

轴向间距对二次水滴运动特性及沉积规律的影响

潘家成^{1,2}, 徐亮¹, 高建民¹, 赵世全², 漆小兵², 王维¹

(1. 西安交通大学机械系统工程国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 东方汽轮机有限公司, 618000, 四川德阳)

摘要: 基于有限体积法、计算流体力学研究了某核电大功率汽轮机次末级的二次水滴侵蚀问题, 采用 Lagrangian 方法求解了水滴的离散输运方程, 利用 Eulerian 方法求解了叶栅内蒸汽的流动, 并为叶栅通道内的汽相流动与水滴运动建立了数学模型. 在定常条件下, 通过轴向间距对二次水滴运动特性及沉积规律的影响研究发现: 脱离静叶尾缘的水滴在叶栅通道空间中均呈现出向上端壁倾斜的运动趋势, 由此获得了叶栅通道中水滴在各固壁面的沉积率; 加大轴向间距可以减小二次水滴对动叶片的撞击速度, 增大颗粒水滴抛落到轴向间距上端壁的沉积率. 所以, 依据大颗粒水滴的集中沉积区域可以确定动叶表面去湿沟槽的适宜位置, 该位置应位于吸力面上半部的前缘至中弦区域之间.

关键词: 汽轮机; 二次水滴; 水蚀; 沉积率

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)07-0001-06

Influence of Axial Clearance on Movement Characteristic and Deposition of Secondary Droplets

PAN Jiacheng^{1,2}, XU Liang¹, GAO Jianmin¹, ZHAO Shiquan², QI Xiaobing², WANG Wei¹

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Dongfang Steam Turbine Co. Ltd., Deyang, Sichuan 618000, China)

Abstract: Secondary droplet erosion in the penultimate stage of a nuclear power large steam turbine was investigated by CFD on the basis of the finite volume method. The discrete phase transport model of the water droplets was solved using the Lagrangian formulations, and the Eulerian conservation equations were applied to solve the steam flow in blade cascades. The mathematical model of steam flow and droplets movement in the cascade passage was established. The influence of axial clearance on the movement characteristic and deposition of secondary droplets was examined under the steady condition. The results show that the movement of all the water drops from the trailing edges of the stationary blade displays the tendency to slope up to the tip and then the deposition rates of water drops on all the walls in the blade passage can be obtained. The impact velocity of secondary drops on the moving blades decreases and the deposition rate of large droplets dropping onto the top of axial clearance increases if the axial clearance is greater. In addition, the suitable positions of the moisture-removal grooves should be distributed from the leading edge to 50% axial chord of the rotating blades according to the concentrated deposition areas of large droplets.

Keywords: steam turbine; secondary droplet; water erosion; deposition rate

汽轮机在电力能源中起着极其重要的作用,但在湿蒸汽下效率损失很大,叶片及其他固壁面由于长期处于高速水滴撞击环境中而备受侵蚀^[1-2].为了提高汽轮机运行的安全性和经济性,有必要研究叶栅湿蒸汽级内大水滴的运动特性及其在叶栅通道内的沉积规律.

汽轮机动叶栅内湿蒸汽水蚀已有详细的物理解释^[3].现有的研究和经验表明,汽轮机内直径小于50 μm 的水滴没有危害^[4],造成危害的水滴是直径为50~350 μm 的二次水滴^[4-5].二次水滴是指,饱和蒸汽于自发凝结过程中产生的雾滴,在静叶壁面沉积成水膜而后在出口边缘处被分离的大水滴.因此,准确分析静叶尾迹区二次水滴的运动特性是预防工作叶片受到水蚀、改善湿蒸汽透平级特性的一个重要方面.

汽轮机的理论机理分析^[6-7]常采用汽液两相数值模型进行,而通过测量手段来研究汽轮机二次水滴的相对较少^[8-12],特别是针对轴向间距影响叶栅内二次水滴的运动特性及沉积规律的更不多见.因此,本文以某核电大功率汽轮机次末级为研究对象,利用 Eulerian-Lagrangian 汽液两相流数值模拟方法,研究了不同轴向间距下二次水滴的运动特性及其在叶栅内固壁面的沉积规律,以期设计叶栅通流时的去湿方法提供理论参考.

1 湿蒸汽两相计算模型

1.1 蒸汽流场求解

基于蒸汽的真实热物理性质,通过求解定常三维黏性雷诺平均 N-S 方程模拟了叶栅流道的蒸汽流场.方程的离散格式为水平对流修正下的迎风差分格式,并具有二阶差分精度.湍流模型为加壁面函数修正的标准 $k-\epsilon$ 模型.蒸汽流动模拟计算时需准确地给定蒸汽的热物理属性,所以本文采用了 IAPWS-IF97^[13]提供的相关数据.

1.2 水滴输运模型

采用 Lagrangian 方法来追踪水滴的运行轨迹,每一个水滴颗粒为路径相同颗粒群的一个样本,追踪的颗粒视为可描述离散相平均特征的颗粒.为了得到一个合理的统计分布,需减小预测表面水滴沉积的分散度,增大追踪的颗粒数,并记录每一个颗粒流过计算区域的轨迹,确定固壁面上颗粒的沉积位置.进入动叶前的二次水滴均由脱离静叶片的水膜撕裂形成的,由于水膜运动速度很低,水膜撕裂形成二次水滴的历程较短,所以可以假定二次水滴形成

时的初速度很小.二次水滴的形状为球形,且数量较少,所以水滴之间碰撞的可能性很小.在运动过程中,若考虑二次或多次凝结,则二次水滴的尺寸会发生变化,而级间的间距不会很大,为了降低问题的复杂性却不违背物理本质,可以假定水滴的尺寸是不变的.低压汽轮机末级的通道壁面是湿润的,以一定倾斜角度撞击湿润壁面的水滴会附着在壁面上,因此认为水滴碰撞固体壁面后不会反弹.采用 Lagrangian 方法求解颗粒运动轨迹时需假设:①水滴为球状,无化学反应,不会破裂且不生长,轴向间距对水滴的雾化效应不予考虑;②水滴之间的相互作用忽略不计,水滴运动对流场的扰流不予考虑;③水滴撞击壁面时运动停止,水滴飞溅、反弹及水膜聚集等效应不予考虑;④水滴撞击固壁后的形状不改变;⑤二次水滴的起始位置在静叶尾缘处.

本文采用颗粒随机轨道模型来修正 Lagrangian 方法在描述颗粒运动上的误差,在运动方程的速度项中通过添加随机速度分量,来考虑了湍流对颗粒运动的影响,在连续相中考虑了运动水滴在诸多作用力下加速度的变化,包括汽固两相速度引起的滑移和颗粒自身的位移.在旋转坐标系下,由 Basset、Boussinesq 和 Oseen 推导的颗粒的运动方程^[14]为

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \frac{1}{8} \pi \rho_f d^2 C_D |\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p| (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p) + \frac{\pi d^3 \rho_f}{6} \frac{d\mathbf{u}_f}{dt} + \frac{\pi d^3 \rho_f}{12} \left(\frac{d\mathbf{u}_f}{dt} - \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} \right) + F_b + \frac{3}{2} d^2 (\pi \rho_f \mu)^{1/2} \int_{t_0}^{t_1} \left\{ \left(\frac{d\mathbf{u}_f}{dt'} - \frac{d\mathbf{u}_p}{dt'} \right) / (t - t')^{1/2} \right\} dt' - \frac{\pi d^3}{6} (\rho_p - \rho_f) \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}) - \frac{\pi d^3 \rho_p}{3} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u}_p) + F_U$$

式中: m_p 为颗粒质量; d 为颗粒直径; $\mathbf{u}$ 为速度; ρ 为密度; μ 为流体运动黏性系数; C_D 为阻力系数; F_b 为因重力引起的浮力; $\boldsymbol{\omega}$ 为旋转角速度; $\mathbf{R}$ 为标定旋转轴的方向矢量; F_U 为用户自定义的其他力; t_0 为起始时间;脚标 f 和 p 分别表示汽相和固体.

对于球状颗粒, F_b 给定,即

$$F_b = \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho_p - \rho_f) g$$

式中: g 为重力加速度.

C_D 来自球形固体颗粒摩擦阻力实验数据,取决于颗粒的雷诺数.在 $0.01 < Re_p < 260$ 范围内的阻力系数^[14]

$$C_D = \begin{cases} 1 + 0.1315 Re_p^{0.82-0.05 \lg(Re_p)}, & Re_p < 20 \\ 1 + 0.1935 Re_p^{0.6305}, & Re_p > 20 \end{cases}$$

1.3 计算模型的可靠性验证

由于汽轮机叶栅中湿蒸汽两相流动的实验数据难以获得,所以本文用文献[15]中板间距为 8 mm 的 A 型波纹板的实验结果来验证所述模型.波纹板中汽水分离是利用波形板通道的转向实现的.

图 1 为波纹板中水滴颗粒的运动轨迹.从图 1 可知: $d=5\text{ }\mu\text{m}$ 的水滴,其流动跟随性较好,该直径下大部分水滴均随汽流流出分离器; $d=10\text{ }\mu\text{m}$ 的水滴只有一部分被分离; $d=15\text{ }\mu\text{m}$ 的水滴可全部被分离.图 2 为波纹板分离效率的实验与计算结果对比,从图 2 可见,二者吻合较好,说明本文模型能够较为准确地描述汽流中的水滴运动特性.

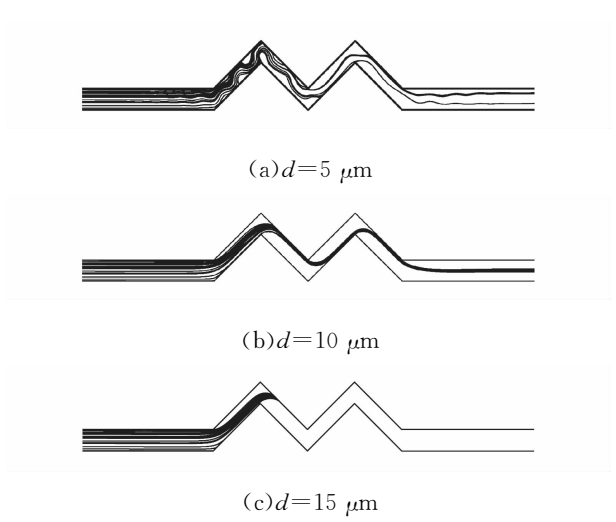


图 1 波纹板中水滴颗粒的运动轨迹

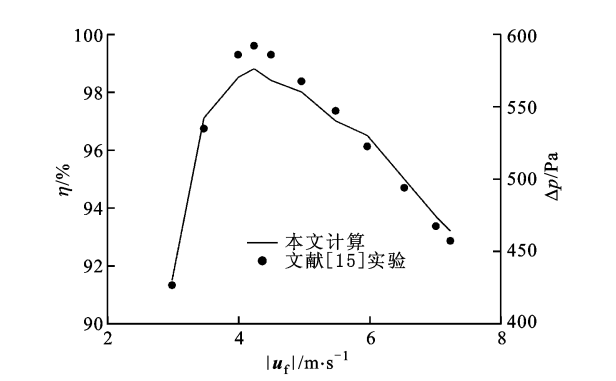


图 2 波纹板分离效率的实验与计算结果对比

2 研究对象和计算设置

研究对象为某核电大功率汽轮机次末级,该级中:静叶为 185 mm 叶长的等截面直叶片,叶片数为 72,几何出汽角沿叶高不变;动叶为 210 mm 叶高的

扭叶片,叶片数为 150,几何进汽角沿叶高逐渐减小.本文选取了 3 种轴向间距,分别为 45、60、75 mm,为了便于区别,依次称之为 L_{45} 、 L_{60} 、 L_{75} .图 3 为 3 种轴向间距的流道子午面.从图 3 可见,轴向间距不同,流道子午面上端壁的膨胀扩张角有所不同,即扩张角随轴向间距的加大而减小.

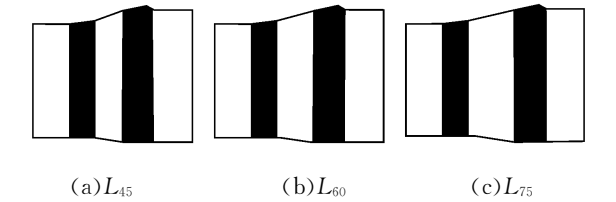


图 3 3 种轴向间距的流道子午面

计算域由 1 个静叶流道和 2 个动叶流道组成,在软件 Ansys ICEM 中,计算域为多块结构化网格.每个流道进、出口区域网格为 H 型,叶片周围区域网格为 O 型.对于单一流道,采用了 6 种大小不同的网格,网格数分别为 $5\times 10^5\sim 10^6$,其中 8×10^5 、 9×10^5 、 10^6 这 3 种网格下计算出的叶栅流道质量流量基本相同,可以认为网格数为 8×10^5 的单一流道具有网格无关性.对于对数壁面函数,近壁面网格需加密处理,且 $Y^+\approx 5$.

假定大水滴的起始位置位于静叶尾缘,因此在尾缘母线上沿叶高均匀布置了 10 股水滴,每股水滴含有 100 个有代表性的水滴,水滴直径 d 依次为 10、50、100 μm .根据文献[16],水滴脱离的初速度介于 0.5~3 m/s 之间,其中以 1~2 m/s 的居多,因此本文水滴脱离的初速度定为 1.5 m/s.根据文献[8-12],二次水滴质量仅占叶栅内全部水分的 1%~3%,所以本文的二次水滴质量为静叶栅出口水的总质量的 2%.边界条件基于该级实际运行的额定工况.对于进口,给定总温、总压和汽流角;对于出口,由简单径平衡方程给出周向质量平均背压.动叶给定额定运行转速和静、动叶交界面.周向边界为周期性边界,壁面,如上下端壁面叶片表面,假定为绝热无滑移壁面.对于粒子与壁面的作用,由法向和切向碰撞恢复系数来描述,根据 1.2 节模型的假设③知,计算中这 2 种碰撞恢复系数均为 0.

3 计算结果分析

3.1 水滴的运动特性

图 4 为蒸汽和水滴的速度三角形.尾缘脱落的水滴在主流蒸汽中加速,若水滴的绝对速度 u_p 和蒸汽的绝对速度 u_t 相差很小,水滴就可跟随蒸汽流过

动叶片区域而不产生侵蚀。如果水滴的质量很大或轴向间距过小,水滴的速度不能加速到接近蒸汽的速度,两者的相对速度之差 Δw 很大,于是水滴的运动方向将偏离主流蒸汽运动的方向,并以非设计工况的负冲角撞击动叶栅的固壁面。轴向间距越大,水滴在静叶中加速的距离越长,蒸汽就有足够的时间来加速水滴;水滴直径越小,其撞击叶片的相对速度就越低。

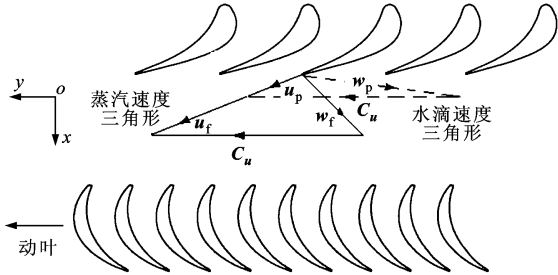


图4 蒸汽和水滴的速度三角形

图5为静叶尾缘后水滴的运动轨迹。从图5看出,水滴的运动轨迹具有沿叶片径向向叶顶倾斜的趋势,呈抛物线形式。在静叶栅内,受子午流道扩张的影响,蒸汽流线向叶顶倾斜,气动拖曳力作用下的粒子运动自然向叶顶倾斜。粒子直径越小,质量惯性力越小,粒子更易被汽流所携带,水滴运动的径向位移就越大。当 $d=10\ \mu\text{m}$ 时,水滴与蒸汽的跟随性最好,水滴运动轨迹与蒸汽基本一致;当 $d=50\ \mu\text{m}$ 时,水滴运动轨迹会偏离蒸汽流线,但偏离的程度较小;当 $d=100\ \mu\text{m}$ 时,水滴运动轨迹偏离了蒸汽流线,并沿叶高径向呈直线,但径向位移很小。水滴进入动叶,即水滴进入旋转空间后,其运动主要取决于水滴本身的惯性离心力和汽流携带的拖曳力。水滴直径越大,其向叶顶抛离的程度越大,径向位移越大。相比静叶栅内的水滴,进入动叶后的水滴,其运动方向的折转程度更大,向叶顶的翘曲程度更大。

改变动、静叶轴向间距时,相同直径的水滴在空间的运动会发生变化。如果轴向间距较大,子午流道的膨胀扩张角较小,则蒸汽流线向叶顶倾斜的程度越小,水滴的径向位移越小。随着轴向间距继续加大,水滴加速的空间增大,静叶栅内水滴的轴向速度增大。因此,水滴的径向位移越大,水滴落入到轴向距上端壁的概率越大。

对于小粒径水滴,其中一部分能顺利地穿过动叶流场通道进入下一级;对于大粒径水滴,由于进入动叶栅时水滴速度与汽流法向分速度的差异较大,

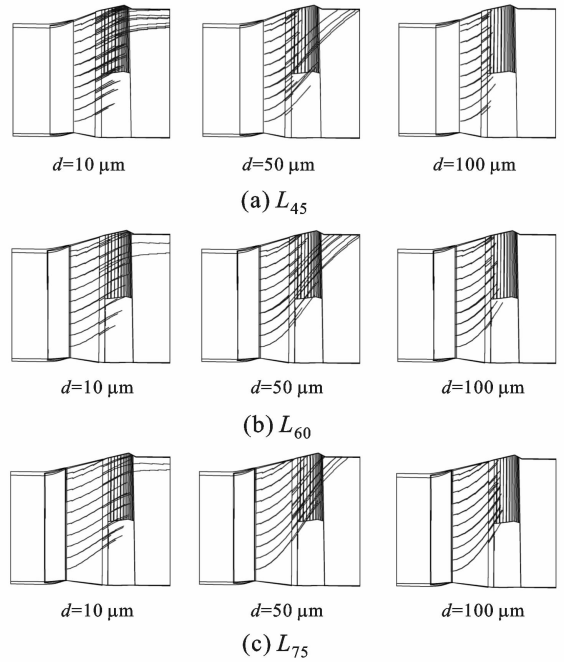


图5 静叶尾缘后水滴的运动轨迹

所以该粒径的大部分水滴与邻近动叶的吸力面相撞击,从而导致水滴沉积的区域极其分散,这不利于解决动叶表面除湿问题。轴向间距越大,水滴运动的空间越大,靠近静叶叶顶的水滴将逐渐落入动、静叶轴向间距的上端壁,其他水滴在动叶表面沉积,沉积区域相对集中,沉积位置由于集中在动叶叶顶上半部的叶高区域。

3.2 水滴沉积规律

为了便于描述,本文用 T1 表示动、静叶轴向间距的上端壁,用 T2 表示动叶上端壁,用 PS 表示动叶压力面(凹面),用 SS 表示动叶吸力面(凸面),用 OUT 表示跟随主流蒸汽流出动叶而未沉积的水滴。计算时选取的有代表性的水滴颗粒总数为 1 000,不同固壁区域沉积的液滴数为 N ,则水滴的沉积率

$$\eta = (N/1\ 000) \times 100\%$$

表1~表3为水滴在不同轴向间距下的沉积率。从表中可以看出: L_{45} 下 $d=10\ \mu\text{m}$ 小水滴主要沉积在叶片的压力面,其次沉积在动叶吸力面和动叶叶顶区域,沉积范围较大;增大水滴直径,吸力面上的沉积率急剧增大,70.4%的 $d=50\ \mu\text{m}$ 的水滴沉积在动叶吸力面上,22.4%的水滴沉积在压力面,少量水滴沉积在动叶叶顶区域; $d=100\ \mu\text{m}$ 的大水滴全部沉积在叶片的吸力面上。可见,轴向间距越小,大水滴与主流蒸汽的相对速度的偏差越大,动叶吸力面的水蚀、叶片压力面的侵蚀的可能性就越大。

表 1 L_{45} 下水滴的沉积率

$d/\mu\text{m}$		10	50	100
$\eta/\%$	OUT	4.7	4.0	0.0
	T2	14.0	3.2	0.0
	SS	11.1	70.4	100.0
	PS	70.2	22.4	0.0

表 2 L_{60} 下水滴的沉积率

$d/\mu\text{m}$		10	50	100
$\eta/\%$	OUT	6.2	0.8	0.0
	T2	10.8	18.2	0.0
	SS	11.8	60.6	93.5
	PS	71.2	20.4	6.5

表 3 L_{75} 下水滴的沉积率

$d/\mu\text{m}$		10	50	100
$\eta/\%$	Out	5.4	0.0	0.0
	T1	0.0	10.4	19.1
	T2	16.9	29.4	2.6
	SS	9.9	45.1	78.3
	PS	67.8	15.1	0.0

当轴向间距发生改变时, $d=10\text{ mm}$ 的小水滴在相同固壁面区域的沉积率基本相同,仅有 5%的水滴流出动叶,沉积情况为:吸力面上 $\eta=10\%$,压力面上 $\eta=70\%$,动叶上端壁上 $\eta=15\%$ 左右.这表明,小直径水滴在固壁面上的沉积率受轴向间距的影响很小.小水滴在跟随主流流动时,如果主流流线曲率变化不大,则水滴流向不会偏离主流;如果主流流线曲率变化较大,加速到一定速度的水滴会由于自身动量较大而撞击在叶型曲率发生变化的压力面上,因此压力面为小水滴的主要沉积区,表明小水滴的沉积规律主要取决于动叶栅的流道形状.

增大轴向间距会影响大直径水滴的沉积率.对比 L_{45} , L_{60} 下 $d=50\text{ }\mu\text{m}$ 的水滴在动叶吸力面上的沉积率减小, $\eta=60.6\%$,动叶压力面上的沉积变化很小,水滴抛落到动叶上端壁的有所增加, $\eta=18.2\%$; $d=100\text{ }\mu\text{m}$ 的水滴大部分沉积在动叶吸力面上,小部分沉积在动叶压力面上.相比 L_{60} , L_{75} 下 $d=50\text{ }\mu\text{m}$ 和 $d=100\text{ }\mu\text{m}$ 的水滴主要沉积在动叶吸力面, η 均下降了 15%,而在轴向间距上端壁区域的 η 分别为 10.4% 和 19.1%. 这表明:在轴向间距上端壁设置吸水槽,可以减小水滴在动叶表面上的沉积率,对大颗粒水滴尤其有效;加大轴向间距有益于

去湿.从大水滴的沉积率来看,水滴质量占静叶叶栅出口的水的总质量的 10%~20 % 时,核电大功率的汽轮机次末级去湿仅依靠加大轴向间距进行是不够的.

图 6 为动叶表面水滴沉积率随相对轴向弦长 (X/B) 的分布.从图 6 看出: $d=10\text{ }\mu\text{m}$ 的小水滴的沉积位置在压力面,范围宽,分散度高,当叶型曲率

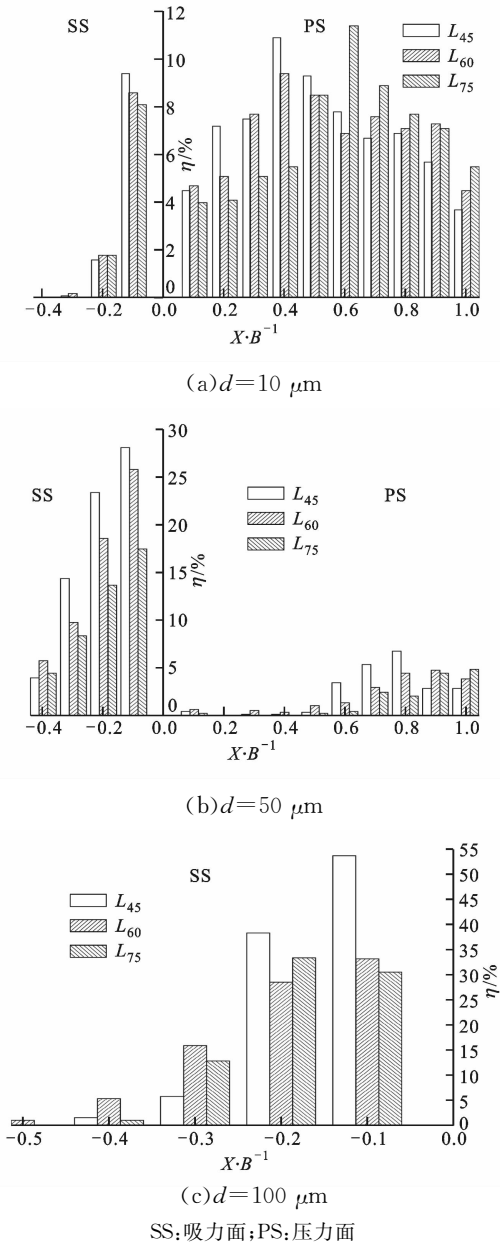


图 6 动叶表面水滴沉积率随相对轴向弦长的分布

变化较大时,40%~60%轴向弦长区域中沉积率更大,也就是说,仅有少量水滴沉积在吸力面前缘至 20%轴向弦长区域中; $d=50\text{ }\mu\text{m}$ 水滴主要沉积在动叶上半部的前缘至 40%轴向弦长区域之间,仅有少量水滴沉积在压力面的 70%轴向弦长至尾缘区域

之间,沉积范围相对集中; $d=100\ \mu\text{m}$ 水滴主要沉积在吸力面上半部的前缘至50%轴向弦长区域之间,沉积范围窄,分散度低.动叶受水滴冲击的区域是靠近前缘的吸力面区域,可见大水滴是产生水蚀的根源.

4 结 论

通过分析可得到以下结论.

(1)子午面流道的膨胀、扩张造成了静叶出口区域主流流面向上翘曲,使得脱离尾缘的水滴在叶栅通道中的运动呈现向上端壁倾斜.同一轴向间距下,水滴直径越大,水滴在静叶叶栅中的径向位移越小,在动叶叶栅中更易抛离叶顶,径向位移增大更为明显,运动轨迹折转更加显著.

(2)加大动、静叶轴向间距来减轻水蚀的2个有利因素是:①减小水滴与主流蒸汽的相对速度;②增大直径水滴在轴向间距上端壁区域的沉积率.增加轴向间距会降低动叶工作负荷,增大动叶叶栅中的流动损失.由于汽轮机自身空间受限,在获得一个相对较高除湿效率的情况下,为了保证叶片安全运行,轴向间距应尽可能小.

(3)大直径水滴主要沉积在吸力面上半部的前缘至中弦区域之间,所以在动叶表面的这一区域可以设置一系列的除湿沟槽,在动叶叶顶部制作一个拱形排水围带,可以解决水滴集中沉积的问题.

参考文献:

- [1] RYZHENKOV V A, LEBEDEVA A I, MEDNIKOV A F. Erosion wear of the blades of wet-steam turbine stages: present state of the problem and methods for solving it [J]. Thermal Engineering, 2011, 58(9): 713-718.
- [2] AVERKINA N V, ZHELEZNYAK I V, KACHURINER Y Y, et al. Wet-steam erosion of steam turbine disks and shafts [J]. Power Technology and Engineering, 2011, 44(5): 386-393.
- [3] XU L, YAN P G, HUANG H Y, et al. Effects of hot steam injection from the slot at the trailing edge on turbine nozzle vane flow field [J]. Journal of Thermal Science, 2008, 17(4): 298-304.
- [4] HESKETH J A, WALKER P J. Effects of wetness in steam turbines [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2005, 219(12): 1301-1314.
- [5] BAKHTAR F. Special issue on wet steam; part 2 [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2005, 219(12): 1-3.
- [6] FAKHARI K. Unsteady phenomena in the condensing steam flow of an industrial steam turbine stage [C] // 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibition. Reston, VA, USA: AIAA, 2008: 1449.
- [7] RUBECHINI F, MARCONCINI M, AMONE A, et al. Some aspects of CFD modeling in the analysis of a low-pressure steam turbine [C] // Proceedings of the ASME Turbo Expo. New York, USA: ASME, 2007: 519-526.
- [8] KLEITZ A. Water droplet sizing in LP and HP wet steam turbines [C] // Fluid Machinery Forum. New York, USA: ASME, 1991: 99-104.
- [9] BAKHTAR F, RASSAMVS Y, ZHANG G. On the performance of a cascade of turbine rotor tip section blading in wet steam; Part 4 Droplet measurements [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 1999, 213(4): 343-353.
- [10] CAI X, NING T, NIU F, et al. Investigation of wet steam flow in a 300 MW direct air-cooling steam turbine; Part 1 Measurement principles, probe, and wetness [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy, 2009, 223(5): 625-634.
- [11] BAKHTAR F, MAMAT Z A, JADAYEL O C, et al. On the performance of a cascade of improved turbine nozzle blades in nucleating steam; Part 1 Surface pressure distributions [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2009, 223(8): 1903-1914.
- [12] DU L P, TIAN R F, ZHANG P F, et al. Numerical simulation and experiment investigating the performance of a capacitance sensor measuring the humidity of wet steam [J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(12): 233-236.

(下转第81页)