

DOI: 10.7652/xjtuxb201305005

超超临界汽轮机高压缸旁路冷却系统冷却特性研究

霍文浩, 晏鑫, 李军, 丰镇平

(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 采用耦合流动计算和共轭传热的数值方法研究了 1 000 MW 超超临界汽轮机高压缸旁路冷却系统的冷却特性,给出了系统作用下高压缸内外缸和轴端平衡活塞等固体部件的温度场分布特性,对比了有/无内部旁路冷却系统在不同条件下高压缸的温度场。研究表明:超超临界汽轮机高压缸旁路冷却系统能有效冷却高压缸内缸和轴端平衡活塞,使整体温度水平明显下降,高压缸外缸温度略有上升,高压缸内缸在旁路冷却系统的作用下温度分布均匀;对于阶梯式平衡活塞的冷却作用,主要取决于 3 段汽封长度、汽封齿间隙及平衡活塞前径向间隙。

关键词: 超超临界汽轮机;旁路冷却系统;冷却特性;数值模拟

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)05-0024-07

Numerical Investigation on the Cooling Characteristics of the Bypass Cooling System in High Pressure Cylinder of Ultra-Supercritical Steam Turbines

HUO Wenhao, YAN Xin, LI Jun, FENG Zhenping

(Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The cooling performance of the bypass cooling system in the high pressure cylinder of a 1 000 MW ultra-supercritical steam turbine was numerically investigated using conjugation of the flow calculation and heat transfer method. The temperature distributions of the inner case and outer case of the high pressure cylinder, and the thrust equilibrium piston were obtained. The comparison between the temperature distributions of the high pressure cylinder with and without the bypass cooling system was performed under different conditions. The results show that the high pressure inner case and the thrust equilibrium piston can be effectively cooled by the bypass cooling system. The temperature of these solid domain decreases obviously while the outer case temperature increases slightly. In addition, the temperature distribution of the inner case is relatively uniform with the bypass cooling system.

Keywords: ultra-supercritical steam turbine; bypass cooling system; cooling characteristics; numerical simulation

电力需求的快速增长使得大功率机组进汽参数和容量不断提高,而进汽参数提高使得汽缸、转子以及平衡活塞等固体部件的温度上升,而造成部件热疲劳和高温蠕变。现代超临界和超超临界汽轮机高中压缸均采用蒸汽冷却技术,以保证机组长期安

全、可靠运行^[1-2]。

为了对超超临界汽轮机蒸汽冷却结构进行合理分析和正确设计,国外采用理论分析和数值方法开展了相应的研究,以过载补汽技术为背景详细分析了系统冷却机理及结构设计要点,并论述了蒸汽冷

收稿日期: 2012-07-21。 作者简介: 霍文浩(1988—),男,博士生;李军(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目。

网络出版时间: 2013-03-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130307.0830.011.html>

却效果及其对材料性能提升的作用^[3],此外还通过某实际运行机组上的一系列实验,进一步验证了内部冷却系统的有效性^[4]。

吕智强等采用近似处理方法对中压转子的冷却特性进行了数值研究^[5],但是研究中冷却蒸汽导致动叶温度分布不均匀。祁明旭等采用 CFD 和共轭传热方法研究了汽轮机中压缸前两级的蒸汽冷却特性,分析了不同工况下高压缸漏汽对中压缸前两级转子轮缘、叶根的冷却效应及近根部流动特性的影响^[6]。霍文浩等采用耦合流场计算和共轭传热数值方法研究了超临界和超超临界汽轮机中压缸蒸汽冷却特性,分析了冷却蒸汽与主流掺混对主流场的影响^[7-8]。关于超超临界百万等级汽轮机高压缸的内外缸间隙处的旁路冷却系统冷却特性的研究,目前尚未见报道。

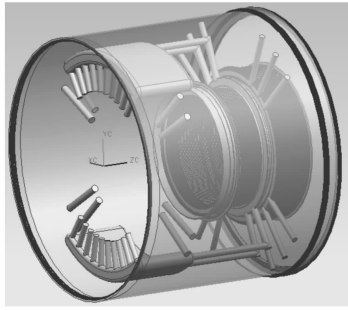
本文采用耦合流场计算和共轭传热的计算方法研究了某型 1 000 MW 超超临界机组高压缸旁路冷却系统对于高压缸及平衡活塞等固体部件的冷却作用,给出了内外缸固体域及内部截面的温度分布,以期为大功率机组高压缸采用旁路冷却系统优化设计提供理论基础和技术支撑。

1 计算模型和数值方法

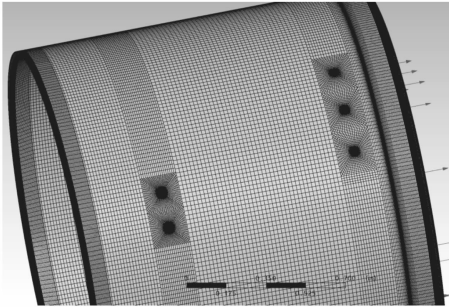
图 1 为某型 1 000 MW 超超临界汽轮机高压缸旁路冷却系统。补气调节阀位于高压缸第 5 级后。内部旁路冷却系统由高压缸第 4 级后、主蒸汽进口前的纵向孔和内缸内部轴向孔,内外缸之间的环形间隙以及内缸与转子间的汽封组成。通过从高压缸第 4 级后抽取少量温度较低的蒸汽,来代替高温节流蒸汽,以降低并稳定内外缸的温度,同时冷却阶梯式平衡活塞。高压缸中主蒸汽经过第 1 级斜置静叶后一小部分由斜置静叶后间隙进入转子与内缸之间的汽封间隙,并在压力梯度的作用下沿轴向向右流动;在高压缸第 4 级后,温度较进口明显下降的主蒸汽通过径向冷却孔流入内外缸之间的环形间隙,之

后沿轴向向右流动,通过最右侧的径向冷却孔进入阶梯型平衡活塞上侧的汽封间隙,并在此分为两部分,一部分蒸汽继续向右流动至汽封出口,同时对内缸及平衡活塞进行冷却,另一部分冷却蒸汽在压差的作用下沿间隙向左流动并与斜置静叶后泄漏流汇合。混合蒸汽进入上部管道后沿轴向向左流动,最终在第 5 级后汇入主流。

根据内部冷却系统实际结构尺寸进行了建模,对内缸内壁面和外缸外表面进行了局部简化,以方便网格划分。图 2a 为超超临界汽轮机高压缸旁路冷却系统流体域三维结构图,图 2b 为旁路冷却系统内外缸间隙计算网格,其中加密部分与径向管道相连,加密时考虑了管道内的小网格尺寸,为的是减小连接面的差分误差。



(a) 流体域



(b) 内外缸间隙处网格

图 2 超超临界汽轮机高压缸旁路冷却系统流体域及内外缸间隙处网格

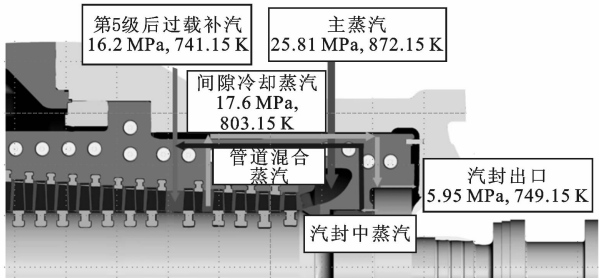
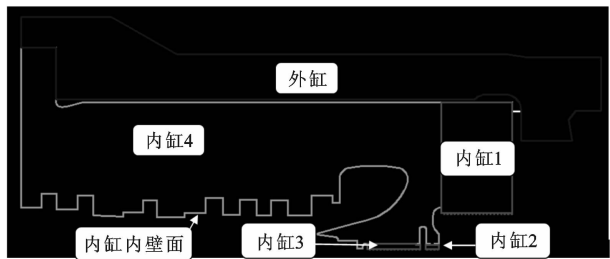


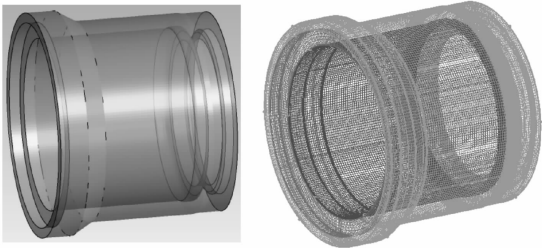
图 1 超超临界汽轮机高压缸旁路冷却系统

图 3 为旁路冷却系统固体域及其计算结构和网格。流体域中除管道 3 以及与其相连的腔室和汽封中间段以外,其余结构均采用结构化网格;固体域中内缸 4 采用非结构化网格,内缸 1~内缸 3 及外缸均采用结构化网格。汽封和内外缸间隙等流体域尺寸比较小,其中的流动比较复杂,因此这些区域的网格较密,为的是捕捉近壁面流动细节来保证计算精度;管道中网格及流固耦合面两侧网格需要进行加密处理。内外缸固体域中网格划分较为稀疏,这样

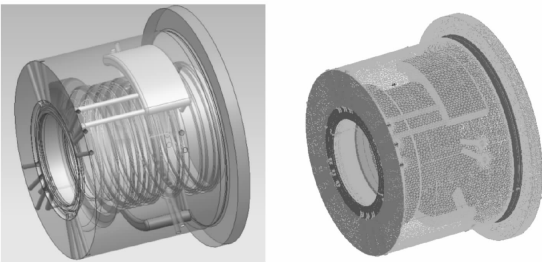
在保证计算精度的同时可以控制网格总数。网格总数为 23 575 910。



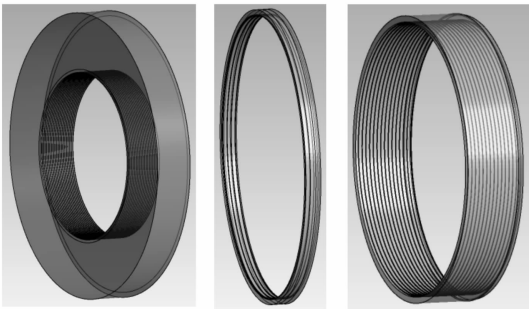
(a) 固体域分块



(b) 外缸结构和计算网格



(c) 内缸 4 造型和计算网格



(d) 内缸 1、2、3 结构

图 3 旁路冷却系统高压缸内外缸结构

图 4 为计算中蒸汽进出口位置,调节级斜置静叶后间隙进口为进口 1,第 4 级后管道 2 内侧端面为进口 2,汽封右侧出口为出口 1,第 5 级后管道 1 内侧端面为出口 2,进出口边界条件如表 1 所示。流体域和固体域及流固耦合面均采用热连接面,固

体域外侧非连接表面为绝热面,内缸内表面给定了温度边界条件。

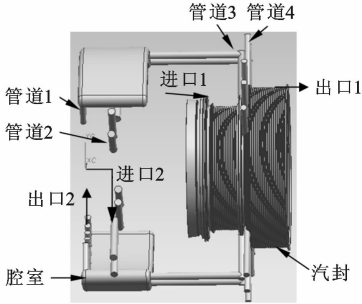


图 4 高压缸旁路冷却系统流体域进出口及管道

为了研究高温主蒸汽对内外缸的传热作用,计算中在内缸内壁面加载了简化的温度边界条件。如图 5 所示,由于静叶顶部内缸壁面与主蒸汽没有直接接触,与相邻的叶根之间存在间隙,因此将静叶顶部内缸壁面设为绝热壁面,而动叶顶部内缸壁面受叶顶间隙中蒸汽的直接加热,从而为该壁面设定了温度边界条件。温度边界条件的作用在于,通过对内外缸进行加热可确定汽缸的整体温度水平,所以本文在有/无蒸汽冷却计算中都加载了该边界条件,具体温度如表 2 所示。

表 1 进出口边界条件

参数	进口 1	进口 2	出口 1	出口 2
总温/℃	579.9	530		
总压/MPa	23.416	17.6	5.95	16.2

表 2 温度边界条件

参数	动叶 1	动叶 2	动叶 3	动叶 4
T_1/K	851.10	839.30	823.55	806.66
参数	动叶 5	动叶 6	动叶 7	
T_1/K	792.05	778.70	763.45	

注: T_1 为动叶顶部壁面静温。

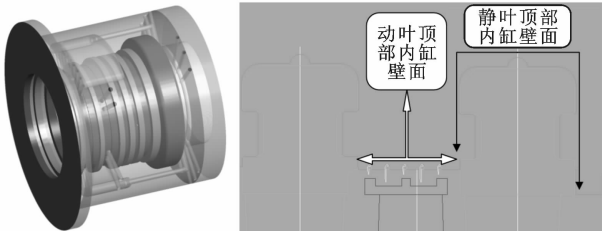


图 5 高压缸旁路冷却系统固体域温度边界条件

采用 CFD 软件 ANSYS-CFX 对内部冷却系统进行了定常研究,紊流模型采用 $k-\epsilon$ 两方程模型。为了揭示冷却蒸汽对内外缸温度的影响,分别计算

了不考虑冷却的纯固体域和流固耦合域,流固耦合冷却计算的边界条件包括蒸汽进出口边界条件和内缸壁面温度边界条件,无蒸汽冷却计算仅考虑温度边界条件。

ANSYS-CFX 的共轭传热模块能够同时模拟固体内热传导及其与流体间的对流换热。固体域热传导采用下列输运方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E \tag{1}$$

式中: ρ 、 c_p 和 λ 分别为固体的密度、比热容和导热系数。固体材料及材料性能参数均为实际值。在流固耦合面,ANSYS-CFX 采用热通量守恒来计算流体和固体的温度。本文中内外缸温差不大,整体温度水平有限,相比于固体域的热传导及流固之间的对流换热,辐射传热的作用很小,因此本文计算未考虑热辐射的影响。

2 结果与分析

图 6 为高压缸外缸固体域的温度分布。冷却计算时,内缸对外缸的传热主要是通过内外缸间隙的蒸汽进行的;无冷却计算时,内缸对外缸的传热是通过左侧接触面进行的。因此,冷却计算中外缸温度整体上升约 12 K 左右,温度波动幅度较大,高温区温度约为 804 K,对应于主蒸汽进口。

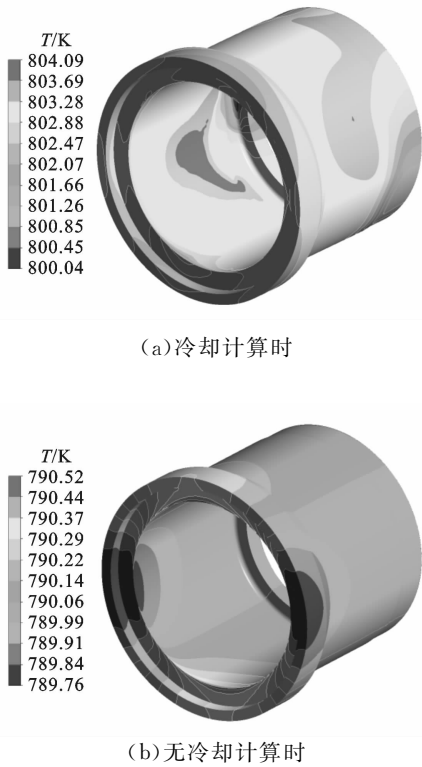


图 6 高压缸外缸固体域的温度分布

图 7 为高压缸内缸固体域的温度分布。在旁路冷却系统冷却蒸汽的作用下,内缸温度明显下降,温度分布比较均匀。冷却计算中内外缸温度最高的区域均对应于主蒸汽进口的位置。

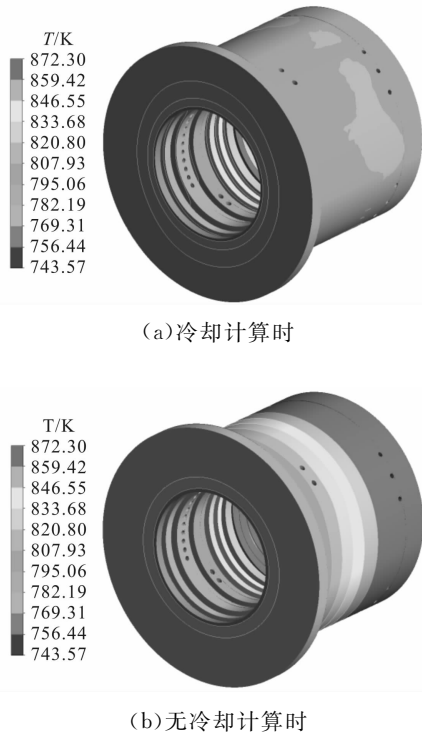


图 7 高压缸内缸固体域的温度分布

图 8 为高压缸内外缸固体域周向截面的温度分布及流线。剖面经过了管道 3 和管道 1,清楚地显示出旁路冷却系统的内部结构。主蒸汽进口处内缸壁面温度最高,为主蒸汽进汽温度,在内缸内部温度迅速下降。前 3 级主蒸汽温度较高,因此内缸壁面温度高于内缸内部温度;在第 3 级后,受主蒸汽温度下降的影响,内缸壁面温度较低,受相邻固体域及内部旁路冷却管道 3 和腔室中温度较高的混合蒸汽的影响,内部固体域温度略高于壁面温度。右侧汽封出口段受汽封中蒸汽温度下降的影响,内缸温度明显下降;同理,汽封出口段下部的阶梯式平衡活塞温度也会明显下降。除此之外,内外缸大部分区域的

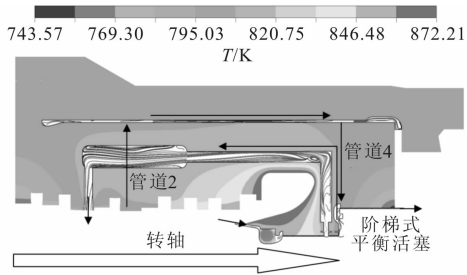


图 8 高压缸内外缸固体域周向截面的温度分布及流线

温度分布比较均匀,表明内部旁路冷却系统对内外缸温度分布具有调控的作用。

为了进一步研究冷却蒸汽对内外缸的影响,在内外缸周向及轴向不同位置截取了截面,以比较分析不同截面固体域的温度变化,截面位置如图 9 所示,其中周向 y 轴截面通过了内缸内部腔室。轴向截面 1 在内缸腔室前部,用它来研究腔室中混合蒸汽对内缸左端固体域的影响;轴向截面 2、3 在管道 2 前后两侧,截面 4、5 在管道 4 前后两侧。

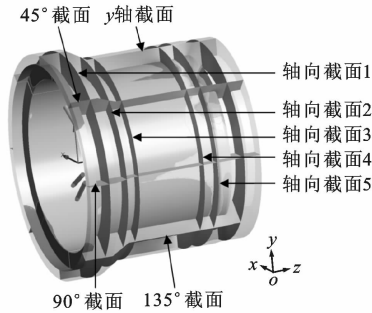


图 9 高压缸内外缸截面位置示意图

图 10~图 13 为周向截面处高压缸内外缸的温度分布。无冷却计算时,内外缸温度取决于内缸内壁面温度(叶栅流动主蒸汽温度),因此内缸温度变化与主蒸汽温度变化一致,在主蒸汽进口处温度最高达 872.15 K,沿流向逐渐下降,且周向各截面温度分布基本一致。在不考虑辐射换热的条件下,外缸只通过外缸左侧与内缸的连接面进行换热,因此外缸温度较低且分布均匀。与无冷却计算时相比,冷却计算时内外缸的温度变化较大,主要表现为:内缸高温区明显减小,主蒸汽进口处的内缸受到了冷却蒸汽的作用,使得内缸温度沿壁面向内部迅速下降,特别是在汽封出口段冷却蒸汽的影响下,内缸右端温度降幅较大;在冷却蒸汽作用下,内缸温度分布比较均匀,大部分固体域温度稳定在 810 K 左右,这有利于提高内缸机械强度;冷却计算中除了外缸左

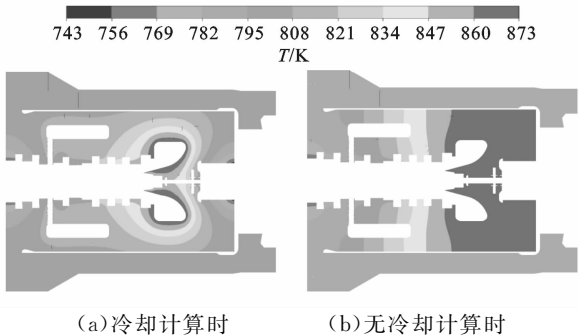


图 10 内缸 y 轴截面的温度分布比较

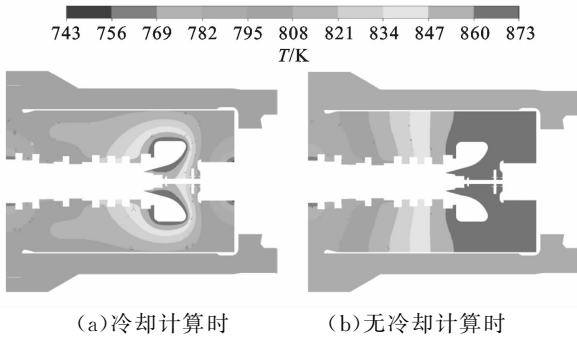


图 11 内缸 45° 截面的温度分布

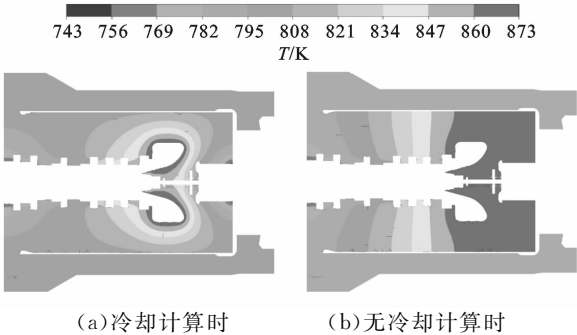


图 12 内缸 90° 截面的温度分布

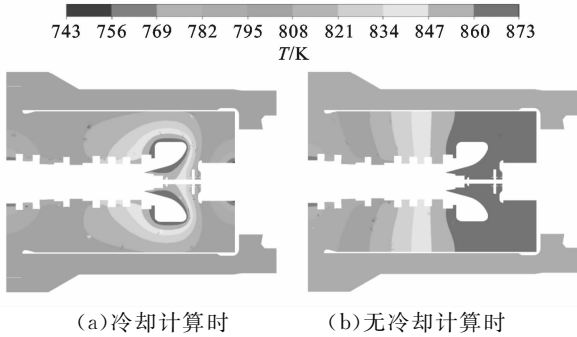


图 13 内缸 135° 截面的温度分布

侧与内缸相连处受到了内缸的传热作用外,其他部分均受到了内外缸间隙中蒸汽的传热作用,因此外缸温度略有上升。此外,冷却计算中周向 y 轴截面(通过内缸腔室)和 45° 截面中内缸内部高温区域向左端延伸,这是因为这两个截面在周向靠近内缸内部腔室位置,受到了腔室中温度较高的混合蒸汽的加热,使得内缸腔室附近固体域温度较高。

图 14~图 18 为内缸轴向截面温度分布。无冷却计算时,截面 1 由于远离主蒸汽进口,其温度水平较低;冷却计算时,受上下腔室中温度较高的混合蒸汽及内外缸间隙中蒸汽的影响,截面 1 整体温度水平升高,对应的上下腔室处温度最高,远离腔室的水平内侧区域主要受内缸壁面温度的影响,所以温度较低。冷却计算时,截面 2 温度除上下腔室周围区

域以外均低于无冷却计算,对应的上下腔室处温度最高,而在水平位置距离腔室较远处温度最低,即从截面 2 位置处开始表现出内部冷却系统的冷却作用。冷却计算时,截面 3 整体温度水平明显低于无冷却计算,受截面右侧固体域的传热作用,内缸中部内侧温度较截面 2 有所上升,靠近外表面处在内外缸间隙冷却蒸汽作用下温度最低;无冷却计算时,靠近内缸内壁面处温度较低,受主蒸汽进口高温区的传热作用,内缸外侧区域温度较高。无冷却计算时,截面 4、5 均处于主蒸汽进口右侧的高温区域,温度在 870 K 左右,此时壁面温度最高。冷却计算时,主蒸汽进口的高温区主要在截面中部,但温度较无冷却时明显降低,受管道 3 和管道 4 中蒸汽的影响,该高温区域温度周向分布不连续。截面外侧受到了内外缸间隙冷却蒸汽的影响,截面内侧受到了底部汽封中冷却蒸汽的作用,所以这两处温度较无冷却计算时大幅下降。

由上述分析可知,采用内部旁路冷却系统后,在冷却蒸汽的作用下,内缸整体温度明显下降,温度分布更加均匀。冷却蒸汽作用还体现在对汽封出口段内缸及阶梯式平衡活塞的冷却作用。研究结构中,对于阶梯式平衡活塞的冷却效果,主要取决于 3 段汽封长度、汽封齿间隙及平衡活塞前径向间隙。

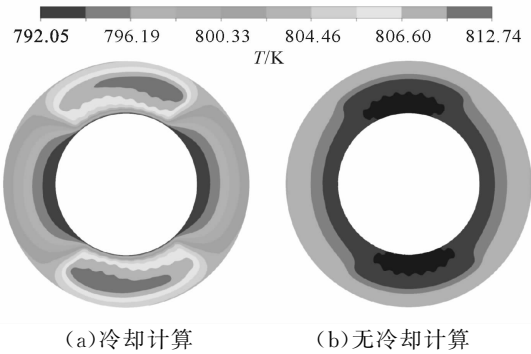


图 14 内缸轴向截面 1 的温度分布

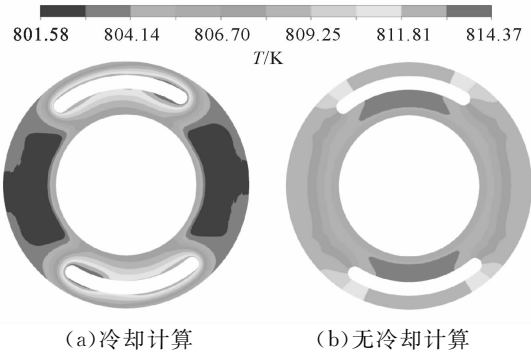


图 15 内缸轴向截面 2 的温度分布

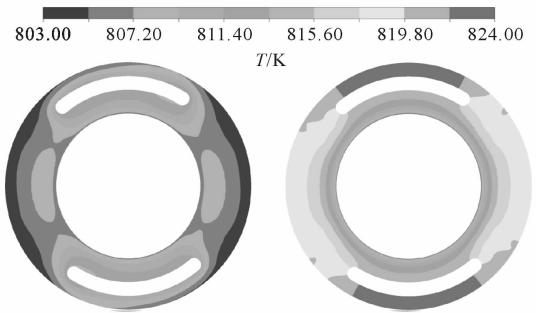


图 16 内缸轴向截面 3 的温度分布

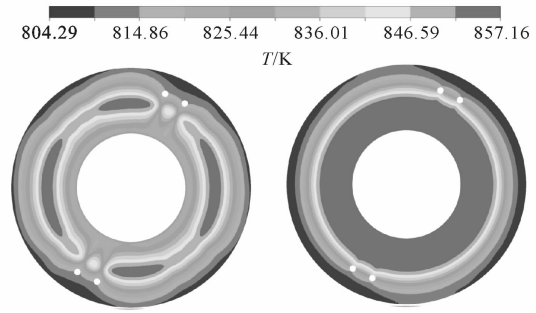


图 17 内缸轴向截面 4 的温度分布

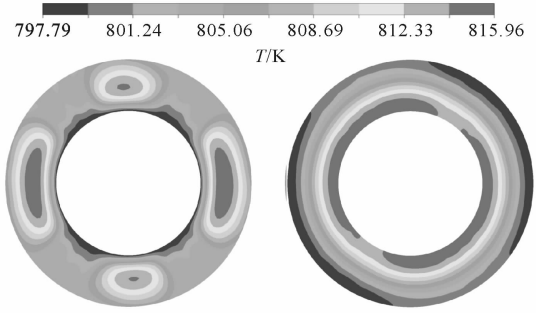


图 18 内缸轴向截面 5 的温度分布

3 结 论

本文采用耦合流动计算和共轭传热的数值方法研究了超超临界汽轮机高压缸旁路冷却系统的蒸汽冷却特性,分析了内外缸固体域的温度分布,比较了在有/无冷却条件下汽缸固体域内部截面的温度分布。

在冷却蒸汽的作用下,阶梯式平衡活塞温度明显下降,这样可以提高汽轮机的机械性能,益于采用高进汽参数。内外缸间隙中冷却蒸汽可以降低内缸表面温度,减小温度梯度,这部分冷却蒸汽的温度同时受到内缸导热的影响,使得内外缸间隙中温度变化范围增大。在管道 3 和腔室中的混合蒸汽由于温

度较高,对周围固体域起到了加热的作用。

参考文献:

- [1] 史进渊, 杨宇, 孙庆, 等. 超超临界汽轮机部件冷却技术的研究 [J]. 动力工程, 2003, 23(6): 2735-2760.
SHI Jinyuan, YANG Yu, SUN Qing, et al. Research on component cooling technique of ultra-supercritical steam turbines [J]. Power Engineering, 2003, 23(6): 2735-2760.
- [2] 史宣平, 李劲松, 王永中. 1 000 MW 超超临界汽轮机高温部件的冷却设计 [J]. 东方电气评论, 2009, 23(3): 18-22.
SHI Xuanping, LI Jingsong, WANG Yongzhong. Cooling design for high temperature parts of ultra-supercritical 1 000 MW steam turbine [J]. Dongfang Electric Review, 2009, 23(3): 18-22.
- [3] DEIDEWIG F, WECHSUNG M. Thermodynamic aspects of designing the new siemens high pressure steam turbine with overload valve for supercritical applications [C]//Proceedings of ASME Power. New York, USA: ASME, 2006: 88020.
- [4] QUINKERTZ R, THIEMANN T, GIERSE K. Validation of advanced system turbine technology: a case study of an ultra super critical steam turbine power plant, GT2011-45816 [R]. New York, USA: ASME, 2011.
- [5] 吕智强, 周逊, 刘顺隆. 超超临界汽轮机中压转子冷却效果分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(7): 1168-1171.
LÜ Zhiqiang, ZHOU Xun, LIU Shunlong. Analysis of the cooling efficiency of medium pressure rotor in ultra-supercritical turbine [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(7): 1168-1171.
- [6] 祁明旭, 杨建道, 周代伟, 等. 汽轮机高压冷却蒸汽对中压转子的冷却效果研究 [J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(4): 408-421.
QI Mingxu, YANG Jiandao, ZHOU Daiwei, et al. Cooling effects of HP steam on ip rotor in steam turbine [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(4): 408-421.
- [7] 霍文浩, 祁明旭, 李军, 等. 超临界汽轮机中压透平级流动传热特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(7): 9-14.

HUO Wenhao, QI Mingxu, LI Jun, et al. Investigations on flow and heat transfer characteristics in the middle pressure turbine stage for supercritical steam turbines [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(7): 9-14.

- [8] HUO Wenhao, LI Jun, YAN Xin, et al. Numerical investigations on the steam cooling performance of the first two middle pressure turbine stages for ultra-supercritical steam turbines, GT2012-69302 [R]. New York, USA: ASME, 2012.

[本刊相关文献链接]

霍文浩, 晏鑫, 李军, 等. 超超临界汽轮机高压缸旁路冷却系统流动特性的研究. 2013, 47(3): 42-47.
邵帅, 邓清华, 时和双, 等. 不同容积流量下汽轮机低压缸末三级定常流动数值研究. 2013, 47(1): 15-20.
潘家成, 徐亮, 高建民, 等. 轴向间距对二次水滴运动特性及沉积规律的影响. 2012, 46(7): 1-6.
蔡柳溪, 王顺森, 毛靖儒, 等. 静叶斜置对高参数汽轮机再热后第一级叶栅冲刷的影响. 2012, 46(7): 12-15.
李瑜, 李亮, 钟刚云, 等. 末级透平对低压缸气动和凝结特性的影响. 2012, 46(7): 16-20.
陈景龙, 瞿艳阳, 何正嘉, 等. 自适应冗余多小波及其在故障诊断中的应用. 2012, 46(7): 44-49.
屈焕成, 张荻, 谢永慧, 等. 汽轮机调节级非定常流动的数值模拟及汽流激振力研究. 2011, 45(11): 39-44.
霍文浩, 祁明旭, 李军, 等. 超临界汽轮机中压透平级流动传热特性研究. 2011, 45(7): 9-14.
文乐, 高林, 戴义平. 透平压缩机机组的模糊 PID 控制与特性研究. 2011, 45(7): 76-81.
何伟峰, 戴义平. 环境风速对空冷凝汽器运行性能的影响. 2011, 45(5): 31-35.
刘钊, 丰镇平, 宋立明. 实际叶片前缘冲击冷却流动和换热的数值研究. 2011, 45(1): 5-9.
何伟峰, 戴义平, 马庆中, 等. 环境风影响下直接空冷单元背压预测研究. 2011, 45(1): 15-20.
钟杰, 郭成, 岳朋, 等. 43" 汽轮机叶片材料热变形行为及制坯工艺参数优化. 2011, 45(1): 94-98.
周贤, 王波, 张士杰, 等. 联合循环电站改造为整体煤气化联合循环的粗煤气冷却. 2010, 44(11): 71-76.
张明书, 徐自力, 漆小兵, 等. 大型动压滑动轴承动特性系数辨识研究. 2010, 44(7): 75-78.

(编辑 苗凌)