

# 自然循环预冷和低温热管耦合系统的初步实验研究

李炜征 邱利民 甘智华 陈国邦

(浙江大学制冷与低温研究所, 杭州, 310027)

摘要: 介绍的高效低温传热方法主要包括: 自然循环冷却法和基于自然循环预冷及低温热管的高效低温冷却方法。自然循环冷却法的特点是在大温差条件下实现物体的快速冷却。一旦被冷却物体到达或接近低温液体的温度, 将产生循环动力不足的情况, 必须采用诸如气体引射或容器自增压等方法加以解决。而低温热管的特点在于能在小温差条件下, 传递大量的热能。文中将自然循环预冷法及低温热管技术有机结合, 综合自然循环和低温热管的优点, 取长补短, 既可以在很短的时间内使被冷却物体的温度降低下来, 又可以保证被冷却物体的温度波动较小。文中还详细给出了基于自然循环预冷及低温热管的高效低温传热单元的设计及试验结果。

关键词: 自然循环 低温热管 复合冷却

## 1 引言

随着低温制冷机的发展, 如何实现被冷却物体的快速冷却是目前低温制冷机应用的关键问题之一。目前常用的连接方式是使用铜棒将低温制冷机和被冷却物体连接起来, 由于受到低温制冷机冷头横截面积的限制, 铜棒的直径一般较小, 大大限制了制冷机冷量的传递。实验证明, 低温热管在相同的横截面积下传递的冷量比铜棒多数倍, 它的特点是在小温差条件下具有较大的传热量。而采用自然循环冷却的方法可以使被冷却物体在很短的时间内实现降温过程。本文中基于自然循环预冷过程的高效低温传热元件, 综合了低温热管小温差大传热量以及自然循环冷却能够使被冷却物体快速降温的特点, 使基于自然循环预冷过程的高效低温传热元件能够具有更加良好的传热性能且能实现带自反馈的冷却过程<sup>[1]</sup>。

独立使用自然循环冷却物体时, 在很短的时间内可以使物体的温度降低到冷却流体的温度附近, 但是被冷却部件温度降低以后, 自然循环的动力消失, 丧失了进一步冷却的能力, 而且由于液体静压的作用, 使低温液体处于过冷状态, 当被冷却物体有热量散发时, 可以使管道中的低温液体产生间歇喷泉现象, 回流管路发生震动, 这对于要求稳定的被冷却物体是不利的<sup>[2-3]</sup>。低温热管具有在小温差下大传热量的优点, 当自然循环停止或基本停止以后, 低温热管可以在小温差下将被冷却物体散发的热量直接高效的传递到冷源, 使被冷却物体的温度保持稳定, 所以基于自然循环预冷的低温高效低温传热元件的特点就是综合自然循环和低温热管的优点, 取长补短, 既可以在很短的时间内使被冷却物体的温度降低下来, 同时又可以保证被冷却物体的温度波动较小。这样可以增加那些对于温度稳定性要求很高的被冷却物体的安全性。特别需要指出的是, 一旦被冷却物体的温度发生急剧上升(如超导体失超), 则自然循环过程又可以重新启动, 从而再次快速冷却, 使被冷却物体迅速恢复到目标温度, 因此该传热元件具有自反馈的功能。

## 2 自然循环和低温热管耦合系统

本文自行设计了一套基于自然循环预冷过程的低温高效传热元件实验系统。它由冷源、低温热管、冷头、自然循环回路、加热器以及数据采集系统组成。其中冷源可以使用低温液体, 也可以使用低温制冷机。从而形成采用低温液体作为冷源及自然循环介质及采用低温制冷机作为冷源、低温液体为自然循环介质两种结构, 本文采用的是前者, 见图 1。

本文中基于自然循环预冷过程的高效低温传热元件采用内径为 6mm、壁厚 1mm 的紫铜管作为低温热

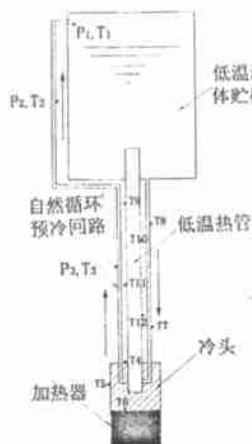


图 1 实验装置基本结构图

虹吸管材料,自然循环回路采用内径为 4mm、壁厚为 0.5mm 的不锈钢管,冷头材料为高导热系数的紫铜。在冷头上表面上通过机械加工的方法打四个 20mm 深的洞,两个焊接铜管,两个焊接不锈钢管。把铜管和不锈钢管的一端深入 5mm,直接焊接在冷头上,铜管的另一端封闭形成低温热管,其中一个不锈钢管直接焊接在低温液体贮槽的下底板,另一个焊接在低温液体贮槽的液面之上。在冷头的侧面及热管的垂直面上打两个 5mm 的通孔,并且铣出两个 5mm × 5mm 槽道连通两个通孔用铜板封闭形成自然循环的流体通道。实验时直接将液氮倒入低温液体贮槽中即可。由于低温热管的冷凝段在低温液体贮槽中,当倒入低温液体时,工质通过气库管道在低温热管中冷凝,并开始传递被冷却物体散发的热量。

在实验中主要测量热管轴向和冷头的温度变化以及自然循环预冷回路的压力变化,在热管的绝热段对称布置经自行标定的铜-康铜热电偶,分度号 T 型,测量范围- 200 ~ 400 ,响应时间小于 300ms,通过 Keithley2700 型 6 位半数字万用表读取温度数值。我们自行开发了 Labview 应用程序,完成对于 2700 型数字万用表的驱动,该程序可以使测试系统读取的数据以曲线的形式直接显示在屏幕上,直观地反映低温热虹吸热管和冷头热平衡时的温度分布状况。在自然循环回路安装了三个压力测试点,可以根据压力测点的压力变化得知自然循环的运行情况。

### 3 实验结果分析

整个系统的温度分为这样五个部分,  $T_a$  表示自然循环管路出口温度  $T_1$ ,  $T_b$  表示自然循环管路离开冷头的温度  $T_3$ ,  $T_c$  表示冷头的平均温度  $(T_4 + T_5 + T_6)/3$ ,  $T_d$  表示自然循环管道进入冷头的平均温度  $(T_7 + T_8)/2$ ,  $T_e$  表示热管绝热段的平均温度  $(T_9 + T_{10} + T_{11} + T_{12})/4$ 。自然循环产生时自然循环管路的压力是变化的,在下面图 3 和图 5 中的压力差  $\Delta P = P_3 - P_1$ 。

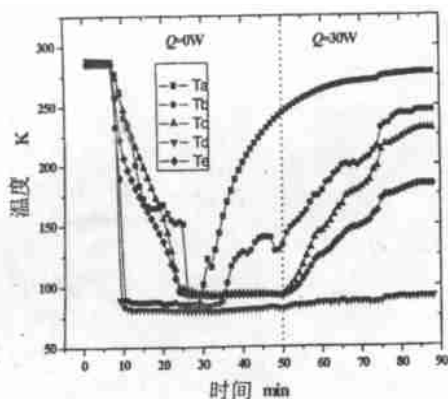


图 2 NCC 系统温度变化图

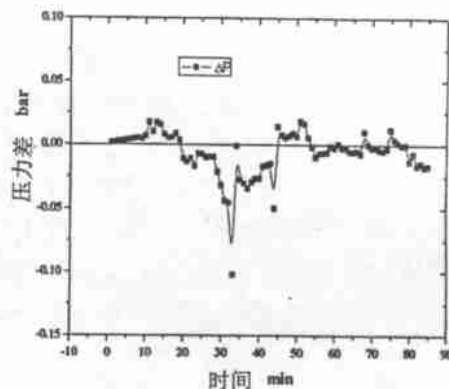


图 3 NCC 管路压力差变化图

图 2 和图 3 是只有自然循环冷却过程系统温度变化趋势图以及压力差变化趋势图,图 4 和图 5 是自然循环和低温热管复合冷却过程系统温度变化趋势图以及压力差变化趋势图。从图 2 和图 4 中我们可以看出,在预冷过程中仅仅使用自然循环冷却,可以更快的将冷头降低到目标温度,这是因为低温热管在开始预冷的过程中,要依靠低温液体来冷凝低温热管中的气态工质,低温热管是需要消耗冷量的,延长了冷头降低到目标温度的时间。但当用这两种系统来冷却有 30W 散热量的器件时,从图中我们可以看出:仅仅使用 NCC,系统温度迅速上升,最终冷头温度稳定在较高的温度。而使用 NCC+CHP,系统温度变化缓慢,最终冷头温度

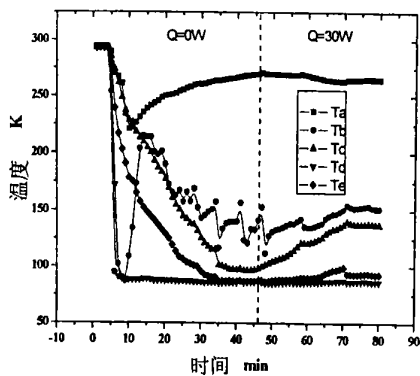


图 4 NCC+ CHP 系统温度变化图

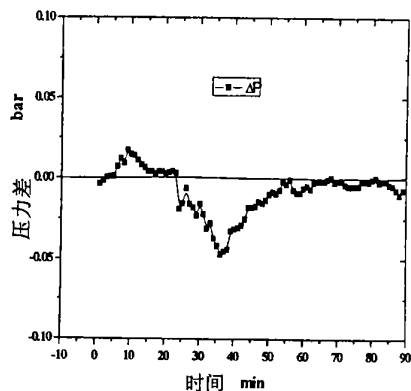


图 5 NCC+ CHP 管路压力差变化图

稳定在较低的温度。从图 3 和图 5 系统自然循环管路的压力变化我们可以看出, 整个系统的降低, 低温液体沿管路进入冷头, 冷头温度降低到低温液体温度附近。当冷头温度稳定后, 加入 30W 的热量, 从图 3 和图 5 我们可以看出, 这时自然循环回路的压力变化很小, 自然循环过程基本结束。这是因为加热是自然循环管路入流管中的低温液体完全蒸发, 一部分蒸汽通过自然循环回路循环, 另一部分蒸汽沿入流管流回低温液体贮槽中, 这一部分蒸汽也阻碍了低温液体流入自然循环回路, 使自然循环冷却的作用大大降低。所以在只有 NCC 的系统中, 系统温度快速上升到较高的温度, 而在 NCC+ CHP 的复合系统中, 系统可以通过低温热管将冷头的热量直接传递到低温液体贮槽, 使冷头温度保持在较低的温度。

此外, 该冷却系统应用于半导体发电系统的冷源, 在 400K 的温差下, 两个  $25 \times 25\text{m}$  的半导体片复叠在一起, 并联电路产生了 4.9V 的电压。通过基于自然循环预冷的高效低温元件, 可以使半导体的上表面稳定在比较低的温度, 通过调节半导体下表面的加热功率, 使半导体两侧的温度稳定保持在 400K 温差的条件下, 产生稳定的电压。

## 4 结论

通过本文的实验与分析, 得出以下结论: (1) 本文提出一种新的制冷方式, 该方法综合自然循环快速冷却以及低温热管小温差下大传热量的优点。(2) 通过比较 NCC 和 NCC+ CHP 两种制冷方式, 可以看出低温热管在冷却中具有重要的作用, 可以使整个系统保持在较低的温度。(3) 通过实验可以看到, 在系统进入较低温度之后, NCC 的冷却作用大大减弱, 在有一定加热量情况下, 通过自增压或者引射来增强 NCC 的作用, 使系统温度更加接近低温液体的温度。

## 参 考 文 献

- [1] 邱利民, 李炜征, 甘智华等. 中国发明专利(审理中): 基于自然循环预冷过程的高效低温传热元件, 申请号: 200310109516.1
- [2] Chen G B, Zhong Y K, Zheng X L, et al. Experimental study on natural circulation precooling of cryogenic pump system with gas phase inlet reflux configuration. *Cryogenics*, 2003, 43(12): 693- 698
- [3] 陈国邦, 郑锡亮, 钟铁魁等. 低温液体火箭发动机模拟预冷过程的传热与压降. *低温工程*, 2002, (3): 1- 10  
(下转第 47 页后)

field equality degree

作者简介: 杜元秋, 女, 1967 年生, 工程师。主要研究方向为计算机算法和核磁共振用超导磁体计算机最佳设计方案。

(上接第 33 页后)

## Experimental Study on Compound Heat Transfer System of Natural Circulation Cooling and Cryogenic Thermosyphon

Li Weizheng, Qiu Limin, Gan Zhihua, Chen Guobang

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, Hangzhou, 310027)

**Abstract:** A compound heat transfer system which consists of the natural circulation cooling and cryogenic thermosyphon is introduced in this paper. The natural circulation cooling can cool down the object in a large temperature difference, while the cryogenic thermosyphon can transfer more heat within a small temperature difference. In this paper, the compound heat transfer system takes advantages of natural circulation cooling and cryogenic thermosyphon, and eliminates the disadvantage of natural circulation cooling for its low thermodynamic efficiency. In order to verify its performance, a cryogenic heat transfer device was designed and fabricated. Experimental results are compared with those simply cooled by a natural circulation cooling, which show the potential for further applications.

**Keywords:** Natural circulation cooling, Cryogenic heat pipe, Compound cooling

作者简介: 李炜征, 男, 1979 年生。现为浙江大学制冷与低温研究所硕士研究生。主要从事低温条件下传热的实验与理论研究。

(上接第 52 页后)

[6] Heller R, Friesinger G, et al. Development program of 60kA high temperature superconductor current lead for the ITER toroidal field coil, Fusion Engineering and Design, 2001, 58- 59: 105- 109

[7] 20kA 高温超导电流引线研发取得突破性进展, <http://www.ipp.ac.cn/2004-1/200416115929>.

[8] Ando T, Kato T, et al. Design of the toroidal field coil for A - SST R2 using high Tc superconductor, Fusion Engineering and Design, 2001, 58- 59: 13- 16

## High Temperature Superconductor Applied in Future Tokamak Fusion Reactor

Hou Binglin, Zhu Xuewu

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu, 610041)

**Abstract:** In this paper, using superconductor substitution for conventional magnet in Tokamak Fusion Reactor is introduced briefly. The two kinds of high temperature superconductor (HTS) materials used possibly in Tokamak Fusion Reactor and the limitations of HTS applied in Tokamak are discussed. The development tendency of HTS applied in fusion is told. High temperature superconductor current lead and the conceptual design for the toroidal field coil of A - SST R2 are introduced.

**Keywords:** Superconducting Tokamak, High temperature superconductor (HTS), High temperature superconductor current lead, Toroidal field coil.

作者简介: 侯炳林, 男, 1972 年生。核工业西南物理研究院核能科学与工程专业硕士研究生。主要从事低温与超导技术应用研究。