

重力分离空间均匀流中液滴行为问题研究

张谨奕, 薄涵亮

(清华大学核能与新能源技术研究院, 清华大学先进反应堆工程和安全教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 本文针对汽水分离器均匀流场中单个液滴的运动机理进行研究, 分析了液滴在蒸汽流中所受的力; 建立了单个液滴运动模型, 并进行了数值求解; 分析了其主要参数对液滴运动轨迹的影响, 包括蒸汽流速、液滴直径和初速度等。定性描述了蒸汽流场中液滴重力分离之机理, 为单液滴动力学模型定量分析奠定了基础。

关键词: 汽水分离器; 液滴; 重力分离

中图分类号: TK124 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931 (2010) S0-0293-05

Investigation on Droplets Behavior in Uniform Flow of Gravity Separation Space

ZHANG Jin-yi, BO Han-liang

(Key Laboratory of Ministry of Education on Advanced Nuclear Reactor Engineering and Safety,
Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A physical description of the formative cause and mechanism of the droplets movement in the steam uniform flow field in the separator was researched in the paper. According to the mechanism of gravity separation, the forces on droplets were analyzed and the equation of single droplet was founded and solved. The effects of the velocity of the vapor flow, the droplet diameter, the initial velocity as well as the gravity separation space height, on the gravity separation efficiency were discussed in details. The mechanism of the droplets movement and separation qualitative analysis will set up the groundwork for the qualitative analysis of the dynamic single-drop model.

Key words: steam-water separator; droplet behavior; gravity separation

在汽水分离两相流动问题的研究中, 液滴重力分离是典型的例子。汽水分离器重力分离空间位于一级汽水分离器和干燥器之间的一定蒸汽高度的大空间, 在重力分离空间内将实现液滴与蒸汽的重力分离。研究液滴在蒸汽重力分离空间的行为, 对蒸汽发生器(SG)具有意义。

SG蒸汽体积负荷大, 因此要求出口蒸汽品质高。为确保SG产生合格的蒸汽, 应确保汽水分离的效率。SG水容积中逸出的汽水混合物湿

度为50%~80%, 经重力分离空间后, 要求蒸汽湿度应小于8%~10%^[1]。因此, 应正确选择重力分离空间高度。若重力分离空高度太低, 液滴不能得到充分分离, 将会增大干燥器的入口蒸汽湿度, 从而影响其分离效果; 而重力分离空间高度超过某一高度后, 继续提高其高度, 重力分离效率不会进一步提高。相反, 将会增加SG总高度, 提高SG的制造成本。

多年来人们对汽水分离两相流过程进行了

大量研究^[2-8,13-15]。其中Gunther等^[2]通过试验测定了1个或连续气泡流各种直径气泡在水面破裂生成的液膜水滴和喷射液滴的初始直径、初始水滴,给出了液滴场的初始分布。Berman等^[3]建立了描述重力沉降罐中液滴沉降的简化动力学模型。Prabudharwadkar等^[4]通过试验,研究了先进重水堆重力分离器中液滴夹带过程,发现最主要的影响参数是蒸汽表观速度和分离空间内径,提出了无量纲关联式来预测液体的夹带。Katolicky等^[5]研究了SG蒸汽管道中的液滴沉降过程,采用三流场两相流欧拉-拉格朗日的方法(ELM)进行数值模拟,其中液滴相的数值模拟采用单液滴模型。采用Star-CD软件对于连续相进行了数值模拟,其中蒸汽相采用 $k-\varepsilon$ 模型,液膜相采用附加方程求解。Galletti等^[6]采用ELM进行了汽水分离器波形板中汽液两相流的数值模拟。国内华中科技大学的王晓墨等^[7]采用ELM进行了汽水分离器中液滴的行为分析。Holowach^[8]采用两流体方法研究了上升环状流中的液滴夹带问题。CtepMaH^[9]对汽水混合物在大容积中重力分离进行了实验研究,提出了无量纲关联式,以预测不同高度及蒸汽表观流速下的液体的夹带。该实验结果被广泛引用^[10-12],刘世勋^[13]采用解析的方法研究了SG中的液滴重力分离过程。陈韶华^[14]用分离流动模型模拟了SG重力分离空间内的汽水两相流动。

由于蒸汽流场中液滴运动的复杂性,对于液滴运动的数值研究,大多仅考虑曳力和重力的影响,而忽略其他因素;且鲜见对重力分离空间均匀蒸汽流场中液滴行为的细节研究。本工作针对重力分离空间均匀蒸汽流场中液滴的运动过程,进行理论描述和讨论,采用单液滴动力学模型对重力空间给定蒸汽流场中的液滴受力与行为等分离机理进行初步探究。

1 单液滴模型

本文研究重力分离空间中汽水分离工况为:压力 $p=5\text{ MPa}$,饱和湿蒸汽入口湿度80%,蒸汽流速已知,液滴直径范围 $50\sim 3\ 000\ \mu\text{m}$ 。在实际工况下,影响汽水分离两相流动的因素很多。重力分离空间蒸汽流场中液滴动力学模型的基本假设为:1)液滴与蒸汽流之间有速度差,蒸汽流场为均匀层流,流速已知,蒸汽表

观流速为 $v_g=0.1\sim 1\text{ m/s}$;2)在汽水分离重力空间内液滴相为稀疏相,故忽略液滴对蒸汽流场的影响;3)液滴自身无湍流扩散;4)液滴群不作为连续介质,按初始尺寸和初速度分组;5)液滴为理想球体,不变形、不旋转;6)液滴间不相互干扰,无碰撞,无聚合;7)仅对重力分离空间内液滴重力分离机理进行探究,不考虑液滴形成过程;8)液滴运动过程中无传热传质现象。根据以上假设探讨主要因素的影响。

对液滴运动采用拉格朗日描述,液滴运动方程矢量形式为:

$$m \frac{d\mathbf{u}}{dt} = F \quad (1)$$

对受力 F 进行分析知,对于在 $0.2 \leq Re_d \leq 2 \times 10^5$ 范围内的液滴,在流场中可以考虑重力、浮力和粘性阻力、附加质量力的作用^[1,6,11]。单个液滴动量变化率方程为:

$$m_d \frac{du_d}{dt} = \frac{1}{2} \rho_g |u_g - u_d| (u_g - u_d) C_D A - \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho_d - \rho_g) g + \frac{1}{12} \pi d^3 \rho_g \frac{du_d}{dt} \quad (2)$$

球形液滴受周围蒸汽的阻力为:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_g |u_g - u_d| (u_g - u_d) C_D A \quad (3)$$

其中:迎风面积 $A = \pi d^2/4$; C_D 为曳力系数,考虑液滴粘度、液滴变形、液滴雷诺数及惯性效应的影响, C_D 用下式计算^[4,6,11]:

$$C_D = C_{D0} \frac{2\mu_g + 3\mu_l + k}{3\mu_g + 3\mu_l + k} h \quad (4)$$

$$C_{D0} = \begin{cases} 24/Re & Re < 6.2 \\ 10Re^{-1/2} & 6.2 \leq Re < 500 \\ \frac{24}{Re} (1 + 0.15Re^{0.687}) & 500 \leq Re < 800 \\ 0.44 & 800 \leq Re < 2 \times 10^5 \\ 0.1 & Re \geq 2 \times 10^5 \end{cases} \quad (5)$$

其中:液滴雷诺数 Re 定义为 $Re = \rho_g |u_{i-1} - u_g| \cdot d / \mu_g$; μ_g 为饱和汽动力学粘度; μ_l 为液滴动力学粘度; u_{i-1} 为液滴速度; d 为液滴直径; k 为表征液滴内部环流量, $k \propto 1/d$; h 为表征液滴变形量, $h \in (1, \infty)$, 取 $h = 1.5$ ^[4]。

2 模型验证

液滴和蒸汽以一定初速度从一级汽水分离器出口逸出，进入重力分离空间。液滴上升过程中，在重力、浮力和蒸汽阻力作用下减速。达到一定高度后，大液滴开始沉降，小液滴则被蒸汽携带。在重力分离空间中，不同直径的液滴以不同终端速度跟随蒸汽上升。图1所示在蒸汽速度为1 m/s、 $p=0.5$ MPa、液滴初速度2 m/s工况下，液滴终端速度与液滴直径的关系，反映了小液滴的跟随性。较小液滴（直径小于100 μm ）其速度与蒸汽相近，较大直径的液滴在蒸汽中的上升速度较低，大液滴（直径小于320 μm ）不能被蒸汽携带。由图可见，在文献[14]的分离工况下，本文计算结果与陈韶华^[14]的结果一致，偏差小于20%。

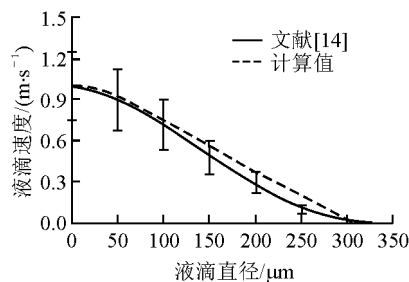


图1 不同直径液滴的跟随性

Fig. 1 Tracking of droplets with different diameters

$v_g=1$ m/s, $v_0=2$ m/s

3 计算结果与分析

3.1 单个液滴行为

SG二次侧蒸汽压力一般为4~6 MPa。本文计算工况为蒸汽压力5 MPa，蒸汽流速为0.5 m/s，液滴初始速度为5 m/s。计算液滴直径取350 μm 。时间间隔取0.001 s。初始跃离角 α 分别取90°、60°、30°、10°，可得到相应的液滴位移与速度。液滴轨迹示于图2。

图3为直径350 μm 的液滴在各个跃离角度下的速度随时间的变化规律。由图3a可知，液滴跃离角越大则轴向速度越大；液滴在上升阶段需克服重力和阻力，其轴向速度衰减至0时刻上升至最高点。液滴运动总时间主要取决于上升阶段总时间。因此，跃离角越大，轴向速度越大，上升所需时间越长，最高点越高，液滴在蒸汽中运动总时间越长。

由图3可知，竖直向上的液滴运动总时间

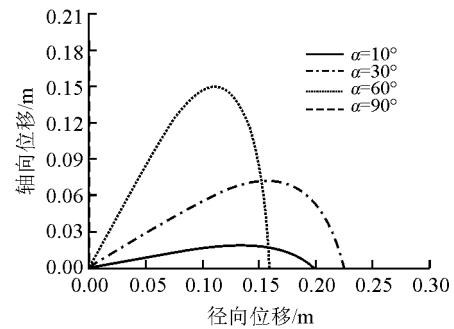


图2 液滴轨迹

Fig. 2 Trajectory of droplets

$v_g=0.5$ m/s, $v_0=5$ m/s

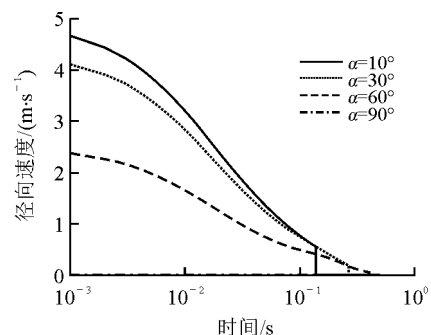
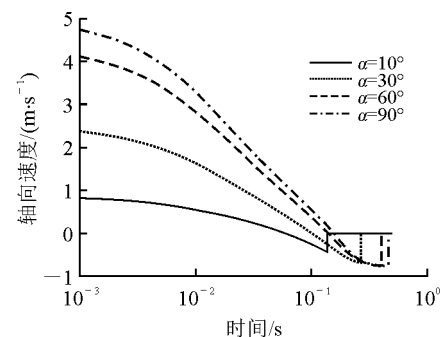


图3 液滴速度随时间的变化

Fig. 3 Droplet velocity as a function of time

$v_g=0.5$ m/s, $v_0=5$ m/s

最长。跃离角度为10°液滴，由于其速度的轴向分量较小而很快衰减至0，液滴落回液面，径向速度也立即随之变化为0。可见径向和轴向速度之间有耦合关系。液滴轴向运动受到重力和阻力的作用，径向运动受阻力作用，因此，速度在轴向比径向衰减更为迅速，轴向运动决定了液滴在蒸汽中的运动时间。

3.2 蒸汽流速的影响

图4为不同蒸汽流速下，不同直径液滴的终端速度。对初始速度为2 m/s的液滴，当蒸

汽压力 4.5 MPa, 蒸汽速度 0.2 m/s 时, 直径大于 180 μm 液滴能被重力分离, 直径不大于 180 μm 液滴则被蒸汽携带。当蒸汽速度 0.5 m/s 时, 直径大于 270 μm 液滴能被重力分离。蒸汽速度 1 m/s 时, 直径大于 1 100 μm 液滴才被重力分离。可见, 液滴直径越大, 越易被分离; 蒸汽流速越高, 液滴越易被携带。

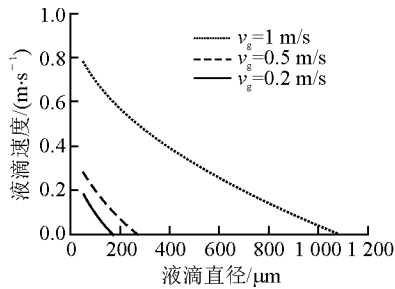


图4 不同蒸汽流速下液滴的跟随性

Fig. 4 Tracking of droplets with different steam flow rates

$v_0 = 2 \text{ m/s}$

3.3 液滴尺寸和速度的影响

计算蒸汽压力 5 MPa, 流速 0.5 m/s, 液滴初始速度 5 m/s。计算液滴直径分别取 100、200、300、600 μm 。初始跃离角取 90°。时间间隔取 0.001 s。

液滴在蒸汽流中运动, 如果具有较高初始速度, 则会受到蒸汽的阻滞作用。图 5 为不同直径液滴轴向运动速度-时间曲线。可见, 液滴进入蒸汽空间后, 速度迅速减小。约 0.1~0.2 s 后, 液滴速度达到终端速度, 此后在蒸汽流中作匀速运动。直径为 100 μm 液滴终端速度约为 0.8 m/s, 200 μm 终端速度约为 0.4 m/s, 300 μm 液滴几乎悬浮在蒸汽中, 或以较小的速度跟随蒸汽上升。600 μm 的液滴终端速度为负, 匀速下降。可见在大部分时间内, 大液滴在蒸汽中或匀速下降, 或以较小速度匀速上升; 小液滴以与蒸汽相近的速度匀速上升, 跟随蒸汽进入下一级分离器。这说明小液滴表现出“跟随性”, 易被蒸汽输运而不能实现重力分离。大液滴则可能实现重力分离, 直径越大, 沉降速度越快。

图 6 为不同直径及速度的液滴的最大上升高度, 即沉降高度。最初角度取 90°, 速度取 0.1~5 m/s, 液滴直径 100~3 000 μm 。可看出, 在初始速度相同的情况下, 液滴直径越小, 受阻力影响越大, 速度很快降为 0, 液滴能上升的最大高

度也越小。在液滴直径相等情况下, 液滴初始速度越大, 用于克服能量耗散和重力势能的动能越大, 则液滴能上升的最大高度也越大。

3.4 跃离角度的影响

蒸汽压力 5 MPa, 蒸汽流速为 0.2 m/s。液滴跃离角度分别设为 10°、30°、60°、90°, 初速度取 5 m/s。图 7 为不同跃离角度下液滴的沉降高度。

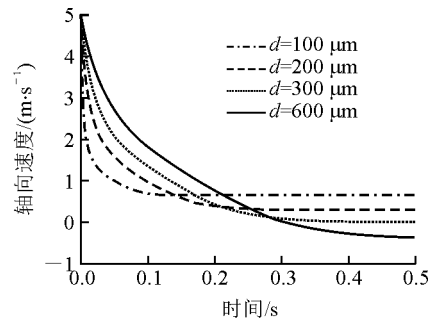


图5 液滴速度随时间的变化

Fig. 5 Velocity of droplets as a function of time

$v_g = 0.5 \text{ m/s}, v_0 = 5 \text{ m/s}$

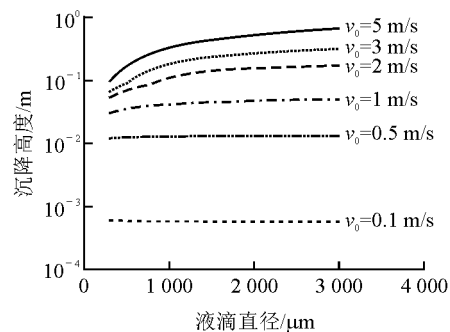


图6 沉降高度和液滴直径与速度的关系

Fig. 6 Sedimentation height as a function of droplet diameters vs. different initial velocity

$v_g = 0.2 \text{ m/s}$

可看到, 液滴滴直径越大, 最大上升高度越高; 跃离角 90°液滴最大能上升至 0.5 m, 分析见 3.1 节。这表明在初始速度相同的情况下, 跃离角越小, 液滴最大上升高度越低, 越易重力分离。

4 结论

通过单液滴模型的数值求解, 定量研究了 SG 内的液滴从一级汽水分离器逸出后的行为规律; 液滴速度很快衰减至某一稳定值; 直径较大的液滴, 速度衰减后稳定在一定值, 以终端

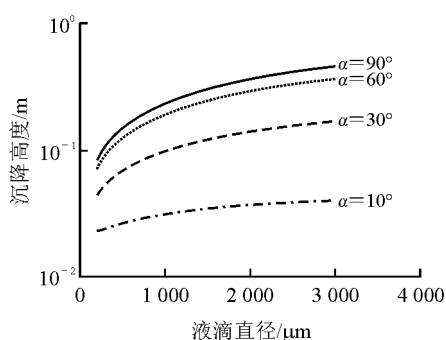


图7 不同跃离角度下沉降高度和液滴直径的关系

Fig. 7 Sedimentation height as a function of droplet diameters at different initial projection angles

$$v_g = 0.2 \text{ m/s}, v_0 = 5 \text{ m/s}$$

速度沉降; 直径较小液滴, 速度迅速衰减而稳定在一定值, 达到终端跟随速度, 随蒸汽流匀速上升; 直径为悬浮直径的液滴, 则速度迅速衰减而稳定为 0, 悬浮在蒸汽中。在不同蒸汽速度、液滴直径、初始速度、初始角度的情况下, 分析液滴重力分离行为; 一定的蒸汽流速对应一定的液滴重力分离直径。对于能实现重力分离的大液滴, 初始角度、初始速度相同, 直径越大则上升高度越高; 初始速度、直径相同, 初始角越大则上升高度越高。当蒸汽重力分离空间高度较高时, 有利于液滴重力分离; 但当空间高度高于一定值后, 大液滴完全被分离, 而小于液滴重力分离直径的小液滴则不能被分离。

参考文献:

- [1] 《SG》编写组. SG[M]. 北京: 原子能出版社, 1982.
- [2] GUNTHER A, WALCHLI S, von ROHR P R. Droplet production from disintegrating bubbles at water surfaces: Single vs. multiple bubbles[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2003, 29: 795-811.
- [3] BERMAN Y, TAMIR A. Kinetics of droplets' sedimentation in a continuous gravity settler[J]. Chem Eng Sci, 2003, 58: 2 089-2 102.
- [4] PRABHUDHARWADKAR D M, MORE R Z, IYER K N. Experimental study of liquid carryover in a separator drum[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240: 76-83.
- [5] KATOLICKY J A, JICHA M A. Droplets deposition in steam piping connecting steam generator and steam turbine in nuclear plant[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237: 1 534-1 549.
- [6] GALLETTI C, BRUNAZZI E. A numerical model for gas flow and droplet motion in wave-plate mist eliminators with drainage channels[J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63: 5 639-5 652.
- [7] 王晓墨, 黄素逸. 汽水分离器中液滴的行为分析[J]. 工程热物理学报, 2006, 6 (1): 181-185.
- [8] HOLOWACH M J, HOCHREITER L E. A model for droplet entrainment in heated annular flow[J]. Int J Heat Fluid FL, 2002, 23: 807-822.
- [9] KYTEIIOB A M, CTEPMAH J I C. 蒸汽形成时的流体动力学和热交换[M]. 范从振, 撒应禄, 译. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [10] 郭烈锦. 两相与多相流动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [11] 林宗虎, 王树众. 气液两相流和沸腾传热[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003: 191.
- [12] 李守恒. 电站锅炉汽水分离装置的原理和设计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986: 1-21, 82-91.
- [13] 刘世勋. 压水堆蒸汽发生器水滴重力分离的理论研究[J]. 核动力工程, 1988, 8 (4): 25-32. LIU Shixun. Theoretic analysis for gravity separation of water droplets in PWR steam generator[J]. Nucl Power Eng, 1996, 8(4): 1-10(in Chinese).
- [14] 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): 67-71. CHEN Shaohua, HUANG Suyi, ZHAO Xuxin. A study on the gravity separation of water droplets in steam generators for PWR[J]. J Huazhong Univ Sci Technol, 1997, 25(1) 69-71(in Chinese).
- [15] 高彦栋, 王晓墨, 黄素逸. 用液滴碰壁模型对波形板汽水分离器的模拟[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2002, 30 (2): 48-50. GAO Yandong, WANG Xiaomo, HUANG Suyi. Numerical simulations of wave-type vans with spray impingement model[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2002, 30(2): 48-50 (in Chinese).