

氢能利用现状及其材料需求

刘文月^{1,2}, 杨志强³, 李天怡^{1,2}, 徐岩松⁴, 王勇^{1,5}, 徐海健⁶, 李新玲⁶, 王爽^{1,5}

(1. 海洋装备金属材料及其应用全国重点实验室, 辽宁鞍山 114009; 2. 鞍钢集团北京研究院有限公司, 北京 102200; 3. 鞍钢股份有限公司冷轧厂, 辽宁鞍山 114021; 4. 鞍钢股份有限公司制造管理部 辽宁鞍山 114021; 5. 鞍钢集团钢铁研究院, 辽宁鞍山 114009; 6. 鞍钢股份有限公司, 辽宁鞍山 114021)

摘要: 随着化石能源日益枯竭, 氢的能源属性备受关注, 氢能被视为“21世纪终极能源”, 但应用价格高、体积能量密度低以及临氢材料氢脆倾向大等问题限制了氢能利用。解决上述三项难题是当前氢能发展的关键。介绍了当前比较成熟的制氢、储氢、输氢与用氢技术路线及其优缺点, 对比了常用氢损伤理论与临氢材料现有选材标准, 提出了关注高耐氢材料开发、氢损伤机理研究、天然氢勘探与提高绿氢在氢能中的占比等发展建议, 期待为氢能提升利用规模、拓展应用场景提供参考。

关键词: 氢能; 绿氢; 氢脆; 储氢密度; 掺氢比

中图分类号: TQ038 文献标志码: A 文章编号: 1006-4613(2026)02-0038-12

DOI: 10.3969/j.issn.1006-4613. 2026. 02. 005

Current Status of Hydrogen Energy Utilization and Its Material Requirements

LIU Wenyue^{1,2}, YANG Zhiqiang³, LI Tianyi^{1,2}, XU Yansong⁴,
WANG Yong^{1,5}, XU Haijian⁶, LI Xinling⁶, WANG Shuang^{1,5}

(1. State Key Laboratory of Metallic Materials for Marine Equipment and Applications, Anshan 114009, Liaoning, China; 2. Ansteel Beijing Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China; 3. Cold Rolling Mill of Angang Steel Co., Ltd., Anshan 114021, Liaoning, China; 4. Department of Manufacture Management of Angang Steel Co., Ltd., Anshan 114021, Liaoning, China; 5. Ansteel Iron & Steel Research Institutes, Anshan 114009, Liaoning, China; 6. Angang Steel Co., Ltd., Anshan 114021, Liaoning, China)

Abstract: With the increasing depletion of fossil energy, the energy attributes of hydrogen have drawn significant attention. Hydrogen energy is regarded as the “ultimate energy source of the 21st century”. However, such problems as high cost, low volumetric energy density and high tendency for hydrogen embrittlement in hydrogen-exposed materials greatly limit hydrogen energy utilization. Solving three problems mentioned above is the key issue for the current development of hydrogen energy. Currently mature technological routes for hydrogen production, hydrogen storage, hydrogen transportation and hydrogen utilization, along with their advantages and disadvantages were described. The commonly used hydrogen damage theories and the existing material selection criteria for hydrogen-exposed materials were compared, and future development suggestions such as focusing on the development of high hydrogen-resistant materials, researching hydrogen damage mechanisms, exploring natural hydrogen and increasing the proportion of green hydrogen in hydrogen energy were proposed. It was expected to provide references for expanding the scale of hydrogen energy utilization

and expanding its application scenarios.

Key words: hydrogen energy; green hydrogen; hydrogen embrittlement; hydrogen storage density; hydrogen bending ratio

氢能被视为“21世纪终极能源”，因其无碳属性，成为煤炭、石油、天然气等化石能源的最佳替代能源，是解决碳排放问题的重要手段之一^[1-9]。随着化石能源日益枯竭，氢能的能源属性备受国内外关注，我国更是以立法的形式将氢能纳入能源管理体系，并将氢能定义为“能量载体进行化学反应释放出的能源”^[10-11]。

氢是最轻的元素，在地球上，氢主要以化合物的形式存在于水（占11%）、石油、天然气、动植物中^[1]。虽然自然界中存在大量单质天然氢，但至今未能实现人工开采^[12-13]。基于此，氢能一直被归类于二次能源^[3-4,14]。又因目前90%以上的氢能来源于以石油、天然气等化石能源为原料的氢^[1]，由于原料不可再生而被归类于不可再生资源。

现阶段，氢能除了价格高，其能量密度的两面性也限制了其应用^[1,15]。氢能的优势之一是质量能量密度高（142 kJ/g）^[2]，同等质量的氢释放的能量是锂电池的7.7倍、煤炭的4.5倍、燃料电池的3.1倍、石油的3倍、天然气的2.5倍^[16-18]。但氢能体积能量密度低，气氢（12.1 kJ/L）为同等压力下天然气的36%；液氢（70.8 kJ/L）为同等体积汽油能量密度的1/3。氢能体积能量密度低且提升困难是限制其广泛应用的不利因素之一。

此外，氢与金属材料相互作用还会引发材料性能退化^[19-21]，从而导致安全问题，这是氢能用于基础设施建设中需要克服的技术难题之一^[22-27]。为了推广氢能的利用，国内外从制氢、储氢、运氢与用氢全链条作出了诸多努力^[2,5,18,28-32]。本文从氢对材料性能改变的机理、氢能利用技术路线以及氢能利用过程中选材、材料开发等问题进行梳理，为用好氢能提供技术参考。

1 氢的种类与氢能特征

氢气本身无色无味，根据氢气生产所用的原料和产生的环境影响，主要排放物类型与排放量，氢气被划分为黑、棕、灰、蓝、绿氢等^[33-35]。一般而言，从生物质、核能或不同种类的网电产生的氢没有固定的类别。各类氢中，以灰氢为主，占比不低

于95%；灰氢生产过程中，运用碳捕集、利用与封存（Carbon Capture, Utilization, and Storage, CCUS）技术即可获得蓝氢^[4,15]；绿氢占比极少，不足1%，它仅指通过可再生能源电解水获得的氢。表1为不同类别的氢的碳排放量对比^[35]。从全生命周期来看，不存在“零”碳排放的氢能。以电解水生产绿氢为例^[35]，使用风能、太阳能的碳排放量分别为0.6 kgCO₂/kgH₂、2.5 kgCO₂/kgH₂。风能生产的氢能更绿色。

表1 不同类别的氢的碳排放量对比^[35]

Table 1 Comparison of Carbon Emissions of Different Types of Hydrogen^[35]

类型	氢源	生产方法	排放物	碳排放量/ (kgCO ₂ /kgH ₂)
黑氢	水+煤炭	蒸汽重整	CO ₂	19~29
棕氢	水+褐煤	蒸汽重整	CO ₂	19~29
灰氢	天然气	蒸汽重整	CO ₂	10~14
蓝氢	天然气	蒸汽重整 +CCUS	碳中和	5~9
蓝绿氢	甲烷	高温分解	固体碳	6~8
绿氢	水+可再生能源	电解	O ₂	0.6~2.5
红氢	水+核电	电解	O ₂ 、核废料	
黄氢	水+网电	电解	O ₂	22~40

氢气是已知密度最小的气体。标准压强下，0℃氢气密度为0.089 g/L，约为空气的1/14、天然气的1/10；-253℃时，氢气可液化，密度为70.79 g/L。氢液化能耗高，液化1 kg氢气的能耗相当于20 kW·h的电，约为液氢本身燃烧热的1/3。液氢沸点低、气化能低，易挥发，难以长期存储^[33]，以当前主流球形储罐为例，日挥发量约为3%~5%。氢作为能源载体^[1,11,15,36-38]，可直接燃烧或做成燃料电池提供能量。燃料电池能量转换效率高、发展潜力大^[2-3]。直接燃烧时，氢燃烧速度快，火焰温度高，燃烧过程产生NO_x，产生量约为天然气燃烧的两倍^[38]。可见，氢能并非完美能源，虽然可降低CO₂排放但有增加NO_x的倾向^[15]。另外，与传统能源相

比,氢能体积能量密度与储氢体系储氢密度均不高。为了实现氢能的商业化应用,国际能源署(International Energy Agency, IEA)与美国能源部(Department of Energy, DOE)提出了相应的储氢密度指标,氢的能量密度与储氢密度目标见表2^[1,36-40]。

表2 氢的能量密度与储氢密度目标^[39-40]Table 2 Targets for both Hydrogen Energy Density and Hydrogen Storage Density^[39-40]

能量密度(1atm)		储氢密度	
按质量计算/ (kJ/g)	按体积计算/ (kJ/L)	按质量计算/ %	按体积计算/ (gH ₂ /L)
142	12.1(20℃,气氢)	5.0(IEA)	>40(IEA)
	70.8(-253℃,液氢)	6.5(DOE)	62(DOE)

2 氢能利用流程

2.1 制氢

制氢技术有很多,各有优缺点。表3为常用制氢技术以及制氢成本对比,通常依据用氢场景和制氢成本选择合适的制氢技术路线。目前比较成熟的技术有3种^[1,3,6,33,41]:

- (1) 煤炭、天然气等化石能源重整。
- (2) 焦炉煤气、氯碱尾气等工业副产品提纯。
- (3) 电解槽电解水。

根据IEA数据^[33]显示,2022年全球氢供应接近 9.5×10^7 t,其中天然气制、煤制、工业副产氢、油制占比分别约为62%、21%、16%、0.5%,通过电解槽制氢量仅不到0.5%。制氢成本主要源于原材料成本,其中,煤制氢、天然气制氢与电解水制氢,成

表3 常用制氢技术以及制氢成本对比^[6,41]Table 3 Comparison of Common Hydrogen Production Technologies and Their Cost^[6,41]

技术	技术成熟度	环保情况	经济性
化石能源重整	可大规模安全生产	有CO ₂ 直排	成本低
副产品提纯	方法多样,技术成熟	工业品生产阶段污染	副产物利用
火电电解水	可大规模安全生产	发电阶段污染	存在资源浪费
可再生能源电解水	可商业化,产气不稳定	仅有O ₂ 排放	消纳可再生资源
高温热分解	研发阶段,可稳定供气	能耗高	成本高
生物质转化	研发阶段,分散性供给	环保性高	成本高
光解水	研发初期,转化率0.5%	环境友好	成本高

本中的52%、74%与94%分别源于煤、天然气与网电^[33]。其它制氢技术还有高温热分解、生物质转化、光解水等,尚处于研发阶段,制氢成本高于主流的制氢技术^[2]。

煤制氢技术是当前成本最低的制氢方式,适合我国“富煤、缺油、少气”的资源结构国情;工业副产品提纯制氢可提供百万吨级氢气供应,是氢能产业发展初期比较理想的氢源,可就近提供,成本较低^[1,3,33]。电解水制氢,是就地消纳废电的最具前景的技术方案,可充分利用1 000亿kW·h的弃光、弃风、弃水所产生的电能。电解水每生产1 m³氢需要耗电4~5kW·h,当电价低于0.3元/(kW·h),电解水的制氢成本才能接近化石能源制氢。可再生能源与氢能耦合是电解水制氢的发展优势^[1,33]。电解水制氢中碱性电解槽(Alkaline Electrolyzer Cells,

AEC)最成熟,生产成本较低,其运行温度为70~90℃;质子交换膜电解槽(Proton Exchange Membrane Cells, PEMEC)运行温度与AEC相当,可使用波动性电源,安全性最高;固体氧化物电解槽(Solid Oxide Electrolyzer Cells, SOEC)能量转换效率最高,但是运行温度高达700~1 000℃^[3]。

2.2 储氢

根据氢气的状态,储氢可以分为高压气态储氢、液态储氢、固体储氢等三类储氢方式^[1,3,14,21,33,42-44]。IEA规定,实用的储氢系统其质量储氢密度必须达到5%(质量分数,下同),体积储氢密度也要求大于40 gH₂/L。现有储氢方式均能达到该要求。对于固体储氢材料,还要满足充放氢工作温度-40~60℃、氢的吸脱能垒不高于30 kJ/mol等要求。

2.2.1 气态储氢

高压气态储氢是指将氢气压缩在储氢容器中,通过增压来提高氢气的容量,满足日常需求^[21,37,45]。随着压力的增加,氢气的密度提升,氢气密度在30~40 MPa增长快,70 MPa以后密度增长幅度不大。目前,工业和实验室应用较广泛的为15 MPa的储氢钢瓶,虽说该方式成本低、充放气速度快,且可在常温进行,但质量储氢密度仅约1%是其最大弱点。压力从15 MPa提升到70 MPa,质量储氢密度可从1%提高到5.7%;目前,工业标准氢气压缩钢瓶的体积储氢密度15 MPa时为10 gH₂/L,35 MPa时为22.9 gH₂/L,70 MPa时可达39.6 gH₂/L^[3,21,39]。

目前,高压气态储氢提升质量储氢密度的主要技术手段除了提升储氢压力,还有降低储氢容器自重^[2,33,40-43]。表4为高压储氢瓶的特点^[2,40-43]。高压气态储氢容器中的I型瓶(纯钢全金属瓶)与II型瓶(钢内胆)因自重大将逐渐被III型瓶(Al内胆)与IV型瓶(塑料内胆)所取代^[2,43]。70 MPa时,IV型容器储氢密度可达5.7%,是国外的主要研究方向。因此,车载储氢瓶大多使用III、IV型两种容器。IV瓶对温度特别敏感,更适用于乘用车;III型虽然偏重,但其材质温度及环境适应能力强,密封性好,比较适合大巴和重卡使用^[40]。2024年,国内实现450 L III型超大容积车载储氢瓶首发^[46]。

表4 高压储氢瓶的特点^[2,40-43]Table 4 Characteristics of High-pressure Hydrogen Storage Bottle^[2,40-43]

瓶型	材质	优点	缺点
I型	Cr-Mo钢, Ni-Cr-Mo-V钢	廉价、疲劳强度高	重、安全性低
II型	Cr-Mo钢内衬/FRP	廉价、内衬坚韧、制造简单	钢瓶顶部存在应力集中
III型	Al内衬/FRP	轻、安全性高	内衬弱、制造复杂
IV型	塑料内衬/FRP	比III型轻、安全性高	对温度敏感、内衬更弱、制造复杂、存在氢微量渗透

2.2.2 液态储氢

液氢的质量储氢密度和体积储氢密度分别为40%、70.6 gH₂/L。液氢为超低温液体,虽然其储氢密度可以满足DOE、IEA的要求,但是对储存材料有严格要求,制约了氢能产业化进程中液氢的实际应用范围。当前,液氢主要应用于军事与航天领域^[33-34]。

存周期长、储能成本低、安全性高等四大优势^[28]。UHS构造的建造成本和储氢成本从低到高依次为枯竭油气藏、含水层与盐穴。盐穴需要人工开辟所以相对而言储量最低。UHS通常储存气态氢气,还可以储存甲醇、合成氨等液态氢载体,UHS经济性高,是实现氢能大规模长期存储的有效途径。表5为不同类型UHS特点对比。

2.2.3 固体储氢

固体储氢是指氢气通过物理或化学作用与固体物质相结合的储氢方式,吸放氢的温度与可逆性限制是固体储氢需要克服的核心难题^[2,14,44,48-52]。固体储氢物质以金属氢化物、非金属氢化物或纳米材料等为主^[2,35]。当前,至少16种氢化物理论储氢量超过7.5%,至少6种超过12%^[2]。与其他储氢相比,安全性高是其最大技术优势。

表5 不同类型UHS特点对比

Table 5 Comparison of Characteristics of Different Types of UHS

类型	深度/ m	作业压力/ bar	工作气占比/ %	注采周期/ a
盐穴	300~1 800	30~210	>70	10次
枯竭油气藏	300~2 700	15~285	5~60	1~2次
含水层	400~2 300	30~315	20~50	1~2次

2.2.4 地质储氢

地质储氢(也称地下储氢, Underground Hydrogen Storage, UHS)利用盐穴、含水层、枯竭油气藏等地下地质构造进行氢能存储,具有储能规模大、储

UHS不与大气中的氧气接触,不存在爆炸危险,更具安全性。但是,UHS存在氢气成分发生显著改变(氢和CO₂或CO原位生成CH₄、硫酸盐还原菌将硫酸盐还原成H₂S等)、氢气易破坏地下储氢

库的多孔地质结构等问题^[28,53]。

UHS研究始于20世纪70年代^[28,54],大规模研

究始于2011年,目前仍然处于发展初期。表6为典型储氢设施。

表6 典型储氢设施

Table 6 Typical Hydrogen Storage Facilities

设施	位置	地质构造	储氢方式	深度/m	工作条件/bar
Clemens Dome	美国	盐层	95%	1 000	70~137
Mass Bluss	美国	盐层	95%	1 200	55~152
Spindletop	美国	盐层	95%	1 340	68~202
Teesside	英国	盐层	95%	365	45
Ketzin	德国	含水层	煤气+62%H ₂	200~250	
Beynes	法国	含水层	煤气+50%H ₂	430	
Lobodice	捷克	含水层	煤气+50%H ₂	430	90(34 °C)
Diadema	阿根廷	枯竭气藏	天然气+10%H ₂	600	10(50 °C)
Underground Sun Storage	奥地利	枯竭气藏	天然气+10%H ₂	1 000	70(40 °C)

由表6看出,国外已在盐层、含水层以及废弃油气藏实现规模化应用。国内尚处于示范应用阶段。2024年,我国批准了国内首个岩洞储氢和地下分布式储氢科研中试基地(湖北大冶深地储氢科研中试基地)与亚洲首个深地盐穴大规模储氢项目(河南省平顶山市中国平煤神马集团)。

2.3 输氢

输氢方式有很多种,需依据输送距离和输送规模来选择合适的输送方式^[6,33,54-55]。目前,仅有约15%的氢需要运输到异地使用。当运输量不超过10 kg时,可以选用氢气瓶或集装格;当运输量为10~50 kg时,可以选用集装格或长管拖车;超过50 kg就需要从长管拖车、管道与液体罐车中选择。当运输量超过10 000 kg,运距1 500 km范围内,管道运输成本最低,超过这个距离,液体罐车成本最低,管道次之。综合来看,管道输氢是最经济、最节能的大规模长距离输送氢气的方式。管道输氢的初期投资大,是油气管道投资的2倍。当输氢距离超过1 000 km时,氢气管道输送的平均运输成本为0.84~1.61元/kg(0.11~0.21欧元/kg)^[56]。

国外输氢管道建设早、里程长。根据美国太平洋西北国家实验室(Pacific Northwest National Laboratory, PNNL)2016年的统计数据,全球共有4 542 km的氢气管道,其中美国有2 608 km的输氢管道,欧洲有1 598 km的输氢管道^[55,57]。国外最早的长距离纯氢输送管道由德国于1938年建成,总里程208 km,输送压力2.5 MPa,管径D168~273 mm,

管道材质为SAE 1016^[54]。国外已建成的短距离输送压力最高达14 MPa,长距离普遍在10 MPa以下,大部分集中在3~5 MPa。表7为国外典型输氢管道^[55-57]。到2040年,欧洲将建立一个长达53 000 km的纯氢管网连接28个欧洲国家,其中约60%的管道由现役天然气管道改造而成。

我国氢气管网发展不足^[55,57],累积仅有400 km,主要分布在环渤海湾、长三角等地。表8为我国典型输氢管道^[55-57]。目前,国内已建成的输氢管道中,最长的为巴陵—长岭输氢管道,全长约42 km,压力为4 MPa;正在规划的输氢管道中,定州—高碑店氢气管道工程设计压力4 MPa,距离164.7 km,是全球第一条输送燃料电池所需纯度氢气的管道^[58];乌兰察布—京津冀输氢管道是我国首条跨省区、大规模、长距离的纯氢输送管道,也是目前全球最长的输氢管道,设计压力6.3 MPa,预计约1 150 km,钢级L245,管径D457 mm和D610 mm,分别采用无缝管和高频电阻焊(HFW)管^[54]。包头—临河输氢管道是我国第一条具备掺氢输送能力的高压、长距离管道,于2024年正式投产,最大输气能力可达12亿m³/a,掺氢比例可达10%^[58]。

与天然气输送相比,氢气的输送成本高,导致输氢管道的建设发展缓慢。全球有近300万km的天然气管道和近4 000亿m³的地下储存容量^[33]。在氢能发展初期,借助这些基础设施可有效降低成本^[43]。研究表明,含有20%体积比的掺氢天然气可以直接使用现有的天然气管道,

表7 国外典型输氢管道^[55-57]Table 7 Typical Hydrogen Transmission Pipelines Abroad^[55-57]

国家	材料	年份	口径/mm	距离/km	压力/MPa	纯度
德国	SAE 1016	1 938	168~273	208	0.2~2.5	纯氢
法国	碳钢	1 966		200	6.5~10	纯氢
法国—荷兰	碳钢无缝管	1 966	158	> 1 100	< 10	
美国		1 969	114~324	100	0.3~5.5	纯氢
美国		1 972	114.3~324	100	5.5	
美国	ASTM A524	1 986	203	20.9	12	
加拿大	Gr. 290(X42)	1 987	273	3.7	3.8	99.90%
美国	原输气管道	1 996	114.3	8	5.5	纯氢
美国	X42	1 997	273	45	3~4	纯氢
日本	碳钢	2 009	1.2			
美国	API 5L B	2 010	168~323	18	3.7~6.2	
加拿大	碳钢		168	16		92.5% H_2 +7.5% CH_4
英国	碳钢			15	30	纯氢
美国	316SS	使用28年以上	50	1.6~2.0	42	
美国	ASTM 106	使用20年以上	76~356	> 983	3~5	
美国	API X52	新建	219	0.9	14	

表8 我国典型输氢管道^[55-57]Table 8 Typical Hydrogen Transmission Pipelines in China^[55-57]

管道	材料	年份	长度/km	管型	压力/MPa	输送介质
金陵—扬子	20	2008	32	D325 无缝	4	99.5%
乌海—银川	L245NB	2012	217.5	D610 直缝	3~5	焦炉煤气
巴陵—长岭	20	2014	42	D457 无缝	4	99.5%
济源—洛阳	L245NS	2015	25	D508 无缝	4	99.5%
玉门油田	L245NS	2023	5.77	D200 无缝	2.5	99.99%
浙江石化	X42QO	2023	50	D457 无缝	6	99.999%
包头—临河	X52MS	2024	258	D457 螺旋	6.3	10% 掺氢
库车门站	X60	2025	258	D323.9		3% 掺氢
定州—高碑店	L245N	预计2025	164.7	D508 无缝	4	99.999%
乌兰察布—京津冀	L245	预计2025	1 145	D457 无缝, D610HFW	6.3	99.999%
固阳—白云鄂博	L360MH	预计2025	125	D457 焊管	6.3	20% 掺氢

无需任何改造。不同的国家或地区对掺氢比有不同规定,多在5%~30%^[59]。表9为各国或地区典型管道掺氢输送项目中的掺氢比^[55-57]。

根据IEA统计,目前全球约有40个天然气管道掺氢项目,其中我国已有4例^[38,59]。从示范成果与全技术链的突破来看,天然气掺氢技术已进入“可以用”的阶段。但从产业整体来看,天然气掺

氢尚处于示范初期^[59]。

目前,液氢管道仅用于航天和军事领域,民用领域多采用液氢罐车。随着氢能利用的发展,跨洋轮船运输开始进入示范应用阶段^[5,55]。2024年,中海油成功完成国际首例长距离(10 000海里)跨洋液氢运输示范,此次液氢跨洋运输采用了液氢二次保冷的ISO标准罐式集装箱。

表9 各国或地区典型管道掺氢输送项目中的掺氢比^[55-57]

Table 9 Hydrogen Blending Ratio in Typical Hydrogen-gas Mixture Pipeline Transportation Projects in Various Countries or Regions ^[55-57]			
国家(地区)	年份	项目/公司	掺氢比/%
欧盟	2004—2009	Naturally 项目	< 50
荷兰	2008—2011	VG2 项目	< 20
德国	2013	电力和天然气公司	5
德国	2013	能源储存和清洁公司	< 2
德国	2020	Avacon 项目	20
法国	2014	CRHYD 项目	20
英国	2015	Hydeploy 项目	20
意大利	2019	SNAM 燃气公司	5
中国	2019	朝阳天然气掺氢示范工程	10
中国	2021	陕宁一线掺氢示范项目	5
中国	2023	宁夏宁东天然气掺氢管道示范平台	24(试运行)
中国	拟建	广东海底掺氢管道	20

2.4 用氢

氢的应用存在多元化特征,既可以是工业原料,又可以是能源载体^[33,52]。氢的终端形式可以是氢,也可以是氢的衍生物(如合成氨、合成甲醇等)^[34]。氢在多个领域都有广泛应用。根据IEA发布的2022年全球氢能数据,全球氢年需求 9.5×10^7 t,主要集中在工业领域,其中炼化(43.2%)、合成氨(33.5%)、甲醇(16.8%)、重整制氢(5.6%)为主要用氢领域。针对氢气不利于存储、液化成本高等难题,人们提出绿氢(氢2.0)、绿色甲醇(液体阳光)等“泛氢”能源,用于解决氢能远距离输送难的限制,全球正进入“氢2.0时代”^[6,42,47]。除了传统的工业应用外,氢气还在交通、电力、建筑等领域发挥着重要作用^[33,41,60-62]。目前氢能行业发展处于早期阶段,且产业链尚未完全建立,各环节成本较高^[50],其中管道输送的氢能总成本为56~66元/kg,而采用掺氢方式的成本可降低至31~36元/kg,是目前氢能利用的最经济形式^[6,42]。

我国是世界第一制氢大国,年产量 3.5×10^7 t(其中 1.0×10^7 t来自于工业副产品),可为全球提供

1/3的氢。我国可再生能源装机规模全球第一,绿氢产能潜力大。截至2024年,我国可再生能源制氢产能突破 1.0×10^5 t/a,规划及在建产能约 8.0×10^6 t/a^[61]。但在应用端,我国氢能80%以上用于工业领域,规模化用氢场景单一制约了氢能产业的进一步发展^[62]。

3 氢对材料性能的影响

3.1 氢损伤机理

氢损伤机理有多种解释,但任何机制都无法准确描述完整的氢损伤过程,实际过程是多种机制共同作用的结果^[20,45,57,63]。常见的氢损伤机理有^[64-71]氢致内压(Hydrogen Internal Pressure, HIP)、氢诱导相变(Hydrogen-induced Phase Transformation, HIPT)、高温氢腐蚀(High Temperature Hydrogen Attack, HTHA)、氢促进解理(Hydrogen-enhanced Decohesion, HEDE)、氢促进局部塑性(Hydrogen-enhanced Localized Plasticity, HELP)、氢增强应变诱导空位形成(Hydrogen-enhanced Strain-induced Vacancy, HESIV)、吸附诱发位错发射(Adsorption Induced Dislocation Emission, AIDE)及大一统理论等。表10为常见氢损伤解释机理核心观点。

3.2 氢损伤定量评价

目前,氢损伤定量评价指标有两个^[20,22,27,31,45,55,65-69]。一个是依据NO.NASA8-30744标准评价材料氢脆严重程度的氢致材料的性能或疲劳寿命损失百分比,当百分比低于10%时,材料的氢脆倾向可以忽略,即认为无氢脆;当百分比为25%、50%时,将材料的氢脆划分成氢脆、严重氢脆、极度氢脆三个区间。该百分比可采用任何一个性能指标,对比含氢、非含氢情况下获得的定量变化。不同性能指标获得的氢脆严重程度有较大差异,推荐使用断后延伸率、疲劳裂纹扩展速率与疲劳寿命损失百分比等指标进行评价^[27]。氢气环境中,强度和低温冲击韧性等指标的变化不敏感。另一个是依据GB/T 34542.3、ISO 11114-4与ASTM F1459标准^[21,55]使用氢脆敏感度系数 F_H 来评价材料氢脆敏感度。表11为不同标准中关于氢脆敏感度评价对比^[55]。标准不同,分级特征值有一定差异,ISO 11114-4氢脆范围最宽、GB/T 34542.3最严格^[54-57]。

表10 常见氢损伤解释机理核心观点

Table 10 Core Viewpoints on Common Hydrogen Damage Mechanisms

理论名称	核心观点
HIP	进入金属内部的氢,会优先在缺陷处(宏观缺陷或微观缺陷)聚集,重新结合成氢分子产生巨大的氢压
HIPT	形成脆性氢化物或诱发马氏体相变导致材料表面发生结构变化
HTHA	高温环境下,氢原子与金属内部固溶碳形成甲烷并于晶界等缺陷处聚集,形成甲烷气泡导致材料失效
HEDE	氢的电子占据过渡金属电子运行轨道后降低了原子间键合力,进而表现为晶格平面或晶界界面的结合强度降低
HELP	氢能够加速位错运动与增殖。位错增殖后,在滑移交叉位置产生位错堆积,即产生应变集中,材料失效所需的宏观塑性变形量降低,导致材料提前失效
HESIV	塑性变形过程中产生的空位通过形成“H-空位”而稳定,这将进一步与位错相互作用
AIDE	结合了 HEDE 和 HELP 两种理论。认为充氢材料的裂纹萌生和扩展通过裂纹尖端位错增殖、裂纹尖端前沿微孔洞的形核和扩展来共同实现,分别对应穿晶断裂与沿晶断裂两种裂纹形态。在晶间断裂和沉淀相/基体界面脱落过程中,HEDE 机制起作用;当损伤开始于滑移带交叉位置处时,HELP 机制被激活
大一统理论	氢会在已有孔洞间隙处引入微小的纳米“亚孔洞”,继而导致孔洞间隙的脆性断裂。该理论基于单一微观力学模型(基于微孔洞生长的韧性断裂理论)和单一氢脆理论(基于空位和纳米孔洞表述的 HESIV 氢脆理论)

表11 不同标准中关于氢脆敏感度评价对比^[55]表11 Comparison of Hydrogen Embrittlement Sensitivity Evaluation with Different Standards^[55]

标准	F_H	评价标准
GB/T 34542.3	$F_H \leq 1$	氢脆不敏感
	$1 < F_H < 2$	长期在氢气环境中使用可能发生氢脆
	$F_H > 2$	氢脆敏感,不得制造临氢零部件
ISO 11114-4	$F_H \leq 2$	应考虑适用于压缩氢气/脆化气瓶
ASTM F1459	$F_H = 1$	不易发生氢脆
	$F_H \leq 2$	长时间暴露于任何形式的氢后可发生氢脆
	$F_H > 2$	对氢敏感,必须采取措施避免接触氢

3.3 氢损伤影响因素

影响氢损伤的3个关键条件有含氢量、应力水平与微观组织的氢敏感性^[69,72]。与上述条件有关的氢分压与氢纯度、温度、应力与临氢材质等成为影响氢损伤的重要因素^[21,38,45,55,65,69]。

3.3.1 氢分压与氢纯度

氢分压越高,材料的氢脆敏感性越显著^[1]。一般而言,纯氢环境下,压力低于2 MPa时可忽略氢的影响。采用钢级为X52及以下,可直接输送掺氢比小于10%的混合天然气;含氢量低于5%,国产X80的安全性仍有保证;继续提高掺氢比,X80性能将会恶化,且母材恶化程度高于焊缝;掺氢比为50%时,X80的疲劳寿命只有纯输天然气时的1/20^[73]。

氢气的纯度是影响氢脆敏感性的关键因素^[24-25,35,74]。通常,氢气越纯,氢脆敏感性越高。当氢气中存在O₂、CO、SO₂、H₂O(气态)会降低氢脆程度,甚至ppm级含量即可起到显著作用;提高其含量,抑制氢脆的效果更明显。与CO相比,O₂分子抑制氢分子吸附的作用更强。H₂S加剧氢脆^[74];CH₄与N₂几乎没有影响^[24];CO₂比较复杂,促进和抑制氢脆都有相应的文献报道^[35]。

3.3.2 温度

温度通过影响氢在材料中的扩散、溶解行为来影响材料的氢脆敏感性^[1,69,72]。材料的氢脆敏感性存在极值温度,是氢的扩散与偏聚互相竞争的结果。当温度高于极值温度时,氢的扩散过程占优势,氢不容易聚集而诱发氢脆;当温度低于极值时,氢既不容易聚集也不容易扩散,氢脆倾向降低。以拉伸试验确定的氢致塑性损失为例,-75~65℃对氢的影响显著,通常室温时最严重^[69,72]。

3.3.3 应力

氢会优先在应力集中处聚集从而促进氢脆的发生^[38,65,75]。应力集中点主要有材料的表面缺陷、焊接缺陷等。外加载荷对氢脆敏感性有不同程度的影响,增加加载速率和应力三轴度,拉伸性能确定的氢脆敏感性程度增加;增加应力比,减少加载频率,疲劳试验确定的氢脆敏感性增加,疲劳裂纹扩展速率加快。

3.3.4 临氢材质

临氢材质的微观组织是影响管线钢氢脆敏感性的重要因素,不同的微观组织具有不同的氢陷阱种类和数量^[54,76-77]。一般认为,氢脆敏感性从小到大依次为铁素体、珠光体(或珠光体+铁素体)、贝氏体、低碳马氏体、马氏体+贝氏体、孪晶马氏体。碳含量过高时会导致钢材在热轧状态下产生大量对氢脆敏感的马氏体组织,国内储氢容器用钢中控制碳含量 $\leq 0.35\%$,欧洲工业气体协会控制碳含量 $\leq 0.37\%$ ^[54]。

3.4 选材规则

氢原子在金属晶格中的渗透和扩散,会引起金属性能退化、局部脱碳、鼓泡、开裂等多种损伤^[1,20,27,31-32,45,63-66]。材料内部含氢量高、应力水平高与微观组织对氢敏感是产生氢损伤的三要素。对于临氢材料,选材的原则是避免出现氢损伤或者在服役寿命内不得出现影响使用安全的氢损伤。

对特定的金属和氢气压力,氢损伤程度主要受温度影响。高温时,氢损伤主要表现为鼓泡或开裂,此时美标与国标均推荐参照Nelson曲线选材^[63]。常温或低温下,氢损伤主要表现为性能退化,即氢脆,氢脆的敏感温度区间是 $-73\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此温度区间选材时一般遵循“限制材料强度、降低应力使用”的原则^[55,57,63,67]。常温或低温下临氢材料的选择标准不统一,主要原因是以往氢气以化工原料为主,临氢材料承受压力较低(一般 $< 4\text{ MPa}$),几乎不存在选材的问题。近年来,随着氢能应用的进一步发展,临氢材料需要承受 10 MPa 以上甚至 70 MPa 的压力。压力升高对材料选择提出了挑战,氢脆问题成为氢能应用无法回避的问题^[55,57,63,67]。

在我国,目前暂无专用于临氢材料的国家标准^[55,57,63,67]。1997年,美国航空航天局NASA整理了氢气利用条件下材料的适用性^[1,68],认为奥氏体不锈钢、铝及合金、铜及合金、钛基合金适合用于氢气环境;白口铸铁、镍钢不适合;与高强钢相比,低强度钢更适合。ASME B31.12与CGA G-5.6是目前最被认可的适用氢气环境下的技术标准,均推荐X52/L360及其以下强度级别用于氢气环境,最高允许使用X80/L555级材料^[21,57]。基于每天两个压力周期的假设^[35],API X70及以下钢级在高压氢气环境下使用寿命超过50年;而50%的氢气与

天然气混合环境下X80钢的使用寿命约为37年。

当强度超过X52时,ASME B31.12建议材料的氢适应性实验至少每英里进行一次,且同时限定最高许用钢级不超过X80^[30,35]。该标准规定,工艺管道的压力不能 $> 100\text{ MPa}$,长输管道的压力不允许 $> 21\text{ MPa}$,而选择管道使用的输送压力和管道直径的标准为管道的工作应力不高于材料的名义最小屈服强度(Specified Minimum Yield Strength, SMYS)的50%。

ASME B31.12规定,钢管可以是无缝管、HFW管或者双面埋弧焊管^[57]。无缝管因没有焊缝,应力集中问题少,在现有长输氢管道中应用较多;使用HFW管与埋弧焊管,需要去掉焊缝余高和进行整管热处理以降低残余应力。美国机械工程师协会统计了Air Products公司137条输氢管道,其中90%的管道为X52钢级及以下的HFW管,管道公称外径 $50.8\sim 457.2\text{ mm}$,管道运行压力85%集中在 $4.5\sim 10\text{ MPa}$,最高运行压力达到 15 MPa ^[54-57]。

CGA G-5.6规定,用于输氢管道的钢铁材料基体、热区与焊缝硬度均需 $< 22\text{ (HRC)}$ 或 250 (HB) 或 248 (HV) (相应拉伸强度上限约为 800 MPa),管道中的缓冲器材料抗拉强度可以放宽至 950 MPa 。对于化学成分,要求硫含量 $\leq 0.01\%$ 、磷含量 $\leq 0.015\%$ 、碳当量 ≤ 0.35 ,采用API 5L PSL2钢级材料,可以放宽至硫含量 $\leq 0.015\%$ 、磷含量 $\leq 0.025\%$ 、碳当量 ≤ 0.43 。为了避免氢脆的影响,选择材料时应同时满足如下要求:

- (1) 推荐使用细晶粒均质材料。
- (2) 避免使用高硬度和高强度材料。
- (3) 采用高洁净材料,减少夹杂物等对低温韧性和氢脆的影响。
- (4) 避免明显的表面与内部缺陷。

如果这四项要求无法同时满足,系统的许用工作应力应不高于材料SMYS的30%或名义最小抗拉强度(Specified Minimum Ultimate Tensile Strength, SMUTS)的20%。

4 未来发展趋势与建议

与传统能源相比,氢能的优势和短板都十分突出,为了扬长避短,未来氢能有如下几个重要发展方向:

- (1) 氢能一次能源化。当前可商用的氢能属

于二次能源,一次能源向二次能源转换过程中,有相当部分的能量损耗。自然界存在天然氢且储量可观,氢能具备成为一次能源的条件。

(2) 氢能可再生化。氢能来源众多,仅通过可再生资源电解水生产的绿氢才能被归类于可再生资源,当前其占比不足1%,拓宽绿氢在氢能中的占比符合“双碳”政策要求且潜力巨大。

(3) 氢能低成本化。氢能利用最大的困境是成本高,若没有政府的政策支持,氢能不具备与现有传统能源(包括电池)竞争的优势,通过技术提升与市场培育,预计5~10年后氢能才能“有利可图”。

为了实现上述发展目标,提出如下发展建议:

(1) 降低用氢成本。加大氢能政策扶持力度,积极拓宽氢能应用场景,加强用氢基础设施建设,通过提升市场认可度的方式降低用氢成本。另外,使用管道输氢、使用现有油气管道输送混合氢气都是比较现实的降低用氢成本的技术方案。在制氢环节,加强电解水制氢技术及其相关装备用高性能材料的研发,提高电解水效率与能源转化率,降低绿氢生产成本。

(2) 提升氢能储运安全性。氢脆是氢能应用不可规避的技术问题,可从氢储运转变为含氢物质储运,如液氨、甲醇,它们可以直接被使用,也可以作为获取氢的原料,能够满足大部分用氢场所的需求,且与现有设备相容性高、安全性好,因此被认为是最有实用前景的氢储运方式之一。

(3) 提高储氢密度。提高储氢密度是氢能利用的关键研发领域。目前,提高储氢密度的技术手段有提高压力、降低温度或者形成新的化合物。降低温度对储氢材质有特殊要求,经济性差;而提高压力是目前最常用的商业模式,但因对储氢密度提高程度有限不适合长远发展,只能作为过渡方案;形成氯化物的化学储氢最具有发展前景,但其吸放氢温度有严格限制,是目前重点攻关方向,是未来储氢的最佳技术路线。

(4) 开发高性能临氢材料。对于临氢材料而言,需要开发耐更高输送压力、更低储存温度的高性能金属材料,特别是钢铁材料。这需要攻克氢进入材料的界面问题、氢在材料内分布的准确实验测量、原位测量材料内部氢致起裂过程、多尺度定量数值模拟等一系列难题。为了解决这些难

题,有必要建立氢脆材料数据库,广泛应用大数据和机器学习技术助推新型材料工程应用。

参考文献

- [1] 李星国. 氢与氢能(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [2] 李佳. 氢能产业链深度研究: 氢能, 终极能源之路[EB/OL]. (2016-06-02). <https://max.book118.com/html/2023/1120/7003102104006010.shtm>.
- [3] 电力设备新能源行业氢能专题研究之一: 氢能重点产业链介绍[EB/OL]. (2023-08-02). <https://max.book118.com/html/2023/0731/5143032132010302.shtm>.
- [4] 镁基固态储氢行业市场分析[EB/OL]. (2023-06-25). <https://max.book118.com/html/2023/0622/6055101101005151.shtm>.
- [5] 于金虎. 氢能和燃料电池及其船舶应用进展[J]. 船舶电气与通信, 2020, 188(5): 69-76.
- [6] 王艺强, 刘录强, 张志成, 等. 化学储氢介质实现“西氢东送”的可行性研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(3): 1050-1058.
- [7] 陈晨. 氢能战略定位日益明确, 绿氢应用示范持续推进[EB/OL]. (2025-02-26). <https://www.fx361.cc/page/2025/0226/256648652.shtml>
- [8] 工信部等三部门: 加快清洁低碳氢替代应用[EB/OL]. (2024-12-30). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202412/content_6995692.htm.
- [9] 刘德民, 刘志刚. 新型电力系统下的氢储能研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2024, 10(2): 34-41.
- [10] 新华社. 中华人民共和国能源法[EB/OL]. (2024-11-09). https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202411/content_6985761.htm.
- [11] 2024-2029年氢能源业险投资及投资运作模式研究报告[EB/OL]. (2024-05-12). <https://max.book118.com/html/2024/0511/6150223215010130.shtm>.
- [12] Hand E. Hidden hydrogen: does Earth hold vast stores of a renewable, carbon-free fuel? [J]. Science, 2023, 379 (6633): 630-636.
- [13] 刘全有, 吴小奇, 孟庆强, 等. 天然氢气: 一种潜在的零碳能源[J]. 科学通报, 2024, 69(17): 2344-2350.
- [14] 刘红梅, 徐向亚, 张蓝溪, 等. 储氢材料的研究进展[J]. 石油化工, 2021, 50(10): 1101-1107.
- [15] 赵志坚, 崔维洁, 祁贻. 航运能源转型下的各种船用动力燃料前景展望[J]. 中国远洋海运, 2022(6): 42-48.
- [16] 彭永伦. 氢能在能源革命中的重要作用[J]. 能源与节能, 2025(2): 13-17.
- [17] 刘应都, 郭红霞, 欧阳晓平. 氢燃料电池技术发展现状及未来展望[J]. 中国工程科学, 2021, 23(4): 162-171
- [18] Stepie Z. A Comprehensive overview of hydrogen-fueled internal combustion engines: achievements and future challenges[J]. Energies, 2021, 14(6504): 1-26.
- [19] 氢能产业风险分析及管理对策[EB/OL]. (2023-07-02). <https://max.book118.com/html/2023/0629/8020054047005105.shtm>.
- [20] 兰亮云, 孔祥伟, 邱春林, 等. 基于多尺度力学实验的氢脆现象

- 的最新研究进展[J]. 金属学报, 2021, 57(7): 15-29.
- [21] 李其, 秦宗川, 于亚楠, 等. 单层整锻式储氢容器选材及关键制造技术分析[J]. 大型铸锻件, 2024(6): 60-64.
- [22] 王琴, 李文昊, 伍奕, 等. 抑制混氢输送管道氢脆的最低CO含量研究[J]. 腐蚀与防护, 2022, 40(2): 79-87.
- [23] Lee Y H, Lee H M, Kim Y, et al. Mechanical degradation of API X65 pipeline steel by exposure to hydrogen gas [J]. *Metals and Materials International*, 2011, 17(3): 389-395.
- [24] Gangloff R P, Somerday B P. Gaseous hydrogen embrittlement of materials in energy technologies volume 2: mechanisms, modeling and future developments [M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [25] Gangloff R P, Somerday B P. Gaseous hydrogen embrittlement of materials in energy technologies volume 2: the problem, its characterisation and effects on particular alloy classes [M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [26] Ding Y, Yu H Y, Zhao K, et al. Hydrogen-induced transgranular to intergranular fracture transition in bi-crystalline nickel [J]. *Scripta Materialia*, 2021, 204: 114122.
- [27] Yu H Y, Diaz A, Lu X, et al. Hydrogen embrittlement as a conspicuous material challenge—comprehensive review and future directions [J]. *Chemical Reviews*, 2024, 124(10): 6271-6392.
- [28] 周庆凡, 张俊法. 地下储氢技术研究综述[J]. 油气与新能源, 2022, 34(4): 1-6.
- [29] Alvaro A, Olden V, Macadre A, et al. Hydrogen embrittlement susceptibility of a weld simulated X70 heat affected zone under H₂ pressure [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2014, 597(5): 29-36.
- [30] Briottet L, Batisse R, Dinechin G, et al. Recommendations on X80 steel for the design of hydrogen gas transmission pipelines [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(11): 9423-9430.
- [31] 陈林, 董绍华, 李凤, 等. 氢环境下压力容器及管道材料相容性研究进展[J]. 力学与实践, 2022, 44(3): 503-518.
- [32] 李丛, 赵雷, 徐连勇, 等. 掺氢/纯氢环境下燃气轮机的氢致损伤研究进展[J]. 材料导报, 2025, 39(9): 126-135.
- [33] IEA. The Future of Hydrogen [EB/OL]. (2019-06-01). <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.
- [34] 刘俊, 苗雨菲, 张瑶珈. 氢能源行业深度报告: 氢能的2.0时代到来 [EB/OL]. (2024-05-08). https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzI1MjkzMTcwOQ=&mid=2247708519&idx=7&sn=a26e70c1fa30040563464f4631e3c&chksm=e8411e9b2bb5eca9897713eab6a9774c381273b51a5ceee2d35a3e76954ff60233d756242bffd&scene=27&poc_token=HGUY6mejd4tK0g4JZXTdja9Tu0dtaZUMcEo3A7M.
- [35] Ahad M T, Bhuiyan M M H, Sakib A N, et al. An overview of challenges for the future of hydrogen [J]. *Materials*, 2023, 16: 6680-6707.
- [36] 姜海, 王宇霖, 刘文质, 等. 氢基能源多元化储运体系研究[J]. 现代化工, 2025, 45(5): 17-24.
- [37] 李可欣, 董学强, 王昊成, 等. 低温高压储氢气瓶研究进展[J]. 科学通报, 2025, 70(14): 2176-2189.
- [38] 尚娟, 鲁仰辉, 郑津洋, 等. 掺氢天然气管道输送研究进展和挑战 [J]. 化工进展, 2021, 40(10): 5499-5506.
- [39] 黎子鸣. YFe₂基新型稀土合金结构与性能的关系 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [40] 张志芸, 张国强, 刘艳秋, 等. 车载储氢技术研究现状及发展方向 [J]. 油气储运, 2018, 37(11): 13-18.
- [41] 袁理, 赵梦妮, 任逸轩. 2021年氢能产业链深度研究报告 氢能产业链 [EB/OL]. (2022-01-03). https://data.eastmoney.com/report/zw_industry.jshtml?infocode=AP202201031538311029
- [42] 2024年能源转型氢能业分析报告: 氢能的2.0时代到来 [EB/OL]. (2024-03-21). <https://max.book118.com/html/2024/0318/5120342334011123.shtm>.
- [43] 氢储运方式、技术特点及适合场景梳理 [EB/OL]. (2023-09-15). <https://max.book118.com/html/2023/0913/5210302343010324.shtm>.
- [44] 金星星. 储氢材料研究进展 [J]. 科技创新与应用, 2023(5): 76-79.
- [45] 陈瑞. 高压储氢风险控制技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [46] 氢能联盟CHA. 69个「首个首创」, 中国氢能如何破局 [EB/OL]. (2025-01-13). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1819585001840619221&wfr=spider&for=pc>.
- [47] 卢奇秀. 氢能加速向“泛氢”能源方向发展 [N]. 中国能源报, 2024-08-26 (008). https://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2024-08/26/content_26077939.htm.
- [48] Zhang Y H, Wu S F, Wang L W, et al. Chemisorption solid materials for hydrogen storage near ambient temperature: a review [J]. *Frontiers in Energy*, 2023(17): 72-101.
- [49] Ren J W, Musyoka N M, Langmi H W, et al. Current research trends and perspectives on materials-based hydrogen storage solutions: A critical review [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(1): 289-311.
- [50] 王艺强, 刘录强, 张志成, 等. 化学储氢介质实现“西氢东送”的可行性研究 [J]. 储能科学与技术, 2024, 13(3): 1050-1058.
- [51] 田野. 氢能新世界—我国氢能产业发展现状、困境和对策 [J]. 中国石油企业, 2021(3): 14-21, 111.
- [52] 吴广新. 镁基储氢合金吸放氢热力学和动力学研究 [D]. 上海: 上海大学, 2009.
- [53] 阳月, 杨明, 陆晖. 我国氢能产业发展综述 [J]. 红水河, 2025, 44(1): 54-57, 88.
- [54] 张忠铎, 刘传森, 齐亚猛, 等. 新能源用钢管的应用现状、需求分析及思考 [J]. 钢管, 2024, 53(1): 1-15.
- [55] 韩秀林, 孙宏, 李建一, 等. 输氢管道钢管研究进展 [J]. 钢管, 2023, 52(1): 1-7.
- [56] 曹权, 王洪建, 秦业美, 等. 纯氢管道输氢技术发展现状与分析 [J]. 力学与实践, 2024, 46(1): 18-27
- [57] 陈燕, 刘江成, 李艳, 等. 氢气输送管道研究进展 [J]. 钢管,

- 2024, 53(5):6-14.
- [58] 镜泊湖. 国内氢气输送管网项目梳理[EB/OL]. (2023-07-25). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1772383407061509584&wfr=spider&for=pc>.
- [59] 仲冰, 张学秀, 张博, 等. 我国天然气掺氢产业发展研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 100-107.
- [60] 工信部、国家发改委等. 印发《加快工业领域清洁低碳氢应用实施方案》[J]. 中国设备工程, 2025(3): 1.
- [61] 林水静, 张胜杰. 清洁低碳氢将成为工业深度脱碳利剑[N/OL]. 中国能源报, 2025-01-06(007). <http://paper.people.com.cn/zgnyb/pc/attachment/202501/06/b4d8b1f9-4fe4-403e-964f-ac55e2aff8ce.pdf>.
- [62] 2024-2030年氢能源产业规划专项研究报告[EB/OL]. <https://max.book118.com/html/2024/0525/8100100135006072.shtm>.
- [63] 王雅熙, 陈宇, 李天雷, 等. 高压储氢容器及输送管道选材与设计标准综述[J]. 油气储运与处理, 2023, 41(4): 1-8.
- [64] 章小峰, 万亚雄, 武学俊, 等. Fe-Mn-(Al)-C高强韧性钢氢脆微观机制的研究进展[J]. 工程科学学报, 2020, 42(8): 949-962.
- [65] 李鑫, 韦博鑫, 鲁仰辉, 等. 临氢环境下管线钢氢损伤机理研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(5): 1125-1133.
- [66] 王贞. 高强DP钢中氢扩散行为及其对氢脆敏感性的影响[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2025.
- [67] GB/T 29729—2022 氢系统安全的基本要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [68] Hua Z L, Gao R Z, Xing B H, et al. State-of-the-art and knowledge gaps in gaseous hydrogen pipelines: from the perspective of materials, design, and integrity management[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2025, 26(2): 87-109.
- [69] 石荣建. 纳米析出相对马氏体钢氢脆性能影响机制的研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
- [70] 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]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [71] Huang L C, Chen D K, Xie D G, et al. Quantitative tests revealing hydrogen-enhanced dislocation motion in α -iron[J]. Nature Materials, 2023, 22: 710-716.
- [72] 林晓磊, 郭玉华. 超高强度钢的应用与分析[J]. 中国锰业, 2004, 22(2): 41-44.
- [73] 曲炎森. X80管线钢焊接热影响区氢致裂纹行为研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2010.
- [74] Nardo R M, Cerniglia D, Lombardo P, et al. Detection, characterization and sizing of hydrogen induced cracking in pressure vessels using phased array ultrasonic data processing[J]. Procedia Structural Integrity, 2016(2): 581-588.
- [75] 巩建鸣, 蒋文春, 唐建群, 等. 湿 H_2S 环境下低合金钢焊接接头氢扩散数值模拟[J]. 焊接学报, 2007, 28(4): 5-8.
- [76] 巩建鸣, 蒋文春, 唐建群, 等. 16MnR钢焊接接头氢扩散三维有限元模拟[J]. 机械工程学报, 2007, 43(9): 113-118.
- [77] 钟振前, 田志凌, 唐树平. 0Cr16Ni5Mo钢中条状夹杂物对氢扩散过程的影响[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(2): 84-89.

(编辑 许营)

修回日期: 2025-08-26

(上接第23页)

- [13] 青格勒, 黄文斌, 安钢, 等. 低硅碱性球团矿制备技术研究[J]. 烧结球团, 2022, 47(1): 119-126.
- [14] ZHU D Q, WANG D Z, PAN J, et al. Utilization of hydrated lime as binder and fluxing agent for the production of high basicity magnesium fluxed pellets[J]. ISIJ International, 2022, 62(4): 632-641.
- [15] 田筠清, 青格勒, 刘长江, 等. 使用石灰石生产低硅碱性球团矿试验[J]. 中国冶金, 2018, 28(4): 13-16.
- [16] 余晓波, 李志海, 韩红伟, 等. 首钢股份1号高炉高碱度球团矿冶炼工业试验[J]. 炼铁, 2020, 39(1): 12-16.
- [17] 韩红伟, 余晓波, 李志海, 等. 首钢股份3号高炉高比例球团矿冶炼工业试验[J]. 炼铁, 2023, 42(6): 55-59.
- [18] 王新东, 刘存强, 刘磊, 等. 碱性球团生产技术研究及高炉高比例应用实践[J]. 河北冶金, 2025(2): 1-11.
- [19] 于丽娟, 宋宪平, 王义达, 等. 鞍钢合理炉料结构的形成[J]. 钢铁, 2003, 38(11): 1-4.
- [20] 邓睿, 苏鸿, 韩基祥, 等. 高球比炉料结构下镁质球团的冶金性能研究[J]. 烧结球团, 2020, 45(2): 31-35.
- [21] 司金凤, 贾彦忠, 李凤臣. 配加高镁球团矿高炉炉料结构的研究[J]. 钢铁研究, 2016, 44(3): 1-5.
- [22] 滕召杰, 王凯, 陈建, 等. 首钢京唐3号高炉高比例球团矿冶炼实践[J]. 炼铁, 2021, 40(4): 29-32.
- [23] 毛庆武, 章启夫, 李欣, 等. 特大型高炉使用高比例球团矿冶炼技术及应用[J]. 炼铁, 2020, 39(6): 1-6.
- [24] 张旭升, 何友国, 曹树志. 唐钢新区2922m³高炉高球比生产的操作制度[J]. 炼铁, 2024, 43(2): 20-24.
- [25] 李朝旺, 庞真丽, 董国强, 等. 唐钢碱性球团矿的开发研究及高炉高球比冶炼[J]. 炼铁, 2023, 42(6): 60-64.
- [26] 张建良, 刘征建, 李克江, 等. CaO对球团矿还原行为及结构的影响[J]. 北京科技大学学报, 2015, 37(10): 1261-1268.
- [27] 朱德庆, 郭正启, 李建, 等. 高碱度烧结矿与酸性球团矿综合炉料的还原性能[J]. 钢铁研究学报, 2010, 22(5): 1-5.

(编辑 白璐)

修回日期: 2026-03-18