

文章编号: 0253-2697(2008)06-0933-05

非线性有限元法用于腐蚀管道失效压力预测

帅 健 张春娥 陈福来

(中国石油大学机电学院 北京 102249)

摘要: 采用非线性有限元法建立了含缺陷管道爆破失效的数值模型, 以此预测腐蚀缺陷管道的失效压力。分析了模型中的单元划分、材料模式、非线性求解方法、失效判据等技术要点, 对不同管材、规格以及缺陷尺寸的全尺寸管道爆破试验结果进行了分析和计算, 验证了所建模型的准确性。基于有限元计算结果, 同时考虑缺陷长度、深度、宽度等因素的影响, 拟合出含缺陷管道的失效压力预测公式, 与其他方法以及试验结果相比, 该公式计算误差较小。

关键词: 油气管道; 剩余强度; 安全评定; 腐蚀; 失效压力; 预测模型; 有限元法

中图分类号: TE732

文献标识码: A

Prediction of failure pressure in corroded pipelines based on non-linear finite element analysis

SHUAI Jian ZHANG Chun'e CHEN Fulai

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract A numerical model for predicting the burst failure of corroded pipeline was established using the non-linear finite element method in which some technical points including the element mesh, material mode, non-linear solution and failure criterion were discussed. The full-size pipe burst experiments of pipelines with different material, various sizes and defect were analyzed and computed using this model. Based on the calculation result, a new formula for predicting failure pressure was presented. The depth, length and width of a defect were involved in this formula. Compared with other assessment methods and experiments, the formula had a satisfactory precision.

Key words: oil and gas pipeline; residual strength; safety evaluation; corrosion; failure pressure; prediction model; finite element method

腐蚀造成的直接后果是管道壁厚减薄, 当腐蚀发展到一定程度时, 就会造成管道局部穿孔或破裂, 从而发生大面积泄漏。因此, 对于发生了腐蚀的管线, 必须对其剩余强度进行评估^[1]才能做出正确决策——继续服役、维修或更换。这样既可以避免事故的发生, 又能节约维护费用。

腐蚀管道的破坏机理一般是爆破失效, 在爆破失效压力的基础上考虑一定的安全裕度, 即根据不同的安全等级乘以合适的设计系数, 就可以得到缺陷管道能承受的安全压力。因此, 爆破失效分析是缺陷管道剩余强度评价的基础。在各种缺陷管道的剩余强度评定规范和办法中, 从广泛使用的 ASME B31G 到后来的 DNV RP-F101 和 PCORRC 等方法^[2], 关于含缺陷管道的爆破失效压力普遍采用了半经验的断裂力学公式^[3]。笔者采用非线性有限元方法, 建立缺陷管道爆

破失效的数值模型, 计算了 14 个全尺寸爆破试验管道的失效压力。并以有限元分析结果为依据, 提出了预测管道失效压力的新公式。

1 含缺陷管道的有限元模型

1.1 单元划分

采用 20 节点的六面体等参单元, 根据问题的对称性, 取含缺陷管体的 1/4 建立有限元分析模型。由于在缺陷处应力和应变变化梯度很大, 分析的重点在缺陷部位以及缺陷的附近区域, 因而在缺陷处的网格划分更密。同时, 在管道的壁厚方向划分了数层单元, 这样能够比较真实地反映缺陷处的应力水平。为了减少不必要的计算时间和工作量, 选择远离缺陷处比较稀疏的管体网格。几种缺陷管道的有限元模型如图 1 所示。

基金项目: 国家“十一五”支撑计划课题(2006BAK02B01-12)资助。

作者简介: 帅 健, 男, 1963 年 8 月生, 1982 年毕业于武汉化工学院化机专业, 现为中国石油大学(北京)教授、博士生导师, 主要从事工程力学、油气储运系统安全工程的科研与教学工作。E-mail: shuaijian@cup.edu.cn

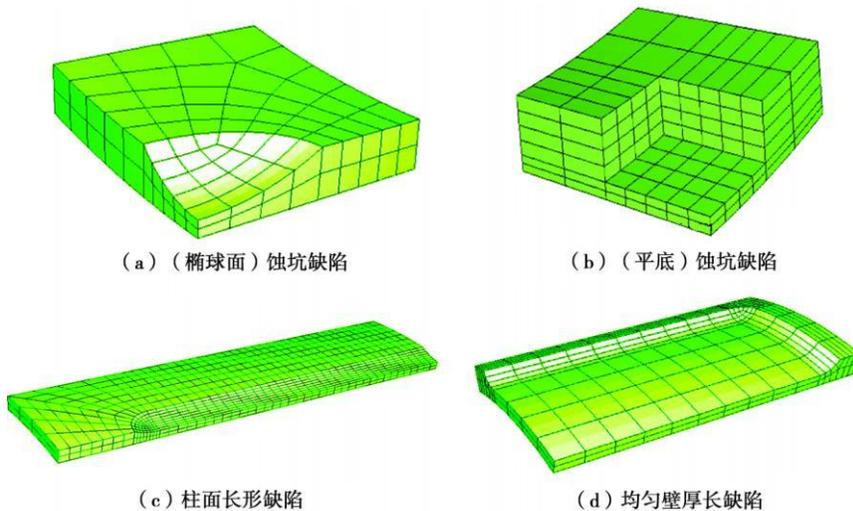


图 1 缺陷管道的有限元模型

Fig. 1 The finite element model of pipeline with defect

对含缺陷管道进行有限元模拟时,须注意以下两点:①合理构造和简化模型。由于缺陷形状复杂,分析过程中需要进行简化,但是简化的效果会对失效压力产生一定的影响。在简化过程中,应尽量避免引入新的影响因素,如应力集中等。②合理的离散化。合理的离散也就是划分网格单元,采用不同的单元形式描述实体的准确性也不相同。并且,采用不同的单元形式,计算的精度也会有差异。网格划分并非越细越好。过细则计算成本过大;过粗则描述实体不理想,计算结果误差大,所以只要准确表达模型形状即可。

1.2 材料模式

材料的硬化效应对管道的爆破失效影响很大。为了反映管道材料屈服后的硬化性能,在计算模型中采用 Ramberg-Osgood 幂硬化应力-应变法则,其表达式为

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_s} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_s} \right)^n \quad (1)$$

式中: ε_0 为初始应变, $\varepsilon_0 = \sigma_s / E$; σ_s 为屈服应力, MPa; E 为弹性模量, MPa; α 为硬化系数; n 为幂硬化指数。

对于某些管道材料,也可采用分段线性的弹塑性材料本构关系,或直接应用拉伸实验,得到管材的真应力-应变曲线。

1.3 非线性问题的求解方法

含缺陷管道在内压以及其他载荷的作用下,根据作用载荷的大小,先后经历弹性变形、塑性变形以至达到强度极限,局部出现失稳,最后破裂失效。整个过程的非线性特征非常明显,既包括有管材的物理非线性,也包含由于缺陷部位大变形而引起的几何非线性。管道爆破失效中的这种强烈的非线性,使得标准的牛顿

迭代方法变得不稳定。在这种情况下,应采用改进的 Rik's 算法。该方法比牛顿-拉夫逊方法计算能力更强,能够表达管段颈缩后的压力变化。对于塑性失稳和后屈服情况,比较适合使用 Rik's 算法。

2 含缺陷管道失效的判定准则

在含缺陷管道的数值模拟中,对于爆破失效的判断已经提出了 3 种准则:

(1) 弹性极限准则^[4]: 只计算管子的弹性应力状态,即认为当腐蚀区的 Mises 应力不超过管材的屈服强度时,管道处于安全状态。该准则将管壁中的应力完全限制在弹性范围内,比较保守。

(2) 基于塑性极限状态的失效准则^[5]: 腐蚀管道的失效可以由腐蚀区的环向应力值来确定,当环向应力值达到材料的抗拉强度时,管子发生塑性失效,否则就是安全的。该准则未考虑管道材料后屈服强化的影响,仍然有些保守。

(3) 基于塑性失效的准则^[6]: 当腐蚀区的应力状态达到材料后屈服终点时,即腐蚀区最小等效应力达到材料的抗拉强度 σ_b 时,管道发生失效。油气管道材料有较好的韧性,采用这一准则比较合理。

对于尺寸较小的蚀坑缺陷,采用腐蚀区最小等效应力达到 $0.9\sigma_b$ 的准则较为合适^[7]。

3 实例计算

对于不同规格和缺陷尺寸的管道,其全尺寸爆破试验结果如表 1 所示^[8-14],管道上的缺陷有蚀坑、槽形长缺陷和面积缺陷等。采用塑性失效的准则,利用表 1 中的数据,分析了每个试验管道的失效压力。

表 1 14 个缺陷管道的爆破试验结果

Table 1 The burst test data of 14 pipelines with defect

序号	直径/mm	壁厚/mm	钢级	屈服极限/ MPa	强度极限/ MPa	缺陷尺寸/mm			失效压力/MPa
						长度	深度	宽度	
1	304.8	6.35	X46	351	543	26	4.950	20	15.36
2	304.8	6.35	X46	382	570	33	4.250	21	16.29
3	304.8	6.35	X46	351	463	37	4.640	30	14.29
4	324	6.01	X46	382	570	19.35	3.600	18.99	16.22
5	324	10.30	X52	380	514	243	5.150	154.50	23.20
6	324	10.30	X52	380	514	243	5.150	30.90	22
7	508	6.60	X60	443.4	598.9	381	2.620	25.40	11.25
8	508	6.35	X60	429.6	672.5	900	3.429	25.40	8
9	508	6.35	X60	434.8	672.5	1000	3.175	25.40	8.40
10	508	6.70	X60	430	601	1016	2.660	25.40	11.56
11	323.9	9.80	X60	422.5	589.6	255.6	6.950	95.30	14.40
12	323.9	9.71	X60	422.5	589.6	350	6.850	95.30	13.58
13	323.9	9.91	X60	422.5	589.6	433.4	7.080	95.30	12.13
14	323.9	9.74	X60	422.5	589.6	527.8	7.060	95.30	11.30

有限元法预测的失效压力与水压试验结果(图 2)相比较可见:用有限元方法预测的管道失效压力非常接近于管道爆破试验得到的结果。其预测压力的最小误差为 0.49%,最大误差为 10.78%。

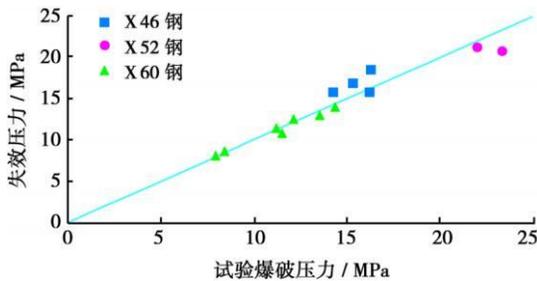


图 2 试验爆破压力与有限元法预测失效压力比较
Fig. 2 The comparison of test burst pressure with pressure predicted by finite element model

4 基于有限元分析的腐蚀管道失效压力预测

用有限元模型计算了 39 例各种不同情况下的含缺陷管道的爆破失效压力。考虑到管道材料的抗拉强度、管道的规格和缺陷的尺寸等,对计算结果进行拟合,得到管道失效压力的预测公式为

$$p_b = \frac{2\sigma_b t}{D} \left\{ 1 - \frac{d}{t} + \frac{d}{t} \left\{ \left[0.0973 \left[1 - \left(\frac{w}{\pi D} \right)^2 \right]^6 + 0.903 \exp \left(\frac{-0.474L}{\sqrt{Rt}} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{d}{t} \right)^{4.491} \right] \right\} \right\} \quad (2)$$

式中, d 为缺陷深度, mm; w 为缺陷宽度, mm; D 为

管道直径, mm; t 为管道壁厚, mm; L 为缺陷长度, mm。

式(2)考虑了宽度的影响,这对于环向宽度比较大的缺陷更为合理。

拟合结果与有限元计算值对比见图 3。其中复判定系数为 0.982591,残差平方和为 19.686413。拟合误差最大值为 -13.6,最小值为 0.4,拟合结果较为理想。

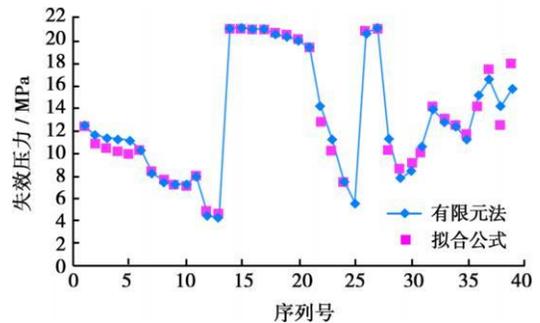


图 3 有限元计算值与拟合值对比
Fig. 3 The comparison of calculation values by finite element model with values of fit formula

用 ASME B31G、DNV RP-F101、PCORRC 等方法^[2-3]计算了该组数据,误差分析如表 2 所示。从中可以看出,拟合公式计算结果优于 ASME B31G、DNV RP-F101 和 PCORRC 方法。

表 2 4 种方法计算误差

Table 2 Calculation errors using four methods

计算方法	B31G	DNV	PCORRC	拟合公式
误差最大值	33.52	-23.54	-22.89	-13.57
误差最小值	-0.66	0.26	0.53	0.40
残差平方和	303.90	102.09	80.21	19.69

此外,用5种计算方法分析了缺陷的长度、宽度和深度与失效压力的关系(图4),从中可以看出拟合公式和有限元分析结果最为接近。

为了进一步验证拟合公式的准确度,分别采用拟合公式、ASME B31G 和 DNV RP-F 101 方法对表1中管道爆破试验的实例数据进行了计算,其误差对比

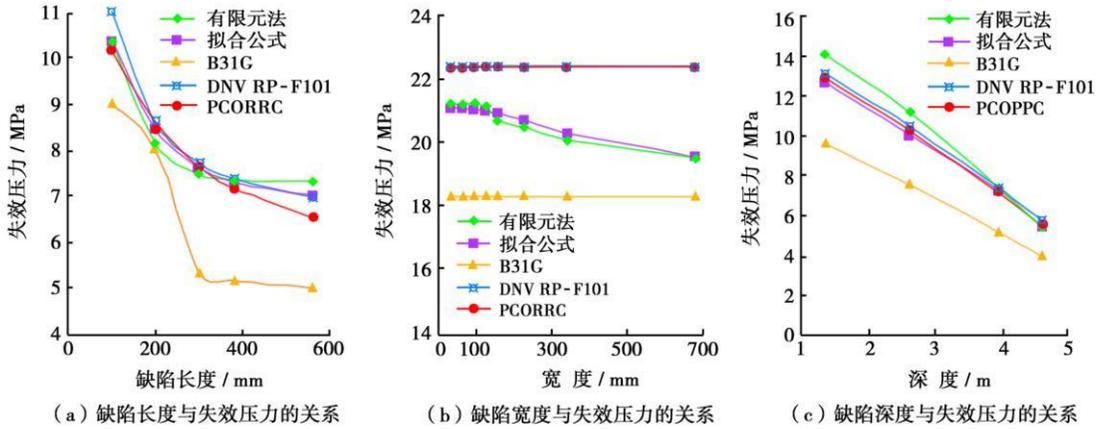


图4 5种计算方法计算结果对比

Fig. 4 Comparison of calculation results using five methods

如图5所示。其中,拟合公式的误差最小。

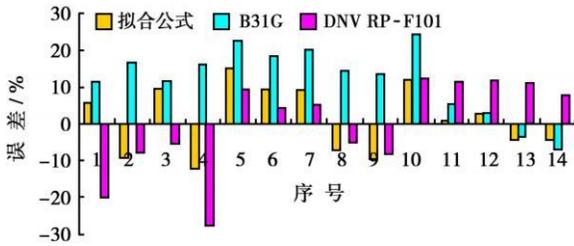


图5 3种方法的计算误差对比

Fig. 5 The comparison of calculation errors using three methods

5 结论

- (1) 有限元方法能够有效模拟单独蚀坑、沟槽、大面积腐蚀等各种缺陷管道受内压时的失效行为。
- (2) 采用基于塑性失效的准则,即当腐蚀区的最小等效应力达到材料的抗拉强度时管道失效,可以得到比较准确的预测结果。
- (3) 基于有限元方法计算,同时考虑缺陷长度、深度及宽度对失效压力影响,拟合了一个新的预测含缺陷管道的失效压力公式,其预测结果令人满意。

参考文献

[1] 帅健,许葵. 腐蚀管线失效概率的评定方法[J]. 石油学报, 2003, 24(4): 86-89.
 Shuai Jian, Xu Kui. Assessment method for failure probability of corroded pipeline[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(4): 86-89.
 [2] 帅健,张春娥,陈福来. 腐蚀管道剩余强度评价方法的对比研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(11): 122-125.

Shuai Jian, Zhang Chun'e, Chen Fulai. Comparison study on assessment methods for remaining strength of corroded pipeline [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(11): 122-125.
 [3] 帅健,张春娥,陈福来. 基于爆破试验数据对腐蚀管道剩余强度评定方法的验证[J]. 压力容器, 2006, 23(10): 5-8.
 Shuai Jian, Zhang Chun'e, Chen Fulai. Validation of assessment method for remaining strength of corroded pipeline based on burst test data [J]. Pressure Vessel Technology, 2006, 23(10): 5-8.
 [4] Wang Y S. A plastic limit criterion for the remaining strength of corroded pipe; Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (10th), Stavanger, Norway, June 23-28, 1991 [C]. Stavanger: ASME, 1991.
 [5] Hopkins P, Jones D G. A study of the behavior of long and complex-shape corroded in transmission pipelines; Proceedings of the 11th International Conference of Mechanics and Arctic Engineering, Calgary, Canada, June 7-11, 1992 [C]. Calgary: ASME, 1992.
 [6] Fu Bin. Advanced methods for integrity assessment on corroded pipelines; Proceedings of 1996 Pipeline Reliability Conference, Houston, USA, Nov. 19-22, 1996 [C]. Houston: ASME, 1996.
 [7] Cronin D S, Andrew R K, Pick R J. Assessment of long corrosion grooves in line pipe; Proceedings of the 1st International Pipeline Conference, Calgary, Canada, June 9-14, 1996 [C]. Calgary: ASME, 1996.
 [8] Chouchaoui B A, Pick R J, Yost D B. Burst pressure predictions of line pipe containing single corrosion pits using the finite element method; Proceedings of the 11th International Conference of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Calgary, Canada, June 7-11, 1992 [C]. Calgary: ASME, 1992.
 [9] Chouchaoui B A, Pick R J. Behavior of circumferentially aligned corrosion pits [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1994, 2(57): 187-200.
 [10] Bjornoy O H, Sigurdsson G, Cramer E H. Residual burst strength

- of corroded pipelines; Proceedings of the 10th International Off-shore and Polar Engineering Conference, Seattle, USA, May 28-June 2, 2000[C] . Seattle: ASME, 2000.
- [11] Adilson C, Benjamin R D, Jose Luis F, et al. Burst tests on pipeline with long external corrosion; Proceedings of the 3rd International Pipeline Conference, Calgary, Canada Oct. 1-5, 2000[C] . Calgary: ASME, 2000.
- [12] Damo B N, Jr., Adilson C B. Finite element models for the prediction of the failure pressure of pipeline with long corrosion defects; Proceedings of the 4th International Pipeline Conference, Calgary, Canada, Sept. 29-Oct. 3, 2002[C] . Calgary: ASME, 2002.
- [13] Mok D H B, Pick R J, Glover A G, et al. Bursting of line pipe with long external corrosion[J] . International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1991, 2(46): 195-216.
- [14] Woo-sik Kim, Young-pyo Kim, Young-tai Kho. Full scale burst test and finite element analysis on corroded gas pipeline; Proceedings of the 4th International Pipeline Conference, Calgary, Canada, Sept. 29-Oct. 3, 2002[C] . Calgary: ASME, 2002.

(收稿日期 2008-01-05 改回日期 2008-03-28 编辑 仇学艳)

《石油学报》中英文摘要书写要求

论文的中英文摘要国内外各大数据库进行检索收录的主要依据,因此规范中英文摘要的编写显得尤为重要。为确保摘要的“独立性”或“自明性”,本刊参考美国工程索引(EI)对英文摘要的书写要求,提出《石油学报》中英文摘要书写的具体要求:

1 内容要求

(1) 中英文摘要应该是独立、完整的短文,应包含正文的要点,即研究对象(目的)、研究方法(所用的设备、材料)、结果和结论。文中的创新之处或重要结论为摘要的重点部分。

(2) 在不遗漏主题概念的前提下,摘要应力求简洁,但逻辑性要强。尽可能删去课题研究或为同行所熟悉的背景信息,作者研究工作的未来计划不应纳入摘要。应尽量简化措辞和避免重复的内容,摘要第一句话避免和文题重复。摘要的长度应不少于300字。

(3) 摘要中不可添加正文中不存在的内容。不要出现图、表及公式等内容,技术术语尽量用专业领域的通用术语。

2 语句格式要求

(1) 中英文题名一般为短语结构,不用句子。英文题名应简洁,略去不必要的“study on”“a preliminary study on”“research on”等套语。英文题名尽量少用冠词,开头第一个单词最好不用The, An和A。题名中尽量少用缩略词,必要时需在括号中注明全称,特殊字符及希腊字母在题名中尽量不用或少用。

(2) 关键词的数目和内容应与中文完全一致,不可添加或遗漏。

(3) 英文摘要除了遵守语法规则,保证句子通顺流畅外,最好长短句结合使用,避免语句单调。句子结构严谨完整,尽量用短句子,并删繁从简:如用“increase”代替“has been found to increase”;取消不必要的字句:如“It is reported …”,“Extensive investigations show that …”,“The author discusses …”,“This paper concerned with …”,等等;缺乏主语的祈使句等句型不宜使用。

(4) 英文摘要一般用过去时态叙述作者的工作和研究方法,用现在时态叙述结论,最好不要用将来时态。

(5) 文词要朴实无华,不用武断性的、文学性的以及个人色彩性的描述。英文拼写最好用美式拼写,并且全文要一致。

(本刊编辑部)