

大型氦气压缩机技术特点和发展趋势

胡忠军¹,王炳明¹,杨伟茂^{1,2},龚领会¹

(1. 中国科学院理化技术研究所 低温工程学重点实验室,北京 100190;

2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:氦气压缩机是大型低温系统的核心设备之一,压缩机的可靠性和经济性直接决定了低温系统的可靠性和效率。通过回顾大型低温系统氦气压缩机技术的发展历史,总结了喷油式氦气螺杆压缩机的技术特点、关键技术和国产化进程。分析了喷油式氦气螺杆压缩机在低温工程上的技术缺陷及带来的问题。对比分析了氦气压缩机无油化措施的优缺点和适用范围。提出了新型高效离心式氦气压缩机技术,介绍了离心式氦气压缩机技术中的关键点及其解决措施。期望高效可靠的氦气压缩机技术为相关大科学装置的稳定运行提供有力的技术保障。

关键词:螺杆压缩机;大型低温系统;离心式压缩机

中图分类号:O514.1;TB652

文献标志码:A

文章编号:1006-7086(2020)04-0270-08

DOI: 10.3969/j.issn.1006-7086.2020.04.003

Technical Characteristics and Development Trend of Large Helium Compressor

HU Zhongjun¹, WANG Bingming¹, YANG Weimao^{1,2}, GONG Linghui¹

(1. Key Laboratory of cryogenics, Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Helium compressor is one of the core equipment of large-scale cryogenic systems. The reliability and economy of compressor directly determine the reliability and efficiency of cryogenic system. This paper reviewed the development history of helium compressor technology in large-scale cryogenic systems, and summarizes the technical characteristics, key technologies and localization process of oil-injected helium screw compressor. The technical defects and problems of oil-injected helium screw compressor in cryogenic engineering were analyzed. The advantages, disadvantages and application scope of the measures of helium compressor without oil are compared and analyzed. A new high-efficiency centrifugal helium compressor technology is proposed, and the key technologies and their solutions in the centrifugal helium compressor technology were introduced. The efficient and reliable helium compressor technology would provide a strong technical guarantee for the stable operation of the relevant scientific apparatus.

Key words: screw compressor; large-scale cryogenic system; centrifugal compressor

0 引言

低温工程是第二次世界大战以后正式获得公认的一门技术,并迅速地从实验室研究发展到航空和前沿高技术领域的广泛应用。低温技术起源于更早时期的气体液化技术,其中空气液化技术对工业技术和经济的发展产生了深远影响,解决了当时兴

起的钢铁和化学工业等对大量廉价氧的需求问题。随着气体工业的壮大,发展了低温工程综合技术,并产生了未曾预计到的新作用。氦气作为液化温度最低的气体,也是最后一种被液化的气体。在过去的一百多年时间里,液氢和液氦温区的大型低温技术取得了几个里程碑式的进步,特别是在液氦温度

收稿日期:2020-03-20

基金项目:国家重大科研装备研制项目(Y5AF021ZD8)

作者简介:胡忠军,博士,主要从事大型低温技术研究。E-mail: zjhu@mail.ipc.ac.cn。

引用本文:胡忠军,王炳明,杨伟茂,等. 大型氦气压缩机技术特点和发展趋势[J]. 真空与低温, 2020, 26(4): 270-277.

HU Z J, WANG B M, YANG W M, et al. Technical characteristics and development trend of large helium compressor[J].

Vacuum and Cryogenics, 2020, 26(4): 270-277.

这种极端试验环境下,超导现象被发现;卡皮查的透平膨胀机技术,提高了低温系统的可靠性和效率。二战后,核能、空间技术和超导强磁场等尖端领域相继提出对低温技术的要求,液氢和液氦的大规模生产迅速实现,超导工程的复杂科学技术问题也得以较快地解决,出现了低温工程发展的又一全新局面^[1]。

随着超导和大型强子对撞机、可控核聚变等前沿科学技术的发展,以氦气为工质的大型低温系统的应用越来越多,规模也越来越大^[2]。这种大型低温系统一旦出现故障,通常会使得大科学装置处于瘫痪状态,主要原因是大型超导磁体的复温和降温一般需要较长的恢复周期。表1统计了一个典型低温系统的故障时间^[3]。

表1 NIFS 低温系统故障时间统计数据(1998-2011)

Tab. 1 NIFS cryogenic system failure time statistics (1998-2011)

故障原因	故障次数	停机时间/h	平均停机/h
测量和控制系统	11	280.9	25.5
氦气螺杆压缩机	6	278.2	46.4
停电故障	4	10.0	2.5
公用设施问题	4	7.5	1.9
误操作	1	0.1	0.1
合计	26	576.7	22.2

大型氦低温系统运行的可靠性主要决定于运动设备,即压缩机和膨胀机。氦气压缩机作为大型低温系统的核心部件之一,是整个低温制冷循环的动力之源,也是氦低温系统最主要的耗电单元,其效率几乎可以决定整个低温系统的运行效率。以液氦温区的大型低温制冷机的能效比为例,一般须消耗250~500 W的功率才能获得1 W@4.5 K的制冷量^[4]。目前大型低温系统的规模不断扩大,如欧洲核子中心(CERN)的大型强子对撞机(LHC)拥有8台18 kW@4.5 K制冷机;正在建设的国际热核聚变实验堆计划(ITER)的低温系统制冷量为65 kW@4.5 K。如图1所示^[5],随着低温系统规模的扩大,大型低温制冷机制冷功率不断增大,目前最大的氦液化器为5 000 L/h,最大的氦制冷机为25 kW@3.8 K,氦气压缩机组的功率消耗也越来越大,其热力学效率成为影响大型低温系统能效的重要指标。因此,围绕提高氦气压缩机可靠性和热力学效率两个方面的研究一直是大型低温技术关注的研究方向^[6-7]。随着大型氦低温系统在大科学工程等领域的应用需求和规模的扩大,对低温系统的紧凑性、可靠性、经济

性三方面的要求也越来越高。大科学装置也曾经出现过雨季雷击引起电网波动造成氦气压缩机停车的故障。高效和高可靠性的各种氦气压缩机技术是大型低温工程发展的关键技术之一。

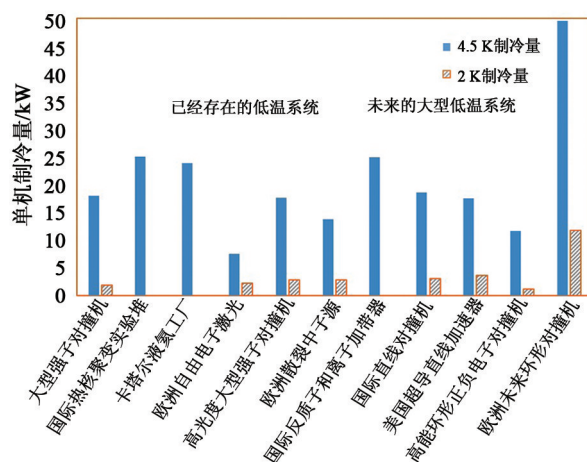


图1 大型低温制冷机及应用

Fig. 1 Large cryocooler and its application

1 氦气压缩机的种类及其技术特点

氦气压缩机的技术特点是由氦气特殊的物理性质所决定的。其中分子量小容易泄漏和绝热指数大引起的压缩热大是制约氦气压缩机技术发展的两大难点。根据理论分析,不同气体的漏气量与其气体分子量的平方根成反比。

氦的临界温度只有5.19 K,是自然界中最难液化的气体,因此被选择作为大型低温系统的主要工作介质。氦气独特的物理性质也决定了氦气压缩技术上的特点和难点。氦气绝热指数高(1.667),远高于空气的绝热指数(1.4),因此压缩过程中容易产生更高的压缩热;加之氦气的比热容小,引起的压缩温升很大。以对室温氦气进行绝热压缩引起的温升为例,在压比为14时,理论温升约为550 °C,这比压缩同样的空气温升高了约200 °C。由于氦气分子量小,运动黏度小、渗透性强,极易泄漏,所以一般被用做检漏介质。

按照压缩气体的原理不同,压缩机通常分为容积型和速度型两大类。容积式压缩机主要基于通过改变气体容积,以增加单位容积内气体分子数目,从而提高压力的原理来工作的。容积式压缩机根据活塞等部件运动方式的不同,分为往复式和回转式两类,大型低温工程上常用的螺杆式压缩机属于回转式。速度式压缩机的工作原理是通过叶轮对气体做功而获得高速度,在流道和扩压器内进一

步使速度能转化为压力,从形式上又分为离心式和轴流式两种。各种压缩机的发展趋势为:提高效率、提高可靠性、大容量、结构紧凑、延长使用期限、降低噪音和振动^[8]。与其他类型的压缩机相比,活塞式压缩机对工作压力和排气量的适用范围广,效率高,适应性强,在进行气量调节时,排气压力变化很小。因此,活塞式压缩机曾经是氦低温工程最主要的压力来源动力设备。表2为不同类型氦气压缩机主要优缺点的比较。

表2 不同类型氦气压缩机主要优缺点比较

Tab. 2 Comparison of main advantages and disadvantages of different types of helium compressors

氦气压缩机类型	优点	缺点
活塞式	技术成熟、制造成本低、热力学效率较高	余隙容积瓶颈 振动和噪音大
螺杆式(喷油)	结构简单、易损件少	复杂的冷却 和除油设备
离心式	输气量大、结构紧凑、免维护周期长、对介质无油污染	单级压比较低, 容易发生喘振
轴流式	流量大、效率高	叶轮较长, 机组较大

我国试制的第1台100 L/h大型氦液化设备是由585所完成的,当时遇到的最大技术问题是氦气泄漏。使用的3台氦气压缩机,是用活塞式空压机简单改造成的。虽然改进了轴封,但每次运行中,仍要漏掉上百立方米的氦气。压缩机振动大是引起泄漏的主要因素。泄漏主要发生在进排气活门压盖和管道法兰、传感器接头等部位,这些部位虽然静态不漏,但经过一段时间运行后因为振动引起松动而发生漏泄^[9]。1970年前后,我国氦低温工程逐步发展起来,但是氦低温系统所配用的活塞式无润滑压缩机仅有2Z2.8-4/40型一种,几乎无选择余地。这种活塞式氦气压缩机遇到的最大问题是排气量比空气介质减小30%,初期运转时功率的消耗大幅度超出额定值。气阀寿命很短,甚至有的仅工作半小时就发生断裂。分析发现,氦气的内部泄漏造成输气量的减少,活塞径向颤动,使密封圈形成了较大的间隙。初期功耗增加,也是由于氦气压缩热大,热变形引起气缸活塞的热态间隙变小,造成磨损所导致^[10]。

高压氦气压缩机曾经只有膜式或往复式无油压缩机。其中膜式压缩机的优点是:完全无油,气体介质不受污染,压缩级数比往复式少。缺点主要

是膜片寿命短,占地面积较大。在诸多典型的压缩机中,历史悠久的活塞压缩机的应用比较广泛,这主要是由于其具有很高的“性价比”。活塞压缩机容易实现高压比的主要技术特点和原因是弹性活塞环可有效减少内部泄漏。长期以来的研究表明,活塞压缩机存在的余隙容积问题,已经成为制约其发展的瓶颈。由于采用曲轴连杆机构驱动活塞往复运行而造成设备形体大而重,并且有较大的噪声和振动。一旦能够突破余隙瓶颈问题,活塞压缩机有可能部分取代甚至完全取代某些领域其他各种压缩机机型^[8]。

2 螺杆式氦气压缩机的发展

螺杆压缩机结构简单紧凑,易损件少,免维护周期较长,具有较高的容积效率,流量可以无级调节,主要缺点是噪声大,必须配套较为复杂的油分离、冷却、过滤设备,因而造成机组体积较为庞大。为提高氦气压缩效率,转子最好使用磨床加工,但是磨床装备限制了加工转子的直径(通常不大于410 mm),从而限制了单台螺杆压缩机的最大输气量。对于大规模的低温系统通常要使用数十台的螺杆压缩机并联使用。

与活塞压缩机等其他类型的压缩机相比,螺杆压缩机是一种比较新颖的压缩机。最先发展起来的是无油螺杆压缩机,1957年喷油空气螺杆压缩机投入应用^[11]。虽然1878年Krigar就发明了双螺杆式压缩机,但是直到1934年,Ljungstrom Steam Turbine company的Alf Lysholm在进行有关气体透平研究中设计的螺杆压缩机才真正得以实际应用。1950年,喷油螺杆式压缩机飞跃发展,替代活塞压缩机应用在制冷装置上。由于其结构简单、易损件少、在大的压力差或压力比的工况下排气温度低、对制冷剂中大量的润滑油不敏感、良好的输气量调节性、很快占据了大容量往复式压缩机的市场。我国从1965年开始研制螺杆式空气压缩机,1997年,国产氦气螺杆压缩机应用在“神舟”飞船地面环境模拟装置KM6上。

在大型低温技术领域,自从1979年美国费米国家加速器实验室在“万亿电子伏特加速器项目(TEVATRON)”的低温系统中第一次尝试性地使用喷油式氦气螺杆压缩机以来^[12],喷油式氦气螺杆压缩机凭借大容量、低振动、高可靠性和散热性能好等优势,基本替代了其他类型压缩机在大型氦低温系统中的应用。将空气压缩机等改造成氦气压缩机,运

行实验数据表明,在同等啮合间隙和同等工况条件下,氦气工质的容积效率和热力学效率比空气介质的效率一般低 10 % 左右。

国外的氦螺杆压缩机通常是在空气螺杆压缩机的基础上通过特殊的改造设计制成。如目前氦制冷领域广泛采用的氦气螺杆压缩机就是德国凯撒(KAESER)公司在系列空气螺杆压缩机基础上改造而成,其喷油螺杆压缩机的单级压比可达 15:1。其他掌握氦气喷油式螺杆压缩机技术的公司还包括美国寿力公司(SULLAIRCORP)、德国艾珍(AERZEN)、英国的豪顿(HOWDEN)、日本的前川(MYCOM)等。这些公司的一些定型产品由于与林德(Linde)等低温公司之间的技术排他性协议,一般不对中国用户单独出口。即使允许独立出口到中国的产品,除了价格昂贵,还实行最终用户的限制,禁止使用在航天、核能等应用领域。这严重制约了我国大型低温技术及其相关应用领域的发展。国际上关于氦气喷油螺杆压缩机方面的报道也主要是对低温工程上一些运行测试数据的报道。

我国在氦螺杆压缩机方面尚无成熟的产品,主要原因是研制难度大。由于对氦气物性认知的限

制,生产厂家基本不具备研发氦气螺杆转子的技术能力,对氦气喷油螺杆压缩机的研究只能参照制冷工质或空气螺杆压缩机的研究。虽然在大型环模装置 KM6 中曾经有过氦气螺杆压缩机改制的先例,但是轴封和油分问题都没有解决。2003 年武汉新世界制冷公司为中科院等离子所 EAST 项目改制了氦气螺杆压缩机,但该压缩机经常出现抱轴等严重故障,性能不稳定,效率远低于国际水平。2010 年以来,中国科学院理化技术研究所国家重大科研装备研制专项“大型低温制冷设备研制”支持下,搭建了氦气螺杆压缩机性能测试平台^[13],开展了系列化氦气压缩机的研制工作,通过联合国内相关单位,实现了氦气喷油式螺杆压缩机的国产化。采用缩紧主机三大间隙、新型线开发、喷油雾化冷却等技术,提高了热力学效率和可靠性,解决了氦气分子量小带来的极易泄漏以及绝热指数高带来的压缩热大等两大技术难点。在喷油冷却特性研究、转子型线优化、机组方案优化等基础上,试验测试结果表明,压缩机的容积效率和绝热效率接近国际水平,如表 3 所列^[14]。在开发过程中也遇到了为提高效率而调整转子间隙,导致间隙过小引起机头抱死事故。

表 3 国产氦气螺杆压缩机与国际水平的比较

Tab. 3 Comparison between domestic helium screw compressor and international level

编号	主要参数	国际水平		国内水平	
		德国凯撒	样机 A	样机 B	样机 C
1	最大泄漏率/(Pa·m ³ /s)	1×10 ⁻⁸	2×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	5.8×10 ⁻⁸
2	含油量/(mg/kg)	≤2	2.69	1.74	0.17
3	等温效率/%	48.45	45.3	41.83	46.3
4	容积效率/%	未知	92.2	85.08	91.7
5	绝热效率/%	86.1	80.4	73.25	82.4
6	噪音/dB	75	94	83	76.5
7	外形尺寸/mm	2 600×1 407×2 192	3 300×2 000×2 200	3 460×2 100×2 480	2 420×1 600×2 050
8	生产周期/m	12	6	6	8
9	型线齿数比	Sigma 5/6	SRM I 5/7	西交大 5/6	伦敦城市大学 N4/5

国内外喷油式螺杆压缩机的研究和发展基本上是围绕提高螺杆压缩机性能而开展的,主要包括降低转子泄漏三角形的型线设计与优化、排气孔口流动过程的研究、刀具计算及生产实际中的问题研究、转子振动与噪声、转子碰撞、喷液螺杆压缩机研究等。氦气喷油螺杆压缩机的研究主要集中在转子型线的改进及润滑油特性方面。研究者对不同转子型线和采用不同类型润滑油的氦气螺杆压缩机进行了性能试验,结果表明,新型的润滑油和改

进的转子型线降低了压缩机的轴功消耗,性能提高 5%^[15]。Dreksler 等^[16]研究了螺杆压缩机工作过程中油-气质量比对容积效率的影响以及润滑油的黏度对压缩机功耗的影响。

氦气喷油式螺杆压缩机利用喷入大量的油来吸收压缩热(约占输入功率的 90%),把压缩过程的温度升高值控制在相对较低水平,喷油内冷却是使其得以迅速发展的关键技术。采用喷油冷却可以使压缩过程更接近于等温压缩过程,从而获得较高

的热力学效率。同时由于螺杆转子之间黏度较高的油膜产生密封效应,有效地减少了氦气压缩过程中的内部泄漏。但是转子接触面间的这层油膜还是用以传递转子转动的力矩,工作过程中油膜厚度不断变化,密封具有动态的特性。实际压缩的混合物中的油-气质量比通常在30~50,从质量流量上看,主要的工作介质是油气。螺杆转子中发生的喷油冷却过程与经各种间隙通道的泄漏传质过程紧密相关。工程上表现为热力学效率和容积效率并不能单纯依靠加大喷油量实现,宏观效率与实际油气混合物(油气溶胶状态)雾化程度也息息相关。图2为2.5 kW/4.5 K氦制冷机的氦气喷油式螺杆压缩机主机。



图2 2.5 kW/4.5 K氦制冷机的氦气喷油式螺杆压缩机主机图

Fig. 2 The main engine of the oil-injected helium screw compressor developed for the 2.5 kW/4.5 K refrigerator

氦气喷油式螺杆压缩机是利用旋转的两个转子的啮合来减小基元容积实现压力升高的,在这个过程中,转子与机壳之间有小的间隙,阴阳转子能保持一定小的间隙而互不接触地旋转。为保证安全运行,在设计中须预留足够的工作间隙补偿制造缺陷和公差来防止转子干涉,因此转子间隙中的氦气泄漏问题是不可避免的,通常利用阴极转子间隙中油膜的辅助作用密封气体。螺杆压缩机采用间隙节流密封。间隙设计是提高双螺杆压缩机性能的关键技术,各种间隙的内部泄漏是引起容积效率下降的主要因素。转子的冷态间隙与工作时的热态间隙显著不同,在负荷工作下,温度和压力引起的变形影响运行中各个部位的泄漏通道间隙大小和流态,对性能产生显著影响。为有效提高氦气螺杆压缩机的容积效率,须在预防转子干涉和密封两

方面达到最佳的妥协。

3 新型高速离心式氦气压缩机

传统低温系统主要使用喷油式螺杆压缩机,借助于四五十倍于氦质量流量的油冷却使得等温效率达到50%以上。但是为防止低温下油污染、油冻堵等灾害事故,需要精密的油气分离技术,氦气工质中油含量要求低于 $10 \mu\text{g}/\text{kg}$ 才允许进入冷箱。工程上,用于油气分离的过滤器滤芯、活性炭、润滑油等材料每一到两年必须定期更换维护才能保证系统运行的安全。润滑油是影响传统氦低温系统可靠性的重要因素,低温部件的油污染是不可彻底清洗恢复的,因此须定期检修。如果压缩机设计为无油的,氦制冷系统将避免油污染的问题,可靠性将会得到显著进步。离心式透平压缩机通过高速叶轮对工质做功实现压力的提升,没有油密封,并可采用无油的气体轴承或磁轴承润滑,彻底实现无油。从低温工程的实际要求和传统大型低温系统的技术特点考虑,发展诸如采用磁悬浮轴承的离心式氦气压缩机非常迫切。图3为日本J-PARC低温系统因油污染进行检修的照片。



图3 日本J-PARC低温系统因油污染进行检修照片
Fig. 3 Overhaul of J-PARC cryogenic system due to oil pollution in Japan

低温制冷的过程是由一系列热力过程组成的循环,其主要作用是将氦气工质冷却到所需的低温温度,并补偿系统的冷损,以获得低温下的制冷量或获得液氦。氦制冷/液化循环是利用氦气工质进行循环的状态变化过程,使氦气低温液化时放出的热量转移到环境中去,由于是一个熵减的过程,要消耗一定的能量。液氦的正常沸点是4.2 K,在这样的低温下制取冷量所消耗的能量很大,因此提高循环效率十分重要。氦气节流的最高转化温度为46 K,仅约在7 K以下节流才能产生液体,因此液

化氦必须使用液氮或液氢预冷,或者使用气体对外做功膨胀获得冷量预冷。获得低温的过程中所付出的代价(能耗)就是通过压缩机把氦气工质提高到所需要的压力。

基于将低温环境下的热量通过复迭式制冷循环逐级“泵送”到环境温度的复叠制冷思想,重新分析氦低温流程,可以将液氮甚至超流氦温度下的热量逐级转移。如图4所示,把原本在室温环境下完成的氦气压缩过程改为在液氮环境温区下进行,计算表明典型氦液化工况下气体压缩功只有室温下压缩功的1/4左右,但同时为了冷却(或称转移)这部分功耗在液氮温度下形成的热负荷,须用液氮冷却,或者使用混合工质低温预冷,最终在环境温度

下功耗将扩大十几倍才能实现制冷循环。因而理论上整个循环的能效比(COP)将比传统的室温压缩循环提高15%~20%。由于受液氮温度下各种润滑油的制约,完成整个基于液氮温区冷压缩热力学循环的最关键技术是离心式冷压缩机技术。这种新型氦制冷循环在国内首次提出,整个大型低温系统的尺寸将减小60%左右,结构更为紧凑,去掉了庞大繁琐的室温压缩机及其冷却和油分离单元,整机性能更加可靠,免维护周期延长一倍以上。同样,20世纪末,日本也启动了一个“超级GM”的国家项目,由石川岛播磨重工业株式会社(IHI)和前川制作所(MYCOM)研究开发出类似的先进氦制冷系统,并实现了预期的效率^[7]。

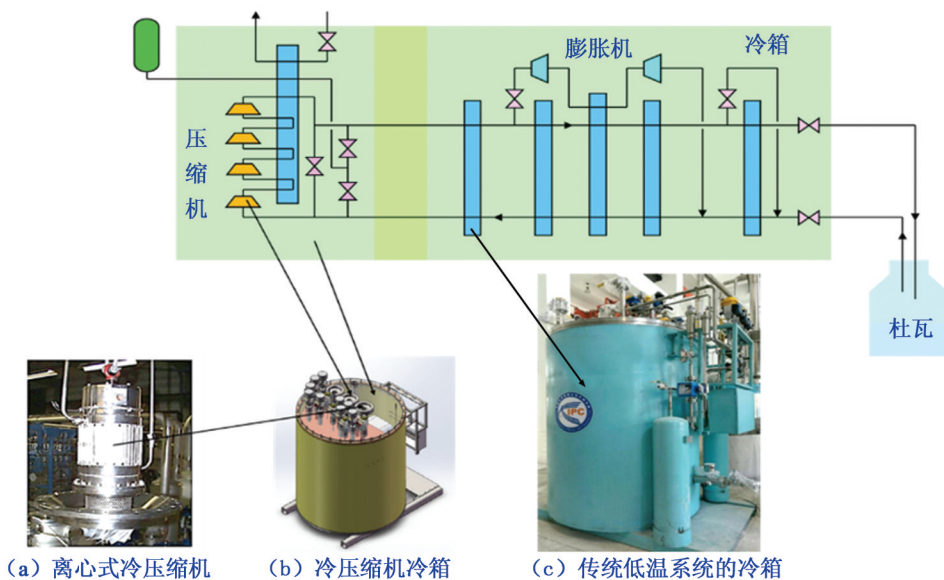


图4 基于液氮温区压缩的大型高效氦低温制冷系统图

Fig. 4 Large-scale high-efficiency helium cryogenic refrigeration system based on liquid nitrogen compression

液氮温区的离心式压缩机在整体结构上分为常温和低温工作部分,常温部分包括电机驱动装置、电磁轴承、变频控制器。低温部分包括压缩机进气道、工作叶轮、扩压器和蜗壳组成的气体流通部分。离心式压缩机主要工作部件是高速旋转的叶轮和扩压器。通过叶轮对气体做功,在叶轮和扩压器的流道内,利用离心升压作用和降速扩压作用,将机械能转换为气体压力能。叶轮对气体做功是气体压力升高的根本原因,对于尺寸一定的叶轮来说,转速越高,气体获得的能量就越多,压力的提高也就越大;室温下离心式压缩机通过一个叶轮能使气体提高的压力是有限的,如果要求的气体压力较高,就要采用多级压缩。在叶轮尺寸确定之后,压缩机的转速越高,每一级的压比就越大,因此对于

一定的总压比来说,压缩机的级数就可以减少。但是,随着转速的提高,叶轮的强度也要求越高。因此,离心压缩机一般采用多级压缩。

离心式透平压缩机不是最适合压缩小分子量氦气的压缩机。因为氦的分子量小,增加相同的压缩比,氦的焓增为空气的7倍。压比与叶轮圆周速度的平方成正比。由于最大圆周速度由机械强度决定,为获得传统的克劳德循环需要的压力,室温下必须使用超过10级串联工作的氦气透平压缩机。等温压缩功与吸气温度成正比,因此可以通过降低吸气温度来提高压比,进而减少达到需要高压力的压缩机级数。采用基于液氮温区离心式压缩机,一般只需4级离心压缩就可以提供克劳德循环所需要的压比。

液氮温区离心式压缩机的主要技术问题是可靠性和效率,效率问题又包括气体动力学损失和漏热损失引起的效率降低等。随着气体动力学研究的发展,从流道设计上可以进一步提高离心压缩机的效率;近年来小流量窄叶轮的加工工艺、电磁悬浮轴承和高速电机技术也取得了重要进展,正是有了这些基础,研制液氮温区离心式氦气压缩机才具有真正的可行性。为了使压缩机处理小分子氦气时能够取得最佳值,必须设计出更高的转速,否则必须降低每级的压比。而材料强度决定了转速具有上限。国外对高速电机及相关技术的研究比较早,经过近年的发展,已具备了相当的基础,取得了很多的研究成果,产业化势头良好。

对于液氮温区的离心式氦气压缩机,由于压缩机转子的质量和推力载荷太大,而气体轴承通常支撑不住,因而采用磁力轴承,磁力轴承自动平衡系统更适应转子变形。早期的磁力轴承由于硬件的限制,刚度和阻尼等性能指标都远达不到期望值。近20年来,随着电子、计算机技术及控制理论等学科的发展,磁轴承技术也得到了飞速的发展。目前,瑞士、美国、日本等国家研制的磁轴承性能指标已经很高,并且已成功应用于透平机械、离心机、真空泵、机床主轴等旋转机械中。

如图5和图6所示,中国科学院理化技术研究所目前已研制了1台液氮温区高速离心式氦气压缩机样机,正在进行调试。初步实验表明,转子最高转速达到了85 000 r/min。

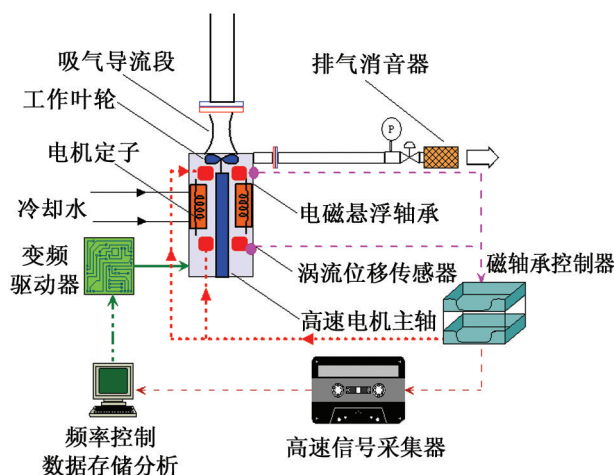


图5 离心氦气压缩机的基本结构和性能测试实验装置示意图

Fig. 5 Basic structure and performance test device of centrifugal helium compressor

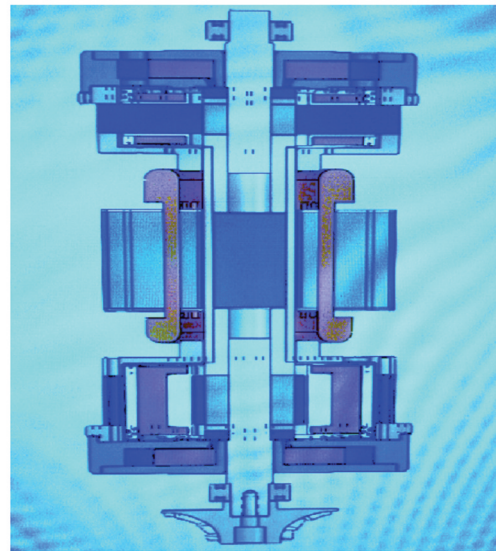


图6 高速电机驱动的离心压缩机剖面图

Fig. 6 Profile of centrifugal compressor driven by high-speed motor

4 结论

氦气压缩机是大型低温系统的核心设备,其效率和可靠性决定了低温系统的经济性和可靠性。随着大型低温技术应用需求和规模的不断扩大,传统的活塞式和螺杆式压缩机有了一定的局限性。氦气压缩机呈现从活塞机到螺杆机,再到离心式压缩机发展的技术趋势。各种类型的压缩机都有自己的适用范围,科学技术和整体工业技术的进步,必然会推动压缩机技术的发展。通过分析氦气容易泄漏和压缩热大的技术特点,不同类型的氦气压缩机都是围绕如何提高效率和可靠性开展技术改进的。喷油式氦气螺杆压缩机的国产化取得了突破性进展,各项性能指标达到了国际先进水平。但是工程经验表明,随着低温系统长年累月的运行,螺杆压缩机虽然采用了庞大的精密油分离系统,依然暴露出严重的低温部件油污污染问题。随着高速电机和电磁悬浮轴承等技术的进步,高速离心式氦气压缩机取得了更大的发展,大幅降低了低温系统的尺寸,延长系统的免维护周期,提高系统功率容量和效率。

参考文献:

- [1] 张亮,李静,熊联友. 氦气液化100周年回顾[J]. 低温工程, 2008(5):1-6.
- [2] CAILLAUD A, CRISPELS, GRABIE V, et al. Evolution of the standard helium liquefier and refrigerator range designed by

- air liquide DTA[J]. France Adv Cryog Eng, 2008, 53: 830-837.
- [3] MITO T, IWAMOTO A, HAMAGUCHI S, et al. Improvements of the LHD cryogenic system for further highly reliable operations. Cryogenics Operation[C]// Kobayashi Hall, KEK, Tsukuba, Japan, May, 2012.
- [4] FCC: le CERN étudie un accélérateur de 100 km[EB/OL]. <https://lasciencepourtous.cafe-sciences.org/articles/fcc-le-cern-etudie-un-accelereur-de-100-km/>, 2015.
- [5] LEBRUN P. Cryogenic refrigeration for the LHC[C]//MaTeFu Spring Training School Cadarache, CERN, Geneva, Switzerland, April 2009.
- [6] KISHIT, KUDO M, IISAKA H, et al. High efficiency, high reliability oil injection type helium screw compressor[C]//Advance in Cryogenic Engineering, 1991(37): 771-778.
- [7] 徐光福, 庄明, 盛林海, 等. 氦低温系统螺杆压缩机运行分析及节能优化[J]. 低温工程, 2009(2): 15-19.
- [8] 严天宏, 梁嘉麟, 李青. 压缩机的现状、发展及新型技术展望[J]. 压缩机技术. 2011(01): 52-58.
- [9] 张玉文. 氦系统的漏泄和检查[J]. 低温与超导, 1983(4): 25-27.
- [10] 杭乃敦. 2Z2.8-4/40 氦气压缩机的改造[J]. 压缩机技术, 1989(2): 16-17.
- [11] 邢子文. 螺杆压缩机——理论、设计及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [12] CRYOGENIC CONSULTANTS, INC. Evaluation of various options for the compression and distribution of compressed helium gas to the satellite refrigeration system of the energy doubler[R]. Fermilab cc1 Report-Inspire HEP, 1979: 390-107.
- [13] WANG B M, HU Z J, ZHANG P, et al. Development of a test rig for a helium twin-screw compressor[C]//AIP Conference Proceedings, 2013.
- [14] 金晶晶, 胡忠军, 王炳明, 等. 氦气喷油式螺杆压缩机关键技术初步解决方案[J]. 低温工程, 2016(6): 29-35.
- [15] STOSIC N, MUJIC E, KOVACEVIC A, et al. Profiling of screw compressor rotors by use of direct digital simulation [C]//International Compressor Engineering Conference at Purdue, 2008.
- [16] DREKSLER M Y, KISHI T. High efficiency, high reliability, improved oil injected helium screw compressor[J]. Supercolider, 1992(4): 627-634.
- [17] ASAKURA H, SAJIN, KANEKO Y, et al. Performance analysis of multistage 80 K centrifugal compressors for helium refrigerator[C]//Proceedings of ICEC16, 1997: 203-206.

关于中国真空学会会议调整的通知

各位会员单位、参会代表:

在新型冠状病毒肺炎疫情全球蔓延的形势下,为进一步确保参会代表会议期间的健康和安 全,根据国际真空技术与应用联合会(IUVSTA)的要求,会议调整如下:IUVSTA 执委会会议(ECM-133)取消在中国的举办;第十届亚洲和澳大利亚真空与表面科学会议(VASSCAA-10)暨中国真空学会学术年会会议推迟到 2021 年 10 月召开。

特此通知。

感谢大家对学会的关注,让我们相约 2021 年。

(中国真空学会供稿)