

# 气体双燃料发动机运行模式的研究

徐兆坤 蒋妙范 张珏成 李西秦 吴伟蔚 黄鹏

(上海工程技术大学)

徐兆坤等. 气体双燃料发动机运行模式的研究. 天然气工业, 2005; 25(3): 157~159

**摘要** 为了改善汽车能源结构和降低排放量, 根据对天然气、石油气、汽油和柴油理化特性的分析, 在理论上预测了不同燃料发动机的特性, 并结合试验结果, 研究了不同气体双燃料发动机的运行模式。结果表明: 燃用气体燃料是降低一氧化碳和颗粒物排放量的有效手段, 但并不存在降低 NO<sub>x</sub> 排放量的机理; 其中, CNG/柴油混用双燃料发动机是最佳的运行模式, 其次是汽油/LPG 双燃料发动机; 另外, 并非所有的模式都值得开发, 相关研究也值得商榷。

**关键词** 天然气 石油产品 混合 燃料 汽车 发动机 运行 模式 优选法 排放标准

由于气体燃料发动机汽车均存在着续航里程短、不易压燃等缺点。因此, 与液体燃料组合而形成的双燃料汽车便应运而生。

双燃料发动机有多种运行模式, 根据传统燃料发动机的不同(汽油机、柴油机), 所代用燃料的不同(CNG、LPG)以及燃用方式的不同(两用、混用), 进行排列组合, 共有 8 种可能的模式。这就存在着 8 种模式实现的可行性、各自特点以及适用车型的问题。针对目前的相关研究, 笔者认为有必要指出, 并非所有模式均值得研发, 应当站在“改善能源结构, 节能环保”的战略高度, 突出重点, 而不是填补所有模式的空白。

## 一、不同燃料理化特性对运行模式的影响

发动机的运行模式很大程度上取决于燃料。分析各种燃料理化特性发现: 表 1 中所列燃料几乎所有的理化参数, 都有点类似化学元素周期表的特点, 即按表 1 的顺序排序。这样的特点, 对于推测不同燃料发动机的特性及其原因极具价值, 对于选用发动机燃料, 提高发动机性能, 具有指导意义。

(1) 由参数 1~3 可见, H/C 比, 在表中从右到左, 即柴油、汽油、石油气和天然气依次升高, 换言之, 含碳量依次减少。因此, 如果燃烧过程组织得好, 含碳排放物(CO、CO<sub>2</sub> 和颗粒物 PM)将依次明

表 1 不同燃料主要理化参数排序表

参数\排序	天然气	石油气	汽油	柴油(轻)
1 含碳原子数	C <sub>1</sub> ~C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> ~C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub> ~C <sub>11</sub>	C <sub>15</sub> ~C <sub>23</sub>
2 碳氢比(H/C)	4	2.62~2.3	2~2.3	
3 质量成分 (%)	g <sub>C</sub>	0.75	0.855	0.87
	g <sub>H</sub>	0.25	0.145	0.126
4 沸点(°C)	-161.5	-30	-25~220	160~360
5 密度 (kg/m <sup>3</sup> )	液相	424	520~602	700~780
	气相	0.715	2.0~2.6	
6 燃料低热值(MJ/kg)	50.05	46	44.00	42.50
7 理论空气量(kg/kg)	17.4	15.5	14.9	14.5
8 混合气热值(MJ/m <sup>3</sup> )	3.230	3.5	3.758	3.819
9 十六烷值			0~10	40~55
10 辛烷值 RON	130	110	90~106	
11 许用压缩比典型值	12	10	8	15
12 火焰传播速度(m/s)	0.338	0.37	0.39~0.47	
13 火焰温度(°C)	1918	1975	2197	1918
14 自燃温度(°C)	632	504	220~250	200~220
15 着火温度(°C)	537	450	390~420	

显减少。而仅仅通过代用燃料(LPG、CNG 等), 一般而言, 很难有效降低氮氧化物(NO<sub>x</sub>)排放量。因为氮是来自空气, 而不是燃料。大量实验也证明了这一点, 因此不必再盲目作徒劳的努力。

(2) NO<sub>x</sub> 产生的机理是富氧、高温及高温持久, 只有破坏这些条件, 才能有效降低 NO<sub>x</sub> 排放量。LPG 或 CNG 发动机之所以有减少 NO<sub>x</sub> 排放量的

**作者简介:** 徐兆坤, 1953 年生, 副教授, 上海交通大学硕士研究生毕业; 主要研究方向为发动机燃烧和气体燃料。地址: (200336) 上海市长宁区仙霞路 350 号上海工程技术大学汽车学院。电话: (021) 62759779 转 5014, 13166159850。E-mail: nieh@scei.com.cn

可能,原因之一是其火焰温度(参数13)稍低。另外还有很多影响因素,诸如发动机的结构、点火提前角、气体的组织和燃料的混合等。因此气体燃料发动机 NO<sub>x</sub> 的实际排放量会或高或低。

(3)PM 产生的机理主要是燃料的液相不完全燃烧,因此柴油机 PM 排放量较高,汽油机很低。由参数4、5可见,天然气和石油气呈气相。因此 PM 排放更低。

(4)虽然各燃料低热值(参数6)依次增大,但理论空气量(参数7)也依次增大。因此,在理论空燃比条件下,对于同样的气缸容积,燃料产生的热值并不增大。相反,由于气体燃料占据了部分气缸容积,混合气热值(参数8)反而依次降低,因而可以认为,“小打小闹”的技改很难有效提高气体燃料发动机的动力,除非有本质性的技术突破,比如气体燃料液态高压电控直喷技术。

(5)十六烷值(参数9),从右到左,依次降低;辛烷值(参数10)依次升高。因此汽油、LPG、CNG 发动机的许用压缩比(参数11)因此也依次升高,而柴油机的压缩比又比 CNG 发动机更高,参数11在表1中构成“首尾相连”。可见如果“相邻配对”,即在汽油机上燃用 LPG,柴油机上燃用 CNG,则压缩比差别小。燃用不同燃料时,发动机较适应,发动机改动较小。

(6)火焰传播速度依次降低,可见 CNG 更适宜低速工况,而 LPG 的火焰传播速度比 CNG 高 10% 以上,故适应的转速可高些。一般而言,汽油机转速比柴油机高些。因此,从火焰传播速度的角度来看,“相邻配对”也较合适。

(7)自燃温度(参数14)依次升高,而且柴油与天然气相差最大,达 400℃ 以上,因而两者混用时只可能压燃柴油,然后以柴油高能量火焰引燃天然气。因此燃烧过程更可控、更有序、更可靠。

(8)着火温度(参数15)依次升高,即 CNG 更难点燃,所需点火能量更高,如使用汽油机的点火系统,有点“力不从心”,失火率较高,所以 CNG/汽油两用发动机性能欠佳,而 CNG/柴油混用发动机则是较佳的匹配。

(9)密度(参数5)天然气液相密度仅为柴汽油的 50%,气相密度比空气还轻 30%,同时天然气又不易液化(除非冷至 -162℃)。由于 CNG 的体积能量密度较小,为此储气瓶压力(20 MPa)是 LPG 气瓶压力的 10 倍,储气瓶笨重。在同等能量下,CNG 储气瓶总重比汽油或柴油油箱重 4~5 倍,而 LPG 储气

瓶总重增加 1 倍。因此,CNG 发动机更适宜作为固定动力源,或固定路线公交汽车或载重汽车,而不太适宜流动性大的小型车,如出租车等。

## 二、对各种运行模式的分析

8 种运行模式的主要特点见表 2,补充说明如下。

表 2 8 种模式的主要特点表

模式	原机/气体燃料/燃用方式	评价	主要特点
1	柴油机/CNG/两用燃料	C	需加装点火系统,成本过大,易爆震
2	柴油机/LPG/两用燃料	D	需加装点火系统,且许用压缩比差别过大,更易爆震
3	柴油机/CNG/混用燃料	A+	压缩比相差不大。可与原机功率相同,甚至更高
4	柴油机/LPG/混用燃料	C	压缩比相差较大。可降低负荷和替代率运行
5	汽油机/CNG/两用燃料	C	压缩比差别过大。易爆震,功率下降 20%
6	汽油机/LPG/两用燃料	A-	压缩比差别不大 <sup>[1]</sup>
7	汽油机/CNG/混用燃料		根据理化参数进行预测,总体性能难以很好,具体结论尚待进一步研究
8	汽油机/LPG/混用燃料		

模式 1,CNG 自燃温度是柴油的 2 倍,难以压燃。如果切换到燃用 CNG,则必须要加装高能量点火系统,因此是不经济的。其次,如果加装了点火系统,由于 CNG 发动机所许用的压缩比比柴油机低,因此在高负荷时,易发生爆震,只能降低负荷运行。

模式 3 是用少量柴油(10%~15%)引燃 CNG,因此不必加装点火系统。燃料替代率可高达 70%~90%。也可切换到纯柴油工作,两种燃料发动机所许用的压缩比相差不大,是较佳的运行模式。

模式 4,与模式 3 相似,但更易发生爆震,中高负荷时 LPG 燃料替代率只有 10%~40%。以增加一套 LPG 燃料系统的代价,获取 PM 等部分排放物有所下降,此举值得商榷。

模式 5,简单改造后可正常运行,但当燃用 CNG 时,发动机动力性下降高达 20%,提高压缩比后,可得到部分弥补,但仍要下降约 10%,燃用汽油时辛烷值应更高。

## 三、CNG/柴油燃料发动机的特点

大量试验分析和理论研究表明:与柴油机相比,CNG 发动机虽然会使充气效率下降约 10%,但由于

燃料易于混合,过量空气系数 $\alpha$ 可以在1附近;而柴油机由于液态燃料混合困难,在理论空燃比附近,会发生不完全燃烧而产生冒烟,因而在高负荷时,最大功率受冒烟极限所限,即 $\alpha$ 必须在1.2以上运行。因此CNG发动机的空气利用率比柴油机高约10%。但由于实际燃烧系统的匹配水平不同,因而CNG发动机的实际性能(比如扭矩),与柴油机相比可以或高或低。

中等负荷时,由于柴油引燃火焰能量大,可燃用较稀混合气,因此经济性甚至好于CNG单燃料发动机。动力性能较好,排放量(特别是PM、CO<sub>2</sub>和CO)较少。

低负荷时性能较差的原因是:低负荷时的柴油机虽然总空燃比较高,混合气很稀,但由于其混合不均匀,局部空燃比并不高,混合气并不稀,因而能正常的燃烧。而CNG是均质燃烧,低负荷时,混合气浓度已接近可燃下限,因而燃烧不良,造成油耗增加,HC明显增加,尤其是高速低负荷时。

#### 四、结 论

在双燃料发动机8种运行模式中(其中2种难以正常运行),CNG/柴油混用发动机是最佳的运行模式,几乎具有了“混合动力”意义上的优势,即高负荷时,主燃CNG,发挥均质燃烧优势,提高气缸利用率,动力性排放性较好;中负荷时,稀薄燃烧,柴油高

能量引燃,排放性较好,而小负荷时,切换燃用纯柴油,发挥非均质燃烧优势,提高排放性能和经济性能,是目前认为的最佳的组合燃烧模式,是最值得大力推广的气体双燃料发动机。

笔者认为,如果以柴油机(或汽油机)为基础发动机,则应以柴油/CNG混用(或汽油/LPG双用)模式运行。如果当地LPG(或CNG)资源较丰富,或供给方便,那么应以汽油/LPG双用(或柴油/CNG混用)模式运行。

#### 参 考 文 献

- 1 徐兆坤等.LPG—汽油两用燃料汽车发动机的性能特征及其技术对策.小型内燃机与摩托车,2002;(2):10~13
- 2 李西秦,徐兆坤等.LPG喷射形式对发动机性能的影响.内燃机工程,2004;(2):43~45
- 3 张铁,谢存禧.LPG/柴油双燃料发动机中LPG供气系统的研制.天然气工业,2001;21(6):80~83
- 4 赵春红.国内第一辆LNG—汽油两用燃料汽车.天然气工业,2003;23(5):100~101
- 5 王强,历彦忠等.LNG在汽车工业中的发展优势.天然气工业,2002;22(5):93~96
- 6 宋钧,黄震等.车用天然气发动机技术及其应用.天然气工业,2002;22(1):88~92

(修改回稿日期 2004-12-31 编辑 居维清)