

掺氢天然气管道输送工艺特性

崔兆雪¹, 田 磊², 段鹏飞³, 李璐伶³, 李玉星¹, 刘翠伟¹

(1. 中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国宏观经济研究院, 北京 100038;

3. 深圳市燃气集团股份有限公司, 深圳 518000)

摘 要: 将氢气掺入现役天然气管道中混输是实现氢气大规模、长距离、低成本储运的有效方法,但是氢气的掺入会对天然气管道水力特性和安全等方面造成较大影响。为此,采用SPS软件对不同混氢比(均为摩尔分数)的天然气管道输送工况和泄漏工况进行仿真计算,探究掺氢对天然气管道水力特性、离心压缩机运行特性、泄漏后截断阀压降速率及泄漏量的影响。结果表明,掺入氢气会降低天然气管网的输气效率和压缩机性能,可通过增大压降的方式确保管道输气效率不变;在相同天然气需求下,随混氢比的增大,管道动态压力波动减小;掺氢天然气管道泄漏后,随着混氢比的增加,压降速率和泄漏量均增大,管线截断阀压降速率阈值设定值也要相应增大。该研究成果为确定天然气管道最大混氢比的研究奠定了一定基础,为天然气管道掺氢输送工艺的确定提供了有效借鉴。

关键词: 天然气管道; 掺氢; 水力特性; 压缩机特性; 泄漏; 压降速率阈值

中图分类号: TE832 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1006-396X.2021.06.013

Process Characteristics of Hydrogen Blend Natural Gas Pipeline Transportation

Cui Zhaoxue¹, Tian Lei², Duan Pengfei³, Li Luling³, Li Yuxing¹, Liu Cuiwei¹

(1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong 266580, China;

2. Academy of Macroeconomic Research, Beijing 100038, China; 3. Shenzhen Gas Corporation Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: Mixing hydrogen into natural gas pipelines for transportation is an effective way to achieve large-scale, long-distance, and low-cost transportation of hydrogen. However, the mixing of hydrogen will have a great impact on the hydraulic characteristics and safety of natural gas pipeline during transportation. In this regard, SPS software was used to simulate the transportation and leakage conditions of natural gas pipelines with different hydrogen mixing ratios, in order to investigate the effects of hydrogen mixing on the hydraulic characteristics of natural gas pipelines, the operating characteristics of centrifugal compressors, and the pressure drop rate of block valve and leakage after leakage. The results show that adding hydrogen will reduce the gas transmission efficiency of the natural gas pipeline network and compressor performance, which can be compensated by increasing the pressure drop. The dynamic pressure amplitude decreases with the increase of hydrogen mixing ratio under the same natural gas output. When the hydrogen mixed natural gas pipeline leaks, the pressure drop rate and the leakage would increase as the increasing of hydrogen mixing, and the set value of the pressure drop rate threshold of the pipeline block valve also increases accordingly. In conclusion, the research results in this work can provide the basis for the research on determining the maximum of hydrogen mixing ratio in the natural gas pipeline and provide a reference for the determination of hydrogen mixing transportation technology in natural gas pipelines.

Keywords: Natural gas pipeline; Hydrogen mixing; Hydraulic characteristics; Compressor characteristics; Leakage; Pressure drop rate threshold

收稿日期: 2021-03-03 **修回日期:** 2021-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(51704317); 山东省重点研发计划(2019GSF111026); 中石油科技创新基金(2018D-5007-0603); 广东省重点研发计划(2019B111102001); 国家发展和改革委员会能源研究所咨询项目“天然气高效输运利用及其技术装备创新支撑研究”(A31-2019)。

作者简介: 崔兆雪(1997-), 女, 硕士研究生, 从事掺氢天然气管道输送方面的研究; E-mail: 707256021@qq.com。

通信联系人: 刘翠伟(1987-), 男, 博士, 副教授, 从事油气管道安全输送关键技术方面的研究; E-mail: 20180093@upc.edu.cn。

由于氢能来源广泛、清洁低碳、高效灵活,氢能在推动全球能源转型中扮演关键角色^[1]。目前氢气主要是以压缩氢气长管拖车、液氢和金属合金储氢等方式输送,但是这些方法储运规模小、成本高、效率低^[2]。因此,将氢气掺入现役天然气管道中混输,可实现氢气大规模、长距离、低成本储运。

然而,随着氢气的掺入,天然气管道、压缩机等设备的正常运行及燃具适应性会受到很大影响,且增加天然气管道的安全风险^[3]。H.Dries等^[4-5]研究了掺氢对终端家用燃气具的影响,分别得到最大混氢比为17%和23%。黄明等^[6-8]对掺氢天然气的燃气互换性进行了研究,最大混氢比为20%~27%时,终端用户燃气具可正常使用。F.Tabkhi等^[9-10]通过模拟掺氢天然气管道输送水力工况,发现掺氢后天然气管道输气功率会降低。H.Dries等^[4]和A.G.Irfan等^[11]研究得到,随着混氢比的增加,管网的输气能力呈现先降后升的趋势,并指出当混氢比低于17%时,原来的天然气管道和压缩机等设备可正常运行。美国The Gas Technology Institute(GTI)发现向天然气管网中添加氢气会增加泄漏风险^[12]。国外众多学者研究表明,相比甲烷,氢气具有更高的泄漏率^[13-14]。赵永志等^[15]指出,天然气管道中掺入氢气不仅会造成管材韧性降低,还会导致管道泄漏、氢渗透、燃烧爆炸等风险的增加。

目前,关于不同混氢比对天然气管道和压缩机运行影响的研究还较少,关于掺氢天然气管道泄漏后截断阀压降速率方面的研究几乎没有。基于此,本文利用SPS软件进行模拟仿真,研究了掺氢对天然气管道水力特性、压缩机运行特性、泄漏后截断阀压降速率、泄漏量及管线阈值设定的影响,对天然气管道掺氢输送工艺及最大掺氢比的确定有一定的借鉴意义。

1 掺氢对管道输送工况的影响

1.1 掺氢对天然气管道水力特性的影响

利用SPS软件建立模型,分析管道水力参数的变化。模型参数:管道长61.2 km,外径406.4 mm,壁厚6.3 mm,温度21.1℃。

1.1.1 流量和输气功率 输气功率为管道在单位时间里输送气体的热负荷,可代表管道的输气效率^[7],表示为:

$$\Phi = q_v Q_{h,z} \quad (1)$$

式中, Φ 为输气功率,MJ/h; q_v 为体积流量, m^3/h ; $Q_{h,z}$ 为气体高热值, MJ/m^3 。

管道首末端压力分别设为2.0、1.6 MPa,模拟

了0~100%混氢比的流量和输气功率的变化,结果如图1所示。

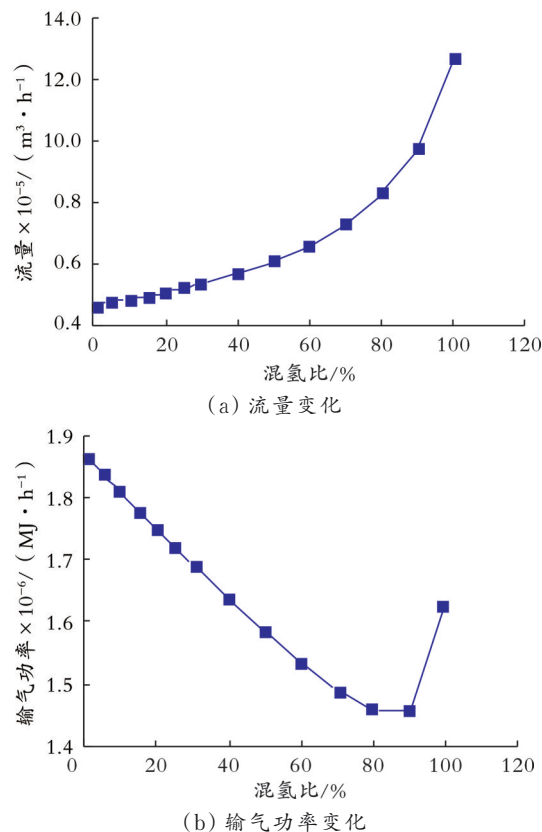


图1 流量和输气功率随混氢比的变化

Fig.1 Change of flow rate and gas transmission power with hydrogen mixing ratio

由图1可知,天然气管道掺氢后,在压力一定的情况下,随着混氢比的增大,流量不断增大,输气功率呈现先下降后增加的趋势。但整体来看,相比于纯天然气,掺氢天然气管道的输气功率依然较小。这说明掺氢导致天然气管道的输气效率降低。

管道末端压力为1.6 MPa,起点压力分别设为2.0、2.1、2.2 MPa,得到0~30%混氢比的输气功率的变化,结果如图2所示。由图2可知,管道起点压力越大,输气功率越大,即管道的输气效率随着压降的增加而得到提高。这是由于氢气分子质量极小,密度低于同等压力下天然气的主要组分甲烷的密度,在压力、温度相同时氢气的压缩因子明显高于甲烷,等压力下氢气所占体积更大,则在管道内需要更高的压力压缩氢气以保证输气效率不变。

1.1.2 管道压降 流量设为定值50 000 m³/h,管道起点压力设为定值2.0 MPa,得到管道终点压力随混氢比的变化曲线,结果如图3所示。由图3可知,当管道的流量、起点压力一定时,随混氢比的增加,终点压力增大,即管道的压降减小。证明了上文中得到的结论,当流量不变时,混氢比升高导致

管道终点压力增大,输气功率下降。为保证输气功率,需降低管道终点压力,进而增大管道流量。因此,天然气管道掺氢后可以通过增大压力降的方式来确保管道输气效率不变。

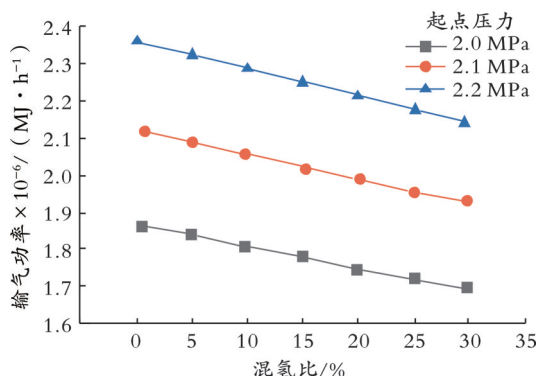


图2 输气功率随混氢比的变化

Fig.2 Change of gas transmission power with hydrogen mixing ratio

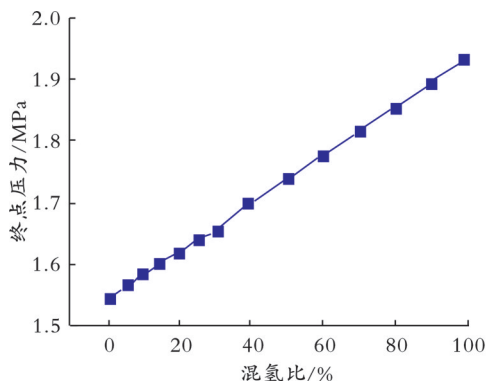


图3 相同流量下管道终点压力随混氢比的变化曲线

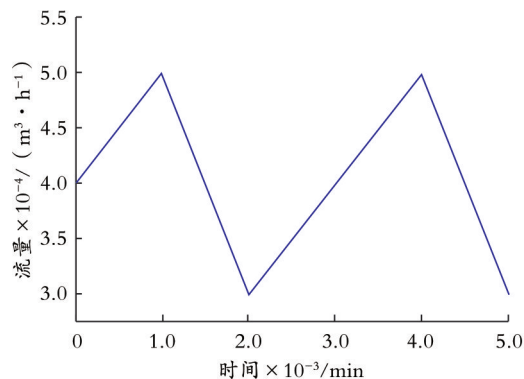
Fig. 3 Change of pipe end pressure with hydrogen mixing ratio under the same flow rate

1.1.3 动态压力 管道起点压力设为定值 2.0 MPa,若天然气需求存在周期性变化,将管道终点设为图 4(a)所示的动态流量变化进行模拟,得到图 4(b)所示的不同混氢比下管道终点的动态压力变化。由图 4 可知,在相同天然气需求变化下,随混氢比的增大,动态压力波动越小,其压力极值越大。这是因为掺氢天然气的黏性阻力较低,使摩擦压力损失降低,即摩阻导致的压降减小。

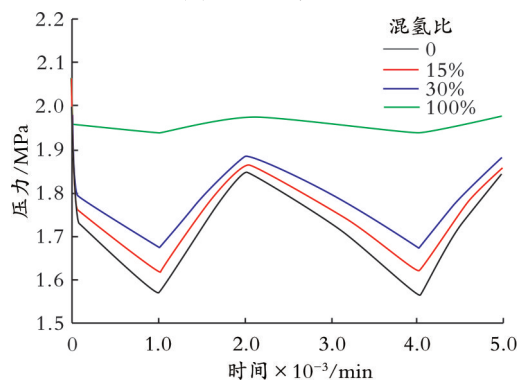
1.2 掺氢对离心压缩机运行特性的影响

1.2.1 压缩机参数变化 流量设为定值 250 000 m^3/h ,压缩机入口压力设为定值 8 MPa,模拟得到不同混氢比的离心压缩机各参数变化,结果如图 5 所示。由图 5(a)可知,混氢比为 0~20% 时,压缩机的压比基本无变化;20% 时会有一个显著的下降;30%~60% 时基本不变;60% 时又有一个显著下降。总体来看,随着混氢比的增加,离心压缩机的

压比呈现降低趋势。离心式压缩机压比宜为 1.2~1.5,当混氢比为 0~100% 时,各压缩机压比均在 1.2~1.5。



(a) 流量需求变化



(b) 动态压力变化

图4 管道终点流量和动态压力变化

Fig.4 Flow and dynamic pressure changes at the end of the pipeline

由图 5(b)、(c)、(d) 可知,向天然气管道掺混氢气后,随着混氢比的增加,压缩机的功率、转速、效率均不断增大,当混氢比为 50% 时,压缩机的效率达到最大。若压缩机的运行转速不断升高,则影响压缩机运转时的功率与流量变化,并对掺氢后管线压缩机的配置问题及最大输量产生较大影响。因此,为避免压缩机持续在转速上限状态工作,需要严格控制混氢比的上限。

1.2.2 压缩机特性曲线 压缩机转速固定不变,设为 6 146 r/min ,模拟得到 0~30% 混氢比的压缩机性能特性曲线,结果如图 6 所示。由图 6 可知,当压缩机转速一定时,随着混氢比增加,压比、轴功率和效率特性曲线均下移。由伯努利方程可知,在能量守恒的条件下,压缩机会将气体的动能转换为压能,而氢气的分子质量和相对密度低于甲烷,导致在同样的动能转换时受到氢气密度的限制引起增压减小,因此掺氢后压缩机特性曲线有所下移。这也说明向天然气管道掺入氢气后,会降低压气站压缩机的性能,影响输气效率。

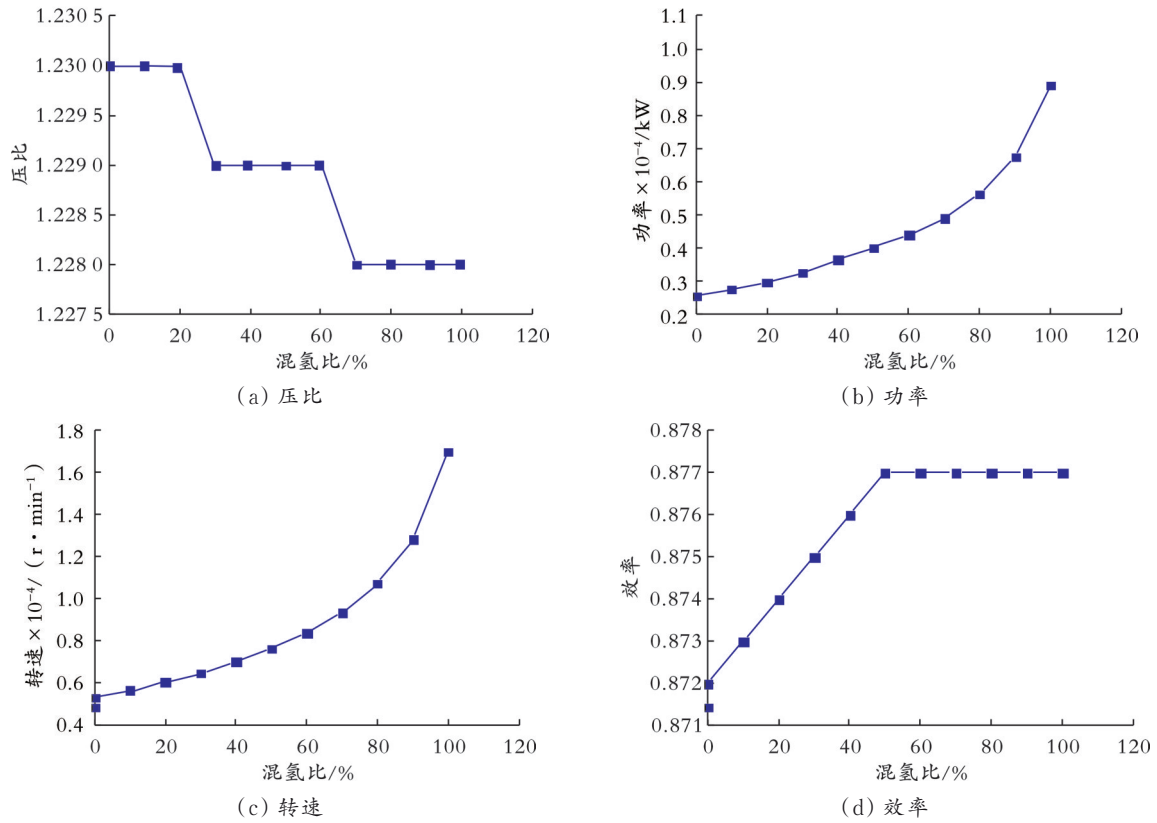


图 5 压缩机参数随混氢比的变化

Fig.5 Variation of compressor parameters with hydrogen mixing ratio

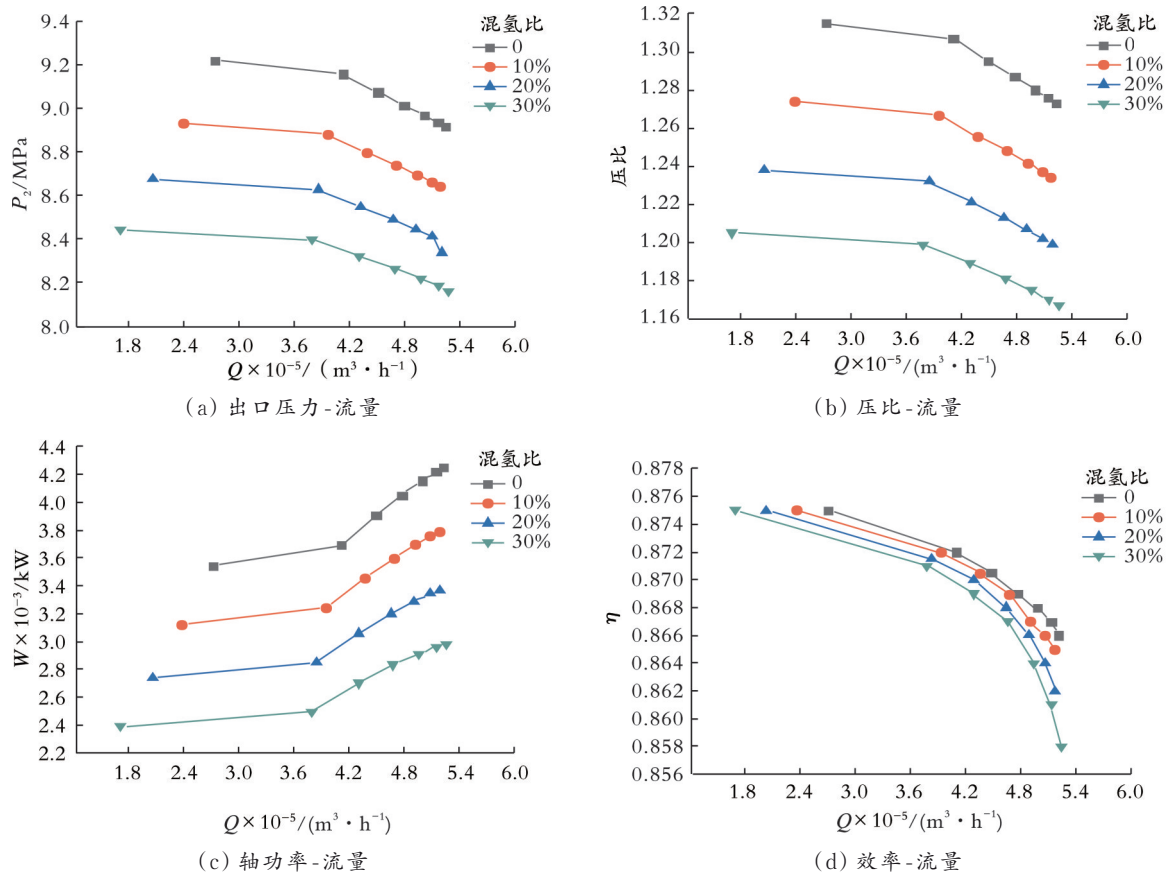


图 6 混氢比改变后压缩机性能曲线

Fig.6 Compressor performance curve after hydrogen mixing ratio is changed

2 掺氢对泄漏工况的影响

利用SPS软件建立泄漏模型(见图7),管道内径644 mm,总长30 km,SALE-1管道起点设为流量入口:90 000 m³/h;SALE-2管道终点设为压力出口:4.93 MPa,软件模拟达到稳定后在100 min时改为流量条件;NODE-2为泄漏点,泄漏点位置可变,泄漏通过快速开启阀门实现,200 min时打开阀门,阀门操作时间为6 s;PIPE-3为泄漏管,内径644 mm,长0.02 km;SALE-3设为压力出口:0.10 MPa。采样时间设为2 s。

2.1 压降速率

压降速率可用式(2)计算:

$$k = \frac{p_2 - p_1}{\Delta t} \quad (2)$$

式中, k 为压降速率,MPa/min; $\Delta t = t_2 - t_1$,为采样时间; p_1 、 p_2 分别为当前和下一时刻压力,MPa。

分别进行不同泄漏位置和混氢比的泄漏模拟,以混氢比10%、工况1(泄漏点距离管道起点15 km)

为例进行分析,得到泄漏点两端截断阀压力和压降速率的变化曲线(见图8)。工况1在不同混氢比的压降速率变化见图9。

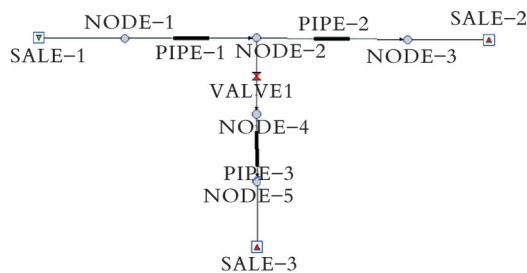


图7 仿真模型

Fig.7 Simulation model

由图8可知,当在200 min发生泄漏时,压力快速下降,最终稳定于某一较小值,压降速率急剧上升达到极大值,之后开始下降达到最小,又上升出现第二个峰值。由图9可知,相同泄漏工况下,管道上下游截断阀的压降速率都是随着混氢比的增大而增大,且下游截断阀压降速率均比上游大。

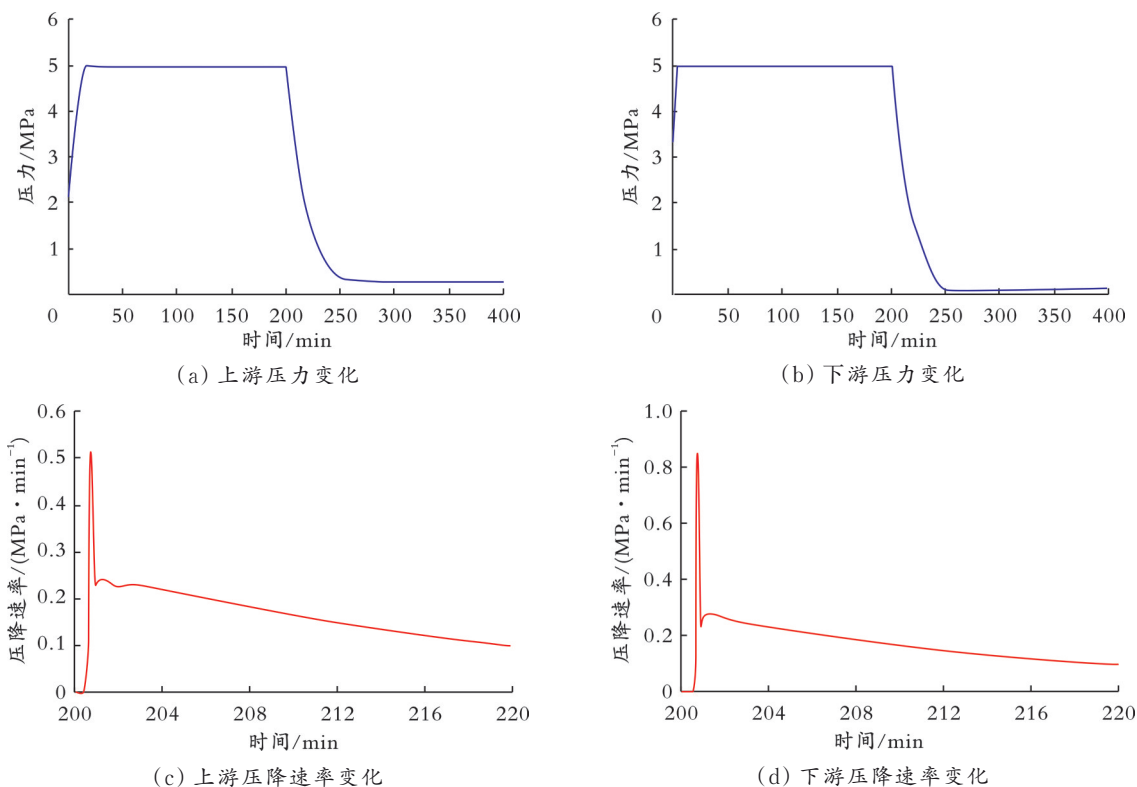


图8 混氢比10%泄漏工况上下游压力和压降速率变化

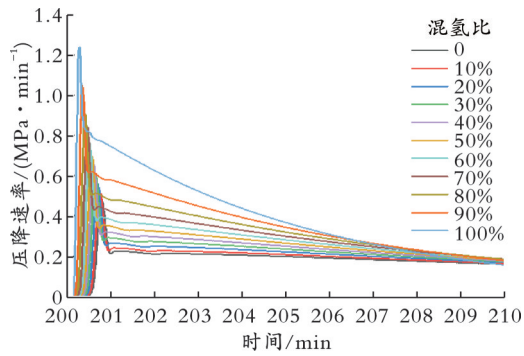
Fig.8 Variations of pressure and pressure drop rate in upstream and downstream at 10% hydrogen content

2.2 截断阀压降速率阈值

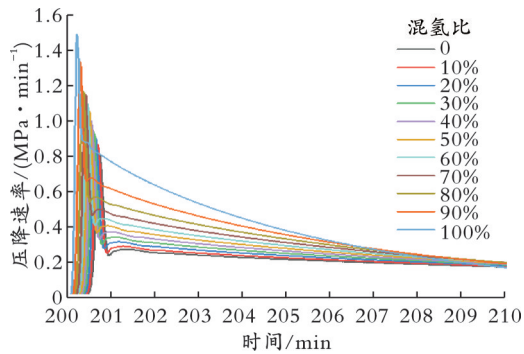
我国天然气管道沿线设立的截断阀一般采用气液联动执行机构,一旦识别到管道压降速率大于设定的阈值时,认为管道存在泄漏,两端截断阀自动关断,避免引发事故^[16-18]。按照截断阀阈值设定特点,每个截断阀阈值应取其压降速率的最小值,

但考虑到泄漏点两端截断阀操作的同一性,可取上下游截断阀压降速率最小值中的较小值作为阈值^[19]。因此,可将上游截断阀压降速率最小值作为阈值。但考虑到实际工程中会有分输情况,若只根据泄漏工况的模拟结果设定阈值,容易引起误报,造成截断阀频繁关闭,影响管道正常运行。因此,

对分输情况进行模拟,综合考虑泄漏和分输结果。



(a) 上游压降速率变化



(b) 下游压降速率变化

图9 不同混氢比在相同泄漏工况上下游压降速率变化

Fig.9 Variations of pressure drop rate in upstream and downstream at different hydrogen content

分输模型如图7所示,将PIPE-3长变为20 km,其余参数均与泄漏模型一致。分输通过开启阀门

实现,实际工程中分输需要持续一定时间,将阀门操作时间设置为60 s,其余边界条件均与泄漏工况一致。

对纯天然气在工况1的泄漏和分输的上游截断阀压降速率变化进行对比分析,结果如图10所示。由图10可知,分输的压降速率极大值与泄漏的压降速率第二个峰值接近,除了工况1,其他在相同工况下的分输和泄漏的压降速率变化曲线均有同样的变化规律。综合考虑,可以将泄漏工况上游曲线压降速率的第二个峰值设定为截断阀阈值。此时,既可以检测泄漏,又可以区分分输情况,避免阀门误操作。因此,得到不同混氢比天然气在管道不同位置泄漏时截断阀阈值取值,结果如表1所示。

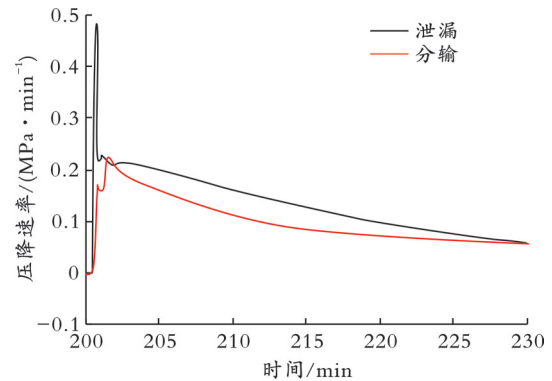


图10 纯天然气泄漏与分输工况的上游压降速率对比

Fig.10 Comparison of pressure drop rate in upstream of pure natural gas under leakage and distribution conditions

表1 阈值取值结果

Table 1 Threshold value results

工 况	A/ km	阈值/(MPa·min ⁻¹)										
		0	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
1	15	0.225 0	0.240 0	0.265 3	0.290 8	0.320 7	0.354 0	0.395 1	0.444 6	0.513 1	0.619 5	0.816 1
2	10	0.340 4	0.360 7	0.396 8	0.433 5	0.474 7	0.521 8	0.577 8	0.647 3	0.739 3	0.883 0	1.150 3
3	5	0.562 9	0.598 5	0.652 4	0.704 2	0.770 6	0.835 4	0.923 4	1.009 0	1.120 5	1.319 5	1.678 3
4	20	0.190 0	0.205 8	0.221 7	0.241 8	0.260 7	0.290 4	0.327 3	0.361 3	0.420 4	0.508 2	0.677 9
5	25	0.172 5	0.184 3	0.201 8	0.220 9	0.240 1	0.263 7	0.297 7	0.328 6	0.386 4	0.466 9	0.621 3

注:A表示泄漏点到起点距离。

以纯天然气为例,对不同泄漏位置阈值进行拟合,得到阈值随泄漏位置占管道总长比例变化的关系曲线(见图11),拟合多项式为 $y = -1.6128x^3 + 3.6802x^2 - 2.8770x + 0.9482$ 。由图11可知,泄漏点位置越靠近管道末端,阈值越小。可以推测当管线终点即泄漏点位置占总管长比例趋近于1处发生泄漏时,阈值最小,为0.1332 MPa/min。因此,可将此值作为整条管线的阈值。同理,对其他混氢比的工况进行拟合,分别得到阈值随泄漏位置占管线全长比例变化的关系曲线和管线阈值设定值,结果如

表2所示。

图12为管线阈值设定值随混氢比变化的曲线,由图12可以看出,随着管道掺入氢气的增多,管线的阈值设定值增大。因为无论是泄漏工况还是分输工况,上下游的压降速率都是随混氢比的增加而增大。加入氢气后,若继续取纯天然气的管线阈值作为含氢的管线阈值设定值,虽然可以判断泄漏工况,但由于含氢后分输工况的压降速率会增大,对分输工况造成误报。因此,需要确定每种混氢比下各自的阈值设定值。

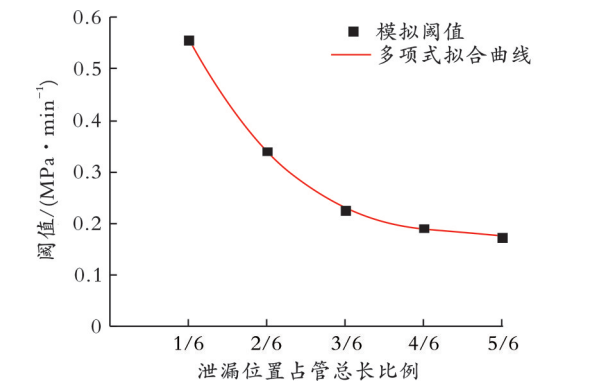


图 11 纯天然气泄漏位置对阈值的影响

Fig.11 The influence of leak location on threshold under pure natural gas

表 2 不同混氢比多项式拟合曲线和管线阈值设定值

Table 2 Polynomial fitting curve and threshold value of pipeline at different hydrogen mole fraction

混氢比/%	拟合曲线	管线阈值/(MPa·min ⁻¹)
0	$y = -1.6128x^3 + 3.6802x^2 - 2.8770x + 0.9482$	0.1332
10	$y = -1.5984x^3 + 3.7198x^2 - 2.9608x + 0.9950$	0.1556
20	$y = -1.8072x^3 + 4.1490x^2 - 3.2687x + 1.0907$	0.1638
30	$y = -1.7982x^3 + 4.2229x^2 - 3.3994x + 1.1622$	0.1875
40	$y = -1.8450x^3 + 4.4250x^2 - 3.6320x + 1.2617$	0.2097
50	$y = -1.9602x^3 + 4.6837x^2 - 3.8533x + 1.3570$	0.2272
60	$y = -2.2446x^3 + 5.2875x^2 - 4.2932x + 1.5029$	0.2526
70	$y = -1.9512x^3 + 4.9258x^2 - 4.2662x + 1.5927$	0.3011
80	$y = -1.7334x^3 + 4.7290x^2 - 4.3375x + 1.7208$	0.3789
90	$y = -1.8540x^3 + 5.2048x^2 - 4.8872x + 1.9989$	0.4625
100	$y = -2.0196x^3 + 5.9577x^2 - 5.8041x + 2.4912$	0.6252

2.3 泄漏量

泄漏孔径为 244 mm 时,模拟得到管道在不同混氢比的泄漏量变化,结果如图 13 所示。

由图 13 可知,氢气的掺入会导致管道泄漏流量增加,且随着混氢比的增加,管道的泄漏量不断增大。这是由于相比甲烷,氢气的分子质量小,扩散率大,在天然气中掺入氢气会产生更轻的混合物,使其具有更高的扩散系数和更大的泄漏量。

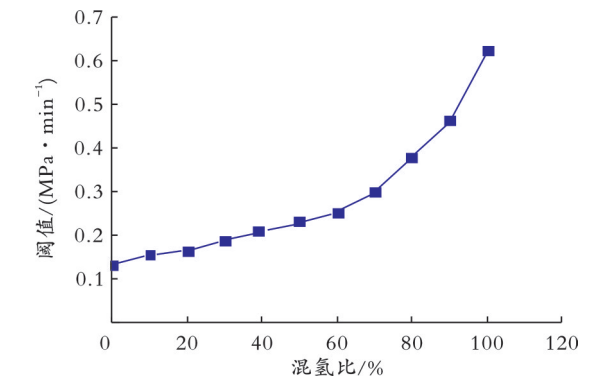


图 12 管线阈值随混氢比变化曲线

Fig.12 The curve of pipeline threshold with hydrogen mixing ratio

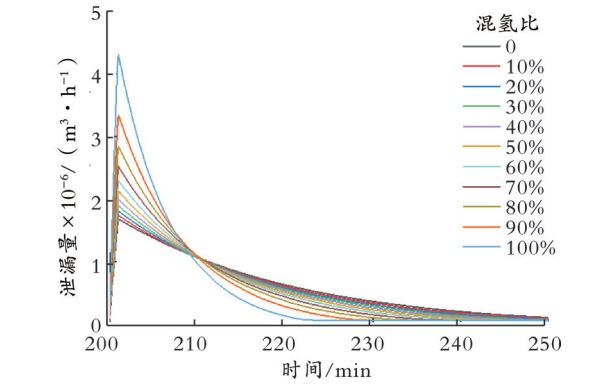


图 13 不同混氢比的泄漏量变化

Fig.13 Leakage changes with different hydrogen mixing ratio

3 结 论

(1)天然气管道中掺入氢气后,随着混氢比的增大,管道的流量增大,输气功率呈先降后升的趋势。整体来看,相比于纯天然气,掺氢天然气管道的输气功率依然是减小的,即管道的输气效率下降;若增大管道压降,管道的输气功率显著增大。因此,可以通过增大管道压力降的方式来确保管道输气效率不变;且在相同天然气需求变化下,随混氢比的增大,管道动态压力波动减小。

(2)对于离心压缩机,相同流量、进口压力下,随着混氢比的增加,压缩机的功率、转速、效率均不断增大,而压比减小;当保持压缩机转速一定时,随着混氢比增加,压比、轴功率和效率特性曲线将下移,即向天然气管道掺入氢气后,压缩机的性能降低。

(3)模拟管道泄漏工况和研究截断阀压降速率阈值设定。结果表明,管道泄漏后上下游的压降速率和截断阀压降速率阈值设定值都随着混氢比的增加而增大;掺氢会导致天然气管道泄漏量的增加,且泄漏量随混氢比的增大而增大。

参 考 文 献

- [1] 张英,王红涛.氢能,能源进化的新路径[N].中国石化报,2020-07-27(4).
- [2] 单彤文,宋鹏飞,李又武,等.制氢、储运和加注全产业链氢气成本分析[J].天然气化工,2020,45(1):85-90.
Shan T W, Song P F, Li Y W, et al. Cost analysis of hydrogen from the perspective of the whole industrial chain of production, storage, transportation and refueling[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2020, 45(1): 85-90.
- [3] Zine L M, Fotis R, Mahar D, et al. Hazards, safety and knowledge gaps on hydrogen transmission via natural gas grid: A critical review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(39): 17511-17525.
- [4] Dries H, William D. The use of the natural-gas pipeline infrastructure for hydrogen transport in a changing market structure [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(10-11): 1381-1386.
- [5] Judd R, Pinchbeck D. Hydrogen admixture to the natural gas grid[J]. Compendium of Hydrogen Energy, 2016(8): 165-192.
- [6] 黄明,吴勇,文习之,等.利用天然气管道掺混输送氢气的可行性分析[J].煤气与热力,2013,33(4):39-42.
Huang M, Wu Y, Wen X Z, et al. Feasibility analysis of hydrogen transport in natural gas pipeline[J]. Gas & Heat, 2013, 33(4): 39-42.
- [7] 马向阳,黄小美,吴婷.天然气掺氢对家用燃气灶燃烧特性的影响研究[J].可再生能源,2018,36(12):1746-1751.
Ma X Y, Huang X M, Wu C. Study on the influence of natural gas hydrogenation on combustion characteristics of domestic gas cooker[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(12): 1746-1751.
- [8] 罗子萱,徐华池,袁满.天然气掺混氢气在家用燃气具上燃烧的安全性及排放性能测试与评价[J].石油与天然气化工,2019,48(2):50-55.
Luo Z X, Xu H C, Yuan M. Safety and emission performance test and evaluation of natural gas mixed with hydrogen combustion on domestic gas appliances[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2019, 48(2): 50-55.
- [9] Tabkhi F, Azzaro 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, 33(21): 6222-6231.
- [10] Guandalini G, Colberataldo P, Campanari S. Dynamic modeling of natural gas quality within transport pipelines in presence of hydrogen injections[J]. Applied Energy, 2017, 185(2): 1712-1723.
- [11] Irfan A G, Mukhtar H S. Prospects of natural gas pipeline infrastructure in hydrogen transportation[J]. International Journal of Energy Research, 2011, 36(15): 1338-1345.
- [12] Melaina M W, Antonia O, Penev M. Blending hydrogen into natural gas pipeline networks: A review of key issues[R]. Colorado USA: National Renewable Energy Laboratory, 2013.
- [13] Klopffer M H, Beren P, Castagnet S, et al. Proceedings of the 18th world hydrogen energy conference 2010[C]. Essen: Forschungszentrums Jülich, 2010.
- [14] Swain M R, Shriber J, Swain M N. Comparison of hydrogen, natural gas, liquified petroleum gas, and gasoline leakage in a Residential Garage[J]. Energy & Fuels, 1998, 12(1): 83-89.
- [15] 赵永志,张鑫,郑津洋,等.掺氢天然气管道输送安全技术[J].化工机械,2016,43(1):1-7.
Zhao Y Z, Zhang X, Zheng J Y, et al. Safety technology for pipeline transportation of hydrogen-natural gas mixtures[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2016, 43(1): 1-7.
- [16] 张双蕾,陈凤,孙在蓉,等.输气管道线路截断阀压降速率设定值研究[J].天然气与石油,2015,33(4):7-11.
Zhang S L, Chen F, Sun Z R, et al. Study on pressure drop rate set value of block valve in gas pipeline[J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33(4): 7-11.
- [17] 汪世军. Shafer气液联动阀执行机构功能与维护[J].油气储运,2010,29(4):296-298.
Wang S J. Function of Shafer gas-hydraulic valve actuator and care[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29(4): 296-298.
- [18] 徐文强.长输管道SHAFTER干线截断阀动作过程分析[J].产业与科技论坛,2012,11(9):71-73.
Xu W Q. Analysis of operation process of block valve in SHAFTER trunk line of long-distance pipeline[J]. Industrial & Science Tribune, 2012, 11(9): 71-73.
- [19] 王彪.输气管道截断阀安全关断的环道与仿真实验研究[D].成都:西南石油大学,2015.

(编辑 王戩丽)