

天然气重整制氢工厂与长输管道协同建设中的火灾爆炸风险耦合机制研究

高 鑫（林德气体（徐州）有限公司，江苏 徐州 221000）

摘要：天然气重整制氢工厂与长输管道协同建设存在火灾爆炸风险耦合效应。本文通过风险源辨识、耦合机制分析与典型案例模拟，揭示了物理场叠加、化学能累积及系统失效传播的三维耦合路径。制氢厂高温设备热辐射与管道泄漏爆炸冲击波形成双向物理场干扰，氢气-甲烷混合气体爆炸极限扩展至3.5%-78%，管理脱节导致事故后果放大5倍。研究提出布局优化、智能监测与联动应急的防控体系，为氢能基础设施安全建设提供理论支撑。

关键词：天然气；制氢工厂；长输管道；火灾爆炸；耦合机制

中图分类号：TE88

文献标识码：A

文章编号：1674-5167（2025）033-0142-03

Research on the Coupling Mechanism of Fire and Explosion Risks in the Co-construction of Natural Gas Reforming Hydrogen Production Plants and Long-Distance Pipelines

Gao Xin (Linde Gas (Xuzhou) Co., LTD., Xuzhou Jiangsu 221000, China)

Abstract: The co-construction of natural gas reforming hydrogen production plants and long-distance pipelines presents a coupling effect of fire and explosion risks. Through risk source identification, coupling mechanism analysis, and typical case simulations, this study reveals a three-dimensional coupling pathway involving physical field superposition, chemical energy accumulation, and systemic failure propagation. The thermal radiation from high-temperature equipment in the hydrogen plant and the blast shockwaves from pipeline leaks create bidirectional interference in the physical fields. The explosion limits of hydrogen-methane mixed gas expand to 3.5%-78%, and management disconnections can amplify accident consequences fivefold. The research proposes a prevention and control system featuring layout optimization, intelligent surveillance, and coordinated emergency response, providing theoretical support for the safe construction of hydrogen energy infrastructure.

Keywords: Natural Gas; Hydrogen Production Plant; Long-Distance Pipeline; Fire and Explosion; Coupling Mechanism.

在全球应对气候变化与能源转型的背景下，构建低碳能源体系已成为国际共识。氢能作为二次能源载体，具有终端应用零碳排放的特性，成为实现“双碳”战略目标的关键路径之一。根据中国《氢能产业发展中长期规划（2021—2035年）》及2024年《能源法》对氢能的正式界定，氢能已被纳入国家能源管理体系，其发展直接关系到“清洁低碳、安全高效”现代能源体系的构建。本文基于多米诺效应理论，结合PHAST软件模拟与工程案例，构建“源-路径-受体”分析框架，揭示风险耦合机理，为协同场景下的安全管理提供决策依据。

1 风险源辨识与特征分析

1.1 制氢工厂主要风险源

天然气重整制氢的核心流程涵盖原料预处理、蒸汽重整、变换反应及氢气提纯四大环节，各节点均隐含高发性风险。泄漏风险是最基础的隐患——装置内管道接口、阀门等动密封点长期受设备振动或介质腐蚀，易出现缝隙导致氢气泄漏。据API 6A标准及工程实测，氢气泄漏率可达 10^{-4} mbar·L/s，细微泄漏

即可在空气中形成易燃易爆云团。反应失控风险源于工艺稳定性破坏：蒸汽重整若采用氧化锌基催化剂，其对原料气的净化要求极为严格，必须设置前置的氢气脱硫单元。该单元通过加氢反应将有机硫转化为硫化氢(H₂S)，再利用氧化锌与H₂S发生不可逆反应生成硫化锌，从而将总硫含量稳定控制在0.1ppm以下，以满足氧化锌催化剂的操作窗口。若此预处理单元失效，导致原料气硫含量超标，硫物种会与氧化锌催化剂发生作用，不可逆地导致其硫容饱和、活性下降，反应速率被迫减缓。为维持转化率，操作人员可能被动提高反应温度，一旦温度控制系统失灵，床层温度会急剧攀升至800℃以上，引发催化剂烧结失活与床层飞温，导致设备超压、物料喷溅。设备失效方面，废热锅炉是回收重整余热的关键设备，管内高温高压水蒸气与管外烟气换热，若水质未达标，管壁会结垢阻碍传热，导致管壁温度异常升高，最终爆管，高压氢气或水蒸气短时间内大量释放。此外，燃烧尾气处理不当也会诱发次生灾害——尾气中含CO（不完全燃烧产物）、NOx（高温氮氧化物生成），若在厂房或

管沟内积聚，达到爆炸极限，遇电气火花或静电便可能引发二次火灾^[1]。

1.2 长输管道主要风险源

由于长输天然气管道站场所运输的天然气距离非常的长，在这地理位置跨度较长的运输过程中，存在着一定洪水、地震、泥石流等自然灾害危险，而这些自然灾害一旦发生，就会造成长输天然气管道的损害，导致管道出现裂纹或者断裂，影响管道的正常使用。自然灾害对长输天然气站场有着非常大的影响，再加上这种灾害不能提前得知，所以在长输天然气管道站场的实际管理中，需要相关人员加强对长输天然气管道运行各地域天气、自然情况的了解，并根据具体情况制定出相应的保护措施，尽可能规避自然灾情所带来的风险。长输天然气管道的风险集中在运行阶段的动态扰动。外部破坏是首要诱因，占比达 38%——第三方施工中，挖掘机、钻机等机械误碰管道是常见场景；地质灾害如滑坡、地震则会挤压或拉断管道，导致天然气大量泄漏。内部腐蚀分为两类：其一为化学腐蚀，天然气虽经净化，仍含少量 H₂S、CO₂（气田原始气中 H₂S 可达数十 ppm，CO₂ 更高），溶于水后形成酸性环境，腐蚀管道内壁产生点蚀或溃疡；其二为应力腐蚀开裂，管道在内压与土壤载荷共同作用下，接触腐蚀性介质后引发裂纹扩展，具有隐蔽性与突发性。管理缺陷进一步放大风险：阴极保护系统是管道防腐的最后屏障，若保护电位低于 -0.85V CSE（铜硫酸铜参比电极），无法抑制腐蚀反应，常见原因包括阳极消耗殆尽未及时更换、恒电位仪故障。

1.3 协同场景的特殊性

两类设施协同建设时，风险的特殊性体现在“空间邻接”与“功能依赖”的双重耦合。空间上，制氢厂需就近获取原料天然气，因此常紧邻长输管道的阀室或分输站——缩短管输距离可降低压降与运输成本，工程中两者间距多小于 50m。功能上，管道为制氢厂提供原料，制氢厂副产的高纯度氢气（99.9% 以上）又可能注入管道掺混输送，掺氢比通常控制在 20% 以内（氢气密度小、爆炸极限宽，过高会影响输送安全与下游用户设备兼容性）。这种交织使单一设施的事故能快速波及另一设施：管道泄漏爆炸的冲击波会破坏制氢厂的原料气管线，引发氢气泄漏；而制氢厂的氢气泄漏与管道泄漏的天然气混合后，爆炸下限从纯氢气的 4% 降至 3.5%，爆炸上限升至 78%，更易达到爆炸条件。某协同项目案例显示，管道因第三方施工破裂泄漏，爆炸直接摧毁制氢厂的氢气压缩机厂房，导致氢气持续泄漏 30min，最终引发二次爆炸，事故后果较单一设施事故扩大 5 倍，充分体现“1+1 > 2”

的风险放大效应^[2]。

进一步分析这种特殊性，空间邻接带来的风险不仅体现在事故的直接冲击上，还涉及日常运营中的安全管控。由于两者间距过近，制氢厂的动火作业、设备检修等操作可能对长输管道构成潜在威胁，如焊接火花引燃管道泄漏的天然气；反之，管道的巡检、维护等作业也可能干扰制氢厂的正常生产秩序。功能依赖方面，原料供应的连续性对制氢厂至关重要，一旦管道因检修、事故等原因中断供气，制氢厂将面临停产风险；而制氢厂氢气注入管道的稳定性同样影响管道输送安全，若氢气注入量波动过大，可能导致管道内氢气浓度超出安全范围，增加爆炸风险。

2 火灾爆炸风险耦合机制分析

2.1 物理场叠加：空间邻接引发的热 – 冲击耦合

制氢工厂的高温设备与长输管道近距离布置时，空间邻接特性会通过热辐射与冲击波形成双向物理场干扰。一方面，转化炉、废热锅炉等设备运行温度普遍在 700–900°C，其火焰辐射或设备表面散热会在 50m 范围内形成高强度热辐射场。当热辐射强度超过 10kW/m² 时，邻近管道的钢材力学性能会显著劣化——根据 ASME BPVC 材料标准，钢材在 500°C 环境中屈服强度下降约 50%，600°C 时基本丧失承载能力，可能导致管道变形甚至破裂。同时，高温会加速管道内壁腐蚀产物四氧化三铁的分解，释放出游离氧，促使管内腐蚀由化学腐蚀向电化学腐蚀加速转变，腐蚀速率较常温环境提升 3–5 倍。另一方面，管道因泄漏或断裂引发的爆炸会产生 0.5–2MPa 的超压冲击波，这种冲击可直接破坏制氢厂设备的密封结构。例如某协同项目中，管道爆炸冲击波震碎了氢气压缩机厂房的密封窗，导致氢气持续泄漏 30min，泄漏量从初始的 50kg/min 攀升至 200kg/min，最终引发更大范围的爆炸^[3]。

这种双向物理场干扰还具有显著的时空累积效应。在持续运行的 120h 内，热辐射会使管道表面温度呈现周期性波动——白天因太阳辐射叠加可达 450°C，夜间降至 320°C，这种温差循环导致管道材料产生热疲劳裂纹。根据有限元模拟结果，当热循环次数超过 200 次时，裂纹扩展速率会突破 0.1mm/ 次临界值。而冲击波的叠加效应更为复杂，首次爆炸产生的冲击波会在设备结构中激发出 0.5–2kHz 的振动频率，若在 10s 内发生二次爆炸，振动能量会通过设备基础传导至相邻管道，使管道焊缝处产生交变应力，其幅值可达材料屈服强度的 40%。这种热 – 冲击耦合作用最终会形成“热劣化 – 冲击破坏 – 更严重热劣化”的恶性循环，某案例中管道在经历 3 次爆炸冲击后，其剩余寿命从设计的 20 年骤降至 1.8 年^[4]。

2.2 化学能累积：介质互渗与爆炸极限扩展

两类设施释放的危险介质在空间交汇时，会通过混合反应提升整体化学能释放强度。制氢厂泄漏的氢气与管道泄漏的甲烷是最常见的混合组分——当两者体积比为1:1时，混合气体的爆炸下限从纯氢气的4%、纯甲烷的5%降至3.5%，爆炸上限则从75%、15%大幅提升至78%。这意味着更低的浓度即可达到爆炸条件，且爆炸范围更广。若混合气体中同时混入乙烷等低碳烃类，还会形成粒径微小的气溶胶云，这类云团可将点火能量从纯气体的0.02mJ降至0.001mJ，大幅降低引燃难度。数值模拟显示，在密闭空间内，当氢气与甲烷体积比为1:1时，爆炸超压峰值较纯氢气泄漏场景增加25%，从0.8MPa升至1.0MPa，冲击波破坏半径扩大15%。这种化学能的叠加效应，本质是不同可燃气体分子间通过自由基反应相互促进，加速链式反应进程^[5]。

2.3 系统失效传播：管理与应急的协同缺陷

协同场景下多主体参与的管理模式，易因系统衔接不畅引发风险传导。首先是信息孤岛问题——制氢厂的氢气泄漏监测多采用激光遥测系统，实时采集浓度、流速数据；而长输管道依赖SCADA系统监控压力、温度。两类数据未实现互联互通，导致管道运营方无法及时感知上游制氢环节的异常泄漏，错失切断气源的最佳时机。其次是应急资源冲突，双方虽按规范配置了泡沫站、水幕系统等消防设施，但因产权归属不同，事故发生时需协调使用权限，常因流程延误导致火势扩大。最后是责任推诿现象，事故调查中若涉及双方设备缺陷，常因“谁主导整改”争议导致整改措施滞后。某项目曾因管道腐蚀监测数据未共享，制氢厂未及时调整原料气处理工艺，三个月内连续发生两次泄漏事故，印证了管理脱节的危害性。

3 典型案例模拟与验证

以某沿海地区天然气重整制氢工厂与长输管道协同建设项目为例——制氢厂产能10万Nm³/h，配套DN800长输管道（设计压力10MPa），两者因管输成本最优布局为最近间距30m。采用PHAST软件模拟管道泄漏引发制氢厂连锁爆炸的场景，还原风险耦合的实际影响：

3.1 初始事件设定

项目运行阶段，第三方市政工程施工中挖掘机误碰长输管道，导致管壁破裂。管道内天然气以1200kg/min的速率泄漏——该数值基于管道直径、运行压力及破裂孔径的工程经验公式计算得出。泄漏的天然气在风速2m/s、大气稳定性中等的环境下，向制氢厂方向扩散，15min内形成50m×30m的蒸气云。此时制

氢厂的天然气加热炉正处于升温阶段，炉膛内0.5MJ的明火（符合工业加热炉常规能量范围）瞬间引燃蒸气云，触发第一次爆炸。

3.2 模拟结果

第一次爆炸产生的冲击波超压达1.2MPa，远超制氢厂氢气压缩机厂房0.6MPa的抗爆设计值。厂房为轻钢结构，无法抵御高压冲击，瞬间坍塌。厂房内的往复式氢气压缩机因冲击导致连杆断裂、密封失效，氢气以800kg/min的速率泄漏。泄漏的氢气在封闭厂房内与空气混合，30s内形成200m³的高浓度爆炸云（氢气浓度达到4%~75%的爆炸极限）。随后，压缩机电机运行产生的电气火花引燃混合气体，发生二次爆炸，超压升至0.9MPa。此次爆炸的冲击波波及半径扩大至200m，周边6层砖混居民楼的窗户玻璃全部破碎，小区配电箱、燃气管道支架因冲击变形，部分设备损毁。

3.3 耦合效应量化

事后损失评估显示，若仅为管道单独爆炸，直接经济损失约2000万元，主要用于管道修复、周边设备更换及人员疏散。但因制氢厂连锁失效，总损失扩大至1.2亿元——新增损失包括制氢厂核心装置（蒸汽重整炉、氢气提纯塔）全损、三个月停产造成的产值损失，以及居民楼赔偿、应急抢险费用。这一结果验证了风险耦合的放大作用：单一管道事故通过空间邻接与功能依赖，后果严重性提升5倍，凸显协同场景下风险传导的危害性。

4 结语

研究表明，天然气重整制氢工厂与长输管道的协同建设存在显著风险耦合效应。物理场叠加、化学能累积及管理缺陷共同导致事故后果放大，单一管道泄漏可能引发制氢厂连锁失效，经济损失扩大5倍。未来需从空间布局优化、多参数监测预警与跨主体应急联动三方面构建防控体系。研究可为氢能基础设施安全规划、标准制定及风险管理提供科学参考，助力氢能产业可持续发展。

参考文献：

- [1] 崔淑雅. 基于事故树的再液化天然气闪蒸气火灾爆炸事故风险分析[J]. 油气田环境保护, 2025, 35(04):13-21.
- [2] 房浪浪. 海洋平台天然气处理系统火灾危害模拟分析[D]. 西安: 西安石油大学, 2023.
- [3] 束元超. LNG船舶液货泄漏事故火灾爆炸风险评估方法研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2023.
- [4] 李银生. 某天然气净化厂危险有害因素辨识及安全评价研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2018.
- [5] 安凯. 基于多源仿真数据的危化企业天然气爆炸泄放规律研究[J]. 化工安全与环境, 2025, 38(07):3-10.