

◀石油管工程▶

交变载荷下悬跨双金属复合管安全评估分析*

齐昌鑫 周传喜 管 锋 朱恩成 陈义洪

(长江大学机械工程学院)

齐昌鑫, 周传喜, 管锋, 等. 交变载荷下悬跨双金属复合管安全评估分析 [J]. 石油机械, 2026, 54 (4): 147–155.

Qi Changxin, Zhou Chuanxi, Guan Feng, et al. Safety assessment and analysis of suspended bimetallic composite pipes under alternating loads [J]. China Petroleum Machinery, 2026, 54 (4): 147–155.

摘要: 双金属复合管 (简称复合管) 铺设于海床时, 管道在波流冲刷、地形变化及内应力作用下易形成悬跨段。而海流等交变载荷会诱发管道悬跨段持续振动, 长期作用下可能导致结构疲劳甚至破坏, 严重威胁管道的安全稳定运行。为此, 基于有限元软件建立了复合管的成形模型, 并验证了模型的有效性; 研究了不同边界条件、海流流速及悬跨长度等关键参数对悬跨复合管力学行为的影响, 重点分析了内管 **Mises** 应力分布及内外管间残余接触压力的变化规律; 从应力水平和界面结合状态 2 个层面, 对悬跨复合管的结构安全性进行了评估。研究结果表明: 悬跨复合管内管的最大 **Mises** 应力与层间残余接触压力受边界条件与悬跨长度影响显著, 随悬跨增长呈非线性变化; 海流等交变载荷会引起二者波动, 流速越高波动幅值越大, 长期作用易导致内管疲劳及层间结合力减小, 危及管道安全; 在最大流速工况下, 悬跨长度较短时使用最大 **Mises** 应力作为评估指标, 悬跨长度较长时则更适合以残余接触压力作为评估指标。综合而言, 使用层间残余接触压力评估复合管悬跨段在交变载荷作用下的安全性更为合适。所得研究结果可为悬跨复合管安全评估提供依据。

关键词: 海底输油气管道; 双金属复合管; 悬跨; 波流载荷; **Mises** 应力; 残余接触压力; 安全性评估

中图分类号: TE973 文献标识码: A DOI: 10.12473/CPM.202508053

Safety Assessment and Analysis of Suspended Bimetallic Composite Pipes under Alternating Loads

Qi Changxin Zhou Chuanxi Guan Feng Zhu Encheng Chen Yihong

(School of Mechanical Engineering, Yangtze University)

Abstract: Bimetallic composite pipes (BCPs) laid on the seabed tend to form suspended span sections due to wave-current scouring, topographic changes and internal stresses. Alternating loads such as ocean currents can induce continuous vibration of the suspended pipeline sections, possibly leading to structural fatigue or even failure under long-term vibration. This seriously threatens the safe and stable operation of the pipeline. In this paper, a forming model of BCP was established using the finite element software and validated. The influences of key parameters such as different boundary conditions, ocean current velocity and suspended span length on the mechanical behavior of the suspended BCP were investigated, and the distribution of Mises stress in the inner pipe and the variation of residual contact pressure between the inner and outer pipes were analyzed. The structural safety of the

* 基金项目: 国家重点研发计划“海洋石油大直径指向式旋转导向系统研制”(2023YFC2810901)。

suspended BCP was evaluated in view of stress levels and interfacial bonding states. The results show that the maximum Mises stress of the inner pipe and the interlayer residual contact pressure of the suspended BCP are greatly affected by boundary conditions and suspended span length, and vary nonlinearly with an extending suspended span. Alternating loads such as ocean currents cause fluctuations in both parameters, and the higher the current velocity, the greater the fluctuation amplitude. Long-term vibration tends to induce fatigue of the inner pipe and degradation of the interlayer bonding force, endangering pipeline safety. In the case of the maximum current velocity, the maximum Mises stress should be taken as the evaluation index for short suspended spans, while the residual contact pressure is more appropriate for long suspended spans. Overall, the interlayer residual contact pressure is more suitable for evaluating the safety of suspended BCP sections under alternating loads. The research results provide a basis for the safety assessment of suspended BCPs.

Keywords: subsea oil and gas pipeline; bimetallic composite pipe; suspended span; wave-current load; Mises stress; residual contact pressure; safety assessment

0 引言

双金属复合管是有效解决海底管道 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 腐蚀问题的关键技术之一^[1]。然而,铺设于海床的双金属复合管在波流冲刷、地形变化及管道内应力的作用下,易产生悬跨现象。管道悬跨段在波浪和海流等交变载荷作用下会诱发振动,长期作用下可能导致管道疲劳甚至破坏,严重威胁管道的安全稳定运行。

当前,国内外学者对悬跨海底管道在波流载荷下的动态响应和稳定性问题开展了大量的仿真和试验研究。BAI Y.等^[2]针对波浪与海流荷载下海底管道的非线性稳定问题,引入ABAQUS有限元法建立仿真模型,模拟了悬跨裸露管道的动态响应。ZHANG Y.等^[3]建立了管道-土相互作用模型,分析波浪与海流作用下海底悬空管道的力学响应,以及不同悬跨长度时管道应力变化及应力分布情况。ZHU H. M.等^[4]提出了一种不考虑具有剧烈和非线性响应的工况下,仅使用静态应变测量来评估海底管道正常和稳定运行条件下自由跨度条件的新方法。在参数影响方面,刘成等^[5]根据管道最大弯曲应力与材料许用应力的关系确定临界悬跨长度,分析悬跨长度、波浪等要素对海底管道受力分布的影响。FU C. J.等^[6]建立了悬空管道段所承受的水动力载荷表达式,推导了适用于常见形式的海底悬空管道自由跨度允许长度的公式。夏日长等^[7]研究了不同海床参数和不同波流载荷对悬跨海底管道发生侧向运动的影响。冯宾等^[8]对悬跨海底电缆在波流载荷下的侧向运动行为进行分析,并研究了不同波流参数下的运动特性。闫术明等^[9]通过试验模拟了悬跨海底管道

在海流作用下的侧向失稳过程。对于边界条件方面,徐万海等^[10]考虑流-固-土多场耦合,设计了拖曳水池试验系统,并开展了多跨管道涡激振动试验观测。路顺等^[11]分析了海流-管道-海床之间的耦合作用,得到海底管道侧向失稳规律。另外,在悬跨海底管道安全性评估方面,付崔伟等^[12]研究了管道受到海底滑坡冲击作用时的动态响应,提出了综合考虑悬跨长度和高度影响下海底管道的安全性评估方法。黄朝炜等^[13]从侧向稳定性、强度失效及悬跨疲劳分析方面提出了受冲刷裸露管道的安全评估方法。姚平等^[14]研究了不同底床形状下海管最大静挠度随海流流速变化的规律,对东方1-1气田某标段海管进行了安全评估。向敏等^[15]建立了水下管道有限元模型,分析其在水流冲击下的应力-应变特性,构建了强度评价准则。杨涛等^[16]研究了水流冲击下悬跨管道的受力特性和失效行为,并提出了悬跨管道的分级安全评价方法。

综上,目前对于悬跨管道的研究主要集中于单层管,且其安全性评估以管道最大应力为标准,对于交变载荷作用下双金属复合管(简称复合管)悬跨段的界面分层问题和安全评估方法尚不明确。为此,笔者使用有限元模拟复合管成形过程,并验证模型的有效性,分析不同边界条件下流速及跨长对复合管悬跨段应力和残余接触压力的影响,并以此对悬跨管道的安全运行开展了评估。研究成果可为悬跨双金属复合管的安全评估提供依据。

1 复合管成形有限元模型建立及验证

1.1 复合管成形分析

复合管成形过程分为3个阶段(见图1):①内管受到液压力作用膨胀,内、外管间隙消除;

②内、外管贴合后,在液压力的作用下两者同时膨胀变形;③卸载液压力,管道发生自然弹性回复。成形后管道的内、外管之间紧密贴合,存在残余接触压力。

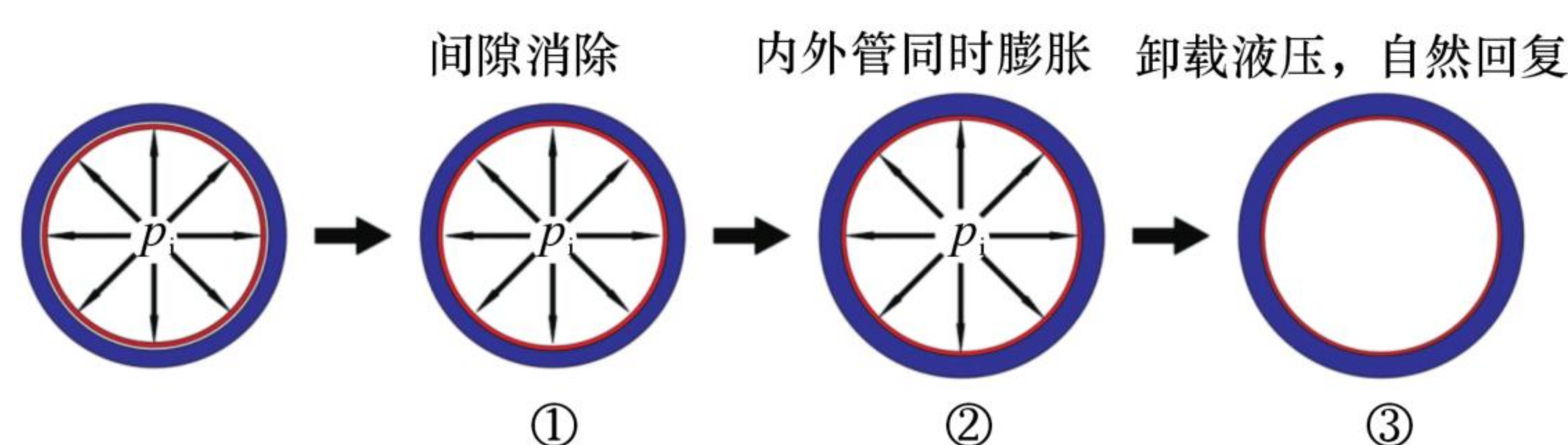


图1 复合管液压成形过程

Fig. 1 Hydroforming process of BCPs

考虑到内管材料的强化作用,假定内管为线弹性强化材料模型。而外管只产生弹性变形或很小的塑性变形,忽略材料的强化作用,认为外管为理想弹塑性材料模型。

当外管达到最大弹性变形时卸载液压力在理论上达到最大残余接触压力^[17],故复合管的最大成形压力为:

$$p_i = \frac{K^2 - 1}{2K^2} \sigma_{so} + \sigma'_{si} \ln k \quad (1)$$

其中:

$$\sigma'_{si} = \sigma_{si} + E'_i \left(\frac{2\delta}{d_o} \right) \quad (2)$$

式中: p_i 为液压成形压力, MPa; K 为 D_o 与 D_i 的比值, D_o 和 D_i 分别为外管的外径和内径, mm; k 为 d_o 与 d_i 的比值, d_o 和 d_i 分别为内管的外径和内径, mm; σ_{so} 为外管的屈服应力, MPa; σ'_{si} 为内衬管的应变强化应力, MPa; σ_{si} 为内管的屈服应力, MPa; δ 为内外管间隙, mm; E'_i 为内衬管塑性强化阶段的弹性模量, MPa。

液压力卸载后内外管残余接触压力 p_c^* 与成形压力 p_i 之间的关系为:

$$\frac{p_i}{B} = \frac{p_c^*}{A} + \left(\frac{1}{E_i} + \frac{1}{B} \ln k \right) \sigma'_{si} \quad (3)$$

其中:

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{E_i} \left(\frac{k^2 + 1}{k^2 - 1} - \mu_i \right) + \frac{1}{E_o} \left(\frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} + \mu_o \right) \quad (4)$$

$$\frac{1}{B} = \frac{1}{E_o} \left(\frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} + \mu_o \right) + \frac{1}{E_i} (1 - \mu_i) \quad (5)$$

式中: μ_i 、 μ_o 分别为内外管的泊松比; E_i 、 E_o 分别为内外管的弹性模量, MPa。

1.2 复合管成形有限元模型建立

按照文献[18]相关参数及设置建立模型,外管选用X65管线钢,内管选用SUS304不锈钢。相关几何尺寸与材料属性如表1所示。

内外管均采用实体单元,网格属性为C3D8R。

表1 复合管几何尺寸及材料参数

Table 1 Geometric dimensions and material parameters of BCPs

管道类别	外径/mm	厚度/mm	径厚比	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	泊松比
外管	323.6	14.3	22.6	206	465	0.3
内管	293.0	3.0	97.7	193	265	0.3

内外管接触采用有限滑移方式,法向硬接触,切向未考虑摩擦力的影响。模型网格划分情况如图2所示。

为符合实际生产成形过程,复合管成形有限元模型左端面选取对称边界条件,管道前后端面限制轴向位移,限制水平面与前后端面交线处沿竖直方向的位移。

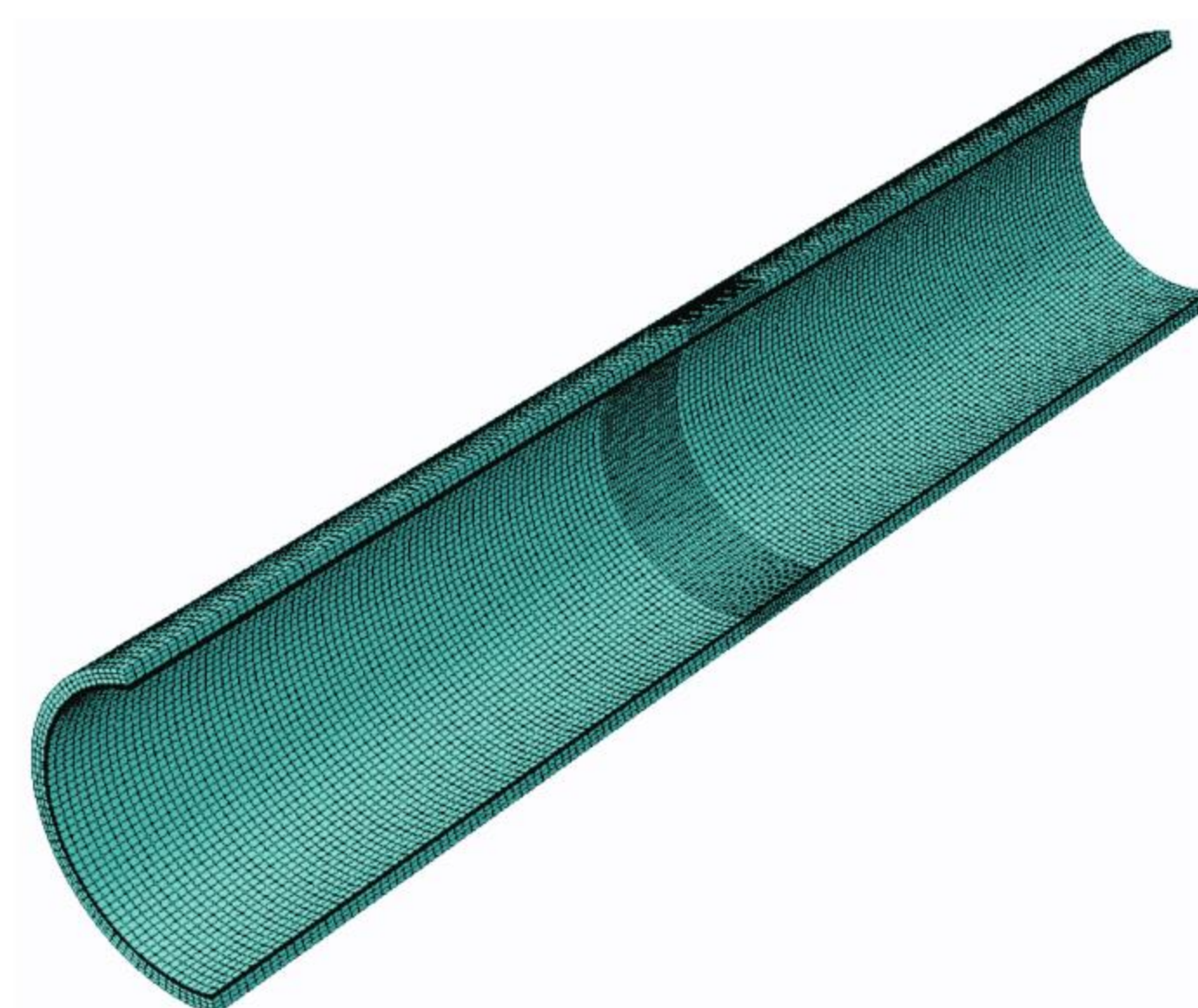


图2 复合管有限元模拟网格划分图

Fig. 2 Meshing in finite element simulation for BCPs

1.3 网格无关性分析

网格数量和质量也是影响有限元模拟准确性的重要因素。对不同网格密度下的计算结果进行对比,结果如图3所示。由图3可以看出,网格数量达到61 920后可满足精度要求,故后续使用该网格密度进行载荷分析。

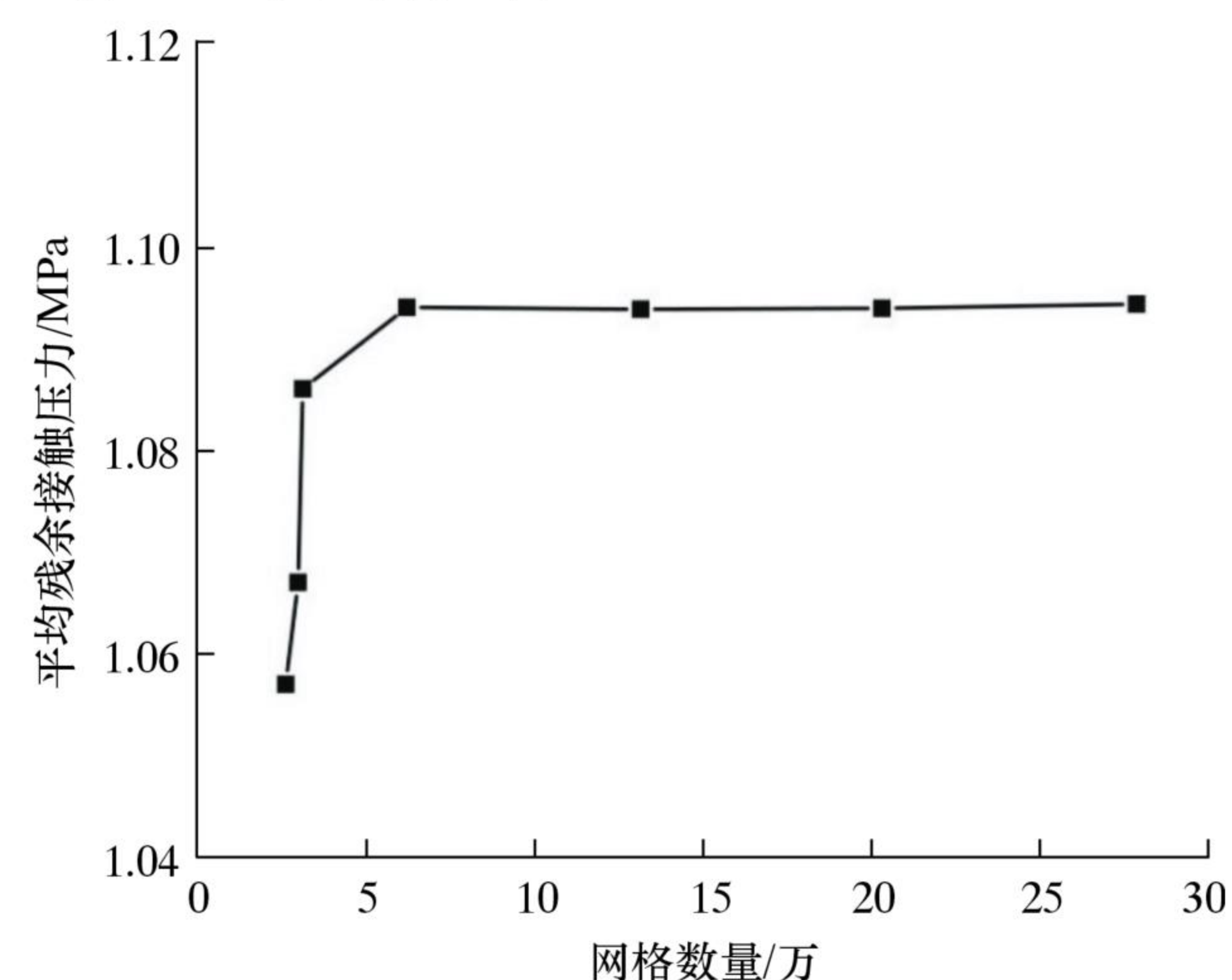


图3 网格无关性分析

Fig. 3 Mesh independence analysis

1.4 复合管成形有限元模型验证

通过式(1)~式(5)计算得到最大成形压力下的残余接触压力为1.2 MPa。在理论最大成形压力下,有限元模拟得到成形后内管外壁的残余接

触压力如图4所示。由图4可知,平均残余接触压力为1.098 MPa,有限元模拟平均残余接触压力与理论值最大误差为8.51%,验证了该有限元模型的有效性。

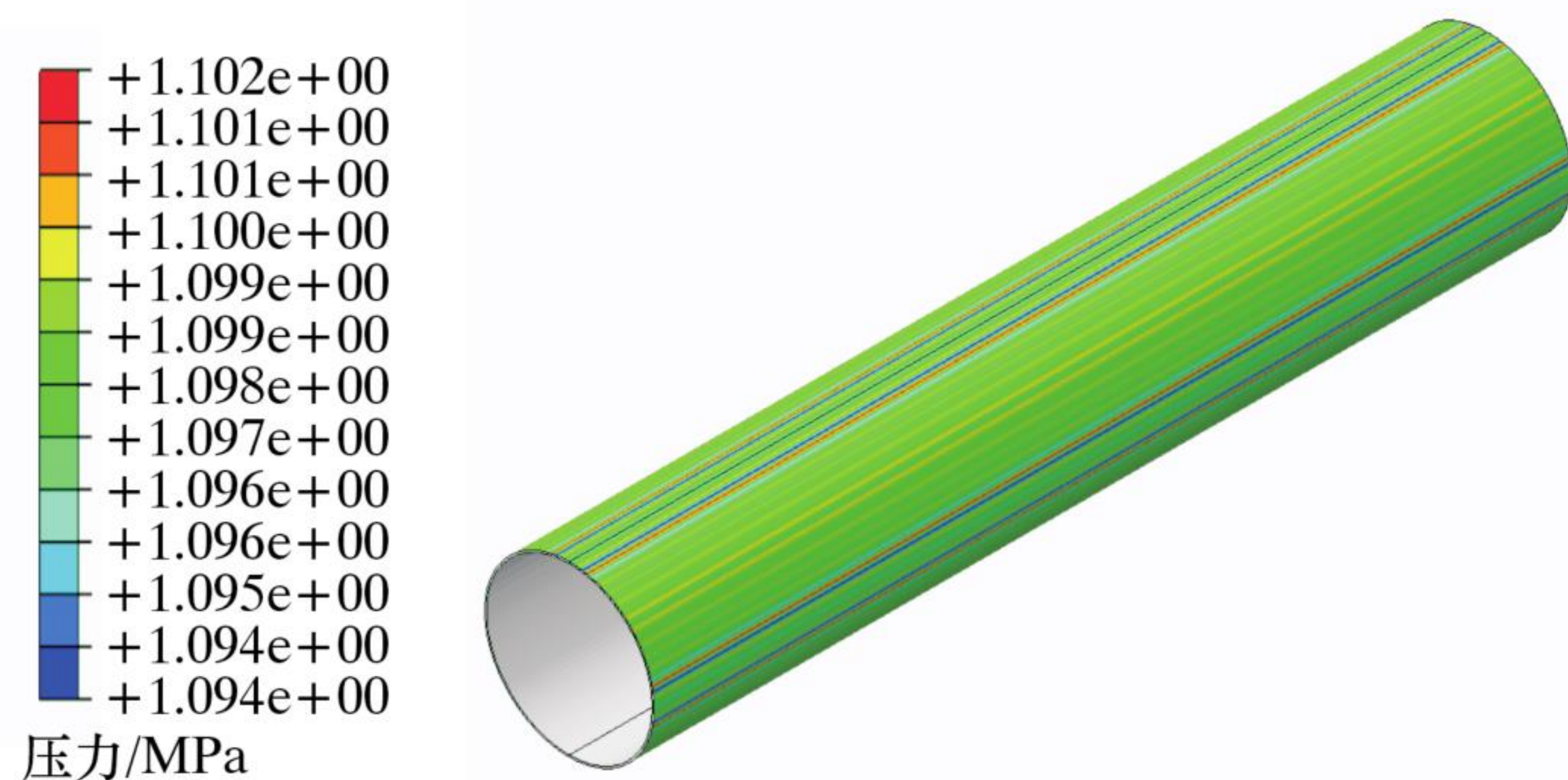


图4 复合管内管残余接触压力

Fig. 4 Residual contact pressure of the inner pipe of the BCP

2 悬跨复合管有限元分析

2.1 悬跨环境载荷分析

2.1.1 海流作用下最大悬跨长度计算

悬跨管道会因重力产生纵向应力,但在实际工况中,海流作用也会使悬跨管道产生顺流向和横向的振动位移。

在计算复合管最大悬跨长度时,需要将复合管等效为单层管^[19]后当量折算。等效管的横截面应与复合管具有相同的弯曲刚度,可以采用复合管惯性矩叠加原理,则等效管截面惯性矩为:

$$I_{eq} = I_1 + I_2 = \frac{\pi}{64} (D_{eq2}^4 - D_{eq1}^4) \quad (6)$$

式中: I_{eq} 为等效管截面惯性矩, m^4 ; I_1 、 I_2 分别为内、外层管截面惯性矩, m^4 ; D_{eq1} 、 D_{eq2} 分别为等效管内、外径, m 。

同理:

$$A_{eq} = A_1 + A_2 = \frac{\pi}{4} (D_{eq2}^2 - D_{eq1}^2) \quad (7)$$

式中: A_{eq} 为等效管横截面积, m^2 ; A_1 、 A_2 分别为内、外管横截面积, m^2 。

等效管单位长度质量为:

$$m_e = \rho_e A_{eq} = \rho_1 A_1 + \rho_2 A_2 \quad (8)$$

式中: m_e 为等效管单位长度质量, kg/m ; ρ_1 、 ρ_2 分别为内、外管密度, kg/m^3 ; ρ_e 为等效管密度, kg/m^3 。

通过对南海北部海域海况分析,选取最大海流流速 $v_c = 1.0 m/s$,基于 DNV-RP-F105 标准^[20]对最大悬跨长度分析(管道两端考虑简支)。管道固有频率 f_n 为:

$$f_n = \frac{C_n}{2\pi} \sqrt{\frac{E_{eq} I_{eq}}{m_e L^4}} \quad (9)$$

式中: f_n 为固有频率, Hz ; E_{eq} 为等效管弹性模量, Pa ; L 为悬跨长度, m ; C_n 为频率系数,与管道两端边界条件有关,简支取 π^2 。

约化速度 v_r (无量纲) 为:

$$v_r = \frac{v_c}{f_n D_o} \quad (10)$$

以约化速度 $v_r \leq 3.5$ 调整跨长,通过计算得到基于涡激振动控制的最大悬跨长度为 23.6 m,故后续分析时采用悬跨长度 12、16、20 和 24 m。

2.1.2 管土相互作用

根据不同土壤类型,基于 DNV 标准^[21]对土壤水平刚度进行分析。考虑土壤类型为软黏土,其土壤水平刚度如下:

$$k_h = \frac{N_p s_u D_o}{\gamma_{50}} \quad (11)$$

式中: k_h 为土壤水平刚度, Pa ; N_p 为侧向承载力系数,无量纲; s_u 为不排水抗剪强度, Pa ; γ_{50} 为水平向位移,取 $0.02 D_o$, m 。

土壤垂向刚度如下:

$$k'_v = \frac{E_s}{(1 - \nu^2)} \quad (12)$$

式中: k'_v 为土壤垂向刚度, Pa ; E_s 为土壤弹性模量, Pa ; ν 为土壤泊松比。

2.1.3 悬跨段水动力载荷分析

海流水质点速度变化缓慢,近似认为是定常流。根据 Morsion 方程^[22],作用于单位长度管道上的水平拖曳力 F_D 和垂向升力 F_L 为:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho D_o v_c^2 [1 + A_D \cos(2\pi \cdot 2f_s t)] \quad (13)$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho D_o v_c^2 \cos(2\pi \cdot f_s t) \quad (14)$$

式中: ρ 为海水密度, kg/m^3 ; C_D 为拖曳力系数,无量纲; C_L 为升力系数,无量纲; f_s 为漩涡脱落频率, Hz , 其中 $f_s = v_c Sr / D_o$, 斯特劳哈尔数 Sr 值取 0.2; A_D 为拖曳力波动幅值,取 0.2。

拖曳力系数 C_D 和升力系数 C_L 与海洋环境雷诺数相关,其中雷诺数 Re 为:

$$Re = \frac{\rho D_o v_c}{\mu} \quad (15)$$

式中: μ 为海水动力黏度系数,取 $1.07 \times 10^{-3} kg/(m \cdot s)$ 。

升力系数与拖曳力系数可以参考相关环境载荷推荐^[23],具体如表2所示。

表 2 管道相关环境载荷推荐系数

Table 2 Recommended coefficients of environmental loads related to pipelines

Re	C_D	C_L
$Re < 5 \times 10^4$	1.3	1.5
$5 \times 10^4 \leq Re < 1 \times 10^5$	1.2	1.0
$1 \times 10^5 \leq Re < 2.5 \times 10^5$	$1.53 - Re / (3 \times 10^5)$	$1.2 - Re / (5 \times 10^5)$
$2.5 \times 10^5 \leq Re < 5 \times 10^5$	0.7	0.7
$5 \times 10^5 \leq Re$	0.7	0.7

2.2 悬跨复合管有限元模型

以南海北部海域为例, 复合管实际应用深度为 90 m, 海床土壤多为软黏土或砂质黏土, 因此真实管土接触段土壤刚度为软黏土刚度。悬跨管道与土壤相互作用段长度 L_1 使用 Winkler 模型^[24]确定。衰减长度 λ 是指悬跨管道从接触土体起, 沿管道延伸到使悬跨引起的管道附加弯矩等衰减至可忽略不计的距离。为了减少边界效应的影响, 悬跨管道与土壤相互作用段应满足 $L_1 \geq 3\lambda$, 即有:

$$L_1 \geq 3\lambda = 3 \sqrt[4]{\frac{k'}{4E_{eq}I_{eq}}} \quad (16)$$

式中: L_1 为管土相互作用长度, m; λ 为衰减长度, m; k' 为土壤地基反力系数, 取 20 N/m²。

悬跨管道与土壤相互作用段 $L_1 \geq 3\lambda$, 通过计算以及为了缩短模型运算时间, 取 $L_1 = 8.09$ m, 即实际管道悬跨两端与土壤接触部分长度为 $25D_0$ 。悬跨管道两端采用固定约束, 管土接触段采用接地弹簧模拟土壤的水平 and 垂向刚度, 如图 5 所示。

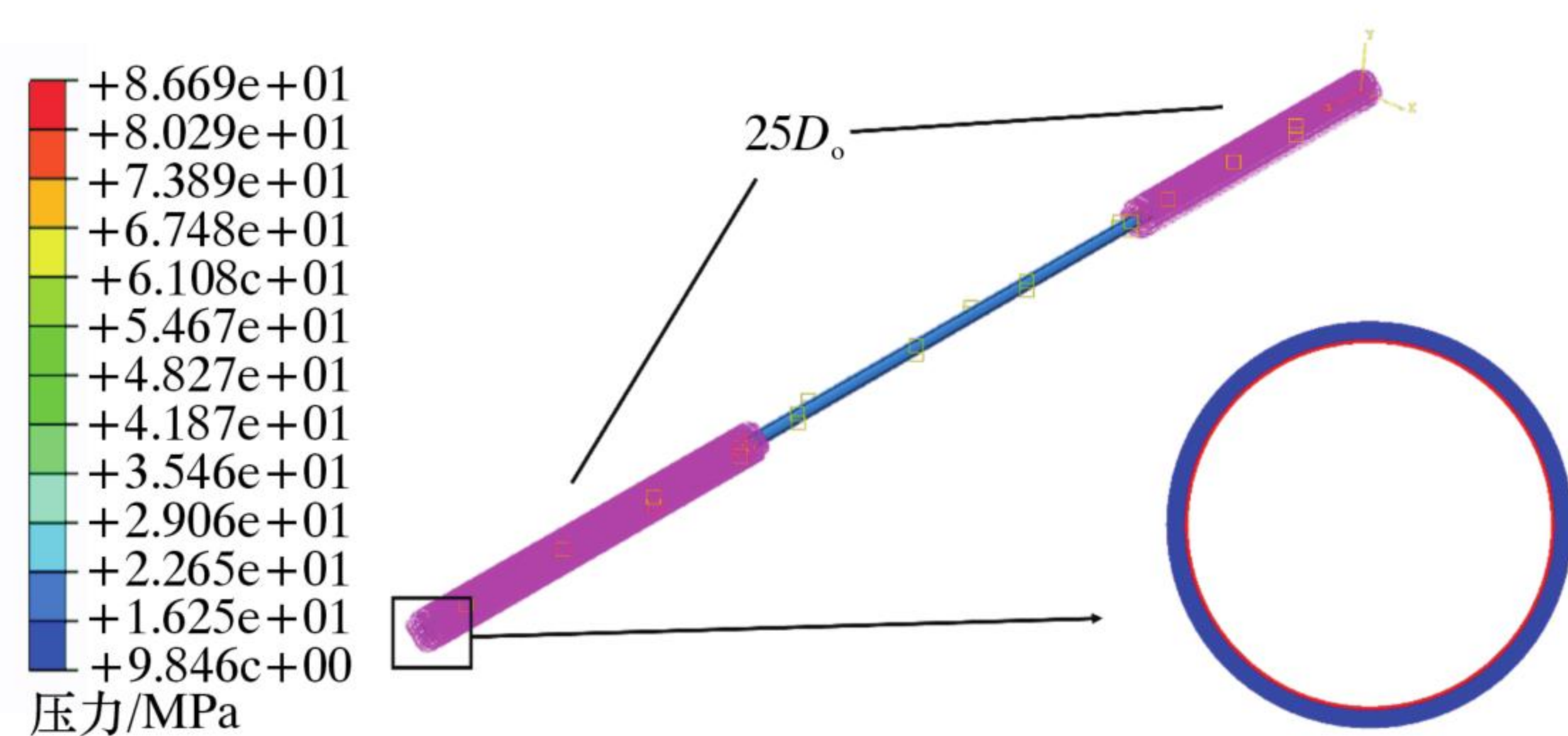


图 5 悬跨管道有限元模型

Fig. 5 Finite element model of the suspended span of pipelines

2.3 有限元分析结果

在考虑成形复合管存在层间残余接触压力的基础上, 采用预定义场中的初始状态功能, 导入成形后管道的应力状态进行载荷动力学分析。

2.3.1 残余应力对悬跨管道位移影响

考虑复合管成形后内、外管的残余应力, 对比同尺寸普通复合管在悬跨长度 20 m、边界条件为简支、最大流速 1 m/s 工况下的跨中位移曲线,

结果如图 6 所示。由图 6 可以看出, 无残余应力的曲线波动相对较大。对比位移差值, 无残余应力的管道振幅在顺流向和横向均大于存在残余应力的管道。同时, 对比最大位移差值, 存在残余应力的复合管在顺流向最大位移减少 60.3%, 横向最大位移减少 12.8%。这是由于成形管道残余应力的存在, 使得内、外管之间产生残余接触压力, 而接触压力抑制了内外管沿轴向的相对滑动, 可以得出残余应力对减小管道顺流向和横向振动具有一定效果, 这与文献 [8] 中得到结论基本相符。

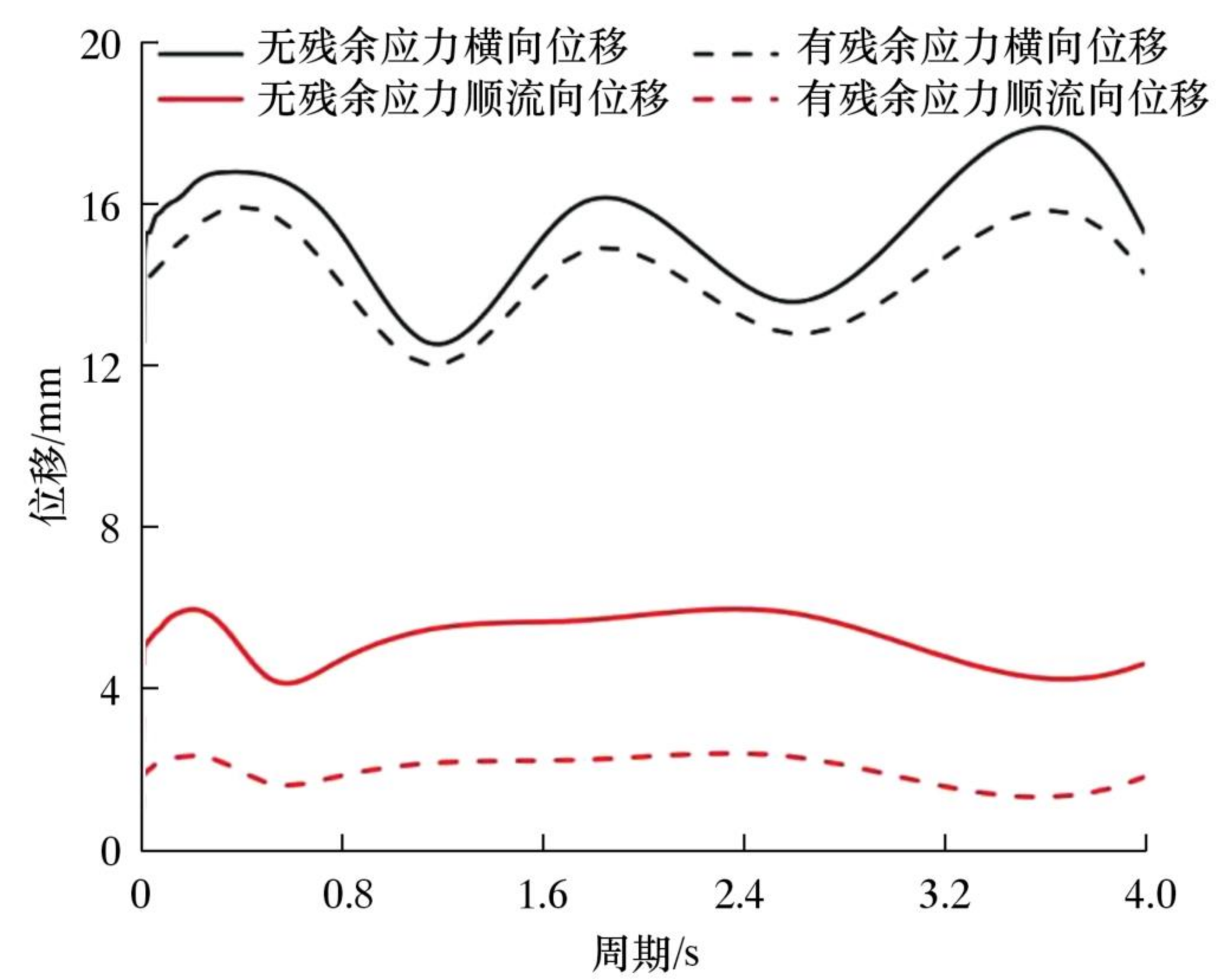


图 6 残余应力对管道位移影响

Fig. 6 Influences of residual stresses on pipeline displacement

2.3.2 边界条件对悬跨管道内管轴向受力影响

在实际工程中固定支撑一般采用固定支座, 对管道完全限制; 而简支支撑一般采用滑动支座, 允许轴向的位移。图 7 为不同边界条件下内管 Mises 应力云图。图 8 为内管轴向应力分布图。由图 7a 和图 7b 可以看出: 固定支撑和简支支撑的应力集中于跨肩, 简支支撑跨肩处 Mises 应力大于固定支撑; 由于简支支撑允许轴向移动, 故跨肩受到的拉应力更大。由图 7c 可以看出, 固定简支支撑时 Mises 应力则介于前两者之间。由图 7d 可以看出, 当边界为管土接触时, Mises 应力集中区域由跨肩沿管土接触段逐渐向端部发展。综合图 7 和图 8, 悬跨管道 Mises 应力集中区域和 Mises 应力分布与管跨两端的边界条件有密切关系。

3 安全性评估

3.1 内管安全性评估

鉴于内管本身的壁厚和材料属性, 强度远小于外管, 加之在成形后发生较大的塑性变形, 其承载弯曲等载荷的能力小于外管, 因此需要对内

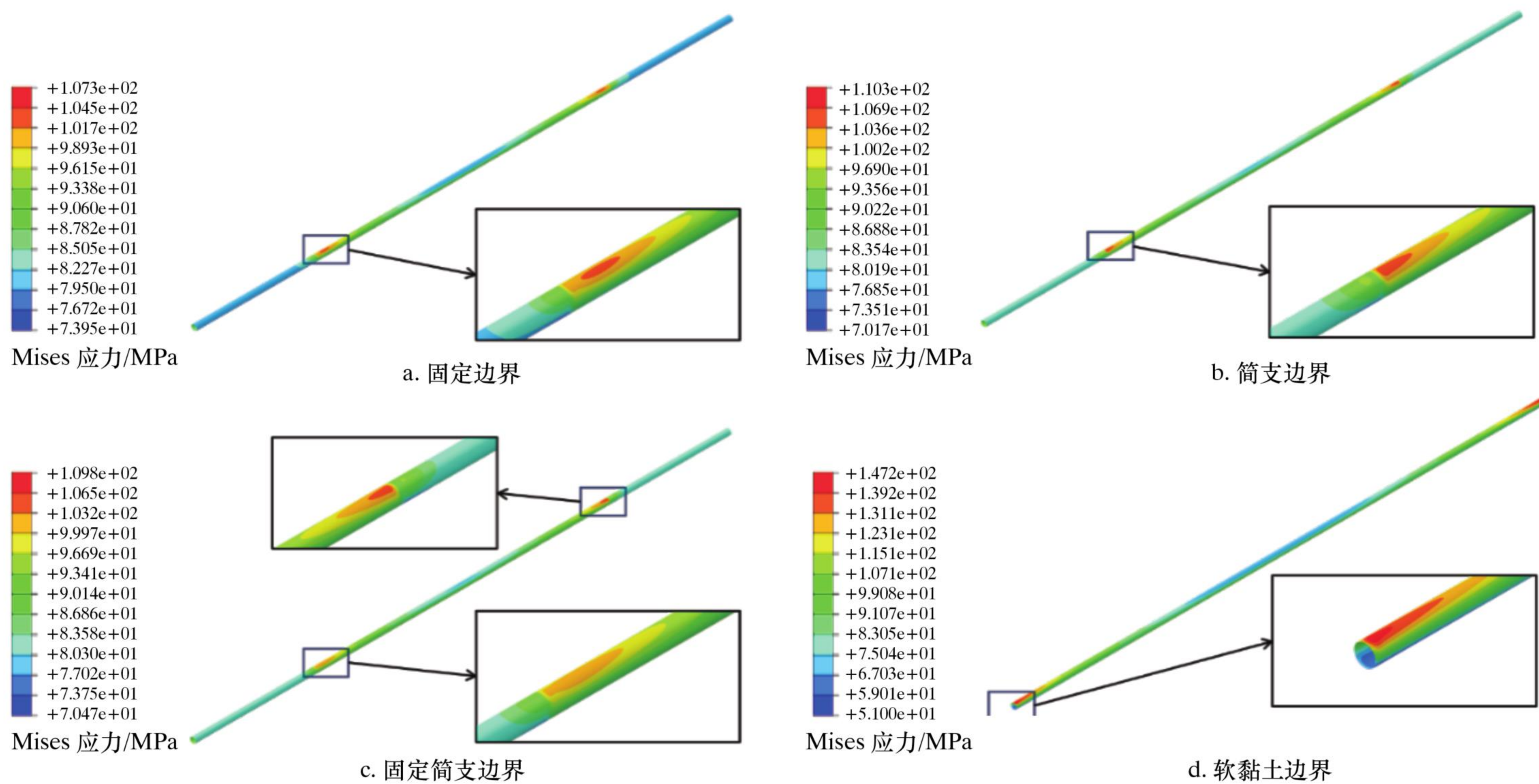


图7 不同边界条件下内管应力云图

Fig. 7 Stress contour of the inner pipe under different boundary conditions

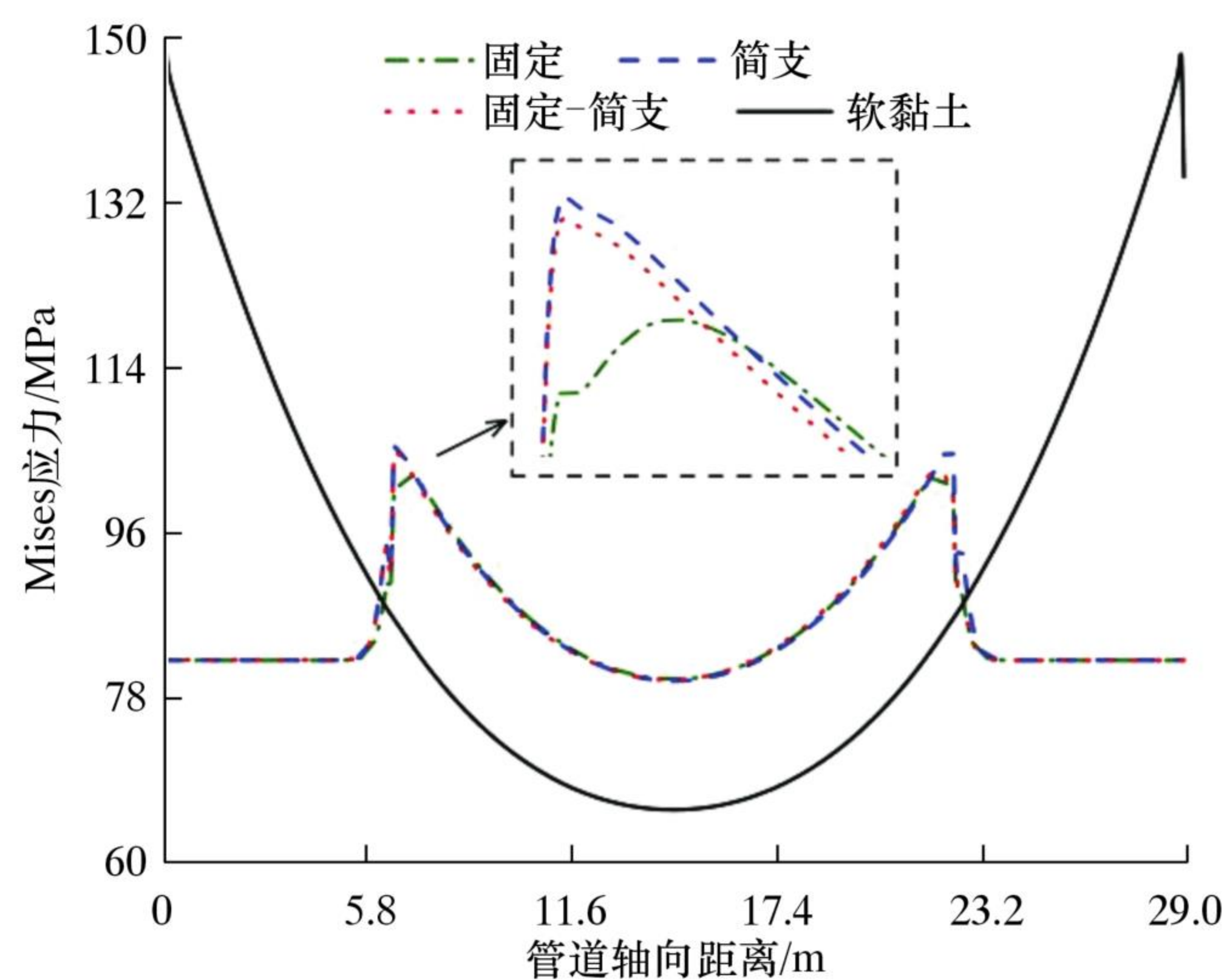


图8 内管轴向应力分布

Fig. 8 Axial stress distribution of the inner pipe

管进行安全性评估。内管材料为SUS304不锈钢，屈服强度为265 MPa，安全系数取0.6。

3.1.1 悬跨长度的影响

图9为最大海流流速1 m/s时，不同边界条件下悬跨长度与内管最大Mises应力关系图。由图9可以看出：当悬跨长度小于16.8 m时，简支最大Mises应力大于固定；悬跨长度大于16.8 m后，固定最大Mises应力大于简支；一端固定一端简支的最大Mises应力介于两者之间，同时三者悬跨长度24 m时的最大Mises应力小于内管许用应力。软黏土边界最大Mises应力随着悬跨长度的增大呈现非线性变化，且悬跨长度在19.8 m左右时内管最大Mises应力达到许用应力，管道进入危险工作状态。当受到更大载荷后，内管接近或进入塑性而发生永久变形，进而导致管道破坏。

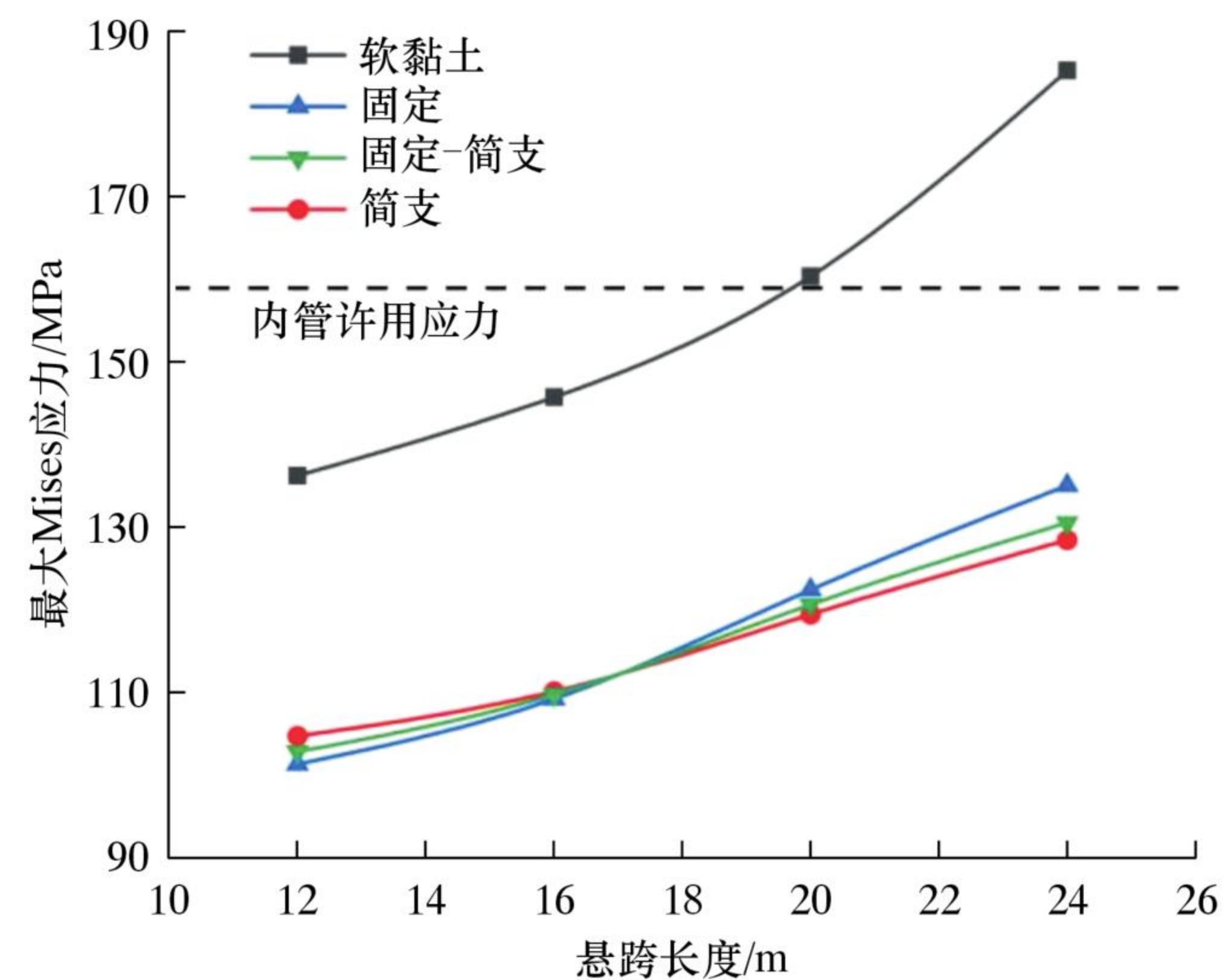


图9 跨长与内管最大Mises应力关系

Fig. 9 Suspended span length versus maximum Mises stress of the inner pipe

3.1.2 流速的影响

图10为悬跨长度20.0 m、软黏土边界下，流速与内管端面处应力关系周期变化图。由图10可以看出：海流使内管Mises应力在一定范围波动，且流速越大Mises应力波动幅值越大；流速为0.2 m/s时Mises应力最大幅值波动为0.03%，流速增大至0.4 m/s时最大幅值波动增大至1.20%，流速为1 m/s时最大幅值波动增大至7.90%以上，呈现明显的非线性变化趋势。

3.2 考虑残余接触压力安全性评估

3.2.1 残余接触压力静态分析

图11为软黏土边界、不同悬跨长度条件下，静态端部环向残余接触压力分布图。由图11可以看出，端部残余接触压力的增大和减小都呈现出

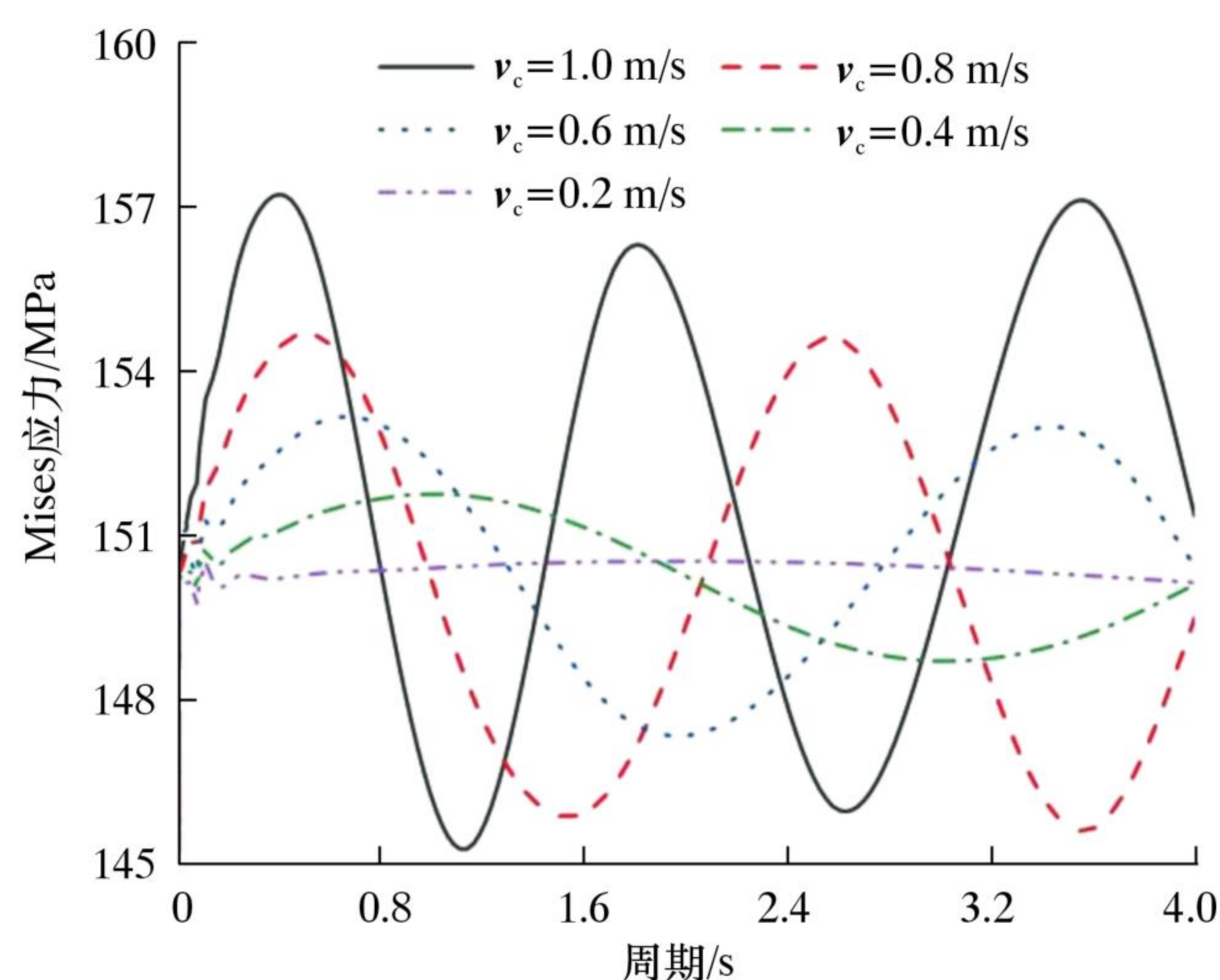


图 10 内管 Mises 应力与流速周期变化图

Fig. 10 Periodic variation of Mises stress of the inner pipe with current velocity

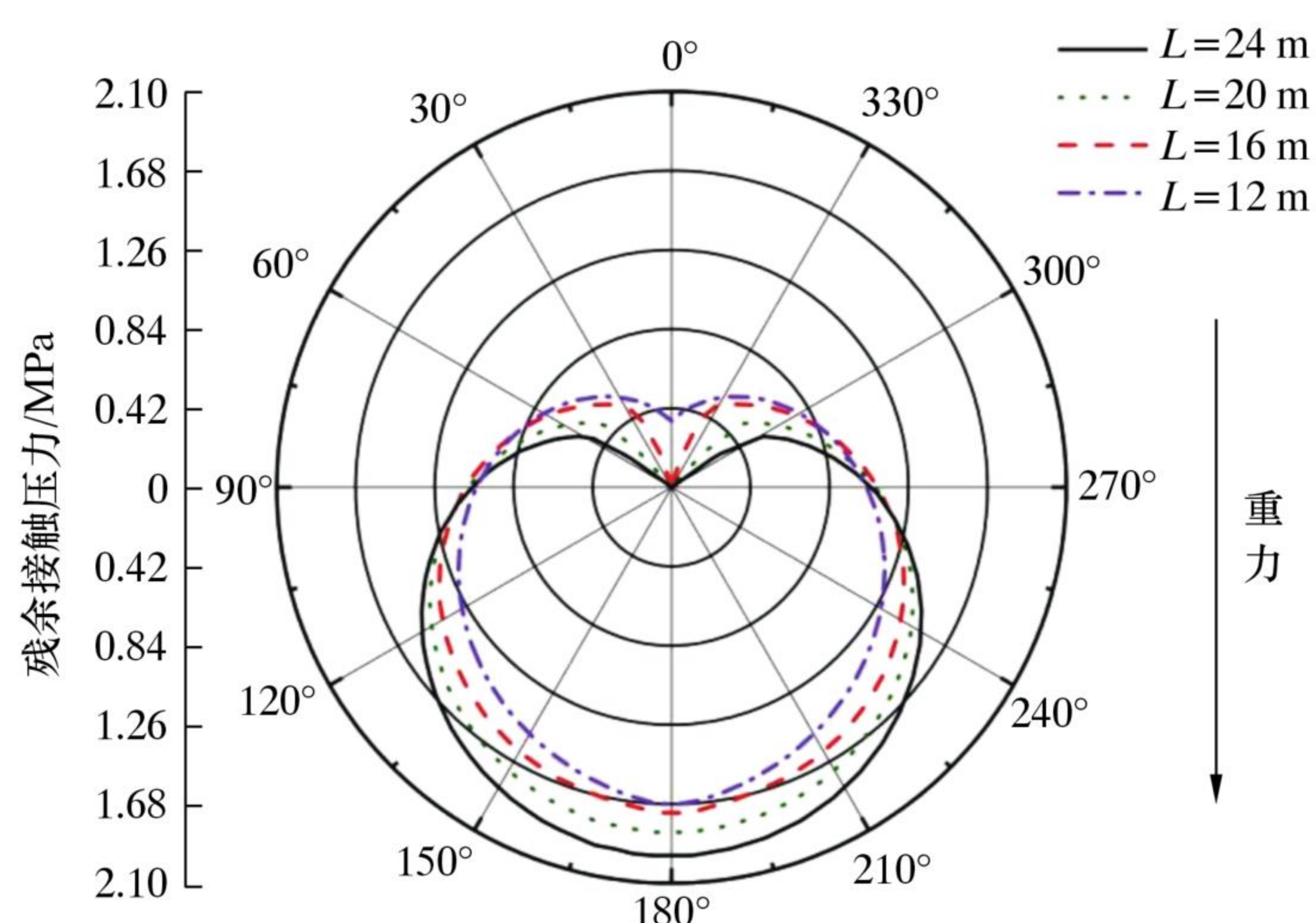


图 11 环向残余接触压力分布图

Fig. 11 Circumferential distribution of residual contact pressure 非线性趋势。仅在重力载荷下, 悬跨长度大于 16 m 时, 端面就出现残余接触压力为 0 的区域, 说明此时内、外管无结合力, 且随悬跨长度增大内、外管无结合力的区域逐渐增大。

3.2.2 残余接触压力动态分析

图 12 为悬跨长度 12 m、软黏土边界、不同流速条件下, 端部残余接触压力周期变化图。由图 12 可以看出: 在海流作用下, 残余接触压力在一定范围内波动, 且随着流速的增大, 波动幅值随周期变化逐渐增大; 当流速大于 0.2 m/s 后, 残余接触压力数值波动更加明显, 内、外层结合强度逐渐减弱。

综上所述, 重力载荷是造成端部残余接触压力变化的最大影响因素, 海流会使其在一定范围内波动。

3.3 最小-最大归一化评估

在考虑成形后复合管残余应力与残余接触压力的基础上, 选用最大海流流速 (1 m/s) 进行分析, 对不同边界条件和悬跨长度的内管最大 Mises 应力与层间残余接触压力进行归一化计算:

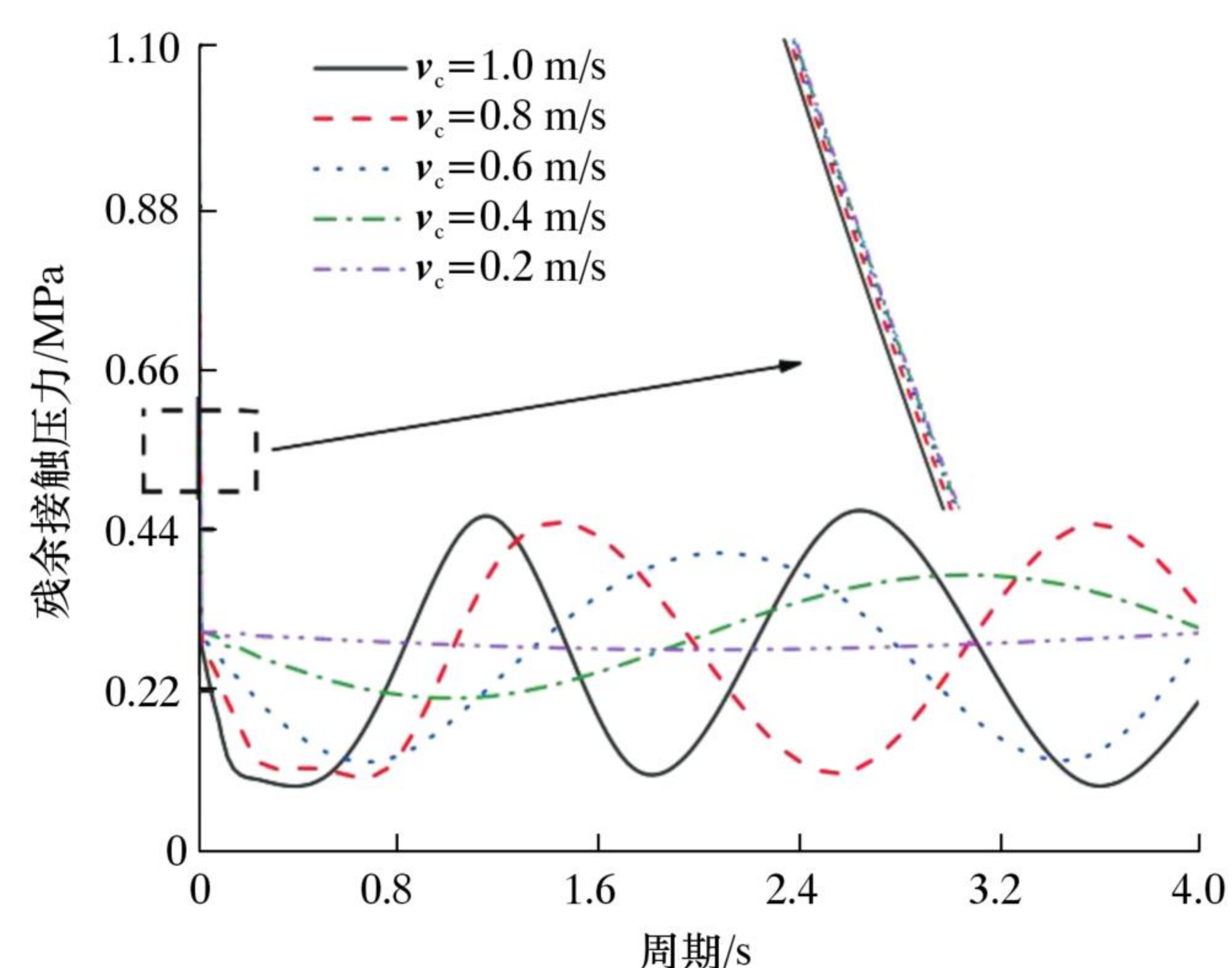


图 12 残余接触压力与流速周期变化图

Fig. 12 Periodic variation of residual contact pressure with current velocity

$$\sigma_{\text{normal}} = \frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_{\text{max}} - \sigma_0} \quad (17)$$

式中: σ_{normal} 为应力归一化系数; σ 为悬跨内管 Mises 应力, MPa; σ_0 为管道成形后残余应力, MPa; σ_{max} 为悬跨管道内管最大 Mises 应力, MPa。

由于残余接触压力与悬跨长度呈现负相关, 因此将其进行如下处理, 以便与最大 Mises 应力进行对比:

$$p_{c, \text{normal}} = 1 - \frac{p_c - p_c^*}{p_{c, \text{max}} - p_c^*} \quad (18)$$

式中: $p_{c, \text{normal}}$ 为残余接触压力归一化系数; p_c 为悬跨管道接触压力, MPa; p_c^* 为管道成形后残余接触压力, MPa; $p_{c, \text{max}}$ 为悬跨管道最大残余接触压力, MPa。

图 13 为不同悬跨长度和边界条件与无因次系数的关系图。以软黏土边界为例, 由图 13 可以看出, 对比内、外管分离和内管许用应力的无因次系数, 前者允许最大悬跨长度更小。在悬跨长度

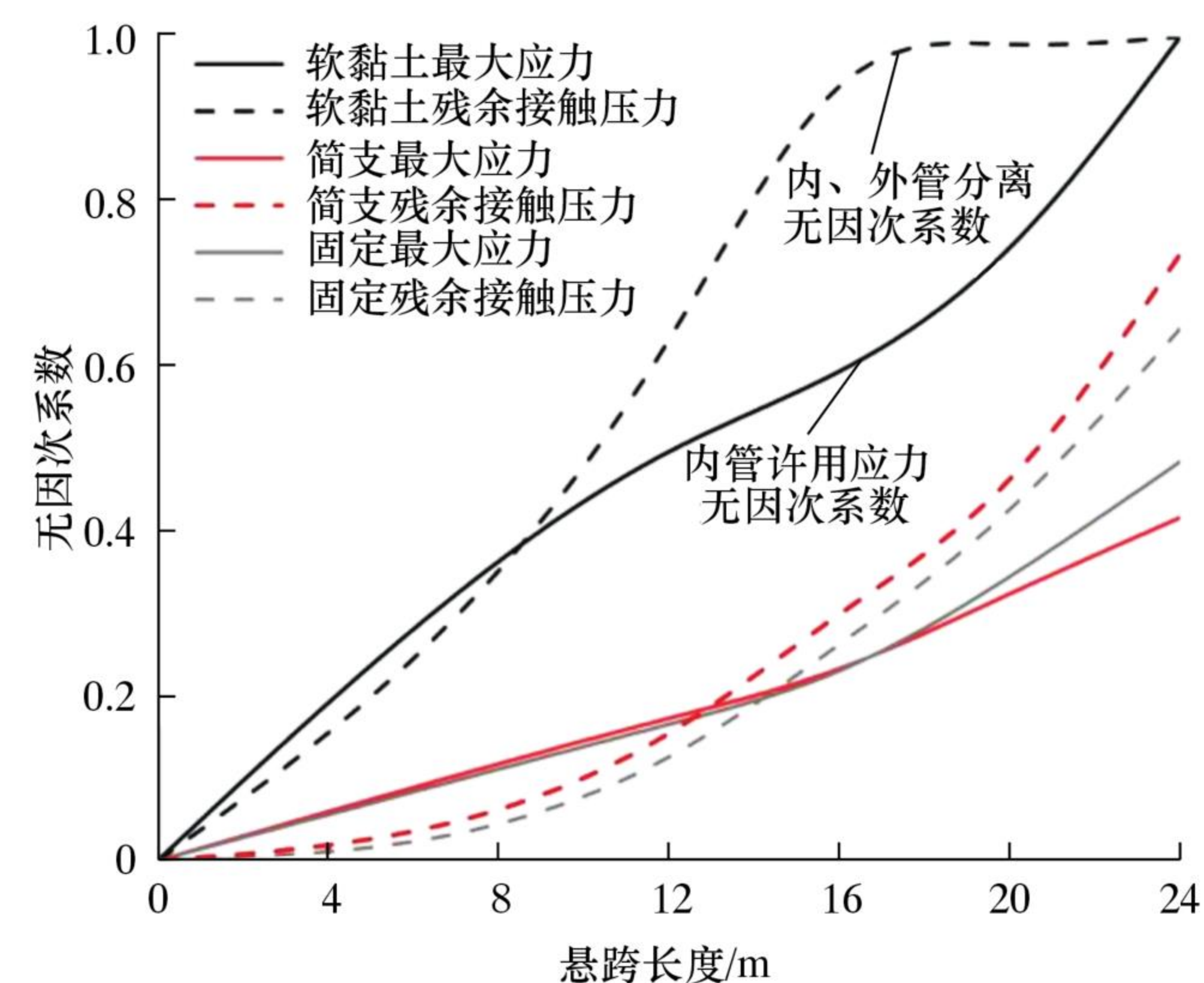


图 13 不同悬跨长度和边界条件与无因次系数关系图

Fig. 13 Dimensionless coefficient vs. suspended span length in cases of boundary conditions

小于 8.7 m 时, 使用残余接触压力评估管道安全性更保守; 当悬跨长度大于 8.7 m 后, 使用内管最大 Mises 应力评价管道安全更为保守。但管道运行悬跨长度小时相比悬跨长度大时要更加安全, 故综合来看, 使用残余接触压力进行评估更为合适。

通过上述分析, 内管应力和层间残余接触压力的变化均会影响管道安全运行, 因此对两者进行归一化可以更好地评估悬跨复合管在不同工况下的安全性。

4 结 论

(1) 悬跨复合管内管最大 Mises 应力和层间残余接触压力变化与两侧边界条件密切相关, 随着悬跨长度的增大, 内管最大 Mises 应力和层间接触压力呈现非线性变化。

(2) 海流对内管 Mises 应力和层间残余接触压力的影响使其在一定数值范围波动, 且随流速增大其波动幅值逐渐增大, 长期的交变载荷会导致内管出现应力疲劳及内、外管层间结合力的减弱, 影响管道安全运行。

(3) 在最大流速下, 不同的边界和悬跨长度应选取不同的评估标准, 悬跨长度较小时使用最大 Mises 应力评估, 反之则使用残余接触压力来评估。综合来看, 使用层间残余接触压力标准评估悬跨复合管安全性相比于内管最大 Mises 应力更为合适。

参 考 文 献

- [1] 黄振东, 李雪梅, 沈人杰, 等. 崖城 13-4 气田水下管汇研究与应用 [J]. 中国海上油气, 2014 (1): 105-108, 118.
HUANG Z D, LI X M, SHEN R J, et al. Research and application of subsea manifold in Yacheng 13-4 gas field [J]. China Offshore Oil and Gas, 2014 (1): 105-108, 118.
- [2] BAI Y, YU Z M. Pipeline on-bottom stability analysis based on FEM model [C]//ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Rotterdam, the Netherlands: ASME, 2011: 329-333.
- [3] ZHANG Y, SHUAI J, SHUAI Y, et al. Mechanical responses and assessment of fatigue life for submarine suspended pipelines [C]//Proceedings of ASME 2024 Pressure Vessels & Piping Conference. [S. l.]: ASME, 2024.
- [4] ZHU H M, DU Z F, TANG Y G. Automatic free span assessment for subsea pipelines using static strain data [J]. Ocean Engineering, 2022, 263: 112413.
- [5] 刘成, 贾贝贝, 陈舒阳, 等. 海底管道临界悬跨长度及受力分析 [J]. 现代隧道技术, 2024, 61 (1): 165-173.
LIU C, JIA B B, CHEN S Y, et al. Analysis of critical suspended span length and stress of subsea pipeline [J]. Modern Tunnelling Technology, 2024, 61 (1): 165-173.
- [6] FU C J, WANG P Y, ZHAO T L, et al. Allowable span length of submarine pipeline in shallow water [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2018, 36 (5): 532-539.
- [7] 夏日长, 崔少敏, 李立业, 等. 波流联合作用下海底管道侧向运动数值分析 [J]. 海洋工程, 2024, 42 (3): 170-178.
XIA R C, CUI S M, LI L Y, et al. Numerical simulation of lateral movement of submarine pipelines under wave-current interaction [J]. The Ocean Engineering, 2024, 42 (3): 170-178.
- [8] 冯宾, 傅明利, 贾磊, 等. 波流作用下悬跨海缆的侧向运动特性 [J/OL]. 南方电网技术, 2026: 1-9 (2025-10-30) [2025-11-10]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20251029.0909.010>.
FENG B, FU M L, JIA L, et al. Lateral motion characteristics of overhead submarine cables under wave-current interaction [J/OL]. Southern Power Grid Technology, 2026: 1-9 (2025-10-30) [2025-11-10]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20251029.0909.010>.
- [9] 闫术明, 高福平, 吴应湘. 海流作用下海底管道侧向失稳特征的试验研究 [C]//中国造船工程学会 2009 年优秀学术论文集. 中国石油天然气管道工程有限公司, 2010: 98-105.
YAN S M, GAO F P, WU Y X. Experimental study on the lateral instability characteristics of submarine pipelines under ocean currents [C]//Excellent Academic Papers Collection of China Shipbuilding Engineering Society in 2009. [S. l.]: China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd. 2010: 98-105.
- [10] 徐万海, 艾化楠, 贾昆, 等. 海底多跨管道流-固-土多场耦合试验研究 [J]. 振动与冲击, 2023, 42 (5): 1-6.
XU W H, AI H N, JIA K, et al. Test study on fluid-solid-soil multi-field coupling of multi-span submarine pipeline [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42 (5): 1-6.
- [11] 路顺, 闫术明, 周晓东, 等. 砂质海床上海底管道侧向失稳试验研究 [J]. 油气储运, 2024, 43 (6): 692-701.

- LU S, YAN S M, ZHOU X D, et al. Experimental study on lateral instability of submarine pipelines in sandy seabed [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43 (6): 692-701.
- [12] 付崔伟, 张浩, 郭兴森, 等. 海底滑坡冲击下悬跨管道动态响应及安全性评估 [J]. 工程地质学报, 2021, 29 (6): 1841-1848.
- FU C W, ZHANG H, GUO X S, et al. Dynamic responses and safety evaluation of suspended pipelines impacted by submarine landslides [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29 (6): 1841-1848.
- [13] 黄朝伟, 罗叶新, 王松. 河流穿越管道冲刷裸露段安全评估方法 [J]. 油气储运, 2021, 40 (8): 867-873.
- HUANG C W, LUO Y X, WANG S. Safety assessment method for exposed crossing pipelines caused by river scouring [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40 (8): 867-873.
- [14] 姚平, 范奉鑫, 李中阳, 等. 东方气田海管悬跨段安全评估分析 [J]. 海洋科学, 2011, 35 (8): 58-62.
- YAO P, FAN F X, LI Z Y, et al. Security analysis for the spanning pipelines located in Dong-Fang 1-1 gas field [J]. Marine Sciences, 2011, 35 (8): 58-62.
- [15] 向敏, 刁洪涛, 张子涛, 等. 水下穿越油气管道水流冲击作用下强度安全研究 [J]. 工业安全与环保, 2017, 43 (5): 66-68.
- XIANG M, DIAO H T, ZHANG Z T, et al. Study on strengthen safety of oil and gas pipelines under the impact of water flow [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2017, 43 (5): 66-68.
- [16] 杨涛, 郭旭, 成志强, 等. 水下穿越管道悬空段三级安全评价 [J]. 应用数学和力学, 2023, 44 (2): 220-228.
- YANG T, GUO X, CHENG Z Q, et al. Three-level safety evaluation of suspended sections of underwater buried pipelines [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2023, 44 (2): 220-228.
- [17] 王学生, 李培宁, 王如竹, 等. 双金属复合管液压成形压力的计算 [J]. 机械强度, 2002, 24 (3): 439-442.
- WANG X S, LI P N, WANG R Z, et al. Calculation of hydro-forming pressure for bi-metal clad pipe [J]. Journal of Mechanical Strength, 2002, 24 (3): 439-442.
- [18] 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. Simulation analysis of buckling failure of bimetallic composite pipes under complex load conditions [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32 (5): 168-173.
- [19] 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 T P, LIAN Z H, CHEN J W, 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.
- [20] DNV. Environmental conditions and environmental loads [S]. Norway: DET Norske Veritas, 2010.
- [21] DNV. Pipe-soil interaction for submarine pipelines: DNVGL-RP-F114 [S]. Norway: DET Norske Veritas, 2017.
- [22] GAO X F, XIE W D, XU W H. Vortex-induced vibrations of a free-spanning pipe based on a nonlinear hysteretic Soil model at the shoulders [J]. China Ocean Engineering, 2020, 34 (3): 328-340.
- [23] DNV. Recommended practice for submarine pipeline span assessment [S]. Norway: DET Norske Veritas, 2017.
- [24] 于昊, 喻勇, 李荣光, 等. 基于弹性地基梁原理的埋地天然气管道内力分析 [J]. 四川轻化工大学学报 (自然科学版), 2025, 38 (1): 103-113.
- YU H, YU Y, LI R G, et al. Internal force analysis of buried natural gas pipeline based on elastic foundation beam principle [J]. Journal of University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2025, 38 (1): 103-113.

第一作者简介: 齐昌鑫, 生于2000年, 现为在读硕士研究生, 研究方向为油气装备安全工程。地址: (434023) 湖北省荆州市。email: 1576129012@qq.com。
通信作者: 周传喜, 教授。email: zcx123tt@163.com。

修改回稿日期: 2025-11-25
(本文编辑 任 武)