脉管制冷－90 ℃低温冰箱研究*

张安阔[1†]　吴亦农[1]　文佳佳[1]　刘少帅[1]　张　华[2]

[1]中国科学院 上海技术物理研究所,上海 200083;

[2] 上海理工大学,上海 200093

收稿日期:2018-01-08;接收日期:2018-03-05

【摘要】 基于真空绝热板(VIP)超低热导率的优点,开展了－90 ℃低温冰箱的设计和实验研究.分析了同轴型脉管制冷机的结构特点和制冷性能属性,研究了 VIP 和聚氨酯发泡层组成复合绝热层结构以及低温冰箱箱体的漏热损失计算方法,实验验证了容积为 27.6 L 的低温冰箱良好的制冷效果和保温性能,在 135 W 的电功输入下可提供－90 ℃的低温环境.该研究为空间及商用长寿命深低温冰箱的研究提供一定的参考.

关键词: 低温冰箱,脉管制冷机,－90 ℃,真空绝热板

PACS: TB651

1 引　　言

随着低温医学科技水平的不断进步,对超低温存储环境要求越来越紧迫,这促进长寿命低温冰箱的快速发展.低温冰箱需要低温制冷机和绝热箱体等重要部件,前者通过制冷循环提供冷量,后者依靠绝热材料保持低温环境.传统的低温冰箱,多采用单级自复叠、多级复叠循环等制冷系统[1],系统具有结构复杂、效率低下、超低温难以获取以及易油堵等特点,难以满足医学环境及可靠性要求.斯特林型制冷系统内部气体工质为高纯度高压氦气,干净且无润滑油,制冷过程绿色环保,近年来得到了快速的发展[2-4].斯特林型脉管制冷机制冷循环为斯特林循环,其冷头无运动部件,振动小,寿命更长,然而早期由于技术限制,其性能低下,应用较少.航天科技的发展推动着脉管制冷技术的进步,促使具有结构简单、降温低(可低于－200 ℃)、效率高(比卡诺效率可大于 20%)、体积小、重量轻(低于 10 kg)、冷端振动低(小于 1 Nrms)、可靠性高及寿命长(大于 5 年)等诸多优点的脉管制冷机广泛应用于航天工程领域[5-7].

本文研制了一台－90 ℃脉管制冷低温冰箱,介绍了 VIP 绝热箱体和脉管制冷机组件的结构特点和耦合方法,分析了制冷机理及 VIP 绝热箱体的漏热计算方法,研究了制冷机性能以及其与 VIP 绝热箱体组件耦合后的冷却效果,－90 ℃低温冰箱的实验结果验证了高效的脉管制冷性能和良好的 VIP 绝热箱体保温能力,进行了理论值和实验值的比较研究,并分析其差异性产生的原因.

2 低温冰箱结构分析

低温冰箱主要由脉管制冷机和保温箱体两部件组成,如图 1 所示,前者通过工装支架固定于后者的一侧,以下针对脉管制冷机结构和保温箱体的设计分别展开分析.

2.1 脉管制冷机分析

脉管制冷机由压缩机和冷指两部分构成,如图 2 所示.压缩机为活塞对置式压缩结构,为系统提供不同频率和功率的压力波;冷指由热端换热器、回热器、冷头、脉管等依次连接而成,其内部气体工质往

* 国家自然科学基金(51741610)和上海自然科学基金项目(16ZR1441500)资助的课题.

† zhangankuo@126.com

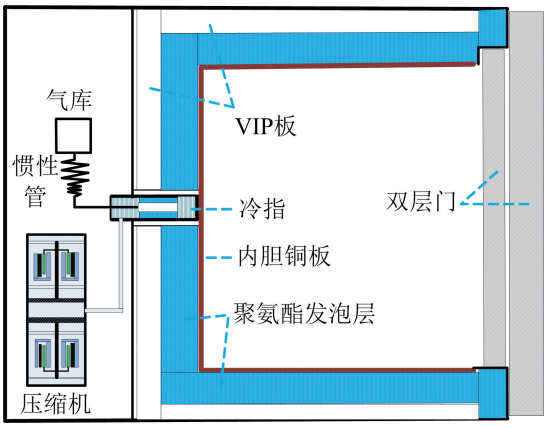

图 1　低温冰箱结构简图

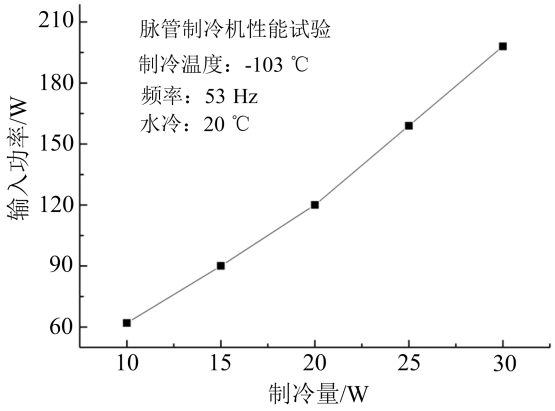

图 3　脉管制冷机性能图

复穿梭交变流动，在脉管内膨胀产生制冷效应[8]．热端换热器采用狭缝式换热结构，换热效率高[9]，蓄冷器内填充高目数不锈钢丝网，为多孔介质，空隙率约为 70%，实际的参数值与丝网的填充工艺有关．脉管是一个空的不锈钢管，其内壁光洁度要求较高，理想状态下，脉管内气体在其中部形成一气体活塞，气体活塞绝缘性要求较高，从而减少冷量的损失．脉管的尺寸设计需要考虑到空体积大小以及系统惯性管的调相能力，即调节系统的气体质量流、压力波相位以及两者间的相位差值．

研制了一台高效同轴型脉管制冷机，该机型具有长寿命特性，工作寿命可达到 5 年以上，制冷机系统内部为高压气体工质，压力为 3.2 MPa，水冷控制温度 20 ℃，通过实验测试可获得制冷机性能如图 3 所示，可知制冷机在－103 ℃时可产生 20 W 冷量，输入电功约为 120 W，当制冷机产生 30 W 冷量时，输入电功需增加至 200 W．

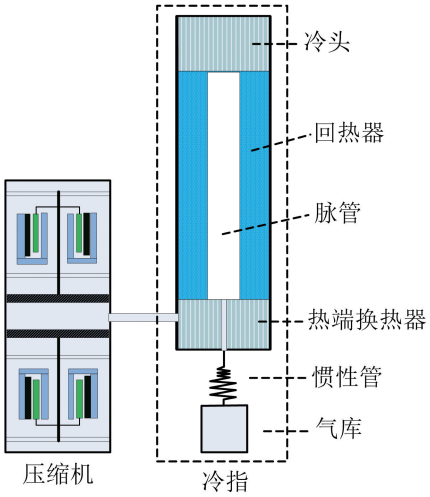

图 2　脉管制冷机结构简图

2.2　低温冰箱真空绝热箱体分析

当低温冰箱正常运行时，其箱体内部与外界环境间存在较大的温度差异，造成冷量损失，因此非常有必要对低温冰箱箱体的绝热特性进行分析研究．

假设箱体内、外空气温度和露点温度分别为 t_2、t_1 和 t_d，箱体内外表面温度分别为 t_{w2} 和 t_{w1}，箱体内、外表面与空气间的传热系数分别为 h_2 和 h_1，隔热材料的导热系数为 λ_{total}．根据热平衡条件得：

$$h_1 \times (t_1 - t_{w1}) = \frac{\lambda_{total}}{L}(t_{w1} - t_{w2}) = h_2(t_{w2} - t_2)$$

式中 L 为绝热层厚度，保温层厚度应大于该绝热层厚度．

具体边界条件设置如表 1 所示．

表 1　冰箱边界条件列表

名称	t_1 /℃	t_2 /℃	t_d /℃	h_1 / W/(m² · ℃)	h_2 / W/(m² · ℃)
数值	24	－80	17	5.0	1.2

箱体的热量损失主要包括箱体的传热损失、开门热量损失、储物发热损失和其他传热损失等．箱体的传热损失主要由箱体表面的传热损失，箱门露热损失和箱门门吸封条的露热损失等三部分组成，以下对三个损失分布进行量化分析．

箱体内胆紫铜的导热系数及外壳不锈钢的导热系数远远大于绝热及保温层的导热系数，为简化计算，该值可忽略不计，则可得出箱体的总传热系数 k：

$$k = \frac{1}{d_1/\lambda_1 + d_2/\lambda_2} = 0.095\ \mathrm{W/m^2 \cdot ℃}$$

传热面积 A 按照外围尺寸进行计算，计算时面

积选取考虑门的厚度，故而将这一部分厚度没有纳入面积的计算.

$$A=0.47\ \mathrm{m}\times0.53\ \mathrm{m}\times2+0.5\ \mathrm{m}\times0.47\ \mathrm{m}\times2+0.50\ \mathrm{m}\times0.53\ \mathrm{m}=1.2491\ \mathrm{m}^2$$

传热温差 Δt 按照设计工况进行计算，环境温度为 24 ℃，箱内温度设计为－90 ℃，则温差为

$$\Delta t=24-(-90)=114℃$$

因此箱体壁面的露热损失为

$$Q_1=A\times k\times\Delta t=1.2491\times0.095\times114=13.52\ \mathrm{W}$$

箱内外门为耐低温塑料材料，两层门可按照多层保温结构处理，漏热量 Q_2 在 2 W 左右.门吸封条为硅胶材料，气密性好，可减小冷量损失，热量会通过密封条渗透到箱体内部，该部分的热量没有明确的计算公式和计算方法，一般采用经验值进行估算，其大小取 Q_1 和 Q_2 总和的 15%，即为：

$$Q_3=(Q_1+Q_2)\times15\%=2.33\ \mathrm{W}$$

因此，箱体总的传热损失主要为以上三种热负荷之和，即

$$Q_{total}=Q_1+Q_2+Q_3=17.85\ \mathrm{W}$$

3 低温冰箱实验研究

图 4 为低温冰箱一侧脉管制冷机装配实物图，压缩机、惯性管和气库固定在箱体上，冷指插入内陷腔体，冷头与内胆铜板相连，实现冷量传输.高频交流电源驱动压缩机活塞交变往复运动，气体经过热端换热器、回热器、在脉管内膨胀做功产生制冷效应.图 5 为冰箱箱体实物图，可见黄色内胆铜板和双层密封门，内胆布置多点热电偶进行温度测量，各测点位置分别位于内胆内部左测点、右测点、门内测点、腔体中间测点以及近冷头测点(该点铜板另一侧靠近冷头，温度相对较低).

图 4 脉管制冷机图

图 5 冰箱箱体图

制冷机压缩机和冷指热端通过水冷板内水循环实现冷却，控制冷却温度为 20 ℃，制冷机冷却方式有几种选择，一是制冷机直接加水冷块，通过水冷管路直接连接恒温水泵实现冷却，此方法适用于实验研究，但不便于运输；二是低温冰箱侧端内置一个循环冷却系统，如图 6 所示，循环泵和风扇动力可通过一个普通变压器实现.该方法冷却效果良好，便于运输，适用于大批量产品生产；三是制冷机热端固定散热翅片，通过风扇强制对流实现冷却，该方法便于运输，但冷却效果较差，并且制作加工成本较高.目前低温冰箱处于实验室阶段，本文采用第一种制冷机冷却方案.

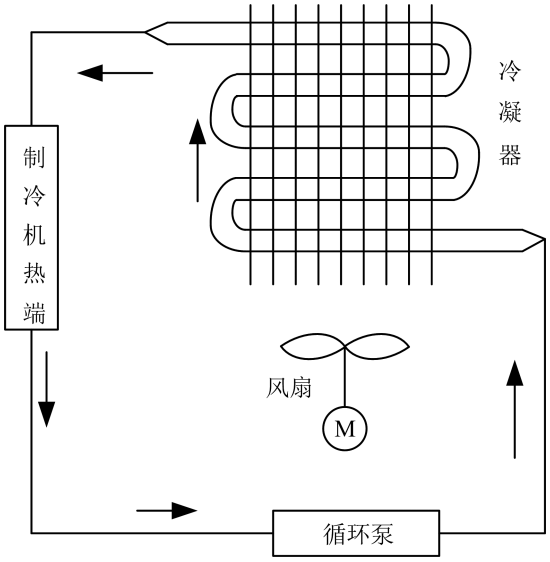

图 6 制冷机内循环系统简图

图 7 为 VIP 型低温冰箱降温曲线图.低温冰箱内胆内分布的五个测温点随着时间的变化渐进式下降，在 22 个小时后低温冰箱系统热力学平衡趋于稳

定.可知，最低温度点位于近冷头测点，其值约为－100 ℃，最高温度点位于箱体中间测点附件，其温度值约为－90.5 ℃，这是因为冰箱内胆为铜板，脉管制冷机产生的冷量通过冷头和铜板的直接耦合而传导，因此测点越靠近冷头，其温度越低，腔体内和门侧测点温度相对要高，而此时的冷头温度与测点温度存在几摄氏度的接触温差，大约为－103 ℃.在整个降温的过程中，脉管制冷机输入电功先小后增大，性能稳定时输入电功为 135 W.根据脉管制冷机性能曲线图可知，脉管制冷机在该功率下－103 ℃以上温区时可获得大于 22 W 制冷量，该冷量数值大于箱体在－90 ℃的计算漏热损失 17.85 W，两者存在 4.15 W 冷量的差异，其原因为计算漏热是基于理论状态下的，而实际冰箱装配过程中由于工艺的差异性，造成一些其他损失的存在，如 VIP 为分体式，未采用整体式结构，造成 VIP 边缘出现多个热桥，存在漏热损失等.

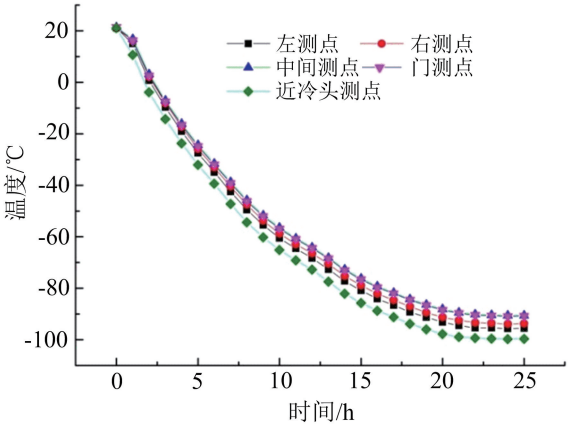

图 7　低温冰箱性能曲线图

本实验低温冰箱在空载的情况下降温到－90 ℃需要 20 小时以上，其主要原因一是制冷机功率限定在一百多瓦以内，制冷速率低，二是低温冰箱本体的热容较大，从 23 ℃冷却至－90 ℃直至平衡需要时间较长，如果低温冰箱内放置物品，冷却时间会更长，不利于产品的实际应用.因此，在后期的研究过程，一方面需通过配置较大功率的制冷机提升制冷速率，另一方面需优化冰箱箱体，减小热容量和腔体导热速率，从而提升产品应用的可行性.

3　结　　论

为了研制出一台零下 90 ℃ VIP 型脉管制冷低温冰箱，开展了脉管制冷机和 VIP 型绝热箱体的理论分析和实验研究.一方面，设计并实验测试了一台高性能、低振动、长寿命的－103 ℃同轴型脉管制冷机，该制冷机可提供 30 W 制冷量，充分满足低温冰箱箱体漏热损失要求；另一方面，研究了 VIP 和聚氨酯发泡层组成的复合绝热低温冰箱箱体，理论计算该箱体在－90 ℃的工况下其理论漏热损失为 17.85 W，具有良好的保温性能.脉管制冷机采用侧挂方式与箱体进行耦合，并开展了相关性能测试实验，实验研究表明制冷机在 135 W 输入功率下，低温冰箱箱体内部可冷却至－90 ℃以下，根据制冷机性能可知其冷头－103 ℃下可提供 22 W 制冷量，该值大于理论值，是由于实际状态下的一些传热损失造成的.本文研究验证了低温冰箱具有良好的制冷性能和保温效果，其研究方法为节能环保长寿命型低温冰箱的研制提供一定参考.

［致谢］作者感谢上海海事大学阚安康老师在绝热箱体分析工作中的帮助.

参　考　文　献

［1］张华，刘占杰，荆磊，陆向阳，低温与超导，**33**(2005)，24.

［2］陈曦，张华，吴亦农，制冷学报，**29**(2008)，51.

［3］S.Y.Kim，W.S.Chung，D.K.Shin，K.S Cho，Intersociety energy conversion engineering conference，**32**(1997)，790.

［4］E.Oguz，F. Ozkadi，International refrigeration and air conditioning conference，**9**(2002)，623.

［5］R.G. Ross，R.F. Boyle，*Cryocooler*，**14**(2007)，1.

［6］J. Raab，E. Tward，*Cryogenics*，**50**(2010)，572.

［7］A.K. Zhang，Y.N. Wu，S.S. Liu，H.Q. Yu，B.Y. Yang，*Journal of Low Temperature Physics*，**191**(2018)，1.

［8］A.K. Zhang，X. Chen，Y.N. Wu，H. Zhang，K.X. Yang，*Cryogenics* ，**52**(2012)，800.

［9］K. Taekyung，J. Sangkwon，*Cryogenics*，**51** (2011)，341.

Study on −90℃ Refrigerator Cooled by Pulse Tube Cryocooler

ZHANG Ankuo[1†] WU Yinong[1] WEN Jiajia[1] LIU Shaoshuai[1] ZHANG Hua[2]

[1] *Shanghai Institute of Technical Physics, CAS, Shanghai*, 200083, *China*;

[2] *Institute of Refrigeration Technology, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai* 200093, *China*

Received date: 2018-01-08; accepted date: 2018-03-05

【Abstract】 Based on ultra-low thermal conductivity of vacuum insulatedpanel (VIP), some design and experimental study of a cryogenic refrigerator were carried out, whose temperature was dropped down to −90 ℃. A coaxial pulse tube cryocooler (PTC) was used for the cryogenic refrigerator and its structural characteristics and refrigeration performance were analyzed, respectively. The composite heat insulation layer of the cryogenic refrigerator is composed of VIP and polyurethane foam layer and its leakage heat loss calculation method was studied. Some experiments were carried out and the cryogenic refrigerator could be cooled down to −90 ℃ with 135 W input power. This study provides a reference for the research of space and commercial long-life low temperature refrigerators.

Keywords: Cryogenic refrigerator, Pulse tube cryocooler, −90 ℃, VIP

PACS: TB651

* Supported by the Natural Science Foundation of China (No. 51741610) and the Natural Science Foundation of Shanghai − China (NO. 16ZR1441500).