

腐蚀管道剩余强度评价方法的对比研究^{*}

帅健 张春娥 陈福来

(中国石油大学·北京)

帅健等. 腐蚀管道剩余强度评价方法的对比研究. 天然气工业, 2006, 26(11): 122-125.

摘要 综述了 ASME B31G 1984、ASME B31G 1991、DNV RP F101 以及 PCORRC 等 4 种腐蚀管道剩余强度的评价方法, 从安全准则、适用缺陷类型、适用管材强度等级等几个方面进行了分析、比较。基于全尺寸爆破试验结果验证, 指出修改后的 ASME B31G 的保守性有所降低, 但仍然存在较大的安全裕量。PCORRC 和 DNV 采用了基于爆破强度的安全准则, 因此更适应中、高强度等级管道的缺陷评定。计算并分析了流变应力的选取、腐蚀面积的简化计算、Folias 鼓胀因子等因素对腐蚀管道剩余强度评价结果的影响程度。旨在便于评定人员选取合适的评价方法, 进而提升管道安全运营管理水平。

关键词 腐蚀 管道 强度 评价 方法

随着油气管道使用年限的增加, 管道腐蚀现象日益严重, 造成壁厚减薄, 管道承压能力下降, 甚至会导致管体局部腐蚀穿孔泄漏或破裂事故的发生。为了预测整个管道的腐蚀情况, 确定腐蚀对管道结构完整性的危害程度, 有必要评估管道的剩余强度, 确保管道在服役期限内的安全使用^[1,2]。很多国家都已出台相关的评价标准和规范。这些规范形成于不同时期, 并且研究的管道强度也不尽相同, 为标准使用者带来不便。因此, 对腐蚀管道剩余强度评价方法比较的研究, 可为管道评估人员选取合适评价方法提供参考, 同时提供决策来确定含缺陷管道是否继续服役、维修或更换。

一、评价标准及方法的对比分析

20 世纪 60 年代末, 许多国家已开始腐蚀管道剩余强度评价研究, 并出台了一些评价标准和方法。笔者选取国际通用的 ASME B31G 1984、ASME B31G、PCORRC 方法以及 DNV RP F101 等常用的评价标准和方法, 进行失效压力计算公式、安全准则、适用材料范围及评价缺陷类型等方面的对比分析。

1. ASME B31G 1984 标准

该标准是评估腐蚀管道的原始和最常用的方法, 它是一些评价标准的基础^[3]。前身是基于断裂

力学的 NG-18 表面缺陷计算公式, 其爆破失效压力表达式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_b = \frac{\sigma_{low} 2t}{D} \left[\frac{1 - \frac{2}{3} \frac{d}{t}}{1 - \frac{2}{3} \frac{d}{tM}} \right] \quad \sqrt{0.8 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{D}{t} \right)} \leq 4.0 \\ p_b = \frac{\sigma_{low} 2t}{D} \left[\frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{tM}} \right] \quad \sqrt{0.8 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{D}{t} \right)} > 4.0 \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: M 为 Folias 鼓胀因子, 为了区别不同形式的表达式, 分别用 M_1 、 M_2 、 M_3 表示; $\sigma_{low} = 1.1 SMYS$; p_b 为失效爆破压力, MPa; d 为腐蚀缺陷深度, mm; L 为腐蚀缺陷轴向投影长度, mm; σ_{low} 为流变应力, MPa; $SMYS$ 为规定的管材最低屈服强度, MPa; D 为管道外径, mm; t 为管道公称壁厚, mm。

$$M_1 = \sqrt{1 + \frac{2.51(L/2)^2}{Dt} - \frac{0.054(L/2)^4}{(Dt)^2}} \quad (2)$$

M_1 可进一步简化为:

$$M_2 = \sqrt{1 + \frac{0.8L^2}{Dt}} \quad (3)$$

该标准以下列假设为前提。

- ① 假设最大圆周应力 = 管材的屈服强度。
- ② 假设流变应力为 $1.1 SMYS$ 。
- ③ 利用投影面积 A 来表达腐蚀区金属损失的面

^{*} 本文受到北京市教育委员会共建项目“天然气输气管网运行中的关键技术”项目资助(课题编号: XK114140478)。

作者简介: 帅健, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 1982 年毕业于武汉化工学院化机专业; 从事工程力学、油气储运安全工程的科研与教学。地址: (102249) 北京市昌平区中国石油大学机电学院。电话: (010) 89733772。E-mail: shuaij@cup.edu.cn

积:对于较短的缺陷,投影面积近似为抛物线形即 $\frac{2}{3} dL$;对于较长的缺陷,投影面积近似为矩形即 dL 。其长短的判定准则为:当 $L/\sqrt{Dt} < 4.48$ 时,为短缺陷,用抛物线形面积模拟;当 $L/\sqrt{Dt} > 4.48$ 时,为长缺陷,用矩形面积模拟。

该标准规定:缺陷最大许可深度为名义壁厚的 80%。深度小于名义壁厚的 10% 的缺陷可以忽略不计。需要注意的是:原始的 NG-18 方程不适用于长缺陷,而在 ASME B31G 中所引入的适用于长短缺陷的公式导致了失效压力预测方程的不连续性。在实际应用中,人们逐渐发现 ASME B31G 1984 过分保守,它所预测的失效压力远远低于实际压力。这样的预测结果在工程使用上比较安全,但却造成了对管道不必要的维修或更换。

2. ASME B31G 1991 标准

针对 ASME B31G 1984 保守性,美国燃气协会 (AGA) 选取 86 个具有不同形状缺陷的管道试件进行了试验,发展为 ASME B31G 1991 准则^[4]。失效爆破压力预测公式的形式与 ASME B31G 1984 基本相同,主要修正了以下 3 个表达式。

(1) 流变应力

$$\sigma_{low} = SMYS + 10000 \text{ psi} = SMYS + 68.95 \text{ MPa} \quad (4)$$

(2) Folias 系数^[5]:

$$\begin{cases} M_b = 0.032 \frac{L^2}{Dt} + 3.3 & L^2/Dt > 50 \\ M_b = \sqrt{1 + \frac{2.51(L/2)^2}{Dt} - \frac{0.054(L/2)^4}{(Dt)^2}} & L^2/Dt \leq 50 \end{cases} \quad (5)$$

(3) 金属损失面积

$$A = 0.85dL \quad (6)$$

此值等于矩形和抛物形面积的平均值。

基于文献[6]中的试验数据,笔者通过计算证实,ASME B31G 1991 标准相对 ASME B31G 1984 预测结果更贴近于实际失效压力,保守程度有所降低(图 1),但是还有不小的安全裕量(见表 1)。

3. DNV RP F101 标准

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^[7]。该标准不但考虑了内压,而且还考虑了管道所受的轴向和弯曲载荷。它提供的两种腐蚀缺陷评价方法的主要区别是安全准则不同。①分项安全系数法:安全准则是根据 DNV 近海标准 OS-F 101 和海底管道

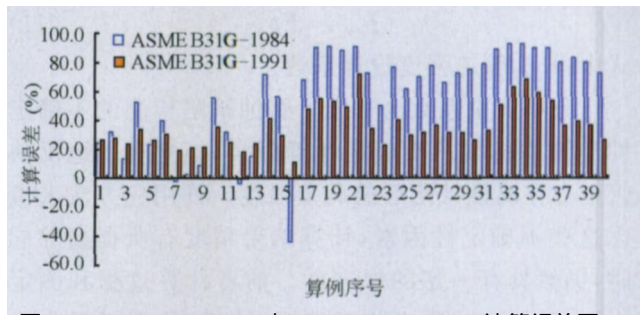


图 1 ASME B31G 1984 与 ASME B31G 1991 计算误差图

表 1 ASME B31G 1984 与 ASME B31G 1991 误差统计表

误差分析	误差(%)		
	最大	最小	平均
ASME B31G 1984	72.007	11.495	36.401
ASME B31G 1991	51.9	4.1	28.2

系统标准来确定。该方法使用了概率修正方程—分项安全系数来确定腐蚀管道的许用操作压力。②许用应力法:是根据许用应力设计(ASD)标准。计算腐蚀缺陷的失效压力后再乘以管道的强度设计系数。对于缺陷尺寸的不确定性,需要计算者自行判断。

(1) 分项安全系数法(缺陷深度测量值不能超过全壁厚的 85%)

$$\begin{cases} p_{corr} = \gamma_m \frac{2tSMTS}{D-t} \frac{1 - \gamma_d(d/t)^*}{1 - \frac{\gamma_d(d/t)^*}{Q}} & \gamma_d(d/t)^* < 1 \\ p_{corr} = 0 & \gamma_d(d/t)^* \geq 1 \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$Q = \sqrt{1 + 0.31 \left[\frac{L}{\sqrt{Dt}} \right]^2} \quad (8)$$

$$(d/t)^* = (d/t)_{meas} + \epsilon_d StD[d/t] \quad (9)$$

式中: p_{corr} 为在内压荷载作用下的腐蚀管道单个纵向腐蚀缺陷的许用压力, MPa; Q 为长度校正系数; $SMTS$ 为规定的最小拉伸强度, MPa; γ_d 为腐蚀深度的分项安全系数; γ_m 为预测模型的分项安全系数; ϵ_d 为定义腐蚀深度分数值的系数; $StD[d/t]$ 为随机变量 d/t 的标准偏差。

(2) 许用应力法

$$p_f = \frac{2tUTS}{(D-t)} \left[\frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{tQ}} \right] \quad (10)$$

式中: p_f 为失效压力, MPa; UTS 为极限拉伸强度, MPa。

若计算管道的工作压力(p_{sw}), 则

$$p_{sw} = Fp_t \quad (11)$$

式中： F 为管道强度设计系数。

分项安全系数法考虑了腐蚀缺陷检测的不确定性和管道材料的不确定性等因素，能更客观地反映管道存在腐蚀缺陷后的剩余强度。许用应力法未考虑这些不确定性因素，计算结果精度有所提高的同时，仍然具有一定的保守性。前者计算过程和测定也要相对复杂，后者相对简明、便捷，故现场操作人员乐于采用后者。

DNV 标准由于开发数据库新，适用范围广，保守程度低，应用越来越广泛。对于单个缺陷的评价，采用的失效模型的形式和 NG 18 方程一样，但系数 M 通过数值分析结果修正为 Q 。流变应力的定义不是根据屈服极限，而是根据极限拉伸强度，采用实际面积来表述缺陷形状。此标准针对中高强度等级管道（可达到 X80），更适合于现代高强度大口径管道的安全评价。

4. PCORRC 方法

PCORRC 方法 (Pipeline CORROsion Criterion)^[8] 是近期开发的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。虽然该方法开发的时间较短，但在改善评价方法的保守性方面表现出了优越性。

PCORRC 方法的公式如下：

$$p_b = \sigma_u \frac{2t}{D} \left\{ 1 - \frac{d}{t} \left[1 - \exp \left(-0.157 \frac{L}{\sqrt{R(t-d)}} \right) \right] \right\} \quad (12)$$

式中： R 为管道半径，mm； σ_u 为管材的极限拉伸强度，MPa。

此方法认为管子的失效由极限拉伸强度决定，而不是屈服强度或流变应力。这一公式是由有限元计算结果拟合得到的。在诸多参数中，缺陷的长度和深度是最主要的影响因素，而管材的应变硬化和缺陷的宽度可以忽略。该拟合出的表达式中考虑了各种基本变量的单独作用和相互作用。通过一系列实验验证，证实这个评价方法预测中高强度钢的结果与试验值偏差较小，很好地改善了较为保守的 ASME B31G-1991 等评价方法，但在评价低强度等级的管道时出现偏于危险的结果。

5. 几种方法应用比较

几种标准(方法)在应用上的差异见表 2。

二、参数对评价结果影响程度的计算

为了验证各参数修正对评价结果的影响，基于

表 2 各标准应用比较表

比较项目	ASME B31G 1984, 1991 (国家标准)	DNV RP F101 (工业标准)	PCORRC (工业方法)
安全准则	屈服强度, 流变应力	极限拉伸强度	真实极限拉伸强度
数据库材料范围	X52 以下	X65 X80	中高强度钢 X52 X70
最佳适用材料范围	中低强度钢	低于 X80 钢	中高强度钢
缺陷类型	孤立缺陷或将相邻缺陷作为一个孤立缺陷	孤立缺陷或交互作用缺陷、复杂缺陷	孤立缺陷、将相邻缺陷作为一个孤立缺陷
载荷范围	内压	内压、轴向压力	内压
裂纹适用性	是	否	否
缺陷模型不确定性	未考虑	利用分项安全系数校正	未考虑

收集的国外多个试验数据库数据^[6,9,11]，笔者对几个参数进行了计算。

1. Folias 鼓胀因子的影响

对式(1)，当流变应力和尺寸等条件相同时，仅括号内的部分对评价结果产生影响，将此部分称为减速比。从图 2 可以得出：对于短缺陷，Folias 鼓胀因子对计算结果的影响较小，但随着缺陷的长度加大，Folias 鼓胀因子的影响作用愈加明显，式(3)的 M_2 和式(5)的 M_3 始终相当接近。

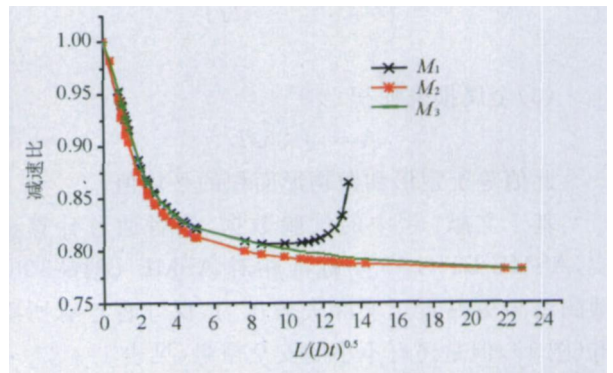


图 2 同尺寸不同 M 值对减速比的影响图

2. 缺陷面积计算方法的影响

缺陷面积的定义有抛物线、矩形及两者面积平均值等 3 种方式。图 3 表示根据不同的缺陷面积定义和 ASME B31G-1984 计算出的关于失效压力的减速比。ASME B31G-1984 标准要求根据当量长度

范围的不同来选取面积计算公式。当量长度因子 $L/\sqrt{D_i} < 4.48$ 时, 计算结果与采用抛物线面积计算的结果相同; 当量长度因子 $L/\sqrt{D_i} > 4.48$ 时, 计算结果则十分接近矩形。这也表明对于长缺陷而言, 选用抛物线面积公式计算失效压力具有一定的局限性。而 ASME B31G-1991 采用等效面积比为 0.85, 则突破此局限, 使计算更加简捷、合理。

3. 流变应力的影响

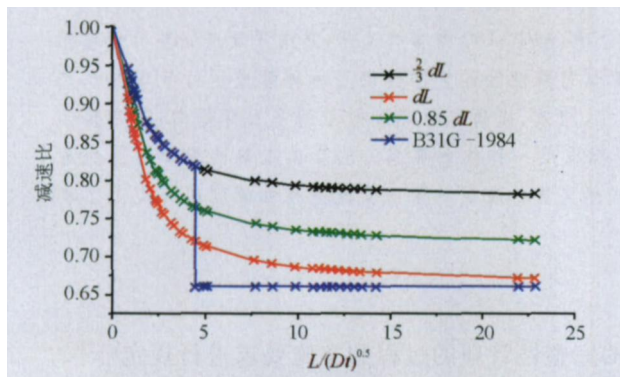


图 3 ASME B31G 1984 和不同面积定义对减速比的影响图

有学者指出, 引起失效压力预测结果差异的主要因素在于流变应力的定义。针对流变应力选取, 很多学者都提出改进方案, 图 4 中选取流变应力的 4 个较为常用的形式进行计算比较, 其中 *SMTS* 为规定的管材最低拉伸强度。

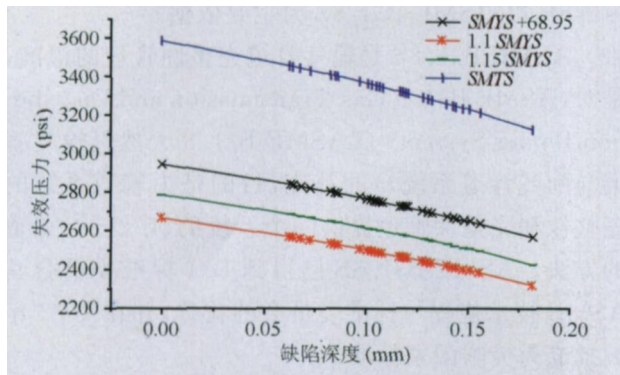


图 4 流变应力的选取对失效压力的影响图

注 1 psi=6.89476 kPa

从图 4 可以看出, 当流变应力从 1.1 *SMYS* 变到 *SMTS* 时, 预测的失效压力发生了显著的变化, 可见流变应力的选择对失效压力的预测结果有很大影响。

三、结论及建议

(1) 基于全尺寸爆破试验结果的验证, 可以看出修改后的 ASME B31G 1991 相对于 ASME B31G-1984 有很大改善, 预测结果更加接近实际值, 但仍有

一定的保守性, 有改进的余地。

(2) DNV 和 PCORRC 采用了基于管材爆破强度的安全准则, 因此更适应中、高强度等级管道的缺陷评定。

(3) 影响腐蚀管道剩余强度评价结果的因素主要包括流变应力的选取、腐蚀面积的简化计算、Folias 鼓胀因子等。笔者通过计算表明流变应力对评价结果的影响尤为明显。

参 考 文 献

- [1] 帅健, 许葵. 腐蚀管线的失效概率评定方法[J]. 石油学报, 2003, 24(4): 86-89.
- [2] 帅健. 腐蚀管线的剩余强度预测[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2003, 27(4): 91-93.
- [3] American Society of Mechanical Engineers. ANSI/ASME B31G 1984 Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines[S]. New York: ASME B31 Committee, 1984.
- [4] American Society of Mechanical Engineers. ASME B31G 1991. Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines[S]. New York: ASME B31 Committee, 1991.
- [5] KIEFNER J F, VIETH P H. A modified criterion for evaluating the remaining strength of corroded pipe[R]. 1989.
- [6] CRONIN D S, PICK R J. Experimental database for corroded pipe: Evaluation of RSTRENG and B31G[C]. Proceedings of the International Pipeline Conference, 2000; 757-768.
- [7] DNV. Recommended practice RP F101 Corroded Pipelines[S]. 1999.
- [8] STEPHENS D R, LEIS B N, KURRE 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.
- [9] ADILSON G, BENJAMIN RENALDO D, VIEIRA, JOSE LUIS F, et al. Burst tests on pipeline with long external corrosion[C]. International pipeline conference, 2000; 793-799.
- [10] CRONIN D, ROBERTS K A, POCK R J. Assessment of long corrosion grooves in line pipe[C]. Proc. 1st International Pipeline Conference, ASME, Calgary, 1996.
- [11] Woo sik Kim, Young pyo Kim, Young tai Kho. Full scale burst test and finite element analysis on corroded gas pipeline[C]. Proceedings of 4th International pipeline conference, Calgary, Canada, 2002.

(修改回稿日期 2006 09 26 编辑 赵 勤)

Cell phone 13880716361 E mail: ren ren@swpi.edu.cn

CONTROLLING GEL TIME OF WEAK CROSS LINKED POLYMER GEL SYSTEM BY BUFFER METHOD

Jing Yan¹, Zhang Shicheng¹, Lu Xin²(¹ China University of Petroleum · Beijing; ² EOR Research Center of China University of Petroleum · Beijing). *NATUR. GAS IND.* v. 26, no. 11, pp. 119-121, 11/25/2006. (ISSN 1000-0976; **In Chinese**)

ABSTRACT: Weak gel drive technique means to inject the mixture of polymer, cross linking agent, and additives into the formation for the purpose of deep drive. The gel time of existing weak cross linked polymer gel system is so short that can't satisfy with the requirement of oil fields. This paper introduces the method of adding buffer that regulates the pH value to weak gel system to control gel time of cross linked polymer. Through orthogonal test (L9) and differential analysis and normalization processing of data, the degree how the gel time has affected by those factors is in the order of pH value (Factor B) > cross linked gel quantity (Factor A) > temperature (Factor C). Also, the gel time is longer while pH < 7. Adopting five kinds of HAc NaAc buffer to control the gel time of E2/HpAM system, the gel time is from 42-384 hours and the gel strength is not changed. So it is concluded that buffer method can control the gel time of cross linked polymer system.

SUBJECT HEADINGS: buffer, gel, polymer, gel time, experiment

Jing Yan born in 1979, is studying for a Ph. D degree. She is now engaged in research on oil/gas field development theory and system engineering.

Add: Petroleum Engineering College, China University of Petroleum · Beijing, Changping District, Beijing 102249, P. R. China
Tel: 86 10 8973 4056 E mail: jingyan0622@tom.com

COMPARISON STUDY ON ASSESSMENT METHODS FOR REMAINING STRENGTH OF CORRODED PIPELINE

Shuai Jian, Zhang Chun'e, Chen Fulai (China University of Petroleum · Beijing). *NATUR. GAS IND.* v. 26, no. 11, pp. 122-125, 11/25/2006. (ISSN 1000-0976; **In Chinese**)

ABSTRACT: This paper presented a review on ASME B31G 1984, ASME B31G 1991, DNV RP F101 and PCORRC methods in evaluating the remaining strength of corroded pipeline. These four methods were generalized and compared in safety criterion and fitness for defect type and strength grade of pipeline steel. Based on the validation with full scale burst test data, it is pointed out that B31G modified in 1991 has less conservatism than the initial B31G method presented in 1984, but it should be still improved because it has much safety marginal. DNV RP F101 and PCORRC method applied the limit tensile strength of pipeline steel in the formula about the burst failure pressure of pipeline, thus they are suitable for pipelines with moderate to high strength grade. The paper further computed and analyzed the effect of the access of flow stress, simplified calculation of corrosion area and the Folias factor on the assessment result about the remaining strength of corroded pipelines. It aimed to make it easy to select appropriate assessment method for assessment personnel and thus to advance pipeline safety control level.

SUBJECT HEADINGS: corrosion, pipeline, strength, assessment, methods

Shuai Jian (professor), born in 1963, graduated in 1982 from Wuhan Institute of Chemical Technology. Now he is a doctoral tutor in China University of Petroleum, being engaged in study and research works on engineering mechanics, oil and gas storage safety engineering.

Add: China University of Petroleum · Beijing, Changping District, Beijing 102249, P. R. China

Tel: 86 10 8973 3772 E mail: shuaij@cpu.edu.cn

THE FEATURE OF THE STANDARDS OF PIPELINE INTEGRITY MANAGEMENT AND ITS SUPPORTING REGULATIONS SYSTEM

Wang Tao^{1,2}, Shuai Jian¹(¹ China University of Petroleum · Beijing; ² Wuhan University of Technology). *NATUR. GAS IND.* v. 26, no. 11, pp. 126-129, 11/25/2006. (ISSN 1000-0976; **In Chinese**)

ABSTRACT: It is briefly introduced the conceptions of pipeline integrity and Pipeline Integrity Management (PIM). Then, it is