

# 天然气汽车发动机低 $\text{NO}_x$ 燃烧排放技术研究现状\*

闫云飞 张力 冉景煜

(重庆大学能源与环境研究所)

闫云飞等. 天然气汽车发动机低  $\text{NO}_x$  燃烧排放技术研究现状. 天然气工业, 2007, 27(5): 126-128.

**摘要** 天然气汽车在缓解能源短缺、降低汽车尾气污染和保护环境等方面具有较大的优越性,但其  $\text{NO}_x$  的排放量仍然较高。为此,通过对国内外车用发动机低  $\text{NO}_x$  燃烧与排放技术及其应用文献的综合与研究,阐述了天然气汽车发动机低  $\text{NO}_x$  燃烧、排放技术特点、措施及现状。得到了目前天然气汽车发动机不同低  $\text{NO}_x$  燃烧、排放技术的  $\text{NO}_x$  减排量和变化趋势。结果表明,天然气作为汽车燃料将成为车用发动机燃料发展的重要方向,低  $\text{NO}_x$  燃烧与排放技术是今后天然气汽车尾气减排技术的研究重点,而同时采取机内、机外净化措施,  $\text{NO}_x$  的减排效果将更好。

**关键词** 汽车 天然气发动机 环境保护 燃烧  $\text{NO}_x$  排放

目前,我国天然气汽车主要分布在四川、重庆、北京、西安、银川、新疆、兰州等地。在国际上,低公害天然气汽车发展的速度非常快,日本丰田、三菱,瑞典沃尔沃,美国通用等都推出了多种轿车、货车、公共汽车和城市专用车辆,其中凌志 300、本田 CIV-IC、沃尔沃 850 等一些名车均有天然气车型<sup>[1,2]</sup>。

## 一、天然气汽车的环保节能优势

各国从法规上对汽车尾气有害物含量的限制越来越严,表 1 为欧洲在此方面的限制标准。采用低公害、高经济性的燃料取代传统车用燃料是解决尾气污染的有效措施。

表 1 欧洲对汽车排气中有害物含量限制标准表

标准名称	生效年份	有害物含量 [g/(kW·h)]			
		$\text{NO}_x$	CO	$\text{C}_x\text{H}_y$	固体颗粒
欧-0	1988	14.4	11.2	2.5	
欧-1	1993	8.0	4.5	1.1	0.36
欧-2	1996	7.0	4.0	1.1	0.15
欧-3	1999	5.0	2.0		0.10
欧-4	2002	3.5	1.0		0.02
欧-5	2008	2.0	1.0		0.02

### 1. 减少大气环境污染

汽车使用燃油、LPG 和天然气时排气中的有害物含量见表 2<sup>[3]</sup>。从表 2 可见,天然气汽车 CO 和  $\text{C}_x\text{H}_y$  的排放显著降低,但  $\text{NO}_x$  的排放并没有较大

表 2 汽车使用不同燃料时排气中有害物含量比较表 g/(kW·h)

燃料类型	CO	$\text{C}_x\text{H}_y$	$\text{NO}_x$	碳黑	氧化铝	苯并芘
汽油	100	100	100	无	100	100
汽油(发动机带催化器)	25~30	10	25	无	无	50
柴油	10	10	50~80	100	无	50
柴油+天然气	8~10	8~10	50~70	20~40	无	30~40
LPG(丙烷)	10~20	50~70	30~80	无	无	3~10
天然气	5~10	1~10	25~50	无	无	3~10

\* 本文为重庆市科技攻关项目资助课题,编号:2002-07。

**作者简介:** 闫云飞,1978年生,博士研究生;在核心期刊发表论文2篇;主要从事汽车尾气处理、燃烧与环境保护、微尺度催化燃烧等方面的研究。地址:(400030)重庆市沙坪坝区沙正街174号重庆大学动力工程学院。电话:(023)65103114。E-mail:yyf1354@sohu.com

降低。在天然气机动车所排放的挥发性有机化合物 VOCs (Volatile Organic Compounds) 中,  $\text{CH}_4$  是最主要成分(占 90%~99%)。  $\text{CH}_4$  具有极低的光化学反应性, 可不作为光化学烟雾先驱物考虑, 故能抑制光化学烟雾形成。所以天然气汽车在改善空气质量方面有重要意义。

## 2. 降低汽车运行费用

改用天然气有较高的经济效益。据资料介绍, 几乎每辆汽车都可改为双燃料汽车, 并可以在行驶中随意转换燃料类型。这不仅弥补了由于汽车数量不断增加而引起的液体燃料供应不足, 而且使汽车的运行费用大幅度降低。

## 二、天然气汽车发动机的低 $\text{NO}_x$ 燃烧排放技术

控制及减少汽车有害排放物的净化措施分为机内和机外净化措施。机内净化措施即减少有害排放物的生成, 而机外净化措施则是在有害排放物生成后, 通过净化措施使排出量减少。化石燃料排放物主要为  $\text{C}_x\text{H}_y$ 、 $\text{CO}$  和  $\text{NO}_x$ , 使用天然气时, 其  $\text{C}_x\text{H}_y$  和  $\text{CO}$  的排放已大幅降低, 但其  $\text{NO}_x$  含量依然偏高(见表 2), 需重点加以控制和治理<sup>[4]</sup>。

### 1. 改进进气系统

改进进气系统的目的在于提高混合气雾化质量, 以及改善各缸分配的不均匀性等。其措施有: 利用废气、冷却水的热量或采用正温度效应(PTC)元件提高混合气温度; 采用螺旋进气管、压缩涡流、异形气门等, 以增强进气涡流及其他改善各缸混合气分配不均匀性的措施<sup>[5]</sup>。可减少 8%~13% 的  $\text{NO}_x$  排放量, 而且还可节能。

### 2. 改进点火系统

首先是点火时间, 通过点燃和燃烧初态影响燃烧过程进而影响排气成分, 尤其在稀混合气和低温低压时, 其影响更大。延迟点火提前角, 可降低燃气的最高燃烧温度和延长燃气的燃烧时间, 将排放物中  $\text{NO}_x$  体积分数降到  $300 \times 10^{-6}$  以下。这种简单有效的净化措施, 在国外已应用在各种低公害车上。

### 3. 废气再循环

废气再循环简称为 EGR 系统 (Exhaust Gas Recirculation), 它是将一部分废气引入进气管与新气混合后进入气缸燃烧, 从而实现再循环。对送入进气系统的废气进行最佳的控制与调节, 可以降低

$\text{NO}_x$  的排放。EGR 方法可使最高燃烧温度降低, 同时由于废气对新气的稀释作用, 降低了氧的浓度, 从而可抑制燃烧过程中  $\text{NO}_x$  的生成。经验表明,  $\text{NO}_x$  的降低率随着废气再循环量的增加而增加, 但当废气再循环量超过空气总量的 15% 时, 降低  $\text{NO}_x$  的作用开始减弱(见图 1), 对燃烧品质也有不利影响, 且最大废气再循环量受火焰稳定性的限制。

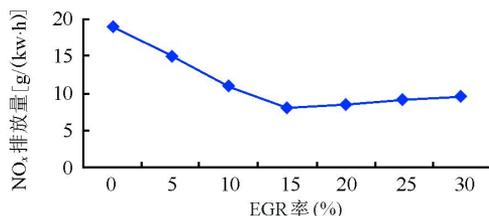


图 1  $\text{NO}_x$  排放量随 EGR 的变化曲线图

### 4. 分级燃烧

分级燃烧是在燃烧过程中加入空气或燃料的阶段性操作, 使燃烧区域温度控制在最高温度以下, 以此来降低污染物的排放量。空气分级是将空气分为两级或多级注入燃料再进行燃烧。在初始阶段, 只加少量空气, 造成一级燃烧区内的富燃料燃烧状态, 从而降低燃烧区内的燃烧速度和温度, 并在还原气氛中降低了燃料型  $\text{NO}_x$  的生成速率。第二级空气喷到一次富燃料区的下游, 与一级燃烧产生的烟气混合, 由于火焰温度和氧浓度降低, 在该区域热型  $\text{NO}_x$  受到抑制。采用空气分级燃烧技术,  $\text{NO}_x$  的排放量可降低 60%~70%。

燃料分级则是利用燃料作为还原剂来还原燃烧产物中的  $\text{NO}_x$ 。80%~85% 的燃料从燃烧器进入一级燃烧区, 在贫燃料状态下燃烧并生成  $\text{NO}_x$ , 其余 15%~20% 的燃料喷入二级燃烧区, 在富燃料状态下形成强还原性气氛, 使在一级燃烧区生成的  $\text{NO}_x$  在该区内被大部分还原成  $\text{N}_2$ , 同时在二级燃烧区还抑制了新  $\text{NO}_x$  的生成。通常, 燃料分级燃烧技术可使  $\text{NO}_x$  的排放浓度降低 50% 以上。研究表明, 分级燃烧可同时有效降低  $\text{CO}$  和  $\text{NO}_x$  排放量, 但应考虑到分级燃烧方式设计的复杂性及使用上的不便性。

### 5. 高温空气燃烧技术

高温空气燃烧技术的特征是尾气热量被最大程度地回收, 助燃空气被预热, 燃料在低氧浓度下燃烧。可实现燃料化学能的高效利用, 有效抑制燃烧主要污染物  $\text{NO}_x$  的生成(可使体积分数降至  $100 \times 10^{-6}$ )。但产物中  $\text{NO}_x$  的浓度与燃烧温度成指数变

化关系,一味提高空气预热温度而不采取措施抑制 $\text{NO}_x$ 的生成,则会引起 $\text{NO}_x$ 排放的急剧增加。

### 6. 空气分离技术

空气分离技术即从空气中分离出氧气参与燃烧,以减少氮气的量,氮气的分离效率可达87%以上,从而减少快速型 $\text{NO}_x$ 的生成量。

### 7. 低过量空气燃烧

从 $\text{NO}_x$ 的形成机理中可知,反应区内的过量空气系数对 $\text{NO}_x$ 的生成有重要影响。在低过量空气下燃烧,随着尾气中过量氧的减少,在一定程度上控制了 $\text{NO}_x$ 的生成。此法可降低 $\text{NO}_x$ 排放15%~20%(见图2)。但过低的过量空气系数会导致燃烧不充分,将增加CO的排放量,且使燃烧效率下降。

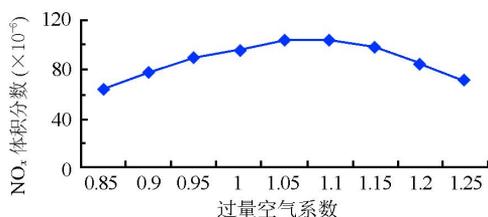


图2  $\text{NO}_x$  排放随过量空气系数的变化曲线图

### 8. 浓淡燃烧

浓淡燃烧是使一部分天然气在空气不足的条件燃烧,即燃料过浓燃烧;而另一部分天然气在空气过剩的条件下燃烧,即燃料过淡燃烧。两种情况下的天然气和空气当量比都偏离化学反应的理论当量比,以此抑制 $\text{NO}_x$ 的生成。浓淡燃烧时,燃料过浓部分因氧气不足,燃烧温度不高,热力型 $\text{NO}_x$ 会减少。燃料过淡部分因空气量过大,燃烧温度低,快速型 $\text{NO}_x$ 生成量也减少,总的结果是 $\text{NO}_x$ 生成量低于常规燃烧,可减少10%~25%的 $\text{NO}_x$ 排放量。

### 9. 低 $\text{NO}_x$ 燃烧器

为能有效控制燃烧过程中 $\text{NO}_x$ 的生成,须开发各种低 $\text{NO}_x$ 燃烧器。利用上述低 $\text{NO}_x$ 燃烧排放原理,根据不同情况,设计出浓淡型、两级燃烧式、循环式等不同原理的天然气低 $\text{NO}_x$ 燃烧器,也可综合利用几种原理研究出新型的低 $\text{NO}_x$ 燃烧器来控制 $\text{NO}_x$ 的生成,一般可减少40%以上。

### 10. 对尾气的净化处理技术

尾气的净化处理技术中最典型和应用最广泛的是催化转化器,另外还有空气喷射、热反应器等。前者降低 $\text{NO}_x$ 排放量,后两者仅能降低CO和HC的排放量。

在催化转化器的研究中,三效催化器是一种能使CO、HC和 $\text{NO}_x$ 三种有害成分同时得到净化的处理装置<sup>[6]</sup>。它是利用催化技术加速汽车废气中CO、HC和 $\text{NO}_x$ 的氧化还原反应,使大部分污染物转化为 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{N}_2$ ,起到净化汽车尾气、降低污染物排放的目的。利用该技术可使 $\text{NO}_x$ 降低90%以上。

## 三、结束语

天然气将成为车用发动机燃料发展的重要方向,天然气汽车发动机有效降低了 $\text{C}_x\text{H}_y$ 和CO的排放,但其 $\text{NO}_x$ 的排放量依然较高,必须进一步深入研究各种天然气汽车发动机低 $\text{NO}_x$ 燃烧与排放技术,抑制 $\text{NO}_x$ 的产生与排放,才能满足日益严格的汽车尾气排放法规要求。

### 参 考 文 献

- [1] KATO TAKESHI, et al. Development of CNG fueled engine with lean burn for small size commercial van [J]. JSAE Review 2001, 22(3):365-368.
- [2] ASLAM M U, et al. An experimental investigation of CNG as an alternative fuel for a retrofitted gasoline vehicle [J]. Fuel, 2006, 86(5-6):717-724.
- [3] 邵邛南. 发展天然气为汽车燃料的环保和经济前景 [J]. 甘肃科技, 2005(7):18-19.
- [4] 张成毅, 李帆, 荣庆兴. 天然气燃烧的低 $\text{NO}_x$ 排放研究现状和趋势 [J]. 上海煤气, 2005(4):31-34.
- [5] 张道文. 天然气汽车技术改进 [J]. 天然气工业, 2006, 26(2):123-125.
- [6] 张力, 闫云飞, 冉景煜, 等. 天然气汽车三效催化器流场均匀性数值模拟及催化剂优化 [J]. 化工学报, 2005(9):1679-1684.

(修改回稿日期 2007-04-06 编辑 赵 勤)