

氢燃料混合动力机车氢燃料电池布置设计及结构疲劳强度评估

蒋宽¹, 张瑾², 刘逸³, 闫玉凤⁴

1. 苏州中车氢能动力技术有限公司, 江苏 张家港 215634

2. 广州电力机车有限公司, 广东 广州 510850

3. 西南交通大学, 四川 成都 610031

4. 中车戚墅堰机车有限公司, 江苏 常州 213003

摘 要 : 基于氢能的能量密度高、可再生、绿色低碳等, 以轨道交通外走廊式调车机车应用为基础, 介绍了一种氢燃料电池布置设计并按照 GB/T 21563-2018 中结构性能评价指标对氢燃料电池框架进行疲劳分析, 各指标都满足要求, 证实了该设计的合理性以及氢燃料电池在轨道交通应用的可行性。

关 键 词 : 氢燃料电池; 调车机车; 结构设计; 疲劳强度

Layout Design and Structural Fatigue Strength Evaluation of Hydrogen Fuel Cells for Hydrogen Fuel Hybrid Locomotives

Jiang Kuan¹, Zhang Jin², Liu Yi³, Yan Yufeng⁴

1. CRRC Hydrogen Power Technology (Suzhou) Co., Ltd. Zhangjiagang, Jiangsu 215634

2. Guangzhou Electric Locomotive Co., Ltd. Guangzhou, Guangdong 510850

3. Southwest Jiaotong University. Chengdu, Sichuan 610031

4. CRRC Qishuyan Co., Ltd. Changzhou, Jiangsu 213003

Abstract : Based on the high energy density, renewability and green low-carbon characteristics of the hydrogen energy, this paper introduces a hydrogen fuel cell layout design based on the application of shunting locomotives in railway. The fatigue analysis of the fuel cell frame is conducted according to the structural performance evaluation indicators specified in GB/T 21563-2018. All indicators meet the requirements, confirming the rationality of the design and the feasibility of applying hydrogen fuel cells in railway.

Keywords : Hydrogen fuel cell system; shunting locomotive; structural design; fatigue strength

随着全球气候变化加剧,“碳达峰、碳中和”已然成为国家战略,氢能能量密度高、可再生、无污染等优点,成为能源变革的重要组成部分。随着氢能技术迭代更新及产业链的不断完善,氢燃料电池应用并助力轨道交通节能减排、绿色低碳和环保发展。本文主要介绍了一种基于轨道交通外走廊调车机车的氢燃料电池应用,并对承载的框架结构进行仿真分析,旨在说明氢燃料电池在调车机车上的应用是切实可行的。

一、氢燃料电池概述

氢燃料电池实质是一种能量转换装置,通过在催化剂的作用下以非燃烧的方式,将氢气和氧气中蕴含的化学能转化为电能和热能,最后生成物为水^[1-2]。氢燃料电池工作原理如图1所示。

储氢瓶内的高压氢气通过减压阀调压后进入氢燃料电池电堆的

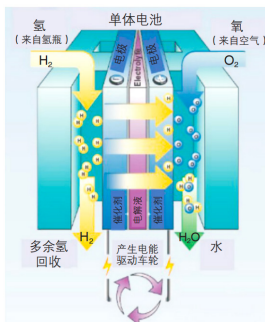


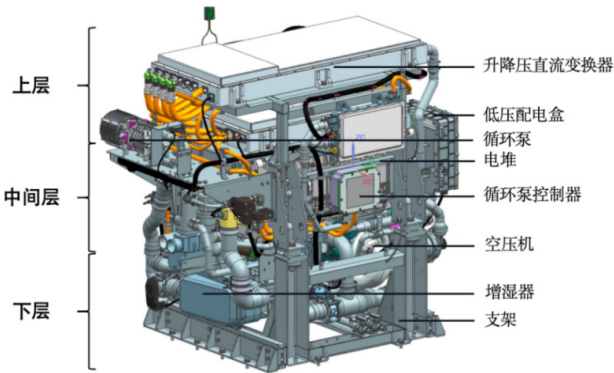
图1 氢燃料电池工作原理示意图^[3]

阳极,在催化剂的作用下失去电子,电子通过外接电路到达电堆阴极,而氢质子以水合氢质子形态通过质子交换膜迁移到电堆阴极。同时空压机增压的过滤空气(氧气)进入电堆的阴极,在催化剂的作用下接收电子与从阳极迁移而来的氢质子生成水,并释放热量。

二、氢燃料电池布置设计

构成适用于该机车的单个氢燃料电池采用集成式简化设计,以电堆为设计的中心,遵循氢电、高低压隔离的原则,采用

竖向三层式布置结构，即上层为升、降压直流变换器；中间为电堆及电气部件；下层为空气和热管理部件，如图2所示。



> 图2 单氢燃料电池布置示意图

氢燃料电池总布置设计上遵循机车模块化和氢燃料电池集群化，将氢燃料电池和与之配套的散热系统集成在一起，以实现模块化整体拆装。在保证散热系统高效工作的前提下，将其布置在氢燃料电池的上方；整车功率匹配所需求的四组氢燃料电池采用 2×2 矩阵式布置在下方，兼顾应用维护需求把维护部件布置在车辆过道两侧。

三、框架静强度和疲劳强度分析

（一）框架设计概述

框架（如图3所示）结构形式为框架横梁式，由底架、顶架、立柱及若干加强梁焊接而成，以实现上下承载的要求。根据使用要求设有氢燃料电池、线束及管路固定座等。所用矩形钢管、板材折弯件等，材料为 Q345B，屈服极限为 355MPa。

（二）载荷计算及工况组合

在车体承受和传递的随机振动激励下，可能引发框架振动疲劳破坏。依据标准 GB/T 21563^[4] 对框架进行随机振动分析，并基于 Steinberg 方法和 IIW-2259 标准对框架结构进行疲劳损伤评估。

1. 振动疲劳

基于幅值增强方法在约束点施加相应的加速度功率谱，载荷参照标准 GB/T 21563-2018 中 1 类 A 级车体安装 ASD 频谱的加载方式，分别施加标准规定的功率谱以及实测功率谱。

当 $M > 1250\text{kg}$ 时， $f_1 = 2\text{Hz}$ 、 $f_2 = 60\text{Hz}$ （ M 为框架重量（含氢燃料电池）），不同频率下加载的 ASD 值如表 1 所示。

表 1 框架各向 ASD 加载值

频率 (Hz) 方向	f_1 (m/s^2) ² / Hz	5 (m/s^2) ² / Hz	20 (m/s^2) ² / Hz	f_2 (m/s^2) ² / Hz
垂向	0.067	1.034	1.034	0.116
横向	0.016	0.250	0.250	0.028
纵向	0.029	0.452	0.452	0.051

2. 静强度

基于机车实际运用速度低的特点，对于静强度载荷，考虑垂向 $\pm 2g$ 振动作用，横向 $1g$ 振动作用，纵向 $3g$ 振动作用。以垂

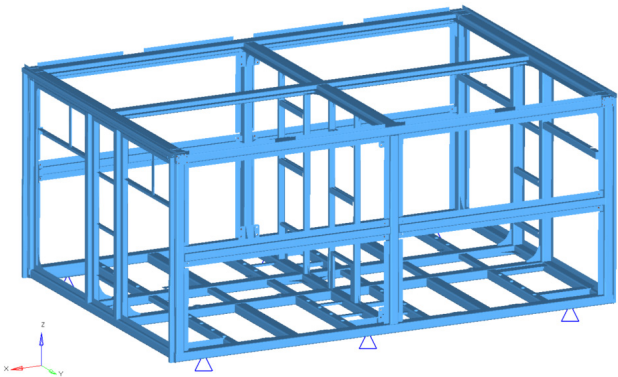
向、横向和纵向为基本载荷，工况组合如表 2 所示。

表 2 框架静强度工况组合

工况	载荷工况		
	Y 向（纵向）	X 向（横向）	Z 向（垂向）
1	F_y	F_x	F_z
2	F_y	F_x	F'_z
3	--	F_x	F_z
4	--	F_x	F'_z
5	--	--	F_z
6	--	--	F'_z
7	起吊工况		

（三）有限元计算模型

取整个框架进行建模，采用 SHELL181 壳单元，计算模型节点总数为 1331963 个，单元总数为 1339625 个。计算模型（如图 3 所示）的约束条件用刚性边界，边界条件施加在框架底部安装座处。



> 图 3 框架有限元模型

框架自重、散热系统和氢燃料电池重量以质量形式分配在计算模型中并进行计算。

（四）强度分析评估

1. 静强度

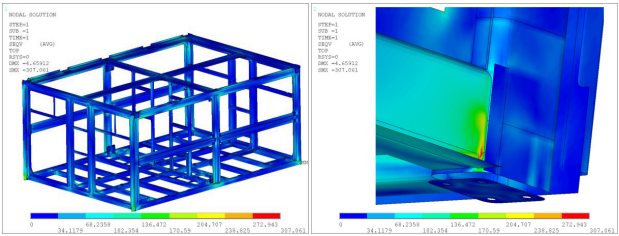
静强度工况下框架最大 Von Mises 等效应力见表 3，最大等效应力静强度工况为工况 1 其应力云图见图 4 和图 5。框架最大 Von Mises 等效应力值均小于材料的屈服极限 345N/mm^2 。通过计算可知，满足静强度对框架的强度要求。

表 3 静强度工况计算结果

工况	最大 Von Mises 应力 /MPa	屈服强度 /MPa	安全系数
1	307.06	345	0.89
2	286.76	345	0.83
3	166.50	345	0.48
4	109.75	345	0.32
5	154.72	345	0.45
6	51.58	345	0.15
7	136.30	345	0.40

2. 疲劳母材损伤

框架的疲劳损伤评估，选用 IIW 标准中 FAT 值为 140MPa 的母材曲线，曲线斜率 $m=3$ 。基于母材应力值计算不同概率区间下的载荷循环次数和许用寿命次数，最终获得框架的母材随机振动应力情况与疲劳损伤值 D ，疲劳损伤结果如表 4 所示。



> 图4 工况1 Von Mises 整体等效应力云图 > 图5 工况1 Von Mises 局部等效应力云图

表4 框架母材疲劳损伤计算结果

纵向 随机 振动	$n_{1\sigma}$	$n_{2\sigma}$	$n_{3\sigma}$	$N_{1\sigma}$	$N_{2\sigma}$	$N_{3\sigma}$	D
	3.8×10^5	1.5×10^5	2.4×10^4	2.5×10^6	1.0×10^9	9.2×10^4	0.900
横向 随机 振动	$n_{1\sigma}$	$n_{2\sigma}$	$n_{3\sigma}$	$N_{1\sigma}$	$N_{2\sigma}$	$N_{3\sigma}$	D
	3.8×10^5	1.5×10^5	2.4×10^4	2.5×10^6	3.1×10^5	9.2×10^4	0.797

表5 框架焊缝 SN 疲劳寿命曲线

焊缝	位置	图示	描述及编号	FAT 值 /MPa	曲线斜率值 /m
1001 ~ 1011 2001 ~ 2005 3001 ~ 3004 ZZ1 ~ ZZ11 S1 ~ S7	钢管与钢管角的焊缝		圆形或矩形空心截面，与另一截面焊接成角。(No.531)	71	3

对于纵向随机振动，每条焊缝在各概率区间的应力值及最终损伤值，都小于阈值1；其中角焊缝 S2在 1σ 下应力值为67.47MPa，最大损伤值为0.961。焊缝都满足疲劳强度要求。

对于横向随机振动，每条焊缝在各概率区间的应力值及最终损伤值，都小于阈值1；其中角焊缝1001在 1σ 下应力值为63.10MPa，最大损伤值为0.786。焊缝都满足疲劳强度要求。

对于垂向随机振动，每条焊缝在各概率区间的应力值及最终损伤值，都小于阈值1；其中角焊缝1001在 1σ 下应力值为0.07MPa，最大损伤值为0.001。焊缝都满足疲劳强度要求。

四、结语

基于氢能的绿色低碳，在社会发展中扮演着越发重要的角

垂向 随机 振动	$n_{1\sigma}$	$n_{2\sigma}$	$n_{3\sigma}$	$N_{1\sigma}$	$N_{2\sigma}$	$N_{3\sigma}$	D
	3.8×10^5	1.5×10^5	2.4×10^4	1.0×10^9	1.0×10^9	1.0×10^9	0.001

母材纵向随机振动在 1σ 下应力值为130.33MPa，最大损伤值为0.900；母材横向随机振动在 1σ 下应力值为125.00MPa，最大损伤值为0.797；母材垂向随机振动在 1σ 下应力值为0.06MPa，最大损伤值为0.001。框架结构的最大损伤值D均小于1，因此随机振动疲劳强度满足设计要求。

3. 疲劳焊缝损伤

选择框架中的主要焊缝进行疲劳损伤计算，共选择38条焊缝。焊缝的疲劳曲线 FAT 值及其相关描述如表5所示。

色，为促进在轨道交通中的应用，提出了一种适用于外走廊式调车机车的氢燃料电池，并形成了以下结论：

1) 布置设计方案满足该机车的应用要求，并已交付客户并进行装车应用认证。

2) 通过对框架进行静强度评估，框架最大 Von Mises 等效应力值小于其材料的屈服极限345MPa，满足静强度要求。框架母材和焊缝在纵向、横向及垂向随机振动最大损伤值均小于阈值1，焊缝满足疲劳强度要求。

参考文献

[1] 冯轩, 韩国鹏, 高伟尧, 汪星华, 王艳琴, 刘楠, 赵丽丽. 燃料电池氢气排气管路堵水的研究 [J]. 铁道车辆, 2023, 61 (6): 95-98.
[2] 袁磊, 吕婷婷, 李康, 贾红洋, 常洪, 杜平. 一种机车用氢燃料电池热管理系统 [J]. 铁道机车与动车, 2024 (1): 35-37+44.
[3] 云祉婷, 张蕾蕾, 黎妍, 孙琪深. 氢燃料电池在现代有轨电车上的运用 [J]. 新能源汽车, 2024 (01): 97-99.
[4] GB/T 21563-2018, 轨道交通 机车车辆设备 冲击和振动试验 [S].