



北京 2022 年冬奥会张家口赛区 燃料电池汽车应用和氢能供应评估

Evaluation of fuel cell vehicle application and hydrogen
energy supply in Zhangjiakou competition Zone of the
Olympic Winter Games Beijing 2022

张家口氢能与可再生能源有限公司

2023 年 6 月

Zhangjiakou Hydrogen and Renewable Energy co., Ltd.

June 2023

课题组

组长

王贺武 清华大学车辆与运载学院教授
张家口市氢能与可再生能源研究院执行院长

协调人

张成斌 张家口市氢能与可再生能源研究院副院长

成员

高国强 张家口氢能与可再生能源有限公司研究主管
厉一平 张家口氢能与可再生能源有限公司研究员
孟晓敏 张家口氢能与可再生能源有限公司助理研究员
佟甜甜 张家口氢能与可再生能源有限公司助理研究员
霍俊青 张家口市公共交通集团有限公司副总经理

关于作者

王贺武，清华大学教授、博士生导师，中国电动汽车百人会副秘书长、清华大学碳中和研究院零碳交通研究中心主任、张家口市氢能与可再生能源研究院执行院长。研究方向为车用能源与动力系统评价。

(wanghw@tsinghua.edu.cn)

张成斌，张家口市氢能与可再生能源研究院副院长。研究领域是新能源汽车产业，包括产业政策、技术路线分析、车辆生命周期排放及评价、商业模式等。(zhangcb1976@tsinghua.edu.cn)

高国强，张家口氢能与可再生能源有限公司研究主管。从事氢能

产业政策分析、规划编制等工作。（gaoguoqiang@hycentre.org.cn）

厉一平，张家口氢能与可再生能源有限公司研究员。长期从事新能源汽车数据分析。（liyiping@hycentre.org.cn）

孟晓敏，张家口氢能与可再生能源有限公司助理研究员。长期从事氢能工作，负责氢能和燃料电池产业链项目管理。

（mengxiaomin@hycentre.org.cn）

佟甜甜，张家口氢能与可再生能源有限公司助理研究员。负责对接政府部门，协调调研企业和相关单位，协助研究人员进行课题研究。

（tongtiantian@hycentre.org.cn）

霍俊青，张家口市公共交通集团有限公司副总经理。长期从事公交运营、技术保障等工作，具有丰富的燃料电池车辆运营管理和实践经验。（zjkhjq@126.com）

致谢

本研究由张家口氢能与可再生能源有限公司撰写，由能源基金会提供资金支持。

在本项目研究过程中，研究团队得到了张家口市发展和改革委员会、张家口市交通运输局的大力支持，同时得到了各阶段评审专家为项目研究过程做出的倾力指导，包括杨福源、欧训民、方海峰、甄子健、韩武林、谢添、沈春干、张长令、雷雪亚等，在此向他们表示诚挚感谢。

研究团队同时感谢以下单位、企业和机构在项目研究过程中提供的帮助：

政府部门

张家口市发展和改革委员会

张家口市能源局

张家口市交通运输局

张家口市气象局

制氢企业

张家口海珀尔新能源科技有限公司

张家口市交投壳牌新能源有限公司

崇礼新天风能有限公司

建投燕山（沽源）风能有限公司

国电电力河北新能源开发有限公司尚义分公司

国华（赤城）风电有限公司

储运企业

中国石油运输有限公司河北分公司

北京环宇京辉京城气体科技有限公司

北京鸿港顺运输有限公司

加氢企业

张家口市交投氢能新能源科技有限公司

张家口中油新能源有限公司

中石化销售有限公司河北张家口石油分公司

系统企业

北京亿华通科技股份有限公司

整车企业

北汽福田汽车股份有限公司

中通客车股份有限公司

吉利四川商用车有限公司

宇通客车股份有限公司

上海申龙客车有限公司

丰田汽车（中国）投资有限公司

运营企业

张家口市公共交通集团有限公司

北京水木通达运输有限公司

高校机构

清华大学“氢能出行”关键技术研发和应用示范项目组

摘要

2022年北京冬奥会开展了全球最大规模的燃料电池汽车示范，其中张家口赛区燃料电池汽车数量达623辆，约占北京冬奥会燃料电池汽车示范总量的55.6%。冬（残）奥会期间，低温、强降雪等复杂气象条件以及高海拔、多弯道、大坡度等山地复杂地形，对燃料电池汽车的可靠性和动力性能提出了严苛的要求与挑战。最终，燃料电池汽车克服了低温严寒和复杂多变的路况条件，以极佳的可靠性和动力性能完成了张家口赛区交通运输服务保障工作。

课题基于张家口赛区燃料电池汽车示范，评估了赛时燃料电池汽车运行特征、氢能供应基础设施保障能力、氢安全以及环境效益等，探讨了示范中存在的问题与不足，对赛后车辆处置和利用、氢能供应基础设施可持续发展进行了分析，并提出相关政策建议，以期为其他地方开展类似活动提供参考，并为我国燃料电池汽车商业化探索方向。

研究显示，张家口赛区燃料电池汽车示范体现出了我国燃料电池产品的技术进步水平，成功验证了燃料电池汽车在北方低温山区运行的可靠性和技术可行性；形成了较为完备的绿氢制储运加保障能力；燃料电池汽车和氢能应用具备良好的环境效益。同时，通过本次示范对我国氢能产业发展起到了积极带动作用，成功探索了低碳制氢和应用协同发展的先进经验和模式。研究认为，随着技术进步，燃料电池汽车已具备在低温地区大规模推广应用的可行性。

研究发现，燃料电池汽车示范应用在绿氢电价、车辆类型、关键部件国产化及验证、数据采集以及评估指标体系建设等方面还存在不

足，赛后燃料电池汽车利用不充分，氢能供应基础设施可持续发展还面临多方挑战。

因此，还需要国家、地方和行业三个层面共同努力，不断完善制氢电价机制和优惠政策，积极引导氢能多元化和规模化利用、加强技术创新提升产品可靠性和经济性等，完善产业发展环境，从而推动燃料电池汽车规模化商业应用和氢能产业高质量发展。

由于水平有限，错误在所难免，欢迎批评指正。

课题组

2023年6月

目录

第一部分 燃料电池汽车应用和氢能供应评估	1
一、 项目背景	1
(一) 示范背景	1
(二) 研究范围	3
(三) 数据来源	4
二、 评估指标体系	4
三、 车辆运行评估	6
(一) 示范车辆信息	6
1. 车辆规模水平	6
2. 车型静态参数	7
3. 赛前使用情况	8
(二) 车辆技术性能	9
1. 车辆性能水平	9
2. 关键部件水平	10
(三) 车辆运行特征	11
1. 车辆服务水平	11
2. 车辆日活跃	11
3. 车辆运行里程	12
4. 车辆运行时长	13
5. 车辆运行速度	14
(四) 经济性	14
1. 平均百公里氢耗	14
2. 百公里燃料成本	16
3. 燃料电池发动机效率	17
(五) 可靠性	18
1. 故障次数	18
2. 故障里程	19
3. 耐久性	19
(六) 环境适应性	20
1. 低温启动	20
2. 余热管理	22
3. 爬坡和转弯	22
(七) 评估小节	23
四、 氢能供应评估	23
(一) 制氢	23
1. 氢气来源	23
2. 氢气生产	25

3.	氢气供应.....	26
(二)	储运.....	26
1.	运输企业.....	26
2.	运氢特征.....	27
(三)	加注.....	28
1.	基本情况.....	28
2.	加注量.....	29
3.	加注车次.....	31
4.	加注时长.....	32
(四)	氢气成本.....	34
1.	生产成本.....	34
2.	出厂价格.....	35
3.	加氢站氢气成本构成.....	35
4.	终端价格.....	35
(五)	评估小节.....	36
五、	氢安全评估.....	36
(一)	氢安全事故.....	36
(二)	产业链安全措施.....	37
1.	车辆质量安全.....	37
2.	车辆运营安全.....	38
3.	制储运加安全.....	38
(三)	评估小节.....	39
六、	环境效益评估.....	39
(一)	评估范围.....	39
(二)	基本参数.....	40
1.	电力排放因子.....	40
2.	柴油排放因子.....	41
3.	氢气排放因子.....	41
(三)	评估结果.....	43
1.	燃料周期碳排放.....	43
2.	燃料周期污染物排放.....	43
(四)	评估小节.....	44
七、	结论及建议.....	44
(一)	评估汇总.....	44
(二)	结论.....	45
1.	充分彰显了我国燃料电池汽车技术水平的进步与提升.....	45
2.	成功验证了燃料电池客车在低温高海拔地区的可行性.....	46
3.	形成完备的绿氢制取、储运和加注供应保障体系能力.....	47
4.	燃料电池客车和氢能规模化应用的环境效益十分突出.....	47
5.	北京冬奥会氢能示范对产业发展起到积极的推动作用.....	48
6.	探索了低碳制氢和应用协同可复制可推广的经验模式.....	50

7. 电价政策、车辆示范应用、数据采集等方面存在不足.....	52
(三) 建议.....	53
1. 国家层面.....	53
2. 地方层面.....	54
3. 行业层面.....	54
第二部分 冬奥会后车辆处置研究.....	56
一、 处置现状.....	56
(一) 冬(残)残奥会车辆投入情况.....	56
(二) 冬(残)奥会后车辆处置情况.....	57
二、 存在问题.....	59
(一) 部分 35MPa 车辆赛后陷入短暂停运状态.....	59
(二) 70MPa 车辆赛后利用面临多重因素制约.....	62
三、 结论及建议.....	63
(一) 结论.....	63
(二) 建议.....	64
1. 采取多种措施提高 35MPa 车辆利用率.....	64
2. 完善 70MPa 产品标准和加强技术创新.....	65
第三部分 氢能供应相关基础设施可持续方案研究.....	67
一、 发展现状.....	67
(一) 已构建较完善的氢能政策支撑体系.....	67
(二) 已先行先试探索制氢用电价格机制.....	68
(三) 已形成较大规模的电解水制氢产能.....	69
(四) 已适度超前部署一批加氢基础设施.....	70
(五) 已开展氢能交通为先导的示范应用.....	70
二、 存在问题.....	71
(一) 氢能供应设施利用不足.....	71
(二) 加氢站仍面临各种困难.....	72
(三) 电解水制氢用电价格高.....	73
(四) 绿氢应用和消纳不明确.....	74
(五) 缺少系统性的绿氢规划.....	75
三、 发展潜力.....	75
(一) 交通领域.....	75
(二) 工业领域.....	76
(三) 建筑领域.....	77
(四) 储能领域.....	78
(五) 发电领域.....	78

(六) 发展研判.....	80
1. 绿氢是张家口参与京津冀协同发展的重要优势.....	80
2. 未来张家口将继续立足可再生能源发展氢能.....	81
四、 相关建议.....	82
(一) 国家层面：加强电价支持，实施财税激励.....	82
1. 完善绿氢用电价格机制.....	82
2. 制定绿氢财税支持政策.....	82
3. 规范绿氢项目审批管理.....	84
4. 部署绿氢重大示范工程.....	84
(二) 地方层面：统筹规划布局，培育市场需求.....	84
1. 继续探索绿氢支持政策.....	84
2. 制定绿氢大基地规划.....	85
3. 培育多元化的市场需求.....	85
4. 强化政策落实和资金拨付.....	86
(三) 行业层面：加强技术创新，降低氢能成本.....	87
附 1：北京冬（残）奥会总体示范情况	89
附 2：亿华通、丰田和国电投车辆示范情况	89
附 3：北京冬奥会和日本东京奥运会氢能示范对比	89
附 4：燃料电池公交车经济性评估	92
附 5：国家层面关于绿氢相关政策	93

图片

图 1 张家口赛区位置.....	2
图 2 重点接驳转运场景示意.....	2
图 3 冬奥会期间张家口赛区气温日变化.....	3
图 4 北京冬奥会关键时间节点示意.....	4
图 5 张家口赛区示范应用的燃料电池车辆.....	7
图 6 宇通氢燃料无障碍公交车和柯斯达氢擎福祉车.....	8
图 7 冬奥会保障期内燃料电池客车日活跃 单位：辆.....	12
图 8 冬奥会保障期内燃料电池客车行驶里程统计.....	13
图 9 冬奥会保障期内燃料电池客车运行时长 单位：h.....	14
图 10 冬（残）奥会期间燃料电池车辆平均速度 单位：km/h.....	14
图 11 冬（残）奥会期间燃料电池客车氢耗 单位：kg/100km.....	15
图 12 燃料电池与柴油汽车百公里燃料成本对比 单位：元.....	16
图 13 冬奥期间亿华通燃料电池发动机平均效率.....	17
图 14 张家口赛区车辆燃料电池故障分布.....	18
图 15 冬（残）奥会 724 辆搭载亿华通系统的车辆故障里程统计.....	19
图 16 燃料电池寿命对比情况 单位：h.....	20
图 17 不同温度区间下整车动力系统平均冷启动成功率.....	21
图 18 燃料电池客车余热利用节能架构.....	22
图 19 海珀尔可再生氢和燕山石化清洁氢认证.....	25
图 20 3 家电解水制氢企业总产量及产能利用率.....	26
图 21 6 家企业供氢量.....	26
图 22 交投壳牌运氢效率统计.....	28
图 23 5 座加氢站日累计加注量趋势 单位：kg.....	30
图 24 日单车平均加注量水平 单位：kg/车·次.....	31
图 25 5 座加氢站日累计加注车次 单位：车次.....	32
图 26 加氢站日累计加注时长 单位：h.....	33
图 27 燃料电池车辆单次加注时长分布 单位：min.....	33
图 28 冬（残）奥会期间张家口市绿氢电价及生产成本.....	34
图 29 整车安全设计.....	37
图 30 张家口赛区燃料电池汽车减碳效益 单位：tCO ₂	43
图 31 张家口赛区燃料电池汽车减少污染物排放 单位：t.....	44
图 32 冬奥会后张家口燃料电池客车月活跃情况 单位：辆.....	59
图 33 冬奥会后张家口氢气生产情况.....	60
图 34 张家口市燃料电池客车运行里程 单位：万 km.....	61
图 35 国内 250 座在运营加氢站情况.....	63
图 36 张家口市氢能政策出台情况.....	68
图 37 冬（残）奥会后张家口市制氢与加氢情况.....	72

表格

表 1	课题评估指标.....	4
表 2	车辆示范规模.....	6
表 3	车辆服务水平.....	11
表 4	6 家氢气生产企业基本情况.....	24
表 5	长管拖车关键参数.....	27
表 6	赛区 5 座加氢站基本情况.....	29
表 7	张家口赛区加氢站氢气成本构成.....	35
表 8	车辆运营安全措施.....	38
表 9	制储运加安全措施.....	39
表 10	全国电力排放因子 单位: g/kWh.....	40
表 11	张家口市电力排放因子 单位: g/kWh.....	40
表 12	国五柴油客车燃料周期运行阶段的温室气体和污染物排放因子.....	41
表 13	氢气供应相关参数.....	41
表 14	不同路径氢气温室气体和污染物排放因子.....	42
表 15	评估指标汇总 单位: 个.....	45
表 16	冬(残)残奥会张家口赛区燃料电池汽车应用情况.....	57
表 17	冬(残)残奥会张家口赛区燃料电池汽车处置结果.....	58
表 18	截至 2023 年 4 月底国内柯斯达氢擎上险量情况.....	58
表 19	张家口电解水制氢项目情况.....	69
表 20	张家口加氢站建设情况.....	70
表 21	燃料电池在数据中心应用案例.....	78
表 22	张家口及周边绿氢需求潜力.....	80
表 23	主要国家绿氢支持政策.....	83

第一部分 燃料电池汽车应用和氢能供应评估

一、项目背景

(一) 示范背景

张家口赛区在赛时大规模应用燃料电池汽车作为接驳运载工具，为赛事提供交通运输服务保障。张家口赛区是 2022 年北京冬奥会三大赛区之一，位于崇礼区太子城区域，距主城区约 70km。北京奥组委提出“北京赛区内，主要使用纯电动、天然气车辆；延庆和张家口赛区内，主要使用氢燃料车辆”的原则，以安全为前提，最大限度应用节能与清洁能源车辆，减少碳排放量。按照上述原则，张家口赛区在冬奥会和冬残奥会期间分别投入燃料电池汽车 623 辆、294 辆，主要承担赛区内各类人群在冬奥村和场馆间（云顶场馆和古杨树场馆）的接驳和转运任务，运营线路规划最大里程 53.6km，最小里程 2.6km。张家口赛区燃料电池汽车服务人群包括运动员和随队官员、国际奥委会（奥林匹克大家庭）、国际单项体育联合会、注册媒体和转播商、市场开发合作伙伴、工作人员和志愿者七大利益相关方。

营场点都处于 1200m 海拔以上，平均海拔约 1500m，最高海拔超过 1900m。

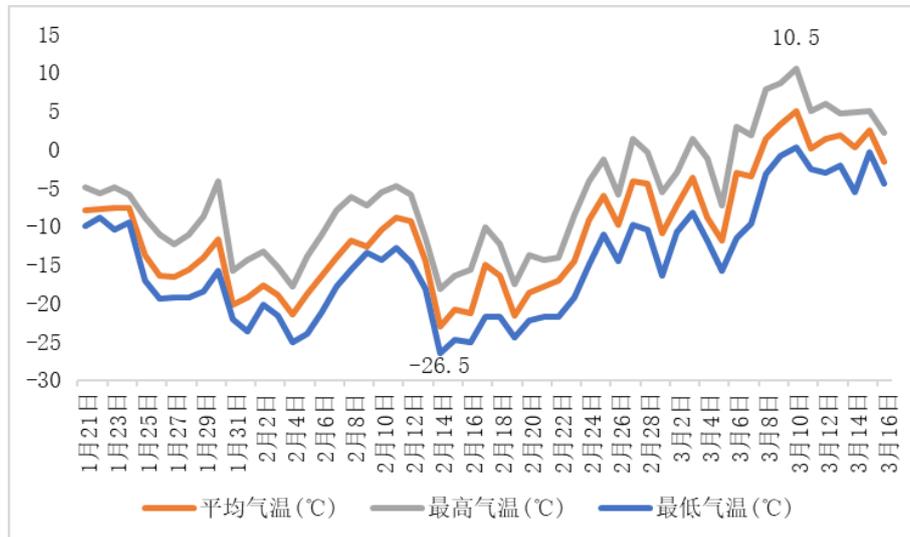


图 3 冬奥会期间张家口赛区气温日变化³

(二) 研究范围

区域范围：张家口赛区（不包含张家口主城区）。

对象范围：燃料电池汽车和氢能供应基础设施，具体包括冬奥会 477 辆和冬残奥会 201 辆燃料电池客车，海珀尔、交投壳牌和新天风能 3 座电解水制氢厂，太子城服务区加氢站（35MPa）、太子城服务区撬装站（70MPa）、崇礼南加氢站（35MPa）、崇礼南撬装站（70MPa）和崇礼北加氢站（35MPa）5 座加氢站。

时间范围：2022 年北京冬奥会和冬残奥会交通服务保障期为 2022 年 1 月 21 日至 3 月 16 日，共计 55 天。其中：冬奥会保障期从 1 月 21 日至 2 月 23 日，共计 34 天；冬残奥会保障期从 2 月 24 日至 3 月 16 日，共计 21 天。

³ 张家口市气象局.

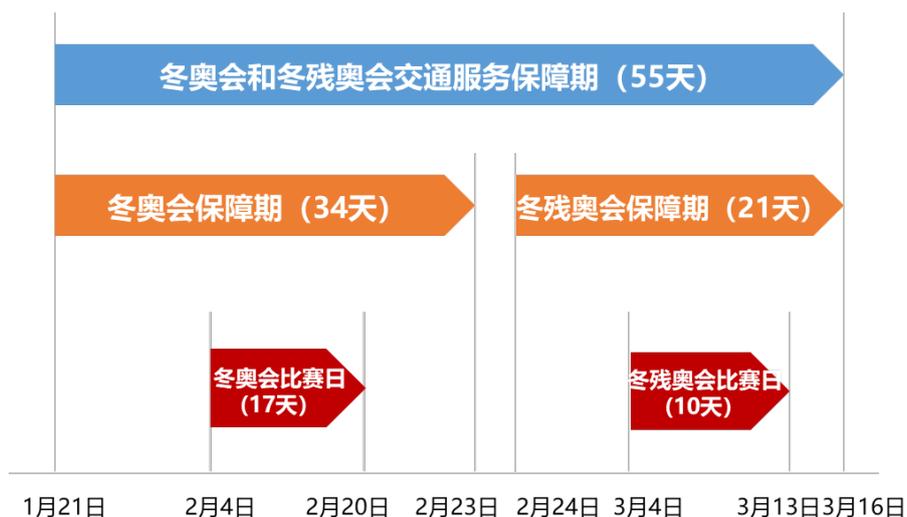


图 4 北京冬奥会关键时间节点示意

(三) 数据来源

课题重点分析张家口市公共交通集团有限公司、北京水木通达运输有限公司在冬奥会和冬残奥会投入运营的 477 辆、201 辆燃料电池客车运行数据，数据来源于张家口市氢能与可再生能源研究院数据采集和监测平台、亿华通氢见未来平台以及相关方。

二、评估指标体系

为更全面评价张家口赛区燃料电池汽车示范运营活动的成效，课题基于国内已有的评价指标和方法，结合数据的可获得性，最终提出了由 4 个一级指标、13 个二级指标以及 50 个三级指标组成的评价指标体系，以期为我国制定完善的燃料电池汽车示范应用评价体系和方法提供参考，为其他类似活动开展示范应用评价提供借鉴。

表 1 课题评估指标

一级指标	二级指标	三级指标
车辆运行	车辆类型及数量	车辆类型
		车辆数量
	性能参数（静态）	续航里程
		燃料电池系统功率

一级指标	二级指标	三级指标	
		燃料电池系统质量功率密度	
		低温冷启动温度	
		爬坡能力	
		动力电池类型/容量	
		储氢瓶类型/数量/容量	
		燃料电池系统关键部件国产化水平	
	车辆运行特征	完好车率	
		车辆日活跃	
		运送乘客人次	
		运输班次	
		累计运营里程	
		日均运营里程	
		车辆运行时长	
		平均运行车速	
	经济性	平均百公里氢耗	
		百公里燃料成本	
		燃料电池发动机效率	
	可靠性	燃料电池故障次数	
		故障里程	
		耐久性	
	环境适应性	低温冷启动时间	
		低温冷启动成功率	
		车辆温升性能	
		爬坡性能	
氢能供应	制氢	产能	
		产量	
		供氢量	
		制氢成本	
		产能利用率	
	储运	运氢距离	
		运氢量	
		运氢效率	
	加注	加注能力	
		运营天数	
		加注车次	
		加注时长	
		加注量	
	氢安全	氢安全措施及规范	整车质量安全
			整车运营安全措施
氢气制/运/加安全措施			
氢安全事故次数	制/运/加/车辆氢安全事故统计		
环境效益	燃料周期温室气体排放	CO ₂ 排放量	

一级指标	二级指标	三级指标
	燃料周期污染物排放	VOCs 排放量
		NO _x 排放量
		一次 PM _{2.5} 排放量
		SO ₂ 排放量

注：需要指出的是在实际评估中部分统计指标难以获取，如完好车率

三、车辆运行评估

(一) 示范车辆信息

1. 车辆规模水平

张家口赛区燃料电池汽车示范具有规模大、车辆类型多、技术路线多样的特征。冬奥会和冬残奥会期间，张家口赛区分别投入 623 辆和 294 辆燃料电池汽车，涉及大型客车、中型客车和乘用车 3 种车辆类型、6 个整车品牌、13 款车型、2 个系统集成商、35/70MPa 共 2 种压力类型、石墨堆和金属堆 2 种电堆。北京冬奥会是全球最大规模的一次燃料电池汽车赛事示范，示范车辆规模达到 1121 辆（不含张家口主城区 87 辆），其中张家口赛区示范车辆数量约占 55.6%，是北京冬奥会燃料电池汽车示范的重要承载地。

表 2 车辆示范规模

车辆类别	整车企业	系统商	储氢压力 (MPa)	电堆类型	冬奥会数量 (辆)	冬残奥会数量 (辆)
12m 大型客车	宇通、吉利、中通、福田、申龙	亿华通	35	石墨堆	357	116
11m 大型客车	福田	亿华通	35	金属堆	60	60
9.5m 中型客车	福田	亿华通	35	石墨堆	60	25
小计					477	201
7m 中型客车	丰田（四川一汽丰田）	丰田	70	金属堆	66	23
乘用车（Mirai）	丰田	丰田	70	金属堆	80	70
小计					146	93
合计					623	294

注：由亿华通配套的冬奥会 477 辆和冬残奥会 201 辆燃料电池客车是课题研究的重点对象，

由张家口公交和北京水木通达等负责运营

2. 车型静态参数

张家口赛区燃料电池汽车示范车型数量达到 13 款(冬奥会 13 款、冬残奥会 10 款), 主要涉及北汽福田、宇通客车、中通客车、吉利远程、申龙客车、丰田(含四川一汽丰田)等 6 家整车品牌。其中, 国内 11 款(不含丰田 2 款车型)大中型客车等速法下续航里程 510~700km, 燃料电池系统额定功率 63~80.5kW, 系统质量功率密度 252~405.9W/kg, 冷启动温度-30℃, 爬坡能力大于 15%。主要搭载磷酸铁锂和锰酸锂动力电池, 容量 100.16~149.76kWh。配置 6~8 个 35MPaIII型瓶, 储氢总量约 19.8~31.4kg。动力构型以燃料电池+动力电池的电-电混动方式。

图片					
车辆型号	ZK6126FCEVG2	ZK6125FCEVG5	ZK6125FCEVG10	BJ6956FCEVCH	BJ6123FCEVCH-3
品牌	宇通	宇通	宇通	福田	福田
图片					
车辆型号	BJ6123FCEVCH-5	DNC6120FCEVG1	DNC6120FCEVG2	LCK6126FCEVG1	BJ6116FCEVUH-2
品牌	福田	远程	远程	中通	福田
图片					
车辆型号	SLK6128AFCEVH	SCT6700FCEV	Mirai II Advanced		
品牌	申龙	四川一汽丰田	丰田		

图 5 张家口赛区示范应用的燃料电池车辆

同时, 为了保障冬残奥会运动员出行, 按照北京冬奥组委的要求, 张家口赛区投入部分燃料电池无障碍公交和福祉车, 具备低地板、车身侧倾、翻板摆渡等特殊功能, 能够在冬残奥会期间实现轮椅无障碍上下车, 方便运动员乘坐。柯斯达氢擎福祉车, 采用了后门开启自动

升降式上下车的方式，乘坐轮椅的运动员可以在不下轮椅的前提下，直接坐在轮椅上实现快速上下车。



图 6 宇通氢燃料无障碍公交车和柯斯达氢擎福祉车

3. 赛前使用情况

北京冬奥会前，477 辆燃料电池客车已投入实际运营或完成赛前测试，其中最早一批车于 2018 年 8 月作为公交车投入运营，最晚一批车也在 2021 年 10 月完成上牌。从实际运营情况看，477 辆燃料电池客车累计行驶里程超过 1200 万 km，单车累计最大行驶里程 118363km。

为适应冬奥会张家口赛区的超低温环境，亿华通携手福田欧辉客车于 2020 年 1 月在海拉尔完成了极寒测试，氢燃料电池客车在 -30°C 的环境下，放置超过 8 小时后，进行了超低温冷启动测试，116 秒成功启动。同时，部分车辆在赛前参与了 2021 年 2 月和 11 月相约北京

系列冬奥测试赛、张家口赛区两项国际测试赛、张家口冬奥村及冬奥场馆的全要素测试等，车辆在低温启动、雪地爬坡、续航能力等方面均符合冬奥测试要求。

(二) 车辆技术性能

1. 车辆性能水平

张家口赛区燃料电池汽车的性能水平能够满足在低温、高海拔山区的运营需求。针对张家口赛区低温和山地运营场景需求，为了更好地满足冬奥交通服务保障工作，整车企业联合燃料电池系统集成商、运营企业等，研制了符合场景需求的燃料电池客车，并应用多项新技术。

(1) 低温冷启动技术。开发和应用-30°C环境下燃料电池系统快速冷启动关键技术，突破石墨板的低温启动极限，该项技术可实现-30°C环境下 124s 即达额定功率快速启动，解决低温环境下燃料电池快速启动的难题。采用快速加热动力电池系统，在-40°C的情况下，动力电池每分钟温升可以达到 7.2°C⁴。同时，冬（残）奥会期间，燃料电池车辆实现-26.5°C低温冷启动，-40°C极寒低温存放和停机自动保护，冬奥会整车动力系统（燃料电池+动力电池）冷启动成功时间≤5min 的占比达到 81.8%，冬残奥会整车动力系统冷启动成功时间≤5min 的占比达到 98.3%。

(2) 爬坡性能。为适应高原陡坡环境要求，福田汽车创新开发和采用双电机耦合无动力中断自动变速电驱动系统，实现无动力中断、

4 北汽福田秦志东：服务冬奥会,让我们看到燃料电池未来在中重型车辆上的应用空间。
<http://www.bjcv.com/show-13-18774-1>.

可靠平顺多模式切换，后备驱动力和后备功率均较为充足，车辆爬坡性能显著提升，满足冬奥山地高爬坡使用场景需求，整车最大爬坡度达 15%以上。优化控制策略，针对运营场景海拔较高，采用模糊逻辑控制方式，实现了能量管理的动态调节，协调电池系统输出功率与燃料电池系统发电功率，满足高海拔环境中持续输出能量的需求。冬（残）奥会期间，燃料电池客车顺利通过转枝莲隧道 500m 6.98%的纵坡和核心区环岛 230m 6.91%的纵坡。

（3）热管理技术。同时兼顾极寒条件车内取暖，创新开发整车智能综合热管理系统，实现燃料电池系统余热取暖。冬（残）奥会期间，福田车辆搭载国内首创的“U 度”综合热管理技术，可将氢燃料电池所产生的废热进行循环利用，利用所产生的废热为车内采暖和前车窗除霜、除雾，实现在 25min 内将车内温度升至 10°C以上。福田 BJ6956FCEVCH 测试结果显示，暖风系统可在 20.85min 内将车内温度升至 10°C⁵。

（4）车载储氢系统集成技术。首次实现 70MPa III型瓶车载氢系统集成技术在燃料电池客车上的应用，填补了国内空白。

（5）国产 70MPa 加注技术。示范应用国富氢能 70MPa 加注技术，在冬奥期间实现了安全稳定运行，体现出自主设备的可靠性。

2. 关键部件水平

国产燃料电池技术水平提升明显，但关键部件国产化程度仍需提升。13 款车型搭载亿华通 YHTG60、YHTG80 和 TS80 以及丰田

5 北汽福田.冬奥服务场景下高性能氢燃料客车研发.2023.

TFCS 等 4 款燃料电池发动机，其中 YHTG60 和 YHTG80 采用国产石墨堆，电堆体积功率密度分别为 2.01kW/L、2.5kW/L，较“十三五”初期 1.5kW/L 的技术水平有明显提升；YHTS80 采用金属堆，体积功率密度为 3.1kW/L。丰田 TFCS 系统采用金属堆，体积功率密度为 5.4kW/L。

(三) 车辆运行特征

1. 车辆服务水平

张家口赛区燃料电池汽车以零事故、高准点率等高水平完成了冬奥会交通运输服务工作，且驾驶员、乘客对车辆的满意度反馈较高。冬（残）奥会期间燃料电池客车累计运营线路 89 条，累计发车约 7.46 万车次，累计载客约 75.7 万人次。

表 3 车辆服务水平

运营企业	服务线路 (服务人群)	冬奥会		冬残奥会		运行 车次 (车 次)	载客人 次(人 次)
		车辆规 模(辆)	线路条 数(条)	车辆规 模(辆)	线路条 数(条)		
张 家 口 公 交	TA 班车 (运动员及随队 官员)	357	38	129	16	46939	277900
	TG 合乘班车 (技术官 员、奥林匹克大家庭、市 场开发商等注册人员)						
	DDS 班车						
水 木 通 达	TW 班车 (国内技术官 员、工作人员及志愿者)	120	22	72	13	27621	479677
合计		477	60	201	29	74560	757577

2. 车辆日活跃

冬(残)奥会期间燃料电池客车日活跃(车辆日行驶里程 $\geq 2.6\text{km}$ 、时间 $\geq 10\text{min}$)数量较大，呈现出较高的使用特征。分阶段看，冬奥

会保障期内投入燃料电池客车 477 辆，车辆日活跃最大 444 辆，最小 194 辆；冬残奥会保障期内投入燃料电池客车 201 辆，车辆日活跃最大 176 辆，最小 97 辆。按照冬奥组委要求，需要提前预留备用车辆（各线路备用车辆按 10% 准备，如张家口公交 357 辆车中有 36 辆为备用车辆），这些车辆根据需求参与每日的实际运营。

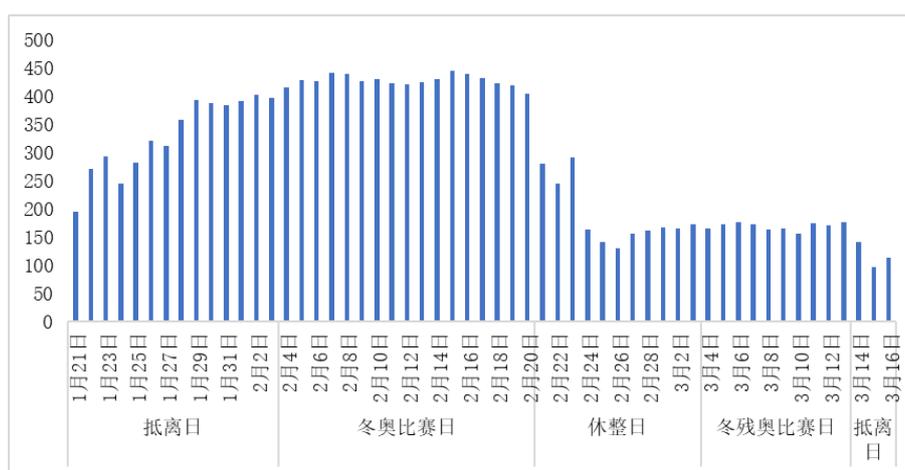


图 7 冬奥会保障期内燃料电池客车日活跃 单位：辆

3. 车辆运行里程

冬（残）奥会期间，燃料电池客车累计行驶里程 139.25 万 km，其中：冬奥会 477 辆累计行驶里程 117.16 万 km，冬残奥会 201 辆累计行驶里程 22.09 万 km。冬奥会保障期内，车队单日最大累计行驶里程 4.49 万 km；单车日最大里程 629.50km，日均里程 88.87km。Top 10 单车累计行驶里程均超过 8500km，单车累计最大里程 10573.90km。冬残奥会保障期内，车队单日最大累计行驶里程 1.30 万 km。单车日最大里程 270.60km，日均里程 64.62km。Top 10 单车累计行驶里程均超过 2400km，单车累计最大里程 3646.10km。



图 8 冬奥会保障期内燃料电池客车行驶里程统计

4. 车辆运行时长

由于冬奥赛事的特殊性、部分出行需求的不确定性以及崇礼区域低温特征，导致燃料电池车辆总体运行时间较长（含热车及等待时长）。冬（残）奥会期间，燃料电池客车累计运行时长约 11.41 万 h，其中：冬奥会 477 辆累计运行时长约 9.39 万 h，冬残奥会 201 辆累计运行时长约 2.02 万 h。冬奥会保障期内，车队单日最大累计运行时长约 4069h；单车日最大运行时长 22.07h，日均运行时长 6.42h。Top 10 单车累计运行时长均超过 370h，单车累计最大运行时长 431.73h。冬残奥会保障期内，车队单日最大累计运行时长约 1134h；单车日最大运行时长 21.78h，日均运行时长 5.58h。Top 10 单车累计运行时长均超过 200h，单车累计最大运行时长 260.75h。

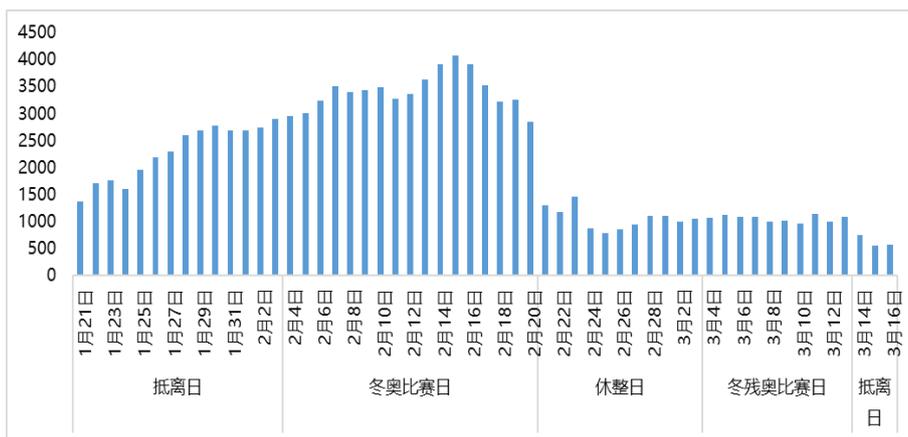


图 9 冬奥会保障期内燃料电池客车运行时长 单位: h

5. 车辆运行速度

由于张家口赛区属于山地地形，道路坡度大、弯多且部分道路狭窄，比赛期间车流量较大，为保障通行和人员安全，车辆时速一般不高于 30km/h，特殊区域甚至会低于 10km/h。其中 9.5m 车辆平均运行速度 27.8km/h，11m 车辆平均运行速度 28.3km/h，12m 车辆平均运行速度 25.4km/h。

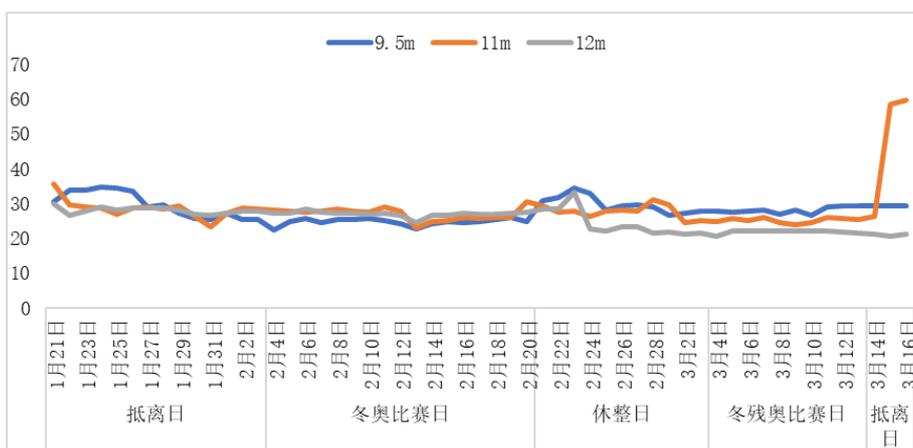


图 10 冬（残）奥会期间燃料电池车辆平均速度 单位: km/h

(四) 经济性

1. 平均百公里氢耗

冬（残）奥会期间，张家口赛区燃料电池汽车的平均百公里氢

耗高于行业平均水平，这与冬奥会特殊示范场景有直接关系。冬（残）奥会期间，为了保障运动员乘坐舒适性，车辆需要提前 0.5~1h 进行车辆启动、预加热以及开展点检，以保证车厢内温度达标；受气温、地形、路况、车辆负荷、等待时间长、司机驾驶习惯等因素影响，冬（残）奥会燃料电池客车实际能耗相对偏高。以张家口 12m 燃料电池公交为例，2021 年 1~3 月平均氢气消耗量为 8.58kg/100km。《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》2022 年年度评估商用车实际平均氢耗约为 5~7.8kg/100km。国家重点研发计划“科技冬奥”重点专项《“氢能出行”关键技术研发和应用示范》项目（以下简称“科技冬奥氢能出行项目”）要求燃料电池车辆的氢耗为：9m≤6kg/100km，11m≤7kg/100km，12m≤8kg/100km。冬奥会保障期内，9.5m、11m、12m 燃料电池客车能耗分别为 11.05kg/100km、10.69kg/100km、10.17kg/100km；冬残奥会保障期内，9.5m、11m、12m 燃料电池客车运行能耗分别为 6.35kg/100km、7.85kg/100km、9.22kg/100km。与冬奥会保障期相比，燃料电池车辆的能耗明显下降，说明氢耗随环境温度、工况变化而下降。

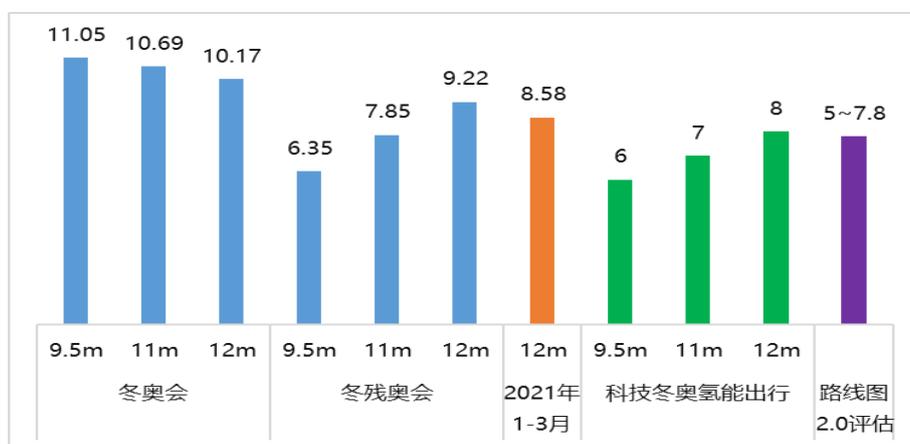


图 11 冬（残）奥会期间燃料电池客车氢耗 单位：kg/100km

2. 百公里燃料成本

冬（残）奥会期间，燃料电池车辆的百公里燃料成本要高于同级别柴油车，这与赛区氢气价格高、车辆能耗高有直接关系。经济性是燃料电池车辆能否实现商业化推广的重要因素，其中燃料成本是关键。为了与传统车辆进行对比，采用百公里燃料成本指标，燃料电池车辆的百公里燃料成本为百公里氢气消耗质量与氢气价格的乘积。冬奥会期间，张家口赛区氢气价格为 70 元/kg，冬奥会场景下 9.8m 团体、11m 团体和 12m 公交百公里氢气成本分别为 773.5 元、748.3 元、711.9 元；冬残奥会场景下，9.8m 团体、11m 团体和 12m 公交百公里氢气成本分别为 444.5 元、549.5 元、645.4 元。同级别柴油车型的运营成本以油耗和油价计算，9.8m 团体、11m 团体和 12m 公交百公里油耗分别取 30L、30L 和 35L⁶，柴油价格取 8 元/L，9.8m 团体、11m 团体和 12m 公交百公里柴油成本分别为 225.0 元、225.0 元、262.5 元。可以看出，在氢气 70 元/kg 的价格下，燃料电池车辆的百公里燃料成本显著高于同级别柴油车，约为同级别柴油车的 2.9~3.0 倍。

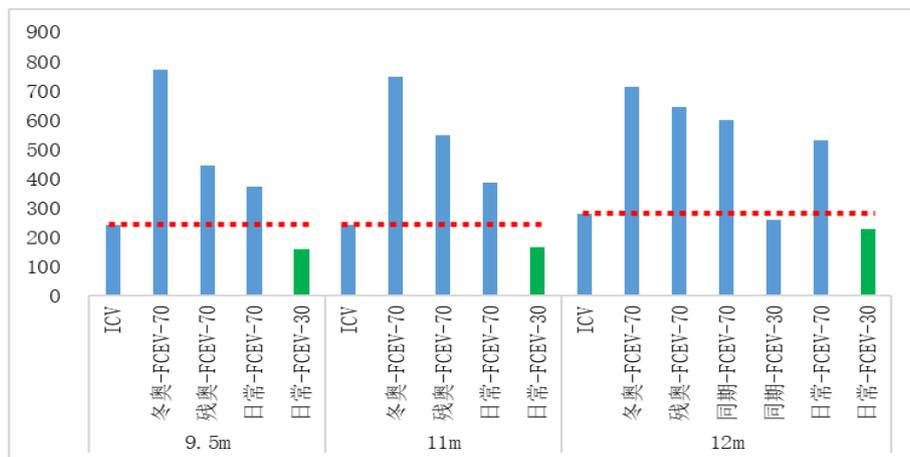


图 12 燃料电池与柴油汽车百公里燃料成本对比 单位：元

6 张家口公交公司提供。

注：日常是指与全年运营相比，同期是指与上年 1-3 月相比较

3. 燃料电池发动机效率

冬（残）奥会期间，燃料电池发动机平均效率高于传统柴油机的平均效率水平。效率是评价发动机性能的重要指标。燃料电池发动机效率是指其单位时间净输出能量与所消耗氢气的理论能量之间的比值。车载燃料电池发动机在长时间尺度下的平均效率与发动机的性能、整车的动力系统能量管理策略、司机的驾驶习惯、实际的行驶工况都密切相关。张家口赛区车辆运营场站的海拔都在 1200m 以上，平均海拔 1500m，在这样恶劣的环境情况下，亿华通燃料电池发动机平均效率依然达到 45%以上。相比之下，目前传统柴油机的平均效率在 35%左右。燃料电池发动机的最高效率已达到 60%，超过《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》提出的商用车燃料电池系统 2025 年 55% 的最高效率目标。

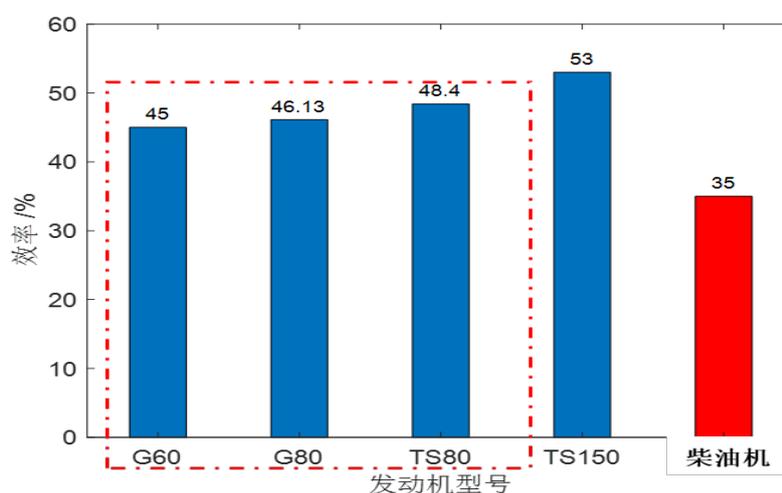


图 13 冬奥期间亿华通燃料电池发动机平均效率⁷

注：张家口赛区示范应用了 G60、G80 和 TS80

⁷ 数据来源：亿华通。

(五) 可靠性

可靠性是燃料电池车辆的关键性能指标，是保证车辆示范运营及大规模推广的基础。评估燃料电池可靠性的指标主要有车辆完好率、故障次数、故障里程和耐久性。因冬奥会交通保障任务时间紧、任务重，相关运营企业并未统计车辆完好率。以下主要分析冬（残）奥会期间燃料电池车辆的故障次数、故障里程和耐久性。

1. 故障次数

冬（残）奥会期间，**散热系统故障、氢系统故障是燃料电池的主要故障类型**。根据故障工单统计，散热系统故障占比约 33%，氢系统故障占比约 22%，空气系统故障占比约 17%，电气系统故障占比 6%，其他零部件占比约 22%。亿华通和相关整车企业在赛区组建了服务团队，以及采取提前备品备件等措施，对车辆相关故障进行了及时维修处理，极大地保障冬奥燃料电池车辆的正常运营。

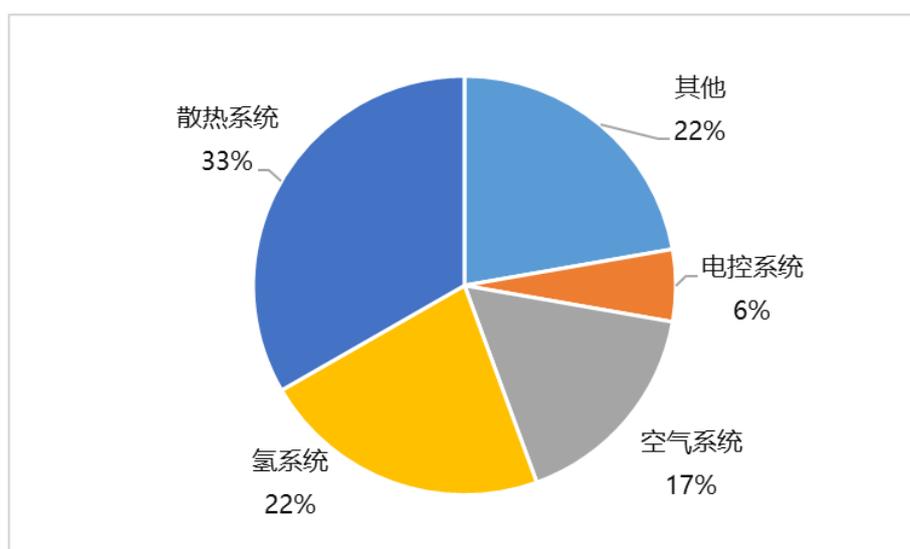


图 14 张家口赛区车辆燃料电池故障分布

2. 故障里程

亿华通燃料电池发动机的平均无故障间隔里程已大幅优于行业平均水平。北京和张家口赛区 724 辆搭载亿华通燃料电池发动机车辆，平均首次故障里程达到 26605km，平均故障间隔里程达到 22705km。该数值优于 UNDP 一期、二期项目平均无故障里程（分别为 1375km、3430km）⁸，以及朱成等（2022）统计的国内 7 个城市 128 辆燃料电池客车平均无故障运行里程 7761km⁹。

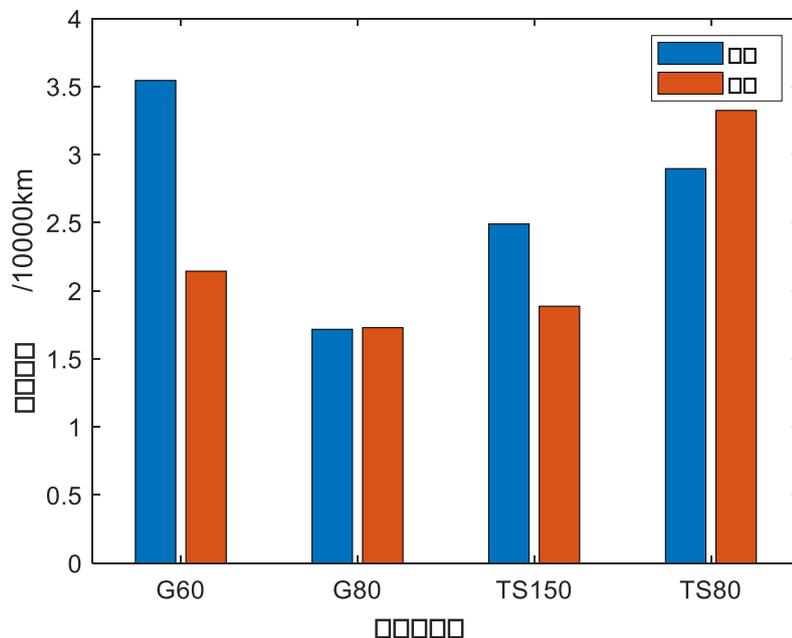


图 15 冬（残）奥会 724 辆搭载亿华通系统的车辆故障里程统计¹⁰

注：张家口赛区示范应用了 G60、G80 和 TS80

3. 耐久性

实车预测寿命已超过《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》提出的 2025 年商用车燃料电池系统寿命目标，但仍落后于国外先进水

8 方川,袁殿,邵扬斌,徐梁飞,李飞强,胡尊严,李建秋,周宝,戴威.面向冬奥示范的新一代燃料电池系统技术突破[J].汽车工程,2022,44(04):535-544.DOI:10.19562/j.chinasae.qcgc.2022.04.009.

9 朱成,滕欣余,胡辰树等.典型区域燃料电池汽车示范运行情况[C]//中国环境科学学会环境工程分会.中国环境科学学会 2022 年科学技术年会--环境工程技术创新与应用分会场论文集

(四).2022:5.DOI:10.26914/c.cnkihy.2022.042825.

10 资源来源：亿华通提供。

平。耐久性衡量燃料电池系统技术水平最重要的指标，也是决定燃料电池汽车商业化的关键因素。以 10 辆参与冬奥会的宇通车辆运行数据(65kW)为基础，预测该系列燃料电池产品的寿命大于 18000h¹¹。按照市区公交车平均速度 25km/h、年均里程 60000km 计算，搭载该系列燃料电池系统的车辆可行驶 45 万 km，基本接近传统内燃机车辆的水平。《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》中提出 2025 年商用车燃料电池系统寿命达到 15000h、整车里程 40 万 km 的目标。根据中国汽车工程学会《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》2022 年度评估结果显示，2021 年和 2022 年商用车燃料电池系统寿命分别为>10000h、20000h，商用车里程 30~50 万 km，而国外先进水平达到 30000h、里程 70 万 km。

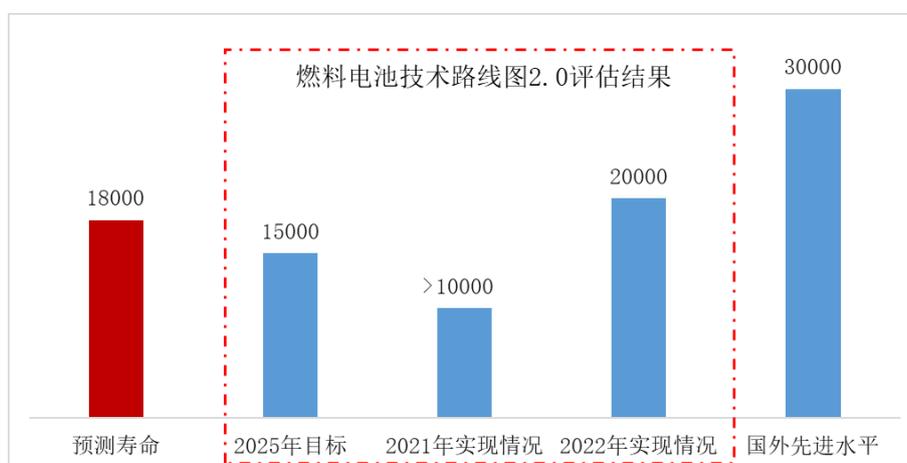


图 16 燃料电池寿命对比情况 单位: h

(六) 环境适应性

1. 低温启动

张家口赛区燃料电池车辆具备较强的低温启动能力。由于燃料

11 李建秋.高性能商用车燃料电池系统关键技术及其产业化应用. 2022 年 10 月 6 日.

电池在零下环境中，其反应生成物水会因低温而冻结，造成燃料电池性能下降，无法启动。冷启动能力是对冬奥示范场景下燃料电池的重要考量指标。衡量冷启动能力的指标有启动最低温度、启动时间、启动成功率等。燃料电池系统按照 GB/T 33979-2017《质子交换膜燃料电池发电系统低温特性测试方法》、GB/T 24554-2009《燃料电池发动机性能试验方法》和《燃料电池汽车测试规范》（装备中心[2021]367号）进行低温启动及运行试验检验，均通过第三方机构认证，能够在-30℃环境下实现低温启动。冬（残）奥会期间，张家口赛区最低气温-26.5℃，整车动力系统平均冷启动成功率 89.0%，基本与张家口 CNG 公交平均启动成功率 90%¹²的水平相当；平均冷启动成功时间 160.6s，大幅优于科技冬奥氢能出行项目要求（低温启动成功时间低于 5min）。

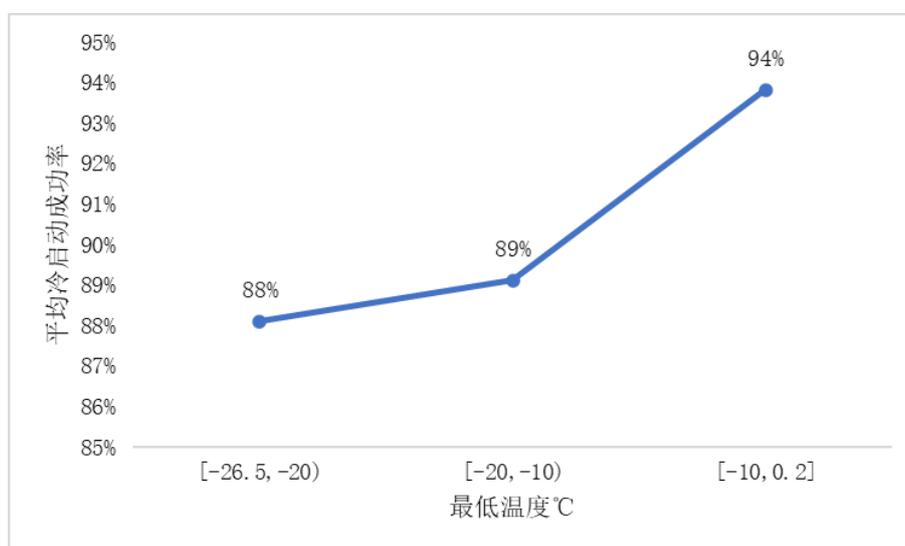


图 17 不同温度区间下整车动力系统平均冷启动成功率

12 张家口氢能可再生资源有限公司.以张家口为代表的寒冷地区氢燃料电池公交车应用评估及发展建议.2021.

2. 余热管理

在车辆余热管理上，针对冬季舒适性与行驶里程矛盾，北汽福田开发了余热调节自适应整车综合热管理技术——U度，能够在 25min 内使车内温度升至 10°C 以上。在燃料电池系统较高的发电效率基础上，进一步挖掘废热的利用，用余热来满足车辆的供暖需求，提升节能效果至 13% 以上。张家口赛区各种车型在 -30°C 的赛时环境温度下，10~25 分钟将车内温度升至 10°C 左右，基本达到科技部氢能出行项目提出“30min 内将车内温度升至 10°C 以上”的相关要求。

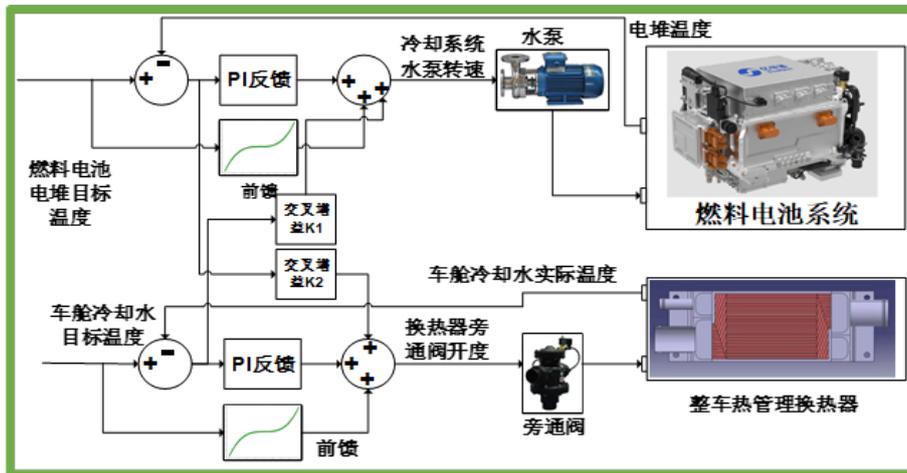


图 18 燃料电池客车余热利用节能架构¹³

3. 爬坡和转弯

张家口赛区燃料电池车辆在赛时爬坡性能和转弯能力均达到车辆选型标准要求，满足赛时运营需求。张家口赛区燃料电池车辆要求爬坡时无打滑现象，停稳后能够平稳起步，车辆功能正常，稳定转向，并且能够在雨雪气候环境下顺利通行 500m 的 7% 纵坡，同时顺利通行 9m 急弯。针对大坡度问题，车企通过优化控制策略，采用模糊逻辑

13 李建秋.高性能商用车燃料电池系统关键技术及其产业化应用. 2022 年 10 月 6 日.

辑控制方式，实现了能量管理的动态调节，协调电池系统输出功率与燃料电池系统发电功率，满足高海拔环境中持续输出能量的需求。张家口赛区燃料电池汽车克服了冰雪路面大坡度爬坡动力供应问题，实现持续上坡、驻坡安全转向，顺利通过 500m 纵坡 6.98%的转枝莲隧道，且顺利通过云顶 A 结束区 9m 的转弯半径。

(七) 评估小节

从上述对车辆运行的评估结果看，共有 6 个二级指标、28 个三级评估指标，其中：有标准可评估的三级指标 16 个。在 16 个可评估的三级指标中，10 个指标达到要求，3 个指标基本达到要求，3 个指标未达要求。3 个未达要求的指标分别是完好车率、平均百公里氢耗和百公里燃料成本。完好车率是因赛时交通运输任务时间紧、任务重，车辆企业的工作重心在于安全稳定的完成车辆运输任务，故未统计车辆完好车率。平均百公里氢耗未达要求是因赛时氢耗水平偏高，这与低温、高海拔、路况、车辆负荷、司机驾驶习惯等因素有关，特别是为了等待运动员乘车，需要长时间等待。百公里燃料成本未达要求，是因为赛区氢气价格高（70 元/kg）和车辆氢耗水平高造成的。

四、氢能供应评估

(一) 制氢

1. 氢气来源

张家口赛区形成了多样化的氢源保障体系，具备氢气来源广、技术路径多样的特征。在国内燃料电池汽车大型赛事示范活动中，张家口赛区实现了绿氢的第一次集中规模化应用。氢气主要来源于海珀

尔、交投壳牌、崇礼新天风能 3 家域内企业，以及燕山石化、天津石化和华北石化分公司 3 家域外企业。6 家企业氢气总产能 28.96t/d。3 家域内供氢企业总产能 12.86t/d，约占 44.4%，交通壳牌（8t/d）、海珀尔（4t/d）和新天风能（0.86t/d）均采用碱性电解水制氢技术。海珀尔和交投壳牌 2 个项目采用网电制氢，通过“四方协作机制”在电力交易平台上获得可再生能源电力。这种不直接以可再生能源制氢，但通过购买可再生能源电力生产氢气的也可被认为是可再生能源制氢，符合《低碳氢、清洁氢与可再生氢的标准与评价》（T/CAB 0078-2020）中关于可再生氢的规定。新天风能项目采用风电制氢。3 家域外供氢企业总产能 16.1t/d，燕山石化（4.3t/d）、天津石化（6.4t/d）和华北石化分公司（5.4t/d）采用工业副产氢提纯技术。

表 46 家氢气生产企业基本情况

项目名称	海珀尔制氢项目	交投壳牌绿色氢能一体化示范基地项目	崇礼新天风能大规模风光互补制氢关键技术与应用示范项目	燕山石化北京冬奥会氢气新能源保供项目	中石化天津炼油部加氢母站	中石油华北石化燃料电池撬装项目
建设企业	海珀尔	交投壳牌	崇礼新天风能	燕山石化	天津石化	中石油华北石化分公司
项目建设地点	张家口市桥东区	张家口市桥东区	张家口市崇礼区	北京市房山区	天津市滨海新区	河北省任丘市
制氢技术路线	碱性电解水	碱性电解水	碱性电解水	副产氢提纯	副产氢提纯	副产氢提纯
电力来源	网电（绿电）	网电（绿电）	可再生电力	/	/	/
产能（t/d）	4	8	0.86	4.3	6.4	5.4



图 19 海珀尔可再生氢和燕山石化清洁氢认证

2. 氢气生产

赛时 3 家域内电解水制产能及产量能够满足赛区和主城区用氢需求，但产能利用率未完全释放。冬（残）奥会期间，海珀尔、交投壳牌、新天风能分别实际生产 55 天、49 天和 13 天，3 家企业累计生产氢气 195.49t，大部分用于供应张家口赛区，还有一部分供应张家口市主城区加氢站（纬三路和创坝站）。分企业看，交投壳牌产量占比 51.03%，海珀尔占比 47.4%，新天风能占比 1.57%。分阶段看，冬奥会保障期内，累计生产氢气 162.24t，日最大产量 6.41t，日最大产能利用率 49.87%；冬残奥会保障期内，累计生产氢气 33.25t，日最大产量 2.49t，日最大产能利用率 17.87%。

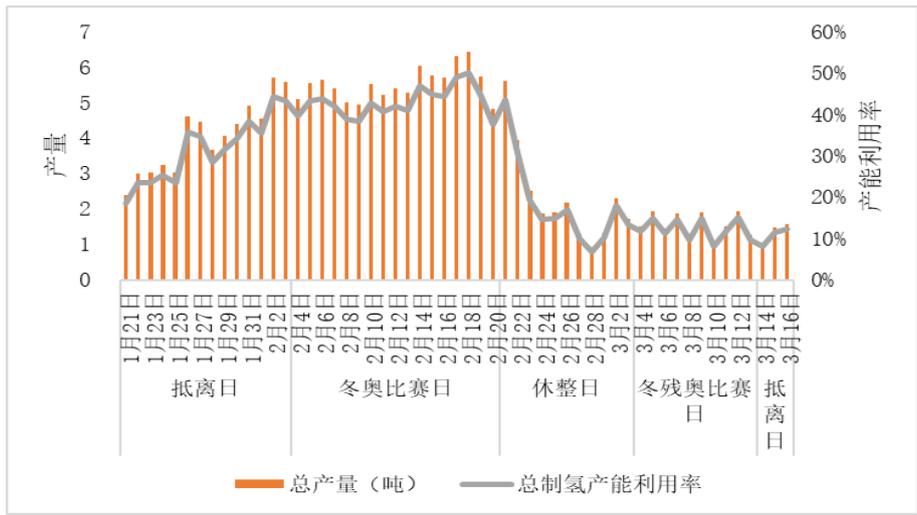


图 20 3 家电解水制氢企业总产量及产能利用率

3. 氢气供应

张家口赛区构建了绿氢为主、工业副产氢为辅的氢源供应格局。

冬（残）奥会期间，6 家企业向张家口赛区累计供应氢气 160.65t，其中，3 家域内企业累计供应绿氢 148.75t，约占总量的 92.6%；3 家域外企业累计供应工业副产氢 11.90t，占比 7.4%。

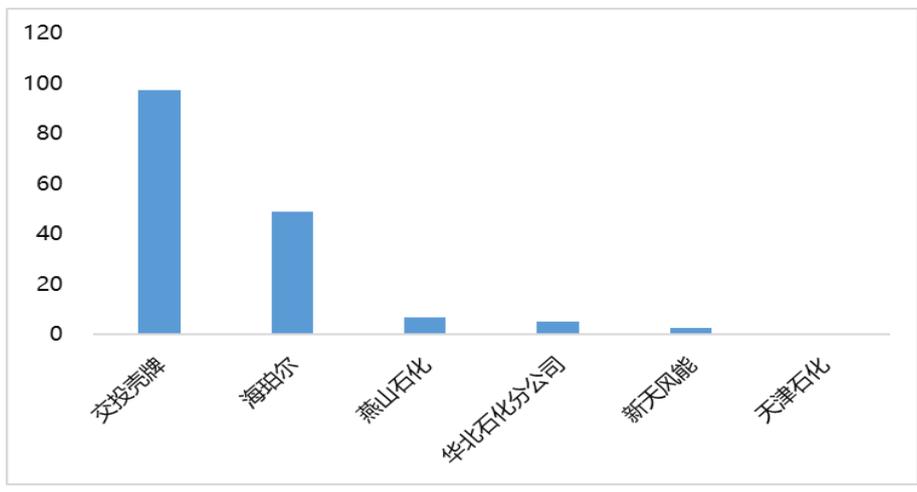


图 21 6 家企业供氢量

(二) 储运

1. 运输企业

张家口赛区采用技术较为成熟的 20MPa 高压气氢长管拖车运

氢。冬（残）奥会期间，北京鸿港顺、北京环宇京辉、中石油运输公司河北分公司 3 家企业参与了张家口赛区氢气运输保障工作，共计投入 9 个车头、19 个挂车，备用 7 个车头、6 个挂车。20MPa 长管拖车的主要生产制造商为 EKC 工业（天津）、上海南亮、中集安瑞科和浙江蓝能，单车总容积 22.5~26.18m³，单次可充装氢气质量 330~410kg。

表 5 长管拖车关键参数

车型	环宇京辉			鸿港顺	
	长管拖车 1	长管拖车 2	长管拖车 3	长管拖车 1	长管拖车 2
生产制造商	EKC 工业（天津）有限公司		上海南亮	中集安瑞科	浙江蓝能
公称工作压力（MPa）	20	20	20	20	20
使用环境温度（℃）	60	60	60	-40~60	-40~60
总容积（m ³ ）	23.8	22.5	23.95	26.18	26.18
充装质量（kg）	350	330	353	410	385
管束数量（个）	10	10	10	7	7

2. 运氢特征

赛时张家口赛区通过长管拖车运氢保障了车辆用氢需求，但存在运氢距离超出经济运输半径、运氢效率低等问题。根据氢源和对应的保供站点不同，3 家电解水制氢企业与加氢站之间的运氢距离约为 30~85km；3 家域外氢源企业的运输距离约为 250~400km，已经超出国家燃料电池汽车示范城市群政策要求的经济运输半径<200km。长管拖车平均车速 50~70km/h，平均油耗约 40~60L/100km。20MPa 长管拖车运氢效率较低，以交投壳牌的氢气运输为例，单车次运氢量最高 258.1kg，最低 145.8kg，平均运氢量约 207kg，仅占可充装总质量的 50~63%。

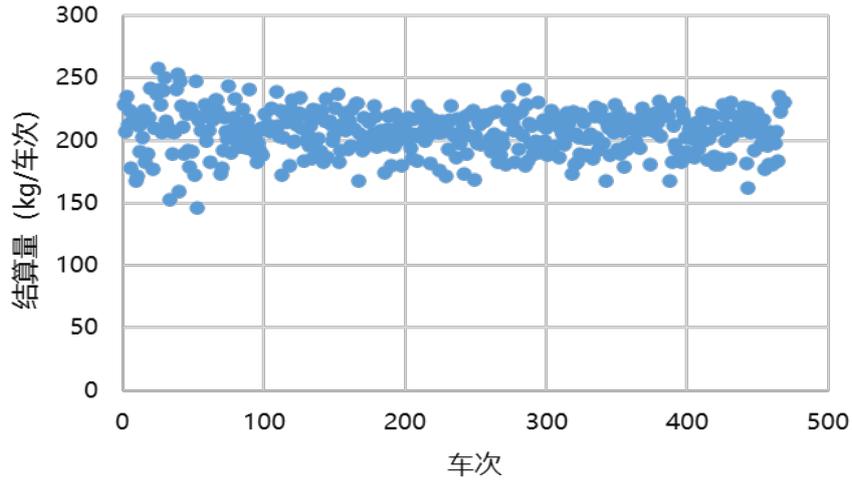


图 22 交投壳牌运氢效率统计

(三) 加注

1. 基本情况

张家口赛区实现了建站形式多样化、35MPa 和 70MPa 两种加注技术路线以及国内外加注设备的综合性示范应用。张家口赛区累计建成并投运太子城加氢站、太子城撬装站、崇礼南加氢站、崇礼南撬装站、崇礼北加氢站 5 座加氢站，总加注能力 3680kg@12h，有效满足张家口赛区绿色交通氢能需求。从加氢距离看，根据加氢站点分配和驻车场站位置不同，车辆加氢距离差别较大，最短加氢距离 1.6km，最长距离 33.1km。在示范中应用的 2 套 70MPa 加氢设备，1 套采用美国空气化工（AP）产品；另 1 套采用国富氢能自主集成装置，并在冬奥期间实现了安全、稳定、可靠运营，体现出自主集成设备技术的可靠性。

表 6 赛区 5 座加氢站基本情况

项目	太子城加氢站	太子城撬装站	崇礼南加氢站	崇礼南撬装站	崇礼北加氢站
图片					
运营企业	张家口中油新能源	张家口中油新能源	中石化张家口分公司	中石化张家口分公司	张家口中油新能源
加氢站类型	固定站	撬装站	固定站	撬装站	合建站
加注压力 (MPa)	35	70	35	70	35
加注能力 (kg@12h)	1000	180	1000	500	1000
占地面积 (m ²)	2833		4390		4027
建成时间	2020 年 12 月	2021 年 12 月	2021 年 7 月	2021 年 7 月	2020 年 12 月
加氢机数量 (台)	2	1	2	1	2
加氢枪数量 (把)	4	1	4	1	4
氢气压缩机数量 (台)	2	1	2	1	2
储氢容器数量 (台)	1	1	2	/	1
储氢容器类型	储罐	管束	管束	管束	储罐

从关键零部件国产化情况看，加氢机以国产设备为主，主要来自优捷特、厚普股份、国富氢能；加氢枪以外资产品为主，主要来自德国 WBH 公司；站用氢气压缩机以液驱式和隔膜式为主，4 座加氢站采用豪顿和 Hydro-PAC 等进口产品，1 座加氢站采用国富氢能的自主产品。同时，5 座加氢站选址地冬季平均气温低于-10℃，最低气温-26.5℃，因此主要设备及零部件均采用特种材料，设计工作环境温度低至-40℃，符合赛时低温严寒的环境要求。

2. 加注量

5 座加氢站在低温环境下为燃料电池车辆提供了安全、稳定、可靠的加注服务，期间未发生重大故障和氢安全事故。冬（残）奥会期间，5 座加氢站实际运营天数≥45 天，其中：崇礼南撬装站 54 天、太子城站 51 天、崇礼南站 49 天、太子城撬装站 46 天、崇礼北站 45

天。冬（残）奥会期间，5座加氢站累计加注量 147.97t，日最大累计加注量 5.52t，单座加氢站（太子城站）日加注量最高达到约 1.98t。分阶段看，冬奥会保障期内累计加注量 128.29t，冬残奥会保障期内累计加注量 19.68t。

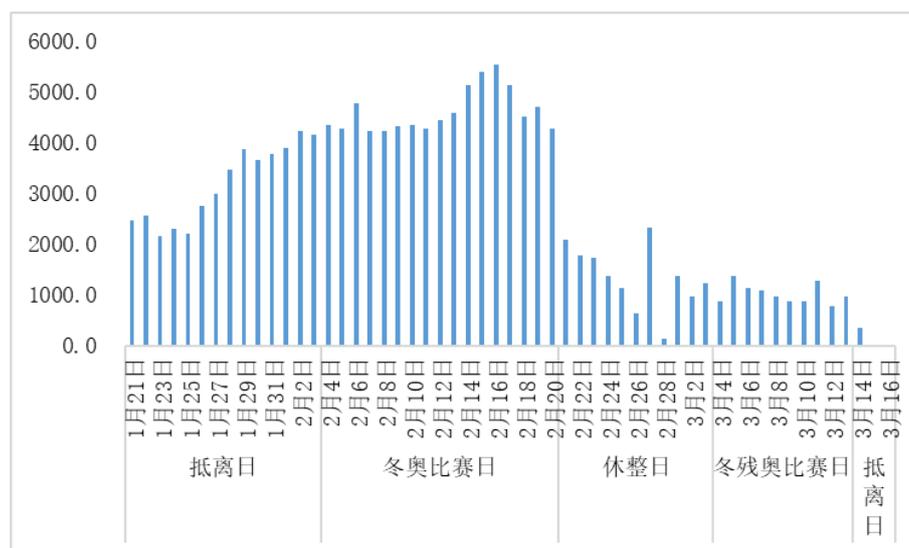


图 23 5 座加氢站日累计加注量趋势 单位: kg

从单车加注量水平看，崇礼北加氢站 35MPa 燃料电池客车单车加注量最大 25.14kg/车·次，平均加注量 15.15kg/车·次。崇礼南站 35MPa 燃料电池客车单车平均加注量 13.75kg/车·次。太子城站 35MPa 燃料电池客车单车加注量最大 26.88kg/车·次，平均加注量 13.46kg/车·次。崇礼南撬装站 Mirai 单车平均加注量 3.73kg/车·次，柯斯达中巴单车平均加注量 4.50kg/车·次。太子城撬装站无法区分 mirai 和柯斯达加注情况，故未统计该站 70MPa 车辆单车平均加注情况。

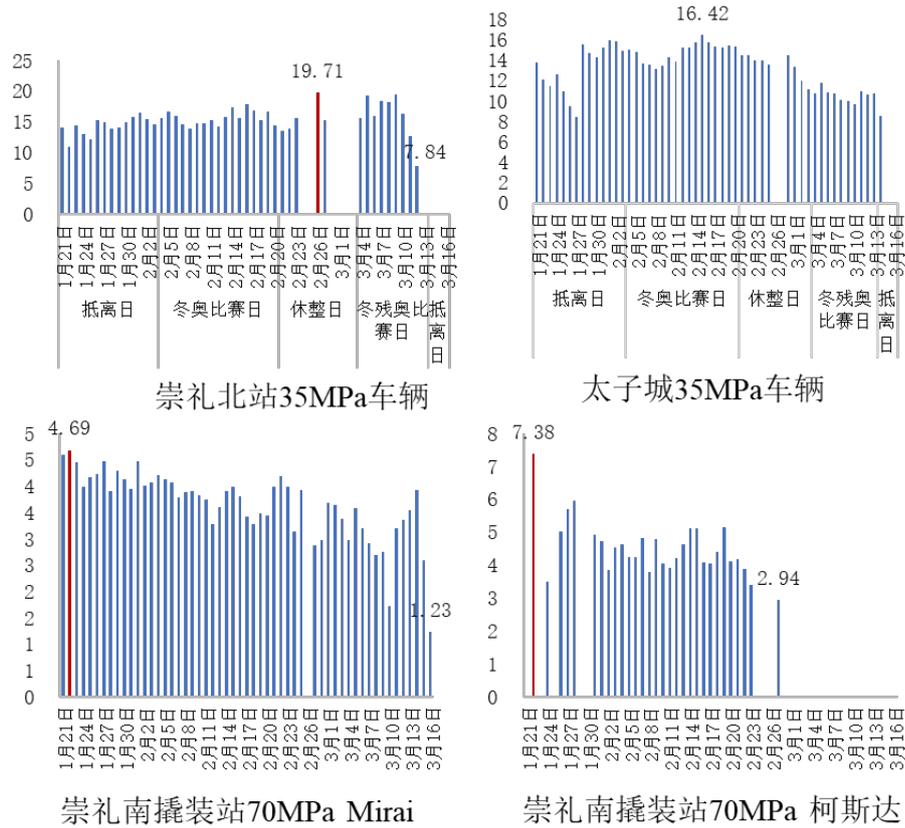


图 24 日单车平均加注量水平 单位: kg/车·次

3. 加注车次

冬（残）奥会期间，5 座加注站累计加注车辆 11997 车次，日最大累计加注 405 车次，日最小累计加注 7 车次，日均累计加注 218 车次，单座加注站（太子城站）日加注车次最高达到 134 车次。分阶段看，冬奥会保障期内累计加注 10172 车次，冬残奥会保障期内累计加注 1825 车次。

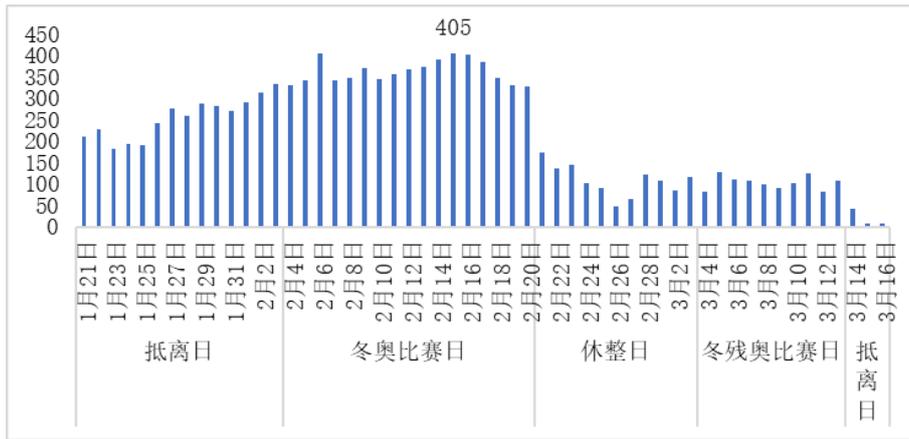


图 25 5 座加氢站日累计加注车次 单位：车次

从单车加氢频次看，崇礼北站 35MPa 燃料电池客车单车日最大加氢次数 4 次，平均日加氢次数 1.08 次/车。太子城 35MPa 燃料电池客车单车日最大加氢次数 2 次，平均日加氢次数 1.02 次/车。太子城撬装站 70MPa 燃料电池车辆（含 Mirai 和柯斯达中巴）单车日最大加氢次数 3 次，平均日加氢次数 1.04 次/车。崇礼南及撬装站无统计数据。总体来看，冬（残）奥会期间，燃料电池车辆平均每天需要加一次氢气。

4. 加注时长

冬（残）奥会期间，张家口赛区加氢站设备在极寒环境下实现了高强度连续运转，日累计加注时长最大达到 21.47h（根据有时长数据的加氢站统计）。具体来看，崇礼北站日累计加注时长最大值为 21.47h，太子城站日累计加注时长最大值为 18.65h，太子城 70MPa 撬装站日累计加注时长最大值为 1.45h。

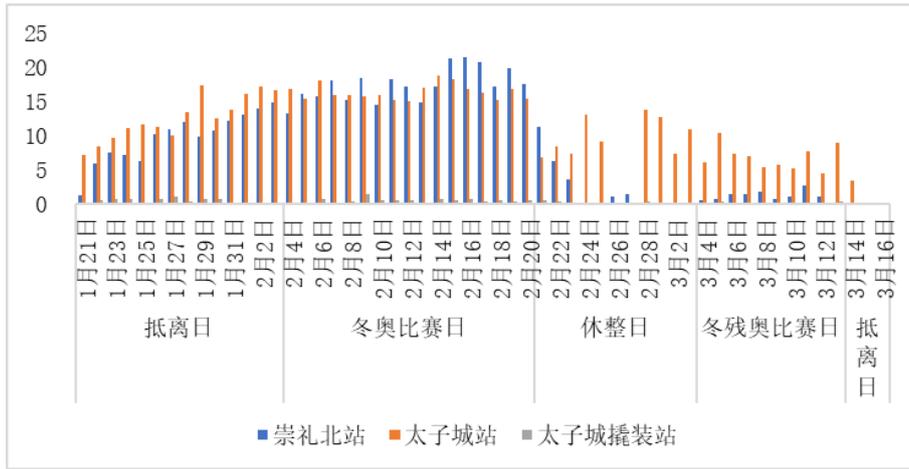


图 26 加氢站日累计加注时长 单位: h

赛时 35MPa 燃料电池车辆平均加注用时 7.61~9.95min，基本与传统柴油车（3~10min）相当。鉴于部分加氢站无法提供车辆加注时长数据以及太子城无法区分 Mirai 和柯斯达加注时长，在分析单次加注时长时，对数据处理如下：（1）选择有加注时长数据的加氢站；（2）对太子城撬装站有所 70MPa 车辆归为一类分析加注时长。分加氢站看，崇礼北站 35MPa 车辆单车单次加注时长最大 35min，平均单车单次加注时长 9.95min，5~15min 内完成加注的次数约占 87.7%。太子城站 35MPa 车辆单车单次加注时长最大 29min，平均单车单次加注时长 7.61min，5~15min 内完成加注的次数约占 77.9%。太子城撬装站 70MPa 车辆单车单次加注时长最大 14min，平均单车单次加注时长 3.97min，5min 内完成加注的次数约占 87.0%。

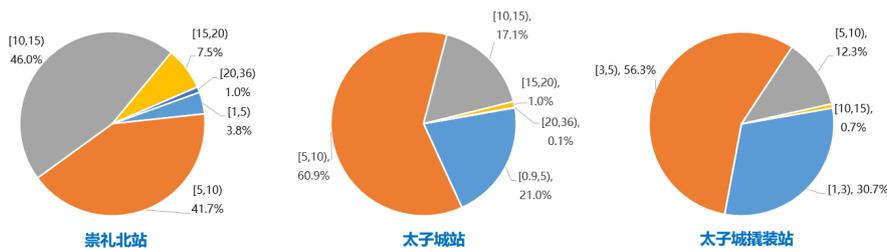


图 27 燃料电池车辆单次加注时长分布 单位: min

(四) 氢气成本

1. 生产成本

(1) 绿氢成本

冬（残）奥会期间，张家口本地 3 家电解水制氢企业享受不同的电价和政策优惠，造成制氢用电成本存在差异，直接影响制氢成本。海珀尔参与四方协作机制，享受 0.15 元/kWh 优惠电价（超出部分由市财政给予补贴），制氢成本 23.42 元/kg。交投壳牌享受四方协作机制优惠电价，以 2 月为例，实际核算电价为 0.46 元/kWh，制氢成本 34.50 元/kg。新天风能风电制氢在冬奥会举办前后半年享受“自发自用、余量上网和免收容量电费”用电政策支持下，执行电价 0.33 元/kWh，制氢成本 26.17 元/kg。

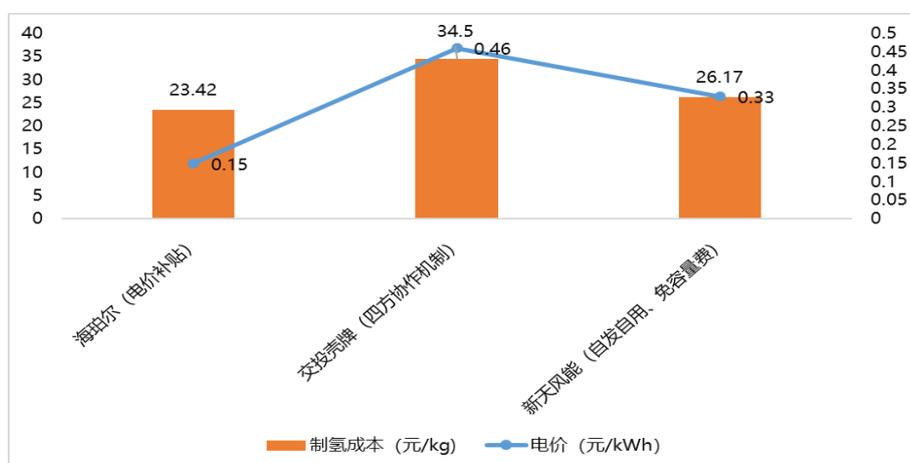


图 28 冬（残）奥会期间张家口市绿氢电价及生产成本

(2) 副产氢成本

3 家域外供氢企业以副产氢提纯为主，氢气成本构成难以获取。但根据文献资料可知，工业副产氢生产成本一般约为 10~16 元/kg¹⁴。

14 中国氢能联盟.中国氢能及燃料电池产业手册.2021.

2. 出厂价格

根据氢气生产成本、氢气采购量、是否承运等不同，各家企业氢气出厂价格不同。赛时海珀尔和交投壳牌出厂价格为 38 元/kg（含运费），新天风能出厂价格为 22 元/kg。根据调研，域外工业副产氢出厂价格约 19~26.3 元/kg，但由于氢气运输距离较远，造成氢气的运输成本大幅上升。

3. 加氢站氢气成本构成

加氢站氢气成本由进气成本、运输成本和加注成本构成，或由到站价格（含氢气出厂价格和运输成本）和加注成本构成。张家口赛区加氢站的氢气成本 22~38 元/kg（38 元/kg 是到站价格，含运费）。以本地供氢为例，根据制氢厂以及加氢站位置不同，长管拖车运氢距离约为 30~85km，氢气运输成本约为 6~10 元/kg。加氢站加注成本 5~5.91 元/kg 左右。综合考虑制氢、储运、加注等环节，张家口赛区加氢站的氢气成本约为 37~43.91 元/kg，已高于城市群政策要求的氢气价格不高于 35 元/kg。要实现氢气价格不高于 35 元/kg，电解水制氢成本需要下降到 23 元/kg 以下（按储运和加注成本各 6 元/kg 计算）。

表 7 张家口赛区加氢站氢气成本构成

加氢站	氢源	进气成本 (元/kg)	运输成本 (元/kg)	加注成本 (元/kg)	氢气成本合计 (元/kg)
崇礼南加氢站	新天风能	22	10	5	37
崇礼南加氢站	海珀尔	38		5	43
崇礼北加氢站	交投壳牌	38		5.91	43.91
太子城加氢站	交投壳牌	38		5.91	43.91

4. 终端价格

冬（残）奥会期间，张家口赛区氢气销售价格统一为 70 元/kg。

(五) 评估小节

从上述对氢气供应的评估结果看，共有 3 个二级指标、13 个三级评估指标，其中：有标准可评估的三级指标 13 个。在 13 个可评估的三级指标中，10 个指标达到要求，1 个指标基本达到要求，2 个指标未达要求。2 个未达要求的指标分别是运氢效率和制氢成本。运氢效率未达要求是存在运氢效率偏低现象，部分运氢车次平均运氢量约 207kg，主要原因在于赛时长管拖车卸氢到 200kg 左右时，长管内压力降至 10MPa 左右，这个时候站用氢气压缩机增压变慢，卸氢时间就会变长。另外，由于赛时加氢站基本上处于车辆排队加氢状态，一边卸氢，一边加注，也会造成长管拖车卸氢变慢，因此为了争取时间和加强长管车辆调度、提升效率，存在长管拖车卸氢压力未达到 10MPa 以下就走的现象，导致卸氢量低于日常水平。制氢成本未达到要求是因本地电解水制氢成本较高（约 23.42~34.50 元/kg）。

五、氢安全评估

(一) 氢安全事故

赛时张家口赛区未发生氢安全事故，达到冬奥组委车辆运输保障的安全要求。张家口赛区在冬奥会赛前、赛中和赛后长达 55 天的持续高强度交通服务保障期间内，通过完善安全管理机制、制定安全管理方案和应急措施，事前加强安全培训和应急演练，提前对车辆进行点检、维护，建立完善的服务保障团队和机制等，并通过大数据及时监控各环节安全风险，实现了氢能全产业链各环节没有发生任何氢安全事故，运行平稳顺利，极大地保障了交通运输服务工作。

(二) 产业链安全措施

冬（残）奥会期间，为了保障冬奥安全，各相关利益方均出台了相关安全制度、措施与应急方案，有效防范了氢安全事故的发生。

1. 车辆质量安全

整车企业在燃料电池客车设计时充分考虑氢-电-结构安全三个方面，充分保障整车的安全性。一是碰撞安全，安装碰撞传感器及防碰撞结构。当整车发生碰撞时，由碰撞传感器通过总线发送报警信号，VCU 执行安全下电策略，保障车辆及人身的安全；整车增加了防碰撞的相关结构，充分保证关键部件的安全。二是氢安全，设计氢气浓度检测及其结构。当整车氢气浓度高于 1.5%时，仪表突出显示，并自动关闭燃料电池电堆，保证安全。同时，在氢系统经过的路径、接头、气瓶仓等部位均设计可逃逸的结构，确保氢气泄露时，氢气可顺利逃逸。三是电安全，设计整车 24h 监控系统及绝缘实时监控系统。通过 24 小时全天对整车与关键零部件进行监控，使车辆更加具有全气候适应能力，实现全自动无人自动自维护，使车辆的安全性能、适应性、使用寿命大大提升。



图 29 整车安全设计¹⁵

15 “氢能出行”关键技术研发与应用示范项目组.氢燃料电池汽车及加氢站示范应用效果总结.2023.

2. 车辆运营安全

车辆运营单位通过建立安全服务保障机制，设置全方位服务保障团队，积极开展车辆点检、维护工作。赛时运输过程中没有出现交通安全事故和严重车辆故障情况，车辆整体准点率较高。即便在强降雪路面湿滑的环境下，燃料电池汽车也能正常有序的进行运输工作。

表 8 车辆运营安全措施

企业	安全保障措施
张家口公交集团	制定多项冬奥会期间故障管理及发生各种突发事件应急保障方案；设置运营保障组、场站巡查组，路检路查组，防疫组，明确岗位职责。
北京水木通达	制定冬奥氢燃料客车氢能应急事故预案、关于冬奥会从业人员相关培训计划、水木通达应急场景“人头对人头”处理流程。组建安全工作领导小组及保障团队，对场站实际道路的线路分析、探勘、调度对接，严格落实车辆安全检查，做好燃料电池汽车加注安排。提前对车辆运营安全和应急处置进行员工培训。
整车企业	派出车辆技术保障人员，组建服务团队，实行 7×24 小时全程待命。如福田汽车组建了 180 多人的团队为冬奥会各个赛区提供服务保障；中通客车抽调 21 名技术保障人员参与服务团队组建（含外围保障及相关配套商人员）。
系统企业	亿华通在张家口赛区组建了由技术人员和服务保障人员组成的 29 人团队，7×24 小时全程参与车辆维保工作。

3. 制储运加安全

张家口市十分重视冬奥氢能源保供安全，由市安委办牵头氢能全链条保障供应的安全防范工作，推动制氢、储运、加注等企业制定专项保障安全方案，督促各企业成立专班负责安全保障，落实安全防范工作任务分解清单，定人、定岗、定时、定责任。建立起运转高效、协调有序、反应灵敏、统一指挥的氢能全链条冬奥会保供安全防范沟通协调机制。

表 9 制储运加安全措施

环节	企业	安全保障措施及方案
制氢	海珀尔	制定冬奥期间安全生产保障方案和突发事故应急预案；成立冬奥期间安全生产保障领导小组（含安全生产、应急救援、综合保障等）
	交投壳牌	制定冬奥期间安全生产保障方案；成立冬奥期间安全生产保障领导小组
	新天风能	制定阳坡制氢站冬奥供氢保障工作方案；成立冬奥供氢保障工作领导小组和应急专家小组
运氢	环宇京辉	制定冬奥氢气运输应急保障方案
	鸿港顺	制定冬奥专项应急预案
	中石油运输河北分公司	制定冬奥长管拖车安全运输以及应急保障方案
加注	交投氢能	创坝站和纬三路生产安全事故综合应急预案
	中石化张家口分公司	制定崇礼西湾子氢和气加注综合服务站生产安全事故综合应急预案；“2022 冬奥会和冬残奥会”安全保障工作方案；2022 年冬奥能源保障方案；成立冬奥项目保障工作组。建设氢气检测实验室
	中油新能源	制定《加氢站安全管理制度》《加氢站应急处置程序》《崇礼北加油加氢站生产安全事故综合应急预案》《太子城服务区加氢站生产安全事故综合应急预案》及操作规程。制定计划对员工进行安全培训和应急预案演练，并且设有专门的安全人员和设备厂家维护人员 24 小时对设备现场、加注现场、设备运行进行巡检维护及隐患排查。提前准备充足的备品备件，安全附件及应急物资

(三) 评估小节

从上述对氢安全的评估结果看，共有 2 个二级指标、4 个三级评估指标，其中：有标准可评估的三级指标 4 个，均达到要求。

六、环境效益评估

(一) 评估范围

燃料电池汽车的排放物只有水，真正实现了“零排放、无污染”，但在氢气的生产、储运、压缩和加注等过程中却会产生温室气体和污染物排放。不同氢气的生产方式和路径不同，产生的温室气体和大气污染物排放各不相同。课题重点分析车用燃料生命周期（Well-to-Wheel, WTW）能源使用和排放情况。车用燃料生命周期评估包括燃料周期上游阶段（Well-to-Pump, WTP）和车辆运行阶段（Pump-to-

Wheel, PTW)。WTP 的研究对象是车用燃料的上游即生产阶段，包括一次能源开采、一次能源运输、燃料生产、燃料运输、储存、分销以及燃料加注过程；PTW 的研究对象是车用燃料的下游即使用阶段，包括车辆发动机燃烧燃料时的燃料消耗和气体排放。为便于评估环境效益，课题将燃料电池汽车与同级别柴油车进行重点比较。

(二) 基本参数

1. 电力排放因子

本研究采用杨来等人（2021）在“典型供氢路径下燃料电池汽车生命周期环境效益评估”中的研究成果，具体见表 10；线损率为 5.6%¹⁶。张家口市电力构成采用 2021 年数据¹⁷。

表 10 全国电力排放因子 单位：g/kWh

	GHGs(CO ₂ eq)	VOC _s	NO _x	一次 PM _{2.5}	SO ₂
煤电	1010	0.0800	0.490	0.0570	0.560
风电	12.5	0.0020	0.017	0.0010	0.019
光伏发电	42.7	0.0340	0.081	0.0150	0.119
生物质发电	63.4	0.1500	1.040	0.6100	0.650

根据全国电力构成和排放因子、线损率以及张家口市电力结构，计算出张家口市网电温室气体排放因子为 412.55kgCO₂e/kWh，VOC_s、NO_x、一次 PM_{2.5}、SO₂ 等污染物排放分别为 0.04g/kWh、0.22g/kWh、0.03g/kWh、0.25g/kWh。

表 11 张家口市电力排放因子 单位：g/kWh

	GHGs(CO ₂ eq)	VOC _s	NO _x	一次 PM _{2.5}	SO ₂
张家口电网平均	412.55	0.04	0.22	0.03	0.25

16 杨来,王菊,雷雪亚.典型供氢路径下燃料电池汽车生命周期环境效益评估[J].汽车文摘,2021(12):1-7.

17 张家口市能源局提供.

2. 柴油排放因子

柴油生产和使用阶段碳排放、污染物排放因子参考中国汽车工程学会发布的《汽车生命周期温室气体及大气污染物排放评价报告 2019》¹⁸计算获得。

表 12 国五柴油客车燃料周期运行阶段的温室气体和污染物排放因子

项目	排放阶段	VOCs	NO _x	一次 PM _{2.5}	SO ₂	GHGs(CO ₂ eq)
柴油	WTP(g/L)	1.89	1.75	0.11	0.75	587
柴油	PTW(g/L)	0.2033	27.700	0.310	0.0168	2654

3. 氢气排放因子

张家口市电解水制氢电耗统一按 58kWh/kg；本地绿氢运输到赛区的距离按 80km，域外工业副产氢运距按 350km；长管拖车有效运氢量 207kg/车次；氢气压缩和加注能耗按 2kWh/kg；在终端加注上，绿氢和工业副产氢比例分别为 92.59%、7.41%（参考供氢比例）。

表 13 氢气供应相关参数

项目	数值	单位	备注
单位电解水制氢电耗	58	kWh/kg	根据调研取值
绿氢运距	80	km	本地氢源
工业副产氢运距	350	km	外地氢源
长管拖车能耗	40	L/100km	国五柴油驱动
长管拖车有效运氢量	207	kg/单车次	根据调研数据计算
压缩和加注能耗	2	kWh/kg	根据加氢站提供
9.5m 柴油客车能耗	30	L/100km	张家口公交提供
11m 柴油客车能耗	30	L/100km	张家口公交提供
12m 柴油客车能耗	35	L/100km	张家口公交提供
终端加注绿氢比例	92.59%		根据绿氢和副产氢供应量计算
终端加注副产氢比例	7.41%		根据绿氢和副产氢供应量计算

不同文献研究中对风电电解水制氢和工业副产氢在生产端的碳排放计算结果存在较大差异。本研究采用的风电电解水制氢生产端碳

¹⁸ 中国汽车工程学会.汽车生命周期温室气体及大气污染物排放评价报告 2019.2020.

排放为 $0.89\text{kgCO}_2\text{eq/kgH}_2$ ¹⁹，工业副产氢生产端的碳排放为 $0.23\text{kgCO}_2\text{eq/kgH}_2$ ²⁰。由于工业副产氢生产过程中污染物排放核算的复杂性且数据难以获得，本研究主要采用杨来等人（2021）在“典型供氢路径下燃料电池汽车生命周期环境效益评估”和中国汽车工程学会 2019 年度国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作重点专项”《中国汽车燃料电池发展战略研究》中关于北京市工业副产氢的研究成果，VOC_s、NO_x、一次 PM_{2.5}、SO₂ 等污染物排放分别为 5.33g/kgH_2 、 5.79g/kgH_2 、 3.30g/kgH_2 、 16.78g/kgH_2 ¹⁶。

综合考虑不同制氢方式在制氢端、运氢距离、压缩和加注能耗、电力结构及单位发电量碳排放强度等因素，经计算得出张家口市可再生能源电解水制氢（含通过绿电交易购买的绿氢）、域外工业副产氢全生命周期碳排放强度分别为 $2.26\text{kgCO}_2\text{eq/kgH}_2$ 、 $3.3\text{kgCO}_2\text{eq/kgH}_2$ 。若采用网电电解水制氢，经计算得出，其碳排放则达到 $26.72\text{kgCO}_2\text{eq/kgH}_2$ 。车辆运行阶段，氢气的碳排放和污染物排放为 0。

表 14 不同路径氢气温室气体和污染物排放因子

制氢路径	排放阶段	GHG ($\text{kgCO}_2\text{eq/kgH}_2$)	VOC _s (g/kgH_2)	NO _x (g/kgH_2)	一次 PM _{2.5} (g/kgH_2)	SO ₂ (g/kgH_2)
电解水制氢 (风电)	WTP	2.27	0.52	3.60	0.15	1.82
工业副产氢	WTP	3.30	5.33	5.79	3.3	16.78
绿氢/副产氢	PTW	0	0	0	0	0

19 中国标准化研究院 全国氢能标准化技术委员会.中国氢能产业基础设施发展蓝皮书（2018）.2018.

20 田涛等.石化行业不同制氢过程碳足迹核算.油气与新能源,2021,33（5）:39~45

(三) 评估结果

1. 燃料周期碳排放

冬（残）奥会期间，张家口赛区燃料电池汽车通过使用绿氢和工业副产氢，相比同级别柴油车累计减少 **1195.4tCO₂**，减碳效益十分明显。冬（残）奥会期间张家口赛区燃料电池汽车在燃料周期阶段碳排放总量为 **327.3tCO₂**。参考同级别柴油车，根据每种车型百公里油耗水平、运行里程以及柴油在生产和使用阶段的碳排放强度，计算出同级别柴油车在燃料周期阶段碳排放总量为 **1522.7tCO₂**。

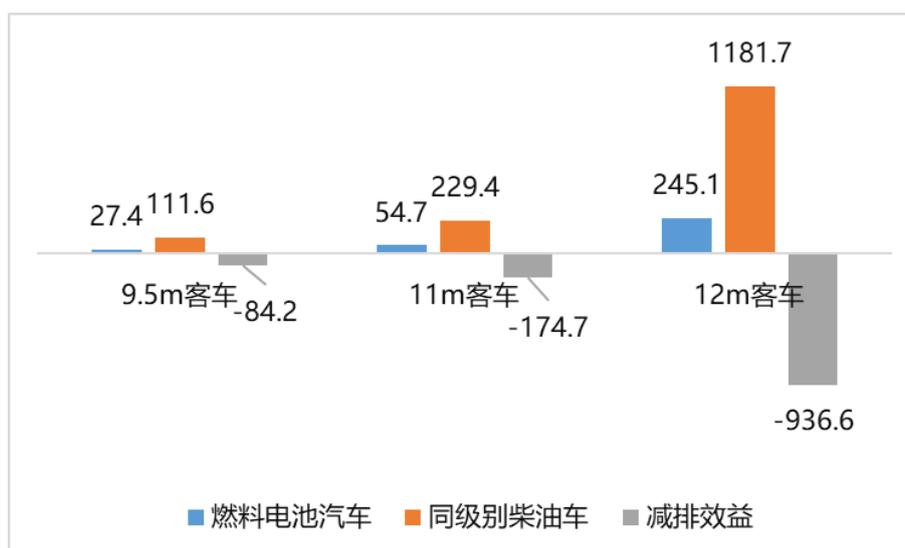


图 30 张家口赛区燃料电池汽车减碳效益 单位：tCO₂

2. 燃料周期污染物排放

冬（残）奥会期间，张家口赛区燃料电池汽车通过使用绿氢和工业副产氢，相比同级别柴油车累计减少各类污染物总量 **14.32t**，但 **SO₂** 排放增加 **0.05t**。冬（残）奥会期间张家口赛区燃料电池汽车 **VOC_s**、**NO_x**、一次 **PM_{2.5}**、**SO₂** 排放分别为 **0.12t**、**0.53t**、**0.05t**、**0.41t**。同级别柴油车 **VOC_s**、**NO_x**、一次 **PM_{2.5}**、**SO₂** 排放分别为 **0.98t**、**13.84t**、

0.20t、0.36t。结果表明，燃料电池汽车相比同级别柴油车分别累计减少 0.86t VOCs、13.31t NO_x、0.14t 一次 PM_{2.5}，增加 0.05tSO₂。

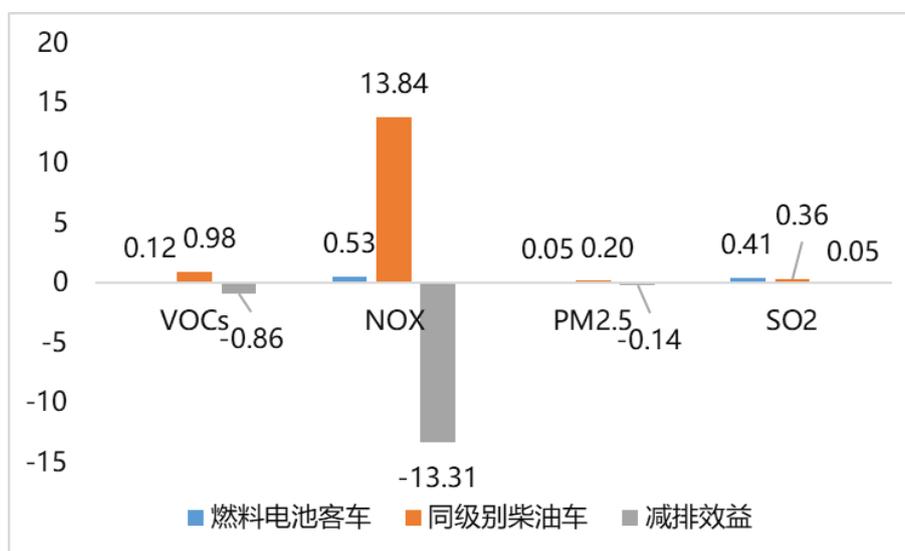


图 31 张家口赛区燃料电池汽车减少污染物排放 单位：t

(四) 评估小节

从上述对环境效益的评估结果看，共有 2 个二级指标、5 个三级评估指标，其中：有标准可评估的三级指标 5 个。在 5 个可评估的三级指标中，4 个指标达到要求，1 个指标未达要求。1 个未达要求的指标是 SO₂ 排放，测算结果是 SO₂ 有增加，主要原因在于采用的工业副产氢排放因子中含有 SO₂。目前由于工业副产氢来源较多，且污染物排放核算较复杂，导致缺乏统一的工业副产氢污染物排放计算方式和排放标准可供借鉴。

七、结论及建议

(一) 评估汇总

课题评估指标体系由 4 个一级指标、13 个二级指标以及 50 个三级指标构成。其中：有标准可评估的三级指标 38 个，具体来看 28 个

达到要求，4 个基本达到，6 个未达要求。

表 15 评估指标汇总 单位：个

评估领域	一级指标	二级指标	三级指标	有标准可评估的三级指标		
				达到要求	基本达到	未达要求
车辆运行评估	1	6	28	10	3	3
氢气供应评估	1	3	13	10	1	2
氢安全评估	1	2	4	4	/	/
环境效益评估	1	2	5	4	/	1
合计	4	13	50	28	4	6

(二) 结论

1. 充分彰显了我国燃料电池汽车技术水平的进步与提升

相比“十三五”初期，北京 2022 年冬奥会示范应用的燃料电池产品在性能参数、经济性、可靠性、环境适应性等方面取得了显著进步，主要表现在：（1）燃料电池性能参数大幅提升。电堆功率由 35kW 提升至 96kW，体积功率密度由 1.5kW/L 提升至 2.5kW/L；燃料电池系统功率由 30kW 提升至 80.5kW；系统质量功率密度提升至 405.9W/kg，超过《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》中提出 2025 年商用车燃料电池系统质量功率密度达到 350W/kg 的目标要求；车辆续航里程由 200km 提升至 500km 以上，赛时中型、大型车辆的低温续航里程 $\geq 300\text{km}$ ，满足北京交通发展研究院《北京 2022 年冬奥会和冬残奥会张家口市清洁能源车辆选型和筹措策略研究》中提出的“低温实际续航里程应达到 300km”的车辆选型标准。（2）经济性关键指标有进步。示范应用的燃料电池发动机平均效率达 45% 以上，高于传统柴油机的平均效率水平。燃料电池发动机的最高效率已达到 60%，超过《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》提出的商用车燃料电池系统 2025 年

55%的最高效率目标。(3) 可靠性有显著提升。燃料电池车辆平均无故障间隔里程 22705km, 该数值优于 UNDP 一期、二期项目平均无故障里程(分别为 1375km、3430km), 也优于朱成等(2022)统计的燃料电池汽车平均无故障运行里程 7761km。实车燃料电池寿命从 3000h 提升至 18000h, 该预测寿命已超过《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》提出的 2025 年商用车燃料电池系统寿命 15000h 的目标水平。(4) 环境适应性明显增强。低温启动温度由-20°C降至-30°C; 燃料电池平均冷启动成功率 89.0%, 基本与张家口 CNG 公交平均启动成功率 90%的水平相当; 平均冷启动成功时间 168.8s, 大幅优于科技冬奥氢能出行项目要求。

同时, 在本次示范中还应用了一系列新技术, 提升了燃料电池汽车的可靠性。如开发和应用-30°C环境下燃料电池系统快速冷启动关键技术, 可实现-30°C环境下 124s 即达额定功率快速启动; 采用快速加热动力电池系统, 在-40°C的情况下, 动力电池温升可以达到 7.2°C/min; 采用双电机耦合无动力中断自动变速电驱动系统, 显著提升车辆爬坡性能至 15%以上; “U 度”余热调节自适应整车综合热管理技术能够在 25min 内使车内温度升至 10°C以上; 另外还首次使用 70MPaIII型瓶车载氢系统自主集成技术以及国产 70MPa 加注设备及技术。

2. 成功验证了燃料电池客车在低温高海拔地区的可行性

通过在张家口赛区大规模示范应用燃料电池客车, 以零氢安全事故成功验证了燃料电池客车在低温天气、高海拔地区、复杂路况(多

弯道、大坡度、路面结冰)和高强度交通运输场景下的技术可行性和可靠性。这也表明燃料电池汽车已具备在北方低温地区大规模推广的可行性。

3. 形成完备的绿氢制取、储运和加注供应保障体系能力

北京 2022 年冬奥会期间,张家口市氢能产业体系安全稳定地保障了核心赛区 623 辆和主城区 87 辆燃料电池汽车运行,首次实现奥运史上燃料电池汽车规模化示范应用。为保障赛时张家口赛区大规模燃料电池汽车的示范运行,张家口市已从绿氢生产、储运和加注等环节建成投产电解水制氢项目 3 个、建成投运 35/70MPa 加氢站 5 座、投入 20 余辆 20MPa 长管拖车,形成了完备的绿氢制取、储运和加注供应保障体系能力,积累了丰富的绿氢应用实践经验,也表明我国在绿氢规模化应用上实现了重大突破和重要进展,并为全球绿色低碳转型提供绿氢解决方案。

4. 燃料电池客车和氢能规模化应用的环境效益十分突出

减少温室气体、应对气候变化是全球大力发展氢能的重要原因,张家口赛区燃料电池客车示范实践进一步证明了绿氢和工业副产氢具有低碳排放特性。相关测算结果表明,冬(残)奥会期间,张家口赛区分阶段投入的 477 辆和 201 辆燃料电池客车累计行驶 139.25 万 km,累计加注绿氢和副产氢 139.77t,相比同级别柴油车可以累计减少 1195.4tCO₂,分别累计减少 0.86tVOC_s、13.31tNO_x、0.14t 一次 PM_{2.5}。但这部分评估结果尚未包含 80 辆丰田 Mirai 和 66 辆柯斯达氢擎在张家口赛区运营带来的环境效益,张家口赛区使用氢能和燃料电池汽车

的实际环境效益要大于目前的评估结果。根据丰田公开数据显示，丰田燃料电池车辆在北京冬奥会上累计减少 113tCO₂（含北京和张家口两地）²¹。

5. 北京冬奥会氢能示范对产业发展起到积极的推动作用

北京冬奥会氢能示范对推动我国氢能产业发展产生了积极作用，并带来深远影响，主要表现在：

（1）推动燃料电池自主创新加快。通过冬奥会氢能示范，我国基本掌握燃料电池及关键核心零部件开发技术，产品创新加快，自主化水平明显提升。以亿华通为例，已完成从膜电极、双极板、电堆到发动机的完全自主可控技术链条布局，逐步实现氢燃料电池发动机及其关键材料、核心部件的自主化、国产化、产业化。其燃料电池发动机经过多次技术迭代，开发出了 30~240kW 等多种型号，其中 G60、G80 和 TS80 产品在张家口赛区进行了批量示范应用。依托冬奥会，清华大学牵头实施了科技冬奥重点专项“氢能出行关键技术研发和应用示范”项目，重点突破了氢能制储运加、燃料电池车辆开发与示范、氢能与燃料电池汽车全链条信息监控等三方面关键技术。

（2）推动产业相关标准制修订。北京冬奥会推动了氢能和燃料电池汽车产业标准制修订。为实现 70MPa 燃料电池汽车在冬奥会上使用，推动修订《燃料电池电动汽车加氢口》《燃料电池电动汽车车载氢系统试验方法》和《燃料电池电动汽车车载氢系统技术条件》等标准，将搭载 70MPaIII 型瓶车载氢系统的燃料电池汽车相关技术要求

²¹ 为助力实现碳中和目标，丰田加速在中国推进氢能应用。
<http://www.toyota.com.cn/mediacenter/show.php?newsid=5210>.

纳入其中；制定了国际首个手持火炬用氢燃料气瓶标准，确保了火炬绿色能源内核工业化生产的可靠性、安全性和一致性²²。

（3）推动京津冀氢能产业链构建。通过冬奥氢能示范，加快推动了京津冀地区氢能企业积聚，初步打通了氢能的“制-储-输-用”全产业链。以张家口为例，以冬奥会为契机，先后培育和引进氢能产业链企业 22 家，项目 40 个，完成投资 27.67 亿元，涵盖氢能制储运加、燃料电池系统、整车和创新平台等，初步形成氢能全产业链发展格局。

（4）推动区域联动与国际合作。通过冬奥会氢能示范，也增强了京津冀氢能协同能力，比如赛前北京亿华通负责燃料电池系统研发，张家口负责燃料电池发动机生产，北汽福田负责整车组装生产；北京燕山石化、天津石化、华北石化在赛时向张家口供应氢气；北京京辉气体和鸿港顺赛时参与张家口赛区氢气运输保障工作；张家口向北京输送绿电，实现了奥运史上首次所有场馆 100%使用绿色电力。同时，立足冬奥会示范，也加强了国际氢能合作。壳牌集团与张家口交投合作，共建绿色氢能一体化示范基地项目，在 2022 年冬奥会期间为赛区燃料电池汽车提供绿氢。在北京和张家口赛区投运的福田燃料电池客车由亿华通、丰田、福田汽车联合推出。在此次合作中亿华通与丰田承担金属板燃料电池发动机核心技术研发及产品外观设计，北汽福田承担整车开发及车辆外观设计等工作。丰田柯斯达氢擎是由丰田中国进行研发，在四川一汽丰田生产，并搭载亿华通 70MPaIII 型瓶车载储氢系统。

22 绿色冬奥 | 816 辆氢燃料电池汽车成为冬奥赛事运输主力.
https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_16718424.

(5) 形成了全国性示范效应。北京冬奥会成功示范运营上千辆燃料电池汽车，凭借良好的低温性能和可靠性，安全、高效、圆满完成了运动员、志愿者及赛事参与人员的出行保障任务，向全世界展示了我国在燃料电池汽车领域的前沿成果。在产业发展初期，北京冬奥会燃料电池汽车的示范效应，不仅增强了燃料电池汽车产业发展的信心，引发了全国各地产业布局热潮，而且在一定程度上加速了氢能产业落地的进程，对于未来建立绿氢工业，实现绿色低碳发展具有里程碑式意义。作为我国燃料电池汽车的首次大规模示范应用，既可以为后续的技术研发提供参考数据，也为相关政策的制定提供重要依据。

6. 探索了低碳制氢和应用协同可复制可推广的经验模式

依托建设国家级可再生能源示范区“先行先试”的政策优势，张家口已建立氢能制、储、运、加、用全产业链的安全保障措施和工作机制，形成了低碳制氢与氢能应用协同互补的创新发展模式，对保障北京冬奥会燃料电池汽车示范，发挥了较好的激励、引导和支撑作用，为全国绿氢发展探索可复制、可推广的经验。具体包括：

绿氢生产上，(1) 先行先试实践氢能管理创新。河北省出台《关于调整化工建设项目备案权限的通知》，在全国首次明确“风力发电配套制氢项目”可不进化工园区。张家口在冬奥期间成功验证了氢气生产可以不进入化工园区的可行性，绿氢生产过程中未发生安全事故。

(2) 实践了以“绿电”+“绿氢”模式。《张家口市支持氢能产业发展的十条措施》明确提出“对于注册的可再生能源制氢企业，在四方协作机制下，参与张家口可再生能源电力市场化交易，按照高新技术产业给

予不高于 0.36 元/kWh 的优惠电价”。冬奥会期间，网电制氢企业通过“四方协作机制”获得低成本可再生能源电力，取得可再生氢认证，实现了低碳制氢。（3）依托丰富的可再生资源，探索发展绿氢生产。冬（残）奥会期间给予自发自用、余量上网、免收容量电费政策支持，进一步降低了可再生能源发电制氢成本。

加氢站管理上，（1）在全国较早出台《张家口市加氢站管理办法（试行）》，推动完善了加氢站建设流程，确保了服务于冬奥会的崇礼南及撬装站、崇礼北站、太子城及撬装站 5 座加氢站合法投入运营，为今后加氢站的建设积累了丰富的经验。（2）率先制定加氢站竣工验收与安全运营评价地方标准，出台《张家口市加氢站竣工验收与安全运营评价导则（试行）》。（3）《张家口市加氢制氢企业投资项目核准和备案实施意见》允许加氢基础设施项目在符合张家口市土地利用总体规划、各区县土地利用总体规划和城镇加氢站布局规划，并且投资主体间签订协议对土地产权等问题无争议的情况下，以租赁土地方式办理审批手续。

安全管理上，（1）在氢能安全生产监管方面，率先出台国内首个《氢能产业安全监督和管理办法》，建立了氢能制、储、运、加、用全产业链的安全保障措施，确保了冬奥期间燃料电池汽车安全运行，为后续氢能产业发展和燃料电池汽车运行提供了安全管理保障，也为全国其他地方出台氢能安全管理措施提供了借鉴和参考。（2）在国内较早开发制-储-运-加-用全链条信息采集和监测平台，对制氢、储运、加注和车辆与运行进行监测与跟踪，实现氢能全产业链的信息监控和智

慧调度。(3) 定期开展氢能生产安全事故实战演练。

体制机制上，(1) 为保障氢能产业发展，张家口市成立了以市长为组长的氢能产业发展领导小组，建立领导小组定期会商制度，明确氢能城市建设发展战略、重点方向和年度任务。(2) 建立了氢能产业相关工作台账及项目台账，通过协调、跟进、督办等方式推动项目顺利实施。(3) 从产业规划、行动计划、扶持政策、项目核准备案、加氢站布局和安全监管办法等方面形成了较为完善的“1+N”氢能政策保障体系，推动和支撑了张家口市“制储输用”氢能产业生态的建设，确保了冬奥会燃料电池汽车大规模示范。

7. 电价政策、车辆示范应用、数据采集等方面存在不足

尽管张家口赛区燃料电池汽车示范获得了较大成功，但还存在一些不足之处需要进一步优化和改进。氢气制取上，尽管冬（残）奥会期间，制氢企业享受四方协作机制和自发自用、余量上网、免收容量费等政策带来的低电价，但目前这些政策已取消或到期，未形成长效机制；可再生能源直接制氢规模偏低。氢气运输上，单车有效运氢效率偏低，20MPa 长管拖车单次平均运氢量约 207kg/车次，需要推广更高压力的长管。氢气加注上，因冬奥核心区对安全要求较高，部分加氢站建在距离比赛场馆较远的地方（最远 33.1km），导致车辆加氢用时较长；赛时车辆加注密集，部分加氢站存在排队现象。车辆示范上，示范车型以燃料电池客车为主，缺少对燃料电池货车车型的长周期示范，同时由于冬奥示范场景时间短，对燃料电池耐久性的验证还存在不足。燃料电池关键部件自主化水平低，亟需推动关键部件国产化替

代以及实施长周期验证，并进行技术评估。数据采集上，缺少对车载储氢瓶充装温度和压力等指标的采集和监测，氢气计量准确性不够；数据采集存在手工填报现象，容易造成数据统计误差，亟待提升数据采集质量；制氢厂氢气充装、长管拖车卸氢、加氢站加注等环节氢气的计量方式不统一，亟待统一氢气计量方法和标准。评估方法上，国内还没有建立统一的燃料电池汽车示范项目评价指标体系和方法。

(三) 建议

1. 国家层面

(1) 制氢端。探索建立电解水制氢电价长效机制，给予并网型可再生能源电力制氢“自发自用、余量上网、电网购电量免收两部制电价容量电费”的支持性政策，鼓励发展大规模离网型可再生能源制氢；将网电制氢纳入绿电交易体系，并给予用电价格优惠。

(2) 储运端。推动 30MPa 及以上长管商业化应用，提高运输效率，有条件地区建设输氢管道，降低氢气运输成本。

(3) 数据采集。规范燃料电池汽车数据采集方法与标准，比如增加车辆和加氢机的通信协议，增加车载储氢瓶起始温度、压力等指标的采集和监测。通过大数据采集和监测平台提高数据采集质量。统一充装、卸氢、加注等环节的氢气计量方法和标准。

(4) 示范评估。建立统一的燃料电池汽车示范评价指标体系和方法，全面客观地评价中国燃料电池汽车及氢能基础设施相关产业的技术水平和商业化水平。建议定期对五大燃料电池汽车示范城市群进行全面的示范评估，并向行业公布评估结果。

(5)积极探索将绿氢纳入碳交易市场。目前绿氢生产成本较高，成为制约氢能大规模推广的瓶颈，将绿氢纳入碳交易市场，从市场角度来弥补绿氢高成本的问题，有利于绿氢推广和碳减排。

2. 地方层面

(1)制氢端。积极协调国家部委和电网，争取恢复“四方协作机制”，让网电制氢企业享受优惠电价，并执行单一电价，取消容量费，以降低绿氢成本。对网电制氢项目，奖励风电或光伏开发资源并视同配置储能，以风光发电收益补贴绿氢生产，以降低氢气生产成本。从项目审批、财税优惠、氢能消纳等方面，支持可再生能源电力制氢项目。鼓励发展大型离网型可再生能源制氢。

(2)加注端。优化加氢站建设布局，提高燃料电池车辆运营效率。允许建设制氢加氢一体站，以大幅度减少氢气销售价格。

(3)应用端。强化政策激励和引领，通过组织实施一批交通、工业、建筑等领域的示范工程，积极引导企业开展氢能多元化和规模化利用，带动电解槽、燃料电池热电联供系统、氢燃气轮机、氢内燃机和氢氨燃烧器等氢能核心装备技术攻关和产业化落地，推动氢能产业发展。

3. 行业层面

(1)制氢端。加快发展可再生能源制氢，探索风光氢储一体化发展模式。开展大规模离网型可再生能源制氢示范工程，降低氢气成本。

(2)储运端。加强 30MPa 以上长管拖车产品研制和产品验证。

重点研制的核心装备包括高压氢气压缩机、长管拖车用储氢瓶、氢气计量、输氢管件和阀门、大流量宽负荷调节氢气加压装备等。开展氢载体储运、掺氢天然气管道、纯氢管道等试点示范。通过研制相关高效率储运装备和开展示范应用，降低氢气储运成本。

（3）加注端。提升加氢站设备可靠性和寿命，降低设备成本。开发更高精度的氢气计量产品，提高氢气加注计量准确性。加氢站需要合理安排车辆加注时段，减少车辆排队。

（4）整车端。加强质子交换膜、催化剂、碳纸等基础材料和关键部件技术攻关以及国产化替代，推动规模化示范验证。提升燃料电池发动机/系统可靠性与寿命。通过燃料电池关键部件国产化替代以及规模化实现整车降本，提升燃料电池车辆经济性。

（5）应用端。有序推动氢燃料电池中重型车辆在短倒运输、城际物流、冷链物流、市政作业等场景示范和商业化运营，不断扩大交通领域氢能应用规模。并探索氢能在工程机械、非道路移动机械等领域应用空间。

第二部分 冬奥会后车辆处置研究

2022 年北京冬奥会上，张家口赛区大规模投入燃料电池汽车作为交通运输工具，为相关利益方提供班车运输服务。冬奥用车由冬奥组委和地方政府负责筹措，属于特殊示范场景下的临时性需求，冬奥会后，这批燃料电池汽车如何处置和利用，也是当前国内外比较关注的热点问题。

一、 处置现状

（一）冬（残）残奥会车辆投入情况

冬奥会和冬残奥会期间，张家口赛区分别投入 623 辆和 294 辆燃料电池汽车，涵盖 35MPa、70MPa 2 种技术路线，包括大型客车、中型客车和乘用车 3 种车辆类型，详见表 16。张家口赛区燃料电池汽车主要由冬奥组委和城市政府筹措，其中：冬奥组委筹措 503 辆，包括 35MPa 大中型客车 357 辆、70MPa 中型客车 66 辆、70MPa 乘用车 80 辆；城市政府筹措 120 辆，均为 35MPa 大型客车。35MPa 车辆均由国内整车企业生产；70MPa 中型客车（柯斯达氢擎）由丰田中国研发，在一汽丰田成都工厂生产，这也是丰田首次在海外实现氢燃料电池技术从研发到生产的全流程“本土化”；70MPa 乘用车（Mirai）以进口方式进入中国。该批车辆以租赁或赞助的方式在张家口赛区参与冬奥交通保障工作，这些车辆产权分别归属张家口公交、北京水木通达和丰田 3 家企业，赛后车辆处置也由 3 家企业各自负责。

表 16 冬（残）残奥会张家口赛区燃料电池汽车应用情况

项目	筹措方	筹措方式	冬奥会数量（辆）	冬残奥会数量（辆）	加注类型（MPa）	产权归属
12m 大型客车	城市政府	租赁	60	12	35	北京水木通达
11m 大型客车	城市政府	租赁	60	60	35	
12m 大型客车	冬奥组委	赞助	297	104	35	张家口公交集团
9.5m 中型客车	冬奥组委	赞助	60	25	35	
7m 中型客车	冬奥组委	赞助	66	23	70	丰田
乘用车（Mirai）	冬奥组委	赞助	80	70	70	
小计			623	294	/	/

（二）冬（残）奥会后车辆处置情况

35MPa 大中型燃料电池客车均已完成处置，终端用途明确。分企业来看，张家口公交集团的 297 辆 12m 客车，主要作为公交车使用，用于主城区 1 路、9 路、10 路、11 路、15 路、k1 路、k2 路、k3 路等 10 余条公交线路；60 辆 9.5 米客车交由集团下的张家口巴士旅游发展有限公司作为团体客车使用，主要用于商务用车、旅游包车等。北京水木通达的 120 辆 11/12m 客车返回北京市域内运营，主要为企业、高校、园区等提供通勤班车、商务和旅游出行、社区摆渡定制等客运服务，重点分布在海淀区、昌平区等区域。

70MPa 中型客车和乘用车基本完成处置，终端用途较分散。在北京冬奥会上，丰田共计提供了 140 辆第二代 Mirai 和 105 辆柯斯达氢擎，在延庆和张家口赛区作为贵宾车、运动员班车运营使用。这也是丰田首次在中国市场大规模投入使用燃料电池汽车。完成赛事服务后，丰田计划将这批车辆继续留在我国使用，并推动实施后续使用计划，截至 2023 年 5 月底，该批车辆基本处置完毕。Mirai 乘用车主要客户包括企业、机构和个人，用于出租运营、测试、展示、试乘试驾

等用途，重点分布在广州、佛山、北京等城市。广汽丰田是 Mirai 的主要承接者，共计接受 111 台 Mirai 赛事服务用车，计划在北京、上海、广州、佛山开展包括短租车、网约车、专线巡游车在内的大规模示范运营活动。目前广汽丰田已在广州市南沙区投入 65 辆 Mirai，在佛山市南海区启动 30 辆 Mirai 运营。柯斯达氢擎主要客户包括车辆运营企业、租赁公司和地方政府，用于通勤班车、活动接驳车、商务接待等用途，重点分布在北京、上海、天津、深圳、广州、太原、昆明、甘孜等城市。其中：北京申威狮星汽车服务有限公司承接 30 辆柯斯达氢擎，作为北京 CBD 免费商务班车投入运营。2023 年 6 月，中浩易汽车租赁首批 10 辆柯斯达氢燃料电池车在深圳投入运营。根据调研了解到，丰田 Mirai 和柯斯达氢擎虽已基本处置完毕，但在赛后车辆利用上受 70MPa 加氢站少、加氢困难等因素影响，车辆运营并不理想。

表 17 冬（残）残奥会张家口赛区燃料电池汽车处置结果

项目	产权方	数量 (辆)	终端用户	终端用途
12m 大型客车	北京水木通达	60	北京水木通达	班车服务
11m 大型客车	北京水木通达	60	北京水木通达	班车服务
12m 大型客车	张家口公交集团	297	张家口公交集团	公交运营
9.5m 中型客车	张家口公交集团	60	张家口巴士旅游公司	旅游包车等
7m 中型客车	丰田	105	政府、租赁和运营企业；北京申威狮星等	通勤班车；公务接待；活动接驳
乘用车 (Mirai)	丰田	140	政府、租赁和运营企业、机构和个人；广汽丰田等	试乘、展示；测试；租赁、网约车等

表 18 截至 2023 年 4 月底国内柯斯达氢擎上险量情况

上险时间	城市	数量 (辆)	使用性质
2022 年 7 月	北京	3	非营业
2022 年 8 月	上海	1	非营业

上险时间	城市	数量（辆）	使用性质
2022年8月	太原	8	非营业
2022年10月	北京	1	非营业
2022年11月	昆明	2	非营业
2022年12月	北京	1	非营业
2023年2月	北京	8	非营业
2023年2月	北京	22	非营业
2023年2月	北京	30	公路客运
2023年3月	天津	1	非营业
2023年3月	甘孜	2	非营业
2023年4月	广州	5	非营业
2023年4月	深圳	2	非营业
合计		86	/

二、存在问题

（一）部分 35MPa 车辆赛后陷入短暂停运状态

在赛后车辆利用上，受制氢厂停产或未投产、绿氢电价上涨、地方财政压力大、补贴资金发放难、加氢站数量少、疫情封控等多重因素影响，张家口燃料电池汽车还存在利用率较低的问题。例如，自 2022 年 10 月起，张家口 384 辆燃料电池公交陆续开始停运，截至 12 月活跃车辆数量降至个位数。

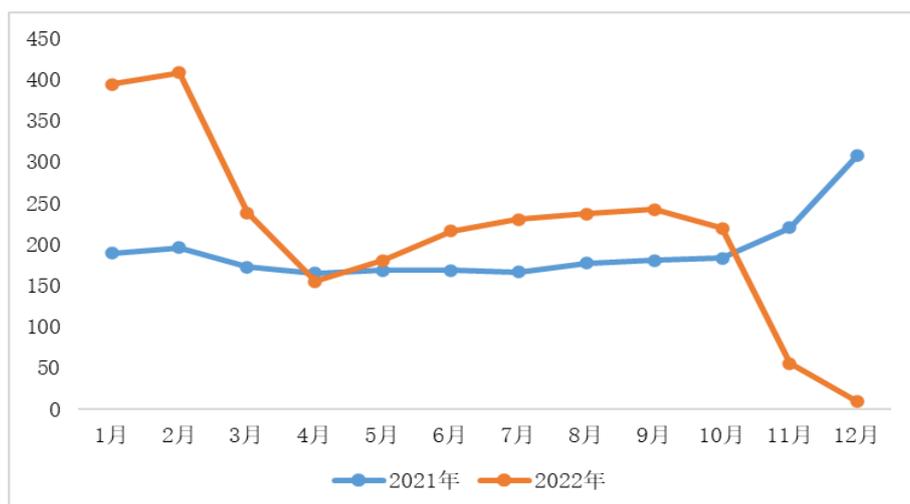


图 32 冬奥会后张家口燃料电池客车月活跃情况 单位：辆

影响因素主要包括：

(1) 氢气供应不足。2022 年 9 月 22 日海珀尔开始停产进行设备检修，交投壳牌和崇礼新天风能等其他制氢项目未正式获得安全生产许可证，不能正式合规生产，从而造成张家口市氢气供应量不足。

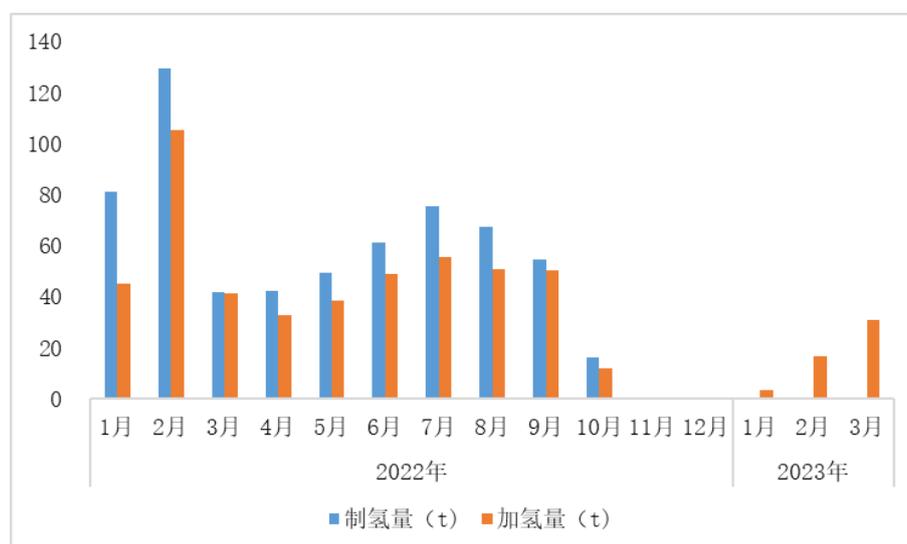


图 33 冬奥会后张家口氢气生产情况

(2) 绿氢电价上升。“四方协作交易”从 2022 年 5 月起取消，导致海珀尔和交投壳牌用电成本上涨，实际的用电价格上涨至约 0.7 元/kWh，从而推高制氢用电成本至 40.6 元/kg 左右，再加上制氢其他成本、运输成本和加注成本，加氢站枪口成本已远高于城市群 35 元/kg 的氢气价格要求。在氢气出厂价格 26 元/kg（含运费）、终端售价限定在 30 元/kg 情况下，制氢企业越生产越亏损，对企业生产积极性产生不利影响。

(3) 燃料成本较高。相比纯电动公交车和天然气公交车，氢燃料电池公交车的燃料成本高，是纯电动公交车的 2 倍，是天然气公交车的 1.5 倍。目前，氢燃料公交车燃料成本为 230 元/100km，纯电动

车燃料成本为 120 元/100km，天然气公交车燃料成本为 173 元/100km²³。若全部氢燃料电池车辆投用，每年氢燃料成本将成倍增加，收入远远无法覆盖成本，这将加重公交公司经营压力，并降低燃料电池车辆使用的积极性。

(4) 地方财政压力大。受举办冬奥会等因素影响，张家口地方财政压力不断加大，对氢能领域的投资支持力度减弱，造成加氢站建设补贴、电价补贴和公交运营补贴等未能进行及时清算和发放，对各环节企业造成较大影响，整个产业链面临停摆风险。

(5) 疫情影响。张家口主城区 10 月~12 月受疫情影响进行了封控，市民减少了公共出行，叠加氢气供应减少，导致公交车辆运营里程大幅降低。如下图所示。

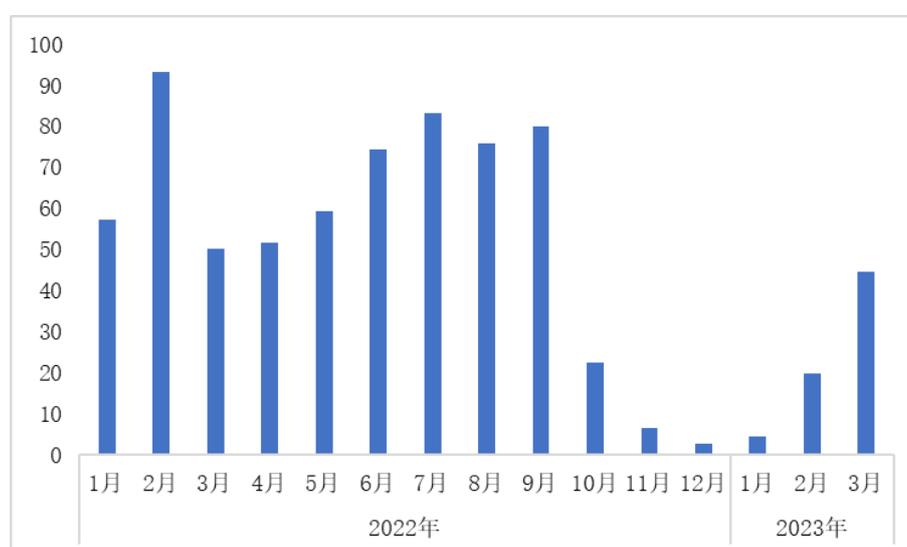


图 34 张家口市燃料电池客车运行里程 单位：万 km

(6) 加氢站数量偏少。张家口主城区仅有 3 座加氢站提供加氢服务，其中：1 座在运营，2 座停运，加氢困难影响车辆使用效率。

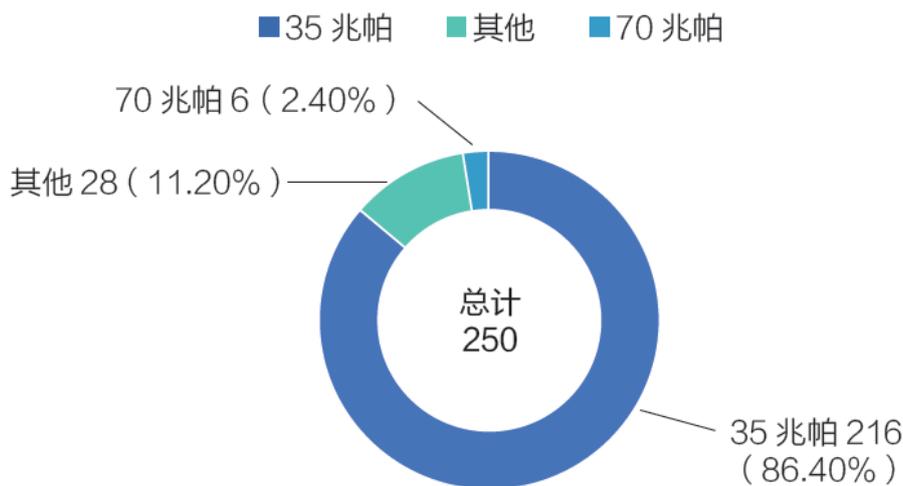
23 张家口市公共交通集团有限公司.张家口市氢能产业发展座谈会议发言材料.20230214.

总之，上述问题主要是由电价、成本、补贴和加氢站所引起，如果不采取有效措施应对，则会造成燃料电池车辆的永久性停运，不利于氢能产业的长远可持续发展。

(二) 70MPa 车辆赛后利用面临多重因素制约

在国内，丰田 70MPa 燃料电池车辆利用和运营上还面临多重因素的制约，具体表现在：

(1) 车辆加氢难。首先，国内 70MPa 加氢站数量偏少且零散分布，难以支撑 70MPa 车辆加注和运营需求。根据中国氢能联盟统计，截至 2023 年 2 月，我国共建成加氢站 359 座，在运营加氢站 250 座，其中 70MPa 加氢站仅 6 座，约占总量的 2.4%²⁴。其次，国内加氢站加注通信协议、加氢枪口与丰田 Mirai 不统一。再次，即使 35MPa 加氢站可为 70MPa 车辆提供氢气加注，但存在加注时间长、加注总量少等问题，行驶里程也将大幅缩水，造成车辆运营效率低下。最后，加氢站 70MPa 加注业务相关许可证办理困难²⁵。



24 中国氢能联盟.氢能产业观察 2月刊.2023.

25 IV 型储氢瓶“风起”降本提质等难题待解. <http://field.10jqka.com.cn/20230207/c644667319.shtml>

图 35 国内 250 座在运营加氢站情况²⁴

(2) 标准不完善。丰田车辆采用 70MPa 技术路线，搭载 III 型和 IV 型储氢瓶，国内在这方面的法规标准并不健全，尤其是 IV 型储氢瓶，极大地阻碍了 IV 型储氢瓶和相关车辆的推广应用。2023 年 5 月 23 日，《车用压缩氢气塑料内胆碳纤维全缠绕气瓶 GB/T 42612-2023》和《车用高压储氢气瓶组合阀门 GB/T 42536-2023》正式发布，均计划 2024 年 6 月 1 日开始实施，这 2 项国家标准的出台，将推动 IV 型储氢瓶商业化应用进程。尽管 IV 型储氢瓶国家标准即将正式实施，但关于 70MPa 产品及技术检测、评价、认证等诸多环节都缺乏具体、统一的标准。如 70MPa 加氢站，为保证加注安全和效率，美国、日本等国家均有加氢机与氢燃料电池车交互的红外通讯协议标准，而国内尚未推出此项标准。综上所述，丰田 Mirai 在国内上线运营还将面临相关法规和产品检测标准体系仍不健全等因素制约。

(3) 车辆价格高。以 Mirai 为例，丰田宣布其在中国标准版售价为 74.8 万元，高配版售价 75.1 万元。柯斯达氢擎是为北京冬奥会定制开发，未公开上市，没有官方指导价格。

三、结论及建议

(一) 结论

从赛后燃料电池车辆的处置和利用上可以看出，35MPa 车辆受制氢厂停产或未投产、绿氢电价上涨、地方财政压力大、补贴资金发放难、加氢站数量少、疫情封控等多重因素影响，处于停运状态。在车载储氢系统上，我国商用车以 35MPa 储氢瓶为主，当前配套加氢站

的加注能力多为 35MPa，技术路线较为成熟。但 35MPa 车载储氢系统存在储氢密度低、储氢量少的缺点，亟待提升储氢密度，以提升燃料电池车辆的续航里程水平。丰田 Mirai 和柯斯达氢擎车载储氢系统以 70MPa 为主，分别搭载IV型和III型储氢瓶，配套采用 70MPa 加注技术。从赛后丰田燃料电池车辆在中国的处置和利用来看，70MPa 车辆利用存在较大困难，主要在于国内能够提供 70MPa 加注的加氢站数量偏少。从国际趋势来看，欧美日韩燃料电池汽车普遍采用的是 70MPaIV 型瓶，甚至已经开始研发 V 型储氢瓶。70MPa 是提高车载储氢系统质量储氢密度的重要手段，是车载储氢系统商业化应用的重要趋势。随着燃料电池车辆向大功率、长续驶里程方向发展，对储氢提出了更高的要求。相较于 35MPaIII型储氢瓶，70MPaIV 型的储氢密度可提升 50%。70MPaIV型瓶以及加氢，能够显著提升燃料电池车辆续航能力和运营经济性，但由于相关法规、标准的滞后，目前国内没有大规模推广应用，在产业发展和示范应用上还存在一些难点、堵点亟需突破。

(二) 建议

1. 采取多种措施提高 35MPa 车辆利用率

一是降低制氢电价，推动氢气成本下降。(1) 积极争取恢复“四方交易机制”，给予网电制氢优惠电价支持；(2) 对于以并网型可再生能源电力制氢项目，建议国家允许继续享受“自发自用、余量上网、电网购电量免收两部制电价容量电费”的政策；(3) 尽快协调海珀尔恢复生产，协助交投壳牌、新天风能、河北建投、国华赤城、国电尚

义等制氢项目办理安全生产许可证，增强氢气生产供应能力。

二是加快市区加氢站布局建设，满足车辆就近加氢，减少车辆空驶里程，节约成本，提高车辆运营效率。

三是加强补贴资金清算和发放，缓解制氢厂、公交公司、加氢站等经营压力。

2. 完善 70MPa 产品标准和加强技术创新

一是完善 70MPa 产品标准体系。从 70MPaIV 型储氢瓶制造工艺、产品检测、质量认证等方面，逐步制定和出台一批国家标准。加快推进 70MPa 加氢站建设审批和相关资质审核。

二是加强 70MPa 产品技术研发。通过设立国家重点研发计划、专项行动、重点专项，支持 70MPaIV 型储氢瓶共性关键技术研发。鼓励国内企业、高校和科研院所开展产学研合作，加强 70MPaIV 型储氢瓶技术创新和产品研制，突破共性关键技术、核心技术、成型工艺、关键原材料制备等“卡脖子”问题。重点开发塑料内胆非注塑成型工艺技术、碳纤维缠绕技术、瓶阀及瓶体的密封技术。加快从材料（碳纤维）、关键阀门（瓶口阀等）、产品制造、标准制定到检测检验等方面形成自主可控的产业体系。开展 70MPa 加氢站关键技术攻关和设备开发，加快推进 70MPa 加氢站建设。

三是开展 70MPa 车辆试点示范。推动 70MPaIII 和 IV 型储氢瓶应用验证，鼓励有条件的区域开展 70MPa 车辆试点示范。在矿区、港口、工业园区等运营强度大、行驶线路固定区域，鼓励探索 70MPa 燃料电池商用车示范运行。在上海、广州、重庆、保定等燃料电池乘

用车基础较好的城市，通过网约、出租等形式开展 70MPa 燃料电池乘用车规模化应用试点。加快推进 70MPa 加氢站建设布局，支撑相关车辆试点示范。

四是通过大型氢能示范工程推动燃料电池车辆示范。建议国家或地方政府设立大型氢能示范工程，如大型风光氢储用项目，要求承担企业拿出部分资金支持一定规模的车辆示范，并配套建设加氢站。比如鼓励和支持炼化、化工和钢铁等高碳排放企业，在化工园区、厂区、港口、物流园区等场景，试点推广燃料电池车辆。对通过使用清洁车辆达到节能减排效果显著的企业给予税收抵免、津贴、拨款等奖励。探索氢能车队碳资产（碳积分）变现商业模式。

第三部分 氢能供应相关基础设施可持续方案研究

基础设施是氢能产业发展的重要保障。自 2022 年我国首次明确氢能顶层设计以来，国内氢能基础设施发展较为迅速，拟建和在建制氢项目激增，建成绿氢项目 37 个（产能 5.58 万 t/年），64 个在建项目，还有 200 多个项目规划中，加氢站数量超过 350 座，在全球已处于领先水平²⁶。但我国氢能产业还处于起步阶段，氢能主要应用在交通领域，在工业、建筑、发电和储能等领域仍然处于前期探索阶段，存在应用领域单一、市场容量有限，基础设施增长过快与下游需求不匹配等问题，这会引发氢能供应基础设施能利用的不稳定性和可持续发展的不确定性。张家口是我国氢能发展和示范应用的领先城市，为保障冬（残）奥会大规模燃料电池汽车示范运营，超前规划和投资建设了一批电解水制氢项目和加氢站。冬（残）奥会后，这些基础设施能否实现可持续利用，是影响张家口市氢能产业发展的关键问题，也是产业界所关注的焦点。张家口是我国氢能发展的一个典型缩影，研究其氢能供应基础设施可持续发展问题，有利于为全国其他地方发展氢能、推进基础设施建设提供相关借鉴。

一、发展现状

（一）已构建较完善的氢能政策支撑体系

张家口市已从产业规划、行动方案、产业扶持、项目准入、加氢站管理、氢安全等方面制定出台氢能相关政策 14 项，在全国范围内较早形成氢能产业发展的“1+N”政策体系。同时，政策体系对统筹推

26 中国氢能联盟.氢能产业观察 2 月刊.2023.

进氢能基础设施建设具有重要作用。在规划引领上，明确了近远期零碳制氢产能和加氢站建设目标。在项目准入上，完善了加氢制氢企业投资项目核准和备案实施意见，以及相关立项、审批流程等。在安全管理上，在国内率先制定出台《氢能产业安全监督和管理办法》，对确保全市氢能基础设施安全稳定运营具有重要意义，同时对全国氢能产业安全具有重要的示范作用。在配套支持上，给予电解水制氢不高于 0.367 元/kWh 的优惠电价，给予加氢站建设和运营双重补贴支持，推动了氢能供应基础设施的建设与运营。在组织机制上，成立了由市长任组长的氢能产业发展领导小组，建立领导小组定期会商制度和跨部门工作协调机制，对于推动氢能供应基础设施的建设与发展具有重要保障作用。

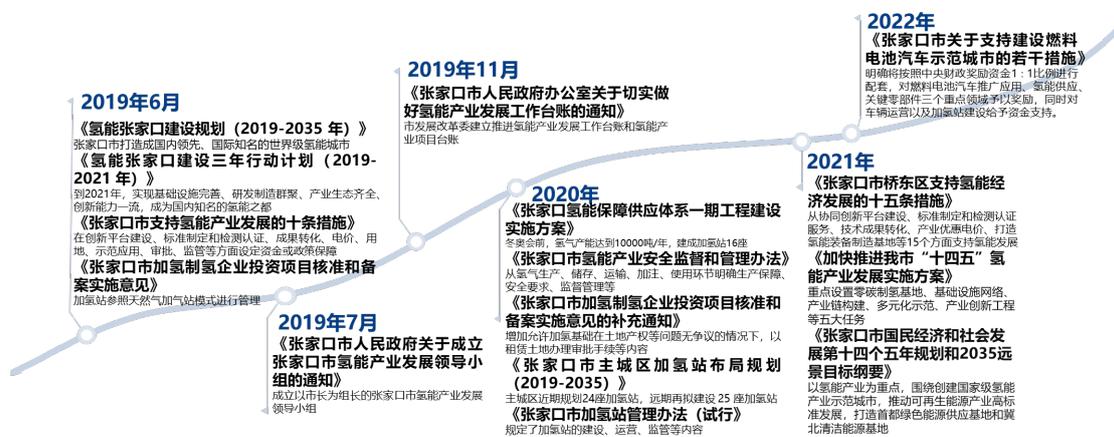


图 36 张家口市氢能政策出台情况

(二) 已先行先试探索制氢用电价格机制

依托可再生能源示范区“先行先试”政策优势，探索构建了“政府+电网+发电企业+用户侧”的四方协作机制，将电解水制氢企业纳入绿电市场交易，用电价格不高于 0.367 元/kWh，给予政府补贴后最低降

至 0.15 元/kWh（差价部分由地方财政补贴），有效降低制氢成本。张家口可再生能源示范区建设第十一次协调推进会上，明确给予风电制氢项目在冬奥会举办前后各半年内享受“自发自用、余量上网”和取消两部制电价中容量电费的优惠政策，风电制氢电价 0.33 元/kWh。通过落实相关会议精神和电价优惠政策，张家口市实现了低成本电解水制氢，绿氢生产成本约 23.42~34.50 元/kg。

（三）已形成较大规模的电解水制氢产能

张家口已建成国内规模领先的电解水制氢基地。全市拥有海珀尔、交投壳牌、河北建投、国华风电、国电电力等电解水制氢企业 7 家，涉及项目 8 个，规划总产能 43.06t/d。其中：建成项目 7 个，制氢产能 22.06t/d；谋划项目 1 个，制氢产能 21t/d。但目前大部分建成制氢项目处于设备调试、停产或未投产状态。

表 19 张家口电解水制氢项目情况

项目名称	建设企业	类型	产能（t/d）	状态
氢能产业化应用示范园建设项目	海珀尔	网电制氢	4	建成投产
交投壳牌绿色氢能一体化示范基地项目	交投壳牌	网电制氢	8	建成，已停产
大规模风光储互补制氢关键技术与应用示范项目	崇礼新天风能	可再生能源制氢	0.86	建成，已停产
风电制氢综合利用示范项目一期	建投（燕山）沽源	可再生能源制氢	1.7	建成，未投产
风电制氢综合利用示范项目二期	建投（燕山）沽源	可再生能源制氢	2.6	建成，设备调试中
风氢储多能互补示范项目制氢站一期项目	国华（赤城）风电	可再生能源制氢	4	建成，未投产
尚义风光耦合制氢科技示范项目	国电电力	可再生能源制氢	0.9	建成，未投产
康保制氢一期	鸿蒙氢能	可再生能源制氢	21	规划中
合计			43.06	
其中：已建成			22.06	

项目名称	建设企业	类型	产能 (t/d)	状态
在谋划			21	

(四) 已适度超前部署一批加氢基础设施

基于保障冬奥氢能出行和主城区氢能公交运营需求，张家口已累计建成加氢站 9 座，分别为创坝站、纬三路站、东望山站、太子城站及太子城撬装站、崇礼南站及崇礼南撬装站、崇礼北站、万全加氢站等，加氢能力达 7.88t@12h。在建和谋划加氢站各 1 座。冬（残）奥运会后，加氢站的利用效果并不理想，其中：张家口赛区 5 座配套的加氢站已停运或拆除，主城区 3 座加氢站仅有创坝站在运营，纬三路站和东望山站 2 座停运；其他区县的 1 座加氢站处于未投运状态。

表 20 张家口加氢站建设情况

加氢站名称	建设企业	类型	加注压力 (MPa)	加注能力 (kg/12h)	状态
创坝站	交投氢能	撬装	35	1000	在运营
纬三路站	交投氢能	固定	35	1000	已停运
东望山站	海珀尔	固定	35	1000	已停运
太子城站	中油新能源	固定	35	1000	已停运
太子城撬装站	中油新能源	撬装	70	180	已拆除
崇礼北站	中油新能源	固定	35	1000	已停运
崇礼南站	中石化张家口分公司	固定	35	1000	已停运
崇礼南撬装站	中石化张家口分公司	撬装	70	500	已拆除
万全油氢电综合能源站	国氢中极氢能源	固定	35/70	1200	未投运
现代产业园区加氢站	交投氢能	固定	35	1000	前期
阳原中泰加氢站	时泰能源热力	固定	35	500	规划

(五) 已开展氢能交通为先导的示范应用

张家口以交通领域为突破口，率先探索燃料电池公交车的示范应用，并逐步拓展到天然气掺氢和氢冶金领域，初步形成了以氢能交通为先导的示范应用格局。截至 2022 年底，全市累计投运燃料电池客

车 444 辆（公交 384 辆、团体客车 60 辆），累计行驶里程超过 2800 万 km，累计载客量超 8000 万人次，累计加氢近 2000t，是全国燃料电池客车运行数量最多、最稳定的城市之一，2021 年被联合国计划开发署（UNDP）评价为中国规模最大的燃料电池公交运行车队²⁷。此外国内首款微型氢能源物流快递车已在下花园、涿鹿 2 个县区投入运行。国家电投集团中央研究院、张家口鸿华清洁能源科技有限公司等已启动天然气掺氢关键技术研发及示范应用项目，已实现 3-20%氢气掺混可调，完成注入 20 户居民验证研究；张宣高科正在打造可推广、可复制的“零碳”氢冶金创新发展模式，120 万 t 氢冶金示范一期已建成，利用焦炉煤气为还原介质直接制氢冶炼钢铁，目前实现安全顺利连续生产绿色 DRI 产品。

二、存在问题

（一）氢能供应设施利用不足

冬奥会后，张家口氢能供应基础设施利用率较低，原因在于部分基础设施主要为保障冬奥会氢能示范这一特殊场景而建设，随着冬奥会的结束后该部分基础设施因没有相应的应用场景而停运。已建成的 7 个制氢项目，海珀尔拥有齐全的安全生产许可证、氢气危化品经营许可证、气瓶充装许可证和工业产品生产许可证等资质，具备持续生产运营的条件；其他制氢项目均处于已停产或未投运状态，尚不具备持续生产条件，导致设施利用不充分。已建成的 9 座加氢站中，张家口赛区 5 座加氢站因冬奥会后没有车辆加注需求已停止运营或进行

27 助力碳达峰碳中和 加快“氢能张家口”建设. <https://www.zjk.gov.cn/content/gzbs/179338.html>

设备拆除；东望山加氢站位于厂区内部，因加氢距离和加氢便利性等原因导致其未能充分利用；万全加氢站是 2019 年国家重点研发计划项目“大规模风/光互补制氢关键技术研究及示范”的配套示范站，在项目完成验收后因周边没有燃料电池车辆加注一直处于未投运状态；纬三路站受制于白天长管拖车无法进入主城区，其加注能力并未完全释放，目前由于车辆上线运营不足处于停运状态。张家口市氢能供应基础设施利用不充分，直接影响其可持续发展和利用，亟需通过培育和扩大终端应用，刺激绿氢市场需求，提高氢能供应基础设施利用水平。

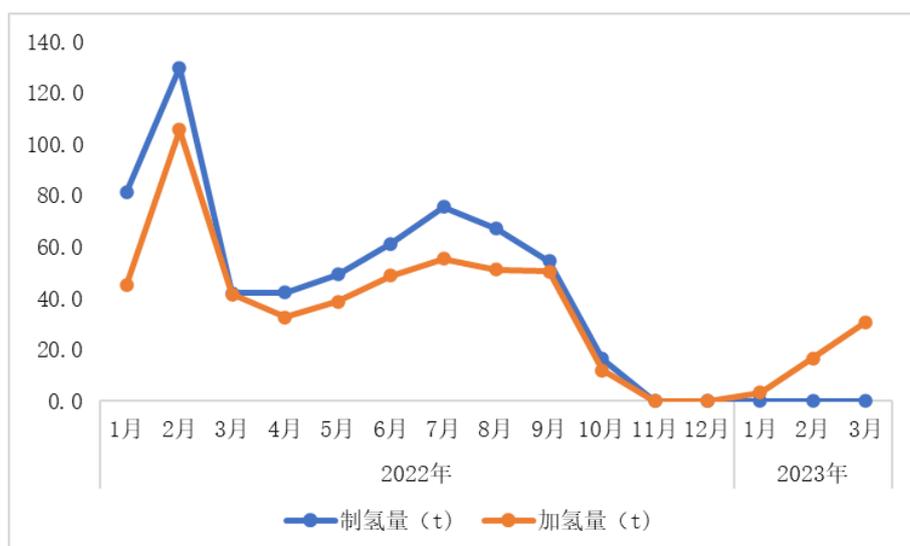


图 37 冬（残）奥会后张家口市制氢与加氢情况

(二) 加氢站仍面临各种困难

从张家口加氢站建设实践来看，加氢基础设施仍然面临投资成本高、盈利难等突出问题。加注能力 1000kg/12h 的 35MPa 加氢站，投资成本约为 1367~2451.67 万元；加注能力 1200~1500kg/12h 的 35/70MPa 合建加氢站，投资成本约为 2583~3800 万元；加注能力

180kg/12h 的 70MPa 撬装装置（进口），投资成本约 1955 万元（287 万美元）。根据对创坝站和纬三路站的调研，2 座加氢站依然处于亏损经营状态，尤其在本地制氢项目停产后，从外地采购氢气的到站价格达到 50 元/kg，但对外销售仍按 30 元/kg，亏损程度进一步加剧。另外，加氢站仍然面临建设周期长，审批、验收流程复杂等问题。总体看，加氢基础设施面临着诸多问题，亟需降低建站成本和加注成本，提升加氢站盈利能力。

（三）电解水制氢用电价格高

冬（残）奥会后，张家口市电解水制氢用电政策出现重大调整，导致用电价格上涨，推高用电和制氢成本。一方面，在网电电解水制氢上，按照《河北省发展和改革委员会关于做好冀北电网 2022 年绿电市场化交易工作的通知》（冀发改电力〔2022〕41 号）要求，2022 年 5 月起（冬奥会以后），全省“四方交易”机制取消，统一推进冀北电网绿电交易机制，导致海珀尔的用电成本上涨，实际的用电价格上涨至约 0.7 元/kWh，在每月实际产能约 50%的情况下，制氢成本高达 62.84 元/kg²⁸。另一方面，可再生能源制氢上，在冬奥会举办前后各半年内享受的“自发自用、余量上网、免收容量费”政策已于 2022 年 10 月到期。此外，现有的风电制氢项目在电场发电上网后再取电制氢，导致电价达 0.52 元/kWh 以上（不含容量费），制氢成本达到 42.4 元/kg。由此可以看出，目前在无电价优惠政策的情况下，张家口绿氢生产成本已高于国家燃料电池汽车示范城市群 35 元/kg 的氢气售价要求，也

28 张家口海珀尔新能源科技有限公司在张家口市氢能产业发展座谈会议上的发言材料.202302.

高于张家口市 30 元/kg 的加氢站终端售价，出现成本与价格严重倒挂。以示范城市群要求的 35 元/kg 的售价倒推，电价需降低至 0.25 元/kWh 以下，制氢企业才能抵消成本。

通过对制氢成本影响因素的分析发现，**电价和生产负荷对制氢成本有较大的影响**。以海珀尔 2000Nm³/h 网电电解水制氢项目为例，50%生产负荷情形下，电价 0.15 元/kWh 和 0.7 元/kWh 时，制氢成本分别为 30.81 元/kg、62.84 元/kg；100%生产负荷情形下，电价 0.15 元/kWh 和 0.7 元/kWh 时，制氢成本分别为 23.42 元/kg、54.45 元/kg。另外，**容量费和力调电费对制氢用电和生产成本有显著影响**。以崇礼新天风能制氢项目为例，在自发自用、余量上网情景下，免收容量费的制氢用电成本与收取容量费相比下降 44%左右；在自发自用、余量上网、免收容量费情景下，不执行功率因数考核（免收力调电费）的制氢用电成本与执行功率因数考核相比下降 21%左右。同时，如果国家电网调整目前的有功功率控制系统（AGC），实现以弃风电量制氢，风电场和制氢站均不执行功率因数考核，制氢电费成本将控制在 2.4 元/kg 左右，能够大幅降低氢气生产成本。

(四) 绿氢应用和消纳不明确

当前，张家口市绿氢产业面临终端应用场景偏少、下游需求不足、产能消纳难的问题。张家口绿氢应用领域主要以交通（燃料电池客车）为主，受限于经济水平、财政实力以及车辆应用主体不清晰、应用场景不明确等，氢能交通后劲不足。现有 444 辆燃料电池客车，日氢气需求量为 5t 左右（实际运行约 200 辆车，日氢气需求量仅为 2.5t 左

右), 而 7 个制氢项目的总产能约 22t/d, 存在产能过剩风险。氢冶金和天然气掺氢均处于前期试验阶段, 对绿氢需求拉动作用较小。绿氢产能如何消纳已成为张家口市迫切需求解决的重大难题。这也是全国其他区域发展绿氢面临的重要共性问题。

(五) 缺少系统性的绿氢规划

张家口是国家级可再生能源示范区, 拥有丰富的可再生能源资源, 风光资源可开发量达 7000 万 kW, 在绿氢生产上具有较好的发展潜力, 并能够为北京、天津等大城市提供清洁能源。当前张家口市已制定出台 14 项氢能政策, 但这些政策主要为支撑冬奥氢能示范和氢能交通, 并不适合绿氢的整体发展要求。绿氢在热电联供、分布式上网、绿氨合成、绿氢冶炼等更大范围的工作尚未启动, 相关配套的政策也没有制定, 亟需加快制定张家口绿氢生产基地规划, 统筹绿氢终端供应设施建设。

三、发展潜力

(一) 交通领域

在交通领域, 氢能可以推动交通清洁化转型, 减少交通领域碳排放。《绿色交通“十四五”发展规划》明确提出, 鼓励开展氢燃料电池汽车试点应用, 在张家口等城市推进城际客运、重型货车、冷链物流车等开展氢燃料电池汽车试点应用。《氢能产业发展中长期规划(2021-2035 年)》强调, 重点推进氢燃料电池中重型车辆应用, 有序拓展氢燃料电池等新能源客、货汽车市场应用空间。《关于启动燃料电池汽车示范应用工作的通知》明确支持燃料电池汽车示范应用, 并更加侧

重于中重型车辆。燃料电池汽车在中重型、中长途等运输场景下更具有竞争优势，是未来中重型商用车发展的重要技术方向。张家口经过4年多实车运营以及冬奥会上规模化示范，已证明了燃料电池客车在北方低温地区具有技术可行性。按照河北省燃料电池汽车示范城市群任务，到2025年，张家口市计划推广燃料电池汽车1130辆，则对氢能的需求约为10.6t/d。统计数据显示，截至2022年底，张家口市的中重型柴油和天然气商用车保有量约3.3万辆，将中重型车辆按照30%替换为燃料电池汽车，即约1万辆，按照单车日均氢耗30kg/d，则年氢气需求量约99602t。从北京、天津等京津冀周边城市来看，2025年燃料电池汽车保有量约1万辆以上，对氢气的需求量超过250t/d，存在较大的绿氢替代潜力，假设可实现30%绿氢替代，则对绿氢年需求约24750t。

(二) 工业领域

氢冶金。氢冶金具有显著的碳减排潜力，是钢铁行业实现低碳绿色转型升级的有效途径之一。《2030年前碳达峰行动方案》《氢能产业发展中长期规划(2021-2035年)》《工业领域碳达峰实施方案》等政策明确支持开展氢冶金示范。张宣高科120万吨氢冶金示范一期工程已于2022年12月16日建成，主要使用焦炉煤气，并预留了绿氢接口，未来对绿氢的需求潜力较大，潜在绿氢用量约1万t/a。

水泥。水泥是重要的建筑材料，其中化石燃料燃烧排放和电力排放约占全部排放的40%²⁹。氢气在水泥行业可作为高品质的原料和热

29 中国建筑材料联合会.水泥行业碳减排技术指南 <http://www.cbmf.org/c/2022/11/20/9610.shtml>.

源来使用,以减少传统燃料在水泥行业的应用,从而达到减碳的效果。如果采用绿氢或者绿氨燃烧替代燃煤,则可以减少 35%的燃料排放。开展“以氢代煤”的水泥熟料煅烧技术示范项目,可以推动水泥行业低碳转型。国家发改委等《水泥行业节能降碳改造升级实施指南》提出,要加快研发绿色氢能煅烧水泥熟料关键技术。工业和信息化部《“十四五”工业绿色发展规划》鼓励氢能等替代能源在钢铁、水泥、化工等行业应用。目前,国际上一些水泥集团公司也正尝试采用绿氢代替燃煤进行水泥熟料煅烧。例如,墨西哥西麦斯水泥在西班牙的水泥厂大多采用电解水制氢、氢能替代燃煤用量达 20%;德国海德堡水泥在英国的一家水泥厂采用液氢代替燃煤,替代率接近 40%³⁰。2022 年张家口市生产硅酸盐水泥熟料 175.38 万 t、水泥 372.72 万 t。假设生产 1t 水泥熟料消耗约 22kg 氢气³¹,按 10%替代,则每年对绿氢的需求约为 3858t。

(三) 建筑领域

在建筑领域,氢气通过发电、直接燃烧、热电联产等形式为居民住宅或商业区提供电热水冷多联供。天然气掺氢燃烧技术是未来供热等领域低碳化的重要方向,研究认为现有燃气管道掺入 20%以内体积比例的氢,不会降低管道安全性和燃气使用性能。统计数据显示,2021 年,张家口市供热领域天然气销售 2128.31 万 m³,按照 10%等热值掺氢,预计需要氢气 570t。居民用天然气销售 3914.58 万 m³,按照 10%

30 汪澜.绿氢煅烧水泥熟料关键技术初探[J].中国水泥,2022(04):46-48.

31 李爱红,杨楠,刘鹏飞等.氢气燃料用于熟料烧成的可行性分析[J].水泥,2022,No.550(12):14-18.DOI:10.13739/j.cnki.cn11-1899/tq.2022.12.004.

等热值掺氢，预计需要氢气 1049t。³²

(四) 储能领域

氢储能被认为是具有前景的集中式大规模、长周期和低成本储能方式。《“十四五”新型储能发展实施方案》明确提出，要加大氢（氨）储能的技术装备研发和可再生能源制氢（氨）等氢储能示范应用。《河北省张家口市可再生能源示范区发展规划》提出，到 2030 年，可再生能源发电装机规模达到 5000 万 kW。截至 2022 年底，张家口市已完成可再生能源装机规模 2647 万 kW。到 2030 年还需要新增可再生能源发电装机约 2353 万 kW，按照 10%配套储能计算，需要 235.3 万 kW 氢储能。按日均储能 2h、年运营 365 天计算，则对绿氢的需求量为 107356t/a。

(五) 发电领域

氢能可以作为数据中心的零碳能源，通过燃料电池提供主电源或备用电源供电，打造零碳数据中心。2020 年，微软已成功测试用 250kW 氢燃料电池系统为 10 个机架(一排)的数据中心服务器连续供电 48h，并于 2022 年部署了一套 3MW 的氢燃料电池系统作为数据中心的应急供电电源。荷兰最大的区域数据中心公司 NorthC 在格罗宁根新数据中心安装 500kW 氢燃料电池模块，并通过使用绿氢来供电。

表 21 燃料电池在数据中心应用案例³³

序号	公司	国别	燃料电池	装机量	燃料介质
1	eBay	美国	SOFC	6MW	天然气
2	苹果	美国	SOFC	4MW	生物质燃料

32 2021 年城市建设统计年鉴。

33 饶文涛,魏炜,蔡方伟等.氢能源在绿色数据中心中的应用现状及前景分析[J].上海节,2022,No.402(06):716-720.DOI:10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2022.06.009.

序号	公司	国别	燃料电池	装机量	燃料介质
3	CenturyLink	美国	SOFC	500kW	天然气
4	微软	美国	PEMFC	250kW	H ₂
5	NorthC	荷兰	PEMFC	500kW	H ₂ （绿氢）
6	微软	美国	PEMFC	3MW	H ₂

国家发展改革委《关于推动数据中心和 5G 等新型基础设施绿色高质量发展的实施方案》明确提出，结合储能、氢能等新技术，提升可再生能源在数据中心能源供应中的比重。数据中心具备高能耗、高排放特征，向绿色转型发展已是大势所趋，而氢燃料电池作为主电源或应急备用电源，可通过利用绿氢实现净零排放，具备良好的发展潜力。张家口是“东数西算”的核心枢纽节点之一，已逐步形成怀来大数据产业基地、张北云计算基地等多个产业园区协同联动的大数据发展格局。截至 2022 年底，全市已建成投运 16 个数据中心，已累计投运服务器 124 万台。河北省政府办公厅印发的《张家口数据中心集群建设方案》明确提出，到 2025 年新增标准机柜 55 万架，总量达到 70 万架。因此，数据中心将会成为张家口绿氢应用的潜在场景。以 20MW 数据中心机房为例，考虑 80% 的平均负载率连续运行：（1）氢燃料电池作为备用使用，应急备用电源单次运行不低于 2h 的电能消耗约 32MWh，若全部采用氢能供电（1kg 氢气发电约 16kWh），需消耗氢气约 2t³⁴；（2）氢燃料电池作为主电源使用，24h 的电能消耗约 384MWh，若全部采用氢能供电，需消耗氢气约 24t。

34 张诚,檀志恒,晁怀颇.“双碳”背景下数据中心氢能应用的可行性研究[J].太阳能学报,2022,43(06):327-334.DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0592.

(六) 发展研判

1. 绿氢是张家口参与京津冀协同发展的重要优势

从上述对张家口市氢能供应基础设施的分析来看，张家口市发展氢能产业既有机遇，也存在较大挑战。张家口市在交通、工业、建筑、储能、发电等领域，具备绿氢应用潜力。同时京津冀地区到 2025 年具有 1 万辆燃料电池汽车的推广任务需求，其大部分氢源均为副产氢提纯，即所谓的“灰氢”，存在一定的碳排放。张家口绿氢与京津冀氢源相比，具有清洁、低碳的比较优势，但劣势在于绿氢生产成本较高。从碳达峰碳中和角度来看，张家口具备替代灰氢向京津冀地区供给绿氢的优势和潜力。本地及京津冀地区对绿氢的需求在 24.7 万吨/年以上，这是张家口市氢能发展面临的重大机遇。但在绿氢发展上，张家口市还面临终端需求小、产能消纳难和绿氢成本高、如何向外输送等挑战。在未来产业发展上，必须尽快拓宽本地绿氢终端应用、打通京津冀绿氢供给通道、降低绿氢生产成本，利用绿氢先天的低碳甚至零碳排放优势，将绿氢和绿氨作为重要的零碳绿色能源和绿色材料，支撑京津冀地区能源消耗需求，打造京津地区的绿色氢能基地。

表 22 张家口及周边绿氢需求潜力

氢能替代场景		测算基数	绿氢替代比例	年绿氢需求量 (t)
交通领域	域内重型商用车	中重型柴油和天然气商用车 33546 辆	30%	99602
	京津冀氢能车辆	2025 年京津冀保有量 1 万辆	30%	24750
工业领域	冶金	产能 120 万吨/年	/	10000
	水泥	水泥熟料产量 175.38 万 t	10%	3858
	居民天然气	3914.58 万 m ³	10% (等热值)	1049

氢能替代场景		测算基数	绿氢替代比例	年绿氢需求量 (t)
建筑领域	集中供热天然气	2128.31 万 m ³	10% (等热值)	570
储能领域	储能发电	新增可再生能源装机量约 2353 万 kW	10%	107356
合计 (折合日氢气需求 749t/d)				247185

2. 未来张家口将继续立足可再生能源发展氢能

从政策、资源、需求、机遇等方面来看，张家口还将继续发展氢能产业。一是政策上，氢能已纳入《张家口市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》，并提出以氢能产业为重点，围绕创建国家级氢能产业示范城市，推动可再生能源产业高标准发展，打造首都绿色能源供应基地和冀北清洁能源基地。二是资源上，张家口市风光可开发量达 7000 万 kW。可再生能源制氢是唯一的零碳绿色制氢方式，是国家产业政策重点支持方向。张家口发展绿氢具有天然优势。三是需求上，需要落实燃料电池汽车示范城市 1130 辆推广任务，还需要加大车辆、加氢站等相关投资。四是机遇上，京津冀地区作为我国三大城市群之一，是我国能源消耗、碳排放的集聚区，碳排放量约占全国的 11%，碳排放强度高出全国平均水平约 40%³⁵。在推进“双碳”目标的进程中，迫切需要零碳能源来替代传统化石能源，降低各领域的碳排放。张家口具备向京津冀地区供应绿氢和绿氨等零碳绿色能源和绿色材料的可能性。

35 黄昱杰,刘贵贤,薄宇等.京津冀协同推进碳达峰碳中和路径研究[J].中国工程科学,2023,25(02):160-172.

四、相关建议

(一) 国家层面：加强电价支持，实施财税激励

1. 完善绿氢用电价格机制

制氢是发展氢能产业的基础，绿氢用电价格高是阻碍产业发展的关键因素。建议从国家层面完善绿氢电价支持政策，加快形成长效机制。建议允许并网型可再生能源发电制氢自发自用、余量上网，并取消容量费和力调电费，降低可再生能源制氢用电价格和制氢成本。通过崇礼新天风能制氢项目实践证明，采用风电制氢“自发自用、余量上网和免收两部制电价中容量费电费”模式，可以有效降低氢能生产成本，与国网购电制氢成本相比下降 53%左右。支持发展离网型可再生能源制氢；建议将网电制氢纳入绿电交易，并给予电价政策优惠支持。

2. 制定绿氢财税支持政策

国际上欧盟、美国、日本、韩国、澳大利亚等国家和地区以直接投资、税收抵免、碳差价合约等方式支持绿氢生产，降低绿氢成本，提升绿氢应用占比。建议国家通过设立专项基金、提供补贴或减免税收等方式，鼓励绿氢产业的投入和创新。针对绿氢制取装备关键技术、材料研究和科技成果产业化应用设立科技专项，加大专项资金投入。将绿氢纳入碳交易市场，实施碳税或碳补贴等方式，调节绿氢与化石能源制氢之间的价格差异，提高绿氢的市场竞争力。制定绿氢税收减免专项优惠政策，如通过投资税收抵免、消费税收抵免等政策激励绿氢的生产和使用。

表 23 主要国家绿氢支持政策

国家	激励措施
美国	《降低通货膨胀法案(IRA)》提出全球首个清洁氢税收抵免政策，为每公斤绿氢提供最高 3 美元的税收抵免。同时，美国能源部制定了 95 亿美元清洁氢投资计划，其中：80 亿美元用于建造区域清洁氢中心；10 亿美元用于清洁氢的电解计划，降低清洁电力生产氢气的成本；5 亿美元用于清洁氢的制造和回收计划，支持美国制造业和巩固美国国内供应链。
欧盟	欧盟委员会发布了欧洲氢能银行计划。欧洲氢能银行将支持欧盟内部吸收，以及从国际合作伙伴进口可再生氢。按照计划，欧盟将于 2023 年秋季在创新基金下，启动首批可再生氢能试点拍卖，专项预算为 8 亿欧元（约合人民币 58 亿元），这将是氢能银行的第一个金融工具。为了缩小欧盟可再生氢和化石氢之间的成本差距，降低投资成本，选定的试点项目将以每公斤制氢固定溢价的形式获得补贴（绿氢生产商能够获得每公斤氢气 4 欧元的固定溢价），最高可运作十年，这将提高项目的可融资性并降低总成本。欧洲氢能银行成立的主要目的，是创设一套金融工具，覆盖掉早期项目的可再生氢气和化石燃料之间的成本差距
英国	英国政府启动了全球首个国家级清洁氢气补贴计划，将使用差价合约（CfD）机制资助 1GW 绿色氢气和 1GW 蓝色氢气项目，使绿氢及蓝氢在价格上可以与廉价但存在污染的灰色氢气竞争。英国净零氢基金将提供 2.4 亿英镑的政府联合投资，支持 2022 年至 2025 年间的低碳氢生产。
德国	在财税政策方面，德国《可再生能源法（2021）》首次提出支持绿氢的生产和工业使用，减免用于绿氢制取的可再生能源附加费，减免幅度可达 85%甚至 100%。德国还将试点碳差价合约（Carbon Contract for Difference, CCfD），即由政府补足合同约定的碳价格与碳市场交易价格的差额，此举能够显著降低碳市场价格波动的风险，继而保障绿氢企业的投资回报。
意大利	2023 年 4 月，欧委会批准意大利 4.5 亿欧元支持可再生氢生产的计划。欧盟复苏和恢复基金(RRF)将对此提供资金，预计采取覆盖投资成本的直接赠款形式，每个项目的最高援助金额为 2000 万欧元。
加拿大	2023 年 3 月，加拿大政府通过 2023 年财政预算，对清洁技术制造、清洁氢、零排放技术、碳捕获和储存提供投资税收抵免。为清洁氢提供 15%到 40%生产成本的补贴，需新机器和设备的投资成本提供 15%税收抵免。
韩国	韩国国会预算办公室（National Assembly Budget Office）建议对绿色氢能经济进行投资的企业采取更积极的税收激励措施——减免高达 40%的税收，目前韩国政府正在对该方案进行详细研究。
印度	已经批准了一项 20 亿美元的综合激励计划，以支持和激励绿色氢气燃料生产商。作为这个计划的一部分，各方将通过竞争性招标程序获得成本的 10%激励。激励措施将每年逐步减少，招标计划将向已经生产氢气和氨气或拥有可再生能源工厂的公司开放。印度政府预计将颁发大约 1300 亿卢比用于生产绿色氢气，其余的财政激励将用于支持电解槽的制造。
日本	日本推出 2 万亿日元的绿色创新基金用以建设大规模的绿氢供应链。4 月，日本宣布更新国家氢能战略，同时日本政府将公布新的差价合约计划(CfD-Contract For Difference)。该计划将补贴清洁氢和未减量的天然气或煤炭生产的灰氢之间价格差异。更新后的日本氢能战略目标需要 15 万亿日元（约合 1128 亿美元）的公共和私人投资共同完成所需大规模供应链打造和工业园区建设。

国家	激励措施
澳大利亚	澳大利亚宣布，将斥资 20 亿澳元（约合 13.5 亿美元）补贴绿氢生产，作为每公斤氢生产价格的抵免额来实施。
埃及	埃及在批复的一项新法案草案中拟议对绿氢项目提供 55% 的税收抵免。在进行税收减免的同时，该法案还为埃及新兴绿氢产业提供了系列的财政激励措施，包括免除项目设备购买和材料增值税 VAT，免去公司和土地注册相关的税费，以及设立信贷设施和抵押贷款的税费。

3. 规范绿氢项目审批管理

为杜绝以绿氢名义谋取风光资源指标现象，防止绿氢项目无序增长，造成产能过剩，建议从国家层面制定出台绿氢项目审批管理办法，指导地方政府和企业稳慎有序推进绿氢生产项目建设，促进产业高质量发展。

4. 部署绿氢重大示范工程

针对绿氢在工业、建筑、储能、发电等领域利用规模小、推广难度大、经济性差和商业模式不成熟等难题，建议围绕绿氢冶金、绿氨合成、绿电制甲醇、天然气掺氢、氢储能等领域，从国家层面规划部署一批重大示范工程，探索工业、建筑、储能及发电等领域规模用氢模式和绿氢消纳途径，打造形成一批可复制可推广的标杆应用场景，加快探索形成有效的绿氢产业发展商业化路径。

(二) 地方层面：统筹规划布局，培育市场需求

1. 继续探索绿氢支持政策

给予网电电解水制氢项目风电或光伏开发资源，并视同配置储能，以风光收益补贴绿氢生产，不断推动企业探索降低绿氢成本到具有竞争力的水平。给予并网型可再生能源发电制氢税收减免等政策支持，鼓励开展离网型可再生能源发电制氢试点。优化可再生能源发电制氢审批管理，建议有关部门将绿氢（风光等电解水制氢）项目纳入能源

项目进行管理，不需要取得危险化学品安全生产许可。

2. 制定绿氢大基地规划

为有序推动绿氢生产项目建设，明确绿氢终端应用与消纳途径，建议依托国家级可再生能源示范区资源、政策等优势，尽快制定张家口绿氢大基地规划。

一是明确本地交通、工业、建筑、储能、发电等领域绿氢应用和需求潜力，开展绿氢应用综合示范工程，促进绿氢消纳。

二是积极拓展京津冀绿氢市场。加强对京津冀地区可再生能源+绿电+绿氢的生产、运输和应用场景进行研究，与北京天津等有关部门和企业沟通绿氢消纳，明确京津冀绿氢需求，打造绿氢或绿氨外输通道，为北京天津等城市供能（绿色电力）、供热（居民供能、工商业供热能或冷能）、通信（基站和数据中心的备电或热电联供系统）、重载交通（城市垃圾运输、城际货运干线等）领域提供绿氢或绿氨供应。

三是根据本地和京津冀绿氢需求和消纳潜力，制定绿氢生产基地建设规划，统筹推进绿氢终端供应设施和能力建设。同时，通过大规模绿氢生产基地建设，推动绿氢成本下降。目前张家口网电制氢的度电成本为 0.7 元/kWh，风电制氢的度电成本为 0.52 元/kWh，而大规模风电制氢的电价成本可低至 0.2 元/kWh，仅电费一项，氢气成本可从 40.6 元/kg 下降到 11.6 元/kg。

3. 培育多元化的市场需求

坚持以氢能交通为先导，积极开展工业、建筑、储能等领域的示范应用，打造多元化应用场景，培育绿氢市场需求，构建完善的氢能

应用生态，通过规模化应用降低氢能利用成本。建议在现有示范基础上，强化政策引导，通过财政补贴、科技创新基金或产业创新发展专项资金等，重点支持企业开展 6 方面绿氢应用示范：

一是扩大氢能交通应用领域，除燃料电池公交外，加强旅游通勤客车、中重型卡车（物流配送、渣土运输等）、环卫车等领域的应用。加强与北京等周边城市的应用场景协同，打造京津冀氢能货运廊道，如怀安/怀来-昌平矿物建筑材料运输，大兴区京东亚洲一号仓-张家口物流货运通道；积极参与氢能高速网络建设。

二是积极推进氢冶金工作进展，以为张宣高科（宣钢）提供低成本绿氢为目标，谋划大型绿氢生产基地和绿氢输送管道战略研究。

三是逐步开展热电联供，重点以楼宇用燃料电池冷热电联供系统和掺氢热电联供系统为主。发展燃料电池热电联供系统，用于社区、园区甚至农村地区。发展掺氢或掺氨，代替现有的火电热电联产。

四是积极开展电网调峰，探索氢储能发电（燃料电池）上网，满足电网调峰需求和余电消纳。

五是率先开展在数据中心示范应用。推动氢燃料电池作为数据中心备用电源的重要补充，支持张北、怀来、宣化等区域率先在国内打造氢能数据中心示范工程。

六是开展绿氢合成氨示范工程，探索绿氢的本地化消纳，打通液氨外输通道（如输送至唐山港，通过船舶进行出口）。

4. 强化政策落实和资金拨付

受张家口市联合举办冬奥会、地方财政压力较大等因素影响，张

家口加氢站建设补贴、电价补贴和公交运营补贴等未能进行及时清算和发放，对各环节企业造成较大影响，企业陷入经营困境。建议强化相关政策落实，及时清算和拨付氢能相关补贴资金，缓解企业经营压力，提高各环节相关资产的利用效率。

(三) 行业层面：加强技术创新，降低氢能成本

在绿氢产业发展初期，不同应用场景难以齐头并进，基础设施建设也不宜过度超前、贪大求全，建议行业企业既要注重氢能供应基础设施相关设备的技术创新，也要合理把控基础设施的建设步伐。

一是制氢端，面向可再生能源制氢，重点围绕提高电流密度、降低直流电耗、电解槽优化与氢电融合智能调控策略等方面，开发大规模、低成本、高效率、强适应性的电解水制氢技术。研制大规模集中式电解制氢系统（适配可再生能源波动性的电解制氢电源装备和大规模碱性水电解制氢装备）、分布式模块化电解制氢系统（模块化 PEM 制氢装备和集装箱式碱性水电解制氢装备）等装备。制氢项目要注重建设与产能消纳并重，通过实施大规模风光电储氢综合示范工程，以风光电收益支持示范工程中的技术研发和多元化利用等投入，降低氢能成本。

二是储运端，加快氢储运关键技术装备的研制和产业化，支撑绿氢供应体系建设。开发气态储氢系统（包括高压和管道）和液氨储运系统，重点研制的核心装备包括高压氢气压缩机、长管拖车用储氢瓶、氢气计量、输氢管件和阀门、大流量宽负荷调节氢气加压装备、氨液化装备、液氨储存装备、氨催化分解制氢装备等。推动 30MPa 及以

上长管研制及商业化应用，提升氢气运输效率。开展大规模氢载体（绿氨）、纯氢管道输氢和天然气掺氢试点。

三是加注端，进一步加强 35/70MPa 加氢站关键设备研制及国产化，降低加氢站设备成本。开发压力高、流量大、安全、密封性好的站用氢气压缩机。优化主城区加氢站布局，减少加氢空驶距离，提升加氢效率。

四是应用端。面向氢供能、氢原料等领域，研制氢/氨燃料电池发电和供热装备、氢/氨燃烧发电和供热装备，开发富氢冶炼高炉、氢冶炼气基竖炉等技术。开发多元化和规模化氢能应用。有序扩大氢能在中重型车辆、工程机械和非移动道路机械上的应用。探索开展可再生能源发电+电解水制氢+氢能冶金技术研发和示范项目，适时开展“以氢代煤”的水泥熟料煅烧技术示范项目。建设绿氨综合性示范工程。

附 1：北京冬（残）奥会总体示范情况

根据公开资料显示，2022 年冬奥会和残奥会分别投入燃料电池汽车 1200 台和 800 余台，累计运行里程 370 余万公里，累计减少 CO₂ 约 2700 余吨。³⁶

附 2：亿华通、丰田和国电投车辆示范情况

根据亿华通公开数据显示，其中，搭载亿华通燃料电池发动机的 724 辆大巴车累计运营里程超 260 万公里，减少 CO₂ 约 2200 余吨³⁷。

根据丰田公开资料显示，在北京冬奥会上丰田投入了 140 台 Mirai 和 107 台柯斯达氢擎，累计里程 397104 公里，耗氢 11 吨，减少 CO₂ 约 113 吨³⁸。

根据国家电投公开资料显示，在北京冬奥会上，共有 200 辆搭载国家电投集团燃料电池系统的车辆（其中 50 辆备用），累计发车 7205 班次，接驳乘客 160697 人次，累计行驶 888599 公里，消耗氢气 75 吨，减少 CO₂ 约 700 余吨（含准备期间）³⁹。

附 3：北京冬奥会和日本东京奥运会氢能示范对比

本次北京冬奥会氢能示范应用，相比 2021 年日本东京奥运会的氢能应用，具有如下特点：

一是氢源具备多样化特征。北京冬奥会氢源主要来自交投壳牌、海珀尔、新天风能、燕山石化、天津石化、华北石化、京辉气体等企业，技术路线包括风电碱性电解水制氢、工业副产氢和天然气重整制

36 焦点访谈《履职见证 非凡五年》. <https://www.163.com/dy/article/HVAJAV7O0518QRAR.html>.

37 欧阳明高. 绿氢氢能研发与产业化进展及技术展望. 2023 年全球氢能技术大会. 202305.

38 丰田 2022：没有退路，就是胜利之路. https://www.sohu.com/a/537305275_120044111.

39 11 位大咖论道产业发展！多场景氢能应用该如何实现？
<https://www.163.com/dy/article/H3Q8HOV60519BMQA.html>.

氢等。东京奥运会建成了福岛光伏制氢项目，制氢规模 10MW（2000Nm³/h），年产约 900t⁴⁰。而本次北京冬奥会电解水制氢最大规模达到 20MW（4000Nm³/h）。二者均实现了绿氢生产与应用。

二是运氢方式呈现较大差异。北京冬奥会氢气运输采用 20MPa 高压氢气长管拖车，东京奥运会则通过修建管道，向奥运村的氢燃料电池发电设备供应氢气。

三是加氢站加注能力不同。从加注类型上看，北京冬奥会投入加氢站 15 座，其中 35MPa 加氢站 10 座，具备 70MPa 加注能力的加氢站 5 座；而东京奥运会基本上以 70MPa 加氢站为主。从加注能力上看，北京冬奥会 35MPa 加氢站设计加注能力 500~1000kg@12h，东京奥运会 70MPa 加氢站基本以 300Nm³/h 加注为主（即 27kg/h，约为 324kg@12h）。为了配合东京奥运会及残奥会上投入使用的燃料电池汽车，在东京都江东区丰州建设了超级加氢站，这是日本第一个可同时供燃料电池乘用车及大型燃料电池巴士加氢的制氢加氢一体站，占地面积约 2000m²，配备 2 台加氢机。从服务对象上看，北京冬奥会 35MPa 加氢站主要服务于燃料电池商用车，35/70MPa 加氢站可同时为燃料电池乘用车和商用车加注，而东京奥运会 70MPa 加氢站主要服务于乘用车。从服务车次上看，北京冬奥会加氢站单站日最大加注 80-150 辆大巴，东京奥运会则最大加注 20 辆大巴。

四是氢能示范场景具有单一性。北京冬奥会氢能示范主要聚焦交通领域，而东京奥运会氢能应用更具综合性，这也反映出了中国和

40 魏晨,龚龔,樊锦艳.东京奥运会背后的“氢能社会”战略布局及经验启示[J].中外能源,2022,27(11):23-29.

日本在氢能利用现状上的差异，中国目前氢能应用场景主要集中在车辆领域，而日本推广使用氢能的力度更大，出台了多种扶持政策开拓更多元的氢能应用场景，比如家庭住宅、商业建筑供电供暖等。在交通场景上，北京冬奥会投入燃料电池汽车 1121 辆，以燃料电池商用车示范为主，而东京奥运会投入燃料电池汽车 600 余辆⁴¹，以燃料电池乘用车示范为主。在建筑场景，东京奥运会在晴海人工岛上建成了氢能奥运村，并将奥运村打造为家用热电联产的“样板间”。氢能奥运村具备完整的氢能基础设施，包括一座用于公交系统的快速加氢站、向居民区和燃料电池汽车供能的输氢管道、供公用空间和商业建筑使用的燃料电池以及用于所有私人住宅的 ENE-FARM。奥运村 5632 户住宅全部安装了松下公司为家庭开发的燃料电池 ENE-FARM⁴²。

五是二者均向世界展示了氢能源的制取、储运、加注和应用等多个环节的阶段性发展成果，形成了较完善的氢能源利用体系。

表 北京冬奥会和东京奥运会氢能应用对比

领域		东京奥运会	北京冬奥会
制氢	氢源	福岛 10MW 光伏制氢项目 (FH2R)，产能 2000Nm ³ /h	交投壳牌、海珀尔、崇礼新天风能、燕山石化、天津石化、华北石化等。总产能超过 1.52 万 Nm ³ /h
	技术路线	光伏碱性电解水制氢、液化天然气重整制氢	风电碱性电解水制氢、工业副产氢、天然气重整制氢
运氢	运氢方式	输氢管道	20MPa 长管拖车
加氢	加氢站	<ul style="list-style-type: none"> · 奥运村周边修建数座加氢站，其中在丰州建设超级加氢站（液化天然气制氢），配备 2 台加氢机 · 以 70MPa 加氢站为主 	<ul style="list-style-type: none"> · 加氢站超过 15 座，其中：张家口赛区 5 座加氢站，北京赛区 10 座 · 以 35MPa 加氢站为主 · 氢气价格 70 元/kg

41 500 辆丰田氢燃料电池车 MIRAI 和 100 辆氢能客车投入东京奥运会 [EB/OL].<http://www.mrhcn.cn/evcar/hangye/4635.html>.

42 氢动冬奥：中日两国奥运会氢能应用比较[EB/OL].<http://www.pgo-china.com/index.php?ac=article&at=read&did=13412>

领域	东京奥运会	北京冬奥会	
	<ul style="list-style-type: none"> 丰州加氢站氢气价格为 1600 日元/kg(约为人民币 99.76 元/kg)⁴³ 其他加氢站氢气价格约 1100-1200 日元/kg(约为人民币 66-70 元/kg) 		
应用	火炬	首次使用氢气作为主火炬燃料来源，接力火炬大部分采用丙烷	主火炬和接力火炬均为氢气。“飞扬”火炬采用高压储氢，属于全球首次
	车辆	总量约 600 辆，其中 500 辆 MIRAI 乘用车，100 辆 SORA 大巴，全部为 70MPa 车辆	总量约 1121 辆，其中：乘用车 140 辆，客车 979 辆，专用车 2 辆，覆盖 35MPa 和 70MPa 两种压力
	无人机	/	在张北和延庆投入 8 架氢能无人机进行电力巡检，保障冬奥期间供电安全
	专用车	/	分别投入 1 辆燃料电池雪蜡车和 1 辆燃料电池发电车
	建筑	奥运村 5632 户住宅全部安装家用燃料电池 ENE-FARM	/

附 4：燃料电池公交车经济性评估

在能源基金会支持下，张家口氢能与可再生能源有限公司已于 2021 年完成《以张家口为代表的寒冷地区氢燃料电池公交车应用评估及发展建议》课题研究，详见能源基金会网站 <https://www.efchina.org/Reports-zh/report-ctp-20220426-2-zh>。该课题对张家口 10.5m 燃料电池公交车的经济性进行了评估。评估结果显示，在不考虑环境成本的情况下，氢燃料电池公交 TCO 成本（总拥有成本）最高，每公里成本达 12.22 元，远高于柴油公交的 8.75 元、天然气公交的 7.43 元以及纯电动公交车的 7.96 元。这还是在本地政府对氢气零售价做出 30 元/kg 限定的情况下，如根据实际制氢、运氢、加注的成本来看，现阶段张家口地区氢气成本远高于 30 元/kg。因此从

43 壳牌供天然气 日本首个天然气制氢加氢站开业. <https://news.bjx.com.cn/html/20200119/1037672.shtml>.

经济性角度看，氢燃料电池公交车现阶段并不具有经济性。

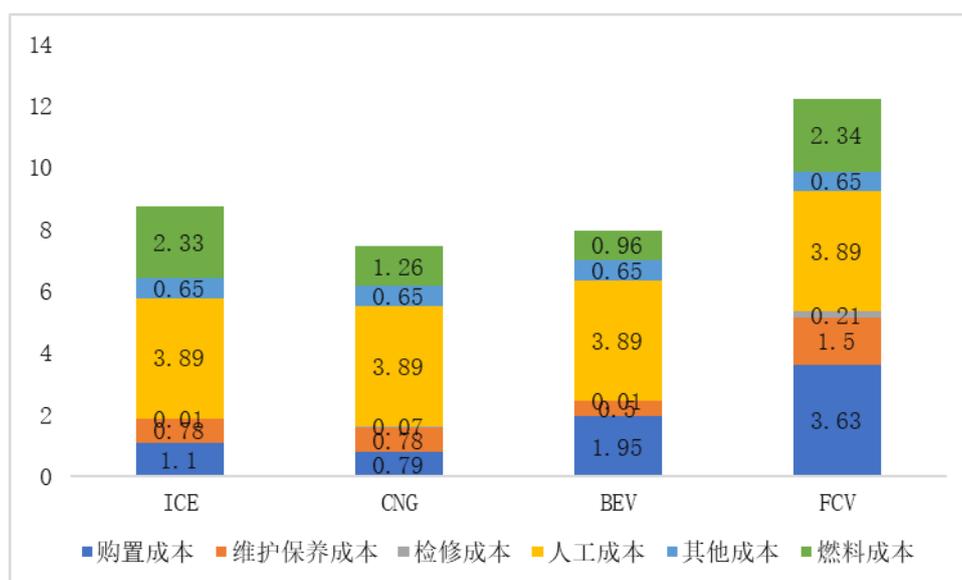


图 张家口地区四种公交车 TCO 经济性对比 单位: 元/km⁴⁴

附 5：国家层面关于绿氢相关政策

政策名称	发布单位	发布时间	政策要点
关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见	中共中央 国务院	2021/10/24	推进高效率太阳能电池、可再生能源制氢、可控核聚变、零碳工业流程再造等低碳前沿技术攻关。
“十四五”能源领域科技创新规划	国家能源局	2021/11/29	[集中攻关]突破适用于可再生能源电解水制氢的质子交换膜（PEM）和低电耗、长寿命高温固体氧化物（SOEC）电解制氢关键技术，开展太阳能光解水制氢、热化学循环分解水制氢、低热值含碳原料制氢、超临界水热化学还原制氢等新型制氢技术基础研究。 [示范试验]开展多能互补可再生能源制氢系统最优容量配置研究，研发动态响应、快速启停及调度控制等关键技术；建立可再生能源—燃料电池耦合系统协同控制平台；研发可再生能源离网制氢关键技术；开展多应用场景可再生能源-氢能的综合能源系统示范。
“十四五”工业绿色发展规划	工业和信息化部	2021/12/03	开展非高炉炼铁、水泥窑高比例燃料替代、可再生能源电解制氢、百万吨级二氧化碳捕集利用与封存等重大降碳工程示范。开展绿氢开发利用。推进低碳冶金、洁净钢冶炼、

44 张家口氢能与可再生能源有限公司.以张家口为代表的寒冷地区氢燃料电池公交车应用评估及发展建议 [EB/OL].<https://www.efchina.org/Reports-zh/report-ctp-20220426-2-zh>.

政策名称	发布单位	发布时间	政策要点
			绿氢炼化等。
“十四五”原材料工业发展规划	工业和信息化部	2021/12/29	推动石化化工行业探索现代煤化工与传统炼化产业、可再生能源发电制氢产业互补发展。
“十四五”新型储能发展实施方案	国家发展改革委 国家能源局	2022/01/29	开展可再生能源制储氢(氨)、氢电耦合等氢储能示范应用。探索利用可再生能源制氢,支撑大规模新能源外送。开展依托可再生能源制氢(氨)的氢(氨)储能试点示范,针对新能源消纳和系统调峰问题,推动大容量、中长时间尺度储能技术示范,重点试点包括示范可再生能源制氢等更长周期储能技术;统筹推进张家口可再生能源示范区新型储能发展,探索风光氢储、风光火储等源网荷储一体化和多能互补的储能发展模式。
“十四五”现代能源体系规划	国家发展改革委 国家能源局	2022/01/29	开展风电、光伏发电制氢示范。开展高效可再生能源氢气制备、储运、应用和燃料电池等关键技术攻关及多元化示范应用。实施高效可再生能源氢气制备、储运、应用和燃料电池等关键技术攻关及多元化示范应用;氢能在可再生能源消纳、电网调峰等场景示范应用。
2022年能源工作指导意见	国家能源局	2022/03/17	因地制宜开展可再生能源制氢示范,探索氢能技术发展路线和商业化应用路径。
氢能产业发展中长期规划(2021-2035年)	国家发展改革委 国家能源局	2022/03/23	燃料电池车辆保有量约5万辆,部署建设一批加氢站,可再生能源制氢量达到10万~20万吨/年,成为新增氢能消费的重要组成部分。2030年,形成清洁能源制氢及供应体系,可再生能源制氢广泛应用;2035年,可再生能源制氢在终端能源消费中的比重明显提升,对能源绿色转型发展起到重要支撑作用。并提出研究探索可再生能源发电制氢支持性电价政策,完善可再生能源制氢市场化机制,健全覆盖氢储能的储能价格机制,探索氢储能直接参与电力市场交易。
关于“十四五”推动石化化工行业高质量发展的指导意见	工信部、国家发改委等	2022/04/07	加快突破新型催化、绿色合成、功能-结构一体化高分子材料制造、“绿氢”规模化应用等关键技术;鼓励石化化工企业因地制宜、合理有序开发利用“绿氢”,推进炼化、煤化工与“绿电”“绿氢”等产业耦合示范。
“十四五”可再生能源发展规划	国家发展改革委 国家能源局等	2022/06/01	开展规模化可再生能源制氢示范。在可再生能源发电成本低、氢能储输用产业发展条件较好的地区,推进可再生能源发电制氢产业化发展,打造规模化的绿氢生产基地。突破

政策名称	发布单位	发布时间	政策要点
			适用于可再生能源灵活制氢的电解水制氢设备关键技术，推进适用于可再生能源制氢的新型电解水设备研制。推广燃料电池在工矿区、港区、船舶、重点产业园区等示范应用，统筹推进绿氢终端供应设施和能力建设，提高交通领域绿氢使用比例。
工业领域碳达峰实施方案	工业和信息化部 国家发展改革委 生态环境部	2022/07/07	鼓励有条件的地区利用可再生能源制氢，优化煤化工、合成氨、甲醇等原料结构。
2023 年能源工作指导意见	国家能源局	2023/04/12	加快攻关新型储能关键技术和绿氢制储运用技术，推动储能、氢能规模化应用。
新型电力系统发展蓝皮书	国家能源局	2023/06/02	在交通领域大力推动新能源、氢燃料电池汽车全面替代传统能源汽车。交通、化工领域绿电制氢、绿电制甲烷、绿电制氨等新技术新业态新模式大范围推广。推动可再生能源制氢，研发先进固态储氢材料，着力突破大容量、低成本、高效率电氢转换技术装备，开展大规模氢能制备和综合利用示范应用。

免责声明

- 若无特别声明，报告中陈述的观点仅代表作者个人意见，不代表能源基金会的观点。能源基金会不保证本报告中信息及数据的准确性，不对任何人使用本报告引起的后果承担责任。
- 凡提及某些公司、产品及服务时，并不意味着它们已为能源基金会所认可或推荐，或优于未提及的其他类似公司、产品及服务。

Disclaimer

- Unless otherwise specified, the views expressed in this report are those of the authors and do not necessarily represent the views of Energy Foundation China. Energy Foundation China does not guarantee the accuracy of the information and data included in this report and will not be responsible for any liabilities resulting from or related to using this report by any third party.
- The mention of specific companies, products and services does not imply that they are endorsed or recommended by Energy Foundation China in preference to others of a similar nature that are not mentioned.