

1000MW 超超临界机组汽轮机高压缸、超高压缸预暖缸温骤降原因分析

王永正

江西大唐国际抚州发电有限责任公司 江西 抚州 344128

摘要: 某1000M超超临界一次再热机组、二次再热机组,汽轮机均为东方电气集团生产制造。汽轮机冷态启动时,高压缸、超高压缸均要进行预暖,一次再热机组要求将缸温暖至150℃,二次再热机组要求将缸温暖至180℃。按现有逻辑,在暖缸结束时,缸温出现骤降,通过对超高压缸、高压缸结构的研究,分析缸温骤降的原因,通过逻辑优化,保证汽轮机的安全运行,为同类型汽缸预暖中出现类似问题提供解决思路借鉴。

关键词: 超高压缸; 高压缸; 预暖; 缸温; 夹层; 骤降; 交变应力

引言: 随电力工业的蓬勃发展,汽轮机容量越来越大、进汽参数越来越高、汽轮机效率越来越高、装配间隙越来越小,缸温控制稍有不慎,极有可能导致汽缸变形,导致汽轮机装配间隙消失而发生动静碰磨等严重事故;尤其四代汽轮机的桶型缸结构,一般需要返厂检修,检修工期延长,在当前新型电力市场的大环境下,机组启停频繁、暖高操作次数增加,一旦汽轮机本体出现异常,将对发电企业带来巨大的经济损失,引起保证汽轮机的安全运行显得尤为重要。本论文从结构、逻辑、操作上分析汽轮机暖缸过程中出现缸温骤降的原因,通过操作方法、逻辑优化等方面给出了解决缸温骤降的方法,非常值得借鉴。

1 某1000MW超超临界一次再热、二次再热汽轮发

电机组概况介绍

一次再热机组汽轮机为东方汽轮机厂(N1000-26.25/600/600型)引进日立技术生产制造的超超临界、一次中间再热、单轴四缸四排汽、冲动凝汽式汽轮机,高压缸为双层缸结构^[1];二次再热机组汽轮机同为东方汽轮机厂制造(N1000-32/600/620/620型),超超临界、二次中间再热、单轴、五缸四排汽、十一级回热、凝汽式汽轮机,超高压缸、高压缸均为双层缸,筒形缸结构^[2]。

2 超高压缸、高压缸夹层疏水布置情况

超高压缸、高压缸夹层疏水由汽缸进汽端引出,通过一根OD20管道引至高压缸排汽管垂直管段,如图1红色标识。

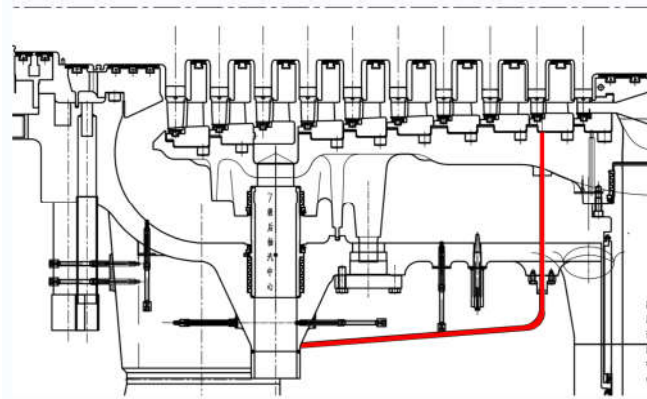


图1 高压缸夹层疏水管道布置图

Figure 1 High-pressure Cylinder Interlayer Drainage Pipe Layout

3 超高压缸、高压缸汽缸预暖系统介绍

超高压缸、高压缸属于高温高压、厚壁设备,机组启动中存在较大应力。超高压缸、高压缸预暖系统用于将缸温加热至指定温度。对于东汽前几代机型,一般要求将高压模块均匀加热至150℃以上^[3];对于二次再热机

组,要求将超高压、高压模块加热至180℃以上^[4],以减少高压及超高压模块的热冲击、降低厚壁部件的热应力。预暖蒸汽一般取至辅助蒸汽,当再热蒸汽达到一定压力后,通过汽缸预暖系统对汽缸进行加热到指定温度后,在重新将缸内抽成负压,预暖时应缓慢进行,注意控制

缸内压力，避免产生附加推力，注意轴向位移、瓦温的变化，汽缸预暖蒸汽流向如图2所示。

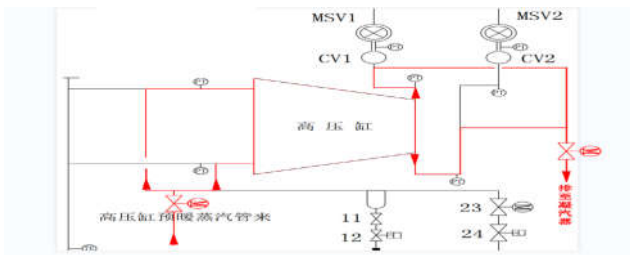


图2 高压缸预暖系统图

Figure 2 High-Pressure Cylinder Preheating System Diagram

4 超高压缸、高压缸预暖缸温骤降异常现象及原因分析

高压缸结构及测点布置如图3。

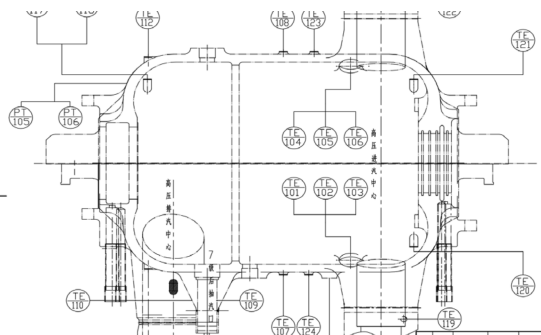


图3 高压缸结构及测点布置

Figure 3 High-Pressure Cylinder Structure and Measurement Point Layout

TE101、TE102：高压内缸下缸内壁温度 TE103：高压内缸下缸外壁温度 TE104、TE105：高压内缸上缸内壁温度 TE106：高压内缸上缸外壁温度 TE123：高压缸上

缸内外缸夹层温度 TE124：高压缸下缸内外缸夹层温度 TE108：高压缸上缸外缸内壁温度 TE107：高压缸下缸外缸内壁温度

4.1 超高压缸、高压缸预暖缸温骤降异常现象

汽缸预暖前，汽缸排汽通风阀、缸体疏水均在开启状态，缸内为负压状态。在汽缸预暖时，将汽缸排汽通风阀均关闭、缸体相连疏水关闭，预暖蒸汽逆向进入汽缸；汽缸预暖结束后，开启疏水及汽缸排汽通风阀，汽缸被抽成真空，在退出汽缸预暖时，缸内压力降低，汽缸内壁温度出现骤降情况，上缸由153.7℃降至135.6℃，降幅18.1℃；下缸由149.6℃降至135.4℃，降幅14.2℃。

4.2 超高压缸、高压缸预暖缸温骤降原因分析

4.2.1 汽缸内缸外壁温度变化情况

分析内缸温发现，汽缸上缸内缸外壁温度由159℃降至128.8℃，降幅30.2℃；汽缸下缸内缸外壁温度由162.9℃降至157.3℃，降幅5.6℃，温度变化较为平稳。

4.2.2 汽缸夹层温度变化情况

4.2.3 分析夹层温度发现，汽缸上缸夹层温度由187.7℃降至172℃，降幅15.7℃；汽缸下缸夹层温度由158.12℃降至72.89℃，降幅85.23℃。

4.2.4 汽缸外缸内壁温度变化情况

分析外缸内壁温发现，汽缸上缸外缸内壁温度由161.1℃降至160.4℃，降幅0.7℃；汽缸下缸外缸内壁温度由152.4℃降至127℃，降幅25.4℃。

4.2.5 超高压缸、高压缸预暖缸温骤降原因分析

通过对汽缸结构及汽缸温度变化情况研究发现，内缸内壁温度骤降的时候，内缸上缸外壁温度、汽缸下缸夹层温度、外缸下缸内壁温度变化最为明显，降幅分别达到30.2℃、85.23℃、25.4℃，如表1。

表1 汽缸缸温变化统计表

Table 1 Statistical Table of Cylinder Temperature Changes

汽缸各部位温度变化统计				
汽缸不同部位温度测点	单位	异常前温度	异常温度	温度变化值
内缸内壁温度（上半）	℃	153.7	135.6	-18.1
内缸内壁温度（下半）	℃	149.6	135.4	-14.2
内缸外壁温度（上半）	℃	159	128.8	-30.2
内缸外壁温度（下半）	℃	162.9	157.3	-5.6
夹层温度（上半）	℃	187.7	172	-15.7
夹层温度（下半）	℃	158.12	72.89	-85.23
外缸内壁温度（上半）	℃	161.1	160.4	-0.7
外缸内壁温度（下半）	℃	152.4	127	-25.4

分析原因如下：在汽缸预暖过程中，汽缸内部压力0.51MPa，汽缸内缸最高点温度153.7℃，与汽缸内部压力对应的饱和温度为152.59℃，缸内蒸汽过热度仅1.11℃；下缸内壁温度仅149.6℃，低于饱和温度2.99℃，缸内低温部位蒸汽势必凝结成水并在缸内低点聚集；通过汽缸结构及疏水研究发现，预暖时与缸体相连疏水关闭状态、汽缸进汽管疏水接口位置标高远高于汽缸本体最低点，缸内凝结积水无法排出，导致缸内积水。

预暖结束后，缸内压力下降，缸内积水吸热汽化产生低温饱和蒸汽，使夹层内蒸汽温度大幅下降，当汽缸内蒸汽全部通过疏水抽至凝汽器后，汽缸金属蓄热向外辐射，使缸体温度快速上升，这就造成了缸温骤降后快速回升的现象，其物理公式如公式1：

$$\text{公式1: } Q = m \times L$$

其中：

Q表示汽化过程中吸收的热量（单位：焦耳，J）

M表示汽化的水的质量（单位：千克，kg）

L表示水的汽化热（单位：焦耳/千克，J/kg）。

4.3 防止超高压缸、高压缸预暖缸温骤降方法

根据超高压缸、高压缸预暖缸温骤降原因分析，解决汽缸预暖过程中缸温骤降问题，要从两个方面解决：

4.3.1 汽缸预暖过程中及预暖结束减压前将汽缸内部聚集的凝结水疏放尽。

（1）高压缸降压前通过截流与缸体疏水气动门前隔离阀，在开启疏水气动门。

（2）截流汽缸VV阀前隔离阀，再开启超高压缸、高压缸VV阀，将缸内积水放尽。

4.3.2 暖缸结束控制降压速度

（1）暖缸结束开启缸体疏水排汽时，通过截流并逐个开启，防止气动执行机构瞬间全开，缸内及夹层内压力骤降，涉及阀门有：汽缸进汽管疏水、与缸体相连疏水、VV阀前疏水、VV阀等。

（2）一般情况下，汽缸预暖阀与VV阀做有联锁逻辑，例如：预暖阀开，VV阀关；预暖阀开VV阀关等，该逻辑极易导致缸内、夹层压力骤降。可以通过优化控制予以解决，主要逻辑如下：

- ① 投入汽缸预暖功能；
- ② 汽缸进汽管疏水阀关至20%；
- ③ 关闭缸体相连疏水气动门前电动门至20%，关闭

缸体相连疏水气动门；

④ 关闭VV阀前疏水气动门前电动门至20%，关闭VV阀前疏水气动门；

⑤ 关闭VV阀前电动门至5%~10%，关闭VV阀；

⑥ 开启预暖电动门10%，通过控制该电动门开度控制缸内压力升高速度 $\geq 0.1\text{MPa/min}$ ，汽缸内缸温度升高速度 $\geq 1^\circ\text{C/min}$ ，内缸上下缸温差 $\geq 30^\circ\text{C}$ ，外缸上下缸温差 $\geq 45^\circ\text{C}$ ，缸内压力 $\geq 0.6\text{MPa}$ ；

⑦ 间隔10min~20min将汽缸进汽管疏水阀开度增加10%，装置该电动门开度 $> 80\%$ ；

⑧ 将超高压缸、高压缸预暖至制造厂规定值（一般为 150°C 或 180°C ）

⑨ 超高压缸、高压缸预暖结束后；

⑩ 开启与缸体相连抽汽逆止门前疏水气动门；

⑪ 开启VV阀前疏水气动门；

⑫ 开启VV阀；

⑬ 全开高压缸进汽管疏水电动门；

⑭ 控制缸内压降 $\geq 0.05\text{MPa/min}$ ，温降 $\geq 1^\circ\text{C/min}$ ，逐个开启与超高压缸、高压缸相连抽汽逆止门前疏水气动门前电动门，开启VV阀前疏水气动门前电动门；

⑮ 超高压缸、高压缸内压力 $< 0.05\text{MPa}$ ，全开VV阀前电动门，将缸内抽至真空状态

5 结束语

通过对老一代1000MW汽轮机及最新一代1000MW二次再热器汽轮机的汽缸结构、缸内测点布置、预暖系统、疏水系统、相关联锁逻辑的研究分析，找到预暖过程中缸温骤降的原因，制定相应的控制策略，优化控制逻辑，彻底解决异常，为汽轮机安全运行、防止汽缸变形及裂纹的产生提供了理论支持及应用案例，为同类型电厂汽缸预暖过程中出现类似问题提供解决思路借鉴。

参考文献

- [1]江西大唐国际抚州发电公司集控主机规程Q/CDT-FZPC1010001-2024[Z]:3-5.
- [2]江西大唐国际新余第二发电有限责任公司集控运行规程Q/CDT-XYIIPC1001-2025[Z]:11-13.
- [3]D1000F-000106ASM汽轮机启动运行说明书[Z]:11-12.
- [4]D1000T-000106BSM_D汽轮机启动运行说明书[Z]:85-88.