第 40 卷 第 1 期 实 验 流 体 力 学 Vol. 40, No. 1
2026 年 2 月 Journal of Experiments in Fluid Mechanics Feb., 2026

文章编号: 1672-9897(2026)01-0034-11 doi: 10.11729/syltlx20240020

# 液滴撞击结冰机理研究进展

张瑞敏[1], 蔡灏亭[1], 赵玉刚[1, 2, *]

1. 上海理工大学能源与动力工程学院 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093
2. 中国空气动力研究与发展中心 结冰与防除冰重点实验室, 绵阳 621000

**摘要:** 通过飞机结冰问题引出对液滴撞击固体表面结冰现象的探讨, 分别对静置液滴结冰、室温液滴撞击以及两者时空耦合的液滴撞击结冰动力学问题展开研究, 分析了部分关键参数的作用机制。研究指出, 液滴冻结前后的形状变化、液滴间的相互作用以及冻结触发的动力学行为均对结冰结果有重要影响。通过研究液滴撞击结冰动力学的影响因素, 对比了室温液滴和过冷液滴的结冰现象, 指出两者在初期热物性、传热机理和相变模式上存在差异, 具体表现在成核时间、冰晶类型、界面传热特征、界面推移速度等动力学行为以及冰滴形貌上。最后, 总结了撞击速度、液滴粒径及表面润湿度对液滴撞击固体表面结冰的影响。

**关键词:** 飞机结冰; 单液滴; 撞击动力学; 结冰动力学; 传热; 过冷液滴

**中图分类号:** TB61; V211.3 **文献标识码:** A

# Research progress of icing on droplet impinging

ZHANG Ruimin[1], CAI Haoting[1], ZHAO Yugang[1, 2, *]

1. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China
2. Key Laboratory of Icing and Anti/De-Icing, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China

**Abstract**: Icing in the form of impinging supercooled droplets accounts for the most cases of aircraft icing. This review provides an in-depth discussion over single sessile droplet icing, impinging of a droplet, and the combined icing of an impinging droplet. Special focus is placed on icing of an impinging supercooled large droplet, which is of significant importance in the study of aircraft icing. The effects of a few key parameters, such as the impinging speed and droplet size, are studied and analyzed. Meanwhile, by studying the factors influencing the dynamics of droplet impact icing, the icing phenomena of room temperature droplets and supercooled droplets are investigated, and it turns out that the initial thermophysical properties, heat transfer mechanisms and phase transition modes vary drastically, and the kinetic behaviors such as nucleation time, ice crystal type, interfacial heat transfer characteristics and phase advancing velocity as well as the droplet morphology are significantly different. The effects of the impact velocity, particle size and surface wetting on droplet impact icing are indicated, providing a theoretical basis and reference for the design and development of anti-deicing technology for aircraft.

**Keywords**: aircraft icing; single droplet; impact dynamics; ice formation dynamics; heat transfer; supercooled droplet

**收稿日期**: 2024-03-15; **修回日期**: 2024-04-24; **录用日期**: 2024-05-20
**基金项目**: 国家自然科学基金项目(52276079)
* 通信作者 E-mail: ygzhao@usst.edu.cn

**引用格式**: 张瑞敏, 蔡灏亭, 赵玉刚. 液滴撞击结冰机理研究进展 [J]. 实验流体力学, 2026, 40(1): 34-44.
ZHANG R M, CAI H T, ZHAO Y G. Research progress of icing on droplet impinging[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2026, 40(1): 34-44.

## 0 引 言

飞机结冰是指飞机在飞行过程中，过冷水滴撞击机体表面并触发结冰成核，随后冰相在机体某些部位附着堆积。飞机结冰特别是在旋翼、尾桨等关键动力部件上的结冰，会增大飞行阻力，影响飞行稳定性，威胁飞行安全，甚至引发坠机事故[1-2]。尽管目前已发展出大量可靠的防冰和除冰技术，但飞机结冰问题仍然是制约航空业发展并可能引发灾难性事故的重要原因之一。例如，1994 年美国一架波音 727 飞机在飞行过程中遭遇直径约 400 μm 的水滴撞击，导致机翼防冰保护区后部积冰[3]，引发空难；2006 年，中国一架空警–200 预警机在安徽广德坠毁，事故直接原因是结冰导致的螺旋桨失衡共振。据美国联邦航空管理局（FAA）等机构统计，每年超过 12% 的飞行事故由结冰造成。因此，欧盟《欧洲航空发展战略 2020 规划》和美国航空航天局《民用航空技术十年发展规划》均将防范飞机结冰事故列为未来航空领域的重点科研计划。

我国在飞行结冰领域的研究起步相对较晚，但近年来在基础成冰理论、结冰探测、防除冰技术及相关材料应用等方面都取得了显著进展。目前国内研究主要集中在结冰风洞试验技术和防除冰技术上，同时，开展飞机结冰问题与液滴撞击结冰问题研究，并通过国际结冰适航标准审查，也是当前该领域的主要任务。

为保障飞行安全，飞机适航标准要求飞机能在含有常规小液滴和过冷大液滴（Supercooled Large Droplet, SLD）的云层中正常飞行，这一标准为积冰现象分析和防除冰系统设计提供了依据。在飞机结冰领域，过冷大液滴通常指粒径为 100～2000 μm、温度低于−4 ℃ 的液滴[4-5]。SLD 高速撞击结冰是一个界面剧烈变化、伴随相变放热的过程，发生在极短时间内（ms 量级）[6]，涉及自由界面与相界面的快速迁移，以及冰、水两相与固体表面（后文简称“固面”）之间的热量交换。该问题一直是国内外研究热点，但绝大部分实验和理论研究设定的工况与真实情况存在差异，例如：液滴静置或在重力驱动下低速撞击结冰；固面过冷而非液滴过冷；结冰风洞实验等仅能观测微液滴群的聚集积冰效应，难以揭示单液滴撞击成冰的具体机制。

液滴结冰可分为固着液滴结冰和液滴撞击结冰两类。液滴撞击过程一般包括铺展、相对静止、回缩、反弹（或黏附）4 个阶段[7]；而液滴结冰过程则通常包括液滴降温、成核、再辉、冰枝晶生长、结冰完成 5 个阶段[8]。这 2 个过程共同构成液滴撞击结冰的全过程。在室温液滴撞击结冰工况下，相界面迁移释放的潜热主要通过冰相导入基底。与之相比，当更接近真实撞击结冰情况时，温度更低的液滴会缩短结冰成核时间，且所形成的冰晶类型及最终的冰滴形貌也存在明显差异。

与固着液滴结冰相比，液滴撞击结冰会产生更多成核位点，更易引发结冰。在撞击过程中，液滴会呈现出显著的扩展、回流/溢流/溅射等动力学特征，这些特征与非稳态传热相变过程耦合密切，使得结冰行为复杂，部分液滴结冰机理尚不明确。在航空航天领域，液滴撞击结冰，尤其是过冷大液滴引发的异常结冰，具有极高危险性，常规除冰系统无法有效清除，极易导致严重事故。基于以上问题，本文系统介绍了液滴撞击结冰现象，阐述液滴冻结前后的形状变化、液滴间相互作用及其撞击动力学行为、冻结触发的结冰动力学行为，将室温液滴与过冷液滴撞击结冰进行对比，并对液滴过冷度、表面润湿度、撞击速度和粒径效应影响液滴撞击固面冻结的动力学及热力学耦合机制做出解释，以期为飞行器防除冰系统的设计与开发提供参考。

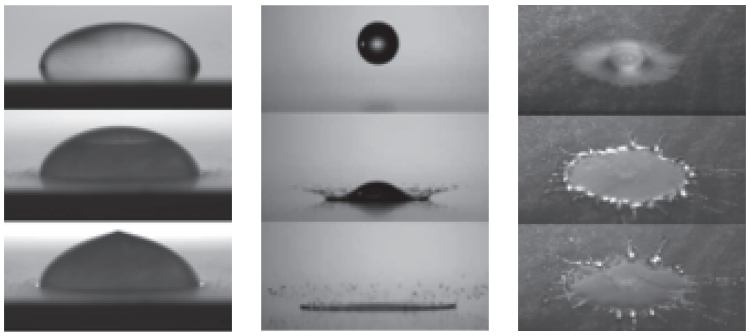
## 1 液滴撞击结冰

飞机结冰的物理模型可简化为图 1（a）[9] 的液滴结冰动力学行为和图 1（b）[10] 的液滴撞击动力学行为在时空上的耦合，两者共同构成图 1（c）[6] 的液滴撞击固面结冰行为。液滴撞击动力学行为和结冰动力学行为分别是流体力学和传热学中的经典课题，相关研究较为成熟[11-12]。两者的耦合则引出了新的科学问题，如相界面推移对三相线和自由界面的限制以及最终的冰滴形貌等。

液滴撞击结冰动力学行为的研究对液滴过冷度、粒径和撞击速度有明确要求，但目前还缺乏针对性、系统性的实验和理论研究，导致其发生机制不明、理论框架不够完善，从而制约了防除冰技术的开发应用。液滴撞击结冰动力学行为的研究对理解 SLD 高速撞击结冰机理具有重要意义。现阶段，深入探究液滴撞击结冰机理并开发相关防除冰技术，对缓解乃至解决飞机结冰问题具有重要价值。

### 1.1 液滴撞击动力学研究

常温下的液滴撞击动力学研究为液滴撞击结冰



（a）结冰动力学[9] （b）撞击动力学[10] （c）液滴撞击结冰[6]

**图 1 撞击结冰过程**

Fig. 1 Impact icing process

机理提供了大量的理论基础和实验参考。在较小过冷度（−10 ℃ 以上）的情况下，液滴撞击后通常先达到稳定状态，随后才发生结冰成核和相界面传递[13]。Clanet 等[14] 将液滴撞击的动力学过程按照时序划分为接触变形、扩展、回流/溢流/溅射 3 个阶段（图 2），最终撞击结果取决于惯性、表面张力和黏滞阻力的共同作用。本文主要讨论液滴撞击结冰问题，重点关注扩展系数 $\beta$ 和接触黏滞时间 $\tau$（即从接触至稳定或脱离的时间），其中 $\beta = D_{\max}/D_0$，$D_{\max}$ 为液滴最大扩展直径，$D_0$ 为液滴撞击前的直径。

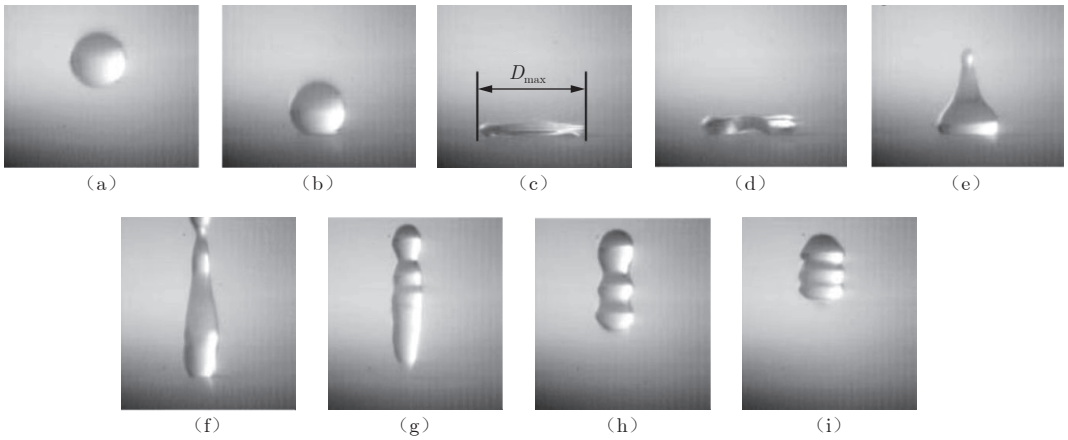



**图 2 液滴撞击疏水表面（图片间隔时间为 2.7 ms）[14]**

Fig. 2 Droplets impacting hydrophobic surfaces (picture interval of 2.7 ms)[14]

扩展系数是描述液滴撞击结冰后实际覆盖面积的重要指标，对后续积冰行为具有决定性影响。Josserand 等[15] 的研究表明，在液滴扩展过程中，可以忽略重力作用，其仅为液滴提供加速度。无量纲参数韦伯数 $We$ 和雷诺数 $Re$ 与液滴速度、粒径相关（$We = \rho D_0 u^2/2\sigma$，$Re = \rho D_0 u/\mu$，其中，$\rho$ 为液体密度，$u$ 为特征流速，$\sigma$ 为表面张力系数，$\mu$ 为黏性系数），是表征扩展系数 $\beta$ 的主要变量。Chandra 等[16] 假设撞击过程中液滴动能均通过黏性逸散形式完成能量转换，结合体积守恒推导出了扩展系数 $\beta \sim Re^{1/5}$。Richard 等[17] 假设撞击过程中的液滴动能全部转换为表面能，推导出扩展系数 $\beta \sim We^{1/2}$。Pasandideh-Fard 等[18] 则同时考虑了黏性逸散和表面能的贡献，假设液滴达到最大扩展时动能可忽略，通过添加固面浸润性因素，得到了相对综合的扩展系数表达式：

$$\beta = \left\{(We + 12) \Big/ \left[3(1 - \cos\theta_{\mathrm{a}}) + 4We \Big/ Re^{1/2}\right]\right\}^{1/2} \tag{1}$$

式中，$\theta_{\mathrm{a}}$ 为所测得的变接触线最大前进角。

接触黏滞时间表征液滴撞击后固–液界面处于非平衡态的维持时间。Fletcher 的经典成核理论[19] 是判定撞击过程发生结冰成核几率的重要指标。从防结冰的角度考虑，若能有效缩短接触黏滞时间，对解决飞机结冰问题具有重要意义。Okumura 等[20] 否定了 19 世纪末 Hertz 提出的弹性接触理论（$\tau \sim D_0 We^{2/5}/u$），认为接触黏滞时间仅取决于液滴粒径

等物性参数，与撞击速度无关，并基于能量平衡获得了接触黏滞时间理论极限 $\tau\sim\rho D_0^3/\sigma$。Bird 等[21]提出以非对称回缩或中心辅助回缩 2 种模式缩短接触黏滞时间，采用一种宏观尺度脊状拓扑结构对回缩液滴进行区域质量分配，通过调控各区域的界面流场分布，使质心附近液膜更薄且回缩速度更快，从而将接触黏滞时间缩短至对称回缩理论极限的 1/2。Liu 等[22]则在一种阶梯式微纳拓扑结构上发现了异常的撞击回缩机制：液滴以碟状形态脱离固体表面，即脱离液滴仍有部分能量以界面能形式储存，从而将接触黏滞时间大幅缩短至对称撞击理论极限的 1/4。

### 1.2　静置液滴结冰动力学研究

静置液滴结冰动力学的研究主要关注发生于固–液接触面的异质成核和相界面推移等现象。Gurganus 等[23]利用显微高速拍摄技术获得了大量实验数据，发现静置液滴的结冰成核可发生于固–液界面的任意位置，对固–液–气界面三相线没有倾向，且不随固面降温速率和浸润性的变化而变化。该研究结论解决了关于“静置液滴结冰成核是否倾向于发生在固–液–气界面三相线处”的长期争议。

在相界面推移研究方面，Jung 等[24]将静置液滴冻结过程按时序和形态特征划分为 2 个阶段：复辉阶段和等温阶段。在复辉阶段，枝晶迅速（ms 量级）蔓延并占据液滴部分区域，形成类骨骼稀疏冰型，同时释放大量潜热。随后的等温阶段进程缓慢（s 量级），相界面温度接近稳态冻结点，在冰相传热主导下，冻结峰垂直于固面开始向上生长。液滴撞击结冰过程中，流动液体的内部难以观测成核动力学、相界面推移等重要动态特征和晶体特征，而静置液滴提供了很好的观测环境。

液滴冻结前后的形状变化、液滴间的相互作用以及冻结触发的动力学行为均对结冰结果有重要影响。水的密度在结冰过程中明显改变（$\rho_s/\rho_l\approx0.92$，其中 $\rho_s$ 为结冰时的固态水密度，$\rho_l$ 为液态水密度），导致液滴形态也会发生变化。例如，静置液滴冻结后，液滴顶部会形成尖峰形貌。Marín 等[25]基于传热约束指出，结冰过程中自由界面必须与结冰界面垂直，并结合相界面动态曲率和体积膨胀系数，解释了冻结液滴顶部形成尖峰形貌的原因。由于结冰前后的密度变化，Wildeman 等[26]发现当异质成核发生于气–液界面时（即液滴外表面冻结为冰壳而液滴内部仍为液态），液滴体积膨胀会导致冰壳内应力集聚，直至冰壳达到强度极限而发生破碎甚至炸裂。Guadarrama-Cetina 等[27]报道了液滴之间的冰相传递现象，即在浓度梯度驱动下，水蒸气分子会自发从液滴表面输运至邻近的冰滴表面，形成冰桥结构并触发源液滴冻结（图 3[28]）。该现象表明结冰并非发生于单个液滴的孤立现象，液滴冻结后的形貌、炸裂后的破碎晶粒和形成的冰桥结构，都会影响液滴及其周围液滴后续的结冰行为。

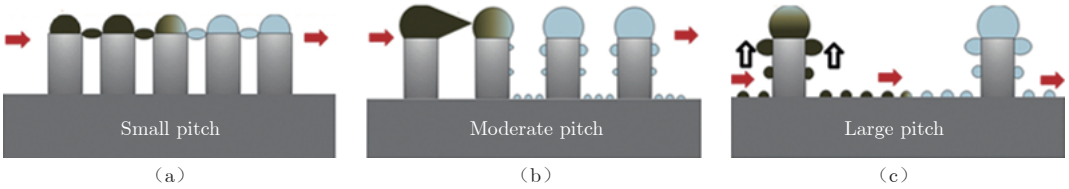



图 3　液滴间的冰相传递现象[28]

Fig. 3　Ice transfer phenomenon between liquid droplets[28]

## 2　液滴撞击结冰的影响因素

一般而言，液滴撞击动力学行为可以分为沉积、瞬时飞溅、冠状飞溅、向后破裂、部分反弹和完全反弹[29]。基于前文分析，液滴撞击固面结冰的影响因素主要包括液滴粒径、过冷度和撞击速度等，此外表面润湿度也会影响液滴撞击结冰。

### 2.1　液滴过冷度

液滴撞击固面结冰可分为室温液滴撞击结冰和过冷液滴撞击结冰。由于“室温液滴在过冷固面上结冰”和“过冷液滴在固面上结冰”的初期热物性、传热机理和相变模式不同，两者的成核时间、冰晶类型、界面传热特征和推移速度等动力学行为及冰滴形貌均存在明显差异。因此，不能简单以“室温液滴在过冷固面上结冰”替代“过冷液滴在固面上结冰”，或以前者的研究结论阐释后者的发生机理。单液滴撞击结冰研究大多为室温液滴撞击过冷固面结冰研究，其原因主要在于过冷固面比过冷环境更易获得，且其动力学规律和物理机制仍具有一定的参考意义。

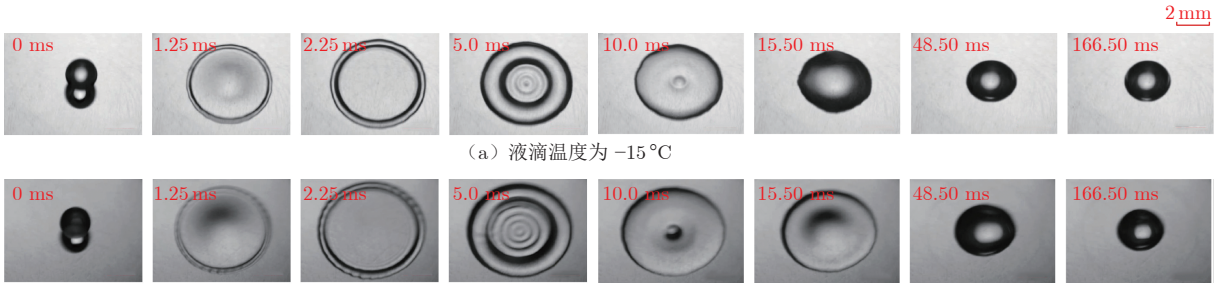
Thiévenaz 等[30]按时序将室温液滴撞击过冷固

面结冰的过程分为液滴扩展、相对静止、回缩振荡、稳定成形 4 个阶段。在液滴扩展阶段，固–液接触面处发生成核，并沿平行方向迅速蔓延，形成极薄冰层并限定接触线位置；在相对静止阶段，冰层通过与固面热交换释放潜热，并沿垂直于接触面的方向生长，液层则保持静止，接触角缓慢减小；在回缩振荡阶段，接触角达到脱离阈值后，液层在冰层上部回缩并发生多次振荡；在稳定成形阶段，液层停止振荡，相界面垂直于冰层向上稳定推移直至液滴完全结冰，形成最终冰滴形貌。

Kant 等[10] 采用全(内)反射(TIR)技术测量了液滴扩展阶段的冰相成核点位置和相界面沿平行方向的传播过程，发现相界面呈明显的对流态环形结构。在结冰过程中，相界面同时沿平行和垂直方向迁移，前者确定了接触线的最大位置和扩展系数 $\beta$，后者可通过求解一维 Stefan 问题获得其传热和界面迁移特征，进而确定冻结时间和部分冰滴形貌。

室温液滴撞击结冰过程中，相界面迁移释放的潜热主要通过冰相导入基底，因此液滴初始温度、固面温度和热导率对相界面推移速度影响显著，进而会影响扩展系数、冻结时间和冰滴形貌等关键结冰特征。Ju 等[31] 实验观测了不同初始温度(高于冰点)液滴撞击过冷冰面的冻结过程，发现液体黏度和表面张力随温度升高而降低，促进了液滴变形，增大了接触面，获得了更大的扩展系数，而温度升高附带的显热增量与接触面增大带来的换热增量基本抵消，因此液滴整体冻结时间变化不大。Chang 等[32] 测量了不同固面温度下的液滴结冰动力学过程，发现固面温度越低，相界面推移速度越快，液滴所携动能通过黏性耗散的比例越高，液滴冻结后所对应的扩展系数也越小。针对几种不同热导率的固面承载结冰液滴，Stiti 等[33] 采用一种激光荧光法捕捉相界面动态形貌，发现相界面曲率依赖于固面热导率及其对应的结冰速率：低热导率材料上的液滴冻结时间更长，液滴顶部最终形成尖峰形貌；高热导率材料上的液滴冻结时间更短，液滴顶部最终形成圆顶形貌。因此，当液滴初温高于冰点时，冻结时间、扩展系数和液滴形貌等重要动力学特征参数受固面温度和热导率主导，受液滴初始温度影响较小。

随着液滴过冷度增大，结冰成核所需时间、随后的冰晶类型和最终的冰滴形貌均与室温液滴存在明确差别。Wang 等[34] 比较了室温液滴和过冷液滴的结冰成核时间、相界面动力学和冰滴形貌(图 4)，发现过冷液滴成核时间远短于室温液滴，且其特有的复辉阶段枝晶生长模式与自由界面振荡耦合，形成了迥异于室温液滴的 Basin 谷形冰滴。




(a) 液滴温度为 −15 °C

(b) 液滴温度为 20 °C

**图 4 液滴在−20 ℃ 下撞击基底系列图像[34]**

Fig. 4 Series images of droplet impinging substrate at −20 °C[34]

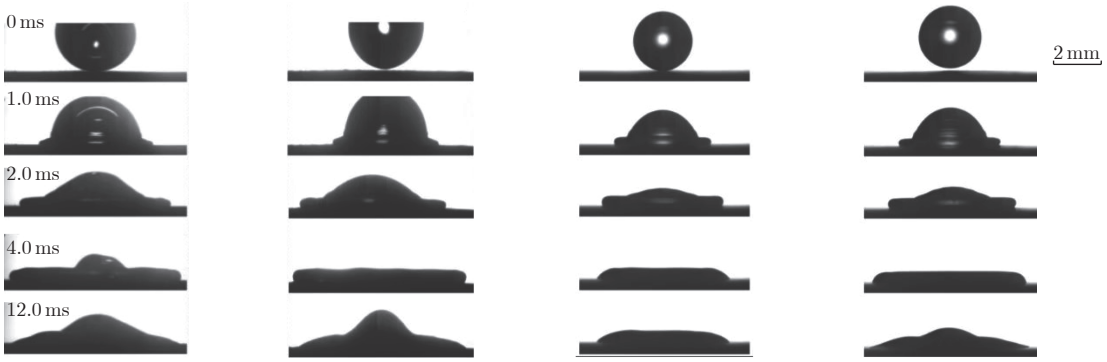
过冷度及其引起的快速结晶对热流的影响，推翻了普遍的平衡态冰点假设。Singh 等[35] 结合热流耦合分析法和等体积法追踪了结冰过程中过冷液滴的自由界面和相界面动态形貌，发现快速冻结必须在非稳态条件下进行，即相界面温度低于冰点，才能符合对液滴过冷和复辉行为的描述。Sun 等[36] 研究了过冷液滴撞击不同导热特性表面的冻结过程，发现了 2 种新的液滴冻结形态，并通过分析指出过冷液滴冻结由成核和结冰演化共同决定。Zhang 等[37] 研究了液滴过冷度对撞击动力学的影响，发现过冷液滴扩展和回缩速度都较慢，最大瞬态扩展系数略小于室温液滴，但其快速成核导致冻结后更易黏附于固面，因此稳态时的扩展系数更大。Schremb 等[38] 测量了过冷液滴撞击不同温度冰面的动力学过程，发现冰膜与水膜之间存在由多孔冰水混合物构成的枝晶层，冰层的最终厚度由液相区层流的板式切削(lamella thinning)作用确定，因此液滴扩展和冰层形貌主要取决于液滴本身的过冷度，对固面温度不

敏感。Kong 等[39] 研究了不同过冷度下液滴形成的冰滴形貌，将其归纳为 Ellipse 和 Rivulet 等 4 种类型，通过比较液滴动力学和水平结冰的特征时间，发现动态结冰相互作用可在较高过冷度下带来更大的热传导面积。Kong 等[39] 还指出，较大的接触面积与初始热通量的耦合作用增大了初期传热面，同时大过冷度也引起了瞬态大热流密度，因此过冷液滴的结冰时间在扩展强化效应下远短于室温液滴。

## 2.2 撞击速度

液滴对固面的撞击速度一般是由液滴自由释放高度所决定的，同时也与韦伯数 *We*、奥内佐格数 *Oh* 和雷诺数 *Re* 相关，这些参数共同影响液滴的最大扩展直径和最大回缩高度。Pan 等[40] 通过研究液滴在重力作用下以 0.77～1.17 m/s 的速度撞击固面的过程，发现撞击速度越快，液滴初始动能越大、扩展也越快，从而能够在更短时间内获得更大的扩展半径，还能拥有更大的传热面积和更高的传热速率，增强了液滴与固面之间的热交换。Jin 等[41] 早期报道了液滴撞击冰面的详细动态运动，通过改变初始高度控制液滴撞击速度，发现无论冰面温度多大，撞击速度增大都会导致液滴冻结时间缩短，冻结冰珠的高度也会显著降低。当液滴达到最大扩展直径时，接触线便会固定在冰面上，不再发生回弹。Hu 等[42] 测试了低温光滑壁面上的液滴撞击结冰行为，发现韦伯数是影响液滴撞击结冰的主要因素，指出在实际工程中可通过降低液滴速度来延缓结冰，还可采用切向风提高液滴速度，使液滴在结冰前脱落，以达到防除冰效果。Zhang 等[43] 研究了不同速度的液滴撞击圆柱形表面的结冰行为，发现液滴在方位角和轴向上存在 3 种类型的不对称回弹，而形成这些回弹模式的原因是液滴直径减小和韦伯数增大。

飞机在结冰环境中的飞行速度约为 100 m/s[44]，处于粒子高速撞击范围内。Liu 等[45] 以液滴滴落撞击旋风分离器叶片，通过低温氮气流平衡液滴过冷度，在叶片外沿切线方向实现了最大约 12.6 m/s 的撞击速度。图 5 展示了高速相机捕捉到的液滴以 1.10 m/s 速度撞击冰面时的形变过程（$\Delta T$ 为过冷度）。为在更高撞击速度下进行研究，Mehdizadeh[46] 和 Dhiman[47] 等让液滴撞击固体旋转部件表面，撞击速度高达 40 m/s。研究发现，随着撞击速度增大，液滴扩展边缘的凸起增大、数量增多，同时伴随着强烈的快速飞溅和液膜破裂，导致液滴的大小和数量分布发生变化。Meng 等[48] 在结冰风洞中以 40 m/s 的风速开展了防冰实验，研究结冰对机身和航空推进系统的影响。实验采用等离子技术控制结冰，将等离子高压放电产生的热效应与伴随形成的诱导气流耦合，在不同电极排布形式下，发现诱导流场的方向是影响等离子防冰性能的关键。




（a）$\Delta T = 14$ K, $D_0 = 3.5$ mm　（b）$\Delta T = 12$ K, $D_0 = 3.2$ mm　（c）$\Delta T = 8$ K, $D_0 = 2.5$ mm　（d）$\Delta T = 4$ K, $D_0 = 2.5$ mm

**图 5　液滴以 1.10 m/s 的速度撞击冰面[45]**

Fig. 5　Droplets impacting the ice with a velocity of 1.10 m/s[45]

目前，结冰风洞主要应用于微液滴群的积冰行为、结冰气动性能、结冰探测和防除冰方法等工程问题的研究[11, 49-50]。在与飞机结冰相关的过冷大液滴撞击结冰研究方面，Zhang[51] 和 Tan[52] 等在结冰风洞竖井段装设大液滴发生器，利用风洞环境加速大液滴、平衡过冷度，使毫米级粒径的液滴达到了最大约 46 m/s 的撞击速度。在加速过程中，液滴粒径越大，越难避免变形和破碎[53-54]，溅射的微液滴群也会在近固面切向流中快速散逸。尽管如此，Zhang[51] 和 Tan[52] 等成功再现了过冷条件下的快速冻结现象，区分了不同工况下的冻结特性，讨论了撞击加热模型在飞机结冰研究中的实际应用。然而，固面运动方向迅速变换，正交撞击后附着的液滴在离心力作用下发生变形和剥离，这并不是常规的撞击结冰

工况；同时，在重力加速度影响下，现有装置无法满足实验条件要求，导致撞击结冰过程的观测点和观测时间非常局限，无法有效观测撞击和结冰动力学行为。尽管如此，与绝大部分重力驱动的低速撞击研究相比，文献 [45]、[51] 和 [52] 的研究工作均在提升撞击速度方面取得了实质性进展。

## 2.3 粒径大小

Fletcher 的经典成核理论[55] 认为，结冰成核率 $R_{\mathrm{in}}$ 与液滴粒径 $D$ 正相关（例如，均质成核时，$R_{\mathrm{in}}\propto D^3$，异质成核时 $R_{\mathrm{in}}\propto D^2$）。因此，云层中悬浮的微液滴可在−46 ℃ 低温下维持液体状态，而大液滴（粒径约 500 μm）则很难在低于−33 ℃ 的环境中维持不冻结。Johari[56] 基于热力学推导结构位错理论发现，粒径效应会导致不同冰晶类型的形成：当液滴粒径小于 30 nm 或液膜厚度小于 10 nm 时，倾向于形成立方晶型；大于上述粒径（厚度）的液滴（液膜）则形成常规的六方晶型。Zhang 等[51] 观测了不同粒径过冷液滴的撞击结冰动力学过程，发现大粒径液滴在撞击过程中更容易发生溢流和溅射，且粒径越大，撞击动力学和结冰动力学的耦合性越强，扩展系数、冻结时间和冰滴形貌等，不确定性越强。

Laan 等[57] 研究了液滴撞击固面的最大扩展直径，特别是低黏度液滴（水或血液）的高速撞击，发现液滴扩展行为受动能转化为表面能或耗散热量的控制。Wang 等[58] 同样发现，在相同外部条件下，液滴粒径越大，撞击能量越高，这会影响液滴飞溅，进而影响液滴撞击结冰的结果。Gent 等[59] 在结冰风洞实验中发现：液滴平均体积直径约为 50 μm 时，撞击过程中的溅射质量损失小于 5%；而当液滴平均体积直径增大至约 180 μm 时，溅射质量损失达到了 25%。溅射的微液滴在撞击点周围形成大范围覆冰，这也是大液滴结冰危害更大的原因之一。因此，大液滴撞击结冰的撞击和结冰动力学耦合更强，结冰行为更为复杂，不能简单等效为等体量微小液滴的“集合”。

## 2.4 表面润湿度

液滴撞击不同固面后的回缩过程容易触发反弹，尤其在疏水或超疏水表面上。若液滴在成核或复辉之前发生反弹并脱离表面，则液滴撞击结冰问题可能得以避免。Li 等[60] 基于可视化实验研究了室温液滴撞击疏水表面的动力学行为，发现当撞击速度达到 1.6 m/s 时，会出现双子液滴回弹现象。Shen 等[61] 发现液滴撞击动力学行为受到液滴结冰的显著影响，在不同基底温度与不同撞击速度的组合工况下，液滴撞击疏水表面最终会形成珍珠形、不规则帽形、中心帽形、单环形、双环形和盆地形等 6 种冻结形貌，如图 6 所示（图中 $T$ 为基底温度，$H$ 为撞击高度）。相比之下，液滴撞击超亲水表面时，冻结形貌更加规则，接触线更接近圆形。Wu 等[62] 研究发现，液滴撞击超疏水表面时，快速回缩过程对最终冻结形貌起主导作用。表面疏水性越强，成核速率越小，快速回缩过程越快，扩展系数越小，这些因素共同影响最终冻结形貌。

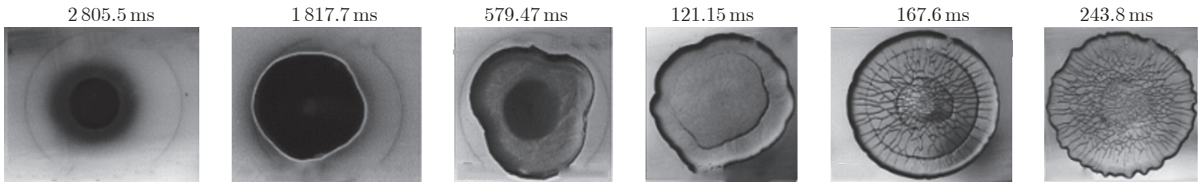



**图 6 不同基底温度和撞击速度下的液滴最终冻结形貌[61]**

Fig. 6 Final frozen droplet morphology at different substrate temperatures and impact velocities[61]

Antonini 等[63] 在不同结冰条件下开展的开环结冰风洞实验结果表明：与亲水表面不同，疏水涂层表面上不会形成致密冰层，可以有效减少冰对表面结构的黏附。疏水涂层还可以减少机翼前缘防冰所需的加热功率，并显著抑制回流冰的形成。由于存在液滴反弹和空气阻力，疏水涂层还可以使大部分液滴在冻结前脱落，从而降低了防除冰的工作量。Zhang 等[64] 解释了过冷液滴撞击超疏水表面时由回弹转变为黏附的原因：液体黏附是由冰成核引起的，而不是低温导致的黏性增强。Zhang 等[64] 还发现，冰成核速率是基底温度、粗糙度、润湿度和固液接触面积分数的函数，过冷液滴撞击结果取决于液滴接触时间与冰成核延迟时间的比值，并指出具体纳米级粗糙度的单层超疏水表面对冰点以下高速液滴的黏附性能最佳。

冰形成的真实物理过程涉及多个液滴，而非孤

立单液滴。Zhou 等[65] 研究了双液滴同时撞击过冷超疏水表面的反弹行为，将耦合撞击与冻结过程归纳为无聚结回弹、部分聚结回弹、完全聚结回弹、无聚结黏附和聚结黏附 5 种模式，指出液滴间相互作用增强，会增大冰黏附的可能性，即韦伯数与双液滴黏附相关（通常以韦伯数表征撞击条件和各作用力的强弱），双液滴的水平间距也会对聚结过程产生很大影响。因此，提高表面润湿度、防止多液滴聚结是防除冰技术良好应用的前提。

在低温飞行环境中，飞机超疏水表面的疏水能力会有所下降，因此需将表面疏水涂层与其他防除冰方法结合，优化防除冰能量分配，以最低能耗实现最佳防除冰效果。Chang 等[66] 研究了液滴对不同表面的撞击特性，发现与亲水表面不同，超疏水表面上的液滴在铺展过程中会破碎并释放多个小液滴，经多次反弹后静止于表面，且液滴最大回缩高度也高于亲水表面。当表面温度较低时，超疏水涂层的疏水能力会显著下降，因此需结合使用超疏水表面和其他防除冰方法（如热气除冰），在降低能耗的同时达到更好的防除冰效果。

## 3　结　论

本文针对飞机结冰问题，将液滴撞击固面结冰过程解耦为液滴撞击动力学过程和液滴结冰动力学过程，总结了结冰过程中自由界面和相界面的迁移演化规律，并对撞击过程中的有关参数进行了研究，阐述了液滴撞击固面结冰过程中的界面迁移和相变热质传递发生机制。

液滴撞击固面结冰过程的影响因素很多，本文重点分析了界面在撞击结冰动力学行为中的调控机制。研究表明，冰晶类型和冰滴形貌的显著差异与液滴过冷度有关：随着过冷度增大，液滴的动力学黏度和表面张力增大，导致最大扩展系数减小，液滴撞击固面结冰的动力学行为显现明显不同。撞击速度也会影响液滴撞击结冰过程，通过调控撞击速度可延缓液滴结冰或使液滴在结冰前脱落，从而达到防除冰效果。大液滴结冰行为不能简单等效为等体量微小液滴的“集合”，不同粒径的液滴撞击固面结冰，会得到比小粒径液滴更复杂的结冰结果。不同的表面润湿度会使液滴在成核或复辉前反弹脱落，为防除冰简单有效的途径。

过冷大液滴结冰涉及的反弹、溅射等问题更为复杂，相关机理研究较为缺乏。迄今为止，液滴撞击结冰研究大多针对单液滴，部分学者针对双液滴也开展了研究；但实际飞机结冰问题涉及的液滴数量很大，现有模型也存在较大局限，使得相关研究和计算变得非常复杂。

当前我国采用的除冰技术主要包括机械除冰、电加热除冰和化学除冰[67]，或对表面材料进行改进，如超疏水表面除冰[68]、等离子体驱动加热除冰[45]、超声波除冰[69] 等。这些技术都能在一定程度上防止冰晶产生或改善结冰情况，而多项技术的联合使用，有望实现更加高效、节能、环保的防除冰效果。

**参考文献：**


[1] 邵元培, 车竞, 丁娣. 大飞机机翼结冰对飞行动力学特性影响研究[J]. 飞行力学, 2018, 36(1): 12-15, 19.
SHAO Y P, CHE J, DING D. Study on the influence of wing icing on flight dynamics characteristics of large aircraft[J]. Flight Dynamics, 2018, 36(1): 12-15, 19.
doi: 10.13645/j.cnki.f.d.20170824.002

[2] 桂业伟, 周志宏, 李颖晖, 等. 关于飞机结冰的多重安全边界问题[J]. 航空学报, 2017, 38(2): 1-12.
GUI Y W, ZHOU Z H, LI Y H, et al. Multiple safety boundaries protection on aircraft icing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(2): 1-12.
doi: 10.7527/S1000-6893.2016.0280

[3] National Transportation Safety Board. Aircraft Accident Report: In-flight icing encounter and uncontrolled collision with terrain, COMAIR flight 3272, Embraer EMB-120RT, N265CA, Monroe, Michigan, January 9, 1997[R/OL]. (1998-11-04) [2023-10-01]. https://www.ntsb.gov/investigations/Accident-eports/Reports/AAR9804_body.pdf.

[4] CEBECI T, KAFYEKE F. Aircraft icing[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2003, 35: 11-21.
doi: 10.1146/annurev.fluid.35.101101.161217

[5] 王桥, 肖京平, 刘森云, 等. 过冷大水滴变形及阻力特性的温度影响实验研究[J]. 实验流体力学, 2016, 30(3): 21-26.
WANG Q, XIAO J P, LIU S Y, et al. Experimental study on temperature effect on deformation and drag characteristics of supercooled large droplet[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2016, 30(3): 21-26.
doi: 10.11729/syltlx20160028

[6] FANG W Z, ZHU F Q, ZHU L L, et al. Self-peeling of frozen water droplets upon impacting a cold surface[J]. Communications Physics, 2022, 5: 51.
doi: 10.1038/s42005-022-00827-0

[7] ZHANG X, LI K L, ZHU Z B, et al. Droplet impact and freezing dynamics on ultra-cold surfaces: a scaling analysis of central-concave pattern[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 239: 122135.
doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.122135

[8] 曾昊, 王峰, 孙超. 液滴结冰研究中的光学测量方法[J]. 力学学报, 2025, 57(2): 316-334.
ZENG H, WANG F, SUN C. On the optical measurement techniques for droplet icing experiments[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2025, 57(2): 316-334.

doi: 10.6052/0459-1879-23-643

[9] LU M L, SONG M J, PANG X L, et al. Modeling study on sessile water droplet during freezing with the consideration of gravity, supercooling, and volume expansion effects[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2022, 147: 103909.
doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103909

[10] KANT P, KOLDEWEIJ R B J, HARTH K, et al. Fast-freezing kinetics inside a droplet impacting on a cold surface[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(6): 2788-2794.
doi: 10.1073/pnas.1912406117

[11] WILDEMAN S, VISSER C W, SUN C, et al. On the spreading of impacting drops[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2016, 805: 636-655.
doi: 10.1017/jfm.2016.584

[12] ZHANG H F, ZHAO Y G, LV R, et al. Freezing of sessile water droplet for various contact angles[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 101: 59-67.
doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2015.10.027

[13] ZHAO Y G, ZUO Z C, TANG H B, et al. Ice coverage induced by depositing a water drop onto the supercooled substrate at extreme low vapor pressure[J]. Crystals, 2021, 11(6): 691.
doi: 10.3390/cryst11060691

[14] CLANET C, BÉGUIN C, RICHARD D, et al. Maximal deformation of an impacting drop[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2004, 517: 199-208.
doi: 10.1017/S0022112004000904

[15] JOSSERAND C, THORODDSEN S T. Drop impact on a solid surface[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2016, 48: 365-391.
doi: 10.1146/annurev-fluid-122414-034401

[16] CHANDRA S, AVEDISIAN C T. On the collision of a droplet with a solid surface[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1991, 432(1884): 13-41.
doi: 10.1098/rspa.1991.0002

[17] RICHARD D, CLANET C, QUÉRÉ D. Contact time of a bouncing drop[J]. Nature, 2002, 417: 811.
doi: 10.1038/417811a

[18] PASANDIDEH-FARD M, QIAO Y M, CHANDRA S, et al. Capillary effects during droplet impact on a solid surface[J]. Physics of Fluids, 1996, 8(3): 650-659.
doi: 10.1063/1.868850

[19] FLETCHER N H. The Chemical Physics of Ice[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1970.

[20] OKUMURA K, CHEVY F, RICHARD D, et al. Water spring: a model for bouncing drops[J]. Europhysics Letters (EPL), 2003, 62(2): 237-243.
doi: 10.1209/epl/i2003-00340-1

[21] BIRD J C, DHIMAN R, KWON H M, et al. Reducing the contact time of a bouncing drop[J]. Nature, 2013, 503: 385-388.
doi: 10.1038/nature12740

[22] LIU Y H, MOEVIUS L, XU X P, et al. Pancake bouncing on superhydrophobic surfaces[J]. Nature Physics, 2014, 10: 515-519.
doi: 10.1038/nphys2980

[23] GURGANUS C, KOSTINSKI A B, SHAW R A. High-speed imaging of freezing drops: still no preference for the contact line[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2013, 117(12): 6195-6200.
doi: 10.1021/jp311832d

[24] JUNG S, TIWARI M K, DOAN N V, et al. Mechanism of supercooled droplet freezing on surfaces[J]. Nature Communications, 2012, 3: 615.
doi: 10.1038/ncomms1630

[25] MARÍN A G, ENRÍQUEZ O R, BRUNET P, et al. Universality of tip singularity formation in freezing water drops[J]. Physical Review Letters, 2014, 113(5): 054301.
doi: 10.1103/PhysRevLett.113.054301

[26] WILDEMAN S, STERL S, SUN C, et al. Fast dynamics of water droplets freezing from the outside in[J]. Physical Review Letters, 2017, 118(8): 084101.
doi: 10.1103/PhysRevLett.118.084101

[27] GUADARRAMA-CETINA J, MONGRUEL A, GONZÁLEZ-VIÑAS W, et al. Percolation-induced frost formation[J]. EPL (Europhysics Letters), 2013, 101(1): 16009.
doi: 10.1209/0295-5075/101/16009

[28] ZHAO Y G, WANG R Z, YANG C. Interdroplet freezing wave propagation of condensation frosting on micropillar patterned superhydrophobic surfaces of varying pitches[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 108: 1048-1056.
doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.12.112

[29] WANG X, XU B, GUO S, et al. Droplet impacting dynamics: recent progress and future aspects[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2023, 317: 102919.
doi: 10.1016/j.cis.2023.102919

[30] THIÉVENAZ V, SÉON T, JOSSERAND C. Solidification dynamics of an impacted drop[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2019, 874: 756-773.
doi: 10.1017/jfm.2019.459

[31] JU J J, YANG Z G, 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): 057107.
doi: 10.1063/1.5094691

[32] CHANG S N, SONG H, WU K. Experimental investigation on impact dynamics and freezing performance of water droplet on horizontal cold surface[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 45: 101128.
doi: 10.1016/j.seta.2021.101128

[33] STITI M, CASTANET G, LABERGUE A, et al. Icing of a droplet deposited onto a subcooled surface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 159: 120116.
doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120116

[34] WANG L P, KONG W L, WANG F X, et al. Effect of nucleation time on freezing morphology and type of a water droplet impacting onto cold substrate[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 130: 831-842.
doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.142

[35] SINGH D, KUMAR A. Numerical and experimental analysis of rapid solidification considering undercooling effect during water droplet impact on a substrate[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2020, 20: 100722.
doi: 10.1016/j.tsep.2020.100722

[36] SUN M M, KONG W L, WANG F X, et al. Impact freezing modes of supercooled droplets determined by both nucleation and icing evolution[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 142: 118431.
doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.07.081

[37] ZHANG X, LIU X, WU X M, 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.
doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119997

[38] SCHREMB M, ROISMAN I V, TROPEA C. Normal impact of supercooled water drops onto a smooth ice surface: experiments and modelling[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2018, 835: 1087-1107.
doi: 10.1017/jfm.2017.797

[39] KONG W L, WU H C, BIAN P X, et al. A diffusion-enhancing icing theory for the freezing transition of supercooled large water droplet in impact[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 187: 122471.
doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122471

[40] PAN Y T, SHI K W, DUAN X L, et al. Experimental investigation of water droplet impact and freezing on micropatterned stainless steel surfaces with varying wettabilities[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 129: 953-964.
doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.032

[41] JIN Z Y, ZHANG H H, YANG Z G. Experimental investigation of the impact and freezing processes of a water droplet on an ice surface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 109: 716-724.
doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.02.055

[42] HU H B, HE Q, YU S X, et al. Freezing behavior of droplet impacting on cold surfaces[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(10): 104703.
doi: 10.7498/aps.65.104703

[43] ZHANG H X, YI X, DU Y X, et al. Dynamic behavior of water drops impacting on cylindrical superhydrophobic surfaces[J]. Physics of Fluids, 2019, 31(3): 032104.
doi: 10.1063/1.5083070

[44] CAO Y H, XIN M. Numerical simulation of supercooled large droplet icing phenomenon: a review[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2020, 27(4): 1231-1265.
doi: 10.1007/s11831-019-09349-5

[45] LIU Y Z, WANG T B, SONG Z Y, et al. Spreading and freezing of supercooled water droplets impacting an ice surface[J]. Applied Surface Science, 2022, 583: 152374.
doi: 10.1016/j.apsusc.2021.152374

[46] MEHDIZADEH N Z, CHANDRA S, MOSTAGHIMI J. Formation of fingers around the edges of a drop hitting a metal plate with high velocity[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2004, 510: 353-373.
doi: 10.1017/s0022112004009310

[47] DHIMAN R, CHANDRA S. Rupture of thin films formed during droplet impact[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2010, 466(2116): 1229-1245.
doi: 10.1098/rspa.2009.0425

[48] MENG X S, HU H Y, LI C, et al. Mechanism study of coupled aerodynamic and thermal effects using plasma actuation for anti-icing[J]. Physics of Fluids, 2019, 31(3): 037103.
doi: 10.1063/1.5086884

[49] 高郭池, 李保良, 丁丽, 等. 气动除冰飞机结冰风洞试验技术[J]. 实验流体力学, 2019, 33(2): 95-101.
GAO G C, LI B L, DING L, et al. Icing wind tunnel test technology for pneumatic de-icing aircraft[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2019, 33(2): 95-101.
doi: 10.11729/syltlx20180064

[50] 易贤, 王斌, 李伟斌, 等. 飞机结冰冰形测量方法研究进展[J]. 航空学报, 2017, 38(2): 520700-520711.
YI X, WANG B, LI W B, et al. Research progress on ice shape measurement approaches for aircraft icing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(2): 520700-520711.
doi: 10.7527/S1000-6893.2016.0276

[51] ZHANG C, LIU H. Effect of drop size on the impact thermodynamics for supercooled large droplet in aircraft icing[J]. Physics of Fluids, 2016, 28(6): 062107.
doi: 10.1063/1.4953411

[52] TAN C, PAPADAKIS M, MILLER D, et al. Experimental study of large droplet splashing and breakup[C]// Proceedings of the 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2007: 904.
doi: 10.2514/6.2007-904

[53] 郭向东, 柳庆林, 刘森云, 等. 结冰风洞中过冷大水滴云雾演化特性数值研究[J]. 航空学报, 2020, 41(8): 123655.
GUO X D, LIU Q L, LIU S Y, et al. Numerical study of supercooled large droplet cloud evolution characteristics in icing wind tunnel[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(8): 123655.
doi: 10.7527/S1000-6893.2019.23655

[54] 陈舒越, 郭向东, 王梓旭, 等. 结冰风洞过冷大水滴粒径测量初步研究[J]. 实验流体力学, 2021, 35(3): 22-29.
CHEN S Y, GUO X D, WANG Z X, et al. Preliminary research on size measurement of supercooled large droplet in icing wind tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2021, 35(3): 22-29.
doi: 10.11729/syltlx20200104

[55] FLETCHER N H. Size effect in heterogeneous nucleation[J]. The Journal of Chemical Physics, 1958, 29(3): 572-576.
doi: 10.1063/1.1744540

[56] JOHARI G P. Water's size-dependent freezing to cubic ice[J]. The Journal of Chemical Physics, 2005, 122(19): 194504.
doi: 10.1063/1.1900723

[57] LAAN N, DE BRUIN K G, BARTOLO D, et al. Maximum diameter of impacting liquid droplets[J]. Physical Review Applied, 2014, 2(4): 044018.
doi: 10.1103/PhysRevApplied.2.044018

[58] WANG C, CHANG S, LENG M, et al. A two-dimensional splashing model for investigating impingement characteristics of supercooled large droplets[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2016, 80: 131-149.
doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.12.005

[59] GENT R, FORD J, MOSER R, et al. Results from SLD

mass loss tests in the ACT Luton icing research wind tunnel[C]//Proceedings of the 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2003: 389.
doi: 10.2514/6.2003-389

[60] LI J F, ZHAO C, WANG C Y. Experimental study on the dynamics of droplet impacting on solid surface[J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2023, 27(10): 69.
doi: 10.1007/s10404-023-02680-1

[61] SHEN F Q, FANG W Z, ZHU F Q, et al. Freezing behaviors of an impacting droplet on subcooled hydrophobic surfaces [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121535.
doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121535

[62] WU H C, KONG W L, BIAN P X, et al. The coupled impact-freezing mechanism of supercooled droplet on superhydrophobic surface[J]. Aerospace Systems, 2024, 7(1): 11-28.
doi: 10.1007/s42401-023-00192-y

[63] ANTONINI C, INNOCENTI M, HORN T, et al. Understanding the effect of superhydrophobic coatings on energy reduction in anti-icing systems[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 67(1-2): 58-67.
doi: 10.1016/j.coldregions.2011.02.006

[64] ZHANG R, HAO P F, ZHANG X W, et al. Supercooled water droplet impact on superhydrophobic surfaces with various roughness and temperature[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 122: 395-402.
doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.076

[65] ZHOU X, WANG H, WU J J, et al. Bounce behaviors of double droplets simultaneously impact cold superhydrophobic surface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 208: 124075.
doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124075

[66] CHANG S N, QI H F, ZHOU S, et al. Experimental study on freezing characteristics of water droplets on cold surfaces[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 194: 123108.
doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123108

[67] 邱超, 杨京龙, 寇祎. 飞机防冰除冰技术的研究进展[J]. 西安航空学院学报, 2023, 41(3): 1-8, 14.
QIU C, YANG J L, KOU Y. Research progress of anti-icing and de-icing technology for aircraft[J]. Journal of Xi'an Aeronautical Institute, 2023, 41(3): 1-8, 14.
doi: 10.20096/j.xhxb.1008-9233.2023.03.001

[68] SHEN Y Z, WU Y, TAO J, et al. Spraying fabrication of durable and transparent coatings for anti-icing application: dynamic water repellency, icing delay, and ice adhesion[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(3): 3590-3598.
doi: 10.1021/acsami.8b19225

[69] WANG Y B, XU Y M, HUANG Q. Progress on ultrasonic guided waves de-icing techniques in improving aviation energy efficiency[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 79: 638-645.
doi: 10.1016/j.rser.2017.05.129



**作者简介:**
**张瑞敏**(2000—),女,山西大同人,硕士研究生。研究方向:结冰和防除冰技术。
E-mail: 222210089@st.usst.edu.cn

(编辑:秦虹)