

缝隙吹扫对静叶出口二次水滴直径影响的试验研究

王新军¹, 卢澄¹, 李振光¹, 高铁瑜¹, 刘建成², 张俊博²

(1. 西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安; 2. 哈尔滨第七〇三研究所汽机室, 150036, 哈尔滨)

摘要: 在缝隙热气流吹扫条件下, 利用 Malvern 粒度分析仪对空心静叶尾迹区的二次水滴直径及直径分布进行了测量. 实验参数如下: 进口空气湿度为 7.94%, 出口气流速度为 170 m/s, 缝隙宽度为 1.0 mm, 缝隙角度为 45°, 吹扫气流温度比主气流温度高 50 °C, 缝隙位置分别位于静叶的内弧和背弧. 试验结果表明: 缝隙吹扫可以使静叶尾迹区的二次水滴的最小直径和最大直径都有所减小, Sauter 平均直径减小 33.4%, 且水滴直径分布范围变窄; 吹扫压差越大, 二次水滴的直径就越小, 直径分布也越窄, 有利于减轻或防止动叶的水蚀; 静叶背弧上缝隙吹扫的去水效果优于内弧上缝隙吹扫的去水效果.

关键词: 缝隙吹扫; 二次水滴; 去水性能

中图分类号: TK261 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)07-0764-04

Experimental Study on Effects of Slot Hot Gas Blowing on Secondary Water Droplet Diameter Downstream of the Stationary Blade

Wang Xinjun¹, Lu Cheng¹, Li Zhengguang¹, Gao Tieyu¹, Liu Jiancheng², Zhang Junbo²

(1. Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Department of Steam Turbine, Harbin No. 703 Research Institute, Harbin 150036, China)

Abstract: With slot hot gas blowing, the secondary water droplet diameters and its distributions downstream of the hollow stationary blade were measured by Malvern droplet and particle size analysers. The tests were conducted at inlet gas wetness of 7.94%, an outlet gas velocity of 170 m/s, a slot width of 1.0 mm, a slot angle of 45°, temperature difference between hot gas and main gas of 50 °C, and the slot position on concave or convex of the hollow stationary blade surface. The results show that the slot hot gas blowing could reduce the minimum and maximum diameters of secondary water droplets downstream of the stationary blade, The Sauter mean diameter of secondary water droplets could be reduced by 33.4%, and the water droplet diameter distribution became narrow. The larger the blowing pressure difference, the smaller the secondary water droplets, and the narrower the water droplet diameter distribution. This may be beneficial to reducing or preventing the rotational blade erosion. In addition, the slot located on the convex surface of hollow stationary blade was better than that on the concave surface in water removal.

Keywords: slot gas blowing; secondary water droplet; water removal performance

随着汽轮机单机容量的增大及核电汽轮机的发展, 汽轮机低压末几级动叶片的水蚀问题越来越严

重. 研究表明^[1-2]: 静叶表面上的溪流或水膜在出口边撕裂及破裂形成的二次水滴是造成动叶水蚀

的根源,有效去除汽轮机中的水分,防止动叶水蚀是汽轮机安全运行和提高动力装置热效率的关键技术之一.汽轮机的除湿方法有多种^[3-5],空心静叶缝隙热气流吹扫是防止动叶水蚀的有效方法之一^[1,3],该方法可以部分去除静叶表面上的流动水膜,从而减少静叶出口边液膜撕裂及破裂所形成二次水滴的数量和直径,达到减轻或防止动叶水蚀的目的.目前,有关缝隙吹扫方面的最新研究未见报道.本文在湿空气平面叶栅两相流动试验装置上,利用 Malvern 粒度分析仪对缝隙吹扫条件下的空心静叶尾迹区气流所携带的二次水滴直径及直径分布进行了测量和分析.

1 湿空气平面叶栅缝隙吹扫试验装置

图1是湿空气平面叶栅缝隙吹扫试验装置系统图,它由气源、稳压室、试验段及试验叶栅、造湿系统、加热吹扫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.叶栅出口的气流速度可以通过风机的排气阀、调节阀进行调节,并利用 U 型管和温度计测量气流的全压、静压及全温(最大测量误差小于1%),通过计算得到气流速度.造湿系统是由水泵、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在空气流中雾化形成湿空气.

在缝隙热气流吹扫试验过程中,湿空气中的水滴在随空气通过试验叶栅通道时,由于惯性和扩散作用沉积在叶片表面上,并在叶片表面逐渐形成膜状(或溪状)流动.叶片上的流动水膜受空心静叶内部热气流加热和缝隙吹扫的双重作用,部分水膜吸热并蒸发成蒸汽,部分水膜被热气流吹离静叶表面,并被主气流吹散,再次雾化成具有一定直径分布的水滴.剩余部分流动水膜(或溪状流)则越过缝隙流

向叶片出口边,并在叶片出口边撕裂及破裂形成二次水滴.用于加热吹扫的热空气由空气泵、电加热器、小型稳压室及一些调节阀来提供.空气泵不断地将空气送入加热器中,加热器将空气加热到一定的温度,小型稳压室用来稳定压力并且调节热空气到需要的温度.叶栅进、出口的水滴直径及直径分布是利用 Malvern 粒度分析仪测量的,并根据水滴的容积浓度计算得到叶栅进口的空气湿度.

2 静叶尾迹区水滴的二次雾化过程分析

汽轮机中的水滴随着汽流在叶栅通道运动的过程中,都程度不同地由蒸汽中分离出来.直径较大的水滴由于惯性撞击沉积到叶片表面上.直径较小的水滴则由于受汽流旋涡的影响而被带入流场的边界层附近,依靠布朗运动或惯性运动穿越边界层而撞击并沉积在叶片表面上,这种方式称为扩散沉积.这些沉积在叶片表面上的水滴逐渐形成厚度为 10~300 μm 的溪流或水膜^[6-7].

沉积在动叶上的水膜受离心力的作用被甩向汽缸壁面,但沉积在静叶表面上的水膜,由于受汽流切应力的作用而向叶片出口边运动,并在出口边撕裂形成大分散度的粗糙水滴.粗糙水滴在从静叶栅向动叶栅加速运动的过程中,形状不断发生变化,当保持水滴稳定的表面张力小于汽流与水滴之间的相对速度所形成的引起水滴变形、破裂的气流阻力时,液团或粗糙水滴可能发生二次破裂形成二次水滴.图2是用高速摄影机拍摄的一个典型二次雾化过程.由于静叶尾迹区内水滴的质量较大,它们不可能被加速到接近汽流的速度,于是就撞击在动叶片前缘背面上,造成动叶水蚀.液团或水滴的变形及二次破裂主要发生在静叶叶片出口边外 80 mm 的范围内^[6],在 100 mm 以后的水滴已基本处于稳定.

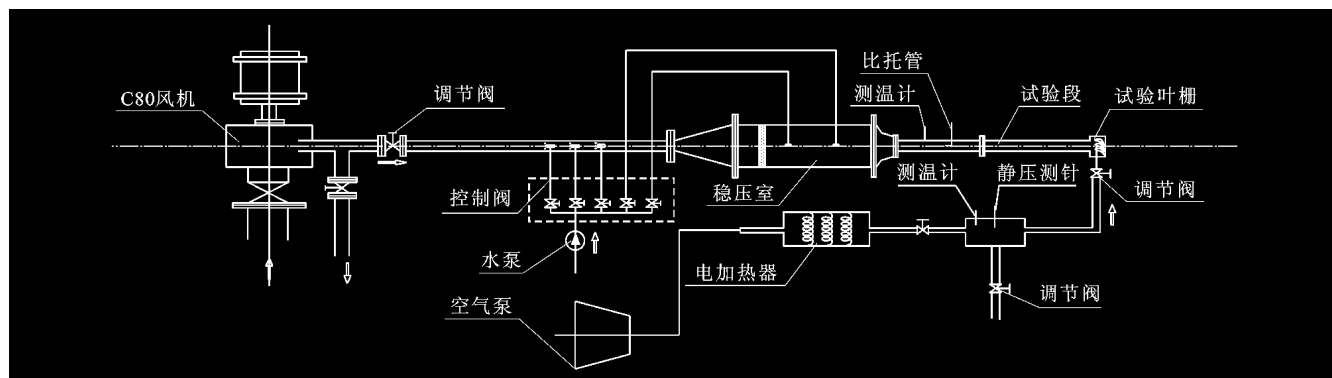


图1 湿空气平面叶栅缝隙吹扫试验装置系统图

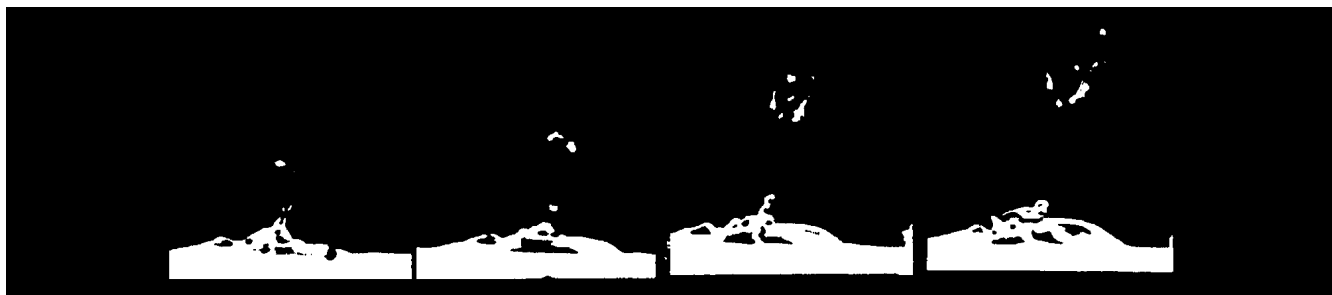


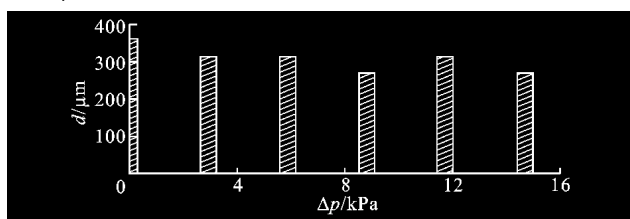
图2 静叶尾迹区水滴的二次雾化过程图

3 试验结果及分析

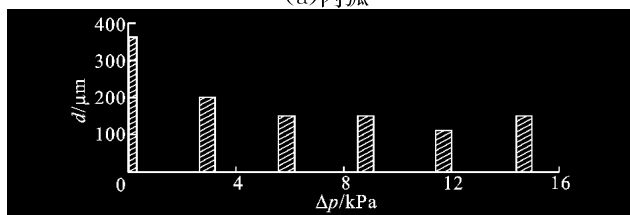
3.1 缝隙热气流吹扫对二次水滴直径及直径分布的影响

试验条件为:叶栅进口气流湿度 $y=7.94\%$, 叶栅出口气流速度 $U_e=170$ m/s, 吹扫缝隙宽度 $\Delta=1.0$ mm, 吹扫缝隙角度 $\alpha=45^\circ$ (顺主气流方向), 主气流温度 $t_1=25^\circ\text{C}$, 热气流温度 t_2 高于主空气流温度 50°C , t_1 和 t_2 是在气流稳定后通过温度计测量的, 吹扫缝隙位置分别位于空心试验叶片的内弧和背弧。

图3是在不同试验条件下测量得到的空心静叶尾迹区二次水滴的直径分布, 图中 d 为水滴直径。图4是典型的二次水滴直径分布和累计曲线图: 左纵坐标为直径小于 d 的水滴体积占水滴总体积的百分比 φ_a , 即累计曲线的坐标; 右纵坐标为某一直径范围内的水滴体积占总体积的百分比 φ_b , 即水滴分布曲线的坐标。从图3和图4可以看出: 在没有缝隙热气流吹扫情况下, 静叶尾迹区二次水滴直径分布范围为 $1.50\sim 362\ \mu\text{m}$ (见图4a); 当吹扫缝隙开设在叶片内弧时, 二次水滴直径分布范围为 $1.50\sim 270\ \mu\text{m}$ (见图4b)。当吹扫缝隙开设在叶片背弧时,



(a) 内弧

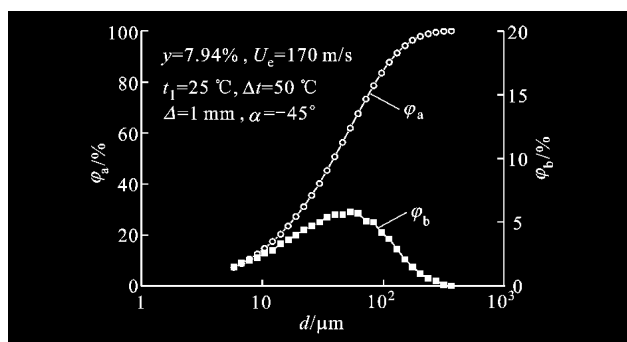


(b) 背弧

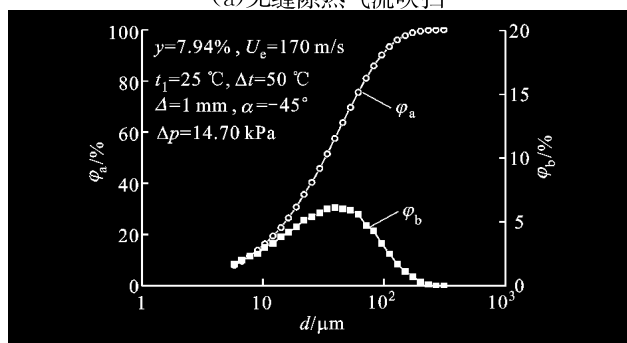
图3 静叶尾迹区二次水滴的直径分布范围

二次水滴直径分布范围为 $1.50\sim 150\ \mu\text{m}$ (见图4c)。显然, 缝隙热气流吹扫使静叶尾迹区二次水滴的直径分布范围变窄, 平均直径有所减小。其他试验工况下测量得到的结果同样表明, 缝隙热气流吹扫对水滴直径及直径分布有类似的影响。

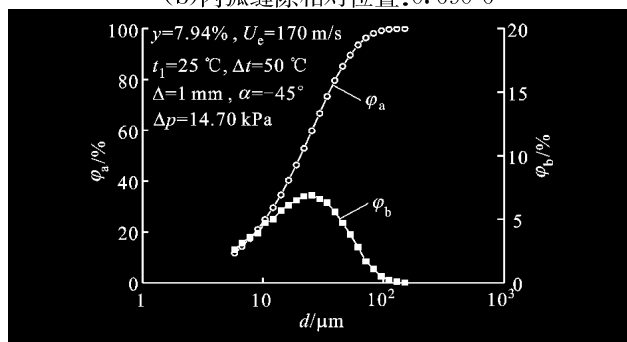
试验发现: 如果没有缝隙热气流吹扫, 叶片表面上的水分是膜状流动, 水膜在叶片出口边的撕裂是



(a) 无缝隙热气流吹扫



(b) 内弧缝隙相对位置: 0.690 6



(c) 背弧缝隙相对位置: 0.690 6

图4 叶栅出口水滴直径及直径分布

膜状撕裂,形成的粗糙水滴直径比较大,因而粗糙水滴发生二次破裂形成的二次水滴直径和直径分布范围也比较大;当存在缝隙热气流吹扫时,一方面,空心叶片内的热气流通过叶片壁面将热量传递给流动水膜,使部分流动水膜吸热后蒸发变成蒸汽,另一方面,缝隙吹扫可以将部分水膜吹离叶片表面,使缝隙后叶片表面的流动水量减少,从而使叶片尾迹区二次水滴的数目和直径减小;但是,被热气流吹离叶片表面的部分水分形成的水滴将随主气流一起流过叶栅通道,使叶片尾迹区的水滴总数目变化不大,只是水滴的直径分布范围和水滴平均直径有所减小;吹扫压差越大,缝隙吹掉的水量也越大,相应的叶片尾迹区二次水滴直径分布越窄,平均直径越小。

3.2 吹扫压差和吹扫缝隙位置对叶栅出口水滴 Sauter 平均直径 $D[3,2]$ 的影响分析

从图5可以看出:在无缝隙吹扫时,二次水滴的 $D[3,2]$ 为 $17.10\ \mu\text{m}$;吹扫缝隙开在叶片内弧(相对位置:0.690 6)时,二次水滴的 $D[3,2]$ 随吹扫压差的增大而略为减小,当吹扫压差为 $14.70\ \text{kPa}$ 时,水滴的 $D[3,2]$ 为 $15.65\ \mu\text{m}$,与无吹扫缝隙相比, $D[3,2]$ 减小幅度为 8.5% ;将吹扫缝隙开在叶片背弧(相对位置:0.690 6)时,二次水滴的 $D[3,2]$ 也随吹扫压差的增大而减小,当吹扫压差为 $14.70\ \text{kPa}$ 时,水滴的 $D[3,2]$ 为 $11.39\ \mu\text{m}$,减小幅度高达 33.4% ,表明在空心叶片背弧开设缝隙的去水性能要优于内弧开设缝隙的去水性能。

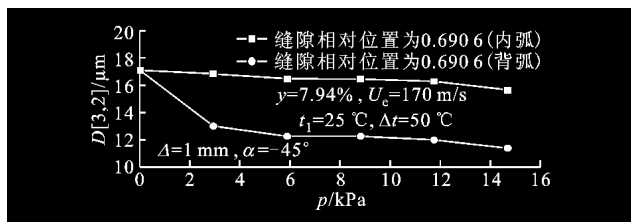


图5 吹扫压差和吹扫缝隙位置对叶栅出口水滴 Sauter 平均直径的影响

出现这种现象的原因是:叶片内弧缝隙的热气流吹扫虽然将部分水膜吹离叶片表面,但由于叶片壁面是向内弧弯曲,吹离的水分在随主气流向下游流动时可能再次撞击并沉积到叶片内弧表面上,气流吹扫的作用没有充分发挥出来;在叶片背弧开设吹扫缝隙,吹离的水分在随主气流向下游流动的过程中,离开叶片背弧壁面越来越远,不易再次沉积到叶片背弧,吹扫缝隙之后的叶片背弧表面上流动水

膜减小,叶片出口撕裂形成的水滴直径变小,且直径分布也变窄。

4 结 论

(1) 汽轮机空心静叶缝隙热气流吹扫可以使静叶尾迹区的二次水滴最小直径和最大直径都有所减小,且直径分布范围也变窄。缝隙吹扫压差越大,二次水滴的直径就越小,直径分布也越窄。

(2) 静叶尾迹区二次水滴的 Sauter 平均直径随吹扫压差的增大有所减小。

(3) 空心叶片背弧开设缝隙的去水性能要优于内弧开设缝隙的去水性能。

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. 湿蒸汽两相流[M]. 西安:西安交通大学出版社,1985.
- [3] 刘建成,林志鸿,闻雪友,等. 汽轮机内部除湿技术的发展[J]. 热能动力工程,2005, 20(1):1-5.
Liu Jiancheng, Lin Zhihong, Wen Xueyou, et al. Recent advances in the technology of moisture removal in steam turbine [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005, 20(1):1-5.
- [4] Tanuma T. The removal of water from steam turbine stationary blades by suction slots[C] // ImechE. London, Britain: Proc. Inst. Mech. Eng., 1991: 179-199.
- [5] 王新军,高铁瑜,徐廷相. 缝隙抽吸对二次水滴直径影响的试验研究[J]. 汽轮机技术,2004, 46(6):444-446.
Wang Xinjun, Gao Tiedu, Xu Tingxiang. Experimental study on effects of suction on secondary water droplet diameter and its distribution [J]. Journal of Turbine Technology, 2004, 46(6):444-446.
- [6] 孔琼香. 静叶出口边液膜的撕裂及液滴的二次破裂[D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院,1990.
- [7] 王新军,李炎峰,徐廷相. 缝隙抽吸对液膜撕裂特性影响的实验研究[J]. 中国工程热物理学报,2004, 25(4): 616-618.
Wang Xinjun, Li Yanfeng, Xu Tingxiang. The Effects of water suction from suction slot on tearing of water film at trailing edges of blade [J]. Heat Transfer Asian Research, 2005, 34(6):380-385.

(编辑 王焕雪)