

# 城市天然气供应系统可靠性的探讨

□ 中国市政工程华北设计研究总院燃气技术研究院 (300384) 项友谦 高文学 王启 赵自军

## 1 引言

近几十年来,温室气体造成的温室效应越来越明显,给人类的生存环境带来很大威胁。据有关评估表明,在温室气体的总体温室效应中,二氧化碳约占63%,甲烷约占18%,氧化亚氮约占6%,氟化物约占13%<sup>[1]</sup>。显然,化石能源的燃烧应用是主要的温室效应源。目前,煤炭、石油和天然气等化石能源仍然是主要的能源。天然气的主要成分是甲烷,按相同热量计,产生的温室气体约为煤炭的1/2,石油的2/3,故天然气已成为人类的首选能源。

全世界天然气年消耗量约3万亿m<sup>3</sup>,占一次能源中的比重约占24%,我国天然气年消耗量约800亿m<sup>3</sup>,在一次能源中的比重约占4%。全球天然气探明储量约200万亿m<sup>3</sup>,我国天然气探明可采储量约6万亿m<sup>3</sup>。尽管天然气年消耗量不断增加,天然气的储采比反而逐年有所增加,这说明随着天然气地质勘探技术的进步,在相当长的时间内天然气的供给量还是能满足人类需要的。

我国首条西气东输天然气干线建成以来,许多城市用上了天然气。这对于优化我国城市燃气的结构、促进节能减排的实施发挥了重要的作用。但是要看到,城市天然气供应形势也越来越严峻,2005年底及2009年11月中旬我国局部地区出现的“气荒”就是突出的征兆<sup>[2]</sup>。近几年来,国外跨国天然气供应也出现过争端,影响了供气的保障,随着我国天然气进口量的增加,对此也应予以关注。因此,天然气供应可靠性的问题已经提到议事日程上来。

天然气供应可靠性是一个系统性的问题,涉及到

天然气生产、储运、应用的整个产业链。为了提高我国城市天然气供应系统的可靠性,下面拟从天然气的应急气源、储运系统可靠性、终端应用节气与调峰等方面进行探讨。鉴于学识所限,所谈论点恐系管见,希同仁指正。

## 2 天然气应急气源的开发

天然气供应系统供需之间的不平衡是永远存在的,但是供需之间数量相差太大而引发“气荒”是要设法避免的。为了减少天然气的供需差,提高产能弹性是一个重要的方向,单靠天然气主气源(天然气矿井开采、地面净化、集气输送)系统,要达到几倍甚至十几倍的产能弹性是很困难的,而且天然气由上游输送到用气城市的响应时间比较长,因此要在中下游开发多种应急气源。天然气的主要成分是甲烷,应急气源的首要条件是与天然气主气源有相近的燃烧特性。甲烷与其它可燃气体的性质参见表1。不同地区或城市可根据天然气的气质特性、应急气源的条件,从技术、经济等综合因素考虑,选用合适的应急气源方案。

### 2.1 合成天然气

合成天然气是以煤或石油为原料,先制成H<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>原料气,再合成天然气。合成天然气过程的主要反应为<sup>[3]</sup>:



甲烷化反应为放热的反应,为提高合成甲烷的转

表1 城市燃气主要可燃组分的物化性能与燃烧特性

	甲烷	乙烷	丙烷	正丁烷	二甲醚
标况气态高热值 / (MJ/m <sup>3</sup> )	39.85	70.35	100.90	133.14	63.16
相对密度	0.554	1.040	1.550	2.079	1.592
15℃华白数 / (MJ/m <sup>3</sup> )	50.76	65.39	76.83	87.53	47.45
火焰传播速度 / (m/s)	0.38	0.43	0.42	0.38	0.50
相对于甲烷的燃烧势	40.3	45.6	44.5	40.3	53.0

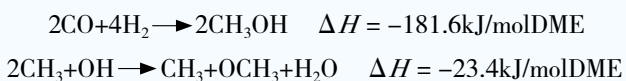
化率和热效率，主要存在下述关键技术。

- ① 原料气制造效率的提高，以降低原料的费用；
- ② 采用高活性的催化剂，以提高甲烷化的转化速率；
- ③ 镍系催化剂对原料气净化要求高，原料气含硫量为 $0.5 \times 10^{-6}$ 级；
- ④ 采用流化床合成甲烷，提高甲烷化的反应速度和反应热的回收效率；
- ⑤ 流化床合成甲烷，催化剂易带出而损失，应采用高效回收微球催化剂的技术。

20世纪末，德国、美国、英国、日本进行过大量甲烷化研究<sup>[4, 5]</sup>，我国城市燃气领域为降低燃气中的一氧化碳含量，也进行过大量部分甲烷化的研究，大连化学物理研究所、沈阳煤气热力研究设计院等单位研究过固定床甲烷化技术，中国市政工程华北设计研究院和大连理工大学、天津第一煤气厂等单位曾进行过流化床甲烷化技术的研究，均取得了一定的工程数据与运行经验<sup>[6]</sup>。上述关键技术已经基本突破，国外建成过日供数百万m<sup>3</sup>级的合成天然气装置<sup>[7]</sup>，国内因天然气发展的需要，已开工建设年供30亿m<sup>3</sup>天然气的大型合成天然气工业装置，还有几个大型合成天然气装置正在规划之中。煤和天然气相比，由于单位热量的价格较低，在煤矿附近建厂生产合成天然气，其成本更低。但煤制天然气作为应急气源乃至调峰气源的经济性如何，还要看实际运行的结果。

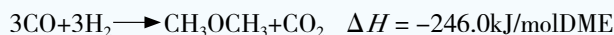
## 2.2 二甲醚(DME)替代天然气

二甲醚可以由煤、石油为原料生产，煤、石油先经气化制成CO+H<sub>2</sub>合成气，然后合成为甲醇，再由甲醇脱水生成二甲醚，这即所谓间接法合成。其反应为<sup>[8]</sup>：



据悉CO+H<sub>2</sub>一步法合成二甲醚的技术也已突破，

其反应为：



由表1可知，二甲醚的华白数与天然气的华白数相差5%以内，燃烧势相差也不太大，经过一定的技术处理后，与天然气互换。我国二甲醚的生产技术已经成熟，已建成几十套工业生产装置，2010年产能可达1 000万t。如果采用一步法煤制二甲醚的路线，生产成本会更低。二甲醚用煤生产，价格受国际原油价格波动的影响小。另外，二甲醚可以在常温下加压液化储存，储存费用比天然气液化储存低。因此，二甲醚作为天然气的替代气源，经济上比较可行<sup>[9,10]</sup>。目前存在的主要问题是二甲醚（尤其是液态二甲醚）对于城市燃气储配与应用设施中所采用的橡胶类密封材质有较强的溶解腐蚀作用。在这方面，国内的研究已经起步，耐二甲醚溶解腐蚀的材质已经初步选定，并且国内已有生产，但相关的系列制品有待开发。耐二甲醚介质溶解腐蚀材质及制品的使用寿命还需要考察，如果考察其自然寿命，所需时间太长。基于反应动力学机理的加速腐蚀法预测寿命的时间短得多<sup>[11]</sup>，但还需要实际验证，不断总结经验，制定标准，以规范检测方法。

## 2.3 液化石油气混空气代用天然气

液化石油气主要由丙烷、丁烷组成。由表1可知，单独用液化石油气作为天然气的替代气源，华白数相差太大，混以一定比例的空气后，其性能与天然气主成分甲烷比较接近（见表2），实际上已有若干城市曾用液化石油气混空气作为向天然气的过渡气源。因此，用液化石油气混空气作为天然气的应急气源在技术上是可行的。由于液化石油气在常温下加压储存，比液化天然气液化储存便宜，即使液化石油气的单位热量价格比天然气高一倍多，用液化石油气混空气作为天然气的应急气源，还是可取的，应急气源

表2 液化石油气(50%丙烷+50%丁烷)用作天然气应急气源时掺混空气的比例

	液化石油气混空气中空气的分子分数(%)					
	40	42	44	46	48	50
15℃华白数/(MJ/m <sup>3</sup> )	54.55	53.02	51.48	49.92	48.34	46.75
与甲烷华白数之比	1.075	1.044	1.014	0.983	0.952	0.921

表3 重油循环式热裂解燃气的性质

		重油循环式热裂解制气组分体积分数(%)		
		循环初期	循环中期	循环后期
重油 循环 式热 裂解 制气 组成	CO <sub>2</sub> 体积分数(%)	7.6	3.8	2.2
	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> 体积分数(%)	3.8	6.4	8.8
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 体积分数(%)	12.7	20.4	24.0
	O <sub>2</sub> 体积分数(%)	1.3	20.4	24.0
	CO体积分数(%)	13.8	8.0	5.2
	H <sub>2</sub> 体积分数(%)	28.1	22.5	20.1
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 体积分数(%)	0	0	0.8
	CH <sub>4</sub> 体积分数(%)	28.1	37.3	36.1
	N <sub>2</sub> 体积分数(%)	4.6	0.4	2.0
生成 燃气 性质	15℃高热值/(MJ/m <sup>3</sup> )	26.69	35.73	39.55
	生成气相对密度	0.66	0.66	0.69
	华白数/(MJ/m <sup>3</sup> )	32.87	44.01	47.60

主要是考虑社会效益。

## 2.4 重油制代用天然气

重油为原料制造人工煤气,国内外曾经盛行一时。表3为采用重油循环式热裂解生成燃气的组成与性质<sup>[12]</sup>。由表可知,生成燃气的热值范围较宽,调节热解过程的温度即可调节生成气的华白数,可以符合天然气的华白数范围。重油储存方便,制气装置启动快,重油热解生成燃气也可用作天然气的应急气源甚至调峰气源。

## 3 天然气储运系统的可靠性

干线输气管道供气满足不了用户的需求原因除气源以外有两个,一是储配系统出现故障,二是因气候条件变化使需求量超过计划量。为提高天然气供应可靠性,重要措施之一是提高天然气储运系统的可靠性。

### 3.1 提高设施的可靠性

首先是加快调峰、储备设施的建设。一方面是在

主干管网建设的同时,要利用各地废弃油气田或地下岩洞,沿主干建立大型地下贮气库,实施储备与调峰,并逐步纳入国家天然气的储备体系。另一方面是鼓励有能力的下游企业建设城市调峰、储备设施,形成城市日常性调峰储备能力,作为城市季节性调峰的补充。

### 3.2 提高管道系统的可靠性

为了应对气象变化和意外事故,应加强天然气管道系统可靠性的研究。在这方面,前苏联曾进行过大量研究,提出了干线输气管道可靠性的指标,建立了单元和节点的可靠性模型,详细研究了可靠性指标的计算方法,对大型天然气输气干线进行了实际计算,并提出了一系列关于天然气长输管道系统的单元和节点可靠性、干线输气管道可靠性、供气系统可靠性和寿命等问题的研究方向<sup>[13]</sup>。国内对于管道的可靠性也进行过研究。20世纪80年代,有关学者率先将可靠性理论引进到城市燃气管道可靠性领域来,根据燃气管网中各部件的失效机理服从统计与概率分布的特征,建立燃气管网供气能力的数学模型,并对支状燃气管

网和环状燃气管网的可靠度进行了计算<sup>[14,15]</sup>。近年来，“十一五”国家课题中为了提升市政基础设施的功能，对城镇燃气管道的安全评价方法进行了研究，主要是采用故障树分析法对城市燃气管道进行安全评估<sup>[16,17]</sup>。

### 3.3 加强短期预测，提高调度水平

如同任何事件的发生一样，天然气供销差的变化也是有一定预兆的，城市燃气负荷预测的及时与准确对于“气荒”的缓解有着重要的作用。国内有的学者对于城市燃气负荷的长期、中期、短期预测技术进行了大量研究，取得了可喜的进展，在若干城市已经实际应用<sup>[18]</sup>。德国在贯彻欧洲议会和理事会保障安全节能的天然气供应的法规时，要求各城市燃气上报未来3天的用气量预测误差控制在5%以内。此举促进了燃气预测方案的发展，对国内燃气的预测工作有借鉴意义<sup>[19]</sup>。国内某城市的燃气用气量经德国慕达燃气预测系统的分析，在给出了1年的用气量和天气数据的前提下，7天内的预测误差为1.75%，实际值和预测值的对比曲线见图1。如能利用燃气负荷预测技术对于气象干扰的影响能准确的预测，加上及时的调度，对于天然气供应系统“气荒”的避免将具有重要的意义。

## 4 调峰型天然气用户的建设

所谓调峰型天然气用户是指有利于天然气削峰填

谷的终端用户和能应急临时停产的特殊工业用户。下面主要讨论前一种调峰型天然气用户。

随着人民生活水平的提高，电空调使用越来越多，导致夏季供电负荷很高。但燃气和电力负荷峰谷刚好相反，冬季负荷高，夏季负荷低，二者存在很强的互补性。如果能够均衡发展电力和燃气，相互达到一个削峰填谷的作用，无论对于电力、燃气企业，还是我国能源的综合利用都是大有益处的。采用燃气热泵式制冷、制热与供应生活热水装置，夏天代替电力空调，冬天代替锅炉供热，平时提供生活热水，使得夏季也有较高的天然气负荷，减少冬夏两季燃气负荷的峰谷差，降低燃气产供成本，同时燃气空调的推广也减轻电网的夏季电力高峰负荷，使得全年电力负荷峰谷差减小，推广燃气空调具有削峰填谷的作用。另一方面，采用燃气热泵式制冷、制热与供应生活热水装置，比直接燃烧供热和供应生活热水的效率约提高40%，可以节约相应的燃气用量和减少相应的二氧化碳排放量。

据统计，如果中国一半的电空调市场由燃气空调替代，相当于有32.13GW的尖峰用电负荷被削减下来，各地区的电力紧张现象则可缓解<sup>[20]</sup>。同时，从平衡燃气低谷的角度上看，32.13GW的用电负荷转变成燃气空调制冷，相当于每日解决了 $3\ 000 \times 10^4 \text{m}^3$ 的天然气用量。我国现在78%左右的电力来自于火力发

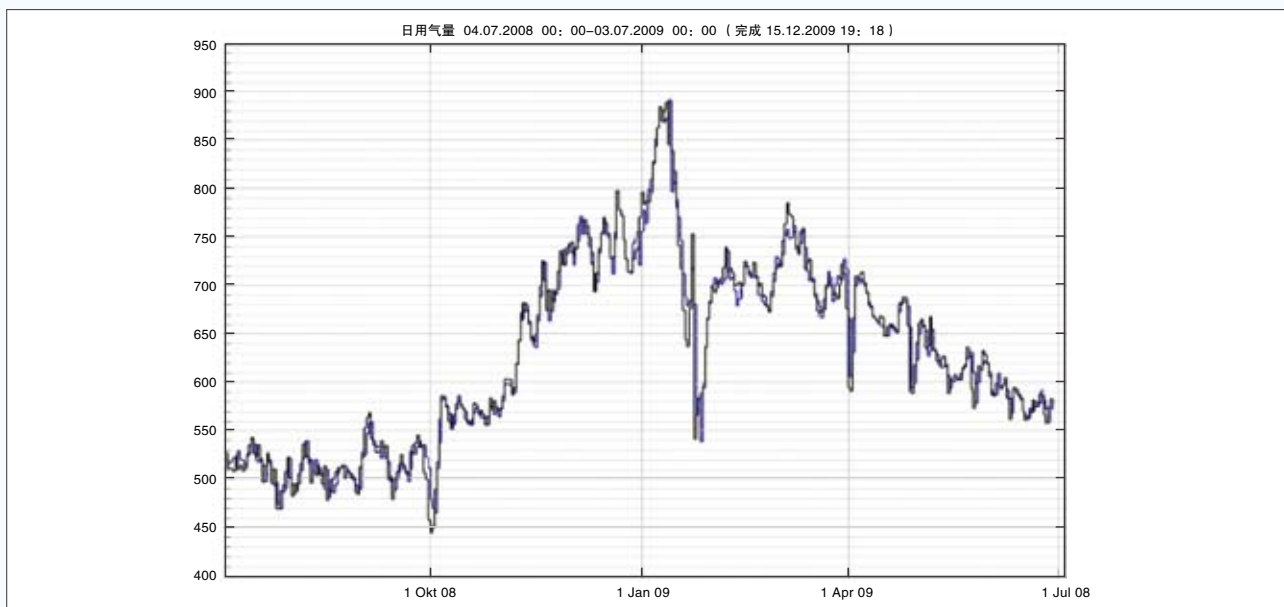


图1 某城市天然气实际值和预测值的对比

电,在火力发电约30%转换效率的情况下,获得电能的代价是巨大的,约70%的一次能源就要浪费掉,而火力发电使用的燃煤又是污染环境的最大因素。这样采用燃气空调部分替代电力空调,既可以填补夏季天然气利用的低谷,又可以有效地避免夏季电力高峰的出现,从而起到环保、节能、优化能源结构的三重效果,具有重大的社会经济效益。因此,适当限制电空调的使用量,按照合理的比例转换电空调为燃气空调,加快燃气空调的发展速度是今后能源合理利用的方向,采用燃气空调是解决电力危机、平衡电力和燃气能源的最佳途径之一。

## 5 结语

(1) 上述这些方法各有所长,相互具有互补性。若能将其集成用于城市燃气供应系统,必将有益于城市燃气供应系统可靠性的提高,减少“气荒”的出现次数,减轻“气荒”的影响程度。

(2) 上述分析主要侧重技术上的定性分析,各种方法是否适用与当地的条件有关,有待进行详细的定量分析。

(3) 各种方法有的已经成熟,有的还需进行试验或示范,尤其是经济性的评价更需要深入研究,维修成本较高的设施还需进行全寿命周期成本的研究。

### 参考文献

- 冯会会,苗红,薛兵et al. 循环经济. 低碳城市建设的路径与手段[J]. 再生资源与循环经济, 2009; (11):17-20
- 中国城市燃气协会企业管理工作委员会. “天然气供气短缺,城市燃气企业如何应对供需不平衡矛盾座谈会”会议纪要[J]. 城市燃气, 2010; (1):37-39
- Ernst Bartholome. Ullmanns Enczklopädie der technishchen Chemie (Band14) [M]. Weiheim: Verlag Chemie, GmbH, 1977
- Ahmed Bellagi. Zur Reaktionsterchnik der Methanisierung von Kohlenmonoxid in der Wirbelschicht[D]. Aachen: Aachen TH, 1979
- Klaus Kaltenmaier. Untersuchungen zur Kinetik

der Methanisierung von CO<sub>2</sub>-reichen Gasen bei höheren Drücken[D]. Karlsruhe: Karlsruhe Universität (TH), 1988

6 项友谦,姜志清,贾树华. 流化床甲烷化有关工程技术问题的探讨[J]. 煤化工, 1993; (3): 29-36

7 K.黑德, M.雷德曼, J.加斯特卡et al. 人工煤气生产委员会报告[C]. IGU/B-82, 1982

8 Japan DME Forum. DME Handbook[M]: Tokyo: Japan DME Forum, 2006

9 项友谦,王启. 二甲醚生产工艺与燃料用途[J]. 煤气与热力, 2006; 26(9):20-24

10 王启,项友谦. 二甲醚在城镇燃气领域的应用前景[J]. 煤气与热力, 2007; (5): 24-27

11 二甲醚介质中有机材质性能变化的预测方法. 发明专利200810053435.7

12 日本瓦斯协会. 用油、气制造煤气与合成气(油煤气篇)(中译本)[M]. 北京:石油化学工业出版社, 1976

13 E. P.斯塔夫罗夫斯基(苏)著,张玉斌,李商信译. 干线输气管道可靠性计算方法[M].

北京:石油工业出版社, 1995

14 毕彦勋. 燃气输配管网的可靠性评价[J]. 煤气与热力, 1986; (3): 22-31

15 毕彦勋,卢桂菊. 燃气输配系统用户供气可靠性失效树分析法评价[J]. 煤气与热力, 1987; (5): 27-35

16 高文学,李建勋,王启et al. 故障树分析法在城市燃气管道安全评价的应用 [J]. 煤气与热力, 2009; (12):B29-35

17 韩青龙,李颜强,高文学et al. 城镇燃气管道的安全评价方法[J]. 煤气与热力, 2010; (1): B38-42

18 焦文玲. 城市燃气负荷时序模型及其预测研究(博士学位论文) [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2001

19 吴婷. 欧洲燃气市场化进程中的智能决策支持系统及其具体应用[A]. 2009中国天然气市场供需暨城市燃气发展论坛文集[C], 北京:中国天然气市场供需暨城市燃气发展论坛

20 项友谦,王启. 天然气燃烧与应用技术手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2007

基金项目:“十一五”科技支撑计划课题(2006BAJ03B02)