

基于爆破试验数据对腐蚀管道 剩余强度评定方法的验证

帅 健, 张春娥, 陈福来
(中国石油大学, 北京 102249)

摘 要:为验证腐蚀管道的剩余强度评价方法,收集了 63 组腐蚀缺陷管道全尺寸爆破试验结果。基于这些全尺寸爆破试验数据,分别使用 ASME B31G、DNV RP-F101 及 PCORRC 等评定方法计算管道失效压力,并用图表定量地示出各种方法的计算误差。结果表明,ASME B31G 有很强的保守性,但这种方法在预测中高强度等级管道的剩余强度时也会出现不安全的评价结论。DNV RP-F101 及 PCORRC 两种方法的差别不大,其保守性也较小,比较适用于中高强度等级的管道的剩余强度评价。但这两种方法在应用于中、低强度等级的管道时,都会产生不安全的评价结果。PCORRC 的评价结果略好于 DNV-RP-F101 方法。应发展中高强度等级管道的缺陷安全评定方法。

关键词: 腐蚀; 管道; 剩余强度; 评定方法; 缺陷

中图分类号: TQ055.8; TQ050.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4837(2006)10-0005-04

Validation of Assessment Method for Remaining Strength of Corroded Pipeline Based on Burst Test Data

SHUAI Jian, ZHANG Chun-e, CHEN Fu-lai
(China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: 63 sets of data about full-scale burst test of pipe with a defect were collected to validate the assessment method about the remaining strength of corroded pipelines. Based on these full-scale burst test data, the failure pressure were computed by ASME B31G, DNV RP-F101 and PCORRC, respectively. The computation errors were showed in the charts. By comparison, it is concluded that ASME B31G has great conservation, but it is sometime unsafe for medium high strength pipelines. DNV RP-F101 and PCORRC are almost similar and little conversation in calculating the remaining strength of corroded pipelines. They are suitable for medium high strength pipelines. However both of them result in the unsafe evaluation for low to medium strength pipelines. PCORRC method can be more accurate in computing results than DNV-RP-F101. The safety assessment method for medium high strength pipelines should be developed.

Key words: corrosion; pipeline; remaining strength; assessment method; defect

20 世纪 70 年代初,美国燃气协会(AGA)开始进行含有各类腐蚀缺陷的压力管道的剩余强度的评估研究,其主要采用断裂力学的方法研究了裂纹缺陷的扩展机理和失效模式以及缺陷评估方法等。以

此为基础,提出了评估腐蚀管线的准则,即 B31G 准则。1984 年,美国机械工程师协会(ASME)把该准则收录到规范中,即 ANSI/ASME B31G 标准^[1]。1991 年,根据研究结果对 B31G 准则进行了修正,出版了

《确定腐蚀管线剩余强度的手册——补充部分》^[2]。1999年,由英国燃气公司 BG 和挪威船级社 DNV 合作开发了 DNV-RP-F101 标准^[3],该标准提供了两种腐蚀缺陷评价方法:分项安全系数和许用应力法。最近,一些研究者提出了 PCORRC (Pipeline CORROsion Criterion)^[4]方法,用于评价含钝口腐蚀缺陷的中高强度等级管道由塑性失稳导致失效的剩余强度。虽然,PCORRC 方法开发的时间较短,但其在改善评价方法的保守性方面表现出了优越性。

在不同时期提出的这几种管道剩余强度评价方法,适应了油气管道不断向高强度发展的需要。本文以 ASME B31G、DNV RP-F101 以及 PCORRC 等方法为例,通过计算分析了各种方法的精确度和适用范围。

1 现行的三种常用评价方法

1.1 ASME B31G 标准

20世纪90年代美国机械工程师学会(ASME)颁布的 ASME B31G 标准,它基于大量实验数据的经验公式,为目前腐蚀管道评估中使用最为广泛的一种标准^[2]。

$$p = \frac{\sigma_{flow} 2t}{D} \left(\frac{1 - \frac{A}{A_0}}{1 - \frac{A}{A_0 M}} \right) \quad (1)$$

其中: $\sigma_{flow} = SMYS + 68.95 \text{ MPa}$

$$\begin{cases} M = 0.032 \frac{L^2}{Dt} + 3.3 & \frac{L^2}{Dt} > 50 \\ M = \sqrt{1 + \frac{2.51(L/2)^2}{Dt} - \frac{0.054(L/2)^4}{(Dt)^2}} & \frac{L^2}{Dt} \leq 50 \end{cases}$$

式中 p ——失效爆破压力, MPa

σ_{flow} ——流变应力, MPa

t ——管道公称壁厚, mm

D ——管道外径, mm

A ——腐蚀缺陷的轴向投影面积, mm^2

A_0 ——原始面积, mm^2 , $A_0 = Lt$

M —Folias 鼓胀因子

$SMYS$ ——规定的最低屈服强度, MPa

L ——腐蚀缺陷轴向投影长度, mm

$A = 0.85dL$, 此值等于矩形和抛物形面积的平均值(见图1)。

标准规定^[2]: 缺陷最大深度超过名义壁厚的80%, 则需及时更换; 最大深度小于名义壁厚的10%的缺陷可以忽略不计; 在两个限度之间的用式

(1)进行评价。

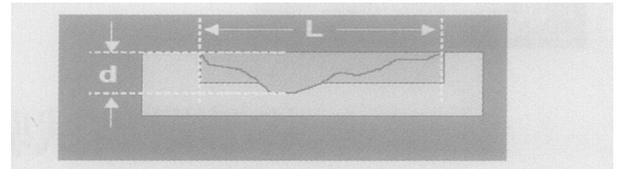


图1 腐蚀缺陷面积表示方法示意

1.2 DNV-RP-F101 标准

DNV-RP-F101 标准考虑了内压, 另外考虑了轴向和弯曲载荷。此标准分别针对单一缺陷、交互作用缺陷、复杂缺陷开发了不同的方法。本文主要研究内压作用下的单一缺陷, 故下面给出单一轴向腐蚀缺陷在只有内压作用下, 许用应力法的失效压力计算公式:

$$p_f = \frac{2tUTS}{D-t} \frac{1-d/t}{1-d/(tQ)} \quad (2)$$

$$Q = \sqrt{1 + 0.31(L/\sqrt{Dt})^2} \quad (3)$$

式中 UTS ——极限拉伸强度, MPa

d ——缺陷深度, mm

Q ——长度校正系数

1.3 PCORRC 方法

PCORRC 方法的公式如下:

$$p_b = \sigma_u \frac{2t}{D} \left\{ 1 - \frac{d}{t} \left[1 - \exp(-0.157 \times \frac{L}{\sqrt{R(t-d)}}) \right] \right\} \quad (4)$$

式中 σ_u ——管道实际失效压力时的真实拉伸强度, MPa

R ——管道半径, mm

2 算例验证

本文收集整理文献[5~8]中的爆破试验压力数据, 分别采用 ASME B31G、DNV-RP-F101 和 PCORRC 三种评价方法进行了腐蚀管道失效压力的计算, 以比较几种方法的准确度及可靠性。表1, 2中分别列出爆破试验管道的强度等级、规格、缺陷尺寸、爆破试验压力等。三种方法的计算误差分别如图2~4所示, 图中横轴为算例标号(和表1, 2中的标号对应), 纵轴为三种方法与试验失效压力误差(正的误差表示预测压力低于爆破试验压力, 预测结果保守; 而负的误差表示预测压力高于爆破试验压力, 预测结果偏于不安全)。从表1, 2中可以看出, ASME B31-1991 预测结果的保守程度明显高于其他两种方法; DNV-RP-F101 方法中有16例不安全的预测结果; 而 PCORRC 方法中有12例不安全预

测结果。

表1 中低强度等级管道爆破试验数据

序号	钢级	D(mm)	t(mm)	d(mm)	L(mm)	爆破试验压力(MPa)
1	X42	273.30	4.95	3.30	182.88	13.75
2		272.97	4.67	2.62	48.26	13.79
3		273.53	4.78	1.63	30.48	13.71
4		273.10	4.88	2.18	101.60	15.18
5		273.89	4.93	1.60	45.72	14.99
6		274.14	5.00	2.16	124.46	13.35
7		274.45	4.57	2.74	66.04	12.67
8		274.12	4.98	2.72	38.10	14.80
9		274.52	4.83	2.11	157.48	12.62
10	X46-1	323.60	8.51	0.00	0.00	25.06
11		323.34	8.64	2.16	63.50	24.37
12		323.60	8.64	0.00	0.00	24.44
13		323.09	8.59	2.97	203.20	23.11
14		324.10	8.53	0.00	0.00	25.01
15		323.09	8.64	2.69	60.96	25.23
16		321.56	8.33	0.00	0.00	22.46
17		323.60	8.74	0.00	0.00	23.92
18		324.10	8.43	0.00	0.00	23.27
19		323.60	8.61	3.30	144.78	23.93
20		323.60	8.64	2.67	127.00	21.75
21		323.09	8.53	2.18	50.80	21.56
22		323.85	8.64	0.00	0.00	24.52
23		X46-2	323.85	5.08	3.66	99.06
24	X46-3	863.60	9.63	3.63	213.36	10.80
25		863.60	9.47	3.00	185.42	10.56
26		863.60	9.37	4.62	91.44	9.17
27	X46-4	273.05	8.26	3.96	241.30	21.21
28	X52-1	273.05	5.23	1.85	408.94	16.71
29		273.05	5.26	1.73	139.70	18.06
30		273.05	5.28	0.00	0.00	17.24
31	X52-2	611.35	6.55	3.30	901.70	9.45
32		612.55	6.43	3.56	1432.56	7.88
33		611.51	6.40	2.57	1371.60	9.81
34	X55	506.73	5.74	3.02	132.08	10.73
35		504.95	5.66	3.25	462.28	8.05
36		508.00	5.69	3.76	619.76	8.58
37		508.00	5.74	3.84	533.40	9.89
38		508.00	5.74	3.05	416.56	10.91
39		508.00	5.61	3.35	596.90	8.05
40		508.00	5.64	2.46	170.18	11.51

对表1,2中各种评价方法计算结果与爆破试验压力的总体误差进行统计分析,结果见表3,可见ASME B31G方法最保守,DNV-RP-F101和PCORRC两种方法相差不大。

表2 中高强度等级管道爆破试验数据

序号	钢级	D(mm)	t(mm)	d(mm)	L(mm)	爆破试验压力(MPa)
41	X60-1	323.90	9.80	7.08	255.60	14.40
42		323.90	9.66	6.76	305.60	14.07
43		323.90	9.71	6.93	350.00	13.58
44		323.90	9.71	6.91	394.50	12.84
45		323.90	9.91	7.31	433.40	12.13
46		323.90	9.74	7.02	466.70	11.92
47		323.90	9.79	6.99	488.70	11.91
48		323.90	9.79	6.99	500.00	11.99
49		323.90	9.74	7.14	527.80	11.30
50		508.00	6.60	2.62	381.00	11.30
51		508.00	6.70	2.66	1016.00	11.60
52		508.00	6.40	3.46	899.20	8.00
53		508.00	6.40	2.18	899.20	11.80
54		508.00	6.40	3.18	1000.80	8.40
55	X65	914.00	8.40	5.54	406.40	5.30
56		762.00	17.50	4.40	200.00	24.11
57		762.00	17.50	8.80	200.00	21.76
58		762.00	17.50	13.10	200.00	17.15
59		762.00	17.50	8.80	100.00	24.30
60		762.00	17.50	8.80	300.00	19.08
61		762.00	17.50	8.80	200.00	23.42
62		762.00	17.50	8.80	200.00	22.64
63		812.80	19.10	13.40	203.20	20.50

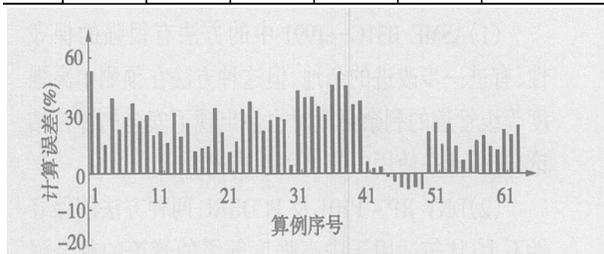


图2 ASME B31-1991的计算误差示意

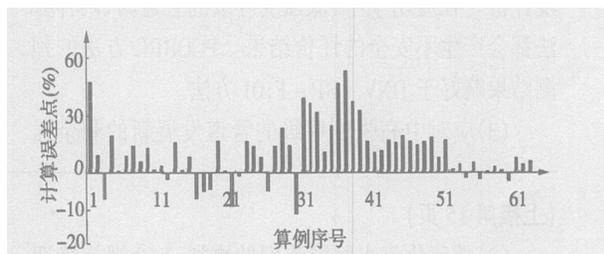


图3 PCORRC计算误差示意

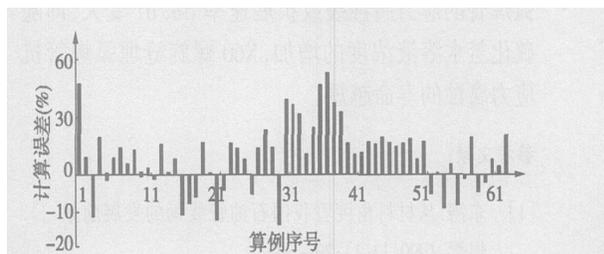


图4 DNV计算误差示意

表3 不同标准(方法)计算误差统计分析

项目	误差(%)		
	最大	最小	平均
ASME B31G	51.86	0.00	21.46
DNV RP-F101	47.48	0.26	8.88
PCORRC	47.27	0.77	11.42

从图2~4中可以清楚地看出各种评价方法的准确度和适用范围。

在中低强度等级管道(X55及其以下), ASME B31G中方法出现了相当保守的结果, 而DNV和PCORRC中方法在一些算例中的预测压力高于爆破试验压力(出现负偏差), 即出现了不安全的评定结果。在预测中高强度等级管道(X60及其以上)的失效压力时, ASME B31G方法有一定程度的保守性, 但也会出现不安全的评定结果; DNV-RP-F101和PCORRC方法的预测结果和爆破试验压力比较接近, 表明这两种方法比较适用于中高强度等级的管道。在表3中, DNV-RP-F101方法的总体误差虽小于PCORRC方法, 但图4示出了DNV-RP-F101方法出现了更多的不安全的评价结果, 因此, PCORRC方法的计算精确度略好一些。

3 结论

(1)ASME B31G-1991中的方法有很强的保守性, 有进一步改进的余地, 但这种方法在预测中高强度等级管道的剩余强度时也会出现不安全的评价结论, 这一点在使用中应该引起重视。

(2)DNV RP-F101及PCORRC两种方法的保守性不大, 比较适用于中高强度等级的管道的剩余强度评价。在应用于中、低强度等级的管道时, 两种方法都会产生不安全的评价结果。PCORRC方法的预测结果略好于DNV-RP-F101方法。

(3)应对中高强度等级的管道发展新的剩余强

(上接第15页)

(3)随硫化氢水溶液浓度的增加, X60螺旋缝埋弧焊管的应力腐蚀裂纹扩展速率 da/dt 变大, 即随硫化氢水溶液浓度的增加, X60螺旋缝埋弧焊管抗应力腐蚀的寿命越短。

参考文献:

- [1] 东涛. 从材料角度看我国石油管线钢的发展前景[J]. 焊管, 1990, 13(1): 29-34.
- [2] GB/T 15970.6-1998 预裂纹试样的制备和应用[S].

度评价方法。现尚缺少X70甚至更高强度等级管道的爆破试验结果。因此, 数据库还需扩充, 相应的评定标准还需进一步修正、完善。

参考文献:

- [1] ANSI/ASME B31G-1984. Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines[S]. New York, 1984.
- [2] ASME B31G-1991. Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines[S]. American Society of Mechanical Engineers, 1991.
- [3] DNV RP-F101, Recommended practice RP-F101 Corroded Pipelines[S]. DNV, 1999.
- [4] Stephens D R, Leis B N, Kurte M D, et al. Development of Alternative Criterion for Residual Strength of Corrosion Defects in Moderate to high toughness Pipe[R]. Catalog No. L51794e. 1999, 1.
- [5] Cronin D S, Pick R J. Experimental database for corroded pipe: Evaluation of RSTRENG and B31G.[A]. Proceedings of the International Pipeline Conference[C]. Vol. 2. 2000. 757-768.
- [6] Adilson C, Benjamin Renaldo D Vieira, Jose Luis F, et al. Burst tests on pipeline with long external corrosion[A]. 2000 International pipeline conference[C]. Vol. 2. 2000. 793-799.
- [7] Cronin D, Roberts K A, Pick R J. Assessment of Long Corrosion Grooves in Line Pipe[A]. Proc. 1st International Pipeline Conference, ASME, Calgary[C]. 1996.
- [8] Woo-sik Kim, Young-pyo Kim, Young-tai Kho. Full scale burst test and finite element analysis on corroded gas pipeline[A]. Proceedings of IPC'02 4th International pipeline conference[C]. Calgary, Canada, 2002.

收稿日期: 2006-05-25

作者简介: 帅健(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事油气储运及力学分析等领域的研究, 通讯地址: 北京昌平中国石油大学 131 信箱。

[3] GB 12445.3-1990, 高强度合金楔形张开加载(WOL)预裂纹试样应力腐蚀试验方法[S].

[4] 吴萌顺. 腐蚀试验方法与防腐蚀检测技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1996.

[5] GB 2038-1991, 金属材料延性断裂韧性 J_{IC} 试验方法[S].

收稿日期: 2006-04-28 修稿日期: 2006-06-22

作者简介: 潘卫军(1970-), 男, 硕士, 主要从事化工设备的可靠性教研工作, 通讯地址: 江苏宿迁 宿迁学院。