

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20160292

辐射吊顶表面冷凝液滴脱落尺寸分析

唐海达, 张涛, 刘晓华, 江亿

(清华大学建筑学院, 北京 100084)

摘要: 通过对超疏水纯铜样品和 4 种经过不同表面改性处理的铝合金样品的冷凝实验, 系统地研究了表面特性不同的辐射吊顶表面冷凝液滴的脱落尺寸。结果表明, 超疏水表面合并诱导脱落的液滴半径不足 300 μm , 而且尺寸相近的微小液滴 (半径之比在 1.0~1.5) 合并后易于发生液滴脱落。根据能量守恒原理对液滴合并过程进行了理论分析, 结果表明随着合并前两液滴半径之比的增大, 液滴合并脱落的阻力, 黏附功和黏性耗散相比于合并后释放的表面能均变得显著, 从而导致液滴合并脱落的概率减小。常规辐射吊顶表面上重力诱导脱落的液滴半径随机分布在 2.0~6.0 mm, 但在表面的后退角和前进角所确定的上、下限范围内。因此, 超疏水处理后的辐射吊顶大幅减小了冷凝液滴的脱落尺寸, 可显著降低其表面结露风险。

关键词: 凝结; 超疏水表面; 接触角; 热力学; 数值模拟

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2016) 09—3552—07

Size of departing condensate droplets from radiant cooling ceiling

TANG Haida, ZHANG Tao, LIU Xiaohua, JIANG Yi

(School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The size of condensate droplets departing from horizontal superhydrophobic copper surfaces and conventional aluminum alloy surfaces was studied experimentally and theoretically. During the whole condensation experiment, the dew formation and departure underneath the sample surfaces were imaged by CCD. It was found that the radius of the condensate droplets of the coalescence-induced jumping condensate departed from the superhydrophobic surface was below 300 μm . The coalesced droplets merged by micro-droplets with a radius ratio ranging from 1.0 to 1.5 were subject to self-removal from the superhydrophobic surface. This was because the driving force of the released surface energy after droplet coalescence became dominant compared to the resistance of the work of adhesion and viscous dissipation with the decrease of the radius ratio. In addition, the radii of the gravity-induced falling droplet from conventional aluminum alloy surfaces were ranged from 2.0 mm to 6.0 mm, and limited by the advancing and receding contact angles. Therefore, these results revealed that the superhydrophobic surface can significantly decrease the size of droplets departing from radiant ceiling panels and reduce condensation risks of radiant cooling ceiling systems.

Key words: condensation; superhydrophobic surface; contact angle; thermodynamics; numerical simulation

2016-03-11 收到初稿, 2016-06-07 收到修改稿。

联系人: 张涛。第一作者: 唐海达 (1990—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2014BAJ02B01); 广东省科技计划项目 (2013A090100016)。

Received date: 2016-03-11.

Corresponding author: Dr. ZHANG Tao, zt2015@mail.tsinghua.edu.cn

Foundation item: supported by the National Key Technology Support Program (2014BAJ02B01) and the Science and Technology Planning Project of Guangdong Province (2013A090100016).

引言

随着经济社会的发展, 中国建筑能耗占社会总能耗的比例达到了 23%^[1], 而空调能耗通常占建筑能耗的 30%~60%^[2]。辐射吊顶供冷系统相比于传统全空气空调系统具有能效高、舒适度高、噪声低及占用建筑空间小等优点^[3-6]。辐射吊顶供冷系统广泛应用在办公楼、住宅等建筑中。但是辐射吊顶供冷系统应用在热湿地区时, 面临吊顶表面结露的风险^[7]。因此, 研究辐射吊顶表面的结露现象、探索有效降低结露风险的方法一直受到国内外学者的普遍关注。

Yin 等^[8]对包括裸露毛细管、金属板和石膏板等不同形式的辐射吊顶进行了冷凝实验。实验结果表明, 石膏板由于具有吸水性, 其结露风险最小。在接触角小于 90° 的常规辐射吊顶表面, 冷凝液滴生长到临界半径后, 在重力作用下脱离表面。脱落液滴的半径约为水的毛细管长度(2700 μm)^[9-10]。目前, 超疏水表面合并诱导的液滴弹跳现象可实现微米级尺寸的液滴脱落而受到广泛关注^[11-13]。王四芳等^[14-15]通过高速摄像考察了水平超疏水表面上液滴合并过程, 发现合并中液滴气液界面减小释放出的表面能可以克服表面黏附作用诱发合并液滴弹跳现象。Rykaczewski 等^[16]研究发现超疏水表面上微小液滴合并后液滴脱离和黏附在表面上的现象均存在。在整个冷凝过程中常规辐射吊顶表面以及超疏水表面液滴脱落尺寸是衡量结露风险的重要参数, 需要进一步深入研究。

本文制备了具有微纳结构的超疏水纯铜样品和 4 种经过不同表面改性处理的铝合金样品, 实验研究了超疏水表面上合并诱导的液滴脱落尺寸和铝合金样品表面上重力诱导的液滴脱落尺寸。基于能量守恒理论, 分析了表观接触角、液滴尺寸、合并前液滴半径之比对超疏水表面液滴合并脱落的影响。此外, 理论分析了常规表面上重力诱导脱落液滴的尺寸范围。本文研究内容为降低辐射吊顶的结露风险提供了一种新思路。

1 实验部分

1.1 样品制备

如图 1 所示, 冷辐射吊顶通常安装在建筑内墙面, 空调冷冻水在铜管中循环作为冷媒, 铜管贴附在金属板结构上以强化冷媒与室内的换热, 增大单

位面积供冷量。实验制备了 1 种超疏水纯铜样品 (SH1) 和 4 种经过不同表面改性处理的铝合金样品 (H1~H4)。超疏水的铜片样品的制备方法^[17]: 将尺寸 30 mm × 50 mm × 0.1 mm 的铜片 (纯度为 99.8%) 浸泡在 4 mol · L⁻¹ 的盐酸溶液中 1 min, 取出后用乙醇和蒸馏水分别超声清洗 5 min, 干燥后浸泡在 100 ml 的碱溶液中刻蚀 90 min。该碱溶液为 2.5 mol · L⁻¹ NaOH 和 0.13 mol · L⁻¹ (NH₄)₂S₂O₈ 的混合物。刻蚀结束后的铜片用蒸馏水清洗干燥后, 再浸泡在 20 g · L⁻¹ 的硬脂酸的乙醇溶液中 24 h, 然后冲洗干净并干燥。而 4 种铝合金样品均对其表面进行了低表面能处理。

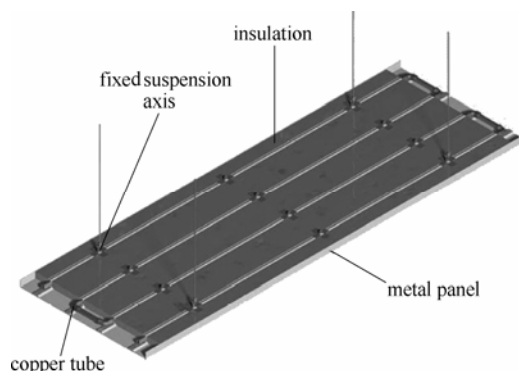


图 1 金属辐射吊顶的结构

Fig.1 Schematic diagram of radiant cooling ceiling panel

材料的表面润湿性能通常用接触角来刻画。接触角 θ 即为液滴在固体表面达到热力学平衡状态时, 气液界面与固液界面所夹的角度。 θ 越小, 表面润湿性越好。 $\theta < 90^\circ$, 固体表面称为亲水表面; $90^\circ < \theta < 150^\circ$, 固体表面称为疏水表面; $\theta > 150^\circ$, 固体表面称为超疏水表面。在水平表面上的液滴, 固液界面扩展时的接触角称为前进角 θ_{adv} (即最大接触角), 固液界面缩小时接触角称为后退角 θ_{rec} (即最小接触角)。实验中, 表观接触角 θ 是通过在水平样品表面静置体积为 1 mm³ 的液滴测量得到。采用 JC2000CD1 型接触角测量仪对超疏水纯铜样品和铝合金样品的表面润湿特性进行表征, 测量参数包括表观接触角、前进角和后退角。并经过 5 次测量取平均值, 其结果如表 1 所示。

1.2 实验装置

辐射吊顶表面结露的实验平台如图 2 所示。样品表面的冷凝实验在尺寸为 1 m × 1 m × 0.6 m, 外壳为有机玻璃的恒温恒湿环境舱内进行。通过电加热和电热加湿器, 环境舱内的温度控制在 30℃ ± 0.5℃, 相对湿度控制在 50% ± 5%。超疏水铜片

表 1 纯铜样品和铝合金样品的接触角

Table 1 Contact angles of copper and aluminum alloy sheets

Sample		Contact angle / (°)		
		Apparent(θ)	Receding(θ_{rec})	Advancing(θ_{adv})
copper	SH1	161.6	120.4	170.6
aluminum alloy	H1	74.4	9.1	81.8
	H2	91.3	52.9	108.2
	H3	99.5	52.8	109.5
	H4	101.9	65.0	108.1

和常规铝合金片用导热硅脂黏附在水平放置的冷台上。冷台为空心铜盒，采用低温恒温槽（冷冻水槽）对冷台进行降温，并控制其表面温度均匀。

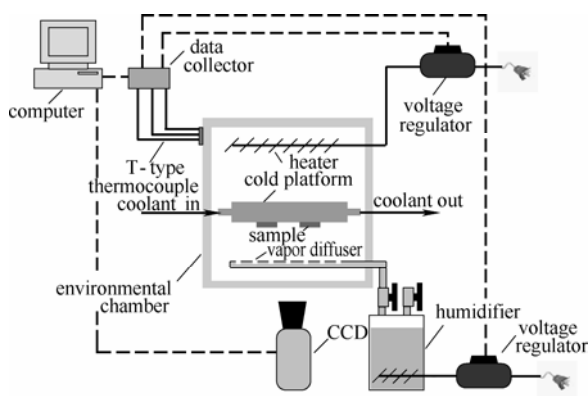


图 2 辐射吊顶表面结露实验平台

Fig.2 Schematic diagram of experimental platform for condensation on radiant cooling ceiling

实验中，样品表面冷凝液滴的生长、合并和脱落的全过程均采用 CCD 视频摄像头和体式显微镜进行图像的实时采集。样品的表面温度和环境舱内空气温度通过 T 型热电偶测量得到，而环境舱内的空气露点温度由氯化锂露点仪测量得到。

2 实验结果与讨论

2.1 超疏水表面合并诱导的液滴脱落

2.1.1 合并诱导的液滴脱落现象分析 在温度为 30℃，相对湿度为 50%的恒温恒湿舱内对表面温度为 6.8℃的超疏水纯铜样品表面进行 24 h 的连续冷凝实验观察。冷凝实验进行到 4 h 后，实验中观察到半径为 100~300 μm 的冷凝液滴连续不断地脱离壁面。实验照片显示，液滴脱落前均伴随有微小液滴的合并现象。然而，并不是所有的液滴合并事件均会诱导液滴的脱落。部分合并事件中，合并后的液滴黏附在超疏水纯铜样品表面，最终导致存在半

径为毫米级的液滴留在超疏水表面上。冷凝实验进行到 14 h 后，观察到半径为 700~1000 μm 的冷凝液滴在重力作用下连续脱离壁面。

图 3 为超疏水表面冷凝过程中微小液滴合并后发生脱离和黏附的典型案例。实线圆圈中的微小液滴合并后诱导液滴脱离壁面，而虚线圆圈中的为小液滴合并后，依然黏附在壁面上。

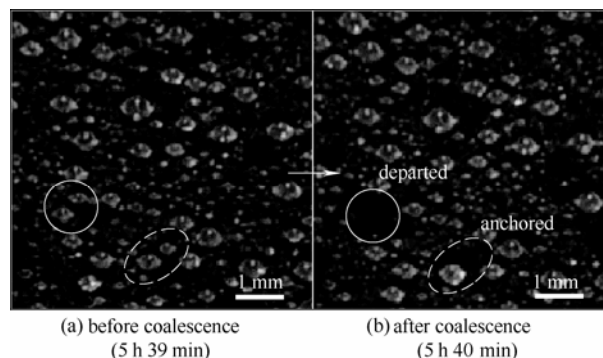


图 3 超疏水表面液滴合并诱导的液滴脱落和黏附

Fig.3 Micro-droplets' coalescence events on superhydrophobic surface that culminate in formation of departed and anchored droplets

利用 CCD 采集到的图像信息，在冷凝实验进行了 6 h 后，分析了 20 min 内超疏水表面上全部的液滴合并事件。统计合并前液滴的半径以及合并后液滴是否脱离壁面。定义合并前液滴半径之比为

$$\eta = r_{01}/r_{02} \quad (1)$$

不失一般性，令 $r_{01} \geq r_{02}$ 。图 4 给出液滴合并事件中两液滴的半径。实验结果表明，在合并诱导的液滴脱落事件中，合并前液滴半径比为 1.0~1.5 的占了其中 79%。而在合并后液滴黏附壁面的事件中，合并前液滴半径比超过 1.5 的占了其中 73%。超疏水表面冷凝过程中，超过 90% 的合并诱导下液滴脱落事件中，脱落液滴的半径在 300 μm 以下。从实

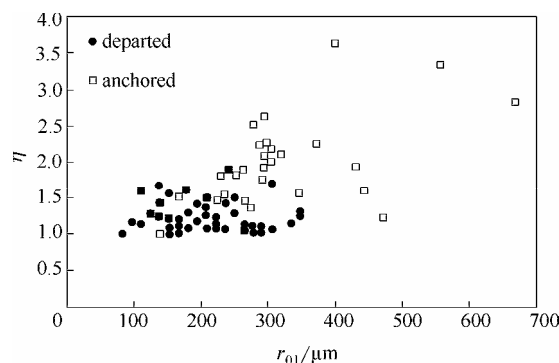


图 4 超疏水表面液滴合并前的尺寸统计

Fig.4 Plot of large radius vs radius ratio of two droplets involved in coalescence events

验结果可以看出, 超疏水表面液滴合并后能否诱发液滴脱落是随机的, 其中半径相近的微小液滴合并后易于脱离壁面。

2.1.2 合并诱导液滴脱落的理论分析 下面针对超疏水表面上两液滴合并的过程从能量守恒的观点进行理论分析。超疏水表面上, 合并诱导的液滴脱落驱动力为合并后释放的表面能(ΔE_{surf})以及重力势能(ΔE_g)。合并过程中释放的表面能和重力势能一部分用于克服表面黏附功(ΔE_{ad}), 一部分用于消耗来自液滴内部液体流动的黏性耗散(ΔE_{vis})。根据能量守恒定律, 合并后脱落液滴的初始动能(ΔE_k)可表示为

$$\Delta E_k = -\Delta E_{\text{surf}} - \Delta E_g - \Delta E_{\text{ad}} - \Delta E_{\text{vis}} \quad (2)$$

液滴合并过程的模型如图5所示, 超疏水表面的微小液滴的形状可视为球冠, 并假设合并前后超疏水表面上的液滴表观接触角不发生变化。

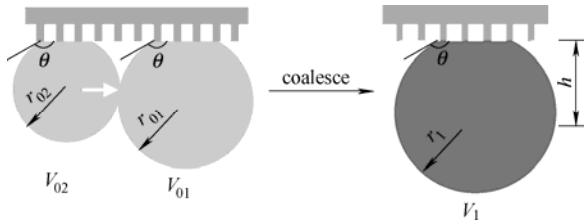


图5 超疏水表面液滴合并的示意图

Fig.5 Schematic diagram of two-droplet coalescence

对于一个在表观接触角为 θ 的超疏水表面上的液滴, 其表面能可表示为 $E_{\text{surf}} = \gamma_{\text{lv}}A_{\text{lv}} + (\gamma_{\text{sl}} - \gamma_{\text{sv}})A_{\text{sl}} = 3\gamma_{\text{lv}}V_0/r$ 。因此, 两液滴合并前后释放的表面能为

$$\Delta E_{\text{surf}} = 3\gamma_{\text{lv}} \left(\frac{V_1}{r_1} - \frac{V_{01}}{r_{01}} - \frac{V_{02}}{r_{02}} \right) \quad (3)$$

式中, r_{01} 、 r_{02} 、 V_{01} 、 V_{02} 分别为合并前液滴的半径和体积; r_1 和 V_1 分别为合并后液滴的半径和体积 ($V_1 = V_{01} + V_{02}$)。

超疏水表面上的液滴在合并后, 其质心位置发生了下移, 释放了重力势能。液滴的质心位置由表观接触角和液滴半径决定, 可表示为 $h = r(3 + \cos\theta)(1 - \cos\theta)/4(2 + \cos\theta)$ 。因此, 液滴合并后释放的重力势能为

$$\Delta E_g = -\rho_l g (V_1 h_1 - V_{01} h_{01} - V_{02} h_{02}) \quad (4)$$

液滴固液表面的黏附功可表示为^[18]

$$\Delta E_{\text{ad}} = A_{\text{cont}} \gamma_{\text{lv}} (1 + \cos\theta_{\text{rec}}) \quad (5)$$

其中合并前两液滴的固液接触面积为 $A_{\text{cont}} = \pi(r_{01}^2 + r_{02}^2) \sin^2\theta$ 。

合并过程中, 液滴发生剧烈形变, 其黏性耗散可用近似方程估算得到^[19]

$$\Delta E_{\text{vis}} = 36\pi\mu(r_{01}^{3/2} + r_{02}^{3/2})\sqrt{\gamma_{\text{lv}}/\rho_l} \quad (6)$$

合并前液滴尺寸、液滴半径之比和表观接触角对超疏水表面合并诱导的液滴脱落的影响可进一步用式(7)~式(12)表示。

$$\frac{\Delta E_g}{\Delta E_{\text{surf}}} = Bo f_1(\eta) g_1(\theta) \quad (7)$$

$$\frac{\Delta E_{\text{ad}}}{\Delta E_{\text{surf}}} = -(1 + \cos\theta_{\text{rec}}) f_2(\eta) g_2(\theta) \quad (8)$$

$$\frac{\Delta E_{\text{vis}}}{\Delta E_{\text{surf}}} = -36Ca f_3(\eta) g_3(\theta) \quad (9)$$

其中

$$f_1(\eta) = \frac{(1 + \eta^3)^{4/3} - 1 - \eta^4}{1 + \eta^2 - (1 + \eta^3)^{2/3}}, g_1(\theta) = \frac{(3 + \cos\theta)(1 - \cos\theta)}{12(2 + \cos\theta)} \quad (10)$$

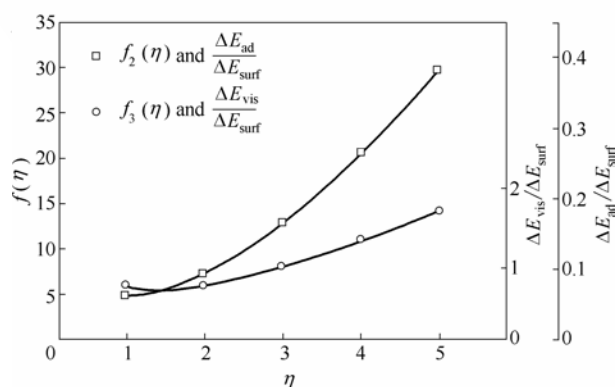
$$f_2(\eta) = \frac{1 + \eta^2}{1 + \eta^2 - (1 + \eta^3)^{2/3}}, g_2(\theta) = \frac{\sin^2\theta}{(2 + \cos\theta)(1 - \cos\theta)^2} \quad (11)$$

$$f_3(\eta) = \frac{1 + (1 + \eta^3)^{1/2}}{1 + \eta^2 - (1 + \eta^3)^{2/3}}, g_3(\theta) = \frac{1}{(2 + \cos\theta)(1 - \cos\theta)} \quad (12)$$

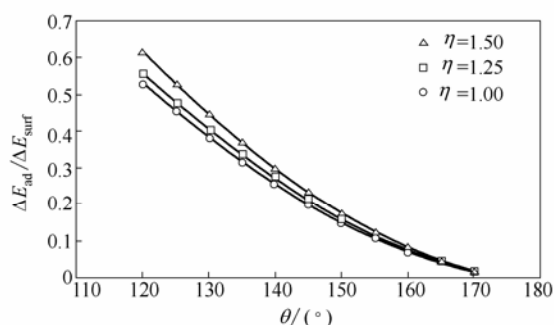
其中, Bond 数(Bo)表征表面张力与体积力的比值 $Bo = \rho_l g r_{01}^2 / \gamma_{\text{lv}}$, 毛细数(Ca)表征黏性力与表面张力的比值 $Ca = \mu / \sqrt{\rho_l \gamma_{\text{lv}} r_{01}}$ 。

实验中, 合并诱导的脱落液滴的半径为 100~300 μm , 对应的 Bo 和 Ca 均不足 0.01。当合并前液滴半径之比小于 5.0, 且表面接触角在 $120^\circ \sim 170^\circ$ 时, $f_1(\eta) = 1.3 \sim 6.6$, $g_1(\theta) = 0.63 \sim 0.99$ 。因此, 根据式(7), 液滴合并后释放的重力势能相比于释放的表面能, 在合并诱导的液滴脱落过程中可忽略。

图6给出了合并前液滴半径之比(η)和表面接触角(θ)对液滴合并脱落过程黏附功($\Delta E_{\text{ad}} / \Delta E_{\text{surf}}$)和黏性耗散($\Delta E_{\text{vis}} / \Delta E_{\text{surf}}$)的影响。如图6(a)所示, 随着合并前液滴半径之比的增大, 合并过程中的黏附功和黏性耗散相对于释放出的表面能均变得更为显著, 导致合并后液滴脱落的概率降低。当合并前液滴半径之比为 1.0~2.0 时, $\Delta E_{\text{vis}} / \Delta E_{\text{surf}}$ 几乎保持不变。而当合并前液滴的半径之比超过 3.0 时, 液滴合并后释放的表面能无法克服其黏性耗散, 使得合并后液滴黏附在超疏水表面上。冷凝实验中超疏水表面上合并脱落的液滴半径之比近似为 1.0~1.5, 理论分析与实验结果相吻合。如图6(b)所示, 随着表面的表观接触角的增大, 液滴与壁面的接触面积迅速减小, 导致黏附功与释放的表面能之比迅速减小。



(a) radius ratio of two pre-merging droplets with $\theta=161.6^\circ$, $\theta_{\text{rec}}=120.4^\circ$, and $r_{01}=0.3 \text{ mm}$



(b) apparent contact angle with $\theta_{\text{rec}}=120.4^\circ$, and $r_{01}=0.3 \text{ mm}$

图 6 合并脱落过程中阻力的影响因素分析

Fig.6 Influence factors on $\Delta E_{\text{ad}}/\Delta E_{\text{surf}}$ and $\Delta E_{\text{vis}}/\Delta E_{\text{surf}}$

此外,黏附功也随表面后退角的增大而减小。因此,较高的表观接触角和后退角是超疏水表面合并诱导液滴脱落的重要原因。

2.2 重力诱导的液滴脱落

2.2.1 重力诱导的液滴脱落现象分析 超疏水表面冷凝实验结果表明,超疏水表面上存在半径为 $700\sim 1000 \mu\text{m}$ 的冷凝液滴在重力作用下脱离壁面。本节重点分析水平表面上重力诱导下脱落液滴的尺寸。利用 CCD 对常规铝合金样品(H1~H4)表面上的冷凝全过程进行记录分析。在温度为 30°C ,相对湿度为 50% 的恒温恒湿舱内对表面温度为 6.8°C 的铝合金样品表面进行 24 h 的连续冷凝实验,结果显示,冷凝实验约 10 h 后,冷凝液滴初次从样品表面脱落,随后尺寸为毫米级的液滴在重力作用下持续脱落。

图 7 反映了水平表面上重力诱导脱落的液滴脱落尺寸的不确定性。在铝合金样品 H1 和 H2 上进行连续 24 h 的冷凝实验,结果表明脱落液滴的半径(液滴在水平表面上投影圆的半径)随机分布在 $2.5\sim 5.5 \text{ mm}$ 的区间内。

2.2.2 重力诱导的液滴脱落尺寸的理论分析 分析

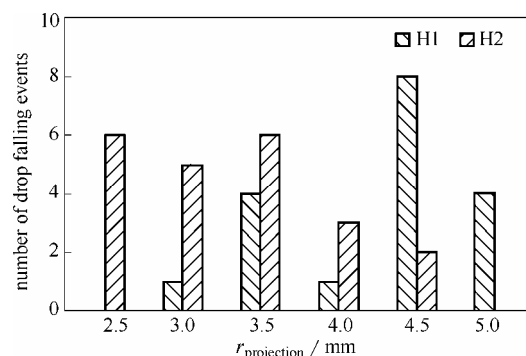


图 7 重力诱导脱落液滴的尺寸的不确定性

Fig.7 Uncertainty of size of critical falling droplets induced by gravity

重力作用下液滴临界脱落的尺寸,需先得到液滴的形态。水平表面上悬垂液滴的形态是表面张力、重力和压力平衡的结果,可用 Young-Laplace 方程描述。如图 8(a)所示,液滴的轮廓线可表示成弧长的常微分方程组

$$\begin{aligned} \frac{dx}{ds} &= \cos \varphi \\ \frac{dz}{ds} &= \sin \varphi \\ \frac{d\varphi}{ds} &= \frac{2}{b} + \frac{(\rho_l - \rho_v)g}{\gamma_{lv}} z - \frac{\sin \varphi}{x} \\ \frac{dV}{ds} &= \pi x^2 \sin \varphi \\ x(0) &= z(0) = \varphi(0) = V(0) = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

式中, b 表示悬垂液滴底部(O 点)的曲率半径, φ 为液滴轮廓线切线的倾角,当在三相接触线处即为表观接触角(θ),在液滴底部有 $(\sin \varphi/x)_{s=0}=1/b$ 。对式(13)积分可得悬垂液滴的形态,结合 Fuchikami 等^[20-21]提出的水平表面上重力作用下液滴临界脱落的判据,可得到如图 8(b)所示的表观接触角对液滴脱落半径和体积的影响。从模拟结果可知,重力作用下,液滴脱落半径和体积均随表观接触角的增大而减小。

在整个冷凝过程中,同一表面上的表观接触角并不是定值,而是在由其后退角和前进角确定的区间内变动。接触角的波动性导致了重力诱导脱落液滴的尺寸的不确定性。因此,用表面后退角作为微分方程组式(13)的边界条件模拟可得到临界脱落液滴半径的上限;而用表面前进角作为微分方程组式(13)的边界条件模拟可得到脱落液滴半径的下限。

图 9 给出了在两种过冷度下 (8.5°C 和 11.5°C),超疏水表面(SH1)和常规铝合金表面(H1~H4)在 24 h 连续冷凝实验中脱落液滴半径分布的四分位图。过冷度(SCD)表示空气露点温度和样品表面温度之

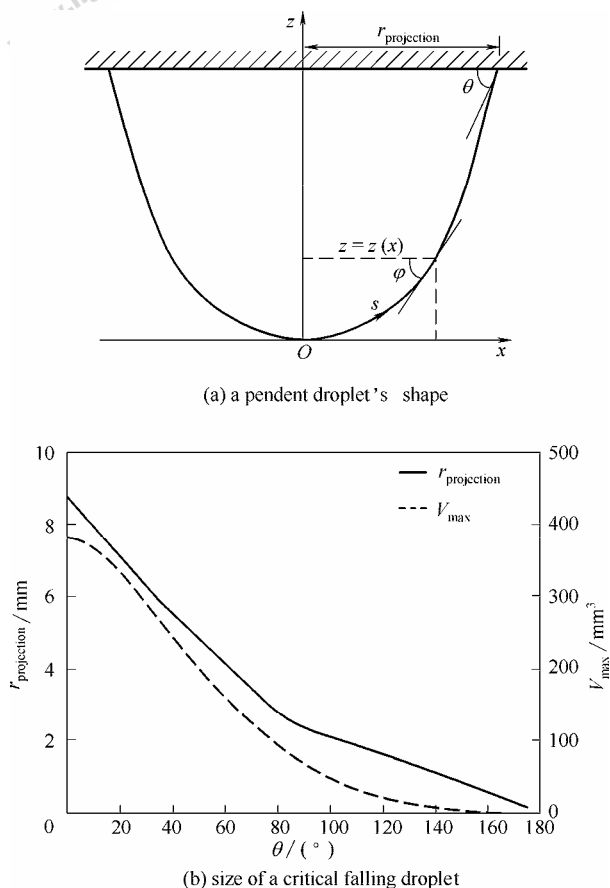


图8 接触角对重力诱导脱落液滴的尺寸的影响
Fig.8 Size of a critical gravity induced falling droplet as function of apparent contact angle

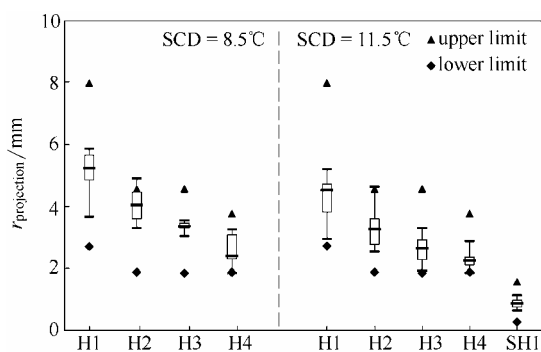


图9 超疏水和常规表面上重力诱导脱落液滴的尺寸分布
Fig.9 Distribution of projection radii of critical falling droplets induced by gravity

差。从实验结果可以发现, 常规表面上重力诱导脱落的液滴半径分布在 2.0~6.0 mm 这一相对较宽的范围内。由超疏水表面和常规铝合金表面冷凝实验的结果显示, 在不同的过冷度下, 重力诱导脱落的液滴半径均分布在由表面后退角和前进角确定的上、下限内, 与理论分析吻合良好。

3 结 论

本文通过实验和理论研究了辐射吊顶表面冷凝液滴脱落的尺寸。在恒温恒湿的环境舱内, 对超疏水纯铜样品和 4 种经过不同表面特性处理的铝合金样品进行冷凝实验, 采用 CCD 进行图像采集, 测量了表面脱落的液滴尺寸。进一步, 对合并诱导和重力诱导的液滴脱落的机理进行了理论分析。结果如下。

(1) 超疏水表面的冷凝过程中, 微小液滴的合并可诱导液滴脱离壁面, 且脱落液滴的半径在 300 μm 以下。但超疏水表面上仍然存在半径为 700~1000 μm 的液滴在重力作用下脱离壁面。

(2) 通过对超疏水表面微小液滴的合并过程从能量守恒角度进行理论分析, 当气液界面减小释放的表面能克服黏附功和黏性耗散时, 合并可诱发微小液滴脱离超疏水表面。而当合并前液滴半径之比增大时, 液滴合并脱落的阻力, 黏附功和黏性耗散相比于合并后释放的表面能均变得显著, 从而导致液滴合并脱落的概率减小。实验中观察到超疏水表面合并脱落的液滴合并前半径之比近似为 1.0~1.5, 表明理论分析与实验结果吻合。

(3) 常规铝合金表面的冷凝过程中, 重力作用下液滴脱落半径具有随机性, 分布在 2.0~6.0 mm 的范围内。不过, 重力脱落的液滴尺寸可由表面后退角和前进角所确定的上、下限估计。

(4) 超疏水表面合并诱导脱落的液滴相比于重力诱导脱落的液滴, 极大地减小了脱落液滴的尺寸, 显著降低了超疏水处理后的辐射吊顶的结露风险。

符 号 说 明

A_{lv}, A_{sl} ——分别为气液和固液接触面积, m^2

Bo ——Bond 数

b ——悬垂液滴底部曲率半径, m

Ca ——毛细数

E_g ——重力势能, J

E_k ——动能, J

E_{surf} ——表面能, J

ΔE_{ad} ——黏附功, J

ΔE_{vis} ——黏性耗散, J

g ——重力加速度, $\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$

h ——液滴质心位置, m

r ——液滴半径, m

V ——液滴体积, m^3

$\gamma_{lv}, \gamma_{sl}, \gamma_{sv}$ ——分别为气液、固液和固气界面张力, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$

$\theta, \theta_{\text{adv}}, \theta_{\text{rec}}$ ——分别为表面的表观接触角、前进角和后退角, rad

ρ_l, ρ_a ——分别为水和空气的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

μ ——水的动力黏度, $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$

η ——合并前两液滴的半径之比

References

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2011[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 2-6.
Building Energy Research Center of Tsinghua University. 2011 Annual Report on China Building Energy Efficiency[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011: 2-6.
- [2] PEREZ-LOMBARD L, ORTIZ J, POUT C. A review on buildings energy consumption information[J]. Energy Build., 2008, **40**(3): 394-398.
- [3] MEMON R A, CHIRARATTANANON S, VANGTOOK P. Thermal comfort assessment and application of radiant cooling: a case study[J]. Building and Environment, 2008, **43**(7): 1185-1196.
- [4] SUI X, ZHANG X. Effects of radiant terminal and air supply terminal devices on energy consumption of cooling load sharing rate in residential buildings[J]. Energy Build., 2012, **49**: 499-508.
- [5] CHIANG W H, WANG C Y, HUANG J S. Evaluation of cooling ceiling and mechanical ventilation systems on thermal comfort using CFD study in an office for subtropical region[J]. Building and Environment, 2012, **48**: 113-127.
- [6] TIAN Z, LOVE J A. Energy performance optimization of radiant slab cooling using building simulation and field measurements[J]. Energy Build., 2009, **41**(3): 320-330.
- [7] RHEE K N, KIM K W. A 50 year review of basic and applied research in radiant heating and cooling systems for the built environment[J]. Building and Environment, 2015, **91**: 166-190.
- [8] YIN Y L, WANG R Z, ZHAI X Q, *et al.* Experimental investigation on the heat transfer performance and water condensation phenomenon of radiant cooling panels[J]. Building and Environment, 2014, **71**: 15-23.
- [9] TANG H, LIU X H. Experimental study of dew formation on metal radiant panels[J]. Energy Build., 2014, **85**: 515-523.
- [10] DIMITRAKOPOULOS P, HIGDON J J L. On the gravitational displacement of three-dimensional fluid droplets from inclined solid surfaces[J]. J. Fluid Mech., 1999, **395**: 181-209.
- [11] BOREYKO J B, CHEN C H. Self-propelled dropwise condensate on superhydrophobic surfaces[J]. Phys. Rev. Lett., 2009, **103** (18): 184501.
- [12] FENG J, QIN Z, YAO S. Factors affecting the spontaneous motion of condensate drops on superhydrophobic copper surfaces[J]. Langmuir, 2012, **28** (14): 6067-6075.
- [13] LV C, HAO P, YAO Z, *et al.* Condensation and jumping relay of droplets on lotus leaf[J]. Appl. Phys. Lett., 2013, **103** (2): 021601.
- [14] 王四芳, 兰忠, 彭本利, 等. 超疏水表面液滴合并诱导弹跳现象分析[J]. 化工学报, 2012, **63**(S1): 17-22.
WANG S F, LAN Z, PENG B L, *et al.* Characteristics of droplet coalescence and self-propelling on superhydrophobic surface[J]. CIESC Journal, 2012, **63** (S1): 17-22.
- [15] 王四芳, 兰忠, 王爱丽, 等. 超疏水表面蒸汽及含不凝气蒸汽滴状冷凝传热实验分析[J]. 化工学报, 2010, **61**(3): 607-611.
WANG S F, LAN Z, WANG A L, *et al.* Dropwise condensation of steam and steam-air mixture on super-hydrophobic surfaces[J]. CIESC Journal, 2010, **61** (3): 607-611.
- [16] RYKACZEWSKI K, PAXSON A T, ANAND S, *et al.* Multimode multidrop serial coalescence effects during condensation on hierarchical superhydrophobic surfaces[J]. Langmuir, 2013, **29** (3): 881-891.
- [17] CHEN X, KONG L, DONG D, *et al.* Fabrication of functionalized copper compound hierarchical structure with bionic superhydrophobic properties[J]. J. Phys. Chem. C, 2009, **113** (14): 5396-5401.
- [18] GAO L, MCCARTHY T J. Wetting 101°F [J]. Langmuir, 2009, **25**(24): 14105-14115.
- [19] WANG F C, YANG F, ZHAO Y P. Size effect on the coalescence-induced self-propelled droplet[J]. Appl. Phys. Lett., 2011, **98** (5): 053112.
- [20] FUCHIKAMI N, ISHIOKA S, KIYONO K. Simulation of a dripping faucet[J]. J. Phys. Soc. Japan, 1999, **68** (4): 1185-1196.
- [21] PITTS E. The stability of pendent liquid drops(2): Axial symmetry[J]. J. Fluid Mech., 1974, **63** (3): 487-508.