

加热温度对钠钾合金热管启动和传热性能影响

贾先剑¹, 郭 航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, 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, 北京 100013)

摘 要: 实验研究加热温度分别为 300、500、550、600 及 650 °C 时, 钠钾合金热管(NaK-55)的启动特性和传热性能。实验采用循环冷却水冷却热管冷凝段, 并通过冷却水进出口温度计算钠钾合金热管的传热量和传热系数。实验结果表明: 在 300~550 °C 的加热温度范围内热管无法完全启动, 此时热管的传热量和传热系数很低; 在 600 和 650 °C 的加热温度下热管完全启动并且达到传热平衡, 热管传热量和传热系数大幅提高。

关键词: 热管; 钠; 钾; 相变; 传热

中图分类号: TK172.4

文献标识码: A

0 引 言

热管是一种利用工质气液相变将热量从热管蒸发段传递至冷凝段的高效传热装置^[1, 2]。Gaugler 等^[3]提出热管的工作原理后, 热管就进入高速发展时期。按其工作温度分类, 工作在 750 K 以上的称为高温热管^[4]。目前, 高温热管已成为航空航天^[5]、斯特林发动机^[6, 7]、太阳能利用^[8, 9]、熔盐^[10]、高温储能^[11]等高温工程应用领域重要的换热元器件之一。

高温热管通常以钠、钾、锂、铯等碱金属作为工质。碱金属工质具备汽化潜热大, 饱和压力低, 传热效率高等特点^[12]。然而由于以上碱金属工质的熔点远高于室温, 使得此类热管在冷冻状态下启动时极可能发生干烧和启动失败等^[4, 13]后果。钠钾合金根据其不同配比在室温条件时可呈液态, 这使得以其为工质研制的热管可有效避免以上问题^[14]。Anderson 等^[15]在 1993 年指出采用钠钾合金替代钠、钾研制高温热管的优越性。随后多位学者对钠钾合金的物性进行研究, 证明钠钾合金作为高温热管工质的可行性和优越性^[4, 13~16]。Yamawaki 等^[17]比较了钠钾合金热管和钠热管的启动和传热性能, 证明钠钾合金热管的可行性。Calin 等^[6]成功将钠钾

合金热管用于斯特林发动机系统的散热装置, 结果表明钠钾合金热管可达到斯特林系统散热要求。冯踏青^[4]分析了钠钾合金的物性, 理论阐述钠钾合金(NaK-77.8)热管的工作原理, 实验研究钠钾合金热管的特性, 为钠钾合金热管的工业化应用提供理论和实验支持。文献[14]在自然冷却的条件下对钠钾合金热管的启动特性、等温性、传热性能进行研究, 验证高温热管的可行性和实用性。文献[18]提出在熔盐反应堆余热利用中应用钠钾合金热管传热的新概念, 采用有限元法数值模拟热管的传热特性。模拟结果表明热管能高效移走熔盐反应堆中的余热, 证明高温钠钾合金热管有良好的传热性能。郭 青等^[19, 20]对钠钾合金热管在辐射和自然对流冷却条件下的启动性能进行详细研究, 并研究倾角、蒸发段长度等因素对热管启动性能的影响。贾先剑等^[21]通过实验研究不同加热温度下钠钾合金热管的传热性能。

以上研究现状表明, 钠钾合金热管的研究仍处于初步可行性验证阶段。特别是热管冷凝段在冷却水强制对流冷却过程中启动时, 加热温度对其启动特性以及传热性能的影响规律尚未得到深入研究。鉴于此, 本文对已有实验系统^[21]进行改进, 在冷却水强制对流冷却热管冷凝段条件下, 详细研究

收稿日期: 2016-09-07

基金项目: 国家质检总局科技计划(2012QK357)

通信作者: 郭 航(1970—), 男, 博士、教授, 主要从事清洁能源热流体方面的研究。hangguo@bjut.edu.cn

加热温度对钠钾合金热管的启动特性和传热性能的影响。

1 实验系统及方法

1.1 实验系统

本文的研究对象是一支钠钾合金(NaK-55)热管,热管的充液量为 0.07 kg,热管的总长度为 1000 mm,外径为 25 mm,内径 20 mm。因 Inconel 600 具备良好的耐高温、耐腐蚀和抗氧化性能,能保障钠钾合金热管正常工作范围内的可靠性和安全性,本文热管管壳所用材质为 Inconel 600。

图 1 所示为本文钠钾合金热管实验系统图,实验系统主要由钠钾合金热管、控温加热系统、冷却水循环系统、测温及数据采集系统、保温层等组成。实验系统相比文献[21]的系统有较大改进。首先,为使电加热炉能提供更为均匀的温度场,实验前对加热炉内部加热丝分布重新进行调整,采用非均匀缠绕方式极大提高了温场均匀性。其次,本文冷却水循环系统所用的冷却水循环机是一款高精度的恒温制冷设备,冷却水的控温精度在 0.01 °C,还可通过旁通阀调节实验系统中的冷却水流量。最后,本文冷却水循环系统中增加一台智能型液体涡轮流量计,该流量计的精度可达 $\pm 1\%$,通过流量计可准确测量冷却水流量。

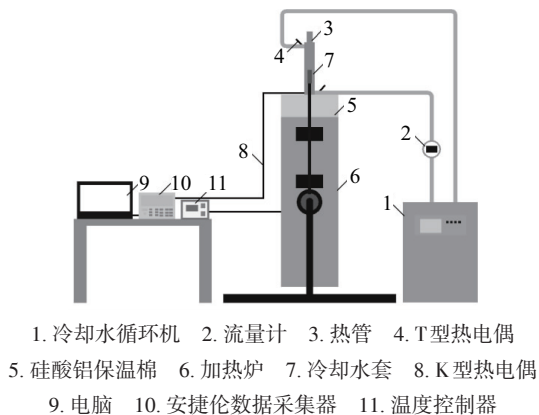


图1 钠钾合金热管实验系统

Fig. 1 Experimental system of the Na-K heat pipe

图 2 所示为本文所用加热炉在不同控制温度下内部温场分布图,热管实验段炉温温差不超过 30 °C。本文主要研究加热温度对钠钾合金热管的启动和传热性能的影响,因此均匀稳定的炉温分布是保证实验结果的必要条件。

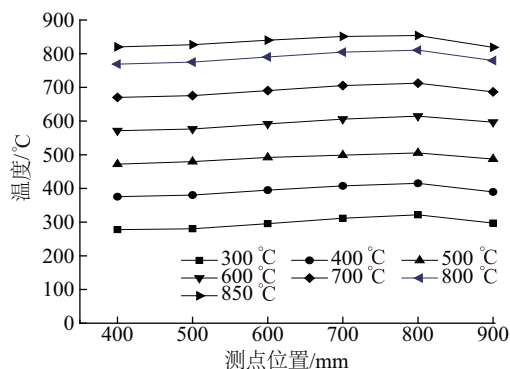


图2 加热炉温场分布

Fig. 2 Temperature field distribution of the furnace

图 3 所示为钠钾合金热管壁面温度测点分布图,热管外壁面从蒸发段至冷凝段共分布 11 个 K 型热电偶,分别对应测点 1~测点 11。热管的蒸发段长度为 580 mm,共布置 6 个热电偶,对应测点 1~测点 6;热管的绝热段长度为 90 mm,布置 1 个热电偶,即测点 7;热管冷凝段长度为 330 mm,对应测点 8~测点 11。热管冷凝段冷却水进口和出口位置处分别布置 1 个 T 型热电偶用来测量冷却水进出口温度。另外,还对实验系统其他部位布置热电偶进行全面的温度测量和监控,保证实验安全运行。实验过程中所用的 K 型热电偶和 T 型热电偶均由中国计量科学研究院标定合格之后使用。

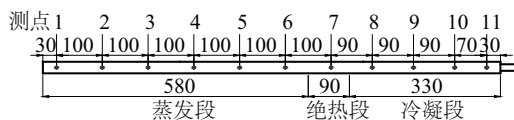


图3 热管壁面测温点分布(mm)

Fig. 3 Measuring point of wall temperature in heat pipe(mm)

1.2 传热量和传热系数计算方法

钠钾合金热管的传热量和传热系数的计算方法主要依据 GB/T 14812—2008《热管传热性能试验方法》。热管传热量 Q 由式(1)计算得出,热管的当量传热系数 K 由式(2)^[22]计算得出。

$$Q = G \cdot c_p (T_2 - T_1) - h(T_3 - T_4) \quad (1)$$

$$K = \frac{Q/A}{\Delta T} \quad (2)$$

2 实验结果与讨论

2.1 热管的启动性能

图 4 所示为钠钾合金热管壁面各测点温度在

不同蒸发段加热温度下随时间变化的曲线图。加热温度为设定为 300 ℃时,钠钾合金热管蒸发段各点温度由室温迅速上升。由于加热炉是以一定功率从室温被加热至 300 ℃,因此蒸发段各点温度出现高于电加热炉炉温的情况。待炉温稳定在 300 ℃时,热管蒸发段各点温度保持稳定并接近加热温度。当蒸发段各点温度高于 200 ℃时,位于热管绝热段的测点 7 开始升温,而此时冷凝段温度仍无明显升高的趋势。由图 4 可知,待绝热段温度达到稳定时,蒸发段最大温差为 73 ℃,其中 60 ℃温差都源自于蒸发段出口位置处的测点 5 与 6 间的温差,且此时绝热段测点 7 与蒸发段测点 6 之间温差达到 155 ℃。以上温差分布结果表明,蒸发段产生的钠钾合金饱和气体尚未均匀分布于整个蒸发段,绝热段内饱和气体量也不足以使得蒸发段出口位置处测点 6 与绝热段测点 7 之间的温度差进一步降低,冷凝段内气态工质不足以使得冷凝段温度升高乃至热管启动。

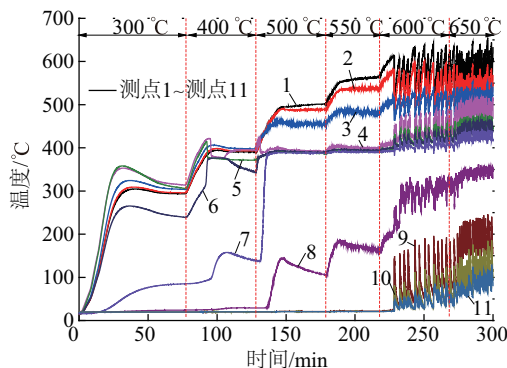


图4 不同加热温度下各测点温度随时间变化情况

Fig. 4 Temperature variation curves of heat pipe under different heating temperatures

加热温度上调为 400 ℃时,热管蒸发段和绝热段各测点温度持续升高,冷凝段测点 8 温度上浮 9 ℃,冷凝段其他测点依旧处于室温状态。在加热进行到 90 min 时,热管蒸发段测点 4 和测点 5 的温度出现瞬间下降现象,紧接着测点 6 温度瞬间升高 70 ℃、绝热段测点 7 温度升高 61 ℃。这一温度变化主要源自于热管内部气态工质的运动。在蒸发段测点 4 和测点 5 位置处对应气体腔内,气态钠钾合金在达到一定压力后快速运动到测点 6 和测点 7,并带走大量热量,从而使得测点 4 和测点 5 的温度突然下降,因此测点 6 和测点 7 的温度突然上

升。同时,冷凝段测点 8 温度小幅上升也说明热管内部有高能气态钠钾合金可运动至测点 8 对应热管腔体位置处并释放热量。而冷凝段测点 9~测点 11 的温度仍无任何温升现象表明此时热管仍未启动。

加热温度为上调至 500 ℃时,蒸发段测点 1~测点 3 的温度随之升高并接近于加热温度,测点 4~测点 6 的温度略有升高,测点 7 的温度瞬间升高了 250 ℃,此后其温度与蒸发段出口位置处测点温度稳定保持在同一水平。这说明在 500 ℃的加热温度下,热管蒸发段产生的气态钠钾合金已完全可到达热管测点 7 的位置,测点 7 对应气体腔内已达到连续流状态^[4]。在测点 7 开始大幅升温的 4 min 后,冷凝段入口处测点 8 的温度也之呈现出明显的温升,约 11 min 内其温度由 29 ℃提高至 140 ℃,但测点 9~测点 11 的温度依旧为循环冷却水温度。这一结果表明,测点 7 对应气态工质腔内大量高能气态工质也流动至测点 8 对应位置处,然而却未能维持气态钠钾合金连续运动的过程,致使冷凝段仍未启动。

随着加热温度上调至 550 ℃,热管冷凝段入口测点 8 的温度仍出现先上升后缓慢下降的波动趋势,冷凝段其他测点温度始终未改变。如图 5 所示,当加热温度上调至 600 ℃时,热管壁面各测点温度出现周期性波动现象,该现象与文献[19,20]得到的现象相似。实验中,伴随着清脆的气态钠钾合金冲击热管壁面的“嘭嘭”声,热管测点 1~测点 3 的温度骤然下降,测点 4~8 的温度有明显波动,测点 9~测点 11 的温度骤然上升。这一波动过程中,测点 1 的温度由 613 ℃降至 511 ℃,测点 9~测点 11 的温度从室温分别瞬间升高 149、82 和 46 ℃。热管启动过程的这一波动现象,一方面是由于该加热温度使得蒸发段内钠钾合金工质吸热、蒸发过程剧烈,气体生成量及饱和气体压力大幅提高,在气体压差的推动下,高能密度气态工质可由蒸发段瞬间冲击至冷凝段顶部,因此冷凝段各点温度出现瞬间上升现象,热管在温度上升前夕发出的“嘭嘭”声有力印证了这一分析;另一方面,气态钠钾合金从热管蒸发段带走大量潜热,在热管冷凝段释放,从而使得热管蒸发段温度骤降,热管冷凝段温度骤升,由此随之引发热管外壁面各点温度的波动现象。这一加热温度条件下,热管壁面各测点温度进

入规律性波动状态,冷凝段温度呈规律性瞬间上升而后缓慢下降现象,热量可由蒸发段传递至冷凝段各位置处,热管内部工质进入良性的气液循环状态^[4]。

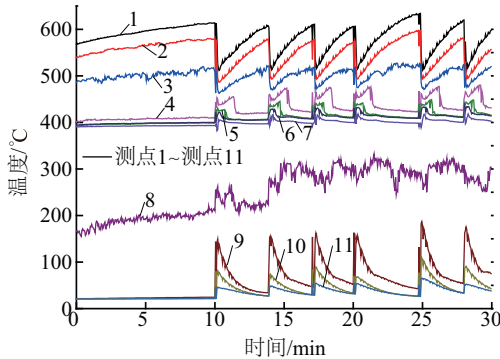


图5 加热温度为600 °C时,热管壁面温度变化

Fig. 5 Outside wall temperature variation of heat pipe under heating temperature of 600 °C

随着加热温度提升至650 °C,热管冷凝段温度整体进一步提高,热管各测点温度的波动频率明显增大。这是因为在650 °C的加热温度下,热管蒸发段工质的吸热速度得到提高,蒸发段的工质可更快达到所需温度和压力,缩短了钠钾合金工质吸热、蒸发、放热、冷凝、回流的时间,钠钾合金工质可更快将热量从热管的蒸发段传递至冷凝段。

图6所示为不同加热温度下,钠钾合金热管壁面轴向温度分布图。由图6可知,在300~550 °C的加热温度范围内,随着加热温度的提高,热管测点1~测点8的温度均有明显提高,热管冷凝段测点9~测点11的温度处于室温状态。在600和650 °C的加热温度下,热量在气态工质的携带下可传递至整个冷凝段,热管冷凝段各测点温度大幅升高。虽然此时冷凝段温度相比于较低加热温度时已有明显

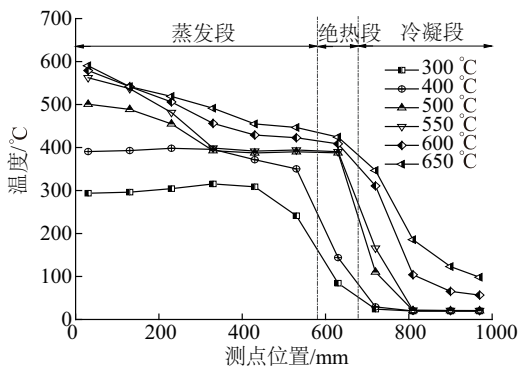


图6 不同加热温度热管壁面温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of the heat pipe under different heating temperatures

升高,但相对于热管蒸发段的温度分布,此时冷凝段的温度依旧很低。这主要是因为饱和的气态钠钾合金在传递到热管冷凝段之后被冷却水迅速冷却冷凝,冷却水强迫对流的传热系数较大,热管冷凝段的热量很快被冷却水带走,热管冷凝段的热量无法汇聚,因此热管冷凝段的温度较低。

2.2 热管的传热性能

图7所示分别为钠钾合金热管在不同加热温度下的传热量和当量传热系数。由图7可知,当加热温度为300 °C时,热管的传热量和当量传热系数接近于零。这是因为,在该加热条件下,热管蒸发段内的气体压力不足以使得携带热量的高温气态工质运动至冷凝段并传递热量,即热量未传递至冷凝段。当热管在400~550 °C的加热温度范围内工作时,随着加热温度的提高热管的传热量和当量传热系数均有微弱提高,如图6所示。如前所述,在这一加热温度范围内,热管内部气态钠钾合金在压差的作用下可传递至热管测点8的位置,高能量气态工质可与冷却水进行热量交换,从而将热量传递出热管,所以热管的传热量、当量传热系数有了提高。然而,此加热温度范围内钠钾合金气体压力仍较低,高能量气态工质未能到达冷凝段其余各点,气态钠钾合金不能大量传递至热管冷凝段,因此热管的传热量和当量传热系数增长缓慢。

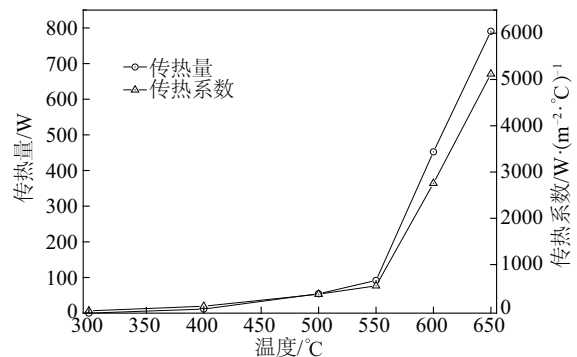


图7 不同加热温度下钠钾合金热管传热量和当量传热系数

Fig. 7 Heat transfer quantity and equivalent heat transfer coefficient of the heat pipe under different heating temperatures

加热温度为600 °C时,由于热管腔体内已形成良性的钠钾合金工质循环蒸发、冷凝以及回流程,热量可从蒸发段传递至整个冷凝段,饱和的气

态钠钾合金在冷却水的作用下冷凝并释放出汽化潜热。因此,钠钾合金热管工作在 600 ℃的加热温度时,其传热量和传热系数大幅提高,热管的传热量达到 452.2 W,传热系数为 2756.5 W/(m²·℃)。当加热温度上调为 650 ℃时,热管蒸发段吸热量大、气态工质的气压进一步升高,热管内部工质循环频率进一步提高,热管可以将更多的热量从蒸发段传递至冷凝段,热管的传热量和传热系数分别高达 790.6 W 和 5120.2 W/(m²·℃)。

此外,分析图 7 可知,钠钾合金热管的当量传热系数与其传热量成正比,与热管壁面测点 1 和测点 11 的温差成反比。在 300~650 ℃的加热温度范围内,随着加热温度的提高,热管的传热量明显提高,但热管壁面测点 1 和测点 11 的温差并无明显变化,热管的传热系数主要受热管传热量的影响,因此钠钾合金热管的传热量和当量传热系数趋势一致。

3 结 论

由以上实验结果和分析可知,在冷却水强迫对流条件下,加热温度对钠钾合金热管的启动和传热性能有显著影响,启动特性和传热性能之间也显现出必然联系。本文主要结论为:

1)加热温度为 400~550 ℃时,热管冷凝段末端的温度始终维持在室温,热量无法传递到整个冷凝段,此时热管的传热量和传热系数始终较低;

2)加热温度升高至 600 和 650 ℃时,热管冷凝段各测点温度大幅升高,大量的热传递至整个冷凝段,且热管传热量和传热系数均大幅增加。

3)在 300~650 ℃加热温度范围内,加热温度的升高使得热管传热量及当量传热系数随之增加。加热温度为 650 ℃时,该钠钾合金热管的传热量为 790.6 W,当量传热系数达到 5120.2 W/(m²·℃)。

符号表

G	冷却水的质量流量,kg/s
c_p	冷却水的定压比热容,J/(kg·℃)
T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4	冷却水进口、冷却水出口、环境、冷却水套壁面温度,℃
h	空气对流传热系数,W/(m ² ·℃)
A	热管的横截面积,m ²
ΔT	钠钾合金热管蒸发段测点 1 和冷凝段测点 11 的温差,℃

[参考文献]

- [1] Faghri A. Heat pipe science and technology [M]. England: Taylor & Francis Group, 1994, 1—10.
- [2] Chi S W. Heat pipe theory and practice [M]. New York: McGraw Hill Co, 1976, 2—20.
- [3] Gaugler R S. Heat transfer device [P]. US: 2350348 A. 1944-06-06.
- [4] 冯踏青. 液态金属高温热管的理论和实验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 1988.
- [4] Feng Taqing. Theoretical and experimental research on liquid metal high temperature heat pipe [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1988.
- [5] Conway E C, Keliey M J. A continuous heat pipe for spacecraft thermal control, Aviation and Space, progress and prospects-Ann [A]. Aviation and Space Conference [C], United States, 1968: 655—658.
- [6] Calin T, Anderson W G, Kara W. NaK variable conductance heat pipe for radioisotope Stirling systems [A]. 6th International Energy Conversion Engineering Conference [C], Cleveland, 2008, 679—688.
- [7] Schwendeman C L, Tarau C, Schifer N A, et al. Optimized heat pipe backup cooling system tested with a Stirling convertor [A]. Nuclear and Emerging Technologies for Space (NETS 2016) [C], Huntsville, 2016.
- [8] Coventry J, Andraka C, Pye J. A review of sodium receiver technologies for central receiver solar power plants [J]. Solar Energy, 2015, 122: 749—762.
- [9] 许 辉, 张 红, 白 瑾, 等. 高温热管太阳能接收器的开发及传热特性分析 [J]. 太阳能学报, 2010, 31 (12): 1585—1590.
- [9] Xu Hui, Zhang Hong, Bai Tong, et al. Development and heat transfer analysis of high temperature heat pipe solar receiver [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2010, 31(12): 1585—1590.
- [10] Wang Chenglong, Zhang Dalin, Qiu Suizheng, et al. Study on the characteristics of the sodium heat pipe in passive residual heat removal system of molten salt reactor [J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 265: 691—700.
- [11] Khalifa A, Tan L, Date A, et al. A numerical and experimental study of solidification around axially finned heat pipes for high temperature latent heat thermal

- energy storage units[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 70(3): 609—619.
- [12] 曲 伟, 王焕光, 段彦军. 高温热管及超高温热管的启动特性和传热极限[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(8): 1345—1348.
- [12] Qu Wei, Wang Huanguang, Duan Yanjun. Startup characteristics and heat transfer limits of high and super high temperature heat pipes[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(8): 1345—1348.
- [13] 李桂云, 屠 进. 高温热管工质的选择[J]. 节能技术, 2001, 19(1): 42—44.
- [13] Li Guiyun, Tu Jin. Working fluid choicing for high temperature heat pipe[J]. Energy Conversation Technology, 2001, 19(1): 42—44.
- [14] 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: 工学版, 1999, 33(4): 414—417.
- [14] Gamal M G, Hu Yacai, Feng Taqing, et al. Analysis on the properties of NaK alloy high temperature heat pipe and its experimental study[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 1999, 33(4): 414—417.
- [15] Anderson W G. Sodium-Potassium (NaK) heat pipe[J]. Heat Pipes and Capillary Pumped Loops, 1993, 236: 47—53.
- [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] 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: 142—152.
- [19] 郭 青. 钠钾合金高温热管启动性能实验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
- [19] Guo Qing. Experimental study of start-up performance on the Na- K alloy high temperature heat pipe [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013.
- [20] 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.
- [20] 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.
- [21] 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): 7—11.
- [21] 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): 7—11.
- [22] 赵蔚琳, 庄 俊, 张 红. 钠热管的性能试验研究[J]. 化工装备技术, 2004, 25(1): 25—27.
- [22] Zhao Weilin, Zhuang Jun, Zhang Hong. Experimental study on the performance of sodium heat pipe[J]. Chemical Equipment Technology, 2004, 25(1): 25—27.

EFFECT OF HEATING TEMPERATURE ON START-UP AND HEAT TRANSFER PERFORMANCE OF Na-K ALLOY HEAT PIPE

Jia Xianjian¹, Guo Hang¹, Guo Qing¹, Yan Xiaoke², Ye Fang¹, Ma Chongfang¹

(1. MOE Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, and Beijing Key Laboratory of Heat Transfer and Energy Conversion, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract: The performances of the start-up and heat transfer of the heat pipe charged with Na-K (55% wt K) were studied under the heating temperatures of 300, 400, 500, 550, 600, and 650 °C. The condenser section of the heat pipe was cooled by the cooling water. The outside wall temperatures of the heat pipe were measured. The temperatures at the inlet and outlet of the cooling water were measured to estimate the heat transfer quantity and heat transfer coefficient of the Na-K heat pipe. Results showed that the condenser section of the Na-K heat pipe cannot start up completely at the heating temperature of 300–550 °C. The heat transfer quantity and heat transfer coefficient of the Na-K heat pipe were very low. When the heating temperature were set as 600 and 650 °C, the condenser section of the heat pipe starts up completely, and the heat pipe achieves in an equilibrium of the heat transfer. Consequently, the heat transfer quantity and heat transfer coefficient of the Na-K heat pipe increase significantly.

Keywords: heat pipes; sodium; potassium; phase transitions; heat transfer