车载燃料电池系统高原环境适应性研究

王家恒，温敏，杨磊

安徽江淮汽车集团股份有限公司　安徽合肥　230601

摘要：针对氢燃料电池性能对阴极压力和流量十分敏感，尤其是高海拔地区。利用氢燃料电池汽车高海拔环境相关试验数据分析研究，分别从动力性、经济性方面探讨此环境下燃料电池系统综合表现。结果表明：燃料电池系统动力性能受高原海拔环境影响较大，额定功率衰减在30%左右，通过调整阴极匹配参数和优化控制策略，提升高海拔环境下系统的适应能力，为燃料电池在高海拔环境下匹配设计做参考。

关键词：氢燃料电池；高海拔；低气压；极化曲线

DOI:10.16173/j.cnki.ame.2024.10.012

氢燃料电池汽车作为新能源汽车一种，凭借其终极能源的特征，尤其在物流运输车辆的应用推广方面有着优势[1-2]。据统计2021—2023年，燃料电池重型货车总销量为6694台，其中2023年销量3458台，占比51.7%。然而研究表明，燃料电池的发电效率、工作电压和可靠性能与环境温度、湿度和供气流量压力强相关[3-4]，氢燃料电池汽车运行特性在四高环境下十分敏感。

本文介绍了高海拔环境下，燃料电池系统功能评价，并与平原地区做对比定量讨论空气系统变量对燃料电池影响，为燃料电池系统环境适应性匹配设计提供依据。

海拔高度对燃料电池影响

对于燃料电池性能运行工况，由能斯特方程[5]可表示为：

$$E_{\mathrm{Nment}} = E_0 + \frac{RT}{2F}\ln\left(\frac{P_{\mathrm{H_2}}P_{\mathrm{O2}}{}^{0.5}}{P_{H2O}}\right) \quad (1)$$

式中　E_{Nment}——电池电势；

$P\mathrm{o}_2$、$P\mathrm{H}_2$、$P\mathrm{H}_2\mathrm{O}$——分别为氧气、氢气、水的分压，单位为atm（1atm=101.325kPa）；

T——电池温度，单位为K；

F——法拉第常数；

E_0——标准压力和温度下的理论电势；

R——气体常数。

随着海拔上升，大气压力和空气中含氧量随之下降。电池的理论电势降低，活化损失[6]增大，同时气体扩散能力减弱，浓差极化[7]损失增大。在压力与流量两种因素的共同影响下，电池输出功率出现明显衰减。不同海拔高度下的性能仿真数据如图1所示。

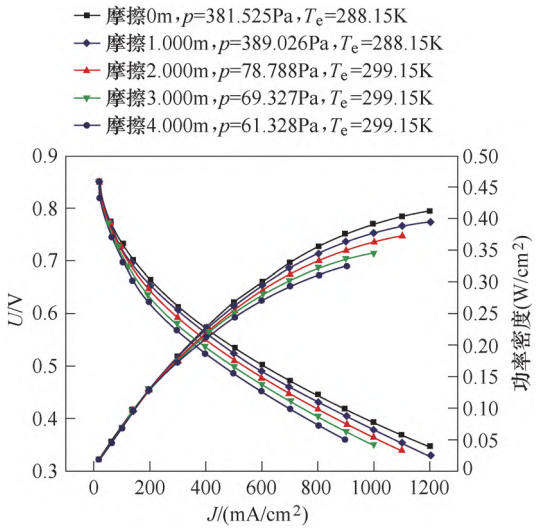

图1　不同海拔下电池性能仿真曲线[8]

试验准备

1.地点与环境

高原地区：青海格尔木，平均海拔2900m，大气压力73kPa，环境湿度RH20%，温度25℃。

平原地区：安徽合肥，平均海拔0m，大气压力101kPa，环境湿度RH70%，温度31℃。

2.试验车辆

车辆来自江淮轻客车型星锐，电堆来自大连新源额定功率36kW。整车和动力系统具体参数见表1。

表1　氢燃料电池车辆参数

尺寸	外形尺寸（长×宽×高）/mm	6200×2098×2845
	轴距/mm	3570
质量	整备质量/kg	3664
	最大总质量/kg	4675
电机	额定功率/kW	60
	峰值功率/kW	110
动力系统	燃料电池额定功率/kW	36
	燃料电池系统额定功率/kW	30
氢瓶	储氢压力/MPa	35
	氢瓶容积/L	128+28×2

3.测试准备

1）整车状态确认：动力电池电量SOC处于30%～60%，氢气加满状态，车辆一般性检测要求符合。

2）相关设备连接确认：将CANoe、USBCAN2.0一端通过OBD接口分别接入整车CAN总线系统，另一端连接至笔记本USB接口、将氢气流量计接入FCU采集流量数据。

3）数据记录：使用CANoe记录所有CAN信号，上位机记录控制面板数据，重点关注DCDC输出电流、母线电压、电堆输出功率、电堆运行时间、辅助系统电流及氢气流量等数据。

试验数据分析

1.极化性能

如图2所示，平原曲线为电堆正常操作条件下的极化性能，而高原1数据测试条件为提高阴极供气量得出性能最优值，见表2，即当前电流燃料电池输出最大功率值。高原2数据与平原数据为同一系统操作条件。

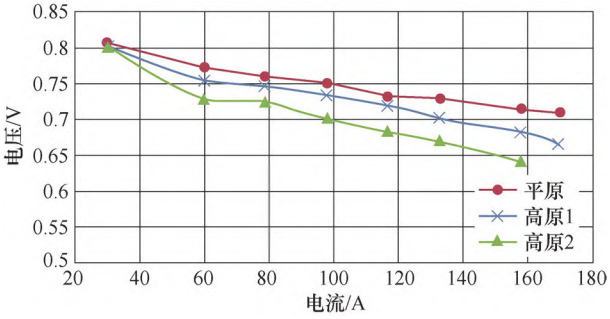

图2　不同环境和操作条件下电堆极化曲线

表2　高海拔电堆性能数据

操作环境	空压机转速/（r/min）	电流/A	电压/V	功率/kW
平原	36 000	170	156	26.5
高原1	40 000	170	146	24.7
高原2	36 000	158	141	22.2

高原数据1中，在阴极供气量充足，燃料电池性能达到高海拔环境最大值，与平原单体压差＜0.02V（电流＜120A）。随着电流增大，供气系统性能达到极限，气体扩散速率相对于电流的转化速率开始变慢，浓度极化影响增大，单体压差达到0.045V，功率损失2kW。且由于燃料电池电压输出值限制，此系统在73kPa高海拔环境下输出功率最高为24.7kW。数据2中，与平原环境同样操作条件，由于低压环境影响，

此时对应流量已不足支撑170A电流拉取，此时，最大输出功率仅22.2kW。

2.燃料电池系统输出性能

燃料电池系统净输出与空压机寄生负载相关，一定条件下，空压机供气量有益于提高燃料电池输出，但自身能量消耗随之增加。然而高海拔环境，燃料电池与辅助系统功耗关系更加复杂。

如图3所示，高海拔环境燃料电池系统最大输出功率21.6kW，低于平原地区23.2kW。

低电流(＜60A)运行系统性能受空气系统影响较小，中等电流(＜140A)系统适宜在平原操作条件下运行，而高电流下空气供气量增加带来燃料电池性能增益大于空压机功耗。

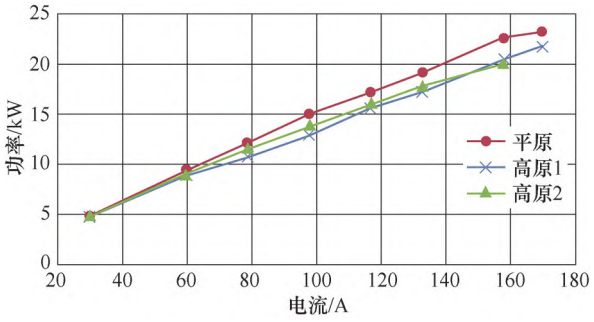

图3　燃料电池系统净功率输出曲线

3.燃料电池系统效率

燃料电池系统效率是衡量燃料电池系统经济性能的重要指标，它与氢气转化率、电堆效率及系统负载等参数相关。高海拔环境引起的电堆性能衰减、辅助功耗增加，最终导致系统工作效率降低。如图4所示，工作电流越大，效率变化越明显，最大功率点效率降低近4%。

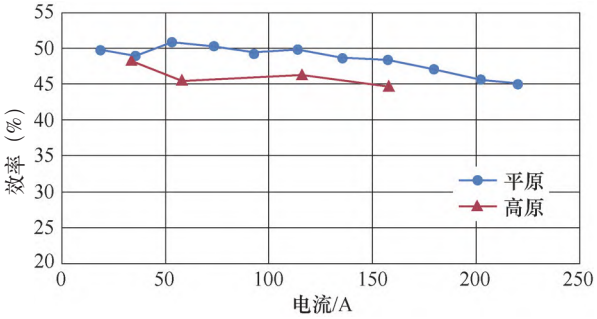

图4　燃料电池系统效率曲线

4.氢气消耗量

燃料电池将氢气转化为电能，氢气转换效率即利用率代表了燃料电池氢气系统最重要设计指标。如图5所示，高海拔与平原地区氢耗量基本相同，高电流工作区由于绝对压力降低，氢气供氢压力减小，氢耗量降低，但仍可维持电流输出，对应利用率增加。

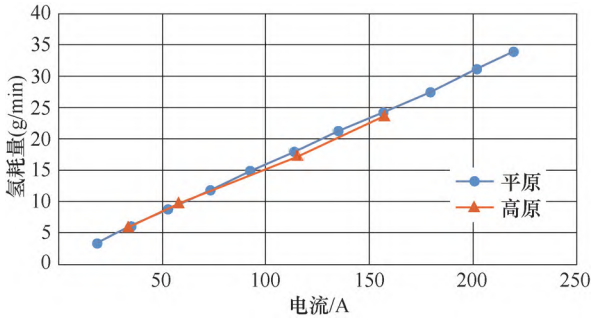

图5　氢气消耗量曲线

5.空气系统对燃料电池性能影响

高海拔环境试验数据见表3，燃料电池性能同时受到空气计量比和入口压力影响。高海拔环境带来的大气压和氧含量不足的情况，使得燃料电池电压低于正常水平。通过增加空压机转速，提高空气供气量和进气压力，此时燃料电池电压有所改善，直至增加到临界值。

燃料电池拉取电流98A，当进气流量为35.6g/s，空气计量比4.6满足电堆计量比操作需求，然而对比不同海拔环境燃料电池电压分别为1.445V、1.48V，相对压力分别为33kPa、23kPa，绝对压力为106kPa、123kPa，可认为绝对压力不足，影响气体传质效率，使得燃料电池性能有所衰减，单体电压损失0.0175V，衰减较小。

表3　空气系统变量与燃料电池参数关系对照表

高原参数				平原参数		
流量/（g/s）	压力/kPa	计量比	电压/V	流量/（g/s）	压力/kPa	电压/V
28.4	0.18	3.7	1.4	35.4	0.23	1.48
32.1	0.24	4.2	1.427			
34.9	0.31	4.5	1.436			
35.6	0.33	4.6	1.445			
36.9	0.37	4.8	1.455			
38.6	0.42	5.0	1.464			

结语

高海拔环境对燃料电池系统性能有较大影响，2900m海拔高度，由于空压机性能限制，燃料电池最大输出为22.2kW，对比平原环境额定输出33kW，性能衰减33%，通过调整系统空气供应量，燃料电池最大可输出24.7kW，系统最大功率21.6kW，效率降低4%。

空气系统中进气流量、压力和燃料电池性能相关。提高空气进气压力和进气量有助于提升燃料电池输出性能，尤其在高电流工作区，有利于降低浓度极化影响。

高海拔环境燃料电池系统匹配重点在于：电堆正常工作条件下，通过提高阴极进气压力和流量，保证系统净输出功率及效率最优。

参考文献：

[1] 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.

[2] 董格，许广健，吴胜男. 燃料电池汽车整车技术现状与发展趋势[J]. 汽车工业研究， 2024（2）：32-39.

[3] 胡旦，张梦元，张望. 船用PEMFC发电模块高原运行特性研究 [J].船电技术，2023，43（11）：36-38，42.

[4] 王家恒，蔡文杰，杨磊，等.基于粒子群算法的燃料电池仿真模型建模与分析[J]. 汽车制造业，2024（4）：41-46.

[5] 顾洮，袁野.质子交换膜燃料电池仿真建模与分析［J］.电源技术，2021，45（4）：459-462.

[6] 李龙，梁前超，赵建锋，等. 空冷型PEMFC的动态建模仿真及验证［J］. 电源技术，2020，44（2）：200-203，259.

[7] Yang Yang，Zhu Wenchao，Li Yang，et al. Modeling of PEMFC and analysis of multiple influencing factors on output characteristics［J］. Journal of the Electrochemical Society，2022，169（3）：1-13.

[8] 苗宇航，邢路，程文君，等.空冷型PEMFC高海拔地区运行特性研究[J].电源技术，2021，45（8）：1023-1026.

（上接第14页）

员工熟悉应急流程、掌握应急技能、提高应急反应速度。同时，通过演习发现存在的问题和不足，为后续的改善提供参考。

成果展示

在高压管理体系的运行过程中，顺义工厂注重运用PDCA的思路，通过日常检查、员工反馈及事故调查等多种方式收集信息，对发现的问题进行深入分析并制定改进措施。通过上述体系的搭建，顺义工厂取得了以下显著成果。

准入通过：顺利通过工信部MIT工厂准入审核，确保可以投产电动车。

体系审核：通过ISO和TS16949体系审核及戴姆勒全球审核。

公司内审：通过公司安全部、高压组织和质量部的审核。

高压0事故：保障了新能源汽车生产过程中的高压安全，从2020年电动车试装准备开始至今，无高压相关问题和事故。

人才储备：建立了电动化人才的储备库，有力保障了电动车的生产和交付。

结语

顺义工厂在新能源汽车从项目确立到序列化生产的过程中，通过建立健全的高压管理体系，实现了高压安全管理的规范化和系统化。这一体系不仅保障了生产员工的生命安全和生产过程的顺利进行，还提升了企业的整体竞争力和社会形象。未来，顺义工厂将继续深化高压管理体系建设和完善工作，为推动公司和集团的新能源汽车产业的健康发展贡献更多力量。

参考文献：

[1] 裴学杰，张鑫．新能源汽车维修安全防护及性能测试[J]．内燃机与配件，2022（6）：93-95.

[2] 李洪涛.浅谈新能源电动汽车的专项检测技术[J]．客车技术，2019（1）：37-38.