



# 大型氦气螺杆压缩机核心技术研发与应用

胡忠军<sup>1\*</sup>, 吴霞俊<sup>2</sup>, 林文剑<sup>3</sup>, 王炳明<sup>1</sup>, 张开闯<sup>2</sup>, 朱振中<sup>2</sup>, 谭海龙<sup>3</sup>, 胡建军<sup>2</sup>, 李强<sup>1</sup>

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. 无锡锡压压缩机有限公司, 无锡 214145;

3. 福建雪人股份有限公司, 福州 350299

\* 联系人, E-mail: [zjhu@mail.ipc.ac.cn](mailto:zjhu@mail.ipc.ac.cn)

2022-02-27 收稿, 2022-03-30 修回, 2022-04-06 接受, 2022-04-08 网络版发表

国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2010-1, ZDYZ2014-1)资助

**摘要** 大型氦低温制冷技术是支撑空间技术和前沿基础科学等研究的关键技术. 氦气喷油式螺杆压缩机是实现大型氦低温制冷循环的一种核心设备, 技术难度高于一般气体介质的压缩机, 是螺杆式压缩机技术制高点之一. 针对压缩氦气容易泄漏和冷却难两大技术挑战, 我们研究了适用于氦气工质高效率压缩的核心技术, 包括转子新型线开发、喷油雾化冷却、高效率油-氦气分离技术等. 提出了转子内部泄漏归一化权重分析方法和复杂多变量整体优化方法, 开发出N<sub>2</sub>-He和I两种适用于氦气压缩的流线型非对称新型线, 动力学上更利于油膜形成, 进一步提高了容积效率; 根据螺杆转子热弹变形分析, 采用补偿法设计调整转子间隙, 提高了运行的可靠性. 研究形成了单机压比范围为4~15和容量排量范围为100~10000 Nm<sup>3</sup>/h的成熟工业化产品, 不同型号的性能指标达到或优于国际同类产品. 研发的产品在国家重大低温装备、航天级氢液化、核工业、可控核聚变和氦工业等战略领域都获得了长期稳定的成功应用, 促进了我国超导研究、前沿科学、氢能源和航天事业等领域的发展.

**关键词** 氦气, 螺杆压缩机, 大型低温, 制冷, 氢液化, 超导

大型氦低温系统一般指23 K(–250°C)以下、制冷量大于150 W的低温系统(参照美国《出口管制条例》(Export Administration Regulations)). 大型氦低温技术在前沿基础科学研究、特殊领域以及航天、能源、材料、医学等领域具有广泛的应用. 氦气是最难液化的气体, 故成为低温工程最主要的工质. 液氦因其独特的性质而具有重要的用途, 液氦温度(4.2 K, 约–269°C)下超导现象和超流氦温度(–271°C)下超流现象促进了量子科学的发展. 液氦不仅在医疗磁共振成像中具有重要应用, 在加速器和质子对撞机上也具有大规模的应用. 更低温度的超流氦(–271°C)是一种理想制冷剂, 提高了超导磁体抗热扰动能力和稳定裕度<sup>[1,2]</sup>. 低温技术

就是通过热力学循环获得和保持低温环境的技术. 热力学循环主要由压缩、膨胀以及传热设备等构成, 其中氦气(或氢气)工质循环的动力来自压缩机. 压缩机在功能上相当于制冷机的“心脏”, 提供维持循环需要的纯净气源. 螺杆式压缩机综合了离心式与活塞式两种压缩机的优点, 保持高效率气体压缩的同时又简化了压缩机结构, 从而逐渐替代了活塞式压缩机, 成为大型氦低温工程最主要的压缩机形式. 螺杆压缩机因结构简单, 也广泛应用于化工、动力、制冷、电子、医药、国防等领域.

氦压缩机对整个低温系统的效率和稳定性具有决定性作用. 在液氦温度下, 每获得1 W制冷量一般需要

引用格式: 胡忠军, 吴霞俊, 林文剑, 等. 大型氦气螺杆压缩机核心技术研发与应用. 科学通报, 2022, 67: 2482–2491

Hu Z J, Wu X J, Lin W J, et al. Large helium screw compressor core technology development and industrial application in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 2482–2491, doi: [10.1360/TB-2022-0220](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0220)

通过压缩机消耗240~500 W的功率<sup>[3]</sup>。低温系统也是大科学装置中的最薄弱环节,由压缩机故障引起低温系统停机的时间几乎相当于其他设备所引起故障时间的总和<sup>[4]</sup>。因此,大型低温工程对氦气压缩机的效率和可靠性提出了更高的要求。由于氦气分子量小容易泄漏、绝热指数大带来喷油冷却等技术挑战问题,氦气压缩机技术难度高于一般气体介质的压缩机,长期以来,只有少数国家掌握这一技术,并对我国航天等高科技领域实行出口禁止管理。美国《出口管制条例》和美国《商业管制清单》(Commerce Control List)列出的大型低制冷装置中,使用的氦气螺杆压缩机规格为:流量大于130 Nm<sup>3</sup>/h,输入功率大于15 kW。

1934年,瑞典阿尔夫·莱肖姆(Alf Lysholm)<sup>[5]</sup>从海因里希·克里加(Heinrich Krigar)<sup>[6]</sup>1878年的螺杆式鼓风机专利中获得灵感,发明了实用化的螺杆压缩机<sup>[7]</sup>。螺杆压缩机的发明,从理论设想到工艺制造实现的过程,在工程技术研究和技术创新上具有深远的启示意义。螺杆压缩机获得实用化发展,主要是转子不对称型线和喷液冷却两项技术的发明改进。20世纪50年代,喷油式螺杆压缩机开始逐渐替代活塞式压缩机在制冷领域应用。我国于1965年开始试制螺杆式空气压缩机,大庆油田就使用了最早的国产螺杆空气压缩机<sup>[8]</sup>。2010年,螺杆空压机实现了国产化,使空压机市场价格降低了七成,我国成为世界最大的生产基地。2016年,国内年产能已超过40万台,但此前无法生产出1台产品级氦气螺杆压缩机。1979年,费米实验室尝试在低温系统中使用喷油氦气螺杆压缩机<sup>[9]</sup>。从此,氦气螺杆压缩机由于振动小、效率高而成为大型低温工程的首选。20世纪70年代,我国氦低温工程逐步发展起来,但所使用的压缩机只有无润滑活塞压缩机,排气量比压缩空气时减小30%,且寿命很短,经常发生故障<sup>[10]</sup>。1997年,在“神舟”飞船地面环境模拟装置(KM6)上开始尝试使用国产氦气螺杆压缩机<sup>[11]</sup>。2003年,中国科学院等离子体研究所东方超环“人造太阳”(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)项目由工业冷冻压缩机改制了氦气螺杆压缩机<sup>[12]</sup>。这些直接利用空压机或制冷剂压缩机压缩氦气的尝试,其效率远低于国际水平,性能也不稳定,我国氦气螺杆压缩机技术一直没有开展实质性技术研究。

氦气独特的物理性质决定了其压缩技术的挑战性。由于分子量小、运动黏度小,容易泄漏,使用空压机直接压缩氦气时输气量降低约30%。氦气绝热指数(1.66)高于空气绝热指数(1.40),压缩氦气比压缩空气的绝热

温度升高30%以上。这些特点使氦气成为适宜研究螺杆机械的敏感介质,有助于深入研究螺杆式压缩机的热力学和动力学过程,也是提升整个螺杆压缩机行业技术进步和推广应用于普冷和化工领域的基础。

2009年起,在中国科学院部署下,中国科学院理化技术研究所与国内相关单位大力协同,打破传统核心技术转子型线设计上的思维禁锢,逐渐开发出适用于氦气压缩的新型线,突破了氦气螺杆压缩机的核心技术,有效提高了氦气压缩机的效率和可靠性,并逐步形成了系列成熟的工业化产品,实现了国产化,容积效率和热力学效率等主要指标达到或超过同等产品。

## 1 氦气螺杆压缩机核心技术研究开发

从传热和传质的角度出发,国产化氦气螺杆压缩机的核心技术研究主要包括三方面。

(1) 为解决氦气泄漏问题,提高容积效率,开发出适用于氦气工质高效压缩的转子型线,命名为N\_He和I型线,分别适用于单级高压比(例如14)和大容量的工况(如10000 Nm<sup>3</sup>/h)。新型线减小了泄漏三角形,优化了啮合间隙等转子内部氦气泄漏通道;以椭圆弧为基本构型的流线型新型线设计和对齿顶速度的控制,更利于形成油膜,增加了机械间隙密封效果。

(2) 为解决氦气压缩热大的问题,提高热力学效率,进行喷油冷却参数的优化,包括油气质量比(定义为油质量流量与氦气质量流量的比值)、喷油雾化粒径、喷油位置和多点喷油、油黏度优化选择等。根据对氦气压缩机工作过程的性能模拟,机械间隙的优化结合转子热态变形分析进行补偿设计,避免转子热态“抱轴”等事故的发生。

(3) 为避免低温系统性能衰减和冻堵故障等风险,开发出高效离心式和混合式油气分离技术,排气油含量低于2 ppmW(1 ppmW=1 mg/kg),优于传统螺杆空压机等10 ppmW的水平,并研制出红外分光光度法分析油含量的精密测试分析装置。

在研究方法上,提出了归一化权重分析方法,分析多参数耦合的复杂系统中决定性能的权重,以全局整体优化法解决多个变量之间的耦合与妥协关系,例如泄漏三角形与接触线长度之间的妥协、齿顶速度对改善泄漏和附加油功损失之间的妥协等。

### 1.1 适用于压缩氦气的新型线开发

螺杆压缩机核心技术在于转子型线(又称齿形),对

效率、动力学性能和可加工性具有决定性影响,是压缩机研究的热点和重点之一.如果直接利用空压机和制冷压缩机型线来压缩氦气,容积效率(定义为实际输气量与理论输气量之比)降低了10%~30%,更突出的热弹变形问题增加了发生抱轴事故的风险.高效率的氦气压缩,必须进行型线适用性开发,减少影响效率的啮合间隙等泄漏通道面积.转子高低压之间的通道由防止转子干涉的必要预留间隙和型线几何特性决定.温度和压力引起转子的变形不可忽视,冷态间隙与热态间隙有显著不同,氦气型线设计中,依据转子热弹性变形分析予以补偿设计,这也是将低温系统热应力分析常用的方法用于螺杆转子热影响的补偿设计.

我国曾主要以直接引进国外第二代型线为主,很少改动设计.以单边不对称摆线-销齿圆弧构成的国家标准型线也属于第二代,比第三代型线功耗和噪音大.Stosic等人<sup>[13]</sup>采用齿轮与齿条的啮合原理发展的齿条法设计型线应用较广,氦气螺杆型线的开发采用的就是齿条法与转子法相结合的方法.

为解决氦气压缩性能受制于众多错综复杂的特征参数问题,通过计算和样机试验验证,对影响容积效率和热力学效率(等温效率或绝热效率)的各种特征参数作无量纲归一化对比<sup>[14]</sup>,可清晰地得到例如各泄漏通道对性能影响的权重,其中啮合间隙和端面间隙较为重要.型线优化时,例如接触线长度和泄漏三角形这两种影响内漏的特征参数“此消彼长”,啮合间隙等优化还需要平衡各因素之间的关联,采用整体全局优化方法,不限于单一特征参数的最优化.根据不同泄漏通道的几何形状和气体流态特征,选用不同的泄漏计算模型.根据转子热力学仿真模拟和对样机间隙调整的试验数据,总结出氦气型线的优化设计原则.为保证加工和组装精度,工艺上采用了带有自动补偿的磨削工艺,加工精度为7.5  $\mu\text{m}$ ,齿面粗糙度小于0.8  $\mu\text{m}$ .试验

发现,高效氦气螺杆齿型中,阳阴转子齿数比有4/5、5/6、5/7等几种,这是由于基元容积间的压差减少,提高了容积效率.对于压差和压比较大的工况,阴阳转子采用相近直径,因转子刚度接近,转子承载力高,可降低由转子动力学带来的振动.

对于单级高压比(最高为15)的氦气压缩机,开发的N\_He型线的几何特征如图1所示,以双边非对称椭圆包络线为基本构型.N\_He型线采用非对称齿数比为4:5的优化设计,替代原来试制氦气压缩机使用过的齿数比为4:6的X型线,泄漏三角形面积相对减小了50%以上,典型工况下,绝热效率相对提高18.7%.型线几何构型根据样机测试,以有利于油膜形成为原则.啮合间隙减少至20~40  $\mu\text{m}$ ,根据转子型面各段热膨胀量不同,采用补偿法调整转子型面间隙,减小了内漏损失,典型工况下,容积效率提高至91.7%.N\_He型线可实现纯滚动传动,齿顶圆更大,由于圆周速度更高,提高了氦气密封性;消除了尖点,具有更好的可加工性,避免长时间运行磨损.如图2所示,新型N\_He型线与其他常见型线之间的特征参数具有鲜明的特征,啮合线长度与泄漏三角形面积具有适合氦气压缩的相对平衡关系.

为适应兆瓦级大型氦气压缩机(例如吸气400 kPa、排气2000 kPa)的要求,根据上述氦气型线优化设计原则和方法,又成功开发出大型螺杆转子(主要用于转子直径250 mm以上)的I型线,采用非对称齿数比为5:7的优化设计,受力均匀,转子刚度是其他齿数比的2~4倍.I型线经过优化,降低了加工精度控制的难度,最小啮合间隙减少至20  $\mu\text{m}$ 以内,减少了齿间泄漏,获得了更好的密封效果.转子啮合间隙的减小也有助于转子散热及容积效率和等温效率的提升.负荷工况试验测试结果表明,容积效率提高至92.4%,等温效率为61%,绝热效率达到84.9%.I型线与传统SRM-D、

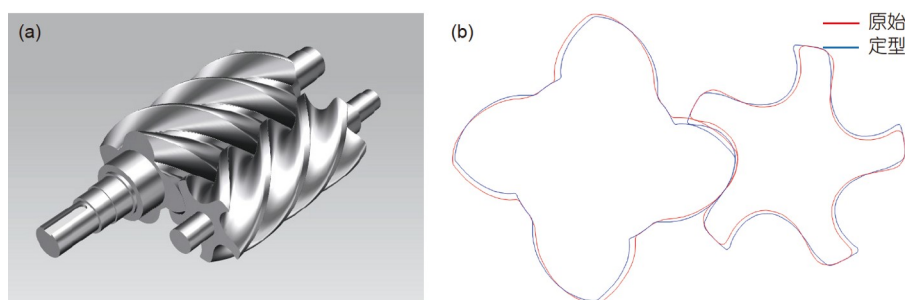


图1 N\_He型线转子(a)和型线几何特征(b)

Figure 1 The N\_He profile rotor photo (a) and the profile geometric characteristics (b)

SRM-G等型线相比较,在延长密封线长度时并没有带来泄漏三角形面积增加.型线几何设计依据气体压强分布来优化,如图3所示.为控制加工精度,I型线在高压端开启方向,几何曲线采用平缓设计;在低压端闭合方向,适当增加型线角度,以减少转子内漏.

## 1.2 氦气压缩过程喷油参数优化

除型线几何构型等机械间隙内采用油膜提高转子内部密封性能外,热力学效率还取决于喷油冷却的效果.由于氦气绝热指数大,高压比工况下绝热压缩温度比压缩空气高200℃左右,因此需喷入大量的油进行冷却,以接近等温压缩,获得更高的热力学效率(因等温压缩可获得理论上最高的压缩效率).但油的引入增加了黏性剪切力和搅拌功损失,喷油冷却与喷油附加功损失之间存在最佳质量比.结合样机试验研究,油气质

量比约为30~50,从质量流率看更像是油泵.通过热力学仿真计算和试验测试分析进一步优化喷油位置,如图4所示,喷油位置在接近吸气端(转子 $\alpha$ 主轴角为0°),比在主轴角为60°时,氦气最高温度可降低177℃;同等喷油参数(油气质量比、喷油温度等)下,主机排气温度也可降低58℃.氦气压缩机排气极限温度一般控制在110℃以下,排气温度越高,为补偿热膨胀的间隙越大,效率会降低,且油蒸汽含量增加,增加油最终分离的困难.为有效实现动态气液高效传热,向氦气中喷油冷却时的雾化优化也很重要<sup>[15,16]</sup>.由于氦气绝热指数高,不同的油气质量比对氦气压缩机效率有显著影响.如图5(a)所示,同样的油气质量比时,相比单点喷油,采用多点喷油的容积效率可提高3%左右,这是因为氦气沿程相继喷入温度较低的油,提高了动态密封效果.如图5所示,以高压比工况下多点喷油为例,随着油气质

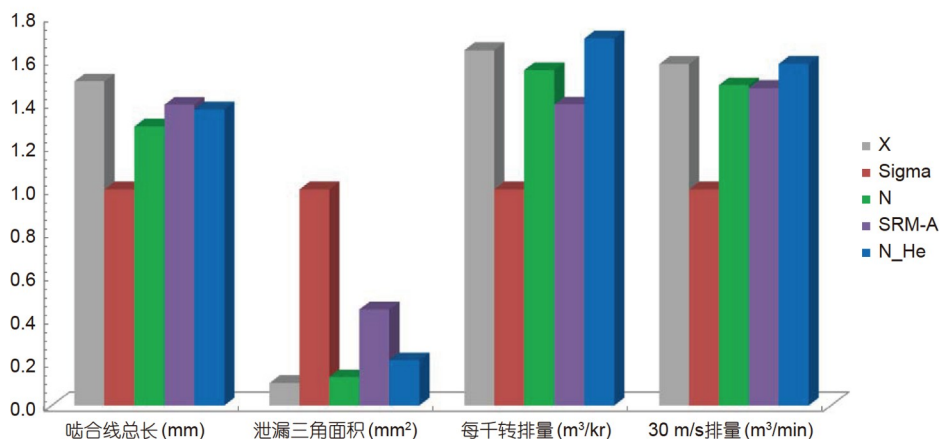


图2 N\_He氦型线与常见型线之间的特征参数对比(以Sigma型线做基准)

Figure 2 Comparison of characteristic parameters between N\_He helium and general profiles (based on Sigma profile)

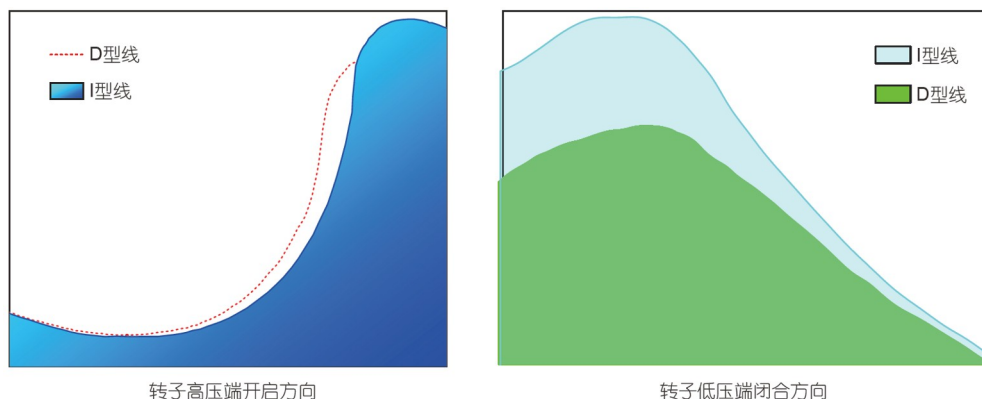


图3 压缩氦气新I型线与SRM-D型线特征对比

Figure 3 Comparison of characteristics between the new I profile for compressed helium and the SRM-D profile

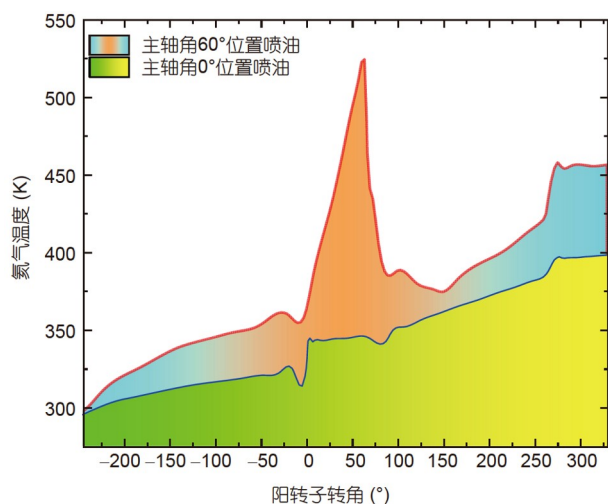


图4 喷油位置对氦气压缩沿程温度的影响

Figure 4 Influence of the oil injection position on compressed helium temperatures

量比的加大, 容积效率、等温效率和绝热效率均有所提高, 特别是在油气质量比为10~30影响显著, 所以压缩机中的油-氦气质量比大于30. 油气质量比在20以下时, 容积效率低于85%, 等温效率低于40%, 绝热效率低于72%.

喷油孔的直径直接决定喷油速度, 从而影响雾化. 根据对氦气压缩机工作过程的模拟, 最终确定合适的喷油雾化粒径和喷油孔直径. 雾化设计依据维勃数  $We = \rho u^2 d / \sigma$  判断 ( $We$  为维勃数,  $\rho$  为油密度,  $u$  为速度,  $d$  为喷油孔径,  $\sigma$  为表面张力),  $We > 20$  时形成喷雾化. 过低的喷油粒径会降低密封性能. 由于氦气导热系数高, 氦螺

杆压缩机中并不以减小喷油粒径为优化目标. 喷油温度低, 油的黏度大, 对壁面材料吸附性好, 泄漏通道中的油膜稳定. 试验表明, 喷油温度控制在40°C左右, 采用人工合成油, 黏度约为33 mm<sup>2</sup>/s.

在进行喷油冷却计算时, 根据氦气-油混合物在转子内部传热传质过程, 计算得到温度和压力的沿程分布. 基于有限元法对转子进行热变形分析, 为型线几何优化和配合间隙等设计提供补偿设计依据. 计算表明, 阳转子在轴方向上的变形最大值出现在吸气端面上, 是其转子径向上位移最大值的2.5倍左右. 为获得良好的动力学性能, 在型线和喷油参数优化后, 根据压比和相对间隙进一步优化转子圆周速度, 压缩氢和氦小分子量最佳圆周速度比空气高几倍, 受转子动态特性和转子动力学可靠性影响, 实际有所降低. 同时, 为减少欠压缩和过压缩的损失, 运行时控制内容积比与管网压比基本一致, 提出了内容积比四段渐进式调节控制方式, 进一步提高了机组运行的效率和稳定性.

### 1.3 高效油-氦气分离技术

压缩氦气的喷油质量流率为氦气的30~50倍, 为避免对低温系统造成油污污染冻堵等事故的发生, 需要把几乎所有的油都分离出来, 油含量水平一般要求3~5 ppmW以下(低温系统经过附加的精滤装置, 要求达到0.01 ppmW以下). 油气混合物中, 油的状态有气相和液相两种形式. 气相油由润滑油蒸发所产生, 浓度取决于油气混合物的温度、饱和蒸气压和氦气压力. 气相油的特性与气体类似, 无法用机械方法分离, 在压缩机外

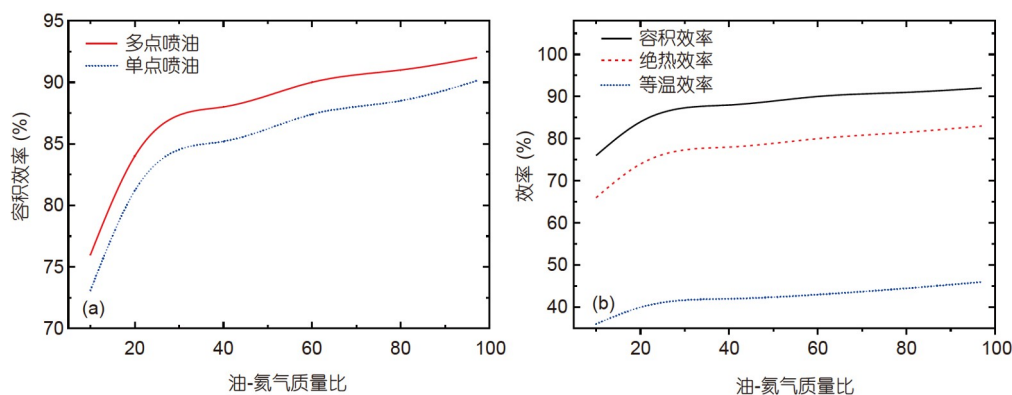


图5 油气质量比对氦气压缩机效率的影响. (a) 单点与多点喷油条件下不同油气质量比对容积效率的影响; (b) 油气质量比对容积效率、等温效率和绝热效率的影响

Figure 5 Effect of the oil-helium mass ratio on efficiencies of helium screw compressors. (a) Effects of different mass ratios of oil and gas on volumetric efficiency under single-point and multi-point oil injection conditions; (b) effects of mass ratio of oil and gas on volumetric efficiency, isothermal efficiency and adiabatic efficiency

部分离, 99.999%以上的油以液态形式混合于氦气流之中, 油滴的尺寸范围分布很广, 大部分油滴直径在1~100  $\mu\text{m}$ 范围内, 少部分的油滴可小至与气体分子具有同样的数量级, 仅有0.01  $\mu\text{m}$ . 不同尺度油滴的性质会有较大的差异, 油滴直径越小, 与氦气分离的时间就越长. 高效油气分离器结构的设计主要依据油滴颗粒直径的分布, 对不同尺度的油滴进行不同机理的分离. 采用切向进气的离心分离器, 油气混合物沿着分离筒上部切向经折流板进入由滤芯外层(作为导流筒)与分离筒内壁构成的环形通道形成强旋流. 由于氦气与油蒸汽之间的密度差大, 最佳分离的空塔流速控制在0.5 m/s左右. 气流在进气口突然膨胀和旋转, 大于1  $\mu\text{m}$ 的油滴在离心力和重力作用下基本可分离出来, 并沿筒壁流下, 油分离效率大于99%. 小于1  $\mu\text{m}$ 的油雾随气体向上流动经过滤芯分离. 滤芯二次分离原理为亲和聚结作用, 亚微米级大小的油滴在纳米级玻璃纤维网状结点上聚合成大油滴, 纤维直径和气流速度是实现2 ppmW以下油分离的决定因素.

离心分离的效率对总分离效率有显著的影响, 离心油分离部分的特征尺度主要依靠流场分析和试验研究. 中国科学院理化技术研究所(以下简称中科院理化所)在纳米级玻璃纤维滤油试验平台研究的基础上, 掌握了内部流场分布规律, 得到了合理流速. 采用拉格朗日颗粒跟踪法, 对1~30  $\mu\text{m}$ 的油滴颗粒在油气分离器中的运动轨迹进行跟踪模拟, 得到液滴流场特征和不同大小油滴的运动轨迹, 并得到提高油气分离效率的最优化特征尺度, 例如进气速度、进气位置、分离筒直径、筒高等. 为进一步解决大型喷油螺杆压缩机(油质量流量大于10 kg/s)油气分离的问题, 在高效离心分离的基础上还开发出了卧式混合型三级油分, 内部流场采用纵横式组织实现了油气分离, 组合利用了气流

膨胀和转向、离心力、重力、亲和聚结分离, 油含量依然可以控制在小于2 ppmW的水平.

## 2 氦气螺杆压缩机在重要领域的应用

适用于高效压缩氦气的N\_He型线和I型线成功开发后, 逐步形成了单机压比范围为4~15和容量排量范围为100~10000  $\text{Nm}^3/\text{h}$ 的系列工业化产品, 并陆续在我国大型氦低温工程获得了许多重要的应用, 保障了国家重大低温装备等全国产化和成功稳定运行, 单机无故障最长运行时间超过10000 h, 促进了特殊工业、超导研究、氦工业和氢液化等领域的研究进展. 相关应用主要包括我国自主研制的首套产量达到吨级的工业氢液化系统、我国首台液化天然气闪蒸气提氦项目、超导加速器、超导磁体测试平台、超导托卡马克核聚变试验装置等, 具体统计情况见表1.

新型线大型高效氦螺杆压缩机组为国家重大科研装备研制项目“液氦到超流氦温区大型低温制冷系统研制”提供了稳定洁净的动力氦气源, 先后支撑完成了液氦温区280、2710 W和超流氦温区510 W大型低温制冷机的研制, 标志着我国具备了研制液氦温度(-269°C)千瓦级和超流氦温度(-271°C)百瓦级大型低温制冷装备的能力. 如图6所示, 国家重大装备中的氦气压缩机完全国产, 性能稳定. “我国研发成功-271°C超流氦大型低温制冷装备”入选“两院”(中国科学院和中国工程院)院士评选的“2021年中国十大科技进展新闻”, 可满足大科学工程、航天工程、氦资源开发等国家战略高技术发展的迫切需要. 《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》确定建设的十多项大科学工程须在液氦或超流氦低温环境下运行; 大型氦低温系统是实现大科学装置低温环境的唯一手段, 也是氦工业的核心设备之一.

表1 国产氦气螺杆压缩机应用情况的不完全统计

Table 1 Incomplete statistics of the application of domestic helium screw compressors

| 编号              | 转子型线 | 吸/排气压力(100 kPa) | 稳定运行时长( $\geq$ h) <sup>a)</sup> | 具体应用场景         |
|-----------------|------|-----------------|---------------------------------|----------------|
| 1               | N_He | 1/14            | 4000                            | 超导磁体测试平台       |
| 2               | N_He | 1/14            | 4000                            | 超导加速器          |
| 3               | I    | 1/4, 4/20       | 2000                            | 液氦到超流氦温区大型低温装备 |
| 4               | I    | 1/14            | 10000                           | 首台天然气BOG提氦工程   |
| 5               | I    | 1/12            | 500                             | 首台日产吨级大型氢液化    |
| 6 <sup>b)</sup> | I    | 1/20            | 100                             | 可控核聚变试验装置      |
| 7 <sup>b)</sup> | N_He | 1/14            | 100                             | 南方光源超导腔试验平台    |

a) 在氦气测试台上的运转时间; b) 正在系统联调中



图6 新型线氦气螺杆压缩机应用于首台全国产液氦制冷机(a)及510 W超流氦(−271°C)大型低温系统(b)

Figure 6 The new profile helium screw compressor applied to the first domestic liquid helium refrigerator (a) and the 510 W large cryogenic system at superfluid helium (−271°C) (b)

氦气在地球上是一种稀缺而重要的战略资源<sup>[17]</sup>, 在医疗、电子工业等高技术领域具有重要的应用. 氦资源常伴生在古老地台的天然气藏中, 主要分布在美国、卡塔尔、俄罗斯、澳大利亚等. 宁夏盐池天然气液化天然气中闪蒸气(简称boil off gas, BOG)提氦项目, 是我国首套液化天然气闪蒸气低温提氦装置, 实现了包括氦气压缩机在内的大型低温装备全国产化, 探索出适合于低丰度天然气的提氦技术路线. 氦气螺杆压缩机在其他液化天然气工厂BOG提氦项目中具有较大的应用前景, 对提升液化天然气工厂经济效益、节约宝贵的氦资源等具有重要意义<sup>[18,19]</sup>.

液氢是一种环保型燃料, 单位质量热值约是汽油的3倍. 我国新一代运载火箭的发动机主要采用液氢、液氧等作为燃料. 2021年, 由北京航天试验技术研究所自主研制的首套吨级氢液化系统调试成功, 实现了连续稳定生产, 产量为2.3 t/d. 国产氦气压缩机保障了氢液化系统的成功研制, 意味着今后航天领域将可以使用国产液氢作为燃料, 对航天系统起到重要的支撑作用; 同时, 也会助力我国氢能产业的发展, 特别是氢的储运、长距离运输等<sup>[20,21]</sup>. 在“双碳”(碳达峰、碳中和)目标下, 氢能源在绿色能源生产和消费中将发挥重要作用<sup>[22]</sup>. 高效螺杆压缩机技术的发展对进一步降低氢液化能耗, 促进氢能源的长足发展具有重要意义.

### 3 国内外氦螺杆压缩机性能指标的对比

国际低温工程领域广泛采用的氦气螺杆压缩机主要是德国凯撒(Kaeser)公司在系列空气螺杆压缩机基础上改造而成, 采用了最新的第三代流线型西格玛(Sigma)型线, 转子齿数比为5:6. 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、德国艾珍、英国豪顿、日本前川等, 这些氦螺杆主要采用上一代型线技术, 容积效率比我国新开发的I型线低10%左右.

德国凯撒氦气螺杆压缩机是大型氦低温工程中性能整体表现最优的螺杆压缩机, 是目前世界上公认效率较高的型线之一, 代表了常规氦气喷油螺杆压缩机技术的最高水平, 也是在液氦温度制冷量1 kW以下规模的低温系统标准配置的压缩机. 根据公开信息显示, 凯撒不提供排气压力超过1600 kPa和输入功率超过315 kW的氦气螺杆压缩机, 对于315 kW以下的单级高压比工况条件, 国产氦气压缩机组与凯撒产品在效率、油含量、噪音等主要性能指标方面基本一致<sup>[23]</sup>. 如表2所示, 对于兆瓦级大功率机型, 以欧洲核子研究组织(European Organization for Nuclear Research, CERN)等国际广泛应用的豪顿(Howden)和前川(Mycom)公司的氦气压缩机实际测试数据作为参照对比, 国产氦气螺杆压缩机容积效率比国际水平提高约10%, 等温效率提高约4%~8%, 绝热效率提高约6%~12%. 从文献[24~26]报道的数据对比, 国产大型氦气螺杆压缩

表2 国内外兆瓦级大型氦气螺杆压缩机性能对比

Table 2 Performance comparison of MW-class large helium screw compressors at home and abroad

| 主要参数      | 日本前川公司    | 英国豪顿公司 | 中科院理化所与雪人股份公司 |
|-----------|-----------|--------|---------------|
| 容积效率(%)   | 80.4~83.0 | 81.0   | 92.4          |
| 等温效率(%)   | 52.9      | 56.7   | 61.0          |
| 绝热效率(%)   | 72.6      | 78.1   | 84.9          |
| 质量流量(g/s) | 210.0     | 389.8  | 422.9         |
| 噪音(dB)    | 98.8      | 97.7   | 97.8          |

机的等温效率和容积效率等指标优于同等国际产品水平。

## 4 结论

大型氦低温技术是支撑航天事业和前沿科学研究等重要领域的关键技术,在科学研究、国民经济及国防事业中有着广泛和重要的应用。经过中国科学院与国内相关单位十余年的研究,作为其核心技术之一的氦气螺杆压缩机技术取得了重大突破。从氦气特殊物理性质出发,我们提出了复杂系统多参数整体优化分析方法热变形补偿设计法,开发出两种适用于氦气高效压缩的新型线,形成了系列化工业产品。用于氦气工质的新型线、喷油参数及高效油气分离技术的发展,分别提高了氦气压缩的容积效率、等温效率和油分离

效率,不同型号产品的各项性能指标达到或优于国际同等产品的水平。氦螺杆压缩机技术的成功开发,不仅完全替代进口,也深化了压缩过程的认识,设计方法也推广到丙烯、硫化氢等其他工艺气体压缩机中,带动了工艺螺杆行业技术水平的提升和推广应用。所开发的新型氦螺杆压缩机在稀有气体资源提取、国家重大科研装备、大科学研究等领域发挥重要作用,实现了低温装备的完全国产化,满足了战略领域亟需,推动了航天事业、前沿科学和氢能源等领域的新发展。氦气螺杆压缩机国产化研制过程是工程试验与传热传质基础理论研究相互结合的过程、理想设计与工业制造精度水平相结合的过程、多参数耦合匹配整体优化设计的过程。“卡脖子”氦气螺杆压缩机的国产化对工程技术研究 and 应用可以带来一定的启示。

## 参考文献

- 1 Tavian L. Large cryogenics systems at 1.8 K. In: Proceedings of the 7th European Particle Accelerator Conferences (EPAC 2000). Vienna: EPAC Press, 2000. 212–216
- 2 Niu X F, Bai F, Wang X J, et al. 2 K cryogenic system development for superconducting cavity testing of CiADS. *Cryogenics*, 2021, 115: 103247
- 3 Claudet S, Ferlin G, Millet F, et al. 1.8 K refrigeration units for the LHC: Performance assessment of pre-series units. In: Zhang L, Lin L Z, Chen G B, eds. Proceedings of the 20th International Cryogenic Engineering Conference (ICEC20). Beijing: Elsevier, 2005. 999–1002
- 4 Maiti T K, Pal S, Kundu B, et al. Evaluation of an existing helium liquefier in refrigerator and mixed-mode operation through exergy analysis. *Cryogenics*, 2019, 103: 102977
- 5 Lysholm A. Rotary screw apparatus. US Patent, US2174522, 1939-10-03
- 6 Krigar H. Schraubengebläse (Screw blower). DE Patent, 4121, 1878-03-24
- 7 Brown R N. Compressors: Selection and Sizing. 3rd ed. Houston: Gulf Professional Publishing, 2005
- 8 Gao Q L. Sidelights of technical progress of compressor industry (in Chinese). *Compr Technol*, 2009, 1: 48–61 [高其烈. 压缩机行业技术进展史话侧记. 压缩机技术, 2009, 1: 48–61]
- 9 Cryogenic Consultants, Inc. Evaluation of Various Options and Costs for the Compression and Distribution of Compressed Helium Gas to the Satellite Refrigeration System of the Energy Doubler. Technical Report, TM-881-B, CCI Report No. 390-107. 1979
- 10 Hang N D. 2Z2.8-4/40 reconstruction of helium compressor (in Chinese). *Compr Technol*, 1989, 2: 16–17 [杭乃敦. 2Z2.8-4/40氦气压缩机的改造. 压缩机技术, 1989, 2: 16–17]
- 11 Zhao Y L, Zeng J. Blue Xiya served for “Shenzhou” to simulate space (in Chinese). *Gen Mach*, 2004, 1: 15–16 [赵宇龙, 曾江. 蓝色锡压为“神舟”模拟太空. 通用机械, 2004, 1: 15–16]
- 12 Xu G F, Zhuang M, Sheng L H, et al. Operation analysis and energy saving optimization of screw compressor unit in helium cryogenic system (in Chinese). *Cryog Eng*, 2009, 2: 15–19 [徐光福, 庄明, 盛林海, 等. 氦低温系统螺杆压缩机组运行分析及节能优化. 低温工程, 2009, 2: 15–19]
- 13 Stosic N, Smith I K, Kovacevic A. Screw Compressors: Mathematical Models in Computer Aided Design. Berlin: Springer Verlag Press, 2005
- 14 Jin J J. Improved design and experimental study of helium oil-injected screw compressor (in Chinese). Master Dissertation. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018 [金晶晶. 氦气喷油式螺杆压缩机的改进设计和实验研究. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2018]
- 15 Wu X, Xing Z, He Z, et al. Effects of lubricating oil on the performance of a semi-hermetic twin screw refrigeration compressor. *Appl Therm Eng*, 2017, 112: 340–351
- 16 Luo Y X. Research on performance prediction and integration technology of twin-screw helium compressor (in Chinese). Master Dissertation. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012 [罗叶欣. 双螺杆氦气压缩机性能预测与集成技术研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2012]
- 17 Dong M, Wang Z, Dong H, et al. Characteristics of helium accumulation in the Guanzhong Basin, China. *China Geol*, 2019, 2: 218–226
- 18 Hamed H, Karimi I A, Gundersen T. Optimization of helium extraction processes integrated with nitrogen removal units: A comparative study.

- [Comput Chem Eng](#), 2019, 121: 354–366
- 19 Hamed H, Karimi I A, Gundersen T. A novel cost-effective silica membrane-based process for helium extraction from natural gas. [Comput Chem Eng](#), 2019, 121: 633–638
- 20 Xu J, Lin W. Integrated hydrogen liquefaction processes with LNG production by two-stage helium reverse Brayton cycles taking industrial by-products as feedstock gas. [Energy](#), 2021, 227: 120443
- 21 Hydrogen Cloud Chain. China's first ton-class hydrogen liquefaction system has been successfully developed. In the future, domestic liquid hydrogen will be used as fuel in China's launch vehicles (in Chinese). *Shanghai Energ Conserv*, 2021, 9: 929 [氢云链. 我国首套吨级氢液化系统研制成功 今后我国运载火箭将可用国产液氢作为燃料. *上海节能*, 2021, 9: 929]
- 22 Izato Y, Suzuki T, Iki H, et al. Determining the minimum ignition energy of toluene vapor containing hydrogen towards a risk assessment for liquid organic hydride storage in hydrogen refueling stations. [Fuel](#), 2022, 310: 122236
- 23 Hu Z J, Wang B M, Yang W M, et al. Technical characteristics and development trend of large helium compressor (in Chinese). *Vac Cryog*, 2020, 26: 270–277 [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. *真空与低温*, 2020, 26: 270–277]
- 24 Knudsen P, Ganni V, Dixon K, et al. Performance testing of Jefferson Lab 12 GeV helium screw compressors. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 2015, 90: 012072
- 25 Ganni V, Knudsen P, Creel J, et al. Screw compressor characteristics for helium refrigeration systems. *AIP Conf Proc*, 2008, 985: 309
- 26 Moshe Y D, Takayuki K. High efficiency, high reliability, improved oil injected helium screw compressor. *Supercollider*, 1992, 4: 627–634

Summary for “大型氦气螺杆压缩机核心技术研究开发与应用”

# Large helium screw compressor core technology development and industrial application in China

Zhongjun Hu<sup>1\*</sup>, Xiajun Wu<sup>2</sup>, Wenjian Lin<sup>3</sup>, Bingming Wang<sup>1</sup>, Kaichuang Zhang<sup>2</sup>, Zhenzhong Zhu<sup>2</sup>, Hailong Tan<sup>3</sup>, Jianjun Hu<sup>2</sup> & Qiang Li<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Cryogenics, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

<sup>2</sup> Wuxi Xiya Compressor Corporation Limited, Wuxi 214145, China;

<sup>3</sup> Fujian Snowman Corporation Limited, Fuzhou 350299, China

\* Corresponding author, E-mail: [zjhu@mail.ipc.ac.cn](mailto:zjhu@mail.ipc.ac.cn)

Helium is the most difficult gas to be liquefied. Helium liquefaction cryogenic technology has been playing an important role and has been used widely, especially in large-scale scientific facilities such as superconducting accelerators. Large-scale helium cryogenic refrigeration technology has also considerably contributed to supporting space technology research and frontier basic sciences. The helium oil-injected screw compressor is the “heart” of large-scale helium cryogenic refrigeration cycles. However, helium compressors pose greater technical difficulties than general gas compressors, and it is a commanding height of screw compressor technologies. To tackle two core challenges associated with helium compression, i.e., prone to leakage and difficult to cool, this work presents technologies suitable for high-efficiency helium compression, which include developing new rotor profiles, oil injection atomization cooling, and high-efficiency oil-helium separation technologies. Among these, rotor profiles have a considerable influence on the efficiency, dynamic performance, and machinability of screw compressors. These are also among the hot topics in international compressor research. To study helium profile, normalized importance analysis and complex multivariable overall optimization for the internal leakage of rotors have been proposed. Two new streamlined asymmetric profiles suitable for efficient helium compression, named separately as N\_He and I, have been developed. The volumetric efficiency is also improved using measures to reduce leakage by oil film formation equably. Rotor clearance has been adjusted according to the thermoelastic deformation analysis of rotors to improve operational reliability. One ppmW precision oil separation technology is also used in helium compressors to avoid freezing and blocking accidents in cryogenic devices. This, however, is a challenging task as cryogenic temperatures approach absolute zero. Moreover, a helium screw compressor can almost be regarded as an “oil pump”, where helium flow is filled with lubricating oil with a mass flow rate of dozens times that of helium. By overcoming challenges in the abovementioned core technologies, industrialized helium compressor products with a pressure ratio of 4–15 and a capacity of 100–10000 Nm<sup>3</sup>/h have been developed gradually. The main performance indices of various products in different specifications reach or lead the international level of equivalent products. Domestic helium compressors have obtained long-term and stable practical applications in some strategic fields. Specifically, important applications of helium screw compressor technology include the first industrial hydrogen liquefaction system independently developed by China with a daily capacity of tons, the first helium extraction project from boil off gas (BOG) in China, some superconducting accelerators, the superconducting magnet test platform, and superconducting tokamak nuclear fusion test devices. Developing a high-efficiency screw compressor technology will reduce the energy consumption of the hydrogen liquefaction process considerably and will promote hydrogen energy in the future. It has a good application prospect in the BOG helium extraction project of liquid nature gas (LNG) plants to save precious and scarce helium resources. The domestic helium screw compressors not only completely replace the import but also deepen the understanding and design method of compression processes. The core technology in helium screw compressors has been extended to other process gas compressors that are used for propylene, hydrogen sulfide, etc. This has improved the level of the process gas screw industry, popularized its technology, and improved its application. The domestic development process combines engineering tests with the basic theory research of heat and mass transfer, combines the ideal design with industrial level manufacturing, and matches the overall optimized design. Therefore, the localization process of helium compressors can also bring some enlightenment to the research and application of engineering technology.

**helium, screw compressor, large scale cryogenics, refrigeration, hydrogen liquefaction, superconduction**

doi: [10.1360/TB-2022-0220](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0220)