

# 关于汽轮机内湿蒸汽两相凝结流动的研究进展

韩旭, 李恒凡, 韩中合

(华北电力大学 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 河北 保定 071003)

**摘要:** 汽轮机内的湿蒸汽非平衡凝结流动会导致机组效率降低和叶片水蚀损坏。由于两相流动远比单相流动复杂, 通过实验难以测量其凝结特性。对此, 通过分析国内外湿蒸汽两相流理论和实验研究现状, 总结了现有的3种研究方法, 并指出研究中存在的问题, 讨论了两相流凝结机理及其求解方法, 阐述了几种湿蒸汽测量方法优点及不足之处。分析指出: 凝结相变过程十分复杂, 传热传质在微米级水平发生, 因此, 有必要发展一种考虑两相间耦合的凝结模型。结合两相流数值研究的现状, 对汽轮机两相流数值的求解方法进行阐述。湿蒸汽两相流研究为汽轮机通流部分设计和改造提供了理论参考。

**关键词:** 湿蒸汽; 两相流; 自发凝结; 透平

中图分类号: TK261 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.05.001

## 引言

汽轮机通流部分在长期水蚀作用下, 出现流动效率降低、机组经济性变差等问题。叶片长期工作在湿蒸汽工况下, 还可能出现断裂, 导致严重的事故<sup>[1]</sup>。1910年, Baumann提出: 1%的湿度增加导致1%的效率下降<sup>[2]</sup>。目前, 1000 MW机组低压缸在THA(热耗率验收)工况下的效率可达93%左右, 继续提高效率的空间主要集中在末几级上<sup>[3]</sup>。因此, 研究湿蒸汽两相凝结流动的传热传质机理, 成为提高发电效率的重要课题。

湿蒸汽两相流动远比单相流动复杂的多, 实验测量法很难得到精确数据且难度较大, 这就使得文献中湿蒸汽凝结流动的实验数据大多为平均值<sup>[2-4]</sup>。随着CFD数值模拟技术的进步和叶轮机械气动热力学的发展, 基于自发凝结理论和已经积累的实验数据, 建立低压段自发凝结湿蒸汽两相流

动的理论模型和CFD数值研究方法的条件已经基本成熟。

## 1 湿蒸汽两相流动的特点

汽轮机低压段中湿蒸汽两相凝结流动本质上是热力不平衡过程和动力不平衡过程, 是一种既出现膨胀同时又发生凝结的多相流动。由于液相物质在湿蒸汽中所占比例很小, 故基本认为其均匀分布在汽相中, 很少发生碰撞。自发凝结湿蒸汽两相流具有以下特点:

(1) 纯净蒸汽自发凝结核半径在 $10^{-4} \sim 10^{-3} \mu\text{m}$ <sup>[4]</sup>, 这种极小液滴可视为不可变形刚体。凝结核内部压力很大, 且表面自由能在气流总能量中所占比例不可忽略<sup>[2]</sup>。

(2) 两相流中的一次水滴是通过水分子凝结成核、生长之后形成的, 占液相的90%以上<sup>[5]</sup>。一次水滴具有固体微粒的力学性能, 尺寸一般不超过 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ <sup>[6]</sup>。一次水滴跟随性极好, 与高速气流之间基本无速度滑移, 对湿蒸汽热力学性能有较大影响。

(3) 一次水滴在动叶、静叶、汽缸壁上扩散、沉积形成水膜, 水膜撕裂破碎形成二次水滴<sup>[5]</sup>。二次水滴的直径一般在 $20 \sim 200 \mu\text{m}$ , 其速度大小、方向与一次水滴有着很大差异, 这就造成了湿蒸汽两相流动的前后不均匀性<sup>[2]</sup>。二次水滴与高速气流之间较大的速度滑移, 故易对叶片造成水蚀损坏。

(4) 湿蒸汽在汽轮机内通过弯曲通道时不断膨胀, 而成核和水滴生长伴随大量凝结潜热的释放, 对膨胀流动起到了加热作用, 出现类似激波的凝结冲

收稿日期: 2015-04-17; 修订日期: 2015-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51576066); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015MS107)

作者简介: 韩旭(1991-), 男, 河北保定人, 华北电力大学博士研究生。

波<sup>[7]</sup>。蒸汽分子在热力学平衡状态下不断发生自发凝结,伴随着动量交换和传热传质现象。

## 2 湿蒸汽两相流动的数值研究进展

### 2.1 湿蒸汽两相流研究现状

在国外,冯·卡门流体力学研究所、英国中央电业研究实验室、伯明翰大学、耶鲁大学 Mason 实验室等机构较早的开展了湿蒸汽两相流的实验研究和数值模拟<sup>[1~4]</sup>; White 和 Young 运用二维非粘性时间推进法对叶栅非平衡凝结流动进行了计算,得到了精准的计算结果,通过求解汽轮机内过冷度、膨胀率、湿度之间的关系,得到了 Wilson 点与过冷度之间的关系<sup>[5~6]</sup>; Bakhtar 等运用经典成核理论,采用有限体积法对跨音速二维叶栅凝结流动进行了计算,并通过实验与静叶进行比较<sup>[7]</sup>; Heiler 对现有的湿蒸汽模型做了大量验证,并推导了湿蒸汽 Reynold 时均方程和 Navier - Stokes 方程<sup>[8]</sup>; Slawomir Dykas 等考虑到微小液滴尺寸接近蒸汽平均自由程,液滴表面与气相间的速度滑移不可忽略,利用在自由流动区和远离固壁区并不适用的 BL 模型,提出了一种最佳滑移速度模型求解可压缩、粘性湍流<sup>[9]</sup>; Bolm 等考虑盐分对成核率和水珠生长的影响,得到了带盐蒸汽凝结计算模型<sup>[10]</sup>。

在国内,蔡颐年教授通过建立湿蒸汽自发凝结模型,计算了湿蒸汽的成核与生长过程;李亮利用二阶 TVD 高分辨率离散方程和时间推进法,以湿度和水滴数目作为控制参数,对非平衡流动进行了数值模拟,提出两相耦合求解方法<sup>[11~14]</sup>;张冬阳基于 Wilson 点与相对饱和湿度算法,得出了低压缸内三维粘性非平衡湿蒸汽流动的数值算法<sup>[15]</sup>;林智荣考虑了 LU - SGS - GE 的隐式时间推算法,并对高分辨率 TVD 差分格式进行改良,较为准确的得到了拉伐尔喷管中湿蒸汽凝结流动的参数分布情况<sup>[16]</sup>;韩中合对拉伐尔喷管和 White 平面叶栅内的湿蒸汽凝结流动进行了计算,研究了影响激波强度和凝结特性的热力学参数,分析了三维湍流工况下不同叶高处的非平衡凝结流动特性<sup>[17~18]</sup>;吕孝飞考虑到相间速度滑移和传热温差,建立了适用于多组分凝结的多流体模型,研究表明:相间速度滑移对流动参数影响较大,采用该模型可提高计算精度<sup>[19]</sup>。

国内外学者的研究阐述了湿蒸汽成核、水滴生长、凝结流动边界层、激波等方面的问题,为汽轮机低压缸内凝结流动研究提供了理论基础。目前,学者们对非平衡相变损失已经认识比较透彻,然而单列叶栅凝结流动与实际汽轮机有较大差别,并未考虑级动静干涉对凝结流动的影响。研究动静干涉对凝结流动的影响,有可能发现湿蒸汽损失新机理,对叶片设计具有指导意义。

### 2.2 数值研究方法

目前,湿蒸汽自发凝结两相流动模型一般采用 Euler/Lagrange 和 Euler/Euler 两种方法。Lagrange 方法可以清楚的获得水滴数目、水滴半径、蒸汽湿度沿流线的变化, Bakhtar、Young、Huang、White 等就采用此方法对凝结流动进行了一维和二维的数值模拟,取得了不错的效果<sup>[7~12]</sup>。但三维情况下,流线的位置不易确定,流场中存在漩涡、回流等复杂问题且收敛速度较慢。Euler 法利用一组控制方程即可将汽液两相流场控制,便于统一求解,因此在复杂非平衡凝结流动计算中优势显著。

水滴数量分布方程可以通过物理过程进行推导,但水滴半径分布却很难直接描述。自发成核过程和水滴生长过程同时进行,水滴半径分布成为 Euler/Euler 模型方程建立的难点。汽液两相间的耦合方式也是湿蒸汽研究重点,处理耦合问题主要有两种方法<sup>[14~16]</sup>:

- (1) 将汽液两相作为一个整体考虑,控制方程组中单相汽体的参数换成湿蒸汽的参数;
- (2) 将汽液两相分开处理,在控制方程组中添加源项进行耦合求解。

第二种方法可以清楚的显示出两相遵守的规律且易于实现,文献[15]将两相的控制方程统一到矩阵中,并对其特征值和特征向量进行了推导,运用 TVD 格式、时间推进法对这一方程进行了求解。当前,研究湿蒸汽两相流动的高分辨率差分格式主要有: TVD、NND、失通量分裂格式等<sup>[16]</sup>。但三维湿蒸汽凝结流动数值计算方面的成果还较少,仍需进一步深入研究。

### 2.3 湿蒸汽两相流控制方程组

气液两相流动的控制方程组为<sup>[13~16]</sup>:

质量方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g u_{ij})}{\partial x_j} = S_g \\ \frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_l u_{ij})}{\partial x_j} = S_l \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u$ —速度矢量,  $m/s$ ;  $\rho$ —汽液混合物密度,  $kg/m^3$ ;  $S$ —源项; 下标  $l$ —液相参数; 下标  $g$ —气相参数。

忽略自发凝结过程中水滴在流场中的浮升力、虚拟质量力, 巴斯特力, 只考虑水滴对气相的阻力  $F_h$  [18], 得出动量方程如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho_g u_{gi})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g u_{gi} u_{ij})}{\partial x_j} = -\frac{\partial(\alpha_g p_g)}{\partial x_i} + \frac{\partial(\tau_{gij})}{\partial x_j} + \Delta p_g g_i + F_h + u_{li} S_g \\ \frac{\partial(\rho_l u_{li})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_l u_{li} u_{ij})}{\partial x_j} = \rho_l g_i + F_h + (u_{gi} - u_{li}) S_l \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $p$ —压力,  $MPa$ ;  $g$ —当地重力加速度,  $m/s^2$ ;  $F_h$ —水滴对气相的阻力,  $N$ 。

利用体积平均法对能量方程进行变换, 忽略两相间温差引起的对流换热和相间相互作用产生的能量源项, 得出能量方程为:

$$\frac{\partial(\rho_g e_g)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g u_{gi} e_g)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T_g}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial(\rho_g u_{gi})}{\partial x_j} + \frac{\partial(\tau_{gij} u_{gi})}{\partial x_j} - S_g h_{fg} + S_g h_l \quad (3)$$

式中:  $e$ —单位质量流体所具有的内能,  $kJ/m^3$ ;  $h_{fg}$ —汽化潜热,  $kJ/kg$ 。

液滴数量方程:

$$\frac{\partial(\rho_m N)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m N u_{ij})}{\partial x_j} = \rho_g I \quad (4)$$

式中:  $N$ —液滴数目;  $I$ —成核率,  $kg/s$ 。

#### 2.4 均质成核模型

由于总成核时间一般小于  $1 \mu s$ , 因此认为凝结流动瞬间达到稳定成核状态, 由此得出经典均质成核率 [7]:

$$J = q_c \frac{\rho_g^2}{\rho_l} \sqrt{\frac{2\sigma}{\pi m^3}} \exp\left(-\frac{4\pi r^*{}^2 \sigma}{3kT_g}\right) \quad (5)$$

式中:  $q_c$ —凝结系数;  $m$ —单分子的质量,  $kg$ ;  $\sigma$ —表面张力,  $N/m$ ;  $a_0$ —单个气体分子的表面积,  $m^2$ ;  $r^*$ —临界水滴半径,  $m$ ;  $T_g$ —蒸汽温度,  $K$ ;  $k$ —Boltzmann 常数。

Courtney 指出经典成核率计算式中忽略了分子团的分压力, 其得出了 CNY 修正成核率计算式 [20]:

$$J_{CNY} = q_c \frac{\rho_g \rho_{gs}}{\rho_l} \sqrt{\frac{2\sigma}{\pi m^3}} \exp\left(-\frac{4\pi r^*{}^2 \sigma}{3kT_g}\right) \quad (6)$$

式中:  $\rho_{gs}$ — $T_g$  对应的饱和密度,  $kg/m^3$ 。

Girschik 基于内部一致性经典理论, 利用修正因子  $e^\theta$  对成核率进行修正, 得出 ICCT 修正成核率计算式 [21]:

$$J_{ICCT} = q_c \frac{\rho_g \rho_{gs}}{\rho_l} \sqrt{\frac{2\sigma}{\pi m^3}} \exp\left(-\frac{4\pi r^*{}^2 \sigma}{3kT_g}\right) \exp\left(\frac{\sigma a_0}{kT_g}\right) \quad (7)$$

Kantrowitz 考虑到非等温成核过程中的能量传递, 在等温成核理论的基础上推导了非等温成核模型, 得出: 成核速率与分子团间的能量传递有关 [22]。Wölk 利用低温试验数据, 采用经验函数对经典成核率进行修正, 得出 WS 修正成核率计算式 [23]:

$$J_{WS} = J \exp\left(-27.56 + \frac{6500}{T_g}\right) \quad (8)$$

CNY 修正已经被物理学家认可; ICCT 修正目前仍有较大争议; WS 修正在低温工况下的计算精度很高, 高温工况下的精度有待进一步研究。

#### 2.5 水滴生长模型

目前, 各种水滴生长模型还不能准确描述全尺寸水滴的生长过程, 尤其在过渡区有较大分歧。

Gyarmathy 水滴生长模型 [24]:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\lambda_g \Delta T \left(1 - \frac{r^*}{r}\right)}{\rho_l h_{fg} r \left(1 + 3.18 K_n\right)} \quad (9)$$

式中:  $\lambda_g$ —蒸汽的导热系数,  $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ ;  $K_n$ —Knudsen 数;  $\Delta T$ —过冷度,  $K$ ;  $r$ —液滴的平均半径,  $\mu m$ 。

Young 利用三层理论模型对式 (5) 进行修正, 提出了低压修正模型 [5]:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\lambda_g \Delta T \left(1 - \frac{r^*}{r}\right)}{\rho_l h_{fg} r \left[\frac{1}{1 + 1.5 K_n} + 3.78(1 - \nu) \frac{K_n}{P_{rg}}\right]} \quad (10)$$

式中:  $P_{rg}$ —普朗特数;  $\nu$ —半经验修正系数。

式 (5) 和式 (6) 在物理一致性方面存在不足, 没有考虑过渡层与水滴表层的传热传质, Heiler 采用插值方法对式 (5) 进行修正, 得出了 Heiler 水滴生长模型 [11]:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\lambda_g \Delta T \left(1 - \frac{r^*}{r}\right) (1 + 2K_n)}{\rho_l h_{fg} r (1 + 3.42 K_n + 5.32 K_n^2)} \quad (11)$$

Bakhtar 认为自由流区域内的水滴生长速率受凝结速率、蒸发速率影响,其利用修正因子  $z$  对连续流区域内的水滴生长模型进行修正。连续流水滴生长模型为<sup>[10]</sup>:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{K_n}{K_n + 0.375q_c S_c} \frac{q_c}{\rho_l} \sqrt{\frac{R}{2\pi}} [\rho_g \sqrt{T_g} - \rho_s(T_r, r) \sqrt{T_r}] \quad (12)$$

式中:  $\rho_s(T_r, r)$ —饱和压力下的表面水密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $S_c$ —Schmidt 数;  $T_r$ —水滴温度,  $\text{K}$ 。

### 3 湿蒸汽两相流动测量研究进展

由于非平衡凝结流动的复杂程度远大于单相流动,在低压级中实验测量仍很难得到精确数据,且测量难度较大。鉴于 Laval 喷管的形状与叶栅通道类似,早期的两相凝结流动实验多采用 Laval 喷管进行。上世纪 90 年代, Bakhtar 设计了能够产生并长时间保持过冷蒸汽的吹风装置,利用此装置进行二维叶栅湿蒸汽实验,获得了较多的实验数据<sup>[25]</sup>。White 和 Young 以 660 MW 汽轮机末两级为研究对象,测量了湿蒸汽参数,并利用激光照相法得到了激波分布<sup>[8]</sup>。结合国内外研究进展,最新湿蒸汽测量方法有:显微视频技术法、微波谐振腔微扰法、光脉动法、超声波法等。

#### 3.1 显微视频技术法

随着高速摄影技术的发展,微粒图像速度仪开始用于湿蒸汽测量。使用高速摄像仪对叶栅通道内的湿蒸汽区域进行拍照,将图像数据传输至计算机,通过软件分析得到湿蒸汽流中的水滴数目、尺寸、分布<sup>[26]</sup>。该方法对主流无扰动,也无需进行标定,随着高速摄影技术和计算芯片的发展,该测量方法已具有较高精度。法国电力公司(EDF)开发了显微视频技术测量系统,并测量了湿蒸汽中二次水滴速度和分布<sup>[27]</sup>;刘波峰等采用图像采集系统,利用 Canny 边缘检测算子获得了水滴真正边缘,由此得出水滴尺寸分布,对蒸汽湿度进行估计<sup>[28]</sup>。

#### 3.2 微波谐振腔微扰法

蒸汽湿度变化会造成介电常数改变,导致谐振腔的谐振频率偏移。当湿蒸汽通过微波谐振腔时,会对谐振腔产生扰动,因此测量谐振频率的偏移量即可计算湿蒸汽的介电常数。当蒸汽温度、压力相同时,湿蒸汽的介电常数仅和湿度有关。韩中合建

立了湿蒸汽等效介电常数模型,计算了蒸汽湿度和微波谐振腔相对频率偏移量的关系,设计了谐振腔测量系统,并进行现场试验,如图 1 所示<sup>[29]</sup>。该方法无需蒸汽样本,即可连续进行高精度测量。但此方法只能获得蒸汽湿度,不能获得水滴粒径和水滴速度。钱江波设计了开式同轴谐振腔传感器,对液膜厚度与谐振腔频率的关系进行仿真研究,并推导了液膜厚度测量关系式,此方法可用于测量汽轮机静叶、汽缸壁处的水膜厚度<sup>[30]</sup>。



图 1 微波谐振法测量排汽湿度

Fig. 1 Wetness of the exhaust steam measured by using the microwave resonance method

#### 3.3 光脉动法

两相流中的二次水滴直径一般在  $20 \mu\text{m}$  以上,当二次水滴穿越测量区域时,会导致透射光强降低,此时的光信号会出现一个向下的脉冲,测量原理如图 2 所示。根据脉冲信号下降的幅值和有效范围,即可计算出二次水滴的直径和速度。蔡小舒等研发了一种基于光脉动法的新型集成化探针,通过数值计算和风洞试验数据对测量方法进行优化,并利用此探针对接捷克 Prunerov 电厂汽轮机内的两相流进行了测量<sup>[31]</sup>。

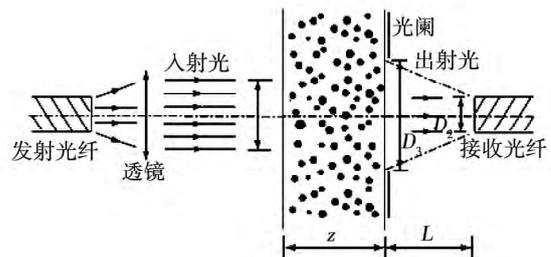


图 2 光谱消光法测量装置

Fig 2 Spectral extinction method-based measurement device

## 4 结 论

汽轮机内的湿蒸汽两相流动十分复杂,受实验条件和凝结理论的限制,该领域尚存在较多问题有待解决。过去的几十年中,经过学者们不懈努力,两相流测量及数值模拟都取得了较多成果。本文通过分析研究现状,总结了现有的数值方法,讨论了两相流凝结机理及其求解方法,阐述了显微视频技术法、微波谐振腔微扰法、光脉动法的优点及不足之处。得出以下主要结论:

(1) 凝结相变过程十分复杂性,传热传质在微米级水平发生,其描述和计算都基于半经验公式,没有考虑两相间传热温差以及耦合问题。因此,有必要发展一种考虑两相间耦合的凝结成核和水滴生长模型。

(2) 大多数研究针对纯净蒸汽,但汽轮机中的高参数蒸汽往往带有盐分及杂质颗粒。对于盐分和可溶性颗粒对蒸汽凝结流动的影响还需进一步研究。

(3) 低压段内的蒸汽参数不能用饱和状态下的性质确定,自发凝结损失评估存在困难。尽管文献中对这方面进行了探讨并给出了计算损失的经验公式,但仍存在一定的局限性。

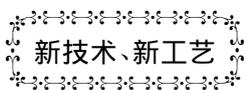
(4) 湿蒸汽两相流的数值方法基本已经完善,但在测量系统设计和实验过程中还存在一些难题有待解决。

### 参考文献:

- [1] Moore M J, Sieverding C H. Two-phase steam flow in turbines and separators [M]. London: Hemisphere Publishing Corporation, 1976.
- [2] Baumann K. Some recent developments in large steam turbine practice [J]. Electrical Engineers, Journal of the Institution of, 1921, 59 (302): 565 - 623.
- [3] Guha A. Computation, Analysis and Theory of Two-Phase Flows. The Aeronautical Journal, 1998: 71 - 82.
- [4] Bakhtar F, Ebrahimi M, Webb R A. On the Performance of a Cascade of Turbine Rotor Tip Section Blading in Nucleating Steam-Part 1: Surface Pressure Distributions. Proc Instn Mech Engrs, Part C, 1995, 209: 115 - 124.
- [5] White A J, Young J B, Walters P T. Experimental validation of condensing flow theory for a stationary cascade of steam turbine blades [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, 1996, 354(1): 59 - 88.
- [6] Huang L, Young J B. An analytical solution for the Wilson point in homogeneously nucleating flows [J]. Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1996, 452 (1949): 1459 - 1473.
- [7] Bakhtar F, Young J B, White A J, et al. Classical nucleation theory and its application to condensing steam flow calculations [J]. Proc. IMechE, 2005(219): 1315 - 1333.
- [8] Heiler M. Instationäre Phänomene in homogen/heterogen kondensierenden Düsen- und Turbinenströmungen [M], 1999.
- [9] Slawomir Dykas, Włodzimierz Wróblewski. Two-fluid model for prediction of wet steam transonic flow [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013(60): 88 - 94.
- [10] Bolm D, Kerpicci H, Ren J, et al. Homogeneous and Heterogeneous Nucleation in a Nozzle Guide Vane of a LP-Steam Turbine [C]. 4th European Conference on Turbomachinery. Firenze, Italy, 2001.
- [11] 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.  
LI Yu, NING De-liang, LI Liang, et al. Quantitative calculation of the wet steam-caused losses in steam turbines [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(1): 25 - 30.
- [12] 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.  
LI Yu, LI Liang, ZHONG Gang-yun, et al. Influence of the last stage in a turbine on the aerodynamic and condensation characteristics of its low pressure cylinder [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(7): 16 - 20.
- [13] 巫志华, 李亮, 丰镇平. 三维湿蒸汽自发凝结流动的数值模拟 [J]. 动力工程, 2006, 26(6): 814 - 817.  
WU Zhi-hua, LI Liang, FENG Zhen-ping. Numerical simulation of a 3-D wet steam spontaneous condensation flow [J]. Power Engineering, 2006, 26(6): 814 - 817.
- [14] 吴晓明, 李亮, 李国君, 等. 基于双流体模型的湿蒸汽凝结流动三维数值模拟 [J]. 热能动力工程, 2007, 22(4): 367 - 370.  
WU Xiao-ming, LI Liang, LI Guo-jun, et al. A three-dimensional numerical simulation of a wet steam condensation flow based on a dual fluid model [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007, 22(4): 367 - 370.
- [15] Zhang D Y, Jiang H D, Liu JJ. Numerical calculation of one dimensional steam nucleating flow by considering some influences [J]. J Eng Therm, 2001, 22: 25 - 28.
- [16] 林智荣, 袁新. 自发凝结流动数值模拟方法及其在 Laval 喷管中的应用 [J]. 工程热物理学报, 2006, 27(1): 42 - 44.  
LIN Zhi-rong, YUAN Xin. A method for numerically simulating a spontaneous condensation flow and its application in Laval nozzles [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(1): 42 - 44.
- [17] 韩中合, 王智, 杨昆, 等. 膨胀率对湿蒸汽自发凝结流动影响的数值分析 [J]. 华北电力大学学报, 2004, 31(2): 36 - 39.  
HAN Zhong-he, WANG Zhi, YANG Kun, et al. Numerical analysis of the influence of the expansion rate on a wet steam spontaneous condensation flow [J]. Journal of North China University of E-

- lectric Power 2004 31(2): 36-39.
- [18] 韩中合,陈柏旺,刘刚,等.湿蒸汽两相凝结流动中水滴生长模型的研究[J].中国电机工程学报,2011,31(29): 79-84.  
HAN Zhong-he, CHEN Bai-wang, LIU Gang, et al. Study of a model for growth of water drops in wet steam two-phase condensation flows[J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering 2011 31(29): 79-84.
- [19] 吕孝飞,张锋,曹洪贵,等.非平衡凝结流动的多流体模型[J].机械工程学报,2014,50(22): 165-170.  
LU Xiao-fei, ZHANG Feng, CAO Hong-gui, et al. Multi-fluid model for non-equilibrium condensation flows[J]. Journal of Mechanical Engineering 2014 50(22): 165-170.
- [20] W. G. Courtney. Remarks on homogeneous nucleation [J]. J. Chem. Phys 1961 35: 2249-2250.
- [21] S. L. Girschik, C. P. Chu. Kinetic nucleation theory: a new expression for the rate of homogeneous nucleation from an ideal supersaturated vapour [J]. J. Chem. Phys 1990 93: 1273-1277.
- [22] B. E. Wyslouzil, J. H. Seinfeld. Nonisothermal homogeneous nucleation [J]. J. Chem. Phys 1992 97: 2661-2669.
- [23] J. Wölk, R. Strey, C. H. Heath, B. E. Wyslouzil. Empirical function for homogeneous water nucleation rates [J]. J. Chem. Phys, 2002, 117(10): 4954-4960.
- [24] G. Gyarmathy, The spherical droplet in gaseous carrier streams: review and synthesis in: Handbook of Chemistry and Physics [C]. Multiphase Science and Technology 1 62nd ed, McGraw-Hill, New York, 1981-1982 99-279.
- [25] Bakhtar F, M. T. Mohammadi Tochai. An investigation of two-dimensional flows of nucleating and wet steam by the time-marching method [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1980 2(1): 5-18.
- [26] Laali A Courant J J. Calculation and measurement of fog droplet size: comparison between nuclear and fossil fired turbine, design, repair and refurbishment of steam turbine of ASME [R]. Firenze, Italy, 1991, 13, 115.
- [27] Dobkes A L, Zilber T M, Y. Kachuriner et al. Studying the characteristics of wet steam in turbine flow sections [J]. Thermal engineering, 1992 39(1): 45-49
- [28] 李群林,刘波峰,肖湘.使用照相法测量汽轮机湿蒸汽中水滴尺寸的研究[J].中国仪器仪表,2006(12): 66-68.  
LI Qun-lin, LIU Bo-feng, XIAO Xiang. Study of the use of photography method in measuring sizes of water drops in wet steam in a steam turbine [J]. China Instrumentation 2006(12): 66-68.
- [29] 韩中合,钱江波,田松峰.在线测量汽轮机排汽湿度的微波谐振腔结构优化[J].中国电机工程学报,2009,29(26): 1-6.  
HAN Zhong-he, QIAN Jiang-bo, TIAN Song-feng. Structure optimization of a microwave resonance cavity for on-line measuring the wetness of the exhaust steam from a steam turbine [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2009, 29(26): 1-6.
- [30] 钱江波,严晓哲,韩中合.用于液膜厚度测量的开式同轴腔传感器结构设计[J].热力发电,2015,44(3): 99-103.  
QIAN Jiang-bo, YAN Xiao-zhe, HAN Zhong-he. Structural design of an open type coaxial cavity sensor for use in measuring the thickness of liquid film [J]. Thermal Power Generation, 2015 44(3): 99-103.
- [31] 马力,蔡小舒,田昌,等.试验汽轮机内湿蒸汽测量研究[J].热力透平,2012,41(02): 97-105.  
MA Li, CAI Xiao-shu, TIAN Chang, et al. Research of the measurement of wet steam in a test steam turbine [J]. Thermal Turbine, 2012 41(2): 97-105.

(刘瑶 编辑)



新技术、新工艺

## 在橡胶外壳底座上具有液力惯性运动变扭器的隔振支座

据《Судоостроение》2014年1-2月刊报道,俄罗斯奥姆斯克国立技术大学的专家对船舶动力装置上装有液力惯性运动变扭器的隔振支座进行了分析和研究。

通过分析和研究,给出了由橡胶-金属减震器和在橡胶外壳底座上液力惯性运动变扭器组成的隔振支座的设计原理并估算其隔振性能。

由平行连接弹性元件和橡胶外壳底座上液力惯性变扭器组成的隔振支座的研究结果表明,借助于选择批量生产的减震器并选配在液力惯性变扭器内惯性管的数量,可以保证隔振支座所需的调整次数,以便改善船舶动力装置的隔振效果。

(吉桂明 摘译)

关于汽轮机内湿蒸汽两相凝结流动的研究进展 = **Advances in the Study of the Wet Steam Two-phase Condensation Flow Inside Steam Turbines** [刊 汉] HAN Xu ,LI Heng-fan ,HAN Zhong-he ( Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment State Monitoring and Control ,North China University of Electric Power ,Baoding ,China ,Post Code: 071003) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(5) . -1 ~6

The wet steam non-equilibrium condensation flow inside steam turbines may result in a decline of the efficiency of the units and damage to blades due to water erosion. In view of the fact that a two-phase flow is far more complicated than a single-phase flow ,it is difficult to measure its condensation characteristics through various tests. In such a case ,the currently available three research methods were summarized through analyzing the latest research findings in the study of the wet steam two-phase flow theory both at home and abroad and its experimental study and the problems existing in the studies above-mentioned were also pointed out. Furthermore ,the mechanism governing the condensation of a two-phase flow and the method for seeking its solutions were discussed and the merits and demerits of several wet steam measurement methods were expounded. The research results show that the condensation and phase process is very complicated and the heat and mass transfer occurs at the micrometer level. Therefore ,it is necessary to develop a condensation model with the coupling between two phases being taken into consideration. In combination with the status quo of the two-phase flow numerical study ,the numerical methods for seeking solutions to two-phase flows inside steam turbines were expounded. The foregoing can offer a theoretical reference for the design and reconstruction of the flow path in steam turbines. **Key words:** wet steam ,two-phase flow ,spontaneous condensation ,turbine

板壳式换热器板程流量分布特性的模拟与优化 = **Simulation and Optimization of the Flow Distribution Characteristics of the Plate Side of a Plate and Shell Type Heat Exchanger** [刊 汉] LIU Jia-rui ,ZHAO Wei ,ZHANG Hua ,YU Xiao-ming ( College of Energy Source and Power Engineering ,Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 , 31(5) . -7 ~15

With the plate side of a plate and shell type heat exchanger serving as the object of study ,established was a geometrical model and performed also was a numerical simulation. On this basis ,the flow distribution characteristics in a U-shaped and Z-shaped inlet and outlet arrangement were analyzed and compared and through calculating the heat transfer efficiency and comparing the pressure drops ,the influence of the flow distribution characteristics on the heat transfer efficiency and the pressure drops was analyzed. The simulation and analytic results show that a serious flow