

多缺陷相互作用及对油气管道强度影响研究

穆 怀, 曾祥国, 李 洋, 肖雨果, 耿清华

(四川大学建筑与环境学院, 成都 610065)

摘 要:采用有限元数值计算方法,对单个均匀腐蚀管道进行模拟评价,得出管道的剩余强度,进而与标准的 API579 准则评价结果进行对比分析,结果表明有限元计算结果与 API579 准则评价结果接近,验证了有限元模型的正确。对含有不同轴向间距和不同缺陷长度的两个腐蚀缺陷的管道进行计算和分析,研究发现腐蚀缺陷的长度和轴向间距并不是单独作用的参数,在计算腐蚀干涉极限影响距离时应考虑其相互影响。通过 ABAQUS 有限元软件计算分析,拟合得到腐蚀缺陷在不同长度下的极限距离影响公式。该公式综合考虑了两腐蚀缺陷的长度和腐蚀轴向间距的影响,可以用于快速判断两腐蚀缺陷之间是否发生相互干涉作用。

关键词:有限元;剩余强度;API579;腐蚀缺陷长度;腐蚀缺陷轴向间距;极限影响距离

中图分类号:TE973

文献标志码:A

引 言

管道作为输送油、气、水等战略物资的最重要载体,对其进行安全可靠评估非常重要。腐蚀是引起管道失效并最终导致破坏的重要原因之一^[1],其中较为严重的为均匀腐蚀与局部腐蚀。腐蚀会导致管道壁厚减薄,而引起应力集中,导致管道局部破坏,发生管道泄露事故。目前对于腐蚀管道的评价方法有很多种,主要的评价规范如 ASME B31G 准则(修订版)^[2],该准则是最基本的评价腐蚀管道的剩余强度评价方法,但自身也存在着不足之处,比如对于评价单一的轴向腐蚀其评价结果较为准确,但对于其他的腐蚀情况评价结果不太理想。总的来说,评价结果较为保守。此外还有 API579 评价准则,API579 评价准则^[3-4]是根据炼化企业对压力容器服役适应性评价(FFS, Fitness - For - Service)标准的需要由美国石油协会于 1993 年颁布的腐蚀评价法规。API579 准则主要采用分级评价体系,一、二级评价

所需数据较少,易于计算,但三级评价所采用的评价法则所需数据较多,过程较为复杂,主要由经验丰富的专家进行评价。该准则主要通过检测人员的实际检测数据由腐蚀管道评价人员和工程师确定腐蚀的轴向腐蚀长度以及周向腐蚀长度,再由相关公式确定最小剩余壁厚,进而算出剩余强度系数,最后计算出剩余强度,确保管道在输送介质的过程中能够在内压下正常运行,该准则把保证管道内介质正常输送的内压下管道仍然可以正常运行的临界值作为腐蚀后管道的最大运行压力。

蔡文军等^[5]已经通过计算机仿真对含有单个腐蚀缺陷的管道进行了有限元计算。在实际工况中,往往除了单个缺陷外,大多数情况下存在两个腐蚀缺陷,甚至更多的缺陷。赵新伟等^[6]研究了腐蚀坑轴向间距和径向夹角对管道的影响,但是没有考虑双腐蚀缺陷的影响。董事尔等^[7]研究了管道剩余壁厚对点腐蚀之间的相互作用的影响。张日向等^[8]研究了双腐蚀缺陷夹角之间的影响规律,但没有考虑双腐蚀缺陷长度之间的影

收稿日期:2016-03-18

基金项目:四川省应用基础研究计划项目(13JC0277);四川大学大学生创新创业训练计划项目(201510610882)

作者简介:穆 怀(1991-),男,贵州遵义人,硕士生,主要从事结构工程方面的研究(E-mail)798991098@qq.com;

曾祥国(1960-),男,四川安岳人,教授,博士,主要从事油气管道安全评价方面的研究,(E-mail)xiangguozeng@scu.edu.cn

响。研究人员建立了大量的双腐蚀缺陷作用准则,但是这些准则有很大的局限性,因此有必要对双腐蚀缺陷之间的相互作用进一步展开研究。

1 有限元与 API579 准则的对比分析

API579 评价准则评价腐蚀管道剩余强度的三个参数是缺陷尺寸、管道极限承载能力、管道材料。API579 准则准确建立了三者之间的关系,只要确定其中两个参数就能计算出第三个参数。

1.1 API579 评价均匀腐蚀的一级评价

管道内径 D_i 为 730 mm,管道外径 D_0 为 740 mm, σ_s 为材料最低屈服强度 359 MPa, S 为材料许用应力 (MPa),设计系数 K_s 为 0.72, P 为管道运行内压 (MPa), ν 为材料泊松比为 0.3,管壁壁厚 t 为 10 mm, LOSS 为上一个运行周期的金属损失厚度(公称壁厚减去测量最小壁厚)(mm),未来腐蚀裕量 FCA 为 1.89 mm,管道设计运行最大压力 $MAWP_0$ 为 6 MPa,许用剩余强度系数 RSF_a 为 0.9, t_{min} 为管道计算最小壁厚 (mm),测量最小壁厚 t_{mm} 为 5.0 mm,焊缝系数 E_w 为 1.0。评价方法分三个步骤:

(1) 确定运行压力下的最小要求壁厚 t_{min} :

$$t_{min}^c = \frac{PD_0}{2SE_w}, t_{min}^l = \frac{\beta PD_0}{4SE_w} \quad (1)$$

$$t_{min} = \max(t_{min}^c, t_{min}^l) \quad (2)$$

(2) 确定剩余壁厚比 R_t 以及最大允许腐蚀长度 L , 测量所有被测点厚度的最小值作为 t_{mm} , t_{am} 作为所有被测点厚度的算术平均值, β 为泊松比的两倍。

$$R_t = \left[\frac{t_{mm} - FCA}{t_{min}} \right] \quad (3)$$

当 $R_t < \frac{4RSF_a}{4 + \beta RSF_a}$ 时,

$$L = 1.123 \sqrt{D_i t_{min}} \sqrt{\left[\frac{1 - R_t}{R_t \left(1 + \frac{\beta}{4} RSF_a \right)} \right]^2 - 1} \quad (4)$$

当 $R_t > \frac{4RSF_a}{4 + \beta RSF_a}$ 时,

$$L = 50 \sqrt{D_i t_{min}} \quad (5)$$

(3) 确定管道可否继续服役必须同时满足式(6)及式(7):

$$t_{am} - FCA \geq t_{min} \quad (6)$$

$$t_{mm} - FCA \geq \max[0.5t_{min}, 2.5mm] \quad (7)$$

此时管道的最大运行压力 $MAWP_r$ 为:

$$MAWP_r^c = \frac{2SE_w(t_{am} - FCA)}{D_0} \quad (8)$$

$$MAWP_r^l = \frac{4SE_w(t_{am} - FCA)}{D_0} \quad (9)$$

$$MAWP_r = \min(MAWP_r^c, MAWP_r^l) \quad (10)$$

1.2 API579 评价均匀腐蚀的二级评价

如果不满足一级评价,则需要进行二级评价,二级评价的一、二步骤与一级评价相同,判断是否可以继续服役则需要用到式(7)与式(11)。

$$t_{am} - FCA \geq RSF_a t_{min} \quad (11)$$

在二级评价中,只有当同时满足式(7)与式(11),才认为管道可以继续服役,此时管道的最大运行压力 $MAWP_r$ 为:

$$MAWP_r^c = \frac{2SE_w(t_{am} - FCA)}{D_0 RSF_a} \quad (12)$$

$$MAWP_r^l = \frac{4SE_w(t_{am} - FCA)}{D_0 RSF_a} \quad (13)$$

$$MAWP_r = \min(MAWP_r^c, MAWP_r^l) \quad (14)$$

如果不满足二级评价则需要对管道进行维修:补强或者更换。根据实际测量数据运用 API579 准则计算得到管道运行允许的最大内压为 3.38 MPa。

1.3 均匀腐蚀缺陷管道剩余强度有限元计算

1.3.1 基本假设

结合已有的腐蚀管道的腐蚀情况和结构特点,做如下三个基本假定^[9]:

(1) 不考虑腐蚀管道在正常运行中液体对管道的影响。

(2) 输送高温介质时,温度产生的热应力不考虑。

(3) 本次 ABAQUS 模拟仅考虑内压载荷,不考虑集中载荷、管道自重、静水压力以及土壤压力。

1.3.2 管道基础数据及失效准则

采用常用的 X52 天然气管道作为研究对象,管道基本特性参数见表 1。

表 1 管道基本特性参数

材料	长度 /mm	外径 /mm	壁厚 /mm	弹性模 量/Pa	泊松比	屈服强度 /MPa
X52	1000	740	10	2.1E11	0.3	359

腐蚀缺陷的形状选择为矩形,缺陷轴向长度为 100 mm,环向长度为 100 mm(约为 15°),腐蚀深度为 5 mm。

在 ABAQUS 软件后处理中,采用屈服作为失效准则。本文研究的腐蚀管道为 X52 钢,是一种典型的塑性材料。采用 Von Mises 屈服准则,即:当等效应力超过材料的屈服应力时,将会产生塑性变形,在三维主应力空间上, Mises 屈服条件表示为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]} \quad (15)$$

式中: σ 为 Von Mises 等效应力, MPa; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为 x、y、z 三个方向的主应力, MPa。

1.3.3 有限单元划分及载荷边界条件

由管道对称性,采用 1/2 管道模型。由于腐蚀缺陷处应力和应变梯度较大,对腐蚀缺陷处的网格加密,远离缺陷处网格划分较为稀疏,有限元模型如图 1 所示。采用 ABAQUS 软件提供的 C3D4 单元,有限元模型中包含 158 771 个单元,46 336 个节点。

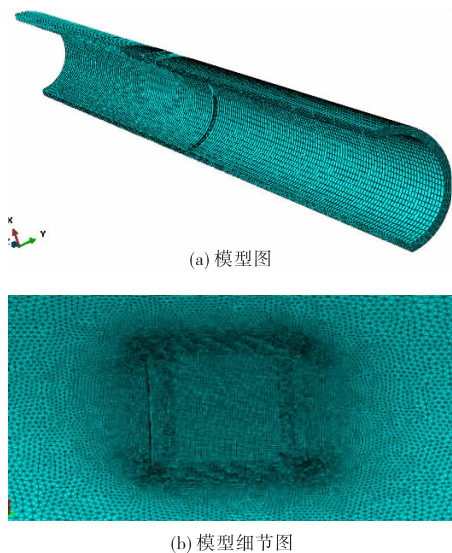


图 1 单个均匀腐蚀缺陷区仿真网格图

1.3.4 计算结果及讨论

分别计算内压为 3.7 MPa、3.8 MPa、3.9 MPa、4 MPa 下均匀腐蚀缺陷管道的等效应力,计算结果见表 2,均匀缺陷等效应力如图 2 所示。

表 2 不同内压下最大等效应力值

内压/MPa	最大等效应力/MPa
3.7	339.9
3.8	349.1
3.9	358.3
4.0	367.0

由表 2 可以看出,当运行内压为 3.9 MPa 时,管道的最大等效应力为 358.3 MPa,小于管道屈服强度 359 MPa,当运行内压为 4 MPa 时,最大等效应力为 367 MPa,所以管道允许运行最大内压为 3.9 MPa,与 API579 准则计算出来的管道允许运行最大内压 3.38 MPa 较为接近,验证了有限元分析方法的可靠性。

2 双腐蚀干涉的有限元分析

实际管道的腐蚀缺陷大部分是由多个腐蚀缺陷组

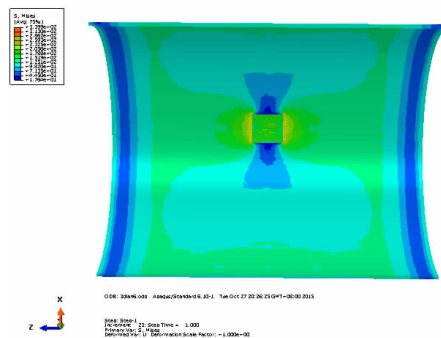


图 2 单个均匀缺陷等效应力云图

成的,多个腐蚀缺陷之间会发生相互作用,从而影响管道的极限承载力。当前对管道的腐蚀评价规范如 ASME B31G(修订版)、API579 准则等大部分以单腐蚀缺陷为研究对象。因此,采用有限元软件 ABAQUS 对不同长度的双腐蚀缺陷管道进行计算,分析缺陷不同长度和间距对于双腐蚀缺陷干涉的影响,为建立更精确的双腐蚀干涉准则提供依据。

2.1 双腐蚀管道力学模型

模型同样选用 X52 钢管作为管道模型,管道外径为 60 mm,管道壁厚为 4 mm,管道长度选取 500 mm,管道模型参数见表 3:

表 3 双腐蚀管道模型参数

材料	长度/mm	外径/mm	壁厚/mm	弹性模量/Pa	泊松比	屈服强度/MPa
X52	500	60	4	2.1E11	0.3	359

采用规则的腐蚀缺陷来近似模拟腐蚀区。腐蚀缺陷深度取 0.5 mm,宽度取 5 mm,长度分别选取 5 mm、7.5 mm、10 mm、12.5 mm、15 mm、20 mm、30 mm、40 mm 进行计算。以 L 表示腐蚀缺陷长度。以 L_d 表示腐蚀缺陷轴向间距,为防止过大应力集中,腐蚀缺陷与管壁之后有光滑过渡,而且比较符合实际工况。

2.2 有限单元划分及载荷边界条件

采用管道模型的 1/2 建立模型。采用六面体网格划分含有腐蚀缺陷的管道模型。管道厚度方向划分六层网格,对腐蚀区域进行网格加密,远离缺陷处采用稀疏网格划分,有限元模型中单元总数为 40 500 个,节点总数为 48 860 个,如图 3 所示。

实际情况中,管道受到的载荷主要为内压和弯矩,对建立的模型只考虑内压的作用,取运行压力为 $P = 4$ MPa。

2.3 计算结果及讨论

计算分析中考虑了两个腐蚀缺陷之间的轴向间距和腐蚀缺陷长度的影响,分别计算了不同长度的腐蚀缺陷在不同轴向间距时的等效应力,应力云图如图 4 所

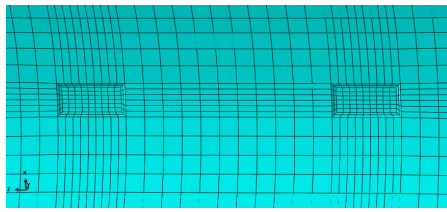


图 3 双腐蚀缺陷模型细节图

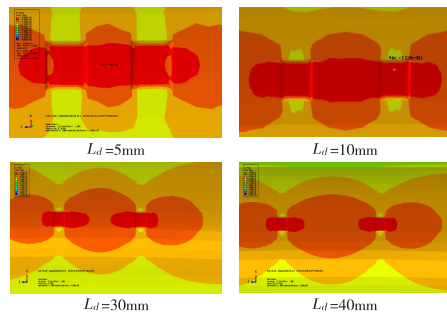


图 4 腐蚀长度 $L = 5 \text{ mm}$ 在不同腐蚀轴向间距的等效应力云图

示。随着腐蚀缺陷轴向间距的增大,腐蚀管道最大等效应力逐渐减小并且趋于稳定,由于计算误差的存在,为了确定腐蚀轴向间距多大时两个腐蚀缺陷之间不产生干涉,因此采用式(16)来判断两个腐蚀缺陷之间是否产生干涉影响。

$$\left| \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_2} \right| \leq 5\% \quad (16)$$

式(16)中, σ_2 为两个腐蚀缺陷最大等效应力, σ_1 为单个腐蚀缺陷最大等效应力,当两个腐蚀缺陷最大等效应力与单个腐蚀缺陷最大等效应力之间误差小于 5% 时,可以近似认为两个腐蚀缺陷最大等效应力与单个腐蚀缺陷最大等效应力相同,即两腐蚀缺陷之间不发生干涉作用,可以作为单个腐蚀缺陷进行计算,误差计算结果图 5 所示。

表 4 极限影响距离计算结果

腐蚀缺陷长度/mm	5	7.5	10	12.5	15	20	30	40
极限影响距离/mm	20.01	29.49	39.06	42.98	47.34	50.36	51.35	49.3

根据表 4 中的数据绘制极限影响距离与腐蚀缺陷长度关系点,并进行多项式拟合,得到极限距离影响公式:

$$L_m = -8 \times 10^{-5} L^4 + 0.0091 L^3 - 0.4153 L^2 + 8.449 L - 13.234$$

式中, L 表示腐蚀缺陷长度, L_m 表示腐蚀缺陷极限影响距离。拟合多项式的相关系数 R^2 为 0.9975,说明拟合曲线有效,利用该曲线可以迅速判断双缺陷之间干涉的极限影响距离拟合曲线,如图 6 所示。

由图 6 可以看出,当腐蚀缺陷长度小于 20 mm 时,随着腐蚀缺陷长度的增加,腐蚀缺陷极限影响距离逐渐

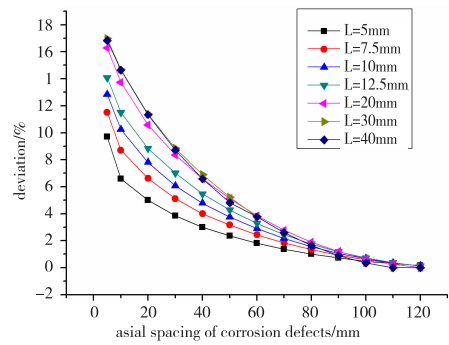


图 5 不同腐蚀长度误差计算曲线

由图 5 可知,当腐蚀长度一定时,腐蚀缺陷轴向间距与误差成非线性变化关系。当腐蚀缺陷在同一轴线上时,误差呈现出单调递减的变化过程。

分析结果发现,当缺陷长度变化时,误差大小随着长度的增加而增加,当腐蚀缺陷长度增大时,误差逐渐增大。缺陷长度较小时,误差达到稳定值时的轴向间距较小,长度增大,误差达到稳定值时的轴向间距较大,说明缺陷长度变化时,误差达到稳定值时的轴向间距并不相同。当双腐蚀缺陷轴向间距大于某一个值时,双腐蚀缺陷管道最大等效应力与单个腐蚀缺陷管道的最大等效应力趋于相同,此时双腐蚀之间没有干涉作用,当双腐蚀缺陷轴向距离小于该距离时,则应该考虑两个腐蚀之间的干涉作用。定义这一距离为“极限影响距离”,当双腐蚀缺陷轴向间距比极限影响距离小时,管道最大等效应力出现在两个腐蚀缺陷中未腐蚀区域中间,当腐蚀间距较大时,最大等效应力出现在腐蚀缺陷中间。在不同的腐蚀长度条件下,腐蚀干涉距离不同,根据式(16)来判断极限影响距离,从而计算出在不同腐蚀长度下双腐蚀干涉的极限影响距离,见表 4。

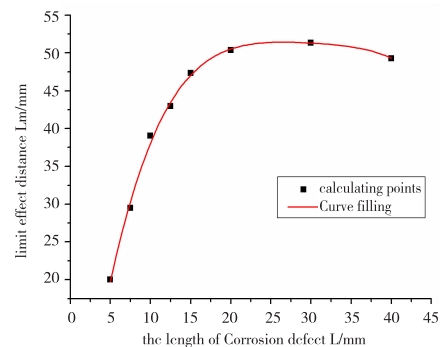


图 6 极限影响距离拟合曲线

增加,当腐蚀缺陷长度达到 20 mm 以后,随着腐蚀缺陷

长度的增加,极限影响距离变化平缓,说明腐蚀缺陷长度对极限影响距离只在一定范围内产生影响,超过一定腐蚀长度,极限影响距离就会稳定在一个值左右。

3 结 论

(1)验证了有限元方法的准确性,能够用于评价带有腐蚀缺陷管道的剩余强度,计算结果与 API579 准则评价结果较为接近,有限元方法可靠。

(2)在相同腐蚀缺陷长度情况下,随着腐蚀缺陷轴向间距的增大,双腐蚀缺陷的等效应力逐渐趋于单个腐蚀缺陷的等效应力。

(3)对于不同的腐蚀缺陷长度,都存在着一个极限影响距离,在缺陷长度小于 20 mm 时,随着腐蚀缺陷长度的增加,极限影响距离逐渐增大,当腐蚀缺陷长度大于 20 mm 时,极限影响距离趋于平稳。

(4)通过有限元计算,得到极限影响距离计算公式以及曲线,通过曲线可以迅速判断双腐蚀缺陷之间是否发生干涉作用。当腐蚀缺陷参数位于图中曲线右下侧,需要考虑两缺陷的相互干涉作用,否则按单个缺陷进行计算,这为实际评价管道的应力水平提供了一定的参考价值。

参 考 文 献:

[1] MMS.Proceeding of the International Workshop on the

Damage to Underwater Pipelines[C].New Orleans:Minerals Management Service,1995.

[2] American Society of Mechanical Engineers. ASME B31G-1991 Manual for determining the remaining strength of corroded pipeline [S]. New York: ASME B31G Committee,1991.

[3] Recommended Practice For Fitness-For-Service [S]. ISSUE6, API 579(1997)适用性评价推荐.

[4] Recommended Practice For Fitness-For-Service [S]. ISSUE6, API 579(2000)服役适应性.

[5] 蔡文军,陈国明,潘东民.腐蚀管线剩余强度的非线性分析[J].中国石油大学学报:自然科学版,1999,23(1):75-76.

[6] 赵新伟,罗金恒,路明旭.含腐蚀缺陷管道剩余强度的有限元法分析[J].油气储运,2001,20(3):18-21.

[7] 董事尔,何东升,张鹏,等.双点腐蚀管道的弹塑性有限元分析[J].机械,2005,32(9):20-22.

[8] 张日向,顾孜昌,姜萌.考虑双腐蚀缺陷影响的内压钢管的有限元分析[J].钢结构,2010,25(2):79-81.

[9] HISASHI B,SUMITOMO E.System analysis of earthquake damage on water supply networks in Kobe City [C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Water Pipe Systems,1997:137-145.

Interaction of Multi Defect and Its Influence Study on the Strength of Oil and Gas Pipeline

MU Huai, ZENG Xiangguo, LI Yang, XIAO Yuguo, GENG Qinghua

(College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Through simulating and evaluating for pipes that contains a single uniform corrosion by using finite element numerical calculation method, and obtaining residual strength of pipeline, the result of numeral calculations compared with standard API 579 guidelines have shown that the results of the standard API 579 guidelines were close to the result of finite element simulation, the correctness of finite element model was verified. Calculated and analyzed for pipeline containing two different axial spacing corrosion defects, the study found corrosion defect length and axial spacing parameters were not a single parameter. Considering their mutual influence when calculating limit interference distance, calculated by ABAQUS finite element analysis software, the formula for limit effect distance of corrosion defect in different length was obtained, which has taken into account the influence of the length of corrosion and axially spaced. It can quickly determine whether is mutual interference effects between the two corrosion defects.

Key words: finite element; remaining strength; API579; the length of corrosion defect; the axial spacing of corrosion defect; limit effect distance