

## 舰船用冷凝器冷却管腐蚀寿命的可靠性探讨

(驻四二五厂军代表室) 查长松

(海军工程学院) 胡德明 徐宜桂

[摘要] 局部腐蚀是舰船用冷凝器冷却管的主要失效模式,其可靠性寿命计算属于极值问题。文中结合积累的腐蚀数据和某舰船用冷凝器剖管分极报告,建立了 BFe30-1-1 冷却管腐蚀寿命的可靠性数学模型,并预测了主冷凝器冷却管的可靠使用寿命。

关键词 冷凝器 冷却管 可靠性 腐蚀寿命 局部腐蚀  
中图分类号 U664.5

## 1 概述

近年来,以海水为冷却介质的舰船用冷凝器,以及滨海电站冷凝器陆续发生过冷却管腐蚀破损泄漏事故,引起了有关部门的极大关注,并开展了一系列研究工作<sup>[1]</sup>。一般来讲,机械装备和结构材料的腐蚀多为局部腐蚀,它们的寿命服从极值分布。根据某舰船用冷凝器剖管分析报告,主要是海水腐蚀引起管子穿孔,至于高速液流引起冷却管穿孔失效,可以通过结构工艺设计加以改善或避免。通过试验研究可知,当海水流速超过某一临界流速时对 BFe30-1-1 管腐蚀才有明显影响。鉴于舰船用冷凝器实际运行时间少,主要是在海水浸泡中引起腐蚀,文中在预测冷却管腐蚀寿命时略去海水流速影响。下文将结合某舰船用冷凝器 BFe30-1-1 管剖管分析报告中孔蚀数据和舰船材料研究所进行的 BFe30-1-1 管受海水腐蚀后孔蚀数据积累,预测某舰船用冷凝器冷却管的腐蚀可靠性寿命。

## 2 局部点蚀平均速度的计算

根据中船总七二五研究所的资料给出不同厂家 BFe30-1-1 管全浸暴露四年的结果,绘制出各厂家 BFe30-1-1 管点蚀速度均值与相应的暴露时间的关系曲线,如图1所示。

由图1可知,各厂家 BFe30-1-1 管点蚀潜伏期短,初始阶段各自点蚀平均速度均高于后期。随着时间的增长,不同厂家 BFe30-1-1 管点蚀速度趋向一致,各自稳定腐蚀速度渐近于某一常数。由

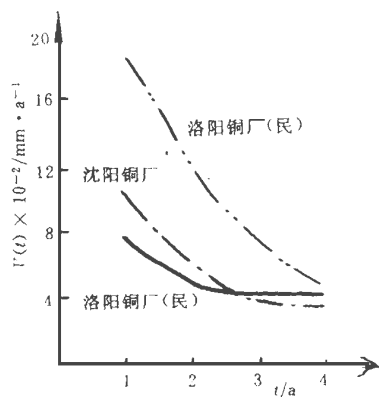


图1 各厂家 BFe30-1-1 管点蚀平均速度与时间关系

图1还可看出, BFe30-1-1 铜镍管点蚀平均速度随时间增长,呈指数衰减形式。文中借助长磨合期的磨损速度公式,来拟合 BFe30-1-1 铜镍管潜伏期后的腐蚀速度均值线,其公式为:

$$V(t) = (V_0 - V_\infty)e^{-bt/a} + V_\infty \quad (1)$$

式中:

$V(t)$ —潜伏期后  $t$  时刻腐蚀速度, mm/a;

$V_0$ —为潜伏期结束时的腐蚀速度, mm/a;

$V_\infty$ —稳定时的腐蚀速度, mm/a;

$b$ —相应的腐蚀期所确定的时间间隔参数, 1/a。

考虑到 BFe30-1-1 冷却管点蚀潜伏期短,为从寿命预测中保守点考虑,将对 BFe30-1-1 冷却管潜伏期寿命忽略不计,并把稳定腐蚀速度  $V_\infty$  定义为最晚期测得的平均速度。由式(1)和图1可得洛阳厂军用 BFe30-1-1 管点蚀平均速度方程:

$$V(t) = (0.1598786 - 0.038750)e^{-0.602996t} + 0.038750 \quad (2)$$

## 3 主冷凝器冷却管可靠性寿命预测

实际主冷凝器工作能力的丧失,并不是腐蚀最严重的管子泄漏而报废,只要堵管数在允许的范围内仍然能完成预定的功能,这就要求正确预测冷凝

器管材的寿命分布。

根据某舰船用冷凝器剖管分析报告, 有明显腐蚀的占 42 根。假设对它们进行腐蚀寿命试验, 按无

替换定数截尾试验要求, 到 17 根失效为止。由公式

(2)和剖管报告中孔蚀深度, 得到 17 根管子的最小寿命取值, 如表 1 所示。

表 1 寿命的 Weibull 分布检验

$i$	$t_i$ (年)	$s_i = \ln t_i$	$s_{i+1} - s_i$	$E(Z_i)$	$E(Z_{i+1}) - E(Z_i)$	$H_i \times 10$
1	20.797	3.0348	0.0247	-3.4104	1.0306	2.3967
2	21.317	3.0595	0.0241	-2.3798	0.5323	4.5275
3	21.836	3.0836	0.0235	-1.8475	0.3675	6.3946
4	22.356	3.1071	0.0246	-1.4800	0.2863	8.5924
5	22.913	3.1317	0.0240	-1.1937	0.2388	10.0503
6	23.470	3.1557	0.0235	-0.9549	0.2082	11.2872
7	24.027	3.1792	0.0229	-0.7467	0.1879	12.1873
8	24.584	3.2021	0.0298	-0.5588	0.1739	17.1363
9	25.327	3.2319	0.0288	-0.3849	0.1649	17.465
10	26.069	3.2607	0.0281	-0.2200	0.1599	17.5735
11	26.812	3.2888	0.0138	-0.0601	0.1586	8.7011
12	27.183	3.3026	0.0135	-0.0985	0.1616	8.354
13	27.554	3.3161	0.0134	0.2601	0.1701	7.8777
14	27.925	3.3295	0.0132	0.4302	0.1880	7.0213
15	28.296	3.3427	0.0130	0.6182	0.2658	4.8909
16	28.667	3.3557	0.0129	0.8840	0.2890	4.4621
17	29.039	3.3686		1.1730		

3.1 寿命的 Weibull 分布的拟合检验

设寿命分布为  $F(t)$ , 要检验假设:

$$H_0: F(t) = F_{-III}(t, m, \eta) \quad (3)$$

$F_{-III}(t, m, \eta)$  为两参数的 Weibull 分布, 即:

$$F_{-III}(t, m, \eta) = 1 - e^{-(t/\eta)^m} \quad (t \geq 0) \quad (4)$$

式中  $m > 0$ , 为形状参数;  $\eta > 0$  为特征寿命;  $t$  为腐蚀寿命,  $m, \eta$  为未知参数。检验式(3)有两种方法: 一种是 Weibull 概率纸法; 另一种是数值检验法—范蒙特福特法。本文用后一种方法。有关检验数据列于表 1。取显著水平  $\alpha = 0.10$ , 由文献[4]知, 冷凝器管子寿命分布符合极值 III 型分布, 即 Weibull 分布。

3.2 Weibull 分布的参数估计

首先, 对服从极值分布的变量  $s_i$  的参数进行估计, 因抽出的样本数为 42, 样本量较大, 采用简单线性无偏估计 (GLUE), 计算极值分布的参数  $\alpha, \lambda$ , 然后根据 Weibull 分布参数  $\eta, m$  与极值分布参数  $\lambda, \alpha$  的关系, 计算  $\eta, m$ , 即:

$$\eta = e^\lambda, \quad m = 1/\alpha \quad (5)$$

查文献[3]得  $\lambda = 3.4662, \hat{\alpha} = 0.1390$ , 再由式

(5)知  $\eta = 32.0149, m = 7.1942$ 。Weibull 分布的形状参数  $m > 1$ , 说明其失效率  $\lambda(t)$  是递增的, 证明了管材腐蚀寿命的分布是符合耗损失效的分布类型。

3.3 冷凝器冷却管寿命分布的可靠性指标

寿命分布函数  $F(t)$  为:

$$F(t) = 1 - e^{-(t/32.0149)^{7.1942}} \quad (t > 0) \quad (6)$$

可靠度为:

$$R(t) = P(T > t) = 1 - P(T \leq t) = 1 - F(t) \quad (7)$$

由式(6)、(7)

知, 可靠度  $R$  的可靠寿命  $t_R$  为

$$t_R = \eta \left[ \ln \frac{1}{R} \right]^{1/m} \quad (8)$$

图 2 为某舰船用冷凝器 BFe30-1-1 管的可靠度  $R(t)$  随时间的变化关系。

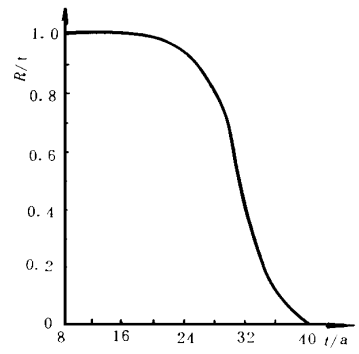


图 2 可靠度  $R(t)$  与时间  $t$  的关系

主冷凝器使用时间超过 20 年时,可靠度开始明显地降低。因此,对该主冷凝器来讲,使用时间超过 20 年时,应结合舰船维修对主冷凝器管束的腐蚀情况进行全面检查,经无损探伤测量出蚀坑深度的分布情况。

#### 4 结论

(1)文中用指数函数描述舰船用冷凝器冷却管腐蚀速度随时间的变化关系是可取的,对管束点蚀潜伏期寿命和稳定腐蚀速度  $V_{\infty}$  的处理方法也是偏于安全的。

(2)文中所采用的分布函数的拟合检验和参数估计方法,对冷却管腐蚀数据较少的场合均可采用。

(3)文中介绍的舰船用冷凝器冷却管的服役寿命的预测方法,可以推广到其它工业用冷凝器和换

热器冷却管的腐蚀寿命的确定,并预报不同时刻结构的可靠度。

#### 参考文献

- 1 林乐耘等. 原始表面状态影响  $\text{BF}_3\text{O}-1-1$  铜管耐海水腐蚀性能的电化学研究. 腐蚀科学与防护技术, 1990, 2(12).
- 2 汽轮机检修. 海军舰艇机电教材, 1979, 7.
- 3 可靠性试验用表. 国防工业出版社, 1987.
- 4 费鹤良, 王玲玲. 产品寿命分析方法. 国防工业出版社, 1988.
- 5 查长松. 舰用汽轮机结构可靠性定寿技术研究. 海军工程学院硕士学位论文, 1993.

作者简介 查长松, 男, 1967 年生, 工程师, 1989 年海军工程学院攻读硕士学位, 毕业后在四二五厂军事代表室工作。在动力装置失效分析、预测、预防以及可靠性定寿技术方面有一定的研究, 尤其是应用机械结构可靠性理论对舰用动力系统进行了可靠性定寿技术的探讨, 并撰写了相关的论文。  
(通讯处: 241001 芜湖 425 厂军代表室)

#### 简 讯

## 美 GE 与日本东芝公司共同开辟 H 燃气轮机市场

据“Modern Power Systems”1998 年 7 月号报道, 美国通用电气公司(GE)与日本东芝公司签订了一项协议, 共同开辟 H 系统的新型联合循环发电装置市场。这两个公司将在研制、生产及设计这种先进的发电装置方面进行合作。

H 系统是一个联合循环动力块, 其热效率将突破 60% 的障碍, 其输出电功率为 480 MW。协议的融资条款尚未披露。

协议是 1996 年两公司签订的制造许可的扩充。GE 将为 H 系统设计并制造燃气轮机和控制装置。东芝将制造 GE 设计的燃气轮机压气机段和东芝设计的汽轮机及发电机, 燃气轮机将在美国组装和试验。

首台 H 系统燃气轮机正在格林威尔进行工厂试验, 它已在无负荷状态下运行。2000 年计划进行满负荷发电试验。首台商业化运行装置期望于 2001 年成为现实。

H 系统的燃气轮机采用蒸汽替代空气冷却, 提高燃气轮机的运行温度至 1430 °C, 而目前大型燃气轮机的运行温度在 1300 °C 左右。从而大大提高了热力学效率。

(王震华 供稿)

discussion is conducted of the cylindrical fins when the entropy generation attained a minimum value under forced convection conditions. **Key words:** fin, entropy generation, irreversibility

催化裂化再生烟气能量回收系统的经济优化 = **Exergoeconomic Optimization of a Catalytic Cracking Regeneration Flue-gas Energy Recovery System** [刊, 中] / Chen Qinglin, Hua Ben (South China University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(1). — 20 ~ 23

By the use of the binary sub-system method of an energy system an exergoeconomic analysis and optimization is conducted of a flue-gas energy recovery system. Under the condition that the regeneration flue-gas physical parameters are constant the maximum economic benefits of recovery as a result of the optimum distribution of energy recovery quantity and heat recovery rate within the system are designated as the system optimization target. In addition, on the basis of a given economic model an optimization is performed of a representative flue-gas energy recovery system. Thereupon, obtained are the optimum design operation parameters when the system enjoys the maximum economic benefits. The optimization results can serve as a useful guide during the optimization design and operation of flue-gas energy recovery systems. **Key words:** fluid catalytic cracking, exergoeconomics, system optimization

舰船用冷凝器冷却管腐蚀寿命的可靠性探讨 = **A Reliability Study of the Cooling Tube Corrosion Life of a Naval Condenser** [刊, 中] / Cha Changsong, Hu Deming, Xu Yigui (Resident Military Representative Office of No. 425 Works) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(1). — 24 ~ 26

Local corrosion constitutes a major failure mode of naval condenser cooling tubes. The reliability life calculation of such tubes pertains to a maximal value problem. Based on accumulated corrosion data and the analytical report on naval condenser cooling tubes the authors have set up a reliability mathematical model for Bfe 30-1-1 cooling tube corrosion life assessment. The reliable service life of the main condenser cooling tubes has also been predicted. **Key words:** reliability, condenser, cooling tube, corrosion life, local corrosion

柴—燃交替使用动力装置(CODOG)的实验研究 = **Experimental Study of a Combined Diesel or Gas Turbine (CODOG) Power Plant** [刊, 中] / Zhang Biao, Wang Chuanpu, (Harbin Engineering University) et al // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(1). — 27 ~ 29

On the basis of research and development of a combined diesel or gas turbine (CODOG) power plant test rig an experimental study is conducted of the effect of such a variety of factors as load, diesel engine throttle speed and S.S.S clutch damping on the diesel and gas turbine switch-over process. As a result, some meaningful conclusions have been obtained. **Key words:** CODOG power plant, S.S.S clutch, dynamic process, experimental study

垂直上升管内气水两相流动截面含气率的测量 = **The Measurement of Void Fraction of a Two-phase Flow in Vertical Riser Tubes** [刊, 中] / Cai Jiyong, Chen Tingkuan, Ye Qiang (Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(1). — 29 ~ 33

The void fraction of gas-water two-phase flow in a vertical riser tube under bubble and slug flow conditions is measured by the use of a combination horizontal-riser tube method. The experimental test results are forecast using a theoretical model. The forecast values agree well with those of experimental results. This proves that the above-mentioned measurement method is a simple, accurate and feasible one. **Key words:** gas-water two-phase flow, void fraction, combination method, vertical riser tube, measurement

油页岩循环流化床锅炉返料系统调节特性试验研究 = **An Experimental Investigation of the Material Return System Regulating Characteristics of a Oil Shale Circulating Fluidized Bed Boiler** [刊, 中] / Jiang Xiumin