

中国气体燃料资源及开发利用前景展望

冯立岩^{1,2} 翟君¹ 杜宝国^{1,2} 隆武强^{1,2}

1.大连理工大学内燃机研究所 2.大连理工大学船舶制造国家工程研究中心

冯立岩等.中国气体燃料资源及开发利用前景展望.天然气工业,2014,34(9):99-106.

摘要 在经济发展迅猛、能源紧缺、环境恶化等因素的共同驱动下,中国对气体燃料发动机的需求非常紧迫。为此,分析了中国常规天然气、煤层气、垃圾填埋气、页岩气等轻质气体燃料的资源分布、开采及利用状况,认为大量的气体燃料资源储备为中国气体燃料发动机的发展提供了契机。然而,对我国动力行业的发展水平及规模的分析结果表明,目前我国气体燃料发动机的技术水平和制造规模都远远落后于发达国家,缺乏竞争力,满足不了国内市场需求。进而,对气体燃料的开发利用和气体燃料发动机的发展提出以下建议:①健全煤层气利用设施,推动煤层气产业的发展;②规范市场,优化资源利用比例,提高气体燃料的利用效率;③加快对气体燃料发动机的研究,在中远期能源和动力发展规划中要高度重视我国气体燃料发动机核心关键技术和制造水平的迅速提高;④针对不同的气体燃料,优化气体燃料发动机的性能。

关键词 中国 常规天然气 煤层气 垃圾填埋气 页岩气 发动机 能源 环境 动力 发电

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2014.09.016

Prospects of gas fuels resources and their exploitation and utilization in China

Feng Liyan^{1,2}, Zhai Jun¹, Du Baoguo^{1,2}, Long Wuqiang^{1,2}

(1. Research Institute of Internal Combustion Engines, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China; 2. National Engineering Research Center of Shipbuilding, Dalian, Liaoning 116023, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 34, ISSUE 9, pp.99-106, 9/25/2014. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Under the present situation of rapid economic development, energy shortage, environment deterioration, etc., gas fuelled engines will be urgently needed in China. In view of this, through an overview of the light gas fuels such as conventional natural gas, CBM, landfill gas, shale gas, etc., as well as their distribution, exploitation and utilization status, we concluded that a large amount of gas fuels reserves provide an opportunity for the development of gas fuelled engines in China. However, the present technical level and manufacturing scale of gas fuelled engines are still lagging far behind those developed countries. We presented the following proposals for China to explore more uses of gas fuels and well develop gas fuelled engines. (1) CBM utilization policies and infrastructures should be implemented and fulfilled to stimulate the development of CBM industry. (2) The utilization efficiency of gas fuels should be highly improved by regulating the market and optimizing the resource utilization ratio. (3) The research of gas fuelled engines should be speeded up with focus on improving the core technologies and manufacturing level especially in the mid- and long-term energy and power development strategies. (4) The performance of different engines should be enhanced upon various types of gas fuels.

Keywords: China, conventional natural gas, CBM, landfill gas, shale gas, generator, energy, environment

基金项目:国家自然科学基金“以分区控制及湍流激扰方式实现气体燃料大型船用主机高效稀燃的基础研究”(编号:51079026)、“低速二冲程双燃料船用主机气缸油自燃引发爆炸机理研究”(编号:51479028)、辽宁省自然科学基金“实现气体燃料大型船用主机高效稀燃的分区控制及湍流激扰作用过程研究”(编号:20102033)、中央高校基础科研项目“LNG—柴油双燃料大型发动机燃烧特性及可靠性研究”(编号:DUT12JN03)。

作者简介:冯立岩,1973年生,副教授,博士;主要从事内燃机燃烧与性能优化、代用燃料技术和新型清洁燃料发动机技术研究工作,现为大连理工大学内燃机研究所所长。地址:(116023)辽宁省大连市大连理工大学内燃机研究所。电话:(0411)84709803, 13795180696。E-mail:fengli@dlut.edu.cn

气体燃料主要包括常规天然气、煤层气、垃圾填埋气、页岩气等轻质气体燃料。这些燃料资源丰富且燃烧清洁。随着我国经济高速发展、人口迅速增加,传统能源消耗量迅猛增长,温室气体排放量快速上升,我国已经取代美国成为世界第一大温室气体排放国,这使得我国在温室气体减排问题上承受着巨大的国际压力。另外,主要由传统内燃机和传统火力发电所产生的颗粒(PM)和氮氧化物(NO_x)等有害物排放也成为危害环境的突出问题^[1-2]。迅速发展并推广绿色节能气体燃料发动机是解决上述问题的有效举措之一。气体燃料发动机具有良好的经济性和排放性能。与传统液体燃料发动机相比,气体燃料发动机的温室气体排放量和有害物排放量较低^[3-4]。可见,在经济发展迅猛、能源紧缺、环境恶化等因素的共同驱动下,我国对气体燃料发动机的需求是非常紧迫的。而且,我国大量的气体燃料资源储备也为气体燃料发动机的发展提供了契机。

为此,介绍了我国气体燃料资源的分布和利用情况^[5-6],并结合对我国气体燃料发动机应用及发展现状

的分析,对气体燃料的开发和气体燃料发动机的发展提出了建议。

1 中国气体燃料资源

1.1 常规天然气(Conventional Natural Gas)

据新一轮全国油气资源评价结果,中国的常规天然气资源储备量约为 $35.03 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[7],已证实的天然气可开采资源量由 2002 年的 $2 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 增长到了 2009 年的 $3.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[8]。天然气产量在过去的 10 年里增长迅速,2001 年的天然气产量为 $303 \times 10^8 \text{ m}^3$,而 2011 年天然气产量则达到了 $1\ 025 \times 10^8 \text{ m}^3$ (表 1)。与此同时,天然气的消费量也由 2001 年的 $274 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到了 2011 年的 $1\ 307 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。以 2010 年为例,电力、热力的生产和供应业消耗了 $180 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的天然气,占当年天然气消费总量的 16.8%;交通运输、仓储和邮政业消耗的天然气量为 $106.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,占当年天然气消费总量的 9.9%。为满足如此高速增长的天燃气消费水平且避免过度开采,中国从 2006 年开始进口天然气,仅 2011 年的天然气进口量就已达 $309 \times 10^8 \text{ m}^3$,占当年天然气消费总量的 23.6%。

表 1 中国天然气的产量、消耗量及进口量统计表

年份	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
产量	303	327	350	415	493	586	692	803	853	948	1 025
消耗量	274	292	339	397	468	561	705	813	895	1 076	1 307
进口量	0	0	0	0	0	10	39	44	76	164	309

10^8 m^3

1.2 煤层气(Coal Mined Gas, CMG)

煤层气是煤矿生成过程中在煤层产生的一种伴生气体,是由生物在生物和地质的作用下形成的一种可燃气体,其主要成分是甲烷。根据其中的甲烷含量,煤层气可以划分为以下 3 种类型^[9-11]。

1) 地面抽采煤层气(Coalbed Methane, CBM): 甲烷的含量达到气体组成的 80%~95%,且其成分相对稳定。通常在煤矿开采前由地表直接钻井抽取。

2) 井下抽采煤层气(Coal Mined Methane, CMM): 甲烷含量的变化范围较宽,从 25%到 80%不等,气体的成分受到开采矿井的地质和通风等情况影响较大。在中国,由于气体储存地质情况极度复杂,开采技术也不成熟,这一类型煤层气的甲烷含量尤其不稳定。

3) 矿井乏风(Ventilation Air Methane, VAM): 甲烷含量很少,只有 0.05%~0.7%。极低的甲烷含量使得矿井乏风成为最难以回收和利用的煤层气。通常情

况下,矿井乏风在煤矿开采的过程中被直接排放到大气中去,成为煤矿开采过程中温室气体的主要来源。

中国煤层气资源十分丰富(图 1),2006 年的煤层气资源评价结果表明,中国埋深 2 000 m 以浅的煤层气资源总量达 $36.81 \times 10^{12} \text{ m}^3$,与常规的天然气资

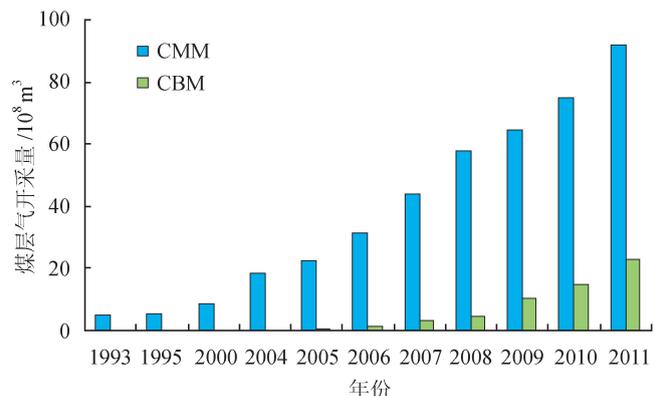


图 1 中国煤层气开采利用情况示意图^[13-14]

源量相当^[12]。由图1可知,中国较早利用井下开采煤层气,产量增长较快,由1993年的 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增长到2011年的约 $92 \times 10^8 \text{ m}^3$;对于地面开采煤层气的回收和利用则起步较晚,2005年其产量才有了零的突破,但自利用以来,其产量增长平稳,截至2011年底,产量达到 $23 \times 10^8 \text{ m}^3$ (产量和利用量均以纯甲烷计,以下相同)。

1.3 垃圾填埋气(Landfill Gas, LFG)

垃圾填埋气是城市生活垃圾被填埋于地下之后在厌氧条件下经生物分解产生的,其主要成分是甲烷和二氧化碳,其中甲烷占气体组成的40%~60%。垃圾填埋气是一种可再生的生物质能,去除其中的二氧化碳和一些有害的气体成分之后,可以作为内燃机的替代燃料,应用到发电和交通运输领域。

近年来中国的城市化和工业化发展迅速,同时中国又拥有全球最大的人口基数,城市生活垃圾(Municipal Solid Waste, MSW)的数量增长迅速。

2010年,中国的城市生活垃圾量为 $15\,733.7 \times 10^4 \text{ t}$,而1996年,该值仅为 $10\,825.4 \times 10^4 \text{ t}$,平均年增长率达3.5%。

填埋是中国城市生活垃圾最常用的处理方式,几乎一半的城市生活垃圾被运送到垃圾填埋场,埋于地下。垃圾的生物降解和垃圾填埋气的产生从第一批垃圾被填埋入地下就开始了^[15],但其产生气体的甲烷含量和产气速率受到垃圾的成分、填埋地区的地理条件和气候情况等多方面因素的影响,垃圾填埋气的平均产生速率难以准确测量和预测。魏宁等人^[16]针对中国的垃圾填埋场和城市生活垃圾的成分对垃圾填埋气的产生速率进行了计算和预测:1 t垃圾被填埋后可产生30~70 m^3 的甲烷,笔者采用其均值($50 \text{ m}^3/\text{t}$)对垃圾填埋气的产量进行估算。表2给出了2003年至2011年中国填埋的垃圾总量^[8]和估算的垃圾填埋气产量。

表2 2003—2011年中国城市生活垃圾填埋量和垃圾填埋气产量估算值表

年 份	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
MSW 填埋量/ 10^6 t	64.04	68.89	68.57	64.08	76.33	84.24	88.98	95.98	100.64
LFG 产量/ 10^8 m^3	32.0	34.4	34.3	32.0	38.2	42.1	44.5	44.8	50.3

1.4 页岩气(Shale Gas, SG)

页岩气是指从富有机质黑色页岩中开采的,或者自生自储、在页岩纳米级孔隙中连续聚集的天然气^[17],这部分天然气以吸附或游离的状态聚集于页岩层中,其中吸附状态的天然气占气体总量的40%~85%^[18],它是一种非常规的油气资源。

2011年4月,美国能源信息署(EIA)发布了“世界页岩气资源初步评价报告”,报告表明,全球页岩气可开采资源总量约为 $187.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。北美、加拿大、欧洲和亚洲均有较丰富的页岩气资源^[19]。美国是利用页岩气最成功的国家之一,其页岩气开采已经有180多年的历史^[18]。中国对页岩气的研究则刚刚起步,目前的研究重点还在气体的累积机制和产生规律上。现有的关于页岩气矿井的资料几乎是空白,目前的大部分研究所用的数据是基于传统的石油和天然气资源,煤层气和固体矿质开采的数据也常被作为参考,所研究的页岩的样本大部分都来自于地表或者是近地表^[20]。由于数据的极度缺乏,中国的潜在页岩气资源储备量难以估测。张金川等人^[21]对页岩气的地质特征、成藏边界条件及识别方法做了讨论,对中国的页岩气分布做了分析,结果表明,我国可开采的页岩气资源量为 $(15 \sim 30) \times 10^{12} \text{ m}^3$,与美国的页岩气资源量相当。

页岩气的储藏深度范围较广,从近地表到地下

3 000 m不等,而中国广泛的地域面积和复杂的地形地貌可能会使这一数值跨度更大,这使得页岩气的开采难度较大。虽然我国页岩气的开采难度较大,利用技术不成熟,但美国经过多年的发展已经积累了页岩气形成机理和储藏机制的重要信息和技术可供借鉴。中国对页岩气资源的关注程度也在不断加大,制订了多项促进页岩气发展的方针和政策。据BP世界能源的预测,中国2030年页岩气的开采量可以达到 $1.7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$,占中国气体燃料产量的20%^[22]。页岩气有望在不远的将来成为一种内燃机的替代能源投入使用。

2 气体燃料在动力领域的应用

气体燃料除了可以用于民用及工业加热设备外,还可以广泛应用于动力领域,用于运载器动力设备和发电设备。在动力领域中,主要设备是气体燃料发动机。

2.1 气体燃料发动机的减排效应

燃烧工质为气体的内燃机被称为气体燃料发动机,上述4种气体均可以作为气体燃料发动机的燃料,可广泛应用于公路运输、水路运输、发电等多个领域。近年来,先进的气体燃料发动机的热效率已远高于汽油机,并接近于先进柴油机的热效率^[23-25]。而甲烷作为上述4种气体燃料的主要成分,其热值较高,且碳氢比远低于传统液体燃料(汽油、柴油等)。这就大大降

低了其燃烧产物中的温室气体含量。煤层气和垃圾填埋气本来就是2种较大的温室气体来源,且甲烷的温室效应为二氧化碳的25倍^[26]。将它们作为内燃机的代用燃料不仅可以减少直接排空造成的大气污染,还可以减少内燃机燃烧所产生的二氧化碳排放量。

与此同时,目前先进气体燃料发动机的 NO_x 与PM的排放量都很低,这方面的优势为传统柴油机和煤电设备所无法企及。在深受 NO_x 造成的光化学污染和PM造成的雾霾所困扰的中国,发展和推广绿色节能的气体燃料发动机无疑是极具吸引力的解决方案。

2.2 气体燃料发动机的发展现状

天然气是目前在中国被利用得最为广泛的一种气体燃料,将天然气作为内燃机燃料的技术也已经日趋成熟。根据交通部的数据,截至2012年,天然气公交已占全国公交总量的18.2%^[27]。与此同时,多艘柴油—LNG双燃料船舶已经投入使用。“气化长江战略”于2011年4月正式启动,以LNG发动机为动力的8艘船舶已在长江武汉段、芜湖、京杭运河及珠江4地投入运行^[28]。

2005年10月,国家发展与改革委员会颁布《清洁发展机制(Clean Development Mechanism, CDM)项目运行管理办法》,其中回收和利用煤层气是在中国开展清洁发展机制项目的重点领域。2010年全国煤层气发电装机容量接近 150×10^4 kW,而2005年该值还不到 20×10^4 kW^[29]。目前中国已经建成数个煤层气联合循环发电项目,都采用的是进口内燃机组,单机功率为4~500 MW,所利用的煤层气甲烷浓度可低于30%^[29]。

我国对垃圾填埋气的使用开始较晚,其中内燃机是目前垃圾填埋气应用最广的领域^[30]。与其他垃圾填埋气的利用方法相比较,如进入供气管道、供热制冷等,利用垃圾填埋气内燃机机组来发电是目前较为成熟的办法。对我国而言,填埋气预处理设备、填埋气发电设备和输电设备可全部国产化^[16]。

无论从用户个体所追求的经济性目标看,还是从社会整体所要求的环保目标出发,中国对气体燃料发动机的需求都是极其旺盛的,市场是非常庞大的。然而,我国目前气体燃料发动机产品却难以满足市场和社会需求。我国在300 mm缸径以上大型气体燃料发动机领域处于空白状态。现有的170~280 mm缸径国产气体燃料发动机的平均有效压力均低于1.4 MPa,有效热效率低于0.4^[31-32];而国外170 mm以上缸径气体燃料发动机的平均有效压力普遍高于1.8 MPa,有效热效率普遍大于0.45^[33-38]。可见国产气体

燃料发动机的强化程度和经济性水平偏低,难以满足用户需求,在国内市场也缺乏竞争力。

对于煤层气发动机,进口发电机组的有效热效率也已经超过40%^[36],而国产煤层气发电机组的效率仍低于35%^[26]。但白红彬与杨俊辉^[39]的研究显示,虽然目前国产煤层气发电机组的发电效率低于进口机组,但其对煤层气甲烷浓度的敏感性较低,造价较低。

1998年,杭州天子岭垃圾填埋场LFG发电站建成,并投产发电,一期工程安装了2台燃气发动机组,每台装机容量为970 kW^[40]。2005年,南京天井洼垃圾填埋气发电项目注册成功,成为中国首个垃圾填埋气发电CDM项目,其先后投入的发电机组的装机容量分别为1 100 kW和500 kW^[41]。截至2010年,我国已有20个垃圾填埋气回收和利用项目成为CDM注册项目^[42]。目前,香港所有垃圾填埋场均利用填埋气作为发电机组的燃料^[43]。但目前国内的LFG发动机几乎还是空白,上述垃圾填埋场所用的LFG发动机均为进口机型,高昂的发动机成本和维护、维修费用成为发展LFG发电的最大障碍之一。

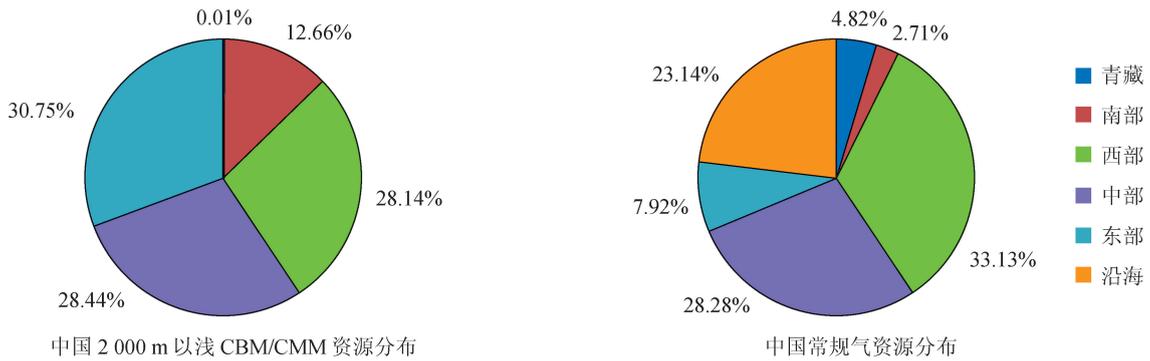
综上所述,国内大型气体燃料发动机在型号上和技术水平上全方位落后,缺乏竞争力,难以满足国内市场需求。对此不利局面,政府和工业界及学术界已有共识,要加快掌握核心技术,尽快研制出技术先进、价格合理的产品,工业和信息化部分别于2012和2013年在高技术船舶项目中对中、高、低速大型气体燃料发动机立项,以官产学研相结合的方式,有力推进我国大型气体燃料发动机的技术进步和产业体系的形成。

3 气体燃料发展空间分析

3.1 煤层气资源分布优势

中国煤层气和天然气资源分布情况如图2所示,煤层气资源在中国的分布较为均匀,其中,东部地区的煤层气储备量最大,达到 11.32×10^{12} m³,占全国资源总量的30.8%,即便在天然气资源匮乏的南部地区也蕴藏12.7%的煤层气资源。西部和中部地区天然气和煤层气资源都比较丰富,因此,国家政策鼓励其煤层气电站的建设,同时禁止在陕、蒙、晋、皖等13个大型煤炭基地所在地区建设基本负荷为天然气的发电项目。

图2显示,东部和南部天然气资源的空缺可以由当地的煤层气资源填补。同时,“西气东输”管线经过的部分地区恰为煤层气资源丰富的地区,煤层气作为非常规天然气,在经过简单处理之后可以与天然气混输混用,减少煤层气专用管网的建设,既可以节约资金,又提高了天然气管网的利用率^[44]。

图 2 中国煤层气和常规天然气资源分布情况图^[2,38]

目前,我国主要的煤层气发电站都集中在山西省,在其余煤炭资源丰富的地区利用煤层气内燃机机组进行发电不仅可以缓解天然气不足带来的压力,同时,回收利用煤矿开采过程中排放的甲烷气体可以大大减少温室气体的排放量。

3.2 煤层气利用率有待提高

由于地面开采煤层气具有较高的甲烷含量,其利用率增长很快,2011 年的利用率已经达到了 76.28%。对于井下开采煤层气,较大的甲烷含量变化范围使得其利用存在较大的障碍。

井下开采煤层气的利用率并没有随着其产量的快速增长而上升,1993—2000 年,由于气体开采技术的限制,只能回收甲烷成分较高的煤层气,使其利用率较高;2004 年之后,开采技术的发展让可回收的井下开采煤层气大大增加,但甲烷含量波动范围变大,而气体利用技术并没有很大进步,导致其利用率维持在 30% 左右。以 2010 年为例,井下开采煤层气的产量为 $75 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中只有约 $23 \times 10^8 \text{ m}^3$ 得到了利用。

在 CDM 的支持下,煤层气企业可以引进国外的资金和技术,并向国家申请资金进行自主研发。目前,很多企业和科研机构在对利用煤层气的内燃机进行优化,使其可以利用浓度更低、气体含量波动范围更大的煤层气。胜动集团与淮南矿业联合开发的“低浓度瓦斯细水雾输送系统及瓦斯发电技术”目前已在 70 多座瓦斯发电站上得到利用,该技术降低了低浓度煤层气在运输过程中爆炸的风险;与此同时,电控混合器和预燃室的使用使得甲烷浓度超过 6% 的煤层气都可以被内燃机组利用^[45]。但是国产煤层气发动机效率较低,进口机型不适合国内气体成分波动大的气源,是目前煤层气的利用效率不高的两个主要原因。

3.3 垃圾填埋气和页岩气利用前景巨大

虽然垃圾填埋气和页岩气在我国还没有得到广泛

的应用,尤其是页岩气才刚刚处于开采阶段,但它们作为生物质能和非常规天然气资源,在气体燃料发动机上有很大的发展前景。

在一些发达国家,垃圾填埋气的回收和利用已经进行了 20 多年^[46]。而我国对垃圾填埋气的利用才刚刚开始,目前老填埋场数量较多,大多数已经处于产气高峰;新建填埋场的设施逐渐完善,可以借鉴香港垃圾填埋场对垃圾填埋气的处理办法,铺设收集管道,提高垃圾填埋气收集效率,采用以垃圾填埋气作为燃料的内燃机,现采用用。由前文的分析可知,作为可再生的生物质能,垃圾填埋气作为内燃机替代燃料的节能减排效果显著,而发展中国家可以通过 CDM 向发达国家销售 CO_2 减排额度来获取利益(即温室气体排放权交易),国家发展与改革委员会制订的《可再生能源发电价格和费用分摊管理试行办法》中,国家对于垃圾填埋气发电项目有 0.25 元/kWh 的补助,这使得垃圾填埋气发电项目受到了前所未有的关注。借鉴国外先进的填埋气产业化经验和商业运作模式,结合我国垃圾填埋场分布的实际情况,建立适合中小规模分散式回收利用的产业化模式,将使垃圾填埋气发电站在未来几年得到迅速发展。

国家能源局、国家发展与改革委员会、财政部和国土资源部在 2012 年 3 月联合发文正式制订《页岩气发展规划(2011—2015 年)》;中央财政明确表示将在 2012—2015 年对页岩气开采企业给予 0.4 元/ m^3 的补贴,由此可见,国家对页岩气的发展给予厚望。从 2009 年开始,我国在页岩气开发方面与美国合作,借鉴美国多年累积的经验和技术可以大大加快页岩气开发和利用的步伐。未来几十年,天然气的需求将快速增长,需求缺口将逐渐扩大,发展页岩气有良好的市场前景。天然气发动机技术的不断完善,储运设施的不断健全,使得在不久的将来使用页岩气成为天然气的

补充成为可能。

4 结论

我国气体燃料资源丰富,常规气、煤层气、垃圾填埋气和页岩气都可以作为内燃机的代用燃料,应用于运输、发电等多个领域。凭借良好的排放性能和潜在的温室气体减排效应,气体燃料和气体燃料发动机受到越来越多的关注。政府出台了多项措施鼓励开发和利用气体燃料;大量的企业和研究机构针对气体燃料发动机的结构和性能进行研究,使其能更好地适应气体燃料的特点。气体燃料的利用和气体燃料发动机的发展需要政府和能源工业及动力工业的关注。

1)健全煤层气利用设施。我国煤层气的开采已经进入高速发展阶段,而相应的利用设施还不健全。我国应当合理规划天然气管道的布置,利用开采和运输天然气资源的技术和经验来推动煤层气的发展。

2)规范市场,优化资源利用比例。我国的常规天然气和煤层气资源分布基本属于互补的状态;垃圾填埋气的分布则较为分散,垃圾填埋场的规模以中小型居多,需要的发电机组个数少,功率大多在1 000 kW左右,因此对小型LFG发电机组的需求量大;页岩气资源的开采才刚刚起步,其分布和储藏量有待进一步探明。针对这些我国特有的国情,对于不同地区应有不同的气体燃料发展侧重点,提高气体燃料的利用效率。

3)加快气体燃料发动机的研究。我国对于大型气体燃料发动机的开发和应用起步较晚,现有国产机型的热效率和强化指标都偏低,这大大制约了我国气体燃料的应用和发展。国家在给予气体燃料开发补助的同时,需要进一步提高对气体燃料发动机技术研发的重视程度,加快气体燃料发动机的研究进度,尽快掌握高水平气体燃料发动机核心技术,开发具有自主知识产权的国际先进水平发动机,站稳国内市场,面向国际市场。

4)针对不同的气体燃料,优化气体燃料发动机的性能。目前我国气体燃料发动机主要使用的燃料是常规天然气,大部分性能优化都是针对天然气发动机的,对于使用垃圾填埋气及煤层气的内燃机研究较少。虽然垃圾填埋气和煤层气的主要成分都是甲烷,但它们各自特点不同。垃圾填埋气中含有大量的二氧化碳,而煤层气的甲烷含量波动范围大,所以需要在燃料提纯、燃料改性方面做大量的研究工作,同时,还要提高发动机本身的适应性,针对不同燃料优化发动机性能,研制出适合不同气体燃料的机型。

参 考 文 献

- [1] 司云航,朱玉琴,邹蓉梅,等.我国车用柴油标准现状及发展趋势[J].石油与天然气化工,2014,43(1):82-86.
SI Yunhang, ZHU Yuqin, ZOU Rongmei, et al. Current situation and development trend of automobile diesel standards in China [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2014, 43(1): 82-86.
- [2] 张新庄,张书勤,张娟利.车用低比例甲醇汽油的使用性能研究[J].石油与天然气化工,2014,43(1):44-48.
ZHANG Xin Zhuang, ZHANG Shuqin, ZHANG Juanli. Usability research of the low proportional methanol gasoline for motor [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2014, 43(1): 44-48.
- [3] 温永刚,陈运文,樊栓狮,等.LNG汽车技术发展及其推广应用前景[J].石油与天然气化工,2013,42(3):257-260.
WEN Yonggang, CHEN Yunwen, FAN Shuanshi, et al. Development of LNG vehicles technology and its prospect of popularization and application [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2013, 42(3): 257-260.
- [4] Prevention of Air Pollution from Ships. Second IMO GHG study 2009 [R]. London: Marine Environment Protection Committee, 2009.
- [5] 邢慧娟,秦朝葵,周宇.工业燃烧器对天然气掺混二甲醚适应性的实验研究[J].石油与天然气化工,2013,42(3):252-256.
XING Huijuan, QIN Chaokui, ZHOU Yu. Experimental research of industrial burner fueled by DME-NG mixtures [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2013, 42(3): 252-256.
- [6] 宋建桐,张春化,陈金柱.过量空气系数对柴油引燃天然气发动机的影响[J].石油与天然气化工,2012,41(6):567-569.
SONG Jiantong, ZHANG Chunhua, CHEN Jinzhu. Effect of excess air ratio on natural gas engine fueled by diesel fuel [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2012, 41(6): 567-569.
- [7] 车长波,杨虎林,李玉喜,等.中国天然气勘探开发前景[J].天然气工业,2008,28(4):1-4.
CHE Changbo, YANG Hulin, LI Yuxi, et al. Prospect of natural gas exploration and development in China [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(4): 1-4.
- [8] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[J].北京:中国统计出版社,2012.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook [J]. Beijing: China Statistics Press, 2012.
- [9] 冯明,陈力,徐承科,等.中国煤层气资源与可持续发展战略[J].资源科学,2007,29(3):100-104.
FENG Ming, CHEN Li, XU Chengke, et al. Coal-bed methane resources and sustainable development in China

- [J].Resources Science,2007,29(3):100-104.
- [10] 刘文革,韩甲业,赵国泉.我国矿井通风瓦斯利用潜力及经济性分析[J].中国煤层气,2009,6(6):3-8.
LIU Wenge, HAN Jiaye, ZHAO Guoquan.Potential and economic analysis of VAM utilization in China[J].China Coalbed Methane,2009,6(6):3-8.
- [11] 毛庆国,陈贵峰,谢华,等.中国煤层气利用途径[J].洁净煤技术,2009,15(4):14-16.
MAO Qingguo, CHEN Guifeng, XIE Hua, et al.Utilization ways of China's coal-bed methane [J].Clean Coal Technology,2009,15(4):14-16.
- [12] 黄盛初,刘文革,赵国泉.中国煤层气开发利用现状及发展趋势[J].中国煤炭,2009,35(1):5-10.
HUANG Shengchu, LIU Wenge, ZHAO Guoquan.Coal-bed methane development and utilization in China: Status and future development[J].China Coal,2009,35(1):5-10.
- [13] 武建文.中国煤层气资源极其开发利用分析[J].科技创新与生产力,2010,200(9):22-24.
WU Jianwen.Analysis of coal mine gas resources and utilization in China [J].Taiyuan Science and Technology, 2010,200(9):22-24.
- [14] 刘笑迪.煤矿瓦斯防治部际协调领导小组九次会议在京召开[EB/OL].(2012-01-09)[2013-12-07].http://www.gov.cn/gzdt/2012-01/19/content_2048599.htm.
LIU Xiaodi.The 9th meeting of the Internal Minister Coordination Leading Group of Coal Mine Gas Prevention and Control held in Beijing[EB/OL].(2012-01-09)[2013-12-07].http://www.gov.cn/gzdt/2012-01/19/content_2048599.htm.
- [15] LOMBARDI L, CARNEVALE E, CORTI A.Greenhouse effect reduction and energy recovery from waste landfill [J].Energy,2006,31(15):3208-3219.
- [16] 魏宁,李小春,王燕,等.城市垃圾填埋场甲烷资源量与利用前景[J].岩土力学,2009,30(6):1687-1692.
WEI Ning, LI Xiaochun, WANG Yan, et al.Resources quantity and utilization prospect of methane in municipal solid waste landfills[J].Rock and Soil Mechanics,2009,30(6):1687-1692.
- [17] 邹才能,董大忠,王社教,等.中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J].石油勘探与开发,2010,37(6):641-653.
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Shejiao, et al.Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J].Petroleum Exploration and Development,2010,37(6):641-653.
- [18] 李新景,胡素云,程克明.北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J].石油勘探与开发,2007,34(4):392-400.
LI Xinjing, HU Suyun, CHENG Keming. Suggestions from the development of fractured shale gas in North America[J].Petroleum Exploration and Development,2007,34(4):392-400.
- [19] 姜福杰,庞雄奇,欧阳学成,等.世界页岩气研究概况及中国页岩气资源潜力分析[J].地学前缘,2012,19(2):198-211.
JIANG Fujie, PANG Xiongqi, OUYANG Xuecheng, et al.The main progress and problems of shale gas study and the potential prediction of shale gas exploration[J].Earth Science Frontiers,2012,19(2):198-211.
- [20] 李玉喜,张金川.我国非常规油气资源类型和潜力[J].国际石油经济,2011,19(3):61-67.
LI Yuxi, ZHANG Jinchuan.Types and potential of unconventional oil and gas resources in China[J].International Petroleum Economics,2011,19(3):61-67.
- [21] 张金川,徐波,聂海宽,等.中国页岩气资源勘探潜力[J].天然气工业,2008,28(6):136-140.
ZHANG Jinchuan, XU Bo, NIE Haichuan, et al.Exploration potential of shale gas resources in China[J].Natural Gas Industry,2008,28(6):136-140.
- [22] BP Public Limited Company.BP energy outlook 2030[EB/OL].(2013-01)[2013-12-07].http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/statistical-review-of-world-energy-2013/energy-outlook-2030.html.
- [23] CLAUDIO C, DANIEL B. IMO Tier 3:Gas and dual fuel engines as a clean and efficient solution[C]// paper No.187 presented at the 27th CIMAC Congress,13-16 May 2013,Shanghai,China.Frankfurt:CIMAC,2013.
- [24] CHRISTIAN T, ANDREAS B, NIKOLAUS S, et al. GE's all new J920 gas engine—a smart accretion of two-stage turbocharging, ultra lean combustion concept and intelligent controls[C]// paper No.289 presented at the 27th CIMAC Congress,13-16 May 2013,Shanghai,China. Frankfurt:CIMAC,2013.
- [25] CALLAHAN T J, HOAG K.An updated survey of gas engine performance development[C]// paper No.277 presented at the 27th CIMAC Congress,13-16 May 2013, Shanghai,China.Frankfurt:CIMAC,2013.
- [26] SOLOMON S.Climate change 2007—The physical science basis:Working group I contribution to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [27] 杨义,周淑慧,李琳娜,等.我国车用天然气业务发展现状与展望[J].油气储运,2013,32(9):939-942.
YANG Yi, ZHOU Shuhui, LI Linna, et al.Development actuality and prospect of domestic NGV business[J].Oil & Gas Storage and Transportation,2013,32(9):939-942.
- [28] 王鲁星,田明,韩有臣.LNG点亮中国船用燃料市场新前景[J].国际石油经济,2012,20(5):64-69.

- WANG Luxing, TIAN Ming, HAN Youchen. LNG lights the new prospect of China's marine fuel market[J]. International Petroleum Economics, 2012, 20(5): 64-69.
- [29] 樊金璐, 吴立新, 王春晶, 等. 中国煤层气发电技术发展和应用现状[J]. 洁净煤技术, 2012, 18(1): 1-4, 8.
- FAN Jinlu, WU Lixin, WANG Chunjing, et al. Development and application status of CBM power generation technologies in China[J]. Clean Coal Technology, 2012, 18(1): 1-4, 8.
- [30] BOVE R, LUNGHI P. Electric power generation from landfill gas using traditional and innovation technologies [J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(11/12): 1391-1401.
- [31] 中国客车网. 潍柴蓝擎 WP7 系列气体发动机[EB/OL]. [2013-12-07]. <http://www.chinabuses.com/product/show.php?productid=1103.html>.
- Chinabuses.com. Wei Chai Lanqing WP7 gas engine series [EB/OL]. [2013-12-07]. <http://www.chinabuses.com/product/show.php?productid=1103.html>.
- [32] 牟善祥. 气体燃料及燃气机的技术研究与应用[J]. 柴油机, 2009, 31(4): 45-52, 57.
- MOU Shanxiang. Technology and application of gaseous fuel and gas engine[J]. Diesel Engine, 2009, 31(4): 45-52, 57.
- [33] GE-Jenbacher. The new J920[EB/OL]. [2013-12-07]. <http://www.ge-j920gasengine.com/the-new-j920/specifications/index.jsp>.
- [34] OKA T, KONDO M, AIKO T. Development of large gas engine with high efficiency (MD36G)[C]// Paper No. 115 presented at the 26th CIMAC Congress, 14-17 June 2010, Bergen, Norway. Bergen: CIMAC, 2010.
- [35] THOR H, ERLING J, ERLEND V, et al. Development of the rolls-royce C26; 33 marine gas engine series[C]// Paper No. 54 presented at the 26th CIMAC Congress, 14-17 June 2010, Bergen, Norway. Frankfurt: CIMAC, 2010.
- [36] 卡特皮勒. 卡特彼勒燃气发电机组[EB/OL]. (2013-08-16) [2013-12-07]. <http://china.cat.com/cda/layout?m=442217&x=15&f=416505>.
- Caterpillar. CAT gas generator sets[EB/OL]. (2013-08-16) [2013-12-07]. <http://china.cat.com/cda/layout?m=442217&x=15&f=416505>.
- [37] SILLANPAAEAE H, ASTRAND U. Wärtsilä gas engines — the green power alternative[C]// paper No. 95 presented at the 26th CIMAC Congress, 14-17 June 2010, Bergen, Norway. Frankfurt: CIMAC, 2010.
- [38] BOECKHOFF N, HEIDER G, HAGL P. Operational experience of the 51/60 DF from MAN diesel SE[C]// paper No. 37 presented at the 26th CIMAC Congress, 14-17 June 2010, Bergen, Norway. Frankfurt: CIMAC, 2010.
- [39] 白红彬, 杨俊辉. 煤层气发电设备的比较与选择[J]. 中国煤层气, 2007, 4(2): 30-32.
- BAI Hongbin, YANG Junhui. Comparison and selection of CMM power generating equipments [J]. China Coalbed Methane, 2007, 4(2): 30-32.
- [40] 王大逊. 杭州天子岭垃圾填埋场利用填埋气体发电[J]. 环境卫生工程, 1999, 7(4): 151-153.
- WANG Daxun. Hangzhou Tianziling landfill gas generator[J]. Environmental Sanitation Engineering, 1999, 7(4): 151-153.
- [41] 全球节能环保网. 南京天井洼垃圾填埋气发电 CDM 项目 [N/OL]. (2009-12-02) [2013-12-07]. http://www.gesep.com/News/Show_1_26834.html.
- Global Energy Saving and Environmental Protection (gesep.com). LFG electricity power generation CDM project in Nanjing Tianwa Landfill [N/OL]. (2009-12-02) [2013-12-07]. http://www.gesep.com/News/Show_1_26834.html.
- [42] 杜鹃. 我国城市垃圾填埋气资源化利用现状及前景研究 [C]// 中国环境科学学会学术年会论文集: 第四卷. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- DU Juan. Resource utilization and prospect research of urban landfill gas in China [C]// Proceedings of Annual Conference of Chinese Society for Environmental Sciences. Beijing: China Environmental Science Press, 2010.
- [43] 中华人民共和国发展和改革委员会. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报 [M]. 北京: 中国经济出版社, 2011.
- National Development and Reform Commission. The People's Republic of China's second national communication on climate change [M]. Beijing: China Economic Press, 2011.
- [44] 李元建. 中国煤层气产业开发利用现状与对策分析[J]. 中国矿业, 2010, 19(6): 8-10.
- LI Yuanjian. China coalbed methane industry exploration & utilization status and countermeasure analysis [J]. China Mining Magazine, 2010, 19(6): 8-10.
- [45] 孔庆阳. 煤层气在气体燃料发动机上的应用[J]. 内燃机, 2006(4): 45-47.
- KONG Qingyang. Application of coal gas in gas engines [J]. Internal Combustion Engines, 2006(4): 45-47.
- [46] MORGAN S M, YANG Qing. Use of landfill gas for electricity generation[J]. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management, 2001, 5(1): 14-24.