

乙醇液滴冲击过冷水平壁面的铺展行为实验研究

张泽^{1,2}, 杨松¹, 刘秀芳^{1,2}, 赖天伟^{1,2}, 侯予^{1,2}

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 西安交通大学深低温技术与装备教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为探究表面张力对液滴冲击过冷水平壁面铺展动力学行为的影响,搭建了可视化实验系统,探究了乙醇液滴冲击过冷水平壁面的铺展动力学行为,分析了水平壁面过冷度对低表面张力液滴冲击铺展动力学行为的影响。实验中,采用亲水硅水平壁面及较小的冲击速度以观测乙醇液滴冲击过冷水平壁面的铺展动力学行为。此外,还比较了不同的最大铺展因子和最大铺展时间的典型模型对乙醇液滴冲击过冷水平壁面铺展动力学因子的适用性。结果表明:乙醇液滴冲击过冷亲水水平壁面的铺展动力学行为分为飞溅、铺展、稳定3个阶段;最大铺展时间随水平壁面过冷度的增大而减小;水平壁面过冷度对最大铺展因子的影响是非单调的,在水平壁面过冷度较低时,最大内部铺展因子减小起主要作用,在水平壁面过冷度较高时,由于瑞利-泰勒不稳定性的增强,无量纲手指状突起增大起主要作用,二者共同作用造成了非单调变化;现有模型对于最大铺展时间的预测效果较好,相对平均偏差为6.05%,而对最大铺展因子的预测效果较差。

关键词: 液滴冲击;过冷水平壁面;表面张力;铺展动力学行为

中图分类号: O353.4 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202401011 **文章编号:** 0253-987X(2024)01-0119-07

Spreading Behavior of an Ethanol Droplet Impacts on a Supercooled Substrate

ZHANG Ze^{1,2}, YANG Song¹, LIU Xiufang^{1,2}, LAI Tianwei^{1,2}, HOU Yu^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. MOE Key Laboratory of Cryogenic Technology and Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: This study aims to investigate the effect of surface tension on the spreading dynamics of a droplet impacting a supercooled substrate. To accomplish this, a visualization experimental system is established. The influence of substrate supercooling on the spreading dynamics of low surface tension droplet is analyzed. In the experiment, hydrophilic silicon substrate and a smaller impact velocity are used to observe the spreading dynamics of an ethanol droplet impacting the supercooled substrate. In addition, this study compares the applicability of typical models with different maximum spreading factor and maximum spreading time to the spreading dynamic factors of an ethanol droplet impacting supercooled substrate. The results demonstrate that the spreading dynamics of an ethanol droplet impacting the supercooled hydrophilic substrate can be divided into three stages: splash, spreading, and stability. The maximum spreading time decreases with an increase in substrate supercooling. Moreover, the influence of substrate supercooling on the max-

imum spreading factor is non-monotonic. At low substrate supercooling, the reduction of the maximum internal spreading factor plays a dominant role. Conversely, at high substrate supercooling levels, the enhancement of Rayleigh-Taylor instability leads to an increase in the “fingering-like” protrusion of the infinite chain plays a major role. The combined effect of the two causes non-monotonic changes. The existing models have good predictive performance for the maximum spreading time, with a relative mean error of 6.05%. However, their predictive accuracy for the maximum spreading factor is poor.

Keywords: droplet impact; supercooled substrate; surface tension; spreading dynamics

在日常生活与工业生产中,液滴冲击固体水平壁面这一物理过程广泛存在。例如,拍打在荷叶水平壁面于中心聚集的水滴^[1-2],下雨天从高空冲击在雨伞上的雨滴飞溅^[3-4],内燃机中未燃尽的油滴冲击燃烧室壁面^[5-6],航空发动机内部小水滴冲击叶片造成的侵蚀^[7]等。因此,深入探究液滴冲击固体水平壁面的铺展特性、飞溅特性和铺展时间,可以对液滴冲击固体水平壁面这一物理过程制定控制策略,这对我们的日常生活及工业生产具有重要意义。

迄今为止,对于液滴冲击水平壁面的动力学行为,已有众多学者针对液滴物性进行了一系列研究。Kulkarni 等^[8]通过在液体中增加活性剂,改变表面张力,确定了尿素液滴冲击水平壁面的4种模式,即沉积、热雾化、回弹和破碎。Lin 等^[9]利用修正的毛细惯性时间,考虑液体黏度和水平壁面润湿性对液滴铺展的影响,得到了描述最大铺展时间的修正表达式。Zhao 等^[10]研究了黏性液滴对超重力水平壁面的影响,表明最大铺展因子随着韦伯数或雷诺数的增加而增加,但随着液体黏度的增加而减小。

不仅如此,也有众多学者展开了过冷水平壁面的液滴冲击动力学研究。Ding 等^[11]利用高速摄像机,并采用液滴铺展因子、无量纲高度、特征时间、反弹能量和二次液滴质量分数来反映动力学行。Qian 等^[12]对冷弹性超疏水膜进行了液滴冲击实验,研究了水平壁面硬度和冲击速度对液滴冲击过程的影响,与弹性疏水膜相比,弹性超疏水膜具有更强的防冰性能。Castillo 等^[13]通过冷冻液滴和邻近液滴之间的热量和质量交换来研究液滴之间的相互作用,在冷冻液滴的最终形状中观察到不对称性。Liu 等^[14]利用流体体积(VOF)法和熔-孔隙度技术建立了一个数值模型,并通过模拟和实验比较了液滴轮廓和铺展面积因子。Zhang 等^[15]利用 VOF 多相模型和凝固/熔化相变模型,建立了一个同时考虑过冷度对物理性质的影响和动态接触角对接触线运动的影响的数值模型来模拟液滴的冲击-冻结行为。

尽管如此,目前针对低表面张力液滴冲击过冷水平壁面的研究仍有所欠缺。液滴在过冷表面上的冲击和应用在生活中也十分常见,例如喷雾冻结^[16-17]、高空中的过冷水滴冲击机翼导致结冰^[18-20]、过冷喷涂^[21-23]等。本文针对乙醇液滴冲击过冷亲水水平壁面这一基本物理现象开展实验,针对其铺展动力学行为进行分析与讨论,旨在探究低表面张力对液滴冲击过冷水平壁面的铺展动力学行为的影响。这一研究有助于加深对固液接触现象的理解,为更好的控制固液介面接触提供有效指导。

1 实验方法

1.1 实验系统

本文实验系统如图1所示,选择常温状态下的无水乙醇(质量分数99.9%,Tansoole)进行实验。常温下,该液体的密度 ρ 为788.69 kg/m³,表面张力 σ 为0.023 N/m,黏度 μ 为0.0012 Pa·s,乙醇液滴的初始温度为20℃。注射泵(Harvard, PHD-Ultra)通过推动总量程为5 mL的注射器以生成乙醇液滴,当针尖处液滴的自身重力大于其表面张力时,液滴从针尖脱落。针尖的外径为(0.23±0.02) mm,液滴的初始直径 D_0 为(1.75±0.08) mm,针尖底部距离过冷水平

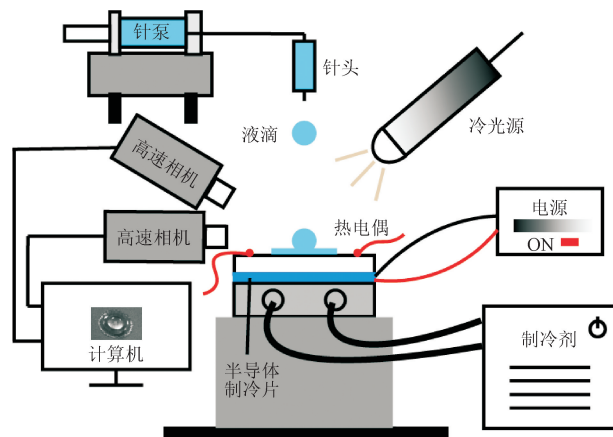


图1 本文实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

壁面的距离为 335 mm,液滴冲击过冷水平壁面的初速度 U_0 为 (2.43 ± 0.19) m/s。使用高速相机(Photron, Fastcam-MiniAX100)拍摄了液滴冲击过冷水平壁面的过程,拍摄速度为 18 000 帧/s,镜头方向与水平方向夹角为 54° 和 0° 。

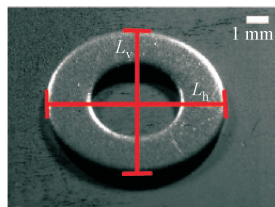
液滴冲击的水平壁面为硅片(亲水光滑硅片),乙醇液滴在该水平壁面上的静态接触角为 8.5° 。硅片紧密贴合于一半导体制冷片的冷端,半导体制冷片的热端与循环制冷机(JULABO, CD-300F)的冷却模块贴合,通过这种方式,硅片的温度 T_s 的范围为 $0 \sim -36^\circ\text{C}$ 。水平壁面温度为硅片两个对称布置的 K 型热电偶(Omega, 精度为 ± 0.1 K)的测量值的平均值。环境温度为 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$,相对湿度为 $(35 \pm 2)\%$ 。为了尽量消除过冷表面结霜对表面粗糙度的影响,每次实验前利用无纺布沿同一方向对实验水平壁面进行擦拭。为确保实验数据的可靠性,每组实验至少重复 3 次,对重复的结果进行计算,所获得的标准方差为误差棒。

1.2 数据处理

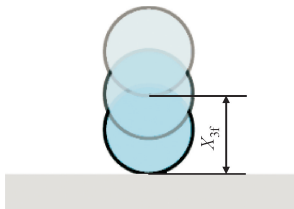
实验数据处理方法如图 2 所示。首先,使用圆形薄片进行标定,以确定高速摄像机镜头的放大比例,圆形薄片的水平直径和垂直直径分别为 L_h 和 L_v ,如图 2(a)所示。其次,根据乙醇液滴即将接触过冷水平壁面的最后 3 帧计算冲击速度,如图 2(b)所示,冲击速度的计算公式为

$$U_0 = \frac{X_{3f}}{t_{2f}} \quad (1)$$

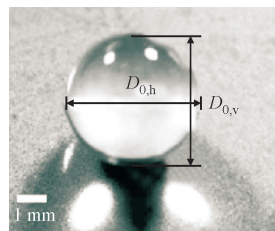
式中: X_{3f} 为乙醇液滴最后 3 帧移动的距离; t_{2f} 为移动时间。



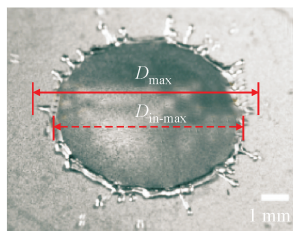
(a) 圆形薄片两方向长度测量



(b) 液滴冲击速度测量



(c) 液滴初始直径测量



(d) 最大铺展因子测量

图 2 实验数据处理方法

Fig. 2 Experimental data processing methods

最后,使用 PFV 软件针对液滴的初始直径及铺展过程中的参数进行测量,如图 2(c)、2(d)所示,分别从水平与垂直两个角度进行测量,并根据圆形薄片的水平和垂直角度放大比例,计算得到各物理量的真实值,计算公式为

$$X_{\text{real}} = (X_v X_h^2)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

式中: X_v 为垂直测量值; X_h 为水平测量值。

根据实验数据测量值,乙醇液滴冲击过冷水平壁面的雷诺数 $Re = \rho U_0 D_0 / \mu$ 为 2 795,韦伯数 $We = \rho U_0^2 D_0 / \sigma$ 为 354,奥内佐格数 $Oh = \sqrt{We}/Re$ 为 0.006 7。雷诺数代表惯性力与黏性力的比值,韦伯数代表惯性力和表面张力的比值,奥内佐格数代表黏性力与表面张力的比值。

2 结果讨论

2.1 乙醇液滴冲击过冷水平壁面的现象

乙醇液滴冲击过冷水平壁面表现出两种不同模式。定义水平壁面过冷度为 $\Delta T = 273.15 - T_s$,其中 T_s 为水平壁面温度,实验涉及的过冷度有 7 个,分别为 0、6、12、18、24、30 和 36 K。如图 3 所示,乙醇液滴以 2.43 m/s 的初速度冲击过冷度 $\Delta T = 6.0$ K 的水平壁面时,在冲击后立即铺展,同时在液滴边缘发生飞溅。子液滴向周围各个方向散落,经历一段时间的铺展后逐渐趋于稳定,这一模式被称为模式 I 飞溅-铺展。当水平壁面过冷度逐渐增大,如图 4 所示, $\Delta T = 30.0$ K 时,乙醇液滴冲击过冷水平壁面后同样发生铺展,同时子液滴飞溅,但随着铺展程度增大,液滴边缘在最大铺展时间时出现“手指状突起”,这一模式 II 被称为飞溅-突起。

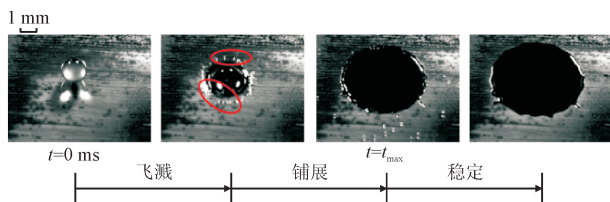


图 3 乙醇液滴冲击低过冷度水平壁面的铺展行为

Fig. 3 Spreading behavior of an ethanol droplet impacting low supercooling substrate

乙醇液滴冲击过冷水平壁面会在两个阶段出现飞溅或手指状突起,但两者形成的机理有所不同:前者是由于乙醇液滴的表面张力较小,液滴在冲击水平壁面的一瞬间,惯性力大于表面张力,液滴边缘无法保持原状,因而造成了飞溅;后者是由于液滴冲击

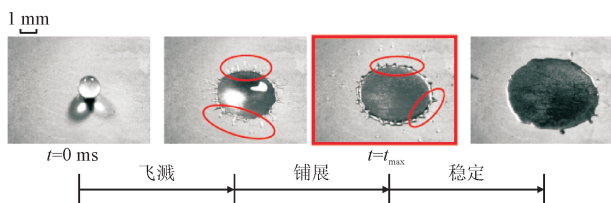


图 4 乙醇液滴冲击高水平壁面过冷度的铺展行为

Fig. 4 Spreading behavior of an ethanol droplet impacting high supercooling substrate

过冷水平壁面,经过一段时间换热,液滴底部及边缘的温度降低,使得流体的密度增大,加剧了液滴与空气的密度差,在边缘前进速度的作用下,触发了液体-气体界面的瑞利-泰勒不稳定性,形成了手指状突起。总而言之,水平壁面过冷度较低时,乙醇液滴冲击形成模式 I 飞溅-铺展;水平壁面过冷度较高时,冲击现象向模式 II 飞溅-突起转变。

2.2 水平壁面过冷度对铺展动力学行为的影响

为了探究水平壁面过冷度对液滴冲击的影响机制,定义无量纲铺展因子 $\beta = D(t)/D_0$, 其中 $D(t)$ 为液滴每一时刻的直径, $D_{\max}$ 为液滴能达到的最大铺展直径,对应的最大铺展因子为 $\beta_{\max} = D_{\max}/D_0$ 。图 5 展示了不同水平壁面过冷度下,乙醇液滴冲击水平壁面的铺展因子 β 随时间的变化曲线。可以看出,乙醇液滴冲击不同过冷度水平壁面均在 1.0 ms 内发生破碎-飞溅,在这段时间内,铺展速率近似为线性,在飞溅后, β 突然减小,随后铺展因子继续增大,铺展速率逐渐减小,最终趋于 0,液滴形态不再发生变化。

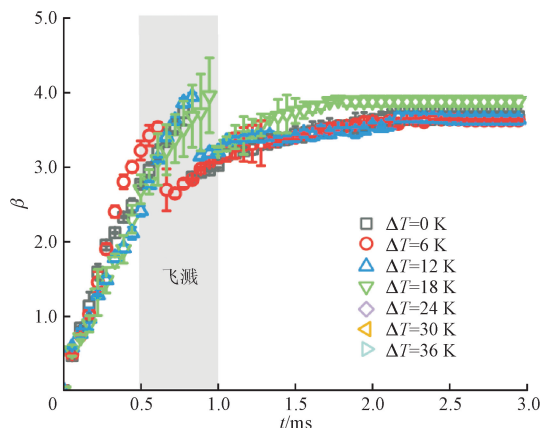


图 5 乙醇液滴冲击不同过冷度水平壁面的铺展因子变化

Fig. 5 Changes in spreading factor of an ethanol droplet impacting substrate with different supercooling degree

根据液滴铺展随时间的变化,提取了不同过冷度下的 $\beta_{\max}$ 和 $t_{\max}$ 并绘制了图 6。如图所示:随着水

平壁面过冷度的增大, $\beta_{\max}$ 呈现了先减小后增大的非单调变化趋势,并在水平壁面过冷度为 18.0 ~ 30.0 K 时达到最小值;不同于 $\beta_{\max}$ 的变化趋势, $t_{\max}$ 呈现逐渐减小的趋势,这是由于随着水平壁面过冷度的增加,换热加剧,液滴的温度降低,这使得密度、黏度、表面张力增加,抑制了最大铺展时间。根据 Shang 等^[24]提出的换热模型,将乙醇液滴看作一个整体,并将液滴冲击过冷水平壁面的过程看作圆柱形不断“变矮”和“变宽”的过程,可以得到乙醇液滴冲击过冷水平壁面的温度降低范围为 1.8~3.7 K。

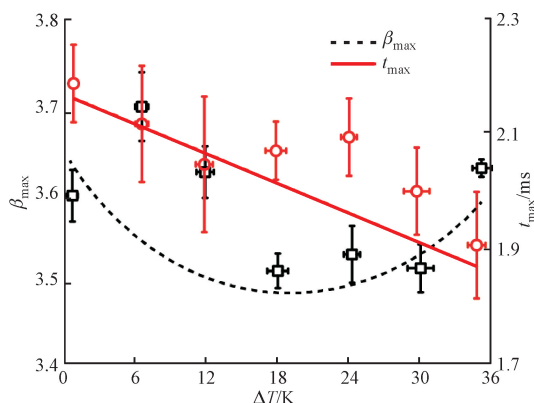


图 6 最大铺展因子和最大铺展时间随水平壁面过冷度的变化

Fig. 6 Variation of maximum spreading factor and maximum spreading time with substrate supercooling

为了揭示 $\beta_{\max}$ 随水平壁面过冷度的这一非单调变化,将 $\beta_{\max}$ 分为两部分,并分别研究各部分与乙醇浓度的关系。如图 7(a) 所示, $\beta_{\max}$ 包含内部铺展无量纲直径 $\beta_{\text{in-max}} = D_{\text{in-max}}/D_0$, 以及边缘的无量纲指状长度 $\zeta = L_{\text{fmax}}/D_0$, 其中 $D_{\text{in-max}}$ 为液滴铺展到最大程度的内部铺展直径, L_{fmax} 为液滴铺展至最大的指状长度。当 $\zeta < 0.15$ 时,认为液滴不形成指状突起,当 $\zeta \geq 0.15$ 时,认为液滴形成指状突起。

$\beta_{\text{in-max}}$ 与乙醇浓度的关系如图 7(b) 所示, $\beta_{\text{in-max}}$ 随着水平壁面过冷度的增大呈现持续减小的变化趋势,这是由于经过换热,液滴的表面张力和黏度均增大,阻碍了液滴的铺展动力学行为。相反的, ζ 随水平壁面过冷度的升高呈现单调增加的趋势,这是由于水平壁面过冷度增加,触发了更剧烈的换热,增大了液滴的密度,使得液滴边缘与空气的密度差增大,导致了瑞利-泰勒不稳定性的加剧。因此,液滴的最大铺展程度是由内部铺展程度 $\beta_{\text{in-max}}$ 和无量纲指状长度 ζ 共同决定的。当水平壁面过冷度低于 24.0 K 时, $\beta_{\text{in-max}}$ 的下降趋势占主导,使得 $\beta_{\max}$ 随水平壁面过

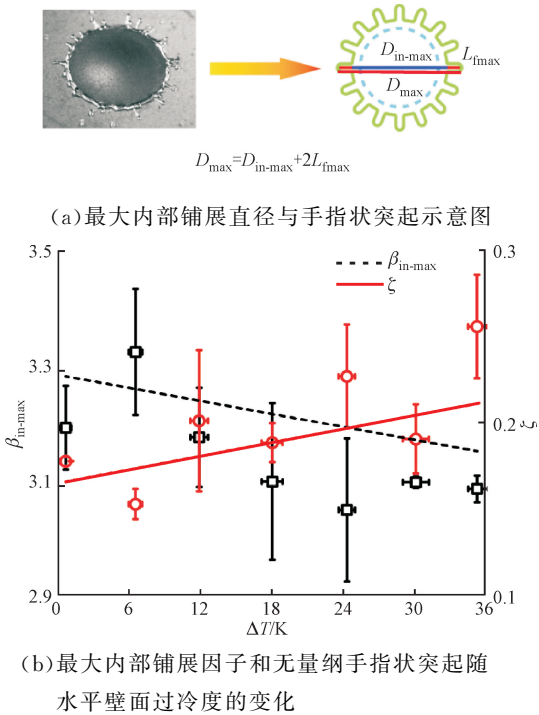


图 7 液滴形状简化与最大内部铺展因子和无量纲手指状突起随水平壁面过冷度的变化

Fig. 7 Simplification of droplet shape and variation of the maximum internal spreading factor and the “fingering-like” protrusions with substrate supercooling

冷度升高而下降;当水平壁面过冷度高于 24.0 K 时, ζ 的上升趋势占主导,使得 $\beta_{\max}$ 随水平壁面过冷度升高而增大。 $t_{\max}$ 与水平壁面过冷度的关系和 $\beta_{\max}$ 与水平壁面过冷度的关系类似,均为单调递减,说明铺展时间不是唯一引发液滴铺展程度与水平壁面过冷度非单调关系的因素。

2.3 动力学参数表征模型

针对液滴冲击水平壁面的最大铺展因子和最大铺展时间,众多学者开展了一系列定量研究,以期探究液滴冲击水平壁面的铺展动力学行为定量表达式。

如表 1 所示,Bayer 和 Megaridis 认为液滴冲击水平壁面的最大铺展因子与韦伯数、奥内佐格数有关,并提出了相关关联式。Roisman 认为最大铺展因子与雷诺数、韦伯数均有关,他采用半假设半理论的方法,从动量守恒理论出发,提出了最大铺展因子的表达式。针对最大铺展时间,Wildeman 等认为,最大铺展时间与最大铺展因子有关,结合实验数据,对最大铺展时间进行了修正。Shang 等探究了水滴冲击过冷水平壁面的铺展动力学行为,并将水平壁面过冷度引入最大铺展时间模型,重新定义无量纲

过冷温度

$$\tilde{T} = \frac{\Delta T}{T_{\text{air}} - 273.15}$$
 (3)

式中: T_{air} 为室温。

表 1 典型最大铺展因子和最大铺展时间模型

Table 1 Typical maximum spreading factor and maximum spreading time model

动力学 表征 参数	文献 来源	表达式
$\beta_{\max}$	文献 [25]	$\beta_{\max} = 0.72(We/Oh)^{0.14}$
	文献 [26]	$\beta_{\max} = 1.73We^{0.14}$
	文献 [27]	$\beta_{\max} = 0.87Re^{0.2} - 0.4Re^{0.4}We^{-0.5}$
$t_{\max}$	文献 [28]	$t_{\max} = \frac{D_0}{U_0}(\beta_{\max} - 1)$
	文献 [29]	$t_{\max} = \frac{D_{\max}}{2U_0}$
	文献 [24]	$t_{\max} = \frac{D_{\max}}{U_0}(-0.08\tilde{T} + 0.84)$

利用表 1 中的模型,对乙醇液滴冲击过冷水平壁面的最大铺展时间和最大铺展因子进行预测,并采用相对平均偏差 δ 为评价指标,衡量不同公式的预测效果

$$\delta_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{t_{\max, \text{pre}} - t_{\max, \text{exp}}}{t_{\max, \text{exp}}} \right|$$
 (4)

$$\delta_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\beta_{\max, \text{pre}} - \beta_{\max, \text{exp}}}{\beta_{\max, \text{exp}}} \right|$$
 (5)

式中: $t_{\max, \text{pre}}$ 和 $\beta_{\max, \text{pre}}$ 为使用各模型的最大铺展时间和最大铺展因子预测值; $t_{\max, \text{exp}}$ 和 $\beta_{\max, \text{exp}}$ 为最大铺展时间和最大铺展因子实验值。

如图 8 所示,不同公式的预测结果不同,对于最大铺展因子,尽管不同学者提出的表达式对实验结果的预测准确率均较好,单个数据点的偏差均在

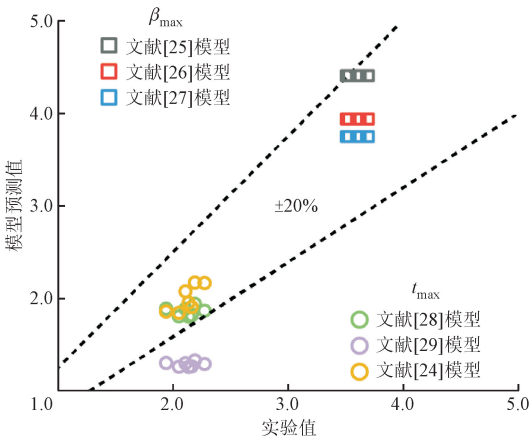


图 8 不同模型对实验值的预测

Fig. 8 Prediction of experimental values by different models

20%以内,然而由于表达式的限制,无法针对液滴冲击不同水平壁面过冷度的实验工况进行预测,存在一定缺陷。对于最大铺展时间,Huang 和 Chen 等人提出的表达式预测效果较差,Wildeman 等提出的表达式预测效果较好,相对平均偏差为 12.32%,但由于其表达式内不包含水平壁面过冷度的影响因素,因而预测效果略差于 Shang 等提出的表达式,其相对平均偏差为 6.05%。综上所述,现有最大铺展时间的表达式能较好预测乙醇液滴冲击过冷水平壁面的铺展动力学行为,但最大铺展因子表达式仍需进一步探索。

3 结 论

本文探究了乙醇液滴冲击过冷水平壁面的铺展动力学行为,并分析了表面张力和水平壁面过冷度对铺展动力学行为的影响,结果如下:

(1)低表面张力液滴冲击过冷水平壁面会发生飞溅,形成的子液滴向各个方向散落;

(2)水平壁面过冷度的增大使得最大铺展时间一直减小;

(3)水平壁面过冷度增加时,液滴经过换热,其边缘的密度差与空气密度差增加,促进了瑞利-泰勒不稳定性的形成,造成了水平壁面过冷度对最大铺展因子的非单调性影响;

(4)现有的最大铺展时间模型能够较好地预测乙醇液滴冲击过冷水平壁面的最大铺展时间,相对平均偏差为 6.05%,然而由于现有模型未考虑水平壁面过冷度,最大铺展因子不能被很好的预测。

参考文献:

- [1] YANG Song, HOU Yu, SHANG Yuheng, et al. BPNN and CNN-based AI modeling of spreading and icing pattern of a water droplet impact on a supercooled surface [J]. AIP Advances, 2022, 12(4): 045209.
- [2] YANG Song, HOU Yu, ZHOU Dongdong, et al. Non-monotonic effect of ethanol concentration on the spreading of an ethanol-water binary droplet impact on a supercooled surface [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 183: 107828.
- [3] 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.
- [4] ZHOU Dongdong, LIU Xiufang, YANG Song, et al. Intense deformation and fragmentation of two droplet collision at high Weber numbers [J]. Colloids and Surfaces: A Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 655: 130171.
- [5] 陆军军, 陈雪莉, 曹显奎, 等. 液滴撞击平板的铺展特征 [J]. 化学反应工程与工艺, 2007, 23(6): 505-511.
LU Junjun, CHEN Xueli, CAO Xiankui, et al. Characteristic phenomenon and analysis of a single liquid droplet impacting on dry surfaces [J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 2007, 23(6): 505-511.
- [6] SHANG Yuheng, LIU Xiufang, BAI Bofeng, et al. Central-pointy to central-concave icing transition of an impact droplet by increasing surface subcooling [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2019, 108: 104326.
- [7] SHAO Xiaoxiao, HOU Yu, ZHONG Xin. Modulation of evaporation-affected crystal motion in a drying droplet by saline and surfactant concentrations [J]. Colloids and Surfaces: A Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 623: 126701.
- [8] KULKARNI A P, MEGARITIS T, GANIPPA L C. Insights on the morphology of air-assisted breakup of urea-water-solution sprays for varying surface tension [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 133: 103448.
- [9] LIN Shiji, ZHAO Binyu, ZOU Song, et al. Impact of viscous droplets on different wettable surfaces: impact phenomena, the maximum spreading factor, spreading time and post-impact oscillation [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2018, 516: 86-97.
- [10] ZHAO Binyu, WANG Xiang, ZHANG Kai, et al. Impact of viscous droplets on superamphiphobic surfaces [J]. Langmuir, 2017, 33(1): 144-151.
- [11] DING Bin, WANG Hong, ZHU Xun, et al. How supercooled superhydrophobic surfaces affect dynamic behaviors of impacting water droplets? [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 124: 1025-1032.
- [12] QIAN J, LAW C K. Regimes of coalescence and separation in droplet collision [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 331: 59-80.
- [13] CASTILLO J E, HUANG Yanbo, PAN Zhenhai, et al. Quantifying the pathways of latent heat dissipation during droplet freezing on cooled substrates [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 164: 120608.
- [14] LIU Xin, MIN Jingchun, ZHANG Xuan. Dynamic be-

- havior and maximum spreading of droplets impacting concave spheres [J]. *Physics of Fluids*, 2020, 32(9): 092109.
- [15] ZHANG Xuan, LIU Xin, WU Xiaomin, et al. Impacting-freezing dynamics of a supercooled water droplet on a cold surface: rebound and adhesion [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 158: 119997.
- [16] YANG Song, HOU Yu, ZHOU Dongdong, et al. Effects of solution concentration and surface supercooling on the spreading characteristics of an impact binary droplet [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, 147: 106927.
- [17] SHANG Yuheng, BAI Bofeng, HOU Yu, et al. Alteration of freezing paradigms of an impact water droplet on different cold surfaces [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 183 (Part A): 122177.
- [18] 姚一娜, 刘呈, 李聪, 等. 液滴撞击超疏水冷表面的反弹/黏附特性对比研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2021, 17(1): 31-35.
- YAO Yina, LIU Cheng, LI Cong, et al. Comparative study on rebound/adhesion characteristics of droplets impacting superhydrophobic cold surface [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2021, 17(1): 31-35.
- [19] 朱程香, 王珑, 孙志国, 等. 风力机叶片翼型的结冰数值模拟研究 [J]. *空气动力学学报*, 2011, 29(4): 522-528.
- ZHU Chengxiang, WANG Long, SUN Zhiguo, et al. Numerical study of wind turbine blade airfoil ice accretion [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2011, 29(4): 522-528.
- [20] 胡良权, 陈进格, 沈昕, 等. 结冰对风力机载荷的影响 [J]. *上海交通大学学报*, 2018, 52(8): 904-909.
- HU Liangquan, CHEN Jingge, SHEN Xin, et al. Load of wind turbine affected by icing [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2018, 52(8): 904-909.
- [21] 赵亚鸽, 林世玑, 赵彬钰, 等. 微结构超疏水表面的制备及其对液滴撞击动力学的影响 [J]. *微纳电子技术*, 2020, 57(8): 643-649.
- ZHAO Yage, LIN Shiji, ZHAO Binyu, et al. Preparation of the micro-structured superhydrophobic surface and influence on droplet impact dynamics [J]. *Micro-nanoelectronic Technology*, 2020, 57(8): 643-649.
- [22] 尚宇恒, 白博峰, 侯予, 等. 液滴撞击过冷壁面的结冰特性实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(10): 144-149.
- SHANG Yuheng, BAI Bofeng, HOU Yu, et al. Experimental research for freezing characteristics of droplets impacting on supercooled surface [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(10): 144-149.
- [23] 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.
- [24] SHANG Yuheng, ZHANG Yuhui, HOU Yu, et al. Effects of surface subcooling on the spreading dynamics of an impact water droplet [J]. *Physics of Fluids*, 2020, 32(12): 123309.
- [25] BAYER I S, MEGARIDIS C M. Contact angle dynamics in droplets impacting on flat surfaces with different wetting characteristics [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 558: 415-449.
- [26] SEN S, VAIKUNTANATHAN V, SIVAKUMAR D. Experimental investigation of biofuel drop impact on stainless steel surface [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, 54: 38-46.
- [27] ROISMAN I V. Inertia dominated drop collisions: II an analytical solution of the Navier-Stokes equations for a spreading viscous film [J]. *Physics of Fluids*, 2009, 21(5): 052104.
- [28] WILDEMAN S, VISSER C W, SUN Chao, et al. On the spreading of impacting drops [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 805: 636-655.
- [29] HUANG Haimeng, CHEN Xiaopeng. Energetic analysis of drop's maximum spreading on solid surface with low impact speed [J]. *Physics of Fluids*, 2018, 30(2): 022106.

(编辑 杜秀杰)