

WANG Huizhi, LU Shuaiting, GUO Yuandong, HUANG Jinyin, MIAO Jianyin, LIN Guiping. Experiments and Simulations on 3D Printed High Temperature Titanium Water Heat Pipe (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(1): 239–246. CSTR:32142.14.cjss.2025–0145. DOI:10.11728/cjss2026.01.2025–0145

3D 打印高温钛水热管的传热性能实验和仿真*

王慧志¹ 卢帅婷^{1,2} 郭元东²
黄金印¹ 苗建印¹ 林贵平^{3,2}

1(北京空间飞行器总体设计部 航天器热控全国重点实验室 北京 100094)

2(北京航空航天大学航空科学与工程学院 人机与环境工程重点学科与技术研究中心 北京 100191)

3(杭州市北京航空航天大学国际创新研究院 (北京航空航天大学国际创新学院) 杭州 311115)

摘要 未来星际航行对高温工况下的废热排散提出了更高的要求. 当前辐射器设计越来越依赖热管, 高温环境下具有高导热性的钛水热管, 可以有效传递热量, 并且最大限度缩减辐射器的面积. 本文针对 3D 打印的钛水热管进行了传热性能实验与仿真研究. 在 100~225℃ 的工作温度范围内, 通过向热管施加不同的加热功率, 研究钛水热管的传热能力. 实验结果表明, 钛水热管的最大传热温差随加热功率的增大而增加, 钛水热管在 200℃ 时最大传热功率为 893.9 W. 在实验测试的基础上开展仿真研究, 得到钛水热管的等效换热系数随温度的变化规律, 并预测 250℃ 下其等效换热系数为 $3650 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, 传热温差为 29.22℃.

关键词 3D 打印, 高温热管, 传热性能, 实验研究

中图分类号 V476.2

Experiments and Simulations on 3D Printed High Temperature Titanium Water Heat Pipe

WANG Huizhi¹ LU Shuaiting^{1,2} GUO Yuandong²
HUANG Jinyin¹ MIAO Jianyin¹ LIN Guiping^{3,2}

1(National Key Laboratory of Spacecraft Thermal Control, Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094)

2(Key Discipline and Technology Research Center for Human-Machine and Environment Engineering, School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191)

3(Hangzhou International Innovation Institute of Beihang University, Hangzhou 311115)

* 国家自然科学基金项目 (52472443), 中国科协青年人才托举工程项目 (2023QNRC001) 和航天器热控技术全国重点实验室开放基金项目 (NKLST-JJ-202401007) 共同资助

2025-08-05 收到原稿, 2025-11-12 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract Future interstellar navigation will demand new energy. The thrust of spacecraft using chemical fuels is difficult to sustain, and a suitable launch window must be found for each launch in order to utilize the planet's gravity for acceleration. Traditional solar panels are far from meeting the energy requirements for manned interstellar travel and must rely on the effective and stable supply of new energy power systems. The propulsion system of new energy powered spacecraft can carry a larger payload, enter planetary orbit and return to the ground in a more flexible and efficient manner, but also poses higher requirements for waste heat dissipation at high temperatures. Heat pipe technology is an important technical means to achieve efficient and long-distance heat transfer in medium and high temperature zones (100~300℃). The current radiator design increasingly relies on heat pipes. Titanium water heat pipes with high thermal conductivity at high temperatures can effectively transfer heat and raise the radiation temperature, thus minimize the area of the radiator. Experiments and simulations on the 3D printed titanium water heat pipe were conducted. Applying different heating powers at 100~225℃, the heat transfer capacity of the titanium water heat pipe was studied. The results show that the maximum heat transfer temperature difference of the titanium water heat pipe increases with the increase of heating power. The maximum heat transfer power of titanium water heat pipe at 200℃ is 893.9 W, and analysis shows that the maximum heat transfer power of titanium water heat pipes is greater than 893.9 W at 200~264℃. Based on experiments, simulations were conducted to obtain the variation of the equivalent heat transfer coefficient of titanium water heat pipes with temperature. The equivalent heat transfer coefficient at 250℃ is predicted to be $3650 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, with a heat transfer temperature difference of 29.22℃.

Key words 3D printing, High temperature heat pipes, Heat transfer performance, Experimental study

0 引言

未来的星际探测需要发展新的太空动力来源^[1-3]. 使用化学燃料的航天器推力难以持久, 每次发射必须寻找合适的发射窗口, 以便利用行星的引力进行加速. 新型能源动力航天器的推进系统相比传统化学燃料航天器, 能够承载更大的载重量, 以更灵活快捷的方式, 进入行星轨道并返回地面. 传统太阳能电池板远不能满足载人星际航行的能量需求^[4], 必须依赖新型能源系统实现能量的有效稳定供给. 新型能源动力航天器结合了空间技术与新型能源技术的优势, 受到研究人员的密切关注^[5]. 由于大功率新型能源航天器需要排放大量的废热, 热排放系统的设计至关重要^[6], 避免航天器内部温度过高, 影响敏感设备的正常运行, 甚至引发灾难性故障.

目前辐射器的设计越来越依赖于热管^[7], 热管技术是实现中高温区 (100~300℃) 热量高效、远距离传输的重要手段之一^[8]. 以氨为工质的轴向槽道热管被广泛应用于卫星散热系统中, 其主要作用是提

升辐射器的温度均匀性^[9], 进而提高辐射散热功率, 但是氨热管无法在高温环境下运行. 水在高温下是优良的传热工质^[10], 在中高温区范围内, 金属钛与水具有良好的相容性^[11], 因此钛水热管可以应用于中高温区新型能源动力航天器的热排散系统.

美国 NASA 重点开展了钛水热管在 310~530 K 温度范围内的传热性能提升研究, 一种长度为 115.5 cm、外径为 1.27 cm 的钛水热管在 500 K 温度下的水平方向最大传热功率可以达到 800~900 W^[12]. 此前的寿命测试研究表明, 15-3 β 钛合金-水热管能够在 280℃ 下运行 30000 h 以上^[13], 钛水热管具备长时间可靠运行的性能.

热管辐射器的传热路径为: 航天器上的热源通过直接或间接 (例如流体回路) 的方式将热量传递至热管, 热管将热量沿着轴向高效扩散并传递到辐射器蒙皮上, 蒙皮主要沿垂直于热管方向传热, 且辐射板蒙皮喷涂了高发射低吸收涂层, 可将热量排散至外空间^[14]. 辐射器的辐射温度主要由蒙皮的温度决定, 辐射温度越高, 单位面积的辐射功率越大, 所需辐射器

面积越小, 这有利于减小辐射器的体积与质量. 根据热管辐射器的热阻分析模型^[15], 在航天器上的热源温度固定的情况下, 辐射器蒙皮温度与热管的传热温差、热管与蒙皮连接处的钎焊接触温差以及蒙皮的导热温差有关. 其中, 通过减小热管的最大传热温差能够提高蒙皮温度, 从而减小辐射器质量.

研究热管的最大传热功率对于热管辐射器的减重设计也具有重要意义, 因为其与辐射器上所需布置的热管数量有关. 对于具有足够传热能力的热管, 可通过减少辐射器的热管数量来减小质量. 此前的研究表明, 在逆重力试验中, 混合式筛槽钛水热管在正常工作时可以传输 390 W 热量, 在出现部分烧干现象时传输热量可达 450 W^[16]. 然而, 为实现在下一代航天器上的应用, 钛水热管的最大传热功率需开展进一步研究与改进.

本文以 3D 打印的钛水热管为研究对象, 搭建了高温钛水热管热性能实验台, 在 100~225℃ 的工作温度范围内, 通过对钛水热管施加不同的加热功率, 研究钛水热管的传热能力. 在实验结果的基础上, 通过仿真方法模拟钛水热管在 100~225℃ 下传热情况, 获得等效换热系数, 并预测钛水热管在 250℃ 下的等效换热系数与传热温差.

1 钛水热管性能实验台

钛水热管性能实验台由钛水热管、加热系统、冷却系统及测温系统组成, 如图 1 所示. 在蒸发段输入热量 Q_{in} , 在冷凝段带走热量 Q_{out} , 通过实验检验钛水

热管的热量传输功能.

1.1 钛水热管试验件

钛水热管试验件是一个长度为 2 m 的圆管, 管内设计有 20 个 Ω 形微通道, 旨在增大水与热管的换热面积. 金属钛的导热系数较低, 仅为 $22 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 因此在设计中需尽可能减小钛管壁的厚度, 以降低热管径向的导热热阻. 该设计可使整个热管辐射器温度分布更加均匀^[17]. 由于金属钛的可加工性存在局限, 难以通过挤压的方式成型, 因此采用 3D 打印的方式加工具有 Ω 形槽道的钛水热管^[18].

1.2 加热系统

加热系统由 5 个相同的陶瓷加热片组成, 单个加热片的尺寸为 $90 \text{ mm}\times 30 \text{ mm}$, 其均匀布置于热管蒸发段. 钛水热管蒸发段的长度为 500 mm. 陶瓷加热片贴附在热管蒸发段上方的加热板上, 且每个陶瓷加热片均由独立电源供电, 电源电流上限为 4 A, 电压上限为 120 V.

热管的外部包覆隔热石棉, 但是仍无法完全避免热量泄漏到空气中. 因此需要从系统加热功率中减去漏热功率, 以获得热管的实际加热功率.

在石棉外侧设置三个温度测量点以获取其外表面的平均温度, 石棉外表面简化为一个面积 0.012 m^2 的圆柱形表面. 石棉与空气之间的自然对流换热系数取 $20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, 系统漏热功率按照下式计算:

$$Q_{\text{leak}} = h_a A_{\text{oa}} (T_{\text{oa}} - T_a). \quad (1)$$

式中, A_{oa} 为传热面积, 单位 m^2 ; h_a 为保温石棉与空气之间的传热系数, 单位 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$; T_a 为空气温度, 单位 K; T_{oa} 为绝缘石棉的平均温度, 单位 K.

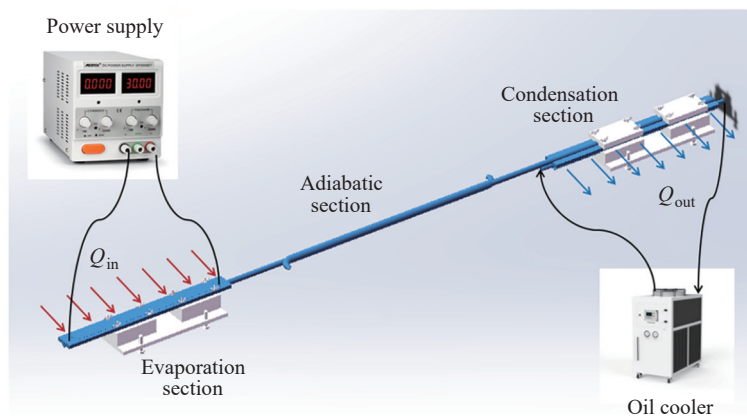


图 1 钛水热管性能实验台

Fig. 1 Titanium water heat pipe performance experimental setup

电加热功率根据 5 个加热回路的电压和电流计算^[19], 有

$$Q_{\text{electric}} = \sum_{j=1}^5 U_j I_j. \quad (2)$$

其中, U_j 为加热电路 j 的电压, 单位 V; I_j 为加热电路 j 的电流, 单位 A. 实际加热功率为

$$Q = Q_{\text{electric}} - Q_{\text{leak}}. \quad (3)$$

1.3 冷却系统

冷凝系统由冷板及穿过冷板的冷凝回路组成. 冷凝回路中的低温工作流体为硅油. 钛水热管内的高温工质通过热对流的方式将热量传递至硅油, 硅油在制冷机的作用下不断循环, 从而将热量带走.

1.4 数据采集系统

在钛水热管的表面布置了 16 个温度测量点, 包括蒸发段 T1~T6、绝热段 T7~T10 及冷凝段 T11~T16. 其位置分布如图 2 所示.

蒸发段共有 6 个温度测点 (T1~T6), 各测点距钛水热管热端的距离依次为 10, 20, 30, 150, 300, 450 mm. 冷凝段共有 6 个测点 (T11~T16), 各测点距钛水热管冷端的距离依次为 450, 300, 150, 30, 20, 10 mm. 值得注意的是, 钛水热管热端与测点 T1、测点 T1 与测点 T2、测点 T2 与测点 T3 之间的距离均为 10 mm, 这些测点用于判断热管蒸发段是否存在烧干现象. 同理, 测点 T14 与测点 T15、测点 T15 与测点 T16、测点 T16 与钛水热管冷端之间的距离也均为 10 mm, 这些测点用于判断热管冷凝段是否存在液塞现象.

1.5 实验台姿态

实验台按照重力不利条件摆放. 重力不利条件为, 蒸发段陶瓷加热片位于钛水热管的上方, 而冷凝段的冷板位于钛水热管的下方. 在此姿态下, 蒸发段产生的气泡聚集在加热表面附近, 而冷凝段产生的冷凝水聚集在冷却表面附近, 该姿态不利于传热. 因此, 在此条件下通过实验获得的钛水热管的最大传热能

力相对保守.

2 钛水热管传热性能实验分析

钛水热管的传热效率受重力、不凝气体、工质充装量、工作温度等多方面因素的影响. 本实验在水平姿态下进行, 排除重力因素的影响, 实验前预先排出热管中的不凝气体, 实验过程中始终保持工质充装量恒定, 主要探究不同工作温度对钛水热管的传热性能的影响. 实验策略为: 在设定不同加热功率的条件下, 通过调节冷却回路工质的温度, 使钛水热管在指定实验温度下达到热平衡.

冷却工质的温度调节范围为 5~70℃, 该范围对实验操作有一定的限制. 在较低的实验温度下, 钛水热管无法在较高的加热功率下达到热平衡, 因为在钛水热管达到最大传热能力之前, 冷却工质已降低至最低温度 5℃, 无法进一步提高加热功率并降低冷却工质温度. 由于冷却工质最高温度为 70℃, 在较低的加热功率下钛水热管温度较低, 难以在较高的目标实验温度下达到热平衡. 通过在冷凝段的钛水热管与冷板之间设置多层导热性较差的聚酰亚胺薄膜, 钛水热管可以在较高工作温度和较低加热功率条件下实现热平衡.

当钛水热管的绝热段温度分别为 100, 125, 150, 175, 200, 225℃ 时, 在不同的加热功率下进行实验, 结果列于表 1.

当各测温点的温度在 2 min 内变化小于 1℃ 时, 认为钛水热管已达到传热平衡状态^[18]. 在热力学平衡状态下, 钛水热管蒸发段最高温度与冷凝段最低温度之差 ΔT_{max} (即最大传热温差) 以及热阻 R 随实际加热功率 Q 的变化分别如图 3 和图 4 所示.

热管的传热热阻计算公式为

$$R = \frac{\Delta T_{\text{max}}}{Q}. \quad (4)$$

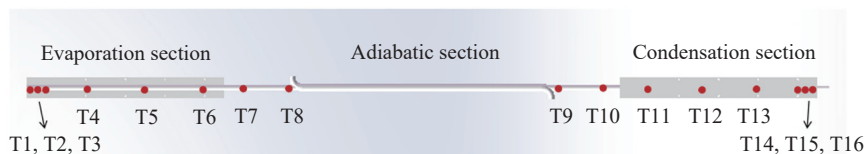


图 2 钛水热管上温度测点的分布

Fig. 2 Distribution of temperature measuring points on titanium water heat pipe

其中, R 为热管的热阻, 单位 $\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$; $\Delta T_{\max}$ 为热管从蒸发段至冷凝段的最大温差, 单位 K ; Q 为实际加热功率, 单位 W .

在 $100\sim 200^\circ\text{C}$ 温度条件下, 最大传热温差 $\Delta T_{\max}$ 与热阻 R 均随实际加热功率的增加而增加. 温度为 225°C 时, 热阻 R 随实际加热功率的增加呈现先增大后减小的趋势. 热管热阻包括热管管壁与工质之间的径向传热热阻, 以及工质从蒸发段依次到绝热段和冷凝段的轴向热阻. Tian 等^[20] 对高温钾热管的实验研究发现, 热管热阻随功率增加而逐渐减小, 在接近蒸发段烧干状态时, 热阻上升. 据此推测, 本实验中观察到热阻随加热功率上升的现象, 原因在于实验工况中的实际加热功率已接近热管的极限传热功率, 使热管蒸发段处于接近烧干的状态. 这一结论需通过进一步实验验证.

表 1 钛水热管性能实验工况
Table 1 Experimental conditions for performance of titanium water heat pipes

绝热段温度/ $^\circ\text{C}$	加热功率/ W
100	200, 300, 400, 500
125	300, 400, 500, 600
150	500, 600, 700, 800
175	700, 800, 900
200	850, 900
225	700, 800, 850

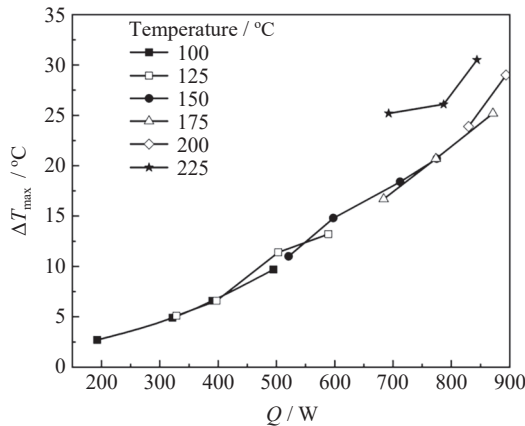


图 3 不同温度下钛水热管的最大传热温差 $\Delta T_{\max}$ 随实际加热功率 Q 的变化
Fig. 3 Variation of maximum heat transfer temperature difference $\Delta T_{\max}$ of titanium water heat pipe with the actual heating power Q at different temperatures

分析实验结果发现, 当钛水热管的温度为 100°C 和 125°C 时, 在不同工作温度下对钛水热管施加相同的实际加热功率, 其最大传热温差 $\Delta T_{\max}$ 和热阻均相近. 由此可知, 在 100°C 和 125°C 工况下, 钛水热管的热阻仅受传热功率的影响. 当钛水热管的工作温度升至 225°C 时, 最大传热温差 $\Delta T_{\max}$ 显著增大, 说明该温度下热管的热阻出现明显上升.

通过实验获得了钛水热管在 200°C 时的最大传热功率. 具体来说, 当钛水热管的工作温度为 200°C , 实际加热功率达到 893.9 W 时, 钛水热管可以达到热平衡状态. 如果此时加热功率继续增加, 蒸发段将出现明显的烧干现象, 即温度测点 T2 在 5 s 内突然增加了 20°C 以上, 钛水热管无法再保持原有的热平衡状态. 因此可以推断, 钛水热管在工作温度为 200°C 时的最大传热功率为 893.9 W .

采用 Dunbar 因数^[21] 研究不同温度下水工质的综合性能. 假设蒸汽流动压降占主导地位, 根据热管内的压力平衡推导得到 Dunbar 因数, 用以表征毛细力限制的热管最大传热能力. Dunbar 因数的计算公式为

$$Du = \frac{I^{1.75} \sigma \rho_v}{\mu_v^{0.25}}. \quad (5)$$

式中, I 为水的汽化潜热, 单位 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$; σ 为表面张力, 单位 $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$; ρ_v 为气体密度, 单位 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; μ_v 为气体动力黏度, 单位 $\text{Pa}\cdot\text{s}$.

水工质的 Dunbar 因数随温度变化情况如图 5 所

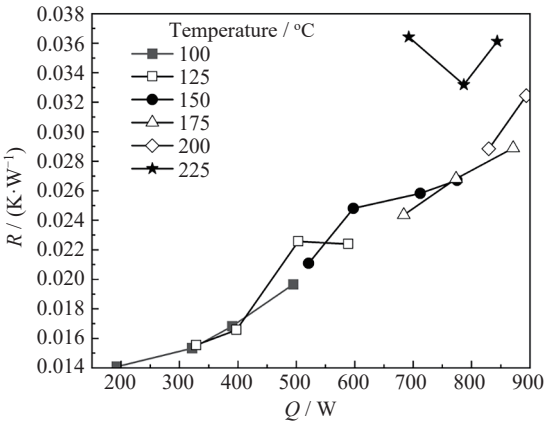


图 4 不同温度下钛水热管的热阻 R 随实际加热功率 Q 的变化
Fig. 4 Variation of thermal resistance R of titanium water heat pipe with the actual heating power Q at different temperatures

示. 温度从 473 K (200℃) 升高至 537 K (264℃), 水的 Dunbar 因数不断增大; 在温度为 537 K (264℃) 时, 水的 Dunbar 因数最大, 此时水的极限传热功率最大. 实验中发现, 钛水热管在 200℃ 时的极限传热功率为 893.9 W. 据此推断, 在工作温度处于 200~264℃ 范围内时, 钛水热管的极限传热功率可能大于 893.9 W.

3 钛水热管等效换热系数仿真

以 100~225℃ 温度下的实验数据为基础, 对钛水热管的传热过程进行仿真, 得到钛水热管两相工质与管壁之间的等效换热系数, 并预测钛水热管在工作温度为 250℃ 时的等效换热系数.

3.1 仿真模型

对钛水热管进行稳态传热仿真, 仿真中的几何模型由钛水热管、加热板和冷却板组成, 如图 6 所示,

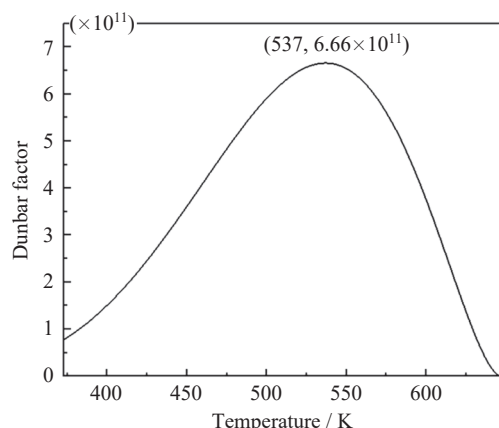


图 5 水工质 Dunbar 因数随温度的变化
Fig. 5 Variation of Dunbar factor of water with temperature

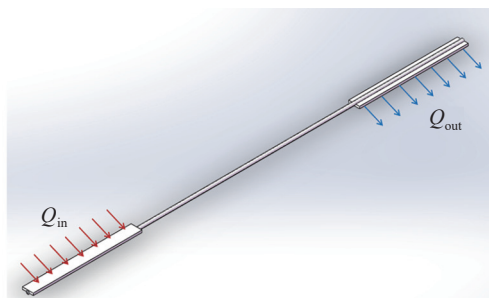


图 6 钛水热管仿真几何模型
Fig. 6 Geometric simulation model of titanium water heat pipe

其中, 热流输入平面 (加热板) 位于钛水热管蒸发段上方, 热流输出平面 (冷却板) 位于钛水热管冷凝段下方.

对于钛水热管传热的物理过程进行简化处理. 钛水热管内部的两相状态水工质被简化为一个定温区域, 温度的具体数值取决于热管的工作温度, 在仿真中分别取为 100, 125, 150, 175, 200, 225℃. 钛水热管的管壁材料为 TA1, 其密度为 $4600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 比热容为 $500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 热导率为 $22 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. 调整仿真模型, 使仿真结果与实验结果满足一致性要求, 可以获得钛水热管的等效换热系数.

3.2 仿真结果讨论

通过实验获得了钛水热管在工作温度为 100, 125, 150, 175, 200, 225℃ 时, 不同加热功率下的热阻和传热温差 (见图 7), 以此作为仿真模型的参考数据. 分别在以上 6 个工作温度下开展钛水热管的仿真, 调整仿真模型, 直至仿真温差与实验温差的相对误差达到 $\pm 3\%$ 以内, 满足一致性要求.

通过仿真得到的热管等效换热系数如图 8 所示. 对 100, 125, 150, 175, 200, 225℃ 温度下的钛水热管等效换热系数进行拟合, 得到钛水热管等效换热系数随工作温度变化的指数函数关系式, 其拟合优度为 0.995. 据此关系式预测钛水热管在 250℃ 工作温度下的等效换热系数为 $3650 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

上文根据实验结果得出, 在工作温度为 250℃ 时, 钛水热管的极限传热功率大于 893.9 W. 因此, 在工作温度为 250℃, 输入加热功率为 800 W 的条件下

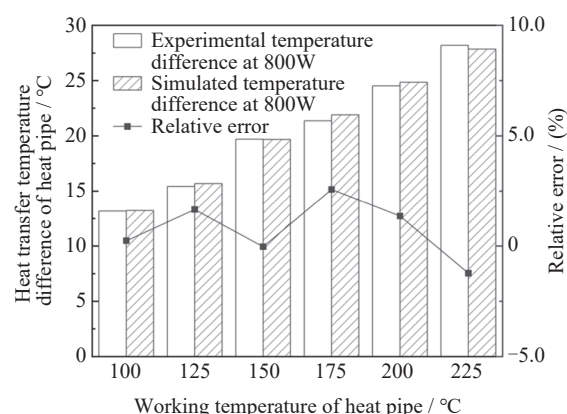


图 7 实验与仿真所得的热管最大传热温差
Fig. 7 Maximum heat transfer temperature difference of the heat pipe obtained from experiments and simulations

对钛水热管进行仿真, 得到等效换热系数的预测值为 $3650 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, 结果如图 9 所示, 计算得到钛水热管的最大传热温差为 29.22°C .

4 结论

以 3D 打印的钛水热管为研究对象, 进行实验与仿真研究, 得到主要结论如下.

(1) 在 $100 \sim 225^\circ\text{C}$ 的工作温度范围内进行钛水热管传热性能实验, 结果表明, 钛水热管的最大传热温差随加热功率的增加而增加.

(2) 钛水热管在温度为 200°C 时最大传热功率为 893.9 W , 通过分析得到, 工作温度处于 $200 \sim 264^\circ\text{C}$ 范围内时, 钛水热管的极限传热功率大于 893.9 W .

(3) 在实验结果的基础上, 通过仿真方法模拟钛水热管在 $100 \sim 225^\circ\text{C}$ 温度条件下的传热情况, 获得

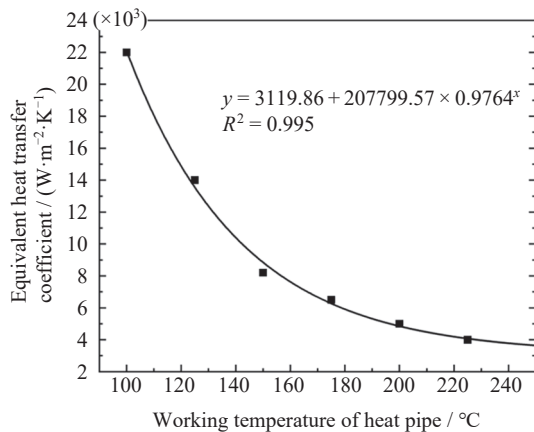


图 8 仿真中等效换热系数随热管工作温度变化情况

Fig. 8 Variation of equivalent heat transfer coefficient with the working temperature of the heat pipe in simulation

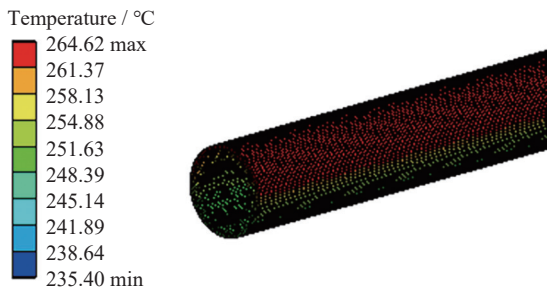


图 9 钛水热管仿真结果 (250°C , 800 W)

Fig. 9 Simulation results of titanium water heat pipe (250°C , 800 W)

了钛水热管的等效换热系数, 并据此预测钛水热管在 250°C 时的等效换热系数为 $3650 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, 输入热功率为 800 W 条件下的最大传热温差为 29.22°C .

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

- [1] ZHANG Ze, XUE Xiang, WANG Yuanding, *et al.* Prospect of space nuclear power propulsion technology[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2021, **47**(5): 1-13 (张泽, 薛翔, 王园丁, 等. 空间核动力推进技术研究展望 [J]. 火箭推进, 2021, **47**(5): 1-13)
- [2] LEE K L, ANDERSON W G, TARAUC. Titanium-water heat pipe radiators for kilowatt system cooling applications[C]//International Energy Conversion Engineering Conference. Cincinnati, Ohio: AIAA, 2018
- [3] Lee K L, Tarau C, Anderson W G, *et al.* Titanium-water heat pipe radiators for space fission power system thermal management[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2020, **32**(3). DOI:10.1007/s12217-020-09780-5
- [4] CHEN Jie, GAO Shaolun, XIA Chenchao, *et al.* Study on space nuclear power technological option[J]. *Aerospace Shanghai*, 2019, **36**(6): 1-10 (陈杰, 高劭伦, 夏陈超, 等. 空间堆核动力技术选择研究 [J]. 上海航天, 2019, **36**(6): 1-10)
- [5] WANG Zhao, XIA Chenchao, KANG Zhiyu, *et al.* Design and key technologies of modular nuclear powered spacecrafts[J]. *Aerospace Shanghai*, 2019, **36**(6): 141-147 (王钊, 夏陈超, 康志宇, 等. 模块化核动力航天器设计及其关键技术 [J]. 上海航天, 2019, **36**(6): 141-147)
- [6] ZHOU Tao. Research on Design Optimization Technology of Loop Heat Pipe Radiator in Space Reactor[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023 (周涛. 空间堆环路热管辐射散热器设计优化技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023)
- [7] HAINLEY D C. User's Manual for the Heat Pipe Space Radiator Design and Analysis Code (HEPSPARC)[R]. Brook Park: NASA Lewis Research Center Group, 1991
- [8] GROVER G M, COTTER T P, ERICKSON G F. Erratum: structures of very high thermal conductance[J]. *Journal of Applied Physics*, 1964, **35**(10): 3072-3072
- [9] ENKE C, JÚNIOR J B, VLASSOV V. Transient response of an axially-grooved aluminum-ammonia heat pipe with the presence of non-condensable gas[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, **183**: 116135
- [10] ANDERSON W G, BIENERT W. Loop heat pipe radiator trade study for the $300 \sim 550 \text{ K}$ temperature range[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2005, **746**(1): 946-953
- [11] SANZI J L, JAWORSKE D A. Heat Pipes and Heat Rejection Component Testing at NASA Glenn Research

- Center[R]. Cleveland: Glenn Research Center, 2012
- [12] ROSENFELD J H, GERNERT N J. Advances in high temperature titanium-water heat pipe technology[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2007, **880**(1): 129-136
- [13] ROSENFELD J H, GERNERT N J. Life test results for water heat pipes operating at 200°C to 300°C[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2008, **969**(1): 123-130
- [14] FENG Maolong, LAI Xiaoyi, HAN Haiying *et al.* Study on radiation performance of fluid loop-heat pipe coupled radiator for China space station[J]. *Aerospace Shanghai (Chinese & English)*, 2023, **40**(5): 88-93 (丰茂龙, 来霄毅, 韩海鹰, 等. 空间站流体回路/热管耦合式热辐射器性能研究[J]. *上海航天 (中英文)*, 2023, **40**(5): 88-93)
- [15] ZHANG Xiu, ZHANG Haochun, LIU Xiuting, *et al.* Thermal analysis and parameter optimization of a heat-pipe radiator for space nuclear power[J]. *Journal of Astronautics*, 2019, **40**(4): 452-458 (张秀, 张昊春, 刘秀婷, 等. 空间核电源热管式辐射散热器热分析与参数优化[J]. *宇航学报*, 2019, **40**(4): 452-458)
- [16] BEARD D, ANDERSON W G, TARAU C, *et al.* High temperature water heat pipes for kilopower system[C]// 15th International Energy Conversion Engineering Conference. Atlanta: AIAA, 2017
- [17] LEE K L, KADAMBI J R, KAMOTANI Y. The influence of non-condensable gas on an integral planar heat pipe radiators for space applications[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, **110**: 496-505
- [18] ZHOU Qiang, WANG Lu, LIU Chang, *et al.* Design and verification of 3D printing titanium-water heat pipe used in high power spacecraft[J]. *Spacecraft Engineering*, 2020, **29**(4): 86-92 (周强, 王录, 刘畅, 等. 用于大功率航天器的3D打印钛水热管设计及试验研究[J]. *航天器工程*, 2020, **29**(4): 86-92)
- [19] FLEMING A J, THOMAS S K, YERKES K L. Titanium-water loop heat pipe operating characteristics under standard and elevated acceleration fields[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2010, **24**(1): 184-198
- [20] TIAN Zhixing, LIU Xiao, WANG Chenglong, *et al.* Study on heat transfer performance of high temperature potassium heat pipe at steady state[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2020, **54**(10): 1771-1778 (田智星, 刘道, 王成龙, 等. 高温钾热管稳态运行传热特性研究[J]. *原子能科学技术*, 2020, **54**(10): 1771-1778)
- [21] DUNBAR N, CADELL P. Working fluids and figure of merit for CPL/LHP applications[C]//CPL-98 Workshop. El Segundo: The Aerospace Corporation, 1998

作者简介



王慧志 男, 1992年4月出生于河南省周口市, 现为北京空间飞行器总体设计部高级工程师, 主要研究方向为航天器热控技术。
E-mail: wanghuizhi@cast.com



郭元东 (通信作者) 男, 1992年6月出生于河北省邢台市. 现为北京航空航天大学航空科学与工程学院副教授, 博士生导师, 主要研究方向为航空航天器热管理、热管、流动沸腾传热技术。
E-mail: guoyd@buaa.edu.cn