

文章编号: 0258-0926(2020)02-0001-05; doi:10.13832/j.jnpe.2020.02.0001

气流扰动下单液滴撞击单根干燥扁网丝 特性数值研究

陈博文¹, 李净松², 田瑞峰^{1*}, 毛峰¹, 卢川³, 温济铭¹

1. 哈尔滨工程大学核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 哈尔滨, 150001; 2. 中核武汉核电运行技术股份有限公司, 武汉, 430000;
3. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213

摘要: 丝网分离器在工业中有着广泛地应用。本文针对液滴撞击网丝的动态过程, 采用 CLSVOF 方法对单个液滴撞击干燥网丝的问题进行数值模拟, 经过合理的简化, 建立了气流扰动下单液滴撞击干燥扁网丝面的二维数学模型, 分析了液滴撞击角和撞击位置对液滴撞击行为特性的影响。数值计算的结果表明: 液滴撞击到干燥网丝上分为铺展和飞溅 2 个过程, 撞击角越小, 上铺展半径越大, 下铺展半径越小, 分离的二次液滴体积越大; 液滴撞击网丝的位置离网丝边缘越近, 越容易产生二次液滴, 二次液滴的总体积越多。

关键词: 液滴撞击; 丝网; CLSVOF 方法; 二次液滴

中图分类号: TL339 **文献标志码:** A

Numerical Study on Characteristics of Single Droplet Impacting on Single Dry Flat Wire Mesh under Airflow Disturbance

Chen Bowen¹, Li Jingsong², Tian Ruifeng^{1*}, Mao Feng¹, Lu Chuan³, Wen Jiming¹

1. Fundamental Science on Nuclear Safety and Simulation Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin, 150001, China;
2. Research Institute of Nuclear Power Operation, Wuhan, 430000, China;
3. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: Mesh separators are widely used in industry. Based on the dynamic process of droplet impact on the mesh in this paper, the CLSVOF method is used to solve the problem of single droplet impact on the dry flat wire mesh. After reasonable simplification, a two-dimensional mathematical model of the single droplet impacting mesh surface is established and analyzed. The effects of droplet impact angle and impact position on the behavior of droplet impacting were studied. The numerical results show that the droplets impacting on the dry mesh are divided into two processes: spreading and splashing. The smaller the impact angle, the bigger the front spreading radius, and the smaller the back spreading radius, the larger the volume of the daughter droplets; the closer the impact point is to the end of the mesh, the more likely to produce daughter droplets, the more the total volume of daughter droplets.

Key words: Droplet impact, Flat wire mesh, CLSVOF method, Daughter droplet

0 引言

丝网分离器是核电厂中应急过滤排放系统的关键部件, 其分离性能决定着放射性污染物向大

气排放的程序。丝网分离器实际工作过程中, 内部存在大量的液滴撞击网丝和液膜的现象, 液滴的这些撞击行为在一定程度上会造成二次携带的

收稿日期: 2019-03-20; 修回日期: 2019-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (51676052)

作者简介: 陈博文 (1993—), 男, 博士研究生, 从事两相分离技术研究, E-mail: chenbowen@hrbeu.edu.cn

*通讯作者: 田瑞峰, E-mail: ruifengtian@hrbeu.edu.cn

发生,降低分离器效率。因此,研究丝网分离器内液滴的撞击行为,明确二次液滴的产生机理,最大限度的利用液滴撞击网丝特性提升丝网分离器的性能,对于实际工业应用具有重要意义。

早在 1998 年, Nakao T 和 Saito Y^[1]就通过实验和理论分析提出了丝网分离器二次携带来源。H Y Kim 和 J H Chun^[2]在 2001 年对液滴撞击固体表面达到其最大扩散直径的过程进行理论研究,通过求解质量和动量守恒方程,预测了液滴碰壁后所铺展的最大范围。刘晓一等^[3]采用流体体积函数(VOF)方法研究了造水系统丝网分离器内液滴撞击圆形网丝的形态变化,分析了液滴直径、液滴初始速度和液膜厚度等因素对液滴撞击网丝行为的影响。

基于上述研究现状,本文主要研究气流扰动下液滴撞击角度与撞击位置对液滴撞击干燥扁网丝的行为的影响。本文采用 CLSVOF 方法进行数值模拟,对液滴撞击干燥网丝的形态变化进行具体分析,对液膜在网丝上的铺展与二次液滴的飞溅做出合理解释,加深对丝网分离器内二次液滴的产生机理的理解。

1 数学物理模型

1.1 数学模型

VOF 模型是一种应用于欧拉网格的表面追踪技术,专为 2 种或以上不混溶流体之间定义界面,在核反应堆工程领域中有着广泛应用^[4]。在 VOF 模型中,一组动量方程被所有流体共享,跟踪计算域内每个网格单元中的每种流体的体积分数。

在 VOF 模型中,通过定义在网格中液相的体积分数(α)捕捉界面,即 $\alpha=0$ 时网格内为气相; $\alpha=1$ 时网格内为液相;其余情况网格内为两相。则 α 的控制方程为:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + U \cdot \Delta \alpha = 0 \quad (1)$$

式中, U 为速度矢量; t 为时间。

水平集方法(Level-set)在追踪两相界面时,定义界面位置和时间演化方程为:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + (v \cdot \nabla) \phi = 0 \quad (2)$$

式中, v 为流场速度。

式(2)即为相函数 ϕ 的对流输运方程,也称

level-set 函数对流输运方程,为方便进行离散求解,改写成以下形式:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + v(\nabla \cdot \phi) = 0 \quad (3)$$

式中, ϕ 为到界面的距离函数。

在两相系统中,界面是零水平集, $\phi(x,t)$ 可被表示为 $\Gamma = \{x | \phi(x,t) = 0\}$,有以下 3 种情况:

$$\phi(x,t) = \begin{cases} +|d| \\ 0 \\ -|d| \end{cases} \quad (4)$$

式中, d 为 x 到两相界面的距离,即 $\phi=0$,代表 x 在两相界面上; $\phi>0$,代表 x 在液相处; $\phi<0$,代表 x 在气相处。

综合前面对 VOF 和 Level-set 方法的介绍,可以看出这 2 种方法原理清晰,易于实现,对大变形问题处理有很大优势,一直被计算流体力学领域所关注,同时 2 种方法各自存在一定的缺陷。

VOF 模型在界面重构问题上存在体积分数在相间界面不连续的缺点;Level-set 方法需要不断的对距离函数重新初始化,过程中物理量(体积或质量)会不守恒。

为了克服上述缺点,Sussman 和 Puckett^[5]提出了 CLSVOF 方法,将 VOF 方法良好的守恒性和 Level-set 方法处理界面局部尖角的优势相结合,极大改善了上述 2 种界面捕捉方法。

1.2 物理模型

本文考察单个液滴撞击单个干燥扁网丝。其中气流的速度与液滴初始速度相同,撞击角度为液滴速度方向与丝网迎风面夹角,位置 1(P_1)为网丝侧面 1/2 处,位置 2(P_2)为网丝侧面 1/4 处,位置 3(P_3)为网丝末端顶点处。

网丝采用 $0.1 \times 0.4 \text{ mm}^2$ 规格的扁丝,计算域大小选定为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的矩形,网格采用四边形均匀网格。当网格尺寸为 $1/400 \text{ mm}$,总网格数为 63 万时,计算结果与网格数无关。计算域边界

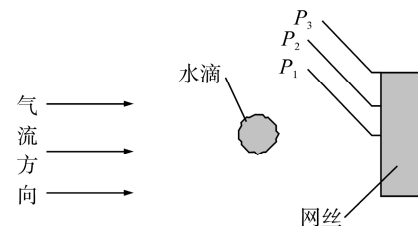


图 1 液滴撞击网丝物理模型

Fig. 1 Physical Model of Droplet Impacting Mesh

条件为一个速度进口（左侧边），3 个压力出口（其余 3 边），网丝为固体域，其余为流体域。压力速度耦合方程中采用 PISO 算法进行求解。液滴采用水作为工质，水的密度 $\rho_l=998 \text{ kg/m}^3$ 、水的粘度 $\mu_l=1.005 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、表面张力系数 $\sigma=0.073 \text{ N/m}$ 、周围环境气体密度 $\rho_g=1.205 \text{ kg/m}^3$ 、气体粘度 $\mu_g=1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。对流项和水平集密度方程（Level-set function）离散格式为 QUICK，基于单元体的最小二乘法差值用于扩散项，压力项格式为 PRESTO。

2 计算结果与分析

2.1 撞击角度对液滴撞击行为的影响

选取液滴直径为 $50 \mu\text{m}$ ，撞击速度为 10 m/s ，撞击位置为网丝迎风面中心，撞击角度（速度方向与网丝表面夹角）为 30° 、 45° 和 60° 3 种典型角度进行模拟。

图 2~图 4 表现了液滴以不同角度撞击网丝后的气-液交界面和压力场随时间的变化，由于撞击角的影响，液膜内部出现了不均匀不对称的压力场，液滴在接触网丝时，压力主要积聚在接触点附近，液膜开始铺展时，压力逐渐在铺展前端积聚，即铺展前端压力梯度较大。等压线的形状出现了扁长形，一段时间过后，液膜可能会分离出液滴（图 2 未分离出二次液滴，图 3、图 4 分离出二次液滴），在撞击点与初始速度相同的情况下，取决于撞击角的大小，撞击角度越小，当液膜铺展到丝网边缘时越容易产生二次液滴。在液膜铺展的后期，由于表面张力的影响，液膜会发生回缩现象，在此过程中，铺展前端压力积聚变弱，与网丝接触的液膜内压力分布也逐渐变得均

匀，液膜稳定的粘附在网丝上。随着撞击角度的减小，液滴刚接触网丝时的最大压强逐渐变小，这是由于随着撞击角度的减小，液滴网丝壁面法向方向的速度分量减小，从而导致压强变小。而气流的流动方向垂直于丝网面，对液滴的铺展与飞溅都有着促进作用。

图 2 是撞击角为 60° 情况下液滴的气-液交界面和压力场，根据仿真结果，液滴接触网丝的初始时刻接触点的压强最大，与交界面的压差产生的驱动力使液膜向两端铺展，随后压差最大的位置转移到了液膜两端，由于撞击角的存在，液膜的铺展上端压力较大，因而上端铺展速度较快，随着时间的发展，液膜内压力分布逐渐均匀，进入液膜回缩阶段，最后稳定地粘附在网丝上， 60° 撞击角下液滴的铺展过程中没有发生飞溅。

图 3 是 45° 撞击角下液滴的气-液交界面和压力场，与 60° 撞击角的液滴相比，液膜上端的铺展速度更快，这是因为液滴向上的分速度更大，同时随着时间的发展，在液膜两端形成 2 个压力中心，液膜中部压力场趋于稳定，中部液膜厚度受两端铺展影响逐渐变薄，由于网丝的构造，液膜铺展范围超出网丝顶端时，液滴颈部受到 Plateau-Rayleigh 不稳定性影响而断裂，并在气流作用下继续向前运动。在 $37.5 \mu\text{s}$ 时刻液滴出现了飞溅，飞溅液滴直径为 $18 \mu\text{m}$ 。

图 4 是 30° 撞击角下液滴的气-液交界面和压力场，铺展过程与 45° 撞击角时情况类似，但由于液滴以 30° 撞击角接触网丝时，液滴扭曲变形

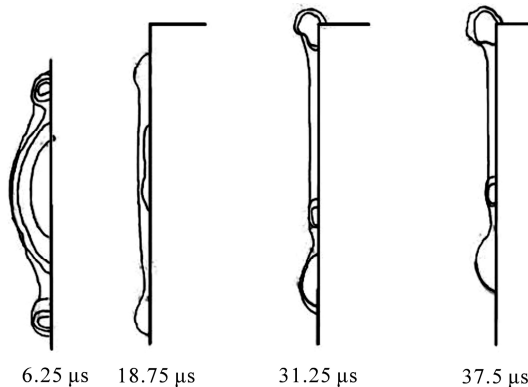


图 2 液滴以 60° 撞击角撞击到干燥网丝的铺展形态

Fig. 2 Spread Form of Droplets Impinging on Dried Mesh at Impact Angle of 60°

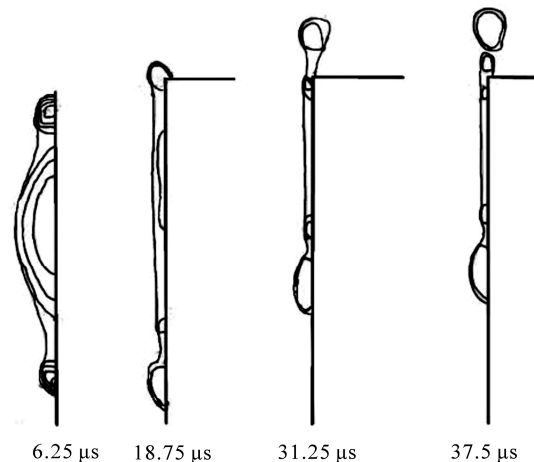


图 3 液滴以 45° 撞击角撞击到干燥网丝的铺展形态

Fig. 3 Spread Form of Droplets Impinging on Dried Mesh at Impact Angle of 45°

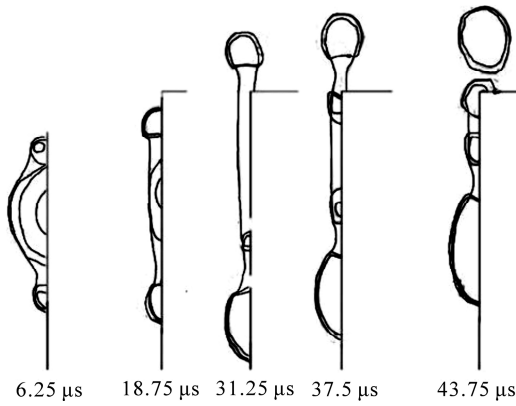


图4 液滴以30°撞击角撞击到干燥网丝的铺展形态

Fig. 4 Spread Form of Droplets Impinging on Dried Mesh at Impact Angle of 30°

的方向明显偏向于上端，因而撞击点上端的液膜体积更大，使得该处液膜顶端在表面张力和粘性力的作用下，脱离网丝顶端一段距离后并没有分离，导致虽然液膜铺展速度比45°撞击角时大，二次液滴的分离时刻反而比45°撞击角时时刻滞后，分离出二次液滴的直径为23 μm。

图5为液滴以一定角度撞击网丝并铺展的几何模型，显然其铺展过程是不对称的，因而以液滴与网丝的初次接触点为基准，定义上、下铺展半径为 X_{front} 和 X_{back} ，下铺展半径加入负号，以便在同一张图中区分前后液膜的铺展情况。定义铺展因子为 X/D 。

液滴以一定角度撞击网丝时，速度可以被分解为水平与竖直2个方向，液滴的铺展状态不再

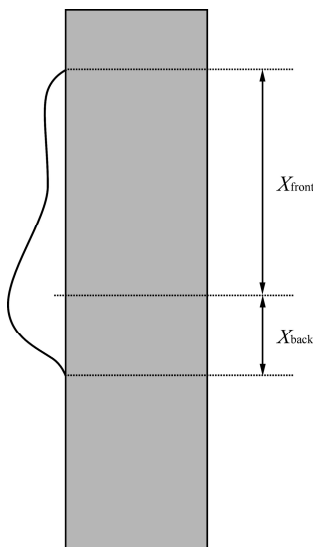


图5 液膜上下铺展半径示意图

Fig. 5 Upper and Lower Spread Radius of Liquid Film

关于撞击点对称，铺展方向的不对称性与竖直方向的速度分量有很大关系，水平方向的速度对液滴的初始铺展行为影响较大。在图6中，撞击角60°时，上铺展因子最小，下铺展因子最大，撞击角30°时与之相反，且下铺展半径回缩的时刻比上铺展半径回缩的时刻早，撞击角度越小，回缩的时刻越提前。这是由于速度一定时，撞击角度越小，速度在液膜平面的切向速度分量越大，越有利于液膜向上铺展，越不利于液膜向下铺展。

综上所述，由于撞击角的存在，液滴在网丝上铺展形态不再保持对称，增大了液膜上部铺展的面积，导致液膜延伸到网丝端面外，形成长液冠，液冠在气流的剪切力和自身的惯性力作用下，容易发生毛细破碎，分离出二次液滴。

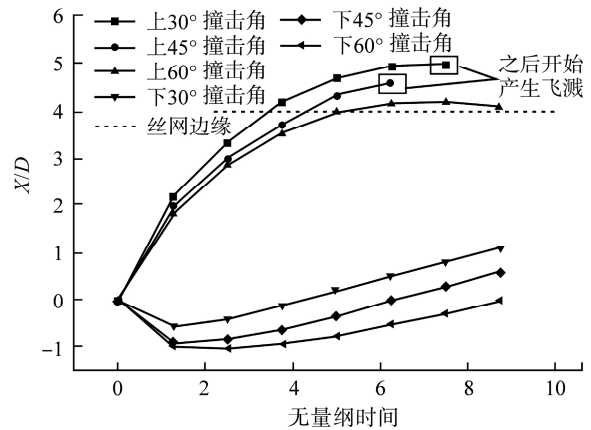


图6 液滴以不同角度撞击到干燥网丝径向铺展情况

Fig. 6 Spread Form of Droplets Impinging on Dried Mesh at Different Impact Angle

2.2 撞击位置对液滴撞击行为的影响

选取液滴直径为50 μm，撞击速度为10 m/s，撞击角度为90°，并使计算域进口速度方向与液滴初速方向相同。撞击点的选取如图1所示。

当液滴撞击干燥网丝 P_1 位置时，液滴撞击网丝后开始铺展，在液膜边缘形成压力中心，液膜继续沿网丝表面铺展，并在30 μs时铺展半径达到最大，随后液膜开始收缩，整个铺展过程液膜未到达网丝边缘，也未分离二次液滴。

当液滴撞击干燥网丝 P_2 位置时，在12.5 μs时刻液滴铺展范围脱离网丝面并形成狭长的液冠，液冠内部存在一个稳定的圆形等压线和一个不稳定的狭长等压线，在13.75 μs时刻在液冠内压力中心区域分离出一个液滴，液滴内部等压线保持分离前的状态。随后狭长的液冠由于

Plateau-Rayleigh 不稳定性, 在 $17.5\sim 22.5\ \mu\text{s}$ 时间内连续分离出 2 个液滴, 第一个液滴为哑铃型, 由于表面张力的作用, 两端的等压线逐渐融合, 由 2 个压力中心变为一个压力中心, 形成一个稳定的圆形液滴。剩余液冠在表面张力的作用下回缩到网丝面, 在网丝面形成液膜。

当液滴撞击干燥网丝 P_3 位置时, 在撞击过程的初始, 液滴只有一部分将与网丝面接触, 在 $1.25\ \mu\text{s}$ 时刻, 液滴内部等压线已经出现严重不对称, 在与网丝面接触的少量液膜顶端出现了稳定的高压区, 逐渐向下铺展; 其余大部分液滴未被网丝面吸附, 内部出现了 2 个高压区, 而在网丝面的末端顶点处, 细小的颈部产生的表面张力不能与液滴受到气流扰动力和自身惯性力平衡, 在 $5\ \mu\text{s}$ 时刻分离出一个大液滴, 其体积接近原来液滴, 而由于撞击损失了动能, 运动速度有所下降, 方便被之后的网丝捕捉。

通过对液滴撞击网丝不同位置的研究, 发现液滴撞击网丝的位置离网丝边缘越近, 越容易产生二次液滴, 且二次液滴的总体积越多。

3 结 论

采用 CLSVOF 方法进行数值模拟, 对气流扰动下液滴撞击单根干燥扁网丝的行为特性进行了研究, 得出以下结论:

(1) 撞击角度在非 90° 时, 撞击网丝后液滴内部压力场非对称不均匀, 撞击角度越小, 上铺

展半径越大, 下铺展半径越小, 脱离网丝面液膜的液冠长度越长, 分离的二次液滴体积越大。

(2) 液滴撞击网丝的位置离网丝边缘越近, 越容易产生二次液滴, 且二次液滴的总体积越多。

(3) 液滴撞击网丝面与网丝边缘所产生的飞溅机理不同, 撞击网丝面是由于 Plateau-Rayleigh 不稳定性引起的液滴飞溅; 而撞击网丝边缘是由于撞击点压差过大引起的液滴断裂而产生的飞溅。

参考文献:

- [1] NAKAO T, SAITO Y, SOUMA H, et al. Droplet behavior analyses in the BWR dryer and separator[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1998, 35(4): 286-293.
- [2] KIM H Y, CHUN J H. The recoiling of liquid droplets upon collision with solid surfaces[J]. Physics of Fluids, 2001, 13(3): 643-659.
- [3] 刘晓一, 田瑞峰, 黄亚军, 等. 丝网分离器液滴撞击水膜的机理研究[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(6): 1009-1014.
- [4] FENG T, WANG M, SONG P, et al. Numerical research on thermal mixing characteristics in a 45-degree T-junction for two-phase stratified flow during the emergency core cooling safety injection. Core cooling safety injection[J]. Progress in Nuclear Energy, 2019(114): 91-104.
- [5] SUSSMAN M, PUCKETT E G. A coupled level set and volume-of-fluid method for computing 3D and axisymmetric incompressible two-phase flows[J]. Journal of Computational Physics, 2000, 162(2): 301-337.

(责任编辑: 杨洁蕾)