

氢气安全储运解决方案的关键思路

刘晓生（河北海川能源科技股份有限公司，河北 石家庄 050000）

摘要：在可持续发展背景下，世界各国在节能环保方面达成了统一共识，对于清洁能源的开发力度随之增强。氢气作为一项代表性的清洁可再生能源，是国内外能源技术发展的主流方向。但尽管氢能有着突出的优势，但是氢能的安全储运却面临着严峻挑战，在加氢站建设中，氢能储存规模不断扩大，运输过程中也伴随着一系列安全隐患，如何安全储运氢气成为氢能产业发展首要待解决的问题。本文就氢气安全储运相关内容展开分析，在了解储运中的安全问题基础上，提出合理有效的技术和方法予以解决，在保障氢气储运安全同时，助力氢能产业高水平发展。

关键词：安全储运；氢气；储运技术；节能环保；产业转型

0 引言

在社会主义现代化建设背景下，我国正处于能源结构转型重要阶段，正朝着低碳、绿色环保方向发展。以往我国能源增量主要是依托于非化石能源，尤其是可再生能源，因此需要积极深化非水可再生能源创新，以便于占据新能源战略制高点。氢气最终产物是 H_2O ，在这个过程中并不会排放 CO_2 ，因此属于一种前景广泛的情节能源。

通过氢气能源的应用，有助于充分践行节能环保战略到实处，在满足社会主义现代化发展的能源需求同时，有助于改善化石能源危机、气候环境问题。而且氢气属于优质、高效的二次能源，可以实现大规模存储和运输，呈现出广阔的发展前景。但也正是由于氢气储运技术限制，导致氢气未能得到大规模推广应用，此类问题还有待进一步深化完善。

1 氢气特性

氢气是一种清洁可再生能源，具有易燃、无臭、无色、无味的特点，常压沸点 $-252.8^{\circ}C$ ，空气中含量在 4%~74% 左右时会形成爆炸性混合气体。氢气难以在各种溶液中融化，液态氢属于无色透明液体，容易燃烧，并产生青色火焰，出现爆鸣声音，最高燃烧温度 $2000^{\circ}C$ ，同氯、氟混合后可以产生较为强烈的化学反应。

氢气作为一种质量较轻的能源，在室内使用氢气，一旦发现漏气会导致大量氢气在顶部滞留，不便排出，一旦碰到火花则会诱发严重的爆炸事故，产生巨大的损失^[1]。氢气如果直接作用在人体，吸入到人体中将会威胁到人体健康，浓度过高时甚至会导致窒息。因此，在气体分压较高情况下，具有麻醉效果，如果出现了氢气浓度过高而窒息的情

况，则要及时转运人员到空气新鲜的区域，呼吸顺畅，以此来维护人员人身安全。

2 氢气储运中的安全隐患

2.1 氢气容易泄漏、爆炸

氢气密度较小，在高压氢气储运中泄漏的几率较高。开放空间环境中，尽管安全性良好，但一旦泄漏将会大范围扩散，氢气积聚，浓度过高下回大搜之人员窒息。氢气泄漏、扩散，浓度达到一定标准后，遇到明火则会燃烧、爆炸。氢气作为一种无毒无色的气体，在白天却很少能看到燃烧状态的氢气^[2]。

2.2 压力危险

高压氢气储运设备中能量储运较大，大概在几十个 MPa 下正常使用。由于重装过量或是温度过高等因素影响，可能导致设备强度不足出现爆炸事故，威胁到人员人身安全。车用储氢容器频繁重复充装，一旦出现裂纹则会快速延伸扩展，并且诱发很多新的裂缝，为储运装置带来疲劳损坏^[3]。

2.3 充装危险

在氢气储运过程中，随着压力下降，会有大量的热量释放，并且在热量传递期间促使设备连接位置升温。如果温度过高，可能会威胁到充装人员人身安全，原本的设备承压材料也将发生改变，致使承压能力受到不同程度的影响。高压氢气储运设备管理、设备使用环境以及人员培训等因素，均在不同程度上影响着储运设备运行安全^[4]。

3 氢气储运方式比较分析

就目前常见的氢气储运形式来看，具体表现在以下几个方面。

3.1 高压气态储氢

在众多的氢气储运方式中，当属高压气态储氢

方式最具代表性,通过高压将氢气压缩存储到储气瓶中,压力大概在 35MPa~70MPa 范围内。依据不同的氢气储运需要选择不同的高压气瓶,主要是以车载储氢气瓶、固定式储氢容器以及移动是氢气运输气瓶等^[5]。

I 型、II 型储氢瓶具有鲜明的优势特点,单位质量储氢量较少,会形成氢脆效应,运行中可能诱发失效问题,因此并不适合采用车载氢瓶;III 型和 IV 型气瓶选择玻璃纤维、碳纤维等材料,有别于金属内胆气瓶质量更轻,具有突出的耐疲劳性能,因此要选择性能良好的塑料材料,增强氢气相容性。所以,车载储氢瓶多为 IV 型和 III 型,相较于国内,国外已经实现车用领域的 IV 型储氢瓶 70MPa 应用,而国内则是 35MPa III 型瓶较为常见。

由于高压气态储氢技术具有能耗低、成本低和难度低的优势特点,因此属于国内发展较为成熟的储氢技术,与当前的氢能产业发展趋势相契合,因此国内外均得到了广泛应用。但同时,此种技术却由于体积比容量低的过多,氢气存储总量较小,因此整体安全性能偏低。目前国内主要是选择钢材制成的氢气瓶,储氢压力 15MPa 时氢重量也仅仅站总体 19% 左右,但如果淘汰钢材,选择高强度奥氏体材料可以提升到 2%~6% 左右^[6]。

3.2 液态储氢

液态储氢形式,相较于高压储氢方式而言,是将氢气低温液化后存储,液态氢密度相较于标况下的氢气密度更高,即便是 90MPa 其密度大概是液态氢密度 60% 左右。液态氢能量最高位 10.05MJ/L,相较于气态氢则在 2 倍以上。所以,液态氢相较于气态氢而言,储运优势更加鲜明,尤其是储氢密度大、能量密度高,同时具有运输便捷的优势特点,呈现良好的发展前景。但有别于其他液态气体而言,液化后的氢气沸点大概在 20.37K,温度偏低,同储运环境存在较大的温差,所以液态氢对于储运容器的绝热性能有着更高的要求。在储氢期间,可能受到诸多因素影响出现自然挥发、热漏损以及耗能过高的特性,因此要求储运容器具有较高的密封性能,以目前的技术条件来看,大规模实现液态氢工业化应用还有很大的难度,有待进一步优化完善^[7]。

一般情况下,液态氢主要是选择液氢储罐存储,此种容器绝缘性能优良,主要是选择真空绝热方式存储。固定式储氢罐的形式多样,主要是以圆柱形和球形为主,但液氢储罐表面积较小,漏热蒸发损

失也将随之下降,因此目前主要是以球形储罐形式最佳。

美国的液氢储运技术水平较高,NASA 主要是选择大型球形液氢储罐,直径在 25m 左右,容积最高可以达到 3800m³。相较于国内的液氢储运技术,国外的液氢处于方式已经趋于成熟,尤其是在大容量和长距离运输方面有着突出的优势。目前液氢储运技术已经凭借其优势广泛应用到载人汽车、货运卡车以及航空航天领域,但由于配套技术成本高,因此多采用高压气态路线。而国内的液氢政策和技术标准不合理,还有待进一步创新优化^[8]。

3.3 储氢材料储氢

就储氢材料储氢技术而言,选择固体储氢材料来储运,如有机液体材料、稀土合金等材料,采用化学储氢和吸附储氢等方式实现氢气储运和释放,但由于国内外产业化水平不高,因此正处于小规模实验阶段,有待进一步完善。就吸附储氢技术而言,通过碳质材料、金属合金、金属框架物以及水合物等材料实现储氢的目的。吸附储氢有别于其他储氢方式,具有极高的安全性,但结合目前技术限制,导致化学储氢放氢难度大,储氢密度偏低,成本更高^[9]。同时,化学储氢具有安群姓高和储氢密度高的优势,但需要配备脱氢装置、加氢装置,因此装置总体成本过高;脱氢反应效率偏低,最终的氢气纯度不高,难以满足技术标准。

4 氢气运输形式比较分析

氢气运输过程中,需要结合综合考量技术条件和经济条件选择最佳的运输方式,具体包括管道输送、长管拖车以及液氢槽车几种方式。

4.1 管道输送

基于管道输送方式来实现氢气储运,具体包括液态氢管道输送以及高压气态氢管道输送,基于管道输氢和氢油同运技术来满足氢气大规模、长距离运输。管道输送可以显著降低总体运输成本,但由于前期投资成本过高,施工难度较大,对技术要求较高,因此更适合大规模氢气运输。目前国内已经建成了多条输氢管道,如乌海-银川的输气管道共计 216km,年输气量达到 10 万 t 以上。

4.2 长管拖车运输

长管拖车方式,其中包括拖车和车头,车辆在行驶到加氢站后,可以实现车头和长管分离,长管用于储氢的容器设备。通常情况下,管束选择无缝钢瓶构成,具体尺寸的直径是 0.5m 左右,长度 10m 左右。依据设计要求,长管拖车预设压力

20MPa 左右, 储量 3500Nm^3 氢气左右。国内的加氢站以长管拖车方式为主, 经由车头运输拖车中的氢气到加氢站, 在加氢站内冷却系统、压缩系统和加注系统支持下, 实现拖车加氢。在运输过程中, 由于加氢技术要求较高, 具有成本高、加氢运输效率不高的问题, 如果运输距离达到 200km 以上, 氢气运输成本大概是 11 元 /kh 左右, 相较于煤制氢的成本高无二致, 因此更适合输送规模小、输送距离近的用户^[10]。

4.3 液氢槽车运输

采用液氢槽车运输氢气, 以液态氢形式输送, 将氢气液化后体积密度最高位 70.8kg/m^3 , 体积能量则在 10.05MJ/L , 相较于气态氢而言容量更大。液氢打车输送能力较强, 相较于长管拖车而言, 高出有 10 倍左右, 在提升运输效率的同时, 也可以降低整体成本。但同时, 此种运输方式也会增加一个液化深冷的环节, 因此对设备和工艺要求更高, 总体投资成本也将随之升高。目前国外的液氢槽罐车输送方式应用较为广泛, 但国内的应用领域存在很大的局限性, 主要应用在军事以及航天领域^[11]。

在选择合适的储运方式的同时, 也要加强其中伴随的安全风险控制。

首先, 优化结构设计。高压储氢设备中不可避免存在焊接位置, 由于操作不当可能存在夹渣和未焊头等情况, 不仅降低接头承载能力, 还会影响到设备整体使用性能和使用寿命。因此, 应该适当的减少焊接接头数量, 对于同类型、同规格的材料, 钢带性能优于薄钢板、后钢板, 因此选择钢带与薄钢板材料是最佳选择。

其次, 加强应力控制。结构曲率变化过大的区域, 所产生的应力较大, 基于优化设计, 对出清设备优化改良, 可以避免出现应力过于集中在某区域, 保证储氢容器积极效应发挥。应力水平越低, 材料缺陷敏感性越低, 如果应力水平达到一定标准, 并不会大范围扩展, 但会出现泄漏, 诱发更加严重的安全事故。

最后, 超压保护, 在选择合适的高压储氢装置基础上, 增设超压保护装置, 可以有效控制容器压力变化, 规避超压风险出现。如果设备出现超压, 基于超压控制系统可以自动化调整, 第一时间关闭氢气通道, 适当的释放一定量气体, 促使系统可以恢复到正常运行状态。

5 结论

综上所述, 氢气储运涉及到诸多环节, 在方式

的选择上应当充分考虑各种因素, 为保证氢气储运安全, 还应该综合分析其中伴随的风险隐患, 制定合理有效的措施予以防控。在安全基础上选择更加经济合理的氢气储存和运输方式, 才是实现效益最大化的合理选择。

参考文献:

- [1] 单彤文, 宋鹏飞, 李又武, 侯建国, 王秀林, 张丹. 制氢、储运和加注全产业链氢气成本分析 [J]. 天然气化工 (C1 化学与化工), 2020, 45(01): 85-90+96.
- [2] 单彤文, 宋鹏飞, 侯建国, 王秀林, 李又武, 张丹. LNG 产业视角下不同天然气制氢模式的终端氢气成本分析 [J]. 天然气化工 (C1 化学与化工), 2020, 45(02): 129-134.
- [3] 任文华. 钢罐瓶装压缩气体和液化气体的安全储运管理 [J]. 中国金属通报, 2020(04): 260-261.
- [4] 李军, 薄柯, 黄强华, 骆辉, 王红霞, 赵继瑞. 高压氢气储运移动式压力容器发展趋势与挑战 [J]. 太阳能学报, 2022, 43(03): 20-26.
- [5] 陈俊文. 中国石油工程建设有限公司获氢能储运利用领域发明专利 1 项 [J]. 天然气与石油, 2021, 39(04): 122.
- [6] 张鹏程, 胡龙, 张佳, 吴谋远, 唐诚杰. 中国西部地区开展天然气管道氢气掺输的思考 [J]. 国际石油经济, 2021, 29(09): 73-78.
- [7] 李建林, 李光辉, 马速良, 宋洁. 氢能储运技术现状及其在电力系统中的典型应用 [J]. 现代电力, 2021, 38(05): 535-545.
- [8] 王振华, 蒋军成, 尤飞, 李刚, 庄陈浩, 赵耀鹏, 倪磊, 潘勇, 李丹. 高压氢气储运设施泄漏喷射火过程预测模型及其验证 [J]. 化工学报, 2021, 72(10): 5412-5423.
- [9] 殷卓成, 杨高, 刘怀, 马青, 郝军. 氢能储运关键技术研究现状及前景分析 [J]. 现代化工, 2021, 41(11): 53-57.
- [10] 李西贵, 滕霖, 李卫东, 黄鑫. 管内障碍物位置对高压氢气泄漏自燃影响的数值模拟 [J]. 油气储运, 2021, 40(11): 1306-1313.
- [11] 林云鹏, 赵连刚. 烧碱装置副产氢气储运方式比较及加压运输方案实施 [J]. 氯碱工业, 2014, 50(04): 27-30.

作者简介:

刘晓生 (1984-), 汉族, 工程师职称, 研究方向为化工及石油天然气储运、制氢和氢气储运。