

# 掺氢化工压力管道智能化检测模型的研究与应用前景

王超 陈浩 (阜新市特种设备监督检验所, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 在全球能源结构加速向清洁化、低碳化转型的大背景下, 氢能作为一种高效、清洁的二次能源, 在化工领域的应用愈发广泛。掺氢化工压力管道作为氢能输送的关键基础设施, 其安全稳定运行至关重要, 但传统检测方法在面对掺氢化工压力管道复杂的运行环境时, 难以满足高精度、实时性的检测需求。智能化检测模型的出现为解决这一难题提供了新的思路。因此, 本文将从掺氢压力管道的特性入手, 简要分析了掺氢化工压力管道智能化检测模型的技术方案, 并以此对智能化检测模型在掺氢压力管道检测中的应用前景和挑战进行了深入研究分析。

**关键词:** 掺氢化工; 压力管道; 智能化检测模型; 应用前景

中图分类号: TE973.6 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 021-0010-03

## Research and Application Prospects of Intelligent Detection Models for Hydrogen-Blended Chemical Pressure Pipelines

Wang Chao, Chen Hao(Fuxin Special Equipment Supervision and Inspection Institute, Fuxin Liaoning 123000, China)

**Abstract:** Against the backdrop of the global energy structure rapidly transitioning toward cleaner and low-carbon solutions, hydrogen energy, as an efficient and clean secondary energy source, is being increasingly utilized in the chemical industry. Hydrogen-blended chemical pressure pipelines, serving as critical infrastructure for hydrogen transportation, require safe and stable operation. However, traditional detection methods struggle to meet the high-precision and real-time monitoring demands posed by the complex operating environments of these pipelines. The emergence of intelligent detection models offers a novel approach to addressing this challenge. Therefore, this paper begins by examining the characteristics of hydrogen-blended pressure pipelines, briefly analyzes the technical solutions for intelligent detection models, and conducts an in-depth study on the application prospects and challenges of these models in the inspection of hydrogen-blended pressure pipelines.

**Keywords:** Hydrogen-blended Chemical; Pressure Pipelines; Intelligent Detection Model; Application Prospects

掺氢化工技术作为一种新型的能源利用方式, 在提高能效、减少碳排放等方面展现出显著优势。然而, 氢气在输送和储存过程中可能与压力管道材料发生复杂的物理化学反应, 导致材料性能退化或泄漏风险增加。尤其是在高压力、高温环境下, 传统的人工检测手段往往难以及时发现潜在问题, 这为工业安全带来了巨大挑战。

### 1 掺氢压力管道特性分析

天然气中掺入氢气后, 高压富氢环境对管道系统的材料性能产生显著影响, 其中管材相容性问题尤为关键, 加上管道本体、焊缝、配件及压缩机等部件长期处于该环境中, 材料的强度、塑性和韧性可能发生劣化, 进而威胁管网的安全服役。其中, 氢分子与金属材料的相互作用机制是引发相容性问题的核心, 当氢分子吸附于材料表层后, 会分解为氢原子并渗入金属晶格内部, 以间隙原子形式在晶体点阵中扩散。<sup>[1]</sup>在此过程中, 氢原子易在材料缺陷位点及应力集中区域聚集, 可能诱发裂纹萌生或形成氢致鼓包, 对管材完整性及服役寿命构成威胁。这种现象的发生与材料

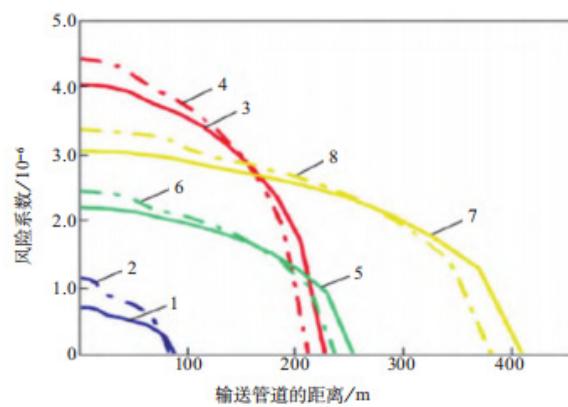


图 1- 不同输气管道的风险系数与输送管道的距离的关系  
自身属性、环境条件 (如氢浓度、压力) 以及外加应力状态密切相关, 三者的复杂交互作用可能导致氢脆风险加剧。不同钢级管线钢在富氢环境中的表现存在差异。高钢级管线钢的氢脆敏感性随掺氢比例的升高而增强, 而低钢级管线钢在较低压力及掺氢比条件下则展现出相对更优的服役性能, 这表明材料选择需结合具体工况, 平衡强度需求与抗氢脆性能。此外, 材料内部的缺陷或裂纹会加速氢致裂纹的扩展过程, 成

为管材失效的重要诱因，因此在管材制造与检测环节需严格控制缺陷等级。

从材料相容性的角度分析，高压富氢环境下的氢原子扩散和聚集过程是影响管材性能的核心机制，金属晶格中的缺陷位点和应力集中区域作为氢原子的主要聚集场所，会导致材料内部微结构的改变，进而引发力学性能劣化。此外，不同钢级材料对氢脆的敏感性差异，也反映了材料成分、组织结构与氢原子相互作用的复杂性，在工程应用中要综合考虑材料选择、缺陷控制、应力状态以及运行环境等多方面因素，以确保掺氢压力管道系统的安全可靠运行。

## 2 掺氢化工压力管道智能化检测模型的技术方案

### 2.1 智能化检测模型的技术路线

智能化检测模型，以数据采集、数据处理、缺陷识别与定位、动态监测与评估、智能控制这五步技术路线（见图2）为基础，构建起了对掺氢燃气管道的智能化检测管理体系，同时依据掺氢燃气管道特性进行针对性优化<sup>[2]</sup>。



图2—智能化检测模型的技术路线

其中，数据采集是智能化检测模型最重要的一步，掺氢比与氢浓度数据直接反映了管道内氢气的占比情况，是评估氢气对管道影响的关键指标，而混合气体的密度、热容比及爆炸极限等参数，则关乎管道内气体的物理化学性质，影响着管道运行的安全性与稳定性。与此同时，动态监测与评估是主要依据管道安全运行的标准范围，运用机器学习算法，让模型从大量历史数据与实时监测数据中学习规律，进行风险评估。智能反馈与控制作为智能化检测的最后一步，要不断对模型内的指标体系进行参数优化，使其能够适应掺氢燃气管道运行过程中的各种变化，并基于优化后的参数制定科学合理的掺氢燃气管道控制策略。

### 2.2 智能化检测模型的系统架构

本文所构建的智能化检测模型，其核心架构由数据采集模块、风险评估模块以及智能控制模块这三大核心模块组成，各模块间紧密关联、协同运作，共同打造智能化与自动化的检测流程，其结构示意如图3所示。

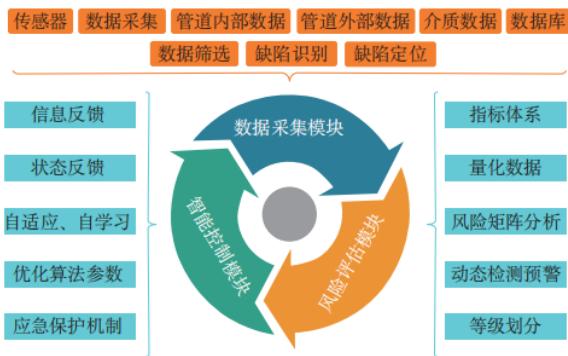


图3—智能化模型检测掺氢压力管道系统模块

在掺氢化工压力管道的运行环境中，数据来源广泛且复杂，数据采集模块作为整个智能化检测模型的前端，承担着信息收集的重要使命，该模块需要从多个不同的源头精准捕获相关数据，以此反映管道内部的物质特性和运行状态。然后，运用先进的传感器技术和数据传输手段，高效地整合这些来自不同源头的数据，为后续的风险评估和智能控制奠定坚实的基础。风险评估模块是智能化检测模型的核心分析单元，其主要是依托数据采集模块所提供的数据，运用一系列先进的算法与模型，进行深入研究分析。在这个过程中，风险评估模块会对数据进行多维度的分析，一方面，针对管道材料在含氢环境下的特性变化，评估氢脆、氢腐蚀等风险的发生概率和可能造成的影响程度；另一方面，综合考虑管道的运行参数、环境因素等，对管道整体的安全状态进行评估，准确识别出高风险区域和关键风险点，为后续的决策提供科学、可靠的依据<sup>[3]</sup>。

### 3 智能化检测模型在掺氢压力管道检测中的应用前景

在能源结构加速向清洁化、低碳化转型的当下，掺氢压力管道作为氢能输送与应用的关键基础设施，其安全稳定运行至关重要。近年来，我国在该领域积极探索与实践，众多掺氢管道项目相继落地，推动氢能产业的发展。随着这些项目的集中实施，掺氢压力管道的安全运行成为关注焦点，传统检测方法在面对日益复杂的掺氢管道运行环境时，逐渐暴露出效率低、准确性不足等问题。例如，在检测氢渗透速率、氢脆敏感系数等关键参数时，智能化检测模型可利用安装在管道各处的传感器，持续收集数据，再结合智能算法快速分析处理，及时发现潜在风险。以某实际掺氢管道项目为例，在采用智能化检测模型前，传统检测方式需耗费大量人力物力，且一次全面检测需数周时间，还难以精准定位一些细微的管道缺陷。而引入智能化检测模型后，不仅能在短时间内完成全面检测，还能通过对历史数据的分析和学习，提前预测管道可

能出现的问题，将隐患扼杀在萌芽状态<sup>[4]</sup>。

## 4 智能化检测模型在掺氢压力管道检测中的应用挑战及解决问题

### 4.1 数据处理与分析的困境

智能化检测模型运作的基石是海量检测数据的高效处理与精准分析，以此挖掘出关乎管道安全运行的关键信息，但掺氢压力管道的检测环境复杂，所采集的数据常混入诸多干扰因素。例如，在运用导波检测技术时，管道周边的噪声和振动会严重干扰导波数据的准确性，这些噪声来源广泛，可能是附近施工设备的机械振动，也可能是复杂电磁环境产生的电磁干扰，导致数据呈现出杂乱无章的波动，使得从数据中精准提取管道真实状态信息变得极为困难。这就要求模型具备强大的数据处理和筛选能力，不仅要能过滤掉这些干扰信号，还要从复杂的原始数据中识别出细微的异常变化，判断管道是否存在潜在缺陷或运行风险，目前这对许多智能化检测模型而言仍是严峻挑战。

### 4.2 模型适应性难题

掺氢压力管道的运行工况复杂多变，温度、压力以及介质成分等关键因素时刻处于动态变化之中。理想状态下，智能化检测模型应敏锐感知并迅速适应这些变化，始终保持稳定且准确的检测性能，但现状是多数现有检测模型在面对复杂运行环境时存在明显短板。当管道内的氢气浓度因生产需求临时调整，或者管道所处环境温度在昼夜温差较大的地区发生显著变化时，模型可能无法及时调整检测参数和分析算法，导致检测结果出现偏差，甚至可能漏检一些在特殊工况下才会显现的安全隐患。

### 4.3 成本与技术的双重考量

从成本角度来看，研发一套高精度、高可靠性的智能化检测模型，需要投入大量资金用于前沿技术研究、专业人才聘用以及先进设备购置。不仅如此，模型投入使用后的维护费用也不容小觑，需定期更新算法、校准传感器，以确保其始终处于最佳工作状态。例如，不同材质的管道，其抗氢腐蚀和氢脆性能各异，运行环境恶劣(如高温、高湿且含腐蚀性介质)的管道，老化速度更快，使用年限较长的管道，出现结构性损伤的概率更高。这些因素都要求在确定检测周期和频率时进行综合权衡，既要保证能及时发现安全隐患，又要避免过度检测造成资源浪费，这对技术决策和成本控制提出了极高要求。以某大型能源企业的掺氢管道项目为例，该企业引入了一套智能化检测模型，在前期研发阶段，投入了巨额资金用于技术攻关，但在实际应用中，由于模型对运行环境变化的适应性不足，在一次管道介质成分临时调整后，未能及时准确检测

出部分管道的氢脆早期迹象。直到后续人工巡检时才发现问题，此时管道已出现轻微损伤，虽未引发严重事故，但企业不得不紧急停产进行抢修，不仅耗费了大量人力、物力和财力，还导致了生产中断，造成了巨大的经济损失。

### 4.4 解决措施

针对复杂检测环境下的干扰数据，要建立“预处理-特征筛选-噪声抑制”三级数据清洗机制，利用传感器阵列时空同步校准技术，剔除因环境振动、电磁干扰等导致的异常原始信号，并基于领域知识构建压力管道缺陷特征库，采用梯度提升树(GBDT)等算法对多维检测数据进行相关性分析，筛选出与氢致损伤高度关联的核心特征(如应力集中系数、氢浓度梯度等)。然后，引入自适应小波降噪与生成对抗网络(GAN)结合的噪声抑制模型，针对超声、涡流等检测信号中的非线性噪声进行动态滤除，提升数据信噪比。与此同时，整合超声导波、激光测厚、氢渗透监测等多源异构数据，构建基于联邦学习的分布式数据融合模型。通过设计跨模态特征对齐算法，并将不同检测手段获取的物理量(如应变、氢分压、裂纹扩展速率)映射至统一特征空间，利用注意力机制动态分配各数据源权重，形成包含材料劣化、应力状态、环境参数的综合特征向量，为后续模型分析提供高可靠性输入<sup>[5]</sup>。

## 5 结语

掺氢化工压力管道智能化检测模型的应用过程中，主要是通过实施数据采集与处理优化策略，利用高精度传感器和先进的数据筛选、修正算法，确保模型输入数据的准确性和有效性。同时，采用自适应算法和多模型融合技术，使其能够更好地应对复杂多变的运行环境，通过合理规划成本，综合考虑管道材质、运行环境等因素确定检测周期和频率，实现检测的有效性与经济性的平衡。

### 参考文献：

- [1] 杨冰雪, 杨洪斌. 掺氢压力管道智能化检测模型的研究与应用前景 [J]. 中国特种设备安全, 2025, 41(02):86-91.
- [2] 邓娇, 王权. 化工园区掺氢天然气管道水合物生成预测研究 [J]. 石油和化工设备, 2024, 27(10):40-43.
- [3] 李威. 城市综合管廊掺氢天然气管道泄漏爆炸特性规律研究 [D]. 北京: 北京石油化工学院, 2024.
- [4] 张衡. 掺氢天然气管输水热力特性及管材力学性能数值模拟研究 [D]. 北京: 北京石油化工学院, 2021.
- [5] 曹哲. 氢气 / 柴油发动机特性的试验与计算分析研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019.