

# 超导托卡马克装置中脉冲热负荷的调控方法

薛瑞<sup>1,2</sup>, 杨少柒<sup>1</sup>, 谢秀娟<sup>1\*</sup>, 潘薇<sup>1</sup>, 王云龙<sup>1</sup>, 龚领会<sup>1</sup>

(1. 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;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 由于超导托卡马克装置等聚变实验设备运行过程会产生较强的脉冲热负荷, 这将对配备的氦低温制冷系统的稳定运行提出更加苛刻的要求。本文介绍了大型氦低温制冷系统的一般流程, 对比了三种超导托卡马克装置中产生的脉冲热负荷特征, 并系统分析了超导托卡马克装置中低温制冷系统应对不同脉冲热负荷时的调控方法, 为此类低温制冷系统的调控提供工程经验。

**关键词:** 脉冲热负荷; 大型氦低温制冷系统; 稳定运行; 调控方法; 超导托卡马克装置

中图分类号: TB657

文献标志码: A

文章编号: 1006-7086(2020)03-0219-08

DOI: 10.3969/j.issn.1006-7086.2020.03.008

## Commissioning Method of Pulse Heat Load in Superconducting Tokamak Device

XUE Rui<sup>1,2</sup>, YANG Shaoqi<sup>1</sup>, XIE Xiujuan<sup>1\*</sup>, PAN Wei<sup>1</sup>, WANG Yunlong<sup>1</sup>, GONG Linghui<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Technologies in Space Cryogenic Propellants,  
Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The stable operation of the helium cryogenic refrigeration system equipped with the superconducting tokamak device will be more demanding due to the strong pulse heat load generated during the operation of such fusion experimental equipment. In this paper, a general process of large-scale helium cryogenic system is introduced. The characteristics of pulsed heat load generated in three different superconducting Tokamak devices are compared. The commissioning methods of the cryogenic system in superconducting Tokamak devices scoping with pulsed heat load are systematically analyzed, which can be applied to other similar cryogenic system.

**Key words:** pulsed heat load; large-scale helium cryogenic system; commissioning method for stable operation; superconducting Tokamak device

## 0 引言

大科学工程一般用于基础科学研究, 推动着国家科学事业的发展, 是一个国家综合竞争力以及科学技术水平的标志。据报道, 截至2011年, 在国际合作的众多大科学工程中, 50%以上配有氦制冷系统, 这一数据在美国和中国境内, 分别可以达到80%和60%以上。目前, 大型低温制冷系统广泛地

应用于超导设备、热核聚变工程和科学实验研究等领域<sup>[1]</sup>, 并且推动着前沿科技的迅速发展。国际上, 用于高能物理研究的大型科学实验研究装置, 如欧洲核子中心大型强子对撞机(LHC)、国际磁约束可控热核聚变实验堆(ITER)、欧洲散列中子源(ESS)等普遍使用大型超导器件和真空设备, 需要多台4.5 K等效制冷量在万瓦以上的大型氦低温制冷系统为

收稿日期: 2019-11-15

基金项目: 财政部国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2014-1)

作者简介: 薛瑞, 硕士研究生, 主要从事大型低温制冷系统调控研究。E-mail: xuerui18@mails.ucas.ac.cn。

通信作者: 谢秀娟, 研究员, 博士生导师, 主要从事大型低温制冷系统的集成与调控研究。E-mail: xiexiujuan@mail.ipc.ac.cn。

引用本文: 薛瑞, 杨少柒, 谢秀娟, 等. 超导托卡马克装置中脉冲热负荷的调控方法[J]. 真空与低温, 2020, 26(3): 219-226.

XUE R, YANG S Q, XIE X J, et al. Commissioning method of pulse heat load in superconducting tokamak device[J]. Vacuum and Cryogenics, 2020, 26(3): 219-226.

其提供低温环境。国内具有代表性的大科学装置有全超导托卡马克核聚变实验装置(EAST)、北京正负电子对撞机(BEPC)及二期工程(BEPCII)、上海光源(SSRF)等。我国自“十一五”以来启动的国家重大科技基础设施建设项目,比如正在建设中的强流重离子加速器装置(HIAF)、加速器驱动嬗变研究装置(CiADS)、上海硬 X 射线自由电子激光装置(SHX-FEL)、中国聚变工程实验堆(CFETR)等,这些国家重大科技基础设施也都需要液氮到超流氦温区的大型氦低温制冷系统为其提供必须的低温环境。

超导托卡马克装置是目前热核聚变领域实现可控核聚变的一种重要试验装置,其配备的氦低温制冷系统主要用来冷却超导设备,以产生足够的强磁场来约束核聚变过程产生的高温等离子体<sup>[2]</sup>。通常情况下,低温制冷机是根据稳定热负荷进行设计的,而超导托卡马克装置运行过程中超导设备产生的热负荷会发生变化。这种波动的热负荷会对氦低温制冷系统的高、低压快速稳定、压缩机变频调节、透平最大转速有效控制、低温容器内(液氮杜瓦等)压力的调控等工作过程带来不利的影响,比如引发关键部件的报警,甚至导致制冷系统连锁停机。因此,在满足低温用户冷却要求的同时,需要在制冷机和低温用户之间采取相应的调控方法,以保证制冷机在热负荷发生变化的情况下也能够稳定运行。本文主要对比了三种超导托卡马克装置中产生的脉冲热负荷特征,并系统分析了超导托卡马克装置中氦低温制冷系统稳定运行的调控方法及其工作特点,为后续此类大型低温制冷系统的调控提供工程经验。

## 1 大型氦低温制冷系统的一般流程

大型低温制冷系统的流程框图如图 1 所示,开机过程首先要开启压缩机小循环,气体管理面板控制加载阀将缓冲罐内的氦气通入制冷系统。首先氦气进入螺杆压缩机被压缩成常温高压的气体,压缩过程会向压缩机内喷射大量的油以起到冷却作用,同时对压缩过程还可以起到润滑和密封的作用。此时压缩机出口的高压氦气中会混有较多的油杂质,须要通过高精滤器系统将油组分的浓度降低到  $10^{-9}$  ug/kg 量级后,再通入冷箱降温,以保证系统的可靠运行。此外,高压氦气还需要继续通过外纯化器,利用低温吸附原理对氦气进一步纯化,保证氦气内水、氮和碳氢化合物等杂质含量降低至要求的范围内。同时,利用气体管理面板的调节,保证

压缩机小循环内高压和低压的稳定。在该循环稳定运行后,连通冷箱的高低压球阀打开,高压氦气进入冷箱(内含低温换热器、透平膨胀机和节流阀等)实现逐级降温,最终通过节流阀节流获得制冷量,然后通过低温分配系统和低温传输管线将低温流体输送至低温用户用以冷却热负载。蒸发后的低压氦气回流至冷箱,通过换热器将部分冷量回收至高压氦气流中,最后进入压缩机完成一次循环<sup>[3]</sup>。

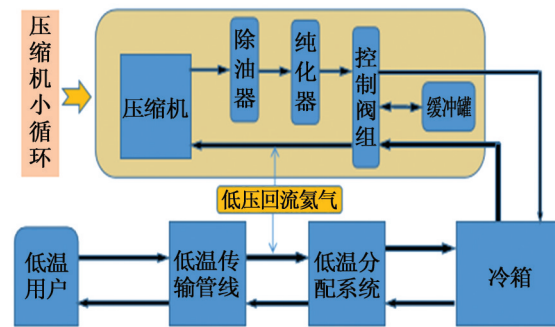


图 1 大型低温制冷系统流程框图

Fig. 1 Flow diagram of large cryogenic system

以国际热核聚变实验堆 ITER 为例,其低温用户主要是超导磁体系统,包括环形场线圈、极向场线圈、中心螺线管以及磁体支撑结构等。其他的低温用户还包括低温泵系统、冷屏系统、电流导线等。通过在制冷机和用户之间设置的低温分配系统,可以将冷量合理地分配给各个低温用户,同时可以削弱脉冲热负荷对制冷机稳定运行产生的不利影响<sup>[4-5]</sup>。

## 2 超导托卡马克装置中的脉冲热负荷

在超导托卡马克实验装置运行过程中,由于磁场的变化导致了磁体系统内产生大量的热沉积,同时聚变过程短时间内也会产生大量的热量<sup>[6]</sup>,这会造成低温用户产生周期性变化的热负荷,即脉冲热负荷,进而导致氦低温制冷系统低压回流氦气的质量和压力产生波动。

表 1 给出了三种超导托卡马克装置中的脉冲热负荷参数,分别来自国际热核聚变实验堆 ITER<sup>[7]</sup>、首次采用  $\text{Sn}_3\text{Ni}$  超导材料的全超导托卡马克装置 KSTAR<sup>[8]</sup>和 Kuendig 等<sup>[9]</sup>提出的一种托卡马克实验装置。从表 1 可以看出,三种超导托卡马克装置运行过程中低热负荷阶段需要的制冷量约为高热负荷阶段的 50%~80% 不等,相应的高、低热负荷阶段持续时间以及两种热负荷之间的过渡时间存在较大的差异。因此,低温制冷系统需要根据脉冲热负荷特征制定不同的调控策略,在满足低温用户对制冷

量需求的同时,保证系统的稳定运行。

表1 三种超导托卡马克热核聚变装置的脉冲热负荷参数

Tab. 1 Pulse thermal load parameters of three superconducting Tokamak thermonuclear fusion devices				
负荷阶段	负荷参数	ITER	KSTAR	Kuending
高热负荷阶段	热负荷/kW	30	5.5	24
	持续时间/s	1 500	4 050	1 750
过渡阶段	高热负荷向低热负荷过渡时间/s	1 950	450	1
	低热负荷阶段	热负荷/kW	24	3.3
低热负荷阶段	持续时间/s	1	6 300	1 749
	低热负荷向高热负荷过渡时间/s	149	450	100

### 3 超导托卡马克装置中脉冲热负荷的调控方法

基于不同的超导托卡马克装置,系统分析了不同脉冲热负荷的调控方法以及各种调控方法的工作特点。

#### 3.1 国际热核聚变实验堆ITER中脉冲热负荷的调控方法

##### 3.1.1 利用辅助冷箱的调控方法

在国际热核聚变实验堆ITER的运行过程中,高、低热负荷阶段所产生的热负荷相差6 kW左右。G-Claude等利用磁体支撑结构具有较大热容的特点,将高热负荷阶段产生的部分蒸发氦气通入磁体支撑结构中,以减小高热负荷对低温制冷系统产生的影响。由于该磁体系统所需要的冷量较大,因此采用了循环泵迫流冷却的方式,且制冷机回路和低温用户冷却回路是独立的<sup>[10-11]</sup>,其简化流程如图2所示。该磁体系统的低温分配系统设置了四个辅助冷箱,分别由液氮槽、换热器、旁通阀以及低温循环泵等部件组成,用来冷却三种线圈以及磁体支撑结构<sup>[12]</sup>。在辅助冷箱中,两个换热器被浸泡在液氮槽中,对低温用户产生的回流氦气进行冷却。高热负荷阶段,在调节阀门的协同控制下,确保回流至换热器的氦气流量不超过额定值,保证了换热器的正常工作,并且避免了液氮槽中液位的大量消耗,从而维持了制冷机的稳定运行,辅助冷箱内旁通阀门的流程如图3所示。在高热负荷阶段,该方法依然可以维持磁体支撑结构的温度在5 K以内。在低热负荷阶段,低温制冷系统可以补充液氮槽的液位,并对支撑结构继续冷却降温。

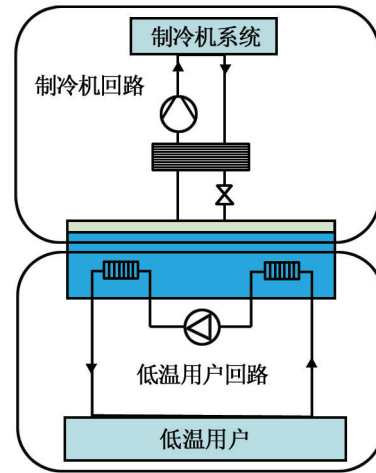


图2 ITER低温分配系统简图

Fig. 2 ITER cryogenic distribution system schematic diagram

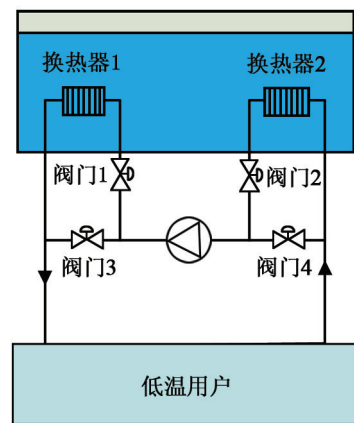


图3 辅助冷箱内部旁通阀门流程图

Fig. 3 By-pass valve control process diagram

##### 3.1.2 利用阀门和液氮罐的调控方法

法液空公司为ITER低温系统提出了一种改进的调控方法:在高热负荷阶段,将热量储存到液氮罐中,在低热负荷阶段,将储存热量所产生的蒸发氦气释放至低温系统以补充回流氦气流量,进而保证制冷机进、出口流量稳定。分别在韩国和日本建成的超导托卡马克聚变装置KSTAR和JT60-SA也采用了类似的调控方法<sup>[13-14]</sup>,这为ITER的设计及调试提供了实验支持。该调控流程示意图<sup>[15]</sup>如图4所示,末级透平出口的氦气被分为两个通路,一个通路在经过状态点3后进入冷旁通阀门,最终汇入低压回流氦气管道;另外一个通路,氦气通过末级换热器冷却后,一部分经过状态点2后通过节流阀产生液氮,并储存在液氮罐中,另一部分经过状态点1后通入一个被浸入液氮中的换热器,产生的过冷液

氦储存在液氦槽中,为低温用户提供冷量。

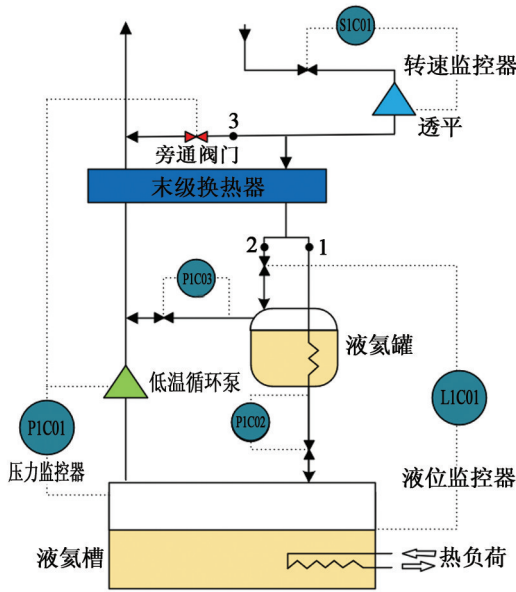


图4 利用阀门和液氦罐组合的流程示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of control flow using combination of valve and liquid helium tank

在高热负荷阶段,用户产生的热负荷超过低温系统提供的制冷量。此时,在阀门控制下,2、3处氦气流量减小,1处流量增加。这将导致液氦罐中液氦的消耗量大于液氦的生成量,进而造成储罐中的液位下降。在低热负荷阶段,用户产生的热负荷低于低温系统提供的制冷量,阀门的变化将与高热负荷阶段相反,此时液氦罐内的液位会有所上升。该方法主要的调控目标是保持透平出口流量以及液氦槽液位的稳定,为此还须设置许多监控器对各环节的压力和温度进行动态调整。

Briend 等<sup>[15]</sup>对该调控方法进行了模拟,发现未使用旁通阀门时,低压回流氦气的质量流量在 1 050 g/s 和 1 350 g/s 之间波动,使用旁通阀门后该波动值由 300 g/s 下降到 80 g/s。Sarkar 等<sup>[16]</sup>通过模拟实验对比了多个低温用户共用一个大型液氦槽和分别独立使用小型液氦槽的区别,模拟结果显示,共用一个大型液氦槽对脉冲热负荷具有更好的控制效果。

图 5 给出液氦槽、液氦罐液位以及脉冲热负荷随时间的变化曲线,可以发现,液氦槽和液氦罐内液位的变化趋势与脉冲热负荷的变化趋势相一致,而且液氦罐中的平均液位出现了下降的趋势,这是由于低温系统的平均制冷量小于用户产生的平均热负荷造成的。

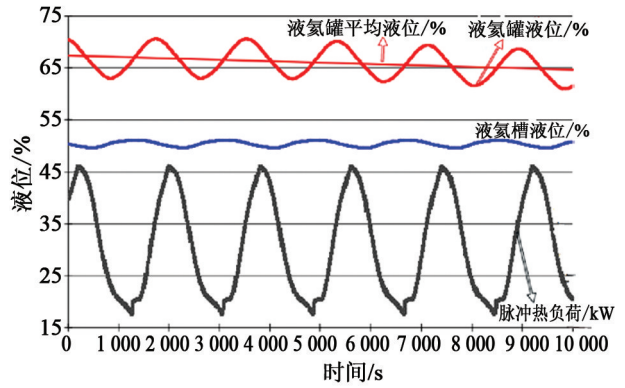


图5 液氦槽、液氦罐液位和脉冲热负荷随时间的变化曲线  
Fig. 5 Changes of level of liquid helium bath and liquid helium tank with pulse heat load

### 3.2 全超导托卡马克装置中脉冲热负荷的调控方法

超导托卡马克物理实验装置(TPX)的环向场和极向场磁体均采用了超导材料,是国际上首个全超导托卡马克装置<sup>[17]</sup>。该装置脉冲热负荷的一个周期是 830 s,高热负荷阶段长达 30 s,会产生高达 5 MJ 的热量,稳定热负荷为 4 kW,一个周期内的平均热负荷为 10 kW。

1994年,Slack 等<sup>[18]</sup>以此为研究对象,提出了一种低温系统的调控方法,基本原理是通过一个未完全充满的液氦杜瓦、换热器、阀门和压力控制器的组合,使低温用户产生的脉冲热负荷被杜瓦内的液氦吸收,并维持制冷机进出口压力及质量流量的稳定,流程如图 6 所示,BPR1 是一个背压控制器(Back Pressure Regulator),可以通过控制阀门开度确保制冷机排气压力和出口氦气流量的稳定。图 6 中的 1、3~13 表示流程的各个状态点。

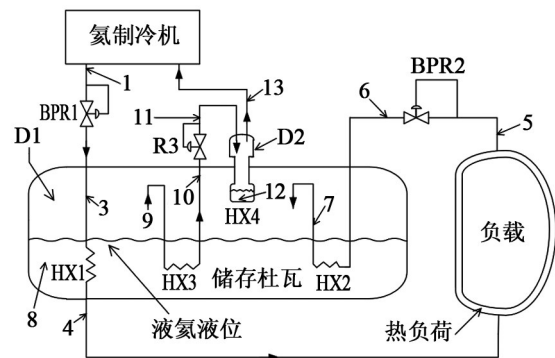


图6 利用液氦杜瓦的调控流程图  
Fig.6 Control flow diagram using liquid helium dewar

由于脉冲热负荷会造成负载压力的变化,于是在负载出口处设置了 BPR2 以维持负载压力在

120 kPa,这样可以保证6处氦气的单相流动。换热器HX1~HX3直接被浸入液氦中,氦制冷机出口的工质氦首先通过HX1被液氦冷却,随后被用来冷却低温用户所产生的热负荷。

在高热负荷条件时,负载端短时间内产生的大量蒸发氦气通过HX2被冷却至饱和蒸气温度,该过程会明显增加液氦杜瓦上部氦气区的压力和温度。状态点9处的氦气必须进入HX3再次降温至饱和温度,然后通过节流阀R3节流后进入气液分离器D2。产生的部分液体通过D2底部的换热器HX4,被液氦杜瓦上部的氦气加热蒸发,随节流后产生的氦气回流至制冷机。低热负荷阶段,该调控方法同样具备稳定运行的能力。

表2对比了脉冲热负荷变化前后各状态点温度、压力、质量流量和焓值的变化情况。可以看出,该调控方法能够保证脉冲热负荷变化前后制冷机进出口温度、压力和焓值的稳定,运行过程中各状态点质量流量也能够保持相对稳定。

表2 脉冲热负荷变化前后各状态点的工况

Tab. 2 The working conditions of each state point before and after the pulse heat load

状态点	温度/°C		压力/kPa		质量流量/(kg·s <sup>-1</sup> )		焓/(J/K)	
	前	后	前	后	前	后	前	后
1	5.40	5.40	101.0	121.2	1.0	1.0	11.94	11.94
4	4.50	5.00	808.0	808.0	1.0	1.0	13.44	15.40
5	5.53	5.82	505.0	595.9	1.0	1.0	17.94	19.40
6	4.42	4.76	121.2	161.6	1.0	1.0	17.44	19.40
7	4.42	4.76	121.2	161.6	1.0	1.0	17.44	19.40
9	4.42	4.76	121.2	161.6	1.0	1.0	29.94	28.98
10	4.42	4.42	121.2	161.6	1.0	1.0	29.94	28.98
11	4.42	4.42	121.2	161.6	1.0	1.0	29.94	28.98
13	4.42	4.42	121.2	121.2	1.0	1.0	29.94	29.84

### 3.3 一种典型的脉冲热负荷调控方法

Dutta等<sup>[19]</sup>为开展托卡马克装置低温制冷系统的研究工作,提出了一种典型的脉冲热负荷。该热负荷一个周期为3 600 s,高、低热负荷分别为24 kW和12 kW,如图7所示。其高、低热负荷持续的时间较为平均,且两种热负荷之间的过渡时间较短。Dutta等基于修改的克劳德循环,从理论上提出了多种该脉冲热负荷的应对方法,并利用软件Aspen HYSYS进行了模拟研究。

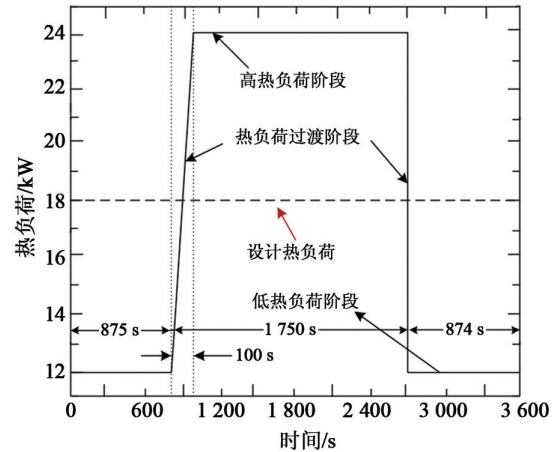


图7 一种典型的脉冲热负荷曲线图

Fig. 7 Diagram of a typical pulse heat load

#### 3.3.1 利用并联换热器的调控方法

通过对J-T阀冷端的分析发现,回流低压氦气质量流量主要由两部分组成:一是J-T阀出口产生的氦气流量;另一部分是低温用户端液氦蒸发所产生的氦气流量。2011年,Dutta等<sup>[19]</sup>提出一种对末级换热器的改造设计,其目的是利用阀门的动态控制改变换热器的有效传热面积,来调整J-T阀出口所产生的氦气流量。其流程形式如图8所示,采用了两个并联的换热器,通过阀门对进入两个换热器的流量进行独立的控制。其中6~8为状态点。

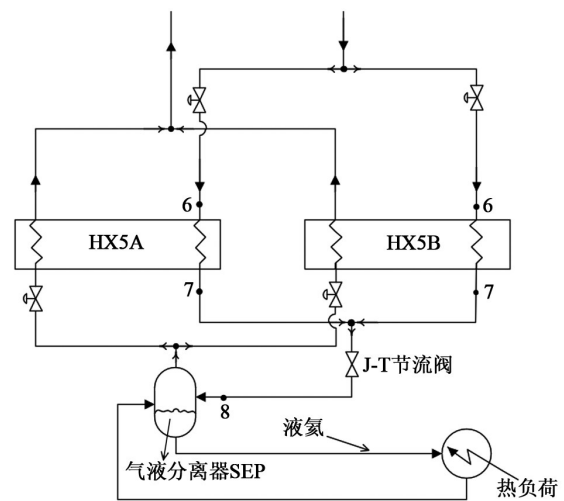


图8 利用并联换热器的流程图

Fig. 8 The control flow diagram using parallel heat exchanger

在高热负荷阶段,高、低压氦气的质量流量被平均分配到两个末级换热器HX5A和HX5B内进行充分换热。此时,由于两台并联的换热器相对于一台换热器,可以回收低压回流氦气中更多的冷量,从而降低了高压氦气出口7处的温度,提高了J-T

阀出口液氮的质量分数,降低了节流后产生的氦气量。在低热负荷阶段,控制阀门关闭其中一个换热器通道,高、低压氦气流通过另外一个换热器进行换热,由于换热器有效传热面积的减小以及低压回流氦气流量的降低,换热器高压氦气出口7处的温度将会升高,从而增加J-T阀出口氦气的质量分数,进而补充低压回流氦气的流量。

### 3.3.2 利用超临界氦缓冲罐的调控方法

氦的临界点温度和压力分别为5.2 K和2.2 MPa,工质氦在超临界缓冲罐中为单相流状态,因此不需要设置气液分离器。超临界氦的密度变化受温度影响较小,具有较小的压缩因子,储罐中允许的压力波动范围较宽。相较于亚临界氦气,同样容积的缓冲罐可以储存更多的超临界氦气。

2012年,Dutta等<sup>[20]</sup>提出了一种新的调控方法,利用超临界氦缓冲罐和阀门的调控,提高回流氦气流量的波动消除率,如图9所示。

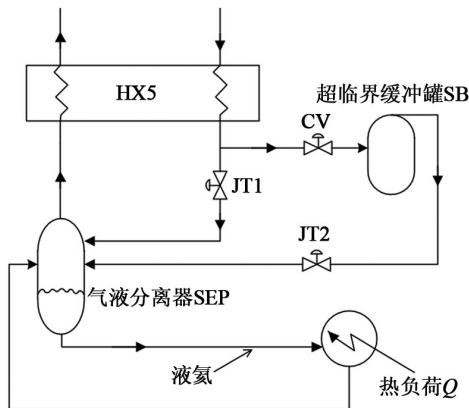


图9 利用超临界氦缓冲罐的流程图

Fig. 9 Control flow diagram of supercritical helium buffer tank

在高热负荷阶段,阀门CV开启,节流阀JT2关闭。一部分超临界氦气充入缓冲罐SB,使得通过节流阀JT1的流量减少,进而减少节流后进入气液分离器SEP的氦气质量流量,从而降低总的低压回流氦气的质量流量;在低热负荷阶段,关闭CV阀门,开启JT2阀门。缓冲罐中的超临界氦气通过节流阀JT2后进入气液分离器SEP,补充了低压回流氦气的质量流量。

通过动态模拟发现,在高、低热负荷阶段,该方法分别可以达到78%和74%的波动消除率。该调控方法的优势是不需要额外的能源消耗,主要利用静态部件,可以很好地适应低温用户,并且可以长期稳定运行。缺点是需要较大体积的缓冲罐和高效阀门控制系统,来保证通入以及排出超临界缓冲罐

时质量流量的稳定<sup>[20]</sup>。

图10给出了气液分离器SEP内液位变化曲线,在高、低热负荷阶段,采用该调控方法均会提高液氮液位的变化速率。原因是增加的超临界缓冲罐使得高热负荷阶段JT1阀门出口的液氮产量降低,而低热负荷阶段通过JT2阀门对气液分离器SEP液氮进行了补充。所以,杜瓦以及缓冲罐的设计须结合脉冲热负荷的特点,使得液氮能够合理地分配。

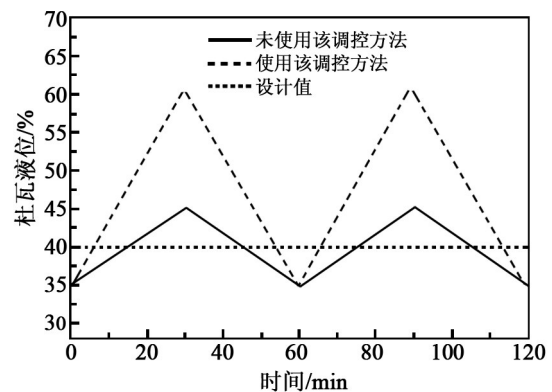


图10 气液分离器SEP液位变化曲线

Fig. 10 Comparison of level changes in gas-liquid separator SEP

### 3.3.3 利用蒸气压缩循环的调控方法

2013年,Dutta等<sup>[21]</sup>提出了一种在冷端增加蒸气压缩循环的流程形式,如图11所示。在高热负荷阶段,部分低压回流氦气在阀门的控制下从气液分离器SEP进入蒸气压缩循环,随后通入末级换热器HX5A、HX5B、HX5C中被冷却降温(该末级换热器为并联形式),最后通过JT2阀门节流后回到气液分离器SEP中。该过程可以减少低压回流氦气流量,并回收一部分进入冷箱的回流氦气的冷量;在低热负荷阶段,由于采用加热蒸发杜瓦中的液氮来补充低压回流氦气的方式,会导致冷压缩机的间断运行,并且造成较大的冷量损失。于是利用了并联换热器在低热负荷阶段的调控优势,通过减少换热器有效传热面积,增加高压氦气出口7处的温度,提高其膨胀后的气体分数,以补充出口13处的低压回流氦气流量。

动态模拟表明,该方法在高、低热负荷阶段均可以使用,分别可以达到70%和96%的波动消除率,配合其他方法,可以基本消除波动热负荷。蒸气压缩循环在低温下具有较高的效率,可以将高热负荷阶段产生的多余冷量回收,提高系统的能效;蒸气压缩循环可以嵌入制冷系统中,冷箱外无须添加设备,节省了空间。但是,此蒸气压缩循环的设计效率高达80%,在技术上仍然面临一定的挑战。

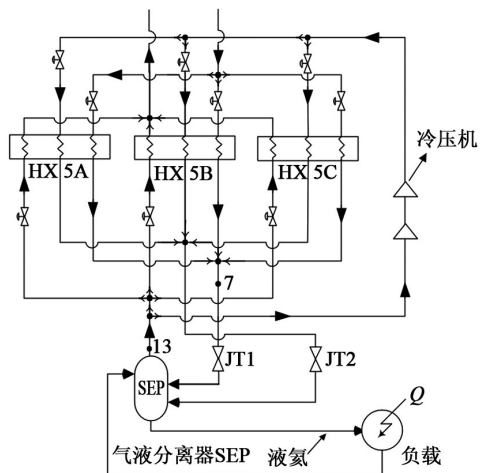


图 11 利用蒸汽压缩循环的流程图

Fig. 11 Control flow diagram using steam compression cycle

### 3.3.4 一种可以完全消除脉冲热负荷的调控方法

为了完全消除脉冲热负荷,2013年,Dutta等提出了一种新的调控方法,包括一个蒸汽压缩循环、一个超临界氦缓冲罐和一个并联换热器,如图12所示。动态模拟结果显示,该方法可以完全消除低压回流氦气流量的波动,其最大优势是应用于超导托卡马克装置时不再需要辅助冷箱,同时可以使调节阀的工作环境远离超导托卡马克装置所产生的强磁场环境,以保证其正常的工作性能。但是超临

界氦缓冲罐和冷压机的设计、制造以及该调控方法的经济性等方面依然面临着挑战。

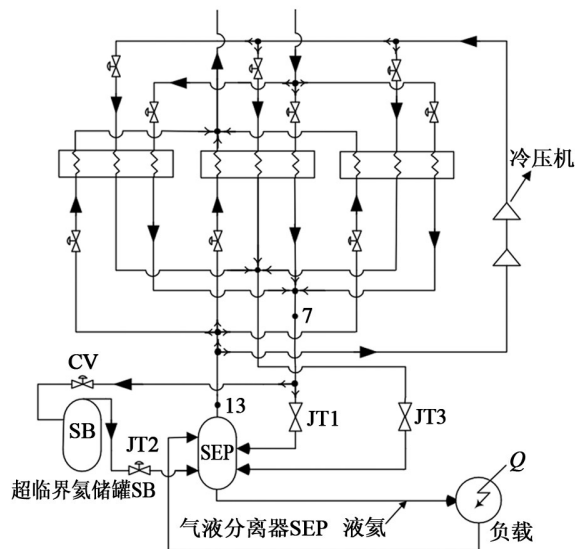


图 12 一种可完全消除脉冲热负荷的调控流程图

Fig. 12 A control flow diagram that completely eliminates the pulse heat load

### 3.4 各种调控方法的优缺点对比

对上述几种调控方法进行简单的总结,如表3所列。

表 3 不同调控方法的对比

Tab. 3 Comparison of different control methods

波动消除范围	方法	优点	缺点
0% ~ 20%	使用并联换热器 <sup>[19]</sup>	1. 提高系统制冷能力; 2. 可以配合其他技术使用。	1. 增加了换热器冷却和加热次数; 2. 高热负荷阶段调控能力有限。
0% ~ 80%	制冷机与用户端之间设置液氮罐 <sup>[13-16]</sup>	可以实现较高的波动消除率。	需要大尺寸储罐以及高效的控制阀组。
0% ~ 80%	使用辅助冷箱(包括换热器、冷循环器和旁通阀) <sup>[10]</sup>	可以有效缓解短时高脉冲热负荷,对制冷系统产生的不利影响。	1. 需要较高的冷循环泵和旁通阀门动态调控技术; 2. 低温下须要具有大热容量的设备暂时储存热负荷。
0% ~ 80%	使用超临界缓冲罐 <sup>[20]</sup>	1. 不需要增设运动部件,系统可靠性高; 2. 不需要消耗额外的能量,并且可以很好地适用于其他低温系统的调控。	1. 需要大尺寸的缓冲罐; 2. 缓冲罐须要具有较高的绝热性能,其控制阀门须要具有较高的动态调控性能。
0% ~ 80%	使用蒸汽压缩循环 <sup>[21]</sup>	1. 不需要设置缓冲罐等大型调控设备,节省了空间。 2. 该调控方法可以回收一部分低压回流氦气中的冷量。	冷压机需要较高的效率。
0% ~ 100%	使用电加热器 <sup>[23]</sup>	可以完全消除脉冲热负荷波动。	冷量损失非常大。
0% ~ 100%	使用蒸汽压缩循环、并联换热器和超临界氦缓冲罐的组合 <sup>[22]</sup>	1. 可以完全消除脉冲热负荷波动; 2. 不需要设置辅助冷箱。	设备庞大,控制系统复杂,成本高。

## 4 总结

本文重点介绍了几种托卡马克装置中低温系

统应对脉冲热负荷的调控方法,对比分析了不同调控方法的工作特点。得到以下结论:

第一,调控脉冲热负荷的根本目标是保证低压回流氦气流量和压力的稳定。

第二,高热负荷阶段主要有两种调控原理:将一部分回流氦气液化或者利用容器进行储存(容器压力、温度升高)。相应地,低热负荷阶段可以减小回流氦气液化率或者释放容器中储存的氦气,以维持低温制冷机的稳定运行。

第三,对于利用液氦罐的调控手段,采用多种低温用户共用一个液氦罐的方式可以简化控制系统的配置并且获得更稳定的调控效果。

第四,Dutta等所提出的一种可以完全消除脉冲热负荷的方法,结合了上述两种基本的调控原理。该方法充分发挥了几种单一调控方式在高、低热负荷阶段所具有的调控优势,但在系统调控能力、可靠性和经济性等方面仍须进行工程验证和优化设计。

综上所述,这些调控方法将为大型低温制冷系统在超导托卡马克装置中的应用提供工程经验。

#### 参考文献:

- [1] YU Z, QIANG L, WU J, et al. Performance analysis of a large-scale helium brayton cryo-refrigerator with static gas bearing turboexpander[J]. *Energy Conversion & Management*, 2015, 90:207-217.
- [2] 董家齐.托卡马克高约束运行模式和磁约束受控核聚变[J]. *物理*, 2010(6):30-35.
- [3] 吕翠.氢氦温区大型低温氦制冷系统动态仿真及实验研究[D].北京:中国科学院理化技术研究所,2016.
- [4] KALININ V, TADA E, MILLET F, et al. ITER cryogenic system[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2006, 81(23/24):2589-2595.
- [5] SERIO L. Challenges for cryogenics at ITER[C]//American Institute of Physics, 2010.
- [6] HENRY D, JOURNEAUX J Y, ROUSSEL P, et al. Analysis of the ITER cryoplant operational modes[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2007, 82(5/14):1454-1459.
- [7] KALININ V, TADA E, MILLET F, et al. ITER cryogenic system[J]. *Fusion Engineering & Design*, 2006, 81(23):2589-2595.
- [8] CHOI C H, CHANG H S, PARK D S, et al. Helium refrigeration system for the KSTAR[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2006, 81(23/24):2623-2631.
- [9] KUENDIG A, SCHOENFELD H. Helium refrigerator design for pulsed heat load in tokamaks[C]//Transactions of the Cryogenic Engineering Conference, 2006.
- [10] HOA C, BONNAY P, BON-MARDION M, et al. Forced flow supercritical helium in a closed heat transfer loop subjected to pulsed heat loads[J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 2012, 57:1943-1950.
- [11] 姜永诚. ITER 超导磁体热脉冲的抑制研究[D].北京:中国科学院理化技术研究所,2013.
- [12] CLAUDET G, KALININEV, MITCHELL N, et al. Design of the ITER-FEAT cryoplant to achieve stable operation over a wide range of experimental parameters and operation scenarios[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2001, 58(1):205-209.
- [13] MICHEL F, HITZ, D, VALLCORBA R, et al. Thermohydraulic studies related to pulsed heat loads generated by JT60-SA tokamak[C]//Proceeding of ICEC 22-ICMC, 2008:643-648.
- [14] CHANG H. Design issues of the distribution valve box of the KSTAR helium refrigerator[C]//Proceedings of the Twentieth International Cryogenic Engineering Conference (ICEC20), 2005:43-46.
- [15] BRIEND P, DESCHILDRE C, ICART Y, et al. Dynamic simulation of a large scale pulsed load helium refrigerator[C]//AIP Conference Proceedings, 2010.
- [16] SARKAR B, BHATTACHARYA R N, VAGHELA H, et al. Adaptability of optimization concept in the context of cryogenic distribution for superconducting magnets of fusion machine[J]. *Transactions of the Cryogenic Engineering Conference*, 2012, 57(1):1951-1958.
- [17] HASSENZAHL W V, CHAPLIN M R, HEIM J R, et al. Superconducting magnet system for the TPX tokamak[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1994, 30(4):2058-2061.
- [18] SLACK D S. A novel scheme to handle highly pulsed loads with a standard helium refrigerator[J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1994, 39:1223-1229.
- [19] DUTTA R, GHOSH P, CHOWDHURY K. Application of parallel heat exchangers in helium refrigerators for mitigating effects of pulsed load from fusion devices[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2011, 86(4/5):296-306.
- [20] DUTTA R, GHOSH P, CHOWDHURY K. Mitigation of effects of pulsed heat loads in helium refrigerators for fusion devices using supercritical helium storage[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2012, 22(6):3712.
- [21] DUTTA R, GHOSH P, CHOWDHURY K. Mitigation of effects of pulsed heat load from fusion devices on helium refrigerator: a novel technique using vapor compression cycle[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2013, 36(6):1776-1789.
- [22] DUTTA R, GHOSH P, CHOWDHURY K. A cycle configuration for large-scale helium refrigerator for fusion devices towards complete mitigation of the effects of pulsed heat load[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2013, 88(11):2972-2982.
- [23] DUTTA R, ROY S, GHOSH P, et al. Evaluation of a technique to mitigate effects of pulsed heat load of fusion devices on helium refrigerator[C]//Presented in 24th National Symposium on Cryogenics, IPR, Gandhinagar, 2013.