

环路热管失效后再启动特性实验

郑磊^{1,2}, 崔晓钰¹, 李南茜², 吴亦农²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200080)

摘要: 当环路热管所承受的瞬时热负载过大或蒸发器局部过热时, 会出现失效现象。为使失效后的环路热管快速恢复正常工作状态, 通过实验研究了两种环路热管失效后再启动方法的可行性以及影响环路热管再启动速度的因素。实验发现, 在环路热管失效后的恢复过程中选择适当时机加热蒸发器, 可使环路热管重新启动并缩短恢复时间; 重力与加热功率是影响再启动速度的关键因素。加热功率较小时, 重力辅助下的环路热管再启动速度明显快于逆重力状态下的环路热管; 随着加热功率的提升, 重力因素对环路热管再启动速度的影响逐渐减弱。环路热管失效后不切断热负载, 通过抬高冷凝器的方式也可使环路热管停止失效, 但此方法会导致环路热管出现逆流现象, 因此不具备可行性。

关键词: 环路热管; 失效; 再启动; 重力辅助; 逆重力; 加热功率

中图分类号: TK 172.4 **文献标志码:** A

Experiment on restart character of loop heat pipe after failure

ZHENG Lei^{1,2}, CUI Xiaoyu¹, LI Nanxi², WU Yinong²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 2000093, China;
2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200080, China)

Abstract: When the instantaneous thermal load is too large or the partial overheating occurs in the evaporator, loop heat pipe is prone to failure. In order to make the failing loop heat pipe back to proper functioning as early as possible, the feasibility of two restart schemes after loop heat pipe fail and the factors affecting restarting speed were researched. The experimental results shows that reheating evaporator in the recover process after failure makes loop heat pipe restart to reduce recover time. Gravity and heating power are the key factors affecting restart speed. When the heating power is small, the restart speed under gravity assistance is much faster than the restart speed under antigravity. With the increasing of the heating power, effect of gravity factor on restart speed of loop heat pipe diminishes gradually. Loop heat pipe can also stop failure by lifting the condenser without cutting the heating power off. However, this scheme is not feasible because the reverse flow occurs in loop heat pipe.

收稿日期: 2021-03-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51776121)

第一作者: 郑磊 (1991-), 男, 硕士研究生。研究方向: 动力工程。E-mail: 673683369@qq.com

通信作者: 崔晓钰 (1967-), 女, 教授。研究方向: 动力工程及工程热物理。E-mail: xiaoyu_cui@usst.edu.cn

Keywords: loop heat pipe; failure; restart-up; gravity assistance; antigravity; heat power

随着电子元器件的小型化与集成化，电子元器件的热流密度呈日益上升趋势^[1]，热耗散问题成为影响电子设备可靠运行的关键因素^[2]。环路热管(loop heat pipe, LHP)作为一种被动式的传热装置，依靠工质在蒸发器多孔芯内形成的毛细力来驱动回路的运转^[3]，具有传热能力强^[4]、传输距离远^[5]、无需外力驱动等优势，适用于电子元器件的高效散热及空间冷却技术等相关领域^[6-8]。当环路热管在运行中受到瞬时热负载过大、蒸发器局部过热以及其他不稳定因素影响时，会出现因蒸发器“蒸干”而导致的热管失效现象，如果可以使失效后的环路热管尽快恢复正常工作状态，将有效提高环路热管的有效工作时间，因此有必要开展针对环路热管失效后的“再启动”的实验研究。

国内外的专家学者就影响环路热管启动的诸多因素进行了探索，Ku^[9]研究了4种不同状态下的环路热管启动模式，发现蒸发器与储液器内的初始气液分布是决定环路热管能否顺利启动的决定性因素。张红星等^[10]研究了逆重力工作高度、启动热载荷对环路热管启动的影响，发现环路热管在逆重力状态启动且蒸汽槽道存在蒸汽时，所需启动时间与启动温升偏大。黄洁等^[11]对环路热管的启动特性进行了数值模拟，研究了启动热载荷与毛细芯孔隙率对环路热管启动的影响，指出大的启动热载荷有助于缩短环路热管的启动时间，而孔隙率对环路热管的启动性能影响很小。在相同加热功率的条件下，降低蒸发器温度可以有效防止环路热管失效，Zhang等^[12]研究了蒸发器的倾斜对环路热管蒸发器工作温度的影响。实验将蒸发器与补偿器置于3种不同的倾斜度，分别是蒸发器与补偿器水平，蒸发器低于补偿器，蒸发器高于补偿器。实验发现蒸发器的倾斜对环路热管的工作温度有明显影响，蒸发器高于补偿器时的工作温度远高于其他两种工况。张正芳等^[13]研究了重力辅助环路热管的倾斜角对极限功率的影响，并对蒸发段和冷凝段的热阻进行了分析，研究表明重力辅助可以明显地提高热管的极限功率，环路热管在倾斜角50°时的极限功率可达到水平位置的11.7倍。Chuang等^[14]对环路热管在重力辅助下的启动与稳态运行进行了分析研究，提出与解释了重力辅助的作用原理，并借助中子

成像技术进行了实验验证。

以上研究多集中于环路热管在稳定初始状态的正常启动以及稳态性能，对环路热管失效后的再启动研究仍然较少。本文利用环路热管实验台对环路热管进行了两种不同方案的失效再启动测试：一种是在环路热管失效后切断热负载，在回温过程中重新加热蒸发器使环路热管再启动；另一种是在环路热管失效后不切断热负载，通过抬高冷凝器即增加重力辅助程度的方式使环路热管再启动。实验结果具有一定的参考价值。

1 实验系统

1.1 实验装置

环路热管装置如图1所示，主要由蒸发器、储液器、气体管线、冷凝器以及液体管线构成。蒸发器内的毛细芯为工质循环提供动力，工质在毛细芯的气液界面吸收外部热载荷后蒸发并获得一定过热度，蒸汽通过蒸汽槽道进入气体管线，经气体管线进入冷凝器与冷源换热后被冷却成液体，通过液体管线返回到补偿器，然后再次进入蒸发器，如此循环完成传热过程。

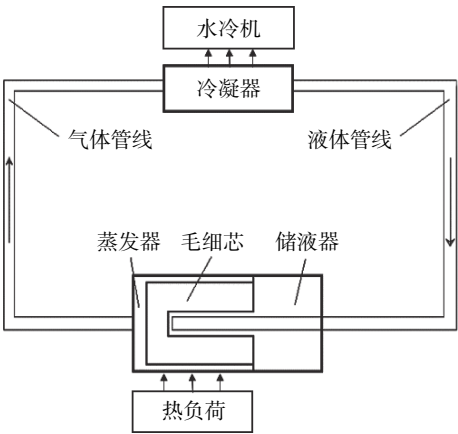


图1 环路热管工作原理图

Fig.1 Schematic diagram of working principle of loop heat pipe

试验采用的环路热管结构参数如表1所示，各部件及管路材料均为铜材料制造而成，冷凝器底盘材料为铝合金，盘管流道类型为涡旋型，流道尺寸与气体、液体管线尺寸保持一致。毛细芯孔径50 μm，孔隙率0.46，长度75 mm。环路热管

的充装工质选用丙烯, 丙烯的工作温区广且适用于室温, 其与铜管有很好的兼容性, 同时根据丙烯环路热管的相关实验经验^[15]确定充液率为 60%。

表 1 环路热管参数
Tab.1 Parameters of the loop heat pipe

部件	外径/mm	内径/mm	长度/mm
蒸发器	24	2	90
补偿器	24	20	60
气体管线	6	3	667
液体管线	6	3	518
冷凝器	6	3	437

1.2 实验测试系统

实验测试系统主要由加热系统、循环水冷却系统、温度数据采集系统以及环路热管组成。蒸发器、气体管线以及液体管线由保温棉完全包裹隔热, 大幅减小了环路热管与环境之间的热交换, 且通过室内空调控制实验环境为恒温, 所有实验均在室温 (293 K) 下完成。环路热管蒸发器外壁面贴聚乙烯薄膜加热片, 连接直流稳压加热电源模拟热源, 通过改变直流电源的电压和电流实现不同加热功率的输出。同时, 在环路热管上安装 9 个相对误差为 0.1% 的四线制铂电阻 PT1000, 测量热管各关键部位温度, 测点安装位置如图 2 所示。其中, T1 为储液器温度测点, T2 为蒸发器温度测点, T3 为蒸发器出口温度测点, T4 为气体管线温度测点, T5, T6 和 T7 分别为冷凝器入口、中间和出口处的温度测点, T8 为液体管线温度测点, T9 为储液器入口温度测点。冷却系统采用水冷机连接冷板与冷凝器完成热交换, 水冷机控制循环冷却水出水温度为恒温, 水冷温度设为 15 ℃。利用安捷伦数据采集系统采集各测点温度数据, 并传输至实验计算机记录保存。蒸发器与冷凝器下方均由垫块支撑, 通过调节各自垫块的厚度来调整蒸发器与冷凝器的相对位置, 进而改变环路热管的重力条件。

1.3 环路热管启动成败的判定标准

环路热管启动时, 液体工质在蒸发器内吸热汽化后经蒸汽槽道进入气体管线, 蒸发器温度与气体管线温度均会上升, 随着经过冷凝放热后的液体工质不断回流至蒸发器, 蒸发器温度停止上升并逐渐趋于稳定, 此时可以判定环路热管启动

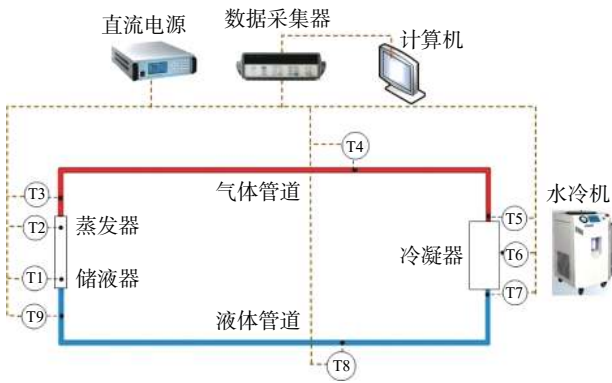


图 2 温度测点布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the temperature measuring points arrangement

成功; 反之当启动过程中气体管线温度在随蒸发器温度上升的过程中突然下降, 则可以判断没有新的液体工质蒸发并进入气体管线, 此时环路热管的工质循环中断, 环路热管启动失败。

2 实验结果与讨论

2.1 环路热管失效后的回温过程再启动特性

环路热管失效后的再启动过程与正常启动过程存在差异。LHP 在正常启动前, 其各点温度均为室温, LHP 发生失效时, 蒸发器温度会在短时间内迅速上升, 此时应该关闭加热器停止加热, 待蒸发器温度开始缓慢回落至接近室温方可开启加热器使 LHP 重新启动运行。而 LHP 的再启动则是指在环路热管尚未回温稳定时, 提前开启加热器使 LHP 启动, 选择恰当时机的再启动可以大大缩短 LHP 的回温过程。图 3 给出了丙烯环路热管失效后的再启动特性。可以看出, 环路热管失效后, 蒸发器温度快速上升至 360 K 以上, 关闭加热器后温度开始缓慢下降。依次在蒸发器温度为 330, 320 K 处尝试加热功率为 20 W 的再启动, 蒸发器温度快速上升, 气体管线温度先上升后回落, 液体管线温度先下降后回升。这说明工质在蒸发器内蒸发进入到气体管线, 并推动冷凝器内的部分液体流至液体管线, 但由于毛细芯补液不足, 导致蒸发器“烧干”并使其温度再次出现快速上升的现象, 两次再启动尝试的结果均为失败。当在 310 K 尝试第三次再启动操作时, LHP 气体管线测点温度迅速上升, 说明有液体在蒸发器内受热蒸发后进入气体管线, 同时 LHP 液体管线测点温度有明显下降, 说明冷凝器被激活, 有

液体回流至液体管线，而蒸发器与储液器的温度则迅速下降并稳定，可以判定 LHP 在 310 K 进行的再启动获得了成功。三次再启动实验得到不同的结果，这是因为在环路热管失效后的回温过程中，蒸发器与储液器的温度持续下降，而温度的变化会影响蒸发器与补偿器内的气液分布，当蒸发器温度降至 310 K 时毛细芯被有效润湿且储液器中有足够的液位，所以不会因为蒸发器“蒸干”而启动失败。

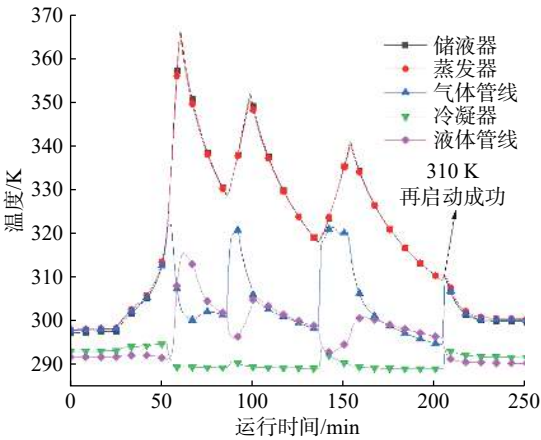


图 3 丙烯环路热管的再启动
Fig.3 Restart-up of propylene LHP

2.1.1 重力与加热功率对再启动速度的影响

由于环路热管再启动的主要目的是为了缩短其失效后的回温时间，所以从再启动开始至稳定运行的时间长度是衡量再启动特性的重要指标，又因为在不同重力因素和不同加热功率的条件下，蒸发器的温降大小也各不相同，所以本系列实验选择将温降大小与再启动时长的比值即温降速度作为衡量再启动性能的指标，测试重力条件分别为-20 mm(逆重力)，0 mm(蒸发器与冷凝器水平)，20 mm(重力辅助)，加热功率分别为 10, 15, 20 W 共 9 个工况下的再启动速度。参考上图的再启动成功过程，本实验选择统一施加 60 W 加热功率使 LHP 进入失效状态，在蒸发器温度超过 350 K 后的瞬间停止加热，待温度降至 310 K 时按设定功率重新开启加热器，再启动过程开始，环路热管蒸发器与冷凝器的温差迅速下降后逐渐趋于平缓，当蒸发器温度在 10 min 之内变化不超过 0.1 K 时视为达到稳定状态，再启动过程结束。

图 4 为环路热管在不同重力条件和不同加热功率下再启动速度的示意图。可以清晰地看到，当加热功率较小时，其对再启动速度的影响并不

明显，此时重力条件才是决定再启动速度的关键因素。环路热管在重力辅助 20 mm 条件下的再启动速度远大于水平状态和逆重力状态下的再启动速度，这是因为当环路热管处于重力辅助状态时，可以依靠重力压头克服部分循环压降，驱动更多工质流动达到更佳的换热效果，此时的加热功率较小所以毛细力并不占主导地位，环路热管处在重力控制模式。随着加热功率的逐步提升，工质与毛细芯之间的接触角随之增大，毛细力不断变大，环路热管逐渐进入毛细力控制模式，而重力压头保持不变，所以虽然不同重力条件下的再启动速度都在增大，但是 3 条曲线的斜率却存在较大区别。对于处于重力辅助条件下的环路热管，加热功率的增大对再启动速度的提升并不明显；而当环路热管处于逆重力状态时，加热功率的增大则会显著提高环路热管失效后的再启动速度。

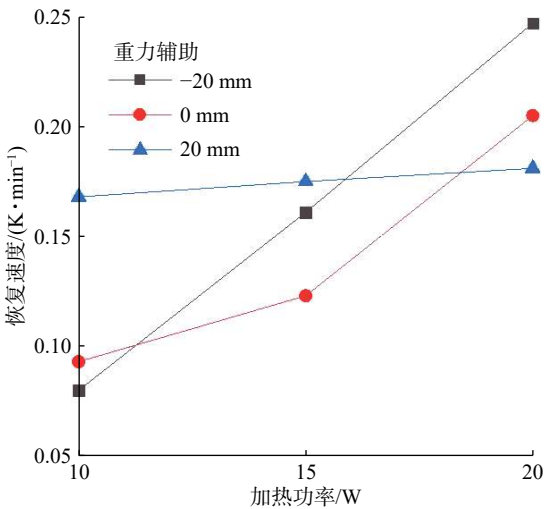


图 4 不同重力条件下的再启动速度对比图
Fig.4 Comparison of restart-up speed of LHP with different gravity conditions

为了进一步研究不同重力条件和加热功率对再启动后的环路热管稳态传热性能的影响，对比了上述实验中环路热管经过失效后回温过程再启动后达到稳态时的热阻。热阻是衡量传热元件性能的一个重要指标，其定义为传热温差与功率的比值，图 5 为各再启动工况达到稳定时的热阻。可见，随着加热功率的增加，蒸汽的质量流量随之增加，冷凝器的冷凝区域增大，过冷区域减小，各重力条件下的环路热管热阻均呈现下降趋势。其中，重力辅助 20 mm 状态下的环路热管热阻在不同加热功率下均为最低，且随着加热功率

的增加，热阻变化曲线较为平稳，这是由于液体工质在重力辅助下的回流更为顺畅，相较水平状态与逆重力 20 mm 表现出的变化趋势较为一致，即在加热功率较小时热阻很大，随着加热功率的增大热阻快速减小，当加热功率较大时，重力因素的影响被削弱，其热阻变化趋势逐渐与重力辅助状态下的热阻变化同步。

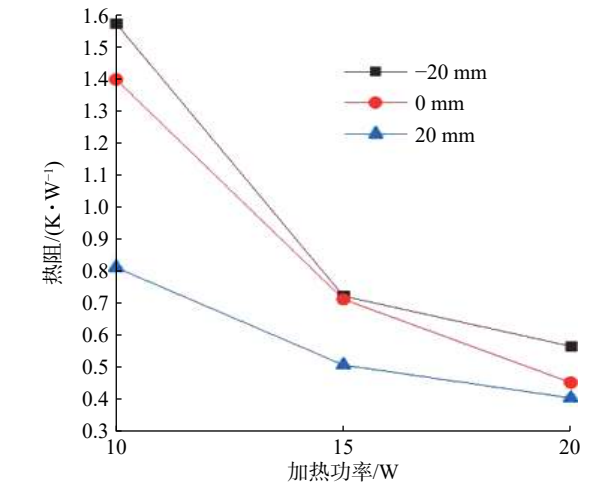


图 5 环路热管在不同重力条件下再启动后的热阻对比
Fig.5 Comparison of thermal resistances of LHP after restart-up

通过上述实验不难看出，当加热功率较小时，重力辅助可以有效提高环路热管的再启动速度，使环路热管快速达到稳定状态，且传热热阻较小；当加热功率较大时，重力因素对 LHP 的整体性能影响较小。

2.2 环路热管失效后不停止加热的再启动特性

本实验探究在环路热管失效后不切断热负载的前提下，待环路热管失效升温至 350 K 后，通过瞬时改变蒸发器和冷凝器的相对位置从而尝试使环路热管直接实现再启动。

实验过程如图 6 所示，环路热管在逆重力 40 mm（蒸发器高于冷凝器 40 mm）、加热功率为 40 W 时发生失效，待蒸发器测点温度升至 350 K 后调整 LHP 的姿态，蒸发器下方垫块厚度保持不变，将冷凝器下方垫块厚度增加 80 mm，重力条件由逆重力 40 mm 改为重力辅助 40 mm，同时保持加热功率 40 W 不变。由图 6 可以看出，蒸发器温度停止上升，但与前一组再启动实验中蒸发器温度迅速回落有所不同，此时环路热管蒸发器温度与冷凝器温度在 65 K 的温差下保持稳定，此温差远远高于环路热管正常运行时的温差。通过对比气体

管线与液体管线测点温度可以发现，此状态下的气线温度远远低于液线温度，而当环路热管正常运行时，气线温度应该高于液线温度。结合异常的高温差现象可以判断，环路热管的工质流向由于瞬时重力条件的变化发生了改变，环路热管出现了逆流现象。此后尝试改变加热功率依然无法消除 LHP 的逆流现象，甚至还出现了温度振荡的现象，经过了数次相同工况的重复试验后，均发现在环路热管失效后大幅抬高冷凝器，环路热管将会出现逆流的现象。分析发生逆流现象的原因，是由于将冷凝器位置抬高后，冷凝器内的大量液体工质在重力作用下通过气相管线涌至蒸发器出口，此时气相管线与蒸发器内蒸汽槽道被液体工质填充，蒸发器内对称分布的 12 个蒸汽槽道尺寸只有 1 mm×1 mm×75 mm 较为狭窄，由于蒸汽正向流动的阻力突然剧增，最终导致环路热管出现逆流现象。虽然此实验通过改变重力条件使环路热管停止失效并可以保持温度稳定，但是由于逆流现象的出现以及蒸发器与冷凝器的高温差，使环路热管丧失了其高效的传热性能，因此无法作为环路热管失效后的再启动手段。

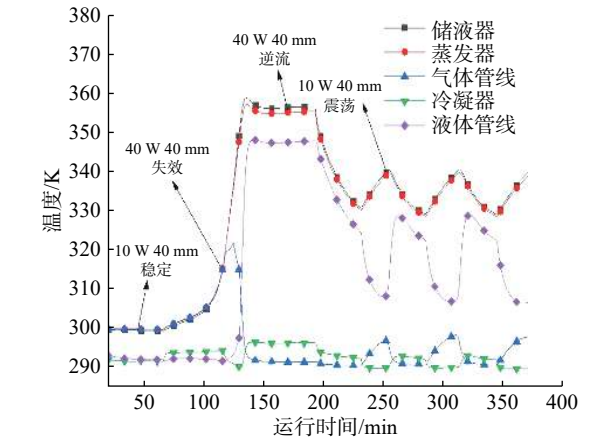


图 6 环路热管失效后不停止加热的再启动温度变化
Fig.6 LHP temperature variation under heating power after failure

3 结 论

通过实验首次验证了环路热管在失效后，无需等待其完全回温，在降温过程中的适当时刻重新加热蒸发器，即可使环路热管重新启动且保持稳定运行。

当加热功率较小时，重力条件是决定再启动

速度的主要因素,重力辅助下的环路热管再启动速度远大于逆重力与水平状态下的环路热管,且启动后的稳态热阻也相对较小。

加热功率的增加对重力辅助状态下的环路热管再启动速度提升有限,但对逆重力状态下的环路热管提升显著。当加热功率较大时,不同重力条件下的环路热管再启动速度相差很小,稳态热阻也趋于一致。

环路热管失效后不关闭加热器,通过抬高冷凝器即增加重力辅助程度的方式可以停止失效,但此操作会导致环路热管出现逆流现象,其稳态传热温差过大且可能伴随温度振荡现象。

参考文献:

- [1] 陈萨如拉,朱丽,孙勇.高热流密度器件散热技术的研究进展[J].[流体机械](#),2015,43(5):39–45.
- [2] 李广义,张俊洪,高键鑫.大功率电力电子器件散热研究综述[J].[兵器装备工程学报](#),2020,41(11):8–14.
- [3] MAIDANIK J, VERSHININ S, KHOLODOV V, et al. Heat transfer apparatus[J]. *Journal of Heat Recovery Systems*, 1986, 6(1): xi–xii.
- [4] MAYDANIK Y F. Loop heat pipes[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25(5/6): 635–657.
- [5] VASTA S, PALOMBA V, LA ROSA D, et al. Experimental assessment and numerical study of a pump-assisted loop heat pipe for high capacity thermal systems[J]. [Applied Thermal Engineering](#), 2020, 180: 115828.
- [6] MAYDANIK Y, PASTUKHOV V, CHERNYSHEVA M. Development and investigation of a loop heat pipe with a high heat-transfer capacity[J]. [Applied Thermal Engineering](#), 2018, 130: 1052–1061.
- [7] 林兵谣,谢荣建,陶乐仁.低温环路热管综述[J].*热能动力工程*,2020,35(3):1–12.
- [8] 林梦,欧阳新萍,袁道安.管外冷凝强化换热管的结构及发展趋势[J].*能源研究与信息*,2015,31(3):125–130.
- [9] KU J. Operating characteristics of loop heat pipes[J]. *SAE Transactions*, 1999, 108: 503–519.
- [10] 张红星,林贵平,丁汀,等.环路热管启动特性的实验研究[J].*中国科学E辑:工程科学 材料科学*,2005,35(1):17–30.
- [11] 黄洁,王乃华,程林.环路热管启动特性模拟[J].*化工学报*,2014,65(S1):297–302.
- [12] ZHANG Q D, LIN G P, SHEN X B, et al. Visualization study on the heat and mass transfer in the evaporator-compensation chamber of a loop heat pipe[J]. [Applied Thermal Engineering](#), 2020, 164: 114472.
- [13] 张正芳,霍秀和,赵嘉琪.重力辅助热管的性能及热阻的实验研究[J].*工程热物理学报*,1982,3(1):67–75.
- [14] CHUANG P Y A, CIMBALA J M, BRENIZER J S. Experimental and analytical study of a loop heat pipe at a positive elevation using neutron radiography[J]. [International Journal of Thermal Sciences](#), 2014, 77: 84–95.
- [15] 刘成,谢荣建,王仕越,等.丙烯环路热管补偿器的可视化实验研究[J].*北京航空航天大学学报*,2020,46(5):933–940.

(编辑:董伟)