

# 1 000 MW 汽轮机低压末级二次水滴沉积特性分析

王纯<sup>1</sup>, 谢诞梅<sup>1</sup>, 李曦滨<sup>2</sup>, 范小平<sup>2</sup>

(1. 武汉大学 动力与机械学院 湖北 武汉 430072; 2. 东方汽轮机有限公司 四川 德阳 618000)

**摘要:** 采用 ANSYS CFX 软件对某 1 000 MW 火电汽轮机低压末两级内部流场进行了数值计算, 确定了末级进口处一次水滴的径向分布; 通过二次水滴份额预测并对其径向分布进行合理修正, 得到了较高精度的二次水滴末级进口边界条件并计算得到二次水滴在末级静叶表面的沉积分布情况。结果表明: 末级静叶栅进口处二次水滴的份额为 10%, 主要分布在进口相对叶高 60% 以上; 末级静叶片表面二次水滴沉积率为 77.8%, 其中, 压力面占总沉积量的 60.9%; 在径向上, 二次水滴主要沉积在 30% 叶高以上; 在轴向上, 二次水滴主要沉积在压力面 80% 叶宽之后和吸力面 40% 叶宽之前。

**关键词:** 汽轮机; 末级静叶; 二次水滴; 沉积分布

中图分类号: TK263.3 文献标识码: A  
DOI:10.16146/j.cnki.mdjgc.2015.05.018

## 引言

我国火电与核电的装机容量已超过总装机容量的 73%, 汽轮机作为火电站和核电站的核心设备, 其安全性问题十分重要。随着核电、火电机组容量的增大及火电机组参数(尤其是压力)的提升, 低压级动叶片也将面临着越来越严重的水蚀问题, 国内的大功率机组中曾出现过多起低压级动叶片水蚀和断裂事故<sup>[1]</sup>, 严重影响机组的安全运行。

在低压级内膨胀做功过程中, 蒸汽会逐渐达到过冷状态, 从而自发凝结成直径较小的一次水滴, 一次水滴会在叶片表面沉积, 并在出口处撕裂形成二次水滴。虽然二次水滴占总水滴的份额较小, 但二次水滴的直径较大, 并且与动叶片表面的相对速度也很大, 所以会对动叶片造成严重的水蚀。为解决低压级动叶片因湿蒸汽而产生的水蚀问题, 目前较为成熟有效的除湿措施是在空心静叶片表面开设除湿缝。为确定除湿缝的位置, 必须先分析二次水滴的沉积分布, 因此研究二次水滴的沉积分布特性是

开展汽轮机除湿防蚀工作的必要前提。

本研究结合理论公式计算和数值模拟方法研究了某 1 000 MW 火电超超临界汽轮机低压末级二次水滴沉积特性: 首先, 采用非平衡凝结模型数值计算得到其末级进口处一次水滴的分布情况; 其次, 根据实际工况, 利用理论公式对数值计算结果进行修正, 得到对应二次水滴的份额及分布; 最后, 采用液滴沉积模型计算得到二次水滴的运动规律及沉积分布情况, 并分析了其沉积分布特性。研究成果为该叶片的除湿缝设计提供了理论依据。

## 1 数值模型

### 1.1 非平衡凝结模型

汽轮机低压级内蒸汽凝结属于非平衡凝结过程<sup>[2]</sup>, 这里采用 CFX 中的非平衡模型进行计算, 选取  $k-\omega$  SST 双方程模型作为湍流模型, 利用 IAPWS-IF97 确定气、液两相状态方程。文献 [3] 中通过与实验结果对比证明上述模型可以很好地预测低压下的非平衡凝结过程。

数值计算建立在欧拉-欧拉坐标系下, 成核过程的计算采用经典成核公式<sup>[4-5]</sup>:

$$J = \frac{q_c}{1 + \eta} \left( \frac{2\sigma}{\pi m^3} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\rho_v^2}{\rho_l} \exp\left(-\frac{4\pi\sigma r_*^2}{3KT_v}\right) \quad (1)$$

$$\eta = 2 \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \frac{h_{fv}}{RT_v} \left( \frac{h_{fv}}{RT_v} - \frac{1}{2} \right) \quad (2)$$

式中:  $J$ —成核系数;  $q_c$ —凝结系数, 通常取为 1;  $\sigma$ —表面张力, N/m;  $m$ —单个水分子质量, kg;  $r_*$ —水滴临界半径,  $\mu\text{m}$ ;  $K$ —玻尔兹曼常数;  $\gamma$ 、 $R$ —水蒸气的比热比和气体常数;  $h_{fv}$ —气化潜热, kJ/kg。

从式(1)可知: 成核率对于表面张力的变化较

收稿日期: 2014-09-23; 修订日期: 2014-12-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51376140)

作者简介: 王纯(1991-), 男, 辽宁本溪人, 武汉大学硕士研究生。

敏感。因此,计算时需要根据实际工况,利用表面张力修正系数 NBTF( Nucleation Bulk Tension Factor) 对其进行修正,一般对于低压级内非平衡凝结流动问题,将 NBTF 取为 0.85 可以与实际情况相吻合<sup>[3]</sup>。

### 1.2 液滴沉积模型

二次水滴随蒸汽在叶栅通道内流动时,由于自身质量较大,在运动过程中会偏离主流方向,从而沉积到叶片表面。本研究采用 CFX 中的粒子追踪模型( Particle - Tracking Model) 来模拟上述沉积过程,该模型建立在欧拉 - 拉格朗日坐标系下。

相比于气体对二次水滴的作用力,一、二次水滴间的相互作用力十分微小,因此本研究不考虑一、二次水滴间的作用力。研究表明:如果叶片表面为湿壁面,则所有小水滴以倾斜的角度撞击到壁面上都会被壁面上的水膜所吸收<sup>[6]</sup>。因此将壁面模型假设为当水滴撞击到壁面时,全部吸附在壁面上而不发生反弹。

## 2 二次水滴份额

研究工况均为机组的设计工况:次末级进口总压为 0.074 7 MPa,进口总温为 369.93 K,排气静压为 0.005 4 MPa。该汽轮机的低压缸中共有 6 级叶栅,根据非平衡凝结模型的数值计算结果得知:凝结发生于次末级静叶栅内,动叶栅进口处湿度为 1.6%。由水蚀准则计算可知<sup>[7]</sup>,次末级动叶片并不会产生水蚀问题,而水蚀危险区域基本集中于末级动叶片 60% 叶高以上。为获得准确的末级进口边界条件,选取末两级叶栅进行计算,具体的几何模型如图 1 所示。

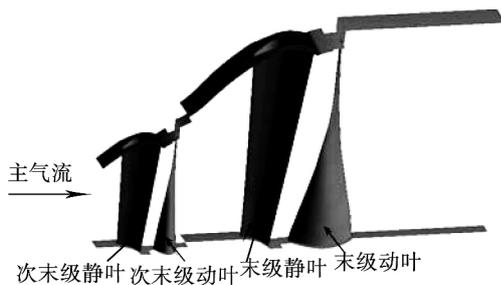


图 1 低压缸末两级几何模型

Fig. 1 The geometric model of last two stages of LP

通过对叶栅内的初始流场进行数值计算(采用非平衡凝结模型,  $k - \omega$  SST 双方程湍流模型, NBTF 取为 0.85),得到末级静叶栅单通道内的液相质量流量为 0.074 15 kg/s。其中,二次水滴所占份额可以根据图 2( a) 进行估测<sup>[8]</sup>。  $z$  为低压缸级数,横坐标对应各级所在位置,纵坐标为二次水滴份额,斜线代表初始凝结所在级(  $z - i$  )。对于本研究对象:  $z = 6$ ,  $z - i = 5$ ,由图查得:末级静叶栅进口处的二次水滴份额  $\lambda'$  约为 10%;利用经验公式  $\lambda' = 0.04 + 0.06i$  对该数值进行验证<sup>[9]</sup>,计算可知两者结果相同。

此外,由于机组背压的不同,需要对  $\lambda'$  值进行修正,具体修正方法如图 2( b) 所示<sup>[8]</sup>。横坐标为机组背压,纵坐标为修正系数。对于本研究机组,其背压为 0.005 4 MPa,由图可查得修正系数为 1。因此,最终确定末级静叶栅进口二次水滴份额为 10%,对应质量流量为 0.007 415 kg/s。

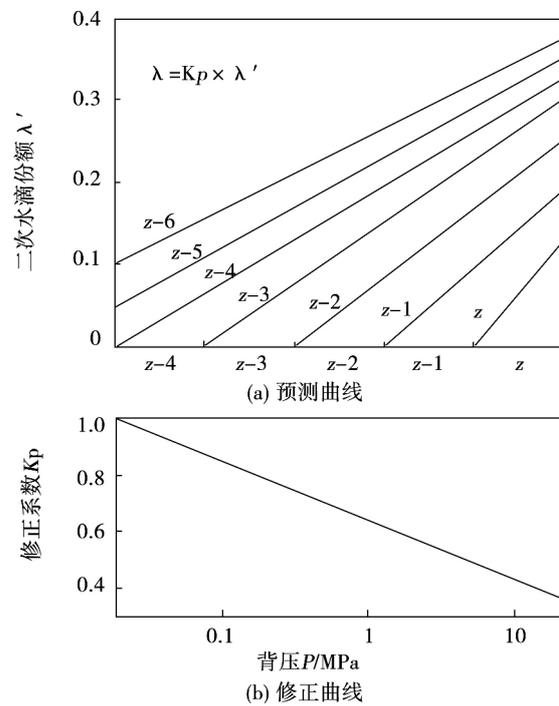


图 2 二次水滴份额预测与修正曲线

Fig. 2 The prediction and correction curves of the coarse water droplet proportion

## 3 二次水滴沉积分布

由于最大二次水滴直径通常可接近或达到 50  $\mu\text{m}$  以上<sup>[9]</sup>,其径向速度受离心力影响较大,因而直

接通过一次水滴径向分布乘以二次水滴所占份额得到的二次水滴分布不能很好地反映实际情况,因此需对其进行适当修正。具体的修正曲线如图 3 所示,图中横坐标为平均湿度比  $\bar{y}$  ( $\bar{y} = y_i / y_m$ ,  $y_i$  为相对叶高处对应的湿度,  $y_m$  为平均湿度), 纵坐标为相对叶高  $L$ ,  $\lambda$  为二次水滴所占份额。由上节可知:  $\lambda = 0.1$ 。根据上节中计算得到的初始流场中的一次水滴分布及二次水滴所占份额,利用图 3 中  $\lambda = 0.1$  所对应的修正曲线,计算得到考虑离心力影响后的末级静叶栅进口处二次水滴质量流量的径向分布曲线,如图 4 所示<sup>[8]</sup>。从图中可以看出,二次水滴质量流量主要分布在相对叶高 60% 以上,这与实际运行中动叶片的水蚀情况相符<sup>[10]</sup>。

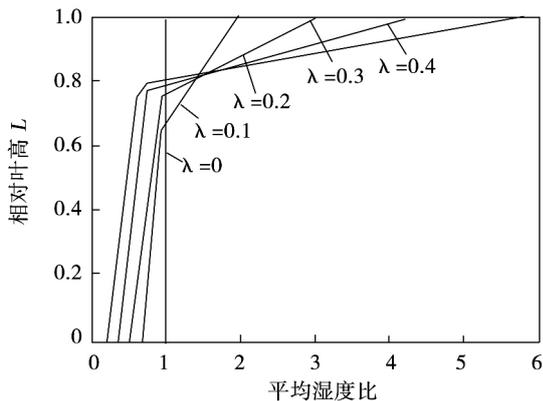


图 3 二次水滴径向分布修正曲线  
Fig. 3 The correction curves of the radial distribution of the coarse water droplet

由于二次水滴主要通过叶片表面上沉积和脱落而形成,因此本研究在设置二次水滴的进口边界条件时,将二次水滴的喷射点布置在次末级动叶片尾缘附近。刚从尾缘脱离出来的二次水滴的轴向初速度很小,此处依据文献[11]取其推荐值 3m/s;周向速度与对应叶高区域的圆周速度相同;而径向速度设置与主汽流的径向分速度相同。为分析叶高方向参数变化对于二次水滴速度和直径的影响,在叶高方向分别布置 20 个喷射区域,并根据每个区域的对应参数,利用式(2)计算二次水滴直径  $d$  沿叶高方向的分布:

$$We = \rho_v (\vec{u}_v - \vec{u}_1)^2 d / \sigma \quad (3)$$

式中:  $We$ —韦伯数;  $\rho_v$ —蒸汽密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\vec{u}_v$ 、 $\vec{u}_1$ —蒸汽和水滴的绝对速度矢量,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $d$ —水滴直径,  $\mu\text{m}$ ;  $\sigma$ —水滴表面张力,  $\text{N}/\text{m}$ 。

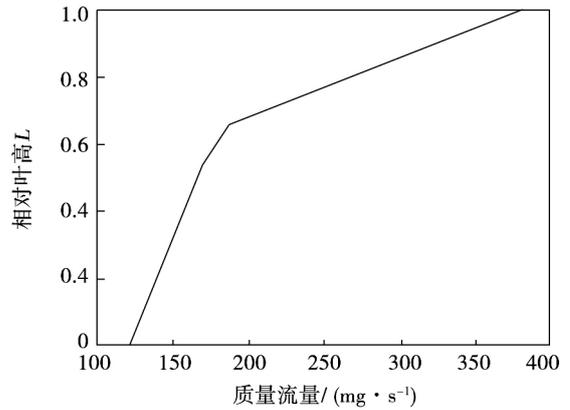


图 4 二次水滴质量流量径向分布  
Fig. 4 The radial distribution of the coarse water droplet mass flow

在高  $We$  数情况下,大水滴从叶片脱落时会被主汽流冲击成细小的雾滴,而能保留下来的最大水滴对应的极限  $We$  数为 20<sup>[12]</sup>,由此计算得到对应区域二次水滴的最大直径  $d_{\text{max}}$ ,平均直径  $\bar{d}$  通过  $\bar{d} = d_{\text{max}} / 2$  进行近似计算<sup>[9]</sup>,最终得到图 5 所示的次末级动叶片尾缘出口处二次水滴平均直径的径向分布图。

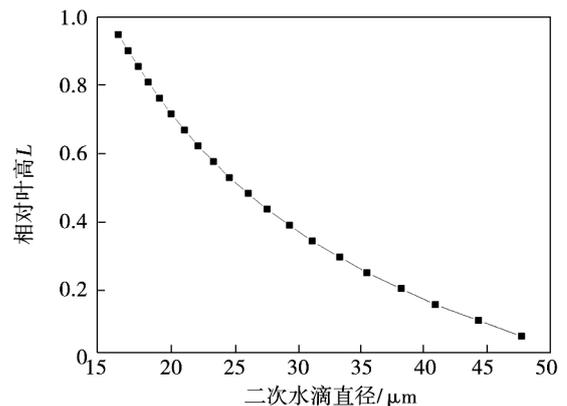


图 5 二次水滴平均直径径向分布  
Fig. 5 The average diameter radial distribution of the coarse water droplet

在确定上述重要的边界条件后,根据设计工况的进、出口参数,利用液滴沉积模型(在叶高方向设置 20 个喷射区域,喷射区域布置在次末级动叶出口,并导入图 4 和图 5 中的对应数据点),由数值计算得到二次水滴在末级静叶轴向和径向上的沉积分布,如图 6 所示。其中,单流道内二次水滴总沉积量为 0.005 766  $\text{kg}/\text{s}$ ,由第 2 节可知:在进口处二次水

滴的质量流量为 0.007 415 kg/s,通过计算可得二次水滴沉积率为 77.8%。

由图 6 可以看出:二次水滴在压力面上的沉积量要大于吸力面,压力面上的沉积量约占总沉积量的 60.9%。从二次水滴的轴向分布可以看出:在压力面上,二次水滴主要沉积在静叶片尾缘附近(80%叶宽之后);而在吸力面上基本都沉积在叶型转折线之前(40%叶宽之前),并且在流动方向上呈递减趋势。这种明显的规律性主要与惯性力作用和叶型变化有关,二次水滴直径或是叶片与进口汽流速度方向的迎风面积越大,则叶片表面沉积率  $\Psi$  越大。

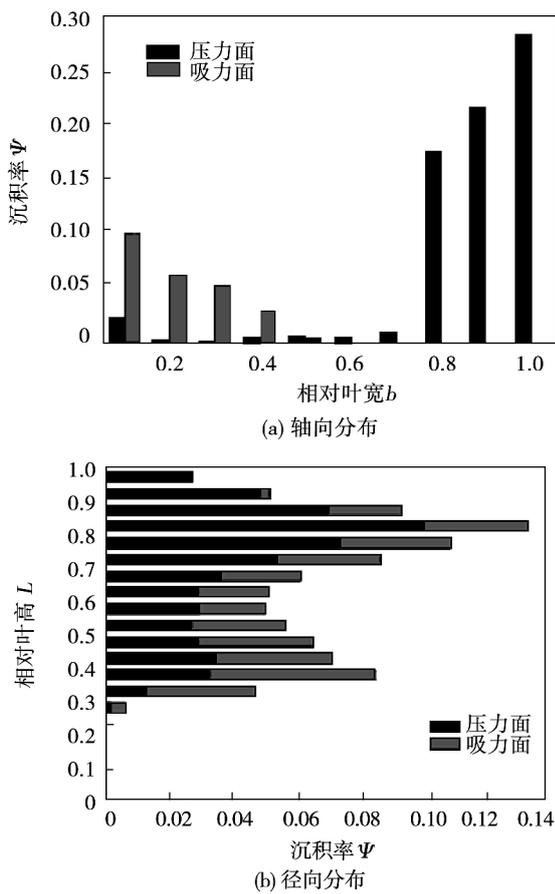


图 6 二次水滴沿轴向和径向的沉积分布  
Fig. 6 The deposition distribution of the coarse water droplet in the axial and radial direction

对于其径向分布,二次水滴的沉积主要集中在 30% 叶高以上,这主要由于二次水滴质量较大,在圆周运动过程中,受离心力作用会产生向叶顶的分速度,从而导致叶根附近形成沉积真空区,即图 7 中的轨迹线以下区域。叶顶附近的沉积量也相对较少

(特别是在吸力面) 这主要因为次末级与末级之间的流道有很大的扩张角,该角度要大于二次水滴运动轨迹的倾斜角度,如图 7 所示,因而二次水滴在运动到叶顶之前,便已经沉积到叶片表面,导致叶顶附近沉积量较少。又由于在吸力面侧,沉积主要发生在叶片前缘区域,与压力面侧(主要沉积在叶片尾缘)相比,二次水滴沉积得更早,因此沉积到叶片表面时的径向位移更小,从而导致吸力面侧叶顶附近的沉积量更少。

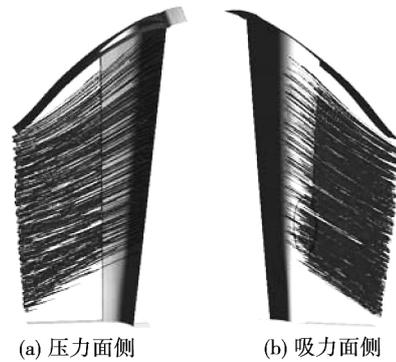


图 7 二次水滴的沉积轨迹

Fig. 7 The deposition track of the coarse water droplet

此外,在径向分布中出现两处极峰值(40%和 85%叶高附近),其中 85%处的极峰值主要由于叶顶附近的沉积量减少而形成;而 40%处的极峰值主要与叶型和二次水滴的运动轨迹有关,若单纯考虑静叶栅进口处二次水滴的质量流量及静叶的径向截面积对于沉积的影响,由于上述值均沿径向增加,因而更有利于水滴沉积在叶高相对较大的位置。但从图 7(b)圈内的轨迹线可以看出,50%叶高以下区域二次水滴的沉积轨迹相对较为密集。此外,从图 8 中各叶高的截面轮廓线可以看出:相对叶高越小,其压力面尾缘处的叶型更利于二次水滴的沉积,且由于二次水滴大量沉积在压力面尾缘附近,因此该处的叶型变化对整体的沉积分布影响较大。在 40%叶高附近,密集的沉积轨迹和尾缘的叶型对于二次水滴沉积量的提升要大于不利因素(进口处二次水滴的质量流量及静叶的径向截面积)的影响,最终导致该处出现沉积分布的极峰值。

由于二次水滴在径向上的沉积都集中在 30% 叶高以上,因此在设计除湿缝时,没必要沿整个叶高开设,只需在可能引起动叶片水蚀的区域开设即可;根据二次水滴在轴向上的沉积分布特点,在空心叶

片设计规范允许条件下,压力面上的除湿缝应尽可能地开设在尾缘附近,而吸力面上的除湿缝最好开设在叶片背弧面转折线稍前的区域。

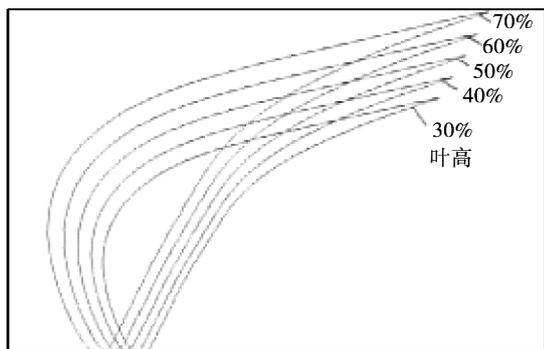


图 8 叶片截面轮廓线径向视图

Fig. 8 The radial view of blade cross section outlines

#### 4 结 论

(1) 初始凝结发生于次末级静叶栅内,末级静叶栅进口处二次水滴的份额为 10%,单流道内二次水滴的质量流量为 0.007 415 kg/s,且质量流量较大的区域主要集中在 60% 叶高以上;

(2) 二次水滴在末级静叶片表面的沉积率为 77.8%,其中,压力面上的沉积量约占总沉积量的 60.9%;在径向上,二次水滴的沉积主要集中在 30% 叶高以上,其中叶顶附近的沉积量相对较少,40% 和 85% 叶高附近出现极峰值;而在轴向上,二次水滴主要沉积在压力面 80% 相对叶宽之后和吸力面 40% 相对叶宽之前的区域;

(3) 建立了一种用于确定低压级空心导叶开设去湿缝的方法:在设计时,除湿缝只需布置在对应动叶片水蚀的区域;为了达到理想的除湿效果,在设计规范允许条件下,空心静叶压力面上的除湿缝应开设在靠近尾缘的区域(80% 相对叶宽附近),而吸力面上的除湿缝开设在背弧面转折线稍前的区域(40% 相对叶宽之前)。

#### 参考文献:

[1] 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.  
NI Yong-jun, WANG Zhi-jun, SUN Yu-ming. The Study of Water worn for the Rotor of Steam Turbine Last Stage[J]. Turbine Technology 2008, 50(1): 67-69.

[2] 蔡颐年,王乃宁. 湿蒸汽两相流[M]. 西安交通大学出版社,1985.  
CAI Yi-nian, WANG Nai-ning. Two-Phase Flow of Wet Steam [M]. Xi'an Jiaotong University Press, 1985.

[3] Wang Chun, Xie Danmei et al. Research of Temperature Characteristics of Non-equilibrium Condensation in Transonic Steam Flow [A]. In: Proc. ASME Turbo Expo 2014, June 16 - 20, 2014, Düsseldorf, Germany #GT2014-26455.

[4] A. J. White, J. B. Young, P. T. Walters. Experimental Validation of Condensing Flow Theory for a Stationary Cascade of Steam Turbine Blades [J]. Philosophical Transactions of The Royal Society, 1996, 59-86.

[5] A. G. Gerber, M. J. Kermani. A Pressure based Eulerian-Eulerian Multi-phase Model for Non-equilibrium Condensation in Transonic Steam Flow [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47: 2217-2231.

[6] J. B. Young, K. K. Yau, P. T. Walters. Fog Droplet Deposition and Coarse Water Formation in Low-Pressure Steam Turbines: A Combined Experimental and Theoretical Analysis [J]. Journal of Turbomachinery, 1988, 4: 163-172.

[7] 施红辉,俞茂铮,蔡颐年. 汽轮机低压级动叶片的水蚀机理及水蚀准则[J]. 热力发电, 1990(4): 29-34.  
SHI Hong-hui, YU Mao-zheng, CAI Yi-nian. The Erosion Mechanisms and Rules of Rotor Blade in LP Stage of Steam Turbine [J]. Thermal Power Generation, 1990(4): 29-34.

[8] B. M. Troyanovskii, G. A. Filipov and A. E. Bulkn. Steam and gas turbine for nuclear power plants (in Russian). Moscow: Energoatomizdat, 1985.

[9] 俞茂铮,黄跃. 汽轮机末级隔板中的水分沉积规律及去湿方法[J]. 汽轮机技术, 1988(5): 44-50.  
YU Mao-zheng, HUANG Yue. The Rules of Water Deposition and the Methods of Dehumidification in the Last Stage clappboard of Steam Turbines [J]. Turbine Technology, 1988(5): 44-50.

[10] 秦华魂,张春梅. 叶片水蚀危险性的分析计算[J]. 汽轮机技术, 2007, 49(1): 35-36.  
QIN Hua-hun, ZHANG Chun-Mei. The Analytical Calculation of the Blade Erosion [J]. Turbine Technology, 2007, 49(1): 35-36.

[11] 潘家成. 国产大型核电汽轮机内部除湿若干关键技术的数值研究[D]. 西安交通大学, 2012.  
PAN Jia-cheng. Numerical Investigation of Several Key Techniques to Remove Internal Wetness In A Large Domestic Nuclear Power Steam Turbine [D]. Xi'an Jiaotong University, 2012.

[12] M. J. Moore, C. H. Sieverding. Two-Phase steam flow in turbines and separators [M]. Washington: hemisphere publishing corporation, 1976: 59-122.

(姜雪梅 编辑)

With an increase of the gas/air equivalent ratio, the main reaction zone of the combustion of fuel oil in a dual swirling flow will shift to the downstream of the burner, the area of the flame will increase and the flare angles of the flame front at both inside and outside will monotonously decrease. In addition, at a place  $Z/D = 0.183$  away from the outlet of the swirler ( $Z$  is the axial distance and  $D$  denotes the outer diameter of the swirler), the thickness of the flame will gradually increase. When the gas and air equivalent ratio is 0.27, there will emerge a local extinction and reburning phenomenon in the flame of fuel oil in a dual swirling flow. When the gas and air equivalent ratio is greater than 0.62, it will be found that the flame is filled with the whole section of the burner in the tail portion of the burner and the flame will close along the circumferential direction. **Key words:** dual swirling burner, visualization of flame during combustion of fuel oil, OH-PLIF

1 000 MW 汽轮机低压末级二次水滴沉积特性分析 = **Analysis of the Secondary Water Droplet Deposition Characteristics in the LP Last Stage of a 1 000 MW Steam Turbine** [刊, 汉] WANG Chun, XIE Dan-mei, YU Xing-gang ( College of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan, China, Post Code: 430072 ), LI Xi-bin, FAN Xiao-ping, YIN Ming-yan ( Dongfang Steam Turbine Co. Ltd., Deyang, China, Post Code: 618000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(5). - 720 - 724

Numerically calculated was the flow field inside the last two stages of a 1 000 MW thermal power generation purposed steam turbine by using the software ANSYS CFX and determined was the distribution of the primary water droplets at the inlet of the last stage along the radial direction. By making use of the secondary water droplet proportion, the primary water droplet proportion was predicted and its distribution along the radial direction was also reasonably corrected, thus obtaining the boundary conditions of the secondary water droplets at the inlet of the last stage with a relatively high precision. Finally, the distribution of the water droplets deposited on the surface of the stator blades of the last stage was calculated. It has been found that the proportion of the secondary water droplets at the inlet of the stator blade cascade of the last stage is 10% and mainly distributed at the relative blade height of above 60% and the secondary water droplet deposition rate on the stator blade surface of the last stage is 77.8%, among which that on the pressure surface accounts for 60.9% of the total deposition amount, along the radial direction, the secondary water droplets mainly deposit at the relative blade height of above 30% while along the axial direction, they mainly stand on the pressure surface after the blade width of 80% and on the suction surface before the blade width of 40%. **Key words:** steam turbine, stator blade in the last stage, secondary water droplet, deposition distribu-

tion

当量比对掺氢天然气预混燃烧特性的影响 = **Influence of the Equivalent Ratio on the Premixed Combustion Characteristics of Natural Gas Mixed and Diluted With Hydrogen** [刊, 汉] JIA Liang, HE Feng, LI Hui-lin, FAN Xing-guang ( College of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang, China, Post Code: 550025) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(5). - 725 - 729

In order to improve the combustion quality of natural gas mixed and diluted with hydrogen in an internal combustion engine and enhance the power and emission performance of a vehicle, by making use of the spheric flame schlieren images obtained from a constant volume combustion bomb high speed schlieren system in combination with the spheric flame propagation theory, analyzed was the law governing the influence of the fuel/air equivalent ratio on the premixed combustion characteristics of natural gas mixed and diluted with hydrogen at various proportions of hydrogen mixed and diluted. It has been found that at a high proportion of hydrogen mixed and diluted, a high equivalent ratio can force the unstretched laminar flow combustion rate to emerge a peak value and can heighten the combustion rate while a high proportion of hydrogen mixed and diluted can make the instability of the flame to be enhanced. A high equivalent ratio can contain the instability of the flame and enhance the stability of the flame and there exists a critical value of the equivalent ratio  $\varphi = 1.0$  at which the combustion pressure is biggest and the time duration required for attaining the maximum combustion pressure is shortest. In addition, at a high proportion of hydrogen mixed and diluted, the maximum combustion pressure is comparatively big. **Key words:** natural gas, hydrogen, equivalent ratio, stability, constant volume combustion bomb

燃烧器配风方式对低热值煤层气燃烧影响数值模拟 = **Numerical Study of the Influence of the Air Distribution Mode of a Burner on the Combustion of Coalbed Gas With a Low Heating Value** [刊, 汉] CHEN Yan-rong, LI Hao-jie, YANG Zhong-qing ( Education Ministry Key Laboratory on Low Grade Energy Utilization Technologies, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400030), FAN Hu ( Chongqing Youshui Hydropower Development Co. Ltd., Chongqing, China, Post Code: 409809) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(5). - 730 - 735

Numerically simulated were various air distribution modes of a low heating value coalbed gas burner with a gas swirl-