

局部腐蚀油气管道失效压力计算方法

崔铭伟¹, 曹学文¹, 封子艳², 张俊¹, 马玉鹏¹

(1. 中国石油大学储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580; 2. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西西安 710075)

摘要:利用管道应力集中理论,以数值模拟数据为基础,建立一种局部腐蚀油气管道失效压力的计算方法。验证非线性有限元法评价局部腐蚀的可靠性,用该方法分析局部腐蚀半径及局部腐蚀深度对管道失效压力的影响;并与其他评价规范计算结果进行对比。结果表明,拟合得到的局部腐蚀油气管道失效压力计算方法的误差小,误差分布均匀,可以满足局部腐蚀油气管道失效压力的预测要求。

关键词:油气管道;局部腐蚀;局部腐蚀尺寸;非线性有限元法;应力集中;计算方法

中图分类号:TE 988.2 **文献标志码:**A

Calculation method of oil-gas pipeline failure pressure with localized corrosion

CUI Ming-wei¹, CAO Xue-wen¹, FENG Zi-yan², ZHANG Jun¹, MA Yu-peng¹

(1. College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Company Limited, Xi'an 710075, China)

Abstract: A method to calculate failure pressure of oil-gas pipeline with localized corrosion defects was established based on stress concentration theory and the numerical simulation data. This method was used to assess the impacts of radius of localized corrosion and localized corrosion depth on oil-gas pipeline failure pressure. The reliability of evaluating the localized corrosion with the non-linear finite element method was also validated. Compared with existing calculation methods, the calculation method introduced has both small error and evenly distributed error in calculating oil-gas pipeline failure pressure, therefore, it meets the requirements of predicting oil-gas pipeline failure pressure with localized corrosion defect.

Key words: oil-gas pipeline; localized corrosion; localized corrosion size; nonlinear finite element method; stress concentration; calculation method

国内油气集输管线的腐蚀问题非常突出,在众多的实际腐蚀失效事例中,局部腐蚀所占比例比全面腐蚀要大得多,油气集输管线外部长期受到土壤介质和杂散电流的腐蚀,内部受到含有 H_2S 、 CO_2 、 Cl^- 等腐蚀性介质的油、气、水的侵蚀,极易发生以点蚀为代表的局部腐蚀。Cosham 等^[1]列举了目前通用的管道缺陷评价方法,如:腐蚀缺陷评价规范 DNV-RP-F101^[2-3]、修正的 B31G 规范^[4-7]及 RSTRENG 规范^[6]、沟槽缺陷评价方法 NG-18 方程^[8]、BS7910^[9]、API579^[10]、裂纹评价方法 BS 7910 (或 API 579) 等,但还没有一套适用于局部腐蚀油气管道失效压力的评价方法。从 20 世纪 90 年代中

期开始,随着计算机技术的发展和有限元理论的不断成熟,以有限元模拟为主、试验为辅的腐蚀管道研究广泛展开,并取得了丰硕成果^[11-16],证明基于应力失效准则的非线性有限元分析预测得到的腐蚀管道的极限内压荷载具有很高的准确性;美国宾夕法尼亚大学和沈阳中科院金属腐蚀与防护研究所的研究者^[17-18]研究了局部腐蚀的生成、发展以及评价方法,但其研究只是针对一般意义上的局部腐蚀,很难直接应用到油气管道中。笔者借助大型有限元分析软件 ANSYS,采用非线性有限元方法,研究局部腐蚀对油气管道的影响,借鉴管道应力集中理论,建立一种适应局部腐蚀油气管道失效压力的计算方法。

1 非线性有限元分析方法

管线局部腐蚀如图 1 所示。非线性有限元分析方法中的失效准则以及相关模拟条件见文献[19]。有限元模型如图 2 所示。

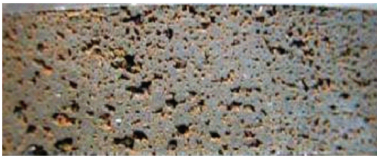
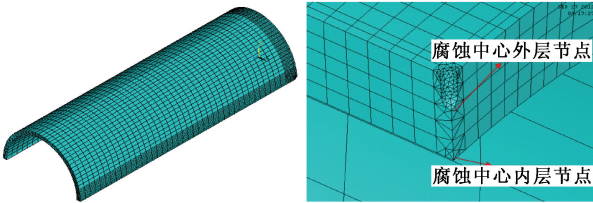


图 1 管线局部腐蚀截图

Fig. 1 Localized pipeline corrosion picture



(a) 带腐蚀缺陷管道1/4模型 (b) 腐蚀缺陷局部放大图

图 2 带腐蚀缺陷管道有限元模型

Fig. 2 Finite element model of pipelines with corrosion defects

为验证网格密度对非线性有限元分析的影响，

在壁厚方向分别划分 2、3、5、7 层网格,轴向和环向网格数量不变,腐蚀周围网格加密。网格层数对模拟结果的影响见图 3。从图 3 可以看出,网格层数对内层节点等效应力影响不大,但对外层节点等效应力稍有影响,随着网格层数的增加,屈服应力点越来越明显,因此非线性有限元模拟中将依据缺陷大小选择 5 层及以上的网格。

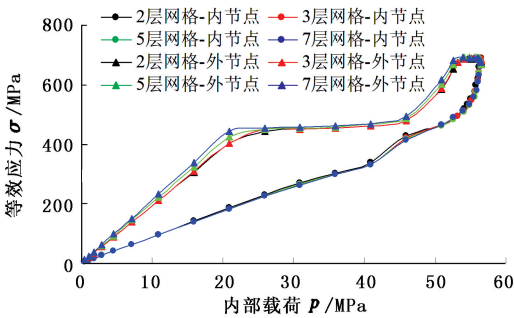


图 3 不同分析模型等效应力随内压的变化

Fig. 3 Changes of equivalent stress with internal pressure in different analysis model

2 材料参数及计算模型

表 1 给出了用于非线性有限元分析的油气管道局部腐蚀缺陷尺寸。

表 1 管道腐蚀缺陷尺寸

Table 1 Corrosion defect size of pipeline

序号	钢级	r_d/mm	β	序号	钢级	r_d/mm	β	序号	钢级	r_d/mm	β	序号	钢级	r_d/mm	β
1		1.69	0.1	18		2.82	0.9	35		6.77	0.8	52		33.85	0.4
2		1.69	0.2	19		4.51	0.1	36		6.77	0.9	53	X65	33.85	0.5
3		1.69	0.3	20		4.51	0.2	37		11.28	0.1	54		33.85	0.6
4		1.69	0.4	21		4.51	0.3	38		11.28	0.2	55		33.85	0.7
5		1.69	0.5	22		4.51	0.4	39		11.28	0.3	56		2	0.3
6		1.69	0.6	23		4.51	0.5	40		11.28	0.4	57		4	0.4
7		1.69	0.7	24		4.51	0.6	41		11.28	0.5	58	X60	8	0.4
8		1.69	0.8	25		4.51	0.7	42		11.28	0.6	59		5	0.5
9	X65	1.69	0.9	26	X65	4.51	0.8	43	X65	11.28	0.7	60		6	0.6
10		2.82	0.1	27		4.51	0.9	44		11.28	0.8	61		12	0.6
11		2.82	0.2	28		6.77	0.1	45		11.28	0.9	62		2	0.3
12		2.82	0.3	29		6.77	0.2	46		18.05	0.3	63		2	0.4
13		2.82	0.4	30		6.77	0.3	47		18.05	0.4	64	X80	8	0.4
14		2.82	0.5	31		6.77	0.4	48		18.05	0.5	65		3	0.5
15		2.82	0.6	32		6.77	0.5	49		18.05	0.6	66		3	0.6
16		2.82	0.7	33		6.77	0.6	50		18.05	0.7	67		8	0.6
17		2.82	0.8	34		6.77	0.7	51		33.85	0.3				

注: r_d 表示缺陷当量半径,mm; β 表示腐蚀缺陷深度系数, β =缺陷深度/壁厚。

管道规格为:1-55 号管道, X65 管线钢; 56-61 号管道, X60 管线钢; 62-67 号管道, X80 管线钢, X60、X65 和 X80 管线钢的应力应变关系均符合幂硬化应力-应变法则,其表达式为

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_s} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_s} \right)^n$$

其中

$$\varepsilon_0 = \sigma_s / E.$$

(1)

式中, ε_0 为初始应变; σ_s 为屈服应力, MPa; E 为弹性模量, MPa; α 为硬化系数; n 为幂硬化指数。

管线规格见表 2。

表 2 管线参数

Table 2 Pipeline specifications

钢级	外壁直径/mm	壁厚/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	硬化系数	幂硬化指数
X60	508	14.8	478	600	206	0.3	0.66	15
X65	355.6	15.9	453.2	695	206	0.3	5.2	6.5
X80	459	8	589	731	200	0.3	2.2	12

3 计算结果分析

3.1 非线性有限元法可靠性验证

针对文献[20]~[22]中描述的具有局部腐蚀缺陷形貌特征的 7 例管道失效试验,用非线性有限元法分析预测了其失效压力,计算结果与误差见表

表 3 非线性有限元计算结果与试验数据对比

Table 3 Comparison between nonlinear finite element calculation results and experimental data

序号	钢级	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	管道几何参数		缺陷尺寸		失效压力 p_{inv} /MPa	p_{theory} /MPa	误差/%
				外径/mm	壁厚/mm	长度/mm	深度/mm			
1	X46	356.4	469.29	323.34	8.64	63.5	2.16	24.37	22.18	-9.0
2				323.09	8.59	20.3	2.97	23.11	21.18	-8.4
3				323.09	8.64	60.96	2.69	25.23	22.64	-10.3
4				323.09	8.53	50.8	2.18	21.56	20.28	-5.9
5				762	17.5	100	8.8	24.3	24.6	1.2
6	X80	589	731	459	8	40	3.75	24.2	23.62	-2.4
7		601	684	457	8.1	39.6	5.39	22.7	21.53	-5.2

3.2 局部腐蚀缺陷深度与半径对管道失效压力的影响

图 4 为局部腐蚀缺陷深度及半径对管道失效压力的影响。从图 4 可以看出,随着腐蚀缺陷深度和

3。从表 3 可以看出,计算误差较小,且数值预测的失效压力除 1 例外,其余均低于试验值,这与实际管道失效试验中须经过一个塑性硬化的过程有关,因此非线性有限元法的预测结果会有一定的安全裕量,是合理可信的。

半径的增加,油气管道的失效压力均越来越低,但是不同腐蚀缺陷半径和深度对油气管道失效压力影响的变化趋势有很大的不同。

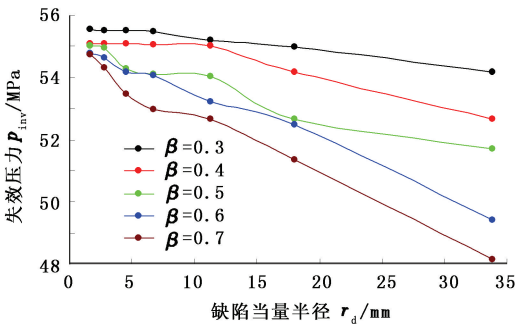
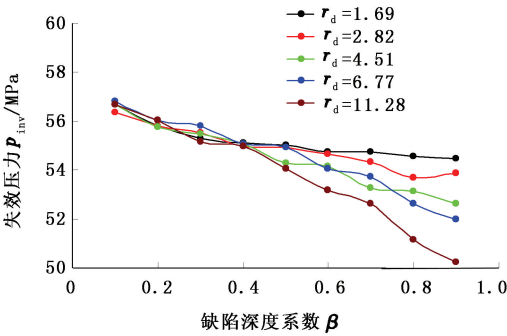


图 4 局部腐蚀缺陷深度及半径对管道失效压力的影响

Fig. 4 Effect of localized corrosion defect depth and diameter on failure pressure of oil and gas pipeline

当腐蚀缺陷半径较小时,油气管道失效压力对局部腐蚀缺陷深度不敏感;当局部腐蚀缺陷半径达到管道壁厚以后,局部腐蚀缺陷深度对油气管道失效压力的影响急剧加大。因此可以以管道壁厚作为局部腐蚀缺陷深度严重影响油气管道失效压力的临

界半径 r_{dc} 。

当腐蚀缺陷深度较小时,油气管道失效压力对局部腐蚀缺陷半径不敏感。当局部腐蚀缺陷深度达到管道壁厚的 0.6 倍后,局部腐蚀缺陷外表面半径对油气管道失效压力的影响急剧加大,但为了局部

腐蚀评价的安全性,建议以管道壁厚的 0.5 倍,即 $\beta = 0.5$ 作为局部腐蚀缺陷半径严重影响油气管道失效压力的临界深度 β_c 。

4 计算方法的建立

4.1 基本理论

依据材料力学可以知道,最大剪应力强度和变形能强度理论能够较好地符合塑性材料破坏的情况,但变形能强度理论的计算结果会稍高于最大剪应力强度理论^[23],这在管道失效压力计算中导致危险,因此以最大剪应力强度理论为依据,建立局部腐蚀失效压力计算公式。最大剪应力强度理论表达式为

$$\sigma_\theta - \sigma_r \leq [\sigma]. \quad (2)$$

式中, σ_θ 、 σ_r 分别为材料在复杂应力状态下的最大和最小主应力, MPa; $[\sigma]$ 为管道许用应力, MPa。

在实际应用中,为了计算准确,一般会采用受内压管道的平均应力,最终推导出完整管道失效压力计算公式:

$$p_{p-f} = \frac{2(R-r)[\sigma]}{R+r}. \quad (3)$$

式中, p_{p-f} 为完整管道的极限失效压力, MPa; R 、 r 分别为管道外壁、内壁半径, m。

具体计算过程见文献[23]。

4.2 管道失效压力

公式(3)只适应于等截面的完整管道,局部腐蚀油气管道由于截面的急剧变化,将引起应力集中。工程上用应力集中系数来表示应力增高的程度,即

$$K_t = \sigma_{\max} / \sigma_n. \quad (4)$$

式中, K_t 为理论应力集中系数。

最大应力 $\sigma_{\max}$ 可根据弹性力学理论和有限元法计算得到,也可由试验方法测得;而基准应力 σ_n 是完整构件上的应力。

4.2.1 应力集中系数的表示

理论应力集中系数并不能作为局部腐蚀使油气管道强度降低的标准,缺陷对油气管道失效强度的影响与材料和缺陷的几何形状有关,通常比理论应力集中系数所确定的影响小,这种普遍现象用缺口敏感度表示^[24],缺口敏感度可以看作是理论效应达到的程度,表示为

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1}. \quad (5)$$

式中, q 为缺口敏感度,其值介于 0 ~ 1; K_f 为有效应力集中系数。

$q=0$ 表示无缺口效应, $K_f=1$, 说明管道对应力

集中不敏感; $q=1$ 表示全理论效应, $K_f=K_t$, 说明管道对应力集中十分敏感。依据 Peterson^[25] 提出的经验公式计算缺口敏感度 q :

$$q = 1 / (1 + \alpha / r_d). \quad (6)$$

式中, α 为与材料有关的常数。

综合式(3) ~ (6),可得局部腐蚀油气管道的预测公式为

$$p_f = p_{p-f} / \left[\left(\frac{1}{1 + \alpha / r_d} \right) (K_t - 1) + 1 \right]. \quad (7)$$

4.2.2 应力集中系数的计算

许多科研人员^[26-30]提出了针对各种凹口、沟槽和圆孔构件应力集中系数的经验计算公式,并绘制了相应的应力集中系数图,可在文献[24]中查到。早期应力集中系数的研究未涉及到油气管道的应力集中,因此也没有相关的应力集中系数经验公式或图表,世界上相关研究文献亦较少,但 Lekkerkerker^[29]、Eringen 等^[30]、Van Dyke^[27]对内压作用下带圆孔圆柱壳中的应力做了大量的分析,并给出了相应的经验公式和图表。本文中参考上述内压作用下带圆孔圆柱壳中应力集中系数的经验公式,研究油气管道局部腐蚀应力集中系数经验公式,并依此得到适应局部腐蚀油气管道失效压力的计算方法,其中:

$$K_t = C_1 + C_2 \lambda + C_3 \lambda^2 + C_4 \lambda^3 + C_5 \lambda^4. \quad (8)$$

$$\text{令 } C = (C_1 \quad C_2 \quad C_3 \quad C_4 \quad C_5).$$

其中

$$\lambda = \frac{\sqrt[4]{3(1-\nu^2)}}{2} \frac{r_d}{\sqrt{R_a t}}, \quad (9)$$

$$C^T = p B^T, \quad (10)$$

$$p = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} \\ p_{51} & p_{52} & p_{53} \end{pmatrix}, \quad B = (1 \quad \beta \quad \beta^2).$$

式中,无因次量 λ 表示与缺陷面积相应的总压力的作用效果; R_a 为管道的平均半径; t 为管道的厚度; ν 为泊松比; p 为待定系数。

将表 1 所示 67 例局部腐蚀油气管道失效压力的计算结果以及相应的管道参数代入式(7)中拟合得

$$p = \begin{pmatrix} 0.93 & -0.4 & 0.88 \\ 1.76 & 3.23 & -6.87 \\ -4.9 & -7.82 & 18.51 \\ 5.6 & 7.43 & -19.36 \\ -2.21 & -2.36 & 7 \end{pmatrix}.$$

4.3 管道失效压力拟合公式可靠性验证

分别采用腐蚀缺陷评价规范 B31G 修正版、DNV RP-F101、PCORRC、拟合公式计算了表 1 中局部腐蚀缺陷引起的失效压力,与模拟数据对比,结果如表 4 所示。从表 4 中可以看出,拟合公式的计算结果与模拟数据差绝对值的平均值仅为 1.55%,其他 3 种评价方法此项数值分别达到 14.88%、16.34% 和 11.73%,差别均较大。具体计算差别见

图 5。从图 5 可以看出,评价规范修正的 B31G、DNV RP-F101 和 PCORRC 的计算结果偏差均较大,最大偏差接近 30%,而且 DNV RP-F101、PCORRC 评价规范计算结果的大部分为正偏差,这样局部腐蚀评价结果会引起很大的安全隐患,而拟合公式的计算结果误差相对较小,且误差分布均匀,能够满足局部腐蚀油气管道失效压力的预测要求。

表 4 四种评价规范与非线性有限元分析结果

Table 4 Analysis results of 4 kinds of evaluation norms and nonlinear finite element method MPa

序号	修正的 B31G/MPa	DNV-RP-F 101	PCORRC	拟合 公式	非线性 有限元	序号	修正的 B31G/MPa	DNV-RP-F 101	PCORRC	拟合 公式	非线性 有限元
1	46.77	65.06	62.12	56.46	56.68	35	45.8	63.79	59.98	53.24	52.64
2	46.77	65.06	62.08	56.12	55.8	36	45.3	62.26	58.72	52.70	51.96
3	46.76	65.05	62.04	55.70	55.32	37	46.66	64.96	61.94	56.39	56.68
4	46.76	65.05	61.99	55.20	55.1	38	46.52	64.84	61.7	56.08	56.05
5	46.75	65.04	61.93	54.61	55.03	39	46.34	64.68	61.42	55.60	55.18
6	46.74	65.03	61.86	53.95	54.76	40	46.13	64.47	61.1	54.98	55
7	46.73	65.01	61.76	53.22	54.73	41	45.86	64.18	60.72	54.21	54.04
8	46.71	64.98	61.6	52.43	54.58	42	45.49	63.75	60.24	53.31	53.2
9	46.68	64.88	61.28	51.59	54.46	43	44.98	63.05	59.58	52.30	52.64
10	46.77	65.05	62.1	56.74	56.36	44	44.23	61.69	58.58	51.19	51.15
11	46.76	65.05	62.04	56.54	55.8	45	42.98	57.93	56.56	49.99	50.22
12	46.75	65.04	61.97	56.30	55.52	46	45.75	64.13	61	54.30	54.98
13	46.73	65.02	61.89	56.03	54.99	47	45.25	63.62	60.5	53.63	54.15
14	46.71	65	61.79	55.72	54.93	48	44.62	62.93	59.9	52.82	52.64
15	46.69	64.98	61.66	55.38	54.64	49	43.8	61.91	59.14	51.88	52.48
16	46.65	64.93	61.49	55.00	54.31	50	42.68	60.29	58.12	50.84	51.34
17	46.6	64.83	61.23	54.59	53.7	51	43.99	62.23	60.05	53.78	54.15
18	46.51	64.55	60.7	54.16	53.85	52	42.7	60.76	59.14	52.40	52.64
19	46.75	65.04	62.06	56.20	56.68	53	41.14	58.82	58.05	50.90	51.69
20	46.73	65.02	61.97	55.92	55.76	54	39.21	56.13	56.7	49.29	49.42
21	46.7	65	61.86	55.63	55.5	55	36.77	52.16	54.89	47.61	48.14
22	46.67	64.96	61.73	55.32	55.09	56	31.91	36	34.9	31.49	33.36
23	46.62	64.92	61.57	55.00	54.27	57	31.88	35.98	34.78	30.67	32.88
24	46.56	64.84	61.37	54.68	54.17	58	31.75	35.88	34.6	30.52	32.71
25	46.47	64.72	61.11	54.34	53.28	59	31.82	35.94	34.65	30.38	32.28
26	46.33	64.49	60.69	53.99	53.14	60	31.73	35.85	34.46	30.09	31.79
27	46.1	63.78	59.84	53.64	52.64	61	31.17	35.39	33.97	29.80	31.36
28	46.73	65.02	62.02	56.21	56.8	62	27.9	20.89	20.48	23.25	24.04
29	46.68	64.98	61.88	55.89	56.06	63	27.9	20.89	20.45	23.11	23.44
30	46.61	64.92	61.71	55.53	55.8	64	27.62	20.75	20.23	22.02	22.77
31	46.53	64.84	61.52	55.13	55.05	65	27.85	20.86	20.37	22.52	23.29
32	46.43	64.74	61.29	54.71	54.94	66	27.83	20.85	20.32	22.34	22.77
33	46.29	64.58	60.99	54.25	54.06	67	27.31	20.57	19.97	21.76	22.08
34	46.1	64.31	60.59	53.76	53.73						
与模拟结果差绝对值的平均值,即 $\left \frac{p_{f-x}-p_{f-s}}{p_{f-s}}\right \times 100\%$						14.88%	16.34%	11.73%	1.55%	0	

注: p_{f-x} 表示修正的 B31G、DNV RP-F101、PCORRC 和拟合公式计算的失效压力, p_{f-s} 表示非线性有限元的仿真结果。

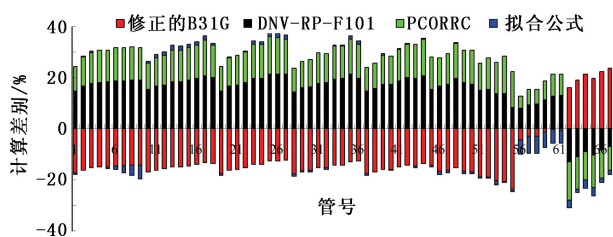


图5 四种腐蚀评价规范计算结果与非线性有限元计算结果对比

Fig.5 Comparison of calculation results among 4 kinds of evaluation norms and nonlinear finite element

5 结论

(1)非线性有限元分析方法可以安全可靠地评价局部腐蚀引起的油气管道失效。

(2)可以以管道壁厚和腐蚀深度系数 $\beta=0.5$ 作为影响局部腐蚀油气管道失效压力发生重大变化的临界半径和临界深度。

(3)经过适当修改,管道应力集中理论可以应用到局部腐蚀油气管道失效压力的计算。与已有的腐蚀评价规范相比,依据应力集中理论得到的拟合公式计算结果误差小,误差分布均匀,更能满足局部腐蚀油气管道失效压力的预测要求。

参考文献:

- [1] COSHAM A A, HOPKINS P A, MACDONALD K A. Best practice for the assessment of defects in pipelines-corrosion[J]. Engineering Failure Analysis, 2007;1245-1265.
- [2] DNV OS-F101. Submarine pipeline systems[S]. Oslo: Det Norske Veritas, 2007.
- [3] DNV RP-F101. Corroded pipelines[S]. Det Norske Veritas, 2010.
- [4] ASME B31G-2009. Manual for determining the remaining strength of corroded pipeline-supplement to ASME B31 code for pressure piping [S]. New York: ASME B31 Committee, 2009.
- [5] ASME B31G-2009. Manual for determining the remaining strength of corroded pipeline [S]. New York: ASME B31 Committee, 2009.
- [6] KIEFNER J F, VIETH P H. A modified criterion for evaluating the strength of corroded pipe [R]. Battelle, 1989.
- [7] KASTNER W, ROHRICH E, SCHMITT W, et al. Critical crack sizes in ductile piping[J]. Int J Pressure Vessels Piping, 1981,9:197-219.
- [8] KIEFNER J F, MAXEY W A, EIBER R J, et al. The

failure stress levels of flaws in pressurized cylinders[R]. ASTM STP, 1983.

- [9] BS7910-2005. Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures[S]. London (UK): British Standards Institution, 2005.
- [10] ANON. Fitness for service, API recommended practice 579[M]. Washington, D. C.: American Petroleum Institute, 2000.
- [11] MA Bin, SHUAI Jian, LIU De-xu, et al. Assessment on failure pressure of high strength pipeline with corrosion defects [J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 32: 209-219.
- [12] BEDAIRI B, CRONIN D A, HOSSEINI A Plumtree. Failure prediction for crack-in-corrosion defects in natural gas transmission pipelines[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2012, 96/97: 90-99.
- [13] XU L Y, CHENG Y F. Reliability and failure pressure prediction of various grades of pipeline steel in the presence of corrosion defects and pre-strain[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2012, 89: 75-84.
- [14] 郭今, 黄其青, 殷之平, 等. 基于弹塑性有限元法的含多部位损伤(MSD)板剩余强度分析[J]. 西北工业大学学报, 2011, 29(6): 898-903.
- GUO Jin, HUANG Qi-qing, YIN Zhi-ping, et al. A better residual strength analysis method for MSD(multiple site damage) structure using elastic-plastic analysis method[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2011, 29(6): 898-903.
- [15] 韩冰, 王芝银, 吴张中, 等. 基于应变理论在采空区管道失效分析中的应用[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2012, 36(4): 134-139.
- HAN Bing, WANG Zhi-yin, WU Zhang-zhong, et al. Application of strain-based theory in failure analysis of pipeline subjected to mining collapse areas[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2012, 36(4): 134-139.
- [16] 王宪, 廖俊必. 腐蚀管道的剩余强度评定及 ANSYS 二次开发[J]. 压力容器, 2012, 29(1): 27-31.
- WANG Xian, LIAO Jun-bi. Assessment of residual strength for corroded pipeline and customized development of ANSYS[J]. Pressure Vessel Technology, 2012, 29(1): 27-31.
- [17] ZHANG Yan-cheng, MIRNA Urquidi-Macdonald, GEORGE R, et al. Development of localized corrosion damage on low pressure turbine disks and blades: I-III[J]. Electrochimica Acta, 2012, 69: 1-11, 12-18, 19-29.

参考文献:

- [1] YI W, BIER V M. An application of copulas to accident precursor analysis[J]. Management Science, 1998, 44(12):257-270.
- [2] MEEL A, SEIDER W D. Plant-specific dynamic failure assessment using Bayesian theory[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(21):7036-7056.
- [3] KALANTARNIA M, KHAN F, HAWBOLDT K. Dynamic risk assessment using failure assessment and Bayesian theory[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(5):600-606.
- [4] YUN G, ROGERS W J, MANNAN M S. Risk assessment of LNG importation terminals using the Bayesian-LOPA methodology[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(1):91-96.
- [5] KALANTARNIA M, KHAN F, HAWBOLDT K. Modeling of BP Texas city refinery accident using dynamic risk assessment approach[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2010, 88(3):191-199.
- [6] 周红波. 基于贝叶斯网络的深基坑风险模糊综合评估方法[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(9):1474-1478.
ZHOU Hong-bo. Risk assessment of deep foundation pit by using fuzzy comprehensive evaluation method based on Bayesian networks[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(9):1474-1478.
- [7] 罗桦槟, 张世英. 事件树方法的贝叶斯分析[J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(9):78-80.
LUO Hua-bin, ZHANG Shi-ying. Bayesian analysis of event tree method[J]. Systems Engineering and Electronics, 1999, 21(9):78-80.
- [8] American Petroleum Institute. API RP 581-2008, risk-based inspection technology[S]. Washington, DC: IHS, 2008.
- [9] American Petroleum Institute. API Publication 581-2000, risk-based inspection base resource document[S]. Washington, DC: API Publication and Distribution, 2000.
- [10] 高少华, 邹兵, 严龙, 等. 含硫天然气净化厂硫化氢泄漏分析及对策[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(2):174-179.
GAO Shao-hua, ZOU Bing, YAN Long, et al. Study of hydrogen sulfide leakage and dispersion in sour gas purification plants and countermeasures[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(2):174-179.
- [11] Center for Chemical Process Safety. Guidelines for chemical process quantitative risk analysis[M]. New York: American Institute of Chemical Engineers, 2000.
- [12] COLOMBO A G, CONSTANTINI D. Ground-hypotheses for Beta distribution as Bayesian prior[J]. Microelectronics Reliability, 1980, 20(6):902-906.
(编辑 沈玉英)
- (上接第128页)
- [18] WANG Hai-tao, HAN En-hou. Simulation of metastable corrosion pit development under mechanical stress[J]. Electrochimica Acta, 2013, 90:128-134.
- [19] 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 defect on failure pressure of medium-high strength oil-gas pipeline[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(6):1086-1092.
- [20] 帅建. 管线力学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [21] FREIRE J L F, VIEIRA R D, BENJAMIN A C. Part 1: experimental techniques in the field of pipeline integrity[J]. Experimental Techniques, 2003, 5:47-50.
- [22] FREIRE J L F, VIEIRA R D, BENJAMIN A C, et al. Part 3: burst tests of pipeline with extensive longitudinal metal loss[J]. Experimental Techniques, 2006, 11:60-65.
- [23] 王致祥, 等. 管道应力分析与计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982:63-73.
- [24] PETERSON R E. Stress concentration phenomena in fatigue of metals[J]. Applied Mechanics Section, 1933, 55:157.
- [25] PETERSON R E. Analytical approach to stress concentration effect in aircraft materials[C]. Dayton: Air Force-WADC Symposium on Fatigue of Metals, 1959.
- [26] ISIDA M. On the tension of the strip with semi-circular notches[J]. Trans Japan Soc Mech Eng, 1953, 19:5.
- [27] VAN Dyke P. Stresses about a circular hole in a cylindrical shell[J]. AIAA Journal, 1965, 3(9):1733-1742.
- [28] HADDON R A W. Stresses in an infinite plate with two unequal circular holes[M]. Oxford: Q J Mech, 1967.
- [29] LEKKERKERKER J G. Stress concentration around circular holes in cylindrical shells[C]. Berlin: Proc 11th Intern Congr Appl Mech, Springer, 1964.
- [30] ERINGEN A C, NAGHDI A K, THIEL C C. State of stress in a circular cylindrical shell with a circular hole[C]. Welding Research Council Bulletin 102, 1965.
(编辑 沈玉英)