

文章编号:1672-3961(2025)06-0090-10

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2024.335

多热源冷却的新型环路热管设计及性能

柳洋¹,朱波¹,陈超伟²,陈岩²,辛公明^{2*}

(1.山东省特种设备检验研究院集团有限公司,山东 济南 250101; 2.山东大学核科学与能源动力学院,山东 济南 250061)

摘要:为了解除环路热管在多热源工况下的使用限制,拓展环路热管内工质的循环换热效率,在传统环路热管基础上,设计制造一种针对多热源冷却的新型环路热管。该环路热管具有一个蒸发器和多个热沉部件,通过内部流体工质循环将蒸发器及热沉处的热量吸收并在冷凝器处释放,实现同时对多个热源冷却。通过对传统环路热管进行优化设计,制造上述结构的新型环路热管,进一步探究新型环路热管中热沉数量变化对运行性能的影响。通过试验验证新型环路热管运行的可行性,其内部产生的循环流量最高达45 mL/min,相较于优化设计前,系统整体散热量最高提升90%。在此基础上,对不同结构的新型环路热管启动及稳定运行性能参数进行对比,结果显示,新型环路热管中热沉数量变化会对内部工质的循环阻力产生显著影响,进而影响系统内工质的循环流量,决定蒸发器和热沉的冷却能力。

关键词:环路热管;多热源;冷却系统;相变;多孔介质

中图分类号:TK172.4

文献标志码:A

引用格式:柳洋,朱波,陈超伟,等.多热源冷却的新型环路热管设计及性能[J].山东大学学报(工学版),2025,55(6):90-99.

LIU Yang, ZHU Bo, CHEN Chaowei, et al. Design and performance of a novel loop heat pipe for multi-heat-sources cooling[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(6):90-99.

Design and performance of a novel loop heat pipe for multi-heat-sources cooling

LIU Yang¹, ZHU Bo¹, CHEN Chaowei², CHEN Yan², XIN Gongming^{2*}

(1. Shandong Special Equipment Inspection Institute Group Co., Ltd., Jinan 250101, Shandong, China; 2. School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: To overcome the limitations of loop heat pipes under multi-heat-sources conditions and enhance the circulation and heat exchange efficiency of the working fluid, a novel loop heat pipe was designed and fabricated based on the traditional structure to provide cooling for multi-heat-sources simultaneously. This loop heat pipe featured one evaporator and multiple heat sinks. By circulating the working fluid internally, it absorbed heat from the evaporator and heat sinks and released it at the condenser, achieving simultaneous cooling of multi-heat-sources. Through the optimization of the traditional loop heat pipe design, the novel structure was manufactured, and the effect of varying the number of heat sinks on its operational performance was further investigated. Experimental tests verified the feasibility of the new loop heat pipe, showing that the system generated a maximum circulation flow rate of 45 mL/min. Compared with the pre-optimized design, the overall heat dissipation capacity of the system increased by up to 90%. A comparison of the startup and stable operation performance parameters of different structural configurations showed that changes in the number of heat sinks affected the circulation resistance of the working fluid inside the system, thereby influencing the circulation flow rate and ultimately determining the cooling capacity of the evaporator and heat sinks.

Keywords: loop heat pipe; multi-heat-sources; cooling system; phase change; porous media

收稿日期:2024-12-20

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFB4004400);山东省重点研发计划资助项目(2022SFGC0801);山东省自然科学基金资助项目(ZR2023ME184)

第一作者简介:柳洋(1995—),男,山东烟台人,工程师,博士,主要研究方向为强化传热传质及节能技术。E-mail:youngofsc@126.com

*通信作者简介:辛公明(1977—),男,山东日照人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为功率器件热管理。E-mail:xingm@sdu.edu.cn

0 前言

特种设备广泛应用于能源、交通、化工、机械、建筑等领域,具有高风险、高能量、高温高压等特性,其安全性至关重要^[1-2]。特种设备的检验工作具有极高的价值和必要性^[3-4]。无损检测(nondestructive testing, NDT)技术是指在不损伤被检测物体的前提下,了解其内部结构、性质及缺陷的一种技术手段^[5-6]。在特种设备检验中,NDT技术可以保障特种设备安全、提高可靠性及延长使用寿命^[7-8]。高功率探伤仪、X射线机、超声波检测设备等NDT设备在运行过程中会产生大量的热量^[9-10],它们内部有许多高精度和敏感元件(如传感器、电子元件等),需要长时间持续运行,设备内部温度过高会导致传感器性能下降,测量误差增大^[11-12],甚至损坏内部电子元器件^[13-14]。随着NDT设备逐渐向小型化和便携化方向发展^[15-16],其内部元器件的集成度越来越高,散热问题越发突出^[17-18]。为了保证设备稳定运行并延长其使用寿命,需采用高效的冷却技术^[19-20]。热管理方式依据对吸收热源处热量的介质是否需要驱动能耗,主要分为主动式^[21]和被动式^[22]。被动式热管理主要依靠翅片、热管等高导热器件将热源处热量传递到环境中进行散热^[23-24],主动式热管理主要通过泵、风扇驱动空气和冷却液体等冷却介质将热量从热源处吸收并释放^[25-26]。传统风冷技术适用于散热需求低或内部具有大空间的NDT设备,但由于噪声问题和散热效率的限制,无法满足高功率设备的散热需求。液冷比风冷具有更高的冷却效率,能够有效降低设备内部温度,适用于高功率的NDT设备,但需要更多的部件(包括液体管路、泵、冷却板、热交换器等)和精密的设计,系统结构复杂,安装和维护困难,因此成本较高。液冷系统通常依赖机械泵驱动冷却液循环流动,泵的效率 and 可靠性直接影响整个散热系统性能。泵故障、堵塞、漏液等问题可能导致液冷系统无法正常工作,对设备造成损害。液冷系统通常体积较大,限制其在某些对体积和质量有严格要求的领域(如航天、军事、便携式设备等)中应用。

综合以上热管理方法的技术问题,热管冷却技术基于热管内工质的相变,可以实现高效热量传递^[27-28],其工作过程通过温差驱动传热,不需要外部动力源,具有低功耗、无噪音、无机械磨损的优势,散热和使用可靠性大大提升。同时,热管结构简单且制造工艺成熟,量产后成本低廉,且无须额

外电力驱动,整体使用成本较低。环路热管(loop heat pipe, LHP)是一种特殊热管^[29-30],其蒸发器与冷凝器分离,利用蒸发器内部多孔结构毛细芯产生的毛细力驱动工质循环形成环路,运行不受重力限制,具有高度的灵活性^[31-32]。目前的环路热管只能对单一热源进行散热,无法实现对多热源同时散热。NDT设备中热量多以多点分布式出现,可能同时包含电子器件、传感器等多个功率器件的热管理,因此,需要新的设计思路拓展环路热管的适用性。本研究基于环路热管可以驱动内部工质循环的原理,对环路热管结构进行优化设计,使循环工质在多个部件中吸热,实现多热源同时冷却。同时,增加工质循环过程中的吸热和放热次数,充分利用工质循环过程,提升环路热管散热效率。

1 试验装置及系统

1.1 多热源冷却的新型环路热管部件设计及制造

多热源冷却的新型环路热管以传统单热源冷却环路热管为基础设计制造。单热源冷却环路热管的运行原理如图1所示。当蒸发器受热后,多孔毛细芯内的液体工质开始相变,气液界面处产生毛细力,工质持续相变产生的蒸气汇聚于蒸发器出口处,使出口处蒸气压升高,毛细芯细小孔隙中毛细力的产生阻止蒸气穿透毛细芯,促使蒸气进入蒸气管路,整个环路内流体开始循环。蒸气进入冷凝器后,释放热量并凝结成液体,经过液体管路重新回到毛细芯中,等待后续蒸发,完成循环。环路热管的主要驱动力来源为毛细芯内部的细小孔和气液两相工质所产生的毛细力。由Young-Laplace公式可知,毛细力主要由液体的表面张力、工质与毛细芯材料之间的接触角及毛细芯内孔隙的孔径决定,液体工质表面张力越大、接触角越大、毛细芯内孔径越小,所能产生的毛细力越大。

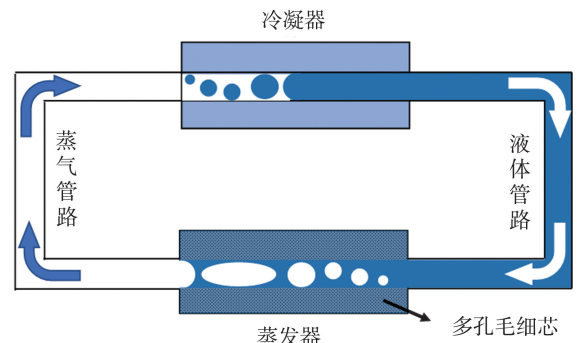


图1 单热源冷却环路热管运行原理

Fig.1 Operating principle of single heat source cooling LHP
为了适用于便携式设备内部小空间情况下的

散热,环路热管的蒸发器厚度较小,内部布置由400目镍粉颗粒烧结而成的毛细芯,同时具有蒸气腔和液体补偿腔,以便毛细芯中产生的蒸气和冷凝器中回流液体汇聚。蒸发器具体结构如图2所示,结构参数如表1所示。

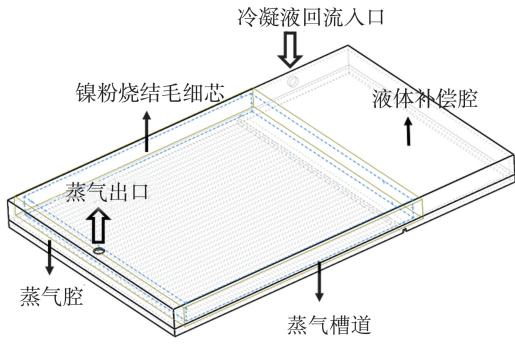


图2 蒸发器结构
Fig.2 Evaporator structure

表1 蒸发器及毛细芯结构参数

Table 1 Structural parameters of evaporator and wick

蒸发器外壳				毛细芯			
长/mm	宽/mm	厚/mm	壳体壁厚/mm	长/mm	宽/mm	厚/mm	平均孔径/ μm
120	76	9	0.5	80	74	6	≈ 6

蒸发器作为吸热部件只能对单一热源进行冷却,整个多热源冷却系统中还应包含其余热沉以吸收其余热源的热量。蒸发器可以提供驱动力以驱动环路热管中工质循环,因此系统中其余热沉不需要具有多孔结构以提供毛细力。所设计的热沉结构内需要具有流体通道,使流体流经热沉带走热量。为了强化流道内的传热效果,本研究加工制造具有微通道结构的热沉,如图3所示。该热沉基板采用纯铜制造,表面镀镍以防止工质对铜腐蚀造成冷板损坏,上盖板采用低导热系数的有机玻璃制造,方便观察热沉内工质的流动状态并减少导热造成的热损失。微通道热沉具体结构参数如表2所示。

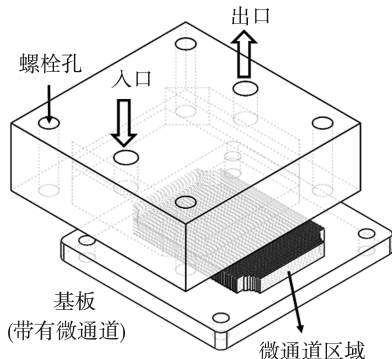


图3 具有微通道结构的热沉
Fig.3 Heat sink with microchannel

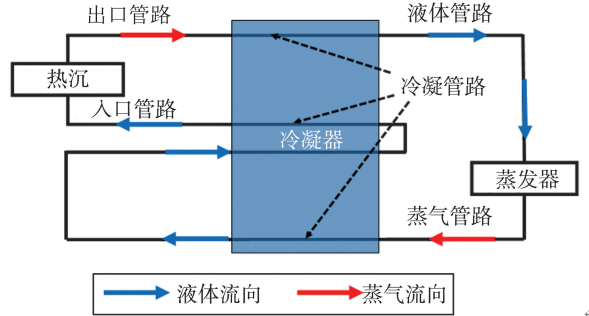
表2 微通道热沉结构参数

Table 2 Structural parameters of microchannel heat sink

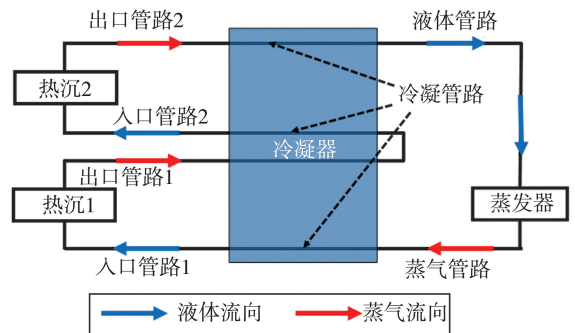
热沉			微通道				
长/mm	宽/mm	厚/mm	单条长度/mm	单条宽度/mm	单条高度/mm	数量/条	通道间距/mm
60	60	20	30	0.5	5	43	0.5

1.2 新型环路热管设计制造及其测试试验台搭建

新型环路热管的基本部件设计制造完成后,将各部件用不锈钢管路相连,形成封闭系统。管路主要包括蒸气管路、冷凝器内的冷凝管路及液体管路。根据热沉数量不同,本研究设计一套可以方便改变结构的新型环路热管,不同结构环路热管的运行原理如图4所示。工质按照常规环路热管中的流动过程,在蒸发器中相变为蒸气,在毛细芯的毛细力驱动下通过蒸气管路进入冷凝器中的冷凝管路,重新冷却为低温液体后进入热沉中吸收热源热量,热流体沿出口管路进入冷凝管路冷却,再进入下一个热沉,重复吸放热,最终回到蒸发器完成循环。目前所设计的系统最多连接两个热沉,蒸发器和热沉可以同时2~3个热源进行散热。



(a) 单热沉系统



(b) 双热沉系统

图4 不同结构环路热管的运行原理

Fig.4 Operating principles of LHP with different structures

新型环路热管设计制造完成后,需要搭建试验台对其运行性能进行表征。本研究设计搭建的新型环路热管性能表征试验台如图5所示,主要包括试验段(所制造的新型环路热管)、加热系统、冷却系统及数据采集系统。加热系统采用陶瓷加热片

模拟蒸发器及热沉处的发热热源,加热面积为 $4\text{ cm}\times 4\text{ cm}$ 。使用3台可调节式恒功率直流电源为加热片供电。蒸发器处加热片提供的热负荷为 Q_{Eva} ,热沉处加热片提供的热负荷为 Q_{HS} 。系统中包含两个热沉时,根据工质流动路径,热沉的热负荷分别为 Q_{HS1} 、 Q_{HS2} 。冷却系统采用一台恒温水循环机,为冷却块提供 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温水,系统冷凝段管路穿过冷却块,确保管路内的蒸气能够被冷凝并冷却至 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。数据采集系统主要采集系统运行过程中各个位置的温度及系统内的循环流量。温度采集使用T型热电偶。新型环路热管中热电偶的布置如图6所示,其中 T_N 为第 N 个T型热电偶。试验中深入探究系统性能的影响因素,对循环流量进行测量。为了尽可能避免流量测量对环路内工质流动产生影响,采用可夹持不锈钢管的超声波流量计进行流量测量,其布置位置如图6所示。为了尽可能排除管内同时存在两相气液工质对流量测量产生影响,将超声波流量计布置于冷凝段后的液体

管路位置。使用无纸记录仪每隔 0.5 s 记录一次流量及温度。

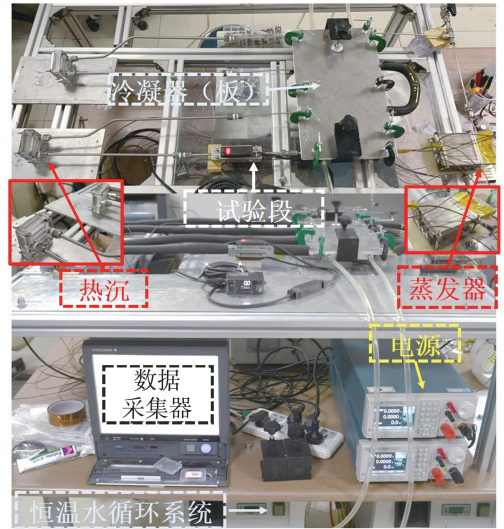


图5 新型环路热管性能表征试验台
Fig.5 Experimental bench for performance characterization of the novel LHP

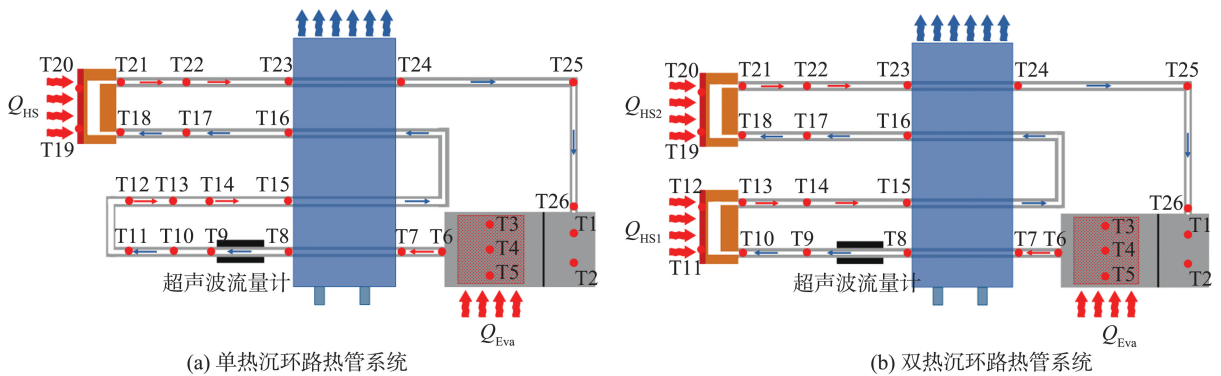


图6 热电偶及流量计布置示意图
Fig.6 Schematic diagram of thermocouple and flowmeter arrangement

1.3 试验过程及不确定性分析

试验前需对系统进行抽真空和充液操作。为了尽可能减少封闭系统内存在不凝气体对性能的影响,并降低液体工质相变温度,使用分子泵机组将系统内真空度控制在 $(4.8\pm 0.2)\times 10^{-4}\text{ Pa}$ 。抽真空完成后,向系统内充入一定量的液体工质,本研究系统的充液率控制在 85% 左右。为了契合该系统在 NDT 设备散热中的应用背景,使用不导电且易挥发的电子氟化液 (Noah-2100A) 作为工质。试验过程如下:对蒸发器处施加热负荷,使蒸发器处有气体工质进入气体管路中,保证整个环路内工质开始循环;对冷板处施加热负荷。为了保证试验的安全性,参考电子器件运行温度,系统最高温度设为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

试验中各参数的不确定性主要来自测量数据的误差,包括:冷却水的温度偏差为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,热电偶的测温误差为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,流量计的测量误差为

$\pm 1\text{ mL/min}$,电源的负载稳压率误差为 $\pm 0.5\%$ 。经计算,各试验结果表征参数(包括温度、流量、热负荷及热阻等)的最大误差不超过 6% ,试验结果可靠。

2 试验结果与分析讨论

2.1 蒸发器启动及运行性能表征

对于多热源散热的新型环路热管系统,蒸发器作为工质循环的动力来源,决定系统能否正常运行。蒸发器的启动性能(包括启动时间和启动温度)决定系统能否以较短时间和较低温度进入正常工作状态。

系统运行过程温度 T 与流量 V 的变化曲线如图7所示。由图7可以看出,当给蒸发器施加热负荷后,蒸发器温度上升,一段时间后,蒸发器出口

(即 T6、T7) 温度突升, 此时系统内循环流量产生突升, 表明系统内流体开始循环, 系统启动。此时, 蒸

发器温度为蒸发器启动温度 $T_{start-up}$, 从施加热负荷开始到此时的时间为蒸发器启动时间 $t_{start-up}$ 。

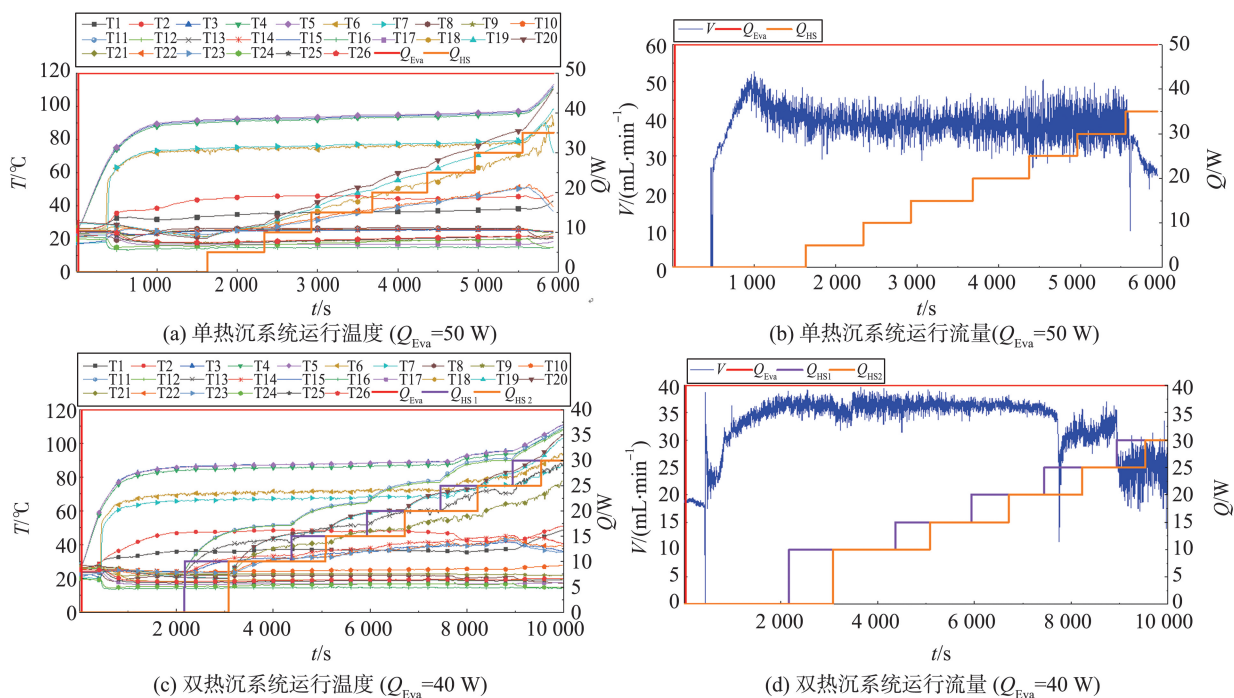


图7 系统运行过程温度与流量变化曲线

Fig.7 Temperature and flow curve during system operation

单热沉与双热沉系统蒸发器的启动时间及启动温度对比如图8所示。由图8可以看出, 随着施加给蒸发器的热负荷增加, 蒸发器的 $t_{start-up}$ 缩短, $T_{start-up}$ 降低。热负荷升高使进入蒸发器的热流增加, 内部工质升温更快, 因此 $t_{start-up}$ 缩短。当蒸发器驱动的工质流经的热沉数量增多时, 蒸发器的 $t_{start-up}$ 变长, $T_{start-up}$ 升高。

的 T_{Eva} 均高于单热沉系统。

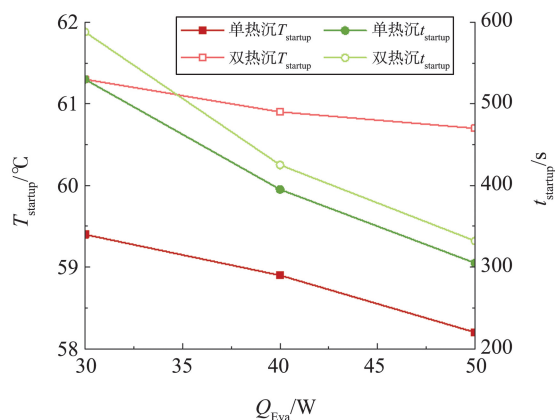


图8 不同结构系统蒸发器启动参数对比

Fig.8 Comparison of starting parameters of evaporators in different structural systems

当蒸发器稳定运行时, 运行温度 T_{Eva} 及 V 的变化如图9所示。由图9可以看出: 随着 Q_{Eva} 升高, 蒸发器的 T_{Eva} 及 V 增大; 双热沉系统内的 V 明显低于单热沉系统; 在不同热负荷下, 双热沉系统蒸发器

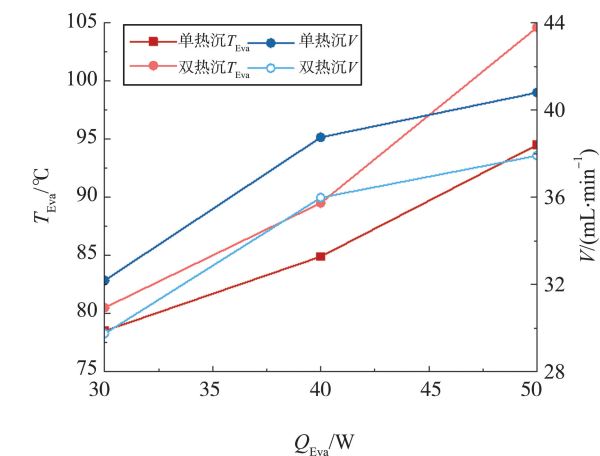


图9 蒸发器稳定运行温度及循环流量变化

Fig.9 Evaporator operating temperature and circulation flow

综合以上试验结果可以发现, 对于本研究设计的新型多热源散热环路热管系统, 蒸发器可以作为一个既能吸收热量又能驱动工质流动的毛细驱动泵, 决定系统能否正常运行。当蒸发器驱动的流体工质流经的热沉数量增加时, 系统内的工质流动阻力增大, 导致蒸发器启动时间变长, 启动温度升高, 系统内整体的循环流量降低。

2.2 微通道结构热沉的运行性能分析

观察图7可以发现, 当热沉处(即 T11、T12 或 T19、T20) 的热负荷升高, 其运行温度约等于蒸发器

处(即 T3、T4、T5)的运行温度时,系统运行温度和流量曲线会出现较大波动,热沉及蒸发器 T_{Eva} 突升,系统内 V 突降。试验中发现,此时热沉微通道内的液体发生相变,热沉内的换热状态由单相对流变为流动沸腾。该现象发生后,引起系统内各个部件(包括蒸发器及热沉)的运行温度升高和流量变化,甚至可能造成系统失效,环路热管各个部件的运行温度持续上升,如图 7(a)所示。因此,本研究主要研究内部工质为单相液体时,具有微通道结构热沉的运行参数,以排除热沉内部发生流动沸腾后造成的不稳定性因素对系统中热沉性能的影响。

相同蒸发器热负荷下,单热沉与双热沉系统中各个热沉的稳定运行温度 T_{HS} 对比如图 10 所示。由图 10 可以看出:当系统中只有一个热沉时,其运行温度最低,因为此时系统内循环流量较大,对流换热效果好;当系统中同时连接两个热沉时,由图 4 可以发现,热沉 1 入口前端的流体只经过一段冷凝,而进入热沉 2 的流体则经过两段冷凝,入口温度更低,因此热沉 1 的运行温度高于热沉 2。

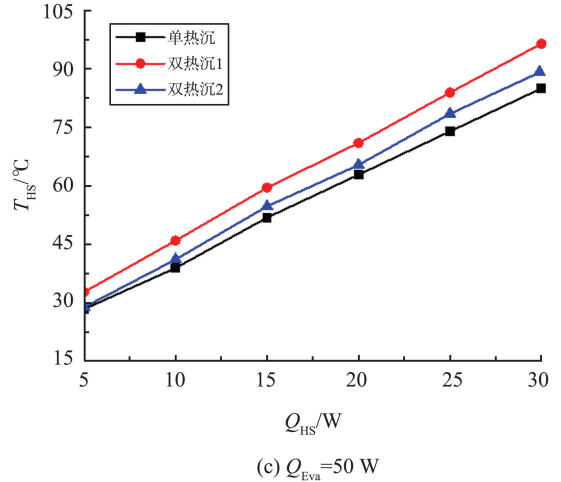
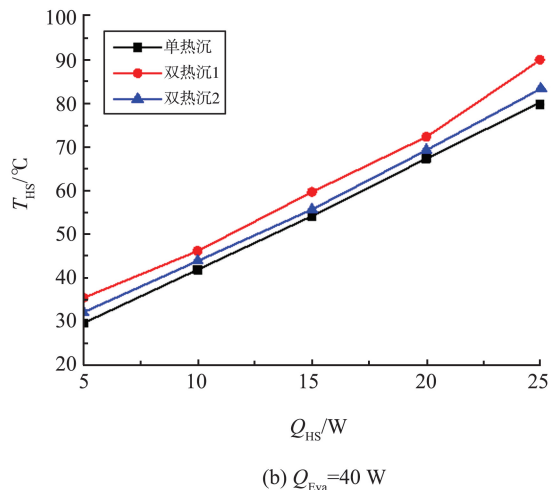
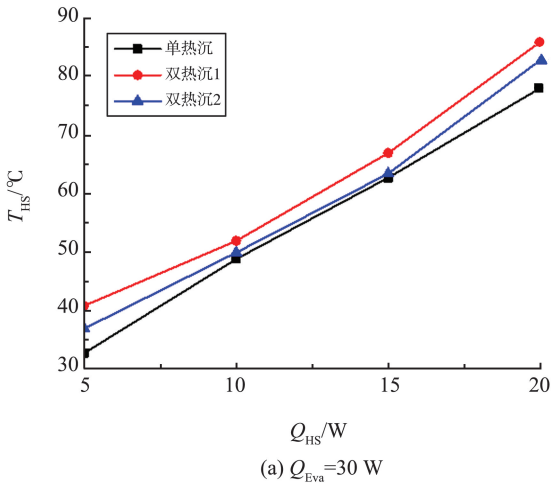


图 10 热沉运行温度对比

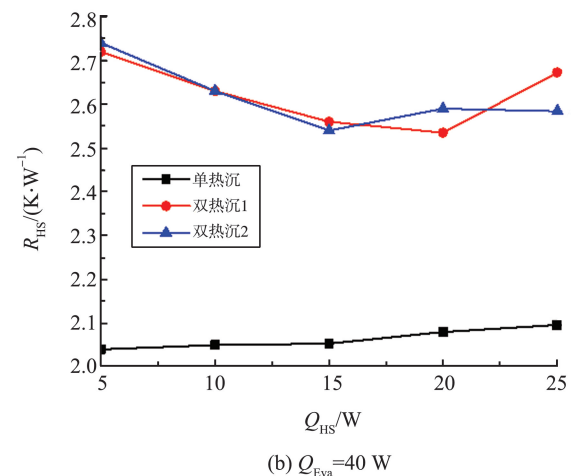
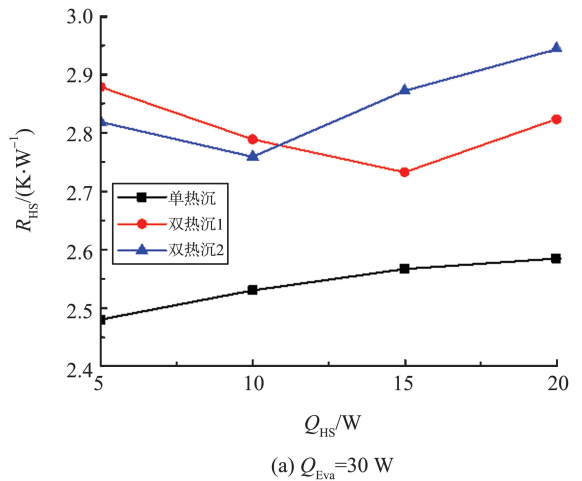
Fig.10 Comparison of operating temperatures of heat sinks

为了进一步判断热沉的运行性能,排除入口温度对热沉运行温度的影响,计算热沉稳定运行时的热阻

$$R_{HS} = (T_{HS} - T_{in}) / Q_{HS}, \quad (1)$$

式中 T_{in} 为热沉入口流体温度。

热沉内部热阻对比结果如图 11 所示。



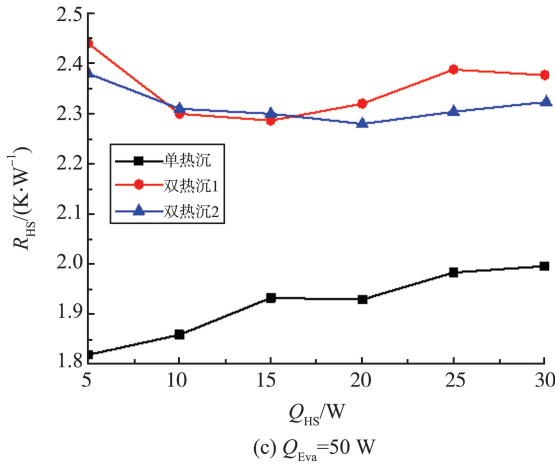


图 11 热沉内部热阻对比

Fig.11 Comparison of internal thermal resistance in heat sinks

由图 11 可以看出,热沉内部热阻与系统结构(即热沉数量)有很大关系。当系统内有一个热沉时, R_{HS} 较低。当蒸发器热负荷一定时,系统内循环流量保持稳定,此时 R_{HS} 变化较小,波动幅度不超过 0.2 K/W 。因此,本研究认为,当热沉内的结构确定时, R_{HS} 只与 V 有关,增加热沉数量会导致系统内的 V 降低,从而导致每个热沉的 R_{HS} 均较高。

2.3 不同结构系统的整体性能分析

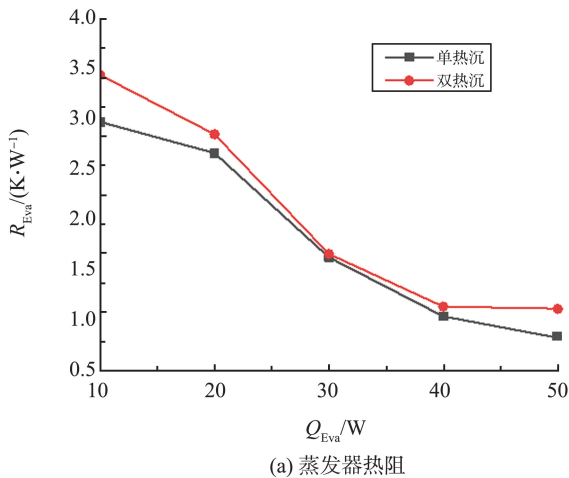
根据环路热管系统的运行原理及各传热过程,分别计算新型环路热管中蒸发器热阻 R_{Eva} 及热沉传热热阻 R_{T-HS} , 计算式分别为

$$R_{Eva} = (T_{Eva} - T_{cond}) / Q_{Eva}, \quad (2)$$

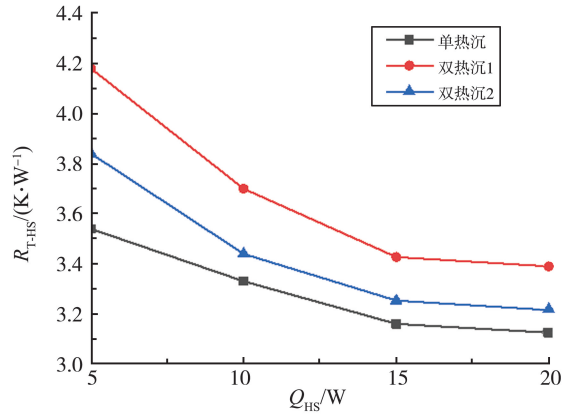
$$R_{T-HS} = (T_{HS} - T_{cond-HS}) / Q_{HS}, \quad (3)$$

式中, T_{cond} 为蒸发器出口处冷凝段的出口温度, $T_{cond-HS}$ 为热沉出口对应的冷凝段出口温度。

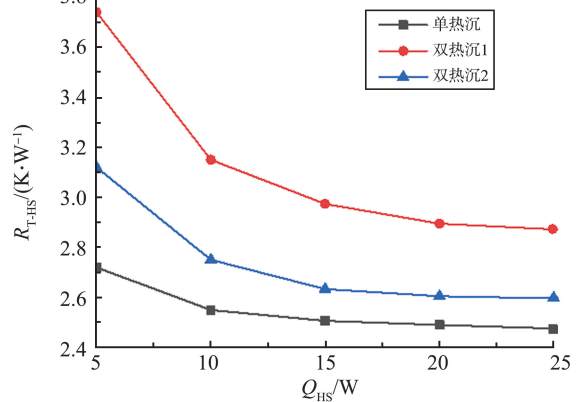
系统运行过程中的蒸发器热阻及热沉传热热阻对比如图 12 所示。



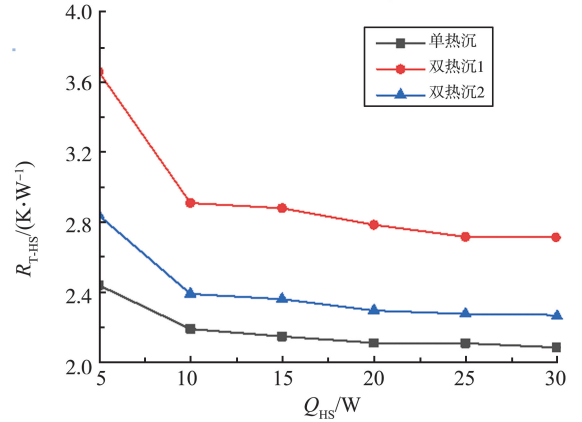
(a) 蒸发器热阻



(b) 热沉传热热阻($Q_{Eva} = 30\text{ W}$)



(c) 热沉传热热阻($Q_{Eva} = 40\text{ W}$)



(d) 热沉传热热阻($Q_{Eva} = 50\text{ W}$)

图 12 蒸发器热阻及热沉传热热阻对比

Fig.12 Comparison of thermal resistance of evaporators and heat transfer thermal resistance of heat sinks

由图 12 可以看出:当系统中只有一个热沉时, R_{Eva} 及 R_{T-HS} 均较低;对比不同 Q_{Eva} 下的 R_{T-HS} 可以发现, Q_{Eva} 越大, R_{T-HS} 越低。与图 11 中情况类似,由于热沉 2 的入口液体温度较低,能够吸收更多热量, R_{T-HS} 较低,而单热沉系统中 V 最高,因此该系统中热沉的 R_{T-HS} 最低。

综合上述结果,本研究认为新型环路热管系统内各吸热部件(包括蒸发器及热沉)的性能主要取决于整个封闭系统内的循环流量。

系统运行过程中的传热传质过程如图 13 所示。

流体在蒸发器外部管路及热沉内流动时产生流动压降 Δp_{flow} ,当毛细芯和工质相变时产生的毛细力 Δp_{cap} 大于 Δp_{flow} 时,系统才能稳定运行。蒸发器处的热量传递主要有两种方式:第一种是通过毛细芯内液体工质相变吸热 Q_{pc} 将蒸发器处的部分热量吸收,通过流体循环至冷凝段,释放热量,重新凝结为冷凝液体;第二种是通过毛细芯及液体工质的导热,以热泄漏 Q_{hl} 的形式进入补偿腔中,被回流的冷凝工质吸收。系统内的循环流量越大,证明蒸发器毛细芯内的液体工质相变越剧烈,并且回流的冷凝液体量越大,所能够吸收的蒸发器热量越多,在相同热负荷情况下,蒸发器运行温度越低。同理,对于内部只进行单相对流换热的热沉,其入口流量越大,换热能力越强。

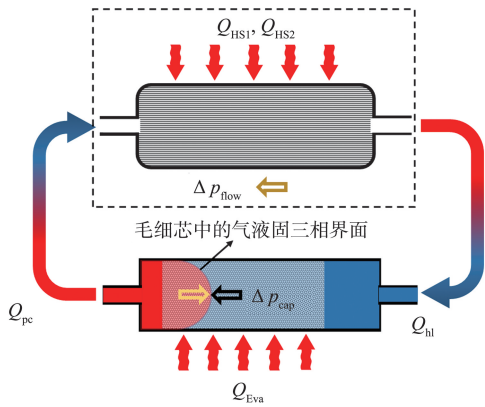


图 13 系统内传热传质过程示意图

Fig.13 Schematic diagram of heat and mass transfer in the novel LHP

由于毛细芯内提供的毛细力一定,随着蒸发器处的热负荷升高,工质相变量增大,流量随之增大,同时工质外部循环流动阻力增大。当工质外部循环流动阻力约等于毛细芯提供的毛细力时,随蒸发器处热负荷升高,系统内循环流量增长开始变缓,如图 14 所示。

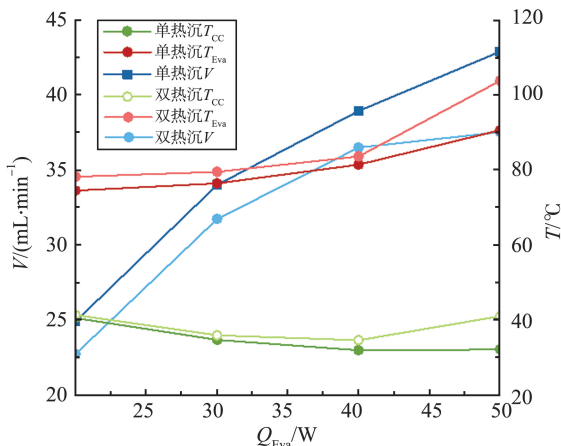


图 14 系统内循环流量变化规律

Fig.14 Circulation flow change law in the novel LHP

由图 14 可以看出,补偿腔温度 T_{CC} 开始升高,说明此时热量更多通过漏热方式进入补偿腔,被回流冷凝液体吸收,工质相变带走的热量增长较少,系统内循环流量增长速率下降。

3 结论

基于环路热管运行原理,本研究设计制造一种适用于多热源散热的新型环路热管,由蒸发器内毛细芯孔隙中工质相变产生的毛细力驱动工质在系统其余热沉中流动并吸收热量,经冷凝管路将热量释放,完成热量的传递和散失。通过试验验证新型环路热管运行的可行性,对比系统结构对蒸发器及热沉运行性能的影响,主要结论如下。

(1) 系统中的循环流量是判断该系统性能的重要参数,循环流量越大,蒸发器内的相变换热越强烈,蒸发器运行温度越低。热沉内的单相对流换热能力随循环流量的增大而增强,热沉运行温度随之降低。系统中循环流量同时取决于蒸发器处热负荷和系统内热沉数量,蒸发器处热负荷越大,工质蒸发量越大,系统中循环流量越高;系统内热沉数量越多,工质流动阻力越大,循环流量越低。

(2) 系统结构会对蒸发器启动时间与启动温度产生较大影响。随着系统中热沉数量增加,工质开始在系统内进行循环的阻力增大,因此需要更长的启动时间和更高的启动温度,使蒸发器毛细芯内产生更大的毛细力,推动系统内工质开始进行循环。

(3) 热沉内液体工质相变会对系统造成不利影响,主要表现为当沸腾发生后,系统内循环流量急剧下降,造成蒸发器及热沉运行温度升高。微通道内流动沸腾不稳定性的影响可能会造成系统失效。由于热沉内工质的汽化热不能有效利用,热沉处所能承受的热负荷小于蒸发器处。

参考文献:

[1] 陈学东, 范志超, 陈永东, 等. 我国高端压力容器设计制造与维护技术进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59(20): 18-33.
CHEN Xuedong, FAN Zhichao, CHEN Yongdong, et al. Technological progress on design, manufacturing and maintenance of high-end pressure vessels in China [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(20): 18-33.

[2] 王新华, 杨兆瀚, 黄国健, 等. 特种机电设备安全检测、

- 监测与风险管理研究进展[J]. 自动化与信息工程, 2013, 34(1): 1-5.
- WANG Xinhua, YANG Zhaohan, HUANG Guojian, et al. Development of special mechanical and electrical equipment safety testing, monitoring and risk management [J]. Automation & Information Engineering, 2013, 34(1): 1-5.
- [3] MOU X, LU W, CHEN L. Safety management and preventive measures for inspection and testing personnel of chemical special equipment[J]. Industrial Engineering and Innovation Management, 2023, 7(8): 14-18.
- [4] 陈国华, 刘晖. 特种机电设备安全科技支撑体系建设探讨[J]. 工业安全与环保, 2012, 38(1): 74-77.
- CHEN Guohua, LIU Hui. Discussion on construction of safety scientific and technological support system for special electromechanical equipment [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2012, 38(1): 74-77.
- [5] DWIVEDI S K, VISHWAKARMA M, SONI A. Advances and researches on non destructive testing: a review[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 3690-3698.
- [6] WANG B, ZHONG S C, LEE T L, et al. Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: a state-of-the-art review [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2020, 12(4): 1-28.
- [7] 沈功田. 承压设备无损检测与评价技术发展现状[J]. 机械工程学报, 2017, 53(12): 1-12.
- SHEN Gongtian. Development status of nondestructive testing and evaluation technique for pressure equipment [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(12): 1-12.
- [8] WEN L J, ZHANG H B, XIE F. Special equipments with special materials by nondestructive testing technology[J]. Advanced Materials Research, 2013, 675: 192-195.
- [9] VASAGAR V, HASSAN M K, ABDULLAH A M, et al. Non-destructive techniques for corrosion detection: a review[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2024, 59(1): 56-85.
- [10] LAMPMAN S, MULHERIN M, SHIPLEY R. Non-destructive testing in failure analysis[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2022, 22(1): 66-97.
- [11] 郁朋, 代秋声, 邢晓曼, 等. 大束流场发射阴极 X 射线管的阳极设计[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(6): 1127-1131.
- YU Peng, DAI Qiusheng, XING Xiaoman, et al. Design of large beam field emission cathode X-ray tube anode [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(6): 1127-1131.
- [12] NAYAKSHIN S, KAZANAS D, KALLMAN T R. Thermal instability and photoionized X-ray reflection in accretion disks [J]. The Astrophysical Journal, 2000, 537(2): 833-852.
- [13] KARNAUKHOV V G, KARNAUKHOVA T V, MCGILLICUDDY O. Thermal failure of flexible rectangular viscoelastic plates with distributed sensors and actuators [J]. Journal of Engineering Mathematics, 2013, 78(1): 199-212.
- [14] BALAKRISHNAN V, PHAN H P, DINH T, et al. Thermal flow sensors for harsh environments [J]. Sensors, 2017, 17(9): 2061.
- [15] DU W X, ZHAO Y F, ROY R, et al. A review of miniaturised non-destructive testing technologies for in-situ inspections [J]. Procedia Manufacturing, 2018, 16: 16-23.
- [16] HASSANI S, DACKERMANN U. A systematic review of advanced sensor technologies for non-destructive testing and structural health monitoring [J]. Sensors, 2023, 23(4): 2204.
- [17] JIAO J, DE X L, CHEN Z W, et al. Integrated circuit failure analysis and reliability prediction based on physics of failure [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 104: 714-726.
- [18] LAWAG R A, ALI H M. Phase change materials for thermal management and energy storage: a review [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 55: 105602.
- [19] HE Z Q, YAN Y F, ZHANG Z E. Thermal management and temperature uniformity enhancement of electronic devices by micro heat sinks: a review [J]. Energy, 2021, 216: 119223.
- [20] QIAN C, GHEITAGHY A M, FAN J J, et al. Thermal management on IGBT power electronic devices and modules [J]. IEEE Access, 2018, 6: 12868-12884.
- [21] SIDDIQUE A R M, MAHMUD S, VAN HEYST B. A comprehensive review on a passive (phase change materials) and an active (thermoelectric cooler) battery thermal management system and their limitations [J]. Journal of Power Sources, 2018, 401: 224-237.
- [22] TONG X C. Advanced materials for thermal management of electronic packaging [M]. Heidelberg, Germany: Springer Science & Business Media, 2011: 6-10.
- [23] MOORE A L, SHI L. Emerging challenges and materials for thermal management of electronics [J]. Materials Today, 2014, 17(4): 163-174.
- [24] ANANDAN S S, RAMALINGAM V. Thermal management of electronics: a review of literature [J]. Thermal Science, 2008, 12(2): 5-26.

- [25] KIM J, OH J, LEE H. Review on battery thermal management system for electric vehicles [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 149: 192-212.
- [26] LIN J Y, LIU X H, LI S, et al. A review on recent progress, challenges and perspective of battery thermal management system [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 167: 120834.
- [27] 田长青, 徐洪波, 曹宏章, 等. 高功率固体激光器冷却技术[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1686-1692.
TIAN Changqing, XU Hongbo, CAO Hongzhang, et al. Cooling technology for high-power solid-state laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1686-1692.
- [28] 马永锡, 张红. 电子器件发热与冷却技术[J]. 化工进展, 2006, 25(6): 670-674.
MA Yongxi, ZHANG Hong. Heat dissipation of electronics and cooling techniques [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2006, 25(6): 670-674.
- [29] MAYDANIK Y F. Loop heat pipes [J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(5/6): 635-657.
- [30] AMBIRAJAN A, ADONI A A, VAIDYA J S, et al. Loop heat pipes: a review of fundamentals, operation, and design [J]. Heat Transfer Engineering, 2012, 33(4/5): 387-405.
- [31] WANG Z Y, YANG W S. A review on loop heat pipe for use in solar water heating [J]. Energy and Buildings, 2014, 79: 143-154.
- [32] NITHINV K. Opportunities, challenges, and state of the art of flexible heat-pipe heat exchangers: a comprehensive review [J]. Heat Transfer, 2024, 53(2): 893-938.

(编辑:孙亚彤)

(上接第89页)

- DU Yuji, ZHOU Changjiang, DING Weijun, et al. Influence of ice bucket structure on ice making performance based on fluent [J]. Building Energy & Environment, 2021, 40(7): 6-9.
- [11] 余丽丽. 制冰桶结构形式对大型砖冰机制冰池盐水流场影响分析[J]. 时代农机, 2018, 45(10): 198-199.
- [12] 陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 2019: 229-245.
- [13] THEODORE L B, ADRIENNE S L, FRANK P I, et al. Introduction to heat transfer [M]. 6th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011: 377-378.
- [14] YUNUS A C, AFSHIN J G. Heat and mass transfer [M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2011: 436, 441, 489.
- [15] 房贤仕, 李秋英, 陈杰, 等. 管内气液两相流换热关联式研究现状[J]. 东北电力大学学报, 2022, 42(1): 71-78.
- FANG Xianshi, LI Qiuying, CHEN Jie, et al. A review on heat transfer correlation of gas-liquid two-phase flow in tubes [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2022, 42(1): 71-78.
- [16] XIN Rongceng, TAO Wenquan. Analytical solution for transient heat conduction in two-semi-infinite bodies in contact [J]. ASMEJ Heat Transfer, 1994, 116(1): 224-228.
- [17] JACK P H. Heat transfer [M]. 10th ed. Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2010: 350.
- [18] YUNUS A C, AFSHIN J G. Heat transfer, a practical approach [M]. 4th ed. Boston: WCB McGraw-Hill, 2011: 228.
- [19] 张洪济. 热传导 [M]. 北京:高等教育出版社, 1992: 189-215, 217-224.

(编辑:郭少华)