

# 工业汽轮机转子高温疲劳及寿命评估\*

郭乙木 鲁祖统 (浙江大学)

倪金沪 孙银海 (杭州工业汽轮机研究所)

〔摘要〕 在工业汽轮机转子材料低周疲劳试验及对实际工况下转子瞬态温度场、应力场分析的基础上,对转子的有效寿命进行预测,并研制成专用软件。实例分析表明,该软件能快速有效地达到上述目的,对工程应用有现实意义。

关键词 汽轮机转子 高温疲劳 寿命评估

分类号 TK263.61

## 0 引言

工业汽轮机是现代化工系统的主要驱动设备,它启停及工况转换频繁,引起较大幅度的温度、转速和负荷的变化,使转子产生较大交变的热应力和机械应力,导致疲劳损伤。另外,转子在高温环境中长期工作,产生材料蠕变损伤与疲劳损伤的交互作用,导致材料的高温疲劳损伤,加速转子寿命的损耗。因此,对其进行疲劳强度校核及有效寿命评估是十分必要的。

本文在对工业汽轮机运行工况调研的基础上,设计了用于转子应变疲劳损伤分析的两种载荷循环,通过对转子两种循环的非稳态温度场、循环加载的弹塑性应力场的计算和材料低周循环疲劳损伤规律的试验研究,进行转子寿命评估,为其疲劳设计和寿命管理提供科学依据。

## 1 两种载荷循环

工业汽轮机的整个运行过程包括起动工况、运行工况和停机工况:

(a)起动工况是汽轮机各部件逐渐加热受力的过程,在此过程中其通流部分各处蒸汽温度、压力等参数迅速变化,致使转子内部形成瞬间的温度梯度,导致热应力的产生,它是整个运行过程最复杂的工况。起动分为冷起动和热起动,为保证分析的安全性和了解更多的规律,本文采用冷起动。

(b)运行工况,汽轮机在正常运行过程中经常要随生产工艺、外界负荷、锅炉供汽等因素的变化而变化,以达到安全、经济地运行。机组从一个工况开始经调节达到新的工况所需的时间很短,在转子疲劳损伤分析中本文假定从一个稳态工况瞬时跳跃到另一稳态工况。

(c)停机工况是各部件降温 and 冷却的过程。停机速率直接决定了各部件不均匀冷却的程度,一般采用在维持新蒸汽参数额定值不变的条件下,通过减小进汽量按升速曲线逆过程停机或减去它全部负荷迅速停机。

收稿日期 1994 09 06 收稿改稿 1994 11 15

\* 本文为机械工业部“七五”攻关项目

在进行疲劳寿命分析时,必须关心构件在整个运行过程中可能导致损伤的各级循环及其出现次数。它可根据已投入运行的同类机组监控取得,也可由系统载荷规范要求确定。通过对  $T_{6000}$  机组近六年的实机调研、统计分析表明,机组运行平稳,产生疲劳损伤的主要原因是启动和停机过程。为此,确定如下的两种循环用于转子的疲劳寿命分析:

循环 A:零转速、零负载冷态启动 → 设计工况 → 停机;

循环 B:设计工况 → 最大工况 → 设计工况。

## 2 转子钢的低循环应变疲劳性能的研究

研究转子材料的高温低周疲劳特性、疲劳与蠕变交互作用特性以及掌握材料的疲劳损伤规律,对转子的寿命评估具有重要意义,是疲劳设计的重要依据。

### 2.1 材料疲劳失效的判据和试验方法

根据等幅应变疲劳试验记录的循环应力峰值  $\sigma$  与相应循环周次数据  $N$  可以作出  $\sigma \sim N$  曲线(如图 1),冷加工硬化金属材料在等幅应变疲劳的初期会产生循环软化现象,即随循环周次的增加,  $\sigma$  不断减小。

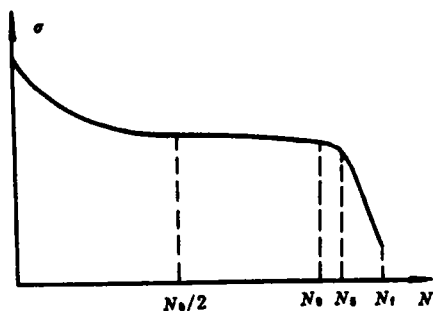


图 1  $\sigma \sim N$  曲线

初始裂纹定义为用肉眼可见的宏观裂

纹( $0.5 \pm 0.25$  mm)。据研究,试件表面出现初始裂纹的循环数大致相当于刚刚偏离  $\sigma \sim N$  曲线上循环稳定阶段线性变化时的循环数  $N_0$ ,  $N_0$  是材料的循环特征值,  $N_0/2$  到  $N_0$  为稳定循环,其滞后环称为稳定滞后环。定义应力峰值下降了  $N_0$  稳定环的 5% 时的循环周次为疲劳失效判据,记作  $N_s$ 。把试样在循环载荷作用下发生完全断裂或峰值应力下降急剧增加的循环数称为材料断裂循环数  $N_f$ 。

按 GB6399 - 86 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法(参考 ASTM606E - 80)对常用转子材料 28CrMoNiV 钢制成的试件在空气介质中进行试验,总应变值控制在(0.5 ~ 3)% 范围内,应变速率为  $1 \times 10^{-3}/s$ 。

对试件的稳定滞后环进行分解,总应变分解为弹性应变和塑性应变:

$$\epsilon_t = \epsilon_e + \epsilon_p \quad (1)$$

其中 
$$\epsilon_e = \sigma/E \quad (2)$$

弹性模量  $E$  由试验测得:

$$E_{25^\circ C} = 205 \text{ GPa}, E_{450^\circ C} = 179 \text{ GPa}, E_{530^\circ C} = 172 \text{ GPa} \quad (3)$$

### 2.2 材料高温低循环疲劳特性

在  $25^\circ C$ 、 $450^\circ C$ 、 $530^\circ C$  温度下采用应变三角波(如图 2a)对试件进行低循环疲劳试验:

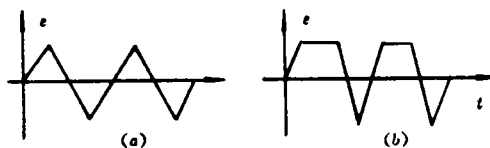


图 2 应变波形

#### 2.2.1 循环过程中应力峰值随循环周次变化特性

由某幅值的应变三角波作用下的试验记录,可绘制出材料的循环应力峰值  $\sigma$  与循环周次  $N$  的特性曲线(图 3 是  $25^\circ C$  的  $\sigma \sim N$  曲线图),  $\sigma \sim N$  曲线可分为三段,始末段  $\sigma$  变

化较大,中间段则比较平稳,三者可能与裂纹的萌生、扩展和断裂相对应。从 $\sigma \sim N$ 曲线可以明显地看出 28CrMoNiV 钢是循环软化材料,并且存在软化不对称现象(即鲍欣格效应),拉应变端比压应变端软化更快。

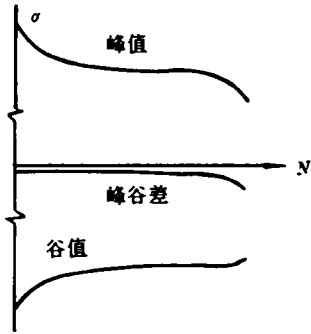


图3  $\sigma \sim N$  曲线

### 2.2.2 材料循环应力—应变特性

材料稳态的循环应力—应变曲线表征了材料在承受循环加载条件下的应力应变响应特性,它可以由不同应变幅值 $\epsilon_i$ 循环加载得到一组稳态循环应力应变滞回线的顶点相连接而成的光滑曲线表示(如图4)。材料的应力应变关系可由下式表示:

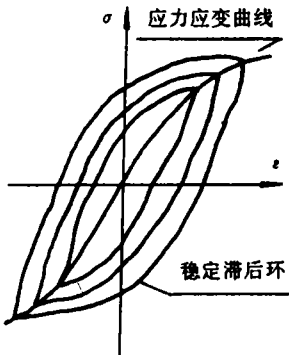


图4 循环 $\sigma \sim \epsilon$ 曲线

$$\epsilon_i = \epsilon_e + \epsilon_p = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'}\right)^{1/n'} \quad (4)$$

式中 $\epsilon_e$ 、 $\epsilon_p$ 、 $\epsilon_i$ 分别为总应变幅值、弹性应变幅值、 $E$ 、 $K'$ 、 $n'$ 分别为弹性模量、循环强度系数、

循环硬化系数。

$\epsilon_p \sim \sigma$ 在双对数坐标( $\ln \sigma \sim \ln \epsilon_p$ )中为一直线,经线性拟合得到( $\sigma$ 单位为MPa):

$$25^\circ\text{C} \quad \sigma = 1140 \epsilon_p^{0.1102} \quad (5)$$

$$450^\circ\text{C} \quad \sigma = 680 \epsilon_p^{0.0602} \quad (6)$$

$$530^\circ\text{C} \quad \sigma = 552 \epsilon_p^{0.0499} \quad (7)$$

图5为不同温度下 $\sigma \sim \epsilon_i$ 曲线,从图中可以看出,该材料为循环软化材料,而且 $K'$ 和 $n'$ 都随温度升高而降低。

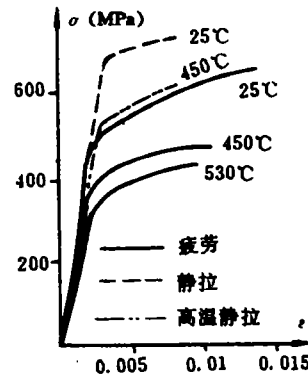


图5 不同温度下循环应力、应变曲线

### 2.2.3 材料的应变疲劳寿命特性

应变寿命曲线表达式可用于材料疲劳寿命的预测<sup>(3)(4)</sup>:

$$\epsilon_i = \frac{\sigma_i}{E} (2N_f)^b + \epsilon_i (2N_f)^c \quad (8)$$

式中 $\sigma_i$ 、 $\epsilon_i$ 、 $b$ 、 $c$ 分别称为疲劳强度系数、疲劳延性系数、疲劳强度指数、疲劳延性指数。常温下,它们是常数, $\ln \epsilon_i \sim \ln(2N_f)$ 、 $\ln \sigma_i \sim \ln(2N_f)$ 具有线性关系。在高温下,由于低频和保载的影响,非弹性应变中除了塑性流变外,还有蠕变的影响,使 $\ln \epsilon_i \sim \ln(2N_f)$ 的线性度不能保持,再经相关检验发现,该材料蠕变影响不大,仍可按式(8)处理,由实验数据拟合得到不同温度下 $\epsilon_i \sim N_f$ 的表达式。

但由于各种随机性和分散性及其本身的统计性,通常由试验得到的公式从数理统计角度评定,其置信度仅为50%,即中值平均预测值。为安全评定汽轮机转子的寿命,有

必要给出更高置信度的预测公式。设试验数据遵循正态分布,按统计理论给出不同应变量级下的一组测量数据的标准误差,从而求得不同置信度下的安全寿命公式<sup>[1]</sup>。99% 置信度的疲劳寿命表达式为:

$$25^{\circ}\text{C } \varepsilon_s = 4.69 \times 10^{-3} (2N_5)^{-0.0622} + 0.210 (2N_5)^{-0.551} \quad (9)$$

$$450^{\circ}\text{C } \varepsilon_s = 3.49 \times 10^{-3} (2N_5)^{-0.0440} + 0.530 (2N_5)^{-0.740} \quad (10)$$

$$530^{\circ}\text{C } \varepsilon_s = 2.89 \times 10^{-3} (2N_5)^{-0.0317} + 0.437 (2N_5)^{-0.727} \quad (11)$$

从式中可知,  $N_5$  随温度的升高明显下降,以循环应变——寿命曲线进行强度校核和寿命分析时必须考虑温度的影响。

### 2.3 材料高温低周疲劳与蠕变交互作用特性

为研究循环频率和应变峰值的保持时间对低周疲劳性能的影响,进行试件的 530℃ 拉伸端保时 5 分钟(波形如图 2b) 低周疲劳试验。一般认为保时对拉伸过程的影响较大<sup>[2]</sup>。

采用与上相同的试验方案及数据处理方式,得到如下公式:

$$50\% \text{ 置信度: } \varepsilon_s = 2.100 \times 10^{-3} (2N_5)^{-0.0317} + 0.267 (2N_5)^{-0.640} \quad (12)$$

$$99\% \text{ 置信度: } \varepsilon_s = 2.301 \times 10^{-3} (2N_5)^{-0.0317} + 0.214 (2N_5)^{-0.640} \quad (13)$$

考虑到频率  $\gamma$  的影响,则采用 Coffin 频率修正公式<sup>[3,4]</sup>:

$$\varepsilon_s = C_s (2N_5)^{-\alpha_1} \gamma^{\beta_1} + C_p (2N_5)^{-\alpha_2} \gamma^{\beta_2} \quad (14)$$

保持时间的影响可归结为  $\gamma$  与循环时间的关系中<sup>[5]</sup>:

$$\gamma = \frac{1}{t_c + t_h} \quad (15)$$

试验中保持恒应变速率,每一试件的频率各不相同,将 530℃ 保时 5 分钟和不保时的数

据组合在一起,把弹性分量和非弹性分量分别与相应项进行多元回归可得系数  $C_s$ 、 $C_p$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ ,最后得到:

$$50\% \text{ 置信度: } \varepsilon_s = 2.892 \times 10^{-3} (2N_5)^{-0.046} \gamma^{0.0543} + 0.627 (2N_5)^{-0.763} \gamma^{0.0444} \quad (16)$$

$$99\% \text{ 置信度: } \varepsilon_s = 2.886 \times 10^{-3} (2N_5)^{-0.046} \gamma^{0.0543} + 0.549 (2N_5)^{-0.763} \gamma^{0.0444} \quad (17)$$

寿命将随  $\gamma$  的减小和保时的增加而降低,如  $\varepsilon_s = 0.5\%$  时,530℃ 保时 5 分钟的寿命是不保时的 60%。

### 3 转子温度场和应力场分析

欲对转子进行寿命预测,必须首先分析其随时间变化的温度场和应力场,找到危险点。

**3.1 轴对称模型** 汽轮机转子结构复杂,在通流部分的表面有许多叶片,通过对叶片的稳态和瞬态温度场分析发现,叶片从初始温度到稳态温度的时间极短,约 20 秒,而转子要 40 分钟以后才趋于稳定,因此,忽略叶片而近似以轴对称问题处理是完全合理的,轴对称瞬态热传导问题可由有限元法求解,采用第三类边界条件。

**3.2 转子热弹塑性循环应力分析** 转子是轴对称的阶梯轴,在工作中承受蒸汽压力、旋转惯性力和负荷扭矩以及非均匀温度场的作用,考虑到上述荷载变化缓慢且沿周向的变化甚小,可按准静态准轴对称问题来处理,并作如下简化:1) 忽略转子自重;2) 不考虑应变速率效应和材料蠕变;3) 小变形;4) 材料初始各向同性服从 Mises 屈服条件、混合强化规律和关联流动法则,有关的函数由实验数据的拟合加以确定。

### 4 转子低周疲劳寿命损耗分析

在三向应力状态下,一形成疲劳有关的应变参量是有效应变 $\bar{\epsilon}$ ,在柱坐标中:

$$\bar{\epsilon} = \left\{ \frac{2}{9} [(e_r - e_\theta)^2 + (e_r - e_z)^2 + (e_\theta - e_z)^2] + \frac{1}{3} (v_r^2 + v_\theta^2 + v_z^2) \right\}^{1/2} \quad (18)$$

对自由表面或有压力作用的表面,可简化为:

$$\bar{\epsilon} = \left\{ \frac{2}{9} [(e_r - e_\theta)^2 + (e_r - e_z)^2 + (e_\theta - e_z)^2] \right\}^{1/2} \quad (19)$$

其中 $e_r, e_\theta, e_z$ 为该点的三个主应变。

由静强度试验表明,当温度高于350℃时,材料强度极限和屈服极限出现明显下降,又由温度场分析知,转子处在450℃以下。作如下假定:当 $T \geq 350^\circ\text{C}$ 时,按450℃的寿命公式估计,当 $T < 350^\circ\text{C}$ 时,按室温寿命公式估计。450℃、99%置信度的寿命估计公式:

$$\epsilon_1 = 3.310 \times 10^{-3} (2N_s)^{-0.064} \nu^{0.066} + 0.360 (2N_s)^{-0.770} \nu^{0.090} \quad (20)$$

常温下的频率影响小得多,可按式(9)估算。

由热弹塑性有限元分析得到的转子表面危险点的三个主应变和有效应变随时间变化曲线通常是一个复杂波形(如图6),需要用几个简单应变循环来替代,并认为两者对材料的疲劳损伤是等效的,这就是所谓的波形处理。雨流法(Rain Flow Counting Method)是一种被广泛采用的波形处理方法。

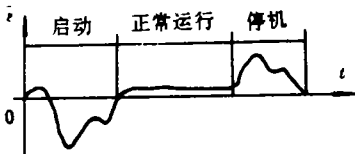


图6 波形曲线

由已知循环应变幅值及频率,应用上述公式求得有效寿命 $N_{51}$ ( $i$ 为循环计数),按累积损伤理论,当满足:

$$\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{N_{51}} \right) = k \quad (21)$$

时寿命耗尽,将导致疲劳破坏。文献(9)认为 $k$ 与应变量级和波形有关,对工业汽轮机取0.6~0.8,若 $k=0.7$ ,则每次循环的寿命消耗率为:

$$\eta = 1.33 \left( \frac{1}{N_{51}} \right) \times 100\% \quad (22)$$

当 $\eta \leq 10^{-4}$ 时循环应变称为无效应变幅值 $\epsilon_0$ 估算时可不考虑。

在已知各时间步 $t_i$ 的温度 $T_i$ ,三个主应变 $e_{r_i}, e_{\theta_i}, e_{z_i}$ 后,可按如下步骤分析:取绝对值最大的主应变波形,其波峰波谷值以等效应变 $\bar{\epsilon}_i$ 替代,采用雨流法作波形处理,求得每次循环的应变幅 $\bar{\epsilon}_i$ 和频率 $\nu_i$ 舍去无效应变循环;当 $T \geq 350^\circ\text{C}$ 时按式(20)求 $N_i$ ,否则按式(9)求 $N_i$ ;按式(22)求每次循环的 $\eta$ ,对循环计数迭加寿命损耗率。整套软件的框图如图7。

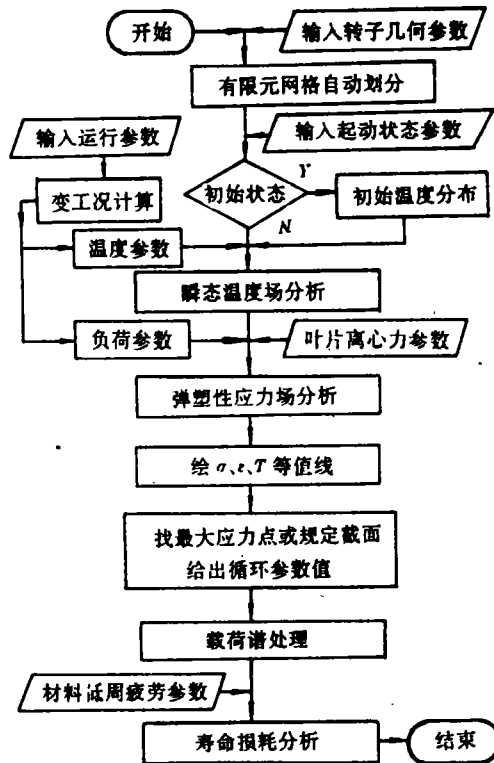


图7 软件框图

### 5 实例分析

本文选择在某石化总厂驱动  $CO_2$  压缩机的  $T_{6000}$  机组作为分析实例。该机为抽汽冷凝式。材料物理参数随温度的变化及对称循环加载情况下屈服极限与温度、等效塑性应变的关系见表 1、2。起动工况、设计工况、最大工况蒸汽参数沿轴和的变化如表 3，汽轮机转速、功率和介质温度随时间的变化如图 8，

有限元网格、载荷、约束如图 9。

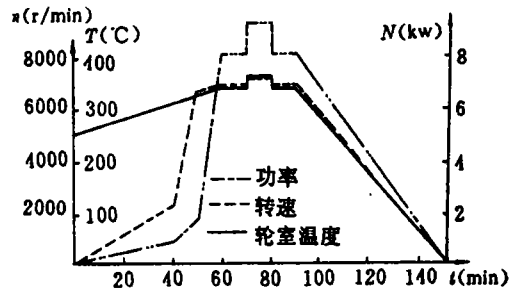


图 8 计算循环各步参数变化

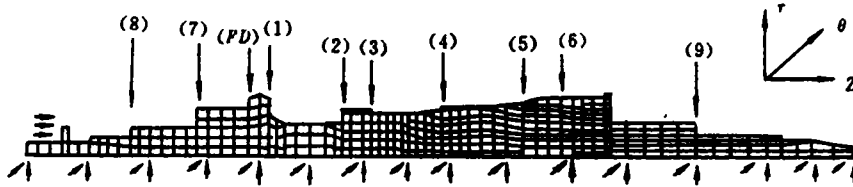


图 9 转子网格图及约束(小箭头)载荷情况

表 1 材料参数随温度的变化

温度(°C)	0	100	200	300	400	500	600
弹性模量 $E(10^4 MPa)$	20.50	20.01	19.62	19.12	18.34	17.36	16.48
平均线膨胀系数 $\alpha(10^{-6}/°C)$	12.0	12.0	12.4	12.9	13.4	13.8	14.0
泊松比 $\mu$	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	0.29
导热率 $\lambda(J/m \cdot sec \cdot °C)$	66.04	59.36	53.09	46.40	40.13	33.86	27.17
比热 $C_p(J/kg \cdot °C)$			509.5	538.0	575.6	634.5	706.8

表 2 屈服应力(MPa)

温度(°C)	0	100	200	300	400	500
等效塑性应变 0.000	483.0	464.0	444.0	431.0	418.0	380.0
0.001	524.0	516.0	508.0	486.0	460.0	403.0
0.005	600.0	593.0	573.0	558.0	517.0	450.0
0.010	683.0	661.0	636.0	607.0	556.0	472.0

表 3

工 况		位 置										转速	功率	流量	
		FD	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
设计	压力(MPa)	3.75	2.91	2.43	1.86	0.30	0.08	0.01	0.08	0.11	0.11	6470			
	温度(°C)	360	335	313	307	137	94.5	52.57	305	126	126				
最大	压力(MPa)	4.11	3.43	2.65	2.52	0.37	0.10	0.02	0.10	0.11	0.11	7060			
	温度(°C)	380	362	331	329	145	101	57.98	330	126	126				
空 载	压力(MPa)	4.11	2.65	2.65	0.08	0.01	0.005	0.005	0.005	0.11	0.11				
	温度(°C)	380	368.3	368.3	347	137	91	108	343	343	343				
起 动 工 况 起 动 时 间 (min)	0	压力(MPa)	3.00						0.029		0.11	0.11	0	0	0
		温度(°C)	365	50					90		343	343			
	10	压力(MPa)	3.70						0.011		0.11	0.11	700		
		温度(°C)	365	300					94		343	343			
	25	压力(MPa)	3.70						0.011		0.11	0.11	2100		
		温度(°C)	365	320					87		343	343			
	45	压力(MPa)	3.65										6052		
		温度(°C)	365	335					45		126	126			
	60	压力(MPa)	3.63		2.43		0.30		0.017		0.11	0.11	6470		
		温度(°C)	365	335	313	507	137	94.5	52	305	126	126			

5.1 计算结论与讨论 循环A、B的温度场分16步计算,由每步温度场得到转子内相应的应力场,由结果可知,启动十分钟后,最大等效应力曲线集中在转子调节级附近的表面处,值为630 MPa,这是由于突然的剧烈加热所致;启动升温过程转子表面产生较大压应力,停机则产生拉应力。

5.2 转子寿命损耗分析 对危险点应力、应变作波形处理,计算出正常启停的温度循环低周疲劳寿命及损伤为: $N_s = 3752$ 次,每次起停损伤率为0.38%(当 $k = 0.7$ )。

## 6 结论

1) 通过实例分析证明所研制的汽轮机转子疲劳寿命分析专用软件能较好地完成对运行载荷谱的分析处理、转子稳态和瞬态的温度场分析、循环加载的弹塑性应力场分析

及寿命损耗估计;

2) 因本构方程参数是基于循环加载的材料试验,寿命估计公式是基于转子材料的低周疲劳试验及采用了循环加载的混合强化理论,分析结果是可靠的;

3) 实例分析表明,按规范的起停过程中,影响转子疲劳寿命的主要因素是热应力循环。纯疲劳寿命为3752次,如果在总有效寿命中扣除在高温下长期稳定运行的蠕变寿命(占2/3),并考虑到两者交互作用,转子加工工艺,波形不对称等因素,允许起停约为1000次,与西门子公司提供数据相等。

## 参 考 文 献

- 1 傅惠民,高镇同.P-S-N曲线拟合.航空学报1988,9(7)
- 2 胡先约.汽轮机转子热应力及寿命计算与方法,1983

3 Manson S S etc. Creep fatigue analysis by strain-range partitioning. Symposium on Design for Elevated Temperature Environment ASME 1971,5,12-24

4 Coffin L F. Fatigue at elevate temperature. ASTM, STP 1973,520,5-31

5 Coffin L F. Proc. of the 2nd Int Conf. on Mech. Behaviour, Newyork 1976,338

6 丁有余等编. 汽轮机强度计算. 水电出版社 1985

7 Simo J C, Taylor R L. Consistent tangent operators for rate-independent elastoplasticity. Computer Methods in Applied Mech. and Eng. 1985, 48,101~118

8 Osgood, Carl C. Fatigue Design, 1982,90-95

9、荒木良一郎. 蒸汽タービン高压ロークの熱疲労寿命の推定. 三菱重工技報, 1973,10(4) (梁源 编辑)

作者简讯: 曹祖统, 男, 1968年生, 1992年浙江大学固体力学专业硕士毕业。主要从事结构优化、地基处理、地下工程等方面工作。现任职于浙江大学技术实业总公司工程部, 工程师。(杭州 310013)

〔封面说明〕照片上

## 哈尔滨七〇三研究所燃气轮机 设计和试验研究室(第四研究室)介绍

第四研究室拥有雄厚的技术力量、丰富的工程经验和先进的试验设备。长期以来从事舰用燃气轮机的设计和试验研究,先后研制了多型舰用燃气轮机,为海军建设做出贡献。

近年来,本研究室又承担了大量民品工程项目,下面介绍一例本室完成的重大工程项目。

本研究室在所长亲自带领下,协同兄弟单位自1984年便开始瞄准80年代国际上的热点研究项目——双工质平行复合循环燃气轮机(简称STIG),国际上第一套商用装置1986年投运,在世界各先进国家获得迅速的发展。它的特点是:

- 高比功;
- 高效率;
- 热电负荷平衡方面高度灵活;
- 减少排放物中NOx含量;
- 投资费用低;
- 可用现有机组改造。

封面右上图是利用S1A-02型燃气轮机(200kW)建成的STIG整机试验装置。在该试验装置上进行了大量的科学试验,取得重要成果。该项目1990年获中国船舶工业总公司科技进步二等奖。

在此基础上,迅速将此科研成果应用到工程中,承包了深圳南山热电有限公司三台ALSTONOM公司制造的PG5361P<sub>1</sub>型燃气轮机(24700kW×3)STIG装置。该装置1992年投运,当回注7%的蒸汽时,在燃气初温不变的条件下,功率增加30%,耗油率降低了15%,每台机组年增利润近1500万元,获得用户高度评价。这是我国第一套国产STIG商用装置,是科研成果迅速转为产品并取得明显经济效益的范例。为此,1993年该项目荣获中国船舶工业总公司科技进步一等奖。

此外,本研究室还具备从事燃气轮机电站设计,燃气轮机安装调试、部件试验,燃气轮机改烧重质燃料,再热清洗装置总承,重(原)油处理装置安装调试,油库,煤气集输工程设计总承,制冷、空调设计和计算机应用,自动控制设计总承等领域工程项目的能力。

欢迎来人来函,洽谈业务,共同发展。

联系人: 邹积国 王全伏  
传 真: (0451)5662881--34

地 址: 哈尔滨公滨路452号  
邮 编: 150030 电 挂: 6511



An abrupt converging and abrupt diverging piping should not be viewed as a simple superimposition of an abrupt converging connection to an abrupt diverging one. It has been found through tests that under the condition of a given distance of the abrupt convergent and abrupt divergent connection the pressure drop in a piping is related to the dual-phase flow dryness and gas flow rate for which the authors have derived the corresponding calculation formulas. Key words: abrupt convergence, abrupt divergence, gas/liquid dual-phase flow, pressure drop

磁化水在冷却循环和供暖系统中的应用研究—An Applied Study of Magnetized Water in a Cooling Circulation and Heat Supply System [刊,中]/ Guo Ping (Kunming Non-ferrous Metallurgy Design Institute), Zhao Danya (Yunnan Industrial University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). -371~374

On the basis of the experimental research conducted by scientists of the former Soviet Union a series of theoretical analyses have been carried out regarding the mechanism of fouling prevention and elimination of magnetized water when used in a cooling circulation and heat supply system with the aim that such a technology may eventually find widespread uses in China. Key words: solubility product, salt hardness, hydration, magnetic field force, complex compound

循环流化床煤燃烧过程中  $N_2O/NO_x$  的排放研究—An Investigation on the Emissions of  $N_2O/NO_x$  During the Process of Circulating Fluidized Bed Coal Combustion [刊,中]/ Lu Jianxin, Liu Hao, Feng Bo, Lin Zhijie, Liu Dechang (Central China University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). -375~380

On a circulating fluidized bed hot state test rig an investigation has been conducted of the generation during coal combustion of nitrogen oxides (including  $N_2O$  and  $NO_x$ ) with the variation of their concentration along the bed height being measured. It has been found through tests that there emerged a continuous increase in  $N_2O$  and a drastic decrease in  $NO_x$  with the increase in furnace height. The  $N_2O$  attained a maximum value at the furnace outlet with a dramatic increase in emissions. The authors have analysed the underlying causes of such phenomena and also studied the effect of operating parameters on the  $N_2O$  and  $NO_x$  emissions. Key words: circulating fluidized bed, coal burning, nitrogen oxides

发电厂省煤器管镍基合金喷熔层组织与性能的研究—Study on Structures and Properties of the Nickel Based Alloy Spray Welding Layers on the Pipes of Economizers of Coal-Fired Power Stations [刊,中]/ Liu Shaoguang, Wang Ping, Shu Delin (Anhui Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). -381~384

In this paper, the authors investigated on purpose the structures and properties of the nickel based alloy spray welding layers, considering the serious actual situation of high temperature erosion of the pipes of economizers of coal-fired power stations. It has been shown that there are the complex structures, higher hardness and connecting strength, excellent oxidation resistance and high temperature erosion resistance on the layers. It is fairly suitable to deal with the high temperature erosion problem of the pipes of the economizers. Key words: economizers, high temperature erosion, nickel based alloy spray welding layers, structures and properties

工业汽轮机转子高温疲劳及寿命评估—High-temperature Fatigue and Service Life Evaluation of Industrial Steam Turbine Rotors [刊,中]/ Guo Yimu, Lu Zutong, (Zhejiang University), Ni Jinhui, Sun Yinghai (Hangzhou Industrial Steam Turbine Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). -385~392

On the basis of industrial turbine rotor material low-cycle fatigue tests and the analysis under actual operating conditions of the rotor transient temperature and stress field a prediction of the rotor effective life has been conducted with the ensuing development of a special software. The analysis of specific examples shows that the software is capable of effectively

attaining the above-mentioned aim and has practical significance for engineering applications. Key words: turbine rotor, high-temperature fatigue, service life evaluation

用工程方法考虑流动损失的跨音速透平级全三元流场的计算—Computation of a Transonic Turbine Stage Full Three-dimensional Flow Field with Flow Loss Being Taken Account of by a Engineering Method [刊, 中] / Huang Dianguai (Southeastern University), Jiaog Zikang (Qinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). 393~396

Presented in the paper is a full three-dimensional flow field computational method for a transonic turbine stage with flow losses by the use of a time marching method. The flow losses are calculated by using the flow loss model proposed by Harbin Turbine Works. The full three-dimensional flow field computation results with flow losses being taken into account have been compared with those with the neglect of flow losses. It is found that in the case of flow losses being considered there emerged a certain enhancement in the degree of reaction with a slight change in speed triangle, indicating that the consideration of flow losses is essential to the further improvement of turbine stage design. The method recommended in the present paper is suitable for use in engineering designs. Key words: turbine, full three-dimensional, transonic.

汽液两相螺杆膨胀机的定熵膨胀功率特性—The Power Characteristics of a Two-phase Helical Screw Expander During Its Isentropic Expansion [刊, 中] / Wang Wei (Tianjin Urban Construction Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). -397~400

The power characteristics of a helical screw expander during its isentropic expansion was studied in detail with the concept of expansion ratio of peak power being proposed. Also analysed was the effect of inlet working medium (steam-water mixture) parameters and the said medium pre-throttling on the power characteristics of the helical screw expander. Key words: total flow, helical screw expander, two-phase expansion, power characteristics.

水平管内气—液两相流流型及其转换特性研究—Gas liquid Two phase Flow Pattern in a Horizontal Pipe and the Study of its Conversion Characteristics [刊, 中] / Zhou Yunlong, Xia Guolong, Chen Xiaoshan, Jiang Anzhong, Li Hongyuan, Li Xuewu (Northeast Electrical Power Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). -401~404

An experimental study was conducted of an air-water two phase flow pattern in a horizontal circular pipe. A flow pattern figure plotted on the basis of the test results was compared with that obtained through conventional test results, indicating the presence of analogous specific features. As a result, proposed was a flow pattern conversion relation with a greater forecast capability. Key words: horizontal pipe, gas-liquid two phase flow, flow pattern, conversion characteristics

Edited and Published by Harbin Marine  
Boiler & Turbine Research  
Institute and Editorial Staff  
of this Journal

Printer: Printing House of Harbin Institute  
of Technology

Address: P. O. Box 77, Harbin China

Cable: 6511, Harbin China

Post Code Number 150036

ISSN 1001-2060  
Periodical Registration:  
CN23-1176/TK

Distributed by China International  
Book Trading Corporation,

P. O. Box 399, Beijing, China