

旋叶分离器中液滴运动相变特性分析

赵富龙, 薄涵亮*

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要:为研究 AP1000 核电站蒸汽发生器中初级旋叶分离器的液滴运动相变特性以及液滴相变对汽水分离性能的影响,通过建立液滴运动相变模型,基于 AP1000 旋叶分离器三维模型,采用欧拉-拉格朗日方法求解气液两相流动模型,计算得到了不同工况下旋叶分离器的汽水分离效率和压降的变化规律,并分析了液滴相变特性对分离效率的影响,获得了不同初始半径液滴的相变特性。计算结果表明:随着蒸汽流速的增加,分离效率和压降快速增加;压降相同时,半径较小的液滴在运动蒸发过程中半径变化百分比比较大,相比半径较大的液滴其运动轨迹容易改变,更易逃逸出分离器,造成考虑相变时的分离效率降低;在正常运行工况下,液滴相变对分离效率的影响可忽略。计算结果可为进一步研究汽水分离装置中的汽水分离性能提供理论依据,并用于指导汽水分离装置的设计。

关键词:旋叶分离器;汽水分离效率;液滴;运动相变;压力变化

中图分类号:O359.1;TK124

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2017)12-2183-08

doi:10.7538/yzk.2017.51.12.2183

Characteristics Analysis of Droplet Phase Transformation during Moving in Swirl-vane Separator

ZHAO Fu-long, BO Han-liang*

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To investigate the characteristics of the droplet phase transformation during moving in the swirl-vane separator and the influence of the droplet phase transformation on the steam-water separation performance within the steam-water separator of the AP1000 steam generator, a phase transformation model for single moving droplet was developed. The steam-water separation efficiency and the pressure drop were obtained by using the Euler-Lagrange approach based on the three-dimensional geometric model of the swirl-vane separator. The analysis of the influence of the droplet phase transformation on the separation performance and the radius variation of different sizes of droplets was conducted. The results indicate that the separation efficiency and the pressure drop increase rapidly with the steam velocity. In addition, the radius variation percentage of the smaller droplet is greater during the moving and evaporating process in the

收稿日期:2017-08-21;修回日期:2017-09-09

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51406096);清华大学辅导员海外研修计划资助项目

作者简介:赵富龙(1990—),男,山东烟台人,博士研究生,核科学与技术专业

*通信作者:薄涵亮, E-mail: bohl@tsinghua.edu.cn

swirl-vane separator, which leads to the more likely change of the motion trajectories, the increasing probability to escape from the separator, and the smaller separation efficiency. Besides, the influence of the droplet phase transformation on the separation performance can be negligible under the actual operation conditions. The calculation results can provide theoretical basis for the further investigation of the separation performance and guide the design of the steam-water separator.

Key words: swirl-vane separator; steam-water separation efficiency; droplet; phase transformation during moving; pressure variation

随着大型核电站蒸汽发生器功率增加以及船用核动力装置蒸发器空间紧凑的要求,必须提高蒸汽的参数,汽水分离装置必须具有更高的分离性能^[1]。刘世勋^[2]阐述了立式自然循环蒸汽发生器重力分离空间中水滴重力分离的机理。陈韶华等^[3]用分离流动模型模拟了简化的重力分离空间内汽水两相流动。张谨奕等^[4]对汽水分离器均匀流场中单液滴运动机理进行研究,建立了单液滴运动模型。黄伟等^[5]用两相流模型对一级汽水分离器两相流动进行模拟得到了两相流动细节。Zhang 等^[6]通过数值方法对 AP1000 汽水分离器分离性能进行了仿真。文献[7-8]通过缩比实验和数值仿真方法对旋叶分离器的分离性能进行了较为深入的研究,得到了旋叶分离器分离效率和压降的细节。

从已有研究发现,许多学者对汽水分离特性展开了大量的研究,但关于 AP1000 蒸汽发生器中汽水分离性能研究较少^[9]。另外,在汽水分离器中,虽然水蒸气和液滴总体处于饱和状态,但在液滴被蒸汽携带运动的过程中,由于阻力的作用以及局部结构的改变会造成压力不断降低,会对液滴的传热和传质特性产生影响,进而可能影响汽水分离特性^[10-11]。Gopireddy 等^[12]采用数值方法对双组份液滴干燥过程进行了模拟;谭思超等^[13]提出了气液界面传质与体积传质的转换方法。目前关于液滴传质方面的研究,大多数是灌溉蒸发、灭火、燃油、火箭推进方面^[14],汽水分离器中液滴的传质方面尚无公开论文发表,因此有必要对汽水分离装置中的液滴传热传质特性进行研究。

本文拟建立液滴在汽水分离器中运动相变过程中的运动相变模型,根据 AP1000 旋叶分离器三维模型,通过 FLUENT 软件与 C++ 自编耦合求解,获得 AP1000 旋叶分离器的汽

水分离效率、压降等信息,并对液滴运动相变特性进行分析。

1 计算模型

1.1 运动相变机理

液滴在汽水分离装置中压力变化条件下的相变过程按照作用机理和发生过程的时间序列的不同分为以下 2 个阶段^[10-11]。

1) 快速蒸发阶段:液滴在汽水分离装置中的运动过程中由于阻力和局部结构的改变会造成压力降低,在压力降低刚开始的很短时间内,液滴表面周围的压力以压力波波速快速传播,降低到与环境压力基本一致,而在压力的变化过程中由于压差的驱动会造成液滴表面蒸汽的快速运动,使得液滴快速蒸发。

2) 热平衡蒸发阶段:当液滴表面周围的压力降低到与环境压力基本一致时,压差驱动的作用机理影响基本很小,可忽略,但由于在快速蒸发过程中液滴的温度变化要远远滞后于压力的变化,此时液滴表面的气液界面处于过热,打破了原有的气液相平衡,液滴进入热平衡蒸发过程,随着蒸发过程的进行,液滴表面温度逐渐降低,气液界面的饱和压力也降低,直至达到新的气液相平衡或液滴完全蒸发,蒸汽环境仍处于过热状态。

1.2 基本假设

根据液滴在汽水分离装置中运动相变物理解释进行简化假设,做出如下 5 个基本假设^[10-11]。

1) 球对称蒸发:汽水分离装置中液滴半径一般为几 μm 到几百 μm ^[15],尺寸较小,因此可认为液滴在蒸发过程中保持球形。

2) 蒸汽流场稳态、蒸发过程准稳态:汽水分离器中液滴占的体积很小,对蒸汽流场的影

响很小,可认为气相流场为稳态流场。另外, Cole^[16]、Semenov^[17]及 Linán^[18]等通过特征时间的数量级分析,发现气相的热传导时间和动量传递的特征反应时间较液滴受热时间短1~2个量级,可认为蒸发过程中的小段时间内流场参数不变,蒸发为准稳态过程。

3) 液滴温度均匀:由于液滴尺寸较小, Biot数小于0.1^[19],可忽略液滴内部温度梯度。

4) 忽略辐射传热:分离装置中液滴与装置壁面之间的温差较小,可忽略辐射传热。

5) 液滴与流场之间为单相耦合:由于汽水分离器中,液滴占的体积很小,对蒸汽流场的影响很小,因此可忽略液滴对流场的影响,只考虑流场对液滴的影响。

1.3 数学模型

1) 液滴运动模型

根据液滴运动机理的分析可得到液滴在流场运动过程的受力情况,液滴受到自身重力、流体的浮力、流动曳力、附加质量力、Magnus升力和 Saffman 升力^[4]。液滴运动模型基本方程包括液滴位移方程、转动方程和速度方程。

液滴旋转速度 $\omega(t)$ 满足的方程为:

$$I \frac{d\omega}{dt} = \mathbf{M} \quad (1)$$

其中: $I = 2mr^2/5$ 为液滴的转动惯量; \mathbf{M} 为流场对液滴的转矩, $\mathbf{M} = -0.5\rho_f C_M r^5 |\omega - \Omega/2| (\omega - \Omega/2)$, ρ_f 为流体密度, Ω 为流场旋度, $\Omega = \nabla \times \mathbf{u}$, C_M 为转矩系数, \mathbf{u} 为蒸汽流动速度。

液滴运动速度 $\mathbf{v}(t)$ 满足的方程为:

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_A + \mathbf{F}_V + \mathbf{F}_M + \mathbf{F}_S \quad (2)$$

其中: $m = 4\pi\rho_d r^3/3$ 为液滴质量, ρ_d 为液滴密度; $\mathbf{F}_D = \pi C_D \rho_f |\mathbf{u} - \mathbf{v}| (\mathbf{u} - \mathbf{v}) r^2/2$ 为流动曳力, C_D 为曳力系数; $\mathbf{F}_A = 2\pi\rho_f r^3 [d(\mathbf{u} - \mathbf{v})/dt]/3$ 为附加质量力,此处附加质量力的系数取为0.5; $\mathbf{F}_V = \mathbf{F}_G - \mathbf{F}_B = 4\pi r^3 (\rho_a - \rho_f) \mathbf{g}/3$ 为体积力,是重力 \mathbf{F}_G 和浮力 \mathbf{F}_B 的合力, \mathbf{g} 为重力加速度; $\mathbf{F}_M = \pi C_{Ma} \rho_f r^3 (\mathbf{u} - \mathbf{v}) \times (\omega - \Omega/2)$ 为 Magnus 升力, C_{Ma} 为 Magnus 升力系数; $\mathbf{F}_S = 6.46 C_{Sa} R_\mu^2 (\rho_f \mu_f)^{0.5} \cdot r^2 |\Omega|^{-0.5} [(\mathbf{u} - \mathbf{v}) \times \Omega]$ 为 Saffman 升力, C_{Sa} 为 Saffman 升力系数, R_μ^2 为特征液滴内部环流量对 Saffman 升力的影响, μ_f 为流体动力黏性系数。 C_M 、 C_D 、 C_{Ma} 、 C_{Sa} 等力和力矩相关系数参考

张谨奕和张璜的相关研究结果^[4,20-21]。

液滴位移 $\mathbf{x}(t)$ 满足的方程^[22]为:

$$d\mathbf{x}/dt = \mathbf{v} \quad (3)$$

2) 液滴相变模型

液滴相变模型包括水动力学模型和动力学模型^[11],快速蒸发阶段采用水动力学模型,热平衡蒸发阶段采用动力学模型,两者以压力变化从环境传播到液滴表面的时间 t_p 作为分界判据, t_p 的数值根据从环境位置到液滴表面的距离和压力波在蒸汽中的传播速度计算得到。根据机理的解释和相变过程的描述可知,在时间小于等于 t_p 时,采用水动力学模型进行压力变化后液滴快速蒸发过程计算;在时间大于 t_p 时,采用动力学模型进行液滴热平衡蒸发过程计算。

(1) 水动力学传质模型

根据基本的传质理论^[23]有:

$$\dot{m} = 4\pi r^2 D_v d\rho/dr \quad (4)$$

其中: \dot{m} 为液滴的质量变化速率, kg/s; D_v 为蒸汽的自扩散系数, m^2/s , 根据 Fuller 等提出的中低压气体扩散系数经验关系式求得^[24]。

考虑到管道内流动为有限空间内流动,假设选取的环境边界到液滴中心距离为 n 倍的液滴半径,将式(4)沿半径方向在 $[r, nr]$ 进行积分并考虑对流作用,可得考虑对流时液滴传质方程^[11]为:

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{n}{n-1} \frac{Sh D_v}{2\rho_a r} (\rho_r - \rho_{nr}) \quad (5)$$

其中: Sh 为 Sherwood 数; ρ_r 和 ρ_{nr} 分别为蒸汽在液滴表面处和距离液滴中心 n 倍半径处的密度, kg/m^3 。Sherwood 数和 Reynolds 数的表达式分别为:

$$Sh = 2 + 0.6 Re^{0.5} Sc^{1/2} \quad (6)$$

$$Re = 2\rho_r v r / \mu \quad (7)$$

其中: μ 为蒸汽的动力黏度, $kg/(m \cdot s)$; Sc 为 Schmidt 数。

(2) 动力学传质模型

热平衡蒸发阶段的主要作用机理为恢复气液相平衡,采用经典的体现界面传质特性的蒸发冷凝模型 Hertz-Knudsen 公式^[25]进行气液界面非气液相平衡传质过程计算,其表达式为:

$$G = \frac{2\alpha}{2-\alpha} \sqrt{\frac{M}{2\pi R}} \left(\frac{p_1}{\sqrt{T_1}} - \frac{p_g}{\sqrt{T_g}} \right) \quad (8)$$

其中: G 为质量流密度, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; α 为气液界面蒸发/冷凝系数; R 为气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; M 为摩尔质量, kg/mol ; T_l 和 T_g 分别为液相温度和气相温度, K ; p_g 和 p_l 分别为蒸汽压力和液相温度 T_l 所对应的液相饱和压力, MPa 。

式(8)经过化简变为:

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{1}{\rho_d} \frac{2\alpha}{2-\alpha} \sqrt{\frac{M}{2\pi R}} \left(\frac{p_l}{\sqrt{T_l}} - \frac{p_g}{\sqrt{T_g}} \right) \quad (9)$$

其中, α 的取值参考文献[10]的研究结果。

3) 传热方程

对液滴运用能量守恒方程^[26]可得:

$$mc_p \frac{dT}{dt} = 4\pi r^2 h (T_w - T_r) + \gamma \dot{m} \quad (10)$$

其中: c_p 为液滴比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; h 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_r 、 T_w 分别为液滴表面处和距离液滴中心 n 倍半径处蒸汽的热力学温度, K ; γ 为水汽化潜热, J/kg 。

整理式(10)可得温度的变化关系式:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{3}{\rho_d c_p r^2} \left[hr (T_w - T_r) - \frac{n}{n-1} \gamma Sh D_v (\rho_r - \rho_w) \right] \quad (11)$$

Nusselt 数和对流换热系数 h 的表达式为:

$$Nu = 2 + 0.6 Re^{0.5} Pr^{1/3}$$

$$0 \leq Re \leq 7 \times 10^4, 0.6 \leq Pr \leq 400 \quad (12)$$

$$h = \frac{\lambda Nu}{2r} \quad (13)$$

其中: λ 为蒸汽的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; Pr 为 Prandtl 数。

1.4 数学模型求解方法

由于上述数学模型符合微分方程 $y' = f(x, y)$ 的基本形式,所以采用经典的 4 阶 Runge-Kutta 法求解,采用显式差分格式,先求解液滴运动方程,然后在每个液滴运动方程的迭代步长中再求解液滴相变方程。具体求解

方法和模型验证参见文献[10-11]。

1.5 几何模型

AP1000 核电站采用立式蒸汽发生器^[21],汽水分离装置主要包括 3 部分:初级旋叶分离器、重力分离空间和次级汽水分离器。本文研究对象为初级旋叶分离器,其三维几何结构如图 1 所示。主要结构参数为:整个旋叶分离器高度,3.771 m;旋叶分离器筒体内径,0.496 m;溢流环内径,0.682 m;旋叶倾角,30°。

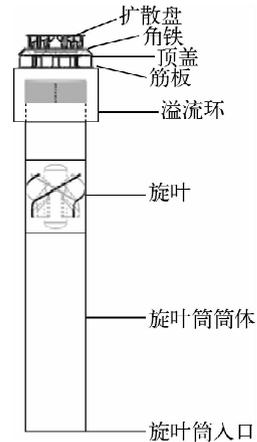


图 1 AP1000 旋叶分离器几何结构

Fig. 1 Schematic of AP1000 swirl-vane separator

AP1000 核电站满功率负荷运行时,两台蒸汽发生器的总蒸汽流量为 1 887.4 kg/s ,压力为 5.78 MPa,蒸汽密度为 29.6 kg/m^3 ,计算得到满功率负荷下旋叶分离器入口蒸汽流速 u 为 5.11 m/s 。为进行全面分析,选取蒸汽发生器从 10% 到 120% 功率负荷工况进行计算,认为蒸汽流速与蒸汽发生器的蒸汽负荷呈线性关系^[27],不同功率负荷下的蒸汽流速列于表 1。另外,为获得旋叶分离器在更高参数下的分离效率,进行了入口蒸汽流速为 10、15、20 m/s 等的计算,编号分别为 10、11 和 12。

表 1 蒸汽发生器不同负荷下旋叶分离器入口蒸汽流速

Table 1 Steam velocity at inlet of swirl-vane separator under different power loads

编号	负荷/%	$u/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	编号	负荷/%	$u/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	编号	负荷/%	$u/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	10	0.51	4	30	1.53	7	80	4.09
2	15	0.77	5	50	2.55	8	100	5.11
3	20	1.02	6	60	3.06	9	120	6.13

1.6 液滴入口参数

马超^[15]估算了蒸汽发生器内产生的膜液滴信息,包括数量、直径、速度大小等,如图2所示。在后续的计算中以此液滴分布作为旋叶分离器的入口液滴参数来进行分离效率计算。

1.7 计算流程

由于汽水分离装置中,液滴被蒸汽携带着运动,且液滴体积份额较小,为此采用欧拉-拉格朗日方法模拟蒸汽和液滴两相流动。蒸汽流场利用 FLUENT 软件通过欧拉方法求解,液

滴运动相变模型通过拉格朗日方法求解,得到的蒸汽流场信息导入到 C++ 自编的液滴运动模型中追踪液滴运动相变过程。采用 Solidworks 软件建立三维模型,ICEM 软件绘制网格,划分3组不同的网格验证网格无关性,确定最终的网格数量为215 557,对于单相蒸汽流场采用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型,液滴在分离器入口处均匀分布,液滴入口位置分为1 224组,液滴半径(1~238 μm)分为238组。

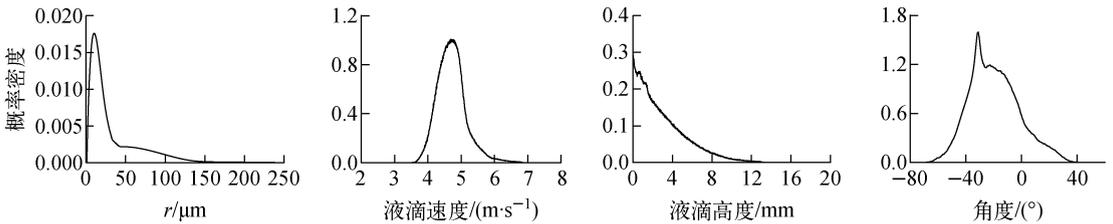


图2 蒸汽发生器蒸发面处产生的液滴分布^[15]

Fig. 2 Droplet parameter distribution at free surface of steam generator^[15]

2 结果分析及讨论

2.1 分离效率和压降

计算得到的不同蒸汽入口流速条件下旋叶分离器的分离效率和压降如图3所示。

从图3可看到,随着蒸汽入口速度的增加,分离效率先快速增加,之后逐渐趋于平稳,主要是由于在旋叶分离器中液滴的分离主要依靠惯性分离,液滴与蒸汽相比惯性较大不易改变运动方向,液滴在流经旋叶的过程中,运动方向由原来的向上运动变为旋转运动,当蒸汽流速增加时,液滴更易在离心力的作用下被抛向旋叶

分离筒的壁面而被分离,且大液滴相对于小液滴更易被分离;在蒸汽速度较小时,只有半径较大的液滴才能被分离,增加蒸汽流速,原来不能被分离的半径较小的液滴也可被分离,对分离效率的影响较大。当蒸汽流速增加到一定数值(约6 m/s)时,半径较大的液滴几乎被完全分离,半径很小的液滴基本上不能再被分离,此时随着流速的增加,旋叶分离器的分离效率增加缓慢。随着蒸汽入口速度的增加,压降逐渐增加,尤其在蒸汽入口流速大于5 m/s后,压降快速增加,这主要是由于随着流速增加会产生大

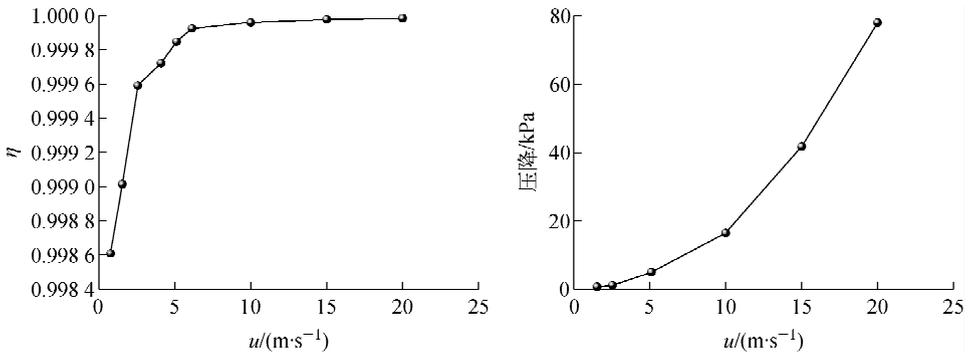


图3 分离效率和分离器压降随蒸汽入口速度的变化

Fig. 3 Separation efficiency and pressure drop of separator with steam inlet velocity

量的涡结构,消耗大量的能量。

2.2 液滴运动相变特性

为研究旋叶分离器中液滴相变特性及其对分离效率的影响,计算得到的考虑液滴相变与不考虑液滴相变时分离效率的对比结果如图4所示。从图4可看到,考虑相变与不考虑相变时的分离效率结果基本一致,且仅在蒸汽流速大于10 m/s后才有很小的影响,考虑相变与不考虑相变时分离效率的相对误差为 $10^{-7} \sim 10^{-4}$,

几乎可忽略;当蒸汽流速小于10 m/s时,相变对分离效率没有影响。这主要是由于在汽水分离器中压降较小,且液滴和蒸汽整体处于饱和状态,液滴相变很小,几乎不会对分离效率产生影响。

为弄清考虑相变后分离效率变化的原因,图5示出了不同蒸汽流速条件下考虑相变与不考虑相变时不同半径液滴分离效率的对比。可看出,蒸汽流速一定时,考虑相变后半径较小($\leq 5 \mu\text{m}$)的液滴分离效率降低较大,而半径较大($>5 \mu\text{m}$)的液滴分离效率几乎不变,且由于小液滴自身体积很小、重量轻,因此对整体分离效率影响很小($10^{-7} \sim 10^{-4}$),这一结果可较好地解释图5中无相变时分离效率几乎不变这一现象。需指出的是,在蒸汽入口速度相同即压降相同条件下,半径较小的液滴在蒸发过程中半径变化百分比比较大,相比大液滴随流性更易被改变,运动轨迹会发生较大变化,因此半径较小的液滴半径减小,随流性增加,更容易逃逸出分离器,造成考虑相变时分离效率降低,而对于大液滴其半径变化相比初始半径很小,轨迹基本上不变,几乎不会影响分离效率。

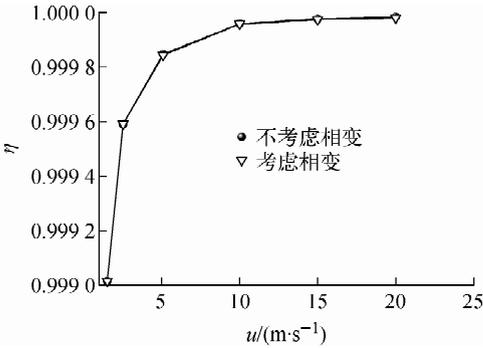


图4 分离效率随流动速度的变化

Fig. 4 Separation efficiency change with steam velocity

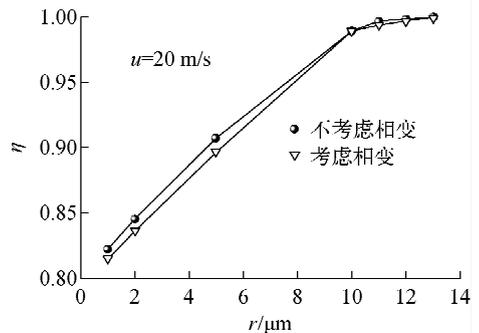
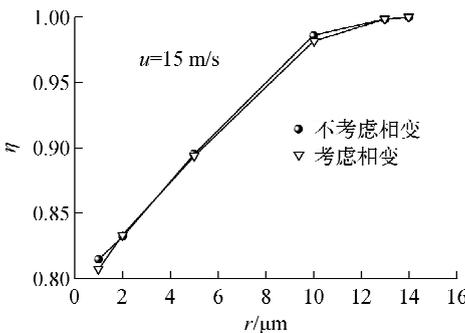
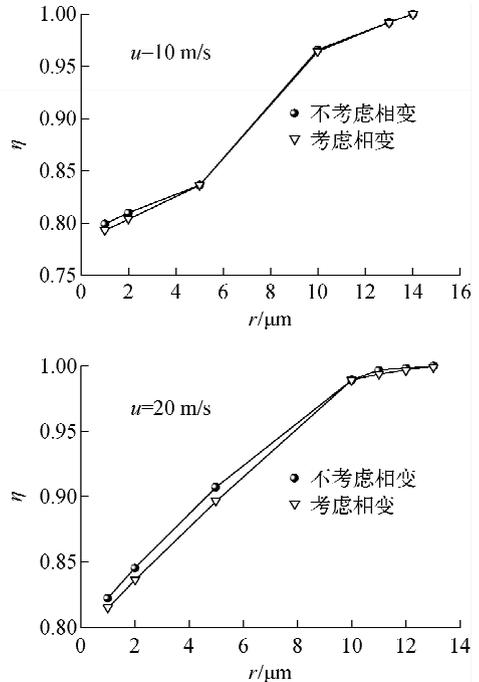
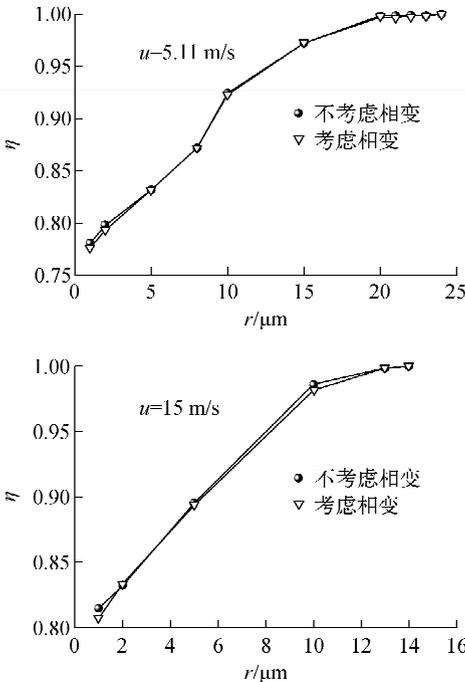


图5 分离效率随液滴半径的变化

Fig. 5 Separation efficiency change with droplet radii

3 结论

针对汽水分离装置中液滴在运动过程中的相变过程进行了物理现象描述和机理解释,并建立了液滴在汽水分离器中运动相变过程中的运动相变模型,通过绘制 AP1000 旋叶分离器三维模型,采用欧拉-拉格朗日方法,实现了旋叶分离器汽水分离性能和运动相变特性模拟,获得了汽水分离效率、压降等参数,并对液滴运动相变特性进行了分析。主要得到以下结论:

1) 随着蒸汽流速增加,分离效率快速增加,之后基本不变,但压降随着流速的增加迅速增加;

2) 蒸汽流速相同时,半径较小的液滴在运动蒸发过程中半径变化百分比较大,相对大液滴其运动轨迹更容易改变,更容易逃逸出分离器,使得考虑相变较不考虑相变时的分离效率降低;

3) 在蒸汽入口流速为 $0\sim 20$ m/s 范围内,考虑相变与不考虑相变时对分离效率影响的相对误差为 $10^{-7}\sim 10^{-4}$,液滴相变对分离效率的影响可忽略。

本文的计算结果可为进一步研究汽水分离装置中的汽水分离性能提供理论依据,相关计算结果可用于指导汽水分离装置的设计。

参考文献:

[1] 李嘉,黄素逸,王晓墨. 波形板汽-水分离器分离效率的实验研究[J]. 核动力工程,2007,28(3): 94-97,124.
LI Jia, HUANG Suyi, WANG Xiaomo. Experimental research of separation efficiency on steam-water separator with corrugated plates[J]. Nuclear Power Engineering, 2007, 28(3): 94-97, 124(in Chinese).

[2] 刘世勋. 压水堆立式蒸汽发生器中水滴重力分离的理论研究[J]. 核动力工程,1988,9(4):26-32.
LIU Shixun. Theoretical research of gravity separation of the water droplets in PWR vertical steam generator[J]. Nuclear Power Engineering, 1988, 9(4): 26-32(in Chinese).

[3] 陈韶华,黄素逸,赵绪新. PWR 蒸汽发生器水滴重力分离研究[J]. 华中理工大学学报,1997,25(1):70-72.

CHEN Shaohua, HUANG Suyi, ZHAO Xuxin. Gravity separation research of water droplets in the PWR steam generator[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1997, 25(1): 70-72(in Chinese).

- [4] 张谨奕,薄涵亮. 重力分离空间均匀流中液滴行为问题研究[J]. 原子能科学技术,2010,44(增刊):293-297.
ZHANG Jinyi, BO Hanliang. Investigation on droplets behavior in uniform flow of gravity separation space [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(Suppl.): 293-297(in Chinese).
- [5] 黄伟,陈五星,张文其,等. 蒸汽发生器一级汽水分离器两相流动数值模拟[J]. 核动力工程,2006,27(1):76-79.
HUANG Wei, CHEN Wuxing, ZHANG Wenqi. Numerical simulation for two-phase flow in first-stage moisture separator of steam generator [J]. Nuclear Power Engineering, 2006, 27(1): 76-79(in Chinese).
- [6] ZHANG H, LIU Q, QIN B, et al. Study on working mechanism of AP1000 moisture separator by numerical modeling[J]. Annals of Nuclear Energy, 2016, 92: 345-354.
- [7] XIONG Z, LU M, WANG M, et al. Study on flow pattern and separation performance of air-water swirl-vane separator[J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, 63: 138-145.
- [8] 李亚洲,熊珍琴,路铭超,等. 旋叶汽水分离器试验和数值模拟研究[J]. 原子能科学技术,2014,48(1):43-48.
LI Yazhou, XIONG Zhenqin, LU Mingchao, et al. Experimental and numerical study on swirl-vane steam separator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(1): 43-48 (in Chinese).
- [9] KATAOKA H, SHINKAI Y, HOSOKAWA S, et al. Swirling annular flow in a steam separator [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009, 131(3): 32904.
- [10] 赵富龙,薄涵亮,刘潜峰. 压力变化条件下静止液滴相变模型[J]. 清华大学学报:自然科学版,2016,56(7):759-764,771.
ZHAO Fulong, BO Hanliang, LIU Qianfeng. Static droplet phase transformation model for variable pressure conditions[J]. Journal of Tsing

- ghua University: Science and Technology, 2016, 56(7): 759-764, 771(in Chinese).
- [11] 赵富龙, 赵陈儒, 薄涵亮. 单液滴运动相变模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2016, 56(11): 1 213-1 219.
ZHAO Fulong, ZHAO Chenru, BO Hanliang. Single droplet phase transformation model during motion[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2016, 56(11): 1 213-1 219(in Chinese).
- [12] GOPIREDDY S R, GUTHEIL E. Numerical simulation of evaporation and drying of a bi-component droplet[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 66: 404-411.
- [13] 谭思超, 赵富龙, 李少丹, 等. VOF 模型界面传质与体积传质的转换方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(3): 317-321.
TAN Sichao, ZHAO Fulong, LI Shaodan, et al. The transformation method of mass flux and mass transfer rate per volume at the interface in VOF model[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(3): 317-321(in Chinese).
- [14] ERBIL H Y. Evaporation of pure liquid sessile and spherical suspended drops: A review[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2012, 170(1): 67-86.
- [15] 马超. 自由液面单气泡破裂产生膜液滴现象实验与理论研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [16] COLE P R. Droplet evaporation in a quiescent, micro-gravity atmosphere[D]. Lansing: Michigan State University, 2006.
- [17] SEMENOV S, STAROV V, RUBIO R G, et al. Computer simulations of quasi-steady evaporation of sessile liquid droplets[M]. Berlin: Springer, 2011: 115-120.
- [18] LINÁN A. Theory of droplet vaporization and combustion[M]. Paris: Eyrolle, 1985: 73-103.
- [19] 崔成松, 蒋祖龄, 沈军, 等. 雾化过程气体与金属雾滴的三维流动模型[J]. 金属学报, 1994, 30(19): 294-300.
CUI Chengsong, JIANG Zuling, SHEN Jun, et al. Modelling of three-dimensional flow of atomizing gas and droplets in atomization process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1994, 30(19): 294-300 (in Chinese).
- [20] 张谨奕. 三维流场中单液滴运动模型和应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [21] 张璜. 多液滴运动和碰撞模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [22] 张谨奕, 薄涵亮, 孙玉良, 等. 三维空间液滴运动模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2013, 53(1): 96-101.
ZHANG Jinyi, BO Hanliang, SUN Yuliang, et al. Three dimensional droplet motion model[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2013, 53(1): 96-101(in Chinese).
- [23] ZHANG T. Study on surface tension and evaporation rate of human saliva, saline, and water droplets[D]. Charlottesville: West Virginia University, 2011.
- [24] 波林, 普劳斯尼茨, 奥康奈尔, 等. 气液物性估算手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 448-472.
- [25] KRYUKOV A P, LEVASHOV V Y, SAZHIN S S. Evaporation of diesel fuel droplets: Kinetic versus hydrodynamic models [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(12): 2 541-2 549.
- [26] LIU L, BI Q, LIU W, et al. Experimental and theoretical investigation on rapid evaporation of ethanol droplets and kerosene droplets during depressurization[J]. Microgravity Science and Technology, 2011, 23(1): 89-97.
- [27] 李海军. 岭澳核电站蒸汽发生器的运行特性分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.