

天然气掺氢燃烧器安全性分析

李娟 王龙 龚昊 方明洋

中特检焱晶燃烧设备检测(北京)有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i6.16786

[摘要] 本文通过氢环境下材料的影响、掺氢天然气的燃料特性分析,根据现行燃烧器型式试验检测内容,探讨天然气掺氢燃烧对工业燃烧设备的安全性影响,为工业燃烧器产品质量安全的发展提供技术支撑。

[关键词] 天然气掺氢; 燃烧器; 安全性

中图分类号: TK16 文献标识码: A

Safety Analysis of Hydrogen-blended Natural Gas Combustion Burners

Juan Li Long Wang Hao Gong Mingyang Fang

China Special Equipment Yanjing Combustion Equipment Testing (Beijing) Co., Ltd.

[Abstract] This paper examines the impact of hydrogen-blended natural gas combustion on the safety of industrial combustion equipment by analyzing the effects of hydrogen on materials and the fuel characteristics of hydrogen-enriched natural gas, in accordance with current burner type testing procedures. The study aims to provide technical support for the development of product quality and safety in industrial burners.

[Key words] hydrogen-blended natural gas; burner; safety

前言

氢能利用可以缓解我国对化石能源的依赖,降低天然气对外依存度,有助于构建多能互补的能源体系。“双碳”目标下,氢能因环保、来源广、应用途径多等特点,备受期待。氢能应用途径多样,通常利用电化学和热化学反应,将其转化为电能、热能和动能,主要用于工业燃烧、能源转换和汽车动力等设备中。其中,工业燃烧设备主要有氢气热风炉、氢气烧嘴、氢燃料燃烧器、氢气炉等。

《中国氢能发展报告(2025)》中显示,截至2024年底,我国氢气产能超5000万吨/年,同比增长约1.6%。其中工业副产氢产能约1070万吨/年,产量约770万吨,同比增长约4.0%。在天然气中掺入一定比例的氢,形成“掺氢天然气”供工业锅炉燃烧利用,不仅可以降低碳排放,还能充分利用烟气的潜热提高锅炉热效率,同时“掺氢天然气”较“纯氢”更具大规模低成本推广使用的优势,掺氢技术的发展为氢能提供了规模化利用路径。一直以来,制约氢能大规模使用的原因一是没有找到廉价的制氢方法,二是安全储运问题存在技术难题。目前氢气大规模、长距离安全输送的技术瓶颈问题已取得突破性进展,同时《氢气储输管道用钢管》国家标准已通过审定,随着康保至曹妃甸项目、“西氢东送”工程等重大管道工程陆续建成,我国氢能产业必将迎来快速发展期。对比三大主流制氢工艺的经济性、成熟性、可靠性,目前易获取、成本低、规模大的工业副产氢作为燃烧器掺烧燃

料的应用场景比较多,运输方式主要是短距离管道运输,本文主要针对此应用场景开展讨论研究。

1 氢环境下对材料的影响

可用于氢气运输的管道材料有钢、铝、钛、碳纤维、玻璃钢等,而钢因强度高、价格低、易制造等优点成为最常用的材料,但金属管道在高温高压工况下易发生氢腐蚀现象,一直是材料行业重点解决的问题。

氢腐蚀主要有氢蚀、氢脆、氢鼓泡三种类型。氢蚀是在高温高压下,氢气与钢中的渗碳体发生反应生成甲烷,导致金属管道内表面的渗碳体含量减少,强度降低,生成的甲烷在金属内部的缺陷处积聚,产生裂纹。氢脆的发生机理目前尚未完全明确,但已有多种研究理论支持,氢脆产生的金属断裂发生速率很快,造成的危害性也极为严重。张国信^[1]通过研究氢在材料中的吸附和扩散方式、氢与材料中裂纹萌生和扩展的关系等方面,给出了金属材料的氢脆机理。氢鼓泡是由于氢气分子不断渗透扩散在金属材料表面的空隙、裂缝等缺陷处,导致金属材料表面发生局部变形,形成氢鼓泡。如果氢气管道因氢腐蚀产生裂纹,管道发生氢气泄漏概率就会增大。

2 掺氢天然气的燃烧特性

氢气比天然气低位发热量低,高温下化学性质活泼,易与很多物质发生反应,最小点火能量低,燃烧速度快,火焰温度高,扩散系数大,空气爆炸范围广。

天然气掺氢之后燃烧特性会发生改变,其沃泊指数、热值、燃烧速度等均发生变化,具有与天然气不同的燃烧特性。随着掺氢比例的提高,燃料低位发热值降低,燃料所需理论空气量、烟气量、碳排放量降低,但烟气中的水含量提升。林嘉^[2]等人以燃气锅炉为研究对象,利用FLUENT模拟软件研究发现掺氢比在0%~25%之间时,燃烧仍较为平稳。随着甲烷体积分数降低,掺氢比例提高,回流越来越明显。许艺鸣^[3]通过对掺氢甲烷预混合燃烧过程进行二维数值模拟研究发现,在平板式微型燃烧器内,氢气的加入提高了混合燃料可燃流速,提升了燃烧器外壁面的平均温度。

3 燃烧器安全性分析

目前,燃烧器相关国家标准有TSG 11《锅炉安全技术规程》和GB/T 36699《锅炉用液体和气体燃料燃烧器技术条件》,TSG 11《锅炉安全技术规程》中要求液(气)体燃料燃烧器必须满足规程中所要求的型式试验才能使用。GB/T 36699《锅炉用液体和气体燃料燃烧器技术条件》于2025年进行了修订,增加了氢气/天然气掺氢燃烧器要求,指出天然气掺混氢气含氢量小于23%时,燃烧器的设计可以遵守气体燃料燃烧器的通用要求。当天然气掺混氢气含氢量大于等于23%时,常规要求已经不能满足其安全性,设计的时候要充分考虑氢气阀组的高密封和防爆性。

燃烧器由燃料供给系统、供风系统、点火系统、燃烧系统、自动调节系统和安全与控制系统组成。燃烧器型式试验内容包括基本安全要求检查、安全性能试验和运行性能试验。根据天然气掺氢混合燃料的燃烧特性,依据国家标准要求内容,对比天然气工业燃烧器,对掺氢天然气工业燃烧器的安全性进行分析。

3.1 基本安全要求

基本安全检查包括对燃烧器的结构与设计、安全与控制装置、外壳防护等级等检查。对比纯天然气燃料,需重点考虑燃烧器材料选择、安全与控制装置设置等方面的安全。

3.1.1 选择适用氢环境下的材料

燃烧器中涉及和氢气有接触的部位都要考虑采用适用氢环境下的材料。首先从燃料供给端考虑,燃料通过供给系统进入燃烧器,供给系统除了管道之外,还由过滤器、燃气压力调节器、燃气流量调节装置和自动安全切断阀等部件组成。

一是氢气运输管道应选择适用氢环境的无缝钢管。一般情况下,企业是将氢气和天然气通过管道分别引入燃烧器,在氢气管道或富氢气管道中,通常由于氧气含量较低,爆炸风险不高。但是如果使用有焊缝的钢管,焊缝位置易被氢气聚集渗透,增加管道脆化断裂风险,郜源^[4]在文章中指出选择氢运输管道事,需考虑氢气对金属管道的危害机理,参考纳尔逊曲线,选择合适的氢气压力和流速,确保氢气管道选材的科学性和安全性。

二是氢供给系统管道上安全切断阀阀体和密封件应选择适用氢环境的材料。GB/T 36699《锅炉用液体和气体燃料燃烧器技术条件》在2025年最新修订版的征求意见稿中已经增加了关

于氢气/天然气掺氢燃烧器的要求内容,明确提出“燃气安全切断阀的密封件和阀体应采用适用氢气的材料”。

3.1.2 选择高密封性、防爆功能的氢燃料供给阀组和电气设备

供氢系统中的阀组要具有高密封性和防爆功能。阀门是氢燃料供给系统的核心组件,氢气分子小、易扩散,供氢系统压力高,氢气节流减压过程会产生热效应导致温度变化,阀门密封难度大。供氢系统中的氢气阀门有许多接头、密封结构、承压结构、节流机构以及运动单元,这些部位在长期使用过程中易发生损伤和破坏,是供氢系统安全性的核心。所以阀门的密封性级别要高,且有防爆性能。此外,供氢系统中还有大量的电磁执行器、控制器等电气设备,当设备位于封闭或半封闭空间时,要求高防爆性能。

3.1.3 设置回火监测安全装置

王天天等人^[5]研究发现对于燃气锅炉,当掺氢比在0~0.4范围内变化时,锅炉无明显回火风险。但随着天然气燃料掺氢比例的提高,产生回火的可能性增大,燃气管线应设置氢气专用阻火器,回火时阻止火焰传播,且设置位置应尽量靠近燃烧器本体的燃气供气连接部位。

3.2 安全性能试验

安全性能试验内容包括泄漏、点火测试、安全时间和点火故障测试、前吹扫时间与风量和故障测试、后吹扫时间测量、启动、启动热功率、重新启动、连锁保护和报警、点火运行和火焰稳定性、耐热性、电压改变、部件表面温度等试验。对比纯天然气燃料,重点考虑密封、火焰稳定性、部件表面温度等方面的安全。

3.2.1 燃烧器本体燃气管道部件采用可靠密封设计

氢气具有易燃易爆特性,即使微量泄漏也可能引发爆炸或火灾。因此,燃烧器本体上的燃气管路连接部件应采用可靠密封设计,以防止氢气泄漏。

3.2.2 降低火焰稳定性

很多学者对掺氢天然气燃烧的火焰稳定性做了研究,刘方等^[6]研究发现掺氢比越大,回火临界速度越大,回火倾向越大;Zhao等^[7]研究发现对于点火前已掺混氢气的燃烧器,保证点火瞬间不发生回火的最大掺氢比为25%;Choudhury等^[8]研究发现燃烧器掺氢比不高于10%时才能更好的保障燃烧稳定;朱宏丹等^[9]研究发现当掺氢比达到20%后,家用燃气灶会出现轻微熄火爆鸣。经上述文献调研可知,掺氢比越大,对燃烧器火焰的稳定性影响越大,为了确保产品安全,要慎重选择掺烧比,确保火焰稳定性。

3.2.3 提升部件表面温度

氢气的加入具有稳定火焰和提高混合燃料可燃流速的作用,并可提升燃烧器外壁面的平均温度,因此应注意部件表面温度的问题,燃烧器元器件实际工作温度应在其允许范围内,燃烧器部件可触及但不允许触碰部分的表面温度不高于环境温度加6℃。

3.3 运行性能试验

运行性能试验内容包括燃烧器输出热功率范围测试以及运行状态下的燃烧产物排放、自振动、噪声测试和工作曲线等试验。对比纯天然气燃料，重点考虑氮氧化物排放问题。

张子扬^[10]等人利用FLUENT 模拟软件研究掺氢天然气燃烧特性发现掺氢比增大氮氧化物排放增加，当掺氢比超过0.8时，氮氧化物排放量增加的幅度变大。掺氢气后燃烧区局部温度升高，加速空气中氮气与氧气的反应，导致热力型氮氧化物增多，出现“降碳增氮”的情况，需增加控制氮氧化物生成的技术。

4 总结

本文通过对氢环境下材料的影响、掺氢天然气燃烧特性分析，根据现行燃烧器型式试验检测内容，探讨天然气掺氢燃烧对工业燃烧设备的安全影响。主要结论如下：

(1) 氢气运输管道应选择适用氢环境的无缝钢管，燃气管道上安全切断阀体和密封件应选择适用氢环境的材料；选择高密封性、防爆功能的氢燃料供给阀组和电气设备；设置回火监测安全装置。

(2) 燃烧器本体上的燃气管道部件需采用可靠密封设计；掺氢比例增大会增加回火可能降低火焰稳定性，提升部件表面温度，同时增加氮氧化物生成。

迄今为止，国内外学者关于天然气掺氢对工业燃烧设备影响方面的研究并不多，本文根据现行燃烧器型式试验检测内容，探讨天然气掺氢燃烧对工业燃烧设备的安全影响，为燃烧器工业产品设计和产品质量安全的发展提供技术支撑。

参考文献

- [1] 张国信. 氢环境脆化损伤机理、影响因素及相关问题探讨[J]. 炼油技术与工程, 2024, 54(8): 1-7.
- [2] 林嘉, 刘远超, 张皓宇. 掺氢/天然气燃料的燃烧特性研究[J]. 北京石油化工学院学报, 2024, 32(02): 38-44.
- [3] 许艺鸣, 单春贤, 唐爱坤, 等. 微型燃烧器内掺氢甲烷燃烧特性的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2015, 519(18): 151-157.
- [4] 鄒源. 煤化工项目中氢气管道的选材研究[J]. 天津化工, 2025, 39(4): 118-120.
- [5] 王天天, 张海, 张扬, 等. 掺氢天然气在燃气锅炉和灶具中的回火风险分析[J]. 力学与实践, 2022, 44(3): 543-553.
- [6] 刘方, 杨宏伟, 邓付洁. 不同空气系数与掺氢比对10mm火孔火焰稳定性的影响[J]. 低碳与新能源, 2024, 43(7): 740-748.
- [7] ZHAO Y, MCDONELL V, SAMUELSEN S. Assessment of the combustion performance of a room furnace operating on pipeline natural gas mixed with simulated biogas or hydrogen[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(19): 11368-11379.
- [8] CHOUDHURY S, MCDONELL V G, SAMUELSEN S. Combustion performance of low-NOx and conventional storage water heaters operated on hydrogen enriched natural gas[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(3): 2405-2417.
- [9] 朱宏丹, 秦朝葵, 李晖, 等. 家用燃气灶燃用掺氢天然气的实验研究[J]. 煤气与热力, 2022, 42(10): 26-29.
- [10] 张子扬, 高跃, 丁战武, 等. 天然气掺氢燃烧特性分析[J]. 工业锅炉, 2025, 2(总第210期): 1-6.