

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-12

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250915001

## 高热流密度器件液体射流冷却研究进展

张鹏 许伟聪 赵力 黄锬腾 龙强

(先进内燃动力国家重点实验室(天津大学) 天津 300350)

**摘要** 随着电子器件向高集成度与高功率方向发展,热流密度持续攀升,对散热技术提出了极致挑战。液体射流冷却凭借其极高的局部换热强度和优异的空间适应性,成为应对千瓦级热流散热的潜在方案。本文系统综述了射流冷却技术的基本原理与研究进展,重点剖析了单孔射流、阵列射流及相变射流沸腾的换热机制与特性。现有研究结果显示,受限式阵列射流可有效提升冲击面上的温度均匀性与临界热流密度(CHF);交错分布式喷嘴排布能够显著抑制横流负面影响,增强流动与换热稳定性。此外,在射流冲击表面设计微纳尺度的强化结构可大幅增加成核位点与传热面积,从而显著强化换热。工质物性、喷嘴几何结构、系统流量及过冷度等因素对换热性能具有决定性影响。目前该技术仍需在低GWP环保工质开发、多尺度结构优化及复合冷却系统集成等方面深入探索。通过多因素协同优化,射流冷却技术有望突破极端散热瓶颈,为下一代高功率器件提供可靠热管理方案。

**关键词** 射流冷却;高热流密度;强化换热;射流阵列;热管理

中图分类号: TK124;TB61

文献标识码: A

## Research Progress of Liquid Jet Cooling for High Heat Flux Devices

Zhang Peng Xu Weicong Zhao Li Huang Kunteng Long Qiang

(State Key Laboratory of Engines (Tianjin University), Tianjin, 300350, China)

**Abstract** With the ongoing trend toward higher integration and greater power output in electronic devices, heat flux densities are steadily increasing, posing severe challenges for thermal management technologies. Among the various approaches, liquid jet cooling has emerged as a promising candidate for kilowatt-level heat dissipation owing to its exceptionally high local heat transfer coefficients and excellent spatial adaptability. This review systematically summarizes the fundamental principles and recent advances in jet cooling with a particular focus on the heat transfer mechanisms and characteristics of single jets, jet arrays, and phase-change jet boiling. Current studies indicate that confined jet arrays can effectively enhance temperature uniformity and critical heat flux (CHF) at the impingement surface, while staggered nozzle arrangements significantly mitigate adverse cross-flow effects, thereby improving the flow stability and heat transfer performance. Furthermore, incorporating micro/nanoscale surface structures at the jet impingement interface significantly increases the number of nucleation sites and heat transfer area, leading to a substantial enhancement in boiling heat transfer. Key influencing factors, such as the working fluid properties, nozzle geometry, system flow rate, and liquid subcooling, critically determine the cooling performance. Nevertheless, further exploration is required to address challenges such as adaptability to non-uniform heat fluxes, development of environmentally friendly low-GWP working fluids, multi-scale structure optimization, and integration of hybrid cooling systems. Through coordinated optimization across multiple factors, jet cooling technology holds significant potential for overcoming extreme heat dissipation bottlenecks and providing reliable thermal management solutions for next-generation high-power electronic devices.

**Keywords** jet impingement cooling; high heat flux; enhanced heat transfer; jet array; thermal management

在电子设备高集成与大功率发展的背景下,高热流密度散热已成为关键瓶颈。研究显示,约55%的电子设备故障源于过热<sup>[1-2]</sup>。电子器件的热流密度呈指数级增长趋势(图1),预计至2030年,芯片热点热流密度可能突破1000 W/cm<sup>2</sup>,这凸显了发展极端

散热技术的紧迫性<sup>[3-4]</sup>。因此,发展能够应对超过1000 W/cm<sup>2</sup>热流密度的高效热控制技术,对于保障高功率元件的可靠性至关重要<sup>[5]</sup>。数据中心常采用风冷或水冷散热系统<sup>[6]</sup>,传统的空气冷却方法包括自然对流和强制对流,如肋化表面<sup>[7]</sup>和风扇冷却<sup>[8]</sup>。温

基金项目:国家重点研发计划(2024YFE0212700)资助项目。(The project was supported by the National Key R&D Program of China (No. 2024YFE0212700).)

收稿日期:2025-09-15;修回日期:2025-11-23;录用日期:2025-12-01

升 40 °C 时各种冷却方法的热流密度值如图 2 所示, 在温度升高 40 °C 的条件下, 空气冷却的热流密度范围为 0.04~0.3 W/cm<sup>2</sup>, 而直接液体冷却系统的峰值热流密度可达 160 W/cm<sup>2</sup>。即便是强迫液体冷却, 其散热效果仍远不及相变冷却。这促使热工程师积极探索相变冷却技术, 如毛细管装置、降膜装置、大通道流动沸腾、射流冷却、微通道冷却和喷雾冷却等<sup>[9]</sup>。在高热流密度工况下, 业界普遍采用射流冷却、喷雾冷却、微通道冷却和池沸腾冷却等先进散热方案。

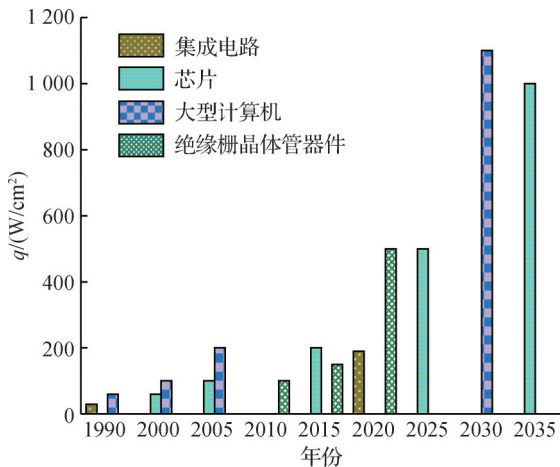


图1 电子器件热流密度发展趋势<sup>[3-4,10-12]</sup>

Fig.1 Development trend of thermal flux density of electronic devices<sup>[3,4,10-12]</sup>

微通道在相同散热条件下能够散掉更多的热量<sup>[13]</sup>, 但传统的平行直微通道结构存在热流密度低, 流场分布不均匀的问题<sup>[14]</sup>。喷雾冷却确保了表面温度的均匀性, 设计轻巧<sup>[15]</sup>。但喷雾冷却是一个复杂的传热和流动过程<sup>[16]</sup>, 系统设计中需要考虑喷嘴的布置和喷雾模式等因素, 这使得系统难以实现紧凑化。射流冷却在特定的应用场景下能够有效解决这些问题<sup>[17]</sup>。新世纪以来, 我国科研人员逐步启动了基于泵驱动的双相流体喷射制冷实验装置的探索工作<sup>[18]</sup>, 为小型化电子器件的热管理提供了有前景的解决方案<sup>[19]</sup>。射流技术具备显著的强对流性能, 通常在较大冷却剂流量的条件下实现较低的压降效应<sup>[20]</sup>。其结构更为紧凑, 更适应于小流量冷却剂的需求。

当前冷却技术体系呈现多元化发展态势, 为提升射流冷却技术的传热效能, 必须深入研究其作用机理及影响因素。本文系统回顾了国内外最新研究成果, 阐述了射流冷却理论的研究进展, 对比分析了单孔射流与阵列射流的流动特性和传热特征, 重点讨论了影响换热效率的核心参数, 并对该技术的未来发展方向及潜在应用领域提出了前瞻性思考。

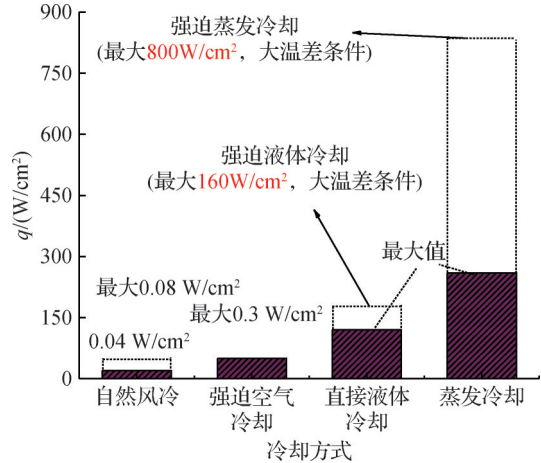


图2 温升 40 °C 时各种冷却方法的热流密度值<sup>[21]</sup>

Fig.2 Heat flux density values of various cooling methods at a temperature rise of 40 °C<sup>[21]</sup>

## 1 射流冷却技术概述

### 1.1 射流冷却的分类

射流冲击冷却是一种将流体以一定速度通过喷嘴喷射, 并直接冲击在被冷却表面上的换热方式。按 S. V. Garimella 等<sup>[22]</sup>的框架, 射流可分为撞击射流和非撞击射流。撞击射流根据界面形态和几何约束进一步细分为自由表面式、浸没式和受限式。在此基础上, D. H. Wolf 等<sup>[23]</sup>提出了更细致的 5 种分类: 自由表面、浸没、受限、投入和沿壁。其中, 自由表面式是指液体通过喷口后与气相接触并形成明确的液-气界面; 投入式则指液柱跨越气隙后进入液体介质; 浸没式发生在同相介质内部; 受限式的受限程度由结构决定, 若受热面上方有约束板或罩, 称为半受限式。若射流冲击后的径向外流被周围 1~3 侧壁面导向或限制, 则归为完全受限。此外, 沿壁射流是指射流在目标面上贴附并沿壁面发展。

射流冷却的其他分类如图 3 所示, 不同类型的射流具有不同的换热机理: 自由表面/投入式以“更新换液+界面扰动”为主导, 强化效果强但均匀性差; 浸没式动量衰减小、界面稳定, 适用于稳态工况; 受限/半受限通过导向外流和二次剪切提升换热效果, 但需避免横流掩蔽。未来研究应通过流动结构、相变行为和局部换热的关联, 揭示不同射流类型的规律, 并借助无量纲参数建立统一的性能评价体系。

### 1.2 射流冷却原理与发展

射流冷却技术的基本原理可概括为: 流体介质经由狭窄通道或特制喷嘴后, 在扩张空间内形成高速流动, 最终以一定速度撞击目标固体表面。

单孔射流的流动区域如图 4 所示。由图 4(a) 可

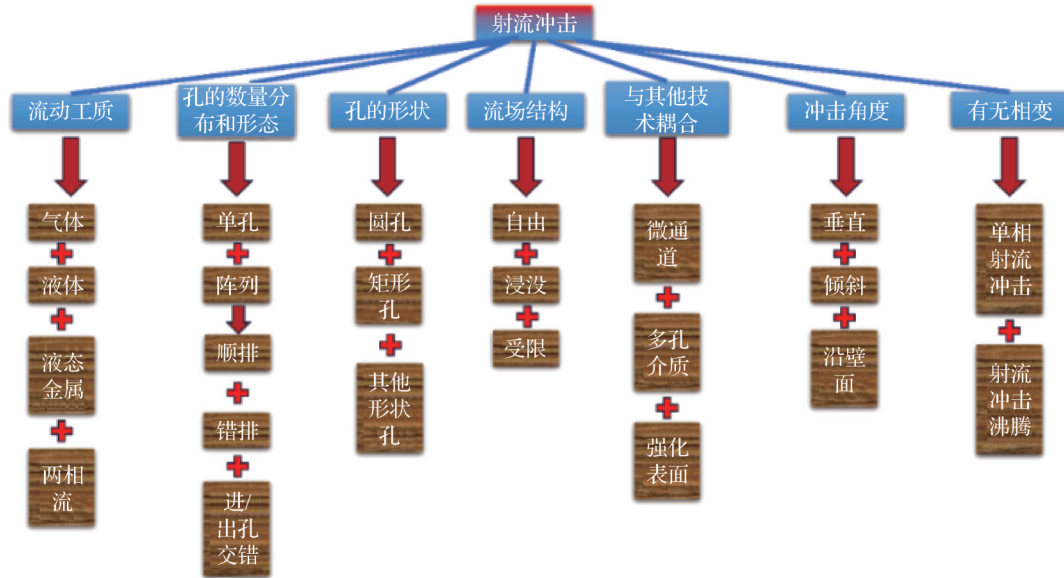


图3 射流冷却分类<sup>[24]</sup>

Fig.3 Classification of jet cooling<sup>[24]</sup>

知,射流冲击将流场划分为自由射流区、滞止区以及壁面射流区<sup>[25]</sup>。自由射流区速度较高,滞止区速度衰减并径向扩散,壁面射流区形成强烈湍流强化传热。图4(b)中,流动区域分为潜在核心区、过渡发展区和充分发展区。潜在核心区速度与出口一致,长度为速度降至95%时的距离<sup>[26]</sup>。过渡发展区速度衰减、射流扩张、湍流增强;充分发展区射流稳定并达到最大宽度。

为提升单孔射流冲击的冷却性能,学者们优化喷射特性,寻找最佳参数组合,以强化流体与受冷表面的传热效率。J. W. Zhou等<sup>[27]</sup>发现在喷嘴直径较小时,单一喷流的冷却速度受限,难以达到所需的流动强度,需要通过阵列喷流的方式来提升整体流速与传热效果。Xi Lei等<sup>[28]</sup>指出,单孔射流直接冷却涡轮叶片虽是提升冷却效果的重要途径,但受限于流速较低和表面温度分布不均,其换热性能并不理想,应用效果受限。S. V. Garimella等<sup>[29]</sup>以FC-77为工质的圆形单射流冷却在滞止区具有最佳换热性能,但沿径向向壁面扩展时效率逐渐下降,导致温度场分布不均。总体而言,单孔射流受制于流量与湍流发展不足,虽局部强化明显,但难以满足高热流密度散热需求,且需较大流量维持效能,增加系统复杂性与能耗。

对单一射流出现的问题,C. T. Chang等<sup>[30]</sup>指出,相较单孔射流,阵列射流虽在撞击点传热稍弱,但能够显著改善壁面远端换热,缓解温度不均。其优势包括:1)适应复杂结构,均匀换热;2)控制冷却路径,防飞溅;3)相较微通道,以更低压降去除相同热流密

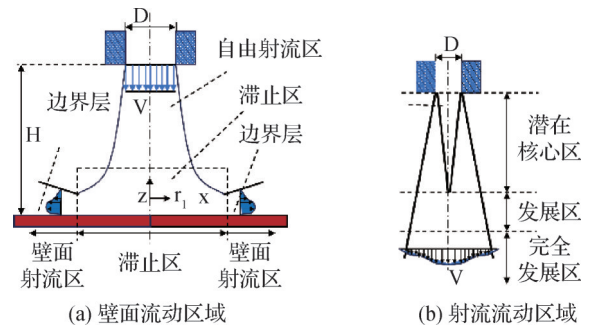


图4 单孔射流的流动区域<sup>[25]</sup>

Fig.4 Flow region of single-channel jet<sup>[25]</sup>

度<sup>[31]</sup>。因此,阵列射流在高热流密度场合表现出更优的综合性能。

根据喷流形态将射流冷却分为自由射流式、浸没式和受限式<sup>[32]</sup>。A. J. Robinson等<sup>[33]</sup>发现,在相同条件下,浸没式射流的传热效率显著高于自由表面射流。D. J. Womac等<sup>[34]</sup>的实验则表明,在水介质下,受限射流在各雷诺数范围内均优于自由表面射流,显示出更佳的传热性能。J. A. Diosdado De la Pena等<sup>[35]</sup>发现,受限式射流中气泡由中心快速移向约束板边缘,显著增强横向换热,而浸没式射流未呈现此效应。上述结果表明,受限式阵列射流通过约束流动通道和引导排液方向,提升局部换热并改善温度均匀性与稳定性。其在高热流密度散热中的可控性和高效性,使其成为液体射流冷却研究的重点方向。

由于单相射流换热受限,研究者通过利用显热与汽化潜热强化冷却,其中核态沸腾因在较低壁面温差下实现高效传热,被视为典型形式<sup>[36]</sup>。加热面

温度超过沸点后,射流冷却经历单相对流、核态沸腾、过渡沸腾至膜态沸腾。核态沸腾下射流冷却的传热性能显著优于单相换热,冷却强度常超过 200 W/cm<sup>2</sup>。后续研究重点优化射流沸腾冷却的工况参数,并探讨流体不均匀性与几何形状对两相流稳定性的影响,以提高换热效果和可控性。

## 2 射流冷却影响因素

为了提高射流冷却的换热效果,研究人员正在探索多种因素对其影响。D. E. Maddox 等<sup>[36]</sup>得到撞击液体射流产生的传热系数  $h$  的关系式:

$$h \propto k^{0.58} \rho^{0.67} \mu^{-0.25} \left[ \left( \frac{n}{A} \right)^{0.35} D^{0.67} H^{-0.3} \right] V^{0.67} \quad (1)$$

式中: $h$  为表面传热系数, W/(m<sup>2</sup>·K);  $k$  为导热系数, W/(m<sup>2</sup>·K);  $\rho$  为密度, kg/(m<sup>3</sup>);  $\mu$  为动力黏度, (N·s)/m<sup>2</sup>;

$n$  为射流孔数;  $A$  为加热表面面积, m<sup>2</sup>;  $D$  为射流孔直径, mm;  $H$  为射流高度, mm;  $V$  为射流速度, m/s。

由该关系式可知,表面传热系数与射流流体的黏度和密度即工质的种类有关,还与射流孔数、射流直径、射流高度、射流速度等有关。在设计参数对射流传热影响的回顾中<sup>[37]</sup>,大部分研究集中在探讨设计参数对射流冷却的影响,例如表面形状、流量、射流与表面的距离以及工质选择等因素。因此,接下来对射流冷却的影响因素展开讨论。

### 2.1 流体工质热物性

由于比热容与汽化潜热差异,不同工质的换热能力存在显著差别。表 1 中文献表明,各类工质在最大热流密度承受能力上差异明显。常用介质包括 FC-72、HFE-7000、HFE-7100、R134a、去离子水和乙二醇溶液等,同时液氮、R1336mzz(Z)、HP-1 和氨等新型工质也逐渐受到关注。

表 1 射流冷却实验工况和最大热流密度

Tab.1 Test conditions for jet cooling and maximum heat flux density

参考文献	射流孔尺寸/mm	射流速度	加热面积/cm <sup>2</sup>	工质	热流密度/(W/cm <sup>2</sup> )	入口温度/壁温/°C
齐云龙 <sup>[24]</sup>	$D=1$	2.0 L/min	>1.75	水	800	35/130
A. Patel 等 <sup>[66]</sup>	$D=1$	4.0 L/min	4	水	252	20/88.37
张鹏等 <sup>[67]</sup>	$D=1$	1.4 L/min	0.25	水	1 042	40/130
Han Yong 等 <sup>[68]</sup>	$D=0.1$	0.3 L/min	7×7	水	260	25/51
铁鹏等 <sup>[69]</sup>	$D=1$	4.47 L/min	2.56	水	340	32.5/78
Wu Ruikang 等 <sup>[70]</sup>	$D=0.3$	1.5 L/min	9.8	水	81.6	40/72
E. A. Browne 等 <sup>[39]</sup>	$D=0.112$	—	0.01	水	1 110	23/50
Wang Jiaxuan 等 <sup>[71]</sup>	$D=4$	200 kg/h	60	R134a	120	45/<80
Hong F. J. 等 <sup>[72]</sup>	$D=1$	0.5 m/s	8	43% 乙二醇	127.5	50/110
G. Choi 等 <sup>[73]</sup>	$D=3$	2.75 kg/min	1	FC-72	50	56/56
M. T. Meyer 等 <sup>[31]</sup>	$L=0.127$	8 m/s	9	FC-72	139.2	38.3/92.5
M. K. Sung 等 <sup>[74]</sup>	$D=0.39$	6.5 m/s	2	HFE-7100	1 127	-20/90
Ji Xinyu 等 <sup>[75]</sup>	$D=1$	3040 kg/(m <sup>2</sup> ×s)	5	HFE-7100	293	—
E. A. Browne 等 <sup>[38]</sup>	$D=0.112$	6.6 m/s	0.01	R134a	590	17/50
Hong F. J. 等 <sup>[42]</sup>	$D=1$	0.5 m/s	8	43% 乙二醇	127.5 <sup>2</sup>	56/-
Li Ran 等 <sup>[41]</sup>	$D=1$	—	550.24	LN <sub>2</sub>	150	-196/-140
Huang Yanpei 等 <sup>[76]</sup>	$D=1.38$	6.4 m/s	0.06	液氮	1 367	25.5/<92.5
Ma Xiang 等 <sup>[44]</sup>	$D=1.5$	381 kg/(m <sup>2</sup> ×s)	10.24	HP-1	153.2	45/72
Xu Jinyang 等 <sup>[43]</sup>	—	—	—	R1336mzz(Z)	61.2	—

E. A. Browne 等<sup>[38]</sup>采用 R134a 错列微射流阵列(孔径为 112 μm),最高传热通量达 590 W/cm<sup>2</sup>,但因汽化潜热低,CHF 提升有限。相比之下,水具有更高汽化潜热,更利于高热流密度散热。E. A. Browne

等<sup>[39]</sup>使用去离子水(孔径为 54 μm 与 112 μm,入口温度为 23 °C)实现最高 1 110 W/cm<sup>2</sup>的传热通量,加热面稳定在 50 °C,性能显著优于其他工质。然而水不适用于直接接触电子器件,介电冷却液因低沸点可

在较低温度下相变,更利于控制壁面温度<sup>[40]</sup>。在低温环境中水会结冰失效,而液氮虽可提供  $159 \text{ W/cm}^2$  的冷却能力<sup>[41]</sup>,但需专门的低温设备,操作不便。乙二醇水溶液在提高质量分数至 60% 前冰点持续下降,但超过 60% 后出现回升。F. J. Hong 等<sup>[42]</sup>在 43% 质量分数乙二醇水溶液的受限阵列射流沸腾实验中获得  $127.5 \text{ W/cm}^2$  的峰值热通量,但由于沸点较高,相变温度偏高,存在潜在安全隐患。

随着环境可持续性需求的提升,新型环保冷却剂的研究逐渐增多。Xu Jinyang 等<sup>[43]</sup>采用 R1336mzz (Z),在针状翅片表面实现最大热流密度  $61.2 \text{ W/cm}^2$ ,显著优于池沸腾。Ma Xiang 等<sup>[44]</sup>使用环保制冷剂 HP-1,最高热流密度达  $153.2 \text{ W/cm}^2$ 。此类新工质兼具高传热性能与低环境影响,在“双碳”目标背景下具备广阔应用前景。同时,纳米流体为高功率芯片的散热提供了新的选择。Li Qiang 等<sup>[45]</sup>使用铜纳米水溶液(粒径为 25 nm 与 100 nm),在 3.0% 体积分数下传热效率较纯水提升 52%。此外,虽氨具优异冷却性能,但 H. Bostanci 等<sup>[46]</sup>指出其与部分材料不兼容,且对密封性要求高,导致系统设计复杂化并增加成本。

总体来看,不同冷却介质在射流冷却中的表现体现出明显的性能权衡关系。高潜热工质具有更高的热流承载能力,但受限于介电性和低温适应性;低沸点介质能够在较低温度下稳定相变,有利于控制壁面温度,但其潜热较低、冷却范围有限;新型制冷剂和纳米流体则在传热性能、可控温度与环境友好性之间提供了新的平衡。在高热流密度散热领域,水及其改性工质仍是主流方案,而介电液及新型环保冷却剂的综合优势将推动射流冷却技术向高能效、安全性和可持续方向发展。未来研究可聚焦于高潜热-低黏度-高介电性的复合冷却介质开发,以及多组分混合流体在极端热流密度条件下的动态相变行为研究,以进一步拓展液体射流冷却的应用边界。

## 2.2 几何结构

### 2.2.1 喷嘴形状

喷嘴形状直接影响射流速度分布、湍流强度和滞止区结构,从而决定局部换热效率与温度均匀性。圆形喷嘴在局部与整体换热性能上普遍优于非圆喷嘴<sup>[47-48]</sup>;渐缩型喷嘴具有最高的滞止区速度,换热性能最佳<sup>[49]</sup>;在固定雷诺数下矩形喷嘴局部强化更强,而固定质量流量下圆形喷嘴更具优势<sup>[50]</sup>。喷嘴与通道的耦合结构同样重要:在矩形通道中填充金属丝网可改善温度均匀性,但会削弱局部与整体传热<sup>[51]</sup>;尖锐边缘喷嘴相比圆管喷嘴可产生更高中心速度与

更陡径向梯度,强化滞止区换热,并在高雷诺数下改善整体均匀性<sup>[52]</sup>。

由此可见,喷嘴形状通过调控动量分布与湍流生成影响剪切层结构和能量耗散,从而决定局部传热机理。圆形喷嘴因轴对称性高、附壁效应弱,可形成稳定强中心射流,适用于局部高热流密度强化;矩形与方形喷嘴可扩大高换热区域,但更易产生二次涡与不均速度梯度,导致边缘温度波动。渐缩型喷嘴可集中动量、提高滞止点速度,渐扩型则增强径向扩散、改善均温性能。总体而言,喷嘴设计是在局部强化与整体能效之间寻求平衡,应依据动量分配与湍流调控展开。未来可结合数值仿真与实验,建立喷嘴几何参数与传热性能的关联模型,实现多目标优化设计,以在冷却效率与能耗之间获得最佳权衡。

### 2.2.2 射流直径与高度

多数研究采用圆形喷嘴,因此喷嘴直径成为影响射流冷却性能的关键参数。直径变化不仅决定射流速度与流量分布,也影响撞击区湍流强度与换热均匀性。研究表明,小直径喷嘴在相同流量或相同冲击速度下均表现出更高的换热性能和更高的极限热流密度(critical heat flux, CHF)<sup>[53-55]</sup>,且 CHF 与  $(V/d)^{1/3}$  呈线性关系。在相同冲击速度下,较小直径喷嘴获得的 CHF 高于较大直径。其优势源于出口动量更集中、湍流更强,可在冲击核区产生更剧烈的剪切与更新换液,从而显著强化局部换热。而大直径喷嘴因核心区稳定、覆盖范围大,可提升温度均匀性和整体散热表现。

除喷嘴直径外,射流高度  $H$  同样显著影响流动再分布与沸腾特性。研究表明,随着  $H$  增大,射流之间的相互干扰明显减弱<sup>[56]</sup>,但在恒定流速下,  $H/D=1.0$  时的 CHF 反而最低<sup>[57]</sup>。多点测温结果进一步显示,不同位置的最优  $H$  并不一致<sup>[57]</sup>。较低  $H$  能够增强冲击动量、提升局部换热,但易引发飞溅与流动扰动;过高  $H$  则会削弱动量通量、降低液体更新速度,导致换热性能下降。从机理上看,喷嘴直径与高度共同决定了射流的雷诺数、射流核长度及再起位置,进而影响滞止区的动量扩散和汽泡生成动力学。小直径或低  $H/D$  工况强化了动量集中与湍流混合,但可能引起早期干涸;而大直径或高  $H/D$  则改善均温性但降低峰值换热能力。因而,二者需协同优化:可通过调节  $H/D$  比、阵列间距或多喷口布局,实现在相同泵功下的综合性能最优。未来研究可利用高分辨 PIV 测量与多尺度数值模拟,深入揭示  $H$  与  $D$  变化下的边界层再起与两相界面演化规律,从而为射流冷却结构设计提供量化指导。

### 2.2.3 排液方式

在冲击射流换热中,横流会偏移冲击位置、削弱高换热区从而导致下游性能劣化。研究表明,单向出口加剧横流发展,使高换热区明显偏移,下游换热性能下降尤为显著;双向出口可缩短横流路径、减弱积累效应,从而获得最佳整体换热性能<sup>[58-59]</sup>。横流还与压降密切相关:单相条件下压降基本稳定,但进入沸腾后,少量气泡会降低压降,而高热通量下大量气泡生成则使压降急剧上升<sup>[60-64]</sup>。气泡的流动形态如图5所示,适度热流下气泡能随横流顺利排出,而在高热流密度下,蒸气积聚与横流相互作用会引起不稳定与压力振荡,大气泡加速干涸并触发CHF,导致温度急剧升高,烧毁器件。为解决传统阵列中横流积累和排液不均的问题,分布式射流<sup>[65]</sup>结构被提出并逐渐成为研究热点。该结构在每个喷孔周围设计局部渗流或回流通路,使射流液体与汽泡能在局部并行排出,从而减弱横流干扰并提高局部传热稳定性。

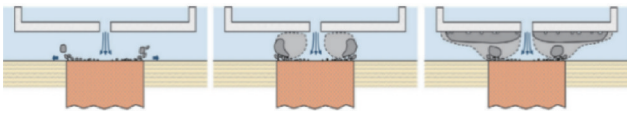


图5 气泡流动形态<sup>[64]</sup>

Fig.5 Bubble flow pattern<sup>[64]</sup>

Ji Xinyu 等<sup>[75]</sup>设计的分布式射流在喷口周围设置回流通路,其压降几乎仅受质量流量影响,与热流无关。相比传统出口方式,该结构有效消除了横流积累,减轻了下游射流减弱与局部过热问题。Cui F. L. 等<sup>[77]</sup>设计的分布式射流结构如图6所示,在单相区普通与分布式射流性能相近,但进入沸腾后,普通射流因横流导致下游换热恶化并提前触发CHF,导致电子器件烧毁。2种射流结构气泡形态对比如图7所示,分布式射流能够快速排除气泡,实现均匀换热并显著提升CHF。A. Patel 等<sup>[66]</sup>设计的分布式射流冲击歧管如图8所示。通过优化喷嘴阵列与流道路径,使分布式射流在多芯片封装中实现更均匀的热负荷分配,降低芯片间热耦合,提升系统稳定性与效率。而S. G. Lee 等<sup>[78]</sup>提出的交错阵列射流则通过错位布置扩大高换热区,在保持较高局部强化的同时,实现大面积的温度均匀冷却。

综合各研究结果,分布式与交错型射流的性能提升主要源于以下3点机理:局部排液与汽泡分流、流场均匀化和突破传统阵列“入口-出口”耦合约束。实现了“动量分散—气泡疏排—热流均化”的协同效应。在高热流密度电子封装中,该结构能够在

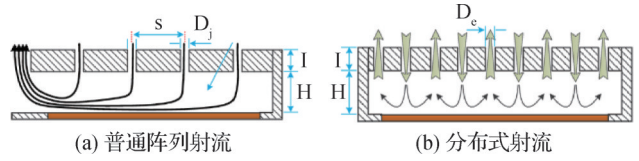


图6 2种射流结构配置<sup>[77]</sup>

Fig.6 Two configurations of jet structures<sup>[77]</sup>

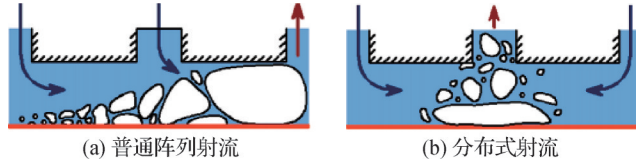
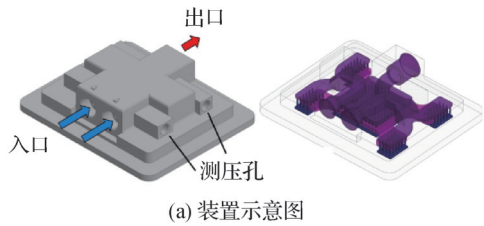
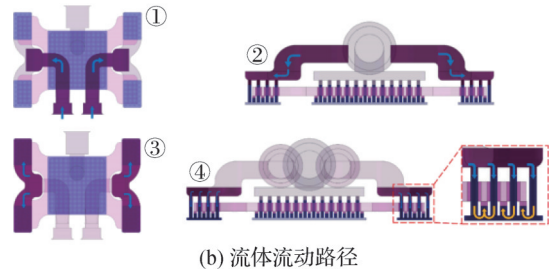


图7 2种射流结构气泡形态对比<sup>[77]</sup>

Fig.7 Comparison of bubble shapes of two jet structures<sup>[77]</sup>



(a) 装置示意图



(b) 流体流动路径

图8 分布式射流冲击歧管<sup>[66]</sup>

Fig.8 Distributed jet impact manifold<sup>[66]</sup>

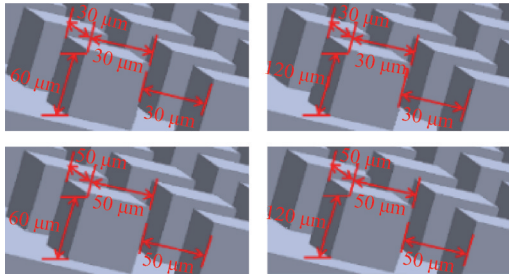
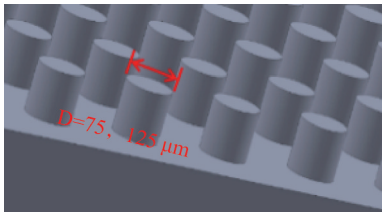
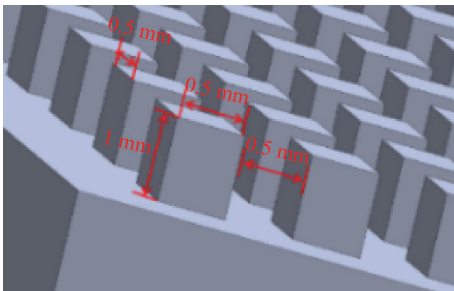
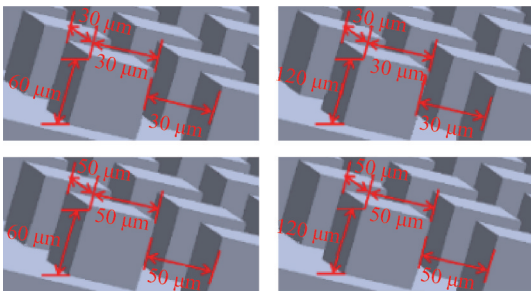
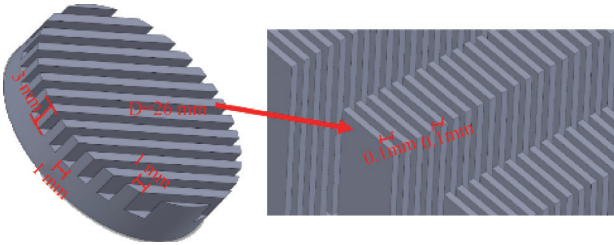
不显著增加泵功的条件下同时提升CHF与温度均匀性,展现出优越的综合性能与应用潜力。未来研究可在此基础上开展参数化建模与多物理场优化设计,进一步量化横流强度、排液阻力与传热系数之间的耦合关系,为分布式射流冷却系统的工程化提供理论依据。

### 2.3 换热表面结构

通过先进的刻蚀与模板加工技术,在受热表面引入微纳沟槽或多孔结构,可显著改善射流冲击冷却性能。Zheng Wenxiu 等<sup>[79]</sup>制备的微柱多孔表面在间距减小条件下实现最高548 W/cm<sup>2</sup>的CHF,较光滑面提升36%,最大传热系数达其2倍。崔付龙等<sup>[80]</sup>基于HFE-7000研究不同粒径铜粉多孔表面,其中100 μm样品沸腾传热系数提升61%,CHF提高17%。Zhang Yonghai 等<sup>[81]</sup>采用FC-72研究微针翅结构,发现翅高/翅距比及射流速度主导沸腾性能;薄液膜蒸发与沟槽再润湿是换热增强的核心机理。总体来

看,表2所示各类微纳结构均能显著提升换热效率并改善运行稳定性。

表2 强化表面射流沸腾的部分试验  
Tab.2 Partial experiments on enhanced surface jet boiling

参考文献	工质	表面强化结构	换热面积增加倍数	强化效果
Ji Xinyu 等 <sup>[87]</sup>	HFE-7100		从上至下依次增加 3.0、5.0、2.2、3.4倍	CHF最大增加2.2倍
S. Ndao 等 <sup>[88]</sup>	R134a		面积增加比为2.44	流速为2.2 m/s时,两相传热系数超过15000 W/m <sup>2</sup> ,传热增强比为3.3
Cui F. L. 等 <sup>[77]</sup>	HFE-7100		对流传热面积是光滑表面的3倍	流量为0.5、0.8、1.0 L/min时,传热系数增强比分别为2.0、2.0、1.8
Guo D. 等 <sup>[89]</sup>	FC-72		从上至下依次增加 3.0、5.0、2.2、3.4倍	4种表面CHF分别增强2.71、2.37、2.10、2.66倍。
C. H. Hoang 等 <sup>[90]</sup>	HFE-7000			将微通道切割翅片阵列换热更强,传热系数增加51%

总体而言,微结构表面通过以下3种机制强化射流换热性能:1)增加有效传热面积与液膜更新频率;2)促进液体回补、抑制局部干涸,提升CHF;3)改变气泡成核密度与生长动力学,降低沸腾起始过热度。从机理角度看,微尺度结构调控气泡形核与薄膜蒸发,纳尺度粗糙度调节润湿性与接触角,二者耦合决

定热通量极限与传热系数。未来研究应重点关注:1)量化几何参数(孔径、深宽比、孔隙率)与关键指标(CHF、传热系数、起始过热度)之间的函数关系;2)探索亲疏水协同界面、复合微纳结构及涂层稳定性;3)结合实验测量与多尺度模拟,建立可迁移的微结构优化设计准则。

## 2.4 运行工况

### 2.4.1 工质流量

射流流量通过改变速度与雷诺数,不仅影响撞击区动量输运和对流传热,还耦合调控边界层发展、再润湿及传热分布。研究表明,在多种流体和壁面条件下,完全发展的核态沸腾曲线与射流速度无关,其主导机制是气泡生成与坍塌引起的强烈流动混合<sup>[82]</sup>。流量的增加能够提高单相传热系数并提高 CHF,但对两相换热影响较小。

其他学者<sup>[77,83-84]</sup>也得到相同的结论。从机理上看,流量增加会提升射流动量通量,强化滞止区液体更新速率并加快气泡脱离,因而延缓干涸点的出现;但同时更高的流量也导致系统压降上升,泵功需求增加,可能引发流动波动与噪声问题。低流量工况虽能降低能耗,但易出现液体再润湿不足、气泡滞留及局部过热。由此可见,射流流量在强化换热与能耗之间存在明显权衡,过低流量限制传热强度,而过高流量虽可提高 CHF,但能效下降且流动稳定性降低。

### 2.4.2 工质过冷度

以往研究成果表明,在完全成熟的核心沸腾状况中,沸腾曲线同样与过冷效应不相关。例如,Fan Simiao 等<sup>[85]</sup>研究发现在固定喷嘴和雷诺数条件下,液体过冷度对单相对流传热系数影响不显著,传热系数随过冷度变化几乎保持不变,沸腾阶段对过冷度不敏感。Meyer M. T. 等<sup>[31]</sup>与 Cheng Ziyang 等<sup>[86]</sup>也得到相同的结论,相同的流速下,增加过冷度可以延迟核态沸腾发生在更高的过热度下,并且提高 CHF。适度增加过冷能有效拓宽单相传热区并延缓沸腾转变,但过高过冷会带来能耗增加与相变迟滞效应。换热强化与能效提升之间存在明显平衡:低过冷度易导致早期汽化与干涸。因此,射流冷却的最优运行区间应通过过冷度与射流速度、喷嘴结构及工质物性协同确定。

## 3 结语

通过射流冷却的基本原理,可以确定关键的设计参数,并通过优化设计结构及改善其他影响因素来提升射流冷却的效果。本文总结了国内外文献对射流冷却原理和射流冷却换热的影响因素,得出如下结论:

1)应对高热流密度散热的主要方式有射流冷却、微通道冷却和喷雾冷却。液体射流冷却通过高速流体直接冲击受热表面,形成强剪切与更新换液过程,可显著强化局部传热,其在 $>1\ 000\ \text{W}/\text{cm}^2$ 的极

端热流条件下仍能维持较高的传热系数与温度均匀性,是目前最具潜力的高效散热技术之一。

2)在不同的射流冷却形式中,阵列射流冷却效果强于单孔射流,射流冷却沸腾效果强于单相冷却射流,且受限式结构的冷却效果最好,因此在近几年的研究中,为了有效处理高热流密度的散热问题,多采用受限式阵列射流冷却沸腾的方式。

3)射流冷却的影响因素包括工质、几何结构和工况条件。工质性能取决于汽化潜热和沸点,潜热大、沸点低更利于强化传热。几何参数如射流直径、高度和间距均有最佳范围,分布式射流可减弱横流不利影响。微纳结构表面通过毛细吸液、气泡脱离与薄膜蒸发机制,可显著提升传热系数与 CHF,表现出优异的两相强化效果。

4)流量和过冷度是射流冷却的关键工况参数。流量增大可提高速度与动量通量,增强对流传热并推迟干涸,从而提升 CHF,但在完全核态沸腾区域作用有限。过冷度升高可延缓沸腾起始、扩展单相区并显著提高 CHF,但强化效果存在阈值。二者协同有助于改善换热均匀性和系统稳定性,实现高效可靠的热管理。

随着电子器件功率密度的持续提升,传统冷却方式已难以满足极端散热需求。射流冷却凭借其结构简单、局部强化能力强的优势,在高热流密度散热领域已经取得了显著进展,并展现出良好的应用前景。但目前仍存在若干挑战与研究方向:

1)需进一步探索兼具高潜热、低黏度、高介电性与环保特性的工质体系,如混合制冷剂、纳米流体及可再生工质,为绿色热管理提供新方案。由于经费与时间问题,对射流结构参数和强化目标表面的研究不能十分细致,寻找最佳射流结构参数和强化目标表面的微结构参数的大致范围也是需要研究的内容之一。

2)微/纳结构表面与宏观流场之间的多尺度耦合关系尚不明确。未来应基于实验与数值模拟相结合的方法,构建几何参数—流动特征—传热性能的定量模型,实现结构—工况一体化优化。

3)对于3种常见的冷却方式大多都是单独研究,现已有射流冷却结合微通道冷却的研究,但需要更大的压降,对泵的要求更高,产生更多的能耗。可探索射流冷却与微通道、喷雾或热管技术的协同应用,通过分级换热与多相流调控,进一步突破 $>1\ 000\ \text{W}/\text{cm}^2$ 的极限散热瓶颈。引入机器学习与实时传感反馈技术,建立基于能耗优化与热安全约束的射流冷却控制策略,实现从局部强化到系统级热管理的转变。

## 参考文献

- [1] Mudawar I. Assessment of high-heat-flux thermal management schemes [J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2001, 24(2): 122-141.
- [2] Tilak T, Jagannatha D, Narayanaswamy R. Synthetic jet-based hybrid heat sink for electronic cooling[M]. Rijeka: InTech, 2011.
- [3] 吴红刚, 王文, 李庆友. 一种芯片散热型热管的强化传热研究[J]. *科学技术与工程*, 2006, 6(11): 1474-1478. (Wu Honggang, Wang Wen, Li Qingyou. Investigation of heat transfer enhancement for a heat-pipe heat exchanger used for chips [J]. *Science Technology and Engineering*, 2006, 6(11): 1474-1478.)
- [4] Kandlikar S G, Colin S, Peles Y, et al. Heat transfer in microchannels—2012 status and ResearchNeeds [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2013, 135(9): 091001.
- [5] Bostanci H, Rini D P, Kizito J P, et al. High heat flux spray cooling with ammonia: Investigation of enhanced surfaces for HTC [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 75: 718-725.
- [6] Sarkar S, Gupta R, Roy T, et al. Review of jet impingement cooling of electronic devices: Emerging role of surface engineering [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 206: 123888.
- [7] 王坤. 微小通道内射流冲击肋化表面流动与换热特性研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022. (Wang Kun. Flow and heat transfer characteristics of jet impinging on ribbed surfaces in micro channels [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2022.)
- [8] 韩前鹏, 余力, 王星. 乘用车电子冷却风扇参数化模型设计[J]. *江汉大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(6): 80-88. (Han Qianpeng, Yu Li, Wang Xing. Parametric model of electronic cooling fan for passenger cars [J]. *Journal of Jianghan University (Natural Science Edition)*, 2023, 51(6): 80-88.)
- [9] Devahdhanush V S, Mudawar I. Critical heat flux of confined round single jet and jet array impingement boiling [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 169: 120857.
- [10] 张立军, 刘世博, 甘振威, 等. 合成射流传热特性及其在MEMS散热应用研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(24): 164-176. (Zhang Lijun, Liu Shibo, Gan Zhenwei, et al. Study on the heat transfer characteristics of synthetic jet and its cooling application for MEMS [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(24): 164-176.)
- [11] 何涛. 电子元器件散热方法研究[J]. *信息系统工程*, 2014(12): 126. (He Tao. Research on heat dissipation method of electronic components [J]. *China CIO News*, 2014(12): 126.)
- [12] Wang Peng, McCluskey P, Bar-Cohen A. Two-phase liquid cooling for thermal management of IGBT power electronic module [J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2013, 135(2): 021001.
- [13] 齐文亮, 赵亮, 王婉人, 等. 高热流密度电子设备液冷技术研究进展[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(11): 4261-4270. (Qi Wenliang, Zhao Liang, Wang Wanren, et al. Research progress of high heat flux electronic devices liquid cooling technology [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(11): 4261-4270.)
- [14] Zhou Weinan, Dong Kaijun, Sun Qin, et al. Research progress of the liquid cold plate cooling technology for server electronic chips: a review[J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46(9): 11574-11595.
- [15] Yang B H, Wang H, Zhu X, et al. Heat transfer enhancement of spray cooling with ammonia by microcavity surfaces [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 50(1): 245-250.
- [16] Peng Can, Xu Xianghua, Li Yeming, et al. Experimental study on spray cooling under reduced pressures [J]. *Science China Technological Sciences*, 2019, 62(2): 349-355.
- [17] 朱丽瑶, 曹建光, 董丽宁, 等. 航天器高热流射流冷却技术研究综述[J]. *上海航天*, 2016, 33(2): 106-112. (Zhu Liyao, Cao Jianguang, Dong Lining, et al. Review on jet impingement technology for spacecraft high-heat-flux removal [J]. *Aerospace Shanghai*, 2016, 33(2): 106-112.)
- [18] 王佳选, 宋霞, 高天元, 等. 高热流密度航空电子泵驱两相液冷却系统实验研究[J]. *制冷学报*, 2023, 44(1): 50-58. (Wang Jiaxuan, Song Xia, Gao Tianyuan, et al. Experimental study on pump-driven two-phase cooling loop for high heat flux avionics [J]. *Journal of Refrigeration*, 2023, 44(1): 50-58.)
- [19] Fan Yiwen, Zhang Xinfeng, Xiang Linyi, et al. A compact jet array impingement cooling system driven by integrated piezoelectric micropump[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 205: 123905.
- [20] Su L M, Chang S W. Detailed heat transfer measurements of impinging jet arrays issued from grooved surfaces [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2002, 41(9): 823-841.
- [21] 张健. 电力电子器件及其装置的散热结构优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015. (Zhang Jian. Study on heat dissipation structure optimization of power electronic device and equipment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.)
- [22] Garimella S V, Rice R A. Confined and submerged liquid

- jet impingement heat transfer [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1995, 117(4): 871–877.
- [23] Wolf D H, Incropera F P, Viskanta R. Jet impingement boiling[M]. Amsterdam: Elsevier, 1993: 1–132.
- [24] 齐云龙. 受限式阵列射流冲击传热特性和沸腾可视化研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.(Qi Yunlong. Heat transfer characteristics and boiling visualization research of confined jet array impingement [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.)
- [25] Viskanta R. Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1993, 6(2): 111–134.
- [26] Hussain L, Khan M M, Masud M, et al. Heat transfer augmentation through different jet impingement techniques: a state-of-the-art review [J]. *Energies*, 2021, 14(20): 6458.
- [27] Zhou J W, Herwig H. Heat transfer characteristics of precessing jets impinging on a flat plate: Further investigations [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50(21/22): 4488–4492.
- [28] Xi Lei, Ruan Qicheng, Gao Yuan, et al. Study on flow and heat transfer performance of single jet impingement cooling through variable-diameter hole [J]. *Thermal Science*, 2024, 28(6A): 4499–4517.
- [29] Garimella S V. Heat transfer and flow fields in confined jet impingement [J]. *Annual Review of Heat Transfer*, 2000, 11(11): 413–494.
- [30] Chang C T, Kojasoy G, Landis F, et al. Confined single- and multiple-jet impingement heat transfer—I. Turbulent submerged liquid jets [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1995, 38(5): 833–842.
- [31] Meyer M T, Mudawar I, Boyack C E, et al. Single-phase and two-phase cooling with an array of rectangular jets [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, 49(1/2): 17–29.
- [32] 李伟静, 李振宁, 洪芳军, 等. 受限式阵列射流过冷沸腾的可视化实验研究 [J]. *低温工程*, 2015(2): 44–50. (Li Weijing, Li Zhenning, Hong Fangjun, et al. Visualization study on nucleate bubble dynamics in confined jet array impingement boiling [J]. *Cryogenics*, 2015(2): 44–50.)
- [33] Robinson A J, Schnitzler E. An experimental investigation of free and submerged miniature liquid jet array impingement heat transfer [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, 32(1): 1–13.
- [34] Womac D J, Ramadhyani S, Incropera F P. Correlating equations for impingement cooling of small heat sources with single circular liquid jets [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1993, 115(1): 106–115.
- [35] Diosdado De la Pena J A, Bevan W A, Alsharif K I, et al. Heat transfer characteristics of confined and unconfined submerged air bubble jet impingement [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2024, 45(19): 1659–1667.
- [36] Maddox D E, Bar-Cohen A. Thermofluid design of single-phase submerged-jet impingement cooling for electronic components [J]. *Journal of Electronic Packaging*, 1994, 116(3): 237–240.
- [37] Culun P, Celik N, Pihtili K. Effects of design parameters on a multi jet impinging heat transfer [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2018, 57(4): 4255–4266.
- [38] Browne E A, Michna G J, Jensen M K, et al. Microjet array single-phase and flow boiling heat transfer with R134a [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(23/24): 5027–5034.
- [39] Browne E A, Michna G J, Jensen M K, et al. Experimental investigation of single-phase microjet array heat transfer [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2010, 132(4): 041013.
- [40] 汤振彪, 崔晓钰. 液体阵列射流冲击冷板工质与传热结构研究进展 [J]. *化工进展*, 2022, 41(7): 3431–3445. (Tang Zhenbiao, Cui Xiaoyu. Research progress on working medium and heat transfer structure of liquid cooling plate with array jet impingement [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(7): 3431–3445.)
- [41] Li Ran, Wu Xiaoguang, Huang Zhongwei. Jet impingement boiling heat transfer from rock to liquid nitrogen during cryogenic quenching [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, 106: 255–264.
- [42] Hong F J, Zhang C Y, He W, et al. The local and average heat transfer characteristic of confined jet array impingement boiling of aqueous ethylene glycol solutions [C]//ASME 2013 4th International Conference on Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer, 2014.
- [43] Xu Jinyang, Hong Fangjun, Hou Zhaozheng. Parametric study in pool boiling enhancement with self-induced jet impingement on sandblasted pin-fin surfaces using R1336mzz (Z) [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 157: 107754.
- [44] Ma Xiang, Gui Liangxin, Hu Chengyu, et al. Jet impingement boiling heat transfer performance of refrigerant HP-1 in micro-pin-finned surfaces for high-power chips [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 221: 125101.
- [45] Li Qiang, Xuan Yimin, Yu Feng. Experimental investigation of submerged single jet impingement using Cu-water nanofluid [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 36: 426–433.

- [46] Bostanci H, Rini D P, Kizito J P, et al. High heat flux spray cooling with ammonia: investigation of enhanced surfaces for HTC [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 75: 718–725.
- [47] Gulati P, Katti V, Prabhu S V. Influence of the shape of the nozzle on local heat transfer distribution between smooth flat surface and impinging air jet [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2009, 48(3): 602–617.
- [48] Vinze R, Chandel S, Limaye M D, et al. Influence of jet temperature and nozzle shape on the heat transfer distribution between a smooth plate and impinging air jets [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2016, 99: 136–151.
- [49] Stevens J, Pan Y, Webb B W. Effect of nozzle configuration on transport in the stagnation zone of axisymmetric, impinging free-surface liquid jets: part 1—turbulent flow structure [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1992, 114(4): 874–879.
- [50] Singh D, Premachandran B, Kohli S. Effect of nozzle shape on jet impingement heat transfer from a circular cylinder [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2015, 96: 45–69.
- [51] Sung H C, Liu Y H. Heat transfer in rectangular channels with porous wire mesh under impinging jet conditions [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017, 122: 92–101.
- [52] Agrawal C, Kumar R, Gupta A, et al. Determination of rewetting on hot horizontal surface with water jet impingement through a sharp edge nozzle [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2013, 71: 310–323.
- [53] Tie Peng, Li Qing, Xuan Yimin. Investigation on the submerged liquid jet arrays impingement cooling [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(14/15): 2757–2763.
- [54] Liu Zhenhua, Tong Tiefeng, Qiu Yuhao. Critical heat flux of steady boiling for subcooled water jet impingement on the flat stagnation zone [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2004, 126(2): 179–183.
- [55] Qiu Yuhao, Liu Zhenhua. Critical heat flux in saturated and subcooled boiling for R-113 jet impingement on the stagnation zone [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25(14/15): 2367–2378.
- [56] San J Y, Chen J J. Effects of jet-to-jet spacing and jet height on heat transfer characteristics of an impinging jet array [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 71: 8–17.
- [57] Shin C H, Kim K M, Lim S H, et al. Influences of nozzle-plate spacing on boiling heat transfer of confined planar dielectric liquid impinging jet [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(23/24): 5293–5301.
- [58] Yan W M, Mei S C, Liu H C, et al. Measurement of detailed heat transfer on a surface under arrays of impinging elliptic jets by a transient liquid crystal technique [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(24): 5235–5245.
- [60] Sung M K, Mudawar I. Effects of jet pattern on two-phase performance of hybrid micro-channel/micro-circular-jet-impingement thermal management scheme [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(13/14): 3364–3372.
- [61] Rau M J, Garimella S V, Dede E M, et al. Boiling heat transfer from an array of round jets with hybrid surface enhancements [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2015, 137(7): 071501.
- [62] de Brún C, Jenkins R, Lupton T L, et al. Confined jet array impingement boiling [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 86: 224–234.
- [63] Joshi S N, Dede E M. Two-phase jet impingement cooling for high heat flux wide band-gap devices using multi-scale porous surfaces [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 110: 10–17.
- [64] Mira-Hernández C, Weibel J A, Garimella S V. Visualizing near-wall two-phase flow morphology during confined and submerged jet impingement boiling to the point of critical heat flux [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 142: 118407.
- [65] Natarajan G, Bezama R J. Microjet cooler with distributed returns [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2007, 28(8/9): 779–787.
- [66] Patel A, Yogi K, Sahu G, et al. Multi-chip Jet impingement cooling for heat dissipation in 2.5D integrated system with 1 kW+ thermal design power [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2025, 244: 126978.
- [67] 张鹏, 许伟聪, 赵力, 等. 高热流密度射流冷却实验研究 [J]. *低温工程*, 2025(3): 10–17. (Zhang Peng, Xu Weicong, Zhao Li, et al. Experimental study on high heat flux jet cooling [J]. *Cryogenics*, 2025(3): 10–17.)
- [68] Han Yong, Lau B L, Tang Gongyue, et al. Si-based hybrid microcooler with multiple drainage microtrenches for high heat flux cooling [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2017, 7(1): 50–57.
- [69] 铁鹏, 程度煦, 陈维兵, 等. GaN 芯片阵列射流冷却技术研究 [J]. *低温与超导*, 2019, 47(5): 55–59. (Tie Peng, Cheng Duxu, Chen Weibing, et al. The heat transfer feature of jet impingement cooling for GaN chip [J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2019, 47(5): 55–59.)
- [70] Wu Ruikang, Hong Tao, Cheng Qingyu, et al. Thermal

- modeling and comparative analysis of jet impingement liquid cooling for high power electronics[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 137: 42–51.
- [71] Wang Jiaxuan, Yu Binbin, Qian Chenyi, et al. Experimental study on the boiling heat transfer characteristics of a pump-driven two-phase cooling loop system for high heat flux avionics[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023, 45: 102150.
- [72] Hong F J, Zhang C Y, He W, et al. Confined jet array impingement boiling of subcooled aqueous ethylene glycol solution [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2014, 56: 165–173.
- [73] Choi G, Kim B S, Lee H, et al. Jet impingement in a crossflow configuration: convective boiling and local heat transfer characteristics [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2014, 50: 378–385.
- [74] Sung M K, Mudawar I. CHF determination for high-heat flux phase change cooling system incorporating both micro-channel flow and jet impingement [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52 (3/4) : 610–619.
- [75] Ji Xinyu, Yang Xiaoping, Ma Xiang, et al. Two-phase flow characteristics and visualization of distributed confined array jet boiling [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 57: 104345.
- [76] Huang Yanpei, Miao Jianyin, Niu Zitian, et al. Experimental investigation on heat transfer and pressure drop characteristics of confined jet impingement boiling on hybrid-structured surface [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 218: 119320.
- [77] Cui F L, Hong F J, Cheng P. Comparison of normal and distributed jet array impingement boiling of HFE-7000 on smooth and pin-fin surfaces [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 126: 1287–1298.
- [78] Lee S G, Kaviany M, Lee J. Quench subcooled-jet impingement boiling: Staggered-array jets enhancement [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 136: 888–898.
- [79] Zheng Wenxiu, Chen Tiefeng, Sen P, et al. Subcooled jet impingement boiling enhanced by porous surface with microcolumn array [J]. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2021, 28(5): 1–17.
- [80] 崔付龙, 洪芳军, 林涛, 等. 烧结多孔表面分布式阵列射流沸腾[J]. *科学通报*, 2020, 65(17): 1760–1769. (Cui Fulong, Hong Fangjun, Lin Tao, et al. Distributed jet array impingement boiling on particle sintered porous surfaces [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65 (17) : 1760–1769.)
- [81] Zhang Yonghai, Wei Jinjia, Kong Xin, et al. Confined submerged jet impingement boiling of subcooled FC-72 over micro-pin-finned surfaces [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2016, 37(3/4): 269–278.
- [82] Kim J. Review of nucleate pool boiling bubble heat transfer mechanisms[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2009, 35(12): 1067–1076.
- [83] Zhou D W, Ma C F. Local jet impingement boiling heat transfer with R113[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2004, 40 (6) : 539–549.
- [84] Jenkins R, De Brún C, Kempers R, et al. Thermal-hydraulic performance of convective boiling jet array impingement [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 745: 032120.
- [85] Fan Simiao, Duan Fei. Correlations for heat transfer characteristics of the onset of nucleate boiling in submerged jet impingement [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 170: 107071.
- [86] Cheng Ziyang, Li Xunfeng, Huai Xiulan, et al. Boiling heat transfer characteristics of pin-finned surface in distributed jet array impingement[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2023, 184: 107956.
- [87] Ji Xinyu, Ma Xiang, Yang Xiaoping, et al. Jet array impingement boiling in compact space for high heat flux cooling [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 219: 119538.
- [88] Ndao S, Peles Y, Jensen M K. Experimental investigation of flow boiling heat transfer of jet impingement on smooth and micro structured surfaces [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(19/20): 5093–5101.
- [89] Guo D, Wei J J, Zhang Y H. Enhanced flow boiling heat transfer with jet impingement on micro-pin-finned surfaces [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31 (11/12) : 2042–2051.
- [90] Hoang C H, Fallahtafti N, Rangarajan S, et al. Impact of fin geometry and surface roughness on performance of an impingement two-phase cooling heat sink [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 198: 117453.

#### 通信作者简介

许伟聪,男,助理研究员,天津大学机械工程学院。联系电话: 18722373369。E-mail: xuweicong@tju.edu.cn。研究方向:先进热力系统。

#### About the corresponding author

Xu Weicong, male, assistant researcher, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Contact Number: 18722373369, E-mail: xuweicong@tju.edu.cn. Research fields: advanced thermal systems.

(责任编辑:田甜)