维普资讯 http://www.cqvip.com

第 28 卷 第 6 期
2007 年 11 月

石 油 学 报
ACTA PETROLEI SINICA

Vol. 28 No. 6
Nov. 2007

文章编号：0253-2697(2007)06-0125-04

腐蚀管道剩余强度评价方法及其应用

何东升 郭 简 张 鹏

（西南石油大学机电工程学院 四川成都 610500）

摘要：分析了管道腐蚀缺陷各种评价方法的理论基础，导出了相应的评价方法的评价公式。将现有的标准归纳为 3 种基本的准则，即 B31G 准则、API 579 准则和 DNV RP-F101 准则。理论和数值分析表明：B31G 准则评价的保守性低于 API 579 准则。在单一荷载下，3 种准则的保守性从高到低依次为 API 579 准则、B31G 准则、DNV RP－F101 准则，评价复杂程度从高到低依次为 API 579 准则、DNV RP-F101 准则和 B31G 准则。鉴于大多数管段主要在单一内压载荷下运行，为了降低评价的保守性，简化评价过程，对于单一荷载和简单缺陷，腐蚀管道的剩余强度仍按 B31G 准则或 DNV RP-F101 准则进行评价。

关键词：腐蚀管道；剩余强度；腐蚀缺陷；评价标准；评价公式

中图分类号：TE732 **文献标识码**：A

Assessment method for remaining strength of corroded pipeline and its application

He Dongsheng Guo Jian Zhang Peng

(*School of Mechanical and Electronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu* 610500, *China*)

Abstract: On the basis of the theoretical foundations of various assessment methods for corroded pipeline, the assessment formulas for every method were deduced according to their basic hypothesis and calculative method for the surface correction factor of through-wall crack. The current criterions were concluded into three basic types of ASME B31G criterion, API 579 criterion and DNV RP F101 criterion. The theoretical and numerical analyses show that the API 579 criterion is more conservative than the B31G criterion. The conservations of three criterions become lower in the order of API 579 criterion, ASME B31G criterion and DNV RP F101 criterion, and the assessment complexity of three criterions is in the order of API 579 criterion, DNV RP F101 criterion and ASME B31G criterion. Because some pipe-section operates mainly under single inner pressure, the ASME B31G criterion or DNV RP F101 criterion should be used to assess the remaining strength in the corroded pipeline to reduce the conservation of assessment and simplify the assessment programs.

Key words: corroded pipeline; remaining strength; corroded fault; assessment criterion; assessment formula

1 现有管道腐蚀剩余强度评价标准及腐蚀缺陷应力计算公式

评价管道腐蚀缺陷剩余强度的标准较多[1-8]，这些标准的强度计算公式大都是基于 1969 年由 Folias 提出的半经验公式[9]，即非穿透性缺陷的表面影响因子 M_s 为

$$M_s = \frac{1-A/A_0}{1-A/(A_0M_t)} \tag{1}$$

式中 A 为通过管壁厚度的纵向平面缺陷的面积，mm^2；A_0 为未受损管线纵向面积，mm^2；M_t 为 Folias 系数。

式(1)仅为透壁裂纹表面影响因子的修正公式，透壁裂纹的表面影响因子直接由表面影响因子 M_t 确定，M_t 又由圆柱壳体参数 λ 确定。

管子含有缺陷时的圆周断裂应力 σ 为

$$\sigma = \sigma_f M_s \tag{2}$$

式中 σ_f 为材料的流动应力，MPa。

1971 年，Eiber 等人给出计算 M_t 的表达式为[10]

$$M_t = (1+0.4845\lambda^2)^{1/2} \tag{3}$$

其中壳参数为

$$\lambda = \frac{1.285L}{\sqrt{D_i t}} \tag{4}$$

式中 L 为缺陷长度，m；D_i 为管道内径，m；t 为管道壁厚，m。

1987 年和 1989 年，Krammer 和 Kiefner 等人修正了 M_t 的表达式，成为后来的 B31G—1991 和 API 579 中 M_t 的表达式[11-12]。

基金项目：国家自然科学基金项目(No. 50674077)和中国石油天然气集团公司中青年创新基金项目(04E70490)联合资助。

作者简介：何东升，男，1964 年 6 月生，2001 年获大连理工大学计算力学博士学位，现为西南石油大学机电工程学院副教授，主要从事管道强度、智能井等方面的研究。E-mail：dongsheng_he@sina.com

维普资讯 http://www.cqvip.com

当 $\lambda \leqslant 9.1$ 时，有

$$M_t = (1 + 0.3797\lambda^2 - 0.001236\lambda^4)^{1/2} \quad (5)$$

当 $\lambda > 9.1$ 时，有

$$M_t = 0.01936\lambda^2 + 3.3 \quad (6)$$

拟合出新的 M_t 表达式为[13]

$$M_t = \left(\frac{1.02 + 0.4411\lambda^2 + 0.006124\lambda^4}{1.0 + 0.02642\lambda^2 + 1.533 \times 10^{-6}\lambda^4}\right)^{1/2} \quad (7)$$

对非透壁缺陷，采用 Folias 的半经验公式把应力简单地表示成面积比和 M_t 关系的形式，即式(1)；对环向缺陷，采用式(7)确定 M_t。

显然，采用裂纹性缺陷的应力表达式难以表达体积型缺陷的应力分布。由于缺陷形貌比较复杂，用面积比来校正缺陷在深度方向的变化过于简单，因而式(1)～式(7)都是简化公式。

2 各种评价方法的特点

2.1 ASME B31G 标准

为建立几何参数的评价准则，B 31G 标准中假设：①材料的流动应力 σ_f 是材料的最小屈服强度 σ_s 的 1.1 倍；②Folias 系数 M_t 用式(3)表示；③缺陷形状近似为抛物线。若缺陷最大深度为 d，则 $A = 2(Ld)/3$，$A_0 = Lt$；④ 壁厚远小于管线直径，则有：$D_i \approx D_o = D$。

联立式(1)～式(4)，注意到管道进入屈服时，即 $\sigma = \sigma_s$，可以得出 B 31G 标准中关于缺陷长度的判断公式为

$$L = 1.12B\sqrt{Dt} \quad (8)$$

其中

$$B = \sqrt{\left(\frac{d/t}{1.1d/t - 0.15}\right)^2 - 1} \quad (9)$$

此外，B 31G 标准规定：当 $d/t \leqslant 0.1$ 时，管道可以继续使用；当 $0.1 < d/t \leqslant 0.175$ 时，$B = 4$；当 $d/t > 0.8$ 时，管道不能继续使用。

B 31G 标准的不足：①腐蚀长度与工作压力无关。最大容许纵向腐蚀长度的计算式(8)和式(9)中没有包含使用压力和管道材料参数，这意味着无论管道在何种压力下工作、管道的材质如何，只要满足最大容许纵向腐蚀长度准则，B31G 标准规定管道可以继续服役，这显然不合理。②对环向缺陷不进行评价。当管道只承受压力载荷时，环向应力为纵向应力的两倍，所以应主要考虑环向应力对应的纵向缺陷。但当环向缺陷较大或管道承受其他不可忽略的纵向载荷(如弯曲、温升伸长)时，必须考虑纵向应力以及相应的环向缺陷。③单个缺陷的评价。B 31G 标准不考虑复合缺陷的相互影响，对复杂的缺陷没有相关的评价方法。

2.2 SY/T 6151 评价方法

在 SY/T 6151—1995 钢质管道管体腐蚀损伤评价方法中，按腐蚀程度不同列举了 5 类缺陷。其纵向缺陷长度的计算及评价同 B 31G 标准，同时考虑了环向缺陷的影响，给出了不同缺陷深度所允许的缺陷周长(圆周角)。可见 SY/T 6151 方法中增加了环向缺陷的评价，它是 B 31G 标准的改进版。

2.3 API 579 准则

API 579 准则在 B 31G 标准基础上，考虑了相邻缺陷和附加载荷的影响，建立了含有缺陷管道的剩余承压能力、缺陷尺寸及材料强度参数之间的关系，避免了 B 31G 标准出现的上述问题。API 579 准则服役适应性评价把腐蚀缺陷分为均匀腐蚀、局部腐蚀和点蚀 3 类，对每一类都建立了三级评价体系。在 3 类缺陷的界定上，API 579 准则只给出了模糊的定义。

API 579 准则评价的思路是：首先根据设计压力确定管道所需的最小壁厚 t_{min}，测量管道的实际最小壁厚 t_{mm}，确定管道的未来腐蚀裕量 A_{FC}、剩余壁厚比 R_t 和剩余强度系数 F_{RS}，再按照前述的应力计算原则进行评价。剩余强度系数 F_{RS} 可表示为

$$F_{RS} = \frac{\sigma}{\sigma_f} = \frac{1 - A/A_0}{1 - A/(A_0 M_t)} \quad (10)$$

剩余壁厚比 R_t 为

$$R_t = \frac{t_{mm} - A_{FC}}{t_{min}} \quad (11)$$

式(11)中 $t_{mm} - A_{FC}$ 为剩余有效壁厚。考虑最不利情况，即缺陷断面为矩形，则有

$$R_t \approx 1 - \frac{A}{A_o}$$

代入式(10)，有

$$F_{RS} = \frac{R_t}{1 - (1 - R_t)/M_t} \quad (12)$$

从而得出

$$M_t = \frac{1 - R_t}{1 - R_t/F_{RS}} \quad (13)$$

2.3.1 均匀腐蚀评价

要得到缺陷长度的关系式，API 579 准则根据式(5)和式(6)[14-15]，并进行了一定的数学变换，得到 API 579准则的最大允许缺陷长度为

$$L = 1.123\sqrt{M_t^2 - 1}\sqrt{D_i t} \quad (14)$$

F_{RS} 采用允许剩余强度系数 F_{RSa}，一般取 $F_{RSa} = 0.9$。当 $R_t = 0.9$ 时，取 $L/\sqrt{D_i t} = 50$，得到

$$M_t = \frac{1 - R_t}{1 - R_t/F_{RSa}} \quad (15)$$

2.3.2 局部腐蚀一级评价

改写式(15)可得剩余壁厚比的表达式，但 M_t 按 Eiber 的关系式取值，即

$$R_t \geqslant F_{RSa}\frac{1 - M_t^{-1}}{1 - F_{RSa}/M_t} \quad (16)$$

维普资讯 http://www.cqvip.com

$$M_t = (1+0.4845\lambda^2)^{1/2} \tag{17}$$

2.3.3 局部腐蚀二级评价

当一级评价不满足时,API 579 准则对缺陷在纵向划分从短到长的子域,再确定每一子域的剩余强度系数 $F_{RS}{}^i$,取最小值作为管道的 F_{RS}。当 $F_{RS}\geqslant F_{RSa}$ 时,评价通过。其中 F_{RS}^i 按式(10)计算,缺陷影响因子 M_t^i 按式(7)计算,即

$$F_{RS}^i = \frac{1-A^i/A_0^i}{1-A^i/(A_0^i M_t^i)} \cdot \tag{18}$$

$$M_t^i = \left[\frac{1.02+0.4411(\lambda^i)^2+0.006124(\lambda^i)^4}{1.0+0.02642(\lambda^i)^2+1.533\times10^{-6}(\lambda^i)^4}\right]^{1/2} \tag{19}$$

式中　上标 i 表示第 i 个子域。

2.3.4 缺陷的环向评价

在均匀腐蚀的一级、二级评价和局部腐蚀的一级评价中,API 579 准则环向缺陷评价的计算公式为

$$R_t = \frac{-0.73589+10.511(C/D_i)^2}{1+13.838(C/D_i)^2} \tag{20}$$

式中　C 为缺陷的环向尺寸,m。

在局部腐蚀的二级评价中,综合考虑缺陷环向尺寸对轴向膜应力、轴向载荷、抗弯截面模量的改变、弯曲载荷和引起的附加弯曲载荷的影响,得到一个复杂的评价公式。

可见 API 579 准则考虑了缺陷的 3 个方向尺寸和管道的受力情况,基本避免了 B 31G 标准出现的上述问题。但仍然存在以下问题:①在局部腐蚀的二级评价和缺陷的环向尺寸评价中,F_{RS} 和 R_t 只与结构参数有关,与管道受力无关;②分别考虑缺陷 3 个方向的尺寸,把缺陷从一个整体割裂开来;③对均匀腐蚀和局部腐蚀的界定模糊。

2.4 SY/T 6477 评价方法

SY/T 6477 方法包含缺陷油气管道剩余强度评价方法,体积型缺陷中只包含了均匀腐蚀和局部腐蚀两种评价方法,没有考虑点蚀群的相互影响。其均匀腐蚀和局部腐蚀的评价方法与 API 579 准则基本相同,因而 SY/T 6477 方法只是 API 579 准则的子集或简化版。

2.5 DNV RP-F101 方法

SY/T 10048-2003 腐蚀管道评估的推荐方法,实际上等同于 DNV RP-F101"腐蚀管道评估的推荐作法",采用分项安全系数法和许用应力法来评估管道是否安全。分项安全系数法是概率和力学分析相结合的方法,其基本原理与许用应力法相同。它把缺陷分为单个缺陷、相互作用缺陷和复杂形状 3 种类型,单个缺陷和相互作用缺陷间的界定是明确的。

只有内压时的管道失效压力为

$$p_f = \frac{2t\sigma_b}{D-t}\cdot\frac{1-d/t}{1-d/(tQ)} \tag{21}$$

其中

$$Q = \sqrt{1+0.31L^2/(Dt)} = \sqrt{1+0.188\lambda^2} \tag{22}$$

式中　σ_b 为材料的抗拉强度,MPa。

可见 DNV RP-F101 方法中用 σ_b 代替了 σ_f(通常 $\sigma_b>\sigma_f$),用 Q 代替了 M_t。因为 $Q<M_t$,因而由式(21)确定的失效压力通常比由式(2)确定的失效压力大,因而 DNV RP-F101 方法的保守性较小。

3 各类评价方法中缺陷长度的计算

对 B 31G、API 579 和 DNV RP-F101 准则,以简单的单一缺陷进行对比。对单一缺陷和单一荷载,均匀腐蚀的一、二级评价结果相同,因而只列出均匀腐蚀的一级评价。将应力或缺陷长度表达式写成统一的缺陷长度形式。

由式(8)和式(9)得到 B31G 准则的缺陷长度计算式为

$$\frac{L}{\sqrt{D_i t}} = 1.12\sqrt{\left(\frac{d/t}{1.1d/t-0.15}\right)^2-1} \tag{23}$$

API 579 准则不计未来腐蚀裕量 A_{FC},式(11)中 R_t 可写为

$$R_t \approx 1-d/t \tag{24}$$

将式(24)代入式(13)(通常剩余强度系数 $F_{RSa}=0.9$),得

$$M_t = \frac{0.9d/t}{d/t-0.1} \tag{25}$$

由此可确定 API 579 准则中均匀腐蚀长度为

$$\frac{L}{\sqrt{D_i t}} = 1.123\sqrt{\left(\frac{0.9d/t}{d/t-0.1}\right)^2-1} \tag{26}$$

API 579 准则中局部腐蚀一级评价的长度为

$$\frac{L}{\sqrt{D_i t}} = 1.118\sqrt{\left(\frac{0.9d/t}{d/t-0.1}\right)^2-1} \tag{27}$$

局部腐蚀二级评价的长度关系式为

$$\frac{L^2}{D_i t} \approx \{3.64\times10^{14}-2.18\times10^{14}M_t^2-2.5\times10^5\times[1.85\times10^{18}+1.3\times10^{16}M_t^2+7.55\times10^{15}M_t^4]^{1/2}\}[2\times(-8.35\times10^{12}+2.09\times10^9 M_t^2)]^{-1} \tag{28}$$

DNV RP-F101 准则用抗拉强度来度量管道的应力,一般与屈服强度没有准确的数值关系。为便于与 API 579 准则和 B 31G 准则对比,仿照 B 31G 准则假设:$\sigma_b\approx1.1\sigma_s$,当管道本体应力达到屈服极限时,为管道失效,由式(21)和式(22)得

维普资讯 http://www.cqvip.com

$$\frac{L}{\sqrt{Dt}} \approx 15.43 \times [-31 + 1364d/t - 19406(d/t)^2 + 96844(d/t)^3 - 78771(d/t)^4]^{1/2} \times [31 - 682d/t + 3751(d/t)^2]^{-1} \quad (29)$$

由于繁琐的数学表达式，难以从式(23)、式(26)～式(29)确定相互之间显式数量关系，缺陷长度比与缺陷深度比的关系曲线如图1所示。可以看出：①在相同的缺陷深度比下，DNV RP-F101的允许缺陷长度比最大，在保证安全的前提下，保守性最低；②传统认为的B 31G具有较大的保守性，但与API 579相比，B 31G的允许缺陷长度比通常大于API 579均匀腐蚀和局部腐蚀的允许缺陷长度比，因而比API 579的保守性更低。

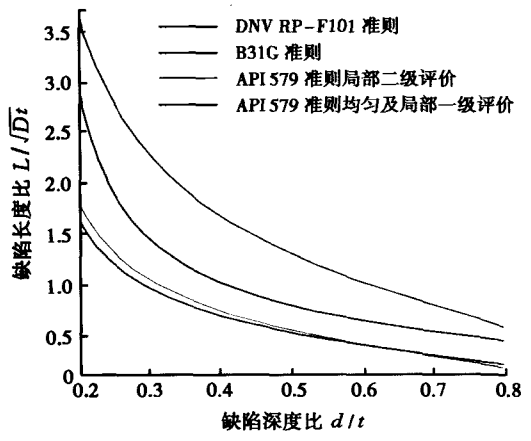


图1 最大允许缺陷长度关系曲线

Fig. 1 The relation curves of the maximum allowed flaw length in four criterions

4 结 论

(1) 现行腐蚀管道剩余强度评价主要基于B31G、API 579和DNV RP-F101准则，3个准则的理论基础均基于Folias的半经验公式，再根据爆破试验得出的实验数据进行修正。这些准则缺乏系统的理论依据，建议深入开展相关的研究。

(2) 通常认为过于保守的B31G评价方法，在单一载荷(内压)下所得的允许缺陷长度一般大于API 579准则的允许缺陷长度，因而API 579准则比B 31G准则更保守。

(3) 3种评价体系以B 31G准则最为简单，DNV RP-F101准则次之，API 579准则最为繁琐。而在单一内压载荷下，3种评价体系中以DNV RP-F101准则保守性最小，B31G准则次之，API 579准则最大。

(4) 鉴于大多数管段主要承受单一内压载荷，为降低评价的保守性和简化评价程序，建议：在简单载荷及环向缺陷较小的情况下，采用B 31G准则或DNV RP-F101准则进行评价；在其他场合用API 579准则进行评价。

参 考 文 献

[1] American Society of Mechanical Engineers. ANSI/ASME B31G-1991 Manual for determining the remaining strength of corroded pipeline[S]. New York: ASME B31 Committee, 1991.

[2] American Petroleum Institute. API579-2000 Recommended practice for fitness-for-service[S]. ISSUE6. Washington D C: American Petroleum Institute, 2000.

[3] British Standards Institution. PD 6493-1991 Guideline on method for assessment of the acceptability of flaws in fusion welding structure[S]. London: British Standards Institution, 1991.

[4] British Standards Institution. Draft revision to PD6493-1996 fracture assessment [S]. London: British Standards Institution, 1996, 3.

[5] Det Norske Veritas. DNV RP-F101-1999 Recommended practice for corroded pipelines[S]. Oslo: Det Norske Veritas, 1999.

[6] 中国石油天然气总公司. SY/T 6151-1995 钢质管道管体腐蚀损伤评价方法[S]. 北京：石油工业出版社，1996.
China National Petroleum Cooperation. SY/T 6151-1995 The evaluation method of corrosion flaw of the steel pipe[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.

[7] 国家石油和化学工业局. SY/T6477-2000 含缺陷油气输送管道剩余强度评价方法[S]. 北京：石油工业出版社，2000.
China National Petroleum and Chemical Industry Bureau. SY/T6477-2000 The evaluation method of remaining strength of the oil and gas transmission with the flaw[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.

[8] 国家经济贸易委员会. SY/T 10048-2003 腐蚀管道评估的推荐作法[S]. 北京：石油工业出版社，2003.
China National Economic Commission. SY/T10048-2003 Recommended practice for corroded pipelines[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.

[9] Folias E S. On the effect of initial curvature on cracked sheets [J]. International Journal of Fracture Mechanics, 1969, 5(4): 327-346.

[10] Eiber R J, Maxey W A, Duffy A R, et al. Investigation of the initiation and extent of ductile pipe rupture[R]. Final Report BMI 1908, 1971.

[11] Kramer G S, Wilkowski G M, Maxey W A. Flaw tolerance of spiral welded pipe[R]. Battelle NG-18 Report 154, 1987.

[12] Kiefner J F, Vieth P H. Final report on project PR 3-805 A modified criterion for evaluating the remaining strength of corroded pipe[R]. Columbus: Battelle Memorial Institute, 1989.

[13] Murakami Y. Stress intensity factors handbook[M]. Oxford: Pergamon Press, 1987: 1356-1358.

[14] 方华灿. 油气长输管线的安全可靠性分析[M]. 北京：石油工业出版社，2003：81-85.
Fang Huacan. Analysis of security and reliablity of oil and gas long distance transmission pipeline[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 81-85.

[15] Keith Escoe. Piping and pipelines assessment guide, A[M]. Boston: Elsevier, 2006: 26-27.

(收稿日期 2006-11-21 改回日期 2007-04-04 编辑 仇学艳)