

水滴在撞击不同厚度水膜条件下产生的 二次液滴特性

周博通¹, 杨志刚², 易贤³, 杜雁霞⁴, 熊兵⁵, 徐毅⁵, 吴凌昊⁵, 金哲岩^{1,2}

(1. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092; 2. 上海市地面交通工具空气动力学与热环境模拟重点实验室, 上海 201804;

3. 中国空气动力研究与发展中心 结冰与防除冰重点实验室, 四川 绵阳 621000;

4. 中国空气动力研究与发展中心 空气动力学国家重点实验室, 四川 绵阳 621000; 5. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 绵阳 621000)

摘要: 采用高速相机对水滴撞击水膜的飞溅过程进行了详细测量, 分析了水滴撞击水膜的飞溅临界值、二次液滴的直径分布和二次液滴的速率等飞溅特性。结果表明, 在实验参数范围内, 当韦伯数增大时发生飞溅现象。此外, 可以使用量纲为一参数 K 来描述飞溅临界值, $K = We \cdot Oh^{-0.4}$ 。当 K 值大于 2 100 时发生飞溅现象, 二次液滴的量纲为一直径和二次液滴的量纲为一速率随着 K 值的增大而增大。水膜量纲为一厚度对二次液滴直径分布的影响不明显, 但由冠状水花产生的二次液滴的平均量纲为一速率随水膜量纲为一厚度的增加而减小。

关键词: 水滴撞击; 水膜; 飞溅; 二次液滴

中图分类号: O359+.1

文献标志码: A

Characteristics of Secondary Droplets Produced During Impact Process of a Water Droplet on Water Film of Different Thicknesses

ZHOU Botong¹, YANG Zhigang², YI Xian³, DU Yanxia⁴, XIONG Bing⁵, XU Yi⁵, WU Linghao⁵, JIN Zheyang^{1,2}

(1. School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Vehicle Aerodynamics and Vehicle Thermal Management Systems, Shanghai 201804, China; 3. Key Laboratory of Icing and Anti/De-icing of Aircraft, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China; 4. State Key Laboratory of Aerodynamics, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China; 5. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang 621000, China)

Abstract: The splashing dynamics of a water droplet

impacting a water film was experimentally investigated by a high-speed camera. The splashing limit, the size distribution of secondary droplets, and the velocity of secondary droplets were analyzed. The results show that within the range of the experimental parameters, the splashing occurs when the Weber number increases. The dimensionless parameter K ($K = We \cdot Oh^{-0.4}$) could be used to describe the splashing limit. When $K > 2 100$, splashing phenomenon happens. In addition, with the increase of the K number, both the dimensionless secondary droplet diameter and the dimensionless velocity of secondary droplets increase. The effect of dimensionless film thickness on the diameter distribution of secondary droplets is not significant. However, the average dimensionless velocity of secondary droplets produced by crown splashing decreases with the increment of dimensionless film thickness.

Key words: water droplet impact; water film; splashing; secondary droplets

在自然界和工业应用中, 水滴撞击水膜都是一种常见的现象, 其复杂的作用机理及相关过程的重要性引起了研究人员的关注。水滴撞击水膜的飞溅过程也一直被认为是飞机结冰过程中的一个重要过程, 然而由于缺乏水滴撞击水膜飞溅特性的详细实验数据, 目前用于飞机结冰模拟的飞溅模型没有考虑水滴撞击水膜的撞击过程^[1-2], 因此, 了解水滴撞击水膜的飞溅特性对于在飞机结冰数值模拟中建立可靠的模型非常重要。

多年来许多研究人员对液滴撞击液膜的过程进

收稿日期: 2022-01-05

基金项目: 国家数值风洞工程(NNW2019ZT2-B26)

第一作者: 周博通(1989—), 男, 博士生, 主要研究方向为飞行器结冰机理。E-mail: zhoubotong@tongji.edu.cn

通信作者: 金哲岩(1978—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为飞行器结冰机理。

E-mail: zheyangjin@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

行了研究,以单液滴撞击为主,聚焦于颈部射流、冠状水花的形成机理、动力学特征、飞溅临界参数及二次液滴的预测等。例如,Cossali等^[3]通过实验研究了液体为水和水-甘油混合物时液滴撞击液膜的过程,发现液体黏度对撞击过程有很大的影响。Thoroddsen^[4]研究了液体为水-甘油混合物时不同液体黏度下液滴撞击液膜产生的颈部射流的速度和演化过程。Wang等^[5]使用水-甘油混合物研究液滴撞击液膜的过程,发现当液膜足够薄时,飞溅的临界值不依赖于液膜的厚度。Rioboo等^[6]通过研究液体为水-甘油混合物、十六烷、聚二甲基硅氧烷时液滴撞击液膜的过程,发现可以使用韦伯数和奥内佐格数以及液膜量纲为一厚度的组合来确定飞溅的临界值。Wal等^[7]使用水、水-甘油混合物和庚烷等液体研究了液膜厚度对液滴撞击液膜的影响,发现薄液膜能促进飞溅的发生,而较厚的液膜起到抑制飞溅的作用,另外还研究了表面张力系数和液体黏度对液滴撞击液膜的影响。Okawa等^[8]研究了不同大小和速度的初始水滴撞击水膜的过程,发现撞击后主要存在3种现象:铺展、形成冠状水花但不发生飞溅和发生飞溅,二次液滴总质量与初始液滴质量之比可以使用包含量纲为一参数 K 的公式来描述。Deegan等^[9]使用丙醇、水、硅油等液体研究了液滴撞击液膜的过程,发现颈部射流破碎后形成小尺寸二次液滴,冠状水花发展阶段边缘波动形成较大尺寸二次液滴。Agbaglah等^[10]研究了液体为硅油时液滴撞击液膜的过程,并结合数值模拟和线性稳定性理论探讨了撞击后产生的射流的形成和发展过程。此外,Motzkus等^[11]研究了液体为水、水-乙醇混合物以及水-甘油混合物时液膜厚度对液滴撞击液膜产生的二次液滴的影响。Jossierand等^[12]使用量纲分析和数值模拟来研究液滴撞击液膜的动力学过程,结果表明,飞溅的形成既取决于初始液滴和液膜的物理性质,也受到初始液滴和液膜之间的气体的影响。Li等^[13]发现水滴撞击水膜产生的二次液滴的数量随着韦伯数的增加而增加,而水膜厚度对二次液滴的数量几乎没有影响。

迄今为止已经对液滴撞击液膜上的过程进行了大量研究^[3-13],然而仍然缺少水滴撞击水膜的飞溅临界值、二次液滴的直径分布、二次液滴的速度等飞溅特性的详细信息,由于这些信息与飞机结冰模拟的飞溅模型具有重要相关性^[14-16],因此了解水滴撞击水膜的飞溅过程的细节非常重要。

本文通过高速相机研究了水滴撞击水膜的过

程,分析了韦伯数、量纲为一参数 K 和液膜厚度等参数对飞溅临界值、二次液滴的直径分布、二次液滴的速度的影响。此外,把二次液滴分为2类,即由颈部射流产生的二次液滴和由冠状水花产生的二次液滴,分别对这2种二次液滴的速度进行了研究。目前的工作旨在增加对水滴撞击水膜过程的理解,并为研究人员开发更有效的用于飞机结冰模拟的飞溅模型提供有价值的数

1 实验装置和实验参数

研究装置示意图如图1所示。亚克力水槽(100.0mm×100.0mm×35.0mm)的底面铺有不锈钢平板(50.0mm×50.0mm×3mm),向水槽中注入去离子水形成水膜,使用白光共焦位移传感器(ACR-HNDS100)测量水膜的厚度。使用液滴发生器产生去离子水滴,水滴在重力的作用下落下撞击水膜。冷光灯产生的光线通过光扩散板形成均匀的光线,以固定频率($f = 10\ 000\ \text{Hz}$)运行的高速相机(HSVISION)记录水滴撞击水膜的过程,高速相机得到的图片分辨率为 480×240 ,曝光时间为 $45\ \mu\text{s}$,并将其存储在计算机中以供以后进行分析。初始水滴的形状可以近似为椭圆,其等效直径(d)可以通过式(1)^[17-20]计算:

$$d = (D_1 D_2^2)^{1/3} \quad (1)$$

式中: D_1 为水滴竖直方向的长度; D_2 为水滴水平方向的长度。 d 取 $2.70\ \text{mm}$ 。在处理实验数据时,使用相邻2张图片初始水滴的位移除以2张图片的时间间隔($0.1\ \text{ms}$),得到初始水滴的撞击速度。实验中空气温度保持在 $(20.0 \pm 0.5)\ ^\circ\text{C}$,用于产生水滴和水膜的液体为去离子水,其密度 $\rho = 998\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,表面张力系数 $\sigma = 0.073\ \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$,动力黏度 $\mu = 1.002 \times 10^{-3}\ \text{Pa} \cdot \text{s}$,水膜的厚度 h 从 $0.5\ \text{mm}$ 到 $2.5\ \text{mm}$ 。

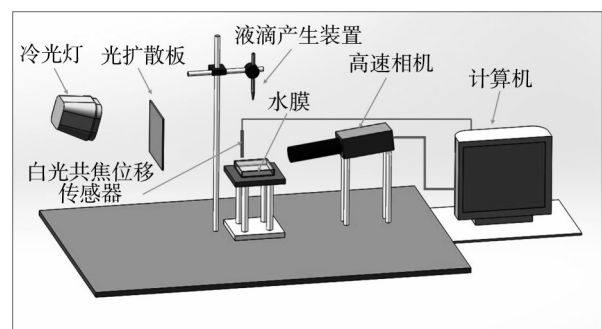


图1 实验装置示意

Fig. 1 Sketch of experimental setup

影响水滴撞击水膜过程的主要量纲为一数为

$$We = \frac{\rho V^2 d}{\sigma}, Re = \frac{\rho V d}{\mu}, Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma d}},$$

$$h^* = \frac{h}{d}, K = We \cdot Oh^{-0.4} \quad (2)$$

式中: ρ 、 μ 和 σ 分别表示液体密度、动力黏度和表面张力系数; V 为初始水滴的撞击速率; We 为韦伯数; Re 为雷诺数; Oh 为奥内佐格数; h 为水膜厚度; h^* 为水膜量纲为一厚度; K 为用来描述水滴撞击水膜过程的重要的量纲为一数^[21]。量纲为一数的取值范围列于表1。对于同一工况,开展5次重复性实验。

表1 量纲为一数的范围

Tab.1 Ranges of dimensionless numbers

We	Re	Oh	h^*	K
72~579	3 765~10 649	2.26×10^{-3}	0.19~0.93	828~6 621

2 实验结果和分析

2.1 水滴撞击水膜过程

图2展示了当 $We = 362$ 、 $K = 4 136$ 、 $h^* = 0.19$ 时水滴撞击水膜的过程。图2a展示了初始水滴即将撞击水膜的瞬间。水滴撞击液膜后,在水滴和水膜接触的颈部区域形成了一个非常薄的液体射流,

称为颈部射流^[4],如图2b所示。随着撞击的继续,液体不断进入射流中形成冠状水花,冠状水花不断向四周扩展,其高度和直径也随时间增长。冠状水花的顶部边缘不断生成二次水滴,向四周发散开来(图2k)。随着时间的推移,二次液滴的直径逐渐增大。

图3展示了当 $We = 579$ 、 $K = 6 621$ 、 $h^* = 0.19$ 时水滴撞击水膜的过程。与图2相比较,水滴撞击水膜后,在水滴和水膜接触的颈部区域都形成了颈部射流(图3b),液体不断进入射流中形成冠状水花,冠状水花不断向四周扩展,但扩展速率明显增大,在水滴撞击水膜后的相同时刻(1.5ms),图3l中的冠状水花的直径和高度明显大于图2l中的冠状水花的直径和高度。与图2相比,图3中的二次液滴的数量明显增多,直径也明显增大。通过观察可以发现,在撞击开始时产生了许多小体积的二次液滴,而在这个过程的后期产生了许多大体积的二次液滴,二次液滴的大小随时间的增加而变大。这是因为不同阶段产生二次液滴的机制不同^[13],水滴撞击水膜后,颈部射流几乎在撞击发生的同时产生大量小体积二次液滴,随着冠状水花增长,冠状水花顶部边缘开始产生直径相对较大的二次液滴,并且产生的二次液滴也逐渐增大。

图4展示了当 $We = 579$ 、 $K = 6 621$ 、 $h^* = 0.56$

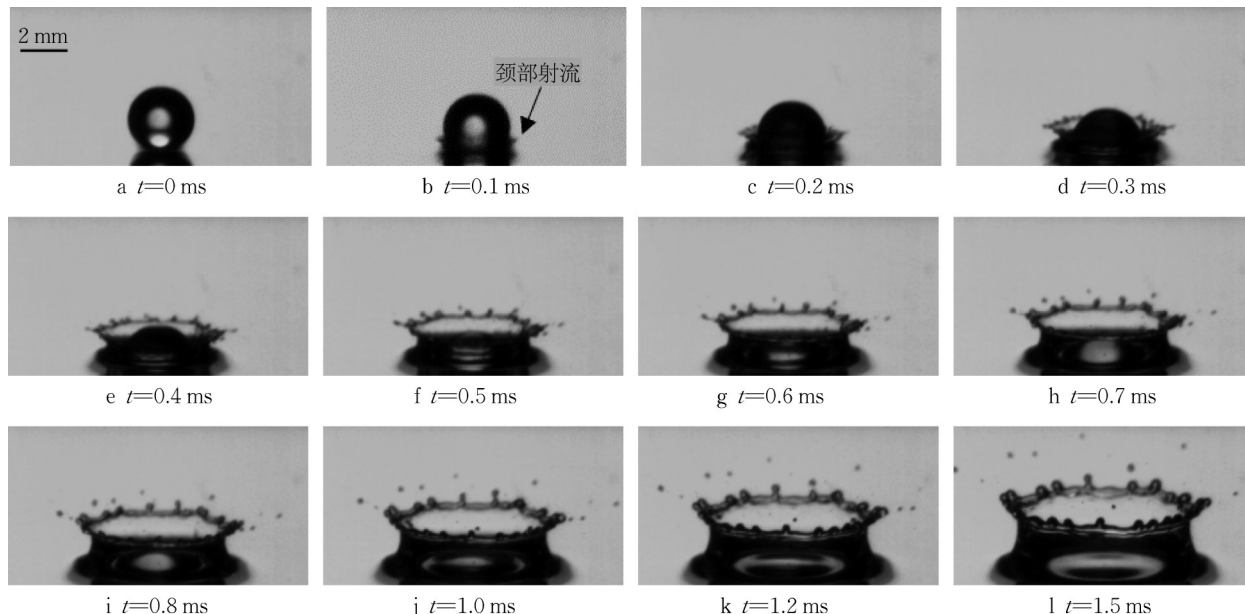


图2 $We = 362$ 、 $K = 4 136$ 、 $h^* = 0.19$ 时水滴撞击水膜的过程

Fig. 2 Sequence of images of water droplet impact process on a water film at $We = 362$, $K = 4 136$, and $h^* = 0.19$

时水滴撞击水膜的过程。与图3相比较,水滴撞击水膜后,在水滴和水膜接触的颈部区域都形成了颈

部射流(图4b),液体不断进入射流中形成冠状水花,冠状水花不断向四周扩展,但扩展速率明显减小,在

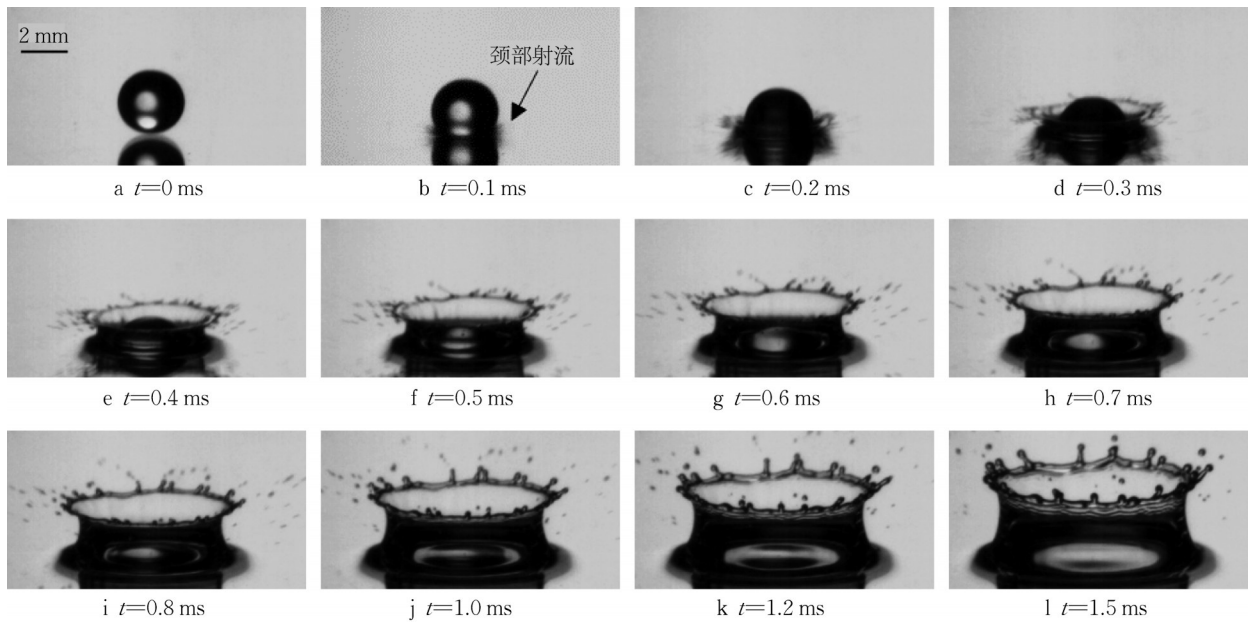


图3 $We = 579, K = 6621, h^* = 0.19$ 时水滴撞击水膜的过程

Fig. 3 Sequence of images of water droplet impact process on a water film at $We = 579, K = 6621$, and $h^* = 0.19$

水滴撞击水膜后的相同时刻(1.5ms),图4l中的冠状水花的直径和高度明显小于图3l中的冠状水花的直径和高度。图4与图3中的撞击过程具有相同的 We 和 K 值,但水膜厚度更大,随着水膜变厚,被水膜

耗散的动能增加,同时更多的液体进入冠状水花,冠状水花膨胀速率由于动量守恒的限制而减小。由于这个因素,冠状水花的直径和高度随着水膜厚度的增加而减小^[22]。

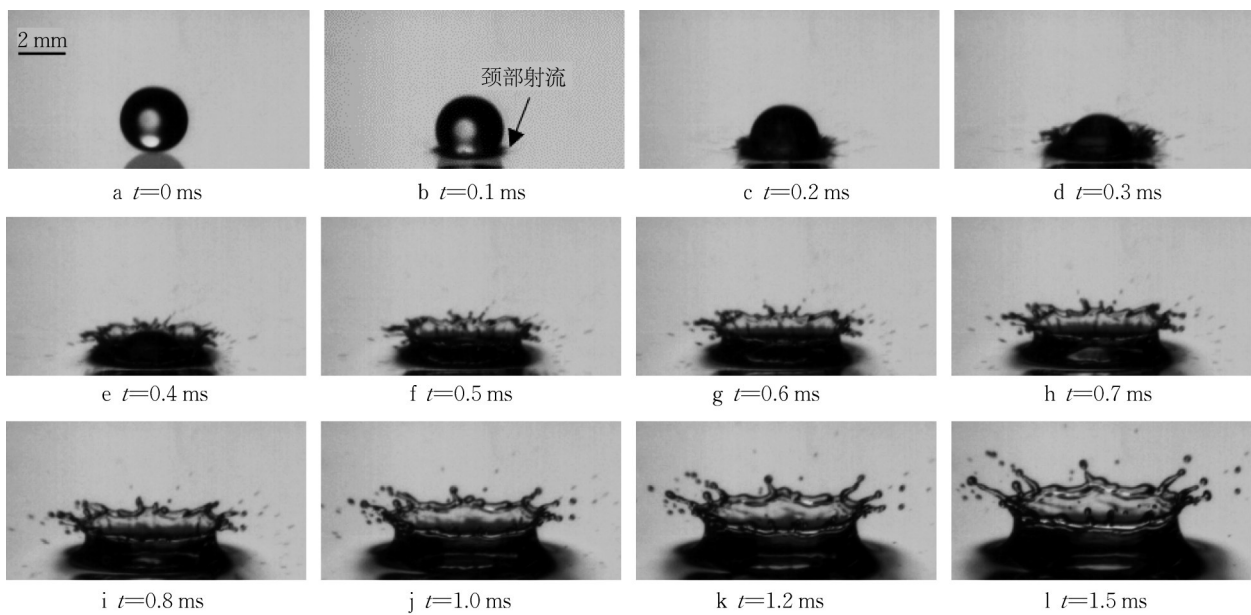


图4 $We = 579, K = 6621, h^* = 0.56$ 时水滴撞击水膜的过程

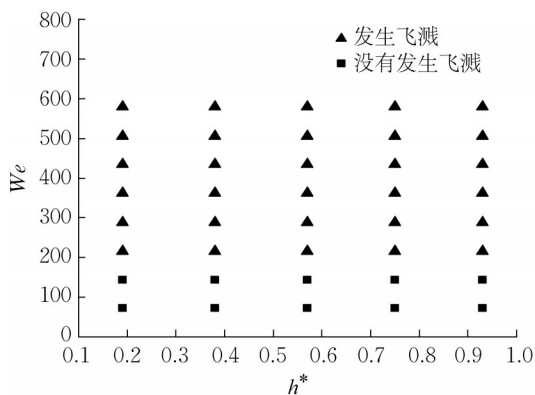
Fig. 4 Sequence of images of water droplet impact process on a water film at $We = 579, K = 6621$, and $h^* = 0.56$

2.2 飞溅临界值

当水滴以较高速率撞击水膜时,在水花的形成和扩展过程中会从边缘分离出小水滴,这种现象被

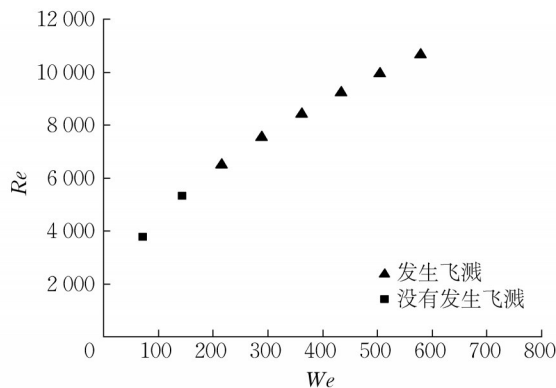
定义为飞溅,可以从撞击后的图像确定飞溅是否发生。是否发生飞溅现象主要取决于惯性力和黏性力之间的平衡,主要受到雷诺数和韦伯数的影响^[12]。

图 5a 展示了韦伯数和水膜量纲为一厚度 h^* 对飞溅的影响。在实验参数范围内,水膜量纲为一厚度对飞溅的影响几乎可以忽略不计,而当韦伯数增大时



a 韦伯数 We 和水膜量纲为一厚度 h^* 对飞溅的影响

则会发生飞溅。图 5b 显示了韦伯数和雷诺数对飞溅的影响,当韦伯数和雷诺数较小时,没有发生飞溅,当韦伯数和雷诺数较大时,发生飞溅。



b 韦伯数 We 和雷诺数 Re 对飞溅的影响

图 5 韦伯数、水膜量纲为一厚度和雷诺数对飞溅的影响

Fig. 5 Influence of Weber number, Reynolds number, and dimensionless film thickness on splashing

K 是一个用来描述水滴撞击水膜过程的重要参数,可以用来判定水滴撞击水膜的过程中是否发生飞溅^[3,8]。图 6 展示了 K 和 h^* 对飞溅的影响,实验中的 h^* 在 0.19 到 0.93 之间。 h^* 相同情况下,当 K 值较小时,没有发生飞溅,随着 K 值的增加,水滴撞击水膜的过程中发生飞溅。飞溅的临界值为 $K = 2100$,当 K 大于 2100 时,产生飞溅现象。当 K 值相同时,改变水膜量纲为一厚度对水滴撞击水膜的过程中是否发生飞溅没有影响。Okawa 等^[8]指出在液体为低黏度液体(例如水)的情况下,飞溅的临界值为 $K = 2100$ 并且不受液膜厚度的影响。

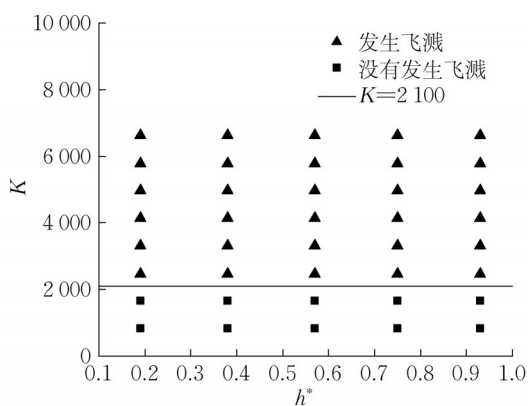


图 6 K 和水膜量纲为一厚度对飞溅的影响

Fig. 6 Influence of K and dimensionless film thickness h^* on splashing

2.3 二次液滴的直径分布

二次液滴的直径分布是二次液滴特性的一个重要组成部分。使用 ImageJ 软件将高速相机得到的图

像转化成黑白二值图像,然后识别并测量二次液滴的直径。费雷特直径是颗粒大小描述的常用参数,经过该颗粒的中心任意方向的直径称为一个费雷特直径。对二次液滴每隔 10° 方向取一个费雷特直径,用 36 个费雷特直径的平均值作为二次液滴的直径。

为了定量描述二次液滴直径随时间的变化,需要使用量纲为一时间 $\tau = t/(d/V)$ 和二次液滴量纲为一直径 $D_{sec}^* = D_{sec}/d$,其中 D_{sec} 是二次液滴的直径, d 是撞击水滴的等效直径。图 7 展示了不同量纲为一时间下二次液滴直径的分布,图中 f 为所在范围的二次液滴数量与二次液滴总数的比值。选择了 4 个量纲为一时间计算二次液滴的直径,即初始水滴撞击水膜液面后的时刻 $\tau = 0.5, 1.0, 1.5$ 和 2.0 。当 $\tau = 0.5$ 时(图 7a), D_{sec}^* 在 0 到 0.04 之间的二次液滴最多。当 $\tau = 1.0$ 时(图 7b), $D_{sec}^* < 0.04$ 的二次液滴百分比明显减少,而 $D_{sec}^* > 0.04$ 的二次液滴百分比增加。而当 $\tau = 2.0$ 时(图 7d), D_{sec}^* 在 0.08 到 0.12 范围内的二次液滴百分比明显增加。随着时间的增加,二次液滴的量纲为一直径趋于增加。

图 8 展示了当 $\tau = 1.0, K = 6621$ 时 4 种水膜量纲为一厚度下 ($h^* = 0.19, 0.37, 0.56, 0.74$) 二次液滴的直径分布。大多数二次液滴量纲为一直径 D_{sec}^* 集中在 0.04 到 0.12 的范围内。水膜量纲为一厚度对二次液滴直径分布的影响不明显,这可能是因为在所选范围内水膜厚度的变化对冠状水花边缘的不稳定性影响很小,从而对二次液滴直径分布的影响也不明显^[13]。

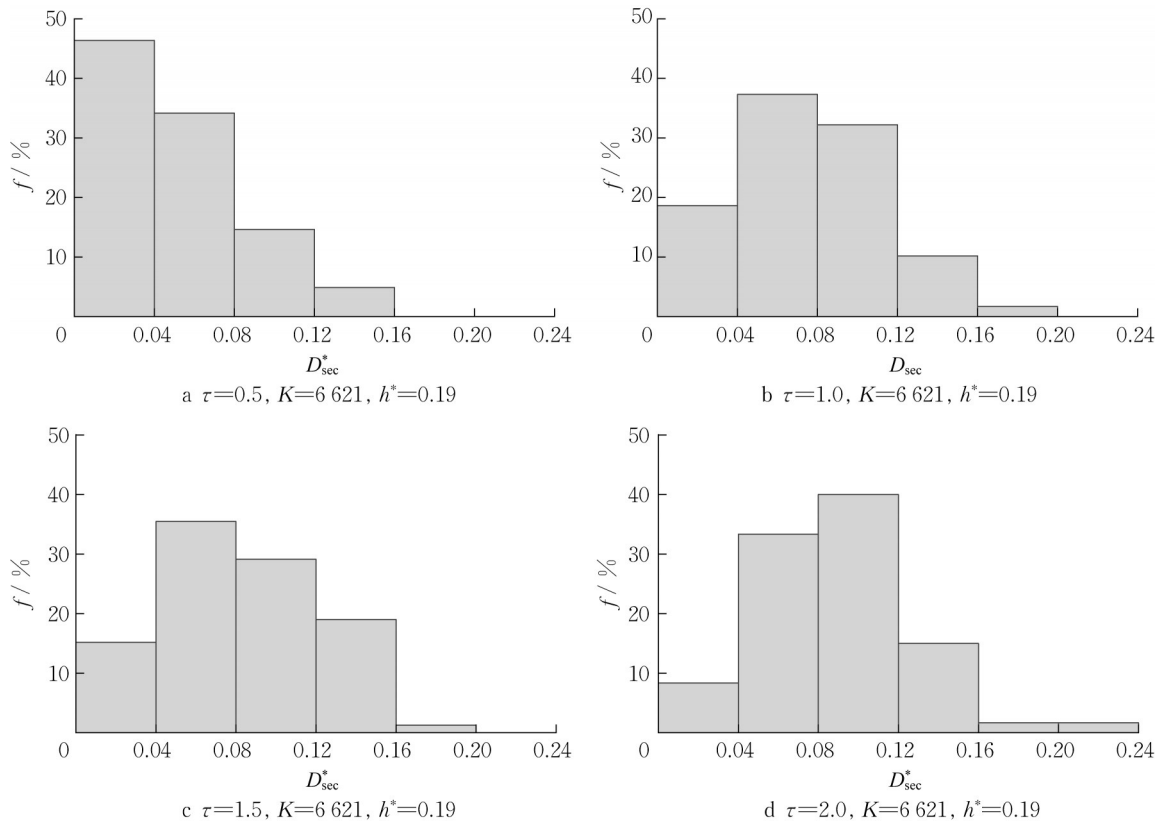


图7 不同量纲为一时间时二次液滴直径分布 ($K=6621$, $h^*=0.19$)

Fig. 7 Histogram of secondary droplets diameter at different dimensionless times ($K=6621$ and $h^*=0.19$)

图9展示了不同 K 值下二次液滴的直径分布 ($\tau = 1.0$, $h^* = 0.19$)。当 $K=3310$ 时(图9a), D_{sec}^* 集中在0到0.08的范围内, D_{sec}^* 在0.04到0.08之间的二次液滴最多, 约为所有二次液滴总数的45%。当 $K=4136$ 时(图9b), D_{sec}^* 仍然集中集中在0到0.08的范围内, 但其所占二次液滴总数的比例减小, 并且开始出现 D_{sec}^* 在0.12到0.16之间的二次液滴。当 $K=6621$ 时(图9d), D_{sec}^* 集中在0.04到0.12的范围内, D_{sec}^* 在0.08到0.12之间的二次液滴最多, D_{sec}^* 在0到0.04之间的小体积二次液滴占二次液滴总数的比例明显减少。随着 K 值的增大, 二次液滴量纲为一直径趋于增大。

2.4 二次液滴的速率

水滴撞击水膜表面是一个非常复杂的过程, 图10展示了水滴撞击水膜产生飞溅现象的具体过程^[12, 23]。水滴撞击水膜后, 在水滴和水膜接触的颈部区域形成了颈部射流, 颈部射流边缘产生了许多非常小的二次液滴。随着撞击的继续, 液体不断进入射流中形成冠状水花, 冠状水花的高度和直径不断随时间增长。冠状水花的顶部边缘不断生成二次水滴, 随着时间的推移, 二次液滴的直径逐渐增大。将二次液滴分为2组, 即由颈部射流产生的二次液

滴和冠状水花产生的二次液滴, 分别研究这2种二次液滴的速率。

二次液滴的量纲为一速率定义为 $V_{\text{sec}}^* = V_{\text{sec}} / V$, 其中 V_{sec} 是二次液滴的速率, V 是初始水滴的撞击速率。在实际过程中, 二次液滴的运动是三维的, 由于使用一个高速相机拍摄液滴撞击液膜的过程, 只能从图像中获取二次液滴的二维速率。如图11所示, 只统计从水花左右边缘产生的二次液滴的速率, 这些二次液滴的二维速率接近其真实的三维速率^[13, 24-25]。

水滴撞击水膜后, 颈部射流产生的二次液滴的速率甚至能达到初始液滴撞击速率的10倍以上^[4]。图12展示了在不同 K 和不同 h^* 下由颈部射流产生的二次液滴的量纲为一速率。这些二次液滴的量纲为一速率随着 K 的增加而增加, 水膜量纲为一厚度对这些二次液滴的量纲为一速率的影响不明显, 这可能是由于这些二次液滴产生于水滴撞击水膜过程中非常早期的阶段, 在这个阶段中水膜厚度对撞击过程的影响较小。根据实验数据, 不同 K 下颈部射流产生的二次液滴的量纲为一速率可以近似为

$$V_{\text{sec}}^* = e^{0.000125K - 0.125} \quad (3)$$

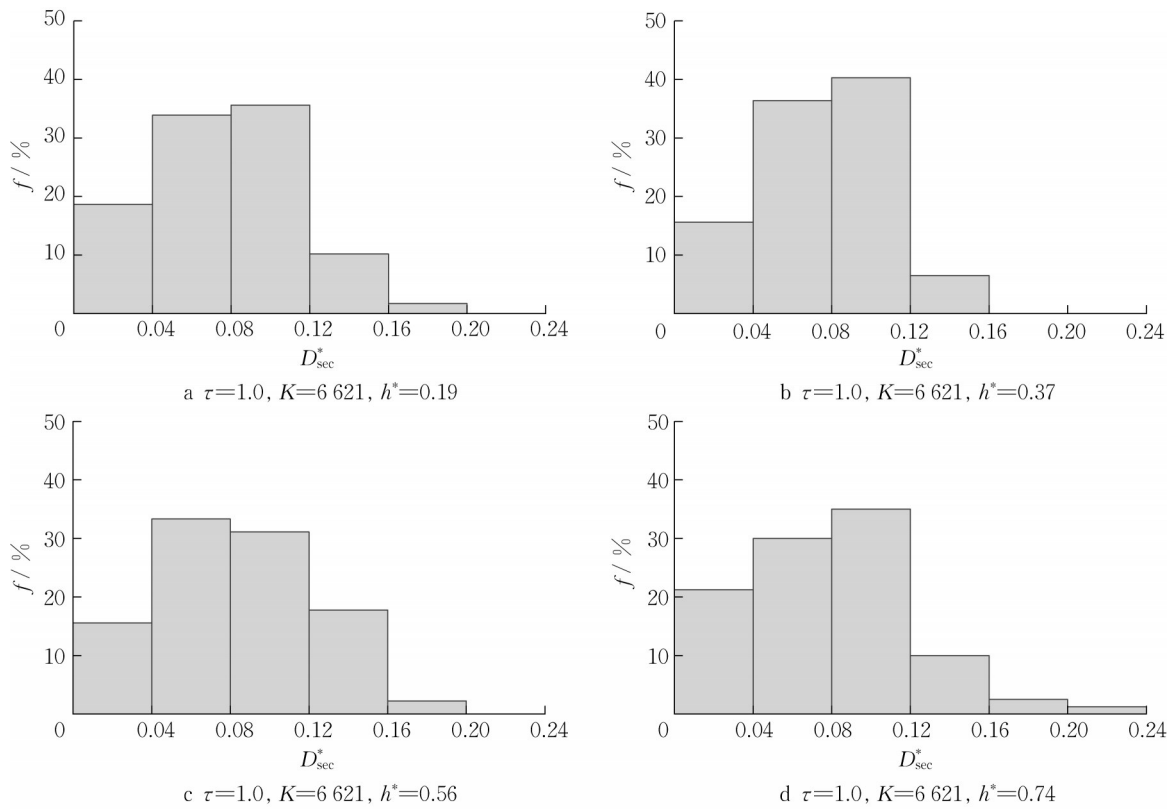


图 8 不同水膜量纲为一厚度时二次液滴直径分布 ($K=6\ 621, \tau=1.0$)

Fig. 8 Histogram of secondary droplets diameter at different dimensionless film thicknesses ($K=6\ 621$ and $\tau=1.0$)

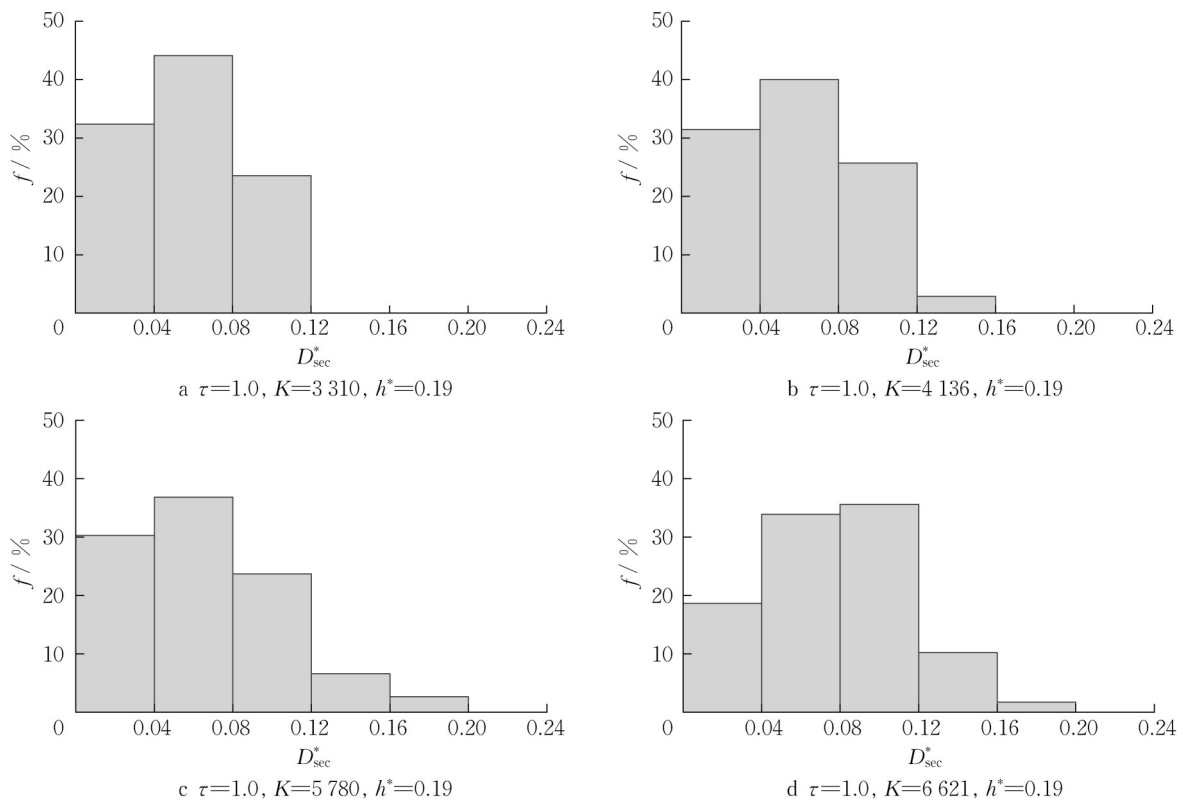


图 9 不同 K 值时二次液滴直径分布 ($\tau=1.0, h^*=0.19$)

Fig. 9 Histogram of secondary droplets diameter at different K values ($\tau=1.0$ and $h^*=0.19$)

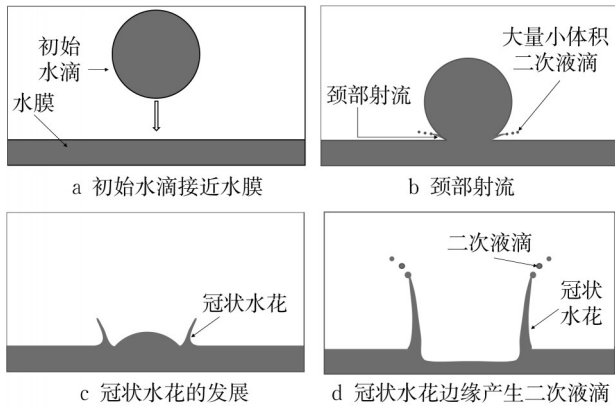


图 10 水滴撞击水膜过程示意

Fig. 10 Process of droplet splashing on a water film

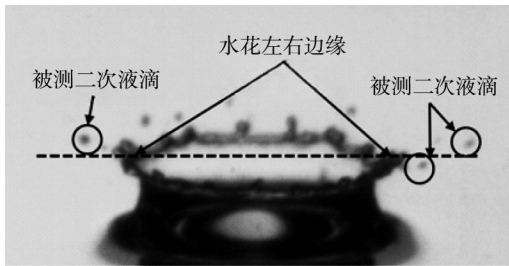


图 11 二次液滴的速率测量示意

Fig. 11 Measurement of velocity of secondary droplets

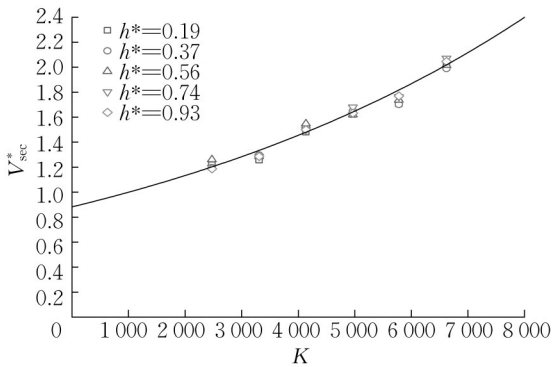


图 12 不同 K 和不同水膜量纲为一厚度下由颈部射流产生的二次液滴的量纲为一速率

Fig. 12 Dimensionless velocity of secondary droplets produced by ejecta sheet at different K values and dimensionless film thicknesses h^*

图 13 展示了在不同 K 和不同 h^* 下冠状水花产生的二次液滴的平均量纲为一速率 (V^*_{asec}), V^*_{asec} 定义为所有二次液滴的量纲为一速率 V^*_{sec} 之和与二次液滴的数量 N 的比值。

$$V^*_{asec} = \frac{\sum V^*_{sec}}{N} \quad (4)$$

冠状水花产生二次液滴的平均量纲为一速率随

着 K 的增加而增加,随着水膜量纲为一厚度的增加而减少。Roisman 等^[26]指出二次液滴的速率应该与初始液滴的机械能正相关,当初始液滴的 K 值增大时,其相对应的机械能也随之增大,因此具有较大的 K 值的撞击过程可以产生较大平均速率的二次液滴。随着水膜厚度的增加,在冠状水花的发展期间,更多的液体进入冠状水花,冠状水花膨胀速率由于动量守恒的限制而减小,从而影响其边缘产生的二次液滴的速率,因此具有较大的水膜量纲为一厚度的撞击过程产生二次液滴的平均速率较小。根据得到的实验数据,冠状水花产生二次液滴的平均量纲为一速率可以近似为

$$V^*_{asec} = 5 \times 10^{-5} K - 0.236 h^* + 0.650 \quad (5)$$

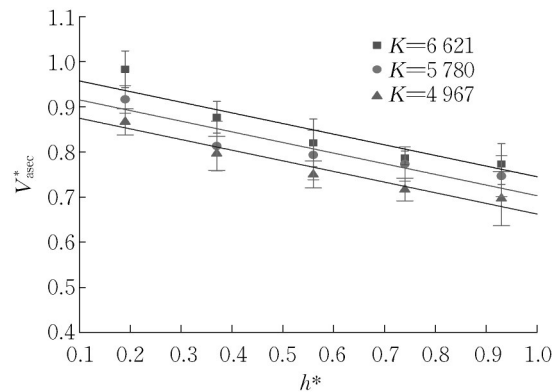


图 13 不同 K 和不同水膜量纲为一厚度下由冠状水花产生的二次液滴的平均量纲为一速率

Fig. 13 Average dimensionless velocity of secondary droplets produced by crown splashing at different K values and dimensionless film thicknesses h^*

3 结语

使用高速相机对水滴撞击水膜的动力学过程进行了详细的测量,研究了飞溅临界值、二次液滴的直径分布、二次液滴的速率等飞溅特性。在实验参数范围内,韦伯数对飞溅现象有着重要影响,当韦伯数增大时发生飞溅现象。 K 是一个非常重要的量纲为一参数,可用于表征水滴撞击水膜的结果,也可以使用 K 来描述飞溅临界值,当 K 值大于 2 100 时会发生飞溅现象。随着量纲为一时间的增加,二次液滴的量纲为一直径趋于增大。随着 K 值的增加,二次液滴的量纲为一直径增加,而水膜量纲为一厚度对二次液滴的直径分布影响不显著。由颈部射流产生二次液滴的量纲为一速率随着 K 的增加而增加,水

膜量纲为一厚度对这些二次液滴的量纲为一速率影响不明显。此外,由冠状水花产生二次液滴的平均量纲为一速率随着 K 的增加而增加,随着水膜量纲为一厚度的增加而减小。

作者贡献声明:

周博通:实验、数据分析、撰写论文。

杨志刚:项目管理。

易 贤:制定研究方案。

杜雁霞:制定研究方案。

熊 兵:理论分析。

徐 毅:文献调研。

吴凌昊:开展实验不确定度分析。

金哲岩:论文整体规划及具体研究内容的工作安排、数据分析、审阅及修改论文。

参考文献:

- [1] TAN C, PAPADAKIS M. Droplet breakup, splashing and re-impingement on an iced airfoil[C]// Proceedings of 4th AIAA Theoretical Fluid Mechanics Meeting and Exhibit. Toronto: AIAA, 2005: 5185-5202.
- [2] TAN S. Effects of large droplet dynamics on airfoil impingement characteristics [C]// Proceedings of 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 2005: 74-86.
- [3] COSSALI G E, COGHE A, MARENGO M. The impact of a single drop on a wetted solid surface [J]. *Experiments in Fluids*, 1997, 22(6): 463.
- [4] THORODDSEN S T. The ejecta sheet generated by the impact of a drop [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2002, 451: 373.
- [5] WANG A B, CHEN C C. Splashing impact of a single drop onto very thin liquid films[J]. *Physics of Fluids*, 2000, 12(9): 2155.
- [6] RIOBOO R, BAUTHIER C, CONTI J, *et al.* Experimental investigation of splash and crown formation during single drop impact on wetted surfaces[J]. *Experiments in Fluids*, 2003, 35(6): 648.
- [7] WAL R, BERGER G M, MOZES S D. Droplets splashing upon films of the same fluid of various depths[J]. *Experiments in Fluids*, 2006, 40(1): 33.
- [8] OKAWA T, SHIRAIISHI T, MORI T. Production of secondary drops during the single water drop impact onto a plane water surface [J]. *Experiments in Fluids*, 2006, 41(6): 965.
- [9] DEEGAN R D, BRUNET P, EGGERS J. Complexities of splashing[J]. *Nonlinearity*, 2008, 21(1): C1.
- [10] AGBAGLAH G, DEEGAN R D. Growth and instability of the liquid rim in the crown splash regime [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, 752(1): 485.
- [11] MOTZKUS C, GENSDARMES F, GÉHIN E. Study of the coalescence/splash threshold of droplet impact on liquid films and its relevance in assessing airborne particle release [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011, 362(2): 540.
- [12] JOSSERAND C, RAY P, ZALESKI S. Droplet impact on a thin liquid film: anatomy of the splash [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 802: 775.
- [13] LI J, ZHANG H, LIU Q. Characteristics of secondary droplets produced by a single drop impacting on a static liquid film [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019, 119: 42.
- [14] CEBECI T, KAFYEKE F. Aircraft icing [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2003, 35(1): 11.
- [15] HONSEK R, HABASHI W G, AUBE M S. Eulerian modeling of in-flight icing due to supercooled large droplets [J]. *Journal of Aircraft*, 2008, 45(4): 1290.
- [16] BILODEAU D R, HABASHI W G, FOSSATI M, *et al.* Eulerian modeling of supercooled large droplet splashing and bouncing [J]. *Journal of Aircraft*, 2015, 52(5): 1611.
- [17] STOW C D, HADFIELD M G. An experimental investigation of fluid flow resulting from the impact of a water drop with an unyielding dry surface [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical*, 1981, 373(1755): 419.
- [18] RIOBOO R, MARENGO M, TROPEA C. Time evolution of liquid drop impact onto solid, dry surfaces [J]. *Experiments in Fluids*, 2002, 33(1): 112.
- [19] JIN Z, SUI D, YANG Z. The impact, freezing, and melting processes of a water droplet on an inclined cold surface [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2015, 90: 439.
- [20] JU J, YANG Z, YI X, *et al.* Experimental investigation of the impact and freezing processes of a hot water droplet on an ice surface [J]. *Physics of Fluids*, 2019, 31(5): 57107.
- [21] YARIN A L. Drop impact dynamic: Splashing, spreading, receding, bouncing [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2006, 38: 159.
- [22] GUO Y, WEI L, LIANG G, *et al.* Simulation of droplet impact on liquid film with CLSVOF [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2014, 53: 26.
- [23] LIANG G, MUDAWAR I. Review of mass and momentum interactions during drop impact on a liquid film [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 101: 577.
- [24] BURZYNSKI D A, ROISMAN I V, BANSMER S E. On the splashing of high-speed drops impacting a dry surface [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2020, 892: A2.
- [25] OKAWA T, KAWAI K, KUBO K, *et al.* Fundamental characteristics of secondary drops produced by early splash during single-drop impingement onto a thick liquid film [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2021, 131: 110533.
- [26] ROISMAN I V, HORVAT K, TROPEA C. Spray impact: rim transverse instability initiating fingering and splash, and description of a secondary spray [J]. *Physics of Fluids*, 2006, 18(10): 102104.