

氨燃料缓解能源安全及替代天然气的可行性分析

王月姑, 吴崇君, 郑淞生, 陈锦, 何嵩, 王兆林
(厦门大学 能源学院, 福建 厦门 361102)

摘要: 文章主要针对我国面临的能源安全问题及现阶段出现的北方地区“气荒”现象, 结合氨燃料储能密度高、燃烧清洁、热值较高、易储存运输、产业基础完善、用处广泛的特点以及厦门大学的锅炉及发电机掺氨燃烧运行成功的实验结果, 定量分析氨燃料可缓解能源安全问题的程度及解决“气荒”问题的规模与容量。分析结果表明: 引入氨能源体系可以有效优化中国的能源结构, 改善过度依赖能源进口的现状, 解决天然气短缺的问题。

关键词: 氨燃料; 天然气; 能源安全; 气荒

中图分类号: TK6 文献标志码: A 文章编号: 1671-5292(2019)07-0949-06

DOI:10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2019.07.001

0 引言

随着经济的快速增长, 我国的化石燃料消耗量逐年提高, 这不仅给环境带来了巨大的压力, 而且使我国的化石能源对外依存度明显增高。近年来, 虽然可再生能源发展迅速, 但是弃风、弃光现象加剧, 风电和光电的消纳问题有待解决^[1]。我国大部分的进口石油来源于政治环境不稳定的中东地区, 天然气管道运输安全性等方面仍面临着东北管道沿线恶劣的气候条件及途径国政治风险高等问题。目前, 我国能源进口多样化的趋势日趋明显, 进口通道布局逐渐形成, 但是进口来源地的政治风险较高, 进口通道风险依然存在。

国际石油市场受到供需状况、国家政策、地缘政治、突发事件等多种因素的影响, 石油价格的波动对我国的能源成本影响较大。只有本身具备稳定、安全的能源供应, 保证能源供应不受要挟时, 我国才可以充分地利用国外源源不断、丰富的天然气资源。“气荒”问题的产生关键不在于供气国具不具备供气的条件, 而在于其是否愿意持续供应。故笔者认为, 若打破我国天然气短缺、能源依靠进口的局面, “气荒”现象今后依然会发生, 并且待投入大量财力建设完毕东北中俄运输管道后, 我国能源供应受要挟的程度不亚于现在, 因此, 在能源供应受要挟的情况下, 我国该采取何种措施才是能否解决问题的关键。

本文提出将氨燃料作为我国石油、天然气的替代性能源, 并分别从汽油、柴油和天然气的替代容量两个方面阐述了氨燃料能够解决油气短缺和能源安全问题。本研究将为能源决策者就目前面临的“气荒”问题在能源供应体系的选择上提供一条解决途径, 为实现低碳减排、提高我国能源安全提供一个行之有效的办法。

1 氨燃料介绍

氨作为燃料最早出现在西方国家将其作为战时的备用和军用燃料。二战时期, 由于燃料来源被切断, 比利时政府将氨和煤油作为燃料为城市公共汽车提供动力。上世纪六十年代, 美国为了应对战时可能出现的石油供应中断危险, 开发了基于氨燃料的超音速战斗机。氨属于富氢载体, 所含氢元素的质量分数为 17.6%, 完全燃烧只产生氮气和水。随着科学技术的进步, 氨燃料的使用技术已经逐步成熟并正向民用领域大力推广。氨燃料能够实现高效清洁燃烧, 可广泛用于汽车发动机、燃气轮机、锅炉、燃料电池等, 因此, 氨燃料作为一种新型的二次能源具有巨大的发展潜力和市场前景。

氨燃料的特性: 易储存运输、体积能量密度高于氢能, 与汽油、柴油相当; 可以作为供氢载体为氢燃料电池提供车载氢源; 辛烷值较高, 抗爆性能好, 应用于高压缩比发动机时, 能够增大压缩比,

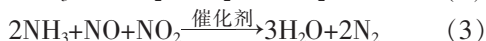
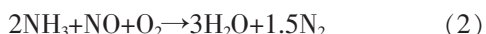
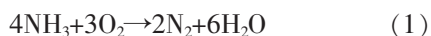
收稿日期: 2018-05-09。

基金项目: 福建省闽江学者经费项目(X170300101); 厦门大学能源学院-金融昌氨能源及动力联合研发中心经费项目(0290K8110075)。

通讯作者: 王兆林(1975-), 男, 博士, 教授, 研究方向为氨燃料、微重力流体与传热。E-mail: forestwang@xmu.edu.cn

从而将发动机的热效率提高至 60%以上;密度比空气小,如果运输过程中发生泄漏,会迅速消散,且极易溶于水^{[2],[3]}。

基于氨燃料的上述特性,国外学者对氨作为内燃机、燃气轮机的燃料及碱性燃料电池的氢源等进行了大量研究^{[4]-[6]}。国内有关氨燃料的研究较少,主要是将其作为发动机的燃料^{[7]-[8]}。但是,目前厦门大学已将氨燃料成功运用于锅炉及发电机,锅炉利用丙烷和氨进行混合燃烧,且氨掺烧比例高达 66%。氨燃料完全燃烧只产生氮气和水 [式(1)]。但是,在实际燃烧过程中,由于空燃比、燃烧温度分布不均匀等原因,氨燃料燃烧会产生部分 NO_x(主要由 NO 和 NO₂ 组成,且 NO₂ 所占比例较小,不足 NO 的 1%),可通过直接与氨反应处理氨燃料燃烧产生的 NO_x[式(2),(3)]^[9]。有研究表明,将氨燃料引入汽车尾气中能够将汽车尾气中的 NO 浓度从 550 mg/L 降低至 10 mg/L^[10]。与传统化石燃料相比,氨燃料燃烧尾气的处理不需要考虑 HC,PM,SO₂ 和 CO 等污染物的脱除,处理过程简单且费用更低。



2 氨燃料改善我国能源安全问题

能源属于战略商品,能源安全是影响国家政治和经济安全的重要因素。国家能源安全以稳定的石油供应和石油价格为中心,主要体现在保证充足的国家进口能源的供应数量、进口能源必须持续、进口能源必须价格合理以保证数量充足的持续供应 3 个方面。从经济学角度来说,能源安全风险的产生源于过多消费进口能源以及过度对外投资能源所产生的负外部性。

2009 年中国成为煤炭净进口国,2011 年中国成为世界最大的煤炭进口国。2015,2016 年我国的化石燃料进口量与产量如表 1 所示。

表 1 2015 年和 2016 年化石燃料进口量与产量
Table 1 Input and production of fossil fuel in 2015 and 2016

化石燃料	2015 年		2016 年	
	进口量	产量	进口量	产量
原油/万 t	33 550	21 474.2	38 101	19 957.6
天然气/亿 m ³	598	1 350	736.3	1 368.3

由表 1 中的数据可以计算出:2015 年,我国

的石油对外依赖度为 61.0%,天然气对外依赖度为 30.7%;2016 年,我国的石油及天然气对外依赖度分别上升至 65.6%和 35.0%^[11]。一次能源的全面净进口使得我国的能源安全风险增大,能源安全形势更加严峻^[12]。“富煤、缺油、少气”一直是我国资源结构的特点,以煤为主的消费结构在短期内难以改变。因此,煤的多样开发对于我国的能源结构调整以及能源安全有着重要意义。

由于氨过去一直主要作为化肥而被视为非易燃物质,并未考虑将其作为替代燃料,而国内外的大量研究已经证明氨属于清洁的可替代性燃料,因此,氨燃料的使用在一定程度上可以缓解我国石油对外依赖严重的困境。鉴于我国的煤制氨技术已经非常成熟,因此,煤制氨能源也是煤炭资源开发新方向的选择之一。氨能源价格低廉、产业基础完善,具有较好的发展潜力。氨燃料的投入使用能在一定程度上缓解能源供应短缺的紧急情况,即我国目前的氨储能在备战状态下完全可以转化为潜在的燃料资源,用于锅炉等热力设备以及发动机等动力设备。

随着社会的发展,我国的汽车保有量不断增加,寻找石油的替代性燃料刻不容缓。我国是合成氨大国,合成氨厂遍布全国,运输体系和分布网络完善,合成氨在能源供应极度短缺的情况下可作为替代性燃料保障国家能源和动力安全。氨作为燃料可用于发动机,厦门大学能源学院已经成功在往复活塞发动机中掺氨燃烧运行,因此,氨燃料可作为今后汽、柴油的替代性燃料应用于动力设备。

2016 年我国的合成氨产能规模为 8 380 万 t,但是实际的氨产能为 4 970 万 t,其中实际产能的 82.5%,即 4 105 万 t 氨用于氮肥的生产,剩余的 865 万 t 氨相当于等热值的原油 490 万 t 或汽油 370 万 t。若完全发挥产能,即实际的氨产能为 8 380 万 t,剔除 4 105 万 t 的氨用于氮肥生产,过剩的氨可替代的原油或汽油、柴油量如表 2 所示。

表 2 过剩氨可替代的原油和汽、柴油量
Table 2 Surplus ammonia and equal calorific value of crude oil, gasoline and diesel

过剩氨量/万 t	相当于原油量/万 t	占原油进口量的比例/%	原油对外依赖度降低值/%	相当于汽油量/万 t	相当于柴油量/万 t
4 275	2 422	6.3	4.1	1 829	1 859

由表 2 可知,过剩氨替代的原油量占实际原油进口量的 6.3%,可将我国 2016 年的原油对外依赖度从 65.6%降低至 61.5%。

从能源储备角度来看,能源储备不足会对我国的能源安全造成极大的影响。由表 1 可知,我国 2015 年的原油进口量为 33 550 万 t,若按满足合格的战略石油储备标准(90 d 的石油进口量)进行核算,则我国的合格战略石油储备标准约为 8 400 万 t^[13]。截至 2016 年年初,中国的战略石油储备为 3 197 万 t,相当于我国 33~36 d 的石油进口量,远低于国际能源署(IEA)的合格战略石油储备量标准。我国 2015 年的氨燃料与能源储备如表 3 所示。以 2015 年的氨产量进行衡量,2015 年的氨产量相当于等热值原油 2 577 万 t,若将我国的氨产量同样视为战略资源储备,我国相当于有 5 774 万 t 的战略能源储备,使我国的合格战略石油储备标准从 38%提升至 69%。

表 3 氨燃料与能源储备

Table 3 Ammonia fuel and energy storage				
现有石油储备	氨燃料与石油总储备	合格战略石油储备	现有石油储备占合格战略石油储备的比例/%	氨燃料与石油总储备占合格战略石油储备的比例/%
万 t	万 t	万 t		
3 197	5 774	8 400	38	69

2015 年,我国各地区的能源消费量和合成氨可替代量如图 1,2 所示。

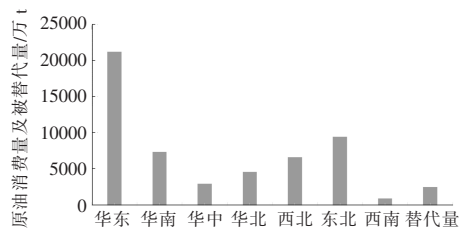


图 1 各地区原油消费量和合成氨可替代量
Fig.1 Regional crude oil consumption and replaceable amount of synthetic ammonia

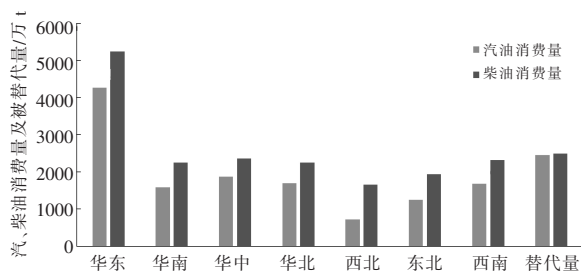


图 2 各地区汽油、柴油消费量和合成氨可替代量
Fig.2 Regional gasoline and diesel consumption and replaceable amount of synthetic ammonia

从图 1 可以看出,2015 年的氨产量可替代原油量远超过西南地区的能源消费需求,达到华中地区当年原油消费量的 85%,超过华北地区原油消费量的一半,占西北地区原油消费量的 39%。

从图 2 可以看出,华东地区的汽、柴油消费量远超过其他地区,其余 6 个地区(不含港澳台地区)的汽油消费量均在 2 000 万 t 以下,柴油消费量不超过 2 500 万 t;合成氨作为燃料可替代除华东地区外任何地区的汽油或者柴油的消费量,可替代华东地区汽油消费量的 60%左右,可替代该地区柴油消费量的 50%。

综上所述,我国的合成氨储备是十分可观的潜在能源储备,对于我国的能源安全具有战略意义。此外,我国大量的合成氨产业正面临着“关、转、停”的现状,如果能将我国合成氨的产能全部利用,能更大程度地减少我国的能源对外依赖度。加之若进一步开发我国高效节能的合成氨产能,对于我国煤炭的高效利用以及解决能源对外依赖问题都具有积极意义,故煤基氨燃料对于我国能源安全意义重大。

3 氨燃料应对“气荒”现象

我国以煤为主的高排放能源消耗模式对环境存在较大的负面影响,至 2015 年底,我国的一次能源消费结构中,煤炭占所有一次能源消费的 64%,远高于全球平均水平的 29.2%^[14]。自 2016 年煤炭去产能政策实施以来,整个煤炭行业一方面不遗余力的关闭煤矿,另一方面竭尽全力推进新产能的建设与投产。然而,由于我国的天然气对外依赖度过高、国际天然气供应的安全性问题、储气库的建设严重滞后、海港液化天然气接收站建设不及时等原因,导致季节性大规模供暖来临时天然气供应严重短缺,新产能煤改气工程面临挑战,因此,合适的能源储备能够在一定程度上缓解这种天然气供应断链的局面。

能源储备是为了应对能源供应突然中断或能源供应突然出现严重短缺的情况,我国作为能源进口大国,目前的石油战略储量远低于国际能源署(IEA)要求的合格战略石油储备标准^[15]。我国能源对外依存度高,因此,国内能源市场在很大程度上受制于国际能源市场,加之能源储备的不足,当面对一些紧急状况,如能源价格飞涨、供应短缺甚至是战时紧急状况,能源储备不足意味着将面临

十分被动的局面。

以下本文从能源问题决策的4大指标,即经济性、安全性、环保性以及气候保护性出发阐述氨燃料对解决“气荒”问题的可行性和低碳经济性。

从能源的经济性出发,一方面,氨燃料来源广泛,我国市场上的液氨主要由煤合成,液氨的市场报价比较稳定,与天然气相比成本更低(图3)。考虑到两种燃料的热值存在一定差异,本文对比了采暖成本相同时两种燃料的价格关系(图4)。另一方面,就储存和运输而言,氨燃料比天然气更易储存和运输,在温度为25℃,压力为1.03 MPa的条件下或温度为-33℃的常压条件下能将氨液化,氨燃料可采用槽车、轮船、管道等多种方式进行运输,利用现有的天然气管道对其连接处进行处理可直接运输氨,并且在同等大小的管道内,在其他条件相同的情况下,液氨所运输的能量是天然气的1.5倍^[16]。

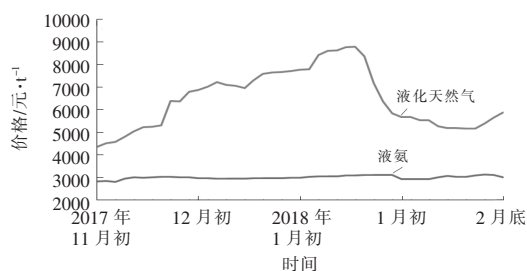


图3 两种燃料出厂价格变化的对比

Fig.3 Price comparison of ammonia fuel and liquid natural gas

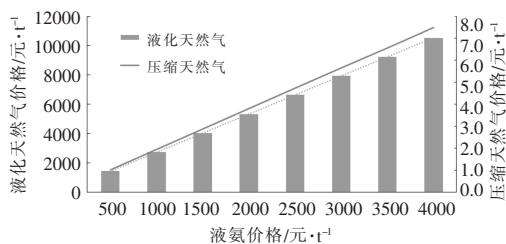


图4 采暖成本一致时两种燃料的价格关系

Fig.4 Price relationship between ammonia fuel and natural gas with same heating consumption

从能源的安全性出发,我国是人均油气资源匮乏的国家,天然气的供应安全性较差。从国内天然气供应角度来看,我国气源分布不均导致天然气市场供应地与需求地“错位”,使得天然气使用成本增高,天然气的使用与供应安全性降低。从国际天然气供应角度来看,其供应不安全性世人皆知,2014年乌克兰天然气危机导致欧洲大部分国家出现“气荒”现象,甚至出现部分居民因为建筑

采暖供气中断而冻死的事件。此外,北方建筑采暖是个季节性能耗,能源使用规模较大,若未形成完备的储备机制,无法应对天然气危机的冲击。因此,为了应对上述的天然气的供应的不安全性和季节性波动,建有相当存储能力的储气库或采用替代性能源供应方案是必须的。

表4是根据十部委《关于印发北方地区冬季清洁取暖规划》的文件中核算出我国为应对北方地区冬季采暖问题需要建设的天然气储气库的规模及投资。由表4可看出,储气库规模庞大,建设投资高昂,这也反应了季节性用气高昂的季节存储成本。而氨燃料替代天然气使用不需要额外的建设成本,可利用现有的合成氨厂生产氨并进行供应。

表4 天然气储气库建设
Table 4 Construction of natural gas storage tanks

采暖面积/亿 m ²	单位面积积需气量/m ³	采暖季用气量占比/%	储气库容量/亿 m ³	储气库投资/亿元
22	15	40	200	1 000

2015年和2016年我国的合成氨产能分别为8 350,8 380万 t,2015年和2016年我国的合成氨应用量分别为5 791.40,5 340.50万 t,过剩率在30%以上。以2015年和2016年我国的合成氨产能为例,氨燃料可替代天然气量见表5。由表5可知,我国2015年和2016年的氨产量均相当于等热值的天然气400多亿 m³,占国内2015年天然气总用量的21%,2016年天然气总用量的19%。换言之,在天然气短缺的情况下,我国现有的氨产量也能解决全国两个月的天然气消费量。此外,2015年的合成氨产量可替代的天然气量占天然气进口量的68%,能将我国天然气的对外依赖度从30.7%降低到9.8%;2016年的合成氨产量可替代的天然气量占天然气进口量的55.4%,可将天然气的对外依赖度从35.0%降低至15.5%。

表5 氨燃料可替代天然气量
Table 5 Natural gas substitution amount of ammonia fuel

时间	氨产能/万 t	天然气可替代量/亿 m ³
2015年	8 350.0	406.7
2016年	8 380.0	408.1

过剩氨燃料可替代天然气量见表6。由表6可知,将生产化肥后过剩的氨均作为燃料使用,

表6 过剩氨燃料可替代天然气量
Table 6 Natural gas substitution amount of excess ammonia fuel

时间	过剩氨量/万 t	天然气可替代量/亿 m ³
2015 年	2 558.6	124.6
2016 年	3 039.5	148.0

2015 年和 2016 年过剩的氨可分别替代 124.6, 148 亿 m³ 的等热值天然气,能解决北方地区 37% 的区域供暖问题。以 2016 年为例,过剩氨替代的天然气量占 2016 年天然气总用量的 7.8%, 可将我国天然气的对外依赖度降低至 27.9%, 资源安全性提高 7.0%。

2015 年我国不同地区的天然气消费量和合成氨可替代量的对比如图 5 所示。从图 5 可以看出, 合成氨可替代的等热值天然气可满足除华东地区以外的任一地区的天然气消费量, 相当于华东地区天然气消费量的 80%; 同样地, 过剩氨燃料可替代的等热值天然气相当于华中及东北地区的天然气消费量。

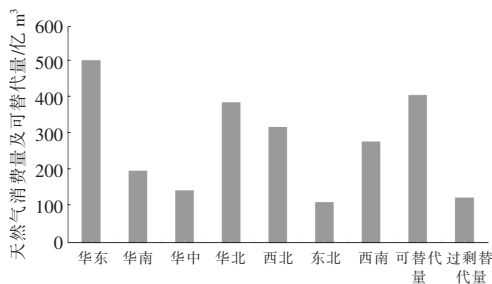


图 5 2015 年各地区天然气消费量和合成氨可替代量对比

Fig.5 Comparison of regional natural gas consumption and replaceable amount of synthetic ammonia in 2015

单位燃烧热及等量空气进气, 氨燃料和天然气的尾气排放情况见表 7。

表 7 等量燃烧热供应及等量空气进气供应时燃料的尾气排放情况

Table 7 Exhaust gas emissions from fuels with equivalent combustion heat and equivalent air intake

燃料	燃烧方式	尾气总量 g/MJ	二氧化碳 g/MJ	水 g/MJ	氮气 g/MJ
氨燃料	等量燃烧	384	0	85	298
天然气	热供应	368	55	45	268
氨燃料	等量空气	1 160	0	260	900
天然气	进气供应	1 060	160	130	770

从能源使用的环保性及气候保护性出发, 天然气中的甲烷本身就是一种温室气体, 且燃烧尾

气中含有的大量二氧化碳亦属于温室气体, 而氨燃料燃烧产生的尾气由氮气和水组成, 不含温室气体, 显示出良好的环境效益, 因此, 氨燃料在气候保护性上更胜一筹。由表 7 可知, 就尾气总量而言, 无论是等量燃烧放热还是等量空气进气, 氨燃料与天然气燃烧的尾气总量均相差无几, 故两种燃料的环保性相当。因此, 从影响能源问题决策的 4 大指标: 经济性、安全性、环保性及气候保护性出发进行分析, 氨能源均满足作为替代性燃料的要求, 能解决天然气“气荒”的问题。

与直接用煤替代天然气缓解“气荒”现象相比, 利用氨燃料会牺牲部分能效, 但能避免分散污染, 因为在合成氨的过程中可利用二氧化碳捕集等技术对产生的温室气体进行集中处理。我国传统的合成氨工艺主要采用煤为原料, 所以煤基氨不属于清洁燃料。目前, 我国可再生能源的发展受到限制, 弃电现象严重, 故笔者指出可利用大规模“弃电”合成氨燃料从而解决能源安全、缓解“气荒”现象, 实现真正的清洁燃料替代^[7]。

4 结论

①氨燃料具备储存方便、运输体系完善、合成工艺成熟等优势; 理论上氨燃料完全燃烧只产生氮和水, 实际燃烧产生的少量 NO_x 也可以通过与氨进行反应而脱除, 所以氨燃料燃烧尾气的处理比化石燃料燃烧尾气的处理更简单, 成本也更低。

②我国的能源安全形势不容乐观, 2016 年我国的原油对外依赖度高达 65.6%, 天然气对外依赖度为 35.0%, 能源储备量远低于合格石油战略储备标准。石油、天然气进口通道风险较高, 天然气供应有可能长期面临“气荒”局面。

③氨燃料的利用对降低我国能源对外依赖度以及应对能源供应紧急状况有重要意义, 进一步开发我国高效节能的合成氨产能, 对于我国煤炭的高效利用以及解决能源对外依赖问题都具有积极意义。

④从影响能源问题决策的 4 大指标, 即经济性、安全性、环保性及气候保护性出发进行分析, 氨能源均满足作为替代性燃料的要求, 能解决天然气“气荒”的问题。

参考文献:

[1] 虞思敏, 温步瀛, 王良缘. 峰谷电价下新能源省级购电

- 优化模型[J].可再生能源, 2017, 35(4): 528-534.
- [2] Joe McClintock, John Holbrook. Alternative fuels: Taking a second look at ammonia [J]. Journal of Clinical Microbiology, 2008, 31(5): 1385-1387.
- [3] 郭朋彦, 申方, 王丽君, 等. 氨燃料发动机研究现状及发展趋势[J]. 车用发动机, 2016(3): 1-5.
- [4] Westlye F R, Ivarsson A, Schramm J. Experimental investigation of nitrogen based emissions from an ammonia fueled SI-engine[J]. Fuel, 2013, 111: 239-247.
- [5] Gross C W, Kong S C. Performance characteristics of a compression-ignition engine using direct-injection ammonia-DME mixtures[J]. Fuel, 2013, 103: 1069-1079.
- [6] Afif A, Radenahmad N, Cheok Q, et al. Ammonia-fed fuel cells: A comprehensive review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 60: 822-835.
- [7] 钟绍华, 万桂芹. 氨燃料燃烧性能数值模拟与分析[J]. 内燃机工程, 2014, 35(3): 46-51.
- [8] 胡剑全, 谢珊, 吴一纯. 低碳氨发动机的研究[J]. 可再生能源, 2014, 32(10): 1505-1509.
- [9] Hadi N, Arif K. Numerical study of combustion characteristics of ammonia as a renewable fuel and establishment of reduced reaction mechanisms[J]. Fuel, 2015, 159: 223-233.
- [10] Iki N, Kurata O, Matsunuma T, et al. Micro gas turbine operation with kerosene and ammonia [EB/OL]. <https://nh3fuel.files.wordpress.com/2014/10/nh3fa-2014-norihiko-iki.pdf>, 2017-12-05.
- [11] 史丹. 中国能源安全的国际环境[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2013. 1-2.
- [12] 史丹. 中国能源安全结构研究[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2015. 1-19.
- [13] 孟涛. 浅议我国能源储备制度的完善[J]. 法制与社会, 2016(22): 31-33.
- [14] 李雪慧, 史丹. 新形势下我国能源安全的现状及未来调整战略[J]. 中国能源, 2016, 7(38): 11-16.
- [15] 廖建凯. 我国能源储备与应急法律制度及其完善[J]. 西部法学评论, 2010(2): 111-115.
- [16] Jeffrey Ralph Bartels. A feasibility study of implementing an ammonia economy [D]. Ames: Iowa State University, 2014.
- [17] 王月姑, 周梅, 王兆林, 等. 以氨燃料为介质的全生命周期储能效率估算[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(2): 301-308.

Feasibility analysis of ammonia energy to relieve energy security and replace natural gas

Wang Yuegu, Wu Chongjun, Zheng Songsheng, Chen Jin, He Song, Wang Zhaolin
(College of Energy, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: This article focuses on energy security problems and the present stage of “natural gases shortage” phenomenon in northern area. Ammonia fuel is a better choice with high energy storage density, clean combustion, high calorific value, easy to store transport, good industrial foundation. Besides, the boiler and generator with ammonia combustion operation successful experimental results in Xiamen University shows that ammonia fuel can alleviate the degree of energy security and the scale and the capacity to solve the problem of “natural gases shortage”. The results show that the introduction of ammonia energy system can effectively optimize China’s energy structure, improve the over-dependence on energy imports, and solve the problem of natural gas shortage.

Key words: ammonia fuel; natural gas; energy security; natural gases shortages