

# 低温风洞中液氮液滴的破碎特性模拟研究

苗庆硕<sup>1</sup>, 魏震<sup>1</sup>, 陈佳军<sup>1</sup>, 张海洋<sup>2</sup>, 钟富豪<sup>1</sup>, 郑勉<sup>1</sup>, 刘秀芳<sup>1</sup>

(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:** 为探究低温风洞中液氮液滴的破碎特性并阐明其破碎机理, 基于耦合水平集流体体积函数 (CLSVOF) 方法, 采用自适应局部网格加密技术, 构建了二维液氮液滴破碎模型, 对比了液氮液滴与常温液滴的形态演变规律, 计算分析了韦伯数 ( $We$ ) 对液氮液滴形态、变形系数及时间特性的影响规律。模拟结果表明: 液氮液滴的  $We$  高于常温液滴, 且更容易发生变形和破碎; 随着  $We$  的增大, 液氮液滴依次发生袋状破碎、多模式破碎和剪切破碎; 液滴迎风面和背风面的压差均随时间呈现先增大后减小的规律, 发生转变的原因是袋状结构形成或边缘液滴颗粒脱落; 不同液氮液滴破碎模式下, 变形系数的变化规律差异明显; 液氮液滴无量纲初始破碎时间随  $We$  的增大而减小, 在  $0 < We < 100$  时, 临界变形系数维持在 2.6 附近。研究结果可为低温风洞中液氮喷雾冷却系统的优化提供理论依据。

**关键词:** 低温风洞; 液氮液滴; 破碎特性; 破碎模式; 变形系数

**中图分类号:** TK121 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.7652/xjtuxb202402009 **文章编号:** 0253-987X(2024)02-0091-09

## Simulation of Breakup Characteristics of Liquid Nitrogen Droplets in Cryogenic Wind Tunnel

MIAO Qingshuo<sup>1</sup>, WEI Zhen<sup>1</sup>, CHEN Jiajun<sup>1</sup>, ZHANG Haiyang<sup>2</sup>,

ZHONG Fuhao<sup>1</sup>, ZHENG Mian<sup>1</sup>, LIU Xiufang<sup>1</sup>

(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:** To explore the breakup characteristics of liquid nitrogen droplets in a cryogenic wind tunnel and determine the underlying mechanism, a two-dimensional liquid nitrogen droplet breakup model is established adopting the coupled level-set and volume of fluid (CLSVOF) method and adaptive local mesh refinement technology. The morphological evolution patterns of liquid nitrogen droplets and normal temperature droplets are compared, and the effects of  $We$  on the morphology, deformation coefficient and temporal features of liquid nitrogen droplets are analyzed. The results show that compared with normal temperature droplets, liquid nitrogen droplets have a higher  $We$ , which makes them more prone to deformation and fragmentation. As the  $We$  increases, the droplets sequentially undergo bag breakup, multimode breakup and shear breakup. For the three different breakup modes, the pressure difference between windward and leeward sides of the liquid nitrogen droplet increases first and then

收稿日期: 2023-03-10。 作者简介: 苗庆硕(1999—), 男, 硕士生; 刘秀芳(通信作者), 女, 副教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52076164); 国家科技重大专项资助项目(J2019-III-0010-0054); 结冰与防除冰重点实验室开放课题资助项目(IADL20220107)。

网络出版时间: 2023-07-27 网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/61.1069.T.20230727.0839.002.html>

decreases with time. This is attributed to the formation of bag structures or the separation of droplets from the edge. Under different breakup modes of liquid nitrogen droplets, the pattern of deformation coefficient is distinctly different. The dimensionless initial breakup time of the droplet decreases with the increase of  $We$ . In the range of  $0 < We < 100$ , the critical deformation coefficient is maintained around 2.6. This study can provide a theoretical basis for the optimization of liquid nitrogen spray cooling system in cryogenic wind tunnel.

**Keywords:** cryogenic wind tunnel; liquid nitrogen droplets; breakup characteristics; breakup modes; deformation coefficient

基于相似理论进行的风洞模拟试验是探究飞行器气体动力学性能的核心技术手段。由于模型试验固有的尺度效应以及试验条件的限制,常规风洞所能达到的雷诺数模拟能力有限,无法满足新型飞行器的气动试验需求。采用液氮喷雾冷却方法实现气流降温是提高风洞试验雷诺数<sup>[1-2]</sup>的最佳方案之一。低温风洞中的液氮喷雾冷却过程是一个复杂的多变量强耦合过程,受到液滴破碎、液滴碰撞、液滴撞壁等行为过程<sup>[3-5]</sup>的影响,其中,液滴的变形与破碎涉及气液界面的失稳和多相流体的湍流混合,机理异常复杂。在高速气流剪切力的作用下,液氮液滴的形态演变及热动力学特性直接影响着液氮喷雾雾场的发展,进而决定低温风洞的流场品质。因此,深入研究低温风洞中液氮液滴的破碎特性,揭示液氮液滴的破碎机理显得尤为重要。

气流中液滴破碎的控制参数主要为韦伯数( $We$ )和奥内佐格数( $Oh$ ),分别表征气动力、液相黏性力与表面张力的相对大小,表达式如下

$$We = \frac{\rho_g U_0^2 d_0}{\sigma} \quad (1)$$

$$Oh = \frac{\mu_l}{\sqrt{\rho_l d_0 \sigma}} \quad (2)$$

式中:  $\rho_l$ 、 $\rho_g$  分别表示液体和气体的密度;  $\mu_l$  表示液体黏度;  $\sigma$  表示表面张力系数;  $U_0$  表示气流初始速度;  $d_0$  表示液滴初始直径。

大量研究表明,  $We$  对液滴破碎起促进作用,  $Oh$  对液滴破碎起抑制作用<sup>[6-7]</sup>, 且当  $Oh < 0.1$  时, 液滴破碎模式基本不受其影响, 主要由  $We$  决定<sup>[8]</sup>。国内外学者将不同液滴破碎模式进行分类, 指出随着  $We$  的增大, 液滴破碎模式可以分为振荡破碎、袋状破碎、多模式破碎(中间态破碎)、剪切破碎和爆炸破碎等5大类, 而多模式破碎又可以进一步分为袋状雄蕊破碎、袋状羽化破碎、双袋式破碎、多袋式破碎、羽化剪切破碎等<sup>[8-16]</sup>。

当液滴位于气流中时, 形态会发生变化。定义变形系数  $C = d_{cro}/d_0$ , 是表征液滴形态变化的重要

参数, 其中  $d_{cro}$  表示发生变形的液滴在垂直气流方向的径向长度。此外, 为了便于比较, 通常对液滴破碎过程中的时间参数进行无量纲化处理, 具体表达式如下

$$T = \frac{tU_0}{d_0 \sqrt{\rho_l / \rho_g}} \quad (3)$$

式中:  $T$  表示无量纲时间;  $t$  表示实际时间。

Song 等<sup>[17]</sup>探究了水滴在液滴变形阶段和袋状扩展阶段变形系数的变化规律, 指出袋状结构开始产生后, 变形系数增速变大。施红辉等<sup>[18]</sup>的研究结果表明, 不同破碎模式下变形系数的变化规律不同, 但在液滴变形阶段, 其随无量纲时间基本呈线性变化。张文英等<sup>[19]</sup>通过研究指出, 当水滴发生袋状破碎时, 随着无量纲时间的增大, 水滴变形系数由线性增长转变为二次函数增长。Zhu 等<sup>[20]</sup>的模拟结果则表明, 发生剪切破碎的正辛烷液滴的变形系数随时间呈指数增长趋势。

液滴初始破碎时间是液滴破碎特性的一个重要参数, 表示液滴袋状结构开始形成或边缘液滴颗粒开始脱落的时间<sup>[10]</sup>。Pilch 和 Erdman<sup>[10]</sup>归纳了无量纲初始破碎时间与  $We$  以及  $Oh$  的关系, 指出无量纲初始破碎时间随着  $We$  的增大而减小, 且随  $Oh$  的增大而增大。Dai 和 Faeth<sup>[12]</sup>通过实验研究, 同样得到了无量纲初始破碎时间随着  $We$  的增大而减小的结论。而 Hsiang 和 Faeth<sup>[8]</sup>的实验结果则表明当  $Oh < 0.1$  时, 无量纲初始破碎时间基本不受  $We$  的影响, 始终维持在 1.6 附近。金仁瀚等<sup>[21]</sup>发现无量纲初始破碎时间随着  $We$  的增大呈现先减小后不变的规律。Zhu 等<sup>[20]</sup>发现当液滴发生剪切破碎时, 液滴初始破碎时间与初始直径成正比, 而与初始气流速度成反比。

现有的研究主要聚焦于水滴、油滴等常温工质液滴。相较于常温工质液滴, 低温液氮液滴的表面张力要低得多, 由于决定液滴破碎特性的关键特征参数  $We$  与表面张力密切相关, 导致液氮液滴的变

形与破碎过程或将呈现出与常温工质截然不同的特点。因此,本文基于耦合水平集流体体积函数(coupled level-set and volume of fluid, CLSVOF)方法,构建了液氮液滴破碎模型,对比了低温液氮液滴与常温液滴的形态演变规律,分析了液滴变形和破碎过程中的压力变化特征,探究了  $We$  对液氮液滴形态和变形系数的影响,最后归纳了液氮液滴的时间特性。

## 1 模型设置与验证

### 1.1 模型设置

对复杂的液滴破碎过程进行适当简化,忽略气液两相之间的相变过程,建立如图1所示的二维液滴破碎仿真模型。选取重力加速度  $g=9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,重力方向与气流方向垂直,压力速度采用压力-隐式分裂算子(pressure-implicit with splitting of operators, PISO)耦合方法,压力离散格式为 PRESTO!,其余参数均采用对流项二次迎风差值(quadratic upwind interpolation of the convective kinematics, QUICK)格式离散。模型网格为结构化网格,采用自适应局部网格加密技术,加密标准取决于单元内液相体积分数梯度分布。

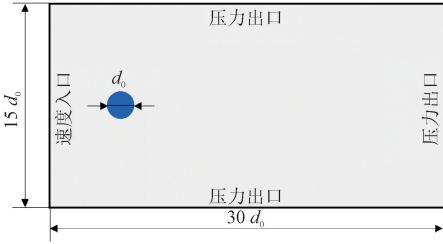


图1 液滴破碎仿真模型

Fig. 1 Droplet breakup simulation model

### 1.2 CLSVOF 相界面追踪方法

液滴在气流中的演化是一个复杂的两相流过程,数值模拟的关键问题是如何有效地追踪气液相界面,目前常用的方法包括流体体积函数(volume of fluid, VOF)方法<sup>[19-20]</sup>、水平集(level set, LS)方法<sup>[22-23]</sup>以及 CLSVOF 方法<sup>[24-25]</sup>等。CLSVOF 方法同时引入 VOF 相函数  $\alpha$  和 LS 距离函数  $\varphi$ ,结合2种方法的优点,采用分段线性界面重构思想,每次计算时需要对气液两相流界面重新构造,并对  $\varphi$  重新初始化。在 CLSVOF 方法中,气液两相流界面的追踪是通过求解对流输运方程实现的。方程的表达式可写为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \varphi = 0 \quad (5)$$

式中:  $t$  表示时间;  $\mathbf{v}$  表示速度矢量;相函数  $\alpha$  表示液

相体积占单元体积的比值;距离函数  $\varphi$  表示单元中心到相界面的最小距离。

界面法向量  $\mathbf{n}$  和界面曲率  $\kappa$  分别由 LS 距离函数  $\varphi$  计算得到

$$\mathbf{n} = \nabla \varphi / |\nabla \varphi| \quad (6)$$

$$\kappa = \nabla \cdot (\nabla \varphi / |\nabla \varphi|) \quad (7)$$

重新对相函数  $\varphi$  进行初始化,定义  $S^\varphi$  为单元中心到相界面的最小距离,正负由 VOF 相函数  $\alpha$  确定,公式表达如下

$$S^\varphi = \begin{cases} \text{sgn}(0.5 - \alpha) < 0, & \alpha > 0.5 \\ \text{sgn}(0.5 - \alpha) > 0, & \alpha < 0.5 \\ \text{sgn}(0.5 - \alpha) = 0, & \alpha = 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

### 1.3 网格无关性验证

图2给出了  $d_0 = 0.1 \text{ mm}$ 、 $U_0 = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $We = 12$  的工况下,基于不同网格得到的液氮液滴变形系数与时间的关系,其中  $h$  表示计算域的最小网格尺寸。由图可见,当  $d_0/h$  大于100时,液滴的变形系数随时间的变化基本与网格尺寸无关,因此,在满足计算精度的前提下,选取  $d_0/h = 100$  的网格最为合适。

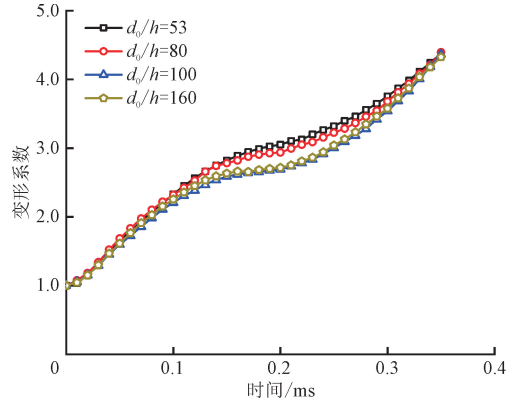


图2 不同网格数量下液氮液滴变形系数与时间的关系

Fig. 2 The relationship between the deformation coefficient and the time under different grids

### 1.4 模型验证

为了验证模型的准确性,选取  $d_0 = 0.78 \text{ mm}$ 、 $U_0 = 50.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $We = 33$  的水滴进行计算,将得到的水滴形态与文献[17]中水滴的实验结果进行对比,如图3所示。由图可见,在液滴中心凸起的周围出现袋状结构,其出现和破碎的时间基本一致,且母体液滴破碎后的子液滴分布规律相似,初步验证了模型的可靠性。如图4所示,选取  $d_0 = 2.3 \text{ mm}$ 、 $U_0 = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $We = 15$  的乙醇液滴,将本文模型计算得到的变形系数与文献[26]的实验结果进行对比,可以看出模拟结果与实验结果一致性较好,统计后得到变形系数的最大偏差不超过10%,进一步验证了模型的准确性。

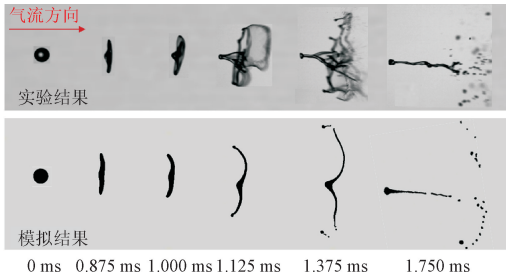


图 3 水滴形态的模拟结果与实验结果<sup>[17]</sup>的对比  
Fig. 3 Morphological comparison of simulation results and experimental results<sup>[17]</sup> of the water droplet

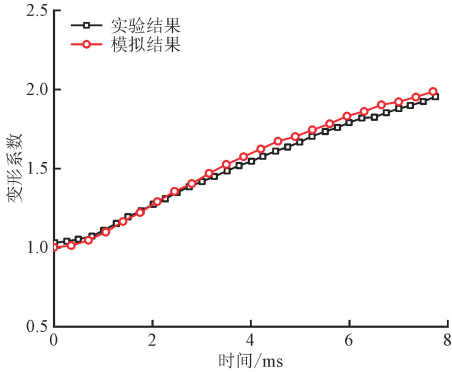


图 4 乙醇液滴变形系数的模拟结果与实验结果<sup>[26]</sup>的对比  
Fig. 4 Comparison of simulation results experimental results<sup>[26]</sup> and on the deformation coefficient of the ethanol droplet

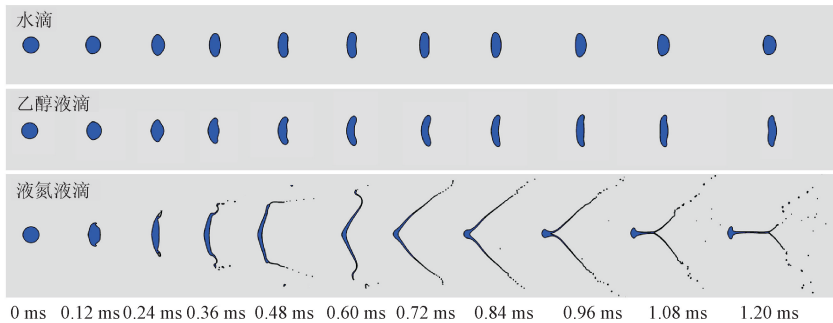


图 5 不同工质液滴形态的对比( $d_0=0.5\text{ mm}$ 、 $U_0=25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )  
Fig. 5 Morphological comparison of different droplets( $d_0=0.5\text{ mm}$ 、 $U_0=25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

由图 5 可见,当水滴和乙醇液滴发生振荡变形时,液氮液滴发生剧烈破碎,大量液滴颗粒从边缘脱落。图 6 给出了不同液滴的变形系数与时间的变化关系,可以看到在气动力的作用下,水滴和乙醇液滴在垂直气流方向被拉伸,变形系数增大,随后在表面张力的作用下出现了回缩,变形系数减小;而液氮液滴的边缘液滴颗粒则是快速脱落,液滴边拉伸边破碎,变形系数动荡变化。液氮液滴与水滴和乙醇液滴的形态演变规律呈现明显不同,

## 2 结果与分析

### 2.1 液氮液滴与常温液滴对比

气流中的液滴破碎特性与工质密切相关<sup>[27]</sup>,表 1 展示了不同工质的物性参数。为探究低温液氮液滴与常温液滴的破碎特性差异,选取相同的初始直径和气流初始速度,对比了水滴、乙醇液滴和液氮液滴的形态演变规律,如图 5 所示。

表 1 工质物性参数(压力 0.1 MPa,液氮 77.4 K,水和乙醇 293 K)

Table 1 Physical properties of working medium (pressure 0.1 MPa, liquid nitrogen 77.4 K, water and ethanol 293 K)

| 工质 | 密度/<br>( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 黏度/<br>( $10^{-6}\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 表面张力系数/<br>( $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ ) |
|----|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 氮气 | 4.56                                     | 5.44                                                               |                                             |
| 液氮 | 806                                      | 160                                                                | 0.008 9                                     |
| 空气 | 1.23                                     | 17.89                                                              |                                             |
| 水  | 998                                      | 1 003                                                              | 0.072 8                                     |
| 乙醇 | 789                                      | 1 200                                                              | 0.022 3                                     |

主要与液滴受到的气动力和表面张力有关,气动力促进液滴的变形和破碎,而表面张力抑制液滴的变形和破碎。在同一液滴初始直径和气流初始速度的工况下,低温氮气的密度高于常温空气,使得液氮液滴受到的气动力更强。与此同时,液氮液滴的表面张力系数低于常温液滴,其自身的表面张力更弱,因此,对于表征气动力与表面张力相对大小的  $We$  而言,液氮液滴的  $We$  远大于常温液滴,更容易发生变形和破碎。



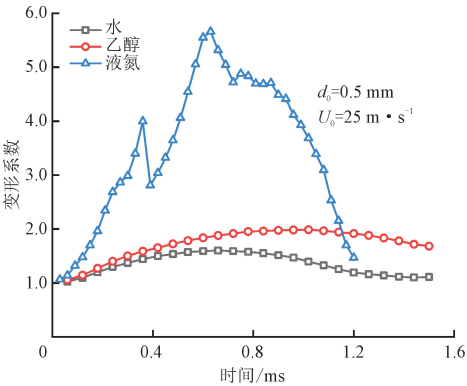


图 6 不同工质液滴变形系数与时间的关系

Fig. 6 The relationship between the deformation coefficient and the time under different droplets

2.2 破碎模式

图 7 展示了不同破碎模式下液氮液滴的形态变化。由图可见,低温液氮液滴的破碎模式主要有 3 种,液滴在中心处出现袋状结构,则在中心最薄处发生袋状破碎;液滴在中心凸起的周围出现袋状结构,则在此最薄处发生多模式破碎;液滴未出现袋状结构,则在液滴边缘处发生剪切破碎。

计算所采用液氮液滴的最大  $Oh$  约为 0.006,其黏性力的影响相较于表面张力可以忽略不计,则液滴破碎模式主要受  $We$  的影响<sup>[8]</sup>,如图 8 所示。随着  $We$  的增大,液氮液滴依次出现袋状破碎、多模式破碎和剪切破碎。

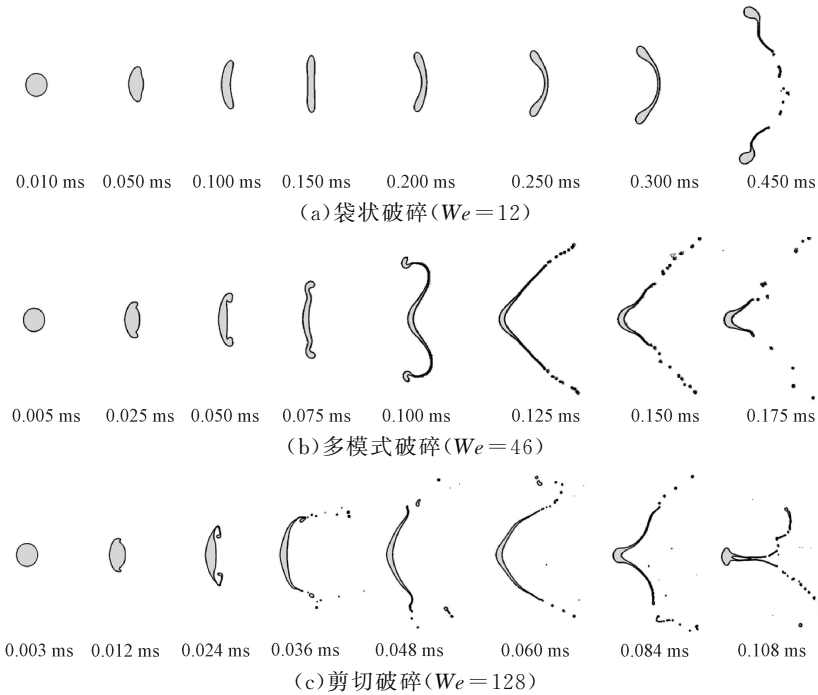


图 7 不同破碎模式下液氮液滴形态的变化

Fig. 7 Behavior of droplets in different breakup modes

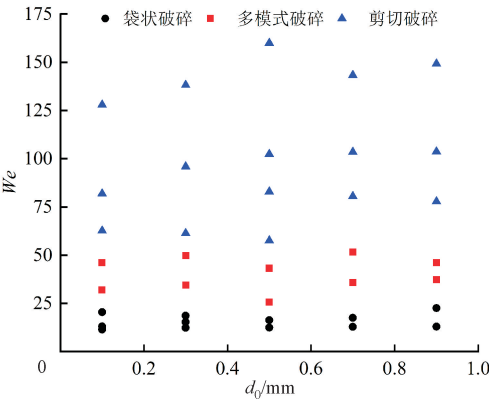


图 8 液氮液滴破碎模式与  $We$  的关系

Fig. 8 The relationship between breakup modes of liquid nitrogen droplets and  $We$

图 9 给出了不同破碎模式下的液滴压力分布云图。可见,当初始静止的液滴位于低温气流时,首先在液滴中心出现高压区,液滴边缘出现低压区,液滴在垂直气流方向被拉伸,在沿气流方向被压缩。随着时间增加,液滴低压区范围逐渐扩大,并出现气体回流现象。在液滴迎风面和背风面的压差作用下,球状液滴向圆盘状液滴过渡。当液滴发生袋状破碎时,如图 9(a)所示,圆盘状液滴( $t = 0.150$  ms)在气流方向上内凹,袋状结构开始形成,此时液滴迎风面和背风面的压差减小,袋状结构不断扩展,直至在液滴中心最薄处发生破碎。当液滴发生多模式破碎时,如图 9(b)所示,随着  $We$  的增大,作用到液滴上的相

对气动力增大,垂直气流方向上的液滴边缘聚集了更多的液体,液滴变成不规则圆盘状,导致液滴中心区域出现凸起,阻碍中心区域沿气流方向的发展,袋状结构开始出现在中心凸起的周围( $t=0.075$  ms)。随着袋状结构的扩展,液滴在袋状结构最薄处发生破碎,大量液滴颗粒从母体液滴脱落,母体液滴逐渐减

小。当液滴发生剪切破碎时,如图 9(c)所示,作用到液滴上的相对气动力进一步增大,在气流剪切作用下,液滴颗粒开始从液滴边缘脱落( $t=0.036$  ms),随后液滴迎风面和背风面的压差减小,处于边拉伸边破碎的状态。相较于袋状破碎和多模式破碎,发生剪切破碎的子液滴尺寸更小、数量更多。

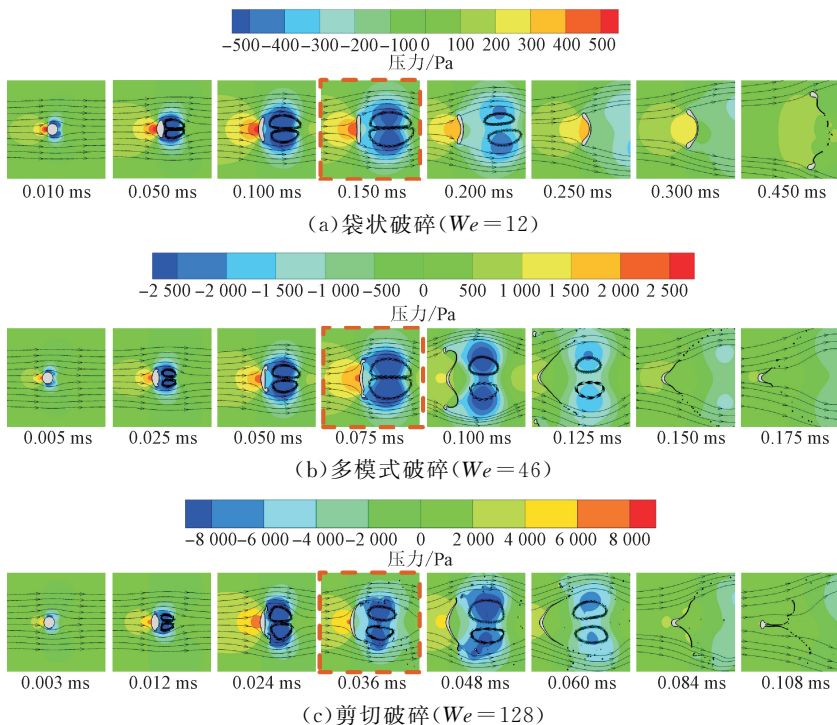


图 9 不同破碎模式下的压力云图

Fig. 9 Pressure cloud map of different breakup modes

在 3 种破碎模式下,低温液氮液滴迎风面和背风面的压差均随时间呈现出先增大后减小的变化规律。如图 9 中红色框所示。对于袋状破碎和多模式破碎,发生转变的原因是袋状结构开始形成;而对于剪切破碎,发生转变的原因是边缘液滴颗粒开始脱落。

### 2.3 变形系数

不同  $We$  下液氮液滴的变形系数与无量纲时间的关系如图 10 所示,可以看到,在不同的  $We$  下,由于液氮液滴的破碎模式不同,液滴变形系数的变化规律差异明显。当  $We=12$  时,液滴发生袋状破碎,液滴在初始阶段由球状变为圆盘状,变形系数快速增大;袋状结构开始产生后,变形系数增速减缓;随着袋状结构进一步扩展,变形系数增速加快。当  $We=35$  时,液滴发生多模式破碎,液滴变形系数快速增大直达峰值,此时液滴在中心凸起周围的袋状结构最薄处破碎,变形系数骤降。当  $We$  分别为 58、81、104 时,液滴发生剪切破碎,液滴在初始阶段的变形系数增速更大,当液滴开始发生破碎时,边缘处

的液滴颗粒脱离,母体液滴减小,液滴处于边拉伸边破碎的状态,直至母体液滴不再破碎为止。

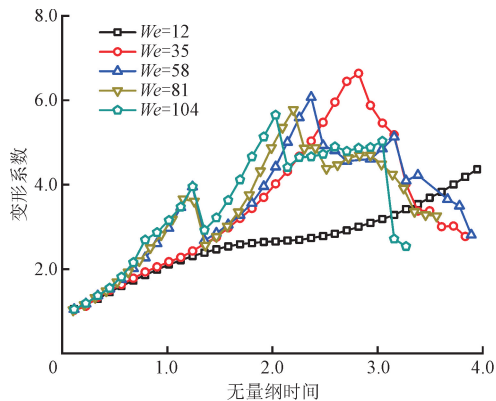


图 10 液氮液滴变形系数与无量纲时间的关系

Fig. 10 The relationship between the deformation coefficient of liquid nitrogen droplets and dimensionless time

### 2.4 时间特性

图 11 展示了不同初始直径下,液氮液滴的无量

纲初始破碎时间与  $We$  的关系,并将本文计算结果与 Hsiang 和 Faeth<sup>[8]</sup>、Pilch 和 Erdman<sup>[10]</sup> 的实验拟合曲线进行对比。由图 11 可见,随着  $We$  的增大,液氮液滴的无量纲初始破碎时间整体呈现减小趋势,这是由于随着  $We$  的增大,液氮液滴所受到的气动力相较于液滴的表面张力增大,液滴更容易克服表面张力的阻碍作用而产生袋状结构或边缘液滴颗粒脱落,导致液滴的无量纲初始破碎时间减小。不同  $We$  下的无量纲初始破碎时间均包含在 Hsiang 和 Faeth<sup>[8]</sup>、Pilch 和 Erdman<sup>[10]</sup> 的实验拟合曲线范围内,且无量纲初始破碎时间随  $We$  的变化趋势与 Pilch 和 Erdman<sup>[10]</sup> 的实验结果规律相一致。

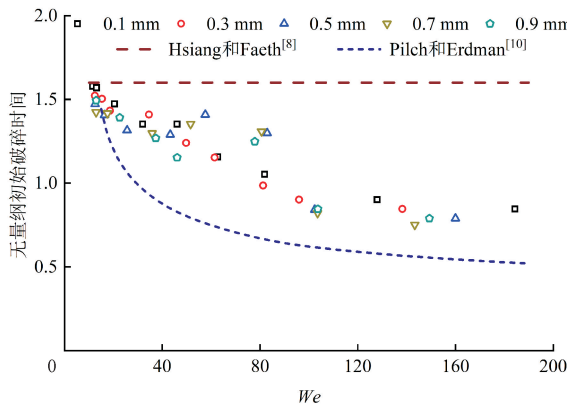


图 11 无量纲初始破碎时间与  $We$  的关系

Fig. 11 The relationship between dimensionless initial breakup time and  $We$

临界变形系数定义为初始破碎时间的液滴变形系数,也是表征液滴破碎特性的重要参数之一。图 12 给出了不同初始直径下,液氮液滴的临界变形系数与  $We$  的关系,并将本文模拟结果与 Hsiang 和 Faeth<sup>[8]</sup>、Dai 和 Faeth<sup>[12]</sup> 的实验拟合曲线进行对比。

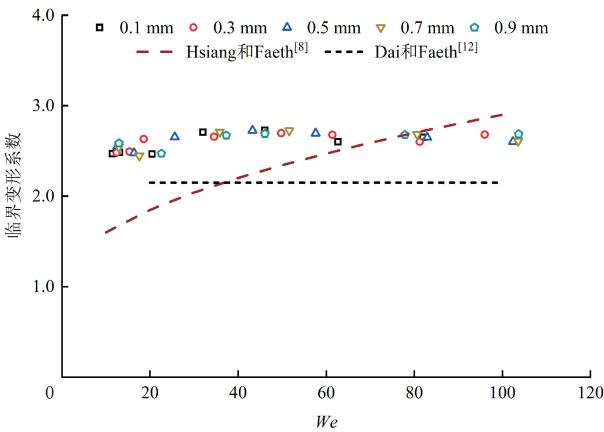


图 12 临界变形系数与  $We$  的关系

Fig. 12 The relationship between critical deformation coefficient and  $We$

由图 12 可知,对于不同初始直径的液氮液滴,在  $0 < We < 100$  时,随着  $We$  的增大,临界变形系数的变化不大,基本维持在 2.6 附近,虽略高于 Dai 和 Faeth<sup>[12]</sup> 的实验结果,但随  $We$  的变化趋势与 Dai 和 Faeth<sup>[12]</sup> 的实验结果规律基本一致。

3 结 论

基于 CLSVOF 方法,采用自适应局部网格加密技术,构建了低温风洞中的液氮液滴破碎模型,探究了低温风洞中液氮液滴的破碎特性,得到如下结论。

(1)液氮液滴与常温液滴具有不同的形态演变规律,在同一液滴初始直径和气流初始速度的工况下,常温液滴发生振荡变形,液氮液滴发生破碎。

(2)液氮液滴破碎模式主要由  $We$  决定,随着  $We$  的增大,低温液氮液滴依次发生袋状破碎、多模式破碎和剪切破碎。

(3)在不同的破碎模式下,液氮液滴迎风面和背风面的压差均随时间呈现出先增大后减小的规律,且发生转变的原因与破碎模式有关。对于袋状破碎和多模式破碎,发生转变的原因是袋状结构形成;而对于剪切破碎,发生转变的原因则是边缘液滴颗粒脱落。

(4)在不同的  $We$  下,液氮液滴呈现不同的破碎模式,变形系数的变化规律差异明显。

(5)随着  $We$  的增大,作用到液氮液滴上的相对气动力增大,液氮液滴无量纲初始破碎时间减小。在  $0 < We < 100$  时,临界变形系数变化不大,基本维持在 2.6 附近。

参考文献:

[1] KILGORE R A. Evolution and development of cryogenic wind tunnels [C]//43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2005: AIAA 2005-457.

[2] 张伟,高荣,张双喜,等. 0.3 m 低温风洞液氮供给系统研制 [J]. 航空动力学报, 2020, 35(5): 1009-1017. ZHANG Wei, GAO Rong, ZHANG Shuangxi, et al. Development of liquid nitrogen supplying system of 0.3 m cryogenic wind tunnel [J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(5): 1009-1017.

[3] 阮一逍,薛绒,赖欢,等. 单液氮液滴在气流中的蒸发运动特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(6): 147-152. RUAN Yixiao, XUE Rong, LAI Huan, et al. Evaporation and movement characteristics of single liquid ni-

- nitrogen droplet in high-speed gas flow [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(6): 147-152.
- [4] 强伟, 侯予, 薛绒, 等. 氮液滴碰撞不同浸润性壁面特性研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(7): 151-157.
- QIANG Wei, HOU Yu, XUE Rong, et al. Research on the behaviors of nitrogen droplets impacting surfaces with different wettabilities [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(7): 151-157.
- [5] ZHOU Dongdong, LIU Xiufang, YANG Song, et al. Collision dynamics of two liquid nitrogen droplets under a low-temperature condition [J]. *Cryogenics*, 2022, 124: 103478.
- [6] 蔡斌, 李磊, 王照林. 液滴在气流中破碎的数值分析 [J]. *工程热物理论*, 2003, 24(4): 613-616.
- CAI Bin, LI Lei, WANG Zhaolin. Numerical analysis of liquid drop breakup in airflow [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2003, 24(4): 613-616.
- [7] 楼建锋, 洪滔, 朱建士. 液滴在气体介质中剪切破碎的数值模拟研究 [J]. *计算力学学报*, 2011, 28(2): 210-213.
- LOU Jianfeng, HONG Tao, ZHU Jianshi. Numerical study on shearing breakup of liquid droplet in gas medium [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2011, 28(2): 210-213.
- [8] HSIANG L P, FAETH G M. Near-limit drop deformation and secondary breakup [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1992, 18(5): 635-652.
- [9] KRZECZKOWSKI S A. Measurement of liquid droplet disintegration mechanisms [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1980, 6(3): 227-239.
- [10] PILCH M, ERDMAN C A. Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1987, 13(6): 741-757.
- [11] GELFAND B E. Droplet breakup phenomena in flows with velocity lag [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1996, 22(3): 201-265.
- [12] DAI Z, FAETH G M. Temporal properties of secondary drop breakup in the multimode breakup regime [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2001, 27(2): 217-236.
- [13] PARK S W, KIM S, LEE C S. Effect of mixing ratio of biodiesel on breakup mechanisms of monodispersed droplets [J]. *Energy & Fuels*, 2006, 20(4): 1709-1715.
- [14] ZHAO Hui, LIU Haifeng, LI Weifeng, et al. Morphological classification of low viscosity drop bag breakup in a continuous air jet stream [J]. *Physics of Fluids*, 2010, 22(11): 114103.
- [15] GULDENBECHER D R, SOJKA P E. Experimental investigation of aerodynamic fragmentation of liquid drops modified by electrostatic surface charge [J]. *Atomization and Sprays*, 2011, 21(2): 139-147.
- [16] JAIN M, PRAKASH R S, TOMAR G, et al. Secondary breakup of a drop at moderate Weber numbers [J]. *Proceedings of the Royal Society: A Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, 471(2177): 20140930.
- [17] SONG He, CHANG Shinan, YU Weidong, et al. Experimental statistics of micrometer-sized water droplet deformation and breakup behavior in continuous air jet flow [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2021, 135: 103529.
- [18] 施红辉, 师顺, 刘晨, 等. 超声速条件下亚毫米液滴的变形破碎模态 [J]. *航空动力学报*, 2020, 35(10): 2017-2027.
- SHI Honghui, SHI Shun, LIU Chen, et al. Deformation and fracture patterns of sub-millimeter droplets under supersonic conditions [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(10): 2017-2027.
- [19] 张文英, 常士楠, 蒋斌, 等. 基于VOF方法的大水滴袋状破碎的仿真研究 [J]. *空气动力学学报*, 2018, 36(4): 605-612.
- ZHANG Wenying, CHANG Shinan, JIANG Bin, et al. Numerical simulation of large droplets in bag breakup regime based on VOF method [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2018, 36(4): 605-612.
- [20] ZHU Wanli, ZHAO Ningbo, JIA Xiongbao, et al. Effects of airflow velocity and droplet diameter on the secondary breakup characteristics [J]. *AIAA Journal*, 2021, 59(8): 3252-3260.
- [21] 金仁瀚, 刘勇, 朱冬清, 等. 初始直径对单液滴破碎特性影响的试验 [J]. *航空动力学报*, 2015, 30(10): 2401-2409.
- JIN Renhan, LIU Yong, ZHU Dongqing, et al. Experiment on impact of initial diameter on breakup characteristic of single droplet [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(10): 2401-2409.
- [22] LIU Jing, XU Xu. Direct numerical simulation of secondary breakup of liquid drops [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2010, 23(2): 153-161.
- [23] SHAO Changxiao, LUO Kun, FAN Jianren. Detailed numerical simulation of unsteady drag coefficient of deformable droplet [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 308: 619-631.
- [24] XIAO F, WANG Z G, SUN M B, et al. Simulation of



drop deformation and breakup in supersonic flow [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36 (2): 2417-2424.

[25] YANG Wei, JIA Ming, SUN Kai, et al. Influence of density ratio on the secondary atomization of liquid droplets under highly unstable conditions [J]. Fuel, 2016, 174: 25-35.

[26] FLOCK A K, GULDENBECHER D R, CHEN J, et al. Experimental statistics of droplet trajectory and air flow during aerodynamic fragmentation of liquid drops [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2012, 47: 37-49.

[27] BOGGAVARAPU P, RAMESH S P, AVULAPATI M M, et al. Secondary breakup of water and surrogate fuels; breakup modes and resultant droplet sizes [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2021, 145: 103816.

(编辑 李慧敏 刘杨)