

氢气储运的发展路线和未来展望



王祎辰*

西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川成都 610065

摘要: 随着全球能源需求的不断增长和环保意识的提高, 传统化石能源已经不能满足人类对美好生活的向往与对环境保护的追求。中国政府响应人民的迫切需求, 顺应时代发展趋势, 就中国污染问题的治理, 提出了双碳目标。氢能作为一种高度清洁的新型能源形态正逐渐成为解决双碳问题研究的关键和热点。中国作为全球最大的氢气生产国之一, 在氢能研究与应用方面也逐渐取得了重要进展。但若要让氢燃料完全取代传统化石能源还需进一步的研究, 氢气储运还面临许多技术和实践上的困难与挑战, 氢气能源的发展对于储运行业的从业者来说既是挑战, 也是机遇。氢气作为一种气体, 其被人类认识已有上百年, 之所以氢气没有作为一种能源形式得到人类的广泛应用, 根本原因在于氢气的储存与运输极其困难, 如果能解决氢气的储运问题, 氢气能源普及中最大的障碍就会被攻克。而氢气和天然气一样是高能量的高危可燃气体, 两者在储运方面有高度的相似性, 天然气储运的经验能为氢气储运的发展提供参考和借鉴, 天然气的储运设备也给氢气储运提供了实验的平台, 目前也已经有天然气的掺氢储运等以天然气储运为基础的氢气储运研究成果。氢气储运问题的研究是国家和时代赋予储运从业者的光荣任务, 氢气储运将会成为储运行业未来的重要发展方向之一。作为储运行业未来的从业者, 我们应当着眼于未来, 认识到氢气能源的巨大潜力和当前遇到的困难和挑战。

关键词: 天然气; 氢气; 储运

DOI: [10.57237/j.jest.2023.06.002](https://doi.org/10.57237/j.jest.2023.06.002)

Development Path and Future Prospects of Hydrogen Transportation and Storage

Wang Yichen*

Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu 610065, China

Abstract: As global energy demand continues to grow, and environmental awareness increases, traditional fossil fuels are no longer able to meet humanity's aspirations for a better life and the pursuit of environmental protection. In response to the urgent needs of the people and in line with the trends of the times, the Chinese government has proposed the "dual carbon" targets for addressing pollution issues in China. Hydrogen energy, as a highly clean and new form of energy, is gradually becoming a key focus in research to address these dual carbon challenges. China, as one of the world's largest hydrogen gas producers, has also made significant progress in hydrogen research and applications. However, for hydrogen fuel to fully replace traditional fossil fuels, further research and development are required. Hydrogen gas storage and transportation also face many technical and practical difficulties and challenges. The development of hydrogen energy poses both challenges and opportunities for professionals in the storage and transportation industry. Hydrogen gas has been known to humanity for over a century, and the fundamental reason it has not been widely used as

*通信作者: 王祎辰, 2415793478@qq.com

an energy source lies in the extreme difficulty of its storage and transportation. If the storage and transportation issues of hydrogen gas can be solved, the biggest obstacle to the widespread adoption of hydrogen energy will be overcome. Hydrogen gas, like natural gas, is a high-energy, highly flammable gas, and they share a high degree of similarity in storage and transportation. Experience in natural gas storage and transportation can provide valuable references and insights for the development of hydrogen gas storage and transportation. The equipment used for natural gas storage and transportation also provides a platform for experimentation in hydrogen gas storage and transportation. There are already research achievements in hydrogen gas storage based on natural gas storage, such as hydrogen blending in natural gas storage. The study of hydrogen gas storage and transportation is a glorious task entrusted to professionals in the storage and transportation industry by the nation and the times. Hydrogen gas transportation will become one of the important future directions for the storage and transportation industry. As future professionals in the storage and transportation industry, we should look to the future, recognize the enormous potential of hydrogen energy, and understand the current difficulties and challenges it faces.

Keywords: Natural Gas; Hydrogen; Storage and Transportation

1 引言

2022 年 3 月 23 日，国家发展改革委、国家能源局印发《氢能产业发展中长期规划（2021-2035 年）》，部署了推动氢能产业高质量发展的重要举措以及产业发展的各阶段目标。

其中氢气的储运要在确保安全可控的前提下，积极推进技术材料工艺创新，探索和实践多种储运方式。将提高高压气态储运效率，加快降低储运成本，有效提升高压气态储运商业化水平作为主要方向。同时，以低温液氢储运产业化应用为次要方向，探索固态、深冷高压、有机液体等储运方式的应用。此外，以掺氢天然气管道为基础，尝试纯氢管道等试点示范，逐步构建高密度、轻量化、低成本、多元化的氢能储运体系。

氢气的储存是氢气储运的另一大支柱，氢能有储能容量大的优势，非常适用于各种新能源的调峰。开展氢能可在再生能源消纳、电网调峰等应用场景的示范，探索培育“风光发电+氢储能”一体化应用新模式，都需要对氢气进行储存。建立安全，稳定，高效且大规模且低成本的氢气储存系统，并制定配套的管理方法，是氢气储存的最终目标，也是氢气储运支持国家双碳战略，带动其他新能源技术的重要助力。

就全球而言，已有多个国家建立了不同长度，输量和掺氢比例的氢气长输管道，据各国研究结果，天然气掺氢比例一般为 5%-30%，其中 20%为多数国家目前的最高掺氢比例。

表 1 国际天然气管道掺氢发展现状

国家	年份	典型项目	最高掺氢比例（%）	掺氢规模
美国	2020	HyBlend	30	-
加拿大	2020	ACTO	5	-
	2018	-	2	约 1.46 万吨/年
欧盟	2004	NATURALHY	20	-
德国	2020	Avacon	20	-
法国	2014	GRHYD	20	约 0.92 万吨/年
意大利	2019	Snam	10	预计 62.3 万吨/年
英国	2017	HyDeploy	20	约 3.68 万吨/年
澳大利亚	2021	JGN	10	约 0.47 万吨/年
日本	-	-	30	-
俄罗斯	2021	-	25	-
乌克兰	2021	-	20	-
韩国	2022	-	20	-

国际天然气掺氢技术开展应用示范 20 多年, 目前正处于商业化导入阶段。国际上已完成 20% 掺氢的研究和应用示范, 内容涉及管道相容性校验、计量技术研究、终端用户适用性和安全性验证; 并已开始大于 30% 掺氢比的研究和示范。国外天然气掺氢标准化工作仍处于起步阶段, 尚未形成天然气掺氢技术的标准体系。

中国天然气掺氢技术起步较晚, 但发展较快, 目前正处于工程示范验证阶段。目前已有 3 个示范项目完成了 10% 掺氢技术的研究, 最高达 24%; 10%~20% 掺氢比的研究和 12 个重点示范工程正在试验/施工设计/可研/论证阶段。

人工煤气中含有高比例 H_2 能够长期安全运行, 可为掺氢天然气的应用提供借鉴。少量团体标准正在推进中, 未形成天然气掺氢技术的标准体系。

中国实现双碳战略时间紧, 任务重, 氢气储运将成为带动其他新能源发展, 联通国家能源网络的重要枢纽, 在中国实现双碳目标的道路上迈出重要一步。

2 氢气储运面临的困难与挑战

2.1 氢气对设备材料强度的挑战

李星国在《金属的氢脆及其产生机制》[1]一文中明确指出氢极易进入钢铁中, 导致钢铁氢致开裂, 且强度越高、含碳量越高, 钢铁的氢致开裂倾向越大。氢原子渗入钢铁, 破坏其晶格结构, 使得钢铁的连续性被破坏。如果气体中含有硫化氢, 该情况会更加严重。硫化氢对钢铁等材料存在着毒化作用, 它能够阻止金属表面的氢原子结合形成氢分子, 从而在某种程度上提高在钢铁表面的氢气浓度, 氢浓度的增加将会加速氢扩散溶解, 形成氢致台阶式开裂、氢诱发裂纹、氢脆, 也可能在材料中形成氢鼓泡, 加速材料的疲劳破裂, 造成破坏。

当前, 储运行业广泛采用各种钢材作为管道和设备的主要构建材料。特别是在管道领域, 趋向于采用高强度钢材。然而, 在这些管道中, 输送氢气或混合氢气与天然气可能引发相比于普通钢材更严重的腐蚀问题, 导致更难以预测的管道壁损害, 导致材料的强度降低, 并可能导致裂纹的产生。这一问题对于储运设备所使用的材料强度构成了严重挑战。

目前, 针对已建设的管道, 可以采取开洞探伤的方式, 通过在特定位置打孔来检测管道受氢气影响的

情况, 也可以通过电化学方式脱去可逆的氢气渗入, 起到对管道运行状态检测和修复的目的。

与此同时, 新建管道的氢腐蚀防护也是氢气储运研究的重点, 方向主要集中在对内防腐层的改良, 寻找高强度且对氢气不敏感的制管材料与对氢气腐蚀机理与逆向的研究。

2.2 氢气的物理性质对储运设备工作状态的挑战

氢气是最轻的气体, 并且在储运条件下表现出接近于理想气体的特性。与天然气相比, 氢气更符合理想气体的行为, 这导致在将氢气引入天然气中时, 气体的压缩性、扩散性、热力学特性以及流动性等方面都会发生相应的变化。

燃气轮机是储运工程中的核心设备, 承担了气体的压缩与输送工作。在长输管道的日常运维中, 针对燃气轮机的控制与维护是储运行业一线人员关注的重点, 故氢气的参混对燃气轮机造成的影响是氢气对储运设备工作状态造成的主要挑战。邓玄亮在《燃气轮机燃烧室天然气掺氢的燃烧特性研究》[2]中指出, 由于不同氢气比例混合燃料的绝热火焰温度、层流预混火焰传播速度和点火延迟时间等燃烧特性参数随当量比、压力和温度变化, 燃气轮机的工作状态将面临极大的挑战。随着掺氢比例的提高, 燃烧特性参数变化速率加快, 氢气含量低于 20% 时相对缓和, 20%~60% 内变化程度加剧, 需要进行燃料适应性改造; 超过 60% 时需要进行综合评估, 从 80% 变为纯氢将面临巨大挑战。

而对于阀门等其他储运设备来说, 氢气的危害也不容忽视。阀门与机械式传感器都有较为精密的活动金属部件, 这些部件在受到氢气腐蚀后, 其精度, 密封性等性能都会受到不同程度的影响, 尤其是机械强度下降带来的结构破坏, 此类损坏可能引发严重事故。

3 氢气储存与管理研究现状

3.1 不同形式的储氢方式

现有的氢气储运技术主要分为储运氢气本身和对含有氢气的氢载体进行储运两种主要形式。对氢本身进行储存可以参照天然气和煤气的储运经验, 氢气本身的苛刻储存条件是阻碍氢气直接储运的主要方面。使用载体储运能大大降低氢气本身的危险性, 但相关

储氢材料的研究，制备可能在未来难以取得有实际价值的突破。目前，各种氢气储运的形式是否能展现出

符合中国国情的价值，还有待客观条件的进一步发展才能做出判断。

表 2 氢气主要储存方式

	能量密度	储存成本	运输成本	技术难度	安全性	存取难度	基建成本	研究前景	综合评价
气态高压	低	低	高	低	一般	低	高，但可利用现有设施	有限	稳妥的技术路线
液化储存	较高	较高	较高	一般	较高	较高	一般	问题多，难度高	技术不成熟，难以大规模应用
氢储存	高	低	低	低	高	高	低	广阔	独辟蹊径的存储方式，但难以与再生能源结合
吸氢材料等	一般	不明	低	较高	不明	不明	较低	非常广阔但方向不明朗	目前与再生能源结合最好的技术路线，但研究还在起步阶段

3.1.1 气态储氢

常温常压下氢气以气态形式存在，气态存储是最直接的存储方式。目前氢气的气态存储思路沿用天然

气的存储思路，即使用储罐与地下储气库存储。但相比于天然气，氢气会严重危害没有特殊处理的金属材料，导致氢气的泄漏量远高于天然气，并且使大容量存储设备的研究、制造与维护变的更加困难。

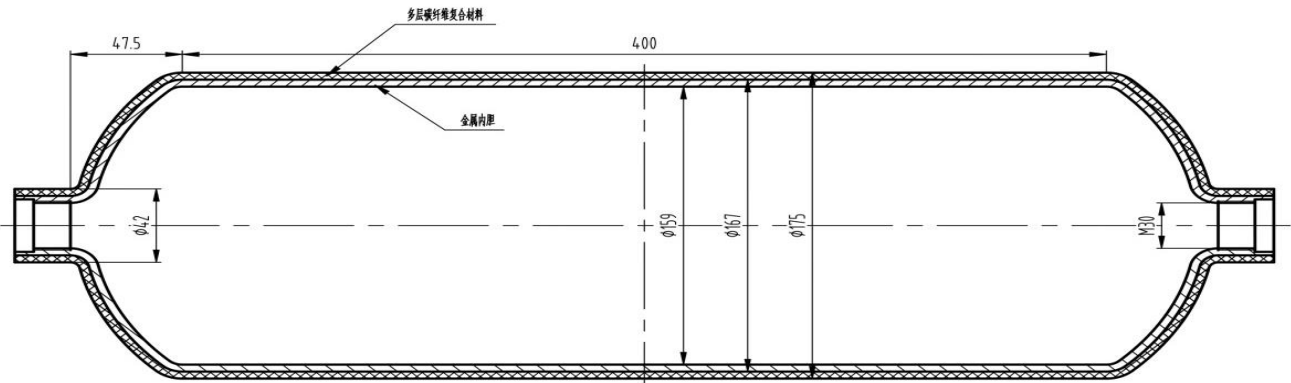


图 1 一种复合材料人造高压氢气罐

3.1.2 液化氢气储存

氢气作为能源储存介质的主要问题之一是其体积能量密度极低，而对氢气进行液化处理能有效增加氢气的体积能量密度。氢气液化之后其密度将增加约 788 倍，达到约每立方米 71 千克，故能降低储存同等能量所需的空 间。液氢的使用也存在一系列的难题，氢气液化点低至-253 摄氏度，需要氦气或其他特殊材料作为制冷剂的特殊制冷机才能达到其制冷要求，成本极高；液氢和 LNG 一样存在汽化问题，但氢气的安全风险更高，其储存容器要求极高的密封性能，耐压性能和保温性能；氢气较高的比热容和极低的液化温度导致氢气液化耗能极高，大概占氢气自身燃烧能量的 30% 左右。除去液氢本身带来的问题，其储存容器与配套设备也需在极低温度下工作。

国外发达国家，如美国 NASA 的储氢罐容量可达 4731.76m³，日本 Hytouch 神户的储氢罐容量可达 2250m³。中国自主研发的液氢储罐最高压力可达到 35MPa，单罐储氢能力为 300m³，最大存储能力约为 2500m³ [3]。

3.1.3 化合储存

(i) 氨储存

将氢气转化为氨气或液氨能规避存储与运输氢气和液氢带来的诸多问题，如氢气对材料的腐蚀与液氢的极低温度。氨气在常压下-33 摄氏度即可液化，在 20 摄氏度时约 900kpa 压力下也可以液化，相比于液氢其条件温和。使用液氨运输氢气氢气的质量密度为 17%，每立方米液氨含氢约 108 千克，体积效率约为液氢运输的 1.5 倍。氨气的储存与运输已经较为成熟，前苏联

在上世纪 80 年代就设计并建造了著名的陶里亚蒂-敖德萨液氨管道,用于为农田提供肥料。目前建造长距离,大流量的液氨管道在技术与成本上都是成熟可控的,很多国家都建设了液氨管道用于工业生产,这使得以氨作为载体存储运输氢气可以利用现有设备,无需投入额外研发成本。但氨气的裂解释放氢气的过程能耗极大,仅从燃烧热角度计算,生成同等质量水所释放的热量氨气将比氢气少约 25%。而氨气的裂解需要在 800 摄氏度以上的条件下进行,这限制了氨气作为氢气载体的广泛运用。

(ii) 氨硼烷储存

硼氮氢类化合物因其高储氢密度和适度释氢条件等特性,已成为学术界研究的焦点。代表性的化合物之一是氨硼烷,其氢含量达到了 19.6%。在实验室条件下该化合物表现出一定的热稳定性,氢气释放程度相对较低。尽管氨硼烷的生产、氢气释放机制以及再生方法目前仍存在多种问题,但作为小规模氢气储存和运输介质,氨硼烷具有巨大的潜力。

(iii) 镁基固态储氢

氢化镁具备高储氢密度和低成本,可通过热解和水解 2 种方式来供氢,因此被认为是一种极具应用潜力的储氢材料,但其商业化应用最大的挑战是热解吸放氢动力学缓慢、温度较高,而水解转化率较低。张秋雨等开发了包括材料组分改性、微观结构优化、反应条件改善等方法来提升镁基材料的吸放氢性能及水解产氢性能,取得了卓有成效的研究成果[4]。

用镁合金来解决氢能储运,对中国而言有着天然的优势。中国拥有丰富的镁资源,约占全球镁资源的 50%左右,且不需大量进口。目前,中国的金属镁产量占全球产量的约 90%。这一优势资源使中国在解决氢能储运方面具备天然的优势。通过充分利用这一资源优势并结合技术创新,中国可以推动氢能产业迈向新的高度。目前,中国已成功研发出基于镁合金的固态氢储运车辆,其最大储氢容量可达 1 吨,相当于传统高压气态长管拖车的四倍,而运输成本仅为传统方法的约三分之一。

3.2 氢气管理方式

为确保高压氢气储存和运输设备安全运行,必须严格按照设备使用管理标准对设备进行管理和使用。

(1) 设备安全管理:建立完善的安全生产管理制度和技

术档案,加强设备安全检查和维护保养,确保设备的稳定运行和安全使用。

- (2) 储氢过程管理:严格执行储氢过程的操作规程,确保储氢过程稳定、安全和高效,避免氢气泄漏和爆炸事故。
- (3) 设备运行监测:通过实时监测系统对设备的运行状态进行实时监测,并及时进行故障排查和处理。
- (4) 储氢设备维护保养:及时进行设备的维护保养工作,包括氢气泄漏检查、气体干燥处理、压力调整和替换氢气储存罐等。
- (5) 使用培训和安全教育:对操作人员进行储氢设备使用培训和安全教育,提高他们的操作技能和安全意识,有效降低氢气储存的风险和危害。
- (6) 氢气储存罐管理:加强氢气储存罐的管理和使用,避免罐体损伤、罐阀损坏、泄漏和意外事故等。
- (7) 故障处理和应急措施:建立完善的应急预案,及时处理设备故障和突发事件,并采取有效的应急措施保障人员和设备的安全。[5]

4 氢气输送安全研究现状

4.1 储氢设施防爆研究现状

小规模氢气使用在中国广泛存在并且有相对丰富的国家标准。沈阳气体压缩机厂的氢气压缩机学习小组在《氢气压缩机材料的选用与防爆》[6]中提到,根据实地调查,即使在运行了三十年以上的氢气压缩机中,其压缩机主体,压缩机辅机以及压缩机配套管路均未发现有氢气腐蚀造成的破坏现象,也没有发现“氢脆”的破坏。小批量氢气运输以钢瓶装高压氢气为主,在设备与人员充分接地且进行抗静电处理后几乎能完全消除氢气爆炸风险。

中国针对大规模氢气储运的防爆研究还处于空白状态,主要原因是中国目前没有建设大型储氢设施,此类设施的研究与建造技术尚不成熟,制氢,运氢与用氢等配套设施也还处于研究与实验阶段。

大规模氢气储存的难点在于密封和通风。氢气的爆炸极限广,氢气在空气中浓度在 4%到 75%之间都会遇明火爆炸,而氢气的泄漏在现有技术条件下是难以避免的。要避免氢气爆炸,除去进行防静电处理和对电气设备进行防爆处理外,将氢气浓度保持在爆炸极

限范围外是重要的防爆手段。通过增大氢气浓度使其超过爆炸极限的方法浪费和污染极大，而且并不能消除爆炸危险，故应该将氢气浓度控制在4%以下，这需要通过改进储罐材料来降低氢气的泄漏量，同时改进通风设备，持续通入足量的新鲜空气降低室内氢气浓度。大规模储氢设施要额外注意氢气的聚集，氢气是最轻的气体，非常容易聚集在设施顶部，形成通风的死角，无论该死角处氢气浓度如何，该氢气聚集处一定会形成浓度处于爆炸极限范围内的气体交界面，产生爆炸隐患。在设计储氢设施的通风系统时，必须仔细规划气体流动路径，防止设施顶部出现死角，消除此类隐患。

4.2 储氢设施消防系统研究现状

氢气消防系统在国内的研究也几乎处于空白状态，氢气宽广的爆炸极限决定了氢气几乎不可能像石油或者天然气一样通过燃烧产生火灾，而是通过爆炸或燃烧破坏氢气容器产生爆炸引发火灾。消防设施的建设思路可以分为提前预防和事后补救两种思路。预防包括防止氢气爆炸，限制可燃物进入储氢设施，在储罐外壁添加防火层，使用隔板分隔储罐等措施；事后补救则需要消防系统在氢气爆炸后仍能维持工作，需要对消防系统整体进行结构强度调整，确保其防爆抗震能力，从而保证氢气爆炸后能快速扑灭因氢气爆炸引燃的建筑与其他可燃物。除去扑灭明火之外，还需要及时切断氢气管道，防止氢气通过破口持续燃烧，引发次生灾害。

4.3 氢气泄露扩散研究现状

由于氢泄露问题真实情况的复杂性和多样性，不同状态下的氢气有不同的扩散形式，相互之间差异较大，不能混为一谈。

高压氢气泄露主要以高速射流与渗漏为主，渗漏不会发生激烈的破坏，泄漏氢气的速率相比于其他泄漏来说可以忽略不计，但氢气的渗漏会持续发生并产生自然扩散，需要人为进行干预处理；高速射流发生在高压氢气储罐发生结构破坏时，高压氢气会从破损处喷射至外界环境，高速的氢气流可能引发后续破坏甚至引发爆炸，研究表明泄漏口形状、移动源、多个射流之间的相互影响等因素都会影响高压氢气的射流扩散。

液氢极低的沸点导致液氢的泄漏扩散以两相流为

主，伴随对外界环境的低温破坏。低温液氢与外界气体的巨大温差很可能导致大量液氢急速汽化产生高压，对扩散过程产生巨大影响。液氢泄漏散 CFD 数值模拟中的两相流泄漏、相变、周围环境条件及浮力影响等问题均有待深入研究。缺乏上述问题的相关试验数据是液氢数值模型验证和应用的主要障碍[7]。

化合储存中，氢气的泄漏不在本文的讨论范围内，镁基和氨硼烷储存均处于研究阶段，其在实践中不具备讨论其泄漏扩散所需的必要资料，故本文不讨论其余形式氢气泄漏扩散的研究。

氢气在各种有限空间中的扩散规律，例如车库、地下停车场、隧道（如汽车维修站）等，仍需要深入研究。这包括但不限于对氢气泄漏的传播特性、可能引发的安全隐患以及相应的防范措施。

5 氢气储运面临的挑战

5.1 掺氢储运

5.1.1 掺氢长输管道研究面对的困难

在天然气掺氢输送腐蚀方面的研究已经发现 H₂S 和 CO₂ 含量不同影响氢气腐蚀管壁的速率。但目前国内还没有相关研究明确两者含量与比例对氢气腐蚀管壁速率的影响。

国内对于天然气掺氢输送的氢气比例尚未形成统一的认识，同时也缺乏符合实际工况的气态氢实验研究技术。未来的研究需要进一步探究掺氢比对不同管道材料在具体使用环境下的影响，并综合考虑掺氢管道的环境温度变化、输送压力等多种因素下的实际运行环境，得出安全可行且经济的掺氢比。

目前高强度钢的氢脆敏感性较差，且目前大部分钢材强度越高，其对氢气的敏感性越高。蒙波等人通过对比 X 7 0 和 X 8 0 管线钢的断口形貌，发现 X 8 0 管线钢的断口形貌表现出的氢脆特征更加明显。这可能与材料的强度有关，有研究发现，材料的屈服强度影响氢脆的程度，通常强度越高，氢脆程度也越明显[8]。未来需要开发适用于天然气掺氢输送的高强度钢。

随着中国逐步开始研究掺氢天然气管道输送的示范项目，我们应认识到在这一战略性领域，国家层面的统筹规划尚需加强。当前，相关技术标准并不完善，法律法规和产业政策等有关方面的配套支持也有待进一步完善。

实现以天然气掺氢为基础的有关产业的高质量发展,亟需制定明确的规划,并应当积极推进天然气掺氢输送系统的建设。在这一过程中,需成体系的制定中国天然气掺氢管道输送的相关技术指标,同时完善相应的政策保障体系。只有在这些方面都取得实质性进展,才能为中国天然气掺氢输送系统的全面发展奠定坚实基础。

定坚实基础。

目前,中国已经有较为成熟的水煤气和混合煤气短距离储运经验,此类煤气的氢气成分占比都较高,故相关行业的经验标准可以为掺氢气储运所借鉴,特别是室内环节的相关标准和规范。在人工煤气中含有30%-60%的H₂,当前香港的城燃管网中H₂比例为50%。

表3 国内天然气管道掺氢发展现状-香港中华煤气

燃气类型	H ₂ /%	CH ₄ /%	C ₃ H ₈ /%	C ₄ H ₁₀ /%	高热值 Hs/(MJ/m ³)	高华白数 Ws/(MJ/m ³)
内地液化石油气(20Y)	-	-	75	25	103.2	79.6
香港液化石油气	-	-	30	70	116.7	84.0
内地人工煤气(5R)	54	19	-	-	13.7	21.6
内地人工煤气(6R)	58	22	-	-	15.3	25.7
内地人工煤气(7R)	60	27	-	-	17.5	31.0
香港人工煤气	51	29	-	-	17.3	24.0

部分煤气公司在富氢燃气生产、运营方面已安全开展运行近50年,积累了丰富的经验,可以助力中国掺氢储运事业的发展。

5.1.2 使用掺氢天然气燃气轮机的研究

中国掺氢天然气燃气轮机的研究工作正在现有燃气轮机的基础上稳步开展,研究天然气不同掺氢比例下天然气工况点,功率,安全余裕等参数变化[9],并尝试通过改进燃烧室结构等方式优化燃气轮机燃烧掺氢天然气的工况[10]。

5.1.3 掺氢天然气对压缩机性能和寿命的影响的研究

目前已经有多篇文章研究天然气掺氢对压缩机的影响,发现氢气因为其能量密度的原因导致能量流量的下降是主要影响,同时氢气的掺混也会降低压缩机的工作稳定性[11]。也有文章研究西气东输压缩机的工作情况,发现温度是氢气掺混后压缩机后影响大部分压缩机参数的主要因素[12]。

若天然气掺氢技术大规模或高压氢气管道运输大规模普及,目前压缩机所用工作参数可能发生大幅变化,评价压缩机工作状态的指标也可能有所不同,而相关研究目前还处于起步阶段。

5.2 纯氢气储运

5.2.1 纯氢气储运设备发展和研究现状

鉴于氢能产业对加氢站用氢气压缩设备的紧迫需

求,2022年,由四川省重大科技专项组织四川金星清洁能源装备股份有限公司牵头,联合清华大学、四川大学、西华大学等产学研单位,开始研究用于加氢站的氢气压缩机的多场耦合压缩、高压密封、临氢状态等环境下的关键部件性能。

该研究在高压精密膜片设计和工艺、油-气耦合压缩等关键技术方面取得了突破。项目已成功申请了七项发明专利和两项软件著作权,彰显了研究的创新性。研发团队率先成功研制出了加氢站用35MPa隔膜式氢气压缩机。

该产品的整体技术水平处于国内领先地位,达到了国际同类产品水平,实现了国内从无到有的突破。目前,该产品已在四川、重庆和湖南等多个加氢站得到示范应用,实现了国产替代[13]。

5.2.2 纯氢气储运配套设备研究现状

要保证氢气储运的安全性和可靠性,需要大量相关配套设施满足氢气储运的安全需要,重点是检测氢气是否发生泄漏。

明桂嘉,欧美娅,罗艺等利用北斗卫星定位系统,提高无人机巡检过程中的定位精度,并基于LORA无线通信技术与北斗短报文通信技术,实现不同情况下无人机数据的精准传输,实现了可视化后台可对无人机巡检过程进行实时监控显示,利用系统中的应急报警功能还可对异常数据做出快速反应。[14]

张莉超,黄嘉斌,徐磊等采用亚微米厚度的商用悬臂梁,通过表面涂覆Pd膜显著提高了氢气敏感性,开发了一种高性能的光纤氢气传感器。相比双光子聚

合微悬臂梁光纤传感器，该传感器制作简单、成本低、无温度串扰，适用于氢能源电池、航空航天、核电站和深空探测等领域，具有重要应用价值。[15]

6 氢气储运发展路径和应用场景展望

6.1 氢气储运展望

6.1.1 高压氢气储运展望

目前中国高压氢气储运的难点在于材料，氢气和其他高压气体最大的区别就是氢气对于材料的破坏是微观的，氢气会从金属的晶格结构等层面系统性削减各类铁合金强度，而常规高压气体一般从宏观上对其容器施加应力造成机械破坏。如果能从微观层面防止氢气渗入金属造成破坏或抑制氢气对金属的破坏，氢气储运的难度将不会和天然气储运有太大区别，氢气的高压储运成本将会大幅下降。

6.1.2 液氢储运展望

目前，液氢储运的难点在于氢气的液化，氢气的液化需要大量能量，且需要氦气作为制冷介质，成本极高。低成本批量液化氢气的方式是液氢储运的重点难点，低成本制得大量液氢将会解决氢气能量密度低等一系列问题。

6.2 氢气储运应用场景展望

6.2.1 氢气储运在可再生绿色能源调峰上的应用

在中国碳中和计划中，将会兴建大量风光发电厂用于替代火力发电等高碳排放发电设施，但风力发电非常不稳定，太阳能发电有明显的昼夜差别，需要在能量充足的时候储存电力，并在需要时释放。目前已有的技术在储能上都有欠缺，电池组蓄电成本高，污染大，且电池损耗高；抽水蓄能需要占用大量空间，且能量密度低；动能储能还处于实验阶段，且动能储能规模小，不适合大面积推广。氢能几乎无污染，制取简单，制取成本低，相对能量密度高，易再生，是优秀的调峰能源，只要能解决氢气存储的困难，氢能就可以和绿色能源有机结合，助力中国绿色发展。

6.2.2 氢气储运在氢能源车上的运用

氢燃料汽车是未来新能源汽车的重要发展方向。而氢气的储运困难是氢燃料汽车成本的重要影响因素。燃料电池汽车比其他汽车更为精密，因此其维护成本也更高。在使用环节上，由于氢气在制备、储存、运输等过程中需要更多的技术处理。最后还要考虑配套设施，燃料电池汽车使用需要众多加氢站支持，加氢站由于需要配置大型压缩机等大型设备，成本比加油站和充电站更高。[16]若能建立起成熟的氢气储运管网，即可以大幅减少建造加氢站所需的成本，甚至可以在社区中完成充氢。

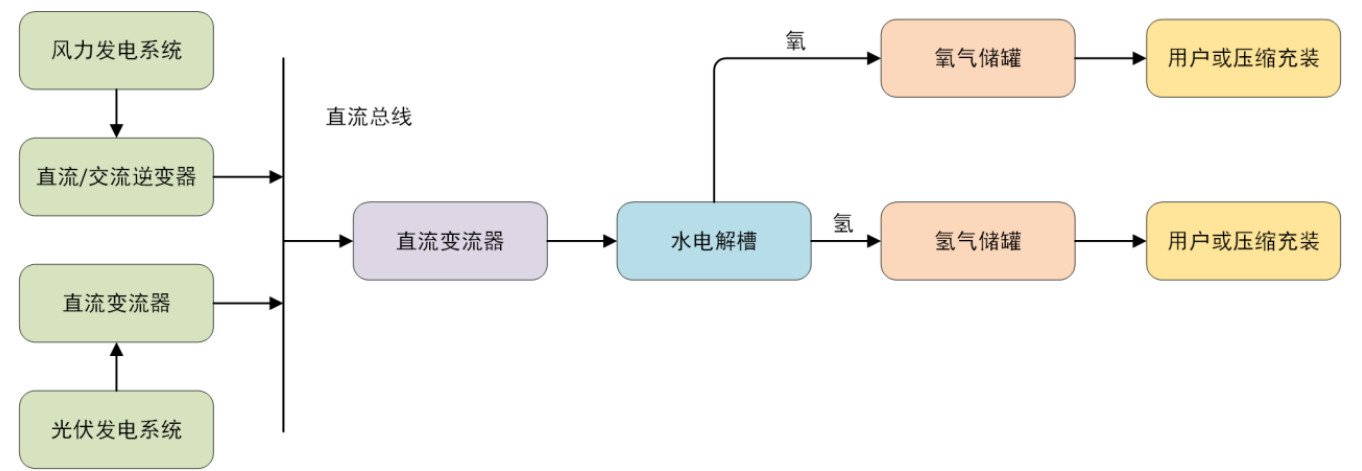


图 2 一种典型的风光发电与氢能储存结合系统

7 结论

中国氢能储运发展面临技术与资源的重挑战，但中国有非常庞大的潜在氢能市场，氢气储运的开发与研究大有可为。氢能储运将助力中国实现能源结构改革，推动中国能源体系建设，为中国实现双碳目标提供有力的支持。

参考文献

- [1] 李星国. 金属的氢脆及其产生机制 [J/OL]. 上海金属.
- [2] 邓玄亮, 孔祥领, 焦永丰等. 燃气轮机燃烧室天然气掺氢的燃烧特性研究 [J]. 节能, 2022, 41(12): 38-41.
- [3] 曹军文, 覃祥富, 耿嘎等. 氢气储运技术的发展现状与展望 [J]. 石油学报 (石油加工), 2021, 37(06): 1461-1478.
- [4] 张秋雨, 任莉, 李映辉等. 镁基固态储氢材料研究进展 [J]. 科技导报, 2022, 40(23): 6-23.
- [5] 蒋玫, 曲木阿妩. 高压氢气储运设备及其风险研究 [J]. 西部特种设备, 2023, 6(04): 7-13+41.
- [6] 氢气压缩机材料的选用与防爆 [J]. 压缩机技术, 1973(01): 35-39. DOI: 10.16051/j.cnki.ysjjs.1973.01.009.
- [7] 郑津洋, 张俊峰, 陈霖新等. 氢安全研究现状 [J]. 安全与环境学报, 2016, 16(06): 144-152. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2016.06.029.
- [8] 蒙波. 含氢天然气高压输送管道材料性能劣化及失效后果研究 [D]. 浙江大学, 2019.
- [9] 马勤勇, 钱白云, 董利江等. 掺氢比例对氢混天然气燃气轮机运行特性影响的研究 [J]. 热能动力工程, 2022, 37(09): 41-49. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.09.005.
- [10] 王阳燊旭, 陈洁, 马榕谷等. 燃氢燃气轮机燃烧室结构改进 [J]. 热力发电, 2016, 45(08): 53-57.
- [11] 陈珂, 王硕琨, 杜文海等. 天然气管道掺氢输送对离心压缩机气动性能的影响 [J]. 油气储运, 2023, 42(04): 398-406.
- [12] 牟磊, 刘海峰, 甘燕利等. 西气东输一线管道掺氢输送压缩机运行工况适应性分析 [J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(02): 133-141.
- [13] 重大科技专项成果—35MPa 加氢站用隔膜式氢气压压缩机填补国内空白 [J]. 内江科技, 2022, 43(01): 5.
- [14] 明桂嘉, 欧美娅, 罗艺等. 基于北斗的无人机氢气运输管道巡检系统 [C] //中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心.第十四届中国卫星导航年会论文集——S01 卫星导航应用. [出版者不详], 2024: 10. DOI:10.26914/c.cnkihy.2024.000212.
- [15] 张莉超, 黄嘉斌, 徐磊等. 基于镀钼微悬臂梁探针的光纤氢气传感器 [J/OL]. 激光与光电子学进展: 1-11 [2023-12-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20231214.0909.044.html>.
- [16] 2019 年中国氢能源汽车行业市场前景研究报告 [J]. 电器工业, 2019, (06): 49-55.