

含相互作用缺陷海洋立管极限载荷数值分析*

姜峰** 曹鑫 周涛

(兰州理工大学石油化工学院)

摘要 对含相互作用缺陷的海洋立管极限载荷进行分析,考虑了相邻缺陷间轴向距离对含缺陷管道极限载荷的影响,由于材料和缺陷尺寸的非线性,采用有限元分析软件 ANSYS 进行分析计算,得到管道极限载荷与缺陷尺寸和距离的关系曲线,研究表明相邻缺陷间轴向距离对缺陷管线的影响较大,特别是当缺陷间距离较近时。结果与国内外相关的海洋管道腐蚀缺陷评价标准中的规定是一致的,证明含相互作用缺陷海洋立管极限载荷的分析计算采用有限元非线性分析是可行的。

关键词 海洋管道 相邻缺陷 极限载荷 非线性 数值分析

中图分类号 TQ055.8⁺¹

文献标识码 A

文章编号 0254-6094(2013)04-0505-05

海洋立管是连接海底井口与海上生产设备的唯一通道,是海洋油气资源开发和利用的生命线,是整个海洋管道系统中重要且薄弱、易损的部分,其安全与否直接影响着海洋工程及其周围环境与海洋生物等。海洋立管处于大气和海水的多重环境作用下,承受风、浪、流等外部载荷和温度、腐蚀等的作用,与陆地输油管道相比,其腐蚀程度更加严重。根据英国 PARLOC^[1]海底管道数据库的统计分析可知,由腐蚀引起的海洋管道的失效占其总失效模式的42%左右,位居第一。

海洋立管的腐蚀,直接导致其壁厚减薄,承载能力下降。随着腐蚀程度的加大,管道的抗泄漏及抗破裂等能力下降,当管道内部压力高于其承载能力时,将导致管道破坏。预测海洋立管在腐蚀情况下的极限载荷,确定腐蚀缺陷对其结构完整性的危害程度,是制定相关防腐措施并确保海洋立管在服役期间能够安全运行的理论基础,为对含缺陷海洋立管的决策——继续服役、维修或更换等提供了理论依据。对含缺陷管道剩余强度的研究始于20世纪60年代,且已形成了相应的评估规范^[2]。目前,国际上比较通用的海洋管道腐蚀缺陷评价标准是由挪威船级社提出的 DNV-RP-F101^[3]。我国在参考国外相关规范的基础

上,结合实际情况,提出了适合国情的管道评价标准 SY/T 6151 等评价规范^[4]。

笔者采用有限元分析的方法对含相互作用缺陷的海洋立管的极限载荷进行了分析,得到了在不同缺陷尺寸和距离下海洋立管极限载荷的变化曲线,表明缺陷尺寸和距离对海洋立管的极限载荷影响较大,应该予以特别重视;证明了含缺陷管道分析计算采用有限元分析软件是可行的,而且准确性比较高,为在役管道的安全运行提供了理论支持。

1 管道极限载荷的分析方法

1.1 相互作用缺陷处理方法

文献[5]中指出,当存在两个以上的凹坑时,应分别按单个凹坑进行规则化,并确定各自的凹坑长轴。若规则化后相邻两凹坑边缘间最小距离大于较小凹坑的长轴,则可将两个凹坑视为互相独立的单个凹坑分别进行评定。否则,应将两个凹坑合并为一个半椭球形凹坑来进行评定,该凹坑的长轴长度为两凹坑外侧边缘之间的最大距离,短轴长度为平行于长轴且与两凹坑外缘相切的任意两条直线之间的最大距离,该凹坑的深度为两凹坑的深度的较大值。

文献[3]认为,对于相互作用的两个相邻缺

* 国家质检公益基金(201210026)。

** 姜峰,女,1969年7月生,副教授。甘肃省兰州市,730050。

陷,满足下面的任何一个条件时,缺陷可以当作独立缺陷进行处理,而且,不需要考虑缺陷间的相互影响:两相邻缺陷的环向角 $\phi > 360 \sqrt{\frac{t}{D}}$;两相邻缺陷的轴向间距 $s > 2 \sqrt{Dt}$ 。相反,如果不能满足这两个条件,则应将两个缺陷看作同一个缺陷来处理。其等效长度和深度分别为:

$$l_{nm} = l_m + \sum_{i=n}^{m-1} (l_i + s_i) \quad (1)$$

$$d_{nm} = \frac{\sum_{i=n}^m d_i l_i}{l_{nm}} \quad n, m = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中 d_{nm} ——相互作用缺陷平均深度, mm;

l_{nm} ——相互作用缺陷总纵向长度, mm。

文献[4]中规定,当相邻两腐蚀缺陷之间轴向距离小于 25mm 时,应视为同一腐蚀缺陷进行处理;当相邻两腐蚀缺陷之间的轴向距离大于 25mm 时,则按照相互独立的缺陷处理。

1.2 极限载荷的有限元分析及其失效准则

1.2.1 极限载荷的有限元分析

当塑性材料的应力未达到其弹性极限时,应力-应变关系呈线性变化,但当应力超过弹性极限后,材料会发生屈服,其应力-应变关系不再呈线性变化。考虑到材料和腐蚀缺陷几何形状的非线性,采用非线性有限元方法对其进行分析,确定含相互作用缺陷海洋立管极限载荷和距离变化的关系。

1.2.2 失效准则

Bin Fu 和 Mike G Kirkwood^[6]于 1995 年提出了一种基于塑性失效的准则,认为当材料的应力状态达到材料的拉伸强度极限时,材料发生失效。该准则在后来的一系列实验中得到了证实,并且具有很高的精度。Von-Mises 等效应力在三维坐标下的当量应力表达式为:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3)$$

其中 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别表示 3 个方向的主应力。

在本次有限元分析中,采用这种基于塑性失效的准则进行分析计算。当腐蚀缺陷处的 Von-Mises 等效应力达到材料的抗拉强度时,认为其已经发生失效,此时所对应的载荷即为管道的极限载荷。

2 实例分析

某海洋立管的材料为 API 5L X52 钢,其外径 $D_o = 325.85\text{mm}$,壁厚 $t = 10.30\text{mm}$,最小屈服强度 $\sigma_s = 358\text{MPa}$,抗拉强度 $\sigma_b = 455\text{MPa}$,密度 $\rho = 7850\text{kg/m}^3$,弹性模量 $E = 206\text{GPa}$,泊松比 $\mu = 0.3$ 。

2.1 模型建立

海洋立管通常比较长,短则数十米,长则成百上千米。其腐蚀缺陷主要位于飞溅区,而且以外腐蚀为主^[7]。在缺陷尺寸相同的情况下,无论是内腐蚀缺陷还是外腐蚀缺陷,对极限载荷的影响都是相同的^[8],所以在本次分析中仅考虑外腐蚀情况下管道的极限载荷。由于管道是轴对称的,根据其结构的对称性和载荷的对称性,为了建模和计算方便,取立管在飞溅区某一段的 1/2 作为研究对象。考虑到边界条件对计算结果的影响,根据圣维南原理^[9],取其两端到腐蚀缺陷边缘的距离为管径的 2~3 倍。

对于相互作用的相邻两腐蚀缺陷,保持大腐蚀缺陷的长度和宽度不变,仅改变其深度;分别改变小腐蚀缺陷的长度、深度和宽度中的任一值;改变两腐蚀缺陷之间的距离。对相互作用的两腐蚀缺陷,两缺陷间的距离为 0.5t、1.0t、1.5t、2.0t、2.5t、3.0t;小缺陷的长度为 20、40、60、80mm,大缺陷长度取为 80mm,缺陷深度为 0.2t、0.4t、0.6t、0.8t。建立含相互作用缺陷海洋立管的几何模型,如图 1 所示。



图 1 含相互作用缺陷管道模型

2.2 边界条件的设定及计算

海洋立管在飞溅区主要承受内压的作用,忽略其外部载荷的影响,在模型的内部增加压力载荷;由于所选取的模型只是其中的一段,在其两端增设由内压引起的轴向等效载荷;考虑到结构的对称性,在剖面部分增设对称面载荷。采用有限元分析

软件 ANSYS 的非线性功能进行分析计算,得到管道的 Von-Mises 等效应力^[10-12]。海洋立管在相互作用两相邻缺陷处的应力分布如图 2 所示。

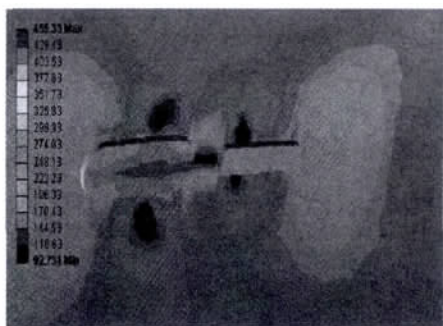


图 2 相互作用缺陷应力分布

3 管道极限载荷分析

对含相互作用腐蚀缺陷的管道模型进行非线性分析,得到管道的极限载荷。只承受内压作用的海洋立管缺陷处的失效模式为塑性失效,由失效准则可以得到在此缺陷尺寸下管道的极限载荷。由于缺陷宽度对海洋立管极限载荷的影响很小,可以忽略不计^[13]。所以,若将两缺陷看作两个独立缺陷进行分析,考虑小腐蚀缺陷长度、深度和两缺陷间距离的变化对海洋立管极限载荷的影响;若将两缺陷视为合并后的同一缺陷进行分析,则考虑缺陷长度和深度的变化对海洋立管极限载荷的影响。

3.1 两个独立缺陷下管线的极限载荷

3.1.1 极限载荷随缺陷深度的变化

根据建立的海洋立管模型和有限元非线性分析得到的数据,在保持小缺陷长度和两缺陷间距离不变的情况下,仅改变缺陷的深度,绘制出含相互作用缺陷海洋立管的极限载荷与缺陷深度的变化曲线,图 3 所示为小缺陷长度为 60mm,两缺陷

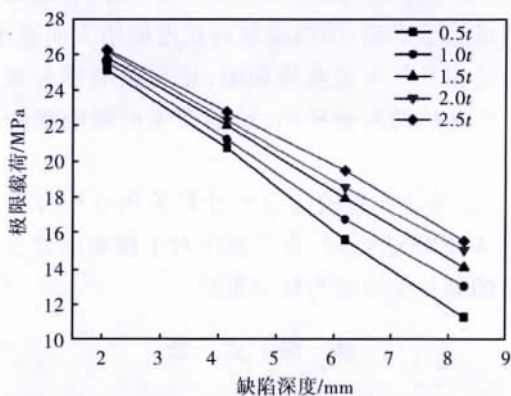


图 3 极限载荷随缺陷深度变化曲线

间距离分别为 0.5t、1.0t、1.5t、2.0t、2.5t、3.0t 时极限载荷的变化曲线。

由图 3 可以看出,在保持小缺陷长度和两缺陷间距离不变的情况下,随着腐蚀缺陷深度的增加,海洋立管的极限载荷逐渐减小。这与工程实际相吻合,由于随着缺陷深度的增大,海洋立管的壁厚减薄,海洋立管的承载能力下降。

3.1.2 极限载荷随两缺陷间距离的变化

在保持缺陷深度和小缺陷长度不变的情况下,仅改变两缺陷间的距离,绘制出含相互作用缺陷海洋立管极限载荷与两缺陷间距离的变化曲线,图 4 所示为缺陷深度为 0.6t,小缺陷的长度分别为 20、40、60、80mm 时极限载荷的变化曲线。

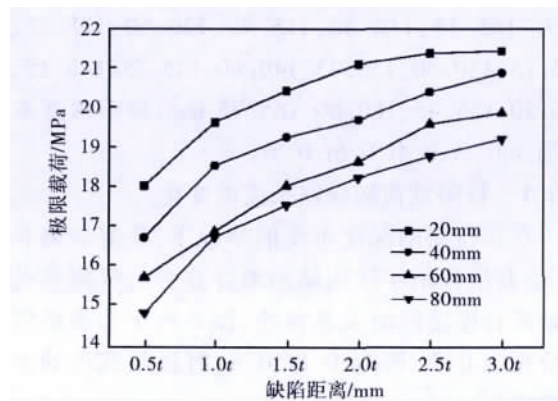


图 4 极限载荷随缺陷距离变化曲线

由图 4 可以看出,在缺陷间距离小于 2.5t (25mm) 时,随着两腐蚀缺陷之间的距离的增大,海洋立管的极限载荷也随之增大;但当缺陷距离大于 2.5t 时,极限载荷的变化趋于平稳。

3.1.3 极限载荷随缺陷长度的影响

在保持缺陷深度和两缺陷间距离不变的情况下,仅改变小腐蚀缺陷的长度,绘制出含相互作用缺陷海洋立管的极限载荷与小缺陷长度的变化曲线,图 5 所示为缺陷深度为 0.8t,两缺陷间的距离分别为 0.5t、1.0t、1.5t、2.0t、2.5t、3.0t 时极限载荷的变化曲线。

由图 5 可以看出,在小缺陷长度小于 60mm 的情况下,随着小缺陷长度的增大,海洋立管的极限载荷随之减小;当小缺陷长度大于 60mm 以后,极限载荷的变化趋于平缓。可见,在两缺陷尺寸相差不大的情况下,两缺陷间的相互作用较小。

3.2 将两个缺陷合并后管线的极限载荷

根据建立的物理模型及管道和缺陷尺寸,将

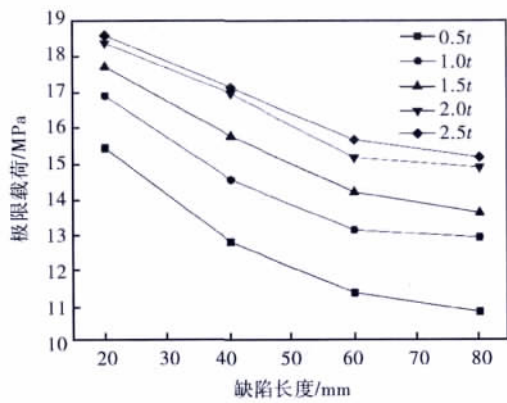


图5 极限载荷随缺陷长度变化曲线

两个缺陷合并为一个缺陷后,缺陷长度应为大缺陷长度、小缺陷长度和两缺陷距离之和,即缺陷长度为: 105.15、110.30、115.45、120.60、125.75、125.15、130.30、135.45、140.60、145.75、145.15、150.30、155.45、160.60、165.75 mm; 缺陷深度取值仍为 0.2t、0.4t、0.6t、0.8t。

3.2.1 极限载荷随缺陷长度的变化

在保持缺陷深度不变的情况下,改变缺陷长度,绘制出含相互作用缺陷海洋立管的极限载荷与缺陷长度之间的关系曲线,图6所示为缺陷深度分别为 0.2t、0.4t、0.6t、0.8t 时极限载荷的变化曲线。

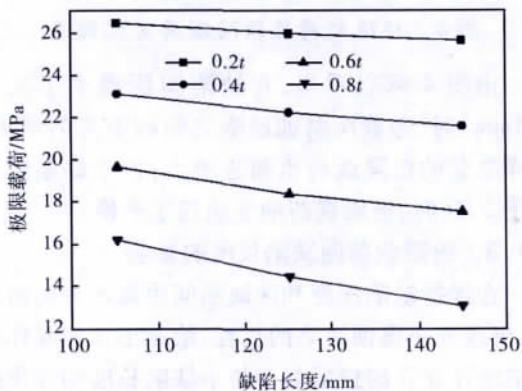


图6 极限载荷随缺陷长度变化曲线

由图6可以看出,在缺陷深度不变的情况下,随着缺陷长度的增大,海洋立管的极限载荷逐渐减小。但随着长度的增加,海洋立管的极限载荷的减小将趋于稳定。

3.2.2 极限载荷随缺陷深度的变化

在保持缺陷长度不变的情况下,改变缺陷深度,绘制出含相互作用缺陷海洋立管的极限载荷与缺陷深度之间的关系曲线,图7所示为缺陷长

度为 105.15、110.30、115.45、120.60、125.75 mm 时极限载荷的变化曲线。

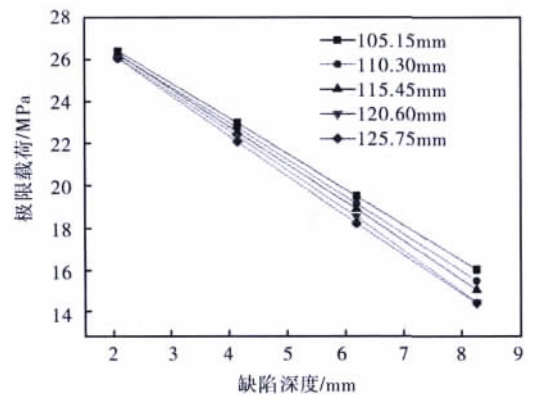


图7 极限载荷随缺陷深度变化曲线

由图7可以看出,在保持缺陷长度不变的情况下,随着缺陷深度的增大,海洋立管的极限载荷逐渐减小。因为随着缺陷深度的增大,海洋立管壁厚减薄,承载能力下降。

4 结论

4.1 海洋立管在海洋环境下,会产生一系列腐蚀缺陷,相互作用相邻缺陷间的距离以及缺陷长度和深度对海洋立管的极限载荷都有较大影响,尤其是两相邻缺陷距离较小的时候,缺陷深度对海洋立管极限载荷的影响远远大于缺陷长度对其极限载荷的影响。

4.2 轴向相邻的两个缺陷,缺陷间的距离对海洋立管的极限载荷影响较大,随着缺陷间距离的增大,海洋立管的极限载荷逐渐增大,当两缺陷间距离大于 2.5t (25mm) 以后,极限载荷的变化区域平缓。

4.3 腐蚀缺陷的极限载荷受到缺陷长度的影响,但是在长度增加到一定值以后,缺陷管线的极限载荷趋于平稳,不再随缺陷长度的增大而减小,无论是相互作用的腐蚀缺陷,还是按照相关规范进行合并后的腐蚀缺陷,缺陷深度的影响更加严重。

4.4 对海洋立管缺陷分析计算采用有限元分析软件 ANSYS 进行时,在分析中对于模型的建立和网格的划分等应给与特别重视。

参考文献

- [1] PARLOC 2001: The Update of Loss of Containment Data for Offshore Pipelines [R]. Prepared by Mott

- MacDonald Ltd. for: The Health and Safety Executive , The UK Offshore Operators Association and The Institute of Petroleum 2003.
- [2] 冯耀荣,王新虎,赵冬岩. 油气输送管失效事故的调查与分析[J]. 中国海上油气(工程), 1999, 11(5): 11~14.
- [3] DNV-RP-F101 Corroded Pipeline [S]. Oslo: DET NORSKE VERITAS 2010.
- [4] SY/T 6151 钢制管道管体腐蚀损伤评价方法[S]. 北京: 国家能源局 2009.
- [5] GB/T 19624 在用含缺陷压力容器安全评定[S]. 北京: 中国标准出版社 2004.
- [6] Bin Fu, Mike G Kirkwood. Predicting Failure Pressure of Internally Corroded Pipeline Using the Finite Element Method [C]. ASME OMAE 13th International Conference of Mechanic Arctic Engineering. Houston: ASME, 1995: 175~184.
- [7] 方华灿. 油气长输管线的安全可靠分析[M]. 北京: 石油工业出版社 2002: 15~21.
- [8] 蔡文军, 陈国明, 潘东民. 腐蚀管线剩余强度的非线性分析[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1999, 23(1): 66~68.
- [9] 杨桂通. 弹塑性力学引论[M]. 北京: 清华大学出版社 2004.
- [10] 刘涛, 杨凤鹏. 精通 ANSYS [M]. 北京: 清华大学出版社 2002.
- [11] 小飒工作室. 最新经典 ANSYS 及 Workbench 教程 [M]. 北京: 电子工业出版社 2004.
- [12] 栾春远. 压力容器 ANSYS 分析与强度计算 [M]. 北京: 水利水电出版社 2008.
- [13] Liang R, Zhou T, Cao X, et al. Numerical Analysis of Ultimate Load for a Marine Riser Containing Corrosion Defects [C]. Proceedings of 2012 International Symposium on Structural Integrity—from Failure to Better Design, Manufacture and Construction. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2012: 385~388.

(收稿日期: 2012-12-10)

Numerical Analysis of Ultimate Load for Marine Riser with Interacting Defects

JIANG Feng, CAO Xin, ZHOU Tao

(School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu)

Abstract The ultimate load of marine riser with interacting defects was analyzed, including the effect of adjacent defects' axial distance on the riser's ultimate load; and considering the nonlinearity of the riser's material and defects' size and through ANSYS, the relation curves of the ultimate load, defect sizes and distance were obtained. The research results show that the effect of adjacent defects' axial distance is obvious, especially at the time that the distance between defects stays closely. This conclusion, consistent with the corrosion defect criterion for marine pipelines at home and abroad, proves the feasibility of applying the finite element non-linear analysis to the ultimate load of marine pipeline with interacting defects.

Key words marine riser, adjacent defects, ultimate load, non linearity, numerical analysis

(Continued from Page 500)

Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Xiamen Special Equipment Inspection Institute, Xiamen 361004, China;)

Abstract Aiming at the PE pipe's viscoelastic properties, the Ansys was used to simulate and analyze the hot melting connector's mechanical properties of the PE pipe with circumferential surface cracks, and the Pro-nny series was used to analog material's viscoelastic properties, as well as the 1/4 node singular element was used to mesh the volumes at the crack boundary and to calculate the stress intensity factor of the PE pipe under the well-distributed internal pressure. The finite element simulation shows that the time of PE pipe rupture is just the moment that the crack occurs, and it is unnecessary to take PE pipe's viscoelasticity into account while calculating the stress intensity factor of circumferential surface cracks. The crack depth-PE pipe thickness ratio mainly influences the circumferential cracks.

Key words PE pipe, stress intensity factor, viscoelasticity, numerical simulation