

研究论文

梯度表面能材料表面上滴状凝结换热

廖 强, 顾扬彪, 朱 恂, 王 宏
(重庆大学工程热物理研究所, 重庆 400044)

摘要: 采用气相沉积 (CVD) 的方法, 以十二烷基三氯硅烷和辛基三氯硅烷为扩散工质, 制备了梯度表面能材料表面。对空气中水滴在水平梯度表面能材料表面上的运动现象和表面倾角为 0° 、 30° 、 60° 和 90° 情况下, 梯度表面能材料表面上的水蒸气滴状凝结换热进行了可视化实验, 研究了凝结液滴的长大、聚并、运动和脱落现象。结果表明: 直径大于 1 mm 的凝结液滴峰值运动速度达到 $110\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 远大于空气中液滴的运动速度。通过图像分析, 分别讨论了壁面过冷度、凝结表面倾角和表面能梯度对换热和液滴运动的影响。结果表明: 随着壁面过冷度的增加, 凝结表面传热系数先增加后减小; 当凝结表面倾角大时, 由于重力作用加大, 凝结表面传热系数也高; 当表面能梯度较大时, 运动液滴尺寸更小, 速度更快, 凝结表面传热系数更高。

关键词: 梯度表面能材料表面; 滴状凝结; 可视化

中图分类号: X 511

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2007) 03-0567-08

Dropwise condensation heat transfer on surface with gradient surface energy

LIAO Qiang, GU Yangbiao, ZHU Xun, WANG Hong

(Institute of Engineering Thermophysics, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: By using the chemical vapor deposition (CVD) technology, two testing surfaces with gradient surface energy were fabricated on a base of silicon wafer with dodecyltrichlorosilane and octyltrichlorosilane respectively. Using a high-speed video imaging system, the movement of water drop on the horizontal surface with gradient surface energy was visualized and measured under ambient condition. The heat transfer experiments were conducted on dropwise condensation of steam on the surfaces with gradient surface energy. During experiments, the condensing surface was placed at inclination angles of 0° , 30° , 60° and 90° , respectively. The growth, coalescence, motion, and abscission of condensed droplets were visualized by the high-speed video imaging system. The observed results showed that the condensed droplets larger than about 1 mm in diameter could move at a peak speed of $110\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ from hydrophobic side to hydrophilic side on the horizontal condensing surface with gradient surface energy. The velocity of condensed droplet was far larger than that of the droplet on the surface with gradient surface energy in ambient atmosphere. The effects of heat transfer temperature difference, inclination angle of condensing surface, and surface energy gradient on the condensation heat transfer were respectively discussed in virtue of the photographic results. The experimental results showed that with an increase of heat transfer temperature difference, heat transfer coefficient increased to a maximum value and then

2006-02-28 收到初稿, 2006-06-20 收到修改稿。

联系人及第一作者: 廖强 (1965—), 男, 教授。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50276072)。

Received date: 2006-02-28.

Corresponding author: Prof. LIAO Qiang. E-mail: lqzx@cq. edu. cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50276072).

decreased afterwards. As the inclination angle of condensing surface increased, the condensation heat transfer coefficient increased due to the action of gravity on the departure and motion of droplet. A larger surface energy gradient led to a smaller departure diameter and a faster motion of droplet, which resulted in a larger condensation heat transfer coefficient.

Key words: surface with gradient surface energy; dropwise condensation; visualization

引 言

发现于 20 世纪 30 年代^[1]的珠状凝结换热的表面传热系数要比同条件下的膜状凝结大几倍甚至一个数量级；国内外许多研究者在其传热机理、实施方法及工程应用等方面进行了大量的研究工作^[2]。目前，绝大多数滴状凝结强化换热研究及应用都是采用均质光管或竖直壁面作为实现滴状凝结的冷凝表面，依靠重力作用排除凝结液滴以维持滴状凝结；而对于水平表面等无法应用重力作用方式排除凝结液滴的情况，一般为膜状凝结换热方式。

Chaudhury 和 Whitesides^[3]改进了 Elwing 等^[4]的梯度表面能材料表面制备方法，制作出表面能沿某一方向变化的梯度表面能材料表面，液滴能在该表面上克服重力向上运动，其运动速度是经典 Marangoni 流动^[5]速度的数百倍。Zhao 等^[6]对此也作了相关研究，认为蒸汽在这种表面上凝结时，从表面能低的区域到表面能高的区域，凝结方式从珠状凝结到膜状凝结变化。Ichimura 等^[7]报道了另一种通过光照实现表面能梯度的实验，这种表面覆盖有光致异构化作用的单层薄膜，当对表面不同部位照射不同强度的某种光时，则会形成湿润能力的梯度；这样可以通过光强的变化控制液滴的运动。最近，Daniel 等^[8]用扩散控制的硅烷化的方法在铜块表面制备了放射状的梯度表面能材料表面，并在此表面进行了滴状凝结换热实验。因此，梯度表面能材料表面可应用于换热设备，达到强化换热目的，比如微流动设备的设计和制造^[9]。至今，针对梯度表面能材料表面的滴状凝结实验研究非常少，仅见 Daniel 等^[8]的实验报道，而且也只对由烷基三氯硅烷制成的一种水平布置的圆形径向表面能梯度材料表面的滴状凝结换热性能进行了测量，其表面上凝结液滴的微观行为和强化换热机理有待进一步探讨。

本文采用扩散控制的硅烷化方法制备了矩形梯度表面能材料实验表面，首次可视化实验研究了凝

结液滴在水平和倾斜梯度表面能材料表面上的活动规律，分别讨论了壁面过冷度、凝结表面倾角和表面能梯度对滴状凝结换热的影响。

1 实验系统

1.1 梯度表面能冷凝表面的制备

本文采用气相沉积 (CVD)^[10]的方法，分别采用了十二烷基三氯硅烷和辛基三氯硅烷为扩散工质，在厚为 0.5 mm 的矩形硅抛光片上沉积，制取了表面能一维梯度分布的矩形材料表面^[11]。表面的接触角分布由微小液滴躺滴法^[12]测量前进角分布。图 1 和图 2 分别给出了以十二烷基三氯硅烷和辛基三氯硅烷为扩散工质时制成的梯度表面能材料表面的接触角分布，表明用辛基三氯硅烷沉积获得的表面能梯度明显小于用十二烷基三氯硅烷获得的表面能梯度。将沉积后的硅抛光片切割成长 30 mm、宽为 7 mm 的矩形作为实验表面，其中，宽度方向为接触角变化方向。

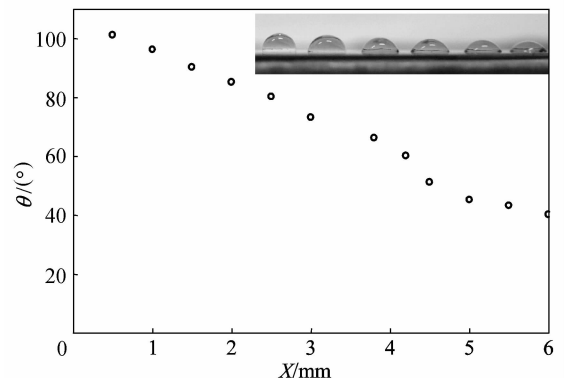


图 1 十二烷基三氯硅烷制备的实验表面上水滴的静态前进角分布

Fig. 1 Static advancing contact angle profile of water drop on tested surface prepared with dodecyltrichlorosilane

1.2 实验装置和实验方法

实验装置系统如图 3 所示，主要由 3 个部分组成：蒸汽回路、冷却水回路和数据采集系统。水蒸

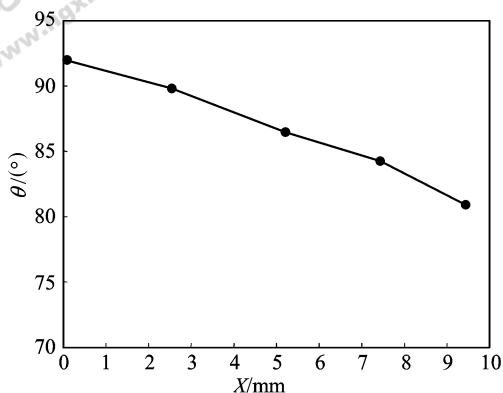


图2 辛基三氯硅烷制备的实验表面上水滴的静态前进角分布

Fig. 2 Static advancing contact angle profile of water drop on tested surface prepared with octrytrichlorosilane

气由 500 W 的蒸发器产生，通过过热器使进入冷凝器的蒸汽保持微过热的状态；过热器功率通过变压器调节。冷凝量和冷却水流量通过称重法测量。冷却水进出口温度由安装在冷凝器冷却通道进出口的丝径为 0.2 mm 的铜-康铜热电偶测量，蒸汽温度由安装在冷凝器进口的热电偶测量，冷凝器内蒸汽侧和蒸发器内压力由精度为 0.4 的精密压力表测量。

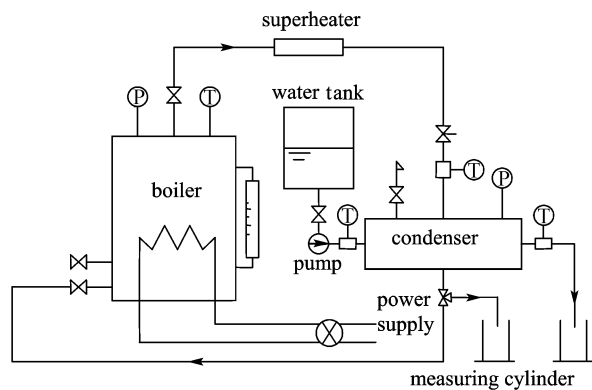


图3 实验系统简图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental system

冷凝器主要由内径 280 mm、厚 5 mm 的不锈钢圆筒和作为热交换元件的铜块组成，圆筒上部盖有 15 mm 厚的玻璃板，以便高速摄影仪拍摄冷凝器内部冷凝表面凝结液滴的运动情况；铜块上部分横截面尺寸为 30 mm×7 mm，下部分横截面尺寸为 30 mm×50 mm。梯度表面能材料表面由导热硅胶粘接到铜块上部表面，而铜块底部通过线切割加工有微小槽道（宽 0.8 mm、深 1.5 mm），通入冷却水散热；图 4 为热电偶在铜块中安装位置的示意

图，铜块上部分钻孔 2 排，每排 2 个 0.8 mm 的小孔，深 10 mm；铜块下部分等距离钻孔 4 个，直径也是 0.8 mm；所有小孔内布置丝径为 0.2 mm 的铜-康铜热电偶。铜块和金属圆筒外均包有保温材料隔热。

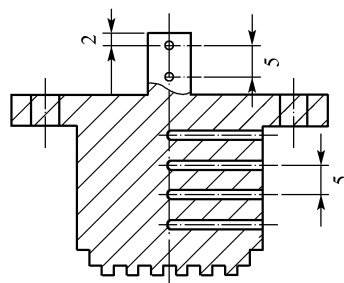


图4 实验铜块简图

Fig. 4 Schematic diagram of copper block

所有温度数据由 HP 数采系统获取，凝结液滴在梯度表面能材料表面的运动情况由 Redlake MotionXtra HG-100K 型高速摄影仪（2000fps）拍摄记录，运用图像软件分析获得液滴运动速度。

通过式（1）计算得到凝结表面的热流量

$$Q = \dot{m}_l c_{pl} (T_{l,out} - T_{l,in}) \quad (1)$$

式中 \dot{m}_l 为冷却水的质量流量； c_{pl} 、 $T_{l,out}$ 、 $T_{l,in}$ 分别为冷却水的比热容，冷凝器冷却段出口、进口的温度。

凝结表面传热系数由冷却段计算获得的热流量和过冷度计算得到，为此，需要确定凝结表面的温度。其方法是：通过测量铜块内部的温度分布，计算得到铜块表面的温度；而凝结表面的温度可以由铜块表面温度、硅抛光片的热阻、硅抛光片与铜块上表面间接触热阻通过导热理论计算获得。接触热阻的确定方法为：在硅抛光片上安装两对热电偶，并使硅抛光片均匀受热，通过这两对热电偶和铜块内温度分布的测量值来计算接触热阻。最后，凝结表面传热系数可由式（2）计算

$$h_c = Q/[A_w(T_s - T_w)] \quad (2)$$

式中 T_s 和 T_w 分别为冷凝器内蒸汽温度和硅抛光片表面温度。

2 实验结果和分析

本文先进行了空气中水滴在梯度表面能材料表面（十二烷基三氯硅烷制备）上的运动实验；图 5 为 1 μ l 水滴在水平梯度表面能材料表面上的运动速度变化情况，实验表明水滴在不均衡的表面张力作用下能够从憎水侧往亲水侧快速移动。从图 5 可

以看出，液滴在梯度表面能材料表面的运动可分为 2 个阶段：第一是加速运动区（从 A 点到 B 点），液滴运动速度从静止迅速地增加，直至达到最大速度；第二是减速运动区（B 点到 C 点），液滴速度逐渐减小直至静止。在整个运动过程中，液滴的峰值速度能够达到 $18 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，运动距离达到了约 2 mm。在减速运动区，发现液滴运动呈现交替变化的蠕动趋势，这与液滴在运动过程中呈现出扩展与收缩相互交替的现象相一致，进而使液滴运动速度出现振荡的变化。

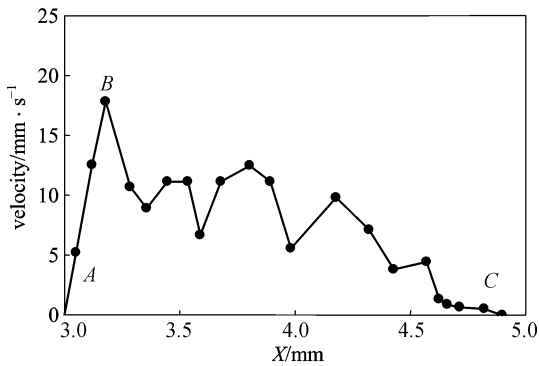


图 5 1 μl 水滴在十二烷基三氯硅烷制备的水平实验表面上的运动速度

Fig. 5 Velocity of water drop (1 μl) moving on horizontal surface prepared with dodecyltrichlorosilane

图 6 为水蒸气中某个凝结液滴（标记为“1”）在相同一块水平梯度表面能材料表面上长大、聚并和脱离的连续过程照片。从图中可以观察到液滴由于凝结和与周边液滴聚并而连续长大。当液滴聚并时，总是促成聚并后的液滴往亲水侧移动。对于液滴比较小的时候，聚并作用成了液滴运动的惟一原因；因此，液滴在无聚并时几乎保持静止；而由于液滴的持续聚并，呈现间歇性迁移。当液滴长大到某一尺寸，液滴在不平衡的表面张力作用下就会向亲水侧连续运动。这时的液滴直径可定义为梯度表面能材料表面上脱离液滴直径，与均质竖直壁上滴状凝结的液滴脱离直径相对应。而此后液滴的聚并对液滴运动的影响也不容忽视。在图 6 所示的时间内，凝结液滴平均运动速度达到 $14 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，而峰值速度达到 $110 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ；明显大于空气中相同尺寸的水滴在同一块梯度表面能材料表面上的运动速度。聚并作用和滞留在凝结表面的薄凝结液膜的润滑作用是引起凝结液滴快速运动的主要原因；此外，由于凝结表面的薄膜的存在，从而引起凝

结表面接触角分布发生变化，这可能也是造成凝结液滴运动速度远大于空气中水滴运动速度的原因之一。

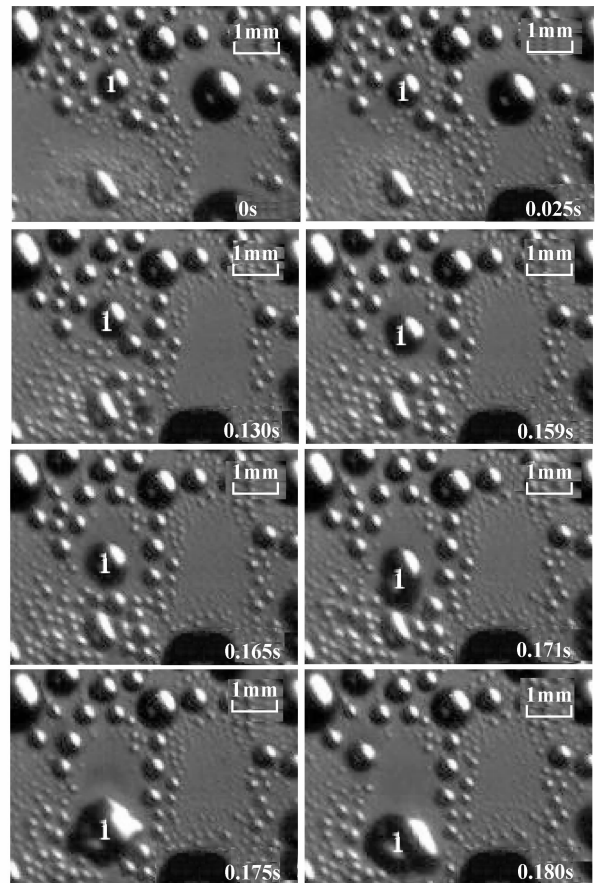


图 6 壁面过冷度为 9.3 K 时凝结液滴在十二烷基三氯硅烷制备的水平实验表面上的运动图像

Fig. 6 Images of condensate droplets moving on horizontal surface prepared with dodecyltrichlorosilane ($T_s - T_w = 9.3 \text{ K}$)

图 7 为水蒸气在水平梯度表面能材料表面（辛烷基三氯硅烷制备）上的滴状凝结传热系数与过冷度的关系图。从图中可以看出，在过冷度较小时，表面传热系数随过冷度增大而增大；当过冷度达到某一定值时，表面传热系数达到峰值；这与 Daniel 等^[8]在水平圆形径向梯度表面能材料表面上的滴状凝结换热实验结果不同，他们获得的表面传热系数只是单调地随过冷度增大而减小。下面将通过凝结液滴运动特性的图像分析，来探讨其表面传热系数变化的机理。

图 8 为实验表面上一个大凝结液滴脱离后所在的一块裸露表面上，凝结液滴成核和长大的 3 组图

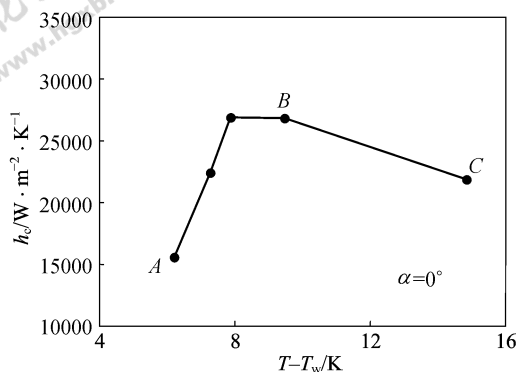
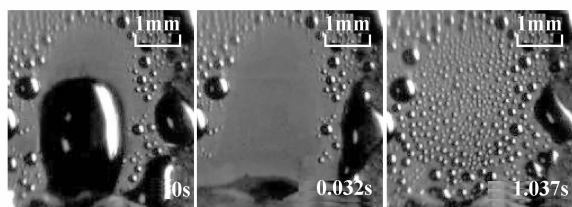


图7 辛基三氯硅烷制备的水平实验表面上传热系数随壁面过冷度的变化

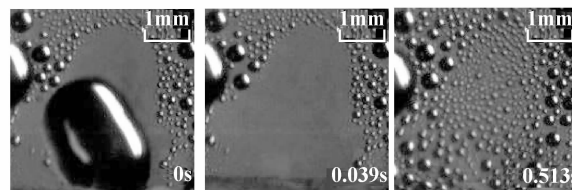
Fig. 7 Variation of heat transfer coefficient versus temperature difference for horizontal surface prepared with octrytrichlorosilane

片, 分别与图7中的A、B、C点 ($T_s - T_w = 6.2$ 、 9.5 、 14.8 K) 相对应。从图8中可以看出: 随着过冷度增加, 液滴成核和长大更迅速。图9为3种过冷度下同一凝结区域的图片, 每组照片上白色箭头所示的液滴为同一个不断长大的凝结液滴。从图9中可以看出: 过冷度为 6.2 K [图9(a)] 时的液滴长大、脱离明显慢于过冷度为 9.5 K [图9(b)] 时的情况。在图9所示的时间间隔内, 图9(a)上所示液滴的平均速度为 $1.1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 而图9(b)上所示液滴的平均速度为 $3.7 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; 这是因为过冷度越高, 液滴聚并加剧, 导致液滴运动加快。而高过冷度下液滴长大-脱离的过程更迅速, 液滴运动速度变快, 扫除效应更加明显。这就是图7中在过冷度不高时(A、B两点)凝结表面传热系数随过冷度增加而增加的主要原因。

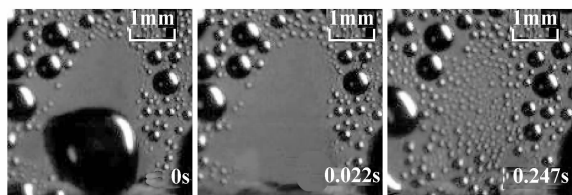
图7也表明当过冷度高于B点时, 表面传热系数反而会减小。从图8(c)可看出当过冷度达到C点(14.8 K)时, 凝结成核和生长速率明显加快, 而从图9(c)也可以看出液滴长大-脱离过程和液滴运动明显变快, 液滴运动速度达到 $4.6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。然而, 从图8(c)和图9(c)中可以看出此时凝结表面上较大的静止凝结液滴数目也在增加, 这是因为随着凝结成核率增大以及液滴长大和聚并的加快, 凝结表面小于脱离液滴尺寸的较大液滴数量将增大。较大液滴的凝结换热热阻大, 因此随着单位面积内较大凝结液滴数量增多, 表面传热系数下降。这是表面传热系数随过冷度增加而减小的主要原因。



(a) $T_s - T_w = 6.2$ K, $h_c = 15574.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$



(b) $T_s - T_w = 9.5$ K, $h_c = 26832.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$



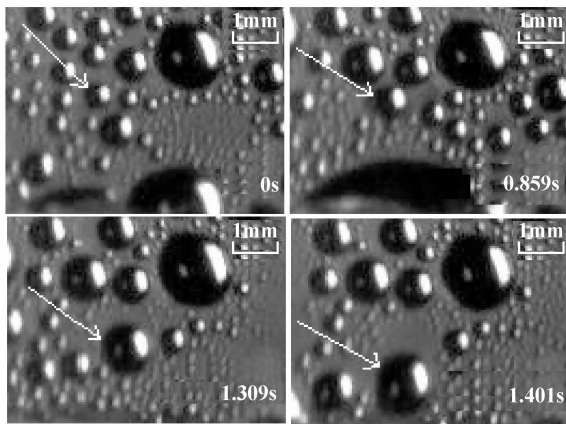
(c) $T_s - T_w = 14.8$ K, $h_c = 21875.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

图8 不同壁面过冷度下辛基三氯硅烷制备的水平实验表面上液滴生长图像

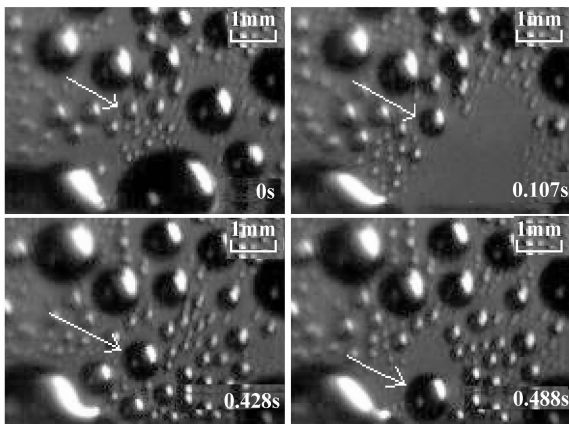
Fig. 8 Images of condensation droplets generation on horizontal surface prepared with octrytrichlorosilane at various temperature differences

图10和图11分别为不同倾角布置的十二烷基三氯硅烷和辛基三氯硅烷制备的梯度表面能材料表面凝结换热性能的实验结果。其表面传热系数与图7所示的表面传热系数随过冷度变化的趋势相类似。从图10和图11中可以看出: 相同过冷度下, 随着凝结表面的倾角增大, 表面传热系数也增大。图12为十二烷基三氯硅烷制备的梯度表面能材料表面上水蒸气滴状凝结的图片, 图12(a)和图12(b)分别对应于过冷度 9.5 K和 9.1 K, 倾角为 0° 和 90° 。从图中可看出: 倾角为 90° 时的液滴脱离直径小于 0° 时的情况, 其液滴运动速度大; 可测得倾角为 90° 时的液滴运动速度达 $5.8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 而 0° 时的液滴运动速度为 $3.7 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这是因为重力作用的增大使得脱离直径减小和液滴运动速度增加, 从而当凝结表面倾角变大时, 表面传热系数也增大。图10和图11也说明随着凝结表面倾角的增大, 过冷度对表面传热系数的影响也增大。

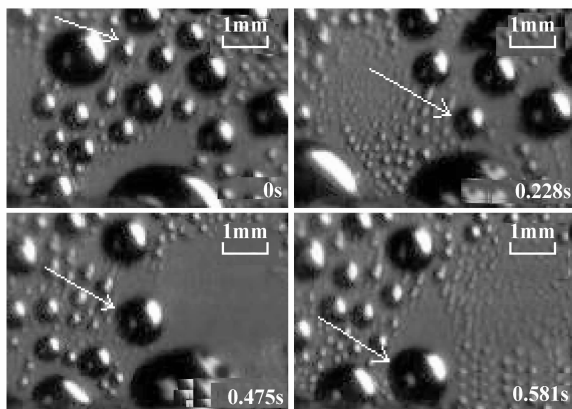
比较图10和图11所示的两块不同硅烷制备的



(a) $T_s - T_w = 6.2 \text{ K}$, $h_c = 15574.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$



(b) $T_s - T_w = 9.5 \text{ K}$, $h_c = 26832.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$



(c) $T_s - T_w = 14.8 \text{ K}$, $h_c = 21875.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

图 9 不同壁面过冷度下辛基三氯硅烷制备的水平实验表面上液滴聚合和运动图像

Fig. 9 Images of condensation drops coalescence and motion on horizontal surface prepared with octrytrichlorosilane at various temperature differences

梯度表面能材料表面上凝结换热性能, 可以看出: 在同一过冷度和凝结表面倾角的情况下, 十二烷基三氯硅烷制备的梯度表面能材料表面的表面传热系

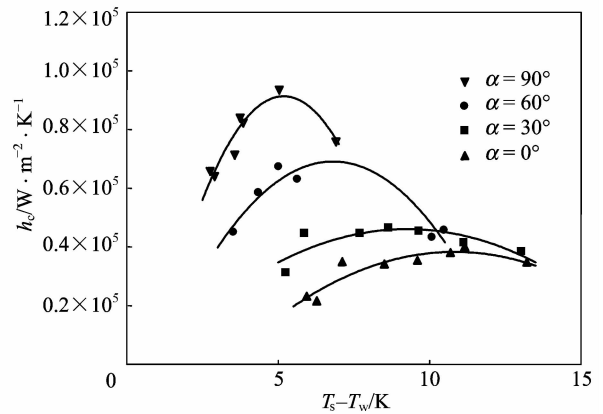


图 10 十二烷基三氯硅烷制备的实验表面倾角对凝结核换热的影

响 Fig. 10 Effect of inclination angle of surface prepared with dodecyltrichlorosilane on heat transfer coefficient

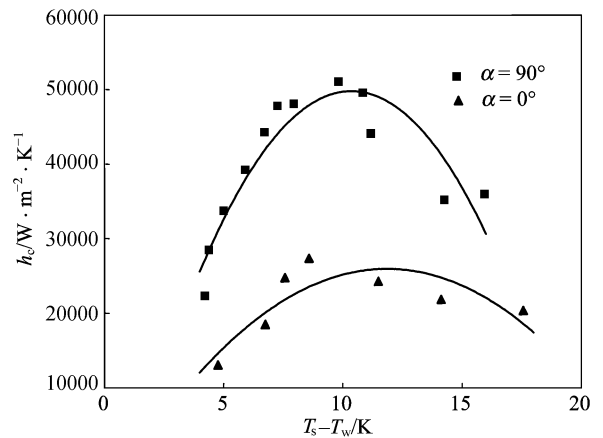
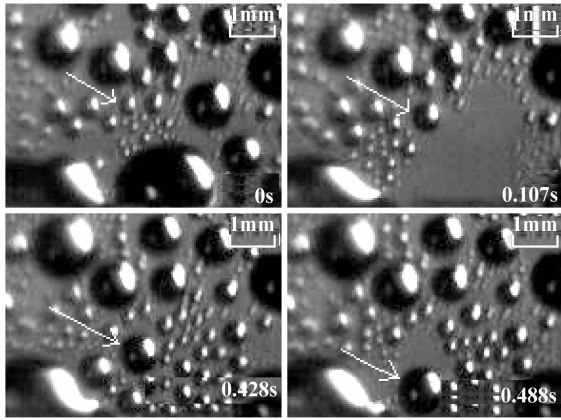


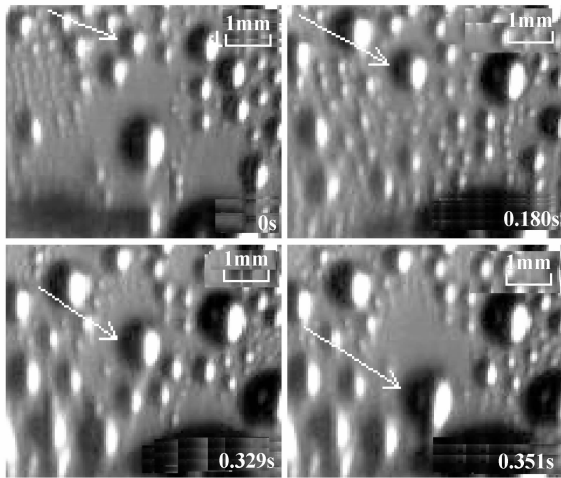
图 11 倾角为 0° 和 90° 时辛基三氯硅烷制备的实验表面上的凝结传热系数

Fig. 11 Heat transfer coefficient of surface prepared with octrytrichlorosilane

数高于辛基三氯硅烷制备的梯度表面能材料表面。这是由于十二烷基三氯硅烷制备的梯度表面能材料表面具有更大的表面能梯度, 使得凝结液滴脱离直径减小、液滴运动速度更快, 这一现象可以从图 6 和图 9 (b) 中看出。在图 6 所示的十二烷基三氯硅烷制备的梯度表面能材料表面上, 凝结液滴的平均运动速度达到 $14 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 而在图 9 (b) 所示的辛基三氯硅烷制备的梯度表面能材料表面上仅为 $3.7 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。随着表面能梯度的增加, 凝结液滴三相接触线上的表面张力的非平衡性增大, 从而导致液滴脱离直径减小和液滴运动速度加快, 表面传热系数随之增大。



(a) $T_s - T_w = 9.5 \text{ K}$, $h_c = 26832.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, $\alpha = 0^\circ$



(b) $T_s - T_w = 9.1 \text{ K}$, $h_c = 37828.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, $\alpha = 90^\circ$

图12 倾角为 0° 和 90° 时辛基三氯硅烷制备的实验表面上液滴的聚合并运动的图像

Fig. 12 Images of condensation drops coalescence and motion on surface prepared with octrytrichlorosilane

3 结论

本文进行了不同倾角下两块不同梯度表面能材料表面上的水蒸气的滴状凝结换热可视化实验，得出主要结论如下。

(1) 水蒸气滴状凝结时，凝结液滴在梯度表面能材料表面上的运动速度远大于空气中液滴在梯度表面能材料表面上的运动速度。

(2) 当过冷度较小时，表面传热系数随过冷度增大而增大，到达一个最大值后，当过冷度继续增大时，表面传热系数会随过冷度增大而减小。

(3) 凝结表面倾角大时，表面传热系数也大，这主要是由于重力的影响。

(4) 凝结表面倾角越大，过冷度对表面传热系数的影响越大。

(5) 表面能梯度越大，液滴脱离直径越小，液滴运动速度越快，表面传热系数也越大。

符号说明

A_w ——换热面积， m^2

c_{pl} ——冷却水比热容， $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

h_c ——凝结传热系数， $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

\dot{m}_l ——冷却水质量流量， $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Q ——凝结换热量， W

$T_{l,in}$, $T_{l,out}$ ——分别为冷却水进口、出口温度， K

T_s ——冷凝器内饱和和蒸汽温度， K

T_w ——硅抛光片表面温度， K

u ——液滴在梯度表面能材料表面上的运动速度， $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$

X ——沿表面能变化方向与槽水侧边缘的距离， mm

α ——凝结表面与水平面的倾角， $(^\circ)$

θ ——水滴在梯度表面能材料表面上的静态前进角， $(^\circ)$

References

- [1] Schmfedt E, Schurig W, Sellschopp W. Versuche über die kondensation in film-und, tropfenform. *Tech. Mech. Thermodynamik*, 1930, **1**: 53-63
- [2] Rose J W. Dropwise condensation theory and experiment; a review. *J. Power and Energy*, 2002, **216**: 115-128
- [3] Chaudhury M K, Whitesides G M. How to make water run uphill. *Science*, 1992, **256**: 1539-1541
- [4] Elwing H, Welin A, Askendal A P. A wettability gradient method for studies of macromolecular interactions at the liquid solid interface. *J. Colloid Interface Sci.*, 1987, **16** (2): 119-203
- [5] Chaudhury M K. Rate-dependent fracture at adhesive interface. *J. Phys. Chem. B*, 1999, **103**: 6562
- [6] Zhao Hong, Daniel Beysens. From droplet growth to film growth on a heterogeneous surface; condensation associated with a wettability gradient. *Langmuir*, 1995, **11**: 627-634
- [7] Ichimura K, Oh Sang-Keun, Nakagawa M. Light-driven motion of liquids on a photoreponsive surface. *Science*, 2000, **288** (5471): 1624-1626
- [8] Daniel S, Chaudhury M K, Chen J C. Fast drop movement resulting from the phase change on a gradient surface. *Science*, 2001, **291**: 633-636

[9] Brzoska J B, Brochard-Wyart F, Rondelez F. Motions of droplets on hydrophobic moldel surfaces induced by thermal gradients. *Langmuir*, 1993, **9**: 2220-2224

[10] Huang Zhongtao (黄仲涛), Zeng Zhaohuai (曾昭槐), Zhong Bangke (钟邦克), Wang Lefu (王乐夫). The Technique and Application of the Inorganic Thin Film (无机膜技术及其应用). Beijing: China Petrochemical Publishing Company, 1999: 58-64

[11] Wang Hong (王宏), Liao Qiang (廖强), Zhu Xun (朱恂). Experimental study for the movement of liquid droplets on the surface with gradient surface energy. *Journal of Chongqing University: Natural Science* (重庆大学学报: 自然科学版), 2005, **28** (8): 35-38

[12] Fox H W, Zisman W A. The spreading of liquids on low energy surfaces (I): Polytet rafluoroet hylene. *Journal of Colloid Science*, 1950, **5**: 514-531

《化工进展》2007 年第 2 期目次

进展与述评

SO ₄ ²⁻ /M _x O _y 型固体超强酸催化剂的研究进展	宋 华, 杨东明, 李 锋, 刘全夫, 徐 骞
介孔分子筛 SBA-15 的改性研究进展	张 微, 徐恒泳, 毕亚东, 李文钊
水溶性介质中 CO ₂ 电催化还原研究进展	魏文英, 尹燕华, 韩金玉
超临界 CO ₂ 流体工艺用于制备多孔分离膜的研究进展	杨 峰, 胡小玲, 赵亚梅, 管 萍
膜蒸馏技术最新研究现状及进展	王许云, 张 林, 陈欢林
利用“三废”制备氧化铁的研究进展	邹海平, 邱祖民, 邱俊明
乳化液膜技术研究进展	张海燕, 张安贵
太阳能热泵供暖技术综述	王振辉, 崔海亭, 郭彦书, 彭培英
离子交换色谱法分离硼同位素的研究进展	白 鹏, 郭宏杰, 李晓峰, 吴 军
过氧乙酸的合成及工业应用研究进展	张腾云, 钟 理
白腐菌降解木质素酶系的特征及其应用	江 凌, 吴海珍, 韦朝海, 梁世中
等离子体技术在化学毒剂洗消中的研究进展	李战国, 胡 真, 孙小亮, 李 颖, 饶 刚
大规模蓄电储能全钒液流电池研究进展	朱顺泉, 孙妮荣, 汪 钱, 尹海涛, 王保国
柴油氧化脱硫技术研究进展	刘淑芝, 孙兰兰, 张晓丽, 王宝辉, 崔宝臣
二氧化碳作为温和氧化剂的研究进展	孙果宋, 黄科林, 杨 波, 周纯海, 陈文纳, 宁 红, 李若华

研究开发

滴流床反应器催化湿式氧化法处理碱渣废水	王 华, 李光明, 张 蓓
陶瓷膜处理乳化悬浮液过程中的膜清洗工艺	谷 磊, 刘有智, 申红艳, 张红宇
壳聚糖吸附剂的制备及性能	卢 霞, 应国清, 易 喻
不同方法合成掺杂 ZnO 粉体制备 ZnO 压敏电阻	刘桂香, 徐光亮, 罗庆平
液相法合成高容量 LiFePO ₄ /C 复合正极材料	韩恩山, 魏子海, 刘 媛, 康红欣
氯代苯乙烯-二乙烯基苯强酸性阳离子交换树脂的合成与应用	孙富安, 郭 一, 张益峰, 何明阳, 陈 群
固体超强酸 Cl ⁻ /Fe ₂ O ₃ 的制备及催化液化生物质	乐治平, 张 宏, 洪立智
小分子有机化合物对聚氯乙烯结晶度的影响	刘亚群

节能技术专栏

化学机械系统的微小化与节能	涂善东, 周帼彦, 于新海
---------------------	---------------

过程系统工程专栏

富氧再生技术在催化裂化装置上的应用	王明哲, 华 炜
单杂质间歇过程用水网络优化	程华农, 孙 杰, 毛文锋, 岳金彩, 郑世清
多变量预估控制在聚丙烯装置上的应用	李 桦, 龚华初, 应伟波
热集成复杂精馏系统综合的研究	董丰莲, 袁希钢, 罗祎青
煤焦油的分离模拟	王立成, 孙津生
质量交换网络	杨友麒
应用遗传算法求解多相化学反应体系的相稳定性及平衡组成	安维中, 董凤蕾, 刘晶晶, 胡仰栋, 伍联营