

DOI:10.7652/xjtuxb201411001

湿蒸汽条件下空心静叶缝隙抽吸性能的试验研究

李亮¹, 薛太旭¹, 刘启凡¹, 吴晓明², 杨建道^{1,2}

(1. 西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安; 2. 上海汽轮机厂有限公司, 200240, 上海)

摘要: 为获得湿蒸汽流动条件下空心静叶缝隙除湿结构的设计依据,利用湿蒸汽试验平台、在与实际空心静叶工作湿度一致的条件下,对8组不同缝隙位置、形状和宽度的空心静叶进行了缝隙抽吸水膜性能的试验研究。结果表明:缝隙抽吸水膜的特性受到气流马赫数和抽吸差压的综合作用,当抽吸差压增大到一定程度时,缝隙尖角处发生水膜汽化是导致抽吸性能下降的重要因素;吸力面缝隙位置从0.24倍叶宽变化到0.42倍叶宽时,缝隙抽吸的水量持续增加;与平直缝隙相比,带台阶过渡的缝隙抽吸性能未提高,反而在马赫数大于0.7时出现显著下降,原因是引起水膜汽化的尖角数目增加;带圆角过渡的缝隙能有效消除水膜汽化,提高缝隙抽吸水膜的性能;0.35 mm宽度的缝隙易于使水膜跨过缝隙,2 mm宽度的缝隙不能形成有效的抽吸差压,且均导致缝隙抽吸性能降低;0.7 mm和1 mm宽度的缝隙均具有良好的抽吸性能,1 mm宽度的缝隙受水膜汽化的影响更小。

关键词: 湿蒸汽;空心静叶;缝隙;抽吸性能;试验研究

中图分类号: TK262 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)11-0001-07

Experimental Research on Water Removal Performance of Hollow Stator Blade in Wet Steam Flow

LI Liang¹, XUE Taixu¹, LIU Qifan¹, WU Xiaoming², YANG Jiandao^{1,2}

(1. Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shanghai Turbine Company Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract: Aiming at providing guidelines for design of suction slots of hollow stator blade under wet steam flow condition, experiments were implemented on a wet steam test rig with eight hollow stator blades to investigate the water removal performance by varying the position, shape and width of suction slots. The wetness fraction at the inlet section of the test cascade was consistent with the real running condition. It is shown that the amount of removed water is affected by the main flow Mach number and suction pressure difference. When suction pressure difference increases to a moderate value, vaporization of water film occurs and acts as an additional important factor leading to degraded water removal performance. With the position of suction surface slot moving from 0.24 to 0.42 of axial chord, the amount of removed water is continuously increased. Compared with the straight slot, the step-shaped slot cannot improve water removal performance. On the contrary, it results in poor performance when the Mach number is beyond 0.7 due to increased number of sharp corners, which leads to water vaporization. A suction slot with arc-shaped inlet is able to eliminate vaporization of water film and improve water removal performance. A suction slot of 0.35 mm width is apt to allow water film across, a suction slot of 2 mm width cannot form an effective suction pressure difference, and

both lead to degraded water removal performance. Suction slots of 0.7 mm and 1 mm width have good water removal performance, but the later is more slightly influenced by water vaporization.

Keywords: wet steam; hollow stator blade; suction slot; water removal performance; experimental study

空心静叶表面设有缝隙,利用缝隙两侧的差压将叶片表面的水膜吸入叶片内部空腔,能有效减小叶片尾缘二次水滴的流量和对动叶的水蚀作用。空心静叶除湿技术在大功率火电和核电汽轮机中得到了广泛应用^[1]。

影响空心静叶除湿性能的因素包括叶片表面缝隙的位置、形状、尺寸和角度,缝隙两侧的抽吸差压以及叶栅通道中的流动情况等。空心静叶的除湿性能取决于上述因素共同作用下的缝隙内汽水两相流动情况。

由于数值方法无法模拟空心静叶缝隙处复杂的汽水两相流动,所以目前空心静叶缝隙的设计主要依靠试验结果确定。1991年 Tanuma 等在湿蒸汽流动条件下进行了空心静叶除湿性能的试验研究,指出合理的抽吸压比(缝隙内部空腔一侧和叶片表面一侧的压力之比)为 0.9~0.92,同时发现台阶状的缝隙比平直的缝隙更有利于提高除湿效率^[2]。

国内对空心静叶除湿技术也开展了研究^[3-7]。王新军等在空气-水膜两相流动试验台上进行了一系列试验,获得了国内最为系统的试验结果^[3-5],但不足是试验中用空气代替蒸汽,另外受试验条件的限制,试验气流的马赫数低于实际气流的马赫数。

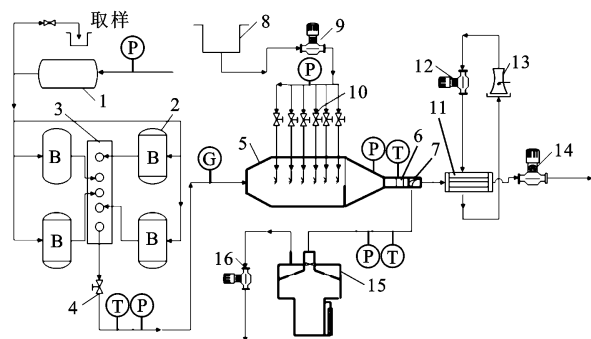
上述原因导致国内在空心静叶的设计方面缺乏有力的试验数据支撑,在一些重要参数,如对缝隙宽度的确定还没有统一的认识,对湿蒸汽流动条件下缝隙内水膜的流动情况及流动机理并不清楚。为此,本文在西安交通大学新建的湿蒸汽试验台上开展了一次较为全面的空心静叶除湿性能试验,以期丰富空心静叶除湿性能的试验结果,为汽轮机行业中空心静叶的设计提供试验数据支撑。

1 湿蒸汽试验平台及试验方案

湿蒸汽试验平台如图 1 所示,主要包括蒸汽发生系统、压力调节系统、试验段、冷凝真空系统、喷水雾化系统、测量系统、水膜抽吸与收集系统等。自来水经软化水装置进入 4 台并联运行的电加热蒸汽发生器,由此产生的饱和蒸汽汇入分汽缸,再通过压力调节阀、经由主蒸汽管路进入稳压罐;涡旋泵将水箱中的水抽出并以一定压力通过 6 个雾化喷嘴喷入稳

压罐中;蒸汽与水雾在稳压罐中充分混合后进入试验段的空心静叶栅通道;在试验段设有光学窗口,以便使用 Malvern 粒度仪进行蒸汽湿度和水滴直径的测量;空心静叶内部与疏水收集桶相连,疏水收集桶依靠真空泵产生的负压将空心静叶缝隙抽吸的水分收集起来;湿蒸汽流出试验段后进入凝汽器中,冷凝水由凝汽器底部的水箱收集。

蒸汽发生系统的额定流量为 320 kg/h,额定压力为 700 kPa。受蒸汽流量的限制,试验段设计了两个叶栅通道,试验叶片位于两个通道中间。试验中以某 1 000 MW 核电汽轮机末级空心静叶除湿特性为研究背景;试验叶片为直叶片,有效叶高为 70 mm,栅距为 69 mm,由该核电汽轮机末级空心静叶 70% 叶高截面的叶型模化而来。



1:软化水装置;2:蒸汽发生器;3:分汽缸;4:压力调节阀;5:稳压罐;
6:光学窗口;7:试验段;8:水箱;9:涡旋泵;10:调节阀;11:凝汽器;
12:循环泵;13:冷却塔;14,16:真空泵;15:疏水收集桶;

P:压力传感器;T:温度传感器;G:流量计

图 1 湿蒸汽试验平台

如表 1 所示,共设计了 8 组叶片,每组叶片只在吸力面开设一道缝隙,用以研究缝隙的位置、宽度和形状对空心静叶除湿性能的影响。为便于对比,当研究一个几何参数时,其余两个几何参数保持不变。表中符号 C_x 代表叶宽,对于叶片 1, $0.24C_x$ 表示缝隙中心位于 0.24 倍叶宽处,如图 2a 所示,其余以此类似。表 1 中 3 种缝隙的形状如图 2b~图 2d 所示。

试验前首先用 Malvern 粒度分析仪对试验段前湿蒸汽的湿度和水滴粒径进行了测量。通过改变 6 个雾化喷头开启的个数和喷水压力,得到了湿度约为 10% 的进口湿蒸汽, Sauter 平均的水滴粒径 D_{32}

表 1 空心静叶除湿性能试验内容

试验内容	叶片编号及变化的参数	备注
缝隙位置的影响	叶片 1(0.24C _x)	缝隙宽度为 0.7 mm, 缝隙为平直形状
	叶片 2(0.36C _x)	
	叶片 8(0.42C _x)	
缝隙形状的影响	叶片 2(平直缝隙)	缝隙宽度为 0.7 mm, 缝隙位于 0.36C _x 处
	叶片 3(台阶过渡)	
	叶片 4(圆角过渡)	
缝隙宽度的影响	叶片 5(0.35 mm)	缝隙为平直形状, 缝隙位于 0.36C _x 处
	叶片 2(0.7 mm)	
	叶片 6(1.0 mm)	
	叶片 7(2.0 mm)	

约为 32 μm。对 8 组叶片进行试验时,雾化喷头开启的个数和喷水压力维持不变,以保证进口湿蒸汽参数的一致性。

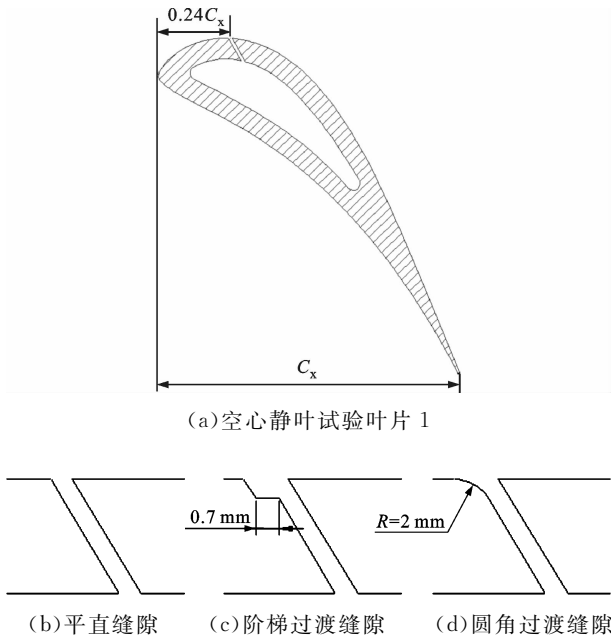


图 2 空心静叶及 3 种缝隙形状示意图

真空泵(图 1 标记 14)与凝汽器相连,通过调节该真空泵的真空度来改变试验段的背压,可以调节试验叶栅出口的马赫数。试验中进口总压维持在 30 kPa 左右,出口静压根据马赫数的不同在 20~25 kPa 之间变化,压力参数与原型汽轮机末级空心静叶运行的参数基本一致。实测的进口总温和出口静温与对应压力下的饱和温度一致。真空泵(图 1 标记 16)由疏水收集桶与空心静叶内部空腔连接,通过调节该真空泵的真空度来改变空心静叶内部压力,可以调节缝隙抽吸的差压。本文中抽吸差压定

义为叶栅进口总压与空心叶片内部静压之差。

对每组叶片至少进行 9 种工况的试验(3 个马赫数和 3 个抽吸差压),以获得一定马赫数和抽吸差压范围内的空心静叶除湿性能。除湿性能以缝隙处抽吸水量的多少进行衡量。由于蒸汽发生器补水等会造成压力波动,所以每种工况的试验进行 15 min,压力参数取 15 min 内的平均值,抽吸的水量取累计值。

为了便于直观对比,将所有工况下抽吸水量的最大值定义为 100 mL,以此为基准对试验结果进行了标准化处理。

2 试验结果及分析

2.1 吸力面缝隙位置对抽吸水量的影响

图 3 给出了吸力面不同位置处缝隙抽吸水量的变化情况。总体来看,随着缝隙位置从 0.24C_x 变化到 0.42C_x,缝隙抽吸的水量逐渐增大。其原因是,缝隙越靠近下游,缝隙前水滴沉积在叶片上的面积越大,因而缝隙收集的水量越多。试验结果表明,在试验工况范围内,吸力面的水膜未发生分离。

另一方面,3 个位置处缝隙抽吸水量随叶栅出口马赫数和抽吸差压的变化却截然不同。对于叶片 1(图 3a),最小抽吸水量的区域位于左上角,即在马赫数较大而抽吸差压较小时出现。马赫数较大时,气流对水膜的剪切力大,水膜有跨过缝隙向下游流动的趋势,这将导致缝隙抽吸的水量随出口马赫数的增加而减小。但是,在同样的马赫数(0.65)下,较小的抽吸差压(4 kPa)对应的抽吸水量却比较大的抽吸差压(8 kPa)对应的抽吸水量大。这表明:在试验工况范围内,抽吸差压为 4 kPa 时水膜汽化开始发生;随着抽吸差压的增大,缝隙尖角处水膜的压力降低,汽化加剧,从而引起缝隙抽吸水量下降。抽吸差压在 10~14 kPa,抽吸差压增大时缝隙抽吸水量缓慢上升。这可能是由于处于缝隙尖角处的水膜外层的饱和蒸汽压力降低导致凝结发生,凝结放热却提高了缝隙尖角附近的压力(绕过尖角的气流加速度很大,此时凝结可能是非平衡凝结),从而在一定程度上抑制了水膜汽化的发生。

对于叶片 2(图 3b),缝隙抽吸水量随着马赫数和抽吸差压的增加均出现先减小后增大的变化趋势,其原因分析与叶片 1 分析类似。最小抽吸水量的区域大致位于图中的中心位置,即抽吸差压约为 7.5 kPa,叶栅出口马赫数约为 0.7。整个试验工况范围内叶片 2 的缝隙抽吸水量最大、最小值均比叶

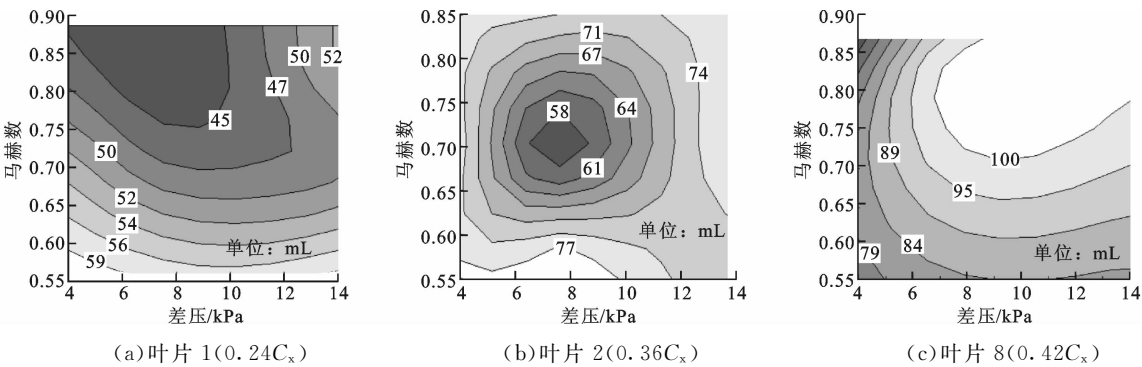


图 3 吸力面缝隙位置对抽吸水量的影响

片 1 高约 30%。

对于叶片 8(图 3c),当气流马赫数一定时,缝隙抽吸水量随抽吸差压的增加基本上持续增加,仅在差压大于 10 kPa 时出现了差压增大而抽吸水量减小的情况。这表明差压小于 10 kPa 时,水膜未发生汽化或差压的影响不大。最大抽吸水量的位置位于右上角,即叶栅出口马赫数为 0.8,抽吸差压为 11 kPa。试验工况范围内叶片 8 缝隙抽吸水量的最大、最小值比叶片 2 高 30% 以上。

2.2 吸力面缝隙形状对抽吸水量的影响

图 4 对比了 3 种缝隙形状对抽吸水量的影响。在试验工况范围内,3 种形状缝隙的抽吸特性显著

不同。图 4a 中叶片 2 为平直缝隙,其抽吸特性已在上节分析。图 4b 中叶片 3 为带台阶过渡的缝隙,当叶栅出口马赫数小于 0.7 时,其抽吸特性与平直缝隙类似,但当出口马赫数大于 0.7 时,其抽吸特性却显著下降。抽吸差压在 6~12 kPa 范围内,抽吸的水量均在最小值附近;抽吸差压小于 6 kPa 或大于 12 kPa 时,抽吸水量显著低于平直缝隙。其原因是,台阶状的缝隙存在两个尖角,为水膜在尖角处发生汽化提供了条件。

对于带圆角过渡的缝隙(图 4c),最大抽吸水量出现的区域在马赫数较大的位置,即叶栅出口马赫数为 0.85,抽吸差压为 10 kPa。

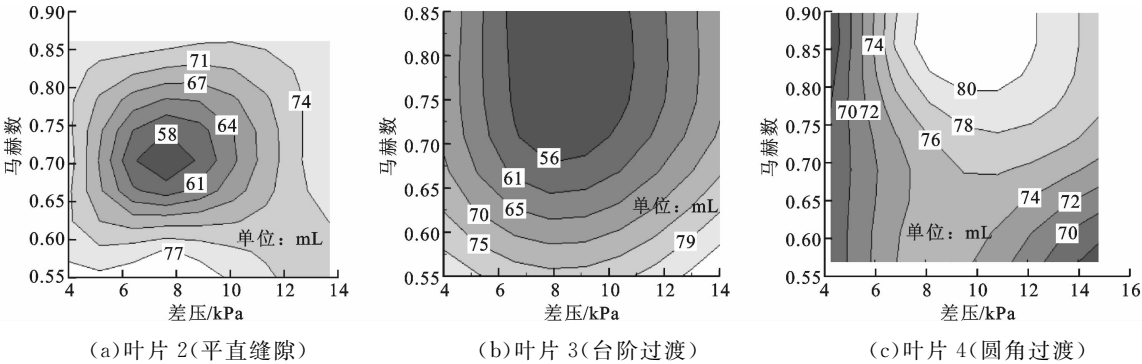


图 4 吸力面缝隙形状对抽吸水量的影响

试验工况范围内 3 种形状缝隙的抽吸特性对比如表 2 所示。从表中可以看到,圆角过渡缝隙的最小和最大抽吸水量均比平直缝隙明显提高,且在试验工况范围内的大部分区域,抽吸水量都接近最大

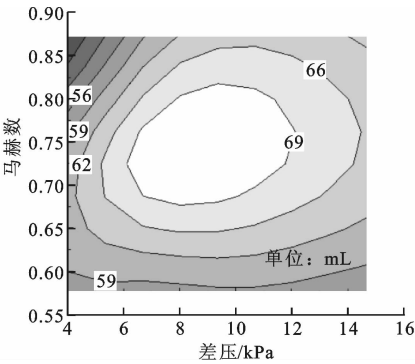
表 2 不同形状缝隙相对抽吸特性的对比

缝隙形状	抽吸水量/mL		
	最小值	最大值	变化幅度
平直缝隙	58	74	16
台阶过渡	56	84	28
圆角过渡	68	80	12

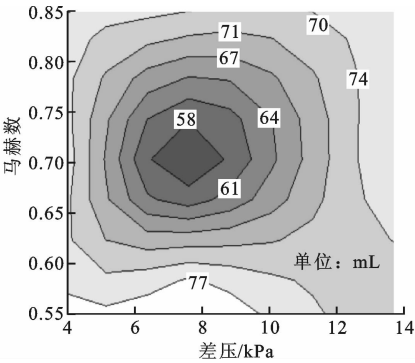
大值。这表明圆角过渡显著提高了缝隙的抽吸特性,为空心静叶缝隙的设计提供了便利。圆角过渡显著提高缝隙抽吸特性的原因在于,其消除了造成水膜局部急剧加速而导致发生汽化的尖角。

2.3 吸力面缝隙宽度对抽吸水量的影响

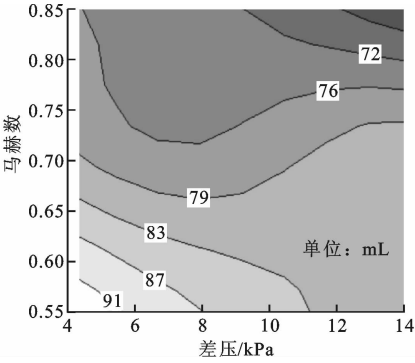
图 5 对比了吸力面不同宽度缝隙对抽吸水量的影响。当缝隙形状和位置固定时,缝隙附近高速气流对水膜的剪切作用使得水膜有跨过缝隙的趋势,但缝隙两侧的抽吸差压又使得水膜有转向进入缝隙的趋势,这两种作用力决定了水膜流经缝隙时的行为。



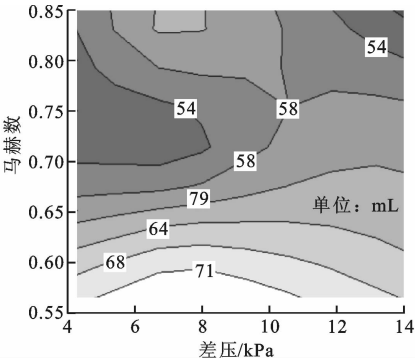
(a)叶片 5(0.35 mm 缝隙)



(b)叶片 2(0.7 mm 缝隙)



(c)叶片 6(1 mm 缝隙)



(d)叶片 7(2 mm 缝隙)

图 5 吸力面缝隙宽度对抽吸水量的影响

图 5a 中叶片 5 缝隙宽度最小,为 0.35 mm。在抽吸差压较小(4~6 kPa)时,该缝隙抽吸的水量最小,且随着气流马赫数的增加而减小。这表明在抽吸差压较小和马赫数较大的条件下,水膜更易于跨过缝隙流向下游。在适中的差压(6~12 kPa)下,缝隙抽吸的水量显著增加,但会受到以下影响:当马赫数较小时,水膜流动的速度小,水膜较厚;当马赫数增加时,水膜流速增加,但水膜厚度减小。马赫数在 0.65 以下时,水膜下层被缝隙抽吸,而水膜上层却跨过缝隙流向下游,此时缝隙抽吸的水量相对较少;马赫数在 0.65~0.80 时,缝隙抽吸的水量最大,但当马赫数进一步增加时,水膜将变为不连续的溪流,溪流上层跨过缝隙流向下游,溪流下层被缝隙抽吸,此时缝隙抽吸水量再次减少。差压在 12~14 kPa 时,缝隙尖角处水膜发生汽化,从而导致缝隙抽吸水量降低。

缝隙宽度增加到 0.7 mm(图 5b)时,缝隙抽吸特性与 0.35 mm 宽度时类似,但总体上抽吸的水量有所增加。

缝隙宽度增加到 1 mm(图 5c)时,试验工况范围内的最大和最小抽吸水量均有所增加,这可能是 1 mm 宽度的缝隙允许水膜以更小的曲率发生转折,从而降低了尖角处水膜汽化的程度。从图 5c 也可以看到,抽吸差压增大而抽吸水量下降仅出现在左下角区域,这表明 1 mm 宽度的缝隙确实有利于弱化水膜汽化的影响。

缝隙宽度为 2 mm(图 5d)的抽吸特性与缝隙宽度为 1 mm 时类似,但 2 mm 宽度的抽吸水量的绝对值却下降了 20%。其原因是,过宽的缝隙导致有效的抽吸差压区域仅限于静叶端部附近,其他叶高位置处缝隙的抽吸差压迅速减小。因此,过宽的缝隙非但不能提高空心静叶的除湿性能,反而会抽走更多的主流蒸汽,导致效率和做功能力下降。

3 缝隙尖角处水膜汽化分析

根据试验结果推断,在一定的气流马赫数和抽吸差压的作用下,缝隙尖角处发生了水膜汽化。缝隙尖角处的水膜流动简化模型如图 6 所示。

设尖角前水膜的压力为 p_1 ,温度为 t ,密度为 ρ ,速度为 u_1 ,厚度为 δ_1 ;尖角处水膜的压力为 p_2 ,速度为 u_2 ,厚度为 δ_2 。显然,尖角处水膜的流速 u_2 远大于尖角前水膜的流速 u_1 ,因此可以合理假设尖角处水膜流动的时间尺度远小于水膜与主流蒸汽发生热交换的时间尺度,使得尖角处水膜的温度为 t 。由

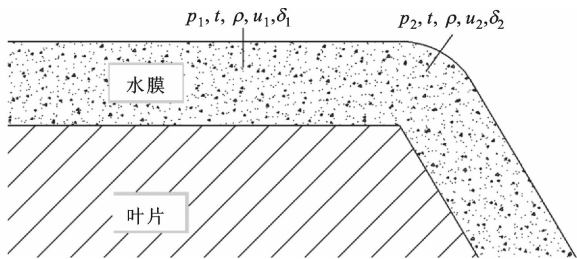


图 6 缝隙尖角处的水膜流动简化模型

于水的密度为温度的函数,因此尖角处水膜的密度为 ρ 。另外,水膜的厚度数量级为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 量级^[1],可以忽略水膜重力。沿水膜内某条流线建立的伯努利方程为

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} \tag{1}$$

将其整理为

$$p_2 = p_1 - \frac{\rho}{2}(u_2^2 - u_1^2) = p_s(t) - \frac{\rho}{2}(u_2^2 - u_1^2) \tag{2}$$

显然,尖角处的压力 p_2 低于当地温度对应的饱和压力 $p_s(t)$,且取决于水膜的密度和水膜进入尖角前后的速度的平方差。在一定的气流马赫数和抽吸差压的共同作用下,缝隙尖角处的水膜会由于热力学不平衡状态的发展而汽化。

尖角前后的水膜质量连续方程为

$$u_1 \delta_1 = u_2 \delta_2 \tag{3}$$

表 3 影响缝隙抽吸特性的因素和作用机理

影响因素	作用机理
气流马赫数	(1) 马赫数小时,水膜厚度较大,水膜趋于均匀,均匀的水膜有利于缝隙抽吸。
	(2) 马赫数较大时,水膜厚度较小,部分水膜变为溪流,水膜上层易于跨过缝隙,使缝隙抽吸水量减小。
	(3) 马赫数较小时,气流对水膜的剪切力作用小,水膜易于转折进入缝隙,有利于缝隙抽吸。
	(4) 马赫数较大时,气流对水膜的剪切力作用大,水膜易于跨过缝隙流向下游。
抽吸差压	(1) 抽吸差压较小时,抽吸作用较小,水膜/溪流不易于转折进入缝隙,不利于缝隙抽吸。
	(2) 抽吸差压较大时,抽吸作用较大,水膜/溪流易于转折进入缝隙,有利于缝隙抽吸。
水膜汽化	(1) 抽吸差压达到一定程度,水膜绕过缝隙尖角转折时压力降低,导致水膜汽化,使抽吸水量减小。差压在一定范围内时,抽吸差压越大,水膜汽化越严重,缝隙抽吸水量越小;抽吸差压进一步增大可能引起缝隙尖角处水膜外层蒸汽发生非平衡凝结,凝结放热提高了尖角附近压力,抑制了水膜汽化。
	(2) 适度增加缝隙的宽度有利于减小水膜绕过缝隙尖角时的加速程度,弱化水膜汽化的影响。

4 结 论

总结试验结果可以得到如下结论:①吸力面位于 0.42 倍叶宽处的缝隙抽吸的水量最大,试验工况范围内未发生水膜分离;②吸力面平直缝隙、台阶过渡缝隙及圆角过渡缝隙 3 者中,圆角过渡缝隙在各

显然,尖角处的水膜厚度 δ_2 小于尖角前的厚度 δ_1 。这意味着尖角处更薄的水膜受到边界层内黏性应力的影响更大,尖角处水膜的加速受到限制。

考虑以上因素,尖角处水膜的汽化究竟是以“闪蒸”的形式发生,还是以接近平衡相变的形式发生,在目前缺乏尖角附近水膜流动速度测量结果的情况下还难以进行判断。

但是,从试验结果可以看到,影响空心静叶除湿特性的因素极其复杂,决定空心静叶除湿性能的是缝隙处水膜的运动行为,而水膜的运动行为受到气流马赫数、抽吸差压以及水膜汽化的影响。在这些因素作用下,缝隙处水膜的流动特征如图 7 所示。虽然目前还无法观测缝隙处微观的流动细节,但根据试验结果,结合湿蒸汽两相流动的理论进行合理推断,可以得到表 3 中影响空心静叶缝隙抽吸特性的因素以及作用机理。

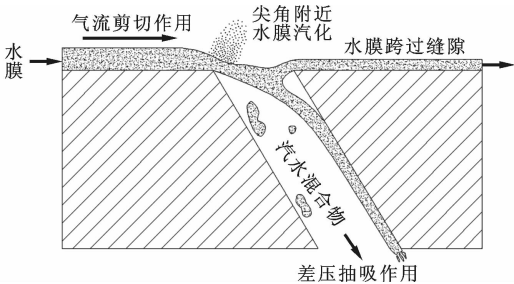


图 7 缝隙处水膜的流动特征

种工况下的抽吸特性提高显著,台阶过渡缝隙在马赫数大于 0.7 时由于发生水膜汽化使得抽吸特性不及平直缝隙;③试验条件下吸力面上缝隙宽度为 1 mm 时性能最佳,宽度减小时水膜易于跨过缝隙或发生汽化,宽度增大时缝隙有效抽吸差压的区域减小,导致抽吸水膜的能力降低。

参考文献:

- [1] 蔡颐年. 透平和分离器的双相流 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [2] TANUMA T, SAKAMOTO T. The Removal of water from steam turbine stationary blades by suction slots [C]//Proceedings of IMechE Conference on Turbomachinery. London, UK: IMechE, 1991: 179-189.
- [3] 王新军, 毛靖儒, 李炎锋, 等. 汽轮机静叶缝隙去水效率的试验研究 [J]. 汽轮机技术, 1999, 41(3): 164-168.
WANG Xinjun, MAO Jingru, LI Yanfeng, et al. Experimental investigation on the water removal efficiency from steam turbine stationary blades by suction slot [J]. Turbine Technology, 1999, 41(3): 164-168.
- [4] 王新军, 李炎锋, 徐廷相. 缝隙宽度对汽轮机空心静叶去水效率影响的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(5): 24-27.
WANG Xinjun, LI Yanfeng, XU Tingxiang. Effect of suction slot width on water removal efficiency for steam turbine hollow stationary blades [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(5): 24-27.
- [5] 李国春, 王新军, 关盼龙, 等. 汽轮机静叶表面水膜缝隙抽吸的试验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(1): 20-23, 33.
LI Guochun, WANG Xinjun, GUAN Panlong, et al. Experimental study on removal of water film from steam turbine stator blade surfaces by suction slots [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(1): 20-23, 33.
- [6] 徐亮, 颜培刚, 黄洪雁, 等. 汽轮机空心静叶开缝抽吸除湿的数值模拟 [J]. 汽轮机技术, 2009, 51(2): 97-99.
XU Liang, YAN Peigang, HUANG Hongyan, et al. Numerical simulation on the suction slot of hollow stationary blade for moisture removal in steam turbine [J]. Turbine Technology, 2009, 51(2): 97-99.
- [7] LI L, YANG J, YOU W, et al. Investigation of the vapour-liquid two-phase flow in the low-pressure cylinder of a 1 000 MW nuclear power steam turbine [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical: Part A Journal of Power and Energy, 2014, 228(2): 178-185.

[本刊相关文献链接]

- 李瑜, 宁德亮, 李亮, 等. 汽轮机中湿汽损失的定量计算. 2014, 48(1): 25-30. [doi: DOI:10.7652/xjtuxb201401005]
- 程鹏, 王新军, 张峰, 等. 核电汽轮机弯管式汽水分离器的改进结构及其除湿性能. 2014, 48(5): 61-66, 77. [doi: 10.7652/xjtuxb201405011]
- 张超, 徐自力, 刘石, 等. 采用热固双向耦合模型的转子热力计算方法研究. 2014, 48(4): 68-72. [doi: 10.7652/xjtuxb201404012]
- 霍文浩, 晏鑫, 李军, 等. 超超临界汽轮机高压缸旁路冷却系统流动特性的研究. 2013, 47(3): 42-47. [doi: 10.7652/xjtuxb201303008]
- 霍文浩, 晏鑫, 李军, 等. 超超临界汽轮机高压缸旁路冷却系统冷却特性研究. 2013, 47(5): 24-30. [doi: 10.7652/xjtuxb201305005]
- 邵帅, 邓清华, 时和双, 等. 不同容积流量下汽轮机低压缸末三级定常流动数值研究. 2013, 47(1): 15-20. [doi: 10.7652/xjtuxb201301004]
- 李瑜, 李亮, 钟刚云, 等. 末级透平对低压缸气动和凝结特性的影响. 2012, 46(7): 16-20. [doi: 10.7652/xjtuxb201207004]
- 潘家成, 徐亮, 高建民, 等. 轴向间距对二次水滴运动特性及沉积规律的影响. 2012, 46(7): 1-6. [doi: 10.7652/xjtuxb201207001]
- 吴晓明, 李国君, 丰镇平, 等. SST $k-\omega-k_p$ 两相湍流模型及其在湿蒸汽凝结流动数值模拟中的应用. 2007, 41(5): 526-529. [doi: 10.7652/xjtuxb200705005]
- 霍文浩, 祁明旭, 李军, 等. 超临界汽轮机中压透平级流动传热特性研究. 2011, 45(7): 9-14. [doi: 10.7652/xjtuxb201107003]
- 黄晓明, TARIK Kaya. 蒸发毛细弯液面热质传输特征及其稳定性分析. 2010, 44(3): 21-25. [doi: 10.7652/xjtuxb201003005]
- 李春国, 王新军, 关盼龙, 等. 汽轮机静叶表面水膜缝隙抽吸的试验研究. 2009, 43(1): 20-23. [doi: 10.7652/xjtuxb200901005]
- 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. 2007, 41(7): 764-767. [doi: 10.7652/xjtuxb200707002]

(编辑 苗凌)