

汽轮机末级静叶水滴沉积规律与缝隙去湿研究

谭 锐, 王新军, 关盼龙, 仇璐珂

(西安交通大学 叶轮机械研究所, 陕西 西安 710049)

摘 要: 采用 Fluent 软件对某 600 MW 汽轮机末级静叶栅中的水滴三维运动与沉积规律进行了数值计算, 确定了水滴在静叶轴向和径向的沉积位置; 实验研究了空心叶栅缝隙抽吸的去湿性能。结果表明: 静叶内弧上的沉积水量占叶栅进口总水量的 12.2%, 背弧的沉积水量占 1.6%; 静叶内弧上的缝隙抽吸水量大于背弧上的抽吸水量, 缝隙位置越靠近静叶出口边, 抽吸水量也越大; 随着缝隙宽度的增大, 缝隙抽吸水量先降低后增大, 在宽度为 3.0 mm 左右时达到较低值; 缝隙抽吸水量随抽吸压差的增大而增大, 随着主流流速的增大而很快减小。

关 键 词: 汽轮机; 末级静叶; 水滴运动与沉积; 空心静叶; 缝隙去湿

中图分类号: TK263 文献标识码: A

引 言

随着汽轮机单机容量的增大及核电汽轮机的发展, 湿蒸气级动叶片的水蚀问题越来越严重^[1]。据统计, 西屋公司生产的 393 台汽轮机发生过叶片腐蚀、甚至断裂的事故; 德国在 35 起低压缸叶片损伤事故中有 13 起是由于水蚀引起的; 国内辽宁清河发电厂 10 台汽轮机组, 末级叶片顶部均发生不同程度的水蚀现象。

蒸汽在汽轮机叶栅通道内膨胀到湿蒸气区, 因自发凝结而生成大量的微小水滴(一次水滴), 其直径约为 $0.01 \sim 1.0 \mu\text{m}^{[2\sim 3]}$ 。一次水滴占湿蒸气中液相质量的 90% 左右, 其中一小部分由于惯性和扩散作用沉积到静叶表面形成水膜或者溪流, 在蒸汽切力作用下向静叶尾缘流动, 并在出口边撕裂形成大分散度的水滴(二次水滴)。二次水滴数目很少, 但单个水滴的质量较大, 很难加速到气流速度, 最后以较高的相对速度撞击到动叶上引起严重的水蚀。研究表明: 静叶表面上的溪流或水膜在出口边撕裂形成的二次水滴是造成动叶水蚀的根源。

在空心静叶的内弧和背弧合适位置上开设去湿缝隙, 利用缝隙内外的压差去除静叶表面上的流动水膜或溪流, 减少水膜或溪流在静叶出口边由于撕裂而形成的大水滴数目, 是防止或减轻动叶水蚀的最直接且有效的措施之一^[4~5]。本研究对某 600 MW 汽轮机末级静叶通道内的水滴运动与沉积规律进行了数值计算, 确定了水滴在静叶轴向与径向的沉积位置与沉积量; 在此基础上, 实验研究了各因素对缝隙抽吸去湿性能的影响。

1 600 MW 汽轮机末级静叶栅内水滴运动与沉积规律的数值计算

1.1 计算模型

汽轮机低压缸湿蒸气中的液相非常稀薄, 水滴在随气流运动时主要受到气流阻力的作用。因此, 可以将水滴作为离散项来处理, 并假定水滴是球形的, 在运动过程中不发生变化, 水滴碰撞到固体壁面没有反弹直接被捕获。在此假定下, 叶栅内水滴的三维运动轨迹可以用下面的方程来描述:

$$\begin{aligned} \frac{d u_{bx}}{dt} &= F_D (u_g - u_{bx}) + \frac{g_x (\rho_p - \rho_g)}{\rho_p} \\ \frac{d u_{by}}{dt} &= F_D (u_g - u_{by}) + \frac{g_y (\rho_p - \rho_g)}{\rho_p} \\ \frac{d u_{bz}}{dt} &= F_D (u_g - u_{bz}) + \frac{g_z (\rho_p - \rho_g)}{\rho_p} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: u_g —蒸汽速度; u_p —水滴速度; ρ_g —蒸汽密度; ρ_p —水滴密度; $F_D (u_g - u_p)$ —水滴单位质量受到的蒸汽阻力, F_D 可以表示为:

$$F_D = \frac{18 \mu_g}{\rho_p} \frac{C_D R e_p}{24} \quad (2)$$

式中: μ_g —蒸汽粘性系数; C_D —阻力系数; $R e_p$ —水滴雷诺数; 水滴雷诺数定义为:

收稿日期: 2009-09-17 修订日期: 2009-10-29

基金项目: 国家高技术研究发展计划基金资助项目(2007 AA05 Z251)

作者简介: 谭 锐(1971—), 男, 重庆人, 西安交通大学硕士研究生。

$$Re_p = [\rho_g d_p |\vec{u}_p - \vec{u}_g|] / \mu_g \quad (3)$$

1.2 计算条件与方法

计算条件为：汽轮机末级静叶进口湿度沿叶高的分布，湿度平均值为 5.71%，水相质量流量为 4 492.8 g/s；其中一次水滴占 94%，主要来源于蒸汽的自发凝结^[5]，二次水滴占 6%，主要是次末级动叶片表面上的水膜在叶片出口边处撕裂及二次雾化形成的。根据文献 [5] 中的方法，计算出末级静叶前的一次水滴平均直径约为 1 μm，假定一次水滴直径为 d_i 的水滴群质量 m_i 与直径等于平均直径 d_m 的水滴群质量 m_m 之比近似服从正态分布^[6]，可以表示为：

$$\frac{m_i}{m_m} = \exp\left[-\pi\left(\frac{d_i}{d_m} - 1\right)^2\right] \quad (4)$$

图 1 是根据式 (4) 计算得到的一次水滴群的质量分布曲线，根据叶栅进口湿度和一次水滴所占比例，计算出平均每秒有 2.0327×10^{17} 个一次水滴进入计算区域进口。

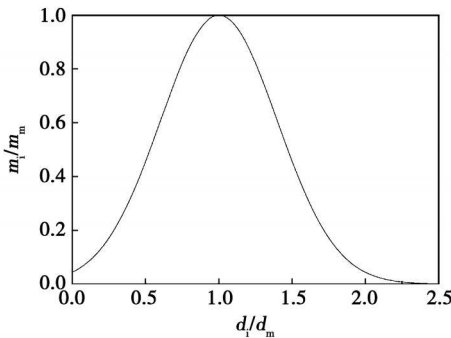


图 1 一次水滴群的质量分布曲线

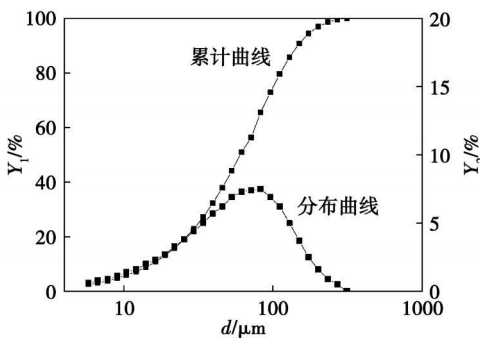


图 2 二次水滴的直径及直径分布曲线

末级静叶栅进口二次水滴的质量流量为 269.57 kg/s，一般认为二次水滴也近似服从正态分布。由于没有二次水滴的分布曲线，本研究根据实验条件下利用 Malvern 粒度仪测量得到的叶栅进口

处的水滴直径及直径分布来进行计算，如图 2 所示，其中 d 是水滴直径， Y_1 是对应累计曲线的水滴体积百分比， Y_2 是对应分布曲线的水滴体积百分比。同样，根据叶栅进口湿度和二次水滴所占比例以及二次水滴的直径分布曲线，可以计算出平均每秒有 2.0231×10^{11} 个大水滴进入计算区域进口。

水滴运动与沉积规律的计算步骤为：

- (1) 根据 600 MW 汽轮机末级静叶的进出口条件，对静叶通道内的蒸汽流场进行数值计算；
- (2) 根据静叶栅进口一次水滴和二次水滴的直径分布曲线以及湿度沿叶高的分布规律，换算出静叶进口各截面的水滴个数及直径大小。由于水滴数目庞大，故按一定的比例缩小进行计算；
- (3) 假定静叶进口各截面的水滴群都是均匀分布的，且水滴进口速度都相同；根据静叶通道内蒸汽流场的计算结果，对每一个水滴进行跟踪并计算出水滴的运动速度、运动方向以及运动轨迹；
- (4) 根据每个水滴最后的坐标位置与叶栅通道壁面的关系，确定水滴是否撞击并沉积在静叶表面上，并统计撞击的水滴个数；
- (5) 将每个沉积水滴的质量按照一定的比例关系进行换算，并对沉积数量进行统计，以确定水滴的沉积量。

1.3 计算结果与分析

利用 Fluent 商用软件对叶栅内各种直径水滴的运动轨迹进行计算，得到了不同直径的水滴运动轨迹图及沉积位置。图 3 是在相对叶高 0.75 截面上的 $13.1 \mu\text{m}$ 水滴运动轨迹。结果表明：水滴直径越小，跟随汽流性越好，保持其运动轨迹的能力越差，越不容易被叶片壁面捕获，主要撞击并沉积在静叶背弧进口区域和内弧出口区域；水滴直径越大，质量越大、运动惯性越大，其运动轨迹几乎近似直线，绝大部分水滴都能撞击到叶片背弧进口和内弧中部表面并沉积下来。

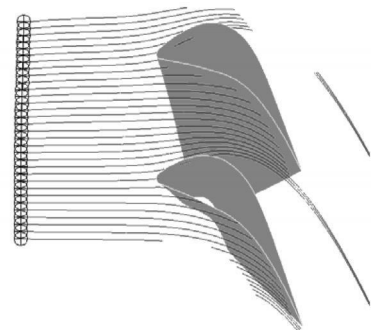


图 3 直径为 13.1 μm 的水滴运动轨迹

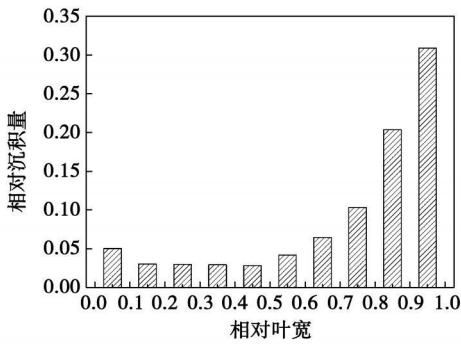


图 4 静叶内弧水滴沉积量沿轴向的分布

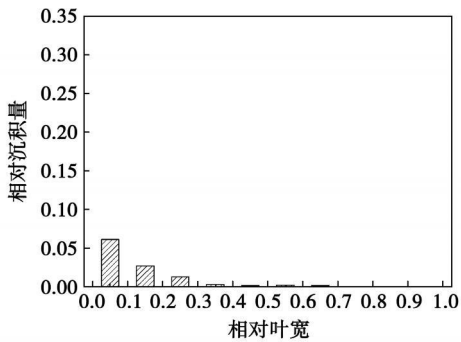


图 5 静叶背弧水滴沉积量沿轴向的分布

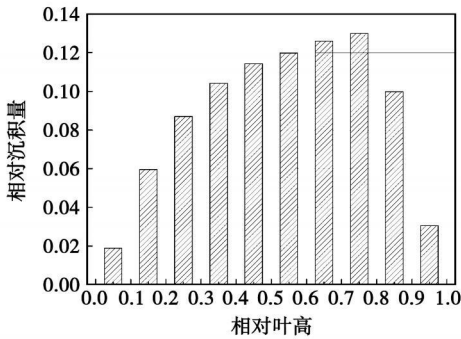


图 6 静叶内弧水滴沉积量沿叶高的分布

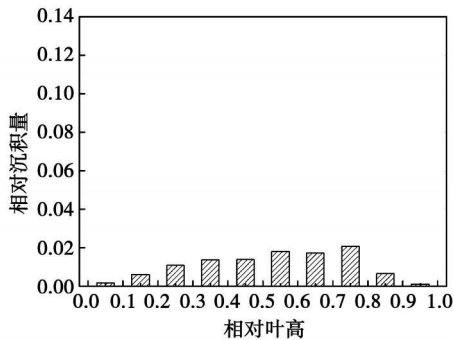


图 7 静叶背弧水滴沉积量沿叶高的分布

图 4~图 7 分别给出了水滴沉积总水量沿叶片轴向与径向位置的分布。可以看出, 在静叶内弧, 水

滴主要沉积区域在相对叶宽 0.7~1.0 相对叶高 0.2~0.9 之间, 沉积总水量约占叶栅进口总水质量的 12.2%; 在静叶背弧, 水滴主要沉积区域在相对叶宽 0~0.3 相对叶高 0.2~0.8 之间, 沉积水量约占进口总水质量的 1.6%。水滴的这种沉积规律为空心静叶去湿缝隙的开设位置提供了理论指导。

2 空心静叶缝隙去湿性能的实验研究

试验条件为: 叶栅进口空气湿度 $\varphi=6.15\%$, 缝隙分别开设在静叶背弧和内弧上, 缝隙宽度 $\Delta=1\text{ mm}$, 角度 $\alpha=45^\circ$ (逆主气流方向)。

图 8 是实验得到的单位长度缝隙抽吸水量与缝隙轴向位置的关系曲线。由图可以看出: (1) 在相同缝隙抽吸压差和叶栅出口气流速度下, 叶片内弧上缝隙的抽吸水量比叶片背弧上缝隙的抽吸水量要大一些。这是因为湿空气中的水滴在叶片内弧上的沉积量远比在叶片背弧上的沉积量大, 造成叶片内弧表面上的水膜流量大, 相应的单位长度缝隙抽吸水量也大。(2) 缝隙位置越靠近叶片出口边, 缝隙的抽吸水量越大。这是因为缝隙开设位置靠近叶片出口边, 抽吸缝隙之前的水滴沉积区域面积大, 相应的水滴沉积量大, 缝隙抽吸量也大。

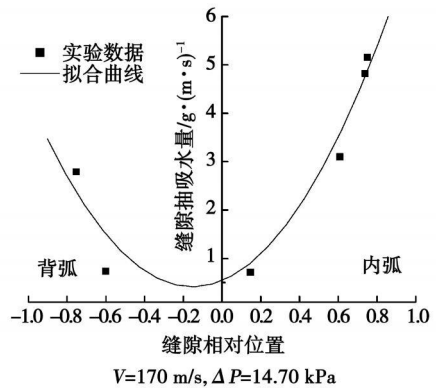


图 8 单位长度缝隙抽吸水量与轴向位置的关系曲线

3 结 论

通过对 600 MW 汽轮机末级静叶栅内的水滴沉积规律的数值计算以及空心静叶缝隙去湿的实验研究, 可以得到以下结论:

(1) 汽轮机叶栅内的水滴直径越小, 气流的跟随性越好, 不容易被叶片壁面捕获; 水滴直径越大, 保持原有运动状态的能力越强, 运动轨迹几乎是一

条直线, 撞击并沉积在叶片表面的可能性越大。

(2) 在静叶内弧, 水滴沉积区域主要分布在相对叶宽 0.7~1.0 相对叶高 0.2~0.9 区间, 沉积总水质量约占叶栅进口总水质量的 12.2%; 在静叶背弧, 水滴沉积区域在相对叶宽 0~0.3 相对叶高 0.2~0.8 区间, 沉积水量约占进口总水质量的 1.6%。

(3) 在本实验条件下, 叶片内弧上缝隙抽吸水量大于背弧上的抽吸水量; 缝隙位置越靠近叶片内弧出口边, 缝隙的抽吸水量也越大。

参考文献:

[1] MOORE M J, SIEVERD NG CH. 透平和分离器中双相流 [M]. 蔡颐年, 译. 北京: 机械工业出版社, 1983.

- [2] CRANE R J. Droplet deposition in steam turbines [J]. Proc Instn Mech Engrs Part C: J Mechanical Engineering Science 2004, 218 (2): 859-861
- [3] HAMED A, TABAKOOV. Erosion and deposition in turbomachinery [J]. Journal of Propulsion and Power 2006, 22 (2): 352-358
- [4] TANUMA T, SAKAMOTO T. The removal of water from steam turbine stationary blades by suction slots [J]. Proc Instn Mech Engrs [C], MechE C423/022 1991, 179-183.
- [5] 姚秀平, 俞茂铮, 孙 弼, 等. 核电 600 MW 汽轮机末级空心静叶去湿缝隙设计研究 [J]. 动力工程, 1998, 18 (4): 7-14.

(编辑 伟)

新技术、新工艺

中国和中亚各国加强能源方面的合作

据《ChinaDaily(中国日报)》2010年6月14日报道, 中国和哈萨克斯坦于6月12日签订协议, 两国将建造一条长约1400 km的天然气管线, 它将与中国和中亚各国之间现有的正在运行的天然气管线相连接。

该项目将有助于满足哈萨克斯坦南部对天然气的需求。两国也将就从 Caspian Sea(黑海)地区和其它中亚国家间通过该管线向中国增加出口天然气的问题进行可行性论证。

专家分析指出: 该协议突出了中国和自然资源丰富的中亚各国间能源合作的重要性。这些国家在中国海外能源战略中将起着越来越重要的作用。

中国和乌兹别克斯坦于6月9日签订了一项协议, 中国每年将从乌兹别克斯坦购买100亿 m³ 天然气。此外两国还签署了关于进一步扩大天然气方面合作非正式协定的备忘录。

中国——中亚天然气管线是中国的第一个用于进口天然气的大型管线项目。它起始于土库曼斯坦——乌兹别克斯坦边境并通过乌兹别克斯坦中部和哈萨克斯坦南部一直延伸到中国的新疆维吾尔自治区。该管线已于2009年12月开始运行。

在新疆的霍尔果斯, 该输气管线与中国第二条西气东输天然气管线连接, 后者长约8653 km, 穿过14个省(自治区)、市和地区, 包括上海和香港。

专家分析认为, 可以预期, 中国未来将进口更多的天然气。到2020年以前, 天然气消耗量将从目前的3.9%增加到中国每年总的一次能源消耗量的10%。

哈萨克斯坦去年超过加拿大, 成为世界上最大的铀矿拥有者。2010年6月12日两国签订了一个供货合同。哈萨克斯坦今后将增加对中国的供铀量。

哈萨克斯坦将向 CGNPC(中国广东核电公司)供应铀。CGNPC目前运行的核电装机容量已占到或超过中国总核电装机容量的40%, 它将与哈萨克斯坦合作共同开发哈萨克斯坦的铀矿。哈萨克斯坦已探明的铀储量约为40000 t。

在6月12日签订的第三份协议将考虑哈萨克斯坦和中国之间关于和平发展核能的合作。

中国计划把它的核电装机容量在2020年增加到70~80 GW (G=10⁹)。中国现在已有11个核电反应堆在运行中。这些反应堆总装机容量为9.1 GW, 约构成国家电力生产(火电、水电、核电、地热发电和风力发电等等)总装机容量的1%。

(吉桂明 摘译)

驻涡燃烧室前驻体后端面冷态流场数值模拟 = Numerical Simulation of the Cold-state Flow Field on the Rear End Surface of a Front Centerbody in a Trapped Vortex Combustor [刊, 汉] / ZHONG Jing-jun, LU Shi-qing (College of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, China, Post Code: 116026) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5). — 482 ~ 486

As far as a centerbody type trapped vortex combustor is concerned, a proper geometrical deformation on the rear end surface of the front centerbody can provide more favorable covering conditions for the trapped vortices between centerbodies, lending themselves better to forming and stabilizing the trapped vortices, weakening the interference among the vortices and enhancing the uniformity of the vortex distribution. By using a numerical simulation method, nine patterns of the flow fields formed by modeling the rear end surface were studied in the cold state. In addition, the flow characteristics inside the trapped vortex cavity were studied in detail. It has been found that when the central modeling of the convex end surface is being performed, the total pressure loss of the flow field is low and the vortices in the trapped vortex cavity become stable and rationally and uniformly distributed. The research results can provide a basis for setting up a front centerbody jet and offer assistance and support for organizing and utilizing the vortex configuration to stabilize the flames. Key words: trapped vortex combustor; rear end surface of a centerbody; cold-state flow field

汽轮机末级静叶水滴沉积规律与缝隙去湿研究 = Study of the Law Governing the Water Droplet Deposition and Wetness Removal From the Stationary Blades at the Last Stage of a Steam Turbine [刊, 汉] / TAN Rui, WANG Xin-jun, GUAN Pan-long, et al (Turbomachinery Research Institute, Xian Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5). — 487 ~ 490

By using software Fluent, numerically calculated was the law governing the 3-D water droplet movement and deposition in the last stationary blade cascade of a 600 MW steam turbine with the locations of the deposition of the water droplets on the stationary blades in the axial and radial direction being determined. Subsequently, an experimental study was conducted of the water removal performance of the suction from slots on the hollow blade cascade. It has been found that the water quantity deposited on the concave surface of a stationary blade accounts for 12.2% of the total water quantity at the inlet of the cascade while that deposited on the convex surface of a stationary blade occupies 1.6% of the abovementioned total water quantity. The water quantity sucked through the slots on the concave surface of a stationary blade is greater than that on the convex surface. The closer the location of the slots to the trailing edge of the stationary blade, the greater the water quantity being sucked. With an increase of the width of the slots, the water quantity sucked through the slots will first decrease and then increase. When the width of the slots is about 3.0 mm, the water quantity will reach a relatively low value. The water quantity sucked through the slots will increase with an increase of the suction pressure difference and quickly decrease with an increase of the main stream speed. Key words: steam turbine; water droplet movement and deposition; hollow stationary blade; wetness removal from slots; stationary blade in the last stage