

文章编号:1673-9469(2023)02-0009-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.02.002

弯矩作用下玻璃钢内衬再生复合管稳定性能分析

李岩¹,柴鹏举¹,顾孝宋²,卢召红^{1*}

(1. 东北石油大学, 黑龙江大庆 163318; 2. 中国石油昆仑燃气有限公司安徽分公司, 安徽合肥 230092)

摘要: 为研究弯矩作用下玻璃钢内衬再生复合管的稳定性能,采用有限元分析软件,基于层间双线性本构关系,建立玻璃钢内衬再生复合管有限元模型,分析外管腐蚀程度和内衬层厚度对玻璃钢内衬复合管稳定性能的影响,得到复合管受弯作用的应力云图并提取弯矩-管道中心点位移曲线。结果表明:外管壁与玻璃钢内衬层之间的层间作用力在一定程度上限制了管道变形的快速发展,提高了复合管的极限弯矩与因屈曲导致管道失稳破坏前的抗变形能力。带腐蚀坑的复合管道的变形与应力主要集中在腐蚀坑最深处周围,随着腐蚀深度的增加,弯矩极值逐渐降低。

关键词: 复合管道;内衬修复;层间作用;稳定性能

中图分类号:TB304

文献标识码:A

Stability Analysis of GFRP Lining Recycled Composite Pipe Under Bending Moment

LI Yan¹, CHAI Pengju¹, GU Xiaosong², LU Zhaohong^{1*}

(1. Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China;

2. Anhui Branch, Petrochina Kunlun Gas Co., LTD., Hefei, Anhui 230092, China)

Abstract: In order to study the stability of GFRP lined recycled composite pipe under bending moment, a finite element analysis software was used to establish the finite element model of GFRP lined recycled composite pipe based on the bilinear constitutive relationship between layers, and the influences of the corrosion degree of outer pipe and the thickness of inner layer on the stability of GFRP lined composite pipes was analyzed. The stress cloud diagram of the composite pipe under bending action was obtained and the curve of bending moment-center point displacement of the pipe was extracted. The results show that the interlayer force between the outer pipe wall and the GFRP lining layer limits the rapid development of pipeline deformation to a certain extent, and improves the ultimate bending moment of the composite pipe and the anti-deformation ability of the pipe before buckling. The deformation and stress of the composite pipe with corrosion pit are mainly concentrated around the deepest part of the corrosion pit. With the increase of corrosion depth, the extreme value of bending moment gradually decreases.

Key words: composite pipe; lining repair; interlayer action; stability performance

薄壁内衬修复再生复合管道是将薄壁内衬层与带腐蚀缺陷的外层钢管通过特殊施工工艺形成复合管道,实现带缺陷管道或待废弃管道的再利用^[1]。复合管中内衬层与外管壁通过粘结剂连接,粘结界面是整个构件中最薄弱的环节^[2]。复合管承受弯矩作用时会存在内衬层脱层屈曲而导

致管道失稳的特性,研究内衬再生复合管的屈曲稳定问题对内衬修复技术有重要意义^[3]。Tounsi^[4]研究得到粘结层界面应力最大值与分布规律,该结果与实际结果相比过于保守。Yu等^[5]对钢与碳纤维布单搭接界面的力学性能进行了试验研究,分析出界面的结合强度主要取决于断裂能,并

收稿日期:2022-09-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52174021);国家自然科学基金青年基金资助项目(11402051)

作者简介:李岩(1979-),女,黑龙江大庆人,硕士,副教授,从事新型组合结构方面的工作。

* 通讯作者:卢召红(1976-),男,山东临沂人,博士,副教授,从事油气安全储运及新型组合结构技术方面的研究。

且不同的粘结剂需要建立不同的粘结-滑移模型。在此基础上尹世豪等^[6]建立了一种基于失效机理的新型三线内聚力本构模型模拟层合板的分层扩展,并且与试验进行了对比,证明了其有效性。龚顺风等^[7]研究结果表明良好的层间黏结可以使夹层管各层间有效传力和协调变形,显著提升结构的整体受力性能。雷明玮等^[8]获得采用环氧树脂胶和 3M-DP8005 胶的层间切应力-位移关系曲线。周维^[9]指出环状间隙是影响不锈钢内衬屈曲强度的重要因素。Vasilikis 等^[10]研究得出外管的变形及约束效应对内衬层屈曲有影响,并确定了相应的屈曲曲率值。沈金生等^[11]通过试验和有限元相结合,分析了偏心距和外钢管壁厚对再生混凝土柱承载性能的影响,可为再生复合管稳定性的研究提供借鉴。郭奕蓉等^[12]、张春迎等^[13]指出降低管道径厚比或增大外管材料的屈服强度,能够有效延缓管道屈曲。卢召红等^[14]对不同腐蚀程度的管道钢进行拉伸试验,研究了管道钢腐蚀损失度与其力学性能之间的关系,其研究结果可在役管线力学性能进行评估预测。

在上述的研究基础上,本文运用有限元软件,考虑衬层之间的相互作用,建立玻璃钢内衬再生复合管数值分析模型。分析弯矩作用下,外管壁的腐蚀程度和内衬层厚度对玻璃钢内衬复合管稳定性的影响。

1 复合管有限元分析模型

研究内容涉及到薄壁内衬修复再生管道的层间相互作用,ABAQUS 有限元软件能提供相应的接触和连接类型,不管是法向的硬接触还是粘结材料的小滑移等,都方便在 ABAQUS 有限元软件中进行定义。故本研究使用 ABAQUS 有限元分析软件进行有限元模型的建立与分析。

1.1 材料尺寸及基本属性

建立有限元模型时,外基层管材料选用 API X52N 钢管,管道长度为 1 600 mm,外直径 324 mm,壁厚 10 mm。外基层管钢具有不同程度的腐蚀缺陷,将腐蚀坑设置在管道中间位置,腐蚀坑形状为均匀环状椭圆形缺陷,长度设置为 400 mm。薄壁玻璃钢内衬层管长度与外基层钢管长度相同,内衬厚度为 1.5 mm,弹性模量为 7.25×10^4 MPa,密度为 7.25×10^{-4} g/mm³,泊松比为 0.28。表 1 为 X52N 外管钢的基本属性参数。

表 1 外管钢基本属性参数

Tab. 1 Basic property parameters of outer pipe steel					
名称	抗拉强度 f_u /MPa	屈服强度 f_u^f /MPa	弹性模量 E_s /MPa	泊松比 μ	伸长率 ε /%
X52N 外管钢	455	360	2.2×10^5	0.28	21.7

1.2 材料本构选取与试件破坏准则

基于文献[1]得出的层间切向与法向的界面应力-相对位移本构关系建立有限元分析模型。层间相互作用力包括法向正应力和两个相互垂直的剪切应力。界面粘结层发生初始损伤后,采用刚度线性软化,基于断裂准则控制单元的退化,最大断裂能指的就是粘结层发生损伤后所需要的能量。在定义损伤时,除最大断裂能外,损伤采用最大名义应力准则(Maxs Damage)进行定义,法向与切向的名义应力指的是粘结层开始发生破坏时的最大峰值应力,该准则以任何一个名义应力比等于 1 时的损伤开始,具体表达式如式(1)所示。

$$\text{Max} \left\{ \frac{\tau_n}{\tau_n^0}; \frac{\tau_s}{\tau_s^0}; \frac{\tau_t}{\tau_t^0} \right\} = 1 \quad (1)$$

式中: τ_n 、 τ_s 和 τ_t 分别为 X、Y 和 Z 方向的名义应力; τ_n^0 、 τ_s^0 和 τ_t^0 分别为 X、Y 和 Z 方向的最大名义应力。

采用双线性内聚力模型来模拟管钢与薄壁不锈钢之间的层间相互作用,通过粘结相互作用引入牵引力-位移损伤准则模拟粘结层的退化过程。其关系控制方程如式(2)和式(3)所示。图 1 为双线性内聚力牵引力-相对位移关系曲线。

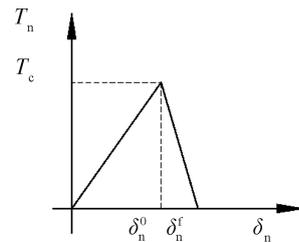


图 1 双线性内聚力牵引力-相对位移关系曲线

Fig. 1 Bilinear cohesion traction-relative displacement relationship curve

$$T_n = \begin{cases} \frac{\sigma_c}{\delta_n^0} \delta & (\delta \leq \delta_n^0) \\ \sigma_c \frac{\delta_n^f - \delta}{\delta_n^f - \delta_n^0} & (\delta > \delta_n^0) \end{cases} \quad (2)$$

$$T_t = \begin{cases} \frac{\tau_c}{\delta_t^0} \delta & (\delta \leq \delta_t^0) \\ \tau_c \frac{\delta_t^f - \delta}{\delta_t^f - \delta_t^0} & (\delta > \delta_t^0) \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_n —法向应力值; T_t —切向应力值; σ_c —界面法向应力极值; τ_c —界面切向应力极值; δ_n^0 —界面法向应力极值对应的相对位移; δ_t^0 —界面切向应力极值对应的相对位移; δ_n^f —界面法向相对位移极值; δ_t^f —界面切向相对位移极值。

1.3 施加的载荷、边界条件及网格划分

将薄壁玻璃钢内衬修复再生复合管有限元模型两端铰接固定,在复合管道两端设置参考点,将参考点与管道端部截面耦合,在模型两端参考点处施加纯弯矩作用。层间用法向硬接触和粘接行为定义。如图 2 所示,内外管壳在网格划分时均采用 C3D8R 单元,单元类型为六面体实体单元,划分网格之前进行了网格敏感性分析,当网格尺寸设置为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 时,改变网格密度对最终计算结果的影响较小。

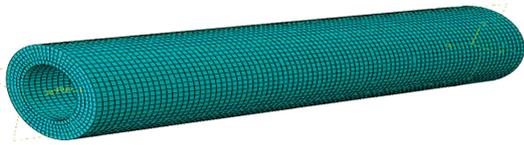


图 2 有限元模型网格划分

Fig. 2 Mesh dividing of the FEM model

1.4 有限元模型验证

选用试件和相关参数与文献[1]试验中完全一致并进行模拟,分析试验得出的外管钢和薄壁内衬之间的层间相互作用本构关系用于建立薄壁衬层再生复合管材层间界面力学分析模型是否具有可行性。在模拟切向拉伸破坏试验时,将外管壁的一端完全固定,对薄壁内衬施加沿轴向向外的位移荷载;在模拟法向拉伸破坏试验时,将外管壁的外层完全固定,对薄壁内衬施加沿径向向内的位移荷载。

根据力的平衡和变形协调条件,建立如式(4)、式(5)和式(6)的平衡方程,计算试件的界面切向应力、法向应力和与之相对应的相对位移。

$$\tau = \frac{\sigma_{i-1} - \sigma_i}{x_i - x_{i-1}} h_2 \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{N}{A'} \quad (5)$$

$$\Delta s = (\varepsilon_{i-1} - \varepsilon_i)(x_i - x_{i-1}) \quad (6)$$

式中: τ —切向界面应力; σ_i —距离端部距离为 x_i 处的应力值; σ —切向界面应力; σ_{i-1} —距离端部距离为 x_{i-1} 处的应力值; N —试验过程施加的荷载; A' —试件粘结面面积; Δs —界面相对位移; ε_i —距离端部距离为 x_i 处的应变值; ε_{i-1} —距离端部距离为 x_{i-1} 处的应变值。

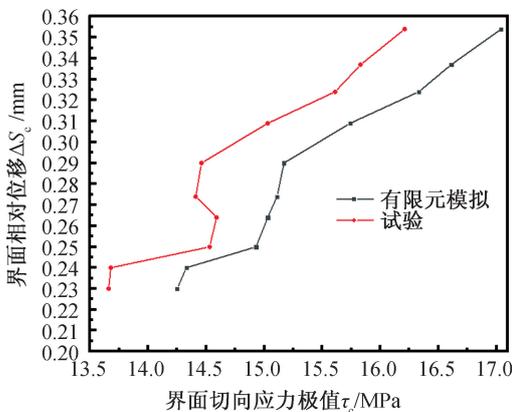
将有限元模拟与试验得出的界面切向、法向应力极值与其相对应的相对位移绘制成曲线,如图 3 所示。

通过计算得出层间切向与法向界面应力,提取与其相对应的相对位移,对比有限元模拟与试验得出的界面应力极值发现最大误差为 4.98%,该本构关系能很好地模拟薄壁内衬修复再生复合管的层间相互作用。

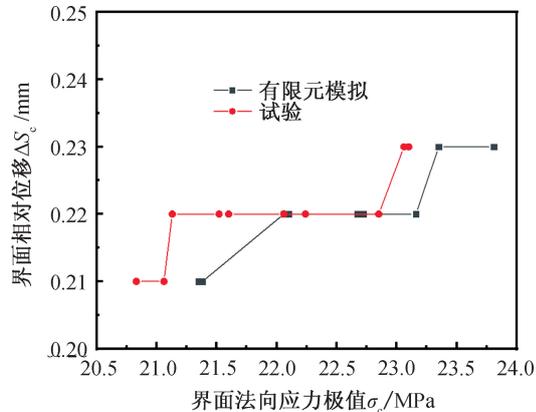
2 数值分析结果

2.1 腐蚀程度对复合管稳定性能的影响

通过改变腐蚀坑深度与外管壁厚厚度之间的比值,即深厚比 d/h 来控制管道的腐蚀程度,选择深厚比 d/h 为 0%、20%、40%、60% 和 80% 五种不同的腐蚀程度进行对比分析。按照腐蚀程度由小到大的顺序,从 XF1501—XF1505 进行编号, XF 代表修复后的管道, 15 代表内衬层厚度为 1.5 mm, 后续数字依次为腐蚀程度。根据输入参数的单位,



(a) 界面切向应力极值-相对位移曲线



(b) 界面法向应力极值-相对位移曲线

图 3 有限元模拟与试验对比曲线

Fig. 3 FEM simulation and test comparison curve

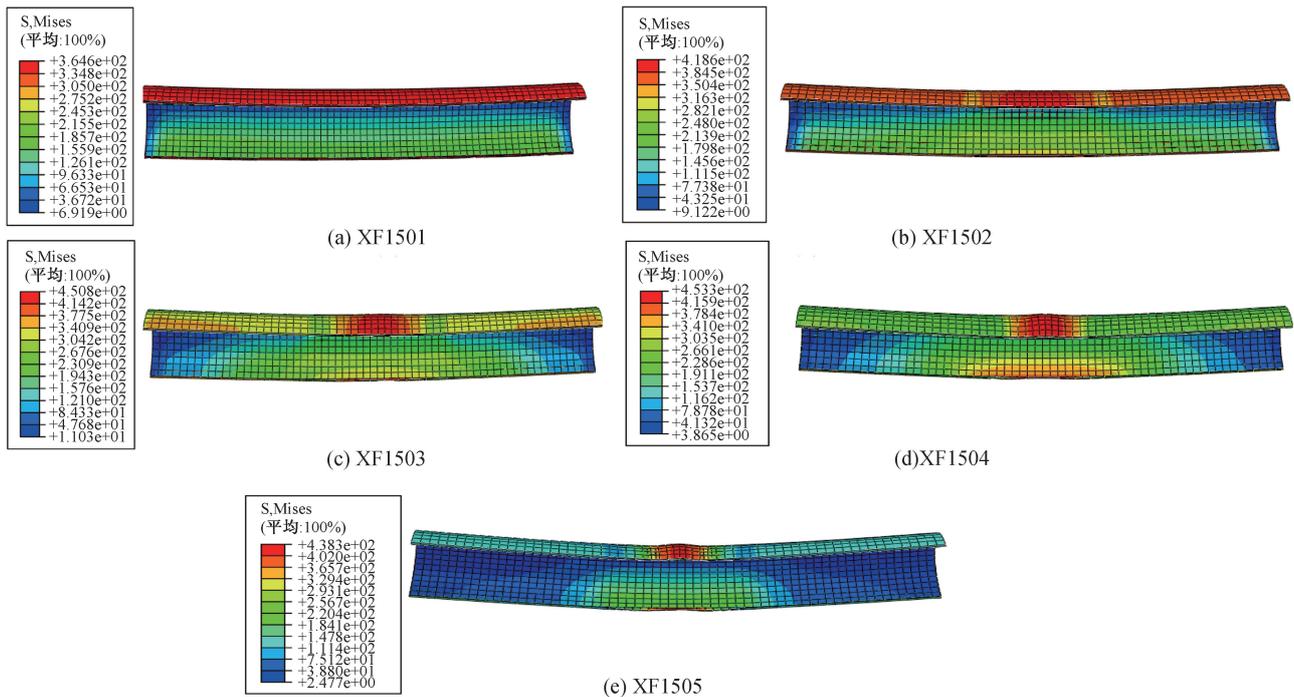


图4 复合管受弯矩作用下的应力云图

Fig. 4 Stress cloud diagram of stress under bending moment of composite pipe

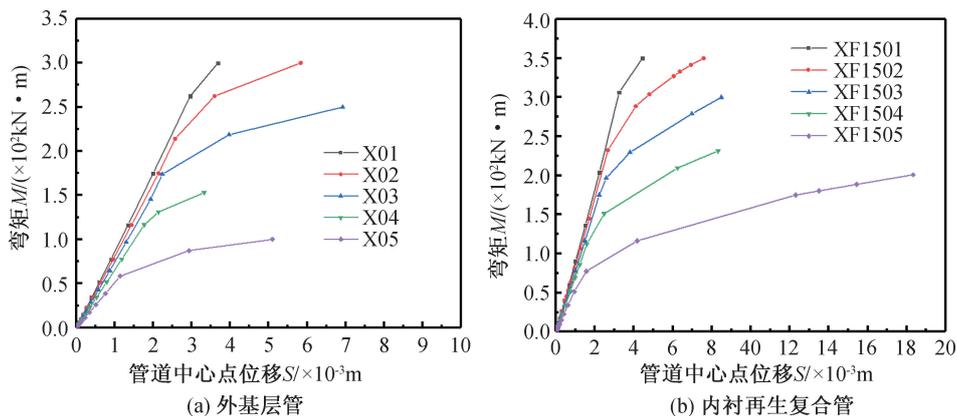


图5 跨中弯矩-位移曲线

Fig. 5 Midspan bending moment-displacement curve

管道试件应力云图的单位为 Mpa。图4为不同腐蚀程度玻璃钢内衬修复管道试件的应力云图。

由图4可知,复合管道受弯矩作用时,对于无腐蚀缺陷的复合管,应力较大值集中在管道的上侧;而对于外基层管具有腐蚀坑的复合管,其屈曲与应力集中部位在腐蚀坑最深处周围,且腐蚀坑深度越深,腐蚀坑处的屈曲变形越明显,内衬层的屈曲变形也越明显,复合管道越容易因丧失保持稳定平衡的能力而破坏。

图5(a)为不同腐蚀程度外基层管的弯矩-管道中心点位移曲线。图5(b)为不同腐蚀程度再生复合管的弯矩-管道中心点位移曲线,曲线分为两

个阶段。第一阶段为弹性阶段,该阶段复合管整体处于弹性阶段,当弯矩继续增加,超过复合管所能承受的弯矩极值后,复合管发生屈曲破坏。当内衬层与外管壁之间的层间应力达到峰值应力时,界面粘聚力逐渐失效,粘结层发生大面积的失效破坏,内衬层发生屈曲破坏。第二阶段的曲线即复合管发生屈曲破坏后整体的弯矩-管道中心点位移曲线。对比图5(a)与(b)两图发现:采用相同厚度的薄壁玻璃钢内衬进行修复时,随着腐蚀坑处最大深厚比的增加,复合管弯矩极值均在减小,管道越容易发生失稳破坏,但与其未修复管道相比,弯矩极值的提升越来越大。分析认为采用

薄壁玻璃钢内衬修复时,得益于薄壁内衬与外管壁之间良好的层间相互作用力,在外管壁腐蚀坑处因应力集中现象快速变形时,外管壁与内衬层之间的层间作用力在一定程度上限制了变形的快速发展,提高了复合管的抗弯性能。

2.2 内衬层厚度对复合管稳定性能的影响

为研究不同薄壁玻璃钢内衬层厚度对复合管在弯矩作用下稳定性能的影响。在不同腐蚀程度外管壁的模型基础上,仅改变薄壁玻璃钢内衬层厚度为 1.0、1.5 和 2.0 mm。图 6 为基于有限元模

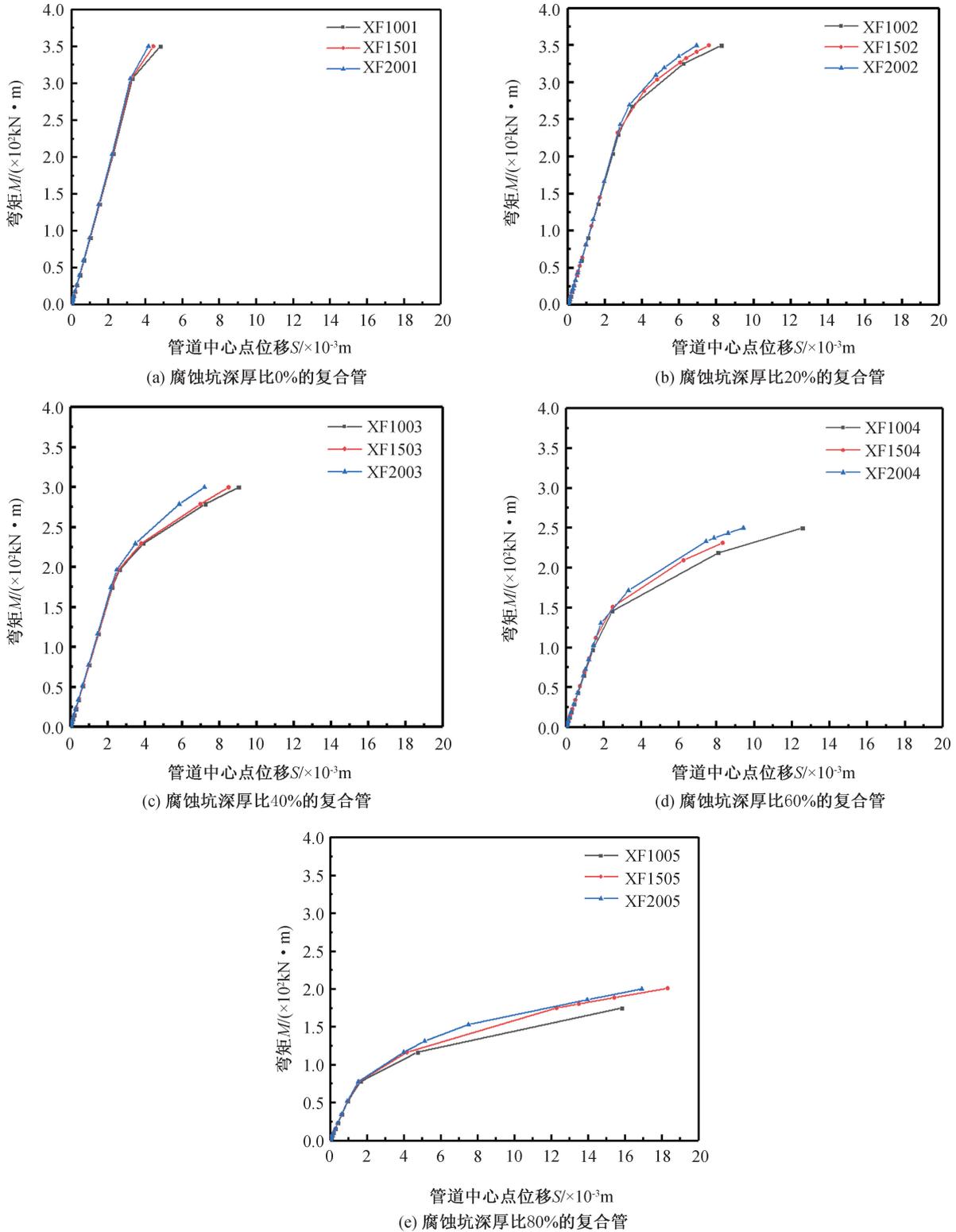


图 6 不同薄壁玻璃钢内衬厚度复合管弯矩-管道中心点位移曲线

Fig. 6 The bending moment of different thin-walled reinforced GFRP lining thickness composite pipe-central point displacement curve of pipe

拟试验得出的数据绘制弯矩-管道中心点位移曲线。

为比较不同厚度的薄壁玻璃钢内衬层对于带腐蚀缺陷外基层管的修复效果,图7为不同薄壁玻璃钢内衬层厚度复合管的弯矩极值曲线图。

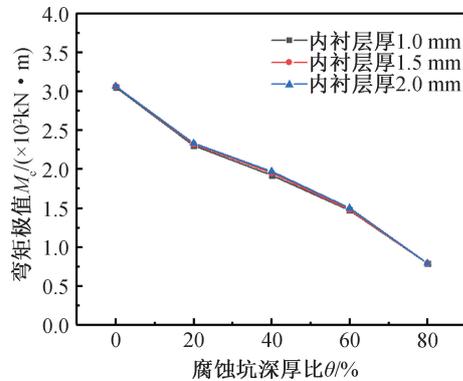


图7 不同薄壁玻璃钢内衬厚度复合管受弯矩作用弯矩极值
Fig.7 Extreme value of the composite pipe with different thin-walled glass fiber reinforced plastic lining thickness

由图6和图7可知,在外管壁腐蚀程度相同的情况下,增大薄壁内衬层的厚度对提升薄壁玻璃钢内衬再生复合管所能承受的弯矩极值影响较小。因为玻璃钢弹性模量远小于外管壁的弹性模量,并且内衬层厚度较薄,对复合管整体刚度的提升较小,但由于薄壁内衬与外管壁之间良好的层间相互作用力,在外管壁腐蚀坑处因应力集中效应应力快速增大时,外管壁与内衬层之间的层间作用力在一定程度上限制了变形的快速发展,提高了复合管的抗弯性能。

3 结论

1)采用玻璃钢内衬修复的再生复合管,薄壁内衬与外管壁之间有良好的层间作用力,承受弯矩作用时,层间作用力在一定程度上限制了腐蚀坑处由于应力集中而导致的快速变形,提高了复合管的极限弯矩与屈曲破坏前的抗变形能力。

2)玻璃钢内衬再生复合管在弯矩作用下的稳定性能受外管壁腐蚀程度的影响较大,当玻璃钢内衬层厚度一定时,随着腐蚀坑处最大深厚比的增加,腐蚀坑处的屈曲变形越明显,内衬层的屈曲变形也越明显,复合管弯矩极值在减小,复合管道也越容易发生失稳破坏。

3)在外管壁腐蚀程度相同的情况下,增大薄壁内衬层的厚度对提升薄壁玻璃钢内衬再生复合管所能承受的弯矩极值影响较小。

参考文献:

- [1] 卢召红,王凯勃,王尊策,等.薄壁衬层再生复合管外层间界面力学行为分析[J].工程科学与技术,2021,53(4):92-100.
- [2] 许巍,陈力,张钱城,等.粘结界面力学行为及其表征[J].中国科学:技术科学,2012,42(12):1361-1376.
- [3] XU X, YUAN M, LIM C W, et al. Dynamic Buckling of Cylindrical Shells Subject to an Axial Impact in a Symplectic System[J]. International Journal of Solids and Structures,2006,43(13):3905-3919.
- [4] TOUNSI A. Improved Theoretical Solution for Interfacial Stresses in Concrete Beams Strengthened with FRP Plate[J]. International Journal of Solids and Structures,2006,43(14-15):4154-4174.
- [5] YU T, FERNANDO D, TENG J G, et al. Experimental Study on CFRP-to-Steel Bonded Interfaces[J]. Composites Part B Engineering,2012,43(5):2279-2289.
- [6] 尹世豪,张建宇,龚愉,等.新型三线性本构内聚力模型的界面参数研究[J].重庆大学学报,2020,43(2):91-99.
- [7] 龚顺风,王喜鹏,李根,等.层间黏结性能对夹层管屈曲传播的影响机理[J].浙江大学学报:工学版,2018,52(5):819-827+835.
- [8] 雷明玮,龚顺风,胡勃.纯弯作用下深海夹层管复合结构屈曲失稳分析[J].浙江大学学报:工学版,2015,49(12):2376-2386.
- [9] 周维.管道薄壁不锈钢内衬屈曲失效理论与试验研究[D].武汉:中国地质大学,2017.
- [10] VASILIKIS D, KARAMANOS S A. Mechanical Behavior and Wrinkling of Lined Pipes[J]. International Journal of Solids and Structures,2012,49(23-24):3432-3446.
- [11] 沈金生,彭宁宁,安新正,等.钢管再生混凝土短柱承载性能有限元分析[J].河北工程大学学报:自然科学版,2021,38(4):1-6+74.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 卢召红,韩璐泽,徐艳,等.表面自然腐蚀后带缺陷钢管的力学性能研究[J].河北工程大学学报:自然科学版,2022,39(2):25-30.

(责任编辑 周雪梅)