

文章编号: 0253-4339(2007)06-0023-06

两相冷却系统过热现象与启动温度关系分析

刘杰¹ 李廷勋² 裴念强² 郭开华^{1,2} 何振辉² 顾建明¹

(1.上海交通大学制冷与低温研究所 上海 200030; 2.中山大学空间技术中心 广州 510275)

摘要 在以二氧化碳为工质的新型空间两相流冷却系统-机械泵驱动两相流冷却系统的实验过程中发现, 在热量加载的同时在蒸发器出口将有过热现象产生。进一步的实验研究得出结论当启动过程蒸发温度越低, 蒸发器出口的过热度也就越大, 同时从过热状态变为两相状态所产生的压力脉冲也越大。通过经典核化理论的角度分析指出该现象的产生主要和工质的物性有关, 又统计物理学和动力学成核理论方面分析指出随着蒸发温度的升高, 核态沸腾产生气泡的直径变小, 所以需要更少的热量就能推动从过热的亚稳态到更加稳定的两相状态的转变。

关键词 动力机械工程; 过热; 机械泵驱动两相冷却系统; 启动; 环路热管

中图分类号: TK 124; TB6

文献标识码: A

Analysis on Relationship Between Superheat Phenomena and Startup Temperature for Two-phase Cooling System

Liu Jie^{*} Li Tingxun Pei Nianqiang Guo Kaihua He Zhenhui Gu Jianming

^{*} Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiaotong University, 200030, China

Abstract Experiments on the performance of a new mechanically pumped cooling loop (MPCL) using CO₂ as a working fluid were conducted. It was observed during the experiment that there was a superheat phenomenon at the outlet of the evaporator when the heat load was added. Moreover, the superheat degree at the outlet of the evaporator and the pressure pulse caused by the change from superheat state to two-phase state increase with the decrease of the evaporating temperature at the start-up stage. The analysis based on nucleation thermodynamic theory indicated that the critical radius of bubbles would become smaller with the increasing of evaporative temperature. So, a relative lower heat power can change the work fluid from superheat into a stable two-phase state.

Keywords Power machinery and engineering; Superheat; Mechanically pumped cooling loop; Startup; Loop heat pipe

过热现象是指液态循环工质在系统压力不变的条件从饱和态继续吸热并不发生汽化, 而是变为过热液体。这时液体的温度高于相同压力下相平衡时的饱和温度, 称之为过热液体。过热液体是一种亚稳态, 之所以会产生过热现象主要是因为当液体的纯度较高或者管路较光滑时发生核态沸腾需要吸收了较多的热量, 才有产生足够多的气化核的推动力^[1]。

过热现象在传统热管、毛细泵为驱动的CPL/LHP系统的启动过程和工质跨临界循环的膨胀过程中是比较常见^[2-4], 但是对该现象的分析较少。而在以对于机械泵驱动两相流冷却系统中的研究较少, 这主要是因为该系统是一种新型的主动式热控冷却技术, 主要用于未来高热流密度、高等温性要求和长距离复杂回路的空间散热任务, 目前对于该

系统研究较少。在对机械泵驱动冷却系统的启动实验过程中发现, 热负荷加载时, 蒸发器出口处有比较明显的过热现象, 同时机械泵进出口处差压传感器测得的系统压力有较大的波动。文章对该实验数据进行分析的同时, 通过典核化理论和统计物力学对现象进行解释。

1 实验台的搭建

实验台是按照荷兰国际空间技术研究实验室(NLR)的设计方案^[5,6]搭建的, 用于研究机械泵驱动两相流冷却系统的运行特性。其结构与毛细泵回路热管(CPL)相似, 一般由机械泵、蒸发器、冷凝器、储液罐、热交换器以及连接管道等几大部分组成, 如图1所示。该系统的工作过程是以细小管路作为蒸发器与发热设备进行热连接, 并控制蒸

发器的入口处的工质为两相状态，从而利用工质汽化吸热温度不变的特性来将发热设备的热量带出，并通过机械泵实现工质循环，然后在冷凝器将热量散出。之所以选用机械泵为驱动力是因为蒸发器管路总长约20米，同时要保证蒸发段的散热温差小于 1°C ，用其他的散热方式在未来的太空应用中很难达到这样的要求。

实验过程中冷凝器分为WAK和RAM两块，放置在 $(1\times 1\times 1)\text{m}^3$ 的小气候箱中，以模拟在太空中冷凝器的边界温度。其他主要部件放置于 $(3\times 2.6\times 2)\text{m}^3$ 的恒温气候箱内，并选用聚乙烯高发泡体PEF材料进行保温。两个气候箱的控温精度均

为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。同时，沿蒸发器回路贴有总发热量为 $0\sim 300\text{W}$ 连续可调的水泥电阻用以模拟热源。为了对系统的温度和压力进行监控，在各个主要部件都布置了测量精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 的T型热电偶；在泵的进出口处布置了精度为 0.01bar 、量程为 $0\sim 5\text{bar}$ 差压传感器；在储液器安装了精度为 0.2bar 、量程为 $0\sim 100\text{bar}$ 绝对压力传感器。系统的流量选用精度为 0.1g/s 、量程为 $0\sim 10\text{g/s}$ 的科里奥利质量流量计进行实时测量。所有传感器同数据采集仪相连接，并通过上位机进行监测。数据采集时间按照每秒采集一次进行。

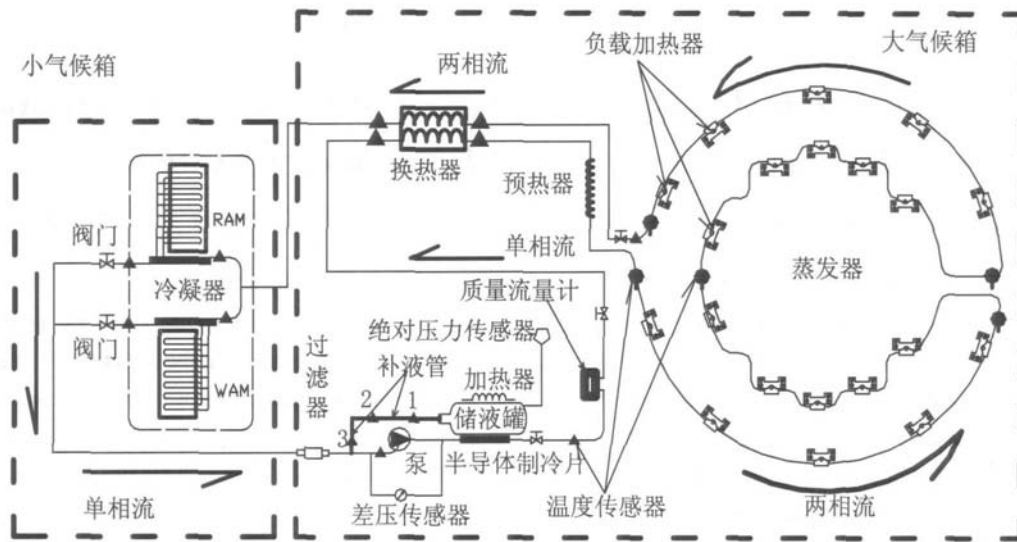


图1 机械泵驱动两相冷却系统结构原理图

Fig.1 Structure of a mechanical pumped cooling loop

系统选用的循环工质为 CO_2 ，这主要是因为 CO_2 在饱和态的热力学性质较适合于机械泵驱动的两相流冷却系统的工作。实验过程中蒸发段的蒸发温度可以通过储液器来设定，而储液器的温度由安装在上面的加热器和半导体制冷片实现。大气候箱的温度也设定为该温度，以减少蒸发器管路和储液器向外界的漏热。在实验之前首先采用单相流体进行热平衡实验，来分析系统的漏热情况，最终确定蒸发器内的液体实际吸收的热量。以下实验过程中所涉及的热负荷均为工质实际吸收的热量。

2 实验结果与分析

启动过程主要分为提高系统压力、启动机械泵和启动热负荷三个阶段。由于启动之初系统久置于大气候箱内，除冷凝器外，所有部件温度相同，

因此管路中将有部分工质处在两相状态。为了防止两相流体对机械泵内部齿轮的“气蚀”损害，在启动之前必须确保泵的入口处为纯液态，因此在第一阶段通过加热储液器来提高系统压力，进而对系统中的气体进行液化。图2(b)中，系统压力从 0°C 对应的饱和压力 $3.48\times 10^6\text{Pa}$ 逐渐上升至 2.9°C 对应的 $3.78\times 10^6\text{Pa}$ ，此时泵的入口处为 0°C ，在 $3.78\times 10^6\text{Pa}$ 的系统压力下对应的状态为过冷液态，因此可以停止加热储液器，并且将设定温度改为 0°C 。同时启动机械泵，进入第二阶段开启机械泵，如图2(a)泵流量从 0g/s 变为 2.7g/s ，图2(b)中系统阻力也从 0Pa 上升到 $8.6\times 10^4\text{Pa}$ 。第三阶段是启动蒸发器的热负荷，在实际应用中也就是启动冷却回路的散热对象。由图2(a)中，启动瞬间，蒸发器入口温度上升缓慢，而出口温度从 -1.3°C 升到 8.3°C ，

经过430秒以后降低到蒸发温度的，这说明出口处的液体吸收热量后并没有蒸发，而是进入单相的过热液态，然后才开始气化蒸发为两相状态，最终稳定在设定温度。

2.1 过热现象的实验研究

启动温度也就是启动时蒸发段设定的工作温

度，该值由储液器上的温度控制器来实现。实验研究发现，启动温度的大小对过热现象有较大的影响。在上述的启动全过程中，蒸发温度为0℃，因此在后续的典型工况中对设定的蒸发温度分别为-13℃和15℃条件下的启动进行实验研究，流量和热负荷保持不变。

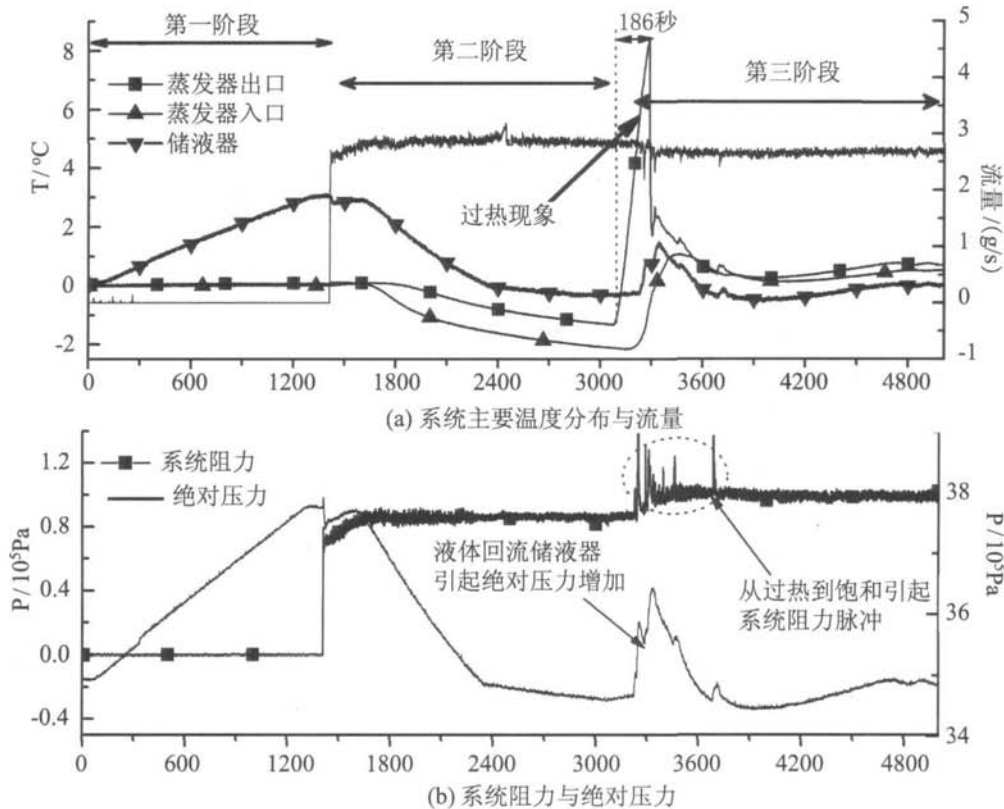


图2 启动全过程分析 (0℃, 200W, 2g/s)

Fig.2 A full startup process

表1 设定温度与过热现象的实验数据

Tab.1 Relationship between set-point and superheat

蒸发温度 /°C	最高液态温度 /°C	过热度 /°C	过热时间 /s	系统阻力最大值 (压力脉冲) × 10 ⁵ Pa
15.1	17.5	2.4	220	0.6
0	8.3	8.3	186	1.3
-13	-4.1	8.9	158	4.9

图3为在启动温度为设定蒸发器的启动温度为15℃和-13℃的条件下系统温度和阻力的变化曲线，结合图2可以看出，三者的共同点都是在启动蒸发器热负荷的同时，蒸发段的出口处产生了温度过热，然后再恢复到设定的蒸发温度。在从过热流

体变为两相流体的同时，系统地阻力都有所变化，通过泵前后的差压传感器均检测到系统出现压力的脉冲。而三者所不同的是各种变化的程度有所不同，如表1的比较结果所示。从中可以看出，随着启动时蒸发器的设定温度降低，工质在蒸发时过热

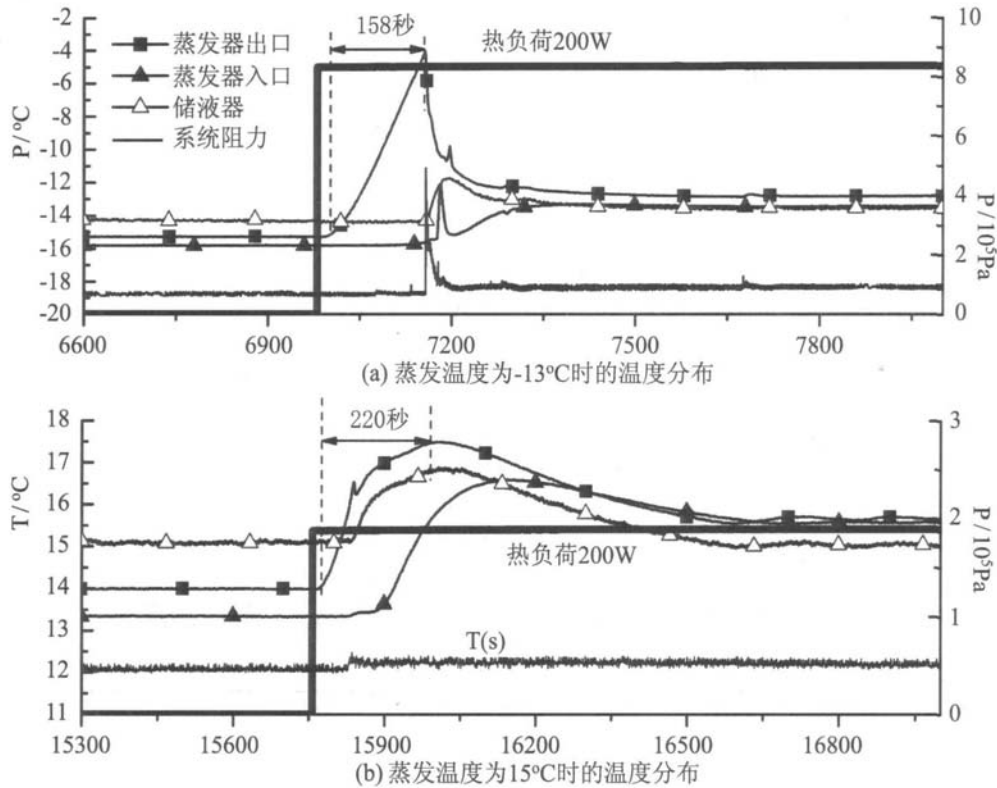


图3 不同蒸发温度下启动后主要参数比较
Fig.3 Startup under different set-point

液体温度也越高, 从过热到两相变化过程所产生对系统的压力冲击越大。

此外, 在蒸发段工质气化膨胀的同时, 系统内的多余液体将会被“压回”储液器, 从而引起了系统绝对压力的升高, 对应蒸发器入口、出口工质的饱和温度也有所提高, 该现象在图3 (b) 高蒸发温度下较为明显。因为从过热液体的亚稳态到达两相态需要一定的弛豫时间, 所以液体回流储液器和热负荷的加载并非同步。

2.2 启动温度与压力脉冲的关系

液体过热状态是一种亚稳态, 一般很难稳定存在。当过热液体失稳时, 将迅速气化, 对一个密闭的小管径长管路中产生较大的压力脉冲。这种现象在工程应用中称之为非化学性“蒸汽爆炸”, 其能量量级小于化学爆炸的量级, 但依然能产生破坏性结果^[7]。例如, 在造纸工业、地热工程、反应堆冷却系统以及在液化天然气的运输过程中所引起的非化学性蒸汽爆炸事故。相变过程为不可逆热力学过程, 其中包含有限温差驱动的传热、两相化学势差驱动的相转变以及由于流体粘性引起的能量耗散, 这些因素之间是相互影响的, 其过程又受到初

始条件和边界条件的控制。考虑到问题的复杂性, 结合工程实践和实验数据, 可以得出结论: 压力脉冲是由过热引起的, 其大小归根结底同过热度有关。系统的启动温度越低, 液体的过热程度越高, 产生的压力脉冲也就越大。例如, 图3 (a) 在设定温度为-13°C的启动过程中, 系统阻力从 $9.9 \times 10^4 \text{Pa}$ 变为 $4.91 \times 10^5 \text{Pa}$, 是正常运行时的5倍, 而在设定温度为15°C的启动过程中, 系统阻力从 $0.5 \times 10^4 \text{Pa}$ 变为 $0.6 \times 10^5 \text{Pa}$ 。要想减小压力脉冲, 就需要缩短亚稳态的弛豫时间, 减小工质在蒸发器内的过热程度。

2.3 启动温度与过热度的关系的理论分析

事实上, 液体发生核态沸腾所需要的过热度同很多因素有关, 如液体的纯度、管道的尺寸、内管壁的清静度、粗糙程度等, 因此每次启动时液体过热度的数值是几乎无法预测的。但是, 根据实验结果可以得出一条规律: 系统的启动温度越低, 启动需要的过热度相对越大。该现象也可以通过理论分析得到较为合理的解释。如前所述, CO₂在蒸发段的等压升温过程要经过亚稳态的“过热液体”阶段才能向更加稳定的状态(气液两相平衡态)转变, 这

一过程需要“有限”大的干扰才能实现,这个“有限”干扰就是气化核心的出现。由经典核化理论可知^[8,9],这个有限扰动的尺度对于纯净气体就是气泡临界半径的尺度。对于平衡相变来讲,利用描述饱和和蒸气压的Clausius-Clapeyron方程(1)和气泡达到力学平衡的Laplace方程(2)

$$\frac{dp_s}{dT_s} = \frac{h_{fg}}{(v_v - v_l) \times T_s} \quad (1)$$

$$p_v - p_l = \frac{2\sigma}{r} \quad (2)$$

可得出气泡临界半径与极限过热度的关系(3):

$$r_c = \frac{2\sigma T_s}{h_{fg} \rho_v T_{sh}}$$

$$\text{或 } T_{sh} = \frac{2\sigma T_s}{h_{fg} \rho_v r_c} = \left(\frac{2\sigma T_s}{h_{fg} \rho_v} \right) \times \frac{1}{r_c} = f(T_s) \times \frac{1}{r_c} \quad (3)$$

式中: h_{fg} —液体的汽化潜热, kJ/kg;
 v —比容, m^3/kg ;
 r —气泡半径, m;
 σ —表面张力, N/s。

下标s为饱和状态; c为临界状态。在气泡临界半径与极限过热度的关系式中, $\left(\frac{2\sigma T_s}{h_{fg} \rho_v} \right)$ 均为与饱和温度有关的参数, 所以可以用 $f(T_s)$ 来表示, 该参数随饱和温度的变化趋势如图4所示。可见随着饱和温度的增大, $f(T_s)$ 减小。如果假定在相同的实验条件下, CO_2 成核的临界半径为定值, 并假设成核半径分别为 $1.3 \times 10^{-5} \text{m}$ 和 $2 \times 10^{-5} \text{m}$ 两种情况, 可以得到图5过热度与饱和温度的关系。该图像表明随着蒸发段饱和温度的增加, 过热度有变小的趋势, 这与实验结果较吻合。

此外, 从统计力学的角度分析^[10], 临界半径的变化与分子自由程有关, 因为对于核态沸腾, 气泡的临界直径应该大于等于蒸汽分子的自由程。

$$\bar{\lambda} = \frac{v M_n}{1.477 \pi R \Phi^2} \quad (4)$$

式中: M_n —分子量, kg/kmol;
 R —阿伏加特罗常数, $R=6.0221 \times 10^{23}$ 个/mol;
 Φ —工质分子直径, m。

可见, 分子的自由程仅与流体的比容有关, 并且液体的温度越高, 比容越小, 分子的自由程也越小。

根据动力学成核理论^[11], 在正常条件下, 并不是液体内部的所有气泡胚都会变成气泡核, 它们

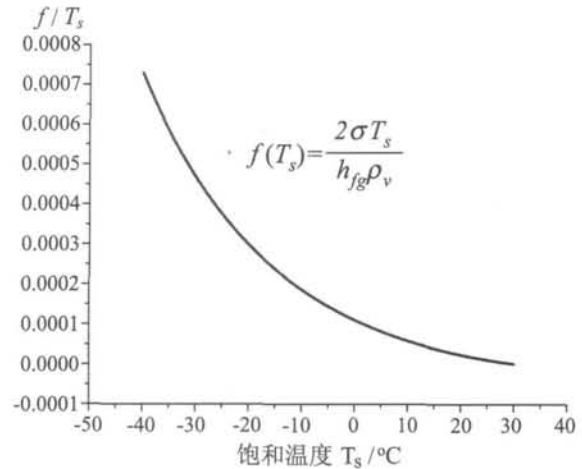


图4 $f(T_s)$ 随饱和温度的变化趋势
Fig.4 $f(T_s)$ changing pattern

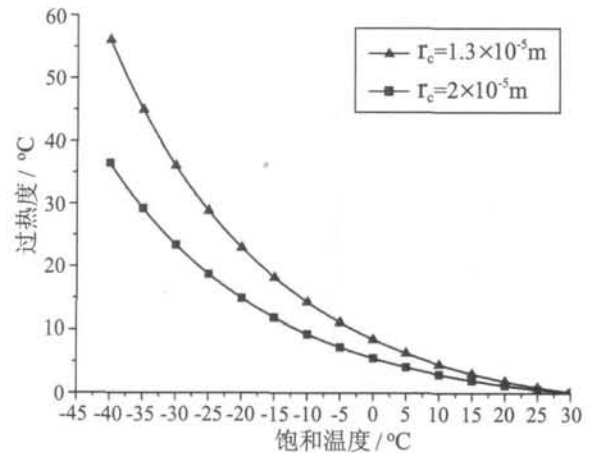


图5 过热度与饱和温度的关系
Fig.5 Relationship between superheat and saturation

必须克服“势垒”亦即提供在液体内部产生临界气泡所需的最小功, 气泡成核势垒的存在导致液体过热。如果产生体积为 V_G 的气泡, 由(5)^[12]:

$$W = \sigma A + V_G (p_L - p_G + p_G \ln \frac{p_G}{p_v}) \quad (5)$$

式中 A —气泡胚的表面积, m^2 ;
 σ —液体的表面张力, N/s;
 p_L —饱和蒸气压, Pa;
 p_G —气泡胚内的压力, Pa。

如果把气泡看成球形时, 将 W 在临界核半径 r_c 处进行泰勒级数展开(略去高阶):

$$W = 4\pi\sigma \left[\frac{r_c^2}{3} - B'(r - r_c)^2 \right];$$

其中 $B' = 1 - \frac{1}{3} \left(1 - \frac{p_L}{p_{rc}} \right)$ (6)

中是当半径为临界半径时期泡内的压力为 p_{rc} 。当 $r = r_c$ 时为产生临界气泡所需的最小功为

$$W_{Rc} = \frac{4\pi\sigma r_c^2}{3} \quad (7)$$

因此当启动时蒸发器的设定温度越高, 由(4)可知分子平均自由程越小。就意味着液相萌发气泡必须的临界半径越小, 通过(7)式可知产生气泡需要的功也变得越小, 液相维持相态不变的能力也越小。所以不需要太大的过热度即可完成成核过程, 实现从过热液体的亚稳态到两相的稳定状态的转化。

3 结论

在对以二氧化碳为工质的机械泵驱动两相流冷却系统的实验过程中发现, 启动过程蒸发器的的工作温度越高, 蒸发器出口的过热度也就越大, 同时从过热状态变为两相状态所产生的压力脉冲也越大。通过经典核化理论的角度分析指出该现象的产生主要和工质的物性有关, 统计物理学和动力学成核理论方面分析为随着蒸发温度的升高, 核态沸腾产生气泡的直径变小, 所以需要更少的热量就能推动从过热的亚稳态到更加稳定的两相状态的转变。

(本文受广东省人民政府科技专项、科技部国际科技合作重点项目计划(2003DF000050)项目资助)

参考文献

- [1] 曾丹苓. 工程非平衡热力学[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [2] 李亭寒, 华诚生. 热管设计与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 1987.
- [3] Maidanik Y F, Solodovnik N N, Fershtater Y G. Investigation of dynamic and stationary characteristics of a loop heat pipe[C]. New Mexico: IX International Heat Pipe Conference, Albuquerque, 1995.
- [4] 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.
- [5] J van Es, G van Donk, A Pauw. AMS02 Tracker Thermal Control System: Loop Lay-out & Specification of loop components [R]. AMSTR-NLR-TN-003 issue 01, 2004.
- [6] A A M Delil. Development of a Mechanically Pumped Two-Phase CO₂ Loop for the AMS-2 Tracker Thermal Control System [R]. National Aerospace Laboratory NLR AMSTIM Meeting .Boston January 23rd 2002.
- [7] A vedisian C T. The homogeneous nucleation limit of liquids. J Phys Chem Ref Data, 1985, 14 (3) : 695.
- [8] 曾丹苓. 气液相变中成核的热力学理论[J]. 重庆大学学报, 1995, 18(2) : 1-81.
- [9] 苏长荪, 谭连城, 刘桂玉. 高等工程热力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.
- [10] 陈仁烈. 统计物理引论[M]. 北京: 人民教育出版社, 1978.
- [11] Frenkel J. Kinetic Theory of Liquids[M]. Oxford: Clarendon Press, 1946.
- [12] 孙良锋, 史宇文, 刘俊吉, 等. 过热现象的动力学—液体过热亚稳态研究之一[J]. 天津大学学报, 1995, 28 (1) 89-95.