

# 基于HIAD2.2数据库的输氢管道风险因素研究

吴禧阳, 梁立龙, 余钦锋

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年5月14日; 录用日期: 2026年6月15日; 发布日期: 2026年6月29日

## 摘要

本研究基于欧洲HySafe网络开发的氢气事件与事故数据库(HIAD 2.2), 采用初步危害分析(PreHA)方法, 对过去50年间记录的44起输氢管道事故进行了系统的风险评估。研究首先对事故数据进行了统计分析, 包括事故的年度分布、国家分布、原因分类和后果类型。分析发现, 火灾是输氢管道事故最主要的后果, 而材料/制造缺陷和管理因素是主要的已知原因。随后, 研究运用PreHA框架, 识别并评估了几个关键危害因素, 包括腐蚀与材料降解(评级为1A, 灾难性且频繁)、焊接问题(评级为1B, 灾难性且可能)、机械完整性与操作故障(2C)、自然灾害(1D)以及土木与建筑工程(3D)。研究旨在揭示导致输氢管道事故的关键风险因素, 并强调持续改进安全管理实践的重要性, 为发展可持续氢经济提供安全保障。

## 关键词

输氢管道, 风险因素, 初步危害分析PreHA, 氢气事件和事故数据库(HIAD)

# Research on Risk Factors of Hydrogen Transmission Pipelines Based on the HIAD2.2 Database

Xiyang Wu, Lilong Liang, Qinfeng Yu

School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: May 14, 2026; accepted: June 15, 2026; published: June 29, 2026

## Abstract

This study conducted a systematic risk assessment of 44 hydrogen pipeline accidents recorded over the past 50 years, using the Preliminary Hazard Analysis (PreHA) method and data from the Hydrogen Incident and Accident Database (HIAD 2.2) developed by the European HySafe network. A statistical analysis was first performed on the accident data, covering annual distribution, country distribution,

cause classification, and consequence type. The analysis revealed that fire is the predominant consequence of hydrogen pipeline accidents, while material/manufacturing defects and management factors are the main known causes. Subsequently, the PreHA framework was applied to identify and evaluate several key hazard factors, including corrosion and material degradation (rated 1A, catastrophic and frequent), welding issues (rated 1B, catastrophic and probable), mechanical integrity and operational failure (2C), natural hazards (1D), and civil and construction works (3D). This research aims to identify the critical risk factors contributing to hydrogen pipeline accidents and emphasize the importance of continuous improvement in safety management practices, thereby providing safety assurance for the development of a sustainable hydrogen economy.

## Keywords

Hydrogen Delivery Pipeline, Risk Factors, Preliminary Hazard Analysis (PreHA), Hydrogen Incident and Accident Database (HIAD)

Copyright © 2026 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“双碳”战略驱动下,氢能作为零碳清洁能源已成为能源转型核心载体,长距离管道输送是实现氢能规模化、经济化配送的关键方式[1]。氢气分子极小、易渗透泄漏,且会引发管道氢脆、氢致开裂等材料失效问题,叠加腐蚀、第三方破坏、施工缺陷、运行参数波动等因素,输氢管道泄漏失效风险显著高于常规天然气管道。一旦发生泄漏,极易引发燃烧、爆炸事故,造成人员伤亡、财产损失与环境污染[2]。这些特性为运输和储存氢气提出了重大的技术和安全挑战,必须克服这些挑战才能使其得到广泛采用。

氢的安全性和相关的危害一直是广泛研究的主题。Rigas 和 Amyotte [3]对氢的性质及其处理相关的安全风险进行了全面分析,为氢的危害提供了基础见解。在此基础上,梅苑等[4]研究了掺氢 X80 钢制管道掺氢后的氢脆敏感性。李磊[5]通过数值模拟与实验测试,研究了掺氢比例、房屋结构及通风条件对室内掺氢天然气管道泄漏扩散的影响,验证了其在室内早期泄漏检测中的有效性。李凤等人[6]围绕输送工艺及关键设备、管材相容性与寿命预测、泄漏监测与风险评估、标准体系建设等关键技术,探讨掺氢天然气长距离管道输送的安全问题。杨静等人[7]从氢气理化性质与氢致管材损伤角度,基于油气管道安全管理经验与技术现状,分析输氢管道完整性检测、缺陷适用性评估及与天然气管道在完整性管理核心环节的主要差异,探讨管道输送氢气的安全性、运维管理挑战及现有不足与建议。Campari 等人[8]采用贝叶斯分析(BA)方法,从公开的 HIAD 2.0 数据库分析 628 起氢相关工业事件,系统考察不同部门、国家和设施类型的事故分布,验证了 BA 在安全数据管理与多变量分析中的实用性。研究表明,氢致材料失效(尤其是氢脆)是事故重要诱因,通过定制检查计划并重点关注焊接和接头等关键部位,多数故障本可避免。该工作强调材料科学与 RAMS 工程需多学科协作,并建议将脆性等氢特异性降解机制纳入新兴氢基础设施的基于风险检查(RBI)方法中。Badia 等人[9]对 HIAD 2.0 中氢相关事件进行全面回顾,聚焦生产、储存、分销、工业应用等全价值链风险,并将氢气装载、卸载及公路运输列为高风险阶段。Tunçand Solmaz [10]专门调查卡车运输风险,强调重型车辆操作(如交通事故、翻车、碰撞)的危害;压缩气氢(CGH<sub>2</sub>)高度易燃易泄漏,液氢(LH<sub>2</sub>)因极低温(-253℃)导致持续沸腾熄火和蒸汽生成,使压力管理复杂。道路基础设施(尤其是拥堵城区)进一步加剧运输风险。为减轻危害,作者建议制定严格安全协议、开展全面驾驶员培

训、执行严格维护程序，并清除危险负载标志以提高公众意识及应急响应；同时指出，遵守国家及国际法规、整合安全与可持续性指标及生命周期碳评估，对保障安全可持续的氢运输系统至关重要。

尽管关于氢气安全的文献越来越多，但很少有研究使用 HIAD 2.2 数据库专门检查涉及氢气管道事故。为了填补这一空白，本研究的重点是通过应用初步危害分析(PreHA)方法来分析此类事件及其相关危害。

## 2. 方法与数据

### 2.1. 数据

本研究数据取自 2026 年 1 月 1 日发布的 HIAD 2.2 氢气事件与事故数据库。该版本集成截至发布时所有公开可用的氢事件数据，并纳入新增事件、更新信息及改进的数据质量标准，最近记录的管道事件发生在 2025 年。数据库面向公众，强调事实报道，不包含机密细节且不涉及责任分配；每个条目均提供可追溯的主要来源链接(如国家/国际数据库、科学出版物、报纸及工业报告)。报告质量按 2 至 5 分评估(排除缺乏足够信息的记录):2 分表示多数定量描述符缺失,5 分代表根本原因分析完整且经验总结充分,多数报告的事件得分为 2 分。该分级确保所有条目满足可追溯性与可靠性的最低标准，同时区分稀疏记录与详尽记录。

### 2.2. 方法

初步危害分析(PreHA)是一种定性风险评估方法，用于在系统设计、建设或运行的早期阶段系统地识别潜在危害并评估其可能性[11]。通过检查可能的事故场景、发生条件和潜在后果，PreHA 能够在事故发生前识别风险，并提出预防措施，以最大限度地减少与不安全技术操作、危险材料、技术不足或系统疏忽相关的损失，从而在项目全生命周期中增强安全性、提高系统可靠性并降低风险。

PreHA 方法将危险严重程度与发生的可能性相结合，以评估风险并在系统设计和操作中优先考虑安全措施。危险严重程度分为四个级别：灾难性(死亡、永久性残疾、不可挽回的环境损害或 1000 万美元以上经济损失)、严重、临界和可忽略(轻微伤害但不损失工作日、最小环境影响或 10 万美元以下损失)，如表 1 所示[12]。

**Table 1.** PreHA risk severity scale

**表 1.** PreHA 危险严重程度量表

等级	解释	可能影响
1	灾难性	健康影响：死亡、永久性全残 环境影响：不可修复的严重环境影响 经济影响：超过 1000 万美元损失
2	严重性	健康影响：部分丧失工作能力、与工作相关的疾病或伤害，可能需要至少三名工人入院治疗 环境影响：可修复的严重环境影响 经济影响：超过 100 万美元
3	临界性	健康影响：导致 $\geq 1$ 天的缺勤的伤害或职业病 环境影响：可修复的中等环境影响 经济影响：损失超过 10 万美元
4	可忽略	健康影响：轻微伤害或职业病，不会导致缺勤 环境影响：轻微的环境影响 经济影响：损失小于 10 万美元

对于给定的危害，至少发生其中一种后果才能被分配至相应严重级别。危险可能性从“频繁”(系统生命周期中经常发生)到“消除”(通过设计或其他手段完全消除危害)分类，其评级遵循 MIL-STD-882E 提供的定性定义[13]，如表 2 所示。

为使这些定性定义适配记录的事件数据集，还定义了与观察到的事件频率相对应的定量阈值。通过交叉严重性和可能性，建立风险排名矩阵，将风险划分为高、严重、中等或低四个等级[13]，如表 3 所示。

**Table 2.** PreHA risk probability scale

**表 2.** PreHA 危险可能性量表

等级	解释	可能影响	近似频率
A	频繁	在一生中经常发生	>30%
B	可能的	一生中多次发生	15%~30%
C	偶尔发生	在一生中偶尔发生	5%~14%
D	罕见	一生中很少发生	1%~4%
E	极不可能	非常罕见，一生中可能不会发生	0%
F	已消除	危险已被消除，不可能发生	——

**Table 3.** PreHA risk matrix

**表 3.** PreHA 的风险矩阵

严重性	可能性	1	2	3	4
		A	高	高	严重
B	高	高	高	严重	中等
C	高	高	严重	中等	低
D	严重	严重	中等	中等	低
E	中等	中等	中等	中等	低
F	已消除	已消除	已消除	已消除	已消除

这种结构化方法能够识别氢气管道运输和存储中的关键危害，确保优先采取预防措施以减轻严重后果，提高整体氢气基础设施的安全性。

### 3. 关键风险因素分析

对氢气事件和事故数据库(HIAD)的检查显示，在过去的 50 年里，有 44 起氢气管道事件断断续续地报告，每年的频率不同。第一次有记录的氢管道事故发生在 1975 年，随后是 20 世纪 70 年代末和 80 年代的零星病例。从 20 世纪 90 年代初到 21 世纪初，事件数量仍然相对较低，大多数年份只发生一次事件。在 2003 年至 2010 年期间观察到轻微的增加，当时报告了多起事件，包括 2005 年的两起和 2008 年的两起，这是该时期的最高峰之一。2010 年之后，此类事件继续零星发生，一般每年发生一起，2019 年除外，这是一个明显的异常现象。仅在 2019 年，就记录了 5 起事件，是数据集中年度数量最高的一年。这一激增可能反映了管道故障的实际增加，氢气使用和基础设施扩建的增加，或者报告和数据收集实践的改进。近年来，事故发生频率仍然不可忽略。在 2021 年至 2022 年期间，记录了八起事故，这表明氢管道还在面临安全挑战。氢管道事件按照年份分布如图 1 所示。

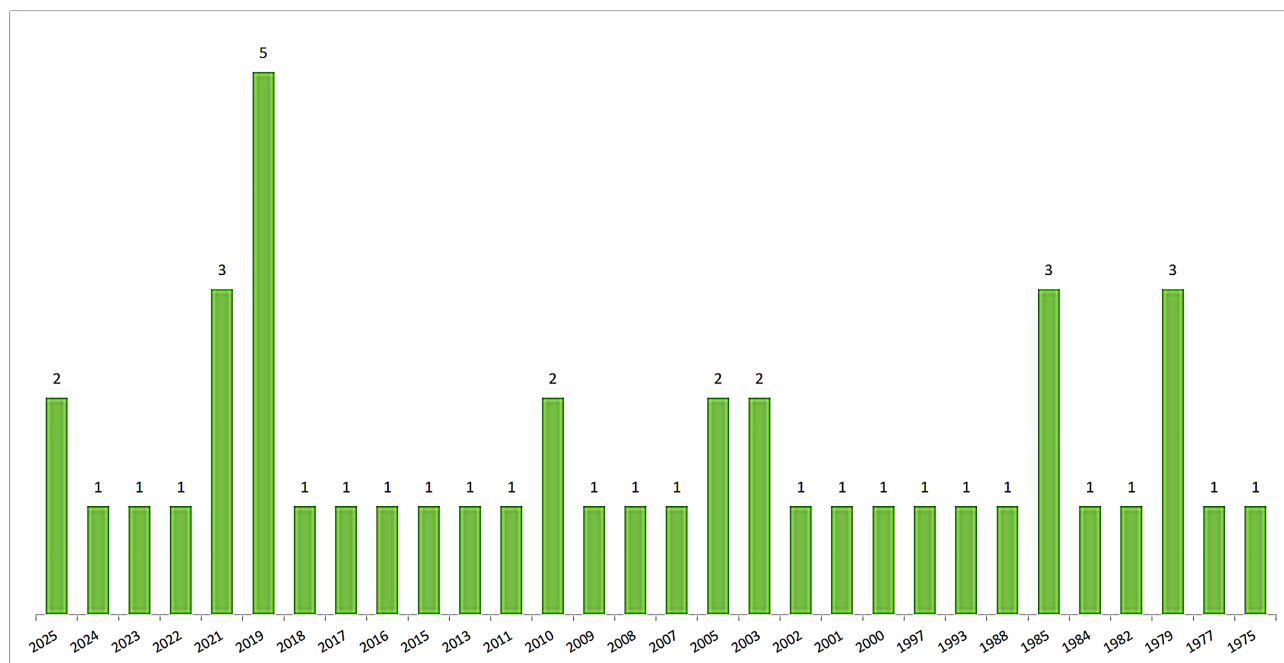


Figure 1. The number of hydrogen pipeline accidents occurring each year

图 1. 每年发生的氢管道事故

对数据库的分析显示, 在 44 起氢气管道事故中, 11 起事故导致大量人员受伤, 37 人死亡, 约占所有记录事件的 25%, 并突出了氢气释放发生时严重后果的巨大潜力。大多数氢气事故发生在美国和法国, 反映了它们广泛的氢气基础设施和工业活动。其他发生多起事件的国家包括英国、德国和比利时, 其余的事件分布在欧洲和其他地区, 包括中国、日本、加拿大、澳大利亚和非洲, 每个国家报告了两个或更少的病例, 如图 2 所示。

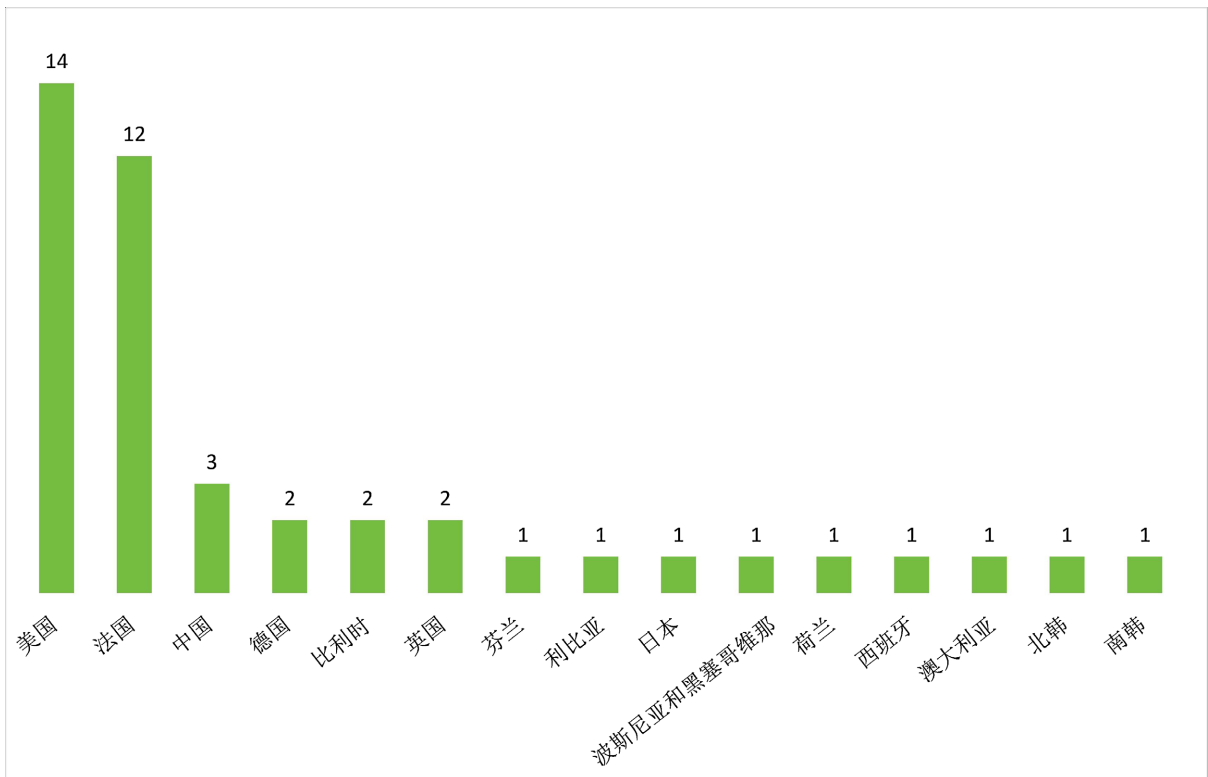
### 3.1. 管道事故原因

根据 HIAD 2.2 中的标准化分类系统, 将 44 起记录在案的管道事故分为八类主要原因。有些事件归因于单一原因, 而其他事件则涉及多个促成因素。氢气管道故障最常见的原因是材料或制造错误, 涉及 14 例。这突出了管道材料对氢气相关降解机制的敏感性。管理因素是第二常见的原因, 占 10 起事件, 这些因素包括组织实践中的缺陷, 如无效的维护计划、不充分的安全监督或不充分的风险管理策略实施。安装错误与 7 起事故有关, 强调了管道安装过程中适当的施工实践、质量控制和检查程序的重要性。系统设计错误和工作因素(工作环境因素)各造成 7 起事故, 反映出低估应力或材料限制等不适当的设计选择和操作任务中的错误同样会使管道暴露在故障中。人为因素虽然频率较低, 但导致了 4 起事故, 这表明操作人员的错误虽然不太常见, 但仍然是一个显著的风险来源。很大比例的事件被归类为未知原因, 这表明可用的调查数据有限。最后, 仅在了一起事件中确定了环境因素, 这表明地震和闪电等外部自然影响是管道故障的相对罕见的触发因素。氢管道事故按照事故原因的分类如图 3 所示。

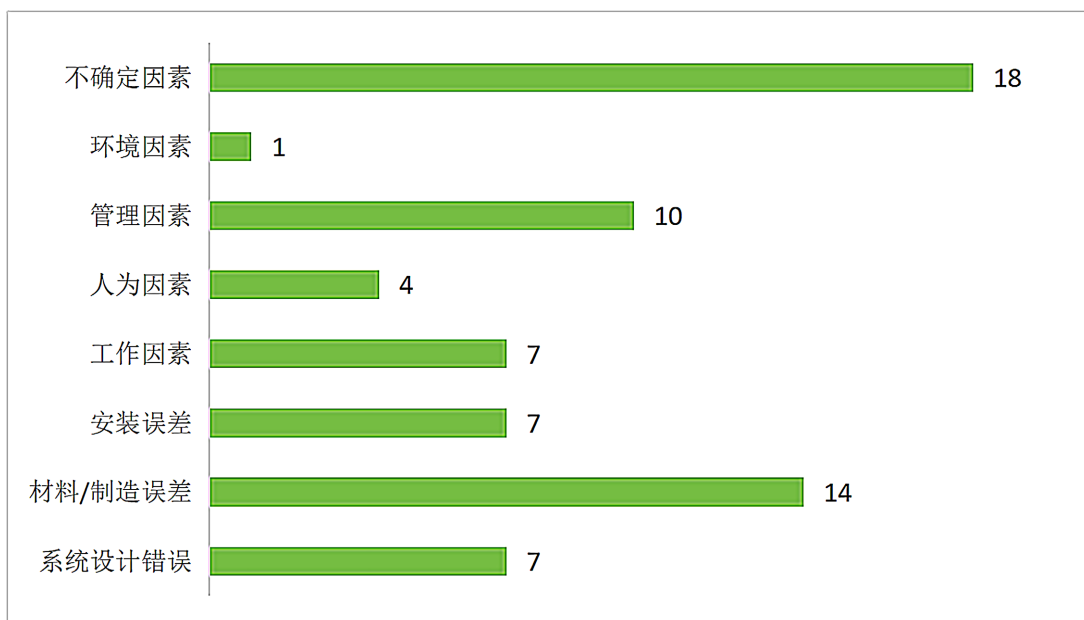
### 3.2. 管道事故后果的性质

HIAD 数据库中记录的氢气管道事故主要导致四种类型的后果: 爆炸、火灾、未点火泄漏和未遂事故。火灾是最常见的结果, 占记录事件的一半以上, 而爆炸和未点燃泄漏的频率较低。这些后果的比例分布如图 4 所示。火灾代表了最大的后果, 突出了氢气从管道系统释放时的高可燃性和点火敏感性。爆

炸虽然不那么频繁，但由于其潜在的破坏性，构成了重大风险。未点火的泄漏和未发生表明了减轻潜在灾难性后果是可以实现的。



**Figure 2.** Hydrogen pipeline accidents that have occurred in various countries  
**图 2.** 各国发生的氢管道事故



**Figure 3.** Statistics on the causes of hydrogen pipeline accidents  
**图 3.** 氢管道事故原因统计

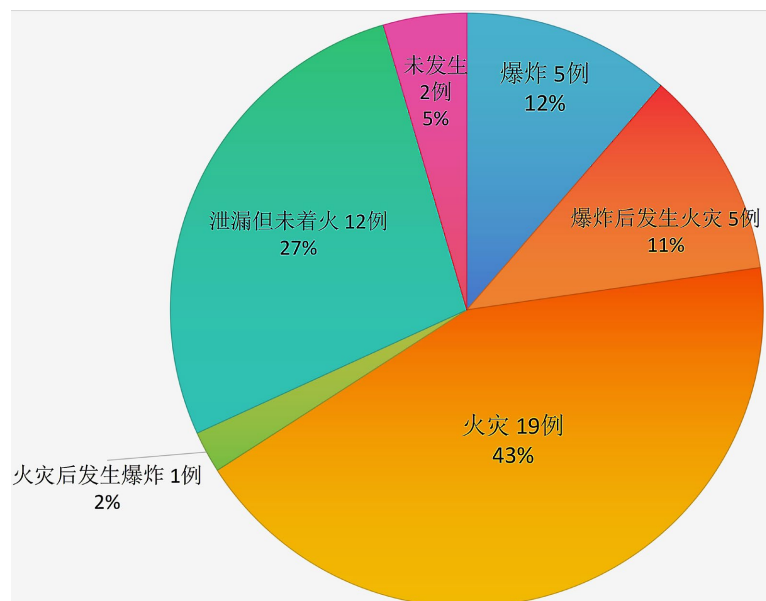


Figure 4. Statistics on the consequences of hydrogen pipeline accidents  
图 4. 氢管道事故后果统计

### 3.3. 危害因素识别

基于对 HIAD 2.2 数据库的分析, 确定了与氢气通过管道运输有关的几个关键危害。这些危害包括腐蚀和材料退化、焊缝和焊接操作、机械完整性和操作故障、建筑工程和自然灾害。这些危害中的每一种都对氢基础设施的安全性和可靠性构成不同程度的风险。使用 PreHA 框架对其风险程度进行评估, 可以深入了解其可能性和严重程度。在下面的章节中, 详细检查了这些危害, 重点介绍了它们的相关风险以及确保氢气安全运输和储存所需的预防措施。

#### 3.3.1. 腐蚀和材料降解

影响氢气运输与储存基础设施的主要危害是腐蚀和氢致材料降解, 二者直接威胁管道与储罐的完整性。基于 HIAD 2.2 数据, 氢气管道因腐蚀和材料降解导致的整体风险评级为 1A, 即灾难性严重程度且频繁发生。这一评级与管道腐蚀事件的较高频率(44 例中占 14 例)相一致, 表明管道面临的腐蚀风险更为突出。大多数氢气管道采用低合金碳铁素体钢建造, 按 API 5L/ISO 3183 标准化, 常用牌号为 X70, 兼顾强度与可焊性。但此类钢对氢脆高度敏感。氢脆过程从氢分子吸附于钢表面开始, 随后解离为原子并扩散进入晶格, 导致材料的延展性、断裂韧性和抗疲劳性能显著下降, 而对抗拉强度影响较小。在氢气环境中试验的样品通常呈现脆性断裂, 表明其在载荷下变形能力降低。将氢气掺入甲烷管道会引入超压、泄漏、爆炸和开裂等附加风险。尽管掺氢有助于降低碳排放, 但也显著增加了安全风险——爆炸严重程度随氢含量升高而上升。Lowesmith [14] 一步发现, 掺氢比例低于 30% 时混合气行为与天然气相近。然而, 当氢含量达到或超过 40% 时, 爆燃向爆轰转变、火焰加速及超压产生的风险大幅上升, 尤其在密闭管道段。因此, 与纯甲烷系统相比, 掺氢或纯氢管网需要更严格的风险评估与设计标准。

#### 3.3.2. 焊接接头和焊接操作

HIAD 数据集中氢气管道特有的一个关键危险与管道建设和维护期间使用的焊缝和焊接工艺有关。焊缝固有地引入了材料性能、残余应力和潜在微结构缺陷的局部变化, 这些变化可以作为裂纹的起始点, 特别是在氢气暴露下。因为在管道系统的运行寿命期间, 因为焊接故障可能会发生多次。根据数据库 44

起记录在案的管道事故中,有 12 起归因于焊接相关问题,所以将焊接接头和焊接工艺的等级定为 1B。

焊接操作可以产生具有改变显微组织的热影响区(HAZ),管道中常用的铁素体钢通常表现出韧性降低和更容易发生氢辅助开裂。焊接工艺不当、焊后热处理不充分或填料材料不相容会加剧这些脆弱性,特别是当高压氢气或氢-甲烷混物流过管道时。此外,焊接过程中产生的残余应力会与操作应力相互作用,在氢传输过程中促进裂纹的萌生和扩展,特别是在焊缝或 HAZ 内已有的缺陷处。对焊缝几何形状和缺陷对氢脆的影响进行了专门研究。Kubota 等人[15]发现,没有缺陷的对接焊接头不受氢脆的影响,而含有焊缝缺陷的插接焊接头和对接焊接头则表现出显著的易感性。这表明,焊接缺陷的存在和焊接接头形状引起的应力集中都会对接头抗氢脆的能力产生实质性影响。

### 3.3.3. 机械完整性和操作故障

基于 HIAD 2.1 数据,在 44 起记录在案的氢管道事故中,有 7 起与机械完整性和操作故障有关,因此评级为 2C。技术问题是此类故障的主要原因,包括密封件和垫片变形、阀门和法兰不对中以及其他设备故障。氢脆降低了金属的延展性和韧性,从而增加了断裂和随后气体释放的可能性,使这些问题更加复杂。

虽然管道通常被视为氢基础设施的关键组成部分,但阀门、压缩机和压力调节器等元件同样存在显著风险。这些部件的失效可能源于金属材料的腐蚀、疲劳开裂、抗断裂性能丧失,或弹性体材料的膨胀与体积变化,最终导致计划外泄漏。例如,弹性体密封件在氢气环境中可能出现渗透性变化、收缩或膨胀,形成隐蔽的泄漏路径,直到发生严重事故才被发现。同样,压缩机中的循环应力可能加速疲劳,在氢气暴露下引发早期失效。

### 3.3.4. 自然灾害

氢气事件和事故数据库(HIAD)中记录的事件证明,自然灾害也对氢气管道造成了危害。数据库中的 2 起事件凸显了此类事件的潜在后果。使用 PreHA 框架进行评级为 1D,表明它具有灾难性后果,但很少发生。

在第 1 起是与闪电有关的事故,管道泄漏是由暴风雨期间可能通过附近输电塔附近的接地棒释放的能量激增引起的。使用系绳在线检查(ILI)工具和直流电压梯度(DCVG)测量的调查显示,接地棒附近的管道中存在异常,将泄漏与雷击引起的电能联系起来,从而损害了管道的完整性。第 2 起事故涉及日本东北大地震和海啸期间发生的地震。地面运动导致储氢罐发生泄漏,随后引发爆炸和火灾。这一事件导致两人受伤,并对附近的建筑物、机械和设备造成了破坏,说明了地震活动对氢基础设施可能造成的严重后果。

这些事件强调了氢气设施对自然灾害的脆弱性,包括地震、雷击、洪水和极端天气事件。氢气的高可燃性和低分子量意味着,即使是微小的结构妥协也可能导致气体快速释放、爆炸和火灾。因此,缓解措施必须包括考虑当地危害概况、加固结构设计、接地和浪涌保护、泄漏检测系统和应急响应规划的稳健选址。

### 3.3.5. 土木和建筑工程

氢气管道特别容易受到民用和建筑活动产生的危害,包括氢气管道在内的地下管道资产经常受到邻近施工作业的影响,如露天开挖、隧道掘进、分级、打桩、爆破以及起重机和其他机械的重型施工装载。这些活动可能会对管道施加额外的应力、变形和局部损坏,可能导致凹痕、涂层失效、错位或裂缝,从而损害管道的完整性。振动、地面沉降和施工设备的循环加载进一步加剧了应力集中,加速了疲劳裂纹的产生或加剧了先前存在的材料弱点,如氢脆。根据 HIAD 2.2,与土木和建筑工程相关的危险被赋予了

3D 风险等级,反映了发生可能性很小的临界后果。

2019年3月21日,比利时发生了一起民事和建筑危险的说明性事件,当时在地下氢气管道附近进行了挖掘工作。挖掘机撞击了携带气态氢的地下管道,导致膨胀不足的射流起火。虽然没有人员伤亡记录,但挖掘机在事故中被毁。调查显示,最初的原因是挖掘过程中对管道造成的机械损伤。根本原因可追溯至人为因素,具体来说,是未能正确告知第三方挖掘公司氢气管道的存在,导致未能采取适当的预防措施。《旧金山观察家报》(2014年1月13日)的一份报告指出,大约25%的地下管道破裂是由附近的建筑活动造成的。美国建筑商协会(AIC)也将地下管道损坏确定为承包商的第三大危机,仅次于需要住院治疗的工伤事故和导致诉讼的与客户的合同纠纷[7]。2004年,比利时的停车场建设过程中,天然气管道发生故障,造成24人死亡,突显了高压管道建设活动可能造成的致命后果。这些事故说明与天然气管道相比,氢气管道在刺穿和喷射火灾情况下的风险更高,主要是由于氢脆和高着火概率。所以我们应该通过仔细地规划来减少预期的不良事件数量及其发生的不确定性。

### 3.4. 对比分析

本文采用 PreHA 方法将腐蚀与材料降解评定为 1A(灾难性且频繁),将焊接问题评为 1B(灾难性且可能),这一排序与近年来基于同一数据库的其他定量或半定量研究结果在本质上是一致的,但在风险呈现的形式和适用性上有所不同。Campari 等[8]运用贝叶斯分析处理 HIAD 2.的 628 起氢相关事件,亦得出氢致材料失效(尤其是氢脆)是最主要的事故诱因,并强调焊接与接头为关键检查部位。该研究从概率角度证伪了某些“高频率-低严重性”的误判,而本文的 PreHA 框架则从严重度与可能性二维交叉中直接锁定了 1A 级危害,在数据稀疏、定量概率难以估计的情况下更易实施,且较 Campari 等的后验概率分布更适合设计阶段的初步筛查。Badia 等[9]在整个氢价值链的安全分析中提到,输氢管道制造和建造缺陷在事故原因中占有重要份额,与本文发现的 14 起材料/制造缺陷和 12 起焊接相关事件高度吻合。但与故障树分析(FTA)或定量风险评估(QRA)相比,PreHA 无法给出精确的失效概率或风险值,其优势在于快速识别防护重点;后续可将本文识别的 1A、1B 危害作为顶事件,进一步开展 FTA 或 LOPA(保护层分析)以量化安全屏障的可靠性。此外,在氢管道风险谱系中,机械完整性与操作故障(2C)虽被归为中等临界,但因氢气的低分子量和宽爆炸极限,其演化成重大事故的可能性远高于天然气管道中的同类故障[2],这说明 PreHA 的二维矩阵在区分介质特性带来的附加风险方面尚有强化空间,未来可在风险矩阵中引入介质敏感性修正系数。总体而言,本研究与前人的结论相互印证,且以 PreHA 为前置分析工具的策略能较好地与后续定量评估衔接,对尚未建立完整失效统计数据库的氢基础设施尤为合适。

## 4. 结论

氢气管道面临多种可能导致严重后果的危险,包括泄漏、火灾和爆炸。氢气事故的后果因具体情况而异。在管道事件中,火灾最为常见;而不着火泄漏和未遂事故虽然发生频率较低,却也反映出在遏制与降低风险方面仍存在持续挑战。

运用 PreHA 框架评估后发现,管道特别容易受到腐蚀和焊接相关问题的影响。其中,腐蚀被评定为 1A 级,表明其后果灾难性且发生频繁;焊接相关故障被评定为 1B 级,表明其后果灾难性但发生可能性为可能级。基于这些发现,建议采取以下几项针对性措施:

#### 1、腐蚀防控的分级策略

对于 X70 等常用铁素体钢制管道,在掺氢体积分数超过 30%或有凝析水存在的管段(参见 3.3.1 节),应将内检测(如电磁超声或超声波导波)周期缩短至不超过 3 年,重点检测氢致裂纹和壁厚减薄,同时将电子显微镜(SEM)分析的抽样率提高至每 10 km 一处。

对外腐蚀控制,应参照 GB/T19285 每年检测一次阴极保护电位和杂散电流,尤其是在穿越大型交通设施或高压输电线路区域(与 3.3.4 节雷击案例呼应),直流和交流杂散电流干扰程度若达“中”级且未设排流设施,应立即补充排流装置。

## 2、焊接质量的靶向管理

基于 12 起焊接相关事故的教训,对所有涉及氢气的环焊缝、三通和插接焊连接处,应强制执行焊接工艺评定(PWPS)和焊后热处理(PWHT),并由具备氢焊接资质的第三方监检。

特别关注热影响区(HAZ)的微观组织,对在役管道中采用 X70 钢的对接焊口,若运行超过 10 年或循环压力波动幅度超过 20%设计压力,应优先采用衍射时差法(TOFD)或相控阵超声进行在线检测,将关键焊缝的检测覆盖率从常规的 10%~20%提高至 50%,并建立焊缝“健康档案”实施分级管理。

## 3、机械完整性与操作环节的氢兼容要求

鉴于 7 起事故与操作故障相关(3.3.3 节),对所有接触氢气的密封件、阀门和压缩机部件,应强制要求供应商提供氢气兼容性测试报告(包括渗透、膨胀、疲劳寿命等数据),并建立定期更换清单,弹性体密封件在运行温度高于 60℃或压力大于 6.9 MPa 工况下的更换周期不宜超过 2 年。

对压缩机、调压站等重点设备,应增设氢气浓度在线监测探头,与紧急切断阀联动,响应时间控制在 10 s 以内。

## 4、数据与报告系统的标准化

本研究发现约 25%的事件原因未知(5 起),反映了事故调查深度的不足。建议管道运营方采用 HIAD 统一的报告框架,强制记录材料状态、操作压力、掺氢比例和保护装置响应情况等字段,并引入 5 分制根本原因分析评级机制(对标 HIAD2.2 数据质量等级),确保新事故数据的完整度达到 3 分及以上,从而为未来定量风险评估和机器学习建模提供可靠基础。

## 参考文献

- [1] 孙宝翔,杨静. 推进输氢管道建设,助力氢能产业健康发展[N]. 中国石化报,2023-03-06(8).
- [2] 杨静,薛倩,周立国. 输氢管道安全与运维管理技术探讨[J]. 炼油技术与工程,2025,55(12): 26-29.
- [3] Rigas, F. and Amyotte, P.R. (2013) Myths and Facts about Hydrogen Hazards. *Chemical Engineering Transactions*, **31**, 913-918.
- [4] 梅苑,吕志阳,帅义,等. 掺氢条件下 X80 管道钢的氢脆敏感性研究[J]. 油气与新能源,2026,38(2): 45-55.
- [5] 李磊. 室内掺氢天然气管道泄露扩散模型及安全检测的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学,2025.
- [6] 李凤,董绍华,陈林,等. 掺氢天然气长距离管道输送安全关键技术与进展[J]. 力学与实践,2023,45(2): 230-244.
- [7] Jeong, H.S., Abraham, D.M. and Lew, J.J. (2003) Pipeline Damage Prevention Systems. *New Pipeline Technologies, Security, and Safety*, 1429-1437.
- [8] Campari, A., Nakhil Akel, A.J., Ustolin, F., Alvaro, A., Ledda, A., Agnello, P., et al. (2023) Lessons Learned from HIAD 2.0: Inspection and Maintenance to Avoid Hydrogen-Induced Material Failures. *Computers & Chemical Engineering*, **173**, Article ID: 108199. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108199>
- [9] Badia, E., Navajas, J., Sala, R., Paltrinieri, N. and Sato, H. (2024) Analysis of Hydrogen Value Chain Events: Implications for Hydrogen Refueling Stations' Safety. *Safety*, **10**, Article No. 44. <https://doi.org/10.3390/safety10020044>
- [10] Tunç, M. and Solmaz, R. (2025) Occupational Health and Safety Assessment of Hydrogen Transport by Trucks. *International Journal of Hydrogen Energy*, **144**, 851-859. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.05.073>
- [11] Yan, F. and Xu, K. (2019) Methodology and Case Study of Quantitative Preliminary Hazard Analysis Based on Cloud Model. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **60**, 116-124. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.04.013>
- [12] Tunç, M. and Solmaz, R. (2024) A Preliminary Hazard Analysis in Bee Pollen and Propolis Decontamination Process: From the Beehive to the Laboratory. *Food Control*, **163**, Article ID: 110487. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110487>
- [13] Department of Defense Standard Practice (2012) System Safety.

- <https://mail.system-safety.org/Documents/MIL-STD-882E.pdf>
- [14] Lowesmith, B.J. and Hankinson, G. (2012) Large Scale High Pressure Jet Fires Involving Natural Gas and Natural Gas/Hydrogen Mixtures. *Process Safety and Environmental Protection*, **90**, 108-120. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2011.08.009>
- [15] Kubota, M., Komoda, R., Cui, X., Wakabayashi, H. and Tanaka, Y. (2019) Effects of Hydrogen and Weld Defect on Tensile Properties of SUH660 and SUS316L Welded Joints. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, **8**, 713-718. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.8.5.713-718>