



·燃气企业管理·

掺氢天然气管道泄漏风险评估

郭保玲¹, 邸鑫¹, 张雪娇¹, 崔斌², 张镇²

(1.北京市燃气集团研究院, 北京 100011; 2.北京市燃气集团第五分公司, 北京 100082)

摘要:城市天然气管道泄漏风险因素包括管道腐蚀穿孔、开挖损坏、管道材料或焊接质量、其他组成件、自然外力破坏、误操作、其他外力破坏以及其他原因。根据美国2022年的统计数据,计算各风险因素的泄漏概率。将燃气管道分为4类管材,分别为钢管、PE管、铸铁管、其他。基于不同的管材各风险因素危害严重性评分,计算得出天然气管道风险因素危害严重性。掺氢天然气管道的风险因素危害严重性会在天然气管道的风险因素危害严重性基础上各增加一定值,依据不同掺氢比下各风险因素危害严重性增量,可计算得到掺氢天然气管道各风险因素的危害严重性,进而计算得到泄漏风险。当不掺氢时,燃气泄漏的主要风险因素为管道腐蚀穿孔。当掺氢比大于0且小于或等于50%时开挖损坏导致燃气泄漏的风险最大,其次是管道腐蚀穿孔。当掺氢比大于50%时,管道腐蚀穿孔导致燃气泄漏的风险最大,其次是开挖损坏。随着掺氢比增加,各风险因素导致燃气泄漏的风险不同程度地增加,其中管道腐蚀穿孔导致燃气泄漏的风险增量最大,城镇掺氢天然气管道应重点关注管道腐蚀穿孔问题。

关键词:城市燃气管道; 掺氢天然气; 泄漏风险因素; 泄漏风险评估

中图分类号:TU996.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-4416-(2025)10-0061-04

1 概述

2022年3月,国家发展改革委、国家能源局联合印发《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》,明确了氢的能源属性,是未来国家能源体系的组成部分,充分发挥氢能清洁低碳特点,推动交通、工业等用能终端和高耗能、高排放行业绿色低碳转型。同时,明确氢能是战略性新兴产业的重点方向,是构建绿色低碳产业体系、打造产业转型升级的新增长点。氢气密度小更容易泄漏且扩散速度快^[1-2]。氢气的爆炸极限范围宽,比甲烷更危险^[3]。城市天然气管道风险管理的目标是在识别风险因素及估算风险因素发生概率的基础上有效控制风险,城市天然气管道运行过程中面临的主要风险为燃气泄漏风险。掺氢天然气会显著增加燃气泄漏后的扩散速度与爆炸风险。城镇掺氢天然气管道有可能因管道腐蚀穿

孔、开挖损坏、管道材料或焊接质量等原因发生泄漏,需量化评估掺氢天然气泄漏风险。本文利用美国国家管道和危险材料安全管理局2022年的统计数据,开展掺氢天然气泄漏风险评估。

2 泄漏风险评估方法

风险因素的泄漏风险计算见下式^[4]:

$$R = PS \quad (1)$$

式中 R ——风险因素的泄漏风险

P ——风险因素导致泄漏的概率

S ——风险因素危害严重性

本文将某种管材的天然气管道长度占天然气管道总长度的比例叫做管长占比。风险因素危害严重性的计算见下式^[4]:

$$S = \sum_{i=1}^4 G_i \beta_i \quad (2)$$

第一作者简介:郭保玲,女,高级工程师,硕士,主要研究方向为城市燃气安全输送。

收稿日期:2023-09-21; **修回日期:**2025-05-19

式中 i ——管材的序号, i 取1~4

G_i ——第 i 种管材的风险因素危害严重性

β_i ——管长占比

3 天然气管道泄漏风险评估

3.1 风险因素的泄漏概率

本文将除管子以外的管道组成件称为其他组成件。城市天然气管道泄漏风险因素包括管道腐蚀穿孔、开挖损坏、管道材料或焊接质量、其他组成件、自然外力破坏、误操作、其他外力破坏以及其他原因。

管道腐蚀穿孔:管道腐蚀穿孔导致燃气泄漏。开挖损坏:施工方案不合理、施工配合不及时等原因导致开挖过程中损坏燃气管道,导致燃气泄漏。管

道材料或焊接质量:管道材料缺陷或焊接质量不合格导致燃气泄漏。其他组成件:阀门密封件失效、法兰连接垫片失效等原因导致燃气泄漏。自然外力破坏:地面塌陷、土壤液化等导致管道扭曲、下沉,导致燃气泄漏。误操作:阀门操作不当等导致燃气泄漏。其他外力破坏:意外碰撞等导致燃气泄漏。其他原因:除了以上导致燃气泄漏的原因之外的其他原因。

将某种风险因素导致燃气泄漏的次数与城市燃气泄漏总次数之比叫做该种风险因素的泄漏概率。根据美国国家管道和危险材料安全管理局2022年的统计数据,美国2022年城市天然气管道风险因素的泄漏概率,见表1。

表1 美国2022年城市天然气管道风险因素的泄漏概率

风险因素	管道腐蚀穿孔	开挖损坏	管道材料或焊接质量	其他组成件	自然外力破坏	误操作	其他外力破坏	其他原因
泄漏次数/次	34 486	18 607	13 816	12 579	6 085	3 244	1 388	11 038
泄漏概率/%	34.063	18.379	13.646	12.425	6.010	3.204	1.371	10.902

3.2 风险因素危害严重性

美国国家管道和危险材料安全管理局统计了美国4类管材的管道长度,4类管材分别为钢管、PE管、铸铁管、其他。2022年美国4类管材管道长度及管长占比见表2。

表2 2022年美国4类管材管道长度及管长占比

管材	PE管	钢管	铸铁管	其他
管道长度/m	13.300×10^8	8.250×10^8	0.281×10^8	0.222×10^8
管长占比/%	60.309	37.410	1.274	1.007

根据美国燃气技术研究院的研究方法,将各风险因素危害严重性等级分为6级,并赋予危害严重性评分。风险因素危害严重性等级与危害严重性评分见表3^[4],不同管材各风险因素危害严重性评分见表4^[4]。

以钢管管道腐蚀穿孔为例计算其危害严重性。钢管管长占比取37.410%,钢管管道腐蚀穿孔危害严重性评分取50,代入式(2),计算得到钢管管道腐蚀穿孔危害严重性为18.705 0。计算4种管材管道腐蚀穿孔的危害严重性并求和,得到管道腐蚀穿孔的危害严重性为19.315 0。以此类推计算其他风险因素的危害严重性。天然气管道风险因素危害严重性见表5。

4 掺氢天然气管道泄漏风险评估

4.1 不同掺氢比下各风险因素危害严重性

I 指掺氢比,即燃气中氢气的体积分数。依据文

表3 风险因素危害严重性等级与危害严重性评分^[4]

危害严重性等级	危害严重性评分
重度	50
中度到重度	40
中度	30
轻微到中度	20
轻微	10
无危害	0

表4 不同管材各风险因素危害严重性评分^[4]

风险因素	PE管	钢管	铸铁管	其他
管道腐蚀穿孔	0	50	40	10
管道材料或焊接质量	40	30	10	10
自然外力破坏	20	30	50	10
开挖损坏	50	50	50	50
其他外力破坏	10	10	10	10
其他组成件	30	30	30	30
误操作	30	30	30	30
其他原因	10	10	10	10

献[4],掺氢天然气管道风险因素危害严重性会在天然气管道风险因素危害严重性基础上增加一定值。

表5 天然气管道风险因素危害严重性

风险因素	PE管	钢管	铸铁管	其他	危害严重性
管道腐蚀穿孔	0.000 0	18.705 0	0.509 6	0.100 7	19.315 3
管道材料或焊接质量	24.123 6	11.223 0	0.127 4	0.100 7	35.574 7
自然外力破坏	12.061 8	11.223 0	0.637 0	0.100 7	24.022 5
开挖损坏	30.154 5	18.705 0	0.637 0	0.503 5	50.000 0
其他外力破坏	6.030 9	3.741 0	0.127 4	0.100 7	10.000 0
其他组成件	18.092 7	11.223 0	0.382 2	0.302 1	30.000 0
误操作	18.092 7	11.223 0	0.382 2	0.302 1	30.000 0
其他原因	6.030 9	3.741 0	0.127 4	0.100 7	10.000 0

掺氢天然气管道危害严重性等级增量与掺氢天然气危害严重性增量,见表6^[4]。

表6 掺氢天然气管道危害严重性等级增量与危害严重性增量^[4]

危害严重性等级增量	危害严重性增量
轻微地增加	5
轻度至中度增加	10
重度至显著增加	20

将掺氢比分为3组: $0 < I < 20\%$ 、 $20\% \leq I \leq 50\%$ 、 $I > 50\%$ 。依据文献[4],不同掺氢比时各风险因素危害严重性增量,见表7。掺氢天然气管道风险因素危害严重性见表8。

4.2 掺氢天然气管道各风险因素泄漏风险评估

以 $0 < I < 20\%$ 时管道腐蚀穿孔的泄漏风险为例进行计算。依据表1管道腐蚀穿孔的泄漏概率取0.340 63,依据表8当 $0 < I < 20\%$ 时管道腐蚀穿孔的危害严重性取24.315 0,代入式(1)得当 $0 < I < 20\%$ 时管道腐蚀穿孔的泄漏风险为8.282。以此类推,计算掺氢天然气管道各风险因素的泄漏风险。掺氢天然气管道各风险因素的泄漏风险见表9。

美国2022年城市天然气管道中,当不掺氢时,燃气泄漏的主要风险因素为管道腐蚀穿孔。当 $0 < I \leq 50\%$ 时开挖损坏导致燃气泄漏的风险最大,其次是管道腐蚀穿孔。当 $I > 50\%$ 时,管道腐蚀穿孔导致燃气泄漏的风险最大,其次是开挖损坏。随着掺氢比增加,各风险因素导致燃气泄漏的风险不同程度地增加,其中管道腐蚀穿孔导致燃气泄漏的风险增量明显。

表7 不同掺氢比时各风险因素危害严重性增量^[4]

风险因素	$I < 20\%$	$20\% \leq I \leq 50\%$	$I > 50\%$
管道腐蚀穿孔	5	5	20
管道材料或焊接质量	5	5	20
自然外力破坏	10	10	20
开挖损坏	10	20	20
其他外力破坏	5	5	20
其他组成件	5	5	20
误操作	5	5	20
其他原因	5	5	20

表8 掺氢天然气管道风险因素危害严重性

风险因素	$I=0$	$0 < I < 20\%$	$20\% \leq I \leq 50\%$	$I > 50\%$
管道腐蚀穿孔	19.315 0	24.315 0	24.315 0	39.315 0
管道材料或焊接质量	35.575 0	40.575 0	40.575 0	55.575 0
自然外力破坏	24.023 0	34.023 0	34.023 0	44.023 0
开挖损坏	50.000 0	60.000 0	70.000 0	70.000 0
其他外力破坏	10.000 0	15.000 0	15.000 0	30.000 0
其他组成件	30.000 0	35.000 0	35.000 0	50.000 0
误操作	30.000 0	35.000 0	35.000 0	50.000 0
其他原因	10.000 0	15.000 0	15.000 0	30.000 0

5 结论

① 掺氢天然气管道的风险因素危害严重性会在天然气管道的风险因素危害严重性基础上各

表9 掺氢天然气管道各风险因素的泄漏风险

风险因素	$I=0$	$0 < I < 20\%$	$20\% \leq I \leq 50\%$	$I > 50\%$
管道腐蚀穿孔	6.579	8.282	8.282	13.392
管道材料或焊接质量	4.855	5.537	5.537	7.584
自然外力破坏	1.444	2.045	2.045	2.646
开挖损坏	9.190	11.027	12.865	12.865
其他外力破坏	0.137	0.206	0.206	0.411
其他组成件	3.728	4.349	4.349	6.213
误操作	0.961	1.121	1.121	1.602
其他原因	1.090	1.635	1.635	3.271

增加一定值,依据不同掺氢比下各风险因素危害严重性增量,可计算得到掺氢天然气管道各风险因素的危害严重性,进而计算得到泄漏风险。

② 当不掺氢时,燃气泄漏的主要风险因素为管道腐蚀穿孔。当掺氢比大于0且小于或等于50%时开挖损坏导致燃气泄漏的风险最大,其次是管道腐蚀穿孔。当掺氢比大于50%时,管道腐蚀穿孔导致燃气泄漏的风险最大,其次是开挖损坏。随着掺氢比增加,各风险因素导致燃气泄漏的风险不同程度地增加,其中管道腐蚀穿孔导致燃气泄漏的风险增量最大,城镇掺氢天然气管道应重点关注管道腐蚀穿孔问题。

参考文献:

- [1] 乔佳,郭保玲,马旭卿,等. 城市燃气管网掺氢输送关键技术探讨[J]. 煤气与热力,2023(3):B19-B22.
- [2] TABKHI F,AZZARO-PANTEL C,PIBOULEAU L,et al. A Mathematical Framework for Modelling and Evaluating Natural Gas Pipeline Networks Under Hydrogen Injection [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008 (21): 6222-6231.
- [3] 段常贵. 燃气输配[M]. 5版. 北京:中国建筑工业出版社,2015:2-4.
- [4] MELAINA M W,ANTONIA O,PENEV M. Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks[DB/OL]. [2023-04-30]. <https://www.nrel.gov/docs/ff13osti/51995.pdf>.

Risk Assessment of Leakage in Hydrogen-blended Natural Gas Pipelines

GUO Baoling, DI Xin, ZHANG Xuejiao,
CUI Bin, ZHANG Zhen

Abstract: Risk factors for urban natural gas pipeline leakage include pipeline corrosion and perforation, excavation damage, pipeline material or welding quality, failure of other components, natural external force damage, operational errors, other external force damage, and other reasons. Based on the 2022 statistical data from the United States, the leakage probability associated with each risk factor is calculated. Gas pipelines are categorized into four material types: steel pipes, PE pipes, cast iron pipes, and others. Based on the hazard severity scores of each risk factor for different pipe materials, the hazard severity of natural gas pipeline risk factors is calculated. The hazard severity of risk factors for hydrogen-blended natural gas pipelines will increase by a certain value on the basis of that for natural gas pipelines. According to the increment of hazard severity of each risk factor under different hydrogen blending ratios, the hazard severity of each risk factor for hydrogen-blended natural gas pipelines can be calculated, and then the leakage risk can be derived. When there is no hydrogen blending, the main risk factor for gas leakage is pipeline corrosion and perforation. When the hydrogen blending ratio is greater than 0 and less than or equal to 50%, excavation damage poses the greatest risk of gas leakage, followed by pipeline corrosion and perforation. When the hydrogen blending ratio is greater than 50%, pipeline corrosion and perforation becomes the primary risk factor for gas leakage, followed by excavation damage. As the hydrogen blending ratio increases, the leakage risks caused by various risk factors rise to varying degrees, among which the risk increment caused by pipeline corrosion and perforation is the largest. Therefore, particular attention should be given to pipeline corrosion and perforation issues in urban hydrogen-blended natural gas pipelines.

Key words: urban gas pipeline; hydrogen-blended natural gas; leakage risk factors; leakage risk assessment

(本文责任编辑:马艳)