

含腐蚀缺陷油气管道评价技术研究进展

黄坤^{1a,1b}, 吴佳丽^{1a}, 全恺², 孔令圳^{1a,1b}

(1.西南石油大学 a.石油与天然气工程学院 b.油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500;
2.中石化川气东送天然气管道有限公司, 武汉 430020)

摘要: 由于外部环境及输送介质的影响, 油气管道在运行过程中不可避免地会出现腐蚀缺陷, 腐蚀处会产生应力集中的现象, 从而削弱管道的承压能力。因此, 必须对含腐蚀缺陷的管道进行剩余强度及剩余寿命评价, 评价结果可以为缺陷管线的维修计划提供重要依据。综述了国内外主要的腐蚀缺陷管道评价规范, 分析了不同规范的适用范围。从单个腐蚀和群腐蚀两个方面展开论述, 归纳了含腐蚀缺陷管道评价技术的最新研究进展, 并介绍了目前的研究热点——群腐蚀缺陷管道剩余强度评价方法以及腐蚀缺陷间相互影响准则 (interaction rule)。另外, 论述了目前腐蚀管道剩余寿命预测的常用方法, 包括灰色预测法以及可靠度函数分析法。最后, 总结了腐蚀缺陷管道评价技术研究进展, 并对未来的研究工作提出了展望。

关键词: 腐蚀管道; 剩余强度; 复杂腐蚀; 相互作用准则; 剩余寿命; 灰色预测法; 可靠度分析

中图分类号: TG171 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)01-0116-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.01.018

A Review on Evaluation Technology of Oil-Gas Pipelines with Corrosion Defect

HUANG Kun^{1a,1b}, WU Jia-li^{1a}, QUAN Kai², KONG Ling-zhen^{1a,1b}

(1. a. School of Petroleum Engineering, b. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Sinopec Sichuan to East Gas Pipeline Co. Ltd, Wuhan 430020, China)

ABSTRACT: Due to effects of external environment and transmission medium, oil-gas pipelines will inevitably be corroded during the process of operation. Intensive stress appears in corroded parts, which may impair loading capacity of pipelines. Therefore, residual strength and residual life must be evaluated for corroded pipelines, the evaluation results can provide vital basis for maintenance schedule of defective pipelines. First, major evaluation standards for corroded pipelines at home and abroad were summarized, and application scope of these standards was analyzed. Discussion was completed from the aspects of single corrosion and multiple corruptions. Recent research progress of corroded oil-gas pipeline evaluation technology was concluded, and current research highlights-remaining strength evaluation methods of pipelines subject to multiple corrosion defects and interaction rule between corrosion defects were introduced. Besides, popular methods of predicting residual life of corroded pipelines, including gray forecasting method and reliability function analysis method were reviewed. In the end, research progress of corroded oil-gas pipeline evaluation technology was concluded and future study prospects were proposed.

KEY WORDS: corroded pipeline; residual strength; complex corrosion; interaction rule; residual life; grey forecasting method; reliability analysis

收稿日期: 2017-07-15; 修订日期: 2017-10-17

Received: 2017-07-15; Revised: 2017-10-17

基金项目: “十三五”国家重点专项 (2016YFC0802100); 中国工程院咨询研究项目 (2015-XZ-37)

Fund: Supported by National Key Project (2016YFC0802100), Consultancy Project of Chinese Academy of Engineering (2015-XZ-37)

作者简介: 黄坤 (1965—), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为油气储运设施安全技术。

Biography: HUANG Kun (1965—), Male, Master, Professor, Research focus: security control of oil & gas storage and transportation facilities.

从 20 世纪 30 年代开始，由于成本低、机械性能好，碳钢开始作为原材料被用于制造油气输送管道。然而，碳钢管道不可避免地会受到腐蚀^[1]。腐蚀将造成管道壁厚的减薄、管壁强度的降低或者应力集中，严重时会造成管道泄漏或爆炸，不仅影响油气管线的正常输送，甚至会威胁人民群众的生命财产安全和生态环境。为了减少腐蚀造成的事故，需要预测整个管道的腐蚀情况，确定腐蚀对管道结构完整性的危害程度。因此，评价含腐蚀缺陷管道的剩余强度，预测其剩余寿命，确保管道在服役期限内的安全使用具有重要意义。

1 腐蚀缺陷管道评价规范

从 20 世纪 60 年代末开始，世界范围内的学者专家们进行了大量关于腐蚀管道失效行为和失效评估的研究。在这些理论和实验研究的基础上，制定出了多个评价腐蚀管道性能的标准和规范，如表 1 所示。较经典的有美国的 ASME B31G^[2]和 API 579^[3]、挪威的 DNV RP-F101^[4]、英国的 BS7910^[5]以及我国常用的 SY/T 6151—2009^[6]。

表 1 腐蚀管道剩余强度评估规范和方法
Tab.1 Residual strength evaluation standards and methods for corroded pipelines

计算规范方法	单位或作者	提出时间
ASME-B31G	ASME	1984
Modified ASME B31G	Kiefer, Vieth	1989
RSTRENG	Kiefer, Vieth	1989
SY/T6151	中国国家能源局	1995
DNV-RP-F101	挪威船级社	1999
CAS-Z183-M86	加拿大标准协会	1999
BS7910	英国标准协会	1999
API-579	美国石油协会	2000
PCORRC	Stephens, Leis	2000
CPS	加拿大滑铁卢大学	2000

美国 Battelle 纪念研究所根据断裂力学理论分析和爆破试验结果提出了 NG-18 表面缺陷计算公式^[7]，其爆破失效压力表达式见式（1）。该公式是包括 ASME B31G、Modified ASME B31G、RSTRENG、DVN-RP-101 在内的多种评价标准和方法的基础。

$$\sigma_0 = \bar{\sigma} \left[\frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{t} \left(\frac{1}{M} \right)} \right] \tag{1}$$

式中：为环向失效压力； $\bar{\sigma}$ 为流变应力，通常表示为（为极限拉伸强度，为屈服强度）； M 为 Folias 膨胀系数，其解析解是一个无穷级数。 M 常用的 3

种近似表达式为：

$$M = \sqrt{1 + 0.26 \left(\frac{2c}{\sqrt{Rt}} \right)} \tag{2}$$

$$M = \sqrt{1 + 0.314 \left(\frac{2c}{\sqrt{Rt}} \right)^2 - 0.00084 \left(\frac{2c}{\sqrt{Rt}} \right)^4} \tag{3}$$

$$M = \sqrt{1 + 0.40 \left(\frac{2c}{\sqrt{Rt}} \right)^2} \tag{4}$$

其中，式（2）用于 $\frac{2c}{\sqrt{Rt}} > 8.0$ 的情况^[8]，式（3）是 Modified B31G 准则和 RSTRENG 中所用的表达式，式（4）是 ASME B31G 中所用的表达式，也是最保守的近似表达式。

ASME B31G 是最早颁布也是应用最为广泛的腐蚀管道剩余强度评价规范，已更新到 2012 版本。该规范适用于评价中低强度的钢管^[9]，且仅考虑了腐蚀区域最大深度和纵向长度，忽略了实际腐蚀形状^[10]。Kiefner 和 Vieth^[11]通过引入新的 Folias 鼓胀系数和流变应力，提出了 modified ASME B31G 准则。青松铸等^[12]对 ASME B31G—2012 标准中的 3 种流变应力计算方法、安全系数、原公式和修正公式等内容进行了研究，发现管道钢级越高，3 种计算方法之间的差异越小，并结合国内规范提出了不同地区安全系数的取值范围。

挪威船级社（DNV）和英国燃气公司（BG）于 1999 年合作推出了 DNV-RP-F101 腐蚀管道评价标准，并于 2015 年推出了最新版本。该标准基于 X65-X80 钢的试验和模拟数据，评价中高强度的钢管时准确度较高^[13-16]。

国内常用的腐蚀管道评价标准主要有 SY/T 6151—2009《钢质管道管体腐蚀损伤评价方法》、SY/T 6477—2014《含缺陷油气输送管道剩余强度评价方法》以及 SY/T 10048—2016《腐蚀管道评估推荐作法》。黄志强等^[17]从评价流程、计算模型和计算参数取值 3 个方面对比了国内外的两种主流评价标准：ASME B31G—2009 和 SY/T6151—2009。结果表明，ASME B31G—2009 的分级评价方法更便于操作，而 SY/T6151—2009 同时采用了断裂力学屈服强度理论和 D-M 理论计算最大安全工作压力，对于中强度管材失效压力的预测值比 ASME B31G—2009 偏保守。

以上标准和规范都有一定的适用范围和局限性，如 ASME B31G 系列标准，仅考虑了内压作用，应用于高强度管线钢管道评价时结果误差较大，但是其提供的分级评价方法易于操作。DNV-RP-F101 考虑了复合载荷以及腐蚀间的相互作用，评价方法较为复杂，但是准确性较高。因此，工程人员应该按照所需的评价准确度和具体要求合理选择评价标准。

2 腐蚀管道剩余强度评价

2.1 单腐蚀管道剩余强度评价

单个腐蚀中低强度管线钢的破坏理论和评价准则已经相对成熟,其成果反映在准则和规范中。近年来,越来越多的大口径、高钢级管线被用于长距离油气输送以及深水油气开发,专家学者开始研究单个腐蚀缺陷下高钢级管道的剩余强度评价。

来自巴西石油公司的 A. C. Benjamin 利用试验和有限元软件等方法,针对腐蚀管道的剩余强度评价展开了广泛全面的研究。通过 1 组轴向和环向腐蚀的 X80 管道爆破试验,表明管道失效是由环向应力还是轴向应力控制取决于腐蚀缺陷的尺寸(深度、长度和宽度)。较大的环向应变对应轴向断裂,较大的轴向应变对应环向断裂^[18]。对含深度不规则长腐蚀

$$P_b = \frac{2\sigma_b t}{D} \left\{ 1 - \frac{d}{t} + \frac{d}{t} \left\{ \left[0.0973 \left[1 - \left(\frac{w}{\pi D} \right)^2 \right]^6 + 0.903 \exp \left(\frac{-0.474l}{\sqrt{Rt}} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{d}{t} \right)^{4.491} \right] \right\} \right\} \quad (5)$$

式中: P_b 为失效压力, σ_b 为抗拉强度, w 为缺陷宽度, d 为缺陷深度, t 为管道壁厚, l 为缺陷长度。

K. H. Choi 等^[24]对含单腐蚀缺陷的 X65 钢管进行了研究。利用有限元软件针对不同位置(管道内壁和管道外壁)的腐蚀,分析了深度、宽度、长度等参数对管道失效压力的影响,发现缺陷位置对管道的失效行为影响不大,而缺陷深度是影响管道安全最重要的参数。数值模拟结果与 API 579 规范的计算结果对比表明,按规范计算的结果较为保守。这是因为相关规范中没有考虑材料非线性,因此建议在计算失效压力时引入修正因子以使结果更加准确。

赵新伟等^[25,26]通过模拟多孔材料的拉伸试验,建立了含孔洞型损伤 X70 管线钢材料弹性模量和屈服强度的退化规律。结果表明管线钢的弹性模量和屈服强度随孔隙率的增大而显著降低,对于 X70 管线钢,当孔隙率达到 50% 时,材料表观弹性模量和屈服强度降为 0。基于损伤理论,将用于评价体积型缺陷的 API RP 579 公式进行了改进,建立了点腐蚀损伤管道的剩余强度评价公式,结合管道应力和强度分析,提出了点腐蚀弥散损伤管道的寿命预测模型和方法。

M. K. Khalajestani 等^[27,28]针对具有腐蚀缺陷的弯头展开了系列研究,包括单个腐蚀和群腐蚀两类。首先是结合有限元软件和多层感知器方法,对内压作用下含单个腐蚀缺陷的 X65 管道极限承压能力进行了分析。结果表明,缺陷深度、轴向长度以及周向位置对管道安全影响最大。另外,还分析了轴向分布的群腐蚀缺陷之间的相互作用对弯头失效压力的影响。结果显示,腐蚀缺陷越深、越长以及相距越近时,群腐蚀间的相互作用越大,而位于内弧面上的群腐蚀间

缺陷的 X80 管道进行了系列爆破试验,并将结果与现有规范预测结果对比,结果表明:对于此类缺陷管道,ASME B31G 的预测结果与试验结果误差很大,不宜采用;API 579-1/ASME FFS-1 标准、RSTRENG 有效面积法和 DNV RP-F101 规范的误差较小^[19,20]。此外, A. C. Benjamin^[21]对 RSTRENG 有效面积法进行改进,提出了新的腐蚀管道剩余强度评价方法——RPA 法 (Rectangular Parabolic Area),并在之后进一步提出了轴向压力作用下的腐蚀管道剩余强度评价方法——RPA-PLLC 法 (Pressure Loading plus Longitudinal Compression)^[22]。

帅健等^[23]在有限元计算结果的基础上,拟合出了腐蚀管道失效压力预测公式,见式(5)。与爆破试验数据对比显示,有限元方法能够有效模拟单独蚀坑、沟槽、大面积腐蚀等各种缺陷管道受内压时的失效行为,并且预测结果较为准确。

相互作用最明显。

P. J. Budden^[29,30]提出了基于应变的失效评定图 (SB-FAD),并在之后进行了改进和验证。目前该方法已经被 R6 标准^[31]所收录。A. Horn 等^[32]利用基于应变的失效评定图对含有焊缝处切口的 X80 和 X100 弧形板进行了失效预测。结果表明,该方法更适用于高约束条件下的尖锐切口。低约束条件下含钝切口的管道,可以通过修正断裂韧性得到更加准确的预测结果。

国内的肖国清、崔铭伟等学者^[16,33-35]均在有限元计算结果的基础上拟合了高钢级管道的失效压力预测公式,并通过爆破试验数据验证了公式的准确性。

上述研究表明,相比于现有的评价标准,基于塑性失效准则的有限元软件考虑了材料的非线性,能得到更为准确的腐蚀管道剩余强度预测结果。研究人员在数值模拟的基础上,或提出了提高当前评价规范准确性的方法,或拟合了更适用于高钢级管道失效压力的预测公式。腐蚀管道的安全主要受到缺陷几何参数的影响,包括缺陷长度、缺陷深度、缺陷宽度等,而缺陷深度是其中最关键的参数。

2.2 群腐蚀管道剩余强度评价

当前主要的腐蚀评价规范如 ASME B31G 标准系列、RSTRENG 方法等,大都以单腐蚀缺陷管道为研究对象而发展、完善,然后将多腐蚀缺陷近似成单腐蚀缺陷进行计算。而实际情况下,腐蚀损伤可能是由两个或者多个腐蚀损伤形成的腐蚀群,且不同腐蚀损伤之间是相互作用和相互影响的^[36]。

巴西里约热内卢天主教大学在多家公司赞助下

开展了一项针对复杂腐蚀形式的研究项目（Mixed Type Interaction Joint Industry Project）^[37,38]，对带有单路径腐蚀群、多路径腐蚀群（见图 1）的管道进行了爆破试验，建立了详尽的数据库，为后续此类研究奠定了基础。

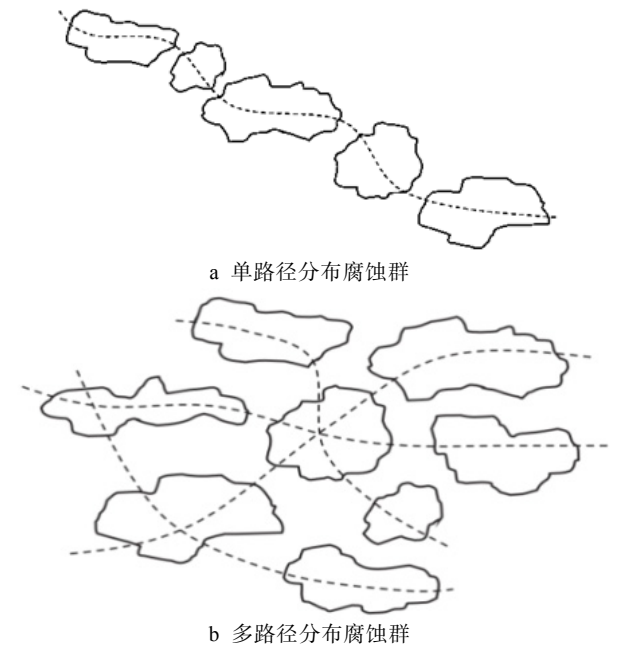


图 1 腐蚀群分布类型

Fig.1 Types of colonies of corrosion defects: a) single-path colony, b) multi-path colony

S. S. Al-Owaisi 等^[39]利用有限元软件对带有不同形状相邻缺陷的 X60 进行了分析，发现两种形状（椭圆形和矩形）的相邻缺陷在轴向距离不大于 3 倍壁厚或周向距离不大于 0.5 倍壁厚时，均会产生相互作用，而矩形缺陷之间的斜向距离不大于 0.5 倍壁厚时会相互影响。

X. Li 等^[40]基于有限元软件分析结果，提出了一种新的群腐蚀相互作用准则，并与已有的准则相对比，证明新方法的准确度更高，且特别适用于长度大于 $\sqrt{20Dt}$ 、轴向分布的腐蚀。具体准则见表 2。

表 2 腐蚀间相互作用准则

Tab.2 Interaction rule between close corrosion defects		
缺陷长度范围	轴向距离极限值	环向距离极限值
$L \leq \sqrt{20Dt}$	$(S_L)_{Lim} = 2.0\sqrt{Dt}$	$(S_C)_{Lim} = 2.0\sqrt{Dt}$
$\sqrt{20Dt} < L \leq \sqrt{50Dt}$	$(S_L)_{Lim} = \sqrt{Dt}$	$(S_C)_{Lim} = 0.05\pi D$
$L > \sqrt{50Dt}$	$(S_L)_{Lim} = t$	$(S_C)_{Lim} = t$

表 2 中，当两个独立腐蚀缺陷的纵向距离 $S_L \leq$ 极限值 $(S_L)_{Lim}$ ，且环向距离 $S_C \leq$ 环向距离极限值 $(S_C)_{Lim}$ 时，两者会相互影响。

Y. F. Chen 等^[41]利用非线性有限元方法，分别对含有单个腐蚀以及轴向、环向分布的交互作用群腐蚀

缺陷 X80 管道的失效压力和失效行为进行了研究，并在此基础上提出了一种针对含有相互作用群腐蚀管道的失效压力评价方法。

综上，腐蚀损伤的相互作用是一个复杂的过程，部分规范如 DNV-RP-F101、API 579 等，虽然给出了相应的评价准则，但是并没有一个统一的结论。而国内外研究人员仍在继续寻找特定情况下，准确性最高的腐蚀缺陷间相互影响准则。

3 腐蚀管道剩余寿命预测

依据腐蚀增长速率预测腐蚀缺陷的增长情况，从而判定修复时间和再检测时间，是保障缺陷及时修复的关键，也是决策再检测周期的关键。目前，应用概率统计方法对腐蚀管道进行剩余寿命预测的研究已经较为成熟，但是该方法需要采集大量数据，且预测结果的准确性难以保证。鉴于此，越来越多的学者对灰色预测方法和可靠度函数分析方法展开了研究。

3.1 灰色预测法

灰色理论通过对原始数据的处理来挖掘系统的变动规律，并建立相应微分方程，从而预测事物未来的发展状况。与概率统计相比，灰色预测法最少可以只要 4 个样本数据就可以建立灰色模型来进行预测。这在腐蚀管道的剩余寿命预测中具有很大的优势。

谭开忍等^[42]以灰色理论的基本模型为基础，探讨了灰色模型的改进方法，提出了基于灰色理论的海底管道剩余寿命预测方法。预测步骤主要包括：最小允许厚度的确定、腐蚀速率的预测以及剩余寿命的预测。

姜峰等^[43]对传统的 GM（1,1）模型进行非等间距改进并建立腐蚀立管剩余寿命预测模型，将改进的非等间距 GM（1,1）模型与中心逼近法、背景值优化法、逐步优化灰导数法、非等距信息逐步优化法、非等距幂预测法和原始优化法进行对比。结果表明，改进后的非等间距 GM（1,1）模型的预测精度比其他改进的 GM（1,1）模型的预测精度高，而且也适用于等间距数据的预测，扩大了 GM（1,1）模型的有效预测范围。

张新生等^[44]建立尾段残差修正 GM（1,1）模型，用以对遭受海上坠物等外部冲击导致腐蚀的海底管道进行剩余寿命预测。结果表明，相比于传统的灰色模型，尾段残差修正 GM（1,1）模型的精度显著提高。

上述研究表明，灰色预测法适用于数据有限的情况。直接应用 GM（1,1）模型的预测精度不是很高，需要对其进行修正和改进，如非等间距 GM（1,1）模型和尾段残差修正 GM（1,1）模型的预测精度均较传统模型显著提高。

3.2 可靠度函数分析法

腐蚀管道的剩余寿命可以根据目标可靠度和可接受的失效概率确定。常用的可靠度分析方法包括一次二阶矩法、改进的一次二阶矩法和蒙特卡洛法。

L. D. De 等^[45]采用一次二阶矩法 (FOSM) 对含多腐蚀的管道进行了可靠性分析。但是在极限状态函数为非线性时, 该方法的准确性不高。随后, W. Zhou 等^[46]利用 modified B31G 失效模型和一次二阶矩法对一组带多腐蚀缺陷输气管道进行了分析, 发现当利用系数一定时, 失效压力比 (FRP) 与失效概率对应的可靠度指标 β 之间存在线性关系, 利用此关系可以快速判断目标可靠度等级对应的失效压力比, 由此识别出关键缺陷。

Q. Li 等^[47]对含有相关群腐蚀的兰成渝管道进行了失效概率分析。结果表明, 当各腐蚀间相关系数 $\rho < 0.6$ 时, 腐蚀数量越多, 失效概率越高。而腐蚀间相关系数 $\rho > 0.6$ 时, 腐蚀数量的影响可以忽略。在进行剩余寿命预测时, 应用改进的一次二阶矩法 (AFOSM) 能得到较为准确的预测结果。径向腐蚀速率、腐蚀深度和管道屈服强度是影响管道安全的关键参数。

O. Larin 等^[48]基于 3D 有限元软件, 提出了一种能在管道外表面建立实体随机空间形状缺陷的特殊算法, 并基于该算法对管道的应力状态以及可靠性进行了分析。结果表明, 在管道额定压力作用下, 当腐蚀深度达到管道壁厚一半时, 会出现塑性应变。而在周期性内压作用下, 带小尺寸缺陷 (最大腐蚀深度约为 0.3 倍壁厚) 管道的失效概率依然达到 70%。由于缺陷区域塑性变形, 腐蚀产生后, 管道依然能够在工作压力 (6 MPa) 下继续工作 15 年。

标准的蒙特卡洛法虽然能准确预测复杂系统的可靠性, 但是计算工作量过大。因此, A. Naess 等^[49]对蒙特卡洛法进行了改进, 新方法有效降低了结构可靠性计算过程中的工作量。B. J. Leira 等^[50]利用改进的蒙特卡洛法对多腐蚀管道的系统可靠性进行了预测, 结果表明腐蚀缺陷之间相关系数大于 0.2 时, 系数越高, 失效概率越低。当缺陷间相关系数较低时, 整体失效概率约为腐蚀群中各个腐蚀缺陷失效概率的总乘积。

在失效函数已知的前提下, 常见的可靠度计算方法有一次二阶矩法和改进的一次二阶矩法等。失效函数为非线性或者无明显表达式的情况下, 采用蒙特卡洛方法可以有效地计算出失效概率。但是蒙特卡洛法的计算工作量较大, 建议采用改进方法以降低工作量。

4 结论和展望

1) 评价高钢级管线时, 现有腐蚀管道评价规范

的预测结果普遍较为保守, 而基于塑性失效准则的非线性有限元分析预测结果准确性很高。

2) 腐蚀管道的安全主要受缺陷几何参数的影响, 包括缺陷长度、缺陷深度和缺陷宽度等, 而缺陷深度是其中最关键的参数。

3) 在对腐蚀管道进行寿命预测时, 灰色预测法克服了传统概率统计法对大数据依赖性高的缺点。改进后的 GM (1,1) 模型能够利用有限的的数据得到较为准确的预测结果。

4) 当前主要的腐蚀评价规范大都以单腐蚀缺陷管道为研究对象而发展、完善, 然后将多腐蚀缺陷近似成单腐蚀缺陷进行计算。而实际上, 腐蚀损伤常以群落方式出现, 且不同腐蚀损伤之间是相互作用和相互影响的。因此, 为了得到更加准确的评价结果, 需要考虑不同腐蚀损伤间的相互作用准则。

5) 在现有的腐蚀管道评价规范中, 较少是针对复杂载荷作用下的管线, 未来需要对在工作荷载和环境荷载等多种荷载作用下腐蚀管道的剩余强度和剩余寿命进行研究。

6) 油气管线的腐蚀是动态过程, 腐蚀在时间和空间上随机分布。在对腐蚀管线进行寿命预测时, 需要考虑随机因素对管线剩余寿命的影响。

参考文献:

- [1] TOTLANI M K, ATHAVALA S N. Electroless Nickel for Corrosion Control in Chemical, Oil and Gas Industries: Corrosion Reviews[J]. Corrosion Reviews, 2000, 18(2-3): 155-180.
- [2] ASME B31G—2009. Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines[S].
- [3] API 579: Fitness for Services[S].
- [4] DNV-RP-F101, Corroded Pipelines[S].
- [5] PD6493, Guidance on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Fusion Welded Structures[S].
- [6] SY/T 6151—2009, 钢质管道管体腐蚀损伤评价方法[S].
- [7] SY/T 6151—2009, Evaluation Method for Corroded Steel Pipe[S].
- [8] ALAN M, AGUSTIN M. Failure Stress Levels of Flaws in Pressurized Cylinders[J]. Astm Special Technical Publication, 1973(536): 461-481.
- [9] COSHAM A, HOPKINS P. An Overview of the Pipeline Defect Assessment Manual (PDAM)[C]// 4th International Pipeline Technology Conference. Berlin: Euro Institute for Information and Technology Transfer, 2004: 9-13.
- [9] 顾晓婷, 王秋妍, 孙萍萍, 等. 油气管道剩余强度评价方法适用性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(12): 105-109.
- GU Xiao-ting, WANG Qiu-yan, SUN Ping-ping, et al. Research on Applicability of Evaluation Method for

- Residual Strength of Oil and Gas Pipeline[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2016, 12(12): 105-109.
- [10] MELIANI M H, MATVIENKO Y G, PLUVINAGE G. Corrosion Defect Assessment on Pipes Using Limit Analysis and Notch Fracture Mechanics[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2011, 18(1): 271-283.
- [11] KIEFNER J F, VIETH P H. New Method Corrects Criterion for Evaluating Corroded Pipe[J]. *Oil & Gas Journal*, 1990, 88: 32(32): 56-59.
- [12] 青松铸, 范小霞, 阳梓杰, 等. ASME B31G—2012 标准在含体积型缺陷管道剩余强度评价中的应用研究[J]. *天然气工业*, 2016, 36(5): 115-121.
QING Song-zhu, FAN Xiao-xia, YANG Zi-jie, et al. Application of ASME B31G—2012 to the Residual Strength Evaluation of Pipelines with Volumetric Defects[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(5): 115-121.
- [13] BJORNOY O H, MARLEY M J. Assessment of Corroded Pipelines, Past, Present and Future[C]// *Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference*. Stavanger, Norway: [s. n.], 2001: 17-22.
- [14] BENJAMIN A C, ANDRADE E Q D, JACOB B P, et al. Failure Behavior of Colonies of Corrosion Defects Composed of Symmetrically Arranged Defects[C]// *2006 International Pipeline Conference*. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2006: 417-432.
- [15] BENJAMIN A C, FREIRE J L F, VIEIRA R D, et al. Burst Tests on Pipeline Containing Closely Spaced Corrosion Defects[C]// *25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2006: 103-116.
- [16] 肖国清, 阚文华, 邓洪波, 等. 基于有限元分析的 X80 高钢级管道剩余强度计算公式构建[J]. *中国安全生产科学技术*, 2016, 12(12): 110-115.
XIAO Guo-qing, KAN Wen-hua, DENG Hong-bo, et al. Construction of Calculation Formula for Residual Strength of X80 High-grade Steel Pipeline Based on Finite Element Analysis[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2016, 12(12): 110-115.
- [17] 黄志强, 谭智勇, 谢豆, 等. 腐蚀管道评价标准 ASME B31G—2009 和 SY/T 6151—2009 对比研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(4): 116-122.
HUANG Zhi-qiang, TAN Zhi-yong, XIE Dou, et al. Constructive Study on Evaluation Standards ASME B31G—2009 and SY/T 6151—2009[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2015, 11(4): 116-122.
- [18] FREIRE J L F, BENJAMIN A C, VIEIRA R D, et al. Burst Strength of Pipeline Test Specimens Containing Longitudinal or Circumferential Corrosion Defects[J]. *Experimental and Applied Mechanics*, 2011, 6: 487-494.
- [19] BENJAMIN A C, FRANZOI A R, FREIRE J L F, et al. Burst Tests on Pipeline Containing Irregular Shaped Corrosion Defects[C]// *2008 7th International Pipeline Conference*. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2008: 169-178.
- [20] BENJAMIN A C, FRANZOI A R, LEAL C, et al. Additional Test Results of Pipeline with Corrosion—Irrregular-Shaped Defects[J]. *Experimental Techniques*, 2010, 34(5): 68-75.
- [21] BENJAMIN A C, ANDRADE E Q. Modified Method for the Assessment of the Remaining Strength of Corroded Pipelines[C]// *Rio Pipeline Conference*. Rio: Petrobras, 2003.
- [22] BENJAMIN A C. Prediction of the Failure Pressure of Corroded Pipelines Subjected to a Longitudinal Compressive Force Superimposed to the Pressure Loading[C]// *2008 7th International Pipeline Conference*. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2008: 179-189.
- [23] 帅健, 张春娥, 陈福来. 非线性有限元法用于腐蚀管道失效压力预测[J]. *石油学报*, 2008, 29(6): 933-937.
SHUAI Jian, ZHANG Chun-e, CHEN Fu-lai. Prediction of Failure Pressure in Corroded Pipelines Based on Non-linear Finite Element Analysis[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(6): 933-937.
- [24] CHOI K H, LEE C S, RYU D M, et al. Comparison of Computational and Analytical Methods for Evaluation of Failure Pressure of Subsea Pipelines Containing Internal and External Corrosions[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2016, 21(3): 369-384.
- [25] 赵新伟, 罗金恒, 郑茂盛, 等. 弥散型腐蚀损伤管道剩余寿命预测方法[J]. *石油学报*, 2006, 27(1): 119-123.
ZHAO Xin-wei, LUO Jin-heng, ZHENG Mao-sheng, et al. A Method for Predicting Remaining Life of Pipeline with Dispersion-type Corrosion Damage[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(1): 119-123.
- [26] 赵新伟, 罗金恒, 郑茂盛, 等. 点腐蚀损伤管道剩余强度的评价方法[J]. *机械工程材料*, 2006, 30(6): 26-29.
ZHAO Xin-wei, LUO Jin-heng, ZHENG Mao-sheng, et al. Residual Strength Assessment Method of Pipeline Containing Damage of Pitting Corrosion[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2006, 30(6): 26-29.
- [27] KHALAJESTANI M K, BAHAR M R, SALEHI A, et al. Predicting the Limit Pressure Capacity of Pipe Elbows Containing Single Defects[J]. *Applied Ocean Research*, 2015, 53: 15-22.
- [28] KHALAJESTANI M K, BAHAR M R. Investigation of Pressurized Elbows Containing Interacting Corrosion Defects[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2014, 123: 77-85.
- [29] BUDDEN P J. Failure Assessment Diagram Methods for Strain-based Fracture[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2006, 73(5): 537-552.
- [30] BUDDEN P J, AINSWORTH R A. The Shape of a Strain-based Failure Assessment Diagram[J]. *Interna-*

- tional Journal of Pressure Vessels and Piping, 2012, 89: 59-66.
- [31] MILNE I, AINSWORTH R A, DOWLING A R, et al. Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1988, 32(1-4): 3-104.
- [32] HORN A, TRULL M, HERTELE S. Failure Prediction of Curved Wide Plates Using the Strain-based Failure Assessment Diagram with Correction for Constraint and Notch Radius[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2015, 137(2): 021208.
- [33] 崔铭伟, 曹学文. 腐蚀缺陷对中高强度油气管道失效压力的影响[J]. 石油学报, 2012, 33(6): 1086-1092.
- CUI Ming-wei, CAO Xue-wen. Impact of Corrosion Defects on Failure Pressure of Medium-High Strength Oil-Gas-pipeline[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(6): 1086-1092.
- [34] MA B, SHUAI J, LIU D, et al. Assessment on Failure Pressure of High Strength Pipeline with Corrosion Defects[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 32: 209-219.
- [35] SU C, LI X, ZHOU J. Failure Pressure Analysis of Corroded Moderate-to-high Strength Pipelines[J]. China Ocean Engineering, 2016, 30: 69-82.
- [36] 崔铭伟, 王媛媛, 贺杰, 等. 相互作用腐蚀管道剩余强度评价方法对比研究[J]. 表面技术, 2016, 45(8): 56-62.
- CUI Ming-wei, WANG Yuan-yuan, HE Jie, et al. Comparison Study on Assessment Methods for Residual Strength of Interaction Corroded Pipeline[J]. Surface Technology, 2016, 45(8): 56-62.
- [37] BENJAMIN A C, FREIRE J L F, VIEIRA R D, et al. Interaction of Corrosion Defects in Pipelines—Part 1: Fundamentals[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2016, 144: 56-62.
- [38] BENJAMIN A C, FREIRE J L F, VIEIRA R D, et al. Interaction of Corrosion Defects in Pipelines—Part 2: MTI JIP Database of Corroded Pipe Tests[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2016, 145: 41-59.
- [39] AL-OWAISI S S, BECKER A A, SUN W. Analysis of Shape and Location Effects of Closely Spaced Metal Loss Defects in Pressurised Pipes[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 68: 172-186.
- [40] LI X, BAI Y, SU C, et al. Effect of Interaction between Corrosion Defects on Failure Pressure of Thin Wall Steel Pipeline[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2016, 138: 8-18.
- [41] CHEN Y, ZHANG H, ZHANG J, et al. Failure Assessment of X80 Pipeline with Interacting Corrosion Defects[J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 47: 67-76.
- [42] 谭开忍, 肖熙. 基于灰色理论的海底管道腐蚀剩余寿命预测方法[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(2): 186-188.
- TAN Kai-ren, XIAO Xi. The Forecast of Remaining Life of Corrosive Submarine Pipelines Based on Grey Theory[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(2): 186-188.
- [43] 姜峰, 郑运虎, 梁瑞. 改进的非等间距 GM(1,1)模型预测腐蚀立管剩余寿命[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(6): 57-61.
- JIANG Feng, ZHENG Yun-hu, LIANG Rui. Method for Corrosion Risers Remaining Life Prediction Based on Improved Non-equidistant GM(1,1) Model[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(6): 57-61.
- [44] 赵梦旭, 张新生, 王小完. 尾段残差修正 GM(1,1)模型在管道腐蚀预测中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2017(1): 65-70.
- ZHAO Meng-xu, ZHANG Xin-sheng, WANG Xiaowan. Application of Modified Empennage Residual Error GM(1,1) Model in Prediction of Pipeline Corrosion[J]. China Safety Science Journal, 2017(1): 65-70.
- [45] DE L D, MACIAS O F. Effect of Spatial Correlation on the Failure Probability of Pipelines under Corrosion[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2005, 82(2): 123-128.
- [46] ZHOU W, SIRAJ T, GONG C. Reliability Consistent Mitigation Criteria for Corrosion Defects on Natural Gas Transmission Pipelines[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2015, 42(12): 1032-1039.
- [47] LI Q, SUN C, HUANG Z, et al. Reliability Analysis of Lan Chengyu Corroded Pipeline with Associated Defects[J]. Petroleum, 2015, 1(3): 244-250.
- [48] LARIN O, BARKANOV E, VODKA O. Prediction of Reliability of the Corroded Pipeline Considering the Randomness of Corrosion Damage and Its Stochastic Growth[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 66: 60-71.
- [49] NAESS A, LEIRA B J, BATSEVYCH O. System Reliability Analysis by Enhanced Monte Carlo Simulation[J]. Structural safety, 2009, 31(5): 349-355.
- [50] LEIRA B J, NAESS A, NAESS O E B. Reliability Analysis of Corroding Pipelines by Enhanced Monte Carlo Simulation[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2016, 144: 11-17.