

B31.G 腐蚀管道剩余强度评价比较分析

黄亚晖 周丽丽

中国市政工程中南设计研究总院,湖北 武汉 420102

摘要:

油气长输管道的腐蚀剩余强度评价一直是管道完整性管理的重要内容,国外在腐蚀管道的剩余强度评价方面已取得很大成就。详细说明了 ASME B31.G 管道腐蚀剩余强度评价方法及其各种改进方法,对其优缺点和保守性进行了分析,通过选取不同的腐蚀面积计算公式、膨胀系数计算公式,不同的流变应力进行计算,结果表明,膨胀系数 M 的选择对失效压力的影响很小;腐蚀面积计算方法的选择对失效压力的影响很大;不同的流动应力定义会得到不同的评价结果,相对于不同的膨胀系数 M 和不同的面积计算方法而言,不同的流动应力选择对评价结果的影响更大。

关键词:

B31.G; 腐蚀; 管道; 剩余强度

文献标识码:A

文章编号:1006-5539(2012)04-0062-05

0 前言

腐蚀管道的剩余强度评价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。1984年美国机械工程师协会颁布的 ASME B31.G-1984 是研究腐蚀管道剩余强度评价方面使用最广泛、最基本的评价方法之一,后又推出了 ASME B31.G-1991 方法修改版及改进的 RSTRENG 方法和最新版 ASME B31.G-2009 方法的分级评价方法。

1 AGA-NG18 方法

20世纪60年代末、70年代初,美国德克萨斯东方运输公司与美国天然气协会管道管理委员会联合开展了一项评定腐蚀管道可服役性的研究,技术上以 Battelle 纪念研究所哥伦布实验室所作的研究为基础,1971年7月10日发表了《确定管线中已腐蚀区域强

度的研究摘要》报告,即 NG-18,其爆破失效压力的表达式为^[1-2]:

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

$$A_0 = dL$$

式中 A_0 ——腐蚀长度内未腐蚀时的原始面积, mm^2 ;

L ——腐蚀缺陷的长度, mm ;

P ——腐蚀管道的失效压力, MPa ;

σ_{flow} ——流变应力, MPa ;

A ——腐蚀区域的面积, mm^2 ;

d ——腐蚀缺陷的最大深度, mm ;

t ——管壁公称厚度, mm ;

D ——管道公称外径, mm ;

M ——膨胀系数。

M 由式(2)计算:

收稿日期:

2012-01-05

作者简介:

黄亚晖(1984-),男,江西南昌人,助理工程师,硕士,主要从事天然气储运设计与管道剩余强度研究工作。

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

流动应力一开始被定义为: $\sigma_{flow} = 1.1SMYS$, SMYS 为规定的管材最低屈服强度。

膨胀系数 M 的确定很复杂, M_1 只适用于缺陷长度较短的情况。随着缺陷长度的增加, M 本应随之增加, 但是 M_1 在缺陷长度相当长时反而减小了, 与事实不符。为解决这个实际问题, Kiefner(1974年)推荐了一个改进的膨胀系数^[3-4]:

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

2 ASME B31.G 方法

最初的 NG-18 方法并不适用于缺陷长度的计算。而在 ASME B31.G 方法中, 由于引入了改进的膨胀系数 M_2 , 使其能适用于较长的缺陷长度计算, 但出现了失效压力预测方程不连续的情况。随后, 很多学者和研究机构通过实验发现 ASME B31.G-1984 方法过分保守, 所预测的失效压力远远低于实际压力, 预测结果虽然在设计上比较安全, 但在实际工程上造成了不必要的管道维修或更换^[5-6]。

由于 B31.G-1984 方法的保守性, 美国机械工程师协会于 1989 年着手进行了修正, 新标准于 1991 年 5 月 20 日发布, 随后得到美国国家标准学会的批准。

ANSI/ASME B31.G(ASME, 1991) 是评估腐蚀管道应用最广的方法。该方法最初是利用 Kiefner 和 Vieth 汇编的 86 个实验数据库对 NG-18 方法进行调整后形成的, 一般安全因子取值为 0.72。

该标准以下列假设为前提:

a) 最大圆周应力为管材的屈服强度;

b) 流变应力为 1.1 SMYS;

c) 利用投影面积 A 来表达腐蚀区域金属损失的面积; 对于缺陷长度较短时, 投影面积近似为抛物线形, 即 $2/3 dL$; 对于缺陷长度较长时, 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。

2.1 ASME B31.G-1991 方法

2.1.1 最大允许腐蚀深度的确定

对于管道腐蚀区域最大腐蚀深度大于管道公称壁厚的 10%, 但小于 80% 的腐蚀轴向长度的极限由下式计算:

$$L = 1.12B\sqrt{Dt} \quad (4)$$

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

式中 L ——腐蚀区域最大允许轴向长度;

B ——系数。

B 值最大不超过 4。如果腐蚀深度处在 10%~17.5% 之间, 则令 $B=4$ 。

2.1.2 腐蚀区域中最大可操作压力(MAOP)评估

如果被评价的腐蚀缺陷的轴向长度满足式(4)计算的值, 则应计算:

$$A = 0.893 \left(\frac{L}{\sqrt{Dt}} \right) \quad (5)$$

当 $A \leq 4.0$ 时:

$$P' = 1.1P \frac{1 - \frac{2}{3} \frac{d}{t}}{1 - \frac{2}{3} \frac{d}{t\sqrt{A^2+1}}} \quad (6)$$

式中 P' ——腐蚀管道最大安全压力;

P ——已确定的 MAOP 或由以下算得的设计压力 P , 两者中的较大值:

$$P = 2StFT/D \quad (7)$$

式中 S ——规定的最小屈服强度(SMYS);

F ——ASME B31.4、ASME B31.8 或 ASME B31.11 中的设计系数;

T ——B31 规范中的折减系数 (如果未列出, 则取 $T=1$);

当 $A > 4.0$ 时:

$$P' = 1.1P(1-d/t) \quad (8)$$

但是 P' 不得大于 P , 如果 $MAOP \leq P'$, 则腐蚀管道可在原来的 MAOP 压力下工作。如果 $MAOP > P'$, 就应重新确定不高于 P' 的较低 MAOP, 或者应对腐蚀区域进行补强或更换。

由于假设条件过于简单, B31.G 方法存在很多不足之处: a) 在最大腐蚀深度确定的条件下, 极限的腐蚀长度与工作压力的 高低无关, 最大容许腐蚀长度的确定没有考虑管道运行压力与管道材料参数, 即无论管道的材质和运行压力如何, 只要在最大的腐蚀深度相同的情况下, 所允许的最大腐蚀长度都是相同的, 但显然与事实不符; b) 最初阶段, 由于内检测技术只能给出管道的最大深度和长度, 而且只考虑管道受单一载荷的作用, 此时环向应力为轴向应力的 2 倍, 因此 B31.G 方法只对管道的轴向缺陷进行了评价, 忽略了环向缺陷; c) 将缺陷当作单个缺陷评价, 不考虑复合缺陷的相互作用方法对管道剩余强度的影响, 结果过于保守。

2.2 各种改进的 B31.G 方法

由于 B31.G 方法给出的结果较保守,为提高预测实际失效压力的时效性,准确计算腐蚀区域面积,放宽了流动应力的定义,提出了许多改进的 NG18/B31.G 方法。但这些修改内容大部分是针对方程参数的修改。对流动压力、 M 和 A 的修改 (Denys, 1995 年) 如下:

$$\sigma_{\text{flow}} = 1.1 \text{ SMYS} \quad (\text{B31.G 方法})$$

$$\sigma_{\text{flow}} = 1.15 \text{ SMYS}$$

$$\sigma_{\text{flow}} = 0.5 (\text{SMYS} + \text{SMTS})$$

$$\sigma_{\text{flow}} = \text{SMYS} + 69 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{flow}} = x \cdot \text{SMTS}, x = 0.90, 1.0, 1.1$$

SMTS 是规定的最小拉伸应力。

建议的腐蚀面积定义如下:

$$A = dL \quad (\text{长腐蚀})$$

$$A = 2/3 dL \quad (\text{短腐蚀})$$

$$A = 0.85 dL \quad (\text{RSTRENG } 0.85 dL)$$

A = 精确面积 (RSTRENG)

对因子 M 的各种定义, M_1 和 M_2 已在前面列出, M_3 是由 Vieth 和 Kiefner 为 RSTRENG 方法提出的。

$$M_3 = \sqrt{1 + \frac{2.51(L/2)^2}{Dt} - \frac{0.054(L/2)^4}{(Dt)^2}}, \frac{L^2}{Dt} \leq 50 \quad (9)$$

$$M_3 = 0.032 \times \frac{L^2}{Dt} + 3.3, \frac{L^2}{Dt} > 50 \quad (10)$$

RSTRENG 0.85dL 方法是 ASME B31.G 的一种改进方法,只需要腐蚀缺陷的最大深度和长度就能对腐蚀管道进行评价,但将 ASME B31.G 方法定义的流动应力值 $\sigma_{\text{flow}} = 1.1 \text{ SMYS}$ (B31.G 方法) 改进为 $\sigma_{\text{flow}} = \text{SMYS} + 69 \text{ MPa}$ 。面积计算方式改为 $A = 0.85 dL$,其计算得到的缺陷面积介于抛物线和矩形计算方法之间。这种面积计算方法比有效面积法简单,尽管计算精度低于有效面积法,但比保守的 ASME B31.G 方法有了很大改进。在 RSTRENG 0.85dL 中用 $A = 0.85 dL$ 取代 $A = 2/3 dL$,看上去腐蚀面积加大,似乎剩余强度的评价结果更保守,但因采用了改进的 $\sigma_{\text{flow}} = \text{SMYS} + 69 \text{ MPa}$ 和膨胀系数 M ,得到的爆破压力值相对于传统的 ASME B31.G 方法就不再保守了。

$$P = \frac{\sigma_{\text{flow}} 2t}{D} \left[\frac{1 - 0.85 \frac{d}{t}}{1 - 0.85 \frac{d}{t} \frac{1}{M}} \right] \quad (\text{RSTRENG } 0.85 dL) \quad (11)$$

式中 $\sigma_{\text{flow}} = \text{SMYS} + 69 \text{ MPa}$ 。

2.3 ASME B31.G-2009 方法

B31.G 方法能可靠地确定腐蚀管道的安全运行压力。B31.G 方法自发布以来虽然持续进行修改,但修改

都基于相同的理论模型,涉及面只限于若干参数的计算方法。随着 API 579 及其它腐蚀评价方法的不断发展,美国国家标准学会 (ANSI) 于 2009 年 7 月 10 日,对其进行了新的修改,提出了三级评价的方法。

一级评价:应用 B31.G-1984 或 B31.G-1991 方法对腐蚀管道的剩余强度进行评价,如果计算结果大于运行压力,则评价结束。

二级评价:应用 RSTRENG 有效面积法,即式 (1) 应用有效面积来确定腐蚀面积对腐蚀管道的剩余强度进行评价,如果计算结果大于运行压力,则评价结束。

三级评价:如果二级评价的计算结果都小于运行压力,则要进行有限元分析,并要考虑载荷、外力、边界条件、约束、变形、材料的应力—应变曲线等因素。

3 B31.G 及其改进方法的对比分析

上述 AGA-NG18、B31.G-1984、B31.G-1991、B31.G-2009 以及其它的 B31.G 方法改进模型,各具有相应的优缺点和保守性,因此有必要对多种模型的不同影响因子进行对比分析。

3.1 膨胀系数 M 的影响分析

不同 M 计算方法对于最终的腐蚀缺陷剩余强度结果有很大影响,图 1 为三种膨胀系数随腐蚀缺陷长度的变化曲线。从图 1 可看出,相同缺陷条件下, Kiefner (1974 年) 的 M_2 计算结果最大,相应的腐蚀管道失效应力 P 最保守。

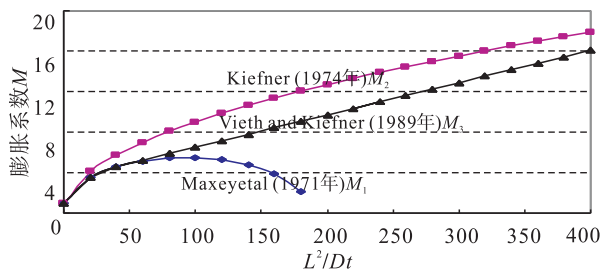
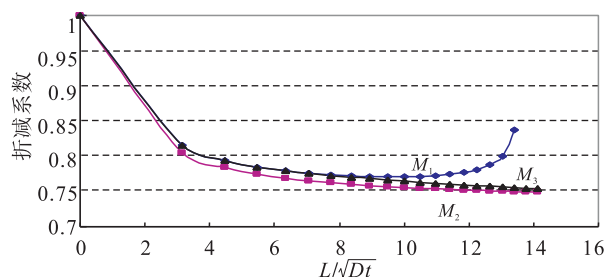
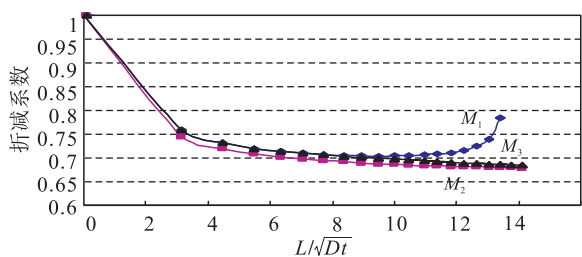
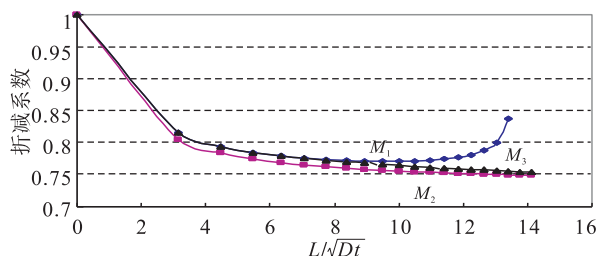
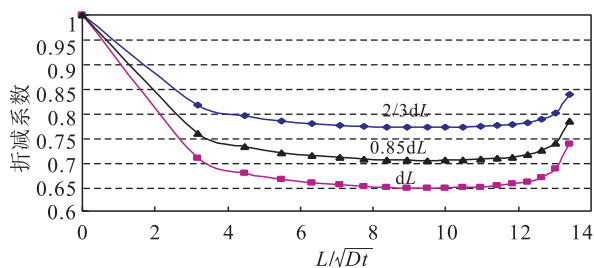
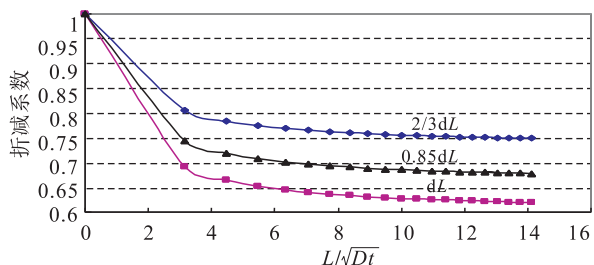
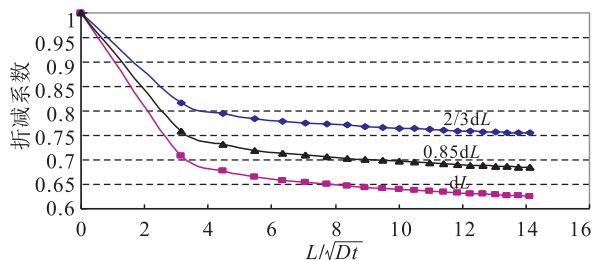


图 1 M 随腐蚀缺陷长度的变化曲线

3.2 腐蚀面积的影响

ASME B31.G-2007 推荐按照相应标准划分缺陷长度,针对长缺陷建议采用矩形 dL 计算投影腐蚀缺陷面积;针对短缺陷建议采用抛物线 $2/3 dL$ 计算投影腐蚀缺陷面积;而修正模型中 RSTRENG 建议采用 $0.85 dL$ 计算腐蚀缺陷投影面积。针对上述现有的三种腐蚀面积计算方法,分别计算其在不同的膨胀系数条件下的折减系数。分析图 2 可以发现,相同腐蚀计算面积条件下, Kiefner (1974 年) 的 M_2 折减系数最大,结果最为保守;不同的腐蚀计算面积条件下,三类方

a) 面积计算公式为 $2/3dL$ b) 面积计算公式为 $0.85dL$ c) 面积计算公式为 dL 图2 当 $d/t=0.4$ 时, 不同 M 计算折减系数变化a) M 计算公式为 M_1 b) M 计算公式为 M_2 c) M 计算公式为 M_3 图3 当 $d/t=0.4$ 时, 不同面积计算折减系数变化

法在腐蚀轴向长度大于一定临界值后,折减系数会发生突变。

图3为使用不同膨胀系数计算不同面积时,折减系数随腐蚀缺陷长度的变化。从图3可以发现,不同的面积计算公式对折减系数及腐蚀管道失效应力的影响很大,矩形 dL 计算投影腐蚀缺陷面积的结果最为保守,其保守程度随腐蚀轴向长度的增加而变大。

3.3 流变应力的影响

现有的管材等级主要包括 X42、X52、X65 和 X70,其抗拉强度和屈服强度具有很大的差异,而在剩余强度计算中,不同的流变应力 σ_{flow} 主要取决于抗拉强度和屈服强度的不同组合。

在管材条件相同情况下 ($D=323.9$ mm, $d=3$ mm, $t=10$ mm), 相同的面积计算方法 $0.85dL$ 和膨胀系数为 M_3 时,不同材质管道在不同流变应力下计算的剩余强度随腐蚀长度的变化,见图4。分析发现,在评价低等级钢材管道 X42、X52 时,评价结果最保守的是 $\sigma_{\text{flow}}=1.1$ SMYS (B31.G 方法), 但对于评价高等级钢材管道如 X65、X70 时, 评价结果最保守的却是 $\sigma_{\text{flow}}=0.9$ SMYS。

综上所述,针对影响腐蚀剩余强度的关键参数,即不同的膨胀系数、腐蚀面积计算方法和流变应力进行系统分析,得到各参数的影响范围和推荐的计算方法,结果如下:

a) 膨胀系数 M 的选择对失效压力的影响很小,但腐蚀面积计算方法的选择却对失效压力的影响很大。

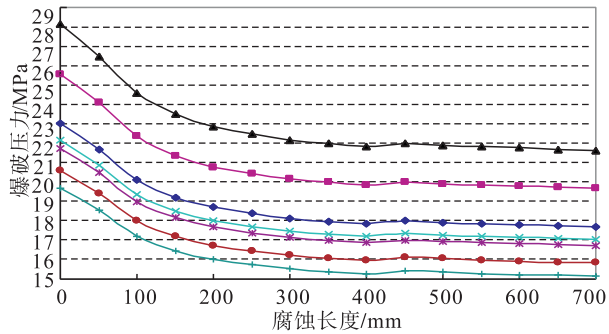
b) 不同的流变应力定义会得到不同的评价结果,相对于不同的膨胀系数 M 和不同的面积计算方法而言,不同的流变应力的选择对评价结果的影响更大。

c) 不同的 B31.G 改进方法修正模型具有不同的优缺点,其中 RSTRENG $0.85dL$ 由于改进了流变应力的计算方法,其结果的保守性在很大程度上有所降低,具有很强的使用性。

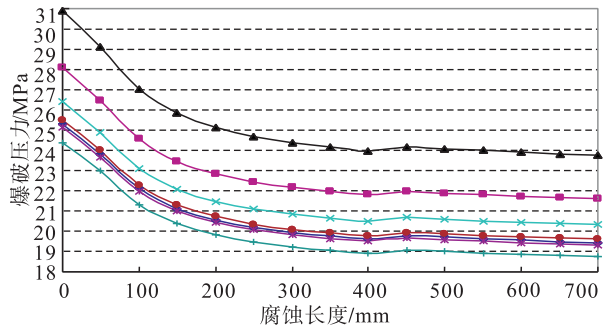
4 结论

详细阐述了 ASME B31.G 方法,以及各国学者和研究机构对 B31.G 方法的改进方向,根据不同腐蚀面积的计算方法,不同的流变应力和不同的膨胀系数的选择,对评价结果进行了比较,得出:

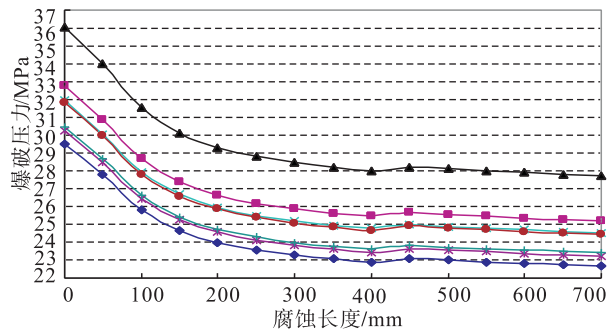
a) 膨胀系数 M 的选择对失效压力的影响很小,但



a) X42 材质管道计算结果



b) X52 材质管道计算结果



c) X65 材质管道计算结果

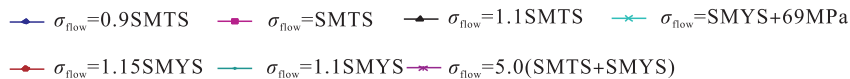
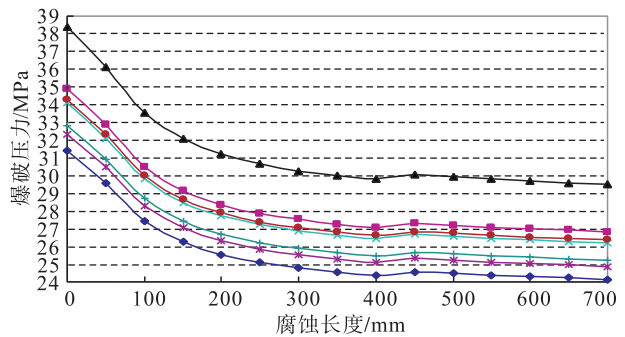


图4 不同材质、流应力下剩余强度的变化

腐蚀面积的计算方法的选择对失效压力的影响很大。

b)不同的流变应力定义会得到不同的评价结果,相对于不同的膨胀系数 M 和不同的面积计算方法而言,不同流变应力的选择对评价结果的影响更大。对低等级钢材管道,如X42、X52进行评价时,评价结果最保守的是 $\sigma_{\text{flow}}=1.1\text{ SMYS}$,但对高等级钢材管道,如X65、X70进行评价时,评价结果最保守的是 $\sigma_{\text{flow}}=0.9\text{ SMTS}$ 。

参考文献:

[1] 苏欣,潘亚东,章磊,等.油气管道完整性管理[J].天然

气与石油,2008,26(3):10-14.

- [2] 刘颖,廖柯焘,刘长林,等.含腐蚀缺陷管道的剩余强度评价方法[J].天然气与石油,2008,26(2):41-44.
- [3] 衣红兵,牟宗元.油田埋地管道防腐层检测方法[J].石油工程建设,2010,36(2):112-113.
- [4] 喻西崇,胡永全,赵金洲,等.腐蚀管道的剩余强度计算方法研究[J].力学学报,2004,36(2):281-285.
- [5] 何东升,张鹏,张丽萍.API 579与B31.G剩余强度评价的保守性分析[J].油气储运.2008,27(1):36-40.
- [6] Bjornoy O H, Marley M D. Assessment of Corroded Pipelines: Past, Present and Future, Proceedings of the Eleventh (2001) International Offshore and Polar Engineering Conference Stavanger, Norway, 2001, 17-22.