

doi:10.3969/j.issn.1001-4616.2022.01.005

微细通道内过冷水温度对蒸汽直接接触 间歇凝结界面波动的影响研究

侯娜娜^{1,3,4}, 李树谦^{1,3,4}, 张东², 张强武², 马坤茹²

(1.河北水利电力学院土木工程学院,河北 沧州 061001)

(2.河北科技大学建筑工程学院,河北 石家庄 050018)

(3.河北省数据中心相变热管理技术创新中心,河北 沧州 061001)

(4.沧州市储热及低品位余热利用型电磁供热技术创新中心,河北 沧州 061001)

[摘要] 为了探究过冷水温度对 T 型微细通道内蒸汽直接接触间歇凝结过程的影响,开展了可视化实验研究.采用高速摄像机(帧率为 5 000 fps)捕捉到了蒸汽温度 100 ℃、蒸汽体积流量 550 μL/min 及过冷水体积流量 14 758 μL/min 等参数恒定且过冷水温度分别为 30 ℃、40 ℃ 和 50 ℃ 工况下,1 000 ms 内汽液界面瞬时演变行为.研究发现,微细通道条件下蒸汽泡在间歇凝结过程中会相继发生多次“颈缩”和“内爆”现象,且随过冷水温度升高“内爆”后的汽液两相区面积逐渐增加;此外,随过冷水温度的升高凝结频率总体减低,而 1 000 ms 内每个间歇凝结周期所需时间的变化趋势与该周期内的汽液两相区最大面积的变化趋势基本一致.

[关键词] T 型微细通道,间歇凝结,过冷水温度,“颈缩”,“内爆”,凝结频率

[中图分类号]TK124 **[文献标志码]**A **[文章编号]**1001-4616(2022)01-0022-10

Study of Sub-cooled Water Temperature on the Interface Wave for Direct Contact Condensation in a Micro Channel

Hou Nana^{1,3,4}, Li Shuqian^{1,3,4}, Zhang Dong², Zhang Qiangwu², Ma Kunru²

(1.The Civil Engineering College, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061001, China)

(2.The Construction Engineering College, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

(3.Hebei Technology Innovation Center of Phase Change Thermal Management of Internet Data Center, Cangzhou 061001, China)

(4.Cangzhou Technology Innovation Center of Thermal Storage and Low-grade Waste Heat Utilization of Electromagnetic Heating, Cangzhou 061001, China)

Abstract: The visualization experiments were carried out in order to investigate the influence of sub-cooled water temperature on the chugging for steam direct condensation in a T-type micro channel. Steam-water interface transient evolution process in 1000ms was obtained through a high-speed camera(5 000 fps), under the condition of steam temperature of 100 ℃, steam volume flow rate 550 μL/min, and sub-cooled water volume flow rate 14 758 μL/min with different sub-cooled water temperature(i.e. 30 ℃, 40 ℃ and 50 ℃). The research indicates that there exists continually“necking”and“implosion”during steam bubble condensation in the micro channel. Additionally, steam-water two-phase areas after“implosion”increase, while the condensation frequencies decrease with the increase of sub-cooled water temperature. The changes of times which needed for each chugging period in 1 000 ms are generally consistent with the variation tendency of largest steam-water two-phase areas.

Key words: T-type micro channel, chugging, sub-cooled water temperature, “necking”, “implosion”, condensation frequencies

蒸汽直接接触凝结(direct contact condensation, DCC)是蒸汽与过冷水直接接触时发生动量、热量和质量传递的一种现象.由于相间无热阻,具有高效的热质传递效率,被广泛的应用核电、化工、海水淡化等工程领域^[1-6].

目前,已有大量研究学者对常规尺度下蒸汽入射到大池和管道中的蒸汽直接接触凝结进行了研究,且

收稿日期:2020-11-18.

基金项目:国家自然科学基金项目(51976052)、河北省自然科学基金项目(E2020412176)、沧州市自然科学基金项目(197000004)、2020年河北省高等学校基本科研业务费研究项目.

通讯作者:李树谦,博士,副教授,研究方向:相变流动与传热研究. E-mail:lsqtcc@163.com

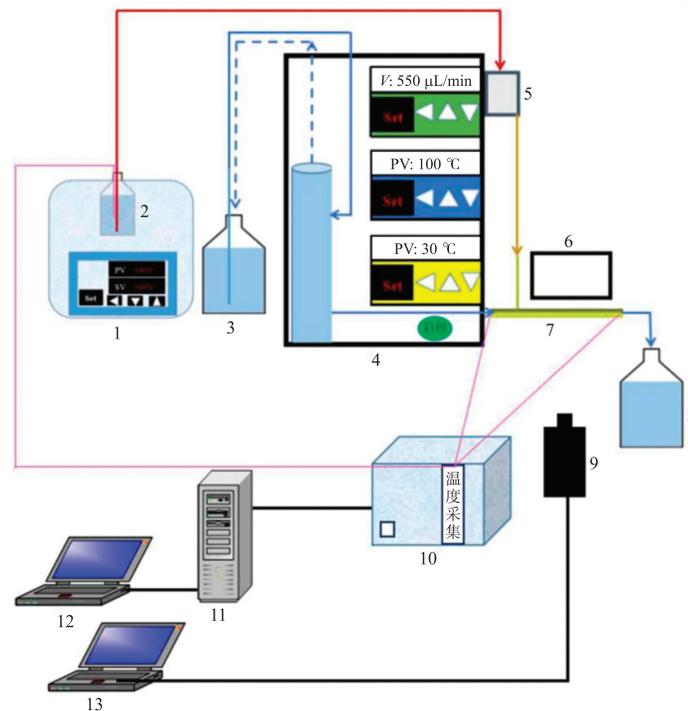
根据气液界面特征不同,划分为不同流型,如射流振荡、泡状凝结、间歇凝结等^[7].例如,郭烈锦等^[8]通过垂直管内蒸汽逆流射入大池的DCC可视化实验发现了4种流型,分别为不稳定间歇震荡流型、不稳定界面振荡流型、不稳定气泡振荡流型和稳定射流凝结流型.

鉴于蒸汽直接接触间歇凝结具有过冷水周期性被吸入、脱离支管的特征,从而会诱发相关设备的震动^[9-10].故关于蒸汽直接接触间歇凝结引起压力瞬时变化及过冷水温度对间歇凝结影响的研究较多.Hujala^[11]等在研究蒸汽射入到压力抑制池时发现,饱和蒸汽在过冷水中的DCC会引起压力瞬时变化,使液体加速冲击周围结构,从而对周围结构产生较高的载荷.Arino^[12]进行了沸水堆突发失水事故时出现的蒸汽直接接触间歇凝结研究,发现由汽泡破裂和蒸汽快速凝结产生的压力振荡可能会诱发设备的结构疲劳.Li等^[13]在不同过冷水温度工况下开展了蒸汽射入大池的可视化实验和数据测量实验,发现随着温度的增加间歇凝结汽泡由圆锥形变为球形,这与Puustinen等^[14]得到了相似的结论.Gregu等^[15]开展了间歇凝结机理探究实验,依据蒸汽质量流量和池水温度绘制了间歇凝结流型图,由流型图可以观察到:随着大池过冷水温度升高,内部间歇凝结逐渐向轻微间歇凝结转变.李树谦^[16]对常规尺度T型管内直接接触凝结进行了探究,发现当过冷水为70℃时,间歇凝结周期内蒸汽在水平主管中的时间要比过冷水温度为30和50℃时停留的时间要长.

可见既往研究中间歇凝结的研究主要集中在常规尺度,且由于间歇凝结引起的压力振荡会对相关设备的安全运行造成不利影响,故其是被抑制的对象.然而近年来有学者研究发现,微细通道条件下由间歇凝结诱发的高频汽液两相流振荡使得流动沸腾临界热流密度得到显著提高^[17-19],并能有效解决高热流密度电子元件散热问题.且已有研究表明,尺度效应会使得微细通道内汽液流动、传热特性不同于常规尺度^[20-22].因此,显著区别于常规尺度蒸汽直接接触凝结,微细尺度下的蒸汽直接接触间歇凝结汽液界面演变特征的研究有待深入研究和探索.

1 实验部分

如图1所示实验系统由蒸汽发生系统、过冷水双循环系统、图像采集系统、温度采集系统及T型可视



1.电加热数显恒温水浴;2.去离子水储存瓶(2 000 mL);3.纯净水储存瓶(5 000 mL);4.蒸汽和过冷水流量集成控制系统(包括:精密双柱塞泵、电磁三通阀、电磁截止阀、蠕动泵、电加热水箱);5.精密蒸汽发生器;6.LED背光源;7.T型微细通道实验段;8.集水瓶;9.高速摄像机;10.DAQ数据采集板卡和主机箱;11.工控机;12.温度数据采集软件操作系统;13.图像采集软件操作系统

图1 实验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental system

化实验段组成. 其中实验段的结构形式、主管段尺寸、蒸汽入射及过冷水流动方向如图 2 所示.

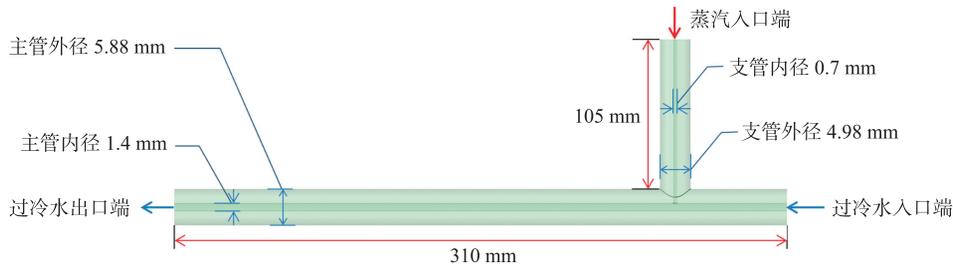


图 2 T 型可视化实验段示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the T-type visualization experiment channel

图 2 为 T 型可视化实验段示意图,实验段材质为石英玻璃管. 水平主管内径为 1.4 mm、外径为 5.88 mm 及管长为 310 mm. 竖直支管内径为 0.7 mm、外径为 4.98 mm 及管长 105 mm. 此外,支管中心距过冷水入口端和出口端的距离分别为 62 mm、248 mm. 需要补充说明的是:(1)在过冷水入口端及出口端安装了 T 型热电偶,用于监测实验过程中过冷水温度瞬时变化趋势,其次还可以确保流入实验段的过冷水温度满足实验条件. 实验中采用的热电偶,已利用恒温水域箱进行了标定.(2)本文列举的可视化实验结果中水平主管内过冷水流动方向与图 2 中的过冷水流动方向一致,即自右向左.

实验系统中涉及主要设备的型号和技术参数如表 1 所示.

表 1 设备技术参数

Table 1 equipment technical parameters

设备及型号	技术参数
精密双柱塞泵(DP-310)	流速范围 0.5 $\mu\text{L}/\text{min}$ ~800 $\mu\text{L}/\text{min}$
精密汽化器(CEM-001)	0.001~0.1 g/min ;无液体死体积;温度 100~250 \pm 1 $^{\circ}\text{C}$
电加热水箱(定制)	容积 2L/min;最高水温为 100 $^{\circ}\text{C}$
电加热数显恒温水域箱(单孔 BHS-1)	工作室尺寸 160 mm \times 160 mm \times 130 mm;温控范围是室温 1~99.9 $^{\circ}\text{C}$;恒温分辨率为 0.1 $^{\circ}\text{C}$
蠕动泵(BT100-2J)	最大流量 253 mL/min ,最高转速 300 r/min
高速摄像机(千眼狼 X113)	分辨率 1 280 \times 1 024;最大内存 32GB+

其中精密双柱塞泵(DP-310)、精密汽化器(CEM-001)和 T 型可视化实验段的竖直支管之间的连接管路是内径为 0.5 mm 的 Peek 管.

此外,关于该系统中部分重要设备的功能及精确度的详细概述可见表 2.

表 2 设备的功能及精确度

Table 2 Function and accuracy of equipment

设备	功能	精确度
精密双柱塞泵	将去离子水输送至精密汽化器	全行程精确度达 \geq 99.9%
电磁三通阀	控制精密双柱塞泵、精密汽化器等设备的启停	\leq 50 μs
精密汽化器	产生蒸汽,控制蒸汽体积流量	每分钟产气量波动范围 $<$ 3%
电加热水箱	储存并加热实验所需的过冷水,使水温维持在一定温度; 排除过冷水循环系统中的不凝汽	
电加热数显恒温水域箱	标定热电偶;对装有去离子水进行预热,排除去离子水中的不凝汽	恒温分辨率为 0.1 $^{\circ}\text{C}$
蠕动泵	通过调节蠕动泵的转动方向,改变过冷水循环系统;给过冷水提供动力 (转速范围 0~300 r/min ,控制体积流量)	转速分辨率为 0.1 r/min
高速摄像机	采集实验段的图像信息	采集时刻控制可精确到 1/100 μs

2 实验工况及方案

本次实验过程中汽液工况如表 3 所示.

表 3 实验工况

Table 3 Experimental conditions

工况	蒸汽体积流量(V_s)/($\mu\text{L}/\text{min}$)	过冷水温度(T_f)/ $^{\circ}\text{C}$	蒸汽温度(T_s)/ $^{\circ}\text{C}$	过冷水体积流量(V_f)/($\mu\text{L}/\text{min}$)
A	550	30	100	14 758
B	550	40	100	14 758
C	550	50	100	14 758

需要补充解释的是:表3中蒸汽质量流量为控制面板中显示蒸汽体积流量,其减去 $90\ \mu\text{L}/\text{min}$ 为蒸汽自支管入射至主管内流动过冷水的体积流量.原因是:精密汽化器与实验段竖直支管之间的连接管段是内径为 $0.5\ \text{mm}$ peek管,该管段沿程阻力较大.此外,观察可视化实验结果发现,在蒸汽体积流量 $90\ \mu\text{L}/\text{min}$ 工况下,蒸汽充满支管但未入射至主管内.因此,可以推测该peek管的沿程阻力约为 $90\ \mu\text{L}/\text{min}$.

实验方案如下:启动蠕动泵运行过冷水正循环系统,将过冷水注入电加热水箱内.当观察到过冷水从水箱顶部回流至纯净水储存瓶时,开始分别设定电加热水箱及恒温水域箱为 $100\ ^\circ\text{C}$ 并持续加热 $6\ \text{h}$,目的是消除实验系统中的不凝汽(具体功能见表2).然后,让水箱温度自然冷却至 $30\ ^\circ\text{C}$ (控制面板中可直接显示).紧接着运行过冷水逆循环系统,使得过冷水再在整个实验系统中循环 $5\ \text{min}$ 左右,其目的是为了消除微细通道的热惯性.其次,开启精密双柱塞泵和精密汽化器(具体功能见表2),随后产生的新鲜蒸汽通过支管持续入射至主管内流动过冷水中.待实验系统稳定运行后(即过冷水入口端温度达到实验所需温度且恒定),依次打开LED背光源、高速摄像机(帧率为 $5\ 000\ \text{fps}$)、图像采集软件,进而捕捉蒸汽直接接触间歇凝结过程中汽液界面瞬时演变特征.过冷水温度 $40\ ^\circ\text{C}$ 和 $50\ ^\circ\text{C}$ 工况的实验过程与 $30\ ^\circ\text{C}$ 相同,因此不再过多赘述.

此外,还需说明:对整个蒸汽输送管段进行了 $100\ ^\circ\text{C}$ 的持续伴热并且用 $10\ \text{mm}$ 厚玻璃纤维保温棉将其包裹,目的是防止蒸汽在进入实验段前液化.

为了提高可视化实验结果的可重复性,同一工况开展了3次以上实验.

3 可视化实验结果与分析

图3描述了蒸汽温度 $100\ ^\circ\text{C}$ 、过冷水温度 $30\ ^\circ\text{C}$ 、蒸汽体积流量 $550\ \mu\text{L}/\text{min}$ 及过冷水体积流量 $14\ 758\ \mu\text{L}/\text{min}$ 工况下,两个间歇凝结周期内典型汽液界面演变过程.由图可见,蒸汽自竖直支管入射至水平主管内流动过冷水后,汽羽首先进入增长阶段($t_a = 0 \sim 0.4\ \text{ms}$).出现该现象的原因是:凝结初期新鲜蒸汽入射量较大于蒸汽凝结量.随着新鲜蒸汽的补充汽羽头部出现“颈缩”,且汽羽由光滑面演变为粗糙面($t_a =$

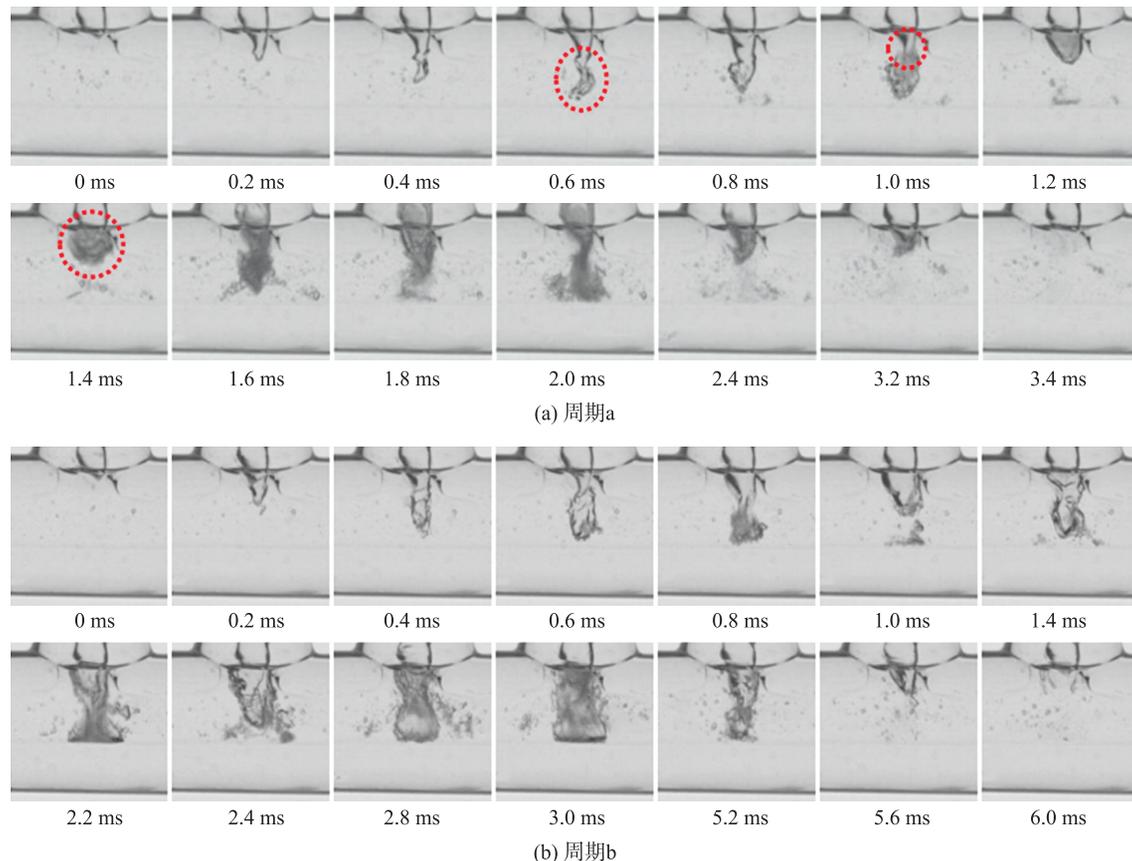


图3 过冷水 $30\ ^\circ\text{C}$ 时2个不同周期内的典型汽液界面演变过程

Fig. 3 Typical steam-water interface evolution process in two different periods at sub-cooled water temperature of $30\ ^\circ\text{C}$

0.6 ms), 该现象的原因可能是部分汽羽发生“局部内爆”和汽羽头部受过冷水扰动作用, 从而导致汽液界面变得粗糙. “颈缩”下部蒸汽区域瞬间溃灭, 与此同时, “颈缩”上部随着蒸汽的补充蒸汽区域继续增大 ($t_a = 0.8$ ms), 继而在 $t_a = 1.0$ ms 时刻, 水平主管与竖直支管相交处出现更为明显的“颈缩”现象, 并且汽羽头部颜色明显加深. 导致该现象的原因是: 此时过冷水与蒸汽进行剧烈的传热传质, 大量的小蒸汽泡发生重叠使该区域反射光的强度减弱从而导致颜色较前一时刻加深.

需要注意的是, 在 $t_a = 1.4$ ms 时刻支管正下方区域的颜色显著加深, 其主要原因是由于蒸汽泡发生“整体内爆”并分散成数量极多的微小汽泡所致. 随后, 这些微汽泡群先后经历了多次“颈缩”(例如 $t_a = 1.6$ ms、 $t_a = 2.0$ ms)、局部溃灭(例如 $t_a = 1.8$ ms、 $t_a = 2.4$ ms)、直至完全消失的过程. 进一步观察发现, 即使在相同工况下汽液界面的时空演变行为也不完全一致, 表明微细通道条件下的蒸汽直接接触间歇凝结具有一定的随机性.

图 4 描述了蒸汽温度 100 °C、过冷水温度 40 °C、蒸汽体积流量 550 $\mu\text{L}/\text{min}$ 及过冷水体积流量 14 758 $\mu\text{L}/\text{min}$ 工况下, 两个间歇凝结周期内典型汽液界面演变过程. 在该工况下汽液界面演变过程与图 3 相似, 且汽羽增长时间基本相同($t = 0 \sim 0.4$ ms), 但图 4 周期内出现汽液界面粗糙至“颈缩”下部蒸汽区域完全溃灭所用时间(例如 $t = 0.6 \sim 1.0$ ms)较长于图 3(a), 水平主管内汽液两相区均较大于图 3(a). 出现上述现象的主要原因为随着过冷水温度的升高, 蒸汽的凝结速率降低. 通过进一步观察对比发现, 图 4 中相同工况下不同间歇凝结周期内汽液界面波动也存在一定的差异: 图 4(b)除了在竖直支管下方形成与图 4(a)相似的圆柱形蒸汽区域外($t_b = 1.6$ ms, $t_a = 1.4$ ms), 蒸汽区域的头部向竖直支管轴线两侧对称延伸($t_b = 3.8$ ms), 逆冷水流动方向一侧发生溃灭, 顺冷水流动方向一侧蒸汽区域继续增大且在蒸汽区域的水平、竖直接触处出现明显“颈缩”($t_b = 5.2$ ms), 随后“颈缩”左侧水平方向蒸汽区域与竖直方向蒸汽区域发生脱离、溃灭($t_b = 5.4 \sim 6.0$ ms). 另外, 图 4(b)周期内水平主管内存在的汽液两相区的时间($t_b = 0.6 \sim 9.6$ ms)要明显长于图 4(a)汽液两相区存在时间($t_a = 0.6 \sim 4.0$ ms).

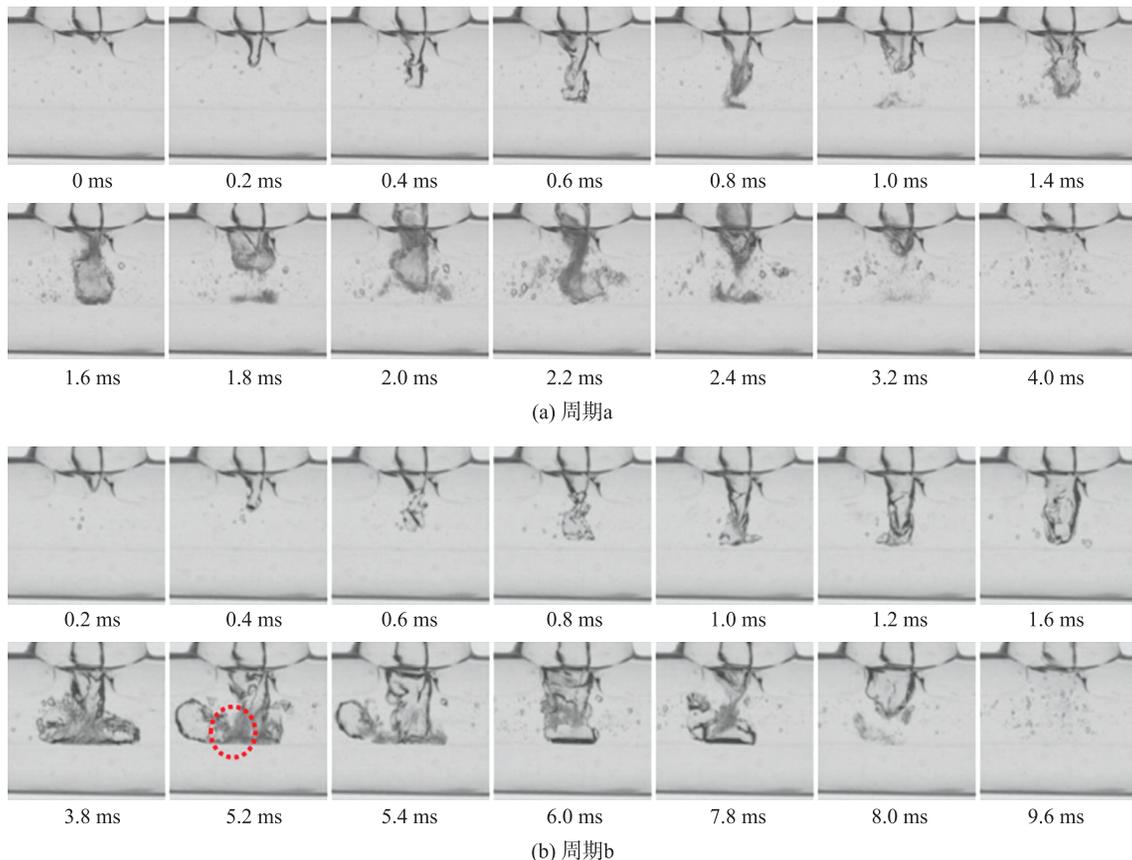


图 4 过冷水 40 °C 时 2 个不同周期内的典型汽液界面演变过程

Fig. 4 Typical steam-water interface evolution process in two different periods at sub-cooled water temperature of 40 °C

图5描述了蒸汽温度 100 ℃、过冷水温度 50 ℃、蒸汽体积流量 550 $\mu\text{L}/\text{min}$ 及过冷水体积流量 14 758 $\mu\text{L}/\text{min}$ 工况下,两个间歇凝结周期内典型汽液界面演变过程. 在该该工况下汽液界面演变过程与图3、图4基本相同,均存在较短的蒸汽汽羽增长及较长时间的汽液两相界面演变过程. 但其与图3、图4又存在一定的区别:图5中汽羽的增长时间($t=0\sim 0.8\text{ ms}$)和汽液两相区存在时间($t_a=1.0\sim 5.8\text{ ms}$, $t_b=1.4\sim 128.0\text{ ms}$)均要长于前2种工况相应的时间(图3、图5),另外图5(a)中汽液两相区在增长阶段均沿垂直支管方向到达水平主管内壁底部($t_a=0.6\sim 4.4\text{ ms}$),且部分时刻出现蒸汽区域头部沿垂直支管两侧方向进行延伸(例如 $t_a=1.6\text{ ms}$, 1.8 ms , 2.4 ms , 2.6 ms). 而图5b与图3、图4的显著区别在于:水平主管出现长时间的纯蒸汽区域的生长(例如 $t_b=4.2\sim 108.2\text{ ms}$),随后发生汽液界面波动,并在 $t_b=117.8\text{ ms}$ 汽液两相区面积达到最大. 间歇凝结后期出现水平主管内水平方向的“蒸汽柱”与垂直方向蒸汽区域进行分离($t_b=123.8\text{ ms}$),且分离后水平方向的蒸汽区域凝结较为平缓,发生凝结的蒸汽区域颜色较为透明,直至水平主管内凝结完成($t_b=123.8\sim 128.0\text{ ms}$).

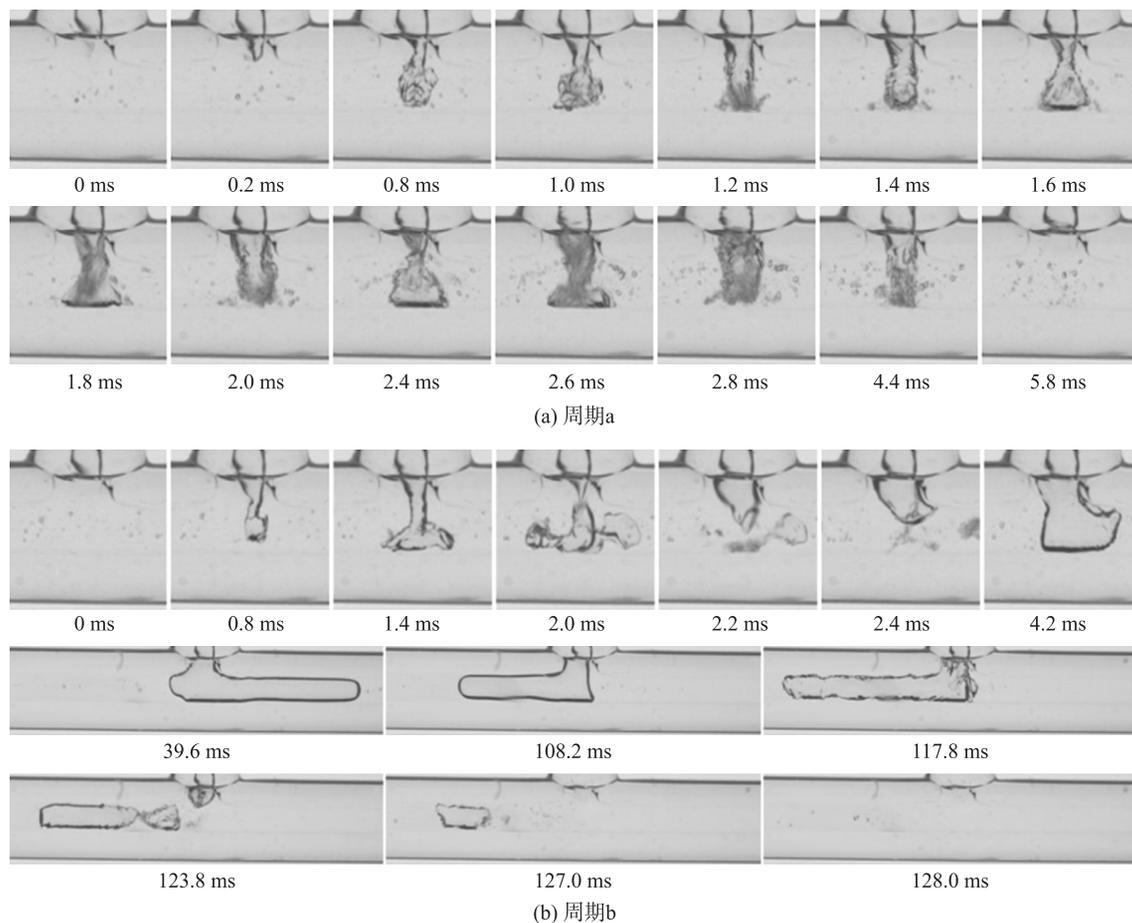


图5 过冷水 50 ℃时 2 个不同周期内的典型汽液界面演变过程

Fig. 5 Typical steam-water interface evolution process in two different periods at sub-cooled water temperature of 50 °C

图6描述了蒸汽温度 100 ℃、过冷水温度 30 ℃、蒸汽体积流量 550 $\mu\text{L}/\text{min}$ 及过冷水体积流量 14 758 $\mu\text{L}/\text{min}$ 工况下,1 000 ms 内不同间歇凝结周期内蒸汽与过冷水分别在水平主管及垂直支管内停留时间的变化情况. 观察图6可知,该工况下间歇凝结频率为 47 Hz,且每个间歇凝结周期持续时间不同,各间歇凝结周期所用时间整体在 20 ms 上下小幅度波动,少部分周期在 25 ms 上下波动. 其中第 41 次间歇凝结周期持续时间和过冷水在垂直支管内停留时间最短分别为 17 ms、13.2 ms,而第 34 次间歇凝结周期持续时间及垂直支管内过冷水停留时间最长分别为 27 ms、21 ms.

另外,间歇凝结周期中水平主管内蒸汽停留时间总体上较短于垂直支管内过冷水停留时间,且主管内蒸汽停留时间不稳定,但大部分蒸汽停留时间维持 4.5 ms 左右. 此外还发现,1 000 ms 内每个间歇凝结周期持续时间的波动趋势与过冷水在垂直支管内停留时间及蒸汽在水平主管内停留时间的波动趋势基本一致.

图 7 描述了蒸汽温度 100 ℃、过冷水温度 40 ℃、蒸汽体积流量 550 μL/min 及过冷水体积流量 14 758 μL/min 工况下,1 000 ms 内不同间歇凝结周期内蒸汽与过冷水分别在水平主管及竖直支管内停留时间的变化情况. 观察图 7 可知,该工况下 1 000 ms 内发生间歇凝结的频率为 40 Hz,各间歇凝结周期所用时间整体在 24 ms 上下小幅度波动,少部分周期 27 ms 上下波动. 同样该工况下全部间歇凝结周期中,水平主管内蒸汽停留时间短于竖直支管内过冷水停留时间,且 1 000 ms 内各个周期中蒸汽和过冷水分别在水平主管及竖直支管内停留的时间有所差异. 其中在第 10 个周期中竖直支管内过冷水停留时间最长约为 21.2 ms,而在第 35 个周期中水平主管内蒸汽停留时间最长约为 12.2 ms. 其与图 6 的区别在于水平主管内蒸汽停留时间与竖直支管中过冷水停留时间的变化趋势不一致,并未出现图 6 中随着水平主管内蒸汽停留时间的增长,相应的竖直支管中过冷水停留时间也相应增长的规律,相反部分周期出现水平主管内蒸汽停留时间增长,竖直支管中过冷水停留时间变短的现象(例如第 35 次间歇凝结).

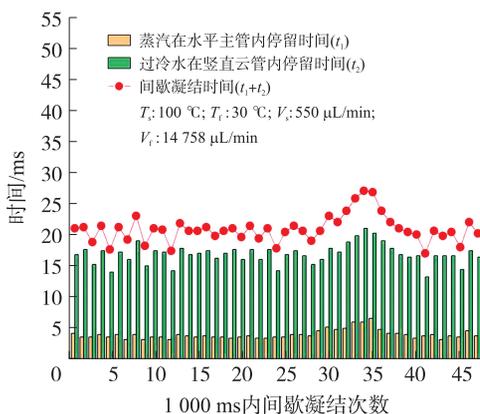


图 6 过冷水 30 ℃ 时不同周期内的汽水停留时间
Fig. 6 The steam-water retention in different periods at sub-cooled water temperature of 30 ℃

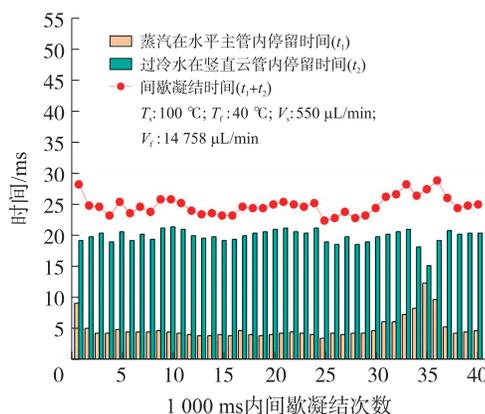


图 7 过冷水 40 ℃ 时不同周期内的汽水停留时间
Fig. 7 The steam-water retention in different periods at sub-cooled water temperature of 40 ℃

图 8 描述了蒸汽温度 100 ℃、过冷水温度 50 ℃、蒸汽体积流量 550 μL/min 及过冷水体积流量 14 758 μL/min 工况下,1 000 ms 内不同间歇凝结周期内蒸汽与过冷水分别在水平主管及竖直支管内停留时间的变化情况. 观察图 8 可知该工况下间歇凝结频率为 33 Hz,间歇凝结周期持续时间的整体波动状况较为平缓且绝大多数周期约为 25 ms,仅个别周期时间较长约为 153.8 ms. 与前 2 种工况相比,绝大多数同样存在间歇凝结周期内过冷水在支管内停留时间高于蒸汽在主管内停留时间的规律,但也出现了水平主管内蒸汽停留时间高于竖直支管内过冷水停留时间的现象(例如第 22 和第 23 个间歇凝结周期),尤其是第 23 个间歇凝结周期中水平主管内蒸汽停留时间(128.2 ms)远远大于竖直支管内过冷水停留时间(25.6 ms). 此外,观察图 6 至图 8 可知:蒸汽直接接触间歇凝结时间随过冷水温度的升高而升高,而凝结频率随过冷水温度升高而降低.

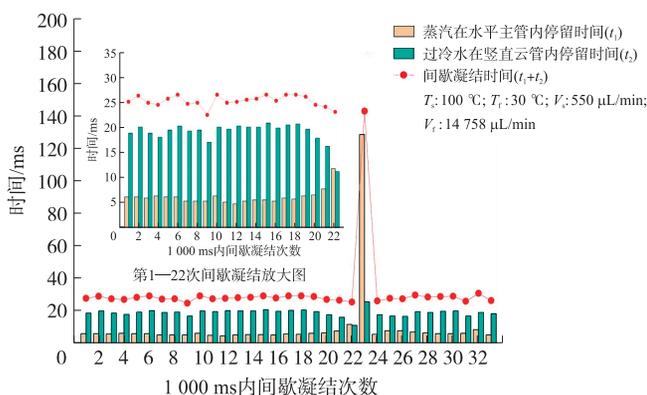


图 8 过冷水 50 ℃ 时不同周期内的汽水停留时间
Fig. 8 The steam-water retention in different periods at sub-cooled water temperature of 50 ℃

由图 3 至图 5 所示的可视化实验结果可知,不同工况下间歇凝结过程中不同周期内汽液两相区最大面积不同. 但图 3 至图 5 仅为 3 种工况下 6 个周期的间歇凝结的典型时刻汽液界面演变过程(每种工况 2 个周期),为了进一步研究不同工况下各间歇凝结周期中两相区最大面积的变化规律,将对不同工况下各周期内两相区最大面积进行图像处理. 图像处理过程如图 9 所示.

应用 MATLAB 图像处理技术对高速摄像机获取的图像信息进行处理. 通过对原始图像依次采用二值化、取反、填充、去噪等方法获得汽液两相区像素面积,进而得到间歇凝结周期内气液两相区的最大面

积. 通过图像处理得到不同工况下的各周期内气液两相区的最大面积变化规律如图 10 所示.

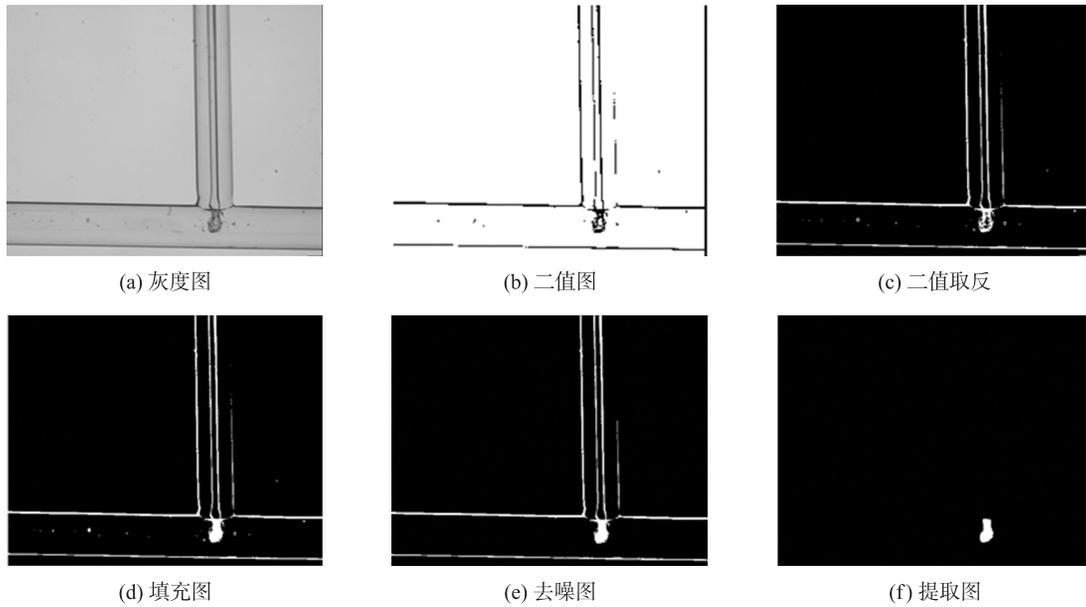


图 9 图像处理过程示意图

Fig. 9 The Schematic diagram of image processing

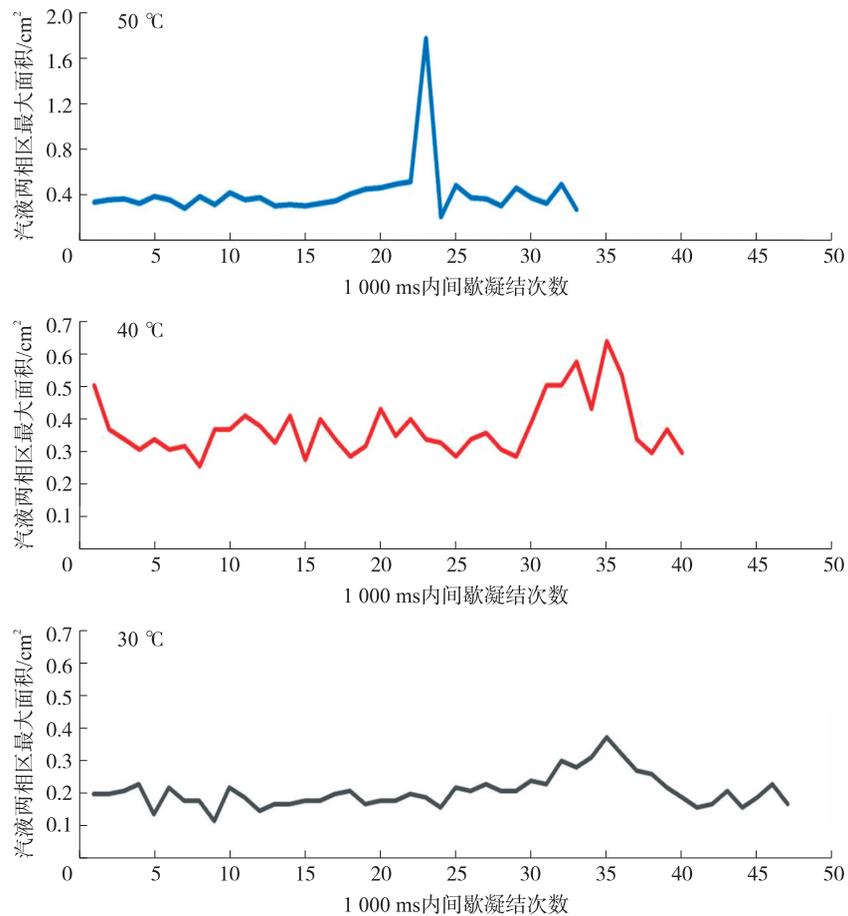


图 10 不同工况下各周期内汽液两相区最大面积对比图

Fig. 10 Comparative of largest steam-water two-phase areas in different periods and working conditions

图 10 描述了过冷水温度 30 °C、40 °C 及 50 °C 工况下, 1 000 ms 内不同间歇凝结周期内汽液两相区最大面积的波动情况. 由图可知各间歇凝结周期内汽液两相区最大面积随过冷水温度升高而升高, 且振幅随温度的升高也有明显的升高. 进一步观察不同工况下汽液两相区最大面积的变化过程, 发现在 30 °C 工

况下大多数间歇凝结周期内汽液两相区最大面积在 0.2 cm^2 上下小幅度波动,部分周期内波动幅度稍大(第 32 至第个 38 周期)且最高为 0.38 cm^2 . 在 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 工况下大多数间歇凝结周期内汽液两相区最大面积在 0.38 cm^2 上下较大幅度波动,部分周期内波动幅度较大(第 31 至第个 38 周期)且最高为 0.53 cm^2 . 而在 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 工况下各间歇凝结周期内汽液两相区最大面积变化总体较为平缓,仅第 23 个周期出现十分明显的振荡变化,且在该周期内出现 3 种工况中最大的汽液两相区面积约为 1.77 cm^2 .

此外,结合图 6~图 8 及图 10 观察可以发现,1 000 ms 内每个间歇凝结周期所需时间的变化趋势与该周期内的汽液两相区最大面积的变化趋势基本一致. 由上述现象表明,蒸汽直接接触间歇凝结过程中间歇凝结周期持续时间不稳定的原因可能是由汽液两相区最大面积波动所致.

进一步观察并对比图 8 和图 10 发现,过冷水温度为 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 时间歇凝结的第 23 个周期在“汽水停留时间”和“汽液两相区最大面积”均出现了与其他周期显著不同的突变. 这两种现象的主要原因是,该工况下过冷水温度较高,其冷凝能力相对下降,导致水平主管内出现了尺寸显著较大的“蒸汽柱”而非尺寸较小的“蒸汽泡”,“蒸汽柱”被完全冷凝的时间及汽液两相区最大面积相应延长和增加.

4 结论

基于 T 型微细通道内蒸汽直接接触凝结可视化实验台,利用高速摄像机获取了 3 种不同过冷水温度下的汽液界面瞬时图像信息,通过 MATLAB 对可视化实验结果进行图像处理,分析了不同间歇凝结周期内汽液两相区最大面积的变化规律,主要结论如下:

(1) 过冷水温度会显著影响蒸汽泡的增长、颈缩和内爆进程,随过冷水温度升高一方面蒸汽泡在发生“内爆”之前的外形随之增大,此外“内爆”后的汽液两相区面积亦随冷水温度升高而增加. 另外,在微细通道条件限制下,蒸汽泡在间歇凝结过程中会相继发生多次“颈缩”和“内爆”现象,该现象在宏观尺度下的直接接触凝结中并未提及. 出现多次“颈缩”和“内爆”现象的主要原因可能是,在微细尺度条件下过冷水流量及其凝结能力受到限制,水平主管内的蒸汽泡发生“振荡”凝结.

(2) 过冷水温度为 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,间歇凝结频率分别为 47 Hz 、 40 Hz 和 33 Hz ,可见随过冷水温度的升高间歇凝结频率总体呈降低趋势,这主要是由于过冷水温度升高其凝结驱动势下降所致. 此外观察发现,即便是同种工况下蒸汽在主支管内停留时间也存在一定的波动性,主要原因在于微细通道条件下的蒸汽直接接触间歇凝结汽液界面瞬时剧烈的传热传质加剧了两相流动不稳定性.

(3) 1 000 ms 内每个间歇凝结周期所需时间的变化趋势与该周期内水平主管内的汽液两相区最大面积的变化趋势基本一致,表明对于 T 型微细通道条件下的蒸汽直接接触凝结而言,凝结主要发生水平主管内而非垂直支管中.

[参考文献]

- [1] GUPTA M K, KAUSHIK S C. Exergy analysis and investigation for various feed water heaters of direct steam generation solar-thermal power plant[J]. Renewable energy, 2010, 35(6): 1228-1235.
- [2] SHAH A, CHUGH TAI I R, INAYAT M H. Experimental and numerical investigation of the effect of mixing section length on direct-contact condensation in steam jet pump[J]. International journal of heat and mass transfer, 2014, 72: 430-439.
- [3] 陈学俊. 气液两相流与传热基础[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [4] 郭烈锦. 两相与多相流动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [5] 林宗虎. 能源动力中多相流热物理基础理论与技术研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [6] WANG W W, SU G H, QIU S Z, et al. Thermal hydraulic phenomena related to small break LOCAs in AP1000[J]. Progress in nuclear energy, 2011, 53(4): 407-419.
- [7] WITH A P D, CALAY R K, WITH G D. Three-dimensional condensation regime diagram for direct contact condensation of steam injected into water[J]. International journal of heat & mass transfer, 2007, 50: 1762-1770.
- [8] 陈琦禹, 徐强, 郭烈锦, 等. 垂直管内逆流蒸汽射流凝结流型特性分析[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(3): 573-578.
- [9] 叶书艳, 徐强, 郭烈锦, 等. 基于压力特性的管内蒸汽射流凝结流型识别[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(2): 328-334.
- [10] URBAN C, SCHLÜTER M. Investigations on the stochastic nature of condensation induced water hammer[J]. International

- journal of multiphase flow,2014,67:1-9.
- [11] HUJALA E,TANSKANEN V,RINEN J. Pattern recognition algorithm for analysis of chugging direct contact condensation[J]. Nuclear engineering and design,2018,332:202-212.
- [12] ARINOBU M,SUZUKI I,SHIHO E, et al. Evaluation of dynamic loads induced by chugging[J]. Journal of nuclear science and technology,1982,19(11):881-888.
- [13] LI W C,WANG J J,SUN Z N, et al. Experimental investigation on thermal stratification induced by steam direct contact condensation with non-condensable gas[J]. Applied thermal engineering,2019,154:628-636.
- [14] PUUSTINEN M,KOSKIAHO J,PELTONEN K. Influence of cultivation methods on suspended solids and phosphorus concentrations in surface runoff on clayey sloped fields in boreal climate[J]. Agriculture, ecosystems & environment,2005,105(4):565-579.
- [15] GREGU G,TAKAHASHI M,PELLEGRINI M, et al. Experimental study on steam chugging phenomenon in a vertical sparger[J]. International journal of multiphase flow,2017,88:87-98.
- [16] 李树谦. T型圆管内蒸汽直接接触凝结的实验研究与数值模拟[D]. 北京:北京化工大学,2016.
- [17] YANG F H,DAI X M,LI C. High frequency microbubble-switched oscillations modulated by microfluidic transistors[J]. Applied physics letters,2012,101(7):91-95.
- [18] YANG F,DAI X,KUO C J, et al. Enhanced flow boiling in microchannels by self-sustained high frequency two-phase oscillations[J]. International journal of heat and mass transfer,2013,58:402-412.
- [19] LI W M,YANG F H,ALAM T, et al. Experimental and theoretical studies of critical heat flux of flow boiling in microchannels with microbubble-excited high-frequency two-phase oscillations[J]. International journal of heat and mass transfer,2015,88:368-378.
- [20] TONG Z H,LIU H T,LIU Y X, et al. A study on the dynamic behavior of macromolecular suspension flow in micro-channel under thermal gradient using energy-conserving dissipative particle dynamics simulation[J]. Microfluidics and nanofluidics,2020,24(5):1-11.
- [21] JO H,JO D. Experimental studies of condensing vapor bubbles in subcooled pool water using visual and acoustic analysis methods[J]. Annals of nuclear energy,2017,110:171-185.
- [22] STEINKE M E,KANDLIKAR S G. An Experimental investigation of flow boiling characteristics of water in parallel micro-channels[J]. Journal of heat transfer,2004,126(4):518-526.

[责任编辑:顾晓天]