

Available online at www.sciencedirect.com**SciVerse ScienceDirect**

Procedia Engineering 27 (2012) 1575 – 1581

**Procedia
Engineering**www.elsevier.com/locate/procedia

2011 Chinese Materials Conference

Transient analysis of LP rotor from NPP 900MW turbine

Mingxiang Gong^{a,b}, Di Guo^b, Zhaoxi Wang^{b*}, Zhenhao Shi^b, Fei Xue^b, Jiang Guo^a^a School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China^b Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou 215004, China

Abstract

Thermal stress and the contact stress for centrifuge force field during the start up and shut down is very most important for the safety of the turbine which will affect the design life of the turbine. The stress at startup and shut down is much larger than the stress at other conditions. The stress level and the fatigue life are important for safety and economy of the rotor. In this paper, the mechanical properties of the material varying with the temperature are considered. The vapor pressure and temperature at different position of the rotor and at different history are considered to calculate the film coefficient. The two dimensional thermal-mechanical coupled model is used to calculate the transient temperature field and stress field. The three dimensional contact model is used to calculate the stress field and contact stress under the centrifuge loading conditions.

© 2011 Published by Elsevier Ltd. Selection and/or peer-review under responsibility of Chinese Materials Research Society. Open access under [CC BY-NC-ND license](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/).

Keywords: LP rotor; warm start up; normal shut down; transient stress; contact stress

某核电站汽轮机中低压转子瞬态应力分析

龚明祥^{a,b}, 郭迪^b, 王兆希^{b*}, 施震灏^b, 薛飞^b, 郭江^a

1. 武汉大学动力与机械学院, 湖北省武汉市 43007

2. 苏州热工研究院有限公司, 江苏省苏州市 215004

摘要

热应力和离心接触应力是机组启停过程中影响其安全运行的最主要因素, 严重影响汽轮机的设计寿命;

* Corresponding author. Tel.: +86-512-68702069; fax: +86-512-68603222.

E-mail address: wangzx03@mails.tsinghua.edu.cn.

启停机过程中的热应力和离心应力相对于其他应力来说要大得多，轴系的应力水平和疲劳寿命损耗是汽机转子安全、经济运行的最主要的因素。本文考虑材料的物理性能随温度的变化，蒸汽参数随时间和转子不同位置的变化，建立二维热力耦合计算模型，对启动和停机典型工况下的转子温度场、应力场进行瞬态计算；建立三维接触计算模型，对离心力作用下的应力场和接触应力进行分析计算，为汽机的安全运行提供技术支持。

关键词： 低压转子；热启动；停机；瞬态应力；接触应力

1. 引言

大型汽轮机运行中影响寿命的主要因素是机组启停和变负荷时在转子中引起的交变热应力和离心力导致的应力，往往产生较大的塑性应变，从而导致转子的低周疲劳损伤，因而转子是汽轮机中最关键也是最脆弱的部件^[1, 2]。转子表面温度主要依赖与周围的蒸汽温度和转子表面的传热系数，因而启停过程中，影响热应力的根本因素是启停机过程中的蒸汽的温度和压力变化情况^[3, 4]。

本文根据机组的实际启动时的蒸汽压力和温度曲线，计算不同时刻位置下转子表面的换热系数，通过热力耦合有限元计算转子启机过程中瞬态的温度场分布和热应力场分布；简化转子叶片的几何形状，模拟离心力作用下转子的应力分布；通过接触模型研究叶片与根槽接触部位局部的应力水平。

2. 转子材料力学特性

国内某核电站汽轮机材料为 3.25NiCrMoV，其力学参数和热学常数随着温度的变化而变化；而在机组的启停过程中，转子表面及内部的温度都处于一个瞬态变化过程中，采用任意时刻材料的物理性质变化更好的表征变物性对整个计算过程的影响。导热系数随着温度的升高线性降低，而热膨胀系数随着温度的升高而升高。实验表明，温度升高，弹性模量降低而比热容升高。

其中 λ 为材料导热系数， c_p 为材料比热， ρ 为材料密度， g 为热流密度函数， α 为对流换热系数， T_f 为转子表面接触的气温。初始条件为第一类边界条件，中心孔为绝热第二类边界条件，转子外缘表面为已知蒸汽温度和对流换热系数的第三类边界条件，其中换热系数为蒸汽温度、压力和流速的函数；转子外表面上蒸汽温度、压力和流速随轴向位置和启停机时间的变化而变化，因而蒸汽温度和转子外表面换热系数也是时间和空间的函数。

叶片间轴位置的对流换热系数可以表示为[6]：

$$\alpha_a = \frac{N\lambda}{R_a} = \frac{\lambda}{10R_a^{0.32}} \cdot \left(\frac{\mu}{\nu}\right)^{0.68} \quad (1)$$

叶片位置的对流换热系数表示为[7]：

$$\alpha_b = \begin{cases} \frac{0.675 \left(\frac{\mu R_b}{\nu}\right)^{0.5} \lambda}{R_b}, & \frac{\mu R_b}{\nu} \leq 2.4 \times 10^5 \\ \frac{0.0217 \left(\frac{\mu R_b}{\nu}\right)^{0.8} \lambda}{R_b}, & \frac{\mu R_b}{\nu} > 2.4 \times 10^5 \end{cases} \quad (2)$$

以汽轮机热启动过程为例，随着启机时间各级叶片位置的蒸汽温度和压力逐渐升高至一个稳定值，根据公式(1)和(2)以及各级叶片和轮轴位置的换热系数如图 1 和图 2 所示。

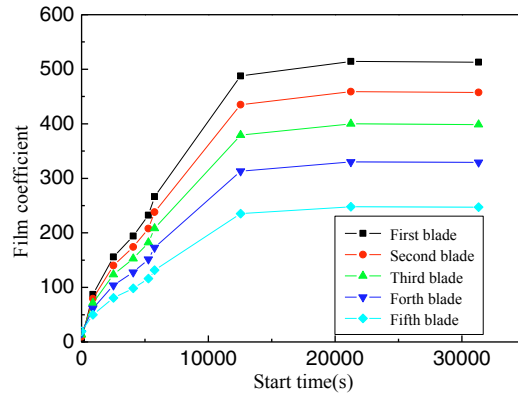


图 1. 叶片位置换热系数随启机时间变化趋势

Fig. 1. Film coefficient at blade Varies with Time

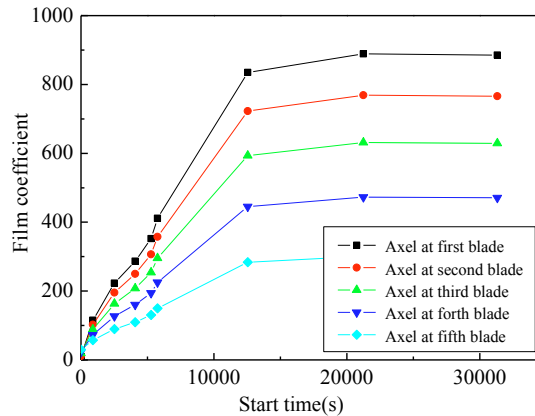


图 2. 轮轴位置换热系数随启机时间变化趋势

Fig. 2. Film coefficient at axel Varies with Time

3. 启机温度场及热应力场计算

考虑到汽轮机转子结构比较复杂，为准确的对转子进行温度场和应力场进行计算分析，建立几何模型时采用了一定程度上的简化，汽封主要影响转子表面的换热系数，建立以包括轴封在内的转子几何模型，然后在其表面施加对应的放热系数，二维轴对称 1/2 模型的网格划分采用轴对称四边形单元。

施加几何边界条件和热力学边界条件，进行瞬态动力学求解。初始载荷步采用施加初始温度场的稳态计算，得到稳定的初始温度场，再在此稳态温度场分布的基础上进行瞬态动力学计算，得到各级叶片根槽部位应力水平变化历程如图 3 所示，随着启机时间，各级轮轴位置的应力水平先升高，后随着温度场均匀分布达到一个稳定的应力水平，其中第一级叶片根槽位置因为温

度梯度较高，应力水平明显高于其他位置。

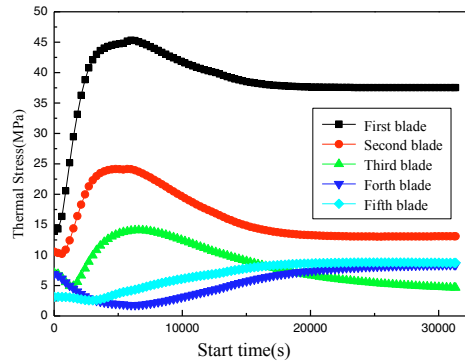


图 3. 各级根槽部位热应力水平历程

Fig. 3. History of the Thermal Stress at the rotor

在各级应力水平达到最高值时刻，转子温度场分布如图 4 所示，应力场分布如图 5 所示。在第一级叶根部位温度较高，温度梯度也较大，因而应力水平较高。



图 4. 应力峰值时转子整体温度分布

Fig. 4. Distribution of the rotor temperature at the peak stress



图 5. 应力峰值时转子整体热应力分布

Fig. 5. Distribution of the rotor thermal stress at the peak stress

启机稳定后的温度场和应力场如图 6 和图 7 所示，温度场有了一个较为稳定的分布，而应力

水平也有降低。



图 6. 启机稳定后转子整体温度分布

Fig. 6. Distribution of the rotor temperature at the steady state



图 7. 启机稳定后转子整体热应力分布

Fig. 7. Distribution of the rotor thermal stress at the steady state

4. 离心力及接触应力计算

转子启动后在转子及叶片离心力的作用下，轮轴往往有较高的应力水平；每次启停机导致应力水平的波动，成为转子疲劳寿命的主要考虑因素。而因为末级叶片尺寸最大，质量最大，所产生的离心力也最大，在该载荷作用之下，叶片与根槽的接触往往会导致根槽产生较大的应力水平，每次启停机引起的疲劳损耗也较强，容易萌生疲劳裂纹。

为计算考虑叶片及转子离心力作用下的转子整体应力水平，将叶片简化为规则几何形状，质量及质心保持不变，叶片及转子之间简化为一个整体，不考虑接触面的作用时，计算得到末级叶片根槽处的应力水平较高。不考虑叶片与转子之间的装配公差，仅考虑叶片、转子及销钉之间的接触，计算其在离心力作用下的接触应力，仅取末级叶片做简化处理，其几何模型及有限元网格如图 8 所示。

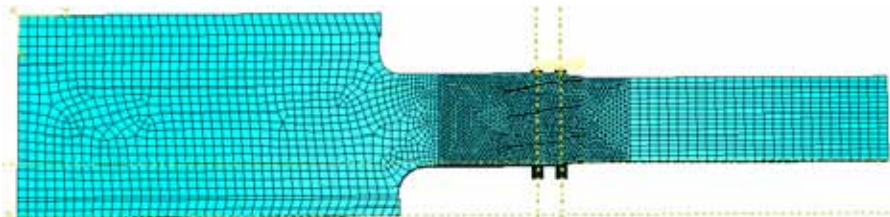


图 8. 叶片及根槽接触几何模型

Fig. 8. Geometry model of contacted blade and rotor

启机后全转速离心力作用下的接触应力分布如图 9 所示，在转子的根槽部位有较高的应力分布，局部位置甚至超过材料的屈服应力，可能成为疲劳裂纹起裂源。

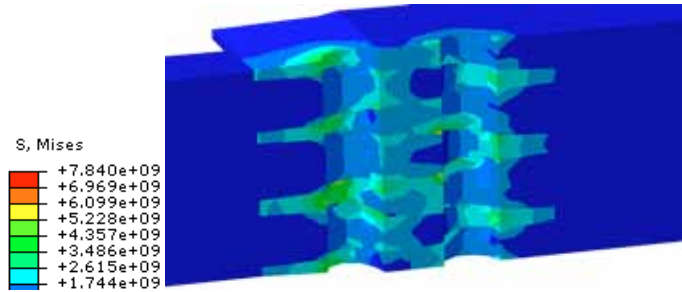


图 9. 叶片及根槽接触应力分布

Fig. 9. Distribution of the contact stress at the rotor and blade

5. 总结

本文考虑材料的力学及热学特性随温度的变化，蒸汽参数随时间和转子不同位置的变化，建立二维热力耦合模型，进行热应力计算；建立考虑接触的三维几何模型进行离心力场作用下的应力场和接触应力计算。

研究表明，在蒸汽压力和温度随着启机时间逐渐升高到一个稳定值，相应位置的换热系数也逐渐增大到一个稳定值。热启动启机过程中的热应力水平随着启机过程先升高后达到一个稳定的值，而热应力因为在进气口处较高的温度梯度而最大。

叶片简化模型的计算结果可以看出，因为末级叶片有较大的质量和质心离旋转轴较远，所以产生的离心力较大，因为导致末级叶片根部的应力水平较高。为实际计算叶片与转子根槽之间接触产生的应力水平，建立三维接触模型，计算结果表明接触部位局部有较高的应力水平，甚至超过屈服极限，可能产生疲劳裂纹的起裂源。

致谢

感谢江苏省企业博士集聚计划，国家重点基础研究发展计划项目(973 计划) (2011CB610506) 和科技重大专项 (2011ZX06004-002) 的经费资助。

References

- [1] Tang J, Ji J, Liu H, Heat Transfer Analysis and Calculation of Thermal Stress of Turbine Rotor, *Thermal Turbine* 2010; **39(3)**:184-186.
- [2] Jing JP, Wu XH, Xia SB, Fatigue damage of the turbine rotor under cold start up conditions. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power* 2000; **15(90)**:598-600.
- [3] Jiang N, Cao ZQ, Calculating the cyclic life expend considering the change of material characteristic with temperature, *Journal of southeast university* 1999; **29(4)**:1-5
- [4] Hao RT, Mou XM, Wang HQ, Calculation and Analysis of Super-critical Turbine Rotor Thermal Stress with Material Physics Properties Changing, *Electric power science and engineering* 2008; **24(3)**:35-37
- [5] Xia YC, Wu J, Study on the performance of startup and shutdown for an induced 600MW steam Turbo-generator unit, *Turbine*

Technology 2008;**50(1)**:55-61.

- [6] Liu YF, Hao RT, Gao JQ, The comparison and application of two common formulas of heat transfer coefficient, *Turbine Technology* 2007; **49(2)**:97-97.
- [7] Shi JY, Deng ZC, Yang Y, Gong GW, Heat transfer coefficient of wheel rims of large capacity steam turbines, *Journal of Power Engineering* 2007; **27(2)**:153-156.