

高压/超高压压缩机关键技术研究与应用进展

任省栋^{1,2}, 贾晓晗^{1,2}, 彭学院^{1,2}

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 高压/超高压压缩机是氢能、热等静压、超高速风洞等诸多领域的核心动力装备。针对超高压气体增压面临的安全性、可靠性及高效性挑战,西安交通大学彭学院团队从超高压增压热力过程基础理论到产品研发关键技术进行了全链条的研究。通过含气液压油可压缩性对压缩机热力过程影响的研究,修正了压缩机容积效率计算方法;通过极端载荷下密封结构泄漏机理与摩擦学特性的研究,获得了密封环磨损量的影响规律;通过压缩机运行状态识别方法的研究,形成了多种无损动态 p - V 图获取方法。基于上述核心技术突破,该团队成功研制全自主知识产权的 90 MPa 氢气压缩机,较国内外同类型产品,排气温度低 20 °C,容积效率提升 15% 以上;实现了 320 MPa 级超高压氮气增压装备的国产化并确定服役于某国家大型实验装置;开发了高压/超高压压缩机无损健康管理系统,并成功应用于北京冬奥会加氢站。面向未来,将进一步向更高压力、更宽工况、智能运维与寿命预测等方向深化研究,推动我国高端气体增压装备的自主化与产业化发展。

关键词: 氢气压缩机;加氢站;超高压;热力过程;容积效率

中图分类号: TK91 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202604010 **文章编号:** 0253-987X(2026)04-0128-12

Research and Application Progress of Key Technologies for High-and Ultra-High-Pressure Compressors

REN Shengdong^{1,2}, JIA Xiaohan^{1,2}, PENG Xueyuan^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: High-/ultra-high-pressure compressors are key power equipment in numerous fields such as hydrogen energy, hot isostatic pressing, and hypersonic wind tunnels. In response to the challenges of safety, reliability, and efficiency faced during ultra-high-pressure gas compression, a full-chain investigation—from the fundamental theory of ultra-high-pressure compression thermodynamic processes to the key technologies for product development—has been conducted by the team led by professor Peng Xueyuan at Xi'an Jiaotong University. Through the study of the influence of gas-containing hydraulic oil compressibility on compressor thermodynamic processes, the calculation method for volumetric efficiency has been revised. By investigating the leakage mechanism and tribological behavior of sealing structures under extreme loads, the

收稿日期: 2025-09-26。 作者简介: 任省栋(1997—),男,助理教授;贾晓晗(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(52276036);陕西省重点研发计划资助项目(2022GXLH-01-21);国家资助博士后研究人员计划(GZC20250411)。

网络出版时间: 2025-12-31

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20251230.1917.008>

patterns affecting seal-ring wear have been revealed. Furthermore, by researching compressor operating-state identification methods, several non-destructive techniques for acquiring dynamic p - V diagrams have been developed. Based on these core technological breakthroughs, a 90 MPa hydrogen compressor with fully independent intellectual property has been successfully developed, which exhibits a discharge temperature 20 °C lower and a volumetric efficiency more than 15% higher than comparable domestic and international products. Additionally, the localization of 320 MPa-class ultra-high-pressure nitrogen compression equipment has been achieved, and it has been designated for service in a national large-scale experimental facility. A non-destructive health-management system for high-/ultra-high-pressure compressors has also been developed and successfully deployed at hydrogen refueling stations for the Beijing Winter Olympics. Looking forward, further research will be directed toward higher pressures, broader operating conditions, intelligent operation and maintenance, and lifetime prediction, thereby advancing the independent development and industrialization of high-end gas compression equipment in China.

Keywords: hydrogen compressor; hydrogen refueling station; ultra-high-pressure; thermodynamic process; volumetric efficiency

在全球绿色低碳能源转型的发展背景之下^[1],氢能因其清洁无碳、来源广泛等优势,被视为实现终端能源脱碳的关键载体。氢能的规模化、商业化发展,离不开高效、经济、安全的储运技术^[2]。在众多储运方式中,高压气态储氢因其设备结构简单、成本低等特点,是目前应用最为广泛的技术^[3]。为实现更高的体积储氢密度和更低的输氢成本,储氢压力从 45 MPa 提升到 90 MPa 乃至 100 MPa 以上已成为明确的发展趋势,高压/超高压增压技术成为制约氢能产业迈向更高水平的卡脖子环节之一。高压/超高压增压技术的突破,不仅对氢能产业至关重要,其意义更辐射至高端制造^[4]、精细化工^[5]、航空航天等诸多关乎国家战略安全与经济命脉的关键领域。在航空航天领域,诸如超高速风洞等国家重大科技基础设施,需要 350 MPa 的超高压气体作为测试气源^[6]。

在氢能应用领域,为满足氢气的洁净度和密封性要求,行业内应用最广泛的为隔膜压缩机和液驱活塞压缩机^[7-8]。这两种类型的压缩机都是由液压油作为中间介质来驱动工作腔体积变化,实现气体压缩,并避免污染。但现有技术在实际应用中普遍存在安全性不足,可靠性不高的问题。在高压/超高压条件下,作为驱动介质的液压油表现出较显著的可压缩性,驱动介质的体积变化带来了额外的容积效率的损失并使得压缩机的热力过程计算变得更加复杂。此外驱动介质和气体介质同时压缩产生更大的热量,导致气体温升过高,不仅降低压缩效率,更会对压缩机材料、密封件等造成热损伤,威胁设备安

全。高压/超高压下的动密封可靠性是制约压缩机稳定运行的关键难题。高压装备作为高能体系统,其失效潜在后果严重,运行安全性是决定设备应用前景的关键命脉。运行状态的实时、精准、无损监测是保障其长期安全可靠运行的生命线。然而,超高压运行时产生的强烈振动、噪声对信号采集形成干扰,且早期故障特征微弱,难以提取和识别。

国际上超高压技术的研究由来已久,国外厂家在特定领域形成了较大优势。在氢能领域,欧美等发达国家起步较早,拥有如 PDC Machines、NEWMODE AIRPRESS、MAXIMATOR 等知名企业,其产品在可靠性和成熟度上具有一定优势。在超高压化工领域,瑞士 Burckhardt Compression 公司长期主导着全球超高压聚乙烯压缩机市场。近年来,我国在上述领域奋起直追,取得了一定进展,但总体而言与国际顶尖水平仍存在差距,特别是在设备长期运行可靠性、核心部件寿命与稳定性、以及基础理论的原始创新方面有待加强。

基于国家对氢气高压/超高压装备的重点需求,西安交通大学彭学院团队依托绿色氢电全国重点实验室,在高压/超高压增压设备,特别是氢气压缩机领域,进行了从基础理论研究、关键技术攻关到核心装备研制与产业化应用的全链条创新,为我国战略性新兴产业的自主可控发展提供了坚实的技术支撑与装备保障。

1 基本工作原理及痛点问题

目前高压/超高压增压领域应用最广泛的压缩

机类型为隔膜压缩机和液驱活塞压缩机,它们的工作原理及面临的痛点问题如下。

1.1 隔膜压缩机工作原理

隔膜压缩机的典型结构示意图如图 1 所示。气侧膜头和油侧膜头通过轴向设置的主螺栓紧固连接。油气侧膜头中间压紧一组金属膜片,金属膜片一侧与气侧膜头“穹顶”壁面构成一个容积可变的腔体,称为气侧膜腔;金属膜片另一侧与油侧膜头穹顶壁面也构成一个容积可变的腔体,称为油侧膜腔。油侧膜头下方联通设置有油缸,油缸内设置有油活塞,油活塞在曲柄连杆机构的驱动下做往复运动。油活塞与膜片组之间的所有腔体中充满液压油,油活塞通过液压油传递活塞力和活塞位移驱动膜片变形,膜片变形时改变气侧膜腔容积。气侧膜腔内的气体与油侧膜腔中的液压油被膜片完全隔开,因此隔膜压缩机具有高洁净度的优点。

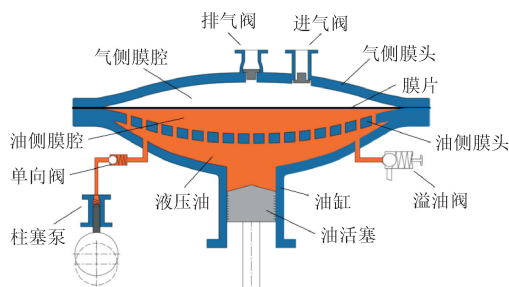


图 1 隔膜压缩机结构示意图

Fig. 1 Structural schematic of the diaphragm compressor

隔膜压缩机中的一组膜片为 3 层设置,但金属膜片厚度多为 0.4 mm 或 0.5 mm,且挠曲变形的应变一般不超过 0.3%,因此驱动膜片变形所需的压力很小。对于应用于加氢站的隔膜压缩机,膜片变形的驱动力远小于压缩机的工作压力,通常忽略不计。工作过程中,液压油的压力与气侧膜腔中气体的压力基本保持相同,油压和气压具有协同关系。

1.2 液驱活塞压缩机工作原理

液驱活塞压缩机整体由相对独立的压缩缸体和液压系统组成。液压系统一般由一台油泵和换向阀组成,为压缩缸提供驱动液体。压缩机的主体压缩缸结构如图 2 所示,中间部分为油缸,油缸中设置一个油缸活塞,油活塞即可将油缸分隔为左右两个液压腔室,液压系统与两个液压腔室联通,通过液压系统的换向阀交替向两个腔室中通入高压液压油,液压油即可驱动油活塞在油缸中做往复运动。油缸两端设置 2 个气缸,气缸中有气缸活塞,油活塞固定连

接一根活塞杆,活塞杆从油缸两侧穿出与两侧气缸中的气缸活塞接触,往复运动的油活塞推动气缸活塞在气缸中做往复运动,实现气缸中气体的压缩。

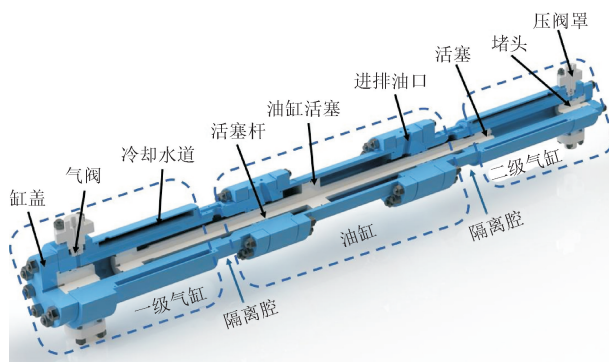


图 2 液驱活塞压缩机压缩缸结构

Fig. 2 Structural diagram of the cylinder in a liquid-driven piston compressor

1.3 痛点问题

1.3.1 隔膜压缩机效率和寿命低

隔膜压缩机腔体为扁平结构,使得隔膜压缩机的腔体容积非常有限。而实际应用发现,90 MPa 氢气隔膜压缩机的容积效率普遍低于 40%,成为限制加氢站加注量的重要因素^[9]。这说明隔膜压缩机的热力过程有更复杂的影响因素,为高压隔膜压缩机设计带来了更多的挑战。

可靠性方面,在加氢站增压用隔膜压缩机中,压缩机排气温度往往偏高,甚至会高于绝热压缩温度,过高的排气温度导致缸盖的热应力过大最终使得缸盖易变形、开裂。高压隔膜压缩机的缸头较厚,且油气协同工作的特性也给缸内的热力过程分析及热管理带来了挑战。

隔膜压缩机最大的痛点问题在于膜片的易破裂^[9-10]。目前加氢站应用中最突出的膜片破裂原因是因液压油泄漏导致腔内油量失衡而膜片撞击油侧腔体发生破裂。膜片破裂是因泄漏故障无法及时准确识别而恶化所导致的结果。在高压密封材料和密封形式没有重大突破的前提下,解决膜片寿命问题的一个关键点在于开发易于实施的高可靠性的故障诊断技术,对泄漏的故障及时做出识别和预警,避免膜片进一步异常运动而破裂,有计划性地停机检查维护,减小故障损伤程度。

1.3.2 液驱活塞压缩机密封易失效

液驱活塞压缩机气缸内活塞密封失效是其在加氢站应用中的核心痛点^[11]。液驱活塞压缩机的驱动系统结构简单,可靠性高,但气缸内全无油的要求

使得气缸活塞环缺少有效的冷却和润滑,导致活塞环磨损加剧,寿命大幅降低。气缸内氢气的泄漏一方面导致氢气损失,成本增大,另一方面过多氢气泄漏也带来了安全风险。因此,对无油活塞环密封及磨损特性进行深入研究,开发泛塞磨损预测模型对于优化密封结构设计及预测失效进行提前干预防止故障升级具有重要意义。

2 核心科学问题突破

基于高压/超高压增压用的隔膜压缩机和液驱活塞压缩机应用中的痛点问题与核心挑战,团队依托西安交通大学绿色氢电全国重点实验室进行了相关科学问题的突破。

2.1 油气协同压缩的热力过程特性及油气双向协同传热特性

液压油驱动气腔容积变化实现气体压缩是隔膜压缩机和液驱活塞压缩机的共同特征,液压油的压力会随着气体压力变化而协同地进行周期性的压缩和膨胀。在大的压差下,液压油的压缩性导致的油容积的变化就会对压缩机的热力过程造成显著的影响。团队建立了考虑液压油可压缩性的隔膜压缩机热力过程模型^[12]。

在液压油可压缩性不能忽略的高压工况下,可分析得到隔膜压缩机的实际工作循环过程如图3所示。膨胀过程液压油的压力增大占据了部分油活塞的行程容积,导致进气结束时气腔容积减小,因此对压缩机容积效率产生负面影响。根据隔膜压缩机油气协同压缩膨胀的热力过程特性可获得高压隔膜压

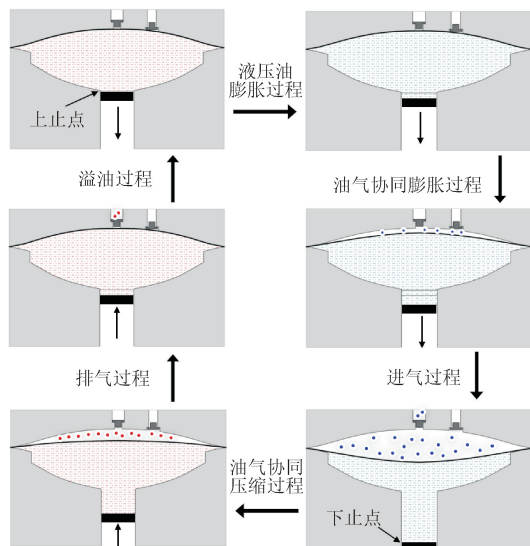


图3 高压隔膜压缩机实际循环过程

Fig. 3 Cycle of a high-pressure diaphragm compressor

缩机容积效率计算方法。

进气结束时,气侧膜腔容积计算公式为

$$V_{c,g} = V_h - \frac{p_o - p_s}{\beta_e} V_{oil} \quad (1)$$

式中: β_e 为液压油等效体积弹性模量, MPa; V_{oil} 为液压油总体积, mm^3 ; V_h 为油活塞行程容积, mm^3 ; p_o 为溢油压力, MPa; p_s 为进气压力, MPa。

综合考虑到余隙容积、进气加热、阻力损失的影响,则高压工况下,隔膜压缩机的容积效率计算公式为

$$\eta_v = \left[V_h - \frac{p_o - p_s}{\beta_e} V_{oil} - \alpha V_h \left(\frac{Z_d}{Z_s} \epsilon^{1/m} - 1 \right) \right] \lambda_p \lambda_T / V_h = \left[1 - \frac{p_o - p_s}{\beta_e} \frac{V_{oil}}{V_h} - \alpha \left(\frac{Z_d}{Z_s} \epsilon^{1/m} - 1 \right) \right] \lambda_p \lambda_T \quad (2)$$

式中: α 为相对余隙容积; Z_d 为排气状态压缩因子; Z_s 为进气状态压缩因子; ϵ 为压比; m 为余隙容积膨胀过程指数; λ_p 为压力系数; λ_T 为温度系数。

油气协同压缩膨胀的热力过程特性不仅阐明了高压工况下隔膜压缩机容积效率损失机制,也引出了高压下排气温度高于绝热压缩温度的原因。研究分析了隔膜压缩机压缩腔换热特点^[13-14]。特别是高压氢气隔膜压缩机,气侧膜头厚度较大且需采用不锈钢材质,导热系数较低,阻碍了气体向外界散热。气体与液压油则只相隔了一组薄薄的金属膜片,油气之间具有较高的换热效率。高压工况下液压油压缩膨胀过程的能量损失导致液压油温度很高,90 MPa 压缩机的液压油温度会达到 100 °C 以上,高温液压油在进气阶段和压缩过程前期会传递热量至气体,导致气腔内一个完整的工作周期整体上是吸热过程,从而导致压缩机排气温度高于绝热压缩温度。

团队建立了通过膜片的油气换热数学模型,并计算了 90 MPa 下控制油温为 35 °C 和 95 °C 时的油气换热特性。计算得控制不同油温下气体的动态温度以及一个循环内油与气之间的换热速率,图4展示了不同油温时的排气温度和油、气换热量。油温达到 95 °C 时,一个循环中液压油向气体传递了 720 J 的热量,导致压缩机的实际排气温度高于绝热压缩温度。将油温维持在 35 °C 时,气体在一个循环中将 1 323 J 的热量传递给液压油,使得压缩机的排气温度降低了 45 °C。而且,吸气过程中气体温度较低,液压油会很快将热量传递给气体,导致进气温度升高。因此可知高压工况下由油温高导致的进气加热也是隔膜压缩机容积效率低的一个重要因素。

通过隔膜压缩机油气协同压缩膨胀工作特性及油气双向换热特性的研究阐明了高压下隔膜压缩机容积效率底、排气温度高的机理,为高压/超高压隔膜压缩机的结构设计提供了理论基础。

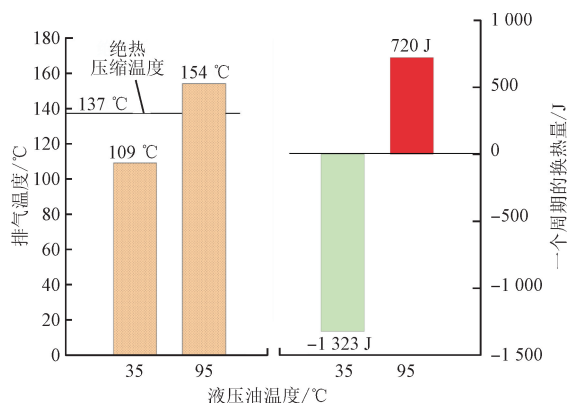


图 4 不同油温下排气温度和一个周期内的油、气换热量

Fig. 4 Discharge temperature and oil-gas heat exchange per cycle under different oil temperatures

2.2 极端载荷密封界面耦合机理

隔膜压缩机的油活塞和液驱活塞压缩机的气缸活塞都涉及高压密封,密封的可靠性是保障压缩机稳定安全运行的关键一环。以高压密封常用的泛塞环为对象研究了极端载荷下的密封和磨损机理。建立了泛塞和壁面接触的物理模型,并分步施加过盈装配约束和气体力,泛塞过盈装配到缸内后的变形量云图如图 5 所示。施加气体作用力后密封环状态会受到被压缩的高温气体的压力和温度的影响,往复运动的活塞环和壁面摩擦也会产热,建立泛塞温度场仿真模型获得工作状态下泛塞温度,并进行泛塞的热—结构耦合模型,得到 90 MPa 工作状态下泛塞与壁面的接触应力如图 6 所示,可见气压的作用使得泛塞的密封唇更加紧贴壁面,增大了密封唇与壁面的接触应力,是实现高压密封的关键。

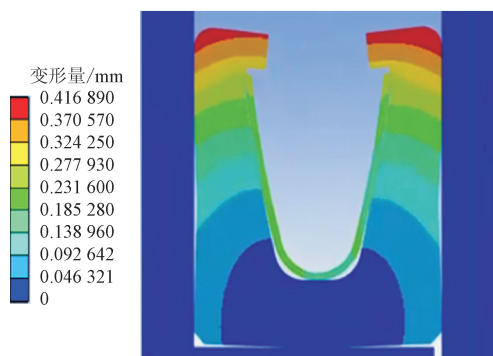


图 5 施加过盈约束后的泛塞变形量

Fig. 5 Deformation of the seal after applying interference constraint

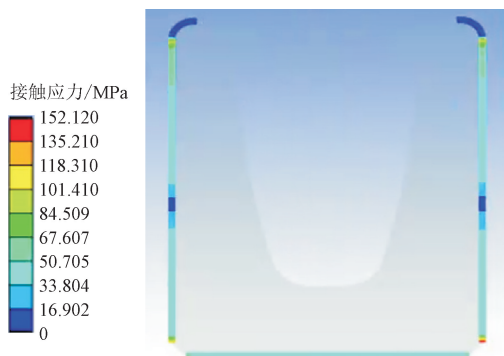


图 6 施加气体力后接触应力分布图

Fig. 6 Contact stress distribution after applying gas pressure

进一步地,在获得了泛塞温度场和接触应力分布的基础之上,基于 Archard 磨损理论^[15]建立了泛塞磨损模型。Archard 磨损理论基本原理为

$$h = \frac{k}{H} p^M v^n \quad (3)$$

式中: h 为磨损率, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; k 为磨损系数; H 为材料硬度, MPa; p 为接触面法向压力, MPa; v 为相对滑动速度, $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$; M 为压力指数; n 为速度指数。

根据磨损模型即可计算得泛塞在工作时的磨损量,并可以进一步分析影响磨损量的因素和规律指导不同工况下的泛塞参数设计^[16]。

2.3 装备状态监测的信号处理与识别

压缩机的研究应用中, p - V (压力-体积) 图是一项重要的分析监测工具,在传统的压缩机应用中,往往采用打孔安装传感器或气阀螺栓打孔引压的方式测量^[17]。该方法在中低压压缩机中获得广泛应用,但在高压/超高压领域采用打孔的方式会对高压缸体带来明显的强度削弱,具有潜在的安全隐患。为获得高压/超高压压缩机 p - V 图进行状态监测,团队提出了应变示功图法,根据隔膜压缩机和液驱活塞压缩机的缸头结构特征,提出采用活塞杆应变^[18-19]、缸头应变^[20]多种方式进行缸内压力复现。

隔膜压缩机和液驱活塞压缩机虽然驱动方式不同,但其驱动力都需要活塞杆传递,工作腔内的压力变化最终都会表现为活塞力的变化,活塞力的变化会表现为活塞杆应变的变化。因此,结合活塞杆动态应变和实时活塞杆位置即可获得腔内实时 p - V 图。隔膜压缩机驱动结构是典型的曲柄连杆机构,活塞杆载荷即为油活塞两侧液压油作用力与往复惯性力和活塞摩擦力之和。对于单作用隔膜机,活塞轴侧为大气压,计算得活塞上油压作用力即为盖侧油压;对于双作用隔膜机,计算得活塞油压作用力为两侧油压作用力的合力,需要从合力中分解出轴侧

和盖侧的压力变化。因此,提出了选择气阀开/闭事件作为计算特征点的 p - V 图重构算法。以气阀开/闭为特征点,分别建立轴侧和盖侧气体力理论平衡方程,根据理论方程,分别得到气缸轴侧和盖侧的吸气压力、排气压力、压缩指数和膨胀指数,构建理论 p - V 图。然后,逐步迭代调整轴侧和盖侧计算压力值,使气体力合力逼近于由活塞杆载荷推算出的气体力合力,而获得优化后的各侧压力曲线,最后输出重构后的 p - V 图。

此外,针对一些活塞杆不便安装应变装置的场景,团队还研究了基于缸头应变的动态压力测量方法^[21]。隔膜压缩机和液驱活塞压缩机的缸盖都是外圈被螺栓紧固约束,中间区域承受均匀气压载荷,可以将缸盖简化为圆平板模型。根据圆平板变形理论和广义胡克定律,腔内气压会导致缸盖变形且应变与压力呈线性关系,因此通过测量缸盖的应变即可复现得腔内动态压力,缸盖结构的非均匀性导致的线性偏差进一步通过有限元仿真计算或者工程应用中通过稳定的吸排气阶段的压力值进行线性标定即可。图7所示为针对一台 90 MPa 隔膜机采用缸头径向应变与压力传感器实测油压的对比,两者变化趋势具有很好的 consistency。

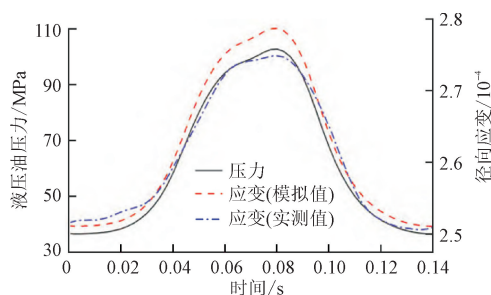
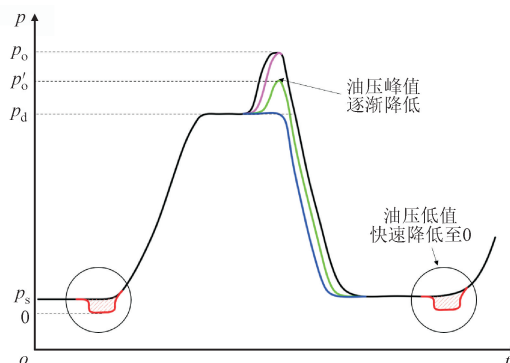


图7 基于缸头应变测得腔内动态压力

Fig. 7 Dynamic pressure measured based on cylinder head strain

p - V 图不仅能反映压缩机功耗、进排气损失、过程指数等关键热力参数,特别对于隔膜压缩机,还能用于识别膜片运动状态。膜片破裂是隔膜压缩机最棘手的故障类型,多数发生于膜片与油侧膜腔的异常撞击,膜片与油侧膜腔油槽或油孔接触的附加应力导致膜片破裂^[22]。现有的监测手段只有膜片破裂报警,只能在膜片破裂之后检测到破裂特征。隔膜压缩机由于油气协同工作的复杂性,其故障的底层原因往往不易发现,简单更换膜片并不能解决问题。如果能从动态压力特征识别膜片运动状态则可以提前预知膜片运动异常进行计划性停机并分析真

实故障原因。基于此,根据油气协同工作过程特征解析了动态压力识别膜片运动状态的特征信号^[23]。当液压油量失去平衡时腔内油压特征如图8所示。油腔中液压油减少时,首先溢油前的液压油二次压缩量减小,油压峰值会逐渐降低,随着液压油量的逐渐减小,膜片在吸气结束前会撞击到油侧腔体并伴随液压油体积快速增大,快速膨胀降压至零。因此提取动态油压信号中的油压峰值和低值作为识别膜片运动状态的特征信号。



p_0 —溢油压力; p'_0 —油压峰值; p_d —排气压力; p_s —进气压力。

图8 隔膜压缩机动态压力特征信号

Fig. 8 Dynamic pressure characteristic signal of the diaphragm compressor

3 关键技术攻克

3.1 高效压缩与高性能设计技术

团队基于隔膜压缩机油气协同压缩的热力过程特性及油气双向传热的研究结果形成了高效率设计方法^[24-25]与热管理技术^[14,26]。所提出的高效率设计方法的关键之处在于精准控制总的膜腔容积。传统设计中,总膜腔容积一般是油活塞行程容积的1.2倍。在高压压缩机中,因液压油压缩膨胀的影响,膜腔很大一部分没有得到应用。团队提出的新型腔体设计中,将液压油的体积膨胀值列入膜腔容积的设计参数。其次,通过改进的配油盘结构设计允许膜片与油侧膜腔的贴合,从而无需增加膜腔补偿容积,使压缩机进气结束时的气侧膜腔容积等于总膜腔容积,使腔体得到最大化的利用。由于总的腔体容积减小,压缩机膜头更小,液压油的体积也降低,则相应的液压油的膨胀体积也降低,压缩机也会有更高的容积效率。提出新的设计参数腔体利用率 η_c ,用于衡量隔膜压缩机膜腔容积的利用率。该参数为一个行程进气状态下的吸气容积 V_s 与总膜腔容积 V_c 的比值,记作

$$\eta_c = V_s/V_c \quad (4)$$

采用团队所提高效率设计方法分别设计了 90 MPa 和 200 MPa 超高压隔膜压缩机并进行了测试,搭建了测试台如图 9 所示。采用本团队设计方法与传统设计方法进行测试对比,结果如图 10 所示。由实测效率的对比结果可见,本团队所提方法将 90 MPa 隔膜压缩机的腔体利用率从 0.37 提高到 0.66,提高了 78%。压缩机工作压力越高时,液压油的可压缩性影响更显著,该方法对于更高压力的隔膜压缩机更有效。200 MPa 隔膜压缩机的腔体利用率由 0.19 提高到 0.64,提高了 2.37 倍。可见本团队所提的腔体设计方法不仅提高了压缩机的容积效率,更是大幅提高了腔体利用率,特别对于超高压隔膜压缩机可以大幅减小压缩腔尺寸。

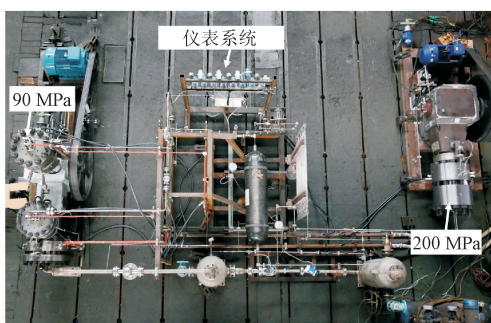


图 9 90 MPa 和 200 MPa 隔膜压缩机及测试台

Fig. 9 90 MPa and 200 MPa diaphragm compressors and the test bench

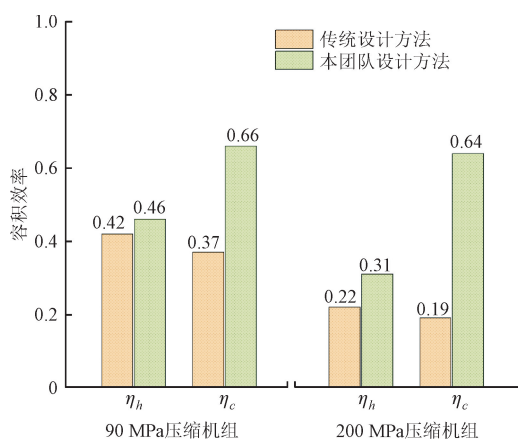


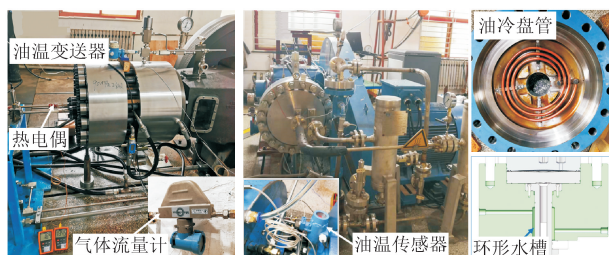
图 10 采用两种方法设计的压缩机容积效率和腔体利用率比较

Fig. 10 Measured volumetric efficiency and cavity utilization of compressors designed by two methods

此外,通过油气协同工作特性的研究揭示了高油压会带来更大的液压油压缩膨胀量而对容积效率有更大的影响,因此特别是对于应用于加氢站这种

变工况环境下的隔膜压缩机,控制溢油压力与排气压力的随动变化具有显著的积极意义。现有隔膜机厂家普遍采用随动阀进行油压控制,但是随动阀结构是一个小型的隔膜压缩机缸头,结构复杂且有较大气体泄漏的风险。该团队基于溢油阀结构特征,开发了比例油压控制技术^[27-30]。将排气压力转化为电信号,通过电信号控制驱动溢油阀的预紧力实现溢油压力与排气压力的随动。经过动态测试其反应频率满足压缩机变工况调节需求。

本团队开发了油气协同换热的膜头热管理技术^[31-32]进行排气温度控制。基于新型热管理技术设计了加氢站用 22、45 和 90 MPa 压缩机并进行了控制油温的效果的测试。22 和 90 MPa 压缩机均以其二级作为研究对象。搭建测试台如图 11 所示,测试结果如图 12 所示。显然,对于在 3 种压力等级下运行的隔膜压缩机,随着油温的下降,排气温度显著降低。



(a) 90 MPa 压缩机

(b) 22 MPa 压缩机

图 11 隔膜压缩机油、气换热性能测试实验台

Fig. 11 Experimental test bench for oil-gas heat exchange performance of the diaphragm compressor

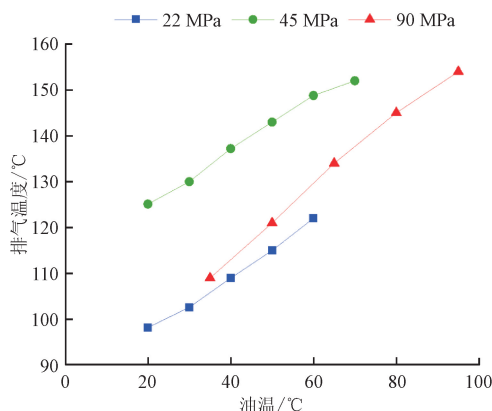


图 12 3 种压力等级下的隔膜压缩机在不同油温下的排气温度

Fig. 12 Exhaust temperature of the diaphragm compressors under three pressure grades at different oil temperatures

3.2 无损监测与安全评估技术

团队基于无损 p - V 图测量方法开发了高压/超

高压压缩机无损监测与安全评估技术^[33-34]。针对隔膜压缩机,采用活塞杆应变重构腔内压力。针对液驱活塞压缩机,采用基于缸头应变的测量方法获取腔内动态压力^[35]。液驱活塞压缩机没有曲柄连杆机构,其活塞位置由两个油缸内液压油体积决定,根据活塞换向时间和油泵动态流量可计算得活塞动态位置,即可实现 p - V 图的重构。

获得压缩机 p - V 图如图 13 所示,即可用于监测压缩机腔内实际进排气压力、压缩膨胀过程指数等热力参数,并评估进排气压力损失、指示功率等热力性能。进一步地结合止点位置测量、声发射监测、振动监测等无损测量技术形成整套的压缩机无损监测技术^[36],可以综合诊断气阀异常工作状态、介质泄漏、机械磨损等故障,保证故障的早期识别。由于该技术采用无损应变测量方法,不受压缩机工作压力限制,尤其适用于高压/超高压设备监测。

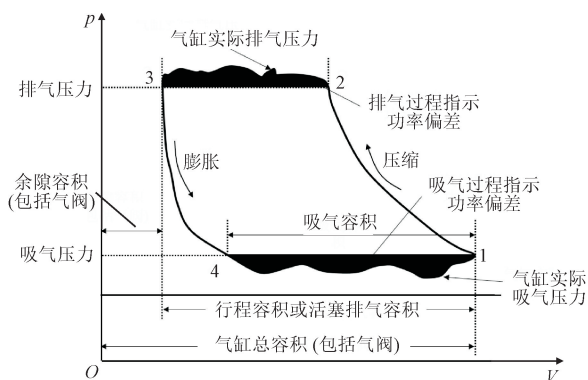


图 13 p - V 图及特征信号

Fig. 13 p - V diagram and characteristic signals

特别地对于隔膜压缩机开发了基于无损动态压力的膜片状态识别技术^[37],根据动态压力特征识别膜片工作状态,对于液压油逐渐泄漏增大的典型故障,可以根据油压峰值的降低而及时预警,预判膜片与油腔的撞击,可以做到“早期预警,及时干预”避免故障的恶化,并根据溢油表征准确判断故障底层原因,做到精准识别。

4 成果产出与应用成效

研究团队成功将基础理论与关键技术攻关成果转化为具有自主知识产权、性能达到国际先进水平的氢气高压/超高压增压装备,解决了我国氢能发展中的卡脖子问题。进一步将成果扩展到其他超高压应用领域,为我国热等静压、超高速风洞建设等

重大工程提供了关键动力设备。同时针对高压/超高压设备对运行安全的重点需求,开发了高压/超高压压缩机无损健康管理系统,有效保障设备运行安全。一系列成果已在多个国家重大工程与战略性新兴产业领域实现了应用,取得了显著的经济效益与社会效益。

4.1 加氢站用高压氢气压缩机

氢燃料电池汽车的商业化推广,依赖于安全、可靠、经济的加氢基础设施。氢气压缩机是加氢站最核心、成本最高的设备,其性能直接决定了加氢站的运行效率与可靠性。长期以来,90 MPa 压力等级的加氢站用压缩机市场被国外品牌垄断。针对这一卡脖子难题,本团队通过高压隔膜压缩机热力特性的研究以及高效换热技术的开发,成功研制出适用于 2 t/d 加氢站的 45 MPa 和 90 MPa 隔膜式氢气压缩机,如图 14 所示。



图 14 应用于加氢站的氢气压缩机

Fig. 14 Hydrogen compressor applied in the hydrogen refueling station

本团队所开发的氢气压缩机能适应加氢站 5~20 MPa 宽范围进气,并实现全工况范围内排气温度低于 160 °C,比行业内同等级产品温度低 20 °C,更好地保证了压缩机的稳定性和寿命。在额定进气压力为 12.5 MPa 下,45 MPa 压缩机容积效率达到 0.69,90 MPa 压缩机容积效率达到 0.62,效率高于市场同类产品 15% 以上。所开发的产品已于 2024 年成功应用于多个加氢站,稳定运行超 2 000 h,为我国氢能交通网络的初步形成提供了坚实的装备保障。

4.2 超高压压缩机

超越氢能领域,超高压技术更是高端制造、国防安全的关键支撑。团队成功攻克了超高压下的非线性热力过程精准预测、超高压缸体强度计算与设计、超高压动密封的长寿命设计等难题。成功研制出热等静压用 207 MPa 氩气压缩机,流量 $200 \text{ N} \cdot \text{m}^3/\text{h}$, 2024 年成功应用于我国超大型热等静压装备的自主研制。

此外,面向超高速风洞的重大需求,该团队研制出流量 $150 \text{ N} \cdot \text{m}^3/\text{h}$,排气压力达 320 MPa 的氮气压缩机,2025 年 1 月通过了多次一键启停及连续运转的现场验收测试,流量及排气压力值均达标,已确定将服役于我国某国家级中心的重要实验装置,为其提供稳定的超高压气源,为深空探索、国防必需的超高速飞行器提供试验保障。这些成果标志着我国在超高压增压技术领域已步入国际先进行列。

4.3 高压/超高压压缩机无损健康管理系统

为确保高压/超高压这一高能装备系统的长期安全、可靠、高效运行,团队将研究成果延伸至智能运维领域,开发了高压/超高压压缩机无损健康管理系统。本系统的核心创新在于实现了对压缩机示功图的无损监测。团队通过深入研究压缩机的热力学特性,开发了基于高精度无损应变测量与无线传输技术的解决方案,通过监测活塞杆或缸体表面的微弱应变信号,精准反演出缸内压力-容积(p - V)关系曲线,从而实现对气阀泄漏、活塞环磨损、膜片破裂等多种核心故障的早期诊断与预警。该系统同时集成了数字孪生、寿命预测及备件管理等高级功能,为用户提供从状态监测到预测性维护的整体解决方案。该产品目前已在 2022 北京冬奥会加氢站、中船七一研究所等多个场景投入应用。其中,为北京冬奥会加氢站配套的健康管理系统属国内首套,在赛时保障期间,系统成功预警了一台隔膜压缩机膜片的破裂,为冬奥会的顺利举行提供了可靠的技术保障。

5 结 论

围绕高压/超高压压缩机的热力学调控、密封可靠性与状态监测等关键挑战,团队通过理论突破与技术攻关,形成了一系列具有自主知识产权的核心成果,主要结论如下:

(1)揭示了高压下液压油可压缩性对容积效率的影响机制,建立了修正的容积效率计算模型,并发现了油气双向协同传热规律,据此提出高效腔体设

计与油温控制方法,使 90 MPa 隔膜压缩机容积效率提升 15%以上、排气温度降低 20°C 。

(2)攻克了极端载荷下密封界面耦合与磨损预测难题,建立了泛塞密封热力磨损多场耦合模型,为长寿命密封系统设计提供了理论依据与参数指导。

(3)成功研制出 45 MPa 和 90 MPa 加氢站用氢气压缩机、207 MPa、320 MPa 超高压压缩机等系列装备,并在多个加氢站及国家重大工程中实现应用,打破了国外技术垄断,提升了我国在高端气体增压装备领域的自主可控能力。

(4)创新提出了基于活塞杆应变与缸头应变的无损动态 p - V 图重构方法,实现了高压/超高压压缩机运行状态的实时精准监测,并研发出无损健康管理系統,成功应用于北京冬奥会加氢站,实现故障早期预警。

6 展 望

面向氢能规模化与高端装备自主化发展需求,未来将在以下方面持续深化研究。

(1)面向增压装备更高压力与更宽工况,进一步完善真实气体性质、液压油可压缩性、结构变形与油气传热耦合的多物理模型,并通过高频测试与参数标定提升预测精度,为装备快速迭代设计与运行优化提供支撑。

(2)围绕增压装备“长寿命与本质安全”,系统开展超高压承压件、膜片与密封材料的疲劳/磨损/腐蚀失效机理研究,发展高可靠密封与长寿命零部件,并结合在线无损监测实现寿命预测与主动防护。

(3)结合加氢站与国家重大装置需求,推进系列化与标准化,并将健康管理系统与站级控制策略深度融合,提升全生命周期经济性与运维效率,促进高端增压装备规模化应用。

参考文献:

- [1] 新华社. 中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见 [EB/OL]. (2021-10-24) [2025-09-10]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
- [2] WANG Xusheng, CHENG Tao, HONG Haoliang, et al. Challenges and opportunities in hydrogen storage and transportation: a comprehensive review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 219: 115881.
- [3] 崔振莹. 氢能储运技术现状及发展分析 [J]. 中外能源, 2024, 29(7): 31-39.

- CUI Zhenying. Current status and development of hydrogen storage and transportation technologies [J]. *Sino-Global Energy*, 2024, 29(7): 31-39.
- [4] 姜卓钰, 张朋, 包建文, 等. 等静压技术在材料加工领域的应用现状 [J]. *宇航材料工艺*, 2017, 47(1): 13-19.
- JIANG Zhuoyu, ZHANG Peng, BAO Jianwen, et al. Current applications of isostatic pressing technology in materials processing field [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2017, 47(1): 13-19.
- [5] 孙滨. 超高压压缩机在高压聚乙烯装置中的发展前景 [J]. *石化技术*, 2001, 8(4): 249-252.
- SUN Bin. The prospect of extra high pressure compressor in LDPE plant [J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2001, 8(4): 249-252.
- [6] FOMIN V M, KHARITONOV A M, MASLOV A A, et al. Hypersonic short-duration facilities for aerodynamic research at ITAM, Russia [M]//IGRA O, SEILER F. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2016: 315-346.
- [7] 贾晓晗, 任省栋. 加氢站压缩机发展现状与展望 [J]. *压缩机技术*, 2023(4): 1-5.
- JIA Xiaohan, REN Shengdong. Development status and prospect of compressor for hydrogen refueling station [J]. *Compressor Technology*, 2023(4): 1-5.
- [8] 黄振辉, 聂连升, 王向丽, 等. 加氢站用隔膜压缩机和液驱活塞式压缩机的性能和应用分析 [J]. *化工设备与管道*, 2022, 59(6): 78-82.
- HUANG Zhenhui, NIE Liansheng, WANG Xiangli, et al. Performance and application analysis for hydraulic driven piston compressor and diaphragm compressor in hydrogen refueling station [J]. *Process Equipment & Piping*, 2022, 59(6): 78-82.
- [9] 路伟. 影响隔膜压缩机可靠运行的主要因素及优化措施 [J]. *压缩机技术*, 2025(3): 58-61.
- LU Wei. Main factors affecting the reliable operation of diaphragm compressors and optimization measures [J]. *Compressor Technology*, 2025(3): 58-61.
- [10] 曹田田. 加氢站隔膜式氢气压缩机膜片破裂原因分析及发展建议 [J]. *石油石化绿色低碳*, 2024, 9(4): 14-20.
- CAO Tiantian. Cause analysis and development suggestion of the diaphragm rupture of hydrogen compressor in hydrogen refueling stations [J]. *Green Petroleum & Petrochemicals*, 2024, 9(4): 14-20.
- [11] 聂连升, 巩建峰, 王向丽, 等. 加氢站用液驱活塞式氢气压缩机的密封技术分析 [J]. *化工设备与管道*, 2025, 62(4): 53-57.
- NIE Liansheng, GONG Jianfeng, WANG Xiangli, et al. Analysis of sealing technology for hydraulic driven piston compressor in hydrogen refueling station [J]. *Process Equipment & Piping*, 2025, 62(4): 53-57.
- [12] REN Shengdong, JIA Xiaohan, JIANG Jiacheng, et al. Effect of hydraulic oil compressibility on the volumetric efficiency of a diaphragm compressor for hydrogen refueling stations [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(34): 15224-15235.
- [13] REN Shengdong, JIA Xiaohan, ZHANG Jiatong, et al. Analysis of heat transfer of the gas head cover of diaphragm compressors for hydrogen refueling stations [J]. *Processes*, 2023, 11(8): 2274.
- [14] REN Shengdong, JIA Xiaohan, LI Kai, et al. Enhancement performance of a diaphragm compressor in hydrogen refueling stations by managing hydraulic oil temperature [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 53: 103905.
- [15] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surfaces [J]. *Journal of Applied Physics*, 1953, 24(8): 981-988.
- [16] 杨金, 肖强, 李鹏, 等. 过盈量和弹簧夹角对泛塞密封性能的分析 [J/OL]. *润滑与密封*. (2025-08-26) [2025-09-12]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1260.th.20250825.1742.002>.
- YANG Jin, XIAO Qiang, LI Peng, et al. Analysis of the effects of interference fit and spring angle on the performance of PTFE seals [J/OL]. *Lubrication Engineering*. (2025-08-26) [2025-09-12]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1260.th.20250825.1742.002>.
- [17] 刘卫华, 郁永章. 往复压缩机故障示功图诊断法研究 [J]. *压缩机技术*, 2001(6): 9-12.
- LIU Weihua, YU Yongzhang. Study on fault diagnosis of a reciprocating compressor by *P-V* diagnosis [J]. *Compressor Technology*, 2001(6): 9-12.
- [18] LI Xueying, PENG Xueyuan, ZHANG Zetian, et al. A new method for nondestructive fault diagnosis of reciprocating compressor by means of strain-based *p-V* diagram [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 133: 106268.
- [19] 西安交通大学. 一种通过测量活塞杆应变获得往复压缩机 *p-V* 图的方法: CN201811083653. 5 [P]. 2019-03-08.
- [20] GUO Yi, ZHANG Shimao, QI Qiang, et al. Study on the thermodynamic performance of the hydraulic-actuated piston compressor by non-destructive methods for hydrogen storage [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*

- neering, 2025, 74: 106928.
- [21] 李凯, 任省栋, 张升涛, 等. 90 MPa 高压隔膜压缩机油缸优化设计 [J]. 流体机械, 2025, 53(4): 83-92.
LI Kai, REN Shengdong, ZHANG Shengtao, et al. Cylinder optimization design of 90 MPa high-pressure diaphragm compressor [J]. Fluid Machinery, 2025, 53(4): 83-92.
- [22] JIA Xiaohan, CHEN Jiahao, WU Han, et al. Study on the diaphragm fracture in a diaphragm compressor for a hydrogen refueling station [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(15): 6412-6421.
- [23] LI Xueying, CHEN Jiahao, WANG Zhizhong, et al. A non-destructive fault diagnosis method for a diaphragm compressor in the hydrogen refueling station [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(44): 24301-24311.
- [24] REN Shengdong, JIA Xiaohan, SHI Long, et al. Theoretical and experimental study on improving diaphragm compressor design for hydrogen refueling stations through use of a free moving oil piston concept [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 74(Part A): 109397.
- [25] 西安交通大学. 一种高压隔膜压缩机: CN202210172957. 9 [P]. 2022-07-01.
- [26] WANG Ting, JIA Xiaohan, LI Xueying, et al. Thermal-structural coupled analysis and improvement of the diaphragm compressor cylinder head for a hydrogen refueling station [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(1): 809-821.
- [27] 西安交通大学. 隔膜压缩机油气压伴随控制系统及方法: CN202110962748. X [P]. 2022-06-07.
- [28] 西安交通大学. 一种高压隔膜压缩机用油气压随动阀及系统: CN202111069747. 9 [P]. 2022-01-28.
- [29] 西安交通大学. 一种高压隔膜压缩机用电磁随动阀及其控制系统: CN202111069580. 6 [P]. 2022-01-28.
- [30] 西安交通大学. 一种隔膜压缩机油气压伴随控制装置及其控制系统: CN202010676798. 7 [P]. 2020-10-23.
- [31] 西安交通大学. 一种隔膜压缩机缸盖冷却结构: CN201910690087. 2 [P]. 2019-10-25.
- [32] 西安交通大学. 一种隔膜压缩机油腔冷却结构: CN202211181749. 1 [P]. 2022-12-09.
- [33] 李雪莹, 任鹏, 彭学院, 等. 加氢站压缩机无损监测方法与故障诊断系统 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(22): 186-195.
LI Xueying, REN Peng, PENG Xueyuan, et al. Non-destructive monitoring and fault diagnosis system for hydrogen refueling station compressors [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(22): 186-195.
- [34] 西安交通大学. 一种隔膜压缩机油缸内油压监测装置及方法: CN201980000253. X [P]. 2019-07-30.
- [35] 西安交通大学, 四川大川压缩机有限责任公司. 一种液驱活塞压缩机示功图无损监测装置及方法: CN202111399626. 0 [P]. 2022-04-12.
- [36] 西安交通大学, 江苏恒久机械股份有限公司. 一种隔膜压缩机故障诊断仪: CN202010677133. 8 [P]. 2020-11-13.
- [37] REN Shengdong, JIA Xiaohan, ZHANG Jiatong, et al. Diagnosis method to identify diaphragm state of diaphragm compressors for hydrogen refueling stations based on dynamic oil pressure [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 49(Part D): 1043-1055.

(编辑 刘杨 陶晴)

团队介绍:

氢能动力装备研究团队长期专注于以氢气高压/超高压为代表的极端工况增压过程热、动力特性基础理论及关键技术研究,团队成员包括教授3人、副教授2人、副研究员1人、助理教授2人、硕博士研究生50余人。团队负责人彭学院,二级教授、教育部新世纪优秀人才,现任中国通用机械工业协会压缩机技术委员会主任委员、中国机械工程学会流体工程分会常务委员、全国压缩机标准化技术委员会委员、氢能动力装备陕西省高校工程研究中心主任,获国家科技进步奖2项,省部级奖5项。团队成员主持863项目1项,973项目1项,国家重点研发1项,重点研发子课题多项,国家自然科学基金10余项,国际合作项目4项,企业合作项目百余项。团队代表性研究成果包括:研发45 MPa、90 MPa加氢站用氢气压缩机,应用于多座加氢站;开发基于活塞杆应变重构 p - V 图的压缩机无损健康管理系统,在北京冬奥会加氢站投用;突破超高压增压关键技术成功研发320 MPa氮气压缩机应用于超高速飞行器测试装置,打破国外超高压增压技术垄断。授权中国发明专利及PCT专利共计50余项,转让19项。



团队负责人:彭学院教授



团队合影