

高温钠热管传热性能试验研究

卫光仁, 柴宝华, 韩冶*, 张亚坤, 冯波, 毕可明, 杨斌, 王晨龙

(中国原子能科学研究院 反应堆工程技术研究所, 北京 102413)

摘要:为获得高温钠热管传热性能,开展真空条件下钠热管启动性能和等温性能试验,获得了钠热管真空条件下启动速度与等温性能数据;开展强制冷却工况条件下传热性能试验,获得了钠热管声速限特性与试验工况下的最大传热功率。经试验验证,所研制高温钠热管在真空条件下,580 °C时完全启动,启动用时 20 min,轴向壁面温差低于 11 °C,等温性能良好;钠热管传热功率在工作温度为 500~650 °C时受声速极限制,在 650 °C以上受携带极限制;在 750 °C和 850 °C时,测得热管最大散热功率分别为 4.78 kW与 8.02 kW,对应的最大轴向热流密度分别为 1.51 kW/cm²与 2.53 kW/cm²。试验结果表明,所研制钠热管具有较强传热能力,可满足热管式核反应堆等工程应用需求。

关键词:钠热管;高温热管;声速极限;热管式核反应堆

中图分类号:TL133

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2021)06-1039-08

doi:10.7538/yzk.2021.youxian.0115

Experimental Study on Heat Transfer Performance of High Temperature Sodium Heat Pipe

WEI Guangren, CHAI Baohua, HAN Ye*, ZHANG Yakun, FENG Bo,

BI Keming, YANG Bin, WANG Chenlong

(Reactor Engineering Technology Research Institute,

China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: In order to obtain the heat transfer performance of high temperature sodium heat pipe, the start-up performance and isothermal performance tests of sodium heat pipe under vacuum conditions were carried out, and the start-up speed and isothermal performance data of sodium heat pipe under vacuum conditions were obtained. Heat transfer performance tests under the forced cooling conditions were carried out, and the sonic limit characteristics of sodium heat pipe and the maximum heat transfer power under test conditions were obtained. The experimental results show that the developed high temperature sodium heat pipe is fully started at 580 °C under vacuum condition, and the start-up time is 20 minutes, the axial wall temperature difference is lower than 11 °C, and the isothermal performance is good. The heat transfer power of sodium heat pipe is limited by the sonic limit in the temperature range of 500-650 °C, and is limited

by carrying limit in the operating temperature above 650 °C. When the working temperature is 750 °C and 850 °C, the measured maximum heat transfer power of the heat pipe is 4.78 kW and 8.02 kW, respectively, and the maximum axial heat flux density was 1.51 kW/cm² and 2.53 kW/cm², respectively. The test results show that the developed sodium heat pipe has strong heat transfer capability which can meet the needs of heat pipe nuclear reactors and other engineering applications.

Key words: sodium heat pipe; high temperature heat pipe; sonic limit; heat pipe nuclear reactor

热管通过腔内工质相变与高速流动,实现热量从热源向热沉的高效非能动传输,使热管具有热传导能力强、非能动传热、运行可靠及寿命长等特点^[1-3]。高温钠热管适用于 550~900 °C 工作温度区间,在该温度区间能实现高温热源的高效热传导与散热需求^[1,3-19]。为满足工程应用需求,一般需通过传热性能试验掌握所研制高温钠热管的启动传热性能、等温升温性能及极限传热性能。

美国在高温钠热管领域曾开展多项探索性研究:热管式火星探索反应堆(HOMER)^[12]概念设计,采用钠热管将堆芯热量传输至斯特林发电机,单支热管传热功率约 2 kW;HOMER-15^[13-14]方案中单支钠热管设计传热功率约 0.8 kW;对钠热管开展了在 650~700 °C 下 115 000 h 及 700 °C 下 41 000 h 寿命考验,被考验件未见失效;千瓦级斯特林技术反应堆(KRUSTY)^[15]设计采用钠热管将 5 kW 堆芯热量传输至斯特林发电机,单支钠热管传热功率 0.6 kW,运行温度 800 °C,并通过初步电加热模拟试验验证了方案的可行性;开展热管式反应堆 Kilopower^[16-18]测试,设计利用 8 支弯曲钠热管在 720~800 °C 将堆芯 3 kW 热量传输至斯特林发电机,单支热管传热功率 380 W,实际测试中钠热管将堆芯 1.3 kW 传输至斯特林发动机,钠热管启动温度约 600 °C,启动用时约 40 min。在国内,赵蔚琳等^[10]对化工用钠热管开展了启动测试初步研究;于萍等^[19]对用于太阳能发电系统的钠热管开展了停止工作后再启动性能研究。中国原子能科学研究院在高温热管领域开展了广泛而深入的研究,研制出高温热管^[2,9,20]、超高温热管与中温热管^[21],并实现热管式辐射器与热管式核反应堆工程应用。目前国内尚无其他单位对热管式核反应堆用钠热管开

展系统性试验研究。

本文介绍中国原子能科学研究院瞄准热管式核反应堆工程需求,针对高温钠热管所做的研究,包括高温钠热管研制、钠热管启动传热试验、等温升温试验及传热极限试验等。试验验证该类型钠热管工程应用的可行性。

1 试验件描述

热管式核反应堆应用需求如下:热管工作温度 750~850 °C,热管最大散热能力不小于 3 kW,热管最大轴向热流密度不小于 1 kW/cm²,选用钠作为热管工质。热管工作温度通常指热管绝热段的平均温度。

1.1 设计参数

钠热管由端盖、管壳、吸液芯及充液管等组成,结构材料为 316 不锈钢,吸液芯结构型式为干道式,最佳使用温度 600~900 °C。钠热管内部工质为高纯度碱金属钠,工质钠与不锈钢材料有较好的相容性^[1]。钠热管结构与工作原理示意图如图 1 所示。钠热管参数列于表 1。

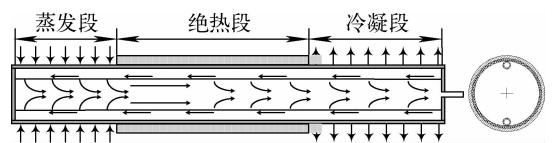


图 1 钠热管结构与工作原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of construction and working principle for sodium heat pipe

钠热管主要制造工艺包括零部件清洗、组装集成、真空检漏、真空除气、工质充装封口等。真空除气避免了热管内不凝结气体的产生。钠热管工质充装量 25 g。

1.2 传热极限计算

热管的热传导能力极强,但传热功率有上限,主要受固有的各传热极限所限制。根据应用广泛的热管传热计算理论^[1,11,22-23],各传热极限功率的理论计算公式如下。

表 1 钠热管参数

Table 1 Parameter of sodium heat pipe

参数	数值
管壳尺寸(直径×厚度),mm	φ24×1.5
结构材料	不锈钢
吸液芯种类	干道式吸液芯
丝网目数	300
总长度,mm	1 000
蒸发段长度,mm	200
绝热段长度,mm	420
冷凝段长度,mm	380
工质	钠

毛细极限时最大传热功率为:

$$Q_{c,max} = \frac{2\sigma/r'_c - P_g}{(F_1 + F_v)l_{eff}} \quad (1)$$

式中: σ 为液体表面张力系数; r'_c 为吸液芯丝网有效毛细半径; P_g 为垂直方向上的液体静压力; l_{eff} 为热管有效长度; F_1 为吸液体摩擦系数; F_v 为蒸气摩擦系数。

液体摩擦系数为:

$$F_1 = \mu_l / (KA\rho_l h_{ig}) \quad (2)$$

式中: μ_l 为液态钠动力黏度; K 为吸液芯渗透率; A 为吸液芯截面积; ρ_l 为液态钠密度; h_{ig} 为钠气化潜热。

蒸气摩擦系数为:

$$F_v = f_v Re_v \mu_v / (2A_v r_{h,v}^2 \rho_v h_{ig}) \quad (3)$$

式中: $f_v Re_v$ 取值为16; μ_v 为液态钠动力黏度; A_v 为蒸气腔截面积; $r_{h,v}$ 为吸液芯丝网孔隙水力半径; ρ_v 为液态钠密度。

声速极限时最大传热功率为:

$$Q_{s,max} = A_v \rho_v h_{ig} \sqrt{\frac{\gamma_v R_v T_v}{2(\gamma_v + 1)}} \quad (4)$$

式中:蒸气比容比 $\gamma_v = 1.67$;蒸气气体常数 $R_v = 361.48$ 。

携带极限时最大传热功率为:

$$Q_{c,max} = A_v h_{ig} \left(\frac{\rho_v \sigma}{2r_{h,s}} \right)^{0.5} \quad (5)$$

$$r_{hs} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{N} - d_w \right) = 2.34 \times 10^{-5} \text{ mm} \quad (6)$$

式中: $r_{h,s}$ 为吸液芯丝网表面水力半径; N 为丝网目数,取300; d_w 为丝网直径,为0.038 mm。

黏性极限时最大传热功率为:

$$Q_{v,max} = \frac{d_v^2 h_{ig}}{64\mu_v l_{eff}} \rho_v P_v A_v \quad (7)$$

式中: d_v 为热管蒸气腔直径; P_v 为钠蒸气饱和蒸气压。

利用上述公式,计算得到所研制钠热管极限传热功率(图2)。由图2可知,钠热管在400~500℃传热功率受黏性极限限制,500~650℃传热功率受声速极限限制,650~900℃传热功率受携带极限限制,900~1000℃传热功率受毛细极限限制。钠热管实际传热功率将被包络在如图2所示各极限传热功率范围内。

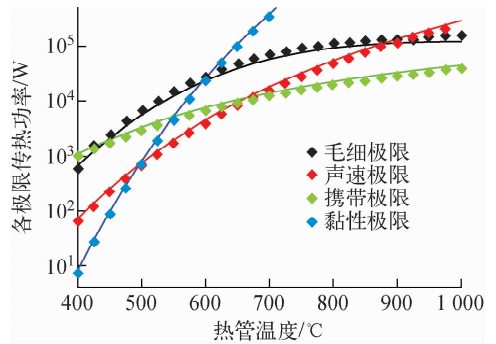


图 2 所研制钠热管极限传热功率
Fig. 2 Limit heat transfer power of developed sodium heat pipe

2 试验装置与试验方法

2.1 试验装置

钠热管传热性能试验装置^[9,24]示意图如图3所示。该装置利用高频感应系统为热管蒸发段提供热量输入。冷凝段热沉是冷却水套,水套设置气隙,气隙内可实现真空环境,也可通入导热气体实现热沉散热能力的调节。热沉气路系统内为氦气和氩气,通过调节两种气体的混合比例,来调节热沉散热能力^[1,24-25],当氩气充满水套汽腔、冷却水流量最大时热沉可达到最大的散热能力。热沉末端与真空系统连接。冷却水来自高位恒水位水箱,以保证冷却水进口水压恒定。冷却水流量通过质量流量计测量,进出口水温通过水路热电偶测量。

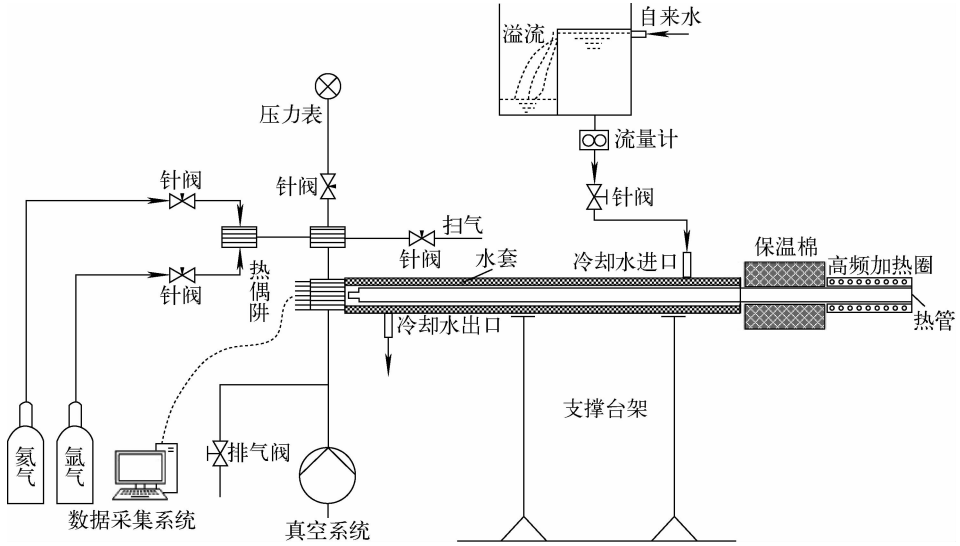


图3 钠热管传热性能试验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test device for sodium heat pipe heat transfer performance

热管壁面温度测量采用 I 级精度 K 型铠装热电偶。为满足热管与水套安装、密封连接及壁面测温需求,热管外壁面需设置纵向槽道,槽道宽度及深度与热电偶外径相同,均为 1 mm,图 4 为槽道径向截面示意图,并将热电偶紧密布置于槽道内,由于槽道并未改变冷凝段散热面积与管壳主体厚度,因此槽道对热管传热无影响。钠热管热电偶测点位置列于表 2。

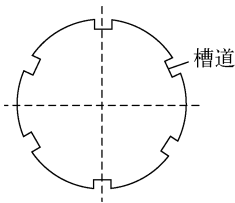


图4 槽道径向截面示意图

Fig. 4 Schematic diagram of radial cross section of channel

表 2 钠热管热电偶测点位置
Table 2 Measuring point position of sodium heat pipe thermocouple

序号	位置/mm	序号	位置/mm
1	50	7	720
2	150	8	780
3	305	9	840
4	410	10	900
5	515	11	960
6	620		

试验中所用计量元件由计量单位校准,质量流量计测量偏差小于 $\pm 0.15\%$,直径 1 mm 的 K 型铠装热电偶测温偏差小于 $\pm 0.1\%$ 。热电偶紧压于测温槽道内并与壳体紧密贴合,且不高出管壳外径,长期试验经验表明这种热电偶布置方式接触热阻极小,所带来的测温误差可忽略不计。

2.2 试验方法

1) 启动与等温升温传热试验

利用试验装置,对钠热管进行真空启动与等温升温试验。钠热管蒸发段被加热后,热管沿轴向逐渐被加热,当绝热段与冷凝段各点温度趋于一致,热管便实现了启动;完全启动后继续加热进行等温升温;测得启动与等温升温过程中温度分布与升温速率,以此判断热管完全启动温度点、等温升温能力及产品质量等。

2) 传热极限试验

热管传热极限是指在不同温度点热管冷凝段向热沉的极限散热功率。通过理论计算可得到各传热极限功率理论值,试验中达到热管传热极限需要较高的试验条件,如热管蒸发段热量输入能力和热沉冷却能力均可按需求不断增大。对于工程应用的热管,最关注的是所研制热管的散热能力能否满足工程应用需求。因此当无法在试验中测得某极高的极限传热功率时,可将测得的热管最大散热功率与应用需求对比,以判断其是否满足需求。

根据试验过程中温度分布可判断热管所处极限状态。声速极限:钠热管完全启动后,在 500~650 °C 区间,不断增强热沉冷却能力并增大蒸发段热量输入,可实现冷凝段各点温度大幅降低,及冷凝段散热功率不随蒸发段热量输入增加而增大的现象。此现象原因是热管工质蒸气流速达到了蒸发段在该温度点的声速,蒸发段向冷凝段的轴向热流密度受声速限制无法进一步提高,所增加的热流量无法传输至冷凝段。黏性极限:该极限处于热管启动阶段,由于启动阶段冷凝段温度低,散热功率远低于黏性极限功率,因此试验中黏性极限通常无法测得。携带极限:热管完全启动后继续升温,650~900 °C 区间,由于毛细极限远高于携带极限,因此该温度区间受携带极限限制。假设热沉冷却能力可覆盖携带极限计算值,那么达到携带极限的现象是:增强热沉冷却能力、增大蒸发段热量输入动态维持热管某一工作温度,当蒸发段温度在某一时刻突然迅速大幅升高时,便达到了该工作温度点的携带极限功率。

3 试验结果与分析

3.1 启动与等温升温传热试验结果与分析

利用热管传热试验装置,测得了启动过程中热管壁面的轴向温度分布,如图 5 所示。钠热管启动过程需要将吸液芯内固态钠沿轴向逐步融化成液态钠,绝热段与冷凝段各测温点逐步升温。如图 5 所示,当热管平均温度达到 580 °C 时,热管实现完全启动。启动过程中为避免蒸发段工质蒸发过快导致干烧,蒸发段升

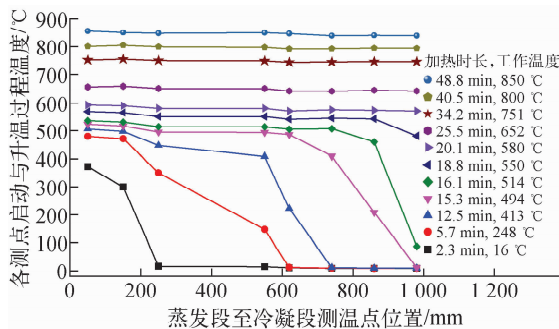


图 5 热管真空启动与升温壁面轴向温度分布
Fig. 5 Vacuum start-up of sodium heat pipe and axial temperature distribution of heating wall

温速率应不大于 80 °C/min,高频加热器输出功率不高于 3 kW,完全启动用时约 20 min。此时高频加热器输出功率 2.75 kW,冷却水质量流量 41.6 g/s。

钠热管完全启动后,继续对其加热升温,如图 5 所示,600~850 °C 区间钠热管实现等温升温,蒸发段至冷凝段热管壁面各测温点等温性能良好,轴向壁面温差 ≤ 11 °C。在 850 °C 时钠热管辐射散热功率约 1.86 kW,此时高频加热器输出功率 5.64 kW,冷却水质量流量 41.6 g/s。

3.2 传热极限试验结果与分析

1) 低温区间传热试验

图 6 为钠热管完全启动后,通过加强冷却在低温段(500~650 °C)达到传热极限过程的温度分布。按照声速极限的试验方法,得到工作温度(绝热段平均温度)为 520 °C 时的声速极限。此时热沉冷却水进出口温差 Δt 为 6 °C,质量流量 m 为 41.7 g/s,利用散热功率公式 $Q = mc_p \Delta t$ [26] 得到声速极限功率为 1.05 kW。

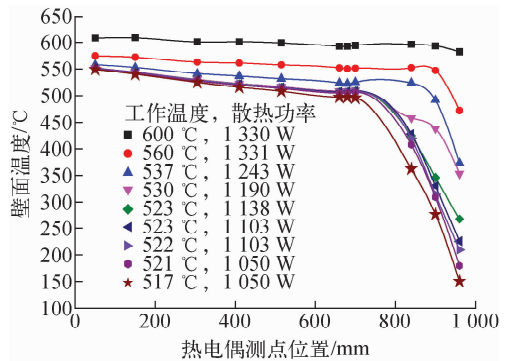


图 6 钠热管声速极限实现过程的温度分布
Fig. 6 Temperature distribution of sodium heat pipe sonic limit in realization process

根据声速极限理论 [22] 计算得到热管工作温度 520 °C 时声速极限理论值 1.13 kW。试验值与理论值相对误差为 7%,吻合较好,验证了声速极限所选用的理论计算方法的合理性。

2) 高温区间传热试验

如图 2 所示,钠热管在高温区间(650~900 °C)的极限传热功率将主要受携带极限限制。图 7 为钠热管高温区间温度分布与最大散热功率。通过增加蒸发段热量输入并对热沉强制加强冷却,使热管工作温度与散热功率均提

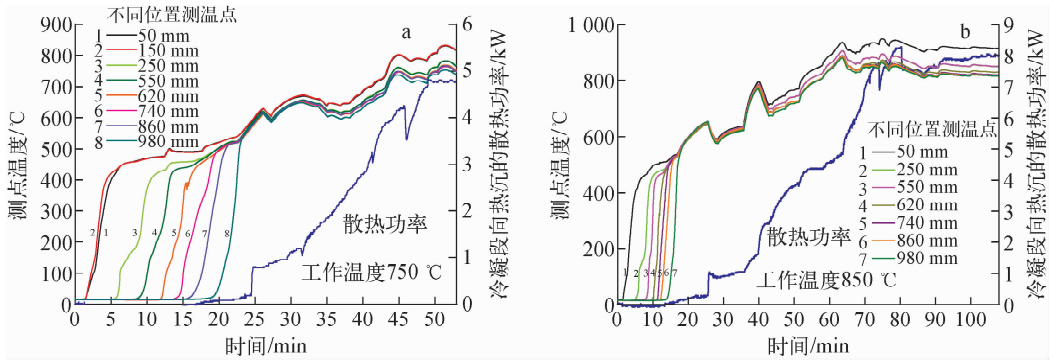


图7 钠热管高温区间温度分布与最大散热功率

Fig. 7 Temperature distribution and maximum heat transfer power in high temperature range of sodium heat pipe

升,试验测得了钠热管工作温度分别在 750 °C 与 850 °C 时热沉在最大散热能力下的冷却水进出口温差与质量流量。将测量值代入 $Q = mc_p \Delta t$ 计算得到钠热管在 750 °C 和 850 °C 时最大散热功率分别为 4.78 kW 和 8.02 kW, 轴向热流密度分别为 1.51 kW/cm² 和 2.53 kW/cm²。相对比,当没有强制冷却,在空气环境中钠热管在 750 °C 与 850 °C 通过热辐射与自然对流的散热功率分别是 1.47 kW 与 2.17 kW。

试验中钠热管所达到的最大传热功率证明了所研制钠热管具有极强传热能力,钠热管最大散热能力能满足热管式核反应堆堆芯热传输工程需求,即在 750~850 °C 工作温度区间热管最大散热能力 ≥ 3 kW, 最大轴向热流密度 ≥ 1 kW/cm²。

受试验装置热沉散热能力限制,试验条件下得到的热管最大传热功率远未达到在此温度点热管携带传热极限计算值 12 kW, 但传热试验判断热管最大传热能力能否满足工程需求的主要目的已实现。

钠热管处于最大传热功率状态下的折算导热系数^[10,26]为:

$$\lambda = \frac{QL}{A\Delta T} \quad (8)$$

式中: λ 为钠热管被折算的导热系数; Q 为 750 °C 和 850 °C 工作温度下热管传热功率(4.78 kW, 8.02 kW); L 为热管有效长度(1 m); A 为热管截面积(0.000 45 m²); ΔT 为热管轴向平均温差(25 K, 58 K)。将数值代入式(8),得到钠热管处于极限传热功率状态下轴向导热系数,即

$\lambda = 424\ 268$ W/(K·m), 307 011 W/(K·m)。相对比,铜在 750 °C 和 850 °C 下导热系数分别为 348 W/(K·m) 和 333 W/(K·m)^[26]。因此,所研制钠热管在 750 °C 和 850 °C 时导热系数分别是铜的 1 219 倍和 922 倍。

4 结论

本文主要对高温钠热管开展了传热性能试验研究,得到如下结论。

1) 钠热管能正常启动,启动温度点 580 °C,完全启动用时 20 min,启动后等温升温性能良好,轴向壁面温差 ≤ 11 °C。

2) 钠热管在 500~650 °C 时可通过强制冷却达到声速极限,520 °C 时声速极限功率 1.05 kW。

3) 钠热管在 650~900 °C 时传热功率主要受携带极限制。钠热管为 750 °C 时,极限传热功率 4.78 kW,轴向热流密度 1.47 kW/cm²,导热系数是铜的 1 219 倍;钠热管为 850 °C 时,极限传热功率 8.02 kW,轴向热流密度 2.53 kW/cm²,导热系数是铜的 922 倍。

4) 试验结果表明所研制的高温钠热管具有极强的热传导能力,能满足热管式核反应堆电源热传输工程应用需求。

参考文献:

- [1] 庄骏,张红. 热管技术及其工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社,2000:5-13.
- [2] 韩冶,柴宝华,周问,等. 基于多孔介质模型的钾热管数值模拟研究[J]. 原子能科学技术,2014, 48(1):49-53.

- HAN Ye, CHAI Baohua, ZHOU Wen, et al. Numerical simulation of potassium heat pipe based on porous media model[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(1): 49-53(in Chinese).
- [3] 胡居传,岳永亮,王铁恒,等. 热管的应用及发展现状[J]. 制冷,2001,9(3):20-25.
HU Juchuan, YUE Yongliang, WANG Tieheng, et al. The application and development status of heat pipes[J]. Refrigeration, 2001, 9(3): 20-25(in Chinese).
- [4] 张光玉,张红,涂善东,等. 热管在核电工程中的应用[J]. 原子能科学技术,1997,31(1):89-95.
ZHANG Guangyu, ZHANG Hong, TU Shandong, et al. The application of heat pipes in nuclear power engineering[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1997, 31(1): 89-95(in Chinese).
- [5] 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,2019,6(3):30-42.
LI Jinwang, DAI Shugang. Research progress and prospects of high-temperature heat pipe technology[J]. Chinese Space Science and Technology, 2019, 6(3): 30-42(in Chinese).
- [6] 王傲,申凤阳,胡古,等. 热管空间核反应堆电源的研究进展[J]. 核技术,2020,6(6):1-6.
WANG Ao, SHEN Fengyang, HU Gu, et al. Research progress of heat pipe space nuclear reactor power supply[J]. Nuclear Technology, 2020, 6(6): 1-6(in Chinese).
- [7] 赵蔚琳,刘宗明,李树人. 高温热管的研究与发展[J]. 石油化工设备,2005,7(4):40-43.
ZHAO Weilin, LIU Zongming, LI Shuren. Research and development of high-temperature heat pipes[J]. Petrochemical Equipment, 2005, 7(4): 40-43(in Chinese).
- [8] 王成龙,田文喜,苏光辉,等. 新概念熔盐堆非能动余热排出系统中钠热管的特性研究[J]. 原子能科学技术,2013,47(12):2254-2255.
WANG Chenglong, TIAN Wenxi, SU Guanghui, et al. Research on the characteristics of sodium heat pipe in the passive waste heat removal system of the new concept molten salt reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(12): 2254-2255(in Chinese).
- [9] 卫光仁,柴宝华,魏国锋,等. 干道式高温热管的传热性能试验研究[J]. 原子能科学技术,2014, 48(3):447-448.
WEI Guangren, CHAI Baohua, WEI Guofeng, et al. Experimental study on the heat transfer performance of dry-channel high-temperature heat pipes[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(3): 447-448(in Chinese).
- [10] 赵蔚琳,庄俊,张红. 钠热管的性能试验研究[J]. 化工装备技术,2014,2(1):25-27.
ZHAO Weilin, ZHUANG Jun, ZHANG Hong. Performance test of sodium heat pipe[J]. Chemical Equipment Technology, 2014, 2(1): 25-27(in Chinese).
- [11] FELDMAN K T, WHITING G H. Applications of the heat pipe[J]. Mechanical Engineering, 1968, 11(5): 48-53.
- [12] MASON L M. A comparison of fission power system options for lunar and mars surface applications[C]// AIP Conference Proceedings. New York: Space Technology Applications International Forum, 2006: 270-280.
- [13] AMIRI B W. A stainless-steel uranium-dioxide potassium-heatpipe-cooled surface reactor [C] // AIP Conference Proceedings. New York: Space Technology Applications International Forum, 2006: 289-297.
- [14] ZINKLE S J. Overview of materials technologies for space nuclear power and propulsion[C]// AIP Conference Proceedings. New York: Space Technology Applications International Forum, 2002: 1 063-1 074.
- [15] GIBSON M. The kilowatt reactor using stirling technology (KRUSTY) nuclear ground test results and lessons learned [C] // International Energy Conversion Engineering Conference. Cincinnati, Ohio: AIAA Propulsion and Energy Forum, 2018: 1-12.
- [16] ROSENFELD J H. An overview of long duration sodium heat pipe tests[C]// AIP Conference Proceedings. USA: Space Technology Applications International Forum, 2004: 1-9.
- [17] 王晓博. 千瓦级空间核反应堆电源发展现状[J]. 工程技术研究,2017(10):1-3.
WANG Xiaobo. Development status of kilowatt space nuclear reactor power supply[J]. Engineering Technology Research, 2017(10): 1-3(in Chinese).
- [18] DEREK B. Self-venting arterial heat pipes for

- spacecraft applications [C] // 14th International Energy Conversion Engineering Conference. Salt Lake, UT; Propulsion and Energy Forum, 2016: 1-14.
- [19] 于萍,张红,许辉,等. 高温钠热管再启动特性研究[J]. 中国电机工程学报,2015,1(2):404-410.
YU Ping, ZHANG Hong, XU Hui, et al. Study on the restart characteristics of high-temperature sodium heat pipes[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2015, 1(2): 404-410(in Chinese).
- [20] 韩冶,柴宝华,卫光仁,等. 有芯和无芯高温重力钾热管启动性能试验研究[J]. 原子能科学技术, 2019,53(1):38-44.
HAN Ye, CHAI Baohua, WEI Guangren, et al. Experimental study on start-up performance of cored and coreless high-temperature gravity potassium heat pipes[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(1): 38-44 (in Chinese).
- [21] 韩冶,柴宝华,王泽鸣,等. 中温热管工质选型与试验研究[J]. 科技创新导报,2019,5(13):101-105.
HAN Ye, CHAI Baohua, WANG Zeming, et al. Selection and experimental research of medium temperature heat pipe working fluid[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2019, 5(13): 101-105(in Chinese).
- [22] FAGHRI A. Heat pipe science and technology [M]. UK ; Taylor & Francis Press, 1995: 15-23.
- [23] COTTER T P. Theory of heat pipes, LA-3246-MS [R]. USA: Los Alamos Scientific Lab., 1965.
- [24] TURNER R C. The constant temperature heat pipe-a unique device for the thermal control of spacecraft components[C]// AIAA 4th Thermophysics Conference. USA: AIAA , 1969.
- [25] BIENERT W. Heat pipes for temperature control[C]//4th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. USA: [s. n.], 1969.
- [26] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,2006:3-38.