

相对浸润性对二元液滴碰撞影响的数值研究

张艺凡, 孙一颢, 孙中国, 席光

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了阐明液滴间的相对浸润性对液滴碰撞现象及过程的影响,采用无网格移动粒子半隐式(MPS)方法,建立了不同相对浸润性下的表面张力模型。在传统表面自由能模型的基础上,采用流体间宏观接触角拟合两相流体在界面处的分子间势能,实现不同浸润性下二元液滴碰撞与融合过程的仿真。通过大量数值计算,分析了二元液滴碰撞与融合的机理,根据韦伯数和碰撞参数划分了二元液滴碰撞的聚并、破碎和拉伸分离区域,研究了流体的相对浸润性对二元液滴碰撞形态及结果的影响。结果表明:相对浸润性对碰撞机理图的影响十分明显,在相对浸润角从 0° 增加至 120° 的过程中,拉伸分离-融合分界线随相对浸润角增加向低韦伯数方向单调偏移;在相对浸润角从 0° 增加至 60° 时,融合-破碎分界线向低韦伯数方向偏移,相对浸润角继续增加至 120° 时,分界线又向高韦伯数方向回移。该结论为实际工程中液滴碰撞与融合过程的研究提供了相关理论依据。

关键词: 浸润性;表面张力;移动粒子半隐式方法;液滴

中图分类号: O351.2 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202511011 **文章编号:** 0253-987X(2025)11-0115-10

Numerical Study on the Effect of Relative Wettability on Binary Droplet Collision

ZHANG Yifan, SUN Yijie, SUN Zhongguo, XI Guang

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To elucidate the influence of relative wettability between droplets on the phenomenon and process of droplet collision, a surface tension model under different relative wettability conditions is established using the meshless moving particle semi-implicit (MPS) method. Based on the traditional surface free energy model, the macroscopic contact angle between fluids is employed to fit the intermolecular potential energy of the two-phase fluids at the interface, enabling the simulation of the collision and coalescence processes of binary droplets under different wettability conditions. Through extensive numerical calculations, the mechanism of binary droplet collision and coalescence is analyzed. The coalescence, broken, and stretching separation regions of binary droplet collision are delineated according to the Weber number and collision parameter. The influence of the relative wettability of the fluids on the collision morphology and outcomes of binary droplets is investigated. The results indicate that the relative wettability has a significant impact on the collision mechanism diagram. As the relative contact angle increases from 0° to 120° , the boundary between stretching separation and coalescence

收稿日期: 2025-04-01。 作者简介: 张艺凡(2001—),女,硕士生;孙中国(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(GZB20240596)。

网络出版时间: 2025-07-11

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20250711.1516.004>

monotonically shifts toward lower Weber numbers. The boundary between coalescence and broken shifts toward lower Weber numbers when the relative contact angle increases from 0° to 60° , but as the relative contact angle further increases to 120° , the boundary moves back toward higher Weber numbers. These conclusions provide relevant theoretical foundations for the research of droplet collision and coalescence processes in practical engineering applications.

Keywords: wetting property; surface tension; moving particle semi-implicit method; droplet

液滴间的相互碰撞广泛发生在工业生产和生活当中。在食品加工和化妆品领域,油滴和水滴的碰撞结果会影响调味品最终的口感,乳液的稳定性也受到不同原料液滴碰撞结果的影响^[1-2]。在环境检测方面,污水处理过程中也存在不同种类的液滴相互碰撞^[3-6],大气中不同的颗粒聚结和沉降会产生不同天气状况^[7-8]。在日常生活中,喷墨打印机里各种颜色的墨滴碰撞后会产生不同的颜色效果^[9]。在工业生产中,有效提高原油采出率,分离原油中的水分,对提高油品质十分重要^[10-11]。在国防领域,自然推进剂火箭发动机中存在着氧化剂和燃料两种液体,而推进剂的雾化特性在燃烧过程中具有关键影响,雾化过程又包含了大量液滴的碰撞融合、破碎和分离等现象^[12],液滴的碰撞过程也会影响燃烧效率等^[13-15]。

对于液滴碰撞问题,前人已经做了大量实验研究。Jiang 等^[16]对等大水滴和正构烷烃液滴在不同碰撞参数下进行实验研究,发现流体的流变性质差异会带来碰撞结果的多样化,同时从机理上分析了液滴碰撞后黏性耗散的两个阶段。Kropotova 等^[17]改变液滴碰撞周围气流的属性,在煤油燃烧产物气流中使水滴与另一溶液中的液滴发生碰撞,结果表明在煤油燃烧产物气流中喷射液体会导致液滴相互作用机制间的边界向较小临界韦伯数方向移动。Planchette 等^[18]测试了甘油水溶液和硅油液滴的碰撞过程,发现了交叉分离的不稳定机制。

在数值模拟方面,Focke 等^[19]通过应用一种具有聚并时间抑制算法的流体体积法对不同黏度的等大液滴碰撞结果进行模拟,发现在不同黏度液滴碰撞的初始阶段会发生聚并延迟。贾飞飞^[20]通过相场多相流模型对不同表面张力系数的不等大液滴碰撞进行模拟,对马拉高尼流动现象的流动机理进行了系统分析。刘栋^[21]通过引入液滴合并时刻的实验信息,采用光滑粒子流体动力学(SPH)方法,对水滴和柴油液滴在较小相对速度下的碰撞进行模拟,成功模拟出液滴反弹现象。同时,刘栋^[21]还采用界面追踪法(FTM),对变表面张力差的液滴合并

进行模拟,结果表明表面张力差的增大并不能促进液滴间的相互混合。

液滴碰撞现象复杂,影响因素多,前人相关研究主要集中在变表面张力系数、黏度或液滴尺寸等参数来考察物性对液滴碰撞结果的影响,但针对液滴间相对浸润性对碰撞结果影响的研究较少。碰撞后形成的单液滴可能因相对浸润性不同呈现非球形状,液滴间的传质效果也会因为浸润性不同而变化。因此,本文选择通过改变流体间的相对浸润性对二元液滴碰撞进行研究,讨论液滴间相对浸润性对碰撞结果的影响并绘制碰撞机理图谱。

本文基于无网格移动粒子半隐式(MPS)方法,将流体间的浸润性量化为浸润角,计算两相流体在界面处的分子间势能,建立了与浸润角相关的表面自由能表面张力模型,研究了不同浸润性下液滴碰撞过程和机理,为多种界面间界面张力作用的复杂流动问题提供了有效的数值研究方法。

1 数值方法

移动粒子半隐式方法是一种求解不可压缩流动的无网格数值方法,在每个时间步内,通过显示步和隐式步来求解流体的控制方程。将连续流体离散为具有一定质量的离散粒子,这些粒子通过基于核函数形成的粒子间作用模型产生相互作用。

1.1 控制方程

不可压缩流体的控制方程与已有文献中广泛采用的形式一致^[22-23],公式如下

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} + \frac{\mathbf{F}_s}{\rho} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{u}$ 为流体速度; t 为时间; p 为压力; ρ 为流体密度; ν 为运动黏度; $\mathbf{g}$ 为重力加速度; $\mathbf{F}_s$ 为表面张力。

1.2 核函数

核函数定义了粒子间相互作用的权重函数,本文采用的核函数为 Koshizuka 等^[24]所给出的反比例形式的核函数

$$W(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1, & r < r_e \\ 0, & r \geq r_e \end{cases} \quad (3)$$

式中: r_e 为粒子影响半径; r 为粒子间距离。本文取光滑半径 $r_e = 2.1l_0$, l_0 为粒子直径。

1.3 粒子数密度

在 MPS 方法中,引入粒子数密度的概念,定义为粒子 i 支持域内所有邻近粒子的核函数之和,反映流场中粒子分布的疏密程度。粒子数密度计算域如图 1 所示。对于不可压缩流体,因粒子数密度与流体密度成正比,为满足连续性方程,在不可压缩流动过程的计算中,粒子数密度需保持恒定,其对应的值被称为粒子数密度常数。

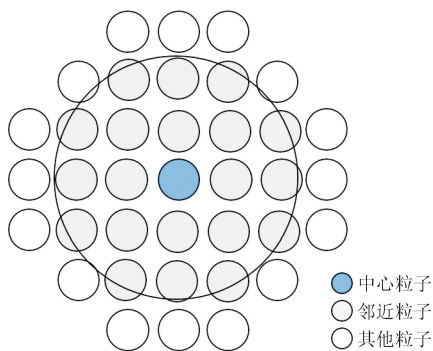


图 1 粒子数密度计算域

Fig. 1 Particle number density calculation domain

粒子 i 的粒子数密度计算公式如下

$$\langle n \rangle_i = \sum_{j \neq i} W(|r_j - r_i|) \quad (4)$$

式中: r_i, r_j 为粒子 i, j 的位置。

1.4 压力泊松方程

在 MPS 方法中,采用混合源项的压力泊松方程如下^[25]

$$\langle \nabla^2 p^{k+1} \rangle_i = (1 - \gamma) \frac{\rho}{\Delta t} \langle \nabla \cdot \mathbf{u}^* \rangle_i - \gamma \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{\langle n^* \rangle_i - n^0}{n^0} \quad (5)$$

式中: γ 为调和系数,取值范围为 $[0, 1]$; k 为计算步数; $\mathbf{u}^*$ 为速度估计值; n^* 为引入的中间粒子数密度; n^0 为初始粒子数密度。

1.5 相对浸润性下的表面自由能模型

表面张力实际上是分子间作用力的宏观表现,定义流体粒子的势能为 $P(r)$, 则表面张力为^[26]

$$\mathbf{f} = \frac{\partial P(r)}{\partial \mathbf{r}} \mathbf{n} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{n}$ 为两粒子间的单位方向矢量。

本文选择了 Kondo 等推荐的势能函数^[27-28]

$$P(r) = \begin{cases} \frac{1}{3} C \left(r - \frac{3}{2} l_m + \frac{1}{2} r_e \right) (r - r_e)^2, & r \leq r_e \\ 0, & r > r_e \end{cases} \quad (7)$$

式中: l_m 为势能函数极值点, $l_m = 1.5l_0$; $r_e = 3.1l_0$, 取值参考文献[29]; C 为决定表面能大小的系数。

如图 2 所示,为了在 Γ 处产生自由表面,需要将流体 M, N 间相互作用力削弱至 0, 所需要的功是 W_Γ ^[30]。当两相流体除分子间作用力外没有其他力存在时,产生自由表面做功所需要的能量

$\sum_{i \in M, j \in N} E(r_{ij})$ 和势能 $\sum_{i \in M, j \in N} P(r_{ij})$ 相等,本文中所有出现的算例均满足上述条件。 W_Γ 计算式如下

$$W_\Gamma = \sum_{i \in M, j \in N} E(r_{ij}) = \sum_{i \in M, j \in N} P(r_{ij}) \quad (8)$$

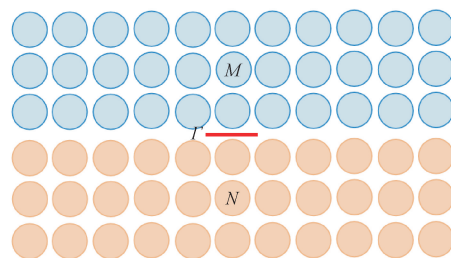


图 2 基于表面自由能的表面张力模型

Fig. 2 Surface tension model based on surface free energy

当流体 M 和流体 N 具有不同浸润性时,可以推导出创建自由表面所需要消耗的功,即

$$(\sigma_{f,M} + \sigma_{f,N} - \sigma_{f,MN}) l_m^2 = \sum_{i \in M, i \in N} E(r_{ij}) \quad (9)$$

其中: $\sigma_{f,M}$ 和 $\sigma_{f,N}$ 分别为流体 M 和 N 的表面张力系数; $\sigma_{f,MN}$ 为流体 M, N 之间的界面张力系数。

把式(9)代入到式(7)中,可以得到系数 C ^[30] 为

$$C = \frac{3(\sigma_{f,M} + \sigma_{f,N} - \sigma_{f,MN}) l_m^2}{\sum_{i \in M, j \in N} (r_{ij} - 1.5l_m + 0.5r_e) (r_{ij} - r_e)^2} \quad (10)$$

结合式(10)可以看出,为了清楚描述两种流体之间的界面行为,如何用界面张力表示两相流体之间的相容性成为研究的重点内容。假设流体 M 在流体 N 上铺展时,接触界面平坦。为了说明流体之间的相互浸润性,定义 θ_{MN} 为两相流体之间的浸润角^[30], 如图 3 所示。

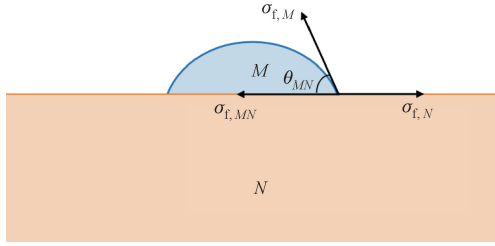


图 3 三相点处假想力平衡示意图

Fig. 3 Schematic diagram of assumed force balance at the triple point

基于三相点处的力平衡,可以得到

$$\sigma_{f,MN} + \sigma_{f,M} \cos \theta_{MN} = \sigma_{f,N} \quad (11)$$

则流体 M、N 之间的界面张力系数 $\sigma_{f,MN}$ 为

$$\sigma_{f,MN} = \sigma_{f,N} - \sigma_{f,M} \cos \theta_{MN} \quad (12)$$

将式(12)代入到式(10),可以得到系数 C 关于表面张力系数和接触角的方程

$$C = \frac{3(\sigma_{f,M} + \sigma_{f,M} \cos \theta_{MN}) l_m^2}{\sum_{i \in M, j \in N} (r_{ij} - 1.5 l_m + 0.5 r_e) (r_{ij} - r_e)^2} \quad (13)$$

流体 M 和流体 N 之间界面处张力的实际分析如图 4 所示。在三相点处界面接触的切向和垂直方向列力平衡方程,可以得到

$$\sigma_{f,M} \cos \left(\theta_{f,M} - \frac{\pi}{2} \right) = \sigma_{f,N} \cos \left(\theta_{f,N} - \frac{\pi}{2} \right) \quad (14)$$

$$\sigma_{f,MN} = \sigma_{f,M} \cos(\pi - \theta_{f,M}) + \sigma_{f,N} \cos(\pi - \theta_{f,N}) \quad (15)$$

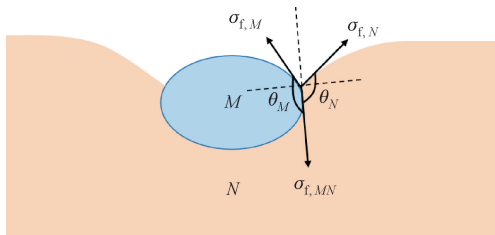


图 4 三相点处实际力平衡示意图

Fig. 4 Schematic diagram of actual force balance at the triple point

事实上, θ_M 和 θ_N 均可以反应流体 M 和流体 N 之间的浸润性。为便于表示,本文选择 θ_M 作为流体 M 和流体 N 的液-液界面接触角。结合文献[30],基于式(12)~(14),可以得到接触角 θ_M 和浸润角 θ_{MN} 的关系如下

$$\cos \theta_{f,M} = \frac{2\sigma_{f,N} \cos \theta_{MN} - \sigma_{f,M} (1 + \cos^2 \theta_{MN})}{2\sigma_{f,N} - 2\sigma_{f,M} \cos \theta_{MN}} \quad (16)$$

2 方法验证

2.1 分辨率无关性验证

对二元液滴相互浸润算例进行数值模拟,初始布置为两个等尺寸方形液滴,先在表面张力作用下变圆,在变圆过程中发生浸润的过程。对分辨率为 0.030、0.025、0.020、0.015 和 0.010 mm 的液滴浸润算例进行计算,并对比稳定时刻下液滴的浸润长度,如图 5 所示。从图中可以看到,分辨率从 0.03 mm 提高到 0.015 mm 的过程中,液滴总机械能的变化量逐渐减小;当分辨率从 0.015 mm 提高到 0.010 mm 后,浸润长度的变化基本可以忽略,故认为 0.015 mm 分辨率可以在节约计算资源的前提下实现准确计算。

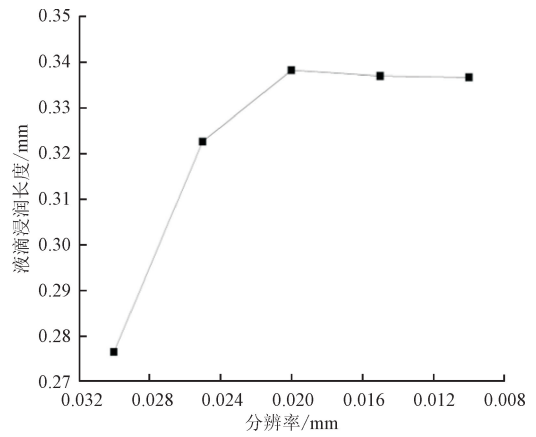


图 5 稳定状态下液滴浸润长度随分辨率的变化

Fig. 5 Variation of droplet wetting length with different resolutions under steady state

2.2 相对浸润性下的表面张力模型验证

2.2.1 液滴和液滴间相互浸润算例验证

对二维液滴浸润算例进行数值模拟,初始布置为相距 2 mm、边长 60 mm 的两个等尺寸方形液滴,在表面张力作用下变圆,同时发生浸润的过程。

无重力情况下液滴相互浸润情况如图 6 所示,液滴稳定状态下浸润长度 l 的理论值可以由图中各参数获得,各参数满足以下公式^[29]

$$V_1 = \left[\frac{2\pi - (\pi - 2\alpha_1)}{2\pi} \pi R_1^2 + R_1^2 \cos \alpha_1 \sin \alpha_1 \right] - \left[\frac{\pi - 2\alpha_3}{2\pi} \pi R_3^2 - R_3^2 \cos \alpha_3 \sin \alpha_3 \right] \quad (17)$$

$$V_2 = \left[\frac{2\pi - (\pi - 2\alpha_2)}{2\pi} \pi R_2^2 + R_2^2 \cos \alpha_2 \sin \alpha_2 \right] + \left[\frac{\pi - 2\alpha_3}{2\pi} \pi R_3^2 - R_3^2 \cos \alpha_3 \sin \alpha_3 \right] \quad (18)$$

$$l = 2R_1 \cos \alpha_1 = 2R_2 \cos \alpha_2 = 2R_3 \cos \alpha_3 \quad (19)$$

式中: V_1 、 V_2 分别为液滴 1、2 的体积; 其他变量均在图 6 中给出。

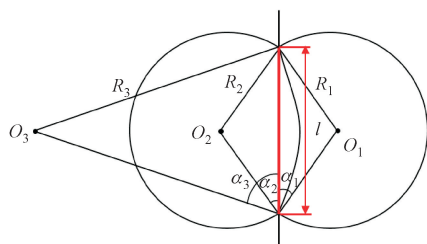


图 6 二元液滴相互浸润时接触角及接触面积示意图^[30]

Fig. 6 Schematic diagram of contact angle and contact area between binary droplets^[30]

对浸润角 θ_{MN} 在 75° 到 130° 变化时两液滴的浸润结果进行数值模拟, 稳定浸润状态下, 模拟结果如图 7 所示。由图可知, 随着相对浸润角增大, 两液滴间的浸润长度 l 逐渐变短。

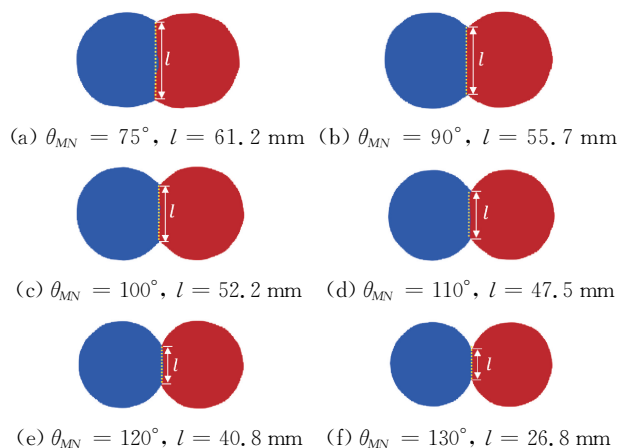


图 7 不同相对浸润角下液滴浸润模拟结果

Fig. 7 Numerical simulation results of droplets under different relative wetting angles

图 8 展示了液滴浸润长度的模拟结果与理论值的对比。从图中可以看出, 模拟结果在一定程度上与理论值吻合较好, 表明修改后的表面张力模型在计算液滴间浸润时具有良好的准确性。

2.2.2 液滴和流体间相互浸润算例验证

流体 M 初始布置为边长 5 mm 的方形液滴, 和流体 N 相互接触, 流体 M 和流体 N 的密度均为 965 kg/m^3 , 表面张力系数为 0.02 N/m , 但 M 、 N 间相对浸润性不同, 计算过程不考虑重力, 几何尺寸及相对位置如图 9 所示。

将流体的物性参数代入式(16)中可得液滴与流体间接触角的理论解为

$$\cos \theta_M = \frac{1}{2}(\cos \theta_{MN} - 1) \quad (20)$$

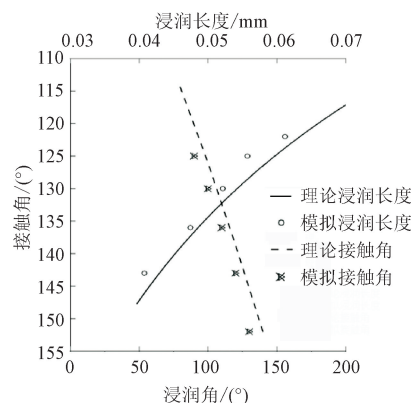


图 8 液滴浸润长度和接触角模拟结果与理论结果的对比

Fig. 8 Comparison of simulation and theoretical results for wetting length and contact angle

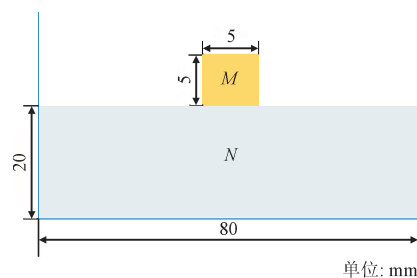
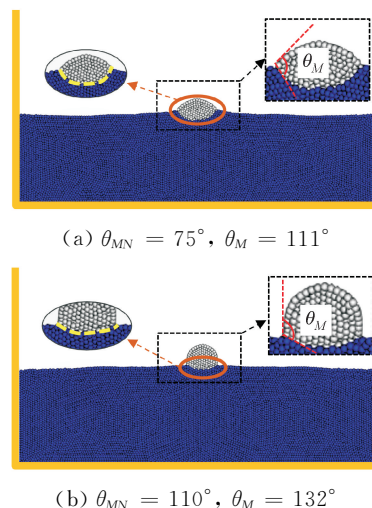


图 9 液滴浸润流体表面示意图

Fig. 9 Diagram of droplet wetting on fluid surface

图 10 展示了流体间的相对浸润角 θ_{MN} 从 0° 到 180° 变化时, 部分相对浸润角下的稳定浸润结果。由图 10 可知, 流体 M 和流体 N 在不同相对浸润角下, 浸润形态变化显著: 随着相对浸润角增大, 流体 M 与流体 N 间的相对浸润性明显变差, 流体间的浸润深度和实际接触面积不断减小, 接触角 θ_M 不断增大。



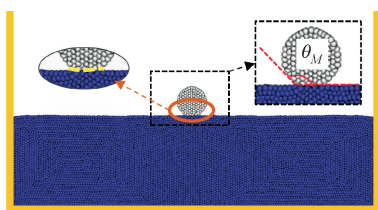
(c) $\theta_{MN} = 165^\circ$, $\theta_M = 157^\circ$

图10 不同浸润角下液滴浸润流体表面的模拟结果

Fig. 10 Simulation results of droplet wetting fluid under different wetting angles

图11给出了流体M为液滴时,在流体N中浸润的接触角数值模拟结果与理论结果的对比曲线。可以看出,模拟结果与理论解吻合较好,表明修改后的表面张力模型在计算液滴与流体间浸润时具有良好的准确性。

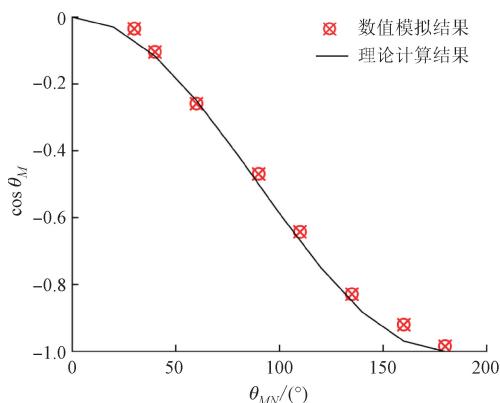


图11 液滴浸润流体时接触角的模拟结果与理论结果的对比
Fig. 11 Comparison of the simulation results of contact angle when droplets wetting fluid and theoretical solutions

3 数值模拟

对等大液滴碰撞算例进行模拟。液滴密度均为 $1\,000\text{ kg/m}^3$, 表面张力系数为 72.75 mN/m 。

韦伯数 We 和碰撞参数 B 是描述碰撞过程的两个重要参数

$$We = \frac{\rho u^2 (r_1 + r_2)}{\sigma} \quad (21)$$

$$B = \frac{\chi}{r_1 + r_2} \quad (22)$$

式中: r_1 和 r_2 分别代表两液滴半径; U 为两液滴相对速度; χ 为两液滴中心之间的距离在与碰撞速度垂直方向上的投影。

选取 0° 、 60° 和 120° 相对浸润角, 代表两液滴之

间不同的相对浸润性, 同时改变液滴的初始速度和相对位置, 共计对 120 余组算例进行模拟并对结果分类, 共有碰撞融合、拉伸分离及碰撞破碎 3 种结果, 对这 3 种碰撞结果及液滴碰撞机理进行分析。

3.1 不同相对浸润角下液滴的碰撞融合现象

针对 0° 、 60° 和 120° 相对浸润角下的碰撞融合结果进行分析, 3 种相对浸润角下液滴的碰撞参数 $B=0$ (对心碰撞), $We=1.09$ 。图12给出了3个相对浸润角下的碰撞融合时序图。

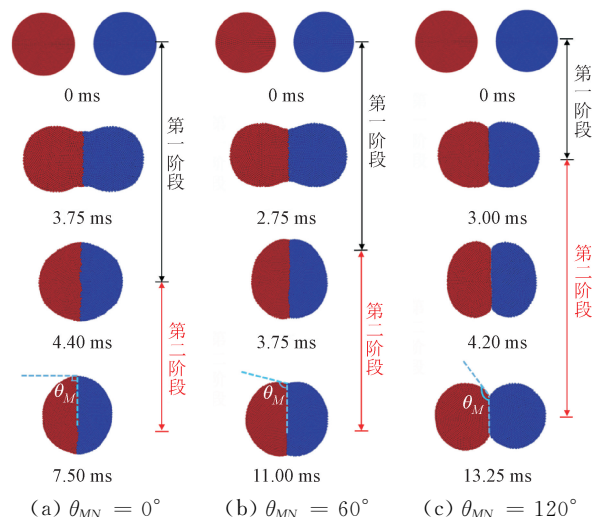
(a) $\theta_{MN} = 0^\circ$ (b) $\theta_{MN} = 60^\circ$ (c) $\theta_{MN} = 120^\circ$

图12 不同相对浸润角下的液滴碰撞融合结果时序图
Fig. 12 Time series of droplet coalescence at different relative wetting angles

从浸润过程来看, 液滴变形分两个阶段: 第一阶段, 动能占主导, 碰撞后的接触面积一直不断增大; 第二阶段, 相对浸润性和表面张力占主导, 碰撞后的接触面积根据相对浸润性发生变化直至稳定。对比变形时长可得: 在融合结果中, 随着相对浸润角增大, 液滴动能被更快耗散, 因此第一阶段时长变短; 浸润性变差导致液滴受力不平衡程度加剧, 达到平衡需要更长时间, 即第二阶段时长变长。

从液滴形态来看, 随着相对浸润角增大, 融合后的液滴形态由圆润光滑向凹陷弯曲变化。在 0° 浸润角下液滴相对浸润性良好, 连接处液滴间接触角为 90° , 液滴变形过程中未出现明显凹陷的过渡区域。在 60° 浸润角下, 液滴相对浸润性变差, 液滴间界面张力减小, 两端在表面张力作用下向内移动, 直至平衡, 端部交界处存在过渡凹陷区域, 连接处液滴间接触角大于 90° , 融合后的液滴形态呈苹果外形。在 120° 浸润角下, 液滴间界面张力更小, 交界面处凹陷程度更深, 构成饱满的花生外形。

3.2 不同相对浸润角下液滴的拉伸分离现象

对不同相对浸润角下液滴碰撞后的拉伸分离结果进行分析,3种相对浸润角下液滴的碰撞参数 $B=0.78$ (偏心碰撞),韦伯数 $We=22.76$ 。图 13 给出了 3 个相对浸润角下的拉伸分离时序图。

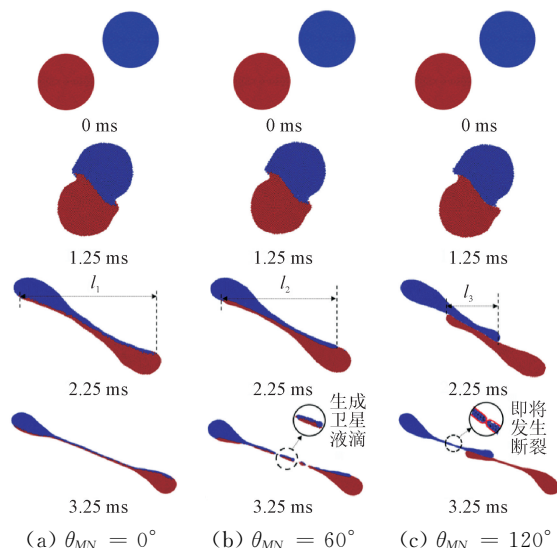


图 13 不同相对浸润角下的液滴拉伸分离结果时序图

Fig. 13 Timing diagram of droplet stretch separation results under different relative wetting angles

在两液滴发生速度较大的偏心碰撞时,可能出现拉伸分离结果,从而伴随液滴间的传热传质现象。在工业生产中,提高传质效果有助于增加反应物接触面积,提升反应速率,因此对于拉伸分离现象,需十分关注液滴间的传质情况。引入液滴间相互浸润长度 l 评价质量交换效果。在 2.25 ms,可以看到液滴浸润长度 l 随浸润角增加而变短,即 $l_3 < l_2 < l_1$,尤其是在相对浸润角增加至 120° 后,浸润长度明显减小。除浸润长度外,新生成卫星液滴的质量组成也可以反应液滴间的传质效果。从断裂部位来看,当相对浸润角为 0° 和 60° 时,断裂点位于二元液滴混合处;当浸润角为 120° 时,断裂点位于均匀单液滴处,即卫星液滴的质量组成随浸润角增加有单一化趋势。液滴间分界线随相对浸润角增加而明显清晰,即液滴间质量交换比例降低。以上结论均表明,对于拉伸分离结果,提高相对浸润性可以有效增强液滴间的传质效果。

3.3 不同相对浸润角下液滴的碰撞破碎现象

对不同相对浸润角下液滴碰撞后的破碎结果进行分析,3种相对浸润角下液滴的碰撞参数 $B=0$,韦伯数 $We=66.05$ 。图 14 给出了 3 个相对浸润角下的碰撞破碎结果时序图。

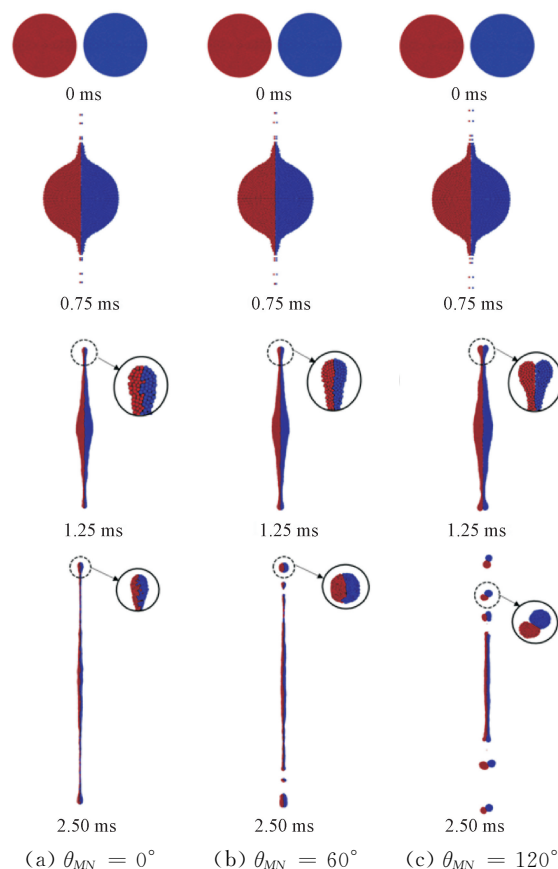


图 14 不同相对浸润角下的液滴碰撞破碎结果时序图

Fig. 14 Timing diagram of droplet broken results under different relative wetting angles

从图 14 中可以看到,不同相对浸润角下液滴碰撞后的形态变化过程较相似,这是因为在相对较高的韦伯数下,液滴都具有较大的初动能,在碰撞瞬间均产生足够高压从而击碎液滴。因此,从碰撞结果上看,两液滴均在挤压过程中先沿纵向大幅伸长,而后破裂形成微小液滴。

结合不同相对浸润角下的时序图来看,破碎初期,液滴形态并无明显区别,但随挤压过程持续进行,在 1.25 ms,液滴端部形态出现明显差异。造成这种形态差异的主要原因是液滴间相对浸润性不同。在 0° 和 60° 相对浸润角下,端部液滴并未出现明显异型;在 120° 浸润角下,相对浸润性明显变差,端部出现和融合结果中相似的凹陷区域及类花生形态。碰撞过程中,除液滴形态有所改变外,液滴两端出现的微小液滴数也不尽相同,在 2.50 ms,随着浸润角增加,小液滴数也逐渐增多。不仅如此,微小液滴形态也略有区别,在 120° 浸润角下,破碎形成的小液滴外观上同样具有花生外形,和同一浸润角下融合碰撞结果中的非球形外观相对应。

因此,对液滴碰撞的破碎过程,相对浸润性变差

会导致液丝狭窄处更容易发生破裂,产生更多的非球形稳态微小液滴。

3.4 不同相对浸润角下的液滴碰撞机理图谱

图15~17分别为 0° 、 60° 和 120° 相对浸润角下的碰撞机理图谱。由于不同浸润角下的机理图谱区域划分一致,因此以 0° 相对浸润角为例分析。

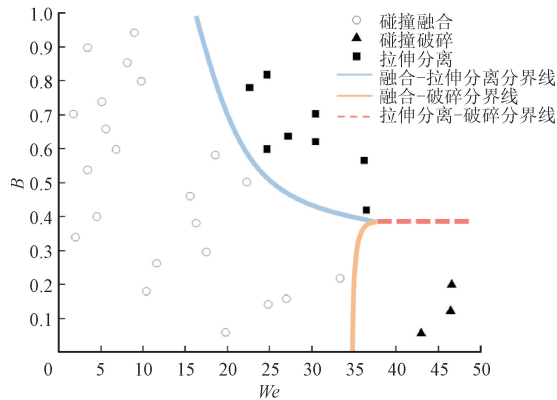


图15 相对浸润角为 0° 时液滴碰撞机理

Fig. 15 Schematic of droplet collision mechanism at a relative wetting angle of 0°

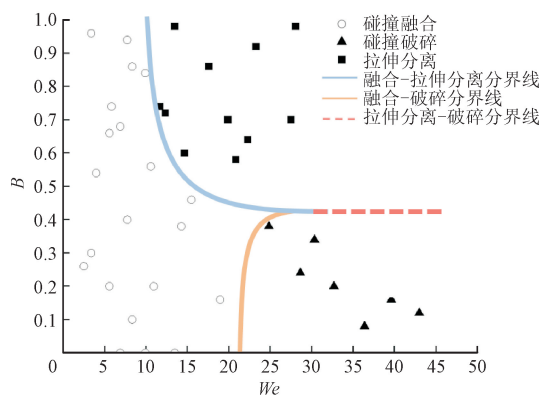


图16 相对浸润角为 60° 时液滴碰撞机理

Fig. 16 Schematic of droplet collision mechanism at a relative wetting angle of 60°

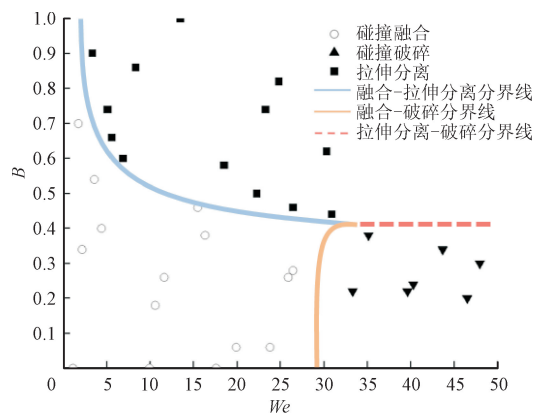


图17 相对浸润角为 120° 时液滴碰撞机理

Fig. 17 Schematic of droplet collision mechanism at a relative wetting angle of 120°

碰撞融合区域对应中低韦伯数及全碰撞参数。在该区域中,两液滴初始动能相对较小,接触面积较大,所以液滴挤压时,动能很快耗散,并最终融合。

拉伸分离区域对应中高韦伯数及较高碰撞参数。当碰撞速度较高、偏心度较大时,液滴碰撞后的接触面积较小,只有相互接触部分粒子的动能才会很快耗散,其他粒子沿原始轨迹继续运动,从而产生较大速度差,导致液滴很快被拉伸变形至断裂。所以,在此范围内碰撞后出现拉伸分离结果。

碰撞破碎区域对应相对较高韦伯数及低碰撞参数。若两液滴初始动能较大,在高碰撞参数下更易出现拉伸分离结果;若两液滴的初始动能较小,无论碰撞参数大小,都更易发生碰撞融合的结果。因此,破碎的前提是液滴具有足够的初始动能,且碰撞参数相对较小。在此条件下,碰撞后瞬间才能在液滴内部产生高压,当液滴表面能不足以维持液滴稳定性时,液滴才能从内部被击碎。

3.5 浸润性对液滴碰撞机理图的影响

3.4节中给出了不同相对浸润角下的碰撞机理图谱,本小节主要分析改变相对浸润角对液滴碰撞结果产生的影响。

图18给出不同相对浸润角下总的液滴碰撞机理图谱及不同区域的分界线。其中,拉伸分离和融合区域的分界线随相对浸润角增加向低韦伯数方向单调移动,因为浸润角增大,相对浸润性变差,动能向内能转化减少,液滴两端剩余动能增大。因此,两端和中心部分速度差更大,容易发生分离,即拉伸分离区域随浸润角增加不断扩大。

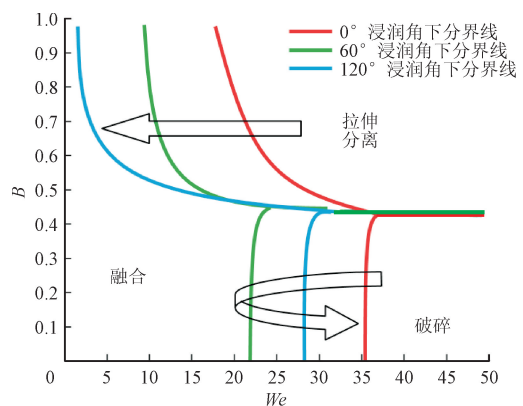


图18 不同相对浸润角下的液滴碰撞机理

Fig. 18 Droplet collision mechanism at different wetting angles

融合和破碎碰撞区域分界线先向低韦伯数移动,再向高韦伯数移动。相对浸润角从 0° 增加至

60°时,液滴间相对浸润性变差,接触面积减小,压强增大,所以破碎区域范围变大,即融合-破碎区域分界线先向低韦伯数方向移动。当相对浸润角增加至120°时,液滴间相对浸润性极差,两液滴不会因为碰撞参数较小保持稳定浸润,也不会因速度较大导致破碎,只会因动能作用在速度垂直方向拉长,又在黏性作用下回弹,最终无法破碎,所以液滴破碎区域相对变小,即融合-破碎区域分界线反向移动。

4 结 论

本文基于无网格 MPS 法,发展了可计算二元液滴在不同相对浸润角下的表面自由能表面张力模型,实现了典型二元液滴碰撞过程模拟,得到主要结论如下。

(1)建立并验证了考虑二元液滴相对浸润性的表面自由能表面张力模型,在碰撞参数 B 为 0~1.0 和韦伯数 We 为 1.09~66.05 的范围内,实现了碰撞融合、拉伸分离和碰撞破碎等典型现象及过程的数值模拟。

(2)当二元液滴相对浸润性良好时,碰撞融合形成了稳定单体液滴,液滴间接触角为 90°,融合边缘光滑过渡,整体呈球形。当相对浸润性较差时,单液滴在两相接触点出现局部凹陷,液滴间接触角大于 90°,整体不再呈球形,稳态单体液滴出现了苹果、花生等典型的异形形态。

(3)相对浸润性对碰撞机理图影响明显。拉伸分离-融合分界线因体系动能耗散与相对浸润角变化趋势相反,随相对浸润角增加而向低韦伯数方向单调偏移。融合-破碎分界线在相对浸润角从 0°增加至 60°时,因液滴内压和浸润角呈正相关性变化而向低韦伯数方向偏移。当浸润角从 60°增加至 120°时,因液滴在动能和黏性的双重作用下不断拉伸并回弹,无法破碎,分界线反而向高韦伯数方向移动。

参考文献:

- [1] 赵文琪, 邓燕君, 朱春英, 等. 纳米粒子稳定的 Pickering 乳液及其液滴聚并动力学研究进展 [J]. 化工学报, 2024, 75(1): 33-46.
ZHAO Wenqi, DENG Yanjun, ZHU Chunying, et al. Research progress on nanoparticle stabilizing Pickering emulsion and droplet coalescence dynamics [J]. CIESC Journal, 2024, 75(1): 33-46.
- [2] 周洋, 管军军, 路新开, 等. 基于运动食品的蛋白-磷脂聚集体及其乳液的液滴特性 [J]. 中国食品学报, 2022, 22(9): 103-113.
- ZHOU Yang, GUAN Junjun, LU Xinkai, et al. Droplet characteristics of protein-phospholipid aggregates and their emulsion based on sports food [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(9): 103-113.
- [3] KOLLÁR L E, FARZANEH M, KAREV A R. Modeling droplet collision and coalescence in an icing wind tunnel and the influence of these processes on droplet size distribution [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2005, 31(1): 69-92.
- [4] PARK J Y, BLAIR L M. The effect of coalescence on drop size distribution in an agitated liquid-liquid dispersion [J]. Chemical Engineering Science, 1975, 30(9): 1057-1064.
- [5] FAETH G M. Current status of droplet and liquid combustion [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1977, 3(4): 191-224.
- [6] 黄良民. 中国海洋资源与可持续发展 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [7] FALKOVICH G, FOUXON A, STEPANOV M G. Acceleration of rain initiation by cloud turbulence [J]. Nature, 2002, 419(6903): 151-154.
- [8] PRUPPACHER H R, KLETT J D. Microphysics of clouds and precipitation [M]. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2010.
- [9] 王涵. 基于 COMSOL 的喷墨打印机喷射墨滴过程的仿真分析 [J]. 机械管理开发, 2021, 36(6): 65-67.
WANG Han. Simulation analysis of ink-jet drop injection process based on COMSOL ink-jet printer [J]. Mechanical Management and Development, 2021, 36(6): 65-67.
- [10] 袁淑霞, 刘涛, 樊玉光, 等. 油水分离过程中液滴碰撞动力学数值模拟 [J]. 石油化工, 2021, 50(7): 675-679.
YUAN Shuxia, LIU Tao, FAN Yuguang, et al. Numerical simulation of droplet collision dynamics in oil-water separation [J]. Petrochemical Technology, 2021, 50(7): 675-679.
- [11] 庞帅, 李庆一, 王若莉, 等. 油水分离器中液滴流动模拟方法研究 [J]. 河南科学, 2018, 36(3): 340-348.
PANG Shuai, LI Qingyi, WANG Ruoli, et al. Droplet motions simulation in oil-water separation [J]. Henan Science, 2018, 36(3): 340-348.
- [12] 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, 63(21): 237-251.
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, 63(21): 237-251.
- [13] DAMBACH E M, CHO K Y, POURPOINT T L, et al. Ignition of advanced hypergolic propellants [C]// 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Los Angeles, USA: AIAA, 2010: AIAA2010-6984.
- [14] 孙凯. 液滴碰撞动力学与层流预混火焰动力学的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2015.
- [15] 汪广旭, 谭永华, 庄逢辰, 等. 喷注流强分布对高频纵向燃烧不稳定性抑制效果 [J]. *航空学报*, 2022, 43(9): 378-389.
- WANG Guangxu, TAN Yonghua, ZHUANG Fengchen, et al. Suppression effect of injection intensity distribution on longitudinal combustion instability [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(9): 378-389.
- [16] JIANG Y J, UMEMURA A, LAW C K. An experimental investigation on the collision behaviour of hydrocarbon droplets [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1992, 234: 171-190.
- [17] KROPOTOVA S S, SHLEGEL' N E, STRIZHAK P A. Collisions of liquid droplets in a flow of flue gases [J]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2023, 96(2): 328-337.
- [18] PLANCHETTE C, LORENCEAU E, BRENN G. Liquid encapsulation by binary collisions of immiscible liquid drops [J]. *Colloids and Surfaces: A Physicochemical and Engineering Aspects*, 2010, 365(1/3): 89-94.
- [19] FOCKE C, KUSCHEL M, SOMMERFELD M, et al. Collision between high and low viscosity droplets: direct numerical simulations and experiments [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2013, 56: 81-92.
- [20] 贾飞飞. 马拉高尼效应对液滴碰撞混合的影响 [D]. 天津: 天津大学, 2021.
- [21] 刘栋. 液滴碰撞及其融合过程的数值模拟研究 [D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [22] 梁杨杨, 孙中国, 席光. 液滴斜向撞击液面的移动粒子半隐式法数值模拟 [J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(9): 93-98.
- LIANG Yangyang, SUN Zhongguo, XI Guang. Numerical simulation of droplet oblique impact on liquid film with moving particle semi-implicit method [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(9): 93-98.
- [23] 张帅, 解利军, 郑耀. 基于移动粒子半隐式法的表面张力模拟 [J]. *计算力学学报*, 2011, 28(3): 345-349.
- ZHANG Shuai, XIE Lijun, ZHENG Yao. Simulation of surface tension force using moving particle semi-implicit method [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2011, 28(3): 345-349.
- [24] KOSHIZUKA S, OKA Y. Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid [J]. *Nuclear Science and Engineering*, 1996, 123(3): 421-434.
- [25] 崔龙豪, 孙一颢, 周子棋, 等. 双股射流撞击雾化的无网格 MPS 法数值研究 [J]. *工程热物理学报*, 2024, 45(5): 1385-1394.
- CUI Longhao, SUN Yijie, ZHOU Ziqi, et al. Numerical study of double jet impact atomization using meshless MPS method [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2024, 45(5): 1385-1394.
- [26] 倪妮, 孙中国, 陈啸, 等. 单液膜气泡聚并和连接过程的移动粒子半隐式法数值模拟 [J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(12): 156-162.
- NI Ni, SUN Zhongguo, CHEN Xiao, et al. Numerical simulation of moving particle semi-implicit method for single-film bubbles coalescence and connection [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(12): 156-162.
- [27] KONDO M, KOSHIZUKA S, SUZUKI K, et al. Surface tension model using inter-particle force in particle method [C]//ASME/JSME 2007 5th Joint Fluids Engineering Conference. New York, NY, USA: ASME, 2007: 93-98.
- [28] LIU Qixin, SUN Zhongguo, SUN Yijie, et al. Symmetric boundary condition for the MPS method with surface tension model [J]. *Computers & Fluids*, 2022, 235: 105283.
- [29] 陈啸, 孙中国, 席光. 表面自由能模型的改进及液滴浸润数值研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2012, 46(7): 115-121.
- CHEN Xiao, SUN Zhongguo, XI Guang. Improvement of surface tension model and numerical investigation on droplet wetting effect [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, 46(7): 115-121.
- [30] ZHU Yingzi, QIU Zhifang, XIONG Jinbiao, et al. Verification and validation of MPS potential force interface tension model for stratification simulation [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2020, 148: 107753.

(编辑 杜秀杰)