

# 1 000 MW 核电汽轮机高压缸启动过程热应力及汽密性分析

魏红明, 蔡林, 侯修群, 谢诞梅

(武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

**摘 要:** 汽轮机高压缸是高温高压蒸汽的通流部件, 其内壁面直接和蒸汽接触。在机组后停及变负荷时, 蒸汽参数的剧烈变化容易造成高压缸热应力过大甚至变形等现象。以某型 1 000 MW 核电半速汽轮机高压缸为例, 对其启动过程高压缸的温度及应力分布进行有限元计算, 进而分析汽缸中分面的汽密性。计算结果表明: 在所设置的启动曲线下, 启动过程中, 高压缸轴封处温差及应力均较大, 且中分面接触压力较小; 高压缸最大热应力(217 MPa) 出现在机组刚进入额定负荷时刻。

**关 键 词:** 核电汽轮机; 汽缸变形; 热应力; 汽密性

中图分类号: TK263.1 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.10.006

## 引 言

高压缸是汽轮机的重要部件, 是高温高压蒸汽的通流结构。在汽轮机运行过程中, 内壁面直接与高温高压的蒸汽接触。当机组后停及变工况时, 蒸汽参数的剧烈变化会引起汽缸产生较大的热应力及热变形, 汽缸变形严重时会导致中分面发生局部分离现象。汽缸热应力及中分面汽密性对机组的安全运行和经济效益存在巨大的影响, 因此分析汽缸的热应力以及中分面汽密性具有十分重要的意义。

汽轮机汽缸强度研究一直是该领域的研究热点。文献 [1] 结合汽缸温度场和三维弹性接触理论, 建立汽缸三维接触有限元模型, 计算了高压缸温度场、应力及变形, 最后进行了汽密性分析, 通过汽密状态得到合适的螺栓预紧力; 文献 [2] 分析了机组启动、加负荷及甩负荷情况下的热应力和中分面螺栓应力, 并表明核电汽轮机易发生额定负荷稳态问题。

本研究建立了某型 1 000 MW 核电汽轮机高压缸应力及汽密性分析的三维有限元模型, 并对该汽轮机启动过程高压缸的温度场、应力场及汽密性进行了计算分析。计算结果可为汽缸设计及运行参数调整提供参考。

## 1 数值模型

### 1.1 温度及应力数值模型

在热-固耦合分析中, 通常先进行瞬态温度场分析, 并将计算结果作为热载荷进行应力计算。

对于非线性瞬态热分析矩阵方程:

$$\{C(T)\}\{\dot{T}\} + \{K(T)\}\{T\} = \{Q(T, t)\} \quad (1)$$

式中:  $C$ —比热矩阵;  $K$ —热传导矩阵;  $T$ —温度载荷矩阵;  $\dot{T}$ —节点温度矩阵;  $\{T\}$ —节点温度对时间的导数矩阵。

计算应力、应变场可以采用单元节点位移法。根据胡克定律写出应力-应变物理方程经过计算, 整体合成所有单元, 得到应力应变有限元格式:

$$\{R\} = [K]\{\delta\} \quad (2)$$

式中:  $\{R\} = \sum \{R\}^e$ —节点载荷列向量;  $[K] = \sum [K]^e$ —总体刚度矩阵;  $\{\delta\} = \sum \{\delta\}^e$ —节点位移列向量。

### 1.2 接触数值模型

在有限元分析中, 非线性实体表面接触, 可使用罚函数或增强的拉格朗日公式, 这两种方法都是基于罚函数的方程:

$$F_{\text{normal}} = k_{\text{normal}} x_{\text{penetration}} \quad (3)$$

收稿日期: 2015-12-08; 修订日期: 2016-04-07

作者简介: 魏红明(1989-), 男, 新疆伊犁人, 武汉大学硕士研究生。

通讯作者: 谢诞梅(1962-), 女, 武汉大学教授。

式中:  $F_{\text{normal}}$  — 有限的接触力;  $k_{\text{normal}}$  — 接触刚度;  $x_{\text{penetration}}$  — 穿透量, 接触刚度越高, 穿透量越小。

和罚函数相比, 增强拉格朗日法增加了接触力 (压力) 的计算:

$$F_{\text{normal}} = k_{\text{normal}} x_{\text{penetration}} + \lambda \quad (4)$$

式中:  $\lambda$  — 额外因子, 因为函数中增加了额外因子, 增强拉格朗日函数对接触刚度变得不敏感。

高压缸接触问题的有限元静力学分析方程为:

$$[K]\{\delta\} = \{F\} + \{F_{\text{normal}}\} \quad (5)$$

式中:  $[K]$  — 汽缸的刚度矩阵;  $\{\delta\}$  — 汽缸的位移向量;  $\{F\}$  — 汽缸的及节点外载荷;  $\{F_{\text{normal}}\}$  — 汽缸中分面的接触力向量。

## 2 有限元建模与计算

### 2.1 有限元模型

核电汽轮机高压缸结构复杂, 曲面及零件较多, 本文采用 PROE 建模软件对某 1 000 MW 核电机组高压缸进行建模。由于高压缸轴封和排汽处应力和应变较大, 接触情况复杂是计算分析的主要结构, 因此本文对轴封及排汽结构进行了精确建模, 并进行网格加密。核电汽轮机高压缸具有左右对称结构, 所以为减少计算量及计算时间, 本文对汽缸进行了对称假设, 本文选取的模型如图 1 所示, 并对模型进行了网格划分, 采用四面体网格, 共划分 462 954 个单元。

### 2.2 边界条件

本文高压缸约束条件如图 2 所示, 猫爪在水平方向可自由滑动, 中分面设置为摩擦接触, 同时在汽缸纵销附近的汽缸表面设置了轴向上的约束。

在有限元计算中, 螺栓预紧力的施加是以轴向力的形式施加在螺栓表面上的, 而在实际运行中, 螺栓分为冷紧螺栓和热紧螺栓。工程上提供的是冷紧螺栓的扭矩和热紧螺栓的伸长量, 在计算分析中需要转化为螺栓预紧力。

对于冷紧螺栓, 螺栓的轴向力是由施加在螺栓上的扭矩所产生的, 螺栓轴向力与螺栓力矩的转化式如下:

$$M_t = KdF_0 \quad (6)$$

式中:  $d$  — 螺栓公称直径, m;  $F_0$  — 螺栓轴向力, N;  $K$  — 扭矩系数, 一般取 0.2;  $M_t$  — 螺栓的预紧力矩, N/m。

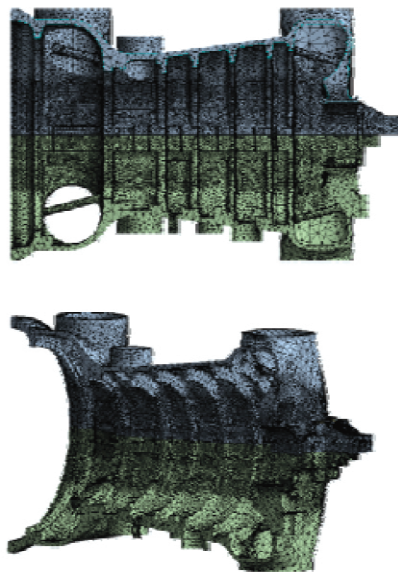


图 1 高压缸计算模型及网格划分

Fig. 1 High-pressure cylinder calculation model and the grid division

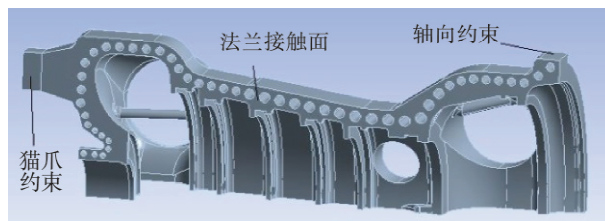


图 2 高压缸约束条件示意图

Fig. 2 High-pressure cylinder constraint conditions

对于热紧螺栓, 螺栓预紧力通过控制螺母的旋转角度和螺栓的伸长量来控制。根据式 (7) 可知, 在螺栓材料许用条件下, 螺栓产生的预紧力和螺栓的伸长量存在线性关系:

$$\delta_b = \frac{F_l l_e}{E_b A_b} \quad (7)$$

式中:  $\delta_b$  — 螺栓伸长量, mm;  $l_e$  — 螺栓有效长度, mm;  $E_b$  — 弹性模量, Pa;  $A_b$  — 螺栓有效受力面积,  $\text{m}^2$ 。

$$A_b = \frac{\pi}{4} \left( d - \frac{13}{14} \sqrt{3p} \right)^2 \quad (8)$$

式中:  $p$ —螺栓螺距,  $m$ 。

在启动及变负荷过程中, 高压缸内外壁温差和应力情况以冷态启动最为严峻。在这种工况下, 由于蒸汽与汽缸温差大, 所以湿蒸汽是以凝结换热的方式将热量传递给汽缸。为避免汽缸产生过大的热应力, 需限制加热速度。

本文参考文献 [2], 根据某核电汽轮机的现场启动数据整理拟合了该汽轮机的冷态启动至全负荷的高压缸蒸汽压力及温度模拟变化曲线, 如图 3 所示。图中:  $0 \sim 4\ 140\ s$  为冲转并网阶段,  $4\ 140 \sim 14\ 400\ s$  为升负荷阶段,  $14\ 400 \sim 16\ 200\ s$  为额定负荷阶段。

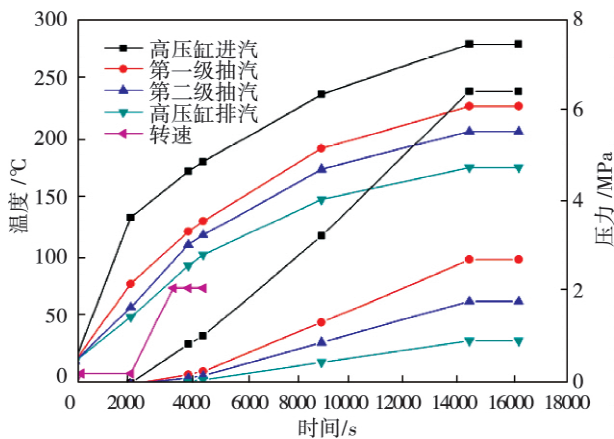


图 3 高压缸主要参数模拟变化曲线(冷态启动)

Fig. 3 Variation of simulated main parameters in high-pressure cylinder (cold start)

### 3 计算结果与分析

根据图 3 的启动曲线, 本文计算了冷态启动过程高压缸的温度场、应力场及中分面接触情况。

#### 3.1 温度及应力分布

图 4 给出了核电汽轮机启动过程中分别在冲转并网、升负荷以及额定负荷阶段的计算温度云图(限于篇幅, 这里只给出了下半缸及中分面的温度云图)。图 4(a) 为  $2\ 500\ s$ ; 图 4(b) 为  $9\ 000\ s$ ; 图 4(c) 为  $14\ 400\ s$ 。

因为核电汽轮机参数较低, 高压缸壁厚相对较薄, 汽缸不会产生较大的径向温差。但根据图 4 可以看出, 核电汽轮机在冷态启动过程中, 汽缸中分面

(局部加厚) 存在较大的径向温差, 特别是在排汽及端部轴封处温差较大。汽缸主要温度梯度产生于轴向, 在机组进入额定负荷后主要以轴向温差为主。

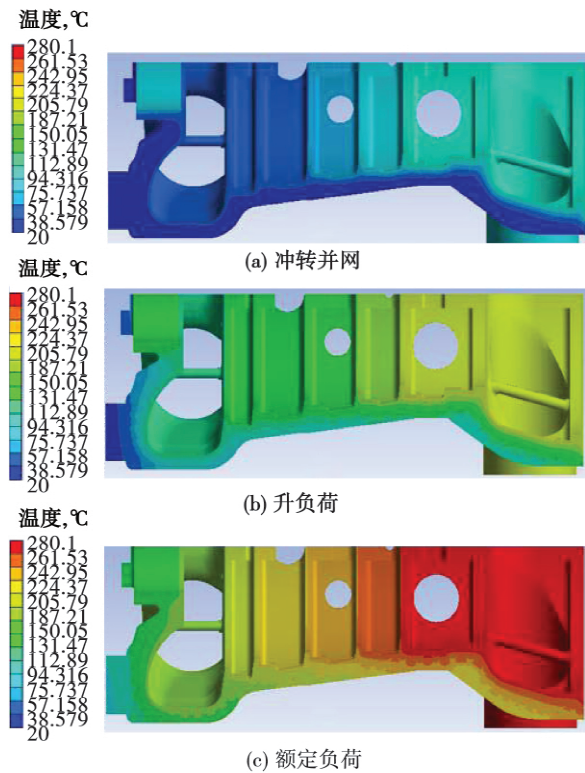


图 4 高压缸启动过程温度云图

Fig. 4 Temperature contours of HP casing in startup

启动过程中高压缸计算应力云图如图 5 所示。由图 5 可以看出, 在冷态启动过程中, 由于温差和局部加厚等原因, 在高压缸进汽及端部轴封处存在较大的热应力。在启动初期, 汽缸内表面热应力较大, 随着负荷的增加内表面应力逐渐减小。启动过程中汽缸端部轴封处和高压缸进汽处的外壁热应力较大, 这是由于汽缸材料导热系数较小, 从而造成外壁温度滞后, 温差较大。

文献 [3~4] 指出, 高压缸的端部轴封处会产生较大的温差及应力, 在启动过程中变形及接触情况复杂。这与本文计算分析结果一致。

#### 3.2 汽密性分析

为更加充分的分析高压缸中分面的汽密性, 本文建立了高压缸三维接触模型, 并对高压缸中分面接触情况进行了有限元计算, 启动过程接触面计算结果如图 6 所示。



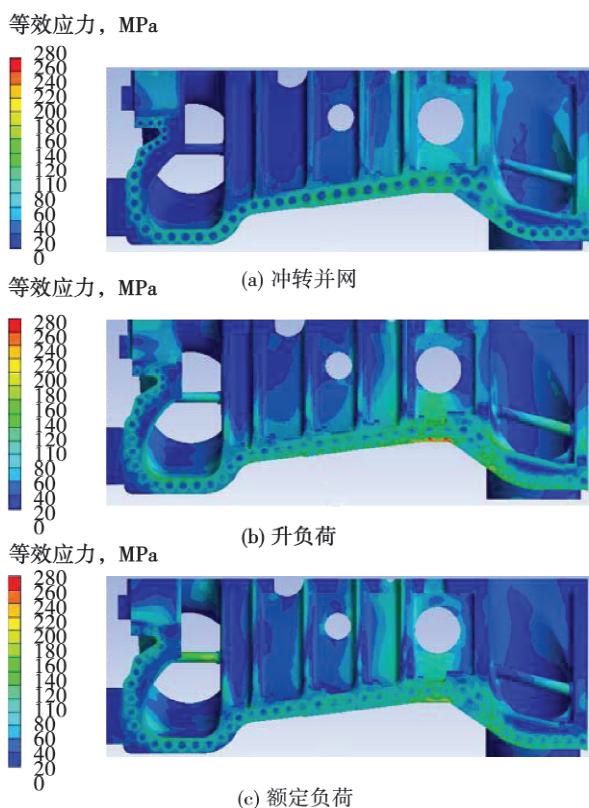


图 5 高压缸启动过程等效应力云图

Fig. 5 Equivalent stress nephogram of HP casing in startup

由图 6 可以看出,在机组冷态启动过程中,高压缸缸端部轴封接触压力始终较低。高压缸进汽处在升负荷过程中局部接触压力有所降低,但只出现在法兰结构的最外部,对高压缸进汽处中分面的汽密性影响不大。

高压缸的温度场、热应力和热变形分析是汽缸法兰中分面汽密性分析的基础,根据汽缸温差、应力及中分面汽密性的分析,可以得到在汽轮机冷态启动过程中,汽缸端部轴封处温差较大,而且会出现较高的热应力,同时中分面接触压力也相对较小,为充分了解汽缸端部轴封处的温差及应力情况,本文在汽缸轴封中分面及轴封外壁设置了 4 个关键点,点 1 为汽缸轴封处中分面内壁点;点 2 为汽缸轴封处中分面的中间点;点 3 为汽缸轴封处中分面外壁点;点 4 为汽缸轴封外壁最大应力点,如图 7 所示。

下面分别给出了关键点之间的温差曲线以及各关键点的应力应变曲线。启动过程高压缸关键点之间的温差如图 8 所示。

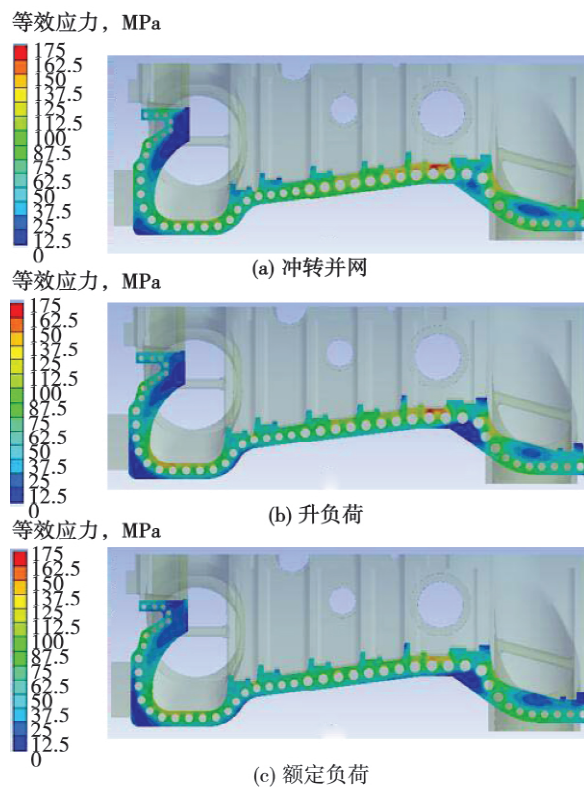


图 6 高压缸启动过程中分面接触压力云图

Fig. 6 Split contact stress nephogram of HP casing in startup

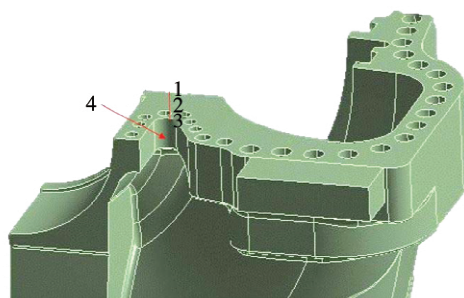


图 7 高压缸关键点示意图

Fig. 7 Key points of HP casing

由图 8 可以看出,在机组冷态启动过程中高压缸轴封处内外壁面存在三个温差峰值,高压缸内外壁关键点最大温差为 18 ℃。出现第一个峰值是由于 5% 负荷前初始阶段的升温速率最快,导致缸体的内壁温度提高较快,而外壁的温度依靠汽缸导热,温度上升缓慢;第二个峰值出现的原因是因为 5% ~ 50% 负荷的温升速率要比 50% ~ 100% 负荷的温升速率要大,同时点 2 处温度增大,轴封供汽从加热

金属变为吸热; 第三个峰值出现在进入稳态运行阶段的时刻, 在这个时刻后, 机组内壁面的温度基本不变, 而汽缸导热依然存在, 从而导致内外壁温差逐渐减小, 并趋于稳定。

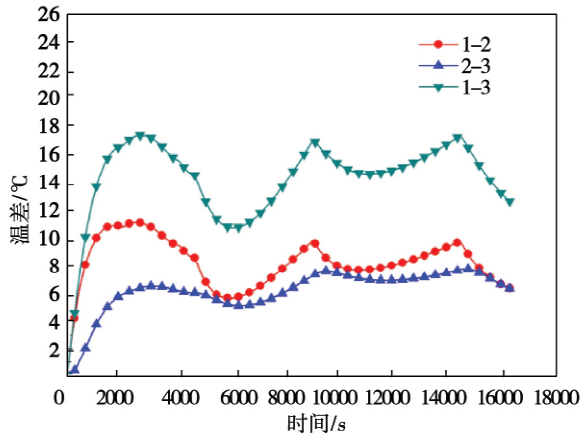


图8 高压缸冷态启动关键点温差

Fig. 8 Temperature difference of key points in HP casing cold start

图9 给出了启动过程高压缸各关键点的等效应力曲线。

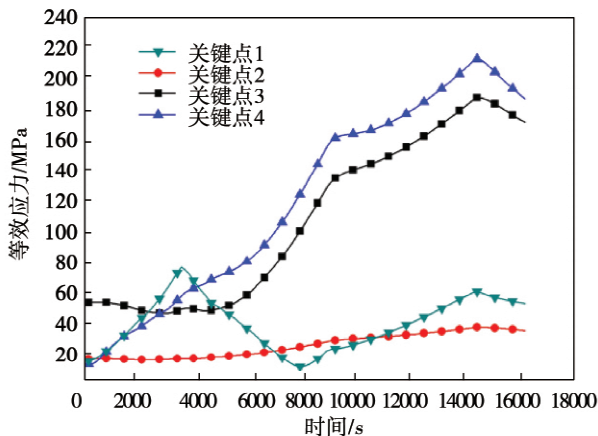


图9 高压缸冷态启动关键点等效应力

Fig. 9 Equivalent stress of key points in HP casing cold start

由图9可知, 在冷态启动过程中高压缸轴封处最大应力出现在汽缸轴封弯角处的外壁面, 出现时间是机组刚进入额定负荷时刻, 最大等效应力为217.4 MPa。关键点最大应力曲线存在3个转折点, 对于第1个转折点, 机组负荷是在5%左右。这个

时刻的温升率发生变化, 使得温差及应力也随着发生变化; 第2和第3个转折点分别出现在50%和100%负荷左右, 同样也是因为温升率带来的温差变化产生的。关键点1等效应力存在二个峰值, 这是因为点1为汽缸内壁点, 受蒸汽及内壁面温度变化的影响很大。值得指出的是, 关键点3在启动开始阶段应力明显大于其它各关键点, 是因为点3在汽缸轴封螺栓附近, 受螺栓预紧力的影响, 产生一个初始等效应力。

图10给出了汽缸关键点的应变曲线。由图10可以看出高压缸外壁关键点在额定负荷时变形较大, 和关键点等效应力的结果相一致。

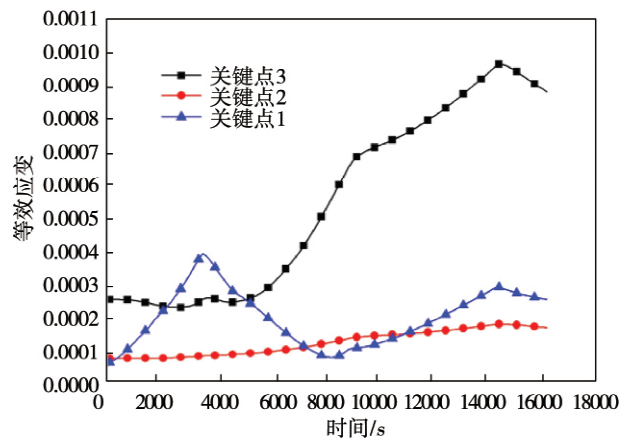


图10 高压缸冷态启动关键点等效应变

Fig. 10 Equivalent strain of key points in HP casing cold start

## 4 结 论

文献[2]根据某核电汽轮机的现场启动数据整理拟合了该汽轮机冷态启动至全负荷的高压缸蒸汽压力及温度的模拟变化曲线。利用ANSYS有限元软件分析计算了其高压缸冷态启动的应力及汽密性情况。通过分析计算, 得到以下结论(在本文所设置的条件下):

(1) 冷态启动过程中, 高压缸轴封处温差及应力较大, 高压缸轴封处中分面内部接触压力较小, 汽缸外壁等效应力明显大于内壁及中间点;

(2) 高压缸轴封处内外壁的温差及应力都存在峰值, 最大应力发生在机组进入额定负荷时刻, 最大

等效应力为 217.4 MPa;

(3) 启动过程中, 高压缸进汽处中分面局部接触压力也较小, 但只发生在局部地方不影响中分面的汽密性。

#### 参考文献:

- [1] 谢永慧, 李 铭, 张 荻. 汽轮机高压缸三维热弹性接触模型及其气密性分析 [J]. 机械强度, 2005, 27(1): 095 - 098.  
XIE Yong-hui, LI Ming, ZHANG Di. Numerical model for 3D thermal elastic contact analysis and its application in steamtight analysis of high pressure casing of turbine [J]. Journal of Mechanical Strength, 2005, 27(1): 095 - 098.
- [2] 朱丹书, 韩 瑜. 核电汽轮机高压缸热应力分析 [J]. 汽轮机技术, 1992, 08(04): 7 - 13.  
ZHU Dan-shu, HAN Yu. Analysis of thermal stress for nuclear steam turbine [J]. Turbine Technology, 1992, 08(04): 7 - 13.
- [3] 张进军. 张家口发电厂汽轮机组汽缸漏汽分析及处理 [J]. 华北电力技术, 2003, 5(02): 35 - 37.  
ZHANG Jin-jun. Analysis and solution of cylinder leakage of turbine generator sets in zhangjiakou power plant [J]. North China Electric Power, 2003, 5(02): 35 - 37.
- [4] 赵冬冬, 等. 650 MW 核电汽轮机高压缸漏汽分析与处理 // 2014 年核电汽轮机技术研讨会 [C]. 杭州: 中国核能行业协会, 2014: 17 - 20.  
ZHAO Dong-dong, et al. Leakage analysis and processing for a 650 MW nuclear steam turbine HP casing // Nuclear Power Steam Turbine Technology Seminar in 2014 [C]. Hangzhou: China Nuclear Energy Association, 2014: 17 - 20.
- [5] 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 [J]. 动力工程, 1995, 04(02): 16 - 19.  
LIU Jun-pu, ZHU Dan-shu, ZHANG Xing-zheng, et al. Numerical analysis of thermal stress for a 1 000 MW nuclear steam turbine HP casing [J]. Journal of Power Engineering, 1995, 04(02): 16 - 19.
- [6] 邓世瑞, 王世超, 张 强, 等. 超临界 600 MW 汽轮机内缸内张口原因分析 [J]. 华东电力, 2010, 03: 417 - 420.  
DENG Shi-rui, WANG Shi-chao, ZHANG Qiang, et al. Analysis of reasons for inner opening in inside cylinder of 600 MW supercritical steam turbine [J]. East China Electric Power, 2010, 03: 417 - 420.
- [7] WANG Wei-zhe. Analysis of multi-axial creep-fatigue damage on an outer cylinder of a 1000 mw supercritical steam turbine [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014(136): 217 - 223.
- [8] MCMECKING R. M., RICE J. R. Finite element for emulation for problems of large elastic plastic deformation [J]. Int. J. Solids Struct., 1975(11): 601 - 607.
- [9] 郭 杰, 谢诞梅, 张恒良, 等. 汽轮机转子热应力有限元计算隔离子模型精度研究 [J]. 汽轮机技术, 2015, 57(3): 172 - 174.  
GUO Jie, XIE Dan-mei, ZHANG Heng-liang, et al. Finite element analysis of isolation model on calculation of steam turbine rotor thermal stress [J]. Turbine Technology, 2015, 57(3): 172 - 174.
- [10] WANG Wei-zhe. Numerical analysis of fatigue life improvement by optimizing the startup phase for a 1000 mw supercritical steam turbine inner casing [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015(137): 265 - 274.
- [11] 侯修群, 魏红明, 黄祥君, 等. 1 000 MW 核电汽轮机高压缸 3D 建模与变形分析 // 2015 年核电汽轮机技术研讨会, 2015 年核电汽轮机技术研讨会 [C]. 杭州: 中国核能行业协会, 2015: 35 - 38.  
HOU Xiu-qun, WEI Hong-ming, HUANG Xiang-jun, et al. Flange contact analysis of nuclear steam turbine high pressure cylinder // Nuclear Power Steam Turbine Technology Seminar in 2015 [C]. Hangzhou: China Nuclear Energy Association, 2015: 35 - 38.
- [12] WANG Wei-zhe. Numerical analysis of fatigue life improvement by optimizing the startup phase for a 1 000 MW supercritical steam turbine inner casing [J]. 2015 by ASME. Gas Turbines and Power. 042601 - 1.
- [13] 史进渊, 杨 宇, 邓志成, 等. 超临界和超超临界汽轮机汽缸换热系数的研究 [J]. 动力工程, 2006, 02(01): 1 - 5.  
SHI Jin-yuan, YANG Yu, DENG Zhi-cheng, et al. Heat transfer coefficients of casings in supercritical and ultra-supercritical steam turbine [J]. Journal of Power Engineering, 2006, 02(01): 1 - 5.
- [14] 刘占生, 顾卫东, 朱自民, 等. 超临界汽轮机高压缸有限元热应力分析 [J]. 汽轮机技术, 2002, 44(1): 23 - 25, 60.  
LIU Zhan-sheng, GU Wei-dong, ZHU Zi-ming, et al. Thermal stress analysis of high pressure cylinder of supercritical 600mw turbine based on finite element method [J]. Turbine Technology, 2002, 44(1): 23 - 25, 60.
- [15] 张恒良, 谢诞梅, 熊扬恒, 等. 600 MW 汽轮机转子高精度热应力在线监测模型研制 [J], 中国电机工程学报, 2006, 26(1): 21 - 25.  
ZHANG Heng-liang, XIE Dan-mei, XIONG Yang-heng, et al. The research and development of high-quality thermal-stress online monitoring model for 600 MW turbine rotors [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(1): 21 - 25.
- [16] MOORE M. J., SIEVERDING C. H. Two-phase steam flow in turbines and separators [M]. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1976: 59 - 122.

(单丽华 编辑)

Gas Turbine II nozzle guide vane was used, and structured grids of high quality were generated using the method of block topology without cutting geometry. The near wall grid size was optimized according to the requirement of turbulence model. Based on the ground experimental data, boundary conditions were defined and the generated grids were tested in both steady-state and transient simulations. The results show that integration of grid generation can reduce the system error and improve the calculation accuracy. The first layer has a greater influence on the quality of grid, so it should be determined by considering the  $y^+$  value. The simulation results using this structured grid agree well with the experimental data, indicating the engineering application value of the grid generation technology presented in this paper. **Key words:** film-cooling, thermal shock load, structured grid, block topology, first layer thickness, temperature field

1 000 MW 核电汽轮机高压缸启动过程热应力及汽密性分析 = Numerical Analysis of Thermal Stress and Steam Tightness for the High-pressure Cylinder of a 1 000 MW Nuclear Steam Turbine in the Startup Phase [刊, 汉] WEI Hong-ming, CAI Lin, HOU Xiu-qun, XIE Dan-mei, GAO Jian-shu ( Power and Mechanical School, Wuhan University, Wuhan, Hubei, China, Post Code: 430072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31( 10) . -32 ~ 37

Steam turbine high-pressure casing is the steam passage component with high temperature and pressure, where its inner wall surface contacts with steam directly. When the unit commitment and load change, the drastic change of steam parameters is likely to cause deformation of cylinder body. The operating data of nuclear power plant show that the high-pressure cylinder of nuclear power steam turbine is prone to excessive stress, deformation and steam leakage phenomenon. In this paper, the finite element method was used to calculate the startup process of 1000MW nuclear power half-speed turbine high-pressure cylinder, and the temperature and stress situation of high pressure cylinder during the boot process were analyzed, followed by the study of the vapor tightness of cylinder split. The results show that during the boot process, the maximum thermal stress of high-pressure cylinder occurs in the moment the unit just reaches the rated load ( 217 MPa) . And the temperature difference and stress of the shaft seal of high-pressure cylinder is relatively large, while the contact pressure of split is fairly small. **Key words:** nuclear turbine, cylinder deformation, thermal stress, steam tightness

循环流化床锅炉散热损失的测试与估算分析 = Test and Estimation of Heat Loss for Circulating Fluidized Bed Boiler [刊, 汉] JIAO Tong-shuai, YAN Wei-ping ( North-China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31( 10) . -38 ~ 42

With the current national standard and industry standard, the separator and the boiler body are considered to be in the same specific heat load when estimating the heat loss of circulating fluidized bed boiler. In order to evaluate the rationality of this method, a 440t/h circulating fluidized bed coal-fired utility boiler was tested to quantify the heat loss and its uncertainty was analyzed. The boiler was divided into 134 zones and 1333 measurement points. And the heat loss of the boiler system was measured at 0.731% with the uncertainty of 0.08%, indicating great test accuracy. According to the national standard and industry standard, the estimated heat loss, however, was only 0.432%.