

欧美燃气质量和互换性问题研究的近期进展（一）

□ 中国市政工程华北设计研究总院（300074）李猷嘉

摘 要：围绕欧盟EN437标准和《共同的商务实践准则》在贯彻中遇到的挑战，追踪欧美对燃气质量和互换性问题近期的研究进展和获得的成果。

关键词：EN437标准 共同的商务实践准则（CBP） 燃气质量和互换性 方法与成果

1 前言

从上世纪末到本世纪初，世界燃气工业发展中对燃气的质量要求，包括燃气的互换性问题，产生了许多不同于传统的概念和要求，归纳起来，可分成以下几个形成的阶段：

（1）欧洲是城市燃气的发源地，已有200年以上的历史。由于燃气使用的历史悠久，各国所用燃气的组分有很大的差别，应用的法律和规程也不同，甚至连状态参比条件至今也不统一。欧盟成立后，成员国已达27个（2003年），在燃气工业中，如何建立一个统一的欧洲燃具市场和统一的贸易市场，已成为发展中的一个重要课题，其中天然气的质量标准是一个不可回避的基础问题。在上世纪90年代，为了构建统一的燃具市场，首先发布了一个欧洲的燃气用具导则（GAD—Gas Appliance Directive），名称为GAD 90/396/CEE。随后，为贯彻导则，制定了一个欧盟的EN437标准，名称为《试验气—试验压力—燃具的类别》（Test gases—Test pressure—Appliance Categories），这个标准至今已有1993年和2003年的两个版本。颁发后欧洲国家的有关部门展开了讨论，特别是欧洲燃气工业技术协会（MARCOGAZ—The Technical Association of the Gas Industry in Europe）和一些研究部门有多篇报告和文章对该标准进行了分析研究并提出建议，且一直延续至今。本世纪以来，以从事天然气贸易方的股东为代

表的欧洲能量交易合理化协会—燃气分会（EASEE—gas—European Association for the Streamlining of Energy Exchange—gas）的执委会也以燃具导则为依据，发布了一个《共同的商务实践准则》（CBP—Common Business Practices）（2005.2.7出版）（以下简称《准则》），其目的是为了创建一个有效的欧洲燃气市场，便于简化风险投资人之间的商业过程。由于《准则》缺少必要的实践依据，履行的时间一再拖延，讨论也一直延续至今。

（2）欧盟EN437标准发布后，也得到美国燃气协会的重视。在上世纪末出版的著作《燃气工程及运行实践》丛书第五卷（丛书共11册）的附录中，全文转载了EN437标准1993年版的全文，这在历史上也是少有的。书中根据美国的传统方法，对该标准进行了分析和讨论，也详细的介绍了在上世纪美国的研究和进展。可以看到非欧盟国家对该问题的不同思路，也加深了对EN437标准的认识。

（3）本世纪初（2005年）美国天然气委员会和互换性研究工作组（简称NGC+）发布了《关于天然气的互换性和非燃烧终端用户》的白皮书，提出了许多新的燃气利用领域中用气设备对燃气质量变化的要求。实际上，燃气工业发展至今，从总耗气量来看，各国的燃气利用方式均在变化中，例如：有的仍重视传统的民用炊事炊具，有的国家已转变到各种加热设施，如不同类型的锅炉或各类发动机、燃气轮机等。

不同的利用方式对燃气质量的变化应有不同的要求,在讨论中也难免因口径不一而各说各的。LNG的国际贸易量在不断增加,LNG质量的变化可能完全不同于传统的管道天然气。例如日本的法律要求对进口的LNG按统一标准对LNG增热,而另一些国家就必须考虑与原供燃气质量的匹配或采用改质LNG、掺混等方法后的成本问题。为此,国际燃气联盟(IGU)从2006年起提出了“LNG与燃气互换性”的课题,组织有能力和条件的国家开展研究。几年来发表的研究报告加起来已不下数百页,大量的资料值得研究和学习。虽然,有些报告提供的实验资料还不够详细,或者说明有些该做的实验还尚未完成,但已有的研究表明,解决问题的思路已渐趋一致,许多问题,包括某些标准在内已不断得到澄清,历史上已有的一些预测互换性的方法也由原提出国不断修正和更新,均值得注意。

(4) 对于欧盟标准中的问题应由欧盟国家自己解决。经过多年的讨论和实践,欧洲委员会(European Committee)已要求欧洲标准化委员会(CEN—European Committee for Standardization)评估燃气质量变化对燃具性能的影响,根据评估结果再形成燃气的质量标准。EASEE-gas的《准则》和成本效益分析,则由欧洲委员会委托别的部门咨询。

2007年欧洲标准化组织已形成一个代号为BT197的工作组,研究燃气质量的变化对燃具的影响。研究工作由欧盟15个成员国组成的集团来完成,实验由丹麦燃气技术中心(Danish Gas Technology Center)负

责,并由技术协会和EASEE-gas两个协会参与管理这项研究工作。项目的名称为欧盟燃气质量项目—EN(GASQUAL Project)。研究工作从2009年1月开始,要求在2012年完成。2012年发表了《燃气质量的协调:欧洲的状况》报告^[9],结论意见已趋于一致,在本文中有所介绍。美国近期对各类燃具也做了大量研究^[11],本文也有所涉及。研究工作需有相当的资金和人力投入,与发达国家相比,我国还有很大的差距。

(5) 研究国外的文献资料也可看到一些新的动向^[11]。例如,从长期着眼,技术的进步可使燃气质量的变化不成为限制的条件,而只需考虑经济政策。这是美国、英国和欧洲部分国家积极开展各类燃具试验的意义。有的认为今后20年,一些国家的政府可能预测到质量变化的范围,当今就应逐步做好准备。从技术上看,期望使用微型芯片自调装置(Micro-chip based self-adjustment device)使各类燃烧设备适应燃气质量的变化,一些国家不仅对燃气轮机等大型设备进行试验,对民用燃具也在试验中。科技进步日新月异,不同专业相互交叉,研究工作应在充分掌握世界最新前沿研究成果的基础上进行创新。

2 欧洲燃气工业的基本状况

欧洲的国家虽多,但燃气工业的研究常以8个国家的基本状况做前提,这8个国家的燃气消费量约占整个欧洲的84%^[9],其现实状况见表1。

表1 欧洲八国燃气工业的基本状况

	丹麦	美国	荷兰	意大利	比利时	法国	西班牙	德国
燃气总消费量 10 ¹² wh	172	1 018	437	718	172	460	196	910
燃气在一次能源 中比重 %	22	40	47	33	23	14	12	21
民用和商业所占 比重 %	15+8=23	35+12=47	25+21=46	30+9=39	25+11=36	36+16=52	14+4=18	32+4=36
燃气的沃泊指数 MJ/m ³	49.10~52.79	47.20~51.4	41.73~50.43	47.22~54.23	46.61~53.90	45.64~53.30	45.66~54.69	43.62~53.45
燃气的高热值 MJ/m ³	38.03~43.52	36.90~43.20	45.3~50.5	36.12~43.60	32.81~43.69	36.44~43.60	34.94~45.70	28.57~44.66

来源:前三项来自Euro-gas

后两项来自参考文献11的附录A,参比条件为15℃/15℃/1atm

EN437标准中的H组天然气各国均有。L组天然气仅4个国家有用，如荷兰、法国、比利时和德国极小的部分；法国、比利时和德国均由地方管网配气，属国内用气；荷兰仅民用、商业和小工业使用，大工业均与H组供气网络连接。H组的组分变化很大，实际

上均采用掺混的方法，使沃泊指数控制在一个小的范围内^[10]。这些国家对传统的燃气互换性均做过研究。

关于国家级的燃气质量规定，MARCOGAZ曾对上述8个国家做了调查与汇总，于2002年出版，数据见表2。

表2 欧盟国家在燃气质量中所用的参比条件和参数⁽⁹⁾

	Be (比)	Dk (丹)	De (德)	F (法)	It (意)	Nl (荷)	Sp (西)	UK (英)	总计
参比温度	0	0	0	0	15	0	0	15	
体积	25/0	25/0	25/0	0/0	15/15	25/0	0/0	15/15	
能量									
换算系数	0.949	0.949	0.949	0.946	1	0.949	0.946	1	
高热值	L		L	L	L	O	L		6/8
沃泊指数	L	L	L	O	L	O	O	L	8/8
相对密度	L	L		L				3/8	
甲烷数								0/8	
烃露点	O	L	L	O	L	O		L	7/8
水露点	O	L	L	L	L	O	O	L	8/8
硫	总硫	L	L	L	L	O	O	L	8/8
	H ₂ S	L	L	L	L	O	L	L	8/8
	加臭剂	L	L		O	O			5/8
	乙二醇			L		L	O		3/8
其他指数	燃烧势	O							1/8
	黄焰端指数I _j	O							1/8
	不完全燃烧因数ICF							L	1/8
	积碳指数SI							L	1/8
CO	O						L		2/8
金属羰基合物	O								1/8
杂质(液、固)		L	L	O	L	O		L	6/8
CO ₂				O	L	O	O		4/8
N ₂							O		
O ₂			L	O	L	O		L	5/8
H ₂				O				L	2/8
芳香族						O			1/8
NH ₃							L		1/8

注：表中L代表被国家采用的法律或技术规范，O代表仅是合同或协议中出现的内容。例如加臭是所有国家的责任，所用的加臭剂和浓度由该国的国家规定或技术法则确定。

值得注意的是,其他指数栏:即燃气的互换性指数仅比利时为O级,英国为L级,其他国家均无规定。比利时采用德尔布(P. Delbourg)的燃烧势和黄焰端指数 I_j (有计算公式);英国则根据法律用达顿法(Dutton, B. C.)考虑不完全燃烧因数(ICF)和积碳指数(SI)。表2也表明,当欧洲的燃气工业由煤、油制气转换到天然气后,在天然气的质量规定中并不把互换性作为一个主要内容,各国均有自己的处理方法。

但欧盟建立后,为了相互协调建立欧洲国家统一的燃具市场时,发现不同国家对燃具的不同要求已成为主要的障碍。于是,首先发布了一个欧洲的燃气用具导则(GAD—90/396/CEE)(以下简称《燃具导则》),于1990年7月发表于公用公务杂志(Community Official Journal)上^[3]。指明,这一导则适用于燃气加热、炊事和制备热水。只要使用的是燃气,水的加热温度低于105℃^[3]。也适用于燃烧器和组装件中的部分燃烧器或一些专用设备,但不适用于工业设备。《燃具导则》的作用也就基本上覆盖了各民用和商业市场的燃具。《燃具导则》认为:只要“使用正确”,一个燃具必须有稳定的火焰,其燃烧产物不含有毒成分或达到不可接受的程度。这一原则适用于所有的燃具,不管是否有排烟设施。对无排烟设施的燃具,规定的要求是:只要在使用燃气的房间内能防止发生CO的积聚即可。也即《燃具导则》降低了对燃气的互换要求,以换取使用范围的扩大。

《燃具导则》对“使用正确”的定义是^[8]:

(1) 燃具的安装与维修必须是按制造厂的要求进行的。

(2) 燃气的质量变化和输入压力应在规定的范围之内。

(3) 燃具的使用方法应按制造厂的要求进行。

以上表明制造厂对导则的贯彻应起主要的保证作用。

从1993年起,欧洲所有的燃具应符合1990年《燃具导则》的要求,允许的燃气质量的要求比各国通用值的范围更宽^[12]。于是,须要有一个性能现代化的,符合《燃具导则》的燃具来作为一个共同的欧洲燃气质量规定的基础,燃具厂必须担负很大的责任。欧洲国家必须联合各方建立一个新的规定,以保证每一国

家的燃具能够接受这样的一个新标准。这一新标准甚至会改变国家的法律和法规。

以上就是1993年颁发欧盟EN437标准的主要原因和目的。到本世纪初,欧洲的天然气投资方以EASEE-gas为代表,为了创建一个有效的欧洲燃气市场,也是以《燃具导则》为依据,批准了一个《共同的商务实践准则》(2005.1.1)。从此,天然气的质量标准,其中包括LNG与管道天然气的互换问题,就成为国际燃气联盟从2006年至今一直在研究的重要课题。为此,必须首先弄清这两个文本的主要内容,才能了解近十余年来的争论焦点和研究进展。

3 从欧洲的EN437标准到《共同的商务实践准则》(CBP)

3.1 EN437标准—《试验燃气—试验压力—燃具的类别》(Test gas—Test pressure—Appliance Categories)

EN437在1993年出版第一个文本(共40页),2003年又出了第二个文本(共39页),两个文本略有不同。2003年的文本指出:EN437为执行欧洲委员会(European Commission)和欧洲自由贸易协会(European Free Trade Association)的指令以及支持《燃具导则》(GAD 90/376/EEC)的要求而形成的文本。1993年的文本指出的适用范围是:适用于1990年6月29日以前采用燃具导则,且法律相近的成员国,作为特指燃具标准的一个参照文件使用。

标准中的试验气与试验压力原则上适用于所有的燃具,以便与有关标准相一致。但不适用于以下情况:

(1) 燃具的额定热入力大于300kW(约相当于30m³/h天然气);

(2) 现场制作的燃具;

(3) 最终设计受到用户影响的燃具;

(4) 采用高压供气的燃具(如直接利用饱和蒸汽气压的)。

关于燃气的分类,使用燃气的国家都是根据历史上燃气工业的状况分成了族,即第1族指人工燃气,第2族指天然气,第3族指液化石油气。各族燃气中根据不同国家的情况可再分成若干组。国际上无统一的规定,且各国也不断的变化。EN437标准中,

第1族人工燃气以a组为代表；第2族天然气分成H、L和E三组。H组为欧洲多数国家均有，L组仅荷兰等少数国家有，E组是基于德国等极少数国家因不同供气压力而引起的。在我国的天然气标准中：主要是H组气，极少L组气，无E组气。从表1可知，欧洲国家相同的H组气在各成员国有不同的沃泊指数和高热值，情况相当复杂。第3族液化石油气分成B/P、P和B组，即丙、丁烷混合气，丙烷气和丁烷气。

关于燃具的类别不能直接对应地理解为适用于人工燃气、天然气和液化石油气的燃具。EN437标准中的定义为：类别Ⅰ的燃具是指使用同一个族或一个组的燃气设计而成的专用燃气类别。因此，应用同一族的燃气（不论是何族或何组）均可用类别Ⅰ表示：如Ⅰ_{2H}—指专用于第2族H组的燃具；Ⅰ_{1a}—指专用于第1族a组的人工气燃具；Ⅰ_{3P}—指专用于第3族丙烷气的燃具。同理，应用两个族的燃气用类别Ⅱ表示，3个族的用类别Ⅲ表示：Ⅱ_{1a, 2H}—指既适用于第1族a组人工气又适用于第2族H组天然气的燃具；Ⅱ_{2L, 3B/P}—为适用于第2族L组天然气和第3族丙、丁烷混合气的燃具；Ⅲ_{1a, 2H, 3B/P}—指适用于第1族a组人工气，第2族H组天然气和第3族B/P组丙、丁烷混合气的燃具。

上述示例中适用于类别Ⅱ的燃具，欧洲瑞士有1种（Ⅱ_{1C, 2H}，参比气为G20，G130两种）；比利时有1种（Ⅱ_{2E⁺, 3B}，参比气为G20，G30）；法国有3种，即：Ⅱ_{1C, 2E⁺}（参比气为G130，G20），Ⅱ_{1C, 2Esi}（参比气为G130，G20，G25）和Ⅱ_{1C, 2Er}（参比气为G130，G20，G25）等。欧洲适用于Ⅲ类的燃具，丹麦和意大利各有1种，即Ⅲ_{1a, 2H, 3B/P}（参比气为G110，G20，G30）；瑞士有3种（标志略），法国有7种（标志略），在EN437标准中有详细的表格和说明。以上说明燃气的分类和燃具分类的差别。

一个燃具，只要通过所规定的试验气的测试（参比气和界限气），符合要求，这样的燃具甚至可适用于3个族的燃气，其适用范围已不是传统燃气互换性研究中的经典定义所能覆盖，因此EN437标准中，无一句话提到燃气的互换性，更谈不上有德布燃烧势的概念。我国燃气的分类标准参考了EN437标准，又处处在燃气的热值、沃泊指数值中加上了一个燃烧势的值（且燃烧势的计算公式不同于德布提出的公式），界限气的定义也不同，这些都是我国自己加上

去的，在此应加以说明，因为长期以来国内均误以为我国的燃气分类标准其来源是EN437标准，是和国际标准接轨的。本人为此做如上的说明。

燃具的类别中规定了对试验气和试验压力（Test gas, Test pressure）的具体要求。试验气的定义是用来检验燃具所试燃气运行特性的气体，燃具的性能必须满足所规定试验气的要求。试验气包括参比气和界限气两类。参比气（Reference gas）即调定气（Adjustment gas），其定义是^[13]：在规定条件下，当供气压力相当于额定压力时燃具运行的试验气。试验气必须有组分和压力规定，才能反映运行条件。额定压力指燃具使用参比气时在规定条件下的运行压力。界限压力有最大压力 $P_{\max}$ 和最小压力 $P_{\min}$ ，分别代表燃具应用条件的两个极端变化压力。成对的压力指在同一族和同一组内，出现大小不同的两个沃泊数值，为保证燃具的入力相同因而存在不同的配气压力，高压对应于低沃泊数，低压对应于高沃泊指数。

EN437标准的参比条件为15℃，1 013.25mbar。遗憾的是这一标准至今并未为欧洲各国所采用。

EN437标准中对无成对压力要求的试验气和试验压力的汇总可见表3。

对仅使用第2族天然气的燃具，除表3列出的Ⅰ_{2H}、Ⅰ_{2L}和Ⅰ_{2E}外，尚有Ⅰ_{2E⁺}，Ⅰ_{2N}和Ⅰ_{2R} 3种，定义为：

Ⅰ_{2E⁺}，仅用第2族E组的燃气，有成对的运行压力，则燃具不必再调节。如燃具设有调压设施，则燃具不允许使用两个额定压力之间的值运行。

Ⅰ_{2N}，在上述供气压力下，仅使用第2族燃气的燃具，可自动适应规定中的第2族燃气。

Ⅰ_{2R}，装有调压器的燃具，使用第2族燃气或与第2族燃气的管网相连，则可根据地方的配气情况，用手动调节的方法，调节使用不同的第2族燃气。

EN437标准对使用各种类别的燃具均有详细的规定。为了统一欧洲的燃具市场，在《燃具导则》（GAD）的要求下，燃具不仅可以使同一族的燃气，甚至可以使用3个族的燃气。毋须考虑传统的燃气互换性定义，只要满足表3所规定的试验要求，即欧洲各国燃气沃泊指数WI的总体变化状况和试验气的要求即可；标准对第二族天然气规定的范围为：

H组：45.7 < WI < 54.7；

表3 EN437中的试验气和试验压力(压力单位 m bar)

	试验气				燃气组分%	试验压力***		
	参比	不完全燃烧 与积碳	回火	离焰		P _n	P _{min}	P _{max}
第1族煤气								
a组（1a）	G110	G110		G110	CH ₄ =26，H ₂ =50，N ₂ =24	8	6	15
			G112		CH ₄ =17，H ₂ =59，N ₂ =24			
第2族燃气								
H组（2H）	G20				CH ₄ =100	20	17	25
		G21			CH ₄ =87，C ₃ H ₈ =13			
			G222		CH ₄ =77，H ₂ =23			
				G23	CH ₄ =92.5，N ₂ =7.5			
L组（2L）	G25		G25		CH ₄ =86，N ₂ =14	25	20	30
		G26			CH ₄ =80，C ₃ H ₈ =7，N ₂ =13			
				G27	CH ₄ =82，N ₂ =18			
E组（2E）	G20				CH ₄ =100	20	17	25
		G21			CH ₄ =87，C ₃ H ₈ =13			
			G222		CH ₄ =77，H ₂ =23			
				G231	CH ₄ =85，N ₂ =15			
第3族燃气								
B/P组（3B/P）	G30	G30		n C ₄ H ₁₀ =50，i C ₄ H ₁₀ =50		29*	25	35
			G31	C ₃ H ₈ =100		50	42.5	57.5
B组**（3B）			G31	C ₃ H ₆ =100		29	20	35
P组（3P）	G31	G31	G31	C ₃ H ₈ =100		37	25	45
		G32		C ₃ H ₆ =100		50	42.5	57.5

* 用这类燃具时,规定的供气压力如在28m bar至30m bar,不须再调定。

** 在P_n=29m bar时,如用G31和G32作试验气会更严重,在正常供气的正常变化中也是如此。

*** 不同国家应用此表时,使用的压力可能略有不同。

L组: $39.1 < WI < 44.8$;

E组: $40.9 < WI < 54.7$ 。

燃具制造厂根据试验,对燃具贴上标记供用户对号使用。之后调定、安装、维修等一切由制造厂负责,且要对欧洲所有的国家负责。

不仅欧洲国家,其他国家(如美国)对这样一个标准的实施状况(由于与传统的燃气互换性原理已

相去甚远)均十分关心。本文所关心的也不是EN437标准的内容,而是各国的评述,尤其是来自欧洲的评述,因为EN437标准一再声明,仅对成员国适用,我们需要的是学习其长处。

3.2 欧洲燃气工业技术协会对EN437标准的评述和建议

欧洲燃气工业技术协会(MARCOGAZ)成员国

代表都是我国燃气界所熟知的，总部设在法国巴黎，长期从事欧洲燃气质量规定的建议工作，自2003年2月发表关于欧洲燃气质量规定的第一个立场文本以来，至今还在协调各个方面，使不完全清楚燃气工业的部门了解燃气质量规定的重要性，如表2就是该协会汇总的，已成为互换性研究中重要的基础材料。其对欧洲燃气互换性的研究有一段评述^[3]：欧洲燃气工业始于人工燃气，上世纪60年代末，天然气管网才开始扩展，先在本国，逐步扩大到欧洲地区。在发展过程中，由于人工燃气的种类很多，燃气的互换性成为一个首先要解决的问题。开始时着眼于局部地区，逐渐成为全国性的问题。多数国家的对策是采用燃气质量的控制，根据互换性的要求，建立适应一个国家燃具市场的允许标准。

作为成果，很多欧洲国家均有自己的燃气互换性预测方法，反映了燃具的不同类型和不同时代的技术要求。其目的是规定一个当时燃气用具使用的配气范围，在保证用户使用的前提下，防止用户使用中面临的以下潜在危险：（1）不完全燃烧导致CO的生成；（2）离焰，导致CO的生成和未燃气体的逸出；（3）回火，损坏燃具和导致未燃气体的逸出。

EN437中仅不完全燃烧和积碳、离焰、回火3项，无黄焰端项。

黄焰端（Yellow tipping）和积碳（Sooting）经鉴定也认为是不该发生的缺陷，当时也有人认为这两者不会对用户产生直接的危害，两者是产生不完全燃烧和积碳的潜在因素，使燃具堵塞而造成工作的失调。例如，上世纪50年代，法国的德尔布（P. Delbourg）（1953年）在天然气的应用在欧洲扩大之前就对人工气互换性中主要参数和数值做了详细的说明，以沃泊指数为纵坐标，横坐标为一个称之为“燃烧势”的参数图作为定义域。这一参数考虑到燃气中含有的H₂和不饱和烃的组成，它与化学计量比下的火焰速度有一定的相关性。高燃烧势的燃气易于回火。德尔布用当时法国市场上的燃具，用不同的试验气确定了一个互换性范围。对第二个参数，如黄焰端指数，后来也用计算方法作了规定（原文未提及德尔布所用的试验燃具）。

文献10对表2所作的说明中，也有一段对德尔布法的评价：^[10]表2中的其他指数是指沃泊数以外的互

换性指数，只有比利时和英国提出。比利时确认采用德尔布的燃烧势为第二个参数以正确地定义燃气的互换性。这个参数“看来似乎”与燃烧速度有关，且明显随惰性气体、氢或重烃而变化。但对通常的天然气而言，这一参数不会有太大的变化，因此，其他欧洲大陆国家所用互换性方法中不规定用这一参数。

与此类似^[3]，从上世纪70年代起，英国的达顿（B.C. Dutton）（1978年）也根据英国市场上的典型燃具用不同的燃具进行了试验。达顿法仅适用于天然气，因此采用了与德尔布不同的参数。由于在化学计量比下烷烃的燃烧速度相类似，因而对天然气而言，回火的危险性也相类似，不需要使用如燃烧势这样的参数。达顿法因此侧重于积碳和不完全燃烧缺陷，而采用沃泊指数与P_N这两个参数。P_N代表一个燃气混合物中“当量”于已知天然气中非甲烷组分的值，也就是把非甲烷的烷烃分别用一个当量“丙烷”的浓度表示。燃气中的惰性气体也用一个“当量”氮的浓度表示，于是P_N=C₃H₈+N₂。

文献10指出：现在的法规均采用达顿法，并有某些简化。

不完全燃烧因数（ICF）和积碳指数（SI）可根据燃气的组分和其他值在规定中限定。表2中，英国规定的H₂含量小于0.1%，但法国推荐小于6%。英国的规定涉及到互换性，而法国看起来似乎与人工煤气时期留下的习惯性做法有关。CO₂在法国、意大利和西班牙相同，最大为3%。CO在西班牙和比利时、金属羰基在比利时、芳香烃在荷兰均有规定，可能与人工煤气和天然气共存时期的习惯做法有关。

笔者从上世纪末到本世纪初以来讨论燃气互换性的国外文献来看，对天然气而言，在欧洲从未看到德尔布的方法，EN437标准也是如此，看到MARCOGAZ协会的多次评论后才知其原因。与此有关，英国著名的吉-普法（Gilbert-Prigg）（1956年），纵坐标采用沃泊指数，横坐标采用韦弗的火焰速度指数，而文献7指出，对天然气而言火焰速度指数均为14，因而用来作为横坐标的参数也不合适，而采用P_N值为好。当然，韦弗火焰速度指数与美国韦弗互换性预测方法是两回事。可见要弄清一个国外对本国技术问题的解决方法，最好是多看其自身国家的评论和多做实践研究。

欧洲国家还有其他的互换性方法，内容有：

- (1) 仅用沃泊指数作为共同参数;
- (2) 评估不同燃气组分的互换性时, 不同国家的沃泊指数范围随燃具的不同而不同;
- (3) 增加一个参数来确定互换性范围;
- (4) 再附加采用其他参数。

如果用这样的互换性方法来定义燃具的相互协调性, 在仅用沃泊指数一个参数时, 欧洲不同国家对H组燃气允许的沃泊数范围很小, 如图1所示^[3]。如用数值表示, 沃泊数WI约为 $49.31\text{MJ}/\text{m}^3 \sim 51.31\text{MJ}/\text{m}^3$ 。原因是各国的燃具均按所供天然气的最佳工况调节, 有一个最佳的运行范围。燃具在此范围内工作, 才能保证长期的高效和低排, 这是讨论互换性预测方法时的主要前提, 也是至今各方意见难以一致的焦点。为此, 了解欧洲各国标准的实际落实情况很有必要。

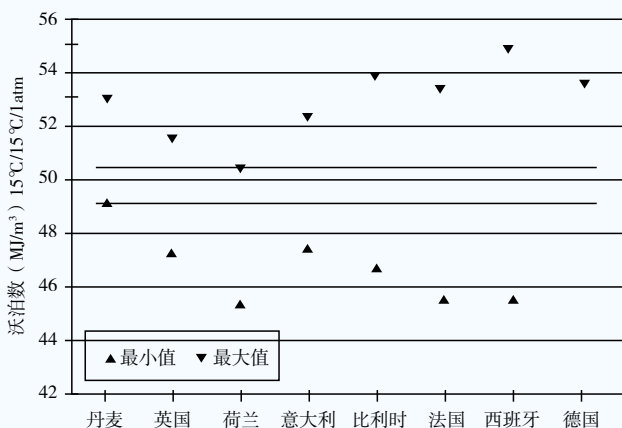


图1 不同欧洲国家对H组天然气的沃泊数允许范围^[3]

MARCOGAZ也在利用《燃具导则》(GAD)所制定的“协调证书构想”(Harmonized certification scheme)的机会来评估一个能覆盖欧洲燃气燃烧的特性, 以允许在欧洲范围内实现燃气市场一体化的可能性。评价的前提是^[3]:

- (1) 不在《燃具导则》(GAD)范围内的燃具不加考虑(即必须是按EN437标准生产的新型燃具);
- (2) 《燃具导则》的基本要求应尽可能的考虑到燃气的互换性。

第一个前提说明, 1993年以前的燃具, 所遵循的都是一个国家的发证标准, 不属于MARCOGAZ建议支持的燃气范围, 也不必再做全面的分析。如果企图将这些燃具再整合到一个协调的或和谐的欧盟标准中

来, 就意味着可能的互换范围只能重新回到图1所表示的一个很窄的范围, 且对有些燃具, 如发动机、燃料电池等, 《燃具导则》本来就未提及, 现在也不能再提出新的问题。这类燃具适于互换的沃泊指数只能另行讨论。

第二个前提说明, MARCOGAZ提出的建议是在规定燃气的范围, 但必须满足基本的安全要求, 如无毒的燃烧产物和稳定的火焰; 而燃具本身必须得到满足的另一些要求, 如效率和排放量也不能忽视。因此, 影响燃气范围变化的因素还包括:

(1) 在低负荷条件下应用燃具时, 效率均很低, 甚至比设计很糟的燃具还要低一个数量级, 也就是常说的“大马拉小车现象”, 这是燃烧设备常出现的情况。

(2) 通常忽视了 NO_x 排放量的预测。燃具的 NO_x 排放量随沃泊指数的增大而增加。当然也有规律相反的燃具。

明显的是, 如在一个互换性方法规定中, 增加一个效率和排放量的规定值, 所有的燃具又无空气/燃气比的控制设施, 则沃泊指数的允许范围必然非常狭小。

由于燃具要向整个欧洲销售, 并不是只向荷兰销售(荷兰的燃气范围最小)。这从由表1绘制的图2可知。对欧洲而言(实际是欧洲八国)试验气的覆盖范围至少应在 $45.66\text{MJ}/\text{m}^3 \sim 54.76\text{MJ}/\text{m}^3$ ($15^\circ\text{C}/15^\circ\text{C}/1\text{atm}$), 如图2中的红色和蓝色虚线所示。而MARCOGAZ的建议范围只可能在这两条线之间, 也是《燃具导则》(GAD)必须具备的安全区, 可以覆盖不同国家新、旧燃具的生产、安装与维修的工艺规程。但即使提出这么大的评估范围, 还只是从现有的配气状况出发, 未能预测到将来可能发生的变化。

如有人想要所有的燃具均能在欧洲销售, 制造厂的燃具就必须遵循这个EN437标准, 欧洲现行的配气也可在这些燃具上进行互换。如能达到这样的程度, 就不致产生因燃气质量所引起的必然或偶然事故。这样, 欧盟的现行配气范围也可作为一个安全范围的规定使用。图2中的虚线即现行H组天然气的沃泊指数范围, 黑点代表欧洲八国现行的配气状况, 而两条实线则代表MARCOGAZ建议的沃泊指数范围($47.0\text{MJ}/\text{m}^3 \sim 54\text{MJ}/\text{m}^3$), 与EN437标准相比, 下限的收进量比上限的收进量要大。

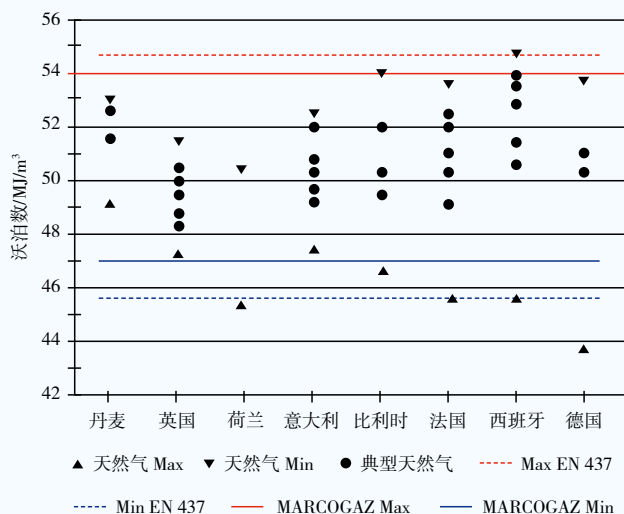


图2 基于现行配气状况的MARCOGAZ建议配气范围^[3]

这样的决策可能产生以下3种状况^[3]:

(1) 如果欧洲各国可以接受这样的建议, 则对丹麦、英国、意大利和荷兰来说, 沃泊数的范围是扩大了, 这样的扩大是多余的; 但对某些国家来说 (如西班牙和德国), 又认为太窄了。实际的情况是欧洲各国沃泊数的变化均小于所谓应完全接受的范围。图2中的每一黑点, 均代表一个独立的配气系统, 使用的是已匹配了的燃具, 使用的情况也一切正常, 没有一个国家会注意到MARCOGAZ所建议的沃泊指数范围, 所谓建议达到的安全范围, 看来似乎是一个理论想法。

(2) 进一步而言, 当规定的一个沃泊指数覆盖了多数的不完全燃烧和离焰, 但另一些互换问题, 如积碳或回火却并不一定能覆盖。文献6在研究EN437标准时, 提醒大家注意标准中的最大值 (不完全燃烧) 和最小值 (离焰), 而忽略了回火这一中间值。实际上小于回火试验气的沃泊数这一中间值时, 已不能满足回火这一参数的要求。又如对L组天然气而言, 参比气和回火取同一试验气等等。认识到这点后, MARCOGAZ提出了一个对燃气相对密度作限制的建议, 采用一个0.55~0.70的相对密度范围, 与上述沃泊指数的范围一起代表1种可操作的实用方法, 用以限制燃气中过高的重烃组分, 这类组分是产生积碳和相关问题之源。

(3) 最后确认这一建议也不能覆盖回火。天然气通常不易发生回火, 但如含H₂或饱和烃时, 会迅

速增大化学计量比时的火焰速度而引起回火问题。为此, 只考虑天然气中不含此类可燃气体的状况。

在EN437标准近20年的实践中, 还存在着许多重大的挑战和不确定性。MARCOGAZ也作了详细的分析, 主要内容如下:

建议的核心是假设在H组燃气的试验气范围内, 所有安装好的燃具均符合《燃气导则》规定的燃烧性能要求 (即基本安全要求), 也即在制造、安装和维修中不能再有变动, 因为任何的变动均会改变燃具设定时的空气/燃气比。特别是在安装和维修时, 通常会按当时实际供应的燃气再作调定, 空气/燃气比就发生了变化, 实际上这一调定已改变了EN437标准中不能再变动的要求, 一旦燃气的组分发生变化, 虽仍在标准的范围内, 也足以带来危险。

进一步分析, 如果按照实际使用的配气状况 (如图2中的某一个黑点) 对燃具的性能作优化和调定 (考虑燃具的高效和低排要求), 如果所供的燃气又转变到另一组分, 且变化较大 (即一旦又按另一组分变化较大的黑点供气), 则来自制造厂的燃具标志说明书中的沃泊数范围就将全部扭曲, 因为调定后的燃具只能适应当时实际使用的燃气状况, 任何供气的突然变化将带来危险。另一矛盾的后果发生在燃具制造厂。当燃具的标定中虽说明该燃具能适应EN437规定的全部范围, 但又按燃具到达国家提出的要求调定时, 将会发生诸如卖给英国的燃具又不同于卖给丹麦的燃具。不管怎么说, 两种燃具均应保证一个使用国家的限值范围, 所谓可以满足EN437全部范围的能力就失去意义。于是“协调范围的唯一可能性便又重新回到上述图1中的所谓沃泊指数的极窄范围。

地区的操作实践受节能和减排这一总目标的制约, 会使MARCOGAZ的建议回到无法使用的状态, 使彼此协调的欧洲管网因受到供气范围的限制陷于险境, 导致供气成本的增加和安全性的降低。当前, MARCOGAZ的建议已在燃气工业的下述两个阵地受到挑战。

一在西班牙, 其强制性的燃具和维修方案要求使用EN437标准中H组天然气的全部范围作为一个协调规定。

一某些制造厂甚至要求沃泊指数的下限从47MJ/m³降至46.44MJ/m³以满足其要求。

上述问题已讨论很久,至今仍在继续。2005年12月在MARCOGAZ组织的工作会议上已反映出不同的立场。看起来,制造厂确定在按照产品使用国家的要求在调定。如此,则MARCOGAZ的“协调范围”建议又将随各国现行的用气状况而有所不同。

至于燃具的安装与维修状况,各国的操作实践完全不同。实际的调定是一回事,评估燃气质量未来的变化又将是另一回事。

上述复杂的情况,EASEE-gas也已深知。

3.3 欧洲能量交易合理化协会燃气分会(EASEE-gas)的组成和工作目标^[1]

2002年3月14日由6个基本成员在巴黎成立了欧洲能量交易合理化协会燃气分会(EASEE-gas),成员均是从事燃气贸易投资的股东。协会成立的目的是支持和形成一个有效的和可实施的欧洲燃气市场,方法是通过开发和促进一个自愿的“共同商务实践准则”(CBP),以便在股东之间可以简化和合理的进行商业过程。

当时的情况是^[5]:欧洲希望实现一个统一的内部燃气市场,而实际上欧洲各国对天然气的质量有不同的要求,已成为影响天然气管网相互协作的一个潜在障碍。不同要求的表达形式也很多:首先,欧洲各国对燃气质量的规定缺乏共同认可的参数集(可参见表2);其次,即使有共同的参数集,不同国家的数值也不同;其三,一些国家的行政部门,对燃气质量的规定已有批复文件,而另一些国家则有自身处理的规定,情况异常复杂(实际上欧洲各国的状态参比标准至今也未统一,我国也是如此)。

2002年2月,欧洲燃气规程论坛(European Gas Regulatory Forum,又称马德里论坛)召开了第五次会议,认为需要迅速和明确的搬走这些技术障碍。论坛特请欧洲燃气长输公司(GTE—Gas Transmission Europe)负责联络有关股东,制定一个解决问题的行动计划和 timetable。为此,欧洲燃气长输公司准备了一个对协调燃气质量规定的立场文本和行动计划,提供在2002年10月的第六次欧洲规程论坛会进行讨论。论坛同意这一计划,并邀请EASEE-gas和欧洲燃气长输公司以及油、气生产国际组织(OGP—International Organization of Oil and Gas Producers),涉及用户和贸易方利益的有关部门进行联络。对有关高热值燃气

中3个反映最多的问题进行了讨论,即燃气的燃烧性能,高热值的数值范围和对其他附加组分的要求。

经过股东们的讨论,EASEE-gas在2005年9月15日~16日的欧洲燃气规程论坛上提出了一个《共同商务实践准则》(CBP)—关于天然气质量的“协调文本”(即参考文献1)。论坛同意,所采取的作法应得到理解,以减少经过一个合理的酝酿阶段后,还不能解决妨碍燃气自由贸易中存在的协作问题。因此,对燃气质量的建议可理解为是建立一个既可竞争又能协调的欧洲燃气市场的第一步。但在国家层面上对待如何评价这一创新的建议文本应持慎重态度,不能仓促行事。为此,论坛邀请所有的参加人员,包括行政部门在内,在下次会议前完成相关立场的评估工作。

高热值燃气在欧洲各国的跨境点上、欧洲管网的引入点和LNG的终端站不必加臭,上述准则也允许;凡是到达跨境点的天然气,只要符合建议的质量规定,就不能以质量原因拒绝使用。但CBP也郑重声明,不能以任何理由限制某方在跨境点上同意采用其他规定(即:为其他的处理方法开一个大口子。当前欧洲各国的跨境点预计有73个)。

如前所述,EASEE-gas的起步工作较晚,没有做必要的调研工作,但对MARCOGAZ和EN437标准为统一欧洲燃具市场的努力已逐步有了充分的认识,即燃气质量的变化会导致终端用户使用的低效和不经济。为此,CBP也指出,在规定范围内燃气质量发生变化的幅度和频率应受到限制。EASEE-gas也正开始在选择的跨境点上量测甲烷的含量和变化的情况。

EASEE-gas要求协调的各项参数和允许范围履行的时间为2006年10月1日。由于已深知保障燃气燃烧性能的复杂性,凡涉及到燃气燃烧性能(包括沃泊指数和燃气的相对密度)以及含氧量可延至2010年的10月1日。履行情况要求在2006年向EASEE-gas报告。表4为EASEE-gas《共同商务实践准则》(CBP)中2005.001/01的质量规定^[5],与参考文献1略有差别。

表4所用的参比条件各国均有所不同,我国也不例外。各国及一些机构所采用的参比条件如表5。

我国燃气工业的参比条件也有多种,城镇燃气设计规范为0℃,天然气国家标准中为20℃,也有采用ISO标准15℃的,大气压均取101.325kPa,且对燃烧参比温度与体积计量参比温度未作区分。

表4 《共同商务实践准则》质量规定中各项参数的数值^[5]

参数	单位*	最小	最大	推荐履行日期
沃泊指数	[kwh/m ³] MJ/m ³	[13.6] 46.4	[15.81] 54.0	1/10/2010
相对密度	m ³ /m ³	0.555	0.700	1/10/2010
全硫	mg/m ³	—	28.3 (30)	1/10/2006
硫化氢+羰基硫 (以S表示) (H ₂ S+COS)	mg/m ³	—	4.75 (5)	1/10/2006
乙二醇RSH (以S表示)	mg/m ³	—	5.69 (6)	1/10/2006
O ₂	mol%	—	[0.01]**	1/10/2010
CO ₂	mol%	—	2.5	1/10/2006
水露点	70 bar (a) 的℃	—	-8	***
烃露点	1~70 bar (a) 的℃	—	-2	1/10/2006

注：最大栏中括号内的值为文献1中的值。

* EASEE-gas采用的燃气参照温度为25℃，体积单位的参照温度为0℃，压力为1.01325 bar (a) 单位为kwh/m³，表中用[]表示。但MJ/m³的参比条件取15℃/15℃/1atm。

** EASEE-gas组织了含O₂量的测定，到2005年底，最大可行的限值或可替代的规定值均低于0.01。

*** 在某些跨境点上，并不严格执行表中的水露点值。可由相关的产气方、船运方和输气方共同商定，此值应满足长期要求。对所有跨境点，必须在1/10/2006履行。

表5 各国及一些机构所用的参比条件

国家或机构	单位	燃烧参比温度	体积计量参比温度	大气压
ISO, EN437, 英国GS (M) R	MJ/m ³	15℃	15℃	101.325kPa
美国	Btu/cf	60°F	60°F	14.73psi
欧洲交易协会EASEE-gas	kwh/m ³	25℃	0℃	101.325kPa
日本	MJ/m ³	0℃	0℃	101.325kPa
日本	MJ/m ³	15℃	0℃	101.325kPa
比利时、丹麦、德国、荷兰	MJ/m ³	25℃	0℃	101.325kPa
法国、西班牙	MJ/m ³	0℃	0℃	101.325kPa
意大利	MJ/m ³	15℃	15℃	101.325kPa

不同参比温度下，燃气的高热值和沃泊指数的换算系数可见表6。

例如，表4中《公共商务实践准则》中的单位为kWh/m³，参比条件为25℃/0℃/1atm，相应的沃泊指数值放在[]内，而参考文献5中以MJ/m³表示的沃泊指数则采用ISO的参比条件，即15℃/15℃/1atm。查表6，可知换算系数为3.415。因此表中的最小值为13.6×3.415=46.44≈46.4MJ/m³，最大值为15.81×3.415=53.99≈54.0MJ/m³。当前国外的技术文献中，计

量数字越来越集约化，而我国仍是粗放的习惯，在此不得不细察。

EASEE-gas在表4中提出的沃泊指数范围，是根据欧洲国家（特别是欧洲八国）当前使用的天然气资料得出的（可参看表1）。从世界范围看，实际上已涵盖了美、英、日等国家当前使用的天然气范围（参考文献5）。上文已提到，EASEE-gas已认识到MARCOGAZ建议范围所遇到的挑战，因而比较客观的从另一角度提出了贯彻意见^[1]，反映在对表4中沃泊指数和相对密

表6 高热值和沃泊指数的换算系数^[5]

	Btu/scf 15℃ /15℃ /1atm	Btu/scf 60°F /60°F /14.73psi	MJ/m ³ 25℃ /0℃ /1atm	kwh/m ³ 25℃ /0℃ /1atm	MJ/m ³ 0℃ /0℃ /1atm	MJ/m ³ 15℃ /15℃ /1atm	MJ/m ³ 20℃ /20℃ /1atm	MJ/m ³ 20℃ /0℃ /1atm
由以下单位换算至乘以								
Btu/scf 15℃/15℃/1atm	1	1.0007	0.03927	0.01091	0.03938	0.03726	0.03648	0.03929
Btu/scf 60°F/60°F/14.73psi	0.9993	1	0.03924	0.01090	0.03935	0.03720	0.03655	0.03926
MJ/m ³ 25℃/0℃/1atm	25.46	25.48	1	0.2778	1.0027	0.9487	0.09308	1.00054
kwh/m ³ 25℃/0℃/1atm	91.67	91.73	3.600	1	3.6097	3.415	3.3501	3.6019
MJ/m ³ 0℃/0℃/1atm	25.40	25.41	0.997	0.2770	1	0.9461	0.9281	0.9976
MJ/m ³ 15℃/15℃/1atm	26.84	26.86	1.054	0.2928	1.0569	1	0.9810	1.0546
MJ/m ³ 20℃/20℃/1atm	27.41	27.36	1.0743	0.2985	1.0774	1.01936	1	1.0750
MJ/m ³ 20℃/0℃/1atm	25.45	25.47	0.9995	0.2776	1.0024	0.9482	0.9302	1

注：(1) 第二栏的参比条件说明：燃烧参比温度/体积计量参比温度/参比大气压。1atm=101.325kPa(绝)，14.73psi=101.559kPa(绝)。

(2) 换算系数根据计算和ISO13443:1996获得。

(3) 对实际天然气而言，误差为±0.1%。

(4) 20℃/20℃/1atm和20℃/0℃/1atm的换算系数由笔者加上。

度这两项的说明中。

(1) CBP推荐的沃泊指数范围为13.6 kwh/m³~15.81kwh/m³。但由于缺乏低于13.76kwh/m³的有效应用数据，因而履行起点值的低限改为13.76kwh/m³(25℃/0℃/1atm)即46.99≈47.0MJ/m³(15℃/15℃/1atm)，与MARCOGAZ的推荐值相同。EASEE-gas认为，最低值取13.6kwh/m³的安全性还应做进一步的调研。

(2) 与MARCOGAZ的建议意见相同，沃泊指数与相对密度也是以《燃具导则》(GAD 90/396/CEE)所要求的燃具有效安全考虑为基础，且假设H₂含量很低；不符合燃具导则生产的燃具，上述范围则可能存在危险，也是把安全责任推向燃具制造厂。由于燃具制造厂为满足导则的安全要求和安装中或安装后的调定也需要时间，因而推迟履行的日期。

(3) 在某些国家，若采用CBP扩大的沃泊数范围可能对燃具的效率和排放量以及输配系统的供气能力产生影响或由于以下原因须要推迟履行日期^[1]：

①需要更改国家的法律。在某些国家，涉及到燃具的已有高热值燃气的规定或法律需要重新调整后

能适应沃泊指数和相对密度的全范围，因而履行的日期推迟到2010年的10月1日；

②民用与工业燃具有大量的管理问题(如：转换、再调定、替换等)；

③需要改变维修操作方法和频率等；

④需要加氮或掺混燃气等。

(4) 沃泊指数和相对密度是互有联系的，推荐的范围必须满足燃具的运行和安全要求，EASEE-gas认为，在跨境点上要满足有关燃烧参数的所有规定，必须将履行日期推迟。

自欧盟为构建欧洲统一的燃具市场和创建一个有效的欧洲燃气市场后，所依据的《燃具导则》，发展到EN437标准，再到MARCOGAZ的建议和EASEE-gas的CBP，均受到来自各个方面的挑战。欧洲的许多协会、研究部门做了大量的研究工作，所涉及的问题不仅有燃气质量中的互换问题，还涉及到购入燃气的改制、混配与转换问题。为此，从2006年起，国际燃气联盟设了专门研究课题，出现了大量的专题研究报告，研究的思路 and 范围不断的扩大，不仅涉及到组分不同的LNG，也展望到未来的生物质燃气，燃具

的类别已大大超过民用、商业和传统的工业燃具。其间（2005年）美国发表了《关于天然气的互换性和非燃烧终端用户的白皮书》，欧洲的MARCOGAZ和EASEE-gas也做了大量的工作，其中关于燃具类别的EN437标准也引起美国的注意。在上世纪末出版的GEOP丛书的燃气应用卷（参考文献6）甚至在附录中全文转载了EN437标准1993年的文本全文，并对照

美国的情况作了讨论。2003年在荷兰召开的第23届世界燃气大会上，荷兰有“LNG质量”的专题报告（文献5），2009年在阿根廷召开的第24届世界燃气大会上，英国有“液化天然气的质量和互换性”的报告，其中7.1节LNG对用户的影响——燃具的试验，值得在本文中介绍和探讨。
(未完待续，见下期)

附：本文主要符号及缩略语汇总

缩略语	中文名称或释义	英文
GAD	欧洲燃气用具导则	Gas Appliance Directive (GAD 90/396/CEE)
EN437	《试验气—试验压力—燃具的类别》	Test gases—Test pressure—Appliance Categories
MARCOGAZ	欧洲燃气工业技术协会	The Technical Association of the Gas Industry in Europe
EASEE-gas	欧洲能量交易合理化协会燃气分会	European Association for the Streamlining of Energy Exchange-gas
CBP	《共同的商务实践准则》	Common Business Practices
CEN	欧洲标准化委员会	European Committee for Standardization
GTE	欧洲燃气长输公司	Gas Transmission Europe
OGP	欧洲燃气长输公司以及油、气生产国际组织	International Organization of Oil and Gas Producers
DTI	英国工贸部	Department of Trade and Industry)
GS (M) R	英国《燃气安全（管理）规程》	Gas Safety (management) Regulations
DGTC	丹麦燃气技术中心	Danish Gas Technology Center
GRI	美国燃气研究院	Gas Research Institute
FERC	美国联邦能源规程委员会	Federal Energy Regulatory Commission
NGC	美国国家天然气委员会	National committee for natural gas in the United States

工程信息

陕西省丹凤县天然气分输站开工

2014年10月12日，商洛至商南天然气输送管道重点工程，天然气分输站在丹凤县商镇张村破土动工。

在丹凤县建设的天然气分输站项目一期投资1 500万元，将设置一台80m³液化天然气储罐。通过分输站将天然气减压、净化后输送到丹凤、商

南两座城市输气门站，然后供应给用户。

由西安连接商洛至商南天然气输气管道全长124km，项目总投资1.2亿元。建成后，年可向丹凤及商南县工矿企业和居民用户提供1亿m³的天然气。

(本刊通讯员供稿)