

在役天然气管道改输氢气工艺安全探讨分析

徐振朋（山东莱克工程设计有限公司，山东 东营 257000）

摘要：现行的国外标准采用最大允许横向应力的校核数值增大了氢气管的安全能力，但是使管道可承受的最大运行压力降低；已用天然气管道改用氢气后需特别关注的问题是：如提高流速，则需考虑杂质管理；另外对站点内插入式测量仪器引起的涡旋涡流问题；同时由于氢气泄漏后危害区较小，站点外的防火放散区评估和调整需要做细致地系统研究；由于管道排热的辐射面减小，应加强管道排气装置爆炸燃烧或爆炸冲击危险管理问题；研究结果为我们后续对现有天然气管道改用氢气做评价提出可参考的研究依据。

关键词：在役天然气管道；输氢气工艺；安全

中图分类号：TE832

文献标识码：A

文章编号：1674-5167(2025)023-0105-03

Discussion and analysis on safety of hydrogen gas transmission process in in-service natural gas pipelines

Xu Zhenpeng(Shandong Laike Engineering Design Co., Ltd., Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: The current foreign standards use the maximum allowable lateral stress verification value to increase the safety capacity of hydrogen gas pipes, but it reduces the maximum operating pressure that the pipes can withstand; The issues that need special attention after using natural gas pipelines to switch to hydrogen are: if the flow rate is increased, impurity management needs to be considered; In addition, the vortex and eddy current problems caused by the insertion of measuring instruments in the station; At the same time, due to the small hazardous area after hydrogen leakage, detailed and systematic research is needed to evaluate and adjust the fire release area outside the station; Due to the reduced radiation surface of pipeline heat dissipation, it is necessary to strengthen the management of explosion combustion or explosion shock hazards in pipeline exhaust devices; The research results provide a reference basis for us to evaluate the use of hydrogen in existing natural gas pipelines in the future.

Keywords: in-service natural gas pipelines; Hydrogen transmission process; secure

1 在役天然气管道改输氢气的挑战

氢气具有无色、无味、无毒，易发生氢腐蚀影响钢管体的结构完整性、降低了冲击韧性等特性，因其粘度低且具有强烈渗透力和扩散力，所以其在生产、储存、使用过程中易泄漏而不易察觉；此外它的燃点释放的热量非常小，仅为0.019mJ；其爆炸范围为4%~75%，爆破范围为18%~59%；起火后产生高温且以较快的速率蔓延，易造成重大财产损失；同时每m³发热量比其他能源小，约为天然气的1/3。

当前，对氢气管系材料属性问题的讨论受到国际和国内广泛关注，并集中在如何通过建立对应的标准来解决这一问题。在原来运输天然气的管道建成后，如改造为输送氢气，要对材料的可行性做出判断，如机械强度、断裂韧性、疲劳裂纹等测试评定，这是新建设施选材的一个普遍性原则，然而，相比新建氢气管道而言，运行中的天然气管道改输送氢气，则是要根据实际情况及其内检测技术的成熟程度做出是否考虑管壁缺陷或裂纹等完整管道健康管理支持的判断，所以针对运行中的天然气管道是否能够成功改管输送氢气问题，其材料评估和管道整体评估仍有待深入研究。

2 改输氢气的最高运行压力确定

精确设定管道的运作压力对于增强管道输送效能至关重要，这也有助于提升将现役天然气管道转变为氢气输送管道的经济效益。针对将现役天然气管道改造成氢气输送管道的设计评估，我们可以通过比较现有氢气管道与天然气管道之间的不同之处，来研究如何确定管道的最大运行压力。

根据ASME B31.12—2023标准，在将天然气管道改造用于氢气输送时，必须依据管道沿线建筑的数量和变化情况来选择相应的地区等级，并且设计系数应依照ASME B31.12—2023规范中的方法A（即规范设计方法）进行选择，具体的设计系数可参考表1。

表1 ASME B31.12—2023方法A的设计系数表

地区等级	设计系数
一级地区(2类)	0.5
二级地区	0.5
三级地区	0.5
四级地区	0.4

注：一级地区分为1类和2类，天然气管道允许通过1类和2类地区，氢气管道只允许通过2类地区。

根据ASME B31.12—2023标准，设计系数的选取

可通过方法 B（即基于性能的设计方法，以下简称方法 B）来确定，相关设计系数的详情如表 2 所示。

表 2 ASME B31.12—2023 方法 B 的设计系数表

地区等级	设计系数
一级地区(2类)	0.72
二级地区	0.60
三级地区	0.50
四级地区	0.40

针对新铺设的氢气输送管道，依照不同地域等级，选用的方法 B 所确定的设计系数与 ASME B31.8—2022《气体传输与分配管道系统》的标准大致相同。然而，在现有天然气管道转而输送氢气的情况下，尚未有明确规定支持采用方法 B 的设计系数要求，即便材料的评估符合 ASME B31.12—2023 中方法 B 的标准，也无法保持原天然气管道的设计系数不变。鉴于此，目前我国长距离输送管道大多穿越一级或二级区域，若改输氢气而降低设计系数，将会对管道的输送效率产生显著的不利影响。

以设计压力为 8MPa、直径为 DN500 的输气管道（管材为 L360）为例，本文计算了在各个地区等级条件下，调整后的最大运行压力。

根据数据显示，改用氢气输送的运行天然气管道在一级与二级区域内的最大操作压力均较最初设计的天然气管道压力有显著下降。具体来看，一级区域的最高操作压力由 8MPa 降至 6.32MPa，若保持相同的流速，这将导致管道在标准状况下的输送能力减少约 21%。同样，二级区域的最高操作压力从 8MPa 下降至 7.01MPa，输送能力相应减少 12.3%，这直接影响了管道的实际输送效率。这一调整主要是为了预防钢制管道在输送氢气时可能出现的氢损伤，通过减小设计系数以控制管道的环向应力不超过 180MPa。

3 改输氢气流速影响问题

3.1 冲蚀问题

在工程中取 $c=100$ 作为计算值，用于无污染以及长期运行的气体或混合法输送系统（例如单一气的管线和双质混合法管线）。但是对含有固体时， c 会有大幅度降低，需要结合具体条件进行分析，并通过相应的研究加以确认。在管道设计和施工：实践方法中，针对天然气管道冲蚀速度建议，给出其管道流速为 40%~50% 冲蚀速度。而在氢气站设计标准（征求意见稿）中，则直接提出了氢气管道的实测流速不应大于工作状态下冲蚀速度的 50% 的要求，与管道设计和施工：一种实践方法中天然气管道冲蚀速度的要求保持一致。

由于天然气管道与改造后的氢气管道输送液体固态物的速度均达 5m/s 时，携带的固态物质最高浓度明显偏高，远超出以往的相关报告中管道内部常规运行

的固态粒子量标准，说明管道对于承载固态物质的能力明显大于实际负载能力，且提升并不显著影响管道的固态物质流量。因此，通过对固态颗粒物量的监测数据对比来考察天然气管道与改造后的氢气管道磨损程度。

由于改变了送氢气管道的输气介质流量，固态污染物的输运增加的同时也相应提高了输气介质流速，导致送氢气管道的环向与弯头处的磨损程度要比天然气管道高数个数量级，虽然这个值不高，但对管道壁厚影响也不大；以天然气管道中固态污染物承载能力为 $1\text{mg}/\text{m}^3$ 作为参考，得到送氢气管道及天然气管道的冲刷尺寸较上述实际观测到的固态污染物运载情况还更大一些，主要是固态污染物运载能力增加引起冲击范围变大，此外，送氢气管道的冲刷范围也较天然气管道大，如气体流速为 10m/s 时， 5° 弯管的冲刷大小为每年 1 亿分之一 mm，按 20 年输送周期计算，总冲刷深度约 0.02/20000mm。

3.2 噪声问题

天然气管线上通过改造后运输氢气，由于可对氢气流速进行提升，故应探究其对应的噪音问题，噪音主要是湍流、湍动交混以及气流冲刷形成的湍动、湍流交混及噪音和湍动交混噪音等等，不同于站场的节流阀的噪音，主要从单一地下管道处理因湍流壁面所形成的湍动噪音的问题。管道中的噪音主要是从管道中的流体流速、管道直径、流体密度传递声音速度等因素。当增大输送的流量时，运输氢气的管道流速提升 1 倍时，在运行时由于噪音的问题，地下管道要比原有的天然气噪音水平略低，地下管道因为地面上的遮蔽情况，比地表面上接收到的噪音少一点。从实际经验分析，流体在湍流流动时，形成噪音的流体的能级应为流体运动耗散的百分之 1 左右，也从侧面表明相同条件下输送氢气的管道在输送量增加 1 倍时，比输送天然气的噪音略小。

4 改输氢气后相关间距问题

4.1 站场区域布置防火间距

隔离间是指划定距离保证站区之间的防火空间，与周边建构筑物以及公用设备之间要保持一定的防火间距。国内关于已建成运营天然气管线管路后转变为氢能输送的相关标准并未出台，加之国内现行氢气运输的相关标准也并未出台，目前国际主要采用的 ASMEB31.12—2023 和 CGAG-5.6—2005(R2013) 等标准的新版并未对已投入运行天然气管道转变为输送氢气提出相关距离的调节要求，依据 CGAG-5.6—2005(R2013)，对于氢气站场周边应该具有一定安全距离，如距变电站之间最小安全间距为 15m，与公共设

施的最小安全间距为 8m 等。

目前已经对天然气、氢气泄漏热辐射进行了众多对比性模拟和研究项目，结论及看法较为一致，即操作压力及漏嘴开口大小相同时，氢气泄漏热辐射范围低于天然气；天然气的泄漏区域面积至泄漏 50% 爆炸极限 50m 以外，该面积大于氢气泄漏。另外，无论是氢气还是天然气，当漏嘴开口大小一致时，随着操作压力的变化，泄漏量、热辐射范围和扩散范围随之变大。当把天然气管道改为氢气运输后，可以在减少氢气泄露的前提下适当减少操作压力。

虽然采用氢气运输后燃气管道安全间距可能会小于现行的设计安全间距，但鉴于我国相关燃气管线安全经验的不足，还需要根据其特性及管线运行方式来选择相适应的安全间距，同时借鉴目前现行的 GB50183-2004《石油天然气工程设计防火规范》和相关的有关氢气储存和运输的规定来综合评估外部的安全间距并使用定量风险分析做出相应的风险管理计划。

4.2 管道潜在影响半径

如果输气管道泄露，则有可能给周边社区造成严重的安全和财产威胁。衡量输气管道这种威胁最常用的方式是使用管道潜在影响半径，这是行业标准普遍认可的方式。基于发生全面损毁的地下气输气管道，可以产生足以致人死亡的影响半径，热辐射为 15.8 kW/m^2 。相同工作压力和管径时，由于氢气相对于天然气密度更小，故其管子爆炸后的辐射热效率远低于后者；对于现有多用途管道运氢的设想，由于 r 仅与管径、介质和工作压力有关，因此将现有管径与介质均不同的管道改为输送氢气，根据上述工况可调参数的影响，其 r 将大幅低于天然气管道 r 。

5 改输氢气后放空系统问题

5.1 泄放自燃问题

高压力的 H_2 通过减压装置（调节器或限流板）后直接排放到无压排放路径。在此过程中，可能在排放口前段产生激波，或者第一次排出的 H_2 发生瞬时燃烧。另外，由于 H_2 的高速与引爆能量低的特点，也可能产生排放部件及排放管束中在高速下产生可燃事故。相关的因素有排放装置的尺寸、通电开启时间、后排管径与管径之比、排放压差等。这 4 个因素中任何一个的比例大都会引发火险。目前这方面研究的主要集中在小尺寸的排放装置模型及试验台上，故未完全研究清楚大尺寸排放体系的排放规律前，建议在新输运体系的设计上考虑这样的风险。排放相关的可燃流现象主要是指静电起火，这种情况可能会发生在高效的排放管束内。然而，在未释放氢气之前排放管内容物只有空气，则释放氢气而自身燃烧只是排放末端

有连续火焰，不会发生爆炸及冲击波现象。

5.2 氢气—空气预混环境及超压问题

现有天然气管道放散装置会把废弃物导向放散竖井，其中一侧是闭合气开关调节装置，另一侧与大气相连接。由于氢的质量较小，其有可能随来自上游的气体泄漏进入放散管道和氢气—氧气混合物，其爆炸速度最高可达 975 m/s ，而其在常规温度压力下空气爆炸速度为 $1480\sim2150 \text{ m/s}$ 。若发生泄漏，氢会引发放散管道的自燃或爆炸，导致放散装置不安全性。根据研究显示，当预先燃烧以及管件压力脉动现象发生的时候，氢气—氧混合物的爆炸压力因数将增加，直到放散管道内压力大幅提高。

5.3 放空潜在热辐射影响与控制问题

通过对热辐射进行研究讨论得知，如果发生因为排放管线尺寸设定原因导致氢气的自然燃烧所引起的火灾，那么因为已经进行了排放管线尺寸的设置，也就是说在排放管线相同情况下，天然气的火苗所带出的热量辐射超过了氢气所带出的热量辐射，所以现有排放设备的尺寸是满足要求的，但是为了适应排放出的氢气的特性，就需要将排放的阀门尺寸缩小，并控制排放量的输出。

6 结论

鉴于目前国际上普遍采用环向应力控制的办法提高管道安全性能，也有可能会降低管道的允许最大工作压力。由于现有管道输送天然气时的工作压力一般比输送氢气要高，因此改输天然气时的站点火灾热辐射覆盖范围、管道受影响的范围要比输送天然气时站点火灾热辐射覆盖范围、管道受影响的范围要小，基于此，建议根据天然气及氢气的性质和管道的工况情况，参考现有的天然气和氢气的规定取相应的站点外部防火距离。

参考文献：

- [1] 王艺, 刘洋, 薛文第. 大口径氢气长输管道投产混气规律研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(08):88-95.
- [2] 张昕. 天然气管道掺入氢气方案优化研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2022.
- [3] 李希龙, 谭应军, 胡元旭, 等. 氢气长输管道的设计与应用 [J]. 大氮肥, 2024, 47(04):263-267.
- [4] 李巨峰, 王玉彬, 张鑫. 氢气在天然气管网中输送的相容性研究进展 [J]. 天然气工业, 2023, 43(5):142-151.
- [5] 蒋庆梅, 王琴, 谢萍, 等. 国内外氢气长输管道发展现状及分析 [J]. 油气田地面工程, 2019, 38(12):6-8+64.
- [6] 刘中庆, 王俊, 康楠, 等. 在役天然气管道站场掺氢后防火间距探讨 [J]. 油气田地面工程, 2024, 44(03):58-64+72.