

不同表面能对微细通道流动沸腾压降特性的影响

罗小平 谢鸣宇 郭峰 李海燕

(华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510640)

摘要: 采用不同浓度氟硅烷-乙醇修饰液对高、宽分别为 2.0 mm、1.0 mm 的矩形截面微通道进行修饰,得到了表面能不同的微通道试件,并以 R141b 制冷剂为实验工质,设定实验工况,在微通道试件中进行沸腾换热实验,探讨具有不同表面能的微通道对两相流动沸腾传热压降特性的影响。实验结果表明:修饰液浓度越高,浸泡时间越长,修饰后槽道的表面能越低;表面能的改变不会对各压降所占比例造成大的影响,但会影响两相摩擦压降,减小表面能会增大单位长度两相摩擦压降,实验中的增大率达到 5.1% 和 12.7%;将实验数据分别与相关模型的预测值进行了对比,并对模型关联式进行了修正,所得到修正模型的平均绝对误差明显降低。

关键词: 微通道; 表面能; 两相摩擦压降; 修正模型

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)01-0406-07

Effect of Different Surface Energies on Pressure Drop Characteristics of Flow Boiling in Microchannels

LUO Xiaoping XIE Mingyu GUO Feng LI Haiyan

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: With the wide application of microchannel heat exchanger, more and more researches focus on the microchannels and the pressure drop characteristics are important research object. Pure refrigerant R141b was used as working fluid in microchannels to carry out boiling flow experiments and explore the effect of surface energy on flow boiling pressure drop characteristics. Fluoroalkylsilane solution in different concentrations was used to modify the surface energy of different microchannel tests with size of 2.0 mm × 1.0 mm, and tests were obtained with different surfaces energy. The flow boiling pressure drop characteristics were experimentally investigated through the tests by using R141b refrigerant. The influence of surface energy on pressure drop were investigated, and then a modified model was got. The results showed that the surface energy of tests were low with long immersion time and high concentration, and the tests with low surface energy had big numerical value of frictional pressure drop. The two-phase frictional pressure drop was increased by 5.1% and 12.7%, respectively. The predicted values of different correlated models were compared with experiment values, and a modified model which had a better predicted result was obtained, the mean absolute error was decreased obviously. The result provided supplement for the research on flow boiling resistance characteristics.

Key words: microchannels; surface energy; two-phase frictional pressure drop; modified model

引言

随着电子信息产业的快速发展,越来越多的微通道换热器得到了应用^[1]。微通道换热器结构紧凑,且换热效率高,相关研究表明,微电子系统中采用微通道换热器后,散热性约为强制水冷的 100 倍,强制风冷的 1 000 倍^[2]。随着材料技术的进一步发

展,很多材料表面通过处理可以得到改善,如改变材料表面特性得到疏水性或者亲水性表面,进而改变阻力特性,很多学者做了这方面的研究并取得了较好的效果^[3-5]。目前研究实验工质大多采用去离子水,而且关于两相流动沸腾方面研究很少。本文利用自己搭建的实验平台,以制冷剂为实验工质,采用经过处理后具有不同表面能的微槽道进行实验,以

收稿日期: 2016-05-15 修回日期: 2016-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(21276090)

作者简介: 罗小平(1967—),男,教授,博士,主要从事微通道换热器传热研究,E-mail: mmxpluo@scut.edu.cn

探究表面能对两相沸腾传热时阻力特性的影响规律。

1 实验系统与微通道结构

1.1 实验系统

图 1 为实验系统简图。主要由 3 部分组成：①注液段。实验前对实验系统进行抽真空处理，然后调节手阀将注液装置中的实验工质注入实验系统，可以控制进入实验系统的工质量。②流动回路。包括了磁力泵、预热段、冷却段和微通道实验段等，实验段竖直放置，实验开始后磁力泵提供动力使实验工质在系统内运转，流经预热段后，以液态向上流入微通道，经过受热后以气液两相态从上端流出，然后进入冷却段，经过充分冷凝和冷却变为液态流入磁力泵开始下一次循环。③数据采集段。包括数据采集模块、工控机等，主要采集和储存实验段所测量的压力、温度等数据。

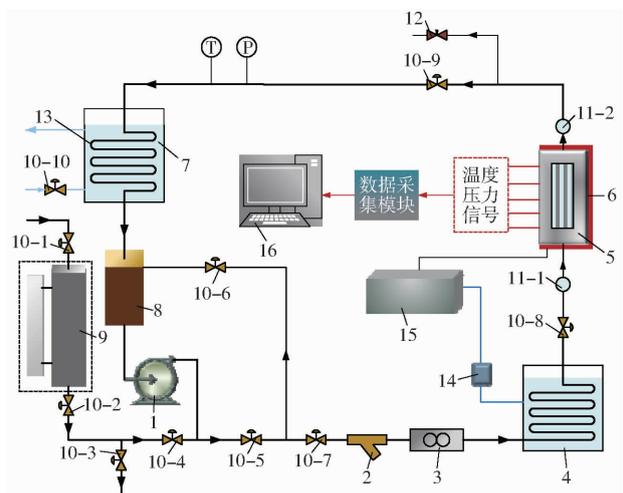


图 1 实验系统简图

Fig. 1 Flow diagram of experiment system

1. 磁力泵 2. 过滤器 3. 流量计 4. 预热水箱 5. 实验段 6. 电加热板 7. 冷却水箱 8. 储液罐 9. 注液装置 10-1 ~ 10-10. 手阀 11-1、11-2. 视镜 12. 针阀 13. 水管 14. 温度控制器 15. 控制箱 16. 工控机

1.2 实验段

(1) 微通道实验段

微通道实验段是本文实验的关键研究对象，其构成模型如图 2 所示。

本实验的铝制基座、微槽道试件以及铝制盖板都采用牌号为 6063-T5 的铝材料加工而成。实验采用的工质 R141b 与大多数橡胶材质会发生反应，因此选用聚四氟乙烯垫片，其耐腐蚀性好。可视化观测窗口选用 Pyrex 耐热玻璃，透过其可观察工质在微通道内流动沸腾状况。

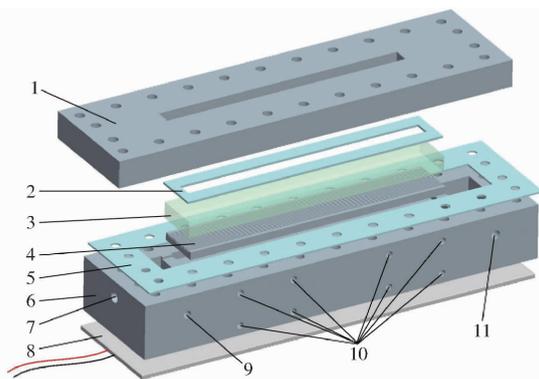


图 2 微通道实验段结构图

Fig. 2 Structure diagram of test section

1. 盖板 2. 密封垫片 3. 可视化玻璃 4. 微通道试件 5. 密封垫片 6. 底座 7. 工质入口 8. 加热板 9. 入口测温孔 10. 壁面测温孔 11. 出口测温孔

(2) 微通道试件

实验所采用微通道试件采用电火花线切割的方式加工得到，有 18 条相互平行的矩形通道，如图 3 所示。

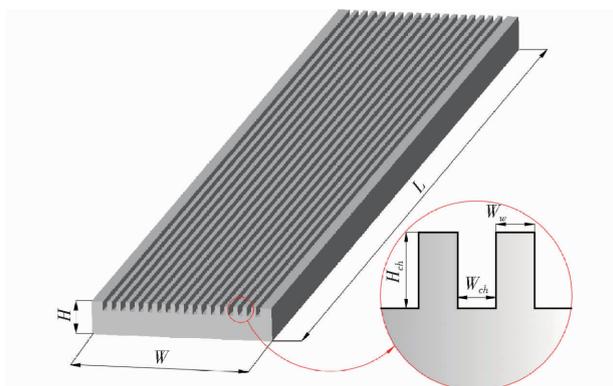


图 3 微通道试件模型

Fig. 3 Model of microchannels test piece

每条微通道尺寸为 $1\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 240\text{ mm}$ ，具体尺寸参数见表 1。

表 1 微通道试件尺寸参数

Tab. 1 Dimension parameters of microchannels test piece

参数	L	W	H	W_{ch}	H_{ch}	W_w
数值/mm	240	40	7.5	1	2	1

1.3 实验试件表面处理

考虑到实验微槽道的材料和尺寸，以及可操作性，选择采用全氟辛基三乙氧基硅烷作为物质修饰，修饰后使微通道表面形成微粗糙结构，获得具有低表面能表面的微通道。以无水乙醇为基液，配置氟硅烷浓度分别为 1%、2%、3% 的 3 种修饰液。为了对比研究，将槽道分别浸泡 3 h 和 12 h 进行对比，如表 2 所示。完成浸泡后取出试件，静置待接触角测量。

表2 微通道处理情况分组

Tab.2 Group of different microchannels

参数	A	B	C	D	E	F	G
修饰液浓度/%	1	1	2	2	3	3	0
浸泡时间/h	3	12	3	12	3	12	0

1.4 实验主要测量参数

实验段测量参数主要包括:实验段进出口压力(HC3160型压力传感器测量,误差为0.33%)、实验段温度(K型热电偶测得,误差为0.5%)、流量(采用涡轮流量计测量,误差为0.5%)。

2 数据处理

2.1 表面能

固体表面的表面能也称为固体表面自由能,主要指某温度、压力条件下,重新生成单位固体表面时所需的可逆功^[6]。本实验采用 Young's 法计算固体表面能。整个界面体系受到固体表面能 γ_s 、液体表面能 γ_L 和固液界面能 γ_{sL} 综合作用,整个体系中不同的表面能均有3个分量:Lewis 酸分量 γ^+ 、Lewis 碱分量 γ^- 以及 Lifshitz-vander Waals 分量 γ^{LW} ^[7]。因此,液体表面能 γ_L 、固体表面能 γ_s 的计算式为

$$\gamma_s = \gamma_s^{LW} + 2\sqrt{\gamma_s^+ \gamma_s^-} \quad (1)$$

$$\gamma_L = \gamma_L^{LW} + 2\sqrt{\gamma_L^+ \gamma_L^-} \quad (2)$$

固体表面能、液体表面能和固液接触面表面能存在关系

$$\gamma_{sL} = (\sqrt{\gamma_s^{LW}} - \sqrt{\gamma_L^{LW}})^2 + 2(\sqrt{\gamma_s^+ \gamma_s^-} + \sqrt{\gamma_L^+ \gamma_L^-} - \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_L^-} - \sqrt{\gamma_s^- \gamma_L^+}) \quad (3)$$

结合 Young's 方程^[8] $\cos\theta = \frac{\gamma_s - \gamma_{sL}}{\gamma_L}$, 可得表面能与接触角的关系为

$$(\gamma_L^{LW} + 2\sqrt{\gamma_L^+ \gamma_L^-})(1 + \cos\theta) = 2(\sqrt{\gamma_s^{LW} \gamma_L^{LW}} + \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_L^-} + \sqrt{\gamma_s^- \gamma_L^+}) \quad (4)$$

根据式(4),如果已知接触角 θ 和3组不同液体的 γ_L^{LW} 、 γ_L^+ 、 γ_L^- 值,就能计算出固体表面能参数: γ_s^{LW} 、 γ_s^+ 、 γ_s^- 。为了因此求得固体表面能,不仅需知接触角,也需知3种已知液体的表面能参数。常用测试液的表面能参数如表3所示。

实验中选取部分表面形成液滴情况如图4所示。

将各组接触角数据代入式(3)中,可以计算微通道不同位置的表面能,如表4所示。

从表4中可看出,相比G组,A、B、C、D、E、F组的表面能依次降低。因此,修饰液浓度和浸泡时间对表面能有一定的影响,修饰浓度越大,修饰后表面

表3 3种测试液的表面能参数

Tab.3 Parameters of three kinds of test fluids

测试液	γ_L	γ_L^{LW}	γ_L^+	γ_L^-	mJ/m ²
去离子水	72.8	21.8	25.5	25.5	
乙二醇	48.0	29.0	1.92	47.0	
甲酰胺	58.0	39.0	2.28	39.6	

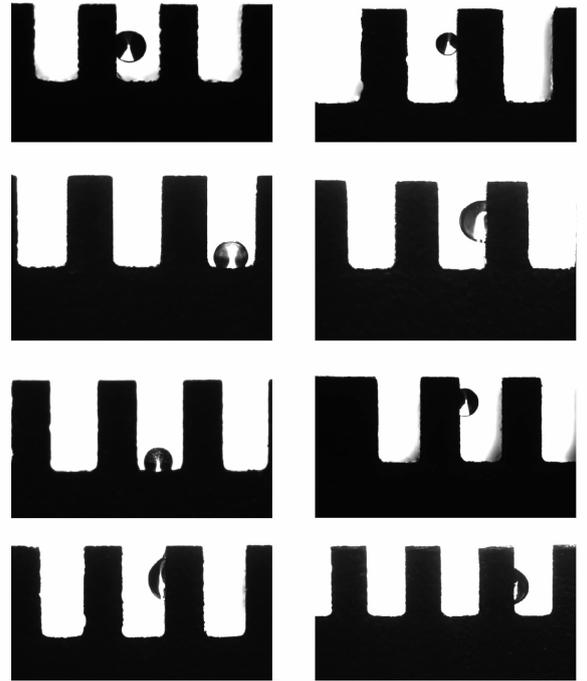


图4 不同位置液滴示意图

Fig.4 Sketches of liquid droplet at different positions

表4 微通道不同位置表面能

Tab.4 Surface energy of microchannels at

位置	组号						mJ/m ²
	A	B	C	D	E	F	
底面	43.79	38.14	33.73	28.81	22.87	19.39	50.83
左侧面	44.86	38.53	33.39	28.76	23.17	19.81	51.23
右侧面	43.62	38.33	33.79	29.14	23.24	20.37	51.22

的表面能越低;浸泡时间越长,槽道表面能同样越低。本实验条件下,参照组槽道底面表面能为50.83 mJ/m²,而经过修饰的槽道,最小表面能降为19.39 mJ/m²。

2.2 压降

考虑到实验中气液两相相对流动速度较大,微通道中不易形成气液均匀混合流动的现象,本实验数据采用分相模型^[9]进行计算分析。工质进入微槽道时,刚开始是单相液态流,之后由于受热,会转换为气液两相流。因此实验过程中的总压降 Δp_{tot} 包括4部分^[10-11],即进口突缩压降 Δp_c 、出口突扩压降 Δp_e 、单相流动阻力压降 Δp_{sp} 、两相流动阻力压降 Δp_{tp} ,即

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_c + \Delta p_e + \Delta p_{sp} + \Delta p_{tp} \quad (5)$$

其中

$$\Delta p_c = \frac{G^2}{2\rho_L}(1 - \sigma^2)$$

$$\Delta p_e = \frac{(1 - \sigma)\sigma}{2\rho_L} \left[x_{out} \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} - 1 \right) + 1 \right] G^2$$

式中 σ ——截面收缩比

x_{out} ——工质出口干度^[12]

G ——质量通量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

ρ_L, ρ_G ——液相流密度和气相流密度, kg/m^3

本实验中单相流段的流动阻力压降由单相流摩擦压降 $\Delta p_{sp,f}$ 和单相重力压降 $\Delta p_{sp,g}$ 组成, 即

$$\Delta p_{sp} = \Delta p_{sp,g} + \Delta p_{sp,f} = \rho_L g L_{sp} + \frac{2L_{sp}}{\rho_L D_h} f_{sp} G^2 \quad (6)$$

其中

$$L_{sp} = \frac{GW_{ch}H_{ch}C_p}{q_{eff}(W_{ch} + 2H_{ch})}(T_{sat} - T_{in})$$

式中 L_{sp} ——微通道内单相流长度, mm

f_{sp} ——两相摩擦因数

C_p ——工质定压比热容, $\text{J}/(\text{kJ} \cdot \text{K})$

D_h ——水力直径

T_{sat} ——操作压力下工质的饱和温度, $^{\circ}\text{C}$

T_{in} ——工质入口温度, $^{\circ}\text{C}$

两相流状态下, 流动阻力压降包括两相流摩擦压降 $\Delta p_{tp,f}$ 、两相流加速度压降 $\Delta p_{tp,a}$ ^[13] 和两相流重力压降 $\Delta p_{tp,g}$, 即

$$\Delta p_{tp} = \Delta p_{tp,f} + \Delta p_{tp,a} + \Delta p_{tp,g} \quad (7)$$

$$\Delta p_{tp,a} = G^2 \left[\frac{(1 - x_{out})^2}{(1 - \alpha_{out})\rho_L} + \frac{x_{out}^2}{\alpha_{out}\rho_G} - \frac{1}{\rho_L} \right] \quad (8)$$

$$\Delta p_{tp,g} = \frac{gL_{tp}\rho_G\rho_L}{x_{out}(\rho_L - \rho_G)} \ln \left(1 + \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} - 1 \right) x_{out} \right) \quad (9)$$

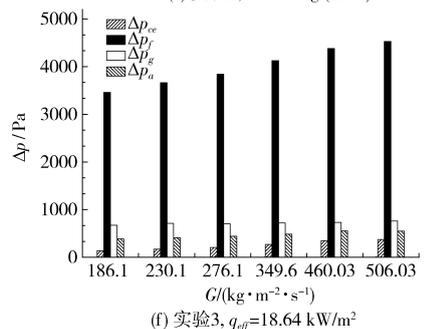
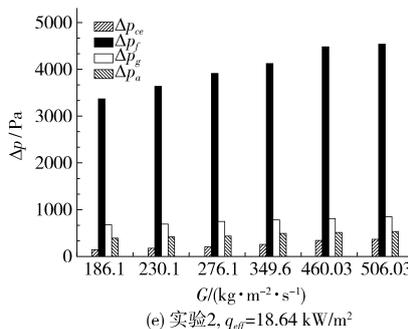
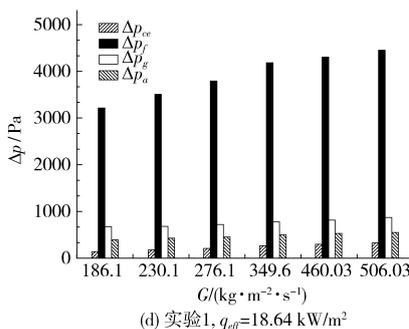
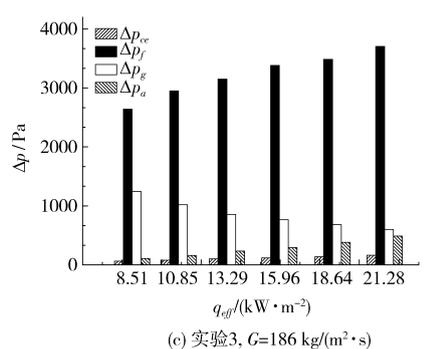
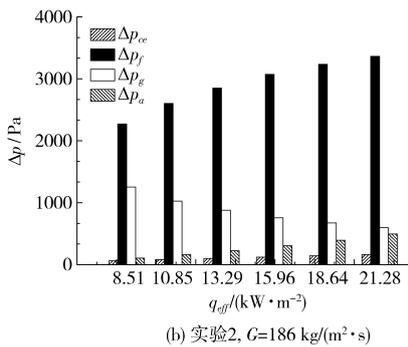
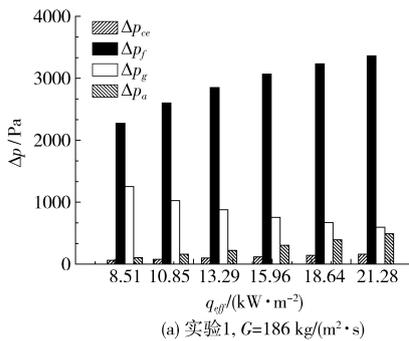


图5 不同表面能试件的各压降分量

Fig. 5 Pressure drop of different test pieces

$$\alpha_{out} = 1 / \left[1 + \left(\frac{1 - x_{out}}{x_{out}} \right) \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.6667} \right] \quad L_{tp} = L - L_{sp}$$

式中 L_{tp} ——两相段长度, mm

α_{out} ——出口空泡率

综合式(6)~(9)得

$$\Delta p_{ce} = \Delta p_c + \Delta p_e \quad \Delta p_f = \Delta p_{sp,f} + \Delta p_{tp,f}$$

$$\Delta p_g = \Delta p_{sp,g} + \Delta p_{tp,g}$$

可得两相摩擦压降

$$\Delta p_{tp,f} = \Delta p_f - \Delta p_{sp,f} = (\Delta p_{tot} - \Delta p_{ce} - \Delta p_g - \Delta p_{tp,a}) - \Delta p_{sp,f} \quad (10)$$

3 结果与分析

3.1 表面能对微通道各压降比例的影响

为了进一步探究表面能对压降的影响规律, 本实验选取了 G、B、E 3 组表面能不同的槽道来分析影响压降变化的因素, 分别记为实验 1、实验 2、实验 3。

实验以 R141b 纯制冷剂为实验工质, 实验时热流密度变化范围为 $8.51 \sim 21.28 \text{ kW}/\text{m}^2$, 质量通量从 $186.1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 变化到 $506.03 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 入口过冷度保持 6°C 不变。

图 5 为不同工况下, 纯制冷剂 R141b 在不同表面能试件中流动沸腾时, 各压降的变化。

由图 5 可知, 3 种不同表面能试件各压降所占比例大体保持一致。热流密度增加时, 摩擦压降增加, 重力压降有所减小, 但进出口局部阻力压降没有明显的变化; 当质量通量增大时, 摩擦压降有较为明显的增大趋势, 但是其他压降的变化不明显。在

本实验条件下,表面能的改变不会对各压降所占比例造成较大的影响。其中,摩擦压降是造成总压降的最主要因素,所占比例达到60%~75%,重力压降次之,约为15%~30%,加速度压降和进出口局部阻力压降所占比例更小,约5%~15%。

3.2 表面能对两相摩擦压降的影响

通过对各压降分量的计算数据分析,得知影响压降的主要是两相摩擦压降,因此研究表面能对两相摩擦压降的影响有较大的意义。实验工况发生变化时,两相段长度和单相段长度会发生一定的改变,因此不能单纯考虑两相摩擦压降总值。本文采用了单位长度的两相摩擦压降来进行对比研究,定义为 ΔP_{tp}^f ,这样可以更合理地研究表面能的改变对两相摩擦压降的影响,其计算式为

$$\Delta P_{tp}^f = \frac{\Delta p_{tp,f}}{L_{tp}} \quad (11)$$

实验中,热流密度8.51~21.28 kW/m²,质量通量186.1~506.03 kg/(m²·s),入口过冷度6℃。分析单位长度两相摩擦压降随热流密度、质量通量的变化规律。当质量通量保持506.03 kg/(m²·s)不变时实验结果如图6所示;而当热流密度保持18.64 kW/m²不变时,实验结果如图7所示。

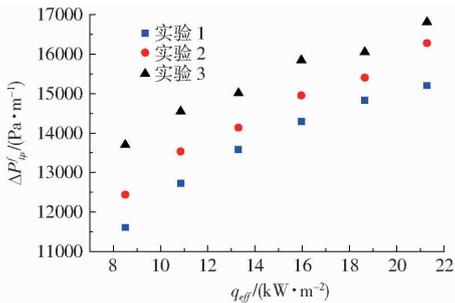


图6 单位长度两相摩擦压降随热流密度变化

Fig.6 Changes of pressure drop with heat flux

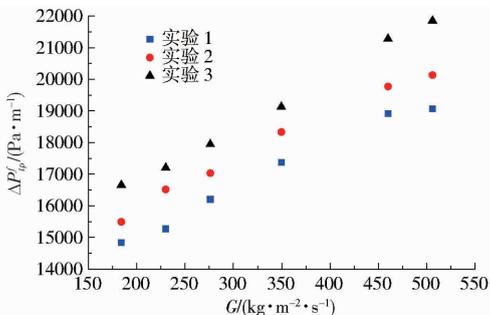


图7 单位长度两相摩擦压降随质量通量变化

Fig.7 Changes of pressure drop with mass flux

由图6、7可知,增大热流密度和质量通量时,单位长度两相摩擦压降也有所增加。其他工况不变,热流密度从8.51 kW/m²增加到21.28 kW/m²过程中,微通道换热面产生的气泡增多,附着在壁面的气泡增大了液体与壁面的阻力,部分气泡长大并脱离

壁面后会与液体夹杂在一起流动,流体中的不同气泡相互作用产生摩擦阻力,同时从壁面脱离的部分小气泡会形成受限气泡挤压液膜,从而加剧了液体与壁面的摩擦。当增大质量通量时,微通道内工质的流速增加,液体与壁面、液体与壁面附着气泡之间的摩擦都会增强;同时,增加质量通量会增大流体对气泡的流动曳力,进而加速气泡脱离壁面,脱离的气泡会加剧通道中气泡与液体的摩擦。因此,单位长度的两相摩擦压降会有上升趋势。

从图6和图7可以看出,不同表面能微通道的两相摩擦压降存在差异。槽道的表面能越低,单位长度两相摩擦压降越大,相比实验1,表面能较低槽道实验2和实验3的单位长度摩擦压降分别增大了约5.1%和12.7%。这是由于表面能越低,表面润湿性越低,从而气泡的脱离直径越大,脱离频率也相应增大^[14],这样生成的气泡会挤压液体,增大液体与壁面的摩擦阻力,实验工质流动阻力增大,进而压降会增大。

3.3 实验结果与已有模型的对比

为了验证实验结果的科学性和准确性,需要与压降计算模型进行对比。

LOCKHART等^[15]于1949年提出利用分相模型计算两相流摩擦压降,即

$$\Delta p_{tp,f} = \frac{L_{tp}}{x} \int_0^x \frac{2f_L G^2 (1-x)^2}{\rho_L D_h} \phi_L^2 dx \quad (12)$$

其中 $\phi_L^2 = 1 + C/X + 1/X^2$

式中 ϕ_L^2 ——两相摩擦因子

C ——Chishdm参数

很多学者提出了改进压降模型,特别是对 C 值进行修正^[16]。

本文将实验值分别与Mishima-Hibiki模型^[17]、Qu-Mudawar模型^[18]和Zhang模型^[19]的预测值进行对比,结果如表5所示。

表5 实验值与模型预测值对比绝对误差(MAE)分布
Tab.5 MAE between experimental and predicted values

对比模型	C	MAE/%
M-H模型	$C = 21(1 - e^{-319D_h})$	49.3
Q-M模型	$C = 21(1 - e^{-319D_h})(0.00418G + 0.0613)$	23.1
Zhang模型	$C = 21(1 - e^{-0.385/N_{conf}})$	28.9

表5中

$$N_{conf} = [\sigma_N / (\rho_L - \rho_G) g]^{1/2} / D_h$$

式中 σ_N ——液体表面张力, N/m

σ_N 随温度变化,对应的值可由软件REFPROP7.0中查得。

模型对比的平均绝对误差^[20]为

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|\Delta p_{tpf,pred} - \Delta p_{tpf,exp}|}{\Delta p_{tpf,exp}} \times 100\%$$

式中 $\Delta p_{tpf,pred}$ ——两相压降的预测值

$\Delta p_{tpf,exp}$ ——两相压降的实验值

由表 5 数据可知, Q - M 模型预测值与实验值的平均绝对误差最小, 如图 8 所示。

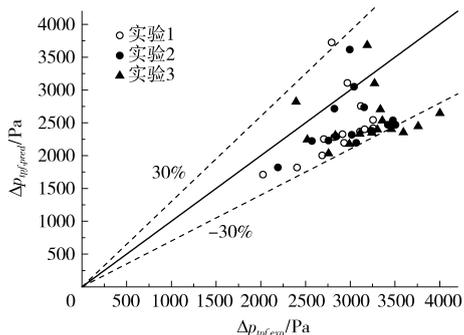


图 8 Q - M 模型预测值与实验值对比

Fig. 8 Comparison of prediction values of Q - M model and experimental values

同时注意到, Q - M 模型和 Zhang 模型中的 C 值是变化的, 而 M - H 模型中的 C 值是固定的。实际中, C 值也是变化的, 因此 Q - M 模型和 Zhang 模型的预测误差较小。

为此, 本文参考预测效果最好的 Q - M 模型, 结合所得的实验数据对 C 值进行修正, 认为 C 值是线性变化的, 即

$$C = 21(aG + b)(1 - e^{-319D_h})$$

代入实验数据进行拟合, 得出: $a = 0.00342$, $b = 1.56245$ 。将所得的修正模型预测值与实验数据进行对比, 结果如图 9 所示。从图中可以看出, 平均绝对误差有明显降低, 此时 M 为 10.9%。

为了验证所得修正模型的适用性, 将实验修正的关联式与文献中几种模型的实验结果进行了对比分析, 实验结果如表 6 所示。由表 6 可知, 修正后的关联式预测效果较好。

4 结论

(1) 采用 3 种不同浓度的修饰液对微通道进行

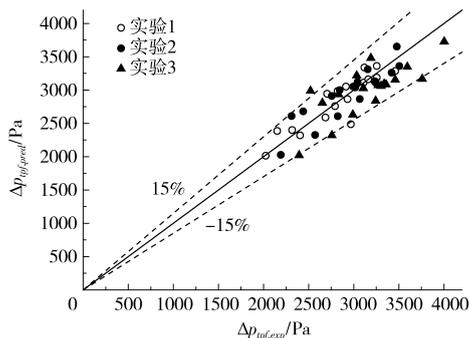


图 9 修正模型与实验值的对比

Fig. 9 Comparison of values of modified model and experimental values

表 6 修正模型与文献实验结果的对比

Tab. 6 MAE between results of modified model and experiment from references

对比模型	M - H 模型	Q - M 模型	Zhang 模型
$M/\%$	27.7	15.8	13.1

分组处理, 修饰液浓度越高, 浸泡时间越长, 修饰后的槽道的表面能越低。本实验条件下, 没有经过任何修饰槽道的底面表面能为 50.83 mJ/m^2 , 通过本实验的修饰, 最小的表面能达 19.39 mJ/m^2 。

(2) 本实验条件下, 入口过冷度为 6°C 保持不变, 热流密度范围为 8.51 kW/m^2 到 21.28 kW/m^2 , 质量通量从 $186.1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 变至 $506.03 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 表面能的改变不会对各压降所占比例造成大的影响; 不同表面能槽道的两相摩擦压降的变化规律基本一致, 单位长度两相摩擦压降均随着热流密度的增加而增加, 随质量通量的增大而增大; 表面能越小, 单位长度两相摩擦压降越大, 相比对照组, 其他 2 组低表面能槽道的单位长度摩擦压降分别增大了约 5.1% 和 12.7%。

(3) 将实验数据分别与 M - H 模型、Q - M 模型、Zhang 模型的预测值进行了对比分析, 平均绝对误差分别为 49.3%、23.1%、28.9%, 并根据本实验的数据, 同时参考 Q - M 模型对两相摩擦压降模型中的 C 值进行了修正, 平均绝对误差降至 10.9%, 预测效果有明显改善。

参 考 文 献

- HYOUGSOON L, ILCHUNG P, MUDAWAR I, et al. Micro-channel evaporator for space applications-1. Experimental pressure drop and heat transfer results for different orientations in earth gravity[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 77:1213 - 1230.
- SIENSKI K, EDEN R, SCHAEFER D. 3-D electronic interconnect packaging[C] // Proceedings of the IEEE Aerospace Applications Conference, 1996, 1: 363 - 373.
- HAI T P, NADIA C, PHILIPPE M, et al. Flow boiling of water in a minichannel; the effects of surface wettability on two-phase pressure drop [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(11 - 12): 1894 - 1905.
- CHEN F, JULIE S, WANG Fumin, et al. Impact of wall hydrophobicity on condensation flow and heat transfer in silicon

- microchannels[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2010, 20(4):045018.
- 5 CHI Y L, SANG Y L. Pressure drop of two-phase plug flow in round mini-channels: influence of surface wettability [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2008, 32(8):1716-1722.
- 6 FOX H W, ZISMAN W A. The spreading of liquids on low energy surfaces, I. polytetra-fluoroethylene[J]. *Journal of Colloid Science*, 1950, 5(6):514-531.
- 7 YOUNG T. An essay on the cohesion of fluids[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1805, 95:65-87.
- 8 YOUNG T. Experiments and calculations relative to physical optics[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1804, 94:1-16.
- 9 鲁钟琪. 两相流与沸腾传热[M]. 北京:清华大学出版社, 2002:41-64.
- 10 SUNG M K, MUDAWAR I. Consolidated method to predicting pressure drop and heat transfer coefficient for both subcooled and saturated flow boiling in microchannel heat sinks[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(13-14):3720-3731.
- 11 LEE J, MUDARWAR I. Two-phase flow in high heat flux microchannel heat sink for refrigeration cooling applications: part I-pressure drop characteristics[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(5):928-940.
- 12 阎昌琪. 气液两相流[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2007:160-167.
- 13 胡丽琴, 罗小平, 廖寿学. 矩形微细通道纳米流体沸腾流动阻力特性研究[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2014, 45(7):2209-2216.
- HU Liqin, LUO Xiaoping, LIAO Shouxue. Research on boiling flow resistance of nanofluid in rectangular microchannels[J]. *Journal of Central South University:Science and Technology*, 2014, 45(7):2209-2216. (in Chinese)
- 14 CHIWOONG C, JEONG S, DONG Inyu, et al. Flow boiling behaviors in hydrophilic and hydrophobic microchannels [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2011, 35(5):816-824.
- 15 LOCKHART R W, MARTINELLI R C. Proposed correlation of data for isothermal two-phase two-component flow in pipes [J]. *Chemical Engineering Progress*, 1949, 45:39-48.
- 16 FRANCISCO R, ALEJANDRO L. Two phase flow pressure drop in multiport mini-channel tubes using R134a and R32 as working fluids [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2015, 92:17-33.
- 17 MISHIMA K, HIBIKI T. Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1996, 22(4):703-712.
- 18 QU W, MUDAWAR I. Measurement and prediction of pressure drop in two-phase micro-channel heat sinks[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46(15):2737-2753.
- 19 ZHANG W, HIBIKI T, MISHIMA K, et al. Correlations of two-phase frictional pressure drop and void fraction in mini-channel [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(1-3):453-465.
- 20 刘波, 罗小平, 谢鸣宇. 纳米制冷剂在微通道内两相摩擦压降实验研究[J]. *低温工程*, 2015(4):20-26.
- LIU Bo, LUO Xiaoping, XIE Mingyu. Experimental study of two-phase fractional pressure drop of nanorefrigerant through microchannels[J]. *Cryogenics*, 2015(4):20-26. (in Chinese)

(上接第 352 页)

- 14 余胜威. MATLAB 优化算法案例分析与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2014.
- 15 王庚祥, 原大宁, 刘宏昭, 等. 空间 4-SPS/CU 并联机构运动学分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(3):207-212, 199. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120337&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.037.
- WANG Gengxiang, YUAN Daning, LIU Hongzhao, et al. Kinematic analysis of spatial 4-SPS/CU parallel mechanism[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(3):207-212, 199. (in Chinese)
- 16 张艳伟, 韦斌, 王南, 等. 空间转动 3-SPS-S 并联机构运动学性能分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(4):212-215, 207. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120440&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.040.
- ZHANG Yanwei, WEI Bin, WANG Nan, et al. Kinematic performance analysis of 3-SPS-S spatial rotation parallel mechanism [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(4):212-215, 207. (in Chinese)
- 17 崔国华, 张艳伟, 张英爽, 等. 空间转动型 3-SPS/S 并联机器人的构型设计分析[J]. *吉林大学学报*, 2009, 39(增刊 1):200-205.
- CUI Guohua, ZHANG Yanwei, ZHANG Yingshuang, et al. Configuration design and analysis of a new 3-SPS/S spatial rotation parallel manipulator[J]. *Journal of Jilin University*, 2009, 39(Supp.1):200-205. (in Chinese)