

氮液滴碰撞不同浸润性壁面特性研究

张伟¹, 侯予¹, 薛绒¹, 张海洋², 宋远佳², 刘秀芳¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;
2. 中国空气动力研究与发展中心设备设计及测试技术研究所, 621000, 四川绵阳)

摘要: 为了探究氮液滴撞击不同浸润性壁面的行为特性,揭示其与常温工质液滴碰撞特性的差异,采用流体体积法研究了氮液滴以一定速度碰撞壁面接触角分别为 30°、90°、120°和 150°的壁面的过程,并将其与水滴碰撞特性进行对比。模拟计算结果表明:在接触角为 30°和 90°的壁面上,氮液滴和水滴均出现振荡行为,并且氮液滴在铺展阶段达到的铺展系数更大,在回缩阶段初始回缩速度不均匀,整体的振荡次数更少,达到稳定状态更缓慢;在接触角为 120°的壁面上,水滴出现振荡,氮液滴则完全反弹;在接触角为 150°的壁面上,相比水滴而言,氮液滴出现反弹行为所需的时间更长。

关键词: 氮液滴;振荡;反弹;接触角;流体体积法

中图分类号: TK121 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202107017 **文章编号:** 0253-987X(2021)07-0151-07



Research on the Behaviors of Nitrogen Droplets Impacting Surfaces with Different Wettabilities

QIANG Wei¹, HOU Yu¹, XUE Rong¹, ZHANG Haiyang², SONG Yuanjia², LIU Xiufang¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Facility Design and Instrumentation Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, Sichuan 621000, China)

Abstract: In order to explore the behaviors of nitrogen droplets impacting surfaces with different wettabilities and reveal the differences of the impact performance between nitrogen droplets and normal-temperature working fluid droplets, this paper adopts the volume of fluid method to study the process of nitrogen droplets impacting the walls with contact angles of 30°, 90°, 120° and 150° at a certain speed, and compares this process with that of water droplets. The results show that on the wall with contact angles of 30° and 90°, both the nitrogen droplets and water droplets exhibit oscillating behavior, but the nitrogen droplets have a larger spreading factor during the spreading stage; the initial retraction speed is uneven in the retraction stage, the overall oscillation frequency is lower and reaches slower to a stable state. On the wall with contact angle of 120°, the water droplets oscillate, but the nitrogen droplets rebound completely; on the wall with contact angle of 150°, it takes longer time for nitrogen droplets to rebound.

Keywords: nitrogen droplets; oscillation; rebound; contact angle; volume of fluid method

喷雾冷却技术在电子器件冷却、低温风洞领域有着广泛的应用。作为喷雾冷却技术的关键环节之一,液滴碰撞固体壁面后会出现沉积、飞溅、破碎和回弹等不同行为^[1],这些行为对于喷雾冷却的最终

效果和整个系统的可靠运行至关重要。

液滴碰撞壁面所呈现的行为特性非常复杂,液滴自身的物性、尺寸、初始速度,碰撞环境的温度、气流速度以及被碰撞壁面的粗糙度、润湿性、曲率等因素均会对其产生影响^[2-5]。学者们借助理论分析、数值模拟和实验研究等方法对液滴碰撞壁面的行为特性进行了大量的研究,相关的研究结论在综述文章[6-8]中有详细的介绍。

壁面的浸润性是影响液滴撞击壁面行为特性的关键因素之一。梁超等探究了水滴在不同浸润性壁面上的形态演变过程,结果表明固体壁面的浸润性对液滴撞击表面后形态的演化有较大影响,亲水壁面有利于液滴的铺展^[9]。Sahoo 等探究了壁面浸润性对水滴碰撞倾斜壁面后最大铺展系数的影响,结果表明,亲水表面和超疏水表面呈现出截然不同的趋势^[10]。现有的相关研究主要关注常温工质液滴,与常温工质相比,液氮表面张力和黏度、密度等物性参数低很多,表 1 给出了水和液氧在 0.1 MPa 对应饱和温度下物性参数的比较。因此,氮液滴在碰壁过程中可能呈现出与常温工质液滴迥然不同的动力学特性。

在低温风洞和电子器件冷却中,了解不同浸润性壁面上氮液滴的形态演变过程可为喷雾工况选择提供有效指导。目前,学者们对于液氮的喷雾特性^[11]以及氮液滴在高温壁面上碰撞时的相变过程^[12]有所关注,但对于单个氮液滴碰撞壁面的微观过程,尤其是碰撞不同浸润性壁面的研究鲜见报道。

为了探究氮液滴撞击不同浸润性壁面的行为特性,揭示其与常温工质液滴碰撞特性的差异,本文借助数值方法,对氮液滴在不同浸润性表面的碰撞结果进行了探究,对比了氮液滴和水滴各自在接触角分别为 30°、90°、120°和 150°壁面上的碰撞结果,并对氮液滴运动过程中的动力学特性进行了分析。

表 1 水和液氮在 0.1 MPa 对应饱和温度下的物性参数比较

Table 1 Comparison of physical properties between water and liquid nitrogen at corresponding saturation temperature of 0.1 MPa

工质	密度 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏度 $\mu/$ ($10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	表面张力系数 $\sigma/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$
水	998.20	10.0	0.073 0(对空气)
液氮	806.08	1.6	0.005 5(对氮气)

1 计算模型

本文重点探究液滴碰撞过程中的动力特性,对实际十分复杂的碰撞过程进行了适当简化,忽略液滴的换热及相变等过程以便于研究。模型设置中,针对实际电子器件相变喷雾冷却中的低速氮液滴,将液滴定义为初始直径是 D_0 (1.5 mm) 的球形,液滴在计算初始时刻与壁面相切,并以与标准重力加速度 (-9.8 m/s^{-2}) 方向相同的速度 U_0 (-0.5 m/s) 垂直向下撞击壁面。其中,氮液滴在碰撞过程中的环境气体为氮气,水滴在碰撞过程中的环境气体为空气;液滴初速度较小,在 0.1 MPa 的常压环境下,可以将液相视为不可压缩流体处理,且忽略气相对于液相的剪切力。

1.1 数值理论与方法

流体体积法 (VOF) 是网格法解决两相流问题时捕捉相界面的通用手段,通过体积分数和几何重构的方法,适用于各种工质^[13-14]。如 Yao 利用 VOF 法分析了水滴振荡行为^[15],周剑宏等利用 VOF 法探究了油滴碰壁时的气泡变形破裂^[16]。VOF 法通过引入相体积分数量实现了对每个计算单元内相界面的追踪。假设某单元内第 i 相流体的体积分数为 a_i ,则

$$\begin{cases} a_i = 0, \text{单元内无第 } i \text{ 相流体} \\ a_i = 1, \text{单元内充满第 } i \text{ 相流体} \\ 0 < a_i < 1, \text{单元内包含至少一个相界面} \end{cases}$$

a_i 的获得借助于求解相连续性方程

$$\frac{\partial a_i}{\partial t} + v_i \cdot \nabla a_i = \frac{S_{a_i}}{\rho_i} \tag{1}$$

式中 S_{a_i} 为质量源项。对整个计算域,求解动量方程、能量方程如下

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = \\ &-\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \nabla)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \end{aligned} \tag{2}$$

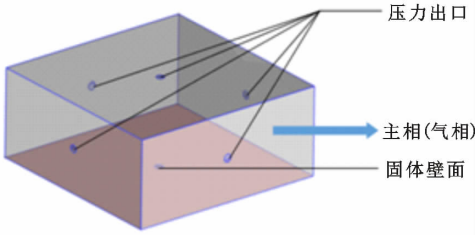
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\mathbf{v}(\rho E + p)] = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_h \tag{3}$$

式中: g 为重力加速度; k_{eff} 为有效热导率; S_h 为源项 (包括辐射及其他体积热源); E 为总能量。

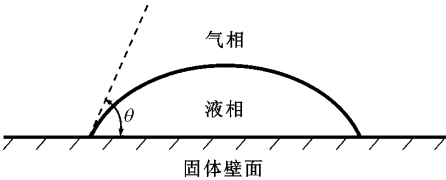
1.2 模型验证

模型边界条件如图 1 所示,本文的计算域为长方体,顶部及侧面边界均为压力出口,压力大小为 0.1 MPa,压力梯度为 0。底面边界为热流密度是 0 的绝热固体壁面,计算域内充满气体,且气体作为主

相。壁面的粗糙度为 0.5,不考虑滑移,但考虑了黏附作用。 Q 是壁面与液滴间的接触角。



(a) 计算域边界条件设置



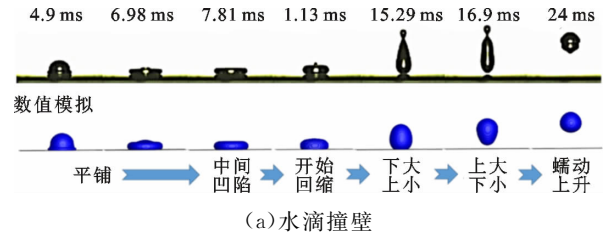
(b) 底部壁面黏附作用

图 1 模型边界条件

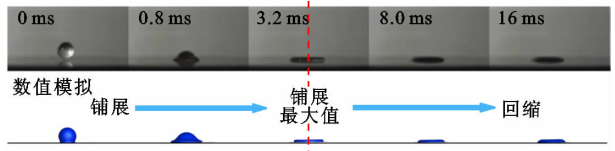
Fig. 1 Model boundary conditions

为保证计算域足够大,计算域为 10 mm×10 mm×5 mm 的立方体,采用均匀六面体结构化网格。在氮液滴碰壁计算中,经过无关性验证,确定网格数为 90 万,尺寸为 0.1 mm×0.1 mm×0.05 mm。

为了验证模型的准确性,本文首先将模拟和实验结果进行了比照。图 2a 给出了本文的模拟与实验^[9]的形态对比,在 0.1 MPa、200 K 环境下,直径为 2.6 mm、撞击壁面速度为 0.5 m/s 的水滴垂直向下碰撞接触角为 160°的憎水壁面,模拟结果在对应时刻先后出现了铺展、凹陷、回缩、拉伸及蠕动上升等行为,与实验结果一一对应。图 2b 在与液滴碰撞实验结果^[17] 对比时,运动趋势也分别对应,初步



(a) 水滴撞壁



(b) 油滴撞壁

图 2 水滴和油滴撞壁形态模拟与实验结果对比^[9-17]
Fig. 2 Simulation and experimental results^[9-17] of water droplets and oil droplets impacting the wall

证明了模型准确性。图 3 给出了本文模拟与实验结果^[18]在铺展过程中铺展系数的发展趋势对比情况,两条曲线趋势高度吻合,最大偏差不超过 10%,进一步证明了模型的可靠性。

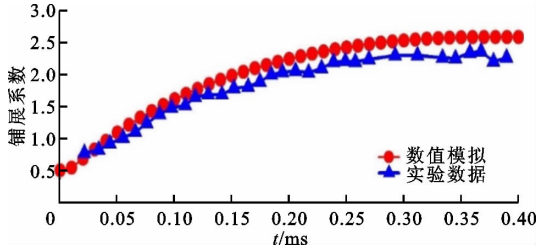


图 3 水滴铺展系数模拟与实验结果对比^[18]

Fig. 3 Simulation and experimental results^[18] of the water droplet spread factor

2 结果与分析

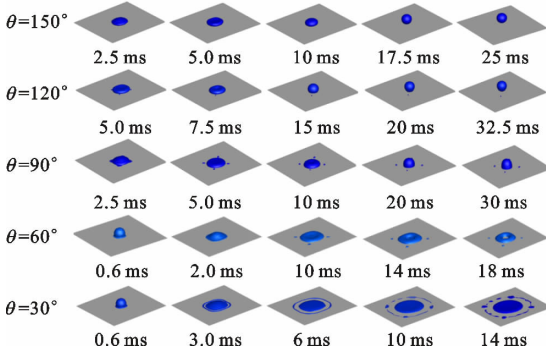
2.1 氮液滴在不同浸润性壁面上的行为表现

接触角 θ 是描述物体浸润性的重要特征参数。图 4 为氮液滴碰撞几种不同浸润性壁面的行为表现,氮液滴碰撞壁面后的不同形态分别为经过反复振荡后的铺展和直接反弹;壁面非浸润性随接触角增加不断增强,氮液滴铺展更加困难,因此氮液滴最大铺展系数不断减小、达到最大铺展系数的时间不断缩短。其中,铺展系数是指液滴在壁面上浸润面积的等效直径与液滴初始直径的比值,是一个无量纲数,计算方法如下

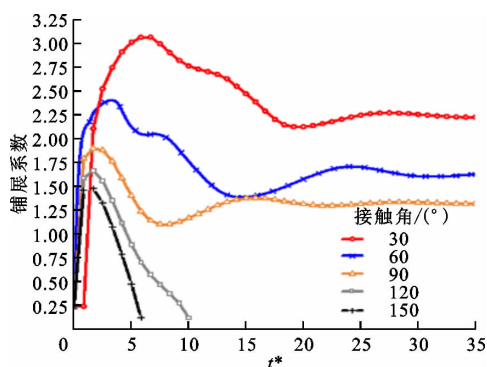
$$\beta = 2 \sqrt{\frac{S}{\pi}} \frac{1}{D_0} \quad (4)$$

式中: S 是液滴运动过程中在壁面接触浸润的面积。

在接触角为 120°和 150°的壁面上,氮液滴的铺展系数在终点时刻为 0,此时,液滴出现了反弹而并未出现振荡,这与图 4a 结果保持一致。本文无量纲时间是借助液滴的特征尺寸和速度,对实际的时间进行无量纲化得到的,表达式如下



(a) 形态变化



(b) 铺展系数随无量纲时间的变化趋势

图4 氮液滴在不同浸润性壁面上的碰撞特性

Fig. 4 Impact performance of nitrogen droplets on surfaces with different wettability

$$t^* = t \frac{U_0}{D_0} \quad (5)$$

为了更好地对氮液滴撞击不同浸润性表面的行为特性进行研究,本文将氮液滴在接触角分别为30°、90°、120°和150°壁面上碰撞的结果与水滴的结果进行了对比。

2.2 氮液滴碰撞接触角为30°和90°壁面

当氮液滴和水滴分别碰撞与各自接触角为30°的壁面时,图5给出了相同的无量纲时间范围内,两者的铺展系数随着无量纲时间的变化规律。对比两条曲线可知,两者碰撞各自接触角为30°的壁面后都会出现振荡行为。水滴完成了从振荡到保持稳定的完整过程;氮液滴在相同时间内进行了一次铺展和回缩之间的往复。在氮液滴第一个振荡周期内,主要有两点不同:在水滴达到最大铺展系数并开始回缩的时刻,氮液滴依旧保持铺展状态,从而最大铺展系数在水滴出现峰值后才出现更高的峰值;在第一次回缩过程中,氮液滴的回缩速度是不均匀的,从曲率变化上来看,中间段的曲率减小。

在初始尺寸和速度一致的情况下,对于表征惯性力与表面张力大小关系的无量纲参数We数,氮液滴远大于水滴,即惯性力在碰撞过程中对于氮液滴的影响更大。因此,在水滴表面张力恰好可以克服惯性力和黏性力使得自身液膜开始回缩的时刻,惯性力依旧会驱使氮液滴的液膜向四周扩散,从而达到更大的铺展系数;而在两种液滴回缩过程开始时,液滴边缘处的速度为0,表面能达到最大,液滴三相接触线在表面张力作用下回缩,由外向内挤压液滴。从图5标记出的特定回缩段中氮液滴、水滴的相界面变化过程可以看出,水滴表面始终保持相对的圆滑,因此回缩速度均匀。氮液滴的接触线开始回

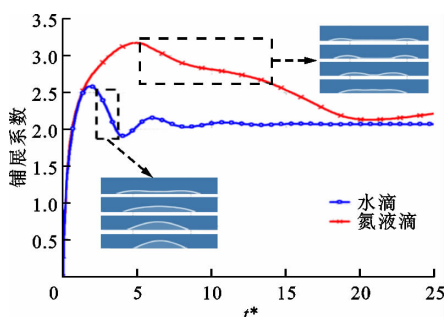


图5 氮液滴和水滴碰撞接触角为30°时壁面铺展系数随无量纲时间的变化

Fig. 5 Variation of spread factor with dimensionless time as nitrogen droplets and water droplets impacting the wall with a contact angle of 30°

缩时,由于中心处表层液体难以克服惯性改变速度方向,会继续向外侧运动,在边缘形成隆起的液环,所以造成了一定程度的回缩受阻和回缩速度变慢。等到液滴表面趋于平整圆滑,回缩速度恢复正常。

图6给出了当氮液滴和水滴分别撞击接触角为90°的壁面时,两者铺展系数随无量纲时间均达到稳定状态过程的变化规律。无论是氮液滴还是水滴,均出现了明显的铺展—回缩—再铺展—再回缩往复。随时间推移,受黏性耗散作用影响最终维持在稳定状态。往复振荡实质是液滴自身的动能、势能、表面能及能量耗散之间转换、平衡的结果。对比两条曲线可知:与水滴相比,氮液滴在振荡后达到稳定状态需要更长时间,且振荡次数更少。

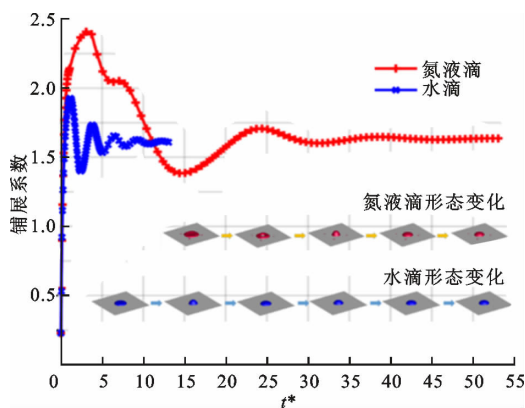


图6 氮液滴和水滴碰撞接触角为90°的壁面时铺展系数随无量纲时间的变化

Fig. 6 Variation of spread factor with dimensionless time as nitrogen droplets and water droplets impacting the wall with a contact angle of 90°

在液滴的每一次振荡中,除了自身动能、势能和表面能的相互转换,也必然伴随着因液滴与壁面之

间的摩擦、液滴内部摩擦所造成的能量耗散。依照上述分析,氮液滴在惯性力作用下会铺展达到更大的面积。因此,氮液滴单次振荡所需的时间更长,耗散的能量也更多。当液滴初始的动能和势能通过转换被表面能和黏性作用耗散用尽时,液滴就保持在最终的稳定状态。

2.3 氮液滴碰撞接触角为 120°和 150°壁面

当氮液滴碰撞接触角分别为 120°和 150°的壁面时,均会出现反弹现象,且会和水滴的碰撞表现出不同的行为特性,如图 7 所示。

在接触角为 120°的壁面上,虽然水滴的最大铺展面积相对于浸润性好的壁面明显变小,但依旧出

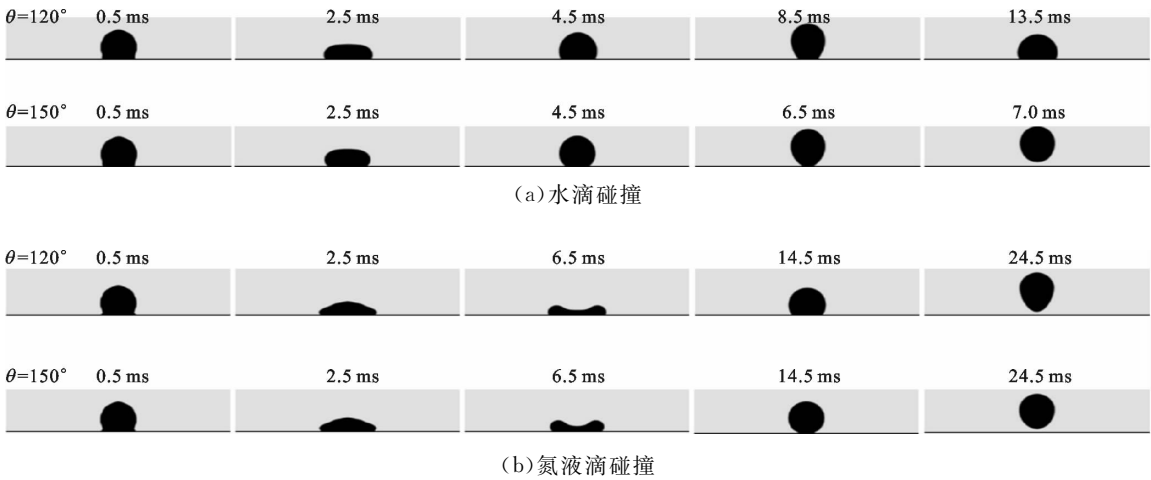


图 7 水滴和氮液滴碰撞接触角为 120°、150°壁面后的形态演变

Fig. 7 Morphological evolution of water and nitrogen droplets impacting the wall with contact angle of 120° and 150°

现振荡行为;与水滴相比,氮液滴则完全反弹。在接触角为 150°的壁面上,水滴和氮液滴则都出现了完全反弹的结果。水滴在 7 ms 时刻,已经出现了完全脱离壁面的情况;氮液滴在 24.5 ms 时刻,才出现了完全脱离壁面的情况。相比之下,氮液滴的完全反弹过程所需要的时间更久。对比氮液滴自身在两种壁面上的情况可知:在同一时刻,接触角更大的 150°壁面上,氮液滴的铺展面积小于接触角较小的 120°壁面,最终的回弹也更加充分。

氮液滴和水滴在各自接触角为 120°和 150°壁面上碰撞结果的差异主要是因为黏性力作用。在接触角为 120°和 150°的壁面上,液滴的铺展受到很大限制,在铺展、回缩过程中因为摩擦造成的黏性耗散就相应减少,剩余动能足够大时,就会使得液滴反弹。即壁面接触角越大,浸润性越差,液滴就越容易出现反弹。

对于表征惯性力和黏性力之间相对大小的无量纲参数 Re 而言,氮液滴远远大于水滴,氮液滴的黏性耗散作用相对较弱,在回缩后就有充足的动能支持自身脱离壁面。在各自接触角为 120°的壁面上,水滴出现振荡而氮液滴出现反弹;而在接触角为 150°的壁面上,由于氮液滴铺展面积进一步缩小,剩余动能使得其自身出现更快和更加充分的回弹。

图 8 给出了氮液滴在回弹不同阶段的运动状态

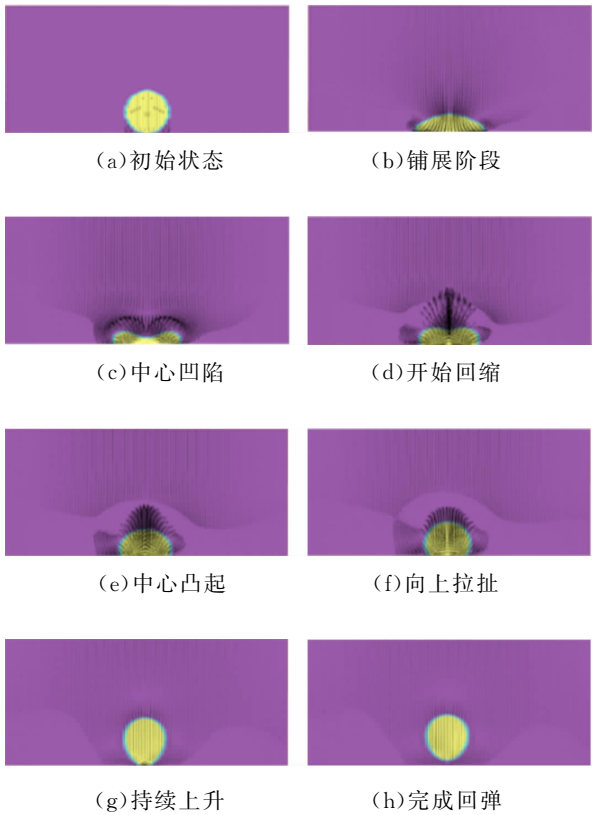


图 8 氮液滴回弹过程中各阶段矢量图

Fig. 8 Vector diagrams of nitrogen droplet rebound process at different stage

矢量图,可以表明各个阶段的行为特性。液滴在回弹过程受到的力主要包括惯性力、表面张力、液滴内部压力和壁面施加的黏附力。其中,惯性力促使液滴保持初始运动状态;表面张力促使液滴表面积趋于最小;内部压力总伴随表面张力造成的弯曲液面而存在,分静压力和附加压力两部分,合力方向指向表面曲率中心;黏性力始终阻碍液滴运动,与作用表面平行,与液滴运动的方向相反。

图8a为初始状态,液滴底部按照 150° 接触角与壁面相接,呈球缺状。此阶段惯性力和内部压力都竖直向下,驱动液滴增大与壁面的接触面积。

图8b是径向铺展阶段,液滴在纵向被挤压,呈现帽子状。依然以指向液滴外侧的惯性力和内部压力为主,但表面张力和黏附力开始阻碍液滴向外运动,此时液滴上半部分的速度垂直向下,下半部分的速度开始转向并沿壁面方向向外。

图8c出现了两边凸起、中间凹陷的状态,液滴呈对称的哑铃状。由于液滴上方竖直向下的速度基本不变,而液滴底部沿着液滴径向向外的速度较大,所以造成液膜厚度的不均匀。需要注意的是,此时液滴的内部压力方向由之前的指向外侧改变为指向内侧曲率中心处,但在惯性力主导下,此阶段末端将达到液膜的最大铺展状态并开始回缩。

图8d是开始回缩阶段,液滴形态由哑铃状重新向帽子状开始过渡。主导液滴运动的力此时由指向斜上方的表面张力、内部压力和平行于壁面的黏附力占据,在三者的共同作用下,液滴中心,尤其是上半部分,垂直向上的速度远大于底部贴近壁面处指向液滴内部的速度。

图8e是中心凸起阶段,液滴在向中心聚拢后重新呈帽子状。由于能量不断耗散,液滴顶部向上的速度减小,但仍然大于底部沿壁面指向内部的速度。

图8f、图8g阶段液氮依靠顶部向上的惯性力拉扯,克服黏附力、内部压力等,形成上大下小的液柱蠕动上升,顶部速度也逐渐减小。

最终在图8h阶段,完成回弹,彻底脱离与壁面的接触。

3 结 论

通过研究对比,相较于水滴,氮液滴在碰撞固体壁面后受到不同作用力影响,其会在不同浸润性壁面上呈现出不同行为特性,具体有以下结论:

(1)氮液滴以一定速度碰撞不同浸润性的壁面后,会出现和水滴类似的振荡、反弹过程,但每个具

体过程均区别于水滴的行为;

(2)氮液滴撞击接触角为 30° 和 90° 壁面后的振荡过程,主要受惯性力作用,相较于水滴,铺展系数更大、回缩速度不均匀、振荡次数更少、达到稳定状态更缓慢;

(3)氮液滴在接触角为 120° 和 150° 的壁面上,相较于水滴更容易发生回弹现象,回弹所需的时间更长;

(4)氮液滴撞击接触角为 120° 和 150° 的壁面后反弹时,惯性力及液滴内部的压力在铺展过程占据主导地位,后期的回缩及反弹过程,表面张力和液滴内部压力起到主导作用。

参考文献:

- [1] RIOBOO R, TROPEA C, MARENGO M. Outcomes from a drop impact on solid surfaces [J]. *Atomization and Sprays*, 2001, 11(2): 155-166.
- [2] RANGE K, FEUILLEBOIS F. Influence of surface roughness on liquid drop impact [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1998, 203(1): 16-30.
- [3] STAAT H J J, TRAN T, GEERDINK B, et al. Phase diagram for droplet impact on superheated surfaces [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, 779 (R3): 1-12.
- [4] 秦缘, 王关晴, 黄雪峰, 等. 液滴碰撞不同尺寸固壁铺展特性研究 [J]. *杭州电子科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(1): 86-90.
QIN Yuan, WANG Guanqing, HUANG Xuefeng, et al. Spreading of droplet impacting on various size solid surface [J]. *Journal of Hangzhou Dianzi University (Natural Sciences)*, 2019, 39(1): 86-90.
- [5] NEGEED E-S R, HIDAKA S, KOHNO M, et al. Effect of the surface roughness and oxidation layer on the dynamic behavior of micrometric single water droplets impacting onto heated surfaces [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2013, 70: 65-82.
- [6] LIANG G, MUDAWAR I. Review of drop impact on heated walls [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 106: 103-126.
- [7] YARIN A L. Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding, bouncing... [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2006, 38(1): 159-192.
- [8] JOSSERAND C, THORODDSEN S T. Drop impact on a solid surface [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2016, 48(1): 365-391.
- [9] 梁超, 王宏, 朱恂, 等. 液滴撞击不同浸润性壁面动态过程的数值模拟 [J]. *化工学报*, 2013, 64(8):

- 2745-2751.
- LIANG Chao, WANG Hong, ZHU Xun, et al. Numerical simulation of droplet impact on surfaces with different wettabilities [J]. CIESC Journal, 2013, 64(8): 2745-2751.
- [10] SAHOO N, KHURANA G, HARIKRISHNAN A R, et al. Post impact droplet hydrodynamics on inclined planes of variant wettabilities [J]. European Journal of Mechanics: B Fluids, 2020, 79: 27-37.
- [11] XUE R, RUAN Y, LIU X, et al. Experimental study of liquid nitrogen spray characteristics in atmospheric environment [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 142: 717-722.
- [12] 赵可, 余阳梓, 蒋彦龙, 等. 液氮滴撞击壁面相变行为的数值研究 [J]. 物理学报, 2019, 68(24): 201-215.
- ZHAO Ke, SHE Yangzi, JIANG Yanlong, et al. Numerical study on phase change behavior of liquid nitrogen droplets impinging on solid surface [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(24): 201-215.
- [13] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. Academic Press, 1981, 39(1): 201-225.
- [14] UBBINK O, ISSA R I. A method for capturing sharp fluid interfaces on arbitrary meshes [J]. Journal of Computational Physics, 1999, 153(1): 26-50.
- [15] YAO Yina, LI Cong, CHEN Xiantao, et al. Droplet oscillation after impact on a solid surface [C]// ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York, US: ASME, 2016: 1-5.
- [16] 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 [J]. 力学学报, 2018, 50(2): 427-437.
- ZHOU Jianhong, 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.
- [17] 唐鹏博. 单液滴正碰壁面动态特性行为研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2020: 31-35.
- [18] HATTA N, FUJIMOTO H, KINOSHITA K, et al. Experimental study of deformation mechanism of a water droplet impinging on hot metallic surfaces above the Leidenfrost temperature [J]. Journal of Fluids Engineering, 1997, 119(3): 692-699.
- [本刊相关文献链接]**
- 秦梦晓, 张旭辉, 汤成龙. 液滴撞击不同粗糙度固体表面动力学行为实验研究. 2017, 51(9): 26-31. [doi:10.7652/xjtuxb201709004]
- 范增华, 荣伟彬, 王乐锋, 等. 压电微喷辅助液滴的多物理场耦合与实验. 2016, 50(11): 56-61. [doi:10.7652/xjtuxb201611009]
- 王宁宁, 刘海湖, 张楚华. 液桥重开过程的两相格子 Boltzmann 模型及计算. 2016, 50(9): 55-60. [doi:10.7652/xjtuxb201609009]
- 李耀庭, 黄勇成, 孟凡胜, 等. 增压直喷汽油机中润滑油液滴诱发早燃机制的数值研究. 2016, 50(7): 51-57. [doi:10.7652/xjtuxb201607009]
- 王武强, 吴东垠, 程亮, 等. 柴油、甲醇和水三相乳化液粒径分布预测模型及实验验证. 2016, 50(5): 65-71. [doi:10.7652/xjtuxb201605010]
- 张彬, 郭朋华, 李景银. 液滴与水平壁面碰撞力的实验方法. 2015, 49(11): 8-13. [doi:10.7652/xjtuxb201511002]
- 朱永灿, 黄新波, 贾建援, 等. 输电导线覆冰生长及影响因素数值分析模型. 2015, 49(7): 120-125. [doi:10.7652/xjtuxb201507020]
- 刘亚欣, 赵亚涛, 路士州, 等. 压电驱动撞针式高黏性胶体微喷系统的研制. 2015, 49(6): 90-95. [doi:10.7652/xjtuxb201506015]
- 施东晓, 毕勤成, 周荣启. 磁性液体两相界面演变特性的数值研究. 2014, 48(9): 123-129. [doi:10.7652/xjtuxb201409021]
- 张彬, 韩强, 袁小芳, 等. 液滴与水平壁面碰撞力的数值研究. 2013, 47(9): 23-27. [doi:10.7652/xjtuxb201309004]
- (编辑 武红江)