

超临界汽轮机中压透平级流动传热特性研究

霍文浩¹, 祁明旭², 李军¹, 丰镇平¹

(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安; 2. 北京理工大学机械与车辆学院, 100081, 北京)

摘要: 通过采用耦合流场计算和共轭传热的数值方法, 研究了超临界汽轮机高压缸冷却蒸汽对中压缸第一级固体部件的冷却特性及其对级气动性能的影响, 同时对比了有无蒸汽冷却的中压缸第一级的流场和温度场。结果表明: 蒸汽冷却技术可以有效地对中压缸第一级动叶叶片、叶根、转子及轮盘进行冷却。受到冷却孔的抽吸作用而进入冷却孔的冷却蒸汽对冷却孔及周围的叶根区域具有明显的冷却作用。在蒸汽冷却的作用下, 中压缸第一级转子系统温度下降的最大幅度达 80 K。部分冷却蒸汽进入中压缸第一级叶栅主流道并与主流掺混, 从而使得根部反动度增大, 动叶通道涡强度增加。所以, 蒸汽冷却技术可以有效提高高温转子的运行寿命和安全的可靠性。

关键词: 超临界汽轮机; 中压转子; 蒸汽冷却; 数值模拟

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)07-0009-06

Flow and Heat Transfer Characteristics in Middle Pressure Turbine Stage in Supercritical Steam Turbines

HUO Wenhao¹, QI Mingxu², LI Jun¹, FENG Zhenping¹

(1. Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Institute of Mechanical and Vehicle Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The coupling of the flow field calculation and the conjugate heat transfer method was employed to investigate the cooling characteristics of the steam from the high pressure cylinder of a supercritical steam turbine to cool the solid parts of the first stage in the middle pressure cylinder and the influence of the cooling effect on aerodynamic performance of the first stage. The flow field and the temperature field in the first stage of the middle pressure cylinder with steam cooling were compared with those without steam cooling. The results show that the steam cooling technology can effectively reduce the temperature of the rotor blade, blade root, rotor and wheel disc of the first stage. The cooling steam flowing through the cooling holes by pumping action of the cooling holes has obvious cooling effect on the cooling holes and their surrounding area. The temperature of the rotor system of the first stage in the middle pressure cylinder decreases by up to 80 K. In addition, part of the cooling steam enters the main flow passage of the first stage and mixes with the main flow, leading to greater hub reaction and strength of the passage vortex.

Keywords: supercritical steam turbine; middle-pressure rotor; steam cooling; numerical simulations

随着节能和环保要求的日益严格, 大功率汽轮机主蒸汽进汽的压力、温度逐步提高, 并要求达到超

临界和超超临界蒸汽参数水平, 这样相应的机组效率便可大幅提高。为了降低高温区工作转子的热应

力和表面温度,常采用低温蒸汽来冷却高温转子表面和叶根的温度,以延长转子的寿命,减小转子弯曲的可能性。^[1-2]

超临界大功率汽轮机大都采用中间再热方式,因而高压缸和中压缸前端主蒸汽的温度相同。高压缸转子支撑一般位于调节级之后,而主蒸汽经过调节级获得了较大的温降,所以在转子前支撑处的温度大大降低。中压缸转子前支撑一般位于中压缸第一级之前,该区域温度与主蒸汽温度相同,为机组温度最高区域,因而高温蠕变和热疲劳问题尤为严重。同时,高压缸调节级后的蒸汽温度较之主蒸汽已大幅降低,其压力较之中压缸仍然很高,通过引入高压缸的少量低温蒸汽,可对中压缸前几级转子、轮缘以及动叶叶根进行局部冷却,以降低这些高热负载区域的工作温度,从而达到机组安全运行的目的^[3]。

吕智强等^[4]采用近似模型,数值研究了大功率汽轮机转子蒸汽冷却特性,并建立了相应的传热模型,之后采用 ANSYS CFX 对某超超临界汽轮机中压转子进行了流热耦合的数值模拟研究^[5]。杨建道等^[6]数值研究了中压切向涡流对转子的冷却效应。高压缸蒸汽对中压缸转子的冷却效果可以通过传热方程近似预测,但是在转子轮缘、轮盘、动叶叶片、叶根、叶根槽以及静叶隔板区域,高压冷却蒸汽的冷却途径非常复杂,且实际换热效果还取决于当地区域蒸汽流动的情况,因此不能采用简单的传热方程方法来预测实际结果。祁明旭等^[7]采用 CFD 和共轭换热方法,对某型 600 MW 汽轮机中压缸前两级的内部流动进行了分析,研究了 2 种不同工况下高压缸漏汽对中压缸前两级转子轮缘和叶根的冷却效应及对近根部流动特性的影响,结果表明,利用高压缸的漏汽可以实现中压缸转子的冷却。

超临界汽轮机中压再热的进汽温度与高压缸主蒸汽温度相同,这就需要对中压缸第一级转子进行蒸汽冷却,以提高中压转子的运行寿命和安全性。本文采用商用软件 NUMECA 对某型超临界汽轮机中压缸第一级转子系统展开了流动传热特性的耦合数值研究,揭示了换热区域流体流动特性,给出了转子的冷却结果,该结果可为转子的蒸汽冷却设计提供理论基础和技术支撑。

1 计算模型及数值方法

图 1 是为计算模型的结构图。该模型由流体域

和固体域两部分组成,其中流体域包括叶栅流道、叶顶汽封、隔板汽封前部腔室、隔板汽封、隔板与动叶轮盘间的流道、冷却孔以及下游腔室,固体域包括动叶、叶根、轮盘和转轴。

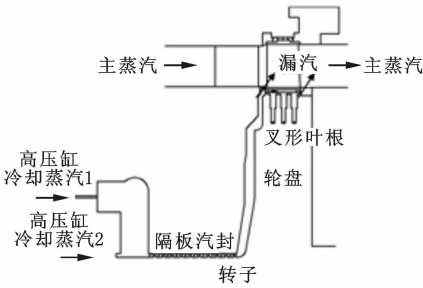


图 1 计算模型结构

计算模型网格为多块结构化网格,包括流体域和固体域网格,见图 2。汽封齿间隙、冷却孔及圆弧过渡处网格为加密网格。网格总数约为 870 万。

本文基于 FINE/Turbo 求解了三维雷诺平均 N-S 方程组,计算工质为可凝结水蒸气 (condensable water steam),紊流模型为 Spalart-Allmaras 模型。边界条件中给定了进口总压、总温以及出口静压,如表 1 所示。在图 1 中进口有 3 个,进口 1 和进口 2 为高压缸抽汽口,主蒸汽来自中压缸再热蒸汽进口。网格前后两侧的边界条件是周期性的,流固耦合面和固固连接面为热连接表面,其余固体表面为绝热壁面。

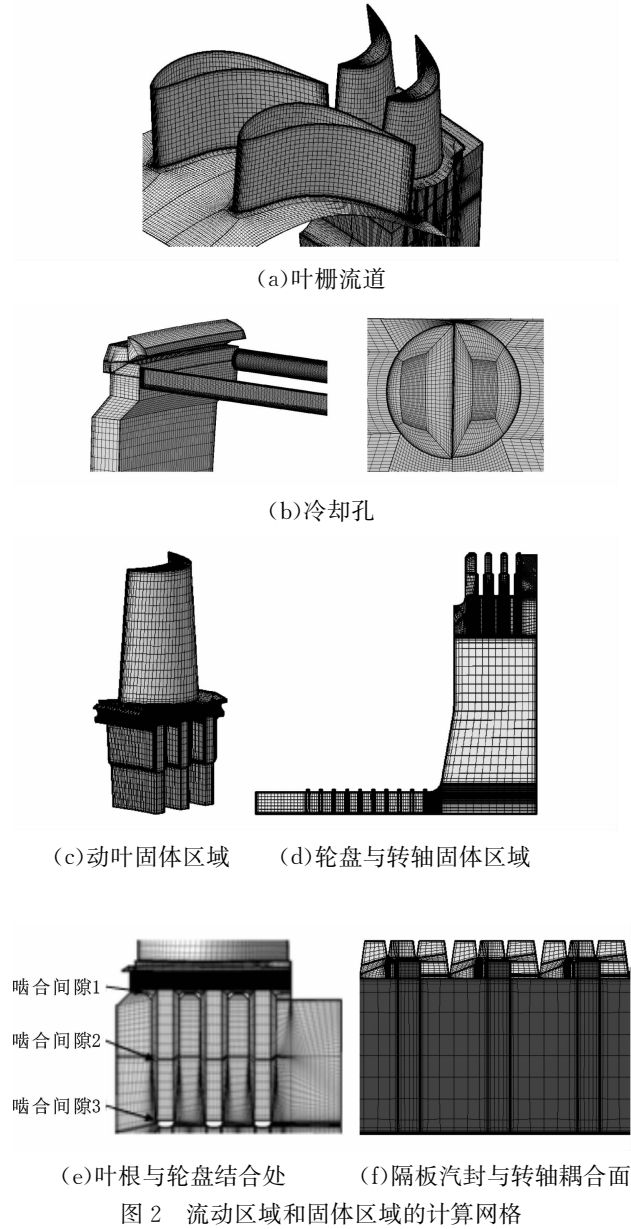
表 1 计算时的进出口边界条件

边界条件	进口 1	进口 2	主蒸汽进口	主蒸汽出口
总温/K	705.00	774.00	838.84	
总压/MPa	10.154 0	10.154 0	3.767 9	
静压/MPa				2.939

流体域和固体域之间的耦合换热计算式为

$$h_f(T_f - T_w) = h_s(T_w - T_s) \tag{1}$$

式中: h_f 、 h_s 分别为换热面流体侧和固体侧的换热系数, $h = \frac{k}{\Delta y}$, k 为热导率, Δy 为换热面两侧网格法向尺寸; T_f 、 T_w 、 T_s 分别为流体侧、换热面和固体侧的温度。在耦合计算过程中,流体侧的热导率是根据当地的流体温度从水蒸气热力性质数据库中自动插值提取的,固体侧的热导率则采用给定定值的方法来选取。



2 结果与讨论

2.1 冷却蒸汽流量分配

图 3 是冷却蒸汽的流量分配,其中 M_1 和 M_2 分别对应于进口 1 和进口 2 的流量, M_3 对应于侵入叶栅主流道的流量, M_4 和 M_5 分别对应于前后两侧冷却孔的流量, M_6 对应于主蒸汽的流量。

表 2 给出了各处的冷却蒸汽流量及其与总流量的比值 α 。进口 1 处冷却蒸汽流量仅占总流量的 3.36%,即冷却蒸汽主要来自进口 2。通过冷却孔对叶根进行冷却的蒸汽流量为总流量的 17.77%,剩余 77.40%的冷却蒸汽沿隔板与轮盘间的流道侵入主流道,与主流掺混后对动叶根部进行冷却。冷却蒸汽总流量为主蒸汽的 0.87%。

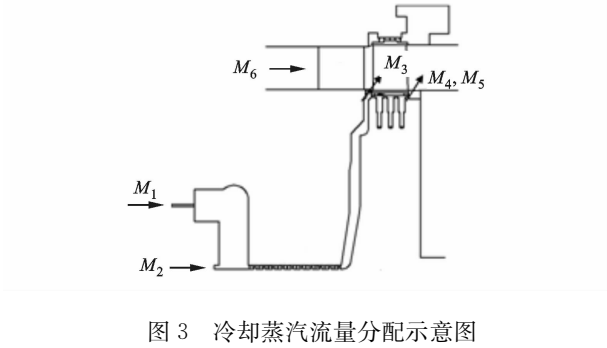
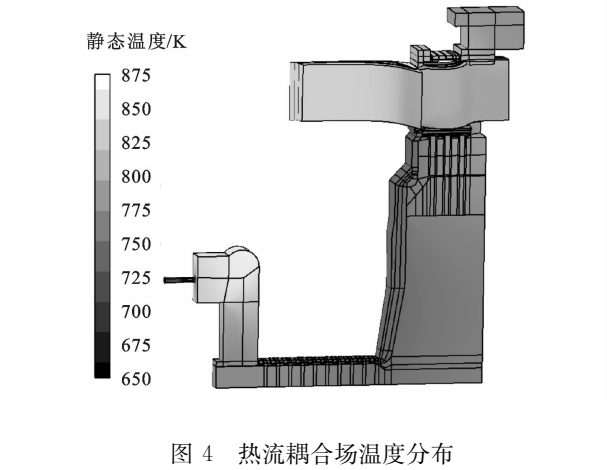


表 2 冷却蒸汽流量绝对值分配

	流量/ $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$	$\alpha/\%$
M_1	1.28	3.36
M_2	36.77	96.64
M_3	29.45	77.40
M_4	3.36	8.83
M_5	3.40	8.94
M_6	4 398.12	

2.2 计算域温度及冷却孔压力分布

图 4 是计算模型流体域和固体域的温度分布。图 5 是动叶根部冷却孔处静压云图。在中压缸第一级动叶叶根两侧加工出 2 个半径为 2.5 mm 的半圆形冷却孔,冷却蒸汽经隔板汽封及下游隔板与轮盘



间的流道到达图 5 所示冷却孔的进口,受冷却孔的抽吸作用,部分蒸汽经冷却孔进入下游腔室。经过冷却孔的蒸汽可以对叶根区域进行冷却,之后通过下游腔室进入主流道并被主流携带流向下流,其余大部分冷却蒸汽沿径向进入动静叶间的主流道并与主流掺混,进而对动叶根部前缘进行冷却。

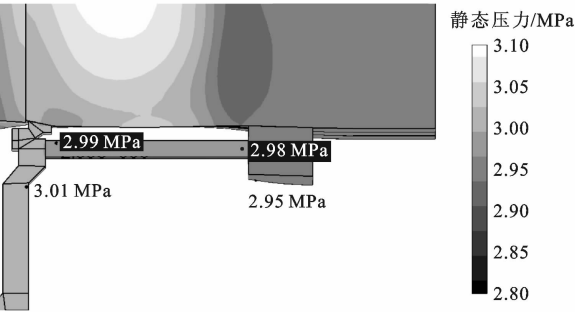
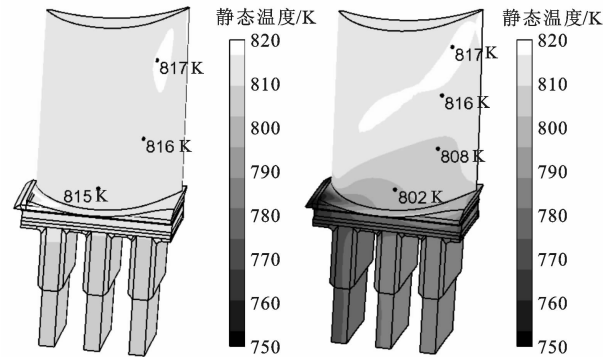


图 5 冷却孔静压分布

2.3 固体域温度分布

图 6 和图 7 分别是蒸汽冷却设计前后动叶的固体表面和叶根的温度分布. 受主流及横向压差的影响, 侵入主流道的冷却蒸汽与主流掺混并冲击动叶吸力面根部的前半弦长区域, 使得该区域温度最低降至 788 K, 之后混合蒸汽沿着吸力面逐渐向叶展中部发展. 受影响的动叶吸力面从前缘根部到尾缘中部展的近似三角形区域形成了低温区, 温度最大降幅为 27 K. 另外, 在横向压差的作用下, 冷却蒸汽冲击吸力面并沿吸力面发展, 因此对吸力面的冷却作用大于压力面, 而在压力面根部最大温降为 11 K. 叉形叶根的 3 个叉从左向右平均温度依次下降了约 32、25、22 K. 距冷却孔进口截面越远, 冷却作用越小, 温度降幅越小. 无蒸汽冷却设计下, 叶根台顶部前侧区域温度最高, 达到 824 K, 而在蒸汽冷却设计下, 该区域温度下降到了约 744 K, 温度降幅达 80 K, 其原因是进入主流道的冷却蒸汽直接冲击叶根台前侧进行冷却.



(a) 蒸汽冷却前 (b) 蒸汽冷却后

图 6 动叶冷却效果比较

图 8 和图 9 是冷却孔固体区域温度分布. 由图 8 可以看到, 蒸汽冷却作用下冷却孔固体区域温度较无蒸汽冷却时大幅下降, 并沿轴向逐渐上升, 但在出口略有下降, 且冷却孔两侧的温度分布基本一致. 由图 9a 可以看到, 前端面冷却孔周围的固体区域温

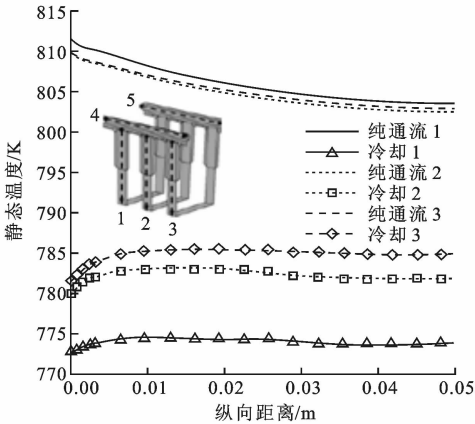


图 7 动叶叉形叶根温度分布

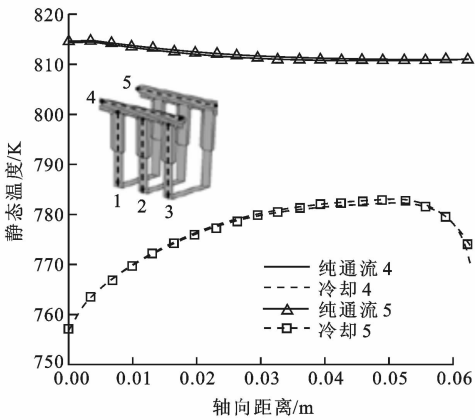
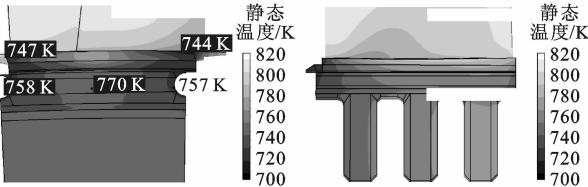


图 8 冷却孔壁面温度的轴向分布



(a) 轴向 (b) 周向

图 9 冷却孔固体区域温度分布

度较低, 而在远离冷却孔的区域温度有所上升, 但仍然低于蒸汽冷却设计前的温度, 说明冷却蒸汽在叶根台前侧的冷却效果良好.

图 10 是轮盘与转轴固体区域的温度分布. 轮盘与转轴温度分布受冷却蒸汽的影响较大, 其温度变化与冷却蒸汽在沿冷却蒸汽流动方向上是一致的. 与冷却蒸汽直接接触的表面温度最低, 而在远离冷却蒸汽的区域温度逐渐升高, 但总体温度低于主蒸汽温度, 表明冷却蒸汽在轮盘和转轴上的冷却效果良好.

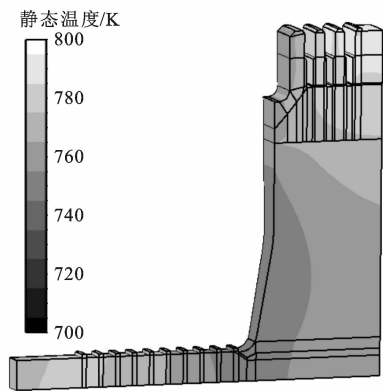


图 10 轮盘与转轴固体区域的温度分布

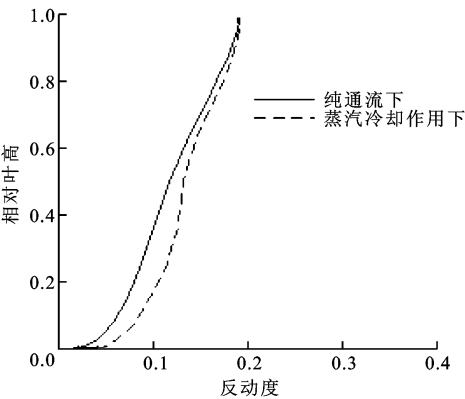


图 12 中压缸第一级纯通流和蒸汽冷却作用下的反动度比较

2.4 冷却蒸汽对主流的影响

从高压缸引入的冷却蒸汽进入叶栅主流道后与主流掺混,从而影响了主流流动特性.图 11 是在蒸汽冷却设计前后动叶吸力面的壁面极限流线分布.在蒸汽冷却作用下,进入主流道的冷却蒸汽在流道周向分布是不均匀的,其与主流掺混后共同冲击动叶吸力面,然后在叶根横向压差及通道涡的卷吸作用下沿吸力面上升并向下游发展,从而影响动叶根部.受影响的动叶根部通道的涡强度与范围均大于纯通流的情况.

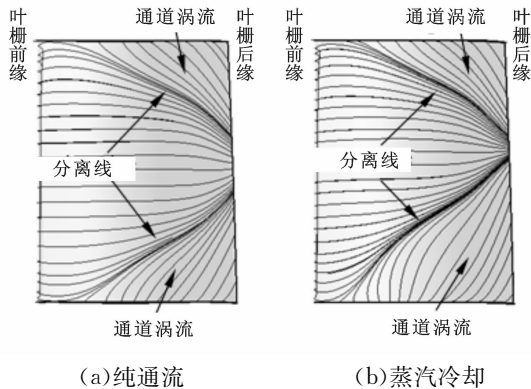


图 11 动叶吸力面极限流线分布比较

图 12 是中压缸第一级在纯通流和蒸汽冷却设计下反动度沿叶高的分布.从图 12 可以看到,蒸汽冷却作用下,动叶根部反动度增大,这是由于大部分冷却蒸汽进入主流道后增加了动叶通道的流量,并且与主流共同参与动叶做功,使得动叶近根部区域的压力有所升高,导致级反动度增大.在动叶顶部,叶顶汽封出口气流焓值大于主蒸汽,相应地减小了顶部焓降,同时叶顶汽封泄漏流的存在减小了顶部区域流量,所以动叶顶部反动度基本不变.

3 结 论

本文通过采用流动计算和共轭传热相结合的方法,研究了超临界汽轮机高压缸冷却蒸汽对中压缸第一级转子系统的冷却效果,并简要分析了冷却蒸汽与主流掺混对主流流场的影响.

从高压缸抽取的冷却蒸汽能够有效地对中压缸第一级动叶、轮盘及转子进行冷却,使得该区域的温度在不同程度上有所下降,从而改善了中压缸转子和叶根等部件的工作环境.在冷却蒸汽作用下,中压缸第一级转子系统温度的最大降幅达 80 K.受到冷却孔的抽吸作用,部分冷却蒸汽通过冷却孔流入下游腔室,再汇入主流,对冷却孔周围的叶根区域进行冷却.

从高压缸抽取的冷却蒸汽经隔板汽封后,大部分进入动叶前主流道,并与主流掺混,对动叶的流场和气动参数产生干扰,其影响范围主要在动叶下部区域.这部分冷却蒸汽对动叶根部具有良好的冷却作用,同时进入主流道的冷却蒸汽与主流掺混,致使根部反动度增大,同时增强了动叶通道涡强度.

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):2725-2739. SHI Jinyuan, YANG Yu, SUN Qing, et al. Research on component cooling technique of ultra-supercritical steam turbines[J]. Power Engineering, 2003, 23(6): 2725-2739.

[2] KOSMAN W. The influence of cooling flows on the operating conditions of the ultra-supercritical steam turbine components, ASME GT2010-22706[R]. New

- York, USA: ASME, 2010.
- [3] 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: 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: 18-22.
- [4] 吕智强, 韩万金. 超超临界汽轮机蒸汽冷却技术的数值研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(12): 1703-1704.
- LÜ Zhiqiang, HAN Wanjin. Numerical investigation of cooling technique in ultra-supercritical steam turbine [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(12): 1703-1704.
- [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] 杨建道, 竺晓程, 杨建, 等. 中压切向涡流冷却的数值研究 [J]. 热力透平, 2009, 38(1): 39-42.
- YANG Jiandao, ZHU Xiaocheng, YANG Jian, et al. Simulation study on tangential direction cooling in IP cylinder [J]. Thermal Turbine, 2009, 38(1): 39-42.
- [7] 祁明旭, 杨建道, 周代伟, 等. 600 MW 汽轮机高压漏汽对中压缸转子冷却及动叶根部流动特性的影响 [C] // 中国工程热物理学会学术会议. 北京: 中国工程热物理学会, 2010: 092071.

(编辑 苗凌)