

汽轮机静叶表面水膜缝隙抽吸的试验研究

李春国¹, 王新军¹, 关盼龙¹, 苏鹏飞¹, 孙弼¹, 周洪宇²

(1. 西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安; 2. 东方汽轮机有限公司设计处, 618000, 四川德阳)

摘要: 在气液两相流试验装置上,对汽轮机空心静叶表面水膜缝隙抽吸进行了试验研究,并结合两相流动数值方法对水滴沉积的径向分布进行了探讨. 试验条件为:叶栅进口空气湿度为7%,水滴直径分布在1.5~201 μm 之间,抽吸缝隙宽度为1 mm,缝隙角度为45°. 研究表明:吸力面上的抽吸缝在相对弧长约为0.5处具有最大的抽水效率,而压力面的抽吸缝隙越靠近尾缘处抽水效率越高,且压力面的缝隙抽水性能比吸力面的好,增加气流速度会引起抽水效率降低,增大缝隙抽吸压差可以提高抽水效率. 另外,抽水效率沿着叶高方向是增加的.

关键词: 汽轮机;空心静叶;抽吸缝隙;抽水效率

中图分类号: TK261 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)01-0020-04

Experimental Study on Removal of Water Film from Steam Turbine Stator Blade Surfaces by Suction Slots

LI Chunguo¹, WANG Xinjun¹, GUAN Panlong¹, SU Pengfei, SUN Bi¹, ZHOU Hongyu²

(1. Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Department of Design, Dongfang Steam Turbine Limited Company, Deyang, Sichuan 618000, China)

Abstract: An experiment on the performance of water film removal from hollow stator blade surfaces of a steam turbine by slot suction was conducted on an air-water two-phase flow rig with an inlet air wetness of 7%, a droplet diameter range of 1.5-201 μm , a slot width of 1 mm and a slot angle of 45° to the blade surface. The investigation into the radial characteristic of the droplet deposition on the blade surface was also performed with the two-phase flow numerical simulation method based on the experiment data. The results show that a maximum water removal rate was obtained at a relative arc length of about 0.5 for the suction slot on the suction side, and for the suction slot on the pressure side the higher water removal efficiency was observed when the slot was nearer to the blade trailing edge. The water removal efficiency of the blade surfaces was greater for the suction slot on the pressure side than that on the suction side. Increasing airflow velocity resulted in the decrease of water removal efficiency, and larger suction pressure difference leaded to higher water removal efficiency. In addition, the water removal efficiency exhibited an increase in the radial direction of the blade.

Keywords: steam turbine; hollow stator blade; suction slot; water removal efficiency

过热蒸汽在汽轮机流道中逐级膨胀进入湿蒸汽区,会发生自发凝结而生成大量微小的一次水滴. 部分一次水滴由于惯性和湍流扩散作用沉积到流道内表面,尤其是静叶表面,汇集成水膜或者溪流,在气

流拽力作用下向叶片尾缘流动,并在尾缘处被气流撕裂形成直径小于400 μm 的二次水滴. 与一次水滴相比,二次水滴的数目很少,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侵蚀,如图1所示。流道中液态水的出现还会引起透平效率的降低,早在1910年,Baumann就确定级内1%的湿度可能使级效率降低大约1%。二次水滴撞击动叶引起的侵蚀取决于水的密度、撞击速度和水滴数^[1],为了防止动叶侵蚀并提高汽轮机效率,要求尽可能地除去流道中的水分,减小二次水滴的数量和大小。

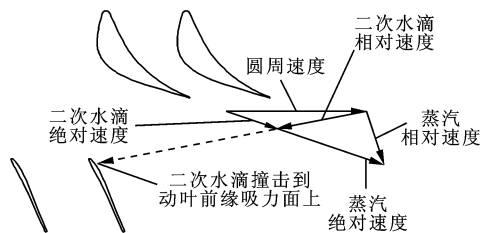


图1 二次水滴撞击在动叶前缘吸力面上

目前,应用广泛的去湿措施是外部湿汽分离和再热技术,去湿效率高,但引起了压力损失和增加了汽轮机结构的复杂性和成本。随着大功率汽轮机的发展,即使应用外部去湿和再热技术,低压汽轮机末几级仍然受到严重的侵蚀,因此采取进一步的去湿措施是很必要的。动叶上的水分在离心力作用下被甩向汽缸内壁,动叶和静叶之间的排水圈可以捕获这些水滴而实现汽水分离,动叶前缘吸力面侧的径向槽可以加强这种分离效果,获得0.1%~0.3%的分离效率^[2]。Riley^[3]提出静叶加热的方式抑制小水滴的沉积,同时蒸发一部分静叶表面的水膜,这是一种很有效的去湿方式,但需要提供高温加热系统,从而影响循环效率。Christie^[4]提出了空心静叶热气流吹扫,在高密度吹扫气流中水滴的最大尺寸比主流中水滴的要小,而且可以使得水滴到达动叶时具有更大的绝对速度,这2点都有助于减小动叶侵蚀。王新军^[5]进一步通过试验发现,空心静叶热气流吹扫可以有效地减小二次水滴的大小,并蒸发叶片表面的部分水膜。空心静叶上开设去湿缝隙可有效地抽掉静叶表面上的大部分水膜,这是一种有效的去湿措施,研究者们对此进行了大量的研究:Reley和Parker^[6]发现尾缘抽吸具有相当高的抽吸效率,但需要对叶片尾缘进行加厚,而较高的抽吸压差使得在汽轮机中进行尾缘抽吸难以实现;Tanuma^[7]通过试验研究发现抽吸压比为0.9~0.92时,可同时保证最大的抽吸效率和最小的抽汽率;王新军^[8-9]研究叶片尾缘水膜撕裂特性时发现,水膜缝隙抽吸有助于减小二次水滴的大小和数量,同时使得二次水滴的直径分布变窄。

在前人的基础上,本文通过试验进一步研究了环形叶栅中空心静叶的水膜缝隙抽吸,抽吸效率具有明显的径向特性,这与水滴在叶片上沉积分布的数值结果是一致的。研究结果有助于设计静叶抽吸缝隙,从而减少动叶侵蚀。

1 湿空气环形叶栅缝隙抽吸试验装置

湿空气环形叶栅缝隙抽吸试验装置系统由气源、稳压室、试验段及试验叶栅、造湿系统、水膜抽吸系统以及测量系统等部分组成,如图2所示。C80风机提供的压缩空气经调节阀、空气管道进入稳压室。在稳压室及其上游的管道中分别有2和3个雾化喷头,水泵提供的具有一定压力的水经过雾化喷头后生成大量的小水滴并与空气混合。稳压室内具有一定湿度和稳定压力的空气在加速段膨胀加速后通过试验段通道排入大气。叶栅出口的气流速度可以通过风机的排气阀和调节阀进行调节,并利用U型管和温度计测量气流的全压、静压及全温,通过计算得到气流速度。造湿系统是由水泵、雾化喷嘴、调节阀以及相应的管路系统组成,水泵提供的压力水通过喷嘴在气流中雾化形成湿空气。抽水系统由真空泵、真空罐和贮水容器组成,该系统使得缝隙在叶片表面和空心内部之间具有一定的压差,压差大小通过调节阀控制。

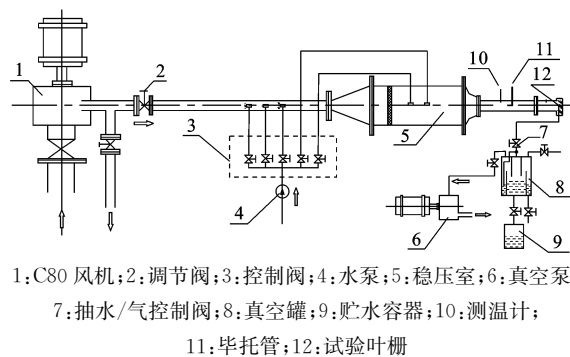


图2 气-液两相流试验装置原理图

叶栅进口的水滴直径及其分布利用Malvern粒度分析仪测量,并根据空气中水滴的容积浓度计算得到叶栅进口的空气湿度。

在试验过程中,湿空气中的部分水滴在惯性和扩散作用下沉积在叶片表面上,汇集成水膜或溪流,在气流拽力作用下向尾缘流动。在一定的抽吸压差下,叶片表面的部分水膜或溪流进入缝隙而被抽掉,其余水膜或者溪流越过抽吸缝隙流向叶片尾缘,并在叶片尾缘处撕裂、破裂形成二次水滴。

2 试验结果及分析

试验叶栅进口前空气湿度 y 为 7%, 水滴直径范围为 $1.5 \sim 201 \mu\text{m}$, 抽吸缝隙宽度 $W=1 \text{ mm}$. 考虑强度的影响, 缝隙与叶片表面成 45° 角. 在出口气流速度 $U=110, 140, 170 \text{ m/s}$ 和不同抽吸压差情况下, 获得了抽吸缝隙分别位于压力面(相对弧长 $s=0.14, 0.42, 0.54, 0.60$) 和吸力面(相对弧长 $s=0.16, 0.40, 0.54$) 时单位缝隙长度的抽水量. 为了避免叶栅通道上、下端壁上流动水膜对缝隙抽吸水量的影响, 将抽吸缝隙沿叶片高度方向的位置控制在距离上、下端壁各 10 mm 的中段, 有效抽吸缝隙长度 $L=68 \text{ mm}$.

2.1 叶栅前水滴直径及分布

试验过程中, 给水泵提供水的压力为 1.2 MPa , 5 个雾化喷头全开, 当出口气流速度为 170 m/s 时, 利用 Malvern 粒度分析仪测得水滴的直径 d 分布在 $1.5 \sim 201 \mu\text{m}$ 之间, 其中 90% 以上的水滴直径位于 $10 \sim 120 \mu\text{m}$. 图 3 给出了水滴的体积分数 φ 与直径 d 的关系. 水滴的 Sauter 平均直径 $D_{32}=30.22 \mu\text{m}$.

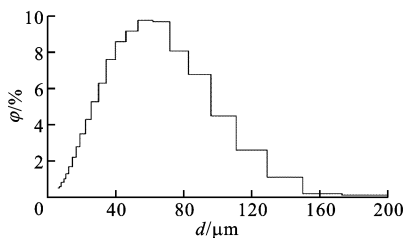
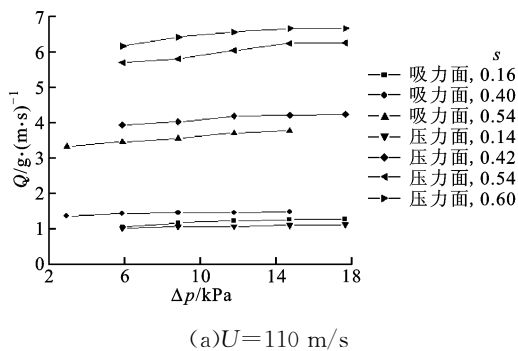


图3 叶栅进口水滴直径分布

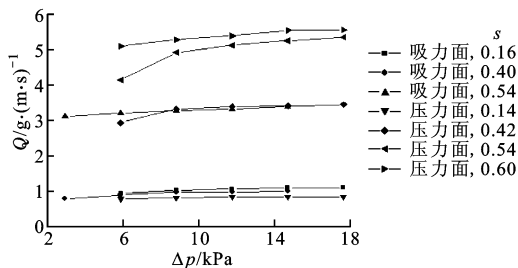
2.2 缝隙位置、气流速度以及抽吸压差对抽吸水量的影响

图 4 给出了叶栅出口气流速度 $U=110, 140, 170 \text{ m/s}$ 时, 抽吸缝隙位置与抽吸压差 Δp 对单位长度缝隙抽水量 Q 影响的关系曲线. 从图中可以看出, 抽吸缝隙位置对抽吸水量的影响相当大, 在吸力面上, 缝隙位置在相对弧长 s 为 0.54 处抽水量最大, 这是因为直径在 $10 \sim 120 \mu\text{m}$ 之间的水滴在吸力面上主要沉积在靠近前缘的区域, 因此吸力面的抽吸缝隙位置开在叶片中部可以取得最佳的抽吸效果. 对于压力面, 直径较大的水滴由于惯性大, 受到气流力的影响相对较小, 运动轨迹接近直线, 这些水滴沉积在压力面靠近前缘的较大区域内, 直径较小的水滴受到惯性和气流拽力的综合作用沉积在压力面靠近尾缘的区域内, 而直径更小的水滴在气流中具有

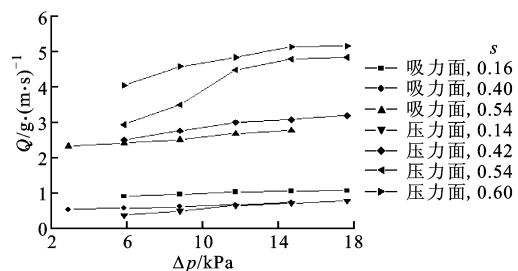
良好的跟随性, 绝大部分都随着气流通过叶栅通道, 因此压力面上的抽吸缝隙越靠近尾缘, 抽水量越大, 抽吸缝隙在相对弧长 s 为 0.60 处具有最佳的抽水量. 压力面上的抽吸缝隙进一步靠近尾缘可以继续提高抽水效果, 但需要加厚叶片. 由于大部分的水滴沉积在叶片压力面上, 与吸力面相比, 压力面上相同的相对弧长位置处, 缝隙的抽水量比吸力面的要大. 因此, 在设计空心静叶抽吸缝隙时, 可在吸力面靠近叶片中部和压力面尽量靠近尾缘处开设抽吸缝隙.



(a) $U=110 \text{ m/s}$



(b) $U=140 \text{ m/s}$



(c) $U=170 \text{ m/s}$

图4 抽吸缝隙位置与抽吸压差对抽吸水量的影响

气流速度对抽水量具有较大的影响: 抽吸压差 $\Delta p=17.64 \text{ kPa}$ 时, 压力面上相对弧长 $s=0.60$ 处的抽吸缝隙在叶栅出口速度 $U=110 \text{ m/s}$ 时, 抽水量 $Q=6.67 \text{ g/(m} \cdot \text{s)}$, 当出口速度 $U=140 \text{ m/s}$ 时, 抽水量 $Q=5.58 \text{ g/(m} \cdot \text{s)}$, 相对于 $U=110 \text{ m/s}$ 时的抽水量减少了 16.3% , 当叶栅出口速度 $U=170 \text{ m/s}$ 时, 抽水量 $Q=5.19 \text{ g/(m} \cdot \text{s)}$, 相对于 $U=110 \text{ m/s}$ 时的抽水量减少了 22.2% ; 对于吸力面

$s=0.54$ 处的抽吸缝隙, $U=140, 170$ m/s 时的抽水量比 $U=110$ m/s 时的抽水量分别减少了 9.9% 和 26.1%。水膜经过抽吸缝隙时,一部分水膜进入缝隙而被抽掉,其余水膜越过抽吸缝隙继续向叶片尾缘方向流动,气流速度的增加会使得更多的水膜越过抽吸缝隙,因此减少了抽水量。此外,气流速度的增加使得水滴在叶片表面上的沉积率减小,从而减小了水膜流量,引起抽水量减少。

抽吸压差的增加将使抽水量增加,气流速度越大,抽吸压差对抽水量的影响越大。在叶栅出口速度 $U=110, 140, 170$ m/s 时,抽吸压差从 5.9 kPa 增加到 17.6 kPa 将使抽水量分别增加约 10%、15% 和 30%。但是,相对于缝隙位置对抽水量的影响,抽吸压差的作用显得小了很多,这一点从图 4 很容易看出来。

2.3 缝隙抽水效率的径向特性

为了研究缝隙抽水效率的径向特性,将叶根处大部分缝隙和叶顶处的 10 mm 缝隙堵住,有效抽吸缝隙长度 $L=37$ mm,对抽吸缝隙在背弧($s=0.54$)和内弧($s=0.60$)的情况进行了试验。结果表明,与全长 $L=68$ mm 抽吸缝隙相比, $L=37$ mm 的有效抽吸缝隙的抽水率稍微偏高,如图 5 所示,抽水量越大的缝隙位置这种差别越明显(见图 5b)。这说明靠近叶顶附近比靠近叶根附近的水膜流量大,抽水量大。

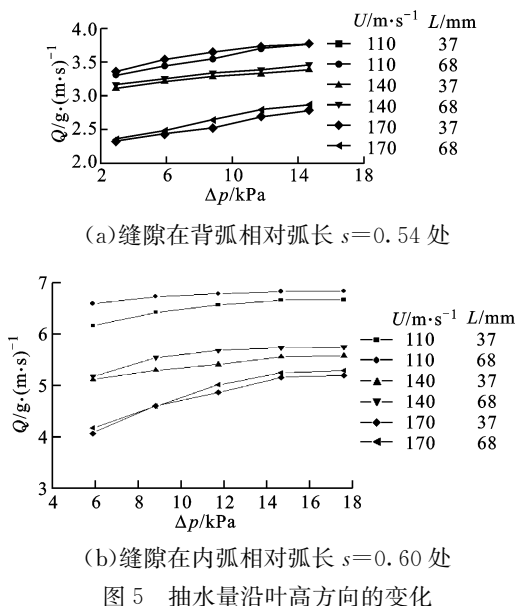


图 5 抽水量沿叶高方向的变化

利用两相流动数值方法获得了水滴在静叶表面上的沉积分布。图 6 给出了叶片 5 个等分截面的水滴沉积率 ψ 的分布与相对叶高 l 的关系, ψ 定义为

沉积水滴的质量与进入叶栅通道总水滴质量之比。从图 6 可以看出,沉积率沿着叶高方向是增加的,这个结论吻合了抽水量沿着叶高方向增加的试验结果。

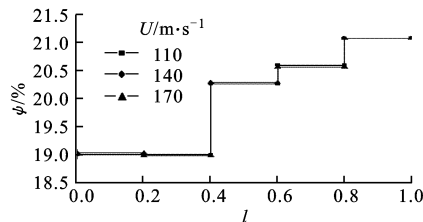


图 6 水滴沉积率沿叶高的分布

3 结 论

(1) 试验叶栅进口水滴直径分布在 $1.5 \sim 201 \mu m$ 之间,这些水滴主要沉积在静叶吸力面前缘附近和整个压力面上,抽吸缝隙位于吸力面相对弧长约 0.5 处和压力面靠近尾缘处时,可获得最佳的抽水效率。

(2) 气流速度的增加可使更多的水膜越过抽吸缝隙,降低抽水效率。

(3) 提高压差有助于提高抽水效率,但压差对抽水效率的影响远小于缝隙位置和气流速度的影响。

(4) 抽水量沿着叶高方向增加,这与水滴在叶片上的沉积分布的径向规律是一致的。

参考文献:

- [1] DEHOUE J, NARDIN P, ZEGHMATI M. Erosion study of final stage blading of low pressure steam turbines [J]. Applied Surface Science, 1999, 144(3):238-243.
- [2] ALEXANDER S. Wet-steam turbines for nuclear power plants [M]. Tulsa, USA: Penn Well Corporation, 2005:191-216.
- [3] RYLEY D J, AI-AZZAWI H K. Suppression of the deposition of nucleated fog droplets on steam turbine stator blades by blade heating [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1983, 4(4):207-216.
- [4] SMITH A, CALDWELL J, CHRISTIE D G, et al. Physical aspects of blade erosion by wet steam in turbines and discussion [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London: Mathematical and Physical Sciences, 1966, 260(1110):209-219.
- [5] 王新军, 卢澄, 李振光, 等. 缝隙吹扫对静叶出口二次水滴直径影响的试验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(7): 764-767.

WANG Xinjun, LU Cheng, LI Zhengguang, et al. Ex-

- perimental study on effects of slot hot gas blowing on secondary water droplet diameter downstream of the stationary blade [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(7): 764-767.
- [6] RELEY D J, PARKER G J. The removal of water from low-pressure steam turbine blades by trailing-edge suction slots [J]. Proceeding of Institute Mechanical Engineers, 1970, 182(3): 94-103.
- [7] TANUMA T. The removal of water from steam turbine stationary blades by suction slots [C]//Proc Inst Mech Eng. London, UK: IMechE, 1991: 179-189.
- [8] 王新军, 高铁瑜, 徐廷相. 缝隙抽吸对二次水滴直径及直径分布影响的试验研究[J]. 汽轮机技术, 2004, 46(6): 444-450.
- WANG Xinjun, GAO Tieyu, XU Tingxiang. Experimental study on effects of suction on secondary water droplet diameter and its distribution [J]. Turbine Technology, 2004, 46(6): 444-450.
- [9] WANG Xinjun, XU Tingxiang, LI Yanfeng. Effects of water suction on water film tearing at trailing [J]. Heat Transfer; Asian Research, 2005, 34(6): 380-385.

(编辑 王焕雪)