

# 汽轮机汽封供汽温度对轴端形变影响的计算分析

谭江波

上海电气集团股份有限公司 上海 201199

**摘要:** 超超临界汽轮机由于其大容量和高参数的技术特点,在发电经济效益和环保效益上优势明显。美中不足的是,部分超超临界机组曾发生紧急停机时出现转子碰摩的情况。本文首先调研收集并分析了部分机组发生碰摩时的运行状态及数据;其次,基于某型号超超临界汽轮机高压缸的实际三维尺寸,构建了端部汽封和转子的三维固体简化模型,进一步构造了热流固耦合计算模型;然后采用热流固耦合方法对不同汽封供汽温度下的稳态和瞬态工况进行计算研究,得到了汽封体转子系统在不同供汽温度下的稳态和瞬态径向位移特性,对汽轮机轴端汽封结构的设计及轴端碰摩故障的分析有所帮助。

**关键词:** 汽轮机;超超临界;汽封系统;抱轴

## 1 汽轮机轴封系统

轴封系统是汽轮机的重要辅助系统之一,其主要功能是将汽缸内蒸汽与外界空气隔离,防止端部泄漏,维持汽缸内系统真空度和机组安全运行。典型的汽轮机轴封系统主要分两类:开式轴封系统和闭式轴封系统。

闭式轴封系统主要由汽机端部密封结构、汽源、供汽调节阀门站、溢流调节阀门站、带有风机的汽封冷却器、供漏汽管路及必要的控制系统组成。该类系统通过汽封冷却器风机抽气使端部汽封最外档腔室维持一定的负压,让从内档汽封漏出的蒸汽及由环境漏入的空气都被吸入该腔室,汽气混合物通过抽气管道被吸入汽封冷却器冷凝,从而实现汽轮机汽缸内外环境的隔离,起到密封作用。

在启动阶段或者低负荷工况,汽封系统处于非自密封状态,需要外部汽源补充进汽封系统维持供汽母管压力,以实现汽轮机端部密封。本文研究的汽轮机轴端密封采用多段迷宫齿汽封,动静汽封齿装配间隙仅0.6mm,为防止动静部件不均匀热膨胀(收缩)导致动静碰摩,对轴封辅助供汽参数提出了较严格的限制,进入汽封系统的外部蒸汽必须为过热蒸汽,且蒸汽温度需与汽轮机高压缸转子名义温度相匹配。轴封供汽温度限制曲线见图1。

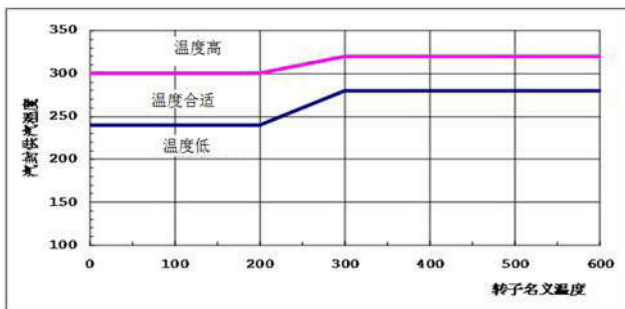


图1 某超超临界汽轮机轴封系统供汽温度要求

## 2 某型号汽轮机抱轴事故分析

本文整理了对某型号超超临界汽轮机抱轴事故的调研情况,分别是来自A、B、C、D、E电厂的实际案例。故障情况及简要分析见表1。

从表1中几个实际案例可以看出,某超超临界机组抱轴问题一般发生在机组热态跳机以后,事故的发生与进入轴封系统的辅助蒸汽参数有很大关系。当轴封供汽温度低于要求的值时,汽轮机容易发生动静碰摩甚至抱轴现象,碰摩一般发生在高压缸进汽端的轴端汽封处。

表1 某型号超超临界汽轮机轴端碰摩故障案例

电厂	故障描述	初步分析
A	主汽门打闸停机,轴封辅助蒸汽切换为来自辅助锅炉的蒸汽,温度陡降至200℃左右,高压缸两端轴封处有明显摩擦声音。	轴封辅助供汽温度低。
B	汽机跳机,停机过程中,轴封进汽温度由270℃下降至199℃,汽机转速由盘车转速60r/min下降到20r/min,然后突然抱死。	轴封进汽温度低。
C	汽机停机,轴封供汽温度从325℃陡降至190℃,并在190-240℃之间波动。汽机转速1000转/分左右时高压缸轴承发生大幅振动。	轴封供汽温度过低(从325℃陡降到190℃)。
D	机组跳机后,辅助蒸汽供汽温度由270℃突降至160℃,随后回升至269℃并持续。	轴封供汽温度发生在汽封供汽温度波动的过程中,机组振动生大幅波动。
E	机组故障停机,辅助蒸汽投入,轴封蒸汽温度由280℃突降至175℃,之后发生波动,盘车转速降为0,转子抱死。	轴封供汽温度突降至180℃以下。

## 3 计算模型的建立及边界条件

为研究辅助供汽温度对汽轮机轴端形变影响的机理,本文采用热流固耦合模型进行计算分析。热流固耦合问题是场与场之间的相互作用。通常热流固耦合是将流场分析的结果(如温度、力和对流载荷等)通过耦合

面传递给固体结构进行分析。本研究中由于固体的变形较小,对流动的影响较小,所以采用单向流固耦合分析方法,可以提高计算效率。

### 3.1 建立计算模型

以某型号超超临界汽轮机高压缸端部汽封体及转子的实际图纸,提取了对流动传热及变形较为关键的尺寸数据建立计算模型。为了建模和计算的方便,做了如下简化:(1)保留汽封齿处的细节结构;(2)保留轴封模型的整体尺度大小及蒸汽接触部分的尺寸;(3)简化对流动影响较小的圆角和倒角;(4)简化螺纹孔以及一些安装或装配时采用的突起结构。

将汽封体和转子按照工作时的相对位置进行组合,得到汽封体和转子系统的固体模型。在固体域的基础上,通过几何体的运算构建出了计算的流动区域。

采用ANSYS ICEM对流体域进行网格划分,由于流体域结构较为复杂,因此将其分为三层,并对每一层结构分割出最小周期域进行网格划分,然后在CFX中进行阵列组合。各层的流体域网格见图2。采用ANSA对固体域进行网格划分,在汽封齿及与流体接触的壁面附近区域采用六面体网格,在结构复杂及对流动影响较小的区域采用四面体。

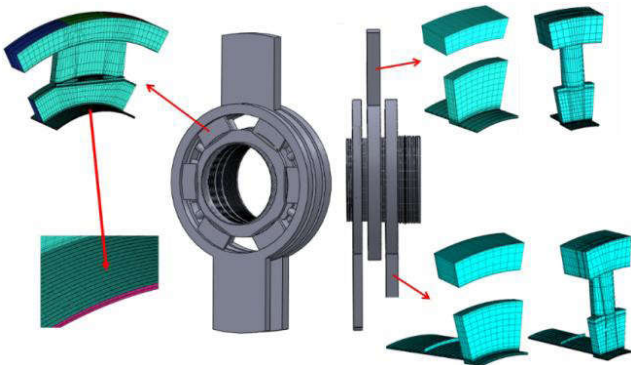


图2 流体域最小周期域网格

### 3.2 边界条件

流体之间的接触面、流体与固体的接触面设置为interface,然后进行边界条件设置:(1)非接触的流体壁面为绝热边界;(2)非接触的汽封体壁面也为绝热边界;(3)非接触的转子壁面为流动换热第三类边界条件,即与25℃的空气进行自然对流换热;(4)给定汽封供汽口、抽气出口及真空出口压力;(5)供汽温度是本文研究的主要变量,选择180℃、200℃、240℃、280℃、300℃和400℃作为蒸汽的进口温度。

### 4 不同供汽温度工况的计算分析

不同温度的辅助蒸汽进入轴端汽封装置,会导致汽封体及转子发生不同程度的径向位移,两者之间的径向

间隙也会随之发生变化,若最小径向间隙小于零,则会发生碰摩甚至抱轴。本文分别计算了汽封供汽温度为180℃、200℃、240℃、280℃、300℃及400℃工况下,汽封转子系统的稳态和瞬态温度场、汽封齿端部与转子外边界的径向位移,验证不同工况下端部汽封是否发生动静碰摩。

#### 4.1 稳态工况计算

根据稳态计算结果,不同供汽温度下汽封齿和转子外侧的径向最小间隙如表2所示(膨胀为正,收缩为负)。

表2 不同温度工况下稳态径向位移及最小径向间隙

供汽温度 (℃)	汽封齿径向位移 (mm)	转子外侧径向位移 (mm)	最小径向间隙 (mm)
180	0.329	0.301	0.628
200	0.476	0.346	0.730
240	0.583	0.434	0.749
280	0.709	0.526	0.783
300	0.764	0.572	0.792
400	1.059	0.803	0.856

从计算结果可以看出,对轴封系统供入不同温度的辅助蒸汽,在稳态工况下,汽封齿和转子的径向位移在周向和轴向上的变化趋势一致,汽封齿的膨胀量大于转子的膨胀量,因此各供汽温度稳态工况下没有发生碰摩现象。

#### 4.2 瞬态工况计算

本文分别计算了180℃、200℃、240℃、280℃、300℃及400℃各汽封供汽温度情况下,汽封体和转子的瞬态温度场及汽封齿与转子外边界的径向位移,计算的时间为供汽后0-120s。

分析计算得到的径向位移云图得出,汽封体的最小径向位移在汽封齿处,即汽封齿为最大收缩位置,转子的最大径向位移在转子外部区域中间,即该处为最大膨胀位置。分别取供汽后5s、15s、30s、60s和120s的数据进行分析。本文仅展示180℃和400℃供汽温度下各时间点瞬态位移情况,如图3所示。

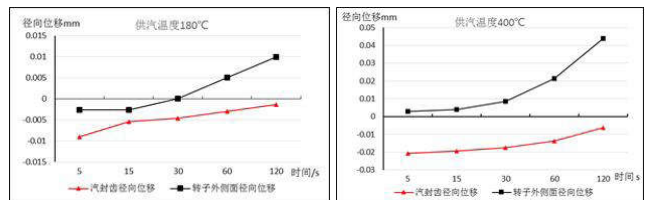


图3 供汽温度180℃、200℃时汽封齿和转子的瞬态径向位移

从计算结果来看,在不同供汽温度时的瞬态工况下,转子表面在供汽后的前5秒出现收缩,之后随着时间推移逐渐向外膨胀。转子表面膨胀速率普遍大于汽封齿

收缩量减小的速率，转子外表面与汽封齿之间的间隙有逐渐缩小的趋势。汽封齿和转子外表面的最大径向位移均不大于10-2mm数量级，考虑汽封齿与转子之间的装配间隙为0.6mm，则各计算工况中出现的的最小径向间隙均大于0，因此，在上述供汽温度的瞬态工况下没有发生动静碰摩现象。

4.3 180℃蒸汽冲击至300℃轴封系统的计算结果分析

为验证机组热态工况下，供入较冷辅助蒸汽对轴封系统的影响，本文还计算了180℃的蒸汽冲击至300℃汽封工况下，汽封转子系统的瞬态温度场以及汽封齿与转子外边界的径向位移。计算结果如图4所示。

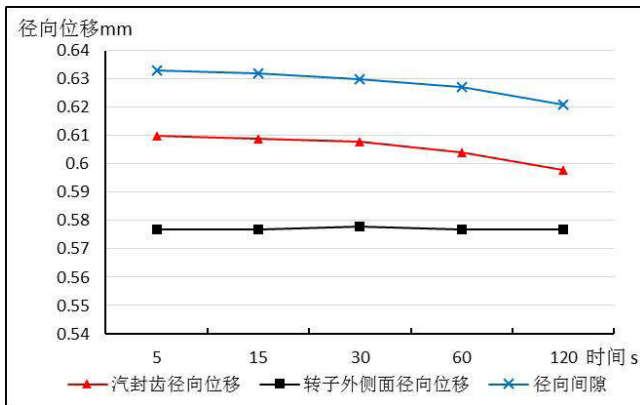


图4 180℃蒸汽冲击300℃汽封系统时汽封齿和转子的瞬态径向位移

从计算结果可以看出，在180℃蒸汽进入300℃汽封系统后的120s内，转子外表面径向位移几乎没有变化，汽封齿径向位移逐渐缩小，两者之间的间隙逐渐缩小，但未发生碰摩。该计算结果与调研的实际情况有出入。从调研的情况来看，在发生辅汽温度低的情况后，5个事故样本中只有2个出现完全抱死的情况，其他机组仅出现转子振动增大或者转速降低的情况，这也说明冷蒸汽对汽封体和转子的冲击可能不是导致汽轮机抱轴的唯一原

因，还存在其他的因素叠加导致抱轴事故发生。

5 结论

本文通过建立某型号超超临界汽轮机高压缸进汽端汽封和转子系统的热流固耦合模型，计算获得了在不同供汽温度下其稳态和瞬态温度场及径向位移情况，还获得了该系统在冷热冲击工况下的瞬态位移情况。经分析，不同供汽温度的瞬态工况下有如下规律：轴封体的最小径向位移在汽封齿处，即汽封齿有着最大的收缩量，转子的最大径向位移在转子外部区域中间，即该处为最大膨胀位置；汽封齿与转子外侧区域形变为10-2mm数量级；180℃蒸汽冲击300℃热态汽封系统，前120s转子外侧径向位移基本不变，汽封齿收缩量逐渐增加，间隙有缩小趋势，但相对径向位移维持在10-2mm数量级，未发生抱轴现象。计算结果与调研的实际案例有一定出入，可能是由于本文构建的模型范围偏小，实际运行发生了模型以外的形变，各处形变叠加导致轴端动静碰摩。

参考文献

[1]唐飞,董斌,赵敏.超超临界机组在我国的发展及应用[J].电力建设,2010,31(1):80-82

[2]柯文石,张峰.华能玉环电厂4×1000MW机组3年运行的实践探索[J].电力建设,2010,31(4):64-68

[3]冯伟忠.外高桥三期1000MW超超临界机组的节能技术[J].中国电力,2009,42(增刊2):1-7

[4]郭千文.汽轮机轴封供汽参数研究及抱轴问题分析[硕士学位论文].上海交通大学,2013

[5]刘孝峰.超超临界汽轮机轴封系统设计与运行要求[J].热力透平,2008,37(4):52-54

[6]刘继男.超临界汽轮机转子热一流耦合问题的数值分析[硕士学位论文].华中科技大学,2011

[7]朱红钧.ANSYS 14.5热流固耦合实战指南[M].北京:人民邮电出版社,2014