

# 含体积型缺陷油气输送管道 剩余强度评价软件开发及应用

张丽娜, 张楠, 马亚静, 张红

(中国石油集团渤海石油装备制造有限公司, 河北 沧州 062658)

**摘要:** 介绍一种依据 SY/T 6477—2014 标准开发的含体积型缺陷油气输送管道剩余强度评价软件, 并以某均匀腐蚀管线钢管为例, 运用该软件对其含缺陷剩余强度进行评价。该软件的核心计算模块由均匀腐蚀缺陷评价模块和局部腐蚀缺陷评价模块组成; 可逻辑判断缺陷类型及量化方法, 计算均厚长度、管道最大允许工作压力、许用剩余强度因子以及管道降压后最大允许工作压力。该软件具有计算结果准确、易操作、响应速度快的优点。

**关键词:** 管线管; 缺陷; 均匀腐蚀; 局部金属损失; 剩余强度

**中图分类号:** TG113.25\*1; TE931\*2 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-2311(2017)04-0037-04

## Development and Application of Residual Strength Evaluation Software for Oil & Gas Pipeline with Volumetric Defect

ZHANG Lina, ZHANG Nan, MA Yajing, ZHANG Hong

(CNPC Bohai Petroleum Equipment Manufacturing Co., Ltd., Cangzhou 062658, China)

**Abstract:** A residual strength evaluation software developed according to the standard SY/T 6477—2014 for oil and gas pipelines with volume defect is introduced and the residual strength of a uniformly corroded pipeline with the defect taken as an example is evaluated by the software. The core calculation module of the software is composed of a uniform corrosion defect evaluation module and a local corrosion defect evaluation module. The following work can be done with the software: logical judgment of the defect types and how to take its quantification, calculation of the length of the uniform thickness, calculation of the maximum allowable working pressure; calculation of the allowable residual strength factors and calculation of the maximum allowable working pressure after the pipeline decompression. The software is of such advantages as accurate result, easy operation and fast response.

**Key words:** line pipe; defect; uniform corrosion; local metal loss; residual strength

目前国内评价油气管道剩余强度, 使用的标准有 API 579—2007、SY/T 6477—2014《含缺陷油气输送管道剩余强度评价方法》。本文依照 SY/T 6477—2014 标准开发了含体积型缺陷油气输送管道剩余强度评价软件, 依据评价方法, 设置不同的计算模块, 通过逻辑运算, 得出体积型缺陷的最大允许工作压力  $MAWP$ , 从而评估管道的安全性能。最后使用该软件对某管道进行含体积型缺陷的剩余强度评价<sup>[1-14]</sup>。

张丽娜(1981-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事焊接钢管材料研究工作。

### 1 软件计算模型

含体积型缺陷油气输送管道剩余强度评价软件采用模块化设计, 主要由均匀腐蚀缺陷评价模块和局部腐蚀缺陷评价模块组成, 界面清晰, 易于操作。在评价其可接受性时, 如果要求的判据都满足, 则表明该损伤管道适用于目前的工作条件, 只要采取适当措施, 管道可以在当前工作条件下继续安全运行。如果评价结果表明损伤管道不适合当前操作条件, 则宜对该管道进行降级使用, 计算  $MAWP$ 。

依据 SY/T 6477—2014 标准, 该软件提供了两个级别的评价程序, 含体积型缺陷管道剩余强度评价流程如图 1 所示。从图 1 可以得出两个评价级别

的逻辑关系。一级评价使用的数据量少，计算过程简单，评价结果偏于保守；二级评价提供了更为详尽的评价程序，评价结果相对准确。评价一般从一级评价到二级评价的顺序执行。

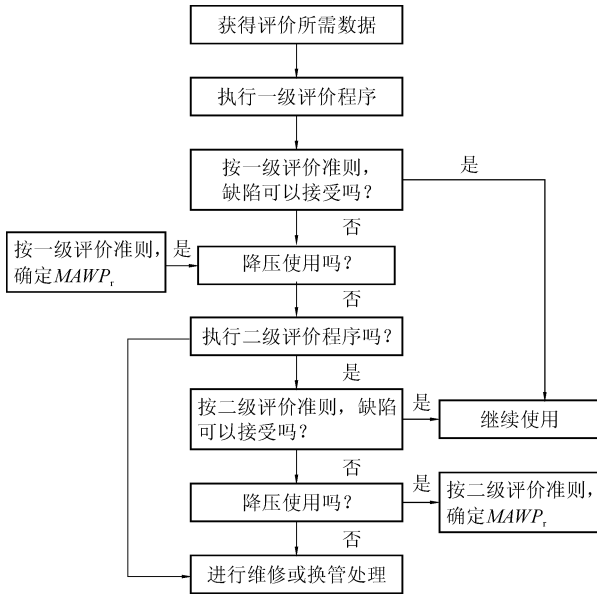


图1 含体积型缺陷管道剩余强度评价流程

1.1 均匀腐蚀缺陷评价模块

1.1.1 一级评价

(1) 计算最小要求壁厚  $t_{min}$ :

$$t_{min}^c = \frac{PR}{\sigma_y FE - 0.6P} \tag{1}$$

式中  $P$  —— 管道设计压力, MPa;  
 $R$  —— 管道平均半径, mm;  
 $\sigma_y$  —— 管材最小要求屈服强度, MPa;  
 $F$  —— 管道设计系数;  
 $E$  —— 焊缝系数;  
 $t_{min}^c$  —— 环向最小要求壁厚, mm。

$$t_{min}^l = \frac{PR}{2\sigma_y FE + 0.4P} + t_{sl} \tag{2}$$

式中  $t_{sl}$  —— 管道附加壁厚, mm;  
 $t_{min}^l$  —— 轴向最小要求壁厚, mm。

(2) 计算均厚长度  $L$ :

$$L = Q\sqrt{D_i(t-LOSS-FCA)} \tag{3}$$

式中  $t$  —— 公称壁厚, mm;  
 $Q$  —— 由剩余壁厚比  $R_1$  确定的系数;  
 $D_i$  —— 管道内径, mm;  
 $LOSS$  —— 管道均匀减薄厚度, mm;  
 $FCA$  —— 未来腐蚀裕量, mm。

若  $R_1 < RSF_a$ , 则:

$$Q = 1.123 \sqrt{\left[ \frac{(1-R_1)RSF_a}{RSF_a - R_1} \right]^2 - 1} \tag{4}$$

式中  $RSF_a$  —— 许用剩余强度因子, 一般取 0.9。

若  $R_1 > RSF_a$ , 则  $Q=50$ ,  $R_1$  为:

$$R_1 = \frac{t_{min} - FCA}{t - LOSS - FCA} \tag{5}$$

式中  $t_{min}$  —— 最小测量壁厚, mm。

(3) 若采用点测厚法, 取所有厚度测试结果的算术平均值作为平均厚度  $t_{am}$ , 并令  $t_{am}^s = t_{am}^c = t_{am} = t_{min}$ 。其中  $t_{am}^s$  为轴向平均厚度,  $t_{am}^c$  为环向平均厚度。

(4) 评价均匀腐蚀缺陷的可接受性, 若满足以下 3 个条件, 则均匀腐蚀缺陷可以接受; 反之则进入二级评价:  $t_{am}^s - FCA \geq t_{min}^c$ ;  $t_{am}^c - FCA \geq t_{min}^l$ ;  $t_{min} - FCA \geq \max(0.5t_{min}, t_{lim})$ ,  $t_{lim} = \max(0.2t, 2.5)$ 。其中  $t_{lim}$  为极限壁厚, mm。

1.1.2 二级评价

二级评价在一级评价的基础上进行, 若满足以下 3 个条件, 则均匀腐蚀缺陷可以接受:

$$\frac{t_{am}^s - FCA}{t_{min}^c} \geq RSF_a; \quad \frac{t_{am}^c - FCA}{t_{min}^l} \geq RSF_a; \quad t_{min} - FCA \geq \max(0.5t_{min}, t_{lim}), \quad t_{lim} = \max(0.2t, 2.5)$$

。其中  $RSF$  为剩余强度因子。

若均匀腐蚀缺陷未能通过二级评价, 宜采用: 降压使用, 重新确定  $MAWP$ ; 更换腐蚀管道。

1.2 局部腐蚀缺陷评价模块

1.2.1 一级评价

一级评价仅考虑内压作用, 评价过程中只使用  $t_{min}$  和体积型缺陷的长度  $s$  两个腐蚀缺陷数据。以下是不考虑附加载荷作用的条件下, 含局部腐蚀缺陷管道的评价程序。

首先检查缺陷极限尺寸, 如果满足以下条件, 则可计算  $MAWP$ , 否则缺陷不能通过一级评价:

$$R_1 = \frac{t_{min} - FCA}{t - LOSS - FCA} \geq 0.20; \quad t_{min} - FCA \geq 2.5 \text{ mm}$$

由  $\sigma_y$ 、 $F$ 、 $E$ 、 $t_{sl}$  和壳体系数  $\lambda$ , 可求得  $MAWP$ :

$$MAWP_c = \frac{\sigma_y FE(t - LOSS - FCA)}{R + 0.6(t - LOSS - FCA)} \tag{6}$$

$$MAWP_l = \frac{2\sigma_y FE(t - LOSS - FCA - t_{sl})}{R - 0.4(t - LOSS - FCA - t_{sl})} \tag{7}$$

$$MAWP = \min(MAWP_c, MAWP_l) \tag{8}$$

$$\lambda = \frac{1.285s}{\sqrt{D_i(t - LOSS - FCA)}} \tag{9}$$

缺陷轴向长度可接受评价如图 2 所示。

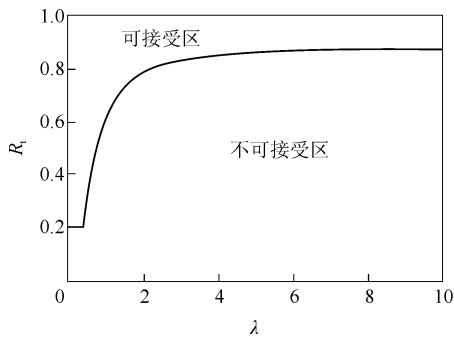


图 2 缺陷轴向长度可接受评价示意

将点 $(\lambda, R_i)$ 代入图 2 中，如果点 $(\lambda, R_i)$ 落在曲线上或者曲线上方，则该缺陷的轴向长度在当前运行压力下可以接受，否则该缺陷的轴向长度在当前运行压力下不可以接受。如果缺陷的轴向长度在当前运行压力下不可以接受，计算  $RSF$ ，如果  $RSF \geq RSF_a$ ，则该局部腐蚀在上述确定的  $MAWP$  下可以接受；如果  $RSF < RSF_a$ ，局部腐蚀在缺陷管道降压后的最大允许工作压力  $MAWP_i$  可以接受。

$$RSF = \frac{R_i M_i}{M_i - 1 + R_i} \quad (10)$$

$$M_i = \sqrt{1 + 0.48\lambda^2} \quad (11)$$

式中  $M_i$  —— 傅里叶因子。

$$MAWP_i = MAWP \frac{RSF}{RSF_a} \quad (12)$$

### 1.2.2 二级评价

二级评价中提供了比一级评价更好的评价剩余强度系数的方法。在一级评价中，对出现金属损失且承受内压的构件，如果其壁厚断面尺寸之间的差别不大，就计算剩余强度系数。而在二级评价中，考虑了金属损失区内、不同壁厚之间的局部加强效应。同时，也保证对最弱带的识别和适当的评价。该方法可直接用于评价几个靠得很近的局部金属损失区，以及附加载荷。局部金属损失区中，计算  $RSF$  所用面积的定义如图 3 所示。

$A_i$  为与长度  $i$  (交叉阴影面积) 相关的金属损失面积。该面积能够用数值积分法确定 (例如，辛普森法或梯形面积法)。在长方形中的面积  $A_i = s_i t_c$ 。

输入剩余壁厚最小的节点的剩余壁厚值  $t_{\min}$ ，以该节点为起始评估点。依次输入每一个子截面的金属损失长度  $s_i$ ，计算该截面的金属损失面积  $A_i$  和原始金属面积  $A_i^0$ 。然后计算该截面的剩余强度

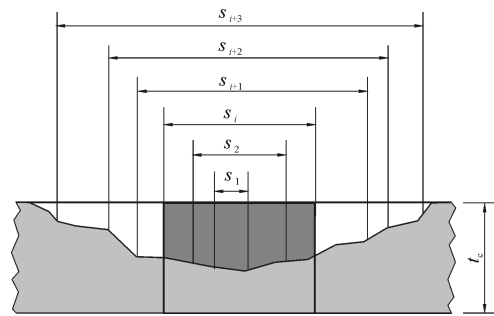


图 3 计算局部金属损失区中  $RSF$  所用面积的定义

因子  $RSF_i$ 。

$$RSF_i = \frac{M_i^i (A_i^0 - A_i)}{A_i^0 (M_i - A_i^0)} \quad (13)$$

$$M_i = \sqrt{\frac{1.02 + 0.441 \lambda_i + 0.006 \cdot 124 \lambda_i^4}{1.0 + 0.026 \cdot 42 \lambda_i^4}} \quad (14)$$

$$\lambda_i = \frac{1.285 s_i}{\sqrt{D_i t_c}} \quad (15)$$

$$t_c = t - LOSS - FCA \quad (16)$$

式中  $M_i$  —— 傅里叶因子；

$\lambda_i$  —— 壳体系数；

$t_c$  —— 中间参量。

输入该评估点所有数据后，找出计算得到的  $RSF_i$  的最小值，即为当前评估点的  $RSF$ 。然后对下一个评估点重复以上步骤。输入该管道所有评估点后，找出用于评价局部金属损失的  $RSF$  的最小值。最后评价轴向缺陷尺寸的可接受性，如果  $RSF \geq RSF_a$ ，该金属局部腐蚀在按照公式(6)~(8)所得的  $MAWP$  下可以接受；否则，该金属局部腐蚀在  $MAWP_i$  (公式 12) 下可以接受。

## 2 软件结构及功能原理

### 2.1 软件结构

该软件采用模块化设计模式以及三层结构模型。一层读取数据，二层逻辑运算，三层显示过程与结果<sup>[15]</sup>。剩余强度评价软件逻辑结构如图 4 所示。

### 2.2 软件功能原理

剩余强度评价软件能够从数据库读取或直接由用户输入数据，并统计分析；逻辑判断缺陷类型及量化方法；计算  $L$ 、 $MAWP$ 、 $RSF_a$  以及  $MAWP_i$ 。

当用户从数据库调取数据或者直接输入数据后，软件针对测试数据进行标准偏差与平均值之比的分析，判断腐蚀缺陷分类，确定进入均匀腐蚀缺陷评价模块还是局部金属腐蚀缺陷模块。随后进行

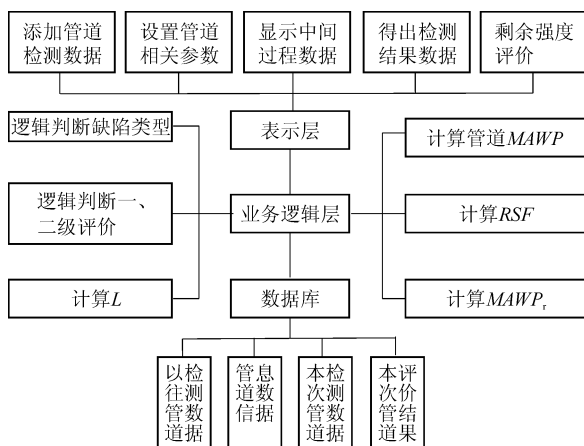


图4 剩余强度评价软件逻辑结构示意图

逻辑运算，运算结果满足一级评价要求，则腐蚀缺陷可以接受，否则进入二级评价进行更准确的评判。对于均匀腐蚀缺陷评价模块，当逻辑运算满足二级评价要求，则腐蚀缺陷可以接受，否则计算管道  $MAWP$ 。对于局部腐蚀缺陷评价模块，如果运算结果满足一级评价要求，则绘制缺陷轴向长度可接受评价曲线，判断缺陷点是否可以接受。曲线上或者上方的缺陷点在当前运行压力下是可以接受的，曲线下方的缺陷点在当前运行压力下是不可以接受的。但是可通过  $RSF_a$  与  $RSF$  的比值确定局部腐蚀是否能够在  $MAWP$  或者  $MAWP_i$  下接受，若不能接受则进入二级评价。二级评价原理相同于一级评价，但是二级评价是多点测量，通过  $R_i$  以及  $RSF$  的递增顺序排序进行逻辑比较运算。

### 3 功能应用

以某均匀腐蚀的管线钢管为例，运用该剩余强度评价软件对其进行评价。

设计条件：压力 3.85 MPa，内径 384 mm，公称壁厚 16 mm，金属损失 3 mm，未来腐蚀裕量 2 mm，X70 等级，焊缝系数 1.0。

通过剩余强度评价软件计算得出最小壁厚  $t_{\min}^c=10.13$  mm， $t_{\min}^l=4.90$  mm， $t_{\min}=10.13$  mm。

确定该管线钢管继续服役操作的可接受性：

因  $(t_{\min}^c - FCA = 10.07 \text{ mm}) \leq (t_{\min}^c = 10.13 \text{ mm})$ ， $(t_{\min}^c - FCA = 10.07 \text{ mm}) \geq (t_{\min}^l = 4.90 \text{ mm})$ ， $(t_{\min} - FCA = 8 \text{ mm}) \geq [\max(0.5t_{\min}, 2) = 5.06 \text{ mm}]$ ，不能完全满足一级评价的准则；因此，进行二级评价。

确定管道连续操作的可接受性：

因  $(t_{\min}^s - FCA = 10.07 \text{ mm}) \geq (RSF_a \cdot t_{\min}^c = 9.17 \text{ mm})$ ，

$(t_{\min}^c - FCA = 10.07 \text{ mm}) \geq (RSF_a \cdot t_{\min}^l = 4.41 \text{ mm})$ ， $(t_{\min} - FCA = 8 \text{ mm}) \geq [\max(0.5t_{\min}, 2) = 5.06 \text{ mm}]$ ，满足二级评价准则，即管道在当前运行压力下可接受。

### 4 结语

介绍了基于 VB6.0 和 IBM BladeCenterS 数据库平台开发的含体积型缺陷油气输送管道剩余强度评价软件，以及软件的计算方法、主要功能，并通过实例对软件进行测试。结果表明：软件逻辑性强，计算结果准确，易于操作，响应速度快，对提高含体积型缺陷管道的检测效率有较好推广前景。

### 5 参考文献

- [1] 李方圆. 含腐蚀缺陷管道的剩余强度评价方法[J]. 化工设备与管道, 2015, 52(5): 74-76.
- [2] The American Society of Mechanical Engineers. ASME B 31G—2009 Manual for determining the remaining strength of corroded pipeline[S]. 2009.
- [3] SY/T 6477—2014 含缺陷油气输送管道剩余强度评价方法[S]. 2014.
- [4] 刘颖, 刘长林. 含缺陷管道剩余强度评价方法探讨[J]. 焊管, 2008, 31(2): 82-85.
- [5] 刘海峰, 王毅辉. 在役油气压力管道腐蚀剩余强度评价方法探讨[J]. 天然气工业, 2001, 21(6): 90-92.
- [6] SY/T 6151—2009 钢质管道管体腐蚀损伤评价方法[S]. 2009.
- [7] SY/T 10048—2003 腐蚀管道评估的推荐做法[S]. 2003.
- [8] 冉龙飞, 王晓霖. 含体积型缺陷管道的剩余强度评价[J]. 石油化工高等学校学报, 2015, 28(1): 93-96.
- [9] 胡翻, 刘书海, 王德国. 油气管道数据管理与安全评价软件的开发[J]. 油气田地面工程, 2013, 32(4): 63-64.
- [10] 孙东旭, 赵玲, 吴明, 等. 油气管道完整性评价软件开发及应用[J]. 当代化工, 2015, 44(1): 89-92.
- [11] 宋汉成, 冯庆善, 王学力, 等. 管道完整性评价软件及其应用[J]. 管道技术与设备, 2012(6): 4-6.
- [12] 杨辉, 汤怡, 陈健, 等. 油气管道体积型腐蚀缺陷有限元分析[J]. 油气储运, 2015, 34(1): 37-40.
- [13] 陈星明. 油气管道体积型缺陷弹塑性有限元分析[J]. 煤气与热力, 2016, 36(4): 35-38.
- [14] 冯耀荣, 张平生, 李鹤林. 含缺陷油气管道的完整性与适用性评价[J]. 焊管, 1998, 21(3): 3-8.
- [15] 任玉鸿, 吴梦雨. 页岩气地面集输系统评价软件开发与应用[J]. 石油工业技术监督, 2015, 31(12): 51-54.

(收稿日期: 2017-04-27)