

利用 Gumbel 极值分布预测管道最大腐蚀深度

王水勇,任爱

苏州热工院 电站寿命管理研究中心,苏州 215004

摘要:对某核电站设冷水系统二次滤网部分不锈钢除淤管道的壁厚数据进行概率统计分析,利用 Gumbel 极值分布和回归期预测了不锈钢除淤管道最大腐蚀深度.用最小方差线性无偏估计法对 Gumbel 分布函数的参数估值,并对 Gumbel 分布函数作 K. S. 适度检验,证明冲淤管道腐蚀数据的 Gumbel 极值分布成立,最大腐蚀深度预测值可信.

关键词:管道腐蚀;Gumbel 分布;MVLUE;K. S. 检验;最大腐蚀深度预测

中图分类号:TG174.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-6495(2008)05-0358-03

EVALUATION OF MAXIMUM CORROSION DEPTH OF PIPE BY GUMBEL EXTREME VALUE PROBABILITY DISTRIBUTION

WANG Shui-yong, REN Ai

Plant Life Management Research Center, Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou, 215004

Abstract: Corrosion depth data of partial backwash pipes of a sea water system in nuclear power plant was treated statistically using the extreme value probability distribution i. e. the so called Gumbel distribution. And the maximum corrosion depth 10.8 ± 1.3 mm of the whole backwash pipes had been predicted with the return period which equals to 149. The corrosion depth data were subjected to Gumbel distribution treatment and the parameters of its probability function were estimated by MVLUE method. The Gumbel probability distribution was checked by Kolmogorov-Smirnov test and proved to be accurate. As a result, the maximum depth predicted by it was confident.

Keywords: pipe corrosion; Gumbel-Distribution; MVLUE; Kolmogorov-Smirnov Test; max. corrosion depth prediction

预测系统, 结构, 部件 (systems, structures, components, SSCs) 腐蚀失效时间有确定性方法 (deterministic approach) 和统计方法 (statistical approach). 前者是根据具体腐蚀模式的动力学和热力学规律, 计算材料的腐蚀速度; 它不适合处理材料同时发生均匀腐蚀与局部腐蚀的问题, 而且实际腐蚀过程中影响腐蚀速率的因素非常复杂, 很难建立起统一的公式来描述这些因素. 后者是基于材料—环境体系的局部腐蚀的随机性特征^[1], 以局部腐蚀特征值 (如最大腐蚀量或者最小失效时间) 作为统计变量进行统计分析, 计算材料腐蚀失效的概率; 它是针对局部腐蚀的评估方法. 实际上, 如果能预测出局部腐蚀中的最大值腐蚀深度或最小断裂时间, 就能评估设备或部件的剩余寿命. 预测设备的最大腐蚀深度和最小腐蚀失效时间的极值统计评估方法在国内外已经有成功应用^[2,3]. 本文通过利用 Gumbel 极值分布估计最大腐蚀深度的方法, 并通过自编计算机程序 plc_gumbel 对腐蚀数据分布函数作参数估值、作图、最大值预测、检验和结果输出.

1 数据测量

某核电站设冷水系统除淤管道按材质分为两部分, 一为 ASTM B690 不锈钢无缝管, 外径为 219.1 mm 和 406.4 mm, 标称厚度 15.9 mm, 共 3 条管道, 总长 5980 mm, 无防腐措施; 二为 ASTM A106, Gr. B 无缝钢管, 外径 406.4 mm, 内有水泥砂浆衬里.

该电站运行 1 年后, 对设冷水系统的除淤管道不锈钢部分进行超声测厚, 选择最易腐蚀的 2 个三通和 2 个弯管进行测厚. 测厚时, 将其沿轴向共划分为 18 个小的测量区域, 每一个测量区域长度约为 40 mm, 在测量区域内绕管道一周测量若干个点, 并记下壁厚, 测得壁厚数据列于表 1.

测厚完成后, 又对三通和弯管通过超声波探伤仪进行扫查, 在 T1 和 E2 的焊缝处发现两处减薄区域. 减薄区域 1 面积为 $210 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 区域内最小壁厚为 4.3 mm, 减薄区域 2 面积为 $190 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, 区域内最小壁厚为 6.3 mm. 测厚和扫查仪器测量精度为 $\pm 0.1 \text{ mm}$.

2 数据处理与讨论

2.1 Gumbel 极值分布

正态分布 (高斯分布), 泊松分布, 指数和对数正态分布

收稿日期: 2007-08-17 初稿; 2007-10-31 修改稿

作者简介: 王水勇 (1980-), 男, 硕士, 工程师, 从事电站腐蚀与防护研究.

Tel: 051268602625 E-mail: wangshuiyong@cgnpc.com.cn

以及二项分布是工程数据中最常见的基本分布形式. 从这些基本分布中推导出来的最大值或最小值分布称为极值分布. 材料的局部腐蚀问题中最大腐蚀量和由此引起的最小寿命的集合服从极值分布^[4]. Gumbel 分布也叫第一渐进分布的最大值分布或二重指数分布, 用来分析局部腐蚀的最大值问题. Gumbel 分布的累积概率函数为:

$$F(x) = \exp\{-\exp\{-(x-\lambda)/\alpha\}\} \quad (1)$$

其中 λ, α 分别为位置参数与尺寸参数. 定义标准化变量:

$$y = (x - \lambda) / \alpha \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式得:

$$F(x) = \exp[-\exp(-y)] \quad (3)$$

求出上式的反函数可得 y 的显式表达式:

$$y = -\ln\{-\ln[F(y)]\} \quad (4)$$

将管道标称壁厚减去表 1 中每一测量区域的最小壁厚得到每一测量区域最大腐蚀深度, 列于表 2; 将最大腐蚀深度作为统计变量, 从大到小排序, 再用顺序统计的平均排列法计算累积概率, $F(y) = 1 - i/(1 + n)$, 计算值列于表 2.

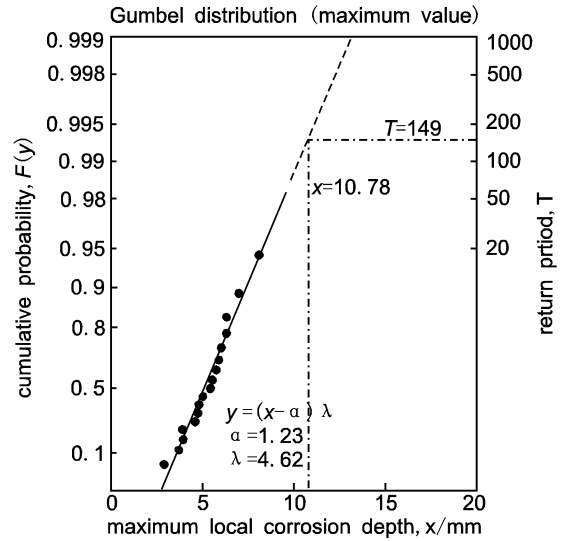


Fig. 1 Gumbel probability diagram of maximum corrosion depth of backwash stainless pipe

Table 1 Wall thickness and amount of data for each test site where corrosion is most likely to be occurred

NO.	thickness mm	min. thickness mm	amount of test point	No.	thickness mm	min. thickness mm	amount of test point
T1-1	12.5,13.1,7.8,13.6,13.3	7.8	5	T2-1	12.4,12.7,13.2,13.2,13.7,12.2,13.1	12.2	7
T1-2	-	-	-	T2-2	12.0,14.6,14.3,13.2	12	4
T1-3	13	13	1	T2-3	13.3,12.0,12.5,12.8,13.8	12	5
T1-4	13.4,11.9,11.4,10.9,11.8	10.9	5	T2-4	12.0,11.0,9.9,11.9,12.0	9.9	5
E1-1	10.5,11.1,8.9	8.9	3	E2-1	11.2,12.2,11.5,12.1	11.2	4
E1-2	9.6,11.3,11.4	9.6	3	E2-2	11.1,11.6,12.2,12.1	11.1	4
E1-3	9.6,11.8,11.5	9.6	3	E2-3	10.5,11.8,12.8,11.1	10.5	4
E1-4	10.2,11.7,11.3,11.8	10.2	4	E2-4	10.4,11.8,12.2,11.5	10.4	4
E1-5	11.6,11.3,11.4	11.3	3	E2-5	10.2,11.9,11.8,11.1	10.2	4

Table 2 Maximum local corrosion depth arranged in descending order with MVLUE weight for estimation of parameters and cumulative probability

order	max. depth, mm	MVLUE weight		calculation		cumulative probability
		$a_i(17,17)$	$b_i(17,17)$	$a_i \cdot x_i$	$b_i \cdot x_i$	
1	8.1	0.01656229	0.04221189	0.134154549	0.341916309	0.94
2	7	0.02131204	0.04534773	0.14918428	0.31743411	0.89
3	6.3	0.02571345	0.04666492	0.161994735	0.293988996	0.83
4	6.3	0.03000392	0.04681091	0.189024696	0.294908733	0.78
5	6	0.0342856	0.04597681	0.2057136	0.27586086	0.72
6	5.9	0.03862595	0.04421234	0.227893105	0.260852806	0.67
7	5.7	0.04308166	0.04149056	0.245565462	0.236496192	0.61
8	5.5	0.04770896	0.03772341	0.26239928	0.207478755	0.56
9	5.4	0.05257095	0.03275743	0.28388313	0.176890122	0.5
10	5	0.0577446	0.02635395	0.288723	0.13176975	0.44
11	4.8	0.0633318	0.01814828	0.30399264	0.087111744	0.39
12	4.7	0.06947633	0.00756985	0.326538751	0.035578295	0.33
13	4.6	0.07639781	-0.0063226	0.351429926	-0.02908396	0.28
14	3.9	0.08446549	-0.02522111	0.329415411	-0.098362329	0.22
15	3.9	0.09439396	-0.05261839	0.368136444	-0.205211721	0.17
16	3.7	0.10796149	-0.09779396	0.399457513	-0.361837652	0.11
17	2.9	0.13636371	-0.253312	0.395454759	-0.7346048	0.06
			sum	4.622961281	1.23118621	

将上述计算的累积概率代入(4)式计算出 y 值,以 x 为横坐标, y 为纵坐标,画出腐蚀概率分布图.如图1所示,腐蚀数据分布成一直线,说明腐蚀概率遵循 Gumbel 分布.

2.2 分布函数参数估计

Gumbel 分布函数参数的估值有最小方差线性无偏估计法(MVLU),最大似然估计法(MLE),矩法(MOMENT),作图法(即概率纸法)以及最小二乘法.其中作图法不是数值分析方法,无法计算方差,估值受人为因素影响.最大似然估计法与最小二乘法估计参数具有偏差,而矩法不是完全统计量^[4].最小方差线性无偏估计法估值结果是最可信的.

MVLU 参数估计公式如下:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n a_i(N, n) x_i \quad (5)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^n b_i(N, n) x_i \quad (6)$$

其中 $a_i(N, n)$ 和 $b_i(N, n)$ 为每一个样本的权重,与总样本数 N 和截断数 n (总样本数减去中断数)有关.

MVLU 参数估计法的方差为:

$$V(x) = \alpha^2 [A(N, n)y^2 + B(N, n)y + C(N, n)] \quad (7)$$

$A(N, n)$, $B(N, n)$ 和 $C(N, n)$ 以及 $a_i(N, n)$ 和 $b_i(N, n)$ 的计算方法 White^[4] 已经给出,并证明 $N=20$,估值仍然是无偏的.如果样本数超过 20,可以通过把样本数据随机分成小于 20 的小组进行 MVLU 法估计后,再求所有小组的平均值以求得 Gumbel 分布参数.

将参数 $a_i(17, 17)$ 和 $b_i(17, 17)$, 表 2 代入(5)和(6)式计算得 $\alpha = 4.62$, $\lambda = 1.23$. 以(2)式(代入 α 和 λ 值)在图 1 同一坐标系内画一直线,直线与数据分布重合,说明参数估值正确.要证明参数估值是可信的,需要适度检验.

2.3 最大腐蚀深度的预测

在实际工程应用中,一般根据小面积样本的最大腐蚀深度估计大面积样本的最大腐蚀深度,需要用到概率统计上回归期的概率.回归期(T)定义如下:

$$N = T(a) \equiv 1/[1 - F(a)] \quad (8)$$

即,回归期为极值分布的随机变量超过某一临界值 a , 所需的样本的数量^[5].根据(8)和(4)式,我们可以计算出 y 与 T 的对应关系,把这种对应关系标在图 1 的右纵轴上,这样通过 T 值就可以计算出该回归期下的 x 值.

对于局部最大腐蚀深度的极值分布,回归期为极值分布的随机变量(单位测量面积上最大腐蚀深度 x) 大于某一值(最大腐蚀深度 x_m), 所需要进行测量的最大面积与单位测量面积的倍数,即

$$T = \text{最大腐蚀面积/单位测量面积} \quad (9)$$

因为全部不锈钢除淤管道的面积为 $5980 \text{ mm} \times \pi \times$ 管道内径,单位测量面积为 $40 \text{ mm} \times \pi \times$ 管道内径.所以: $T = 5980/40 \approx 149$.

联合(8)、(4)和(2)式并代入 α , λ 和 T 值计算得到全部不锈钢除淤管道的最大腐蚀深度 $x_m = 10.78$. 因为计算 T 使用的最大腐蚀面积为全部不锈钢除淤管道的面积,相应计算的 x_m 应为全部不锈钢除淤管道的最大腐蚀深度.联合式(8)

和(4)并代入 T 值可计算出 y 值,再将 y 值, α 值以及 MVLU 系数 $A(17, 17) = 0.03952382$, $B(17, 17) = 0.02780788$ 和 $C(17, 17) = 0.06590838$ 代入(7)式得最大腐蚀深度估算的方差 $V(x_m) = 1.60$, 而标准差 $\sigma = \sqrt{V(x_m)} = 1.26$.

因此,全部不锈钢除淤管道的最大腐蚀深度为 $(10.8 \pm 1.3) \text{ mm}$. 这与扫查的结果相符.

2.4 Gumbel 分布的 K. S. 检验

对于某一腐蚀数据来说,开始并不知道它的分布规律,需要先假设,然后经过检验,才能最后确定符合的分布规律.对于样本数多(大于 120)情况可以使用 χ^2 检验^[4].因为除淤管道有效的测厚试样只有 17 个,所以使用 K. S. 检验法进行适度检验.

假设腐蚀数据为 $x_1 < x_2 < \dots < x_n$, 在检验这些数据是否服从假定的分布时,数据的顺序统计量的累积分布值(平均排列法) $1 - i/(n + i)$ 与理论上计算的累积分布函数 $F(x_i)$ 之差的最大值 D_n 为:

$$D_n = \max_{1 \leq i \leq n} \{ |F(x_i) - [1 - i/(n + 1)]| \} \quad (10)$$

如果 D_n 小于某一临界值 D_n^* , 那么认为假定的理论分布是合适的,这就是 K. S. 检验.用来检验假定的理论分布是否合适的临界值 D_n^* 有如下关系: $p(D_n < D_n^*) = 1 - \alpha$, α 为显著性水平,表示假定的分布正确与否,要放弃这一假定的危险率.根据(1)和(10)式($n = 17$),计算得 $D_n = 0.0874$, 设 $\alpha = 40\%$, 查参数未知的二重指数分布的 K. S. 检验用临界值表的 $D_n^* = 0.1466$. $D_n < D_n^*$, 说明全部不锈钢除淤管道的最大腐蚀深度遵循 Gumbel 分布.

3 结论

1. 通过 Gumbel 最大值分布计算表明,运行 1 年后核电站的不锈钢除淤管道的最大腐蚀深度为 $(10.8 \pm 1.3) \text{ mm}$, 此预测值与超声波扫查的结果一致.经过 K. S. 检验,证明 MVLU 法估算 Gumbel 分布函数参数的值可信的.

2. 用极值分布统计预测最大腐蚀深度可行.统计概率方法预测最大腐蚀深度优点是无需关注设备腐蚀细节.

参考文献:

- [1] [加] R·温斯顿·里维(Revie, R. W.) 主编,杨武,等译. 尤利格腐蚀手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 265.
- [2] P M Aziz. Application of the statistical theory of extreme values to the analysis of maximum pit depth data for aluminum[J]. Corrosion, 1956, 12: 495.
- [3] 翁永基. 区域土壤腐蚀试验数据分布特征研究 - I 概率分布特征表述[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 14(5): 249.
- [4] 陈家福, 周卫, 翁瑞. 装置材料的寿命预测入门 - 极值统计在腐蚀中的应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1991: 24, 124, 134, 178.
- [5] T Shibata. Evaluation of corrosion failure by extreme value statistics[J]. The Iron and Steel Institute of Japan International, 1991, 31(2): 115.