

开槽泡沫金属镍的流动沸腾机理及性能

田涛¹,姜鲲¹,曹峻腾²,郭春生^{2,3*}

(1. 国电投莱阳核能有限公司, 山东 莱阳 265217; 2. 山东大学低空科学与工程学院, 山东 威海 264209; 3. 山东大学深圳研究院, 广东 深圳 518057)

摘要: 为了深入探究微尺度下不同孔密度和开槽尺寸等参数对泡沫金属镍蒸发器内运行机理的影响, 选用3类孔密度(100、500、1 000目)和4类开槽尺寸(0、0.4、0.7、1.0 mm)共12类样品进行流动沸腾换热试验, 对样品热流密度、对流换热系数及压降进行计算分析。结果表明, 对于孔密度相同的样品, 开槽尺寸为0.7 mm的样品对流换热系数最高; 在相同开槽尺寸下, 试验得出的最优解是孔密度为500目、开槽尺寸为0.7 mm的样品, 相比100目样品对流换热系数提高3.02倍, 极限热载荷为152.40 W/cm², 对流换热系数最高达27 630.50 W/(m²·K)。通过硅溶胶对泡沫金属镍进行改性, 探究润湿性对换热性能的影响。结果表明, 开设槽道与亲水改性两者结合无法起到相互促进的作用, 未开槽时亲水改性可以使换热效果提升, 但也会大大削弱开槽带来的换热能力的提升, 使处理后的样品效果弱于未处理的泡沫金属镍样品。

关键词: 泡沫金属镍; 孔密度; 开槽尺寸; 流动沸腾换热; 泵驱两相回路

中图分类号: TK17

文献标志码: A

引用格式: 田涛, 姜鲲, 曹峻腾, 等. 开槽泡沫金属镍的流动沸腾机理及性能[J]. 山东大学学报(工学版), 2025, 55(6): 58-68.

TIAN Tao, JIANG Kun, CAO Junteng, et al. Mechanism and properties of slotted metallic nickel foam in flow boiling[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(6): 58-68.

Mechanism and properties of slotted metallic nickel foam in flow boiling

TIAN Tao¹, JIANG Kun¹, CAO Junteng², GUO Chunsheng^{2,3*}

(1. State Power Investment Corporation Laiyang Nuclear Power Co., Ltd., Laiyang 265217, Shandong, China; 2. School of Airspace Science and Engineering, Shandong University, Weihai 264209, Shandong, China; 3. Shenzhen Research Institute of Shandong University, Shenzhen 518057, Guangdong, China)

Abstract: To investigate the influence of pore density and grooved dimension on the operating mechanism of metallic nickel foam evaporators at the microscale, flow boiling heat transfer experiments were conducted using twelve samples with three pore densities (100, 500, and 1 000 mesh) and four grooved dimensions (0, 0.4, 0.7, and 1.0 mm). The heat flux density, convective heat transfer coefficient and pressure drop were calculated and analysed. The results showed that, for samples with the same pore density, the grooved dimension of 0.7 mm yielded the highest convective heat transfer coefficient. Under identical grooved dimension, the optimal performance was achieved by the sample with the pore density of 500 mesh and the groove dimension of 0.7 mm, which convective heat transfer coefficient increased by 3.02 times compared with the 100 mesh sample, reaching a maximum critical heat flux of 152.40 W/cm² and a peak convective heat transfer coefficient of 27 630.50 W/(m²·K). Surface modification of metallic nickel foam with silica sol was further carried out to examine the effect of wettability on heat transfer. The results indicated that the combination of grooving and hydrophilic modification did not exhibit a synergistic effect. Without grooves, hydrophilic modification enhanced heat transfer performance. However, it also significantly weakened the improvement brought by grooving, resulting in lower performance compared with untreated metallic nickel foam samples.

Keywords: metallic nickel foam; pore density; grooved dimension; flow boiling heat transfer; mechanically pumped two-phase loop

收稿日期: 2024-12-22

基金项目: 山东省重点研发计划资助项目(2022SFGC0501); 苏州市科技计划资助项目(SYG202118); 深圳市科技计划国际合作研究资助项目(GJHZ20240218113407015); 深圳市基础研究专项(自然科学基金)面上资助项目(JCYJ20240813175900001)

第一作者简介: 田涛(1982—), 男, 山东济阳人, 研究员, 硕士, 主要研究方向为先进核能开发。E-mail: bluesy8233@162.com

* 通信作者简介: 郭春生(1983—), 男, 黑龙江绥芬河人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为传热传质理论。E-mail: guo@sdu.edu.cn

0 引言

随着科学技术的发展,机械制造、电路设计和航天军工等领域的高精尖设备更新迭代,云计算、人工智能等新一代信息技术应用于各行各业,导致各类电子设备发热量激增,部分设备甚至可产生高达 150 W/cm^2 的局部热点。设备长期处于超额定温度下运行时,其可靠性与运行寿命都会大大降低^[1]。因此,如何针对高热流密度元件进行精确散热是下一步散热技术发展的重点。传统散热方式多以单相散热为主,在散热过程中,散热介质不会发生相变,带走的热量偏少。两相流散热方式通过在散热过程中发生工质相变达到局部高散热量,可以带走比单相流更多的热量,减小散热系统体积。在泵驱两相回流散热系统中,蒸发器作为与元件直接接触的器件,承担带走电子元件热量的工作,因此其工作效率直接影响系统散热效果^[2]。目前,提高蒸发器蒸发效率最常见的手段是增加传热面积,在平面上加工微槽道就是其中一种方式^[3]。微槽道换热器具有结构紧凑、换热能力强、工质消耗少等优点,是解决电子元器件散热难题的有效手段之一^[4]。但微槽道换热器中各个微槽道不互通,导致部分微槽道在局部高热流密度下容易出现局部干涸^[5],补液不及时也会导致气泡被微槽道限制并产生逆流,影响其他微槽道的传热效率,进一步导致传热恶化,增加流动阻力^[6],产生壁面震荡^[7]。因此,相较于实体翅片,由多孔材料构成的透水壁面可以解决流量分布不均的问题,改善流况,提高均温性,并且多孔壁面可以提供更大的传热面积及更多的成核位点^[8]。泡沫金属是一种具有大量连通孔的多孔介质材料^[9],结构强度高,适合二次加工,具有高开孔率、高孔隙率等特点^[10]。泡沫金属翅片结合多孔毛细芯的特点,可以通过毛细效应增加再润湿频率,加快气泡排出速率与补液速率,提高热流密度和传热系数^[11]。因此,泡沫金属翅片是进一步改善蒸发器效率的有效选择,对泡沫金属沸腾性能的研究是蒸发器设计的重要一环^[12]。

文献[13]将110目、孔隙率95%的泡沫金属填充至蒸发器内,新型蒸发器中四氟乙烷的传热系数提高1.5倍,实现延迟干涸;通过试验研究微槽道中流形变化,观察到的流动模式包括气泡流、段塞流、段塞-搅动流、环形-搅动流和环形流,其中气泡产生频率-质量流量的关系和光滑管类似,热通量对气泡产生频率影响较小;推测泡沫金属翅片中核沸腾、核蒸发是两种不同性质的机制,根据文献[14]

的研究,可以推测出活性成核位点数量随热通量的增加而增加,使用均质流模型分析出泡沫金属中摩擦导致的压降占总压降的70%以上。

文献[15]设计的换热器用多孔翅片代替原本固体翅片,Forchheimer-Brinkman-Darcy模型用于该设计中。试验结果表明,在不同冷却液流速下,该设计可以使压降降低43.0%~47.9%,带来的热阻变化仅增加5%。这是因为多孔翅片使冷却液可以在通道壁上滑动,减阻效果可适用于超疏水表面的滑移理论,表明减阻效率与多孔介质的结构尺寸等参数有很大关系。

文献[16]使用孔密度为20目、孔隙率为0.96的泡沫金属铜作为基底,研究泡沫铜的填充比对沸腾-冷凝换热的影响。通过切割泡沫金属铜实现不同的填充比,试验结果得出泡沫金属铜的最佳填充率为50%。

文献[17]研究不同尺寸的开槽泡沫金属在流动沸腾换热中的性能,采用去离子水作为工质。研究表明:110目、6槽微通道的泡沫金属铜综合性能最佳;在封闭空间内,开槽泡沫金属铜的换热性能优于不开槽泡沫金属铜,6槽泡沫金属铜优于9槽泡沫金属铜,泡沫金属镍的性能略低于泡沫金属铜;在开通微槽道的情况下,泡沫金属性能主要受孔隙率影响较大,孔隙率越大,换热性能越好,受孔密度影响较小;在开放空间下,开槽数量是影响泡沫金属沸腾换热性能的最重要因素,17槽泡沫金属铜沸腾换热系数高于11槽泡沫金属铜,但平均压降远大于11槽泡沫金属铜^[18]。

综上所述,已有研究发现将泡沫金属填充至管道或代替原本实心壁面具有极大的换热增强效果。然而,泡沫金属的填充会极大增大流动压降。目前常用的解决方法有优化泡沫金属结构及应用纳米流体。优化泡沫金属结构中最有效的是开槽。微槽道可以为泡沫金属提供减压与补液的途径,且加工工艺简单,成本低廉。但因为泡沫金属的结构与性能各异,在开槽泡沫金属的换热研究上尚未有统一的结论。因此,微米级微槽道与泡沫金属孔隙内流动沸腾机制的内在联系仍有待深入讨论。如何将微槽道与泡沫金属两个结构更好地结合,设计出热负载能力更强、换热性能更好的换热器,是本研究的难点。

1 试验装置及系统

1.1 试验装置设计与加工

本试验系统由循环回路和测量与控制部分组成,如图1所示。循环回路包括磁力泵、预热器、测

试段、冷凝器和储液器,形成封闭循环系统。磁力泵提供 0~3 L/min 的可调流量,确保工质在所需的流速范围内稳定循环。预热器能够将工质加热至设定过冷度(5~10 K),以保证测试段入口处工质的初始状态。冷凝器采用水冷结构,通过循环冷却水维持出口饱和状态。储液器容量约为 0.5 L,用于补充工质,缓冲系统压力波动,维持稳定的循环运行。整体装置结构紧凑,保证热流密度能够在 20~200 W/cm² 稳定运行。

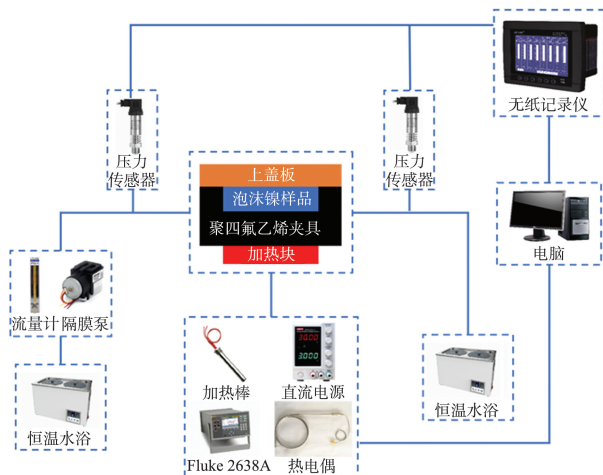


图1 试验系统图

Fig.1 Diagram of experimental system

本研究中,工质流经上部泡沫金属镍区域,并在底部施加热量以模拟热载荷。由于涉及工质相变,夹具需具备良好的密封性和隔热性,以保证热流密度和对流换热系数等数据计算的准确性。试验夹具如图2所示。综合考虑上述要求,选用聚四氟乙烯作为夹具材料。聚四氟乙烯可在 180~260 °C 长期使用,化学性质稳定,常压下几乎不与任何物质发生反应,因此能满足试验温度(230~240 °C)及长期使用的需求;聚四氟乙烯的导热系数仅为 0.2~0.3 W/(m·K),具有良好保温性能,能有效减少热损失;聚四氟乙烯具备优异的密封性、低表面张力和低摩擦系数,既能降低夹具对系统压降的影响,又可确保试验过程的稳定与测量的准确性。

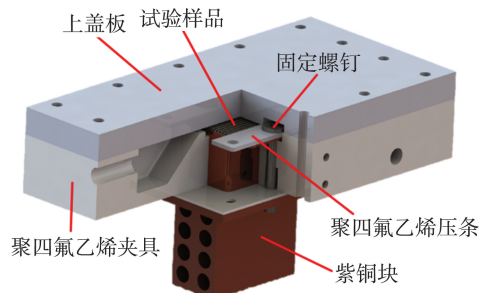


图2 试验夹具三维图

Fig.2 3D model of the experimental fixture

试验样品选用电沉积制备的泡沫金属镍^[19],测试段由铜制基底与泡沫金属镍样品加工组合而成,如图3所示。泡沫金属镍样品包括不同孔密度(100、500、1 000 目)与不同开槽尺寸(0、0.4、0.7、1.0 mm)的组合,总计 12 种。样品有效传热面积约为 10 mm×10 mm,通过环氧树脂密封固定。为减少散热,测试段外壁包覆绝热层。加热部分由直流稳流电源(最大输出功率为 1 kW)提供,在电流 0~30 A 和电压 0~60 V 下可实现稳定可控输入。冷却部分通过恒温水浴维持冷却水温度为(20±0.5) °C,确保冷凝器工况稳定。

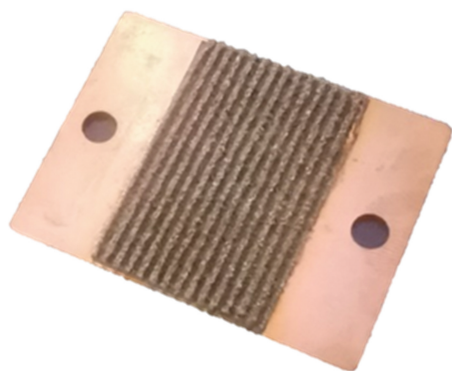


图3 泡沫金属试验件

Fig.3 Foam metal specimen

测量与控制方面,系统配置质量流量计(精度为±1%)、压差传感器(测量范围为 0~50 kPa,精度为±0.25%)及分布式 K 型热电偶阵列(精度为±0.5 K)。所有测量信号统一接入数据采集系统(采样频率为 10 Hz),实现温度、压降和流量的实时监测。为观察气泡动态行为,测试段上方设置透明可视化窗口,利用高速摄像机(最大分辨率为 2 000 帧/s)对气泡成核、合并与脱离过程进行捕捉与分析。

通过上述装置设计与加工,本试验平台能够覆盖 50~200 W/cm² 的热流密度和 50~500 mL/min 的流量范围,保证系统运行的稳定性和数据获取的准确性。该平台不仅能够实现换热性能与压降的定量研究,还能通过可视化手段深入揭示泡沫金属蒸发器内部的流动沸腾机理。

1.2 数据处理与不确定度分析

1.2.1 数据处理

本试验主要通过采集温度与压强计算需要分析的属性,采集点分布如图4所示。紫铜块上温度采集点为 $T_1 \sim T_4$,上下各 2 个, T_5 、 T_6 负责采集进出口温度。与 T_5 、 T_6 对应的另一个面上为压力传感器测量的进出口压力 P_1 、 P_2 。 L_1 为从泡沫金属镍底部到上测温点的距离, L_2 为上下测温点的距离。

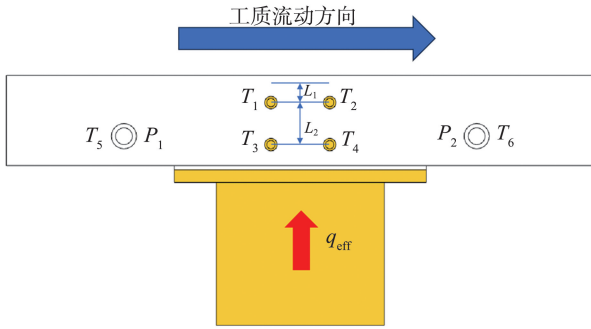


图4 采集点原理图

Fig.4 Schematic diagram of the sampling point

试验过程中使用的工质为去离子水。试验时,去离子水流入夹具内,润湿泡沫金属镍,并在此吸收紫铜块传递的加热棒热量;随后去离子水温度升高,当达到沸腾温度时,去离子水继续吸热并发生相变,当吸收一定程度的热量后,去离子水变为气态并形成气泡;当气泡汇集并脱离泡沫金属镍支架后,气泡随去离子水的流动离开样品区域。加热时,加热棒通过紫铜块为样品施加一个等效热流密度

$$q_{\text{eff}} = \frac{h_{\text{Cu}}(T_3 + T_4 - T_1 - T_2)}{2L_2}, \quad (1)$$

式中 h_{Cu} 为紫铜块导热系数。试验时,本研究对紫铜块上的传热做一定简化处理,默认传热为线性传导,此时可通过上下测温点温差与测温点之间的距离计算出对应的等效热流密度。

对流换热系数

$$h = \frac{q_{\text{eff}}}{\Delta T}, \quad (2)$$

式中, ΔT 为温差, $\Delta T = T_d - T_{\text{sat}}$, 其中 T_d 为泡沫金属镍底部温度, $T_d = \frac{(T_1 + T_2)}{2} - \frac{L_1}{L_2} \left[\frac{(T_3 + T_4)}{2} - \frac{(T_1 + T_2)}{2} \right]$, T_{sat} 为加热区域泡沫金属镍内流体的平均温度, $T_{\text{sat}} = \frac{T_5 + T_6}{2}$ 。由上述可知,本研究认为紫铜块上温度为线性传递,将上下测温点的温差按比例推算得上测温点与泡沫金属镍底面的温差,由此可得 T_d 。因为无法直接测量 T_{sat} ,本研究使用夹具进出口的平均温度作为流体的平均温度。

夹具内的流动阻力通过压降 ΔP 进行表征。 ΔP 的计算式为^[20]

$$\Delta P = P_1 - P_2. \quad (3)$$

1.2.2 不确定度分析

(1) 温度的不确定度

本试验所用热电偶的测温区间为 0~800 °C,热电偶间的误差为 0.5 °C。试验中最低温度为 75 °C,温度的不确定度

$$U(T) = \frac{0.5}{75} \times 100\% = 0.67\%. \quad (4)$$

(2) 电源的不确定度

电源不确定度 $U(E)$ 按 B 类方法评定,计算式为

$$U(E) = \frac{O}{\sqrt{3}}, \quad (5)$$

式中 O 为标称误差限。本研究用电源说明书中 $O = 1\%$, 由式(5)计算可得电源的不确定度为 0.577%。

(3) 输入热载荷的不确定度

输入热载荷的不确定度

$$U(Q_{\text{in}}) = \frac{\sqrt{[I \cdot U(u)]^2 + [u \cdot U(I)]^2}}{ul}, \quad (6)$$

式中, I 为测量电流, u 为测量电压, $U(u)$ 为测量电压的不确定度, $U(I)$ 为测量电流的不确定度。本研究假定电流与电压测量均采用直流电源自带显示器, $O = 1\%$, 由式(5)可计算出 $U(u)$ 、 $U(I)$, 代入式(6)可得输入热载荷的不确定度约为 0.816%, 在允许范围内。

2 试验结果与讨论

2.1 热流密度变化规律

相同开槽尺寸下不同孔密度样品的热流密度随温差变化情况如图 5 所示。从图 5 中可以看出,在相同温差下,500 目样品在不同开槽尺寸下均可负载更高的热流密度。不开槽时,500 目样品的极限热流密度最大,为 108 W/cm²,在温差小于 50 °C 时,100 目样品的热流密度比 1 000 目的更大,意味着在低热流密度下,孔密度增大所带来的强化换热效果并不明显。一方面,在低热流密度下,流动换热以单相换热为主,此时低孔密度所带来的阻力减小可以优化单相换热;另一方面,流动换热早期气泡产生速度较慢,尺寸较小,低孔密度下阻力较小,更有利于小气泡脱离,减少气泡附着,但当热流密度增大时,气泡产生速度加快,此时孔密度增大带来的比表面积增加及更多的成核位点可使高孔密度的泡沫金属镍承载更高的热载荷。因此,当 100 目的泡沫金属镍热载荷到达极限时,1 000 目的泡沫金属镍仍然可以承受更高的热载荷。低热流密度时,流体受热较少,在试样前半段液体仍然呈现液态,直至试样后半段才逐渐吸收足够热量发生相变,因此随热流密度增大,高孔密度的泡沫金属镍更大的换热面积与更多的成核位点带来的优势变大。

开槽将带来减阻效果及毛细补液效果,相较于高孔密度样品,低孔密度样品的减阻效果不明显,因此在同等加热面温差下,1 000 目样品的热流密度均大于 100 目样品,且随开槽尺寸增大,差距越来越明显。500

目样品既不会因 100 目样品过大的孔径导致极限热载荷低,也不会因 1 000 目样品过小的孔径使气泡脱离困难,阻力过大,因此其性能最好,当开槽尺寸为 0.7 mm 时,热流密度最高,达 152.40 W/cm^2 。

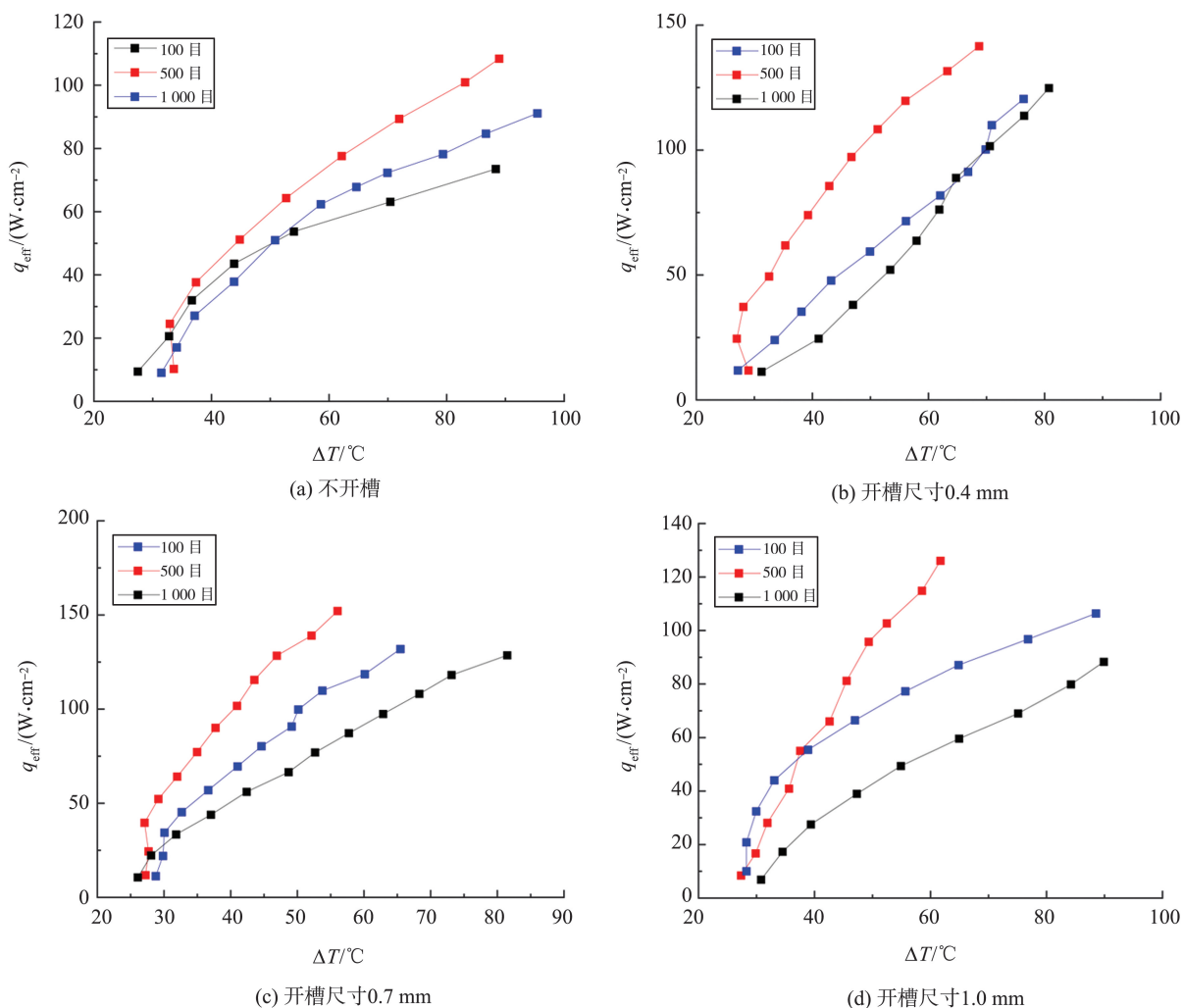


图5 相同开槽尺寸下不同孔密度样品的热流密度-温差图

Fig.5 Heat flux density-temperature difference plot for samples with different pore densities under the same grooved dimension

相同孔密度下不同开槽尺寸样品的热流密度随温差变化情况如图 6 所示。从图 6 可以看出,各个样品的最优开槽尺寸均为 0.7 mm。随着开槽尺寸增加,在相同温差下不同孔密度样品的热流密度均呈现先增加后减少的趋势。当开槽尺寸为 1.0 mm 时,100 目样品的热流密度曲线接近未开槽样品,500 目样品的热流密度曲线接近开槽尺寸为 0.4 mm 样品的曲线,1 000 目样品的极限热流密度介于 0.4 mm 与未开槽样品之间。在相同温差下,100 目样品与 500 目样品相比,开槽样品与未开槽样品的热流密度差距不断增加;500 目样品与 1 000 目样品相比,开槽样品与未开槽样品的热流密度差距则呈现减小趋势。这表明在低孔密度下,开槽虽然具有减阻与辅助补液的作用,但由于 100 目样品

孔径过大,泡沫金属支架的传热极限小于高孔密度样品,整体阻力也较小,减阻与辅助补液效果并不明显;当孔密度增大至 500 目时,样品的成核位点、比表面积和阻力带来的影响处于相对平衡状态,此时开槽带来的换热增强最明显,可以在优化阻力的同时帮助泡沫金属镍样品脱离气泡和补液;当孔密度进一步增大至 1 000 目时,开槽尺寸带来的差距开始减小,但仍然对泡沫金属镍的性能提升有帮助,表明开槽带来的换热性能提升效果依然受孔密度等参数影响,需要与其他参数综合考虑。综上,开槽可以增强泡沫金属镍的换热性能,但增强效果随孔密度增大出现先增大后减小的趋势,当孔密度为 500 目时,样品的换热增强效果最佳,样品具有最大热流密度。

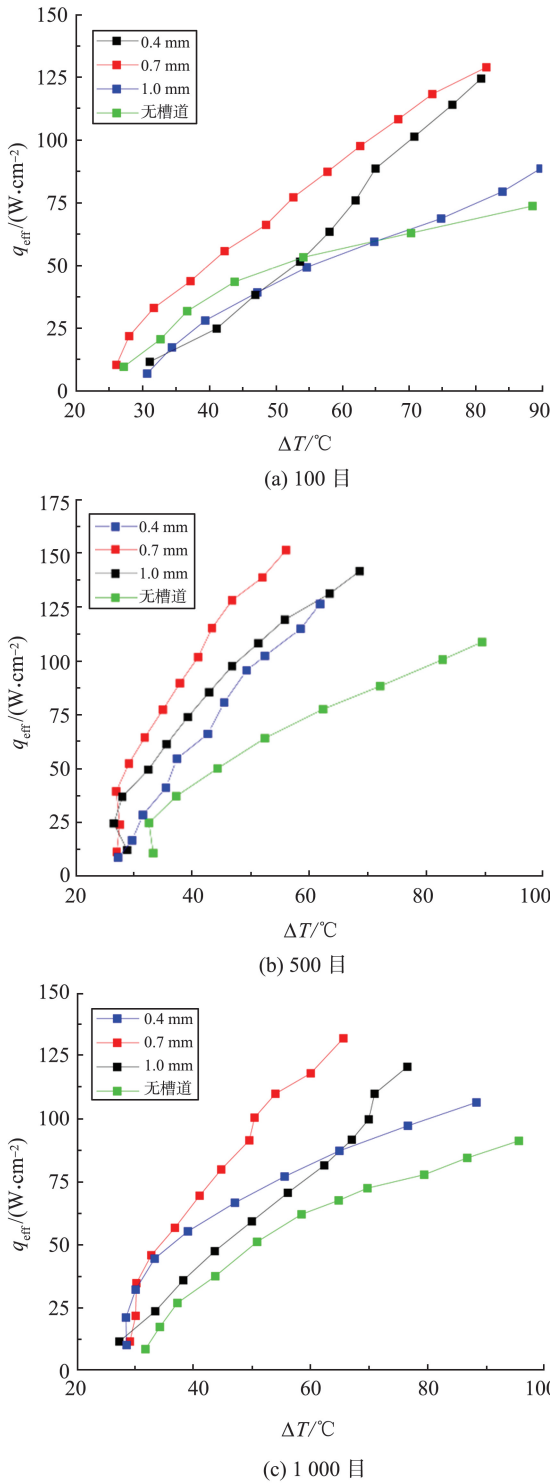
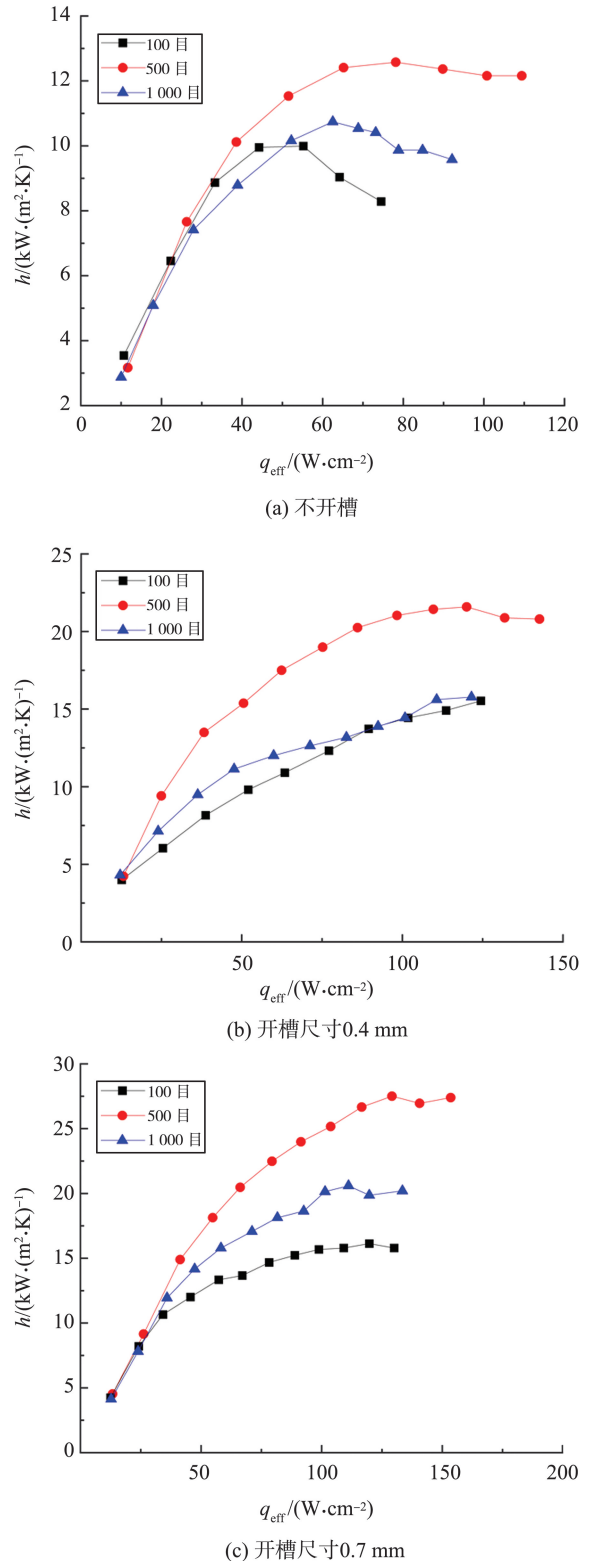


图6 相同孔密度下不同开槽尺寸样品的热流密度-温差图
Fig.6 Heat flux density-temperature difference plot for samples with different grooved dimensions under the same pore density

2.2 对流换热系数变化规律

相同开槽尺寸下不同孔密度样品的对流换热系数 h 随热流密度变化情况如图7所示。由图7可知,500目样品的对流换热系数最高,表明在相同热载荷下,500目样品的换热效率最好。在不开槽时,各样品的最大对流换热系数都较低,500目样品的

对流换热系数为 $12\ 595.16\ W/(m^2 \cdot K)$;开槽样品的对流换热系数均有一定程度提升,当开槽尺寸为0.7 mm时,500目样品的对流换热系数最大,为 $27\ 630.50\ W/(m^2 \cdot K)$ 。此外,500目样品在接近极限热流密度时对流换热系数最稳定,仅有小幅降低,意味着该样品并未出现传热恶化,表明500目样品在全尺寸中具有最好的热稳定性。



(c) 开槽尺寸0.7 mm

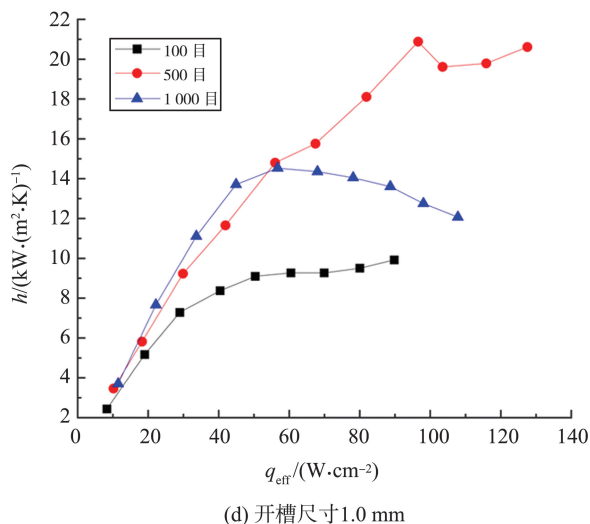


图7 相同开槽尺寸下不同孔密度样品的对流换热系数-热流密度图

Fig.7 Convective heat transfer coefficient-heat flux density plot for samples with different pore densities under the same grooved dimension

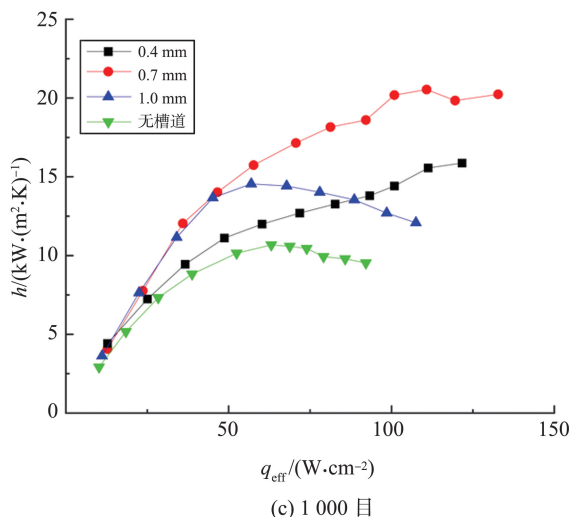
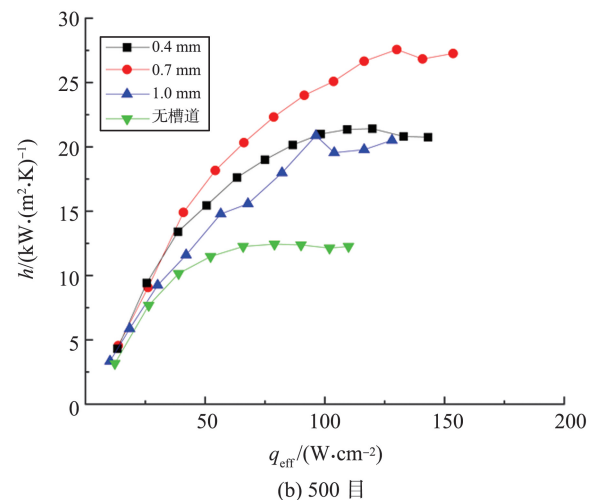
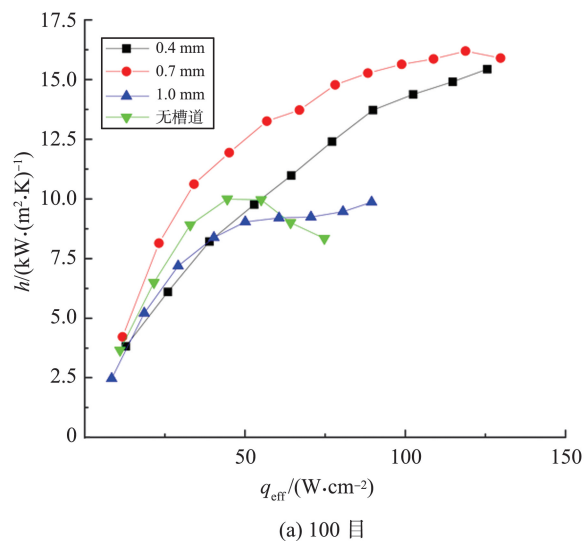


图8 相同孔密度下不同开槽尺寸样品的对流换热系数-热流密度图

Fig.8 Convective heat transfer coefficient-heat flux density plot for samples with different grooved dimensions under the same pore density

相同孔密度下不同开槽尺寸样品的对流换热系数随热流密度变化情况如图8所示。

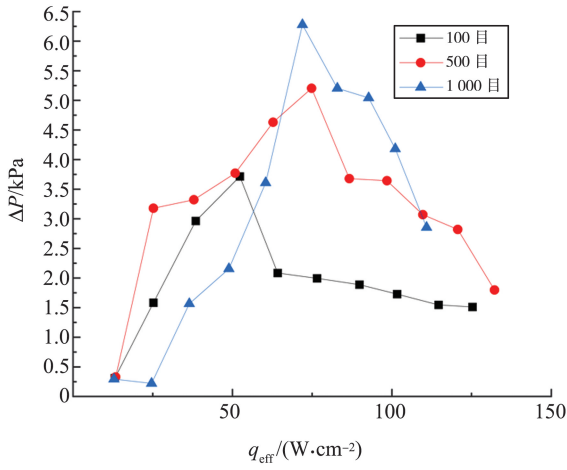
由图8可以看出,开槽大多对对流换热系数具有积极作用,但孔密度为100目、开槽尺寸为1.0 mm时,样品的对流换热系数比不开槽时低,因为100目样品的孔径较大,此时微槽道的减阻与润湿效果较弱,且开槽尺寸越大,毛细力越小,补液效果越差,导致样品的换热性能比不开槽时低。此外,不同孔密度样品在不开槽时的对流换热系数先增大后减小,表明随着功率接近极限,样品的传热状况逐渐恶化。该趋势在100目与1000目样品上尤为明显,但二者的恶化原因并不相同。100目样品是由于孔径过大,泡沫金属支架带来的换热增强效果达到极限,使传热恶化;1000目样品的孔径过小,导致阻力过大,气泡脱离,补液受阻。在500目样品上传热恶化现象不明显。由此可以看出,微槽道在合适的孔密度下可以改善泡沫金属镍的传热特性。当孔密度较小时,开槽尺寸为0.4 mm和0.7 mm样品的对流换热系数较为接近。对比500目和1000目样品,开槽尺寸为0.4 mm和0.7 mm样品间的对流换热系数差距逐渐变大。



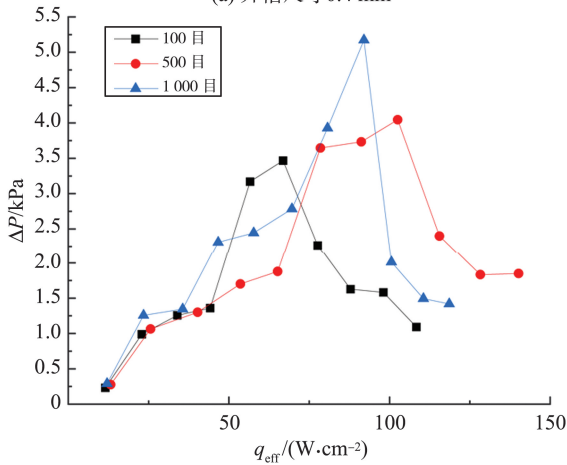
2.3 压降变化规律

相同开槽尺寸下不同孔密度样品的压降-热流密度变化情况如图9所示。在试验过程中,压降先增大后减小。在运行过程中,气液比例接近时,对流换热系数较高,此时对流换热较为剧烈,在泡沫金属镍中不断进行气泡生成与液体补充,未出现热失衡现象,此时两相流流况较为复杂,导致压降较大。在热流密度较低时,对流换热效率较低,气泡产生较少,此时液相为主要流体;在热流密度较高

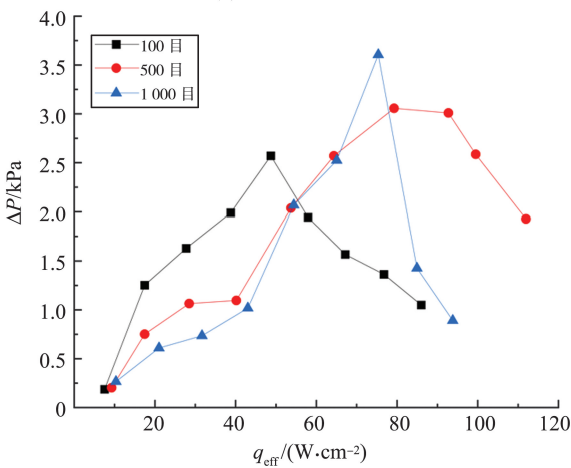
时,对流换热过于剧烈,使内部补液效率变差,此时气相为主要流体。由此可见,单一流体占据主导时的压降远不如气液混合流动时的压降。



(a) 开槽尺寸0.4 mm



(b) 开槽尺寸0.7 mm



(c) 开槽尺寸1.0 mm

图9 相同开槽尺寸下不同孔密度样品的压降-热流密度图

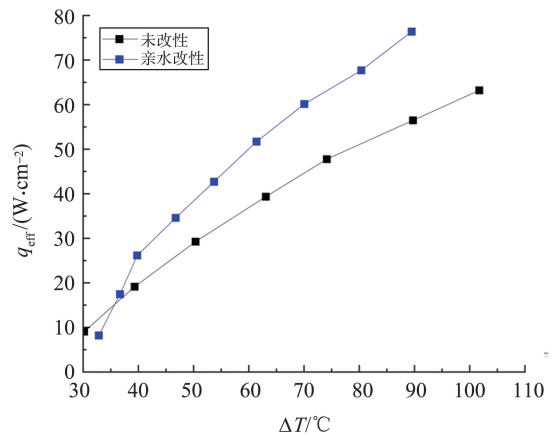
Fig.9 Pressure drop-heat flux density plot for samples with different pore densities under the same grooved dimension

由图9可以看出,随着孔密度增大,压降逐渐增大,当达到最大压降时,100目样品的热流密度最小,500目样品的热流密度最大。推测出现该现象

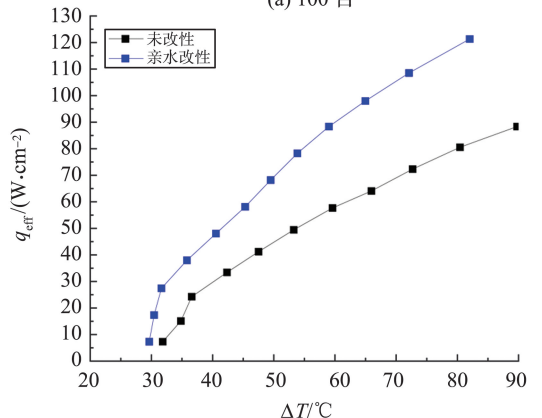
的原因与对流换热效率有关,500目样品的对流换热系数最高,因此恶化速度最慢,100目样品的极限热流密度和对流换热系数都较低,因此达到两相混合流的热流密度最低。孔密度与压降成正比的原因是随着孔密度增大,样品孔径逐渐减小,使相同的两相流在通过孔径更小的泡沫金属时阻力更大,因此压降变大。

2.4 硅溶胶改性变化规律

本研究利用硅溶胶对泡沫金属镍进行亲水改性,不同孔密度的无槽样品改性前后的热流密度曲线如图10所示。由图10(a)可以看出:在沸腾换热初期,100目未改性样品的加热面与流体温差低于亲水改性样品,即过热度较低;当热流密度大于15 W/cm²时,亲水改性样品的过热度较低;未改性样品临界热流密度在65 W/cm²左右,亲水改性样品临界热流密度在75 W/cm²左右,亲水改性对热流密度提升不大。由图10(b)可以看出:500目样品两曲线趋势相近,但改性后样品的过热度一直低于未改性样品,能达到的临界热流密度也更高;与100目样品对比,500目样品亲水改性的效果更佳。



(a) 100目



(b) 500目

图10 不同孔密度的无槽泡沫金属镍改性前后的热流密度曲线

Fig.10 Heat flux density curves for unmodified and modified slotless nickel foam with different pore densities

不同孔密度的无槽样品改性前后的对流换热系数曲线如图 11 所示。由图 11(a)可以看出:在低热流密度时,两者曲线几乎重合,当热流密度大于 20 W/cm^2 时,未改性泡沫金属镍的对流换热系数缓慢上升,而亲水改性样品的对流换热系数上升较快;随着热流密度增大,亲水改性优势逐渐增强,与未改性样品相比,改性样品对流换热系数提高约 $2000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;与开槽相比,亲水改性方案换热效果提升较小,达到的临界热流密度较低。由图 11(b)可知,改性后 500 目样品的最大对流换热系数接近 $16000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,与未改性样品相比提高约 $6000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,换热效果提升较大,但仍不如开槽带来的强化换热效果。

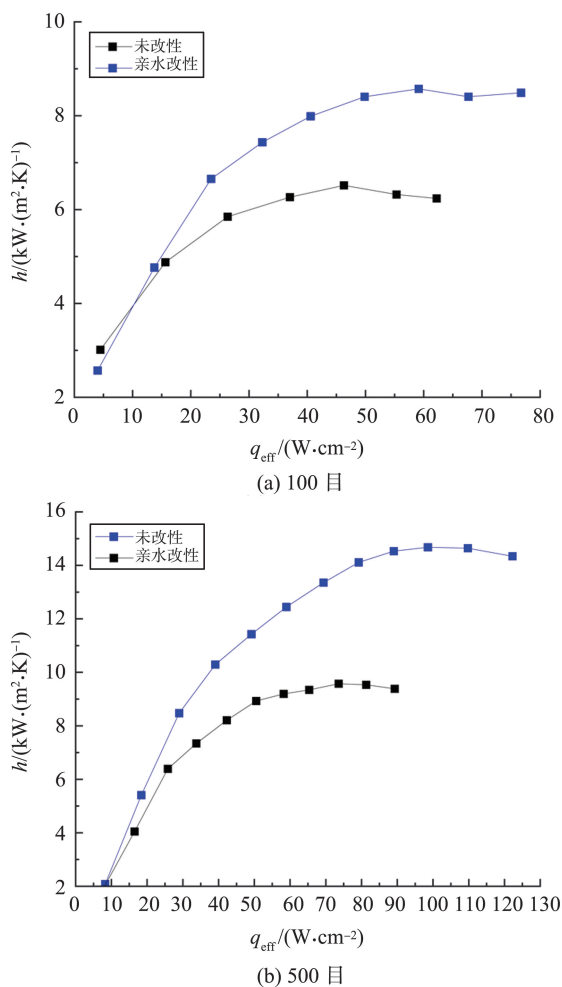


图 11 不同孔密度的无槽泡沫金属镍改性前后的对流换热系数曲线

Fig.11 Convective heat transfer coefficient curves for unmodified and modified slotless nickel foam with different pore densities

综合上述分析,亲水改性可以一定程度上提高泡沫金属镍样品的临界热流密度和对流换热系数,但提升效果不大。一般亲水改性可以提高泡沫金属镍毛细力,有助于液体及时补充,提高气泡排出

速率,强化对流换热,从而提高临界热流密度,延缓膜态沸腾发生。未经处理的泡沫金属镍样品表面疏水,可降低气泡成核壁垒,使沸腾换热能在较低的过热度下发生。

不同孔密度开槽改性复合样品的热流密度曲线如图 12 所示。

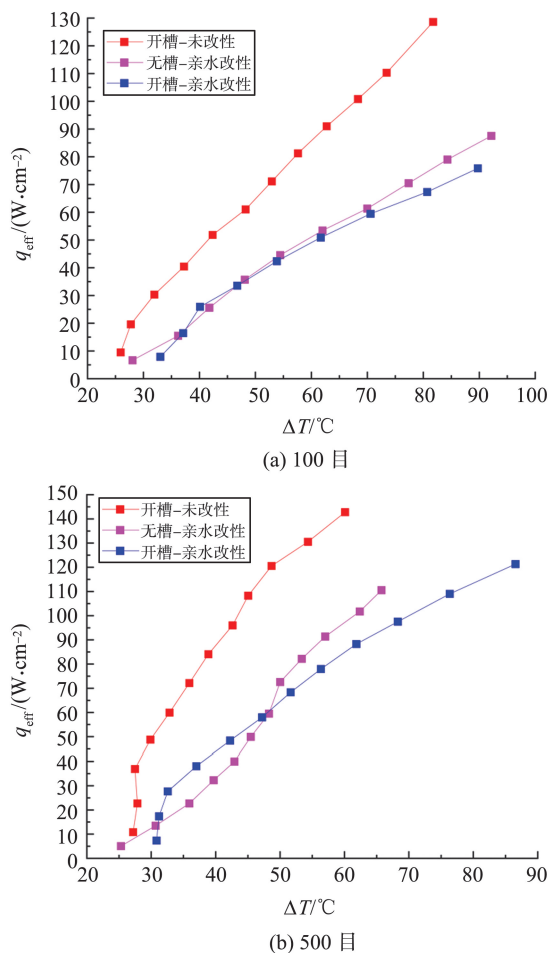


图 12 不同孔密度开槽改性复合泡沫金属镍热流密度曲线
Fig.12 Heat flux density curves for slot-modified composite nickel foam with different pore densities

由图 12(a)可以看出,开槽未改性样品的换热效果最好,开槽改性复合样品与无槽改性样品的换热效果相近。由此初步判断开槽和改性并不能起到相互促进的作用。在整个沸腾换热过程中,开槽未改性样品的过热度最低,能达到的临界热流密度最高。沸腾换热初期,开槽改性样品过热度低于无槽改性样品,但初始曲线上升较缓,即换热效果较差,在中低热流密度时,曲线几乎与无槽改性样品重合,在高热流密度时,开槽改性样品的优势提升微弱。开槽改性样品的临界热流密度约为 90 W/cm^2 ,无槽改性样品的临界热流密度约为 75 W/cm^2 。由图 12(b)可知,与 100 目样品规律类似,500 目开槽未改性样品的换热能力更佳。在沸

腾换热初期,开槽改性样品的加热面与流体温差最低,斜率最小,在中热流密度时,其过热度大于无槽改性样品,在高温热流密度时则相反。在高温热流密度时,开槽改性样品的上升趋势仍较陡,并未达到临界热流密度,推测其临界热流密度高于无槽改性样品,低于开槽未改性样品。

不同孔密度开槽改性复合样品的对流换热系数曲线如图 13 所示。由图 13(a)可以知,对于 100 目样品,开槽未改性样品对流换热系数为 $16\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,经改性后样品的对流换热系数仅为 $9\ 500\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,与无槽改性样品换热系数相差无几。由图 13(b)可知:对于 500 目样品,在低热流密度时,三者相差不大;当热流密度大于 $30\ \text{W}/\text{cm}^2$ 时,无槽改性样品的对流换热系数上升趋势放缓,开槽改性和开槽未改性样品的对流换热曲线仍以较大斜率上升;当热流密度大于 $60\ \text{W}/\text{cm}^2$ 时,开槽改性样品的对流换热效果强于无槽改性样品,但仍远低于开槽未改性样品。

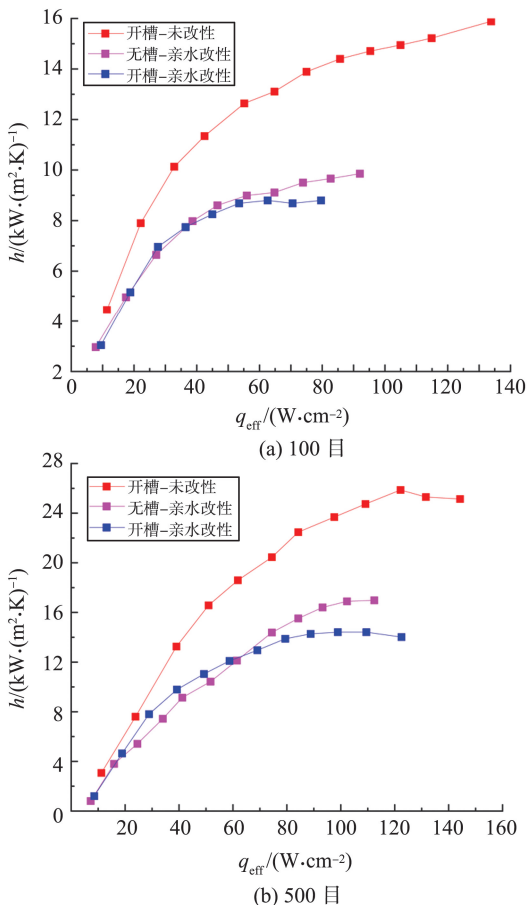


图 13 不同孔密度开槽改性复合泡沫金属镍对流换热系数曲线

Fig.13 Convective heat transfer coefficient curves for slot-modified composite nickel foam with different pore densities

3 结论

本研究旨在深入探究孔密度和开槽尺寸等参数对泡沫金属镍蒸发器内运行机理的影响。选用 3 类孔密度和 4 类开槽尺寸共 12 类样品进行流动沸腾换热试验,并对样品的热流密度、对流换热系数和压降进行计算分析。结果表明,在对流换热系数方面,随着孔密度增大,对流换热系数先增大后减小,随着开槽尺寸增大,趋势相同;在压降方面,随着孔密度增大,样品压降逐渐增大,随着开槽尺寸增大,样品压降逐渐减小。试验得出的最优解是孔密度为 500 目、开槽尺寸为 $0.7\ \text{mm}$ 的样品,该样品可将对流换热系数提高 3.02 倍,极限热载荷可达 $152.40\ \text{W}/\text{cm}^2$,对流换热系数最高为 $27\ 630.50\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。通过硅溶胶对泡沫金属进行改性,探究润湿性对换热性能的影响。结果表明,开设槽道与亲水改性两者复合无法起到相互促进的作用,未开槽时,亲水改性可以提升换热效果,但亲水改性也会大大削弱开槽带来的换热能力的提升,使其散热效果弱于未处理的泡沫金属样品。

参考文献:

- [1] 孙明美. 开放型多孔材料微通道流动沸腾实验研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2021: 1-15.
SUN Mingmei. Experimental study on flow boiling in open microchannels with porous material [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021: 1-15.
- [2] 徐声海, 梅彬. 泵驱两相流回路系统的热启动特性及动态运行技术[J]. 科学技术创新, 2022(36): 83-86.
XU Shenghai, MEI Bin. Hot start characteristics and dynamic operation technology of pump-drive two-phase flow loop system[J]. Scientific and Technological Innovation, 2022(36): 83-86.
- [3] LI H W, ZHANG C Z, YANG D, et al. Experimental investigation on flow boiling heat transfer characteristics of R141b refrigerant in parallel small channels filled with metal foam [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 133: 21-35.
- [4] SUDHAKAR S, WEIBEL J A, GARIMELLA S V. Experimental investigation of boiling regimes in a capillary-fed two-layer evaporator wick [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 135: 1335-1345.
- [5] HONG S H, DANG C B, HIHARA E. A 3D inlet

- distributor employing copper foam for liquid replenishment and heat transfer enhancement in microchannel heat sinks [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 157: 119934.
- [6] XU Z G, QU Z G, ZHAO C Y, et al. Experimental study of pool boiling heat transfer on metallic foam surface with U-shaped and V-shaped grooves[J]. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2012, 19(6): 549-559.
- [7] QU W L, 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.
- [8] MANETTI L L, RIBATSKI G, DE SOUZA R R, et al. Pool boiling heat transfer of HFE-7100 on metal foams [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2020, 113: 110025.
- [9] SHEN B B, YAN H B, SUNDEN B, et al. Forced convection and heat transfer of water-cooled microchannel heat sinks with various structured metal foams[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 113: 1043-1053.
- [10] RYU S, HAN J, KIM J, et al. Enhanced heat transfer using metal foam liquid supply layers for micro heat spreaders[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 108: 2338-2345.
- [11] 宗露香, 徐进良, 刘国华. 微通道内种子气泡抑制沸腾不稳定性研究[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(3): 341-346.
ZONG Luxiang, XU Jinliang, LIU Guohua. Flow boiling instabilities controlled by seed bubbles in microchannels[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(3): 341-346.
- [12] FU K, GAO W H, XU X H, et al. Flow boiling heat transfer and pressure drop characteristics of water in a copper foam fin microchannel heat sink[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 218: 119295.
- [13] GAO W H, XU X H, LIANG X G. Flow boiling of R134a in an open-cell metal foam mini-channel evaporator[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 126: 103-115.
- [14] HSU Y Y. On the size range of active nucleation cavities on a heating surface[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1962, 84(3): 207-213.
- [15] CHUAN L, WANG X D, WANG T H, et al. Fluid flow and heat transfer in microchannel heat sink based on porous fin design concept [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2015, 65: 52-57.
- [16] LIU Z L, ZHENG F W, LI Y X. Enhancing boiling and condensation co-existing heat transfer in a small and closed space by copper foam inserts [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 108: 961-971.
- [17] 孙利利. 开槽泡沫金属强化沸腾换热性能的研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2023.
SUN Lili. Study on enhanced boiling heat transfer performance of grooved metal foam[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2023.
- [18] ZHANG Z D, YAN G H, SUN M R, et al. Pore-scale simulation of forced convection heat transfer in metal foams with uniform and gradient structures[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 225: 120074.
- [19] 陈世龙, 孙麟, 张凯祺, 等. 泡沫铝材料的制备工艺及应用研究进展[J]. *铸造设备与工艺*, 2022(6): 58-62.
CHEN Shilong, SUN Lin, ZHANG Kaiqi, et al. Progress in preparation and application of aluminum foam[J]. *Foundry Equipment & Technology*, 2022(6): 58-62.

(编辑:孙亚彤)