

## 弯叶片降低汽轮机动叶片水蚀危险性的数值研究\*

姚 宏, 周 逊, 韩万龙, 王仲奇

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 为研究弯叶片对叶片水蚀的影响, 以一湿蒸汽级为对象, 基于数值方法对五种弯扭设计方案进行了对比分析。同时也研究了降低汽轮机叶片水蚀的措施, 结合汽轮机的实际工况, 基于美国WESTHOUSE公司的水蚀评估标准, 研究了几种弯叶片的流场与水蚀危险性。研究表明, 弯叶片通过改变流场结构可有效地降低水蚀危险性。与传统叶片造型方式相比, 采用尾缘积迭方式构造叶片时可降低水蚀系数40%以上; 正弯叶片会增加叶片水蚀危险性, 反弯叶片虽然可降低顶部水蚀系数但却增大了中部水蚀系数; 根部正弯、顶部反弯15°设计弯叶片在维持中部较低的水蚀系数的同时, 可降低顶部水蚀系数60%左右; 弯叶片通过改变径向压力分布改变了湿度分布, 从而改变了水蚀危险性。

**关键词:** 弯叶片; 气动设计; 水蚀; 汽轮机; 数值研究

中图分类号: V263.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2016) 11-2065-07

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2016.11.009

## Numerical Study for Effects of Bowed Blade Design on Preventing Water Erosion in Rotor Blade of Steam Turbine

YAO Hong, ZHOU Xun, HAN Wan-long, WANG Zhong-qi

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In order to study the effects of the bowed stator blade on the level of water erosion on the rotor blade, five variant bowed cases of a wetness turbine stage were evaluated through numerical simulations for the comparison and analysis of the overall performance of variant bowed blades. To search an effective method for preventing water erosion on the rotor blades of a steam turbine in the working conditions, based on WESTHOUSE Co.'s criterion of water erosion, the water erosion performance of variants of bowed blade were researched. Simulation results indicate that bowed blade could effectively decrease the level of water erosion on the rotor blade. Compared with the traditional straight blade, the stator blade with the trailing edge stacking law could reduce the water erosion coefficient by more than 40%. The positive bowed stator blade could increase the water erosion hazard on the rotor blades, and the negative bowed stator blade could reduce the water erosion hazard on the top of the rotor blades but make the water erosion hazard on the middle of the rotor blades increased. The stator blade adopted the positive bowed root and negative bowed top with 15° could remain the low level of water erosion in the middle of the rotor blade and reduce the water erosion coefficient in the top of the rotor blade by about 60%. The bowed stator blade could change the moisture distribution through changing the radial pressure distribution, which changed the water erosion hazard eventually.

**Key words:** Bowed blade; Aerodynamics design; Water erosion; Steam turbine; Numerical simulation

\* 收稿日期: 2015-06-23; 修订日期: 2015-08-17。

作者简介: 姚 宏, 男, 博士生, 研究领域为叶轮机械气动热力学。E-mail: mchyh@tom.com

## 1 引言

汽轮机做为发电设备的关键装置,其性能与安全性一直以来都被高度重视,其中与性能和安全性均密切相关的湿蒸汽问题是至今为止仍在深入研究的课题之一<sup>[1]</sup>。在凝汽式汽轮机末几级以及饱和蒸汽发电、低温余热发电等均会遇到湿蒸汽水蚀问题。湿蒸汽流动一方面会产生湿汽损失降低级效率;另一方面也对动叶产生水蚀,引起振动、叶片断裂等问题。

当前广泛采用的减轻水蚀的方法主要有两类:(1)对易水蚀的动叶片顶部吸力侧前缘附近进行电火花强化、镶焊耐水蚀合金片、局部火焰淬硬、激光熔覆等工艺处理以此提高叶片的抗水蚀能力;(2)在静叶表面设计径向除湿槽、采用空心静叶片除湿或加热等减少水滴的措施与方法。除这两类被动防护措施外,在气动与结构设计中还可通过加大静动间隙、静叶顶部前掠等方式来增大水滴速度减轻对动叶片的直接撞击,从而减轻叶片水蚀。

随着计算机技术、研究方法、研究工具等相关方面的发展,近年来国内外研究机构以数值模拟、实验及理论分析的方式对水蚀相关问题从其产生机理、发展过程、两相流动、湿度测量等各方面进行了全面研究。一些新的成果也不断出现,为工程设计提供了有益的指导,有助于重新认识影响水蚀现象的重要因素、提出新的降低水蚀的设计方法。

在水蚀产生机理方面,鄢宇鹏等<sup>[2]</sup>综合论述了有关叶片水蚀的几个重要方面:高速撞击理论、破坏机理、材料性能与试验研究。贾晓梅等<sup>[3]</sup>综合论述了水蚀机理、发展过程和防护方法。Yongqiang等<sup>[4]</sup>研究了水滴高速冲击与固体表面变形之间的关系,Koka等<sup>[5]</sup>研究了压缩机叶轮水蚀现象,两者均以数值模拟的方式研究了水滴与固体表面的相互作用,指出水滴冲击产生的破坏与流场相关,数值模拟结果与现有理论及实验结果相比具有较好的一致性。Azevedo<sup>[6]</sup>, Xiujun<sup>[7]</sup>, Ahamd<sup>[8]</sup>, Starzmann<sup>[9]</sup>等也详细研究了水蚀相关问题。总的来说,蒸汽在叶栅中膨胀越过饱和线后并不会立即凝结,只有当越过Wilson线后才开始凝结,水滴直径约为0.01~1 $\mu\text{m}$ 。其中一小部分很快再蒸发为蒸汽,然后又凝结在一些较大的水滴上形成更大的水滴。这些水滴大部分随蒸汽主流流过叶栅,只有一小部分附着在静叶表面形成水膜,在主流作用下向静叶出汽边运动。在静叶尾缘附近,水膜受高速主流作用而

被撒裂,其中一部分形成直径约为5~500 $\mu\text{m}$ 的大水滴,这些大水滴进入动叶通道的速度较低,撞击在动叶吸力侧进口部分,动叶片的水蚀也主要是由于大水滴的撞击所产生的。水蚀初期,在大水滴的连续撞击下,叶片表层产生裂纹并扩展;之后叶片表面材料被腐蚀,开始出现凹坑;其后叶片表面的腐蚀速度减缓,这是因为叶片表面出现凹坑后,水滴聚集在凹坑中,减轻了大水滴对叶片表面的直接冲击。

与水滴凝结相关的湿蒸汽两相流动近年来也有较多的研究文献,包括流动机理<sup>[10~12]</sup>、两相流动计算方法<sup>[13~15]</sup>等。由于蒸汽湿度的精确测定在汽轮机安全、运行及设计方面的重要意义,近年来,钱江波等<sup>[16]</sup>根据湿蒸汽混合物的介电性质,采用微波谐振腔介质微扰理论,建立了测量蒸汽湿度的关系式,与理论计算值较吻合。牛凤仙等<sup>[17]</sup>对均质与异质凝结进行了实验研究。徐峰等<sup>[18]</sup>以光谱消光法进行湿蒸汽测量研究,实验结果表明在高压状态湿蒸汽中的水滴尺寸比低压汽轮机内湿蒸汽的水滴直径小。李瑜等<sup>[19]</sup>发展了湿汽损失的定量计算程序。可以明确地是,在湿蒸汽两相流动与叶片水蚀、气动性能等方面至今仍没有达成共识的系统、完整的结论。

值得注意的是,叶片水蚀是受水滴冲蚀而发生,水滴的运动与两相流动密切相关,与流场结构相关。从水滴生成机理来看,当流场结构改变时,与水蚀相关的压力、湿度、速度等参数的分布发生较大变化,水蚀的强弱、位置与范围也随之改变,这意味着可以从改变流场结构方面来改善水蚀的危险性。弯叶片正具有改变压力径向分布的作用<sup>[20~23]</sup>,正弯叶片会建立压力沿径向的“C”型分布,使得两端区高能流体向中间流动,降低二次流损失。王松涛等<sup>[24]</sup>研究了弯叶片降低能量损失的涡动力学机制,详细说明了弯叶片流场结构。另一方面,弯叶片也可以减小非定常流场中的压力脉动<sup>[25]</sup>。一般来说,正弯叶片可以有效降低二次流损失,反弯叶片会增强二次流损失,但在不同条件下采用正弯还是反弯设计仍需考虑工况与几何条件<sup>[26]</sup>。

综上所述,水蚀的产生机理、相关影响因素是与流场结构密切相关的。压力、速度、湿度等参数的径向分布对水蚀有重要影响。弯叶片在改变流场结构、压力等参数的径向分布上具有重要作用。因此,分析两者之间的相关性,通过弯叶片设计来改善流动状况可降低水蚀危险性。

## 2 数值方法与水蚀系数

本文以商用CFD软件ANSYS-CFX完成流场数值模拟工作。ANSYS-CFX采用有限体积与有限单元联合算法,为加速收敛应用了多重网格技术。除内置的五种水蒸汽模型外,ANSYS-CFX也可依据IAP-WS-IF97公式设置计算所需的水蒸汽范围,求解方程组中也已计入水蒸汽状态方程。计算结果能够得到湿度分布等本文研究所需的数据。

为消除网格数量对计算结果的影响,首先进行了网格无关性验证。为避免网格划分及局部网格加密对计算结果的影响,在多块结构化网格生成中使用ANSYS-TurboGrid的自动拓朴与网格划分(ATM)方法生成所需网格,同时保证壁面 $y+$ 值不超过6。网格无关性验证所生成的级网格数量分别为 $1 \times 10^5$ ,  $2 \times 10^5$ ,  $4 \times 10^5$ ,  $6 \times 10^5$ ,  $9 \times 10^5$ ,  $12 \times 10^5$ 和 $15 \times 10^5$ 节点。以设计点进口总压、进口湿度和出口静压为边界条件分别计算这七个计算域。湍流模型采用SST模型,工质为水蒸汽,包含汽相与液相两种组份。所有计算均收敛至 $10^{-5}$ 以下。

表1比较了以不同网格规模所预测的总体性能。由此可见,当网格数量达到 $4 \times 10^5$ 以上时,流量与功率仅有极小的变化。在本文研究中对所有方案的网格划分均取 $10 \times 10^5$ 以上。

**Table 1 Comparison of predicted overall performance with different grid size at design point**

Grid size	Relative flow rate/%	Relative power/%
$1 \times 10^5$	100.000	100.000
$2 \times 10^5$	100.068	100.411
$4 \times 10^5$	99.702	100.155
$6 \times 10^5$	99.677	100.500
$9 \times 10^5$	99.682	100.528
$1.2 \times 10^6$	99.668	100.575
$1.5 \times 10^6$	99.677	100.545

为评价叶片水蚀程度,本文采用美国WESTHOUSE公司的水蚀评价标准,通过水蚀系数的大小来判断水蚀危险性,当大于0.1时,应加防护片<sup>[27]</sup>,计算方法如下

$$E = 3.31 \times 10^{25} \times \frac{y_1}{p_1^{3.15}} \times \frac{1}{V_1^{14}} \times \left( \frac{D \cdot n}{3600} \right)^{10.7} \times \frac{L_c^{1.8}}{A_1^{1.62}} \times \lambda$$

式中 $y_1$ 为静叶出口湿度; $p_1$ 为静叶出口静压(MPa); $V_1$ 为静叶出口速度(m/s); $n$ 为转速(r/

min); $D$ 为计算截面处直径(m); $L_c$ 为沿流线弦长(m); $A_1$ 为静动轴向间隙(m); $\lambda$ 为喉节比。

大水滴的生成与蒸汽湿度直接相关,而蒸汽湿度又与蒸汽压力密切相关。若控制静叶片表面的压力分布,使静叶通道前部压力下降得慢一些,水膜增长也会减缓,在静叶通道后部压力下降得快一些,大部分小水滴可随主流运动,减少附着在静叶片表面上的水滴,这样就减少了大水滴的数量。后加载型线可以形成这样的压力分布,因此可减轻大水滴的形成。

此外,在静叶尾缘处水膜被撕裂而形成的大水滴,受主流作用在静叶与动叶之间逐渐加速,直至撞击到动叶吸力侧。静叶与动叶之间的距离越长,大水滴的速度也越高,如果大水滴的速度与主流一致,则可顺利通过动叶通道。这表明,增大静动轴向间隙可减轻水蚀危险,但静动距离的增大会降低级效率,必需在气动设计时考虑这一影响,在水蚀危险性大的位置增大静动轴向间隙,水蚀危险性小的位置适当减小静动轴向间隙,也即以掠叶片的设计方法能够减轻水蚀危险。

## 3 弯叶片设计方案

水蚀系数与静叶出口湿度成正比,随静叶出口静压、静叶出口速度和静动轴向间隙的增加而减小,随平均直径、沿流线弦长和喉节比的增加而增大。通常,水蚀系数沿径向是逐渐增大的,在进行气动设计时采用可控涡设计方法可使喉节比沿径向减小,有利于减小顶部的水蚀系数。静动间隙与弦长也是气动设计中的重要设计参数,在保证气动性能的基础上,适当减小各截面弦长,增加静动轴向间隙也有利于降低水蚀系数。需注意的是,转速为设计之初给定,而末级叶片的高度需综合考虑各种因素,以汽轮机经济性最佳来确定末级叶片的最佳高度。因此,试图以转速和平均直径来降低水蚀危险性是不可行的。

基于以上分析,针对汽轮机末级叶片的特殊要求,本文首先研究了原型结构的水蚀系数并分析了各参数沿径向分布。之后依据分析结果设计了方案II,通过分析方案II完成了方案III的设计。通过方案I,II,III的比较设计了方案IV,最后在四个方案的分析比较基础上,提出了方案V的设计。为便于说明,本文在此节首先介绍各方案的几何设计,在下一节综合比较各方案的结果。

方案I为汽轮机的末级叶片,静叶采用可控涡设

计,后掠,各截面静动叶间隙相同,叶片形状如图1(a)所示,数值模拟结果表明此方案顶部的水蚀系数较大。以方案I为基础,将静叶各截面型线以尾缘圆心沿辐射线积叠形成方案II,此方案中静动间隙在根部截面与方案I相同,在其它各截面沿展向逐渐增加,顶部静动间隙约为方案I的两倍。叶片形状如图1(b)所示,数值模拟结果表明此设计方案使得顶部水蚀系数大幅降低。

在此基础上,进一步研究弯叶片在末级叶片设计中的应用,考虑到汽轮机末级的设计特点,其工况变化幅度较大,且级焓降较小,因此弯高相对于常规机组要大一些。在方案II基础上,将静叶改为两段直线中间圆弧过渡形式的周向正弯设计,根部弯高为30%相对叶高,根部与顶部弯角分别为 $15^\circ$ 和 $-7^\circ$ ,由此形成设计方案III,叶片形状如图1(c)所示,数值模拟结果显示顶部水蚀系数要高于方案II的设计。由于正弯叶片增大了叶片顶部的水蚀系数,研究反弯叶片的作用。在方案II基础上,将静叶改为反弯设计,弯高为50%相对叶高,两端部弯角分别为 $-15^\circ$ 和 $15^\circ$ 。叶片形状如图1(d)所示数值模拟结果表明,此设计方使得叶片顶部水蚀系数显著降低,但在叶片中部附近水蚀系数明显增大,不利于提高叶片的抗水蚀能力。

方案V是在方案III基础上,在相对叶高75%处将叶片反弯,弯角为 $7^\circ$ ,弯高附近光滑过渡,叶片形状如图1(e)所示,数值模拟结果显示,此方案能维持70%相对叶高以下各截面的水蚀系数,在70%相对叶高以上部分可大幅降低水蚀系数,能够显著提高叶片顶部附近的抗水蚀能力。这五个方案中,除方案I外其它四个方案的沿叶高各截面静动间隙均相同。

#### 4 计算结果及分析

各方案级使用相同的进出口参数,均为轴向进汽,进口总压为20.161kPa,进口总温为 $60.27^\circ\text{C}$ ,进口湿度为0.0473,出口压力为8kPa。网格总数为100万

左右。各方案总体性能如表1所示,各参数均无量纲化为相对量。

Table 2 Comparison of total performance parameters

Case	Relative flow rate/%	Relative power/%	Axial thrust/N
I	100.00	100.00	3519.06
II	98.82	98.28	3958.19
III	99.06	98.54	3996.01
IV	99.44	98.13	4207.72
V	98.37	97.38	3968.07

由于本文没有针对各方案的气动设计特点对各截面叶型进行气动优化设计,所以方案II~IV的性能均略低于原型方案I。由表2可见,各设计方案在设计流量下的功率相对变化幅度很小,即使是效率下降幅度最大的第IV种方案,按相同流量比较其功率相对变化也仅为-0.0132。由于本文重点在于研究各种可行设计方案的抗水蚀能力,在效率变化不大的情况下,下面重点分析不同设计方案的抗水蚀能力。与抗水蚀能力相关的参数为静叶出口静压、湿度和速度,以及静动间隙等结构参数,图2为上述各方案的内效率径向分布;图3为静叶出口湿度径向分布;图4为静叶出口静压径向分布;图5为静叶出口速度径向分布。

由图2~5可见,方案II相对于方案I在根部附近内效率有所降低,在7%~40%相对叶高效率明显提高,40%相对叶高以上范围内效率略有下降。这也表明,静动轴向间隙存在着最佳值,当偏离最佳值时,会引起效率下降,但这个间隙最佳值沿叶高方向并不是线性变化的。方案II的静叶出口湿度与方案I相比,在全部叶高范围内均有不同程度的降低。但其降低幅度由根部至顶部逐渐减小;静叶出口压力的变化趋势与湿度恰好相反,在全部叶高范围内均有不同程度的增加,其增加幅度由根部至顶部逐渐减小。由图5可见,静叶出口速度变化趋势与静叶出口湿度类似,在全部叶高范围内均有不同程度的减

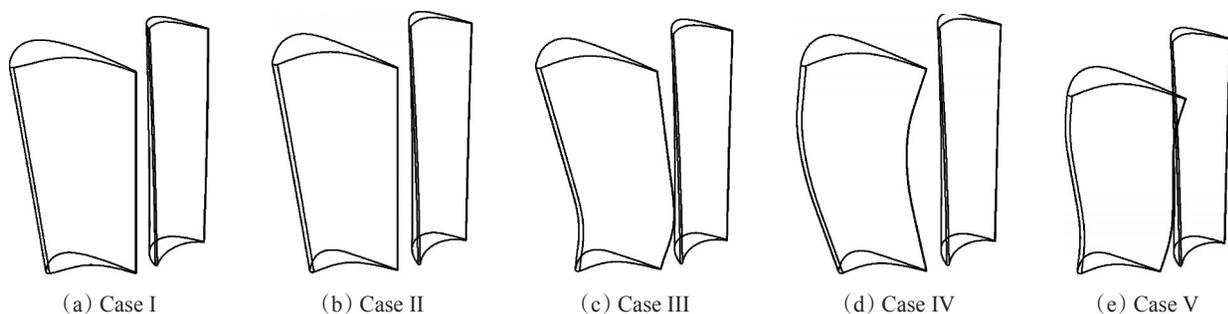


Fig. 1 Blade geometry schematic-diagram

小。方案II和方案I的对比说明静动叶轴向间隙沿叶高增加会提高静叶根部附近的出口压力,即根部反动度增大。这对于需要提高根部反动度的气动设计来说是有利的。

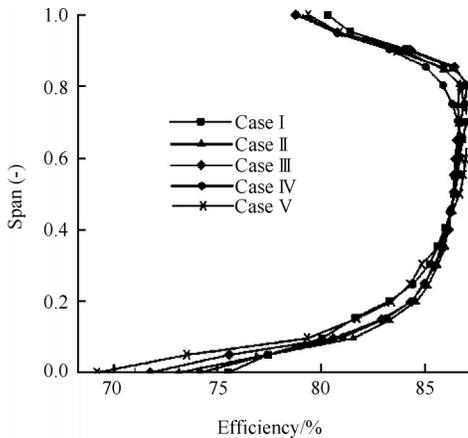


Fig. 2 Efficiency at radial direction

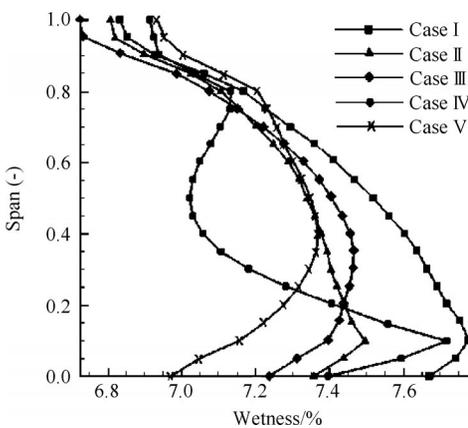


Fig. 3 Wetness at stator outlet

由图3与图4可见,湿度沿径向分布与压力沿径向分布呈现相反的趋势,这一点与理论分析是一致的。在水蒸汽焓熵图上湿蒸汽区域的等压线与等干度线虽然是两簇相交曲线,但沿水蒸汽膨胀过程线可看到随着压力降低,干度也是降低的,也即湿度增加,这是由水蒸汽性质所决定的。结合前述分析,顶部湿度降低意味着水滴凝结减少,也就减少了对动叶有较大冲蚀作用的大水滴的形成。对于根部附近形成的水滴,由于离心力的作用会产生较大的径向加速度,当到达动叶前缘时径向位置已远离根部,这也是动叶片水蚀多发生在动叶顶部附近的主要原因。

方案III是在方案II的基础上对静叶进行正弯设计,由图2可见,叶片正弯后会使得两端部损失增加,而叶片中部效率提高。由图4可见,叶片正弯后,沿叶高建立起压力的“C”型分布。静叶片正弯后,静叶根

部出口湿度得以降低,静叶出口速度呈现出反“C”型分布,两端大中间小。方案III与方案II相比,静叶根部出口压力要高一些,即根部反动度高一些。在静叶出口顶部附近叶片正弯后湿度和速度降低,静压升高。为提高叶片抗水蚀能力,需提高静叶出口顶部附近的速度、静压并降低湿度。

方案IV为在方案II基础,对静叶进行反弯设计。由图2~5可见,相对于方案II,静叶反弯后出口湿度、速度提高而静压下降。其参数变化趋势与方案III相反。方案IV的一个严重不足是径向中部参数变化剧烈,不利于负荷的径向平衡分布。

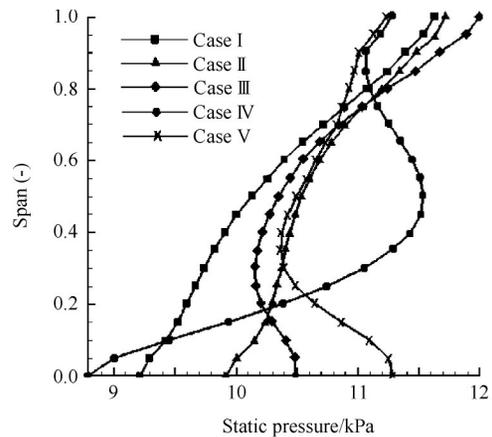


Fig. 4 Static pressure at stator outlet

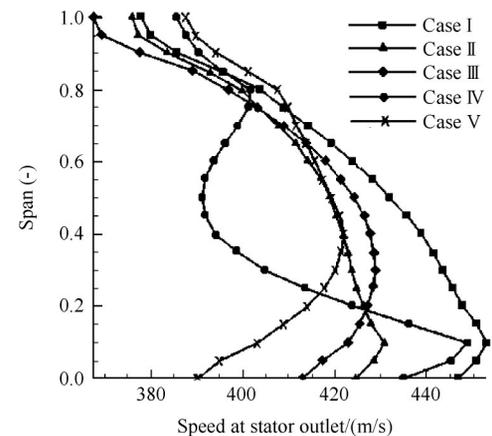


Fig. 5 Speed at stator outlet

在五个方案中,方案III在顶部附近湿度最小、静压最小、出口速度也最小,但其水蚀系数仍是较大;方案IV在中部附近湿度最小、静压最大、出口速度也最小,但中部附近水蚀系数以方案IV为最高。由于级前总压是相同的,静叶出口压力沿径向分布就决定了湿度与速度的分布,这也就表明压力沿径向分布存在使得水蚀系数最小的方案。

进一步分析以上四种方案可知,采用尾缘积迭的可控涡设计可改善参数的径向分布,能够有效降

低叶片顶部的水蚀系数。叶片正弯后,根部附近的参数分布较为有利,但对于降低叶片顶部的水蚀系数不利;而叶片反弯后,虽然不利于改善参数的径向分布,但顶部附近的参数分布却是较为有利的。为此,在方案V的弯叶片设计中,静叶70%相对叶片以下是正弯设计,顶部附近采用反弯设计。叶片以此种方式复合弯曲后,顶部附近湿度、速度提高而静压下降。在这五种方案中,以方案V的顶部速度、湿度最大,静压最低;在根部,速度与湿度最小,静压最高。由于压力降低使得出口速度增大,虽然湿度也有增加,但水蚀系数也是最低的。计算五种叶片方案得到的水蚀系数的径向分布如图6所示。

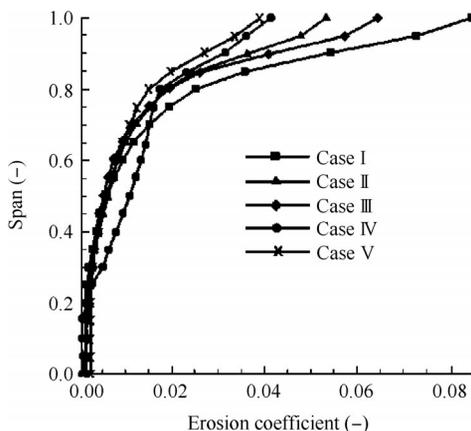


Fig. 6 Comparison of erosion coefficient

图6可知,由根部至60%叶高的大部分区域,除方案IV外其它方案的水蚀系数均很小,且增长缓慢。这表明反弯叶片会使弯高附近的水蚀系数增加。在60%叶高以上区域,各方案的变化显现了不同的发展趋势,却仍是向着水蚀系数提高的方向变化。在80%叶高以上区域各方案的水蚀系数的变化幅度显著不同。在叶顶附近方案V的水蚀系数最低,其次是方案IV;方案I的水蚀系数最高,其次是正弯叶片。

各方案水蚀系数以如此趋势变化的直接原因在于水蚀与湿度、压力及速度密切相关。当降低某处静叶出口静压,速度提高1%时,虽然湿度会增加,但却使该处的水蚀系数降低13%以上。从叶片的气动设计角度看,当压力升高时,湿度减小,速度也随之减小,但减小的幅度是不同的。因此,在静压的变化范围内必然存在一个对应最小水蚀系数的静压。这一点由图3~5可得到验证。顶部水蚀系数最大的方案I,其静叶顶部出口静压、湿度及速度在这五个方案中都处于中间值。当静叶顶部出口静压减小或增大时,由方案II~IV的水蚀系数可知,其水蚀系数

均有不同程度的减小。

## 5 结论

通过本文研究,得出以下结论:

(1)在进行湿蒸汽级叶片设计时首要考虑的因素是顶部静动间隙,采用尾缘沿辐射线积迭方法构造叶片可使水蚀系数降低40%以上。

(2)叶片正弯后会使得叶片顶部的水蚀系数升高,设计此类正弯叶片时应将弯高控制在40%叶片以下,顶部应不弯或适当反弯。

(3)叶片在顶部反弯可有效改善压力径向分布,降低该处静压,提高出口速度,从而降低水蚀危险性。当叶片顶部反弯 $15^\circ$ 时,可降低水蚀系数60%以上。

(4)径向压力分布对水蚀有重要影响,压力分布直接决定了速度与湿度分布。从现有的水蚀研究成果看,提高叶片中部附近的静压5%时,能够减缓蒸汽凝结、降低顶部附近静压,可提高出口速度2%左右,可有效降低水蚀危险性。

(5)对于湿蒸汽级的气动设计,所要考虑的内容不仅是高效,还要研究其在很大的工况范围内的变工况性能。无论如何,叶片的安全性始终是优先考虑的,在气动设计时应首先考虑叶片的抗水蚀能力。将水蚀系数控制在合理的范围内的气动设计有助于汽轮机的长期、稳定、高效运行。

从当前研究来看,随着湿度增加,蒸汽在叶片表面凝结水膜的程度也随之增加,在离心力的作用下水膜向径向运动并最终在尾缘脱离形成大水滴,之后在轴向间隙这一段随蒸汽加速,最后进入动叶通道内。下一步将重点研究弯叶片对水滴在叶片表面凝结与运动的影响以及轴向间隙内蒸汽对水滴的加速作用。

## 参考文献:

- [1] 秦重阳,李亮,柴秀妮,等.湿蒸汽透平级内汽液两相流动特性的研究[C].上海:中国动力工程学会透平专业委员会2010年学术研讨会,2010.
- [2] 鄢宇鹏,孙弼,蔡颐年.汽轮机动叶片水蚀问题的研究[J].汽轮机技术,1994,36(5):305-317.
- [3] 贾晓梅,杨毅.汽轮机末级叶片水蚀的机理及防护措施[J].东北电力技术,2001,22(1):8-9.
- [4] Yongqiang Han, Yonghui Xie, Di Zhang. Numerical Study on High-Speed Impact Between a Water Droplet and Deformable Solid Surface[R]. ASME 2012-GT-69700.

- [ 5 ] Koka T, John P Z, Dayalan S. Water Droplet Erosion Simulation of a Turbocharger Compressor Wheel [R]. ASME 2014-GT-26974.
- [ 6 ] Azevedo C, Sinatora R. Erosion-Fatigue of Steam Turbine Blade[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2009, 16(7): 2290-2303.
- [ 7 ] Xiujun Wang, Pengfei Su, Luke Chou, et al. Water Droplets Dispersion and Optimization of Water Removal Suction Slot Locations of Stationary Blades in Last-Stage of a 600MW Steam Turbine [R]. ASME 2009-GT-59490.
- [ 8 ] Ahmad M. Experimental Assessment of Droplet Impact Erosion Resistance of Steam Turbine Blade Materials [J]. *Wear*, 2009, 267(9): 1605-1618.
- [ 9 ] Starzmann J, Kaluza P, Casey M V. On Kinematic Relaxation and Deposition of Water Droplets in the Last Stages of Low Pressure Steam Turbine[R]. ASME 2013-GT-95179.
- [ 10 ] 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[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(7): 1-6.
- [ 11 ] 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[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(7): 16-20.
- [ 12 ] 李 亮, 李 瑜, 吴晓明, 等. 汽轮机中湿蒸汽两相凝结流动研究[J]. 热力透平, 2008, 37(4): 235-239.
- [ 13 ] 王 智. 汽轮机内湿蒸汽两相凝结流动的数值研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- [ 14 ] 丰镇平, 李 亮, 李国君. 汽轮机湿蒸汽两相凝结流动数值研究的现状与进展[J]. 上海汽轮机, 2002, 31(2): 1-10.
- [ 15 ] 候宪科, 鞠凤鸣. 叶栅内湿蒸汽自发凝结流动的数值计算方法研究[J]. 汽轮机技术, 2014, 56(2): 91-94.
- [ 16 ] 钱江波, 韩中合. 谐振腔微扰技术测量湿蒸汽两相流的理论分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(26): 79-85.
- [ 17 ] 牛凤仙, 蔡小舒, 宋延勇, 等. 300MW 汽轮机内异质均质凝结的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(29): 1-6.
- [ 18 ] 徐 峰, 蔡小舒, 苏明旭, 等. 光谱消光法测量高压湿蒸汽的研究[J]. 动力工程, 2009, 29(3): 254-260.
- [ 19 ] 李 瑜, 宁德亮, 李 亮, 等. 汽轮机中湿汽损失的定量计算[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(1): 25-30.
- [ 20 ] 周鸿儒, 冯国泰. 弯扭叶片的设计思想、设计准则及其在汽轮机中的应用[J]. 汽轮机技术, 2001, 43(6): 328-374.
- [ 21 ] 王会社, 袁 新, 钟兢军, 等. 叶片正弯对压气机叶栅叶片表面流动的影响[J]. 推进技术, 2004, 25(3): 210-214. (WANG Hui-she, YUAN Xin, ZHONG Jing-jun, et al. Influence of Positive Curving on Blade Surface Flow of Compressor Cascade[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(3): 210-214.)
- [ 22 ] 顾发华, 王仲奇, 杨 弘, 等. 叶片的周向弯曲与弦向弯曲及其数值分析[J]. 工程热物理学报, 1994, 15(3): 264-269.
- [ 23 ] 刘振德, 袁 宁, 张振家. 涡轮级叶片弦向弯曲与周向弯曲的应用研究[J]. 推进技术, 2000, 21(6): 36-39. (LIU Zhen-de, YUAN Ning, ZHANG Zhen-jia. Two Types of Bowed Blades in Turbine Stage[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2000, 21(6): 36-39.)
- [ 24 ] 王松涛, 王仲奇, 冯国泰. 弯曲叶片降低能量损失的涡动力学机制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(5): 607-613.
- [ 25 ] 杨 彤, 王松涛, 姜 斌. 弯曲叶片造型对涡轮叶栅作用力影响的非定常数值研究[J]. 推进技术, 2013, 34(6): 760-767. (YANG Tong, WANG Song-tao, JIANG Bin. Unsteady Numerical Study of Effects on Turbine Blade Forces for the Bowed Blade[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(6): 760-767.)
- [ 26 ] 张华良, 王松涛, 王仲奇. 对不同转角扩压叶栅内弯叶片的数值模拟[J]. 推进技术, 2007, 28(4): 362-366. (ZHANG Hua-liang, WANG Song-tao, WANG Zhong-qi. Numerical Simulation for the Influence of Bowed Blade in Compressor Cascades with Different Turning Angles[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2007, 28(4): 362-366.)
- [ 27 ] 倪永君, 王志军, 孙毓铭. 汽轮机末级长叶片水蚀的初步研究[J]. 汽轮机技术, 2008, 50(1): 67-69.

(编辑: 史亚红)