

基于液氮冷源超导磁体氦气循环预冷系统设计

杨英福 宋迎春

东软医疗系统股份有限公司 辽宁 沈阳 110167

摘要: 在现阶段制备低温循环氦气常用的办法是压缩冷却法, 而压缩冷却法从设备及工艺又分成两种方式: 一是低温离心风机被用来直接压缩低温氦气, 从而获取可用于循环使用的低温氦气; 二是常温压缩机在常温条件下对氦气进行压缩, 以建立闭合的氦气循环。本文介绍的氦气循环系统采用了常规的循环过程, 利用液氮对循环氦气进行初步冷却, 可以做到加快冷却速度, 降低冷却成本, 减少换热过程中的能量损失, 通过这种方式可以在系统能耗较低的情况下, 高效生成更多的低温循环氦气。

关键词: 液氮冷源; 超导磁体; 氦气循环预冷系统

引言: 当前超导磁体已在多个领域得到广泛应用, 例如高磁场强度、核聚变、超导发电以及生物医学等。然而超导磁体线圈只有在极端的环境条件下才能展现出其超导特性, 因此需要在氦气氛围下的大量冷量。所以制备低温循环氦气对超导磁体生产制作很有意义。但在制备环节中大型超导磁体对冷量的需求是相当高的。如果预冷处理不充分, 将导致低温介质的过度消耗, 进而增加生产成本, 降低生产效率。因此从运营成本和经济角度考虑, 应尽量加速预冷和降温过程。另外为确保氦气循环系统的稳定性及经济性, 还需对降温过程中的温度差进行控制, 以增强系统中温度分布的合理性。

1 超导磁体降温计算

预冷设备主要是为了构建冷态氦气流, 以实现超导磁性材料的冷却。采用液氮作为制冷剂, 并通过循环压缩机确保氦气流量维持在不小于 $100\text{m}^3/\text{h}$ 。在设计流程的起始阶段的首要任务是构建超导磁体的数值和物理模型; 利用Fluent仿真工具对氦气迫流冷却超导磁体的三维非稳态过程进行优化。通过这一步骤, 可以深入理解磁体的冷却规律, 并预测超导磁体的冷却过程, 进而制定出合适的冷却策略; 对预冷设备进行流程规划, 并对各个组件进行细致的计算优化和筛选。

在研究过程中选取了1.5T磁体作为研究对象。考虑到其不同温度下的特性变化, 为简化分析假设其结构由铁构成, 且密度恒定为 $7860\text{kg}/\text{m}^3$ 。此外, 假设其定压比热和热导率均为温度的独立函数。在 $1.05 \times 10^5\text{Pa}$ 的压力条件下, 建立氦气的密度、定压比热、热导率和运动粘度的数学模型, 并将这些数据导入Fluent软件进行模拟分析。计算时, 因为引入液氮制冷, 将制冷机制冷处的氦气的进口温度设定为 80K , 并保持该温度。氦气降温后的磁体温度应小于 30K , 对应需要冷氦气入口温度 20K , 出

口温度不大于 30K 。通过换热器对迫流氦气降温, 氦气最低温度应低于 20K 。在冷却过程中, 超导磁体的内外温差达到了 16.8K , 这一数值符合设定的小于 20K 标准。

2 低温氦气循环系统

通常低温氦气循环系统有两种循环方式可供选择, 一种是常温循环, 一种是低温循环。常温循环指的是循环增压部件工作在常温模式, 增压的氦气是常温气体, 低温循环指的是循环增压部件工作在低温模式, 增压的氦气是低温气体。

通常常温循环的流程如图1所示, 常温循环的氦气在压缩机的协助下, 氦气被精确地引入预设的循环路径, 进入回热换热器中预冷降温, 然后进入到制冷机的冷头换热器内, 进一步降温后, 输出到磁体端, 与磁体进行充分热交互, 以做到对磁体降温, 返回的低温氦气进入到回热换热器中与进气的氦气换热后被有序地引导回到循环增压机的入口, 并重新投入下一轮循环。

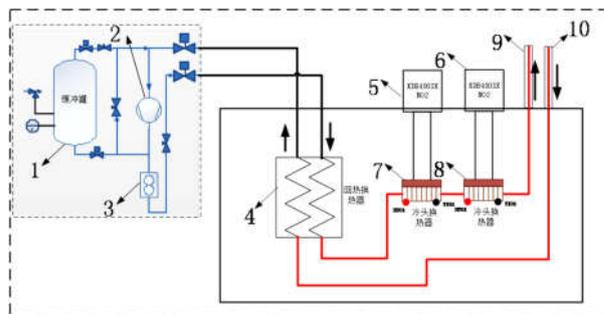


图1. 常温循环的冷氦气循环流程图

- (1) 氦气缓冲罐; (2) 循环增压机; (3) 流量控制器;
- (4) 回热换热器; (5/6) GM制冷机; (7/8) 冷头换热器;
- (9/10) Bayonet接头

根据相关降温要求, 磁体端氦气温度需要达到不超过 20K , 而循环流程需要温度从 300K 降到 20K 温区, 这

样, 计算回热换热器中的换热量约1400W。在300K到20K温区的换热, 目前商业换热器换热效率最高能做到90%, 换热器中的换热器损失约10%, 即140W。目前商业成熟的低温GM制冷机, 在20K时可提供的冷量约40W, 因此此系统操作效率和经济效率不高, 尤其是当流量及负载波动较大时, 很难保证稳定性和精确性。

因此本系统中对流程进行优化。如图2所示, 在循环冷箱内增加液氮换热, 300K到80K的换热损失通过液氮补偿, 而制冷机只需补偿80K到20K的换热损失。

优化后的系统技术工艺流程图如图2所示。

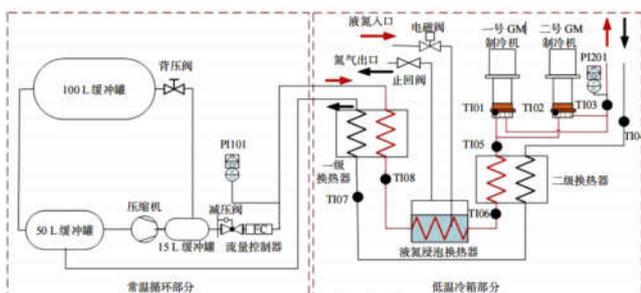


图2. 可控低温氦气循环系统流程图

可见此系统主要由常温循环单元和低温冷箱单元两个部分组成, 其中常温循环单元用于提供循环的氦气, 主要包括循环压缩机、氦气缓冲罐、流量控制器; 低温冷箱单元将循环的氦气降温后输送到使用环境, 主要包括两级回热换热器、液氮浸泡换热器屏、四台GM制冷机和冷头换热器。

图中, 常温状态的氦气被压缩机压缩并导入出口的稳压罐。通过流量控制器来精确控制氦气进入低温冷箱部分的速度, 这样确保了系统的稳定运行和精确控制。在操作过程中, 氦气首次进入低温冷藏设备时, 会先经过一级换热器的预处理, 热氦气在一级换热器中与返回的冷氦气进行初次热交换与降温(充分利用返回冷氦气的冷量以及冷氦气膨胀时的减熵能力)。接着, 预冷过的氦气进入液氮浸泡换热器与液氮在板式换热器中进行浸没式换热, 经过充分的热交换与降温, 使氦气达到液氮温度。紧接着, 氦气会经历二级换热器的再次预处理, 其中装有特制的翅片换热器, 并装有吸附剂, 在此, 氦气经过纯化, 并与回流的冷氦气进行最后的热交换。然后, 氦气在GM制冷机的冷头换热器处, 完成最后的降温换热步骤, 制备出所需的低温氦气, 供后续步骤使用。

为确保氦气温度达到预设标准, 需精细调节氦气的流量, 并控制好液氮的供给量和制冷机的功率。纯化后的氦气随后被送至恒温器, 通过高效的热对流方式, 对磁体进行冷氦气降温。在磁体内部冷氦气完成热交换

后, 氦气会有所升温。降温流程完成后, 将通过风扇和启动阻塞阀门等设备, 让完成降温过程的氦气, 流经二级换热器、一级换热器, 在通道中温度逐渐升高, 最后回到缓冲罐, 并实现充分换热。之后, 氦气再次进入下一轮循环。同时液氮浸泡换热器, 需根据负载保持液氮输入量, 始终让通过的氦气达成浸泡换热, 并通过风扇驱动气化的氦气排除, 保持容器内压强的安全, 及温度的稳定性, 并且能够确保经过冷氦气降温的磁体内部温度差不超过30K。

为确保系统的稳定运行, 在二级回热器的高温部位出口、高温部位入口、低温部位入口、低温部位出口、制冷机冷头以及低温氦气出口, 均设置了相应的温度检测点。此外, 在常温循环的出口以及低温氦气的出口, 我们还安装了压力检测点。

2.1 氦气循环单元

在氦气循环系统的压缩阶段, 由于压缩过程会释放出众多热量, 所以必须依赖润滑油和排放物进行高效的降温。为了获得优秀的降温性能, 本文选择使用板式换热器, 并且采取冷却水装置所供应的冷却液作为降温媒介。为了进一步提高润滑油的冷却效果, 还在润滑油流通管道中安装了一台油流通泵。通过这台泵的加入, 润滑油的流通次数得到了显著增加, 从而提高了其传递热量的效率。此外螺杆压缩机的驱动电机被置于压缩机外壳内。因此为了对驱动电机进行辅助冷却, 我们在压缩机的排气口部分安装了排气冷却器。实验数据显示, 在板式换热器的作用下, 压缩机的排气温度大致下调到90℃。此外, 原本的50℃的输送油在进行了冷却之后, 也被降低到了20℃。

2.2 低温换热单元

该系统包含4台GM制冷机、4套冷头换热器、1台氦气循环压缩机、2套氦气回热器、1个真空杜瓦、缓冲罐、氦气管道及控制系统等。GM制冷机、冷头氦气换热器、氦气回热器集成在真空杜瓦内, 氦气循环压缩机、缓冲容器在真空杜瓦外。

该设备核心功能是通过氦气循环产生冷却效果。在一级回热换热过程中, 常温氦气通过低温换热单元的进气口送入冷藏设备, 并与反馈的冷氦气进行热交换, 以实现冷量的最大化利用。在液氮换热器的协助下, 氦气被稳定降温, 确保其温度降低至约80K。随后, 二级回热换热器将二级回气的冷量转化为液氮换热器的能量, 将循环氦气进一步冷却至20K; 通过低温隔热管路, 该低温氦气被输送到待降温磁体。回收的低温氦气则通过二级回热换热器、一级回热换热器以及冷箱的排气口重新回

到氮气的循环系统。

2.3 监控单元

根据该系统的技术规格,核心参数包括对整套低温制冷装置的温度、压力、制冷机运行状态等的检测以及对加热的控制、制冷机的控制等,并可对制冷装置的温度、压力、真空等数据进行记录保存。

测控系统硬件包含温度传感器、压力传感器、差压传感器、真空计、加热器等。

制冷机远程控制连接到控制系统中,可在控制界面对制冷机的开启、关闭进行控制,并对制冷机状态、报警等信息显示在控制界面

3 主要部件设计

3.1 GM制冷机设计

根据初步估算的制冷量需求以及换热器损耗、管道漏热、支撑漏热等各种系统漏热(普通磁体所需的制冷负载大约为 $0.5W@4.2K-50K$, $12W@50K-300K$),并选用已有成熟技术且实现批量的GM低温制冷机。选定4台制冷机,分为两组,每组有两台制冷机,两台串联,两台并联。

3.2 预冷换热器设计

该系统增加了液氮浸泡换热,可成功实现 $1g/s$ 的质量流速以及 $20K$ 的低温氮气循环。在此过程中,采用逆流式套管换热器对常温氮气进行预冷。该设备的优势在于操作简便、流阻小以及具备优良的换热性能。

3.3 冷头换热器设计

在系统中,氮气需要进行热交换,这一过程需借助GM制冷器的冷头实现。因冷头换热器工作温度范围为 $13-300K$,由于流量大、流阻要求高,换热量大,因此选用换热系数高、流阻小的狭缝式结构换热器。该冷头换热器直接与GM冷头相连。采用具有卓越传热性能 of 无氧铜材料,得以在最小尺寸的换热器中实现氮气出口温度与冷头温差低于 $1K$ 的出色性能,同时确保氮气流动阻力满足既定标准。在换热器结构设计上,换热面积设置一定的余量,当换热器流量分配不均匀时确保可以将冷头冷量带走。

3.4 翅片换热器

在预冷装置中,液氮浸泡换热器、二级换热器均采用翅片结构换热,被安置在容器中。通过调整气动调节阀的开度,可以逐步调整氮气的流量,从而精确控制每一轮氮气的排放温度。为了满足设计的紧凑性和移动的便利性需求,采取了将活性炭吸附剂注入换热器筒内的

策略,显著提高了系统对非纯氮气的去除效率,有效处理了包括含水分、空气和油分在内的混合气体。

4 试验结果与分析

4.1 不同热负载对系统的影响

从TI03的低温氮气温度与制冷机的冷头温度之间的最大换热温差被限制在 $1K$ 之内。根据实验数据,当热负荷为 $50W$ 时, TI03的低温氮气出口温度稳定在 $19.3K$ 。因此在低温氮气温度低于 $20K$ 的条件下,我们可以推断出热负荷的最高值是 $50W$ 。同时在 $60W$ 的热负荷下,冷却头的温度被设定为 $20K$ 。在此条件下制冷设备能够实现 $40W$ 的冷却效果,提供在 $20K$ 温度下运行制冷设备所需的关键信息。由于二级回热器的高温部分入口温度设定为液态氮的温度,这会导致整个系统的冷却效率降低 $20W$ 。当系统热负荷增加时,低温氮气回流温度TI04也会相应上升,进一步导致二级回热器的冷却能力下降。这一变化将引起监测点温度的上升,具体表现在TI05、TI02和TI03等监测点。

4.2 不同循环质量流量对系统的影响

在循环质量流量增加的情况下,换热器的性能表现有所下降。如果传输面积保持不变,那么传输性能的降低将是不可避免的。此外, TI05的高温端出口与低温端入口的温度均有所上升。随着循环的质量流速的增加,换热器的换热损耗也会相应扩大,导致二级回热器的换热效率降低。因此, TI04、TI05的观察点的温度也会相应上升。

结论

本文通过设计液氮冷源超导磁体氮气循环预冷系统,以优化低温氮气循环系统,为了减少热量传递过程中的损失采用液氮作为初始冷却媒介,提高了整个系统的循环冷却效率,不仅有效解决了室内动力循环中热传递效率低下的问题,还实现了在降低输入能量的同时,大量获取低温冷却的效果。

参考文献

- [1]段罗斌,黄天亮,胡咸军等.基于液氮预冷的 $20K$ 低温氮气循环系统设计[J].真空与低温,2023,29(04):387-391.
- [2]崔雨琦,欧阳嵘,李俊杰等.基于液氮冷源超导磁体氮气循环预冷系统设计[J].低温工程,2022,(01):10-16.
- [3]杨林德,王汉斌,单李军等.CAEPFEL-THz $2K$ 低温系统氮气循环利用研究[J].低温与超导,2019,47(03):8-11.
- [4]苏玉磊,卞荣耀,叶海峰等. $20K$ 氮气循环低温系统的研制[J].低温与超导,2017,45(01):38-41+50.