

DOI:10.11918/202409081

低温表面凝结霜特性预测模型研究进展

宋孟杰¹,孔德翰¹,余思锐¹,赵玉刚²,陈宁立³,王海东⁴,张龙¹,张旋¹

(1.北京理工大学机械与车辆学院,北京100081;2.上海理工大学能源与动力工程学院,上海200093;

3.中国空气动力研究与发展中心低速空气动力研究所,四川绵阳621000;4.清华大学航天航空学院,北京100084)

摘要: 结霜是日常生活与工业生产中常见的低温物理现象,且往往产生负面影响。结霜模拟技术不仅有助于深入理解结霜过程,还可为防/除霜技术的发展提供理论指导,降低或避免能源、航天、交通、电力、冷藏等领域因霜导致的潜在危害。为充分理解结霜这一非均匀、变密度、移动边界、连续相变的复杂传热传质与流动耦合过程,分别基于低温表面凝结霜过程中液滴冷凝、凝固凸起、虚霜生长、霜层成熟四阶段及霜冻气候的既有模型研究成果进行梳理分析。结果表明:液滴冷凝阶段,既有模型对液滴粒径、成核速率等指标的模拟精度可达80%以上;凝固凸起阶段,冻结锋面高度、冻结时长等参数的模拟精度可达85.3%;虚霜生长与霜层成熟阶段,霜层厚度、霜层密度等指标的模拟精度可达82%以上;霜冻气候模拟与预测的准确率最高则可达88.4%。既有结霜模拟技术依原理差异可分为基于物理学和数学的数理模型、基于计算流体力学和数值方法的数值模拟和基于统计学和机器学习的数据分析模型3种,其中,数据分析模型类结霜模型多用于霜层生长阶段,因该阶段在结霜全周期中占时长、预测参数多且精度高而具最大发展潜力。低温表面凝结霜全过程中,液滴成核过程模拟因尺度小、变化快、影响因素多且处于枝晶生长前期而难度大,霜层生长中后期的枝晶周期性倒融再生过程因霜层内部微孔隙结构变化剧烈、精密测量时因物理遮挡无法观察而亦属当下挑战。本文结论为复杂场景下结/防/控霜等涉霜涉冰基础研究及技术开发等提供了参考与借鉴。

关键词: 凝结霜;数理模型;数值模拟;液滴凝固;枝晶生长;倒融再生

中图分类号:U492.8

文献标志码:A

文章编号:0367-6234(2025)05-0038-21

Research progress on prediction models for low-temperature surface condensation frosting characteristics

SONG Mengjie¹, KONG Dehan¹, YU Sirui¹, ZHAO Yugang², CHEN Ningli³,

WANG Haidong⁴, ZHANG Long¹, ZHANG Xuan¹

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

3. Low Speed Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, Sichuan, China;

4. School of Aeronautics and Astronautics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As a common low-temperature physical phenomenon, frosting often results in negative effects in daily life and industrial production. Frosting simulation technology not only helps to deepen the understanding of the frosting process, but also provides theoretical guidance for the development of frost prevention and control technology, thereby reducing or avoiding potential hazards caused by frosting in fields such as energy, aerospace, transportation, electricity, and refrigeration. To fully understand this complex heat and mass transfer and flow coupling process, which is characterized by non-uniformity, variable density, moving boundaries, and continuous phase changes, this study systematically analyzes existing models and results of the four stages of droplet condensation, solidification tip-growth, virtual frost growth, and frost layer maturity in the low-temperature surface condensation frosting process. The results show that during the droplet condensation stage, existing models achieve a simulation accuracy of over 80% for indicators such as droplet size and nucleation rate. During the solidification tip-growth stage, the simulation accuracy of parameters such as freezing front height and freezing duration can reach 85.3%. The simulation accuracy of indicators such as frost thickness and frost density during the growth and maturity stages of frost layer can reach over 82%. Additionally, the accuracy of simulating and predicting frost

收稿日期:2024-09-29;录用日期:2024-12-02;网络首发日期:2025-03-18

网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250318.1143.002

基金项目:国家自然科学基金(52076013);北京市自然科学基金(3212024)

作者简介:宋孟杰(1984—),男,教授,博士生导师

通信作者:宋孟杰,mengjie.song@bit.edu.cn

climate can reach up to 88.4%. Existing frost simulation techniques can be divided into three types based on their underlying principles: mathematical models based on physical and mathematical principles, numerical simulations based on computational fluid dynamics and numerical methods, and data analysis models based on statistical and machine learning principles. Among these, the final method is mostly used in the frost growth stage, and has the greatest potential for development due to their long duration, multiple predictive parameters, and high accuracy throughout the frost formation process. During the entire condensation frosting process on low-temperature surface, the simulation of droplet nucleation in complex scenarios is difficult due to its small scale, fast changes, multiple influencing factors, and its occurrence in the early stage of dendrite growth. Similarly, the periodic reverse melting and regeneration of frost crystal in the later stage of frosting growth is also a current challenge due to the drastic changes inside the frost layer and the physical obstruction during precise measurements, which cannot be clearly observed. The conclusions of this study provide valuable references and inspiration for fundamental research and technological development related to frost and ice in complex scenarios, such as frosting, defrosting, frost prevention, and frost control, etc.

Keywords: condensation frosting; mathematical model; numerical simulation; droplet solidification; dendritic growth; reverse melting and regeneration

1 研究背景

结霜在自然界与工业界广泛存在,且往往带来不利影响^[1-4]。对于工程设备运转与施工作业,霜冰的出现使潜在安全风险增加。近年来,低温冰冻气候导致的霜冻灾害时有发生,尤其是在中国的南方地区与西部高海拔地区,地区经济损失巨大,仅2023年因霜冻灾害造成的直接经济损失高达49.2亿元,严重影响日常生活与工程生产^[5-6]。在风力发电领域,高原、山脊、近海等地区的风电机组在低温高湿气候条件下会因叶片表面结冰而停机^[7-8],导致风电年利用小时数大幅降低,限制了风能这种清洁能源的高速高质发展^[9];在航空领域,高速飞行的飞机穿越含有过冷水滴的云层时,机身前端机翼及引擎罩的迎风面等构建表面易迅速形成霜冻或冰层。积冰改变飞机气动外形,继而损害其气动特性,减少升力,影响飞行稳定性和可靠性,甚至威胁飞行安全^[10-11];在交通运输领域,冻雨暴雪等极端天气可致道路大面积积冰结霜,易引发严重交通事故^[12-13];在电力输送领域,结霜会对输电线路造成机械损坏,引发如“闪络”等电器故障^[14-15]。

为应对结霜结冰等问题,各类防/除霜/冰技术发展迅速。目前,较为成熟的防除霜方法有机械除霜^[16]、热力除霜^[17]、表面涂层防霜^[18]、逆循环除霜等。尽管可实现缓解结霜,但往往需在霜冻形成后才启动,存在滞后性与局限性。结霜模拟技术作为一种前瞻性预防手段,通过模拟预知结霜特性^[19],可在霜冰等形成之前采取对应措施,有效减少或避免结霜。不仅可为防除霜装置提供开发与优化的理论依据,还能提高设备的运行效率和安全性,降低维护和运营成本,有效预防结霜引发的事故和损失。结霜过程的模拟研究可大幅减少物理实验需求,显

著降低研究开发成本,还可更为方便、迅速地预测复杂环境条件下的结霜特性。图1罗列了2005—2023年国内外围绕结霜过程中液滴冷凝、凝固凸起和霜层生长三阶段模拟研究类文章数量,该数据随着时间呈现5~6倍的快速增长,说明结霜模拟技术逐渐成为该领域焦点。通过不断完善模拟模型和提高计算精度,结霜模拟技术将在未来的研究和应用中发挥越来越重要的作用。本文按照结霜过程的不同阶段,对结霜模拟的模型与方法进行了介绍与分析,总结了当前结霜模拟技术的研究进展和发展趋势。

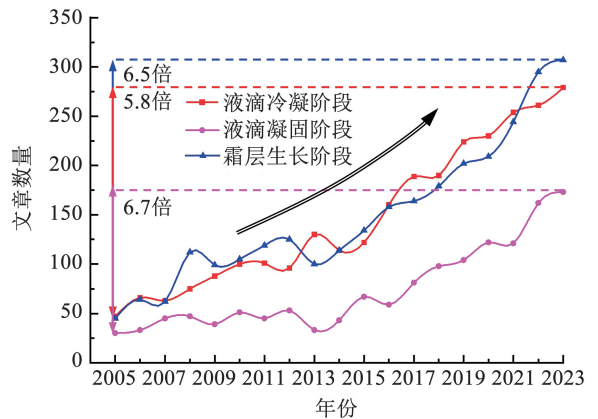


图1 2005—2023年国内外结霜模拟研究文章数量变化趋势
Fig. 1 Trends in the number of domestic and international frost simulation research articles from 2005 to 2023

1.1 结霜过程研究

结霜是“气-液-固”连续相变的传热传质流动耦合过程,按时间顺序可分为液滴冷凝、凝固凸起、虚霜生长与霜层成熟四阶段^[20]。液滴冷凝阶段指低温表面微尺度液滴的冷凝与生长,即空气中的水蒸气在接触到低温冷板后冷凝成核,逐渐从小液滴生长为更稳定大液滴,其间还包含微液滴的合并、跳跃、横扫、铺展等动力学现象^[21-23]。凝固凸起阶

段指液滴凝固顶部形成凸起尖端的过程,还包括后期吸收周围水蒸气尖端处枝晶径向快速非均匀生长的阶段。虚霜生长指液滴顶部尖端形成的霜枝开始周向延伸,相邻霜枝相互交叉连接后形成多孔霜层。由于霜枝生长以及水蒸气向霜层内部传质扩散,霜层密度也会变大。霜层成熟阶段始于表面枝晶周期性倒融再生现象的首次出现,终于表面形成厚厚的冰层。因霜层生长与水蒸气渗透使其热阻增大,霜层表面温升至三相点温度^[24]。霜层表面枝晶融化倒伏,化霜水因重力与表面张力作用进入霜层内部,导致密度增加、热阻减小,表面枝晶温度降低后而再生。之后霜层表面枝晶倒融再生过程周期性出现,其间夹杂倒融、沉积等现象,直至霜层表面温度始终接近 0 ℃。因三、四阶段均为霜层生长过程,结霜模型中往往将二者统一分析。

作为结霜前期阶段,单液滴凝固过程的机制研究有助于结霜过程模拟技术的发展。如图 2 所示,现有研究将平板表面单液滴凝固过程分为过冷、复辉、冻结和降温四阶段^[25]。在过冷阶段,液滴内温度随冷板表面温度降低下降至相变温度 T_1 以下,此时液滴内部未结核。液滴温度继续下降至温度 T_3 时发生成核,伴随潜热释放液滴温升至相变温度 T_1 ,这一毫秒级阶段称为复辉,液滴内部及表面形成非均匀的冰水混合物。冻结阶段,液滴冻结锋面逐步向顶部迁移,终因冰水密度差异而在顶端形成尖状凸起^[26]。冻结速率与最终冰晶形态受环境温度影响,最终温降至 T_2 。水滴完全冻结后,其温度进一步下降到冷源温度附近。液滴凝固完成后,开始在其表面生长复杂枝晶结构^[27]。

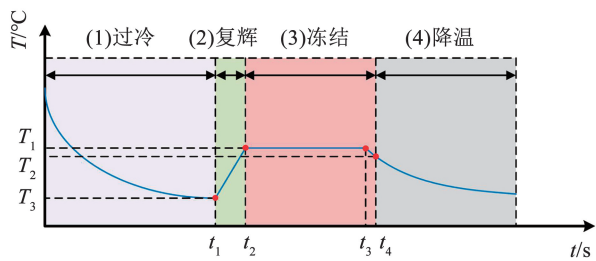


图 2 静置液滴凝固过程温度随时间变化及各阶段划分示意
Fig. 2 Schematic diagram of the temperature change of static droplet solidification process with time and division of each stage

宏观结霜现象是单液滴凝固过程的后续与发展,深入理解单液滴凝固过程能详细揭示水滴在低温环境下的冻结机制、热传导特性与相变行为,可为结霜过程的跨尺度模拟提供理论支撑^[28]。研究冷凝阶段单液滴的形成与生长过程,有助于准确描述水蒸气在冷表面上凝结成微液滴的动力学机制及液

滴形状、粒径与分布规律等特性^[29]。对于液滴凝固阶段,研究单液滴的凝固过程则能提供准确的冻结时间、冻结速率和内部温度分布等关键参数。对于霜层生长阶段,研究单液滴的凝固能够揭示液滴内部的结构变化和应力分布等直接影响霜层厚度与密度的因素。通过研究单液滴的凝固特性,可改进数理模型和数值模拟的参数设定,提高模拟结果的准确性和可靠性,并且为模拟过程提供精确的初始条件与边界条件,更加准确地建立热力学与动力学模型,提高结霜全过程综合模拟精度。

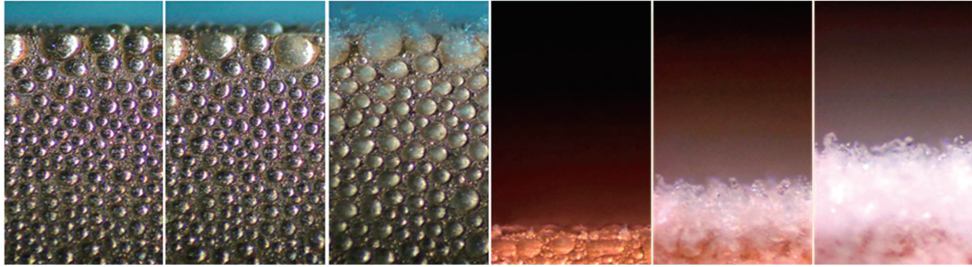
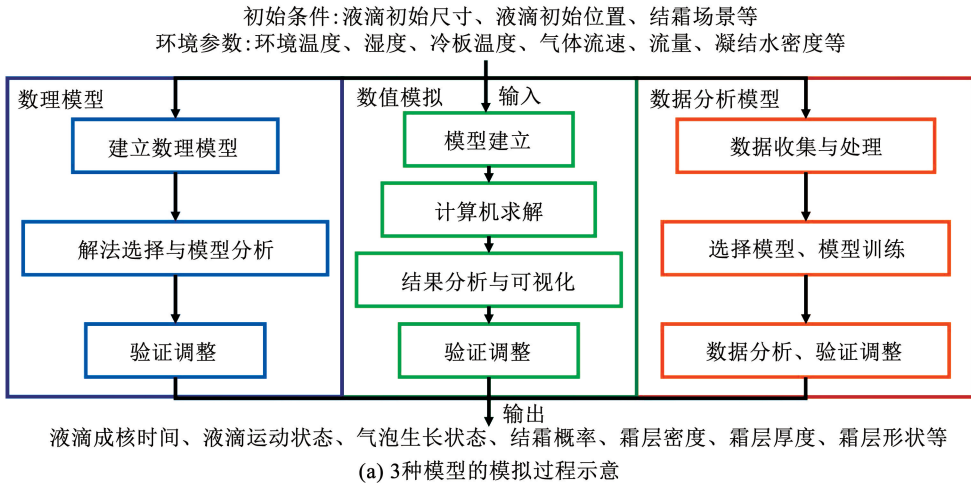
1.2 结霜模拟研究

结霜模拟与实验方法相比具有成本低、速度快、可控性强等优点,可在短时间内进行大量参数的测试和优化,大幅提高研究效率。结霜模拟技术可通过数理建模、数值模拟和数据分析等方法,再现结霜过程中的热力学和动力学参数变化,深入理解霜层生长机制,并探索不同条件下的结霜规律,预测结霜厚度、霜层密度等关键参数。如图 3 结霜模拟技术分类图所示,按模拟原理不同,结霜模拟技术可分为数理模型法、数值模拟法和数据分析法 3 种^[30-32],3 种方法都可数理描述从液滴冷凝到霜层成熟的全过程。数理模型法基于流体力学、传热学、热力学等学科的基本原理,利用数学方程与物理公式描述结霜过程的热力学与动力学特征,以解析出结霜过程中各参数之间的关系^[33]。此模型的建立往往需要精确的物理参数与环境条件参数,如温度、湿度、压力、液滴直径、液滴初始温度等。建立数理模型时,针对结霜 3 个阶段的不同模拟特征,分别建立数学方程,如滴冷凝阶段可以用表面能量平衡方程来描述,液滴凝固阶段需考虑相变热力学方程,霜层生长阶段则涉及多孔介质传热传质方程。模型建立后,通过解析或数值方法求解这些方程,得出结霜过程中的温度场、湿度场、相变界面等参数的变化情况^[34]。例如,Liu 等^[35]建立了计算无柄液滴与悬垂液滴冻结特性的理论模型,该模型的计算结果与实验结果相比平均误差为 10%;Dang 等^[36]基于热焓法对倾斜冷板上的液滴冻结过程进行了理论建模,并分析了液滴冻结特性。数理模型法能提供精确的理论分析,适用于深入研究结霜过程中的基本物理机制,但对复杂系统的模拟可能受到实际情况限制,使得求解难度过大。

数值模拟方法使用计算机算法与有限元仿真等技术,对结霜过程中参数的微分方程进行离散化处理,通过数值求解来实现结霜过程的模拟,并实现结果的可视化^[37]。例如,Mirafiori 等^[38]以基于个体的模型对液滴生长速率进行数值模拟,方法假设条件

少且计算效率高,与实验值的偏差在5%左右;Armin 等^[39]利用一种称为二维流体体积法的数值模拟方法来捕捉疏水和亲水表面液滴的冻结锋面,得到的模拟结果精度较好。数值模拟需要环境参数、材料性质的相关数据和初始边界条件,这些数据可通过实验测量或者参考常用的经验数据。此方法首先根据结霜过程中的物理现象建立数学模型,然后将模型离散化,转化为可计算的方程。例如,液滴冷凝阶段可以用有限元方法或有限差分方法模拟空

气流动和热传递,液滴凝固阶段则需要引入固液相变的数值模型,霜层生长阶段涉及多相流和多孔介质的数值模拟。模型离散化后,通过计算机程序进行迭代求解,得到结霜过程各参数的动态变化。数值模拟法可以处理复杂的边界条件,适用于实际问题的处理,可在较短时间内得到高精度模拟结果,但数值模拟需要较多的计算资源与时间并且对模型的构建和求解过程有较高要求^[40]。



(b) 自然对流环境低温冷板表面凝结霜过程从液滴冷凝到霜层生长的过程演变图

图3 结霜模拟技术分类与结霜模拟的阶段

Fig.3 Frost simulation technology classification and stages of frost simulation

数据分析法基于机器学习和大数据技术,通过对大量实验数据和监测数据的分析和处理建立结霜过程的预测模型^[41]。在结霜各个阶段中,数据分析法多用于霜层生长阶段,模拟霜层厚度和生长速率等宏观物理特征变化。建立模型后利用回归分析、神经网络、决策树等机器学习算法建立预测模型,通过训练和验证优化模型参数,提高模拟精度^[42]。例如,Saleem 等^[43]提出了一种结合神经网络与梯度提升回归器的结霜预测模型,该模型对霜层厚度特性的预测结果较好;Shammi 等^[44]则研发了一种使用红外热像图像训练的机器学习模型对田间作物的霜冻情况进行预测,经过训练优化后预测精确度可达98%。数据分析法能快速处理与分析大量数据,建

立复杂系统的预测模型,适用于实时监测和动态预测。相比其他方法,数据分析法具有更强的适应性和扩展性,但对数据质量和数量有较高要求,需要大量数据来支持模型训练和验证。

应用结霜模拟技术3个阶段的模拟侧重点、模拟特性和影响因素都存在一定差异。表1对比分析了三阶段模拟要点、温度、表面张力、流动特性、模拟尺度以及过程时间。对于前两阶段的模拟多针对于单个液滴的特征变化,霜层生长阶段的模拟特征多为霜层厚度、密度以及生长速率等整体特征变化。此外,三阶段中影响因素的差异也使得各个阶段的建模方式与所采用的模拟方法存在一定差异。

表 1 结霜三阶段模拟技术的比较分析

Tab. 1 Comparative analysis of three-stage frost simulation techniques

序号	比较因素	冷凝阶段	液滴凝固阶段	霜生长与霜层成熟阶段
1	模拟要点	温度场、湿度场、液滴成核与运动	温度变化、液滴相变规律、液滴固液界面迁移规律、液滴轮廓变化	霜层厚度与密度、霜层中传热传质、环境条件对霜层生长的影响
2	温度	低于露点温度时	低于凝固点温度时	低于凝固点后继续降低
3	表面张力	影响液滴形状与冷凝模式(均匀或非均匀冷凝)	影响固液界面形态	在微观尺度上影响霜晶生长,对整体形态影响较小
4	流动特性	气相中流动特性对液滴冷凝位置与速率有重要影响	液滴内部热对流消失,固态无流动	霜层内部无流动,外部气体流动影响霜层表面生长
5	模拟尺度	针对单个或多个液滴	针对单个或多个液滴	针对整个霜层
6	过程时间	秒到分钟的时间尺度	冻结时间取决于环境温度和液滴大小,通常在秒到分钟的时间尺度	霜层形成需要更长时间,在分钟到小时的时间尺度

2 冷凝阶段模拟研究

结霜过程始于液滴在低温基底上的冷凝,冷凝过程可分为成核过程、液滴沿低温表面的复杂运动与随后的液滴生长过程^[45]。对液滴冷凝阶段进行模拟,可详细研究液体冷凝过程的机制与动力学特征,并量化冷凝过程中热流密度、温度场分布与水蒸气浓度等参数变化,有助于揭示结霜初期的微观机制,解释结霜过程中热量与物质的传递规律^[46-47]。

2.1 液滴成核过程模拟

液滴的形成通常通过自发成核或者非均匀分布的成核中心生长而发生,Fereydoon 等^[48]引入了类似 Smoluchowski 方程的速率方程用于描述均匀生长液滴的动力学特性,介绍了非均匀成核液滴生长的动力学模型方法。通过模型模拟了液滴分布与成核的基本特征,在对均匀成核液滴模拟中得到了类似双峰的液滴特征,并获得了两种模式的液滴成核表达式。针对均匀液滴成核,Neimark 等^[49]采用了一种新的蒙特卡罗模拟方法研究液滴的成核势垒,并结合幽灵场(Ghost Field)方法构建液滴与低密度蒸汽的连续状态轨迹,用于积分计算液滴自由能和构造液滴半径与表面张力的关系,为临界核的模拟提供了一种较为准确的方法,最终模型精度高达 90%。因演化速率和粒径贡献度等参数影响液滴凝结过程,Guo 等^[50]模拟了不同凝结核密度液滴凝结的变化过程。液滴凝聚的初始阶段,凝结核均匀随机分布,随后重核液滴位置不变。基于固定成核中心理论^[51],采用 Cassie 模型并将邻域查找法与守恒定律耦合,对液滴初始成核过程与重成核过程进行模拟。Leach 等^[52]使用 ImageJ 图像器,收集液滴初始时刻相对位置与各个液滴的尺寸特征,通过计算机程序进行分析与模拟,预测初始成核密度与随后

的成核速率,得到的模拟结果对参数范围的选择依赖性较小。表明液滴的聚集对液滴尺寸具有重要影响,同时会促进小液滴在基底上的成核过程,大约有 7% 的表面最终被半径 20 μm 或更小的液滴占据。为分析低温表面类型对液滴成核过程的影响,Niu^[53]引入液滴成核半径来定量确定液滴的成核状态,并通过分子动力学模拟的方法探讨了表面润湿程度和热通量对液滴成核的影响,结果表明,粗糙结构顶部较大尺寸液滴的存在会限制内部成核。针对疏水表面液滴的成核过程,Zhang 等^[54]采用了多相、多组分晶格玻尔兹曼模型进行了模拟,发现在不同表面参数影响下存在顶部、侧面和底部 3 种成核模式,纳米结构的润湿性对成核模式有显著影响,实验观察结果验证的仿真误差小于 2%。

2.2 低温表面液滴复杂运动过程模拟

液滴冷凝过程中液滴间相互作用及冷表面的一些物理特征会使得液滴沿低温表面出现复杂运动过程,如合并、弹跳、滚落、横扫、铺展等现象^[55]。液滴合并是指两个或多个相邻的小液滴在表面上碰撞并融合成一个更大的液滴,该过程主要受表面张力驱动,涉及到液体的内部流动和表面张力的平衡过程。Musehane 等^[56]基于多尺度方法对液滴间的相互作用建立了数理模型,并将使用体积流体法的多相流模拟与表面薄膜模型进行耦合,通过多重标记与表面张力的计算,模拟液滴碰撞合并期间界面的变形结果,最终模拟的轮廓与液滴的实际轮廓重叠比例超过 85%。液滴弹跳通常发生在具有一定疏水性的表面上^[57]。当两个或多个液滴聚合时,部分表面张力能和弹性势能转化为动能,使液滴在表面上弹起,该现象也被称为“聚结诱导液滴跳跃”^[58-63]。通过对液滴凝结过程中跳跃液滴的测量以及二元液滴聚结的数值模拟,Enright 等^[64]研究得出仅有少部

分多余表面能转换为动能,阐明了液滴内部流体动力特性在跳跃液滴聚结中的作用。基于此,Lv等^[65]进一步通过实验发现多液滴聚结时更多表面能转化为液滴动能,能量壁垒更容易被克服,从而更容易实现液滴跳跃。之后建立了一个通用的数学模型,对多液滴聚结的跳跃速度与临界尺寸进行定量计算。在跳跃液滴尺寸研究方面,Birbarah等^[66]开发了一种弹跳液滴凝结的三维数值模拟模型,研究了最大和最小弹跳液滴半径与接触角对弹跳液滴尺寸的影响。并为液滴尺寸提供了数值拟合,拟合结果的总体相关系数大于0.955。针对弹跳液滴运动状态的模拟,Meng等^[67]通过数理模型的建立求解

以及与实验结果的对比,发现聚结液滴的弹跳与成对液滴的绝对大小和相对大小有着紧密关系。Enright等^[64]和Lv等^[65]对液滴弹跳速度的预测和实验结果对比如图4(a)所示,与Melissa等^[68]建立的弹跳速度表达式见表2。液滴滚落是指液滴在表面上沿一定方向滚动移动,通常发生在液滴体积较大、重力影响显著的情况下。同时,表面能梯度和表面的粗糙度也会影响液滴滚动的行为,在一些超疏水表面,液滴的滚动更加明显。Sikarwar等^[69]通过构建数学模型,对倾斜基板上滚落液滴的临界半径以及滚落速度等参数进行了计算,得出了液滴滑动开始所需的临界倾角与液滴体积成反比的结论。

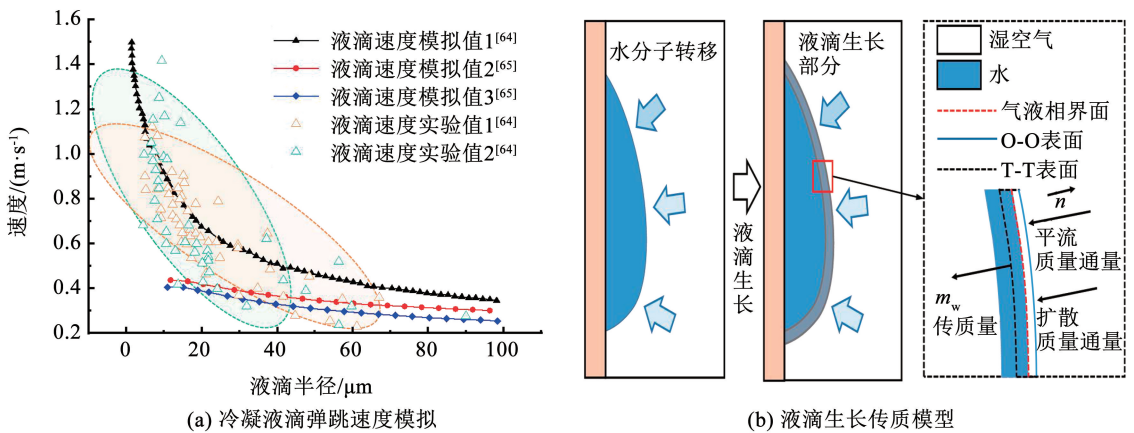


图4 液滴冷凝阶段的结霜模拟

Fig. 4 Frosting simulation during droplet condensation stage

表2 液滴弹跳速度表达式汇总与对比

Tab. 2 Summary and comparison of expressions for droplet bounce velocity

序号	基本假设条件	表达式	参数说明	文献
1	液滴底部为圆形,且处于静力平衡状态	$v_j = (3.402\ 60h^2 - 1.528\ 50h + 0.283\ 1)U$	v_j 为弹跳速度; U 为特征跳跃速度; Oh 为内佐格数,度量黏性力与惯性力和表面张力相互关系的无量纲数	Enright等 ^[64]
2	静态液滴和运动液滴的体积相等	$\rho V_0 v_j^2 = 2V_0 \gamma_{LV} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - 2\pi r_1 \gamma_{LV} (r_1 \sin \theta)^2$	ρ 为液滴密度, V_0 为初始时刻体积, v_j 为弹跳速度, r 为液滴半径, γ 为液滴表面张力, θ 为接触角	Lv等 ^[65]
3	液滴内部速度呈线性分布	$U^2 = V_L^2 + V_S^2 - 2V_L V_S \cos(\theta_1 + \theta_2)$	U 为特征跳跃速度, V 为弹跳速度, θ 为接触角	Melissa等 ^[68]

2.3 冷凝液滴生长模拟

液滴冷凝过程中液滴间相互作用及冷表面的一些物理特征液滴形成后,通过对环境水蒸气的吸收快速增大,液滴在冷表面运动并相互碰撞聚合形成较大的液滴。针对液滴凝结与液滴的生长过程,Fritter等^[70]首先假设单个液滴的生长过程符合幂函数规律,建立对应的数值模拟模型,模拟了液滴聚结过程中不断缩放的特征,解释了液滴之间空间位

置的相关性。对于液滴生长中的传质过程,Zhuang等^[71]建立了如图4(b)的液滴生长传质模型,将流体区域划分为几个控制体,利用传质方程对液滴的生长量进行定量计算,用于模拟液滴的生长过程。由于冷板表面不同润湿性对液滴的生长会产生不同影响,Chu等^[72]采用数据统计的方法对亲水表面、疏水表面和超疏水表面液滴行为和生长特性进行了研究,数据拟合后的指数分别为0.94、0.76和0.7,

并对液滴尺寸的相对标准差进行了计算,最终相对标准差均小于 0.7。在这些模拟工作的基础上,为优化计算时间,研究时间步长、计算域的大小对于液滴尺寸分布结果的影响,Mirafiori 等^[38]提出了一种基于个体的新模型,在不对整个过程作任何假设的情况下,对液滴生长速率进行模拟,将模型的计算效率提高了 10~100 倍,同时使得模拟结果与实验值的偏差保持在 5% 左右。

2.4 结霜过程冷凝阶段模拟研究总结

对冷凝阶段的结霜模拟采用了建立数理模型与数值模拟的方法,表 3 对其具体方法、输入参数和输出结果进行了总结。将冷凝阶段模拟过程划分为对液滴成核过程、低温表面液滴复杂运动过程和冷凝液滴生长过程 3 个阶段的模拟,各阶段的输入参数与模拟特性也存在一定差异^[73]。液滴成核的模拟主要依靠液滴初始尺寸等自身性质参数,对成核速率及成核过程中液滴物理性质的变化进行模拟,现有模型对于液滴形状的模拟误差可以控制在 10% 左右。针对液滴复杂运动过程,主要通过液滴密度与初始尺寸等物理参数,实现对液滴弹跳速度和液

滴临界尺寸的计算与模拟,同时利用数值模拟对弹跳过程的影响因素进行研究。而在冷凝液滴生长过程模拟中,模拟结果则主要关注液滴轮廓的变化情况与液滴的生长速率,现有数值模拟模型对于液滴生长速率的模拟可以将误差保持在 5% 左右。对冷凝阶段的模拟,数理模型、数值模拟和数据分析模型具有不同的发展方向和潜力。数理模型凭借对物理定律的高解释性和简洁性,在基础研究和简单系统的分析中占据重要地位,未来的发展方向主要是进一步完善和扩展现有模型,提升其对液滴冷凝的复杂物理现象的描述能力。数值模拟作为处理复杂系统和非线性问题的主要手段,依托计算能力的提升和算法的改进,将继续向高精度、模拟快速性的方向发展。虽然目前数据分析模型在液滴冷凝模拟中的应用较少,但随着大数据技术和实验测量手段的进步,将来这类模型可能更多地用于辅助传统模拟方法,通过融合物理模型和数据驱动方法,实现参数优化、模型校正和复杂工况下的模拟与预测。因此,数理模型、数值模拟和数据分析模型在液滴冷凝模拟中的发展将呈现协同和互补的趋势。

表 3 液滴冷凝阶段模拟技术总结

Tab. 3 Summary of simulation techniques for droplet condensation phase

序号	模型	采用方法	输入参数	模拟特性	模拟精度	文献
1	数理模型	动力学方程的求解	液滴初始尺寸、生长速率	液滴尺寸	液滴尺寸误差小于 23%	Fereydon 等 ^[48]
2	数理模型	蒙特卡罗模拟	液滴表面张力、液相与气相压差等	成核速率	成核速率置信水平约 90%	Neimark 等 ^[49]
3	数值模拟	Cassie 模型	凝结水密度、蒸汽温度、冷板过冷度	成核位置	—	Guo 等 ^[50]
4	数值模拟	多种程序复合计算	液滴初始位置、初始面积	液滴密度、成核速率	—	Leach 等 ^[52]
5	数值模拟	分子动力学模拟	液滴初始尺寸、热通量	成核过程液滴形状	液滴形状误差小于 15%	Niu 等 ^[53]
6	数值模拟	晶格玻尔兹曼法	液滴密度分布、蒸汽压力、温度	接触角、成核位置	接触角误差小于 2%	Zhang 等 ^[54]
7	数理模型	多尺度建模	液滴密度、内部压力、薄液膜厚度	聚合液滴的形状	液滴轮廓模拟精度高于 85%	Musehane 等 ^[56]
8	数值模拟	有限元计算	液滴初始半径、液滴密度、运动时间	液滴弹跳速度	液滴弹跳速度误差小于 14%	Enright 等 ^[64]
9	数理模型	动态方程计算	液滴体积、聚结后的液滴速度、合并前后的液滴半径	液滴弹跳速度、临界尺寸	液滴弹跳速度误差小于 17%	Lv 等 ^[65]
10	数值模拟	有限元方程迭代	成核位点密度、最小与最大液滴半径、液滴接触角	弹跳液滴尺寸	总体相关系数大于 0.955	Birbarah ^[66]
11	数理模型	动力学方程的求解	液滴密度、饱和蒸汽温度和压力、液滴接触角	液滴运动尺寸	液滴尺寸误差小于 13%	Meng 等 ^[67]
12	数理模型	动力学方程的求解	液滴接触角、液滴初始半径	液滴覆盖面积、速度	液滴覆盖面积误差为 13.3%	Sikarwar 等 ^[69]
13	数值模拟	呼吸图模型	液滴初始半径、环境温度、气流中水蒸气分压	液滴生长速率	液滴生长速率误差约为 5%	Fritter ^[70]
14	数理模型	控制方程的求解	水蒸气质量通量、空气中水蒸气质量分数	液滴生长的传质量	—	Zhuang 等 ^[71]
15	数理模型	数据统计法	液滴分布图像、冷表面温度	液滴生长速率	生长速率相对标准差小于 0.7	Chu 等 ^[72]
16	数值模拟	基于个体的模型	液滴接触角、液滴半径	液滴生长速率	生长速率误差约为 5%	Mirafiori 等 ^[38]

3 液滴凝固阶段模拟模型

作为结霜过程的第二阶段,液滴凝固过程中首先发生的是冰晶成核,在液滴被逐步冻结的过程中,液滴中的固-液相界面保持动态移动,并且液滴的轮廓形态从初始的球形逐渐变为复杂形态^[74-75]。对液滴凝固阶段的模拟,可深入理解微观尺度下液滴的相变过程,分析不同条件下相界面的演化规律,进一步理解液滴凝固过程中的动力学与热力学过程。有助于准确描述结霜过程,确定结霜模型建立时的重要参数。

3.1 冰晶成核模拟

冰晶成核是指液态水在冰点以下形成固态冰晶的过程。Quigley等^[76]使用各种周期性模拟域对液滴动态成核过程进行模拟,证明了在无外界场影响的情况下,液滴在等温、等压系统中的成核过程为均匀成核。通过元动力模拟,构建了采用512个分子的立方体模拟单元,发现无论用于模拟的液滴形状如何,立方冰晶都优先从液滴中成核,并结合过冷度的影响对成核分子能量进行了估算,结果在0.25~0.60 eV/mol,但存在未考虑多晶体长度的问题,具有一定的模型缺陷。针对液态水的结晶过程与冰晶成核速率,Kenneth等^[77]建立了一种多核生长模型,研究得出成核速率主要由冰水和冰蒸汽界面上的阶跃能量决定,并且阶跃能量受温度等因素影响巨大。因此,在建模过程中着重考虑了热扩散效应以确定冰晶成核速率,计算结果显示,温度变化10℃时,成核速率变化倍数达百倍,受温度影响较大。

分子动力学模拟也是冰晶成核模拟中被广泛应用的一种方法。单个水分子之间存在氢键和无序的三维氢键网络,分子之间的结构较为复杂,使得模拟过程需要进行大量的网格布置。为简化整个模拟过程,Matsumoto等^[78]提出了一个分子动力学轨迹,捕捉纯水冷冻与冰晶成核过程中的分子运动过程。结果显示在模拟时间为256 ns时,多个键形成多面体结构,同时演变为一个稳定的初始冰核,并在模拟时间为270 ns时从该位置迅速增大。为评估15~35 K的冰晶成核速率,Eduardo等^[79]建立了TIP4P/2005与TIP4P/ice两种成核速率模型,并与实验结果对比,结果如图5(a)所示。当温度范围大于25 K时,模型模拟的成核速率与实验结果误差小于15%,同时给出了所研究模型的临界簇大小与过冷度的关系,如图5(b)所示^[80-82]。Wang等^[83]同样采用分子动力学模拟的方法,建立了基于冷冻液滴动力学与热传导的数值模型,将多体耗散粒子动力学系数与宏观热导率相联系,对不同润湿度冷表面

上的液滴冻结过程进行了模拟。结果显示冰晶成核的过程中,随着潜热的释放,成核速率会进一步加快,同时在液滴到达平衡温度时,新形成的冰核主要出现在消退区的边缘位置。以上传统的数理模型与数值模拟方法往往存在计算成本过高、模型计算困难等问题,为此,Piaggi等^[84]建立了一种基于密度泛函理论能量的高效机器学习模型并结合经典成核理论,对大气压下的成核速率进行模拟。结果显示,在中等过冷条件下模型模拟的成核速率与实验结果较为吻合,平均精度大于80%。同时,通过建立的模型进一步研究了热力学驱动力、界面温度等性质对于冰晶成核速率的影响。

3.2 相界面动态模拟

冷板表面的液滴凝固冻结时,固液相界面也被称为冻结锋面,在液滴的冻结过程中动态变化,从液滴底部向上移动^[85-86]。Vladimir等^[87]对二维凝固液滴的固相、液相与气相交汇处进行了数值模拟,通过准稳态热传导方程确定冻结锋面的形状。同时考虑了Gibbs-Thomson效应和固液界面的动力学方程,研究了表面张力改变产生的影响,在低表面张力的情况下,相界面在较长时间内中间保持向上的凹陷,而对于高表面张力,对界面形状的影响更加明显,迫使其在凝固过程的更早阶段变平。冷板的表面润湿性与表面倾斜程度对相界面的迁移均会产生影响,因此,Armin等^[39]采用了一种二维流体体积法来捕捉冻结锋面,并应用局部网格处理技术提高精度。模拟结果比较了沿液滴中心线位置冻结锋面随时间的变化,如图5(c)所示,在与Chaudhary^[88]和Yao等^[89]模拟结果的比较中显示出了较强的一致性,在疏水表面的平均偏差小于8.9%,在亲水表面模拟结果的平均偏差小于14.7%。此外,Yao等^[90]在另一项研究中,采用数值模拟的方法对超冷表面液滴凝固过程中液滴中心高度变化进行了模拟,并将模拟结果与试验进行了对比,最终模拟结果的平均误差小于10%。

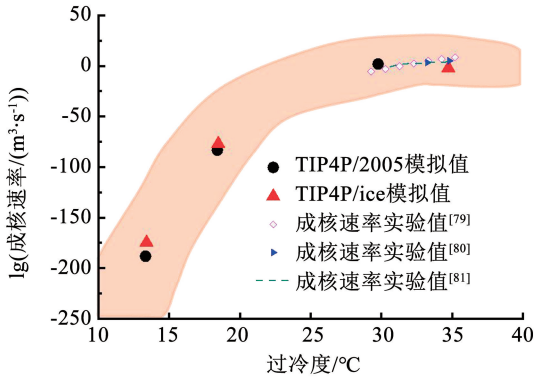
在对冷表面液滴冻结过程的研究中,多通过建立数理模型实现对相界面迁移规律的模拟。Zhang等^[91]建立了一种综合考虑过冷效应对液滴物理特性影响以及重力对冻结液滴形状影响的新模型,引入动态接触角并利用图像识别技术观察与分析液滴的冻结过程。通过实验获得了冻结锋面高度与半径的变化规律,模型模拟的结果与该实验结果较为吻合,对比显示模型模拟结果的误差小于15%。同样考虑重力对液滴相界面的影响,Liu等^[35]建立了计算无柄液滴与悬垂液滴冻结特性的理论模型,并进行了实验验证。比较了模拟结果与实验结果中冻结

锋面高度与半径的变化规律,在液滴凝固的早期阶段,冻结锋面半径随时间均匀减小,同时在尖端开始形成时,半径的减小速率进一步上升,模型计算结果与实验数据吻合较好,平均误差为 10.54%。基于该模型,进一步研究了不同液滴体积、接触角和冷板温度下无柄液滴与悬垂液滴的冻结特性。

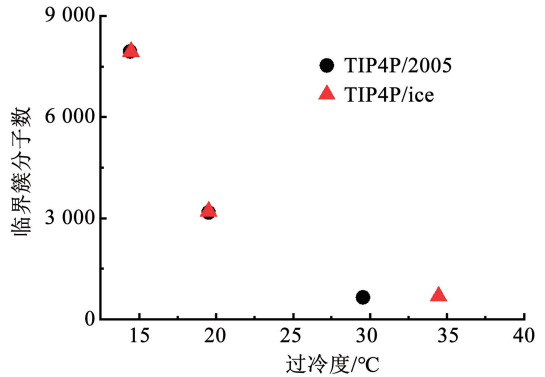
3.3 水滴轮廓模拟

将液滴置于冷板表面上时,凝固过程从液滴的底部开始,在冻结锋面向上的移动过程中,液滴轮廓从球形变为尖顶^[92]。尖顶只是凝固液滴尖端生长期中尖端垂直生长的开始,在液滴的进一步凝固过程中,液滴轮廓还会发生更多变化^[93-94]。Snoeijer 等^[95]假设固液相界面在液滴凝固过程中保持水平,提出了一种用于液滴轮廓计算的简单几何模型,并建立了对应的数学模型,更加直观地展示液滴轮廓的变化规律。因为模型的简化,对于一般冻结过程

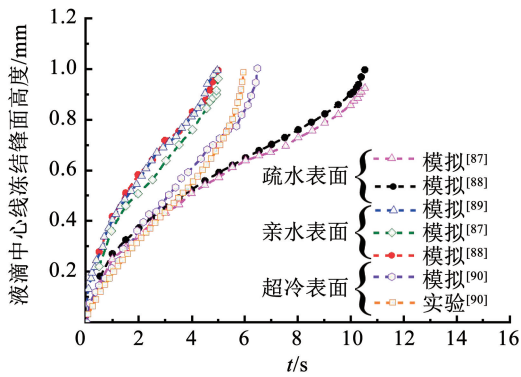
的固液密度比,无法对液滴顶部的凸起状况进行准确模拟,只有在密度比较小时才可以进行较为准确的模拟。在密度比为 0.9 的情况下,液滴顶端会出现锥形尖端,为了与实验达成定量的一致性,需要进行更为准确的模型建立。因此,Schetnikov 等^[96]从理论上研究了液滴凸起的尖端角,并提出了一种数学方法。首先,对于冻结锋面非平坦表面的性质给出了物理解释,随着冻结锋面在液滴冻结过程中的移动与凹陷,冻结锋面将达到一个高度,在此高度前的点都以相同速度向前移动。然后,冻结锋面作为球体的一部分,其中心与形成的圆锥体顶点重合,在这种情况下锋面垂直于液滴表面。最后,利用液滴体积与锋面高度的关系和液滴尖端角,采用 4 个数学方程进行计算,计算结果显示,尖端角度随着固液密度比的增加而增加。尖端角度的数学计算方法与几何关系如图 5(d) 所示。



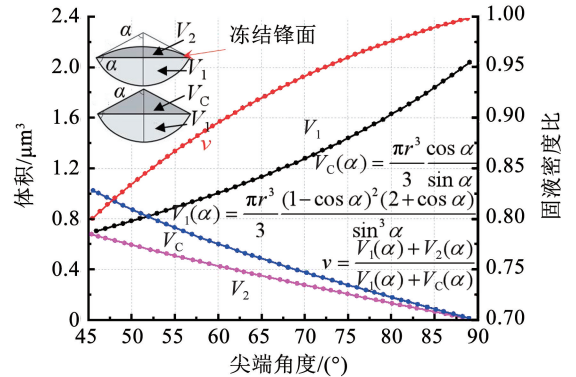
(a) 成核速率模拟结果



(b) 临界簇大小与过冷度的关系



(c) 冻结锋面高度变化模拟结果



(d) 液滴凝固过程尖端角度计算模拟结果

图 5 冷凝结霜过程中液滴凝固阶段的数值模拟研究

Fig. 5 Numerical simulation of droplet solidification stage during condensation and frosting

为提高液滴凝固模型模拟过程的收敛速度, Yao 等^[97]在 OpenFOAM 平台中建立了一种包含扩展相变算法的三维数值模型,模拟研究了表面润湿性对冻结速度的影响。结果表明,润湿性的改变影响接触角的大小,且随着接触角的增大,液滴接触面积减小,液滴冻结凝固的时间也更长,液滴底部轮廓

更趋于一个球体。将该模型对接触角的模拟结果与 Chaudhary 等^[88]的模拟结果相比较,结果显示较强的一致性,偏差值小于 10%。为预测水平基底上的液滴轮廓,Dang 等^[98]基于 Young-Laplace 方程,考虑重力效应与冷板表面润湿性,建立了描述液滴轮廓的几何模型。假设液滴所处环境为自然对流、液

滴凝固过程的几何形状是轴对称的,通过对水滴几何形状模拟结果与实验结果的对比验证,进一步将该模型用于预测模拟如乙醇、乙二醇等其他液体的液滴形状。该模型的模拟结果与实验数据的吻合程度较高,平均误差小于 1.5%。对于水平表面上的各种液滴,当温度升高时,液滴接触半径增大,高度减小。在此基础上,Dang 等^[36]又对倾斜冷板表面的液滴冻结进行了建模研究,基于热焓法并考虑变形与扩散两种动力学行为,提出了一种理论模型。通过实验液滴的剖面形状与冻结持续时间对模型进行验证后,分析了冻结特性,包括接触面积、冻结高

度和顶点偏移量等。结果发现冷板倾斜角对体积小于 10.34 μL 的液滴的影响大于体积大于 10.34 μL 的液滴,同时当液滴体积从 5 μL 增加到 25 μL 时,40°倾斜平板表面的液滴接触面积从 7.31 mm 增加到 24.34 mm,计算结果表明,液滴体积对冻结过程的影响大于冷板倾斜角度的影响。

3.4 液滴凝固阶段结霜模拟研究总结

在对液滴凝固阶段的模拟中,同样较多采用数理模型的建立与数值模拟的方法,表 4 对模拟采用的具体方法、输入参数与模拟特性进行了总结。

表 4 液滴凝固阶段模拟技术总结

Tab.4 Summary of simulation techniques for droplet solidification stage

序号	模型	采用方法	输入参数	模拟特性	模拟精度	文献
1	数值模拟	元动力学模拟	临界核体积、水分子势能、成核分子能、液滴温度	晶核尺寸、冰晶形状	—	Quigley 等 ^[76]
2	数理模型	多核生长模型建模	相界面阶跃能量、界面温度、晶体分子大小	尖端生长速率和结构	尖端生长速率误差小于 12%	Kenneth 等 ^[77]
3	数值模拟	分子动力学模拟	液体温度、水分子数目、液滴凝固时间、体积	成核时间、晶核形状	—	Matsumoto 等 ^[78]
4	数值模拟	分子动力学模拟	液滴温度、临界团簇分子数、液滴凝固时间	成核势能、成核速率	成核速率误差小于 15%	Eduardo 等 ^[79]
5	数值模拟	分子动力学模拟	液滴密度、冰晶成核温度、临界冰核尺寸	液滴温度、成核速率、成核位置	液滴温度误差小于 7%	Wang 等 ^[83]
6	数据分析	机器学习	液滴温度、水分子总数、相界面自由能、冰密度	成核速率	成核速率精度大于 80%	Piaggi 等 ^[84]
7	数值模拟	边界积分方法	固液两相的密度比、液滴曲率半径、液滴温度	相界面形状、凝固速率	—	Vladimir 等 ^[87]
8	数值模拟	压力速度耦合算法	液滴初始温度、接触角、冷表面温度、表面倾斜度	冻结锋面的运动规律	平均偏差小于 14.7%	Armin 等 ^[39]
9	数理模型	多物理场建模	冷板温度、液滴初始尺寸、接触角、冻结时间	相界面高度、冻结速率	相界面高度误差小于 15%	Zhang 等 ^[91]
10	数理模型	多物理场建模	液滴体积、接触角、冷板温度、液滴表面张力	冻结锋面高度	冻结锋面高度误差为 10.54%	Liu 等 ^[35]
11	数理模型	几何模型	液滴基部半径、液滴体积、接触角、固液密度比	轮廓形状、冻结高度	液滴形状误差小于 5%	Snoeijer 等 ^[95]
12	数理模型	动力学方程的求解	液滴半径、液体密度、液滴表面张力	轮廓形状、尖端角度	尖端角度误差小于 4%	Schetnikov 等 ^[96]
13	数值模拟	扩展相变建模方法	液滴半径、液滴体积、接触角、冻结锋面高度	接触角	接触角偏差值小于 10%	Yao 等 ^[97]
14	数理模型	求解杨氏方程	液滴密度和初始直径、液体表面张力、接触角	液滴高度、接触半径	液滴形状平均误差小于 1.5%	Dang 等 ^[98]
15	数理模型	热焓法理论模型	冷板表面温度、液滴体积、液滴表面张力	接触面积、顶点偏移量	准确率为 95%	Dang 等 ^[36]

通过对冰晶成核、液滴相界面迁移和液滴轮廓 3 个过程的模拟,实现对液滴凝固阶段各个特征的模拟与预测。对于输入参数而言,冰晶成核的模拟多关注于液滴温度、临界核体积和冰晶成核温度等微观物理参数,相界面迁移与液滴轮廓变化的模拟还包括液滴半径、接触角和液滴体积等自身形状参数。对于模拟特性而言,成核速率是冰晶成核过程最关注的特征,并且多采用数理模型探究各因素对于成核速率的影响。相界面迁移的模拟多针对于冻结锋面的运动规律,数值模拟可以更为灵活地处理复杂的边界条件和多物理场的耦合,对冻结锋面运动规律模拟精度最高可达到 89.6%。液滴轮廓和尖端角度等自身形状参数则为液滴轮廓变化模拟中最常关注的特性,这一特性可以通过数理模型的求解实现较为准确的模拟。在液滴凝固阶段的模拟中,数理模型未来的发展方向在于更加精细地描述微观结构和复杂的相变过程,进一步完善和扩展现有的理论框架,以提高对实际凝固现象的描述能力。数值模拟受益于计算能力和算法的进步,朝着更高精度的三维模拟发展,尤其是在处理多尺度、多物理场耦合问题时表现出强大的潜力,其应用范围将更加广泛和深入。基于机器学习的数据分析模型目前虽然应用较少,但随着实验数据获取和处理技术的提升,未来将在数据驱动下的模型优化、快速预测以及复杂工况下的实时控制方面发挥重要作用,用于提供新的研究和应用途径。

4 霜层生长阶段模拟研究

结霜过程的第 3 阶段为霜层的生长,此阶段霜层中的传热传质过程变得更为复杂。随着霜层厚度的增加,霜层形状、密度和温度等宏观参数以及孔隙率、冰晶分布等微观结构均会反生变化,并进一步影响霜层的传热传质过程。简单冷表面通常具有规则的几何形状和较少的干扰因素,便于验证和完善霜层生长的基本理论和模型,通过对简单冷表面结霜过程的模拟,可以更好地预测温度、湿度和气体流速等参数对于霜层生长的影响。对换热器表面结霜过程的模拟,可以更好地掌握霜层生长的规律,优化换热器的设计,减少霜层对换热效率的影响,同时优化防除霜设备的设计,为制定更为有效防除霜策略提供可靠的理论依据。

4.1 简单冷表面结霜过程模拟

在对简单冷表面上的霜层生长过程模拟中,数理模型能够以较少的计算量计算负荷预测霜层特征,如密度、厚度和热导率,但不能为每个时间步长

提供霜层的全面信息。Jones 等^[99]首先开发了一种离散模型,结合了质量扩散率和平均传热率预测霜层形成有关参数随时间的变化趋势。此种模型可以通过耦合平均温度梯度^[100]、粗糙度^[101]、导热率^[102]和密度^[103]等参数,对模型实现进一步的优化。后续改进中,对霜层中的温度梯度进行假设,认为其中的温度梯度完全相同^[100],最终模拟结果在英寸尺度下精度大于 71%。为了计算霜层粗糙度对传热系数的影响,Yun 等^[101]根据预测结果提出了霜层平均粗糙度的经验关系,将对霜层密度的模拟精度提高至 87%。由于热导率与霜层中晶体的形状与结构密切相关^[104-105],Na 等^[102]将霜冻表面过饱和条件下的热导率考虑到模型中,从而显著优化了传热路径^[106]的模拟。离散模型是在没有求解水蒸气剖面 and 温度剖面的情况下开发的,因此,不能计算传质速率,但可以在不迭代的情况下估计整体霜冻特性,最终将对霜层质量的模拟精度提高到了 85%。

离散模型中对霜层剖面的均匀假设,导致上述方法无法预测霜层中的霜剖面,因此,为了减少均匀剖面假设带来的预测偏差,Lee 等^[107]假设吸收率与水蒸气浓度成比例,并进一步研究了在某些特定环境条件下霜层质量与刘易斯数的相关性。在此基础上,Ro 等^[34]提出了一个基于毛细管分析的具有恒定吸收率的类似模型。此外,为了通过更准确的模型获得霜层形成的时间信息,Ismail 等^[108]开发了一个瞬态一维模型来分析两个生长阶段的结霜过程,通过对两个校正参数的修改,将误差控制在 10% 以内。Hermes 等^[109]建立了预测霜层厚度和质量随时间变化的理论模型,该数学模型基于霜层内的质量和能量平衡,对质量和热扩散的控制方程进行了解析,得到了只需要对一个变常微分方程进行数值计算的半代数公式,通过该公式模拟的结果误差在 10% 以内。根据实验结果 Wang 等^[110]建立了一个修正霜密度的相关性模型,并在验证了这一相关性后预测了在大范围结霜条件下的动态结霜特性,霜层密度模拟平均误差在 10% 以内。考虑到空气温度、湿度等因素对霜层生长的影响,Cheikh 等^[111]将热量与质量的传递考虑到模型中,提出了一种平面上霜生长和致密化模型,进一步提高了模型预测的适用性与准确性。

在数值模拟模型中,模型结果与实验数据显示出良好的一致性,与数理模型相比,可以通过现有数据计算以实现更直观的模拟与估计。Beer 等^[112]首先提出了一种基于计算流体力学的数值模拟模型,该模型只需要初始孔隙率作为输入,就可以进行模

拟与预测,但当霜层融化时此模型的计算准确度会受到限制。将不同雷诺数和不同相对湿度条件下模型模拟结果与实验结果相对比,如图6(a)所示,模拟结果的最大误差小于18%。在此基础上, Lee等^[113]将一维比例模型与气流的CFD代码相结合,利用局部密度和热导率相关性对模型进行优化,对霜层厚度以及表面温度情况进行模拟,将模型的误差控制到10%以内,但此模型无法对霜层剖面进行预测。考虑不同冷板温度对于霜层生长过程的影

响, Jaehwan等^[114]提出了一种新的体积传质速率方程,该方程可考虑水蒸气对霜层渗透的影响,可对不同温度冷板表面的结霜过程进行模拟,同时实现对霜层厚度变化的预测。如图6(b)所示,将模拟结果和 Bartrons等^[115]的模拟结果相对比,本模型霜层厚度模拟结果的最大误差小于12%,模拟的准确率高出 Bartrons等的模拟结果。表5对既有简单冷表面霜层生长模拟技术进行了分类汇总,各霜层厚度表达式见表6。

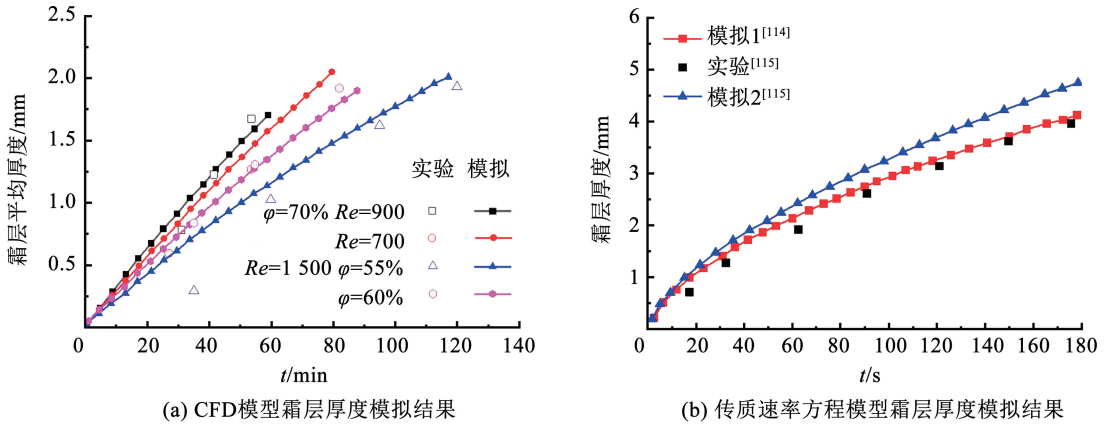


图6 凝结霜过程中霜层生长阶段的数值模拟研究

Fig. 6 Numerical simulation study of growth stage of frost layer during condensation and frosting

表5 简单冷表面霜层生长模拟技术总结

Tab. 5 Summary of simple cold surface frost growth simulation technology

序号	模型	输入参数	模拟特性	模拟精度	文献
1	数理模型	气流速度、空气温度、湿度等	霜的密度、霜层厚度	3 h 内的准确率大于 75%	Jones 等 ^[99]
2	数理模型	湿度、空气流量、空气体积、霜温度等	霜层厚度、密度、形成速率	英寸尺度下精度大于 71%	Sami 等 ^[100]
3	数理模型	环境温度、霜层摩擦因数、粗糙度等	霜导热系数、霜厚度、霜质量、霜密度	霜密度的误差小于 13%	Yun 等 ^[101]
4	数理模型	霜层密度、水蒸气密度、表面气体流速等	霜层质量、霜的晶体形态、霜增长率	霜层质量精度高于 85%	Na 等 ^[102]
5	数理模型	冷板温度、环境温度、湿度、气流流速等	霜层厚度、霜层质量、霜层增长速度	—	Chen 等 ^[103]
6	数理模型	环境温度、湿度、气体流速、流量等	霜层温度、霜的质量、生长速率	霜层质量平均误差为 5.5%	Lee 等 ^[107]
7	数理模型	空气温度、表面温度、水蒸气密度等	霜层厚度、霜层密度	霜层厚度误差小于 12%	Ro 等 ^[34]
8	数理模型	环境温度、湿度、气流速度、冷板温度、结霜时间等	霜层温度、密度、密度增长率	霜层温度误差小于 10%	Ismail 等 ^[108]
9	数理模型	环境温度、湿度、气体速度、地表温度等	霜层厚度、霜层增长速率、密度增长率	霜层厚度误差小于 10%	Hermes 等 ^[109]
10	数理模型	空气温度、湿度、气体流速、冷板温度等	霜层厚度、密度、霜面温度、热通量	霜层厚度平均误差小于 10%	Wang 等 ^[110]
11	数理模型	空气温度、气体流速、水蒸气质量等	霜层厚度、密度	—	Cheikh 等 ^[111]
12	数值模拟	环境温度、湿度、气流速度、平板温度等	霜层厚度、霜层平均温度	霜层厚度最大误差小于 18%	Beer 等 ^[112]
13	数值模拟	霜层初期厚度、密度、气体温度、流速、冷板表面温度	霜层厚度、密度、表面温度	霜层厚度误差小于 10%	Lee 等 ^[113]
14	数值模拟	环境温度、湿度、冷板温度、气流速度	霜层厚度	不同冷板温度情况下霜层厚度的最大误差小于 12%	Jaehwan 等 ^[114]

表 6 霜层厚度表达式

Tab.6 Frost layer thickness expressions

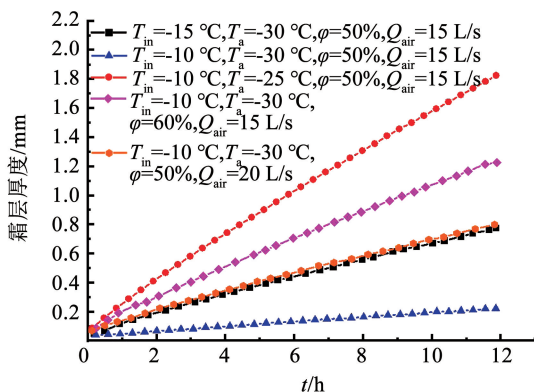
序号	基本假设条件	表达式	文献
1	霜冻中的饱和状态、水蒸气浓度在 y 方向上的变化、均匀的霜密度	$\frac{d\delta}{dt} = \frac{1}{\rho_f} (\dot{m}_t - \dot{m}_p)$	Jones 等 ^[99]
2	水蒸气浓度仅在 y 方向上的变化、辐射换热可以忽略不计、理想气体、Lewis 类比	$\frac{d\delta}{dt} = \frac{1}{\rho_f} (\dot{m}_t - \dot{m}_p)$	Sami 等 ^[100]
3	霜密度与霜高度无关、试验板上均匀的霜粗糙度、忽略霜中的对流和辐射	$\delta _{t+\Delta t} = \delta _t + \Delta\delta$	Yun 等 ^[101]
4	水蒸气在霜表面饱和	$\frac{d\delta}{dt} = \frac{1}{\rho_f} (\dot{m}_t - \dot{m}_p)$	Na 等 ^[102]
5	霜层生长过程为准稳态、均匀霜密度、线性吸收率、均匀压力	$\delta _{t+\Delta t} = \delta _t + \frac{\dot{m}_\delta}{\rho_f} \Delta t$	Lee 等 ^[107]
6	忽略霜中的对流和辐射、霜层的孔隙分布均匀、气相的温度与固相的温度相同	$\delta _{t+\Delta t} = \delta _t + \frac{\dot{m}_\delta}{\rho_f} \Delta t$	Ro 等 ^[34]
7	忽略霜中的对流和辐射、Lewis 类比	$\frac{\delta^n - \delta^{n-1}}{\Delta t} = \frac{h_m}{\rho_f} [w_\infty - w(x = \delta^{n-1})]$	Ismail 等 ^[108]

注： δ 为霜层厚度， t 为时间， ρ_f 为霜层密度， h 为传质系数， w 为含湿量， \dot{m} 为质量。

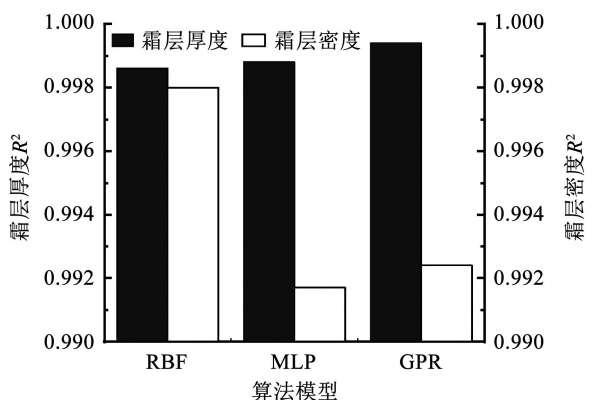
4.2 换热器表面结霜过程模拟

应用于制冷、热泵、空调等领域的换热器通常处于较低工作温度，当潮湿的空气流过低于冰点温度的换热表面时就结霜^[116-118]。霜层生长过程中，因霜层中孔隙的增加以及霜层厚度的增大，霜层热阻不断增大，显著降低了换热器表面的传热系数，导致整体工作性能的降低^[119-121]。换热器表面霜层生长过程的模拟及结霜特性的预测，对设计高效换热器和制定合理防除霜策略有着重要工程意义^[122]。Seker 等^[123]对换热器在霜形成过程中的传热传质过程进行了分析，通过建立数理模型的方法计算了空气与制冷剂侧的传热传质系数、空气-霜层界面温度和换热器表面的霜层质量。采用此模型，还研究了不同进气温度、表面温度、相对湿度和空气质量流量对霜层厚度的影响，最终模拟结果以及各参数

的影响规律如图 7(a) 所示。但此种模型中没有考虑换热器内部参数随时间的动态变化，如空气温度、翅片管表面温度和气流湿度等，存在较大的局限性。因此，Tso 等^[124]建立了一种基于动力学方程的数理模型，对翅片表面的霜层生长情况进行模拟，得到了霜层质量的变化规律，并将模拟结果同实验结果进行对比，最终误差约为 7%。在使用数值模拟方法对霜层生长过程的研究中，Lenic 等^[125]建立了翅片管式换热器霜层生长的瞬态二维模型，并使用 SIMPLER 算法进行了数值求解，最终得到了不同湿度、气流速度和相对湿度下霜层厚度的变化情况。与上述模型相比，在控制方程中添加源项在许多研究中也得到了广泛应用。例如，Cui 等^[126]修改了经典凝成核理论中的源项，并将所开发的模型用于模拟翅片管式换热器的结霜情况，模拟结果与经验公式的计算结果重合度较高，均方根误差为 0.64。



(a) 换热器不同参数对霜层厚度的影响



(b) 数据分析模型模拟结果

图 7 换热器表面结霜过程的数值模拟研究

Fig.7 Numerical simulation of frosting process on surfaces of heat exchanger

应用数据分析模型模拟换热器表面霜层生长情况时,多采用机器学习的方法,整合大量数据进行模型训练,进行多次验证分析后实现对霜层各项参数的模拟与预测。Moradkhani 等^[127]提出了一种基于实际测量数据,通过径向基函数(RBF)、多层感知器(MLP)和高斯过程回归(GPR)方法进行预测的智能模型,以用于模拟空气源热泵中霜层的厚度与密度,如图 7(b)所示,厚度与密度最高模型精度下的 R^2 分别为 0.999 4 和 0.998,同时此模型分析的数据也被用于评估早期模型的预测精度。在此基础上, Han 等^[128]考虑了结霜平板的表面特性,应用人工神经网络与支持向量机的回归模型,建立了平板霜层生长的瞬态模型。此模型在获取数据时根据各种条

件下的非线性复杂生长机制,预测了不同条件下的霜厚度以及霜层的表面特征。在利用神经网络预测霜层生长的基础上, Yong 等^[129]提出了一种基于深度学习模型定量预测由霜冻生长导致的 ASHP 性能(供暖能力、能耗和 COP)变化的模型,并使用全连接深度神经网络(FCDNN)进行结霜过程的参数预测。Saleem 等^[43]提出了一种使用神经网络与梯度提升(XGBoost)回归器的霜层预测模型,并通过机器学习开发了修正经验相关模型,对实验条件范围内霜厚度进行预测,霜层厚度的 RMSE 小于 0.067 9, R^2 小于 0.980 3。表 7 对换热器表面霜层生长的模拟技术进行了汇总。

表 7 换热器表面霜层生长模拟技术总结

Tab. 7 Summary of frost growth simulation technology on heat exchanger surfaces

序号	模型类型	输入参数	模拟特性	模拟精度	文献
1	数理模型	进气温度、表面温度、相对湿度、空气质量流量	霜层质量	—	Seker 等 ^[123]
2	数理模型	进气温度、相对湿度、制冷剂流量、制冷剂入口温度	霜层质量	误差约为 7%	Tso 等 ^[124]
3	数值模拟	进气温度、空气温度、相对湿度、表面温度	霜层厚度、霜层生长速率	—	Lenic 等 ^[125]
4	数值模拟	翅片间距、相对湿度、空气流量、制冷剂蒸发温度	平均霜层厚度、空气侧压降	RMSE 为 0.64	Cui 等 ^[126]
5	数据分析	空气速度、湿度、温度、表面温度、预测时间	霜层密度、厚度	R^2 分别为 0.999 4 和 0.998	Moradkhani 等 ^[127]
6	数据分析	环境温度、表面温度、湿度、接触角、气体流速、预测时间	霜层厚度、表面特征	R^2 分别为 0.989 9 和 0.994 4	Han 等 ^[128]
7	数据分析	气体温度、流量、压缩机转速、制冷剂压力、设备温度	结霜过程发热量、耗能、COP	3 个预测特性的误差分别为 2.8%、2.4% 和 3.4%	Yong 等 ^[129]
8	数据分析	环境温度、空气湿度、气体流速	霜层厚度	RMSE 小于 0.067 9, R^2 小于 0.980 3	Saleem 等 ^[43]

4.3 霜冻天气与霜冻气候模拟

霜冻天气的预测以及霜冻气候的模拟可采用统计分析或机器学习的方法,通过对大量统计数据的记录、整理和分析,研究霜冻事件的频率和强度变化。Rahimi 等^[130]在不同海拔高度选择了 6 个具有 34 年每日最低气温数据的站点,获得了每年无霜期的霜冻发生日期。并根据 Pearson III 型统计方法,构建了当地霜冻事件的概率分布,确定了截至给定日期的霜冻发生率和无霜期的最大长度。同样采用统计分析的方法, Hamdi 等^[131]根据每年霜冻的频率、严重程度和总天数评估了全球变暖对霜冻的影响,采用了正态性检验等统计推断方法检测所有数据的正态性,并进行霜冻的预测。除了针对时间尺度来进行霜冻预测方式, Susan 等^[132]基于成像光谱仪得出的与地形和地表温度等与霜冻风险相关的因素对霜冻区进行统计表征来划定霜冻区。并通过二

元逻辑回归,以霜冻发生与否作为二元因变量,建立了一个逻辑回归模型用于估计霜冻发生的概率,准确率可以达到 81%。

在基于机器学习的霜冻灾害预测领域, Kim 等^[133]将霜冻发生前的气象参数作为变量并通过合成少数过采样技术(SMOTE)进行预处理,同时采用梯度提升的方法对区域精度进行检验,进一步提高了霜冻天气预测的准确率(高于 88.39%)。同样,基于机器学习的结霜预测方法在农业种植领域也有其特殊的算法预测模型, Diniz 等^[134]使用随机森林(RF)算法,基于地区地理数据对霜冻情况进行了总结与预测,绘制了如图 8(a)所示的人工林霜冻概率统计图,该算法准确率可达到 90%。Xu 等^[135]基于支持向量机和人工神经网络,提出了一种分类模型,通过迭代进行参数调整不断提高预测精度,并使用敏感性分析对模型的影响因素进行评估,对浙江省

春季霜冻灾害的分布情况进行统计,绘制了如图 8(b)所示不同程度霜冻灾害出现的频率参考图。可以看出,浙江省春季霜冻灾害的分布范围较广,基本遍及全省,其中,中度霜冻出现的次数最多,而严重程度的霜冻灾害多出现于浙江西北部与东部。为减少传统温度传感系统对结霜预测的消极影响,Shammi 等^[44]研究了一种使用红外热像图像训练的机器学习模型,用于预测田间作物的霜冻情况,并对比了梯度提升、随机森林、卷积神经网络、ResNet-50

4 种算法在此模型下预测精度,选取与模型最匹配的算法。并且在此基础上利用热分布数据对所研究机器学习模型进行训练与优化^[136],将最高预测准确率提高到了 98%。为进一步整合可用于预测的大量数据,Rana 等^[137]提出了一种应用卷积神经网络的算法模型,通过对传感器收集到的大量土壤数据与温度进行处理与分析,进行霜冻事件的预测,霜冻概率预测准确率达 98.86%。表 8 对霜冻天气与霜冻气候的模拟技术进行了汇总。

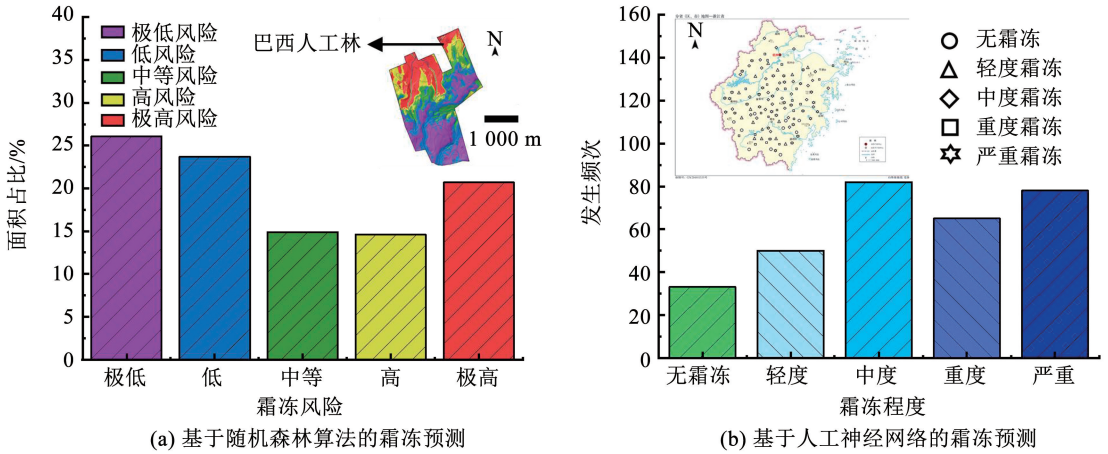


图 8 霜冻天气的数值模拟研究

Fig. 8 Numerical simulation of frost weather

表 8 霜冻天气与霜冻气候模拟技术总结

Tab. 8 Summary of simulation techniques for frost weather and frost climate

序号	模型类型	输入参数	模拟特性	模拟精度	文献
1	数据分析	最低气温、历史霜冻日期	霜冻时间	—	Rahimi 等 ^[130]
2	数据分析	霜冻频率、严重程度、霜冻总天数	霜冻概率	—	Hamdi 等 ^[131]
3	数据分析	海拔、凸度、坡向、上坡流长度、地表温度	霜冻概率	霜冻概率准确率约为 81%	Susan 等 ^[132]
4	数据分析	最低温度、湿度、风速、最近海岸距离、位置高度	结霜概率	准确率大于 88.39%	Kim 等 ^[133]
5	数据分析	纬度、温度、相对海拔、地形地貌等	结霜概率	准确率大于 90%	Diniz 等 ^[134]
6	数据分析	环境温度、土壤温度、气压等	霜冻温度	RMSE 为 1.53	Talsma 等 ^[138]
7	数据分析	气温、热成像数据等	霜层温度	准确率约为 82%	Shammi ^[44]
8	数据分析	土壤数据、温度数据	霜冻概率	准确率最高可达 98.86%	Rana 等 ^[137]

4.4 霜层生长阶段结霜模拟技术总结

对霜层生长阶段分为简单冷表面、换热器表面和霜冻天气与气候的模拟,表 5、7、8 对三方面的输入参数、模拟特性和模拟精度进行了总结。简单冷表面霜层生长阶段的模拟,输入参数主要包括气体与冷板的基本物理性质如湿度、气体流速和冷板温度等,采用求解数理模型与数值模拟的方法,对霜层厚度、密度和温度等宏观物理参数进行模拟,两种模型对于霜层参数的模拟精度基本能达到 85% 以上。针对换热器表面结霜过程的模拟,除了进气温度、湿度和换热器表面温度以外,主要输入参数还包括换

热器翅片间距等结构参数。由于换热器表面结霜的传热传质过程更为复杂,多采用数值模拟的方法以实现多物理场的耦合与分析。或采用数据分析模型,通过各类机器学习的方法,整合大量数据进行模型训练,实现霜层生长的模拟。对于模拟特性而言,对霜层厚度和生长速率进行模拟的同时,还对影响换热器效率的因素进行了分析。对霜冻气候的模拟与预测,多采用数据分析的方法,通过统计分析或机器学习对当地历史霜冻数据及当前环境数据进行整合与分析,实现对霜冻概率与结霜温度的预测,最终预测精度可达到 88.39%。基于数据统计和机器学

习的数据分析模型因其对大数据的处理能力和预测精准度,在霜冻气候模拟中表现出极大的潜力和应用前景。未来,数据分析模型将主要致力于融合多源气象数据,进行模式识别和预测优化,并通过实时监测和大数据分析,提高霜冻预警的准确性和响应速度,促进农业生产和灾害管理的发展。

5 总结与展望

1) 结霜过程的模拟技术可分为求解数理模型、数值模拟和数据分析法3种。冷凝阶段与液滴凝固阶段的模拟技术依赖于外界环境参数和液滴自身的微观物理参数等,霜层生长阶段则多通过气流湿度、温度和历史经验数据等进行模拟。对于模拟特性,冷凝阶段关注液滴成核速率、液滴的运动过程和液滴的生长速率等,液滴凝固阶段关注冰晶成核速率、相界面的迁移规律和液滴轮廓的变化,而霜层生长阶段的模拟着重霜层厚度、霜层密度以及霜冻天气出现概率等宏观参数。既有结霜模拟技术对于冷凝阶段成核速率等参数的模拟,模拟精度可达到80%,对于液滴凝固阶段冻结锋面移动规律模拟精度基本能达到85.3%,霜层生长阶段中霜层厚度与密度的模拟精度能达到82%以上。相比针对液滴的模拟,霜层生长与霜冻气候因为涉及更多的相变过程与复杂的结霜行为,模拟涉及的数据量更多,模拟过程也更为复杂。

2) 结霜模拟技术中的数据分析法在未来有较大的发展潜力。一方面,数据分析法可以同时考虑多个影响因素,通过机器学习和深度学习算法建立复杂的多变量模型,准确捕捉冷凝、液滴凝固和霜层生长等过程中的动态变化。另一方面,数据分析法还能通过历史数据的学习和自适应调整,不断优化结霜模型,提高模拟的精度和适应性。但该方法对物理过程的解释性较差,对结霜过程的微观机制解释不够深入,从而难以体现结霜过程的物理意义。因此,未来需要融合数理模型和数据分析方法,提升模拟的物理解释性和整体精度。

3) 既有结霜模拟技术仍存在模型泛化能力较差的问题,模型在特定条件下可能表现良好,但在不同模拟场景下的适应性较差。现有模拟技术难以在对结霜物理过程精确描述的同时兼顾对海量数据的快速处理,模拟过程中高计算成本和复杂性限制了各类模型的广泛使用,缺乏足够的灵活性来应对多变的实际情况,导致预测能力和可靠性受到影响。上述问题改进的关键在于多方法融合和跨学科合作,流体力学、传热传质学、计算机科学、数据科学等学科的交叉合作,有助于建立适用范围更广的结霜

模拟模型。进一步发展数据获取和处理技术,提高数据的质量和实时性,将有助于提升模拟的准确性和及时性。应加强对模型的验证和校正,通过与实验数据的对比,逐步优化模型参数,提升其在不同场景下适用性和可靠性。通过多方法协同和技术创新,结霜模拟技术有望在未来实现更高的精度和实用性,为防除霜措施的制定和实施提供更科学的依据。

参考文献

- [1] SONG Mengjie, LEI Shangwen, HOSSEINI S H, et al. An experimental study on the effect of horizontal cold plate surface temperature on frosting characteristics under natural convection[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 211: 118416. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118416
- [2] LEI Shangwen, SONG Mengjie, DANG Chaobin, et al. Experimental study on the effect of surface temperature on the frost characteristics of an inverted cold plate under natural convection[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 211: 118470. DOI:10.2139/ssrn.4019231
- [3] ZHANG Long, SONG Mengjie, DENG Shiming, et al. Frosting mechanism and behaviors on surfaces with simple geometries; a state-of-the-art literature review[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 215: 118984. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118984
- [4] SONG Mengjie, DENG Shiming, DANG Chaobin, et al. Review on improvement for air source heat pump units during frosting and defrosting[J]. Applied Energy, 2018, 211: 1150. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.12.022
- [5] 严跃成, 龚守远, 邱秀云. 输电线路覆冰对电网的影响及危害分析[J]. 水力发电, 2008(11): 95
YAN Yuecheng, GONG Shouyuan, QIU Xiuyun. Analysis on the influence and harm of transmission line icing to transmission network [J]. Water Power, 2008(11): 95
- [6] 蒋明, 赵汉棣, 马小强. 高压输电线路覆冰及防冰、除冰技术综述[J]. 电力安全技术, 2020, 22(4): 26
JIANG Ming, ZHAO Handi, MA Xiaoqiang. Icing of HV transmission line and summary of anti-icing and de-icing technology [J]. Electric Safety Technology, 2020, 22(4): 26
- [7] JIN J, VIRK M S. Study of ice accretion and icing effects on aerodynamic characteristics of DU96 wind turbine blade profile[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 160: 119. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.01.011
- [8] 王聪, 黄洁亭, 张勇, 等. 风电机组叶片结冰研究现状与进展[J]. 电力建设, 2014, 35(2): 70
WANG Cong, HUANG Jieting, ZHANG Yong, et al. Status and advance in research on blade icing of wind turbines [J]. Power Construction, 2014, 35(2): 70
- [9] 张朴, 章帆, 何伟, 等. 冰冻气候对风电场发电量的影响[J]. 船舶工程, 2022, 44(增刊2): 144
ZHANG Pu, ZHANG Fan, HE Wei, et al. Impact of frozen climate on power generation of wind farm [J]. Ship Engineering, 2022, 44(Sup. 2): 144. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2022.S2.28
- [10] CAO Yihua, TAN Wenyuan, WU Zhenlong. Aircraft icing: an ongoing threat to aviation safety [J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 75: 353. DOI:10.1016/j.ast.2017.12.028

- [11] 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
SHAO Yuanpei, CHE Jing, DING Di. Study on the influence of wing icing on flight dynamics characteristics of large aircraft[J]. Flight Dynamics, 2018, 36(1): 12. DOI: 10.13645/j.cnki.f.d.20170824.002
- [12] DEL VECCHIO M C, CEPPI A, CORBARI C, et al. A study of an algorithm for the surface temperature forecast: from road ice risk to farmland application [J]. Applied Sciences, 2020, 10(14): 4952. DOI: 10.3390/app10144952
- [13] ZHANG Haigang, ZHOU Haoqiang, ZHAO Decheng, et al. Harmonic characteristics and negative sequence analysis of regenerative braking for high-speed railway[J]. Recent Patents on Mechanical Engineering, 2023, 16(3): 214. DOI: 10.2174/2212797616666230612162748
- [14] LV Jianyong, SONG Yanlin, JIANG Lei, et al. Bio-inspired strategies for anti-icing[J]. ACS Nano, 2014, 8(4): 3152. DOI: 10.1021/nn406522n
- [15] 胡毅. 电网大面积冰灾分析及对策探讨[J]. 高电压技术, 2008(2): 215
HU Yi. Analysis and countermeasures discussion for large area icing accident on power grid[J]. High Volt, 2008(2): 215. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2008.02.020
- [16] HEU C S, KIM S W, KIM J, et al. Frosting and defrosting behavior of slippery surfaces and utilization of mechanical vibration to enhance defrosting performance[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 125: 858. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.146
- [17] LI Shengyu, LU Jun, LI Wuyan, et al. Thermodynamic analyses of a novel ejector enhanced dual-temperature air source heat pump cycle with self-defrosting[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 215: 118944. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118944
- [18] HE Hua, HUANG Wei, GUO Zhiguang. Superhydrophobic and photothermal SiC/TiN durable composite coatings for passive anti-icing/active de-icing and de-frosting[J]. Materials Today Physics, 2023, 30: 100927. DOI: 10.1016/j.mtphys.2022.100927
- [19] LI Shaoming, YANG Kaisheng, WANG Chichuan. A semi-empirical model for predicting frost properties [J]. Processes, 2021, 9(3): 412. DOI: 10.3390/pr9030412
- [20] HUANG Lizhen, TIAN Yueyang, SONG M, et al. An experimental study on edge-affected frosting characteristics on a vertical cold plate at different surface temperatures[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121538. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121538
- [21] BOREYKO J B, COLLIER C P. Delayed frost growth on jumping-drop superhydrophobic surfaces [J]. ACS Nano, 2013, 7(2): 1618. DOI: 10.1021/nn3055048
- [22] CHU Fuqiang, LIN Yukai, YAN Xiao, et al. Quantitative relations between droplet jumping and anti-frosting effect on superhydrophobic surfaces[J]. Energy and Buildings, 2020, 225: 110315. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110315
- [23] CHU Fuqiang, WU Xiaomin, ZHU Bei, et al. Self-propelled droplet behavior during condensation on superhydrophobic surfaces [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(19): 194103. DOI: 10.1063/1.4949010
- [24] LEI Shangwen, SONG Mengjie, DAI Wei, et al. Experimental study on the effect of surface temperature on the frost characteristics of a vertical cold plate under natural convection [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2022, 137: 110684. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2022.110684
- [25] SONG Mengjie, DANG Chaobin. Review on the measurement and calculation of frost characteristics [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 124: 586. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.094
- [26] ZHANG Xuan, WU Xiaomin, MIN Jingchun. Freezing and melting of a sessile water droplet on a horizontal cold plate [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 88: 1. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2017.05.009
- [27] 余思锐, 宋孟杰, 沈俊, 等. 低温静止与运动表面结冰特性预测技术研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(10): 150
YU Sirui, SONG Mengjie, SHEN Jun, et al. Research progress on icing characteristic prediction technologies for low temperature stationary and moving surfaces [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(10): 150. DOI: 10.11918/202402006
- [28] LU Menglong, SONG Mengjie, PANG Xiaoling, 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
- [29] 邵苛苛, 宋孟杰, 张旋, 等. 冰中微尺度受限气泡生长分布特性与宏观热力影响综述 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(6): 152
SHAO Keke, SONG Mengjie, ZHANG Xuan, et al. A review of micro-scale trapped air bubble growth distribution characteristics and thermal mechanical effects in ice [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(6): 152. DOI: 10.11918/202311080
- [30] YU Fengjiao, LIU Zhongliang, LI Yanxia, et al. Experimental study of water drop freezing process on cryogenic cold surface [J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 150(3): 265. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2023.02.021
- [31] GAO Runmiao, SONG Mengjie, CHAO C Y H, et al. Review on condensation frosting and defrosting experiments for superhydrophobic surfaces [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121691. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121691
- [32] ZHANG Long, SONG Mengjie, ZHAN Tianzhuo, et al. Cold plate temperature effect on droplet and frost crystal behaviors at the early condensation frosting stage considering plate edge effect [J]. Engineered Science, 2022, 21: 801. DOI: 10.30919/es8e801
- [33] TEDESCHI L. Assessment of the adequacy of mathematical models [J]. Agricultural Systems, 2006, 89(2/3): 225. DOI: 10.1016/j.agsy.2005.11.004
- [34] LEE Y B, RO S T. Analysis of the frost growth on a flat plate by simple models of saturation and supersaturation [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2005, 29(6): 685. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2004.11.001
- [35] LIU Xiaoliang, HUANG Lizhen, ZHANG Xuan, et al. A modeling study on freezing characteristics of sessile and pendant water droplets on cold plate surfaces [J]. Applied Thermal Engineering,

- 2024, 236; 121693. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121693
- [36] DANG Qun, SONG Mengjie, ZHANG Xuan, et al. Modelling study on freezing process of water droplet on inclined cold plate surface with droplet dynamic behavior considered[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 197; 123327. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123327
- [37] ZHANG Yanqin, LU Wanli, WANG Mulan, et al. Analysis of temperature field of silicone heating plate based on COMSOL[J]. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 2024, 17(1); 2. DOI: 10.2174/2212797616666230127122637
- [38] MIRAFIORI M, TANCON M, BORTOLIN S, et al. Modeling of growth and dynamics of droplets during dropwise condensation of steam[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 222; 125109. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125109
- [39] BODAGHKHANI A, DUAN Xili. Water droplet freezing on cold surfaces with distinct wettabilities [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2021, 57; 1. DOI: 10.1007/s00231-020-02984-w
- [40] SUN Jian, PENG Bin, ZHU Bingguo. Numerical simulation and experimental research of oil-free scroll air compressor based on CFD [J]. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 2022, 15(3); 328. DOI: 10.2174/2212797614666210830154422
- [41] 郭焱华, 邵双全, 李浩, 等. 基于数据驱动研究空气源热泵除霜效果研究[J]. *工程热物理学报*, 2024, 45(3): 628
GUO Yanhua, SHAO Shuangquan, LI Hao, et al. A data-driven evaluating method on the defrosting effect of the air source heat pump system [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2024, 45(3): 628
- [42] JORDAN M I, MITCHELL T M. Machine learning: trends, perspectives, and prospects [J]. *Science*, 2015, 349(6245); 255. DOI: 10.1126/science.aaa841
- [43] ABBAS S, PARK C W. Machine learning based frost thickness prediction of carbon fiber-reinforced polymer composite fin for potential heat pump application [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 153; 107333. DOI: 10.1016/j.compstech.2024.110455
- [44] SHAMMI S, SOHEL F, DIEPEVEEN D, et al. Machine learning-based detection of frost events in wheat plants from infrared thermography [J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 149; 126900. DOI: 10.1016/j.eja.2023.126900
- [45] NATH S, AHMADI S F, BOREYKO J B. A review of condensation frosting [J]. *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, 2017, 21(2); 81. DOI: 10.1080/15567265.2016.1256007
- [46] ROSE J. Dropwise condensation theory and experiment; a review [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2002, 216(2); 115. DOI: 10.1243/09576500260049034
- [47] ZHENG Shaofei, EIMANN F, PHILIPP C, et al. Modeling of heat and mass transfer for dropwise condensation of moist air and the experimental validation [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 120; 879. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.059
- [48] FAMILY F, MEAKIN P. Kinetics of droplet growth processes; simulations, theory, and experiments [J]. *Physical Review A*, 1989, 40(7); 3836. DOI: 10.1103/physreva.40.3836
- [49] NEIMARK A V, VISHNYAKOV A. Monte Carlo simulation study of droplet nucleation [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2005, 122(17); 174508. DOI: 10.1063/1.1888389
- [50] GUO Yali, WANG Run, ZHAO Denghui, et al. Numerical simulation of vapor dropwise condensation process and droplet growth mode [J]. *Energies*, 2023, 16(5); 2442. DOI: 10.3390/en16052442
- [51] TAMMANN G, BOEHME W. Die Zahl der Wassertröpfchen bei der Kondensation auf verschiedenen festen Stoffen [J]. *Annalen der Physik*, 1935, 414(1); 77. DOI: 10.1002/andp.19354140108
- [52] LEACH R, STEVENS F, LANGFORD S, et al. Dropwise condensation; experiments and simulations of nucleation and growth of water drops in a cooling system [J]. *Langmuir*, 2006, 22(21); 8864. DOI: 10.1021/la061901+
- [53] NIU Dong, TANG Guihua. Molecular dynamics simulation of droplet nucleation and growth on a rough surface; revealing the microscopic mechanism of the flooding mode [J]. *RSC Advances*, 2018, 8(43); 24517. DOI: 10.1039/C8RA04003F
- [54] ZHANG Qingyu, SUN Dongke, ZHANG Youfa, et al. Lattice Boltzmann modeling of droplet condensation on superhydrophobic nanoarrays [J]. *Langmuir*, 2014, 30(42); 12559. DOI: 10.1021/la502641y
- [55] 李帅, 李栋, 钱晨露, 等. 超疏水表面融霜液滴翻转与弹跳 [J]. *工程热物理学报*, 2019, 40(10); 2383
LI Shuai, LI Dong, QIAN Chenlu, et al. Defrosting droplets reversing and self-jumping on superhydrophobic surface [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2019, 40(10); 2383
- [56] MUSEHANE N M, OXTOBY O F, REDDY B D. Multi-scale simulation of droplet-droplet interaction and coalescence [J]. *Journal of Computational Physics*, 2018, 373; 924. DOI: 10.1016/J.JCP.2018.07.027
- [57] YU Xingjian, ZHANG Yu, HU Run, et al. Water droplet bouncing dynamics [J]. *Nano Energy*, 2021, 81; 105647. DOI: 10.1016/j.nanoen.2020.105647
- [58] NAM Y, KIM H, SHIN S. Energy and hydrodynamic analyses of coalescence-induced jumping droplets [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(16); 161601. DOI: 10.1063/1.4825273
- [59] MILJKOVIC N, ENRIGHT R, NAM Y, et al. Jumping-droplet-enhanced condensation on scalable superhydrophobic nanostructured surfaces [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(1); 179. DOI: 10.1021/nl303835d
- [60] MILJKOVIC N, PRESTON D J, ENRIGHT R, et al. Electrostatic charging of jumping droplets [J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1); 2517. DOI: 10.1038/ncomms3517
- [61] ENRIGHT R, MILJKOVIC N, DOU N, et al. Condensation on superhydrophobic copper oxide nanostructures [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2013, 135(9); 091304. DOI: 10.1115/1.4024424
- [62] ENRIGHT R, MILJKOVIC N, AL-OBEIDI A, et al. Condensation on superhydrophobic surfaces; the role of local energy barriers and structure length scale [J]. *Langmuir*, 2012, 28(40); 14424. DOI: 10.1021/la302599n
- [63] BOREYKO J B, COLLIER C P. Delayed frost growth on jumping-drop superhydrophobic surfaces [J]. *ACS Nano*, 2013, 7(2); 1618. DOI: 10.1021/nn3055048
- [64] ENRIGHT R, MILJKOVIC N, SPRITTLES J, et al. How

- coalescing droplets jump[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(10): 10352. DOI: 10.1021/nn503643m
- [65] LV Cunjing, HAO Pengfei, YAO Zhaohui, et al. Departure of condensation droplets on superhydrophobic surfaces[J]. *Langmuir*, 2015, 31(8): 2414. DOI: 10.1021/la504638y
- [66] BIRBARAH P, CHAVAN S, MILJKOVIC N. Numerical simulation of jumping droplet condensation [J]. *Langmuir*, 2019, 35(32): 10309. DOI: 10.1021/acs.langmuir.9b01253
- [67] MENG Kaixin, FAN Wenli, WANG Hao. Dynamic scenario simulation of dropwise condensation on a superhydrophobic surface with droplet jumping [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 148: 316. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.11.049
- [68] ORME M. Experiments on droplet collisions, bounce, coalescence and disruption [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1997, 23(1): 65. DOI: 10.1016/S0360-1285(97)00005-1
- [69] SIKARWAR B S, BATTOO N K, KHANDEKAR S, et al. Dropwise condensation underneath chemically textured surfaces: simulation and experiments [J]. *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 133(2): 021501. DOI: 10.1115/1.4002396
- [70] FRITTER D, KNOBLER C M, BEYSENS D A. Experiments and simulation of the growth of droplets on a surface (breath figures) [J]. *Physical Review A*, 1991, 43(6): 2858. DOI: 10.1103/PhysRevA.43.2858
- [71] ZHUANG Dawei, DING Guoliang, HU Haitao, et al. Condensing droplet behaviors on fin surface under dehumidifying condition. Part I: numerical model [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 105: 336. DOI: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2015.02.082
- [72] CHU Fuqiang, WU Xiaomin, MA Qiang. Condensed droplet growth on surfaces with various wettability [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 115: 1101. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.01.060
- [73] 李丽艳, 刘中良, 赵玲倩, 等. 结霜初期无液核形成时的抑霜研究 [J]. *工程热物理学报*, 2019, 40(1): 198
LI Liyan, LIU Zhongliang, ZHAO Lingqian, et al. Frost inhibition research in the early stage of frosting without nucleus formation [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2019, 40(1): 198
- [74] AKHTAR S, XU M, MOHIT M, et al. A comprehensive review of modeling water solidification for droplet freezing applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 188: 113768. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113768
- [75] SONG Mengjie, DANG Chaobin, HIGASHI T, et al. Review of experimental data associated with the solidification characteristics of water droplets on a cold plate surface at the early frosting stage [J]. *Energy and Buildings*, 2020, 223: 110103. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110103
- [76] QUIGLEY D, RODGER P M. Metadynamics simulations of ice nucleation and growth [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2008, 128(15): 22. DOI: 10.1063/1.2888999
- [77] LIBBRECHT K G. Physical dynamics of ice crystal growth [J]. *Annual Review of Materials Research*, 2017, 47(1): 271. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070616-124135
- [78] MATSUMOTO M, SAITO S, OHMINE I. Molecular dynamics simulation of the ice nucleation and growth process leading to water freezing [J]. *Nature*, 2002, 416(6879): 409. DOI: 10.1038/416409a
- [79] SANZ E, VEGA C, ESPINOSA J, et al. Homogeneous ice nucleation at moderate supercooling from molecular simulation [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2013, 135(40): 15008. DOI: 10.1021/ja4028814
- [80] PRUPPACHER H R. A new look at homogeneous ice nucleation in supercooled water drops [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1995, 52(11): 1924
- [81] TABOREK P. Nucleation in emulsified supercooled water [J]. *Physical Review B*, 1985, 32(9): 5902. DOI: 10.1103/PHYSREVB.32.5902
- [82] KASHCHIEV D, VEKILOV P G, KOLOMEISKY A B. Kinetics of two-step nucleation of crystals [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2005, 122(24): 44706. DOI: 10.1063/1.1943389
- [83] WANG Liwei, DAI Jinzhao, HAO Pengfei, et al. Mesoscopic dynamical model of ice crystal nucleation leading to droplet freezing [J]. *ACS Omega*, 2020, 5(7): 3322. DOI: 10.1021/acsomega.9b03415
- [84] PIAGGI P M, WEIS J, PANAGIOTOPOULOS A Z, et al. Homogeneous ice nucleation in an ab initio machine-learning model of water [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, 119(33): 294119. DOI: 10.1073/pnas.2207294119
- [85] KAWANAMI T, YAMADA M, FUKUSAKO S, et al. Solidification characteristics of a droplet on a horizontal cooled wall [J]. *Heat Transfer*, 1997, 26(7): 469
- [86] JUNG S, TIWARI M K, DOAN N V, et al. Mechanism of supercooled droplet freezing on surfaces [J]. *Nature Communications*, 2012, 3(1): 615. DOI: 10.1038/ncomms1630
- [87] AJAEV V S, DAVIS S H. The effect of tri-junction conditions in droplet solidification [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, 264(3): 452. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2003.11.119
- [88] CHAUDHARY G, LI Ri. Freezing of water droplets on solid surfaces: an experimental and numerical study [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, 57: 86. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2014.04.007
- [89] YAO Yina, LI Cong, ZHANG Hui, et al. Modelling the impact, spreading and freezing of a water droplet on horizontal and inclined superhydrophobic cooled surfaces [J]. *Applied Surface Science*, 2017, 419: 52. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.04.085
- [90] YAO Yina, LI Cong, TAO Zhenxiang, et al. Experimental and numerical study on the impact and freezing process of a water droplet on a cold surface [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 137: 83. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.03.057
- [91] ZHANG Xuan, WU Xiaomin, MIN Jingchun, et al. Modelling of sessile water droplet shape evolution during freezing with consideration of supercooling effect [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 125: 644. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.017
- [92] ENRÍQUEZ O R, MARÍN Á G, WINKELS K G, et al. Freezing singularities in water drops [J]. *Physics of Fluids*, 2012, 24(9): 119247181. DOI: 10.1063/1.4747185
- [93] SATUNKIN G. Determination of growth angles, wetting angles, interfacial tensions and capillary constant values of melts [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2003, 255(2): 170. DOI: 10.1016/S0022-0248(3)01187-4
- [94] ITOH H, OKAMURA H, NAKAMURA C, et al. Growth of

- spherical Si crystals on porous Si₃N₄ substrate that repels Si melt [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2014, 401: 748. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2013.12.052
- [95] SNOEIJER J H, BRUNET P. Pointy ice-drops: how water freezes into a singular shape [J]. *American Journal Phys of Ics*, 2012, 80(9): 764. DOI: 10.1119/1.4726201
- [96] SCHETNIKOV A, MATIUNIN V, CHERNOV V. Conical shape of frozen water droplets [J]. *American Journal of Physics*, 2015, 83(1): 36. DOI: 10.1119/1.4897499
- [97] YAO Yina, LI Cong, TAO Zhenxiang, et al. Numerical simulation of water droplet freezing process on cold surface [C]// *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. [S. l.]: American Society of Mechanical Engineers, 2017. DOI: 10.1115/IMECE2017-71175
- [98] DANG Qun, SONG Mengjie, LUO Xiaoyan, et al. A modeling study of different kinds of sessile droplets on the horizontal surface with surface wettability and gravity effects considered [J]. *Energy Storage and Saving*, 2022, 1(1): 22. DOI: 10.1016/j.ens.2021.11.002
- [99] JONES B W, PARKER J D. Frost formation with varying environmental parameters [J]. *Journal of Heat and Mass Transfer*, 1975, 97(2): 255. DOI: 10.1115/1.3450350
- [100] SAMI S, DUONG T. Numerical prediction of frost formation on cooled heat exchangers [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 1988, 15(1): 81. DOI: 10.1016/0735-1933(88)90009-7
- [101] YUN R, KIM Y, MIN M K. Modeling of frost growth and frost properties with airflow over a flat plate [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2002, 25(3): 362. DOI: 10.1016/S0140-7007(1)00026-3
- [102] NA B, WEBB R L. New model for frost growth rate [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(5): 925. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.09.001
- [103] CHENG C H, CHENG Y C. Predictions of frost growth on a cold plate in atmospheric air [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2001, 28(7): 953. DOI: 10.1016/S0735-1933(1)00299-8
- [104] NEGRELLI S, HERMES C J. A semi-empirical correlation for the thermal conductivity of frost [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2015, 58: 243. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.05.021
- [105] NEGRELLI S, NASCIMENTO J R V S, HERMES C J. A study of the effective thermal conductivity of frost formed on parallel plate channels [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, 78(11): 301. DOI: 10.1016/j.exphemflusci.2016.06.019
- [106] AURACHER H. Effective thermal conductivity of frost [C]// *Proceedings of the International Symposium on Heat and Mass Transfer in Refrigeration and Cryogenics*. Dubrovnik, Yugoslavia; [s. n.], 1986: 285. DOI: 10.1615/ICHMT.1986.IntSympHMTinRefCryo.210
- [107] LEE K S, KIM W S, LEE T H. A one-dimensional model for frost formation on a cold flat surface [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, 40(18): 4359. DOI: 10.1016/S0017-9310(97)00074-4
- [108] ISMAIL K, SALINAS C. Modeling of frost formation over parallel cold plates [J]. *International Journal of Refrigeration*, 1999, 22(5): 425. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2016.01.017
- [109] HERMES C J, PIUCCO R O, BARBOSA J R, et al. A study of frost growth and densification on flat surfaces [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2009, 33(2): 371. DOI: 10.1016/j.exphemflusci.2008.10.006
- [110] WANG Wenjing, GUO Qingci, LU Weipeng, et al. A generalized simple model for predicting frost growth on cold flat plate [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2012, 35(2): 475. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2011.10.011
- [111] EL CHEIKH A, JACOBI A. A mathematical model for frost growth and densification on flat surfaces [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 77: 604. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.05.054
- [112] LÜER A, BEER H. Frost deposition in a parallel plate channel under laminar flow conditions [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2000, 39(1): 85. DOI: 10.1016/S1290-0729(0)00193-8
- [113] LEE K S, JHEE S, YANG D K. Prediction of the frost formation on a cold flat surface [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46(20): 3789. DOI: 10.1016/S0017-9310(3)00195-9
- [114] LEE J, KIM J, KIM D R, et al. Modeling of frost layer growth considering frost porosity [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 126: 980. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.098
- [115] BARTRONS E, GALIONE P A, PÉREZ-SEGARRA C D. Fixed grid numerical modelling of frost growth and densification [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 130: 215. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.080
- [116] 张龙, 宋孟杰, 邵苛苛, 等. 管翅式换热器迎风侧翅片末端霜层生长模拟研究 [J]. *化工学报*, 2023, 74(增刊1): 179
ZHANG Long, SONG Mengjie, SHAO Keke, et al. Simulation study on frosting at windward fin end of heat exchanger [J]. *CIESC Journal*, 2023, 74(Sup.1): 179
- [117] ZHANG Long, SONG Mengjie, SHEN Jun, et al. An experimental study on improving defrosting performances of air source heat pump unit based on hot-gas bypass method [J]. *International Journal of Green Energy*, 2023, 20(12): 1363. DOI: 10.1080/15435075.2022.2150521
- [118] ZHANG Long, SONG Mengjie, MAO Ning, et al. Temporal and spatial frost growth prediction of a tube-finned heat exchanger considering frost distribution characteristics [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022; 183: 122192. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122192
- [119] KONDEPUDI S, O'NEAL D. The effects of frost growth on extended surface heat exchanger performance: a review [J]. *ASHRAE Transactions*, 1987, 93(2): 258
- [120] MUTLU M, KILIÇ M. Three-dimensional conjugate numerical analysis of fin and tube heat exchangers with various fin thermal conductivity values and geometric parameters [J]. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 2016, 36(1): 85
- [121] YAN W M, LI H Y, WU Y J, et al. Performance of finned tube heat exchangers operating under frosting conditions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46(5): 871. DOI: 10.1016/S0017-9310(2)00346-0

- [122] 苏伟, 张小松. 换热器表面抑霜/除霜技术研究进展[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(9): 2195
SU Wei, ZHANG Xiaosong. Review of anti-frosting and de-frosting methods on air source heat pump [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(9): 2195
- [123] SEKER D, KARATAS H, EGRICAN N. Frost formation on fin-and-tube heat exchangers. Part I: modeling of frost formation on fin-and-tube heat exchangers [J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27(4): 367. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2003.12.003
- [124] TSO C, CHENG Y, LAI A. An improved model for predicting performance of finned tube heat exchanger under frosting condition, with frost thickness variation along fin [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(1): 111. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.04.009
- [125] LENIC K, TRP A, FRANKOVIC B. Transient two-dimensional model of frost formation on a fin-and-tube heat exchanger [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(1/2): 22. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.06.005
- [126] CUI Jiyuan, LI Wenxin, LIU Yan, et al. A new model for predicting performance of fin-and-tube heat exchanger under frost condition [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2011, 32(1): 249. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.11.004
- [127] MORADKHANI M, HOSSEINI S, VALIZADEH M, et al. Machine learning based models to predict frost characteristics on cryogenic surfaces under forced convection conditions [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, 129: 105667. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105667
- [128] HAN J M, PARK S H, PARK Y G, et al. Predictions on frost growth over a flat plate using surface characteristics; machine learning methods [J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 149: 248. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2022.12.017
- [129] EOM Y H, CHUNG Y, PARK M, et al. Deep learning-based prediction method on performance change of air source heat pump system under frosting conditions [J]. Energy, 2021, 228: 120542. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120542
- [130] RAHIMI M, HAJJAM S, KHALILI A, et al. Risk analysis of first and last frost occurrences in the Central Alborz region, Iran [J]. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 2007, 27(3): 349. DOI: 10.1002/joc.1405
- [131] MOSHRIK R H, MAHMOUD A A, MOHAMMED J. Statistical examination of frost characterization: a case of global warming impact in Jordan [J]. Journal of Water Resource and Protection, 2011, 3: 8. DOI: 10.4236/jwarp.2011.38071
- [132] KOTIKOT S M, FLORES A, GRIFFIN R E, et al. Statistical characterization of frost zones; case of tea freeze damage in the Kenyan highlands [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2020, 84: 101971. DOI: 10.1016/j.jag.2019.101971
- [133] KIM H, KIM J M, KIM S. Frost forecasting considering geographical characteristics [J]. Advances in Meteorology, 2022, 2022(1): 1127628. DOI: 10.1155/2022/1127628
- [134] DINIZ É S, LORENZON A S, DE CASTRO N L M, et al. Forecasting frost risk in forest plantations by the combination of spatial data and machine learning algorithms [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 306: 108450. DOI: 10.1016/j.agrformet.2021.108450
- [135] XU Jie, GUGA S, RONG Guangzhi, et al. Estimation of frost hazard for tea tree in Zhejiang province based on machine learning [J]. Agriculture, 2021, 11(7): 607. DOI: 10.3390/agriculture11070607
- [136] SHAMMI S, DIEPEVEEN D, ZANDER S, et al. Early frost detection in wheat using machine learning from vertical temperature distributions [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 221: 108950. DOI: 10.1016/j.compag.2024.108950
- [137] LATIF R M A, BELHAOUARI S B, SAEED S, et al. Integration of google play content and frost prediction using CNN: scalable IoT framework for big data [J]. IEEE Access, 2020, 8: 6890. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2963590
- [138] TALSMA C, SOLANDER K C, MUDUNURU M K, et al. Frost prediction using machine learning and deep neural network models for use on IoT sensors [J]. Frontiers in Artificial Intelligence, 2022, 18: 4032447. DOI: 10.3389/frai.2022.963781

(编辑 刘 彤)