

文章编号:1005-9865(2022)03-0022-10

海底管道整体式止屈器性能研究与穿越压力预测

徐万海¹, 庞 涛¹, 闫术明², 刘其民², 李国辉²

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊 065000)

摘 要:整体式止屈器可有效抑制海底管道屈曲传播并避免管道的大规模屈曲失效。为探究整体式止屈器的止屈特性, 预测其穿越压力, 利用 ABAQUS 软件建立有限元模型, 分析了整体式止屈器厚度、长度、径厚比等参数对穿越压力和穿越形式的影响机制, 揭示了整体式止屈器的止屈特性。研究表明: 在平行穿越阶段, 增加止屈器厚度、有效长度可明显提升穿越压力; 而在垂直穿越阶段, 穿越压力增长速率明显放缓。结合有限元模拟结果, 拟合得到了整体式止屈器在不同穿越形式下的穿越压力预测公式, 其相较于已有经验公式准确性更高, 对整体式止屈器的设计和建造具有重要的指导意义。

关键词:整体式止屈器; 海底管道; 垂直穿越; 止屈特性; 穿越压力

中图分类号:P756.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2022.03.003

Performance and crossover pressure of integral buckle arrestors for offshore pipelines

XU Wanhai¹, PANG Tao¹, YAN Shuming², LIU Qimin², LI Guohui²

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang 065000, China)

Abstract: Integral buckle arrestors can effectively suppress the buckling propagation of the submarine pipeline and avoid large-scale buckling failure. In order to explore the buckle arresting characteristics of integral buckle arrestors and predict the crossover pressure, a finite element model was established in ABAQUS. By analyzing the influence of integral buckle arrestors' thickness, length, diameter-thickness ratio and other parameters on the crossover pressure and crossover form, the buckle arresting characteristic of integral buckle arrestor was revealed. Research results show that in parallel crossover stage, increasing the thickness and effective length of integral buckle arrestors will effectively improve the crossover pressure. While in flipping crossover stage, the growth rate of crossover pressure has slowed down. Based on the finite element data, the calculation formula of crossover pressure was obtained by fitting. Compared with the existing empirical formula, this formula is more accurate in the comparison with the experimental results, and it has a guiding significance for the design and construction of the integral buckle arrestors.

Keywords: integral buckle arrestor; submarine pipeline; flipping crossover; buckle arresting characteristic; crossover pressure

海底管道可用于高效率、低成本地输运油气资源, 是海洋油气开发中关键的装备之一。深海海底管道长期处于高压环境, 当其局部存在缺陷或承受极端外压时均会发生压溃。局部压溃会在惯性和外部水压的联合作用下传递至相邻区域, 使屈曲变形沿管长方向快速传播。研究表明: 管道屈曲传播压力 P_p 远小于管道临界压溃压力 P_{∞} , 仅有压溃压力的 18% 左右, 屈曲传播的速率能达到每秒上百米, 极易引发海底管道大范围破坏, 造成严重的经济损失, 极端时可诱发漏油等环境灾难^[1-5]。

收稿日期: 2021-05-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51979163)

作者简介: 徐万海 (1981-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事海工结构安全方面研究。E-mail: xuwanhai@tju.edu.cn

实际工程中,通常在管道上增设止屈器来抑制管道屈曲传播。通过间隔 80~100 m 安装一个止屈器装置^[6],增加管道的局部环向强度,使屈曲传播限制在两个止屈器之间,从而保证管道整体安全性^[7]。目前,常见的止屈器类型可分为整体式、扣入式和缠绕式止屈器三种,在扣入式止屈器的基础上还发展有焊接式和灌浆黏结式^[8]。随着海洋工程管道焊接技术的不断发展,整体式止屈器以其强度高、止屈性能优良、适用水深范围广等优点得到了工程上的广泛应用^[9]。整体式止屈器是一种焊接布置在两段管道之间的小段加强结构,其内径与管道内径相同,但壁厚更大,强度更高。如图 1 所示,整体式止屈器的主要几何参数包括:与管道相匹配的外径 D 和壁厚 t 、止屈器整体长度 L_s 、止屈器有效长度 L_a 和厚度 h 等。

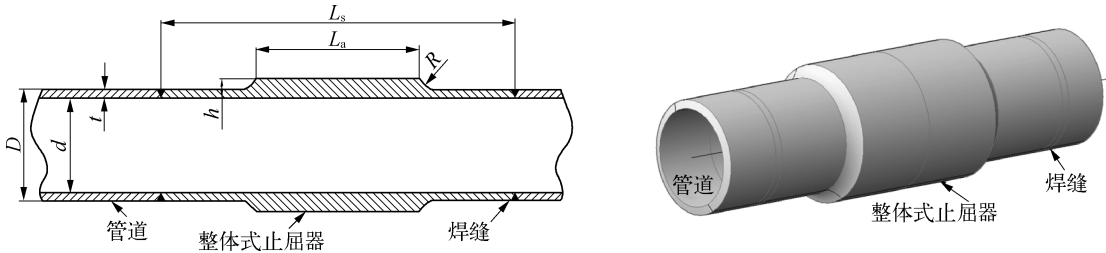


图 1 整体式止屈器
Fig. 1 Integral buckle arrestor

整体式止屈器的止屈性能和穿越压力 P_x 的大小成为人们关注的重点。Kyriakides^[10]在管道压溃和止屈问题研究中,率先提出采用如式(1)所示的止屈效率 η 衡量止屈器性能,该参数将管道压溃压力 P_{co} 和屈曲传播压力 P_p 与止屈器穿越压力 P_x 综合考虑,可较好地反映止屈器的止屈效果。

$$\eta = \frac{P_x - P_p}{P_{co} - P_p} \quad 0 \leq \eta \leq 1 \tag{1}$$

Netto 和 Estefen^[11]分别针对直径和厚度之比(径厚比)为 16 和 23 的两种钢管,开展整体式止屈器的穿越试验研究,并拟合了相应的穿越压力公式。Park 等^[12]和 Lee 等^[13]分别开展整体式止屈器穿越试验,并结合有限元模拟,将止屈器的穿越形式分为平行穿越和垂直穿越两种,探究了止屈器参数对止屈性能的影响,并给出对应的穿越压力公式。余建星等^[14]开展了径厚比为 17 和 22.5 的整体式止屈器模型试验,并辅以有限元模拟,基于 Netto 和 Estefen 公式,进一步给出了整体式止屈器穿越压力的表达式。DNV 规范^[15]在 2007 年的修订中,增加了整体式止屈器穿越压力的推荐公式。另一方面,随着多年来的不断发展,有限元技术已成功用于分析管道屈曲和止屈问题。Netto 等^[16]利用有限元模拟,分别计算了整体式止屈器在准静态和动态条件下的穿越压力,并与试验结果进行对比,发现准静态下穿越压力相比动态条件更保守。Toscano 等^[17]指出有限元模型能对整体式止屈器的止屈性能进行较好预测。

表 1 为上述已发表的整体式止屈器穿越压力计算公式。具体来看:DNV 规范给出的公式结合了管道的屈曲传播公式,将整体式止屈器的失效视为一种特殊的屈曲传播现象,在止屈器的平行穿越阶段具有较好的预测效果;Netto 和 Estefen、余建星等的公式具有类似的形式,可以反映相关参数对穿越压力的部分影响,对于垂直穿越的预测却有着较大的偏差;不同于上述 3 种公式,Lee 的公式中额外引入了管道压溃压力 P_{co} ,以止屈效率 η 来衡量止屈效果,可一定程度上反映止屈器的止屈特性,但仍未明确给出整体式止屈器在不同穿越形式下穿越压力的计算方法。后续的内容还将反映出这些公式在相同工况下的预测结果差别显著,缺乏统一的计算标准。基于上述不足,利用有限元软件 ABAQUS 对止屈器参数进行系统的敏感性分析,得到相应的穿越形式和穿越压力,探究整体式止屈器的止屈特性,并在此基础上,尝试利用数值模拟结果拟合和优化,得到止屈器在不同穿越形式下穿越压力的计算公式。

1 有限元模型

通过 ABAQUS 软件建立整体式止屈器的三维有限元模型,模拟海底管道的压溃、屈曲传播、止屈器止屈和失效全过程,从而探究整体式止屈器的穿越形式并获取相应的临界穿越压力。模型主体包括管道缺陷段 L_f 、屈曲传播段 L_p 、整体式止屈器段 L_a 、后屈曲段 L_u 、刚性面和腔体边界,如图 2 所示。建模过程中将管道与止屈器之间通过放样的形式连接,并预留一定过渡段,同时基于结构几何对称性,建立 1/4 模型以提高计算

效率。此外,为模拟屈曲发生后管道内壁间的接触,在模型中预先设置了刚性面并忽略摩擦力。有限元模型的求解方法采用静水流体单元(F3D4)法^[18],相较于弧长法更容易收敛且后屈曲过程计算更快。

表 1 海底管道整体式止屈器穿越压力计算公式
Tab. 1 Calculation formulas for crossover pressure of integral buckle arrestor

学者或机构	公式形式	年份
Netto 和 Estefen ^[11]	$P_x = 389\sigma_{0a} (t/D)^{3.5} (h/t) (L_a/t)^{0.4}$	1996
DNV 规范 ^[15]	$P_x = P_p + (P_{p,BA} - P_p) \cdot [1 - \exp(-20 \cdot t_2 \cdot L_a/D^2)]$ $P_p = 35 \cdot \sigma_0 \cdot \alpha_{fab} \cdot (t/D)^{2.5}$	2007
Lee 等 ^[13]	$\eta = A_1 \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^{1.25} \left(\frac{h}{t}\right)^{2.5} \left(\frac{L_a}{t}\right)^{0.8} \left(\frac{E}{\sigma_0}\right)^{0.65} \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{0a}}\right)^{0.95} \left(\frac{P_{co}}{P_p} - 1\right)$ $A_1 = 9.541 \ 1 (\eta \leq 0.7)$	2008
余建星等 ^[14]	$P_x = 150\sigma_0 (t/D)^{2.85} (h/t)^{0.55} (L_a/t)^{0.12} (\sigma_{0a}/\sigma_0)^{0.31}$	2017

注: P_x 为整体式止屈器穿越压力, P_{co} 和 P_p 分别为管道压溃压力和屈曲传播压力, η 为止屈效率, $P_{p,BA}$ 表示无限长整体式止屈器的屈曲传播压力; α_{fab} 为制造系数; α 表示中间变量; D/t 为管道径厚比, L_a 和 h 分别代表整体式止屈器的有效长度和厚度; E 和 σ_0 对应管道所用材料的弹性模量和屈服极限, E_a 和 σ_{0a} 为止屈器所用材料的弹性模量和屈服极限。

图 3 展示了模型的网格划分和单元类型选取,管道缺陷段和止屈段的网格均进行了细化处理,环向方向上均匀分布 25~30 份,厚度方向上划分 2~3 份,可提高计算精度并减少计算成本。同时在管道和止屈器的连接处采用楔形网格过渡(C3D6),实现网格整体规整。管道和止屈器的单元类型选择八节点线性非协调单元(C3D8I),避免了通用单元 C3D8R 在薄壁结构中的沙漏化问题。流体单元类型在.inp 文件中设置为 F3D4,通过指定静水流体单元的输入流量,实现腔体内部水压加载。设置腔体内部水压作为结果变量输出,从而得到管道压溃和止屈全过程的压力变化。

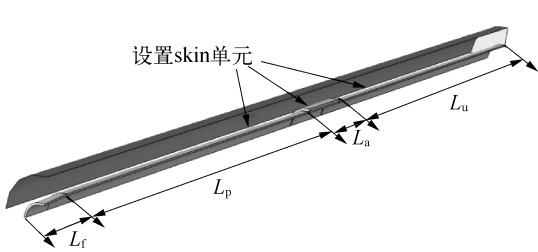


图 2 有限元模型主体
Fig. 2 Finite element model

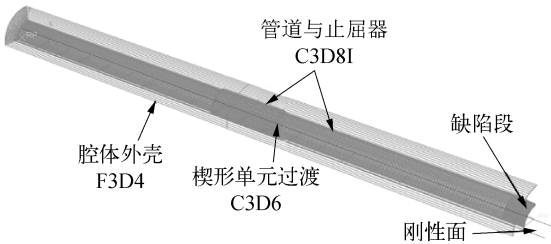


图 3 模型网格划分和单元类型
Fig. 3 Model meshing and element types

管道和止屈器的材料属性采用 Ramberg-Osgood 本构模型描述,材料应力 σ 与应变 ε 满足式(2):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left[1 + \frac{3}{7} \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^{n-1} \right]$$

(2)

其中, E 为材料弹性模量, n 为材料硬化系数, σ_y 为名义屈服应力。

有限元模拟管道压溃及止屈的计算结果如图 4 所示,分别展示了平行穿越和垂直穿越两种模式,后续的分析会看到垂直穿越将会显著影响止屈器的穿越压力,使得该问题表现出一定的复杂性。图 5 展示了模拟过程中舱体内部水压的变化,舱体内部水压经历了两个峰值,分别对应管道的临界压溃压力 P_{co} 和止屈器结构的临界穿越压力 P_x ,两个峰值之间的平稳过渡段对应管道的屈曲传播压力 P_p 。

有限元模拟还原了管道压溃和止屈现象的全过程,舱内压力曲线反映了管道及止屈器结构变形的临界压力大小。为验证该有限元模型的正确性,文中基于上述模拟流程,计算得到了文献[13]中 3 组整体式止屈器试验工况下的穿越压力,并与试验结果进行对比,如表 2 所示。有限元模拟结果与试验结果基本一致,误差分布在 6% 以内,验证了文中有限元模型的准确性。

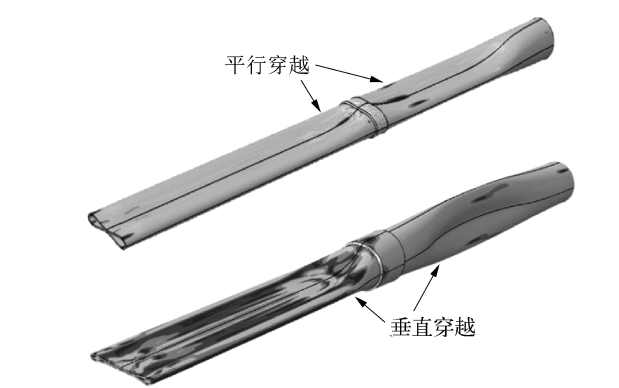


图 4 平行穿越和垂直穿越

Fig. 4 Parallel crossover and flipping crossover

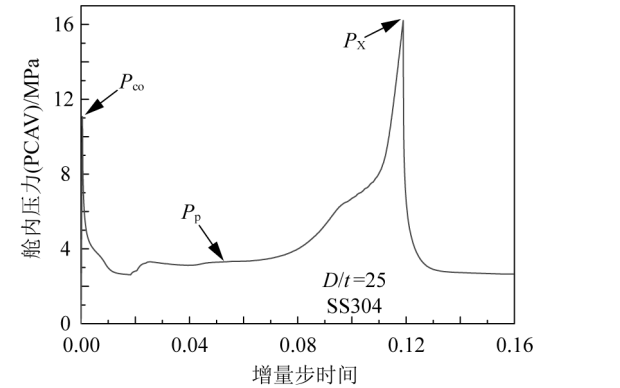


图 5 腔体内部压力变化曲线

Fig. 5 Curve of the pressure inside the cavity

表 2 有限元模拟与试验结果对比
Tab. 2 Comparison of finite element simulation and experimental results

编号	t/mm	D/t	h/t	L_a/t	σ_0/MPa	$P_{\text{X-EXP}}/\text{MPa}$	$P_{\text{X-FEM}}/\text{MPa}$	误差/(%)
L1	2.202	23.10	1.84	11.55	299.8	14.27	15.04	5.4
L2	2.197	23.11	2.21	11.56	293.5	17.11	17.32	1.2
L3	2.202	23.06	2.32	11.53	286.6	15.68	16.24	3.6

2 参数分析

基于通过正确性验证的有限元模型,改变模型中管道径厚比 D/t 、整体式止屈器厚度比 h/t 、有效长度比 L_a/t 和材料属性相关参数,文中系统地研究上述参数对止屈器结构强度和穿越形式的影响。表 3 汇总了相关参数的变化范围,参数间相互组合形成上百组算例,基本涵盖了工程中整体式止屈器常见的参数选取范围。

表 3 参数分析中各参数的变化范围
Tab. 3 Variation range of each parameter in parameter analysis

参数	取值	参数	取值
D/t	12.75~55(重点关注 17、34 和 51)	L_a/t	10~30、20~120、20~150
h/t	1.5~3.5	钢材等级	SS304、API-X55、X60、X70

2.1 管道径厚比 D/t

整体式止屈器在安装时应与管道尺寸相匹配,管道径厚比成为影响止屈器强度和止屈效果的重要因素之一。统计所有以管道径厚比 D/t (12.75~55) 为自变量的计算结果,并对比 DNV 规范中整体式止屈器穿越压力公式结果,如图 6 所示。可以看出,在固定整体式止屈器的 $h/t=2$ 、 $L_a/t=30$ 的工况下,径厚比 D/t 与穿越压力呈反比关系,具体表现为管道径厚比越小,止屈器穿越压力的增长速率越快。

对比 DNV 规范推荐公式的结果来看,不论是曲线的变化趋势,还是特定点的数值对比,有限元模拟和 DNV 公式均表现出较好的吻合效果。特别是在径厚比较大的薄壁管阶段,二者计算所得的穿越压力结果几乎一致,这在一定程度上再次验证了该有限元模型的准确性。

2.2 止屈器厚度比 h/t

止屈器厚度是影响其自身结构强度的主要因素之一。固定管道的径厚比为 17、34 和 51,固定止屈器有效长度比 L_a/t 为 15(对应 $D/t=17$) 和 30(对应 $D/t=34、51$),改变有限元模型中止屈器厚度 h 与管道壁厚 t 的比值,实现对止屈器厚度的敏感性分析。图 7 和图 8 分别给出了 $D/t=17$ 和 $D/t=34、51$ 工况下止屈器厚

度比与穿越压力的变化曲线,同时还作出了 0.2%初始椭圆度管道在外压作用下的压溃压力 P_{co} 。

曲线的走势表明,在固定止屈器长度和管道径厚比时,随着止屈器厚度 h 的增加,穿越压力均呈现出一种先快速上升,随后增长变缓(甚至停滞)的变化趋势。同时注意到,增长速率发生变化时往往伴随着垂直穿越的发生(曲线图中“+”标记的数据点均为发生垂直穿越的算例,表现为下游管道屈曲的方向垂直于上游管道),似乎是这种特殊的穿越形式削弱了整体式止屈器的止屈效果,使得继续增大止屈器的厚度并不能达到预想的性能。Park 等^[12]指出垂直穿越通常发生在强度较高的整体式止屈器上,足够强度的止屈器很难被压扁,止屈器在吸收上游屈曲变形能量后倾向于发生一种类似剪刀结构的“十字”交叉变形(从能量的角度考虑,这是能量耗散最小的变形方式之一),参见图 4。该理论可在一定程度上解释垂直穿越对止屈性能的影响,但对于工程而言,平行穿越和垂直穿越的转换区间即何时发生垂直穿越,同样应当引起足够重视。具体到上述算例,在不同径厚比下,曲线中的拐点各不相同,同时下节针对止屈器有效长度比 L_a/t 的分析也表明了拐点的分布受多种因素影响,难以量化。引入管道临界压溃压力 P_{co} 抵消径厚比带来的影响,关注止屈效率 η 随厚度比 h/t 的变化,结果如图 9 所示。可以看出垂直穿越均发生在止屈效率大于 80% 范围内,考虑到止屈效率 η (式(1))综合了多个临界压力参数且垂直穿越对应较高的止屈效率,在后续的公式拟合中采用止屈效率 η 作为量化穿越形式转换点的变量。

此外,当止屈器的长度 L_a 较短时,以 $D/t=51$ 工况为例(对应 $L_a/t=30$),该长度下止屈器不足以提供阻止屈曲传播所需要的强度。需要额外增加止屈器长度或者继续增加止屈器的厚度才可完全抑制屈曲传播,但这样增加了对铺管设备性能的要求。因此为追求整体式止屈器的材料利用率而选用短且厚的结构形式是得不偿失的,这样的结构不利于管道铺设,同时垂直穿越的存在使其止屈效果并不理想。

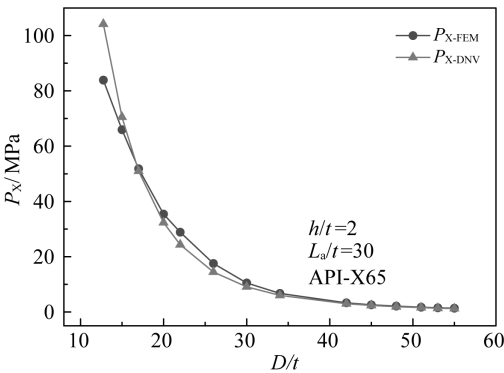


图 6 径厚比 D/t 与穿越压力曲线
Fig. 6 Curve of D/t and crossover pressure

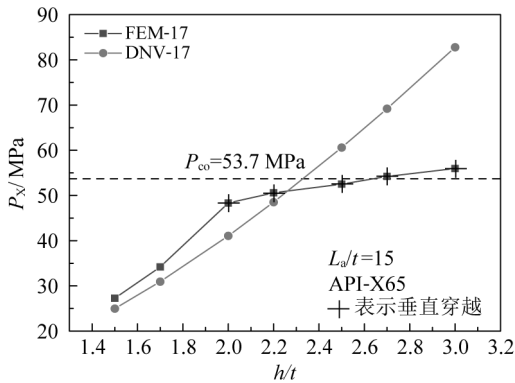


图 7 厚度比 h/t 与穿越压力曲线 ($D/t=17$)
Fig. 7 Curve of h/t and crossover pressure ($D/t=17$)

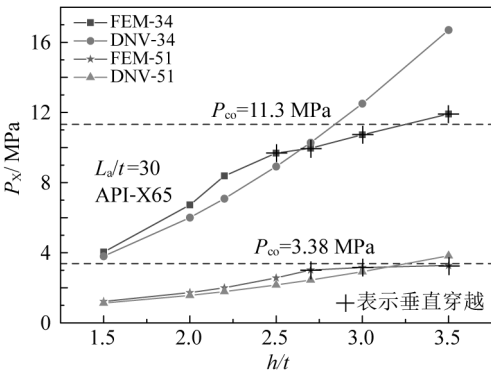


图 8 厚度比 h/t 与穿越压力曲线 ($D/t=34, 51$)
Fig. 8 Curve of h/t and crossover pressure ($D/t=34, 51$)

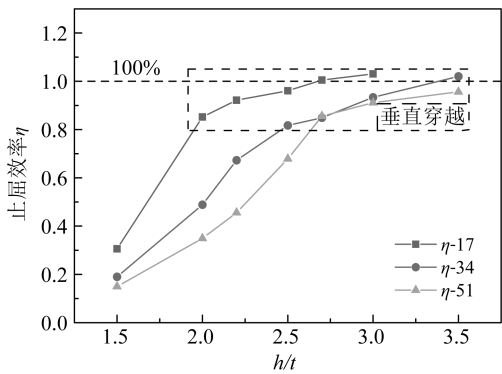


图 9 厚度比 h/t 与止屈效率曲线
Fig. 9 Curve of h/t and buckle arresting efficiency

对比来看,DNV 规范推荐公式并未考虑上述效应, h/t 与穿越压力总体接近线性正比关系。

2.3 止屈器有效长度比 L_a/t

针对 L_a/t 的敏感度分析与 h/t 类似,同样固定管道的径厚比 D/t 和止屈器厚度 $h/t=2$,改变 L_a/t 的值同时保证 L_a/D 在工程常用范围 0.5~1.5 之内。相应的结果如图 10 和图 11 所示。

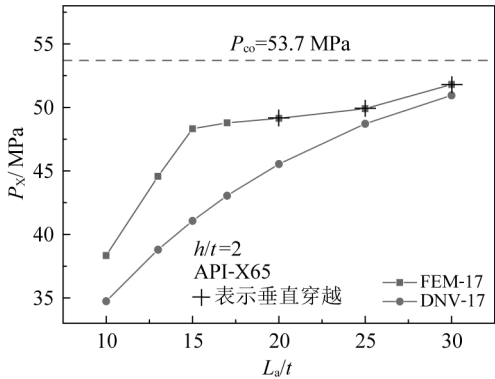


图 10 有效长度比 L_a/t 与穿越压力曲线 ($D/t=17$)

Fig. 10 Curve of L_a/t and crossover pressure ($D/t=17$)

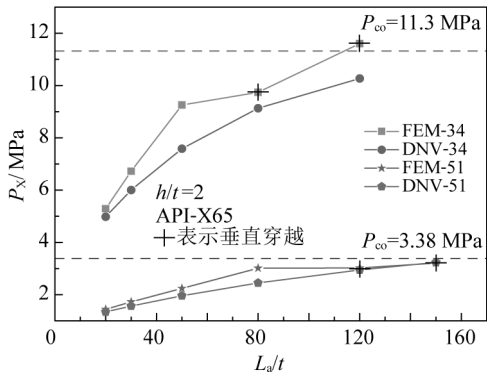


图 11 有效长度比 L_a/t 与穿越压力曲线 ($D/t=34, 51$)

Fig. 11 Curve of L_a/t and crossover pressure ($D/t=34, 51$)

可以看出随着 L_a/t 的增加,穿越压力 P_x 有着和 h/t 敏感性分析中相似的变化趋势,在平行穿越阶段,增加整体式止屈器的有效长度 L_a 可以有效增加止屈器的临界穿越压力 P_x ,一旦进入垂直穿越(止屈效率在 80%左右),穿越压力的提升便不再显著。

对比来看,数值模拟结果在 L_a/t 较小时相比 DNV 公式高很多, L_a/t 较大时则与 DNV 公式拟合较好。

2.4 止屈特性分析

整体式止屈器发生失效时具有两种典型的穿越形式:平行穿越和垂直穿越。在平行穿越阶段,增加整体式止屈器的厚度、有效长度和材料强度^[13]能显著增强止屈器自身的结构强度,从而增加穿越压力的大小。但整体式止屈器的垂直穿越应当引起足够重视,这种穿越形式往往对应较高的止屈效率(80%左右),止屈器失效时本身并未发生较大变形。对于发生垂直穿越的止屈器,增加止屈器的相应参数并不能明显提升其穿越压力。

因此,径厚比 D/t 、止屈器厚度 h 、有效长度 L_a 和材料属性的合理配合才能使整体式止屈器的材料利用率达到最佳,在止屈器设计中要尽量让上述参数落在最佳收益范围之内。应当避免仅增加其中一个参数,因为垂直穿越的存在,在特定组合下,其中一个变量增大到一定程度后的收益便不再明显了。此外,过短或过薄的止屈器也都是不可取的,这会极大地减弱其止屈性能并提高对铺管设备的要求。

3 穿越压力预测

3.1 公式拟合

考虑影响整体式止屈器穿越压力的关键参数,包括管道径厚比、止屈器厚度、长度比以及材料属性,引入管道屈曲传播压力 P_p ,将整体式止屈器穿越压力 P_x 设定为以下无因次函数:

$$\frac{P_x}{P_p} = f\left(\frac{D}{t}, \frac{h}{t}, \frac{L_a}{t}, \frac{\sigma_0}{E}, \frac{\sigma_{0a}}{E_a}\right) \quad (3)$$

采用止屈效率 η (式(1))衡量止屈器的止屈性能,考虑止屈效率 η 的形式,以及穿越压力 P_x 大于屈曲传播压力 P_p ,将函数简化为以下幂函数的形式:

$$\frac{P_x}{P_p} = 1 + A_0 \left(\frac{D}{t}\right)^{a_1} \left(\frac{h}{t}\right)^{a_2} \left(\frac{L_a}{t}\right)^{a_3} \left(\frac{\sigma_0}{E}\right)^{a_4} \left(\frac{\sigma_{0a}}{E_a}\right)^{a_5} \quad (4)$$

此时止屈效率 η 为:

$$\eta=A_0\left(\frac{D}{t}\right)^{a_1}\left(\frac{h}{t}\right)^{a_2}\left(\frac{L_a}{t}\right)^{a_3}\left(\frac{\sigma_0}{E}\right)^{a_4}\left(\frac{\sigma_{0a}}{E_a}\right)^{a_5}/\left(\frac{P_{co}}{P_p}-1\right) \tag{5}$$

取中间变量 α 为:

$$\alpha=\left(\frac{D}{t}\right)^{a_1}\left(\frac{h}{t}\right)^{a_2}\left(\frac{L_a}{t}\right)^{a_3}\left(\frac{\sigma_0}{E}\right)^{a_4}\left(\frac{\sigma_{0a}}{E_a}\right)^{a_5}/\left(\frac{P_{co}}{P_p}-1\right) \tag{6}$$

结合止屈器参数分析中非垂直穿越的有限元模拟结果,基于 Levenberg-Marquardt 最小二乘优化算法拟合式(4)中各个参数与目标函数的关系曲线,依次确定中间变量 α 中各幂指数的取值。随后综合所有有限元模拟结果,绘制于图 12 中。

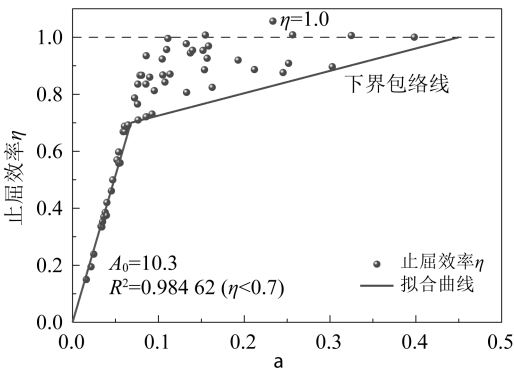


图 12 止屈效率 η 与中间变量 α 的关系拟合
Fig. 12 Fitting relationship between η and α

可以看出,中间变量 α 间接反映了管道径厚比、止屈器厚度、有效长度和相应的材料属性对穿越压力的影响程度。当止屈效率 $0<\eta<0.7$ 时(对应止屈器的平行穿越阶段), η 与 α 的关系可近似为一条斜率 $A_0=10.3$ 的直线拟合;当止屈效率 $0.7\leq\eta\leq 1$ 时,由于垂直穿越的存在,止屈效率 η 和中间变量 α 的关系逐渐发散,呈现出一定的复杂性。此时采用一条线性包络线作为止屈效率 η 的下界,对应的斜率 $A_1=0.785\ 2$ 、截距 $d=0.646\ 6$,尽可能覆盖所有样本点,从而实现对全体模拟结果特别是对发生垂直穿越的算例的保守拟合。同时,对于垂直穿越的发生使得穿越压力增长速率放缓这一特性,文中公式通过改变两条增长曲线的斜率来体现。最终得到了式(7)的整体式止屈器穿越压力计算公式:

$$\begin{cases} P_x=\eta\cdot(P_{co}-P_p)+P_p \\ \eta=\begin{cases} 10.3\alpha & 0<\eta<0.7 \\ 0.785\ 2\alpha+0.646\ 6 & 0.7\leq\eta\leq 1 \end{cases} \\ \alpha=[(t/D)^{1.32}(h/t)^{2.7}(L_a/t)^{0.85}(E/\sigma_{0.2})^{0.65}(\sigma_{0.2a}/E_a)^{0.95}/(P_{co}/P_p-1)] \end{cases} \tag{7}$$

需要说明的是,式(7)中止屈效率 η 的分布范围并非对应止屈器穿越形式发生转变的界限,而是对于该界限的保守拟合。从研究进行的算例结果可以看出该分界点分布在止屈效率 $\eta=80\%$ 左右,因此从工程安全的角度考虑,式(7)中两种止屈效率范围下的表达式(以止屈效率 $\eta=70\%$ 为界限)可分别用于计算止屈器的平行穿越和垂直穿越下的穿越压力。同时,对于整体式止屈器何时发生垂直穿越,与哪些因素有关这一问题,后续可以开展进一步更为细致的研究。

3.2 试验结果验证

为了进一步验证上述拟合公式的正确性和适用性,采用 Park 等^[12]、Lee 等^[13] 的试验数据进行检验,模型参数和试验结果如表 4 所示。将表 4 中试验参数分别代入到余建星等公式^[14]、DNV 规范^[15]、Lee 等公式^[13] 和文中拟合得到的公式中,计算整体式止屈器的穿越压力大小,如表 5 所示。

表 4 Lee 等^[13]、Park 等^[12]模型参数和试验结果
Tab. 4 Model parameters and experimental results of Lee, et al^[13] and Park, et al^[12]

来源	编号	t/mm	D/t	h/t	L_a/t	σ_0/MPa	σ_{0a}/MPa	P_X/MPa
Park 等 ^[12]	K1	2.416	21.01	2.73	10.51	305.7	659	22.67
	K2	2.416	21.01	2.41	10.51	305.7	659	21.68
	K3	2.443	20.76	2.21	10.38	337.4	659	21.30
	K4	2.443	20.75	2.05	10.37	337.4	659	22.51
	K5	2.433	20.83	1.90	10.41	337.4	659	18.50
	K6	5.160	22.23	2.10	22.14	632.7	468.8	28.46
	K7	5.190	22.11	2.10	27.53	648.4	468.8	30.49
	K8	5.170	22.21	2.11	33.15	648.4	468.8	31.95
	K9	5.190	22.10	2.12	44.05	648.4	468.8	33.86
Lee 等 ^[13]	L1	2.454	20.02	1.723	10.01	337.4	659	17.16
	L2	2.591	19.60	1.571	9.80	277.7	659	15.47
	L3	2.583	19.65	1.424	9.83	277.7	659	13.38
	L4	2.588	19.66	1.308	9.83	277.7	659	11.65
	L5	2.200	23.09	1.708	11.55	299.8	659	11.57
	L6	2.192	23.19	1.576	11.60	299.8	659	9.43
	L7	2.205	23.03	1.982	11.52	299.8	659	16.43
	L8	2.184	23.24	1.436	11.62	293.5	659	8.23
	L9	2.187	23.25	2.111	11.63	293.5	659	16.68
	L10	2.195	23.13	1.279	11.57	293.5	659	7.21

表 5 穿越压力 P_X 计算值与试验值对比
Tab. 5 Comparing the calculated values of crossover pressure P_X with the experimental values

编号	试验结果	余建星等公式 ^[14]	误差	DNV 规范 ^[15]	误差	Lee 等公式 ^[13]	误差	文中公式	误差
	/MPa	/MPa	/(%)	/MPa	/(%)	/MPa	/(%)	/MPa	/(%)
K1	22.67	22.83	0.7	39.86	75.8	20.83	-8.1	21.30	-6.0
K2	21.68	21.31	-1.7	31.91	47.2	20.29	-6.4	20.58	-5.1
K3	21.30	22.47	5.5	28.45	33.6	21.88	2.7	22.08	3.7
K4	22.51	21.59	-4.1	25.02	11.2	20.45	-9.2	21.85	-2.9
K5	18.50	20.48	10.7	21.62	16.9	17.60	-4.9	18.95	2.4
K6	28.46	27.37	-3.8	25.01	-12.1	28.29	-0.6	28.55	0.3
K7	30.49	29.01	-4.9	27.61	-9.4	29.21	-4.2	29.56	-3.1
K8	31.95	29.35	-8.1	29.16	-8.7	29.16	-8.7	29.60	-7.4
K9	33.86	30.86	-8.9	32.29	-4.6	30.08	-11.2	30.70	-9.3
L1	17.16	21.64	26.1	20.55	19.8	16.85	-1.8	17.83	3.9
L2	15.47	19.05	23.1	17.98	16.2	13.82	-10.7	14.43	-6.7
L3	13.38	17.93	34.0	15.12	13.0	11.97	-10.5	12.31	-8.0
L4	11.65	17.08	46.6	13.13	12.7	10.75	-7.7	10.94	-6.1
L5	11.57	13.45	16.2	13.05	12.8	10.42	-9.9	10.99	-5.0
L6	9.43	12.71	34.8	11.25	19.3	9.16	-2.9	9.53	1.1
L7	16.43	14.70	-10.5	17.06	3.8	13.37	-18.6	14.51	-11.7
L8	8.23	11.83	43.7	9.55	16.0	7.94	-3.5	8.15	-1.0
L9	16.68	14.61	-12.4	18.51	11.0	14.39	-13.7	15.82	-5.2
L10	7.21	11.25	56.0	8.08	12.1	7.02	-2.6	7.11	-1.4

同时将表中数据作可视化处理,绘制于图 13 中。结合图表中的数据可以看出:文中拟合的穿越压力计算公式与试验结果吻合程度较好,平均误差仅为-3.5%;相比之下,余建星等公式^[14]和 DNV 规范^[15]计算结果明显大于试验值,个别试验工况的偏差甚至达到了 56.0%和 75.8%;Lee 等公式^[13]表现为明显偏保守,在与试验结果的对比中,其整体误差和误差极值分别达到了-7.0%和-18.6%。

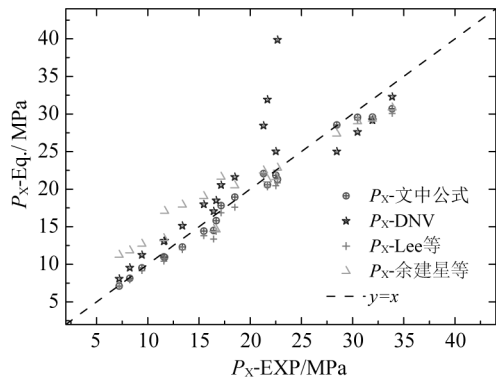


图 13 公式计算值与试验值的标定

Fig. 13 Calibration of formula values and experiments

文中提出的公式相较于已有的规范或学者拟合公式不论是在适用范围,还是结果准确性上都有着显著的优势,能够较为准确地预测出整体式止屈器穿越压力 P_X 这一重要设计参数,从而指导设计。

4 结 语

利用 ABAQUS 有限元软件,对管道整体式止屈器的止屈和穿越过程进行了模拟,分析了止屈器的止屈特性,基于大量有限元模拟结果对整体式止屈器穿越压力进行了公式拟合,得到以下结论和成果:

1) 平行穿越阶段,增大管道径厚比 D/t 、止屈器厚度 h 、有效长度 L_a 可以有效提升止屈效率,但进入垂直穿越阶段后,这种提升效果便不再显著。管道径厚比 D/t 、止屈器厚度 h 、有效长度 L_a 的合理配合才能使整体式止屈器的材料利用率达到最佳,过短或过薄的止屈器都是不可取的,同时应避免一味增加止屈器的一个参数。

2) 提出了一种预测整体式止屈器穿越压力的快速计算公式。将文中公式、Lee 等公式、余建星等公式、DNV 规范的计算结果与已发表的整体式止屈器试验结果进行对比分析,文中公式具有更高的准确性。同时针对不同的穿越形式给出了不同的计算式,可为工程实际中整体式止屈器的设计提供指导和参考价值。

尽管研究针对整体式止屈器的不同穿越形式给出了不同的穿越压力计算公式,但对于两种穿越形式的转变区间仅进行了保守选取(文中以止屈效率 $\eta=70\%$ 为界限),并未进行深入细致的探究。在整体式止屈器何时发生垂直穿越,具体与哪些因素有关这一问题上,有待后续开展更为严谨准确的研究。同时,整体式止屈器的最优参数区间、最佳材料利用率也是一个值得进一步研究的问题。

参考文献:

[1] 徐慧,王诗鹏,杜鹃,等.海底管道内检测技术方案的确定[J].天然气与石油,2015,33(1):6-10. (XU Hui, WANG Shipeng, DU Juan, et al. Determination of technical scheme of internal inspection in subsea pipeline[J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33(1): 6-10. (in Chinese))

[2] YU Jianxing, WU Mengning, SUN Zhenzhou, et al. Research progress of buckling propagation experiment of deep-water pipelines[J]. Transactions of Tianjin University, 2016, 22(4): 285-293.

[3] 余建星,马维林,陈飞宇,等.海底管道止屈器形式与设计方法研究概述[J].海洋工程,2013,31(4):100-105. (YU Jianxing, MA Weilin, CHEN Feiyu, et al. Research on types and design method of buckling arrestors for subsea pipelines[J]. The Ocean Engineering, 2013, 31(4): 100-105. (in Chinese))

[4] KYRIAKIDES S. Propagating instabilities in structures[J]. Advances in Applied Mechanics, 1994, 30: 67-189.

[5] 李旭,李庆,张英.深水海管止屈器设计方法研究[J].海洋工程装备与技术,2014,1(3):227-229. (LI Xu, LI Qing,

- ZHANG Ying. Deepwater pipeline arrestor design study[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2014, 1(3): 227-229. (in Chinese))
- [6] NETTO T A, KYRIAKIDES S. Dynamic performance of integral buckle arrestors for offshore pipelines. Part 1: Experiments[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2000, 42(7): 1405-1423.
- [7] 吴梦宁, 余建星, 孙震洲, 等. 双整体式止屈器结构性能研究及优化设计[J]. 海洋工程, 2017, 35(2): 56-66. (WU Mengning, YU Jianxing, SUN Zhenzhou, et al. Arresting performance analysis and optimum design for the structure of double-integral buckle arrestors[J]. The Ocean Engineering, 2017, 35(2): 56-66. (in Chinese))
- [8] LEE L H. On the design of slip-on buckle arrestors for offshore pipelines[D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2007.
- [9] LANGNER C G. Buckle arrestors for deepwater pipelines[C]//Offshore Technology Conference. 2013.
- [10] KYRIAKIDES S. On the propagating buckle and its arrest[D]. Caltech, 1980.
- [11] NETTO T A, ESTEFEN S F. Buckle arrestors for deepwater pipelines[J]. Marine Structures, 1996, 9(9): 873-883.
- [12] PARK T D, KYRIAKIDES S. On the performance of integral buckle arrestors for offshore pipelines[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1997, 39(6): 643-669.
- [13] LEE L H, KYRIAKIDES S, NETTO T A. Integral buckle arrestors for offshore pipelines: Enhanced design criteria[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2008, 50(6): 1058-1064.
- [14] 余建星, 段晶辉, 孙震洲, 等. 海底管道整体式止屈器模型试验与数值模拟[J]. 中国造船, 2017, 58(3): 80-90. (YU Jianxing, DUAN Jinghui, SUN Zhenzhou, et al. Model tests and numerical simulation on integral buckle arrestors for submarine pipelines[J]. Shipbuilding of China, 2017, 58(3): 80-90. (in Chinese))
- [15] Det Norske Veritas. Offshore standard: Submarine pipeline systems: ST-F101[S]. 2007.
- [16] NETTO T A, KYRIAKIDES S. Dynamic performance of integral buckle arrestors for offshore pipelines. Part II: Analysis[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2000, 42(7): 1425-1452.
- [17] TOSCANO R G, MANTOVANO L, AMENTA P, et al. Collapse arrestors for deepwater pipelines. Cross-over mechanisms[J]. Computers & Structures, 2008, 86(7/8): 728-743.
- [18] 颜铠阳, 余建星, 余杨, 等. 整体式止屈器数值模拟方法与优化研究[J]. 海洋工程, 2020, 38(6): 77-85. (YAN Kaiyang, YU Jianxing, YU Yang, et al. Study of integral buckle arrestors design[J]. The Ocean Engineering, 2020, 38(6): 77-85. (in Chinese))