

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-07
doi:10.12465/issn.0253-4339.20251117001

大高宽比微通道流动沸腾传热特性实验研究

朱学跃 黄涛 李美勇 刘泽宇 申利梅 刘志春

(华中科技大学能源与动力工程学院 武汉 430074)

摘要 为研究大高宽比微通道流动沸腾传热特性,本文以高宽比为18、基材为紫铜的微通道散热器为实验对象,搭建性能测试实验平台,实验研究了持续和间歇2种热源加热模式下微通道散热器温度流动响应与散热特性。结果表明:在持续加热 300 W/cm^2 与间歇加热 750 W/cm^2 -加热时间90 s条件下,该微通道散热器表现出良好的两相传热性能,热源面稳定温度能够控制在 $75\text{ }^\circ\text{C}$ 水平内,进出口压降维持在约18 kPa。流量与微通道进出口压降之间存在较强的正相关关系。

关键词 热管理;加热模式;大高宽比微通道;流动换热

中图分类号:TB657.5;TK124;O359^{*}.1

文献标识码:A

Experimental Study of Flow Boiling Heat Transfer Performance in High Aspect Ratio Microchannels

Zhu Xueyue Huang Tao Li Meiyong Liu Zeyu Shen Limei Liu Zhichun

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074, China)

Abstract In this study, we analyzed the flow-boiling heat transfer behavior of a copper microchannel heat sink with a high geometric aspect ratio of 18. An experimental platform was established to systematically evaluate the thermohydraulic response and heat dissipation capability under two heating regimes: continuous and intermittent. In the continuous mode with a heat flux of 300 W/cm^2 and in the intermittent mode with 750 W/cm^2 for 90 s, the heat sink successfully maintained the heat-source surface temperature below $75\text{ }^\circ\text{C}$, while the inlet-outlet pressure drop remained around 18 kPa, indicating excellent two-phase thermal and hydraulic performance. In addition, the flow rate and microchannel pressure drop exhibited a strong positive correlation.

Keywords thermal management; heating modes; high aspect ratio microchannels; flow boiling heat transfer

目前电子设备集成化与小型化的快速发展对封闭空间内的热管理技术提出更高的要求,而相比于单相换热,微通道相变冷却技术具有冷却通量大、换热效率高、独特优势,成为解决电子设备高效散热问题的可行方法之一。国内外众多学者针对双孔结构^[1]、T型^[2]、矩形^[3]及其他截面^[4]等不同结构与几何形状的微通道散热器开展了广泛研究,证明了其截面几何结构参数对其流动传热性能改善的有效性^[5-6]。

高宽比(aspect ratio, AR)是表征几何结构特征的关键参数,对微通道散热器的流动传热性能具有重要影响。增加微通道散热器的通道高度或减小宽度,可以增加其比表面积,会提供更多的成核位点和降低流动阻力,进而强化两相沸腾传热性能^[7]。

Cheng Xiao等^[8-9]实验研究了互连与侧壁凹槽^[10]阵列结构对硅基微通道散热器(AR=2.5)沸腾传热性能的影响,结果表明该结构可以抑制流动沸腾不稳定性并增强流动沸腾传热性能。其他学者也分析了高宽比对微通道散热器工质流态^[11]及流动沸腾过程中流阻和传热系数^[12]的影响。当选用不同类型基材时微通道因物性参数的差异,高宽比应随着基材导热系数的增大而散热性能增强^[13]。然而,上述微通道AR多集中在1~10,基材一般使用硅基材料加工而成。针对大高宽比(AR>10)、金属基微通道散热器的流动沸腾传热特性研究较少。大高宽比散热器是指高宽比大于10的散热器^[14]。

同时,规律的间歇运行也是一些大功率电子器件的主要工作模式,合理利用间歇工作特性能够更

基金项目:国家自然科学基金(52176007)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52176007).)

收稿日期:2025-11-17;修回日期:2026-01-04;录用日期:2026-01-13

好地释放其换热潜力。Cui Peilin等^[15-16]实验研究了大高宽比微通道(AR=25)的流动沸腾传热特性,得到大高宽比微通道较普通微通道(AR=1)具有更优异的综合传热性能并且沿深度方向为间歇流态。王志远^[17]的研究也证实了大高宽比微通道(AR=20)在发生流动沸腾传热时,各参数的变化具有明显的周期性。上述研究虽然揭示了其在恒定加热条件下的周期特性与机理,但关于间歇加热条件下微通道的实验研究尚不充分。

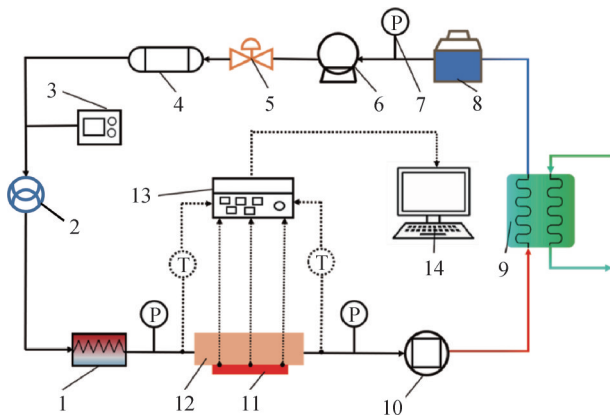
为研究大高宽比微通道散热器在实际应用场景中两相传热特性和间歇运行规律,本文以AR=18的大高宽比铜基微通道散热器为研究对象,构建性能测试平台并开展实验研究,分析流量、热源加热功率、加热时间等参数对流动沸腾传热特性的影响,并开展热源间歇性工作条件下微通道散热器的流动沸腾传热规律的实验研究,为大高宽比相变微通道在工程实际散热问题中的应用提供实验依据和科学指导。

1 微通道散热器实验系统

1.1 实验系统

本研究的微通道相变冷却实验系统由制冷剂回路与冷却水回路构成,实验装置系统如图1所示,制冷剂循环部分以R134a为工作介质,各部件之间通过铜管焊接连接。其中,测温热电偶布置在微通道进出口及与热源接触面,量程为16~98℃,精度为±0.5%。MD-S560A系列压力表的量程为-0.1~1.6 MPa,精度为±0.2%;艾默生科里奥利F025P流量传感器的量程为0~2 720 kg/h,精度为±0.2%。

实验前,需利用真空泵对管路进行抽真空处理,



1 前置加热器; 2 流量计; 3 压力保护器; 4 过滤器; 5 截止阀; 6 氟泵; 7 压力表; 8 储液罐; 9 钎焊板式换热器; 10 视镜; 11 热源; 12 微通道散热器; 13 温度数据采集仪; 14 计算机。

图1 实验装置系统

Fig.1 Experiment device of system

同时完成气密性检测,确保整个循环系统的密封性满足实验要求;随后通过储液罐的加注口填充制冷剂。冷却水循环系统由恒温水冷机组、磁力驱动齿轮泵以及钎焊板式换热器组成,各模块使用软管直接连接。在实验过程中,储液罐的液态制冷剂在氟泵推动下,经干燥过滤器与流量计后进入微通道换热器,并在其中完成相变过程。为确保微通道入口处工质达到饱和状态,入口前设置了前置加热器。离开微通道的两相工质通过视镜液后流入板式换热器冷凝,返回储液罐,实现循环运行。本研究误差主要来源于各测量仪器,根据误差传递公式,各物理量误差如表1所示。

表1 测量与计算误差

Tab.1 Measurement and calculation errors

参数	仪器或方式	误差
温度	TT-T-40-SLE-1000 热电偶	±0.5℃
压力	MD-S560A 系列压力表	±0.5%
流量	艾默生流量计	±0.5%
加热电流	固测电源 KPS6050D	±0.5%
加热电压	固测电源 KPS6050D	±0.5%
加热功率	计算值	±1%
压降	计算值	±1%
热流密度	计算值	±4.9%

1.2 微通道散热器

实验所使用的大高宽比微通道散热器以紫铜为基材,由盖板与微通道两部分构成,详细结构如图2所示。两部分先经过刻蚀工艺制备成型,再通过焊接工艺结合,以确保结构具备良好的气密性。为优化流量分配的均匀性,散热器设计为侧向进出口的流道形式,其进、出口铜管的外径为φ6 mm、内径为φ4 mm;底部与热源接触的区域尺寸为10 mm×20 mm。微通道散热器高宽比为18,详细结构参数如表2所示。

2 持续性热源实验结果分析

在热源持续加热的条件下,本文针对相变微通道散热器的性能,对比了其与传统单相微通道散热系统的差异,并分析了流量与加热功率的影响规律。实验中,流量范围设定为41.7~125.1 kg/h,加热功率为20~700 W,对应的加热热流密度为10~350 W/cm²。所有实验均在微通道入口温度保持(22.0±1.0)℃的条件下进行。

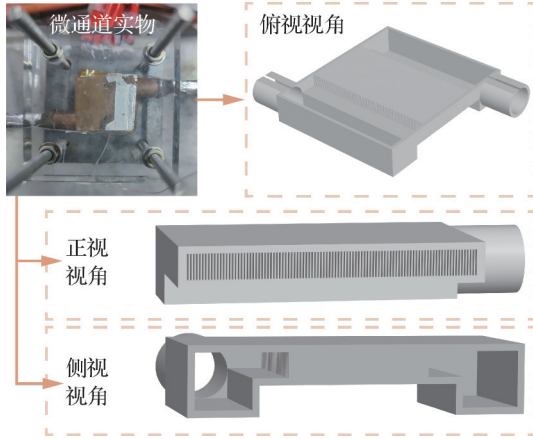


图2 微通道散热器

Fig.2 Microchannel heat sink

表2 微通道结构参数

Tab.2 Structural parameters of the microchannel

参数	数值	参数	数值
通道高度/mm	1.8	通道间隔/mm	0.1
通道宽度/mm	0.1	整体长度/mm	25
通道长度/mm	10	整体宽度/mm	23
通道数量	100	整体高度/mm	9.8

2.1 温度特性

微通道散热系统的热源稳定温度是评价其性能的重要指标之一。为研究相变微通道散热系统的传热特性,首先开展了变负载实验,测量不同加热功率下热源表面的温升过程及其稳定温度,并绘制了相应关系曲线,如图3所示。结果显示,在加热热流密度为 10 W/cm^2 时,热源稳定温度为 $21.6 \text{ }^\circ\text{C}$,与微通道入口温度几乎一致,说明此阶段入口温度对热源面稳定温度具有主导影响。在加热热流密度为 $10\sim 300 \text{ W/cm}^2$,热源温度随热流密度平稳上升,微通道处于最佳工作区,能够充分体现相变换热优势。在热流密度为 $300\sim 325 \text{ W/cm}^2$,热源温度出现急剧上升,散热器性能显著不稳定,存在沸干风险;当热流密度超过 325 W/cm^2 时,系统基本无法正常运行。实验表明,加热热流密度为 325 W/cm^2 以上的工况中,循环基本失稳,系统难以维持正常运行。为防止装置损坏及风险事故发生,实验被迫终止。因此,热流密度超过 325 W/cm^2 的加热条件下,受局部沸干引发的传热劣化影响,热源稳态温度数据已不具备参考价值。

图4所示为加热功率为 650 W (热流密度为 325 W/cm^2) 下热源温升时变化规律。当加热约 1100 s 后,微通道热源表面温度开始急剧上升,并出现明显的温度突升现象(图4)。结合出口处视液镜观测,可

以发现微通道内部传热工质在此时迅速汽化,形成大量气泡。这表明微通道内部已发生局部“干蒸”现象,流动沸腾传热性能显著恶化,进而引起热源表面温度的快速攀升。

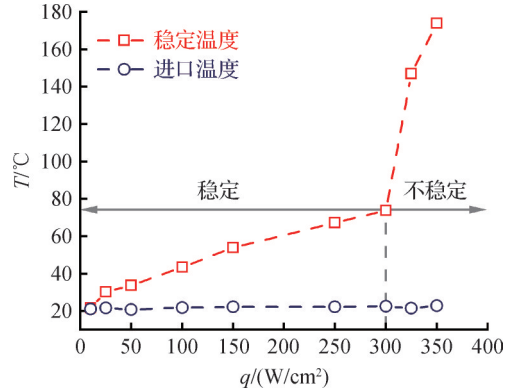


图3 不同热流下的热源稳定温度

Fig.3 Stable temperature of the heat source under different heat fluxes

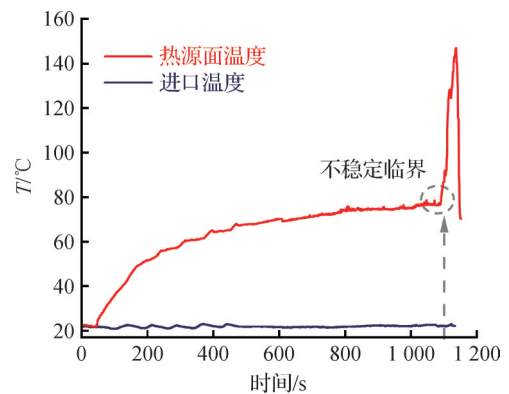


图4 加热功率为 650 W (热流密度为 325 W/cm^2) 下热源温升曲线

Fig.4 Variation of heat source temperature rise at 650 W heating power (heat flux: 325 W/cm^2)

在持续热源加热条件下实验结果表明,本研究所用的大高宽比平直微通道在加热功率不超过 600 W (热流密度为 300 W/cm^2) 时具备优良的散热表现,能够将热源表面温升维持在较低水平,基本满足多数电子设备的正常运行需求。然当进一步提升模拟热源功率,使加热热流密度超过 325 W/cm^2 时,通道内传热状况明显恶化,出现过热沸腾并伴随局部沸干。该阶段即便提高工质流量,对相变微通道的强化换热效果也十分微弱。

2.2 时间特性

热源表面温度达到稳定所需的时间,是衡量散热器散热性能的关键指标之一。图5反映了热源面温度趋于稳定状态过程中的动态响应特征。本文将微通道散热器热源面的稳定时间 t_s 定义为:以最终稳

态温度 $T(\infty) \pm 5\%$ 作为误差范围,热源面温度首次进入并始终保持在该范围内的最短时间,即为稳定时间。该稳定时间 t_s 用于刻画微通道散热器的时间响应特性(图5)。

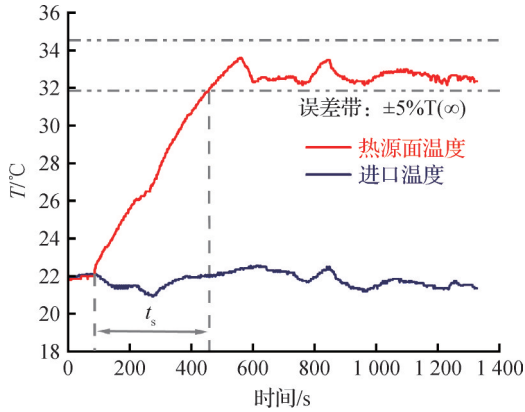


图5 热源面温度的稳定时间
Fig.5 Stabilization time of the heat source surface temperature

为分析热流密度对系统时间响应特性的影响,图6所示为不同热流密度下的稳定时间。由图6可知,随着加热功率的增加,热源表面的稳定时间表现出增大趋势。当热流密度为 50 W/cm^2 (加热功率为 100 W) 时,稳定时间为 350 s ;而热流密度达到 300 W/cm^2 (加热功率为 600 W) 时,该时间为 916 s 。结果表明,功率越高,热源表面温度达到稳态所需的时间越长。不同功率条件下微通道时间响应特性差异较为显著,因此基于该规律确定合适的微通道散热器热源运行参数,从而能够更有效地发挥其散热性能。

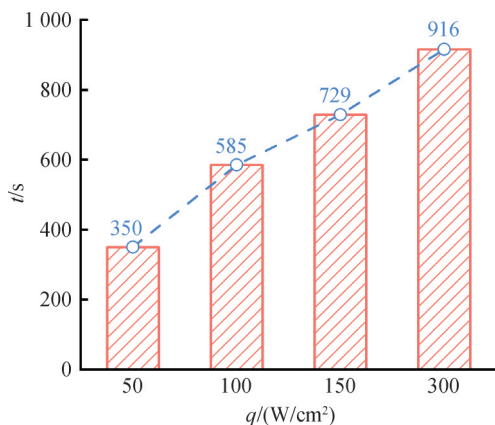


图6 不同热流密度下的稳定时间
Fig.6 Stabilization time at various heat flux densities

2.3 压降特性

进出口压降是衡量微通道散热系统流动性能的关键指标。相变微通道散热器优良的传热性能与合理的压降共同决定其工程应用,图7进一步反映了流

量变化对压降和热源面稳定温度的影响规律。本文实验结果(见图7)显示:在不同加热功率下,压降随质量流量提高呈准线性上升趋势;在相同流量下,各功率工况的进出口压差相近,表明压降的主控因素是工质流量而非加热功率。将工质流量提升至原始值的2倍时,进出口压降约上升至1.8倍;提高至3倍时,压降约增至初始的4.6倍。可见,压降的增长幅度快于流量的提升幅度。由此推断,单以增大流量来增强相变微通道散热,可能引发过高的系统压降;在工程应用中应依据该规律进行流量与系统参数的合理匹配与优化,以兼顾换热强化与压降可控。

另一方面,由图7可知,虽然在相同流量条件下,不同加热热流密度下的压降差异并不显著,但仍呈现出随加热热流增加而升高的趋势。例如,在流量为 62.5 kg/h 时,4个加热热流密度工况相应进出口压降分别为 $30, 32, 33, 35 \text{ kPa}$,说明微通道进出口压降与加热热流密度存在正相关关系。

在相变微通道冷却系统中,进出口压降同时受到流量与加热功率影响,其中与流量的关联性较强。虽然流量对微通道进出口压降变化影响较为显著,但实验结果验证了其对热源面稳定温度影响不显著(图7)。在热流密度为 $50, 100, 150 \text{ W/cm}^2$ 这3个工况下,流量变化对热源面稳定温度影响有限而对压降显著。其原因在于,工质在微通道内流动沸腾传热是以核态沸腾为主要传热机制。只要工质未发生干涸,通道内相变换热与其流量几乎无关,而液相工质温升小故显热换热量低。流量增加,通道内工质平均流速增大,摩擦压降升高,使压降增大。当热流密度增至 300 W/cm^2 时,流量增加对强化换热的影响会略有增强。例如,由初始流量 40.7 kg/h 增至 120.1 kg/h 时,热源面最终稳定温度能够降低 $3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。然而,增加流量对于系统散热强化增益,相比于额外泵功消耗,这种改善散热性能方式显然并不适用于工程应用。因此,在微通道流动沸腾散热实际应用场景中,仅增加换热工质流量强化微通道对流传热,不能有效提升系统冷却性能。当微通道工质未发生干涸时,继续提高流量对传热增强的边际效益非常有限。

3 间歇性热源实验结果分析与讨论

除常规持续工作方式外,部分高功率电子设备还以固定规律的间歇模式运行,因此需研究相变微通道冷却系统在间歇工况下的动态响应与散热性能。实验选择热流密度为 $300, 500, 750 \text{ W/cm}^2$,加热运行时长为 $30, 60, 90 \text{ s}$,间隔时间为 300 s ,对相变微通道散热器性能进行了研究,以评估其在间歇运行

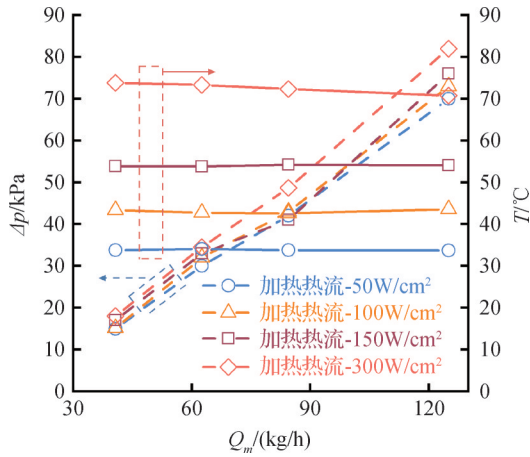


图7 流量与压降、热源面稳定温度关系 Fig.7 Relationship between flow rate, pressure drop, and steady-state temperature of the heat source surface

下的散热响应与稳定性表现。

3.1 温度特性

与持续加热实验不同,间歇性实验中模拟热源按照设定周期启停运行,因此无法得到热源面的长期稳定温度,只能统计各循环的最高温度。当多个工作周期内的最高温度逐渐趋于一致时,可认为间歇运行下热源面的峰值温度已达到稳定。不同热流密度与加热时长条件下的热源面最高温度如图8所示。图8上半部分中,稳定曲线表示微通道入口温度,波动曲线为热源面平均温度,下半部分 q 为热流密度,横坐标为实验时间。300 W/cm²-30 s-300 s表示加热热流密度为300 W/cm²,加热持续30 s,随后停机300 s,按此规律循环运行。

由图8可知,在模拟热源的单个循环周期内,热源面温度先迅速升高至峰值,随后进入下降阶段。升温段呈凸型趋势,而降温段则呈凹型趋势,说明高热导率铜基微通道在加热和停机后初期温差大传热响应迅速。在间歇性加热实验工况中,热源面温升规律与持续加热工况下温升曲线具有相似的变化特征;而在温降阶段呈现明显下凹曲线,停机300 s时间内温度下降速度较快。间歇运行下金属基微通道有利于快速降低器件温度,散热响应快,从而能够满足更高功率的电子器件散热需求。相较于硅基,本研究的金属基微通道散热器导热系数高,6面均具有良好的散热特性,而区别于硅基单面或5面散热,整体上具有更好的散热特性。

根据图8中不同模拟热源工况的结果可知,在间歇性实验中,热源面稳态峰值温度随周期时间步长及加热热流密度增加而升高,显示出明显的正相关趋势,即时间步长越长、热流密度越大,循环达到的

最终稳定最高温度也越高。此外,温度波动幅度,即单循环内热源最高与最低温度的差值。实验结果表明,温度波动范围与加热持续时间及热流密度均表现出正相关关系,随加热时间和加热热流密度的增加而增大。其中,波动范围对热流密度变化的敏感性明显高于对加热时间变化的敏感性,说明加热热流密度对热源温度波动的影响更为显著。

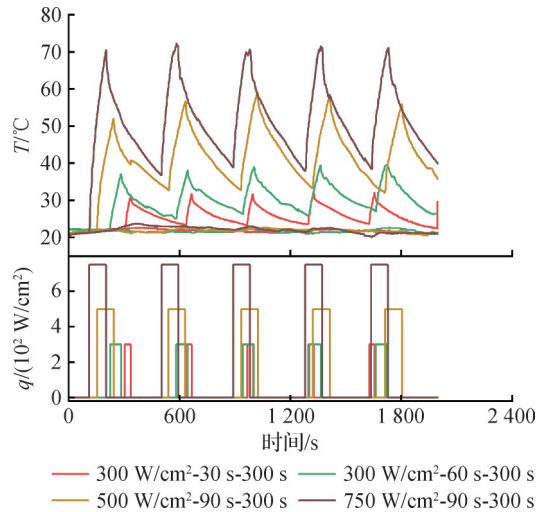


图8 不同热流、不同加热时间下热源面最高温度

Fig.8 Maximum heat source surface temperature under different heat fluxes and heating durations

3.2 压降特性

与持续性工况的实验研究一致,本节在间歇运行模式下研究了大高宽比微通道散热器的压降特性。图9所示为不同工况下流量对压降的影响关系曲线,各曲线的趋势基本一致。在最低流量时,各工况的最高与最低压降差值不超过3 kPa;而在最高流量时,该差值增至约13 kPa。造成压降差异的核心原因在于,两相流段的压降在总压降中占据较大比例,并且与通道内工质平均流速的平方成正比,因此当流速升高时,热流密度对压降的影响会更加显著。整体来看,流量与进出口压降存在很强的关联性。虽然热源的热流密度和加热持续时间对压降也具有积极作用,但影响幅度相对有限,即在相同流量条件下,汽化过程越强烈,压降水平越高。

在流量对热源面最高温度的影响方面,间歇性加热实验的结果与持续性工况相似,即流量变化对最高温度几乎无明显作用。流量对相变微通道的传热性能提升效果较为有限,但对系统进出口压降的影响十分显著。因此,在实际应用中,应优先采用其他优化手段提升性能,而不宜通过仅增加工质流量实现强化换热目的。

在微通道换热器流动阻力方面,对于单相流动,

微通道流动阻力主要决定于几何结构。而两相沸腾传热过程中一部分工质单相流动,另部分工质在受限空间发生相变,使气液两相的剪切力与流体的平均流速增加,且与通道壁面的摩擦阻力变大,故而相比于单相流动流阻更大。

综上所述,实验结果表明,在持续加热 300 W/cm^2 与间歇加热 750 W/cm^2 -加热时间 90 s 条件下,此微通道散热器表现出良好的两相传热性能,热源面稳定温度能够控制在 $75 \text{ }^\circ\text{C}$ 水平内,进出口压降维持在约 18 kPa 。

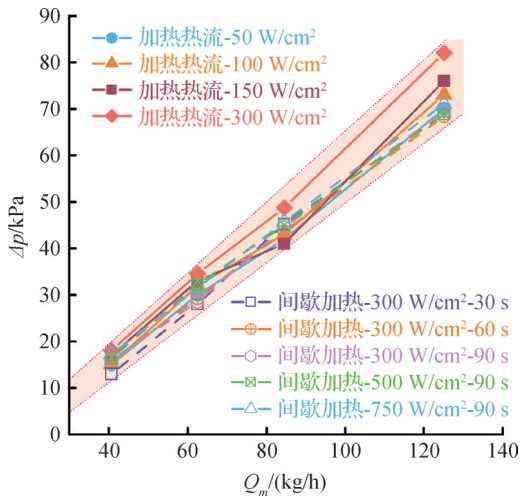


图9 相变微通道散热系统的压降特性

Fig.9 Pressure drop performance of the phase-change microchannel cooling system

4 结论

本文搭建了大高宽比微通道散热器的流动沸腾传热性能测试平台,并开展了其温度、时间及压降响应特性的实验研究。主要研究结论如下:

1)在热源持续加热模式下,大高宽比微通道散热器在加热热流密度为 $10\sim 300 \text{ W/cm}^2$ 时均表现出优异的散热性能。当加热热流密度达到 300 W/cm^2 时,热源面最高温度约为 $75 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2)在间歇加热条件下,加热热流密度为 750 W/cm^2 、加热持续 90 s 时,热源面峰值温度依然低于 $75 \text{ }^\circ\text{C}$,表明该模式下相变微通道散热器亦有良好的散热能力。

3)在微通道中流量与进出口压降之间存在较强的正相关关系。持续加热 300 W/cm^2 与间歇加热 750 W/cm^2 -加热时间 90 s 条件下,该微通道散热器表现出良好的两相换热性能,而且间歇运行模式相较于持续加热模式能够允许热源更高的热流密度。热源面稳定温度能够控制在 $75 \text{ }^\circ\text{C}$ 水平内,进出口压降维

持在约 18 kPa 。同其散热性能相比,压降处于可接受范围内。

参考文献

- [1] Shang Huiqing, Xia Guodong, Zhou Wenbin, et al. Experimental study on flow boiling heat transfer in sudden expansion variable cross-section bi-porous minichannels [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 280: 128486.
- [2] Choi T, Kim T Y. Flow boiling performance of T-shaped microchannels with sudden-expansion flow passages [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 274: 126568.
- [3] 栗庆文. 矩形微通道热沉强化传热及实验研究[D]. 济南: 山东大学, 2024. (Li Qingwen. Heat transfer enhancement and experiment researches on the rectangular microchannel heat sink [D]. Jinan: Shandong University, 2024.)
- [4] 薛丽红. 高纵横比微通道内部的毛细流动及毛细蒸发研究[D]. 济南: 山东大学, 2023. (Xue Lihong. Research on capillary flow and capillary evaporation in high aspect ratio microchannels [D]. Jinan: Shandong University, 2023.)
- [5] 王琛. 基于CPU散热的微通道强化传热数值模拟与实验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022. (Wang Chen. Numerical and experimental study on heat transfer enhancement of CPU cooling based on microchannel [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.)
- [6] 庄晓如, 李翔, 杨智. 微通道液液两相弹状流传热的研究进展[J]. 制冷学报, 2025, 46(6): 1-10. (Zhuang Xiaoru, Li Xiang, Yang Zhi. Research progress on heat transfer of liquid-liquid two-phase slug flow in microchannels [J]. Journal of Refrigeration, 2025, 46(6): 1-10.)
- [7] Long Jiangyou, Liu Ziyin, Lin Huipeng, et al. Pool boiling heat transfer and bubble dynamics over V-shaped microchannels and micropyramids: Does high aspect ratio always benefit boiling?[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 201: 117796.
- [8] Cheng Xiao, Pan Shanshan, Zhou Yuan, et al. Deionized water flow boiling in low-surface-roughness silicon-based high aspect ratio interconnected microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 238: 126454.
- [9] Cheng Xiao, Wu Huiying. Improved flow boiling performance in high-aspect-ratio interconnected microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 165: 120627.
- [10] Cheng Xiao, Wu Huiying. Enhanced flow boiling performance in high-aspect-ratio groove-wall microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021,

- 164: 120468.
- [11] Kim B. An experimental study on fully developed laminar flow and heat transfer in rectangular microchannels [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2016, 62: 224–232.
- [12] Shah N, Mehta H B, Banerjee J. Synchronized visualization and thermal measurements of flow boiling in high-aspect-ratio microchannel with backflow controller [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2025, 185: 105140.
- [13] Pan Yuhui, Zhao Rui, Fan Xihui, et al. Study on the effect of varying channel aspect ratio on heat transfer performance of manifold microchannel heat sink [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 163: 120461.
- [14] Wang Yuan, Sefiane K, Harmand S. Flow boiling in high-aspect ratio mini- and micro-channels with FC-72 and ethanol: Experimental results and heat transfer correlation assessments [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, 36: 93–106.
- [15] Cui Peilin, Liu Zhenyu, Wu Huiying. Subcooled flow boiling in ultrahigh-aspect-ratio microchannels for high heat flux cooling [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 151: 107221.
- [16] Cui Peilin, Liu Zhenyu. Experimental study on flow boiling in ultrahigh-aspect-ratio copper microchannel heat sink [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 223: 119975.
- [17] 王志远. 底部带团簇微柱阵列的高宽深比微通道内流动沸腾换热特性实验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2024. (Wang Zhiyuan. Experimental study on flow boiling heat transfer characteristics in microchannels with bottom-distributed clustered micro-pin arrays of high aspect ratio [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2024.)

通信作者简介

申利梅,女,教授,华中科技大学能源与动力工程学院,027-87542618, E-mail: ep_shenlimei@hust.edu.cn, 研究方向: 热电制冷及发电技术, 光电子器件热管理技术。

About the corresponding author

Shen Limei, female, professor, School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, 86-27-87542618, E-mail: ep_shenlimei@hust.edu.cn. Research fields: thermoelectric cooling and power generation technology; thermal management in optoelectronic devices.

(责任编辑:田甜)