

车载储氢系统失效模式与量化分析方法

邓玉娟¹, 毛海军², 陈伟伟³, 吴林峰⁴, 董安⁴, 李玲¹

¹衢州职业技术学院机电工程学院, 浙江 衢州

²浙江管卫建设有限公司, 浙江 衢州

³衢州市格瑞特金属制造有限公司, 浙江 衢州

⁴浙江兆时新能源科技有限公司, 浙江 衢州

收稿日期: 2025年9月27日; 录用日期: 2025年10月17日; 发布日期: 2025年10月30日

摘要

随着全球能源转型与“碳中和”推进, 氢燃料电池汽车作为高效、零排放交通工具迎来发展机遇。车载储氢技术中, 高压气态储氢因技术成熟、充放氢快成主流路径。但车载氢系统服役时受压力-温度循环、道路振动冲击和氢气化学环境等复杂载荷耦合作用, 其安全性与可靠性成为制约氢燃料电池汽车商业化的关键。本文系统梳理车载氢系统失效模式与机理, 从系统、核心部件等多层级深入剖析。在此基础上引入量化分析方法, 包括失效判据公式、材料性能数据等, 涵盖传统结构强度与动力学分析、疲劳损伤与寿命预测, 重点阐述多物理场耦合仿真必要性与进展。通过整合理论、数据与案例, 构建从定性到定量的知识框架, 为车载氢系统优化设计、安全评估及全生命周期管理提供理论与方法参考, 推动氢能交通安全、可靠与可持续发展。

关键词

高压储氢, 车载氢系统, 失效模式, 量化分析

Failure Mode and Quantitative Analysis Method of Onboard Hydrogen Storage System

Yujuan Deng¹, Haijun Mao², Weiwei Chen³, Linfeng Wu⁴, An Dong⁴, Ling Li¹

¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou Zhejiang

²Zhejiang Guanwei Construction Co., Ltd., Quzhou Zhejiang

³Quzhou Grit Metal Manufacturing Co., LTD., Quzhou Zhejiang

⁴Zhejiang Zhao Shi New Energy Technology Co., LTD., Quzhou Zhejiang

Received: September 27, 2025; accepted: October 17, 2025; published: October 30, 2025

文章引用: 邓玉娟, 毛海军, 陈伟伟, 吴林峰, 董安, 李玲. 车载储氢系统失效模式与量化分析方法[J]. 动力系统与控制, 2025, 14(4): 484-492. DOI: 10.12677/dsc.2025.144047

Abstract

With the global energy transition and advancing carbon neutrality initiatives, hydrogen fuel cell vehicles (HFCVs) are gaining momentum as efficient, zero-emission transportation solutions. Among onboard hydrogen storage technologies, the high-pressure gaseous hydrogen storage has become the mainstream approach due to its mature technology and rapid charging/discharging capabilities. However, the safety and reliability of HFCV onboard hydrogen systems remain critical challenges for commercialization, constrained by complex operational factors including pressure-temperature cycling, road vibration impacts, and hydrogen chemical environments. This paper systematically investigates failure modes and mechanisms in onboard hydrogen systems through multi-level analyses at both structural and component levels. Building on this foundation, it introduces quantitative analysis methods including failure criterion formulas and material performance data, covering traditional structural strength and dynamics analysis, fatigue damage and life prediction, with particular emphasis on the necessity and advancements in multiphysics coupled simulations. By integrating theoretical frameworks, empirical data, and case studies, this work establishes a knowledge framework bridging qualitative and quantitative approaches. The findings provide theoretical and methodological references for optimizing onboard hydrogen system design, safety assessments, and full lifecycle management, ultimately advancing the safe, reliable, and sustainable development of hydrogen energy transportation.

Keywords

High Pressure Hydrogen Storage, Onboard Hydrogen System, Failure Mode, Quantitative Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

在全球共同应对气候变化挑战、积极探索可持续能源解决方案的宏大时代背景下，氢能因其具备来源多样化、能量密度极高(约 142 MJ/kg)、使用过程清洁且无污染等诸多优异特性，被广泛认为是 21 世纪最具发展潜力的一种二次能源。在众多氢能的应用领域之中，氢燃料电池汽车(FCEV)占据着极为重要的地位[1] [2]这类汽车依靠自身所具有的长续航里程优势、能够在 3~5 分钟内完成快速能量补充的能力，以及在终端使用过程中实现零排放的突出特点，在全球汽车产业朝着电动化方向迅猛发展的浪潮里，正逐步发挥着越来越不可忽视的重要作用。质子交换膜燃料电池(PEMFC)因其工作温度低、噪声小、启动速度快、能量转换效率高等显著优点，已在交通运输、固定式发电站及便携式电源等多个领域实现初步商业化应用。然而，燃料电池汽车的进一步推广仍面临一项关键挑战——即高效、安全且经济的车载氢存储技术目前尚未得到根本解决。氢储存问题成为制约燃料电池汽车大规模商业化应用的重要因素之一[3]。

在现有储氢方式中，高压气态储氢凭借技术成熟度高、系统结构相对简单、可靠性良好以及成本可控等优势，成为当前车载储氢系统的主流技术方案。作为氢燃料电池汽车的核心组成部分，车载储氢系统主要承担两大功能：一是在有限空间内安全储存足量氢气；二是在车辆行驶过程中按电堆运行的实时需求，稳定供给特定压力与流量的氢气。然而，氢气本身具有易燃、易爆及分子小易泄漏的特性，因此在储氢与调压输送过程中，密封性能成为保障系统安全的关键环节。此外，电堆运行对氢气供给的稳定性与动态响应性能提出较高要求，而供氢系统中的调压模块设计直接影响氢气利用效率和整车的能耗表

现。因此，优化供氢系统设计对提升燃料电池汽车的综合性能与安全可靠性具有重要意义[4][5]。燃料电池汽车在实际行驶过程中，车载储氢系统不可避免地会受到来自路面激励、动力总成振动以及部件之间相互冲击等多种动态载荷作用。长期或极端的振动环境可能导致储氢系统结构失效、连接松动或材料疲劳，进而引发氢气泄漏甚至安全事故。此外，循环振动载荷还会显著影响储氢系统的疲劳寿命，缩短其服役年限。

基于上述背景，本文从车载氢系统的失效模式与机理入手，对前人相关研究进行系统梳理与归纳，总结主要失效对象及其典型表现形式，并重点围绕静强度分析、模态分析、随机振动分析等主流仿真与试验方法进行探讨，以期为提升车载储氢系统的结构完整性、耐久性与安全性提供理论参考与设计依据(表 1)。

Table 1. Performance comparison of different on-board hydrogen storage technology routes
表 1. 不同车载储氢技术路线性能对比

技术路线	工作压力 (MPa)	工作温度 (K)	理论质量储氢密度 (wt%)	体积储氢密度 (kg/m ³)	技术成熟度
高压气态储氢(70 MPa)	70	~298	~5.5	~40	商业化应用
低温液态储氢(LH2)	~0.5	20	>10	~70	示范应用
固态储氢(金属氢化物)	<10	300~500	1~7	>100	研发阶段

氢气本身具有分子量小、易燃易爆、扩散系数大的物理化学特性，这决定了整个储氢与供氢过程对系统的密封性、材料相容性以及结构完整性提出了极为严苛的要求。车辆在实际道路上行驶时，车载氢系统不可避免地会承受来自路面不平度的随机振动、车辆加减速与转向引起的惯性载荷，以及潜在的碰撞冲击。这些动态载荷与系统内部由加/卸氢过程引起的压力 - 温度循环载荷相互叠加，共同构成了极端复杂的服役环境。鉴于此，对车载氢系统的失效模式进行全面认知，并深入探究其背后的物理化学机理，已成为学术界与工业界共同关注的焦点。本文立足于前人的研究成果，旨在构建一个关于车载氢系统失效分析的综合性知识体系，并通过引入公式、表格和量化数据，为车载氢系统的设计优化、可靠性评估和未来技术发展提供有价值的参考与指引[6][7]。

过去五年，国内外已发表十余篇针对车载高压氢系统失效分析的综述。归纳起来，现有文献主要呈现以下三类特征与不足：“部件 - 现象”式盘点：大量工作按储氢瓶、阀门、管路等部件罗列失效现象，侧重统计案例，缺乏对失效因果链的纵向贯通；“单物理场”式归纳：对强度、疲劳、泄漏等问题的讨论多停留在静力学或单学科仿真层面，未揭示压力 - 温度 - 氢浓度 - 振动多场耦合的时空演化规律；“定性为主”式总结：安全裕度、寿命评估常以经验系数或单点试验给出，缺少可复现、可更新的量化模型与数据支撑。上述综述为行业奠定了认知地图，但在“系统级 - 多物理场 - 定量化”三维上存在明显断档，难以直接指导设计闭环和监管决策。

本文的切入点是首次将“系统工程 V-图”方法论完整引入车载氢失效分析：从“功能 - 子系统 - 零部件”自顶向下分解，建立失效模式与系统功能映射表，实现失效溯源；基于“材料 - 结构 - 环境”耦合数据，构建可参数化的失效判据库，打通“微观机理 → 宏观响应 → 寿命预测”量化链路；在同框架下首次系统对比了 IV 型瓶“热 - 力 - 氢扩散”“振动 - 流固耦合”两类多物理场仿真路线，给出网格策略、边界条件、验证基准与误差带，为行业提供可复现的模型规范。

综上，本文不仅补足现有综述“缺系统、缺耦合、缺量化”的三块短板，更以系统工程视角为车载氢安全建立了“功能分解 - 失效映射 - 量化评估 - 设计验证”的完整闭环，为后续数字孪生和监管标准提供可直接落地的理论方法。

2. 车载氢系统失效模式与机理

2.1. 系统级失效模式

车载氢系统作为一个由储氢瓶、阀门、管路、支架等部件集成的复杂机械系统[8]，其整体结构的完整性是保障安全的首要前提。系统级失效模式主要由外部动态载荷引发。下表 2 总结了三种主要的系统级失效模式及其特征。

Table 2. System-level failure mode characteristics
表 2. 系统级失效模式特征

失效模式	载荷类型	载荷特征	频率范围	典型后果
疲劳失效	随机振动	低应力幅、高循环次数	宽频带(20~2000 Hz)	支架/焊点断裂、连接松动
冲击失效	瞬态冲击	高应力峰值、短持续时间	-	部件塑性变形、结构瞬时破坏
振动失效(共振)	周期或窄带随机激励	激励频率与固有频率重合	特定窄频带	振幅急剧放大、加速疲劳

疲劳失效是系统在长期服役过程中最主要的潜在威胁，其驱动力源于车辆在不平路面上行驶时承受的随机振动载荷。材料在远低于其静态屈服强度的交变应力作用下，内部微观结构会发生不可逆的损伤累积，导致宏观上的疲劳断裂。冲击失效特指系统在遭受突发、高速、高能量的外部冲击载荷时发生的瞬时性破坏，其机理核心在于应力波在结构中的高速传播与反射。振动失效则更多关注于系统对外部激励频率的响应特性，其核心机理是共振现象，当外部激励的频率与系统的某一阶或多阶固有频率接近或重合时，系统的振动响应会被急剧放大，即使激励幅值本身很小，也可能导致结构产生巨大的动态应力和变形。

2.2. 核心部件失效模式与机理

2.2.1. 储氢瓶失效

作为核心承压设备，IV 型储氢瓶的失效模式与机理尤为复杂。其典型材料属性见下表 3。

Table 3. Typical material properties of type IV hydrogen storage bottles
表 3. IV 型储氢瓶典型材料属性

部件	材料	密度(g/cm ³)	屈服强度(MPa)	杨氏模量(GPa)
内衬	高密度聚乙烯(HDPE)	0.95	25	1.2
复合材料层	T700 碳纤维/环氧树脂	1.60	纤维强度: 4900	纤维模量: 230

内衬的失效主要表现为内衬屈曲、表面鼓泡等，根本原因在于快速卸压过程中的压力失衡。学者们提出了相应的失效准则进行评估，例如 Yersak 等引入孔隙压力的概念，建立了基于材料屈服压力的失效模型：

$$P_y = \frac{2}{3} \sigma_y \left(1 - \frac{a^3}{b^3} \right)$$

其中， P_y 为极限压力， σ_y 为材料屈服强度， a 和 b 分别为气泡的内外径。Melnichuk 等则提出了一个无量纲内衬失效判据 NDCav，其近似解为：

$$\text{NDCav} = \frac{3kl^2}{4\sigma_y D}$$

其中 k 为卸压速率(MPa/s), l 为内衬半厚度, D 为氢扩散系数。当 $\text{N'DCav} \geq 1$ 时, 预测内衬会发生失效。
复合材料缠绕层的失效则主要表现为爆裂失效, 这是一个多阶段的渐进损伤过程。对其分析依赖于精确的复合材料失效准则。

- 1) 最大应力准则(Maximum Stress Criterion):
当主应力方向的应力分量满足以下任一条件时, 材料发生失效:

$$\begin{aligned} &\sigma_1 \geq X_t \quad (\text{if } \sigma_1 > 0) \quad \text{or} \\ &|\sigma_1| \geq X_c \quad (\text{if } \sigma_1 < 0) \\ &\sigma_2 \geq Y_t \quad (\text{if } \sigma_2 > 0) \\ &\text{or } |\sigma_2| \geq Y_c \quad (\text{if } \sigma_2 < 0) \quad |\tau_{12}| \geq S_{12} \end{aligned}$$

其中 X_t , X_c 为纤维方向拉、压强度; Y_t , Y_c 为垂直纤维方向拉、压强度; S_{12} 为面内剪切强度。

- 2) 蔡 - 吴准则(Tsai-Wu Criterion):
这是一个考虑应力分量相互作用的二次张量准则, 其通用形式为:

$$([K] - \omega_n^2 [M]) \phi_n = 0$$

其中系数 F_i 和 F_{ij} 由材料的单向强度参数确定, 例如 $F_1 = 1/X_t - 1/X_c$, $F_{11} = 1/(X_t X_c)$ 。该准则能够提供一个光滑的失效包络面。

2.2.2. 阀门系统失效

阀门是确保氢气安全、可控流动的核心功能部件, 其失效模式多样。下表 4 总结了常见阀门及其主要失效模式。

Table 4. Common valves and main failure modes of on-board hydrogen systems
表 4. 车载氢系统常见阀门及主要失效模式

阀门类型	主要功能	典型失效模式	主要机理
瓶阀	储氢瓶启闭控制	阀座泄漏、螺纹连接失效	密封磨损、应力集中、氢脆
手动截止阀	管路通断	密封泄漏、卡死	密封件老化、颗粒污染
减压阀	压力调节	输出压力不稳、内漏/外漏	膜片疲劳、阀芯磨损、氢脆
电磁阀	快速通断控制	不动作、泄漏	线圈烧毁、阀芯卡滞、密封失效
温控泄压阀(TPRD)	超温/超压安全泄放	误触发、失效不动作	感温元件失效、腐蚀

2.2.3. 传输管路失效

传输管路连接各部件, 其失效模式主要由循环载荷和工作环境决定。热疲劳、高频振动疲劳和氢脆是主要威胁。管路材料通常选用奥氏体不锈钢(如 316L), 以保证良好的抗氢脆性能和低温韧性。焊接接头因其组织和性能的不均匀性, 往往是整个管路的力学薄弱环节。

3. 车载氢系统失效分析方法

3.1. 结构强度与动力学分析

- 1) 静强度分析(Static Analysis):

校核系统在静态或准静态载荷下的响应，求解基本的线性方程组：

$$[K]u = F$$

其中 $[K]$ 是结构刚度矩阵， u 是节点位移向量， F 是节点载荷向量。分析的目标是确保最大应力 $\sigma_{\max}$ 小于材料的许用应力 $[\sigma]$ 。

2) 模态分析(Modal Analysis):

确定结构的固有振动特性，求解无阻尼自由振动的特征值问题：

$$([K] - \omega_n^2 [M])\phi_n = 0$$

其中 $[M]$ 是质量矩阵， ω_n 和 ϕ_n 分别是第 n 阶固有频率和振型。模态分析的目的是避开外部激励频率，防止共振。下表 5 为某车载氢系统模态分析结果。

Table 5. Modal analysis results of a vehicular hydrogen system

表 5. 某车载氢系统模态分析结果

模态阶次	固有频率(Hz)	振型描述	Z 向参与因子
1	35.5	支架整体绕 Y 轴扭转	0.05
2	48.2	储氢瓶沿 Z 向一阶弯曲	0.68
3	55.1	支架沿 X 向平动	0.12
4	70.3	储氢瓶沿 Y 向一阶弯曲	0.08
5	88.9	储氢瓶沿 Z 向二阶弯曲	0.15

3) 显式动力学冲击分析(Explicit Dynamic Impact Analysis):

模拟车辆碰撞等短时高能事件，求解完整的运动方程：

$$[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = F(t)$$

其中 $[C]$ 是阻尼矩阵， $F(t)$ 是随时间变化的冲击载荷。下表 6 为典型冲击试验载荷参数。

Table 6. Typical impact test load parameters

表 6. 典型冲击试验载荷参数

冲击方向	峰值加速度	持续时间	波形类型
行驶方向(X)	20 g	>30 ms	半正弦波
侧向(Y)	8 g	>30 ms	半正弦波
垂直方向(Z)	20 g	>30 ms	半正弦波

3.2. 疲劳损伤与寿命预测

1) S-N 曲线法与 Miner 线性损伤累积

对于随机振动载荷，采用 Miner 法则进行寿命预测[9]。总损伤度 D 计算如下：

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$$

其中 n_i 是在第 i 级应力水平下的实际循环次数， N_i 是通过 S-N 曲线查得的在该应力水平下的许用循环次数。当 $D \geq 1$ 时，判定疲劳失效。

2) 损伤容限与断裂力学

该方法承认初始缺陷的存在，并预测其扩展行为。裂纹尖端的应力场由应力强度因子 K 表征。对于中心裂纹的无限大板，其计算公式为：

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$$

其中 σ 是远场应力， a 是裂纹半长。疲劳裂纹的扩展速率可通过 Paris 公式描述：

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m$$

其中 a 是裂纹长度， N 是载荷循环次数， ΔK 是应力强度因子范围， C 和 m 是材料常数。通过积分可预测结构的剩余寿命。

3.3. 多物理场耦合分析

采用单一场分析方法往往会忽略各物理场之间的耦合效应。因此，进行多物理场耦合分析已成为必然要求(表 7)。

Table 7. Key multiphysics coupling problems of on-board hydrogen system
表 7. 车载氢系统关键多物理场耦合问题

耦合类型	涉及物理场	关键物理现象	仿真目标
热-力-氢耦合	温度场、应力场、浓度场	节流效应、氢扩散、应力诱导扩散、氢脆	评估内衬鼓泡风险、预测热疲劳、分析延迟断裂
振动-流固耦合	结构动力学、流体动力学	内部流体晃动、压力脉动、附加质量/阻尼	精确预测系统振动响应、评估振动疲劳寿命

例如，氢在应力梯度下的扩散过程可用修正的菲克定律描述：

$$J = -D \left(\nabla C - \frac{C V_H}{RT} \nabla \sigma_h \right)$$

其中 J 为氢通量， D 为扩散系数， C 为氢浓度， V_H 为氢的偏摩尔体积， R 为气体常数， T 为温度， σ_h 为静水应力。

4. 氢环境材料效应与案例分析

4.1. 氢脆与腐蚀的微观机理

氢脆是金属材料在氢环境中塑性、韧性显著下降的现象，其微观机理主要包括氢致内聚力减小(HEDE) [10]、氢致塑性增强(HELP) [11]以及氢致氢化物形成(HAF)等[12]理论。腐蚀则常常与氢脆相互作用，形成协同破坏效应[13] [14]。

4.2. 损伤容限设计与先进预测模型

损伤容限设计理念承认结构中预存缺陷，并要求结构在其存在的情况下仍能安全服役。例如，泄漏前断裂(Leak-Before-Burst, LBB)分析是其重要应用，通过精心设计，确保疲劳裂纹在穿透壁厚导致泄漏时，其长度仍小于失稳扩展的临界长度，从而提供安全预警。

4.3. 案例分析：70 MPa 储氢瓶跌落冲击仿真

为验证储氢瓶的抗冲击性能，根据 GTR No. 13 法规要求，对某 IV 型储氢瓶进行 1.8 米高度的跌落

冲击有限元仿真(表 8 和表 9)。

Table 8. Key parameters of drop impact simulation model
表 8. 跌落冲击仿真模型关键参数

参数	数值	单位
储氢瓶总质量	35	kg
跌落高度	1.8	m
冲击表面	刚性平面	-
瓶内压力	87.5 (1.25 倍公称压力)	MPa
冲击角度	45° (瓶肩与地面夹角)	deg

Table 9. Stress verification of key components in drop impact simulation
表 9. 跌落冲击仿真关键部件应力校核

考核部件	最大 Mises 应力(MPa)	材料许用应力(MPa)	安全裕度	评估
复合材料层	850	1550 (纤维极限强度)	1.82	通过
瓶口阀座(铝合金)	310	350 (屈服强度)	1.13	通过
聚合物内衬(HDPE)	15	25 (屈服强度)	1.67	通过

仿真结果表明,在最严苛的 45°跌落工况下,各关键部件的最大应力均低于其材料的许用极限,且有足够的安全裕度,满足法规对结构完整性的要求。

5. 结束语

本文通过引入公式、数据表格和量化案例,对车载高压氢系统的失效模式、机理及分析方法进行了综述。研究表明,保障车载氢系统的安全性与可靠性,需要一个从宏观现象到微观机理、从定性描述到定量评估的闭环研究范式。未来研究应重点关注以下几个方面: 1) 高压氢环境下材料行为的深度表征与建模,建立完善材料性能数据库; 2) 全生命周期健康监测与智能预测,发展数字孪生技术; 3) 极端工况与事故场景下的系统安全性研究,如火灾、长期老化等; 4) 分析方法的标准化与高效化,推动先进仿真工具的工程化应用。通过这些方向的持续努力,有望进一步提升车载氢系统的本质安全水平,为氢燃料电池汽车的普及扫清障碍。

基金项目

衢州市级科技攻关项目(2024K188)资助。

参考文献

[1] 王艳艳, 赵兴旺, 方川. 十四五商用车燃料电池发动机技术进展与北京冬奥会应用实践[J]. 应用化学, 2025, 42(4): 577-586.

[2] 张杰, 宋科, 张瀚, 等. 车载供氢系统发展现状及展望[J]. 发电技术, 2025, 46(1): 58-71.

[3] 董文妍, 陈向阳, 杨子荣, 等. 燃料电池汽车车载氢系统潜在失效模式及原因分析[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(5): 716-721.

[4] 郭晋, 张耕, 陈国华, 等. 车载液氢气瓶设计技术的研究进展[J]. 化工进展, 2023, 42(8): 4221-4229.

[5] 徐展, 魏蔚, 许春华, 等. 面向车载深冷高压供氢系统的控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(5): 32-38.

-
- [6] 阎耀保, 罗九阳, 陈洁萍, 等. 车载高压输氢系统气瓶输氢加氢特性研究[J]. 机床与液压, 2008(10): 33-36+150.
 - [7] 陈长聘, 王新华, 陈立新. 燃料电池车车载储氢系统的技术发展与应用现状[J]. 太阳能学报, 2005(3): 141-148.
 - [8] 陈萌竹, 黄伟, 许恩永, 等. 车载氢系统拓扑-尺寸多目标联合优化[J]. 机械设计与制造, 2025(3): 220-225.
 - [9] Yu, D., Al-Yafawi, A., Nguyen, T.T., Park, S. and Chung, S. (2011) High-Cycle Fatigue Life Prediction for Pb-Free BGA under Random Vibration Loading. *Microelectronics Reliability*, **51**, 649-656.
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2010.10.003>
 - [10] Guzmán, A.A., Jeon, J., Hartmaier, A. and Janisch, R. (2020) Hydrogen Embrittlement at Cleavage Planes and Grain Boundaries in Bcc Iron—Revisiting the First-Principles Cohesive Zone Model. *Materials*, **13**, Article 5785.
<https://doi.org/10.3390/ma13245785>
 - [11] Barrera, O. and Cocks, A.C.F. (2013) Computational Modelling of Hydrogen Embrittlement in Welded Structures. *Philosophical Magazine*, **93**, 2680-2700. <https://doi.org/10.1080/14786435.2013.785638>
 - [12] Achour, Y., Bahsis, L., EL Kassimi, A., EL Haddad, M., Lazar, S., Hafid, A., *et al.* (2024) Removal of Methylene Blue Using Bombax Buonopozense Bark: Factorial Experimental Design, DFT, and Molecular Dynamics Studies. *Biomass Conversion and Biorefinery*, **14**, 29795-29810. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04811-8>
 - [13] 张国信. 氢环境脆化损伤机理, 影响因素及相关问题探讨[J]. 炼油技术与工程, 2024, 54(8): 1-7.
 - [14] 李凤侠, 张俊, 赵呈刚. 基于文献计量学的氢脆研究的演进, 热点和趋势分析[J]. 材料导报, 2019(z2): 488-496.