

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2012.10.001

· 续上期 ·

美国燃气协会燃气互换性公式评述（第四部分）

□ 中国市政工程华北设计研究总院（300074）李猷嘉

6 评述

（1）美国的燃气互换性研究始于不同燃气的混合需要。美国燃气协会36号公告法的命题就是《其他燃气与天然气的互换性》。其他燃气的组成都是已知的。互换性研究主要解决作为补充燃气的其他燃气与基础负荷天然气互换时的定量比例，且主要是对当时广泛使用的民用燃具而言。美国当时的天然气（作为基础负荷使用）分成3类：即：高热值、高甲烷和高惰性天然气；假设民用燃具是按其中的一类进行调定，然后研究不同配比的补充燃气与调定天然气的可互换范围。详细的研究结果可见表9、10和11。与3类燃气置换时可得到满意运行特性的补充燃气比例可见表12。

对3类基础负荷天然气之间的互换问题，所得的结果是：除高甲烷天然气可与高惰性天然气调定的燃具置换使用外，均不可互换。

这一互换性的研究成果一直指导着美国燃气行业

所遇到的燃气混合问题，直到本世纪初，由于有些气源点引进的LNG组分变化很大，加上用气规模已完全不同民用燃具的时代，因而用白皮书的方式提出了互换性研究中的新问题。国际燃气联盟用6年时间研究了LNG与天然气的互换问题，是针对当今燃气工业发展中所遇到的新问题提出的，也是过去的研究所不能完全替代的。

（2）历史上关于燃气互换性研究的各种方法都是根据本国燃气工业发展的需要开展的。美国的研究始于1915年^[3]，美国标准局（National Bureau of Standards）对美国民用燃具的燃烧情况进行了调研^[3]，在调查中当时就发现：为了提高燃具的热出力，除一次空气需要量外，在运行中还有4个条件必须满足，即：无离焰；无回火；无表示有游离碳存在的黄焰端；无表示有不完全燃烧产生的一氧化碳。在1925年美国燃气协会的会议上，国家标准局还曾展示过一个机械模型，并做了继续研究的计划，后因缺乏基金支持，计划只好放弃。1927年，美国燃气协会开始了一

表12 补充燃气与3类燃气置换时有满意性能的混合比例

补充燃气	补充燃气热值 MJ/m ³ (Btu/cf)	补充燃气在混合气中的含量%		
		高热值天然气	高甲烷天然气	高惰性天然气
增碳水煤气	36.74 (986)	40	60	< 10
焦炉气	19.9 (534)	20	37.5	40
30%丁烷—70%丁烷改制气	44.64 (1 198)	50	40	< 10
丁烷—空气混合物	52.16 (1 400)	40	20	< 10

个为期6年的关于燃气互换性研究计划,称之为“混合燃气的研究”。其最终报告中指出“详细的结果可见实验室试验的25本进展报告,大约有2 000页的打印材料”,“做了大约175 000个独立的试验,审查了250个以上不同的混合燃气”。研究成果即1936年在美国联邦商业委员会的公用事业调研会上发表的“A.G.A.的C指数”法。

早期的研究表明^[9]:

a. 在燃具前相同的压力下,进入燃具的热入力,代表燃具的负荷特性,用 $\frac{H}{\sqrt{D}}$ 表示。式中:H表示燃气的高热值,D表示燃气的密度,且通常采用燃气的相对密度值。此值即后来通称的沃泊指数。

b. 燃气完全燃烧时的空气需要量正比于 $\frac{\sqrt{D}}{A}$ 。对多数燃气而言,在燃烧所需的空气量A和燃气的热值之间有一个接近于常数的关系(大约是 $0.2415\text{m}^3/1\text{MJ}$ 或 $9\text{cf}/1\ 000\text{Btu}$)^[5],各单一燃气每 $1\text{MJ}/\text{m}^3$ 热值燃气燃烧所需的空气量如表13。在研究报告中通常均列有燃气的热值和相对密度之值,燃烧所需的空气量则很少列出。因为只有确定互换性时,为了方便才需要考虑置换气与A和 $\frac{H}{\sqrt{D}}$ 或其倒数之间这两个特性之间的关系。1934年,在标准局的405通告(Bureau Circular 405)中,已指出 $\frac{H}{\sqrt{D}}$ 的意义是确定互换性的一个重要度量值。通告同时也指出,至少还应有另一个附加因素,即“着火速度”或“火焰传播速度”需要考虑,可用一个近似值S作为代表值。但当时并没有企图将S和 $\frac{H}{\sqrt{D}}$ 综合在一起以形成一个确定互换性的通式。A.G.A.的C指数法就是一个例子。

1938年,一个AGA的委员会对美国有代表性的全部燃气进行了燃具试验,其结果发表在AGA实验室的847报告中,某些重要的数据比以前的更为详细,应用价值也更高。1941年诺氏(Frank Knoy)首次研究了以LPG作置换气的互换性公式。1946年美国的A.G.A实验室出版了一个“36号研究公告”,即本文重点讨论的内容。互换性研究的范围涉及到18种燃具,首先对特性略有不同的3种天然气作了调定,然后用48种组分和特性差异较大的其他燃气作为置换气做了研究,报告的结果十分详尽,形成了以3个数学公式表达的互换性指数,应用价值已超过了“混合燃气研究”时的水平。

当时在研究中已观察到,燃气能否互换尚须考虑一个十分重要的因素,即“不完全燃烧”,当时在燃气燃烧时已观察到CO的释放问题。

1948年的春天,美国调研委员会的执行主席安齐思(J.F. Anthes)用上述研究中相类似的方法对28种燃烧器和更为不同的其他燃气做了试验并提出了初步报告^[10]。报告指出,将实验的观察结果与先前得到的预测公式相比较,结果并不十分令人满意。安齐思提出必须注意到这一事实,希望在不久的将来能出现令人更为满意的公式。

E.R.韦弗(Elmer R. Weaver)接受安齐思的邀请和意见,致力于更为实用的公式研究。他着手修正部分公式中已省略的如 $\frac{H}{\sqrt{D}}$ (或 $\frac{A}{\sqrt{D}}$)和标准局405号通告中火焰速度S值之间的定量联系,研究能否用有关回火和离焰的数据建立简单又实用的预测互换性的方法。韦弗进一步研究了4个极限条件中如离焰、回

表13 各单一燃气每 $1\text{MJ}/\text{m}^3$ 热值燃烧所需空气量(15.5℃, 760mmHg)

燃气	高热值 MJ/m ³	空气需要量 A	1MJ/m ³ 热值 所需空气量m ³	燃气	高热值 MJ/m ³	空气需要量 A	1MJ/m ³ 热值 所需空气量m ³
CH ₄	37.80	9.528	0.252	C ₄ H ₈	118.86	28.585	0.240
C ₂ H ₆	66.66	16.675	0.250	C ₃ H ₁₀	149.04	35.732	0.240
C ₃ H ₈	95.87	23.821	0.248	C ₆ H ₆	146.43	35.732	0.244
n-C ₄ H ₁₀	126.38	30.967	0.245	C ₇ H ₈	196.73	50.024	0.254
n-C ₃ H ₁₂	156.49	38.114	0.244	C ₂ H ₂	55.44	11.911	0.215
C ₂ H ₄	60.14	14.293	0.238	H ₂	12.11	2.382	0.197
C ₃ H ₆	88.79	21.439	0.241	CO	11.98	2.382	0.199

火、黄焰端和不完全燃烧指数的互换性新公式。所得公式可以代表所有有效的观察结果，且略优于36号公告中所提出的3个指数，应用也较为简单。

但是，在安齐思报告发表的同时，美国燃气协会正在出版许多重要的研究资料，认为如继续研究，会对刚提出的36号公告法在应用上受到限制或不满意其准确性，从而搞乱已有的分歧。随后，A.G.A的试验结果分成4个报告出版，定名为1106号研究报告的A、B、C和D。完整的报告说明了在互换性问题中的实际应用情况，因而36号公告法在美国一直沿用至今，包括有关的计算机软件。

1951年，美国国家标准局的E.R.韦弗正式发表了题为“体现燃气互换性的公式与图表”一文，全文共25页。文献2认为，所有对燃气互换性感兴趣的人均应阅读并研究此文。由于内容丰富本文在此甚难作深入的介绍。美国燃气研究院评价认为；韦弗法和36号公告法至今仍是对美国已有燃具进行互换性预测的有效工具。同时也指出，其火焰速度的公式只是一个较粗的近似值，如能用更为精确的火焰速度代入可能更好。

(3) 需要指出的是，英国的互换性预测图中，如吉尔伯特—普里格法或哈里斯和洛弗雷法，均采用了韦弗的火焰速度公式，但与韦弗法完全不同。韦弗法有6个指数，只有离焰指数与回火指数用了火焰速度，黄焰端与不完全燃烧指数均与火焰速度无直接关系。热入力指数（即沃泊指数）与一次空气指数则是36号公告法公式导出过程中应用的基本关系式。

不论韦弗法或36号公告法，应用于动力燃烧器或非大气式燃烧器的互换性预测时均应取高度谨慎和怀疑的态度^[3]。这也是当前世界燃气界互换性研究所面临的任

务。已有的互换性预测方法研究成果均宣称只为本国服务，如1964年在荷兰海牙召开的第9届国际燃气会议上法国德尔布的论文题为《对燃气互换性的法国新近研究》（未定稿版）。2009年，国际燃气联盟出版的《燃气互换性与燃气质量》一书就首先声明：

“BP或IGU不能保证文件中数据的准确性和承担任何人员据此使用的责任”。由于我国燃气行业较快的发展始于本世纪，至今已甚难得到发达国家历史上对互换性研究的完整资料，二手与三手的资料较多，理解上甚易有不同的差别，至今尚无行业的国家重点实验

室，甚难对重大的问题开展前瞻性的研究，只能从消化吸收已有研究资料开始。

(4) 从上所述，美国对燃气互换性的研究历史较久，资金投入较大，在俄亥俄州克利夫兰有著名的美国燃气协会实验室。1993年，笔者曾有机会在美国燃气协会L.T.英格尔先生的安排下访问过该实验室，留下了深刻的印象，实验室曾出版过大量研究报告，至今已无法得见全貌。本文在下决心较系统的介绍36号公告法内容时，也是心存疑虑：能否用少量文字把问题说清楚？最大的障碍是必须先掌握美国民用燃烧器的设计思路和方法以及所依据的实验数据，这是理解燃气互换性问题的基础。美国燃烧器的设计方法在文献9中有全面的介绍，建议参考研究，但如能结合本文所列的参考文献，对照原文，应更好。

36号公告法的特点是调定气和补充燃气（置换气）的化学组成范围虽然很广，但均是可以预知的，目的是解决调峰用气的互换问题，便于运行中合理确定调峰用气的混合比例。应用范围主要是大气式燃烧器，这是当时的要求。随后其他国家的研究目的也相类似，因此，现有各种方法之间是存在某种可比性的，后续的方法不可能不参考以前研究的数据。36号方法以及韦弗法的可贵之处在于建立了许多计算公式，公式来自大量的实验数据，且实验数据都可公开发表，可以供任何人评价参考。当今如遇到历史上同类的燃气互换性问题，应该是不难解决。但当前所论及的LNG与已有天然气的互换问题是完全不同的范畴，两者虽有联系和共性，但不能混淆。当今天然气已属世界三大能源之一，用户范围很广，民用只是其中的一部分。从2010年我国的统计年鉴可知，天然气的总供气量为487.6亿m³，家庭用量为117.2亿m³，仅占24%。2011年我国天然气的对外依存度已达20%，国际上各国所关心的燃气互换问题，在我国也必将遇到，不能没有研究和准备。

(5) 国际燃气联盟出版的“燃气质量与燃气互换性指南”一书^[4]也是一个值得研究的参考文献。美国文献指出^[5]，常规天然气在当今配气中作为补充燃气，未来可能被非常规的天然气所代替，并可能包括以下燃气，如：从煤炭、石油、页岩、泥炭和废弃物等生产的人工燃气；填埋气；生物质气；精炼废气；焦炉气；进口的LNG；煤层气；致密砂岩气和泥盆纪

的页岩气等。

所有上述燃气均期望通过量身定作后能成为通常所称的“管道质量燃气”(“Pipeline quality gas”)或更好的成为“终端使用天然气”(“End-use natural gas”)。上述这类燃气在1993年美国或国际天然气标准中均无反映。国际标准化组织(ISO)曾有一个题为“质量规定”的委员会草案,包括天然气的质量参数和互换性的信息。

重要的并不是未来的燃气在组分上会有多大的变化,变化是肯定的,更重要的是其组分的变化可能已完全超出了现有配气系统在各个使用阶段曾出现的情况。组分的变化可能是突然的出乎意料,根本来不及对设备进行调节或采用掺混和其他减轻组分变化的措施^[8]。

在燃气的组分发生大的变化时,必须对燃具作实质性的修整,对另一些设备则要更换。如发生这类事件,就需要有大规模的转换程序,类似于过去从人工燃气转换成天然气时的状况。对基础负荷气的组成发生这样的变化在当今是不希望发生的,很多国家已提出了这类问题,正在做好准备工作。

参考文献

- 1 Guidebook to Gas Interchangeability and Gas Quality. BP and IGU. 2009
- 2 LOUIS SHNIDMAN GASEOUS FUELS, Properties, Behavior and Utilization. Second Edition American Gas

Association. 1954

3 E.O. Rossbach; S.I. Hyman, P.E.《INTERCHANGEABILITY: WHAT IT MEANS》A USEFUL PROGRAM IN FORTRAN AND ITS DEVELOPMENT. Presented at A.G.A. Distribution Conference Denver, Colorado May 22. 1978, Revised July 1984

4 E.J. Weber Chapter 14 <Interchangeability of Fuel Gases> Gas Engineers Handbook. Fuel Gas Engineering Practices. 1965. The Industrial Press 93 Worth Street New York, N.Y

5 Interchangeability of Other Fuel Gases With Natural Gases. Research Bulletin 36. American Gas Association Laboratories. Catalog NO. XH0203 Reprinted January 2002

6《Fundamentals of Gas Combustion》.Prepared by American Gas Association Laboratories. Catalogue No. XH0373 copyright © 1973 Registered by American Gas Association First Printing January 1973, Eighth Printing March, 1988

7 A.G.A《Interchangeability Program》Catalog No. XH9301 Copyright © 1993. American Gas Association

8 GEOP (Gas Engineering and Operating Practices). A series by the Operating Section The American Gas Association. Volume V UTILIZATION. Book U-1 Residential/Commerical. The American Gas Association Arlington, Virginia 1994

9 姜正侯主编.燃气工程技术手册.同济大学出版社, 1993

10 Progress Report on Mixed Gas Research Project TL-1. J.F.Anthes, Presented at the 1948 Joint Production and Chemical Committee Conference (May 24 to 26 1948)

(全文完)

工程信息

浙江义乌天然气利用工程二期项目通过评审

日前,浙江省发改委原则同意义乌市天然气利用工程二期项目申请报告。

义乌天然气利用工程二期项目包括:建设夏演城市门站1座(含高中压调压站),建设柯村高中压调压站1座(含LNG应急站),铺设7.4km高压输

送储气管网1条。项目总投资估算约10 042万元。该项目建成后,年输气能力达4.8亿m³,输气规模达1.5万m³/h,能有效满足义乌市日益增加的用气需求。

(本刊通讯员供稿)