doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.03.055

微通道内种子汽泡抑制沸腾不稳定性研究*

宗露香[1]　徐进良[2]　刘国华[3]

(1.华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室，北京 102206；
2.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；
3.安徽工业大学能源与环境学院，马鞍山 243002)

摘要：搭建同步光学可视化实验台，以并联三角形微通道硅基热沉为实验段，微通道入口玻璃盖板内侧溅射 5 个 Pt 微加热器构成种子汽泡发生器阵列。研究了低入口质量流量下不同种子汽泡触发频率对微通道内沸腾不稳定性的影响。实验结果表明，种子汽泡触发频率作为控制微通道内流动沸腾不稳定的重要参数，单相液体区域，种子汽泡对微通道内流动影响很小；两相区域，随着热流密度增大，压降呈线性上升，壁面温度呈指数式上升。触发频率越高，压降越高，壁面温度下降越大。相同热流密度条件下，高频种子汽泡能够完全消除沸腾不稳定性，壁面温度显著下降，温度均匀性得到明显提升。

关键词：微通道　沸腾不稳定性　种子汽泡　触发频率

中图分类号：Q813.11　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2014)03-0341-06

引言

根据计算机第一定律——Moore law(摩尔定律)，IC 上可容纳晶体管数目每 18 个月增加 1 倍[1]，即约每两年时间周期呈指数式上升。2011 年 Intel 推出的微处理器芯片上含有 10 亿个晶体管。设备微小型化俨然成为当代科技发展的重要方向之一。随着功能型与紧凑型为一体的微电子设备的不断发展，芯片上热流密度也在不断攀升。Kandlikar[2] 指出，在热阻仅为 0.1 K/W 的芯片上，高热流密度已达到甚至超过 200 W，热电子器件冷却技术发展和应用已成为设备维持其优良功能性及稳定性的主要制约问题。

Fang 等[3] 指出，相对于风扇等传统强化空气对流技术，微通道热沉与高性能微电子设备在尺度上很好地匹配，可以直接集成在芯片散热基上[4]。同时，相对于传统通道具有更大换热比表面积，换热系数得到显著提高，可望满足高热流密度电子器件冷却需求。利用液体蒸发相变换热强化换热[5-6]，相对于单相液体显热换热，可降低微通道液体质量流量，从而降低泵功消耗。同时，汽液相变使得芯片上温度分布沿流动方向趋于均匀，微电子器件运行的可靠性得到提高。因此，近年来，微尺度两相沸腾换热成为高热流密度电子元件冷却热管理问题极具潜力的研究方向[7]。

文献检索表明，目前对伴随着压力剧烈波动及明显温度波动的微尺度流动沸腾非稳定性诱因理解得还不是很透彻[8]。为满足工程实际中研究与设计需要，有必要对微尺度下流动沸腾不稳定产生机理及抑制方法展开研究。

在沸腾不稳定产生机理及影响因素方面，Wu 等[9] 研究了不同热流密度和质量流量下水力直径为 186 μm 梯形微通道内水流动沸腾不稳定性。Muwanga 等[10] 对交叉型微通道内流动沸腾不稳定特性进行实验研究，发现其波动特性类似于常规通道。Harirchian 等[6] 研究了微通道横界面尺寸、热流密度和质量流量对流动沸腾的影响。发现当微通道宽度大于等于 400 μm，一定壁面热流密度条件下沸腾曲线和传热系数在流动沸腾区域与质量流量相关。所有工况下压降变化依赖于通道尺寸和质量流量变化。

与常规通道相比，微通道上游任何小空间均可作为可压缩容积，可压缩容积容易引起微通道内沸腾不稳定性[9]，表征为压力、温度和质量流量等参数的波动。因此，在抑制或消除沸腾不稳定性方面，绝大多数学者通过在微通道上游加装节流阀[11]、限

收稿日期：2013-10-23　修回日期：2013-11-11

*国家自然科学基金国际合作与交流资助项目(51210011)和国家自然科学基金-广东联合基金资助项目(U1034004)

作者简介：宗露香，助教，博士生，主要从事微纳结构相变传热研究，E-mail：zonglx@ncepu.edu.cn

通讯作者：徐进良，教授，博士生导师，主要从事低品位节能、两相流、太阳能及微纳传热研究，E-mail：xjl@ncepu.edu.cn

流小孔[12-15]等节流装置增加上游刚性,减小上游可压缩空间来消除剧烈不稳定波动,或通过在微通道内侧壁面刻蚀人工核化穴[12,16]来降低沸腾起始点温度,抑制沸腾不稳定性。

Xu 等[17-20]在微通道内流动沸腾不稳定性方面做了系统的研究。研究发现,未加种子汽泡时,不同热流密度条件下,微通道内压降随质量流量先线性减小至极值再线性增大,种子汽泡对微通道内过冷液体流动和蒸汽流动不起作用,但过热液体流动和不稳定沸腾流动模式被转化为准稳态流动沸腾模式。

在课题组之前相关研究基础上,本文重点研究低入口质量流量(G = 188.97 kg/m^2)下,不同种子汽泡触发频率(10、100、1 000 Hz)对微通道内流动沸腾的影响,以及不同触发频率下壁面热流密度变化(0 ~ 350 kW/m^2)对压降和壁面温度影响。为研究抑制微通道流动沸腾不稳定性方法提供参考。

1 实验段和测量系统

1.1 实验段

图 1a 为并联三角形微通道热沉结构,图 1b 为 $A-A$ 横截面。与之前研究实验系统类似[19-20],该芯片由上层耐热玻璃和底层硅基静电键合而成。上层 7740 耐热玻璃盖板长、宽、高分别为 226 000 μm、9 000 μm、525 μm。内侧溅射有面积均为 20 μm × 50 μm 的 5 个 Pt 薄膜微加热器,微加热器与 5 个三角形微通道对应形成微加热阵列。下层为硅基热沉,长、宽、高分别为 22 600 μm、6 000 μm、400 μm。硅基上刻蚀有 5 个水力直径为 100 μm 的三角形微通道,每条微通道长和底宽分别为 12 000 μm 和 193.17 μm,相邻微通道间距为 100 μm。热沉背面溅射有 4 500 μm × 1 366 μm 的 Pt 加热薄膜,该加热薄膜由 Au 电极与实验系统中直流电源连接用于模拟芯片背部热源。此外,如图 1 所示,在主加热膜上还设置了二维贴体坐标系(x_{film},y_{film}),坐标原点(0,0)位于加热膜中心线上起始点。

1.2 测量系统

图 2 为实验测量系统。整个系统由丙酮工质流动系统、脉冲加热回路、直流加热回路和光学测量回路组成。丙酮液体经高精度恒流注射泵推动,先经冰槽冷却至所需过冷度,经 2 μm 微细过滤器后进入实验段,最后收集在集液罐中;脉冲电压回路中,脉冲电源与种子汽泡发生器阵列连接,提供脉冲信号触发频率可控的种子汽泡进入微通道;直流回路中,直流电源串联实验段背面加热膜,提供实验中所需壁面热流密度;光学测量回路主要由高速数据采集仪、高速相机、显微镜及 IR 红外热成像仪构成。高速数据采集仪采集数据包括:IR 红外测量的主加热膜上温度场,K-热电偶测量的进出芯片温度(T_{in},T_{out}),压差变送器测量的丙酮工质流经芯片压降(Δp),以及脉冲电压回路和直流电压回路中的电压信号。微通道内流动图像则由经显微镜放大后的高速相机获取。图像采集系统和数据采集系统用同步器实现同步。

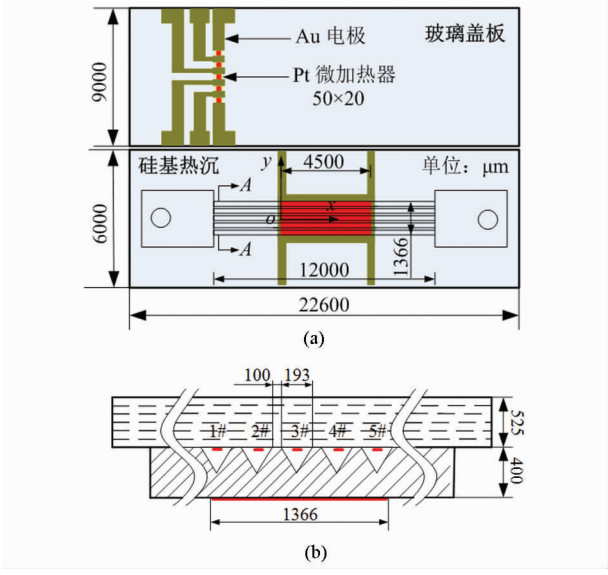

图 1 实验段

Fig. 1 Experiment section

(a) 芯片封装结构 (b) $A-A$ 横截面

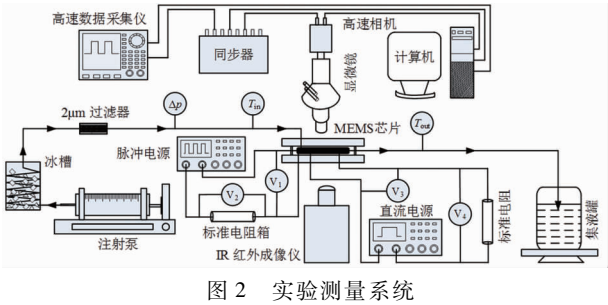

图 2 实验测量系统

Fig. 2 Experiment measurement system

1.3 实验测量参数及误差

恒流注射泵体积流量误差为 1%;芯片背面 Pt 薄膜表面热流密度误差为 6.0%;Pt 薄膜上温度由 IR 相机测量(不确定度 0.5℃,响应时间 0.25 s);进出口压力由压力传感器测量(误差为 0.1%,响应时间为 0.1 s),微通道进出口温度由 K 型热电偶测量(直径为 0.1 mm,响应时间为 0.1 s),电压信号由 DL750 数据采集仪获取,误差为 0.5%。

数据处理包括:

(1) 入口质量流量

$$G = \rho_f Q_v / (NA_c) \tag{1}$$

式中 Q_v——注射泵设定流量

ρ_f——丙酮密度

N——种子气泡发生器个数

A_c——微通道横截面积

（2）基于微通道侧壁面积的有效热流密度

$$q_{sw} = \eta V_3 V_4 / (R_f L W) \tag{2}$$

式中，η 为热效率，本文取 0.8，具体计算方法参阅文献[19－20]。V_3、V_4 为直流回路中芯片和设定电阻 R_f 上电压，R_f 为直流加热回路中设定电阻，大小设置为 1 Ω，L、W 为加热膜长度和宽度。

（3）加热膜上温度标准偏差

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}(T_{ij} - T_{W,a})^2/(IJ)} \tag{3}$$

S 值越大代表膜上温度均匀性越差。其中，$T_{W,a}$ 为加热膜上平均温度，$T_{W,a} = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} T_{ij}/(IJ)$，$T_{ij}$ 为贴体坐标（x_{film}，y_{film}）处温度，I 和 J 为加热膜上（4 500 μm × 1 366 μm）红外测得的网格最大节点数。

2　实验结果和讨论

Xu[19－20]等提出了用种子汽泡触发微通道内过热液体沸腾，消除流动沸腾不稳定的思想。通过对微加热器阵列施加脉冲电压，高电平期微加热器表面产生微纳米尺寸微汽泡，零电平期微汽泡随主流进入微通道与主流过热液体接触，过热液体在极短的时间内得以将过热部分显热通过汽液界面释放给汽泡，汽泡发生爆炸性生长过程。微加热器上产生的微汽泡用作过热液体沸腾的核化种子，称之为种子汽泡，种子汽泡产生频率是周期可控的。研究结果表明，通过控制种子汽泡触发频率能有效抑制微通道内流动沸腾不稳定性，降低微通道壁面温度，强化换热。关于种子汽泡的产生原理请参阅文献[19－20]。

2.1　触发频率对压降和加热膜上温度的影响

在入口质量流量 G = 188.97 kg/(m²·s)，热流密度 q 在 0～350 kW/m² 范围变化时，不同种子汽泡触发频率（0～1 000 Hz）对微通道进出口压降和背面主加热膜中心线上中点处（x_{film} = 2.25 mm，y_{film} = 0 mm）温度 T_{WC} 的影响如图 3 所示。曲线中包括单相液体流动和汽液两相流动。随着热流密度增加，微通道内两相流动区域与单相液体区域从图中曲线曲率突变很容易区分开。单相液体区，随着热流密度增加（q 在 0～150 kW/m²），加热膜上温度线性上升至液体饱和温度 58℃ 甚至过热状态。液体粘度和密度随着温度升高而降低，导致微通道进出口压降由于摩擦因数降低而略微线性下降。随着热流密度继续增加，微通道内流动进入两相区，加热膜上温度呈指数升高，微通道内流体空隙率增大，两相流动膨胀加速，主流与壁面摩擦因数增大，壁面速度梯度增大，压降急剧增大，两相区压降曲率增大。

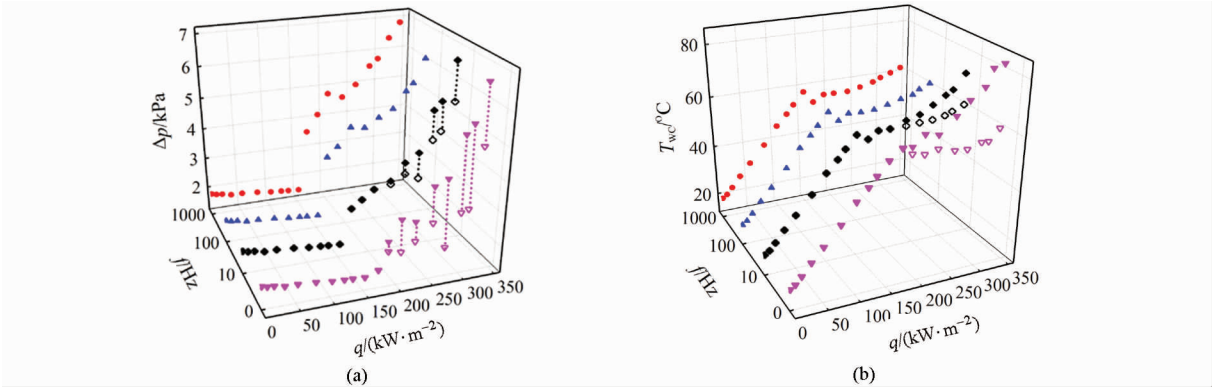

图 3　种子汽泡触发频率对压降和加热膜上温度的影响

Fig. 3　Effect of seed bubble triggering frequency on pressure drop and central point temperature at heating surface

（a）触发频率对微通道进出口压降的影响　（b）触发频率对加热膜上温度的影响

在单相区，种子汽泡对微通道单相过冷液体流动不起作用，压降和加热膜上温度随热流密度变化趋于一致。在汽液两相区，未触发种子汽泡时（f = 0 Hz），压降和温度表现出明显的波动，且振幅随着热流密度增大而增大（对应图中虚线段长度）。触发种子汽泡后，触发频率越大，对应压降越大，加热膜上温度下降越多，但压降和温度曲率随着触发频率增加有所降低。低频（10 Hz）下，压降和加热膜上温度波动明显降低，微通道内沸腾不稳定性得到明显抑制。高频（100，1 000 Hz）下，压降和加热膜上温度波动消失，加热膜上温度比触发种子汽泡前降低了 10℃ 以上，相同热流密度加热条件下，较高的频率对应曲线上压降越高，加热膜上温度越低。

2.2　不同触发频率下压降和壁面温度随时间的变化

图 4 表示质量流量 G = 188.97 kg/(m²·s) 和热

流密度 $q = 311.5\ \text{kW/m}^2$，种子汽泡触发频率 f 为 0～1 000 Hz 条件下，微通道进出口压降、加热膜上温度及其标准偏差随时间的变化。由图中明显可见，未触发种子汽泡时，表征流动沸腾不稳定性的压降和加热膜上温度随时间呈长周期大振幅波动。压降和温度波动基本同步，周期约 125 s，压降在 3.07～5.82 kPa 范围内波动，温度在 59.5～88.9℃范围内波动。加热膜上温度标准偏差随时间在 1～3℃范围内波动，表明加热膜上壁面温度分布均匀性较差且波动明显。另外，参照图 3，$q = 311.5\ \text{kW/m}^2$ 时，压降和温度振幅分别为 2.5 kPa 和 25℃，与图 4 中压降和温度振幅值相近。

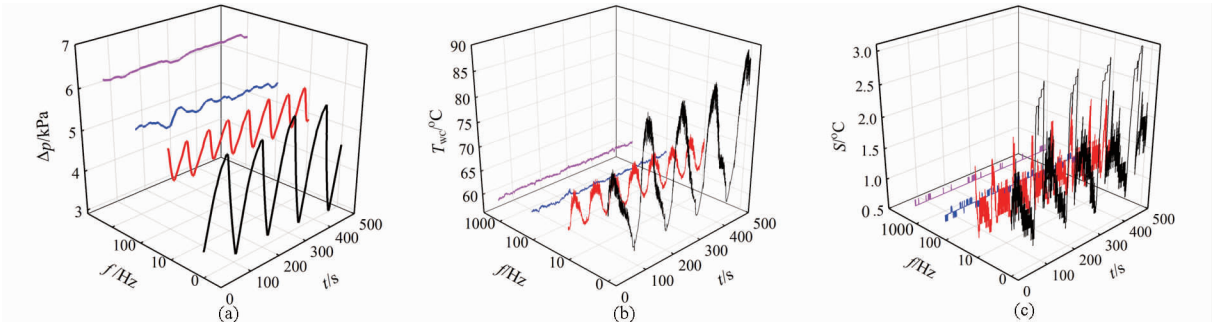

图 4 不同触发频率下压降、加热膜上温度及标准偏差随时间的变化

Fig. 4 Variation of pressure drop, central point temperature at heating surface and standard deviation number with different seed bubble triggering frequencies

（a）微通道进出口压降随时间的变化 （b）加热膜上温度随时间的变化 （c）加热膜上温度标准偏差随时间的变化

随着触发频率增大，微通道内流动沸腾不稳定性逐渐减小直至消失。压降逐渐增大，加热膜上温度降低，加热膜上温度分布均匀性明显提高。低频（10 Hz）下压降和加热膜上温度振幅明显降低，波动周期减小。高频（1 000 Hz）时，压降和加热膜上温度变化区域平稳，基本不随时间变化，加热膜上温度降低至约饱和温度（56.3℃），且加热膜上温度标准偏差降低至 0.8℃，表明加热膜上温度沿流向上分布区域均匀，从而有利于提供微系统运行的稳定性。

2.3 高频种子汽泡对微通道内流型和壁面温度的影响

图 5a 表示未触发种子汽泡时，加热膜中心线上（$x_{film} = 0 \sim 4.5$ mm，$y_{film} = 0$ mm）温度 T_W 随时间的变化。由图 3b、4b 可知，当 $f = 0$ Hz 且 $q > 150\ \text{kW/m}^2$ 时，微通道内流动为不稳定汽液两相流。加热膜上温度随时间呈长周期大幅波动，且沿流动方向，微通道上游波动振幅（大于 35℃）大于微通道中下游振幅。当触发种子汽泡进入微通道后（$f = 1\ 000$ Hz），温度大幅度下降近 25℃，加热膜上温度较高的近出口区域温度低于 62℃，进出口温差小于 5℃，说明高频种子汽泡热控下，微通道内换热得到显著增强，壁面温度降至极限，微通道壁面温度分布均匀性得到明显改善。

微通道内流动表征为单相液体和汽液两相流周期性变换，表现出强烈的不稳定性[19]。种子汽泡积极主动控制下，微通道内流型转换成稳定弹状流，换热得到强化。如图 6 所示，当种子汽泡以触发频率 $f = 1\ 000$ Hz 进入微通道后，微通道内上游（0～

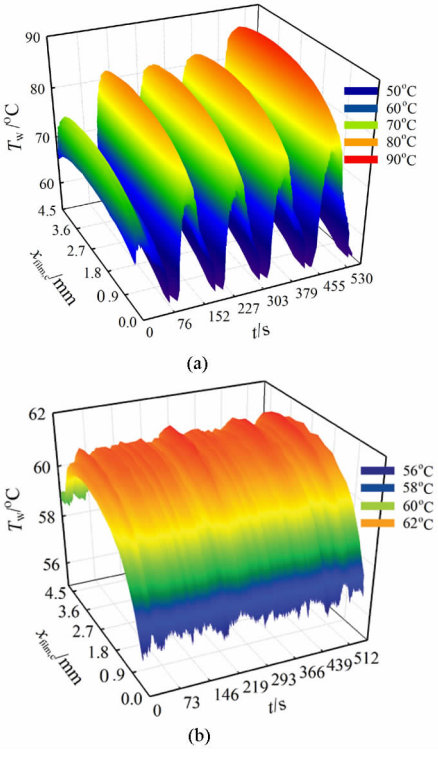

图 5 高频种子汽泡触发前后加热膜中心线上温度随时间的变化

Fig. 5 Wall temperatures at centerline of heating surface versus time for $f = 0$ and 1 000 Hz

（a）未触发种子汽泡前加热膜上温度随时间的变化

（b）触发种子汽泡后加热膜上温度随时间的变化

3.75 mm）由于主流温度较低，基本维持泡状流，微通道中游即主加热膜恒热流加热区域（3.75～8.25 mm），由于主流汽液相间热力学非平衡性较低，基本维持弹状流，汽泡在 $x = 4.3$ mm 位置附近

发生泡状向弹状的转化。随着主加热膜上恒热流不断加热，主流温度和壁面温度沿流动方向逐渐升高，更多热量通过汽液界面供给汽泡生长。因此，沿着流动方向，弹状汽泡持续长大，在加热壁面下游(8.25 ~ 12.0 mm)，拉长汽泡为主要流型，微通道下游则为稳定环状流。这两种流型导致微通道壁面与汽液相界面的液膜蒸发为该区域主要传热机制，液膜蒸发换热稳定且换热系数较高。从而使得壁面温度较低且不随时间发生变化。

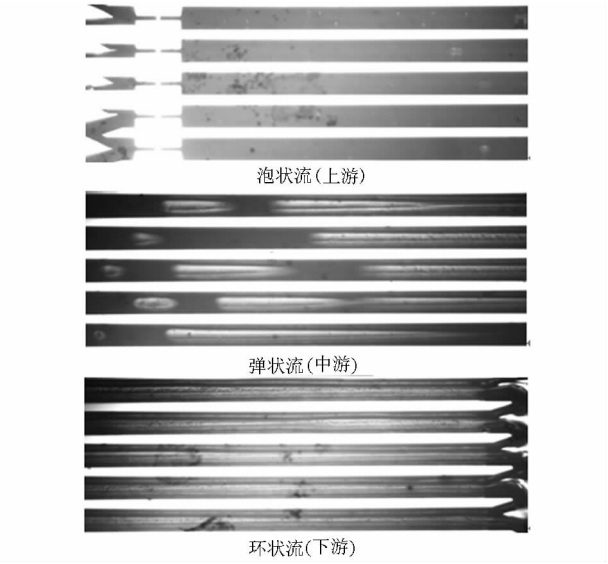

图 6　1 000 Hz 触发频率下微通道内流型

Fig. 6　Flow patterns in microchannels for f = 1 000 Hz

3　结论

搭建同步光学可视化实验台，以并联三角形微通道硅基热沉为实验段，微通道上游集成微加热器构成种子汽泡发生器阵列。通过调节脉冲电压触发不同频率种子汽泡进入微通道，研究微通道内种子汽泡热控下流动沸腾过程。主要结论如下：

(1) 定入口质量流量下，随着热流密度增大，微通道内流动由单向液体流动转换成汽液两相流动。单相液体区，加热膜上温度随热流密度线性上升，进出口压降由于摩擦因数降低而略微线性下降。两相区，加热膜上温度呈指数升高，压降曲率增大，压降急剧增大。

(2) 种子汽泡对微通道单相过冷液体流动不起作用。汽液两相区，触发频率越大，对应压降越大，加热膜上温度下降越多，但压降和温度曲率随着触发频率增加有所降低，低频(10 Hz)下，压降和加热膜上温度波动明显降低，微通道内沸腾不稳定性得到明显抑制。高频(100，1 000 Hz)种子汽泡能够完全消除沸腾不稳定性，壁面温度显著下降，温度均匀性得到明显提升。

(3) 未触发种子汽泡时，压降和加热膜上温度随时间呈长周期大振幅波动。低频(10 Hz)下压降和加热膜上温度振幅明显降低，波动周期减小。高频(1 000 Hz)下，微通道中游(加热膜区域)流型为准稳态弹状流，压降和加热膜上温度不稳定波动消失，加热膜上温度沿流向分布均匀，有利于微系统稳定运行。

参　考　文　献

1　Harirchian T. Two-phase flow and heat transfer in microchanenls[D]. West Lafayette: Purdue University, 2010.

2　Kandlikar S G. High flux heat removal with microchannels-a roadmapof challenges and opportunities[J]. Heat Transfer Engineering, 2005, 26(8): 5 - 14.

3　Fang C, David M, Rogacs A, et al. Volume of fluid simulation of boiling two-phase flow in a vapor-venting microchannel[J]. Frontiers in Heat and Mass transfer, 2010, 1(1): 1 - 11.

4　Rops C M, Geers L F G, Lindken R, et al. Explosive bubble growth during flow boiling in micro-channels[C]// Proceedings of 5th European Thermal-Science Conference on Micro and Nano-scale Heat Transfer, 2008: 18 - 22.

5　Zhang L, Koo J M, Jiang L, et al. Measurements and modeling of two-phase flow in microchannels with nearly constant heat flux boundary conditions[J]. Journal of Microchannel systems, 2002, 11(1): 12 - 19.

6　Harirchin T, Garimella S V. Microchannel size effects on local flow boiling heat transfer to a dielectric fluid[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(15 - 16): 3724 - 3735.

7　Na Y W. Forced convective flow boiling and two-phase flow phenomena in a microchannel[D]. Gainesville: University of Florida, 2008.

8　Thome J R. Start-of-the-art overview of boiling and two-phase flows in microchannels[J]. Heat Transfer Engineering, 2006, 27(9): 4 - 19.

9　Wu H Y, Cheng P. Boiling instability in parallel silicon microchannels at different heat flux[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(17 - 18): 3631 - 3641.

10　Muwanga R, Hassan I, MacGonald R. Characteristics of flow boiling oscillations insilicon microchannel heat sinks[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2007, 129(10): 1341 - 1351.

11　Qu W, Mudawar I. Prediction and measurement of incipience boiling heat flux in micro-channel heat sink[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(19): 3933 - 3945.

12 Kandlikar S G, Kuan W K, Willistein D A, et al. Stabilization of flow boiling in microchannels using pressure drop elements and fabricated nucleation sites[J]. Journal of Heat Transfer, 2006, 128(4): 389 - 396.
13 Kosar A, Kuo C J, Peles Y. Suppression of boiling flow oscillations in parallel microchannels by inlet restrictors[J]. Journal of Heat Transfer, 2006, 128(3): 251 - 260.
14 Kuo C J, Peles Y. Local measurement of flow boiling in structured surface microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(23 - 24): 4513 - 4526.
15 Kuo C J, Peles Y. Pressure effects on flow boiling instabilities in parallel microchannels[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 2009, 52(1 - 2): 271 - 280.
16 Kuo C J, Peles Y. Flow boiling instabilities in microchannels and means for mitigation by reentrant cavities[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2008, 130(7): 072403.
17 Xu J L, Zhou H J, Gan Y H, et al. Unsteady flow phenomenon in a heated microchannel at high heat fluxes[J]. Experimental Heat Transfer, 2004, 17(4): 299 - 319.
18 Xu J L, Zhou J J, Gan Y H. Static and dynamic flow instability of a parallel microchannel heat sink at high heat fluxes[J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(2): 313 - 334.
19 Xu J L, Liu G H, Zhang W, et al. Seed bubbles stabilize flow and heat transfer in parallel microchanenls[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2009, 35(8): 773 - 790.
20 Liu G H, Xu J L, Yang Y P, et al. Active control of flow and heat transfer in silicon microchannels[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2010, 20(4):045006.

Flow Boiling Instabilities Controlled by Seed Bubbles in Microchannels

Zong Luxiang[1] Xu Jinliang[2] Liu Guohua[3]

(1. *State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing* 102206, *China*
2. *Beijing Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer for Low Grade Energy, North China Electric Power University, Beijing* 102206, *China*
3. *School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Maanshan* 243002, *China*)

Abstract: A simultaneous optical visualization experimental system was set up, and a parallel triangle silicon microchannel heat sink was used as the test section. Five platinum film microheaters was etched at the top glass cover surface and located at the microchannel entrance, acting as a seed bubble generator array. The microscale flow boiling instability under different seed bubble frequencies was experimental examined. The results show that the seed bubble frequency is an important parameter to control flow boiling instability. In the single liquid flow region, seed bubbles have negligible effect on flow. In the two-phase flow region, with heat flux increasing, pressure drop increases linearly and the temperature of the heating wall surface increases exponentially. Moreover, higher pressure drop could be approached with lower wall temperatures and higher bubble triggering frequency. With the same heat flux, the seed bubbles triggered with high frequency can completely eliminate flow boiling instabilities, heating wall temperature could be dramatically decreased, and the uniformity of the temperature could be promoted significantly.

Key words: Microchannel Flow boiling instability Seed bubble Triggering frequency