

DOI: 10.7652/xjtuxb201606021

大型高速低温风洞冷量回收的方法研究

赖欢^{1,2}, 陈振华², 高荣², 陈万华², 刘秀芳¹, 侯予¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 中国空气动力研究与发展中心设备设计及测试技术研究所, 621000, 四川绵阳)

摘要: 为提高低温风洞排气冷量的综合利用和节能减排, 实现大型低温风洞科学建设, 分析了目前大型低温设备冷量回收利用的现状和方法; 针对低温风洞高雷诺数试验运行中排气系统的工作流程和特点, 对大型高速低温风洞排气冷量进行了初步计算, 结合当前低温工质气化冷量回收技术方案的流程分析和国内外低温系统冷量回收利用的技术特点, 对低温风洞液氮喷雾制冷后冷量回收与高效利用的方法和可行性进行了初步研究。综合考虑技术难度和投资经济性, 提出了通过蓄冷设备、空分装置、固态氮制取进行冷量回收的3种主要技术途径。分析结果表明: 采用蓄冷设备需要周边用冷设备支持, 回收效率低; 利用空分装置无需额外投资, 经济性较好; 固态氮制取回收效率高, 硬件投资大, 经济性较差。通过合理调整风洞试验流程, 选取合适的技术方案, 可以实现大型低温风洞的冷量回收。

关键词: 低温风洞; 液氮喷雾; 冷量回收

中图分类号: TB69 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)06-0136-07

Cold Energy Recycle from Cryogenic Wind Tunnel Exhaust System

LAI Huan^{1,2}, CHEN Zhenhua², GAO Rong², CHEN Wanhua², LIU Xiufang¹, HOU Yu¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Facility Design and Instrumentation Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, Sichuan 621000, China)

Abstract: To promote the usage of potential cold energy from exhaust system of cryogenic wind tunnel, realize scientific construction and energy saving, the status and methods of cold energy recycle are discussed. The operating processes and features of exhaust system in high Reynolds number testing are introduced and the cold energy from cryogenic wind tunnel exhaust system is calculated preliminarily. Based on the process analysis of oversea cold energy recycle schemes from cryogenic fluids gasification and the technical features of domestic cold energy recycle schemes, the recovery and efficient utilization of cold energy from liquid nitrogen spray cooling in cryogenic wind tunnel are studied. Considering the technology feasibility and economical efficiency, three expected cryogenic energy recycle schemes are provided, including a storage of the exhaust energy for civil air-conditioning, re-liquefying the gaseous nitrogen through an air separation process and using solid nitrogen as the cooling source. The advantages and disadvantages of the above-mentioned three approaches are analyzed. The first scheme has a low recycling rate because of the necessary additional cold-consuming equipment; the second scheme

收稿日期: 2016-01-24。 作者简介: 赖欢(1981—), 男, 硕士生; 侯予(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51406160); 中国博士后科学基金资助项目(2014M560773); 中国科学院低温工程学重点实验室开放课题资助项目(CRYO201409); 中央高校基本科研业务费资助项目(2012JDGZ03)。

网络出版时间: 2016-03-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160311.1715.004.html>

has an acceptable recycling rate and a good economical efficiency without additional investment; the third scheme has a good recycling rate but the further higher investment. Thus an appropriate recycle scheme and a reasonable wind tunnel testing process are important for cryogenic wind tunnel exhaust energy recycling.

Keywords: cryogenic wind tunnel; liquid nitrogen; cold energy recycle

低温风洞利用降低气流温度的方法达到提高风洞雷诺数模拟的目的,是工程上实现高雷诺数模拟的最佳方案。对于大型低温工程,采用喷入液氮、利用液氮潜热进行快速降温是最经济和实用的途径^[1]。目前,世界上两座大型的生产型跨声速低温风洞——美国国家跨声速风洞(NTF)和欧洲跨声速风洞(ETW)均利用液氮喷射制冷实现低温运行,两座风洞的最大液氮消耗量分别为 420 和 250 kg·s⁻¹。气化后的氮气通过排气塔排入大气,排气温度最低可达-183℃^[2]。为了避免低温氮气对排气塔周围空气造成冷污染,NTF 和 ETW 风洞均采用燃气加热空气与低温氮气混合,将排气温度提高至 0℃以上。在复温阶段,低温氮气与高温空气混合,被加热到常温,直接排入大气。为了获得高温空气,必须燃烧很多的燃料,对能源造成了巨大的浪费。

当前,可持续经济建设对传统能源的使用、绿色能源再生和能源循环利用提出了更高的环保指标。对于大型的热能设备,如热电站,要求对排放的蒸汽、冷却水等必须采取热能回收措施,减少对环境的热污染^[3]。同样,对于大型低温设备,如液化天然气(LNG)流程、环境模拟设备等,必须保证制冷循环的各个环节不对环境造成冷污染。目前,对于大型低温工程,如 LNG 气化站,液化天然气气化复热至常温(25℃)将释放大约 8×10⁵ J·kg⁻¹ 的冷量。提高大型低温设备排放的冷量利用率,已经成为国内外研究热点^[4]。大型高速低温风洞,在设计 and 建设时应充分考虑运行的合理性、经济性和安全性,实现高效运行、节能减排。文献[5]对大型低温风洞设计建设的关键技术进行了分析,认为低温风洞排气冷量的处理和回收利用是风洞科学建设、节能运行的关键点之一。

由于低温风洞运行模式的特殊性,其冷量回收存在很大的困难,目前相关方面的研究报道较少^[6]。为了实现低温风洞的科学建设,本文针对低温风洞排气系统的工作流程和特点,对大型高速低温风洞排气冷量进行计算,对低温风洞排气冷量的回收与高效利用可行性进行了初步的研究,提出了可以通过蓄冷设备、空分装置、固态氮制取进行冷量回收的

技术途径。

1 低温风洞运行模式介绍

图 1 是典型的液氮喷射制冷的低温风洞原理图。通过液氮泵将液氮从低温储槽中注入风洞回路,对气流和模型进行降温,通过风扇驱动获得试验需求的风速(马赫数),通过排气控制阀门控制氮气的排放流量,获得试验所需的气流压力。

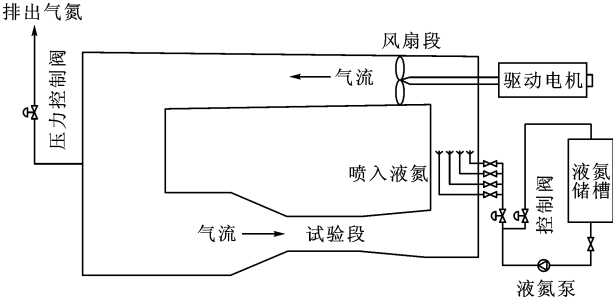


图 1 低温风洞原理图

对于大型低温风洞,试验过程中必须持续不断地向风洞内注入液氮以平衡风洞驱动气流做功带来的热量;同时,持续气化的液氮转变成低温氮气时将带来约 800 倍的体积膨胀量。为了保持试验正常的总压值不变,必须持续不断地将气化的低温氮气排出洞体。低温氮气若直接排入大气,会在排气塔周边造成低温氮气的沉积、起雾、湿空气结冰,进而破坏局部环境和天气。因此,对低温风洞排气冷量进行回收处理是非常必要的。

2 国内外冷量回收的现状

与低温风洞类似具有大量冷量释放的低温系统集中在天然气行业。液化天然气复温至室温气态时,会排出大量的冷能。20 世纪 90 年代以来,LNG 工业得到广泛应用和高速成长,在一次能源结构中已约占 24%。天然气气化冷量应用于联合发电系统、热泵等方面已成为各国竞相开发的研究热点^[7]。

2.1 LNG 冷量回收利用现状

20 世纪 90 年代末,国际上开始关注 LNG 冷量回收利用的可行性研究,日本和韩国是开展液化天然气冷量回收研究起步较早的国家,已有 20 多年的

历史^[4]。主要分为以下几类:①供 LNG 岸基接收站自身使用,利用气化冷量冷却热空气进行综合发电;②外部工厂货物冷却系统集成使用,对食品冷藏系统进行供冷^[8];③作为气体分离及液化设备换热器冷量输入^[9];④用于海水淡化^[10]和石油化工系统^[11-12];⑤为建筑空调设备提供冷源^[13]。近年来,国际上对于 LNG 冷量回收利用的研究主要集中在如何高效利用 LNG,优化燃气发电热力学循环流程,提高电站发电效率,减少 CO₂ 的排放^[3]。

进入 21 世纪以来,关注可持续发展、加强资源节约型循环经济的开发成为能源开发的导向标。对于 LNG 冷量综合回用主要采取闪蒸汽冷凝回收、气体分离供冷、工业物料低温破碎、海水淡化、干冰生产等技术方案。上海小洋山陆上液化天然气基站针对上海周边 LNG 冷量综合使用制定了开发计划,约 70% 的冷量将供周边空气分离站和联合燃气循环发电站使用^[14-15]。

2.2 低温风洞冷量利用现状

由于低温风洞运行的特殊性,其冷量的释放与 LNG 接收站的冷量排放有所不同:一是随试验工况的变化,排气流量在 10~300 kg·s⁻¹ 浮动,排气压力在 15~45 kPa 波动,表现出较强的冷量参数波动性;二是随实验项目的变化,设备运行会出现集中期和空闲期,一年中不同时段冷量排放量也不相同。冷量值的不稳定性是低温风洞进行冷量回收的最大难点。作为目前世界上仅有的两座生产型低温高雷诺数跨声速风洞,NTF 和 ETW 都曾经尝试进行排气冷量的回收。NTF 曾考虑采用带液膨胀机方案液化风洞排放的低温氮气。理论分析表明,该方案回收效率主要取决于带液膨胀机效率,可以达到 12%~18%^[16],但在 NTF 引导风洞进行的缩尺验证表明,回收率仅约 10%。由于回收效率低于期望值,NTF 建设时没有采用该回收方案。ETW 的液氮通过商业公司采购,没有配套的空分设备,周边也没有大型冷量利用设施,因此冷量回收利用仅限于部分回收,将风洞预冷阶段的排气冷量引入模型准备间,对模型进行预冷处理,冷量的利用率较低。试验期间排放的大量冷量,从环保考虑进行了加热复温处理,避免环境污染。

3 低温风洞冷量回收潜在途径

对于大型低温风洞,尽管冷量排放存在非持续性、瞬时冷量大、冷量波动等特点,但由于试验工况和运行时间在较长的一段时间内是稳定的,其运行

工况周期性重复。因此,其冷量的排放量是可以预估的。低温风洞冷量回收利用的关键是:①确定冷量输出量;②寻找稳定的用冷设备;③采用可行的技术途径;④对经济性进行评估。

3.1 低温风洞排放冷量的估算

由于低温风洞对液氮的需求极大,一般在低温风洞附近直接建设一套空分设备,专为风洞供给液氮。NTF 配套的空分系统液氮产出量为 430 t·d⁻¹。工作时液氮最大流量可达 450 kg·s⁻¹,在排气温度为 110 K 时,最大排气流量约为 425 kg·s⁻¹。ETW 没有配置专用的空分系统,通过商业气体公司购买液氮,转注储存在 3 000 m³ 的液氮储罐中,维持试验的需要,液氮年平均消耗约为 30~50 kt。

3.1.1 预冷阶段 预冷阶段风洞在低马赫数下运行,液氮小流量注入风洞内,吸收风扇做功产生的热量,并对风洞内部构件进行降温,利用气化的氮气对洞体内湿气进行置换。该过程液氮的消耗量较小,其潜热用于抵消风扇做功转换的热能,显热用于对洞体内部构件进行降温。为了避免结构件因温度快速下降产生过大的热应力,预冷阶段的降温速率一般控制在 1 K·min⁻¹,降温持续时间约为 2~3 h。该阶段排气温度随着风洞洞体温度的下降而线性下降并达到设定值(如 110 K),最终排气温度、排气流量恒定。这一阶段的排气冷量具有流量恒定和温度线性下降的特点,与预冷进程同步一致。在风洞预冷阶段,处于试验准备阶段的模型也必须预冷到试验温度。因此,该阶段的排气可以引入到模型准备间对模型进行同步预冷,达到冷量部分回收利用的目的。

3.1.2 试验阶段 试验阶段,液氮处于大流量消耗阶段。液氮潜热平衡风扇做功,气流温度维持在工作设定温度,液氮喷射流量约为 0.5~280 kg·s⁻¹。气化后低温氮气根据试验工况的不同将维持在 90~200 K,经排气系统排出风洞,该阶段排气冷量主要为氮气的显热。按 ETW 风洞设计工况考虑,运行速度为 0.9 Ma,排气温度为 110 K,排气压力为 4.5×10⁵ Pa,排气质量流量约为 271.4 kg·s⁻¹。氮气比定压热容 $c_p = 1.165\ 8 \times 10^3$ J/(kg·K)。考虑将氮气复温至 288.15 K(15℃)的常温,忽略氮化物性随温度的非线性,该工况下排气冷量约为 56 368.41 kJ·s⁻¹(56 368.41 kW)^[2]。表 1~表 3 分别给出了排气温度在 110、150 和 200 K 时,典型运行工况下估算的排气冷量。

3.1.3 回温阶段 风洞回温阶段将停止喷射液氮,

表 1 典型工况排气温度 110 K 时的冷量估算

序号	风速 Ma	排气总压/ kPa	排气温度/ K	回收温度/ K	c_p / $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	排气流量/ $kg \cdot s^{-1}$	排气功率/ kW
1	0.2	115	110	288.15	1 066.4	5.41	1 027.79
2	0.2	200	110	288.15	1 088.6	6.39	1 239.24
3	0.2	450	110	288.15	1 165.8	9.26	1 923.18
4	0.9	115	110	288.15	1 066.4	72.49	13 771.59
5	0.9	200	110	288.15	1 088.6	122.97	23 848.08
6	0.9	450	110	288.15	1 165.8	271.41	56 368.41
7	1.3	115	110	288.15	1 066.4	178.66	33 941.68
8	1.3	179	110	288.15	1 088.6	276.74	53 403.09

表 2 典型工况排气温度 150 K 时的冷量估算

序号	风速 Ma	排气总压/ kPa	排气温度/ K	回收温度/ K	c_p / $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	排气流量/ $kg \cdot s^{-1}$	排气功率/ kW
1	0.2	115	150	288.15	1 049.9	4.04	585.98
2	0.2	200	150	288.15	1 058.2	5.00	730.95
3	0.2	450	150	288.15	1 083.8	7.81	1 169.37
4	0.9	115	150	288.15	1 049.9	70.05	10 160.31
5	0.9	200	150	288.15	1 058.2	119.80	17 513.60
6	0.9	384	150	288.15	1 165.8	227.93	33 906.85
7	1.3	115	150	288.15	1 049.9	179.86	26 087.56
8	1.3	151	150	288.15	1 053.3	234.72	34 154.90

表 3 典型工况排气温度 200 K 时的冷量估算

序号	风速 Ma	排气总压/ kPa	排气温度/ K	回收温度/ K	c_p / $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	排气流量/ $kg \cdot s^{-1}$	排气功率/ kW
1	0.2	115	200	288.15	1 044.1	1.59	146.34
2	0.2	200	200	288.15	1 047.9	2.51	231.85
3	0.2	450	200	288.15	1 059.2	7.81	601.29
4	0.9	115	200	288.15	1 044.1	66.13	6 086.43
5	0.9	200	200	288.15	1 047.9	114.83	10 607.12
6	0.9	320	200	288.15	1 053.3	227.93	17 175.09
7	1.3	115	200	288.15	1 044.1	175.63	16 164.53
8	1.3	128	200	288.15	1 044.7	195.86	18 036.81

利用风扇怠速运行发热对洞体进行缓慢回温。若风洞回温阶段安排在常温工况以后,则该阶段不存在冷量排气,可以不考虑冷量回收。若风洞回温阶段安排在低温(如 110 K)运行之后,由于不再喷入液氮,排气温度回温流程线性升温,同样可以将该阶段的气体引入模型更换间进行同步回温。因此,可视为无额外冷量排放,不需要回收冷量。

3.1.4 风洞排气冷量预估 选取风洞设计工况点,排气温度为 110 K,运行马赫数为 0.9,排气总压为

4.5×10^5 Pa,回收温度为 288.15 K,按照风洞每天有效试验时间 2 h 估算,风洞排气冷量约为

$$Q_e = P_e t$$

(1)

式中: Q_e 为排气冷量,kJ; P_e 为排气功率,kW; t 时间,7 200 s。计算得 $Q_e=405\,852.552$ MJ。

3.2 周边冷量利用设备分析

3.2.1 大型建筑空调系统 低温风洞作为重要的国家级设备,必然依托航空航天部门进行建设。美国 NTF 风洞就位于兰利宇航中心,与周边的其他

风洞形成配套的风洞试验能力。ETW 建设地点位于科隆,毗邻德国宇航中心,与其他大型风洞配套形成完整的飞行器试验能力。因此,可以考虑将低温风洞排气冷量引入周边建筑空调制冷系统,降低电制冷比例,节约能耗。以一幢 12 层的都市普通建筑为例,其建筑面积约为 15 000 m²,制冷需求约为 10 000 m²,图 2 给出了空调系统的全年能耗分布。如图所示,城市空调系统在 5 月~11 月为制冷运行期,8 月为高峰期,最高能耗约为 3×10⁵ kW·h,月平均能耗 1.5×10⁵ kW·h。单体建筑空调系统的制冷需求约为 650 kW^[14],按每天空调运行时间 12 h 估算,完全回收风洞每天的排气冷量,需要 14.5 座该级别的单体建筑。

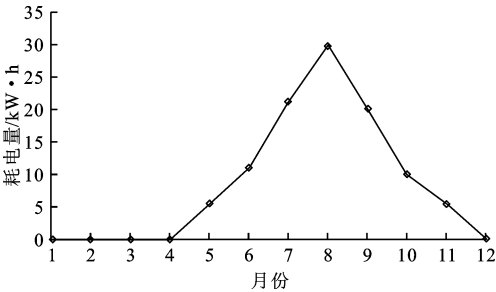


图 2 单体建筑全年空调能耗分布图

图 3 是设想的用于空调系统的多级换热蓄冷原理图。通过多级换热器,利用中间冷媒蓄能,将排气冷量回收用于空调冷却水系统,减少空调系统制冷机组的运行,节约电能消耗。在该模式下,风洞试验的高峰期应与空调系统的使用期同步。可将试验高峰期安排在每年的 7~9 月份,使得排气冷量与空调需求相匹配。

该方案能有效利用周边用冷设备,仅需增加空调 2 级蓄冷换热装置,经济性较好,缺点是受制于风洞建设地点气候条件,且必须提前规划和核算低温

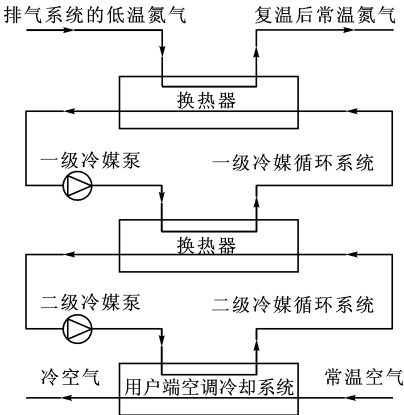


图 3 多级换热器蓄冷系统原理图

风洞建设地点周边建筑用冷量,回收利用率低。

3.2.2 空分设备 作为大型低温风洞,由于液氮消耗量较大,一般会就近建设全液体空分设备,生产液氮提供风洞试验所需。目前大多数全液体空分设备采用空气膨胀制冷流程。图 4 是带增压透平膨胀机和制冷机组的空分装置^[17],通过主换热器将原料空气冷却至 100 K 左右送入精馏塔获取液体产品。主换热器冷量源自工艺流程中引回的级间氮气、产品级低温氮气、产品级低温氧气以及膨胀后的低温空气。将低温排气冷量作为主换热器的一种冷量来源,将减少产品氧、氮和返流气体的使用和膨胀机组的运行气量,能耗将大大降低。图 5 是改进的将风洞排气系统冷量引入主换热器的空分流程^[18]。

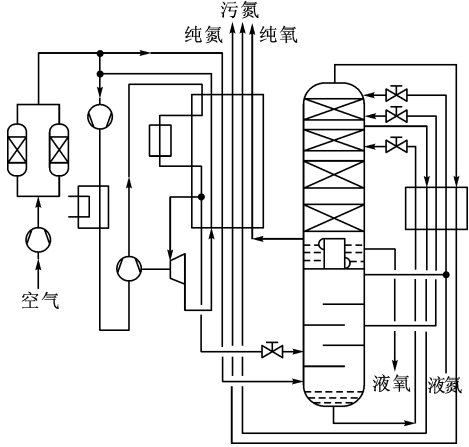


图 4 空气循环膨胀制冷流程

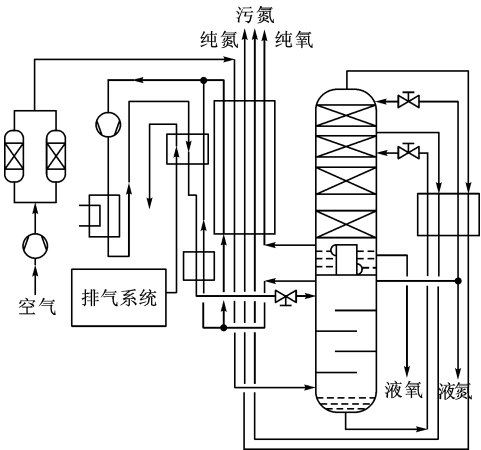


图 5 利用排气冷量的空分流程

按 ETW 风洞液氮需求估算,需配置 10 kN·m³/h 的全液体空分设备,液氮的产出能耗需求约为 400 W/kg。由于空分设备为不间断工作制,因此可以通过蓄冷的方式将试验期间的排气冷量储存,再通过空分设备进行回收利用。

与采用空调系统回收冷量不同,空分设备回收冷量,需将风洞的运行安排日均到全年,避免风洞最高试验条件下的集中排冷,缓解蓄冷装置的压力。该方案充分利用风洞配套用冷设备实现液氮回收,无需增加额外的硬件设备,经济性较好,缺点是风洞排气冷量的不稳定性对空分设备冷媒切换和调峰能力要求较高,技术难度较大。

3.2.3 固态氮冷量回收 低温风洞工作气体为氮气,在冷量回收过程中,若氮气不被污染,并进入循环利用的工作流程,即可节约氮的用量。若将排气考虑为热媒,则可以通过更低温度的冷媒对排气进行降温液化处理,达到回收利用的效果。固态氮蓄冷回收氮气方案的基本原理是以固态氮为蓄冷工质,利用固态氮与风洞排出冷气(热媒)进行充分热交换,将排出的氮气冷却、液化回收,可以部分替代低温风洞配套的空分设备。图 6 是固态氮冷量回收原理图,由固态氮制备、真空维持、氮气液化 3 部分组成。来自风洞排气系统的低温氮气在固态氮储槽中与固态氮及过冷液氮进行充分换热,气氮冷却获得液氮,固态氮吸热融化获得液氮,通过低温泵送入液氮储槽中,达到循环利用的目的。从固态氮顶部抽取的气氮通过低温真空泵送回缓冲罐,经过低温压缩机压缩、膨胀机膨胀冷却、主换热器冷却、冷箱液化,最终还原为液氮。

由图 7 可知,当储罐压力持续下降时,液氮的饱

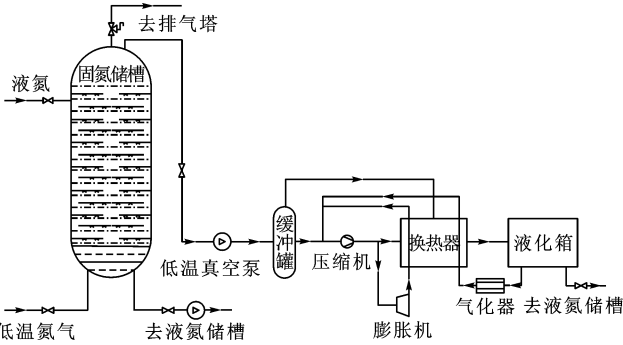


图 6 固态氮冷量回收原理图

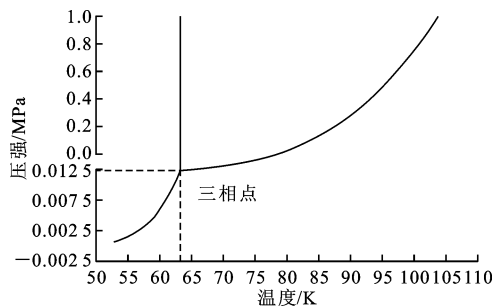


图 7 氮的饱和温度-压力曲线

和温度也持续下降,随着液氮的蒸发吸热,储槽内温度降低。利用液氮在真空状态下挥发吸热,降低剩余液氮温度,凝固成固态氮。通过低温真空泵持续抽取,维持固态氮储槽压力在负压状态。当液氮蒸发吸热使得剩余的液氮温度降低至凝固温度 63.15 K 以下时,得到固态氮。将储槽压力维持在 8 kPa 下,固态氮吸收来自低温风洞排气系统的氮气热量,熔化为液氮,再进一步通过液氮与尾气进行换热,将尾气温度降低至饱和温度 77.66 K,此时储槽压力上升至 0.105 MPa。整个换热需维持冷端液氮不气化。固态氮熔点温度为 61.06 K,熔化热 r 为 $62.773 \times 10^3 \text{ J/kg}$,比定压热容为 $1.0529 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$,熔化温差约为 2.09 K。液态氮比定压热容为 $2.13 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$,换热温差 ΔT_v 约为 14.51 K。在该过程中,作为冷媒的固体氮变为过冷液氮,不产生气化,作为热媒的风洞尾气冷却成过冷氮气,进入氮气液化流程。参与换热的固态氮贡献的冷量为

$$Q = m(r + \Delta T_m c_{ps} + \Delta T_v c_{pl}) \tag{2}$$

式中: Q 为固态氮提供的冷量,kJ; m 为固态氮质量,kg; ΔT_m 为熔化温差,2.09 K; c_{ps} 为固态氮比定压热容, $1.0529 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$; c_{pl} 为液态氮比定压热容, $2.13 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

由式(2)估算可得单位质量的固态氮提供的冷量为 95.88 kJ。同样以风洞设计点工况进行排气量估算,排气温度为 110 K,运行马赫数为 0.9,排气总压为 $4.5 \times 10^5 \text{ Pa}$,排气流量为 $271.41 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,排气回收至饱和温度的温差为 32.34 K,运行时间为 2 h,需要的冷量为

$$Q'_e = q t c_p \Delta T \tag{3}$$

式中: Q'_e 为排气回收所需冷量,kJ; q 为排气流量, $271.41 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$; t 为有效工作时间,7 200 s; c_p 为气态氮比定压热容, $1.1658 \times 10^3 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$; ΔT 为温差,32.34 K。

由式(3)计算得所需最大冷量为 73 675 383.9 kJ,需要制备的固态氮约为 768 412 kg。

采用固态氮回收风洞排气冷量,不会对原有风洞配套设施造成影响,且液氮回收利用率高。缺点是固态氮的制备和储存工艺还不成熟,技术难度高,硬件投资额度较大。

4 结束语

低温风洞排气冷量的回收利用存在冷量巨大、短时输出高、运行波动大等难点,其回收技术途径还

处在探索阶段。通过对目前 LNG 冷量回收利用系统和固态氮蓄能技术的分析,低温风洞冷量回收还应加强以下几方面的研究:

(1)对低温风洞运行流程和试验时间进行详细核算,确定冷量排放的峰值、日时均值和年排放总量,确定冷量回收的输入参数;

(2)对风洞周边潜在的用冷设备,特别是空分系统的用冷核算、固态氮制备和存储工艺进行深入研究和优化;

(3)对回收方案的经济性进行评估,特别是蓄能设备的投资规模和回报率。

通过以上分析可知,低温风洞的冷量回收在技术上是可行的,在当今能源短缺和环境友好性可持续发展的要求下,冷量回收利用也是必要的。通过合理配置冷量回收装置,充分利用周边的用冷设备,可以实现低温风洞排气冷量的高效回收利用。

参考文献:

- [1] KILGORE R A. Evolution and development of cryogenic wind tunnels [C]// 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. New York, USA: AIAA, 2005: 457.
- [2] GREEN J, QUEST J. A short history of the European transonic wind tunnel ETW [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2011, 47(7): 319-368.
- [3] GÓMEZ M R, GARCIA R F, GÓMEZ J R, et al. Review of thermal cycles exploiting the exergy of liquefied natural gas in the regasification process [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 38(10): 781-795.
- [4] FRANCO A, CASAROSA C. Thermodynamic analysis of direct expansion configurations for electricity production by LNG cold energy recovery [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 78(3): 649-657.
- [5] 廖达雄, 黄知龙, 陈振华, 等. 大型低温高雷诺数风洞及其关键技术综述 [J]. 实验流体力学, 2014, 28(2): 1-6.
LIAO Daxiong, HUANG Zhilong, CHEN Zhenhua, et al. Review on large-scale cryogenic wind tunnel and key technologies [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2014, 28(2): 1-6.
- [6] LIU Yanni, GUO Kaihua. A novel cryogenic power cycle for LNG cold energy recovery [J]. Energy, 2011, 36(5): 2828-2833.
- [7] 陈利琼, 孙磊, 李卫杰, 等. 提高 LNG 接收站的冷量利用效率方法 [J]. 石油石化节能, 2013(11): 32-35.

- CHEN Liqiong, SUN Lei, LI Weijie, et al. Discussion on improving the cold energy utilization efficiency of LNG receiving station [J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2003(11): 32-35.
- [8] KIM T S, RO S T. Power augmentation of combined cycle power plants using cold energy of liquefied natural gas [J]. Energy, 2000, 25(9): 841-856.
- [9] MESSINEO A, PANNO D. Potential applications using LNG cold energy in Sicily [J]. Int J Energy Res, 2008, 32(11): 1058-1064.
- [10] NAKAIWA M, AKIYA T, OWA M, et al. Evaluation of an energy supply system with air separation [J]. Energy Convers Manage, 1996, 37(3): 295-301.
- [11] WANG P, CHUNG T S. A conceptual demonstration of freeze desalination-membrane distillation (FD-MD) hybrid desalination process utilizing liquefied natural gas (LNG) cold energy [J]. Water Res, 2012, 46(13): 4037-4052.
- [12] KIM H, HONG S. Review on economical efficiency of LNG cold energy use in South Korea [C]// 23rd World Gas Conference. Amsterdam, Holland: International Gas Union, 2006: 2885-2895.
- [13] JANSEN S, WOUDESTRA N. Understanding the exergy of cold: theory and practical examples [J]. Int J Exergy, 2010, 7(6): 693-713.
- [14] 赵原伟. LNG 卫星站冷量在建筑空调中的应用技术研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [15] CAO Wensheng, BEGGS C, MUJTABA I M. Theoretical approach of freeze seawater desalination on flake ice maker utilizing LNG cold energy [J]. Desalination, 2015, 355(1): 22-32.
- [16] MCINTOSH G E, LOMBARD D S, MARTINDALE D L, et al. Cost effective use of liquid nitrogen in cryogenic wind tunnels, NASA CR-178279 [R]. Washington, DC, USA: National Aeronautics and Space Administration, 1987.
- [17] 燕娜, 厉彦忠. 采用液化天然气冷量的空分系统新流程 [J]. 化学工程, 2007, 35(9): 58-61.
YAN Na, LI Yanzhong. New air separation system by using cold energy of liquefied natural gas [J]. Chemical Engineering, 2007, 35(9): 58-61.
- [18] 燕娜, 厉彦忠. 采用液化天然气(LNG)冷量的液体空分新流程及其分析 [J]. 低温工程, 2007, 156(2): 40-45.
YAN Na, LI Yanzhong. Scheme analysis on the liquid product air separation plant using the cold energy of LNG [J]. Cryogenics, 2007, 156(2): 40-45.

(编辑 杜秀杰)