

文章编号: 1000-8055(2006)06-1001-07

加热板上蒸发液滴动态特性的实验

王晓东¹, 陆 规², 彭晓峰², 张欣欣¹, 王补宣²

(1. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083;

2. 清华大学 相变与界面传递现象实验室, 北京 100084)

摘 要: 采用高速摄像技术可视化观察 5 μl 小液滴在铜、铝和不锈钢表面上的蒸发与核化过程, 板温 50 ~ 112 $^{\circ}\text{C}$ 。实验测量了液滴高度、湿润半径和接触角随时间的动态演化。板温低于 100 $^{\circ}\text{C}$ 时蒸发处于自由界面蒸发模态, 过程可分为两阶段, 第一阶段液滴高度和接触角连续降低, 湿润半径仅比初始值略有降低; 第二阶段后退角恒定, 湿润半径迅速降低至零。板温高于 100 $^{\circ}\text{C}$ 时处于核态沸腾模态, 液滴内部核化及气泡动力学过程强烈依赖壁面过热度。自由界面蒸发模态和核态沸腾模态, 壁面平均热流与壁温均呈线性关系, 斜率的不同反映两种模态换热机制的差别。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 液滴; 蒸发; 核化; 湿润; 接触角

中图分类号: TK124

文献标识码: A

Experimental investigation of dynamic evaporation characteristics of liquid droplet on heated surface

WANG Xiaodong¹, LU Gui², PENG Xiaofeng²,
ZHANG Xinxin¹, WANG Buxuan²

(School of Mechanical Engineering,

Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China;

2. Lab of Phase-change and Interfacial Transport Phenomena,

Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Using high-speed video imaging system, the evaporation and nucleation of 5ml water droplet on copper, aluminum and stainless steel plates with temperature from 50 $^{\circ}\text{C}$ up to 112 $^{\circ}\text{C}$ were observed. The time-dependent height, wetting radius and contact angle of the droplet were measured. In film evaporation regime, the evaporation process could be divided into two stages. In the first stage, the height and contact angle of the droplet continuously decrease, but the wetting radius of the droplet hardly alters. In the second stage, the contact angle remains constant as the preceding one, and the wetting radius rapidly approaches zero. In nucleate boiling regime, the nucleation and dynamics of the bubbles inside the droplet are strongly dependent on the surface superheat. It was found that the linear relationship between the mean heat flux of the surfaces and the temperature of the heated surfaces holds true for both regimes, and their different slopes indicate their different heat transfer mechanism.

收稿日期: 2005-10-08; 修订日期: 2005-12-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50406001)

作者简介: 王晓东(1973-), 男, 广东省湛江市人, 北京科技大学机械工程学院, 博士, 主要从事湿润与相变的研究。

Key words: aerospace propulsion system; liquid droplet; evaporation; nucleation; wetting; contact angle

由于高换热系数和热流率, 喷淋冷却技术广泛应用在各种工业过程中, 诸如空间站热控制系统、核反应堆安全、灭火、涡轮机叶片冷却、热金属铸模表面冷却、低温热泵冷却等。随着微电子技术日新月异发展, MEMS 等高科技迅速崛起, 微电子元件和微机电部件产热密度持续升高, 散热负荷远超出传统单相流体受迫对流冷却能力, 发展新型高效冷却技术的迫切需求极大推动了喷淋和其它相关冷却技术的研究。作为这些冷却技术的基本单元, 研究单个液滴在热表面上的蒸发行为和传热机理对实际应用十分必要。

随热表面温度不同, 液滴蒸发分为自由界面蒸发、核态沸腾、过渡和球化态等模态^[1]。Bonarcina 等^[2]和 Toda^[3]研究表明, 自由界面蒸发模态导热是液体内部唯一的传热模式。Ruiz 和 Black^[4]的模拟表明, 存在内部流动时液滴内部温度分布与纯导热模型有显著差异。蒸发过程中液滴几何形状的演化对理论建模和数值模拟非常重要, 目前多采用常湿润半径^[5]和常接触角^[6]两种模型。核态沸腾模态的研究以实验为主, 许多研究者关注于液滴蒸发的沸腾曲线^[7-11]。Qiao 和 Chandra^[12]考察了添加表面活性剂对液滴蒸发的影响。Cui 等^[14]研究溶解在液滴中的气体和盐对液滴蒸发特性的影响。液滴内部气泡尺寸、分布、生长、合并及演化对蒸发与传热速率有重要影响, 对液滴核态沸腾模态蒸发机理认识有重要意义, 但以往研究较少关注。

本文采用可视化技术观测水滴在铜、铝和不锈钢表面上的动态蒸发过程, 集中观测自由界面蒸发模态下液滴界面形状的动态演化和核态沸腾模态下表面过热度对液滴内部的核化与气泡的分布、生长的影响。通过测量液滴寿命、高度、湿润半径和接触角的动态演化, 计算蒸发速率和传热速率。

1 实验与数据整理

1.1 实验系统

实验装置主要包括三部分(图 1), 实验本体、温度采集系统和图像采集系统。本体有光源、滤光片、水平平台、加热装置、金属板和玻璃罩。根据板温要求不同, 分别采用恒温水浴(50~75℃)和加热片(80~112℃)加热。铜、铝和不锈钢被制成 50 mm×50 mm×5 mm 的方形板作为加热表面, 蒸发液体为去离子水。加热板四周用绝热材料包裹, 上方放置高 100mm 的可视玻璃罩, 以降低横向空气自然对流对液滴蒸发的影响。温度采集系统包括热电偶和 HP 数据采集卡, 液滴放置在板中心, 热电偶测温点距液滴中心约 3 mm。

图像采集系统包括两个 WAT-505EX CCD 摄像头、Matrox Pulsar 高速图像采集卡, 最大采集速率为 500 帧/s。CCD 摄像头分别放置在液滴上方和侧面, 距液滴大约 40 mm, 可同时采集图像, 图像放大倍数根据实验要求可在 20~50 倍之间调节, 通过视频数据线传输到图像采集卡, 被

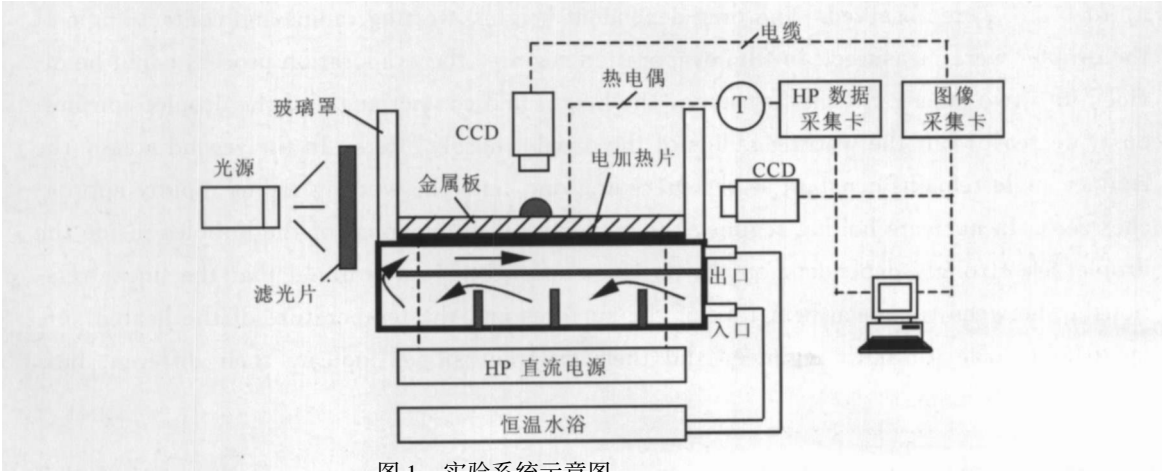


图 1 实验系统示意图
Fig.1 Experimental apparatus

计算机自编软件实时显示和采集。

1.2 实验步骤与测量

实验在一个大气压, 室温 25℃ 条件下进行, 板温分别从 50℃ 变化到 112℃。通过调节恒温水浴或加热片功率控制板温, 待板温达到预定温度并稳定后, 用微量注射器在板上轻轻滴下一个体积为 5 μl 的液滴, 注射器针尖距平板 20 mm, 相应的 Webb 数约为 5~10。Webb 数低于 30 时, 液滴可在几毫秒内迅速铺展达到平衡状态, 可看作球冠形。同时图像采集系统开始工作。不同板温实验至少重复 5 次, 系统自动记录蒸发时间和板温。

1.3 数据整理

液滴碰撞到热表面后, 固液界面温度在几毫秒内降低到接触温度, 并在蒸发过程中保持不变^[15]。

$$T_{\text{contact}} = \frac{T_s \sqrt{\rho_{cs} k_s} + T_l \sqrt{\rho_{cl} k_l}}{\sqrt{\rho_{cs} k_s} + \sqrt{\rho_{cl} k_l}} \quad (1)$$

式中 T_s 和 T_l 分别为固体和液滴的初始温度, ρ 、 ρ 、 c_s 、 c_l 、 k_s 和 k_l 分别为固液的密度、比热和导热系数。液滴初始温度为环境温度 25℃, 计算可得, 固液接触温度与热表面初始温度偏差很小, 本实验范围内, 偏差最大不超过 5℃。图 2 为蒸发过程中热电偶采集到的铜板温度随时间的变化, 开始板温维持在 78℃, 液滴滴到表面上后, 板温大约降低 2~3℃, 然后维持在 75.5℃ 左右。实际的接触温度约为 75℃。可见热电偶测量的温度与固液接触温度相差很小。本文采用液滴被滴到表面上直至完全蒸发整个过程中热电偶温度的平均值作为固液接触温度。

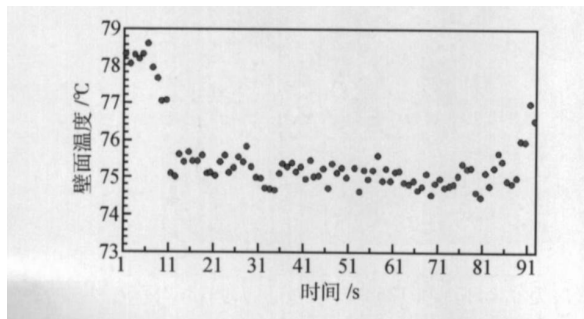


图2 液滴蒸发过程中壁面温度的变化

Fig. 2 time dependent temperature of wall during evaporation process

放大采集到的液滴图像, 采用自编的外形分析-拟合求导法测量接触角^[16]。实验中用不同放大倍数下多次测量取平均值以减小误差, 最终偏

可差控制在为 $\pm 0.5^\circ$ 。根据球冠体积:

$$V = \frac{1}{3} \pi R^3 (1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta) \quad (2)$$

式中 V 为球冠体积, θ 为接触角, R 为液滴湿润半径, h 为液滴高度。计算可得湿润半径和液滴高度。湿润区单位面积的平均热流是衡量液滴蒸发的重要参数, 假设从固体壁面传给液滴的热量全部用来蒸发液滴, 则在整个蒸发过程的平均热流满足:

$$\dot{q} = \frac{\rho_l V L}{\tau A} \quad (3)$$

式中 L 为蒸发潜热, τ 为液滴寿命, A 为湿润区面积。湿润区单位面积的瞬时平均热流满足:

$$\dot{q} = \frac{L \rho \Delta V}{A \Delta \tau} \quad (4)$$

式中 ΔV 为 $\Delta \tau$ 时间间隔内液滴体积的变化, 本文 $\Delta \tau$ 取为 3 s。

2 液滴形态演化

2.1 演变模态

热表面温度低于饱和温度时, 液滴内部流动可忽略, 热量从热表面通过热传导从液滴底部传到自由界面蒸发转化为蒸发潜热, 通常称为膜蒸发或自由界面蒸发模态(图 3)。高于饱和温度时, 液滴内部出现核化, 产生气泡, 液滴处于为核态沸腾模态(图 4~图 6)。壁面过热度为 2℃ 时(图 4), 微小气泡均匀分布在液滴底部, 直径约为 0.05~0.1 mm。过热度为 5℃ 时(图 5), 气泡直径增大, 约为 0.04~0.2 mm, 接触线附近, 液滴薄, 热流率高, 可观测到气泡相互合并, 中心区气泡则相对稳定。过热度 12℃ 时时, 液滴进入旺盛的核态沸腾区(图 6), 液滴内部瞬间出现几个较大气泡, 长大膨胀最终合并成一个大气泡。大气泡膨胀挤压周围液体, 使液滴高度和湿润半径均有增加, 接触线向外扩张需同时克服黏性力和表面力, 故高度比湿润半径增加更显著。大气泡增加了传热热阻, 蒸发速率迅速降低, 液滴内气泡之外固壁上(气泡和液滴界面间的区域), 不断有小气泡产生, 最终被大气泡合并。随液滴高度降低, 大气泡表面和液滴自由界面逐渐接近, 顶部液层变薄, 高度开始降低, 导致大气泡与液滴之间的接触角增大, 当接触角达到 100° 时(通过图 6 可估值大致 100°), 大气泡向内收缩, 大气泡与液滴表面之间缝隙增大, 缝隙中产生的气泡变多变大, 形成包围大气泡的周边气泡环, 与大气泡竞争, 进一步减小

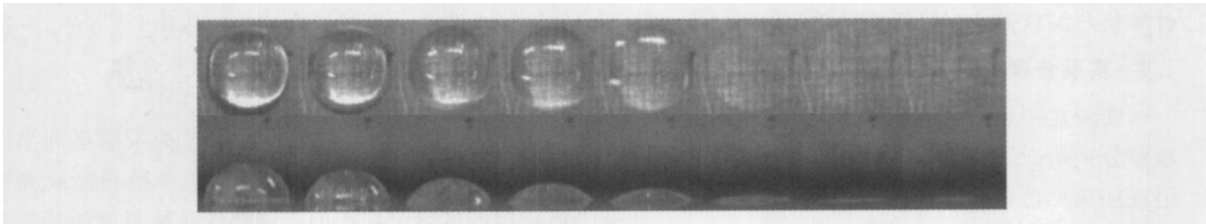


图 3 75℃铜板表面液滴蒸发,从左至右蒸发时间依次为 1s, 11s, 31s, 51s, 61s, 71s, 76s, 78s, 80s
Fig.3 Dynamical evaporation behavior of deionized water on copper surface with temperature of 75℃,
the time is from left to right in turn to be 1s, 11s, 31s, 51s, 61s, 71s, 76s, 78s, 80s

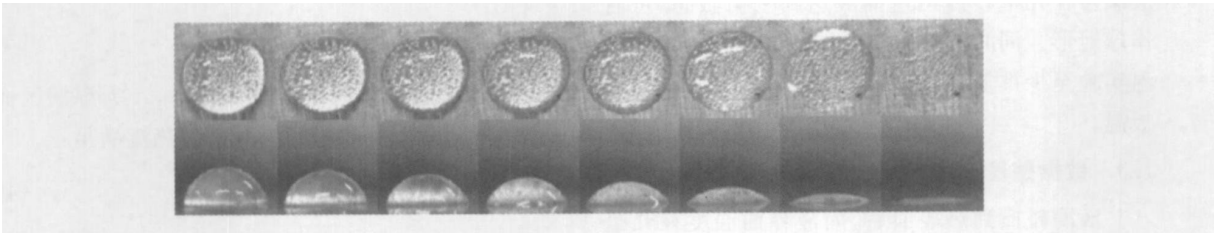


图 4 102℃铜板表面液滴蒸发,从左至右蒸发时间依次为 1s, 6s, 11s, 16s, 21s, 26s, 31s, 34s
Fig.4 Dynamical evaporation behavior of deionized water on copper surface with temperature of 102℃,
the time is from left to right in turn to be 1s, 6s, 11s, 16s, 21s, 26s, 31s, 34s

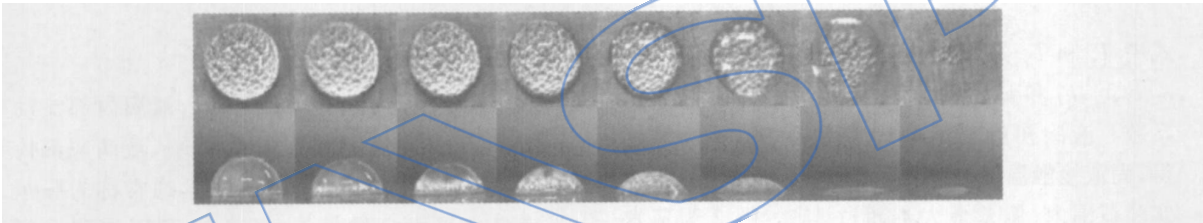


图 5 105℃铜板表面液滴蒸发,从左至右蒸发时间依次为 1s, 5s, 9s, 13s, 17s, 21s, 25s, 26s
Fig.5 Dynamical evaporation behavior of deionized water on copper surface with temperature of 105℃,
the time is from left to right in turn to be 1s, 5s, 9s, 13s, 17s, 21s, 25s, 26s

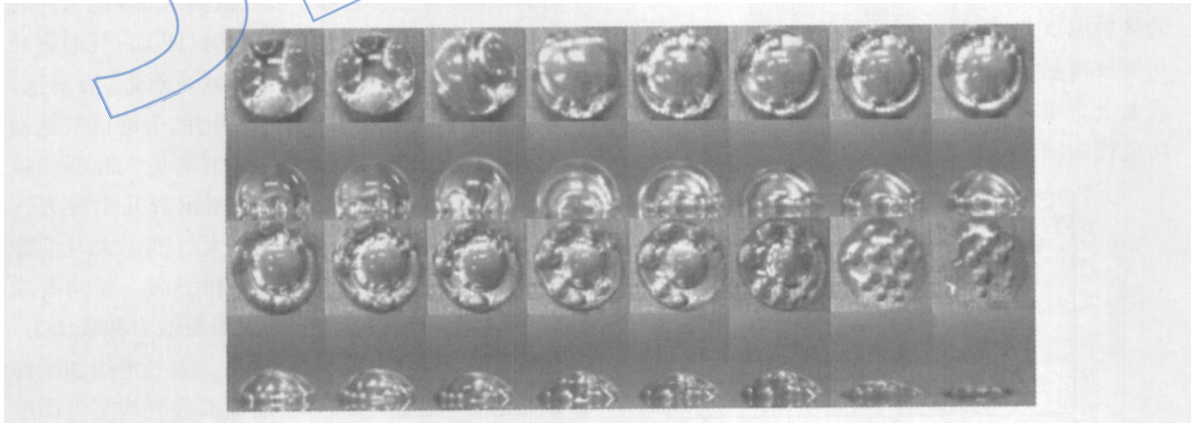


图 6 112℃铜板表面液滴蒸发,从左至右蒸发时间依次为 0.0415s, 0.125s, 0.664s, 1.620s, 3.237s, 5.727s, 7.470s, 9.130s, 10.583s, 11.537s, 11.869s, 12.284s, 12.575s, 13.280s, 14.816s, 15.563s
Fig.6 Dynamical evaporation behavior of deionized water on copper surface with temperature of 112℃,
the time is from left to right in turn to be 0.0415s, 0.125s, 0.664s, 1.620s, 3.237s, 5.727s, 7.470s, 9.130s, 10.583s, 11.537s, 11.869s, 12.284s, 12.575s, 13.280s, 14.816s, 15.563s

大气泡尺寸,最终,大气泡破裂成多个小气泡,其大小与缝隙中气泡相当。气泡破裂使液固接触面积增大,热流率增大,蒸发速率再次升高,液滴快速蒸干。伴随大气泡的产生和破裂,高过热度下

蒸发的特点是初期和末期, 传流率高, 中间阶段相对定, 热流率低。

2.2 尺度变化

蒸发过程中液滴几何形状的演化对理论建模和数值模拟非常重要。图 7 和 8 分别为蒸发过程中液滴高度和湿润半径的变化。液滴高度在整个蒸发过程中连续降低直至蒸干, 湿润半径在蒸发的大部分时间内缓慢减小, 各种表面温度下的最大幅度不超过初始值 10%, 蒸发后期(约 2- 3 秒), 湿润半径迅速减小为零。高过热度的核态沸腾模式, 液滴内部气泡的生长及合并非常剧烈, 液滴体积、高度和湿润面积增大发生不规则变化, 单纯从湿润半径的变化幅度看, 仍可分为前面所述两个阶段。

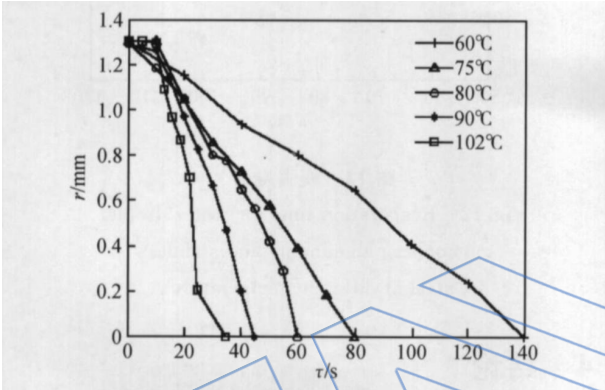


图 7 液滴高度 h 的变化
Fig. 7 Variation of height of water droplet on copper at different temperature

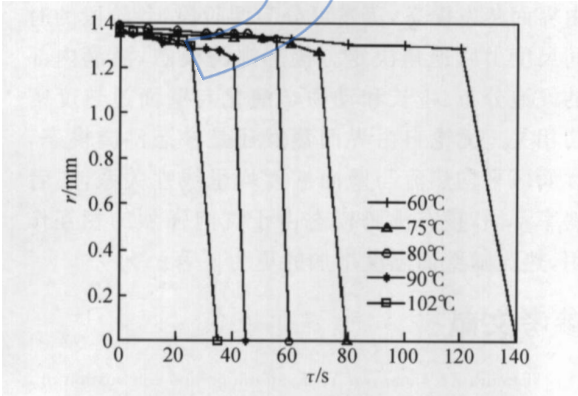


图 8 湿润半径 r 的变化
Fig. 8 Variation of wetted radius for water droplet on copper at different temperature

2.3 接触角特性

图 9 为蒸发过程中液滴接触角的变化, 本实验中液滴滴到表面上时, 韦伯数约为 5~ 10, 液滴

到达固体表面上后迅速铺展达到平衡, 接触角接近前进角。躺滴法测量接触角表明, 水在铜表面上的前进角为 $80 \pm 2^\circ$, 后退角为 $8 \pm 2^\circ$ [17, 18]。图 9 可见, 液滴在不同板温下的初始接触角均在 80° 左右, 此后随液滴蒸发, 接触角连续降低, 直至达到后退角, 对应湿润半径缓慢减小的阶段。此后液滴将维持后退角不变, 液滴湿润半径迅速降低, 直至液滴蒸干。

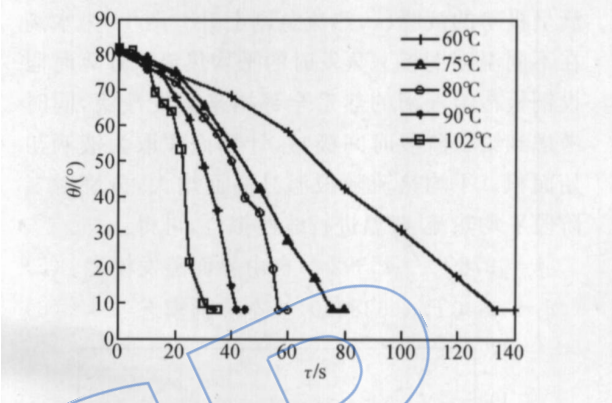


图 9 接触角的变化
Fig. 9 Variation of contact angle for water droplet on copper at different temperature

Chandra 和 Marzo 等^[19] 根据湿润半径和接触角变化特点, 把蒸发分为两阶段。第一阶段液滴保持湿润半径恒定, 接触角连续减小, 到后退接触角时进入第二阶段, 液滴保持后退接触角不变, 湿润半径减小, 直至液滴蒸干。上述结论并未考虑温度变化及自由界面蒸发对接触角的影响, 当界面上存在较强的蒸发时, 将对界面产生附加的抽吸力, 可能导致接触线的收缩。目前的实验恰恰表明, 即使在第一阶段, 液滴的湿润半径依然有小幅度降低。同时, 整个蒸发过程几乎都处于第一阶段。其原因是两个阶段的时间尺度主要由后退角决定。在前进角相同的情况下, 后退角越小, 第二阶段越短。忽略液滴内部自然对流时, 热表面向自由界面的传热是纯导热过程, 如果假设液滴自由表面温度为饱和温度, 板温恒定, 传入液滴的局部热流率与当地液滴高度成反比。液滴自由表面向空气的自然对流热损失远小于蒸发潜热, 可忽略。液滴的局部蒸发速率随当地液滴高度的降低而增大。如果后退角较小, 当进入第二阶段时, 液滴变得很薄, 特别当后退角小于 10° 时, 第二阶段, 液滴已演变为一层薄液膜, 热流率和蒸发速率远高于蒸发前期, 液膜会在很短时间内迅速蒸干。

3 传热规律

图 10 为 75℃铜板上蒸发瞬时热流,液滴刚滴到热表面时,固-液界面温度瞬时达到接触温度,液滴自由界面温度仍处于环境温度,热流高。随着传热自由界面温度逐渐升高,热流降低。约 5 s 后,热流达到稳定值,随后的过程中基本维持不变,有缓慢上升,到接近第二阶段蒸发后期,液滴呈极薄的液膜状,热流急剧上升。图 11 为水滴在不同温度铜板上蒸发时的平均热流。计算时假设铜板传给液滴的热量全部用来蒸发液滴,同时考虑到第二阶段时间极短,计算面积取为液滴初始面积。平均热流随板温升高而增大,分别对二阶段平均热流-壁温进行线性拟合,可得:

$$\dot{q} = 976T_s - 45392 \quad \text{自由界面蒸发模态} \quad (5)$$
$$\dot{q} = 6800T_s - 638890 \quad \text{核态沸腾模态} \quad (6)$$

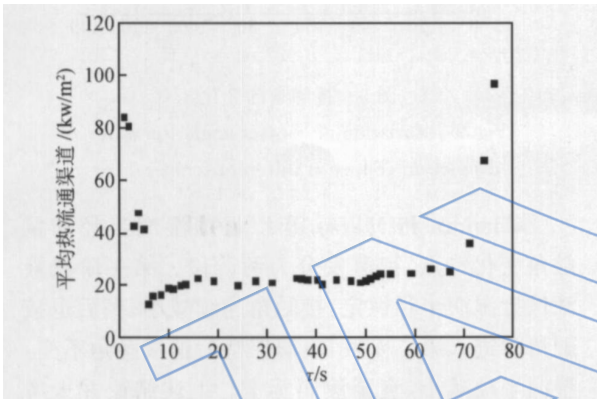


图 10 75℃铜板湿润区平均热流
Fig. 10 Variation of average heat flux for water droplet on copper at 75℃

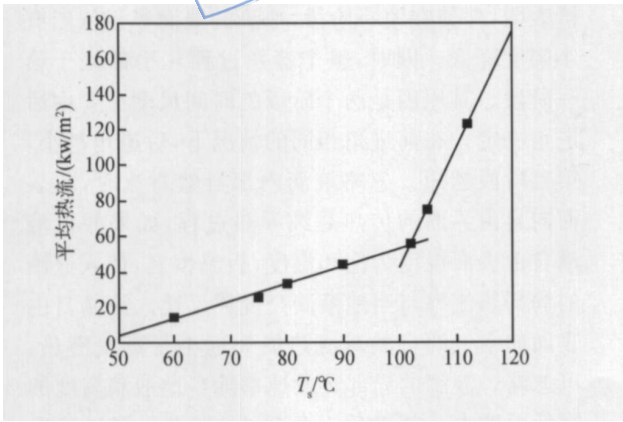


图 11 铜板上湿润区平均热流
Fig. 11 Average heat flux for water droplet on copper at different temperature

显然,平均热流都随壁温线性升高,核态沸腾模态热流上升更快,斜率更大。核态沸腾起

始点,气泡尺寸小且没有强烈相互作用,换热方式可能依然强烈依赖自由界面的蒸发,热流与温度关系和自由界面蒸发模态类似。随着壁温增加,气泡尺寸增大并伴随着合并和破裂出现,气泡核化已成为主要换热模式,热流与温度关系发生改变。图 12 水滴在铜、铝和不锈钢表面上的寿命曲线,三者均满足液滴寿命随板温增加而变短。

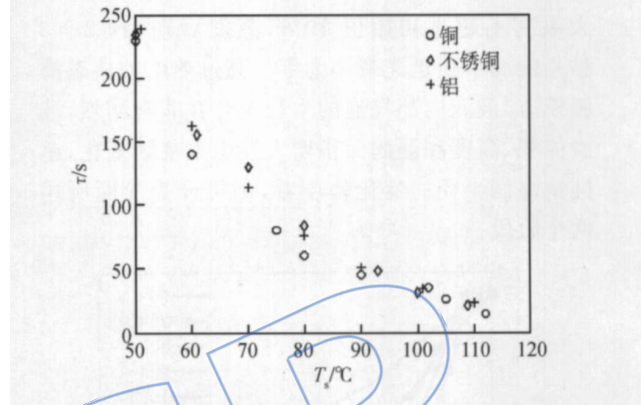


图 12 液滴寿命
Fig. 12 Evaporation time for water droplet on copper, aluminum, and stainless steel at different temperature

4 结论

可视化观测去离子水滴在铜、铝和不锈钢表面上的蒸发过程,壁面温度从 50℃到 112℃,相应蒸发分别处于自由界面蒸发和核态沸腾模态。自由界面蒸发模态,蒸发可分为两阶段,各阶段的时间尺度由后退角决定。核态沸腾模态,液滴内部的气泡分布、生长和动力学演化与壁面过热度密切相关。无论自由界面蒸发还是核态沸腾模态,湿润区平均热流与壁面温度均呈线性关系,二者斜率不同,核态沸腾模态由于气泡强烈的相互作用,热流随壁面温度增加的更为显著。

参考文献:

[1] Tamura Z, Tanasawa Y. Evaporation and combustion of a drop contacting with a hot surface [R]. Seventh International Symposium on Combustion, 1959: 509-522.
[2] Bonacina C, Del Giudice S, Comini G. Dropwise evaporation [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1979, 101: 441-446.
[3] Toda S. A study of mist cooling, first report: investigation of mist cooling [J]. Heat Transfer Japanese Researches, 1972, 1: 39-50.
[4] Ruiz O E, Black W Z. Evaporation of water droplets placed

- on a heated horizontal surface [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2002, 124: 854-863.
- [5] di Marzo M, Evans D. Dropwise evaporative cooling of high Thermal conductivity materials [J]. International Journal of Heat and Technology, 1987, 5: 126-136.
- [6] Sadhal S S, Plesset M S. Effect of solid properties and contact angle in dropwise condensation and evaporation [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1979, 101: 48-54.
- [7] Choi K J, Yao S C. Mechanisms of film boiling heat transfer of normally impacting spray [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1987, 30: 311-318.
- [8] Chen J C, Hsu K K. Heat transfer during liquid contact on superheated surfaces [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1995, 117: 693-697.
- [9] Bernardin J D, Stebbins C J, Mudawar I. Effect of surface roughness on water droplet impact history and heat transfer regimes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997, 40: 73-88.
- [10] Xiong T Y, Yuen M C. Evaporation of a liquid droplet on a hot plate [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1991, 34: 1881-1894.
- [11] Yang J, Chow L C, Pais M R. Nucleate boiling heat transfer in spray cooling [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1996, 118: 668-671.
- [12] Qiao Y M, Chandra S. Spray cooling enhancement by addition of surfactant [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1998, 120: 92-98.
- [13] Tartarini P, Lorenzini G, Randi M R. Experimental study of water droplet boiling on hot, nonporous surfaces [J]. Heat and Mass Transfer, 1999, 34: 437-447.
- [14] Cui Q, Chandra S, McCahan S. The effect of dissolving gases or solids in water droplets boiling on a hot surface [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2001, 123: 719-728.
- [15] Seki M, Kawamura H, Sanokawa K. Transient temperature profile of a hot wall due to an impinging liquid droplet [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1978, 100: 167-169.
- [16] 林志勇, 王晓东, 彭晓峰. 外形分析-拟合求导法测接触角 [J]. 工程热物理学报, 2005, 26(5): 847-849.
- Lin Zhiyong, Wang Xiaodong, Peng Xiaofeng. Contact angle measurement with shape fit differential method [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(5): 847-849.
- [17] Wang Xiaodong, Peng Xiaofeng, Wang B X. Contact angle hysteresis and hysteresis tension on rough solid surfaces [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2004, 12: 615-621.
- [18] Wang Xiaodong, Peng Xiaofeng, Lee D J. Dynamic wetting and stress singularity on the contact line [J]. Science in China Series E, 2003, 46: 407-417.
- [19] Chandra S, di Marzo M, Qiao Y M, et al. Effect of liquid solid contact angle on droplet evaporation [J]. Journal of Fire Safety, 1996, 27: 141-158.