

基于液态金属对流的电子设备冷却研究进展

常向廷, 董伟, 韩俊杰, 董进喜, 刘治虎, 赵航

航空工业集团公司西安航空计算技术研究所, 西安 710065

摘要 受益于液态金属优异的导热和流动性能, 液态金属对流冷却为电子器件和设备的高热流密度热管理难题提供了新的解决方案。介绍了液态金属对流的传热和流动特性, 相比于传统工质, 液态金属的高热导率使得对流的总体热阻更低, 因此产生更好的传热效果。总结了基于液态金属对流的驱动技术、复合式冷却技术和强化冷却技术的相关研究进展, 简述了液态金属对流在电子设备冷却领域的应用现状, 并展望了液态金属对流冷却的发展前景。

关键词 液态金属; 对流传热; 电子设备; 高热流密度

近年来, 随着半导体与电子封装技术的快速发展, 各类电子元器件的集成度和电子设备的封装密度急剧提升, 微处理器芯片、大功率固体激光器、相控阵雷达、高性能航空计算机等电子器件和设备的发展趋势是更轻、更小和更高性能, 导致单位面积的发热功率剧增^[1-4]。根据预测, 许多微电子行业未来面临 300 W/cm^2 的高热流密度^[5], 3D 集成芯片的热流密度甚至将达到 $1000\sim 4000 \text{ W/cm}^2$ ^[6](图 1), 由热流密度增加而引发的“热障”问题日益严峻。此外, 高热流密度芯片的存在导致在不均匀的热流下产生相当大的温度不均匀性^[4]。这都对先进热管

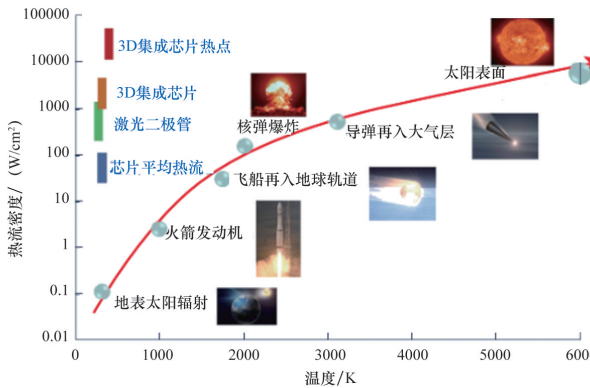


图 1 电子器件的热流密度

收稿日期: 2024-01-18; 修回日期: 2024-09-17

基金项目: 中国航空研究院航空科学基金项目(2023Z008031001)

作者简介: 常向廷, 高级工程师, 研究方向为电子设备热管理, 电子信箱: cxting20232023@163.com

引用格式: 常向廷, 董伟, 韩俊杰, 等. 基于液态金属对流的电子设备冷却研究进展[J]. 科技导报, 2024, 42(24): 30-45;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.01.00124

理技术提出了更高的要求。

传统的散热技术,如自然散热、风扇散热和热管散热,由于具有可靠性高、成本低等优势,在电子设备冷却领域得到了广泛的应用^[7-9],但是这些散热技术最多只能解决热流密度在 100 W/cm^2 以下的典型问题,对于更高热流密度的情况便显得无能为力。为了实现更高的冷却性能和更优异的温度均匀性,研究人员一直在努力改进电子设备冷却的方法和材料。在方法方面,微通道冷却^[10]、射流冲击^[11]、喷雾冷却^[12]、离子风冷却^[13]、压电风扇冷却^[14]等一系列新颖而先进的解决方案不断涌现。这些技术各自都具有独特的优势,有些可以应对极高热流密度的情况,例如,微通道和喷雾冷却均能处理 1000 W/cm^2 以上热流密度的散热问题^[10,12]。然而,上述解决方案都存在一些需要进一步解决的问题,如制造工艺复杂、成本高、存在堵塞风险和其他可靠性问题,它们的大规模工业应用仍需要实质性的改进^[15]。在材料方面,传统的冷却介质以空气、水和氟化物为主,这些流体的低导热性可能会成为提升冷却性能的限制因素,此外,这些流体的循环由

机械泵驱动,造成占用空间大、额外增加质量、可靠性低等问题。有研究人员提出采用纳米流体作为流动工质来提高有效导热性^[16-17],但可能会导致结垢、颗粒沉积或聚集、溶液质量退化等其他的问题^[17]。在这种背景下,液态金属冷却应运而生,并得到了广泛的关注和快速地发展。

液态金属泛指一大类在室温或更高温度附近呈液态的金属材料,其中,镓基合金和铋基合金因为具有安全、无毒、低熔点等特点而被较多地用于电子冷却^[18]。以镓基合金 $\text{Ga}_{68}\text{In}_{20}\text{Sn}_{12}$ 为例,其与水、空气和氟化液的物性参数对比如表 1 所示^[19-21]。相比于传统的冷却工质,液态金属有以下 3 方面的典型优势:(1) 具有远高于水、空气等非金属流动介质的热导率,有助于实现更加高效的热量传输和更极限的散热能力;(2) 液态金属沸点高 ($>1000^\circ\text{C}$),物化性质稳定,可以保证散热系统在很高的温度下稳定、可靠地运行;(3) 可以在无机械泵浦的情况下实现高效的液体驱动,降低能耗、噪音的同时实现更紧凑的结构封装。

表 1 液态金属与传统流体工质的物性参数对比

工质	熔点 $T_m/^\circ\text{C}$	沸点 $T_b/^\circ\text{C}$	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	热导率 $\lambda/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	比热容 $C_p/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	动力黏度 $\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$
水	0	100	998	0.6	4182	1.003×10^{-3}
空气	—	—	1.2	0.026	1005	1.84×10^{-7}
氟化液 HFE-7100	-135	61	1520	0.062	1255	9.27×10^{-4}
$\text{Ga}_{68}\text{In}_{20}\text{Sn}_{12}$	10.7	2200	6363	39	366	2.22×10^{-3}

除了以上优势,液态金属也有不利于散热的因素,例如:密度较大,会增加系统质量;比热容较低,在低速流动情况下不利于传热;动力学黏度稍高,可能会增加流动阻力。不过,相比于其展现的典型优势,这些不利因素的影响相对来说可以被接受。

基于所表现出的突出优势,液态金属为能源、电子、柔性智能机器等领域的热量捕获和传输提供了新的思路和方法。近年来,利用液态金属,研究人员在高效对流冷却系统、高性能热界面材料和相变热控与储能等技术领域取得了一系列令人振奋

的原创性成果^[18,22-24],其中,基于液态金属的对流冷却技术最受关注和最具广泛应用价值^[25]。

1 液态金属对流传热机制

1.1 液态金属对流的传热特性

对流传热作为一种基本的物理现象,在工业热管理和能源等众多领域中均扮演着重要角色。对流传热包括固体壁面与流体工质之间的对流传热和流体流动引起的传热。具体到一个对流系统,系

统总热阻包括热源处的对流热阻、流体温升热阻和末端换热器处的对流热阻^[26],即

$$R_{\text{sys}} = R_s + R_f + R_e \quad (1)$$

其中,

$$R_s = \frac{T_s - T_{fs}}{\Phi} = \frac{1}{hA_s} \quad (2)$$

$$R_f = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{\Phi} \quad (3)$$

$$R_e = \frac{T_{fe} - T_e}{\Phi} = \frac{1}{hA_e} \quad (4)$$

式中, Φ 表示单位时间内的传热量, T_s 、 T_e 、 T_{fs} 和 T_{fe} 分别表示热源温度、换热器温度、热源侧的流体温度和换热器侧的流体温度, h 表示流体对流换热系数, A_s 和 A_e 分别表示热源侧和换热器侧的换热面积。

由式(2)和(4)可以看出,在换热面积一定的情况下,热源处的对流热阻和换热器处的对流热阻主要取决于流体的换热系数 h ,选取液态水作为参照,根据前人研究,液态金属与水的换热系数之比^[27]可表示为

$$\frac{h_{\text{lm}}}{h_w} = \begin{cases} \frac{k_{\text{lm}}}{k_w} & \text{层流} \\ \frac{k_{\text{lm}}}{k_w} \frac{6.3 + 0.0167Re^{0.85}Pr^{0.93}}{0.02Re^{0.8}Pr^{0.4}} & \text{湍流} \end{cases} \quad (5)$$

式中, k_{lm} 和 k_w 分别表示液态金属和水的导热率, Re 和 Pr 分别代表雷诺数和普朗特数。

结合表1,可以得到,液态金属的对流换热系数高于水的对流换热系数,因此液态金属对流系统具有较小的对流热阻。流体温升热阻主要取决于流体工质的流量和热容量。当流体流过热源时,温升热阻随着流速和热容的减小而升高。由于液态金属具有相对较低的热容量,在低流量下,温升热阻可能比较显著,所以增加流量会有益于改善液态金属对流传热效果^[28]。此外,液态金属由于其较高的导热性,所以以液态金属为工质的对流传热温度均匀性会比水好很多。而且,液态金属高热导率的优势强于高密度带来的劣势,所以高流量下单位质量流体的传热能力相比于水也更优异。

总体来说,相比水等传统流体工质,液态金属

的高热导率使传热系统的对流热阻明显降低,尽管温升热阻可能有所提高,但多数情况下总热阻是减小的。李振明等^[29]基于液态金属的高热流密度电力设备冷却实验平台开展了液态金属和水的对流换热对比实验。实验表明,在热源加热功率为1000 W、环境温度为25℃、流体流量为6 L/min的情况下,以液态金属替代水作为冷却介质,系统热阻可由0.033 K/W降低至0.019 K/W。Deng等^[30]针对一种以液态金属为冷却剂的大功率发光二极管(LED)冷却方案进行了实验测试,并与以水为冷却剂的情况进行了对比。当对冷却系统突然施加150 W热负荷时,系统的温度响应如图2所示,在相同的热载荷冲击下,液态金属冷却系统的温升较小。这意味着虽然液态金属的热容较小,但由于其系统热阻较小,在瞬时热载荷冲击下可以有较好的散热性能。因此,当使用液态金属作为冷却剂时,冷却系统可以承受更高的热冲击,运行更加稳定。

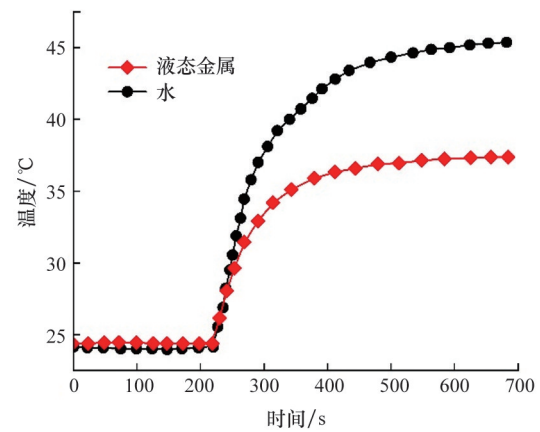


图2 热载荷冲击下LED基板温度随时间的变化

1.2 液态金属对流的流动特性

液态金属的热导率远大于水、空气等流体介质,因此,液态金属对流的分子普朗特数 $Pr = \mu C_p / \lambda$,要远小于普通流体,此处的 μ 表示流体的动力学黏度。普朗特数描述的是流体流动过程中动量扩散与能量扩散的相对重要性。对于空气、水等普通流体,分子普朗特数约等于1,说明分子的热扩散作用与动量扩散作用相当,即能量运输与动量运输作用相当,因此,热边界层的厚度约等于流动速度边

边界层的厚度(图3(a));而对于液态金属,分子普朗特数远小于1,一般在 $10^{-3}\sim 10^{-2}$ 量级,表明分子的热扩散作用远强于动量扩散作用,因此边界附近的温度曲线比速度曲线平滑很多,即热边界层厚于速度边界层(图3(b))^[31]。

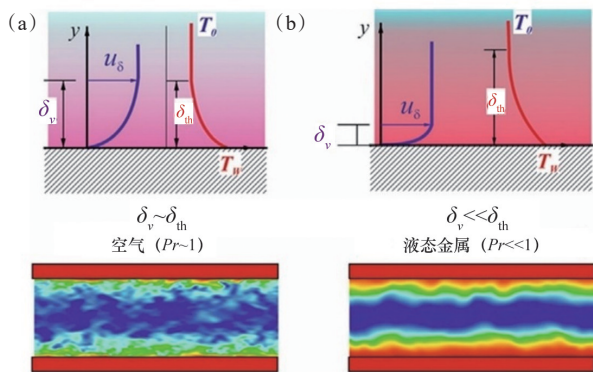


图3 以空气(a)和液态金属(b)为流动介质的垂向速度黏性边界层厚度 δ_v 和温度边界层厚度 δ_{th} 示意(上)以及典型的管道内瞬时流动温度场云图(下)

热边界层的变化会引起2方面问题。一是基于普通流体发展的湍流模型无法用于液态金属对流的建模与分析。因为这些湍流模型通常要求温度场和速度场的输运特性相接近,液态金属对流显然不符合这一要求。因此,为研究液态金属系统的对流与传热特性,需要改进现有模型或者开发新的特定模型,使之适用于低普朗特数流体的湍流流动^[32-33]。二是从场协同理论^[34-35]角度,对于普通流体,热边界层较薄,温度梯度方向主要垂直于速度方向,表明场协同程度较差,此时,增强壁面附近的湍流结构可以增加平行于温度梯度方向的速度分量,提高场协同水平,增强对流换热。而对于液态金属,温度边界层要厚得多,速度场与温度梯度之间的夹角较小,此时诱导垂直速度的湍流结构并不会显著提高场协同水平,反而会明显增加流动阻力,因此对于液态金属对流,光滑流道可能是更合适的选择^[28]。

总的来说,在传热特性方面,得益于高热导率的优势,同等条件下液态金属对流的总体热阻低于其他传统流体工质,产生了更好的传热效果。而在流动特性方面,由于液态金属属于低普朗特数流

体,分子的热扩散作用远强于动量扩散作用,因此在湍流模型和流道设计方面要进行谨慎选择。

2 液态金属对流冷却相关技术的发展

2.1 液态金属驱动技术

对于对流冷却系统,流体驱动方式的选择对系统的性能、成本与可靠性等方面都具有重要意义。以水为介质的对流系统中,一般采用机械泵提供驱动力,但是机械泵的使用会引发噪音和额外的功耗,而液态金属的密度比水高得多,因此很难用机械泵驱动。使用机械泵还会出现液态金属脆化等问题^[36]。由于液态金属具有高导热性、导电性和更好的流动性等特点,人们得以借助一些非机械泵的技术实现液态金属的高效驱动,主要有电磁驱动、热驱动、电/磁驱动和声场/光场驱动等。

2.1.1 电磁驱动

由于液态金属具有优秀的导电性,因此可以结合电磁作用产生驱动力,从而达到驱动液态金属的目的。目前电磁驱动已发展成为一种较为成熟的液态金属驱动技术,各种各样的电磁泵被设计并应用^[15,37-43]。根据驱动原理的不同,电磁泵可分为导电电磁泵和感应电磁泵^[44],用于电子设备冷却的电磁泵一般为前者。导电电磁泵采用直流电源驱动,结构简单、体积紧凑、成本低,由于没有运动的机械部件,因此可以高效率、低功耗、无噪音地运行,并消除了如泄漏、磨损或黏滞等影响可靠性的问题^[36]。图4(a)为导电电磁泵的工作原理,作为传热介质的导电液态金属置于磁场中,通过电磁交互感生性诱导的洛伦磁力作用于液态金属上,从而驱动液态金属在管道内定向流动^[39]。图4(b)是一种典型电磁泵的结构示意^[45]。

目前,已开发出一系列用于电子冷却的电磁泵,静压范围为1~50 kPa,体积流量为1~100 mL/s。但是这些泵的使用需要大电流(15~30 A)和低电压,导致在实际应用中遇到一些困难^[46]。首先,在一个中小型的电子设备里很难获得高电流;其次,根据焦耳定律,由于大电流的存在,电路会产生大

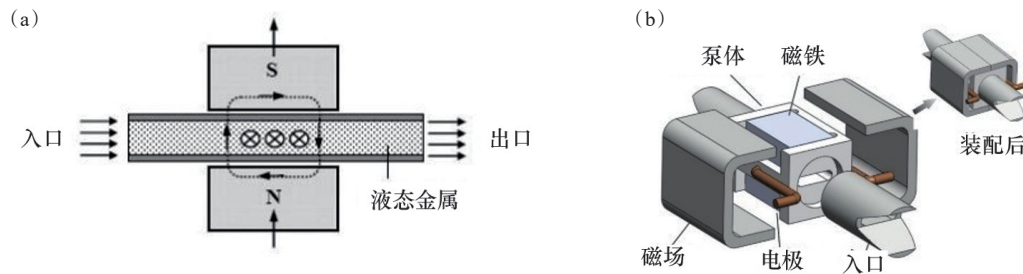


图4 电磁泵的工作原理(a)和结构示意图(b)

量的热量。因此需要进一步设计并优化电磁泵。

Deng等^[38]详细研究了电磁泵的设计和参数优化方法,并开发了电流需求为10 A、功耗小于1 W的用于中央处理器(CPU)液态金属冷却的电磁泵。Ma等^[46]在直流电流小于1 A的情况下实现了电磁泵的有效工作,论证了利用余热驱动热电发电机从而实现液镓流动的可行性。Deng等^[37]为解决10 W的散热问题,采用2 A的电流驱动电磁泵,产生的电磁泵功耗小于50 mW。这些工作推动了电磁泵的实际应用。

为了应对高功耗电子设备的散热,Wang等^[42]提出了一种双级电磁泵,用于高性能液态金属冷却叶片散热器,结果表明,双级电磁泵散热器上表面温度的最大值和标准偏差均低于单级电磁泵。当安装双级电磁泵时,叶片散热器显示出更大的散热潜力。Sun等^[43]提出了一种高性能双螺旋电磁泵,用于以最小的体积高效驱动液态金属流体。结果表明,通过改变螺旋流道的数量可以调节电磁泵的性能。增加螺旋流道的数量有利于实现高压差,减少螺旋流道的数量有利于获得较大的流量。建立了双螺旋电磁泵驱动的液态金属冷却回路,在1.86 L/min流量下实现了 156 W/cm^2 (功耗为755 W)的高效冷却。

2.1.2 热驱动

热驱动是另一种常用的液态金属驱动方式,热驱动不消耗电能,动力来源于流体的热效应。目前,液态金属的热驱动有2种方法^[28]:一种是基于自然对流或热气动效应的直接热驱动法;另一种是间接驱动法,先利用热电发生器将热能转化为电能,继而利用转化来的电能带动电磁泵工作,达到驱动

液态金属的目的。

Li等^[47]研究了用自然对流驱动液态金属的技术可行性,并进行了实验验证。结果表明,可以利用芯片产生的废热来驱动液态金属的流动,当热负荷为42.1 W,水的对流换热系数仅为 $1367 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$,而液态金属的对流换热系数可达到 $2347 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$,且随着热负荷的增大和冷却器与加热器之间高度差的增大,液态金属的冷却性能会更好。进一步地,Li等^[48]制作了一个自然对流驱动液态金属进行冷却的模型样机(图5),研究了热负荷与水平面夹角对密闭柜内模拟热片散热的影响。结果表明,在单芯片情况下,当环境温度为 20°C 、热负荷约为122 W时,可将芯片温度保持在 85.1°C 以下。当机柜与水平面的夹角从 0° 至 90° 变化时,设备的散热性能逐渐变好。罗曼丽等^[49]研究了热虹吸驱动液态金属散热系统的管道尺寸效应。结果显示,当热流密度为 5 W/cm^2 时,热源可分别被液态金属和水冷却到 50.8°C 和 71.6°C 以下。热虹吸驱动方式受管道尺寸的影响很大,只有当实际管道直径大于系统的临界直径时,热虹吸力才足以驱动液态金属

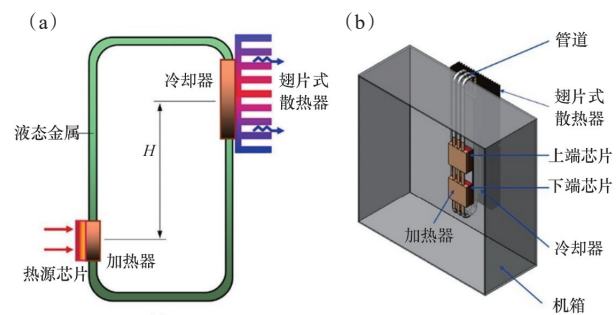


图5 自驱动液态金属冷却系统示意(a)和装置原理(b)

自循环流动,水虹吸系统的临界尺寸高于液态金属系统,但冷却效果显著弱于后者。

Tang等^[50]基于液态金属的热气动原理,提出一种闭式循环自驱动热能采集器。液态金属的驱动力是由电阻加热的挥发性流体提供,由于可压缩介质在加热条件下压力增大,产生的高压能有效地驱动液态金属流动。测试结果表明,在热负荷为12.25 W的情况下,实现了时间平均体积流量为14 mL/min的稳健液态金属循环流动。Ma等^[46]利用热电发生器提出了一种用于计算机芯片热管理的热驱动液态金属冷却装置。在该系统中,利用热电发生器将芯片废热转化为电能,再激活电磁泵驱动液态金属循环。实验表明,当该热驱动模块被激活时,在25 W的热负荷下,芯片温度可以下降15℃。虽然热电发生器的输出功率比较小,但出色的冷却能力显示了这种热驱动方法的应用潜力。

2.1.3 电/磁驱动

近年来,液态金属液滴的电或磁驱动吸引了众多研究者的关注,并在软体机器人、柔性器件和生物医药等领域展示出了独特的应用价值和推广前景^[51-52]。电/磁驱动具有简单、可控、方便等诸多优点。具体来说,磁驱动以非接触的方式提供外部能量,不需要特殊的设备,通过简单的磁改性,就可以实现液态金属液滴的瞬时响应,并且不会导致化学反应和由此引起的破坏^[52-54];电驱动通过外加电场诱导液态金属液滴两端的表面张力失衡来驱动液滴移动,外部施加电压的大小和频率易于调节^[55-58]。借助电/磁驱动,液态金属对流或循环成为了解决局部高热流密度问题的有力方式。

Li等^[52]提出了一种利用铜-铁磁性纳米粒子改性液态金属的方法,改性后获得的功能性液态金属具有与纯液态金属相似的外观、迁移率和可变形性。该功能性液态金属的运动可以通过电场和磁场的同时相互作用来控制。这使得在交联通道内精确操纵液态金属液滴的驱动方向以及爬升运动成为可能。Liu等^[53]通过对液态金属进行磁改性,实现了对液态金属的高性能磁控制,并分析了磁性液态金属在磁场作用下的输运、分裂、合并、旋转等行为,结果表明所制备的磁性液态金属液滴具有良

好的主动和被动变形能力,可以通过尺寸为其自身直径1/3.5的通道空间。上述研究说明在磁场或电场的作用下,经过改性的液态金属液滴可以被简单而有效地控制,适用于受限空间内局部热点的高效冷却。

此外,Fang等^[55]报道了一种电驱动的液态金属射流现象。施加2.5~20 V的低电压电场,很容易诱导毛细管中的液态金属射流,喷射出来的液态金属进入溶液会产生大量的离散液滴,射流速度与外加电压的大小呈正相关,而液滴大小主要受毛细喷嘴孔径的影响。此外,电极可以灵活地控制液态金属液滴的运动。这种液体金属射流冲击具有电压低、结构简单等优点,可用于紧凑空间的高热流密度电子冷却。Tan等^[56]基于电驱动机制提出并论证了一种液态金属对流冷却方法,并系统地研究了所开发装置在几种不同热流密度下的传热性能。结果表明,在较低的电压和功耗下,可以很容易地将流动速度提高到8 cm/s。进一步的实验表明,该冷却装置可以有效地将热点的温度保持在55℃以下,且功耗仅为0.8 W。该工作为制造高度紧凑的芯片冷却装置提供了一条途径,并且这种装置可以灵活地扩展到其他工程领域。

2.1.4 波场/光场驱动

除了电/磁方法外,波场和光场也可以以非接触的方式驱动液态金属。波对液态金属的驱动效果取决于波的频率。由超声波探针或超声波浴产生的高频声波可以迫使液态金属分解成尺寸在10~100 nm的纳米颗粒,同时实现液态金属的可控运动^[59-60]。而垂直振动器等产生的低频波可以实现一些特别的液态金属流动现象,例如形成不同的表面图案、轨道运行等^[61]。由于波具有穿透性,所以该方法在密封通道中也可以发挥作用^[62]。关于光对液态金属的驱动,目前主要有2种方法:第一种是利用光热效应^[63],在激光的照射下,液态金属的不同部位温升不同,形成不均匀的温度分布,从而产生控制液态金属运动的力;第二种是借助光敏材料,形成液态金属运动的光场控制^[64]。需要注意的是,光场一般只能诱导液态金属的简单运动,若实现复杂运动则需要特定的实验设计。

系统具有散热性能好、成本低、温度均匀性好、可靠性高等特点,有望用于服务器和数据中心芯片阵列的热管理。

2.2.2 并行方式

在串行方式中,液态金属和水冷却在传热路径上先后发挥作用,而在并行方式中,液态金属和水介质同时发挥作用。

Mei等^[69]提出了一种基于液态金属和水混合的微通道散热器(图8)。散热器由2个完全分离的通道组构成,其中一组的冷却剂是水,另一组是液态金属,2个通道组的液体入口和出口也是完全分离的。该混合冷却系统结合了液态金属和水冷却剂的优点,与纯液态金属冷却系统相比,一方面减少了液态金属用量,降低了初始成本,另一方面提高了等效比热,在一定程度上改善了传热性能。

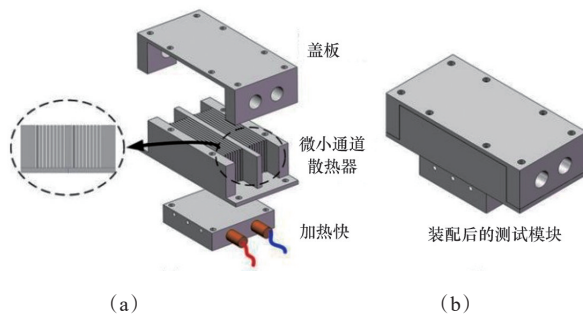


图8 并行式液态金属-水微通道复合冷却系统

Tan等^[56]制作了由液态金属和水溶液组成的混合冷却剂,并用于电子芯片的冷却。制作的工作样机获得了令人满意的冷却效果。Hao等^[70]提出了一种由液态金属和水作为混合制冷剂的新型振荡热管。在没有外力作用的情况下,利用蒸发器和冷凝器之间的压差,成功地驱动液态金属在热管中流动。实验结果表明,加入液态金属可以提高传热能力,但随着液态金属填充率的增加,液态金属振荡幅度减小。

2.3 液态金属冷却强化技术

液态金属对流已经表现出良好的传热性能,当其与一些强化传热方法,如微通道、射流冲击、纳米流体等结合时,能进一步突破传热极限,提升传热效果。

2.3.1 液态金属微小通道冷却

自Tckerman等^[71]的开创性工作以来,微小通道散热器被广泛地研究和应用。因为增加了换热面积,可以在紧凑的空间内实现卓越的对流换热性能。受限于传统流体介质的低热导率 and 高温不稳定性,微小通道的对流换热能力难以进一步提高。为此,研究人员试图将液态金属与微小通道系统结合,希望同时利用前者的高导热性和后者的大换热面积,以获得更进一步的冷却效果^[72-74]。

Deng等^[72]进行了基于微小通道的液态金属对流传热研究,设计的散热器和实验方案分别如图9(a)和图9(b)所示。实验测试结果表明,当系统在较高速度(湍流状态)下运行时,以液态金属为工质的微通道冷却相比传统冷却液能产生更高的对流换热系数和更低的热阻。在一个典型的芯片微通道冷却系统中,水对流可以实现 $10000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 的对流传热系数,而利用液态金属作为介质时,对流传热系数可以达到约 $15000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。另有研究表明,在相同的微通道几何和入口流速下,液态金属对流的热阻比水低36%^[73]。在高热流密度条件下,液态金属对流可以实现低至 $0.077 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ 的热阻值^[74]。

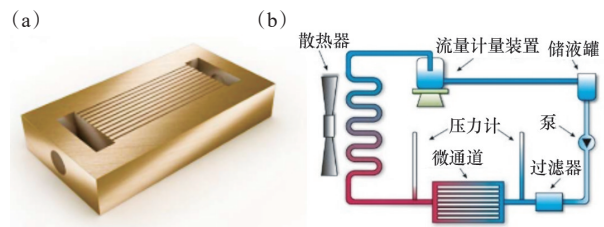


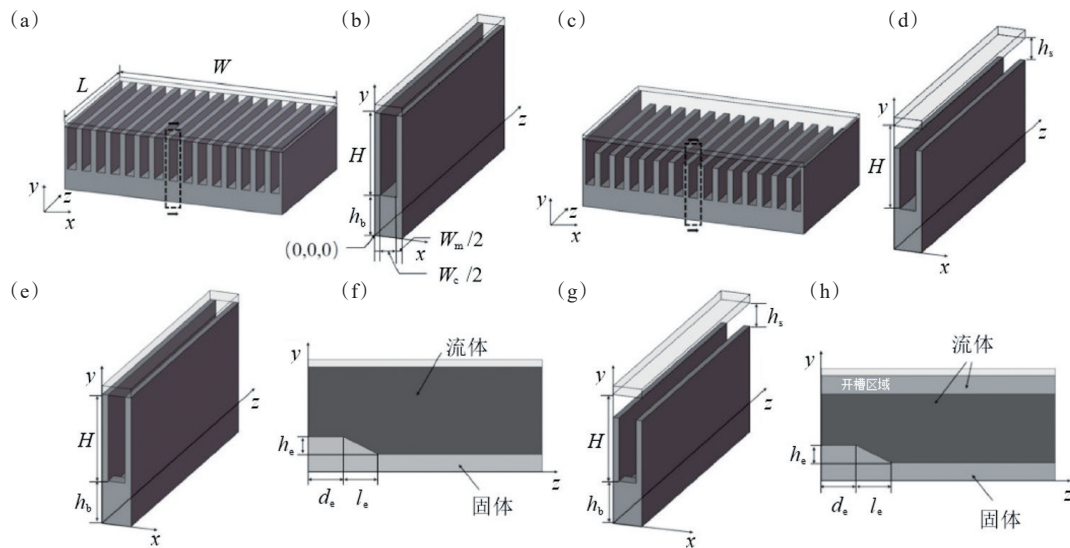
图9 液态金属微通道散热器(a)及实验系统(b)

然而,并不是所有情况下,液态金属微通道的传热性能都优于水等传统介质,具体取决于流动速度和微通道几何参数^[72,75-76]。流动速度较低时,流体的比热占据主导作用,导热的作用不凸显。液态金属的比热小于水,所以在低速区,液态金属的对流换热系数可能小于水^[72],当流动速度相对较高时,液态金属的高导热性在对流换热中才具有明显的优势。Xiang等^[75]对各种几何尺寸的微通道中液态金属和水的散热效果进行了比较,通过单变量研

究得到了几何参数的临界值。结果表明,当散热器长度小于临界长度,或者微通道高度大于临界高度,或者微通道宽度大于临界宽度,或者翅片宽度小于临界宽度时,液态金属散热器才能获得比水散热器更小的热阻。

液态金属的高黏度和高密度会造成在微通道中较大的流动阻力,从而导致较大的泵送功率,为

降低流动阻力和泵送功率,开发和设计了一些针对液态金属介质的新型微通道,如上开槽型微通道、底部延伸型微通道和复合型微通道等^[77-80],如图10所示。基于数值仿真的结果表明,这些新型微通道均能有效降低流动阻力。例如复合型微通道在不增加总热阻的情况下,最多可以降低54.9%的泵送功率^[78]。



(a)(b) 传统微通道散热器;(c)(d) 上开槽型微通道散热器;(e)(f) 底部延伸型微通道散热器;(g)(h) 复合型微通道散热器

图10 多种微通道几何构型

总的来说,液态金属微通道可以大幅提高传统液冷的热流密度极限。如果能有效降低流阻,并进一步优化设计,液态金属微通道在强化对流换热领域将具有广阔的应用前景。

2.3.2 液态金属射流冷却

射流冲击是另一种针对高热流密度问题的有效散热技术,当射流喷射到物体表面时,在撞击区域形成非常薄的流体动力和热边界层,从而在射流区出现极高的换热系数^[11]。将液态金属作为流体工质,能够进一步提升射流冲击的散热能力极限^[81-83]。图11给出了不同射流速度下液态金属镓和水的对流换热系数^[81],其中喷嘴直径为8 mm。可以看出,以水为冷却剂,若想实现更高的传热系数,则需要不断提高射流速度;而液态金属镓可以显著提高射流冲击的冷却效率,在较低的射流速度

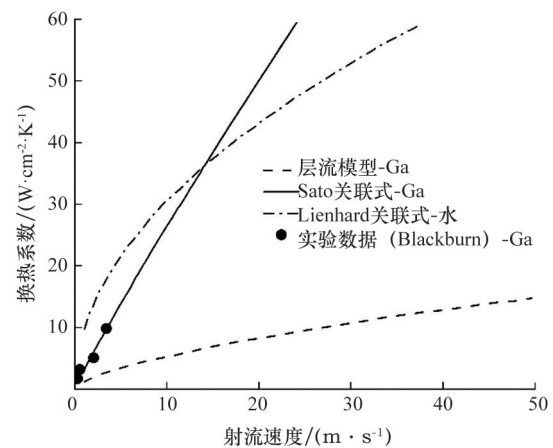


图11 水和镓射流冲击传热系数随射流速度的变化

下便能实现高传热系数,表明在射流系统中用液态金属替代水作为流体工质,具有巨大的散热潜力。

Silverman等^[82]构建并运行了一种液态金属射

流冲击系统,实验结果表明,系统可以在小于4 m/s的极低射流速度下处理约2000 W/cm²的热流密度。Xiang等^[83]基于几种微射流冲击系统,分析比较了以水和液态镓作为冷却剂的系统热阻,选择了热流密度1400和1900 W/cm²的2个不同实验条件。结果表明,无论体积流量如何,在相同体系中,液态镓的热阻始终小于水,热阻最大下降29.8%,热源温度最大下降12.6 K。使用液态金属的最小热阻可低至0.033 K/W。因此,液态金属射流冲击可能是未来解决极高热流密度问题的有力手段。

2.3.3 纳米液态金属冷却

纳米流体是一种具有高导热性的流体质,由具有优异化学稳定性的纳米颗粒(通常为1~100 nm)均匀悬浮在基础流体中制成。传统的纳米流体是将纳米颗粒分散在水、乙二醇或油等普通液体中制成。由于所使用基液的限制,导热性能的改进仍然有限。通过在液态金属中加入具有优异导热性的纳米颗粒可以同时利用液态金属和纳米颗粒的优势,得到更高导热性能的流体^[84-89]。基于这样的思路, Ma等^[84]首次提出了纳米液态金属流体的概念。此外,由于液态金属具有较大的表面张力,可以在液态金属中加入更大体积分数的纳米颗粒,获得具有更加优异导热性的纳米液态金属流体。

Zhou等^[85]数值模拟了圆管内的纳米液态金属(由液态金属Ga和纳米Cu颗粒组成)强迫对流传热。结果表明,在雷诺数 $Re=500$ 、纳米颗粒浓度 $\alpha_p=0.04$ 的情况下,纳米液态金属流体Ga-Cu的平均换热系数是纳米流体水-Cu的23.8倍,而平均壁面剪应力为水-Cu的59%。Khan等^[86]基于数值模拟结果,比较了不同纳米液态金属流体在微通道散热器中的传热性能,发现纳米液态金属流体的换热性能优于水基纳米流体。当雷诺数 $Re=600$ 、纳米颗粒浓度 $\alpha_p=0.02$ 时,纳米液态金属流体GaIn-Al₂O₃的换热系数比常规纳米流体水-Al₂O₃高3.41倍(图12)。

目前看,纳米液态金属流体有望成为未来最为理想的一种液态传热介质。但是目前关于此方面的研究大多是基于理论或数值模拟开展的,纳米液态金属流体的应用有待于未来的系统验证。

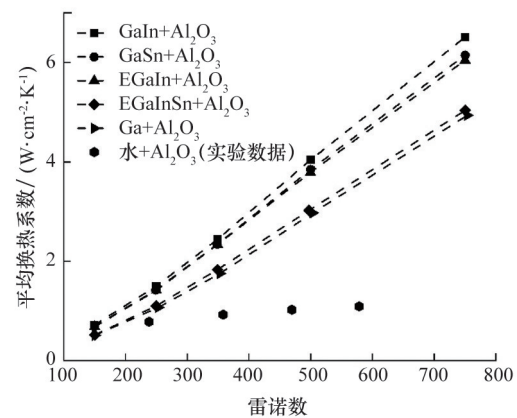


图12 纳米液态金属流体与水基纳米流体的平均换热系数比较

总体看,人们基于液态金属对流,在相关的驱动技术、复合式冷却技术和强化冷却技术方面已进行较多探索。在驱动技术方面,电磁驱动和热驱动发展已较为成熟并被实验验证;在复合式冷却方面,基于液态金属和水2种介质,根据发挥作用顺序的不同,开发了串行和并行2种复合方式;在强化冷却方面,通过数值模拟和简单实验,分别研究了微通道、射流冲击和纳米流体与液态金属结合后的冷却效果,相关结果有望指导液态金属对流冷却未来的技术发展。

3 液态金属对流冷却的应用

近年来,液态金属对流冷却的基础研究不断推动该项技术走向实际应用,并在电子冷却领域取得一定成功。在国内,Deng等^[15]在2010年开发了第一代液态金属冷却原型样机,如图13(a)所示,在微型电磁泵的驱动下,液态金属从冷板中吸收热量,然后通过散热片循环将热量散发到周围空气中。由于液态金属具有优越的传热能力,这一过程的效率很高。该原型样机验证了实现商用产品液态金属冷却的可行性。2013年,Deng等^[38]在第一代样机基础上通过对电磁泵和翅片散热器的关键参数进行优化设计,并辅助以工业设计手段,制作了一种实用的液态金属CPU冷却产品(图13(b)),并与6种典型的商用冷却产品进行对比。结果表

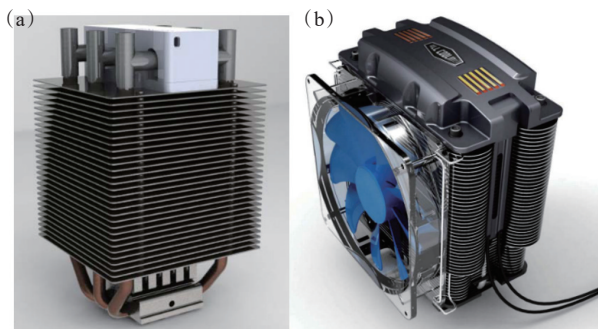


图13 液态金属冷却样机(a)和液态金属CPU冷却商用产品(b)

明,液态金属冷却产品可以作为市场上最好的CPU冷却装置之一进行推广使用。液态金属冷却技术还被进一步扩展到了大功率LED^[30]和动力电池组^[90]的冷却。

2005年,美国Nanocoolers公司的Miner等生产了商用级液态金属CPU冷却系统(图14(a))^[91]。其冷却回路由紧凑高效的磁流体动力泵或电磁泵驱动,功耗极低($< 0.3\text{ W}$),对流换热系数可高达 $2 \times 10^5\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,冷却回路总热阻为 $0.22^\circ\text{C}/\text{W}$,可以满足系统应对高热流密度芯片的冷却要求。丹麦的Danamics公司在2008年和2010年相继推出了LM10 CPU^[92]和LMX Superleggera^[93](图14(b))两款液态金属散热产品。

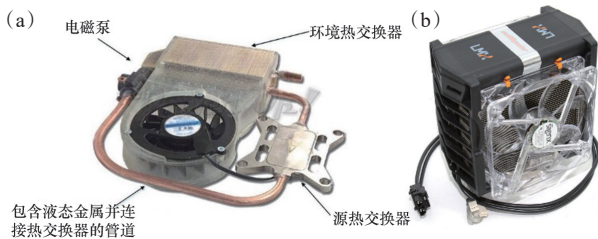


图14 Nanocoolers公司的液态金属冷却系统(a)和Danamics公司的LMX Superleggera产品(b)

2009年起,美国Aqwest公司在US Air的基金支持下,开发了用于大功率激光二极管^[94-95]和用于混合动力汽车逆变器的高功率电子芯片的液态金属冷却技术^[96]。他们开发了一种紧凑的圆形散热器,采用的是一种液态金属-水复合冷却技术,其中液态金属在内环通道中作为主散热器循环,水在

外环通道中流动并作为二次散热器。

目前,液态金属冷却的应用已经涵盖计算机、数据中心、通信站、动力电池以及航天设备等领域。液态金属冷却可以克服传统冷却方法的散热限制,对于其他有高热流密度散热需求的领域,如航空计算机和相控阵雷达等,未来也具有很大的潜在应用价值。

4 结论

梳理了液态金属对流传热及其在电子设备冷却中的应用,阐述了液态金属对流相关的传热与流动特性,并从驱动方法、复合式冷却、传热强化等方面总结了近年相关的研究工作和进展,介绍了液态金属对流冷却的典型应用情况。

液态金属作为一种新兴的功能性流体质工质,在对流冷却方面表现出优异的性能,液态金属具有固有的高导热性和非机械驱动特性,有望突破传统对流冷却的传热极限,在高端电子和能源设备的高热流密度散热方面发挥重大作用。液态金属对流的应用前景主要包括工业电子冷却、能源领域的高温换热和高端军事装备冷却等。

为在复杂恶劣环境中应对极高的热通量冷却要求,并进一步推动液态金属对流技术在电子冷却和热管理方面的发展与应用,还有以下关键技术问题有待解决。

1) 开发更多类型的液态金属。一方面要寻找熔点较低的液态金属以增强低温适应性,另一方面开发比热较高的液态金属以提高低速情况下的对流换热能力。

2) 材料兼容性问题。镓基和铋基液态金属与大多数结构材料具有良好的兼容性,但是在高温环境下,腐蚀作用会变得严重。因此,需要进行腐蚀效应和防护方法的研究,以使液态金属冷却系统在高温下可靠运行。

3) 开发特定的湍流模型。液态金属属于低普朗特数流体,现有湍流模型大多不适用,因此为了进一步揭示液态金属系统的对流与传热特性,需要开发特定的模型,以适用于低普朗特数流体的湍流

流动。

4) 液态金属冷却强化的技术成熟度问题。液态金属与微小通道、纳米颗粒等的结合可以进一步提升散热能力,目前这方面的研究大多处于基础研究阶段,需要通过系统级的样机设计和实验验证提升技术成熟度。

5) 成本问题。与传统流体工质相比,液态金属的价格相对较高,需要通过成分优化或冷却系统配置优化(如复合式液态金属冷却)等方法尽可能降低液态金属的使用成本。

6) 探索更多的应用场景。液态金属冷却的应用场景可以进一步扩展到更多的领域,可以通过创建更多新型的基于液态金属的冷却技术和方法,扩大液态金属冷却的适用范围。

参考文献(References)

- [1] Ball P. Computer engineering: Feeling the heat[J]. *Nature*, 2012, 492(7428): 174-176.
- [2] Waldrop M M. The chips are down for Moore's law[J]. *Nature*, 2016, 530(7589): 144-147.
- [3] Theis T N, Wong H S P. The end of Moore's law: A new beginning for information technology[J]. *Computing in Science & Engineering*, 2017, 19(2): 41-50.
- [4] Murshed S M S, De Castro C A N. A critical review of traditional and emerging techniques and fluids for electronics cooling[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 78: 821-833.
- [5] Agostini B, Fabbri M, Park J E, et al. State of the art of high heat flux cooling technologies[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2007, 28(4): 258-281.
- [6] Bar-Cohen A, Maurer J J, Sivanathan A. Near-junction microfluidic cooling for wide bandgap devices[J]. *MRS Advances*, 2016, 1(2): 181-195.
- [7] Rodgers P, Eveloy V, Pecht M G. Limits of air-cooling: Status and challenges[C]//*Proceedings of Semiconductor Thermal Measurement and Management IEEE Twenty First Annual IEEE Symposium*. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 116-124.
- [8] Ebrahimi K, Jones G F, Fleischer A S. A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 31: 622-638.
- [9] Faghri A. Heat pipes: Review, opportunities and challenges[J]. *Frontiers in Heat Pipes(FHP)*, 2014, 5(1): 1-48.
- [10] Hassan I, Phutthavong P, Abdelgawad M. Microchannel heat sinks: An overview of the state-of-the-art[J]. *Microscale Thermophysical Engineering*, 2004, 8(3): 183-205.
- [11] Ekkad S V, Singh P. A modern review on jet impingement heat transfer methods[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2021, 143(6): 064001.
- [12] Yin J, Wang S M, Sang X H, et al. Spray cooling as a high-efficient thermal management solution: A review [J]. *Energies*, 2022, 15(22): 8547.
- [13] Venkatesh S, Kumar A, Bhattacharya A, et al. Ionic wind review-2020: Advancement and application in thermal management[J]. *Sādhanā*, 2021, 46(3): 165.
- [14] Hales A, Jiang X. A review of piezoelectric fans for low energy cooling of power electronics[J]. *Applied Energy*, 2018, 215: 321-337.
- [15] Deng Y G, Liu J. Design of practical liquid metal cooling device for heat dissipation of high performance CPUs [J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2010, 132(3): 031009.
- [16] Choi S U S, Eastman J A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles[R]. IL, USA: Argonne National Lab(ANL), 1995.
- [17] Buongiorno J. Convective transport in nanofluids[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2006, 128(3): 240-250.
- [18] Yang X H, Liu J. Advances in liquid metal science and technology in chip cooling and thermal management[M]//*Advances in Heat Transfer*. Amsterdam: Elsevier, 2018: 187-300.
- [19] Yan J J, Lu Y, Chen G J, et al. Advances in liquid metals for biomedical applications[J]. *Chemical Society Reviews*, 2018, 47(8): 2518-2533.
- [20] Zhu L F, Wang B, Handschuh-Wang S, et al. Liquid metal-based soft microfluidics[J]. *Small*, 2020, 16(9): 1903841.
- [21] Khoshmanesh K, Tang S Y, Zhu J Y, et al. Liquid metal enabled microfluidics[J]. *Lab on a Chip*, 2017, 17(6): 974-993.
- [22] 周宗和, 宋杨, 杨小虎, 等. 基于液态金属的高性能热管理技术[J]. *节能基础科学*, 2020, 39(3): 124-127.
- [23] 杨小虎, 刘静. 液态金属高性能冷却技术: 发展历程与研究前沿[J]. *科技导报*, 2018, 36(15): 54-66.
- [24] Tian Z X, Wang C L, Guo K L, et al. A review of liquid

- metal high temperature heat pipes: Theoretical model, design, and application[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 214: 124434.
- [25] Liu G L, Liu J. Convective cooling of compact electronic devices via liquid metals with low melting points[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2021, 143(5): 050801.
- [26] 邓月光. 高性能液态金属CPU散热器的理论与实验研究[D]. 北京: 中国科学院理化技术研究所, 2012.
- [27] Miner A, Ghoshal U. Cooling of high-power-density microdevices using liquid metal coolants[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(3): 506-508.
- [28] Deng Y G, Jiang Y, Liu J. Low-melting-point liquid metal convective heat transfer: A review[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 193: 117021.
- [29] 李振明, 刘伟, 赵勇青, 等. 基于液态金属的高热流密度电力设备冷却实验研究[J]. *电工电能新技术*, 2017, 36(4): 66-70.
- [30] Deng Y G, Liu J. A liquid metal cooling system for the thermal management of high power LEDs[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2010, 37(7): 788-791.
- [31] Heinzl A, Hering W, Konys J, et al. Liquid metals as efficient high-temperature heat-transport fluids[J]. *Energy Technology*, 2017, 5(7): 1026-1036.
- [32] Grötzbach G. Challenges in low-Prandtl number heat transfer simulation and modelling[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2013, 264: 41-55.
- [33] Bhushan S, Elmellouki M, Jamal T, et al. Assessment of low-and high-fidelity turbulence models for heat transfer predictions in low-prandtl number flows[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2022, 388: 111614.
- [34] Zhao X H, Jiaqiang E, Zhang Z Q, et al. A review on heat enhancement in thermal energy conversion and management using Field Synergy Principle[J]. *Applied Energy*, 2020, 257: 113995.
- [35] Li Z X, Guo Z Y. Field synergy theory for convective heat transfer optimization[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [36] Ma K Q, Liu J. Liquid metal cooling in thermal management of computer chips[J]. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, 2007, 1(4): 384-402.
- [37] Deng Y G, Liu J. Heat spreader based on room-temperature liquid metal[J]. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2012, 4(2): 1.
- [38] Deng Y G, Liu J. Optimization and evaluation of a high-performance liquid metal CPU cooling product[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2013, 3(7): 1171-1177.
- [39] Liu J, Zhou Y X, Lv Y G, et al. Liquid metal based miniaturized chip-cooling device driven by electromagnetic pump[C]//*Proceedings of Electronic and Photonic Packaging, Electrical Systems Design and Photonics, and Nanotechnology*. ASME/EDC, 2005, 42177: 501-510.
- [40] Kim B Y, Jeong J Y. Electromagnetic pump in sodium thermal-hydraulic test facility: Design and control issues [C]//*Proceedings of 2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 272-275.
- [41] Deng Y G, Zhang M M, Jiang Y, et al. Two-stage multi-channel liquid-metal cooling system for thermal management of high-heat-flux-density chip array[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 259: 115591.
- [42] Wang Y S, Zhang P J, Tan S C, et al. Experimental and numerical analysis on a compact liquid metal blade heat dissipator with twin stage electromagnetic pumps[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2019, 104: 15-22.
- [43] Sun P, Liu C K, He Z Z. A compact Double-spiral electromagnetic pump for liquid metal cooling[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2023, 180: 109486.
- [44] Al-Habahbeh O M, Al-Saqqa M, Safi M, et al. Review of magnetohydrodynamic pump applications[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2016, 55(2): 1347-1358.
- [45] Deng Y G, Liu J. An experimental investigation of liquid metal thermal joint[J]. *Energy Conversion and Management*, 2012, 56: 152-156.
- [46] Ma K Q, Liu J. Heat-driven liquid metal cooling device for the thermal management of a computer chip[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, 40(15): 4722-4729.
- [47] Li P P, Liu J. Self-driven electronic cooling based on thermosyphon effect of room temperature liquid metal[J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2011, 133(4): 041009.
- [48] Li P P, Liu J, Zhou Y X. Design of a self-driven liquid metal cooling device for heat dissipation of hot chips in a closed cabinet[J]. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2014, 6(1): 011009.
- [49] 罗曼丽, 刘静. 液态金属热虹吸散热系统管道尺寸效应研究[J]. *电子机械工程*, 2013, 29(4): 13-17.
- [50] Tang J B, Wang J J, Liu J, et al. A volatile fluid assist-

- ed thermo-pneumatic liquid metal energy harvester[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(2): 023903.
- [51] He Y H, You J, Dickey M D, et al. Controllable flow and manipulation of liquid metals[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023: 2309614.
- [52] Li F X, Kuang S L, Li X P, et al. Magnetically- and electrically-controllable functional liquid metal droplets [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(3): 1800694.
- [53] Liu C, Li D K, Huang J X, et al. High-performance magnetic and electric control of liquid metal droplets[J]. *Langmuir*, 2023, 39(21): 7495-7502.
- [54] Hu L, Wang H Z, Wang X F, et al. Magnetic liquid metals manipulated in the three-dimensional free space[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(8): 8685-8692.
- [55] Fang W Q, He Z Z, Liu J. Electro-hydrodynamic shooting phenomenon of liquid metal stream[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(13): 134104.
- [56] Tan S C, Zhou Y X, Wang L, et al. Electrically driven chip cooling device using hybrid coolants of liquid metal and aqueous solution[J]. *Science China Technological Sciences*, 2016, 59(2): 301-308.
- [57] Wang L, Liu J. Electromagnetic rotation of a liquid metal sphere or pool within a solution[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, 471(2178): 20150177.
- [58] Sheng L, Zhang J, Liu J. Diverse transformations of liquid metals between different morphologies[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(34): 6036-6042.
- [59] Syed N, Zavabeti A, Mohiuddin M, et al. Sonication-assisted synthesis of Gallium oxide suspensions featuring trap state absorption: Test of photochemistry[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(43): 1702295.
- [60] Tang S Y, Qiao R R, Yan S, et al. Microfluidic mass production of stabilized and stealthy liquid metal nanoparticles[J]. *Small*, 2018, 14(21): 1800118.
- [61] Zhao X, Tang J B, Liu J. Electrically switchable surface waves and bouncing droplets excited on a liquid metal bath[J]. *Physical Review Fluids*, 2018, 3(12): 124804.
- [62] Tang J M, Tang J B, Mayyas M, et al. Liquid-metal-enabled mechanical-energy-induced CO₂ conversion[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(1): 2105789.
- [63] Chechetka S A, Yu Y, Zhen X, et al. Light-driven liquid metal nanotransformers for biomedical theranostics [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 15432.
- [64] Tang X K, Tang S Y, Sivan V, et al. Photochemically induced motion of liquid metal marbles[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(17): 174104.
- [65] Wang D L, Gao C Y, Si T Y, et al. Near-infrared light propelled motion of needlelike liquid metal nanoswimmers[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 611: 125865.
- [66] Yang X H, Liu J. Liquid metal enabled combinatorial heat transfer science: Toward unconventional extreme cooling[J]. *Frontiers in Energy*, 2018, 12(2): 259-275.
- [67] 邓月光, 张曼曼, 姜毅. 复合式液态金属热管理技术研究进展[C]//中国材料大会. 厦门: 中国材料研究学会, 2021: 141-149.
- [68] Deng Y G, Liu J. Hybrid liquid metal-water cooling system for heat dissipation of high power density microdevices[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2010, 46(11): 1327-1334.
- [69] Mei S F, Deng Z S, Liu J. Hybrid mini/micro-channel heat sink using liquid metal and water as coolants[C]//International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition. San Francisco, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2015, 56895: V002T06A010.
- [70] Hao T T, Ma H B, Ma X H. Experimental investigation of oscillating heat pipe with hybrid fluids of liquid metal and water[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2019, 141(7): 071802.
- [71] Tuckerman D B, Pease R F W. High-performance heat sinking for VLSI[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1981, 2(5): 126-129.
- [72] Deng Y G, Liu J, Zhou Y X. Liquid metal based mini/micro channel cooling device[C]//International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels. Pohang, South Korea: American Society of Mechanical Engineers, 2009, 43499: 253-259.
- [73] Muhammad A, Selvakumar D, Wu J. Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in a liquid metal cooled mini-channel heat sink[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 150: 119265.
- [74] Zhang R, Hodes M, Lower N, et al. Water-based microchannel and galinstan-based minichannel cooling beyond 1 kW/cm² heat flux[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2015, 5(6): 762-770.
- [75] Xiang X, Yang J S, Fan A W, et al. A comparison be-

- tween cooling performances of water-based and gallium-based micro-channel heat sinks with the same dimensions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 137: 1–10.
- [76] Wu T, Wang L Z, Tang Y C, et al. Flow and heat transfer performances of liquid metal based microchannel heat sinks under high temperature conditions[J]. *Micro-machines*, 2022, 13(1): 95.
- [77] Chen Z W, Qian P, Huang Z Z, et al. Study on flow and heat transfer of liquid metal in a new top-slotted micro-channel heat sink[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2021, 621(1): 012054.
- [78] Chen Z W, Qian P, Huang Z Z, et al. Study on flow and heat transfer of liquid metal in the microchannel heat sink[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2023, 183: 107840.
- [79] He Z Z, Xue X, Liu J. Liquid metal alloy based vascular-like microchannel networks for the thermal management of electronics[C]//*Proceedings of ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Montreal, Canada: American Society of Mechanical Engineers, 2014: V08BT10A083.
- [80] Zhang M K, Zhang X D, Guo L N, et al. Flow and thermal modeling of liquid metal in expanded microchannel heat sink[J]. *Frontiers in Energy*, 2023, 17(6): 796–810.
- [81] Silverman I, Arenshtam A, Kijel D, et al. High heat flux accelerator targets cooling with liquid-metal jet impingement[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2005, 241(1/2/3/4): 1009–1013.
- [82] Silverman I, Yarin A L, Reznik S N, et al. High heat-flux accelerator targets: Cooling with liquid metal jet impingement[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, 49(17/18): 2782–2792.
- [83] Xiang X, Liu W, Fan A W. Comparison between the cooling performances of micro-jet impingement systems using liquid metal and water as coolants for high power electronics[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2022, 173: 107375.
- [84] Ma K Q, Liu J. Nano liquid-metal fluid as ultimate coolant[J]. *Physics Letters A*, 2007, 361(3): 252–256.
- [85] Zhou X M, Li X F, Cheng K Y, et al. Numerical study of heat transfer enhancement of nano liquid-metal fluid forced convection in circular tube[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2018, 140(8): 081901.
- [86] Khan Y, Sarowar M T, Mobarrat M, et al. Performance comparison of a microchannel heat sink using different nano-liquid metal fluid coolant: A numerical study[J]. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2022, 14(9): 091014.
- [87] Zhou X M, Jiang Y N, Li X F, et al. Numerical investigation of heat transfer enhancement and entropy generation of natural convection in a cavity containing nano liquid-metal fluid[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2019, 106: 46–54.
- [88] Zhou X M, Jiang Y Q, Wang Y, et al. Comprehensive heat transfer performance analysis of liquid metal based nanofluid laminar flow in circular tube[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 175: 105530.
- [89] Qi C, Wang G Q, Ma Y F, et al. Experimental research on stability and natural convection of TiO₂-water nanofluid in enclosures with different rotation angles[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2017, 12(1): 396.
- [90] Yang X H, Tan S C, Liu J. Thermal management of Li-ion battery with liquid metal[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 117: 577–585.
- [91] Ghoshal U, Grimm D, Ibrani S, et al. High-performance liquid metal cooling loops[C]//*Proceedings of Semiconductor Thermal Measurement and Management IEEE Twenty First Annual IEEE Symposium*, 2005. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 16–19.
- [92] Teglet T. Liquid metal cooling to revolutionize CPU cooling[EB/OL]. (2008-07-18) [2023-11-30]. <https://news.softpedia.com/news/Liquid-Metal-Cooling-to-Revolutionize-CPU-Cooling-90325.shtml>.
- [93] Hilbert Hagedoorn. Danamics LMX Superleggera review [EB/OL]. (2010-06-08) [2023-11-30]. <https://www.guru3d.com/review/danamics-lmx-superleggera-review/page-2/>.
- [94] Vetrovec J. Quasi-passive heat sink for high-power laser diodes[C]//*High-Power Diode Laser Technology and Applications VII*. San Jose, USA: SPIE, 2009, 7198: 104–113.
- [95] Vetrovec J, Litt A S, Copeland D A, et al. Liquid metal heat sink for high-power laser diodes[C]//*High-Power Diode Laser Technology and Applications XI*. San Francisco, USA: SPIE, 2013, 8605: 95–101.
- [96] Vetrovec J. High-performance heat sink for interfacing hybrid electric vehicles inverters to engine coolant loop [R]. Detroit, USA: SAE Technical Paper, 2011.

Research progress on cooling of electronic equipment based on liquid metal convection

CHANG Xiangting, DONG Wei, HAN Junjie, DONG Jinxi, LIU Zhihu, ZHAO Hang

Aeronautics Computing Technique Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710065, China

Abstract Benefiting from the excellent thermal conductivity and flow properties of liquid metal, liquid metal convection cooling offers a new solution to the high heat flux thermal management of electronic devices and equipment. In this paper, the heat transfer and flow characteristics of liquid metal convection were introduced. Compared to traditional fluids, the high thermal conductivity of liquid metals resulted in lower overall thermal resistance, and the heat transfer performance was better. The relevant research progress of driving technology, hybrid cooling technology and heat transfer enhancement technology based on liquid metal convection were summarized. The application status of liquid metal convection in the field of electronic equipment cooling was briefly described. Finally, the challenges and development prospects of liquid metal convection cooling were discussed.

Keywords liquid metal; convective heat transfer; electronic equipment; high heat flux ●



(责任编辑 傅雪)