

方柱微结构芯片射流冲击流动沸腾换热实验研究

郭栋, 魏进家, 张永海

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 对喷射条件下的电子芯片在 FC-72 中的流动沸腾换热进行了研究, 并和同工况下的光滑芯片作了对比. 实验选取的工况如下: 过冷度为 25、35 °C; 横流速度 V_c 为 0.5、1、1.5 m/s; 喷射速度 V_j 为 0、1、2 m/s. 实验采用的硅片尺寸为 10 mm×10 mm×0.5 mm, 通过干腐蚀技术在其表面加工出 30 μm ×120 μm 、50 μm ×120 μm 的方柱微结构. 实验表明, 所有芯片的换热性能都随过冷度和流速的增加而提高, 方柱微结构能明显地强化芯片换热, 而射流冲击进一步提高了芯片在高热流密度下的换热性能. 同一横流速度下, 喷射速度越大, 换热性能越好, 尤其是 $V_c=0.5$ m/s、 $V_j=2$ m/s 时, 强化效果最显著. 随着横流速度的增加, 射流冲击的强化效果减弱, 临界热流密度值增幅减小.

关键词: 射流冲击; 强化换热; 流动沸腾; 方柱微结构

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)01-0031-07

Experiment of Flow Boiling Heat Transfer on Micro-Pin-Finned Chips with Jet Impingement

GUO Dong, WEI Jinjia, ZHANG Yonghai

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The experiment of flow boiling heat transfer on micro-pin-finned chips in FC-72 with jet impingement was conducted. The experimental conditions consisted of two different liquid sub-cooling degrees (25, 35 °C), three different cross flow velocities ($V_c=0.5, 1, 1.5$ m/s) and three different jet velocities ($V_j=0, 1, 2$ m/s). The dimensions of the silicon chips were 10 mm×10 mm×0.5 mm (length×width×thickness) on which two kinds of micro-pin-fins with the dimensions of 30 μm ×120 μm , 50 μm ×120 μm (thickness×height) were fabricated by the dry etching technique. A smooth surface was also tested for comparison. The correlations for nucleate boiling curves and the maximum allowable heat flux curves were obtained. The results show that the heat transfer performance was improved with increasing liquid subcooling and flow velocity. All micro-pin-finned surfaces displayed a considerable heat transfer enhancement. The addition of jet impingement further enhanced the heat transfer at a high heat flux and increased the CHF. At a certain cross flow velocity, the enhancement was more significant as the jet velocity increased, especially for $V_c=0.5$ m/s, $V_j=2$ m/s. For the micro-pin-finned chips, the CHF increased by more than 93% while the subcooling was 35 °C compared with $V_c=0.5$ m/s, $V_j=0$ m/s. As the cross velocity increased, the intensification degree of jet impingement decreased and the increase of CHF also decreased.

Keywords: jet impingement; heat transfer enhancement; flow boiling; micro-pin-fins

收稿日期: 2010-06-21. 作者简介: 郭栋(1985—), 男, 硕士生; 魏进家(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50806057); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目; 教育部新世纪优秀人才计划资助项目(NCET-07-0680).

网络出版时间: 2010-10-19

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/61-1069_t.20101019.1845.002.html

伴随集成化程度的不断提高,电子器件的高散热率问题越来越受到重视,热致失效已经成为微电子器件失效的主要形式. 传统的风冷方式已经不能满足高散热率的要求,沸腾换热是一种有效的传热方式,在换热面上加工微结构则进一步强化了换热. 作为一种高效的局部冷却技术,射流冲击能够高速冲击换热表面,减小传热热阻,从而具有较好的应用前景.

国内外学者对池沸腾和流动沸腾换热做了许多相关研究^[1-3],魏进家等^[4]通过实验对比了4种不同微结构表面的池沸腾换热性能,发现方柱微结构在高热流密度区域仍能保持良好的换热性能. 袁敏哲等^[5]采用FC-72工质研究了不同表面微结构芯片的流动沸腾换热. 在射流冲击换热方面,国内外的研究也取得了相应的发展,国外研究主要集中在射流冷却的机理上,在实验和数值模拟方面都取得了很大的进展^[6-7],而国内则是以马重芳教授等的研究较多^[8-9]. 目前,对冲击射流冷却的研究还不够深入,包括改变入射面形状以及相变沸腾换热的混合应用、紊流情况下的冲击冷却等方面,尤其是有关不同横流速度 V_c 和喷射速度 V_j 对方柱微结构表面换热的影响规律的研究相对较少. 另外,通过文献^[5]发现,高热流密度时,芯片表面被气膜覆盖,传热热阻增大,换热恶化,而射流冲击具有较强的冲击力度,期望能有效地撕裂或击碎气泡或气膜来延缓临界状态的发生. 本文在文献^[5]的基础上,研究了方柱微结构在喷射条件下的流动沸腾强化换热,进一步改善了高热流密度下的换热性能,提高了临界热流密度 q_{CHF} ,完善了射流冲击的理论,为电子器件结构的优化和实际应用提供了一定的理论依据.

1 实验系统

如图1所示,制冷剂由储液罐经换热器加热到

预定温度后,一路经支路流量计后进入测试段,另一路进入喷射段,两股流体与芯片表面换热后汇合流回储液罐,完成一个循环. 通过变频器调节频率来实现不同流量. 测试段结构如图2所示,通道尺寸为 $30\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 460\text{ mm}$,喷嘴直径为 3 mm ,喷射距离为 5 mm . 在芯片两端焊接直径为 0.25 mm 的铜导线并通过恒流源对其加热,将芯片用绝热环氧硅胶粘结在玻璃板上并用环氧胶将芯片周围密封,使得芯片上表面与流体接触以减小热量损失. 在芯片背面几何中心和通道上游分别布置直径为 0.12 mm 的T型热电偶来测量芯片温度和流体温度. 热电偶线和电源线通过数据采集控制系统与计算机相连,进行实验数据的记录和芯片加热量的控制.

采用干式腐蚀技术在 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ 的硅片表面加工出高度 h 为 $120\text{ }\mu\text{m}$,宽度分别为 $30、50\text{ }\mu\text{m}$ 的方柱微结构(图3). 实验研究了芯片PF30-120、PF50-120和光滑芯片在常压下过冷度为 $25、35\text{ }^{\circ}\text{C}$, V_c 为 $0.5、1、1.5\text{ m/s}$, V_j 为 $0、1、2\text{ m/s}$ 时的射流冲击流动沸腾强化换热性能.

实验中采用T型热电偶测量芯片背面温度和流体温度,所测温度的误差均小于 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$;横流支路的流量测量采用转子流量计,所测流量的最大误差

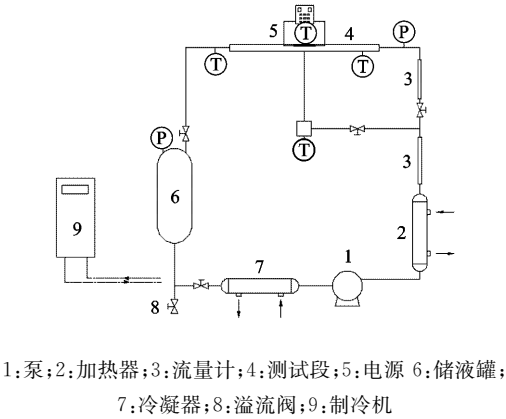


图1 系统装置示意图

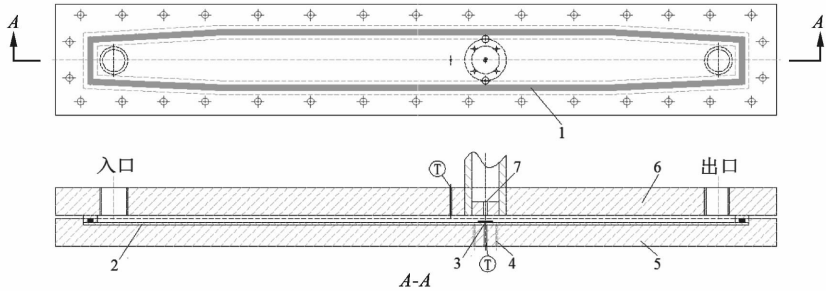
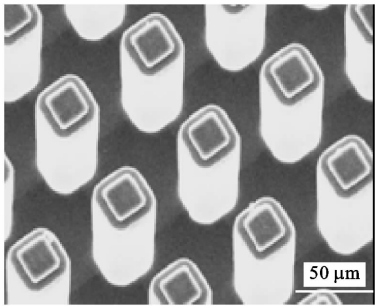
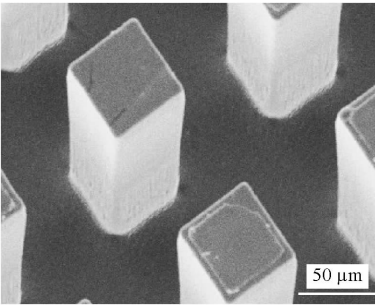


图2 测试段示意图



(a)PF30-120



(b)PF50-120

图 3 电子显微镜下的方柱微结构

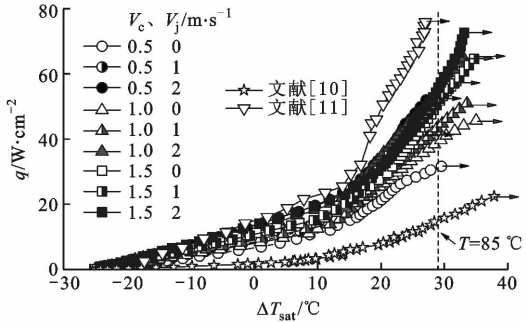
为 17%;芯片加热采用恒电流法加热,供电电流和电压的误差分别为 0.014%、0.1%,加热不确定度为 0.11%;通过 FLUENT 三维芯片模拟得到在强制对流换热和核态沸腾换热区域的热量损失分别为 16%和 6%.

2 实验结果及讨论

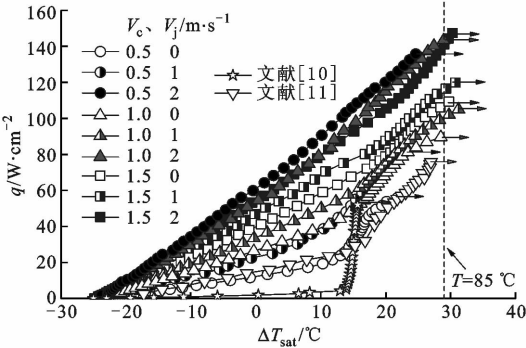
2.1 喷射速度对换热的影响

图 4a~4c 分别给出了过冷度 $\Delta T_{\text{sub}}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,光滑芯片、PF30-120、PF50-120 在不同 V_c 和 V_j 下热流密度 q 与壁面过热度 ΔT_{sat} 的关系曲线.图 4d 为 $\Delta T_{\text{sub}}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不同换热面在不同工况下的换热性能曲线.

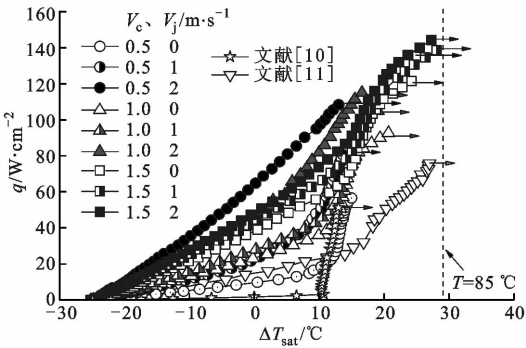
同一 ΔT_{sub} 下流动换热的效果要好于池沸腾^[10],两者在低 V_c 时 q_{CHF} 相差不大.这是由于实验测试段通道高度仅为 5 mm, V_c 低时不能将产生的气泡及时带离芯片表面,阻碍了冷流体的及时补充,从而导致临界状态的发生.与 Andrew 等^[11]的结果相比发现,喷射对单相区的强化作用并不明显,但在沸腾段,随着 V_j 的增加,曲线斜率变大.由于本实验的 V_j 小于文献^[11]的 V_j ,并且存在 V_c 的影响,故整体换热性能不如文献^[11]的结果.在单相区,换热



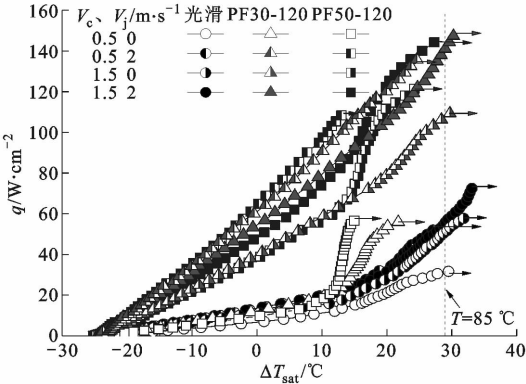
(a)光滑芯片



(b)PF30-120



(c)PF50-120



(d)不同换热面的换热性能

图 4 不同喷射速度下芯片的换热性能曲线

以强制对流换热为主,进入沸腾区域后,核态沸腾、强制对流换热共同作用.随着 V_c 的增加,单相区曲线斜率增加,沸腾起始点明显滞后, q_{CHF} 提高,这与Kosar等^[12]的结论一致,而方柱微结构随 V_c 增大,被激活侧面增多,故 q_{CHF} 受 V_c 影响更为明显.加入喷射后,方柱微结构由于换热面积的增加和边界层减小的共同作用,使得换热受 V_j 的影响明显大于光滑芯片,尤其是 $V_c=0.5\text{ m/s}$ 、 $V_j=2\text{ m/s}$ 的工况下,强化作用最为显著. $V_c=0.5\text{ m/s}$ 时,随着 V_j 的增大,换热曲线由以核态沸腾和强制对流换热共同作用过渡到以强制对流换热占主导, V_j 过渡值位于 $1\sim2\text{ m/s}$ 之间,随着 V_c 的增加,这种强化作用减弱. $V_c=1.5\text{ m/s}$ 时,不同 V_j 下换热曲线差别已不明显,这意味着此时射流发生较大程度的弯曲,冲击力度减弱,强化作用减小.PF50-120在沸腾区仍然有较大的斜率,壁面过热度也较小(图4d).这是因为方柱高度与方柱间距之比 h/p 是影响方柱结构芯片换热的重要因素,从文献[10]得知,PF50-120方柱侧面具有较大的粗糙度,使得核态沸腾提前发生并维持在较低的壁面过热度.当 h/p 较小或流速较大时,芯片底部和方柱侧面气泡的成核过程受流速的影响明显,使得扰动深入到方柱微结构之间,加剧了方柱间的微流动,阻止了气泡的产生、生长与破裂过程,核态沸腾被抑制,故曲线斜率减小.对方柱芯片而言, $V_c=0.5\text{ m/s}$ 、 $V_j=2\text{ m/s}$ 的工况下芯片以对流换热为主,壁面温度相同时能获得高于其他工况的 q ,但由于此时 V_c 较小,产生的气泡不能及时被冲离芯片表面,再加上横流和喷射相互作用导致部分流体换热后又返回芯片表面,故到达临界时壁

面过热度较低.采用 $V_c=0.5\text{ m/s}$ 、 $V_j=2\text{ m/s}$ 的组合,可在满足高热流密度的前提下,保证芯片工作在远小于 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内.

仔细对比发现,PF30-120和PF50-120的沸腾段曲线遵循一定的规律,相同过冷度下,沸腾段曲线趋近于一条直线.其规律可用下式表示

$$q=k\Delta T_b+c$$

(1)

不同芯片在不同工况下系数 k 和 c 的取值见表1.

2.2 过冷度、喷射和横流速度比对最大允许热流密度的影响

通常情况下芯片正常工作的上限温度为 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$,低于 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的最大热流密度才具有实用价值,故定义芯片温度低于 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时对应的临界热流密度值为最大允许热流密度 $q_{\max}$,温度高于 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时则取壁温为 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 对应的临界热流密度值为其 $q_{\max}$.

2.2.1 过冷度和横流速度对 $q_{\max}$ 的影响 图5给出了 $V_j=0\text{ m/s}$ 时 $q_{\max}$ 随 ΔT_{sub} 和 V_c 的变化曲线,以及与文献[5,10,13]的实验结果对比,Yuan^[5]发现同一芯片在 $V_c=0.5\text{ m/s}$ 、 $V_j=0\text{ m/s}$ 下的 $q_{\max}$ 低于同一过冷度下池沸腾的结果,而本实验由于芯片的差异使得个别工况下临界壁面温度偏高, $q_{\max}$ 偏大. ΔT_{sub} 越大,流体在达到饱和温度之前可以吸收大量的热量,并且温度越低,表面张力越大,能够形成更多的活化核心, $q_{\max}$ 也就越高.方柱微结构芯片受 V_c 的影响更为明显, $V_c=1\text{ m/s}$ 作为一个转折点, $q_{\max}$ 随 V_c 的增大而增大,但增幅却减小.这是因为大的过冷度下气泡的尺寸变小,高热流密度时芯片表面并没有被气膜完全覆盖,流体仍能进入方柱间隙中,从而强制对流换热作用增强,核态沸腾换热

表 1 式(1)中参数 k 和 c 的取值

芯片	$V_c,V_j/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\Delta T_{\text{sub}}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$		$\Delta T_{\text{sub}}=35\text{ }^{\circ}\text{C}$	
		k	c	k	c
PF30-120	0.5、0, 1、0, 1.5、0	8.47	-84.7	7.42	-53.4
	0.5、1、1、1	3.19	9.13	3.5	3.16
	0.5、2	3.21	58.2	3.07	60.1
	1、2	3.4	46.6	3.28	49.7
	1.5、1	3.24	23.04	3.13	25.4
	1.5、2	3.63	32.57	3.51	34.4
PF50-120	0.5、0, 1、0, 1.5、0, 1.5、1, 1、1	16.06	-173.6	19.2	-132.4
	1.5、2, 0.5、1	8.81	39.1	8.1	10.7
	0.5、2	2.87	71.08	2.81	95.6
	1、2	5.17	30.85	5.18	67.6

所占比例减小, $q_{\max}$ 增幅减小. 对方柱微结构而言, 毛细吸力和流动阻力共同决定了芯片的换热, $V_c = 0.5 \text{ m/s}$ 时流动阻力作用不明显. 由于 PF30-120 的面积大于 PF50-120 的, 因此前者的 $q_{\max}$ 大于后者, 但 PF50-120 的 h/p 小, 壁面过热度反而低, $V_c = 1 \text{ m/s}$ 时, 在面积强化比(方柱芯片表面积和光滑芯片表面积之比)和 h/p 的共同作用下, 使得 PF30-120 和 PF50-120 的 $q_{\max}$ 相差不大. 然而, 当 $V_c = 1.5 \text{ m/s}$ 时, 高流速使得对流换热作用增强, PF30-120 芯片方柱之间距离小, 流动阻力增大, 从而导致同工况下 PF30-120 的 $q_{\max}$ 低于 PF50-120 的.

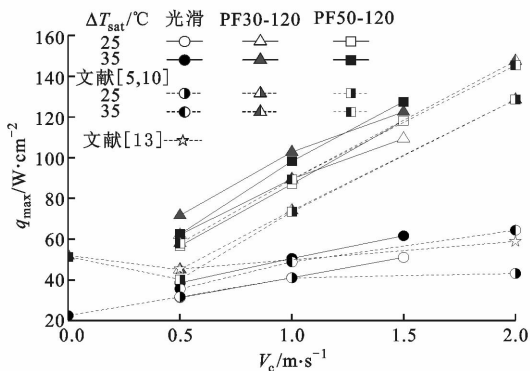


图 5 V_c 和 ΔT_{sub} 对 $q_{\max}$ 的影响 ($V_j = 0 \text{ m/s}$)

2.2.2 过冷度、喷射和横流速度比对 $q_{\max}$ 的影响
喷射速度和横流速度的比值 $R = V_j/V_c$ 是研究横流和射流共同存在下流场和换热性能的重要参数. 图 6 给出了光滑芯片、PF30-120、PF50-120 的 $q_{\max}$ 随过冷度和 R 的变化情况.

过冷度对流动喷射换热的影响与对纯横流换热的影响一致, V_c 一定的情况下, 光滑芯片的 $q_{\max}$ 随 R 的变化较缓慢, 而方柱微结构芯片随着 R 增加, 尤其是 $V_j > 1 \text{ m/s}$ 后, $q_{\max}$ 增幅变大, 且明显高于光滑芯片. PF30-120 的整个过程以强制对流沸腾换热为主, 对 PF50-120 而言, 即使在 $V_c = 1.5 \text{ m/s}$ 时, 核态沸腾依然存在, V_j 增加使得核态沸腾所占比例减

小, $q_{\max}$ 增幅减小. 除了 $V_c = 1.5 \text{ m/s}$ 时 PF50-120 的 $q_{\max}$ 大于同工况下 PF30-120 的外, 其余同工况下, $q_{\max}$ 按光滑芯片、PF50-120、PF30-120 的顺序增大, 与表面积增加的顺序一致. 同一芯片的 $q_{\max}$ 随 R 增加呈非单调性变化, 并受 R 和 V_c 共同影响, R 一定时, $q_{\max}$ 随 V_c 的增加而增加, 但增幅随着 V_c 的增加而减小. 各工况下的 $\Delta q_{\max}$ 与 $V_c = 0.5 \text{ m/s}$ 、 $V_j = 0 \text{ m/s}$ 工况下 $q_{\max}$ 的比值见表 2. 当 $V_c = 0.5 \text{ m/s}$ 、 $V_j \geq 1 \text{ m/s}$ 时, 射流作用影响变大, R 越大强化换热效果越明显. 当 $V_c = 1.5 \text{ m/s}$ 时, 纯流动沸腾影响较大, 只有 $V_j \geq 2 \text{ m/s}$ 时, 射流的强化作用才得以体现, 但强化效果却不如低横流高喷射组合, 并且这以增加较大流量为代价, 系统压损和功耗都会增加. 以 PF50-120 为例, $V_c = 0.5 \text{ m/s}$ 、 V_j 从 0 m/s 增大到 2 m/s 时, $q_{\max}$ 提高了 89%, 流量仅仅增加了 19%, 而 $V_j = 0 \text{ m/s}$ 、 V_c 从 0.5 m/s 增加到 1 m/s 时, $q_{\max}$ 只提高了 63%, 流量却增加了 1 倍. 这意味着, 要达到同样的强化效果, 采用增加 V_j 比增加 V_c 所需要的功耗小. 由于边界层不可能无限减小, 故采用过高的喷射速度意义不大. 因此, 流量一定时采用低横流高喷射可以减小功耗的增加, 具有一定的节能意义. 最大允许热流密度的关系式为

$$q_{\max} = kR + c$$

(2)

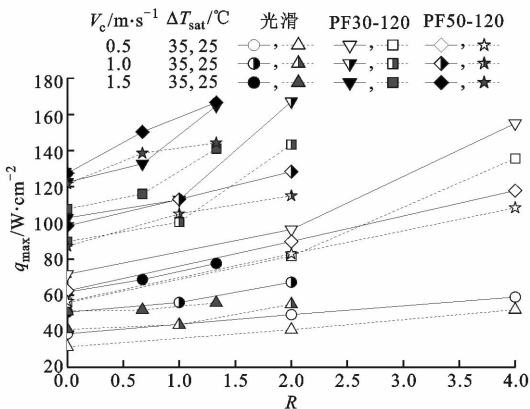


图 6 R 和 ΔT_{sub} 对 $q_{\max}$ 的影响

表 2 不同工况下的 $\Delta q_{\max} \cdot q_{\max}^{-1}$

$V_c, V_j / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\Delta T_{\text{sub}} / ^\circ\text{C}$	$\Delta q_{\max} \cdot q_{\max}^{-1} / \%$		
		光滑芯片	PF30-120	PF50-120
0.5、2	25	59	119	93
0.5、2	35	57	116	88
1.5、0	25	63	73	109
1.5、0	35	60	71	104
1.5、2	25	78	127	155
1.5、2	35	101	137	166

不同芯片不同工况下系数 k 和 c 的取值见表 3。

单个喷嘴射流冲击的有效冷却范围为:冲击面径向距离与冲击孔直径之比 $r/d \leq 1 \sim 1.2$;冲击高度与冲击孔直径之比 $H/d \leq 4 \sim 6^{[14]}$ 。在横流条件下,射流发生弯曲,驻点区偏向下游,势流核心长度缩短,强化效果减弱。本实验为有封闭板的浸没射流冲击流动沸腾换热, R 、 H/d 以及封闭板的共同作用影响着芯片换热, H/d 一定时, V_j 过小则对芯片换热影响甚微, V_j 过大则容易形成涡旋。实验中 $H/d \approx 1.7$,当 $V_c = 1.5 \text{ m/s}$ 、 $V_j = 0.5 \text{ m/s}$ 时,势流核心并没有到达芯片表面,射流一进入横流环境就发生弯曲,在射流出口处形成剪切涡。由于横流的作用不断卷吸周围流体流向下游形成尾迹涡系,剪切涡的存在在一定程度上影响了高热流密度时气膜的聚集和成形,但作用较小,纯流动沸腾换热占据主要地位, $q_{\max}$ 变化不大。高喷射时,射流在发生弯曲之前就已到达芯片表面,驻点区内压力梯度最大,边界层最薄,能深入影响方柱间的微对流过程,射流上游的壁面射流由于和横流相互作用形成 Scarf 涡^[15]。Scarf 涡和剪切涡能够卷吸周围大量流体,增强流体的紊流程度,扩大射流冷却的影响范围,再加上通道壁面的约束作用使得流经芯片表面的流动规律更为复杂,对方柱间的扰动程度增加,从而强化了换热。低热流密度时,芯片换热阻力小,喷射和流动的共同作用可以将气泡迅速带离芯片表面。在高热流密度区域,芯片表面尤其是芯片下游被气泡聚集而成的气膜覆盖,芯片散热的阻力增大,此时冲击作用不断将气泡击碎,并且涡旋作用对气膜具有较强的撕裂和卷吸作用,使得冷流体能及时补充到芯片表面,从而保证了高热流密度下换热的正常进行。当热流密度进一步增加时,芯片表面的液体微层蒸发速度加

快,气泡的聚集频率也加大,喷射的作用不足以及时破坏气膜,同时方柱间的液体微流动也不足以克服流动液压,表面得不到冷却液体的及时补充,从而导致临界状态发生。

3 结 论

本文用硅片模拟实际芯片散热,研究了在 FC-72 中,喷射条件下芯片的流动沸腾换热性能,得到以下结论。

(1)同一工况下,PF 芯片换热性能优于光滑芯片。这是由于 PF 芯片表面积强化比得到提高,气泡的生长和长大引起方柱间的微对流运动,同时气泡可在表面停留较长时间来强化换热。

(2)同一工况下,芯片的壁面过热度按光滑芯片、PF30-120、PF50-120 的顺序减小。随着 V_c 的增加,强制对流换热比重变大,方柱结构芯片核态沸腾区曲线斜率减小。

(3)低速喷射时,射流发生严重弯曲,换热规律与纯流动换热一致, $q_{\max}$ 提高程度小。高速喷射时,驻点换热和壁面涡及剪切涡相互作用,共同扩大射流冲击的影响范围,加剧了方柱间的微流动和对气膜的破坏作用。 $V_j = 1 \text{ m/s}$ 时出现换热 $q_{\max}$ 的拐点。射流冲击换热进一步提高了芯片在高热流密度区域的换热性能,延迟临界状态的发生,从而提高 q_{CHF} 。

(4) $V_c = 0.5 \text{ m/s}$ 、 $V_j \geq 1 \text{ m/s}$ 时,射流强化作用明显, $V_c = 1.52 \text{ m/s}$ 、 $V_j \geq 2 \text{ m/s}$ 时,换热才得到强化。实验条件下, $\Delta T_{\text{sub}} = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $V_c = 1.5 \text{ m/s}$ 、 $V_j = 2 \text{ m/s}$ 工况下 PF50-120 的 $q_{\max}$ 可达 167 W/cm^2 ,明显高于文献[5]中的最大值 148 W/cm^2 ($\Delta T_{\text{sub}} = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $V_c = 2 \text{ m/s}$)。

表 3 式(2)中参数 k 和 c 的取值

芯片	$V_c/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\Delta T_{\text{sub}}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$		$\Delta T_{\text{sub}}=35\text{ }^{\circ}\text{C}$	
		k	c	k	c
光滑芯片	0.5	5.17	31.1	5.1	38.725
	1($R<1,R>1$)	3.55,10.3	41.05,34.3	5.33,11.2	50.62,44.7
	1.5	3.54	50.5	11.98	61.35
PF30-120	0.5($R<2,R>2$)	12.9,27.1	55.84,27.4	11.4,29.4	71.63,37.7
	1($R<1,R>1$)	10.8,42.9	89.6,57.5	10.6,54.3	102.2,58.4
	1.5($R<2/3,R>4/3$)	13.5,36.7	107.6,92.17	15.3,47.86	122.51,100.81
PF50-120	0.5	1.383	62.4	1.295	56.7
	1	1.4	88.4	1.5	98.2
	1.5($R<2/3,R>4/3$)	25.6,8.45	121.572,133	34.24,24.34	127.5,134.11

(5)同样热流密度下, $V_c=0.5\text{ m/s}$ 、 $V_j=2\text{ m/s}$ 工况所需壁面温度明显低于其他工况。增大 V_c 和 V_j 都能强化换热,但后者所需要的流量远小于前者,在一定程度上减小了因增大流量而增加的额外功耗和运行成本,具有节能意义。

参考文献:

- [1] MUDAWAR I, MADDIX D E. Critical heat flux in subcooled flow boiling of fluorocarbon liquid on a simulated electronic chip in a vertical rectangular channel [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1989, 32(2): 379-394.
- [2] GERSEY C O, MUDAWAR I. Effects of orientation on critical heat transfer flux from chip arrays during flow boiling[J]. Transactions of the ASME, 1992, 114(3): 290-299.
- [3] WILLINGHAM T C, MUDAWAR I. Forced-convection boiling and critical heat flux from a linear array of discrete heat sources[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1992, 35(11): 2879-2890.
- [4] 魏进家,本田博司.微结构表面上FC-72的强化沸腾换热研究[J].工程热物理学报,2006,27(2):247-250.
WEI Jinjia, HONDA Hiroshi. Enhanced boiling heat transfer of FC-72 from surfaces with microstructure [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(2): 247-250.
- [5] 袁敏哲.电子芯片高效冷却流动沸腾换热实验研究[D].西安:西安交通大学能源与动力工程学院,2008.
- [6] YAN W M, MEI S C. Measurement of detailed heat transfer along rib-roughened surface under arrays of impinging elliptic jets [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(1/2): 159-170.
- [7] AIDABBAGH L B Y, SWZAI I, MOHAMAD A A. Three-dimensional investigation of a laminar impinging square jet interaction with cross-flow [J]. Journal of Heat Transfer, 2003, 125(2): 243-249.
- [8] 周定伟,马重芳,刘登瀛. L12378 圆形射流冲击和浸没冷却传热[J].西安交通大学学报,2001,35(9):958-961.
ZHOU Dingwei, MA Chongfang, LIU Dengying. Heat transfer by impingement circular jet and immersion cooling of L12378[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(9): 958-961.
- [9] 陈永昌,马重芳,雷道亨.极小尺寸圆形空气射流强化换热的实验研究[J].北京工业大学学报,2000,26(4):5-8.

CHEN Yongchang, MA Chongfang, LEI Daocheng. Experiment study on heat transfer enhancement of air jet impingement with extremely small size round nozzle [J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2000, 26(4): 5-8.

- [10] WEI J J, HONDA H. Effect of fin geometry on boiling heat transfer from silicon chips with micro-pin-fins immersed in FC-72[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46: 4059-4070.
- [11] TAY A A O, HONG Xue, CHENG Yang. Cooling of electronics components with free jet impingement boiling[EB/OL]. [2010-05-15]. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1012430&isnumber=21811>.
- [12] KOSAR A, KUO C J, PELES Y. Boiling heat transfer in rectangular microchannels with reentrant cavities [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(23/24): 4867-4886.
- [13] RAINEY K N, LI G, YOU S M. Flow boiling heat transfer from plain and microporous coated surfaces in subcooled FC-72[J]. ASME Journal Heat Transfer, 2001, 123(5): 918-925.
- [14] 周定伟,马重芳,任玉涛.圆形浸没射流冲击下有关压力梯度的理论分析[J].西安交通大学学报,1999,33(7):54-57.
ZHOU Dingwei, MA Chongfang, REN Yutao. Theoretical analysis of pressure gradient under impinging submerged round jets[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(7): 54-57.
- [15] 张燕.横流冲击射流涡旋结构的实验和数值研究[D].上海:上海大学应用数学和力学研究所,2005.

[本刊相关文献链接]

竖直狭缝通道内水沸腾换热的气泡动力学研究.西安交通大学学报,2010,44(11):12-16.
轴流风扇冲击射流下泡沫铝热沉的换热特性.西安交通大学学报,2010,44(3):6-10.
环路热管系统温度波动的机理研究.西安交通大学学报,2010,44(3):26-31.
沸腾过程的格子 Boltzmann 方法模拟.西安交通大学学报,2009,43(7):25-29.
通孔金属泡沫中的空气自然对流传热实验研究.西安交通大学学报,2009,43(1):1-4.
竖直环管内低压水过冷沸腾数值模拟.西安交通大学学报,2008,42(7):855-859.

(编辑 荆树蓉)