

低温精馏模拟实验平台的研制

张召^{1,2}, 张梅梅¹, 朱伟平¹, 贾启明¹, 龚领会^{1,2}

(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, 100190, 北京;

2. 中国科学院大学, 100190, 北京)

摘要: 针对目前低温精馏多采用小型低温制冷机作为冷凝器冷源而难以满足工业应用中大规模处理精馏原料的问题, 提出将大型低温制冷机应用于低温精馏的方案, 设计并搭建了一套基于逆布雷顿循环的低温精馏模拟实验平台, 同时满足了冷凝器、再沸器和冷屏的负载模拟要求, 解决了回收再沸器冷量过程难以模拟的问题。对模拟实验平台进行了测试, 可在 20 K 温区为冷凝器提供约 600~1 200 W 的制冷量, 回收再沸器的冷量, 并为冷屏提供 500 W 以上的制冷量, 透平膨胀机效率均在 70% 以上。本文结果验证了大型低温制冷系统应用于低温精馏技术的可行性。

关键词: 大型低温制冷系统; 低温精馏; 模拟实验平台; 逆布雷顿循环

中图分类号: TB65 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202108018 **文章编号:** 0253-987X(2021)08-0150-07



OSID 码

Development of a Simulation Experiment Platform for Cryogenic Distillation

ZHANG Zhao^{1,2}, ZHANG Meimei¹, ZHU Weiping¹, JIA Qiming¹, GONG Linghui^{1,2}

(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 100190, China)

Abstract: A scheme of applying a large-scale cryogenic refrigerator to cryogenic distillation is proposed to solve the problem that the current cryogenic distillation mostly uses regenerative refrigerator as the cold source of the condenser, and it is difficult to meet the needs of industrial applications for large-scale processing of distillation materials. A simulation experiment platform of cryogenic distillation based on the reverse Brayton cycle is designed and built, which simultaneously meets the load simulation requirements of the condenser, reboiler and cold shield, and solves the problem that the process of recovering the cooling power of the reboiler is difficult to simulate. The simulation experiment platform is tested. It provides refrigeration capacity of about 600—1 200 W for the condenser in the temperature range of 20 K, recovers the cooling power of the reboiler, and provides cooling power of more than 500 W for the cold shield. The efficiency of the turbine expander is more than 70%. Feasibility of applying the large-scale cryogenic refrigeration system to cryogenic distillation technology is verified.

Keywords: large-scale cryogenic refrigeration system; cryogenic distillation; simulation experiment platform; reverse Brayton cycle

低温精馏技术是氢同位素分离、稳定性碳 13 分离和液氦中除氦-85 等的有效手段,具有分离因子高的优势^[1-6]。尤其在含氦重水脱氦方面,通过低温精馏,可得到 99% 以上高纯氦,脱氦后尾气中氦的体积分数可小于 0.000 1%^[7-11]。低温精馏技术的发展离不开低温制冷技术的支持。目前低温精馏技术多处于实验室研究阶段,精馏规模相对较小,一般采用小型低温制冷机,如斯特林制冷机和 GM 制冷机,为精馏塔的冷凝器提供冷量。再沸器则采用电加热器提供热量。

随着低温精馏处理量的增大,冷凝器所需的制冷量和再沸器的加热量都将达到千瓦级甚至万瓦级,单台小型低温制冷机将难以满足所要求的制冷量,如荷兰斯特林低温和制冷机公司生产的 SPC-4T 型两级斯特林制冷机可在 15~60 K 提供 120~700 W 的制冷量,美国 CRYOMECH 公司生产的 AL330 型 GM 制冷机可在 30 K 提供 100 W 的制冷量。虽然可采用多台制冷机并联的方式来满足冷凝器制冷量的要求,但是多台并联增加了流程的复杂性,使得其可靠性下降;更为重要的是,小型低温制冷机因其制冷原理和结构的限制,无法回收再沸器的巨大冷量,这将造成精馏系统能源的极大浪费。

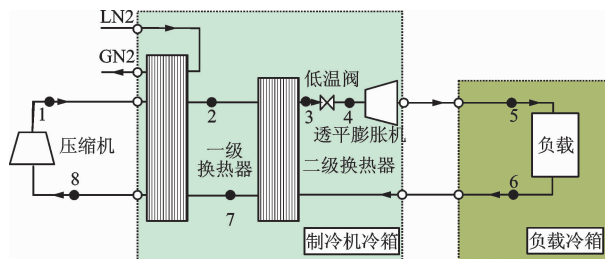
相比小型低温制冷机,氦透平膨胀机大型低温制冷系统具有制冷量大、调节方便、工作寿命长的优点,并且在能源利用和高能物理方面已经广泛应用^[12-19]。通过流程的设计,可使制冷机同时满足三个方面的功能,一是为精馏系统的冷凝器提供冷源;二是为精馏系统的再沸器提供加热量,达到回收冷量的目的,提高低温系统的能量效率;三是为冷屏提供冷量,使整个精馏系统都处于低温环境中,减少热辐射对精馏系统的影响。目前,由于流程的复杂性以及研制和运行的成本问题,国内外相关研究非常少。

本文在逆布雷顿循环的液氢温区低温制冷机^[20]的基础上,设计并研制了一套低温精馏模拟实验平台,可模拟低温精馏过程的冷凝器、再沸器和冷屏的负载变化工况,验证了大型低温制冷系统应用于低温精馏技术的可行性,并且该模拟实验平台可以进一步推广,应用于 20 K 以上温区的大冷量低温精馏模拟实验研究。

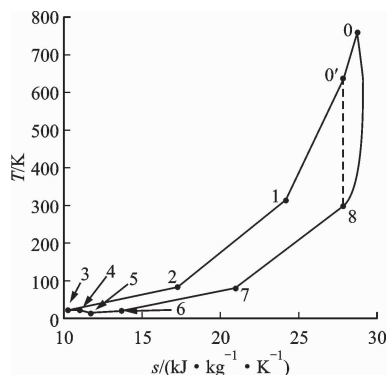
1 逆布雷顿循环制冷机原理

图 1 为液氢温区逆布雷顿循环制冷机的流程图。逆布雷顿循环是大型低温制冷机最简单的制冷流程,工质通常为氦气,包括压缩机、制冷机冷箱、负

载冷箱等部件,其中制冷机冷箱中主要包括一级换热器、二级换热器、低温阀和透平膨胀机。



(a) 逆布雷顿循环制冷机流程图



(b) 实际工作循环对应的 $T-s$ 图

图 1 逆布雷顿循环原理图

Fig. 1 A principle diagram of inverse Brayton cycle

采用逆布雷顿循环的低温制冷机工作过程包括:8—0'为等熵压缩过程,实际压缩过程则为多变过程;8—0为实际的压缩过程,压缩机将常温常压的氦气压缩至高温高压;0—1为冷却过程,由冷却水系统将热量带走;1—2—3和6—7—8为预冷过程,其中一级换热器为3股流换热器,通过液氮预冷,可将点2处温度降至80 K左右,再在二级换热器中被进一步预冷;3—4为压力调节过程,通过低温调节阀将氦气压力调节至透平膨胀机入口工作压力;4—5为膨胀过程,氦气在透平膨胀机中膨胀,使温度进一步降至15 K左右;5—6为吸热过程,制冷机从负载中吸热。

透平膨胀机的效率是影响整个系统能量利用效率的关键因素,其定义为

$$\eta_{\text{exp}} = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{5s}} \quad (1)$$

式中: h_4 为透平膨胀机入口比焓; h_5 为透平膨胀机出口比焓; h_{5s} 为透平膨胀机入口等熵膨胀后的比焓。

制冷机的制冷量为

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_6 - h_5) \quad (2)$$

式中: $\dot{m}$ 为氦气的质量流量; h_5 为负载入口的氦气

比焓; h_6 为负载出口的氦气比焓。

2 流程设计

2.1 设计指标和技术难点

低温精馏模拟实验平台的目的是模拟低温制冷机和精馏系统的耦合系统,因此,模拟实验平台的设计指标根据实际低温精馏系统的需求而定。实际低温精馏系统有冷凝器、再沸器和冷屏3个负载,因此,提出如下3个设计指标:

(1)在20 K温区,为模拟冷凝器负载提供600~1 200 W的制冷量;

(2)利用一股80 K以下的冷流,回收模拟再沸器600~1 200 W的冷量;

(3)在不高于80 K的温区,为模拟冷屏负载提供500 W的制冷量。

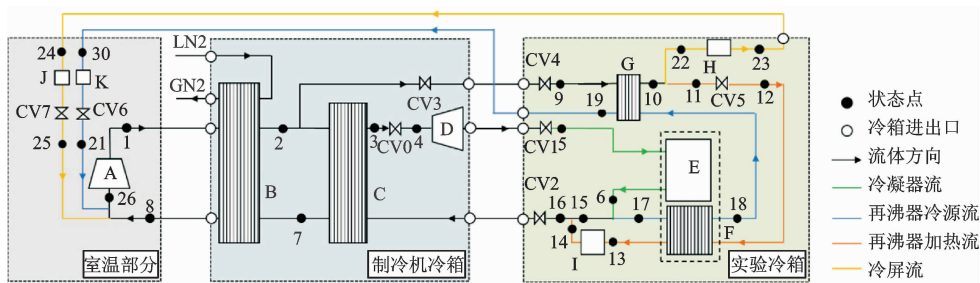
模拟冷凝器和模拟冷屏的负载可分别由两台不同功率的电加热器模拟,制冷量和温度可分别通过电加热器的功率和温度计直接测量。

而模拟实验平台的技术难点在于再沸器负载的模拟,因为实际精馏系统存在低温冷源,可利用一股温度略高于冷源温度的冷流对其加热,从而回收其冷量,但是模拟实验平台并无这一冷源。这一技术难点具体可分为两点。

(1)如何模拟再沸器加热过程。引出两股冷流,温度较低的冷流用来模拟再沸器的冷源,温度相对较高的冷流用来模拟再沸器的加热流,通过板翅换热器模拟再沸器加热过程,如图2所示。

(2)如何测量再沸器加热量。冷源流和加热流的进出口温度和压力均可测量,因此可得到两股流的进出口焓,质量流量在低温下测量难度大且精度不高,因此,将冷源流引出至室温部分,使其复温至常温进行测量。根据能量平衡可知加热量为

$$\dot{Q}_{\text{heater}} = \dot{m}_c (h_{\text{c,out}} - h_{\text{c,in}}) \quad (3)$$



A—压缩机;B—一级换热器;C—二级换热器;D—透平膨胀机;E—模拟冷凝器;F—模拟再沸器;
G—预冷换热器;H—模拟冷屏负载;I—兑温加热器;J—室温加热器1;K—室温加热器2。

图3 模拟实验平台的设计流程

Fig. 3 The design flow chart of the simulation experiment platform

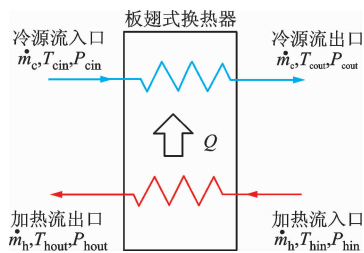


图2 模拟再沸器加热过程示意图

Fig. 2 A schematic diagram simulating the heating process of reboiler

式中: $\dot{m}_c$ 为冷源流的质量流量; h_{cin} 为冷源流的入口比焓; $h_{\text{c,out}}$ 为冷源流的出口比焓。

根据设计指标可知,共需要4股冷流来满足需要。其中3股冷流对应以上3个设计指标,一股冷流为冷凝器流,在20 K温区为模拟冷凝器提供冷量;一股冷流为再沸器加热流,为模拟再沸器负载提供加热量;一股冷流为冷屏流,在80 K温区为模拟冷屏负载提供冷量。另外还需要制冷机提供一股冷流,即再沸器冷源流,用来模拟再沸器冷源。

2.2 流程设计

图3是模拟实验平台的设计流程图,整个模拟实验平台可分为室温部分、制冷机冷箱和实验冷箱3个部分。图4是制冷机冷箱和实验冷箱部分对应的 T - s 图。

模拟实验平台在逆布雷顿循环制冷系统基础上改造而来。相比逆布雷顿制冷系统,模拟实验平台有以下特点。

(1)采用级间旁通方法,从一级换热器B和二级换热器C之间(点2处)引出一股近80 K的高压冷流至实验冷箱,该冷流在预冷换热器G中被进一步预冷后,该冷流在点10处分为两股,一股为冷屏流(图中黄色线),经模拟冷屏负载H后出实验冷箱;另一股为再沸器加热流(图中橙色线)。

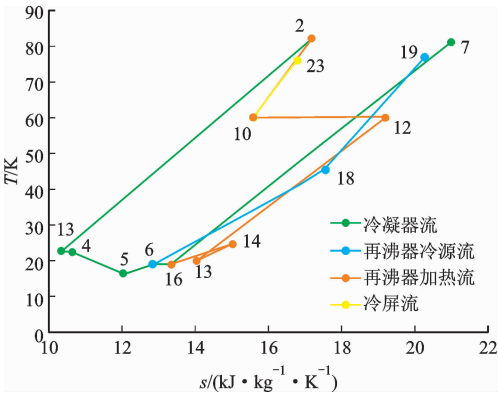


图 4 制冷机冷箱和实验冷箱对应的 T - s 图

Fig. 4 T - s diagram of refrigerator cold box and experimental cold box

(2)透平膨胀机后的冷流进入实验冷箱后,首先进入模拟冷凝器 E,这一股冷流(图中绿色线)为冷凝器流。从点 6 后引出一股低温冷流,即再沸器冷源流(图中蓝色线),作为模拟再沸器 F 的冷源。

(3)冷屏流为模拟冷屏负载 H 提供冷量后出实验冷箱,再沸器加热流则用以回收再沸器冷源流的冷量,再汇入冷凝器流。

此低温精馏模拟实验平台设计的创新点包括:①利用制冷机自身的冷流(图 3 中 17—18)来模拟再沸器的低温冷源,使实验系统完成制冷机和精馏系统的耦合运行;②利用级间旁通为冷屏提供冷量,不需要液氮等额外冷源;③可实现 20 K 以上温区变工况的运行;④可应用于氢的多种同位素低温精馏模拟实验。

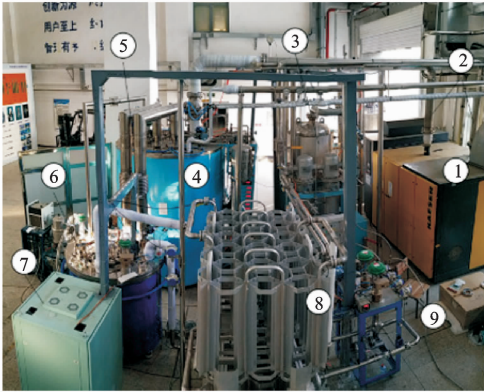
3 模拟实验平台的搭建

3.1 模拟实验平台的搭建

图 5 是模拟实验平台的实物图。模拟实验平台主要由螺杆压缩机、滤油系统、制冷机冷箱、实验冷箱、室温加热器以及连接管路等组成,其中制冷机冷箱主要是将工质氦气降至低温,为实验冷箱提供冷量;实验冷箱主要利用冷量进行相关实验。制冷机冷箱中包括透平膨胀机、板翅式换热器、低温阀等部件,实验冷箱中包括模拟冷凝器负载、模拟冷屏负载、模拟再沸器的换热器、兑温换热器、预冷换热器以及低温阀等部件。

压缩机是整个制冷系统的核心部件,为整个系统提供动力。模拟实验平台采用德国 Kaeser 公司的 ESD441 型喷油式螺杆压缩机,带有变频器,可提供最大 250 kW 的输入功率。

透平膨胀机是大型低温系统的关键部件,模拟



1—压缩机;2—高低压管路;3—滤油系统;4—制冷机冷箱;5—低温管线;6—实验冷箱;7—控制柜;8—室温加热器;9—常温阀。

图 5 模拟实验平台的实物图

Fig. 5 Prototype of the simulation experiment platform

实验平台所用透平膨胀机采用静压气体轴承,轴承气来自于制冷机冷箱的入口前引出的高压氦气。额定转速为 12×10^4 r/min,透平膨胀机的转速通过改变制动气的气体压力来调节。

实验平台主要设备的设计参数见表 1。

表 1 主要设备的设计参数		
Table 1 Parameters of main equipments		
设备名称	主要参数	数值
压缩机	变频器调节范围/Hz	25~59
	额定功率/kW	250
透平膨胀机	叶轮直径/mm	35
	额定转速/(10^4 r·min ⁻¹)	12
模拟冷凝器	设计功率/W	2 250
模拟冷屏	设计功率/W	750
模拟再沸器	翅片尺寸(翅高、翅厚、翅间距)/mm	3,0.2,1
	尺寸/mm×mm×mm	600×150×74
	设计换热量/W	1 600

3.2 控制系统

控制系统采用德国西门子公司的 S7-300 PLC 控制系统,可将采集信号传输至操作台。温度采集使用 Lake shore 公司的 240-8P 温度变送器,并接入 PLC 控制系统。温度传感器采用铱铁温度计和 Pt100 温度计,其中温度低于 55 K 时采用铱铁温度计(准确度为 0.1 K),其余使用 Pt100 温度计(准确度为 0.1 K)。压力传感器采用北京昆仑海岸传感技术有限公司生产的 JYB 型压力变送器。再沸器冷源流复温后测量质量流量,流量计采用艾默生的高准 ELITE 科里奥利 CMFS100 型流量计(0.1 级,

不确定度 $<0.03\%$)。

4 实验操作流程及结果

4.1 操作流程

整个运行过程可分为以下八个阶段,见表 2。

表 2 运行过程

Table 2 Running processes

序号	阶段	主要操作
a	开启压缩机阶段	压缩机升频至 30 Hz
b	气体纯化阶段	氦气中杂质的体积分数达到 0.001% 以内
c	液氮预冷阶段	一级换热器 HX1 高压侧出口温度(图 2 中点 2)达到近 80 K
d	开启透平阶段	透平转速升至 9×10^4 r/min
e	降温阶段	透平出口温度降至 14 K 左右
f	600 W 工况运行	依次开启模拟冷凝器和模拟冷屏负载,调节再沸器冷源流和加热流的流量,使回收冷量达到 600 W
g	1 200 W 工况运行	调大模拟冷凝器和模拟冷屏的负载,调节再沸器冷源流和加热流的流量,使回收冷量达到 1 200 W
h	停机阶段	关闭透平和压缩机

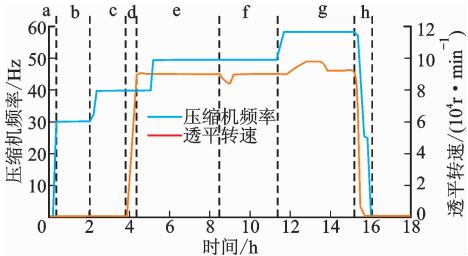


图 6 压缩机和透平膨胀机的运行状态

Fig. 6 Operation status of a compressor and a turbo expander

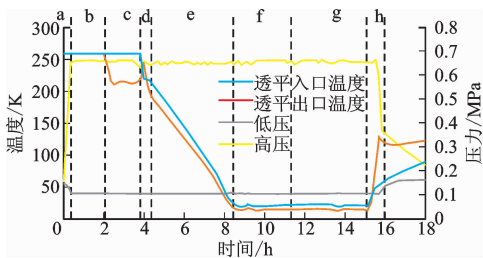


图 7 透平出口温度和高低压变化

Fig. 7 Changes of Expander outlet temperature and high and low pressure

和调试过程中高压和低压的稳定性。从图 6 和图 7 可以看出,模拟实验平台稳定运行,其中高压约为 0.65 MPa,低压约为 0.105 MPa。

(2)降温时长。整个实验从开机到停机共耗时约 16 h,其中气体纯化阶段近 2 h,这一阶段在首次运行时,由于杂质气体较多,因此耗时较长,后续实验中此阶段耗时可缩短;液氮预冷用了近 1.5 h,开启透平膨胀机后降温 4 h 达到最低温度;降温阶段,

4.2 实验结果

图 6 为压缩机和透平膨胀机的运行状态,图 7 为透平出入口温度和高低压的变化。

(1)稳定性。低温系统的稳定运行是应用于低温精馏的前提条件,其稳定性主要体现在降温过程

透平膨胀机以 9×10^4 r/min 转速运行,后续可根据运行状况适当提高转速,使降温速率更快,缩短降温时长。

(3)负载运行。表 3 和表 4 分别列出了负载在 600 W 工况和 1 200 W 工况的运行参数。

表 3 600 W 工况运行参数

Table 3 Operating parameters under 600 W condition

参数	数值		
	模拟冷凝器	模拟再沸器	模拟冷屏
入口温度/K	14.2	54.6	54.6
出口温度/K	16.9	18.2	72.2
功率/W	604.3	682.7	578.9

表 4 1 200 W 工况运行参数

Table 4 Operating parameters under 1 200 W conditon

参数	数值		
	模拟冷凝器	模拟再沸器	模拟冷屏
入口温度/K	14.2	68.8	68.8
出口温度/K	17.8	21.8	83.3
功率/W	1 223.0	1 312.1	579.1

图 8 为再沸器冷量回收的过程。可以看出,600 W 工况开启后,通过调节 CV5 和 CV6 的开度,使加热流回收冷量达到 600 W 以上,稳定运行约 1 h 后,调整至 1 200 W 工况,经过一段时间,加热流回收冷量达到 1 200 W 以上。

在 600 W 工况运行时,模拟冷凝器在 16.9 K

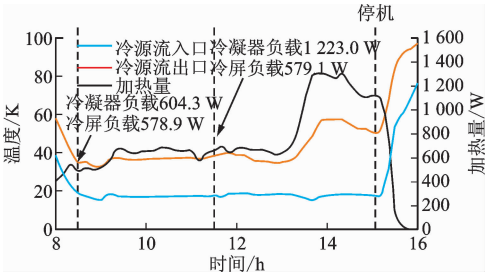


图 8 再沸器冷量回收过程

Fig. 8 Recovering process of Reboiler cold capacity

达到 604.3 W 的制冷量,模拟再沸器在 36.4 K 回收 682.7 W 的冷量,模拟冷屏在 72.2 K 达到 578.9 W 的制冷量,此时透平膨胀机效率为 74.6%;在 1 200 W 工况运行时,模拟冷凝器在 17.8 K 达到 1 223.0 W 的制冷量,模拟再沸器在 45.3 K 回收 1 312.1 W 的冷量,模拟冷屏在 83.3 K 达到 579.1 W 的制冷量,透平膨胀机效率达到 78.3%。

从实验结果可以看出,模拟实验平台可以稳定地模拟在 20 K 温区,为模拟冷凝器提供 600~1 200 W 的制冷量,相应地,模拟再沸器可回收 600~1 200 W 的冷量,同时为模拟冷屏在 80 K 温区提供 570 W 以上的制冷量,并且实验系统透平膨胀机的效率均在 70% 以上,实现了设定的技术指标,可满足低温精馏的技术要求。

5 结 语

本文基于逆布雷顿循环低温制冷机,设计并搭建了低温精馏模拟实验平台,阐明了模拟实验平台的设计指标、技术难点、流程设计、模拟实验平台的搭建及实验结果。利用制冷机自身的冷流来模拟再沸器工质,使实验系统完成制冷机和精馏系统的耦合运行;利用级间旁通为冷屏提供冷量,可使低温精馏系统不需要液氮等额外冷源,验证了大型低温制冷系统用于低温精馏的可行性;可实现 20 K 以上温区变工况的运行,后续可用于氢的多种同位素低温精馏模拟实验。

参考文献:

[1] 夏修龙,熊亮萍,任兴碧,等. 低温精馏氢同位素分离工艺发展及其应用 [C]//第二届全国核技术及应用研究学术研讨会论文摘要集. (2009-05-01)[2021-03-01]. <http://cpfd.cnki.com.cn/Article/CPFDTOTAL-HWLX200905001023.htm>.
[2] ABE K, HOSAKA J, IIDA T, et al. Distillation of liquid xenon to remove krypton [J]. *Astroparticle*

Physics, 2009, 31(4): 290-296.
[3] 李虎林. 低温精馏分离¹³C 的耦合传递理论与试验研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2011: 1-2.
[4] MIHARA S, DOKE T, HARUYAMA T, et al. Development of a liquid-xenon photon detector: Towards the search for a muon rare decay mode at Paul Scherrer Institute [J]. *Cryogenics*, 2004, 44(4): 223-228.
[5] 张金彪,吴旭飞,袁胜芳,等. 一种四氟化碳中微量三氟化氮的去除工艺: CN104548927A [P]. 2015-04-29.
[6] 王舟. 超高纯氦氖低温精馏系统研制与实验研究及优化 [D]. 上海:上海交通大学, 2015: 8-12.
[7] 吴展华,胡石林. 含氚重水脱氚方法 [J]. *同位素*, 2021, 34(1): 89-95.
WU Zhanhua, HU Shilin. Tritium removal from tritiated heavy water [J]. *Journal of Isotopes*, 2021, 34(1): 89-95.
[8] 夏修龙. 重水除氚工艺发展回顾 [C]//中国化学会第 29 届学术年会摘要集. (2014-08-01)[2021-03-01]. <http://cpfd.cnki.com.cn/Article/CPFDTOTAL-ZGHY201408014073.htm>.
[9] 夏修龙. 低温精馏氢同位素分离影响因素研究 [J]. *核技术*, 2006, 29(3): 221-224.
XIA Xiulong. Influencing factors of hydrogen isotopes separation by cryogenic distillation [J]. *Nuclear Techniques*, 2006, 29(3): 221-224.
[10] 罗伟青,袁希钢,刘春江. 氢同位素的低温精馏分离及模拟技术 [J]. *化学工程*, 2004, 32(5): 10-14, 24.
LUO Yiqing, YUAN Xigang, LIU Chunjiang. Hydrogen isotope separation and simulation technology with cryogenic distillation system [J]. *Chemical Engineering (China)*, 2004, 32(5): 10-14, 24.
[11] 夏修龙,熊亮萍,任兴碧,等. 低温精馏氢同位素分离技术及其应用 [J]. *核技术*, 2010, 33(3): 201-206.
XIA Xiulong, XIONG Liangping, REN Xingbi, et al. Separation technology and application of cryogenic distillation hydrogen isotopes [J]. *Nuclear Techniques*, 2010, 33(3): 201-206.
[12] 刘立强. 大型氦低温制冷机研制进展 [J]. *真空与低温*, 2020, 26(6): 471-475.
LIU Liqiang. Development of large helium cryo-plants [J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2020, 26(6): 471-475.
[13] KOCHUNNI S K, CHOWDHURY K. LNG boil-off gas reliquefaction by Brayton refrigeration system; part 1 Exergy analysis and design of the basic configuration [J]. *Energy*, 2019, 176: 753-764.
[14] HOU Y, ZHAO H L, CHEN C Z, et al. Developments in reverse Brayton cycle cryocooler in China

- [J]. Cryogenics, 2006, 46(5): 403-407.
- [15] 何崇超, 叶斌, 李娜, 等. 中国散裂中子源低温系统调试及运行进展 [J]. 低温工程, 2019(6): 62-67.
HE Chongchao, YE Bin, LI Na, et al. Commissioning process and operation development of CSNS cryogenic system [J]. Cryogenics, 2019(6): 62-67.
- [16] 何崇超, 叶斌, 丁美莹, 等. 中国散裂中子源低温系统氦制冷系统的安装与调试 [J]. 低温工程, 2017(5): 54-59.
HE Chongchao, YE Bin, DING Meiyang, et al. Installation and commissioning of helium refrigerator system for cryogenic system of China spallation neutron source [J]. Cryogenics, 2017(5): 54-59.
- [17] 付豹, 白红宇, 朱平. EAST 装置 2 kW/4.5 K 氦制冷机透平膨胀机的测试 [J]. 低温工程, 2007, 155(1): 32-37.
FU Bao, BAI Hongyu, ZHU Ping. Test of 2 kW/4.5 K helium refrigerator turbo expander of EAST device [J]. Cryogenic Engineering, 2007, 155(1): 32-37.
- [18] LEBRUN P. Large cryogenic helium refrigeration system for the LHC [C]//Third International Conference on Cryogenics & Refrigeration. (2003-02-14) [2021-03-01]. <https://cds.cern.ch/record/605468/files/lhc-project-report-629.pdf>.
- [19] HENRY D, CHALIFOUR M, FORGEAS A, et al. Process flow and functional analysis of the iter cryogenic system [C]//AIP Conference Proceedings. New York, USA: AIP Publishing, 2010, 1218(1): 676-683.
- [20] ZHANG Yu, LI Qiang, WU Jihao, et al. Performance analysis of a large-scale helium Brayton cryo-

refrigerator with static gas bearing turboexpander [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 90: 207-217.

[本刊相关文献链接]

- 张蓓乐, 陈小砖, 薛绒, 等. 采用液氮喷雾技术的低温环路结构模拟系统研究. 2019, 53(5): 109-114. [doi: 10.7652/xjtuxb201905015]
- 王娇娇, 陈虹, 厉彦忠, 等. 低温管路预冷过程两相流动与换热计算研究. 2019, 53(1): 93-99. [doi: 10.7652/xjtuxb201901012]
- 邵翔宇, 蒲亮, 雷刚, 等. 液氢泄漏事故中氢气可燃云团的扩散规律研究. 2018, 52(9): 102-108. [doi: 10.7652/xjtuxb201809016]
- 翟亚鑫, 郭朋华, 张彬, 等. 喷雾蒸发-低温多效蒸馏集成海水淡化系统设计. 2018, 52(9): 162-167. [doi: 10.7652/xjtuxb201809023]
- 刘展, 张少华, 张晓屿, 等. 地面热力学排气系统实验研究. 2017, 51(7): 8-15. [doi: 10.7652/xjtuxb201707002]
- 刘展, 孙培杰, 李鹏, 等. 升空过程中低温液氧贮箱压力变化及热分层研究. 2016, 50(11): 97-103. [doi: 10.7652/xjtuxb201611015]
- 刘展, 孙培杰, 李鹏, 等. 地面停放低温液氧贮箱热物理过程研究. 2016, 50(9): 36-42. [doi: 10.7652/xjtuxb201609006]
- 王哲, 厉彦忠, 李正宇, 等. 液氮/超流氦制冷系统负压换热器仿真及优化设计. 2016, 50(8): 143-150. [doi: 10.7652/xjtuxb201608023]
- 刘展, 厉彦忠, 谢福寿. 氦气对低温液氧箱体分层压增的影响. 2016, 50(4): 139-146. [doi: 10.7652/xjtuxb201604021]

(编辑 亢列梅)