

疏水性微结构表面的抗结冰特性仿真研究

胡超, 白清顺, 白锦轩, 张庆春

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: **目的** 探究不同形状微结构表面的疏水、抗结冰特性, 以及两者间的关系。**方法** 基于有限体积分法对液滴滴落至微结构表面的浸润和凝结过程进行仿真探究。首先建立了具有不同形状微沟槽表面的仿真模型, 然后分析了不同微结构表面的疏水特性差异, 最后根据不同微结构表面的水滴滴落凝结行为及内部流场的仿真研究, 获得了微结构表面疏水性和疏冰性关系, 揭示疏冰性产生的原因。**结果** 矩形微结构表面液滴的接触角为 109° , 表现出疏水特性。锯齿形微结构表面液滴的接触角为 162° , 表现出超疏水特性。液滴在锯齿形微结构表面上 20 ms 后凝结率低于 2%, 抗结冰能力最强。普通表面上的液滴凝结率为 4%, 低于矩形表面上的 6%。对比矩形表面与普通表面上的液滴凝结过程, 矩形表面上液滴内部湍流动能是普通表面上液滴的 5 倍, 经过 20 ms 后, 普通表面上液滴近壁面温度下降 30 K, 同时矩形微结构表面上液滴近壁面温度仅下降 10 K。**结论** 具有微结构的表面能表现出疏水性, 这种疏水性对抗结冰特性具有双重作用, 一方面降低了液滴初期的凝结速度, 另一方面加快了液滴在底层形成稳定冰层后的凝结速度。

关键词: 微结构表面; 疏水性; 抗结冰特性; 凝结速度; 有限元体积法; FLUENT

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)09-0145-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.09.023

Simulation Research of the Anti-icing Micro-structured Surface

HU Chao, BAI Qing-shun, BAI Jin-xuan, ZHANG Qing-chun

(School of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

ABSTRACT: **Objective** To explore the hydrophobe and anti-icing character of surfaces with different micro-structures and the link between the two characters. **Methods** Based on FVM, simulations of the progress including water-drop falling onto the surface were done till its solidification. Firstly the model of surfaces with different micro-structures was established. Secondly, the differences between the hydrophobe of those surfaces were analyzed. Lastly, by comparing the different simulation results of the condensation progress on the surface with different micro-structures, the relationship between the hydrophobe and the anti-icing character was obtained and the reason of anti-icing character forming was disclosed. **Results** Contact angle of rectangle

收稿日期: 2016-04-06; 修订日期: 2016-05-17

Received: 2016-04-06; Revised: 2016-05-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51535003)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51535003)

作者简介: 胡超 (1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为材料表面性能研究。

Biography: HU Chao (1989—), Male, Master, Research focus: performance of material surface.

通讯作者: 白清顺 (1974—), 男, 副教授, 主要从事微纳米加工技术及材料表面动力学特征仿真研究。

Corresponding author: BAI Qing-shun (1974—), Male, Associate professor, Research focus: micro-nano machine technology and surface dynamic simulation.

micro-structured surface was 109° , presenting hydrophobic character, while the contact angle was 162° on the zigzag micro-structured surface, presenting super-hydrophobic character. The condensation ratio of the droplets on zigzag micro-structured surface was lower than 2% after 20 ms, showing the best anti-icing character. The condensation ratio of normal surface was 4%, smaller than that of rectangle surface, which was 6%. Comparing the condensation progress of rectangle and normal surface, the turbulent force of the droplets on rectangle micro-structured surface was five times than that of normal surface. And after 20 ms, the temperature near the micro-structured wall reduced by 10 K, while it reduced by 30 K near the normal wall. **Conclusion** The micro-structured surface has the hydrophobic character. The hydrophobicity has both positive and negative effects on the anti-icing character. It can slow down the condensation speed on the initial stage. On the other hand, it can accelerate condensation speed after stable ice layer forms at the bottom of the droplet.

KEY WORDS: micro-structured surface; hydrophobic; anti-icing; condensation rate; FVM; FLUENT

覆冰灾害会带来巨大的安全隐患。输电线上的覆冰会压断电线,影响正常的生产工作,同时威胁到人身安全^[1]。在航空领域,覆冰会增加机翼阻力,影响空速表等传感器的正常使用。此外,在极地等极端恶劣环境,覆冰会严重影响各类暴露在室外的仪器的正常使用。目前,人们主要采用涂覆防冰涂料的方法来防止覆冰及通过加热来除冰,但该方法的有效时间短且价格昂贵,同时消耗大量能量,并且加热对机械结构的影响无法预知^[2]。因此需要一种新型防冰材料来弥补传统防冰方法的缺陷。

自德国植物学家在 20 世纪 70 年代首先发现荷叶表面有极强的疏水性以来,科学家已能解释荷叶自清洁性能的成因。研究表明,“荷叶效应”主要源自于其表面微米级锯齿状微结构^[3]。而 20 世纪 90 年代后,随着 STM 等新检测手段的兴起,科学家得以发现荷叶微米级微结构上还存在纳米级的锯齿状微结构^[4-5],宏观与微观结构的共同作用使其产生了疏水性。科学家已经可以模仿荷叶的微结构人造超疏水表面。连峰等^[6]通过将 SiO_2 纳米粒子均匀地分散在低表面能含氟聚合物中,形成了聚合物基纳米复合材料,然后将其涂覆在表面微结构上构建微纳双层结构,所制成的表面接触角达到 168.2° ,显示出了极好的疏水性。杨周^[7]通过制备花状 ZnO 晶体,并掺杂在油漆中,获得了能使液滴接触角达到 150° 的改性涂料。

随着对疏水表面研究的深入,以及对抗冰材料的刚性需求,科学家开始将目光转向了疏水表面的抗结冰性能。近年来,国内外大量研究证明,超疏水表面确实有抗结冰的作用。清华大学龙江游等^[8]使用飞秒激光制备了超疏水铜表面,证明这种表面能在低温下延缓表面水滴的结冰过程。南京大学朱

林等^[9]通过阳极氧化铝模板灌注法制备了高分子纳米管阵列表面,实验证明了这种具有纳米级微结构的表面具有较好的疏水性,同时对这种疏水性表面上冰的附着力进行了测量,发现在由聚四氟乙烯制成的超疏水表面上,冰的粘附力大幅下降。美国哈佛大学 Lidiya Mishchenko 等^[10]通过在低温下将液滴滴至超疏水表面、疏水表面、亲水表面上,记录并对比液滴凝结时间,发现在疏水性表面上液滴的扩散面积大,凝结时间长。T. Bharathidasan 等^[11]使用不同的涂层修饰表面,并通过实验证明了具有微米级微结构的表面上冰的附着力低于普通表面。加拿大多伦多大学 Daniel Iacovetta 等^[12]通过复合镀的方法制备了 Ni-PTFE 表面,在这种拥有较低表面能的表面上观察到了疏水及疏冰现象。这种利用材料本身物性防覆冰的方法,具有能量消耗低、安全环保、有效时间长等优点。

很多实验证明了疏水表面的抗冰特性,但也有实验证明疏水表面并不一定具有抗冰特性。2010 年 L. Yin 等^[13]制备了超亲水、亲水、临界浸润、疏水及超疏水五种表面,发现疏水表面上冰的凝结速度超过了亲水表面,超疏水表面的疏冰性主要体现在减慢水滴初期的积聚速度,在后期并无明显优势。

目前,虽然对疏水表面抗结冰的特性已经进行了大量实验,但是由于受测量手段的限制,科学家只能通过水滴凝结过程中的形态温度变化来间接判断水滴内部的理化状态。同时,对超疏水表面的仿真研究主要集中在对不同形状微结构的表面疏水性的仿真,而对不同形状微结构的表面抗结冰性能及液滴凝结过程中内部的流场、温度场的仿真研究较少。

针对这种现状,本文首先建立了微结构的表面模型,使用 FLUENT 软件确定这种表面的疏水性,再对液滴在具有微结构的疏水性表面上的凝结过程进行仿真研究,分析了疏水性表面抗结冰效应的产生原因及影响抗结冰效应的因素。

1 微结构表面模型的建立

1.1 表面接触角与疏水性评价

采用接触角来评价表面的浸润性。当液体在金属表面达到稳态时,在液-气-固的三相接触点作液-气接触线的切线,该切线与固体表面的夹角即是接触角,表示为 θ 。如图 1 所示,当 $\theta=0$ 时,表面为完全浸润表面;当 θ 为锐角时,为浸润表面;当 θ 为钝角时,为不浸润表面。接触角 $\theta\geq150^\circ$ 时,为超疏水表面。

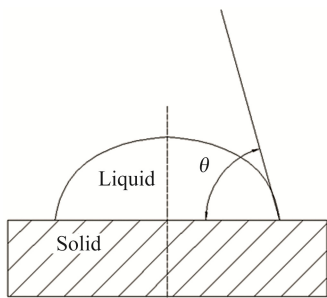


图 1 接触角示意
Fig.1 Diagram of the contact angle

1.2 计算域建模及网格划分

为了比较不同形状表面微结构的疏水性与疏冰性,本文设计了如图 2 所示的锯齿形及矩形微结构。

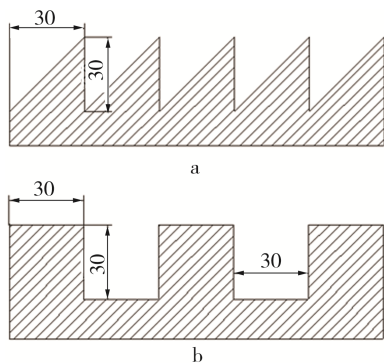
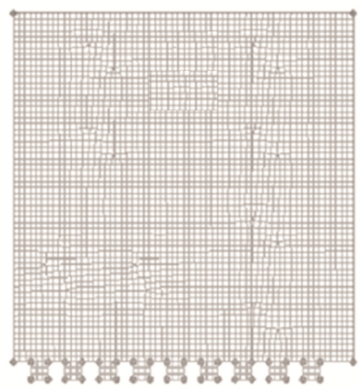


图 2 微沟槽截面形状示意
Fig.2 Diagram of different micro-structure shape

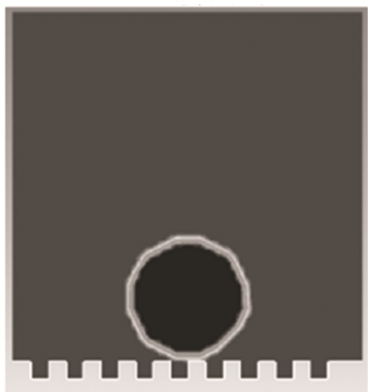
考虑到液滴下落后的铺展面积及反弹高度,经

过多次尝试后,确定计算域为 $0.6\text{ mm}\times0.6\text{ mm}$ 。液滴在下落及凝结过程中处于计算域中,在保证精度的同时,较小的计算域能节省计算资源。

网格划分是仿真结果是否准确的关键。结合参考文献[14]的研究结果,网格参数为液滴直径 $1/20$ 能取得较好效果。根据参考文献[6]的研究成果,带有微结构的表面具有一定的防冰能力,因此首先建立可能具有疏水能力的带有微结构的表面。现有研究已经证明,当液滴直径远大于微结构的尺寸时,会产生明显的疏水现象。针对特征尺寸为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的微结构,将液滴直径设置为 0.2 mm ,网格参数为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。微结构内部区域的流场变化剧烈,采用特征尺寸为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的网格参数,以防止迭代发散。矩形微结构最终的计算域网格划分如图 3 所示。仿真结果显示,这种网格划分在 $1\text{ }\mu\text{s}$ 的迭代步长下仿真过程稳定,没有出现迭代发散的状况。



a 网格划分



b 初始状态

图 3 矩形微结构网格划分及初始状态
Fig.3 The meshing (a) and initialization (b) of the surface with rectangle micro structure

1.3 流场物理模型建立

本文中的数值仿真使用流体体积函数 (VOF) 来捕捉水滴与空气的分界面。在不可压缩液体的

VOF 模型中,规定每个单元体 (Element) 中的目标流体体积分数为 α 。当 $\alpha=0$ 时,表明单元体内没有目标流体;当 $0<\alpha<1$ 时,表明单元体内同时存在多种流体;当 $\alpha=1$ 时,表明单元体内充满目标流体。

在计算流体动力学的同时耦合凝固/熔化模型。FLUENT 的凝固/熔化模型中引入液相率 β 变量,其定义为:

$$\beta = 0, \text{ if } T < T_{\text{固体}} \quad (1)$$

$$\beta = 1, \text{ if } T < T_{\text{固体}} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{T - T_{\text{固体}}}{T_{\text{液体}} - T_{\text{固体}}}, \text{ if } T_{\text{固体}} < T < T_{\text{液体}} \quad (3)$$

式中: T 为任意时刻的温度。当时,相变材料处于液固模糊相区。

FLUNET 凝固/熔化模型是以焓为待求变量,其基本能量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} H) = \nabla \cdot (K \nabla T) + S \quad (4)$$

其中相变过程中材料的焓用显热焓和潜热焓之和表示:

$$H = h + \Delta H = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T C_p dT + \beta L \quad (5)$$

式中: ρ 为密度; t 为凝固时间; H 为任意时刻的焓值; h_{ref} 为参考焓值; h 为显热焓值; L 为相变潜热; C_p 为流体定压比热容; β 为液相率; K 为热系数; T 为任意时刻的绝对温度。

1.4 计算域边界条件确定

对边界条件的设定直接影响仿真的可参考性。模型的下表面即微米级微结构表面设置为无滑移表面。而对于计算域的上表面,设置为大气压力入口 (Pressure-inlet) 最逼近现实。同时对压力入口进行定义,规定入口相为空气,温度与流场初始化温度相同。计算域左右表面设置为大气压力出口 (Pressure-outlet)。该边界条件的设定与大部分实验中的实验室环境相符,方便将仿真结果与实验结果结合研究。

本次仿真中存在三相,即气-液-固。其中固相即冰的属性由“凝结-融化”模型定义,其他参数如表 1 所示。同时需要对计算域进行初始化,初始化将直接决定仿真结果的真实性,各相初始化如表 2 所示。表中“—”表示不需要进行设定。设置空气为工作流体,可以避免在空气进行液体静压力的计

算,节省计算资源,加快了收敛速度。

表 1 材料属性
Tab.1 The attribute of material

Attribute	Density/(kg·m ⁻³)	Viscosity/(kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	Surface tension coefficient
Water	988.2	0.001	0.073
Air	1.225	0.0018	

表 2 初始化参数
Tab.2 Parameter of the initialization

Area	Pressure/Pa	Speed/(m·s ⁻¹)	Temperature/K
Air	101 325	0	200
Water	101 325	0.5	290
Wall	—	—	200

2 微沟槽表面疏水和防冰特性分析

2.1 液滴的疏水特性

图 4 为锯齿形微结构表面上前 2 ms 内液滴的形态变化。液滴落在表面后,经历了“铺展—弹起—再落下铺展—平衡”过程。以 0.5 m/s 速度下落的液滴,经过了 4 次“铺展—弹起”循环后,形态基本稳定。

普通表面及矩形微结构表面上的液滴均遍历类似的循环变化后稳定。但是在不同的表面上,液滴形态稳定后的接触角大小不同。如图 5 所示,三种表面上液滴形状达到稳定后的接触角大小差别较大。普通表面上的接触角 $< 90^\circ$, 不具备疏水性。矩形及锯齿形微结构表面上的接触角均大于 90° , 具有一定的疏水性。其中锯齿形微结构表面上的平均接触角 $\theta=162.8^\circ$, 矩形微结构表面上的平均接触角 $\theta=109^\circ$ 。锯齿形微结构表面上液滴的接触角超过 150° , 表现出超疏水特性。

图 6 为两种不同微结构内部的平均液相率变化。当液滴形状稳定时,矩形微结构内部水的液相率为 2.02%, 锯齿形微结构内部水的液相率为 4.47%。矩形及锯齿形微结构内部的空气层保持完好,空气层减少了液滴与金属表面的接触面积。锯齿形微结构内部的液相率较高,液滴与金属表面的接触面积较小,疏水现象明显。

结合图 5 和图 6,液滴以一定的初速度下落时,向下铺展的同时,微沟槽内的空气层体积被压缩减小,液相率升高。液滴铺展至最大时,液相率达到最高,此时空气层仍然没有被破坏,大部分体积依然是由空气填充。随着液滴开始反弹,液相率开始

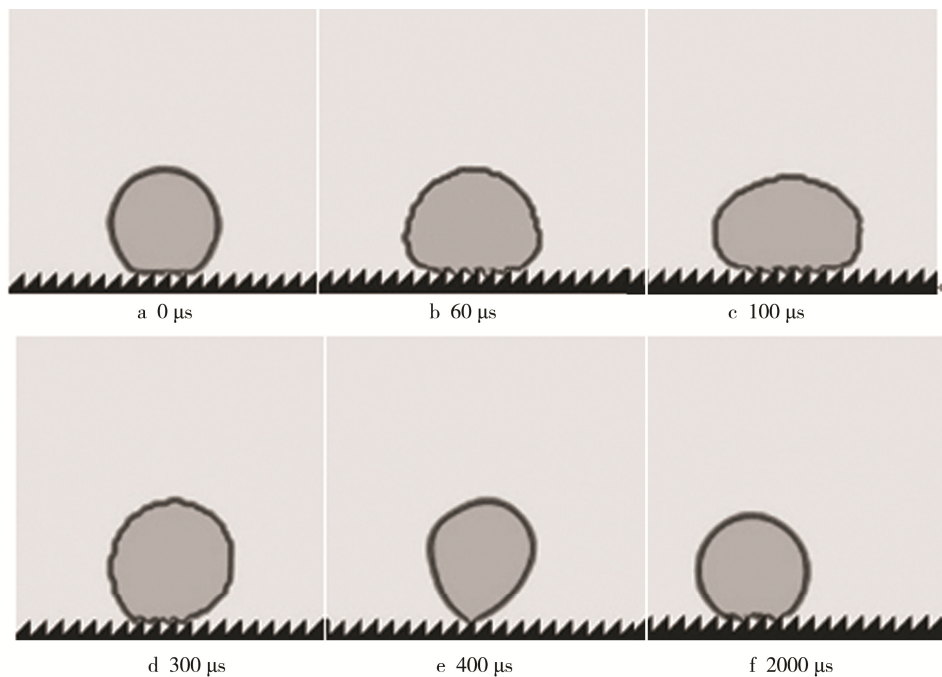


图 4 锯齿形微结构表面液滴形状变化
Fig.4 Change of the droplet shape on the zigzag micro-structured surface

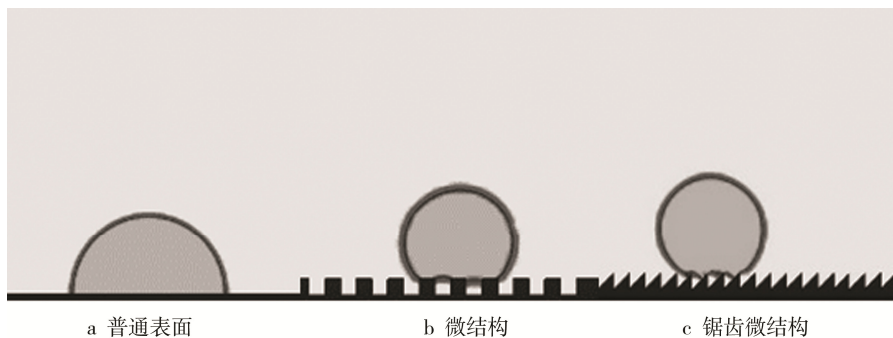


图 5 三种表面液滴稳定形状
Fig.5 Stable shape of the droplets on three surface: a) normal, b) rectangle, c) zigzag

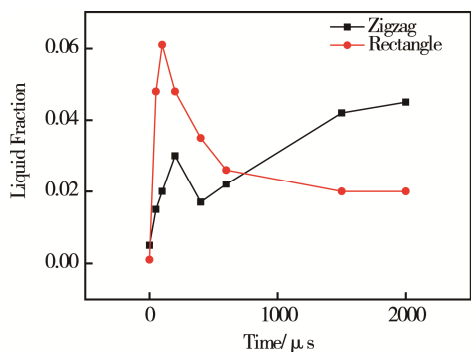


图 6 微沟槽内部液相率
Fig.6 Liquid fraction plot for water inside different shape of micro structure

下降。液相率的变化与液滴的铺展程度有密切关系，随着液滴形态的稳定，液相率也达到稳定。
上述仿真说明，特征尺寸为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的微结构表

面表现出疏水性，微结构不同，其疏水性强弱有所差别，锯齿形微结构的接触角较大，具有超疏水性。

2.2 液滴的凝结行为

图 7 为三种表面上液滴在凝结过程中的相图。本文选择 3 个代表性的时间点，分别为液滴尚在“弹起—落下”的 $600\text{ }\mu\text{s}$ 时刻，液滴形状达到稳定的 2 ms 时刻，以及液滴凝结到一定程度的 20 ms 。如图 7a 所示，凝结从两个方向开始：1) 液滴与较冷的壁面的接触面；2) 液滴与冷空气的接触面。

空气的导热系数为 $0.023\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，是热的不良导体，远低于铝合金的导热系数 $177\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。因此液-固接触面的热交换速度更快，液滴与金属表面接触面的温度下降较快，凝结现象明显，最先

出现凝结现象。如图 7b 和图 7c, 普通表面上液滴下侧凝结速度快, $600\ \mu\text{s}$ 形成了稳定的结冰层。而此时图 7e 和图 7h 中, 在两种具有微结构的表面上, 液滴尚未形成稳定的结冰层。冰的导热系数为 $2.22\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 远小于铝合金的导热系数, 因此当液滴与表面接触处形成稳定的结冰层后, 冰与水进行换热, 凝结速度大幅下降, 液滴侧面与空气接触处的

凝结现象相对明显。如图 7b 和图 7e 所示, 在微结构表面上, 液滴与空气接触面的凝结现象更加明显。 $600\ \mu\text{s}$ 时, 凝结开始于液滴与矩形微结构接触处。如图 7f 和图 7i 所示, $20\ \text{ms}$ 时, 在矩形微结构表面上的液滴中, 可以观察到液滴与空气接触面的凝结, 在疏水性更强的锯齿形表面上, 只能观察到底部的凝结。

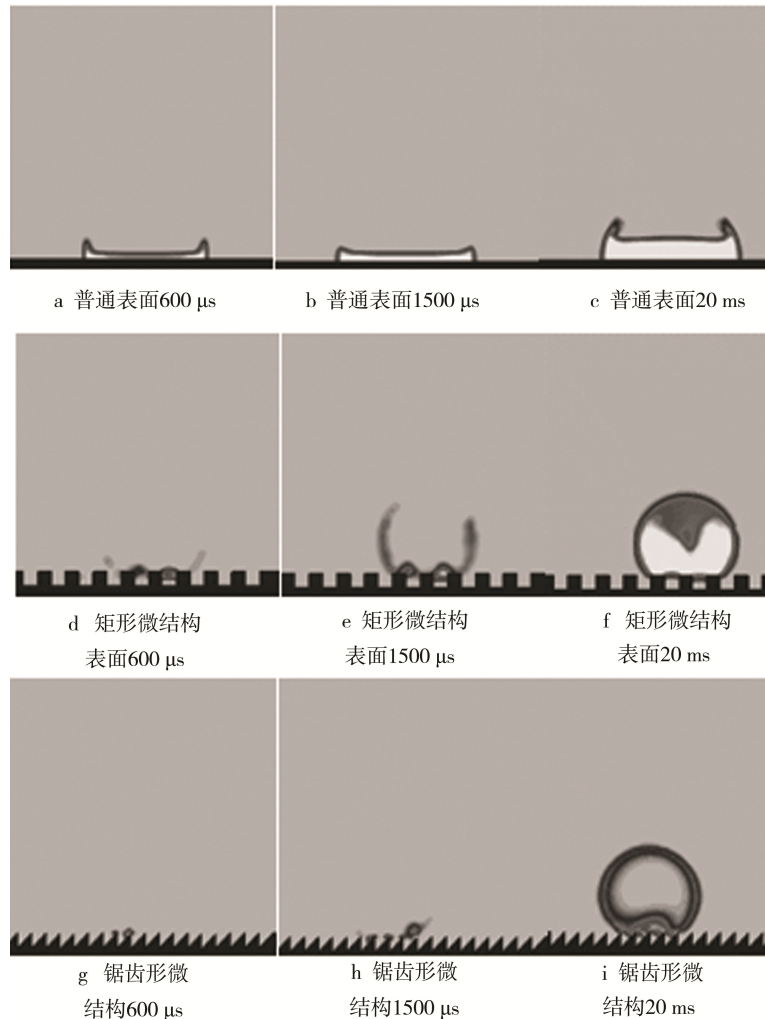


图 7 水滴在三种表面上的凝结过程

Fig.7 Condensation process of droplets on three different surfaces

图 8 为凝结过程中液滴的液相率变化。可知截至到 $20\ \text{ms}$ 时, 矩形微结构表面上水滴的液相率最高, 而锯齿形微结构表面上水滴的液相率最低, 其上液滴凝结程度最低。

由图 8 可知, 微结构表面的减慢液滴凝结特性并不总是与表面的疏水性成正相关。由 2.1 小节可知, 矩形微结构表面具有疏水性, 其上液滴的凝结速度快于普通无疏水性的表面。锯齿形微结构表面具有超疏水性, 液化率最高, 截至 $20\ \text{ms}$ 时, 液滴的凝结比例低, 凝结速度低, 表现出良好的抗冰特

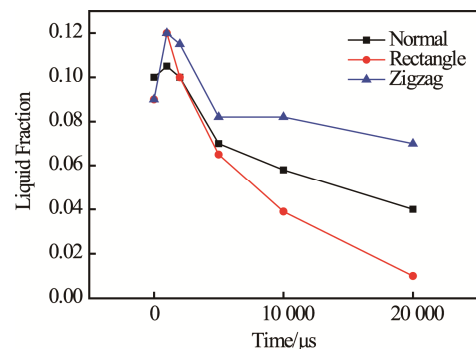


图 8 凝结过程中的水滴液相率

Fig.8 Liquid fraction plot for droplets on different surfaces in the condensation process

性。同时, 10 ms 后, 三种表面上液滴液相率的下降速度基本相同, 与三种表面上液滴底部均形成稳定结冰层的时间相符。当液滴下层形成冰层后, 液滴中的液态部分脱离了与金属表面的接触, 疏水性表面对液滴凝结的影响降低。仿真结果与 WANG. Y 等人的实验结果吻合。WANG. Y 等人在实验中分别将液滴滴落到亲水、普通、疏水、超疏水表面上, 并通过高速摄像机记录结冰过程。实验表明, 液滴在亲水、普通、疏水表面上的凝结过程类似, 在第一次反弹前就能在接触面观察到结冰现象^[15]。依据[9]中的实验现象, 证明了疏水表面能减慢液滴在下层形成稳定冰层前的凝结速度。

2.3 湍流强度对液滴凝结作用

在 2.2 节中通过有限元 VOF 方法仿真了液滴在不同形状的微沟槽上的凝结过程。在矩形微结构表面上, 液滴与金属表面的接触面积小于普通表面, 与金属的换热较小, 则矩形表面上的凝结速度应低于光滑表面上液滴的凝结速度。但是仿真结果显示, 矩形微结构表面上的液滴凝结速度更快, 本节将就该问题进行研究, 说明湍流强度对液滴凝结的作用。

液滴的凝结过程在宏观上符合能量传递模型:

$$\Delta E = \Delta E_{\text{sur}} + \Delta E_{\text{air}} - \Delta E_{\text{con}} \quad (6)$$

式中: ΔE 为液滴能量变化; ΔE_{sur} 为金属表面与液滴间的换热; ΔE_{air} 为自然流动的气体与液滴间换热; ΔE_{con} 为液滴内部耗散能量。液滴宏观凝结速度可以近似由 ΔE 表征。

2.2 节中主要研究了疏水表面对 ΔE_{sur} 和 ΔE_{air} 的影响。超疏水表面的低黏附力导致液滴在表面上多次进行“弹起—回落”循环, 液滴内部的湍流强度高。湍流强度的升高带来两个效果: 1) 流体微元速度更快, 由于分子间的黏性, 湍流动能大量转换为分子热运动的能量, 湍流耗散率上升, ΔE_{con} 增大; 2) 流体微元快速运动使液滴内部的换热过程激烈, 液滴上层温度较高的流体微元能更频繁地将热量传导给下层温度较低的流体微元, 液滴内的热平衡速度快。如图 9 所示为 1 ms 时液滴在两种表面上的温度场与速度场。

图 9a、b 为普通表面上的速度场, 液滴内部流体微元的平均速度为 0.9 m/s, 速度峰值为 1.3 m/s。液滴温度梯度场基本保持了液滴的外形, 这种状态下的液滴类似于各向同性材料, 各方向的导热系数相近。如图 9c、d 所示, 液滴下部有湍流产生, 湍流流域中的液体微元峰值速度达到了 4.5 m/s, 是普通表面上液滴微元峰值速度的 3.5 倍。液体微元

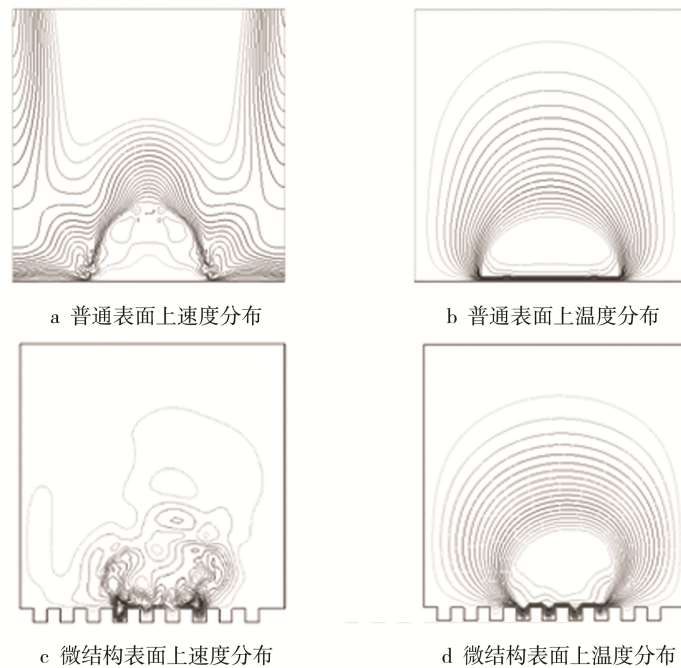


图 9 两种表面速度场与温度场

Fig.9 Velocity field (a) and temperature field (b) of the normal surface compared with the velocity field (c) and temperature field (d) of the rectangle micro-structured surface.

的快速运动加快了液滴内部热平衡过程。而普通表面上,热平衡过程较慢,下层液体开始凝结后,上层仍处于较高的温度。同时,在湍流激烈的流域中,大量的湍流动能转换为热能,温度梯度分布不均匀(图9d)。矩形微结构表面湍流区域近壁面处的温度达到了280 K,相较于初始温度290 K,仅下降了10 K。相同位置,普通表面上液滴近壁面处的温度仅为260 K,下降了30 K。

如图10所示,普通表面上液滴的湍流动能在1 ms后,下降至0.2 J/kg并保持,而矩形微结构表面上液滴的湍流动能始终保持在1 J/kg以上,是普通表面上湍流动能的5倍。

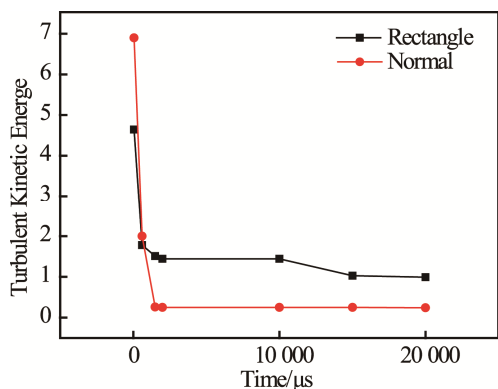


图10 两种表面上液滴湍流动能

Fig.10 Turbulent kinetic energy plot for droplets on normal and rectangle micro-structured surface

液滴内部的湍流作用使疏水表面上液滴下层温度较普通表面上的更高,使矩形微结构表面液滴的液相率显著高于普通表面上液滴的液相率。但是由于液滴内部的湍流作用,使液滴在初始阶段难以在下层形成稳定的结冰层,即使某些流体微元已经凝结,但仍然会沿液滴内部的流线进入流体上层温度较高的区域进行换热,导致5 ms内矩形微结构表面上的液态水一直与金属表面保持接触。金属对流换热系数高,液态水与金属表面间的换热快速,液滴的平均温度较低。而普通表面在0.6 ms时已经在下层形成了稳定的结冰层,剩余液体实际在与冰层和空气进行对流换热。如图8所示,由于冰的对流换热系数远小于金属,在形成稳定冰层后,普通表面上液滴的液化率下降较慢,凝结速度较慢,起到了延缓结冰的作用。

3 结论

建立了液滴滴落到微结构表面上的有限元模

型,并进行了热力学与流体力学的耦合仿真。通过仿真观察了液滴落到表面后的运动、凝结过程,并分析了运动凝结中的规律。可以得出以下主要结论:

1) 通过测量水滴在三种表面上的接触角,证明了特征尺寸为30 μm 的微结构表面同样具有疏水性,其中锯齿形截面的微结构表面表现出了超疏水特性。

2) 对比了三种表面上液滴在凝结过程中的液相率的变化,研究结果表明,锯齿形微结构上的液滴的凝结速度最慢,具有抗结冰特性。表面微结构内部形成了稳定的空气层,一方面减小了液滴的接触角,产生了疏水性,另一方面,减小了液滴与金属表面的接触面积,降低了液滴与表面间的换热速度,起到了减慢液滴凝结速度的作用。具有微结构的金属表面表现出自洁净特性。

3) 分析了微结构表面及普通表面上液滴在凝结过程中的内部速度场、温度场分布。研究表明,微结构疏水表面上液滴的内部流体微元速度快,湍流动能较大,水分子内能较高,内部热平衡速度快。微结构表面上液滴初始时的凝结速度较低,当液滴下层形成稳定的结冰层后,凝结速度快于普通表面上液滴的凝结速度。

参考文献

- [1] 李文,方国平,王秀峰,等。一种防覆冰输电电缆及其生产方法:中国,CN10142534[P].2008-10-14.
LI Wen, FANG Guo-ping, WANG Xiu-feng, et al. A Kind of Anti-icing Cable and Its Production Method: China, CN10142534[P].2008-10-14.
- [2] 周洪英.德科学家研制出可防飞机机翼结冰的鱼蛋白涂料[J].功能材料信息,2008(4):52-53.
ZHOU Hong-ying. German Scientists Have Developed a Fish Protein Coating Which Can Prevent Aircraft Wing Icing[J]. Science and Technology Information, 2008(4): 52—53.
- [3] 石彦龙,冯晓娟.超疏水性生物表面的研究进展[J].应用化学,2012,29(5):490—497.
SHI Yan-long, FENG Xiao-juan. Research Progress of Superhydrophobic Surface[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2012, 29(5): 490—497.
- [4] 赵欢,吕晓璇,周圣文,等.金属防护用超疏水表面主要制备方法及应用研究进展[J].表面技术,2015,44(12):49—55.

- ZHAO Huan, LIU Xiao-xuan, ZHOU Sheng-wen, et al. Research Progress in the Preparation Methods and Applications of the Superhydrophobic Surface for Metal Protection[J]. Surface Technology, 2015, 44(12): 49—55.
- [5] 钱鸿昌, 李海扬, 张达威. 超疏水表面技术在腐蚀防护领域中的研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(3): 15—23.
- QIAN Hong-chang, LI Hai-yang, ZHANG Da-wei, et al. Research Progress of Superhydrophobic Surface Technologies in the Field of Corrosion Protection[J]. Surface Technology, 2015(3): 15—23.
- [6] 连峰, 谭家政, 张会臣. 船体用钢板基底超疏水表面的制备和性能[J]. 材料研究学报, 2013(1): 13—17.
- LIAN Feng, TAN Jia-zheng, ZHANG Hui-chen. Preparation and Properties of Superhydrophobic Surface on Warship Steel[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2013(1): 13—17.
- [7] 杨周. 仿生超疏水功能表面的制备及其性能研究[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2012.
- YANG Zhou. Preparation and Properties of Artificial Bionic Superhydrophobic Functional Surface[D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2012.
- [8] 龙江游, 吴颖超, 龚鼎为, 等. 飞秒激光制备超疏水铜表面及其抗结冰性能[J]. 中国激光, 2015(7): 156—163.
- LONG Jiang-you, WU Ying-chao, GONG Ding-wei, et al. Femtosecond Laser Fabricated Superhydrophobic Copper Surface and Their Anti-Icing Properties[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015(7): 156—163.
- [9] 朱林. 纳米阵列超疏水特性及有机硅涂层疏冰性研究[D]. 南京: 南京大学, 2014.
- ZHU Lin. Super Hydrophobic Property of Nano-tube Arrays and the Research of Ice Phobic Property Based on Silicon Coating[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.
- [10] VAIBHAV, BAHADUR, LIDIYA, et al. Predictive Model for Ice Formation on Super Hydrophobic Surfaces[J]. Langmuir, 2011, 27 (23): 14143—14150.
- [11] BHARATHIDASAN, KUMAR, BOBJI, et al. Effect of Wettability and Surface Roughness on Ice-adhesion Strength of Hydrophilic, Hydrophobic and Super Hydrophobic Surfaces[J]. Applied Surface Science, 2014, 314 (24): 241—250.
- [12] FILLION, RIAHI, EDRISY. A Review of Icing Prevention in Photovoltaic Devices by Surface Engineering[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 32(5): 797—809.
- [13] YIN L, XIA Q, XUE J, et al. In-situ Investigation of Ice Formation on Surfaces with Representative Wettability[J]. Applied Surface Science, 2010, 256(22): 6764—6769.
- [14] 孟祥攀. 疏水性微沟槽液动减阻的仿真分析及其实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- MENG Xiang-pan. Research on Simulation and Experiment of the Hydrophobic Drag Reduction of the Hydrophobic Micro-Groove[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [15] WANG Y, XUE J, WANG Q. Verification of Icephobic/Anti-icing Properties of a Superhydrophobic Surface[J]. Acs Applied Materials & Interfaces, 2013, 5(8): 3370—338.