

缝隙位置对空心静叶去水性能影响的试验研究

王新军¹, 卢 澄¹, 刘建成², 张俊博²

(1. 西安交通大学 叶轮机械研究所 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所 蒸汽轮机装置研究室, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘 要: 在湿空气平面叶栅缝隙抽吸试验装置上, 对汽轮机空心静叶抽吸缝隙的去水性能进行了试验研究。试验条件为: 叶栅进口空气湿度为 7.94%, 水滴直径在 1.5~150 μm 之间, 叶栅出口气流速度为 170 m/s, 缝隙宽度为 1.0 mm, 缝隙角度为 45°, 缝隙位置分别位于静叶的内弧和背弧。试验结果表明: 随着缝隙相对位置的增大, 缝隙抽吸水量增大; 在相同的抽吸压差下, 静叶内弧上单位长度缝隙的抽吸水量大于背弧缝隙的抽吸水量; 靠近静叶内弧出口边的抽吸缝隙的去水性能最好; 另外, 随着抽吸压差的增大, 缝隙抽吸水量也增大。

关 键 词: 汽轮机; 空心静叶; 缝隙位置; 抽吸压差; 抽吸水量

中图分类号: TK261 文献标识码: A

引 言

大功率汽轮机的末几级、核电汽轮机的全部或大部分级的共同特点都是在湿蒸气状态下工作^[1], 湿蒸气一方面使级气动效率降低; 另一方面使动叶片受到高速水滴的不断冲击, 造成叶片的水蚀, 甚至断裂^[1~4]。有效地去除汽轮机中的水分, 防止动叶水蚀是汽轮机安全可靠运行和提高整个动力装置热效率的关键技术之一。防止汽轮机动叶水蚀方法有两类: 一类是被动的采用各种表面抗蚀技术; 另一类是各种主动的除湿技术。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^[3~4]。如果设计合理, 去湿缝隙可以去除大部分对动叶有危害的水分, 不仅减缓或消除动叶的水蚀,

而且还可以减少大水滴所造成的摩擦和制动损失。

影响缝隙去湿/水效率的几何参数有缝隙开设的位置、缝隙宽度与长度、角度和形状^[3~4]。简单来说, 缝隙开设位置与水滴沉积位置有很大关系, 合适的缝隙位置能够最大限度地去除叶片表面上的流动水分。在缝隙宽度为 0~1.5 mm 时, 缝隙去水效率随宽度的增大而增大; 在缝隙宽度约为 1.5~2.0 mm 时, 去水效率存在一个较低点; 继续增大缝隙宽度, 去水效率才迅速增大。较小的缝隙角度避免了气流和水膜流动的突然转向, 有利于缝隙的抽吸; 而较大的缝隙角度在缝隙进口处易产生类似于水膜撕裂时的现象, 导致缝隙去水性能的恶化, 效率下降; 增加过渡圆角也有利于水膜的抽吸。本文在湿空气平面叶栅缝隙抽吸试验装置上, 研究了空心静叶缝隙开设位置对去水性能的影响规律。

1 湿空气平面叶栅缝隙抽吸试验装置

图 1 是湿空气平面叶栅缝隙抽吸试验装置系统图, 它由气源、稳压室、试验段及试验叶栅、造湿系统、抽真空系统以及测量系统等部分组成。C80 风机提供的压缩空气经调节阀、空气管道进入稳压室; 在加速段膨胀加速后进入试验段通道; 随后, 具有一定压力和速度的湿空气通过平面试验叶栅通道并排向大气。试验叶栅出口气流速度可以通过 C80 风机的排气阀、调节阀进行调节, 并利用气流的全压、静压及全温, 通过计算得到气流速度。造湿系统是由水泵、5 个雾化喷嘴、调节阀以及相应的水管路系统组成, 水泵提供的压力水通过喷嘴将水在气流中雾化形成湿空气。

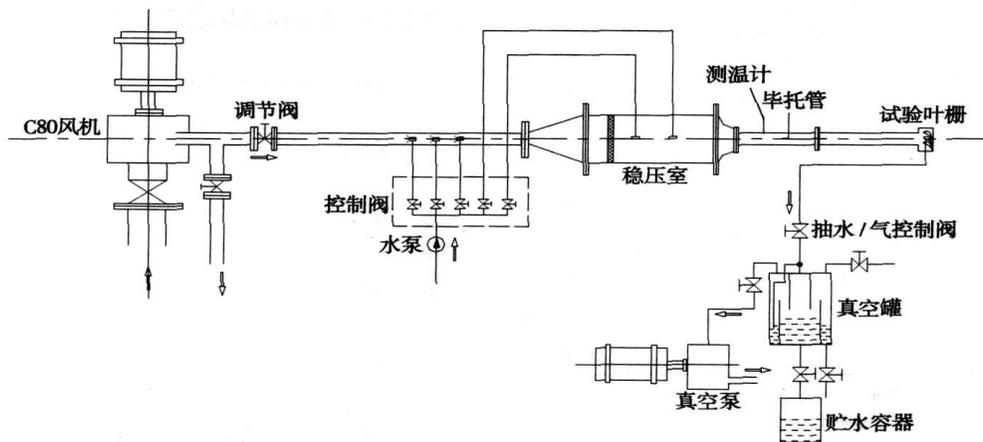


图1 湿空气平面叶栅缝隙抽吸试验装置系统图

在平面叶栅缝隙抽吸试验过程中,湿空气中的水滴在随气流通过试验叶栅通道时,由于惯性作用和扩散作用撞击并沉积在叶片表面上,在叶片表面逐渐形成膜状流动。叶片上的流动水膜在抽吸缝隙处受缝隙内、外抽吸压差的作用,部分水分和空气同时通过缝隙被抽吸掉,剩余部分则越过缝隙流向叶片出口边,在叶片出口边受气流切应力的作用撕裂形成具有一定分布的粗糙水滴,这些水滴随同气流排向大气中。抽吸压差是由真空泵不断地抽吸真空罐里空气,在真空罐中形成一定的真空,造成叶片缝隙表面与真空罐之间的压差,压差的大小是通过调节阀来控制。缝隙的抽吸水量则通过阀门排放到容器中并测量出一定时间内的抽吸水量。

试验叶栅进口的水滴直径及直径分布是利用 Malvern 粒度分析仪来进行测量的,并根据空气中水滴的容积浓度计算得到试验叶栅进口的空气湿度。

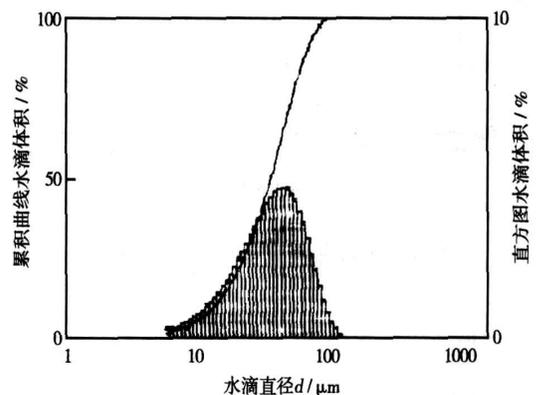
本文中:抽吸压差 Δp 指的是去湿缝隙表面上的压力与空心静叶内部压力的差值;气流速度 U_e 是指叶栅出口的气流速度;缝隙宽度 Δ 是指沿气流方向叶片表面上缝隙的宽度;缝隙角度 α 则为缝隙中心线与叶片表面的夹角;缝隙长度 L 是指抽吸缝隙沿叶片高度方向的长度;缝隙单位长度抽吸水量是指缝隙在单位时间抽吸掉的水质量流量 G_d 与缝隙长度 L 的比值。

2 试验结果及分析

2.1 叶栅前的水滴直径及直径分布

图2是在水压为0.93 MPa、开启4个雾化喷嘴、叶栅出口气流速度 $U_e = 170 \text{ m/s}$ 条件下,利用 Malvern 粒度分析仪测量得到的叶栅前水滴直径及

直径分布曲线。可以看出,水滴的 Sauter 平均直径为 $23.21 \mu\text{m}$,直径分布在 $1.5 \sim 150 \mu\text{m}$ 之间,其中约95%的水滴直径小于 $100 \mu\text{m}$;相应的叶栅进口空气湿度为7.94%,且试验叶片表面有水滴沉积形成的流动水膜。



$U_e = 170 \text{ m/s}$; 1号~4号喷嘴开启

图2 试验叶栅前湿空气中的水滴直径及直径分布

2.2 静叶栅通道内水滴的沉积位置与沉积率

根据前面 Malvern 粒度分析仪测量得到的叶栅前水滴直径及直径分布数据,在与试验相同的条件下,应用拉格朗日方法计算确定了叶栅内水滴的沉积位置和沉积率,如图3~图6所示。图中水滴沉积相对量的定义为:叶片内弧(或背弧)表面各位置沉积水量与总沉积水量的比值。

沉积率定义为:

$$P(x) = M(x) / MT$$

其中: MT —撞击到叶片内弧(背弧)上所有水滴质量; $M(x)$ — MT 中沉积到叶片内弧(或背弧)上相对叶宽 $0 \sim x$ 这一区域上的水滴质量。

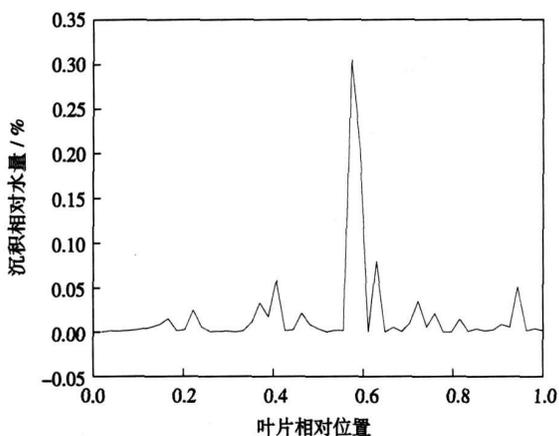


图3 叶片内弧各位置的水滴沉积相对量

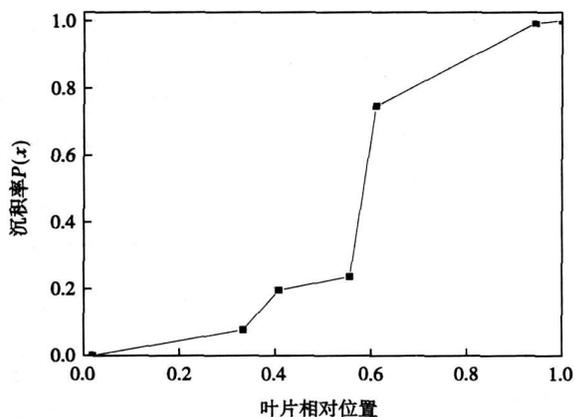


图4 叶片内弧表面的水滴沉积率

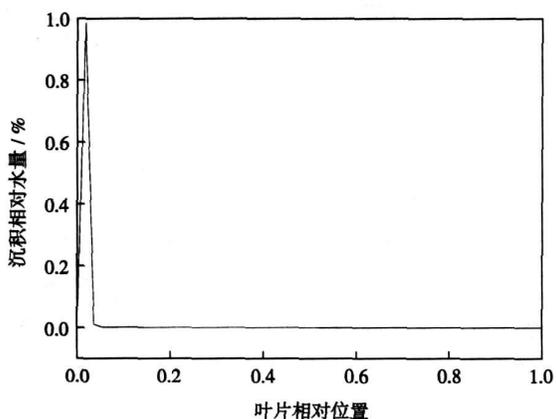


图5 叶片背弧各位置的水滴沉积相对量

可以看出,水滴在叶片内弧上的沉积量主要集中在内弧中部,其沉积率是逐渐增大;而在叶片背弧,水滴主要沉积在进口区域,其沉积率很快增大到1.0。实际上,虽然小直径水滴的数目庞大,但沉积的质量相当有限,叶片表面上的水滴沉积量主要还

是大直径水滴起决定作用。

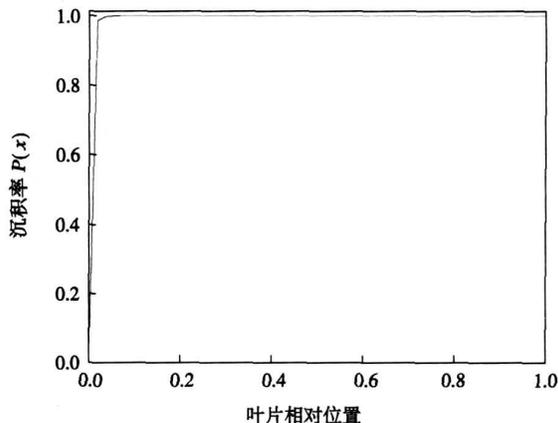


图6 叶片背弧表面的水滴沉积率

2.3 缝隙位置对缝隙抽吸水量的影响

空心叶栅缝隙抽吸试验是在叶栅进口空气湿度为 $y=7.94\%$, 叶栅出口气流速度为 $U_e=170 \text{ m/s}$ 条件下进行的。所有抽吸缝隙的宽度均为 $\Delta=1 \text{ mm}$, 角度为 $\alpha=45^\circ$ (逆主气流方向), 抽吸缝隙分别开设在叶片背弧(相对位置为: 0.033 4、0.273 2)和内弧(相对位置为: 0.572 5、0.690 8)上。缝隙的抽吸压差 Δp 则分别为 14.70、17.64 kPa。另外,由于原始叶型的尾部很薄,在叶片出口边附近无法开设抽吸缝隙,将空心试验叶片的尾部加厚,并在加厚叶片内弧(相对位置为: 0.803 7)和出口边(相对位置为: 0.998 7)开设了两个抽吸缝隙。考虑到加厚叶片的型线与原始叶片的型线很接近,故将加厚叶片的试验数据与原始叶片的试验数据绘在同一个曲线图上,如图7所示。

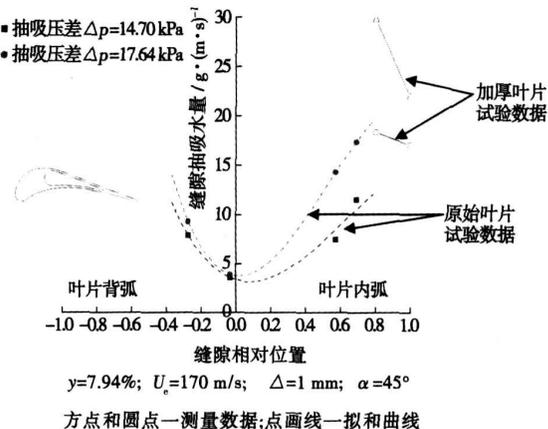


图7 缝隙单位长度抽吸水量与缝隙位置的关系曲线

在试验过程中, 为了避免叶栅上、下两个端壁上的流动水膜对缝隙抽吸水量测量的影响, 将抽吸缝隙沿叶片高度方向的位置控制在叶片中部区域, 缝隙距上、下端壁各 11 mm, 有效抽吸缝隙长度为 $L=58$ mm。

图 7 是单位长度缝隙抽吸水量与缝隙位置的关系曲线。可以看出: (1) 在相同的抽吸压差下, 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。这是因为湿空气在叶栅通道运动过程中, 空气所携带的水滴在叶片内弧上的沉积量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) 在相同的抽吸压差下, 抽吸缝隙的位置越靠近叶片出口边, 缝隙单位长度的抽吸水量也越大。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, 如图 3~图 6 所示。但是, 当抽吸缝隙的位置开设在空心叶片出口边时, 由于缝隙的开设方向与主气流方向一致, 则缝隙抽吸方向与主气流方向相反。高速流动的主气流可能将叶片出口边(抽吸缝隙处)的部分水膜撕裂并携带向下游运动, 造成缝隙的抽吸水量有所减小。(3) 在相同的抽吸缝隙位置下, 随着缝隙抽吸压差的增大, 单位长度缝隙抽吸水量也增大, 这种缝隙单位长度抽吸水量与抽吸压差的变化规律与平板空心叶片的缝隙抽吸试验所

得到的结论是一致的^[4]。

3 结 论

(1) 试验叶栅进口水滴的直径分布在 1.5~150 μm 间, 其中约 95% 的水滴直径小于 100 μm , 水滴 Sauter 平均直径为 23.21 μm , 叶栅进口空气湿度为 7.94%, 且试验叶片表面有水滴沉积形成的流动水膜, 表明本试验条件基本符合汽轮机中的实际情况。

(2) 随着缝隙相对位置的增大, 缝隙抽吸水量增大; 在相同的抽吸压差下, 静叶内弧上单位长度缝隙的抽吸水量大于背弧缝隙的抽吸水量; 另外, 在静叶内弧靠近出口边处开设抽吸缝隙, 其抽吸性能最好。

(3) 随着缝隙抽吸压差的增大, 单位长度的缝隙抽吸水量也有所增大。

参考文献:

- [1] MOORE M J, SIEVERDING C H. 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] 蔡颐年, 王乃宁. 湿蒸气两相流[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1985.
- [3] 姚秀平. 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.
- [4] 王新军. 汽轮机空心静叶去湿缝研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1999.

(编辑 伟)

能源利用

太钢的高炉煤气联合循环动力装置

据《Gas Turbine World》2007 年 3~4 月号报道, 与 Marubeni 联合的三菱重工同太原钢铁集团签订合同, 为 50 MW 联合循环电站提供设备。

该联合循环将由一台 M251S 燃气轮机、汽轮机、余热锅炉和一台发电机组成。

三菱重工将提供 30 MW 的 M251S 燃气轮机, 其燃料是来自太钢高炉的低热值煤气。

汽轮机将由杭州汽轮机厂供应, 余热锅炉由太原钢铁厂自行采购。

M251S 燃气轮机装备有完善的燃烧器、专门的燃料处理设备和快速反应的燃料控制系统, 以保证高炉煤气稳定的燃烧。

该联合循环电站计划于 2008 年 8 月投入运营。

(吉桂明 供稿)

高温气体辐射特性计算模型=A Survey of Models for the Calculation of Radiation Characteristics of High-temperature Gases[刊, 汉]/YIN Xue-mei, LIU Lin-hua (College of Energy Science and Power Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(5). — 473 ~ 479

An accurate calculation of radiation characteristics of high-temperature gases is of major significance in such engineering applications as combustion and infrared detection etc. The current research results of gas radiation characteristics both at home and abroad are described. The fundamental theory and main features of the methods for calculating the radiation characteristics of three kinds of gases are analyzed with the emphasis on the newly developed full-spectrum k-distribution (FSK) model. Summarized and tabulated are the applicable conditions, calculation accuracy and speed of various models for the calculation of radiation characteristics. The authors have calculated the wall surface heat flux in the steam and carbon dioxide mixed gas layer between two parallel plates and presented a chart comparing the relative-error difference between the calculation results of various models and those of a line-by-line calculation. The selection of proper methods for the calculation of radiation characteristics of gases under different conditions is proposed and in the light of the shortcomings of the current models, the future research trend also forecasted. **Key words:** gas radiation characteristics, computational model, k-distribution model

缝隙位置对空心静叶去水性能影响的试验研究= Experimental Study of the Effect of Suction Slot Location on Water Removal Performance of Hollow Stationary Blades[刊, 汉]/WANG Xin-jun, LU Cheng (National Key Laboratory on Multi-phase Flow in Power Engineering, Turbomachinery Research Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049), LIU Jian-cheng, ZHANG Jun-bo (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(5). — 480 ~ 483

On the slot suction test rig of a humid-air plane-cascade, an experimental study was conducted of the water removal performance of the suction slots on hollow stationary blades of a steam turbine. The test conditions are given as follows: the air humidity at the cascade inlet, 7.94%; water droplet diameter, between 1.5 to 150 μm , airflow velocity at the cascade outlet, 170 m/s; width of the suction slot, 1.0 mm, angle of the suction slot 45° with the suction slots being located at the suction and pressure side of the stationary blades respectively. The test results show that with an increase in relative location of the suction slots, the water quantity sucked through the slots will increase and under a same suction pressure difference, the water quantity sucked through a unit length of a slot on the concave surface of a stationary blade is greater than that on the convex surface. The suction slots close to the water outlet on the concave side of a stationary blade enjoy an optimum water-removal performance. Furthermore, with an increase of the suction pressure difference, the water quantity sucked through the slots will also increase accordingly. **Key words:** steam turbine blade, hollow stationary blade, suction slot location, suction pressure difference, water quantity sucked

导叶预旋角对叶轮/扩压器相干的影响=A Study of the Effect of Inlet Guide Vane (IGV) Prewhirl Angles on Impeller/Diffuser Interaction[刊, 汉]/ZHOU Li, CAI Yuan-hu (College of Power and Energy Source, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, Post Code: 710072), XI Guang (College of Energy Source and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(5). — 484 ~ 489

Under different inlet-guide-vane (IGV) prewhirl angles and by using an unsteady approach, a numerical simulation was conducted of the unsteady interactions among the following three components: IGV, impeller and diffuser, moreover, a comparison with the test results was performed. Studied was the effect of IGV prewhirl angles on the flow and unsteadiness inside the impeller and diffuser. Meanwhile, the mechanism of interactions among the above-mentioned three moving and stationary components was also explored. The results show that the calculation results are in good agreement with the test ones. At a same flow rate, the wake flow of the IGV and the unsteady function of a large-sized vortex cluster will