研究论文

DOI：10.11949/0438-1157.20260227

基于氮循环的低温系统在大科学装置上的应用研究

司标，高荣，田富竟，杨晓峰，洪兴福

（中国空气动力研究与发展中心高速空气动力研究所，四川 绵阳 621000）

摘要： 低温系统是大型低温风洞实现高Reynolds数气动模拟与安全稳定运行的核心支撑。针对某大科学装置配套的氮循环低温系统，系统论述其总体架构、关键技术与工程实践，聚焦液氮制备与大流量供给、低温氮气安全排放、氮气及冷量回收三大核心模块开展设计优化与技术攻关。系统采用单塔制氮工艺，配置两座3000 m^3大型常压储槽，实现360 t/d级液氮稳定制备；通过多泵并联变频与多级调压协同控制，实现0.6~315 kg/s宽量程液氮精准喷射，压力控制精度优于0.5%，响应时间小于5 s；采用引射掺混与加热耦合排放方案，攻克110 K、315 kg/s级低温氮气安全环保排放难题；应用增压膨胀液化回收技术，建成氮气及冷量回收系统，液氮单位能耗较传统空分降低27.9%，年回收液氮3万~5万吨，节能与生态效益显著。调试运行结果表明，系统各项性能指标均优于设计要求，突破多项低温核心技术与装备国产化瓶颈，为大型低温风洞高效节能运行提供关键保障，可为同类大科学装置低温系统设计与建设提供重要参考。

关键词： 低温系统；大科学装置；液氮

中图分类号： TB 69　　**文献标志码：** A

文章编号： 0438-1157（2026）08-4610-11

Research on the application of nitrogen cycle-based cryogenic systems in large scientific facilities

SI Biao, GAO Rong, TIAN Fujing, YANG Xiaofeng, HONG Xingfu

(*Institute of High Speed Aerodynamics, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang* 621000, *Sichuan, China*)

Abstract: Cryogenic systems are the core support for large-scale cryogenic wind tunnels to achieve high-Reynolds number aerodynamic simulations and safe stable operation. Focusing on the nitrogen-cycle cryogenic system for a large scientific facility, this paper systematically discusses its overall architecture, key technologies and engineering practices, and carries out design optimization and technical breakthroughs on three core modules: liquid nitrogen preparation and high-flow supply, safe discharge of cryogenic nitrogen, and nitrogen & cold energy recovery. The system employs a single-tower nitrogen production process, equipped with two 3000 m^3 large-scale atmospheric pressure storage tanks, achieving stable liquid nitrogen production at a rate of 360 t/d. Through cooperative control of multi-pump parallel frequency conversion and multi-stage pressure regulation, it achieves precise liquid nitrogen injection in a wide range of 0.6—315 kg/s, with pressure control accuracy better than 0.5% and response time less than 5 s. The coupled discharge scheme of ejector mixing and heating is adopted to solve the problem of safe and environment-friendly discharge of cryogenic nitrogen at 110 K and 315 kg/s. Applying pressurized

收稿日期： 2026-02-23　　**修回日期：** 2026-04-09

通信作者： 田富竟(1987—)，男，高级工程师，18674440178@163.com

第一作者： 司标(1981—)，男，工程师，29361695@qq.com

引用本文： 司标, 高荣, 田富竟, 杨晓峰, 洪兴福. 基于氮循环的低温系统在大科学装置上的应用研究[J]. 化工学报, 2026, 77(8): 4610-4620

Citation: SI Biao, GAO Rong, TIAN Fujing, YANG Xiaofeng, HONG Xingfu. Research on the application of nitrogen cycle-based cryogenic systems in large scientific facilities[J]. CIESC Journal, 2026, 77(8): 4610-4620

expansion liquefaction recovery technology, the nitrogen and cold energy recovery system is built, reducing the unit energy consumption of liquid nitrogen by 27.9% compared with traditional air separation, with an annual recovery of 30000—50000 t of liquid nitrogen, showing remarkable energy-saving and ecological benefits. The commissioning and operation results show that all performance indicators of the system are better than the design requirements. It has broken through a number of core cryogenic technologies and achieved the localization of core equipment, providing key support for the efficient and energy-saving operation of large-scale cryogenic wind tunnels, and can offer an important reference for the design and construction of cryogenic systems in similar large scientific facilities.

Keywords: cryogenic system; scientific apparatus; liquid nitrogen

引　言

低温技术经过多年的发展，在粒子加速器、核聚变、高温超导、空气动力学等领域得到广泛应用，低温系统已成为大科学装置的重要组成部分，比如俄罗斯的超导加速器、中国的同步辐射光源等大科学装置[1-6]。理论和实践表明，用液氮作为工质实现降低气流温度的方法，从而达到提高风洞 Reynolds 数模拟的目的[7-10]，是空气动力学领域实现高 Reynolds 数模拟的最佳方案。目前世界上两座大型生产型跨声速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，最大液氮消耗量分别达到 420 kg/s 和 250 kg/s，液氮气化后与加热空气混合进入排气塔排向大气。

新建设的某大型科学装置工作介质为氮气，最低运行温度为 110 K。其区别于常规连续式装置的主要特点有：一是设置液氮储存和供给系统，由低温泵增压并持续供给液氮，并经过液氮喷射排架末端的喷嘴[11-16]喷入运行回路（液氮最大喷射流量为 315 kg/s），通过液氮气化吸热控制回路内气流的温度，实现装置低温运行；二是设置气氮排出装置，通过精确控制排出液氮气化后产生的氮气稳定风洞回路总压；三是配置清洗系统，通过抽真空（真空度为 0.02 MPa）与采用常温干燥空气、干燥氮气置换清洗相结合的方式[17-18]将洞体内水汽含量降低到目标水平；四是建设氮气及冷量回收系统，用于部分回收装置排出的低温氮气，实现节能环保运行[19-22]。为此，需配套建设低温系统。该低温系统由液氮系统、气氮排出系统、清洗系统、冷却水供应系统、冷量回收系统等组成，是保证风洞正常运行必不可少的系统，是实现总温和总压控制的核心系统，是实现稳定运行的关键。系统氮循环如图 1 所示。

从图 1 可以看出，在整个低温系统中，氮气工质经大气制取，随后经由液氮管路送入装置使用，排出低温氮气部分经由排气塔排向大气，剩余部分经过回收系统液化后回到液氮储罐，实现循环利用。本研究介绍某大型科学装置中基于氮循环的低温系统的建设应用情况，着重讨论几个与液氮及氮气

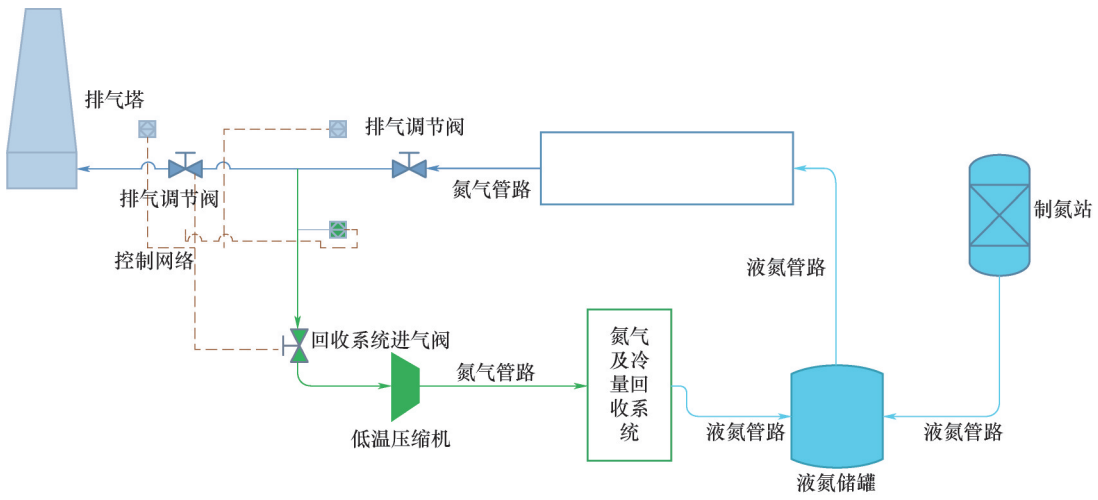


图 1　基于氮循环的低温系统简图

Fig.1　Diagram of cryogenic system based on nitrogen cycle

直接相关的重要系统的设计建设、关键技术攻关等。

1 系统组成概述

某大科学装置低温系统的实际组成较为复杂，本文着重介绍与低温氮气或液氮相关的核心系统，主要包含以下3个方面。

1.1 液氮系统

液氮系统包括液氮生产子系统、液氮储存及输送子系统、液氮供给子系统、氮气供配气子系统和液氮控制子系统，其主要功能是进行液氮的生产、储存、转注、输送及其过程的控制。其中，液氮生产子系统生产高品质液氮产品；液氮储存及输送子系统储存生产的液氮，并可以实现1#液氮储罐向2#液氮储槽的液氮转注；液氮供给子系统将2#液氮储槽中的液氮按需求输送至喷射排架，通过排架上的喷嘴喷射到装置内部；配套的氮气供配气子系统为低温系统及其他用气设备提供常温氮气和干燥空气；液氮控制子系统主要实现对液氮系统各子系统的控制功能。

液氮生产系统采用低压分子筛净化吸附、氮气增压循环、高低温串联膨胀制冷的单塔制氮流程，工艺流程如图2所示。该工艺系统设计产能360 t/d，设计能耗0.635 kWh/kg，实际最大产能374.6 t/d，最低制氮能耗0.6195 kWh/kg。

液氮储存及输送子系统的主要功能是实现液氮的储存及转注。系统主要由液氮储槽、真空管路、低温阀门、离心泵、过滤器、止回阀、安全阀等低温设备组成。现场配置2座大型常压液氮储槽，每座有效容积3000 m^3，配置2台液氮输送低温离心泵，单台最大转注流量100 t/h，可以实现1#液氮储槽向2#液氮储槽的液氮转注。空分设备生产的液氮可分别输送至2座液氮储槽。

2座大型低温液氮储槽主体结构基本相同，均为平底拱顶、立式双圆筒金属壁常压储槽，内罐由奥氏体不锈钢材料制造，外罐由碳钢材料制造；内、外罐均为平底结构，罐顶为自支撑拱形顶；内罐底部采用泡沫玻璃砖绝热，液氮储槽内外罐之间珠光砂夹层充密封正压保护氮气，使其维持微正压，以保持珠光砂干燥；储槽基础采用架空式，整个设备坐落在高架式基础底板上。供液管路根据2座液氮储槽供液需求不同而有不同的设计。单个液氮储槽有效容积3000 m^3，内容器工作压力30 kPa，外形尺寸ϕ20190 mm×18416 mm，储槽空重470 t，液氮蒸发率≤0.2%/d。

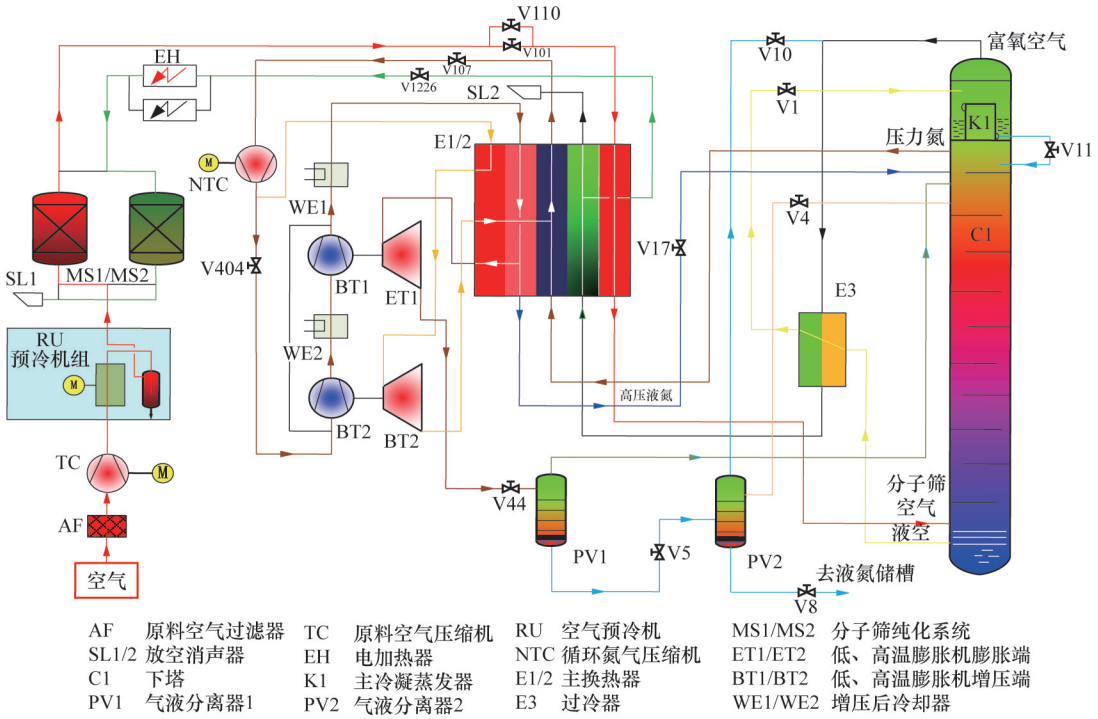


图2 液氮生产系统工艺流程简图

Fig.2 Process flow diagram of liquid nitrogen production system

液氮供给子系统基于泵压式输送基本原理，采用4台低温离心泵并联方式向喷射排架供应液氮，其中3台为新研制的单级卧式结构、额定流量600 m^3/h（约135 kg/s）的大流量离心泵，1台为额定流量240 m^3/h（约54 kg/s）的小流量离心泵，额定扬程均为180 m。每个离心增压泵后配置压力调节阀，回流管路调节阀组采用3台不同口径阀门并联精确调压。在主管路上，回流支路接口后并联2个压力调节阀，用于喷前压力的快速调节。调节手段采用多泵组合变频结合总管回流调压。根据每次试验所需的流量和压力指标确定泵组模式和基准工况，通过离心泵变频和调节阀门开度调节实现最大供应流量和压力控制精度要求。总回流管路具有全回流能力，即使在液氮供给泵满负荷工作、液氮喷射流量为零时，液氮也能够通过该总回流管路全部返回至储罐。回流管路上设置有多种规格的并联调节阀，以满足不同流量工况回流流量的宽范围调节需求。液氮供给子系统总体框架如图3所示，系统设计液氮供应能力为0.6~315 kg/s，压力控制精度优于0.5%，实测指标均优于设计指标。

1.2　氮气排放系统

装置低温运行时，低温氮气从洞体排出，经并联的排气控制阀组调压后进入排气消声器衰减阀后噪声，再进入排气引射器与常温（加热）的空气掺混后由排气塔排入环境大气。在有突发情况需要紧急排放时另设置有紧急排放支路，洞体内的气体可通过正常排气管路和紧急排放支路同时向外排气，后通过外径3 m、高50 m的排气塔排入大气环境。气氮排出子系统组成如图4所示。

1.3　冷量回收系统

低温系统冷能的回收利用长期以来是低温工程研究应用的热点，尤其如何充分回收利用LNG的冷能是全世界关注的课题[19-22]。其他工质的大型低温工程的设计建设同样会充分考虑运行经济性，实现高效节能。在国内大科学装置中，由中国科学院高能物理研究所(Institute of High Energy Physics，IHEP) 承建的高能同步辐射光源(high energy photon source，HEPS)率先开展了氮低温制冷循环系统的设计及应用研究[23]。赖欢等[19]对类似大科学装置排气冷量做初步计算，结合实际情况进行了可行性初步研究。

项目组在方案论证设计时对比分析了蓄冷回收冷量方案、与现有空分装置结合以及增压膨胀液化方案。蓄冷回收冷量方案就是风洞排出的氮气经过蓄冷介质（如金属、冷冰、卵石床等），氮气中的冷量被介质吸收储存，介质温度由常温降至低温，氮气则可升温至常温后排放。介质中储存的冷量可在其他系统中使用。

使用现有空分改造时，如果将原料气由空气改为低温氮气，那么冷箱外的空气压缩机、预冷系统、纯化系统均不用工作，直接利用一台低温氮气压缩机向冷箱供气便可运行，原液氮生产系统的其他部件简单改造利用就可以完成回收生产。可借鉴利用LNG的冷能空分装置[24]。因为总的生产能耗里省去了分离功，同时低温氮气自身携带冷量，该装置的生产能耗会在现有基础上降低。具体实施时在冷箱外设置一台低温氮气压缩机即可

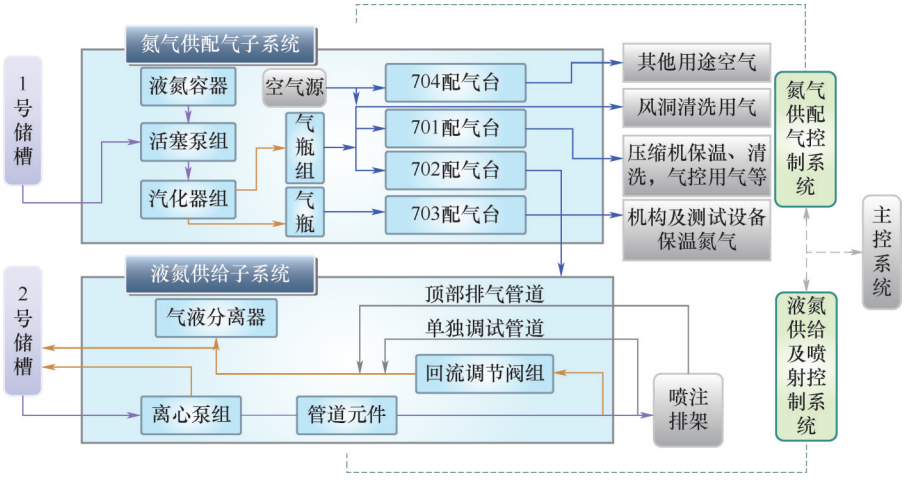


图3　液氮供给子系统总体框架图

Fig.3　Overall frame diagram of liquid nitrogen supply subsystem

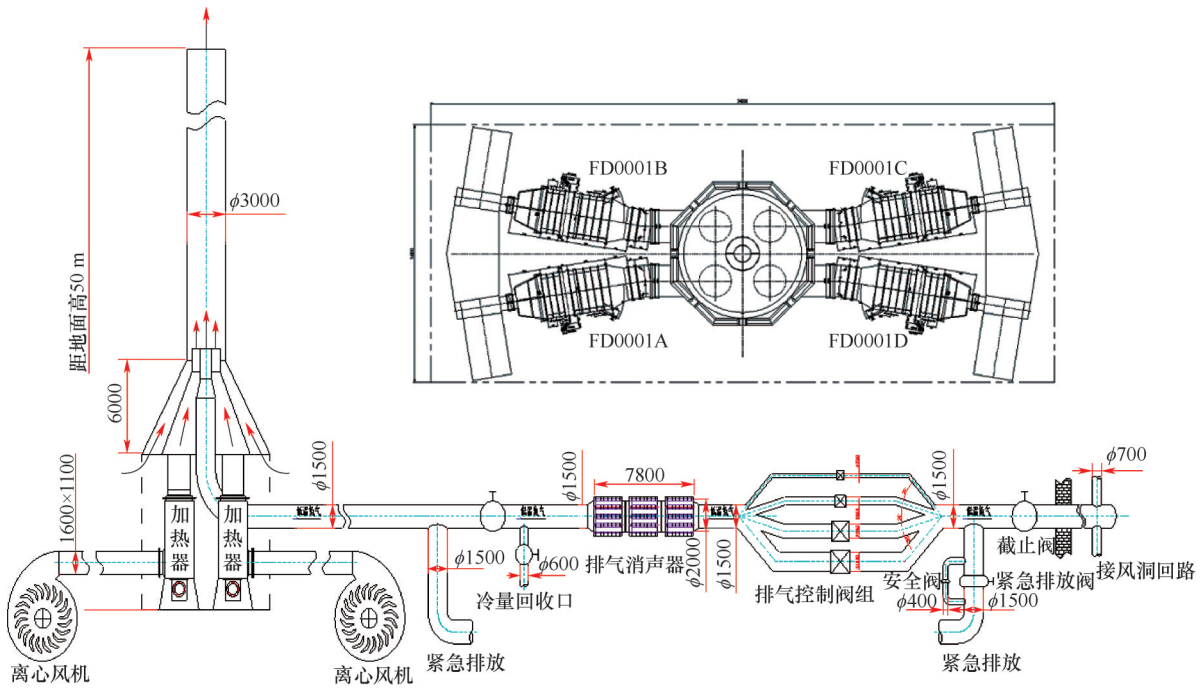


图4 气氮排出子系统组成图

Fig.4 Composition diagram of gas nitrogen discharge subsystem

实现。

采用克劳特循环的两级膨胀机串联的低温系统中，低温工质被压缩预冷后，在不同温度条件下分别进入两台膨胀机以制取高温区和低温区的冷量，减小了低压低温流体与高压流体、氮气的传热温差。对于大型氮气液化系统，该措施可显著降低能耗，但其代价是机组大得多、换热网络也更复杂，系统初投资和运行维护成本更高。3种方案的优缺点及适用范围对比见表1。在方案选择时，考虑到上游排气量巨大，平均排气量(80~100 kg/s)远超现有空分生产能力(处理空气量约10 kg/s)，回收率会非常低，而且蓄冷回收后的冷能无法在现场找到合适的利用办法，或者需要大量的改造才可能利用，因此系统建设采用第三种方案实施，结合上游排气实际特点进行了针对性的设计，其原理如图5所示。

采用低温氮气循环回收液化技术后，不再需要消耗功将氮从空气中分离出来，系统更加简单，而且其单位质量液氮的生产能耗会显著降低。由于氮气进入系统时的温度较低，以150 K[95 kPa(A)]为例，其自身就蕴含有冷量㶲(37.15 kJ/kg)，对其进一步降温液化的耗功必然比由常温气体降温液化更少。根据流程计算可知，针对本项目拟采用的低温氮气再液化系统，在正常运行时，其单位液氮产品能耗仅为0.457 kWh/kg，比空分制液氮设计能耗(0.635 kWh/kg)降低了27.9%。因此，装置消耗液氮量越大，其节能效果越显著。此外，低温氮气排放时需要使用燃烧天然气的方式掺混空气排出，在排气温度为20℃的情况下，每吨低温氮气(150 K)的排放需燃烧约4.2 m^3的天然气，同时带来82.3 t碳排放影响，系统建设具备一定的生态效益。

表1 氮气回收方案对比

Table 1 Comparison of nitrogen recovery schemes

可选方案	优点	缺点	适用场合	是否满足本系统要求
蓄冷回收流程	原理成熟，结构简单，阻力小，投资小	只能回收冷量，无法回收气体，回收后的冷量需要其他途径吸收	小型工厂空调供冷	否
现有空分改造	投资低，改造简便	切换控制难度大，回收量小	适用于类似利用LNG冷能的空分	否
增压膨胀液化	技术成熟，效率高，处理量大，适应范围广	投资大，建设周期长	适用于处理量较大的气体液化场合	是

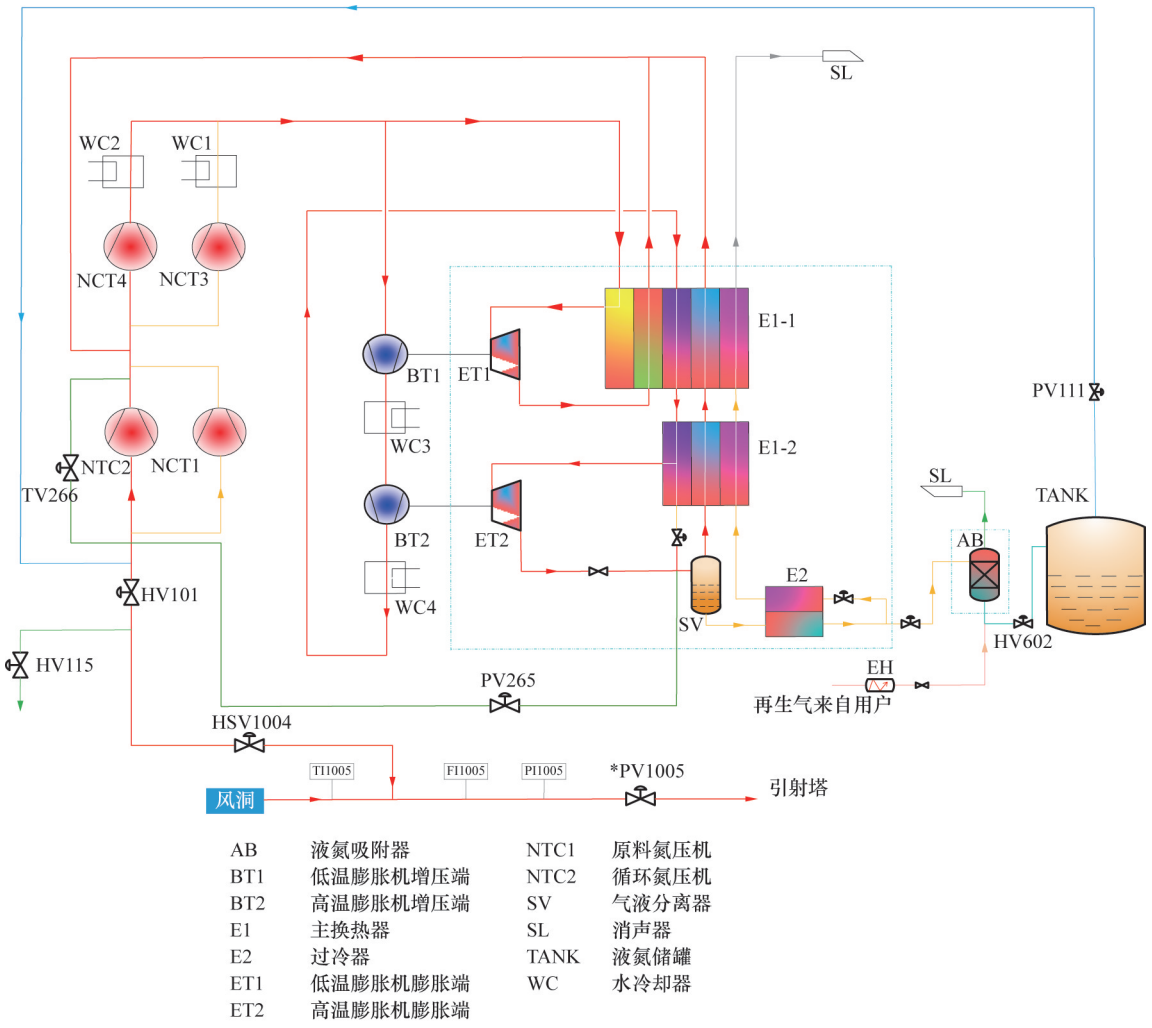


图5 冷量回收系统原理图

Fig.5 Schematic diagram of cold energy recovery system

装置的氮气排出流量范围很大，根据在150 K下的排气情况，运行Mach数在0.4以下时排量为9532~100000 m^3/h，多数在50000 m^3/h及以下，Mach数在0.4以上排气量从80000 m^3/h到几十万，越高的排气量试验时间越少。为了兼顾小流量下的回收及综合考虑技术熟度，设置一台20000 m^3/h和一台40000 m^3/h的机组并联，总共回收60000 m^3/h的低温氮气。单台机组可以在最低75%的负荷下工作，由此可以满足15000~60000 m^3/h排气量范围内的回收，覆盖绝大多数试验工况。实际使用平均回收量每年3万~5万吨，占总使用量的30%，其余氮气经前述气氮排出系统处理后排向大气。无法全部回收的主要原因是上游排气工况的间歇性及流量不稳定，如何更好地改善上游排气工况、提升回收效率将是本系统接下来的研究重点。

2 关键技术攻关

该装置的研制属于深低温（液氮温区）领域，涉及低温材料、低温设备、低温介质、低温绝热、低温测量与控制等相关内容，专业性强，系统设计的可靠性、安全性和可维护性要求非常高；同时由于系统运行中低温介质（液氮、氮气）流量范围宽（喷射和排放流量范围0.6~315 kg/s）、控制精度要求高（压力控制精度优于0.5%）、液氮喷嘴开闭引起喷射排架入口压力波动（精度优于1%）再稳定时间非常短（要求小于5 s），低温氮气排放量大，实现回收难度空前，这些都给系统的设计建设和设备选型带来了较大的难度，存在一定的技术风险，因此在项目论证和设计阶段开展关键技术问题研究与攻关，使存在的技术风险得到很好的解决，可为低温系统的设计、建设、调试和运行提供重要的技

术支撑。

2.1 大产量高品质液氮生产及超大排量储存技术

液氮生产系统液氮产量设计指标为360 t/d，设计时为当时国内液氮产量最大的单体全液体空分装置；液氮产品中水和二氧化碳含量要求极高，均优于0.25×10^{-6}，水含量技术指标优于超纯氮要求。同时实现大产量和高品质，为系统设计与建设带来了较大的挑战。

在工艺流程选择方面，系统主要技术指标及性能要求充分考虑系统能耗、安全、投资和使用条件等，进行了多方案的详细分析、计算和比较，确保选择的工艺流程先进、技术成熟、安全性高、投资较低。设计中对单塔、常规氧氮双塔和双塔双冷凝3种工艺流程方案进行了对比。其中，单塔工艺流程根据主冷温差的不同设定空压机排压0.406 MPa和0.595 MPa两种方案，进行详细分析比较，最终选择了空压机排气压力0.406 MPa的单塔工艺流程，该流程简单、操作维护方便，动设备少，可靠性、安全性最高，设备投资最省。

为确保超大瞬时排液量[25-27]和储槽结构的安全可靠，储槽的排液结构采用技术成熟、可靠性高的专用结构。具体是：采用底部排液方式，在储槽底部设置5根排液管，经储槽底板、水泥均压板、泡沫玻璃砖和水泥基础从储槽底部穿出，在管路中采用波纹管结构进行变形补偿。由于排液管路数量多、口径大且都在储槽底部，排液中容易出现涡流现象。设计中采用具有自有知识产权的专用防涡流装置结构且设计排液口中心距保持3 m以上，这样可以有效避免在排液时各个排液口互相影响。开展贮槽大流量供液下漩涡形成机理及其影响分析，建立排液过程三维模型，对最大流量排液过程（单独排液、有回液的排液）、防涡板对临界液位高度的影响等进行仿真分析，给出了储槽安全供液高度，优化了防涡板结构，仿真分析情况如图6所示。漩涡研究的结论除了优化防涡板结构外，直接用于储槽底部液氮离心泵的安全联锁设计，降低了安全液位要求，使得尽可能多地利用储存液氮，同时确保了超大流量供液时的运行安全。

2.2 液氮喷射流量与压力的精确控制和快速响应

液氮供给压力控制精度（指液氮实际供液压力

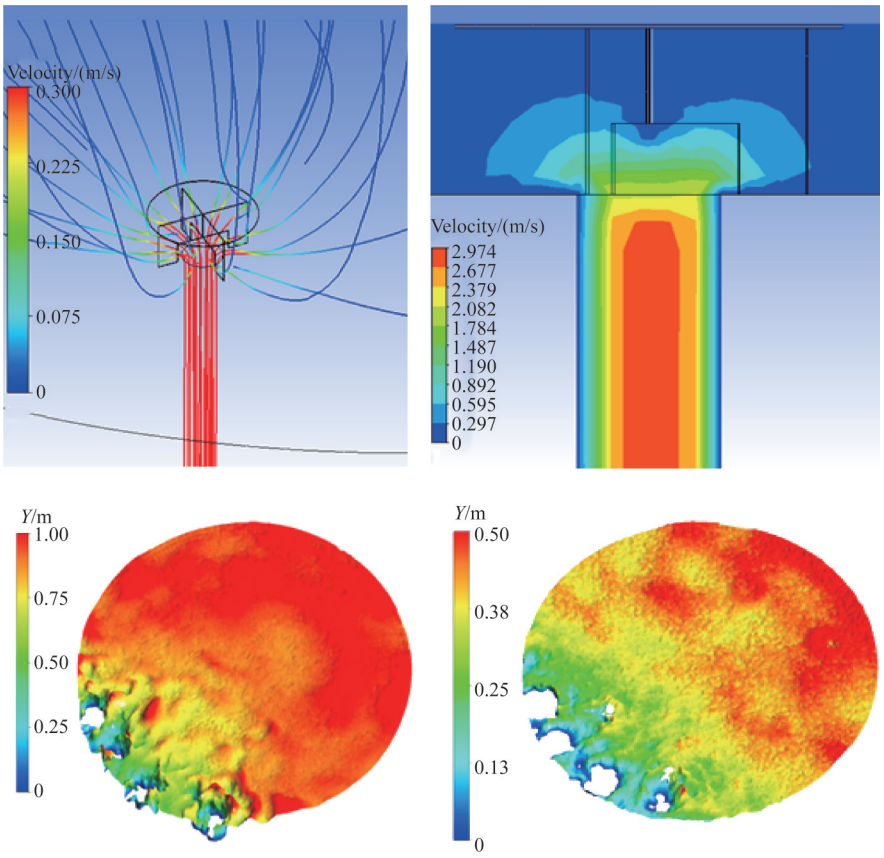


图6 储槽大流量供液仿真分析

Fig.6 Simulation analysis of large flow liquid supply in storage tank

表2 液氮喷射分辨率要求

Table 2 Liquid nitrogen jet resolution requirements

Mach数	110 K, 0.45 MPa			323 K, 0.115 MPa		
	试验段流量/(kg/s)	液氮喷射流量/(kg/s)	液氮喷射分辨率/(kg/s)	试验段流量/(kg/s)	液氮喷射流量/(kg/s)	液氮喷射分辨率/(kg/s)
0.15	2585.92	6.41	2.0242	372.06	0.44	0.1417
0.20	3412.11	9.26	2.6709	490.93	1.08	0.1870
0.30	4968.81	20.06	3.8895	714.91	3.54	0.2723
0.40	6359.09	38.52	4.9777	914.94	7.74	0.3485
0.50	7547.03	64.18	5.9076	1085.86	13.61	0.4136
0.60	8510.23	95.17	6.6616	1224.45	20.73	0.4664
0.70	9239.86	141.12	7.2327	1329.43	31.35	0.5064
0.80	9739.51	188.76	7.6239	1401.32	42.44	0.5338
0.90	10023.01	271.41	7.8458	1442.11	60.81	0.5493
0.95	8731.72	273.79	6.8350	1451.77	72.06	0.5530
1.00	7465.29	272.35	5.8436	1454.89	83.99	0.5542
1.10	6072.16	272.90	4.7531	1443.45	102.95	0.5499
1.20	4775.74	274.31	3.7383	1411.91	129.66	0.5378
1.30	3700.82	276.74	2.8969	1178.73	142.75	0.4490

同目标压力的偏差值与目标压力之比，采用绝对压力）要求优于0.5%，液氮流量变化后再稳定时间要求不大于5 s（控制精度达到1%的情况下），设计指标要求高，而且这两个指标本身就相互影响、相互制约，同时达到技术指标要求存在较大的困难。

液氮通过4组喷射排架向洞体内喷入，每组排架上布置数量不等的雾化喷嘴，喷嘴分为小流量、中流量、大流量和超大流量4种类型，同一流量的喷嘴在喷射截面上均匀分布，在各种流量状态时通过气控阀控制每个喷嘴的开闭，保证喷射点截面均匀性。单个喷嘴流量控制精度必须与总温控制精度相匹配。表2给出了两种极限工作状态（T_0=110 K，p_0=0.45 MPa；T_0=323 K，p_0=0.115 MPa）下液氮喷入量和液氮喷射流量分辨率的要求[28-29]。

图7显示了两种极限工况下对液氮喷嘴入口压力精度的控制要求。可以看出，在Mach数为0.15，气流总温323 K时，对液氮喷射流量分辨要求最高，为0.1417 kg/s，喷嘴入口压力控制精度要求为0.5%。同时，根据风洞不同压力、不同Mach数、不同温度需要，试验中液氮喷射流量范围要求为0.6～315 kg/s，流量变化范围十分宽。为实现液氮宽范围流量的精确供给和快速响应，采取了多项措施来保证，主要包括液氮喷嘴合理选型、合理的工艺设计及控制策略、各环节控制精度的确定、大流量离心泵研制

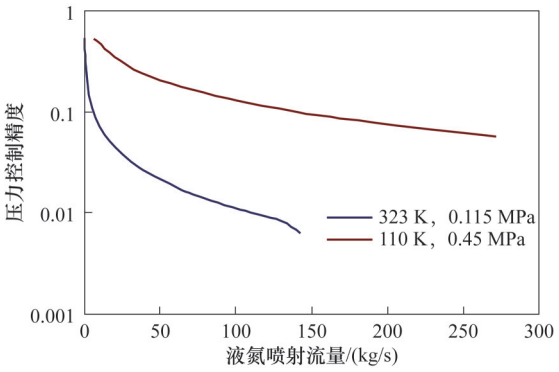


图7 两种极限工况下对液氮喷嘴入口压力精度的控制要求

Fig.7 Control requirements for inlet pressure accuracy of liquid nitrogen nozzle under two extreme working conditions

和液氮供给系统压力控制流程动态仿真及验证5个方面。

在针对压力控制的仿真方面，根据离心泵实际运转参数和喷嘴流量特性等参数计算得到各工况点的喷射压力、泵后压力和喷射流量，通过反复运行程序获得了不同阀门开度组合的最优方式，从而使阀门开度的调节时间最短，工况的调节时间在要求时间范围内。对4种典型工况进行动态模拟，考虑阀门动作时间的情况下，在工况切换时，5 s内将喷射压力波动控制在目标值的1%以内，45 s内将压力稳定在0.5%以内，其中一个仿真模拟工况见表3。

表3 动态仿真典型工况模拟工况A

Table 3 Dynamic simulation typical working condition simulated working condition A

液氮供给压力/kPa(A)	管路初始流量/(kg/s)	喷嘴数量变化
950	10	在0.5 s内关闭12只小喷嘴(单只流量0.048 kg/s)
950	10	在0.5 s内关闭12只小流量喷嘴(单只流量0.048 kg/s)和10只中流量喷嘴(单只流量0.252 kg/s)
615	150	在0.5 s内关闭50只大流量喷嘴(单只流量1.28 kg/s)
615	150	在1 s内关闭50只大流量喷嘴(单只流量1.28 kg/s)

此后,以液氮供给系统施工设计方案为建模依据建立了液氮供给系统物理模型,真实准确地反映系统的功能及工作原理。基于该模型,对管网系统开展了液击、两相流和管网动态调节特性分析,并对控制策略和稳态运行参数进行评估,提出具体的优化建议,解决了两相流液氮管网动态调节难题,实现了液氮喷射精确控制和快速调节。实际应用时得到与设计和仿真结果良好吻合的压力和流量控制效果,图8展示了其中一个工况下的压力控制情况。

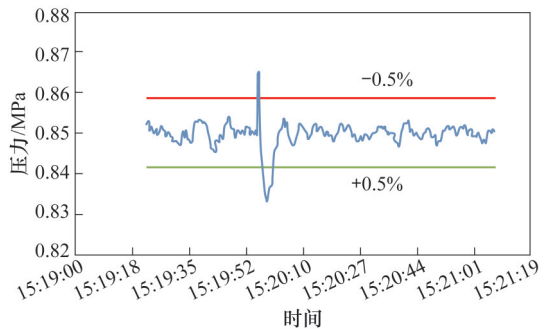


图8 喷射流量118 kg/s转变至183 kg/s的流量变化工况下的压力变化曲线

Fig.8 Pressure variation curve of injection flow changing from 118 kg/s to 183 kg/s

2.3 大流量低温氮气的安全排放

为维持系统压力稳定,需要将气化后的氮气排出洞体[30]。从系统中排出的低温氮气最低温度为110 K,最大流量达到315 kg/s。由于排出的氮气流量大、温度低,其排气羽流会呈现出上升、扩散、结雾、沉降等多种复杂状态,对风洞周围环境产生很大的影响。因此,在设计阶段需要对排气羽流进行必要的数值模拟,预测不同排气情况下羽流的扩散特性,从而优化排气引射器、排气塔和加热系统的设计参数,使排放气体达到要求。为确保大流量低温氮气的安全排放,气氮排出系统需要解决的关键问题是排气引射器设计及优化、高效无棉消声器设计、风机和空气加热系统国产化等。

开展排气羽流对周围环境影响数值模拟,在真实地形下,根据不同排放情况和天气条件组合状态计算了引射器引射环境空气排放模式、引射器+风机排放模式、引射器+风机+加热器排放模式等60多种羽流排放状态。数值模拟以排气塔围墙竖直向上的区域作为建模对象,研究排气塔出口的流场温度、速度以及氧含量水平,排气塔底部为速度入口,假设地面绝热,数值模拟的模型图如图9所示。模拟结果表明,在引射器引射环境空气排放模式,当引射流量/被引射流量>1∶1时无低温、缺氧危险,当引射流量/被引射流量≈1∶1时低温、缺氧危害影响处于临界状态,当引射流量/被引射流量 <1∶1时有低温、缺氧危险。

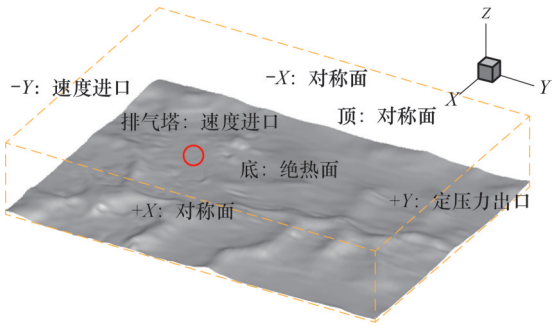


图9 排气羽流数值模拟模型图

Fig.9 Numerical simulation model diagram of exhaust plume

本团队开展了排气引射器及加热系统设计与优化研究。根据引射器设计参数进行典型运行工况下的数值模拟研究工作,验证了初步设计方案,能够满足低温氮气、环境空气和热空气3种气体的均匀掺混,在排气塔出口流场温度、速度以及氧含量均能满足排气系统的设计要求,数值模拟结果如图10所示。还设计建造了引射器缩比试验件及性能测试平台,测试在不同引射气流参数(总压、温度、流量等)、不同引射喷口型式(喷口尺寸、单喷口或多喷口、喷口位置等)、不同混合长度(排气烟道高度)下引射器的实际效率、混合均匀性、排气速度等。同时,还进行了多气流混合条件下的参数匹配特性研究,确定出最优化参数组合。

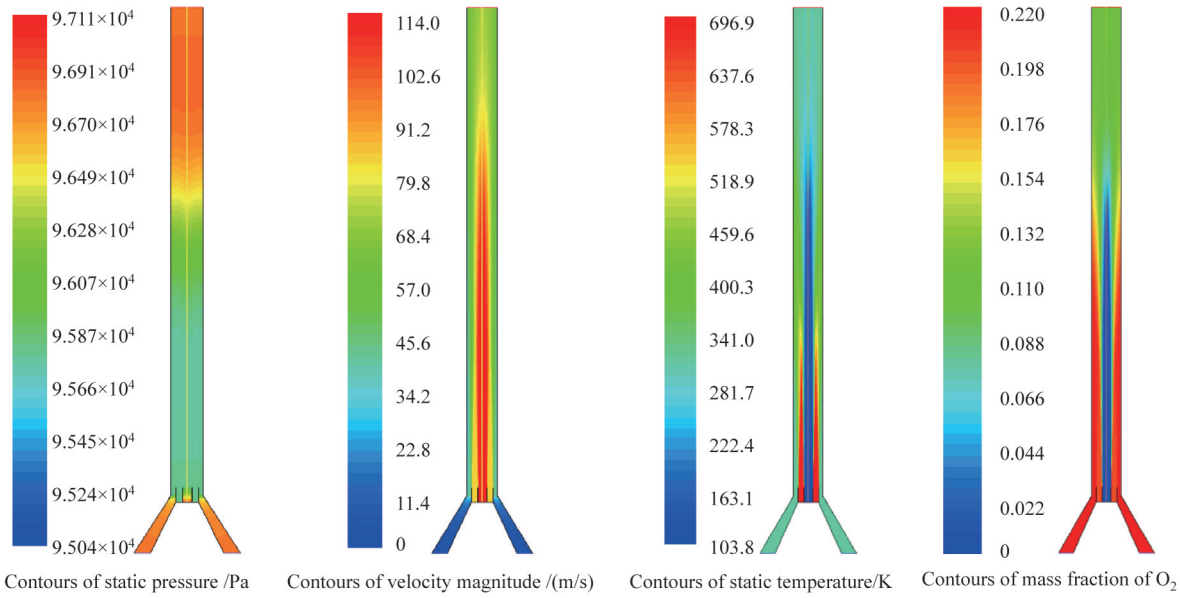


图10 排气塔内气体静压、速度、温度和氧气质量分数分布云图(低温氮气流量221.29 kg/s,温度110 K,热空气流量117 kg/s,温度700 K)

Fig.10 Cloud diagram of aerostatic pressure, velocity, temperature and oxygen mass percentage distribution in exhaust tower

3 结 论

本工作简要概述了某大科学装置配套的低温系统设计应用情况,建设质量满足设计和使用要求,系统风险全面化解,突破了一系列关键技术和设备国产化,并组建了专业的运行团队,为人才培养提供了良好的平台。

(1)系统中的液氮生产工艺流程可实现较低的液氮单耗和较短的启动时间,性能考核实测指标优于设计指标,可为频繁启停带来较大的节能效果。本系统投入试运行以来,已正常开停机40余次,生产液氮总量约14.5万吨,有力地保障了通气试验、性能调试任务和型号试验任务的液氮需求,同时为单位其他用氮设备提供液氮支持和保障。

(2)液氮供给系统实现了液氮压力与流量的精确调节,最大液氮喷射流量达322 kg/s,配置了当时国内最大的低温液体泵,为实现大科学装置低温运行与温度的精确控制提供重要支撑。

(3)建成的气氮排出系统实现了大流量低温氮气的安全排放,实测低温氮气最大排放量为257.6 m^3/s,满足排放需求,未对周围环境造成不良影响,实现了核心部件国产化,突破卡脖子难题。

(4)突破了系统与上游装置运行工况高效匹配、宽温域宽流量非稳定低温氮气高效回收等关键技术,成功研制出氮气及冷量回收系统,实现了超大规模透平膨胀机和循环压缩机的国产化研制。系统的建成,每年可回收液氮3万~5万吨,节约燃气消耗12.6万~21万立方米,减少碳排放247~412 t。

参考文献

[1] 李少鹏, 葛锐, 王国平. 国内外加速器低温系统近况[J]. 中国物理C, 2008, **32**(S1): 194-196.
Li S P, Ge R, Wang G P. Recent situation of accelerator cryogenic systems at home and abroad[J]. Chinese Physics C. 2008, **32**(S1): 194-196.

[2] Zhang Y. Beam-beam effects of single ring and partial double ring scheme in CEPC[J]. International Journal of Modern Physics A, 2016, **31**(33): 1644015.

[3] Kekelidze V D. NICA project at JINR: status and prospects[J]. Journal of Instrumentation, 2017, **12**(6): C06012.

[4] Agapov N, Emelianov N, Khodzhibagiyan H, et al. Liquid helium technologies at the cryogenic complex of the heavy ion collider NICA[J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2015, **28**(3): 1175-1179.

[5] Kalinin V, Tada E, Millet F, et al. ITER cryogenic system[J]. Fusion Engineering and Design, 2006, **81**(23/24): 2589-2595.

[6] Ge R. Application of large cryogenic system in big science facilities[C]//The 1st Low Temperature Metrology Science Workshop, 2019.

[7] 周廷波, 高超, 张正科, 等. NF-6风洞液氮喷射冷却系统的研制[J]. 航空动力学报. 2018, **33**(2): 327-337.
Zhou T B, Gao C, Zhang Z K, et al. Development of liquid nitrogen injection cooling system of NF-6 wind tunnel[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, **33**(2): 327-337.

[8] 廖达雄, 刘晓波. 低温风洞新形式: 换热引射式低温风洞[J]. 实验流体力学, 2009, **23**(3): 108-112.
Liao D X, Liu X B. A new type of cryogenic tunnel-injection cryogenic tunnel with heat exchanger[J]. Journal of Experiments in

Fluid Mechanics, 2009, **23**(3): 108-112.

[9] 廖达雄, 陶瑜, 俞鸿儒. 新型空气低温跨声速原理性风洞研制[J]. 流体力学实验与测量, 2000, **14**(3): 66-72.
Liao D X, Tao Y, Yu H R. The research of a new type of air cryogenic wind tunnel[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2000, **14**(3): 66-72.

[10] 俞鸿儒, 廖达雄. 用于低温风洞的新颖制冷方法[J]. 力学学报, 1999, **31**(6): 645-650.
Yu H R, Liao D X. Novel cooling means for a cryogenicwind tunnel[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1999, **31**(6): 645-650.

[11] Chow L C, Sehmbey M S, Pais M R. High heat flux spray cooling [J]. Annual Review of Heat Transfer, 1997, **8**: 291-318.

[12] 刘然, 张磊, 张显. 喷雾冷却技术在航天领域应用[J]. 真空与低温, 2018, **24**(5): 353-357.
Liu R, Zhang L, Zhang X. Applications of spray cooling technology in aerospace field[J]. Vacuum and Cryogenics, 2018, **24**(5): 353-357.

[13] 秦静. 低温环境下喷雾冷却系统的设计与试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
Qin J. Design and experimental study of spray cooling system in cryogenic environment[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.

[14] 邹天琦. 液氮喷雾换热的冷却实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
Zou T Q. Cooling experimental study on spray heat transfer of liquid nitrogen[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.

[15] 鲍松龄. 液氮喷雾数值模拟及其冷却特性实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
Bao S L. Numerical simulation of spray with liquid nitrogen and experimental study on its cooling characteristics[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.

[16] 薛绒, 阮一道, 赖欢, 等. 低温风洞大空间液氮喷雾冷却数值模拟分析[J]. 低温工程, 2019(1): 35-40.
Xue R, Ruan Y X, Lai H, et al. Numerical simulation of liquid nitrogen spray cooling in cryogenic wind tunnel[J]. Cryogenics, 2019(1): 35-40.

[17] 温维众, 尹晓光. 国内外输油(气)管道清洗技术综述[J]. 管道技术与设备, 2000(1): 34-37.
Wen W Z, Yin X G. A summary of oil & gas pipeline cleaning technology at home and abroad[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2000(1): 34-37.

[18] 谭力文, 敬加强, 戴志向, 等. 天然气管道氮气置换技术研究[J]. 管道技术与设备, 2007(3): 25-28.
Tan L W, Jing J Q, Dai Z X, et al. Study of natural gas pipeline replacement technology by nitrogen gas[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2007(3): 25-28.

[19] 赖欢, 陈振华, 高荣, 等. 大型高速低温风洞冷量回收的方法研究[J]. 西安交通大学学报, 2016, **50**(6): 136-142.
Lai H, Chen Z H, Gao R, et al. Cold energy recycle from cryogenic wind tunnel exhaust system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, **50**(6): 136-142.

[20] Romero Gómez M, Ferreiro Garcia R, Romero Gómez J, 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**: 781-795.

[21] Franco A, Casarosa C. Thermodynamic analysis of direct expansion configurations for electricity production by LNG cold energy recovery[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, **78**: 649-657.

[22] 高文学, 王启, 项友谦. LNG冷能利用技术的研究现状与展望[J]. 煤气与热力, 2007, **27**(9): 15-21.
Gao W X, Wang Q, Xiang Y Q. Present research status and perspectives of LNG cold energy utilization technology[J]. Gas & Heat, 2007, **27**(9): 15-21.

[23] 姜小明, 王九庆, 秦庆, 等. 中国高能同步辐射光源及其验证装置工程[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, **44**(10): 1705-1094.
Jiang X M, Wang J Q, Qin Q, et al. Chinese high energy photon source and the test facility[J]. Sci. Sin.-Phys.Mech.Astron., 2014, **44**(10): 1075-1094.

[24] 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㶲分析[J]. 低温工程, 2007(2): 40-45.
Yan N, Li Y Z. Scheme analysis on the liquid product air separation plant using the cold energy of LNG[J]. Cryogenics, 2007 (2): 40-45.

[25] 邱国毅, 高荣, 司标, 等. 低温储罐大流量排液过程数值模拟研究[J]. 真空与低温, 2023, **29**(1): 78-86.
Qiu G Y, Gao R, Si B, et al. Numerical simulation of large flow liquid discharge process in cryogenic tank[J]. Vacuum and Cryogenics, 2023, **29**(1): 78-86.

[26] 邱国毅, 高荣, 司标, 等. 低温储罐大流量回液冲击液面过程的数值模拟研究[J]. 低温工程, 2022(3): 37-45.
Qiu G Y, Gao R, Si B, et al. Numerical investigation on submerged hydraulic jumps of cryogenic tank with large flow[J]. Cryogenics, 2022(3): 37-45.

[27] 赵国锋, 陈叔平, 姚淑婷, 等. 低温球罐大流量排液过程的流动特性[J]. 石油学报(石油加工), 2025, **41**(1): 135-145.
Zhao G F, Chen S P, Yao S T, et al. Flow characteristics of large flow liquid discharge process in cryogenic spherical tank[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2025, **41**(1): 135-145.

[28] Kim T, Kim Y, Kim S K. Numerical study of cryogenic liquid nitrogen jets at supercritical pressures[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2011, **56**(2): 152-163.

[29] Branam R, Mayer W. Characterization of cryogenic injection at supercritical pressure[J]. Journal of Propulsion and Power, 2003, **19**(3): 342-355.

[30] 贾启明, 龚领会, 李正宇, 等. 液氮温区低温气体引射器的设计及实验研究[J]. 低温工程, 2020(5): 1-6.
Jia Q M, Gong L H, Li Z Y, et al. Design and experiment of cryogenic gas ejector at liquid nitrogen temperature[J]. Cryogenics, 2020(5): 1-6.