doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.06.044

超声场下微细通道内 R141b 流动沸腾压降特性研究

罗小平　刘　倩　喻　葭　廖政标
(华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510640)

摘要: 为探究超声波对微细通道内 R141b 流动沸腾压降特性的影响,设计了带有超声波发生装置的微细通道实验段,以制冷剂 R141b 为实验工质,在截面尺寸为 2 mm×2 mm 的矩形微细通道内进行了流动沸腾实验,研究超声波作用下微细通道内 R141b 的流动沸腾压降特性,并采用高速摄像仪对微细通道内部沸腾情况进行可视化分析。结果表明,在有无超声情况下微细通道压降分量比例大致相同,均以摩擦压降占比最大;在实验段进口处施加超声波会减小微细通道流动沸腾摩擦压降,当质量流率为 118.64 kg/(m²·s)、热流密度为 17.03 kW/m² 时,施加 50 W、40 kHz 的超声波可使单位长度两相摩擦压降减小 12.70%;超声频率越大、功率越小,其减阻效果越好;超声波主要通过影响汽泡运动行为进而影响两相区的压降。可视化分析结果表明,超声波能影响微细通道内汽泡数量及尺寸,并影响通道内的流型。本研究可为超声波在微通道换热器中的应用提供参考。

关键词: 微细通道; 超声波; 流动沸腾; 压降; 可视化
中图分类号: TK124　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)06-0418-09　　**OSID**:

Pressure Drop Characteristics of R141b Flow Boiling in Microchannels under Ultrasonic Field

LUO Xiaoping　LIU Qian　YU Jia　LIAO Zhengbiao
(*School of Mechanical and Automotive Engineering*, *South China University of Technology*, *Guangzhou* 510640, *China*)

Abstract: Microchannel heat exchanger is widely used in agriculture due to compact structure and high efficiency. However, the minification of size can lead to the increase in flow resistance of the system, pressure drop and energy consumption, and finally cause lower economic efficiency. Previous work has proved that ultrasound can be applied to microchannel heat exchanger to improve its heat transfer performance, but the effect of ultrasound on flow boiling pressure drop is not clear. To investigate the effect of ultrasound on flow boiling pressure drop characteristics in microchannels, a microchannel experiment section with an ultrasonic transducer was designed. Using the refrigerant R141b as the experimental working fluid, the flow boiling experiment was conducted in rectangular microchannels with the cross-section of each single channel being 2 mm×2 mm to study the pressure drop characteristics of refrigerant R141b in microchannels under the action of ultrasound and a high-speed digital video camera was used to visualize the flow boiling in the microchannels. The pressure of the system was set as 152 kPa, the heat flux density ranged from 10.01 kW/m² to 23.30 kW/m², mass flow rate ranged from 29.67 kg/(m²·s) to 177.96 kg/(m²·s), the applied ultrasonic power ranged from 12.5 W to 50 W and frequency ranged from 23 kHz to 40 kHz. The results showed that the proportions of the pressure drop components of the microchannels with or without ultrasound were approximately the same and the friction pressure drop accounted for the largest proportion, followed by gravity pressure drop and acceleration pressure drop, with the proportion of inlet and outlet pressure drop being the smallest. The ultrasound applied at the inlet of microchannels had a slight reduction effect on the flow boiling pressure drop of the microchannels. When the mass flow rate was 118.64 kg/(m²·s) and the heat flux density was 17.03 kW/m², the application of 50 W and 40 kHz ultrasound could reduce the two-phase frictional pressure drop per unit length by 12.70%. When the mass flow rate was 118.64 kg/(m²·s) and the heat flow density was 18.56 kW/m², the frictional pressure drop per unit length of two phases was increased

收稿日期: 2020-08-18　修回日期: 2020-09-17
基金项目: 国家自然科学基金项目(21776096)和广东省自然科学基金项目(2019A1515011053)
作者简介: 罗小平(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事微通道换热器及微尺度相变传热机理研究,E-mail: mmxpluo@scut.edu.cn

by 36.15% with 50 W ultrasound compared with 12.5 W ultrasound, and the frictional pressure drop per unit length was decreased by 23.85% with 40 kHz ultrasound compared with 23 kHz ultrasound. The influence of ultrasonic parameters on the friction pressure drop per unit length was weaker at higher heat flux. In order to reduce the flow boiling pressure drop in microchannel, ultrasonic wave with relatively lower power and higher frequency would yield better results. The ultrasound affected the pressure drop of two-phase region mainly by changing the bubble dynamics. The visualization results showed that ultrasonic wave can affect the number and size of bubbles and flow pattern in the channel. In the bubble flow stage, acoustic cavitation and acoustic streaming could promote the formation of bubbles and increase the frequency of bubble detachment. In the intense boiling stage, the increase of gas-liquid interface would hinder the propagation of ultrasound and weaken acoustic cavitation. The research result can provide a reference for the application of ultrasound in microchannel heat exchanger.

Key words: microchannels; ultrasound; flow boiling; pressure drop; visualization

0　引言

随着微电子机械的迅速发展,微细通道换热器以其结构紧凑、轻巧、高效等特点广泛应用于航空航天、现代医疗、能源与环境等领域[1-2],在农产品干燥、农业电子设备冷却等方面也有应用,如用于太阳能电池冷却[3]和热泵空调[4]等。微细通道换热器存在尺度效应、表面效应等问题,换热器尺寸的微小化使系统的阻力增大、压降增大、能耗增加,最终导致经济性降低[5-6]。超声波在农业领域应用广泛[7-9],作为一种有源强化技术,超声波强化传热具有操作简单、可控性强等特点[10]。超声波在液体中传播时会产生声空化、声流效应和热效应[11],可进一步提高设备的换热性能,因此将超声波作用于微细通道换热器可以改善其传热性能。

目前,国内外许多学者进行了有关流动沸腾压降特性的研究,一些学者进一步就超声波对沸腾传热和压降的影响进行了研究[12-15]。BARTOLI 等[16]通过改变工质过冷度、超声波功率等参数研究了超声波对过冷沸腾的影响,发现超声波可使传热系数最大增加 57%。李长达等[17]以去离子水为工质研究了超声波对池沸腾换热的影响,发现超声功率越大、作用距离越短,沸腾传热强化效果越好。段希利等[18]研究了超声波作用下换热器的压降特性,发现超声波功率越大,换热器的压降越小,50 W 和 100 W 超声相比无超声作用时压降分别降低了 20% 和 30%。AMIRI 等[19-20]研究发现,超声振动对圆管湍流的强化传热效果较差,随着雷诺数和进口温度增大,超声波对压降和传热强化的影响减弱;随后以不同浓度纳米流体为介质,通过改变超声波功率、工质流速等工况,探究超声波对换热器传热及压降特性的影响,发现超声振动能降低纳米流体对压降的负面影响,在低雷诺数条件下对压降的影响更显著。以上研究主要关注超声波对过冷沸腾、池沸腾传热性能及常规尺度换热器传热及压降特性的影响,而关于超声波对微细尺度换热器流动沸腾压降特性影响的研究较少。传热特性和压降特性是换热器设计中的两个重要因素,其中压降特性直接影响设备的安全性能,且微细通道流动沸腾的压降特性更为复杂。本文以制冷剂 R141b 为实验工质,在截面尺寸为 2 mm × 2 mm 的矩形微细通道内进行流动沸腾实验,研究超声波作用下微细通道内 R141b 的流动沸腾压降特性,以期为超声波在微通道换热器中的运用提供参考。

1　实验系统及方法

1.1　实验系统

实验系统如图 1 所示,包括外部注液装置、回路系统、实验段以及数据采集系统 4 部分。外部注液装置主要由储液罐、液位计组成;实验工质由不锈钢磁力泵驱动进入回路系统,经节流阀分为两条支路:一部分工质通过主回路系统依次流经涡轮流量计、

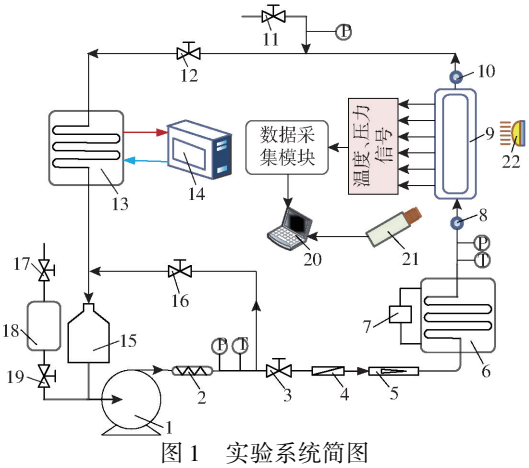


图 1　实验系统简图

Fig. 1　Schematic of experimental system

1. 磁力泵　2. 减振软管　3、11、12、16、17、19. 调节阀　4. 过滤器　5. 流量计　6. 预热水箱　7. 恒温控制仪　8、10. 视液镜　9. 实验段　13. 冷却水箱　14. 冷水机组　15. 储液罐　18. 外部注液装置　20. 工控机　21. 高速摄影仪　22. 光源

预热水箱、实验段、冷却水箱后流回储液罐;另一部分经过旁路调节阀直接回到储液罐;主旁路调节阀共同作用控制实验工质的流量,过滤器可以防止杂质堵塞槽道。涡轮流量计用于测量实验段入口的工质流量,预热水箱可通过恒温控制仪调节使进入实验段的工质温度达到设定值。

实验段主要由底座、加热板、换能器组件、微细通道热沉、密封垫圈、可视化玻璃和聚四氟乙烯盖板装配而成,结构如图 2 所示。底座上设有测温孔及测压孔,换能器组件由超声波换能器和振动板连接而成,安装于实验段进口。微细通道热沉总长 L 为 220 mm,总宽 W 为 100 mm,总高 H 为 15 mm,包含 14 条矩形截面细通道,单条通道宽度 W_{ch} 为 2 mm,高度 H_{ch} 为 2 mm,通道间距 W_w 为 5 mm,单条微细通道截面简图如图 3 所示。

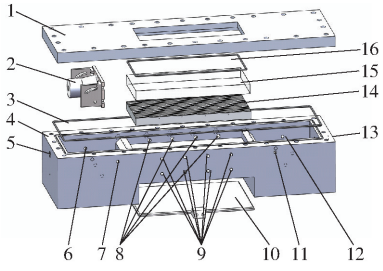


图 2 实验段结构图

Fig. 2 Structure diagram of experimental section

1. 聚四氟乙烯盖板 2. 换能器组件 3. 密封垫圈 4. 底座 5. 工质入口 6. 进口测压孔 7. 进口测温孔 8. 壁面测压孔 9. 壁面测温孔 10. 加热板 11. 出口测温孔 12. 出口测压孔 13. 工质出口 14. 微细通道热沉 15. 可视化玻璃 16. 密封垫圈

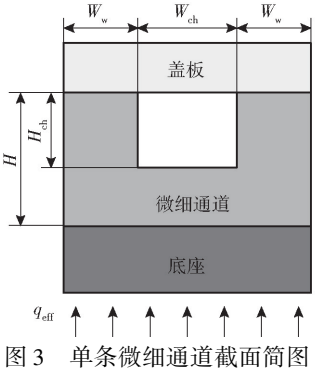


图 3 单条微细通道截面简图

Fig. 3 Sectional view of single microchannel

实验通过安捷伦 34970A 数据采集模块对所测量的温度和压力信号进行采集,并将其转换为标准信号传输至工控机。此外,实验设备还包括 1 台高速摄影仪,用于拍摄和记录微细通道内实验工质流动沸腾情况以进行可视化分析。

1.2 热平衡分析

为保证实验数据有效,避免热损失过大对实验结果产生干扰,在实验开始前进行热平衡分析。文献[21-22]在流动沸腾实验之前采用单相强制对流的方式评估实验系统的热损失状况,本实验采用同样方法。监测实验段进出口工质温度和压力,确保工质在微细通道内进行单相流动,单相流动稳定后采集数据,保持质量流率和进口温度不变,改变加热功率重复实验,热效率 φ 计算式为

$$\varphi = \frac{Mc_{p,l}(T_{out} - T_{in})}{Q_{tot}} \times 100\% \tag{1}$$

式中 Q_{tot}——加热板实际总传热量,W

M——实验段进口质量流量,kg/s

$c_{p,l}$——R141b 的液相定压比热容,kJ/(kg·K)

T_{out}——微细通道出口温度,℃

T_{in}——微细通道进口温度,℃

热平衡实验结果如图 4 所示。由图 4 可知,热效率 φ 在 80.46% ~89.56% 之间,计算得本实验平均热效率为 85.16%。由于实验设备外层的隔热棉起到保温作用,热损失量趋于恒定,热效率随热流密度增大而增大,而在两相流动沸腾实验中,设热流密度 q 为 10 ~24 kW/m^2,大于单相热平衡实验所设计的最大热流密度,故认为该热效率可用于计算热流密度。实验中超声波功率为 12.5 ~50 W,频率为 23 ~40 kHz,不考虑换能器对实验系统的热量输入。

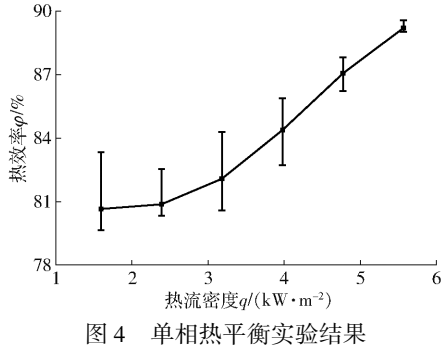


图 4 单相热平衡实验结果

Fig. 4 Thermal equilibrium experiment result

2 实验数据处理

2.1 质量流率

根据工质在实验段进口的体积流量 V 计算单条微细通道的质量流率 G,计算式为

$$G = \frac{\rho_l V}{3.6 \times 10^6 N_{ch} W_{ch} H_{ch}} \tag{2}$$

式中 ρ_l——实验工质液相密度,kg/m^3

V——微细通道进口的体积流量,L/h

N_{ch}——微细通道热沉中通道总数

2.2 热流密度

实验过程中不可避免地存在热损失,利用热平衡实验得到的热效率计算热流密度 q_{eff},计算式为

$$q_{eff} = \frac{\varphi Q_{tot}}{S} \tag{3}$$

式中　S——加热板面积，m^2

2.3　两相段长度

实验中微细通道竖直放置，流动沸腾过程中，通道入口的工质有一定的过冷度，流经微细通道不断吸收热量，通道出口时工质呈气液两相，以干度$\chi_e=0$的点为界可将微细通道内工质的流动沸腾分为两部分：上游单相液体对流传热区、下游气液两相流动沸腾区，如图 5 所示。单相段长度 L_{sp}、两相段长度 L_{tp}可根据热量平衡计算[23]，计算式为

$$L_{sp}=\frac{Mc_{p,l}(T_{sat}-T_{in})}{N_{ch}q_{eff}(W_{ch}+W_w)} \tag{4}$$

$$L_{tp}=L-L_{sp} \tag{5}$$

式中　T_{sat}——实验工质饱和温度，℃

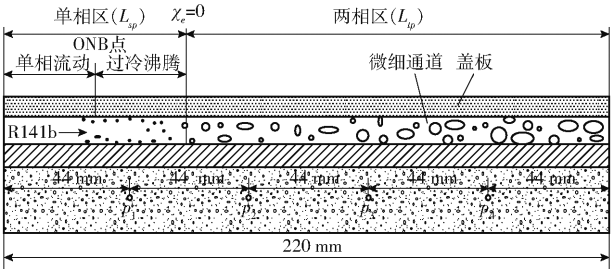


图 5　单条通道内工质流动示意图

Fig. 5　Schematic of working fluid in single channel

2.4　总压降及两相摩擦压降

实验段总压降 Δp_{tot}包括进口突缩压降 Δp_c、单相流动压降 Δp_{sp}、两相流动压降 Δp_{tp}和出口突扩压降 Δp_e，计算式为

$$\Delta p_{tot}=p_{in}-p_{out}=\Delta p_c+\Delta p_{sp}+\Delta p_{tp}+\Delta p_e \tag{6}$$

式中　p_{in}——实验段进口压力，kPa

p_{out}——实验段出口压力，kPa

进口突缩压降 Δp_c和出口突扩压降 Δp_e计算式为[24]

$$\Delta p_c=\frac{G^2}{2\rho_l}\left[\left(\frac{1}{C_c}-1\right)^2+1-\sigma_c^2\right]\cdot\left(1+\frac{\rho_l-\rho_g}{\rho_l}\chi_{e,in}\right) \tag{7}$$

$$\Delta p_e=\frac{G^2\sigma_e(\sigma_e-1)}{\rho_l}\left(1+\frac{\rho_l-\rho_g}{\rho_l}\chi_{e,out}\right) \tag{8}$$

其中　$\sigma_c=\sigma_e$

式中　σ_c——截面突缩面积比

σ_e——截面突扩面积比

ρ_g——工质气相密度，kg/m^3

$\chi_{e,in}$、$\chi_{e,out}$——工质进、出口热力平衡干度

C_c——收缩系数

微细通道单相流动压降 Δp_{sp}包括单相流动摩擦压降 $\Delta p_{sp,f}$和单相流动重力压降 $\Delta p_{sp,g}$，计算式为[25]

$$\Delta p_{sp}=\Delta p_{sp,f}+\Delta p_{sp,g}=\frac{2L_{sp}G^2f_{sp}}{\rho_l D_h}+\rho_l g L_{sp} \tag{9}$$

式中　D_h——单条微细通道水力直径

f_{sp}——单相摩擦因数

g——重力加速度，m/s^2

微细通道两相流动压力损失 Δp_{tp}包括两相重力压降 $\Delta p_{tp,g}$、两相加速压降 $\Delta p_{tp,a}$和两相摩擦压降损失 $\Delta p_{tp,f}$，$\Delta p_{tp,g}$和 $\Delta p_{tp,a}$计算式为[23]

$$\Delta p_{tp,g}=\frac{gL_{tp}\rho_g\rho_l}{\chi_{e,out}(\rho_l-\rho_g)}\ln\left(1+\chi_{e,out}\left(\frac{\rho_l}{\rho_g}-1\right)\right) \tag{10}$$

$$\Delta p_{tp,a}=G^2\left[\frac{\chi_{e,out}^2}{\rho_g\alpha_{out}}+\frac{(1-\chi_{e,out})^2}{(1-\alpha_{out})\rho_l}-\frac{1}{\rho_l}\right] \tag{11}$$

式中　α_{out}——微细通道出口空泡率[26]

综上可得微细通道两相摩擦压降 $\Delta p_{tp,f}$为

$$\Delta p_{tp,f}=\Delta p_{tot}-\Delta p_{sp,f}-\Delta p_{sp,g}-\Delta p_{tp,g}-\Delta p_{tp,a}-\Delta p_c-\Delta p_e \tag{12}$$

实验工况的改变会导致两相段长度改变，将单位长度两相摩擦压降 Δp_{tp}^f作为重要参考，其计算式为

$$\Delta p_{tp}^f=\frac{\Delta p_{tp,f}}{L_{tp}} \tag{13}$$

2.5　实验误差分析

实验数据不可避免地存在一定误差，本实验误差主要来源是读数误差、外部环境误差以及仪器测量误差。多次测量数据取平均值可减小读数误差，利用热效率 φ 求取热流密度 q_{eff}可减小外部环境误差对实验的影响。仪器测量误差包括直接测量误差和间接测量误差，直接测量误差可以根据仪器属性及实验测量数据求得，间接测量误差可由误差传递公式计算[27]，即

$$\Delta R=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial R}{\partial J_i}\Delta J_i\right)^2} \tag{14}$$

式中　ΔR——间接参数 R 的不确定度

J_i——与间接参数 R 相关的独立变量

ΔJ_i——独立变量 J_i 的不确定度

主要参数不确定度如表 1 所示。

表 1　主要参数的不确定度

Tab. 1　Uncertainties of main physical parameters　%

参数	最大不确定度
温度 T	0.22
质量通量 G	0.40
热流密度 q_{eff}	0.46
出口干度 χ_{out}	0.61
总压降 Δp_{tot}	0.71
单相重力压降 $\Delta p_{sp,g}$	1.41
两相重力压降 $\Delta p_{tp,g}$	1.59
两相摩擦压降 $\Delta p_{tp,f}$	3.91
两相加速压降 $\Delta p_{tp,a}$	2.36

3 实验结果与分析

3.1 有无超声情况下沿程压力特性对比

为获得微细通道沿程压力的变化规律,在距微细通道入口 44、88、132、176 mm 处设置了 4 处测压孔(测点 1 ~4),设置系统压力为 152 kPa,工质入口温度为 35℃,以液态进入微细通道,研究不同工况下的沿程压力特性。图 6 为不同热流密度和质量流率条件下微细通道沿程测点压力分布情况。由图 6 可知,进出口总压降随着热流密度和质量流率的增大而增大,各工况下的出口压力均近似于 152 kPa,说明工质在出口位置均达到了饱和沸腾状态;图 6a 中,热流密度为 10.01、15.51、21.62 kW/m^2 时沿程压力曲线分别在测点 3、测点 2 及测点 1 发生转折,由式(4)计算 3 种热流密度条件下单相段长度分别为 131.5、84.8、60.9 mm,说明随着热流密度增大单相段长度减小,两相段长度增大,工质在两相段流动时,从壁面脱离的汽泡增加,凝缩的汽泡数量减少,通道内的流型可能发生变化,故而压力曲线发生转折,热流密度越大,流型转换的位置更靠近入口。图 6b 中 3 条曲线也存在明显转折,计算得 59.32、88.98、118.64 kg/(m^2·s)3 种质量流率下单相段长度分别为 78.1、117.2、156.3 mm,说明质量流率增大使得单相段长度增大,两相段长度减小,两相段内流型的转换也推迟。不同工况下单相段及两相段长度如图 7 所示。

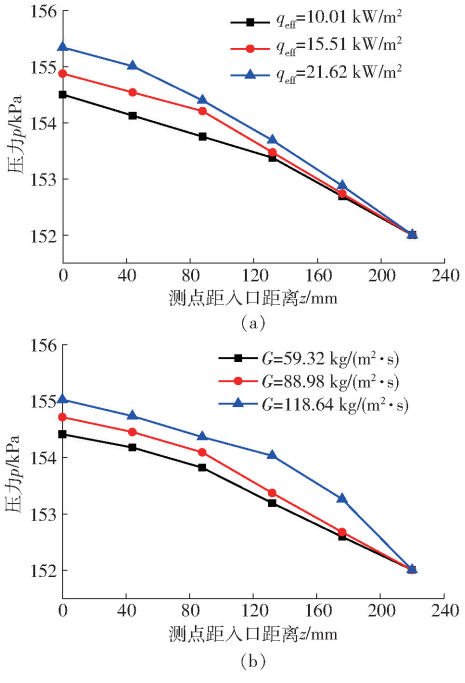


图 6 无超声作用下微细通道沿程测点压力变化曲线

Fig. 6 Pressure variations of measuring points along microchannel without ultrasound

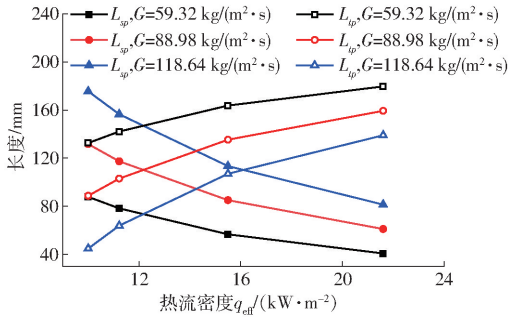


图 7 单相段及两相段长度变化曲线

Fig. 7 Single-phase and two-phase lengths

在有无超声条件下在微细通道中开展流动沸腾实验,超声波频率 f = 40 kHz、功率 P_w = 50 W。图 8 为有无超声作用下微细通道沿程测点压力分布情况。超声作用时的进口压力略微小于无超声时的进口压力,出口压力相同,表明施加超声波使得总压降减小;2 种情况下曲线转折点位置相同,通道内流型转变可能发生在测点 2 和测点 3 之间,说明超声波对气液两相段长度影响不大,且转折点之前沿程测点压力分布曲线的斜率相差不大,表明超声波在单相段对压降的影响不显著,主要是影响两相段压降。

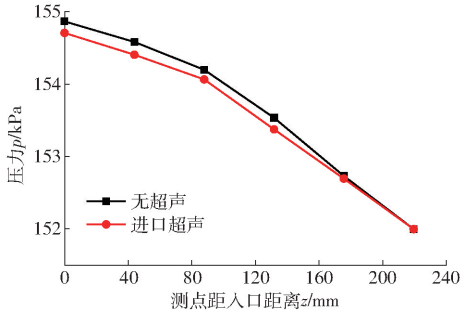


图 8 有无超声作用下微细通道沿程测点压力曲线

Fig. 8 Pressure of measuring points along microchannel with and without ultrasound

3.2 有无超声情况下微细通道压降对比

本实验微细通道总压降主要包括摩擦压降 Δp_f、重力压降 Δp_g、进出口突缩突扩压降 $\Delta p_c + \Delta p_e$、两相加速度压降 Δp_a,其中摩擦压降由单相摩擦压降与两相摩擦压降构成,重力压降由单相及两相重力压降构成。为探究超声波对各压降分量的影响,分别在有无超声作用方式下以制冷剂 R141b 为工质在微细通道内进行流动沸腾实验。实验中超声波频率 f 为 40 kHz,功率 P_w 为 50 W,热流密度为 15.51 ~21.62 kW/m^2。由图 9 可知,有无超声两种情况下微细通道内各压降分量均以摩擦压降所占比例最大,为 60.27% ~76.07%,随后依次为重力压降、加速度压降和进出口突缩突扩压降。相比于无超声作用,超声作用通道内的摩擦压降减小约 8.76%。微细通道内两相摩擦压降是影响流动沸腾

总压降的主要原因，现就各参数对单位长度两相摩擦压降的影响进行分析。

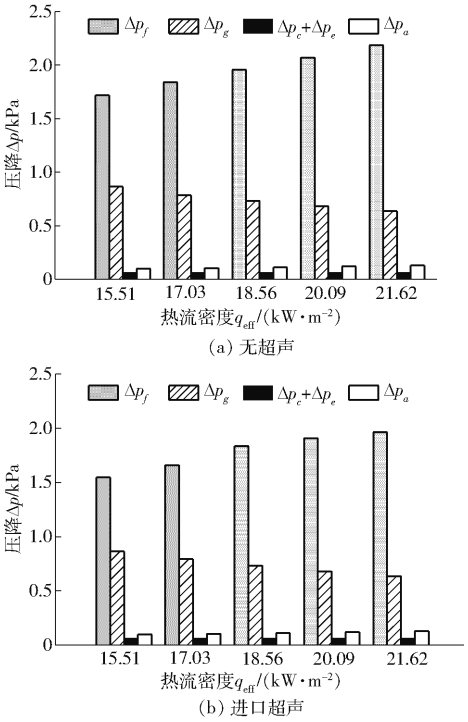


图 9　有无超声作用下压降变化

Fig. 9　Variations of pressure drop composition with and without ultrasound

图 10 表明随热流密度、质量流率增大，有无超声作用下微细通道内单位长度两相摩擦压降呈现增长趋势。热流密度的增大会使得通道内含气率增大，汽泡运动速度增大，两相摩擦作用加剧，因此单位长度两相摩擦压降呈现增大趋势。质量流率增大使得流体与通道壁面相对速度越大，两相摩擦压降也越大，两相段长度变短，单位长度两相摩擦压降增大。在同一工况下，超声作用下单位长度两相摩擦压降较无超声作用时小。

如图 10a 所示，质量流率为 118.64 kg/(m^2·s)，热流密度为 17.03 kW/m^2 时，施加超声波使得单位长度两相摩擦压降降低 12.7%。超声波通过空化作用及声流效应影响沸腾传热，其中空化为微观作用，声流属于宏观作用[28]。空化作用会引起湍动效应和微扰效应，促使加热面附近产生空化汽泡。声流效应则会增加加热表面附近流体的扰动[29]。这两种效应使得通道中汽泡尺寸减小，液体、壁面和汽泡之间的摩擦减小，因此单位长度两相摩擦压降降低。由图 10b 可知，随质量流率增大，有无超声条件下的单位长度两相摩擦压降相差不大，其原因是质量流率增大，两相段长度减小，超声波对压降的影响减弱。

3.3　超声场对单位长度两相摩擦压降的影响

超声波功率及频率会影响其空化效应，进而对单位长度两相摩擦压降产生不同程度的影响。图 11a 中，同一热流密度下，单位长度两相摩擦压降随超声功率增大而增大。热流密度为 18.56 kW/m^2、超声频率为 40 Hz、质量流率为 118.64 kg/(m^2·s) 条件下，50 W 超声波较 12.5、25、37.5 W 超声作用下单位长度两相摩擦压降分别增大 36.15%、24.42%、

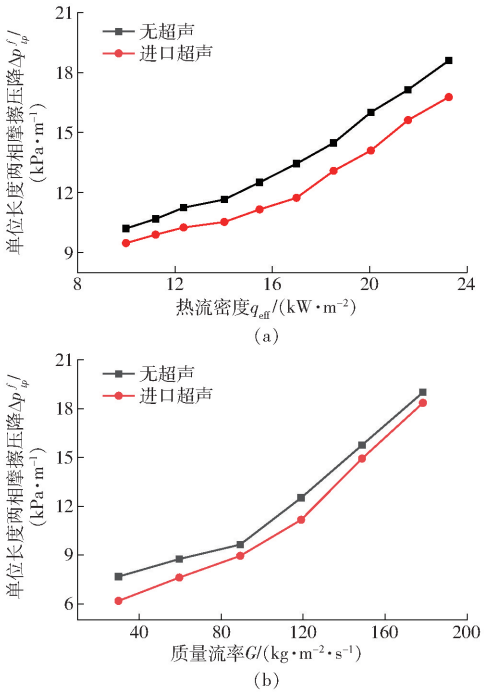


图 10　单位长度两相摩擦压降的变化曲线

Fig. 10　Variation trend of two-phase friction pressure drop per unit length

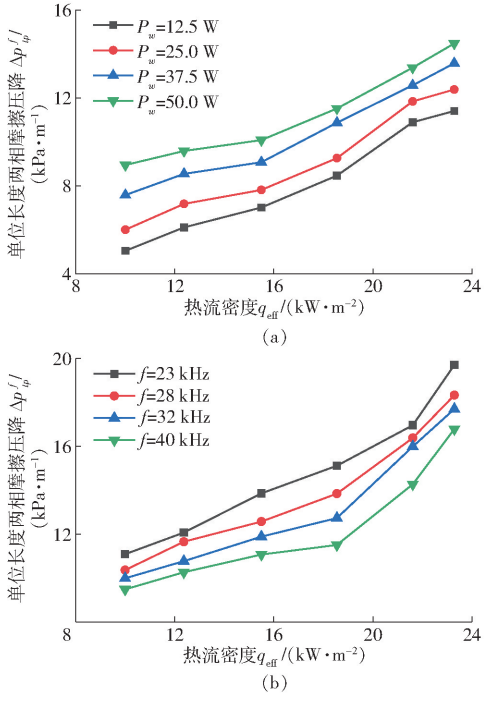


图 11　不同频率及功率超声波下单位长度两相摩擦压降变化曲线

Fig. 11　Variations of friction pressure drop per unit length under ultrasound with different frequency and power levels

5.49%。超声波功率直接影响超声波在工质中的传播能量,一方面,根据声压幅值与超声功率密度的关系,$p_A=(2\rho cI)^{0.5}$(p_A 为声压幅值,c 为反应体系声速,I 为超声功率密度),超声发射面积一定时,超声功率增大,声压幅值亦增大,在正负相区汽泡受到超声波的拉伸和压缩作用更加强烈,通道内汽泡运动更加剧烈,两相摩擦作用加剧;另一方面声空化效应影响空化汽泡成长及溃灭,所产生的声压会使汽泡间存在相互作用力,即次级 Bjerknes 力 F_B[30],表达式为

$$F_B=-\frac{\rho}{4\pi d^2}\langle \dot{V}_1\dot{V}_2\rangle \tag{15}$$

式中 d——两汽泡之间的距离

V_1、V_2——两汽泡的体积

半径不同的汽泡间的作用力随时间的变化引力和斥力交替出现,在本实验的微细通道中,汽泡大小各异,汽泡受到引力斥力的交替作用,随功率增大,空化汽泡的体积增大,汽泡之间相互力作用越强,通道内气液两相紊乱程度增大,从而导致单位长度两相摩擦压降随之增大。

图 11b 表明超声波功率为 50 W 时,同一热流密度下,超声波频率越大,单位长度两相摩擦压降越小。热流密度为 18.56 kW/m^2 时,40 kHz 超声相比 32、28、23 kHz 超声作用下单位长度两相摩擦压降分别减小 9.64%、16.86%、23.85%。超声波频率增大使得空化周期缩短,空化汽泡的膨胀时间变短,使得空化核心还未增长到一定半径便进入超声负相区受到压缩作用,而在负相区的压缩时间也变短,导致空化汽泡来不及发生崩溃,通道内汽泡尺寸较小[31],从而导致汽泡之间的运动相对缓和,单位长度两相摩擦压降减小。在低热流密度 10.01 ~ 18.56 kW/m^2 阶段,超声波功率越小、频率越大,减阻效果越显著;在高热流密度阶段,各工况下压降相差不大,超声参数对压降的影响差异减小,其原因是热流密度越大,微细通道内沸腾更加剧烈,汽泡数量大幅增加,气液界面的增加阻碍超声波传播至加热面,空化作用减弱[32-33]。

3.4 可视化分析

在气液两相流中,流型对传热与流动影响巨大,两相流压降与微细通道内的流型密切相关[34],流型的变化往往会引发流阻的改变,气相份额越大,两相流压降相应增大。为了更加直观地了解微细通道内实验工质沸腾时汽泡的运动及流型的变化情况,借助高速摄像仪研究有无超声作用下微细通道内流体流动状态以探讨超声波对微细通道内流型及汽泡运动行为的影响机理。图 12 为热流密度为 15.51 kW/m^2、质量流率为 118.64 kg/(m^2·s)、进口温度为 35℃时有无超声作用下单条通道内典型区域的高速视频图像,每组相邻图像摄像间隔时间为 2.879 ms。

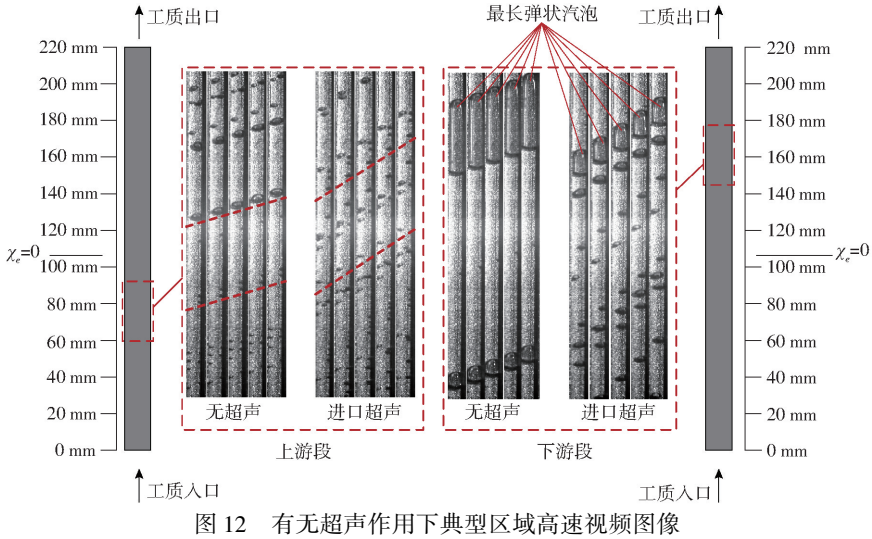


图 12 有无超声作用下典型区域高速视频图像

Fig. 12 High-speed video images of typical regions with and without ultrasound

上游段两种通道内加热面的汽化核心处均产生汽泡,汽泡逐渐长大到一定程度后,失去稳定而脱离受热面进入主流区。对比两种通道内的高速视频图像发现,在沸腾起始阶段,无超声作用的通道内汽泡数量较少,随着工质流动,部分小汽泡逐渐汇聚成较大的汽泡;超声作用时,通道底部汽泡数量也较少,随工质流动汽泡数量有所增加且汽泡尺寸较无超声通道的小,说明超声波使得汽泡沸腾阶段的汽泡数量增加,尺寸减小,比较上游段两通道内的汽泡数量,超声作用通道内的汽泡数量约为无超声作用通道的 1.5 倍,其原因是超声波在介质中传播发生的空化效应能促进加热面附近产生部分气化核心进而

发展形成小汽泡，汽泡在超声波正负相区膨胀、收缩，周期性地生长和溃灭从而增加扰流作用，使汽泡脱离频率加快，脱离直径减小。此时上游段有无超声作用的微细通道内流型均为泡状流。保持其他工况相同，比较有无超声作用下微细通道某一相近位置汽泡的运动轨迹，由第 1 帧(0 ms)到第 5 帧(11.516 ms)图像可发现超声作用下通道内汽泡运动速度更快，这是由于超声波使得通道内汽泡尺寸变小，小汽泡与主流流体的跟随性较强，与主流液体的滑移速度较小；无超声时，汽泡尺寸较大，跟随性较差。

工质流动至下游段时，两种微细通道内小汽泡成分明显减少。无超声作用的微细通道内，汽泡不断长大并迅速与周围相邻汽泡合并形成大汽泡，微细通道对合并后的汽泡在直径方向的生长产生限制作用，汽泡因此产生变形、拉长，形成弹状汽泡(如下游段无超声作用通道底端所示)，合并后的汽泡不断再次合并、拉长，形成较长弹状汽泡(如下游段无超声作用通道上端所示)，因此无超声作用时下游通道内流型主要为拉长弹状流。超声作用通道下游段汽泡数量、尺寸都有所增加，气液界面增加，因此阻碍超声波传播至加热面，且下游段距离换能器较远，空化效应减弱，难以产生空化核心，通道内几乎没有出现上游段的空化汽泡，此时声流作用为主要影响机理，使得大小不同、形状各异的汽泡弥散地分布在连续的液相内形成泡状流，随着工质流动，部分汽泡合并成较短弹状汽泡，此时通道内流型以泡状流和受限弹状流为主。经过测量及计算，高速视频图像中下游段典型区域无超声及进口超声通道内最长弹状汽泡的平均当量直径分别为 23.61、6.65 mm，微细通道内存在拉长弹状汽泡往往会引起压降增大，而汽泡较短时，流体流速较慢，两相摩擦压降较小[35]，这与本文在超声作用下微细通道内摩擦压降较小的实验结果一致。

4　结论

(1)在实验工况下，超声波主要影响两相段流动沸腾的压降。超声波对微细通道内流动沸腾压降具有一定减弱作用，当质量流率为 118.64 kg/(m²·s)、热流密度为 17.03 kW/m²时，在实验段进口处施加 40 kHz、50 W 的超声波可使单位长度两相摩擦压降减小 12.70%。

(2)在相同热流密度条件下，单位长度两相摩擦压降随超声波功率增大而增大，随超声频率增大而减小，质量流率为 118.64 kg/(m²·s)、热流密度为 18.56 kW/m²时，50 W 较 12.5 W 超声波作用下单位长度两相摩擦压降增大 36.15%，40 kHz 相比 23 kHz 超声波作用下单位长度两相摩擦压降减小 23.85%。超声波对压降的影响程度与热流密度有关，在热流密度 10.01 ~ 18.56 kW/m² 范围内，随着超声波功率减小、频率增大，压降减小效果更加显著，在高热流密度条件下超声波参数对单位长度摩擦压降的影响差异较小。为降低微细通道内的流动沸腾压降，可适当采用功率较小、频率较高的超声波。

(3)施加超声波可使通道内汽泡数量增加、尺寸减小，泡状沸腾段典型区域超声作用通道内汽泡数量约为无超声作用通道的 1.5 倍；工质出口段无超声作用通道流型为拉长弹状流，超声作用通道流型为泡状流及受限弹状流，两种通道内最长弹状汽泡平均当量直径分别为 23.61、6.65 mm。超声波在核态沸腾阶段可通过空化效应及声流作用促进汽泡形成、加快汽泡脱离频率，在剧烈沸腾阶段气液界面增加会阻碍超声波的传播，导致空化效应减弱。

参　考　文　献

[1] ASADI M, XIE G, SUNDEN B. A review of heat transfer and pressure drop characteristics of single and two-phase microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 79: 34 - 53.

[2] 葛洋,姜未汀. 微通道换热器的研究及应用现状[J]. 化工进展, 2016, 35(增刊):10 - 15.
GE Yang, JIANG Weiting. The research progress and application of the micro-channel heat exchanger[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(Supp.):10 - 15. (in Chinese)

[3] 闫素英,李洪阳,史志国,等. 太阳能电池冷却用微通道散热器内纳米流体换热特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 212 - 217.
YAN Suying, LI Hongyang, SHI Zhiguo, et al. Heat transfer characteristics of nanofluid in microchannel applied on solar cell cooling[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13): 212 - 217. (in Chinese)

[4] 池帮杰,代苏苏,鲁进利,等. 基于微通道的热泵空调应用基础研究[J]. 低温与超导, 2018, 46(4): 63 - 67.
CHI Bangjie, DAI Susu, LU Jinli, et al. Fundamental research on heat pump air-conditioning based on micro-channel[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2018, 46(4): 63 - 67. (in Chinese)

[5] KARAYIANNIS T G, MAHMOUD M M. Flow boiling in microchannels: fundamentals and applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 115: 1372 - 1397.

[6] JIA Y T, XIA G D, ZONG L X, et al. A comparative study of experimental flow boiling heat transfer and pressure drop characteristics in porous-wall microchannel heat sink[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 127: 818 - 833.

[7] 王东伟,王家胜. 基于超声振动的土壤切削挖掘装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(11):85 - 92.
WANG Dongwei, WANG Jiasheng. Design and test of soil cutting and digging device based on ultrasonic vibration[J/OL].

Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 85 - 92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20201109&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.11.009. (in Chinese)
[8] 李杨,陈凡凡,王中江,等. 超声预处理对大豆蛋白聚集体结构和乳化特性的影响[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(6): 366 - 374.
LI Yang, CHEN Fanfan, WANG Zhongjiang, et al. Effect of ultrasonic pretreatment on structure and functional properties of soy protein aggregates[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 366 - 374. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20200640&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.040. (in Chinese)
[9] 李杨,孙禹凡,谢凤英,等. 不同超声条件重组油体乳液制备及其稳定性研究[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(11):380 - 386.
LI Yang, SUN Yufan, XIE Fengying, et al. Preparation and stability of reconstruction oil body emulsion under different ultrasonic conditions[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 380 - 386. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20191143&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.043. (in Chinese)
[10] GUGULOTHU R, REDDY K V K, SOMANCHI N S, et al. A review on enhancement of heat transfer techniques[J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(2): 1051 - 1056.
[11] MASON T J, LORIMER J P. Theory, applications and uses of ultrasound in chemistry[M]. 1989.
[12] LIU F C, CHEN S W, LEE J D. Feasibility study of heat transfer enhancement by ultrasonic vibration under subcooled pool condition[J]. Heat Transfer Engineering, 2018, 39(7 - 8): 654 - 662.
[13] DOUGLAS Z, BOZIUK T R, SMITH M K, et al. Acoustically enhanced boiling heat transfer[J]. Physics of Fluids, 2012, 24(5): 052105.
[14] LEGAY M, SIMONY B, BOLDO P, et al. Improvement of heat transfer by means of ultrasound: application to a double-tube heat exchanger[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2012, 19(6): 1194 - 1200.
[15] BULLIARD-SAURET O, FERROUILLAT S, VIGNAL L, et al. Heat transfer enhancement using 2 MHz ultrasound[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 39: 262 - 271.
[16] BARTOLI C, BAFFIGI F. Use of ultrasonic waves in sub-cooled boiling[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 47: 95 - 110.
[17] 李长达, 张伟, 刘广林, 等. 超声波对池沸腾换热的影响[J]. 节能技术, 2016, 34(6): 527 - 532.
LI Changda, ZHANG Wei, LIU Guanglin, et al. Effect of ultrasound on pool boiling heat transfer[J]. Energy Conservation Technology, 2016, 34(6): 527 - 532. (in Chinese)
[18] 段希利, 王选盈, 王刚,等. 超声振动对换热器管内传热和压降影响[J]. 石油化工设备, 2004, 33(1): 1 - 4.
DUAN Xili, WANG Xuanying, WANG Gang, et al. Experimental study on the influence of ultrasonic vibration on heat transfer and pressure drop in heat exchanger tubes[J]. Petro-Chemical Equipment, 2004, 33(1): 1 - 4. (in Chinese)
[19] AMIRI D A, SAJJADI H, MOHEBBI R, et al. Experimental study on inlet turbulent flow under ultrasonic vibration: pressure drop and heat transfer enhancement[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 51: 151 - 159.
[20] AMIRI D A, SAJJADI H, IZADI M, et al. The simultaneous effects of nanoparticles and ultrasonic vibration on inlet turbulent flow: an experimental study[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 146: 268 - 277.
[21] PAN L, YAN R, HUANG H, et al. Experimental study on the flow boiling pressure drop characteristics in parallel multiple microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 116: 642 - 654.
[22] YONG T, CHEN C, ZHANG S, et al. Effects of structural parameter on flow boiling performance of interconnected microchannel net[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112: 164 - 173.
[23] LEE H, PARK I, 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(4): 1213 - 1230.
[24] ALAM T, LEE P S, YAP C R, et al. Experimental investigation of local flow boiling heat transfer and pressure drop characteristics in microgap channel[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2012, 42: 164 - 174.
[25] LEE J, MUDAWAR I. Two-phase flow in high-heat-flux micro-channel heat sink for refrigeration cooling applications: part Ⅰ—pressure drop characteristics[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(5): 928 - 940.
[26] KIM S M, MUDAWAR I. Consolidated method to predicting pressure drop and heat transfer coefficient for both subcooled and saturated flow boiling in micro-channel heat sinks[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(13 - 14): 3720 - 3731.
[27] MOFFAT R J. Describing the uncertainties in experimental results[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1988, 1(1): 3 - 17.
[28] TAJIK B, ABBASSI A, SAFFAR-AVVAL M, et al. Heat transfer enhancement by acoustic streaming in a closed cylindrical enclosure filled with water[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 60: 230 - 235.
[29] LI B, HAN X, WAN Z, et al. Influence of ultrasound on heat transfer of copper tubes with different surface characteristics in sub-cooled boiling[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 92: 93 - 103.
[30] CRUM L A. Bjerknes forces on bubbles in a stationary sound field[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1975, 57(6): 1363 - 1370.
[31] 崔方玲,纪威. 超声空化气泡动力学仿真及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 24 - 29.
CUI Fangling, JI Wei. Dynamic simulation of ultrasonic cavitation bubble and analysis of its influencing factors [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(17): 24 - 29. (in Chinese)
[32] BAFFIGI F, BARTOLI C. Influence of the ultrasounds on the heat transfer in single phase free convection and in saturated pool boiling[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012, 36: 12 - 21.
[33] KIM H, KIM Y G, KANG B H. Enhancement of natural convection and pool boiling heat transfer via ultrasonic vibration[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(12 - 13): 2831 - 2840.
[34] CHOI C, KIM M. Flow pattern based correlations of two-phase pressure drop in rectangular microchannels[J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 2011, 32(6): 1199 - 1207.
[35] LEE S, DEVAHDHANUSH V S, MUDAWAR I. Pressure drop characteristics of large length-to-diameter two-phase micro-channel heat sinks[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 115: 1258 - 1275.