物理学报 Acta Physica Sinica
Chinese Physical Society
Institute of Physics, CAS

液态金属软表面池沸腾传热的实验研究

曹春蕾 何孝天 马骁婧 徐进良

Enhanced pool boiling heat transfer on soft liquid metal surface

Cao Chun-Lei He Xiao-Tian Ma Xiao-Jing Xu Jin-Liang

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 70, 134703 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20202053
在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.70.20202053
当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

液态镓在石墨烯表面的润湿性及形貌特征
Wettability and morphology of liquid gallium on graphene surface
物理学报. 2018, 67(14): 149601 https://doi.org/10.7498/aps.67.20172717

冷液滴/热液池碰撞混合及温度特性
Temperature charateristics of droplet impacting on static hot pool
物理学报. 2019, 68(23): 234702 https://doi.org/10.7498/aps.68.20190809

微小水滴撞击深水液池空腔运动的数值模拟及机理研究
Numerical investigation of cavity formation mechanism for micron-waterdrop impact on deep pool
物理学报. 2018, 67(22): 224703 https://doi.org/10.7498/aps.67.20181422

非贵金属表面增强拉曼散射基底的研究进展
Recent research progress of non-noble metal based surface-enhanced Raman scattering substrates
物理学报. 2020, 69(19): 190701 https://doi.org/10.7498/aps.69.20200788

金属表面等离激元耦合理论研究进展
Research progress of coupling theory of metal surface plasmon
物理学报. 2019, 68(24): 247301 https://doi.org/10.7498/aps.68.20191369

MoS_2及其金属复合表面增强拉曼散射基底的发展及应用
Development and application of MoS_2 and its metal composite surface enhanced Raman scattering substrates
物理学报. 2019, 68(13): 134203 https://doi.org/10.7498/aps.68.20182113

液态金属软表面池沸腾传热的实验研究*

曹春蕾[1)] 何孝天[1)] 马骁婧[1)2)†] 徐进良[1)2)]

1) (华北电力大学, 低品位能源多相流与传热北京市重点实验室, 北京 102206)

2) (华北电力大学, 电站能量传递转化与系统教育部重点实验室, 北京 102206)

(2020 年 12 月 3 日收到; 2021 年 2 月 19 日收到修改稿)

池沸腾是一种高效的传热方式, 目前主要通过刚性固体表面改性强化沸腾传热. 本文以乙醇为工质, 实验研究了光滑铜表面和液态金属软表面池沸腾传热. 发现液态金属软表面可有效降低沸腾起始点 (ONB) 壁面过热度, 饱和沸腾时, ONB 壁面过热度从光滑铜表面的约 18 ℃ 降低到软表面的约 6 ℃, 沸腾传热系数最大提高了 149%. 与光滑铜表面相比, 液态金属软表面增加了汽泡核化穴数量, 减小了汽泡尺寸, 提高了汽泡脱离频率. 观察到软表面弹性毛细波和汽泡射流现象. 弹性毛细波增强了壁面热边界层热质传递. 发现汽泡脱离过程中, 汽泡尾部在液态金属薄层内形成残余核化穴, 残余核化穴快速长大, 与上升的大汽泡聚合, 形成汽泡射流现象. 弹性毛细波及汽泡射流解释了液态金属软表面强化池沸腾传热的机理.

关键词: 液态金属, 软表面, 池沸腾, 弹性毛细波

PACS: 47.55.dp, 64.70.fh, 64.60.Q–, 68.35.Rh **DOI:** 10.7498/aps.70.20202053

1 引 言

池沸腾广泛用于许多热能耗散系统的冷却, 如大功率电子设备、热交换器和核反应堆等. 池沸腾是一种伴随着汽液相变的高效能量传递方式[1], 与自然/强制对流相比, 在保持低过热度的同时可以达到较高的热流密度[2]. 目前, 很多学者提出大量强化表面结构来增强沸腾传热. 由于表面改性方法和表面结构形式不同, 采用的方法主要分为机械/微电子加工技术、表面涂层技术和化学工艺[3]. 机械/微电子加工技术是在表面构造不同的结构, 通过扩大换热面积、增加成核密度和改善毛细芯吸效果以达到强化沸腾传热的目的[4], 最初仅在表面构造简单的几何形状用于增强换热, 但随着微纳加工技术 (MEMS/MNMS) 的发展, 各种微结构如微腔[5]、微通道[6]、微柱[7] 以及微孔表面[8] 被用来改变表面形貌以提高沸腾传热性能. 除此之外, Shimada 等[9] 通过多孔干涉板使液体在受限的缝隙中进行沸腾. Xu 等[10] 以丙酮为工质将泡沫铜焊接在加热表面上来增强沸腾传热. 表面涂层是在不改变材料组成的基础上修饰和增强表面功能. 常用的表面涂层技术包括电镀[11]、烧结[12]、喷涂[13,14]、真空溅射[15]、电化学沉积[16]. Mao 等[17] 在铜表面自组装氧化石墨烯纳米颗粒制备氧化石墨烯纳米涂层, 该表面临界热流 (CHF) 提高了 78%, 最大传热系数 (HTC) 提高了 41%. Yim 等[18] 在圆柱状平面铝 (Al6061) 上涂覆亲水氧化钛 (TiO_2) 层研究表面润湿性对池沸腾传热性能的影响, 结果表明, 与普通表面相比, TiO_2 涂层表面将池沸腾性能提高了 64.1%. 化学工艺主要指氧化或湿法刻蚀等, 氧化物可以改变固体表面的润湿性, 而刻蚀可以获得所需的各种表面结构. Lee 等[19] 利用阳极氧化技术在铝合金表面制造出纳米多孔表面, 与光滑表面

* 国家自然科学基金 (批准号: 51821004) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: mxj@ncepu.edu.cn

© 2021 中国物理学会 Chinese Physical Society

相比, 纳米多孔表面的起始壁面过热度较低, 在低热流密度下可以提高沸腾传热系数. Ramaswamy 等[20] 以 FC-72 为工质使用 KOH 溶液来刻蚀硅片, 得到 200 μm 的微结构. 实验结果表明: 平均汽泡直径随着孔径的增大而增大 (对于相同的壁面过热). 在一定的孔径下, 汽泡脱离直径随壁面过热度的增加而增大.

通过以上的文献综述可以发现, 目前对于池沸腾的研究主要集中在对固体加热表面的改性和修饰, 而对于软表面上池沸腾传热的研究却未见报道, 尽管软表面上的液滴润湿[21,22]、蒸发[23]、冷凝[24,25]、结霜[26]、运动[27,28]、撞击[29,30] 等都已进行了大量的研究, 但对于汽泡与软表面上的相互作用却很少被关注. 众所周知的 Young 方程[31] 为 $\gamma_{sv}-\gamma_{sl}=\gamma_{lv}\cos\theta$ (其中 θ 为接触角, γ 为表面张力, 下标 s, v 和 l 分别代表固体, 气体和液体), 但该方程仅强调了沿水平方向的力平衡, 而忽略了竖直方向上的液气界面张力的垂直分量 $\gamma_{lv}\sin\theta$. 许多情况下, 例如固体是刚性, 这种忽略是允许的, 但若基底材料为软材料, 该垂直分量将引起基底的表面变形[32]. Weijs 等[33] 使用分子动力学模拟比较了纳米液滴和纳米汽泡对光滑、柔软表面变形的影响. Rykaczewski[34] 利用理论论证表明, 软表面可以降低沸腾起始点所需的过热量. 目前有关软表面的研究所用的材料多为橡胶、凝胶、硅酮等, 而这些材料的导热系数都较低, 约为 0.15—10 W/(m·K), 并不适合用作沸腾加热表面, 而诸如镓基、铋基合金的液态金属是一种新兴的功能材料, 具有非常独特的物理化学性质. 常温下呈液态, 具有沸点高、导电性强、热导率高、安全无毒等属性, 并具备常规高熔点金属材料所没有的低熔点特性[35]. 在各类室温液态金属中, 镓基合金最具代表性. 因此本实验以乙醇为工质, 利用镓铟锡 $Ga_{67}In_{20.5}Sn_{12.5}$ 液态金属构建低成本、低工艺复杂度的沸腾传热软界面, 进一步通过高速相机捕捉在沸腾时汽泡在液态金属软表面的生长图像, 结合汽泡动力学理论, 研究其池沸腾传热机理. 除此之外, 现有文献报导大多是采用微细加工技术强化沸腾传热, 本文采用液态金属软表面及其形成的弹性毛细波强化沸腾传热, 相比于固体微结构表面, 软表面强化传热是一个新的研究方向, 在强化传热领域具有潜在应用.

2 实验系统及过程

2.1 实验系统

实验装置如图 1(a) 所示, 整个系统由实验段、电加热系统、容器池、液体控温系统、风冷冷凝器以及数据采集系统等组成. 其中实验段的上端面由聚四氟乙烯固定, 两者用硫化硅橡胶密封, 铜加热块用保温棉保温; 电加热系统由稳压电源、调压器和功率计组成, 通过调节调压器电压控制加热的热流密度, 并通过功率计记录其加热功率; 容器池由钢化玻璃构成, LED 灯作为光源, 通过高速相机 (MotionPro Y4, IDT, USA) 对加热表面微细化沸腾现象进行捕捉; 液体控温系统由螺旋冷却管、辅助加热器、恒温水箱及池内放置的 K 型热电偶组成, 以维持池内液温恒定, 液体温度波动控制在 ±0.5 ℃; 风冷冷凝器放置在容器池上方, 用于保持恒定压力, 并使冷凝水蒸汽回流. 实验数据由数据采集仪器 Agilent 34970A 收集并记录. 在实验前,

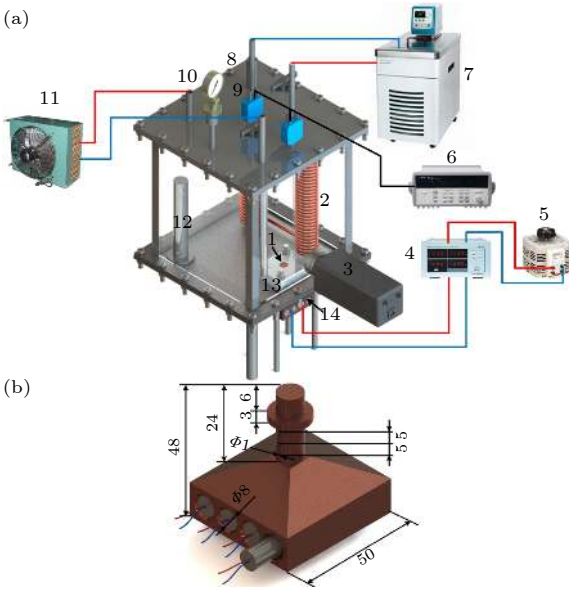

图 1 (a) 池沸腾实验装置. 1: $Ga_{67}In_{20.5}Sn_{12.5}$; 2: 冷凝盘管; 3: 高速相机; 4: 功率计; 5: 调压器; 6: Agilent 34970A; 7: 恒温水箱; 8: 充液口; 9: K 型热电偶; 10: 压力表; 11: 风冷冷凝器; 12: 辅助加热器; 13: 聚四氟乙烯; 14: 紫铜块. (b) 紫铜块尺寸 (所有尺寸均以 mm 为单位)

Fig. 1. (a) Pool boiling experiment setup. 1: $Ga_{67}In_{20.5}Sn_{12.5}$; 2: coiled-tube; 3: high-speed camera; 4: power meter; 5: voltage transformer; 6: Agilent 34970A; 7: constant temperature water bath; 8: filling port; 9: K thermocouple; 10: pressure gauge; 11: air-cooled condenser; 12: auxiliary heater; 13: teflon; 14: copper block. (b) Copper block size (all dimensions are in mm).

通过辅助加热器加热排除液体内的不凝性气体. 实验中所使用的工质为乙醇, 其物性参数通过 NIST 查得, 如表 1 所列.

测试实验段呈圆柱状, 由紫铜材料制成, 相比铝表面, 液态金属在紫铜表面更容易铺展成均匀厚度的薄液膜, 因而选择紫铜作为基底材料. 其几何形状和尺寸如图 1(b) 所示, 铜块底部为 47 mm × 50 mm 的方形, 铜块底部到顶部的距离为 48 mm. 试验段的底部装有直径为 8 mm 的四根加热棒用于试验段加热. 在圆柱中间有 3 个间距为 5 mm 直径为 0.85 mm 的小孔, 孔内插入三个直径为 0.81 mm 精度为 0.2 ℃ 的 K 型热电偶, 用于推算加热表面温度和热流密度. 其上端面为 $\Phi = 10$ mm 的圆形, 涂覆有液态金属.

2.2 样品制备与表征

2.2.1 液态金属材料基本物性

本实验采用的液态金属为镓铟锡合金 ($Ga_{67}In_{20.5}Sn_{12.5}$), 表 2 对比了镓铟锡合金与水的主要物性. 液态金属 $Ga_{67}In_{20.5}Sn_{12.5}$ 具有较宽的单相工作温区, 10.5—1300 ℃ 始终为液态. 热容方面, 水为常温下质量比热容最大的物质; 虽然液态金属的比热小于水, 但是其密度高 (约为水的 6 倍), 体积热容也能达到水的 1/2 左右. 流动性方面, $Ga_{67}In_{20.5}Sn_{12.5}$ 的黏度仅为水的 2 倍左右, 具有较好的流动性. $Ga_{67}In_{20.5}Sn_{12.5}$ 最大的优点为具有很高的导热率, 为水的 27.5 倍, 这使其具有很好的传热换热能力[35].

2.2.2 材料制备与表征

本实验采用两种加热表面: 光滑紫铜表面和液态金属 $Ga_{67}In_{20.5}Sn_{12.5}$ 软表面. 用 2000 目砂纸打磨抛光制作光滑紫铜表面. 在实验开始前, 将制备的样品分别放入稀盐酸、丙酮和酒精中各超声清洗 3 min, 以去除铜表面的氧化层和油脂, 最后用去离子水冲洗并吹干. 为了在软表面上进行沸腾实验, 在乙醇液体环境中, 将 $Ga_{67}In_{20.5}Sn_{12.5}$ 液滴滴在铜表面上, 以防止 $Ga_{67}In_{20.5}Sn_{12.5}$ 氧化. 因为铜对 $Ga_{67}In_{20.5}Sn_{12.5}$ 具有亲水性, 所以液态金属会迅速在铜表面扩散, 形成柔软的液膜. 通过控制 $Ga_{67}In_{20.5}Sn_{12.5}$ 的质量来确定液态金属的厚度. 实验中不同温度下液态金属的厚度分别为: T_b = 78 ℃, $\delta_{ss,1}$ = 120.35 μm; T_b = 60 ℃, $\delta_{ss,2}$ = 120.32 μm; T_b = 40 ℃, $\delta_{ss,3}$ = 120.42 μm.

在沸腾实验前, 对样品表面进行表征 (见图 2). 采用环境扫描电子显微镜 ESEM (FEI, Quanta 200, USA, 分辨率为 3.7 nm) 对抛光铜表面和 $Ga_{67}In_{20.5}Sn_{12.5}$ 表面进行表征. 采用 Dataphysics (OCA15 plus, GER, 不确定度为 0.1°) 测量样品表面接触角. 以乙醇为液滴, 对以上制备好的两种样品进行接触角测量. 基本原理是将乙醇液滴通过微型注射器滴于样品表面, 通过显微镜拍摄获得去离子水液滴在结构表面的形态, 再利用数字化图像分析软件计算接触角 θ. 测得抛光紫铜表面的接触角 θ_{cs}

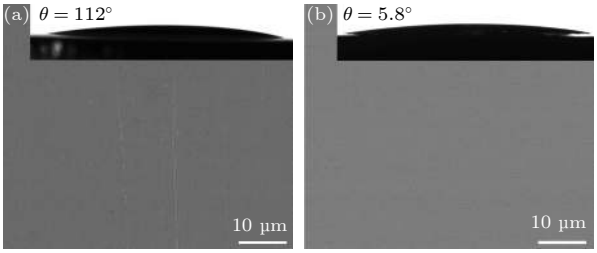

图 2 样品的接触角测量和扫描电镜图像 (a) 抛光紫铜表面; (b) 液态金属软表面

Fig. 2. Contact angle measurement and scanning electron microscope image of the sample: (a) Polished copper surface; (b) Soft liquid metal surface.

表 1 乙醇的物性参数 (20 ℃, 101.325 kPa)

Table 1. Physical parameters of ethanol (20 ℃, 101.325 kPa).

	T_s/℃	ρ/(kg·m^{-3})	h_{fg}/(kJ·kg^{-1})	c_{pl}/(kJ·kg^{-1}·K^{-1})	λ/(W·m^{-1}·K^{-1})	ν/(10^{-6}m^2·s^{-1})	μ/(10^{-3}Pa·s)	σ/(10^{-3}N·m^{-1})	Pr
液体	78.23	789.42	—	2.40	0.16	1.507	1.19	22.3	17.39
蒸汽		1.65	849.63	1.72	0.02	6.061	0.010	—	0.861

表 2 液态金属 Galinstan ($Ga_{67}In_{20.5}Sn_{12.5}$) 与水物性参数对比 (20 ℃, 101.325 kPa)

Table 2. Physical properties of liquid metal Galinstan ($Ga_{67}In_{20.5}Sn_{12.5}$) and water at 20 ℃ and 101.325 kPa.

流体	ρ/(kg·m^{-3})	T_m/℃	T_s/℃	h_{fg}/(kJ·kg^{-1})	c_{pl}/(J·kg^{-1}·K^{-1})	λ/(W·m^{-1}·K^{-1})	μ/(10^{-3}Pa·s)	σ/(10^{-3}N·m^{-1})	Pr
水	998	0	100	2256.47	4184	0.6	1.002	72.8	7.008
Galinstan	6440	10.5	>1300	24.00	366	16.5	2.400	533.0	0.053

为 11.2°, 液态金属表面的接触角 θ_{ss} 为 5.8°. 通过对比可知二者平均粗糙度基本相同, $Ga_{67}In_{20.5}Sn_{12.5}$ 表面较光滑紫铜表面更亲乙醇, 静态接触角较小.

2.2.3 数据处理

实验中, 方柱中的导热过程按一维稳态导热处理, 根据傅里叶定律, 认为加热铜块的热流量是沿着垂直方向进行, 热流密度的计算公式如下式:

$$q = -k_{\mathrm{Cu}}\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}, \tag{1}$$

其中, q 为沸腾热流密度, 单位为 W/m^2; k_{cu} 为紫铜的导热系数, 单位为 W/(m·K); 温度梯度 $\mathrm{d}T/\mathrm{d}x$ 利用三点向后泰勒级数近似计算[36]:

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} = \frac{3T_1 - 4T_2 + T_3}{2\Delta x}, \tag{2}$$

其中 T_1, T_2, T_3 分别为铜加热块热电偶孔顶部、中部和底部对应的温度.

由 (1) 式求得沸腾表面温度:

$$T_{\mathrm{w}} = T_1 - q\,(x_1/k_{\mathrm{Cu}}), \tag{3}$$

其中 T_{w} 为沸腾表面温度; x_1 为沸腾表面到热电偶 T_1 的距离, 对于所有的测试表面 $x_1 = 14$ mm. 对应的沸腾传热系数 h 可以表示为:

$$h = \frac{q}{T_{\mathrm{w}} - T_{\mathrm{b}}}, \tag{4}$$

其中, T_{b} 为容器池内工质的温度, 单位为℃.

由于温度测量和热电偶间距之间的距离而传播的误差用下式计算:

$$U_p = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial p}{\partial a}\times u_{ai}\right)^2}, \tag{5}$$

式中 U_p 为参数 p 中的不确定度, u_{ai} 为被测参数 ai 的不确定度.

热流密度 q 和沸腾传热系数 h 的不确定度可表示为

$$\frac{U_q}{q} = \left\{\left(\frac{U_k}{k}\right)^2 + \left(\frac{3U_{T_1}\times k_{\mathrm{Cu}}}{\Delta x\times q}\right)^2 + \left(\frac{4U_{T_2}\times k_{\mathrm{Cu}}}{\Delta x\times q}\right)^2 + \left(\frac{U_{T_3}\times k_{\mathrm{Cu}}}{\Delta x\times q}\right)^2 + \left(\frac{U_{\Delta x}}{\Delta x}\right)^2\right\}^{\frac{1}{2}}, \tag{6}$$

$$\frac{U_h}{h} = \sqrt{\left(\frac{U_q}{q}\right)^2 + \left(\frac{U_{T_{\mathrm{w}}}}{T_{\mathrm{w}} - T_{\mathrm{b}}}\right)^2 + \left(\frac{U_{T_{\mathrm{b}}}}{T_{\mathrm{w}} - T_{\mathrm{b}}}\right)^2}. \tag{7}$$

表面过热度及液体的温度最大的不确定度 0.3 ℃, 计算热流密度 q 接近 CHF 时, 不确定度小于 4.80%. 传热系数 h 的不确定度小于 4.82%.

3 实验结果与讨论

3.1 沸腾传热特性

图 3 给出了两种表面在不同液温 (78, 60 和 40 ℃) 下的沸腾曲线和传热系数曲线. 从图 3(a) 可以看出, 与光滑铜表面相比, $Ga_{67}In_{20.5}Sn_{12.5}$ 软表面沸腾起始点 (ONB) 的壁面过热度 ΔT 明显降低, 液温 78, 60 和 40 ℃ 时, 光滑铜表面 ONB 处的壁面过热度 ΔT 分别为 18.9, 18.0 和 19.5 ℃, $Ga_{67}In_{20.5}Sn_{12.5}$ 软表面 ONB 处的壁面过热度 ΔT 为 6.8, 8.3 和 6.9 ℃. 在饱和状态时 ($T_{\mathrm{b}} = 78$ ℃), $Ga_{67}In_{20.5}Sn_{12.5}$ 软表面 ONB 处的壁面过热度 $\Delta T =$ 6.8 ℃, 而光滑表面的过热度 $\Delta T = 18.9$ ℃, 与光表面相比降低了将近 12 ℃. 图 3(b) 为两种表面在不同液温下传热系数与热流密度的关系, 液态金属软表面的传热系数明显高于光滑表面. 为便于比较液态金属软表面相比光滑表面传热系数提高程度, 定义强化因子 $\varepsilon = (h_{\mathrm{soft}} - h_{\mathrm{hard}})/h_{\mathrm{hard}} \times 100\%$, 其中, h_{soft} 为液态金属软表面的传热系数, h_{soft} 为光滑紫铜表面的传热系数, 如图 3(c) 所示, 液温为 78, 60 和 40 ℃ 时, 液态金属软表面传热系数较光滑表面传热系数最大提高了 149%, 88% 和 44%. 从起始沸腾过热度、传热系数等性能来看, 液态金属软表面明显优于光滑表面. 汽泡在软表面更容易成核, 这与含两种不混溶液体体系的汽泡成核理论一致[34]. 液态金属软表面传热增强主要是由于其表面具有弹性毛细波和汽泡射流现象, 弹性毛细波增强了热边界层内的热质传递. 汽泡射流使液态金属软表面汽泡脱离频率显著增加. 因此液态金属软表面能带走更多的热量, 传热效果更优. 对于以上详细的机理解释将在 3.3 和 3.4 节进行详细的介绍.

3.2 汽泡动力学行为

3.2.1 低热流密度下的汽泡动力学行为

为研究池沸腾传热性能与汽泡的大小、汽泡脱离频率的关系, 实验中利用高速相机记录了表面的沸腾现象, 拍摄速度为 4000 fps, 图 4 为饱和沸腾时两种表面的池沸腾可视化图像, 可以看出, 相同热流密度 ($q \approx 3.5$ W/cm^2) 下, 液态金属软表面到达沸腾起始点 ($\Delta T = 6.8$ ℃) 时, 光滑表面并没有汽泡产生, 且此时光滑表面的过热度 ($\Delta T =$ 16.9 ℃) 较高.

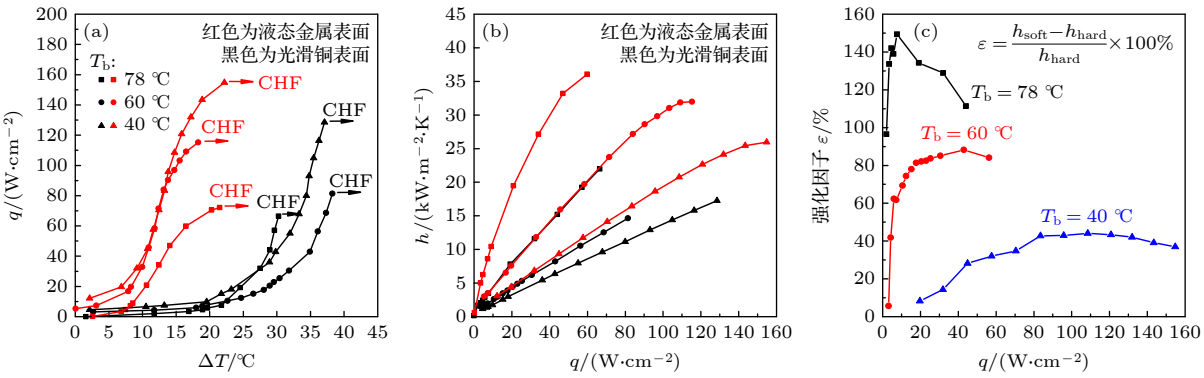

图 3 液温 78, 60 和 40 ℃ 条件下, 光滑铜表面和液态金属软表面的 (a) 沸腾曲线, (b) 传热系数曲线和 (c) 强化因子曲线

Fig. 3. (a) Boiling curve, (b) heat transfer coefficient curve and(c) Heat transfer enhancement factor of smooth copper surface and soft liquid metal surface at 78, 60 and 40 ℃.

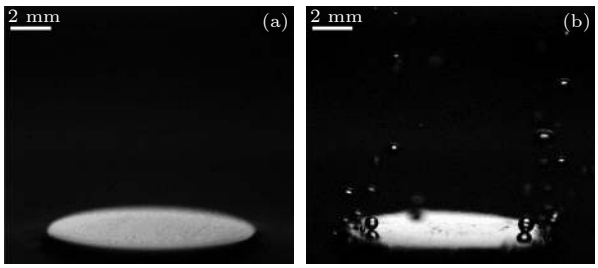

图 4 低热流密度下池沸腾可视化图像 (a) 光滑铜表面 ($\Delta T=16.9$ ℃, $q=3.46$ W/cm^2); (b) 液态金属软表面 ($\Delta T=6.8$ ℃, $q=3.47$ W/cm^2)

Fig. 4. Visualization images of pool boiling at low heat flux: (a) Smooth copper surface ($\Delta T=16.9$ ℃, $q=3.46$ W/cm^2); (b) Soft liquid metal surface ($\Delta T=6.8$ ℃, $q=3.47$ W/cm^2)..

3.2.2 中等热流密度下的汽泡动力学行为

图 5 为饱和沸腾时, 中等热流密度 ($q=7.15$—34.08 W/cm^2) 下池沸腾可视化图像. 在较低热流密度时, 如图 5(a) 和图 5(d), 汽泡多以孤立汽泡的形式存在, 但相比光滑表面, 液态金属软表面汽泡明显较多, 汽泡尺寸明显较小, 汽泡脱离频率较快. 随着热流密度的不断增加, 沸腾核化密度不断增加. 如图 5(c) 和图 5(f) 所示, 光滑表面的汽泡开始出现几个汽泡合并形成较大汽泡脱离的现象, 而液态金属软表面仍为分散汽泡脱离. 相比光滑表面, 液态金属软表面的汽泡脱离频率远远大于光滑表面, 大大促进了汽泡脱离时的瞬态导热作用, 更多地带走表面的热量, 因此液态金属软表面的传热性能优于光滑表面.

3.2.3 高热流密度下的汽泡动力学行为

高热流密度下, 如图 6(a) 所示, 光滑表面在热流密度 $q=57.07$ W/cm^2 时已呈现蘑菇状汽泡脱离模式; 而液态金属软表面在热流密度 $q=58.85$ W/cm^2 时, 汽泡多以两个或者多个柱状汽泡脱离, 此时液态金属软表面仍具有较强的传热能力.

3.3 液态金属软表面弹性毛细波和汽泡射流现象

实验观察到液态金属软表面特有的弹性毛细波和汽泡射流现象, 如图 7 所示, 在饱和沸腾下, $\Delta T=7.49$ ℃, $q=4.74$ W/cm^2 时, 汽泡脱离后会带动液态金属表面产生波动, 并沿圆周方向逐渐消散. 且在汽泡脱离后, 液态金属软表面下方不断出现小汽泡与上一个大汽泡合并的汽泡射流现象. 如图 7(a) 和图 7(b) 所示, 母汽泡脱离后, 与软表面下方生成的小汽泡合并, 随后在 6 ms 时 (图 7(d)), 软表面再次生成小汽泡与上一个合并汽泡合并, 虽然在 10 ms 时 (图 7(f)), 软表面仍产生小汽泡, 但由于此时母汽泡在浮升力的作用下逐渐升高, 底部小汽泡无法与之合并, 随后独自长大, 如图 7(g) 和图 7(h) 所示.

进一步研究出现以上现象的机理, 虽然在实验过程中尽量避免使液态金属镓铟锡合金 (Galinstan) 接触空气, 但与铝一样, Galinstan 暴露在超过百万分之一 (ppm) 的氧气中其表面瞬间形成一层氧化膜[37], 这层氧化层很薄 (根据真空条件下的 x 射线衍射研究得出该氧化层厚度为 0.7 nm), 并且在没有驱动力或物理扰动的情况下, 它不会随时间显著变厚[38]. 该氧化膜呈现出凝胶的特性使 Galinstan 表面类似于一个有固体外壳的弹性体, 在小应力作用下, Galinstan 表现出类似固体的弹性响应[39]. 另外, 如前所述软材料会在表面张力垂直分量 $\gamma_{lv}\sin\theta$ 的作用下变形[31,32].

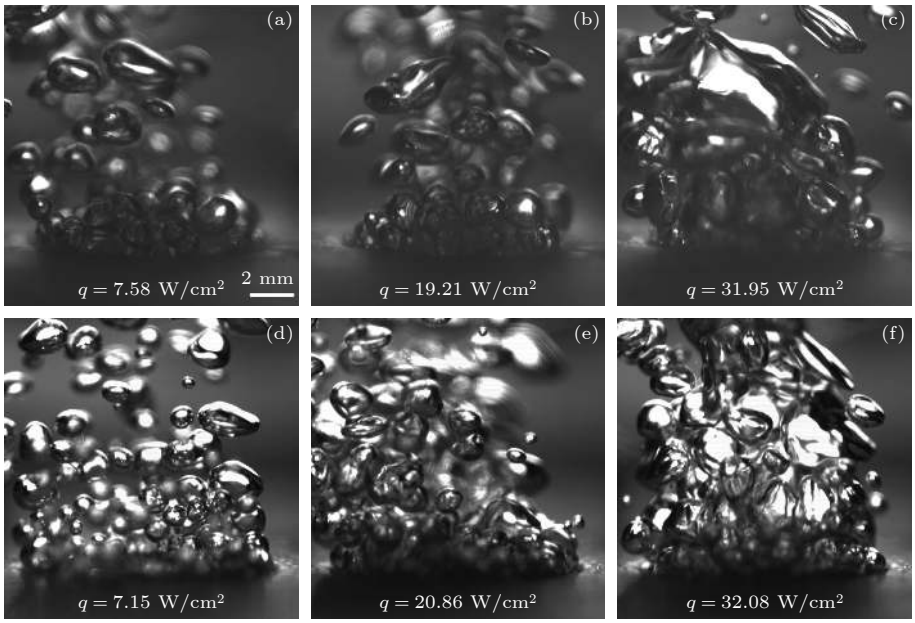

图 5 中等热流密度下池沸腾可视化图像 (a)—(c) 光滑铜表面; (d)—(f) 液态金属软表面

Fig. 5. Visualization images of pool boiling at medium heat flux: (a)–(c) Smooth copper surface and (d)–(f) Soft liquid metal surface.

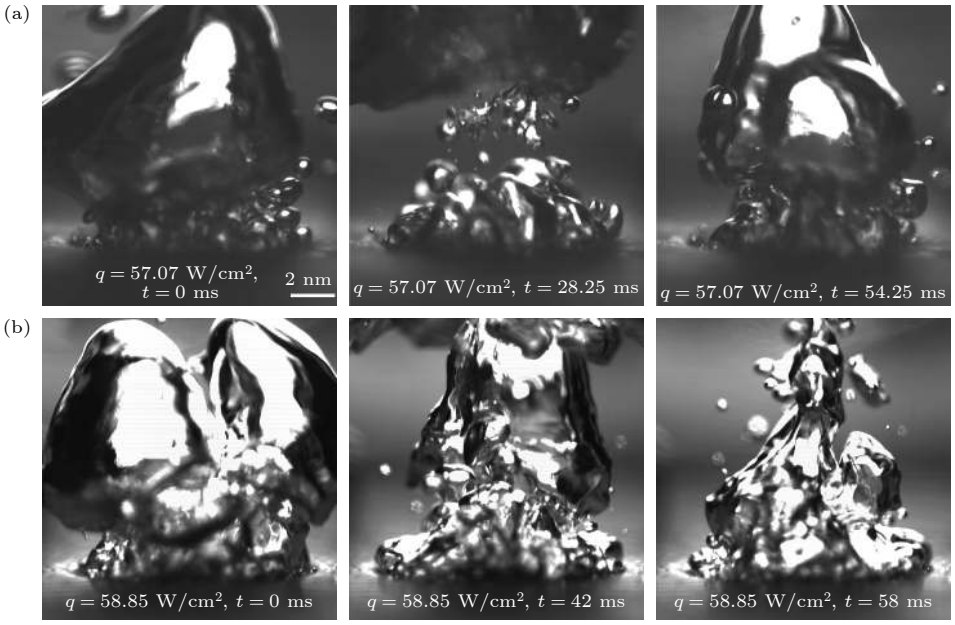

图 6 高热流密度下池沸腾可视化图像 (a) 光滑铜表面; (b) 液态金属软表面

Fig. 6. Visualized images of pool boiling at high heat flux: (a) Smooth copper surface; (b) Soft liquid metal surface.

如图 8(b) 和图 8(c) 所示, 液态金属表面在液汽界面张力垂直分量$\gamma_{\rm lv}\sin\theta$的作用下被抬起一个凸起, 当基底材料的剪切模量已知时, 该凸起的最大高度[40]为 $h^* = \gamma_{\rm lv}\sin\theta/G$, ($G$为基底的剪切模量), 例如光滑铜表面, $\gamma_{\rm lv} = 15.24$ mN/m, $\theta_{\rm cs} = 11.2°$, 纯铜的剪切模量 $G = 46.8$ GPa, 则凸起的高度约为 6.3×10^{-5} nm. 这时的变形可忽略不计. 而对于液态金属软表面, Galinstan 表面氧化层的剪切模量未知, 因此 Galinstan 表面的变形高度只能根据现有文献进行估计, Jacob 等[41]对在空气和水中的镓基合金的流变性质进行了测量, 分别给出了不同应力下镓基合金的应变响应, Galinstan 与乙醇的接触角 $\theta_{\rm ss} = 5.8°$, $\gamma_{\rm lv}\sin\theta = 1.28 \times 10^{-3}$ N/m, 在此量级下, 文献中所测量的应变幅值为

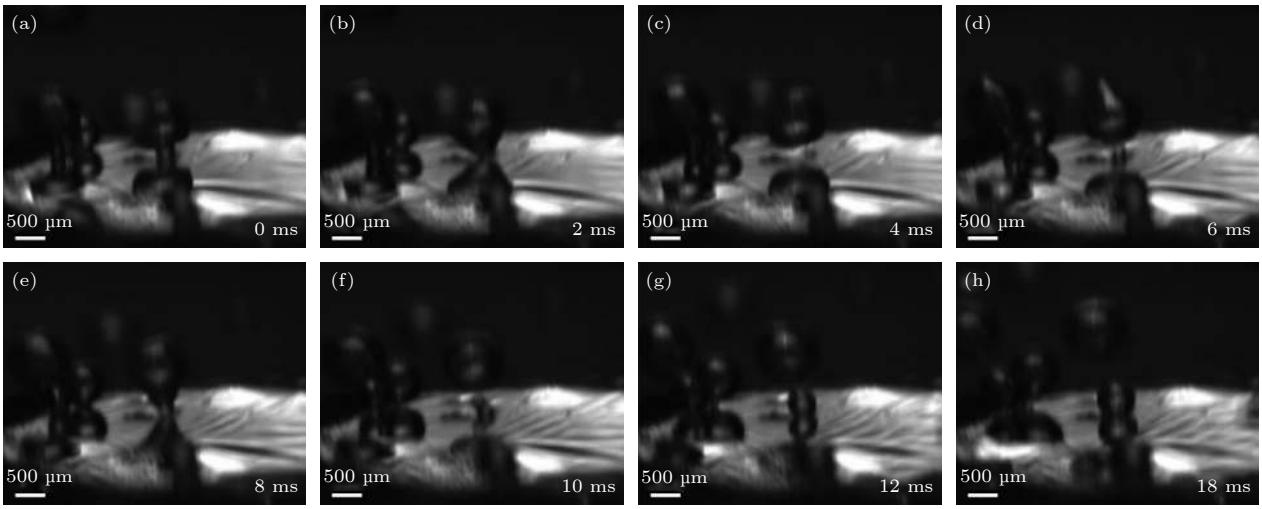

图 7 液态金属软表面弹性毛细波和汽泡射流现象 ($\Delta T = 7.49$ ℃, $q = 4.74$ W/cm^2)

Fig. 7. Elastocapillary wave and bubble jet phenomena on soft liquid metal surface ($\Delta T = 7.49$ ℃, $q = 4.74$ W/cm^2).

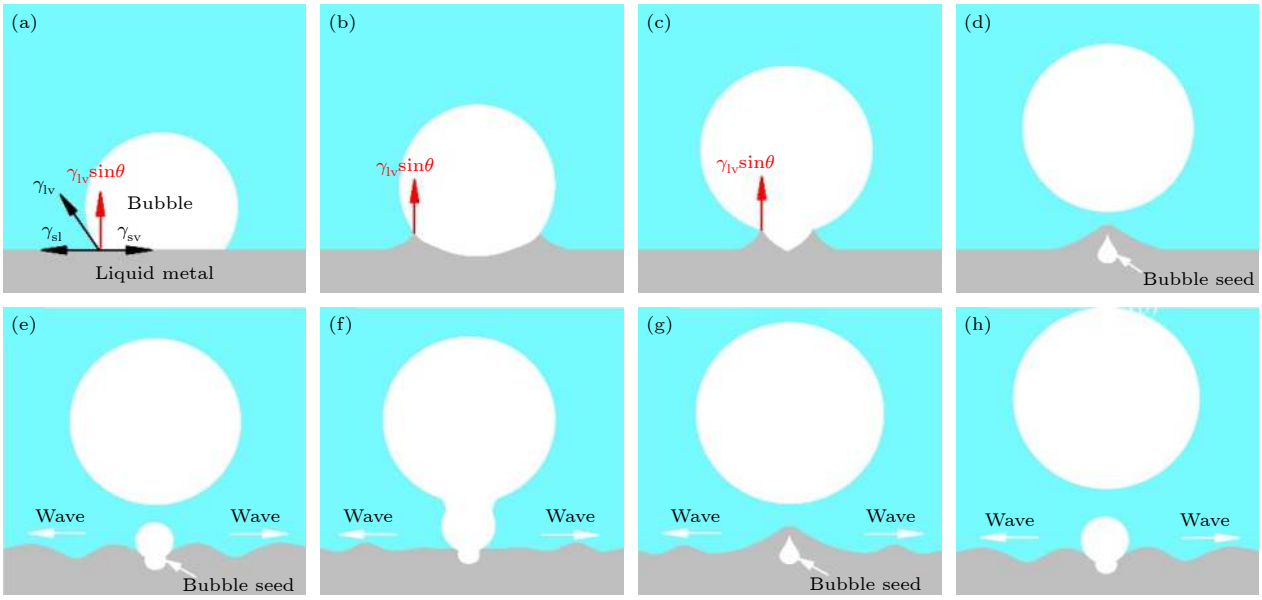

图 8 液态金属软表面弹性毛细波和汽泡射流现象机理 ($\Delta T = 7.49$ ℃, $q = 4.74$ W/cm^2)

Fig. 8. Mechanism of soft surface elastocapillary wave and bubble jet phenomenon on soft liquid metal surface.

0.1%, 本实验中的液态金属直径为 10 mm, 则液态金属表面所产生的形变尺度约为 10 μm. 汽泡长大过程中该凸起随三相接触线移动, 在汽泡脱离瞬间, 液态金属在弹性恢复力的作用下回到水平面, 但由于惯性作用会继续向下运动, 从而形成液态金属表面的震动和因震动沿水平方向传播的弹性毛细波, 如图 8(e) 所示. 此外, 汽泡在脱离的过程中, 由于液态金属氧化后的表面特有的黏附性[39], 自接触后液态金属软表面黏附在一起从而留下残余核化穴, 该残余核化穴的存在有效降低了核化能垒, 缩短了壁面蓄能时间. 残余核化穴快速长大, 与上升的大汽泡聚合, 形成汽泡射流现象, 如图 8(f) 和图 8(g).

3.4 强化沸腾传热机理

低热流密度下 ($q = 3.46$—7.15 W/cm^2), 如前所述, 液态金属软表面可将 ONB 处的壁面过热从光滑铜表面上的约 18 ℃ 降低到液态金属软表面上的约 6 ℃. Rykaczewski 等[34] 从理论上评估了表面的软化是否可以控制核沸腾开始时壁面的过热度. 他们给出了诸如乙醇之类的挥发性液体与诸如 $Ga_{67}In_{20.5}Sn_{12.5}$ 之类的非挥发性液体界面的蒸

汽胚形成速率的理论表达式. 理论预测表明, 乙醇沸腾的壁面过热可降低 5 ℃. 除此之外, Rykaczewski 等[34] 也认为表面的软化增强 ONB 是通过蒸汽捕获机制产生, 该机制由微观变形引起的空腔桥接而产生. 而本实验表明, 这种软表面可将 ONB 处的过热降低 12 ℃, 目前的观察结果与 Rykaczewski 等的预测一致.

如 3.2.2 节所述, 中等热流密度 (q = 7.15—34.08 W/cm^2) 下, 液态金属软表面较光滑表面汽泡增多, 汽泡尺寸减小, 进一步研究液态金属软表面汽泡更易脱离机理. 汽泡脱离受浮升力、惯性力和毛细力控制[42]. 首先考察惯性力项. 两种表面均处于旺盛沸腾阶段, 假设汽泡成长所需的热量, 一是由加热表面通过汽泡底部直接供给, 一是通过汽泡周围的过热边界层输入, 根据能量平衡则有:

$$A_{\mathrm{m}}\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}\tau}h_{\mathrm{fg}}\rho_{\mathrm{v}}=q_1A_{\mathrm{w}}+q_2A_{\mathrm{m}}, \tag{8}$$

其中, A_{m} 为汽液接触面, A_{w} 为汽泡底部与壁面的接触面, h_{fg} 为液体的汽化潜热, ρ_{v} 为蒸汽密度, q_1, q_2 分别表示通过汽泡底部和汽泡周围过热液层向汽泡传递的热流密度. 假设汽泡为球形, 略去摩擦力, 考虑表面张力、惯性力和浮力平衡的条件下得到下式:

$$\frac{\pi}{6}D_{\mathrm{d}}^3g(\rho_{\mathrm{l}}-\rho_{\mathrm{v}})=\frac{\pi}{8}C_{\mathrm{f}}D_{\mathrm{d}}^2\rho_{\mathrm{l}}\left(\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}\tau}\right)^2_{R_{\mathrm{d}}}+\pi D_{\mathrm{d}}\sigma f(\theta), \tag{9}$$

式中 C_{f} 为汽泡成长流体动力阻力系数, D_{d} 为汽泡跃离直径, $f(\theta)$ 为润湿函数, $\left(\dfrac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}\tau}\right)_{R_{\mathrm{d}}}$ 表示液体移动速度, 即等于汽泡成长速率.

因此, 当加热功率相同时, 不同表面上汽泡通过底部和周围流体获得的总热量接近. 由 (8) 式可知, 汽泡生长速度是汽泡尺寸和热流密度的函数. 由 (9) 式可知, 汽泡惯性力由汽泡尺寸和生长速度决定. 因此, 当两种表面上汽泡直径相等且尚未脱离时, 汽泡所受惯性力大小相近.

汽泡毛细力与汽泡直径、表面接触角和表面形貌有关. 液态金属 (LM) 表面接触角小于光滑表面 (CS), 有利于汽泡脱离. 液态金属表面张力作用下发生形变, 汽泡脱离后形变恢复, 向外传递弹性毛细波. 由于波纹曲率未知, 液态金属形变引起的毛细力难以估计, 以下从能量的角度分析汽泡脱离前后准稳态表面能变化, 判断表面形变是否有助于汽泡脱离. 假设两表面上汽泡直径相同, 表面接触角 θ 相同, 仅分析表面形变对汽泡脱离前后表面能变化的影响. 如图 9(a) 和图 9(c) 所示, 汽泡直径 D 相等, 则二者汽固界面投影面积 S 相同. 液态金属表面在表面张力作用下发生形变, 实际汽固界面略大于 S, 表示为 αS, 其中 α 为大于 1 的系数. 若此时汽泡脱离, 如图 9(b) 和图 9(d), 液态金属表面形变恢复, 两类表面新增固液和汽液表面积均为 S. 汽泡脱离前后表面能变化分别为

$$\Delta E_{\mathrm{LM}}=S\gamma_{\mathrm{sl}}+S\gamma_{\mathrm{vl}}-\alpha S\gamma_{\mathrm{sv}}, \tag{10}$$

$$\Delta E_{\mathrm{CS}}=S\gamma_{\mathrm{sl}}+S\gamma_{\mathrm{vl}}-S\gamma_{\mathrm{sv}}. \tag{11}$$

根据 Young 方程:

$$\gamma_{\mathrm{sv}}=\gamma_{\mathrm{sl}}+\gamma_{\mathrm{vl}}\cos\theta. \tag{12}$$

由 (10) 式—(12) 式推出:

$$\Delta E_{\mathrm{LM}}=S\left[(1-\alpha)\gamma_{\mathrm{sv}}+(1-\cos\theta)\gamma_{\mathrm{vl}}\right], \tag{13}$$

$$\Delta E_{\mathrm{CS}}=S\left[(1-\cos\theta)\gamma_{\mathrm{vl}}\right]. \tag{14}$$

(14) 式中, 表面能变化恒大于 0, 说明固体表面汽泡脱离不会自发进行, 需要外界浮升力克服表面能势垒.(13) 式中 $\alpha>1$, 且液态金属表面张力 γ_{sv} 高于乙醇表面张力 γ_{vl} 一个量级, 因此 $\Delta E_{\mathrm{LM}}<\Delta E_{\mathrm{CS}}$. 说明表面存在形变时, 液态金属表面能势垒小于光滑铜表面, 汽泡脱离所需浮升力更小, 汽泡容易脱离.

综上, 两种表面汽泡生长至相同直径时, 所受惯性力和浮升力大小近似. 液态金属接触角更小, 则汽泡脱离毛细阻力较小. 同时液态金属表面在表面张力作用下形变, 相当于为汽泡脱离提供额外毛细推力. 因此液态金属表面汽泡容易脱离, 而光滑表面汽泡脱离较难, 需继续生长以获得更强的浮升力, 脱离直径较大.

汽泡的成长过程主要分为两个阶段: 主要受惯性控制的初始阶段和热扩散控制的后期阶段, 在初始阶段汽泡直径与热边界层厚度相当 ($D\sim\delta_{\mathrm{T}}$), 在后期阶段, 汽泡成长主要靠汽液界面的过热液体和热边界层向汽泡传递热量, 热扩散控制占主导地位, 汽泡直径大于热边界层厚度 ($D>\delta_{\mathrm{T}}$), 根据[43] $\delta_T=3.22k/h_{\mathrm{soft}}$($k$ 为液体导热系数, h_{soft} 为沸腾传热系数) 计算热边界层厚度 $\delta_T\approx15$ μm. 汽泡脱离时引起液态金属表面的形变 $h_{\mathrm{c}}\approx10$ μm 与热边界层厚度 δ_T 相当, 因此汽泡脱离引起的液态金属弹性毛细波足以对热边界层产生扰动. 如图 10

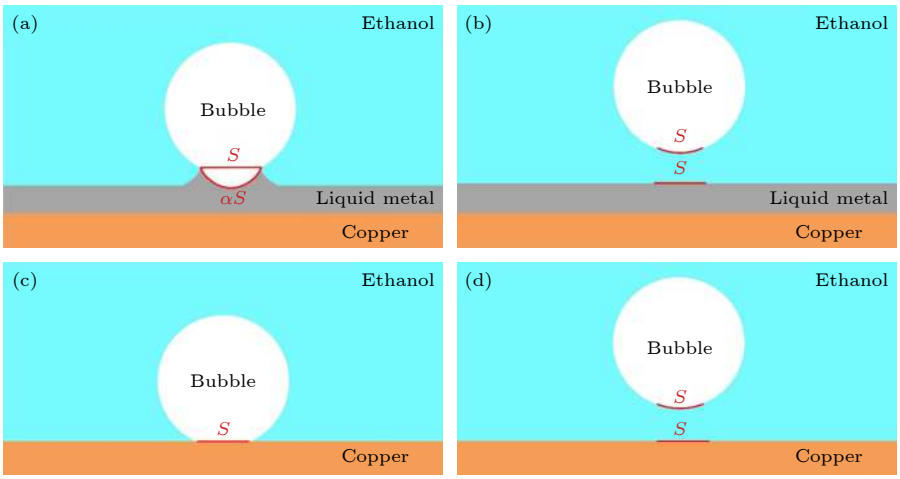

图 9 液态金属软表面汽泡更易脱离机理

Fig. 9. Mechanism of easier detachment of bubbles on soft liquid metal surface.

所示, 液态金属弹性毛细波在径向传播时, 界面两侧的流体分子的流线为环形相当于二次涡流, 因此光滑表面热边界层未受到扰动, 热边界层内主要以导热和自然对流为主, 而液态金属软表面波动引起的涡旋强化了热边界层内的传热传质. 因而液态金属软表面汽泡脱离直径较小, 汽泡脱离频率较高, 相比光滑表面, 液态金属软表面能带走更多的热量, 具有更优的传热性能. 除此之外, 本文研究发现, 在整个热流密度范围内 (低、中、高 q), 相比于铜光滑表面, 液态金属软表面都提高了沸腾传热系数, 其机理为弹性毛细波对热边界层的扰动.

对于饱和沸腾, 光滑铜表面和液态金属软表面的临界热流密度相差不大 (见图 3(a)), 但过冷沸腾条件下, 液态金属软表面显著提高了临界热流密度 (见图 3(a)), 原因是液态金属软表面产生的汽泡动力学行为, 有利于乙醇液体对加热面的补充.

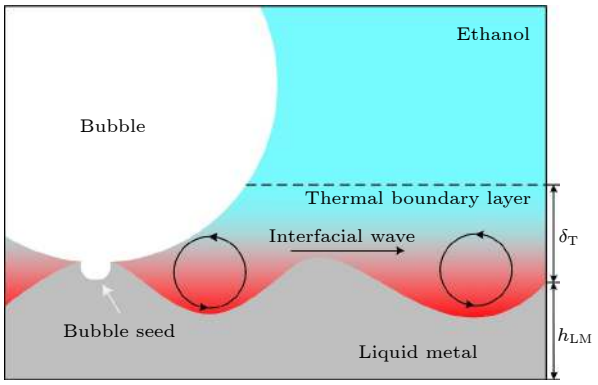

图 10 液态金属软表面强化沸腾传热机理

Fig. 10. Mechanism of boiling heat transfer enhancement on soft liquid metal surface.

4 结 论

本文通过实验手段研究了液态金属 $Ga_{67}In_{20.5}Sn_{12.5}$ 软表面在常压下池沸腾中的传热性能和汽泡动力学行为, 实验工质为无水乙醇, 采用高速相机对微细化沸腾现象进行捕捉, 通过与光滑表面对比得到如下结论.

1) 液态金属 $Ga_{68.5}In_{21.5}Sn_{10}$ 软表面可有效降低沸腾起始点对应的壁面过热度, 在饱和沸腾时, 沸腾起始点处壁面过热度较光滑表面降低近 12 ℃.

2) 与光滑表面相比, 液态金属软表面的汽泡数量较多, 汽泡尺寸较小, 汽泡脱离频率较快, 沸腾传热性能较好, 液温为 78, 60, 40 ℃ 时, 液态金属软表面传热系数较光滑表面传热系数最大提高了 149%, 88%, 44%.

3) 液态金属软表面在汽泡三相接触线处表面张力竖直分量 $\gamma_{lv}\sin\theta$ 的作用下发生弹性变形, 从表面能分析的角度, 液态金属软表面汽泡脱离前后表面能变化 ΔE_{LM} 小于光滑表面表面能变化 ΔE_{CS}. 说明表面存在形变时, 液态金属表面能势垒小于光滑铜表面, 汽泡脱离所需浮升力更小, 汽泡容易脱离.

4) 观察到液态金属软表面弹性毛细波和汽泡射流现象, 弹性毛细波增大了液态金属与乙醇的接触面积, 增强了壁面热边界层内的热质传递. 汽泡射流使液态金属软表面汽泡脱离频率显著增加, 因此液态金属软表面的传热性能优于光滑表面.

参考文献

[1] Cao S, Yang H, Wu X H, Zhou Z H 2020 *Micronanoelectronic Technology* **57** 982 (in Chinese) [曹泷, 杨辉, 吴学红, 周振华 2020 微纳电子技术 **57** 982]

[2] Mori S, Utaka Y 2017 *Int. J. Heat Mass Transfer* **108** 2534

[3] Kong X, Zhang Y, Wei J 2018 *Exp. Therm. Fluid Sci.* **91** 9

[4] Liang G, Mudawar I 2019 *Int. J. Heat Mass Transfer* **128** 892

[5] Gregorcic P, Zupancic M, Golobic I 2018 *Sci. Rep.* **8** 7461

[6] Yu X J, Yuan J D, WangY B, Xu J L 2018 *Chem. Ind. Eng. Prog.* **37** 3751 (in Chinese) [余雄江, 袁金斗, 王彦博, 徐进良 2018 化工进展 **37** 3751]

[7] Lu M C, Huang C H, Huang C T, Chen Y C 2015 *Int. J. Therm. Sci.* **91** 133

[8] Xu Z G, Zhao C Y 2016 *Appl. Therm. Eng.* **100** 68

[9] Ryohachi, Shimada, Jun, Komai, Yoichi, Hirono, Satoshi 1991 *Exp. Therm. Fluid Sci.*

[10] Xu J, Ji X, Zhang W, Liu G 2008 *Int. J. Multiphase Flow* **34** 1008

[11] Jaikumar A, Kandlikar S G 2017 *Sci. Rep.* **7** 15691

[12] Zheng X H, Ji X B, Wang Y, Xu J L, Huang Y P, Li Y 2017 *Nuclear Power Engineering* **038** 179 (in Chinese) [郑晓欢, 纪献兵, 王野, 徐进良, 黄彦平, 李勇 2017 核动力工程 **038** 179]

[13] An S, Kim D Y, Lee J G, Jo H S, Kim M W, Al-Deyab S S, Choi J, Yoon S S 2016 *Int. J. Heat Mass Transfer* **98** 124

[14] Surtaev A, Kuznetsov D, Serdyukov V, Pavlenko A, Kalita V, Komlev D, Ivannikov A, Radyuk A 2018 *Appl. Therm. Eng.* **133** 532

[15] Son H H, Seo G H, Jeong U, Shin D Y, Kim S J 2017 *Int. J. Heat Mass Transfer* **113** 115

[16] Rishi A M, Kandlikar S G, Gupta A 2019 *Int. J. Heat Mass Transfer* **132** 462

[17] Mao L, Zhou W, Hu X, He Y, Zhang G, Zhang L, Fu R 2020 *Int. J. Therm. Sci.* **147** 106154

[18] Yim K, Lee J, Naccarato B, Kim K J 2019 *Int. J. Heat Mass Transfer* **133** 352

[19] Lee Y C, Hossain Bhuiya M M, Kim K J 2010 *Int. J. Heat Mass Transfer* **53** 4274

[20] Ramaswamy C, Joshi Y, Nakayama W, Johnson W B 2002 *Int. J. Heat Mass Transfer* **45** 4761

[21] Park S J, Weon B M, Lee J S, Lee J, Kim J, Je J H 2014 *Nat. Commun.* **5** 4369

[22] Desai P R, Wang Y, Sachar H S, Jing H, Sinha S, Das S 2019 *Matter* **1** 1262

[23] Lopes M C, Bonaccurso E 2012 *Soft Matter* **8** 7875

[24] Sokuler M, Auernhammer G K, Roth M, Liu C, Bonacurrso E, Butt H J 2010 *Langmuir* **26** 1544

[25] Narhe R, Anand S, Rykaczewski K, Medici M-G, González-Viñas W, Varanasi K K, Beysens D 2015 *Langmuir* **31** 5353

[26] Petit J, Bonaccurso E 2014 *Langmuir* **30** 1160

[27] Carré A, Shanahan M E R 2001 *Langmuir* **17** 2982

[28] Shanahan M E R, Carre A 1995 *Langmuir* **11** 1396

[29] Weisensee P B, Tian J, Miljkovic N, King W P 2016 *Sci. Rep.* **6** 30328

[30] Mangili S, Antonini C, Marengo M, Amirfazli A 2012 *Soft Matter* **8** 10045

[31] Young T 1805 *Philos. Trans. R. Soc. London* **95** 65

[32] Yu Y S 2012 *Appl. Math. Mech.* **33** 1095

[33] Weijs J H, Andreotti B, Snoeijer J H 2013 *Soft Matter* **9** 8494

[34] Rykaczewski K, Phadnis A 2018 *Nanoscale Microscale Thermophys. Eng.* **22** 230

[35] Yang X H, Liu J 2018 *Science & Technology Review* **36** 54 (in Chinese) [杨小虎, 刘静 2018 科技导报 **36** 54]

[36] Jaikumar A, Kandlikar S G 2015 *Int. J. Heat Mass Tranfer* **88** 652

[37] Liu T, Sen P, Kim C J 2012 *J. Microelectromech. Syst.* **21** 443

[38] Dickey M D 2014 *ACS Appl. Mater Interfaces* **6** 18369

[39] Xu Q, Oudalov N, Guo Q, Jaeger H M, Brown E 2012 *Phys. Fluids* **24** 063101

[40] Shanahan M E R, Carré A 2002 *Colloids Surf., A* **206** 115

[41] Jacob A R, Parekh D P, Dickey M D, Hsiao L C 2019 *Langmuir* **35** 11774

[42] Lin R T 1988 *Boiling Heat Transfer* (Beijing: Science Press) (in Chinese) p112 (in Chinese) [林瑞泰 1988 沸腾换热 (北京: 科学出版社) 第112页]

[43] Tien C J 1962 *Int. J. Heat Mass Transfer* **5** 533

Enhanced pool boiling heat transfer on soft liquid metal surface*

Cao Chun-Lei [1)] He Xiao-Tian [1)] Ma Xiao-Jing [1)2)†] Xu Jin-Liang [1)2)]

1) (*Beijing Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer for Low Grade Energy, North China Electric Power University, Beijing* 102206, *China*)

2) (*Key Laboratory of Power Station Energy Transfer Conversion and System, Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing* 102206, *China*)

(Received 3 December 2020; revised manuscript received 19 February 2021)

Abstract

Pool boiling is a high-efficient energy transfer method through the gas-liquid phase transition. It has the characteristics of small heat transfer temperature difference and high heat flux density. The current enhancement of boiling heat transfer is realized mainly through modifying the solid heating surface. So far, there has been no report on the study of pool boiling heat transfer on soft surfaces. Therefore, in this work the pool boiling heat transfer performances of ethanol on the copper surface and soft liquid metal surface are investigated experimentally. The experimental results indicate that soft surface can effectively reduce the wall superheat corresponding to the onset of boiling (ONB). In saturation boiling, the superheat of the wall surface at ONB is reduced by nearly 12 ℃, while the heat transfer coefficient is improved by 149%. It is found that soft surface enhances pool boiling heat transfer performance significantly by increasing nucleate site density, reducing the bubble departure diameter, and increasing bubble departure frequency. Unlike the copper surface, the soft surface deforms elastically under the action of the vertical component of surface tension $\gamma_{\rm lv}\sin\theta$ at the three-phase contact line of the vapor bubble. From the perspective of surface energy analysis, the difference in surface energy $\Delta E_{\rm LM}$ between before and after bubble departure on soft liquid metal surface is smaller than in smooth surface $\Delta E_{\rm CS}$. The potential barrier of the soft surface is smaller than of the copper surface, and the buoyancy required for bubble separation is small, and the bubble is easy to separate. Elastocapillary wave and bubble jet phenomenon on the soft surface are observed particularly, which are generated on liquid metal under the action of elastic restoring force. The fluctuation of elastocapillary wave contributes to the enhancement of heat and mass transfer in thermal boundary layer and the generation of residual nucleation site. The residual bubble grows up rapidly and coalesces with the rising large bubble, forming bubble jet phenomenon. Elastocapillary wave and bubble jet contribute to the enhancement of pool boiling heat transfer on soft liquid metal surface.

Keywords: liquid metal, soft surface, pool boiling, elastocapillary wave

PACS: 47.55.dp, 64.70.fh, 64.60.Q–, 68.35.Rh **DOI:** 10.7498/aps.70.20202053

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51821004).

† Corresponding author. E-mail: mxj@ncepu.edu.cn