

文章编号:0253-4339(2020)05-0001-12

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2020.05.001

平板微热管阵列的研究现状与进展

杨露露^{1,2} 徐洪波¹ 王惠惠^{3,4} 张海南¹ 田长青^{1,2}

(1 中国科学院理化技术研究所 热力过程节能技术北京市重点实验室 北京 100190; 2 中国科学院大学 北京 100049;
3 上海加冷松芝汽车空调股份有限公司 上海 201108; 4 上海新能源汽车空调工程技术研究中心 上海 201108)

摘要 平板微热管阵列作为一种新型高效传热元件,解决了单一微热管热通量和热运输能力有限的问题,提升了热管整体的可靠性,克服了传统圆热管在应用中出现的接触面积小、形状限制、接触热阻等局限。本文总结了平板微热管阵列的内部结构、吸液芯种类、制造和封装工艺,介绍了针对平板微热管阵列性能进行的实验、理论研究及建立的数学模型,阐述了平板微热管阵列在多个领域的应用现状,并提出了进一步的研究重点,为平板微热管阵列的研究提供参考。

关键词 平板微热管阵列;槽道;吸液芯结构;传热

中图分类号:TK172.4;TK124

文献标识码:A

Research Status and Progress of Flat Plate Micro Heat Pipe Array

Yang Lulu^{1,2} Xu Hongbo¹ Wang Huihui^{3,4} Zhang Hainan¹ Tian Changqing^{1,2}

(1. Beijing Key Laboratory of Thermal Science and Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, Beijing, 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China; 3. SONGZ Automobile Air Conditioning Co., Ltd., Shanghai, 201108, China; 4. Shanghai New Energy Automotive Air Conditioning Engineering Technology Research Center, Shanghai, 201108, China)

Abstract Flat plate micro heat pipe array (FPMHPA) is a new type of high-efficiency heat transfer element, and its introduction solves the problem of limited heat flux and heat transport capacity of a single micro heat pipe. Furthermore, it improves the overall reliability of the heat pipe. Given its superior flat plate, the FPMHPA overcomes the limitations of small contact area, shape, and contact thermal resistance of a conventional circular heat pipe in typical applications. In this study, the internal structure of the FPMHPA, type of wick, and manufacturing and packaging processes are summarized. Furthermore, theoretical research, mathematical model for performance, and experimental tests of the FPMHPA are introduced. Additionally, the application status of FPMHPA in many fields is expounded. Hence, this review provides focus areas for future research and reference for the development of the FPMHPA.

Keywords flat plate micro heat pipe array; groove; wick structure; heat transfer

热管是 20 世纪 60 年代发展起来的一种高效传热元件,利用工质在管内的蒸发-冷凝来传递热量。热管具有诸多优良特性,如高导热性能、优良的等温性能、热流方向可逆性、热二极管与热开关性能等^[1]。因此,热管被广泛应用于微电子器件散热、空调系统、太阳能利用、高效换热器等领域^[2]。微电子技术的发展促进了微型热管这一新兴技术的发展,在电子制冷的应用背景下,“微型热管”的概念由 G. P. Cotter^[3]在 1984 年首次提出。微型热管的发展经历了重力热管、毛细芯热管、微热管阵列、微槽通过蒸气

腔相互连通的平板热管,为各种小空间内高热流密度的散热提供了有力的支撑。

由于微热管具有微细尺度的特点,单一微热管的热运输能力有限,平板微热管阵列是为了适应高强度的传热而发展起来的一种新型传热元件,外形呈平板状,内部有数个互相独立的微通道形成微热管簇,能够解决常规圆热管在应用中出现的接触面积小、形状限制、接触热阻等问题,热管的热通量和热运输极限得到大幅提高,且每根微热管独立运行,即使单一微热管泄漏也不影响热管整体运行,极大地提升了热管

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB0105404)和国家自然科学基金(51706232)资助项目。(The project was supported by the National Key R & D Program of China (No. 2018YFB0105404) and the National Natural Science Foundation of China (No. 51706232).)

收稿日期:2019-12-04;修回日期:2020-01-28

整体的可靠性。

本文总结了平板微热管阵列在热管及毛细芯结构、制造工艺、传热性能影响因素以及应用方面的研究,为进一步的研究提供方向。

1 平板微热管阵列的结构及制造工艺

1992 年, G. P. Peterson^[4]首次对硅基微型热管阵列进行了综述性介绍,引起了微热管阵列的研究热潮。对微热管阵列结构及制造工艺的研究主要集中在微槽加工、吸液芯结构、封装技术等^[5]。

1993 年, G. P. Peterson 等^[6]分别使用微自动化硅切片锯和各项异性蚀刻技术加工了两种硅微热管阵列,槽道截面形状分别为矩形、V 形,使用紫外线结合技术将透明的耐热玻璃盖板连接到每个硅晶片的顶部表面,形成微热管阵列。随后, A. K. Mallik 等^[7]通过在硅晶片的矩形槽道上蒸气沉积金属层形成横截面为三角形的微热管阵列,并分别制作了包含 34 根微热管阵列和 66 根微热管阵列的大小相同的硅晶片,通过实验与同样大小纯硅片性能进行对比,结果表明,集成 34 根微热管阵列的硅晶片的温差和温度梯度分别下降了 24.4%、27.4%,有效导热系数提高了 41.7%;集成 66 根微热管阵列的硅晶片的温差和温度梯度分别下降了 29.0%、41.7%,有效导热系数提高了 47.1%。

在普通微热管阵列中加入尺寸较小的动脉热管,利用微热管与动脉管之间的界面力之差驱动冷凝液的回流,可以有效抑制干涸现象的发生。S. Launay 等^[8-9]采用各向异性化学蚀刻法及硅晶片键合技术制作了一种带有动脉管的三角形槽道微热管阵列,结构如图 1(a)所示,通过增加液流的横截面积来减小冷凝段与蒸发段之间的压降,并通过实验验证了带有动脉管的微热管阵列传热性能更好。康健^[10]采用光刻、湿法刻蚀、阳极键合的工艺制造了具有相近尺寸的传统微热管阵列和动脉管加强型微热管阵列,动脉管加强型微热管阵列结构如图 1(b)所示。对比实验结果显示,动脉管加强型微热管阵列使微热管的有效工作温度范围增大 100%,即由 3.4 °C 扩展至 6.8 °C。

自 1984 年微热管发展起,沟槽型微热管的横截面多为矩形或三角形,这两种结构沟槽毛细度低,限制了传热极限。S. Kang 等^[11]利用体微加工和共晶键合技术制作了硅基星形槽和菱形槽微热管,结构如图 2 所示,星形槽和菱形槽中锐角和微间隙数量的增加提高了热管的毛细性能,增强了传热能力。杨旸^[12]利用激光制备出具有复合沟槽吸液芯结构的平板微热管,激光加工后生成的微纳球状物冷却凝固后

形成的熔凝物堆积在主沟槽间形成次沟槽,为微热管工质液体的回流提供额外的毛细压力。针对微热管的强化传热,黄光汉^[13]提出了多尺度丝网孔-微通道复合毛细芯,该复合芯在微米级丝网表面制备纳米多孔结构,与微通道复合,丝网孔结构和纳米表面能改善浸润性和增加气化核心数目,有效强化微通道的表面传热系数。

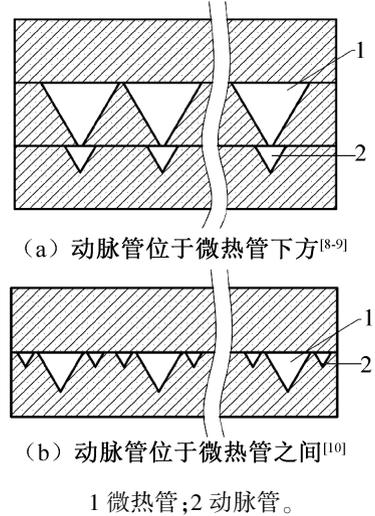


图 1 带有动脉管的硅基微热管阵列截面

Fig.1 Cross section of micro heat pipe array with arteries fabricated in silicon wafers

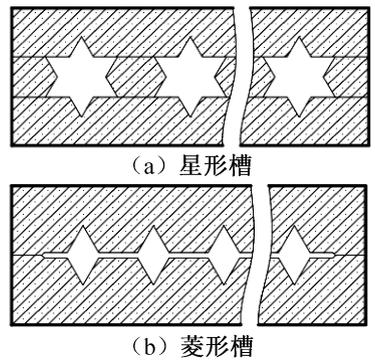


图 2 星形槽/菱形槽微热管阵列截面^[11]

Fig.2 Cross section of micro heat pipe array with star/rhombus grooves^[11]

自然界中的植物,尤其处于高温干旱环境中的植物,也面临着散热问题,经过亿万年的自然选择与进化,植物形成的叶脉是非常具有参考价值的散热结构。将该结构应用于微热管阵列中,对提高微热管传热传质性能具有重要意义,目前该种仿生结构多用于蒸发端和冷凝端分离的环路热管中。胡伟强^[14]采用优化的单层网络树状流道,设计了带气液分离腔的树状微通道热管蒸发器,相比并行通道蒸发器的热管,仿生微通道热管抗振荡性能更好。宋本哲^[15]研究了 3 种异形微通道环路热管的热性能,结果表明,树状

仿生微通道热管性能优于平行微通道热管及自相似分形微通道热管。Liu Yongtao 等^[16]模仿植物的生理蒸腾,提出了一种仿生蒸腾热管,应用于 LED 能有效降低结温,凭借其较高的散热效率和系统优点还可应用于军事、航空等领域。

近年来,越来越多的研究关注金属材料微热管阵列的结构及制造。唐琼辉等^[17]研究了一种零切角曲面的微热管,平行焊接在紫铜板间的铜丝形成一簇平行排布的微热管,如图 3 所示,微热管通道截面由两条半圆形曲线和两条直线组成。赵耀华等^[18]研制了带有微槽群结构的平板微热管阵列,结构如图 4 所示,将数个同时形成的彼此完全独立的带有微槽结构的微细热管组合在一起,各微细热管间相互不连通。

揭志伟^[19]提出了一种新型蒸气腔阵列式铝制均热板,相比传统型均热板整个腔室抽真空、灌注的形式,该新型铝制均热板采用压扁型烧结式微热管阵列作为蒸气腔,从结构上解决了传统均热板制造工艺复杂、成品率低的问题。

热管内部结构的优化能够提升热管自身的传热能力,而表面涂层作为热管外部强化传热的方式同样能够增强热管传热性能^[20]。对此,曾社铨^[21]设计了一种应用于太阳能集热器的新型热管集热片,集热片下表面为平板型,上表面为波纹型,表面覆盖太阳光谱选择性吸收涂层,中间均匀分布 6 根重力热管,重力热管结构采用一体挤压成形,相比于焊接成型,该结构更有利于热量传递给热管。

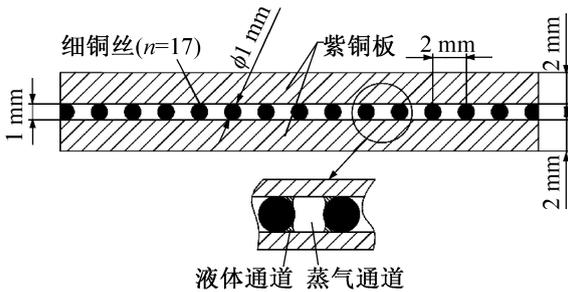


图 3 零切角曲面微热管结构^[17]

Fig.3 Structure of curved surface micro heat pipe with zero tangent angle^[17]

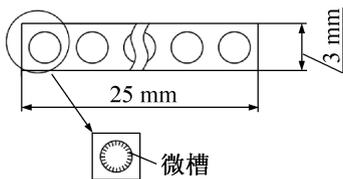


图 4 微通道阵列平板热管断面结构^[18]

Fig.4 Cross section structure of flat micro heat pipe array^[18]

若采用挤压成形制备超薄型铝管材,挤压模具易损坏,且由于内腔高度很小,对吸液芯的设计也提出了很高的要求。传统的槽道型吸液芯由于太薄而无法在挤压过程中形成,传统的多孔芯也不适用,因为铝粉在粉末表面由于氧化铝膜的惰性传质而无法烧结形成多孔芯。为解决上述问题,Zhang Shiwei 等^[22]研究了一种厚 1.5 mm 的超薄铝平板热管,含有多个独立的微腔,每个微腔作为独立的微热管工作,采用两级压缩工艺将铝管压扁至理想厚度,并对比了采用烧结铝纤维吸液芯与铝纤维网吸液芯的热管性能。陈文军^[23]提出了一种基于预成型多齿犁削工艺的超薄铝平板热管加工工艺。该工艺中,超薄铝平板热管的型材通过预成型设计成鼓形形状,扩展后的椭圆形内腔通过对应的鼓形多齿犁削刀具加工出阵列微沟槽,随后经过拉伸变形、压薄平整等工艺完成超薄铝平板热管的制备。通过预成型多齿犁削工艺所制备的超薄铝平板热管均温性能好,传热性能比无沟槽结构的铝平板热管性能得到较大提升,总热阻由 0.21 K/W 降至 0.056 K/W,减小了 73%。配合复合铝编织带吸液芯的超薄铝平板热管能够实现无重力辅助下的低功率运行。

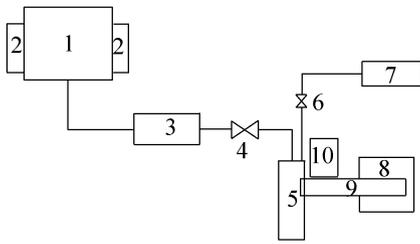
微热管阵列的封装过程,主要包括抽真空、充液和密封,目前常用的方法有热排法和抽真空法。热排法是将工质充入空腔中,然后进行加热排出空腔内的气体从而形成真空,但该方法无法形成高真空,且无法判断形成的真空度大小。而抽真空法是将空腔内的气体抽出形成一定的真空度,再将工质充注到腔体内,相比热排法更适合微小热管,充注完成后,为防止外界空气进入热管内降低其真空度,应尽快对热管进行二次除气以清除热管内的不凝气体^[13,24]。陈文军^[23]设计了与超薄铝平板热管相匹配的灌注腔体,通过转接头将抽真空系统及灌注系统和灌注腔体连接,完成抽真空与工质灌装过程。李卫东^[25]发明了一种独立并行多通道平板热管工质灌装系统,如图 5 所示。其中,平板热管的管口端置于恒温公共腔体内,抽真空后充入平板热管的工质为饱和蒸气,之后利用变温系统使工质在热管内部完成气液相态转变,随后进行封口完成热管封装过程。

2 传热性能研究

2.1 理论研究

微热管将热量从热源传递至冷源需要经过复杂的热量传递过程,这些热传递过程中的热阻构成了微热管复杂的热阻网络,微热管的主要热阻包括:热源/冷源与微热管外表面的传热热阻、蒸发段/冷凝段径

超薄铝平板热管制造在工艺上存在一定的困难,



1 工质罐;2 加热器;3 定量系统;4 控制阀 1;5 恒温公共腔体;
6 控制阀 2;7 真空系统;8 变温系统;9 平板热管;10 封合系统。

图 5 一种独立并行多通道平板热管工质灌装系统^[25]

Fig.5 A working fluid filling system of independent parallel multi-channel flat plate heat pipe^[25]

向传热热阻、气-液交界面蒸发/冷凝换热热阻、蒸气轴向流动传热热阻、管壳轴向导热热阻等^[26],通过建立热管的热阻网络模型和热传输极限模型可以实现对热管进行多目标优化设计^[27]。

研究认为,管壳轴向导热热阻相对较大,可看作绝热,热管内部最大的热阻在热管的蒸发段和冷凝段的液膜及蒸气中^[28]。对于一般微热管,工质液相和气相循环的主要动力是液体和毛细材料结合产生的毛细力,蒸发段内毛细结构表面形成的弯月面曲率半径大小直接影响驱动工质循环的毛细驱动力。因此,建立薄液膜区和宏观半月板区域的传热传质模型,对降低微热管的热阻,提升微热管性能十分重要。

Xu Xianfan 等^[29]对 V 形微槽内的液体流动行为进行了分析和实验研究,提出一种用于预测微槽表面薄膜蒸发传热特性的分析模型,忽略了固有半月板中的传热,假设在液体薄膜上的热传导是传热的主要机制。该模型假设沿 V 形槽道流动的液体主要是由半月板向槽顶后退引起的毛细压差驱动,沿槽壁向上的流动主要是由分离压差驱动。在此基础上,J. M. Ha 等^[30]对 V 形微槽的轴向固有半月板变化进行了分析研究。轴向干涸位置由输入热通量、系统的热物理特性和沟槽的几何参数决定。此外,还证明了 Bond 数和毛细管数 Ca 的重要性,并进行了实验验证,虽然结果与实验数据吻合较好,但 J. M. Ha 等认为要充分了解沟槽表面的蒸发薄膜区,优化沟槽设计,还需要进一步研究。另一研究中,J. M. Ha 等^[31]建立了 V 形槽壁蒸发薄膜传热特性的理论模型。对于一组给定的参数,如槽几何参数、工作在一定系统蒸气压力下的流体性质、沿着板热通量变化,该模型可以用来确定轴向变化的平均传热系数和有效蒸发长度并测量蒸气和槽壁的温度。

对于微槽内的流动传热,G. P. Peterson 等^[32]对微槽道内的毛细流动进行了分析和实验研究,基于薄

液膜理论建立了数学模型,能够准确计算液膜沿轴向的曲率半径变化和热管达到传热极限时发生干涸的位置。同时认为传统的解析解模型计算结果高估了热管最大传热能力,而二人建立的半经验模型的计算结果与实验数据吻合良好,能准确预测热管的工作状态。I. S. Park 等^[33]建立了一种竖直槽管内外壁耦合冷凝/蒸发液膜流动的三维传热分析方法,考虑了两侧的蒸气性质,用简单的有限体积法求解了温度场和速度场的全椭圆 Navier-Stokes 方程和能量方程。分析了沟槽表面强化传热的机理,认为槽峰区的液膜非常薄,冷凝多发生在沟槽的裸露区。E. G. Jung 等^[34-35]对微热管的传热传质进行了数值分析,将质量、能量和动量方程应用于稳态下的气相和液相建立数值模型,分别得到了蒸气和液体在微热管内流动的工质流量、压力分布和温度分布的变化趋势,并通过推广 Young-Laplace 方程得到了气液界面的形状。

许多学者对理论模型应用于微热管阵列的性能预测和优化设计进行了研究,如表 1 所示。S. Launay 等^[36-37]基于流体动力学和传热学相关模型建立数值模型分别对硅/水、铜/水微热管阵列的温度场、传热性能等进行了研究。Wang Yaxiong 等^[38]建立了结合热传导和辐射效应的数值模型,用以预测微热管阵列式散热器在空间环境中的传热性能和温度分布。V. Sartre 等^[39]提出了一种用于预测微热管阵列传热的三维稳态模型。该模型耦合了 3 种模型,包括薄液膜区传热控制方程、二维壁面热传导问题和纵向毛细管两相流动问题。并利用该模型对铝/氨三角形微热管阵列进行了计算。王宏燕等^[2]将槽表面的液膜分成 3 个区,分析了各区中液膜流动与传热过程,认为热量传递过程主要分布于液膜较薄的槽峰和过渡区域,而槽谷主要为冷凝液的输运区域。建立分段微元模型对微热管阵列冷凝段的流动和传热过程进行分析,并利用 Matlab 计算结果拟合得到冷凝段内部饱和温度的表达式。

Young-Laplace 方程表示液面曲率与液体压力之间的关系,是由热力学基本方程得到的存在界面时的热力学平衡判据。A. B. Duncan 等^[40]以 Young-Laplace 方程为基础,建立了用于计算微热管阵列毛细极限和最佳充液率的理论模型。为验证该理论模型,采用各向异性蚀刻工艺制作了一个有 55 个三角形通道的硅微热管阵列,对比分析了微热管阵列传热性能的实验结果与理论模型计算结果,结果表明,虽然该模型正确地预测了与充液率变化相关的趋势,但干涸极限的预测结果与实验结果存在显著差异。

表 1 数值模拟在微热管阵列中的应用

Tab.1 Application of numerical simulation in micro heat pipe array

作者	对象	依据	目标	结论
S. Launay 等 ^[36]	硅/水三角形通道微热管阵列	流体动力学流动方程、冷凝和蒸发液膜的传热方程	预测微热管阵列中流体流动和传热。	蒸发段热量集中在薄液膜区;三角形微热管阵列的传热速率受角部液体压降限制。
S. Launay 等 ^[37]	铜/水平板微热管阵列	水动力模型、传热模型	预测流体轴向分布、温度场、毛细极限下的最大热流密度。	理论模型数据与实验数据吻合良好。
Wang Yaxiong 等 ^[38]	铝/丙酮烧结铝芯平板微热管阵列	传热和辐射效应	模拟热管作为传热肋片的传热性能和温度分布。	数值模型预测的温差在实验实测值的 6.80% 以内。
V. Sartre 等 ^[39]	铝/氨三角形通道微热管阵列	薄液膜区传热控制方程、二维壁面热传导、纵向毛细管两相流动	分析热管界面效应。	蒸发段输入的热量主要通过薄液膜区域传递。
王宏燕等 ^[2]	铝/丙酮微槽型平板微热管阵列	质量、动量、能量方程	计算冷凝液膜的厚度,温度场分布及质量流量。	与实验值吻合良好;拟合得到冷凝段内部饱和温度的表达式。
A. B. Duncan 等 ^[40]	硅/甲醇三角形通道硅微热管阵列	Young-Laplace 方程	计算微热管阵列毛细极限和最佳充液率。	充液率预测准确,干涸极限预测与实验结果有差异。

微/纳米阵列或碳纳米管阵列制成的新型吸液芯具有超高毛细压力、尺寸紧凑的特点,但与传统吸液芯相比渗透率较低。Chen Qiang 等^[41]利用高效热管模拟工具 LVHPM 对热管传热的稳态和瞬态过程进行了数值求解。从质量流量、温度和压力的影响等方面研究了不同吸液芯渗透率下热管的性能,结果表明稳态温度分布与渗透率关系不大,而瞬态温度对渗透率的依赖性较强,在渗透率较小时响应较快。

理论研究的范围,不止局限于微热管内部微观传热传质的研究,将微热管阵列应用于换热器中,对换热器进行数值研究也能为优化换热器设计、提高换热器性能提供理论依据。Diao Y. H. 等^[42]采用有限体积法的焓-多孔介质法,对一种新型的基于平板微热管阵列和纵向矩形翅片的潜热储能装置建立传热和辐射效应相结合的数值模型,分析了蓄热槽内部不同方向的温度分布和相变过程,以及翅片高度、间距和厚度对储热功率和蓄热能力的影响。

除了理论推导,应用商业化的 CFD 软件也是数值研究的有效方法,且结果更加直观、明了。刘昂等^[43]采用 Fluent 软件对微热管阵列的传热性能进行了数值模拟,结果表明,微热管阵列的最佳充液率在 20%~30% 之间。杨厚乐^[44]采用 VOF 模型和标准 $k-\epsilon$ 模型进行 CFD 模拟计算,分析得出微热管的最佳充液率为 30%。

针对微热管阵列的理论研究多为数学建模,分析工质在微热管内,尤其带有微槽结构的微热管内的流动和传热的规律,考虑气液界面的传热传质影响,对热管内工质质量和温度分布计算预测,并辅以实验验证,为进一步研究微热管流动传热机理、提高微热管性能提供了有力依据。相关理论研究还表明^[34,37],在微热管实际应用中,较高的输入负荷也可减小微热管热阻,使其发挥较高性能。

2.2 实验研究

理论研究多从微观传热的角度分析热管传热规律,为发挥热管的优良特性,需要从多角度对影响热管传热性能的因素进行分析,实验是十分重要的研究方式。

鲁祥友等^[45]设计了一种微阵列平板式蒸发器回路热管,该回路热管的平板式蒸发器内有多组独立的蒸气微通道,可用于大功率 LED 散热。并实验研究了热负荷、倾角、加热方式等对热管性能的影响,结果表明,热管的热阻在 0.19~3.10 K/W 之间,热负荷变化时,蒸发器的均温性很好,温差均在 1℃ 以内。苏俊林等^[46]研发了一种适合于集成电子器件散热的微小矩形多槽道平板热管,并实验分析了工作温度、充液率、工质和倾角等因素对该热管传热性能的影响,推导出热管的理论毛细极限。唐琼辉等^[17]实验研究了充液率、工质、倾角对零切角曲面热管传热性

能的影响。Wang Gang 等^[47]实验研究了充液率、倾角和工质种类对新型平板微热管阵列性能的影响,发现充液率对热管性能影响显著;倾角从 0° 增至 20 时,热管性能显著提高,继续增加倾角热管性能无明显改变;甲醇作为工质时热管性能最好。

赵耀华等^[18]对充装不同工质、不同截面结构、不同充液率的微热管阵列进行性能对比,结果表明,在以甲醇、乙醇、丙酮、R141b 为工质时该平板微热管阵列的散热效果均良好,内部有微槽群结构的热管换热性能和最大热负荷均有很大提高。以甲醇为工质的不同充液率实验表明,平板微热管阵列的热通量随充液率的不同而有所变化,最佳充液率为 30%。

B. Badran 等^[48]采用各向异性微机械加工工艺加工了两个硅基微热管阵列,分别以水和甲醇为工质进行实验。结果表明,热管在充液率为 5% 时性能最佳,在较高的输入功率下,以甲醇和水为工质的热管有效导热系数分别提高了 6% 和 11%,与理论模型计算的 193% 有较大差距。S. Launay 等^[8]对两种硅微热管阵列进行了实验研究。在硅晶圆片上集成了 55 个三角形微热管,使用乙醇作为工质,在 24% 的充液率下,其导热系数比空管提高了约 7%。蒋朝勇^[49]研究了以水、丙酮为工质的微型平板热管,结果显示两种工质的热管最佳充液率均为 25%。J. S. Chen 等^[50]实验研究了充液率对平板微热管阵列性能的影响,得出热管的最佳充液率为 25%,相应的热管最大有效导热系数为 3 150 W/(m·K)。且真空度和密封对热管性能影响很大,充液率为 25% 时,未抽真空和一端开口的热管最大有效导热系数分别仅为 200~306 W/(m·K) 和 164 W/(m·K)。

Huang Guanghan 等^[51]研究了微热管阵列分别充装丙酮、环戊烷和正己烷时的性能,认为丙酮作为工质的热管在启动时间、温度均匀性、热阻等方面性能更优越,并探究了倾角以及工质在蒸发段和绝热段体积分对热管性能的影响。研究发现,热管的最佳倾角不是恒定的,而是受工质种类和热负荷的影响,且与体积分密切相关,最佳体积分在 74%±7%。

李颖^[52]制作出与水平面有一定角度的 U 型平板微热管阵列,研究了内部结构、弯折角度、充液率、工质对平板微热管阵列传热性能的影响,及加热温度、弯折角度、充液率、工质对平板微热管阵列启动性能的影响。Bai Pengfei 等^[53]研究了槽道数量和槽道纵横比对微槽热管传热性能的影响,认为热管的最佳槽道数小于 60,最佳纵横比接近 1.5。

对于微热管而言,不同工质的最佳充注率有所不同,充装适量的工质能使其温度更加均匀,传热速率

和能力得到提升。热管内部结构、倾角、工质种类等条件都会影响热管的性能发挥。且对于微热管阵列,实验过程中还需要考虑尺度效应的影响。

从大量的研究中可以看出,对于平板微热管阵列传热性能的研究,无论是理论计算还是实验验证,或是局限于阵列中单根微热管性能预测,或是考虑充液率、工质等因素对平板微热管阵列整体性能的影响。值得注意的是,由于微热管阵列中单根微热管独立运行,互不影响,在生产过程中,由于工艺或其他不可避免的因素,会造成同一平板热管中各微热管密封性能、工质充注量等产生差异,从而使生产出的平板微热管传热性能不能实现与理论完全一致。对此,应尽可能改善生产工艺,改进工质灌装与密封技术,黄光汉^[13]提出一种针对多通道热管的均匀灌装方法,利用连通器原理将工质均匀分配至每个微通道内,实现各微通道内灌注量相等。平板微热管阵列各微通道相互独立,虽然生产过程复杂,但正因如此,独立工作的微通道提高了整个平板热管的可靠性,单根微热管的漏气或不凝气不会影响到其他热管。然而,整个平板微热管阵列的传热性能不是简单地各单根微热管性能的叠加求和,王宏燕等^[2]的研究指出热管的微槽高度和宽度增加,单根微热管的传热量会随之增加,但微槽道宽度的增加会使整个平板微槽道热管阵列的传热量下降。

3 应用研究

LED 的功率随着照明强度的增大而增大,但仅有约 20% 的能量用于发光,其余的能量均以热量的形式损失了^[54]。若芯片中累积的热量不及时散出,会导致结温过高,加速芯片老化,减少使用寿命。平板微热管阵列因其良好的传热特性和易与芯片结合的形状被广泛应用于 LED 散热领域。基于鲁祥友等^[45]提出的平板微热管阵列,王宏燕等^[55-56]提出一种可以有效解决大功率 LED 散热问题的散热装置,能够有效降低 LED 结温,满足散热需求。梁峰^[57]将赵耀华等^[18]提出的平板微热管阵列与传统的铝质翅片散热器结合设计出新型散热器,对大功率 LED 灯珠阵列热流密度较大的中间区域的肋片加宽加高并在肋片中间嵌入平板微热管阵列,利用遗传算法优化后的散热器可以保证路灯工作温度低于 70 °C。

锂离子电池在充放电过程中由于化学、电化学反应会累积大量热量,从而导致电池温度上升影响电池使用寿命和放电效率;而当环境温度过低,也会影响电池效率。叶欣等^[58-60]的研究表明平板微热管阵列应用于锂电池组,可有效解决电池组的散热、加热和

均温问题。Mo Xiaobao 等^[61]利用微热管阵列构建了大容量软包锂电池的热管理系统并进行对比研究发现,电池以 3 C 倍率充放电时,与纯风冷和未充工质空热管冷却相比,应用充有液体工质的热管冷却,散热效果最好,电池模块的最高温度和最大温差分别为 43.7 °C 和 4.9 °C,模块中心的电池单体温升仅为 18.7 °C。

将集/蓄热器应用于太阳能空气加热器,可以减少热损失,提高热效率。但若集热器吸收的太阳能不能迅速传递至蓄热介质中,则会导致蓄热效率低下。为解决这一难题,Wang Zeyu 等^[62]将平板微热管阵列应用于集蓄式太阳能空气加热器并进行了实验研究,验证了该装置蓄热和空气加热的可行性。之后,Wang Zeyu 等^[63-65]又采用两个微热管阵列搭接组成平板微热管组件作为传热单元来收集、存储和提取热能,并将其应用于太阳能空气、水加热器,均表现出优良的性能。

对于微热管阵列式太阳能空气集热-蓄热系统的研究,王腾月等^[66]以平板微热管阵列集热、蓄热核心传热元件,将带有翅片的平板微热管阵列插入内壁有吸热涂层的真空管中作为集热单元,采用月桂酸作为相变蓄热材料,设计了一种由 20 个集热单元及蓄热装置组成的太阳能空气集热-蓄热装置。随后,Wang Tengyue 等^[67]对集热器的结构进行了改进,改进后的集热器由 10 个集热单元组成,选择性吸收膜和翅片利用导热硅胶粘贴在微热管阵列表面,集热器热效率最高可达 85.2%。此外,Deng Yuechao 等^[68-69]提出了一种新型微热管阵列平板太阳能集热器,集热器的性能参数高于国家标准技术要求值。并在北京进行了为期一年的性能实验,实验结果表明,集热器的日、月、季性能均显示其在北京地区有良好的应用前景。

在光伏光热领域,平板微热管阵列也有广泛的应用。甘焜煜^[70]将微热管阵列应用于传统的光伏幕墙,利用微热管阵列优良的传热性能将光伏幕墙组件散发的热量收集起来传递至水槽中,既实现对太阳能的充分利用,又能避免幕墙温度过高,进而提高发电效率。为解决高倍聚光光伏(high concentrated photovoltaic, HCPV)模组的散热和温度均匀性问题,汪婧等^[71]提出了一种平板微热管阵列新型散热器,能使 HCPV 模组得到更有效的散热,同时背板温度更加均匀,比常规模组的输出功率提高约 22%。Chen Haiping 等^[72-73]也指出,将平板微热管阵列与光伏电池相结合可以提高晶硅电池表面温度分布的均匀性,进而提高光伏/光热系统的电学效率。Li Guiqiang 等^[74]研究认为与微通道热管相结合的太阳能聚光热电联

产系统具有良好的综合性能,投入使用后可显著降低热电联产成本。

此外,平板微热管阵列作为核心传热元件在机车牵引变流器散热^[75-76]、芯片冷却^[77]中的应用克服了传统圆热管接触面积小、安装复杂等缺点,证实了其相对于传统型换热器优越的传热性能。在改善建筑室内环境方面,平板微热管阵列换热器具有热响应速度快、换热效率高、压力损失小的优点^[78-79],在住宅建筑的能量回收中表现出巨大的节能潜力^[80],将平板微热管阵列换热器应用于互联网数据中心余热回收,可有效降低新风冷负荷、改善机房热环境^[81]。而将平板微热管阵列作为核心换热元件构建的辐射供冷^[82]、供暖系统^[83],换热更高效、热损失小,且地板辐射采暖系统均温性好,室内环境热舒适性较高。

4 总结与展望

平板微热管阵列以较小的体积、较大的相变换热面积、高承压能力、超强的散热能力展现出传统热管难以比拟的优异性能。近年来,平板微热管阵列的应用领域也逐渐扩大。但相对于成熟的传统热管的研究体系,平板微热管阵列的研究时间尚短,缺乏系统性的理论研究,而且在制造工艺上没有统一的标准可循。结合平板微热管阵列的研究现状,可将以下几个方面作为研究重点:

- 1) 进一步优化和创新平板微热管阵列的内部结构和吸液芯结构。目前市场上应用的主流平板微热管阵列结构较为单一,多采用槽道型通道,且由于铝材料的烧结难度太大,对烧结型吸液芯、复合吸液芯的研究应用较少。
- 2) 完善平板微热管阵列的制造工艺路线,创新针对多通道微热管的封装方法,提升热管整体性能,提高成品率。
- 3) 加强有关数值模型的研究,形成更加完善的平板微热管理论研究体系,提高模型精度,针对整个热管内工质流动和传热传质建立完整的三维模型。
- 4) 充液率、弯折角度等对弯折平板微热管阵列的性能影响研究还需要进一步的定量研究。
- 5) 深入对平板微热管阵列在能量转换领域的应用研究。

参考文献

- [1] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 331-335. (YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education

- Press, 2006:331-335.)
- [2] 王宏燕, 赵耀华. 平板微热管阵列垂直传热的数值分析[J]. 化工学报, 2014, 65(2):508-515. (WANG Hongyan, ZHAO Yaohua. Numerical investigation on heat transfer of vertical micro-heat pipe arrays[J]. CIESC Journal, 2014, 65(2): 508-515.)
- [3] COTTER G P. Principles and prospects for micro heat pipe [C]//Proceeding of the 5th International Heat Pipe Conference. Tsukuba, 1984:328-335.
- [4] PETERSON G P. Investigation of micro heat pipes fabricated as an integral part of silicon wafers[C]//Proceeding of the 8th International Heat Pipe Conference. Beijing, 1992: 385-395.
- [5] 万意, 闫珂, 董顺, 等. 微型平板热管技术研究综述[J]. 电子机械工程, 2015, 31(5):5-10,14. (WAN Yi, YAN Ke, DONG Shun, et al. Review on flat micro-heat pipe technology [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2015, 31(5):5-10,14.)
- [6] PETERSON G P, DUNCAN A B, WEICHOOLD M H. Experimental investigation of micro heat pipes fabricated in silicon wafers [J]. Journal of Heat Transfer-Transactions ASME, 1993, 115(3):751-756.
- [7] MALLIK A K, PETERSON G P. Steady-state investigation of vapor deposited micro heat pipe arrays[J]. Journal of Electronic Packaging, 1995, 117(1):75-81.
- [8] LAUNAY S, SARTRE V, LALLEMAND M. Experimental study on silicon micro-heat pipe arrays[J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24(2/3):233-243.
- [9] LE BERRE M, LAUNAY S, SARTRE V, et al. Fabrication and experimental investigation of silicon micro heat pipes for cooling electronics[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2003, 13(3):436-441.
- [10] 康健. 基于硅基微热管的毛细驱动与相变传热研究[D]. 杭州:浙江大学, 2012. (KANG Jian. Research on capillary driving and latent heat transfer on silicon-based micro heat pipe [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.)
- [11] KANG S, HUANG D. Fabrication of star grooves and rhombus grooves micro heat pipe[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2002, 12(5):525-531.
- [12] 杨旸. 具有复合沟槽毛细结构的微热管激光刻蚀工艺与传热性能研究[D]. 广州:广东工业大学, 2018. (YANG Yang. Research on laser etching process and heat transfer performance of micro heat pipe with composite grooves capillary structure[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.)
- [13] 黄光汉. 微通道强化传热传质结构制造及性能研究[D]. 广州:华南理工大学, 2018. (HUANG Guanghan. The fabrication and performance study of enhanced heat and mass transfer structure on micro channel[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.)
- [14] 胡伟强. 带气液分离腔树状分型微通道热管性能研究[D]. 南昌:南昌大学, 2018. (HU Weiqiang. Operating performance of tree-like fractal heat pipes with gas-liquid separation chamber[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.)
- [15] 宋本哲. 三种异形微通道环路热管的热性能分析[D]. 南昌:南昌大学, 2019. (SONG Benzhe. Thermal performance analysis of three shaped microchannel loop heat pipes [D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.)
- [16] LIU Yongtao, DONG Kai, DONG Tao, et al. Thermal simulation of bionic transpiration heat pipe system for high-power LED[C]//Proceedings of the 2014 16th International Conference on Mechatronics. Brno: Brno University of Technology, 2014:688-692.
- [17] 唐琼辉, 徐进良, 李银惠, 等. 一种新型微热管传热性能的实验研究[J]. 热能动力工程, 2006, 21(4):350-354,434. (TANG Qionghui, XU Jinliang, LI Yinhui, et al. An experimental study of the heat transfer performance of innovative micro heat pipes[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2006, 21(4):350-354, 434.)
- [18] 赵耀华, 王宏燕, 刁彦华, 等. 平板微热管阵列及其传热特性[J]. 化工学报, 2011, 62(2):336-343. (ZHAO Yaohua, WANG Hongyan, DIAO Yanhua, et al. Heat transfer characteristics of flat micro-heat pipe array[J]. CIESC Journal, 2011, 62(2):336-343.)
- [19] 揭志伟. 蒸气腔阵列式铝制均热板的结构设计和传热性能分析[D]. 广州:华南理工大学, 2013. (JIE Zhiwei. Study on structural design and heat transfer performance analysis of aluminum vapor chamber with array chambers [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.)
- [20] BUFFONE C, SEFIANE K, BUFFONE L, et al. Heat transfer enhancement in heat pipe applications using surface coating [J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 2005, 12(1): 21-35.
- [21] 曾社铨. 新型热管平板太阳能集热器及其数值研究[D]. 广州:华南理工大学, 2014. (ZENG Shequan. CFD simulation on flat plate solar collector with novel heat collecting components[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.)
- [22] ZHANG Shiwei, CHEN Jiuling, SUN Yalong, et al. Experimental study on the thermal performance of a novel ultra-thin aluminum flat heat pipe [J]. Renewable Energy, 2019, 135:1133-1143.
- [23] 陈文军. 基于预成型的超薄铝平板热管多齿犁削机理及性能分析[D]. 广州:华南理工大学, 2018. (CHEN

- Wenjun. Multi-tooth ploughing mechanism and performance analysis of ultra-thin aluminum flat heat pipe based on preformed process[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.)
- [24] 黄青松. 内凹槽多孔复合吸液芯平板热管制造及散热性能研究[D]. 厦门:厦门大学, 2018. (HUANG Qingsong. Fabrication and heat transfer performance of vapor chambers with reentrant porous composite wick[D]. Xiamen: Xiamen University, 2018.)
- [25] 李卫东. 一种独立并行多通道平板热管工质灌装系统及其灌装方法: CN201710384223.6[P]. 2018-12-07. (LI Weidong. An independent parallel multi-channel flat heat pipe working substance filling system and method for filling: CN201710384223.6[P]. 2018-12-07.)
- [26] 吴亚平. 沟槽式复合结构微热管设计及传热性能研究[D]. 广州:广东工业大学, 2017. (WU Yaping. The groove composite structure design of micro-heat pipe and heat transfer performance study[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2017.)
- [27] 黄晓明, 施坤, 杨婧, 等. 基于遗传算法的热管多目优化设计[J]. 制冷学报, 2011, 32(2):14-18. (HUANG Xiaoming, SHI Kun, YANG Jing, et al. Optimal design of heat pipe based on the multi-object genetic algorithm[J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(2):14-18.)
- [28] 范春利, 曲伟, 孙丰瑞, 等. 微小型热管的研究现状与进展[J]. 电子器件, 2004, 27(1):211-216. (FAN Chunli, QU wei, SUN Fengrui, et al. Status and recent progress of research on micro/miniature heat pipes[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2004, 27(1):211-216.)
- [29] XU Xianfan, CAREY V P. Film evaporation from a micro-grooved surface-an approximate heat transfer model and its comparison with experimental data[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1990, 4(4):512-520.
- [30] HA J M, PETERSON G P. Analytical prediction of the axial dryout point for evaporating liquids in triangular micro-grooves[J]. Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME, 1994, 116(2):498-503.
- [31] HA J M, PETERSON G P. The interline heat transfer of evaporating thin films along a micro grooved surface[J]. Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME, 1996, 118(3):747-755.
- [32] PETERSON G P, HA J M. Capillary performance of evaporating flow in micro grooves: an approximate analytical approach and experimental investigation[J]. Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME, 1998, 120(3):743-751.
- [33] PARK I S, CHOI D H. Heat- and mass-transfer analysis for the condensing film flow along a vertical grooved tube [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(22):4277-4285.
- [34] JUNG E G, BOO J H. A numerical modeling for the steady-state performance of a micro heat pipe using thin liquid film theory [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 126:557-566.
- [35] JUNG E G, BOO J H. A novel transient thermohydraulic model of a micro heat pipe [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 140:819-827.
- [36] LAUNAY S, SARTRE V, LALLEMAND M. Hydrodynamic and thermal study of a water-filled micro-heat-pipe array [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2004, 18(3):358-363.
- [37] LAUNAY S, SARTRE V, MANTELLI M B H, et al. Investigation of a wire plate micro heat pipe array [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2004, 43(5):499-507.
- [38] WANG Yaxiong, MA Hongbin, PETERSON G P. Investigation of the temperature distribution on radiator fins with micro heat pipes [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2001, 15(1):42-49.
- [39] SARTRE V, ZAGHDOUDI M C, LALLEMAND M. Effect of interfacial phenomena on evaporative heat transfer in micro heat pipes [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2000, 39(4):498-504.
- [40] DUNCAN A B, PETERSON G P. Charge optimization for a triangular-shaped etched micro heat pipe [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1995, 9(2):365-368.
- [41] CHEN Qiang, HUANG Yonghua. Effect of low wick premeability on transient and steady-state performance of heat pipes [J]. Heat Transfer Research, 2019, 50(13):1319-1332.
- [42] DIAO Y H, LIANG L, ZHAO Y H, et al. Numerical investigation of the thermal performance enhancement of latent heat thermal energy storage using longitudinal rectangular fins and flat micro-heat pipe arrays [J]. Applied Energy, 2019, 233:894-905.
- [43] 刘昂, 杨金钢, 杨威, 等. 以 FLUENT 软件微热管阵列传热性能的数值模拟 [J]. 热处理技术与装备, 2019, 40(1):55-59. (LIU Ang, YANG Jingang, YANG Wei, et al. Numerical simulation of heat transfer performance of micro-heat pipe array based on FLUENT software [J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2019, 40(1):55-59.)
- [44] 杨厚乐. 微热管阵列换热器多尺度优化及其性能分析 [D]. 郑州:郑州大学, 2019. (YANG Houle. Multi-scale optimization and performance analysis of micro-heat pipe array heat exchanger [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.)

- [45] 鲁祥友, 华泽钊, 刘美静, 等. 大功率 LED 散热用回路热管传热性能研究[C]//中国工程热物理学会 2008 年传热传质学学术会议论文集. 郑州:中国工程热物理学会, 2008. (LU Xiangyou, HUA Zezhao, LIU Meijing, et al. Investigation of heat transfer of loop heat pipe used to cool high power LED[C]//Proceeding of 2008 CSET Heat and Mass Transfer Conference. Zhengzhou: Chinese Society of Engineering Thermophysics, 2008.)
- [46] 苏俊林, 李博, 矫振伟. 微小矩形多槽道平板热管的传热性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2005, 35(6): 592-595. (SU Junlin, LI Bo, JIAO Zhenwei. Heat transfer performance of flat heat pipe with micro rectangle grooves [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2005, 35(6): 592-595.)
- [47] WANG Gang, QUAN Zhenhua, ZHAO Yaohua, et al. Performance of a flat-plate micro heat pipe at different filling ratios and working fluids[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 146:459-468.
- [48] BADRAN B, GERNER F M, RAMADAS P, et al. Experimental results for low-temperature silicon micromachined micro heat pipe arrays using water and methanol as working fluids[J]. Experimental Heat Transfer, 1997, 10(4): 253-272.
- [49] 蒋朝勇. 新型微型平板热管的传热性能实验研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2009. (JIANG Chaoyong. Experimental study on the heat transfer performance of a new-style miniature flat heat pipes[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2009.)
- [50] CHEN J S, CHOU J H. Cooling performance of flat plate heat pipes with different liquid filling ratios[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 77:874-882.
- [51] HUANG Guanghan, TANG Yong, WANG Pengtao, et al. Thermal characterisation of micro flat aluminium heat pipe arrays by varying working fluid and inclination angle[J]. Applied Sciences, 2018, 8(7):1052.
- [52] 李颖. 平板微槽热管阵列的传热性能及结构优化研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2018. (LI Ying. The heat transfer performance and structure optimization of the plate micro-channel heat pipe array [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2018.)
- [53] BAI Pengfei, TANG Yong, TANG Biao, et al. Thermal performance of heat pipe with different micro-groove structures [J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15:240-244.
- [54] CHENG H H, HUANG D S, LIN M T. Heat dissipation design and analysis of high power LED array using the finite element method [J]. Microelectronics Reliability, 2012, 52(5): 905-911.
- [55] 王宏燕, 邓月超, 郝丽敏, 等. 平板微热管阵列在 LED 散热装置中的应用[J]. 半导体技术, 2012, 37(3): 240-244. (WANG Hongyan, DENG Yuechao, HAO Limin, et al. Applied investigation on LED heat cooling equipment using flat micro-heat pipe arrays [J]. Semiconductor Technology, 2012, 37(3): 240-244.)
- [56] 王薇, 樊洪明. 基于平板微热管阵列的大功率 LED 散热技术[J]. 照明工程学报, 2018, 29(4): 62-68. (WANG Wei, FAN Hongming. High-power LED heat dissipation technology based on the plate micro heat pipe arrays [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2018, 29(4): 62-68.)
- [57] 梁锋. 大功率 LED 路灯散热研究[D]. 天津:天津理工大学, 2016. (LIANG Feng. Study on heat dissipation of high power LED lamp [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2016.)
- [58] 叶欣, 赵耀华, 全贞花, 等. 微热管阵列应用于锂电池模块的散热实验[J]. 工程科学学报, 2018, 40(1): 120-126. (YE Xin, ZHAO Yaohua, QUAN Zhenhua, et al. Experimental on heat dispersion of lithium-ion battery based on micro heat pipe array [J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(1): 120-126.)
- [59] 叶欣, 赵耀华, 全贞花. 电动汽车锂离子电池散热加热设计[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(8): 1263-1267. (YE Xin, ZHAO Yaohua, QUAN Zhenhua. Design of cooling and heating of lithium-ion battery used in electric vehicle [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(8): 1263-1267.)
- [60] 王颖盈, 刁彦华, 赵耀华, 等. 平板微热管阵列应用于锂电池组的散热特性[J]. 电源技术, 2014, 38(8): 1433-1436, 1582. (WANG Yingying, DIAO Yanhua, ZHAO Yaohua, et al. Cooling property of flat micro-heat pipe arrays for lithium battery [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2014, 38(8): 1433-1436, 1582.)
- [61] MO Xiaobao, HU Xuegong, TANG Jinchen, et al. A comprehensive investigation on thermal management of large-capacity pouch cell using micro heat pipe array [J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(13): 7444-7458.
- [62] WANG Zeyu, DIAO Yanhua, LIANG Lin, et al. Experimental study on an integrated collector storage solar air heater based on flat micro-heat pipe arrays [J]. Energy and Buildings, 2017, 152:615-628.
- [63] WANG Zeyu, DIAO Yanhua, ZHAO Yaohua, et al. Performance investigation of an integrated collector-storage solar water heater based on lap-joint-type micro-heat pipe arrays [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 153:808-827.
- [64] WANG Zeyu, DIAO Yanhua, ZHAO Yaohua, et al. Ther-

- mal performance investigation of an integrated collector-storage solar air heater on the basis of lap joint-type flat micro-heat pipe arrays: simultaneous charging and discharging mode[J]. *Energy*, 2019, 181:882-896.
- [65] WANG Zeyu, DIAO Yanhua, ZHAO Yaohua, et al. Experimental investigation of an integrated collector-storage solar air heater based on the lap joint-type flat micro-heat pipe arrays[J]. *Energy*, 2018, 160:924-939.
- [66] 王腾月, 刁彦华, 赵耀华, 等. 微热管阵列式太阳能空气集热-蓄热系统性能试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(18): 148-156. (WANG Tengyue, DIAO Yanhua, ZHAO Yaohua, et al. Performance experiment on solar air collection-storage system with phase change material based on micro heat pipe arrays[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(18): 148-156.)
- [67] WANG Tengyue, ZHAO Yaohua, DIAO Yanhua, et al. Performance of a new type of solar air collector with transparent-vacuum glass tube based on micro-heat pipe arrays[J]. *Energy*, 2019, 177:16-28.
- [68] DENG Yuechao, WANG Wei, ZHAO Yaohua, et al. Experimental study of the performance for a novel kind of MHPA-FPC solar water heater[J]. *Applied Energy*, 2013, 112:719-726.
- [69] DENG Yuechao, ZHAO Yaohua, WANG Wei, et al. Experimental investigation of performance for the novel flat plate solar collector with micro-channel heat pipe array (MHPA-FPC)[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 54(2): 440-449.
- [70] 甘苾煜. 新型光伏光热幕墙组件及系统性能研究[D]. 北京:北京工业大学, 2015. (GAN Hongyu. Research on new type of photovoltaic thermal curtain wall[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.)
- [71] 汪婧, 舒碧芬, 郭银, 等. 基于微热管的高倍聚光光伏模组新型散热实验研究[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(15): 105-111. (WANG Jing, SHU Bifen, GUO Yin, et al. A new heat dissipation experimental research of high concentrated photovoltaic based on micro-heat pipe[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(15): 105-111.)
- [72] CHEN Haiping, HUANG Jiguang, ZHANG Heng, et al. Experimental investigation of a novel low concentrating photovoltaic/thermal-thermoelectric generator hybrid system[J]. *Energy*, 2019, 166:83-95.
- [73] CHEN Haiping, ZHANG Heng, LI Mingjie, et al. Experimental investigation of a novel LCPV/T system with micro-channel heat pipe array[J]. *Renewable Energy*, 2018, 115: 773-782.
- [74] LI Guiqiang, ZHANG Gan, HE Wei, et al. Performance analysis on a solar concentrating thermoelectric generator using the micro-channel heat pipe array[J]. *Energy Conversion Management*, 2016, 112:191-198.
- [75] 吴俊廷. 微热管技术在城市轨道交通机车牵引变流器冷却单元热控机制研究[D]. 长春:吉林建筑大学, 2018. (WU Juntong. Research on thermal control mechanism of micro-heat pipe technology for traction converter cooling unit of urban rail locomotive[D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2018.)
- [76] 母福生, 王海军, 江乐新, 等. 用于地铁变流器的平板微热管散热器数值模拟与实验研究[J]. *制冷学报*, 2019, 40(5): 102-108. (MU Fusheng, WANG Haijun, JIANG Lexin, et al. Numerical simulation and experimental study of flat microheat pipe radiator for metro converter[J]. *Journal of Refrigeration*, 2019, 40(5): 102-108.)
- [77] 李腾, 刘静. 芯片冷却技术的最新研究进展及其评价[J]. *制冷学报*, 2004, 25(3): 22-32. (LI Teng, LIU Jing. Latest research advancement and assessment of chip cooling techniques[J]. *Journal of Refrigeration*, 2004, 25(3): 22-32.)
- [78] 孙乐, 蔺洁, 赵耀华. 基于板式热管的复合容积式换热器的换热性能优化实验研究[J]. *暖通空调*, 2019, 49(5): 129-136. (SUN Le, LIN Jie, ZHAO Yaohua. Heat transfer performance optimization of composite displacement heat exchanger based on plate heat pipes[J]. *Journal of HV & AC*, 2019, 49(5): 129-136.)
- [79] 沈超, 杨绍伦, 张东伟, 等. 平行流热管换热器传热性能实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2018, 39(6): 1339-1343. (SHEN Chao, YANG Shaolun, ZHANG Dongwei, et al. Experimental research on heat transfer performance of parallel flow heat pipe exchangers[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2018, 39(6): 1339-1343.)
- [80] ZHU Zhongwei, FAN Hongming, ZHANG Cheng. Experimental investigations on the effectiveness of micro heat pipe array heat exchanger for heat recovery for residential building[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 102:980-988.
- [81] 韦新东, 陈岩松, 黄一格. 基于 Fluent 的互联网数据中心机房散热优化模拟[J]. *吉林建筑大学学报*, 2018, 35(6): 55-60. (WEI Xindong, CHEN Yansong, HUANG Yige. Simulation of heat dissipation optimization of internet data centers coputer room based on Fluent[J]. *Journal of Jilin Jianzhu University*, 2018, 35(6): 55-60.)
- [82] 崔洁. 新型平板热管辐射板供冷的实验研究及数值模拟[D]. 北京:北京工业大学, 2012. (CUI Jie. The new flat plate heat radtion cooling experimental study and numerical simulation [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012.)

(下转第 22 页)

ance analysis of a novel liquid desiccant evaporative cooling fresh air conditioning system with solution recirculation[J]. *Building & Environment*, 2017, 117(15):218-229.

[13] 张凡, 殷勇高. 一种低位热驱动除湿冷却空调系统的热性能分析[J]. *化工学报*, 2016, 67(增刊 2):275-283. (ZHANG Fan, YIN Yonggao. Thermal performance analysis of liquid desiccant evaporative cooling air-conditioning system driven by low-grade heat [J]. *CIESC Journal*, 2016, 67(Suppl. 2):275-283.)

[14] CHEN Yao, YIN Yonggao, ZHANG Xiaosong. Performance analysis of a hybrid air-conditioning system dehumidified by liquid desiccant with low temperature and low concentration[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 77:91-102.

[15] WANG Lingshi, XIAO Fu, ZHANG Xuejun, et al. An experimental study on the dehumidification performance of a counter flow liquid desiccant dehumidifier[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2016, 70:289-301.

[16] CHO H J, CHEON S Y, JEONG J W. Experimental analysis of dehumidification performance of counter and cross flow liquid desiccant dehumidifiers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 150:210-223.

[17] 汪行, 柳建华, 赵永杰, 等. 液体除湿空调除湿器性能研究[J]. *制冷学报*, 2017, 38(2):45-50. (WANG Xing, LIU Jianhua, ZHAO Yongjie, et al. Study on the performance of dehumidifier with liquid desiccant [J].

Journal of Refrigeration, 2017, 38(2):45-50.)

[18] 王凌士, 肖赋, 陆韬. 高效填料型除湿器新传质关联式实验研究[J]. *制冷学报*, 2017, 38(6):1-6. (WANG Lishi, XIAO Fu, LU Tao. New experimental correlations for the mass transfer of a high-efficiency packed-type dehumidifier[J]. *Journal of Refrigeration*, 2017, 38(6):1-6.)

[19] 钱俊飞. 一种太阳能溶液除湿空调系统模型验证及实验研究[D]. 南京:东南大学, 2014. (QIAN Junfei. Model validation and experimental investigation of a kind of liquid desiccant air conditioning system driven by solay energy [D]. Nanjing: Southeast University, 2014.)

通信作者简介

邱利民, 男, 教授, 浙江大学制冷与低温研究所, (0571) 87952793, E-mail: limin.qiu@zju.edu.cn. 研究方向: 低温制冷机及其应用; 大规模气体液化分离与 LNG 冷能回收; 大功率电子设备高效冷却技术。

About the corresponding author

Qiu Limin, male, professor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, +86 571-87952793, E-mail: limin.qiu@zju.edu.cn. Research fields: cryocoolers and their application, large-scale liquefied gas separation and the cold energy recovery of LNG, high efficiency cooling of high-power electronic equipment.

(上接第 11 页)

[83] 董瑞雪, 全贞花, 赵耀华, 等. 基于微热管阵列的地板辐射采暖系统性能实验研究[J]. *建筑科学*, 2018, 34(8):32-36,81. (DONG Ruixue, QUAN Zhenhua, ZHAO Yaohua, et al. Experimental research on performance of radiant floor heating system based on micro heat pipe array [J]. *Building Science*, 2018, 34(8):32-36,81.)

通信作者简介

徐洪波, 男, 博士, 副研究员, 中国科学院理化技术研究所, (010)82543433, E-mail: hbxu@mail.ipc.ac.cn. 研究方向: 高热

流密度热管理技术、特种制冷空调系统设计、热泵新技术开发、微尺度传热。

About the corresponding author

Xu Hongbo, male, Ph. D., associate professor, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, +86 10-82543433, E-mail: hbxu@mail.ipc.ac.cn. Research fields: high heat flux density heat management technology, design of special refrigeration air conditioning system, development of new heat pump technology, microscale heat transfer.