

含体积型缺陷集输管道剩余强度评价方法适用性

韩冰¹, 季蓓蕾², 付强¹, 张欣亮¹

(1. 中国标准化研究院, 北京 100191; 2. 中国石油大学(北京)油气管道输送安全国家工程实验室, 北京 102249)

摘要: 基于径厚比为 13~20 的管道内压爆破试验数据, 建立了含腐蚀缺陷集输管道数值计算模型的失效判定准则, 并开展了不同缺陷尺寸条件下三种标准评价方法的适用性对比分析; 在此基础上, 基于交叉验证优化的支持向量机(CV-SVM)算法, 建立了集输管道失效压力预测模型, 对比分析了预测模型与标准方法的预测效果。结果表明: 不同缺陷长度、深度及宽度下, DNV-RP-F101 标准方法适用于径厚比较小的集输管道, 但当缺陷长度小于 $1D$ (D 为管道外径) 时, 该方法不具有保守性, 推荐采用 PCORRC 标准方法。相比于标准方法, 预测模型的准确率提高了 3.11%, 适用于含腐蚀缺陷集输管道工程适用性评估。

关键词: 集输管道; 内腐蚀; 失效准则; 评价方法; 预测模型

中图分类号: TG174 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-748X(2025)03-0091-08

油气集输管道所处环境较为恶劣, 大气、土壤以及管内输送介质会给管道带来一系列腐蚀问题。管道腐蚀引发的管道破裂不仅会造成经济损失, 还会污染环境, 甚至威胁相关人员生命安全^[1]。研究表明, 由内腐蚀引起的油气集输管道的失效破坏占比高达 80%^[2-7]。为防止腐蚀引起的管道事故, 国内外学者常采用含体积型缺陷管道剩余强度评价方法及数值模拟方法确定管道的失效压力和剩余强度, 以确保管道在服役期间安全运行。

国内外对于含腐蚀缺陷管道进行了大量研究, 开发了许多含体积型缺陷管道的剩余强度评价方法, 主要包括: ASME B31G - 2009 *Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines* 中提及的 B31G 方法, ASME B31G - 2012 *Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines* 中提及的改进 B31G 评价方法; DNV-RP-F101 标准 (Corroded Pipelines) 推荐方法以及 PCORRC 评价方法等^[8-9]。各评价方法具有一定的差异性, 近年来国内外学者针对各个标准的应用及适用性进行了大量的研究。杨理践等^[10]采用 ASME B31G、Rstreng 0.85 dL、

DNV-RP-F101 标准方法等对不同尺寸的腐蚀缺陷管道进行评价, 得出了各评价标准的保守性及适用性, 以及不同标准的评价结果随腐蚀缺陷尺寸变化的规律。顾晓婷等^[11]等选取 30 组不同级别的管道进行了剩余强度计算分析, 结合爆破试验数据提出了 4 种剩余强度评价方法的适用范围。WANG 等^[12]对不同直径和壁厚的金属管道以及不同尺寸和深度的腐蚀缺陷进行了一系列非线性有限元 (FEM) 分析, 得到了适用于管道剩余强度评价的计算方法。目前, 管道剩余强度评价方法大多应用于油气长输管道, 且其适用性研究多围绕管道钢级、缺陷尺寸、缺陷位置等方面, 而针对各方法对径厚比较小集输管道的适用性研究相对较少。

由于缺乏标准方法对油气集输管道适用性的分析, 相关学者采用数值模拟方法开展了含缺陷集输管道剩余强度计算研究。何雨珂等^[13]采用 ABAQUS 软件建立了腐蚀管道有限元模型, 研究了单个均匀腐蚀缺陷对集输管道剩余强度的影响。廖特权^[14]对集输管道不同运行压力下的均匀腐蚀和局部腐蚀有效应力进行了数值模拟, 分析了均匀腐蚀长度、宽度和深度对管道有效应力的影响。有限元方法的计算准确性与失效准则的选取密切相关, 但现有集输管道数值模型采用的失效准则仍依据长输管道的内压爆破试验结果, 缺乏相关的适用性验证。综上所述, 亟需进一步开展含体积型缺陷集输管道剩余强度评价方法的适用性研究。

因此, 笔者通过有限元分析方法, 结合径厚比较

收稿日期: 2023-01-02

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2022YFF0609602); 中国标准化研究院基本科研业务费项目 (602023Y-10399)

通信作者: 季蓓蕾 (1997-), 博士研究生, 研究方向为油气管道安全技术, 18280314868, jibeilei1997@163.com

小管道的内压爆破试验结果,建立了适用于集输管道数值计算模型的失效准则,并针对三种剩余强度评价方法在不同集输管道腐蚀缺陷下的适用性开展分析,明确各评价方法的适用范围,并在此基础上建立了管道失效压力预测模型,将其预测结果与标准方法计算结果进行对比,以为含腐蚀缺陷集输管道工程适用性评估提供参考。

1 含腐蚀缺陷集输管道的有限元模型

1.1 几何模型及网格划分

针对常见的均匀型内腐蚀缺陷开展研究,如图1所示,管道外径、内径和壁厚分别为 D 、 d 以及 t ,管道腐蚀缺陷深度为 d_c ,轴向长度为 L_c ,环向宽度为 W_c ,腐蚀缺陷的环向宽度所对应的圆心角为 α 。

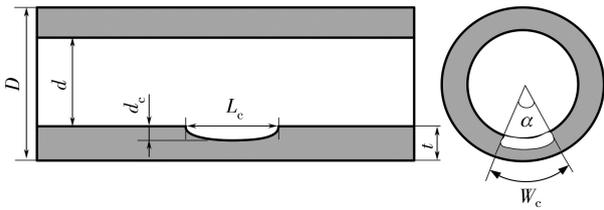


图1 含腐蚀缺陷集输管道示意

Fig.1 Schematic diagram of gathering and transportation pipeline with corrosion defects

如图2所示,管道采用三维八节点线性减缩积分单元(C3D8R)进行划分,为降低模型计算时长,根据管道的对称性建立缺陷管道的1/4模型,管道全长为 $5D$,有限元模型长为 $2.5D$ 。为避免腐蚀缺陷部分应力过度集中造成的不合理结果,对腐蚀缺陷的棱角进行倒角处理,使缺陷底部与管壁交界处平滑无尖角。为使有限元模型计算结果足够精确,

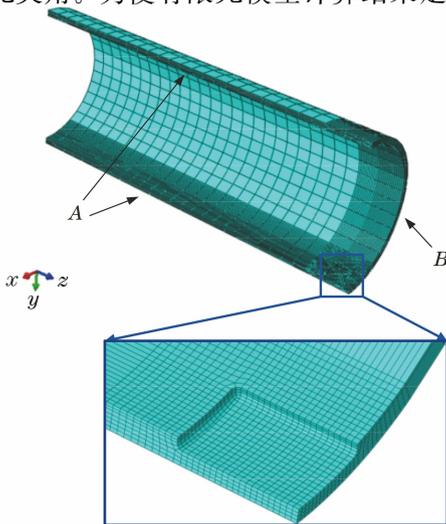


图2 含腐蚀缺陷管道1/4对称模型

Fig.2 1/4 symmetric model of pipeline with corrosion defects

并有效降低计算时长,将管道缺陷处的网格进行局部细化,而缺陷以外部分网格较粗。

1.2 管材模型及载荷边界条件

有限元模型选用 Ramberg-Osgood 材料本构模型^[15],其应力与应变的关系如式(1)所示。

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \left[1 + \beta \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^{n-1} \right] \quad (1)$$

式中: σ 为管道应力,MPa; ϵ 为管道应变; E 为管材的杨氏模量,取210 GPa; σ_y 为管材屈服强度,MPa; β 为偏移系数; n 为硬化指数。

如图2所示,管道有限元模型为1/4模型,因此需要在轴向截面A和环向解横截面B设置对称边界条件。由于只考虑管道在内压载荷作用下的应力响应,因此在垂直管道内表面方向施加管道内压载荷,模拟内液体对管道的压力作用^[16]。

2 基于爆破试验结果的集输管道失效准则的确定

在含腐蚀缺陷集输管道的数值模拟中,对比腐蚀区管道等效应力与临界应力的大小即可判断管道是否失效。如表1所示,临界应力的选取可以依据流变应力(表征塑性破坏)的取值方法,其中 σ_b 为管材抗拉强度。如图3所示,在内压作用下管道腐蚀区壁厚方向内侧节点、中间节点及外侧节点的等效应力变化规律不同,因此临界应力及腐蚀区等效应力的选取是确定失效准则的重要研究内容。

表1 流变应力取值

Tab.1 The value of flow stress

标准方法	流变应力取值
改进 ASME B31G	$(\sigma_b + \sigma_y)/2, \sigma_y + 69$
DNV-RP-F101	σ_b
PCORRC	σ_b

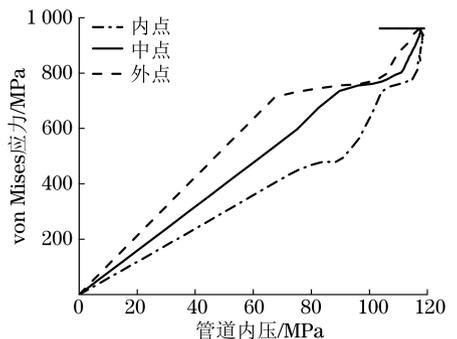


图3 管道壁厚方向不同节点的等效应力与内压的关系

Fig.3 The relationship between equivalent stress and internal pressure at different nodes in the direction of pipeline wall thickness

笔者收集了11组径厚比为13~20的管道内压爆破试验数据^[17],以确定适用于集输管道数值模拟的失效判定准则。基于上述有限元分析方法,建立与11组试验工况相同参数的管道有限元模型,计算

并提取腐蚀区管道应力最大处沿壁厚方向外侧节点、中间节点、内侧节点的等效应力达到各临界应力的管道内压,有限元计算结果与内压爆破试验结果的相对误差对比如图4所示。

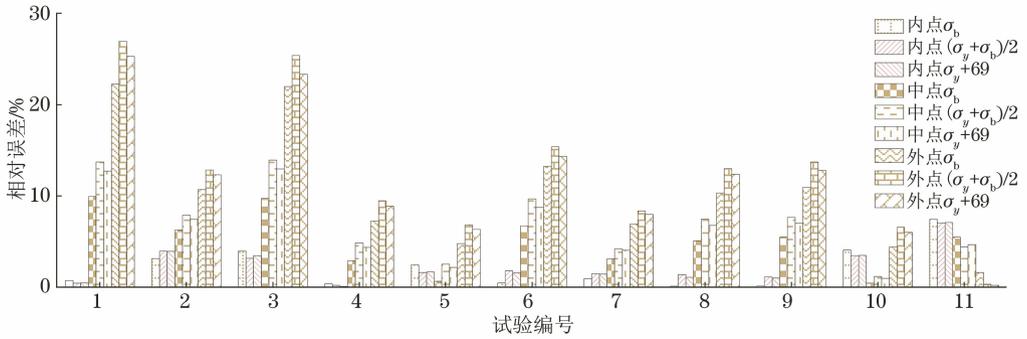


图4 9种管道失效判定准则下有限元计算结果与内压爆破试验结果的相对误差对比

Fig. 4 Comparison of relative error between finite element calculation results and internal pressure blasting test results under 9 kinds of pipeline failure criteria

通过综合对比可以看出,不同临界应力下腐蚀区管道内侧节点等效应力对应的内压相较于中间节点与外侧节点更接近爆破试验结果,平均相对误差均在5%以内;其中内侧节点等效应力达到管材抗拉强度 σ_b 时平均相对误差最小,约为2.16%。选择腐蚀区管道外侧节点的等效应力进行管道失效判定时相比爆破试验结果偏离最多,平均相对误差均在10%以上,其中外侧节点等效应力达到 $(\sigma_b + \sigma_y)/2$ 时平均相对误差最大,约为12.6%。

不同长度缺陷对应的管道失效压力,此时缺陷长度 L 为 $0 \sim 3.3D$ 。

由图5和图6可知,不同缺陷长度下,三种剩余强度评价方法中DNV-RP-F101和PCORRC两种标

基于以上分析得出,将腐蚀区管道应力最大点壁厚方向内侧节点的等效应力达到管材抗拉强度 σ_b 作为有限元模拟中含腐蚀缺陷管道失效的判定准则更适用于径厚比较小的集输管道,且在该准则下,笔者建立的含腐蚀缺陷管道有限元模型具有较高的准确性,可用于计算含缺陷集输管道的失效压力。

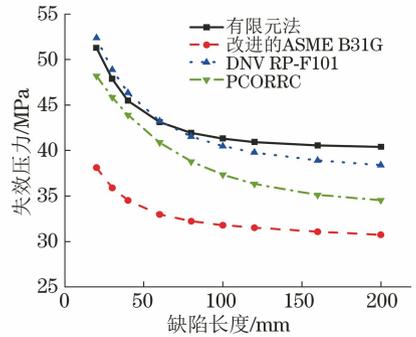


图5 不同缺陷长度下失效压力有限元计算结果 ($\alpha=35^\circ, d_c=1.5\text{ mm}$)

Fig. 5 Finite element calculation results of failure pressure under different defect lengths ($\alpha=35^\circ, d_c=1.5\text{ mm}$)

3 含体积型缺陷管道剩余强度评价方法的适用性

基于以上失效准则,利用有限元分析方法计算不同缺陷长度、深度、宽度下的管道失效压力,并与相关标准计算结果进行对比,分析现有含体积型缺陷管道剩余强度评价标准对集输管道的适用性。模型计算用集输管道尺寸为 $\phi 60.3\text{ mm} \times 4.0\text{ mm}$,径厚比为15.07,管材为L245,屈服强度为245 MPa,抗拉强度为410 MPa。

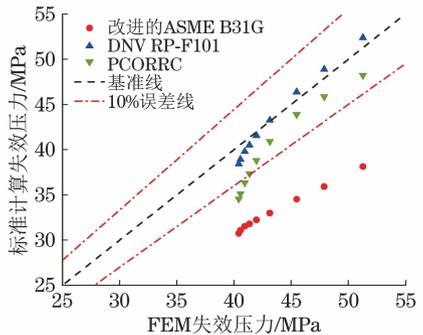


图6 失效压力的有限元与标准方法计算结果对比 ($\alpha=35^\circ, d_c=1.5\text{ mm}$)

Fig. 6 Comparison of failure pressure calculation results between finite element and standard methods ($\alpha=35^\circ, d_c=1.5\text{ mm}$)

3.1 不同缺陷长度下标准方法的适用性

取缺陷宽度对应角度为 35° 、缺陷深度为1.5 mm,分别采用有限元分析方法和三种标准评价方法计算

准方法的误差相对较小,其中 DNV-RP-F101 标准方法的计算结果最接近有限元模拟结果,相对误差均低于 10%。

改进的 ASME B31G 标准方法计算结果均低于有限元模拟结果,且误差较大,说明该方法过于保守,不适用于集输管道的剩余强度评价;PCORRC 方法计算结果略低于有限元模拟结果,整体评价结果较为保守;在缺陷长度小于 1D 的集输管道,而 DNV-RP-F101 方法计算所得管道失效压力大于有限元模拟结果,评价结果存在风险,说明该方法仅适用于缺陷长度大于 1D 的集输管道。而针对缺陷长度小于 1D 的集输管道剩余强度评价可采用 PCORRC 方法。

3.2 不同缺陷深度下标准方法的适用性

取缺陷宽度对应角度为 35°、缺陷长度为 100 mm,分别采用有限元分析方法和三种标准评价方法计算了五种深度缺陷(0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 mm)下对应的管道失效压力。

由图 7 和图 8 可知, DNV-RP-F101 和 PCORRC 两种标准方法的计算结果与有限元计算结果的相对误差均较小,其中 DNV-RP-F101 方法计算结果

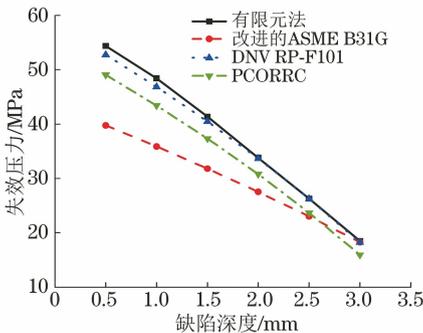


图 7 不同缺陷深度下失效压力有限元计算结果 ($\alpha=35^\circ, L_c=100\text{ mm}$)

Fig. 7 Finite element calculation results of failure pressure under different defect lengths ($\alpha=35^\circ, L_c=100\text{ mm}$)

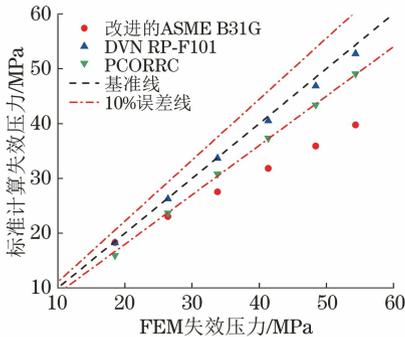


图 8 失效压力的有限元与标准方法计算结果对比 ($\alpha=35^\circ, L_c=100\text{ mm}$)

Fig. 8 Comparison of failure pressure calculation results between finite element and standard methods ($\alpha=35^\circ, L_c=100\text{ mm}$)

最接近有限元模拟结果,相对误差均低于 10%,当缺陷深度为 2.0~2.5 mm 时,该方法准确率最高,相对误差约为 0.5%。

改进的 ASME B31G 标准方法计算结果均低于有限元模拟结果,且在缺陷深度为 0.5~2 mm 时的相对误差较大,计算结果过于保守;PCORRC 方法在 0.5~3.0 mm 缺陷深度下的失效压力计算结果略低于有限元计算结果,整体评价结果较为保守;DNV-RP-F101 方法计算准确率高,且具有保守性,适用于该缺陷深度范围内的集输管道剩余强度评价。

3.3 不同缺陷宽度下标准方法的适用性

一般来说,缺陷宽度采用所对应的圆心角表示。取缺陷长度为 100 mm,缺陷深度为 1.5 mm,分别采用有限元分析方法和三种标准方法计算了 5°、20°、35°、50°、65°、80°六种缺陷宽度下的管道失效压力。

三种标准方法的管道失效压力计算结果均与腐蚀深度无关,但根据有限元计算结果(图 9 和图 10)可以看出,管道失效压力随缺陷宽度的增大而略微降低。

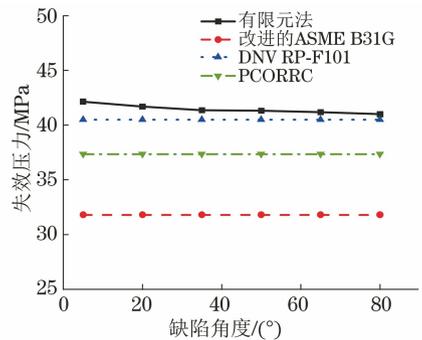


图 9 不同缺陷宽度下有限元计算结果 ($L_c=100\text{ mm}, d_c=1.5\text{ mm}$)

Fig. 9 Finite element calculation results for different defect widths ($L_c=100\text{ mm}, d_c=1.5\text{ mm}$)

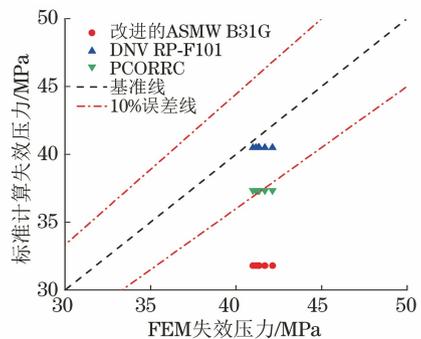


图 10 有限元与标准方法失效压力计算结果对比 ($L_c=100\text{ mm}, d_c=1.5\text{ mm}$)

Fig. 10 Comparison of failure pressure calculation results between finite element method and standard methods ($L_c=100\text{ mm}, d_c=1.5\text{ mm}$)

不同缺陷深度下三种标准方法中 DNV-RP-F101 和 PCORRC 两种方法计算结果与有限元计算

结果的相对误差均较小;其中 DNV-RP-F101 方法计算结果最接近有限元计算结果,相对误差低于 10%。

改进 ASME B31G 方法的计算结果低于有限元计算结果,且误差较大,说明该方法过于保守,不适用于集输管道剩余强度评价;PCORRC 方法的计算结果略低于有限元计算结果,整体评价结果仍较为保守;DNV-RP-F101 方法的计算准确率高,且具有保守性,适用于该缺陷宽度下集输管道的剩余强度评价。

4 基于 CV-SVM 的集输管道失效压力预测模型

采用标准方法可以为工程中管道的失效评价提供参考,但标准方法的计算结果存在一定的保守偏差。因此,基于交叉验证优化的支持向量机(CV-SVM)算法提出了集输管道失效压力预测方法,并与有限元计算结果进行对比。

4.1 CV-SVM 回归预测原理

支持向量机(SVM)的基本原理是通过建立超平面,将样本中的正例与反例分开并实现两者与超平面的距离最大化,构建回归模型从而提高模型的泛化能力。其核心思想是利用非线性特征的映射函数将样本映射到高维空间从而实现线性回归,因此该方法针对高维特征的小样本数据处理具有显著优势。假设其高维空间线性最优决策函数如式(2)所示。

$$f(x) = \omega\varphi(x) + b \quad (2)$$

式中: x 为输入样本; ω 为样本的权值向量; $\varphi(x)$ 为非线性映射; b 为拟合误差。

$$\begin{aligned} \min_{\omega, b, \xi_i, \hat{\xi}_i} & \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^m (\xi_i + \hat{\xi}_i) \\ \text{约束于} & f(x_i) - y_i \leq \epsilon + \xi_i, \\ & y_i - f(x_i) \leq \epsilon + \hat{\xi}_i, \\ & \xi_i \geq 0, \hat{\xi}_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (3)$$

式中: m 为样本量; C 为惩罚因子; ξ 和 $\hat{\xi}$ 为松弛变量; ϵ 为损失函数。

采用拉格朗日乘子法将上述问题转化为对偶问题,采用核函数方法将原本低维的样本转化至更高维的空间,以解决低维空间中样本不可分的问题,得到支持向量回归的一般表达式,如式(4)所示。

$$f(x) = \sum_{i=1}^m (\hat{\alpha}_i - \alpha_i) \kappa(x_i, x_j) + b \quad (4)$$

式中: $\kappa(x_i, x_j) = \varphi(x_i)^\top \phi(x_j)$ 为核函数。

核函数的选择是决定支持向量回归预测结果的关键因素,常用的核函数有线性核,多项式核, Sigmoid 核和径向基(RBF)核。RBF 核可以将低维输入空间映射到高维特征空间,在高维空间中进行划分。这种映射能力使 RBF 核能够处理具有复杂结构的数据,相比之下,线性核、多项式核和 Sigmoid 核在高维空间中的表达能力相对较弱。因此选用 RBF 核函数,其表达式如式(5)所示。

$$\begin{aligned} \kappa(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right) = \\ \exp(-g \cdot \|x_i - x_j\|^2) \end{aligned} \quad (5)$$

采用 SVM 作回归预测时,需要调节的相关参数主要包括惩罚函数 C 和核函数参数 g 。 C 代表寻优过程中对误差的宽容度, g 则决定样本数据通过核函数映射到新空间后的分布情况,两者决定了模型的拟合程度及准确率。

采用 K-fold 交叉验证(K-CV)算法确定最优的 C 和 g 值。交叉验证算法主要用于消除样本随机性所带来的训练误差,对于样本容量小且计算精度高的优化问题尤为适用。针对给定的 C 和 g 取值范围,使用 K-CV 算法任意选择范围中的数值,并对该数值下的模型准确率进行计算,通过反复执行该过程,最终得到参数取值范围内的最优 C 和 g 值。

4.2 集输管道失效压力预测模型

由上述分析可知,管道径厚比、缺陷长度、缺陷深度对管道失效压力的影响均较大。在管道径厚比 13~20,缺陷长度 0~200 mm,缺陷深度 0~3.0 mm 条件下,利用有限元模型建立了 96 组管道失效压力样本库,用于集输管道失效压力预测模型的训练及测试。SVM 预测模型构建流程见图 11。

(1) 确定模型自变量(径厚比、缺陷长度、缺陷深度)及因变量(管道失效压力)。

(2) 选用 RBF 径向基核函数,运用交叉验证方法确定最佳惩罚函数 C 和核函数参数 g 。笔者采用 5 折交叉验证法($K=5$),首先对二者取值进行粗略选择,选择范围为 $[2^{-8}, 2^8]$;经粗略选择后,再根据粗略选择的结果进行精细选择,精细选择范围为 $[2^{-4}, 2^4]$,针对每次寻优得到的一组 C 和 g ,取任意一个样本集合作为模型测试集,其余 $K-1$ 个样本集合作为训练集,交叉验证重复 K 次并计算均方误差(MSE),以 MSE 最小化确定参数最优值,即 $C=1.15, g=1.62$ 。

(3) 将最优惩罚函数 C 与核函数 g 代入 SVM 模型中进行样本训练,输出测试样本预测值,并计算

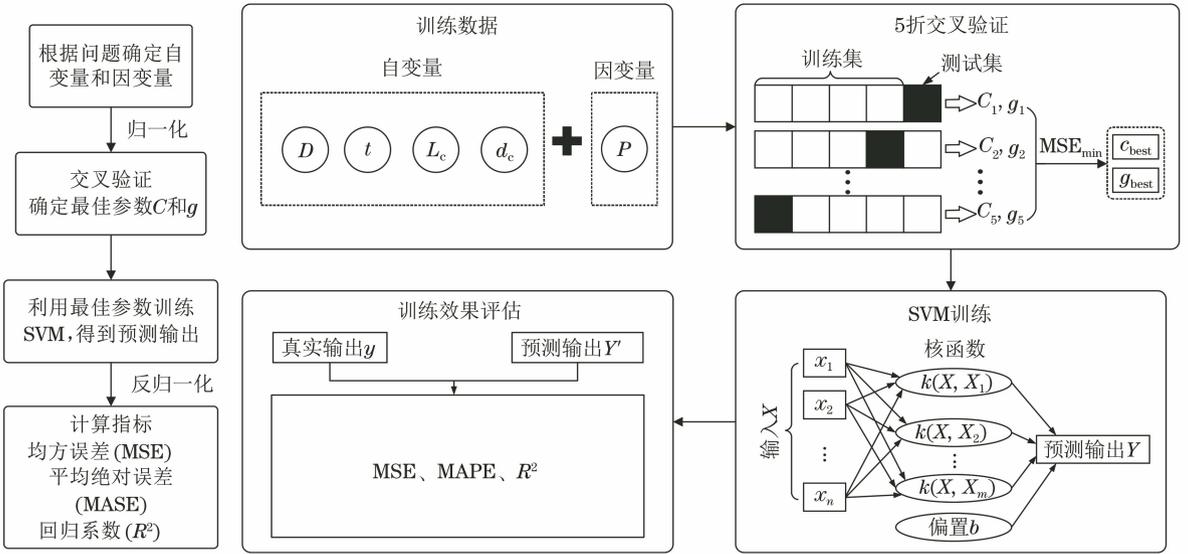


图 11 SVM 预测模型构建流程

Fig. 11 The construction process of SVM prediction model

MSE、平均绝对误差 MAPE 和决定系数 R^2 评价模型预测精度,其计算公式如式(6~8)所示。

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y'_i - y_i)^2 \quad (6)$$

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y'_i - y_i}{y_i} \right| \quad (7)$$

$$R^2 =$$

$$\frac{(n \sum_{i=1}^n Y'_i y_i - \sum_{i=1}^n Y'_i \sum_{i=1}^n y_i)}{[n \sum_{i=1}^n Y_i'^2 - (\sum_{i=1}^n Y'_i)^2] [n \sum_{i=1}^n y_i'^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}$$

(8)

式中: n 为样本总量; y 为真实期望输出; Y' 为模型预测输出。

4.3 结果分析与对比

为了验证基于 CV-SVM 的集输管道失效压力预测模型的准确性,对比了该方法与有限元模型的计算结果,并进一步与上文分析得出的适用于集输管道的标准方法(DNV-RP-F101 和 PCORRC)进行了比较,结果如图 12 和图 13 所示。

由图 12 可知, CV-SVM 预测模型与有限元模型的相对误差均在 10% 以内,模型预测效果较好。且通过与标准方法对比,可以明显看出预测模型的预测结果与有限元计算结果更接近,分别计算两种标准方法的平均绝对误差、均方误差及相关系数如表 2 所示。 CV-SVM 预测模型的各项误差指标均优于标准方法,因此针对含体积型缺陷的集输管道,使用失效压力预测模型可在保障计算效率的同时提

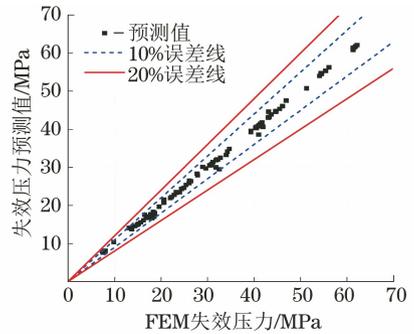


图 12 预测模型与有限元模型所得管道失效压力的相对误差
Fig. 12 Relative error of pipeline failure pressure obtained by prediction model and finite element model

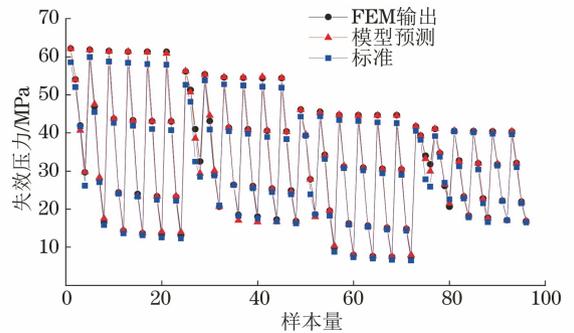


图 13 预测模型与标准方法的失效压力计算结果对比
Fig. 13 Comparison of failure pressure calculation results between prediction model and standard method

表 2 预测模型与标准方法的误差指标

Tab. 2 Error indexes of prediction model and standard methods

参数	平均绝对误差 MAPE/%	均方误差 MSE	相关系数 R^2
两种标准方法	4.45	0.203	0.981
CV-SVM 预测模型	1.34	0.062	0.998

高准确率,可应用于管道工程适用性评估。

5 结论

(1) 根据径厚比为 13~20 管道的内压爆破试验结果,确定了管道失效判定准则,即腐蚀区管道应力最大处壁厚方向内侧节点的等效应力达到管材抗拉强度。

(2) 不同缺陷长度下,改进的 ASME B31G 方法过于保守,不适用于集输管道剩余强度评价。DNV-RP-F101 方法仅适用于缺陷长度大于 1D 的集输管道剩余强度评价,针对缺陷长度小于 1D 的集输管道可采用 PCORRC 方法进行剩余强度评价。

(3) 改进的 ASME B31G 方法在缺陷深度为 0.5~2 mm 下的计算结果均过于保守,不适用于该缺陷范围内集输管道剩余强度评价;PCORRC 与 DNV-RP-F101 方法的预测结果均具有一定的保守性,其中 DNV-RP-F101 方法的预测准确率较高,因此优先推荐使用 DNV-RP-F101 方法。

(4) 不同缺陷宽度下,改进的 ASME B31G 方法均过于保守,不适用于集输管道剩余强度评价。PCORRC 与 DNV-RP-F101 方法计算结果均具有一定的保守性,其中 DNV-RP-F101 方法计算结果准确率较高,因此优先推荐使用 DNV-RP-F101 评价方法。

(5) 提出了基于 CV-SVM 的集输管道失效压力预测模型,对比标准方法计算结果,准确率提高了 3.11%,可应用于工程中管道失效预测。

参考文献:

[1] 贺耀庆. 油气集输管道腐蚀现状与对策[J]. 云南化工, 2020, 47(7): 177-178.
HE Y Q. Corrosion status and countermeasures of oil and gas gathering and transmission pipeline [J]. Yunnan Chemical Technology, 2020, 47(7): 177-178.

[2] 刘碧峰, 刘博洋. 大港南部油田地面设施腐蚀原因探讨[J]. 石油规划设计, 2016, 28(1): 10-14, 54.
LIU B F, LIU B Y. The discussion about the corrosion reason of ground facilities in southern dagang oilfield [J]. Petroleum Planning & Engineering, 2016, 28(1): 10-14, 54.

[3] 唐善法, 付绍斌, 张永祥, 等. 濮城油田一矿注水系统腐蚀影响因素及机理研究[J]. 油田地面工程, 1997, 16(5): 40-42, 78.
TANG S F, FU S B, ZHANG Y X, et al. A study on affecting elements to waterflood system corrosion and its mechanism at first production team Pu-Cheng

oilfield[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 1997, 16(5): 40-42, 78.

[4] 张爱社, 纪云岭, 吝爱芳, 等. 中原油田油系统腐蚀状况分析及对策[J]. 石油与天然气化工, 2002, 31(1): 41-43.
ZHANG A S, JI Y L, LIN A F, et al. Analysis and solution methods of corrosion in oil-producing systems of zhongyuan oilfield[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2002, 31(1): 41-43.

[5] 王宏伟, 张小峰. 油田高含水期集输管线腐蚀原因及防腐技术分析[J]. 化学工程与装备, 2014(12): 156-157.
WANG H W, ZHANG X F. Analysis on corrosion causes and anticorrosion technology of gathering pipeline in high water cut period of oilfield [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2014(12): 156-157.

[6] 慕立俊, 赵文轸. 腐蚀的电化学研究现状[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2008, 25(6): 5-9.
MU L J, ZHAO W Z. The development of corrosion research by electrochemical technologies[J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2008, 25(6): 5-9.

[7] ALI ABD A, NAJI S Z, HASHIM A S. Failure analysis of carbon dioxide corrosion through wet natural gas gathering pipelines[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 105: 638-646.

[8] KIEFNER J F, VIETH P H. A Modified criterion for evaluation the remaining strength of corroded pipe; PR-3-805[R]. [S. l. : s. n.], 1989.

[9] STEPHENS D R, LEIS B N. Development of an alternative criterion for residual strength of corrosion defects in moderate- to high-toughness pipe[C]//2000 3rd International Pipeline Conference. Alberta, Canada; [s. n.], 2016.

[10] 杨理践, 刘凤艳, 高松巍. 基于腐蚀缺陷管道的剩余强度评价标准应用[J]. 沈阳工业大学学报, 2014, 36(3): 297-302.
YANG L J, LIU F Y, GAO S W. Application of evaluation criteria for remaining strength of pipeline based on corrosion defect [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2014, 36(3): 297-302.

[11] 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 X T, WANG Q Y, SUN P P, 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.

- [12] WANG N Y, ZARGHAMEE M S. Evaluating fitness-for-service of corroded metal pipelines: structural reliability bases [J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2014, 5 (1): 04013012-04013012.
- [13] 何雨珂,孔令圳,王金鑫,等. 基于有限元的含腐蚀缺陷原油集输管道剩余强度研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2021, 17(10): 127-132.
HE Y K, KONG L Z, WANG J X, et al. Study on residual strength of crude oil gathering and transportation pipeline containing corrosion defects based on finite element[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2021, 17(10): 127-132.
- [14] 廖特权. 集输管道外腐蚀有效应力及剩余寿命数值模拟研究[J]. *化学工程与装备*, 2018(10): 158-161.
LIAO T Q. Numerical simulation study on effective stress and residual life of external corrosion of gathering and transportation pipeline [J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2018(10): 158-161.
- [15] 刘啸奔,张宏,李勤,等. 含腐蚀缺陷 N80 油管的剩余强度分析[J]. *腐蚀与防护*, 2016, 37(11): 913-916, 920.
LIU X B, ZHANG H, LI M, et al. Residual strength analysis of N80 oil tubes with corrosion defects[J]. *Corrosion & Protection*, 2016, 37(11): 913-916, 920.
- [16] 史交齐,贾路,邓力,等. 含腐蚀坑油管剩余内压强度研究[J]. *石油矿场机械*, 2016, 45(2): 10-15.
SHI J Q, JIA L, DENG L, et al. Study on residual internal pressure strength of tubing with corrosion pit [J]. *Oil Field Equipment*, 2016, 45(2): 10-15.
- [17] 者娜,杨剑锋,刘文彬,等. 基于 KPCA 和 SVM 的工艺管道腐蚀速率预测[J]. *腐蚀与防护*, 2019, 40(1): 56-60.
ZHE N, YANG J F, LIU W B, et al. Prediction of corrosion rate of process pipeline based on KPCA and SVM[J]. *Corrosion & Protection*, 2019, 40(1): 56-60.

Applicability of Residual Strength Evaluation Method for Gathering and Transportation Pipelines with Volume Defects

HAN Bing¹, JI Beilei², FU Qiang¹, ZHANG Xinliang¹

(1. China National Institute of Standardization, Beijing 100191, China;

2. National Engineering Laboratory for Pipeline Safety, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China)

Abstract: Based on the internal pressure blasting test data of the pipeline with a diameter-to-thickness ratio of 13—20, the failure criteria of the numerical calculation model of the gathering pipeline with corrosion defects were established, and the applicability of the three standard evaluation methods under different defect sizes was compared and analyzed. On this basis, based on the cross-validation optimized support vector machine (CV-SVM) algorithm, the failure pressure prediction model of gathering pipeline was established, and the prediction effect of the prediction model and the standard method was compared and analyzed. The results show that DNV-RP-F101 standard method was suitable for gathering and transportation pipelines with relatively small diameter thickness under different defect lengths, depths and widths. However, when the defect length was less than 1D(D was the outer diameter of the pipe), this method becomes conservative, and PCORRC standard method was recommended. Compared with standard methods, the accuracy of the prediction model increased by 3.11% which was suitable for the failure prediction of the gathering and transportation pipeline with corrosion defects.

Key words: gathering and transportation pipeline; internal corrosion; failure criterion; evaluation method; prediction model