

文章编号:1000-8055(2019)01-0001-07

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2019.01.001

不同加热功率条件下钠钾合金热管 启动和传热性能

郭航¹, 贾先剑¹, 郭青¹, 闫小克², 叶芳¹, 马重芳¹

- (1. 北京工业大学 环境与能源工程学院 传热强化与过程节能教育部重点实验室及
传热与能源利用北京市重点实验室, 北京 100124;
2. 中国计量科学研究院 热工计量科学研究所, 北京 100013)

摘 要: 以钠钾合金(NaK-55)为工质进行实验,分别在 800、1000、1200、1400、1600 W 的加热功率条件下对钠钾合金热管的启动和传热性能进行研究。实验结果表明:在 800~1600 W 加热功率范围内,在冷却水冷却条件下,该钠钾合金热管可以完全启动并进入稳定工作状态。随着加热功率的提高,热管外壁面温度整体略有增加,冷凝段启动时间缩短,钠钾合金热管的当量传热系数、蒸发区表面传热系数、冷凝区表面传热系数随加热功率的提高成线性增加。

关键词: 热管; 钠钾合金; 传热; 加热功率; 相变

中图分类号: V23; TK172.4

文献标志码: A

Start-up and heat transfer performance of a sodium-potassium alloy heat pipe under different conditions of heating power

GUO Hang¹, JIA Xianjian¹, GUO Qing¹,
YAN Xiaoke², YE Fang¹, MA Chongfang¹

- (1. Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, Ministry of Education of China, and Beijing Key Laboratory of Heat Transfer and Energy Conversion, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Division of Thermophysics and Process Measurements, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract: A sodium-potassium alloy (45-wt. %-Na and 55-wt. %-K) heat pipe was experimentally tested to investigate the effect of heating powers (800, 1000, 1200, 1400, and 1600 W) on start-up and heat transfer performances. The results showed that under the tested operation conditions, the sodium-potassium alloy heat pipe presented an optimal start-up performance with the heating power. Within the range of 800–1600 W of heating power, the heat pipe could achieve a dynamic equilibrium state of heat transfer as the heat was carried away by cooling water in time, and the heat transfer coefficient of the sodium-potassium alloy heat pipe, convective heat transfer coefficients of evaporator and condenser sections almost

收稿日期: 2018-01-27

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFF0205901)

作者简介: 郭航(1970—),男,教授、博士生导师,博士,主要从事传热与能源利用研究。

引用格式: 郭航,贾先剑,郭青,等. 不同加热功率条件下钠钾合金热管启动和传热性能[J]. 航空动力学报,2019,34(1):1-7. GUO Hang, JIA Xianjian, GUO Qing, et al. Start-up and heat transfer performance of a sodium-potassium alloy heat pipe under different conditions of heating power[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(1): 1-7.

linearly increased with the heating power.

Key words: heat pipe; sodium-potassium alloy; heat transfer; heating power; phase change

热管是一种通过工质气液相变来进行热量传递的高效传热元件^[1-2]。Gaugler^[3]提出了热管的工作原理之后,Cotter^[4]相继提出的热管工作基本方程和模型奠定了热管的理论基础,极大地推动了热管的研究与发展。选用不同热物理性质的工质,热管可工作于不同的温区,目前热管已经在低温、中温、高温及超高温的工业以及航空航天领域得到广泛应用^[5-7]。

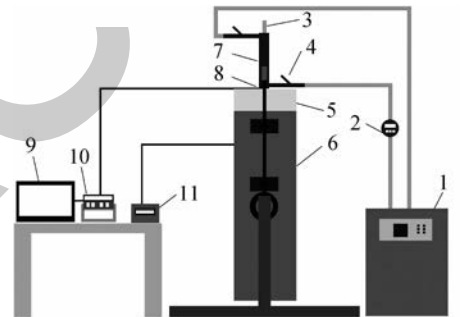
采用锂、钠、钾、铷、铯、铕等碱金属作为热管的工作介质时,可研制出工作温度高于 750 K 的高温及超高温碱金属热管^[8-10]。90 年代初期,由于钠钾合金在一定配比范围内可以液态的形式存在于室温环境,Anderson 等^[11]指出了使用钠钾合金替代钠、钾等碱金属作为高温热管工质的优越性。而后,钠钾合金作为高温热管工质^[12-16]的可行性也得到多方面的证明。目前,钠钾合金热管因其相比于钠、钾热管的优越性引起了越来越多的关注和研究。Yamawaki 等^[17]实验研究了钠钾合金热管和钠热管的启动特性。Carl 等^[18]将钠钾合金热管成功用于斯特林发动机系统的散热系统,并实现了其多次启停。捷曼尔等^[15]对钠钾合金热管的启动和等温特性进行了深入研究,验证了钠钾合金热管的可行性和实用性。Wang 等^[19]采用有限元数值模拟的方法证明了钠钾合金热管具有良好的传热性能。郭青等^[20-21]研究了倾角、蒸发段长度等因素对钠钾合金(NaK-55)热管启动性能的影响。贾先剑等^[22]通过实验研究加热温度对钠钾合金热管的传热性能的影响。李铁等^[23]实验研究了钠钾合金热管应用于汽轮机转子散热问题的可行性。然而,加热功率等影响因素对钠钾合金热管启动特性和传热性能的影响尚未得到深入研究。

本文通过改变热管蒸发段加热功率来研究加热功率对热管的启动热性能的影响,同时借助循环冷却水强制对流冷却热管冷凝段的方式研究加热功率对热管的启动和传热性能的影响。

1 实验系统及可靠性分析

图 1 所示为定功率加热钠钾合金热管蒸发段,冷却水强迫对流冷却热管冷凝段的实验系示意图。实验系统主要由热管、控功率加热系统、冷却水循环系统、数据采集系统等组成。热管所用

工质为 NaK-55,其中钾的质量分数为 55%,钠的质量分数为 45%,充装量为 0.07 kg。热管管壳所用的材质为 Inconel600,Inconel600 具有耐高温、耐腐蚀、抗氧化、易加工焊接等特点。实验选取钠钾合金热管的蒸发段长为 580 mm、绝热段长为 90 mm、冷凝段长为 330 mm。本文研究中,钠钾合金重力热管竖直放置,冷凝段在上方、蒸发段在下方。通过调节可控硅调功器,电加热炉分别以 800、1000、1200、1400、1600 W 的加热功率对钠钾合金热管蒸发段进行加热,调控精度为 0.01 kW。冷凝段采用水温为 20℃、流量为 0.10 m³/h 的循环冷却水通过冷却水套与热管冷凝段进行热量交换。循环冷却水水套出入口分别由两支内置 T 型热电偶(不确定度为 0.1℃)进行实时温度测量。



1 冷却水循环机; 2 流量计; 3 热管; 4 T型热电偶; 5 保温棉; 6 加热炉; 7 冷却水套; 8 K型热电偶; 9 电脑; 10 安捷伦数据采集器; 11 可控硅调功器。

图 1 钠钾合金热管实验系统

Fig. 1 Experimental system of the sodium-potassium alloy heat pipe

热管外壁面共布置 11 支 K 型热电偶(不确定度 1.2℃),可对应测量测点 1 至测点 11 位置处的温度。图 2 所示为测点位置分布,其中测点 1 位于热管蒸发段底部,测点 11 位于热管冷凝段顶部。实验所测量的最低温度为 20℃,最高温度为 700℃,安捷伦数据采集单元的数据采集精度为 1/2¹⁶,故 K 型热电偶测温的最大相对不确定度为 $\sqrt{[1.2/(20+273.15)]^2 + (1/2^{16})^2} \approx 0.41\%$ 。

为确保实验中温度数据的可靠性,本研究对热管外壁面温度进行了重复性测试。图 3 所示为两组实验在达到稳定之后,热管壁面温度分布的对比图,两组数据均取自于不同实验日期时的测

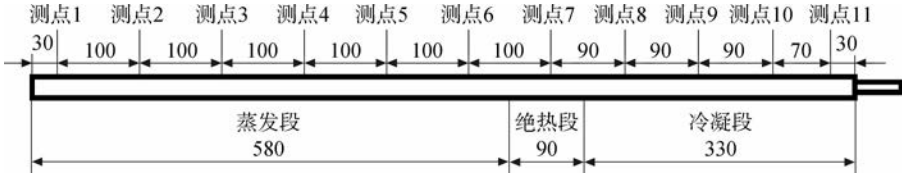


图2 钠钾合金热管壁面测温点分布(单位:mm)

Fig. 2 Measurement points of wall temperature in sodium-potassium alloy heat pipe (unit:mm)

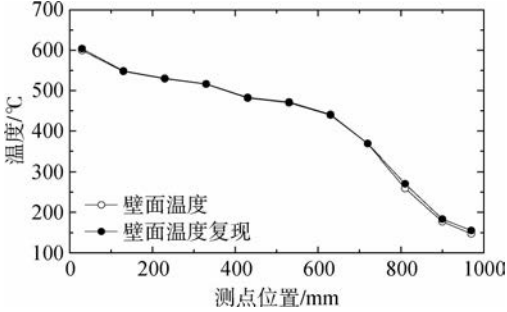


图3 热管壁面温度复现

Fig. 3 Recurrent tests for wall temperature at the heat pipe

量结果。由图3知,不同测试日期得到的钠钾合金热管测点1至测点11的温度曲线基本重合。由此说明钠钾合金热管实验系统稳定性比较好,钠钾合金热管温度测量数据复现性良好。

2 传热系数计算方法

本文依据 GB/T14812-2008《热管传热性能试验方法》进行实验。由于实验漏热量很少,蒸发段加热功率 Q 用于计算热管的当量传热系数,其计算方法按照式(1)^[24]计算。

$$K = Q / (A\Delta t) \quad (1)$$

式中 A 为热管的横截面积(m^2), Δt 为钠钾合金热管蒸发段和冷凝段温差($^{\circ}\text{C}$)。

由于热管管材导热系数较大,忽略这一部分的热阻,热管外壁温用于计算蒸发区和冷凝区传热系数。热管蒸发区传热系数可根据式(2)和式(3)计算

$$h_e = Q / (\Delta t_e A_e) \quad (2)$$

$$\Delta t_e = t_{wc} - t_v \quad (3)$$

式中 h_e 为热管蒸发区表面传热系数 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, Δt_e 为热管蒸发区壁面温度与蒸气之间的温差($^{\circ}\text{C}$), t_{wc} 为热管蒸发区壁面温度平均值($^{\circ}\text{C}$), t_v 为热管蒸气温度,取热管绝热段温度平均值($^{\circ}\text{C}$), A_e 为热管蒸发区表面积(m^2)。

热管冷凝区表面传热系数可根据式(4)和式(5)计算。

$$h_c = Q / (\Delta t_c A_c) \quad (4)$$

$$\Delta t_c = t_v - t_{wc} \quad (5)$$

式中 h_c 为热管冷凝区表面传热系数 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$), Δt_c 为热管冷凝区蒸气温度与外壁面平均温度的温差($^{\circ}\text{C}$), t_{wc} 为热管冷凝区平均温度($^{\circ}\text{C}$), A_c 为热管冷凝区表面积(m^2)。

3 实验结果与分析

3.1 输入功率对热管启动过程的影响

图4所示为定功率加热热管蒸发段、冷却水强迫对流冷却热管冷凝段情况下,钠钾合金热管外壁面各测点温度随功率输入时间变化的曲线。由图4可知,在800W的加热功率下,启动前期,热管蒸发段测点1至测点6的温度随着时间的推移快速上升,热管绝热段和冷凝段的测点7至测点11的温度依旧维持在室温状态下。在加热20min后,钠钾合金热管蒸发段底部测点温度不再继续升高,而是进入温度瞬间下降而后又缓慢上升的波动状态。与此同时,伴随着热管蒸发段测点温度的剧烈波动,热管绝热段测点7的温度瞬间大幅升高,冷凝段入口处测点8温度也随着测点7温度升高而大幅上升,而后冷凝段其余各点温度也陆续缓慢升高并维持该温度波动状态。这一结果说明在热管内部,工质形成稳定的蒸发冷凝过程。由于液池内发生间歇沸腾现象,致使其内部压力发生剧烈变化,导致热管壁面出现剧烈波动。随着热量持续稳定的输入,钠钾合金热管壁面各测点逐渐形成稳定的波动,证明热管蒸发段吸收的热量和冷凝段释放的热量逐渐达到平衡,热管进入热传递持续发生的状态。

图5所示为钠钾合金热管在启动前40min过程中,蒸发段不同加热功率下热管外壁面各测点温度随着加热时间的变化曲线图。

比较上述4种不同加热功率时钠钾合金热管各测点温度变化趋势可以发现,热管冷凝段各测点温度上升的初始时刻随着蒸发段加热功率的增加依次提前了。这一结果表明,以较大的恒定加热功率加热蒸发段条件下启动时,钠钾合金热管

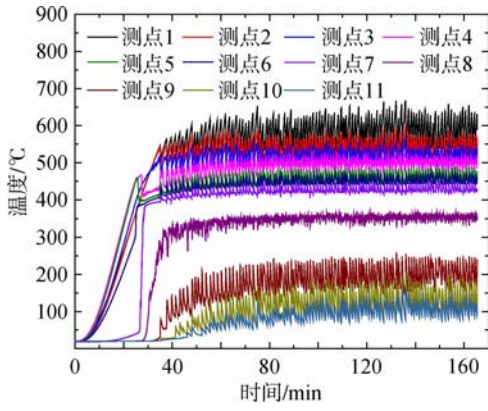
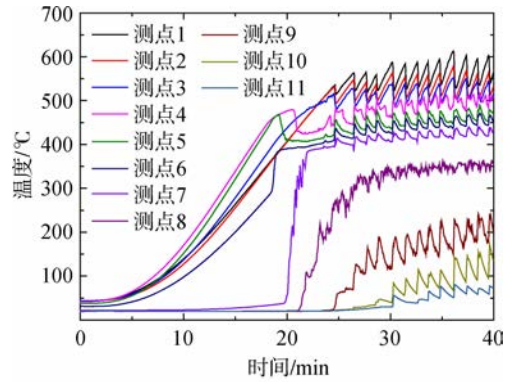


图4 800 W加热功率下热管壁面温度变化

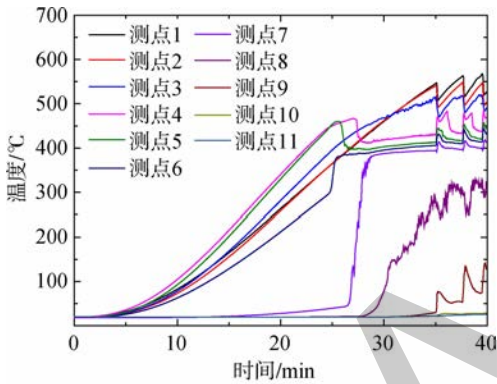
Fig. 4 Wall temperature variations of the heat pipe under heating power of 800 W



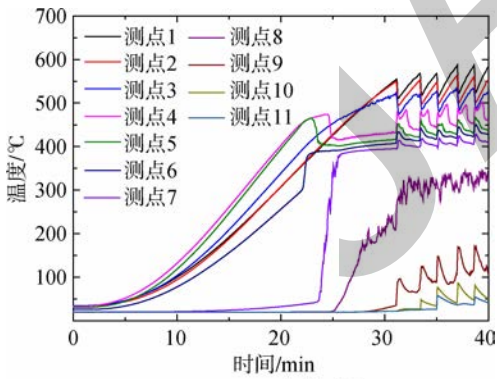
(d) 1400 W加热功率

图5 不同加热功率下热管启动前40 min温度变化

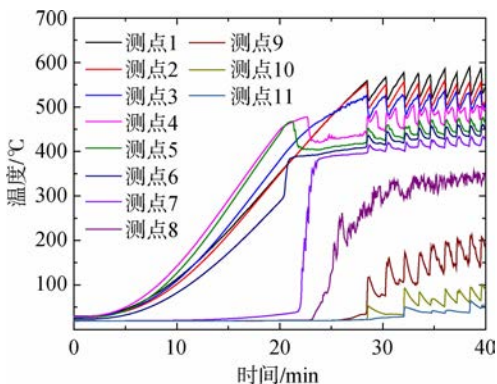
Fig. 5 Wall temperature variations of heat pipe at the initial time of 40 min under different heating powers



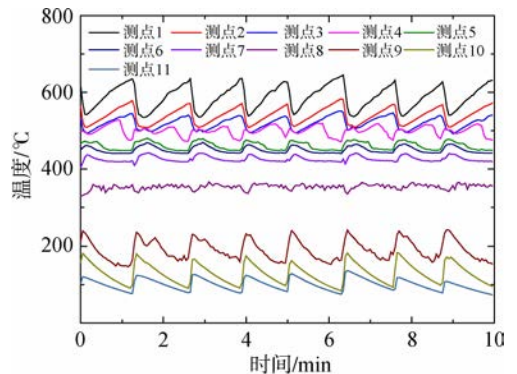
(a) 800 W加热功率



(b) 1000 W加热功率



(c) 1200 W加热功率

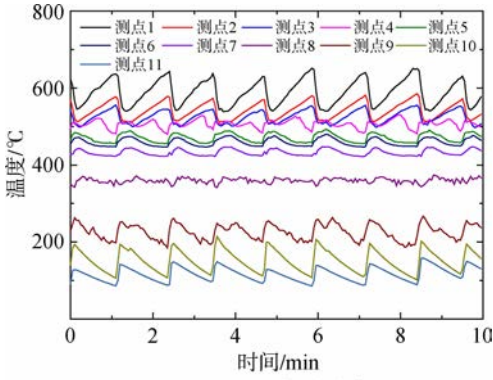


(a) 800 W加热功率

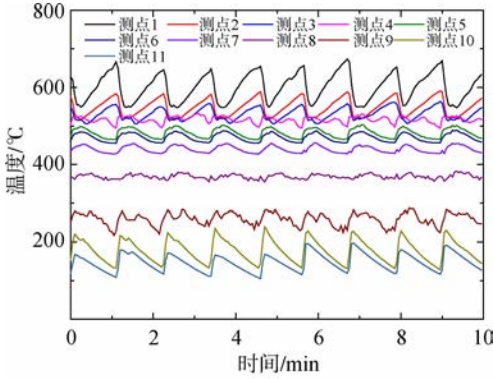
能够更快的启动。产生上述结果的原因主要在于,在相对较大的加热功率条件下启动时,位于热管蒸发段底部的液态钠钾合金工质能够在短时间内吸收更多的热量,因而钠钾合金工质由液态吸热相变为汽态的过程缩短,蒸汽腔内饱和蒸汽压增加较快,继而更快的达到了能够使得携带较高能量的钠钾合金蒸汽从热管蒸发段运动到冷凝段所需的蒸汽压力。因此,在800~1400 W加热功率范围内,输入功率越大,钠钾合金热管越早进入持续蒸发、冷凝、冷凝液回流的循环过程,且蒸汽越容易流动至冷凝段、对外冷凝散热,热管启动时间越短,越早进入工作状态。

在以上条件下启动时,热管均发出金属碰撞声,且同时各测点温度出现了骤升或者骤降现象,该现象伴随整个工作过程。这一结果与文献[20-21]中一致。图6所示为不同加热功率时,钠钾合金热管各测点温度在10 min内的波动情况。

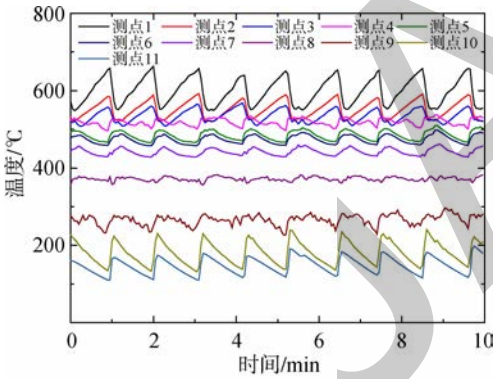
由图6可知,测点1至测点3与其余各测点温度变化情况相反。产生以上现象的原因在于,热管内部发生了间歇沸腾现象。随着热量的不断输入,蒸发段液池内产生大气泡,随着其内压的不断增,气泡占据整个管径,并最终推动气泡顶端的



(b) 1000 W 加热功率



(c) 1200 W 加热功率



(d) 1400 W 加热功率

图 6 不同加热功率下热管壁面温度波动状态
Fig. 6 Wall temperature variations of heat pipe under different heating powers

液态工质运动至冷凝段,由此导致测点 1 至测点 3 温度下降而其余各点温度升高;蒸发段测点 1 至测点 3 在输入功率的援助下温度回升,随着冷却水的强制冷却,热管其余各点温度缓慢下降。

输入功率对热管壁面温度波动具有重要影响。由图 6 可知,当加热功率为 800 W 时,在 10 min 内热管壁面各测点温度的波动次数不足 8 个周期;当加热功率为 1000 W 时,在 10 min 内热管壁面各测点温度的波动次数多于 8 个周期;当加热功率为 1200 W 时,在 10 min 内热管壁面各测

点温度的波动次数接近 9 个周期;当加热功率为 1400 W 时,在 10 min 内热管壁面各测点温度的波动次数为 9 个周期。且随着蒸发段输入功率的增加,相邻两个波峰之间的波动时间也相继缩短,且较大输入功率时热管冷凝段外壁面温度分布略高于低输入功率时温度分布。由此可知,在 800 ~ 1200 W 的加热功率范围内,随着加热功率的提高,在热管壁面温度波动达到动态平衡后,热管壁面各测点温度波动的频率提高,波动周期越来越短。这一结果同样表明,随着蒸发段加热功率的升高,热管蒸发段底部液态钠钾合金吸收热量的速率加快,促进了钠钾合金工质由液态相变至汽态这一过程,可以使热管蒸发段更频繁的将热量从蒸发段传递至冷凝段。

3.2 输入功率对热管传热特性的影响

如图 7 所示,为冷却水强迫对流冷却钠钾合金热管冷凝段的情况下,不同输入加热功率条件时其外壁面温度分布情况。该图中各点均取自钠钾合金热管进入热传递平衡的工作状态后,10 min 之内外壁面温度测量值的平均值。由图 7 可知,在图示 5 种输入功率条件下工作时,钠钾合金热管外壁面温度分布都极其不均匀。蒸发段和绝热段温度分布相对而言要比冷凝段温度分布均匀且冷凝段温度分布整体较低,这一温度分布趋势与文献[15]中所示实验结果相似。冷凝段温度明显低于热管其余区段的主要原因在于,热管冷凝段外壁面是处于循环冷却水强制对流冷却的环境中,冷却水强制换热使得运动到冷凝段的高温蒸汽很快被冷凝。越靠近热管冷凝段顶部,冷却水套高效的换热性能使得流动至冷凝段顶部的高温蒸汽量越少,由此越靠近冷凝段顶部热管外壁面

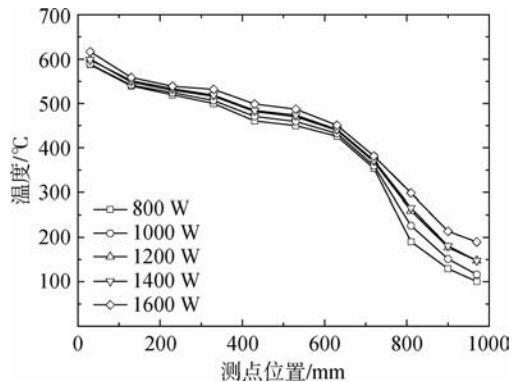


图 7 不同加热功率下热管壁面温度分布
Fig. 7 Wall temperature distributions of heat pipe under different heating powers

温度越低。此外,对比不同输入功率时热管外壁面温度分布情况可以看出,随着热管蒸发段加热功率的提高,热管外壁面各测点温度呈现整体升高的趋势。加热功率由 800 W 升高至 1600 W,蒸发段和绝热段各点以及冷凝段入口处测点 8 的温度有小幅度的上升,而冷凝段测点 9 至测点 11 温度上升幅度远大于热管其余各点。此时,蒸发段温度的升高直接与蒸发段输入功率的增加相关联;而绝热段和冷凝段外壁面温度升高的原因在于,蒸汽腔内高温饱和蒸汽更加频繁的从蒸发段运动至冷凝段从而使得蒸汽流动经过的位置温度升高。

不同类型的热管除了具有适用的工作温区外,热管本身还受到传热极限的限制,只有工作在合适的热量传输范围内,热管才能够持续稳定工作。由图 7 知,即使蒸发段输入功率高达 1600 W 时,钠钾合金热管蒸发段和冷凝段之间仍存在很大的传热温差。热管的传热量是与蒸发段和冷凝段之间的温差密切相关的,温差越小说明热管传热性能越好,反之越差。较大温差存在说明,热管尚未到达传热极限,其传热性能还有继续提高的潜力。在图 4 和图 5 中,可以看到冷凝段各点温度都出现了温度首次很快升高的现象,这一现象表明此时快速的温升是由于高温蒸汽的快速运动所致的。这也说明,热管传递热量是依靠热管内部蒸汽流动以及气液相变进行传递的,而非仅仅通过热管蒸发段至冷凝段管壁来传递热量。因此,本文研究表明,蒸发段输入加热功率在 800~1600 W 范围内,水温为 20℃、流量为 0.10 m³/h 的循环冷却水冷却热管冷凝段时,钠钾合金热管能够通过蒸汽的循环流动以及气液相变方式将热量从蒸发段传递至冷凝段并最终由冷却水将热量带走。该钠钾合金热管可以在蒸发段输入功率为 800~1600 W 范围内能正常工作。

图 8 和图 9 所示为钠钾合金热管稳定工作于不同加热功率时,热管的当量传热系数、蒸发区和冷凝区表面传热系数的变化情况。

本文钠钾合金热管的当量传热系数是根据式(1)计算的,式中 Q 为热管蒸发段加热功率。热管蒸发区的表面传热系数和冷凝区的表面传热系数按式(2)和式(4)计算得出。由图 8 和图 9 可知,随着热管蒸发段加热功率输入的增加,热管的当量传热系数、蒸发区和冷凝区的表面传热系数都随着输入功率的增加基本成直线上升。热管的当量传热系数、蒸发区和冷凝区表面传热系数与热管的传热量成正比,与热管的轴向温差成反比。

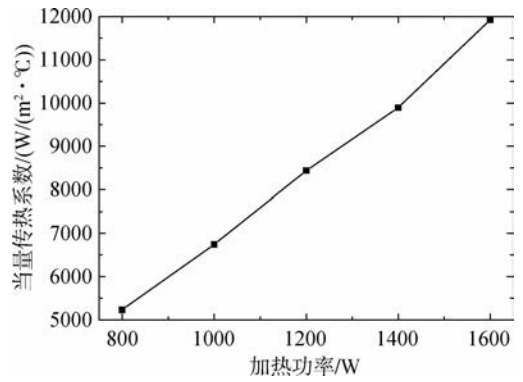


图 8 不同加热功率下热管的当量传热系数
Fig. 8 Equivalent heat transfer coefficient of heat pipe under different heating powers

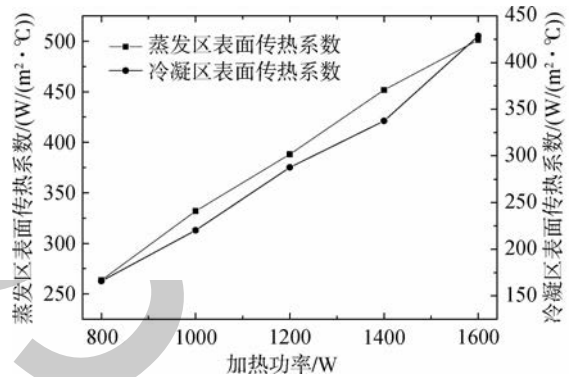


图 9 不同加热功率下热管蒸发和冷凝区表面传热系数
Fig. 9 Convective heat transfer coefficients of evaporator and condenser sections under different heating powers

由图 7 可知,随着热管蒸发段输入功率的增加,热管壁面温度分布整体有一定的提高,但是对热管壁面温差分布没有明显的改善,因此随着热管的当量传热系数、蒸发区和冷凝区表面传热系数与热管的传热量基本成正比关系。

4 结 论

本文主要研究冷却水冷却钠钾合金热管冷凝段时,加热功率对钠钾合金热管的启动和传热性能的影响规律。主要得出以下结论:

- 1) 在冷却水冷却条件下,蒸发段以 800~1600 W 加热功率范围内启动时,该钠钾合金热管可以完全启动并进入传递热量的工作状态。
- 2) 本文实验条件下,增大输入功率可以有效缩短热管启动时间,使得钠钾合金热管更早的进入热量传递的动态平衡状态。
- 3) 在 800~1600 W 范围内,当钠钾合金热管达到热量传递的动态平衡状态时,热管外壁面温

度整体随加热功率的增加而略有提高。

4) 在 800~1600 W 范围内,钠钾合金热管的当量传热系数、蒸发区表面传热系数、冷凝区表面传热系数随加热功率的提高线性增加。

参考文献:

- [1] FAGHRI A. Heatpipe science and technology[M]. London: Taylor and Francis Group, 1994.
- [2] CHI S W. Heat pipe theory and practice[M]. New York: McGraw Hill Co., 1976.
- [3] GAUGLER R S. Heat transfer device: US2350348 A[P]. 1944-06-06.
- [4] COTTER T P. Theory of heat pipes[R]. New Mexico: University of California USAEC Report, LA-3246, 1964.
- [5] 寇志海,吕洪涛,赵国昌,等.一种微小型平板式热管的传热性能分析[J].航空动力学报,2017,32(2):275-279.
KOU Zhihai, LÜ Hongtao, ZHAO Guochang, et al. Analysis on heat transfer performance of a micro-miniature flat heat pipe[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(2): 275-279. (in Chinese)
- [6] 苏向辉.航空电子设备冷却用环路热管冷凝器热沉分析[J].航空动力学报,2010,25(9):1942-1947.
SU Xianghui. Analysis of heat sink for rejected condenser heat of loop heat pipes for cooling avionics[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(9): 1942-1947. (in Chinese)
- [7] 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.
LI Hongchuan, JI Xianbing, XU Jinliang. Investigation on the performance of bionic wick flat heat pipes[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(10): 2403-2409. (in Chinese)
- [8] 曲伟,王焕光.高温及超高温热管的相容性和传热性能[J].化工学报,2011,62(S1):77-81.
QU Wei, WANG Huanguang. Compatibility and heat transfer of high and super high temperature heat pipes[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2011, 62(S1): 77-81. (in Chinese)
- [9] COVENTRY J, ANDRAKA C, PYE J. A review of sodium receiver technologies for central receiver solar power plants[J]. Solar Energy, 2015, 122(1): 749-762.
- [10] 冯踏青.液态金属高温热管的理论和试验研究[D].杭州:浙江大学,1998.
FENG Taqing. Theoretical and experimental research on liquid metal high temperature heat pipe[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1998. (in Chinese)
- [11] ANDERSON W G. Sodium-potassium (NaK) heat pipe[J]. Heat Pipes and Capillary Pumped Loops, 1993, 236(1): 47-53.
- [12] CONWAY E C, KELIEY M J. A continuous heat pipe for spacecraft thermal control, aviation and space, progress and prospects-Ann[R]. New York: Aviation and Space Conference, 1968.
- [13] CALIN T, ANDERSON W G, KARA W. NaK variable conductance heat pipe for radioisotope Stirling systems[R]. Reston: 6th International Energy Conversion Engineering Conference, 2008.
- [14] 李桂云,屠进.高温热管工质的选择[J].节能技术,2001,19(105):42-44.
LI Guiyun, TU Jin. Working fluid choicing for high temperature heat pipe[J]. Energy Conservation Technology, 2001, 19(105): 42-44. (in Chinese)
- [15] 捷曼尔 M G, 胡亚才, 冯踏青, 等. 钠钾合金高温热管性能试验研究[J]. 浙江大学学报, 1999, 33(4): 414-417.
GAMAL M G, HU Yacai, FENG Taqing, et al. Analysis on the properties of NaK alloy high temperature heatpipe and its experimental study[J]. Journal of Zhejiang University, 1999, 33(4): 414-417. (in Chinese)
- [16] ABOU S A, ARBEITER F, BAUMGAERTNER S, et al. Chemical compatibility of Eurofer steel with sodium-potassium NaK-78 eutectic alloy[J]. Fusion Engineering and Design, 2016, 103(7): 31-37.
- [17] YAMAWAKI S, YOSHIDA T, TAKI M, et al. Fundamental heat transfer experiments of heat pipes for turbine cooling[J]. American Society of Mechanical Engineers, 1997, 120(3): 580-587.
- [18] CARL L, CALIN T, NICHOLAS A. Optimized heat pipe backup cooling system tested with a Stirling convertor[R]. Orlando FL: International Energy Conversion Engineering Conference, 2015.
- [19] WANG Chenglong, GUO Zhangpeng, ZHANG Dalin, et al. Transient behavior of the sodium-potassium alloy heat pipe in passive residual heat removal system of molten salt reactor[J]. Progress in Nuclear Energy, 2013, 68(1): 142-152.
- [20] 郭青,郭航,闫小克,等.蒸发段长度对钠钾合金热管启动性能影响[J].工程热物理学报,2016,37(8):1717-1720.
GUO Qing, GUO Hang, YAN Xiaoke, et al. Effect of the evaporator length on start-up performance of sodium-potassium alloy heat pipe[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(8): 1717-1720. (in Chinese)
- [21] 郭青,郭航,闫小克,等.钠钾合金热管启动性能实验研究[J].工程热物理学报,2014,35(12):2508-2512.
GUO Qing, GUO Hang, YAN Xiaoke, et al. Experimental study of start-up performance of sodium-potassium heat pipe[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(12): 2508-2512. (in Chinese)
- [22] 贾先剑,郭航,郭青,等.不同加热温度下钠钾合金热管传热性能[J].应用能源技术,2016,3(3):7-11.
JIA Xianjian, GUO Hang, GUO Qing, et al. Heat transfer performance of the sodium-potassium alloy heat pipe under different heating temperatures[J]. Applied Energy Technology, 2016, 3(3): 7-11. (in Chinese)
- [23] LI Tie, JIANG Yuyan, LI Zhigang, et al. Loop thermosiphon as a feasible cooling method for the stators of gas turbine[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 109: 449-453.
- [24] 赵蔚琳,庄俊,张红.蒸发段长度与充液量对钠热管启动过程的影响[J].化工机械,2003,30(5):259-262.
ZHAO Weilin, ZHUANG Jun, ZHANG Hong. Influences of the evaporator length and liquid-filled content on the start-up operation of the high temperature sodium heat pipes[J]. Chemical Machinery, 2003, 30(5): 259-262. (in Chinese)