

高频无磁脉冲管制冷机尼龙丝网分析

荀玉强^{1,2}, 杨鲁伟¹, 朱文秀¹, 蔡京辉¹ 梁惊涛¹

(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:要为冷却包括 SQUID 在内的高灵敏度高温超导器件, 开发了液氮温区无磁非金属材料制作的高频脉冲管制冷机冷指, 在风冷、60W 输入条件下可达到 74K 制冷温度, 80K 提供 0.1 W 制冷量。作为无磁非金属化的关键, 回热器蓄冷填料无磁化采用了尼龙丝网, 以取代常用的不锈钢丝网。本文分析表了由此带来的热容, 换热和流动阻力方面的变化。

关键词:脉冲管制冷机; 高频; 无磁 超导; 尼龙丝网

1 前言

脉冲管制冷机得益于其冷头无运动部件, 结构简单, 可靠性高, 寿命长, 在获得可媲美斯特林制冷机的效率后, 能够提供电磁振动干扰相对小很多的有效冷却, 利用进一步降低电磁振动干扰的无磁非金属脉冲管制冷机, 确切地说应为冷指无磁非金属化, 来直接冷却要求电磁振动干扰极严格的高温超导器件, 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, 尤其在高频微型化之后, 脉冲管制冷机有望提供极佳的便携操作性。

理化所在高频无磁非金属脉冲管制冷机领域率先取得了开创性的突破。2002 年, 党海政^[1]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。不过需要指出的是, 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, 风冷方式无疑是极为便利的, 采用冷水机组反而失去了便携微型意义。故此, 中心随后在国家自然科学基金的资助下, 展开了后续研究。从工程化角度、由多方面入手进行了高频脉冲管制冷机冷指的无磁非金属化设计以及加工实验优化工作。2007 年样机获得的性能如下^[1]: 风冷, 2.3 MPa 充气压力, 频率 44 Hz, 在 70 W 电功率输入条件下, 可以达到 73.4 K 的无负荷最低温度; 在 60 W 电功率输入条件下, 可以达到 74.0 K 的无

负荷最低温度, 在 80 K 可以提供 0.1 W 的制冷量, 为直接耦合冷却提供了条件。

回热器的回热器是脉冲管制冷机的重要部件, 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。影响回热器性能最主要的因素在于回热材料的选择, 通常在液氮温区回热器是选用金属丝网, 以取得较大的换热面积和较好的换热效果。作为无磁化的选择, 目前实际的可用无磁非金属回热材料, 大致有尼龙丝网、Teflon 丝网和 Kapton 丝网, 尼龙丝网回热能力是这三种丝网中相对最好的, 也是通常最容易得到, 且有较多的目数可以选择, 所以回热器填料无磁非金属化工作采用了尼龙丝网。下文将从热容、换热和流动阻力三个方面对尼龙丝网进行分析。

2 热容分析

蓄冷器中起决定作用的是蓄冷填料的体积比热容 C_m , 其直接决定着单位体积内够储存的能量。通常使用的不锈钢丝网和尼龙丝网蓄冷填料, 其体积比热容都强烈地依赖于温度。常用的不锈钢丝网的体积比热容 C_{mSS} 关于温度的拟合函数可表示如下:

$$C_{mSS} = 10^6 \cdot (C_1 + C_2 \cdot T + C_3 \cdot T^2 + C_4 \cdot T^3)$$

尼龙丝网的体积比热容 C_{mNylon} 拟合函数可以表示为^[3]:

$$\log (C_{mNylon}) = a + b(\log T) + c(\log T)^2 + d(\log T)^3 + e(\log T)^4 + f(\log T)^5 + g(\log T)^6 + h(\log T)^7 + i(\log T)^8$$

基金项目:国家自然科学基金(50890181)

作者简介:荀玉强(1980-), 男, 中国科学院力学研究所。

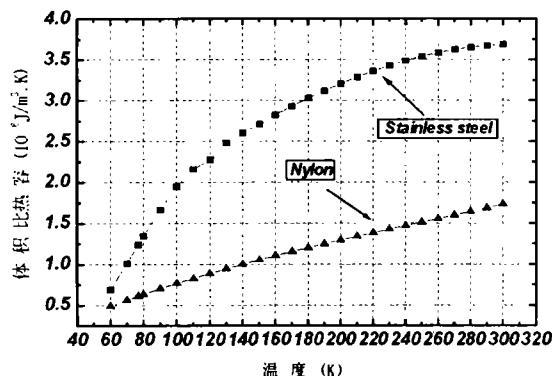


图 1 尼龙与不锈钢丝网体积比热容

依据查得的相应的常数对体积比热容进行拟和,获得的曲线参见图 1。从热容角度来考虑,回热器在气流热吹期间和冷吹期间回热温度会不一致,回热器填料温度随时间的变化曲线在热吹期间和冷吹期间是不重合的,形成了一个闭合曲线——“温度滞后回线”。该温度滞后回线的存在使得热吹期填料的平均温度 T_b 高于冷吹期平均温度 T_c 。这就相当于形成了冷热周期的 T_b 和 T_c 的温差换热,导致回热器产生附加的导热热阻,引起回热器的回热损失增大。回热器热容和气流热容量之比越小,这种损失会越大。相同体积尼龙丝网相对于不锈钢丝网的热容减少了约一半左右,这意味着尼龙丝网回热器相对于不锈钢丝网会带来一定的回热损失。

不过对于较高的温度,例如 60 K 以上温度范围,普通的金属回热器内流过回热器的气体热容量要比回热器填料的热容量小很多,填料热容量与流经气体热容量的比值通常可以达到几十的量级^[4],这时回热器的温度波动非常小,由于热容带来的回热损失也会很小。而同体积尼龙丝网相对于不锈钢

丝网的热容仅仅减少了约一半,尤其在 60~80 K 较低温度区域,两者的差别很小,所以初步认为,尼龙丝网热容减少对于 60 K 以上温区的回热性能影响有限。当然影响回热的另一个重要因素在于换热能力,下一节将对此进行讨论。

3 换热分析

所用尼龙丝网的直径为 30 微米。从基本微分方程出发,对于单根丝网的换热做进一步分析如下。由于丝网的长径比很大,认为是无内热源的、半径为 R 的无限长圆柱,其传热控制方程为:

$$\frac{\partial^2 T(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} \\ 0 \leq r \leq R, t > 0$$

在制冷机内部,工作介质处于交变流动的状态,在周期性的振荡温度边界条件激励下,边界附近有振荡的温度分布。所以可以将换热问题描述成一个横向主流侵入的平均温度为 T_0 振幅为 ΔT 的热波,随着渗透深度增加热波的振幅逐渐衰减,这是由于导热所造成的扩散传输振荡,其内部温度分布表达式为:

$$T(r,t) = T_0 + \int_{\tau=0}^t f(\tau) \frac{\partial \Phi(r,t-\tau)}{\partial t} d\tau \\ = T_0 + \frac{2\alpha}{R} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\alpha \beta_m^2 t} \cdot \beta_m \frac{J_0(\beta_m r)}{J_1(\beta_m R)} \int_0^t e^{\alpha \beta_m^2 \tau} f(\tau) d\tau$$

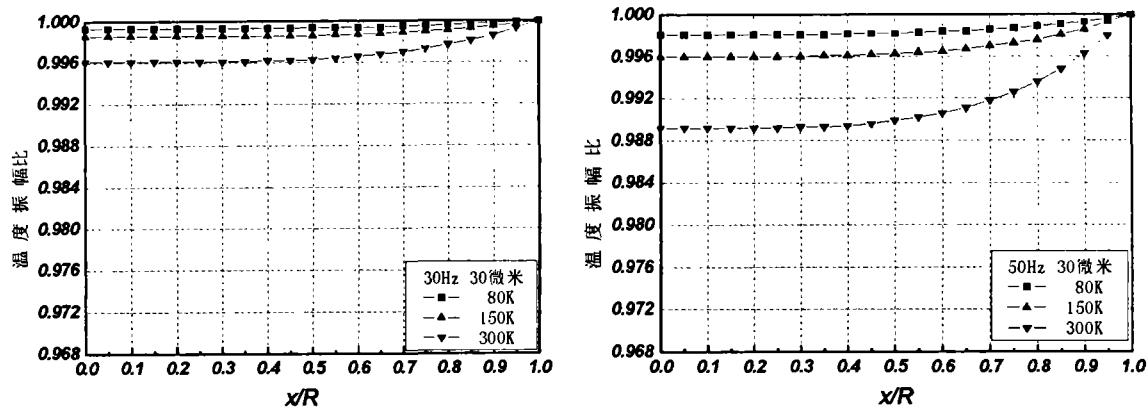
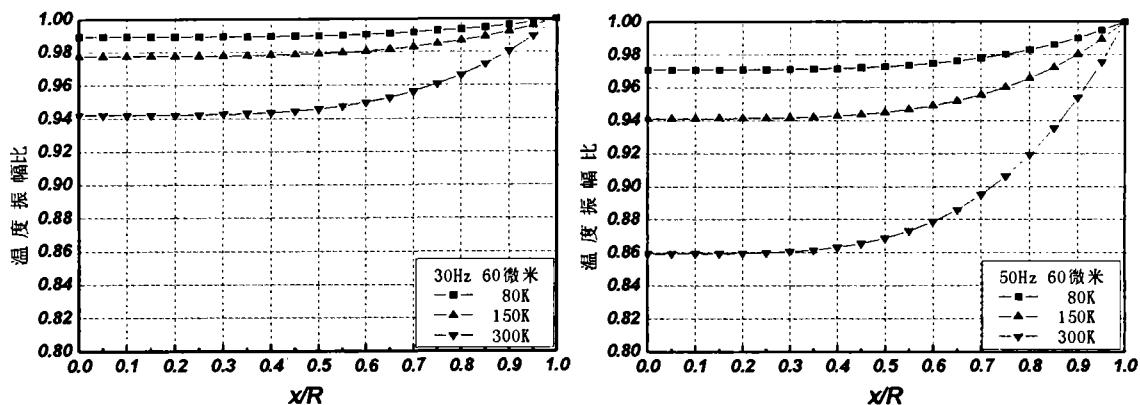
该动态温度的表达式十分复杂,很难给出直观的分析结论。对于丝网,距离丝网表面 x 处的温度波振幅与丝网表面处的温度波振幅之比 $\vartheta_x / \vartheta_R$,文献^[5]给出了更为简单的关系式:

$$\frac{\vartheta_x}{\vartheta_R} = \sqrt{\frac{\left[ch\left(\frac{x}{R} \cdot \frac{R}{\delta_k}\right) \cos\left(\frac{x}{R} \cdot \frac{R}{\delta_k}\right) \right]^2 + \left[sh\left(\frac{x}{R} \cdot \frac{R}{\delta_k}\right) \sin\left(\frac{x}{R} \cdot \frac{R}{\delta_k}\right) \right]^2}{\left[ch\left(\frac{R}{\delta_k}\right) \cos\left(\frac{R}{\delta_k}\right) \right]^2 + \left[sh\left(\frac{R}{\delta_k}\right) \sin\left(\frac{R}{\delta_k}\right) \right]^2}}$$

其中, ϑ_x 为距离丝网表面为 x 的某点处的温度波振幅, ϑ_R 为丝网表面的温度波振幅; R 为丝网的半径, δ_k 为丝网的热穿透深度。据此,计算了 30 微米直径的尼龙丝网和不锈钢丝网的振幅比,变化频率为 30 Hz, 50 Hz, 选取了 80 K, 150 K 和 300 K 三个典型计算温度, 150 K 为近似平均温度。

由图 2 可以看出,对于尼龙丝网而言,在 30 Hz 条件下,30 微米丝网中心温度可以保持和边界条件

一致的温度波振幅,即使是在温度 300 K 较低的热穿透深度条件下。在常用频率范围内,50 Hz, 同样即使是在温度 300 K 较低的热穿透深度条件下,30 微米尼龙丝网中心温度波振幅也可以与表面基本一致,可以达到表面振幅的 98.8 %, 这表明虽然尼龙丝网相对于不锈钢丝网,热导率有一定下降,但较低丝径的丝网同样可以保证良好的换热效果。

图2 30 Hz 及 50 Hz 条件下,30 微米尼龙丝网温度振幅比随 x/R 的变化趋势图3 30 Hz 及 50 Hz 条件下,60 微米尼龙丝网温度振幅比随 x/R 的变化趋势

另外,为给出较为全面的评估,对于较低目数,丝径较大的尼龙丝网,也进行了计算。图3可以看出,对于尼龙丝网而言,在30 Hz条件下,60微米丝网中心温度可以基本保持和边界条件一致的温度波振幅,即使是在温度300K较低的热穿透深度条件下,温度波振幅比也可保持在94%。对于常用频率范围内,50 Hz,同样即使是在温度300K较低的热穿透深度条件下,60微米尼龙丝网中心温度波振幅也可以达到表面振幅较高的比例,为表面温度波振幅的86%,对于丝网平均温度150 K范围,中心温度波振幅可以基本保持在90%以上。60微米丝网对应目数很低,通常为200目左右,目前常用丝网基本都在300目左右,乃至更高。所以可以认为,常用尼龙丝网基本上就可以保证在整个丝径范围内,丝网热容均为有效热容,这也表明了尼龙丝网换热的可行性。

4 流阻分析

尼龙丝网除了在热导率和热容不同于普通不锈

钢丝网外,还有重要的变化就是丝网线收缩率和材质的不同。对于线收缩率,查得的如表1所示。在80K低温条件下,尼龙丝网80K相当于293K的线收缩率达到了10%以上,远大于不锈钢丝网^[6],相差约为5倍;而由于尼龙丝网材质方面的原因,丝网在装填中通常会发生扭曲变形。基于以上不同,在尼龙丝网的具体使用中需要注意调整。

表1 材料80K相当于293K的线收缩率

材料	尼龙	不锈钢
$(L_{293K} - L_{80K}) / L_{293K}$	0.125	0.028

首先通常选取的回热器丝网,其外径尺寸仅仅略大于回热器内径,而且差值处在公差量级。初始在实验中选取的尼龙丝网外径也遵循这一惯例,但是制冷机的制冷性能很差,而且冷指中部温度接近常温,基本无温降。随后对回热器换填的丝网进行检查,在取出丝网时,发现丝网可整体随内部脉冲管一同取出,回热器填料与回热器管壁的结合较差,有一定的缝隙。在制冷过程中,热端气体直接通过这一空隙进入回热器内部,造成了很大的回热器热损失,回

热效果变得很差。这主要是由于丝网发生了扭曲变形,其外径将小于原有尺寸,从而导致回热器边缘出现缝隙。同时由于丝网的热胀冷缩,通常的直径选择在低温下也会形成较大的缝隙,也加剧了这种外形尺寸变化。所以在换填尼龙丝网时,其外径均作了一定程度的加大以防止缝隙的出现。

其次,由于尼龙丝网材料的扭曲变形,导致了流道的复杂,而尼龙丝网较大的线收缩率意味着低温条件下,流道水力直径的减小,这也意味着更大的流动阻力。对于高频条件下交变流动流动损失,目前还没有很好的统一的计算评估方法,这里从基本的流动入手进行简单分析。常见的影响流动的主要因素有流场、温度场、流态、流体物性等,如果相对于不锈钢丝网,这些因素基本一致,其流动损失应该是基本一致的。在实验中考虑到尼龙的变形选用了较低目数的丝网以改善流动损失。采用较低目数尼龙丝

网,丝径较大,理论水力直径也略大,在相同工作频率条件下,换热情况会较原有情况恶化;流动则应较原先有所改善。但实验中,实际测得的回热器热端压差较原先采用不锈钢丝网增大很多,直接表明了尼龙丝网回热器流动损失的增大,这也是尼龙丝网变形导致流道复杂的直接证据。另一方面,同样输入条件下,对应的压缩机功率因数由原先的约 0.89 降为现在的约 0.74,压缩机电流也由原先约 5.5 A 的增大到约 6.6 A 增大许多,表明压缩机压缩时阻力的增大,这也对应了回热器热端的压力测量结果。

因此,在使用尼龙丝网取代不锈钢丝网作为回热器填料方面,应格外注重流动损失的减小,这一方面需要考虑装填工艺的选择,另外也应该在可能的情况下寻求更为合适的无磁非金属蓄冷材料。

5 高频无磁脉冲管制冷机制冷性能

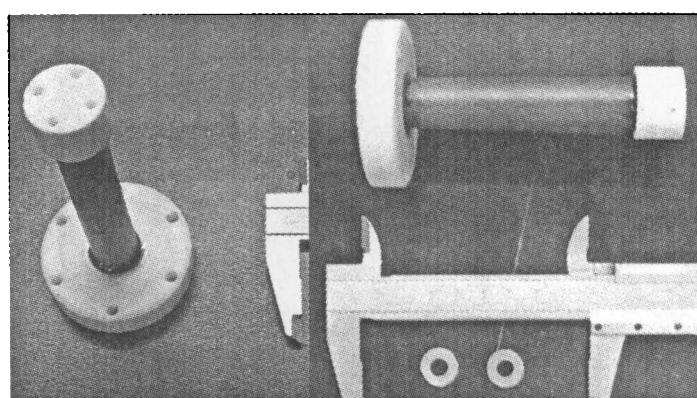


图 4 高频无磁脉冲管冷指

图 4 给出了制作的高频无磁脉冲管制冷机样机冷指图。性能测试采用 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 5 给出了样机的制冷性能曲线。制冷机获得了 73.4 K 的最低温度,对应输入功率为 70W; 在 60 W 率输入时,可达 74.0 K。制冷量方面,70 W 输入时,制冷机可以在 80 K 提供 0.14 W 冷量; 60 W 输入,制冷机可以在 80.2 K 提供 0.1 W 冷量。实验中压缩机与冷指为实现最佳耦合,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。这也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。

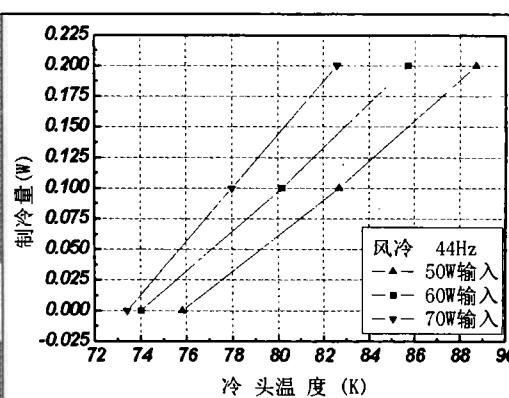


图 5 高频无磁样机制冷性能曲线

6 结论

为冷却包括 SQUID 在内的高灵敏度高温超导器件,开发了液氮温区无磁非金属材料制作的高频脉冲管制冷机冷指,在风冷、60W 输入条件下可达到 74K 制冷温度,80K 提供 0.1W 制冷量。作为无磁非金属化的关键,回热器蓄冷填料无磁化采用了尼龙丝网,以取代常用的不锈钢丝网。尼龙丝网在热容方面基本可以符合 60K 以上温区的使用要求;在换热方面,常用目数的尼龙丝网丝径完全可以保证整个丝网有效参与换热,对性能影响不大;在流动损失方面,由于尼龙丝网的扭曲变形和热胀冷缩,会导致丝网外形尺寸发生变化,最关键的是会导致流道截面复杂变小,导致流动阻力显著增大,需要在制作填充时格外注意。

参考文献

- [1] Dang, H. Z. Ju, Y. L. Liang, J. T. Cai, et al. Performance of Stirling - type nonmagnetic and nonmetallic co - axial pulse tube cryocoolers for high - T_c SQUIDS Operation [J]. Cryogenics, 2005, Vol. 45(2) : 213 - 223.
- [2] 荀玉强. 高频脉冲管制冷机无磁化研究. 中科院理化技术研究所, 博士学位论文, 2008.
- [3] Marquardt E. D. et al. Cryogenics material properties database, Cryocooler 11 [M]. New York: Plenum Press, 2001: p. 681 - 687, 2001
- [4] 边绍雄. 小型低温制冷机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [5] J. Gerster, et al. Low noise cold head of a four - valve pulse tube refrigerator [J]. Advances in Cryogenic Engineering, 1998.
- [6] 闫守胜、陆果. 低温物理实验的原理和方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1985 = 194, 43 = 2077.