

# 城燃管道掺氢输送对终端燃具燃烧性能的影响及适配性改造

李效军 (云南中石油昆仑燃气有限公司, 云南 昆明 650000)

**摘要:** 本文开展城燃管道掺氢输送对终端燃具燃烧性能的影响及适配性改造的研究, 一开始就对比了氢气与天然气的物理特性, 说明了掺氢天然气的燃烧特点以及掺氢比例对燃烧过程的影响规律; 接着分析了往燃具中掺氢对居民燃具 (如常见的燃气灶、热水器) 和工业燃具 (如常用的锅炉、燃气轮机) 燃烧性能的影响及安全风险; 最后提出了终端燃具适配性改造的技术实施路径, 包含燃烧器结构改造工作、材料抗氢脆处理事宜、安全监测系统升级事项等, 为掺氢天然气在终端燃具的实际应用提供理论依据与技术支撑。

**关键词:** 掺氢输送; 终端燃具; 燃烧性能; 适配性改造

中图分类号: TK16

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2026) 004-0109-03

## Effect of hydrogen blending on combustion performance of terminal burner and adaptability transformation of urban gas pipeline

Li Xiaojun (Yunnan CNPC Kunlun Gas Co., Ltd. Kunming Yunnan 650000, China)

**Abstract:** This study investigates the combustion performance of hydrogen-blended natural gas in urban gas pipelines and the retrofitting of compatible terminal appliances. First, it compares the physical properties of hydrogen and natural gas, elucidates the combustion characteristics of hydrogen-blended natural gas, and analyzes the impact of hydrogen blending ratios on combustion processes. Subsequently, the study evaluates the effects of hydrogen blending on the combustion performance and safety risks of residential appliances (stoves, water heaters) and industrial equipment (boilers, gas turbines). Finally, it proposes technical solutions for retrofitting terminal appliances, including burner structural modifications, hydrogen embrittlement-resistant material treatments, and upgraded safety monitoring systems, thereby providing theoretical foundations and technical support for the application of hydrogen-blended natural gas in terminal appliances.

**Keywords:** hydrogen blending transportation; terminal burner; combustion performance; compatibility retrofitting

在全球能源转型以及“双碳”战略目标的大背景下, 由于氢能具有清洁的特点而受到人们的重视。城市燃气管网掺氢输送被看作是氢能大规模应用的重要途径之一, 既可以大幅度减少碳排放, 又可以促进能源结构调整升级。但是氢气和天然气的物理化学性质存在较大差别, 两者混合后会改变天然气的燃烧性能, 还会对终端燃具的运行稳定性、安全可靠、材料耐久性产生复杂的影响。如果不进行针对性的适配改造, 就会出现回火、脱焰、污染物超标排放、金属构件脆化断裂等安全问题, 造成安全隐患, 制约行业可持续发展。因此, 就这些方面展开系统的研究, 寻找科学可行的技术解决方案十分必要且紧迫。

### 1 掺氢天然气物性特征与燃烧理论

#### 1.1 氢气与天然气物性对比

氢气和甲烷 (天然气的主要成分) 在物理化学性质上存在明显的不同, 这些不同影响掺混型天然气 (HCNG) 的燃烧特性以及应用适应性。

从能量密度来说, 氢气的单质量热值为 142 MJ/kg, 远远高于甲烷的约 55.5 MJ/kg, 但是它的每立方米热值仅为 0.36 kWh/m<sup>3</sup>, 仅为甲烷的三分之一。流量相

同的时候使用氢气会降低整体能效, 需要通过调节燃具供气压力或者喷嘴的大小来保证热负荷的稳定<sup>[1]</sup>。

从密度参数上看, 氢气的密度为 0.0899 kg/m<sup>3</sup>, 是甲烷密度的八分之一, 扩散速率较高, 因此容易造成混合气体分布不均, 增大管道内局部浓度波动的风险以及火灾隐患。

#### 1.2 掺氢天然气燃烧特性

掺氢天然气的燃烧特性可利用层流燃烧速度、火焰稳定性及淬熄距离等参数进行理论描述。

层流燃烧速度属于燃料反应活性的第一个指标。氢的活跃燃烧性使它的层流燃烧速度 (2.5 - 3.5 m/s) 比甲烷 (0.37 m/s) 高得多, 并且随着掺氢比的增加呈现非线性增强的趋势。燃烧速度快可以缩短燃烧时间、提高热效率, 但是容易使火焰前沿靠近燃烧器表面, 引起回火。火焰稳定性, 由于氢的轻浮力效应 (密度小) 和高扩散性能, 火焰更容易被周围气流的扰动而脱离。在低负荷或者高流速工况下, 火焰离开燃烧器出口的概率就会增大。通过改善燃烧器结构来提高火焰的锚定力, 例如增加稳焰盘、增加旋流叶片等。

淬熄距离变短以后, 火焰蔓延到受限空间或者低

温接触面的能力会增强，传统燃具中用来防止回火的安全间隙设计就会失效。为了避免意外熄灭和局部过热的危险，必须重新调整核心部件的几何参数，精确校准，保证设备可靠工作。

### 1.3 掺氢比对燃烧过程的影响规律

掺氢比例对于燃烧性能的影响很大。当掺氢浓度为 10% 或者更低时，加入氢气之后混合气体的性质虽有改变，但仍以甲烷为主的燃烧特性<sup>[2]</sup>。火焰稳定性略微增强，由于完全氧化的程度提高，CO 排放量减少，但是 NO<sub>x</sub> 的生成量有所增加。该阶段设备调整改造的需求较小，只需要微调空气与燃料的配比就可以改善运行参数。当掺氢比率进入中等范围（10% - 30%）之后，由于氢分子活性高、淬熄距离短，在加快传热速率的同时加大了回火的风险，火焰温度分布不均匀的现象也会出现，局部高温区可能会引起材料发生力学失效问题。高扩散性造成混合气体在燃烧器出口处出现明显的分层情况，容易产生局部富氢区域，并且会大大加重燃烧的波动性。为此需要改进燃具燃烧器的设计方案，改善材料的耐温性能，完善安全监测系统。具体的措施可以采用多级喷嘴分散气流分布、选用抗氢脆不锈钢或者镍基合金材质、加入氢浓度在线检测装置来达到动态风险监测的功能。

## 2 掺氢对终端燃具燃烧性能的影响分析

### 2.1 居民燃具（燃气灶、热水器）

①热效率变化。氢气高燃烧速率导致混合气能量释放的特征也改变。燃气灶上氢气燃烧速度快，火焰传播时间短，减少了热量向周围环境散失，理论上讲可以提高热效率。但是氢气的低单位体积热值使燃气流量增大，为了保持相同的热负荷，如果空气与燃料的混合比例不能准确匹配，就会出现部分燃气未完全燃烧的情况，反而降低实际热效率<sup>[3]</sup>。对于热水器来说，加入氢气会使燃烧反应加快，使换热器表面温度迅速升高。水流调节滞后就容易造成局部过热或者热应力集中，缩短设备寿命。因此燃具需要改良喷嘴构造以及风门的设计来使氢气和空气混合充分，从而调节燃烧速度和热效率。

②污染物排放。氢气燃烧后的产物只有水，有实现净零碳排放的潜力。对 CO、NO<sub>x</sub> 生成机理要结合甲烷燃烧特性进行系统研究。研究表明高活性氢分子能促进甲烷完全氧化并降低 CO 浓度，但是当供氧不足时，快速反应容易造成局部缺氧，从而增加 CO 生成的风险。NO<sub>x</sub> 的生成主要受火焰温度场分布规律的影响，掺混少量氢气时，热传导增强可能会使 NO<sub>x</sub> 含量小幅上升；大量添加时，由于高温区域面积减小，NO<sub>x</sub> 排放量会降低。为了平衡这些矛盾，需要改进燃

烧装置的设计，采用分级配风或者烟气回流的方法，精确控制整体温区分布和氧气供给水平，达到污染物减排的目的并保证运行效率。

③燃烧稳定性。氢气着火点低、扩散性强，给燃烧稳定性提出更高的要求。燃气灶工作时氢燃料氧化快，火焰边缘靠近燃烧器壁面，有回火的危险。氢气分子流动性大，在出口处会出现分层现象，在某些地方会形成富集区，从而引起闪烁或者脱火等现象。对于热水器中使用预混式燃烧系统的设备来说，混合气的均匀性十分重要。掺入氢后，外部扰动放大的概率增大，燃烧脉冲或者熄灭故障发生的概率也增大<sup>[4]</sup>。研究表明，当氢含量达到一定程度以后，就必须采用改进燃烧器结构设计、减小喷嘴截面积、增加稳焰装置或者采用智能调节手段（动态调整供气压力）等方法来提高系统的可靠性和稳定性。

### 2.2 工业燃具（锅炉、燃气轮机）

#### 2.2.1 碳排放强度

工业燃具的碳排放强度同燃料的含碳量有关。氢气掺混技术可以部分替代甲烷，降低燃烧时二氧化碳的生成量，形成碳排放强度与掺氢比例近似的线性关系。在锅炉运行的情况下，氢气快速氧化的特性可以提高热效率，从而减少单位热量所引起的温室气体排放。燃气轮机方面利用混合氢能实现减排，用高温改善循环性能。但是需要考察极端工况下对材料耐久性的影响以及实际可行性。

#### 2.2.2 燃烧室温度场特点与材料服役年限关联探究

在高氢比条件下，由于氢的化学活性高、淬熄距离短，会明显改变燃烧室内部的热分布情况。当混合气迅速反应时，火焰最高温度局部升高，集中在燃烧器周围，使金属构件受热应力增大，氧化或者蠕变加快。氢分子密度小、扩散速度快，高温烟气回流到壁面表面时，局部热点增多。对于长期运行中可能出现的氢引起的裂缝、高温侵蚀等损伤类型，可以采用抗氢脆钢种、镍基合金或者陶瓷涂层等比较先进的耐蚀材料。通过采用改善设计的方法，如设置冷却回路或者使用浮动内衬结构，达到热量均衡分配的目的，进而提高设备的整体性能以及使用寿命。

### 2.3 安全风险评估

#### 2.3.1 氢脆

氢气很容易渗入金属晶格结构中，使材料韧性降低，称为“氢脆”现象。该现象在高压、高温或者应力集中处表现得更为明显。掺氢天然气输送系统中，氢脆效应会造成管壁微裂纹的扩展，增大泄漏风险。其防护措施应包含选用抗氢脆性较好的管材、进行焊后热处理、定期检测等综合性技术方案。

### 2.3.2 泄漏扩散

氢气密度小、扩散性大，一旦泄漏，很容易沿垂直方向快速上浮，在空间顶部集聚，增大爆炸风险。对于掺氢管道泄漏传播特性，主要针对阀门、法兰等接头处进行检查，改善通风系统的布置，防止气体局部积聚。

### 2.3.3 爆炸极限

氢气的爆炸极限区间（4% ~ 75%）比甲烷（5% ~ 15%）宽，危险浓度范围进一步扩大，最低点火能量降低，燃烧容易发生，释放能量大。燃气设备应当配齐完备的防护系统，采用防爆型驱动装置、安装实时监测模块、加装紧急切断装置等，进一步提升早期预警、应急处理的能力。

## 3 终端燃具适配性改造技术路径

### 3.1 燃烧器结构优化

#### 3.1.1 抗回火设计

传统的燃气燃烧器掺氢后火焰传播速度过快，容易回火，可采用多孔介质燃烧器或旋流燃烧器等新型结构来增强火焰稳定性。多孔介质燃烧器依靠陶瓷或者金属泡沫的多孔结构来分散燃气流速，增大火焰前锋和燃烧器表面的距离，多孔介质的蓄热作用可以减小局部温度梯度，抑制回火<sup>[5]</sup>。旋流燃烧器利用切向气流产生旋转火焰，依靠离心力拉长火焰路径，使火焰和燃烧器之间有更强的动态锚定能力，适合高掺氢比工况。分级燃烧技术、预混-扩散复合燃烧技术可以分阶段控制燃气和空气的混合比例，防止局部富氢区的出现，降低回火风险。

#### 3.1.2 喷嘴和流道的匹配

喷嘴、流道的匹配可以提高燃烧效率。氢气低密度强扩散的特点，喷嘴设计时既要考虑尺寸参数，也要考虑几何形状。喷嘴直径减小虽然可以提高燃气出口速度和湍动混合效果，但是必须保证足够的空气吸入能力，防止缺氧现象；采用拉瓦尔型（收敛-扩张式）流道可以利用流体力学原理改善流场分布，减少涡旋损失，优化燃烧稳定性；对于预混式装置，应该采用多级雾化或者螺旋叶片布局来实现燃料和氧化剂的分层掺混，防止高掺氢比例下早期点火的风险；扩散式系统应该扩大火焰筒开口面积，采用花瓣状喷口结构，延长反应时间，保证充分燃烧过程。

### 3.2 材料抗氢脆处理

氢气渗透特性容易造成金属材料氢脆，使燃具核心部件（管路、阀件、燃烧器）韧性降低甚至断裂。应该从材料选择和表面处理两方面建立综合防护体系来应对。

#### 3.2.1 金属材料选择

金属材料的选用要全面权衡强度与抗氢脆性能之

间的平衡关系。不锈钢 316L、304L 的铬元素形成的致密氧化膜具有很好的屏障作用，是掺氢设备的优良材料；镍基合金 Inconel625、HastelloyC-276 由于高镍含量、稳定的晶格结构，在极端工况下抗氢脆性能最好，被广泛应用于燃气轮机、工业锅炉等场合；钛合金虽然有轻量化的优势，但是高昂的成本限制了其大规模商业化应用的发展。

#### 3.2.2 表面涂层与热处理工艺

表面涂层以及热处理工艺可以提高材料的抗氢脆性能。PVD 或者 CVD 技术可以在金属表面形成纳米级的陶瓷涂层，比如氧化铝、氮化硅，这些涂层可以阻止氢气渗透，并且可以降低表面的应力集中，从而延长部件的使用寿命；渗氮、渗碳等表面硬化处理可以细化晶粒，缩减氢原子的扩散途径，提高表面硬度和耐磨性能；热处理工艺上，真空退火或者氢脆敏感部件的预应力去除处理（如振动时效）可以释放材料内部的残余应力，减小氢脆发生的几率；焊接部分采用低氢型焊材并进行焊后热处理，尤其是消氢处理，可以防止焊缝区域由于氢聚集而发生脆化。

## 4 结束语

城燃管道掺氢输送技术给能源领域带来了新的发展机遇，也给终端燃气器具带来了严峻的挑战。本文通过氢气和天然气物理特性的对比、掺混气体燃烧性能评价及不同掺混比例影响规律的研究，全面阐释了掺氢对居民用具和工业设备燃烧效能的影响，深入探究了掺氢可能存在的安全隐患因素，给出了一套包含燃烧器结构优化设计、材料抗氢脆改性处理和智能化监控系统在内的适应性改造方案，希望为解决掺氢引发的难题提供综合性的应对措施。

### 参考文献：

- [1] 余泽金, 裴福莉, 张行刚, 等. 掺氢天然气输送用 X52QH 钢级无缝钢管研制 [J]. 包钢科技, 2025, 51(04): 30-36.
- [2] 李红艳. 掺氢天然气管道风险控制策略与关键技术研究 [J]. 化工管理, 2025, (24): 108-110.
- [3] 张成龙, 李俊磊, 张永海, 等. 综合管廊中掺氢天然气泄漏安全性分析 [J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(2).
- [4] 朱红钧, 李佳男, 陈俊文, 等. 混氢天然气管道放空自燃过程数值模拟分析 [J]. 天然气工业, 2023, 43(9).
- [5] 彭善碧, 罗雪, 杨林. 掺氢天然气长输管道泄漏扩散规律数值模拟 [J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(6).

### 作者简介：

李效军（1977-），男，汉族，甘肃省天水市甘谷县人，本科学历，中级工程师。主要从事城镇燃气运营管理。