

文章编号:1673-5005(2021)02-0141-08 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2021.02.017

含外表面轴向裂纹管道评估模型预测精度统计推断

郭凌云^{1,2}, 周 晶^{1,2}

(1. 大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024;
2. 大连理工大学建设工程学部土木工程学院工程抗震研究所, 辽宁大连 116024)

摘要:含裂纹管道评估模型预测精度的分布情况对研究管道失效概率和改进模型都至关重要。基于 89 组实验数据, 结合极大似然估计法和 Kolmogorov-Smirnov 检验对 7 种含外表面轴向裂纹管道安全评估模型的预测精度进行统计推断, 并根据其分布规律对不同模型的预测性能进行对比分析。结果表明:除 Battelle 和 CorLAS 模型的预测精度分别服从 Gumbel 分布和正态分布外, 其他规范的预测精度均服从对数正态分布; 7 种模型的优先级顺序和推荐情况为 R6-3、R6-1(或 API)、R6-2 和 SINTAP 规范; BS7910 和 GB 规范应适用于要求比较高的项目; CorLAS 和 Battelle 模型可用于项目的预估计; 采用失效评定图(FAD)评估模型, 两种 FAD 曲线无明显差异, 受断裂比的影响较大, 因此可通过改进断裂比的计算精度提高模型的预测水平。

关键词:含外表面轴向裂纹管道; 预测精度; 统计推断; 极大似然估计; Kolmogorov-Smirnov 检验

中图分类号:TU 81 **文献标志码:**A

引用格式:郭凌云, 周晶. 含外表面轴向裂纹管道评估模型预测精度统计推断[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(2): 141-148.

GUO Lingyun, ZHOU Jing. Statistical inference on prediction accuracy of evaluation models for a pipeline with axial surface cracks[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(2): 141-148.

Statistical inference on prediction accuracy of evaluation models for a pipeline with axial surface cracks

GUO Lingyun^{1,2}, ZHOU Jing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coast and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Institute of Earthquake Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology,
Dalian 116024, China)

Abstract: The distribution of the prediction accuracy for evaluation model plays an important role in studying the failure probability and improving the burst capacity model for the crack-containing pipeline. Based on 89 sets of test data, the prediction accuracy of seven evaluation models was statistically inferred by the maximum likelihood estimation and the Kolmogorov-Smirnov test. According to the distribution law, the prediction performance of different models was compared and analyzed. The results show that, the prediction accuracy of Battelle and CorLAS obeys the Gumbel distribution and the normal distribution respectively, while those of others all obey the lognormal distribution. The priority order and application of the seven models are R6-3, R6-1 (or API), R6-2 and SINTAP specifications. BS7910 and GB should be applied to the evaluation projects with high demand, and CorLAS and Battelle are suitable for the pre-estimation of the projects. The models based on failure assessment diagram (FAD), where the two FAD curves are not significantly different, are influenced by the fracture ratio. Therefore, the prediction performance of the model can be enhanced by improving its computational accuracy.

Keywords: pipeline with axial surface cracks; prediction accuracy; statistical inference; maximum likelihood estimation; Kolmogorov-Smirnov test

收稿日期:2020-03-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0802402)

第一作者:郭凌云(1994-),女,博士研究生,研究方向为管道极限承载力和风险分析。E-mail:andyguo@mail.dlut.edu.cn。

近年来随着既有管道的老化,管道失效时有发生,严重地影响了油气等物质的正常运输^[1-2]。为了更好地对管道进行运营管理,研究管道的失效状态,确定管道的临界失效内压至关重要。目前,中国关于管道失效模型的研究主要集中在腐蚀管道上^[3],针对含裂纹管道的失效研究则比较匮乏。有关含裂纹管道的评估主要借鉴锅炉等压力容器的失效规范,并且适用范围有限。因此研究含裂纹管道的失效机制对于完善我国管道基础规范意义重大。关于含裂纹管道失效,一些研究基于工程经验、实验和有限元模拟进行拟合,并形成一些模型,如 CorLAS 模型^[4]、Battelle 模型^[5]和 SINTAP 规范^[6]等。大多数模型虽然便于操作,但忽略了预测过程的不确定,故而产生极大隐患。因此,应对预测模型的误差分布进行研究,但有关裂纹管道误差统计的分析尚处于探索阶段,研究成果匮乏、分析片面、研究深度有限,如 Mahmoud 等^[7]主要停留在采用均值和变异系数等统计学参数对模型误差进行分析上;Cosham 等^[8]仅对比了 NG-18 模型和 BS7910:2005 规范管道失效内压的散点分布等。针对该问题,利用极大似然估计法(MLE)^[9]进行参数拟合,结合 Kolmogorov-Smirnov 检验(K-S 检验)^[10]对预测精度分布规律进行拟合优度测量,从而选择满足检验的最优拟合分布。笔者基于机器学习和统计学相关理论对内压荷载下含外表面轴向裂纹管道的评价模型预测精度进行分析。

1 轴向外裂纹管道评估标准

利用 7 种常用的裂纹管道计算模型进行分析,包括: Battelle、CorLAS、API RP 579、SINTAP/FITNET FFS、BS7910:2019、R6 和 GB/T 19624-2019 在用含缺陷压力容器安全评定^[4,6,11-18]。除 Battelle 和 CorLAS 模型外,其余模型均采用 FAD 图进行评价,如图 1 所示。当点 B 位于蓝线以内时,结构安全;位于蓝线以外时,结构失效;位于曲线上时,结构处于临界状态。直线 OB 与失效力曲线的交点 A 为管道预测失效点,据此可得临界失效压力。值得注意的是,除 Battelle 模型将裂纹剖面简化为矩形截面进行计算外,其他规范中一律简化为半椭圆状裂纹剖面计算,简化剖面的深度和长度分别为裂纹剖面的最大深度和长度。

$$L_r = \sigma_{ref} / \sigma_y, \quad (1)$$

$$K_r = K_I / K_{mat}. \quad (2)$$

式中, L_r 为荷载比; σ_{ref} 为参考应力, MPa; σ_y 为屈服

应力, MPa; K_I 为应力强度因子, $\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$; K_{mat} 为断裂韧度, $\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$; K_r 为韧度比; $L_y^{\max}$ 为截止线值, 无特殊说明时为 $L_r^{\max} = (\sigma_y + \sigma_u) / 2\sigma_y$ 。

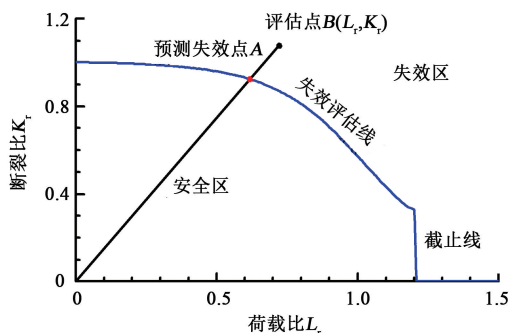


图 1 裂纹管道失效评估

Fig. 1 Failure assessment diagram of crack-containing pipeline

1.1 Battelle 模型

Battelle 模型是美国 Battelle 实验室于 20 世纪 60、70 年代开发的用于预测仅承受内压的含有轴向表面裂纹管道的爆破压力半经验模型, 又称 ln-sec 模型或 NG-18 方程^[4]。该模型基于流动应力和断裂韧性两个破坏准则确定爆破压力, 表示为

$$p_0 = \min \left\{ \begin{aligned} & \frac{2t\sigma_f}{D} \frac{1-a/t}{1-a/(Mt)}, \\ & \frac{4t\sigma_f}{\pi D} \frac{1-a/t}{1-a/(Mt)} \arccos \left[\exp \left(-\frac{\pi K_{mat}^2}{8c\sigma_f^2} \right) \right] \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

其中

$$\sigma_f = \sigma_y + 68.95,$$

$$M = \begin{cases} \sqrt{1 + 0.06275 \left(\frac{2c}{\sqrt{Dt}} \right)^2 - 0.003375 \left(\frac{2c}{\sqrt{Dt}} \right)^4}, & \left(\frac{2c}{\sqrt{Dt}} \right)^2 \leq 50; \\ 3.3 + 0.032 \left(\frac{2c}{\sqrt{Dt}} \right)^2, & \left(\frac{2c}{\sqrt{Dt}} \right)^2 > 50. \end{cases}$$

$$K_{mat} = \left(\frac{C_v E}{A_c} \right)^{0.5}.$$

式中, a 为裂纹深度, mm; c 为裂纹半长度, mm; t 为管壁厚度, mm; D 为管外直径, mm; σ_f 为管道材料流动应力, MPa; p_0 为管道预测极限内压, MPa; M 为 Folias 鼓胀系数; E 为弹性模量, MPa; C_v 为夏比冲击能, J; A_c 为夏比冲击试样的净横截面积(全尺寸试样截面面积为 80 mm^2 , $2/3$ 尺寸试样截面面积为 53.55 mm^2), mm^2 。

1.2 CorLAS 模型

CorLAS 模型为 CC 技术公司开发的评估管道完整性的常用工具^[5]。该模型与 Battelle 模型类似, 考虑两个独立的失效准则: 流动应力准则和断裂韧

性准则。爆破压力计算式为

$$p_0 = \frac{2t}{D} \sigma_{\text{crit}} \left(\frac{1 - \frac{\pi a}{4t}}{1 - \frac{\pi a}{4tM}} \right). \quad (4)$$

其中

$$\sigma_{\text{crit}} = \min \{ \sigma_f, \sigma_1 \}, \sigma_f = (\sigma_y + \sigma_u) / 2.$$

式中, σ_{crit} 为许用应力, MPa; σ_1 为基于韧性准则的裂纹局部破坏应力, MPa。

σ_1 可通过求解 $J = J_c$ 获得, 其中 $J_c = C_v / A_c$ 。式中, J 为抗断裂性, 计算过程详见文献[4]附录 A, kJ/m^2 ; J_c 为 J 积分的临界积分, 表示断裂韧性, kJ/m^2 。

1.3 SINTAP/FITNET FFS

SINTAP 是欧洲共同体基于断裂力学针对缺陷结构所编制的评价规范^[6], 并由多所研究机构发展为 FITNET FFS 商定评价程序, 广泛用于各类金属部件的评估中^[11]。在 SINTAP 评价规范中, 根据所提供的材料数据的详尽程度分 7 个等级, 即 Level 0 ~ Level 6。主要利用 Level 1 对压力裂纹管道进行评估, 该等级分为 Level 1A 和 Level 1B。

当管材有屈服平台时, 采用 Level 1A 评估准则进行研究, 表示为

$$f(L_r) = \begin{cases} (1 + \frac{1}{2} L_r^2)^{-0.5}, L_r < 1; \\ (\lambda + 1/2\lambda)^{0.5}, L_r = 1; \\ f(1) L_r^{\frac{(N-1)}{2N}}, 1 < L_r \leq L_r^{\text{max}}; \\ 0, L_r > L_r^{\text{max}}. \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\lambda = 1 + (E\Delta\varepsilon)/\sigma_y$, $\Delta\varepsilon = 0.0375(1 - \sigma_y/1000)$; $N = 0.3(1 - \sigma_y/\sigma_u)$ 。

当管材无屈服平台时, 采用 Level 1B 进行评估, 表示为

$$f(L_r) = \begin{cases} (1 + L_r^2/2)^{-0.5} (0.3 + 0.7e^{-\mu L_r^6}), L_r \leq 1; \\ f(1) L_r^{(N-1)/(2N)}, 1 < L_r \leq L_r^{\text{max}}; \\ 0, L_r > L_r^{\text{max}}. \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\mu = \min [0.001(E/\sigma_{0.2}); 0.6].$$

式中, $\sigma_{0.2}$ 为无屈服平台金属材料的屈服强度, MPa。

本规范的荷载比 L_r 计算式为

$$L_r = p_m / (1 - \zeta) \sigma_y. \quad (7)$$

其中

$$\zeta = ac / [t(c+t)].$$

式中, p_m 为薄膜应力, MPa, 适用于 $a/t \leq 0.8$ 。

K_r 的表达式见式(2), K_I 的计算过程及应用范围详见文献[12]附录 A1.2.2。 $K_{\text{mat}}^{[13]}$ 的计算式为 $K_{\text{mat}} = [(12\sqrt{C_v} - 20)(25/t)^{0.25}] + 20$ 。

1.4 BS7910:2019

BS7910:2019 是英国标准委员会于 2019 年发表的金属结构缺陷评估标准, 记为 BS7910^[14]。该标准分 3 个评价等级, 即 Option 1 ~ Option 3。采用 Option1 等级进行评估, Option 1 的计算过程与 SINTAP 的 Level 1 一致, 分为材料有无屈服平台情况, 见式(5)和式(6)。其 L_r 和 K_r 的表达式为式(1)和式(2)。 σ_{ref} 和 K_I 的计算过程和应用范围详见该规范附件 P 和附件 M。 K_{mat} 计算式为

$$K_{\text{mat}} = \min \left\{ \begin{aligned} &[(12\sqrt{C_v} - 20)(25/t)^{0.25}] + 20 \\ &0.54C_v + 55 \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

1.5 R6

R6 是由英国中央电力局发布的评估金属缺陷结构方法, 分 3 级评价, 即 Option1 ~ Option3^[15]。其中 Option 2A 是 Option 2 的近似, 是常用的评估选项, 因此采用 Option 2A 进行研究。Option 2A 的表示与 SINTAP 的 Level 1 和 BS7910:2019 的 Option1 相同, 如式(5)和(6)所示。

L_r 的表达式为

$$L_r = p/p_L. \quad (9)$$

塑性破坏极限内压 p_L 有全局解和局部解两种形式。其中全局解是轴向方向不稳定而造成的全面爆破, 依赖于屈服准则, 可用 Tresca 和 Von Mises 准则进行研究, 结果记为 R6-1 和 R6-2; 局部解是壁厚方向上的不稳定而导致的局部塌陷, 结果记为 R6-3, 具体计算见文献[4]附录 B。

K_r 计算见式(2), 其中 K_I 的计算详见该规范 IV.3.4.3 节。 K_{mat} 基于 Rolfe - Novak - Barsom 模型^[16], 计算式为

$$K_{\text{mat}} = \sigma_y \sqrt{0.64 \left(\frac{C_v}{\sigma_y} - 0.01 \right)}. \quad (10)$$

1.6 API RP 579

API RP 579 是由美国机械工程师协会与美国石油协会共同研究的缺陷承压设备适用性评价规范^[17], 记为 API, 包含 3 个等级, 即 Level 1 ~ Level 3。利用 Level 2 进行分析, 表示为

$$K_r = \begin{cases} (1 - 0.14L_r^2)(0.3 + 0.7e^{-0.65L_r^6}), L_r \leq L_r^{\text{max}}; \\ 0, L_r > L_r^{\text{max}}. \end{cases} \quad (11)$$

L_r 和 K_r 可用式(1)和(2)计算。 σ_{ref} 和 K_I 的计

算过程及适用范围详见该规范 9B. 5. 10 和 9C. 5. 10 节,其中 K_I 与 R6 计算一致。 K_{mat} 的计算与 R6 规范中的 K_{mat} 规定一致,用式(10)进行求解。

1.7 GB/T 19624-2019 在用含缺陷压力容器安全评定

《GB/T 19624-2019 在用含缺陷压力容器安全评定》是中国的缺陷压力容器评估规范,记为 GB^[18]。规范中针对裂纹缺陷的评定分为简化评定、常规评定和分析评定。采用常规评定进行分析。常规评定的分析曲线与 API 的 Level 2 评估曲线一致,表达如式(11),其截止线为 $L_r^{max} = \min\{1.2, (\sigma_y + \sigma_u)/(2\sigma_y)\}$ 。

L_r 和 K_r 的计算见式(1)和式(2)。 σ_{ref} 的计算过程与 BS7910 的 σ_{ref} 一致,见该规范附录 A. 4。但该规范并未对含外表面裂纹管道的 K_I 进行规定,由于规范中内表面裂纹管道的 K_I 计算与规范 BS7910 计算一致,故本文中参考 BS7910 的 K_I 计算对其分析。此外, K_{mat} 与 BS7910 的 K_{mat} 计算一致。

2 数据实验

分析含裂纹管道预测爆破内压,收集含裂纹的管道爆破数据,且满足要求:①管道径厚比为 $D/t > 22$;②缺陷类型为外表面轴向裂纹;③裂纹剖面为半椭圆或矩形剖面,且裂纹深度小于壁厚的 0.8 倍;④所受荷载仅为内部压力。

根据以上条件,从文献中筛选出爆破实验数据 89 组^[19-27],参数范围见表 1。

表 1 实验数据的参数范围

Table 1 Parameters range of test data

参数类型	参数上限	参数下限
管道外径 D/mm	1580.000	88.900
管壁厚度 t/mm	40.000	4.000
裂纹深度 a/mm	28.040	1.000
裂纹长度 $2c/\text{mm}$	560.000	8.000
径厚比 D/t	103.960	22.225
a/c	0.961	0.009
a/t	0.799	0.189
屈服极限/MPa	1450.700	266.100
极限抗拉强度/MPa	1611.100	388.000
夏比能 C_v/J	261.000	16.272
实验爆破内压 p_c/MPa	70.271	4.371

需要注意,由于各规范适用范围不同,因此并非所有规范都能计算出每组实验的预测压力。其中 Battelle, SINTAP, BS7910 和 GB 模型可预测 89 组数

据;CorLAS 可预测 84 组数据,而 R6 和 API 可预测 74 组数据。

3 统计推断

基于 89 组数据计算含裂纹管道失效压力 p_0 ,并将其归一化(p_0/p_c),获得预测精度 P_A 。基于极大似然估计法(MLE)和 Kolmogorov-Smirno 检验(K-S 检验)对 P_A 分布进行参数估计和拟合优度评定。

3.1 假设分布及其参数确定

采用 Melchers 等^[28]提出的常用误差分布模型对 P_A 的分布进行假设,即正态、对数正态、Gumbel、Frechet 和 Weibull 分布。采用 MLE^[9]对其参数进行估计,似然函数为

$$L(\theta, x) = \prod_{i=1}^n f(x_i; \theta).$$
 (12)

式中, $L(\theta, x)$ 为似然函数; x_i 为数据样本; n 为样本容量。

3.2 拟合优度评定

拟合优度评定是机器学习中确定数据分布特征的重要组成。结合数据特征,采用 Kolmogorov-Smirno 检验(K-S 检验)进行拟合优度分析^[10]。该检验是基于累积频率 $F_n(x)$ 和假设分布函数 $F(x)$ 的偏差 D 判断样本是否服从假设分布,表示为

$$D = \max_{-\infty \leq x \leq +\infty} |F_n(x) - F(x)|.$$
 (13)

式中, $F_n(x)$ 为观测累积分布对应值; $F(x)$ 为假设分布对应值; D 为累积分布与假设分布偏差。

获得 D 值后,该检验根据 Kolmogorov 表计算对应 P 。当 P 大于置信度 α (取 0.05)时,接收 H_0 ,即从统计意义上认为,样本服从假设分布,反之亦然。因此最优分布需满足 $P > \alpha$,且偏差 D 最小。

4 分析与讨论

图 2 和表 2 分别为不同模型的 P_A 分布情况和不同假设分布的拟合优度。基于图 2 和表 2 的数据拟合情况,确定不同规范的 P_A 最优拟合分布($P > 0.05, D$ 最大),见表 3。

基于表 3 不同模型的 P_A 分布,绘制其概率分布,见图 3。利用 P_A 大于 1、小于 0.5 和介于 0.5 与 1 之间的概率分别代表预测结果危险性、保守性和集中性,并进行计算见表 4。综合以上计算结果,按图 3 的 P_A 分布从右到左依次分析模型的预测性能。

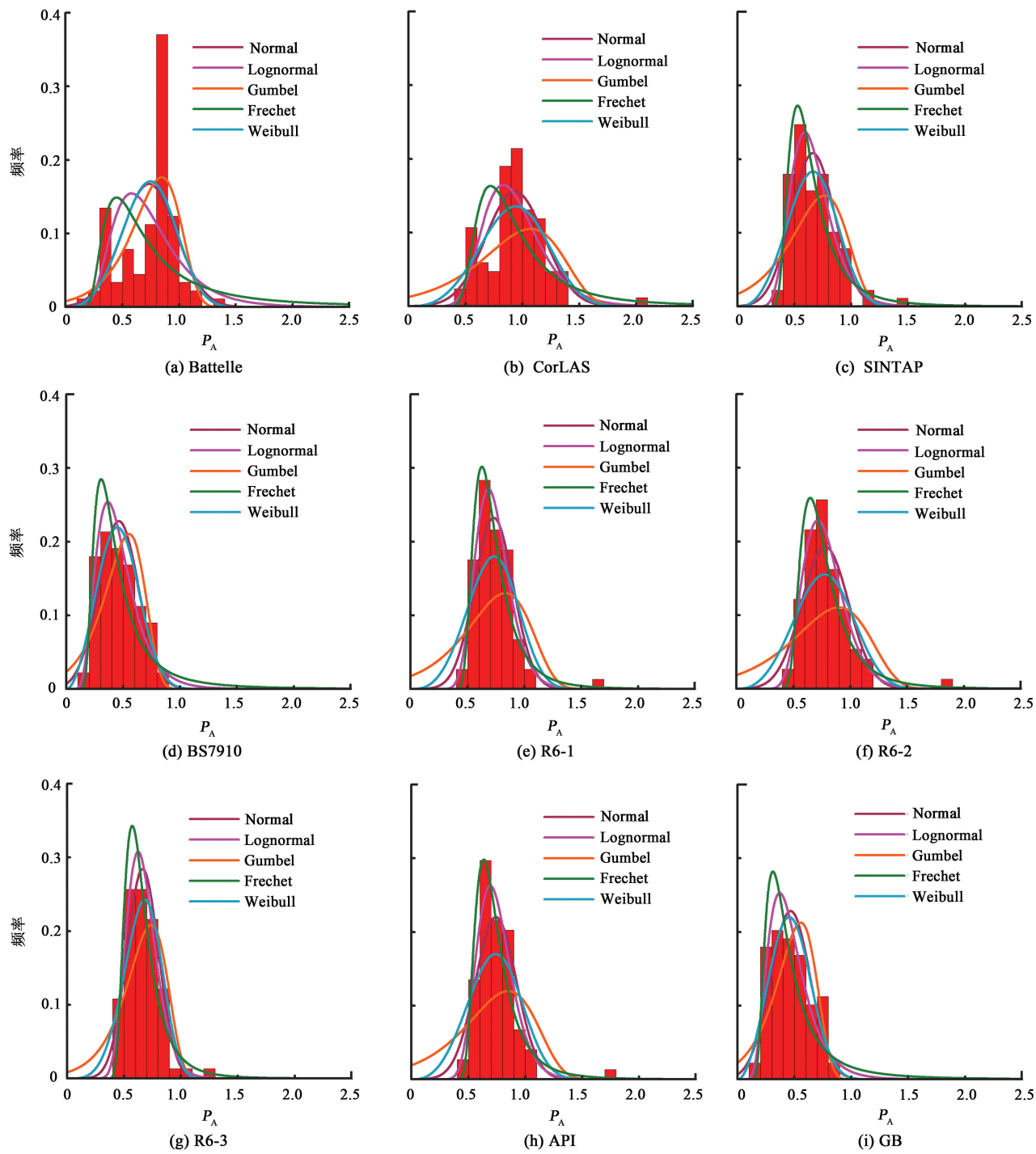


图 2 不同模型的 P_A 分布

Fig. 2 Distribution of P_A for different models

CorLAS 模型的 P_A 服从参数为 0.935 和 0.287 的正态分布,并具有如下性质:①直方图具有多峰性;②所服从分布的峰值出现在 1 附近,且高度最低,即离散度最高;③危险性对应概率为 40.02%,远高于其他规范。这些特性说明该组规范预测虽然正确性较高,但预测稳定性能低,预测结果最为危险。因此采用此规范进行预测时,应慎重使用其预

测结果。

Battelle 模型的 P_A 用参数为 0.848 和 0.208 的 Gumble 分布进行描述。相较于其他规范,该规范的预测精度有以下特点:①直方图呈现多峰性;②所服从的分布峰值位置偏左,且高度低;③危险性概率为 12.53%,保守性的概率为 17.21%。这些特点均反映了该规范的预测性能不稳定,危险性和保守性均

偏高。因此该规范所计算的结果也应谨慎使用。

表 2 不同模型的 P_A 的假设分布拟合优度

Table 2 Goodness-of-fit of P_A hypothetical distribution for different models

评估模型	正态分布	对数正态分布	Gumble分布	Frechet分布	Weibull分布
Battelle	0.175 (0.007)	0.231 (0.000)	0.119 (0.146)	0.237 (0.000)	0.173 (0.008)
CorLAS	0.089 (0.487)	0.133 (0.094)	0.166 (0.018)	0.193 (0.003)	0.115 (0.200)
SINTAP	0.100 (0.312)	0.066 (0.810)	0.180 (0.006)	0.078 (0.631)	0.094 (0.393)
BS7910	0.094 (0.390)	0.081 (0.568)	0.123 (0.127)	0.101 (0.303)	0.082 (0.566)
R-1	0.097 (0.460)	0.051 (0.984)	0.250 (0.000)	0.082 (0.667)	0.146 (0.076)
R-2	0.098 (0.442)	0.054 (0.973)	0.247 (0.000)	0.076 (0.763)	0.137 (0.113)
R-3	0.069 (0.851)	0.060 (0.935)	0.173 (0.021)	0.096 (0.472)	0.107 (0.337)
API	0.088 (0.581)	0.046 (0.995)	0.264 (0.000)	0.073 (0.801)	0.157 (0.046)
GB	0.094 (0.386)	0.077 (0.639)	0.134 (0.073)	0.103 (0.286)	0.084 (0.525)

注:表中数字代表 D 值,括号内数字代表 P 值。

表 3 不同模型 P_A 的最优拟合分布

Table 3 Best-fit distribution of P_A for different models

评估模型	分布类型	位置参数	形状参数
Battelle	Gumble	0.848	0.208
CorLAS	正态	0.935	0.256
SINTAP	对数正态	-0.451	0.275
BS7910	对数正态	-0.850	0.398
R-1	对数正态	-0.337	0.210
R-2	对数正态	-0.279	0.237
R-3	对数正态	-0.430	0.203
API	对数正态	-0.322	0.214
GB	对数正态	-0.838	0.394

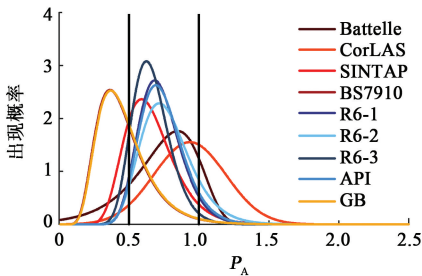


图 3 不同模型 P_A 的分布概率密度

Fig. 3 Probability density diagram of P_A for different models

R6-1、R6-2、R6-3 和 API 规范预测性质相近,都具有以下特点:①直方图为单峰分布,预测结果稳定;②服从对数正态分布,且峰值位置相差不大,在 0.7 附近;③集中性,介于 0.5 到 1.0 之间的概率超

过 80%。因此该组规范的预测性质明显优于前两组。分析该组规范彼此间差异,基于预测性能相差不大时,推荐危险性较低的预测模型的原则,结合峰值高度、危险性、保守性可以得出:①R6-3 的危险性为 1.72%,非常理想,但保守性偏高,为 9.79%,总体预测效果最优;②R6-1 和 API 的危险性偏高,约 6%,但稳定性和保守性均衡,故预测效果次之;③R6-2 危险性相对最高,为 11.99%,但保守性和稳定性均衡,故组内最差。因此使用该组规范进行预测时,推荐顺序为 R6-3、R6-1(或 API)和 R6-2。

表 4 不同模型 P_A 的预测性能

Table 4 Prediction performance of P_A for different models

评估模型	危险性 ($P_A > 1$)	集中性 ($0.5 \leq P_A \leq 1$)	保守性 ($P_A < 1$)
Battelle	12.53%	70.27%	17.21%
CorLAS	40.02%	55.51%	4.47%
SINTAP	5.04%	75.97%	18.99%
BS7910	1.63%	33.05%	65.32%
R-1	5.45%	90.07%	4.48%
R-2	11.99%	84.00%	4.01%
R-3	1.72%	88.49%	9.79%
API	6.63%	89.20%	4.16%
GB	1.68%	33.98%	64.35%

SINTAP 规范的 P_A 服从参数为 -0.451 和 0.275 的对数正态分布。其预测特点有:①直方图为单峰,预测稳定性高;②峰值出现位置偏小,约为 0.6;③保守性概率偏高,为 18.99%,危险性概率较低,为 5.04%。相较其他规范,该模型的预测稳定性较好,危险性也较低,但保守性偏高。因此在预测管道失效内压时,该规范的优先级低于第三组规范。

BS7910 和 GB 规范的 P_A 预测分布几乎重合,呈对数正态分布,其分布性质有:①直方图为明显单峰;②分布的峰值位置出现在 0.4 附近;③保守性概率约为 65%,危险性概率约为 1.6%。以上特性反映:该组规范预测相对稳定,但过于保守,可能会造成材料一定程度上的浪费。因此建议该组规范适用于安全系数要求比较高的工况。

观察第三组规范和第五组规范,发现:BS7910 和 GB 规范的荷载比和断裂比的算法相同,R6-1、R6-2、R6-3 和 API 规范中计算断裂比的方法相同。该现象表明:当断裂比和荷载比的计算方法均相同时,预测分布基本重合,反映上述模型中的两种 FAD 曲线无明显区别。当仅有断裂比的计算方法相同时,预测值的分布形状及位置会表现出一定的相似之处,即断裂比对于预测模型的预测性能有较大影响。综上所述,对采用 FAD 图评价的模型来

说,两种 FAD 曲线彼此间无明显差异,受断裂比的影响较大。

5 结 论

(1) 基于 MLE 和 K-S 检验法对不同规范的 P_A 进行参数估计和分布检验。除 Battelle 和 CorLAS 的 P_A 分别服从 Gumble 分布和正态分布外,其他规范的预测结果服从对数正态分布。

(2) 综合预测数据的稳定性与危险性,分析不同评估模型时:优先采用 R6-3、R6-1(或 API)和 R6-2,其次采用 SINTAP;BS7910 和 GB 适用于安全要求比较高的项目;CorLAS 和 Battelle 模型用于裂纹管道失效内压的预估计。

(3) 对于 FAD 图模型,两种 FAD 图曲线无明显差异,受断裂比的计算方法影响较大。可以通过改进这断裂比的计算精度进而提高含裂纹管道爆破压力的预测。

参考文献:

- [1] 郑晓云,陈国明,付建民,等. 保冷层对液相管道泄漏影响的试验与仿真研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2020,44(2):127-135.
ZHENG Xiaoyun, CHEN Guoming, FU Jianmin, et al. Experimental and simulation studies on influence of cold-keeping layer on liquid leakage of pipeline[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020, 44(2): 127-135.
- [2] 吕祥鸿,张晔,谢俊锋,等. 高 pH 值完井液中超级 13Cr 油管的腐蚀失效及 SCC 机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2020,44(1):141-148.
LÜ Xianghong, ZHANG Ye, XIE Junfeng, et al. Corrosion failure and SCC mechanism of super 13Cr tubings in high Ph completion fluid[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020, 44(1): 141-148.
- [3] 郭凌云,周晶,代云云. 基于不同随机退化过程的腐蚀管道时变失效概率分析[J]. 石油学报,2019,40(12):1542-1552.
GUO Lingyun, ZHOU Jing, DAI Yunyun. Time dependent failure probability analysis of corroded pipelines based on different stochastic degradation processes[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(12): 1542-1552.
- [4] YAN Z, ZHANG S, ZHOU W. Model error assessment of burst capacity models for energy pipelines containing surface cracks[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2014, 120/121: 80-92.
- [5] YAN J, ZHANG, S W, KARIYAWASAM, et al. Validate crack assessment models with in-service and hydrotest failure; International Pipeline Conference[C]. Alberta: ASME, 2018.
- [6] WEBSTER S, BANNISTER A. Structural integrity assessment procedure for Europe-of the SINTAP programmer overview [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2000, 67(2000): 481-514.
- [7] MAHMOUD I, DOUCETTE K, HASSANIEN S, et al. Effect of model error on reliability analysis of surface crack; International Pipeline Conferences[C]. Alberta: ASME, 2018.
- [8] COSHAM A P, HOPKINS, LEIS B. Crack-like defects in pipelines: the relevance of pipeline-specific methods and standards; International Pipeline Conference [C]. Alberta: ASME, 2012.
- [9] ROBERT V H, ALLEN C, JOSEPH W M. Introduction to mathematical statistics [M]. 7th ed. New Jersey: Pearson Education, 2013: 321-327.
- [10] LOPES R H C. Kolmogorov - Smirnov test[J]. International Encyclopedia of Statistical Science, 2014, 10(1): 718-720.
- [11] GUTIÉRREZ-SOLANA F, CICERO S. FITNET FFS procedure: a unified European procedure for structural integrity assessment[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(2): 559-577.
- [12] AL-LAHAM A. Stress intensity factor and limit load handbook[S]. Gloucester: British Energy Generation Ltd, 1998.
- [13] HAMANN R, ZERBST U. Assessment of typical pipeline flaws with SINTAP; ASME Pressure Vessels & Piping Conference[C]. Canada: ASME, 2008.
- [14] BS 7910. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures [S]. London: British Standards Institution, 2019.
- [15] R6. Assessment of the integrity of the structures containing defects[S]. Gloucester: British Energy Generation Ltd, 2013.
- [16] MUSSINI R, HÉCTOR CANCELA, CLARKE T. Structural reliability assessment of cracked pipes: the role of probability of detection data[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2019, 42(3): 664-673.
- [17] API 579-1/ASME FFS-1. Fitness-for-service [S]. Washington DC: American Petroleum Institute, 2016.
- [18] 中国国家标准化管理委员会. 在用含缺陷压力容器安全评价; GB/T 19624—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.

- [19] KIEFNER J F, MAXEY W A, EIBER R J, et al. Failure stress levels of flaws in pressurized cylinders[J]. Astm Special Technical Publication, 1973 (536): 461-481.
- [20] HOSSEINI A, CRONIN D, PLUMTREE A, et al. Experimental testing and evaluation of crack defects in line pipe: International Pipeline Conference[C]. Alberta: ASME, 2010.
- [21] RUGGIERI C, DOTTA F. Numerical modeling of ductile crack extension in high pressure pipelines with longitudinal flaws[J]. Engineering Structures, 2011, 33(5):1423-1438.
- [22] MANNUCCI G, DEMOFONTI G, HARRIS D, et al. Fracture properties of API X 100 gas pipeline steels[R]. 92-894-3652-2, 2002.
- [23] STOPPLER W, STURM D, SCOTT P, et al. Analysis of the failure behavior of longitudinally flawed pipes and vessels[J]. Nuclear Engineering and Design, 1994, 151(2/3):425-448.
- [24] KANNAN P, AMIRTHAGADESWARAN K S, CHRISTOPHER T. Validation of a leak-before-break criterion using limit load solution[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2015, 15(3):417-423.
- [25] KELLER H P, JUNKER G, MERKER W. Fracture analysis of surface cracks in cylindrical pressure vessels applying the two parameter fracture criterion (TPFC)[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1987, 29(2):113-153.
- [26] BROCKS W, KUNECHE G, WOBST K. Stable crack growth of axial surface flaws in pressure vessels[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1989, 40(1):77-90.
- [27] 帅健, 许葵. 含裂纹管道的失效评定曲线的实例验证[J]. 机械强度, 2003, 25(3):251-253.
SHUAI Jian, XU Kui. Validation of failure assessment curve of linepipe containing cracks[J]. Mechanical Strength, 2003, 25(3):251-253.
- [28] MELCHERS R, BECK A T. Structural reliability analysis and prediction[M]. 3rd ed. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd, 2017:31-61.

(编辑 沈玉英)