

防腐保温

## API 579 与 B31G 剩余强度评价的保守性分析\*

何东升\*\* 张 鹏

张丽萍

(西南石油大学建筑工程学院)

(新疆石油管理局井下作业公司)

何东升 张 鹏等:API 579 与 B31G 剩余强度评价的保守性分析,油气储运,2008,27(1) 36~40。

**摘 要** 腐蚀导致在役管道强度降低,运营者必须确定当前腐蚀缺陷下管道是否可以继续服役,目前可采用的评价方法主要有 B31G 和 API 579 系列。介绍了两种评价方法的理论基础,根据各自的基本假设导出了相应的评价方法的评价公式,并对此进行了深入的对比分析,得出通常认为过于保守的 B31G 的保守性比 API 579 低的重要结论。建议在单一荷载和简单缺陷形状下,按 B31G 进行管道的剩余强度评价。

**主题词** 管道 剩余强度 腐蚀 评价 标准

## 一、前 言

腐蚀管道的剩余强度评价的目的就是评价管道受到腐蚀、产生腐蚀缺陷时管道是否能在规定的压力下继续运行。管道公司希望在保证安全的前提下,最大限度地降低管道评价的保守性,提高管道运营的经济效益,因此选择何种评价准则与管道公司的经济利益和安全运营密切相关。目前最具代表性的剩余强度评价准则是美国的 API 579<sup>[1]</sup> 和 ASME B31G<sup>[2]</sup>,我国也颁布了几项关于腐蚀管道的剩余强度评价标准<sup>[3~5]</sup>,但基本是参照国外的准则制定的,如 SY/T 6151—1995,钢质管道管体腐蚀损伤评价方法<sup>[3]</sup>与 ASME B31G 基本相同,SY/T 6477—2000 含缺陷油气输送管道剩余强度评价方法<sup>[4]</sup>与 API 579 部分内容相近,SY/T 10048—2003 腐蚀管道评估的推荐做法<sup>[5]</sup>与挪威船级社 DNV RP-F101-Recommended Practice for Corroded Pipelines<sup>[6]</sup>相近。同时 API 579 和 ASME B31G 基本构成相对完整的美国腐蚀管道的剩余强度评价体系<sup>[7]</sup>,分析讨论这两个准则的保守性,提高评价的经济效益,对指导管道的剩余强度评价具有重要的价值。

管道的运行压力、几何尺寸、材料特性和缺陷形

貌以及其它运营条件是影响管道剩余强度的主要因素,相关准则都是根据缺陷的几何尺寸进行校核。一般只受内压的密闭容器,其环向应力是轴向应力的两倍,管道通常承受比密闭容器小得多的轴向力,其轴向应力也小,由管道的环向截面承受管道的轴向应力,对管道的环向截面要求相对较低,因而 B31G 主要从缺陷的纵向长度对管道缺陷进行评价,而 API 579 不仅考虑缺陷的纵向长度,对缺陷的周向长度和缺陷深度也进行评价。

虽然评价内容在形式上有所不同,但实质是一样的,即在力学上要求计算应力应小于许用应力。

## 二、腐蚀缺陷的应力计算方法

管道腐蚀缺陷剩余强度评价的计算公式大都是基于 1969 年由 Folias 提出的半经验公式<sup>[8]</sup>,即管子含有缺陷时的圆周断裂应力  $\sigma$  为:

$$\sigma = \sigma_f M_s \quad (1)$$

$$M_s = \frac{1 - A/A_0}{1 - A/(A_0 M_t)} \quad (2)$$

式中  $\sigma_f$  ——材料的流动应力,MPa;

$M_s$  ——非穿透性缺陷的表面影响因子;

$A$  ——通过管壁厚度的纵向平面的缺陷的面积,mm<sup>2</sup>;

\* 国家自然科学基金 50674077 和 CNPC 中青年创新基金 04E7049 资助。

\*\* 610500,四川省成都市新都区西南石油大学建筑工程学院;电话:(028)83033605。

$A_0$  ——未受损管道纵向面积,  $\text{mm}^2$ ;  
 $M_t$  ——Folias 系数。

实际上这只是个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  $\lambda$  确定,即:

$$\lambda = \frac{1.285L}{\sqrt{D_i t}} \quad (3)$$

式中  $L$  ——缺陷长度;  
 $D_i$  ——管道内径;  
 $t$  ——管道壁厚。

1971 年 Eiber、Maxey、Duffy 给出一个计算  $M_t$  的表达式<sup>[9]</sup>,即 B31G—1984 的表达式。

$$M_t = (1 + 0.4845 \lambda^2)^{1/2} \quad (4)$$

1987 年和 1989 年, Krammer、Kiefner 等修正了  $M_t$  的表达式<sup>[10,11]</sup>,就是后来 B31G—1991 和 API 579 中的  $M_t$  的表达式:

当  $\lambda \leq 9.1$  时:

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

当  $\lambda > 9.1$  时:

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

此后断裂及固体力学学会出版的应力集中系数手册中又拟合出新的  $M_t$  表达式<sup>[2]</sup>:

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

对非透壁缺陷,采用 Folias 半经验公式将应力简单地表示成面积比和  $M_t$  关系的形式,(见式(2))。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;由于缺陷形貌的复杂性,用面积比来校正缺陷在深度方向的变化确过于简化,因而式(1)~式(7)都是简化公式。下面分析这两种评价准则,确定其中的区别与联系。

### 三、ASME B31G 标准

为建立几何参数的评价准则,B31G 假设如下。

(1)材料的流动应力  $\sigma_f$  是材料的最小屈服强度  $\sigma_s$  的 1.1 倍,即  $\sigma_f = 1.1 \sigma_s$ 。

(2)Folias 系数  $M_t$  用式(4)表示。

(3)缺陷形状近似为抛物线。若缺陷最大深度为  $d$ ,则  $A = 2/3 Ld$ ,  $A_0 = L_t$ ,式(2)中的面积比为

$$\frac{A}{A_0} = \frac{2d}{3t}$$

(4)壁厚远小于管道直径,则有  $D_i \approx D_o = D$ (管道外径)。

B31G 直接用缺陷长度对缺陷进行评价,由式(4)可得:

$$M_t = (1 + 0.4845 \lambda^2)^{1/2} \approx \sqrt{1 + 0.8 L^2 / (D_i t)}$$

$$L \approx 1.12 \sqrt{M_t^2 - 1} \sqrt{D_i t} \quad (8)$$

由式(1)和式(2)可得:

$$\sigma = \sigma_f \frac{1 - A/A_0}{1 - A/(A_0 M_t)} \quad (9)$$

$$M_t = \frac{A/A_0}{1 - \sigma_f/\sigma + A/A_0 \times \sigma_f/\sigma}$$

当管道进入屈服时,即  $\sigma = \sigma_s$ ,注意到假设(1)和假设(3)。

$$M_t = \frac{d/t}{1.1 d/t - 0.15} \quad (10)$$

令  $B = \sqrt{M_t^2 - 1}$ ,并将式(10)代入,得到 B31G 的  $B$  值表达式:

$$B = \sqrt{\left( \frac{d/t}{1.1 d/t - 0.15} \right)^2 - 1} \quad (11)$$

注意到假设(4),再将式(9)写成 B31G 的形式:

$$L = 1.12 B \sqrt{D_i t} \quad (12)$$

式(11)和式(12)就是 B31G 关于缺陷长度的表达式。当  $d/t \leq 0.175$  时,  $B \geq 4$ ,只有内外压作用时,通常环向应力是轴向压力的两倍,要避免大应力下过长的缺陷长度,B31G 规定,当  $d/t \leq 0.175$  时,  $B = 4$ 。当缺陷深度小于壁厚的 10% 时,B31G 认为管道可以继续使用;当缺陷深度大于壁厚的 80% 时,B31G 认为管道不能继续使用。系数  $B$  与  $d/t$  的关系见图 1。

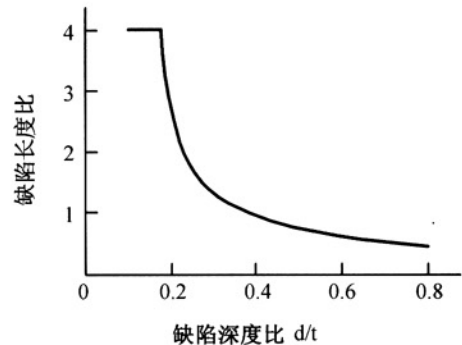


图 1 ASME B31G 确定的系数 B

从以上的推导可看出 B31G 存在着三点不足。

第一,腐蚀长度与工作压力无关。最大允许纵向腐蚀长度的计算式(11)和式(12)中,没有包含使

用压力和管道材料的参数,这意味着无论管道在何种压力下工作,以及管道的材质如何,只要满足最大允许纵向腐蚀长度准则,B31G 即认为管道可以继续服役,这显然不合理。

第二,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,或管道承受其它不可忽略的纵向载荷(如弯曲、温升伸长等)时,必须考虑纵向应力以及相应的环向缺陷。

第三,单个缺陷的评价。B31G 不考虑复合缺陷的相互影响,对复杂的缺陷构成没有相关的评价方法。

### 四、API 579 准则

API 579 按照缺陷类型分别进行评价,它考虑了相邻缺陷的相互影响和附加载荷的影响,为腐蚀缺陷的剩余强度评价提供了更为准确的方法,它建立了含有缺陷管道的剩余承压能力、缺陷的尺寸及有关材料强度参数三者之间的关系,避免了 B31G 的上述问题。API 579 把腐蚀缺陷分为均匀腐蚀、局部腐蚀和点蚀三类,对每一类都建立了三级评级体系。一级评价提供保守的评价和审查准则;二级评价提供一个更为详细的评价,得出的评价结果比第一种评价水平更精确;三级评价提供一个最详细的评价,得出的评价结果比第二种评价水平更准确。但 API579 只给出了一级和二级评价的评价流程和方法,建议三级评价采用有限元法或其他方法。在三类缺陷的界定上,API 579 也只给出了模糊的定义,因为 B31G 只对纵向缺陷进行评价,为便于对比,这里也只讨论纵向缺陷。

API 579 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  $t_{min}$ ,测量管道的最小壁厚  $t_{mm}$ ,确定管道的未来腐蚀裕量 FCA、计算剩余壁厚比  $R_t$  和剩余强度系数  $RSF$ ,再按照前述的应力计算原则进行评价。剩余强度系数  $RSF$  可表示为:

$$RSF = \frac{\sigma}{\sigma_f} \frac{1 - A/A_0}{1 - A/(A_0 M_t)} \quad (13)$$

剩余壁厚比  $R_t$ :

$$R_t = \frac{t_{mm} - FCA}{t_{min}} \quad (14)$$

式(14)上部为剩余有效壁厚,考虑在最不利的情况下,缺陷断面为矩形,则有:

$$R_t = \frac{t_{mm} - FCA}{t_{min}} = \frac{L(t_{mm} - FCA)}{L t_{min}}$$

$$= \frac{A_e}{A_{min}} \approx \frac{A_o - A}{A_o} = 1 - \frac{A}{A_o}$$

式中  $A_e$  —— 剩余有效面积;

$A_o$  —— 所需的最小面积。

代入式(13)可得:

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

$$M_t = \frac{1 - R_t}{1 - R_t/RSF} \quad (16)$$

#### 1、均匀腐蚀

API 579 是从 Krammer 的关系式(5)和式(6)出发得出缺陷长度的关系式,重写式(5)<sup>(7,12)</sup>:

$$0.001\ 236\ \lambda^4 - 0.379\ 7\ \lambda^2 + M_t^2 - 1 = 0$$

代入壳参数可以解得:

$$\frac{L^2}{D_i t} = 93 - \sqrt{93^2 - 296.74(M_t^2 - 1)}$$

经 Taylor 展开,取第一项:

$$\frac{L^2}{D_i t} = 1.595(M_t^2 - 1)$$

Taylor 展开与原解的差别见图 2,由此可知,只取一项时,Taylor 展开与原解的误差较大,所得的  $L$  值较小,偏于安全。上式开方得:

$$L = 1.263 \sqrt{M_t^2 - 1} \sqrt{D_i t}$$

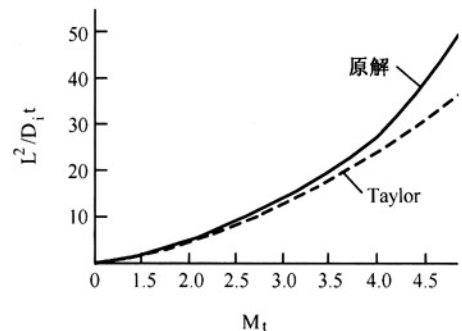


图 2 Taylor 展开与原解的差别

综合其它因素,API 579 实际按式(17)确定缺陷的允许长度:

$$L = 1.123 \sqrt{M_t^2 - 1} \sqrt{D_i t} \quad (17)$$

$M_t$  由式(16)确定,其中  $RSF$  采用允许剩余强度系数  $RSF_a$ ,一般取  $RSF_a = 0.9$ 。当  $R_t = 0.9$  时,取  $L/\sqrt{D_i t} = 50$ 。

$$M_i = \frac{1-R_i}{1-R_i/RSF_a} \quad (18)$$

## 2、局部腐蚀的一级评价

改写式(18)为剩余壁厚比的表达式,取  $RSF_a = 0.9$ ,  $M_i$  按 Eiber 的关系式取值,即:

$$R_i \geq RSF_a \frac{1-M_i^{-1}}{1-RSF_a/M_i} \quad (19)$$

$$M_i = (1+0.4845\lambda^2)^{1/2} \quad (20)$$

## 3、局部腐蚀的二级评价

当一级评价不满足时,API 579 对缺陷纵向划分从短到长的子域,再确定每一子域的  $RSF^i$ ,取最小的  $RSF^i$  作为管道的  $RSF$ ,当  $RSF \geq RSF_a$  时,评价通过。

其中  $RSF$  按式(13)计算,  $M_i$  按式(7)计算,上标  $i$  表示第  $i$  个子域,即:

$$RSF^i = \frac{1-A^i/A_0^i}{1-A^i/(A_0^i M_i^2)} \quad (21)$$

$$M_i = \left( \frac{1.02+0.4411(\lambda^i)^2+0.006124(\lambda^i)^4}{1.0+0.02642(\lambda^i)^2+1.533 \times 10^{-6}(\lambda^i)^4} \right)^{1/2} \quad (22)$$

虽然 API 579 考虑了缺陷的三个方向尺寸以及管道的受力情况,基本避免了 B31G 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中,式(21)确定的  $RSF$  只与结构参数有关,与管道受力无关。

(2) 缺陷 3 个方向的尺寸分别考虑,将缺陷从一个整体割裂开来。

(3) 均匀腐蚀、局部腐蚀与点蚀之间界定模糊。

## 五、对比分析

为便于对比分析,撇开复合复杂缺陷的形式,仅

$$\frac{L^2}{D_i t} \approx \frac{3.64 \times 10^{14} - 2.18 \times 10^{14} M_i^2 - 2.5 \times 10^5 \sqrt{1.85 \times 10^{18} + 1.3 \times 10^{16} M_i^2 + 7.55 \times 10^{15} M_i^4}}{2 \times (-8.35 \times 10^{12} + 2.09 \times 10^9 M_i^2)} \quad (28)$$

将式(25)代入式(28)后,开方得局部腐蚀二级评价的长度表达式。

### 3、数值对比

由式(23)、式(26)~式(28)确定的腐蚀长度与缺陷深度之间的无量纲关系见表 1。

与之相对应的缺陷长度比与缺陷深度比的无量纲曲线见图 3。图中曲线 API G1& L1 为 API 579 均匀腐蚀一级评价和局部腐蚀一级评价的曲线,因为两者相差在 5/1 000 以内,曲线几乎重叠;曲线

以简单的单一缺陷进行对比。由于 API 579 采用了均匀腐蚀和局部腐蚀两种缺陷描述方式,其间的界定较模糊,这两种腐蚀缺陷中除考虑纵向载荷关系外,均匀腐蚀的一二级评价过程和公式相同。对单一缺陷和单一荷载,均匀腐蚀的一二级评价结果相同,因此只列出均匀腐蚀的一级评价。这里先将应力或缺陷长度表达式写成统一的缺陷长度形式。

### 1、B31G

由式(12)和式(13)可得 B31G 的缺陷长度:

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

### 2、API 579

不计未来腐蚀裕量  $FCA$ , 式(14)中的  $R_i$  可写为:

$$R_i \approx 1 - d/t \quad (24)$$

已知剩余强度系数  $RSF_a$  为 0.9, 将式(24)代入式(18)得到:

$$M_i = \frac{d/t}{1.111 d/t - 0.111} \quad (25)$$

由式(17)、式(18)和 API 579 确定均匀腐蚀长度为:

$$\frac{L}{\sqrt{D_i t}} = 1.123 \sqrt{\left( \frac{d/t}{1.111 d/t - 0.111} \right)^2 - 1} \quad (26)$$

API 579 局部腐蚀的一级评价本身是按式(19)和式(20)进行的,即对缺陷的剩余壁厚比  $R_i$  进行评价,其中式(18)和式(19)是等价的,为便于对比,将式(18)和式(20)表示成缺陷长度的形式:

$$\frac{L}{\sqrt{D_i t}} = 1.118 \sqrt{\left( \frac{d/t}{1.111 d/t - 0.111} \right)^2 - 1} \quad (27)$$

由式(22)和式(3)可解得局部腐蚀二级评价的长度关系式:

API L2 为 API 579 局部腐蚀二级评价的曲线。

由表 1 和图 3 可以看出, B31G 具有较大的保守性,但与 API 579 相比, B31G 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,因此, B31G 比 API 579 的保守性更低。

对照式(23)和式(26)可以得出,式(26)中系数项为 1.123,与式(23)中 B31G 的系数项 1.12 相差不到 3/1000,而式(26)中根号内分母项却比式(23)中 B31G 中对应项大,超过 1%,导致式(26)的数值

最终小于式(23)的数值,即 API 579 均匀腐蚀允许的长度比小于 B31G 的长度比。同样可得 API 579

局部腐蚀一级评价的允许长度比也小于 B31G 的长度比。

表 1 最大允许缺陷长度与缺陷深度的关系

L/√Dt	d/t						
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
ASME B31G	2.997	1.493	1.064	0.840	0.694	0.587	0.502
API 579-G1	1.681	1.019	0.745	0.579	0.459	0.360	0.270
API 579-L1	1.674	1.014	0.742	0.574	0.457	0.359	0.269
API 579-L2	1.857	1.097	0.789	0.595	0.451	0.355	0.232

造成 API 579 在一定情况下比 B31G 更保守的原因是,在均匀腐蚀中为了得出简单的缺陷允许长度关系式,使用了一阶 Taylor 展开,只有当  $M_i$  和  $\lambda$  很小时,误差才会更小(见图 2)。其次,尽管采用了不同的 Folias 系数,但图 3 涉及的长度比较小,对应的壳参数也很小,这时 3 种 Folias 系数的数值较为接近。

参 考 文 献

- 1, API 579(2000), Recommended Practice For Fitness-For-Service, ISSUE6, 2000.
- 2, ANSI/ASME B31G—1991, Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipeline.
- 3, SY/T6151—1995, 钢管管道腐蚀损伤评价方法。
- 4, SY/T 6477—2000, 含缺陷油气输送管道剩余强度评价方法。
- 5, SY/T10048—2003, 腐蚀管道评估的推荐做法, 2003。
- 6, DNV, RP-F101-Recommended Practice for Corroded Pipelines, Det Norske, Veritas, 1999.
- 7, A. Keith Escoe, Piping and Pipelines Assessment Guide, New York, Elsevier, 2006.
- 8, Folias E S; On the Effect of Initial Curvature on Cracked Sheets, International Journal of Fracture Mechanics, 1969, 5(4).
- 9, Eiber R J, Maxey W A, Duffy A R and Atterbury T J; Investigation of the Initiation and Extent of Ductile Pipe Rupture, Battelle Report Task 17, June, 1971.
- 10, Kramer G S, Wilkowski G M and Maxey W A; Flaw Tolerance of Spiral Welded Pipe, Battelle NG-18 Report No. 154, Jan., 1987.
- 11, Kiefner J F and Vieth P H; Project PR 3-805, A Modified Criterion for Evaluating the Remaining Strength of Corroded Pipe, Battelle Report to the Pipeline Committee of the American Gas Association, 1989.
- 12, 方华灿; 油气长输管道的安全可靠分析, 石油工业出版社(北京), 2003。

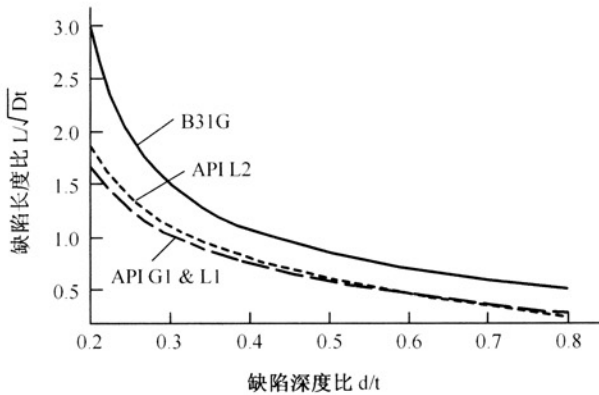


图 3 最大允许缺陷长度

六、结论及建议

(1) 传统认为过于保守的 B31G 评价方法,在单一载荷下所得的允许缺陷长度大于 API 579 的允许缺陷长度,这时 API 579 比 B31G 更保守。

(2) B31G 评价方法简单,在单一内压载荷和简单缺陷时,其保守性较 API 579 更低,建议在简单载荷、简单缺陷形貌及环向缺陷较小的情况下采用 B31G 进行评价,既简单又具有较低的保守性,因而经济性更好;由于 API 579 对复杂复合缺陷、环向缺陷都有详尽的评价方法,建议其他场合使用 API 579 进行评价。

(收稿日期:2006-12-14)

编辑:吕 彦

祝新老读者新年快乐!