

# 制冷剂在微尺度槽道内的流动与传热研究<sup>†</sup>

姜明健 孙 晗

( 北京工业大学热能工程学系, 100022 )

**摘 要** 就微三角形槽道内 CFC12 的流动沸腾换热做了详细的实验研究。研究表明, 在微槽道中流体流动沸腾换热比常规尺寸的换热更为强烈, 且流动阻力相对要小, 实验观察发现, 在微三角形槽内流体流动沸腾时明显有大量气泡生成, 这与其它相关实验得出的不产生气泡的结论是不同的。

**关键词** 微尺度槽道, 流动沸腾, CFC12

**分类号** TK 124

近年来, 随着微电子工程技术、航天热环境控制、材料科学、生物科学以及细微加工工艺技术的发展, 使得“微尺度传热学”的研究, 不仅在传热学理论的拓宽而且对传热学在现今科技发展中的实际应用都具有深远意义<sup>[1]</sup>。

## 1 国内外的研究进展

目前对于微尺度传热的研究大部分以传热和流动的机理为主, 通过对流经微尺度槽道的气体或液体工质在单相或相变状态下温度、压力等物性参数的变化来揭示传热与流动的变化规律, 并与常规尺度流道的研究结果相比较, 实验中所用的工质有液体(如水、甲醇、硅油、CFC113)和气体(如 H<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、空气)。

Tuckerman 和 Pease 于 1981 年研究了水受迫流过直接加工在电子芯片背面的微形槽道的冷却性能<sup>[2]</sup>, 槽宽度为 50 μm, 高度为 300 μm, 槽间距一般为 50 μm, 流动为层流 ( $Re < 1000$ ), 热流量达 1000 W/cm<sup>2</sup>, 压力差为 345 kPa 以下, 其研究发现流体在微小槽道中的磨擦阻力系数比经典理论预计的略高。

Bowers 于 1994 年, 对直径 2.54 mm 及 510 μm 管, 在 10 mm 长的散热片上, 以 CFC113 进行流动沸腾的研究<sup>[3]</sup>, 发现在很小流量下, 达到很高的热流密度  $q > 200 \text{ W/cm}^2$ , 510 μm 微管的阻力为 23 kPa, 而 2.54 mm 直径的管中, 阻力仅为 1 kPa, 因而认为用小直径管更有好处。

国内对微尺度传热的研究始于 90 年代初, 1992 年重庆大学辛明道等对 6 种不同尺度的微矩形槽道内的受迫流动阻力和换热性能进行了研究<sup>[4]</sup>, 槽壁厚为 0.25 mm, 槽宽为

收稿日期: 1996—12—18

† 北京市自然科学基金资助项目

0.65 mm, 槽深为 0.9~2.7 mm, 测出冷态水流动时流态转变雷诺数临界值为  $Re = 1400 \sim 1800$ , 用水作工质进行受迫对流冷却, 其平均对流换热系数最高可达  $67672 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ .

1993、1994 年, 清华大学彭晓峰、王朴宣等对水和甲醇在微矩形槽道内受迫对流和流动沸腾特性进行了实验研究<sup>[5,6]</sup>, 在实验段上开深为 0.7 mm, 宽为 0.2~0.8 mm 的微槽数条, 通过不同流速和过冷度的工况进行实验, 发现微型槽内过冷液体流动沸腾时沸腾曲线上没有明显的部分核态沸腾工况, 一开始沸腾就进入旺盛阶段, 并且核沸腾传热得到很大强化, 而壁面过热度仅为  $5 \sim 8 \text{ }^\circ\text{C}$ , 进一步的可视化观察发现, 理应处于旺盛核沸腾状态的微槽内的流动沸腾观察不到气泡的存在,  $\alpha - t_w$  曲线在单相段存在传热系数陡升的现象. 作者提出了“汽化空间”和“拟沸腾”的新概念.

## 2 实验

在微型槽道中, 由于尺度的微小化, 使槽道内流动和换热状况受到尺寸和槽的深宽比很大影响, 不同的槽型, 不同的表面, 不同的加热方式都对流动和换热情况带来很大的差异.

本论文工作选定为微三角形槽道内流动及换热的实验研究, 选用制冷工质为价格较便宜的 CFC12. 在实验过程中通过流量及加热量的变化, 观察、测示其在温度、压力、阻力等参数的反映, 以分析微三角槽中 CFC12 流动及换热特性并观察流动沸腾的实验现象. 由于制冷剂的气化潜热和蒸发温度等性质都较接近, 因此 CFC12 在微三角槽中的流动换热特性对其它制冷剂有着指导性意义.

### 2.1 实验装置

整个实验系统如图 1 所示, 实验工质 CFC12 由高压储液瓶供给, 经流量计、过冷器、调节流量和蒸发压力的膨胀阀节流后, 至实验段, 加热沸腾后流出.

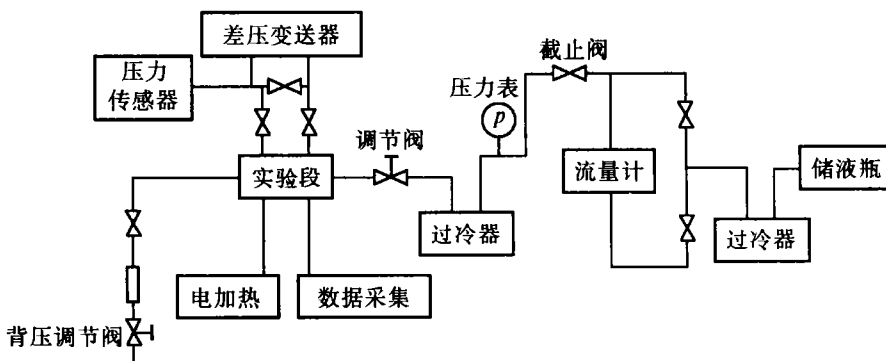


图1 实验系统流程图

实验段结构见图 2, 实验段由 22 条平行的微槽组成, 微槽长 100 mm, 并分成 5 小段, 每段间用 1 mm 厚的云母片平行隔开, 以减小轴向热传导. 在每段中心, 紧紧靠近微槽壁处, 埋有铜-康铜热电偶, 能准确测出内部温度, 在每段下面还装有套在铜块上加热的电热管, 电热管的加热量可由调压器控制, 根据壁温调节每段加热量, 可以进行等热流和

等壁温两种工况的实验研究。在微槽进出口安装了差压变送器和热电偶，可测量制冷剂 CFC12 的流动阻力及温度，并在出口安装了压力传感器，这样可测得 CFC12 在出口的蒸发压力，进一步推算出其蒸发温度。为了使实验可视化，在实验段上压盖有机玻璃盖板，并用耐晴橡胶密封。

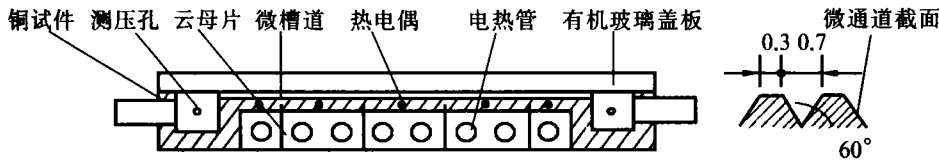


图2 实验段结构

### 2.2 仪器的精度

压力传感器为  $\pm 0.1\%$ ，差压变送器为  $\pm 0.3\%$ ，温度计为  $\pm 0.05\text{ }^\circ\text{C}$ ，热电偶为  $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ ，流量计为  $\pm 1\%$ ，功率计为  $0.5\%$ 。

## 3 实验及结果分析

制冷剂 CFC12 在微槽道内流动的沸腾换热实验研究分别是等壁温和等热流的情况下进行，数据处理的主要公式为：

对流换热系数： $\alpha = q / (t_w - t_s)$ ，其中： $q$  为热流密度 ( $\text{W} / \text{m}^2$ )， $t_w$  为槽道内壁温 ( $^\circ\text{C}$ )， $t_s$  为蒸气饱和温度 ( $^\circ\text{C}$ )；

雷诺数： $Re = v \cdot de / \nu$ ，其中： $v$  为工质流速 ( $\text{m} / \text{s}$ )， $de$  为当量直径 ( $\text{m}$ )， $\nu$  为运动粘度 ( $\text{m}^2 / \text{s}$ )；

努谢尔数： $Nu = \alpha \cdot de / \lambda$ ，其中： $\lambda$  为导热系数 ( $\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})$ )；

摩擦阻力系数： $f = 2 \cdot \Delta p \cdot de / (\rho \cdot v^2 \cdot L)$ ，其中： $\Delta p$  为微槽进口压差 ( $\text{Pa}$ )， $\rho$  为密度 ( $\text{kg} / \text{m}^3$ )， $L$  为微槽长度 ( $\text{m}$ )；

Pierre 沸腾数： $K_f = \Delta i / (g \cdot L)$ ，其中： $\Delta i$  为工质在微槽进口焓差 ( $\text{J} / \text{kg}$ )， $g$  为重力加速度 ( $\text{m} / \text{s}^2$ )；

沸腾数： $Bo = q / (G \cdot r)$ ，其中： $G$  为质量流量 ( $\text{kg} / \text{s}$ )， $r$  为汽化潜热 ( $\text{J} / \text{kg}$ )；  
根据整理出来的数据，得到了一些特性曲线(见图 3~图 6)。

### 3.1 沸腾流动阻力特性

由图 3 可见，对于液体的 CFC12 沸腾流动的过程，微三角形槽道内的  $f$  随  $Re$  的增加而呈现较为光滑的下降趋势，与常规尺寸的槽道相比，其阻力系数略高，分析认为，是槽道尺寸微小而相对粗糙度增大的原因。但由于换热的加强，总体尺寸的减小，其阻力也相对要小。

### 3.2 沸腾流动换热特性

由图 4 可以看出， $Nu$  随  $(Re^2 \cdot K_f)$  的增大而增大，当到一定程度时则其增大趋势变得

十分平缓. 由于实验数据较少, 无法拟合关联式.

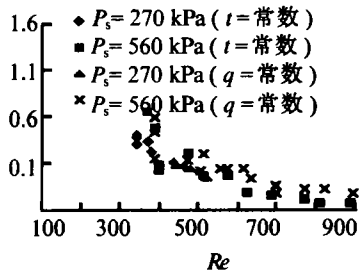


图3  $f-Re$  特性曲

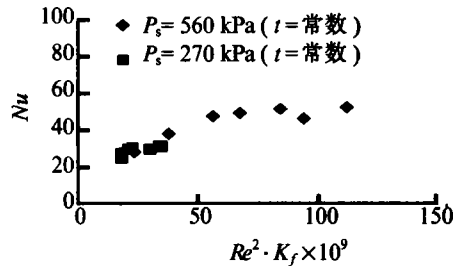


图4  $Nu-Re^2 K_f$  特性曲线

本实验的换热特性研究, 还得出换热系数 $\alpha$ 随质量流量 $G$ 变化的曲线, 以便与其它相关实验进行比较. 图5是本次所得结果与J Eckels<sup>[7]</sup>在1991年以相同工质所作实验结果的比较, 三角形标出的曲线为Eckels所作, 实验是在常规尺寸内径为8 mm的水平圆管中进行的. 通过比较, 可以明显看出在相同质量流量下, 微槽道中的换热系数 $\alpha$ 要比常规尺寸的大得多.

此外, 实验还就阻力变化与沸腾情况的关系作了分析, 作出 $f-Bo$ 特性曲线(如图6). 不难看出, 随着沸腾 $Bo$ 不断增大, 也就是说随着沸腾的激烈程度的不断加强, 微槽中的阻力不断加强.

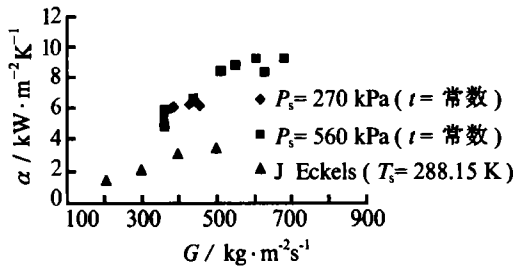


图5  $\alpha-G$  曲线比较

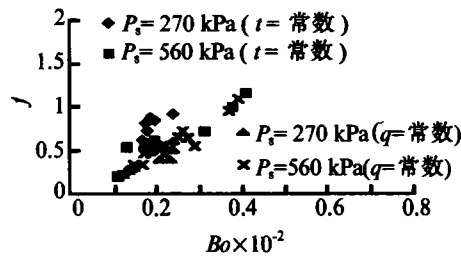


图6  $f-Bo$  特性曲线

### 3.3 槽内流动沸腾现象的观察与探讨

实验的整个过程都是在沸腾流动的情况下进行的, 透过有机玻璃盖板可以清楚地观察到流体蒸发的汽液分界面, 并且在实验段出口端可以观察到间歇性的流体流动振荡. 而对于气泡产生的问题, 就本实验而言与其它相关实验得出的不产生气泡的结论有所不同, 本实验CFC12流体在流经微三角形槽道受热沸腾时有明显的大量气泡生成. 分析认为, 这是由于CFC12的汽化潜热较低和三角形槽道易于成核沸腾造成的. 因此, 微槽道内流动沸腾时是否有气泡产生, 是与流体性质和微槽道结构有关的.

## 4 结论

1. 微槽道中流体流动换热明显强于常规尺寸流道内流动换热, 在相同质量流量下, 微槽道中的换热系数 $\alpha$ 比常规尺寸的 $\alpha$ 要大, 换热更为强烈.

2. 由于相对粗糙度大的原因, 微三角形槽内流动阻力系数较常规尺寸槽道内虽然略大, 但对于总体尺寸减小来说, 其阻力也相对要小.
3. 在微槽道中, 随着流体沸腾激烈程度的加强, 微槽中的阻力系数不断增大.
4. 本实验微槽内流动沸腾可以明显观察到有气泡生成. 因此认为, 是否产生气泡是与流体性质和微槽结构有关.

致谢: 本论文的研究工作, 得到了丁良士教授的帮助和指导, 在此表示衷心的感谢.

### 参 考 文 献

- 1 丁良士, 姜明健, 孙晗. 高紧凑式微通道换热器. 见: 全国暖通空调制冷 1996 年学术年会论文集. 昆明: 1996. 360~363
- 2 Tuckerman D B, Pease R F W. Ultrahigh Thermal Conductance Microstructures for Cooling Integrated Circuits. In: Proc 32nd Electronics Components Conference. 1981. 145~150
- 3 Bowers M B, Mudawar I. High Flux Boiling in Low Flow Rate, Low Pressure Drop Mini-Channel and Micro-Channel Heat Sinks. Int J Heat Transfer, 1994, 37(2): 321~332
- 4 张培杰, 辛明道. 微尺寸管内流体流动与换热. 见: 中国工程热物理学会第八届年会论文集. 北京: 1992. 121~125
- 5 Peng X F, Wang B X. Forced Convection and Flow Boiling Heat Transfer For Liquid Flowing Microchannels. Int J Heat Mass Transfer, 1993, 36(14): 3421~3427
- 6 Wang B X, Peng X F. Experimental Investigation On Liquid Forced-Convection Heat Transfer Through Microchannels. Int J Heat Mass Transfer, 1994, 37: 331~339
- 7 Eckels S J, Pate M B. An Experiment Comparison of Evaporation and Condensation Heat Transfer Coefficients for HFC-134a and CFC-12. Int J Refrig, 1991, 14: 70~77

## Study on Friction and Heat Transfer of the Flow of CFC-12 in Micro-channels

Jiang Mingjian Sun Han

( Department of Thermal Science and Engineering, Beijing Polytechnic University, 100022 )

**Abstract** The friction factors and heat transfer characteristics of the flow of CFC-12 in micro triangular channels are studied. The experimental results show that the heat transfer in micro-channels is greater than that in normal scale channels, and the friction factors are smaller than that in normal channels. Most importantly, lots of bubbles are seen while CFC-12 boiling in the micro channels upon our experiments, which is different from the result got by others so far. It is explained in this paper.

**Keywords** micro-channel, flow boiling, CFC-12