

含氢天然气在家用天然气燃具上的燃烧性能测试

严荣松^{1,2} 高文学^{1,2} 张杨竣¹ 张建海¹

1. 国家燃气用具质量监督检验中心 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司

摘 要 面对当前比较严峻的大气污染形势,城市燃气及相关行业都应积极向着低碳化、多元化的燃气利用方向发展。可再生能源电解氢作为提高天然气中可再生能源占比水平的一种替代气源,已具备一定的物质条件和技术能力。为此,基于我国现有家用燃烧器具的燃烧稳定性与互换性理论,分析了含氢天然气作为城市燃气气源的最佳比例,并基于 12T 基准天然气测试验证了天然气中掺混氢气后对家用燃具能效的影响。研究结果表明:①因不同气源天然气的华白数与热值不同,可加入氢气含量也不同,为有效解决燃气的互换性问题,并考虑气源的普适性,确定天然气中掺入氢气含量应不大于 20%;②天然气中加入氢气后,由于热值的降低,在 12T 燃具上使用时会出现热工性能偏差的问题,但不会改变燃具在能效方面的表现,因此天然气中加入氢气在常规的天然气类家用燃具上可以直接使用,不存在明显改变燃具安全、节能和技术性能等既有状况的现象。

关键词 天然气 氢气 替代气源 家用燃具 掺混比例 热工性能 燃气互换 适应性 能效

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2018.02.016

Combustion performance tests of hydrogen-natural gas mixtures as fuels in domestic gas appliances

Yan Rongsong^{1,2}, Gao Wenxue^{1,2}, Zhang Yangjun¹ & Zhang Jianhai¹

(1. China Quality Supervising and Test Center For Gas Appliances, Tianjin 300384, China; 2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300074, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 38, ISSUE 2, pp.119-124, 2/25/2018. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Facing the present severe air pollution situation, the urban gas sector and all the relevant industries will have to actively turn to the trend of low-carbon and diversified gas utilization. The renewable electrolytic hydrogen, enhancing the level of natural gas in the alternative energy sources, will become a potential source for domestic gas appliances. In view of this, based on the combustion stability and gas interchangeability theories of domestic gas appliances, an analysis was made on the optimal proportion of the hydrogen-natural gas mixtures as desirable urban gas fuels, and the effects of such hydrogen blended with natural gas on the energy efficiency of appliances were also verified by the 12T reference gas test. The following conclusions were drawn. (1) Due to various Wobber indexes and different calorific values of variable gas sources, different hydrogen percentages will be necessarily blended, the maximum percent by volume of which should be no more than 20%. (2) The gas blended with such hydrogen, due to its lower calorific values, will cause the deviation of thermal performance of especially 12T reference appliances, the energy efficiency of which, however, will not be altered at all. In summary, such hydrogen-natural gas mixtures can be directly used as fuels in the conventionally-used domestic gas appliances, and no significant change has been found in gas safety, energy saving and technical performance by present.

Keywords: Natural gas; Hydrogen; Alternative gas source; Gas appliance; Mixing ratio; Thermal performance; Gas interchangeability; Adaptability; Energy efficiency

基金项目: 天津市科技计划项目“建筑燃气安全智慧终端关键技术及产品开发”(编号: 16YFZCSF00480)。

作者简介: 严荣松, 1982 年生, 高级工程师, 硕士; 主要从事燃气燃烧与安全利用方面的研究工作。地址: (300384) 天津市南开区华苑产业园区桂苑路 16 号。ORCID: 0000-0002-6664-5704。E-mail: yanrongsong_tj@126.com

随着风能和太阳能的增长为电解水制造可再生氢提供越来越多的剩余电力,以可再生氢作为提高天然气中可再生能源占比水平的一种新方式,已具备了一定的条件和技术能力。国外部分机构已先期进行了相关领域的研究,2002—2006 年欧洲委员会共同资助的第六框架项目 NaturalHy,致力于推动利用现有的天然气系统作为催化剂的氢气经济变革。NaturalHy 声明,向天然气中注入氢气可以使温室气体总排放量显著降低,是一种有效“绿色”天然气的手段^[1]。德国 DVGW 研究了天然气加氢在燃气输配系统各部件以及终端家用燃气具使用的问题。GasTerra、Stedin 和 KiWa 燃气在荷兰进行“阿默兰岛可持续发展”项目试点,通过低热格罗宁根天然气(G25)注入氢气的示范应用,积累关于混合气对荷兰燃气管网以及传统燃气具影响等方面的经验^[2]。

为适应《国家应对气候变化规划(2014—2020 年)》专项规划中提出的确保实现 2020 年碳排放强度比 2005 年下降 40%~45% 的预期目标,以及“十三五”规划提出的“实施优化产业结构、构建低碳能源体系,落实创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念”,我国城市燃气及其相关行业也应积极向低碳化、多元化的燃气利用方向发展。为此,笔者针对我国现有家用的燃烧器具,理论分析了氢气加入天然气对燃烧稳定性与互换性的影响,并基于 12T 基准天然气测试验证了天然气混氢气对家用燃气具能效的影响。

1 理论分析

1.1 氢气/天然气基本物性

影响燃烧的因素有许多,其中氢气与典型天然气(主要成分为甲烷)显著不同,其物理化学性质有很大的差别(表 1)。

表 1 氢气和甲烷物理化学性质对比表

参数	氢气	甲烷
低热值 (H_l) / (MJ · m ⁻³)	10.23	34.04
高热值 (H_g) / (MJ · m ⁻³)	12.07	37.77
相对密度 (d)	0.069 5	0.554 8
高华白数 (W_g) / (MJ · m ⁻³)	45.78	50.71
理论空气量 (V_0) / (m ³ · m ⁻³)	2.4	9.5

注:比较条件为 15℃, 101.325 kPa

由表 1 可知,氢气单位体积的热值(H)约为甲烷的 32%,相对密度(d)远低于甲烷,理论空气量

约为甲烷的 25%。作为评价性能的重要参数华白数(W),其值为甲烷的 90%。因此,加入了氢气的天然气若想作为城市气源直接在现有家用系统中应用,就不能无限量地直接掺混氢气,需要明确一定的比例^[3-4]。

1.2 基于现有气源的氢气含量确定

任何燃具都是按一定的燃气成分设计的。当燃气成分发生变化而导致其热值、密度和燃烧特性发生变化时,燃具燃烧器的热负荷、一次空气系数、燃烧稳定性、火焰结构等燃烧工况就会改变。当氢气加入到天然气中导致燃气成分发生变化时,燃具燃烧器的燃烧工况就会改变,从而影响燃具的性能,甚至导致原有的燃具不能正常工作。

根据燃气互换性的要求,当气源供给用户的燃气性质发生改变时,置换气必须和基准气具有互换性,否则就不能保证用户安全、满意和经济地用气^[5-7]。因此,将氢气加入天然气用作替代气源时,就必须考虑互换性问题或给出气质参数的波动范围。笔者将依据天然气的波动范围,给出氢气的最佳掺入比例。

天然气的供气质量在 GB 17820—2012《天然气》、GB 50028—2006《城镇燃气设计规范》和 GB/T 13611—2006《城镇燃气分类和基本特性》中都有具体的规定。GB 17820—2012《天然气》指出:“作为民用燃料的天然气,总硫和硫化氢含量应符合一类气或二类气的技术指标,一类天然气高位发热量不小于 36.0 MJ/m³,二类天然气高位发热量不小于 31.4 MJ/m³”。GB 50028—2006《城镇燃气设计规范》中对燃气质量要求为:①城镇燃气(应按基准气分类)的发热量和组分的波动应符合城镇燃气互换的要求;②城镇燃气偏离基准气的波动范围宜按现行的国家标准 GB/T 13611《城镇燃气分类和基本特性》的规定,并应适当留有余地^[8]。

我国城市燃气供应一般以 12T 天然气为主。在 2016 年修订 GB/T 13611—2006 时,除保留了 12T 天然气的高华白数范围为 45.66~54.77 MJ/m³ 的规定外,还明确了其高热值的范围为 31.97~43.57 MJ/m³,12T 天然气的基准气的高华白数为 50.72 MJ/m³、高热值为 37.78 MJ/m³。

相对于基准气的上限高华白数波动值为:

$$\Delta_1 = \frac{54.77 - 50.72}{50.72} \times 100\% = 7.98\%$$

相对于基准气的下限高华白数波动值为:

$$\Delta_2 = \frac{45.66 - 50.72}{50.72} \times 100\% = -9.97\%$$

即 12T 天然气的高华白数允许波动范围介于

-9.97% ~ +7.98%。

相对于基准气的上限高热值波动值为：

$$\Delta_1 = \frac{43.57 - 37.78}{37.78} \times 100\% = 15.33\%$$

相对于基准气的下限高热值波动值为：

$$\Delta_2 = \frac{31.97 - 37.78}{37.78} \times 100\% = -15.38\%$$

即 12T 天然气的高热值允许波动范围介于 -15.38% ~ +15.33%。

在氢气与天然气掺混后，气体组分的基本特性会发生变化，其热值、密度、相对密度和华白数都会迅速降低至 12T 天然气标准要求的下限。不同气源天然气可掺混氢气的最大比例，取决于该燃气的初始特性。汇总部分城市现有气源的气质情况，在 GB 13611—2006 所述 12T 气质波动范围选择热值、华白数较大的气源 1 种，热值、华白数较低的 1 种，中间气源 1 种，进行掺混比例的核算。如图 1 所示，城市现有气源在 12T 燃气范围内可分为 3 类：① H 类，主要气源为 LNG，包括大鹏湾 LNG、海南 LNG 和新疆 LNG 等；② L 类，主要有普光气田气、渤海气、东海平湖气等；③ M 类，包括 12T-0、陕甘宁气、塔里木气、广西北海气、忠武线气等。这其中以 M 类燃燃气源居多。选择 3 类中具有代表性的 12T-0、大鹏湾 LNG 和普光气田气为样本，绘制含有不同比例氢气的混合燃气的高华白数与高热值。

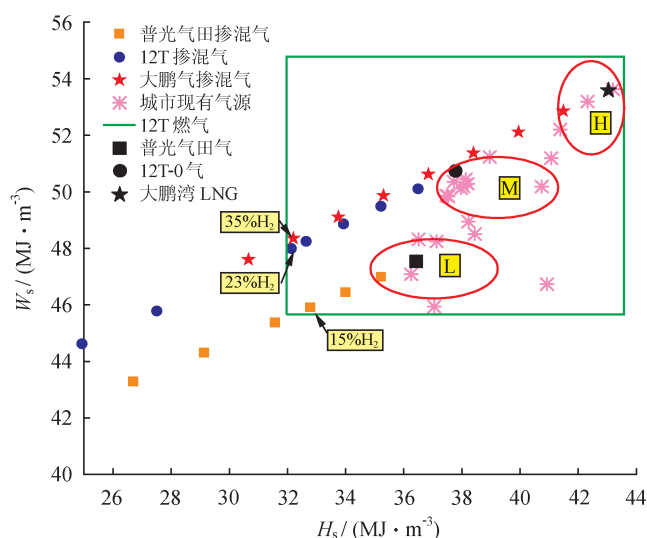


图 1 城市现有天然气分布及掺混氢气后华白数和热值变化情况图

当氢气与大鹏湾 LNG 掺混时，在满足 GB/T 13611—2006 对 12T 界限要求的情况下，可掺混氢气的最大比例约为 35%；当氢气与普光气田气掺混时，

因其初始特性参数较低，可掺混氢气最大比例约为 15%；当氢气与 12T 基准气掺混时，可掺混氢气的最大比例约为 23%。

由于不精确的燃烧器调节、空气系数、制造过程的变化及其他因素的额外影响，很难在所有实际应用过程中实现高掺混比例的“适用性”。为有效解决燃气的互换性问题，并考虑气源的普适性，确定天然气中掺入氢气含量应不大于 20%。

1.3 氢气加入对燃气特性参数影响

与燃气互换性相关的燃烧特性指数主要包括：高热值或低热值、高华白数或低华白数、燃烧势、相对密度等。在欧洲，除了比利时、法国等少数国家采用华白数、燃烧势外，英国等国家采用华白数、韦弗火焰速度指数、燃气当量组分（如当量丙烷和氮气等）等参数；其余国家一般采用热值、华白数等来表示燃气的互换性和质量控制指标。中国自 1987 年开始正式推出法国德尔布燃气互换性理论，并提出采用燃气华白数、燃烧势两个主要参考指标来分析和判断燃气的互换性^[9]。

当氢气与天然气掺混时，不超过 20% 含量的氢气对天然气燃烧特性指标的改变情况如图 2 所示。

随着氢气的加入，天然气的密度、热值和华白数等参数以及其燃烧特性均有所变化^[10-13]。在计量参比条件为 15 °C、101.325 kPa 时，对掺混不同比例氢气后甲烷的相对密度、热值和华白数等特性进行计算，由图 2 可以得：①互混后，混合气相对密度随着氢气含量的增加呈下降趋势，当氢气含量达到 20% 时，相对密度变化为 0.457 8，与甲烷相对密度同比下降 17.5%；②混合气的热值随着氢气含量增加呈下降趋势，当氢气含量达到 20% 时，混合气的高热值变化为 32.64 MJ/m³，与甲烷高热值同比下降 13.6%，混合气的低热值变化为 29.26 MJ/m³，与甲烷低热值同比下降 13.9%；③混合气的华白数随着氢气含量增加呈下降趋势，当氢气含量达到 20% 时，混合气的高华白数变为 48.25 MJ/m³，与甲烷高华白数同比下降 4.9%，混合气的低华白数变为 43.24 MJ/m³，与甲烷低华白数同比下降 5.3%。

2 测试结果与分析

2.1 燃烧稳定性分析

按照 GB 16410—2007《家用燃气灶具》、CJ/T 386—2012《集成灶》、GB 6932—2015《家用燃气快速

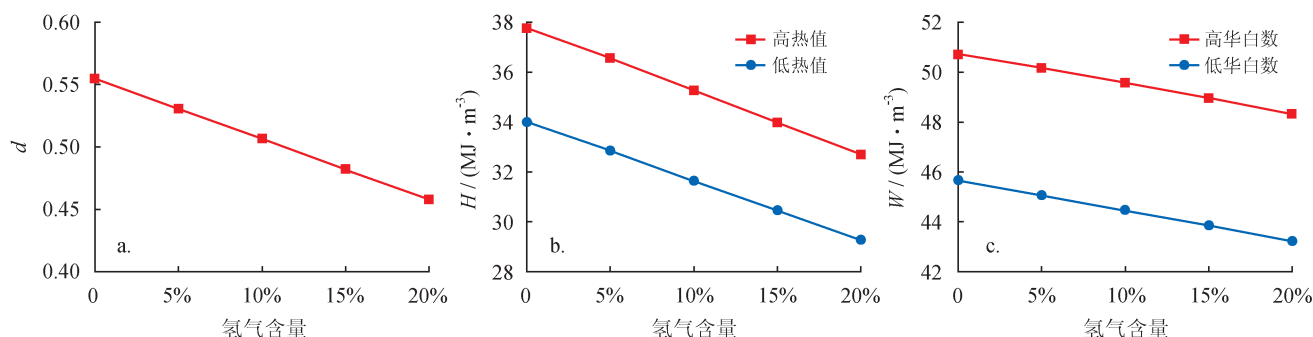


图2 混合气特性参数随氢气含量的变化图

热水器》和 GB 25034—2010《燃气采暖热水炉》^[14-16], 测试燃具在使用 12T 基准天然气时其安全适应性: 点火率、火焰稳定性等性能, 测试结果表明所选样满足标准要求; 在燃气具不做任何调整情况下, 进行不同氢气含量的混合气试验, 其点火率、火焰稳定性性能全部合格, 未见明显的回火与火焰不稳定现象, 说明所选含氢量范围可以在实际中应用, 且不会对燃具安全性构成影响。

2.2 负荷相对偏差分析

在使用含氢量不大于 20% 的 12T 基准天然气掺混气时, 灶具、热水器、采暖热水炉等家用燃具 (大气式燃具和全预混燃具) 上获得的实验结果见图 3。

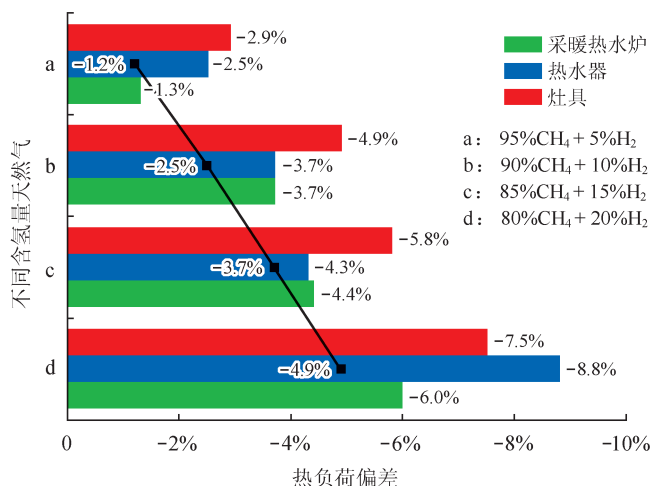


图3 家用燃具热负荷偏差图

测试结果表明, 随着氢气含量的增加、气源华白数的降低, 所测燃具的热负荷降低。家用燃气灶具的测试热负荷相对偏差最大为-7.5%, 热水器测试热负荷相对偏差最大为-8.8%, 采暖热水炉测试热负荷相对偏差最大为-6.0%。由图 3 可知, 当氢气含量在 20% 时, 燃具负荷比理论计算值将降低 4.9%。计算热负荷与实测热负荷偏差 1.9% ~ 3.9%。

2.3 热效率分析

按照 GB 16410—2007《家用燃气灶具》、CJ/T 386—2012《集成灶》的相关技术要求, 对红外灶、嵌入式灶、台式灶和集成灶等 4 类燃具进行热效率测试。测试结果显示: 在整个测试气氛下, 均满足 GB 16410—2007 中台式灶热效率大于等于 55%、嵌入式灶热效率大于等于 50% 的要求; 集成灶的热效率满足 CJ/T 386—2012 中热效率不小于 50% 的要求; 且 4 类燃具在不同含氢量的气氛下燃烧时满足 GB 30720—2014《家用燃气灶具能效限定值及能效等级》中有关台式灶、嵌入式灶和红外灶对各自能效 2 级要求 (图 4)。总体来看, 几种燃气灶具对气质的适应性较好, 随氢气含量的增大, 华白数降低, 但几类灶具样本对热效率的响应相对保持稳定, 变化不大。

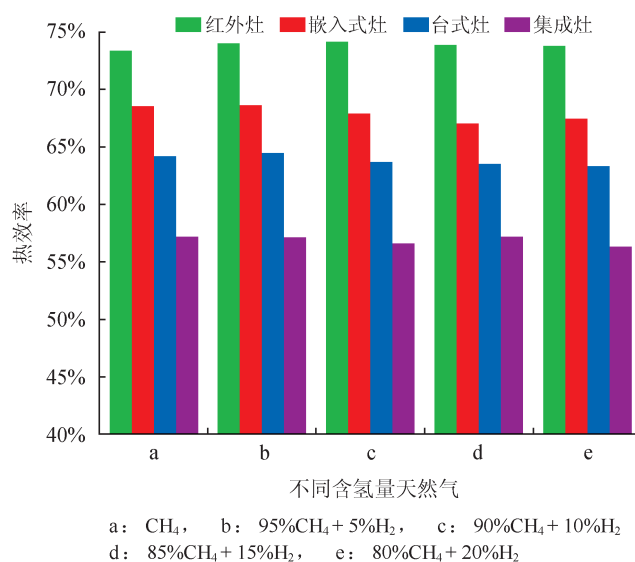


图4 不同氢气含量天然气灶具热效率测试值图

按照 GB 6932—2015《家用燃气快速热水器》的相关技术要求, 用标准方法对所选自然排气式和强制排气式两类快速热水器样本进行热效率测试。测试结果显示: 在整个测试气氛下, 快速热水器热效率

均满足 GB 6932—2015 中额定热负荷的热效率不小于 84% 的要求；且热水器在不同含氢量的气氛下燃烧时满足 GB 20665—2015《家用燃气快速热水器和燃气采暖热水炉能效限定值及能效等级》中有关热水器能效 2 级要求（图 5）。在保持热效率方面，不同类型的几种热水器对掺混气质的适应性较好。热效率随氢气含量的增大，相对保持稳定，与灶具的性能变化规律一致。

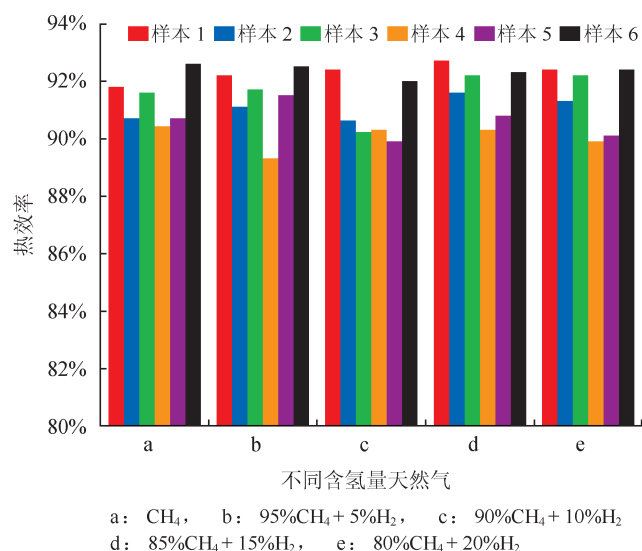


图5 不同氢气含量天然气快速热水器热效率测试值图

按照 GB 25034—2010《燃气采暖热水炉》的相关技术要求，用标准方法对所选全预混燃气采暖热水炉样本进行测试。测试结果显示，在保持热效率方面，不同类型的采暖热水炉对掺混气质的适应性较好。热效率随氢气含量的增大，相对保持稳定（图 6）。

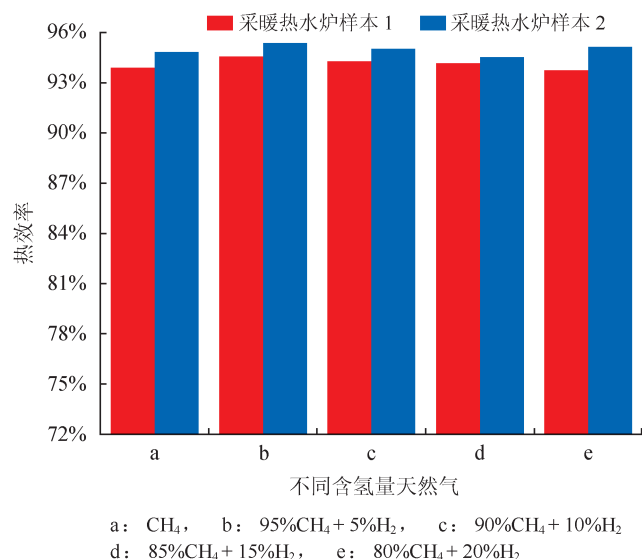


图6 不同氢气含量天然气采暖热水炉热效率测试值图

3 结论

基于家用燃具的燃烧互换性理论和技术标准，研究测试了家用燃具对掺混氢气天然气的安全适应性与热工性能适应性（热负荷、热效率等），得到以下结论：

1) 大鹏湾 LNG 的华白数值较高，属于高热城市天然气族，在满足 GB/T 13611—2006 对 12T 天然气热值与华白数界限要求的情况下，可掺混氢气的最大比例为 30%；普光气田气的华白数较低，可掺混氢气最大比例为 15%；在 12T 基准气中可掺混氢气的最大比例约为 23%，考虑到不精确的燃烧器调节、燃烧空气的温度、制造过程的变化及其他因素的额外影响，为有效解决燃气的互换性问题，并考虑气源的普适性，确定天然气中掺入氢气含量应不大于 20%。

2) 实验测试含氢量在 20% 以内的天然气时，由于掺氢天然气的热值、华白数均低于 12T 基准天然气的相应值，在 12T 燃具上使用时会出现热工性能偏差问题，但不改变燃具在能效方面的表现。因此在天然气中加入氢气，可以在常规的天然气类家用燃气具上直接应用，不存在明显改变燃气具安全、节能和技术性能等既有状况的现象。

参 考 文 献

- [1] Najjar YSH. Hydrogen safety: The road toward green technology[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(25): 10716-10728.
- [2] Kippers MJ, De Laat JC & Hermkens RJM. Pilot project on hydrogen injection in natural gas on Island of Ameland in the Netherlands[C]//International Gas Union Research Conference, 19-21 October 2011, Seoul, Korea.
- [3] 王小伍, 华贲. 液化天然气、管道天然气与煤制天然气的比较分析[J]. 化工学报, 2009, 60(增刊 1): 35-38.
Wang Xiaowu & Hua Ben. Comparison between liquefied natural gas, pipe natural gas and substitute natural gas[J]. Journal of the Chemical Industry and Engineering (China), 2009, 60(S1): 35-38.
- [4] 潘海宁, 严荣松, 赵自军. 煤制天然气进入城市燃气领域可行性研究[J]. 天然气化工 (C1 化学与化工), 2015(1): 65-70.
Pan Haining, Yan Rongsong & Zhao Zijun. Feasibility research on synthetic natural gas in city gas domain[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2015(1): 65-70.
- [5] NGC+ Interchangeability Work Group. White Paper on Natural Gas Interchangeability and Non-Combustion End Use[R/OL]. (2005-02-28)[2017-09-11]. <http://www.ccg-online.com/wp-content/uploads/2011/04/natural-gas-inter.pdf>.
- [6] 同济大学, 重庆建筑大学, 哈尔滨建筑大学, 北京建筑工程学院. 燃气燃烧与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.

- Tongji University, Chongqing Jianzhu University, Harbin University of Civil Engineering & Architecture, and Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture. Gas combustion and application [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000.
- [7] Briggs T. The combustion and interchangeability of natural gas on domestic burners[J]. Industrial Engineering Letters, 2014, 4(3): 67-87.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 城镇燃气分类和基本特性: GB/T 13611—2006[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2007.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Classification and essential property of city gas: GB/T 13611-2006[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2007.
- [9] 李猷嘉. 论液化天然气与管道天然气的互换性[J]. 城市燃气, 2009(6): 3-14.
- Li Youjia. The interchangeability between liquefied natural gas and pipeline natural gas[J]. ChengShi RanQi, 2009(6): 3-14.
- [10] Arrieta CE, García AM & Amell AA. Experimental study of the combustion of natural gas and high-hydrogen content syngases in a radiant porous media burner[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(17): 12669-12680.
- [11] Miao H, Lu L & Huang Z. Flammability limits of hydrogen-enriched natural gas[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(11): 6937-6947.
- [12] Ma F, Wang Y, Liu H, Li Y, Wang J & Zhao S. Experimental study on thermal efficiency and emission characteristics of a lean burn hydrogen enriched natural gas engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(18): 5067-5075.
- [13] 张勇, 黄佐华, 廖世勇, 王倩, 蒋德明. 天然气—氢气—空气混合气的层流燃烧速度测定[J]. 内燃机学报, 2006, 24(2): 97-103.
- Zhang Yong, Huang Zuohua, Liao Shiyong, Wang Qian & Jiang Deming. Measurements of laminar burning velocities for natural gas-hydrogen-air mixtures[J]. Transactions of CSICE, 2006, 24(2): 97-103.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 家用燃气灶具: GB 16410—2007[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Domestic gas cooking appliances: GB 16410-2007[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2008.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 家用燃气快速热水器: GB 6932—2015[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Domestic gas instantaneous water heater: GB 6932-2015[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2017.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 燃气采暖热水炉: GB 25034—2010[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2011.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Gas-fired heating and hot water combi-boilers: GB 25034-2010[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2011.

(修改回稿日期 2018-01-12 编辑 陈 嵩)

亚马尔 LNG 项目正式进入投资回收阶段

中石油参股的亚马尔 LNG 项目首船份额气已在西班牙顺利完成卸货。这艘船装载着 7.3×10^4 t LNG, 标志着中石油在北极圈内的第一个 LNG 项目正式进入投资回收阶段。

亚马尔 LNG 项目地处极寒地带, 全部建成后可年产 $1\,650 \times 10^4$ t LNG。项目投产初期生产稳定, 有一部分 LNG 现货, 中石油按持股比例可获取其中的 20%。根据统一部署, 中国石油国际事业有限公司(以下简称国际事业公司)与中油国际俄罗斯公司、赛宁公司提前近一年组成工作组, 进行销售前的各项准备工作。项目投产初期由于配套冰级船运力有限, 加之生产处于调试阶段导致货物到港时间不确定, 给销售工作带来极大的挑战。中油国际俄罗斯公司和赛宁公司与外方股东积极协调, 国际事业公司配合赛宁公司深入推进与项目方的商务谈判, 并充分发挥全球贸易运作的专长, 通过再装船运作突破了项目冰级船运力不足的瓶颈, 将首船份额气销往南欧高价市场, 获得较好收益。

(天工 摘编自中国石油新闻中心)