buckling propagation and buckle arrestor experiment of underwater pipelines abroad [J]. Ship Engineering, 2012, 34 (4): 1-3, 13.
- [17] YUAN L, KYRIAKIDES S. Liner wrinkling and collapse of girth-welded bi-material pipe under bending [J]. Applied Ocean Research, 2015, 50: 209-216.
- [18] 练章华, 成旭堂, 谷天平. 衬里复合管鼓包塌陷及修形力学分析 [J]. 石油机械, 2021, 49 (10): 116-122.
- LIAN Zhanghua, CHENG Xutang, GU Tianping. Mechanical analysis of bulging collapse and modification of lining composite pipe [J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49 (10): 116-122.
- [19] GU T P, ZHANG Q, LIAN Z H, et al. Research and application of equivalent pipe model in stress analysis of lined pipe systems [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2021, 192: 104418.
- [20] 姜雪琦, 樊晓光, 詹梅, 等. 金属材料热变形中的塑性流动失稳研究进展 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (7): 33-51.
- JIANG Xueqi, FAN Xiaoguang, ZHAN Mei, et al. Research progress on plastic flow instability during hot deformation of metal materials [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (7): 33-51.
- [21] 余建星. 深海管道试验的数值模拟理论及应用 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2019.
- Yu Jianxing. Numerical simulation theory and application for deep-sea pipeline test [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2019.
- [22] GB/T 241—2007, 金属管 液压试验方法 [S].
- GB/T 241—2007, Metal material—Tube—Hydrostatic pressure test [S].