

液气复合压缩储能：一种高效低成本 压缩空气储能新技术

李瑞雄¹, 张宇飞¹, 郭子奥¹, 王焕然¹, 席光¹, 殷尧², 孙昊¹, 蔡旭超¹, 孙旭杰¹

(1. 西安交通大学绿色氢电全国重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 710049, 西安)

摘要: 压缩空气储能技术是减少弃风弃光, 实现电能大容量与规模化存储的关键支撑技术。然而, 受限于系统热管理效率低、热压协同失配等本征性短板, 致使系统整体运行效能与经济效益受到显著影响。为此, 西安交通大学先进储能团队通过融合抽水蓄能的高效能量转换特性与压缩空气储能的低成本优势, 提出一种基于液气两相工质的复合压缩储能新架构, 该技术以气-液两相工质为载体, 利用水力设备作为电能-势能转化设备的同时, 通过液气界面强化热质交换实现储能介质(空气)的近等温压缩/膨胀, 从而有效抑制由热力学不可逆性导致的可用能损失, 实现系统运行过程能量高效存储与释放。实验结果表明, 所提液气复合压缩储能系统具有储能密度高、压缩效率高与地理依赖低等优势, 其能量存储密度是抽水蓄能的 3 倍以上, 系统循环效率比传统压缩空气储能技术提高超过 20%。目前, 液气复合压缩储能技术在系统拓扑结构优化、液气耦合储/释能关键装备设计、高压储能装置制造等方向已取得阶段性进展, 并在山东泰安、江西九江等地相继启动工程示范项目。该技术的规模化应用将为缓解弃风弃光压力、平抑电网负荷波动提供重要技术支撑。未来研究将重点围绕系统集成协同调控、关键装备性能强化与低成本制造工艺突破等方面展开, 以推动其进一步成熟与工程化, 进而为提升可再生能源渗透率与整体利用效率, 提供具备可行性的系统解决方案。

关键词: 液气复合压缩储能; 压缩空气; 拓扑结构; 储能装置

中图分类号: TK02 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202604009 **文章编号:** 0253-987X(2026)04-0115-13

Liquid-Gas Hybrid Compressed Energy Storage: A Novel High-Efficiency and Low-Cost Compressed Air Energy Storage Technology

LI Ruixiong¹, ZHANG Yufei¹, GUO Zi'ao¹, WANG Huanran¹, XI Guang¹,

YIN Yao², SUN Hao¹, CAI Xuchao¹, SUN Xujie¹

(1. National Key Laboratory of Green Hydrogen and Electricity, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Compressed air energy storage (CAES) technology is a key supporting technology for reducing wind and solar curtailment and achieving large-capacity and scalable electrical energy storage. However, inherent shortcomings such as low thermal management efficiency and mismatched thermo-compressive coordination have significantly constrained the overall operational performance and economic

收稿日期: 2025-09-28。 作者简介: 李瑞雄(1990—), 男, 副教授; 王焕然(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2025ZD0805700)。

网络出版时间: 2026-01-08

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20260108.1322.002>

viability of the system. To address this, the Advanced Energy Storage Team at Xi'an Jiaotong University has proposed a new hybrid compressed energy storage architecture based on a liquid-gas two-phase working fluid, which integrates the high energy-conversion efficiency of pumped storage with the low-cost advantages of CAES. In this technology, the liquid-gas two-phase fluid serves as the working medium, where hydraulic equipment is employed as the electric-to-potential energy conversion device. Simultaneously, heat and mass transfer is intensified at the liquid-gas interface to achieve near-isothermal compression/expansion of the storage medium (air), thereby effectively suppressing the available energy loss caused by thermodynamic irreversibility and enabling highly efficient energy storage and release during system operation. Experimental results demonstrate that the proposed liquid-gas hybrid compressed energy storage system exhibits advantages including high energy storage density, high compression efficiency, and low geographical dependence. Its energy storage density exceeds three times that of pumped storage, and the system round-trip efficiency is improved by more than 20% compared with conventional CAES technology. To date, significant progress has been made in the optimization of system topology, the design of key liquid-gas coupled storage/release equipment, and the manufacturing of high-pressure energy storage devices. Engineering demonstration projects have been successively launched in locations such as Tai'an, Shandong and Jiujiang, Jiangxi. The large-scale application of this technology is expected to provide important technical support for alleviating wind and solar curtailment, smoothing grid load fluctuations. Future research will focus on system integration and coordinated control, enhancement of key equipment performance, and breakthroughs in low-cost manufacturing processes, to facilitate its further maturation and engineering application, thereby providing a feasible systemic solution for improving the penetration and overall utilization efficiency of renewable energy.

Keywords: liquid-gas hybrid compressed energy storage; compressed air; topological configurations; energy storage devices

在以化石能源为主导的现有能源结构中,能源短缺、环境污染与生态恶化等问题日益突出。大力发展可再生能源已成为推动社会经济可持续发展的关键路径。据国际能源署预测,到2050年,可再生能源在能源结构中的占比将提高至85%^[1]。然而,光伏、风电等可再生能源固有的间歇性与波动性严重制约了其在能源系统中的大规模应用^[2]。储能技术作为平抑新能源波动、提升电网灵活性及实现削峰填谷的核心手段,已成为能源领域的重要研究方向。目前主要的储能技术包括抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能、铅蓄电池、锂离子电池、液流电池、钠离子电池、储氢、超级电容器等^[3]。

在众多储能技术中,压缩空气储能(compressed air energy storage, CAES)、因具备储能容量大、寿命长和成本较低等优势,被视为最具规模化潜力的储能方式之一^[4]。近年来,多种先进压缩空气储能系统相继被提出并发展,如绝热压缩空气储能(adiabatic-compressed air energy storage, ACAES)、

液态压缩空气储能(liquid-compressed air energy storage, L-CAES)等^[5]。A-CAES能通过对压缩热的回收与再利用,在实现高效运行的同时做到零碳排放。以Huntorf电站为例,理想情况下A-CAES系统在回收并充分利用压缩热后,其能量效率可提升约25%^[6-7]。然而,A-CAES系统在热管理方面仍面临挑战。为提升压缩热回收效率,Shadi等^[8]对A-CAES系统的热能储存模块进行了非稳态建模,并结合梯级相变蓄热器开展了热力学与经济性分析。研究显示,采用填充床蓄热器的系统在焓效率上优于双罐式换热流体储热,设计工况下系统焓效率与投资回收期分别为68.2%和3.5 a。

L-CAES系统是通过将空气深冷至-196℃液化存储、释能时气化发电的长时储能技术,其储能密度较常温气态提升约750倍,储能效率达55%,具有常压存储安全性和电网调峰功能^[9-10]。该技术采用深低温梯级液化蓄冷工艺,设备寿命达40 a,可适

应戈壁高原等极端环境运行^[11-12]。2025年11月,装机容量6万kW/60万kW·h的液态空气储能国家级首台套示范项目在青海格尔木进入调试阶段,单次储能可输出60万kW·h电能。河北省石家庄液态空气储能电站作为全国首个并网发电示范工程,实现单日发电4000kW·h^[10]。为进一步提升L-CAES系统性能,Nabat等^[13]通过集成L-CAES与卡琳娜循环,构建了一种新型绿色储能系统,热力学和经济性分析表明集成余热回收后系统效率提高至61.6%,储能密度达到109.4MJ/m²。

上述研究有力推动了压缩空气储能技术的发展,但由于压缩热的高耗散问题导致传统系统仍普遍面临效率瓶颈、经济性差等问题。为突破这些局限,探索更高性能、更大容量、更加灵活的压缩储能新体系势在必行。在此背景下,西安交通大学先进物理储能团队于2010年创新性地融合抽水蓄能的高效率与空气储能的低成本优势,提出了液气复合压缩储能系统(liquid-gas hybrid compressed energy storage, LG-HCES)。本文系统综述了液气复合压缩储能技术的最新研究进展,重点分析了系统构型创新与关键设备开发方面的突破性成果。尽管液气复合压缩储能技术已取得显著进展,但该技术目前仍面临高压条件下系统可靠性数据不足、系统集成复杂度高等挑战,需在材料耐受性、密封技术和系统控制策略等方面进一步突破。因此本文最后对该技术的未来发展方向进行展望,以期为相关领域研究人员提供参考,推动液气复合压缩储能技术的进一步发展和工程应用。

1 液气储能原理与技术特征

1.1 基本原理

液气复合压缩储能技术并非局限于某种单一具体的拓扑结构,其可根据系统部署地区环境及经济组成进行调整优化,按照做功介质类型可分为单一气介质做功储能、单一液介质做功储能以及液气介质联合做功储能3种主要拓扑结构集。液气复合压缩储能的主要组成结构包括电动机、发电机、压缩机/水泵、膨胀机/水轮机、换热器、储热装置以及储能装置等部分,其工作原理及工作逻辑与常规CAES系统类似,均通过储能介质的势能变化实现能量转换,但液气复合压缩储能以气-液两相工质为载体,工作流程主要分为压缩/增压储能、静置与膨胀/降压释能3个阶段,具体如下:

(1)储能阶段:吸收弃光弃风或低谷电驱动压缩

机/水泵工作,将冗余电能转化为气-液工质的势能,并将储能工质通入定压/定容储能装置中存储;若采用多级压缩机压缩气相储能介质,压缩过程中产生的压缩热可被各级换热器内的蓄热介质收集并传输至储热装置内。

(2)静置阶段:基于系统部署地区环境特征将高压/高水头气-液两相工质存储于不同特征条件的定压/定容储能装置中,回收的压缩热则以高温蓄热介质的形式存储于绝热性能良好的储热装置中,为后续气相介质做功或外界热力负荷提供热量。

(3)释能阶段:释放高压空气进入各级膨胀机的级前换热器与存储的高温蓄热介质换热,由此形成的高温高压气相工质/高水头液相工质进入膨胀机/水轮发电,将气-液工质的势能转化为电能并对外供电;此外储热装置内富余高温热能也可为外界热力用户提供热量。

近年来,液气复合压缩储能技术在系统构型与关键装备方面取得重要进展。系统构型层面,研究人员提出了多种创新循环架构,通过优化能量转换路径提升系统整体性能;核心装备层面,复合式压缩-膨胀机一体化设计、高效近等温设备等取得重要进展,特别是液压活塞式复合压缩装置的出现,实现了气体压缩与液体增压的有机统一,压缩效率较传统设备提升15%以上。

1.2 技术特征

液气复合压缩储能与常规CAES工作流程具有很多相似之处,继承了成本低、零碳排、安全性高、环境影响弱以及储能规模大等特点,同时由于能量存储载体变为气-液两相工质的特殊性,使其具备了不同于常规CAES的技术特征与优势,主要特征如下。

(1)系统效率高。常规CAES仅利用压缩机作为电能转化压力释能的流体设备,其在储能过程中产生的压缩热能总量大于设备释能时所需的热能总量,使得储热装置在释能阶段仍存有大量富余高温热能无法产生电力,致使系统效率下降。液气复合压缩储能技术能够在利用更高效率的水力设备作为电能-势能转化设备的同时,通过液气界面强化热质交换实现近等温压缩/增压过程,减少压缩热的产生,实现电能向热能存储与势能存储的合理配比,以达到在释能阶段能量的高效利用与释放。

(2)储能密度大。常规CAES仅以单一气相介质作为能量存储介质,而在相同压力/水头条件下液

相介质比气相介质存储势能更大。液气复合压缩储能技术在利用液体的不可压缩性传递压力、气体的可压缩性储存能量的同时,又以液气双工质作为能量储能介质,使其储能密度进一步提升,从而在理论上兼具高能量密度、高效率与低地理依赖等优势。研究表明,液气复合系统能量存储密度是抽水蓄能的 3 倍以上,循环效率是传统 CAES 的 1.2 倍以上^[14]。

(3)应用场景广。常规 CAES 的储能装置建造需依托废弃矿洞、岩洞以及盐穴等特殊地形或地面储气钢罐等装备,选址受限条件较多。然而,液气复合储能系统可根据部署地区环境对储能装置形式进行调整,针对于沿海或水资源较丰富的地区可采用水下液气复合压缩空气储能,实现灵活布置的同时有效促进水光互补、海上风电等应用场景;同时,可依托现有抽水蓄能资源实现容量拓展以及增效改造,构建液气双相介质联合做功的液气复合压缩储能系统。

2 液气储能系统拓扑结构

液气复合储能系统通过气液协同作用提升能量转换效率和系统灵活性,已成为储能研究的重要方向。该系统按工质类型与能量转换方式可分为单一气介质、单一液介质及液气联合做功 3 类系统,每类又可基于储释能特性、结构配置和运行策略进一步细分为多种技术路径。

2.1 单一气介质做功系统

单一气介质做功系统的核心特征是在能量释放阶段仅依靠空气驱动透平膨胀机发电,而系统中的液体作为工作介质用来提升压缩和膨胀过程的效率。根据储气形式及功能的不同,以单一气介质为储能工质的液气复合压缩储能系统可分为以下 3 类:水下液气压缩空气储能、热压解耦液气压缩空气储能及多联产液气复合压缩空气储能系统。

2.1.1 水下液气压缩空气储能

水下液气压缩空气储能系统通过将刚性或柔性容器置于海底,利用海水静压维持储气室恒压;也可依托山区地势形成的高度差,构建上部蓄水库和下部储气室,借助水柱静压实现储气室压力稳定,典型系统如图 1 所示。席光、王焕然团队将柔性材料制成的低压与高压气囊分别锚固于不同深度海底,实现压缩和膨胀过程的恒压运行,显著提高系统能量转换效率,降低了对特定地质条件的依赖^[14]。基于现有的水头资源,进一步提出了耦合液体活塞的水

下液气恒压压缩空气储能系统^[15]。研究结果表明,该系统在设计工况下的电效率、烟效率与储能密度分别达到 68.31%、66.99% 及 $9.3 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

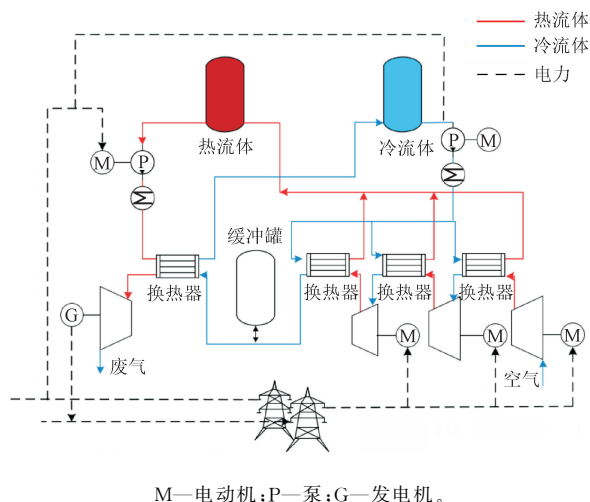


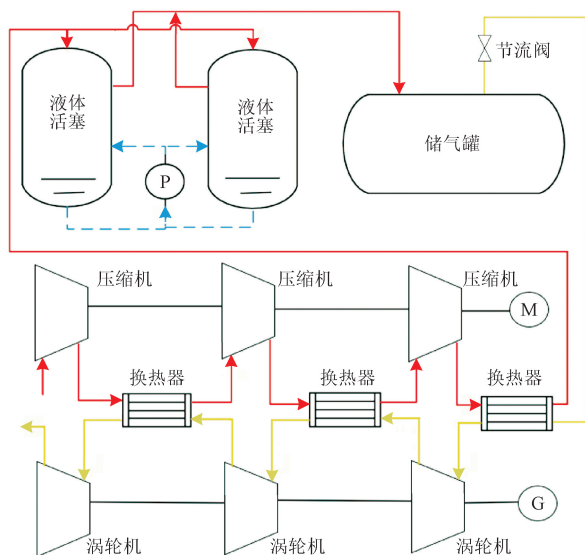
图 1 典型水下液气压缩空气储能系统

Fig. 1 Typical underwater liquid-gas compressed air energy storage system

2.1.2 热压解耦液气压缩空气储能

水下液气压缩空气储能系统主要用于海洋场景中的电能存储,其采用储能容器的恒压恒容设计理念,确保储能/释能设备稳定在设计工况下运行,从而有效提升系统整体性能。然而,受限于特定的海洋应用场景,该技术在我国的规模化推广应用面临显著制约,为此热压解耦液气压缩空气储能系统应运而生。该系统融合了绝热压缩与近等温压缩两种模式,通过灵活调节两阶段的压缩比,实现了热焓与压力焓的优化匹配,进而显著提升了系统的综合性能。典型系统^[16]如图 2 所示。研究表明,采用 3 段绝热压缩与近等温压缩的热压解耦液气压缩空气储能系统^[16]可实现 72.47% 的能量效率。为进一步提高压缩热利用率并降低蓄热器内部能量耗散,通过二元共晶理论设计梯级相变蓄热器,耦合后系统效率提升至 73.24%,且经济性表现良好^[17]。

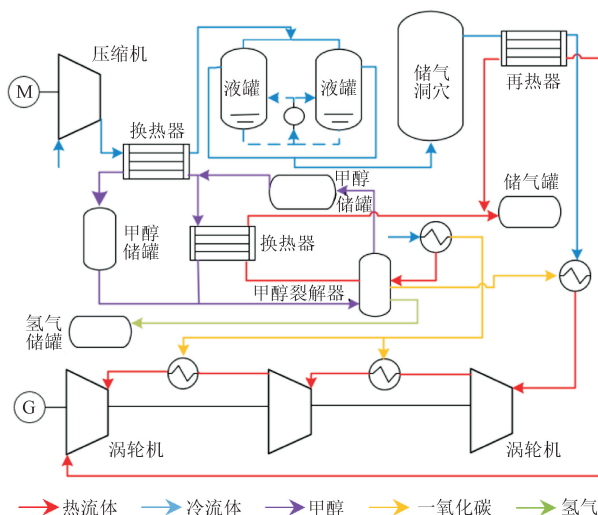
尽管该系统在热力学性能与经济性方面具备优势,但释能过程中节流阀引起的损耗仍是制约效率提升的主要因素。为此,研究提出采用近等温压缩模块替代节流阀,利用液体活塞对来自储能装置的高压空气进行再增压。该方案在避免节流损失的同时,实现了压缩热的有效回收与利用^[18]。与采用节流阀的传统 A-CAES 系统相比,优化后系统效率可提升 5.07%。

图2 典型热压解耦液气压缩空气储能^[16]Fig. 2 Typical decoupling heat-pressure potential energy liquid-gas compressed air energy storage system^[16]

2.1.3 多联产液气复合压缩空气储能

多联产 CAES 系统,本质上是一种以压缩空气为介质、能同时输出电能、热能、冷能等多种能源的综合能量管理系统。该系统的核心目标是在完成电网储能和发电这一基本功能的同时,高效回收并利用系统内部产生的热量,从而提供额外的能源产品,显著提高整个系统的综合能源利用效率,而本团队所提出的多联产液气复合压缩空气储能系统通常以液气压缩空气储能循环为主循环,其他能源设备或系统作为辅助设施,具备较高的综合能源利用率和经济性,适用于工业园区、城市能源站或岛屿微网等多能协同场景。席光、王焕然团队提出了一种兼具制氢、产电于一体的多联产液气复合压缩空气储能系统^[2],如图3所示。该系统的压缩段由绝热压缩和近等温压缩构成,将压缩机组绝热压缩产生的压缩热为甲醇分解制氢反应提供热量,能够将低品位热高效转化为化学能。甲醇分解产生的一氧化碳副产品可以为压缩空气释能模块的高压空气补热,实现电氢联产^[2]。然而,该系统仍存在低品位热源利用不充分的问题,因此,通过将甲醇分解反应供热后仍具有一定温度的高压空气用于生活区供热,实现了热电氢联产^[19]。研究表明,该系统能量效率、焓效率、平准化能源成本及单位能量输出二氧化碳排放量分别为 87.04%、74.05%、137.28 美元/(MW·h)及 155.93 kg/(MW·h)。此外,通过优化甲醇分解反应器焓流过程,发现系统焓效率提高了 3.46%,平准化能源成本降低了 6.09 美元/(MW·h),内部收

益率提高了 3.55%^[20]。

图3 多联产液气复合压缩空气储能系统^[2]Fig. 3 Polygeneration liquid-gas hybrid compressed air energy storage system^[2]

2.2 单一液介质做功系统

单一液介质做功系统作为 CAES 技术的创新发展,旨在通过引入液体介质来克服传统气体介质系统中热量损失和效率低的问题。与单一气体介质系统依赖气体透平的绝热膨胀过程不同,液体介质系统利用水利机械的高效能量转换特性,显著提升了整体系统效率。根据介质状态的不同,单一液介质做功系统可分为闭式和开式两种类型,其中闭式系统通过内部液体循环实现高效能量利用,而开式系统则通过与外界介质交换,适应特定的储能需求。液体介质系统不仅在能效上具有优势,还在稳定性和适应性方面展现出更大的潜力,是提升储能系统性能的重要方向。此类系统采用压缩气体构建虚拟水头,又称为无坝抽水蓄能系统。

2.2.1 闭式单一液介质做功系统

闭式单一液介质做功系统释能结束时空气仍以一定压力储存于工作腔中,不与外界大气连通,典型结构如图4所示。席光、王焕然团队通过对典型闭式单一液介质做功系统的预设压力、蓄能容积、水气容积比、水泵性能和水轮机性能开展大量热力学分析^[21],结果表明该系统能量效率可达 70%以上,且结构简单、成本低,具有大规模推广应用的潜力。随后,为稳定水泵和水轮机的运行工况,团队提出了恒压型闭式单一液介质做功系统,有效提高了设备的工作效率^[22]。研究结果指出,增加预设压力和水气容积比,可以提升恒压型蓄能系统的能量存储密度和系统效率。

针对原有闭式单一液介质做功系统的变工况特性,通过在液气腔内通入蒸汽介质,利用蒸汽凝结过程释放的潜热与显热维持腔内压力恒定,实现释能过程恒压运行,同时蒸汽凝结后参与做功,提高了系统的容量和储能密度^[23]。针对该系统的研究分析表明,增加预置压力会引起系统能量密度增加,但总效率降低;增加单个罐体体积,系统总效率和能量密度先后出现极小值和极大值;蒸汽发生器和气水共容舱的损失占比最高。在实验研究方面,国内已建首台 100 kW 级恒压型闭式单一液介质做功系统试验平台,该系统试验往返效率为 51%,能量密度为 $0.33 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$;当泵效率提升至 90% 时,往返效率达到 63%^[24]。

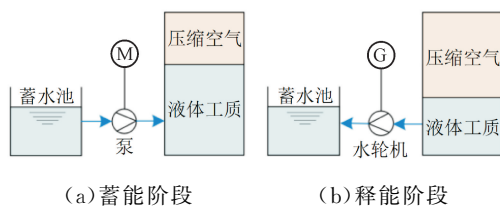


图 4 典型闭式单一液介质做功系统^[23,25-26]

Fig. 4 Typical closed single-fluid energy storage system^[23,25-26]

2.2.2 开式单一液介质做功系统

开式单一液介质做功系统采用 2 个同时运行的工作腔,当一个工作腔处于空气压缩过程,另一个工作腔处于进气过程。由于用于做功的气体在膨胀阶段完全膨胀至环境压力、极大地提高了能量利用率,因此开式单一液介质做功系统储能密度较大,典型结构如图 5 所示。为提升开式系统运行稳定性,在水气罐膨胀做功后增设“吸气”过程,进而调节罐内水位,确保系统持续、稳定地运行^[27]。研究结果表明,该系统在第 2 次循环后即可进入稳定循环状态,并表现出良好的等温性能,空气最低温度可达 282.3 K;在循环周期为 4 800 s 的条件下,系统的膨胀释能效率与释能量提升率均达到最大值,分别为 84.6% 与 18.1%。该研究为提升开式单一液介质做功系统膨胀过程的稳定性与能量效率提供了新的思路与方法支撑。为探寻水和气在高压状态共存造成水中溶气现象对系统的影响,研究者针对宽广工况压力及温度范围条件下水-气共容舱内气体溶解及扩散规律展开研究,并依据研究结果对系统安全运行提供控制策略^[28]。研究结果表明,释能结束后保证水气共容舱内安全水位大于 0.5 m 时,高压溶解气体不会对水轮机产生危害。

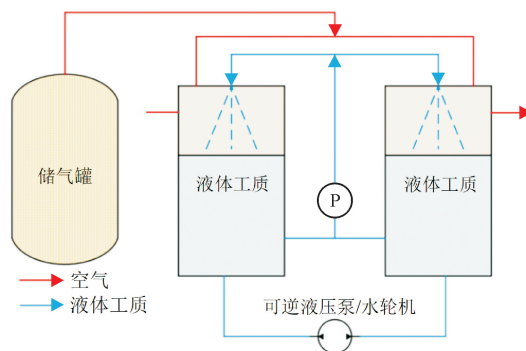


图 5 典型开式单一液介质做功系统^[27]

Fig. 5 Typical open-type single-liquid energy storage system^[27]

2.3 液气介质联合做功系统

液气介质联合做功系统中液介质通过水轮机完成液相持有能量转化,气介质依托膨胀机实现气体能量释放,通过抽水储能、压缩储气,分时段协同做功的方式运作,典型系统如图 6 所示。席光、王焕然团队提出的压缩空气与抽水蓄能耦合的新型储能系统电-电转化效率达到 53.82%,能量转化效率为 41.06%,其中最大损失发生在高压储气空间的节流过程和换热器的传热过程^[29]。

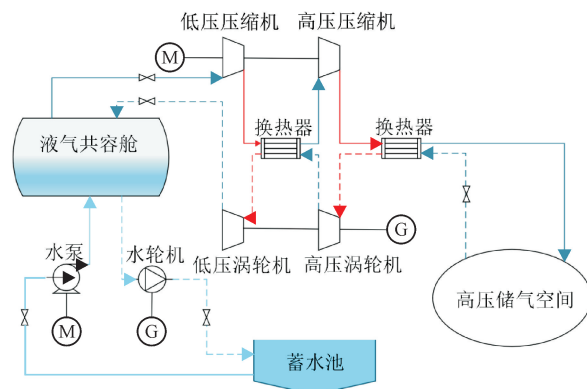


图 6 恒容型液气介质联合做功系统

Fig. 6 Constant-volume liquid-gas medium combined energy storage system

本团队在上述基础上,通过利用能量梯级利用原理优化液气能量释放配比,系统能量效率可提升至 71.82%^[30]。针对恒容储气室在储、释能过程中,气体充入与排出的动态过程引发恒容储气室内温度波动,进而导致系统效率降低的问题,本团队将液气复合压缩空气储能系统作为喷雾系统耦合 A-CAES 系统形成新型液气介质联合做功系统^[31],该系统在储能阶段利用喷雾系统中的泵将水气共容舱中的水喷射到储气室,回收储气室内空气热能,在释能阶段

将水气共容舱中的水喷射到储气室加热储气室内的空气,喷入储气室的水均通过储气室和水气共容舱之间的压差通过调压阀流回水气共容舱;该系统充分利用储气室内的能量,极大提高了系统效率。

为了研究液气介质联合做功系统近等温压缩过程水气共容舱内部热湿传递规律,本团队正在搭建300 kW 液气复合压缩空气储能实验平台。此外,为加速技术成果落地与产业化示范应用,本团队联合清华大学等单位依托泰安二期抽水蓄能电站现有资源,研发设计了一种高效率-高密度的液气复合压缩空气储能系统,该示范工程当前已启动实施。

3 液气储能系统关键装备

液气复合压缩储能系统的性能与效率在很大程度上依赖于其核心能量转换装备的技术水平。压缩机/膨胀机以及水泵/水轮机作为系统中的关键部件,其结构设计、工作原理与运行特性直接影响整个系统的能量转换效率、稳定性和适用场景。当前,围绕这几类设备的研究与开发主要集中在提升等温特性、优化流道结构、改善动态响应及运行稳定性等方面,并通过数值模拟、多目标优化、实验验证等手段持续推动技术进步与工程应用。

3.1 液气复合压缩储能用压缩机/膨胀机

压缩机/膨胀机是液气复合压缩储能系统的关键设备之一,根据其工作原理与应用场景主要可分为离心式压缩机/涡轮式膨胀机、螺杆式压缩机/膨胀机以及活塞式压缩机/膨胀机。

离心式压缩机/涡轮式膨胀机具有流量稳定、运行可靠和适于连续工作的优点,广泛应用于大流量液气复合压缩储能系统,但其体积较大,对安装空间有一定要求^[32]。叶轮作为核心部件,其设计对整机性能影响显著,相关研究通过优化叶片参数、结合CFD模拟与实验、利用有限元和模态分析等手段,以提升效率、扩大稳定运行范围、增强结构可靠性^[33]。此外,针对非稳态工况下的动态响应问题,控制策略的优化也被用于改善变工况性能。席光、王焕然团队研究了叶轮尾迹结构、扩压器导叶安装角的影响,并通过多目标优化方法协同提升系统性能^[34-36]。螺杆式压缩机/膨胀机适用于间歇运行,具有维护简便和效率较高的特点,常用于中等规模液气复合压缩储能系统^[37]。其性能主要取决于转子型线设计,当前研究致力于开发新型线以提升效率并降低能耗。同时,通过数值模拟和实验方法深入分析内部

热力学与流动机制,以优化运行参数^[37-38]。

活塞式压缩机/膨胀机结构简单、成本低,适用于高压、小规模液气复合压缩储能系统,其中液体活塞尤为常见^[39]。液体活塞是一种利用液柱往复运动实现气体压缩或膨胀的装置。其核心原理是通过驱动液柱在腔体内上下运动,周期性改变气室容积:液柱上升时压缩气体实现压缩功能(压缩机模式),液柱下降时气体膨胀输出功(膨胀机模式)。该技术采用液体替代传统机械活塞,兼具密封与冷却功能,结构如图7所示。液体活塞利用液体的大热容与高导热性,在压缩/膨胀过程中实现近似等温操作,显著提高效率^[40],其良好的密封特性避免了传统活塞的磨损与泄漏问题。在压缩/膨胀过程中强化换热是提升液体活塞的等温性能的重要手段之一,目前强化换热手段包括多孔介质、水泡沫、空心球体、腔体构型优化和喷淋技术等。研究人员通过构建与液体活塞尺寸、初始状态、喷雾水量等参数有关的无量纲评价模型,评估了喷雾强化传热对不同运行条件和设计参数下系统的热性能,快速获取不同设计方案的热力学表现^[9]。进一步地,明确了液体活塞设备在近等温压缩空气储能系统中的重要地位,同时指出变工况下水泵效率下降是限制系统效率的主要因素^[39]。此外,本团队系统性研究了液体活塞压缩过程的能量传递与损耗机制,结果表明提高总压缩过程中近等温压缩比可以有效增强系统性能^[41]。在24.71 m³缸体实验中实现了压缩比1.86下仅10.59 K的温升和86.9%的能量效率,表明液体活塞技术具有良好的等温性能与工程可行性^[42]。

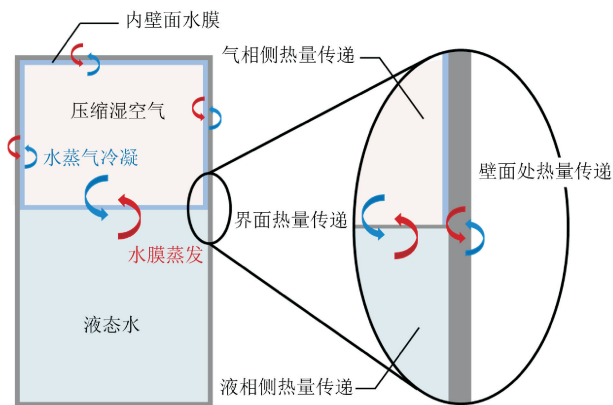


图7 典型液体活塞式压缩示意图

Fig. 7 Schematic of compressed process in liquid-piston

3.2 液气复合压缩储能用高效水泵/水轮机

液气复合压缩储能系统中的水泵与水轮机是关

键能量转换设备,主要包括分体式机组和可逆式水泵水轮机一体机。水泵作为系统的核心动力设备,主要用于实现高效近等温压缩或在充放气过程中维持容器内压力恒定,其性能优化研究涵盖叶片结构改进、瞬态流动机制分析、智能算法优化叶轮设计以及空化运行特性等方面,旨在提升效率和运行稳定性^[43-44]。水轮机承担能量回收功能,主要聚焦于熵产理论分析能量损失、优化转轮和水斗结构以提高水力效率,分析尾水管非定常流动以降低能量耗散^[45-46]。

经液气复合压缩空气储能系统性验证^[47]发现,水泵和水轮机的效率直接影响系统的往返效率和经济效益,水泵流量直接作用于空气压力和温度的演化过程,高效率水泵水轮机能够减少能量转换过程中的损失,从而提高系统的整体性能和经济可行性。其次,通过释能管路流量与水轮机机组变流量联合调节,可以提高整个系统的工作效率^[48]。

4 液气复合压缩储能系统储能装置

液气复合压缩储能系统的储能性能与经济性在很大程度上受其核心储能装置内部热力学与热工水力特性的制约。储能装置在循环运行中伴随显著的能量耗散,并受承压能力限制而直接影响系统储能密度,是影响系统整体效率的关键环节。当前,围绕该类装置的研究重点集中于热力学建模与焓损分析、流动传热特性优化及针对地下硐室开挖的爆破控制技术等方面,通过理论建模、数值仿真、多目标优化与实验验证相结合的手段,系统揭示了储能装置内部状态演化、布置方式、结构完整性对系统性能的影响机制,为提升系统储能效率与工程可行性提供了理论支撑与技术路径。

4.1 储能装置的热力学特性

系统运行过程中储能装置内工质热力学状态的演化过程伴随能量耗散的产生。同时,受装置承压上限约束,其热力学参数亦直接影响系统储能密度。上述能量耗散与储能密度上限共同制约了系统经济性。基于真实气体状态方程的热力学分析与焓分析指出储能装置是系统中不可忽视的焓损源,在一个完整循环中造成的总焓损失率占13.71%,甚至超过了膨胀机的焓损失^[49]。敏感性分析进一步指出,洞穴的传热系数、注气温度以及初始温度是影响总焓损失的关键参数。该工作通过严谨的热力学建模与参数分析,强调了将储能装置作为独立子系统进行精

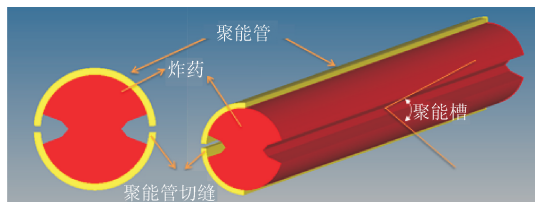
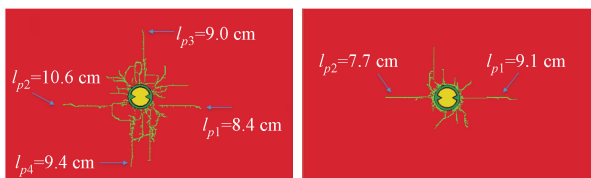
细化研究的重要性,其结论对于开发高效、低损耗的大型压缩空气储能系统具有重要的理论指导价值。

然而,上述研究多集中于宏观热力学分析,将储能装置内部视为均一整体,忽略了实际运行中因气体流动与重力作用导致的复杂热工水力过程,如温度分层、局部热点及非均匀传热等现象。这些被简化的内部动态特性,恰恰是精准评估系统储能效率与密度的关键,也成为了制约系统性能进一步优化的瓶颈。因此,席光、王焕然团队通过数值模拟与实验验证相结合的方法,系统分析了储能装置在不同布置方式下的内部工质的流动与传热特性^[50]。研究指出,在相同工作压力范围内,水平布置的储能装置相较于垂直布置具有更强的传热能力,尽管其储能效率略低(水平为64.61%,垂直为65.50%),但储能密度更高,在特定条件下达到 $3.54 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,优于垂直布置的 $3.14 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。这表明储能装置的布置方式对系统热管理和能量输出具有显著影响。其次,随着储能流量增加,垂直布置的储能装置内空气流动与传热性能得到增强,尤其在超过临界流量后,装置内形成明显的二次流,改善了壁面传热条件,从而缩小了两种布置方式在储能密度上的差距。此外,对固定容积下的储能装置配置进行优化后,发现配置在 0.5 kg/s 的储能流量下,系统输出电能提高 $76.4 \text{ MW} \cdot \text{h}$,输入电能降低 $78.9 \text{ MW} \cdot \text{h}$,显示出合理配置储能装置对提升系统综合性能的重要作用。这些成果为压缩空气储能系统,特别是大规模储能装置的工程设计与运行优化提供了理论依据与实践参考。

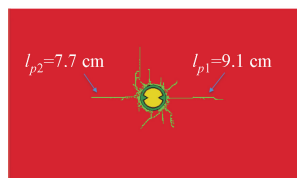
4.2 地下硐室的开挖技术

地下硐室作为系统的核心储能空间,其开挖技术直接关系到项目安全性、经济性和运行效率。钻爆法因其适应性强、成本可控等优势,在硬岩地质条件下仍然是地下硐室开挖的主要工法之一。然而,由于液气复合压缩储能系统硐室在运行过程中同时承受地应力外压与硐室内压的双重载荷,对钻爆法开挖技术提出了更高要求。

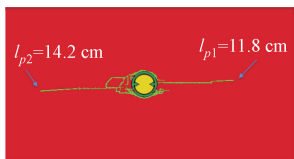
理论层面,Yin等^[51]分析了基于普通双槽聚能装药方法岩石爆破的破碎机理,并通过数值模拟测试了4种不同能量聚集形式的钻孔爆破方案,综合比较分析发现,新设计的双槽切缝聚能装药结构示意图如图8所示,该结构爆破可以实现最佳爆破效果,即定向裂纹最长,非聚能方向裂纹少且对围岩的损伤较小,如图9所示,其中 $l_{p1} \sim l_{p4}$ 为裂纹长度。

图8 双槽切缝聚能装药结构示意图^[51]Fig. 8 Double-slot jet-forming charge structure^[51]

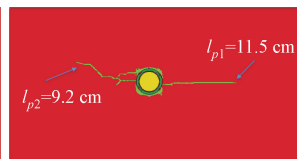
(a) 双槽开放聚能装药



(b) 双槽封闭聚能装药



(c) 双槽切缝聚能装药



(d) 无槽切缝聚能装药

图9 不同聚能形式的单孔岩石爆破裂纹模式^[51]Fig. 9 Fracture patterns from single-hole rock blasting with different energy-gathering forms^[51]

考虑到地应力对地下硐室开挖围岩损伤及稳定性的影响,分别开展了地应力条件下单孔岩石双槽切缝聚能不耦合装药爆破^[52]和双孔岩石普通柱状药卷偏心不耦合装药爆破^[53]的理论和数值模拟研究。对于双槽切缝聚能不耦合装药爆破,单向压缩地应力可以抑制围岩内分散损伤,而拉伸地应力对分散损伤则视聚能方向而定,不同聚能方向下的主裂纹并不完全随竖向地应力单调变化。此外,损伤范围比和有效应力衰减系数都受到侧向压力系数的显著影响,由于不同的聚能装药方向,随地应力侧压力系数呈现出不同的变化趋势。

对于普通柱状药卷偏心不耦合装药爆破,本团队建立了偏心装药爆破的分析模型,深入了解了钻孔周围不同岩石损伤区的形成与各种影响因素之间的理论关系,包括不耦合系数、地应力、岩石和爆炸特性以及峰值爆破压力。结果表明,岩石损伤主要集中在钻孔偏心侧,其较小的不耦合系数导致峰值爆破压力较大。此外,钻孔之间贯通裂缝的形成高度依赖于它们之间的相对角度,而裂缝的范围和方向在很大程度上受地应力的控制。基于上述研究基础,本团队进一步开展了隧道式圆形截面硐室的光面爆破开挖研究,研究表明,在地应力条件下采用本团队设计的双槽切

缝聚能不耦合装药爆破能够形成较好的断面轮廓,并且大幅降低了围压损伤,如图10所示。

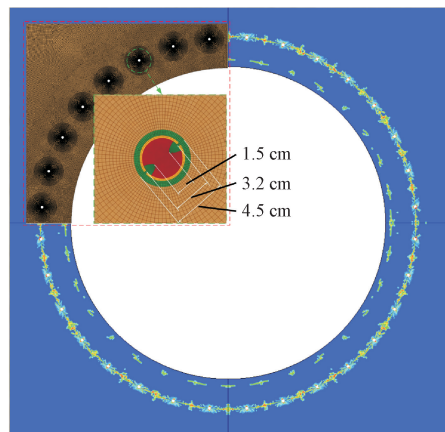


图10 圆形硐室双槽切缝聚能不耦合装药爆破损伤模拟

Fig. 10 Modeling of blast-Induced damage from a dual-slot notched, decoupled charge in a circular underground chamber

此外,针对目前地下硐室爆破质量评价中指标因素相对单一,评价标准不明确等问题。本团队首次建立了考虑几何形状和安全性特征的地下硐室控制爆破质量评价指标体系。通过聚类分析和新建的组合加权方法获得了爆破质量指标等级和指标权重,最终建立了硐室爆破开挖质量的未知测度评价模型并应用于实测工程,获得了准确合理的开挖质量评价结果^[54]。

5 结 论

随着全球能源转型和“双碳”目标的深入推进,液气复合压缩储能系统作为一种高效、灵活、环保的大规模储能技术,正受到越来越多的关注与重视。该系统通过液气介质的协同作用,实现了能量的高效存储与释放,特别适用于风光等可再生能源的平滑输出与电网调频及调峰。本文从系统拓扑结构、关键装备与储能装置3个方面,对液气复合压缩储能系统的研究进展进行了系统综述,具体结论如下:

(1)液气复合压缩储能技术通过引入液-气两相工质,并利用界面强化换热实现了空气的近等温压缩/膨胀,有效抑制可用能损失。实验发现其系统循环效率比传统CAES技术提高超过20%,部分优化系统模型计算效率可达70%以上。

(2)以液-气双工质作为储能介质,结合液体的高能量传递特性,使该技术的能量存储密度达到抽水蓄能的3倍以上。同时,其储能装置可灵活采用水下储罐、地面储罐或改造现有抽水蓄能设施,降低了对特

定地质构造(如盐穴)的依赖,应用场景更为广泛。

(3)液气复合压缩储能技术已发展出单一气介质、单一液介质及液气联合做功等多种拓扑结构,可适配不同应用场景。目前,已在山东泰安、江西九江等地启动工程示范项目,标志着其从实验室研究走向了规模化工程验证。

6 展 望

液气复合压缩储能技术的研究虽已取得重要进展,但在系统集成与优化、关键装备性能提升、成本控制等方面仍需进一步加强。未来,液气复合压缩储能系统的研究将重点围绕以下方向展开。

(1)系统集成与多能耦合优化。液气复合压缩储能系统可与风电、光伏、抽水蓄能等多种能源形式协同运行,未来应重点研究多能流协同控制策略与系统动态匹配机制,提升整体能源利用效率与经济性。

(2)关键装备性能提升与新材料应用。压缩机、膨胀机、水泵、水轮机等核心设备的效率、寿命与可靠性仍是制约系统性能的关键。未来应加强液体活塞结构优化、新型密封材料、轻量化复合材料容器等方面的研究,推动装备向高效、耐用、低成本方向发展。

(3)地下储气库改造与智能运维技术。盐穴、硐室和含水层等地下储气设施具有规模大、成本低的优势,但其改造技术、密封性能与长期稳定性仍需提升。未来应结合数字孪生、智能监测与自适应控制技术,实现储气库的智能化建设与安全运行。

综上所述,液气复合压缩储能技术发展潜力巨大,将在未来新型电力系统中扮演重要角色。通过持续的技术创新与工程实践,有望为实现高比例可再生能源接入和“双碳”目标提供关键支撑。

参考文献:

- [1] ZHONG Like, YAO Erren, HU Yang, et al. Thermo-economic analysis of a novel system integrating compressed air and thermochemical energy storage with solid oxide fuel cell-gas turbine [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 252: 115114.
- [2] ZHANG Yufei, WANG Huanran, LI Ruixiong, et al. An electro-hydrogen cogeneration system combining compressed air energy storage and methanol cracking reaction [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 58: 106351.
- [3] QING Shaowei, WANG Yan, WEN Xiankui, et al. Optimal working-parameter analysis of an ejector integrated into the energy-release stage of a thermal-storage compressed air energy storage system under constant-pressure operation: a case study [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 247: 114715.
- [4] CAO Ruifeng, LI Weiqiang, CONG Xiaowei, et al. Energy, exergy and economic (3E) analysis and multi-objective optimization of a combined cycle power system integrating compressed air energy storage and high-temperature thermal energy storage [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 238: 122077.
- [5] ZHANG Xinjing, GAO Ziyu, ZHOU Bingqian, et al. Advanced compressed air energy storage systems: fundamentals and applications [J]. *Engineering*, 2024, 34: 246-269.
- [6] SCIACOVELLI A, LI Yongliang, CHEN Haisheng, et al. Dynamic simulation of adiabatic compressed air energy storage (A-CAES) plant with integrated thermal storage-link between components performance and plant performance [J]. *Applied Energy*, 2017, 185, (Part 1): 16-28.
- [7] ZHANG Yufei, YAO Erren, LI Ruixiong, et al. Thermodynamic analysis of a typical compressed air energy storage system coupled with a fully automatic ejector under slip pressure conditions [J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2023, 15(2): 024102.
- [8] BASHIRI MOUSAVI S, ADIB M, SOLTANI M, et al. Transient thermodynamic modeling and economic analysis of an adiabatic compressed air energy storage (A-CAES) based on cascade packed bed thermal energy storage with encapsulated phase change materials [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 243: 114379.
- [9] GUIZZI G L, MANNO M, TOLOMEI L M, et al. Thermodynamic analysis of a liquid air energy storage system [J]. *Energy*, 2015, 93(Part 2): 1639-1647.
- [10] TAFONE A, ROMAGNOLI A, BORRI E, et al. New parametric performance maps for a novel sizing and selection methodology of a liquid air energy storage system [J]. *Applied Energy*, 2019, 250: 1641-1656.
- [11] LI Yongliang, CAO Hui, WANG Shuhao, et al. Load shifting of nuclear power plants using cryogenic energy storage technology [J]. *Applied Energy*, 2014, 113: 1710-1716.
- [12] GUO Zi'ao, ZHANG Yufei, CAI Xuchao, et al. Comprehensive performance analysis of a trans-critical CO₂ energy storage system with coupled flexible cold energy storage regulation based on entransy analysis [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 277: 126897.
- [13] NABAT M H, SHARIFI S, RAZMI A R. Thermodynamic and economic analyses of a novel liquid air energy storage (LAES) coupled with thermoelectric gen-

- erator and Kalina cycle [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 45: 103711.
- [14] 西安交通大学. 一种海上非绝热等压双容器压缩空气储能系统及方法: CN201810738727.8 [P]. 2018-12-14.
- [15] 李梦杰, 刘占斌, 何雅玲, 等. 考虑海上风能波动的水下压缩空气储能系统能量转化特性 [J]. *西安交通大学学报*, 2025, 59(2): 1-12.
- LI Mengjie, LIU Zhanbin, HE Yaling, et al. Energy conversion characteristics of underwater compressed air energy storage system considering offshore wind fluctuation [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2025, 59(2): 1-12.
- [16] LI Ruixiong, TAO Rui, YAO Erren, et al. Decoupling heat-pressure potential energy of compressed air energy storage system: Using near-isothermal compressing and thermal energy storage [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 63: 107017.
- [17] ZHANG Yufei, JIN Peng, WANG Haiyang, et al. Design, analysis and optimisation of a novel adiabatic-isothermal CAES system with coupled stepped phase change energy storage unit [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 256: 124091.
- [18] ZHANG Yufei, WANG Haiyang, JIN Peng, et al. Design and thermodynamic performance analysis of a novel adiabatic compressed air energy storage system based on liquid piston re-pressurization [J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 105: 114675.
- [19] ZHANG Yufei, WANG Haiyang, ZHANG Peiye, et al. Energy, exergy, economic and environmental analysis and optimization of an adiabatic-isothermal compressed air energy storage coupled with methanol decomposition reaction for combined heat, power and hydrogen generation system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2025, 325: 119401.
- [20] ZHANG Yufei, GUO Zi'ao, ZHANG Peiye, et al. Study on the comprehensive performance and control strategy of a methanol decomposition reactor for compressed air energy storage with combined heating from compression heat and solar energy [J]. *Renewable Energy*, 2025, 250: 123272.
- [21] WANG Huanran, WANG Liqin, WANG Xinbing, et al. A novel pumped hydro combined with compressed air energy storage system [J]. *Energies*, 2013, 6(3): 1554-1567.
- [22] YAO Erren, WANG Huanran, LIU Long, et al. A novel constant-pressure pumped hydro combined with compressed air energy storage system [J]. *Energies*, 2015, 8(1): 154-171.
- [23] 李丞宸, 李宇峰, 张严, 等. 一种新型蒸汽恒压抽水压缩空气储能系统及其热力学分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(6): 84-91.
- LI Chengchen, LI Yufeng, ZHANG Yan, et al. Novel steam constant-pressure pumped hydro with compressed air energy storage system and thermodynamic analysis [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(6): 84-91.
- [24] CHEN Hao, WANG Huanran, LI Ruixiong, et al. Experimental and analytical investigation of near-isothermal pumped hydro-compressed air energy storage system [J]. *Energy*, 2022, 249: 123607.
- [25] ODUKOMAIYA A, ABU-HEIBA A, GLUESENKAMP K R, et al. Thermal analysis of near-isothermal compressed gas energy storage system [J]. *Applied Energy*, 2016, 179: 948-960.
- [26] ODUKOMAIYA A, ABU-HEIBA A, GRAHAM S, et al. Experimental and analytical evaluation of a hydro-pneumatic compressed-air ground-level integrated diverse energy storage (GLIDES) system [J]. *Applied Energy*, 2018, 221: 75-85.
- [27] 张宇飞, 金鹏, 王海洋, 等. 高效稳定双罐式液体活塞近等温膨胀过程热力性能研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2024, 58(7): 1-12.
- ZHANG Yufei, JIN Peng, WANG Haiyang, et al. Thermal performance study on efficient and stable dual-tank liquid piston near-isothermal expansion process [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2024, 58(7): 1-12.
- [28] 刘明明, 侯付彬, 严凯, 等. 无水坝抽水蓄能系统高压溶气问题研究 [J]. *工程热物理学报*, 2020, 41(3): 609-614.
- LIU Mingming, HOU Fubin, YAN Kai, et al. Analysis of the high pressure air solution in constant-pressure pumped hydro combined with compressed air energy storage system [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2020, 41(3): 609-614.
- [29] 李丞宸, 贺新, 陶飞跃, 等. 一种压缩空气与抽水蓄能耦合的新型储能系统及热力学分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(4): 40-49.
- LI Chengchen, HE Xin, TAO Feiyue, et al. A new energy storage system coupled with compressed air and pumped-hydro energy storage and related thermodynamic analysis [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(4): 40-49.
- [30] 姚尔人, 席光, 王焕然, 等. 一种新型压缩空气与抽水复合储能系统的热力学分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(3): 12-18.
- YAO Erren, XI Guang, WANG Huanran, et al. Thermodynamic analysis on a novel compressed-air based pumped hydro energy storage system [J]. *Jour-*

- nal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(3): 12-18.
- [31] CHEN Hao, WANG Huanran, LI Ruixiong, et al. Thermo-dynamic and economic analysis of a novel pumped hydro-compressed air energy storage system combined with compressed air energy storage system as a spray system [J]. *Energy*, 2023, 280: 128134.
- [32] LIANG Qi, ZUO Zhitao, ZHOU Xin, et al. Design of a centrifugal compressor with low solidity vaned diffuser (LSVD) for large-scale compressed air energy storage (CAES) [J]. *Journal of Thermal Science*, 2020, 29(2): 423-434.
- [33] RAGGIO M, FERRARI M L. Compressed air energy storage with T100 microturbines: dynamic analysis and operational constraints [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 73(Part C): 109093.
- [34] XI Guang, ZHOU Li, DING Haiping, et al. Investigation into the influence of diffuser stagger angles on the flow field and performance of a centrifugal compressor [J]. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, 2007, 1(3): 290-294.
- [35] LI Xuechen, XI Guang, HUA Jiang, et al. Investigation of the wake effect from the centrifugal splitter impeller blade to the vaned diffuser [C]//ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2012: 2607-2617.
- [36] GE Gangqiang, CAI Xuchao, SUN Hao, et al. Optimization design of an adiabatic compressed air energy storage system with sliding pressure operation and packed bed thermal energy storage based on a one-dimensional loss model [J]. *Energy Conversion and Management*, 2025, 328: 119626.
- [37] KUMAR A, PATIL S, KOVACEVIC A, et al. Performance prediction and Bayesian optimization of screw compressors using Gaussian process regression [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, 133(Part C): 108270.
- [38] WANG Jun, ZHAO Lizhuang, ZHAO Xihao, et al. Optimal design and development of two-segment variable-pitch screw rotors for twin-screw vacuum pumps [J]. *Vacuum*, 2022, 203: 111254.
- [39] 李瑞雄, 邹瀚森, 姚尔人, 等. 液体活塞近等温压缩空气储能过程热力性能评估 [J]. *西安交通大学学报*, 2023, 57(5): 58-67.
- LI Ruixiong, ZOU Hansen, YAO Erren, et al. Thermodynamic performance evaluation of the near-isothermal compressed air energy storage system with liquid piston [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2023, 57(5): 58-67.
- [40] 何青, 时金凤, 贾明祥. 等温压缩空气储能技术研究综述 [J]. *热力发电*, 2024, 53(9): 10-18.
- HE Qing, SHI Jinfeng, JIA Mingxiang. A review on technology research of isothermal compressed air energy storage system [J]. *Thermal Power Generation*, 2024, 53(9): 10-18.
- [41] CAI Xuchao, GUO Zi'ao, WANG Haiyang, et al. Thermodynamic analysis of a near-isothermal compressed air energy storage system based on internal combustion engine assistance [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 275: 126815.
- [42] LI Chengchen, WANG Huanran, HE Xin, et al. Experimental and thermodynamic investigation on isothermal performance of large-scaled liquid piston [J]. *Energy*, 2022, 249: 123731.
- [43] 李志峰, 王乐勤, 戴维平, 等. 离心泵启动过程的涡动力学诊断 [J]. *工程热物理学报*, 2010, 31(1): 48-51.
- LI Zhifeng, WANG Leqin, DAI Weiping, et al. Diagnostics of a centrifugal pump during starting period based on vorticity dynamics [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, 31(1): 48-51.
- [44] JI Leilei, LI Wei, SHI Weidong, et al. Effect of blade thickness on rotating stall of mixed-flow pump using entropy generation analysis [J]. *Energy*, 2021, 236: 121381.
- [45] BOŽIĆ I. A novel energy losses dependence on integral swirl flow parameters in an elbow draft tube of a Kaplan turbine [J]. *Renewable Energy*, 2021, 175: 550-558.
- [46] 孙启轩, 谭磊. 冲击式水轮机水斗设计方法及性能优化 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2024, 64(5): 852-859.
- SUN Qixuan, TAN Lei. Bucket design method and performance optimization of a Pelton turbine [J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2024, 64(5): 852-859.
- [47] CHEN Hao, WANG Huanran, LI Ruixiong, et al. Thermo-dynamic and economic analysis of a novel near-isothermal pumped hydro compressed air energy storage system [J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 30: 101487.
- [48] 西安交通大学, 国核电力规划设计研究院有限公司. 一种以废弃隧道或者防空洞作为储能容器的变工况无水坝抽水蓄能系统及方法: CN201910126618.5 [P]. 2023-05-16.
- [49] ZHANG Shuyu, WANG Huanran, LI Ruixiong, et al. Thermodynamic analysis of cavern and throttle valve in large-scale compressed air energy storage system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 183: 721-731.
- [50] ZHANG Wenlong, ZHANG Yufei, LI Xiangdong, et al. Performance analysis and configuration method op-

- timization of AA-CAES-based air storage tanks [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2024, 16(4): 044101.
- [51] YIN Yao, SUN Qing, ZOU Baoping, et al. Numerical study on an innovative shaped charge approach of rock blasting and the timing sequence effect in microsecond magnitude [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(9): 4523-4542.
- [52] YIN Yao, ESMAEILI K, SUN Qing, et al. Numerical investigation of rock damage induced by bilateral-groove-slot shaped charge blasting under the influence of in-situ stresses [J]. Computers and Geotechnics, 2025, 180: 107070.
- [53] YIN Yao, SONG Minxing, FENG Yu, et al. Theoretical and numerical investigation of the effects of in-situ stresses and dual-borehole combinations in eccentric decoupled charge blasting [J]. Rock Mechanics Bulletin, 2025, 4(2): 100191.
- [54] YIN Yao, WANG Jianxiu, ZOU Baoping, et al. Evaluation of controlled blasting quality for rock-mass tunneling based on multiple indices [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2023, 149(1): 04022155.

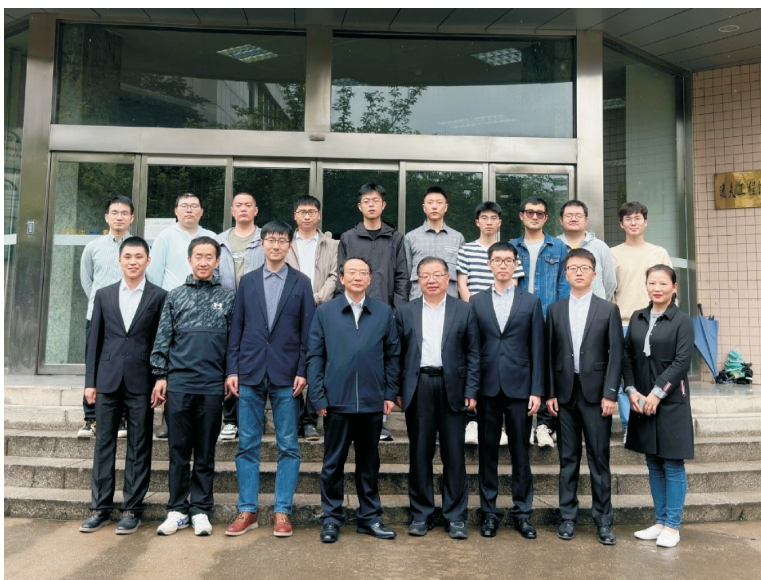
(编辑 刘杨 陶晴)

团队介绍:

先进物理储能团队在流体机械关键共性技术集中攻关、空气储能技术全寿命周期性能评估软件的研发及应用、关键设备与储能系统的性能表征方面具有很好的研究积累。目前,在国际刊物上累计发表学术论文 100 余篇,授权储能技术相关发明专利 80 余项,已得到国际同行的广泛引用。团队负责人王焕然教授提出了先进抽水压缩空气复合储能技术,该技术大大提高了储能系统效率并且降低了系统投资成本;团队负责人席光教授、博导,国家杰青、国家有突出贡献专家,中国工程热物理学会常务理事、流体机械专委会主任,国家“十一五”863 计划重点项目“微型燃气轮机”总体专家组组长,获国家科技进步二等奖 1 项、教育部与陕西省科技进步一等奖 3 项。获中国青年科技奖,亚洲流体机械学会杰出工程师奖等荣誉称号,主持国家重点研发计划、863、重点基金等多项国家级科研项目,在能源与动力工程领域发表学术论文 200 余篇,获授权发明专利 50 余项。



团队负责人:席光、王焕然教授



团队合影