

# 平板热管性能优化及其在航天热控中的应用进展

冷亚坤<sup>1</sup>, 张旭<sup>2</sup>, 甄华龙<sup>1</sup>, 刘迎春<sup>2</sup>, 王仲琦<sup>1</sup>, 蒲亮<sup>1\*</sup>

1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 西安 710049

2. 中国科学院上海微小卫星工程中心, 上海 201304

**摘要** 平板热管具有传热效率高、均温性好、安全可靠等优点, 已成为航天器热控的重要途径之一。吸液芯结构优化是提高平板热管流动传热性能的主要方式。在吸液芯结构设计方面, 综述了高性能吸液芯结构设计方法, 并分析了宏观-介观-微观多尺度数值模型的选择和应用。在吸液芯表面改性方面, 探讨了提高纳米结构机械稳定性、调整传热机制和开展数值模拟研究的重要性。针对太空环境下高辐射和散热困难难题, 展望了平板热管在航天器热控中的发展方向。

**关键词** 平板热管; 吸液芯; 结构优化; 多尺度; 数值模型

航天技术呈现高功率、轻量化、微小型化的发展趋势<sup>[1]</sup>, 紧凑的体积和功率密集型部件的增加, 对航天器热控提出了更加严格的要求<sup>[2]</sup>。作为航天器热控的重要方式, 热管的质量约占航天器总质量的2%, 热管具有布置方便灵活且有极高传热效率的优势<sup>[3]</sup>。根据结构形式的不同, 热管可以分为圆柱形热管、平板热管等<sup>[4-5]</sup>。圆柱形热管结构简单、耐压能力强, 但结构适应性差, 多用于长距离热传输。平板热管结构适应性好、厚度薄, 但抗压能力弱, 需通过加强筋支撑以防止变形, 多用于狭小空间的电

子器件散热。考虑到平板热管与发热部件结构适应性高, 散热效果更佳, 对平板热管的需求和技术要求日益提高。

平板热管是基于气液相变原理实现高效热传递的装置。热源自平板热管的蒸发段输入, 将吸液芯内的液态工质加热为饱和蒸气, 饱和蒸气积累一定量后进入冷凝段, 与冷凝段外界换热成为液态工质, 并在毛细力的作用下流回蒸发段<sup>[6-7]</sup>, 如图1所示。1971年, Feldman<sup>[8]</sup>首次提出并制造了一种结构化吸液芯平板热管, 实现了比圆形截面热管更优

收稿日期: 2023-06-14; 修回日期: 2023-12-07

基金项目: 中国科学院上海微小卫星工程中心项目(202109158)

作者简介: 冷亚坤, 博士研究生, 研究方向为微重力条件下平板热管微尺度传热传质过程等, 电子信箱: lengyakun@stu.xjtu.edu.cn; 蒲亮(通信作者), 教授, 研究方向为低温工质泄漏、扩散机理和规律及微重力条件下微尺度流动传热等, 电子信箱: puliang@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 冷亚坤, 张旭, 甄华龙, 等. 平板热管性能优化及其在航天热控中的应用进展[J]. 科技导报, 2024, 42(24): 46-57;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.06.00912

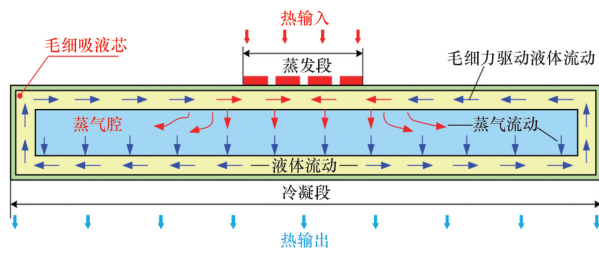


图1 平板热管结构和工作原理示意

的散热效果。2012年,日本发射的微小卫星SDS-4首次确认了带止回阀的平板热管的稳定运行性能<sup>[9]</sup>。航天器中平板热管的功能有2个方面,一是将高密度能流转化为大面积的低密度能流,二是将热量由发热位置传递到便于进行散热或利用的区域。在微重力环境下,平板热管依靠重力作用实现液体回流将不再适用<sup>[10]</sup>,吸液芯毛细力作用成为驱动该过程的唯一动力。为获得更优的流动传热性能,研究人员聚焦于平板热管吸液芯结构<sup>[11-20]</sup>,采用实验研究和数值模拟研究方法<sup>[21-22]</sup>,开展了平板热管宏观-介观-微观多尺度研究<sup>[23-33]</sup>。

首先从实验和数值模拟研究的角度综述了2种平板热管流动传热性能优化策略,即平板热管吸液芯结构与平板热管吸液芯表面改性。并在此基础上探讨复杂太空环境下航天器热控的应对策略。

## 1 平板热管吸液芯结构设计

平板热管流动传热性能的影响因素包括吸液芯结构、热源、工质、充液率等<sup>[34]</sup>。其中,吸液芯结构的影响最为显著<sup>[6]</sup>。根据吸液芯结构的不同,平板热管主要可以分为微沟槽型平板热管<sup>[35]</sup>、丝网烧结型平板热管<sup>[36]</sup>和粉末烧结型平板热管<sup>[37]</sup>等类型,不同吸液芯结构平板热管的优缺点如表1所示。吸液芯的导热性是影响平板热管热阻的重要因素,决定了平板热管的实时传热能力。毛细力和渗透性共同影响了毛细极限,进而决定了临界热流密度,确定了平板热管的最大传热能力<sup>[38]</sup>。为获得更优的流动传热性能,从实验研究和数值模拟研究2方面对平板热管吸液芯结构设计展开综述。

表1 吸液芯结构及其优缺点

吸液芯结构	优点	缺点
微沟槽	具有较高的导热性和渗透性	毛细力较小
丝网	具有较高的渗透性	导热性和毛细力相对较小
烧结粉末	具有较高的毛细力	导热性和渗透性相对较小

### 1.1 吸液芯结构设计实验研究

吸液芯结构设计的目的是获得更低的热阻或者更高的临界热流密度。以微沟槽型平板热管为例,吸液芯结构设计策略包括无梯度结构优化和梯度结构优化2种方式。无梯度结构优化是指槽道沿长度方向不存在梯度变化,包括矩形<sup>[12]</sup>、扇形<sup>[13]</sup>、正六边形<sup>[39]</sup>、V形<sup>[40]</sup>、三角形<sup>[41]</sup>、星形<sup>[42]</sup>等结构(图2)。梯度结构优化往往可以获得更优的性能,如Xin等<sup>[35]</sup>设计的梯度V形槽吸液芯,有效导热系数比无梯度结构提高了913 W/(m·K)。然而,梯度吸液芯平板热管必须考虑常规工况下的最大和最小传热速率,在设计上更加困难,且在复杂环境下的性能有待进一步提高。

丝网结构主要包括螺旋编织网和正交编织网2种类型。螺旋编织网流动阻力小、毛细力大,增大截面积有利于提高传热性能<sup>[43]</sup>。正交编织网的孔隙率较高、厚度更薄,研究热点在于网目数、体积孔隙率、丝网层数等方面<sup>[44]</sup>。Tang等<sup>[45]</sup>指出网目数的筛选要兼顾毛细力和渗透性,在提高毛细性能的同时,需保证足够的渗透性能。若渗透性差,会导致气泡残留在吸液芯中,造成蒸发段过早干涸。针对上述问题,可采用梯度丝网吸液芯结构设计策略,即通过细网格提供较大的毛细力,并通过粗网格辅助气泡离开吸液芯。具体包括3种方式:(1)不同网目数的正交编织网混合<sup>[46]</sup>;(2)不同直径金属丝混合编织<sup>[47-48]</sup>;(3)正交编织网与螺旋编织网混合<sup>[11, 49]</sup>,如图3所示。Yu等<sup>[11]</sup>在正交编织网结构中添加螺旋编织网,发现螺旋编织网可将工质瞬间泵送到一定高度后在正交编织网上扩散,将平板热管的传热性能提高20%~60%。

烧结粉末吸液芯结构优化策略主要分为单孔

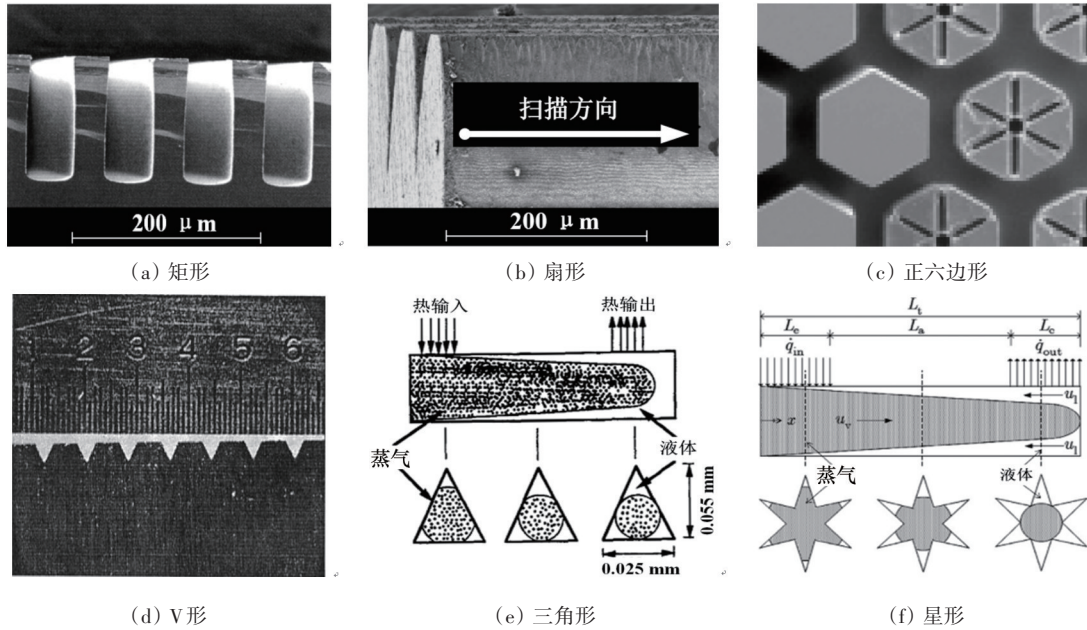


图2 不同形状微沟槽吸液芯示意

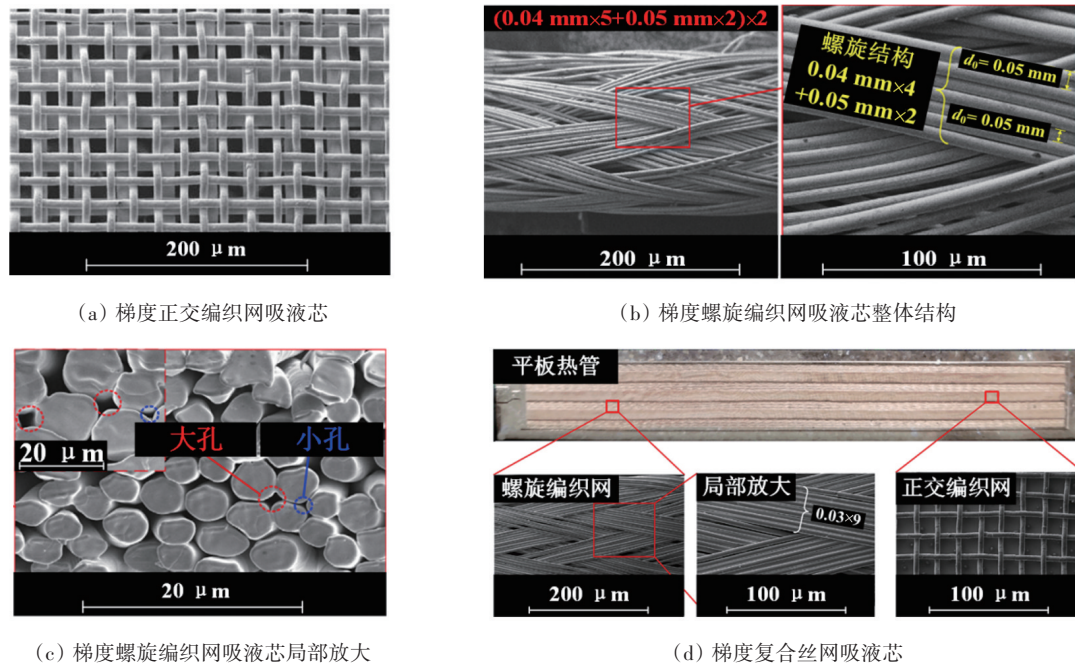


图3 梯度丝网吸液芯

和双孔吸液芯结构优化策略。单孔吸液芯孔隙优化策略主要关注颗粒直径的影响<sup>[51]</sup>,不同颗粒直径的吸液芯结构如图4<sup>[51]</sup>所示。双孔吸液芯往往具有更优的传热性能和临界热流密度,这是因为双孔吸液芯不仅在其顶面形成了蒸发弯月面,而且在内部

也形成了蒸发弯月面<sup>[50]</sup>。Byon等<sup>[51]</sup>建立了预测双孔吸液芯毛细性能的半解析模型,指出双孔吸液芯的团簇尺寸是颗粒粒径的4~6倍时,毛细性能最佳。

基于上述研究,结合不同结构吸液芯的优势,发展复合结构吸液芯<sup>[52-56]</sup>,可以在获得更大毛细力

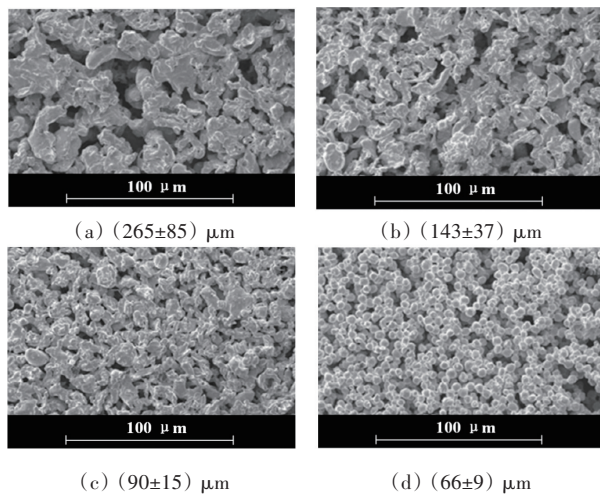


图4 不同粒径烧结粉末SEM图

的同时,保证足够的渗透率,具有广阔的发展前景。

## 1.2 吸液芯结构设计数值模拟

平板热管在航天器热控领域通常采用氨等高压工质,开展可视化实验研究存在困难。而且在微重力环境下开展不同吸液芯结构下的实验研究需要耗费巨大的经济成本和时间成本。开发数值模型可有效解决上述问题。

在宏观尺度,通常采用热阻网络模型和流动传热模型分析吸液芯结构对平板热管流动传热性能的影响<sup>[57]</sup>。热阻网络模型可快速确定吸液芯热阻对平板热管温度分布的影响程度,但并不能获得与工质流动有关的压力、流速等参数信息<sup>[26]</sup>。流动传热模型很好地解决了上述问题,可指导平板热管结构设计并确定最佳充液率<sup>[58-60]</sup>。Wang等<sup>[61-62]</sup>假定液体工质在吸液芯内流动,气体工质仅在蒸气腔内流动。基于流动传热模型分析了吸液芯沟槽参数对平板热管性能的影响,并结合优化算法优化吸液芯结构参数,使平板热管的最大温差下降了9.68%。很多研究人员基于上述模型研究了微沟槽、丝网和烧结粉末吸液芯平板热管的流动传热性能<sup>[23, 63-64]</sup>,但是该模型忽略了气液界面真实分布,并不能处理蒸发段发生干涸的情况。考虑到平板热管涉及蒸发/沸腾-凝结-导热复杂运行机制,且蒸发/沸腾与凝结过程相互影响,传统的相变模型适应性较差<sup>[27]</sup>。很多研究人员对此进行了改进<sup>[65]</sup>,但相关理论仍需进一步发展。

在介观尺度,通常采用格子-玻尔兹曼方法(lattice Boltzmann method, LBM)研究吸液芯结构对平板热管流动传热性能的影响。介观尺度模型对毛细力的计算更加精确,且可以捕捉到液膜的后退现象<sup>[28]</sup>。Huang等<sup>[66]</sup>采用LBM求解吸液芯内的导热和液体流动过程,将平板热管的瞬态求解速度提高了50倍。Fang等<sup>[28]</sup>基于LBM对比分析了不同结构微沟槽吸液芯的毛细性能,研究发现梯形槽的毛细力最大,其次是矩形,最后是倒梯形。针对微柱槽道吸液芯,指出提高毛细极限的方法是在蒸发段减小微柱间距,并适当增大冷凝段的微柱间距。

在微观尺度,通常采用表面能最小化方法研究吸液芯结构对平板热管流动传热性能的影响。在微重力环境下,平板热管中流体热质交换不再受重力的影响,Marangoni效应将发挥决定性作用<sup>[33]</sup>,相关研究对于航天器热控具有重要意义。Ranjan等<sup>[67]</sup>基于表面能最小化方法对比分析了圆锥、圆柱、椎体柱的最大毛细力和薄膜蒸发速率。结果发现,椎体柱吸液芯的性能最优。与烧结粉末吸液芯相比,圆锥、圆柱和椎体柱吸液芯均可将平板热管的最大热传输能力提高10倍以上。Jiang等<sup>[31]</sup>结合加工需求提出了一种梯形长方体微柱结构吸液芯,并与长方体、圆锥等微柱结构的性能进行了比较,不同吸液芯结构及其弯月面如图5<sup>[31]</sup>所示。研究发现,Marangoni效应在流量分布中发挥着重要作用。梯形长方体微柱结构特殊的金字塔形状使得固体壁面与气液界面的距离更近,扩大了薄膜蒸发的范围,因此总传热量最大。

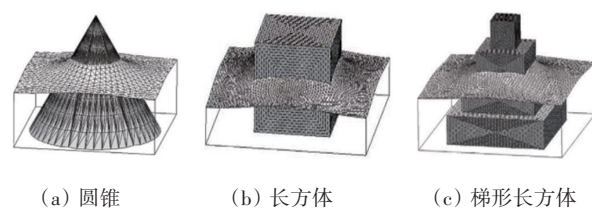


图5 不同吸液芯结构及其弯月面示意

平板热管数值模型在不同尺度下均可指导吸液芯结构设计,但侧重点有所不同。平板热管宏观模型可获得整体的流动传热性能;平板热管介观模型可实现更加快速准确的模拟;平板热管微观模型

则可揭示 Marangoni 效应的影响。微重力环境与重力环境下平板热管的流动传热性能不同,考虑到微重力实验环境的经济成本,开展平板热管宏观-介观-微观多尺度数值模拟研究对于航天器热控具有重要意义。

## 2 平板热管吸液芯表面改性

在卫星小型化高功率的趋势下,沸腾换热对平板热管流动传热性能的影响逐渐增加<sup>[68]</sup>。平板热管吸液芯表面改性一方面可以增加汽化成核点,使核态沸腾提前发生,并提高沸腾传热系数;另一方面可以增加冷凝核化点数,促进凝结换热。以下从实验研究和数值模拟研究 2 个方面对平板热管吸液芯表面改性展开综述。

### 2.1 吸液芯表面改性实验

吸液芯表面改性是指通过改变吸液芯表面的润湿特性来改善平板热管流动传热性能,主要可以分为梯度润湿策略和非均匀润湿策略 2 种方式。

梯度润湿策略主要包括蒸发段亲水性处理、冷凝段疏水性处理和吸液芯表面整体处理 3 种类型。

蒸发段亲水性处理强化传热的机制在于增强了吸液芯的吸液能力,一方面使薄液膜面积显著增加<sup>[17]</sup>,另一方面蒸发段主要处于核态沸腾换热机制范围,而不再是对流换热机制范围<sup>[18]</sup>。亲水性处理的评价指标包括毛细润湿长度、毛细润湿均匀性和毛细性能参数<sup>[16]</sup>。需要注意的是,亲水性处理并不一定会增强传热性能。吸液芯表面沉积的纳米结构阻碍流体的流动,在润湿性变化不大的情况下,可能会导致流动传热性能的降低<sup>[19]</sup>。

冷凝段疏水性处理强化传热的机制在于一方面增加了蒸气冷凝核化点数量,另一方面大大减薄了液膜厚度,使传热由膜状冷凝向珠状冷凝转变<sup>[18]</sup>。此外,超疏水处理还可能发生液滴弹跳现象,进一步强化冷凝传热。然而,当冷凝段过冷度较高时,液滴弹跳现象可能会发生失效,降低传热性能<sup>[69]</sup>。针对上述问题,Wen 等<sup>[20]</sup>采用疏水铜纳米线结构,如图 6<sup>[20]</sup>所示。该结构将冷凝传热的表面过冷度范围由 8 K 提高到了 24 K。但是纳米超疏

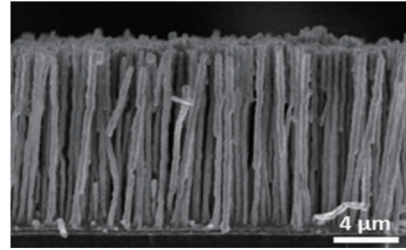


图6 疏水铜纳米线结构

水结构表面的机械稳定性差,这也成为了制约超疏水材料发展的关键问题。对此,Wang 等<sup>[70]</sup>提出了一种铠甲化超疏水表面,采用微米结构作为铠甲,保护具有超疏水作用的纳米结构,有效地提高了超疏水表面的机械稳定性。

吸液芯表面整体处理通常采用蒸发段亲水性处理和冷凝段疏水性处理结合的方式。具体可以分为蒸发段、绝热段和冷凝段接触角均匀分布和正梯度分布。后者的流动传热性能一般更优<sup>[71]</sup>,但接触角梯度应控制在合理范围内,否则会严重降低毛细力<sup>[72]</sup>。

非均匀润湿策略包括在亲水性蒸发段表面添加疏水点和在疏水性冷凝段表面添加亲水点 2 种类型。亲水性表面添加疏水点,可以在维持临界热流密度的同时,提高沸腾传热性能。研究发现,当热流密度较低时,疏水点的大小和间距对传热性能起着决定性作用。然而热流密度较高时,疏水点的数量和尺寸的作用更加重要<sup>[73]</sup>。疏水性表面添加亲水点,可以利用亲水点的低表面能使液滴成核率大大增加,并在液滴生长到临界尺寸时通过疏水表面的作用使其脱离原位置,从而实现更加高效的液滴冷凝及脱附效率<sup>[74]</sup>。

提高平板热管流动传热性能的关键是机制创新,如冷凝段膜状凝结向珠状凝结的转变、液滴弹跳等,调整传热机制并优化新型传热方式的性能,是未来研究的重点和难点问题。

### 2.2 吸液芯表面改性数值模拟

微重力环境与重力环境下核态沸腾气泡动力学参数不同,影响了平板热管的流动传热性能。考虑到微重力环境昂贵的经济成本且不易开展可视化实验,对平板热管吸液芯表面改性数值模拟进行

研究具有重要意义。吸液芯表面改性是通过改变吸液芯表面的润湿特性来影响气泡成核,进而改善平板热管流动传热性能。开展平板热管介观尺度和微观尺度数值模拟研究有利于揭示表面改性对气泡成核的影响。

在微观尺度,主要通过分子动力学方法研究吸液芯表面改性对平板热管流动传热性能的影响,揭示不同润湿性表面的气泡成核机制。Cui等<sup>[32]</sup>研究了平板热管气泡的初始生长过程(直径 $<100\text{ nm}$ ),发现在一定的热流密度( $100\text{ W/cm}^2$ )和初始温度( $350\text{ K}$ )下,初始气泡只能膨胀到直径 $45\text{ nm}$ 左右。为揭示气泡生长全过程的机制,进一步开发了分子动力学模拟与宏观尺度模型耦合的混合模型,用于研究气泡直径在 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ ~ $0.3\text{ mm}$ 时的生长过程。研究指出,气泡的生长主要是通过平板热管底部表面不断形成小气泡并与上方大气泡合并而引起的。

在介观尺度,主要通过格子-玻尔兹曼方法研究吸液芯表面改性对平板热管流动传热性能的影响,揭示表面润湿性对气泡成核机制的影响。Xiong等<sup>[29]</sup>研究指出亲水表面可以促进表面张力,从而促进气泡离开并缩短气泡周期,因此成核位点较少。疏水表面会破坏表面张力,使气泡附着在固体表面上的时间更长,从而延长气泡周期,因此成核位点较多。Liu等<sup>[30]</sup>开展了超疏水表面液滴弹跳现象研究,指出只有当超疏水表面的接触角足够大时,才能发生液滴弹跳现象(图7<sup>[30]</sup>)。研究发现,液滴聚结诱导的弹跳高度随液滴半径的增加先增大后减小,当液滴半径为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 时,弹跳高度最大。

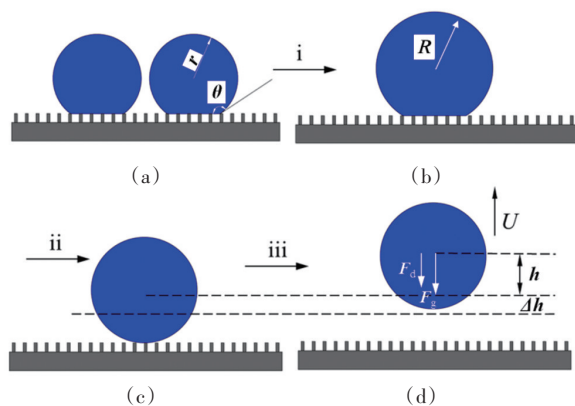


图7 液滴弹跳现象示意

吸液芯表面改性数值模拟研究从气泡成核机制的角度出发,从机制上揭示了表面改性对平板热管流动传热性能的影响。气泡成核机制研究对于分析平板热管的传热机制、开发更高传热性能的平板热管具有重要作用,可用于指导实验研究的开展,对于航天器热控具有重要意义。

### 3 复杂太空环境应对策略

航天器热量通过平板热管的传递过程是双向的。当环境温度恶劣变化时,会对器件正常运行造成不利影响。针对该问题,可研制具有单向传热功能的平板热管,实现正向快速传热、反向阻隔传热功能。此外,在太空环境下,热量只能通过辐射和导热的方式进行传递,对此可将平板热管与相变材料结合,利用相变材料潜热实现热量快速存储<sup>[75]</sup>。

#### 3.1 单向传热平板热管

单向传热平板热管可以避免太空环境恶劣变化对发热器件的不利影响<sup>[76]</sup>。为实现太空环境下平板热管的单向传热功能,主要采用3种策略,即改变固体表面能梯度、借助电场等外力作用、控制工质的流动方向。

改变固体表面能梯度,即将蒸发段进行超亲水处理,冷凝段进行超疏水处理。当热源位于蒸发段时,称为正向工作模式。此时超亲水表面的液体受热蒸发,超疏水表面的气体冷凝,并借助液滴弹跳现象返回到蒸发段,实现循环流动并将热量传输到冷凝段。当热源位于冷凝段时,称为反向工作模式。此时冷凝段的液体受热进入蒸发段,然而蒸发段的液体在超亲水固体表面作用下,并不会返回冷凝段,导致冷凝段液体干涸,热量主要通过固体的导热作用进行传递,传热效率大幅度降低<sup>[77]</sup>。但是固体表面能梯度的驱动力有限,液滴弹跳高度一般小于 $2\text{ mm}$ ,导致热管蒸气腔高度受限<sup>[78]</sup>。针对上述问题,可借助电场等外力作用提高液滴弹跳高度<sup>[79]</sup>。Traipattanakul等<sup>[78]</sup>发现当电场电压为 $50\text{ V}$ 时,平板热管可加载的峰值能流比无电压时提高了 $90\%$ 。然而,高温环境下的热电效应可能会对静电诱导液滴聚集造成影响,因此施加电场作用不适合

极端温度的场合。此外,添加电场的影响在加工制造方面会比较复杂。为解决上述问题,可通过控制工质流动方向实现平板热管的单向传热功能。对于沿水平方向传递热量的平板热管,通常采用反向阻流结构设计,使得流体的逆向流动阻力远远大于正向流动阻力。针对沿水平方向传递热量的平板热管,反向阻流结构包括倾斜微米柱结构<sup>[80]</sup>、V形

凸粒组<sup>[81]</sup>和Y形导流台<sup>[82]</sup>等,如图8所示。针对沿垂直方向传递热量的平板热管,张力文等<sup>[83]</sup>设计了一种仿瓶子草绒毛针状结构,如图8(d)<sup>[83]</sup>所示。该平板热管的工作机制是通过外加电场作用于输液内芯中的场控颗粒,从而控制仿瓶子草绒毛针状结构的直立与弯曲,进而实现正向快速传热,反向阻隔传热的功能。

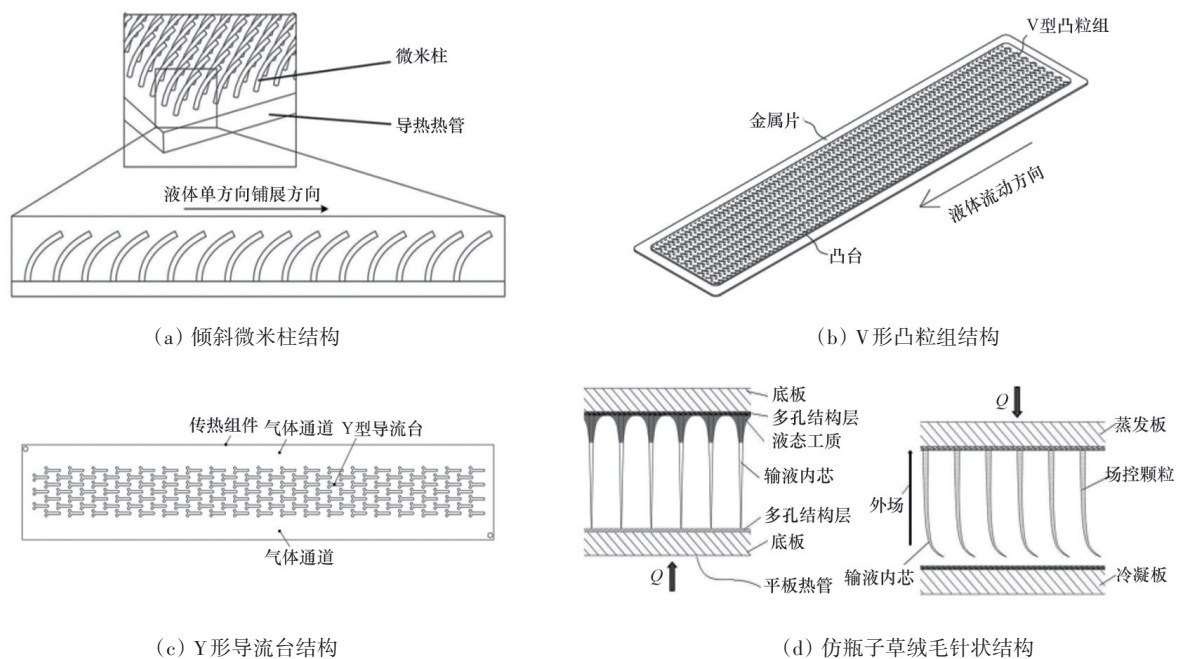


图8 单向传热平板热管结构示意图

### 3.2 平板热管与相变材料的结合

平板热管与相变材料结合可以实现热量的快速传递和等温存储的功能,解决高功率部件对温度的适应需求。中国在嫦娥卫星 CCD(电荷耦合元件)相机等设备的温控需求拉动下,热管耦合相变材料技术得到了快速发展。为应对月球红外热流的不利影响,设计了热管耦合相变材料装置,如图9(a)<sup>[84]</sup>所示。研究表明,热管耦合相变材料系统有效改善了嫦娥一号卫星的热性能,干涉成像光谱仪和 CCD 相机的温度水平均在  $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$  范围内,满足设计要求<sup>[84-85]</sup>。陆江峰等<sup>[86]</sup>采用数值模拟方法研究了应用于某探月卫星的含有相变材料的热管装置性能,并与试验结果进行了对比,如图9(b)<sup>[86]</sup>所示。研究表明,含有相变材料的热管装置对航天器短时大功率工作单机的热控效果明

显。上海卫星装备研究所<sup>[87]</sup>为解决卫星高热流密度散热的问题,研制了一套将平板热管结构、相变材料和微通道热沉结构相结合的装置,如图9(c)<sup>[87]</sup>所示,热量自平板热管扩散后,经微通道热沉结构进行散热,短时间无法排散的热量通过相变材料实现热量的存储,从而实现大热量排散和储能控温功能。上海利正卫星应用技术有限公司<sup>[88]</sup>为解决卫星周期性脉冲式设备的热控问题,提出了环绕型结构和上下结构的含相变材料的平板热管装置,如图9(d)<sup>[88]</sup>所示。上海卫星工程研究所<sup>[89]</sup>针对卫星短时窄温区工作的多热源单机热控问题,提出了一种卫星用复合式相变平板热管,如图9(e)<sup>[89]</sup>所示。该装置采用具有高导热率的金属微肋片,一方面提高了石蜡相变材料的导热性能,另一方面提高了装置的承压能力。

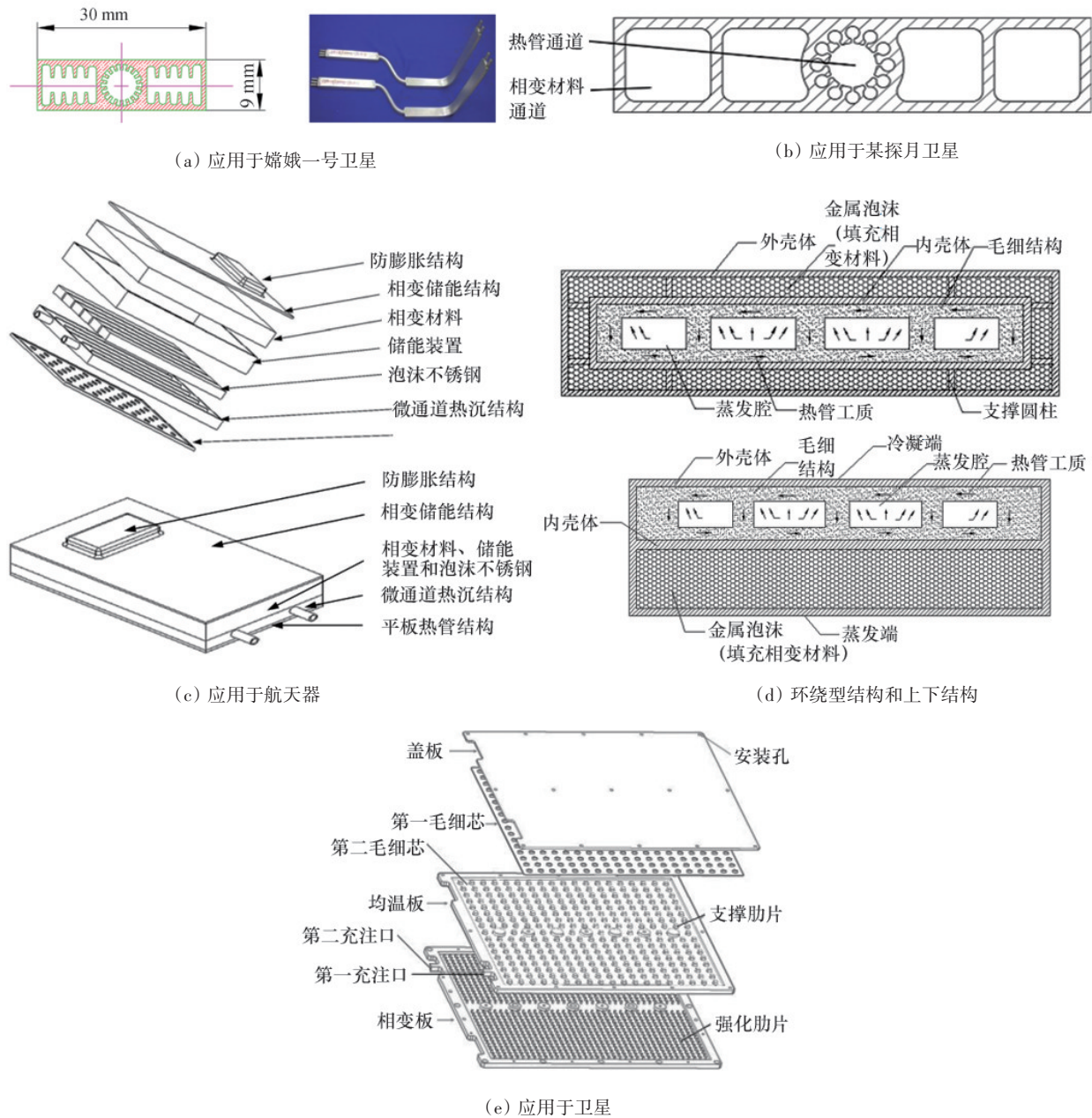


图9 含有相变材料的热管装置

单向导热平板热管以及相变材料与平板热管的结合是热管应用的一次新尝试,其显著的特点将在未来航天器热控设计中得到更广泛的应用。

### 4 结论

从实验、数值模拟和复杂太空环境应对策略3方面综述了平板热管在航天器中的应用,得到主要

结论如下。

1) 吸液芯结构设计是影响航天器平板热管流动传热性能的关键因素,传热机制创新是大幅度提高平板热管临界热流密度和降低热阻的重要方式。从以上2个角度出发开展研究,包括设计高性能吸液芯结构以及提高吸液芯表面纳米结构的机械稳定性,调整传热机制并进一步优化其传热性能等,极具发展前景。

2) 平板热管不同尺度数值模型所解决的具体问题不同。宏观模型可解决航天器平板热管结构和充液率设计难题,介观模型可处理吸液芯结构设计以及不同润湿性时沸腾传热问题,微观模型可揭示 Marangoni 效应以及气泡成核机制。受限于平板热管蒸发/沸腾-凝结-导热复杂机制,为提高模型的可靠性和适应范围,相关理论及数值模型均有待进一步完善。

3) 太空环境下存在高辐射和散热困难的难题,应对策略包括开发单向传热平板热管以及将平板热管与相变材料结合。相关研究集中于结构设计,很少有涉及微重力环境下实验测试以及数值模拟的研究。针对上述问题,应在完善理论的同时,加强相关数值模型的开发及实验研究。

### 参考文献(References)

- [1] 刘志全, 曾惠忠, 邱慧, 等. 小卫星结构的发展与展望[J]. 宇航学报, 2021, 42(9): 1067-1077.
- [2] 詹亚锋, 马正新, 曹志刚. 现代微小卫星技术及发展趋势[J]. 电子学报, 2000, 28(7): 102-106.
- [3] 邵兴国, 范含林, 苗建印, 等. 热管技术在航天领域应用和发展前景[C]//第十届全国热管会议论文集. 贵阳: 中国工程热物理学会, 2006: 276-285.
- [4] 李德富, 刘小旭, 邓婉, 等. 热管技术在航天器热控制中的应用[J]. 航天器环境工程, 2016, 33(6): 625-633.
- [5] Zhang H X, Li G G, Chen L, et al. Development of flat-plate loop heat pipes for spacecraft thermal control[J]. Microgravity Science and Technology, 2019, 31(4): 435-443.
- [6] Xie D D, Sun Y N, Wang G L, et al. Significant factors affecting heat transfer performance of vapor chamber and strategies to promote it: A critical review[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 175(4): 121132.
- [7] 李金旺, 戴书刚. 高温热管技术研究进展与展望[J]. 中国空间科学技术, 2019, 39(3): 30-42.
- [8] Feldman K T J. Flat plate heat pipe with structural wicks: US3613778A[P]. 1971-10-19.
- [9] Nakamura Y, Nishijo K, Murakami N, et al. Small demonstration satellite-4 (SDS-4): Development, flight results, and lessons learned in JAXA's microsatellite project[C]//27th Annual AIAA/USU Conference on small satellites. USA: AIAA, 2013.
- [10] Jin L, Wang S H, Guo J C, et al. Performance study of gravity-type heat pipe applied to fuel cell heat dissipation[J]. Energies, 2023, 16(1): 563.
- [11] Yu J, Xin Z F, Zhang R H, et al. Effect of spiral woven mesh liquid pumping action on the heat transfer performance of ultrathin vapour chamber[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 182: 107799.
- [12] Gillot C, Avenas Y, Cezac N, et al. Silicon heat pipes used as thermal spreaders[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2003, 26(2): 332-339.
- [13] Lim H T, Kim S H, Im H D, et al. Fabrication and evaluation of a copper flat micro heat pipe working under adverse-gravity orientation[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2008, 18(10): 105013.
- [14] 刘百麟, 李一帆, 胡幅杰, 等. GEO 长寿命卫星热管在轨等温性能分析[J]. 中国空间科学技术, 2020, 40(6): 89-98.
- [15] Li Y, Li Z X, Zhou W J, et al. Experimental investigation of vapor chambers with different wick structures at various parameters[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 77: 132-143.
- [16] Tang J C, Hu X G. Evaluation of capillary wetting performance of micro-nano hybrid structures for open micro-grooves heat sink[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2020, 112: 109948.
- [17] Zhou W B, Hu X G, He Y, et al. Study on axial wetting length and evaporating heat transfer in rectangular micro-grooves with superhydrophilic nano-textured surfaces for two-phase heat transfer devices[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 200: 112098.
- [18] 李红传, 纪献兵, 徐进良. 仿生毛细芯平板热管性能研究[J]. 航空动力学报, 2017, 32(10): 2403-2409.
- [19] Wong S C, Cheng H S, Tu C W. Visualization experiments on the performance of mesh-wick heat pipes with differing wick wettability[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 114: 1045-1053.
- [20] Wen R F, Li Q, Wu J F, et al. Hydrophobic copper nanowires for enhancing condensation heat transfer[J]. Nano Energy, 2017, 33: 177-183.
- [21] 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.
- [22] Shukla K N. Heat pipe for aerospace applications—An overview[J]. Journal of Electronics Cooling and Thermal Control, 2015, 5(1): 1-14.
- [23] Xin F, Lyu Q, Wang Q W. Three-dimensional numerical analysis of mini-grooved flat heat pipe filled with differ-

- ent working fluids with experimental validation[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2023, 44(4): 317–333.
- [24] 桂小红, 宋香娥. 微重力条件下热管吸热器瞬态热分析[J]. *中国空间科学技术*, 2015, 35(4): 46–52.
- [25] Faghri A, Harley C. Transient lumped heat-pipe analyses[J]. *Heat Recovery Systems and CHP*, 1994, 14(4): 351–363.
- [26] Zuo Z J, Faghri A. A network thermodynamic analysis of the heat pipe[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, 41(11): 1473–1484.
- [27] Fadhl B, Wrobel L C, Jouhara H. Numerical modelling of the temperature distribution in a two-phase closed thermosyphon[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 60(1/2): 122–131.
- [28] Fang W Z, Tang Y Q, Yang C, et al. Numerical simulations of the liquid-vapor phase change dynamic processes in a flat micro heat pipe[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 147: 119022.
- [29] Xiong S L, Du Y P, Wu R. Study of low-level pool boiling in vapor chamber of wickless micro-heat pipe based on Lattice Boltzmann pseudopotential method—Effects of superheat and wall wettability[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2441(1): 012017.
- [30] Liu X L, Cheng P, Quan X J. Lattice Boltzmann simulations for self-propelled jumping of droplets after coalescence on a superhydrophobic surface[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 73: 195–200.
- [31] Jiang H P, Wang X L, Li X R, et al. Enhanced evaporation performance on a novel microstructured surface with vertical dimension gradient[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 199: 123478.
- [32] Cui Y F, Yu H Y, Wang H J, et al. The numerical modeling of the vapor bubble growth on the silicon substrate inside the flat plate heat pipe[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 147: 118945.
- [33] 黄晓波. 表面张力驱动对流的实验研究[J]. *力学进展*, 1989, 19(3): 353–364.
- [34] 万晓琪, 崔晓钰, 谢荣建. 均温板散热技术研究进展[J]. *化工进展*, 2022, 41(2): 554–568.
- [35] Xin F, Ma T, Wang Q W. Thermal performance analysis of flat heat pipe with graded mini-grooves wick[J]. *Applied Energy*, 2018, 228: 2129–2139.
- [36] Yu J, Li Y, Xin Z F, et al. Experimental investigation on the thermal characteristics of ultrathin vapour chamber with in-plane bending[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 217: 119175.
- [37] Jiang L L, Huang Y, Tang Y, et al. Fabrication and thermal performance of porous crack composite wick flattened heat pipe[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 66(1/2): 140–147.
- [38] Tang H, Tang Y, Wan Z P, et al. Review of applications and developments of ultra-thin micro heat pipes for electronic cooling[J]. *Applied Energy*, 2018, 223: 383–400.
- [39] Ivanova M, Lai A, Gillot C, et al. Design, fabrication and test of silicon heat pipes with radial microcapillary grooves[C]//2006 Proceedings. 10th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronics Systems. San Diego, USA: IEEE, 2006: 545–551.
- [40] Ma H B, Peterson G P. Experimental investigation of the maximum heat transport in triangular grooves[J]. *Journal of Heat Transfer—Transactions of the Asme*, 1996, 118(3): 740–746.
- [41] Mallik A K, Peterson G P, Weichold M H. Fabrication of vapor-deposited micro heat pipe arrays as an integral part of semiconductor devices[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1995, 4(3): 119–131.
- [42] Hung Y M, Seng Q. Effects of geometric design on thermal performance of star-groove micro-heat pipes[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54(5/6): 1198–1209.
- [43] Zhou W J, Li Y, Chen Z S, et al. Ultra-thin flattened heat pipe with a novel band-shape spiral woven mesh wick for cooling smartphones[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 146: 118792.
- [44] Li C, Peterson G P, Wang Y X. Evaporation/boiling in thin capillary wicks (I)—Wick thickness effects[J]. *Journal of Heat Transfer—Transactions of the Asme*, 2006, 128(12): 1312–1319.
- [45] Tang Y L, Hong S H, Wang S F, et al. Experimental study on thermal performances of ultra-thin flattened heat pipes[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 134: 884–894.
- [46] Zhou W J, Li Y, Chen Z S, et al. Effect of the passage area ratio of liquid to vapor on an ultra-thin flattened heat pipe[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 162: 114215.
- [47] Zhou W J, Li Y, Chen Z S, et al. A novel ultra-thin flattened heat pipe with biporous spiral woven mesh wick for cooling electronic devices[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 180: 769–783.

- [48] Zhou W J, Li Y, Chen Z S, et al. Experimental study on the heat transfer performance of ultra-thin flattened heat pipe with hybrid spiral woven mesh wick structure [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 170: 115009.
- [49] Huang G W, Liu W Y, Luo Y Q, et al. A novel ultra-thin vapor chamber for heat dissipation in ultra-thin portable electronic devices[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 167: 114726.
- [50] Semenic T, Catton I. Experimental study of biporous wicks for high heat flux applications[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(21/22): 5113-5121.
- [51] Byon C, Kim S J. Capillary performance of bi-porous sintered metal wicks[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(15/16): 4096-4103.
- [52] Chen L, Deng D X, Huang Q S, et al. Development and thermal performance of a vapor chamber with multi-artery reentrant microchannels for high-power LED[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 166: 114686.
- [53] Velardo J, Date A, Singh R, et al. Experimental investigation of a vapour chamber heat spreader with hybrid wick structure[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 140: 28-35.
- [54] Li Y, Zhou W J, Li Z X, et al. Experimental analysis of thin vapor chamber with composite wick structure under different cooling conditions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 156: 471-484.
- [55] Velardo J, Date A, Singh R, et al. On the effective thermal conductivity of the vapour region in vapour chamber heat spreaders[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 145: 118797.
- [56] Yao F, Miao S S, Zhang M C, et al. An experimental study of an anti-gravity vapor chamber with a tree-shaped evaporator[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 141: 1000-1008.
- [57] 田智星, 刘余, 王成龙, 等. 高温热管传热传质数值模型研究综述[J]. *核科学与工程*, 2022, 42(5): 1093-1113.
- [58] Ranjan R, Murthy J Y, Garimella S V, et al. A numerical model for transport in flat heat pipes considering wick microstructure effects[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54(1/2/3): 153-168.
- [59] Yan W T, Yang X, Liu T Q, et al. Numerical simulation of heat transfer performance for ultra-thin flat heat pipe [J]. *Journal of Thermal Science*, 2023, 32(2): 643-649.
- [60] 吴应杰, 童彦钧, 赵后剑, 等. 碱金属热管传热特性的数值研究[J]. *核科学与技术*, 2022, 10(1): 9-19.
- [61] Wang Q H, Zhao H, Xu Z J, et al. Influence of groove parameters on the thermal hydraulic performance of a composite porous vapor chamber: A numerical study[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 172: 115149.
- [62] Wang Q H, Wu Z H, Xu Z J, et al. Optimization of the coupling groove parameters of composite porous vapor chamber[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 205: 118007.
- [63] Huang Z H, Tang X W, Luo Q L, et al. Numerical analysis on heat transfer characteristics of a multi-vapor channel vapor chamber with novel ultra-thin composite wick[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, 26: 101035.
- [64] Bodla K K, Murthy J Y, Garimella S V. Evaporation analysis in sintered wick microstructures[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 61: 729-741.
- [65] Harimi B, Ghazanfari M H, Masihi M. Analysis of evaporating liquid bridge in horizontal fractures[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 202: 108577.
- [66] Huang Y H, Chen Q. A numerical model for transient simulation of porous wicked heat pipes by lattice Boltzmann method[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 105: 270-278.
- [67] Ranjan R, Patel A, Garimella S V, et al. Wicking and thermal characteristics of micropillared structures for use in passive heat spreaders[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(4): 586-596.
- [68] 刘芳, 杨志鹏, 袁卫星, 等. 电子芯片散热技术的研究现状及发展前景[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(23): 163-169.
- [69] Miljkovic N, Enright R, Nam Y, et al. Jumping-droplet-enhanced condensation on scalable superhydrophobic nanostructured surfaces[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(1): 179-187.
- [70] Wang D H, Sun Q Q, Hong M J, et al. Design of robust superhydrophobic surfaces[J]. *Nature*, 2020, 582(7810): 55-59.
- [71] Hu Y X, Cheng J, Zhang W, et al. Thermal performance enhancement of grooved heat pipes with inner surface treatment[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 67: 416-419.
- [72] Xie X Z, Weng Q, Luo Z Q, et al. Thermal performance of the flat micro-heat pipe with the wettability gradient surface by laser fabrication[J]. *International Journal of*

- Heat and Mass Transfer, 2018, 125: 658–669.
- [73] Lee J S, Lee J S. Critical heat flux enhancement of pool boiling with adaptive fraction control of patterned wettability[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 96: 504–512.
- [74] Kousalya A S, Singh K P, Fisher T S. Heterogeneous wetting surfaces with graphitic petal-decorated carbon nanotubes for enhanced flow boiling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 87: 380–389.
- [75] 张镜洋, 李文通, 张若骥, 等. 脉冲热负荷下相变蓄热对蒸发循环制冷性能的影响[J]. 宇航学报, 2022, 43(3): 383–392.
- [76] 张冰强, 吕巍, 张有为, 等. 热开关热管在月面探测光学设备中的应用[J]. 中国空间科学技术, 2017, 37(6): 68–74.
- [77] Edalatpour M, Murphy K R, Mukherjee R, et al. Bridging-droplet thermal diodes[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(43): 2004451.
- [78] Traipattanakul B, Tso C Y, Chao C Y H. A phase-change thermal diode using electrostatic-induced coalescing-jumping droplets[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 135: 294–304.
- [79] Traipattanakul B, Tso C Y, Chao C Y H. Electrostatic-induced coalescing-jumping droplets on nanostructured superhydrophobic surfaces[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 128: 550–561.
- [80] 陈华伟, 张力文, 郭雨润. 一种单方向导热热管: CN110793367A[P]. 2020–02–14.
- [81] 向建化, 段吉安, 周伟, 等. 一种扁平单向传热热管: CN111590281A[P]. 2020–08–28.
- [82] 向建化, 魏鑫, 周伟, 等. 一种Y形导流台吸液芯单向传热热管及其加工方法: CN114390869A[P]. 2022–04–22.
- [83] 张力文, 陈华伟, 张超旗, 等. 一种单向导热可控开度的平板热管: CN113008060B[P]. 2022–01–11.
- [84] 邵兴国, 向艳超, 苗建印, 等. 热管在嫦娥卫星热控设计中的应用[C]//第十届全国热管会议论文集. 贵阳: 中国工程热物理学会, 2006: 269–275.
- [85] 王磊, 菅鲁京. 相变材料在航天器上的应用[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(5): 522–528.
- [86] 陆江峰, 朱彤, 王海. 带相变蓄热材料热管仿真与试验对比研究[J]. 建模与仿真, 2014, 3(1): 12–16.
- [87] 王晓占, 孙敬文, 季琨, 等. 一种空间飞行器用储能控温散热器结构及其制造方法: CN106697335B[P]. 2019–09–17.
- [88] 刘顺, 周日海, 王琳, 等. 储能式均热板装置: CN112325686A[P]. 2021–02–05.
- [89] 董丽宁, 雷智博, 阮世庭, 等. 一种卫星用复合式相变平板热管: CN113074570A[P]. 2021–07–06.

## Application and development of flat heat pipe in spacecraft thermal control

LENG Yakun<sup>1</sup>, ZHANG Xu<sup>2</sup>, ZHEN Hualong<sup>1</sup>, LIU Yingchun<sup>2</sup>, WANG Zhongqi<sup>1</sup>, PU Liang<sup>1\*</sup>

1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

2. Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201304, China

**Abstract** Flat heat pipe, due to its advantages of high heat transfer efficiency, great temperature uniformity, and safety and reliability, has become one of the important options for spacecraft thermal control. Optimization of wick structure is an important method to improve the flow and heat transfer performance of flat heat pipe. For the design of wick structures, the method of designing high performance wick structures was revealed, and guidance was provided for the selection and application of macro-meso-micro multiscale numerical model. For wick surface modification, the importance to improve nanostructure mechanical stability, adjust heat transfer mechanism and carry out numerical simulation research was emphasized. To solve the problems of heat dissipation and high radiation in space environment, the development directions of flat heat pipe in spacecraft thermal control were figured out, and the shortcomings of current research were analyzed.

**Keywords** flat heat pipe; wick; structural optimization; multiscale; numerical model ●



(责任编辑 傅雪)