

汽轮机隔板分离器内流场的数值研究

李学来 (大连理工大学)

罗春新 孙先亮 (哈尔滨七〇三研究所)

[摘要]用 SIMPLE 法对汽轮机隔板分离器内汽液两相流场进行了数值计算,并探讨了该类分离器有关工作参数对其除湿效率的影响。

关键词 隔板分离器 汽轮机 内部除湿

分类号 TK263.2 O359.1

1 前言

核动力汽轮机其工质一般为饱和蒸汽。为确保汽轮机低压级的经济性及安全性,通常在高、低压汽轮机之间安装一个外置式汽水分离器(Moisture Separator,以下简称MS)。MS有重量尺寸大、造价高及压力损失较大等缺点,因此,国内外正积极开展汽轮机内部除湿的研究工作,以期用内部除湿来取代MS。内部除湿有多种型式,如静叶内除湿、隔板分离器(亦称级间除湿)、动叶除湿、级分离器及特殊分离器等^[1]。其中,隔板分离器除湿

效率较高,国外已在实际运行的小汽轮机上成功地取代了MS^[2]。文献[3]介绍,AEI公司的一台通流部分装有隔板分离器的汽轮机已投入运行,该分离器的除湿效率高达75%。目前文献检索结果未发现更多这方面的资料。本文力图通过数值方法,探讨隔板分离器内蒸汽和水滴的运动情况及有关参数对除湿效率的影响。

2 隔板分离器的结构型式及工作过程

图1为国外已经在实际汽轮机上应用的某种类型隔板分离器结构示意图。其工作过程如下:从静叶栅1流出的湿蒸汽进入环形通道2,并在环形通道中形成旋流。旋流中的水滴由于离心力的作用被抛向通道外侧,沉积在通道外壁上并形成水膜。水膜在压差及汽流携带力的作用下沿外壁流向除湿槽口3。沉积在除湿槽内的水分与少量蒸汽一起被抽除。除湿后的蒸汽则通过弯曲度不大的导

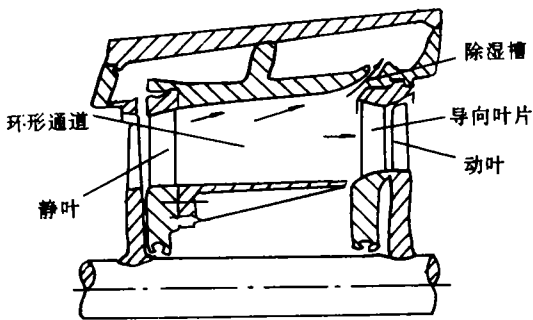


图1 隔板分离器结构示意图

收稿日期 1994-09-08

向叶栅 4 流入动叶 5 继续做功。图 2 表示了隔板分离器在 $i-s$ 图上的热力过程曲线。

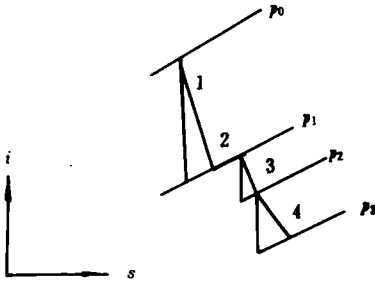


图 2 隔板分离器内热力过程曲线

1. 静叶 2. 通道中 3. 导向叶栅 4. 动叶

影响隔板分离器除湿效果的因素很多,如水分颗粒分散度、环形通道长度、静叶汽流出口角、除湿槽口抽汽量等。而所有这些因素对除湿效率的影响最终综合体现于水滴在通道外壁的沉积率上。

3 基本方程

3.1 汽相流动控制方程

本研究模型是湿蒸汽在环形通道内流动,可以认为蒸汽流动具有轴对称性。另外,在一定工况下,蒸汽流动可以认为是定常的。因此,汽相在柱坐标系下控制方程可采用如下通用形式表示:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u \Phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v \Phi) = \frac{\partial}{\partial z}(r \frac{\partial \Phi}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r r \frac{\partial \Phi}{\partial r}) + S_{(\Phi)} \quad (1)$$

式中 x, r 分别代表轴向及径向坐标; ρ 为蒸汽密度; u, v, w 分别为汽相速度在轴向、径向及圆周方向的投影; $S_{(\Phi)}$ 为源项; Φ 为通用因变量, r 为广义扩散性系数。当 Φ, r 及 $S_{(\Phi)}$ 各取某一具体值时,式(1)便表示某一具有特定意义的方程。如表 1 所示。

3.2 水滴运动方程

由于水滴尺寸很小,可忽略重力及汽相压差的影响,只考虑汽流对水滴携带力的作用,此时水滴运动微分方程可表示为:

$$m_w \frac{d\bar{C}_w}{dt} = C_D \cdot \frac{\rho}{\delta} \pi d^2 |\bar{C}_s - \bar{C}_w| \times (\bar{C}_s - \bar{C}_w) \quad (2)$$

式中 m_w 为水滴质量; \bar{C}_w, \bar{C}_s 分别为水滴、蒸汽速度向量; C_D 为阻力系数; d 为水滴直径。

表 1 不同 Φ, r 及 $S_{(\Phi)}$ 下式(1)代表的方程

Φ	r	$S_{(\Phi)}$	式(1)代表的方程
1	1	0	连续方程
u	μ	$-\frac{\partial p}{\partial z}$	轴向运动方程
v	μ	$-\frac{\partial p}{\partial r} + \rho \cdot \frac{w^2}{r} - \mu \cdot \frac{v}{r^2}$	径向运动方程
w	μ	$-\rho \frac{vw}{r} - \mu \frac{w}{r^2}$	圆周向运动方程

注: μ 为蒸汽动力粘度。

阻力系数 C_D 可表示为蒸汽绕流水滴的雷诺数 Re 的函数,即

$$Re < 4 \text{ 时 } C_D = \frac{24}{Re} + 4.31 - 0.719Re + 0.068Re^2$$

$$4 < Re < 1000 \text{ 时 } C_D = \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re^{\frac{1}{3}}} \quad (3)$$

$$Re > 1000 \text{ 时 } C_D = 0.44$$

Re 的表达式为

$$Re = d \cdot \rho \cdot |\bar{C}_s - \bar{C}_w| / \mu \quad (4)$$

4 数值计算

4.1 基本方程的差分离散

本文采用 SIMPLE 方法离散通用方程(1),其格式为:

$$a_P \Phi_P = a_E \Phi_E - a_W \Phi_W + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + b \quad (5)$$

同时得到压力修正方程:

$$a'_P p'_P = a'_E p'_E + a'_W p'_W + a'_N p'_N + a'_S p'_S + b' \quad (6)$$

系数 $a_P, a_E, a_W, a_N, a_S, b, a'_P, a'_E, a'_W, a'_N, a'_S$ 及 b' 的

意义见文献[4]。

水滴运行方程(2)用中心差分格式离散。

蒸汽动力粘度 μ 按 Shtherland 规律确定。蒸汽密度 ρ 取各网格点压力下的饱和蒸汽密度。

4.2 边界条件

在环形通道进口截面上给定通用因变量 Φ 的分布;出口截面各变量的值假定与前一计算站相同;通道壁面满足速度不滑移条件:

$$u = v = w = 0 \quad (7)$$

在除湿槽口处,根据要求的蒸汽量给定蒸汽径向速度。

4.3 计算方法

先不考虑水分的影响,利用汽相基本方程算出环形通道中蒸汽流场,然后在已知的蒸汽流场中求解水滴运动微分方程,用轨迹法确定水滴运行特性。

水滴尺寸根据自发凝结成核理论确定。

在计算除湿效率时,假定水滴一经碰上通道外壁就被除去。

5 算例

本文以某艇主机为母型,利用上述方法对隔板分离器进行了多方案计算,下面介绍其中较佳的一个方案。

5.1 算例数据

本方案隔板分离器工作参数如下:

进口蒸汽流量:28.94 kg/s

静叶平均直径:761 mm

级前蒸汽压力:30.39 kPa

导叶平均直径:808 mm

蒸汽初焓:2498.04 kJ/kg

隔板分离器允许轴向长度:<520 mm

进口汽流角:90°

抽除汽水混合物含汽率:<0.4

进口蒸汽速度:86.9 m/s

进口蒸汽干度:0.894

静叶栅叶高:78 mm

导叶叶高:125 mm

5.2 计算结果与讨论

图3为环形通道中两相流场在子午面上的投影。汽相流线在通道前2/3部分基本上平行于通道内壁,而后1/3部分由于受除湿槽抽汽的影响,汽相流线沿径向逐渐向通道外壁偏移。在除湿槽附近偏移最大,之后流线又趋于与轴线平行。水滴受惯性力的作用,从静叶出来后便向外壁偏移,除湿槽的抽汽加速了这种偏移。图4表明,除湿槽的抽吸作用使汽相速度明显降低,从而导致在通道出口处蒸汽速度沿径向的不均匀分布。为充分利用蒸汽动能在下一级动叶中继续做功,故在通道出口应安装一系列弯曲度不大的导向叶栅,以使汽流速度均匀并获得最佳汽流入口角。

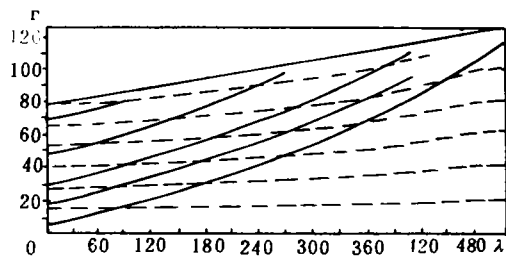


图3 环形通道蒸汽流场及水滴轨迹
---蒸汽流线 —水滴轨迹

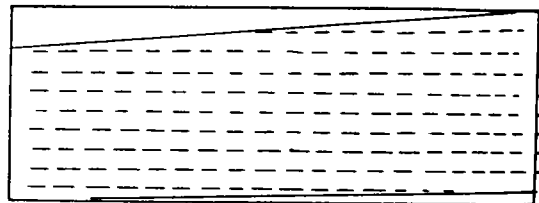


图4 环形通道子午面上汽相速度分布

通道长度 l 及静叶汽流出口角是影响隔板分离器除湿效果的两个主要参数。增大 l 及减小 α_1 都能使除湿效率有显著提高(见图5、6)。但 l 的增大及 α_1 的减小分别受汽轮机转子的临界转速和静叶栅临界流量的制约。图7为除湿效率与水滴直径的关系。图中表明:除湿效率随水滴尺寸的增大而显著增大。 $5\ \mu\text{m}$ 以下的水滴分离效果很差,而 $20\ \mu\text{m}$ 以上的水滴几乎能全部被除去。另外,计算表明,除湿槽口的抽汽作用可使除湿效率提高(5~6)%。

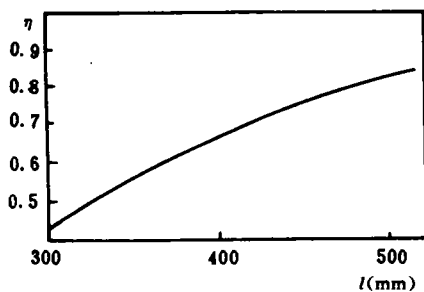


图5 除湿效率与通道长度的关系

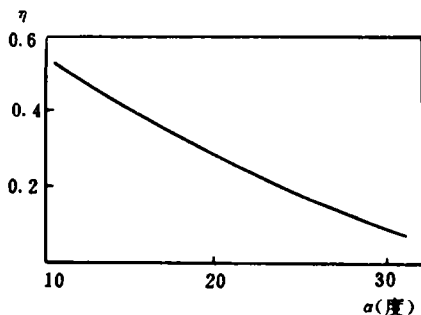


图6 除湿效率与静叶汽流出口角的关系

本方案隔板分离器除湿效率高,当 $\alpha_1 = 15^\circ$ 、 $l = 500\ \text{mm}$ 时除湿效率为 86%。即可将蒸汽湿度由 $y_1 = 10.6\%$ 干燥到 $y_2 = 1.5\%$ 。

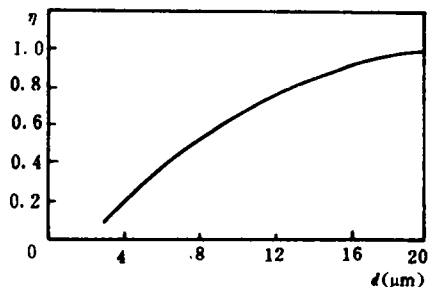


图7 除湿效率与水滴直径的关系

6 结论

本文提出的数值方法及计算程序适用于隔板分离器各种方案的计算。

隔板分离器的除湿效果取决于其结构型式及工作参数。从除湿角度考虑,用隔板分离器取代外置式汽水分离器是可能的。

参 考 文 献

- 1 孙先亮,罗春新.关于汽轮机通流部分内部除湿的研究.热能动力工程,1986,(6):10~19
- 2 Moore M. J Moisture separators and reheaters for wet steam turbines. I. M. E. Design Conf. 1979
- 3 Harris F. R. Steam turbine for the 100 MW(e) prototype. Nuclear Engineering, June, 1967(12)
- 4 帕坦卡 S. V. 传热与流体流动的数值计算. 科学出版社,1984

作者简介:罗春新,男,1942年生,高级工程师。曾参加过我国首台核潜艇、导弹驱逐舰及其改进型的主汽轮机组的研制。近几年来,又先后组织并参加了舰用主汽轮机长叶片、汽轮机反滑参数运行等重大课题的研究,其中核潜艇主汽轮机组荣获全国科学大会奖。

通讯处:150030 哈尔滨 77—3 信箱

Based on years of engineering practice the authors have summed up the design experiences and features of waste-heat recovery boilers for gas turbines, noting that the present technology of home-made waste-heat recovery boilers of gas turbines has already attained a quite advanced level with a strong competitive position on both the domestic and international market. Key words: gas turbine, waste-heat boiler, design features

首座小型天然气发电锅炉的设计与运行 = The Design and Operation of the First Home-made Low-capacity Natural Gas-fired Power Plant Boiler [刊, 中]/Li Zongxi, Liu Wanzhen (Harbin 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -291-296

A brief description is given of the thermodynamic characteristics of a first home-made low-capacity boiler installed in a power station. Also discussed are some specific features concerning the selection of boiler furnace and burners, etc. All the above can provide useful hints for the further improvement of new designs. Key words: boiler, natural gas, combustion, electric power generation

煤及灰辐射特性参数研究 = A Study on Coal and Ash Radiation Characteristics Parameters [刊, 中]/Tang Min (Harbin 703 Research Institute) Ruan Liming, Yu Qizheng, Liu Linhua, Tan Heping (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -297-301

Through the utilization of the transmissivity spectrum of rare-phase homogeneous microparticle dispersion system of three types of Heilongjiang Province coal and its ash, experimentally determined by an infrared spectrophotometer, coupled with the adoption of a highly precise Lorenz-Mie electromagnetic theory and dispersion K-K relation, the authors have made an inverse computation of the basic radiation characteristics parameters (compound refractive index) of microparticles and on this basis determined the decay factor, scattering factor and absorption factor of the said particles. As the only simplification condition of the computation is the extrapolation relation of a limited domain experimental data, the method under discussion in this paper features high precision and a wide applicability. The authors have analysed the effect of transmissivity experimental error on the result of inverse computation and pointed out that the experimental precision of the transmissivity will exercise an influence on the solution of the compound refractive index. Key words: radiation characteristics, Lorenz-Mie theory, microparticle, coal, ash

汽轮机隔板分离器的内流场的数值研究 = A Numerical Study on the Inner Flow Field of a Steam Turbine Diaphragm Moisture Separator [刊, 中]/Luo Chunxin, Sun Xianliang (Harbin 703 Research Institute), Li Xuelai (Dalian University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -302-305

By use of a SIMPLE method a numerical calculation is conducted of the vapor-liquid dual phase flow field in the moisture separator of a steam turbine diaphragm. Also discussed in the paper is the effect of relevant working parameters of such a separator on the moisture removal efficiency. Key words: diaphragm moisture separator, steam turbine, internal moisture removal

新型高效汽水分离元件研究 = A Study on a New Type of High-efficiency Moisture Separating Elements [刊, 中]/Lu Yibo, Ren Abao, Chen Yuxiang (Harbin 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -306-309

On the basis of theoretical analyses and experimental tests the authors have proposed a new type of high-efficiency moisture separating elements, which can retain their highly effective moisture separation performance even at an inner flow speed as high as 4.5-5.0 m/s. This makes it possible to considerably reduce the space occupied by the separator and also its metallic material consumption. Key words: moisture separation, test elements, efficiency