DOI: 10.3901/JME.2020.17.216

气流对含气泡油滴撞壁铺展流动过程的影响*

童宝宏¹ 苏家磊¹ 张国涛¹ 郑楠¹ 郭丹² 王伟³ 刘焜³

(1. 安徽工业大学机械工程学院 马鞍山 243032;

2. 清华大学摩擦学国家重点实验室 北京 100084;

3. 合肥工业大学机械工程学院 合肥 230009)

摘要: 油-气润滑系统工作过程中, 有效的润滑油膜是确保摩擦副润滑效果的关键, 其形成质量与输送气流作用下含气泡油滴撞壁后的铺展流动过程密切相关。为探索该铺展流动过程, 基于 VOF (Volume of fluid) 方法对输送气流作用下含气泡油滴的撞壁过程进行数值模拟研究。观察了输送气流作用下含气泡油滴撞壁后的铺展流动过程, 探讨了气流入射角及碰撞-气流速度比对含气泡油滴铺展特性的影响, 分析了铺展过程中的气泡破裂及中心射流机制。发现当气流方向与含气泡油滴碰撞方向(竖直方向)存在差异时, 含气泡油滴撞壁后在 x 方向的铺展呈非对称性。随着气流入射角的减小, 非对称铺展现象越明显。碰撞-气流速度比增大时, 非对称铺展现象减弱。碰撞速度较低(碰撞-气流速度比小于 4)时含气泡油滴撞壁后, 上侧油膜厚度不断减小直至达到极限值, 最终在气流拖曳力、黏性剪切力及表面张力的共同作用下发生破裂。碰撞速度较高(碰撞-气流速度比等于 4)时含气泡油滴撞壁后, 其内部产生的速度涡旋致使部分铺展油液向气泡底部汇聚, 中心射流得以形成。中心射流逐步发展直至穿透上侧油膜, 气泡发生破裂。之后, 气泡两侧油膜发生破碎并形成膜油滴, 壁面油膜逐渐收缩成油膜层。

关键词: 气流; 含气泡油滴; 碰撞; 非对称铺展; VOF

中图分类号: O359

Effect of Airflow on the Spreading Process of Hollow Oil Droplets after Wall Impacting

TONG Baohong¹ SU Jialei¹ ZHANG Guotao¹ ZHENG Nan¹ GUO Dan²
WANG Wei³ LIU Kun³

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032;

2. State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084;

3. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract: In the oil-air lubrication system, the effective lubrication film is the key to ensure the lubrication effect, and its formation quality is closely related to the spreading flow process of the hollow oil droplets impacting the wall in the conveying airflow. To explore the spreading flow process, the VOF method is adapted to numerically simulate the wall impact process of the hollow oil droplet in the conveying airflow. The spreading process is observed, the effects of incident angle and collision-airflow velocity ratio on the spreading characteristics are discussed, and the bubble breakdown and central jet mechanism in the spreading process are analyzed. It is found that when the airflow direction is different from the collision direction (vertical direction) of the hollow oil droplet, the spread of the hollow oil droplet in the x direction is asymmetric. With the decrease of the incidence angle, the asymmetric spreading becomes more obvious. When the velocity ratio of collision-airflow increases, the phenomenon decreases. At lower collision velocity (collision-airflow velocity ratio less than 4), the oil film thickness upper side of the bubble decreases to the limit in the spreading process, and finally the bubble ruptures under the combined action of airflow drag force, viscous shear force and surface tension. At higher collision velocity (collision-airflow velocity ratio equal to 4), the velocity vortices generated inside the droplets

* 国家自然科学基金(51975005, 51975174, 51875152, 51875154)、清华大学摩擦学国家重点开放基金(SKLTkf17B01)和安徽省自然科学基金(2008085ME148, 1908085QE195)资助项目。20190919 收到初稿, 20200416 收到修改稿

after wall impact cause part of the spreading oil to converge to the bottom of the bubble, and the central jet is formed. With the further development of the central jet, it penetrates the oil film on the upper side of the bubble and the bubble bursts. After that, the oil film on both sides of the bubble breaks up and forms film droplets, and the oil film on the wall gradually shrinks to form oil film layer.

Key words: airflow; hollow oil droplet; impact; asymmetric; VOF

0 前言

液滴撞壁是一种经典的物理现象, 普遍存在于自然界、农业及工业生产^[1-3]中, 同样存在于油-气微量润滑系统中。油-气润滑作为一种有效的润滑技术被广泛应用于工业生产中。该系统工作时, 润滑油在输送管道内与气流相互扰动生成气穴, 部分空气以微气泡的形式滞留在润滑油中。当润滑油以精细油滴形式脱离输送管道时, 部分气泡滞留在精细油滴中形成含气泡油滴。含气泡油滴在输送气流作用下与润滑接触表面再次发生碰撞, 最终经过铺展、气泡破裂等动力学行为后形成润滑油膜。有效的润滑油膜是确保摩擦副润滑效果的关键, 其形成质量与精细油滴撞壁后的铺展流动过程密切相关。研究输送气流作用下含气泡油滴撞壁后的铺展流动过程对于查明润滑油膜的形成机制具有重要意义。

近年来, 关于黏度^[4]、表面张力^[5]、壁面湿润性^[6]及壁面粗糙度^[7]等液滴自身物性和壁面特性对液滴撞壁现象的研究随着计算机及高速摄像技术的快速发展取得了重大进步。国内外学者就外界干扰因素如气体对液滴在壁面处运动的影响进行了系统研究。如 DIAZ 等^[8]对气体辅助下液滴撞击固体表面的动态行为进行了实验、数值和理论研究, 结果表明, 当气体韦伯数较大及其所做压力功大于动能 10% 时, 液滴的扩散阶段受气流影响显著。FAN 等^[9]试验研究了气流作用下液滴在表面的运动过程, 揭示了气流驱动下液滴的三种运动模式, 分别为液滴保持与原液滴相似的运动形态、液滴留有一条与主液滴运动速度相同的尾迹和液滴留有大范围尾迹且尾迹破碎成小液滴。微气泡作为气体的另外一种存在形式, 同样对液滴撞壁后的物理过程有重要影响。当气泡存在于液滴内部时, 含气泡液滴撞壁后展现出与实心液滴不同的水动力特性。GULYAEV 等^[10-11]对中空甘油滴与平面的碰撞进行了实验及数值模拟研究, 发现了中心射流现象并分析了其产生的机理。郑志伟等^[12]数值模拟了中空液滴撞壁行为, 探讨了碰撞速度和壁面浸润性对射流长度的影响。周剑宏等^[13-14]对微气泡扰动油滴撞击油膜过程进行了数值模拟, 研究了微气泡对润滑油膜形成过程的干扰机制。

综上所述, 气体对液滴与壁面的撞击作用过程有着不可忽视的影响。油-气润滑系统工作时, 输送气流作用于含气泡微油滴撞壁后的铺展流动, 扰动壁面油膜的形成, 从而影响摩擦副润滑效果。为研究输送气流对含气泡油滴撞壁后铺展流动过程的作用机制, 本文基于 VOF 方法对输送气流作用下含气泡油滴撞壁过程进行数值模拟, 考察气流入射角及碰撞-气流速度比等参数对气流作用下含气泡油滴铺展过程的影响, 研究该过程中的气泡破裂及中心射流等微观流动现象, 为深入理解微液滴撞壁动力学现象及润滑油膜形成机理提供理论参考。

1 数值模型和 VOF 方法

1.1 基本方程

气流作用下含气泡油滴撞壁后的形态演化是一种典型的自由表面流动问题, VOF^[15-16]作为一种有效的界面追踪方法, 被广泛应用于自由表面流动问题的数值求解中。

在 VOF 方法中, 通过计算各时刻流体相在各个网格中所占体积分数来构建和追踪相界面。流体体积函数 β_i 为

$$\beta_i(x, y, z, t) = \begin{cases} 0 & \\ 0 \sim 1 & \\ 1 & \end{cases} \quad (1)$$

β_i 等于 1 时, 目标区域充满液体; β_i 等于 0 时, 目标区域充满气体; β_i 等于 0~1 之间时, 目标区域处于气液界面处。

采用连续方程、质量方程及动量方程对油滴撞壁及多相流进行建模分析, 方程分别为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_i \rho_i) + \nabla \cdot (\beta_i \rho_i \mathbf{u}_i) = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\text{grad}p + \mu \cdot \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} + F_{SF} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{u}=(u, v, w)$ 为速度矢量; p 为静态压力; F_{SF} 为由表面张力产生的动量源项; ρ 和 μ 为平均密度和动力黏度, 由下式计算

$$\rho = \rho_g + \beta_l(\rho_l - \rho_g) \quad (5)$$

$$\mu = \mu_g + \beta_l(\mu_l - \mu_g) \quad (6)$$

式中, 下标 g 和 l 分别代表气相和液相。

本文考虑了气液界面间的表面张力作用, 根据 BRACKBILL 等提出的连续表面力模型 CSF (Continuum surface force) 将液体表面的表面张力转化为体积力进行求解

$$F_{SF} = \sigma \kappa_i \frac{\rho \nabla \beta_i}{\frac{1}{2}(\rho_g + \rho_l)} \quad (7)$$

式中, σ 为表面张力系数; κ_i 为界面曲率, $\kappa_i = \nabla \cdot (n/|n|)$, $n = \nabla \beta_i$ 。

1.2 方法可行性验证

由于微小尺寸液滴及气泡的生产和调控十分复杂, 液滴撞壁试验研究多以毫米级的大液滴为主^[7,15]。本研究背景下的微液滴多为微米级及亚毫米级, 同时需要在该微液滴内部添加一定尺寸的气泡。试验研究手段尚不够成熟, 而借助多相流体力学数值模拟研究方法在理论上具有很高可行性的^[3, 17]。参照已有液滴撞壁数值研究思路^[12, 15], 检验数值模拟研究方法可行性。为检验基于 VOF 方法数值模拟的可行性, 数值计算含气泡油滴撞壁实验过程。数值计算时, 首先通过有限体积法对控制方程进行离散, 然后采用 PISO 方法对压力速度进行耦合, 其次运用 PRESTO 方法对压力进行求解, 最终采用几何重构方法对气液界面进行捕捉。数值计算结束后, 将该数值模拟结果与文献[11]中已有的试验结果进行对比。

图 1 和表 1 展示了中空甘油滴撞壁的试验结果与数值模拟结果对比情况。其中, 甘油滴直径为 5.25 mm, 气泡直径为 4.389 mm, 中空甘油滴碰撞速度为 5.94 m/s。

图 1 中空液滴形态

从图 1 可看出, 中空甘油滴撞壁后发生“液滴铺展-中心射流-液膜破碎”的形态演化过程, 数值模拟结果和试验结果吻合度较好。从表 1 可以发现, 相同时刻下数值模拟结果的中心射流高度与试验结果相比存在误差, 该相对误差小于 13.14%。

总体看来, VOF 方法能较为准确地模拟含气泡液滴的撞壁过程, 本文将采用此方法对输送气流作用下含气泡油滴撞壁行为进行三维数值模拟。

表 1 中心射流高度

时间 t/ms	高度试验值 L_{exp}/mm	高度模拟值 L_{sim}/mm	误差(%)
0.8	1.946	1.809	7.04
1.2	2.730	2.513	7.95
1.6	3.135	3.167	1.02
2.0	4.081	3.900	4.44
2.4	5.351	4.648	13.14
2.8	5.946	5.351	10.00
3.2	6.838	5.987	12.45

1.3 数值模型及参数定义

基于 VOF 方法对含气泡液滴撞壁现象进行数值模拟具有可行性, 采用此方法可以对一定工况下的液滴撞壁过程进行数值模拟。针对工况进行数值模拟设计及计算, 其数值计算结果符合相应工况。

图 2 为输送气流作用下含气泡油滴撞壁模型及相应边界条件示意图。通过 CFD (Computational fluid dynamics) 前处理软件 ICEM (Integrated computer engineering and manufacturing code) CFD 划分长宽高分别为 600 μm 、100 μm 、250 μm 的 1/2 三维对称数值计算域。对各边界面施加相应的边界条件, 设置上边界面为速度入口, 设置正前边界面为对称, 设置两个侧面及正后面边界面为压力出口, 设置底面边界面为壁面。然后为减小整体网格数对计算域进行块划分, 划分出主要碰撞区域, 对主要碰撞区域进行网格划分。将划分好的网格导入到 Fulent 10.0 流体计算软件中进行数值计算。在油-气润滑系统工作时, 润滑油以精细油滴形式离开喷嘴, 在气流作用下与壁面发生碰撞。在油滴与壁面发生碰撞前, 油滴受气流及空气阻力等干扰产生各种运动, 例如碰撞及融合等。油滴形态存在差异, 比如椭球形、球形及饼状等。油滴撞壁后, 油滴产生各种运动, 如油滴发生反弹运动后产生二次撞壁现象, 二次撞壁油滴受初始条件影响减小。撞壁油滴形态随机性很大, 存在球形油滴撞壁现象。设置撞击初始时刻油滴为球形且其下侧刚与壁面接触, 气泡位于油滴中心。令气流速度为 U_g 、气流方向与水平方向的夹角 θ 为气流入射角, 含气泡油滴碰撞速度为 U_l 。

当油-气润滑系统应用于不同工况时, 油滴尺寸和气流速度等参数也会产生改变。当油-气润滑技术应用于纸机轴承时供气速度在 15 m/s 左右,

当油-气润滑技术应用于航空中时供气速度在 110 m/s 左右, 油滴尺寸基本为微米级及亚毫米级。为使研究结果具有一般性, 在数值计算时将油滴尺寸设为 100 μm , 气流速度设为 2.5~20 m/s, 碰撞速度设为 5 m/s。润滑油密度为 820 kg/m^3 , 润滑油动力黏度为 0.01 $\text{Pa} \cdot \text{s}$, 表面张力系数为 0.032 N/m 。由于液滴撞壁后在铺展流动过程中其与壁面间的接触角是动态变化的, 该动态变化极难确定。因此, 在多数数值研究中将液滴与壁面间的接触角设为静态接触角。通过参照多数文献[18-20]中将壁面接触角设置为静态接触角的方案, 设置静态接触角为 90° 。

图2 模型示意图

为更好地分析气流对含气泡油滴撞壁铺展流动过程的影响, 引入并定义相关参数, 如图3所示。

图3 参数定义

定义撞击点为坐标原点 o , a 点为迎风侧三相接触点, b 点为背风侧三相接触点。引入相关物理参数

$$T = \frac{U_l t}{2r} \quad l_x = x_a - x_b \quad (8)$$

$$U^* = \frac{U_g}{U_l} \quad l^* = \frac{l_x}{l_y} \quad (9)$$

式中, T 表示无量纲运动时间; U_l 为油滴碰撞速度; t 表示油滴运动时间; r 表示油滴半径; l_x 表示油滴 x 方向铺展长度; U^* 表示碰撞-气流速度比; U_g 为气流速度; l^* 表示非对称铺展程度即油滴 x 方向和 y 方向的湿润长度比; l_y 表示油滴 y 方向铺展长度。

1.4 网格无关性

网格设置是数值模拟的重要环节, 网格大小的不同会导致气-液界面形态及计算效率的巨大差异。为精确捕捉气-液界面形态变化及提高计算效率, 对主要碰撞区域网格进行无关性讨论。在网格划分过程中, 先采用六面体结构网格对整体计算域进行网格划分, 然后对油滴与壁面的主要碰撞区域进行网格加密。分别采用每 0.1 mm 50 个、80 个、120 个、150 个网格的不同划分方式对主要碰撞区域进行网格划分。网格尺寸分别为 0.002 mm、0.0015 mm、0.001 mm、0.0008 mm。图4给出了网格尺寸不同时输送气流作用下含气泡油滴铺展长度 l_x 随时间的变化情况。其中, 气流入射角为 45° , 气流速度为 5 m/s, 碰撞速度为 5 m/s。

图4 不同网格下的铺展长度对比

从图4可以看出, 网格尺寸对油滴撞壁后的铺展长度有着明显的影响。网格尺寸为 0.002 mm 及 0.0015 mm 的铺展长度与网格尺寸为 0.001 mm 及 0.0008 mm 相比存在较大差距, 而网格尺寸为 0.001 mm 及 0.0008 mm 的铺展长度随时间的变化规律基本相同。在保证数值计算结果具有参考意义的同时考虑计算效率, 本文选取尺寸为 0.001 mm 的网格对主要碰撞区域进行划分。

2 结果与讨论

2.1 气流入射角对铺展特性的影响

图5展示了无气流及气流入射角 θ 为 0° 、 45° 及 90° 条件下含气泡油滴撞壁后的形态演化过程。

图6为铺展系数随量纲一时间 T 的变化过程对比图。其中,气流速度为5 m/s,碰撞速度为5 m/s。

图5 不同气流入射角下的含气泡油滴撞壁形态

由图5a和5b可以看出,气流入射角 θ 为 90° 时,与无气流条件相比含气泡油滴撞壁后除气泡的破裂时刻及油滴的铺展直径有所差异外铺展形态的变化基本相同。油滴与壁面发生碰撞后,在壁面呈对称铺展。气泡上侧油膜厚度随着油滴的铺展不断减小,在其厚度达到极限值时气泡发生破裂。气泡两侧油膜发生破碎,在表面张力作用下于铺展油

图6 不同气流入射角下的含气泡油滴铺展系数

膜正上方形成膜油滴。从图5c和5d可以看出,气流入射角 θ 分别为 45° 和 0° 时,含气泡油滴撞壁后迎风侧油膜的铺展长度与背风侧油膜相比较短,油滴在壁面 x 方向呈非对称铺展。随铺展过程的推进,油滴变形更为剧烈,气泡上侧油膜厚度不断减小直至气泡破裂。气泡两侧油膜发生破碎并形成膜油滴,膜油滴产生气流方向的运动。

从图6a可以看出,气流入射角 θ 为 90° 时,含气泡油滴 x 方向的铺展系数在坐标两侧大小相等且较大。该现象产生的原因为,气流入射角 θ 为 90° 时,气流在竖直方向上作用于含气泡油滴撞壁过程,对含气泡油滴产生竖直向下作用力,增加了油滴撞壁的惯性力,使得撞壁后的铺展势能增加。气流入射角 θ 小于 90° 时,油滴迎风侧铺展系数与无气流条件相比较小,背风侧铺展系数则较大。随着气流入射角 θ 的减小,迎风侧铺展系数减小,背风侧铺展系数增大。主要原因为,气流入射角 θ 小于 90° 时,气流产生 x 负方向的横向拖曳力。该拖曳力阻碍了迎风侧油膜的铺展,推动了背风侧油膜的铺展,使得两侧铺展系数差值较大。此外,气流入射角 θ 减小时,气流所产生的 x 负方向横向拖曳力增大,迎风侧及背风侧油膜的铺展受气流影响更明显。

从图6b中可以看出,气流入射角 θ 为 90° 时,含气泡油滴撞壁后的湿润长度比 l^* 随量纲一时间 T 的变化规律与无气流条件一致且恒等于1,油滴在壁面上呈对称铺展。当气流入射角 θ 小于 90° 时,湿润长度比 l^* 大于1,油滴在壁面呈非对称铺展。随着气流入射角度 θ 的减小,湿润长度比 l^* 越大,非对称铺展现象越明显。分析其原因为,气流入射角 θ 为 90° ,气流竖直作用于含气泡油滴的铺展流动,各方向油膜的铺展受气流作用相同, x 方向及 y 方向的铺展长度相等,致使该入射角下油滴的湿润长度比 l^* 与无气流保持相等且恒等于1。气流入

(a) 不同气流入射角 θ 下的 x 方向铺展系数

射角 θ 小于 90° 时, 气流产生了 x 负方向的横向拖曳力, 含气泡油滴 x 方向的铺展受气流拖曳, 铺展油膜变得细长。 y 方向的铺展长度与 x 方向相比差距较大, 因此油滴的湿润长度比 l^* 大于 1。此外, 随着气流入射角 θ 的减小, 气流所产生的 x 负方向横向拖曳力增大, 油滴在 x 方向的铺展受气流影响更加显著, x 方向与 y 方向的铺展长度差值增大, 湿润长度比 l^* 增大。

可见, 气流入射角对含气泡油滴撞壁后的铺展流动有着不可忽视的影响。气流方向与油滴碰撞方向(竖直方向)不一致时, 气流对含气泡油滴产生横向拖曳力, 致使油滴在壁面产生 x 方向的非对称铺展现象。此外, 随着气流入射角的减小, 非对称铺展现象越显著。

2.2 速度竞争下的铺展特性分析

为了解碰撞-气流速度竞争下含气泡油滴撞壁后的铺展特性, 将碰撞-气流速度比 U^* 为 0.5、1、2、4 的含气泡油滴撞壁后的相图及铺展特性参数进行对比分析, 如图 7 和 8 所示。此时, 气流入射角 θ 为 45° , 气流速度为 5 m/s。

图 7 不同碰撞-气流速度比下的含气泡油滴撞壁形态图

图 8 不同碰撞-气流速度比下的含气泡油滴铺展系数

由图 7a 和 7b 可以看出, 碰撞-气流速度比 U^* 为 0.5 和 1 时, 当迎风侧油膜停止铺展运动时背风侧油膜仍继续铺展, 迎风侧及背风侧油膜间的铺展长度差值增大, 油滴在壁面的非对称铺展现象明显。铺展过程中, 油滴产生横向的拉伸形变, 其高度降低, 气泡上侧油膜厚度不断减小, 气泡最终发生破裂。从图 7c 和 7d 中可以看出, 碰撞-气流速度比 U^* 为 2 和 4 时, 迎风侧及背风侧铺展油膜开始收缩的时刻基本相同, 两侧油膜的铺展长度差值较小, 非对称铺展现象微弱。此外, 碰撞-气流速度比 U^* 为 4 时, 含气泡油滴撞壁后产生的中心射流穿透气泡上侧油膜, 气泡发生破裂。

从图 8a 可以看出, 碰撞-气流速度比 U^* 为 0.5、1 和 2 时, 含气泡油滴撞壁后 x 方向的铺展规律较为相似, 迎风侧铺展系数与无气流相比较小, 背风侧铺展系数与无气流相比较大。碰撞-气流速度比 U^* 为 4 时, 迎风侧及背风侧铺展系数皆较大大于无气流条件。此外, 随着碰撞-气流速度比 U^* 的增大, 油滴撞壁后迎风侧的铺展系数增大, 背风侧铺展系数减小。研究认为, 碰撞-气流速度比 U^* 增大时, 含气泡油滴撞壁后的铺展势能增加, 气流所产生的 x 负方向横向拖曳力影响减小。迎风侧油液的铺展受阻碍作用减小, 铺展系数增大。背风侧油

液的铺展受推动作用减小, 铺展系数减小。

从图 8b 可以看出, 碰撞-气流速度比 U^* 为 2 和 4 时, 油滴撞壁后的湿润长度比 l^* 略大于 1。而当碰撞-气流速度比 U^* 为 0.5 和 1 时, 油滴撞壁后的湿润长度比 l^* 与 1 相比差值较大。分析认为, 碰撞-气流速度比 U^* 增大时, 含气泡油滴的惯性力增大, 油滴在壁面的铺展势能增加, 油滴受气流影响减弱。油滴撞壁后迎风侧及背风侧铺展油膜开始收缩的时刻差值缩短, x 方向和 y 方向的铺展长度差值减小, 湿润长度比 l^* 减小。

碰撞速度相对气流速度发生变化时, 两速度差异引起速度竞争效应。碰撞-气流速度比增大时, 含气泡油滴撞壁后的铺展势能增大, 气流对铺展过程的影响减小, 非对称性铺展现象减弱。此外, 碰撞-气流速度比不同时, 输送气流作用下含气泡油滴铺展过程中的气泡破裂方式有两种, 分别为气泡上侧油膜厚度达到极限值时气泡发生破裂和中心射流穿透气泡上侧油膜时气泡发生破裂。

2.3 铺展过程中的气泡破裂机制

输送气流作用下含气泡油滴撞壁后, 随着含气泡油滴铺展过程的推进, 油滴变形不断加剧, 气泡上侧油膜厚度不断减小。图 9 展示了气泡破裂前后 x - o - z 剖面的速度云图。其中, 气流入射角为 45° , 碰撞速度为 5 m/s。

从图 9a 可以看出, $27.2 \mu\text{s}$ 时, 气泡上侧油膜较薄, 气液界面变得不稳定并出现明显的毛细波, 气泡上侧油膜左右两侧形成明显的颈部区域。上侧油膜内外的速度矢量方向存在差异, 油膜受 x 负方向的横向拖曳。同时, 油膜在横向上存在明显的速度梯度, 其厚度不断减小。从图 9b 可以看出, $27.5 \mu\text{s}$ 时, 右侧颈部区域油液速度为 1.71 m/s, 左侧颈部区域油液速度为 5.85 m/s, 左侧颈部区域油膜厚度的减小速度更快。从图 9c 可以看出, $27.8 \mu\text{s}$ 时, 气泡发生破裂, 破裂位置首先出现在左侧颈部区域。

图9 气泡破裂前后速度分布

油滴在气流拖曳力及黏性剪切力作用下发生拉伸变形, 气泡上侧油膜厚度不断减小。当该油膜厚度达到极限值时, 气泡在气流拖曳力、黏性剪切力及表面张力的共同作用下发生破裂。

2.4 铺展过程中的中心射流现象及形成机制

随着含气泡油滴撞壁速度的增大, 其拥有的惯性力增大。含气泡油滴撞壁后在壁面铺展, 部分铺展油液向气泡底部汇聚, 从而产生中心射流现象。图 10 给出了油滴与壁面发生碰撞后 x - o - z 剖面的速

图10 中心射流速度矢量图

度矢量图。其中, 碰撞-气流速度比 U^* 为 4。0.5 μs 时, 含气泡油滴刚开始与壁面接触, 气泡正下方速度迅速降低。气泡内部左侧的速度矢量方向为倾斜向下, 气泡内部右侧的速度矢量方向为竖直向下, 而在气泡的下气-液界面的速度矢量方向为斜向上, 并且在气泡内部存在较大的速度梯度, 气泡逐渐发生形变。1 μs 时, 在气泡内部右下侧及气泡外侧左下方形成速度涡旋, 速度涡旋的存在改变了周边油液的流动方向, 原本用于铺展的部分油液向气泡底部汇聚。同时, 气泡下气-液界面油液速度较大且方向为斜向上, 气泡下界面缓慢凸起。在 1~3 μs 期间, 在速度涡旋的作用下油液不断流向气泡底部, 中心射流逐渐形成。中心射流持续发展, 最终穿透上侧油膜, 气泡发生破裂。之后, 中心射流的动能在气流阻碍及黏性耗散作用下持续减小, 其高度不断降低直至为零。

含气泡油滴撞壁后, 其内部产生速度涡旋。该涡旋使部分铺展油液向气泡底部汇集, 促使中心射流现象的产生。

3 结论

(1) 与无气流条件相比, 输送气流方向对含气泡油滴撞壁后的铺展过程存在不可忽视的影响。气流方向与含气泡油滴碰撞方向有所差异时, 含气泡油滴撞壁后在 x 方向呈非对称铺展。且随着气流入射角的减小, 非对称铺展现象更为明显。

(2) 碰撞与气流速度的差异引起速度竞争效应, 对含气泡油滴的铺展过程有着十分重要的影响。碰撞-气流速度比增大时, 油滴在壁面铺展的非对称性减弱。此外, 气泡由上侧油膜厚度达到极限值时破裂的方式向中心射流穿透气泡上侧油膜时破裂的方式过渡。

(3) 输送气流作用下含气泡油滴撞壁后, 在气流拖曳力及黏性剪切力作用下发生横向的拉伸形变。气泡上侧油膜厚度不断减小, 最终气泡在气流拖曳力、黏性剪切力及表面张力作用下发生破裂。

(4) 碰撞速度增大时, 输送气流作用下含气泡油滴撞壁后, 其内部产生速度涡旋。该涡旋改变气泡底部油液的运动方向, 促使油液向气泡底部汇聚, 从而产生中心射流现象。

参 考 文 献

- [1] YILBAS B S, HASSAN G, AL-SHAH-Sharafi A, et al. Water droplet dynamics on a hydrophobic surface in relation to the self-cleaning of environmental dust[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 2984.
- [2] ZHANG G, QUETZERI-SANTIAGO M A, STONE C A, et al. Droplet impact dynamics on textiles[J]. Soft Matter, 2018, 14: 8182-8190.
- [3] LI H Z, FANG W, LI Y N, et al. Spontaneous droplets gyrating via asymmetric self-splitting on heterogeneous surfaces[J]. Nature Communications, 2019, 10: 950.
- [4] BOELEN A M P, DE P J J. Simulations of splashing high and low viscosity droplets[J]. Physics of Fluids, 2018, 30(7): 072106.
- [5] BAEK S, MOON H S, KIM W, et al. Effect of liquid droplet surface tension on impact dynamics over hierarchical nanostructure surfaces[J]. Nanoscale, 2018, 10: 17842-17851.
- [6] XIE J, XU J L, SHANG W, et al. Mode selection between sliding and rolling for droplet on inclined surface: Effect of surface wettability[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 122: 45-58.
- [7] TANG C L, QIN M X, WENG X Y, et al. Dynamics of droplet impact on solid surface with different roughness[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2017, 96: 56-69.
- [8] DIAZ A J, ORTEGA A. Gas-assisted droplet impact on a solid surface[J]. Journal of Fluids Engineering, 2016, 138(8): 081104.
- [9] FAN J, WILSON M C T, KAPUR N. Displacement of liquid droplets on a surface by a shearing air flow[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2011, 356(1): 286-292.
- [10] GULYAEV I P, SOLOMONENKO O P, GULYAEV P Y, et al. Hydrodynamic features of the impact of a hollow spherical drop on a flat surface[J]. Technical Physics Letters, 2009, 35(10): 885-888.
- [11] GULYAEV I P, SOLOMONENKO O P. Hollow droplets impacting onto a solid surface[J]. Experiments in Fluids, 2013, 54(1): 1432-1443.
- [12] 郑志伟, 李大树, 仇性启, 等. 中空液滴碰撞水平壁面数值分析[J]. 物理学报, 2017, 66(1): 235-244. ZHENG Zhiwei, LI Dashu, QIU Xingqi, et al. Numerical analysis of hollow droplet impact on a flat surface[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(1): 235-244.
- [13] 周剑宏, 童宝宏, 王伟, 等. 含气泡油滴撞击油膜壁面时气泡的变形与破裂. 力学学报, 2018, 50(2): 427-437.

[1] YILBAS B S, HASSAN G, AL-SHAH-Sharafi A, et al. Water droplet dynamics on a hydrophobic surface in

- ZHOU Jianghong, TONG Baohong, WANG Wei, et al. Deformation and rupture of bubble when the hollow droplet impacts on the oil film[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, 50(2): 427-437.
- [14] ZHOU J H, TONG B H, WANG W, et al. Numerical simulation of bubble changes in an oil film impacted by oil droplets via a coupled level set and volume-of-fraction method[J]. Fluid Dynamics Research, 2019, 51: 025502.
- [15] 方龙, 陈国定, 刘登. 喷射油滴沉积油膜的流动铺展特性研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(23): 160-167.
FANG Long, CHEN Guoding, LIU Deng. Study on flow characteristics of deposited oil film formed by sprayed oil droplets[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(23): 160-167.
- [16] LV M, NING Z, SUN C H. Numerical simulation of cavitation bubble collapse within a droplet[J]. Computers and Fluids, 2017, 152: 157-163.
- [17] BOELEN A M P, DE P J J. Simulations of splashing high and low viscosity droplets[J]. Physics of Fluids, 2018, 30(7): 072106.
- [18] GUO Y L, SHEN S Q, QUAN S L. Numerical simulation of dynamics of droplet impact on heated flat solid surface[J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2013, 8(2): 134-139.
- [19] DENG L D, WANG H, ZHUN X, et al. Numerical study of water droplets impacting on cylindrical heat transfer pipes[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2018, 12(1): 598-610.
- [20] KUMAR A, GU S, KAMNIS S. Simulation of impact of a hollow droplet on a flat surface[J]. Applied Physics A, 2012, 109(1): 101-109.
-
- 作者简介: 童宝宏(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为流体流动与润滑力学、流-固界面力学行为与调控等。
E-mail: bhtong@ahut.edu.cn
苏家磊, 男, 1994 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为流体流动与润滑力学。
E-mail: su18955519668@163.com