

汽轮机高压缸三维瞬态温度场计算与实验

(哈尔滨七〇三研究所) 刘殊一

(大庆石油管理局技校) 梁军

(哈尔滨工程大学) 高璞珍

[摘要] 汽轮机在快速冷态启动时, 高压缸的热应力相当大, 缸体易出现裂纹, 文中根据某高压缸实型建立了高压缸三维温度场、热应力场的数学物理模型, 确定了合理的边界条件。利用有限元程序进行了三维瞬态温度场、热应力场计算, 找出了在冷态紧急启动时, 产生最大热应力的时间和部位, 将计算结果与试验结果相比较, 两者吻合得很好。

关键词 汽轮机 高压缸 瞬态温度场

中图分类号 TP. 262

1 前言

汽轮机机组的启动时间过长会造成严重的能源浪费, 尤其是电站调峰机组, 由于单机容量日趋增大和昼夜电负荷变化造成的频繁启动, 有必要缩短机组启动时间, 对机组进行快速冷态启动。然而冷态快速启动会引起较大的温度梯度, 随之产生较大的热应力和热变形, 危及机组安全运行。我国运行的高温高压机组中, 有不少高压缸调节级处出现了裂纹, 这基本上是由于启动和变工况运行时调节级区域温度变化剧烈, 引起过大的交变热应力所致。因而近年来人们展开了汽轮机温度场研究, 以寻求最佳的结构和最佳的启动方式。由于汽缸结构复杂、体积较大, 对高压缸的瞬态温度场和热应力场都是采用实验手段测试的。而测点的布置又是凭经验, 所以测试的温度值和热应力值不一定是最大值。目前由于有限元程序的开发和利用, 对于汽缸瞬态温度场和热应力场的计算研究已成为可能。本文针对25 MW工业汽轮机高压缸进行了三维瞬态温度场计算。在计算之前进行试验测试, 在汽缸不同位置上分别布置了10多个测点。在冷态快速启动时每隔三分钟记录一次温度值, 测定使用电子电位差计。本文采用汽缸温度场、应力场实验测试与理论计算相结合, 确定汽缸上的应力水平, 对保证汽缸结构设计和运行方式的合理性是有一定的实用价值的。

2 理论模型

本文根据高压缸的具体情况做了以下假设:

- (1) 高压缸是以子午面为对称的结构;
- (2) 材料各向同性, 材料的物性是温度的函数;
- (3) 不考虑辐射换热的影响;
- (4) 无内热源;
- (5) 缸体外壁绝热, 内壁按第三类边界条件给定;

物体导热微分方程式的普遍形式为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) = \text{div}(K \cdot \text{grad} T) + q_v \quad (1)$$

式中: T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为时间, s ; K 为导热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; ρ 为物体密度, kg/m^3 ; C_p 为定压比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; q_v 为热源强度, W/m^3 。

根据以上假设可以把微分方程式的普遍形式简化为以下形式

$$\text{he} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{\rho C_p} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (2)$$

$$-K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = \alpha (T_f - T) \quad (3)$$

$$T(x, y, z, 0) = f(x, y, z) \quad (4)$$

式中, α 为对流换热系数, $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; T_f 为周围介质的温度(蒸汽温度), $^{\circ}\text{C}$; n 为边界面上的点(x, y, z)外法线方向。

利用 Galerkin 法将热传导微分方程式(2)转化为有限元积分描述形式, 权函数 W_i 取为形函数 N_i , 对于一个单元来说有:

$$\int_V \left[\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{K}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \right] N_i dv = 0 \quad (5)$$

经过变换, 利用奥式公式转换成如下形式

$$\int_V \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} N_i dv - \iint_{\Gamma} K N_i \frac{\partial T}{\partial n} d\Gamma + \int_V K$$

$$\times \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV = 0 \quad (6)$$

通过对空间的离散求得瞬态传导问题的单元平衡方程

$$[C] \frac{\partial \{T\}}{\partial t} + ([K_K] + [K_a]) \{T\} = \{F_a\} \quad (7)$$

式中: $[C] = \int_V \rho C_p [N]^T [N] dV$

摘要 | $[K_K] = \int_V K [B]^T [B] dV$

$$[F_a] = - \int_{\Gamma} \alpha [N]^T [N] d\Gamma$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_r}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \dots & \frac{\partial N_r}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \dots & \frac{\partial N_r}{\partial z} \end{bmatrix} \quad \text{对}$$

$$[N] = [N_1, N_2, \dots, N_r]$$

对时间的离散采用 Calerkin 格式

$$2 \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\}_t + \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\}_{t-\Delta t} = \frac{3}{\Delta t} (\{T\}_t - \{T\}_{t-\Delta t}) \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)整理后得

$$\begin{aligned} (2[K] + \frac{3}{\Delta t}[C]) \{T\}_t &= (2[F_a]_t + [F_a]_{t-\Delta t}) + \\ &(\frac{3}{\Delta t}[C] - [K]) \{T\}_{t-\Delta t} \end{aligned} \quad (9)$$

其中: $[K] = [K_K] + [K_a]$

上式是采用 Galerkin 格式计算瞬态温度场的基本方程。

3 计算和实验结果

在划分网格时, 模型与缸体一致, 主要采用八节点六面体单元和六节点五面体单元。网格模型如图 1 所示。

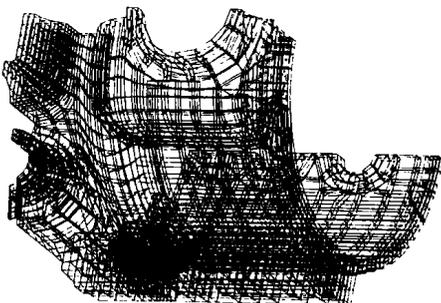


图 1 网格模型

缸体内蒸汽和缸体内壁对流换热系数是通过本机组的试验测定的温度进行反复试算而确定的。由于本高压缸是部分进汽, 在实验时采用测点在调节级处周向布置, 并且在内旁通部位、中分面法兰、圆筒体部位都相应地布置了测点。所有的测点都布置在缸体的外壁, 测试采用电子电位差计, 实验步骤是根据机组的冷态快速启动方式而制定的。

计算采用等步长, 每个时间步是 60 秒, 共计 44 步。图 2 至图 5 是测点温度的实验值和计算值随时间变化曲线。图 6 是热应力随时间变化曲线。测点 1 位于汽缸调节级顶部凹槽处; 测点 2 位于汽缸调节级底部; 测点 3 位于旁通阀上部; 测点 4 位于调节级处中分面法兰上。

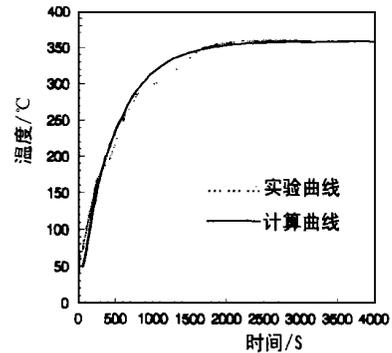


图 2 测点 1 温度变化曲线

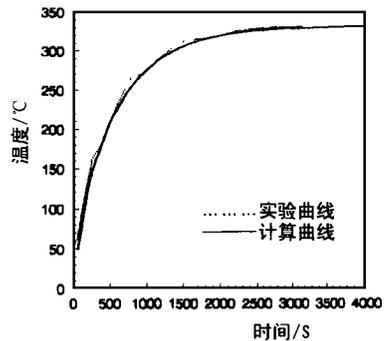


图 3 测点 2 温度变化曲线

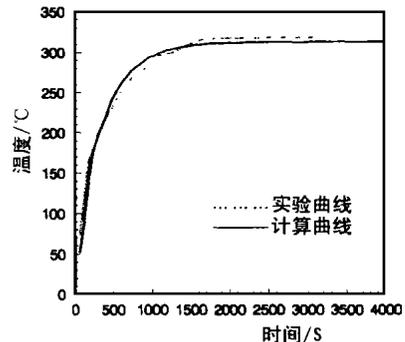


图 4 测点 3 温度变化曲线

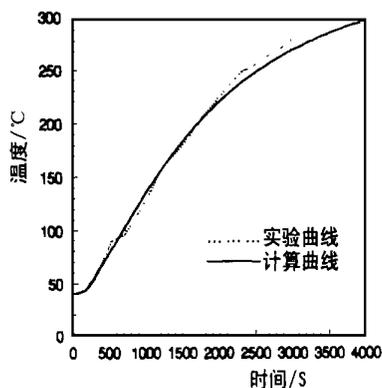
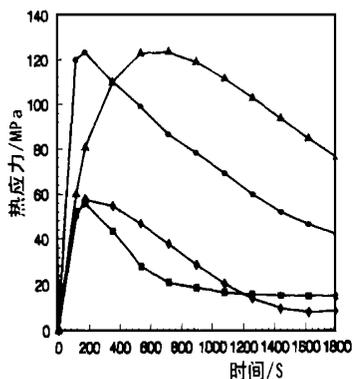


图 5 测点 4 温度变化曲线



▲▲▲法兰 ●●●测点 1
◆◆◆测点 2 ■■■测点 3

图 6 热应力变化曲线

4 结果分析

从图 2~图 5 可以看出, 计算曲线与实验曲线吻合的相当好, 说明给定的对流换热系数是合理的, 计算出来的温度梯度场同实验测定的相一致。

该机组冷态快速启动需要 25 分钟, 在 25 分钟内温度上升非常快, 温度场也极不均匀, 产生了最大温度梯度以及热应力。在 25 分钟以后温度场逐渐趋于稳态时的状况, 热应力值也逐渐减小。壁厚为 35mm 各部位中的各外壁节点最大热应力几乎都在

第三分钟时出现, 在调节级顶部凹槽处的最大热应力值可达 123.2MPa。所以在启动后第 2 分钟时应停止升高转速。中分面法兰厚度是 145mm, 蓄热量较大, 温度上升的缓慢, 在第 12 分钟时出现最大热应力值。在第 12 分钟以后法兰热应力开始下降。因此在前 2 分钟内应任意提高转速, 而在第 2 分钟时应停止升高转速, 需要 15 分钟, 从第 17 分钟开始继续升高转速至 25 分钟时达到全速。用这样的启动程序, 该机组在 25 分钟内就可以达到最大转速, 并且是安全可靠的。

通过计算可以找出最大热应力值出现在什么时间和部位, 这就可以在那一时刻停止升高转速或在设计时对于出现最大热应力值的部位增加强度。这也更有利于节省能源, 降低运行成本, 提高经济效益。

5 结论

利用有限元法进行三维瞬态温度场及热应力场计算, 可以为机组的运行制定合理的启动程序, 同时为机组的设计提供科学依据。蒸汽对流换热系数还不能通过计算或实验直接得到, 本文给出的确定对流换热系数的方法也是一种行之有效的方法。

参考文献

- 1 哈尔滨汽轮机厂. 汽轮机 CrMoV 钢件裂纹问题调查报告. 汽轮机技术, 1982(1).
- 2 刘钧朴, 朱丹书, 张行政等. 核电汽轮机高压缸三维有限元热应力分析. 动力工程, 1995, 15(2).
- 3 汽轮机、锅炉、发电机金属材料手册编写组. 汽轮机、锅炉、发电机金属材料手册. 上海人民出版社, 1973.
- 4 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用. 科学出版社, 1986.

作者简介 刘殊一, 男, 1965 年生, 1989 年毕业于哈尔滨船舶工程学院热能工程专业。毕业后分配在哈尔滨第 703 研究所。1996 年获工程热物理硕士学位。目前主要从事汽轮机的设计和强度分析等工作。

· 技术分析 ·

先进程氏循环与联合循环性能旗鼓相当

据“Gas Turbine World”1998 年 7—8 月号报道, 正把先进的程氏循环(ACC)蒸汽回注方案应用于大功率重型工业和航改型轻型燃气轮机, 以便使其功率增加多达 80%、效率增加 40%, 并明显减少排放。

该设计包括利用燃气轮机排气产生过热蒸汽的余热锅炉。然后蒸汽被回注入燃气轮机, 在其中与空气和燃料混合, 增加了通过燃气轮机的质量流量(加大了输出功率), 并

允许燃气轮机以更高的温度运行(增加效率)。

为了拓展 ACC 的市场, 最近组成了名叫程氏动力系统(CPS)的新公司。CPS 的目标是生产输出功率为 20~125MW 的高性能燃气轮机。

文章对 ACC 设计与流行的 STIG(蒸汽回注式燃气轮机)设计以及联合循环装置作了比较, 论述了 ACC 的优点。

(思 娟 供稿)