

# 城镇燃气天然气管道 掺氢实验平台设计与优化研究

李璐伶, 徐彬, 曹慧平, 张进盛

深圳市燃气集团股份有限公司

**摘要:** 本论文结合国内典型城市城镇燃气输配系统特点, 设计了一套综合性的、功能全面的天然气管道掺氢实验平台, 并对其进行设计和优化。所设计的实验平台包括供气模块、掺混模块、实验模块以及用气模块。通过优化设置循环回路, 当循环流量为1 000Nm<sup>3</sup>/h时, 合理分配各压力等级实验管段的并联管路数, 系统流速与真实情况接近。当缓冲罐水容积为2m<sup>3</sup>时, 可控制掺氢机出口流量不低于20Nm<sup>3</sup>/h, 以保证精准掺氢比例, 同时, 在用气低峰时段, 通过缓冲罐可满足1h以上的用气需求, 避免掺氢机频繁启停。经过优化设计, 实验模块可覆盖城镇燃气全部压力机制, 可将不同管龄、不同管材、不同壁厚的燃气管道、表具、阀门、连接件加工成工装段进行测试。同时, 实验平台可灵活地选择运行的压力等级、实验管段数、测试周期、样品种类、终端用户类型等, 并具有一定的扩容性和安全性。

**关键词:** 城镇燃气; 管道掺氢; 实验平台; 气体流速; 压力等级

## 1 引言

天然气管道掺氢是将氢气与天然气掺混, 再通过现有的天然气输配系统输送至终端用户。利用天然气管道掺氢, 一方面可有效解决可再生能源发电制氢的储运问题, 降低可再生能源产业化对电网负荷的影响; 一方面利用氢气替代部分天然气供能, 不仅可有效降低天然气的使用量, 进而降低我国天然气的对外依存度, 保障能源安全, 还可降低能源利用过程中的碳排放, 助力实现国家“双碳”目标; 另一方面管道掺氢可利用已有的天然气输配系统, 避免资源的浪费<sup>[1-2]</sup>。

美国、英国、德国、意大利等开展了针对现有燃

气管道掺氢的示范项目建设, 经过长时间运行, 结果显示掺氢比低于20%时, 不会对管道系统带来额外的风险<sup>[3]</sup>。然而, 国内天然气输配系统建设所采用的管道和材料与国外存在一定差异, 同时, 不同环境和服役年限的天然气输配系统基础设施与材料也会存在一定的差异<sup>[4]</sup>。因此, 要实现天然气管道掺氢的产业化应用, 有必要针对国内现役天然气输配系统进行测试和评估。

同时, 城镇燃气输配系统位于天然气产业链的下游, 是天然气管道掺氢产业化需首要明确可行性的应用场景。近年来, 我国辽宁朝阳、张家口、宁夏等地, 也先后针对城镇燃气输配系统开展了天然气管道

基金项目: 国家科技部重点研发计划“中低压纯氢掺氢管道输送及其应用关键技术”, 2021YFB4001605。

掺氢的示范建设,但尚未完成长周期的运行<sup>[5-6]</sup>。同时,现有的天然气管道掺氢项目多以示范为主,系统的灵活性有限,一方面运行条件无法完全覆盖城镇燃气输配系统,一方面无法实现不同掺氢比的同步实验,另一方面无法针对现役的管道和设备开展掺氢天然气适应性研究。

针对以上问题,本论文结合国内典型城市城镇燃气输配系统特点,设计了一套综合性的、功能全面的天然气管道掺氢实验平台,并对其进行优化,旨在为天然气管道掺氢产业化提供支持。

## 2 基本条件与功能需求

### 2.1 基本条件

目前,国内城镇燃气输配系统的基本特点:

(1) 输配系统运行模式:由门站接收上游来气,再由城市各地的调压站,通过逐级调压依次注入相应压力的管网系统,最后至终端用户,在用户侧通过减压获得满足终端燃气具使用要求的天然气,供用户使用。

(2) 针对常见的三级调压城镇燃气输配系统包含,即:高压4.0MPa、次高压1.6MPa、中压0.01MPa~0.2MPa。

(3) 高压管段常用材料: X65

次高压管段常用材料: X52

中压管段常用材料: X42、PE100、PE80、20号钢

(4) 天然气管道内气体的流速根据下游用气情况存在一定的波动,但一般低于25m/s。

### 2.2 功能需求

为了实现对现役城镇燃气输配系统对掺氢天然气

适应性的快速评价,天然气管道掺氢实验平台应尽可能地贴近实际生产情况,需满足以下要求:

(1) 可提供三级压力实验条件;

(2) 可提供多种掺氢比实验条件,3%~20%;

(3) 可同时实现不同服役年限、不同材料、不同管径的多组实验管段、表具、阀门、连接件等的测试;

(4) 系统管道内天然气应满足流速要求,且能进行调节;

(5) 适应城镇燃气终端用气波动大的情况。

## 3 工艺设计与优化

### 3.1 功能模块设计

如图1所示,为了实现以上6大功能,并针对城镇燃气不同压力等级的燃气管道和燃气设施开展掺氢天然气适应性的研究,本论文设计的掺氢实验平台从城镇燃气高压输配管道引入天然气,与氢气在掺混模块按一定比例混合后,进入高压实验段,针对高压条件下使用的管道、输配设备进行实验。高压实验段入口的掺氢天然气依次经过三级调压进入次高压实验段、中压实验段。从中压实验段出口的掺氢天然气经入户调压后,分别供给居民用户、工商用户以及天然气分布式能源系统。

### 3.2 水力学分析计算

由于实验平台末端的用气量有限,为了保证实验平台管道气体流速与实际生产情况一致,在设计中考虑使用循环压缩机,增加实验段管道中气体的流量。表1罗列了某城市城镇燃输配系统中高压、次高压、中压管段的实际流速情况。

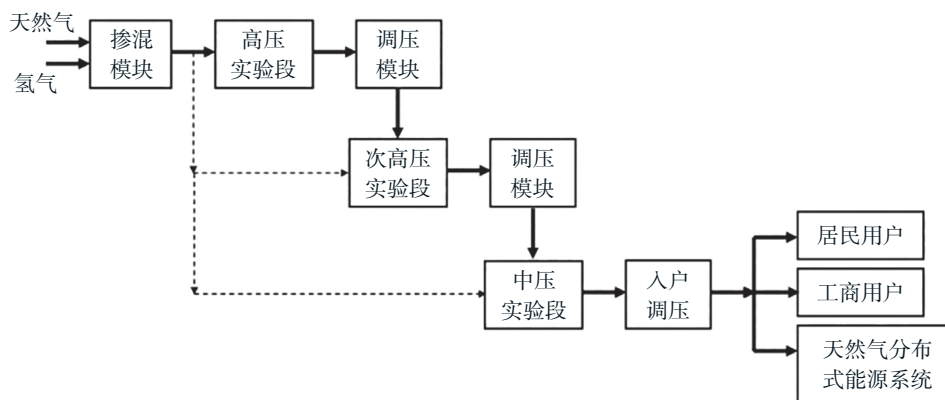


图1 掺氢实验平台工艺流程框图

为了降低实验用气量，本实验平台在高压和次高压条件下，拟主要针对DN63的管道进行实验，利用水力计算模型分别计算高压和次高压条件下，要达到表1所示流速需要的天然气流量，结果如图2、图3所示。

由图2、图3所示，高压条件下，为了得到与实际情况相近的低于6.1m/s的气体流速，至少需要1 000m<sup>3</sup>/h的气体流量；次高压条件下，至少需要300m<sup>3</sup>/h左右的气体流量。由此可设计得各实验管段的并联管道数及对应流速，如表2所示。

表1 某城市各级压力管道的真实流速情况

实验条件	外径 (mm)	流量 (Nm <sup>3</sup> /h)	流速 (m/s)
高压实验管段 (4MPa)	813	≤400 000	≤6.1
	508	≤100 000	≤3.9
	219	≤10 000	≤2.45
	63	500~8 000	1.9~31.8
次高压实验管段 (1.6MPa)	508	≤60 000	≤5.87
	323	≤50 000	≤13.59
	63	100~3 000	1~28.7
中压实验管段 (0.01MPa~0.2MPa)	400	≤16 000	≤25.4
	160	≤4 500	≤43.7
	90	≤1 200	≤40.6
	63	≤600	≤46.8

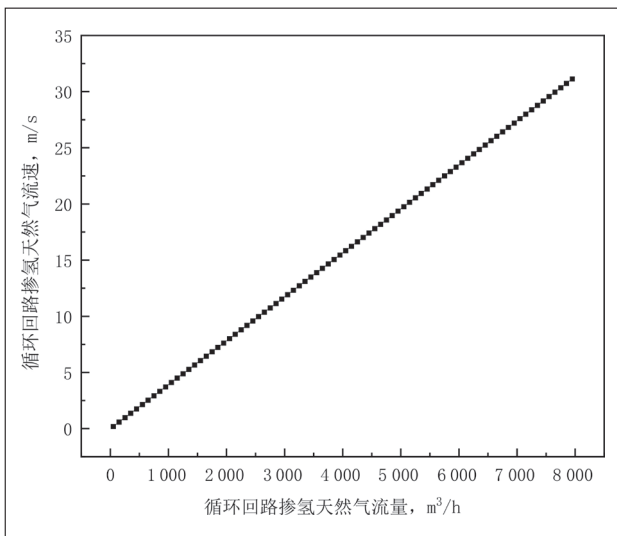


图2 高压条件下不同气体流量对应流速规律

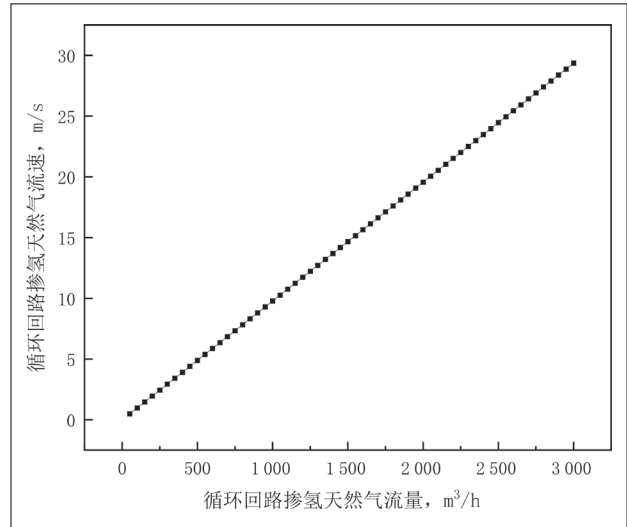


图3 次高压条件下不同气体流量对应流速规律

表2 各实验管段的并联管道数及对应流速

实验条件	并联管路数量	单路最低流量 (Nm <sup>3</sup> /h)	流速 (m/s)
高压实验管段 (4MPa)	1	1 000	5.58
次高压实验管段 (1.6MPa)	3	333	3.46
中压实验管段 (0.01MPa~0.2MPa)	4	250	19.44

对于次高压和中压实验管段，如想获得更高流速的实验环境，则可关闭部分并联管道。经计算，在次高压条件下，1路和2路并联时，流速分别可达到10.2m/s、5.1m/s；在中压条件下，1路、2路和3路并联时，流速分别可达到83.36m/s、40.27m/s、26.42m/s。其中，中压条件下，仅运行1路时，流速高达83.36m/s，高于实际流速。因此，建议中压实验管段至少保持2路以上并联。

### 3.3 缓冲罐设计

由于实验平台终端为居民用户、工商用户以及天然气分布式能源系统，其中居民用户和工商用户的用气行为波动较大，在早中晚时段的用气量较大，其余时段则接近0。因此，要求平台具有一定的储气功能，能够应对用气波动对系统稳定性的影响。同时，由于掺氢比仅为5%~20%，当掺氢比较低时，受氢气流路控制阀门最低流量的限制，要求掺氢机出口流量需

大于 $20\text{m}^3/\text{h}$ 。

目前,实验平台终端的居民用户包括4台单眼灶,用气量约为 $0.35\text{m}^3/\text{h}$ ,1台家用燃气热水器,用气量约为 $2\text{m}^3/\text{h}$ 。工商用户包括1台商用燃气灶,用气量为 $5\text{m}^3/\text{h}$ 。天然气分布式能源系统的用气量为 $20\text{m}^3/\text{h}$ 。当天然气分布式能源系统运行时,掺氢机可正常运行;当天然气分布式能源系统停止时,终端用气量低于 $20\text{m}^3/\text{h}$ ,掺氢机无法正常运行,可能出现掺氢比与设定值不符的情况。因此,有必要设置缓冲罐。

居民用户与工商用户的用气量范围为 $0\text{m}^3/\text{h}\sim 8.4\text{m}^3/\text{h}$ ,缓冲罐宜设置在高压实验段,水容积为 $2\text{m}^3$ 。通过监测缓冲罐内压力,控制掺氢机启停。当缓冲罐内压力 $\geq 4\text{MPa}$ 时,掺氢机暂停;当缓冲罐内压力 $\leq 3.5\text{MPa}$ 时,掺氢机启动。因此,掺氢机启停时间内,缓冲罐可提供 $10\text{m}^3$ 掺氢天然气,可供终端使用大于 $1\text{h}$ 。

### 3.4 实验平台工艺流程

综合以上分析,本论文设计的掺氢实验平台工艺流程如图4所示。

如图4所示,掺氢实验平台主要4大部分,分别是供气模块、掺混模块、实验模块以及用气模块。在供气模块,高压天然气和氢气经过调压稳压后分别通入掺混模块。在掺混模块内,两路气源在掺氢机中按设定比例进行掺混,掺氢机出口掺氢天然气进入缓冲罐内进行缓存。缓冲罐出口掺氢天然气进入实验模块,最后输送至用气模块。

实验平台主要具有以下特点:

(1) 实验模块包含:高压实验管段( $4\text{MPa}$ )、次高压实验管段( $1.6\text{MPa}$ )以及中压实验管段( $0.2\text{MPa}$ )。

各实验管段间设有调压阀进行压力调节。

(2) 高压实验管段区设有1路管段,次高压实验管段区设有3路并联管段,中压实验管段区设有4路并联管段。各并联实验管段的两端均设有截止阀,用于控制实际进行实验的管段路数,以获得不同测试周期的样品。

(3) 各路实验管段的实验样品均以工装段串联,可将不同管龄、不同管材、不同壁厚的燃气管道、表具、阀门、连接件加工成样品,进行测试。

(4) 高压实验管段、次高压实验管段以及中压实验管段均设有并联的预留接口和旁路,预留接口用于后期流量增加或有大量测试样品时进行系统的扩建;旁路用于选择是否将掺氢天然气通入该实验管段进行实验。

(5) 在中压实验管段的出口设有调压阀和截止阀,调压阀用于调节压力以满足终端用户需求,截止阀用于将实验平台与终端用户进行隔离,以在事故情况下,保障终端用户稳定用气。

(6) 循环回路可将中压天然气增压至高压,并循环回高压实验管段的入口。通过该方式,提高实验管段的气体流量,以满足实验的气体流速与真实情况接近。同时,为了提供平台可测试的样品数,在循环回路上设有并联的测试管路,可以将需要测试的样品进行串联,当无需测试时,则通过原管路进行回流。

(7) 用气模块包括居民用户、工商用户以及天然气分布式能源固体氧化物燃料电池(SOFC)系统。可针对不同用气需求的终端场景开展掺氢天然气适应性研究。

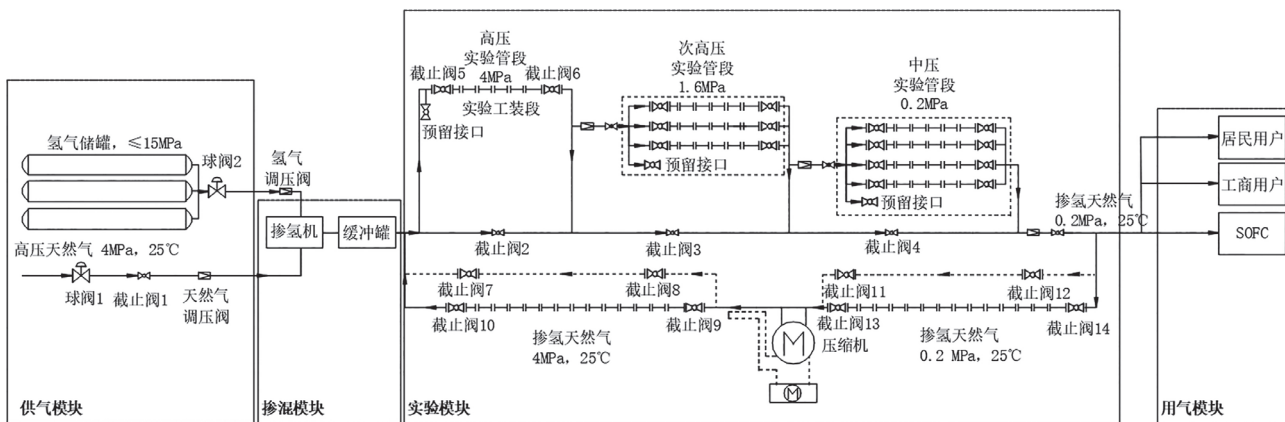


图4 掺氢实验平台工艺流程图

## 4 结论

本论文基于掺氢综合实验平台的测试需求，对其进行设计和优化，并得到以下结论：

(1) 所设计的实验平台包括供气模块、掺混模块、实验模块以及用气模块。

(2) 实验平台设有循环回路，经优化后，循环回路流量为1 000Nm<sup>3</sup>/h，高压实验管段设1条管路，次高压实验管段设3条并联管路，中压实验管段设4条并联管路时，系统流速与真实情况接近。

(3) 实验平台设有水容积为2m<sup>3</sup>的缓冲罐，可控制掺氢机出口流量不低于20Nm<sup>3</sup>/h，以保证掺氢比满足设定值，同时，在用气低谷时段，通过缓冲罐可满足1h以上的用气需求，避免掺氢机频繁启停。

(4) 实验平台具有显著的特点，功能性全面。其中，实验模块覆盖城镇燃气全部压力机制，包含高压、次高压、中压3种压力等级，可将不同管龄、不同管材、不同壁厚的燃气管道、表具、阀门、连接件加工成工装段进行测试。同时，通过合理的设计，实

验平台具有可灵活地选择运行的压力等级、实验管段数、测试周期、样品种类、终端用户类型等，同时具有一定的扩容性和安全性。

### 参考文献

- [1] 寇佳楠. 考虑天然气掺氢及需求响应的电-气综合能源系统经济调度[D]. 燕山大学, 2023.DOI:10.27440/d.cnki.gysdu.2022.000661.
- [2] 孟翔宇, 陈铭韵, 顾阿伦, 等. “双碳”目标下中国氢能发展战略[J]. 天然气工业, 2022, 42(04): 156-179.
- [3] 伍其兵, 张行, 张萌, 等. 基于知识图谱的掺氢天然气管输研究现状与演进趋势[J]. 油气储运, 2022, 41(12): 1380-1394.
- [4] 李玉星, 张睿, 刘翠伟, 等. 掺氢天然气管道典型管线钢氢脆行为[J]. 油气储运, 2022, 41(06): 732-742.
- [5] 张镨, 周理, 张佩颖, 等. 天然气管道掺氢对天然气分析计量的影响[J]. 天然气工业, 2023, 43(08): 135-145.
- [6] 周军, 李帅帅, 周轩, 等. 多气源天然气管网掺氢位置研究[J]. 可再生能源, 2023, 41(03): 291-297.

## 招聘启事

1. 招聘岗位和人数：编辑，1人，身体健康，原则上35周岁以下。

2. 学历和专业要求：全日制高校本科及以上学历，建筑环境与能源应用、油气储运、安全工程等工科相关专业。

3. 岗位要求：

- (1) 有扎实的理论基础和较强的文字运用能力；
- (2) 做事精细、严谨，有团队协作精神，沟通能力强；
- (3) 中共党员优先、具备出版专业中级职称优先。

4. 岗位职责：负责《城市燃气》论文编辑和日常编务工作。

5. 待遇：单位缴纳五险一金，薪酬面议。

请有意应聘者于2024年12月31日前将简历投递到以下邮箱：[csrq@chinagas.org.cn](mailto:csrq@chinagas.org.cn)

联系人：刘老师，010-59513339

地址：北京市海淀区彰化路33号

《城市燃气》杂志社有限公司

2024年10月