

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2025.11.006

民用燃气具掺氢试验平台设计方案研究

赵青松¹, 钱永刚², 吕 凯¹, 顾世强¹, 郝蕴华¹

1.北京市公用工程设计监理有限公司; 2.北京市煤气热力工程设计院有限公司

摘 要: 本文针对一种提供氢气、掺氢天然气和天然气3种介质的民用燃气具掺氢试验平台设计方案进行了分析, 研究了该民用燃气具掺氢试验平台采用的安全措施, 并探讨了民用燃气具掺氢试验平台爆炸危险区划分。

关键词: 掺氢试验平台; 掺氢民用燃气具; 氢气民用燃气具; 安全措施; 爆炸危险区

1 引言

在我国“双碳”目标背景下, 能源行业绿色转型已经启动, 采用氢能部分或全部代替城市燃气成了研究热点。管道运输作为长距离运输氢气的有效方式, 管道利用效率越高氢气运输价格越便宜^[1]。随着我国氢能需求量逐渐增加, 纯氢管道输氢将成为最高效、最经济的氢能储运方式。但我国纯氢管道建设尚在起步阶段, 还需要加强产业顶层设计和战略研究、完善总体规划、加快相关标准的制定、强化产业安全监管、搭建技术与运营管理体系等, 要渐进推动纯氢管道输氢的产业化发展^[2-3]。

我国天然气和城市燃气行业拥有较为完善的管道运输系统和终端使用设备, 将氢气掺混在天然气中可以实现大规模、低成本的运输并消纳风电或光伏发电生产的绿色氢气, 现阶段在储能、交通、供热、发电等行业均可以得到有效的运用。开展天然气掺氢方面的系统整体性研究, 可为氢气社会的发展探索并开启更多的路径^[4]。掺氢天然气技术是输送氢气最佳潜在

方式之一, 然而现今掺氢天然气标准不健全, 长距离运输也面临一些挑战^[5]。

国内有学者对天然气掺氢燃烧的可行性、掺氢对燃气灶及热水器燃烧性能、热效率以及污染物排放的影响进行研究, 指出掺氢体积比0%~20%的天然气可直接应用于现有燃气具^[6-8], 也有学者指出掺氢天然气替代传统天然气中氢气体积含量应低于23%的标准指标要求, 掺氢比例在此范围内不会引起回火方面的燃烧稳定性问题^[9]。罗子萱等^[10]研究表明, 家用燃气具在掺氢比例体积分数不高于20%时, 点火率、火焰稳定性与烟气排放性能全部合格, 烟气排放指标满足标准要求且未发现安全性问题, 并且随着氢气的体积分数增加, 烟气中CO与NO_x排放量有所降低。谢依桐等^[11]研究表明, 民用燃气热水器在使用掺氢天然气后, 热水器热负荷和排烟温度均略有下降, 热效率有所提高, CO排放量大幅降低, NO_x排放量略有减少。吴子天等^[12]研究表明, 全预混燃气热水器上较为安全的掺氢比例应小于40%; 掺氢后烟气中CO和NO_x排放大幅度降低。刘效洲等^[13]研究表明, 家用燃气灶掺入

[第一作者简介] 赵青松, 科技管理部副经理、氢能技术中心副主任, 高级工程师, 从事清洁能源规划设计、氢能工程规划设计工作。

体积分数15%的氢气后，CO排放的摩尔分数降低了约9%，燃烧区域平均温度基本保持稳定；刘仁江等^[14]研究表明，民用燃气灶使用掺氢天然气随着氢气比例的增加，燃烧产生的CO排放量呈现明显上升的趋势。

国内掺氢试验研究中未见有民用燃气具掺氢试验平台的报道，采用不同标准各自搭建试验设施，这也是导致试验数据差异较大的原因之一，因此非常有必要研究和设计适用于民用燃气具的掺氢试验平台。

2 民用燃气具掺氢试验平台掺氢比例上限确定

掺氢试验平台涉及到天然气和氢气两种物理与化学性质差异较大的气体，需要根据氢气和天然气安全性进行设计。国内已经有输送掺氢天然气掺氢试验平台设计方案研究，赵立前等^[15]设计了天然气长输管道掺氢试验平台，掺氢比例为6%~25%，可以验证氢气长输管道上零部件和管材的掺氢适应性；卢伟等^[16]设计城镇燃气管道掺氢试验平台，用于试验压力4MPa以下的城市燃气管道和阀门附件的掺氢适应性问题。但到目前还没有民用天然气掺氢燃气器具的掺氢试验平台的研究报道。

关于掺氢天然气的掺氢比例，有国内学者研究表明，天然气掺氢实验的氢气体积分数最高设定为24%较为合适，氢含量超过25%，混合物的爆炸范围将显著增加^[17]。在本方案中天然气掺氢实验平台暂定氢气体积分数最高为20%，待天然气掺氢机理和安全风险管理有新研究成果后，再提高掺氢比例。

3 民用燃气具掺氢试验平台气源供给

本掺氢试验平台主要涉及到2种实验气源（天然气和氢气）、1种实验安全吹扫气体源（氮气）。

3.1 天然气

本试验平台采用压力为0.2MPa的城市燃气中压B级压力管道供给天然气，天然气供应稳定，压力波动小，可为试验平台提供稳定的保证。

3.2 氢气

采用了两组16瓶氢气集装格供给氢气，集装格氢气最高压力是20MPa，最低保底压力是0.5MPa，每个氢气集装格可以供氢128m³，两组氢气集装格一用一

备，氢气流量或压力不足时，可以自动切换集装格供气。也可以为掺氢天然气燃气具提供氢气源，氢气在多数领域按危险化学品进行管理，涉氢管道设计应重点考虑管材选择。

3.3 氮气

采用了一组16瓶氮气集装格供气氮气，集装格氮气供气最高工作压力是20MPa，最低工作压力是0.5MPa，氮气集装格可以供给氮气125m³。在氮气压力低于1MPa即开始报警，低于0.5MPa试验停机。氮气主要作用有两个方面，一是为试验系统气动阀门提供阀门动作气体，二是为掺氢试验平台的天然气试验系统、掺氢天然气试验系统和氢气试验系统提供管路吹扫气体，吹扫管道内残余的燃料气体，确保掺氢试验人员和平台安全。尽管氮气属于惰性气体，但在将其管道与天然气、氢气管道连接时，除需防范泄漏导致的窒息风险外，还应考虑误操作可能带来的相互影响。

4 民用燃气具掺氢试验平台工艺设计

试验平台设计的核心是满足实验要求，同时满足安全要求。不同实验需求的安全关键不同，生物实验室的安全关键是生物安全，核实验室的安全关键是核物质的储存与防护。经风险分析，确定了本试验平台的安全关键是燃气泄漏导致的燃烧爆炸。

4.1 掺氢试验平台工艺流程设计

掺氢试验平台的设计工艺路线是采用天然气和氢气2种气体，实现天然气、掺氢天然气和纯氢3类不同类型能源介质燃气具燃烧试验。其中掺氢天然气燃料供给采用天然气和氢气混合制备，掺氢体积比例可调，掺氢试验平台工艺流程见图1所示。

掺氢试验平台按照不同的功能，可以细分为以下3种流程：1.天然气民用燃气具试验工艺流程；2.纯氢气民用燃气具试验工艺流程；3.掺氢天然气民用燃气具试验工艺流程。

本试验平台进行了试验功能需求调研，工艺设计采用了共用“一套系统”、模块化、可更换的流程系统，兼顾了微泄漏和大流量泄漏测试需求。

城市燃气管道天然气经过天然气调压阀1减压到3 000Pa，通过天然气流量计1计量天然气流量，然后通过天然气燃气表模块（内含多个安装位置）通入天

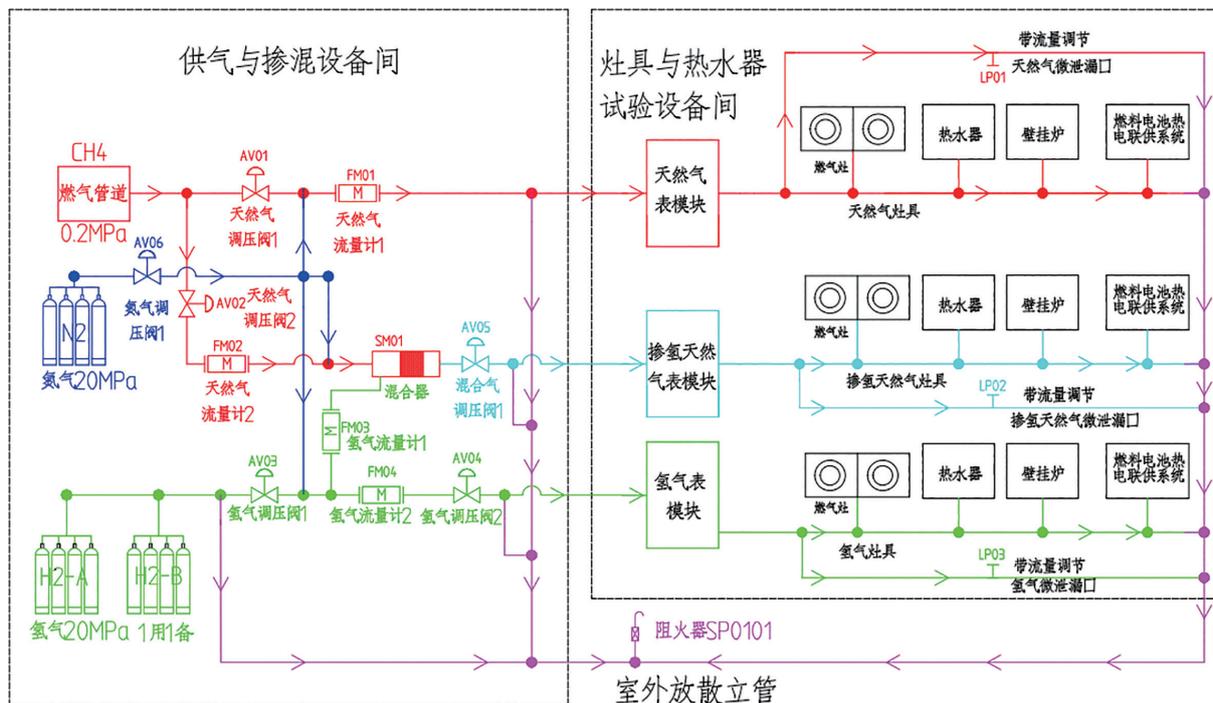


图1 掺氢试验平台工艺流程图

天然气试验平台，为各类型天然气灶、热水器、壁挂炉和燃料电池热电联供系统等提供燃料气体。在试验过程中可以切换天然气计量模块内燃气表，可以对比测试不同型号或厂家的天然气计量表，进行天然气计量表数据差异性分析。

本工艺流程设计了天然气泄漏模拟装置，在天然气试验平台充满天然气后远程开启开关，天然气通过天然气微泄漏口LP01向灶具与热水器试验设备间泄漏，用于测试燃气报警器灵敏度，也可以用来对比测试各个厂家燃气报警器之间的性能。

(1) 天然气微泄漏和大流量泄漏测试

天然气微泄漏是指在实验室面积 52m^2 ，净空高 3.5m 的封闭环境中， 72h 累计天然气泄漏量达到天然气报警器的阈值，即天然气泄漏 72h ，天然气在空气中的累计体积浓度达到 1% 。天然气大流量泄漏是指按照实验室面积 52m^2 ，实验室净空高 3.5m 的封闭环境中， 20min 内天然气在空气中的累计体积浓度达到 1% 。按照以上原则，天然气微泄漏测试流量为 $0.025\text{m}^3/\text{h}$ ，天然气大流量泄漏测试流量为 $5.5\text{m}^3/\text{h}$ 。

(2) 氢气微泄漏和大流量泄漏测试

氢气微泄漏是指在实验室面积 52m^2 ，净空高 3.5m 的封闭环境中， 72h 累计氢气泄漏量达到氢气报警器

的阈值，即氢气泄漏 72h ，氢气在空气中的累计体积浓度达到 0.4% 。氢气的大流量泄漏是指按照实验室面积 52m^2 ，实验室净空高 3.5m 的封闭环境中， 20min 内氢气泄漏达到氢气在空气中的累计体积浓度达到 1% 。按照以上原则，氢气微泄漏测试流量为 $0.01\text{m}^3/\text{h}$ ，氢气大流量泄漏测试流量为 $2.2\text{m}^3/\text{h}$ 。

4.2 掺氢试验平台安全设计

民用燃气具掺氢试验平台主要用于测试不同厂家和类型的燃气阀门、燃气表、燃气器具、燃气报警器以及氢气报警器等。该平台需频繁安装拆卸阀门与管道，因此燃气（天然气、氢气及其混合气）泄漏是关键风险源。本研究通过识别该平台的风险因素，并结合上述功能与操作特点，遵循“本质安全、多层次防御”的原则，从多个层面构建安全保障体系。

(1) 本质安全设计

本质安全是最根本、最有效的安全策略，旨在从源头上消除或减少危险。秉承以下原则：①最小化原则，仅储存和运行所需的最少氢气体量。实验平台的氢气储罐容量应尽可能小，以降低潜在风险。②充分考虑氢脆影响，所有与氢气接触的管道、阀门、密封件、仪器仪表都必须选用抗氢脆材料，如316L不锈钢。③密封材料选择在氢气环境下性能稳定的密封材

料,如聚四氟乙烯(PTFE)等,避免普通橡胶材料老化导致的泄漏。④优先选择不低于氢气爆炸混合物的级别和组别(HICT1)的电气设备。

(2) 工程控制措施

①泄漏控制与通风密闭排放。尽可能将实验系统(如燃烧器)置于封闭的通风柜内。实验区域必须设置强制通风系统,实验期间换气次数 ≥ 12 次/h。百叶窗、通风口设置在上方并考虑不易产生通风死角,使其无法在顶部积聚。

②远程操作和远程安全监控。除了燃气灶需要现场点火和调节火焰外,其他试验过程均为无人操作。热水器、壁挂炉、燃料电池热电联供系统、燃气阀门和燃气表的相关试验、气体的微泄等试验均为远程操作。试验过程中无人在灶具与热水器试验设备间,保证试验人员的人身安全。实验过程均有远程安全监控措施,可燃气体泄漏或火灾报警可以提供声光报警功能,紧急疏散实验人员。

③采用氮气作为阀门驱动气体,掺氢试验平台试验气体管路上所有的远程控制阀门均采用氮气驱动,在可燃气体管路附近不产生电火花,也不会发生阀门驱动气体和可燃气体混接的现象,减少火灾和爆炸发生的可能。所有的气动阀门均设计为常闭阀门,阀门在失去氮气压力后直接把气体密封在管道内,防止可燃气体泄漏。

④轻质屋顶设计和实验间泄爆墙设计。在灶具与热水器试验设备间的外侧墙面处设计有墙体重量不大于 60kg/m^2 轻质泄爆墙和轻质屋顶设计。当以上安全措施全部失效的条件下,爆炸的冲击波将轻质泄爆墙或轻质屋顶掀开,对灶具与热水器试验设备间进行泄压,确保试验人员、试验设备和试验建筑的安全。轻质泄爆墙和轻质屋顶设计泄爆面积按照氢气为爆炸介质来设计,面积为 80m^2 ,满足GB 55037-2022《建筑防火通用规范》的相关要求。

⑤氢气供给系统设计,氢气储氢容器采用双安全阀设计和附加爆破片设计,若储氢容器超压有两个独立的安全阀可以泄压保护氢气实验系统,当双安全阀失效时,还可以通过爆破片泄压保护氢气实验系统安全;氢气减压装置采用双级减压+安全连锁方式,系统发出氢气报警后立即切断氢气的供应,保障氢气实验系统安全。

(3) 设施布局与物理隔离

分区布置,将实验区、储氢区、控制室、辅助区进行物理隔离。控制室应位于安全区域,并采用防爆墙与实验区隔离。保持设备间足够的安全间距,以利于疏散和应急救援。

5 掺氢试验平台总平面图设计

民用掺氢天然气或民用氢气领域尚无可直接应用的国家标准,掺氢试验平台作为涉氢场所,是否直接遵循GB 50177-2005《氢气站设计规范》需要进行研究分析。2016年,住房和城乡建设部发布工程建设标准化改革的意见后,许多协会编制了团体标准。团体标准T/CAS 590-2022《天然气掺氢混气站技术规程》与本试验平台的应用场景更加贴切。另外,本掺氢试验平台也参考了JY/T 0616-2023《高等学校实验室消防安全管理规范》和JGJ 91-2019《科研建筑设计标准》相关规定。

本掺氢试验平台房间耐火等级为甲类二级单层建筑,平面图见图2所示。本掺氢试验平台按照功能分为供气与掺混设备间、灶具与热水器试验设备间、会议室/试验展示间、卫生间、强电与弱电机房/自动控制机房、设备站房(鼓风机)和设备库房等。

6 掺氢试验平台爆炸危险区域划分研究

掺氢试验平台涉及到氢气、掺氢天然气和天然气3种气体介质,掺氢试验平台是3种介质实验功能高度重合的装置。如何根据介质物性和功能科学地划分爆炸危险区是研究的重点。

按照常规要求,民用天然气灶具使用场合没有划分为爆炸危险场所。这3种气体介质根据标准有不同的爆炸危险区划分标准,而GB 50058-2014《爆炸危险环境电力装置设计规范》明确不适用于加味燃气。根据GB 50028-2006(2020年版)《城镇燃气设计规范》附录D和GB 50058-2014《爆炸危险环境电力装置设计规范》第3.2节相关规定,灶具与热水器试验设备间不属于爆炸危险环境。在本掺氢试验平台,调压和实验使用的供气与掺混设备间、放空管口应划分为爆炸危险环境2区。结合试验平台存在使用氢

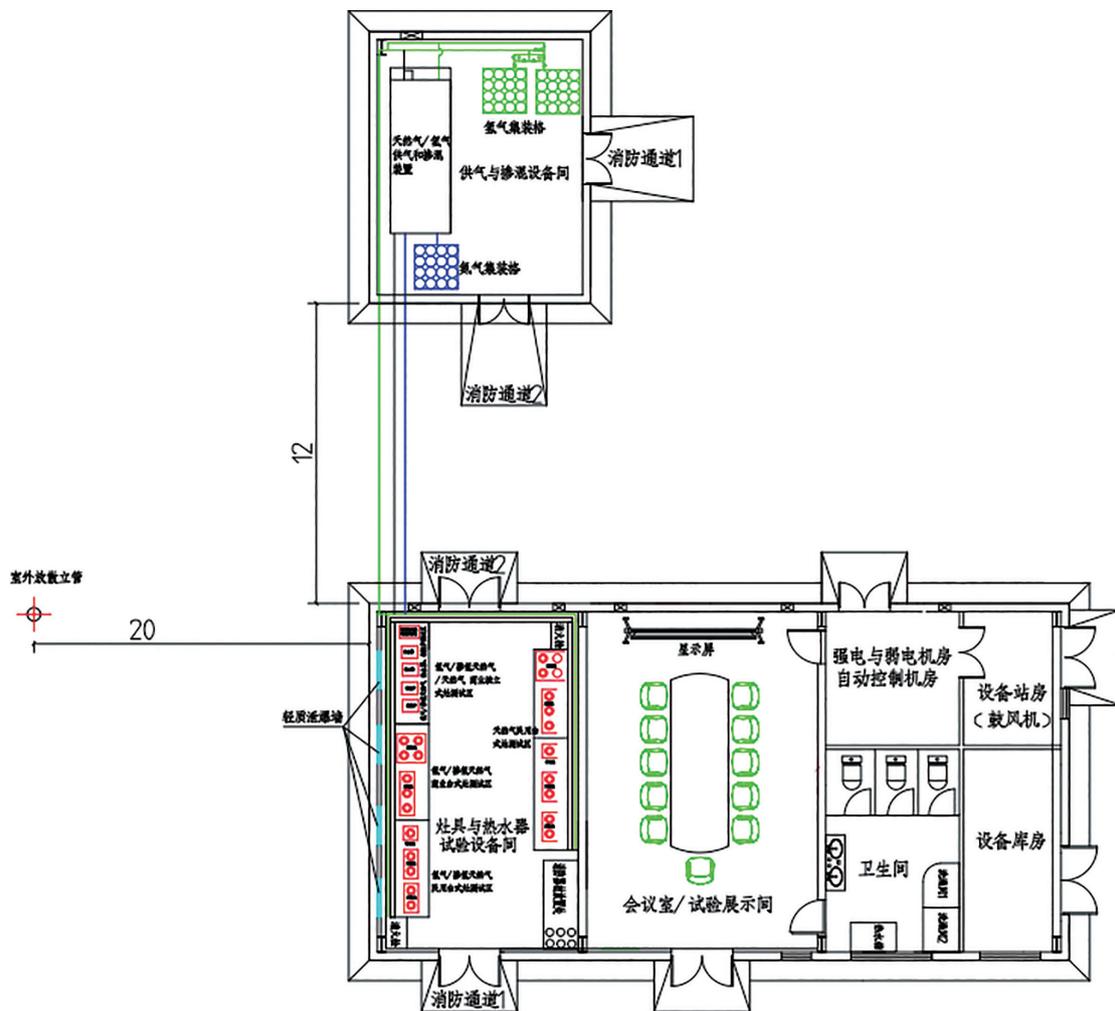


图2 掺氢试验平台总平面图设计

气做实验的功能需求,爆炸危险环境区域大小按照标准条款要求较严格的GB 50177-2005《氢气站设计规范》相关要求划分。灶具与热水器试验设备间根据GB 50058-2014相关规定可以划分为非爆炸危险环境,但该区域除常规天然气外,还涉及氢气或含氢天然气,与传统的民用天然气灶具使用场合存在巨大差异,应从严考虑划分为爆炸危险区域。会议室/实验展示间等安装有强排风系统、烟雾报警器、消防喷淋和火警报警器等,且与可燃介质的房间实现了物理隔离措施,按照一般实验室设计,可以划分为非爆炸危险环境。

在供气与掺混设备间和室外放散立管处设立爆炸危险环境区,供气与掺混设备间外墙4.5m以内区域和室外放散立管外壁直径为4.5m以内圆形区域为爆炸危险环境2区,试验过程中无关人员和产生火花的作业

不得进入。灶具与热水器试验设备间为危险区域。爆炸危险环境区和危险区域划分见图3所示。

7 结论

本方案设计一种氢气、掺氢天然气和天然气3种气体介质的民用燃气具掺氢试验平台,该民用燃气具掺氢试验平台可以测试燃气阀门、燃气仪表和燃气器具,可以同时实现以上设备对比测试试验,对天然气、氢气和掺氢天然气泄漏等功能做了必要的试验条件设置,可应用在燃气报警器、氢气报警器等设备的应用场景测试。民用燃气具掺氢试验平台设计过程采用了必要的安全措施设计,对适用标准进行了分析,探讨了爆炸危险区域划分,可对类似试验平台的建设提供借鉴。

