

编者按：从本期起，本刊将连续3期刊登我国燃气行业资深专家——中国工程院院士李猷嘉先生的论述“当今液化天然气质量与互换性研究进展”。

国际燃气联盟（IGU）和英国BP集团于2010年发表了《燃气质量和互换性手册》，该手册是国际燃气联盟对互换性问题的系统的最新阶段成果。笔者通过学习和研究，认为我国在燃气互换性问题研究上与发达国家存在差距，并且还未意识到差距的所在，和应该怎么去做，而习惯于老的思维方式，希望国内燃气行业能认识、研究和借鉴该成果。我国燃气行业的现状是主要着眼于生活用气，而生活用气在世界范围内的比例已很小，同时对燃气质量问题的处理很粗放，此问题一直未得到解决，一直延续到今天，而沿海各省LNG的质量与原管道燃气的互换问题已迫在眉睫。应对气候的变化首先要着眼于改变我国的能源结构，“十二五”规划已开始有了转变，今后无论国内或进口天然气将必然有较大的发展，世界上燃气行业出现的发展趋势在我国迟早会到来。

论述分成3部分，之一：“燃气质量变化对终端用户的影响”，解决当今世界燃气的终端用户对燃气质量的要求，从中提炼出燃气互换性的共同参数（基础部分）。之二：“液化天然气互换性和质量的研究进展”，介绍和分析发达国家的研究思路：在民用燃烧设备互换性研究成果的基础上，增加一些限制条件以满足当前发展的需要（原理部分）。之三：“燃气质量管理方法与实践”，解决不能互换时的措施（对策部分）。

为了完成此篇论述，李猷嘉院士花了整整半年以上的时间，写稿时还做了大量的计算工作。由衷感谢李猷嘉院士对国际上燃气互换性问题的持续关注、介绍和系统阐述，感谢他对本刊的支持和信任。

《城市燃气》杂志社

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2011.07.001

燃气质量变化对终端用户的影响 ——当今液化天然气质量与互换性研究进展论述之一

□ 中国市政工程华北设计研究总院（300074）李猷嘉

1 前言

近年来，世界燃气工业发展迅速，有两个特点非常明显。第一，国际贸易量不断增加，除管道天然气外，液化天然气（LNG）也逐步形成了国际市场，

其标志是出现了现货市场，预计贸易量在2020年将达世界天然气消费量的17%。第二，天然气的应用范围日益扩大，除民用、商业外已扩大到许多工业（包括电力）和交通运输业。

当前，世界各国天然气工业的发展已做为应对气

候变化、开启低碳未来的重要措施之一。不同用户对燃气的质量,特别是燃气质量的变化有自己的要求。满足不同用户的质量要求已成为发展中的障碍和重要的前提。燃气质量中的互换问题重又凸显。当今,研究燃气质量中的互换性问题,应考虑到以下3个层次的内容:

(1) 终端用户对燃气质量的要求。由于燃气链由上、中、下游3个部分组成,各部分所涉及的技术内涵也不同,但满足各类终端用户的要求应是共同的目标。当前,即使直接为用户服务的下游燃气企业也不能只满足传统的民用、商业和一般工业用途的气质要求,还必须了解和掌握诸如发动机、燃气轮机和众多特殊工业对燃气质量的要求。一些发达国家远远走在前面,如不跟上必然会造成工作中的失误。

(2) 由于气源的变化日益增大,除常规管道天然气外,还有进口的液化天然气、非常规的天然气和各种生物质气等,其组分变化很大。能否利用同一供气系统满足各类用户的要求就成为必须解决的问题,在可互换与不可互换之间做出正确的决策,以确保气体燃料的使用能达到安全、高效和低排放的目的。

(3) 如果燃气质量的变化不能满足各类用户使用的燃气设施对燃气质量的要求,就必须有相应的对策,在安全和经济合理的前提下可对不同方案进行评估,做出燃气质量管理的正确决策。

值得注意的是,自2005年美国发表《天然气的互换性和非燃烧终端使用白皮书》以来,已引起欧洲一些发达国家的重视。有鉴于此,国际燃气联盟(IGU)2006—2009的研究计划中提出了《液化天然气的质量与互换性》的课题。研究中欧洲一些国家的燃气组织发表了很多论文,讨论的焦点和分歧也十分明显。国际燃气联盟委托英国BP集团写出了《燃气互换性和燃气质量手册》(Guidebook to Gas Interchangeability and Gas Quality),以英国的研究为基础,广泛的反映了当前存在的问题,也包括LNG的生产、供应、寿命期和使用的技术进展以及当前各国天然气质量标准的状况等,值得深入研究,开拓视野。由于国际燃气联盟是一个非政府间组织,无权制订、也不存在IGU的标准问题,因此宣称:BP或IGU不能保证文件中数据的准确性和承担任何人据此使用的责任。本书的出版也标志着该课题研究已告一段

落,因而IGU在2009年—2012年的研究计划中已不再列入。

笔者根据个人的学习和认识以及对我国情况的了解和分析,参考本书的内容和近年来国际上发表的有关论文,按上述的3个层次,写出了《当今液化天然气质量与互换性研究进展论述》之一、之二和之三,即:

- 之一:燃气质量变化对终端用户的影响;
- 之二:液化天然气互换性和质量的研究进展;
- 之三:燃气质量管理方法与实践。

由于我国的燃气工业与发达国家的实践相比已落后了半个多世纪,在广度和深度上都有差距,只有认真研究发达国家的经验,从中预知我国也可能发生的问题。更重要的是进行严谨的科学试验,坚持高标准,严要求,掌握第一性资料,才能不断取得进步。

2 问题的时代背景

本世纪以来,液化天然气(LNG)的质量与互换性已成为天然气工业发展中“共同”的突出问题。原因是世界范围内天然气的消费不断增加,而本国气源的供应量又不断减少。为保证安全供气,LNG迅速发展并已逐步形成了国际市场。贸易量1990年为56Mt,约占全球天然气的4%;2004年为131Mt,约占7%;2020年预计将达500Mt,约相当该时天然气的17%^[2]。此外,天然气的用气范围除民用、商业外,早已扩大到许多工业(包括电力)和交通运输,引进LNG后,终端用户对LNG的气质提出了不同的要求,原因是LNG的组分与原使用的天然气发生了很大的变化。不同LNG出口国的LNG高热值和沃泊指数可见表1。

由表1可知,只有美国的LNG热值最低,接近于纯甲烷的值。

2.1 世界主要LNG市场对质量的要求^[3]

(1) 日本、韩国通常用高沃泊指数的LNG($WI > 52 \text{ MJ/m}^3$),特点是已建成了世界最大的LNG市场,LNG链已得到优化。用掺混LPG的方法调整燃气的质量,有法律依据,气质长期稳定。当前对LNG质量的讨论与日本关系不大。

(2) 欧盟要求有较宽的质量允许范围,如西班牙。特点是已建立了管道气的市场,由于跨国联网涉

表1 LNG的高热值与沃泊指数 (15℃, 101.325kPa)

国家	阿尔及利亚 Arzew	阿尔及利亚 Bethioua 1	阿尔及利亚 Bethioua 2	阿尔及利亚 Skikda	埃及 Damietta	埃及 Ldku	利比亚	尼日利亚	阿布扎比
高热值 MJ/m ³	41.68	41.01	39.78	39.87	38.39	38.61	44.02	41.76	42.45
沃泊指数 MJ/m ³	52.62	51.96	51.41	51.42	51.03	51.19	53.82	52.87	53.16
国家	阿曼	卡塔尔	得林尼达	美国 阿拉斯加	澳大利亚 NWS	文莱	印尼 Arun	印尼 Badak	马来西亚
高热值 MJ/m ³	42.73	41.58	38.82	37.75	42.74	42.09	41.32	42.61	41.52
沃泊指数 MJ/m ³	53.27	52.65	51.29	50.62	53.40	53.06	52.64	53.34	52.70

及的国家很多 (常称欧盟27国), 各国所要求的燃气质量不一, 甚至采用的状态标准都不同。欧盟正在推动各国接受一个更宽的质量范围, 由欧洲气体能量交换合理化协会 (EASEE-gas) 在推动这一工作, 反映了欧洲大陆的许多特殊情况。

(3) 美国和英国需要低沃泊指数的LNG (WI < 52MJ/m³)。发展起来的LNG市场需利用已有的天然气管道供应, LNG的质量要考虑与现用天然气的互换性, 质量的调节除了靠购气合同限制外, 也考虑用加氮方法调节燃气的质量。

(4) 新发展的LNG市场, 如中国、印度等, 当前LNG的价格是发展的主要推动力, 正在开始注意研究适应不同质量的方法。

2.2 用什么指标或参数来确定LNG的质量?

2.2.1 主要内容

- 燃气的高热值, 代表燃气的能含量;
- 沃泊指数, 是燃气互换性的主要指数。

2.2.2 其它要求

- 高烃含量 (C₂, C₃, C₄, C₅⁺);
- 硫含量;
- 氮含量 (惰性气体);
- 露点 (水、烃) 和杂质等。

2.2.3 统一使用的标准状态

ISO 13443: 1996 (15℃/1 atm)

2.3 关于互换性的要求

- 用沃泊指数表示燃烧器火焰的输入能量

(负荷入力)。

(2) 在沃泊指数的范围内, 主要互换参数还必须满足:

- 控制NO_x和其他气体的排放量;
- 燃烧器的高效率;
- 燃烧设备的安全运行。

2.4 市场对燃气质量的适应性限制

(1) 根据燃气发动机的要求和成本决定LPG的掺混量, 如日本;

(2) 各国均有大量的民用燃具在使用: a.老的燃具不允许燃气的质量有太大的变化; b.质量变化的成本和安全风险必须考虑 (如英国就有4 600万个燃烧器);

(3) 含有惰性气体的管道气也有互换问题 (如泰国);

(4) 燃气轮机的制造商要求相对稳定的燃气质量。

国际市场中LNG的不断增长 (热值远高于管道天然气), 燃气应用中新型燃具的不断出现 (高效、节能、减排), 以及欧盟27国为统一燃气的质量标准出现的复杂性和不同意见, 导致燃气质量中的互换问题重又为各国所关注。质量中的互换性问题已涉及到供气链的上、中和下游, 由于问题太多, 概念上和过去也有许多的变化, 只能分层次的探讨。本文讨论的内容反映了终端用户对燃气质量的现实要求, 也是所以产生燃气互换性问题的根本源点, 是必须制订燃气质

量标准的重要依据。

3 对终端用户的影响

3.1 燃烧器的类型^[1]

在工业和商业用燃烧器的系统中，扩散型火焰和预混空气型火焰根据工艺的需要被广为采用。使用这两种方法的燃烧器又可分为5种类型：扩散火焰或后吸气式（补充吸气式）燃烧器；大气式燃烧器；空气—鼓风式燃烧器；喷嘴—混合式燃烧器；专用燃烧器，如脉冲式燃烧室或催化式燃烧器。

燃气质量和组分的变化会直接影响到燃烧特性，对系统的运行和产品的质量产生不利影响。影响的大小决定于应用方法、燃烧器及控制系统。影响的结果如下：

- （1）不稳定燃烧；
- （2）高污染物的排放；
- （3）效率降低；
- （4）出现燃烧问题；
- （5）出现热一声问题。

不同类型的燃烧设备和相关的燃烧质量问题汇总表2。

通常，工业用标准燃烧器均设有供给空气的鼓风设施，对一定范围沃泊指数的变化并不敏感，当沃泊指数降低，燃烧器需经一段时间的调节，才能恢复原

来的热负荷。但是，为满足排放安全的要求，民用燃烧器的沃泊指数调节范围就很小，使用不符合规定的燃气常会产生有毒气体的排放。

一个燃气工作者，为了确实掌握燃烧器的工作性能，必须在实践中先做一些基本试验，获得深刻的感性认知后才能更好地把握燃气质量的影响问题。试验内容包括：

（1）燃气喷嘴前压力变化的压力—流量曲线，以便观察压力变化引起的燃烧器热负荷的变化，也便于研究阻力最小的喷嘴结构；

（2）燃烧器的效率—热负荷曲线，加热时间—热负荷曲线，火焰的稳定范围图，燃烧产物中CO含量（NO_x含量）—热负荷曲线等；

（3）掌握不同离焰等级与脱火的关系；掌握黄焰端和黄焰的差别；掌握燃烧器头部的压力、一次空气吸入量和喷嘴前燃气压力等的关系；引射器的自动调节性能等；

（4）其他试验。如燃气热值变化对燃烧器效率的影响曲线；燃气热值变化对燃烧产物中CO含量，NO_x含量的影响曲线；被加热器皿的大小、形状和安装位置等与热负荷、效率的关系等；

（5）为了建立效率动态变化规律的概念，不论炊事或工业的工艺过程，可取有代表性的时间段内做出热负荷—效率曲线，从而求出该时间段的实际平均燃烧效率等。

表2 燃气燃烧设备和相关的燃气质量问题

燃烧器类别	关系	控制参数	对燃气质量的敏感度
民用燃烧器	· 多数燃烧器不具备完善的压力调节控制系统	· 沃泊指数	· 高
商业和工业用燃烧器	· 应用范围宽度 · 效率 · 排放量	· 沃泊指数 · 热值	· 低—中
燃气轮机	· 效率 · 排放量 · 轮机的寿命	· 沃泊指数 · 修正的沃泊指数 · 燃气指数 · 燃料指数	· 低—高
发动机	· 爆燃 · 效率 · 排放 · 稳定的燃烧	· 沃泊指数 · 甲烷数 · 辛烷值	· 高

(6) 不断掌握最新检测仪器的使用方法。建立试验的环境条件对热效率和排放量的影响概念,例如在25℃或15℃环境条件下,热效率的结果就完全不同。

有了上述基本功后,对燃气质量变化对燃烧器带来的影响才能有更深刻的理解,对研究国外的试验报告和论述也会有更深入的认识,带来共同的语言。

为使燃烧器适应燃气质量的变化,在工业设备上也可安装控制系统,例如安装在燃气轮机上的就比常规的燃烧器系统要复杂。而且虽有控制系统,排放情况仍有些变化。例如国外一些新型的干式低NO_x排放(DLN)或干式低排放(DLE)燃烧室,对燃气组分变化的允许范围均很窄。

火花点火发动机对燃气组分变化十分敏感,其性能和排放量决定于良好的点火质量,优化的燃烧率,合适的抗爆性能和燃气—空气混合物中能含量的控制。

燃气(或燃料)—空气混合物中的能含量用与化学计量比的关系来表示,如燃气—空气混合物中燃气与空气的比值相当于化学计量比,则定义当量比 $\phi=1$, $\phi<1$ 表示混合物中的空气量大于化学计量比,可称为贫混合气; $\phi>1$ 表示空气量小于化学计量比,可称为富混合气。 ϕ 值与我国习惯使用的一次(过剩)空气系数 α 的关系为倒数关系,即 $\alpha=\frac{1}{\phi}$,一次空气系数 $\alpha<1$ 为富气,过剩空气系数 $\alpha>1$ 为贫气。

上述扩散火焰燃烧和贫预混燃烧的特点是:在扩散火焰燃烧中,燃气和空气是由分离的通道导入。燃气和空气流混合处的火焰是稳定的,在接近 $\phi=1$ (或 $\alpha=1$)时,燃烧进行得十分迅速,火焰温度很高,在空气中足以形成NO_x。但贫预混式燃烧是燃气与压缩空气预先混合,过剩空气降低了火焰温度,是可以避免热NO_x的形成。但燃烧室应在当量比 ϕ 很小的范围内操作,避免 $\phi<0.5$ ($\alpha>2$)时的熄火和 $\phi>0.6$ ($\alpha<1.6$)时NO_x的形成。

3.2 燃烧器

3.2.1 燃气组分的变化影响工业燃烧器的性能和运行

对简单燃烧器的控制系统而言,空气/燃气比是一个常量的设定值,通常假设所用燃气的热值和沃泊指数也是常量,但对典型的燃烧器,通常设定值与正

常条件相比常给以10%的过剩空气量。

对过程控制中的工业燃烧器,热值的控制多于沃泊指数,因为比较粗放的控制系統常以体积而不是以质量或能量为基础。

调整好的燃烧器改用沃泊指数较高的燃气后将产生以下后果:

降低了效率。在已定的空气/燃气比情况下,使用沃泊指数较高的燃气会因缺氧而产生不完全燃烧,直接减少了能量输出,使燃烧效率降低,CO排放量增加。

相反,如改用低沃泊指数的燃气,由于过剩空气量相应的增加,污染物的排放等级将发生变化。烟气中的含O₂量提高,也使燃烧的总效率下降。经验表明,“若烟气中的O₂含量比优化条件时增加1%,则必须增加1%—1.5%的燃料消费量”。如果提高供气压力,增加燃气的消费量,虽然烟气中的含O₂量减少了,但过多的过剩空气将使火焰的燃烧速度比正常运行条件时降低,气流速度大于火焰速度的结果又易于发生脱火,降低效率。

一些与点火、效率和安全设备运行有关的可操作性问题,不会引发出提高沃泊指数的要求,但会使燃具的CO和NO_x排放发生较大的变化。一些老式的燃烧器设计似对燃气质量的变化并不敏感,但沃泊指数的增加仍会使排放量增加。

3.2.2 燃烧器的控制系统

燃烧器的控制系统是为了保证燃烧器的运行安全和适应燃气组分的某些变化。对火焰的检测可能引发出因燃气组分的变化造成火焰的外形也发生变化,使整个控制系统也发生失误,虽然不会对工艺的安全性有很大的影响,但明显会影响到工厂的运行、生产率和成本。

从工艺性能看,必须考虑到以下因素:

(1) 温度控制:工业过程要求在一定温度下运行,以保证产品质量达到设计要求。

(2) 热值对负荷或消费量的影响:为保持规定的工艺条件,需要控制热值和燃烧的热负荷,并与整个温度控制相连接。

(3) 燃烧效率:理论上,虽然高效率相应于燃气与化学计量的空气量相混合燃烧,但在实际操作中,供给的空气应有一定的裕量,避免理想工艺的变

化产生不完全燃烧和增加潜在的有毒CO的排放。

控制系统可能非常复杂，含有信号的反馈和前馈，为整体运行提供信息。

控制也可分成若干个等级和方法。其复杂性决定于所需控制的程度。高级的包括对过程的热量、温度、蒸汽等要求，也可以是简单的“开、关”式控制方法。低级的控制，可用一种实时计量的动作，保证整个控制工艺的“良好协调”。温度的控制要求也可利用回应曲线的形式记录工艺过程的时间与温度变化关系。

个案研究之一：工业与商业的燃烧器系统

美国燃气工艺研究院（GTI）最近调查了燃气质量变化对若干工业和商业燃烧器运行状况的影响，侧重在沃泊指数增大对排放量变化的关系，结果如表3。

表3 沃泊指数增大对不同类型燃烧器的影响

燃烧器类型	热负荷 (MJ/h)	沃泊数增加的影响	
		CO排放	NO _x 排放
辐射板式燃烧器	105.5	近似常量	近似常量
辐射管式燃烧器	未知	增加	减少
带状燃烧器	未知	常值或略减	增加

个案研究之二：对民用燃具的影响

英国的燃具试验计划（UK Appliances Test Programme）和美国燃气工艺研究院研究了民用燃具质量变化与排放量的关系。沃泊指数的增大使一些燃具的高峰排放量也增大。

沃泊指数的变化对CO排放量的关系可用以下公式表示：

$$CO (\times 10^{-6}) = (3 \times 10^{-6}) \times \exp(0.0128WN)$$

式中：WN—沃泊指数（Btu/cf）

沃泊指数从1 335Btu/scf增大到1 445Btu/scf（49.66–53.75MJ/m³）时，查试验结果的图表（在此略）可得CO从100×10⁻⁶约增加到330×10⁻⁶。

如按上式计算可得CO为102.217×10⁻⁶增大到323.468×10⁻⁶。

3.2.3 蒸汽锅炉，电厂等大型燃烧装置

大型燃烧装置也常设计成使用天然气做为燃料，这类厂对沃泊指数发生的变化不敏感，因为机械排烟

装置的布局有足够的裕量适应增加的沃泊指数。国外曾经有两个大型热电厂提出对燃气中汞含量的要求，这属于法律对排放规定的范围，而不是运行中发生的问题。对LNG而言，在上游液化厂，已完全解决了脱汞的问题。

3.3 燃气轮机

从国外干式低NO_x（DLN）或干式低排放（DLE）预混式燃烧器排放的分布图来看，都是按照规定的燃气质量范围优选过的，如供应燃气轮机的燃料在这一范围之外，则排放量几乎一定会增加。

在这样的系统中，燃烧室的排气温度可低至1 750K。试验表明，如温度降至1 600K，就会出现熄火的问题。

沃泊指数的突然降低会使燃烧室内的温度也随之降低；提高燃气轮机中燃料供应的沃泊指数，温度也随之升高，在系统内部产生热一声问题。在某些燃气轮机中设有所供燃气的热值和沃泊指数的测量装置，由综合控制系统根据所得的测定值控制轮机。

燃气组分对燃气轮机的影响有以下几个方面：

- （1）由燃气/空气比的变化使火焰失效；
- （2）NO_x的排放量与沃泊指数的变化是函数关系；
- （3）NO_x的形成与高烃含量等级增高的关系；
- （4）催化燃烧的效率与惰性气体种类和高烃含量变化的关系；
- （5）回火与自燃是燃气组分变化产生的后果；
- （6）对燃烧动力学、振动和噪声的影响。

现分述如下：

3.3.1 火焰的失效

火焰的失效即燃烧的不稳定性，常用燃烧的稳定曲线表示，纵坐标为燃气流动速度，横坐标为燃料/O₂的比值（或一次空气系数）。如出现火焰回缩，回火、离焰和脱火或猝熄等现象就是火焰的失效。对燃气轮机，燃气组分发生快速的变化会导致火焰的失效，或引起燃烧动力特性的变化和噪音的产生，进一步发展会造成振动引起损伤。

3.3.2 在燃料的灵活性、燃烧室的类型和排放量之间有一定的相关性，可参见图1。

在一些可再次调整的干式低NO_x燃烧室中，可改进排放的性能，虽然燃烧的动力学问题可能增多。图2表示NO_x的排放量变化与沃泊指数的函数关系。

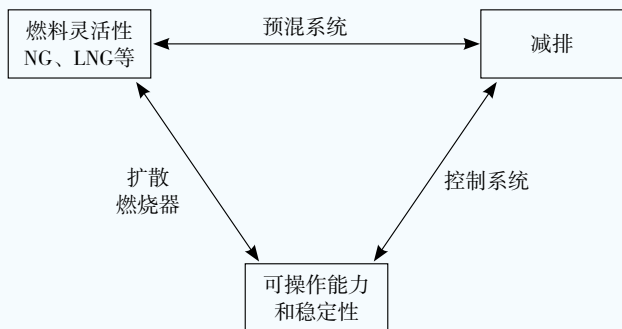


图1 燃料灵活性、燃烧室类型和排放量之间的相关性

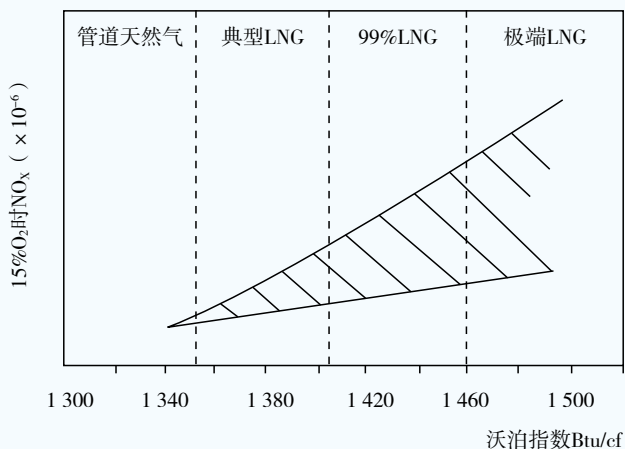


图2 NO_x的排放量与沃泊指数的函数关系

3.3.3 高烃含量对燃气轮机的排放效应

个案研究之三。

美国国家能源技术实验室侧重在一个模拟的燃气轮机上做了基础研究。研究天然气中高烃含量对NO_x排放的影响。得出的结论可见图3和图4。图3表示火焰温度对NO_x排放量的影响，图4表示当量比 ϕ 对火焰温度的影响。由图3可知，对天然气而言，当火焰绝热温度为1550K时，NO_x的排放量约为： $9.3 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$ ；火焰温度为1662K时，NO_x的排放量约为 $14.0 \times 10^{-6} \sim 14.5 \times 10^{-6}$ 。如对天然气和丙烷的混合物而言，火焰温度为1565K时，NO_x值为 10.0×10^{-6} ；火焰温度为1678K时，NO_x值为 $15.0 \times 10^{-6} \sim 15.3 \times 10^{-6}$ 。火焰的温度则可按图4查出。如对天然气而言： $\phi=0.422$ 时，火焰温度约为1550K； $\phi=0.480$ 时，火焰温度约为1660K；对天然气与丙烷的混合物而言： $\phi=0.425$ ，温度为1565K， $\phi=0.483$ ，温度为1675K。以上说明，相同的 ϕ 值，

混丙烷的天然气火焰温度比不混丙烷天然气的火焰温度要高，因而NO_x的排放量也高。不同燃气参数之间的相关关系可见图5。

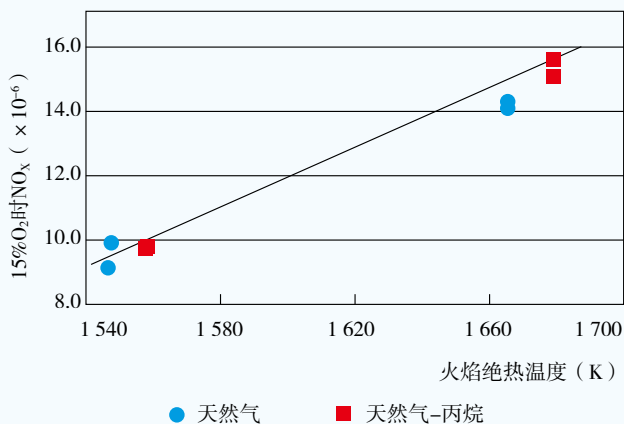


图3 火焰温度对NO_x排放量的影响

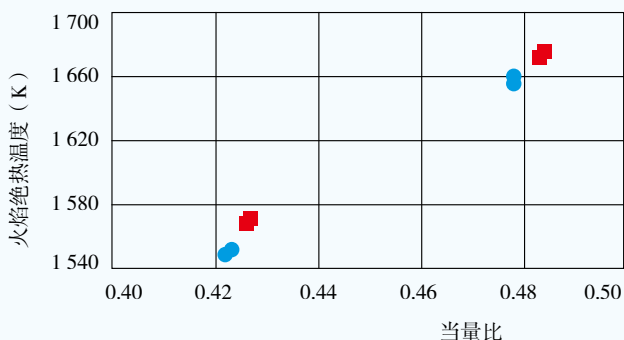


图4 当量比对火焰温度的影响

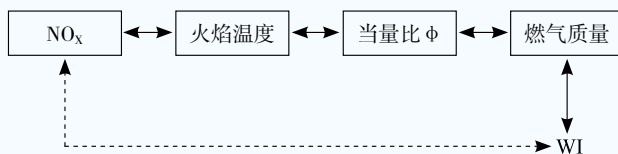


图5 不同燃气质量参数之间的相关性

上述研究结果所示的NO_x与沃泊指数WI之间的关系与已公布的其他研究结果不同，数据也与其他研究不成比例。显然，进行更多的研究是必要的。值得指出的是：上述的试验结果来自一个模拟的燃气轮机，不完全等同于实际的燃气轮机，这可能是试验结果有所不同的原因。

稀释LNG对达到等值的发电量有很大的影响。实

际上,若稀释量达到4%~5%,则燃烧室中火焰的温度可降低,从而可得到相同的发电量(质量流量的关系)。这与其他的试验观察结果相一致。对微型燃气轮机而言,掺入惰性气体可降低 NO_x 的排放量。英国的观察结果表明:位于LNG进口终端附近的电厂,若使用再气化的LNG, NO_x 的排放量会增加。

3.3.4 燃气轮机的催化燃烧

在天然气的燃气轮机上使用催化燃烧法是一种正在开发的超低 NO_x 排放技术。工艺过程中使用的一种催化剂可使燃烧不会形成很多的 NO_x 和CO。

在美国,已在小规模催化燃烧模型中研究燃气组分变化的影响。用含有高烃的天然气和惰性气体来模拟燃气质量变化的范围。试验在一个燃气轮机的典型运行条件下进行。压力比为10—20,可覆盖工业和公用事业中燃气轮机燃烧室的条件。实验数据表明:

(1) 惰性气体的增加实际上对燃烧特性无影响。

(2) 高烃含量的增加会导致降低对催化剂入口温度的要求(常称催化剂的入口为“运行窗口”)。

根据试验结果,可导出一个催化剂入口温度与高烃含量和碳原子数的关系式。用这一关系式可计算每一试验燃气所要求的窗口温度。在美国,对多数燃气算出的催化剂窗口温度均低于20℃,这一温度在催化燃烧室的允许范围之内。在催化燃烧系统中,燃气温度高于此值时也可应用,但催化剂的入口温度应降低,以保持燃烧室的耐久性。

研究结果认为:催化燃烧系统有能力适应组分范围较宽的天然气。对多数燃气而言,其多样性不会影响到燃烧室的耐久性。

图6为催化燃烧室简图。

3.3.5 NO_x 的形成(燃气轮机排气中的“缕”状烟气)

无后燃烧排放控制的燃气轮机和烃含量等级较高的燃料燃烧时,会形成一缕缕褐色的烟气从烟道中排出,伴随着 NO_2 浓度的增高。

这一现象常发生于升温阶段,只有部分负荷在运转,且与基本负荷相比燃烧效率降低时。但也有例外,即在基本负荷时也出现过缕状的褐色烟气。

为能观察到缕烟, NO_2 的含量等级应大于 50×10^{-6} (即, NO_2 的浓度乘以缕烟的直径—假设等于烟道的直径)。NO转换成 NO_2 的机理也包括由高烃形成

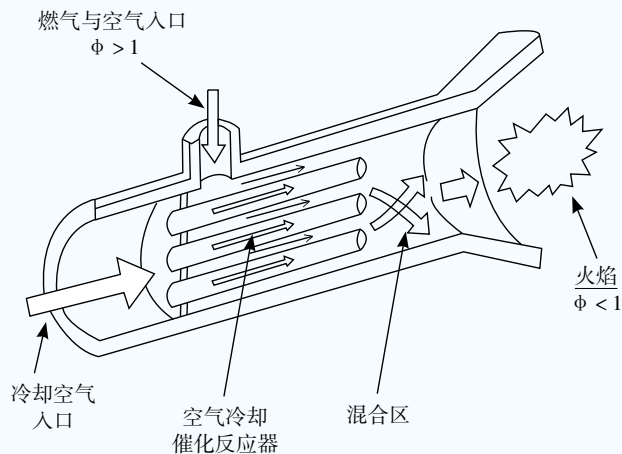


图6 催化燃烧简图

的过氧基;在某些条件下,转换率可超50%。应指出的是, NO 转换成 NO_2 的过程中,总 NO_x 的排放量不变。这说明,由于高烃的存在, NO 转换成 NO_2 就成为一种 NO_x 的减排方法,类似于可选择的催化减排(SCR)。SCR系统是一种用氨和活性催化剂将 NO_x 转换成 N_2 的方法。但改变 NO 和 NO_2 的含量会增加氨的使用量,造成烟气中有氨的排出(常称为“氨的损失”)。

3.3.6 燃气轮机燃烧器的不稳定性(回火与自燃)

在干式低排放和干式低 NO_x 燃烧室中采用预混式燃烧器时,对回火与自燃特别敏感。两者均由燃气组分变化所引起,并受高烃含量和当量比 ϕ 的变化影响。

(1) 回火

当火焰速度增加,且通过燃烧室内流量不能平衡所发生的变化时(即流动速度小于火焰速度时),火焰会向引射器回传,导致燃气喷嘴和引入空气的分配系统损伤。即使微小的损伤对系统也会造成影响,使全部燃烧系统遭到破坏(如不及时发现,会酿成大错)。

回火还将产生燃烧的震动和破坏燃气轮机的空气涡流组件。

(2) 自燃

如燃气被引入预热的空气流,虽无点火源,当温度高达一定程度时也会形成燃烧过程。高烃类燃气的自燃温度比甲烷低,甚易造成热失控。即使两种燃气的沃泊指数相同,但高烃含量高的燃气会显示不同程

度的自燃特性，而惰性物质的存在却无太大的影响。

自燃需要一定的燃烧反应时间，用来提高热失控和增加全部燃烧的比率，即通常所称的着火延迟时间。如与高温接触的时间短于延迟时间，自燃就可防止。这一概念可使燃气轮机的设计工程师们确定预混系统的时间范围（停留时间）。

至今难以预测燃气组分对自燃问题的影响，因为在燃气轮机运行条件下积累的有效数据还很少。燃气轮机有可能得到典型混合燃气的自燃延迟时间只有几十个（千分之一秒），而在燃烧室中停留的时间在多数情况下只有几个（千分之一秒）可使用。虽有一定可利用的安全范围，但燃气组分变化是否能延迟自燃还难以确定。

3.3.7 动力学、振动和噪声特性

燃气组分的变化可造成燃烧的振动，并转化为噪音和压力脉冲兼备的机械振动，危及燃气轮机整体的机械结构，增大疲劳应力和机械零件的潜在失效率，提高修理和重新安装的成本。

动力学和燃烧振动也可对燃烧过程提供一个反馈机制。小振会导致大振，增大对燃烧室的影响。燃烧室内的共振会提高过度噪声的等级。

至于微型轮机，是一种小型的燃气轮机，发电功率在25kW—500kW之间，适用于小型工地的发电和热、电联产。对已知的燃气组分，用设定的参数可优化燃料的控制系统。设定参数决定于发动机控制系统软件中燃料的物理性质。根据天然气的原始资料，多数微型轮机允许“燃料指标”有10%~15%的偏差。设定参数可根据燃气的相对密度和高热值算出。

燃气质量变化的效应可归结如下：

（1）排放量：通常指 NO_x 、CO和总烃的排放量与相对于甲烷的重烃增加比例值有关。

（2）冷凝物（液）：冷凝液滴的存在会严重损伤发动机。以顶级的微型燃气轮机为例，要求燃气系统的各点上燃气的温度必须高于其露点温度 10°C 。

燃气轮机的制造商不主张公开发布燃气质量与燃气轮机运行中的问题。燃气轮机合同燃料的规定是通过协商，性能保证是根据所提供的燃气质量来实现。通用电力公司（GE）引用的修正沃泊指数（MWI）为5%，并宣称如超过5%则必须重新分析和批准所有的条件。

在轮机的燃料规定中，烃露点是一个非常重要的参数。增大沃泊指数通常也提高了形成液烃微滴的露点。英国典型管道燃气的露点为 -21°C 和3MPa。如适当提高烃含量的等级，露点值就会增高到 16°C 。对燃气轮机燃料的引入系统，必须保持气相条件，任何液体燃料的液滴一旦进入系统就会影响到硬件和热负荷。为此，许多燃气轮机均有燃料供应的加热器，防止发生露点问题，且使用修正的沃泊指数比沃泊指数更好。

通用电力公司声明：其轮机所用的气体燃料组分发生变化，必须安装某些监控仪表，如气相色谱仪等。燃气中的痕量物质会严重影响轮机的性能，如痕量金属会损坏轮机的叶轮。

修正的沃泊指数的数学表达式如下：

$$MWI = \frac{LHV}{\sqrt{SG_g \times T_g}} = \frac{LHV}{\sqrt{(MW_g \div 28.96) \times T_g}}$$

式中：LHV—燃气的低热值 MJ/m^3 ；

SG_g —燃气的相对密度；

T_g —燃气的绝对温度K；

MW_g —燃气的分子重量；

28.96—干空气的分子重量。

3.4 发动机

燃气质量和互换性对燃气发动机的影响包括燃气的组分及其附加的燃烧特性。最新一代发动机增加了自适应的发动机控制系统后，允许烃组分有较大的变化。一些老一代的发动机若使用低抗爆性的燃气，不论使用时间的长短，均会发生严重的破坏作用。

燃气质量对系统的整体性、发动机的性能和排放量的影响可用不同的标准来说明。

3.4.1 系统的整体性

ISO 15403（天然气作为汽车压缩燃料使用的质量规定）中，对天然气作为公路运输燃料使用时的某些性质设定了限值，涉及燃气组分的内容如表4。

3.4.2 发动机的性能

火花点火发动机的性能和排放量决定于良好的点火、优化的燃烧能力、合适的抗爆性和控制燃料—空气混合物中的能含量。

燃料的性质关系到发动机的性能，包括空气—燃料比、燃气的组分（沃泊指数与甲烷数）和抗爆性。分述如下：

表4 对汽车发动机使用的燃气规定

水含量	$< 0.03\text{g/m}^3$	在可能发生的压力和温度条件下
硫化物	$< 120\text{mg/m}^3$	有水存在时要防止腐蚀和排出催化剂的中毒
CO ₂	$< 3\%$	—
游离O ₂	$< 3\%$	—
乙二醇/甲醇	未加入	—
油性成分	$70 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$	—

(1) 空气—燃料比 (对气体燃料即一次空气量与燃气燃烧化学计量空气量之比)

——是反映混合物能含量的主要因素, 空/燃比的变化对功率大小的影响大于燃气组分的变化。

——发动机效率的最高值相当于空/燃比的范围为1.05—1.10 (即一次空气系数 $\alpha=1.05\sim 1.10$), 这也是NO_x产出量最高的范围。发动机应在稍高的富气条件下 ($\alpha=0.9$) 运作, 以便得到最大的启动力矩。

——在火花点火的发动机中, 点着能力与空/燃比有很大的关系。在 $\alpha=0.9\sim 1.5$ 的范围内, 天然气的点火不会发生问题。

——空/燃比的变化也影响到燃烧速度。如空/燃比大于化学计量值 (即 $\alpha > 1$), 就会延长整体的燃烧过程。这说明, 如发动机的点火时间是按化学计量比设定的, 则对 $\alpha > 1$ 的这种贫混合气的点火时间应提前。

——如增加N₂或CO₂这类惰性气体的含量, 燃烧能力便降低, 并再次需要提前点火。用涡轮增压的方法可补偿这一效应。

(2) 燃气的组分和沃泊指数

——燃气组分对发动机工况的影响宜用沃泊指数和甲烷数两个特性数值表示。

——如沃泊指数为常数, 则燃气组分变化对空/燃比和燃烧能力不会引起显著的变化, 但会改变可燃混合物的体积能含量和抗爆性。

——燃气的沃泊数会影响到发动机的出力, 使汽车的功率降低; 例如, 在燃气中N₂含量增加时。

燃气组分对天然气汽车性能的影响与天然气汽车工业有关。最初由汽油车改装的天然气车均设有复杂

的“关闭回路”控制系统。它能调节反映燃气组分变化的空/燃比。

对大型车, 如拖车和大巴, 则要转换高压压缩性的柴油发动机, 对燃气组分的变化就要求更高。这类车通常均在高效下运行, 接近于燃料的“爆炸极限”。燃气组分的变化 (如增加烃含量) 会引起潜在的“爆震声”, 说明发动机汽缸内的点火不正确, 长期如此就会损坏发动机。

(3) 抗爆性

——高的热效需要燃料有高的压缩比, 因而要求燃料有较高的抗爆性。天然气比汽油有较高的抗爆性。发动机设计成有高的压缩比, 并与天然气的高抗爆性相匹配, 可明显的提高效率。

——高烃的存在将降低燃料的抗爆率, 如发动机没有保护就会遭到严重的损伤。

3.4.3 排放量

以天然气为燃料的汽车排气中, 含有NO_x、CO₂和未燃烃。主要排放量为CO₂, 也可认为是一种污染物, 但从单位输入能源的排放量作比较, 则天然气低于汽油、柴油或LPG。

——NO_x的形成量决定于燃烧过程的最高温度和可用的O₂量。即, 燃气的组分变化后, NO_x的形成受最高温度和空/燃比变化的影响。

——CO的大量形成是因燃烧过程中空气供给量不足所致 (空/燃比小于1.0); 火焰与冷表面接触而熄灭时也有CO形成。

——燃料不完全燃烧所产生的未燃烃是因贫混合气体中空气量的增加导致温度和火焰速度降低所致。燃料中不同的高烃浓度会影响燃气组分的分类和排出废催化剂的活性, 导致有较高的总烃排出量。

——在一些国家中, 法律对非甲烷烃类的排放量非常重视, 因为燃料中的较高烃类会直接影响到排气中非甲烷烃类的排放量。

总之, 燃气组分的变化会影响到污染物的排放等级。首要的影响来自沃泊指数的变化。具有合理的综合发动机控制系统 (硬件和软件) 时, 可以适应沃泊指数的适量变化, 对排放量也只有少量的影响。但这种情况只有在发动机的运行接近于化学计量比, 排气道中放置可排除3种污染物的催化剂, 且排气道中还设有O₂敏感元件的角环反馈控制装置时才能实现。

催化式排气净化器或催化剂常置于汽车发动机和排气道之间，它是一个蜂窝结构的陶瓷体，上面覆有催化剂。催化剂通常为铂、铑和钯。蜂窝结构的设计是利用其具有单位体积的最大表面积原理。

汽油发动机（火花点火式）装有所谓的三元减排催化剂，用它减排3种污染物，即CO、未燃烃和NO_x。三元减排催化剂包括两个完全不同的部分：一种NO_x减排催化剂，可由NO转化成N₂和O₂（基本反应是2NO→N₂+O₂）；一种氧化催化剂能氧化有害的CO和未燃烃，使之成为CO₂和水。

NO_x减排催化剂可保证汽油发动机能按化学计量比运行。用一个O₂敏感元件放置在催化剂的下游方（离开发动机），敏感元件向电控组件提供信号，调节进入汽缸的燃料量。

柴油发动机被设计成可用贫气操作，可使用比化学计量比更多的空气，NO_x减排催化剂不工作，而氧化催化剂可有效的减少CO和未燃烃和一些悬浮物质。这是柴油车NO_x排放量常高于汽油车的原因。

如不用催化剂和O₂敏感元件，则NO_x和CO的排放量完全受到了燃料组分变化引起的空燃比的影响。

所用的催化剂应根据天然气的组分变化进行修正。催化剂对高烃含量的作用远大于甲烷和乙烷。甲烷需要加载更多的催化剂材料，更高的排气温度和较低的空间速度（空速）。钯催化剂常用于甲烷的转换。三元减排催化剂的运行区可见图7。

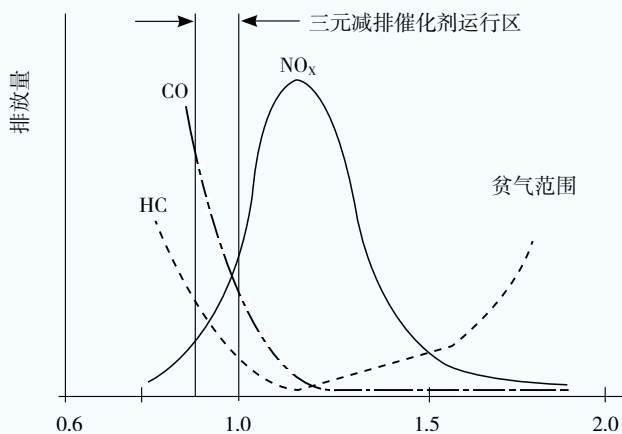


图7 三元减排催化剂的运行区

个案研究四：北美用丙烷—空气调峰产生的影响在北美的一些地区，在配气系统中加有丙烷—空

气混合物以满足高峰耗气量的需要（笔者注—美国首都华盛顿有两座这样的调峰设施满足冬季天然气供应不足7天的需要）。在这一条件下，压缩天然气中较高烃类含量的变化就很大。在气库的服务站中常有冷凝物排出；在加气站中，气库的压降会使浓度进一度增加。这种情况下，对燃气的质量几乎不可能作适当的控制。

主要的问题发生在汽车的汽缸内压缩天然气中含有高等级的丙烷气。在低温和瓶内压力大于5.5MPa时，丙烷将从气相中析出，形成液体，在发动机运行时这些液体也无法排除。如果继续使用这一燃气，只有降低压力才能使丙烷再次气化，但丙烷在燃气混合物中的含量已完全不同于对最初压缩天然气的要求，这就产生了许多控制和可靠性的问题。

这一个案说明，原来以丙烷—空气混合物调峰的系统，一旦随着科技的发展，用户的扩大，需要作为交通运输的燃料时就会发生问题，这在1999年10月美国加州能源委员会《压缩天然气加气系统评估》报告中已有说明。一种建议是改用液化天然气作为调峰手段，这又将牵连到许多其他的新问题。

3.5 对火焰和温度控制有要求的加工工艺

燃气质量对玻璃工艺和金属预热工艺的影响涉及到炉窑的温度、火焰的长度、火焰接触炉壁的温度（撞击温度）和空/燃比，这些均会影响到产品的质量。

对金属预热工艺而言，燃烧产物中的O₂含量会影响到氧化鳞状锈皮的形成。如含O₂的等级太低，锈皮就变硬，在锻造工艺中移动不便；如含O₂的等级太高，锈皮太厚，金属损失量增大。

对玻璃工艺而言，一些问题也与燃气温度有关：有色玻璃产品的质量取决于炉窑中的空气条件。如炉窑内部含氧的等级或火焰的温度有变化，色泽的质量就会降低。对钢化安全玻璃的切割和抛光要求燃烧器在接近化学计量比的条件下运行，沃泊指数的任何变化均会影响到火焰的温度和排放量。

玻璃工业所含的范围很广，包括：平板玻璃、容器玻璃、模压吹出玻璃（桌面、烤盘、平板显示屏、灯泡、显像管、科学和医用玻璃等）和玻璃纤维（绝缘用、纺织用、材料加强用和光导纤维等）等，对燃气的质量各有需求，应认真研究。

3.6 化学工业—甲烷的蒸汽改质或重整

在化学工业中,天然气既可作为燃料也可作为原料。蒸汽改质工艺用于从烃类生产 H_2 。 H_2 在工业上用途很广,其中的一个重要用途是生产合成氨,是农用化肥中氮、磷和尿素的基础。

制 H_2 厂的运行人员需要有合适的天然气作原料。天然气原料中高烃含量的升高(即提高沃泊指数)对甲烷的蒸汽重整工艺而言,由于C的沉积,可导致催化剂的减活或钝化。此外,由于 CO_2/H_2 比的提高而影响工厂的运行条件。一种预重整的工艺可帮助去除不希望含有的杂质,改善转换反应催化剂的寿命,并使所供的原料有一定的适应范围。

重整工艺的第一步是脱S。 H_2S 的脱除可防止重整催化剂的中毒。最常用的是活性碳床。因为重烃可降低C和S含量的作用,使C能多次再生。只要用过热蒸汽通过活性碳床就能达到要求,并可改善工厂的能源平衡。

4 结论与认识

(1) 燃气的应用范围扩大后,国际上传统民用与商业用气在总量中所占的比重逐渐减少,其他工业用户如发电等的比重逐步增加,尤其是发达国家更为明显。为应对气候变化,减少温室气体的排放量,优化能源结构是必然的趋势。进口LNG、发展非常规天然气和生物质气与现用管道天然气的互补性必然会促使气质发生变化。过去以本生火焰为基础研究制定民用燃具为主的燃气互换性方法显然已不适应当今世界燃气工业发展形势的要求,研究工作必须从当今终端用户的要求开始。

(2) 研究终端用户要求的目,旨在解决如何确定互换性要求中的共同参数问题。共同参数要从不同应用方式的燃烧装置中提炼出来,形成统一的完善理论,并以足可指导运行实践为目的。应把保证燃烧装置的高效和低排放放在第一位,再旁及必要的有关燃烧安全的参数。

(3) 当今研究成果的代表性思路是参照了过去关于互换性的研究成果。分析结果表明,仍以沃泊指数为主要参数,增加了修正的沃泊指数和甲烷数等要求,加上其他的安全参数,成为当今液化天然气质量

与互换性研究的基础,在这一基础上才有可能形成后续的互换性方法和质量管理的实践等。

(4) 围绕节能减排的要求,各种应用实践的本身在不断的发展且日新月异,是燃气工业科技创新的重要部分。因此必须不断的总结经验,使互换性方法也不断完善。本文所介绍的研究成果,仅是近年来的研究所得,其应用应通过运行、使用者的认识来判断。从本文可以认识到,必须认真做许多实验研究,研究中必须高标准、严要求,取得第一性认识。

(5) 从当今各国的发展实践已明显看出过去互换性研究中的不足。如本文中个案研究四的示例指出:在管道天然气调峰中,如采用液化石油气加空气的方法,这种混配气已不能压缩后作为车用燃料,这是过去认为可互换的燃气不能适应当今要求的一个例子。

(6) 在民用燃具中有所谓适应性的问题。当燃气使用于各类工业用户后,要密切关注工业控制系统的技术发展。如本文中所介绍的催化式排气净化器等,均属于解决互换性的互补技术,也就是以控制技术来扩大互换范围的一种思路。大量资料表明,天然气的节能、减排效果不能无端产生,还得有先进的应用技术来保证,燃气质量的稳定 and 变化范围是一个重要的前提。

工程信息

贵阳小河液化天然气站扩容

近日,总投资4 000万元的“小河液化天然气储配站扩建工程”正式开工建设。该工程2011年9月底建成后,天然气日供气能力将从目前的30万 m^3 提高到60万 m^3 ,确保小孟工业园、龙洞堡片区、小河区开发大道沿线工商业用户及居民的用气需求。

据介绍,小河液化天然气储配站位于小河区三江口,第一期工程是建设储容110万 m^3 的天然气储罐,该工程已于2008年8月竣工投运。

(本刊通讯员供稿)