

气体介质中海水液滴碰撞过程数值模拟*

梁 伟, 齐晓霓, 尹 强, 赵 强

(山东理工大学 交通与车辆工程学院, 山东 淄博 255049)

摘要: 为揭示对喷式海水无填料冷却塔内海水液滴碰撞的规律及影响因素,采用 VOF 方法开展了相同尺寸的二元海水液滴碰撞数值模拟.首先利用 Qian 等的实验结果对计算模型进行校验,验证了模拟的准确性.开展了常温常压下不同 Weber(韦伯)数以及不同碰撞参数下的海水液滴碰撞过程数值模拟,计算 Weber 数范围为 0.5~200,碰撞参数范围为 0~1.得到了聚合、自反分离以及拉伸分离 3 种碰撞结果,对心碰撞聚合与自反分离的临界 Weber 数为 22;然后对结果类型进行统计,得到了海水液滴碰撞结果分布 $We-x$ 图.

关键词: 海水; 液滴碰撞; VOF 方法; 网格自适应

中图分类号: TK284.9

文献标志码: A

DOI: 10.21656/1000-0887.390053

引 言

对喷式海水无填料冷却塔作为一种有效的冷却装置,因其阻力小、维护费用低、冷却效果显著而被广泛应用于工农业生产,尤其是在需要大量冷却水的火电厂等热力系统中.其原理是利用空气与高温热水直接接触进行充分的热交换,使空气带走部分热量,降低水温,使工业用水得到循环利用.无填料冷却塔在工作过程中,海水在塔内呈雨状或雾状与冷空气进行热质交换后落入集水池^[1],液滴在塔内流动过程中会相互碰撞,出现反弹、聚合、分离等结果类型,从而使得液滴粒径和速度分布发生改变,影响冷却塔的性能.因此,开展液滴碰撞研究可以为冷却塔的优化改进提供有益参考.

液滴在冷却塔内的碰撞是一种典型的两相流动问题,相比于传统的流动问题更为复杂.目前,针对液滴碰撞过程,国内外学者已经开展了一定的实验和数值模拟研究.O'Rourke^[2]基于实验结果建立了液滴碰撞的统计模型,Ashgriz 和 Poo^[3]通过实验结果进一步完善了液滴碰撞结果区域的划分并沿用至今.相较于实验研究,数值模拟具有捕捉更多细节、分析内部机理的优点.Nikolopoulos 等^[4-5]采用自适应网格加密的方法分别模拟了对心和偏心情况下的液滴碰撞过程,并与 Qian 等^[6]的实验结果进行了对比,取得了良好的一致性.目前关于液滴碰撞的实验和数值研究多以烃类化合物为研究对象^[7-12],对于海水液滴碰撞过程的研究还存在空白.本文对数值计算方法的可行性进行了验证,并利用 FLUENT 开展了同等尺寸的二元海水液滴对心碰撞与偏心碰撞的直接数值模拟,分析了各碰撞类型的过程以及物理机制,获得了海水液滴

* 收稿日期: 2018-02-01; 修订日期: 2018-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(51309147;51249001)

作者简介: 梁伟(1993—),男,硕士生(E-mail: 18353362350@163.com);

齐晓霓(1974—),女,副教授,博士,硕士生导师(通讯作者. E-mail: nini@sytu.org).

的碰撞结果预测模型.

1 液滴碰撞机制

液滴碰撞结果一般由以下 4 个无量纲数描述: Weber 数 We 、Reynolds(雷诺)数 Re 、碰撞参数 x 以及液滴粒径比 Δ , 其表达式如式(1)~(4)所示

$$We = \frac{\rho u_r^2 D_0}{\sigma}, \quad (1)$$

$$Re = \frac{\rho u_r D_0}{\mu}, \quad (2)$$

$$x = \frac{X}{D_0}, \quad (3)$$

$$\Delta = \frac{D_s}{D_l}, \quad (4)$$

其中, ρ 是液滴密度, D_0 是液滴直径, u_0 是液滴速度, 相对速度 $u_r = 2u_0$, σ 是液滴表面张力系数, μ 是液滴动力黏度, D_s 和 D_l 分别表示小液滴直径和大液滴直径, 在本文中, 液滴尺寸相同, 所以液滴粒径比为 1. X 是通过两个液滴中心平行于液滴相对速度的两条平行线间的距离, 如图 1 所示.

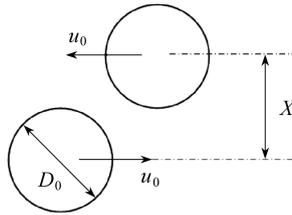


图 1 液滴碰撞示意图

Fig. 1 Schematic of the droplet collision

Qian 和 Law^[6]对水滴和正十四烷液滴进行更为细致的实验和分析, 总结出了二元液滴碰撞之后的 5 种机制: I) 轻微变形后的聚合; II) 反弹; III) 大变形后的聚合; IV) 自反分离; V) 拉伸分离, 并总结为关于 Weber 数和碰撞参数的相图. 为了使液滴聚合, 液滴之间的气体必须被压缩到使液滴间隙与分子间作用力相当的程度; 当两个液滴以非常小的运动速率相互接近时, 两液滴之间压强增大, 气体有足够的时间在液滴接触之前排出, 那么液滴就会在 Van der Waals(范德华)力作用下聚合; 当两个液滴快速接近时, 气体间的压强变大, 这些气体会形成气膜阻止液滴继续靠拢, 如果两液滴的相对速率降为零时它们还未接触, 则彼此反弹开来; 当液滴的速率继续增大时, 液滴间的气膜不足以阻止液滴直接接触, 之后由于液滴内部流体的黏性耗散和外部液滴表面张力的共同作用, 液滴速率减小, 没有足够的动能使两液滴分开, 因此聚合得以发生; 而当液滴速率足够大时, 合并后的液滴仍然有较大的动能, 必然导致合并后的大液滴破碎, 从而重新变成两个液滴, 有时还会伴随几个小液滴的形成, 依据两液滴接触时的相对位置, 分离被分为自反分离和拉伸分离. 对于水滴而言, 碰撞的结果只会出现聚合、自反分离和拉伸分离 3 种情况.

2 控制方程与计算模型

对液滴碰撞过程的数值研究关键在于自由界面的捕捉.液滴碰撞的数值模拟方法大致分为网格法和粒子法.VOF 方法^[13-14]通过定义网格内各相的体积分数确定交界面,是一种在固定的 Euler(欧拉)网格下的表面跟踪方法,可以有效求解气液两相间的稳态或者瞬间分界面.通过求解一套动量方程和跟踪穿过计算域的每一种流体的容积分数来模拟两种或多种不能混合的流体,具有易于实现、守恒性良好和模拟精度高等优点.因此,本文使用 VOF 法对液滴碰撞过程中的自由界面进行追踪.定义流体体积函数 α 为第一相在计算网格中的体积率,即

$$\alpha = \begin{cases} 1, & \text{inside liquid phase,} \\ 0, & \text{inside gas phase,} \\ 0 < \alpha < 1, & \text{inside the transitional area between the 2 phases,} \end{cases} \quad (5)$$

则计算区域内每个网格对应的密度和黏度为

$$\rho(\alpha) = \alpha\rho_l + (1 - \alpha)\rho_g, \quad (6)$$

$$\mu(\alpha) = \alpha\mu_l + (1 - \alpha)\mu_g, \quad (7)$$

其中,下标 l 和 g 分别表示液相和气相.

体积函数的输运方程为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\alpha) = 0. \quad (8)$$

对于海水液滴在无填料冷却塔内的碰撞过程,需要考虑流体的黏性和表面张力作用,同时将流动视为不可压缩流动,不考虑热量传递,因此无需求解能量方程.连续方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (9)$$

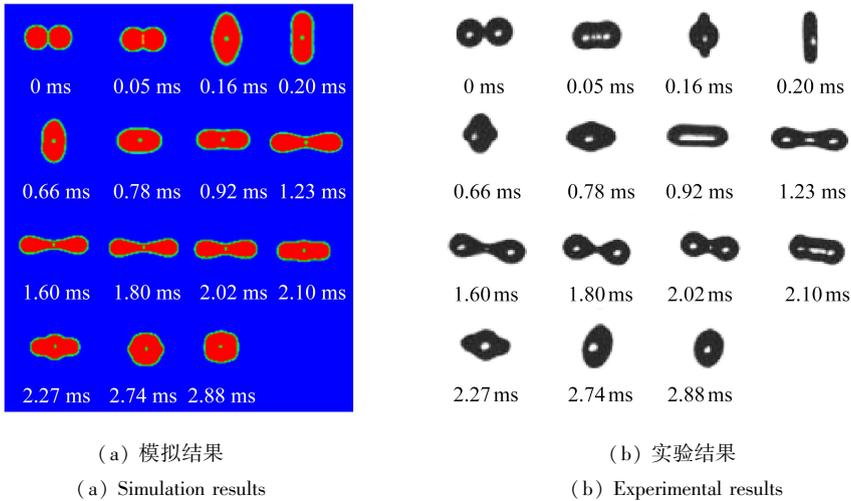
动量方程为

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot (2\mu \mathbf{D}) + \mathbf{F}_s, \quad (10)$$

其中, \mathbf{u} 为速度矢量, p 为压强, μ 为动力黏度, ρ 为密度, \mathbf{D} 为应力张量,其表达式为 $D_{ij} = (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) / 2$, \mathbf{F}_s 为表面张力引起的体积力,采用 Brackbill 等^[15]提出的连续表面张力 CSF 模型,表达式为 $\mathbf{F}_s = \sigma \kappa \mathbf{n}$, σ 为表面张力系数, κ 为气液交界面的曲率, \mathbf{n} 为界面单位法向量.由于计算模型的轴对称性,可以将三维问题简化为二维问题,采用轴对称模型进行计算,并对两相交界面物理量变化剧烈区域采用自适应网格加密的方法进行处理.计算域随着液滴速度的增大而加大,尺寸范围为 $3D_0 \times 1.5D_0 \sim 12D_0 \times 6D_0$;液滴间的距离设置为 $0.25D_0$;底部边界为轴对称边界,其余 3 条边界为壁面边界.模拟使用 PISO 压力-速度耦合算法以及 PRESTO 压力插值格式.

3 数值方法验证

为了验证计算方法的适用性和准确性,数值模拟了 Qian 等^[6]计算条件与流体物性参数与实验条件一致, $We = 32.8$, $Re = 210.8$, $D_0 = 318 \mu\text{m}$.首先进行网格独立性验证,对比模拟了最小网格尺寸为 $D_0/200$, $D_0/300$ 以及 $D_0/400$ 下的液滴碰撞过程,发现在最小网格尺寸等于 $D_0/200$ 时,得到的模拟结果即可与实验结果相一致.图 2 为数值模拟结果与实验结果的对比,液滴的变化情况基本吻合,仅在时刻上略有差异.可见 VOF 模型能够用于模拟二元液滴的碰撞过程.

图2 数值模拟与 Qian 等^[6]的实验结果对比Fig. 2 Comparison between numerical simulation and experimental results from Qian^[6]

4 计算结果及分析

4.1 海水液滴物性参数

海水是一种溶解有多种无机盐、有机物质和气体以及含有大量悬浮物质的混合液体,其溶解无机盐的总含量大约占 3.5%。无填料冷却塔中,海水液滴尺寸一般介于几百微米至几百毫米之间,模拟选取直径均为 $200\ \mu\text{m}$ 的两个海水液滴。常温常压下,计算得到海水黏度、密度以及表面张力系数如表 1 所示,经验关系式参考自文献[16-18]。

表 1 海水液滴及空气物性参数

Table 1 Properties of seawater droplets and air

	density $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	dynamic viscosity $\mu / (\text{Pa}\cdot\text{s})$	surface tension $F / (\text{N}/\text{m})$
seawater	1 021.53	9.63×10^{-2}	0.072 81
air	1.225	1.834×10^{-5}	

4.2 模拟结果分析

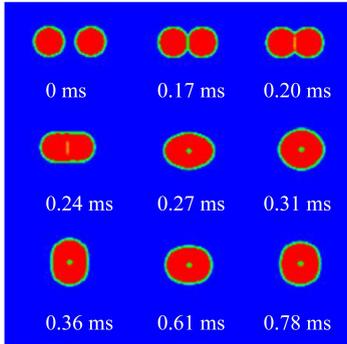
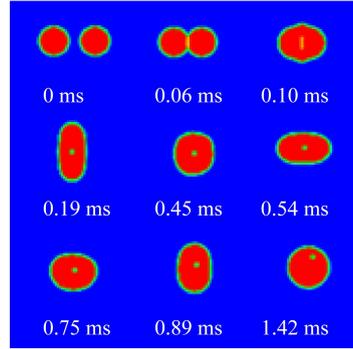
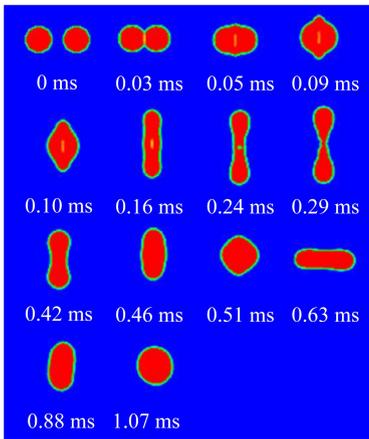
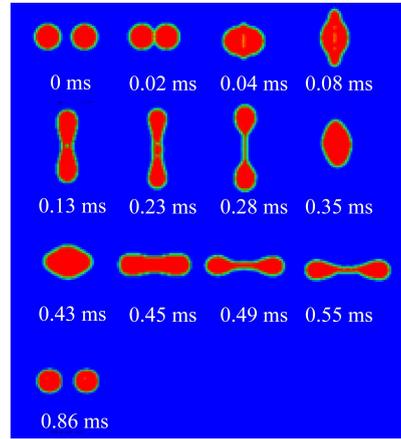
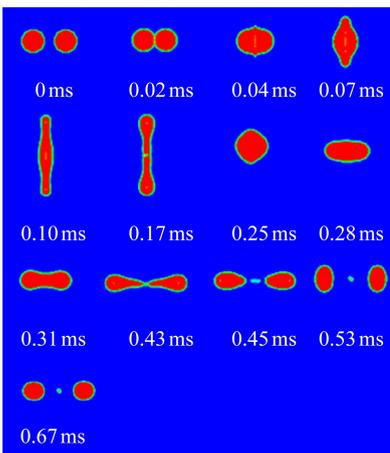
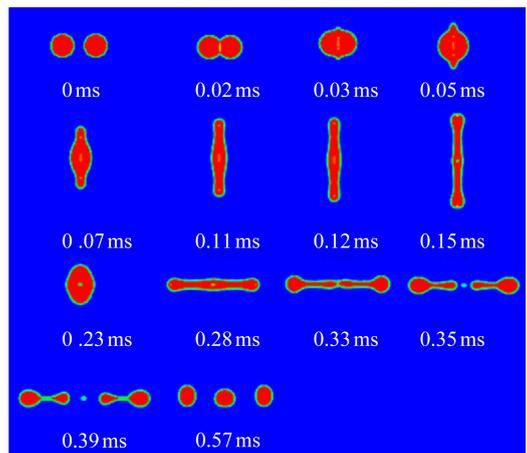
数值模拟了 We 在 0.5~200 下相同尺寸的二元海水液滴对心碰撞和偏心碰撞过程, $D_0 = 200\ \mu\text{m}$, u_r 取值范围为 0.42~8.44 m/s。两液滴初始速度 u_0 相同,均为相对速度 u_r 的一半,方向相反。

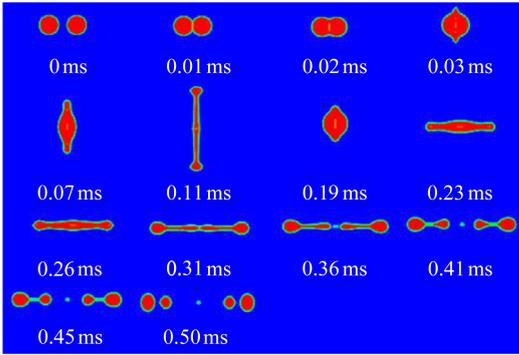
4.2.1 海水液滴对心碰撞过程

图 3 展示了部分 We 下海水液滴的对心碰撞过程。

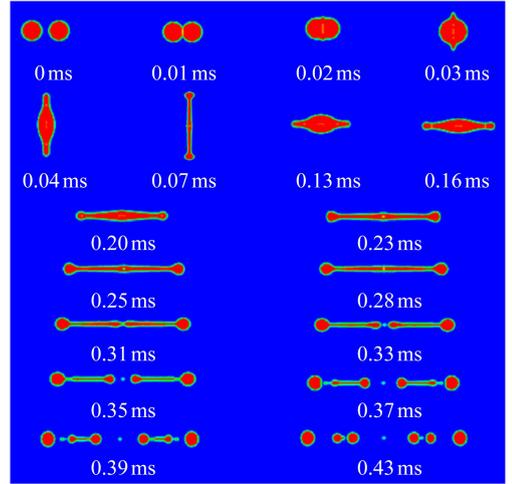
由图 3(a)可以看出,当两个液滴以很小的速度相互靠近时,液滴的动能大于两个液滴之间的气膜压力,液滴由接触的边缘位置开始聚合,形成一个拉伸的圆柱体,将液滴之间区域内的气体包裹在内,形成小气泡包裹在液滴内部,如图 3(a)中 0.20 ms 所示。在 0.36 ms 液滴表面能达到最大值,动能达到最小值;之后液滴由径向运动变为轴向运动,动能增大,但所具有的动能并不足以冲破表面张力和黏性耗散的束缚。液滴经过多次轴向与径向振荡后,最终达到稳定状态从而形成永久聚合。由图 3(b)可以看出,随着 We 继续增大,液滴聚合的时间明显提前,更大的动能导致液滴更大的拉伸变形,使得振荡周期变长;图 3(c)为液滴聚合与自反分离的临界点 $We = 22$,包裹在液滴内的气泡在径向收缩中破裂,气体流出,最终形成的液滴内已无小

气泡.图 3(d)所示为液滴碰撞后自反分离的计算结果,可以看到液滴分离前的变形过程与图 3(c)的变形过程非常类似,但是径向拉伸变形量更大,液滴内部流体汇聚于边缘,中心被拉薄,随后液滴变为轴向运动,动能足以克服表面张力的作用,在两端形成两个同等大小的液滴.

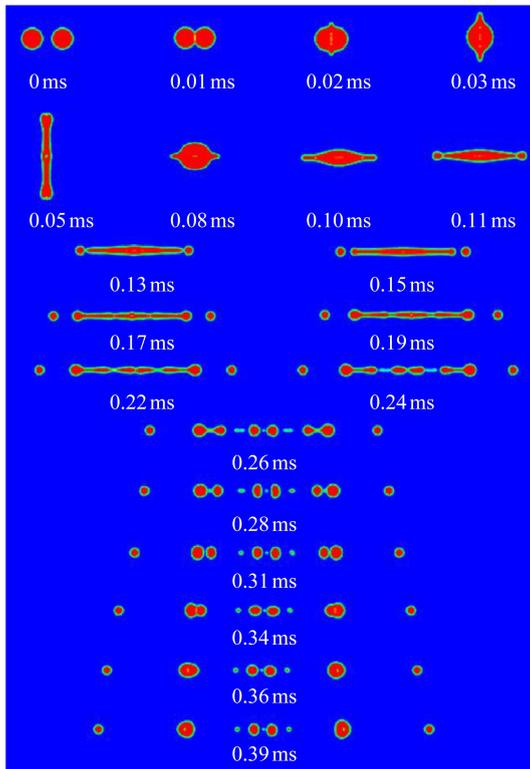
(a) $We = 0.5$ (b) $We = 10$ (c) $We = 22$ (d) $We = 23$ (e) $We = 50$ (f) $We = 80$



(g) $We = 100$



(h) $We = 150$



(i) $We = 200$

图 3 不同 We 下海水液滴对心碰撞过程

Fig. 3 Numerical simulation of head-on collisions of seawater droplets at various Weber numbers

随着 We 继续增大,两端液滴分离的同时中间产生一个非常微小的伴随液滴,如图 3(e) 所示;由图 3(f) 可以看出,由于液滴两端的逐渐收缩以及液滴间液桥的毛细不稳定性,中心连接处被夹断,液桥逐渐成球状,生成一个与两端液滴大小基本一致的伴随液滴.当 We 进一步增大,液滴在更大的动能作用下被拉伸得更加细长,液滴分离所需时间逐渐缩短,伴随液滴的数

量也在增多,图 3(g)~(i)分别生成了 3 个液滴、5 个液滴以及 7 个液滴.两端液滴逐渐脱离后新生成的两端又被夹断,生成新液滴.此条件下的伴随液滴生成机制为末端夹断机制,而非毛细不稳定机制,所述现象与文献[19]中的结果基本相符.

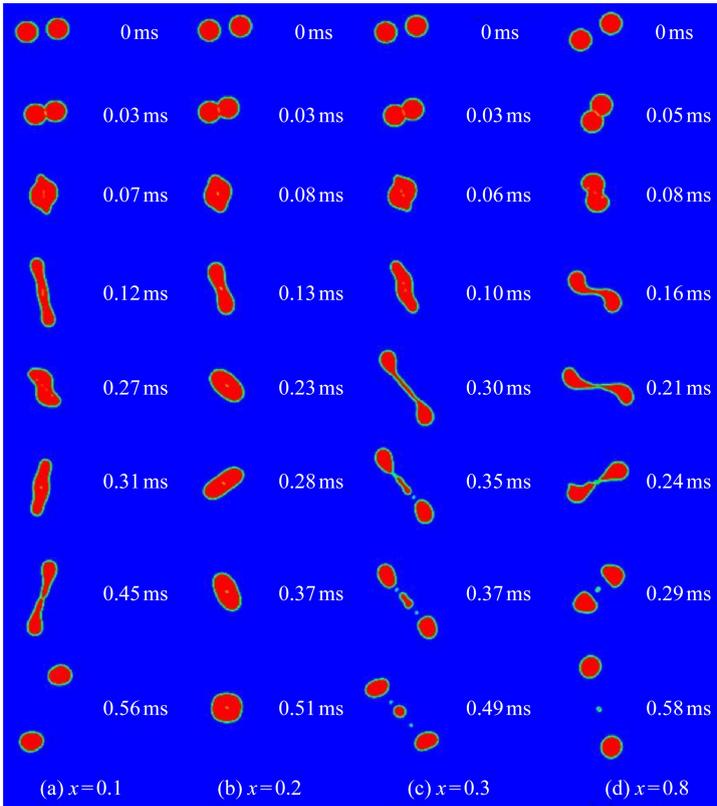


图 4 不同 x 下海水液滴碰撞过程

Fig. 4 Numerical simulation of seawater droplets collision for various impact parameters

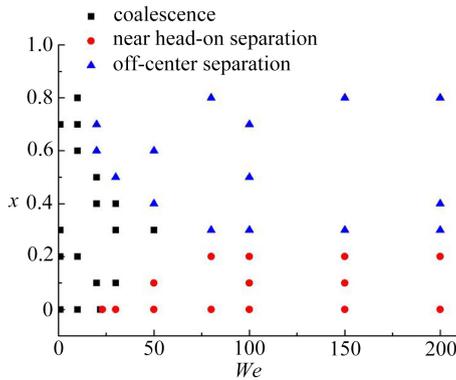


图 5 海水液滴碰撞结果区域分布图

Fig. 5 Schematic of various collision regimes for seawater droplets

4.2.2 海水液滴偏心碰撞过程

为获得海水液滴碰撞结果分布 $We-x$ 图,数值模拟了不同 x 下的液滴偏心碰撞过程. We 为 50 时的碰撞结果如图 4 所示.

图 4(a) 为 $x = 0.1$ 时的碰撞结果, 可以看到液滴碰撞后发生自反分离, 液滴在 0.12 ms 达到径向最大变形量, 之后开始径向收缩; 在 0.45 ms 两端液滴分离, 液滴变形过程中伴随着旋转运动, 在离心作用下两液滴的间距大于相同 We 下对心碰撞的间距. 在 $x = 0.2$ 时, 如图 4(b) 所示, 液滴碰撞后经过多次振荡发生聚合, 通过对比 0.13 ms 和 0.23 ms 可以很清楚地看到液滴发生旋转运动, 且旋转角度随着 x 的增大而增大. 图 4(c) 和 (d) 所示碰撞结果为拉伸分离, 可以看到随着 x 的增大, 液滴旋转的周期明显变长, 在 $x = 0.3$ 时, 在离心作用与轴向作用下, 两端液滴反向运动使得中间液桥被拉伸的足够细长, 从而发生断裂形成子液滴. 而在 $x = 0.8$ 时, 由于偏心距离较大, 两液滴碰撞后空间上未重合的两部分即聚合后上下两部分液滴继续反向运动, 离心作用大于轴向作用从而使得液滴拉伸变形较小, 而旋转幅度显著增大, 两液滴中心连接处发生断裂从而形成两个同等大小的液滴.

4.3 海水液滴碰撞结果区域分布

通过对 We 在 $0.5 \sim 200$, x 在 $0 \sim 1$ 范围内的海水液滴碰撞过程进行模拟计算, 得到了相同粒径海水液滴碰撞结果分布图, 碰撞结果包含聚合、自反分离以及拉伸分离 3 种类型, 如图 5 所示.

5 结 论

本文阐述了液滴碰撞机制, 并对计算方法进行了数值验证, 研究了不同 We 和 x 下两个相同粒径的海水液滴碰撞过程, 获得了相同粒径海水液滴碰撞结果类型分布的 $We-x$ 图, 结论如下:

- 1) 数值模拟了正十四烷液滴在氮气环境下的对心碰撞数值计算, 验证了 VOF 方法能够用于追踪液滴碰撞过程两相界面的变化.
- 2) 开展了不同 We 下海水液滴对心碰撞的数值计算, 得到海水液滴聚合与自反分离临界 We 为 22.
- 3) 在 We 小于 200 的自反分离中, 随着 We 增大, 伴随液滴数量逐渐增加, 伴随液滴生成的机制为末端夹断机制.
- 4) 海水液滴偏心碰撞聚合与自反分离的机制与对心碰撞类似, 但过程中伴随着旋转运动, 受到离心作用的影响, 自反分离临界 We 增大.

参考文献 (References):

- [1] 魏峥, 齐晓霓. 无填料喷雾冷却塔的水滴当量直径研究[J]. 科学技术与工程, 2013, **13**(17): 4797-4800. (WEI Zheng, QI Xiaoni. Investigation on equivalent diameter of water droplets in showing cooling tower[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, **13**(17): 4797-4800. (in Chinese))
- [2] O'ROURKE P J. Statistical properties and numerical implementation of a model for droplet dispersion in a turbulent gas[J]. *Journal of Computational Physics*, 1989, **83**(2): 345-360.
- [3] ASHGRIZ N, POO J Y. Coalescence and separation in binary collisions of liquid drops[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1990, **221**: 183-204.
- [4] NIKOLOPOULOS N, NIKAS K S, BERGELES G. A numerical investigation of central binary collision of droplets[J]. *Computers & Fluids*, 2009, **38**(6): 1191-1202.
- [5] NIKOLOPOULOS N, THEODORAKAKOS A, BERGELES G. Off-centre binary collision of droplets: a numerical investigation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, **52**(19/20): 4160-4174.

- [6] QIAN J, LAW C K. Regimes of coalescence and separation in droplet collision[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1997, **331**(1): 59-80.
- [7] BRAZIER-SMITH P R, JENNINGS S G, LATHAM J. The interaction of falling water drops: coalescence[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1972, **326**(1566): 393-408.
- [8] JIANG Y J, UMEMURA A, LAW C K. An experiment investigation on the collision behavior of hydrocarbon droplets[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1992, **234**: 171-190.
- [9] PAN Y, SUGA K. Numerical simulation of binary liquid droplet collision[J]. *Physics of Fluids*, 2005, **17**(8): 183.
- [10] 强洪夫, 石超, 陈福振, 等. 基于大密度差多相流 SPH 方法的二维液滴碰撞数值模拟[J]. 物理学报, 2013, **62**(21): 245-259. (QIANG Hongfu, SHI Chao, CHEN Fuzhen, et al. Simulation of two-dimensional droplet collisions based on SPH method of multi-phase flows with large density differences[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(21): 245-259. (in Chinese))
- [11] 刘泽军, 张超, 武丽丽, 等. 气相中双液滴正碰过程数值模拟研究[J]. 计算力学学报, 2015, **32**(1): 136-141. (LIU Zejun, ZHANG Chao, WU Lili, et al. Numerical simulation of head-on binary collision of droplets in gas phase environment[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2015, **32**(1): 136-141. (in Chinese))
- [12] 尹金鸽, 孔维梁, 王福新, 等. 过冷水滴碰撞过程的实验研究[J]. 上海交通大学学报, 2017, **51**(8): 939-945. (YIN Jingge, KONG Weiliang, WANG Fuxin, et al. Experimental investigation of binary supercooled water droplet collision[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2017, **51**(8): 939-945. (in Chinese))
- [13] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, **39**(1): 201-225.
- [14] 王建军, 李其汉, 陆明万. 自由液面流体流动问题的数值分析研究[J]. 计算力学学报, 2003, **20**(1): 101-108. (WANG Jianjun, LI Qihan, LU Minwan. Numerical methods for free-surface fluid flow-a review[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2003, **20**(1): 101-108. (in Chinese))
- [15] BRACKBILL J U, KOTHE D B, ZEMACH C. A continuum method for modeling surface tension[J]. *Journal of Computational Physics*, 1992, **100**(2): 335-354.
- [16] ISDALE J D, MORRIS R. Physical properties of sea water solutions; density[J]. *Desalination*, 1972, **10**(4): 329-339.
- [17] ISDALE J D, SPENCE C M, TUDHOPE J S. Physical properties of sea water solutions; viscosity[J]. *Desalination*, 1972, **10**(4): 319-328.
- [18] 齐晓霓. 无填料冷却塔的理论及实验研究[D]. 博士学位论文. 上海: 上海交通大学, 2008. (QI Xiaoni. Impact effects of irregular waves on piled port[D]. PhD Thesis. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008. (in Chinese))
- [19] 夏盛勇, 胡春波. 三氧化二铝液滴对心碰撞直接数值模拟[J]. 应用数学和力学, 2014, **35**(4): 377-388. (XIA Shengyong, HU Chunbo. Direct numerical simulation of head-on binary collision of aluminum oxide droplets[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2014, **35**(4): 377-388. (in Chinese))

Numerical Simulation of Seawater Droplets Collision in Gaseous Environment

LIANG Wei, QI Xiaoni, YIN Qiang, ZHAO Qiang

(School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology,
Zibo, Shandong 255049, P.R.China)

Abstract: Numerical simulation of binary collision between equal-sized seawater droplets was conducted with the VOF method, to reveal the mechanism and the influential factors for colliding seawater droplets in the seawater shower cooling tower. Veracity of the numerical models was firstly validated with the experimental results of Qian. The binary collision of equal-sized droplets were simulated with various Weber numbers and impact parameters under room temperature and pressure conditions. The Weber number ranged from 0.5 to 200 and the impact parameter ranged from 0 to 1. The simulation gave 3 different types of outcomes: coalescence, reflexive separation and stretching separation. The results show that the critical Weber number of head-on collision between coalescence and reflexive separation is 22. The $We-x$ diagrams of various collision regimes of seawater droplets were also obtained.

Key words: seawater; droplet collision; VOF method; adaptive mesh method

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(51309147; 51249001)

引用本文/Cite this paper:

梁伟, 齐晓霓, 尹强, 赵强. 气体介质中海水液滴碰撞过程数值模拟[J]. 应用数学和力学, 2018, **39**(11): 1236-1245.

LIANG Wei, QI Xiaoni, YIN Qiang, ZHAO Qiang. Numerical simulation of seawater droplets collision in gaseous environment[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2018, **39**(11): 1236-1245.