维普资讯 http://www.cqvip.com

第35卷第5期 四川大学学报(工程科学版) Vol.35 No.5
2003年9月 JOURNAL OF SICHUAN UNIVERSITY (ENGINEERING SCIENCE EDITION) Sept. 2003

文章编号:1009-3087(2003)05-0050-05

腐蚀管道剩余强度评价的基本方法

王春兰,张 鹏,陈利琼,姚建军
(西南石油学院 建筑工程学院,四川 成都 新都 610500)

摘 要:管道在长期的运行中不可避免会出现腐蚀,腐蚀缺陷的破裂是管道的主要失效形式。根据腐蚀管道的缺陷形貌将腐蚀分为均匀腐蚀、局部腐蚀和点蚀。采用双剪应力准则分析了腐蚀缺陷管道剩余强度的塑性极限承载能力,所建立的模型考虑了管道现场条件和室内爆破实验条件的差异,并提出了均匀腐蚀、局部腐蚀和点蚀管道剩余强度的分级评价方法和步骤,评价的精确性、评价所需数据资料的多少、评价人员的技能和完成评价分析的复杂性随级度的提高而增加。根据加拿大NOVA公司的爆破实验结果,可以验证该方法比美国ASME B31G和API579所推荐的方法更为接近于工程实际。

关键词:管道;剩余强度;腐蚀缺陷;分级评价
中图分类号:TH133 **文献标识码**:A

Methods for Assessment of Remaining Strength of Corroded Pipe

WANG Chun-lan, ZHANG Peng, CHEN Li-qiong, YAO Jian-jun
(School of Architecture and Civil Eng., Southwest Petroleum Inst., Chengdu 610500, China)

Abstract: The corrosion of pipe commonly appears during the pipe's long working time. The burst of corroded defects is the primary failure form of pipe. In the paper, the corrosion types was divided into general, local and pit corrosion according to defect's feature. The plastic limit carrying capacity of remaining strength of corroded pipe was analysed by use of twin shear stress criterion. The difference of condition between the local and the blast test of pipeline was considered in the model. Then, the methods and steps for graded assessment of remaining strength of pipe with general or local or pit defect was advanced respectively. Each assessment level provides a balance between conservation, the amount of information required for the evaluation, the skill of the personnel performing the assessment, and the complexity of analysis being performed. In terms of results of blast test of pipe conducted in NOVA company of Canada, the mothod is more close to engineering practice than the recommended practice in the ASME B31G and the API579 of America.

Key words: pipe; residual strength; corroded defect; graded assessment

目前国内在役的压力管道大部分将陆续进入事故高发期,不可避免地存在原始的或在使用过程中出现的各种各样的缺陷,如体积型缺陷,平面型缺陷。这些缺陷的存在会降低管道的强度,对管道的安全运行产生隐患[1-4]。限于财力、人力、物力,不可能也无必要对所有超标缺陷管道进行更换,因此,需要进行安全评估。管道剩余强度评价的目的就在于研究缺陷是否能在某一操作压力下允许存在,以及在某一缺陷下允许存在的最大工作压力。

管道剩余强度评价研究始于20世纪70年代,在长期的管道运营管理中建立了一套定期的常规监测和管道腐蚀剩余强度评价模型,各种类型的腐蚀检测工具广泛地用于各类管道中,用先进的装备技

收稿日期:2003-06-10
基金项目:四川省应用基础研究专项基金(01GY051-40);油气藏地质及开发工程国家重点实验室开放基金(PLN0113);石油科技中青年创新基金
作者简介:王春兰(1977-),女,硕士.研究方向:结构强度.

维普资讯 http://www.cqvip.com

术跟踪检查腐蚀状况，并建立数据库，以此来判定管段的报废决策。美国最早建立的 ASME/ANSI B31G "腐蚀管道剩余强度的简明评价方法"规范[5]，可用于处理单片腐蚀对管道承压能力的影响，但该规范因简化和假设条件的不足而过于保守，低估了腐蚀管道的极限承压能力。后来针对 B31G 的保守性，在进一步研究的基础上，形成了美国石油协会《服役适用性评价推荐做法》API 579[6]。这些方法都从理论上对腐蚀缺陷进行了剩余强度的评价，得到一些实际应用，保证了管道的安全运行。

我国长距离输油管道运行时间已接近设计使用寿命，管道大修改造过程已发现了大量的腐蚀缺陷，1995 年制定了《钢质管道管体腐蚀损伤评价方法》的标准[7]。但由于国内检测技术未跟上，腐蚀管道基本属于事后维修，目前研究成果基本属于局部的和零散的，适用标准和条件不统一，评价思想不具备体系完整性，更无法与国际先进标准接轨。

管道剩余强度评价技术已经在实际中得到一些应用，但仍是一个发展中的技术，目前存在以下几个主要难题：1）如何对体积型缺陷提出一种既不过分保守又比较安全可靠的评价方法；2）如何对体积型缺陷进行概率失效评价；3）如何对氢鼓泡和氢致开裂弥散损伤型缺陷进行剩余强度评价。

作者按照腐蚀缺陷的类型，分别对均匀腐蚀、局部腐蚀和点蚀剩余强度进行分级评价。

1　均匀腐蚀缺陷剩余强度分级评价

1.1　均匀腐蚀缺陷的一级评价

均匀腐蚀剩余强度评价基本过程，如图 1 所示。

第 1 步，确定下列参数，D 为管道的直径，L_m 为均匀腐蚀缺陷的轴向长度，t_{mm} 为最小测量壁厚，FCA 为设计的未来腐蚀裕量，许用剩余强度系数为 RSF_a。许用应力 S。

第 2 步，计算允许的最小要求壁厚。

$$t_{min}^{C} = \frac{PD}{2SE_W} \tag{1}$$

$$t_{min}^{L} = \frac{\beta PD}{4SE_W} \tag{2}$$

$$t_{min} = \max(t_{min}^{C}, t_{min}^{L}) \tag{3}$$

第 3 步，确定轴向腐蚀的极限长度 L。

剩余壁厚比：$R_t = \dfrac{t_{mm} - FCA}{t_{min}}$ (4)

应用双剪屈服塑性极限条件，可以确定轴向允许的最大缺陷长度。

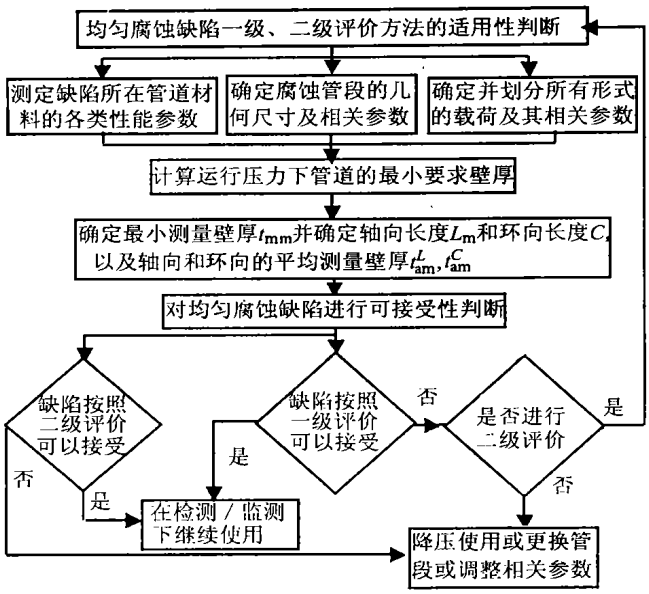


图 1　均匀腐蚀缺陷管道剩余强度评价过程

Fig. 1　Residual strength assessment procedure for general corroded pipe

$$L = \begin{cases} 1.123\left[\left(\dfrac{1-R_t}{1-\dfrac{R_t(1+\frac{\beta}{4}RSF_a)}{RSF_a}}\right)^2 - 1\right]^{1/2} \cdot \sqrt{Dt_{min}}, \\ \qquad R_t < \dfrac{4RSF_a}{4+\beta RSF_a}; \\ 50\sqrt{Dt_{min}}, \qquad R_t > \dfrac{4RSF_a}{4+\beta RSF_a} \end{cases} \tag{5}$$

第 4 步，轴向腐蚀缺陷的可接受性评价。如果 $L_m \leqslant L$，那末，轴向腐蚀缺陷可以接受，如果 $L_m > L$，则计算轴向的平均剩余壁厚 t_{am}。

第 5 步，使用下列准则之一，可以确定腐蚀管道继续服役的可接收性：

1）测量的剩余壁厚值应当同时满足下列两个壁厚准则。

$$t_{am} - FCA \geqslant t_{min} \tag{6}$$

$$t_{mm} - FCA \geqslant \max[0.5t_{min}, 2.5\,\text{mm}] \tag{7}$$

2）按照（$t_{am} - FCA$）计得出的厚度计算出的 $MAWP_r$ 大于或等于原设计的 $MAWP_0$。

$$MAWP_r^{C} = \frac{2SE_W(t_{am} - FCA)}{D} \tag{8}$$

$$MAWP_r^{L} = \frac{4SE_W(t_{am} - FCA)}{D} \tag{9}$$

$$MAWP_r = \min(MAWP_r^{C}, MAWP_r^{L}) \tag{10}$$

同时

$$t_{mm} - FCA \geqslant \max[0.5t_{min}, 2.5\,\text{mm}] \tag{11}$$

维普资讯 http://www.cqvip.com

第6步,如果腐蚀缺陷不满足1级的评价,采取以下措施或其组合:1) 对该构件进行降压再评价、修理、更换;2) 通过补救措施调整 FCA 值和焊缝系数 E_W;3) 进行二级评价。

1.2 均匀腐蚀缺陷的二级评价

二级评价为受内压和轴向载荷及弯曲载荷的腐蚀管道提供更好的评价方法,评价思路与一级评价相似,第1步到第4步与一级评价相同,只是在计算最小要求壁厚时考虑外载荷引起的附加壁厚:

$$t_{sl} = \frac{F}{SE_W\pi D} + \frac{4M_x}{SE_W\pi D^2} \tag{12}$$

第5步,使用下列准则之一确定腐蚀管道继续操作的可受性。

1) 测量的平均壁厚应同时满足下列准则:

$$t_{am}^L - FCA \geq RSF_a \cdot t_{min}^C \tag{13}$$

$$t_{am}^C - FCA \geq RSF_a \cdot t_{min}^L \tag{14}$$

最小测量壁厚 t_{mm} 应满足下列壁厚准则:

$$t_{mm} - FCA \geq \max[0.5\,t_{min}, 2.5\,\text{mm}] \tag{15}$$

2) 按照$((t_{am} - FCA)/RSF_a)$计得出的厚度计算出的 $MAWP_r$ 大于或等于 $MAWP_0$:

$$MAWP_r^C = \frac{2SE_W(t_{am}^L - FCA)}{DRSF_a} \tag{16}$$

$$MAWP_r^L = \frac{4SE_W(t_{am}^C - FCA - t_{sl})}{DRSF_a} \tag{17}$$

$$MAWP_r = \min(MAWP_r^C, MAWP_r^L) \tag{18}$$

测量的最小壁厚 t_{mm} 应满足下列壁厚准则:

$$t_{mm} - FCA \geq \max[0.5\,t_{min}, 2.5\,\text{mm}] \tag{19}$$

第6步,如果缺陷不满足2级评价,采取以下措施:1) 重新评价、修理、替换或使构件退役;2) 通过补救方法和措施来调整 FCA 和焊缝系数 E_W;3) 三级评价。

1.3 均匀腐蚀缺陷的三级评价

三级评价是最高水平和最复杂的评价,这级评价采用保守性最小的判据、最为详细的检测信息和设备服役数据,整个过程完全建立在定量分析的基础上,如应力分析采用有限元方法。

2 局部腐蚀缺陷的剩余强度评价

局部腐蚀剩余强度评价的基本过程如图2所示,整个评价过程都是建立在双剪屈服条件基础上的,二级评价比一级评价要复杂但精确得多。

2.1 局部腐蚀缺陷剩余强度一级评价

第1步,确定下列参数,D 为管道的内径,L_m 为均匀腐蚀缺陷的轴向长度,t_{mm} 为最小测量壁厚,FCA 为设计的未来腐蚀裕量,缺陷到最近的管道连接处的距离为 L_{msd},如果是沟槽状的腐蚀缺陷,还需确定缺陷的基部半径 g_r。

第2步,计算允许的最小要求壁厚 t_{min}。方法与均匀腐蚀缺陷一级评价中的计算相同。

第3步,计算剩余壁厚比 R_t 和管壁参数 λ。

$$R_t = \frac{t_{min} - FCA}{t_{min}} \tag{20}$$

$$\lambda = \frac{1.285L_m}{\sqrt{Dt_{min}}} \tag{21}$$

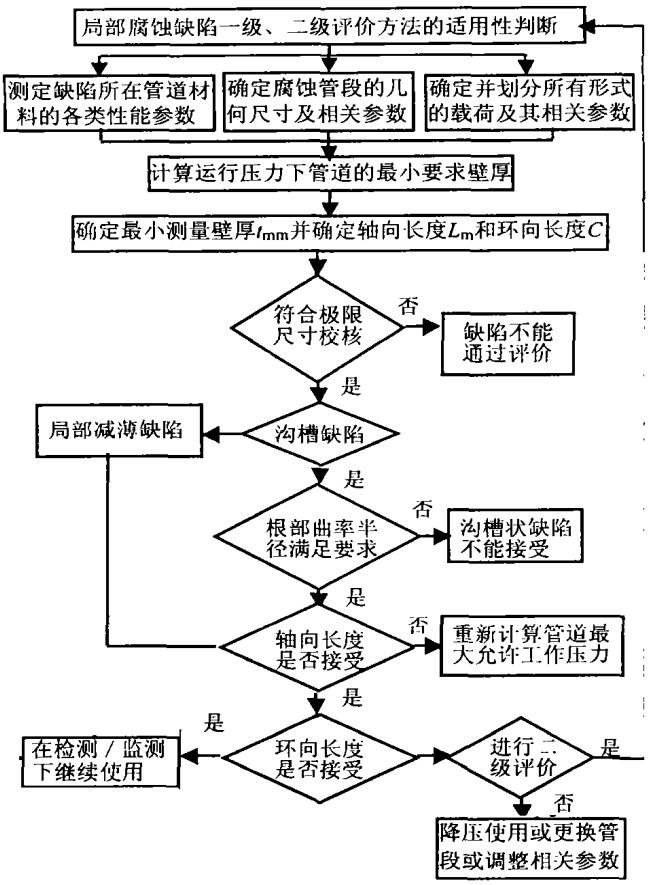


图2 局部腐蚀缺陷管道剩余强度评价过程

Fig.2 Residual strength Assessment procedure for local corroded pipe

第4步,限定的缺陷尺寸的校核:如果满足下列要求,就进行第5步。否则,按1级评价,此缺陷不可接受。

$$R_t \geq 0.20 \tag{22}$$

$$t_{min} - FCA \geq 2.5\,\text{mm} \tag{23}$$

$$L_{msd} \geq 1.8\sqrt{Dt_{min}} \tag{24}$$

第5步,如果金属损失区可以分类为一个 LTA(在 LTA 中不存在沟槽型腐蚀)。那末,就进入第6步。否则对沟槽形缺陷按下述准则校核:

计算临界半径: $g_r^c = \max[0.25\,t_{min}, 6.4\,\text{mm}]$ (25)

如果满足下述两方程,就进入第6步。否则,按1级

维普资讯 http://www.cqvip.com

评价，此缺陷不可接受。

$$g_r > g_r^c \tag{26}$$

$$\frac{g_r}{(1 - R_t)t_{min}} \geq 1.0 \tag{27}$$

第6步，用求得的 λ 和 R_t 值，在图3中作图。如果点 (λ, R_t) 落在图中曲线的上方或左侧，则缺陷的轴向长度 L_m 是可以接受的，反之，则缺陷的轴向上度 L_m 是不可以接受的，但可以用以下公式重新计算管道的最大允许工作压力 $MAWP_r$。

$$RSF = \frac{R_1}{1 - \frac{1}{M}(1 - R_1) - \frac{\beta}{4}R_1} \tag{28}$$

其中：$M = (1 + 0.48\lambda^2)^{0.5}$ (29)

则，$MAWP_r = MAWP_0 \frac{RSF}{RSF_a}$ (30)

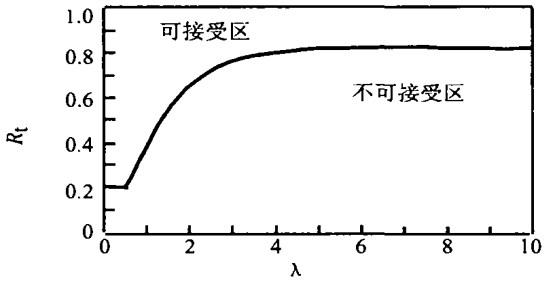


图 3　腐蚀缺陷轴向尺寸 L_m 的可接受性判据

Fig.3 Acceptance criteria for longitudinal size of corrosion defect

第7步，缺陷环向长度 C 可接受性判据。用计算的 C/D 和 R_t 值，在图4中作图。如果点 $(C/D, R_t)$ 落在图中曲线的上方或左侧，则缺陷的轴向长度 C 是可以接受的，管段能够继续使用；反之。则不可以接受，须降压使用或更换腐蚀管段。

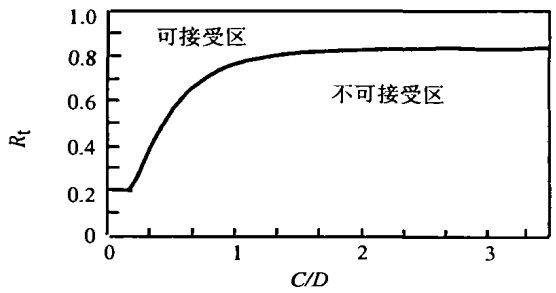


图 4　腐蚀缺陷环向尺寸 C 的可接受性判据

Fig.4 Acceptance criteria for circumferential size of corrosion defect

第 8 步，如果腐蚀缺陷不满足 1 级的评价，采取以下措施或其组合：1）对该构件进行降压再评价、修理、替换或退役；2）通过补救措施和方法来调整 FCA 值和焊缝系数 E_W；3）进行二级评价。

2.2　局部腐蚀缺陷剩余强度二级评价

局部腐蚀缺陷二级评价为受内压和轴向载荷及弯曲载荷的腐蚀管道提供更好的评价方法，评价思路与一级评价相似，第 1 步到第 5 步与一级评价相同，只是在计算最小要求壁厚时考虑由于外载荷引起的附加壁厚。附加载荷用公式(12) 计算。

第 6 步，根据轴向临界壁厚断面图确定剩余强度系数。在壁厚断面重新分组的基础上，计算每次评价点的剩余强度系数，在所有的剩余强度系数中取最小者即为评价的剩余强度系数。

$$RSF^i = \frac{1 - \left(\frac{A^i}{A_0^i}\right)}{1 - \frac{1}{M_t^i}\left(\frac{A^i}{A_0^i}\right)}\left(1 - \frac{\beta}{4}\frac{1 - \left(\frac{A^i}{A_0^i}\right)}{1 - \frac{1}{M_t^i}\left(\frac{A^i}{A_0^i}\right)}\right)^{-1} \tag{31}$$

其中，$M_t^i = (1 + 0.48\lambda_i^2)^{0.5}$ (32)

$$A_0^i = L_m^i \times t_{min} \tag{33}$$

$$\lambda_i = \frac{1.285L_m^i}{\sqrt{Dt_{min}}} \tag{34}$$

A^i 为评估区的损失面积，A_0^i 为评估区的原始金属面积，L_m^i 为评估区域金属的长度。

如果计算的 RSF 值小于设计允许的 RSF_a 值，则该设备不能再继续使用，反之，则可以继续使用。

第 7 步，对于环向腐蚀缺陷长度的评价，在受到内压、轴向载荷和弯曲载荷的联合作用下，计算腐蚀后管壁的剩余面积上受到的轴向和环向应力，采取形状改变比能条件进行评价。

$$\sqrt{\sigma_{cm}^2 - \sigma_{cm}\sigma_{lm} + \sigma_{lm}^2} \leq S \tag{35}$$

其中，σ_{lm} 为轴向最大应力，σ_{cm} 为环向最大应力。

第 8 步，如果缺陷没能通过二级评价，采取以下措施：1）重新评价、修理、替换或退役；2）通过补救方法和措施来提高 FCA 和焊缝系数 E_W；3）进行三级评价。

2.3　局部腐蚀缺陷剩余强度三级评价

与均匀腐蚀缺陷三级评价的思想相同。

3　点蚀的剩余强度评价

3.1　点蚀的一级评价

点蚀剩余强度评价的基本过程如图 5 所示。

第 1 步，确定下列参数，D 为管道的内径，RSF_a 为许用剩余强度系数。

第 2 步，确定最小要求壁厚 t_{min}。

第 3 步，确定点蚀对的的平均深度 $\overline{W}_{avg}$，点蚀的

维普资讯 http://www.cqvip.com

平均直径 d_{avg} 和点蚀对之间的平均间距 P_{avg}。

第4步,计算剩余强度系数。

$$E_{avg} = \sqrt{3}\mu_{avg}/2 \tag{36}$$

$$\mu_{avg} = \frac{P_{avg} - d_{avg}}{P_{avg}} \tag{37}$$

$$RSF = \min\left[\left\{1.0 - \frac{\overline{w}_{avg}}{t_{min}} + \frac{E_{avg}(t - FCA + \overline{w}_{avg} - t_{min}}{t_{min}}\right\}, 1.0\right] \tag{38}$$

第5步,按照点蚀类型分别进行评价。

第6步,对单个点蚀进行评价。

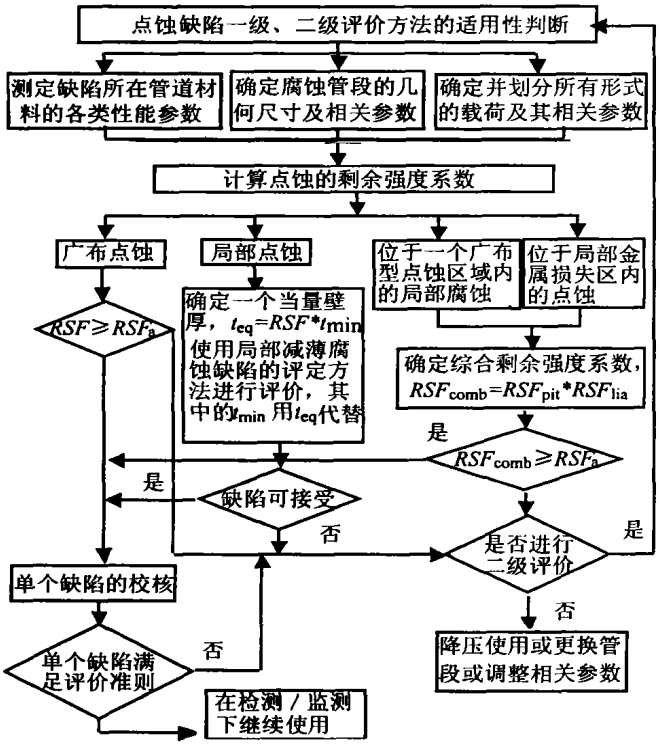


图5 点蚀的剩余强度评价过程

Fig.5 Residual strength Assessment procedure of pitting corroded pipe

对点蚀的直径,应满足方程(39)。

$$d \leq L \tag{39}$$

其中,L 是轴向极限长度,用公式(5)计算。

对于点蚀的深度,推荐使用临界剩余壁厚比。

$$R_t \geq 0.20 \tag{40}$$

第7步,如果腐蚀缺陷不满足1级的评价,采取以下措施或其组合:1)对该构件进行降压再评价、修理、替换或退役;2)通过补救措施和方法来调整 FCA 和焊缝系数 E_W;3)进入2级评价。

3.2 点蚀的二级评价

点蚀缺陷的二级评价与一级评价相同,其中剩余强度系数用下面的方法确定。

计算管壁薄膜应力:$\sigma_1 = \frac{PD}{2E_W t_c}$ (41)

$$\sigma_2 = \frac{\beta PD}{4E_W t_c} \tag{42}$$

用式(38)计算每个点蚀对的剩余强度系数。

其中:$E_{avg,k} = \min[\phi_k/\sqrt{\varphi_k}, 1.0]$ (43)

$$\Phi_k = \mu_{avg,k} \cdot \max[|\rho_{1,k}|, |\rho_{2,k}|, |\rho_{1,k} - \rho_{2,k}|] \tag{44}$$

$$\Psi_k = (\cos^4\theta_k + \sin^2 2\theta_k)(\rho_{1,k})^2 - \frac{3(\sin^2\theta)\rho_{1,k}\rho_{2,k}}{2} + (\sin^4\theta_k + \sin^2 2\theta_k)(\rho_{2,k})^2$$

$$\rho_{1,k} = \frac{\sigma_1}{\mu_{avg,k}} \tag{46}$$

$$\rho_{2,k} = \frac{\sigma_2}{\mu_{avg,k}} \tag{47}$$

$$\mu_{avg,k} = \frac{P_k - d_{avg,k}}{P_k} \tag{48}$$

确定用于评价的剩余强度系数:

$$RSF = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} RSF_k \tag{49}$$

3.3 点蚀的三级评价

与均匀腐蚀缺陷的三级评价思想相同。

4 结 论

腐蚀管道剩余强度评价技术是建立在弹塑性力学和断裂力学基础上的,其显著的社会经济效益已在一些工业发达的国家得到证实。目前,我国在腐蚀管道剩余强度评价方面虽然已有研究,应在以下几个方面进一步深入研究:

1)用有限元方法研究腐蚀管道的剩余强度,应该考虑更复杂的情况,如正确的考虑轴向载荷和弯曲载荷及其联合作用下以及更复杂的腐蚀形状等;

2)进一步研究在内压和附加载荷联合作用下环向腐蚀缺陷的剩余强度评价。

参考文献:

[1]潘家华.油气储运论文集[M].北京:石油工业出版社,1993.
[2]赵新伟,路民旭,白真权,等.管线腐蚀剩余强度评价研究现状及发展趋势[J].石油专用管,1997,4:9~14.
[3]赵新伟,白真权,路民旭,等.在役输气管道腐蚀特点及典型腐蚀类型探索[J].石油专用管,1998,3:47~51.
[4]张 鹏.油气长输管线的安全性、可靠性和风险技术的研究策略[J].质量可靠性研究与探讨,2000,16(9):5~8.
[5]ANSI/ASME B31G. Manual for determining the remaining strength of corroded pipeline[R].1991.
[6]ISSUE6,API-579.Fitness-for-Service[R].2000.
[7]SY/T6151.钢质管道管体腐蚀损伤评价方法[R].1995.

(编辑 黄小川)