



恒压压缩空气储能系统中变容密封技术的研究进展

杨静¹, 李鹏², 张新军²

(¹北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029; ²北京橡胶工业研究设计院有限公司, 北京 100143)

摘要: 恒压压缩空气储能 (Constant-pressure Compressed Air Energy Storage, CAES) 是平抑可再生能源波动、提升电网灵活性的关键技术, 其关键之一在于通过变容密封与外部压力补偿机制协同实现储气压力稳定。本文回顾了恒压压缩空气储能系统中变容密封技术的研究进展, 阐述了恒压 CAES 的技术原理与变容密封的关键作用, 综述了主流变容密封技术路线包括静水压力密封、活塞密封、气囊密封及承压膜密封, 重点分析了上述四种密封方式的作用机理、结构特点、技术优势与面临的挑战。分析表明, 以气囊和承压膜为代表的柔性密封技术, 凭借其低摩擦损耗、优异的密封适应性及结构简洁性, 成为实现低损耗、长寿命恒压储气的重要发展方向。本文展望了变容密封技术的发展趋势, 提出未来研究应聚焦于: 开发兼具高强度、高气密性与耐疲劳性的新型复合材料以提升性能极限; 深入研究高压大温差下多物理场耦合机理与动态响应以建立精确寿命预测模型; 发展基于状态感知的智能控制策略以实现自适应调节与故障预警; 开展全生命周期可靠性评估与成本效益分析以推动大规模工程应用。

关键词: 恒压压缩空气储能; 变容密封; 静水压力密封; 活塞密封; 气囊密封; 承压膜密封

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0439

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-15

A Review on Variable-Volume Sealing Technologies for Constant-Pressure Compressed Air Energy Storage Systems

YANG Jing¹, LI Peng², ZHANG Xin Jun²

(¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

²Beijing Rubber Industry Research and Design Institute Co., Ltd., Beijing 100143)

Abstract: Constant-pressure compressed air energy storage (CAES) is a key technology for mitigating renewable energy fluctuations and enhancing grid flexibility. One of its key features lies in achieving stable storage pressure through the synergistic operation of variable-volume sealing and external pressure compensation mechanisms. This paper reviews the research progress of variable-volume sealing technologies for constant-pressure CAES, elucidates the operating principles of constant-pressure CAES and the critical role of variable-volume sealing, and systematically summarizes four mainstream sealing approaches: hydrostatic pressure sealing, piston sealing, bladder sealing, and pressure-bearing membrane sealing. The mechanisms, structural characteristics, technical advantages, and key challenges of each

收稿日期: 2026-05-20; 修改稿日期: 2026-07-20。

第一作者: 杨静 (1970—), 女, 副教授, 研究方向为压缩空气储能, E-mail: yangjing@mail.buct.edu.cn; 通信作者: 李鹏, 正高级工程师, 研究方向为高分子材料结构设计, E-mail: lipeng_y@163.com。

引用本文: 杨静, 李鹏, 张新军. 恒压压缩空气储能系统中变容密封技术的研究进展[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-15.

Citation: YANG Jing, LI Peng, ZHANG Xin Jun. A Review on Variable-Volume Sealing Technologies for Constant-Pressure Compressed Air Energy Storage Systems[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-15.

approach are analyzed in detail. The analysis reveals a clear evolutionary trend from rigid-contact sealing to flexible isolation sealing and further toward intelligent adaptive sealing. Flexible sealing technologies, represented by bladder and pressure-bearing membrane sealing, are identified as the primary development direction for low-loss, long-life constant-pressure air storage, owing to their low friction loss, excellent sealing adaptability, and structural simplicity. This paper further outlines the development trends of variable-volume sealing technologies and proposes that future research should focus on: (1) developing novel composite materials with high strength, high hermeticity, and fatigue resistance to extend performance limits; (2) investigating multiphysics coupling mechanisms and dynamic responses under high-pressure and large-temperature-difference conditions to establish accurate life prediction models; (3) developing state-aware intelligent control strategies for adaptive regulation and early fault warning; and (4) conducting full life-cycle reliability assessments and cost – benefit analyses to facilitate large-scale engineering deployment.

Keywords: Constant-pressure compressed air energy storage; Variable-volume sealing; Hydrostatic pressure sealing; Piston sealing; Bladder sealing; Pressure-bearing membrane sealing

1 序 言

在全球能源结构向低碳化、清洁化转型的宏大背景下,风能、太阳能等可再生能源的规模化开发利用已成为实现“碳达峰、碳中和”目标的关键路径^[1-2]。然而,可再生能源固有的间歇性与波动性对电网的安全稳定运行构成了严峻挑战^[3-5]。因此,发展大规模、高效率、长时程的物理储能技术,以平抑功率波动、提升电能质量、实现“削峰填谷”,已成为支撑新型电力系统建设的核心需求。

在众多储能技术路线中,压缩空气储能因其容量大、寿命长、成本低及环境友好等优势,被视为最具应用前景的大规模物理储能技术之一^[6-7]。传统压缩空气储能系统常利用废弃矿洞、盐穴等天然地质结构作为储气库,以恒定容积的方式储存高压空气。然而,这种恒容储气模式存在一个固有缺陷:释能过程中,随着气库内空气质量减少,压力持续下降,导致透平膨胀机进气参数不稳定,进而引起系统输出功率剧烈波动和循环效率降低。为此,研究者们提出了多种改进构型,其中恒压压缩空气储能系统因其能够在充放气过程中维持储气压力基本恒定,有助于稳定膨胀机入口压力、改善变工况运行特性^[8-9],但其净效率提升取决于密封辅助能耗、热管理效率和系统集成方式,仍面临诸多技术挑战,但同时也展现出巨大的发展潜力。

恒压压缩空气储能系统通过在储气容器内引入可移动的密封界面(如液体活塞、柔性隔膜或刚性活塞),利用外部介质压力动态平衡容器内的空气压力,从而在充放气过程中维持系统压力恒定^[10]。其设计关键在于“变容”与“密封”的高效协同:“变容”通过改变气腔容积来适应空气量的变化以实现恒压;“密封”则确保高压空气与外部介质有效隔离,防止能量损失和系统失效^[11]。尤为关键的是,密封界面需伴随储气容器容积的连续、大范围变化而进行同步、低摩擦的相对运动。这种“高压”与“动变”的双重约束,对密封结构的几何构型、材料特性、润滑机制以及制造工艺均提出了极为严苛的要求。因此,变容密封技术的性能直接决定恒压压缩空气储能系统的可靠性、效率与经济性。

本文聚焦恒压储气系统的关键变容密封技术(图1),旨在系统梳理其技术原理,深入剖析不同技术路线的优缺点,探讨其在工作压力0.5~30 MPa、储气规模10~300 MW、循环频次 $10^3\sim 10^6$ 次工况下面临的关键科学与技术挑战,并展望其未来研究方向与发展趋势,以期为相关领域的科研与工程实践提供理论参考。

2 静水压力密封

静水压力密封是一种利用静水压力来封存高压气体的密封方案^[12-13]。其核心原理是在储气库周围或内部构建一个可控的水压环境,通过调节该水压

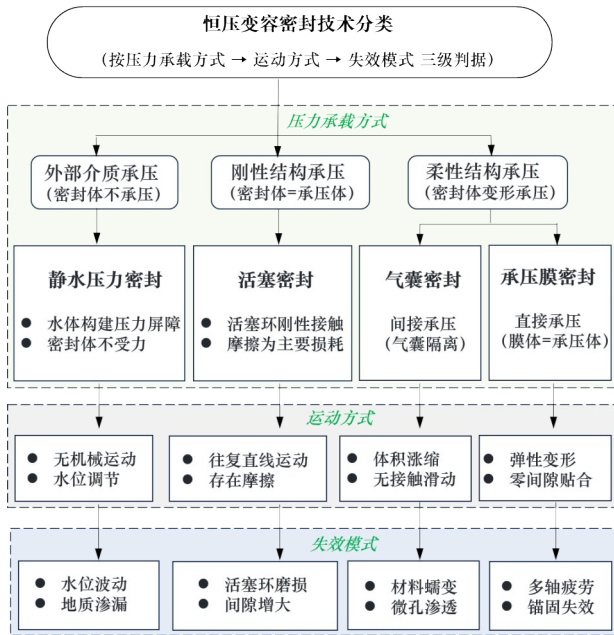


图1 恒压变容密封技术分类依据图

Fig. 1 Classification basis of constant-pressure variable-volume sealing technologies

使其始终略高于内部气压，从而利用内外压差形成有效的气体屏障。该技术尤其适用于大容积、形状不规则的地下洞穴或水下储气设施。

根据压力维持与调控方式的差异，静水压力密封主要可分为被动式与主动式两大类：

2.1 被动式静水压力密封

被动式方案主要依赖自然条件或固定结构来维持密封压力，例如利用地下水的天然静水压力，或依靠固定深度的水柱压力来平衡储气压力。典型的应用案例包括Lim^[14-15]等人提出的混凝土储气结构（图2）以及姜彤^[16]等设计的无底沉箱系统（图3）。此类方案结构相对简单，初期投资较低，但其密封性能对外部水文地质条件的依赖性强，压力调节的灵活性不足。

2.2 主动式静水压力密封

与被动式不同，主动式方案通过集成水泵、阀门及传感器等主动水力调节系统，对密封压力进行精确、动态的控制。例如，Mazloun^[17]等人提出的一种结合抽水蓄能的压缩空气储能系统（图4），即通过主动抽水或排水来补偿储气压力变化。主动式方案能够实现更精确、更灵活的压力控制，适应更宽的运行工况，但系统更为复杂，需要额外的能量输入与控制设备，对系统的集成与控制策略提出了更高要求。

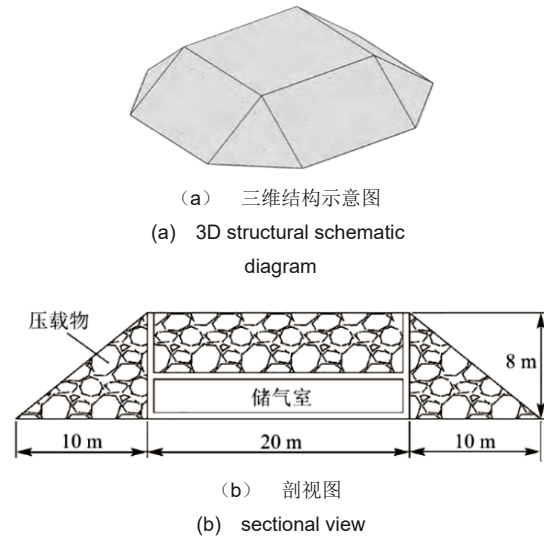


图2 混凝土储气室结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the concrete air storage chamber

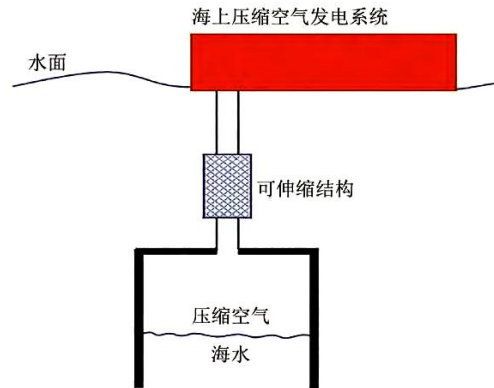


图3 无底沉箱储气系统

Fig.3 Schematic of the bottomless caisson gas storage system

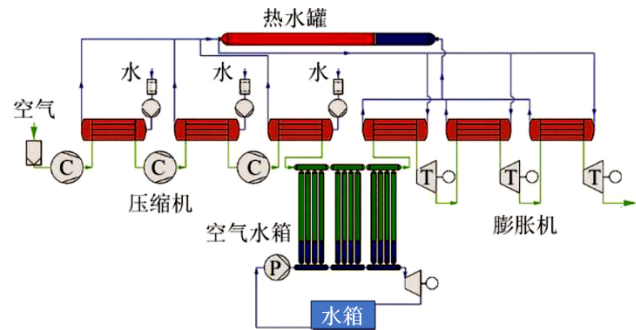


图4 抽水补偿式恒压系统

Fig.4 Schematic of the pump-compensation constant pressure system

2.3 关键技术挑战与发展方向

静水压力密封技术凭借其高可靠性、对储气库结构完整性要求低、运维简便等优势,已成为大型地下储气库的理想选择之一。然而,该技术的成功应用高度依赖于特定的水文地质条件,并需攻克以下几项关键技术挑战。与其他技术路线不同,静水压力密封的核心瓶颈源于气液两相的动态耦合——浮力控制、溶解-析出效应及泵水寄生功耗均为该技术所特有。

2.3.1 水下装置的稳定性与动态控制

该技术的核心挑战源于空气与水之间巨大的密度差。高压空气储库在水下会产生巨大的浮力,若不加以有效控制,可能导致结构失稳甚至上浮。因此,必须通过精密的压载设计与可靠的锚固系统来平衡浮力,确保储气装置的结构稳定。此外,为实现恒压运行,还需建立高精度的水压与气体泄漏监测网络,通过实时数据反馈,动态调节水柱高度或补水/排水速率,从而精确维持系统压力,保障密封的长期有效性。

2.3.2 材料的耐久性与气体湿度控制

在水下环境中,密封结构及储气库壁面长期与水接触,面临着电化学与微生物腐蚀的严重威胁。同时,水分的渗入会显著提高压缩空气的湿度,这不仅可能导致后续膨胀透平在低温工况下发生结冰,危及设备安全,还会加剧管道和设备的内部腐蚀。因此,开发和应用高性能的防腐涂层与材料,并配套高效的除湿或干燥系统,是确保系统长期安全运行的关键。

2.3.3 系统循环效率的提升

静水压力密封系统的主要能耗来自于为维持储气压力平衡而进行的持续或间歇性泵水作业,这部分“寄生功耗”会直接降低系统的净循环效率。因此,如何通过优化水泵运行策略、回收利用膨胀过程中的部分能量,或结合地形优势减少泵水扬程,以最大限度地降低辅助能耗,是提升该技术经济性和竞争力的核心研究方向。

2.3.4 高压空气水溶解度变化及其连锁效应

高压空气在水中的溶解度随压力升高而显著增加,其物理本质可由亨利定律定量描述,空气主要由 N_2 (78%) 和 O_2 (21%) 组成, $25^\circ C$ 、0.1 MPa 下的溶解浓度分别约为 0.51 mmol/L 和 0.26 mmol/L^[18];当储气压力升至 10 MPa 时,溶解浓度

约增至常压的 100 倍,总溶解空气量超过 250 mg/L^[19];当溶解气体的过饱和度 S 超过临界值,溶解空气将在密封界面微观缺陷处异质成核,形成大量微气泡(直径 1~100 μm)^[20]。微气泡在压力恢复阶段被迅速压缩并溃灭,产生局部冲击波与微射流,即气蚀效应;单个气泡溃灭时可产生 >1 GPa 的局部压力和 >5000 K 的瞬时温度^[21],反复作用下材料表面出现点蚀坑,坑深可达 10~50 μm /10⁴ 次循环^[22];富集于密封界面的微气泡层形成等效“气膜”,当气泡体积分数超过 5% 时,密封面等效泄漏率可增大 1~2 个数量级^[23];在高压差(>5 MPa)驱动下,微气泡可被压入密封面微裂纹形成泄漏通道,即“气泡穿透效应”^[24];溶解氧浓度随压力线性增长,10 MPa、 $25^\circ C$ 下溶解 O_2 浓度约为常压的 100 倍(≈ 260 mg/L),远超钢铁腐蚀临界浓度(≈ 8 mg/L)^[25],高压 O_2 与气蚀造成的新鲜金属表面协同作用,使腐蚀速率较常压提高 3~5 倍^[26]; CO_2 的溶解同样加剧酸性腐蚀,pH 可降至 4~5^[27];综合上述机制,可给出该效应成为主要限制因素的定量判据:储气压力 >5 MPa、压力波动幅度 >2 MPa、运行温度 < $20^\circ C$ 时效应显著。静水压力密封在上述参数上均超标,但由于其循环频次低(≤ 2 次/天)且降压速率慢(水泵调节),单次循环损伤量有限,20~30 年设计寿命内累积效应处于可控范围;然而若未来 CAES 向高频次(>10 次/天)调峰发展或采用快速阀门调节,该效应将迅速成为主要限制因素。相比之下,活塞密封与气囊密封因不涉及水-气界面,承压膜密封采用气体背压而非水压,均可规避此问题。

3 活塞密封

活塞密封是一种采用机械接触式实现动态隔离的密封方案^[28-31]。其核心原理是在活塞与气缸壁之间设置活塞环或弹性密封件,通过密封件的自身弹性或外部可控压力源主动调节预紧力,使其紧密贴合气缸内壁,实现对磨损的动态补偿和对密封压力的精确维持。该技术路径尤其适用于结构规整的刚性储气罐。

从力学特性看,活塞密封的主要功能是通过刚性或半刚性部件的直接接触来承受和传递系统压力。密封件在接触面上持续承受巨大的正压力、剪切力以及由相对运动产生的摩擦力,其性能直接决

定了系统的可靠性与效率。

根据密封预紧力的补偿机制差异,活塞密封技术主要可分为以下两大技术路径:

3.1 充压补偿式油润滑密封

该方案通过外部可控压力将润滑油注入密封环背部的独立腔室,为密封环提供持续、恒定的背向推力。当密封环因磨损出现间隙时,外部压力能驱动其自动前移,实现磨损间隙的实时补偿,从而维持密封预紧力的稳定^[29,32-35](图5)。此方案兼具润滑与密封双重功能,有效降低了摩擦磨损,但需解决润滑油污染压缩空气及系统复杂度增加的问题。

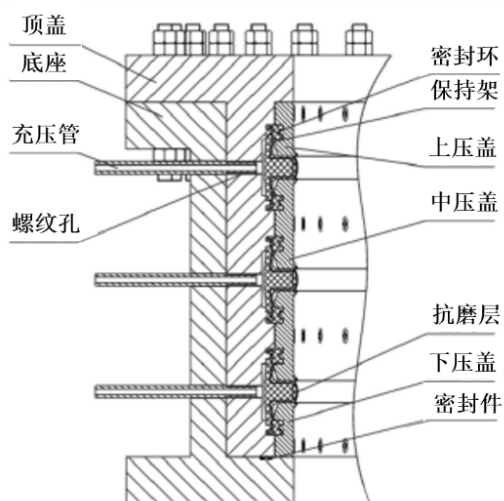


图5 充压补偿式油润滑密封结构示意图

Fig. 5 Schematic of the pressurized-compensated oil-lubricated seal

3.2 充压补偿式气密封

该方案是利用高压气体作为驱动介质,实现主动密封。通过将压缩空气注入“加压腔”,驱动弹性密封件紧贴密封面,形成一个自适应、高可靠性的动态密封屏障(图6)。该方案避免了油品污染,系统更为洁净,但对密封材料的弹性、气密性和耐久性提出了更高要求,且需要精密的气压控制系统以保证密封力的长期稳定^[32-36]。

3.3 关键技术挑战与发展方向

活塞密封技术凭借其成熟的技术基础、直观的密封效果和低泄漏率,在工业领域应用广泛。然而,当将其规模化应用于大型恒压压缩空气储能系统时,面临着摩擦磨损、大型化制造、维护困难及运行稳定性等多重挑战。活塞密封的独有挑战在于宏观运动副的摩擦磨损与大型化导向,这是柔性密

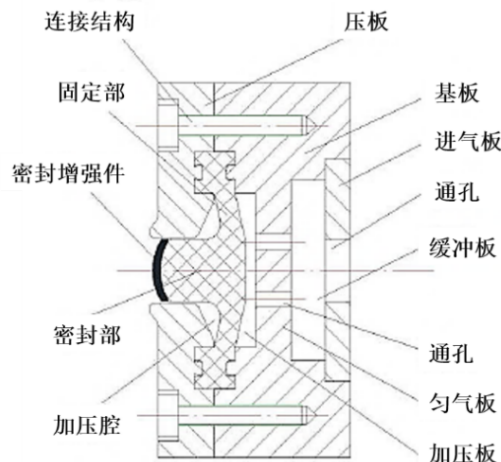


图6 充压补偿式气密封结构示意图

Fig. 6 Schematic of the pressurized-compensated gas seal

封技术所不存在的刚性接触问题。

3.3.1 高性能密封材料的研发与应用

活塞与缸壁间持续的相对运动是导致能量损失和部件磨损的根本原因。因此,开发兼具自润滑、耐磨损、耐高压及长寿命特性的新型低摩擦材料是首要任务。采用高性能合金钢、工程陶瓷或先进复合材料(如聚四氟乙烯基复合材料、碳纤维增强复合材料)制造活塞环,能够显著降低摩擦系数,延长密封件的使用寿命,从而提升系统的长期运行效率与经济性。

3.3.2 精密导向与姿态控制技术

对于直径可达数十米的巨型储气罐,活塞在移动过程中极易因受力不均或流体扰动而发生倾斜或偏摆,进而引发密封件偏磨、局部应力集中甚至卡死,这是威胁系统安全可靠运行的核心风险。为此,必须开发高精度的导向与姿态控制系统。这包括对罐体内壁进行高精度加工(如搪磨、涂层),以及设计可靠的主动或被动导向机构。同时,集成实时监测系统(如激光测距、超声波传感)以精确感知活塞姿态,并结合控制算法实现动态纠偏,是确保活塞平稳运行、保证密封均匀受力的关键。

3.3.3 表面工程与润滑优化

降低摩擦副的摩擦损耗是提升系统效率的直接途径。通过先进的表面处理技术,如对活塞和缸壁进行超精抛光或施加类金刚石碳(DLC)等低摩擦涂层,可以有效减少运动阻力。在润滑方面,需根据工况选用高性能润滑剂以进一步降低摩擦,并优

化润滑系统设计（如采用油气润滑或微量润滑技术），以最大限度减少润滑油消耗并防止其污染压缩空气，确保系统的洁净与安全^[28-29]。

4 气囊密封

气囊密封是一种利用充气柔性气囊实现介质隔离与动态容积调节的密封方案^[37]。其核心原理是在储气容器内放置一个气密性柔性气囊，将容器内部分隔成高压空气腔与介质补偿腔两个独立腔室。介质补偿腔通常填充水、相变工质或其他介质。在储能与释能过程中，气囊通过膨胀与收缩动态调整两腔的容积分配，从而实现变容恒压功能。

从力学特性看，气囊在系统中并不直接承受系统工作压力，其核心功能是作为低应力、大变形的力传递中介，仅承受高压空气腔与介质补偿腔之间的压力差。因此，气囊密封的本质是气动隔离，对气囊性能的核心要求在于能够承受反复的大弹性变形，并具备优异的柔韧性、抗疲劳性和长期密封稳定性^[32-34]。

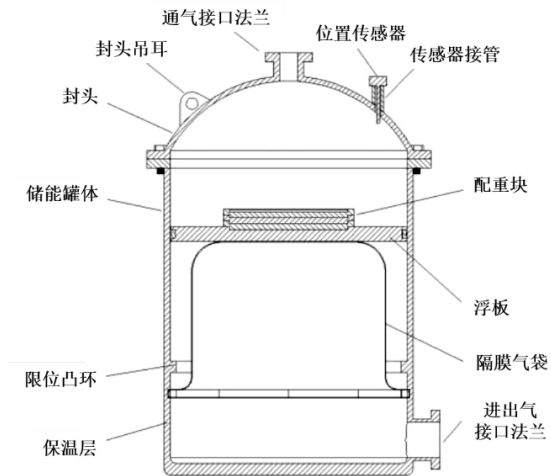
根据实现恒压的耦合机制差异，气囊密封技术主要可分为两大技术路径：

4.1 机械/重力耦合式气囊密封

该技术路径的核心是利用外部物理基准（重力或机械力）直接平衡气体压力^[38-42]。气囊主要作为压力传递的媒介，将空气压力耦合至一个恒定的反作用力系统上。气囊本身仅承受较小的气液压差，系统的稳压精度主要取决于外部耦合系统的稳定性。机械配重耦合装置^[38]（图7a），通过浮板与配重块的重力（ $G = mg$ ）直接平衡气压。其优点是原理直观、结构简单，但稳压精度受机械摩擦、导向稳定性等因素影响。液体重力耦合装置^[43]（图7b），利用液柱的重力势能（ $P = \rho gh$ ）提供恒定背压。气囊变形以鼓包和拉伸为主，对行程要求较低，结构相对简化，但稳压精度依赖于液位的精确控制与液体波动抑制。

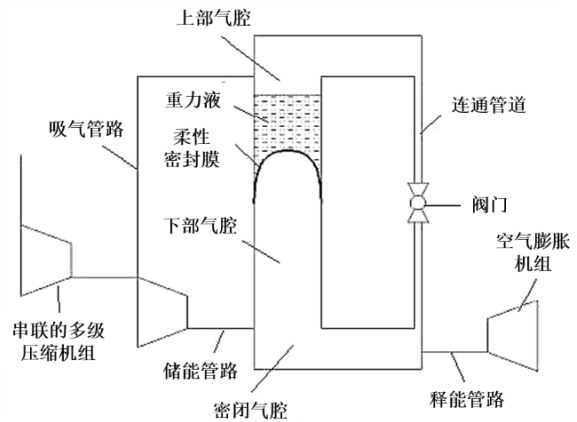
4.2 相变耦合式气囊密封

该技术路径将气囊密封与相变储能相结合，其核心是利用相变工质在等温条件下发生相态转换时的显著体积变化，精确调节系统容积。气囊主要承担物理隔离功能，而恒压任务则由外部热力系统通过控制相变工质的物态变化来完成。利用气-液相变等压法将液态二氧化碳系统与压缩空气储能系统



(a) 机械配重耦合装置

(a) mechanical counterweight coupling



(b) 液体重力耦合装置

(b) liquid gravity coupling

图7 机械/重力耦合式气囊密封

Fig. 7 Schematic of mechanical/gravity coupled airbag sealing

相结合^[39-42]，通过精确控制二氧化碳的相变过程实现储气装置稳压（图8）。这种方案通过热力控制实现容积的精确调节，能够维持空气压力的高度恒定，稳压精度高，然而，系统相对复杂，需要配套精密的热管理系统来协同控制^[44-46]。

4.3 关键技术挑战与发展方向

柔性气囊密封技术利用高分子材料制成的柔性隔膜，实现了压缩空气与外部介质的动态隔离与容积调节。该方案规避了传统刚性活塞的机械摩擦与磨损，降低了对储罐内壁的加工精度要求，展现出巨大的应用潜力。然而，其工程化应用仍面临三大核心技术挑战，这些挑战贯穿了从材料科学到系统

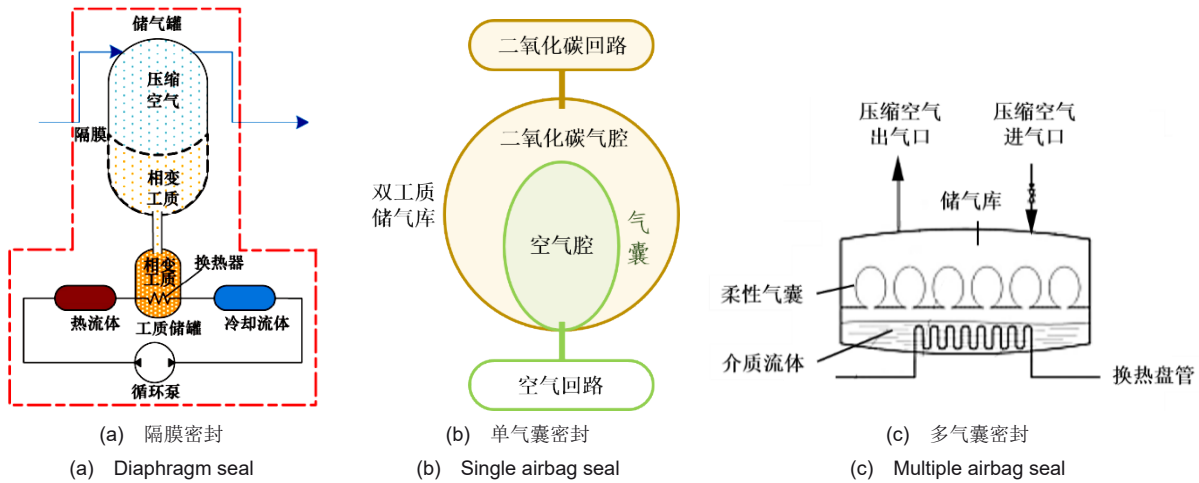


图8 相变耦合气囊密封示意图
Fig. 8 Schematic diagram of phase change coupling airbag sealing

集成与智能控制的多个层面。柔性气囊技术的独有挑战在于大变形下的流固耦合行为及相变工质的多物理场协同，这是刚性活塞与承压膜技术所不涉及的。

4.3.1 高性能柔性材料研发与全生命周期可靠性评估

柔性隔膜是系统的核心，其性能直接决定了密封的可靠性。在高压、反复拉伸的严苛工况下，材料需要同时满足优异的气密性、抗疲劳性、耐老化性及与多种工质的相容性。因此，开发高强度、长寿命的新型复合材料（如增强橡胶、多层复合薄膜），并建立精确的加速老化试验模型与数值仿真方法，对其在全生命周期内的力学性能演化、蠕变行为和密封性能衰减规律进行量化评估，是该技术走向工程应用的首要前提^[47]。

4.3.2 机械耦合系统的动态稳定性与优化设计

在机械耦合方案中，气囊的变形行为并非完全自由，而是与外部机械系统（如浮板、配重块）动态耦合。这种耦合在瞬态工况下可能引发流固耦合振动，导致气囊产生褶皱、局部应力集中或与罐壁发生非正常接触，严重影响密封寿命和系统稳定性。因此，必须通过多体动力学与流固耦合仿真，优化设计浮板结构、配重质量及系统阻尼，以确保气囊在充放气工况下平稳变形，并保证机械系统能够快速、稳定地响应压力变化^[48-49]。

4.3.3 相变耦合系统的多物理场协同与智能控制

相变耦合方案是一个典型的多物理场强耦合系

统。为实现高效稳定运行，必须使相变工质的相变速率与空气充放速率实现动态匹配。这要求系统集成压缩空气与相变储能两个子系统，其控制策略需协同优化热量管理、流体泵送与能量转换。因此，开发基于模型预测控制或人工智能的先进控制算法，以应对复杂的瞬态工况和系统间的强耦合关系，实现整体系统效率的最大化，是该技术路线未来发展的核心方向^[44-46]。

5 承压膜密封

承压膜密封是一种利用高强度纤维骨架与高分子聚合物复合而成的柔性承压膜，在系统工作压力作用下紧密贴合密封面以实现动态隔离的密封方案^[28-34,37,46-47]。该技术通过将承压膜固定于罐壁，或一端固定于罐壁、另一端连接于可移动活塞，使其在活塞运动时如风箱般伸展与折叠，实现“零间隙”变容密封。相较于传统刚性活塞，该技术理论上具有降低摩擦能耗、放宽罐壁加工精度要求以及简化维护流程的潜力，有望在大型地面储气系统中获得应用^[37,50]。

从力学特性看，承压膜在系统中的核心功能是直接承受并传递系统工作压力。膜体在压缩空气气压作用下紧贴密封面，主要承受大拉伸应力、弯曲应力以及与密封面的摩擦力。因此，承压膜密封的本质是承压型柔性密封，对膜体性能的关键要求在于较高的拉伸强度、良好的抗疲劳与耐磨损能力，并能在严苛工况下保持长期的密封完整性与结构稳

定性^[37,48]。

根据膜体的结构形态与运动方式差异，承压膜密封技术主要可分为两大技术路径：

5.1 滚动隔膜密封

滚动隔膜密封技术应用于具有特定几何结构的活塞或蓄能器中。膜体固定于罐壁上，当活塞移动时，膜体与固定壁面接触的部分会像履带一样进行滚动展开或卷起，从而在保持密封的同时适应活塞的位移。例如，Vande Van 等^[50]提出了一种在可变面积活塞结构中使用的滚动隔膜密封（图 9a）。该结构设计精巧，理论上可将摩擦和应力集中于滚动区域，实现低摩擦运动。然而，其对材料的抗弯曲疲劳和耐磨性要求极高，制造高循环寿命的隔膜存在技术瓶颈^[37,49]。

5.2 筒状折叠膜密封

筒状折叠膜密封是目前大型储气罐（尤其是地

面罐或竖井）中更主流的应用形式^[47,51-52]。膜体呈筒状，垂直安装在储罐内。其一端固定在罐壁上，另一端则连接在上下移动的重力块或活塞上。随着活塞的移动，筒膜像手风琴一样有规律地伸展和折叠，始终贴合在活塞与罐壁之间，直接参与动态密封并承受拉应力和往复摩擦^[47]。例如，用于重力空气储能系统的筒体折叠膜密封结构^[52]（图 9b）的核心优势在于通过承压膜体紧密贴合活塞与罐壁，几乎消除了气体泄漏通道，实现“零间隙”密封；承压膜质量轻，且与罐壁的接触压力分布均匀，产生的摩擦力远小于刚性活塞；柔性膜能够很好地适应罐壁的微小不平整度，显著降低对大型储罐内壁的加工精度要求。然而，该技术对膜材料的综合性能（抗拉、抗疲劳、耐磨）和结构设计（防褶皱、防扭转）要求最高。

5.3 关键技术挑战与发展方向

承压膜密封技术，又称纤维增强柔性膜密封，凭借其颠覆性的优势，被视为地面大型储罐的重要发展方向。然而，其在超高压（如 $>15\text{ MPa}$ ）、高频次循环工况下的长期可靠性，仍面临以下关键技术挑战。承压膜密封的独有挑战在于纤维增强柔性体在超高压循环下的多轴疲劳与锚固区域的密封完整性，这是其他三种技术路线均不存在的薄弱环节^[37,49]。

5.3.1 高性能复合材料的开发与制备

承压膜必须同时满足高强度（以承受高压）、高韧性（以适应大变形）、优异气密性、抗疲劳、抗老化以及耐高低温等多重严苛且时常相互制约的性能要求。因此，通过材料科学的创新，开发出兼具上述特性的新型多层复合材料（如芳纶/超高分子量聚乙烯纤维增强橡胶），并实现其稳定、可靠的工业化制备，是该技术取得突破的根本前提^[35,47]。

5.3.2 精密的结构设计与动态行为优化

承压膜在往复运动中极易出现应力集中、过度褶皱甚至扭转，这些都会导致局部损伤和密封失效。因此，必须对膜的几何构型、厚度分布及固定方式进行精密设计。通过非线性有限元分析等力学仿真手段，优化膜体在全行程内的应力分布，并开发可靠的导向与防扭转机构，以抑制非理想变形，是实现其长期稳定运行的关键^[48-49]。

5.3.3 全生命周期疲劳寿命的评估与预测

承压膜在循环载荷下的疲劳损伤是不可避免

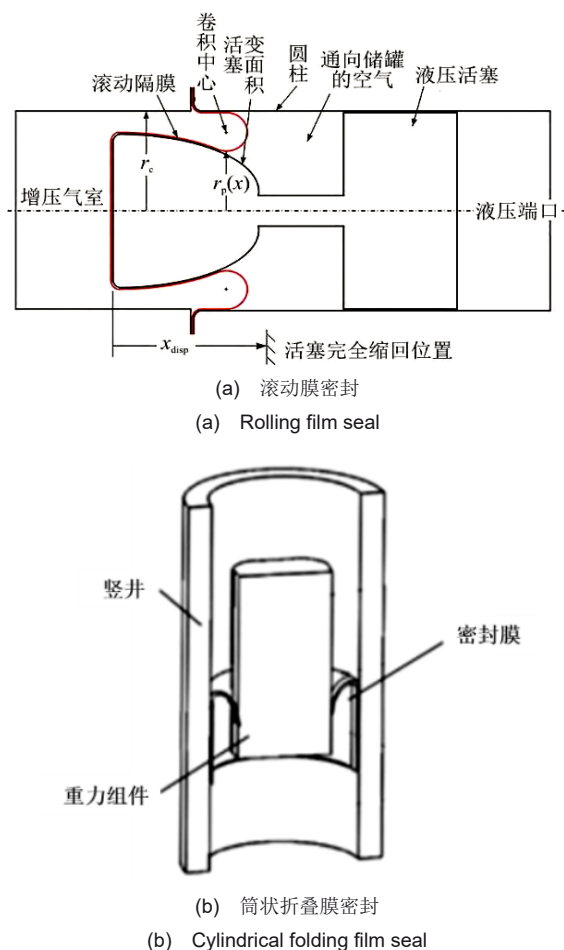


图9 承压膜密封

Fig. 9 Schematic of the pressure-bearing membrane sealing

的，其寿命预测对系统安全至关重要。建立精确的多轴疲劳损伤累积模型，结合材料性能数据与实际工况载荷谱，实现对膜体剩余寿命的可靠预测，是制定科学维护策略、避免灾难性失效的技术保障^[37]。

5.3.4 高可靠性锚固密封技术

膜体与活塞、膜体与罐壁之间的连接部位是整个密封系统中最薄弱的环节。这些锚固区域不仅要承受巨大的拉应力和剪切应力，还要保证长期的密封完整性。因此，开发既能实现快速安装与维护，又能确保在极端工况下绝对可靠的预应力锚固或复合密封结构，是保障整个系统完整性的核心技术瓶颈^[48-49]。

上述四种技术路线虽面临材料寿命等共性问题，但其主导失效机制存在本质差异：静水压技术的核心瓶颈在于气液耦合效应，活塞技术在于摩擦磨损与大型化导向，气囊技术在于流固耦合振动与多物理场协同，承压膜技术在于多轴疲劳与锚固密封。

6 恒压变容密封技术综合比较与分析

前述静水压力密封、活塞密封、气囊密封及承

压膜密封，作为恒压压缩空气储能系统的四种主流技术路径，其作用原理、性能表现与适用场景各具特点。表1从技术原理作用原理、密封方式、承压方式、运动方式、主要损耗、失效模式、结构特征、典型应用压力等维度进行了系统对比。表2从关键性能指标进行了对比。

分析表明，四种技术呈现出从“刚性接触式密封”向“柔性隔离式密封”，并最终向“智能自适应密封”演进的清晰脉络：（1）静水压力密封利用水体重力势能构建动态压力屏障，能够适应不规则大型地下空间，可靠性高，但受制于严格的地理条件。（2）活塞密封是传统机械密封在储能领域的延伸，凭借成熟技术和坚固结构承受超高压，但机械摩擦与磨损在大型化应用中被显著放大。（3）气囊密封通过引入柔性介质隔离规避了刚性摩擦，实现变容功能，但其核心挑战在于柔性材料的长期可靠性。（4）承压膜密封作为柔性密封的进阶形态，通过纤维增强结构直接承受高压，实现“零间隙”密封，代表了高效率、长寿命、低损耗的前沿趋势。

表1 四种恒压变容密封技术原理对比

比较维度	静水压力密封	活塞密封	气囊密封	承压膜密封
作用原理	水压>气压，以重力势能维持封气 ^[53-55]	活塞环/弹性体机械接触阻气 ^[56]	柔性气囊膨胀收缩，动态调容 ^[57-58]	骨架增强膜弹性变形，零间隙贴合 ^[58-59]
密封方式	液封隔离	刚性接触式	柔性隔离式	柔性自适应贴合
承压方式	液柱静压承压	机械刚性承压（活塞+缸体）	气压承压（气体弹性）	密封柔性膜承压（弹性变形）
运动方式	水面升降（准静态）	往复直线运动	气囊胀缩（准静态）	膜大变形（弯曲/拉伸）
主要损耗	蒸发损耗、金属腐蚀	摩擦损耗、气体泄漏	气囊疲劳、气体渗透	膜蠕变、疲劳、气体渗透
典型失效模式	水封干涸、腐蚀穿孔、水位失控	密封磨损、活塞卡滞、缸体变形	气囊破裂、泄漏、压力失控	膜疲劳开裂、蠕变失效、界面脱粘
结构特征	需稳定水源+不规则地下空间 ^[44]	刚性活塞+缸体+导向机构 ^[56]	柔性气囊+介质补偿腔 ^[59]	纤维增强膜体+罐壁锚固 ^[60-61]
典型应用场景	地下盐穴/含水层储气库，季节性调峰 ^[53-54,57]	地面固定式CAES电站，中高压（≤30 MPa）场景 ^[62,63,56,64]	分布式储能/光伏风电耦合系统，需要介质补偿且结构灵活的中低压场景 ^[57-58]	大型地面CAES储气罐超高压（>15 MPa）、高频次（>10 ³ 次/天）、长寿命（>20年）场合 ^[59-60]

上述四种技术并非简单的优劣替代关系，而是分别对应不同的工程约束。静水压力密封零机械磨损，最适合日循环≤2次的季节性调峰场景（金坛盐穴储气库^[53]、Huntorf CAES^[54]），但效率仅40%~55%且受地理条件严格限制。活塞密封技术最成

熟，适合工作压力≤30 MPa的中大型地面储气罐（McIntosh CAES^[62]、张家口示范项目^[63]），但储气罐直径超过数十米时摩擦损耗随尺度非线性增长。气囊密封无机机械摩擦、结构灵活，适合中低压（≤15 MPa）、中等频次（10²~10³次/天）的分布式储

表2 四种密封技术关键性能指标对比

Table 2 Comparison of key performance indicators of four sealing technologies

性能指标	静水压力密封	活塞密封	气囊密封	承压膜密封
储气压力 /MPa	3~10 ^[44,54]	5~30 ^[44,56]	1~15 ^[44,57]	10~100（潜力） ^[59-60]
储气规模 /MW	100~300 ^[54-55]	10~100 ^[56,64]	1~50 ^[57-58]	50~500（目标） ^[59-60]
往返效率 /%	40~55 ^[44] （泵水寄生功耗大）	60~75 ^[44,56] （摩擦损耗为主）	60~80 ^[44,57] （取决于耦合方式）	70~85 ^[59-60] （摩擦损耗最低）
密封寿命 /次	10 ⁴ ~10 ⁵ ^[44] （无机械磨损）	10 ⁴ ~10 ⁶ ^[44,56] （活塞环磨损）	10 ⁴ ~10 ⁵ ^[57-58] （材料蠕变）	10 ⁵ ~10 ⁶ ^[59-60] （多轴疲劳）
泄漏率 /(m ³ ·h ⁻¹)	<10 ⁻⁴ ^[44]	10 ⁻² ~10 ⁻¹ ^[44,56] （磨损后显著增加）	10 ⁻³ ~10 ⁻² ^[57-58]	<10 ⁻⁴ ^[59-60]
摩擦损耗 /%输入能量	≈0 ^[44]	10~15 ^[44,56] （机械摩擦损耗）	≈0 ^[57-58]	<3 ^[59-60]
辅助能耗 /%输入能量	15~25 ^[44] （寄生功耗）	5~8 ^[44,56]	8~12 ^[57-58] （含相变耦合）	<3 ^[59-60]
技术成熟度 TRL	9 ^[44,55] （已商用）	7~8 ^[56,64] （原型验证）	4~6 ^[57-58] （实验室~中试）	3~5 ^[59-60] （实验室研究）

能场景，但材料抗疲劳与流固耦合控制仍是瓶颈。承压膜密封效率最高（70%~85%），适合超高压（>15 MPa）、高频次（>10³次/天）、长寿命（>20年）场景，但锚固密封与多轴疲劳预测仍是前沿难题。技术选型应以压力等级、循环频次、储气规模、地质/场地条件为四个决策轴，结合效率-寿命-成本的综合权衡确定最优方案。工程层面，静水压力与活塞路线已有成熟案例，承压膜路线仍处于研发阶段。

6.1 系统层面损耗分析

恒压CAES的往返效率并非由单一因素决定，而是密封泄漏、摩擦损耗、辅助设备能耗与介质循环损耗四类损失叠加的结果，且不同技术路线的损耗结构差异显著。

密封泄漏直接造成工质损失。静水压力密封与承压膜密封采用物理屏障或零间隙接触，泄漏率极低（<10⁻⁴ m³/h），对效率影响可忽略；活塞密封依赖活塞环与缸壁的机械贴合，磨损导致间隙增大，长期泄漏率可达10⁻²~10⁻¹ m³/h，是其效率上限的硬约束；气囊密封的泄漏主要源于材料微孔渗透与接头失效，泄漏量居中但可控。

摩擦损耗是将机械能直接转化为热能耗散的不可逆损失。活塞密封的摩擦损耗占比最高（可达输入能量的10%~15%），且随储气罐规模增大呈非线性增长，是其往返效率难以突破75%的根本原因；承压膜密封因膜体质量轻、与壁面以滚动接触

为主，摩擦损耗可控制在3%以内；静水压力密封与气囊密封均无刚性接触，摩擦损耗接近于零。

辅助设备能耗指维持系统运行所必需的非储能环节耗电。静水压力密封的泵水/排水系统是最大的辅助能耗源，寄生功耗可占充电能量的15%~25%，这也是其往返效率仅40%~55%的主因；活塞密封的辅助能耗主要来自润滑与冷却系统，占比约5%~8%；气囊密封若耦合相变工质，工质泵送与相变控制的能耗占比可达8%~12%；承压膜密封的辅助设备最少，仅需监测与微量调控系统，占比<3%。

介质循环损耗特指因介质反复流动、相变或溶解所产生的能量损失。静水压力密封独有的气体溶解-析出循环还引发气蚀与腐蚀，等效能耗约占3%~5%；气囊密封若耦合相变工质，液-气两相间的反复相变存在不可逆热损失，占比约5%~10%；活塞密封与承压膜密封基本不涉及介质循环，该项损耗可忽略。

四类损耗的叠加效应决定了各技术路线的效率天花板：静水压力密封受制于辅助设备与介质循环的双重惩罚，效率最低；活塞密封的瓶颈在于摩擦损耗随规模放大；气囊密封的效率损失主要来自介质循环；承压膜密封因同时规避了机械摩擦与大规模辅助设备，成为效率潜力最高的技术路线。技术选型的本质，是在特定工程约束下，以压力等级、循环频次、储气规模、地质/场地条件为四个决策

轴,对四类损耗的权重进行最优分配。

6.2 恒压控制效果

恒压控制效果是衡量密封方案能否满足 CAES 系统稳压运行要求的核心指标,主要包括稳压精度(稳态压力与设定值的偏差)和压力波动范围(充放气过渡过程中的压力峰值与谷值之差)。

静水压力密封依赖水柱高度调节,水的不可压缩性使其天然具有较强的抗扰动能力,稳态压力偏差可控制在 $\pm 1\% \sim \pm 2\%$ 以内。但泵水/排水的流量调节存在分钟级滞后,充放气过渡过程中的压力波动范围通常为 $\pm 3\% \sim \pm 5\%$,难以满足高频次循环工况下的快速稳压需求。

活塞密封配合位置传感器与 PID 闭环控制,稳态精度可达 $\pm 0.5\% \sim \pm 1\%$ 。然而,活塞与缸壁之间的粘滑(stick-slip)效应在充放气转换瞬间易产生压力突变,波动范围约为 $\pm 2\% \sim \pm 4\%$ 。此外,活塞环磨损后间隙增大,长期运行的稳压精度会持续下降。

气囊密封利用气囊弹性变形的自适应特性实现变容恒压,连续弹性响应消除了机械接触引起的压力突变,稳态精度约为 $\pm 1\% \sim \pm 2\%$,压力波动范围可控制在 $\pm 2\%$ 以内。结合变频恒压控制与 PID 调节,可进一步将精度提升至 $\pm 1\%$ 以下。但气囊材料的蠕变特性使其在长时间恒压状态下存在缓慢泄压问题,需配合补气系统。

承压膜密封在恒压控制效果上具有显著优势。膜体弹性变形直接且连续地响应压力变化,实现"零间隙"贴合,配合高精度压力传感器与实时反馈控制,稳态精度可达 $\pm 0.3\% \sim \pm 0.5\%$,为四种方案中最高。由于无机械摩擦与运动部件,充放气过渡过程极为平滑,压力波动范围仅为 $\pm 0.5\% \sim \pm 1\%$,在超高压($>15\text{ MPa}$)、高频次($>10^3$ 次/天)工况下仍能保持优异品质。

四种方案的恒压控制效果排序为:承压膜密封 > 活塞密封 > 气囊密封 > 静水压力密封。但需指出,静水压力密封虽动态控制精度最低,其绝对压力稳定性(抗外部扰动能力)反而最强,这与其利用重力势能构建固定压力屏障的原理直接相关。技术选型时,应根据系统对稳态精度与动态响应的不同侧重进行权衡。

6.3 柔性密封技术的核心优势

综合上述损耗分析与恒压控制效果,四种技术

并非简单的优劣替代关系,而是分别对应不同的工程约束。柔性密封技术(气囊密封与承压膜密封)被视为未来重要发展方向,根本原因在于其同时规避了活塞密封与静水压力密封各自无法克服的系统性缺陷。

相较活塞密封,柔性密封以材料弹性变形替代刚性接触,从物理机制上消除了摩擦损耗,将效率上限从 75% 提升至 85%,并因无运动部件而大幅降低维护频率。相较静水压力密封,柔性密封摆脱了寄生功耗(15%~25%)与地理依赖,无需外部水源与大规模辅助设备,可部署于任意地面场址。

更关键的是,柔性密封实现了"变容"与"密封"的功能统一。活塞与静水压力密封均需额外系统实现容积调节,而柔性密封通过气囊膨胀或承压膜滚动,以单一部件同时完成变容与密封,系统集成度更高、动态响应更快。结合 6.1 节的损耗分析与 6.2 节的控制效果,承压膜密封同时规避了机械摩擦与大规模辅助设备,损耗最低,且稳态精度最优、压力波动最小,控制性能最佳,被认为最适合超高压($>15\text{ MPa}$)、高频次($>10^3$ 次/天)、长寿命(>20 年)的大型 CAES 主储气罐。

6.4 实验验证与测试评价方法

恒压变容密封技术从概念验证到工程落地,实验测试与评价方法是连接理论分析与实际性能的关键桥梁^[61]。现有研究已形成较为系统的测试体系,但在多物理场耦合工况下的综合评价方法仍显不足^[65]。

(1) 密封性能测试。压力衰减法适用于静水压力密封与承压膜密封的静态泄漏评价,检测精度可达 $10^{-6}\text{ m}^3/\text{h}$ ^[66];皂液检漏法广泛用于活塞密封与气囊密封的局部泄漏排查;示踪气体法灵敏度最高($10^{-9}\text{ m}^3/\text{h}$),多用于承压膜密封锚固区域的微泄漏检测^[67]。Huntorf 与 McIntosh 两座 CAES 电站的长期运行数据表明,泄漏率控制是决定系统往返效率的关键因素之一^[68-69]。

(2) 摩擦损耗测试。活塞密封采用力-位移曲线法,通过滞回环面积计算单循环摩擦功,结合活塞环质量损失法评估长期性能^[70]。承压膜密封因无刚性接触,多采用扭矩传感器法或应变片法间接测量膜体与壁面的接触力分布^[71]。

(3) 疲劳寿命测试。全尺寸循环加压试验按实际工况压力范围进行 $10^4 \sim 10^6$ 次循环,可直接获取

表3 关键评价指标与测试方法
Table 3 Key Evaluation Indicators and Test Methods

评价指标	测试方法	适用技术	精度/量程
密封性能 (泄漏率)	压力衰减法	静水压力密封、承压膜密封	10^{-6} m³/h
	皂液检漏法	活塞密封、气囊密封	定性定位
	示踪气体法 (He/SF ₆)	承压膜密封锚固区	10^{-9} m³/h
摩擦损耗	力-位移曲线法	活塞密封	单循环 ±2%
	扭矩传感器/应变片法	承压膜密封、气囊密封	间接测量
疲劳寿命	全尺寸循环试验	全部四类	$10^4 \sim 10^6$ 次
	加速寿命试验	全部四类	10~100 Hz
恒压控制	高频采集 + DIC	气囊密封、承压膜密封	稳态偏差+波动
材料性能	拉伸 + 蠕变 + 多轴疲劳	膜体、气囊材料	E, σ_b , 蠕变曲线

寿命数据，但耗时长、成本高，目前仅 McIntosh CAES 等少数工程完成^[69]；加速寿命试验通过提高循环频率（10~100 Hz）或增大压力幅值加速疲劳损伤，结合 Paris 公式^[72]或 Basquin 模型^[73]外推至实际工况，是当前实验室研究的主流方法，但多轴疲劳工况下的外推精度仍存在较大不确定性^[74]。金坛盐穴储气库的运行经验表明，盐岩蠕变对储气罐长期密封性的影响不可忽略^[63]。

（4）恒压控制效果测试。采用高频压力采集系统（采样频率≥1 kHz）记录充放气过渡过程中的压力曲线，提取稳态偏差、波动范围与响应时间三个指标。对于气囊密封与承压膜密封，还需结合数字图像相关法（DIC）同步测量膜体变形场^[75]，验证压力-容积响应关系是否与理论模型一致。

（5）材料性能测试。包括单轴拉伸试验（获取弹性模量与断裂强度）、等双轴拉伸试验（获取双轴强度包络面）^[76]、蠕变试验（评价长期密封稳定性）以及多轴疲劳试验（内压循环+轴向拉伸复合加载），后者是承压膜密封材料评价中最关键但也最缺乏标准化测试手段^[74]。

现有测试方法的主要不足在于：各技术路线的测试标准不统一，同一指标的测试条件差异大，横向可比性差；多物理场耦合工况下的综合测试极为稀缺；从材料级到系统级的性能传递关系尚不清晰^[65]。未来亟需建立涵盖材料-部件-系统三个层级的标准化测试评价体系，并发展基于数字孪生的虚拟测试方法，以弥补全尺寸试验成本高、周期长的不足^[61]。

7 结 语

恒压压缩空气储能技术的工程可行性，在很大

程度上取决于变容密封系统能否在高压、大变形、长周期工况下保持可靠运行。本文系统对比了静水压力密封、活塞密封、气囊密封和承压膜密封四条技术路线，分析表明：各路线对应明确的工程约束边界，不存在简单的优劣替代关系，而是呈现从刚性接触式向柔性隔离式、再向智能自适应密封演进的技术趋势。

基于前述分析，当前亟需回答以下六个可验证的研究问题：

（1）水封界面的气液传质是否构成静水压方案恒压精度的主要限制因素？需建立气液两相传质—压力响应耦合模型，验证压力波动能否控制在±1%以内。

（2）活塞密封摩擦功耗随尺度放大的演化规律是什么？需建立综合考虑加工误差、流体扰动与热变形的大型活塞导向精度模型，明确功耗增长是否存在临界尺度效应。

（3）气囊密封在流—固耦合作用下的失稳边界如何确定？需给出充放气瞬态工况下临界褶皱压力与对应波长的定量判据。

（4）相变耦合方案相较机械耦合方案，在恒压精度与系统效率之间的净收益如何？需量化精度提升与往返效率损失之间的定量权衡关系。

（5）承压膜在拉伸—弯曲—扭转复合载荷下的疲劳损伤累积规律是什么？需验证锚固区域是否为最薄弱环节，以及多轴疲劳是否构成系统的主导失效模式。

（6）四种路线在 10 MW/100 MWh 量级系统中的全生命周期成本差异是否足以影响技术选型？需建立 LCOE 分解模型，给出度电成本的定量比较结果。

围绕上述问题,未来研究宜从以下四个层面协同推进:材料与制造层面,开发兼具高强度、高韧性与抗疲劳性能的密封用复合材料,突破跨尺度制造瓶颈;建模与控制层面,融合数字孪生与先进传感技术,实现多物理场耦合条件下的状态自感知与参数自优化;可靠性层面,发展高精度疲劳寿命预测模型与在线健康监测方法,支撑全生命周期设计;系统集成层面,探索密封子系统与热管理、电力转换子系统的协同优化路径,明确经济性最优的技术组合。这些问题的系统求解,是恒压变容密封技术从实验室验证走向工程示范、进而支撑新型电力系统低碳转型的重要基础。

参考文献

- [1] 国家发展改革委 国家能源局. 关于印发《“十四五”新型储能发展实施方案》的通知[EB/OL]. (2022-03-21)[2023-08-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202203/t20220321_1319772.html. National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on Issuing the Implementation Plan for the Development of New Energy Storage during the 14th Five-Year Plan Period[EB/OL]. (2022-03-21)[2023-08-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202203/t20220321_1319772.html.
- [2] 国家能源局. 关于促进新型储能并网和调度运用的通知[EB/OL]. (2024-04-02)[2024-08-15]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2024-04/02/c_1310771072.html. Notice of the National Energy Administration on Promoting the Integration and Dispatch of New Energy Storage into the Grid[EB/OL]. (2024-04-02)[2024-08-15]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2024-04/02/c_1310771072.html.
- [3] 陈海生,李泓,马文涛,等. 2021 年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(3): 1052-1076. CHEN H S, LI H, MA W T, et al. Research progress of energy storage technology in China in 2021[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(3): 1052-1076.
- [4] 陈海生,李泓,徐玉杰,等. 2022 年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(5): 1516-1552. CHEN H S, LI H, XU Y J, et al. Research progress on energy storage technologies of China in 2022[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(5): 1516-1552.
- [5] 陈海生,李泓,徐玉杰,等. 2023 年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(5): 1359-1387. CHEN H S, LI H, XU Y J, et al. Research progress on energy storage technologies of China in 2023[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(5): 1359-1387.
- [6] CHEN H, CONG T N, YANG W, et al. Progress in electrical energy storage system: a critical review[J]. Prog Nat Sci, 2009, 19(3): 291-312.
- [7] XU Q, WU Y, ZHENG W, et al. Modeling and dynamic safety control of compressed air energy storage system[J]. Renewable Energy, 2023, 208: 203-213.
- [8] HOUSAINY S, JANBOZORG M, KAVEHPOUR P. Performance of an isobaric hybrid compressed air energy storage system at minimum entropy generation[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2020, 142(5): 052001.
- [9] 陈海生,李泓,徐玉杰,等. 2024 年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(6): 2149-2192. CHEN H S, LI H, XU Y J, et al. Research progress on China's energy storage technology in 2024[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(6): 2149-2192.
- [10] 张遥,张依伦,苏传奇,等. 恒压压缩空气储能技术研究[J]. 热力发电, 2024, 53(9): 19-28. ZHANG Y, ZHANG Y L, SU C Q, et al. Research on Constant-Pressure Compressed Air Energy Storage Technology [J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(9): 19-28.
- [11] ROLLAND K J, NITSCHKE T, BUDT M, et al. Isobaric storage of compressed air: Introduction of a novel concept based on phase change materials and pressure equalizing modules[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 61: 106778.
- [12] 何平. 一种恒定高压运行的压缩空气储能装置及方法: 中国, CN 118167585 B [P]. 2024-04-07[2024-08-27] HE P. A Compressed Air Energy Storage Device and Method for Constant High-Pressure Operation: China, CN 118167585 B[P]. 2024-04-07[2024-08-27]
- [13] 姜彤,张璐璐,全璐瑶. 一种用于压缩空气储能的水封双层恒压储气系统: 中国, CN 106499937 B [P]. 2016-11-02[2020-06-09] JIANG T, ZHANG L L, QUAN L Y. A water-sealed double-layer constant-pressure air storage system for compressed air energy storage: China, CN 106499937 B [P]. 2016-11-02[2020-06-09]
- [14] LIM S D, MAZZOLENI A P, PARK J, et al. Conceptual design of ocean compressed air energy storage system[C]//2012 Oceans. Piscataway: IEEE, 2012: 1-8.
- [15] LIM S D. Ocean compressed air energy storage (OCAES) integrated with offshore renewable energy sources[D]. Raleigh: North Carolina State University, 2013.
- [16] 姜彤,何旭洁,童潇. 等. 海洋压缩空气储能系统: 中国, CN 201410021005.2[P]. 2017-01-04[2024-04-01]. JIANG T, HE X, TONG X, et al. Ocean compressed air energy storage system: China, CN 201410021005.2[P]. 2017-01-04 [2024-04-01].
- [17] MAZLOUM Y, SAYAH H, NEMER M. Exergy analysis and exergoeconomic optimization of a constant-pressure adiabatic compressed air energy storage system[J]. Journal of Energy Storage, 2017, 14: 192-202.
- [18] SANDER R. Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent[J]. Atmos Chem Phys, 2015, 15: 4399-4981.
- [19] KELL G S. Density, thermal expansivity, and compressibility of liquid water from 0° to 150°C[J]. J Chem Eng Data, 1975, 20(1): 97-105.
- [20] BRENNEN C E. Cavitation and bubble dynamics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [21] LAUTERBORN W, KURZ T. Physics of bubble oscillations[J]. Rep

- Prog Phys, 2010, 73(10): 106501.
- [22] THIRUVENGADAM A, et al. Cavitation erosion by a rotating jet[J]. Wear, 2017, 376-377: 1514-1525.
- [23] STIEF P. Effect of dissolved gas on the leakage through face seals[J]. ASLE Trans, 1980, 23(3): 261-270.
- [24] SALANT R F, FORTIER A E. Numerical analysis of gas bubble effects on mechanical face seal performance[J]. Tribol Trans, 2005, 48(4): 539-547.
- [25] EVANS U R. The corrosion and oxidation of metals[M]. London: Edward Arnold, 1960.
- [26] STACK M M, ABD EL BADIA T M. Mapping cavitation erosion in pure metals: the effects of dissolved gas[J]. J Phys D Appl Phys, 2003, 36(21): 2754-2760.
- [27] DUGSTAD A. The importance of CO₂ corrosion in oil and gas production[J]. CORROSION, 2007, 63(12): 1072-1081.
- [28] ETSION I. State of the art in laser surface texturing[J]. J Tribol, 2005, 127(1): 248-253.
- [29] SALANT R F. Modeling rotary lip seals[J]. J Tribol, 1999, 121(2): 309-315.
- [30] MÜLLER H K, NAU B S. Fluid Sealing Technology[M]. Boca Raton: CRC Press, 1998.
- [31] LEBECK A O. Principles and Design of Mechanical Face Seals [M]. New York: Wiley, 1991.
- [32] MARS W V, FATEMI A. A literature survey on fatigue analysis approaches for rubber[J]. Int J Fatigue, 2002, 24(9): 949-961.
- [33] LUO R K, WU W X, PULLEN A D. Characterisation of fatigue behaviour of rubber materials[J]. Int J Fatigue, 2012, 34(1): 21-30.
- [34] GENT A N. Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components[M]. Munich: Hanser, 2012.
- [35] 李自冲, 马仁超, 吴德新, 等. 充压补偿式油润滑密封结构及重力压缩空气储能系统: 中国, CN 118815933 A [P]. 2024-08-28 [2024-10-22].
- LI Z C, MA R C, WU D X, et al. Pressure compensation oil lubrication sealing structure and gravity compressed air energy storage system: China, CN 118815933 A [P]. August 28, 2024 [2024-10-22]
- [36] 马仁超, 吴德新, 曹慧颖, 等. 一种重力压缩空气储能系统的充压密封结构: CN 117704066 A [P]. 2023-12-14 [2024-03-15].
- MA R C, WU D X, CAO H Y, et al. A pressurized sealing structure for a gravity compressed air energy storage system: CN 117704066 A [P]. 2023-12-14 [2024-03-15]
- [37] BEAUMONT P W R, PIPKIN A C. Fatigue of fibre-reinforced composites[J]. Composites, 1980, 11(2): 94-102.
- [38] 曹龙, 张涛, 崔诗佳, 等. 一种隔膜式恒压储能装置: CN 217720835 U [P]. 2022-05-05 [2022-11-01].
- CAO L, ZHANG T, CUI S J, et al. A diaphragm type constant pressure energy storage device: CN 217720835 U [P]. 2022-05-05 [2022-11-01]
- [39] 张鹏举, 李子瑞, 许未晴, 等. 基于气-液相变的等压压缩空气储能方法研究[J]. 液压与气动, 2021, 45(7): 43-48.
- ZHANG P J, LI Z R, XU W Q, et al. Research on isobaric compressed air energy storage method based on gas-liquid phase transition[J]. Hydraulics and Pneumatics, 2021, 45(7): 43-48.
- [40] ZHANG W F, DING J L, YIN S Z, et al. Thermo-economic optimization of an artificial cavern compressed air energy storage with CO₂ pressure stabilizing unit[J]. Energy, 2024, 294: 130821.
- [41] ZHANG Y, LIU J X, YIN S Z, et al. Design and performance analysis of a novel compressed air - liquid CO₂ energy storage [J]. Energy Conversion and Management, 2024, 301: 118068.
- [42] 郑开云, 池捷成, 张学锋. 一种双工质气体压缩储能系统及其可行性分析[J]. 南方能源建设, 2024, 11(2): 154-161.
- ZHENG K Y, CHI J C, ZHANG X F. A duplex gas compression energy storage system and its feasibility analysis[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(2): 154-161.
- [43] 梅生伟, 文军, 薛小代, 等. 一种重力式储气库: 中国, CN 213452833 U [P]. 2021-03-08 [2021-06-15]
- MEI S W, WEN J, XUE X D, et al. A gravity based gas storage facility: China, CN 213452833 U [P]. March 8, 2021 [June 15, 2021]
- [44] BUDT M, WOLF D, SPAN R, et al. A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments[J]. Appl Energy, 2016, 170: 250-268.
- [45] QIN Y, LOTH E, LINDSEY S, et al. Underwater compressed air energy storage: System-level performance and design[J]. Energy, 2019, 172: 838-854.
- [46] AL-ZAHRANI A A, DINCER I. Thermodynamic analysis of an integrated compressed air energy storage and LiBr-H₂O absorption cooling system[J]. Energy Convers Manage, 2014, 85: 529-537.
- [47] 刘学婧, 黄修军, 金守峰, 等. 储气罐橡胶密封膜的密封性能关键影响因素对比分析[J]. 橡胶工业, 2023, 70(8): 601-608.
- LIU X J, HUANG X J, JIN S F, et al. Comparative analysis on key factors influencing sealing performance of rubber sealing film for gas storage tank[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(8): 601-608.
- [48] STEIGMANN D J, OGDEN R W. Elastic surface-substrate interactions[J]. Proc R Soc A, 1999, 455(1984): 869-893.
- [49] WEMPNER G. Mechanics of solids and shells[M]. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [50] VANDE VEN J D. Constant pressure hydraulic energy storage through a variable area piston hydraulic accumulator[J]. Applied Energy, 2013, 105: 262-270.
- [51] 文军, 梅生伟, 赵瀚辰, 等. 一种膜式密封的重力压缩空气储能系统和储能方法: CN 114810262 B [P]. 2022-07-29 [2022-10-11].
- WEN J, MEI S W, ZHAO H C, et al. A membrane sealed gravity compressed air energy storage system and energy storage method: CN 114810262 B [P]. 2022-07-29 [2022-10-11]
- [52] 杨静. 一种重力空气储能用密封膜和重力空气储能系统: CN 117922105 A [P]. 2024-03-12 [2024-04-26].
- YANG J. A sealing film and gravity air energy storage system for gravity air energy storage: CN 117922105 A [P]. 2024-03-12 [2024-04-26]
- [53] 杨海军, 郭凯, 李建君. 盐穴储气库单腔长期注采运行分析及注采压力区间优化——以金坛盐穴储气库西2井腔体为例[J]. 油气储运,

- 2015, 34(9): 945-950.
- Yang H J, Guo K, Li J J. Long-term injection-production operation analysis and pressure interval optimization of a single cavern in salt cavern gas storage: A case study of the West-2 well cavern in Jintan salt cavern gas storage[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2015, 34(9): 945-950.
- [54] Crotagino F, Mohmeyer K U, Scharf R. Huntorf CAES: More than 20 Years of Successful Operation[C]//SMRI Spring Meeting. Orlando, 2001.
- [55] 袁进平, 庄晓谦, 申瑞臣. 金坛盐穴地下储气库注采完井及注气排卤技术研究[J]. *钻井液与完井液*, 2020, 37(2): 239-243.
- Yuan J P, Zhuang X Q, Shen R C. Research on injection-production well completion and gas injection - brine displacement technology for Jintan salt cavern underground gas storage[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2020, 37(2): 239-243.
- [56] Lund H, Salgi G. The role of compressed air energy storage (CAES) in future sustainable energy systems[J]. *Energy*, 2009, 34(9): 1405-1410.
- [57] Van der Stelt T, Al-Sulaiman F, Hamdullahpur F. A review of compressed air energy storage systems with distributed air storage[C]//ASME 2011 5th Int. Conf. on Energy Sustainability. Washington, DC: ASME, 2011: 137-146.
- [58] Rane S, Matheussen B V, Kjøniksen A L, et al. Feasibility study of a flexible membrane energy storage system[C]//ASME 2013 Int. Mech. Eng. Congr. & Exposition. San Diego: ASME, 2013.
- [59] 王晋, 张夏, 李永堂. 压缩空气储能技术中隔膜密封研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(4): 1161-1172.
- Wang J, Zhang X, Li Y T. Research progress on diaphragm sealing in compressed air energy storage technology[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(4): 1161-1172.
- [60] Chen H, Guo Y, He T, et al. Flexible membrane for compressed air energy storage: A review[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 68: 107692.
- [61] Luo X, Wang J, Dooner M, et al. Overview of current development in compressed air energy storage technology[J]. *Energy Procedia*, 2015, 75: 2501-2506.
- [62] Biasi V D. 110 MW McIntosh CAES plant over 90% availability and 95% reliability[J]. *Gas Turbine World*, 1998, 28(1): 26-28.
- [63] 刘颖. 张家口可再生能源示范区发展现状及趋势研究[J]. *现代营销·信息版*, 2019(4): 149.
- Liu Y. Research on the development status and trends of Zhangjiakou Renewable Energy Demonstration Zone[J]. *Modern Marketing (Information Edition)*, 2019(4): 149.
- [64] Ferreira C, van Bussel G, van Kuik G, et al. A survey on wind-integrated compressed air energy storage systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 105: 368-384.
- [65] Wang J, Yan Z, Zhao P, et al. Review of compressed air energy storage technology[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2018, 33(5): 1-14.
- [66] ASME PTC 19.3-1974. Measurement uncertainty[S]. New York: ASME, 1974.
- [67] Regazza D, Della Vedova M D L, Mazzetti M. A review of leak detection and localization techniques applied to pneumatic systems[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(18): 6512.
- [68] Fröhlich K, Meyer N, Pflüger B, et al. 60 years of Huntorf CAES — status and perspectives[C]// Proceedings of the 10th International Renewable Energy Storage Conference. Düsseldorf: IRES, 2016.
- [69] Hamburg S P. Operational experience at the McIntosh CAES plant[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1992, 80(6): 876-883.
- [70] Tian C, Du E, Zhang H, et al. Life assessment and failure analysis of large-scale compressed air energy storage in salt cavern[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 63: 18-28.
- [71] Kim Y M, Favrat D. Energy and exergy analysis of micro compressed air energy storage system using a domestic scale air compressor/expander[J]. *Energy*, 2010, 35(11): 4556-4566.
- [72] Paris P, Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws [J]. *Journal of Basic Engineering*, 1963, 85(4): 528-534.
- [73] Basquin O H. The exponential law of endurance tests[J]. *Proceedings of ASTM*, 1910, 10: 625-630.
- [74] Ratner M V. Fatigue of rubber-like materials under multiaxial loading[J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 2005, 78(3): 559-583.
- [75] Sutton M A, Orteu J J, Schreier H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements[M]. New York: Springer, 2009.
- [76] Marcus A. Biaxial testing of thin membranes[J]. *Experimental Mechanics*, 1971, 11(10): 453-458.