

文章编号: 1007-2691(2004)02-0036-04

# 膨胀率对湿蒸汽自发凝结流动影响的数值分析

韩中合<sup>1</sup>, 王 智<sup>1</sup>, 杨 昆<sup>2</sup>, 田松峰<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学动力工程系, 河北保定 071003; 2. 中国国家电力监管委员会, 北京 100700)

**摘要:** 结合液滴成核、生长理论, 在无滑移假设下, 导出了描述存在自发凝结湿蒸汽两相流动的方程组, 对喷管中的湿蒸汽自发凝结不平衡稳定两相流动进行了数值模拟, 得到了沿喷管轴向蒸汽两相参数的分布。分析了相同进口蒸汽参数和喷管形状下, 膨胀率对蒸汽压力、过冷度、水滴半径、蒸汽湿度沿轴向分布和成核率大小的影响。汽轮机内湿汽损失的大小与蒸汽过冷度、水滴半径、湿度大小和由于凝结产生的“压力冲波”剧烈程度等因素有关, 膨胀率是影响这些因素的主要参数。通过选择合适的膨胀率, 对通流部分进行优化设计, 控制蒸汽凝结的成核过程, 可以预期减小湿汽损失。

**关键词:** 湿蒸汽; 自发凝结; 两相流动; 数值模拟

**中图分类号:** TK262      **文献标识码:** A

## Numerical simulation of expansion rate on two-phase wet steam flow with spontaneous condensation

HAN Zhong-he<sup>1</sup>, WANG Zhi<sup>1</sup>, YANG Kun<sup>2</sup>, TIAN Song-feng<sup>1</sup>

(1. Department of Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. China Electric Power Regulatory Commission, Beijing 100700, China)

**Abstract:** A model for calculating wet steam flows by assuming zero inter-phase speed slip has been derived based on the classical nucleation and droplets growth theory. A numerical simulation of thermal non-equilibrium transonic two-phase flows in a nozzle with spontaneous condensation is performed and the parameter profiles of wet steam along the axis is described. The position of rapid condensing can be predicted. The results show the effects of the expansion rate on subcooling, water droplets status and pressure shock waves, which is related to the wetness loss coefficient of steam turbine.

**Key words:** wet steam; spontaneous condensation; two-phase flow; numerical simulation

## 引 言

常规火力发电厂中大型凝汽式汽轮机的末几级和核电站中汽轮机的全部级都在湿蒸汽状态下工作。湿蒸汽两相流动给蒸汽透平主要带来两方面的问题, 一是湿蒸汽进入透平时带入的水份或蒸汽在透平内自发凝结产生的水份, 会产生湿气损失使机组效率降低; 二是湿蒸汽中的水滴会导致透平动叶

片的水蚀损坏。蒸汽快速膨胀产生的非平衡两相凝结流动现象对流动特性和流动效率有很大影响, 从机理上弄清楚汽轮机内自发凝结现象的本质以及相关参数对蒸汽凝结流动特性的影响, 深入理解湿蒸汽两相凝结流动的特点, 依据凝结流的流动规律设计蒸汽透平的通流部分, 并为汽轮机运行进行指导, 对尽量减小或有效控制湿度损失、提高汽轮机效率, 避免动叶片的水蚀损坏具有重要意义。由于湿蒸汽两相流动问题的复杂性, 自发凝结理论在凝

收稿日期: 2003-10-22.

作者简介: 韩中合 (1964—), 男, 华北电力大学动力工程系博士研究生, 副教授.

结流计算中存在很多不确定因素，国内外现有的研究都是对不确定因素进行假设，与实验值进行对比分析得到结果。数值模型和解法也集中在处理凝结冲波引起陡峭的参数分布。凝结流中的不确定因素在理论上需要进一步探讨。

### 1 蒸汽自发凝结流动的控制方程组

设系统与外界绝热，气相视为无粘气体，忽略液相体积，两相间无滑移，流动为定常流动，在进口压力温度与喷管形状固定条件下凝结位置固定。于一维喷管中湿蒸汽跨音速膨胀凝结两相流方程组为

连续方程

$$\frac{dA}{A} + \frac{d\rho_g}{\rho_g} + \frac{dC}{C} + \frac{dY}{1-Y} = 0, \quad (1)$$

动量方程

$$CdC + (1-Y)\frac{dP}{\rho_g} = 0, \quad (2)$$

能量方程

$$CdC + C_p dT - d(H_{fg} Y) = 0, \quad (3)$$

状态方程为截止到第二维里系数的维里型状态方程<sup>[1]</sup>

$$P = \rho_g RT_g (1 + B\rho_g). \quad (4)$$

$$B = 2.0624 \times 10^{-3} - \frac{2.61204}{T_g} \times 10^{\frac{100800}{34900 + T_g}}.$$

水珠临界半径由 Kelvin 公式确定<sup>[2]</sup>：

$$r_c = \frac{2\sigma}{R\rho_g T_g \ln S}. \quad (5)$$

凝结成核率采用对经典成核率考虑非等温影响修正的公式<sup>[2]</sup>：

$$I = \frac{1}{1+\varphi} q_c \sqrt{\frac{2\sigma}{\pi m^3} \frac{\rho_g}{\rho_l}} \exp\left(-\frac{4\pi r_c^2 \sigma}{3KT_g}\right), \quad (6)$$

$$\varphi = 0.26 \left( \frac{H_{fg}}{RT_g} \right) \left( \frac{H_{fg}}{RT_g} - 0.5 \right).$$

液珠增长率方程<sup>[2]</sup>：

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\lambda_g \Delta T}{r\rho_l H_{fg} (1 + 3.78K_n P_{rg})}. \quad (7)$$

计算步长选取很小，可认为两计算节点间潜热 $H_{fg}$ 为常数。

于是，能量方程 (3) 变为

$$CdC + C_p dT - H_{fg} dY = 0. \quad (8)$$

能量方程与连续方程、动量方程及状态方程联

立求解可得到速度、压力、密度沿流动方向变化的方程组：

$$\frac{dC}{C} = \frac{1-Y}{M^2 - 1 + Y[(k-1)M^2 + 1]} \times \left[ \frac{dA}{A} + \left( \frac{1}{1-Y} \frac{H_{fg}}{C_p T} \right) dY \right], \quad (9)$$

$$\frac{dP}{P} = \frac{-kM^2}{M^2 - 1 + Y[(k-1)M^2 + 1]} \times \left[ \frac{dA}{A} + \left( \frac{1}{1-Y} \frac{H_{fg}}{C_p T} \right) dY \right], \quad (10)$$

$$\frac{d\rho_g}{\rho_g} = - \left( \frac{dA}{A} + \frac{dY}{1-Y} \right) \frac{1-Y}{M^2 - 1 + Y[(k-1)M^2 + 1]} \times \left[ \frac{dA}{A} + \left( \frac{1}{1-Y} \frac{H_{fg}}{C_p T} \right) dY \right], \quad (11)$$

式中 $\frac{dA}{A}$ 由喷管形状参数计算得到， $dY$ 由蒸汽凝结方程得到。

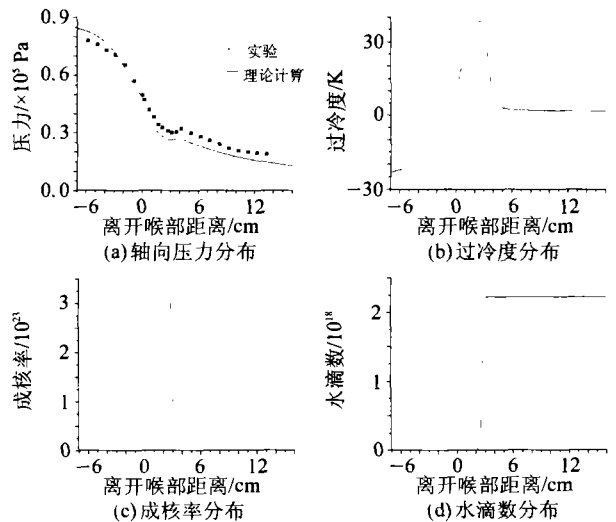
沿流动方向推进求解方程组，可得到沿流动方向参数的分布。凝结流的计算中，采用双分散度模型，每个节点由两类水滴描述液相。第一类表示上游产生的水滴，第二类表示当前节点在一个步长内新产生水滴。

### 2 蒸汽凝结流动数值模拟计算结果及分析

#### 2.1 一维缩放喷管中自发凝结两相流动

喷管截面为矩形，固定宽度，扩张段总扩张角为 8 度，扩张段长 16 cm。进口蒸汽参数 $P_0 = 87 \text{ kPa}$ ， $T_0 = 390.15 \text{ K}$ ，背压设为 5 kPa，保证流动为无冲波超音速流动。喷管形状数据及压力分布实验数据取自文献 [3]。蒸汽参数沿轴向分布如图 1 所示。

图 1 给出了沿喷管轴向的汽液相参数分布。喷管进口至饱和点(喉部前约 1 cm 处)为干过热流动，之后过热蒸汽进入过饱和状态，蒸汽处于热力不平



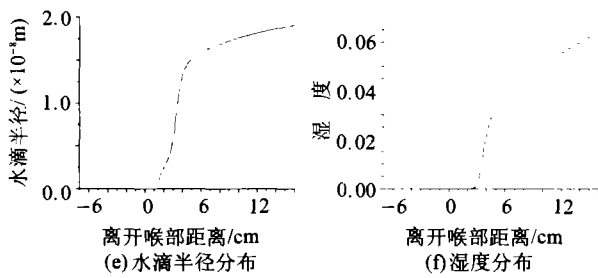


图1 一维喷管湿蒸汽自发凝结流动

Fig.1 Wet steam flow with spontaneous condensation in 1-D nozzle

衡状态。随着膨胀的继续,过冷度迅速增加,当过冷度上升到 38 K 左右,达到热力不平衡的极限点即 Wilson 点,能够稳定存在的水滴半径降到最低点,此时蒸汽发生突然凝结,蒸汽流中出现大量具有临界半径的凝结核心,成核率从 0 急剧上升到  $10^{23}$  数量级,水滴数目急剧增加,凝结流中的水滴数目在成核区下游几乎保持不变,这表明水滴数目在快速成核过程结束时就已经基本确定。从成核率曲线可以看到,成核率对过冷度非常敏感,成核率从峰值到接近零所对应的过冷度之差只有  $5^{\circ}\text{C}$  左右。蒸汽凝结成核的同时,大量的凝结潜热释放出来对气流加热,气流速度下降,突然凝结放热引起“压力冲波”,出现压力跳跃现象,与实验结果基本一致<sup>[3]</sup>。伴随潜热释放,凝结核的产生,在较高的过冷度下,蒸汽分子在凝结核上迅速凝结,水滴半径迅速增长,同时湿度增长也较快。随着凝结过程的进行,过冷度在很短的距离内就迅速降到  $5^{\circ}\text{C}$  以下,此后蒸汽继续膨胀,剩余过冷度只有不到  $2^{\circ}\text{C}$ ,两相间基本恢复到热力平衡状态,流动基本属于湿饱和蒸汽的膨胀过程,蒸汽分子在已有水滴表面不断凝结,水滴半径仍然缓慢增加,湿度也缓慢上升。

2.2 膨胀率对蒸汽凝结流动的影响

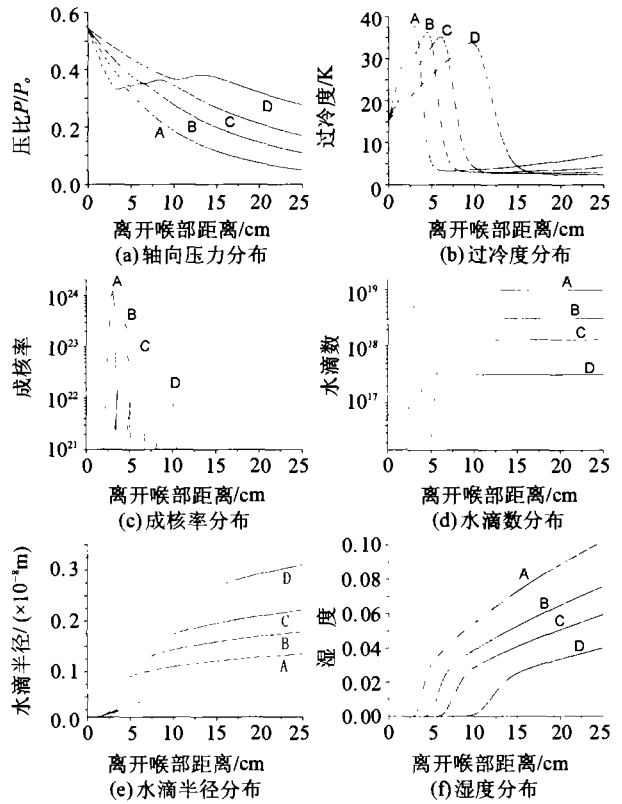
为了将喷管形状引起膨胀率变化的影响与进口状态的影响分离,计算时取相同的进口蒸汽状态,并采用在不出现凝结时喷管扩张段的膨胀率为恒值的喷管壁形状。喷管扩张段通面积分布根据连续方程由下式给定:

$$\frac{A(x)}{A^*} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{1/(k-1)} \sqrt{\frac{k-1}{k+1} \left(\frac{p(x)}{p_{0r}}\right)^{-1/k} \left[1 - \left(\frac{p(x)}{p_{0r}}\right)^{(k-1)/k}\right]^{-1/2}}, \quad (12)$$

$$\ln \left[ \frac{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{p(x)}{p_{0r}}\right)^{(k-1)/k}}}{1 + \sqrt{(k-1)/(k+1)}} \right] - \frac{1}{2} \ln \left[ \frac{\left(\frac{p(x)}{p_{0r}}\right)^{(k-1)/k}}{2/(k+1)} \right] -$$

$$\sqrt{1 - \left(\frac{p(x)}{p_{0r}}\right)^{(k-1)/k}} + \sqrt{\frac{k-1}{k+1} \frac{k-1}{2k} \frac{\dot{P}}{\sqrt{2C_{p0}T}} (x-x^*)}. \quad (13)$$

分别取膨胀率  $\dot{P}$  为 8 000/s, 5 000/s, 3 500/s 和 2 000/s, 计算分析了膨胀率对蒸汽凝结流动过程的影响,结果如图 2 所示。



$P_{0r}=45 \text{ kPa}, T_{0r}=368.15 \text{ K},$

A:  $\dot{P}=8 \text{ 000/s}, B: \dot{P}=5 \text{ 000/s}, C: \dot{P}=3 \text{ 500/s}, D: \dot{P}=2 \text{ 000/s}$

图2 膨胀率对自发凝结流动的影响

Fig.2 Effects of the expansion rate on spontaneous condensation

计算表明,相同的进口蒸汽参数下,膨胀率越大,气流过冷度增加得越快,越早达到 Wilson 点,达到的极限过冷度也越大,蒸汽凝结成水滴的成核率和水滴数越大,潜热的释放在相对较短的时间内完成,湿度增长较快,但水滴平均半径较小,与文献 [1, 3] 中水滴半径的实验数据变化趋势相吻合。同时,由于湿度增长较快,在相对较短的时间内蒸汽释放的凝结潜热较多,气流受到的加热程度也就越剧烈,压力的波动越陡峭。因此,膨胀率大小对蒸汽因膨胀引起的自发凝结流动的最大过冷度、水滴成核率、水滴数目、水滴平均半径和凝结发生的位置有很大影响。

由于设计及结构的原因,在凝汽式汽轮机的低压级组通道内,蒸汽的膨胀率沿径向往往差别很

大,从而造成了级内两相流动参数沿径向分布存在很大不同,文献[4,5]对国产200MW空冷机组汽轮机末级排汽两相参数的测量证明了这一点。测量表明,在近叶根2/7及以下处,排汽压力较高,膨胀率较小,蒸汽湿度较小但水滴平均半径较大;在2/7到4/7叶高范围内,排汽压力逐渐降到最低,蒸汽湿度增加到最大,水滴半径减到最小;从4/7叶高到叶顶,虽然膨胀率保持较大,湿度也较高,但由于叶片上水膜脱落产生了直径较大的二次水滴和离心力的原因,水滴平均半径又逐渐增加,叶顶处的水滴半径为全级最大。

工作于湿蒸汽区的级,由于蒸汽的过冷、凝结及两相流动的原因存在湿汽损失,湿汽损失的大小与过冷度、水滴半径、湿度大小和由于凝结产生的“压力冲波”剧烈程度等因素有关,而蒸汽的膨胀率又是影响这些因素的主要参数。通过对通流部分优化设计,在整级内选择合适的膨胀率,控制凝结的成核过程,可以减小级的湿汽损失。

### 3 结论

建立了存在自发凝结一维湿蒸汽跨音速流动数值模型,对两相不平衡凝结流动进行了数值模拟,给出了沿喷管轴向的两相参数分布。模拟结果与以往实验数据基本一致,证明了模型及算法的正确性。分析了膨胀率对自发凝结两相流动的影响,模拟结果表明膨胀率对极限过冷度、成核率、凝结速率、水滴半径和“压力冲波”的剧烈程度具有显著的影响。级的湿汽损失决定于上述因素,可以预计,通过对通流部分优化设计,在整级内选择合适的膨胀率,控制凝结的成核过程,可以改善级的工作条件,减小级的湿汽损失。

#### 参考文献:

- [1] Moore M J, Sieverding C H. Two-phase steam flow in turbines and separators [M]. London: Hemisphere Publishing Corporation, 1976.1-190.
- [2] Moore M J, Sieverding C H. Aerothermodynamics of low pressure steam turbines and condensers [M]. London: Hemisphere Publishing Corporation, 1986.1-190.
- [3] Bakhtar F, Mohammadi Tochai M T. An investigation of two-dimensional flows of nucleating and wet steam by the time-marching method [J]. Int. J. Heat & Fluid Flow, 1980,2 (1): 5-18.
- [4] 王仲博, 宁哲, 赵毅, 等 (Wang Zhongbo, Ning Zhe, Zhao

Yi, et al). 200 MW 干式冷却汽轮机末级流动特性试验研究 (Testing and study of last stage flowing characteristics of dry cooling type 200 Mwsteam turbine) [J]. 中国电力 (Electric Power), 1997,30 (3): 41-43.

- [5] 卫敬明, 张志伟, 蔡小舒, 等 (Wei Jingming, Zhang Zhiwei, Cai Xiaoshu, et al). 应用光学法饱和蒸汽湿度仪测量汽轮机末级蒸汽湿度 (Measurement of steam wetness in turbine final stage with the optical method) [J]. 动力工程 (Power Engineering), 1997,17 (4): 71-76.

(责任编辑: 吴勃)

附:

### 符号表

- A: 喷管横截面积,  $m^2$   
 B: 第二维里系数,  $m^3/kg$   
 C: 速度,  $m/s$   
 $C_p$ : 等压比热,  $J/(kg \cdot K)$   
 $H_g$ : 汽化潜热,  $J/kg$   
 I: 单位质量成核率,  $1/(kg \cdot s)$   
 K: Boltzmann 常数,  $J/K$   
 k: 绝热指数  
 $K_n$ : Knudsen 数  
 M: 马赫数  
 m: 蒸汽分子质量,  $kg$   
 P: 压力,  $Pa$   
 Pr: Prandtl 数  
 $\dot{P}$ : 膨胀率,  $1/s$   
 $q_c$ : 凝结系数  
 R: 气体常数,  $J/(mol \cdot K)$   
 r: 水滴半径,  $m$   
 S: 过饱和度  
 T: 温度,  $K$   
 x: 沿喷管轴向距离,  $m$   
 Y: 湿度。  
 $\Delta T$ : 过冷度,  $K$   
 $\lambda$ : 导热系数,  $W/(m \cdot K)$   
 $\rho$ : 密度,  $kg/m^3$   
 $\sigma$ : 表面张力,  $N/m$   
 下标  
 0: 进口参数  
 c: 临界值  
 g: 汽相  
 t: 滞止状态  
 i: 液相  
 上标  
 +: 喉部