

引文: 刘方, 杨宏伟, 邓付洁. 不同空气系数与掺氢比对 10 mm 火孔火焰稳定性的影响[J]. 油气储运, 2024, 43(7): 740-748.

LIU Fang, YANG Hongwei, DENG Fujie. Study on the influence of various air coefficients and hydrogen blending ratios on flame stability of 10 mm burner port[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(7): 740-748.

## 不同空气系数与掺氢比对 10 mm 火孔火焰稳定性的影响

刘方 杨宏伟 邓付洁

中海石油气电集团有限责任公司技术研发中心

**摘要:**【目的】天然气管道掺氢输送易导致终端用气设备在燃烧用火时发生脱火、回火现象,影响设备的火焰稳定性。为明确不同空气系数与掺氢比对典型终端用气设备的燃烧火焰稳定性的影响,通过仿真模拟与实验验证相结合的方法开展研究。【方法】以终端用气设备中的 10 mm 圆形单火孔为研究对象,通过仿真计算了一次空气系数为 0.40、0.60、0.65、0.70、0.80 条件下,掺氢比为 0.3%、5%、10% 的脱火工况,以及一次空气系数为 0.60、0.65、0.70、0.80 条件下,掺氢比为 0.3%、5%、10% 的回火工况;结合 GB/T 16411—2023《家用燃气燃烧器具的通用试验方法》,设计了天然气(纯甲烷)掺氢火焰稳定性测试方案进行实验验证。【结果】脱火工况的临界火孔气流速度模拟值与实测值平均相对误差为 5.73%,验证了脱火仿真模型的可靠性;回火工况的临界火孔气流速度模拟值与实测值平均相对误差为 11.22%,受实验测试条件影响,误差偏大;掺氢比越大,脱火极限越高,越不容易发生脱火现象,掺氢有利于防止脱火;掺氢比越大,回火极限越高,回火倾向越大。【结论】研究成果可为掺氢天然气的工业应用提供借鉴,在实验条件受限的前提下,对终端天然气用户进行掺氢适应性分析时,可借助仿真手段开展针对性分析。对于掺氢比较高的应用场景,建议开展针对性测试,确保终端用气设备的稳定运行。(图 13,表 6,参 22)

**关键词:** 圆形火孔; 掺氢比; 仿真模拟; 脱火; 回火

中图分类号: TE89

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2024)07-0740-09

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.07.003

## Study on the influence of various air coefficients and hydrogen blending ratios on flame stability of 10 mm burner port

LIU Fang, YANG Hongwei, DENG Fujie

Technology R&D Center, CNOOC Gas & Power Group Co. Ltd.

**Abstract:** 【Objective】 Hydrogen-enriched natural gas (HENG) delivered via pipeline transmission potentially induces flame lifting and flashback during combustion, adversely impacting flame stability at terminal gas equipment. This study aims to investigate the influence of various air coefficients and hydrogen blending ratios on the burning flame stability of typical terminal gas equipment through simulation and experimental verification. 【Methods】 Focusing on a 10 mm circular single burner port within terminal gas equipment, the simulation calculations were performed respectively under the flame lifting conditions with primary air coefficients of 0.40, 0.60, 0.65, 0.70, and 0.80, alongside hydrogen blending ratios of 0, 3%, 5%, and 10%, and the flashback conditions with primary air coefficients of 0.60, 0.65, 0.70, and 0.80, combined with hydrogen blending ratios of 0, 3%, 5%, and 10%. Subsequent experimental verification was conducted adhering to an experiment plan designed for testing the flame stability of natural gas (pure methane) doped with hydrogen, in alignment with GB/T 16411-2023, titled "Universal test methods of gas burning appliances for domestic use". 【Results】 The average relative error between the simulated and measured values of the critical gas flow rate at the port stood at 5.73% under the flame lifting scenario, which verified the reliability of the flame lifting simulation model. Conversely, this relative error rose to 11.22% under the flashback scenario, attributed to the influence of the experimental conditions. As the hydrogen blending ratio increased, a corresponding elevation in the flame lifting limit was noted, leading to a reduced probability of flame lifting. Consequently, hydrogen blending was recognized as advantageous for deterring flame lifting occurrences. Furthermore, with an increase in the hydrogen blending ratio, a similar rise was observed in the flashback limit, signifying an elevated tendency of flashback. 【Conclusion】 The study findings offer a

reference for the industrial applications of hydrogen-enriched natural gas. Simulation serves as a targeted analytical method to assess the adaptability of hydrogen blending for end users of natural gas under restricted experimental conditions. Furthermore, in application scenarios involving a high hydrogen blending ratio, it is advisable to conduct tailored tests to guarantee the stable performance of terminal gas equipment. (13 Figures, 6 Tables, 22 References)

**Key words:** circular burner port, hydrogen blending ratio, simulation, flame lifting, flashback

氢气因其热值高、燃烧产物对环境无污染等特点,已逐步在工业中实现广泛应用<sup>[1]</sup>。氢气的加入,会降低燃料的最小点火能<sup>[2]</sup>,还会提升燃料的火焰传播速度<sup>[3-5]</sup>与燃料的贫燃极限<sup>[6]</sup>,影响终端现有用气设备的火焰稳定性。因此,亟需开展终端用气设备对掺氢天然气的适应性评估。

Ziani 等<sup>[7]</sup>针对甲烷与氢气混合气体开展数值模拟,发现氢气的加入提高了燃烧火焰温度;戴鎏等<sup>[8]</sup>采用本生灯法测量了甲烷与氢气混合气体的火焰传播速度,发现掺氢比在 0~40% 范围内时,甲烷与氢气混合气体的层流火焰传播速度与氢气体积分数呈线性关系;Kumar 等<sup>[9]</sup>发现氢气、氢气、空气混合气体的火焰层流燃烧速度与热损失有关;佟灵茹等<sup>[10]</sup>利用 CHEMKIN 软件对均质充量压燃内燃机中不同掺氢比天然气的燃烧特性进行数值模拟,发现掺氢比会影响天然气的燃烧速率,且掺氢比为 10% 时可将着火时刻提前;Jang 等<sup>[11]</sup>分析了狭缝燃烧室中的火焰面变化,发现燃烧器圆盘间距越小,火焰面越不稳定,越容易产生胞状火焰;Guo 等<sup>[12]</sup>发现氢气的加入会减小火焰附着的轴向速度波动,增强火焰的附着性;Emadi 等<sup>[13]</sup>发现,在甲烷中参加体积分数为 20% 与 40% 的氢气时,火焰的吹熄极限提高了约 7% 与 35%;冯帅明等<sup>[14]</sup>发现对于家用大气式燃烧器,增大一次空气与燃料的混合量,能够改善大气式燃烧器的燃烧性能;Zhao 等<sup>[15]</sup>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<sup>[16]</sup>通过实验发现在保证燃烧稳定性的前提下,燃烧器可接受的掺氢比不高于 10%;朱宏丹等<sup>[17]</sup>通过实验验证了当掺氢比达到 20% 后,家用燃气灶会出现轻微熄火爆鸣。

基于上述研究,选取终端用气设备中的典型 10 mm 圆形单火孔燃烧器为研究对象,在不同一次空气系数与掺氢比条件下进行脱火、回火工况仿真模拟,得出不同一次空气系数与掺氢比下 10 mm 圆形单火孔火焰的稳定出口速度的极限范围,结合实验对仿真模拟结果的准确性进行验证,为掺氢天然气的工业应用推广提供借鉴。

## 1 火孔脱火、回火仿真

### 1.1 仿真建模

常用天然气燃气灶的工作原理为在固定供气压力条件下,燃气以一定速度从喷嘴处进入引射器,同时凭借喷出燃气的能量引入一定流量的空气,在混合管内均匀混合,然后在火孔处以一定速度喷出,再由点火器点燃。针对天然气终端用户中常见的 10 mm 圆形单火孔燃烧器结构,利用 ANSYS 中的 Fluent 模块开展仿真模拟,分析不同空气系数与掺氢比对 10 mm 圆形单火孔火焰稳定性的影响。

#### 1.1.1 物理模型

考虑到单火孔计算模型的整体结构具有对称性,为节约数值计算成本,在保证计算精度的前提下,设置二维轴对称模型(图 1)进行计算。为确保模拟过程包含所有的燃烧反应以及计算结果准确可靠,并保证网格数量的可接受度与计算效率,计算域长度为喷口直径长度的 20 倍,即壁面长度取 200 mm。

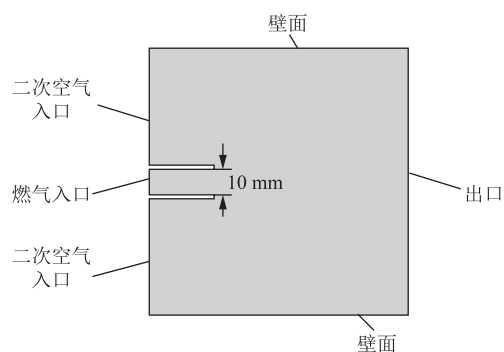


图 1 10 mm 圆形单火孔燃烧器的二维模型图

Fig. 1 Two-dimensional model of 10 mm circular single-port burner

#### 1.1.2 数学模型

为更好地得到天然气(纯甲烷)掺氢燃烧模拟仿真结果,模拟计算均遵循质量、动量、能量、组分守恒定律,其中,湍流模型为 ANSYS Fluent 中的 Realizable  $k-\epsilon$  模型<sup>[18-19]</sup>。为将化学动力学运用于湍流火焰计算分析中,选用有限速率模型下的 EDC (Eddy Dissipation Concept) 模型计算化学反应净生

成速率,并采用 24 步化学反应机理<sup>[20-21]</sup>进行燃烧仿真,该机理在掺氢天然气燃烧模拟中具有较高的准确度<sup>[22]</sup>。

### 1.1.3 网格划分

采用 ANSYS 中的 Mesh 模块对 10 mm 圆形单火孔模型进行网格划分。合理的网格数量对保证计算效率与计算精度具有重要意义。为确定数值模型最终需要的网格数量,选取  $8 \times 10^4$ 、 $15 \times 10^4$ 、 $20 \times 10^4$  的网格数量进行数值模拟。网格无关性分析图(图 2)表明,当网格数量为  $15 \times 10^4$  个时,模拟所得燃烧温度不再发生变化,即在这一网格数量下,模拟结果的实现与网格数量无关,此时最小网格尺寸为  $4 \times 10^{-4}$  m。

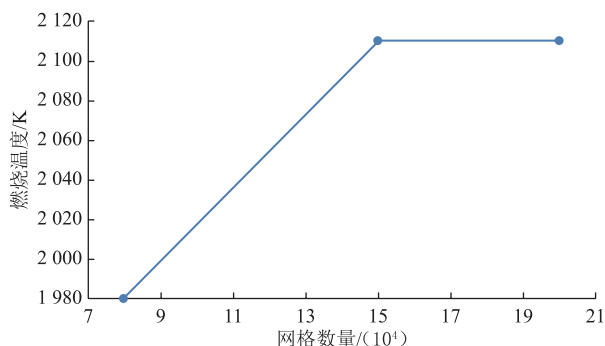


图 2 10 mm 圆形单火孔燃烧器模型的网格无关性分析图  
Fig. 2 Grid independence analysis of 10 mm circular single-port burner model

### 1.1.4 模型假设

由于燃烧过程的复杂性,在保证仿真计算精度的前提下,对掺氢燃烧作如下假设:

- 1) 由于火孔结构具备对称性,假定火孔结构与材料的物性为各向同性。
- 2) 由于天然气中乙烷与丙烷含量相对较少,且在 Fluent 数值模拟中,适用于天然气与甲烷的燃烧机理大多较为复杂,反应步数多,计算负担大,将掺氢天然气简化为纯甲烷与氢气进行模拟。
- 3) 假定甲烷/氢气与一次空气在进入火孔前已充分均匀混合。
- 4) 假定甲烷/氢气、空气及燃烧生成的高温烟气均为不可压缩的理想气体。
- 5) 由于反应物为气体,质量相对较低,忽略重力影响。

### 1.1.5 边界条件

设置研究对象为甲烷与氢气混合后的气体,混合气在燃烧过程中所需要的氧气由空气提供,仿真过程中不考虑空气中所含的少量二氧化碳与其他稀有气

体,即假定空气中氧气的体积分数为 21%,氮气的体积分数为 79%。

混合燃气从火孔处喷出,沿火孔从垂直于燃气灶壁面的方向流出。入口处边界条件设定为速度边界,模型四周边界为二次空气入口,根据燃气入口速度调整空气流速。空气温度设定为 300 K,确保燃烧区域的二次空气量充足,同时不影响燃烧火焰的正常流动。模型出口处边界条件设定为压力边界,相对压力值设定为 0。模拟时,设置燃气出口处的湍流强度为 3%,火孔的水力直径为圆形单火孔的喷口直径 10 mm。

### 1.1.6 模型求解

使用 Fluent 自带的 SIMPLEC 算法进行求解,所有项的离散格式均选取计算精度较高的二阶迎风格式。燃烧仿真时,使用 Fluent 中的 Patch 功能,在燃烧室内设置一高温点火源,将整个烟气域温度设置为 2 000 K。随着计算迭代,该温度对最终的计算结果并不产生影响,仅起到点火源作用。

模拟计算时,将能量方程收敛标准设定为  $10^{-6}$ ,其他变量收敛标准均设定为  $10^{-4}$ ,对变量残差值是否收敛进行监控;残差值收敛与否不作为计算收敛的唯一标准,仿真时监控烟气的出口温度与 CO 平均浓度,将监测参数不再随迭代的进行发生改变作为判定计算达到收敛的条件之一;与此同时,使用 Fluent 自带的 Flux 计算报告,计算流入与流出系统的质量、动量、能量差,将不平衡差低于 0.1% 作为另一计算达到收敛的判定条件。

采用逐步逼近的方法获取脱火、回火极限,计算收敛后,综合温度、 $\text{CH}_4$  质量分数及生成物  $\text{H}_2\text{O}$  质量分数的分布,进而对火焰是否发生脱火或回火进行判断。即首先在较低与较高火孔出口速度下进行模拟,得到收敛结果后,通过温度分布判断是否发生脱火、回火;若燃烧稳定,则在此基础上增大或降低速度进行模拟(步长为 0.3~0.5 m/s),直到燃烧不稳定即将发生脱火,即判定此时的速度为脱火极限;当火焰缩至火孔内,即判定此时的速度为回火极限。

## 1.2 脱火仿真

在开展脱火仿真时,设置一次空气系数分别为 0.40、0.60、0.65、0.70、0.80,掺氢比分别为 0、3%、5%、10%。根据不同一次空气系数与掺氢比设定入口的气体组分,得到 10 mm 圆形单火孔燃烧器脱火模拟工况(表 1)。

以工况 1 为例,一次空气系数为 0.40、掺氢比为



表 1 10 mm 圆形单火孔燃烧器的脱火模拟工况表  
Table 1 Simulation conditions of 10 mm circular single-port burner for flame lifting

工况	一次空气系数	掺氢比	工况	一次空气系数	掺氢比
1	0.40	10%	11	0.65	3%
2	0.40	5%	12	0.65	0
3	0.40	3%	13	0.70	10%
4	0.40	0	14	0.70	5%
5	0.60	10%	15	0.70	3%
6	0.60	5%	16	0.70	0
7	0.60	3%	17	0.80	10%
8	0.60	0	18	0.80	5%
9	0.65	10%	19	0.80	3%
10	0.65	5%	20	0.80	0

10%，得到不同火孔出口速度下燃烧器燃烧达到稳定后的温度、CH<sub>4</sub> 质量分数以及生成物 H<sub>2</sub>O 质量分数分布情况(图 3~图 5)。由温度分布、H<sub>2</sub>O 质量分数分布云图可知:当火孔出口速度由 7 m/s 增至 7.5 m/s 时,火孔出口处的火焰状蓝色区域长度增加,当火孔出口速度增至 8 m/s 时,已不可稳定燃烧,发生脱火现象。因此判定一次空气系数为 0.40、掺氢比为 10% 时,10 mm 圆形单火孔燃烧器燃烧的脱火临界速度为 8 m/s。

根据仿真计算确定的脱火临界速度,得到不同空气系数与掺氢比下 10 mm 圆形单火孔燃烧器中天然气燃烧的脱火临界速度曲线(图 6)。可见掺氢比越大,脱火临界速度越大,越不容易发生脱火现象,即掺氢有利于防止脱火。

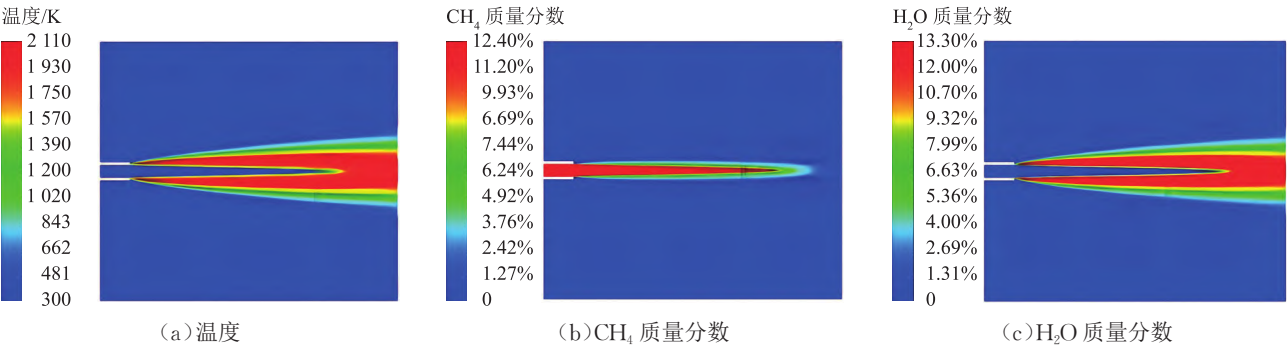


图 3 火孔出口速度为 7 m/s 的脱火仿真模拟结果云图  
Fig. 3 Contours of simulation results of flame lifting at port outlet rate of 7 m/s

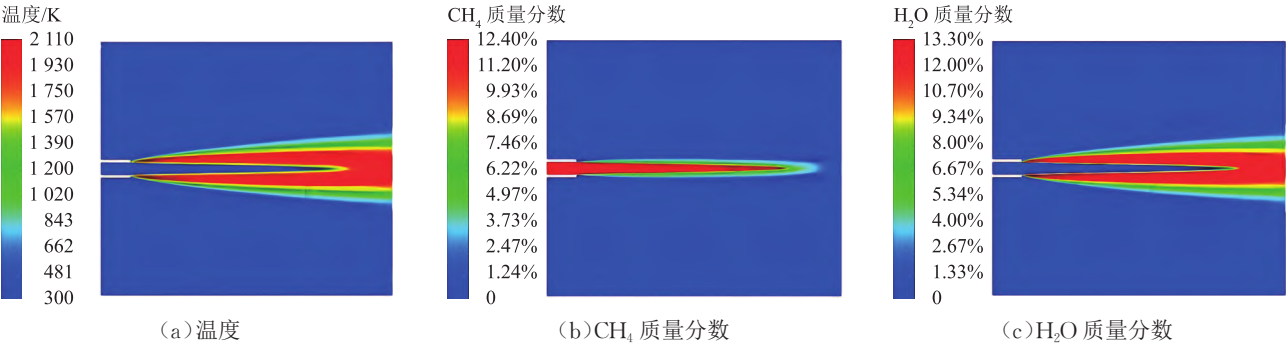


图 4 火孔出口速度为 7.5 m/s 的脱火仿真模拟结果云图  
Fig. 4 Contours of simulation results of flame lifting at port outlet rate of 7.5 m/s

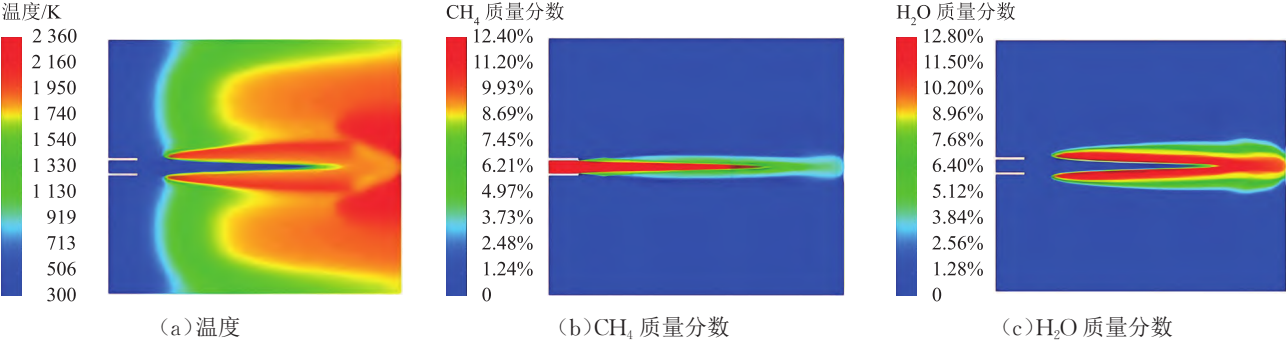


图 5 火孔出口速度为 8 m/s 的脱火仿真模拟结果云图  
Fig. 5 Contours of simulation results of flame lifting at port outlet rate of 8 m/s

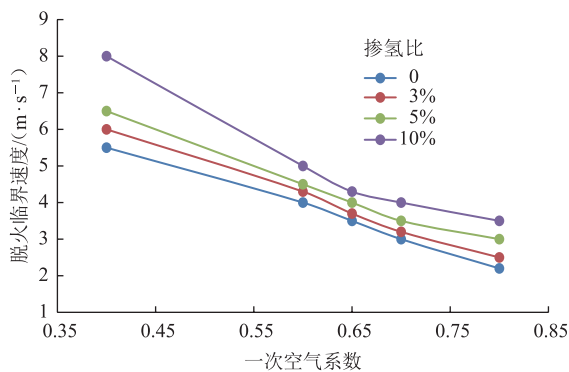


图 6 不同空气系数与掺氢比下 10 mm 圆形单火孔燃烧器中天然气燃烧的脱火临界速度曲线

Fig. 6 Critical rate curve of natural gas combustion under flame lifting scenario in 10 mm circular single-port burner with various air coefficients and hydrogen blending ratios

1.3 回火仿真

在开展回火仿真时,设置一次空气系数分别为 0.60、0.65、0.70、0.80,掺氢比分别为 0%、3%、5%、10%。根据不同一次空气系数及掺氢比设定入口的气体组分,得到 10 mm 圆形单火孔燃烧器的回火模拟工况(表 2)。

以工况 1 为例,一次空气系数为 0.80、掺氢比为 10%,得到不同火孔出口速度下燃烧器燃烧达到稳定后的温度、生成物 H<sub>2</sub>O 质量分数以及 CH<sub>4</sub> 质量分数分

表 2 10 mm 圆形单火孔燃烧器的回火模拟工况表

Table 2 Simulation conditions of 10 mm circular single-port burner for flashback

工况	一次空气系数	掺氢比	工况	一次空气系数	掺氢比
1	0.80	10%	9	0.65	10%
2	0.80	5%	10	0.65	5%
3	0.80	3%	11	0.65	3%
4	0.80	0	12	0.65	0
5	0.70	10%	13	0.60	10%
6	0.70	5%	14	0.60	5%
7	0.70	3%	15	0.60	3%
8	0.70	0	16	0.60	0

布情况(图 7~图 9)。由 CH<sub>4</sub> 质量分数分布云图可见:随着火孔出口速度的减小,火孔处火焰状的红色区域长度缩短,当火孔出口速度减小至 0.145 m/s 时,红色区域长度已小于火孔长度,表明已完全回火。因此判定一次空气系数为 0.80、掺氢比为 10% 时,10 mm 圆形单火孔燃烧器燃烧的回火临界速度为 0.145 m/s。

根据仿真计算确定的回火临界速度,得到不同空气系数与掺氢比下 10 mm 圆形单火孔燃烧器中天然气燃烧的回火临界速度曲线(图 10)。可见掺氢比越大,回火临界速度越大,回火倾向越大。

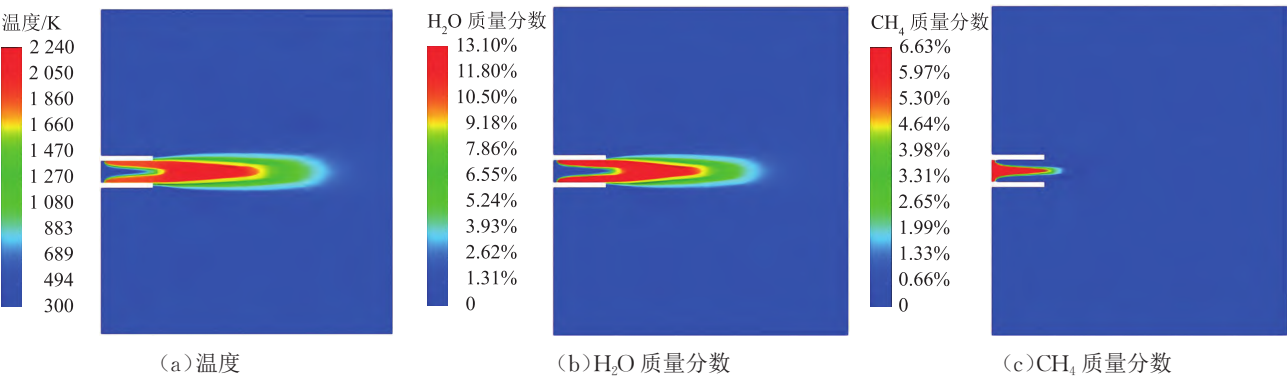


图 7 火孔出口速度为 0.18 m/s 的回火仿真模拟结果云图

Fig. 7 Contours of simulation results of flashback at port outlet rate of 0.18 m/s

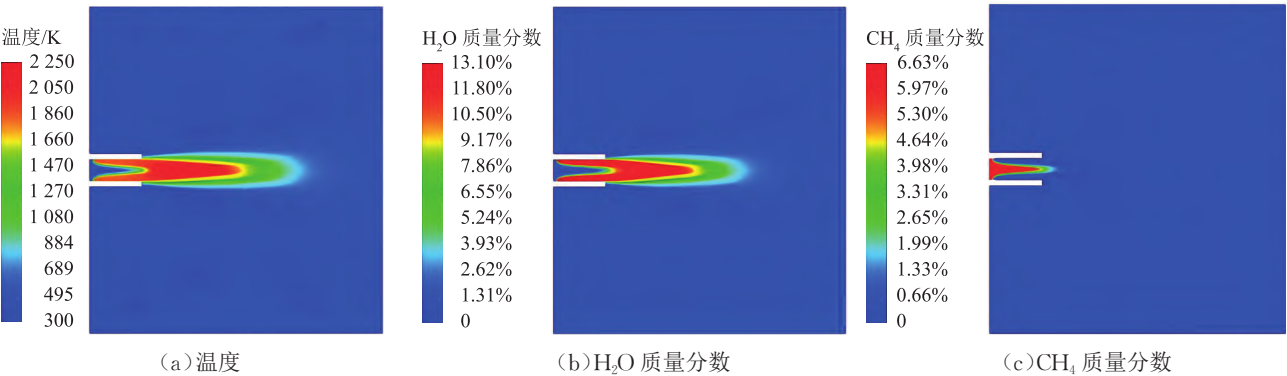


图 8 火孔出口速度为 0.16 m/s 的回火仿真模拟结果云图

Fig. 8 Contours of simulation results of flashback at port outlet rate of 0.16 m/s

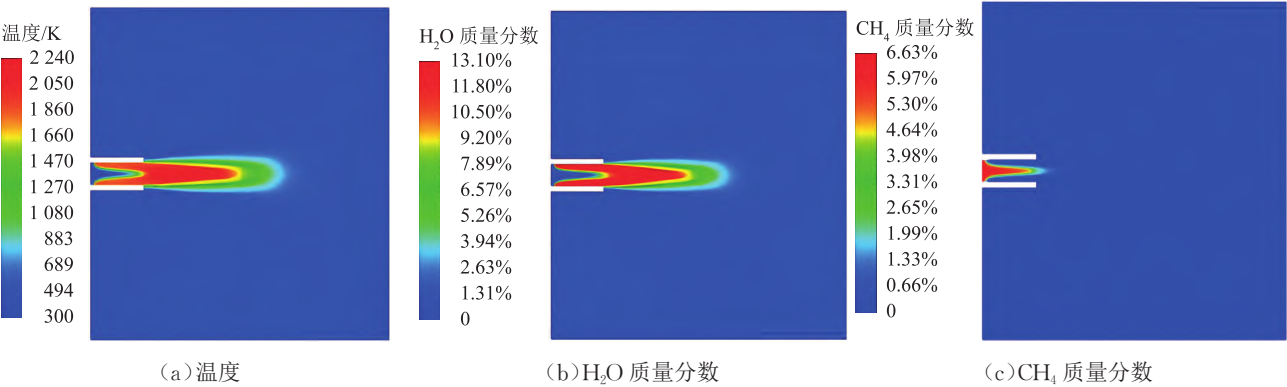


图 9 火孔出口速度为 0.145 m/s 的回火仿真模拟结果云图  
Fig. 9 Contours of simulation results of flashback at port outlet rate of 0.145 m/s

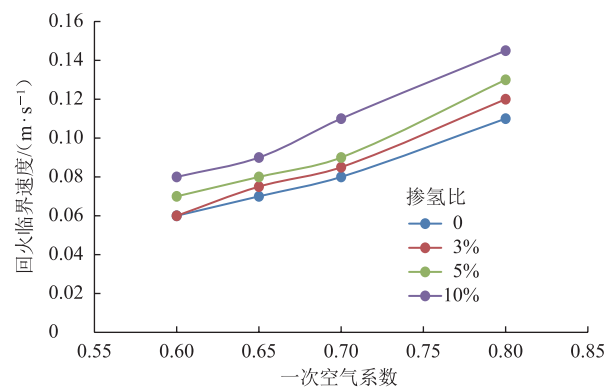


图 10 不同空气系数与掺氢比下 10 mm 圆形单火孔燃烧器中天然气燃烧的回火临界速度曲线  
Fig. 10 Critical rate curve of natural gas combustion under flashback scenario in 10 mm circular single-port burner with various air coefficients and hydrogen blending ratios

2 实验验证

2.1 测试方法

根据 GB/T 16411—2023《家用燃气燃烧器具的通用试验方法》相关规定,设计了天然气(纯甲烷)掺氢燃烧下火焰稳定性测试方案,建立了 10 mm 圆形单火孔燃烧器的燃烧实验系统(图 11)。实验系统中的混气

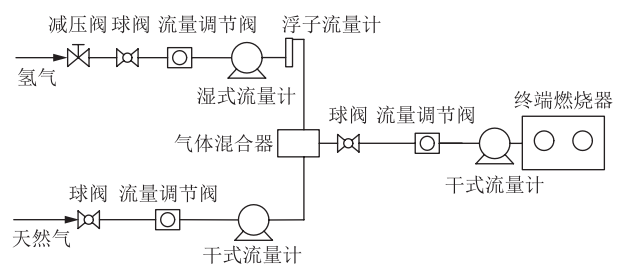


图 11 10 mm 圆形单火孔燃烧器的燃烧实验系统图  
Fig. 11 Combustion experimental setup of 10 mm circular single-port burner

方式为将天然气与氢气均匀混合后引入燃烧器燃烧。在测试过程中,采用湿式流量计实时采集流量数据,并借助浮子流量计实时监控流量,借助干式流量计对从气体混合器流出的掺氢天然气流量进行实时采集,最后于燃烧器中进行点火测试。

2.2 单火孔火焰稳定出口速度范围测试

为确保实验的安全性及可操作性,在每一测点处固定天然气流量与氢气流量,仅改变空气流量,测量掺氢天然气在 10 mm 圆形单火孔燃烧器上发生脱火、回火的气流参数(天然气流量、氢气流量、空气流量),得到 10 mm 圆形单火孔燃烧器的脱火、回火时的极限参数测试数据(表 3、表 4)。

表 3 10 mm 圆形单火孔燃烧器的脱火极限参数测试数据表  
Table 3 Experimental data of flame lifting limit parameters for 10 mm circular single-port burner

掺氢比	一次空气系数	流量/(L·min <sup>-1</sup> )			气流速度/(m·s <sup>-1</sup> )	热强度/(W·mm <sup>-2</sup> )
		天然气	氢气	空气		
3%	0.40	6.28	0.19	24.09	6.49	35.91
3%	0.60	2.73	0.08	15.74	3.94	15.60
3%	0.80	1.44	0.04	11.06	2.66	8.21
5%	0.40	6.73	0.35	25.97	7.02	38.70
5%	0.60	3.07	0.16	17.80	4.46	17.66
5%	0.80	1.57	0.08	12.15	2.93	9.02
10%	0.40	8.53	0.95	33.42	9.11	49.93
10%	0.60	3.56	0.40	20.88	5.27	20.86
10%	0.80	1.83	0.20	14.33	3.47	10.69

表 4 10 mm 圆形单火孔燃烧器的回火极限参数测试数据表  
Table 4 Experimental data of flashback limit parameters for 10 mm circular single-port burner

掺氢比	一次空气系数	流量/(L·min <sup>-1</sup> )			气流速度/(m·s <sup>-1</sup> )	热强度/(W·mm <sup>-2</sup> )
		天然气	氢气	空气		
3%	0.40	—	—	—	—	—
3%	0.60	—	—	—	—	—
3%	0.80	0.06	0.002	0.49	0.117	0.344
5%	0.40	—	—	—	—	—
5%	0.60	—	—	—	—	—
5%	0.80	0.09	0.005	0.67	0.162	0.519
10%	0.40	—	—	—	—	—
10%	0.60	—	—	—	—	—
10%	0.80	0.09	0.010	0.67	0.163	0.527

2.3 结果与讨论

2.3.1 实验结果

通过实验测试得到 10 mm 圆形单火孔的脱火极限与回火极限,测得天然气(纯甲烷)中掺氢比为 3%、5%、10%,一次空气系数为 0.40、0.60、0.80 共 9 组脱火工况的临界火孔气流速度(图 12),以及一次空气系数为 0.80 的 3 组回火工况的临界火孔气流速度(图 13)。

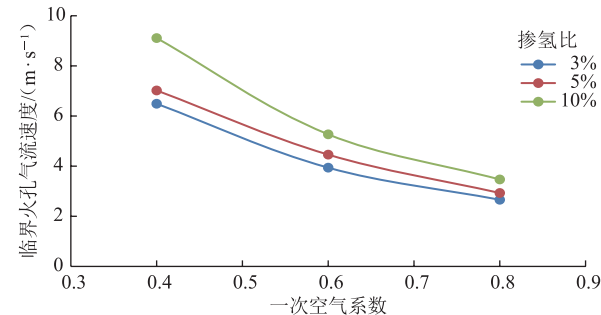


图 12 10 mm 圆形单火孔燃烧器脱火工况的临界火孔气流速度曲线

Fig. 12 Critical port gas flow rate curve of 10 mm circular single-port burner under flame lifting scenario

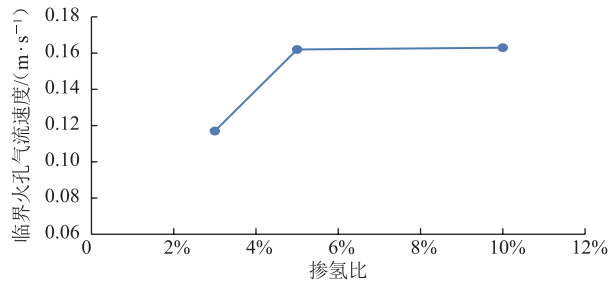


图 13 一次空气系数为 0.80 时 10 mm 圆形单火孔燃烧器回火工况的临界火孔气流速度曲线

Fig. 13 Critical port gas flow rate curve of 10 mm circular single-port burner under flashback scenario with primary air coefficient of 0.80

实验发现,氢气的加入可提高脱火临界速度,有利于防止脱火;氢气的加入可提高回火临界速度,不利于防止回火,但影响不大,当一次空气系数为 0.40、0.60 时,混合气体处于可燃浓度范围以外,不会发生回火现象。

2.3.2 实验结果与仿真结果对比

通过仿真模拟得到一次空气系数为 0.40、0.60、

0.65、0.70、0.80,掺氢比为 0、3%、5%、10% 时的 20 种脱火工况,以及一次空气系数为 0.60、0.65、0.70、0.80,掺氢比为 0、3%、5%、10% 时的 16 种回火工况。结合实验测试结果,得到 10 mm 圆形单火孔燃烧器的脱火临界火孔气流速度的误差数据表(表 5),可见 10 mm 圆形单火孔燃烧器的脱火临界火孔气流速度模拟值与实测值的最大相对误差为 12.2%、平均相对误差为 5.73%,在工程误差范围内,验证了脱火仿真模型的可靠性。在一次空气系数为 0.80 时,得到 10 mm 圆形单火孔燃烧器的回火临界火孔气流速度的误差数据表(表 6),可见模拟值与实测值的最大相对误差为 19.96%、平均相对误差为 11.22%。

表 5 10 mm 圆形单火孔燃烧器的脱火临界火孔气流速度误差数据表  
Table 5 Error statistics of critical port gas flow rate of 10 mm circular single-port burner under flame lifting scenario

掺氢比	一次空气系数	火孔气流速度/(m·s <sup>-1</sup> )		相对误差	平均相对误差
		实测值	仿真值		
3%	0.40	6.49	6.00	7.6%	5.73%
5%	0.40	7.02	6.50	7.4%	
10%	0.40	9.11	8.00	12.2%	
3%	0.60	3.94	4.30	-9.1%	
5%	0.60	4.46	4.50	-0.9%	
10%	0.60	5.27	5.00	5.1%	
3%	0.80	2.66	2.50	6.0%	11.22%
5%	0.80	2.93	3.00	-2.4%	
10%	0.80	3.47	3.50	-0.9%	

表 6 10 mm 圆形单火孔燃烧器的回火临界火孔气流速度误差数据表  
Table 6 Error statistics of critical port gas flow rate of 10 mm circular single-port burner under flashback scenario

掺氢比	一次空气系数	火孔气流速度/(m·s <sup>-1</sup> )		相对误差	平均相对误差
		实测值	仿真值		
3%	0.80	0.117	0.120	2.40%	11.22%
5%		0.162	0.130	19.96%	
10%		0.163	0.145	11.30%	



10 mm 圆形单火孔燃烧器回火工况的临界火孔气流速度的模拟值与实测值最大相对误差为 19.96%, 平均相对误差为 11.22%, 误差偏大。分析其原因, 误差的产生与实验测试条件有关。一次空气系数较大, 实验时空燃比难以控制, 火焰状态不稳定, 同时实验过程受到人员操作、环境气流干扰的影响, 误差较大, 而模拟计算则不受此类因素影响, 导致模拟值与实测值的误差较大。

### 3 结论

以终端用气设备中的典型 10 mm 圆形单火孔燃烧器为研究对象, 通过仿真模拟与实验验证相结合的方式对不同一次空气系数与掺氢比下终端用气设备的火焰稳定性影响进行研究, 结论如下:

1) 在不同一次空气系数与掺氢比条件下, 掺氢比越大, 脱火临界速度越大, 脱火极限越高, 越不容易发生脱火现象, 掺氢有利于防止脱火; 掺氢比越大, 回火临界速度越大, 回火倾向越大。

2) 选取城市燃气脱火与回火实验常用的 10 mm 圆形单火孔燃烧器开展实验, 获得反映脱火、回火基本规律的实验结果。10 mm 圆形单火孔燃烧器脱火临界火孔气流速度模拟值与实测值的最大相对误差为 12.2%, 平均相对误差为 5.73%, 在工程误差范围内, 验证了脱火仿真模型的可靠性; 10 mm 圆形单火孔燃烧器在一次空气系数为 0.80 时, 回火临界火孔气流速度模拟值与实测值的最大相对误差为 19.96%, 平均相对误差为 11.22%。随着一次空气系数增大, 火焰状态越不稳定, 且实验过程会受到人员操作、环境气流干扰的影响, 而仿真过程不受此类因素影响, 导致模拟值与实测值误差偏大。

综上, 天然气管道掺氢输送(掺氢比不超过 10%) 对于终端用气设备(燃气轮机除外)燃烧性能的影响在可接受范围内, 对于管道掺氢输送的工业推广具有工程指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 黄明, 吴勇, 文习之, 刘文斌, 管延文. 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4416.2013.04.010.
- HUANG M, WU Y, WEN X Z, LIU W B, GUAN Y W.

Feasibility analysis of hydrogen transport in natural gas pipeline[J]. Gas & Heat, 2013, 33(4): 39-42.

- [2] MEHRA R K, DUAN H, JUKNELEVIČIUS R, MA F H, LI J Y. Progress in hydrogen enriched compressed natural gas (HCNG) internal combustion engines: comprehensive review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 80: 1458-1498. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.061.
- [3] HUANG Z H, ZHANG Y, ZENG K, LIU B, WANG Q, JIANG D M. Measurements of laminar burning velocities for natural gas-hydrogen-air mixtures[J]. Combustion and Flame, 2006, 146(1/2): 302-311. DOI: 10.1016/j.combustflame.2006.03.003.
- [4] DONG C, ZHOU Q L, ZHANG X G, ZHAO Q X, XU T M, HUI S. Experimental study on the laminar flame speed of hydrogen/natural gas/air mixtures[J]. Frontiers of Chemical Science and Engineering, 2010, 4(4): 417-422. DOI: 10.1007/s11705-010-0515-8.
- [5] HALTER F, CHAUVEAU C, DJEBAÏLI-CHAUMEIX N, GÖKALP I. Characterization of the effects of pressure and hydrogen concentration on laminar burning velocities of methane-hydrogen-air mixtures[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(1): 201-208. DOI: 10.1016/j.proci.2004.08.195.
- [6] 周俊杰, 徐国权, 张华俊. FLUENT 工程技术与实例分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 41-66.
- ZHOU J J, XU G Q, ZHANG H J. FLUENT engineering technology and case analysis[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010: 41-66.
- [7] ZIANI L, CHAKER A, CHETEHOUNA K, MALEK A, MAHMAH B. Numerical simulations of non-premixed turbulent combustion of CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> mixtures using the PDF approach[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(20): 8597-8603. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.11.104.
- [8] 戴镗, 王凯峰, 徐朴方, 胡贤忠. CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> 混合气在 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气氛下层流火焰传播速度的实验研究[J]. 冶金能源, 2020, 39(3): 29-32, 64. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1617.2020.03.007.
- DAI L, WANG K F, XU P F, HU X Z. Combustion characteristics of CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> premixed laminar flame in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmosphere by Bunsen lamp method[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2020, 39(3): 29-32, 64.
- [9] KUMAR P, MEYER T R. Experimental and modeling study of chemical-kinetics mechanisms for H<sub>2</sub>-NH<sub>3</sub>-air mixtures in laminar premixed jet flames[J]. Fuel, 2013, 108: 166-176. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.06.103.



- [10] 佟灵茹, 潘江如, 何龙, 何田, 张成. 掺氢比对天然气 HCCI 燃烧特性和排放的影响研究[J]. 低温与超导, 2020, 48(8): 101-106. DOI: 10.16711/j.1001-7100.2020.08.018.
- TONG L R, PAN J R, HE L, HE T, ZHANG C. Effect of hydrogen-doped ratio on combustion characteristics and emission of natural gas HCCI[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2020, 48(8): 101-106.
- [11] JANG H J, JANG G M, KIM N I. Unsteady propagation of premixed methane/propane flames in a mesoscale disk burner of variable-gaps[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(2): 1861-1868. DOI: 10.1016/j.proci.2018.06.112.
- [12] GUO S L, WANG J H, ZHANG W J, LIN B X, WU Y, YU S B, et al. Investigation on bluff-body and swirl stabilized flames near lean blowoff with PIV/PLIF measurements and LES modelling[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 160: 114021. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114021.
- [13] EMADI M, KARKOW D, SALAMEH T, GOHIL A, RATNER A. Flame structure changes resulting from hydrogen-enrichment and pressurization for low-swirl premixed methane-air flames[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(13): 10397-10404. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.04.017.
- [14] 冯帅明, 杜伟, 夏起, 陈晨, 高增梁. 掺氢天然气在家用燃烧器中的燃烧特性[J]. 过程工程学报, 2022, 22(7): 873-881. DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.221284.
- FENG S M, DU W, XIA Q, CHEN C, GAO Z L. Combustion characteristics of natural gas mixed with hydrogen in domestic burners[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2022, 22(7): 873-881.
- [15] 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. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.02.071.
- [16] CHOUDHURY S, MCDONELL V G, SAMUELSEN S. Combustion performance of low- $\text{NO}_x$  and conventional storage water heaters operated on hydrogen enriched natural gas[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(3): 2405-2417. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.11.043.
- [17] 朱宏丹, 秦朝葵, 李晖, 徐蔚春. 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. DOI: 10.13608/j.cnki.1000-4416.2022.10.019.
- ZHU H D, QIN C K, LI H, XU W C. Experimental study on domestic gas stove burning hydrogen-blended natural gas[J]. Gas & Heat, 2022, 42(10): 26-29.
- [18] CAX 技术联盟, 郑力铭. ANSYS Fluent 15.0 流体计算: 从入门到精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 228-270.
- CAX Technology Alliance, ZHENG L M. ANSYS Fluent 15.0 fluid computing | from beginner to proficient[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015: 228-270.
- [19] 王珂. 天然气掺氢燃烧特性研究[D]. 荆州: 长江大学, 2021.
- WANG K. Research on combustion characteristics of natural gas mixed with hydrogen[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2021.
- [20] 董清丽, 蒋勇, 邱榕. 基于浓度敏感性分析和遗传算法的甲烷燃烧机理简化与优化[J]. 火灾科学, 2014, 23(1): 41-49. DOI: 10.3969/j.issn.1004-5309.2014.01.07.
- DONG Q L, JIANG Y, QIU R. Reduction and optimization of methane combustion mechanism based on PCAS and genetic algorithm[J]. Fire Safety Science, 2014, 23(1): 41-49.
- [21] 朱红钧, 林元华, 谢龙汉. FLUENT 流体分析及仿真实用教程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010: 253-277.
- ZHU H J, LIN Y H, XIE L H. FLUENT fluid analysis and simulation practical tutorial[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2010: 253-277.
- [22] ZHAO Y, MCDONELL V, SAMUELSEN S. Experimental assessment of the combustion performance of an oven burner operated on pipeline natural gas mixed with hydrogen[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(47): 26049-26062. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.011.

(编辑: 祁梦瑶)

**基金项目:** 中国海洋石油集团有限公司科技项目“含氢天然气高压输送管道适用性研究”, CNOOC-KX 135 KXXM QD 2020-009.

**作者简介:** 刘方, 男, 1980 年生, 高级工程师, 2009 年硕士毕业于中国石油大学(华东)油气储运工程专业, 现主要从事天然气储运方向的研究工作。地址: 北京市朝阳区太阳宫南街 6 号院 C 座 911 室, 100028。电话: 010-84526512。Email: liufang9@cnooc.com.cn

- Received: 2023-06-21
- Revised: 2023-11-01
- Online: 2024-04-18

