

汽轮机缝隙抽湿式隔板中的水份运动特性*

张乃成 俞茂铮 蔡颐年

(能源与动力工程系)

摘 要

本文计算并分析了湿蒸汽汽轮机级隔板中大分散度水份的尺寸分布、运动特性及沉积位置。利用平板上的气-水膜两相流试验装置,研究了流动参数对沉积水份流动形式的影响,并测定了壁面上抽湿缝隙的去湿率与抽吸压差、缝隙宽度、汽流切应力及水膜雷诺数等参数的关系。

关键词: 两相流动; 湿蒸汽透平; 隔板; 流动参数测量

中国图书资料分类法分类号: TK121

0 前 言

湿蒸汽汽轮机级中沉积在隔板叶道中的水份是造成动叶片水蚀损坏的主要根源。一种较有效的防水蚀措施是在隔板叶道表面上开设缝隙,利用叶道与凝汽器之间的压差抽除被汽流切应力驱动的叶道表面上的水份。这种措施的去湿效果取决于缝隙的位置是否与水份沉积位置相适应,以及缝隙尺寸是否和抽吸压差、水膜雷诺数及汽流作用于水膜表面的切应力相匹配。生产实践中大多凭直观的想象来确定缝隙位置及尺寸,因而难以保证最大的去湿效果。本文拟就凝汽式汽轮机末级隔板中大分散度水份的尺寸分布及运动轨迹的计算结果,分析布置缝隙位置的一般原则;并利用平板上流动水膜的抽吸试验,确定抽吸压差、缝隙宽度、水膜雷诺数和汽流作用于水膜表面切应力对抽湿效果的影响,得出去湿率与这些参量的综合关系,以供设计人员参考。

1 大分散度水份的运动规律

在汽轮机末级隔板叶道表面沉积的水份中,少部分是由直径在 $1\mu\text{m}$ 以下的雾滴通过边界层中的扩散过程沉积而来,大部分则是次末级动叶表面上的水膜在动叶出口处撕裂后形成的大分散度水份(最大直径可达 $100\sim 200\mu\text{m}$)通过惯性撞击作用而沉积于叶道表面的,因此确

收到日期:1988-10-21

*国家自然科学基金资助项目

定大分散度水份的运动规律及沉积位置对合理布置抽湿缝隙有着重要意义。

根据水滴在平面叶栅叶道内运动轨迹的计算结果^[1],直径在 $10\mu\text{m}$ 以上的水滴运动轨迹基本上不受气流的影响,而是以接近直线运动的形式撞击叶道壁面而沉积或者穿过叶道流出叶栅。因此,大水滴在隔板叶道表面的沉积位置及沉积量,主要决定于水滴在静叶进口的运动方向。

大水滴在末级隔板静叶进口的运动方向及速度取决于水滴在次末级动叶后轴向间隙中的运动特性。水滴在轴向间隙蒸汽流场的轨迹及速度变化,可通过求解水滴的运动微分方程得出

$$\frac{d\vec{c}_w}{dt} = 0.75\psi \frac{\rho_s |\vec{c}_s - \vec{c}_w| (\vec{c}_s - \vec{c}_w)}{\rho_w d} \quad (1)$$

式中, d 为水滴直径; c_s 、 c_w 、 ρ_s 、 ρ_w 分别为蒸汽及水滴的速度和密度; ψ 为阻力系数,可按气体绕流刚球的通用阻力系数公式确定。

在次末级动叶出口,水膜破裂形成的最大水滴的直径 d_{max} ,可取临界韦伯数为 14,由下式确定

$$We_{cr} = \rho_s d_{max} |\vec{c}_s - \vec{c}_w|^2 / \sigma = 14 \quad (2)$$

用流线曲率法算出次末级动叶后轴向间隙中的轴对称蒸汽流场后,即可用差分法沿水滴轨迹求解式(1),得出次末级不同径向截面上动叶出口处水膜破裂后形成的各种直径水滴沿径向、圆周向及轴向的运动轨迹。

作者根据上述方法计算了两台相同功率,不同型号汽轮机(分别以a及b表示)次末级动叶出口形成的二次水滴的运动特性及沉积位置。图1表示了计算所得的动叶各出口截面上由水膜撕裂形成的二次水滴最大直径 d_{max} 沿径向的变化。由图可见, d_{max} 沿径向减小。这是由于水滴离开动叶时的运动速度 c_w 近似等于当地的动叶圆周速度,而动叶出口处蒸汽速度的大小及方向沿径向变化不大,因而汽液相对速度 $|\vec{c}_s - \vec{c}_w|$ 沿径向增大,所以按式(2)计算所得的最大水滴直径沿径向减小。两台汽轮机的最大水滴直径相差较大的原因,是由于动叶出口的蒸汽速度 $\vec{c}_s$ 的大小与方向不同以及蒸汽压力的不同所造成的。由此可知,蒸汽流场对湿蒸汽级中大分散度水份的尺寸分布有着重要影响。由于水滴尺寸的差别,水滴的运动特性及沉积位置也会受到影响。所以,不同机组或同一机组在不同工况下的水份沉积规律可能会有很大差别。

图2及图3分别表示了上述两台机组次末级动叶出口不同半径截面上形成的水滴在轴向间隙中沿圆周向、径向及轴向的运动轨迹。由图可知,水滴脱离动叶后,开始以动叶圆周速度沿圆周向运动,然后由于离心力及蒸汽作用力的影响,运动方向朝径向及轴向偏斜。在末级隔板静叶进口,水滴运动方向折转的程度及水滴速度的变化与水滴尺寸、轴向间隙尺寸、蒸汽压力、蒸汽速度的大小和方向有关。一般来说,轴向间隙越小或水滴尺寸越大,则水滴将以较大的负冲角流向静叶背面(如图2a所示),此时在背弧开设抽吸缝隙会取得一定的去湿效果。

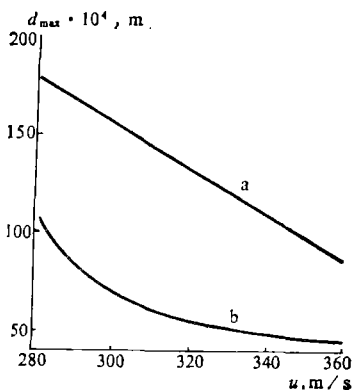


图1 次末级动叶出口形成的二次水滴最大直径沿径向的变化

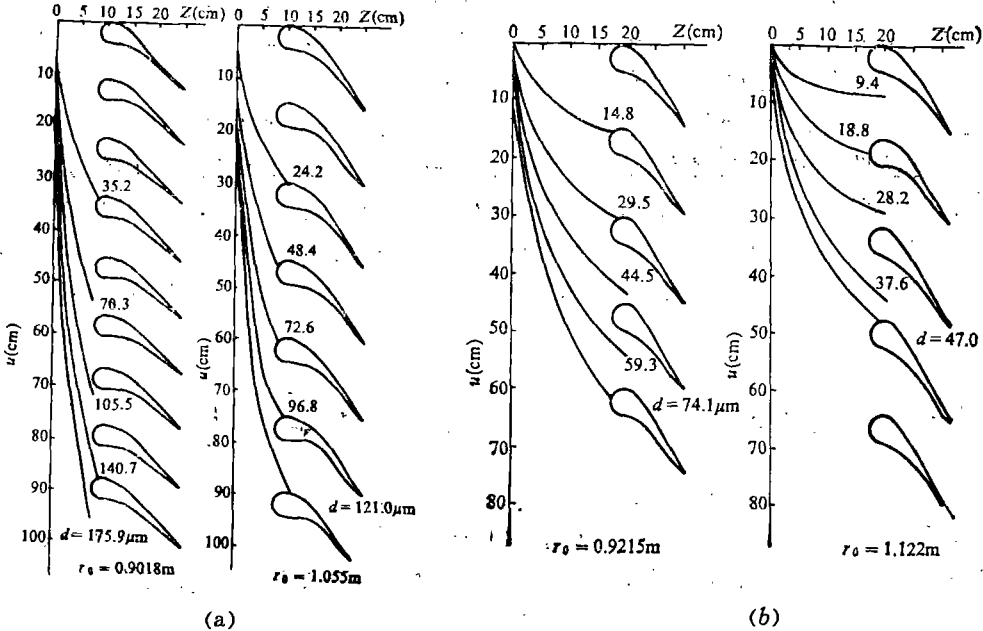


图2 大水滴沿圆周向和轴向的运动轨迹

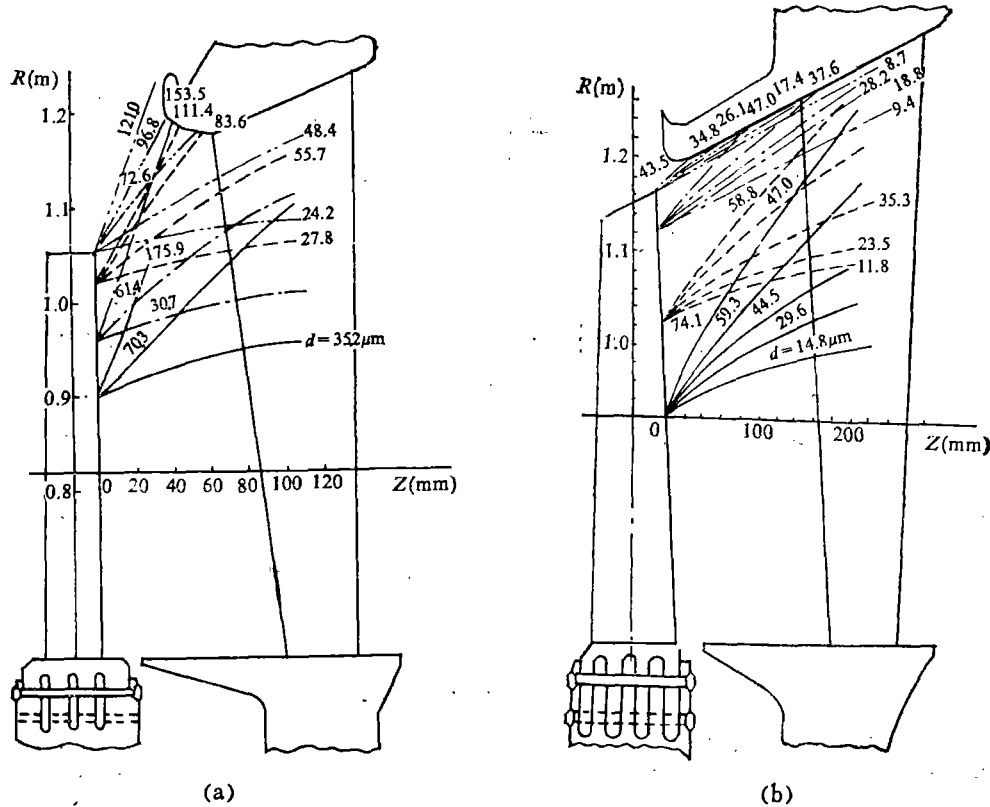


图3 大水滴沿径向和轴向的运动轨迹

由图 3 还可知，次末级动叶顶部区域流出的水份将有相当部分落入隔板通道端壁上，在

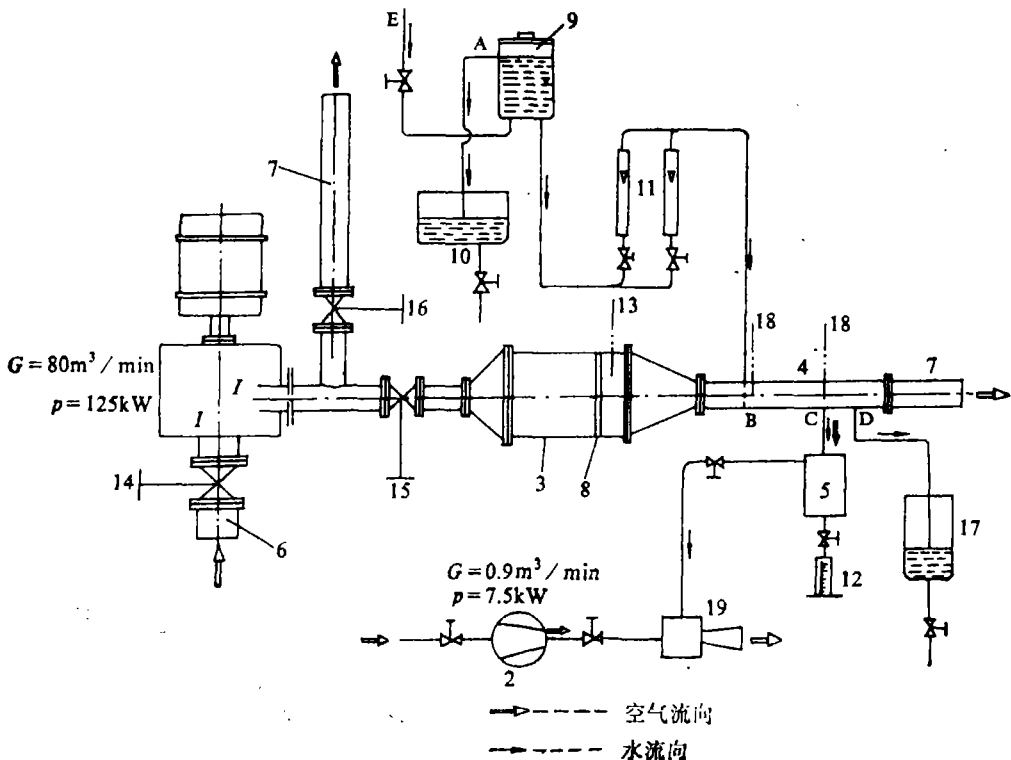
叶道扩张角设计得不太合理的情况下,这些水份可能会由于汽流旋涡而脱离壁面,加剧末级动叶端部的水蚀。因此,在末级隔板叶道前部的端壁上开设缝隙抽除端壁上的水膜也有利于减轻动叶水蚀,并能部分地起到防止气流分离的作用。

沉积在壁面上的水份,在汽流的切力作用下,将以分散的细流或成片的水膜形式流经缝隙。水份的流动形式取决于水膜雷诺数 Re 、表面张力 σ 及作用在水膜表面上的切应力 τ 等因素。缝隙的去湿率 η 为被抽吸的水量 G_s 与叶片表面上的水份流量 G 之比, $\eta = G_s/G$ 。 η 与抽吸压差 Δp 、缝隙宽度 l 、水膜雷诺数 Re 及汽流切应力 τ 等有关。如忽略叶道表面曲率的影响,缝隙抽湿的效果可近似采用平板上的水膜流动模型,用实验的方法研究 η 与上述各量之间的关系。

2 壁面上水份的流动形式及缝隙去湿特性的试验研究

图4及图5分别为试验装置系统图及试验段结构图。

试验段4为90mm×90mm的方形通道,底板由不锈钢制成。试验水由稳流水箱9通过底板前部宽为0.5mm的窄缝流入底板,并被由风机1供应的空气流所驱动,在底板上形成水膜

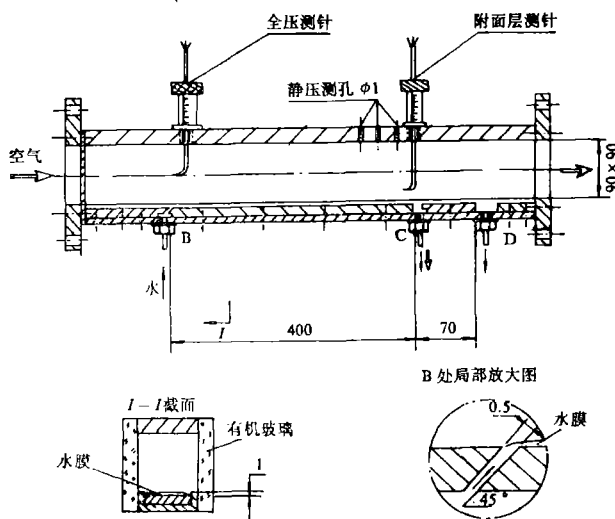


1—空气压缩机, 2—移动式空气压缩机, 3—稳流段, 4—实验段, 5—抽吸腔, 6—进气管道, 7—排气管道, 8—整流段, 9—稳流水箱, 10—集水箱, 11—玻璃转子流量计, 12—量筒, 13—总压、总温测量处, 14—进气管, 15—实验段控制阀, 16—排气管, 17—回水箱, 18—全压测针, A—溢流点, B—进水点, C—抽吸点, D—回水点, E—接水源。

图4 气-水膜两相流试验装置系统图

或细流。稳流水箱A点处的溢流口使水箱中的水位维持一定,以保证稳定的水膜流量。水膜流量由转子流量计11测定,并可用流量计前的阀门调整流量。

底板C处为抽吸水膜的缝隙,其后的平板可移动,用以调整缝隙的宽度。通道C处与抽吸腔室5之间的抽吸压差 Δp 由与腔室相连的空气引射器19产生。引射空气由专用的压气机2供应。 Δp 可通过阀门控制。水膜流过缝隙时,部分水膜和空气被同时抽入抽吸腔内。抽入的空气经由抽吸腔上部孔口排出,抽入的水则流入腔室下部的测量筒12,未被抽入的水份在回水点D处流入回水箱17。



B—进水点, C—抽吸点, D—回水点,

图5 试验段结构图

调整风机后的控制阀15可改变流入通道的气流动压头 $\frac{1}{2}\rho c^2$, 试验时的最大空气速度为130m/s, 其动压与汽轮机末级隔板中蒸汽主流的动压相近。设计时已考虑到使抽吸点C处平板上的气流附面层进入完全紊流区, 因此可用装在该处通道顶板上的附面层测针测出C点前的附面层速度分布, 并将它表示在 $u/u_\infty \sim \ln u_\infty y/\nu$ 坐标图上 (ν 为气体的运动粘性系数)。根据紊流边界层的壁模型, 可由下式求出气流作用在水膜表面上的切应力

$$\tau = k^2 \rho u_\infty^2 \lg^2 \alpha \quad (3)$$

式中 u_∞ 为主流速度, $k=0.4$ 为混合长度常数, α 为测得的速度分布曲线倾斜角。用这种方法测得的切应力误差在15%之内^[2]。

气流的静压、全压及温度均用常规方法测得。水膜的雷诺数由测得的水流量 G 按下式确定

$$Re = \frac{G}{\mu b} \quad (4)$$

式中, μ 为水的动力粘性系数, b 为水膜宽度, $b=70\text{mm}$ 。

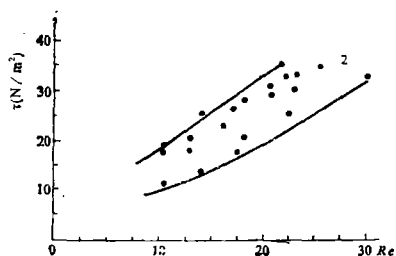
试验时, 先将抽吸缝隙宽度 $\angle$ 调整到一定数值, 然后在一定的抽吸压差及气流速度下, 测出气流作用于壁面的切应力以及不同水膜流量时的去湿率 η 。

图6表示了在不同的切应力及水膜雷诺数下, 板面上水份呈细流或水膜形式流动的区域。图中区域3为细流区, 区域1为水膜流动区, 区域2为过渡区。

由图6可知, 在一定的水膜流量下, 当气流切应力大到一定数值时, 水膜即破裂为细流。水膜雷诺数越小, 使水膜破裂的切应力也越小。显然, 沉积在叶道表面上的水份以细流形式

流经缝隙时,会有较多的蒸汽与水一起被抽走,从而使级效率降低。

图7表示了 $\angle = 3\text{mm}$ 时,在不同的抽吸



1—水膜区, 2—过渡区, 3—细流区。

图6 切应力及水膜雷诺数对壁面上水份流动形式的影响

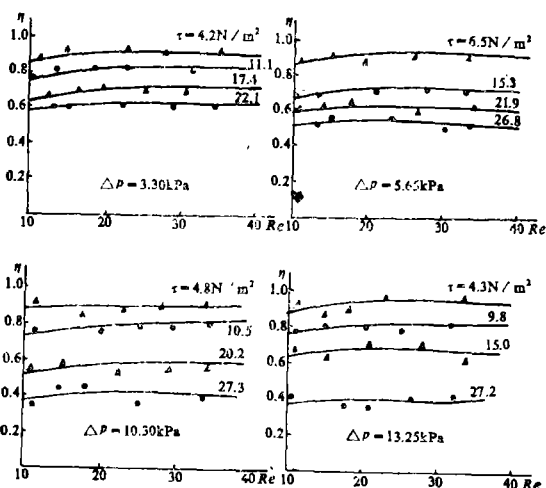


图7 缝隙去湿率的试验结果($\angle = 3\text{mm}$)

压差 Δp 下,去湿率与切应力及水膜雷诺数的关系,图中取切应力作为参变量。由图可知,抽吸压差一定时,去湿率随切应力的增大而减小。在试验范围内($Re = 0 \sim 50$),水膜雷诺数对去湿率的影响却不明显。根据计算,末级隔板叶道表面上的水膜雷诺数一般在50以下,所以设计缝隙时,应当着重注意汽流切应力与抽吸压差的匹配关系。

图8a表示了在一定的水膜雷诺数下($Re = 10$),去湿率与压差及切应力的关系,图中以切应力作为参变量。由图8a可知,在 $\angle = 2\text{mm}$ 时,增加压差对提高去湿率有较大效果;但当 $\angle = 3\text{mm}$ 时,压差对去湿率的影响并不明显。

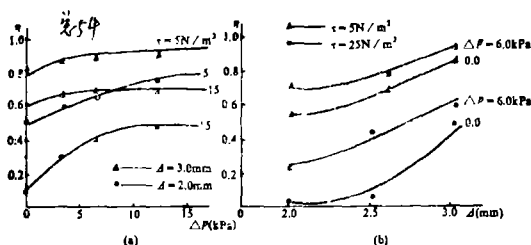


图8 缝隙去湿率的试验结果($Re = 10$)

图8b表示了在一定抽吸压差、汽流切应力及水膜雷诺数下,缝隙宽度对去湿率的影响。由图可见,增加缝隙宽度对提高去湿率有明显效果;但过宽的缝隙会增加汽流流动损失,并使被抽吸蒸汽量增加。

在设计缝隙抽湿式隔板时,可利用上述综合关系曲线,根据透平级和凝汽器的工作参数以及隔板通道中水份沉积量的计算结果

选择合适的缝隙位置及结构参数,并估计去湿效果。

3 结 论

(1) 低压汽轮机隔板中,大分散度水份的尺寸分布、运动规律及沉积位置主要取决于前一级动叶的圆周速度及动叶出口蒸汽流场。级间轴向间隙的尺寸大小对水份沉积位置也有一定影响。

(2) 沉积在隔板通道壁面上的水份,按照水份流量及所受汽流切应力的大小不同,或

(下转第116页)

(上接第80页)

者以细流形式流动,或者以水膜形式流动。在汽轮机末级隔板通道表面可能达到的水份沉积量范围内,缝隙抽吸的去湿效果主要取决于缝隙宽度、抽吸压差及汽流切应力,水份流量对去湿率的影响不明显。

(责任编辑 蒋慧姝)

参 考 文 献

- 1 俞茂铮,黄跃.汽轮机末级隔板中的水份沉积规律及去湿方法.汽轮机技术,1988(5):44~50
- 2 Ellis S R M, Gay B. The Parallel Flow of Two Fluid Streams, Interfacial Shear and Fluid-Fluid Interaction. Trans. Inst. Chem. Eng. 1959, 37: 206~213

MOTION BEHAVIOURS OF LIQUID IN THE STEAM TURBINE DIAPHRAGM WITH SUCTION SLITS FOR MOISTURE REMOVAL

Zhang Naicheng Yu Maozheng Cai Yinian

(Department of Energy and Power Engineering)

Abstract

The size distribution, motion behaviours and deposition positions of the coarse water droplets in the diaphragm of wet steam turbines were calculated and analysed. Using a two-phase flow test rig with air-water film flow on a plate, the effects of flow parameters on the motion pattern of the deposited liquid were investigated and the correlations of moisture-removal rate of suction slit with the slit width, suction pressure drop, interfacial shear stress and film Reynolds number were determined.

Keywords: *two-phase flow; wet steam turbine; diaphragm; flow parameter measurement*