



全国产氦液化器的性能调控优化研究及其工程化应用

潘薇, 杨少柒, 谢秀娟*, 徐向东, 路飞飞, 王云龙, 刘立强, 龚领会

中国科学院理化技术研究所, 航天低温推进剂技术国家重点实验室, 北京 100190

* 联系人, E-mail: xiexiujuan@mail.ipc.ac.cn

2022-03-15 收稿, 2022-05-31 修回, 2022-06-01 接受, 2022-06-01 网络版发表

国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2014-1)和航天低温推进剂技术国家重点实验室开放研究课题(SKLTSCP202011)资助

摘要 超导磁体一般工作在液氦温区(-269°C), 需要稳定可靠的冷源为其提供保障. 为满足未来高能量粒子对撞机所需高场强超导二极磁体研究的测试需求, 本文针对自主研制的国内首台全国产氦液化器开展了性能调控优化研究, 分别实现了冷箱和液氮杜瓦降温过程的优化控制, 节省压缩机功耗分别为12.3%和25.2%, 显著提高了氦液化器的经济性. 在此基础上, 针对用户现场不同运行工况, 实现了氦液化器适应变负荷的自动控制调节功能. 分析了氦液化器在各负荷状态下的运行能耗; 在不考虑液氮消耗的前提下, 氦液化器最低能耗为 2.4 kW h/L . 通过调控优化及实验测试, 成功实现了氦液化器与用户端磁体测试平台的联合运行, 并通过了全国产氦液化器的长时间运行可靠性测试, 满足了磁体测试系统对其低温制冷系统在稳定性和可靠性方面的要求. 目前, 该氦液化器已累计稳定运行超过两个月, 生产液氮超过 35000 L , 推动首台国产化加速器高场强超导二极磁体取得了 12.47 T 磁场强度新指标的突破. 这是全国产氦液化器首次应用于超导二极磁体测试平台, 该工程应用未来可进行进一步推广.

关键词 全国产氦液化器, 超导磁体测试平台, 降温过程优化控制, 变负荷自动控制调节, 高场强超导二极磁体

超导磁体和超导腔是现代大科学装置的核心设备, 通常需要液氮(-269°C)及其以下工作温区, 因此大科学装置都需要大型氦低温制冷系统来为其提供稳定可靠的低温环境. 国际上欧洲核子研究中心(European Organization for Nuclear Research, CERN)的高光度大型强子对撞机(High-Luminosity Large Hadron Collider, HL-LHC)^[1]、国际热核聚变实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)^[2]、欧洲散裂中子源(European Spallation Source, ESS)^[3]、美国布鲁克海文国家实验室(Brookhaven National Laboratory, BNL)的相对论重离子对撞机(Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC)^[4]、日本高能加速器研究组织(High Energy Accelerator Research Organization, KEK)的正负电子对撞机(KEK B-Factor, KEKB)^[5]、德国电子同步加速器

(Deutsches Elektronen Synchrotron, DESY)的X射线自由电子激光器(X-ray Free Electron Laser, XFEL)^[6]等, 国内先进实验超导托卡马克(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)^[7]、加速器驱动嬗变研究装置(China Initiative Accelerator Driven System, CIADS)^[8]、强流重离子加速装置(High Intensity Heavy-ion Accelerator Facility, HIAF)^[9]、上海硬X射线自由电子激光装置(Shanghai High Repetition Rate XFEL and Extreme Light Facility, SHINE)^[10]、北京大学自由电子激光(Peking University Free Electron Laser, PKU-FEL)^[11]等, 这些装置全部采用了液氮或超流氦来冷却超导磁体和超导腔, 用来维持其长期稳定运行.

高能量粒子对撞机是向物质结构更深层次探索的主要工具, 它需要更高场强的磁体来实现对更高能量

引用格式: 潘薇, 杨少柒, 谢秀娟, 等. 全国产氦液化器的性能调控优化研究及其工程化应用. 科学通报, 2022, 67: 4009–4016

Pan W, Yang S Q, Xie X J, et al. The performance regulation optimization and engineering application of a domestic helium liquefier (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 4009–4016, doi: 10.1360/TB-2022-0282

带电粒子束流的轨迹及尺寸控制,而在其有限的隧道空间内,考虑到运行功率和造价,具有高载流密度的超导材料是最佳选择^[12]。二极磁体和四极磁体是加速器中实现将带电粒子加速到更高能量并且不偏离运转轨道的主要部件。因此,高场强超导二极磁体是未来高能粒子对撞机中的核心装备,其性能直接决定着对撞机能够达到的最高能量^[13]。

中国科学院高能物理研究所(以下简称高能所)的研究者开展了高场强超导二极实验磁体的研制工作,前期已将场强提高到了10.71 T^[13]。而未来高能粒子对撞机中需要场强高达20 T的加速器二极磁体来偏转粒子^[14],因此还需进一步开展高场强超导磁体技术研究。目前,国内大科学装置的超导磁体测试多采用液氮浸泡冷却或迫流冷却的方式^[15],通过购买液氮或进口氦液化器自产液氮来满足其对低温环境的需求。而高场强超导二极磁体热负荷大,采用液氮浸泡冷却方式测试所需液氮量大,且测试持续时间长,对氦低温制冷系统的稳定性和经济性提出了更高的要求,国内尚没有实现国产氦液化器自产液氮对超导二极磁体冷却的工程应用。因此,本文将自主研发的全国产氦液化器首次应用于高能所超导磁体性能测试平台,形成氦气全回收再液化的闭环测试系统,并对氦液化器进行了调控优化研究,满足了磁体测试系统对氦液化器长期运行的经济性、稳定性和可靠性要求。通过实验及分析,

确定了氦液化器最优运行策略,联合磁体测试平台进行了长期运行可靠性测试,为后续相关工程应用奠定了技术基础。

1 应用全国产氦液化器的超导二极磁体测试平台

高能所超导二极磁体采用液氮浸没冷却方式进行性能测试,其测试平台流程图(process flow diagram, PFD)如图1所示。测试平台主要包括氦液化器、液氮杜瓦、超导二极磁体垂测杜瓦、氦气回收纯化系统及氦气缓冲罐等。超导二极磁体垂测杜瓦是测试平台的关键部件之一,主要用于储存液氮和进行超导二极磁体低温性能测试。氦液化器主要为超导二极磁体低温性能测试提供持续稳定的液氮,是超导二极磁体测试平台的重要保障系统。液氮杜瓦为2000 L容量,主要用于存储氦液化器产生的液氮,并向垂测杜瓦输送液氮。超导二极磁体垂测杜瓦工作过程中蒸发的氦气经过氦气回收纯化系统增压纯化后注入氦气缓冲罐存储。氦气缓冲罐向氦液化器持续提供高纯氦气用于生产液氮。超导二极磁体在低温下进行多次励磁、失超等实验,需要大量的液氮,故需氦液化器持续稳定高效运行,满足超导二极磁体测试需求。

该超导二极磁体测试平台采用中国科学院理化技术研究所(以下简称理化所)自主研发的全国产氦液化

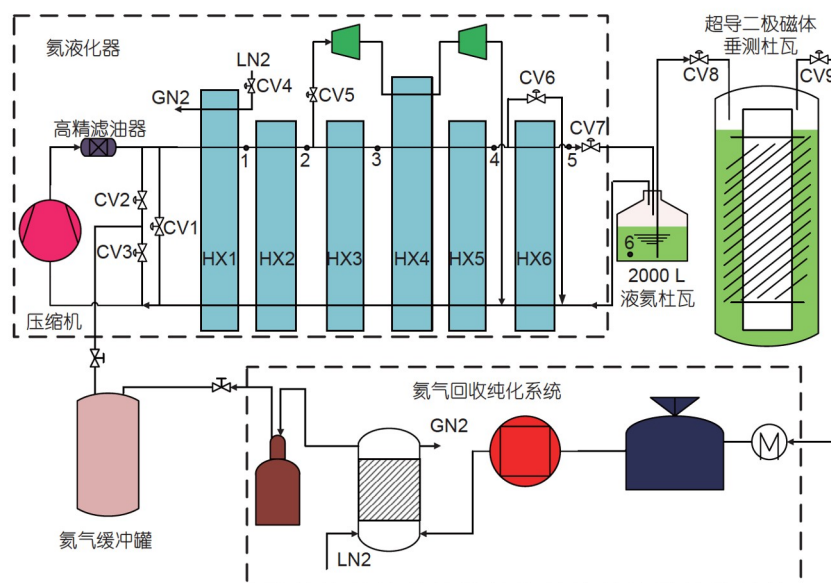


图1 (网络版彩色)应用全国产氦液化器的超导二极磁体测试流程图

Figure 1 (Color online) Process flow diagram of using a domestic helium liquefier for the superconducting dipole magnet test

器。该氮液化器系统基于修正的克劳特循环实现氮液化,其流程图(PFD)如图1所示。具体工作原理为:低压氮气经过压缩机增压后,通过高精滤油器将杂质去除,进入液氮预冷级降温;预冷后氮气分成两路,一路(透平路)进入串联的两级透平膨胀机膨胀产生冷量,与杜瓦回气混合冷却;另一路高压氮气(节流路)被回气冷却后进入节流阀,通过等焓减压降温实现氮气液化;低温换热器实现冷量回收,提升系统能效。

该系统主要包括室温高效氮气喷油式螺杆压缩机、高精滤油器、气体管理子系统(常温气动调节阀组)、低温冷箱(包括一对串联高速氮气轴承透平膨胀机、多级多股流紧凑型低漏率换热器、低温气动调节阀等)、低温传输管线等部件和设备。其中,氮气喷油式螺杆压缩机可实现20~50 Hz变频控制,最大流量为57 g/s;紧凑型低漏率换热器采用板翅式换热器,换热效能 $\geq 95\%$;高速氮气轴承透平膨胀机实测最高转速 ≥ 230 kr/min,等熵效率 $\geq 65\%$;整机集成调控由理化所自主完成,达到设计指标^[16]。

为满足超导二极磁体测试需求,需要对该氮液化器的性能进行进一步的调控优化研究,以满足高强度磁体测试对氮液化器长期运行稳定性、可靠性和经济性的需求。

2 全国产氮液化器性能调控优化研究

2.1 冷箱降温过程调控优化研究

氮液化器实现液化,需要冷箱内各低温部件降温至设计温度。冷箱降温所需的冷量主要来源于预冷级液氮、透平膨胀机膨胀制冷和节流阀节流效应产生的冷量。如图1所示,液氮供应量由低温控制阀门CV4控制,液氮供应速率受换热器材质限制,过大的降温速率会引起换热器热应力过大而出现裂纹,降温速率不得超过2 K/min。采取液氮路出口温度和T1点的温度控制分别与阀门CV4形成控制回路,来保证一级换热器的降温速率。液氮预冷级换热器降温时间基本固定。因此,冷箱降温过程优化主要针对第二级至第六级换热器的降温过程进行优化。

透平膨胀机膨胀产生的冷量由透平膨胀机的膨胀功决定。透平采用气体轴承支撑风机制动。受透平材质和结构限制,转速不允许超过设定转速,透平转速由低温控制阀门CV5控制。低温控制阀门CV6用于降温过程中冷箱内部旁通,使得经过液氮预冷的低温气体带入

冷箱换热器的高压侧,经过控制阀门CV6回到低压侧形成循环,加快冷箱降温。在液氮杜瓦接入系统之前,T5所在测点是换热器HEX6出口的一段死容积,不能反映冷箱降温速率。因此,选择图1中的T3和T4点作为冷箱的温度监测点,比较不同降温策略对冷箱降温过程的影响,如图2所示。

图2给出了不同降温策略下冷箱降温曲线。由于一级换热器采用液氮预冷,降温时间基本固定。图2以一级换热器高压出口温度T1冷却到82 K为初始时刻。实验一为T1冷却到82 K后,经过13.7 h后开启透平,此时T3温度为211 K。由于透平开启引起冷箱流量变大,造成T3小幅上升;随后透平投入工作,产生大量冷量,T3和T4迅速下降。经过13.4 h,T4降到46 K接通2000 L杜瓦;随着杜瓦热负载的接入,T4小幅上升且降温速率变小。整个冷箱降温时间为50.4 h。实验二为T1冷却到82 K后,经过0.8 h后立刻开启透平,此时T3温度为268 K。经过15.6 h,T4降到54 K接通2000 L杜瓦。整个冷箱降温时间为39.2 h。

比较实验一和实验二结果可知,在透平、冷箱旁通控制不变及液氮杜瓦连通条件为 50 ± 5 K范围内时,在透平允许启动条件下,实验二可节省整个冷箱降温过程压缩机功耗约1200 kW·h,节约压缩机功耗12.3%,提升了冷箱降温过程的经济性。

2.2 液氮杜瓦降温过程调控优化研究

低温控制阀门CV7用于控制进入液氮杜瓦的低温氮气,其与二级透平出口温度形成控制回路。CV7的开

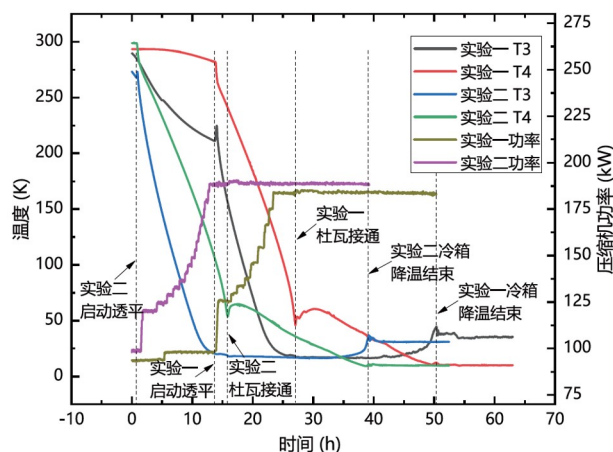


图2 不同降温策略下冷箱降温曲线
Figure 2 The cooling curve of the cold box under different cooling strategies

启时间决定了液氮杜瓦的降温时间。采用T4测点温度反映接通液氮杜瓦时冷箱降温程度, T6测点温度反映液氮杜瓦内的温度情况。比较不同降温策略对液氮杜瓦降温过程的影响, 如图3所示。

图3给出了不同降温策略下液氮杜瓦降温曲线。液氮杜瓦降温起始时间为CV7开启时间。CV7开启后, 液氮杜瓦热负载接入氮液化器, 热冲击会引起T4小幅上升, 随后持续下降至设计温度; 由于冷氮气持续进入液氮杜瓦, T6快速下降。实验一为T4冷却至251 K时打开控制阀门CV7, 液氮杜瓦温度T6从常温开始降温至目标温度耗时约31.3 h。实验二为T4冷却至54 K时打开CV7, 液氮杜瓦温度T6从常温开始降温至目标温度耗时约23.4 h。

比较实验一和实验二结果可知, 在冷箱降温策略不变的情况下, T4冷却至适当低温接通液氮杜瓦, 液氮杜瓦降温时间越短。实验二可节省液氮杜瓦降温过程中的压缩机功耗约1548 kW h, 节约压缩机功耗25.2%, 提升了液氮杜瓦降温过程经济性。

2.3 氮液化器适应变负荷自动控制调节

氮液化器持续产生冷量将液氮杜瓦降温至液氮温度(4.37 K)后, 液氮杜瓦开始积液。液氮杜瓦自带超导液位计测量并显示液氮液位。此时, 氮液化器工作状态不变, CV7节流后气液分离并将液氮存储在液氮杜瓦内, 液氮液位逐渐上升, 需要氮气缓冲罐持续向液化器内补充高纯氮气。因此, 氮气缓冲罐的补气量与液氮产量一致。

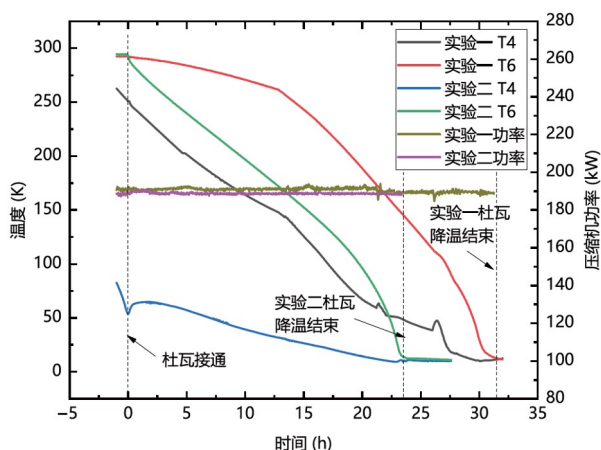


图3 不同降温策略下液氮杜瓦降温曲线
Figure 3 The cooling curve of the liquid helium Dewar under different cooling strategies

氮气缓冲罐中氮气标况下体积为

$$V_N = \frac{T_N}{T_0} \frac{p_0}{p_N} V_0, \quad (1)$$

式中, V 代表体积, T 代表温度, p 代表压力; 下标N代表标况下参数, 下标0代表实际工况下参数。

将液化的氮气质量转化为液氮饱和压力下质量即可得到液氮产量。因此, 氮液化器在 Δt 时间内产生的液氮质量为

$$m_L = m_g = \rho_N \Delta V_N = \frac{\rho_N T_N V_0 p_0}{p_N T_0} \Delta p_0, \quad (2)$$

式中, m 代表质量, ρ 代表密度, ΔV 代表体积差, Δp 代表压差; 下标L代表液态, 下标g代表气态。

实际氮液化率与氮气缓冲罐压力降低速率成正比, 即

$$\eta = \frac{m_L}{\rho_s \Delta t} = \frac{\rho_N T_N V_0 p_0}{\rho_s p_N T_0} \frac{\Delta p_0}{\Delta t}, \quad (3)$$

式中, η 代表液化率, 下标s代表饱和和液态。因此, 可通过氮气缓冲罐压力变化速率来衡量氮液化器的液化率。

为了适应高能所超导磁体现场测试条件, 该氮液化器需要满足4种不同工况的运行需求: (1) 氮源充足时制冷机满负荷运行; (2) 向缓冲罐补充氮气时, 为了不造成透平超速联锁, 保证系统平稳运行, 氮液化器适当减速运行; (3) 夜间氮源不能及时补充时, 氮液化器怠速运行; (4) 氮液化器待机运行, 不产生液氮。

实验过程中氮液化器在不同负荷下运行时, 氮气缓冲罐压力变化曲线如图4所示。通过计算可得, 氮液化器在不同负荷下的液化性能如表1所示。其中, 氮气缓冲罐实际体积 V_0 为102 m³, 实际温度 T_0 为290 K, 标况压力 p_N 为101.325 kPa, 标况温度 T_N 为273.15 K, 液氮杜瓦内饱和压力 p_s 为111 kPa, 标况下密度和饱和液氮密度通过已知参数查询数据库可得。

经过调控优化, 并通过实验测试验证了该全国产氮液化器实现了适应用户现场复杂多变的运行工况, 在不同负荷间能自动切换运行状态、实现平稳过渡的功能。

为进一步分析该全国产氮液化器稳定运行经济性, 定义了氮液化器的能耗, 即压缩机运行功率与其液化率的比值(单位: kW h/L)。不同负荷状态下, 压缩机运行功率、能耗系数、透平一效率和透平二效率如图5所示。

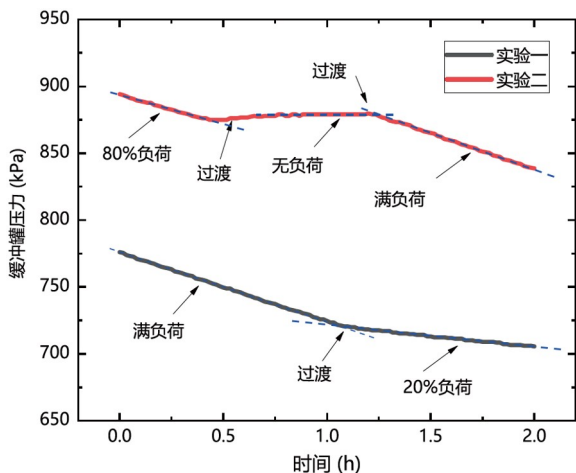


图4 不同负荷下氦气缓冲罐实际压力 p_0 变化曲线
Figure 4 The change curve of actual pressure p_0 of the helium buffer tank under different loads

表1 氦液化器在不同负荷下的液化能力

Table 1 Liquefaction capacities of the helium liquefier under different loads

序号	负荷状态	液化率(L/h)
1	满负荷	72
2	80%负荷	58
3	20%负荷	16
4	无负荷	0

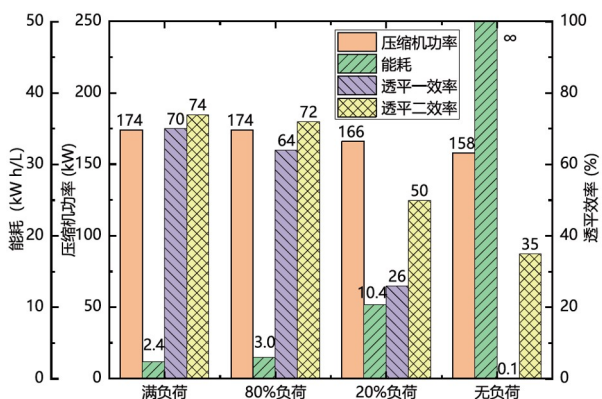


图5 氦液化器在不同负荷状态下的能耗
Figure 5 Energy consumption of the helium liquefier under different loads

比较可知, 满负荷状态下氦液化器的能耗系数最小, 约为2.4 kW h/L, 运行状态最经济. 随着负荷的减小, 压缩机功耗降低较少, 但液化率降低很快. 产生这种现象的原因是满负荷状态时透平运行在设计工况, 各级换热器换热效能最高; 负荷减小时, 透平运行状态

远离设计工况, 绝热效率低于设计工况, 进而引起氦液化器整机性能下降.

3 全国产氦液化器工程化应用实验结果及分析

3.1 氦液化器与超导磁体测试平台联合测试结果

图1所示测试平台在开展高场强超导二极磁体测试过程中, 首先启动氦液化器降温并出液, 并将生成的液氢存储在液氢杜瓦内. 待液氢达到1600 L以上时, 开始向超导二极磁体垂测杜瓦内输送液氢使其逐渐冷却到液氢温度. 垂测杜瓦完全冷却并累积一定液位的液氢后, 开展磁场强度、失超控制等性能测试. 测试过程中由于存在磁体热负载及杜瓦漏热等情况, 需要氦液化器持续工作, 并持续向垂测杜瓦输送液氢. 全国产氦液化器配合超导二极磁体联合测试过程中, 2000 L液氢杜瓦内液氢液位变化情况如图6所示.

图6中OA为开始降温后2000 L液氢杜瓦内首次单独积液的阶段. AB为2000 L液氢杜瓦首次向垂测杜瓦快速输液阶段, 此时需要大量液氢给垂测杜瓦降温并积液. BC为垂测杜瓦中超导二极磁体性能测试阶段. CD为2000 L液氢杜瓦再次积液阶段. 随后, 开始2000 L液氢杜瓦向垂测杜瓦快速输液, 到垂测杜瓦中进行超导二极磁体性能测试, 再到2000 L液氢杜瓦单独积液整个过程的多次循环, 从而完成超导二极磁体性能测

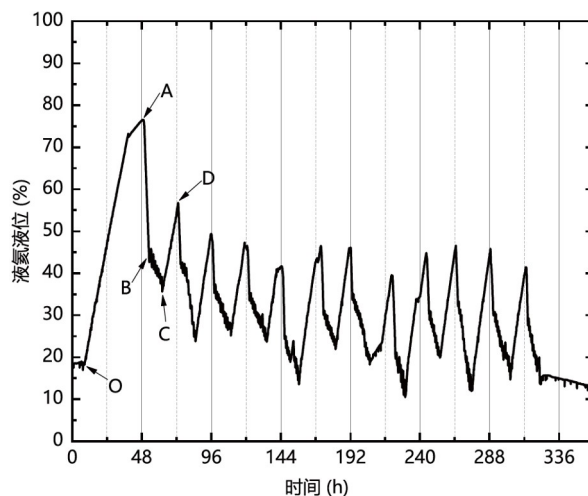


图6 全国产氦液化器联合超导二极磁体测试过程中2000 L液氢杜瓦内液氢液位变化情况

Figure 6 Changes of the liquid helium level in the 2000 L liquid helium Dewar during the test of the superconducting dipole magnet combined with the domestic helium liquefier

试. 每个循环持续时间约为24 h, 本次连续测试约336 h, 验证了氦液化器与磁体测试平台的顺利联合运行.

目前该氦液化器已完成与超导磁体测试平台的3次联合运行, 累计稳定运行超过两个月, 生产液氮超过35000 L.

3.2 氦液化器长期运行可靠性测试

图1中测试平台需要对不同结构和材料组合的超导二极磁体进行大量实验测试, 这就要求氦液化器能够长期稳定工作. 因此, 开展该全国产氦液化器的长期运行可靠性测试是十分必要的.

氦液化器中运动部件为常温的氮压缩机和低温的氮透平膨胀机. 压缩机频率和透平转速作为监测氮压缩机和氮透平膨胀机工作的变量. 该全国产氦液化器3次不同实验的长期运行结果如图7所示.

实验中A点启动压缩机, B点启动透平; 关机时C点关闭透平, D点关闭压缩机. 实验一中, 从压缩机启动到测试完成压缩机停机共运行52 h, 氦液化器工作正常. 实验二中, 从压缩机启动到测试完成压缩机停机共运行485 h. 其中, 由于操作原因, 在E2及F2时刻出现透平联锁停机, G2时刻出现透平和压缩机联锁停机, 但能够复位后迅速启动恢复正常运行. 实验三中, 从压缩机启动到测试完成压缩机停机共运行410 h. 其中, 在E3时刻测试透平和压缩机联锁停机, 在F3时刻测试透平联锁停机, 均能够实现复位后快速启动恢复正常运行. 3次实验结果表明, 该全国产氦液化器可以长期可靠运行, 并满足高场强超导二极磁体的测试研究需求.

该全国产氦液化器的工程应用使国产超导二极磁体在液氮温度4.2 K下双孔径内实现了超过12 T磁场强度, 达到了超导线材临界性能的85%以上, 成为目前国际上唯一采用不同超导材料组合线圈结构达到12 T磁场强度的二极实验磁体^[17].

4 结论

为满足超导二极磁体低温测试需求, 本文开展了全国产氦液化器的性能调控优化研究及其工程化应用, 结论如下: (1) 全国产氦液化器冷箱及液氮杜瓦降温过程的调控优化, 可节省压缩机功耗分别为12.3%和25.2%, 显著提升了非稳态降温过程的经济性. (2) 氦液化器实现了满负荷、80%负荷、20%负荷及无负荷的多工况自动控制调节, 在满负荷状态下运行可实现

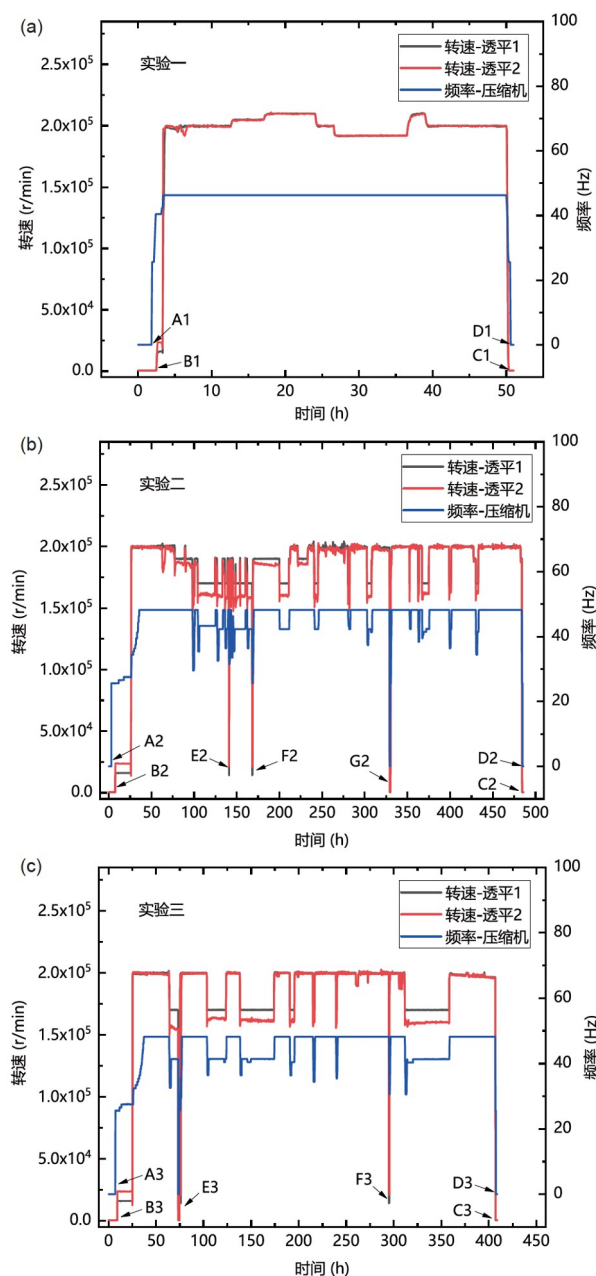


图7 全国产氦液化器在实验一(a)、实验二(b)和实验三(c)中长期运行结果

Figure 7 The long-term operation results of the domestic helium liquefier in Experiment 1 (a), Experiment 2 (b) and Experiment 3 (c)

2.4 kW h/L的氦液化能耗(不考虑液氮消耗), 经济性最高. (3) 通过多次联合测试, 验证了氦液化器的长期运行可靠性. 这是全国产氦液化器首次工程应用于超导二极磁体测试平台, 未来该工程应用可进行进一步推广, 这对我国超导磁体技术的长期发展具有重要意义.

参考文献

- 1 Bradu B. Dynamic simulations of the HL-LHC cryogenic system during beam operation. *Cryogenics*, 2021, 113: 103214
- 2 Monneret E, Benkheira L, Fauve E, et al. ITER cryoplant final design and construction. In: 26th International Cryogenic Engineering Conference & International Cryogenic Materials Conference 2016. New Delhi: IOP Publishing, 2017, 171: 012031
- 3 Wang X L, Arnold P, Hees W, et al. ESS accelerator cryoplant process design. In: Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference 2015. Tucson: IOP Publishing, 2015, 101: 012012
- 4 Than R, Tuozzolo J, Sidi-Yekhelef A, et al. The Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) cryogenic system at Brookhaven National Laboratory: Review of the modifications and upgrades since 2002 and planned improvements. *Adv Cryog Eng*, 2008, 985: 578–587
- 5 Kabe A, Hara K, Hosoyama K, et al. Cryogenic system for KEKB superconducting RF cavities. *Adv Cryog Eng*, 2000, 45: 1347–1354
- 6 Polinskia J, Chorowska M, Duda P, et al. Design and commissioning of vertical test cryostats for XFEL superconducting cavities measurements. *Adv Cryog Eng*, 2014, 1573: 1214–1221
- 7 Qiu L L. Simulation analysis and experiment study of the helium refrigeration system for superconducting Tokamak (in Chinese). Doctor Dissertation. Hefei: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012 [邱立龙. 超导托卡马克大型氦制冷系统模拟分析及实验研究. 博士学位论文. 合肥: 中国科学院研究生院, 2012]
- 8 Niu X F, Bai F, Wang X J, et al. 2 K cryogenic system development for superconducting cavity testing of CiADS. *Cryogenics*, 2021, 115: 103247
- 9 Niu X F, Bai F, Wang X J, et al. Cryogenic system design for HIAF iLinac. *Nucl Sci Tech*, 2019, 30: 178
- 10 Jiang G Y, Ni Q, Wang S H, et al. The cryogenic control system of SHINE. *EPJ Tech Instrum*, 2021, 8: 11
- 11 Xiong L Y, Peng N, Lu W H, et al. Cryogenic system for PKU-FEL. *J Mod Phys*, 2013, 4: 1–4
- 12 Jin S, Xu Q J. Cutting-edge technology in the large circular collider (in Chinese). *Mod Phys*, 2020, 32: 27–35 [靳松, 徐庆金. 大型环形对撞机中的前沿技术. 现代物理知识, 2020, 32: 27–35]
- 13 Wang C T, Xu Q J. Superconducting magnet technology on particle collider (in Chinese). *Sci 24h*, 2020, 10: 14–17 [王呈涛, 徐庆金. 粒子对撞机上的超导磁体技术. 科学24小时, 2020, 10: 14–17]
- 14 Zhang K, Xu Q J, Wang C T, et al. Mechanical analysis and research of 20 T dipole magnets in superconducting accelerator of super proton-proton collider (in Chinese). In: 12th National Conference of Cryogenic Engineering, 2015. 596–601 [张恺, 徐庆金, 王呈涛, 等. 超级质子对撞机20 T超导加速器二极磁体的力学分析与研究. 见: 第十二届全国低温工程大会, 2015. 596–601]
- 15 Green M A. Helium cooling systems for large superconducting physics detector magnets. *Cryogenics*, 1992, 32: 126–129
- 16 Xie X J, Yang S Q, Deng B C, et al. Integration and commissioning of a full localization 250 W@4.5 K helium refrigerator at TIPC. In: 27th International Cryogenics Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference 2018. Oxford: IOP Publishing, 2019, 502: 012013
- 17 Ni S J. The field strength of domestic superconducting dipole magnets reaches 12 Tesla (in Chinese). *China Science Daily*, 2021-06-18 [倪思洁. 国产超导二极磁体场强达12特斯拉. 中国科学报, 2021-06-18]

Summary for “全国产氦液化器的性能调控优化研究及其工程化应用”

The performance regulation optimization and engineering application of a domestic helium liquefier

Wei Pan, Shaoqi Yang, Xiujuan Xie^{*}, Xiangdong Xu, Feifei Lu, Yunlong Wang, Liqiang Liu & Linghui Gong

State Key Laboratory of Technologies in Space Cryogenic Propellants, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

^{*} Corresponding author, E-mail: xiexiujuan@mail.ipc.ac.cn

The superconducting magnets and the superconducting cavities are the key devices of large-scale scientific facilities, such as the HL-LHC in the CERN, the ITER, the EAST, the CiADS, and so on. A stable and reliable cold source such as the liquid helium (-269°C) is required to keep the superconducting magnets and the superconducting cavities working. Therefore, a helium liquefier or a helium refrigerator working at 4.5 K is necessary for them. Research on high-field-strength superconducting dipole magnets used in future high-energy particle colliders is developed in the Institute of High Energy Physics of the Chinese Academy of Sciences. High-field-strength superconducting dipole magnets have large thermal loads and long test durations, which need large amount of liquid helium for their performance tests. Therefore, the long-term operating economy, stability, and reliability of the refrigeration system are highly required. The engineering application of using a helium liquefier for producing liquid helium to cool down superconducting dipole magnets has not been realized in China yet. Meanwhile, the price of the imported helium liquefiers is usually too high and the supply cycles are too long. Fortunately, a domestic helium liquefier has been developed by the Technical Institute of Physics and Chemistry of the Chinese Academy of Sciences. This paper will realize the engineering application of the domestic helium liquefier applied to the superconducting dipole magnet test platform for the first time. In order to meet the test requirements of high-field-strength superconducting dipole magnets, a performance regulation and optimization of the first domestic helium liquefier is studied. It realizes the optimal control of the cold-box cooling process and the Dewar cooling process, saves the power consumption of the compressor by 12.3% and 25.2% respectively, and significantly improves the economy of the helium liquefier. After the commissioning of the liquefier, the helium liquefier realizes the automatic control adjustment function to adapt to variable loads in different operating conditions. And the specific energy consumption of the helium liquefier under each load state is analyzed. Without considering the consumption of liquid nitrogen, the minimum specific energy consumption of the helium liquefier is 2.4 kW h/L when the liquefier works with the full load. Through control optimization and experimental testing, the helium liquefier successfully realizes the joint operation with the user-end superconducting dipole magnet test platform, and passed the long-term operation reliability test. At present, the helium liquefier has run stably for more than two months, produced more than 35000 L of liquid helium, promoting the first domestic accelerator high-field superconducting dipole magnet to achieve a breakthrough in the new index of the magnetic field strength of 12.47 T. It's the first time for the domestic helium liquefier applying to the superconducting dipole magnet test platform, and this engineering application can be further promoted in future.

domestic helium liquefier, superconducting magnet test platform, optimized control of the cooling process, automatic control and adjustment of variable load, high-field-strength superconducting dipole magnet

doi: [10.1360/TB-2022-0282](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0282)