

氢气的存储和运输技术探讨

吕淑贞（广东众和化塑股份公司圣风气体分公司，广东 茂名 525000）

摘要：氢能是当下最具发展前景的二次能源之一，它将成为未来能源革命的推动者。当前，加氢站的建设已经成为氢能应用的关键一步，然而，大规模的氢能储存和运输仍然是一个棘手的问题，需要更多的技术支持和解决方案。本文旨在深入探讨当前几种常见的氢气储存与运输方式，并结合实际情况，给出一些可行的解决方案，以及液氢用于长途储运的优势。

关键词：氢气；存储；运输

“十四五”期间，我国将大力发展非化石能源，特别是可再生能源，以提升能源利用效率，并不断创新，以抢占新能源发展的先机。通过开发氢能，我们有望将全球能源结构从高温高排放的模式转变为低温、清洁、可再生的模式，从而有效地实现“3060”的碳中和目标。氢能是一种高效、优质、环保的二次能源，它具有可以大规模储存和运输的特点，因此在未来的发展中将会受到广泛的关注。储运技术是氢能利用的核心，它可以有效地推动氢气的发展和应用，但是同时，其也是阻碍氢气大规模应用的一个拦路虎。氢气的有效利用率取决于其储存和运输的成本、效率和含量。改善氢气储存和运输的效率，并减少运输费用，已经成为当前氢能源领域的主流发展方向。

1 氢气的研究优势

随着新时代的到来，我国正在加快推进能源结构的转型，以实现绿色、可持续、安全、高效的发展，并将其融入到电气化、智能化、网络化、低碳化的发展之中，以应对当前的环境挑战，“氢能”等也将成为重要议题。氢能作为未来着力发展的可再生能源，其经过燃烧会产生 H_2O ，不仅不会产生 CO_2 ，而且也不会造成任何污染，因此，它拥有巨大的发展潜力，可以说是一种理想的清洁能源。氢能是一种非常有价值的能源，它可以有效地缓解当前面临的全球危机，如环境污染、气候变暖以及化石能源短缺等，因而，它的开发与应用已经成为世界能源发展的关键。

2 氢气常见存储形式

储氢技术的发展已经成为当今氢能领域不可或缺的一部分，尤其是当面临着大量的氢气使用需求时，为了满足当前和未来的市场需求，提供一个安全、高效的储氢技术变得尤为必要。储氢技术可以分为固定应用和移动应用两种。与化石燃料相比，氢的体积能量密度更低，因此需要更大的储存容器来满足其使

用需求。因此，为了确保能够储存到足够的氢气，必须满足以下三个条件之一：①具有较高的氢气存储压力；②具有较低的氢气存储温度；③使用可以吸附大量氢气分子的材料。

2.1 高压气态储氢

通过使用高压气态储存技术，可以将氢气从低压环境中提取到耐高压储气瓶，这种容器的最大承受压力范围为 35~70MPa。四种常见的高压气瓶结构形态包括：①全金属结构；②金属内胆纤维环向缠绕结构；③金属内胆纤维全缠绕结构；④非金属内胆纤维全缠绕结构。这 4 种型式的氢气储存结构被广泛应用于多种容器中，包括移动式、固定式和车载储氢气瓶。

对于第一种以及第二种结构的储氢瓶而言，单位质量下可以存储的氢气比较少，且出现氢脆反应的可能性较高，在使用期间比较容易出现故障，因而不适宜在车载储氢瓶中应用。第三种及第四种储氢瓶采用先进的碳纤维、玻璃纤维等材料，其耐疲劳性能远超过传统的金属内胆气瓶，同时，它们的重量也极为轻巧，使用的塑料材料可以满足氢气存储的要求，其储氢密度（容重比）也达到了目前的最佳水平。由于这个原因，许多车载储氢瓶都是使用的后两种结构。根据相关调查可知，在国外，第四种结构类型的储氢瓶已经可以实现车载领域 70MPa 的应用，但是，据了解，我国这种结构的储氢瓶正面临着禁用的威胁，而 70MPa 型储氢瓶的研发仍然处于落后状态。

高压气态储氢技术具有极大的潜力，它的操作简单、成本低廉、能源消耗极少，使其在当今氢能行业中占据着重要的地位，并被全球范围内的企业所采纳和推广。

然而，这种方法的一个主要问题是它的体积比容量很小，而且储存的氢也很少，且其安全性也不是很理想。目前，我们广泛使用的是由普通钢材制作的气

瓶，当储存压力为 15MPa 时，氢的重量只占整个气瓶的 1%，而如果更换成特定的高强度奥氏体钢，它的储存量可以提升到 2%~6%。

2.2 液态储氢

液体储氢技术通过在低温条件下使氢气液化来实现。在标准大气压下，液氢的密度比氢气的密度高出数千倍，就算在压力等级为 90MPa 的情况下，气态氢的密度也远远不及液态氢的密度，前者只有后者的 60% 左右。在 50MPa 的压力下，液态氢的能量约是气态氢的两倍。因此，与气体储存相比，液态氢气的优势显而易见，它的能量密度极高，储氢密度极大，运输也极为便捷，这些特性为液态氢气的发展提供了巨大的潜力。相比然而，其他液态气体，氢气的沸点仅为 20.37K，这意味着它的温度比周围环境的温度要低得多，因此，在使用液氢作为氢能存储形态时，所选择的容器必须具备极高的绝热性能。储氢过程中的热漏损和自然挥发会消耗大量能源，而且对容器的密封性要求也更加严格，因此，要想将液氢大规模应用于工业生产，仍然是一项艰巨的任务。

液氢储罐是一种具有极高热隔离性能的特殊容器，它可以通过真空技术有效地阻隔热量，从而达到绝热保护的目的。固定式储氢罐的种类繁多，从球形到圆柱形，它们都具备良好的性能，由于液氢储罐表面积越小，则其漏热蒸发损失也会越低，因此，球形储罐更加合适。美国宇航局经常使用球形液氢储罐，其直径高达 25m，容量超过 3800m³。当前，液氢运输在国外已经变得非常成熟，并且被广泛应用。液氢的储存和运输特性可以有效地满足远距离、高容量的运输需求。当前，液氢技术已经广泛应用于航空航天领域，但是民用液氢技术，如货运卡车、载人汽车等，仍处于初级阶段，尚未取得实质性进展。

2.3 储氢材料储氢

这种储氢技术是一种利用固体材料，如稀土合金和有机液体材料，通过吸附或化学方法来储存和释放氢的方法。目前，这项技术在国内外都很少被应用，大多数都处于初级研究阶段。通过使用各种材料，如金属合金、碳质材料、水合物和金属框架，均可以实现吸附和储存氢气的目的。尽管吸附储氢具有安全性的优势，但目前的技术仍然存在一些挑战，例如化学储氢存在放氢困难、储氢密度低等问题，此外，它的成本也比较昂贵。化学储氢的优点包括密度高、安全可靠，但也存在一些不足之处，比如必须使用专门的加氢和脱氢设备，这会导致成本增加；由于脱氢反应

的效率较低，导致所得氢气的纯度无法满足预期的标准。使用储氢材料可以提供更加安全的氢气储存方式，并且在储氢方面可以表现出高纯度、高密度的优势，但是，由于它们的单位质量的氢气储存密度较低，因此需要更多的时间才能完成充装。目前，使用储氢材料进行氢能存储仍然存在重大挑战：它们会消耗大量的贵金属，材料价格比较昂贵；由于储氢材料的储氢量有限，因此它们并不能被广泛使用。

总而言之，氢气储存技术是氢能利用的关键，其成本、效率和含量等因素都将直接影响氢能的利用效果。尽管目前的技术和材料尚未达到氢能的实用水平，但我们仍将继续努力，以期能够将其应用于现实生活中。随着科技的飞速发展，氢气储存领域也取得了显著的成就，为人类社会带来了巨大的改变。氢气储存技术有多种选择，可以满足不同的需求。①相比于液化，压缩技术具有许多优势，例如高效率、低成本以及对环境的影响较小等等；②尽管液化储氢技术的成本远远超过压缩技术，但由于其具有极高的能量密度，因此已经广泛应用于航空和军事领域；③金属氢化物作为一种储氢技术，虽然存在着成本昂贵和重量沉重的问题，但它的储氢密度却是目前所有技术中最高的，可以达到 100kg/m³；④碳质吸附技术已经成为氢气储存领域的一个重要研究方向，它不仅拥有储氢机理简单、条件简单的优势，而且含量高，这些优势使得它在氢气储存领域的研究越来越广泛，但是它仍处于初期发展阶段。氢气储存技术的未来发展将重点放在提升安全性上，因此，当前正在积极探索新型存储介质材料和完善安全标准。

3 氢气常见运输形式

3.1 长管拖车运输

长管拖车是一种装载运输氢气的设备，它的后端是一个装载氢气的装置，称之为长管拖车，当它抵达加氢站时，车头和拖车部分可以实现分离，后者用来装载氢气。当前，通常使用的管道是由直径约 0.5m、长度约 10m 的无缝钢瓶构成的，这种长管拖车的设计承载压力可达 20MPa，而且它一般能够容纳 3500Nm³ 的氢气。在中国，氢气的储存和输送主要采用长管拖车，从原料站把氢气运到加氢站，然后利用站内的压缩机、冷却器和加氢装置来给汽车补充氢气。在运输过程中，由于对安全性的要求非常严格，使得使用高压气氢的效率极其有限，而且成本也极其昂贵，尤其是在 200km 的路程中，其运氢费用高达 11 元/kg，这使得它不太适合那些需要短途运输和大规模输送的客

户。

3.2 管道输送

采用“掺氢”和“氢油同运”技术，对高压气体或液体氢进行输送，可以实现远距离、大规模的氢能源输送。通过使用管道，能够有效地降低氢气的运输成本。然而，这种方法的前期投入较大，建造困难，因此更适用于点对点 and 大规模氢气运输要求。当前，中国已建成多条输氢管道，其中包括中国石化洛阳长达 25km，每年输送 10 万 t 的氢气，以及乌海 - 银川长达 216km，每年输送 $16.1 \times 10^8 \text{m}^3$ 的氢气管线。

3.3 液态氢槽车运输

液氢槽车通常适用于运输液态氢，氢气的液态体积密度高达 70.8kg/m^3 ，而其体积能量则达 10.05MJ/L ，比 50MPa 的气态氢气高出了接近 2 倍。液氢车的运输能力比传统的长管拖车提升了十倍以上，大大提升了运输效率，同时也大大降低了整体成本。然而，这种运输方式涉及到了氢气液化的深度冷却环节，且该环节对于设备、技术和能源等方面均有较为严格的标准规定。就国外的发展来看，液氢槽罐车已经被广泛地应用于多个领域，但目前在我国，它仍然主要被用于航空和军事领域。

4 氢气储运问题解析

4.1 污染

当使用目前的天然气管道运输氢气时，由于管壁的腐蚀程度尚不明确，氢气很有可能受到腐蚀性物质的污染；此外，泵和压缩机内部的润滑油也有可能造成氢气的泄漏。由于复合容器衬里的水脱气会对环境造成潜在的危害，因此，在进行输送前，应当妥善解决这一问题，做好干燥工作，且在生产期间降低含水率，以避免发生环境污染。Cheng 和其团队的研究成员对于污染对燃料电池性能的影响进行了深入的探讨，但是并未对不同的污染来源进行详细的评估。

4.2 压缩

由于氢的摩尔质量极小，其能量密度仅为天然气的 1/3，这意味着，当流速保持不变的情况下，使用氢作为压缩对象时，其所需的压缩和泵送功率要远远大于天然气。因此，为了提升压缩机叶尖的转速，必须增加额外的压缩功率，但这可能会带来其他潜在的可靠性风险。

4.3 管道中的压力波动

不管是现有的天然气管线还是特殊的氢能输送管线，由于可再生能源的生产率和氢能的需求（季节性和高峰时间）的变化，系统内部的压力波动可能会导

致管网遭受破坏。Pellegrino 和其他研究人员通过建立一个模型，研究了如何向天然气管道中注入氢气。他们的研究表明，在 P2G 的概念中，必须使用大规模的仓储设施来平衡系统的输入和输出。

5 总结

目前，高压气态储氢技术已经发展到了成熟阶段，它不仅成本低廉，而且在氢气存储领域也处于领先地位。随着氢能技术的不断发展，液化储氢技术已经取得了显著的进步，其密度、储氢量以及安全性均优于传统的高压气态储氢方式，然而，由于成本和能耗的限制，目前尚未实现规模化应用。不过，随着氢能产业的不断发展，以及相关技术的不断改进，未来前景一片光明。目前，储氢材料的应用仍处于初级阶段，这主要是因为它们的技术难度较大。

使用长管拖车作为氢能运输的一种有效途径，不仅具备节约成本的优势，而且还具备可靠性，可以满足当前氢气供应需求。气氢拖车以其低廉的价格和极佳的充放氢效率，已经被广泛应用于国内加氢站，以实现更快捷、更可靠的供氢服务。然而，随着氢能产业的不断进步和液氢运输技术的不断改进，气氢拖车运输将会逐渐被取代。液氢运输的成本要远低于管道运输，因此，在运输成本方面，液氢运输的优势显而易见。然而，因为氢气的液化过程需要大量的投入，所以综合成本很高，使用长管拖车运输可以获得最优的经济效益。

从长途运输的角度来看，相较于采用传统的拖车运输方式，液氢损耗量显著减少。这表明，在长距离运输中，使用长管拖车来长距离运输氢可能会面临一定的发展阻碍。随着氢能产业的分布越来越不均衡，未来大规模建设加氢站将会带来更多的运输挑战，因此，发展液氢槽车运输显得尤为重要。随着液氢罐车技术的不断改进和减少液氢液化和运输过程中的损耗，它将为中远距离的输氢提供更加可靠的保障，具有巨大的发展潜力。

虽然管道运氢的初期投入较大，但是随着氢能产业的发展，它的运输效率和成本优势都显著提升，因此，将它与可再生能源相结合，有可能会是未来最佳的氢气运输方案。

参考文献：

- [1] 李建, 张立新, 李瑞懿, 等. 高压储氢容器研究进展 [J]. 储能科学与技术, 2021(5).
- [2] 陈晓露, 刘小敏, 王娟, 等. 液氢储运技术及标准化 [J]. 化工进展, 2021(9).