

氢气储存及应用的发展现状

谭凯, 徐义, 高彩霞, 张杰, 李昌胜, 杨拓

湖北特种设备检验检测研究院, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年6月26日; 录用日期: 2023年7月7日; 发布日期: 2023年8月7日

摘要

去碳化在未来的能源系统中发挥着重要的作用, 以减少温室气体排放, 建立零碳社会。氢气被认为是一种有前途的二次能源(能源载体), 可以有效地转换、储存和利用, 从而为未来的应用带来广泛的可能性。氢气储存是实现清洁和可持续氢气经济需要解决的关键问题。本文介绍了多种氢气不同类型的氢气储存技术, 讨论了它们的特点, 并列举了国内外相关研究人员的储氢研究进展和成果, 最后介绍了氢气在多个领域中的应用方式, 近年来对交通运输行业的重要贡献, 展示了氢气的使用前景和价值。

关键词

氢气储存, 氢气利用, 氢气经济

Development Status of Hydrogen Storage and Application

Kai Tan, Yi Xu, Caixia Gao, Jie Zhang, Changsheng Li, Tuo Yang

Hubei Institute of Special Equipment Inspection and Testing, Wuhan Hubei

Received: Jun. 26th, 2023; accepted: Jul. 7th, 2023; published: Aug. 7th, 2023

Abstract

Decarbonization is crucial to the development of a zero-carbon society and a future energy system that reduces greenhouse gas emissions. Since hydrogen can be effectively transformed, stored, and used, it is regarded as a promising secondary energy source (energy carrier) with a wide range of potential uses. The two main problems that must be solved to create a clean and sustainable hydrogen economy is hydrogen storage. This paper introduces a variety of different types of hydrogen storage technologies, discusses their characteristics, and lists the research progress and achievements of hydrogen storage by relevant researchers at home and abroad. Finally, it introduces the application of hydrogen in many fields. In recent years, it has made important contribu-

tions to the transportation industry, showing the prospect and value of hydrogen.

Keywords

Hydrogen Storage, Hydrogen Utilization, Hydrogen Economy

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

化石资源(天然气、煤和石油)的广泛使用已经对环境产生了负面影响, 温室气体排放(二氧化碳、二氧化氮、甲烷和氧气)导致全球变暖。科学家们在埃及举行的 COP27 会议上声称, 预计 2022 年全球化石燃料的二氧化碳排放量将增加 1%, 达到 375 亿吨的新纪录。为了解决日益增长的燃料需求和排放控制问题, 寻找可再生能源作为动力能源十分必要。为了保证未来的能源供应, 需要从自然资源向清洁和可持续发展的能源平稳过渡, 找到一条生产能源的新途径。近几年已经探索了各种可再生能源, 如风能、太阳能和核能来解决这些问题, 而风能、太阳能和核能受限于天气和地点, 难以提供持续稳定的能源, 必须辅助能源储存系统。

因此, 氢燃料作为一种合理的能源载体, 广泛的研究已经致力于氢气的研究, 以期解决温室气体碳排放、节约能源以及减少空气污染等问题[1]。氢气是宇宙中最丰富的元素, 具有很高的能源效率, 单位质量的能量含量为 120 MJ/kg, 远高于汽油 44 MJ/kg [2] [3]。氢气对环境友好, 副产品只有水和热。氢是作为能源载体, 通过化学反应而不是燃烧来储存和输送, 便于终端的应用。因此, 需要考虑各种特性, 例如, 与汽油蒸气(1.4%~7.6%)和天然气(5.3%~15%)相比, 它在空气中的可燃性极限很高(4%~74%) [4]。另外, 与汽油蒸气(1.1%~3.3%)和天然气(5.7%~14%)相比, 它在空气中的爆炸极限很高($H_2 = 18.3\% \sim 59\%$)。此外, 与汽油蒸气(0.20 MJ)和天然气(0.29 MJ)相比, H_2 的低点火能量(0.02 MJ) [4]必须加以控制。最后, 与密度为 700 g/L 的汽油蒸气(37°C~205°C)和密度为 423 g/L 的天然气(-162°C)相比, H_2 的低沸点(-253°C)和液态下的低密度(70.8 g/L) [5]需要对氢燃料采取额外的安全措施。因此, 表 1 中总结了氢气、汽油和天然气的这些关键参数的对比情况。

Table 1. Summary of key parameters for hydrogen, gasoline and natural gas

表 1. 氢气、汽油和天然气的关键参数汇总

参数	氢气	汽油	天然气
密度	70.8 g/L	700 g/L	423 g/L
沸点	-253°C	37°C~205°C	-162°C
爆炸极限	18.3%~59%	1.1%~3.3%	5.7%~14%
可燃性极限	4%~74%	1.4%~7.6%	5.3%~15%

根据安全准则, 氢气可以以气态或液态形式储存在传统的加压或低温罐中。Eriksen 等人[6]总结了目前在使用间歇性可再生能源(风能和太阳能)发电的电力系统中, 氢气作为能源储存的最新技术。他们的结果表明, 虽然氢气储能系统在技术上是可行的, 但它们仍然需要大量的成本降低才能具有商业上的吸引

力[6]。除了这些传统的储氢方法，在固体中储存氢气的广泛研究显示了有希望的结果[7]。此外，氢气作为一种潜在的无碳和无污染的燃料可以用于许多方面，包括地面运输、航空和航天器，包括火箭/导弹等，或用于发电，或用于化学/制造工业的热源。它还可以作为原料元素，用于将原材料转化为增值的基础化学品和其他相关产品。

2. 氢气储存技术

储存氢气对于推动氢气在供应固定电源、运输和便携式电源系统中的应用至关重要。因此，为了实现清洁的氢经济，需要十分高效和可靠的存储技术。由于 H_2 的能量密度很低，储氢装置对体积和重量的储存量要求很高，储存 H_2 材料需要具有成本低、重量轻、良好的吸附解吸性能和可回收等特点。目前，氢气储存方法主要包括压缩氢气、氢气液化、低温压缩和固体储存等形式。

2.1. 压缩氢气

氢气的压缩是通过机械或非机械压缩机实现的，机械式压缩机(如往复式活塞、隔膜、线性马达、液体活塞)已经在工业上广泛用于许多其他气态系统、低温和离子液体的应用，并且可以依次排列以达到高压。然而，与机械压缩机相关的高维护成本、声音污染和较低的效率可能会限制它们在氢气压缩方面的使用，特别是由于氢气是高度可燃的，很容易泄漏出来。其他选择是基于非机械压缩机，如电化学、低温、低温吸附和金属氢化物压缩机。例如，金属氢化物压缩机成功地应用于氢气液化过程[8]，尽管在空间应用中规模很小。由于高压回收率(即高效率)、低维护成本和完全无声的操作，电化学压缩机可能具有广泛使用的高潜力。

高压气体钢瓶是最广为人知的储存氢气的方法，其工作压力为 200 bar。然而，为了最大限度地提高储存能力，新的轻质复合材料钢瓶已经被设计成可以承受高达 800 bar 的压力，将氢气的体积密度提高到 36 kg/m^3 。Merkids 等人[9]研究了三种不同温度(273 K、298 K 和 373 K)下压力和体积密度之间的关系明确了压力和体积密度之间的相关性，如图 1 所示。

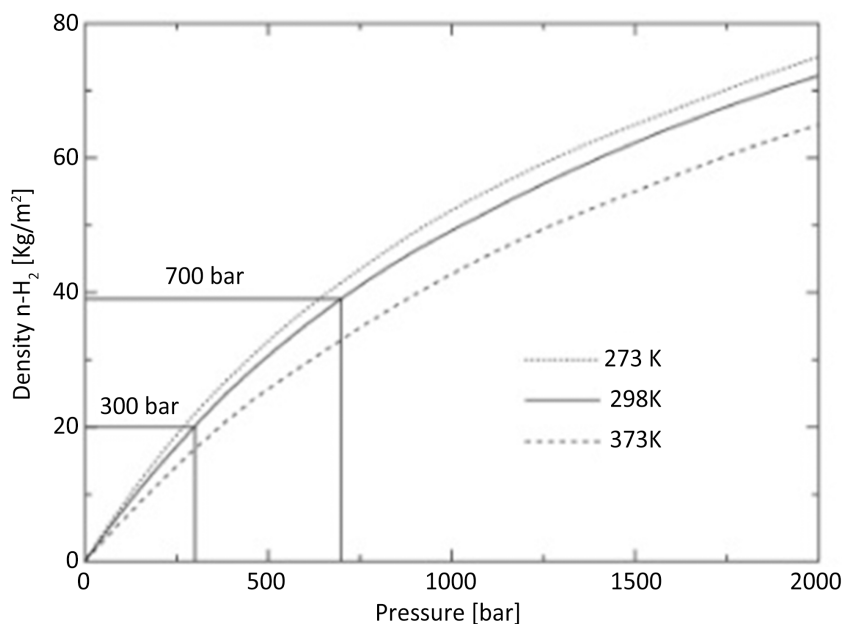


Figure 1. Pressure change versus bulk density at three different temperatures [9]

图 1. 在三个不同的温度下，压力变化与体积密度的关系[9]

体积密度并不遵循压力的线性增长, 实现高的体积密度需要非常高的压力, 存在极大的安全隐患。为了克服此安全问题, 压缩空气通常采用了另一种提高氢气体积密度的方法, 即使用液体储存。

2.2. 氢气液化

由于氢气是一种永久气体(除非在非常低的温度下, 否则不能液化的气体), 因此不能仅通过在 1 大气压下压缩来液化。为了液化氢气, 应将其冷却到临界温度(-240°C), 然后将其储存在低于沸腾温度(1 个大气压时为 -253°C)的真空绝缘容器中。通过低温冷却, 氢气的体积减少到 1/848, 从而使氢气的储存效率大大提高。氢气液化被认为是一项成熟的技术, 尽管正在进行一些改进, 特别是进一步降低能源消耗。目前全球的液态氢产量约为 355 吨/天, 最大的液化厂产量可达 34 吨/天[10]。

液体形式储存氢气是提高氢气能量密度的一种实用方法。液化过程的优点在于在常压下可以达到很高的氢气储存密度, 例如 1 bar 的饱和液态氢的密度为 70 kg/m^3 [11]。

在液化过程中, 涉及压缩机、热交换器、膨胀机和节流阀的组合, 主要包括林德循环和焦耳-汤姆森膨胀循环。在林德循环过程中, 气体在压缩机中被压缩, 随后在热交换器中进行冷却, 再通节流阀, 经历焦耳-汤姆森膨胀产生液体[12]。此外, 氢气需要在小于 -150°C (123 K)的低温条件下进行冷却[13]。低温液化是将大气条件下的气态物种变成常压且低温液体的过程。因此, 在常压或更高的压力下, 借助一些气体, 如氦气、氖气、氮气和空气, 将气态氢气冷却到 -253°C (20 K)以下, 从而实现液化[13] [14]。液态氢呈现出 70.9 g/L 的高能量密度, 而压缩气体为 42 g/L [15]。LH₂ 储罐采用了特殊材料进行高压绝缘。Wijayanta 等人[16]在储氢研究中对液态氢(H₂)、甲基环己烷(MCH)和氨(NH₃)进行了考察。液态 H₂、MCH 和 NH₃ 在储氢方面各有优缺点。液态 H₂ 的缺点在于储存过程中可能出现沸腾问题。MCH 脱氢需要消耗大量能量。而在使用 NH₃ 时, 也需要储存较高的能量。从能效比较来看, NH₃ 表现最好, 其次是液态 H₂ 和 MCH。而从成本角度来看, NH₃ 具有最低的成本。然而, 氢气沸腾和氢气泄漏是液体储存面临的巨大挑战, 需要冷库和绝缘的容器, 尽量减少液化过程中的能量损失。因此, 开发了一种结合了压缩和低温技术的新方法以减轻能量损失: 低温压缩氢气储存。

2.3. 低温压缩氢气储存

为了克服压缩氢和液态氢的储存缺点, 开发了低温压缩氢气储存的新方法。低温压缩储存是指在低温下将氢气储存在一个能在压力窗口(250~350 个大气压)内加压的容器中, 低温容器仅在环境压力附近保存液态氢[17]。因此, 随着容器压力的增加, 休眠期会大大延长。容器中的氢气在较高的温度下排出的, 因此容器具有较强的热接受性。低温压缩需要两步, 即压缩和冷却, 而压缩后的氢气的冷却会增加能量密度, 并提高储存能力。通常, 系统用氮气冷却氢气到沸点 77 K, 体积密度比冷却前增加三倍, 能允许高容量和重量级的存储。在低温压缩存储中, 存储压力和温度可以通过内部和外部热交换器进行控制。在储氢过程中, 容器和绝热装置通过膨胀获得冷却, 不需要外部冷却。低温压缩储存是比较安全的, 因为外层真空罩的设计可以防止化学和机械入侵, 使容器保持在一个稳定的非潮湿环境中[17]。然而, 低温压缩罐还没有在市场上销售。低温压缩储存氢气的休眠时间为七天, 而液态氢储存的休眠时间几乎是七倍。基于这些限制, 低温压缩氢气存储并不是最佳解决方案。

2.4. 固体储存

近几十年里, 固体材料的储氢被作为储氢的替代解决方案被广泛研究。根据材料类型的不同, 氢可以通过化学吸附、准分子形式(物理化学)或库巴斯相互作用来实现。这个方程式可以用来评估氢分子和吸附剂之间的相互作用的强度:

$$E = \frac{\beta_{\text{H}_2} \beta_s}{R^6} \quad (1)$$

其中 β_{H_2} 是 H_2 分子的极化率，而 R 是相互作用距离。复合物($\text{H}_2 +$ 吸附剂)的稳定性随着距离 R 的减少和结合能的增加而增加，如图 2 所示。

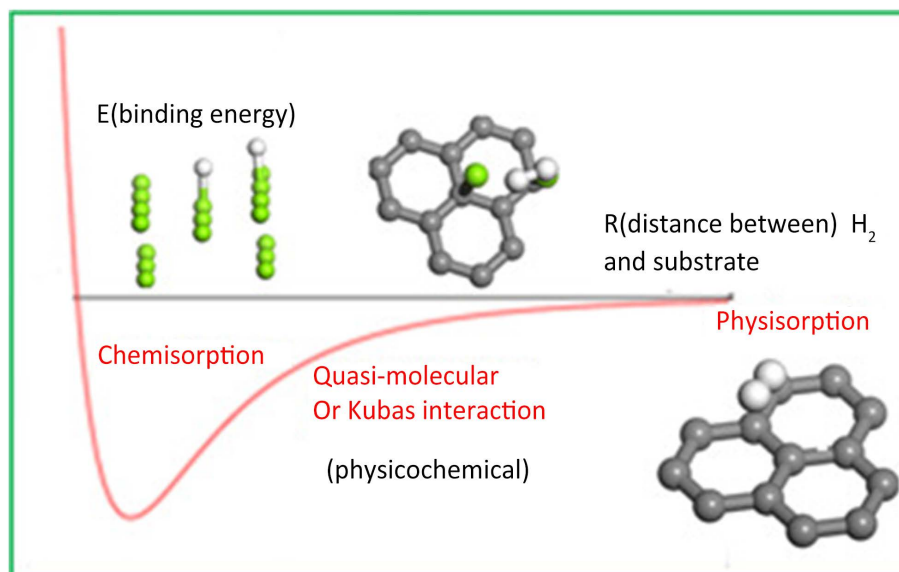


Figure 2. Summary of the strength of stability of the interaction between H_2 and the substrate as a function of the distance between H_2 and the substrate [18]

图 2. H_2 和基底之间的相互作用的稳定性强度作为 H_2 和基底之间距离的函数的总结[18]

以下将对三种储氢机制进行简要介绍，并介绍相关的研究成果以供了解固体储氢材料的发展现状。

2.4.1. 固体储氢机制

1) 物理吸附

物理吸附是发生在气相中的长程相互作用，氢原子和基底之间的平均距离($d_{\text{S-H}}$) $\geq 3 \text{ \AA}$ ，而 H_2 的平均键长($d_{\text{H-H}}$)的平均键长约为 0.76 \AA ，而且它的吸附能量在 $0.041\sim 0.105 \text{ eV}$ 的能量窗口。氢分子在沸石、富勒烯、碳纳米管、活性炭、石墨烯和金属有机支架(MOFs)等碳材料和多孔材料的表面结合力很弱，因此吸附剂在常温常压下呈现出非常低的重量密度。然而，这些碳基和多孔材料在氮气沸点(77 K)和高压($50\sim 100 \text{ bar}$)下具有足够的储氢能力。在环境温度和 $50\sim 100 \text{ bar}$ 的压力范围内，容量迅速下降，重量密度小于 1 wt\% [19]。

2) 化学吸附

化学吸附与物理吸附相反，是一种短程的相互作用。氢分子在基底上解离、迁移并形成化学键，其焓值在 $0.518\sim 1.036 \text{ eV}$ 之间，H 原子和基底原子之间的键长($d_{\text{S-H}}$) $\leq 2.5 \text{ \AA}$ 。化学吸附过程发生在金属、金属氢化物和复合氢化物，其具有较高的重量密度，例如， MgH_2 为 7.6 wt\% ， LiBH_4 为 18.5 wt\% 。尽管如此，但氢气解吸速度与解吸温度(T_D)成正比，通常解吸温度很高($T_D \geq 150^\circ\text{C}$)，不利于移动应用。

3) 物理化学吸附

随着 H_2 键长度的延伸，范围为 $0.76 \text{ \AA} \leq d_{\text{H-H}} \leq 1 \text{ \AA}$ ，吸附行为介于物理吸附和化学吸附之间，称为物理化学吸附，其结合能处于 $0.1\sim 0.8 \text{ eV}$ 的能量窗口。基于库巴斯理论，准分子形式的特点是 H_2 分子向过渡金属原子的未占 d 轨道贡献电荷，然后从过渡金属原子向 H_2 分子的反键轨道获取电荷。Niu 等人[20]证实了物理化学吸附，其极化是由带正电的金属离子产生的电场引起的。根据美国能源部(DOE)的说法，

准分子相互作用是机载应用的理想储氢形式。在合适的温度范围(-40℃至 85℃)和压力(P)窗口($P < 100$ 大气压)下, 吸附剂应至少储存 6.5wt% 的重力密度和 70 g/L 的体积密度[21]。

根据吸附剂和 H_2 分子之间的相互作用类型, 开发了各种策略来提高吸附剂在环境温度下的吸附动力学和热力学性能。例如, 在发生弱相互作用(物理吸附)的碳基和多孔材料中, 使用如辐照、过渡金属掺杂、极化、电离、培养调节(温度、压力和充电时间)、高表面积和宿主材料的大孔隙体积等手段以提高储氢能力。在室温下, 多孔碳的吸氢量很小, 并随压力线性变化。相反, 在氮气沸点附近(77 K), 储氢量与多孔材料的表面积之间存在线性关系, 与碳材料性质无关。

根据 Xia 等人[22]的研究, 在室温下, 多孔碳的吸氢量很小, 并随压力线性变化。相反, 在氮气沸点附近的温度下(77 K), 储氢量与多孔材料的表面积之间存在线性关系, 与碳材料性质无关。然而, Shulet 等人[23]发现在 77 K 和 1 bar 压力下, H_2 储存能力和表面积之间的相关性只在表面积小于 $2000 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ 时才有效, 因为 H_2 分子不能覆盖大于 $2000 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ 的表面积, 而 H_2 更倾向与更高吸引力的电位相互作用。

2.4.2. 固体储氢措施

1) 施加电场

Zhou 等人[24]表明, 施加电场可以通过极化基底而大大增强储氢能力。他们通过在带有富勒烯的氮化硼(BN-sheet)上吸附一层 H_2 分子来展示这种方法[24]。他们观察到每个 H_2 分子的结合能从无场情况下的 0.03 eV/ H_2 增加到 0.045 原子单位(a.u)电场下的 0.14 eV/ H_2 ; 一层 H_2 被吸附在 BN-sheet 上, 重量密度为 7.5 wt% [24]。另外, Zarbo 等人[25]表明, 对于可极化的大型金属有机框架(MOFs), 在外加电场中存在 H_2 分子时, 储氢能力可以翻倍。然而, 在弱极化的金属有机框架(MOFs)中, 外加电场并不明显影响氢气的吸收[25]。另外, Liu 等人[26]利用密度泛函理论研究了 $Li_2C_2H_{4+1}$ 和 TiC_5H_{5+1} 复合物中诱导的电离对储氢的影响。他们的研究表明, $Li_2C_2H_{4+1}$ 的诱导电离改善了键的强度并增加了非解离氢分子的数量。此外, $Li_2C_2H_{4+1}$ 的储氢能力(27.5 wt%)是 $Li_2C_2H_4$ 的两倍。高容量的存储可以解释为从 Li 到 C_2H_4 的电荷转移增加, 从而增强了 Li 原子周围的静电场强度。此外, Wang 等人[27]也表明, 如果 C_{60} 被 Li_2F (低电离能材料)装饰, H_2 和宿主材料之间的结合能和电子转移会得到改善。通过第一原理计算, 他们还预测了 $C_{60}(Li_2F)$ 10.86 wt% 和 59 g/L 的优良重力和体积密度[28]。

2) 过渡金属催化

此外, 使用过渡金属作为掺杂或在多孔碳基材料上的催化剂, 是提高其动力学和热力学性能, 甚至是其重量特性的另一种方式。Panigrahi 等人[29]指出, 二聚体过渡金属(M = Sc, Ti, Ni 和 V)功能化的二维 g- C_3N_4 在 0.6~0.9 eV/ H_2 范围内内增强了氢结合能。Mishra 等人[30]还指出, 原始的 GaS 的结合能是 0.09 eV/ H_2 , 在应用外部电场的存在, 相比之下, 0.19 eV/ H_2 到 0.38 eV/ H_2 的 GaS 功能化的 Li, Na, K, 和 Ca 原子。另外, Mishra 等人[31]报告了原始的二维硼砂单层和 H_2 分子之间的弱相互作用; 然而, 在碱金属的存在下, 观察到它们的结合能有明显的增强。

3) 络合氢化物

复合氢化物法一般由钠(Na)和锂(Li)组成。复杂氢化物具有较高的储氢密度和容量, 但难以安全运输。这些氢化物由铝氢化物、硼氢化物和氮化物组成。铝氢化物是含铝和 Na、Li、K (钾)、H (氢)的氢化物。这些氢化物的储氢容量约为 10 wt%。Na 铝氢化物($NaAlH_4$)具有较高的储氢量, 储氢量约为 5.6 wt%。钛(Ti)被用作加速铝氢化钠反应的催化剂。 $NaAlH_4$ 成本低、储量丰富。Chen 等人利用 Co 掺杂的纳米多孔碳支架, 这是一种提高 $NaAlH_4$ 储氢容量的新策略, 他们试图通过 Co 掺杂纳米多孔碳打开更多的自由空间来提高储氢性能[32]。铝氢化物($LiAlH_4$)具有约 10.6 wt% 的储氢容量。 $LiAlH_4$ 的热力学性质较差, 不能脱氢。Ti 被用作加速 $LiAlH_4$ 反应的催化剂。

硼氢化物具有较高的储氢能力,可溶于水。 LiBH_4 (硼氢化锂)、 $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ (硼氢化镁)、 NaBH_4 (硼氢化钠)和 $\text{Ca}(\text{BH}_4)_2$ (硼氢化钙)是金属硼氢化物中储氢密度较高的氢化物。 LiBH_4 具有 18.5 wt% 的高储氢量。 LiBH_4 在较高的分解温度和实际条件下不会发生可逆反应,不适合作为储氢材料。然而,随着氧化硅(SiO_2) 催化剂的加入,其热力学性质有所改善。通过添加 Ti 和 Mg (镁)作为催化剂,提高了储氢效率。硼氢化物($\text{Zn}(\text{BH}_4)_2$) 具有 8.4 wt% 的储氢量。 NaBH_4 具有 10.8 wt% 的高储氢量。它对分解温度的要求很高,因此不适合用于储氢。Yahya 等人对 $\text{NaBH}_4\text{-Li}_3\text{AlH}_6$ 储氢的研究中,确定了 $\text{NaBH}_4\text{-Li}_3\text{AlH}_6$ 化合物具有 6.1 wt% 的储氢容量[33]。 $\text{Ca}(\text{BH}_4)_2$ 具有 8.3 wt% 的储氢量,且反应在较低的分解温度下进行。 $\text{Ca}(\text{BH}_4)_2$ 的稳定性不如硼氢化锂。与铝氢化物不同,硼氢化物的分解反应是两阶段的,因为六水泻盐中间体不会发生在反应中。硼氢化物的最终分解产物为单质硼和二元金属氢化物。

NaBH_4 化合物在储氢方面具有重要地位,其中再生问题是一个关键议题。对于 NaBH_4 的研究十分丰富。Ouyang 等人[34]提出了一种简单、经济的方法,在 NaBH_4 化合物再生中使用 Mg。与之前的研究相比,他们成功使成本降低了到原来的 2.86%,使 NaBH_4 的再生效率达到 68.55%。Zhu 等人[35]研究 NaBH_4 的再生过程中发现,水解产物 NaBO_2 可以通过与 CO_2 反应生成硼砂 $10\text{H}_2\text{O}$ 和 Na_2CO_3 。通过添加 Mg 到生成的化合物中,可以高产率地生成 NaBH_4 。研究表明,相比较使用金属氢化物的研究,这种方法降低至原材料成本的 4% [36]。Zhong 等人[36]使用廉价的 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 合金,并达到了约 72% 的 NaBH_4 再生效率。而 Zhong 等人[37]的研究结果显示,以 MgH_2 为还原剂的 NaBH_4 再生方法,相较于使用金属氢化物的研究,成本降低至 3.22% [37]。因此,在 NaBH_4 的研究中,实现了单级制氢和储氢,并且原料成本显著降低。

3. 氢气的应用

氢气是一种潜在的无碳和无污染的燃料,它与氧气燃烧后产生水蒸气,而不是二氧化碳或其他污染物,如氮氧化物。氢气可以作为燃料应用于诸多方面,包括地面运输、航空和航天器、发电、化学/制造工业的热源,它还可以作为原料元素转化为增值的基础化学品和其他相关产品。

3.1. 地面运输

3.1.1. 轻型车辆




公路运输,包括汽车、公共汽车和卡车,占了运输部门温室气体排放的四分之三。目前,氢燃料电池轻型汽车正处于商业化的早期阶段,世界上不同的汽车制造商已经推出了几种车型,以取代内燃机车型。然而,这些车辆的销售成本还不具有竞争力,而且缺乏分散的加氢站网络的基础设施问题,制约了氢燃料电池汽车的商业化普及[38]。

丰田、现代和本田是氢燃料电池乘用车的主要制造商[39],表 2 比较了他们最畅销车型的各种技术规格。它们采用了由复合材料组成的罐体,并基于技术成熟度、重量效率和成本方面的考虑,解决了车载压缩氢气存储所带来的技术问题[40] [41] [42] [43]。罐体由一个完全包裹着纤维缠绕层的薄聚合物衬垫组成,最先进的车载储氢技术能在高压下运行 35 或 70 MPa [44]。

3.1.2. 重型车辆

尽管呈现出不同的操作条件和驾驶周期,氢燃料电池在重型车市场也显示出巨大潜力,但重型车辆具有更高的动力输出、耐用性和燃料效率的需求。典型的短途低速旅行的轻型乘用车通常用电瓶和增程装置来管理,但长途重型车辆需要更高的利用率,对氢气动力源有较强的需求。随着许多主要城市中心计划禁止柴油卡车,MAN、Scania、VDL 和 Hyundai 等车辆供应商着手开发了氢燃料电池卡车。对氢燃料电池卡车的车载氢气储存的设计空间评估论证了采用 IV 型氢气储罐的可行性,其能满足不同市场领域的需求,同时正探索不同的操作压力和车辆组合[46]。

Table 2. Specification comparison of three best-selling models of FC cars [45]**表 2.** 三种最畅销型号的 FC 汽车的规格比较[45]

描述	Hyundai 2019 Nexa	Toyota 2018 Mirai FCV	Honda 2017 Clarity FCV
图片			
单次充电续航里程(m)	370	312	366
氢气罐质量(kg)	6.33	5.00	5.46
电机(kW/lb.ft)	113 kW/291 lb.ft	120 kW/247 lb.ft	100 kW/256 lb.ft
最大输出功率(hp)	163	154	1744
最大扭矩(km·m)	40.3	34.2	30.6

氢燃料电池巴士同样引起了极大的关注，并成为公共示范工具和全面验证的研发数据来源[47] [48]，特别是一些政府行动和资助项目的实施，例如欧洲 CUTE (欧洲清洁城市交通)巴士计划、美国国家燃料电池巴士计划、韩国氢经济路线图[49]等。车载油箱通常储存在公共汽车的车顶，较高的空间利用率允许在 35 MPa 下储存，减少了油箱和压缩成本[50]。表 3 对比了不同主要制造商开发的氢燃料电池巴士的技术规格。

Table 3. An overview of the main characteristics of FC buses currently in use in European cities [51]**表 3.** 目前在欧洲城市使用的 FC 巴士的主要特征概述[51]

巴士种类	Van Hool Bus	Evobus	Solaris	Wright Bus
	标准	标准	联接式	带超级电容器
巴士长度(m)	12/13	12/13	18.75	12
燃料系统(kW)	150	120	100	75
电池系统(kW)	100	250	120	-
超级电容器系统(kW)	-	-	-	240
氢气储存系统	7 tanks, 35 MPa	9 tanks, 35 MPa	9 tanks, 35 MPa	4 tanks, 35 MPa
满载容量(kg)	35	35	45	33

比利时的 Van Hool 公司凭借 A330 车型确立了自己的市场领导者地位，在欧洲和美国都有氢燃料电池公交车在运营。韩国现代公司自 2019 年起开始商业化 Elec City 燃料电池，已有 100 多辆投入运营。同时，欧洲不同的公交运营商也进行了在役试验[52]。Wrightbus 在英国开发了世界上第一个双层氢燃料电池巴士[53]。VDL Bus & Coach 在 2011 年交付了氢燃料电池巴士，作为其示范活动的一部分。在氢燃料电池巴士上增加了一个拖车，容纳了燃料技术，以延长续航能力[54]。

3.1.3. 管道拖车

高压管拖车是氢气运输物流的一个重要组成部分。随着氢燃料电池电动汽车的推广，广泛提供加气站成为高效运行的关键问题。目前，可用的管道基础设施非常有限，主要集中在大型工业用户，如石油炼制厂和化肥厂[55]。利用管道拖车可以为需求量较低的客户提供更经济的输送模式，并在离生产地点的合理距离(小于 100 英里)设立加油站。此方案能在加氢站的早期和广泛布局方面发挥重要作用，并针对气体压缩和储存有关的成本进行优化。

典型的管道拖车将 6~15 个压力容器封装在一起[56]，压力容器主要有钢制和和复合材料制。钢制管状拖车(I 型罐)是一种常见的配置，最大氢气有效载荷约为每辆拖车 250 kg，尽管存在有限容量的限制。复合材料压力容器为管式拖车提供了更高强度和更低重量的解决方案，但是成本更高。目前，III 型和 IV 型的压力容器已被采用，可以提供超过 1000 kg 的有效载荷[55]。

在全球范围内，多家企业参与到管道拖车运送气态氢的应用中。空气产品公司(Air Products and Chemical Inc.)可能是牵头公司，与美国交通部(DOT)和欧洲城市氢运输(HyTEC)项目合作，参与了复合材料管拖车的开发和验证项目 ILJIN HYSOLUS 是现代 Nexo 的氢气罐的执行供应商，其 IV 型氢气管拖车已获得全球认证。川崎集团在日本新能源产业技术综合开发机构 NEDO 的支持下，开发了日本第一辆带有 III 型复合气瓶的氢气管拖车，能在 45Mpa 的压力下运行[57]。

3.1.4. 燃料站

发展可靠的燃料加注基础设施是在运输中使用氢能源的基石。压缩、储存和分配是气态氢气加注过程的关键阶段，对客户支付的燃料成本有直接影响。在加氢站中，存储系统不仅在本地存储压缩气体，解决日常运营中燃料供需不匹配的问题，而且在加速加注过程和避免压缩机频繁启动/停止方面也发挥了作用。

氢气站的储存系统设计主要有两种类型：缓冲式和级联式储存，通常都采用几组压力容器的配置。在缓冲储存中，所有的燃料储存缸都连接在一起，并始终保持同一压力。在级联存储中，气体通常在低、中、高压三个储气罐之间分配，车辆加注过程中，车载油箱按压力递增的顺序交替连接到不同的储气罐。级联储能系统在高压加注情况下显示出较低的能耗，而缓冲储能呈现较短的加注时间。储罐是加氢站的核心要素。考虑到轻型车辆在 70 Mpa 下运行时的加注，级联系统中的高压存储通常可以在 90~100 Mpa 下进行，以确保短时间内加注所需的压力差。

3.1.5. 铁路

无论是商品运输还是乘客运输，使用柴油推进系统的传统机车一直是工业化国家铁路运输的基础。然而，燃料电池动力机车被认为是有前途的环境友好的选择，以实现快速和持续的脱碳。预计燃料电池火车和有轨电车在长距离和高功率需求的情况下会有良好的表现，并且与电力和混合柴油 - 电力配置相比，基础设施成本更低。

第一个功能性氢燃料机车是 2002 年在魁北克省 Val-d'Or 展示的 3.6 t/17 kW 的地下采矿车辆。它使用 3 kg 的金属氢化物储存，是由美国和加拿大政府与 Vehicle Projects LLC 公司共同开发的[58]。作为最初的关键发展里程碑，2006/2008 年，东日本铁路公司试用了一辆氢燃料轨道车，130 kW 的氢燃料系统/19 kW·h 的电池，气态氢储存 35 Mpa [59]。2006 年，日本铁路技术研究所对氢燃料轨道车进行了运行测试，该车由美国/意大利 Nuvera 燃料电池公司制造，120 kW 氢燃料电池系统，36 kW·h 电池，18 kg 气态氢储存 35 Mpa [60]。由 BNSF 铁路公司和美国国防部资助的北美合作项目推出了用于城市铁路应用的燃料电池混合机车原型，130 t，240 kW 的氢燃料电池系统/最大功率为 1.2 MW，70 kg 气态氢储存 35 Mpa [60]。

JR-East 在 2019 年宣布正在开发使用丰田的氢气燃料电池技术的两厢列车，2021 年进行试验，预计在 2024 年实现商业化。斯塔德勒正在生产美国第一辆氢动力火车，预计将于 2024 年在加利福尼亚州圣贝纳迪诺县投入使用。TIG/m 公司目前正在向迪拜和阿鲁巴政府提供世界上第一辆使用氢燃料电池的市政电车。自 2012 年以来，已经交付了三辆混合电池/燃料电池车。现代 Rotem 公司已经宣布进入氢气列车市场，目前正在为蔚山市的城市铁路网开发韩国第一辆氢气动力轻轨车。

目前的氢动力客运列车采用了不同的车载存储系统解决方案，压缩气态氢系统是最常见的，其工作

压力值从 30 到 70 Mpa 不等。市场供应和成本较低的重型车辆的成功应用使得 35 Mpa 的系统成为铁路上最常使用的配置, 实现了大约 1000 公里的范围。例如, HydroFLEX 项目中使用了 36 个 Luxer III 型氢气罐, 这是英国第一辆全尺寸的氢动力示范列车[61]。JR-East 和丰田的合作项目计划使用 70 Mpa 的 IV 型储氢罐[62]。

3.2. 航空航天

全球民用航空业已经确立了一项长期的气候承诺, 即到 2050 年实现净零碳排放, 可持续航空燃料(如氢)在其能源转型战略中发挥了重要作用, 因为电池对于航空来说仍然过重。预测氢气在航空领域的应用可以分为两个主要方向: 第一个方向是氢气作为燃料替代大型飞机的燃油, 第二个方向是采用氢气和燃料电池系统来推进小型飞机。燃料电池也有可能取代柴油作为飞机辅助动力装置的燃料, 并取代为其他设备和系统供电的电池。为机场的地面支持设备供电也被认为是将燃料电池技术整合到航空业的一个可行方式。

氢气和燃料电池在载人飞机上使用的主要里程碑可以追溯到过去 20 年。2008 年, 波音公司进行了第一架载人燃料电池飞机的飞行测试, 即 Diamond DA20, 一种改良的双座机动滑翔机, 混合动力: 氢燃料电池/锂离子电池。空客公司随后成功应用燃料电池系统为空客 A320 的辅助液压和电力系统提供动力, 激活了副翼、方向舵和其他飞行控制系统。2009 年, 德国航空航天中心(DLR)开发了机动滑翔机 Antares, 这是世界上第一架仅通过采用高性能燃料电池(25 kW, 5 kgH₂, 35 bar)的载人飞机[63]。欧盟 ENFICA-FC 项目开发的 RAPID 200-燃料电池飞机采用了一个完全的电力混合动力系统(20kW 的氢燃料电池, 35 Mpa 的 H₂ 存储和一个 20 kW 的 Li-Po 电池, 并完成了几次飞行测试, 打破了电力驱动飞机的世界速度记录[64]。由 DLR 开发的以氢燃料电池为动力的四座飞机 HY4 (9 kgH₂, 4 × 11kWFC 和 2 × 10 kW·h 电池), 在 2016 年完成了首飞[65]。

目前, 几个研发团队正致力于进一步开发航空用燃料电池推进系统。HyFlyer 项目计划通过优化高功率燃料电池使中型/小型客机脱碳。在 ZeroAvia 的领导下, 一家位于加州的初创公司与英国政府的航空航天技术研究所(ATI)项目合作, 完成了由氢燃料电池驱动的商业级飞机的首次飞行, 这是一架改良的螺旋桨派珀 M 级六座飞机。2021 年, 通用汽车公司和利勃海尔 - 航空航天公司联合开发飞机应用的氢燃料电池动力系统。该项目专注于商用飞机, 不以推进力为重点, 但计划用燃料电池驱动辅助动力装置, 以取代飞机电气系统的辅助动力装置[66]。空客 ZEROe 项目已经公布了世界上第一架零排放商用飞机的三个概念, 采用氢气作为主要动力源。它们计划利用氢燃料电池来补充改进的燃气轮机动力, 提供一个高效的混合电力推进系统, 期待在 2035 年前投入使用[67]。

使用燃料电池作为主要的能源推进来源, 对无人驾驶飞行器(UAV)和自主遥控飞机来说变得非常流行, 能够执行越来越困难和多样的任务。采用燃料电池可以减轻传统无人机推进系统的重量, 并降低噪音和振动, 同时解决环境问题。例如, 在相同的能量容量下, 氢燃料电池无人机的重量可以比锂离子电池的重量低 3.5 倍[68]。

此外, 氢气在太空项目中已经使用了 50 多年, 它被用作火箭燃料/推进剂以及火箭发动机的再生冷却剂。此外, 基于空气中的可燃性范围广、点火快、比热容高等特性, 氢气也被认为是超音速飞机应用的合适选择, 在民用方面已经进行了少数研究来测试其性能, 特别是在 2.2 至 2.7 马赫数之间。使用氢气作为航空燃料需要在安全、成本和总体可行性方面进行进一步研究, 这些研究都在进行中。

4. 总结

氢气由于其固有的特性可能成为未来的燃料, 也是无碳动力技术的关键推动力之一。如果能找到一

种清洁、可持续和具有成本效益的氢气生产和储存方法，就能加速氢气经济的到来。因此，本文对氢气储存技术及其应用场景进行了详细讨论。本文讨论了压缩氢气储存、氢气液化储存、低温压缩氢气储存和固体储存等不同储氢方式的特征，对最新的固体储氢技术进行了详细论述并列举了国内外相关研究进行分析，总结了储氢方式的优势和不足。最后，详尽地介绍了氢气在交通运输等领域的广泛应用。随着可再生能源成本的下降，以及对无碳能源系统的强劲推动，氢能以其巨大的潜力吸引了深度的关注，这势必会加速推动氢气经济的到来。

参考文献

- [1] Qureshi, F., Yusuf, M., Kamyab, H., *et al.* (2022) Current Trends in Hydrogen Production, Storage and Applications in India: A Review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **53**, Article ID: 102677. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102677>
- [2] Ji, M. and Wang, J. (2021) Review and Comparison of Various Hydrogen Production Methods Based on Costs and Life Cycle Impact Assessment Indicators. *International Journal of Hydrogen Energy*, **46**, 38612-38635. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.142>
- [3] Ma, Y., Wang, X.R., Li, T., *et al.* (2021) Hydrogen and Ethanol: Production, Storage, and Transportation. *International Journal of Hydrogen Energy*, **46**, 27330-27348. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.027>
- [4] Hosseini, S.E. and Wahid, M.A. (2016) Hydrogen Production from Renewable and Sustainable Energy Resources: Promising Green Energy Carrier for Clean Development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **57**, 850-866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.112>
- [5] Hirscher, M., Yartys, V.A., Baricco, M., *et al.* (2020) Materials for Hydrogen-Based Energy Storage—Past, Recent Progress and Future Outlook. *Journal of Alloys and Compounds*, **827**, Article ID: 153548. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153548>
- [6] Egeland-Eriksen, T., Hajizadeh, A. and Sartori, S. (2021) Hydrogen-Based Systems for Integration of Renewable Energy in Power Systems: Achievements and Perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, **46**, 31963-31983. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.218>
- [7] Dematteis, E.M., Barale, J., Corno, M., *et al.* (2021) Solid-State Hydrogen Storage Systems and the Relevance of a Gender Perspective. *Energies*, **14**, Article 6158. <https://doi.org/10.3390/en14196158>
- [8] Lototsky, M.V., Yartys, V.A., Pollet, B.G. and Bowman Jr, R.C. (2014) Metal Hydride Hydrogen Compressors: A Review. *International Journal of Hydrogen Energy*, **39**, 5818-5851. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.01.158>
- [9] Makridis, S. (2016) Hydrogen Storage and Compression. In: Carriveau, R. and Ting, D.S.K., Eds., *Methane and Hydrogen for Energy Storage*, The Institution of Engineering and Technology, London, 1-28. https://doi.org/10.1049/PBPO101E_ch1
- [10] Krasaen, S., Stang, J.H. and Neksa, P. (2010) Development of Large-Scale Hydrogen Liquefaction Processes from 1898 to 2009. *International Journal of Hydrogen Energy*, **35**, 4524-4533. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.109>
- [11] Andersson, J. and Grönkvist, S. (2019) Large-Scale Storage of Hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, **44**, 11901-11919. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.063>
- [12] Christou, C., Hadjipaschalis, I. and Poullikkas, A. (2008) Assessment of Integrated Gasification Combined Cycle Technology Competitiveness. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**, 2459-2471. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.010>
- [13] Valenti, G. (2016) Hydrogen Liquefaction and Liquid Hydrogen Storage. In: Gupta, R.B., Basile, A. and Veziroğlu, T.N., Eds., *Compendium of Hydrogen Energy*, Elsevier, Amsterdam, 27-51. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-362-1.00002-X>
- [14] Zhao Y.X., Gong, M.Q., Zhou, Y., Dong, X.Q. and Shen, J. (2019) Thermodynamics Analysis of Hydrogen Storage Based on Compressed Gaseous Hydrogen, Liquid Hydrogen and Cryo-Compressed Hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, **44**, 16833-16840. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.207>
- [15] Sheffield, J.W., Martin, K.B. and Folkson, R. (2014) 5—Electricity and Hydrogen as Energy Vectors for Transportation Vehicles. In: Folkson, R., Ed., *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*, Woodhead Publishing, Cambridge, 117-137. <https://doi.org/10.1533/9780857097422.1.117>
- [16] Wijayanta, A.T., Oda, T., Purnomo, C.W., Kashiwagi, T. and Aziz, M. (2019) Liquid Hydrogen, Methylcyclohexane, and Ammonia as Potential Hydrogen Storage: Comparison Review. *International Journal of Hydrogen Energy*, **44**, 15026-15044. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.112>

- [17] Brunner, T. and Kircher, O. (2016) Cryo-Compressed Hydrogen Storage. In: Stolten, D. and Emonts, B., Eds., *Hydrogen Science and Engineering : Materials, Processes, Systems and Technology*, John Wiley & Sons, New York, 711-732. <https://doi.org/10.1002/9783527674268.ch29>
- [18] Faye, O., Szpunar, J. and Eduok, U. (2022) A Critical Review on the Current Technologies for the Generation, Storage, and Transportation of Hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, **47**, 13771-13802. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.112>
- [19] Broom, D.P., Webb, C.J., Hurst, K.E., et al. (2016) Outlook and Challenges for Hydrogen Storage in Nanoporous Materials. *Applied Physics A*, **122**, Article No. 151. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-9651-4>
- [20] Niu, J., Rao, B.K. and Jena, P. (1992) Binding of Hydrogen Molecules by a Transition-Metal Ion. *Physical Review Letters*, **68**, 2277-2280. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.68.2277>
- [21] Faye, O. and Szpunar, J.A. (2018) An Efficient Way to Suppress the Competition between Adsorption of H₂ and Desorption of n H₂-Nb Complex from Graphene Sheet: A Promising Approach to H₂ Storage. *The Journal of Physical Chemistry C*, **122**, 28506-28517. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b09498>
- [22] Xia, Y., Yang, Z. and Zhu, Y. (2013) Porous Carbon-Based Materials for Hydrogen Storage: Advancement and Challenges. *Journal of Materials Chemistry A*, **1**, 9365-9381. <https://doi.org/10.1039/c3ta10583k>
- [23] Suh, M.P., Park, H.J., Prasad, T.K., et al. (2012) Hydrogen Storage in Metal—Organic Frameworks. *Chemical Reviews*, **112**, 782-835. <https://doi.org/10.1021/cr200274s>
- [24] Zhou, J., Wang, Q., Sun, Q., Jena, P. and Chen, X.S. (2010) Electric Field Enhanced Hydrogen Storage on Polarizable Materials Substrates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **107**, 2801-2806. <https://doi.org/10.1073/pnas.0905571107>
- [25] Zârbo, L.P., Oancea, M.A., Klontzas, E., et al. (2019) Electrically Enhanced Hydrogen Adsorption in Metal-Organic Frameworks. <https://chemrxiv.org/engage/api-gateway/chemrxiv/assets/orp/resource/item/60c74224bdbb89d972a3843a/original/electrically-enhanced-hydrogen-adsorption-in-metal-organic-frameworks.pdf>
- [26] Raju, K., Rajendran, S., Hoang, T.K.A., et al. (2020) Photosynthesis of H₂ and Its Storage on the Bandgap Engineered Mesoporous (Ni²⁺/Ni³⁺)O@TiO₂ Heterostructure. *Journal of Power Sources*, **466**, Article ID: 228305. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228305>
- [27] Wang, K., Liu, Z.F., Wang, X.Q. and Cui, X.D. (2014) Enhancement of Hydrogen Binding Affinity with Low Ionization Energy Li₂F Coating on C60 to Improve Hydrogen Storage Capacity. *International Journal of Hydrogen Energy*, **39**, 15639-15645. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.07.132>
- [28] Zhang, J., Zhu, Y., Yao, L., et al. (2019) State of the Art Multi-Strategy Improvement of Mg-Based Hydrides for Hydrogen Storage. *Journal of Alloys and Compounds*, **782**, 796-823. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.217>
- [29] Panigrahi, P., Kumar, A., Karton, A., Ahuja, R. and Hussain, T. (2020) Remarkable Improvement in Hydrogen Storage Capacities of Two-Dimensional Carbon Nitride (g-C₃N₄) Nanosheets under Selected Transition Metal Doping. *International Journal of Hydrogen Energy*, **45**, 3035-3045. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.184>
- [30] Mishra, P., Singh, D., Sonvane, Y. and Ahuja, R. (2020) Enhancement of Hydrogen Storage Capacity on Co-Functionalized GaS Monolayer under External Electric Field. *International Journal of Hydrogen Energy*, **45**, 12384-12393. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.186>
- [31] Mishra, P., Singh, D., Sonvane, Y. and Ahuja, R. (2020) Metal-Functionalized 2D Boron Sulfide Monolayer Material Enhancing Hydrogen Storage Capacities. *Journal of Applied Physics*, **127**, Article ID: 184305. <https://doi.org/10.1063/5.0008980>
- [32] Chen, W., You, L., Xia, G.L. and Yu, X.B. (2021) A Balance between Catalysis and Nanoconfinement towards Enhanced Hydrogen Storage Performance of NaAlH₄. *Journal of Materials Science & Technology*, **79**, 205-211. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.11.052>
- [33] Yahya, M.S., Ali, N.A., Sazelee, N.A., et al. (2019) Intensive Investigation on Hydrogen Storage Properties and Reaction Mechanism of the NaBH₄-Li₃AlH₆ Destabilized System. *International Journal of Hydrogen Energy*, **44**, 21965-21978. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.076>
- [34] Ouyang, L., Chen, W., Liu, J., et al. (2017) Enhancing the Regeneration Process of Consumed NaBH₄ for Hydrogen Storage. *Advanced Energy Materials*, **7**, Article ID: 1700299. <https://doi.org/10.1002/aenm.201700299>
- [35] Zhu, Y., Ouyang, L., Zhong, H., et al. (2020) Closing the Loop for Hydrogen Storage: Facile Regeneration of NaBH₄ from Its Hydrolytic Product. *Angewandte Chemie International Edition*, **59**, 8623-8629. <https://doi.org/10.1002/anie.201915988>
- [36] Zhong, H., Ouyang, L., Zeng, M., et al. (2019) Realizing Facile Regeneration of Spent NaBH₄ with Mg-Al Alloy. *Journal of Materials Chemistry A*, **7**, 10723-10728. <https://doi.org/10.1039/C9TA00769E>

- [37] Zhong, H., Ouyang, L.Z., Ye, J.S., *et al.* (2017) An One-Step Approach towards Hydrogen Production and Storage through Regeneration of NaBH₄. *Energy Storage Materials*, **7**, 222-228. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2017.03.001>
- [38] Tanç, B., Arat, H.T., Baltacıoğlu, E. and Aydın, K. (2019) Overview of the Next Quarter Century Vision of Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, **44**, 10120-10128. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.112>
- [39] Ding, R. and Sun, X.J. (2020) Recent Progress with Electrocatalysts for Urea Electrolysis in Alkaline Media for Energy-Saving Hydrogen Production. *Catalysis Science & Technology*, **10**, 1567-1581.
- [40] Villalonga, S., Thomas, C., Nony, C., *et al.* Applications of Full Thermoplastic Composite for Type IV 70 MPA High Pressure Vessels. [https://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM18proceedings/data/2.%20Oral%20Presentation/Aug24\(Wednesday\)/W34%20Processing%20and%20Manufacturing%20Technologies+Thermoplastic%20Composite%20Materials/W34-4-IF0525.pdf](https://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM18proceedings/data/2.%20Oral%20Presentation/Aug24(Wednesday)/W34%20Processing%20and%20Manufacturing%20Technologies+Thermoplastic%20Composite%20Materials/W34-4-IF0525.pdf)
- [41] Berro Ramirez, J.P., Halm, D., Grandidier, J.C., Villalonga, S. and Nony, F. (2015) 700bar Type IV High Pressure Hydrogen Storage Vessel Burst—Simulation and Experimental Validation. *International Journal of Hydrogen Energy*, **40**, 13183-13192. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.05.126>
- [42] Pépin, J., Lainé, E., Grandidier, J.C., *et al.* (2018) Replication of Liner Collapse Phenomenon Observed in Hyperbaric Type IV Hydrogen Storage Vessel by Explosive Decompression Experiments. *International Journal of Hydrogen Energy*, **43**, 4671-4680. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.022>
- [43] Hassan, I.A., Ramadan, H.S., Saleh, M.A. and Hissel, D. (2021) Hydrogen Storage Technologies for Stationary and Mobile Applications: Review, Analysis and Perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **149**, Article ID: 111311. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111311>
- [44] Barthelemy, H., Weber, M. and Barbier, F. (2017) Hydrogen Storage: Recent Improvements and Industrial Perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, **42**, 7254-7262. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.178>
- [45] Ryu, C., Jung, C. and Bae, J. (2020) A Study on the Analysis of the Technology of Hydrogen Fuel Cell Vehicle Parts: With Focus on the Patent Analysis of Co-Assignees. *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, **28**, 227-237. <https://doi.org/10.7467/KSAE.2020.28.3.227>
- [46] Gangloff Jr, J.J., Kast, J., Morrison, G. and Marcinkoski, J. (2017) Design Space Assessment of Hydrogen Storage Onboard Medium and Heavy Duty Fuel Cell Electric Trucks. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, **14**, Article ID: 021001. <https://doi.org/10.1115/1.4036508>
- [47] Alaswad, A., Baroutaji, A., Achour, H., *et al.* (2016) Developments in Fuel Cell Technologies in the Transport Sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, **41**, 16499-16508. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.164>
- [48] Hua, T., Ahluwalia, R., Eudy, L., *et al.* (2014) Status of Hydrogen Fuel Cell Electric Buses Worldwide. *Journal of Power Sources*, **269**, 975-993. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.06.055>
- [49] Stangarone, T. (2021) South Korean Efforts to Transition to a Hydrogen Economy. *Clean Technologies and Environmental Policy*, **23**, 509-516. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01936-6>
- [50] Staffell, I., Scamman, D., Abad, A., *et al.* (2019) The Role of Hydrogen and Fuel Cells in the Global Energy System. *Energy & Environmental Science*, **12**, 463-491. <https://doi.org/10.1039/C8EE01157E>
- [51] Ajanovic, A., Glatt, A. and Haas, R. (2021) Prospects and Impediments for Hydrogen Fuel Cell Buses. *Energy*, **235**, Article ID: 121340. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121340>
- [52] (2021) Hyundai Fuel Cell Bus for Operator in Austria. *Fuel Cells Bulletin*, **2021**, No. 10. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(21\)00534-4](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(21)00534-4)
<https://www.magonlineibrary.com/doi/epub/10.1016/S1464-2859%2821%2900534-4>
- [53] Sustainable Bus (2018) Wrightbus Unveiled the First Fuel Cell Double Decker in the World. <https://www.sustainable-bus.com/fuel-cell-bus/streetdeck-fcev-wrightbus-first-fuel-cell-double-decker-bus-in-the-world/>
- [54] Sustainable Bus (2020) The First VDL Hydrogen Bus Deployed by Connexxion. With a Trailer Housing H2 Technology. <https://www.sustainable-bus.com/news/vdl-hydrogen-bus-connexxion/>
- [55] Reddi, K., Mintz, M., Elgowainy, A., *et al.* (2016) Challenges and Opportunities of Hydrogen Delivery via Pipeline, Tube-Trailer, LIQUID Tanker and Methanation-Natural Gas Grid. In: Stolten, D. and Emonts, B., Eds., *Hydrogen Science and Engineering : Materials, Processes, Systems and Technology*, Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, Weinheim, 849-874. <https://doi.org/10.1002/9783527674268.ch35>
- [56] Fuel Cell Electric Buses (2015) Compressed Gaseous Hydrogen. <https://www.fuelcellbuses.eu/wiki/concept-hydrogen-refueling-station/tube-trailer-gaseous-hydrogen-%E2%80%9Ctrucked-in%E2%80%9D>

-
- [57] Azuma, M., Oimatsu, K., Oyama, S., *et al.* (2014) Safety Design of Compressed Hydrogen Trailers with Composite Cylinders. *International Journal of Hydrogen Energy*, **39**, 20420-20425. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.05.147>
- [58] Valicek, P. and Fourie, F. (2014) Fuel Cell Technology in Underground Mining. *The 6th International Platinum Conference 'Platinum-Metal for the Future'*, Sun City, 20-22 October 2014, 324-332.
- [59] JR-EAST (2006) Press Releases—Development of the World's First Fuel Cell Hybrid Railcar. <https://www.jreast.co.jp/e/press/20060401/>
- [60] Hoffrichter, A. (2019) Hydrogen-Rail (Hydrail) Development. Ph.D. Thesis, Michigan State University, East Lansing.
- [61] Luxfer Group (2019) The UK's First Hydrogen Train Is Unveiled, Developed with Alternative Fuel Expertise from Luxfer. <https://www.luxfer.com/press/2019/ukand-s-1st-hydrogen-train-features-luxfer-alt-fuel-technology.asp>
- [62] (2019) JR East Planning Next-Generation Fuel Cell Train. *Fuel Cells Bulletin*, **2019**, No. 6. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(19\)30220-2](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(19)30220-2)
<https://www.magonlineibrary.com/doi/abs/10.1016/S1464-2859%2819%2930220-2#>
- [63] Renouard-Vallet, G., Saballus, M., Schmithals, G., *et al.* (2010) Improving the Environmental Impact of Civil Aircraft by Fuel Cell Technology: Concepts and Technological Progress. *Energy & Environmental Science*, **3**, 1458-1468. <https://doi.org/10.1039/b925930a>
- [64] Correa, G., Santarelli, M., Borello, F., Cestino, E. and Romeo, G. (2015) Flight Test Validation of the Dynamic Model of a Fuel Cell System for Ultra-Light Aircraft. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, **229**, 917-932. <https://doi.org/10.1177/0954410014541081>
- [65] Kalló, J. (2015) DLR Leads HY4 Project for Four-Seater Fuel Cell Aircraft. *Fuel Cells Bulletin*, **2015**, 13. [https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(15\)30362-X](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(15)30362-X)
- [66] (2021) Liebherr and GM to Develop HYDROTEC Fuel Cell-Based Electrical Power Generation System for Aerospace Application. <https://www.liebherr.com/en/int/latest-news/news-press-releases/detail/liebherr-and-gm-to-develop-hydrotec-fuel-cell-based-electrical-power-generation-system-for-aerospace-application.html>
- [67] Airbus (2021) ZEROe Towards the world's First Hydrogen-Powered Commercial Aircraft. <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen/zeroe>
- [68] Rath, R., Kumar, P., Mohanty, S. and Nayak, S.K. (2019) Recent Advances, Unsolved Deficiencies, and Future Perspectives of Hydrogen Fuel Cells in Transportation and Portable Sectors. *International Journal of Energy Research*, **43**, 8931-8955. <https://doi.org/10.1002/er.4795>