

# 80 K 高频无磁非金属脉冲管制冷机

荀玉强<sup>1,2</sup> 杨鲁伟<sup>1</sup> 蔡京辉<sup>1</sup> 梁惊涛<sup>1</sup> 周 远<sup>1</sup>

( 1. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190 )

**摘 要** 介绍了高频脉冲管制冷机冷指无磁非金属材料的选择、加工以及实验优化工作。制作的高频无磁脉冲管制冷机冷指在风冷, 2.3 MPa 充气压力, 44 Hz, 70 W 电功率输入条件下, 最低达到 73.4 K 的无负荷最低温度; 60 W 电功率输入, 最低温度为 74.0 K, 在 80 K 时可以提供 0.1 W 的制冷量。本文为高频脉冲管制冷机直接冷却相关低温超导器件提供了坚实的基础。

**关键词** 脉冲管制冷机; 高频; 无磁; 非金属; 超导器件

**中图分类号:** TB61 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2009)12-2007-03

## 80 K HIGH-FREQUENCY NONMAGNETIC AND NONMETALLIC PULSE-TUBE CRYOCOOLER

XUN Yu-Qiang<sup>1,2</sup> YANG Lu-Wei<sup>1</sup> CAI Jing-Hui<sup>1</sup> LIANG Jing-Tao<sup>1</sup> ZHOU Yuan<sup>1</sup>

(1. Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, Beijing 100190, China;

2. Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China )

**Abstract** A nonmagnetic and nonmetallic pulse-tube cryocooler (PTC) is fabricated and tested. The lowest no-load temperature of the cold head is 73.4 K by air-cooling with 44 Hz and 70 W input electric power. For an input electric power of 60 W, the cold finger can reach a no-load temperature of 74.0 K and provide an output power of 0.1 W at 80 K.

**Key words** pulse tube cryocooler; high frequency; nonmagnetic; nonmetallic; superconductive device

## 0 引 言

脉冲管制冷机得益于其冷头无运动部件, 能够提供电磁振动干扰相对小很多的冷却能力。采用无磁非金属材料制作脉冲管冷指, 能进一步降低电磁振动干扰, 是脉冲管制冷机结合自身优势而走向实用化的一个重要应用方向, 可为直接冷却电磁振动干扰要求极严格的高温超导器件提供可能。

目前国外开发的无磁脉冲管制冷机或者没实现制冷机冷指的完全无磁非金属化, 由制冷机本体所附加的电磁干扰依旧明显; 或者基本停留在 G-M 型阶段。G-M 型脉管制冷机有着振动噪声大和机体笨重的固有缺点, 距离微型实用仍然有很大差距。

高频脉管制冷机在这些方面优势明显。中科院理化所在高频无磁非金属材料领域已有了开创性的突破。党海政<sup>[1]</sup> 研制的样机冷头已有两台成功降到了液氮温度以下, 获得的最低温度为 76.8 K, 对应输入 72 W。不过, 这是在使用冷水机组冷却热端至 278 K 实现的。在普通风冷条件下, 冷头只能达到 89 K, 性能恶化许多。对于实际应用而言, 风冷无疑是极为

便利的, 采用冷水机组同时也失去了便携微型意义。本文介绍了风冷条件下, 冷头即达到 73.4 K 的高频无磁脉冲管制冷机研制工作。

## 1 无磁材料遴选

这里选用无磁材料并特别强调采用非金属材料取代金属部件主要是受超导器件冷却条件所致。因为即使是弱磁性的钛合金材料<sup>[2]</sup> 替代品, 仍然无法完全解决使用金属材料所带来的涡流问题。这些金属部件在工作环境运动产生的感应涡流通常远远超出了超导器件所能容忍的上限。这是当前无磁脉冲管制冷机研制中不得不面对而又没有很好解决的问题, 也是选用非金属材料的原因。

回热器是脉冲管制冷机的关键部件, 参见图 1。其性能对制冷机整体性能起着至关重要的作用, 高频脉冲管制冷机无磁非金属化的关键也就在于回热器的无磁化。通过尼龙丝网填料的分析和实验研究, 验证了尼龙丝网应用于 60 K 温区的可行性<sup>[3]</sup>。关于

收稿日期: 2008-12-31; 修订日期: 2009-11-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.50476086; No.50890181; No.50676100)

作者简介: 荀玉强 (1980-), 男, 河南南阳人, 博士后, 主要从事低温制冷技术的研究。

脉冲管制冷机冷指的其他部件：脉冲管管壁、回热器管壁、冷热端换热器等，依据部件的不同，对材料性质要求也相应不同。

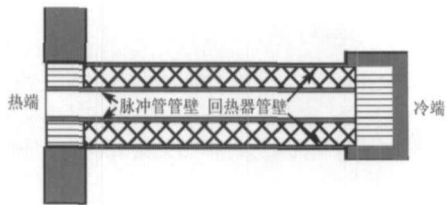


图 1 脉冲管冷指各部件  
Fig. 1 The PTC's cold finger

脉冲管结构为同轴结构，脉冲管管壁处在环形丝网内部，不需承受太大的应力，有一定的强度即可，主要考虑减少热损失，另外是一定的气密性，一般选用尼龙管即可。尼龙的热导率通常会低于不锈钢材料一个数量级，这会带来较为明显的改善。

回热器管壁首要的要求是强度问题，不过通常脉冲管冷指最容易发生破坏的部位不是管壁本身，而是管壁与冷热端的连接处。工质氮气的气密性也是需要格外强调的，回热器管壁即使存在很小的漏率，也会使制冷机性能下降、不稳定，乃至最终无法正常工作，所以管壁需要保证完全的气密性。

冷端和热端包括了相关换热器，如冷端换热器和热端换热器，要优先保证良好的热导率。加工性也是需要的，这是由于换热效能不仅仅与热导率有关，还与换热的有效面积有关；其次，材料应该有一定的热容，可以增加冷头的稳定性；另外，冷端和热端也应保证良好的氮气气密性。

## 2 无磁样机的加工制作

样机的制作采用低温胶粘结，没有采用焊接模式，一方面是为了消除焊接所带来的金属杂质，另一方面也是为了非金属材料连接的有效性。

对于粘结的要求有两条：一是要保证可靠的强度，二是保证可靠的气密性，而且强调对常温乃至低温全温区都要可靠。国内用于液氮温度的低温胶有上海合成树脂研究所的 DW 型低温胶，其中 DW-3 型低温胶由弹性环氧树脂和固化剂等组成，适用于粘接各种金属材料。该低温胶在液氮温度下亦具有良好的密封性能，满足低温密封的要求；在不同非金属材料之间的粘接也能获得满意的效果，满足密封要求，而且操作简便，可以在室温下预固化。

主要的粘结密封位置包括两部分：冷端和回热器管壁，热端和回热器管壁。由于低温胶的抗剪切强度小于 20 MPa，粘结表面也较小，所以在粘结结

构方面作了改进，加厚了回热器管壁，达到了 1 mm 左右，从而方便在管壁上加工螺纹，冷端和热端相应连接部位也加工了对应螺纹。粘结结构首先采用螺纹连接以承受主要载荷，随后以低温胶进行粘结密封，参见图 2 所示。这种粘结结构大大降低了低温胶的强度载荷，低温胶仅承受很小的强度，主要用来密封保证氮气气密性。粘结完毕后，对这一结构进行了高压氮气充气实验，结果表明了这一结构的密封可靠性和强度可靠性。

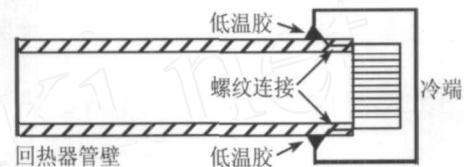


图 2 冷端粘结结构示意图  
Fig. 2 Schematic of connection configuration

## 3 无磁脉冲管制冷机样机

经过选材和粘结加工，最终成功制作的无磁脉冲管制冷机样机参见图 3。利用该无磁制冷机样机进行了优化实验。压缩机采用 Leybold 的 Polar SC7 压缩机，通常充气压力 2.0~3.0 MPa；制冷机热端采用风冷冷却；调相机构为双向、惯性管调节。

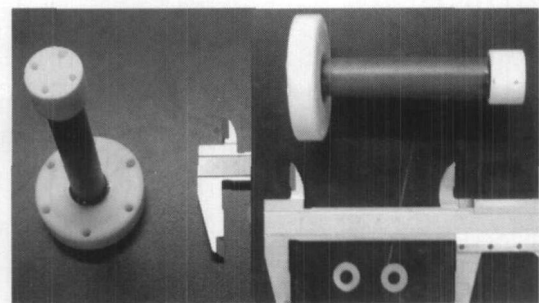


图 3 无磁脉冲管冷指  
Fig. 3 The nonmagnetic nonmetallic PTC cold finger

图 4 给出了样机的无负荷温度随输入功率的变化曲线。制冷机获得了 73.4 K 的最低温度，对应输入功率为 70 W；在 60 W 率输入时，可达 74.0 K。输入功率大于 60 W 之后，温度随功率的改善不大。实验中压缩机的功率因数较低，仅 0.8 左右，工作电流较大，对应 70 W 和 60 W 电功率输入，压缩机的电热功率损耗分别为 32 W 和 27 W。

图 5 是无磁样机的制冷量曲线。60 W 输入，加 0.1 W 热负载，冷头温度可保持在 80.2 K；70 W 输入，制冷机可以在 80 K 提供 0.14 W 冷量。

以上性能虽然较原先有了较大的改进，但 Ley-

bold 的 Polar SC7 线性压缩机在低功率输入状态下较低的效率, 使得制冷机很难达到更加理想的性能。为此, 选用实验室自行研制的低功率输入线性压缩机, 其扫气容积为  $2 \text{ cm}^3$ 。在低功率输入条件下, 压缩机功率因数较高, 能保持在 0.93 左右, 同样电功输入条件, 相比 Polar SC7, 电热损耗能减少约一半以上。

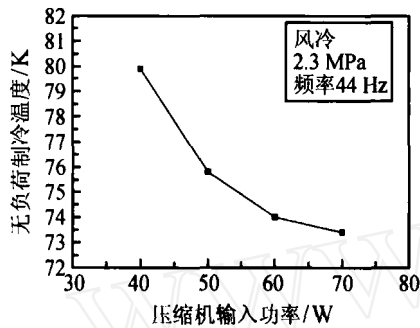


图 4 高频无磁样机无负荷温度

Fig. 4 Diagram of cooling temperature

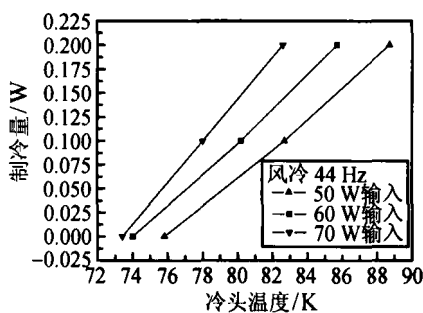


图 5 高频无磁样机制冷量曲线

Fig. 5 Cooling power versus temperature

初步的实验结果: 在约 26 W 输入, 风冷条件下即获得了约 84 K 的制冷温度, 进步明显。此时对应充气压力为 2.5 MPa, 频率 40 Hz。由于该型压缩机设计充气压力在 3.0 MPa 以上, 对于 2.5 MPa 仅仅能提供不到 30 W 的电功输入, 所以实验未能继续进行。不过这一初步实验表明该无磁冷指有达到更加理想性能的潜在能力, 有待寻找合适的压缩机继续优化。

## 4 结 论

本文介绍了高频脉冲管制冷机冷指无磁非金属材料的选择、加工以及实验优化工作。制作的高频无磁脉冲管制冷机冷指在风冷, 2.3 MPa 充气压力, 44 Hz, 70 W 电功率输入条件下, 最低达到 73.4 K 的无负荷最低温度; 60 W 电功率输入, 为 74.0 K, 在 80 K 可以提供 0.1 W 的制冷量, 这是国际上高频无磁脉冲管获得的最好结果, 为高频脉冲管制冷机直接冷却相关低温超导器件提供了坚实的基础。

## 参 考 文 献

- [1] Dang H Z, Ju Y L, Liang J T, et al. Performance of Stirling-Type Nonmagnetic and Nonmetallic Co-Axial Pulse Tube Cryocoolers for High-Tc SQUIDs Operation. *Cryogenics*, 2005, 45(3): 213-223
- [2] J E Zimmerman, R Radebaugh, J D Siegwarth. Refrigeration for Small Superconducting Devices. In: *Conference of the German Refrigeration Society*, Munich, 1976
- [3] Xun Y Q, Yang L W, Cai J H, et al. Investigation of High Frequency Pulse Tube Cryocooler Using Nylon Matrix. In: *21<sup>th</sup> International Cryogenic Engineering (ICEC21)*. Prag, Tschechische Republik, 2006. 553-556