

# 摘要

汽油机稀薄燃烧技术能够有效的降低发动机燃油消耗率和减少有害气体排放,是当今发动机技术发展的主要趋势之一,但是传统三效催化剂在发动机稀燃富氧条件下,降低 $\text{NO}_x$ 排放作用有限,如何降低稀燃汽油机 $\text{NO}_x$ 排放成为了限制稀燃技术实际应用的主要问题。

本文运用配有废气再循环的可变进气系统并结合节气门开度和喷油模态调整,对CA3GA2发动机进行稀燃改制,实现稀燃极限空燃比达到22。研究吸附还原催化剂降低 $\text{NO}_x$ 排放特性,并研究EGR系统与吸附还原催化剂耦合技术对稀燃汽油机 $\text{NO}_x$ 排放的影响。

实验研究结果表明:附还原催化剂能够有效的降低稀燃汽油机 $\text{NO}_x$ 排放,在本实验所设中小负荷工况点下,催化剂对 $\text{NO}_x$ 转化效率达85%以上,甚至在某些工况点达到94%。发动机还原过程中,浓燃空燃比降低(即混合气变浓),吸附还原催化剂对 $\text{NO}_x$ 转化效率越高, $\text{NO}_x$ 排放量越低,但是燃油经济性降低。发动机负荷变化对催化剂吸附能力影响较为明显,随着负荷上升,转化效率呈下降趋势。发动机浓稀燃持续时间比例变化以及浓稀燃切换频率变化对 $\text{NO}_x$ 排放影响也较为明显,当浓稀燃持续时间比例上升时, $\text{NO}_x$ 转化效率降低。当浓稀燃切换频率增加时,燃油消耗率略有提升。但是催化剂对 $\text{NO}_x$ 转化效率得到提高,而发动机 $\text{NO}_x$ 排放量也随之下降。

EGR与吸附还原催化剂相耦合能够有效的降低 $\text{NO}_x$ 排放,但是EGR率过高,会使得催化剂转化效率降低;适当的EGR率与催化剂耦合能够降低燃油消耗率,EGR率过高则会使燃油经济性变差。

**关键词:** 稀燃 汽油机 吸附还原催化剂 EGR  $\text{NO}_x$ 排放

# ABSTRACT

The lean burn gasoline technology can reduce the harmful emissions and improve fuel economy, which has been one of the trends for advanced internal combustion engine technology. However, under the lean burn condition, the conventional Three-way Catalyst's ability of reducing NO<sub>x</sub> emission was limited because of excess oxygen in the exhaust. Thus, to reduce the NO<sub>x</sub> emission became a challenging problem for lean burn engine.

This paper retrofitted a conventional gasoline engine (CA3GA2) through adding variable intake system with Exhaust Gas Recirculation (EGR). By changing the throttle opening and fuel injection system, the retrofitted engine could operate with a limited air/fuel ration 22. Characteristic of Lean NO<sub>x</sub> Trap (LNT) technology was also investigated. After that, the NO<sub>x</sub> reduction efficiency was researched with coupled EGR and LNT.

The experimental result showed that LNT could reduce NO<sub>x</sub> emission from lean burn gasoline engine effectively. Specifically, the NO<sub>x</sub> conversion efficiency of LNT could reach more than 85% under low and moderate load and the highest NO<sub>x</sub> conversion was as high as 94%. When the LNT operated at the desorption stage, the air/fuel mixture was rich and the fuel consumption was high. The load transition had an important effect on the adsorption ability of LNT. The NO<sub>x</sub> conversion dropped as the engine worked under high load condition. The duration ratio of rich-lean burn and the frequency of transition between rich-lean burn had a significant impact on NO<sub>x</sub> emission. When the ratio of lean and rich duration increased, the NO<sub>x</sub> conversion dropped. When the frequency of transition between rich and lean increased, the fuel economy was deteriorated and the NO<sub>x</sub> conversion efficiency increased.

Coupled EGR and LNT could reduce NO<sub>x</sub> emission effectively. However, if EGR rate was too high, the NO<sub>x</sub> conversion of LNT decreased. Proper EGR rate and LNT could reduce the fuel consumption, but too high EGR rate will deteriorate fuel economy.

**KEY WORDS:** Lean burn, Gasoline engine, LNT, EGR , NOx reduction

## 第一章 绪论

### 1.1 引言

内燃机自诞生以来,经过 100 多年的变革、完善与发展,逐渐成为目前热效率最高的热力发动机,其消耗世界 46%的石油资源,发出功率占据世界上所有动力装置的 90%<sup>[1-2]</sup>,对人类社会的发展,尤其是工业、农业、交通运输和国防建设等领域的发展带来了难以估量的影响。在可以预见的未来,内燃机仍然会成为车辆等运载工具的主要动力源。

但是内燃机作为动力源在给人们带来舒适、便捷的同时,也为社会带来了一系列不可回避的问题。随着目前汽车的保有量急剧增加,内燃机燃料消耗、尾气排放所带来的能源环保问题越来越受到社会重视。内燃机的进一步的推广与应用也面临着相当严峻的挑战。

作为内燃机的主要燃料石油资源储备总量是有限的,并且在短期之内是不可再生,近年来国内外许多研究机构和专家学者对石油枯竭以及峰值的预测进行了研究探讨,指出世界石油资源预计到 2020 年达到峰值,随后进行下降,并预计 40 年后枯竭<sup>[3]</sup>。然而全球运输业预计到 2030 年对能源的需求增长会超过 80%,石油需求总量的大幅度增长与石油资源总量与产量下降产生了极大的矛盾。

另外内燃机排放的尾气是大气环境最主要的污染源之一,以本课题研究汽油机为例,汽油机排放的主要污染物包括 HC(碳氢化合物)、CO(一氧化碳)和 NO<sub>x</sub>(氮氧化物)。氮氧化物的传播距离很远,可以在较大范围内引起多种环境和健康问题。氮氧化物与空气中的水分和其他物质反应生成酸,形成酸雨、酸雾、酸雪或干的酸性颗粒物,腐蚀汽车、建筑物和历史文物等。酸雨还会使河流、湖泊酸化,不适宜鱼类生存。氮氧化物与空气中的水分、氨以及其他化合物反应,生成含硝酸的细微颗粒物,影响呼吸和呼吸系统,损害肺组织。这些细微颗粒物可以进入肺脏深部,引或者恶化肺气肿和支气管炎等呼吸系统疾病,起还可以使心脏病患者病情加重。在天气炎热和阳光充足的条件下,氮氧化物与挥发性有机物发生反应,在近地面形成臭氧(光化学烟雾)。臭氧刺激眼睛,吸入浓度极低的臭氧就会引起急性呼吸系统疾病、加重哮喘病、引起肺组织发炎、损害人体免疫系统,使人易于患呼吸系统疾病,包括支气管炎和肺炎。硝酸盐微粒和二氧化氮可以阻碍光线的传播,降低市区的能见度,影响城市景观并严重影响交通安全。

发动机尾气中含有一氧化碳，一氧化碳和人体红血球中的血红蛋白有很强的亲合力，它的亲合力比氧强几十倍，亲合后生成碳氧血红蛋白（COHb），从而削弱血液向各组织输送氧的功能，造成感觉、反应、理解、记忆力等机能障碍，重者危害血液循环系统，导致生命危险。

上述以汽油机有害气体排放物对气候变化、人体健康以及交通安全的危害为例，可以看出汽油机尾气排放是大气环境主要污染源之一，人类社会要实现可持续发展，必须要重视环保问题，严格控制发动机有害气体排放。

面对这两大挑战，世界各国先后制定了燃油消耗法规和排放法规<sup>[4]</sup>，以实现能源的充分高效利用和对环境的有效保护。欧洲于2000年开始实施欧III排放法规标准，2005年开始采用欧IV标准<sup>[5]</sup>。日本各汽车公司甚至在进行实现机动车零排放(ZEV)的研究<sup>[6]</sup>。表1-1为欧洲轻型商务车(1305kg-1760kg)排放标准，由该表中可以看出，排放法规要求日趋严格，这也使内燃机各大制造厂商和研究工作人员把内燃机发展的重心更多的转移到节能和减排方面上。

表1-1 欧洲轻型商务车(1305kg-1760kg)排放标准, g/km

Tier	Date	CO	THC	NMHC	NO <sub>x</sub>	HC+NO <sub>x</sub>	PM	P
Diesel								
Euro 1	October 1994	5.17	-	-	-	1.4	0.19	-
Euro 2	January 1998	1.25	-	-	-	1.0	0.12	-
Euro 3	January 2001	0.80	-	-	0.65	0.72	0.07	-
Euro 4	January 2006	0.63	-	-	0.33	0.39	0.04	-
Euro 5	September 2010	0.630	-	-	0.235	0.295	0.005	-
Euro 6 (future)	September 2015	0.630	-	-	0.105	0.195	0.005	-
Petrol (Gasoline)								
Euro 1	October 1994	5.17	-	-	-	1.4	-	-
Euro 2	January 1998	4.0	-	-	-	0.6	-	-
Euro 3	January 2001	4.17	0.25	-	0.18	-	-	-
Euro 4	January 2006	1.81	0.13	-	0.10	-	-	-
Euro 5	September 2010	1.810	0.130	0.090	0.075	-	0.005	-
Euro 6 (future)	September 2015	1.810	0.130	0.090	0.075	-	0.005*	-
*Applies only to vehicles with direct injection engines								

表1-2 我国轻型汽车标准与欧洲标准的实施日期比较

标准	中国实施年份	欧洲实施年份	相差时间(年)
国 I 前 (欧0)	1990	1973	17
国 I (欧 I)	2000	1992	8
国 II (欧 II)	2004	1996	8
国 III (欧 III)	2007	2000	7
国 IV	2010	2005	5

与发达国家相比,我国机动车排放污染控制工作起步比较晚,汽车以及内燃机行业发展水平较为落后。我国的排放法规基本参照欧洲标准制订。并且排放标准的执行方面也比欧洲落后的多,如表 1-2 所示,我国在 2004 年才开始实行欧 II 标准,而随着城市机动车保有量的迅速增加,车用发动机所造成的大气污染日益严重,对于发动机进行技术改进,控制其有害气体排放量,尽快实现有关排放标准的要求,已经成为我国汽车发动机行业发展的非常迫切的任务。

## 1.2 汽油机稀薄燃烧技术

为迎合日趋严格的排放法规以及燃油消耗法规,解决能源日益紧张、降低发动机尾气排放对环境的污染,相关研究人员采取了许多有效的措施,这其中汽油机的稀薄燃烧技术就是改进发动机经济型有效地重要的技术手段。

稀薄燃烧技术是指发动机在燃烧过程中,实际混合气空燃比大于理论空燃比(14.7)<sup>[7]</sup>。这样可以使燃料在发动机内进行充分的燃烧,最大限度的降低了有害物质的产生,具有提高发动机燃油经济性以及污染物排放低的特点<sup>[8-10]</sup>。

实现稀燃的措施包括组织一定的气流运动、采用电控燃油喷射、高能点火系统、采用紧凑燃烧室等。但在发动机燃烧室等结构固定以后,则不能再作改动,此时则需借助于气流运动的组织来实现稀薄燃烧。根据形成混合气的不同性质,汽油机的稀薄燃烧可分为均质稀混合气燃烧和分层稀混合气燃烧。根据燃油喷射方式的不同,包括进气道燃油喷射稀燃汽油机和缸内直喷稀燃汽油机。根据着火机理的不同,又包括火花点火稀燃汽油机和均质压燃汽油机。

### 1.2.1 稀薄燃烧的发展状况

早在上世纪七十年代,克莱斯勒公司和本田公司首次尝试将稀薄燃烧技术应用用于汽油机,当时的稀薄燃烧空燃比达到了 20,相对于理论空燃比(14.7),有

着很大的突破，也实现了燃油经济性的突破。随后日产和福特公司于1980年左右分别推出了NAPS-Z(Nissan Anti-Pollution System)和PROCO(Programmed Combustion Process)发动机，这两款发动机均采用了EGR技术以降低 $\text{NO}_x$ 排放。

但是由于传统的三效催化器并不能有效的转化 $\text{NO}_x$ 排放，随着90年代美国超低排放法规的颁布，稀燃发动机并不能满足相应排放法规，各大发动机制造厂商均放弃了稀燃汽油机研发。直到克莱斯勒公司提高点火能量，将稀燃极限扩大至30，使得稀燃汽油机的效率与柴油机相近，汽油机稀燃技术又一次受到各大制造厂商和研究人员的重视。随后日本三菱公司和德国大众公司又相继推出了自己的稀薄燃烧技术，即三菱GDI技术和大众FSI技术。

### 1.2.2 汽油机稀燃技术的主要实现形式

汽油机稀燃技术发展的30余年历程里，经历了诞生、被舍弃、再度受到重视的过程。直到现在汽油机稀燃技术的实现形式主要包括气道喷射(PFI)稀薄燃烧、缸内直喷(GDI)稀薄燃烧等。

#### 1. 气道喷射(PFI)稀薄燃烧

汽油机气道喷射稀薄燃烧是目前多气门稀燃汽油机的主流。稀燃汽油机空燃比较大，为保证能够可靠点火，点燃时稀燃汽油机在点火瞬间火花塞附近必须形成易于点燃的空燃比较低(12.0-13.5)的混合气，这就要求混合气在气缸内非均质分布，实现混合气分层，而混合气分层主要依靠气流运动结合实时喷油实现。汽油机进气道喷射稀燃系统根据气流在气缸内的运动形式有可以分为涡流分层以及滚流分层两种。

##### 1) 涡流分层燃烧系统

涡流分层燃烧一般是通过对进气系统的合理布置，使缸内产生强烈的、轴线与气缸中心线大体一致的涡流运动。在进气冲程初期，随活塞向下运动，缸内形成比较强的涡流，通过控制喷油时刻使喷油器在进气后期喷油，使得燃油大部保持在气缸上部，强涡流气道维持混合器分层的作用，这样在火花塞周围形成较浓的混合气。采用涡流分层可有有效的增大稀燃极限，产生涡流的方法主要包括采用螺旋进气道、辅助气道、导气板等等。

在涡流分层方面，最具代表性的稀燃系统主要包括丰田汽车公司开发的进气道喷射第三代稀燃系统<sup>[11]</sup>、本田公司的VTEC-E系统<sup>[12]</sup>，如图1-1所示，以及马自达公司的稀燃系统<sup>[13]</sup>。

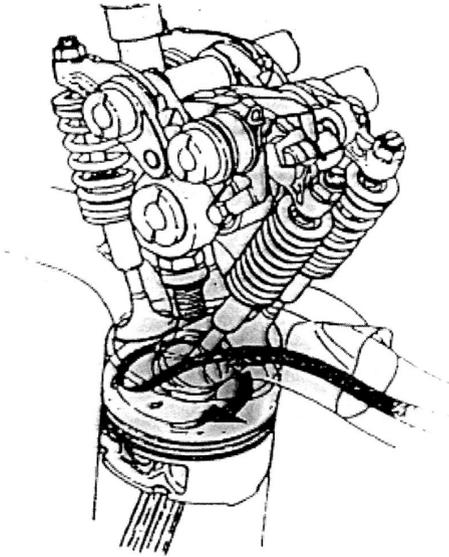


图 1-1 本田公司的 VTEC-E 系统

## 2) 滚流分层燃烧系统

空气经由进气道进入气缸后产生轴线与汽缸中心线垂直的旋转空气运动，即滚流。滚流生命周期短，在接近上止点时，气流由于气缸尺寸限制而破碎，转化为多个小尺度的涡流，将进气流动的动能转化为湍动能，更加有利于混合气稀薄燃烧，提高发动机性能。

滚流分层最早是由三菱公司在台三气门发动机实现的，即 MVV (Mitsubishi Vertical Vortex) 系统。其思想是燃油仅从一侧进气道喷入气缸，另一侧只进空气。缸内气体运动轴线方向上速度分量很小，故使得燃油在缸内分层，实现稀薄燃烧。后来三菱公司在 MVV 系统方面取得了重要的进展，开发一种四气门火花塞中心布置式系统，采用三层桶装分层，如图 1-2 所示。这种改进使得燃烧系统可以应用在更大冲程的发动机上，将稀薄燃烧范围拓宽到更高的转速区域。

## 2 缸内直喷 (GDI) 稀薄燃烧系统

进气道喷射汽油机在不采用助燃的方法组织燃烧时，空燃比很难超过 27，但是缸内直喷稀薄燃烧系统能够很容易超过这个界限，采用分层燃烧时空燃比可以达到 40 以上的超稀薄燃烧<sup>[14]</sup>，泵气损失小。由于混合气绝热指数增加、传热损失小，可以进一步提高热效率，降低 NO<sub>x</sub> 排放。此外，相较于进气道喷射稀薄燃烧系统，缸内直喷系统还具有抗爆性好以及动态响应快等特点。

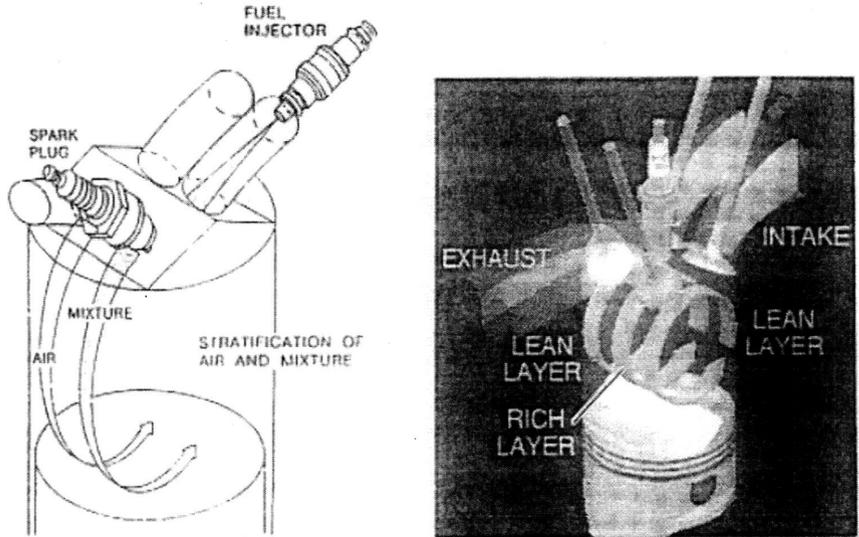


图 1-2 三菱进气道燃油喷射稀燃技术 MVV 气门滚流分层<sup>[16]</sup>

缸内直喷技术最早是由德国在 20 世纪 30 年代开发的,受到当时发动机的技术水平的限制,当时开发的缸内直喷发动机的系能以及排放水平并不是很理想,没有得到实际的应用。直到 20 世纪 90 年代,随着制造精度高、性能优良的发动机零部件的应用以及精度高、响应快的电控系统的开发,使得缸内直喷汽油的研发有了长足的进步和快速的发展。

三菱推出的 GDI 系统式缸内直喷系统的典型代表<sup>[15]</sup>,如图 1-3 所示,该燃烧系统主要包括了垂直的直进气道,使得进气是在缸内产生与传统进气道滚流方向相反的滚流运动,即逆滚流;紧凑的球面活塞腔体,能够保持充量分层,使得在燃油喷射和蒸发过程中形成均匀混合气;低压电磁涡流燃油喷射器,能够实现燃油喷射雾化、渗透以及扩散。

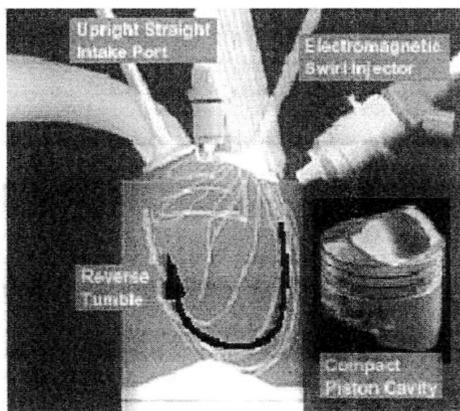


图 1-3 三菱 GDI 系统

### 1.2.3 稀薄燃烧的优点

与当量空燃比（14.7）燃烧系统相比，稀薄燃烧的优点主要体现在以下几个方面：

1. 燃烧热效率高，提高发动机经济性。发动机的热效率是随着空燃比的增加而增加的，并且在空燃比接近无限大的时候能够达到理论上的最大值。这是由于空燃比的增加使空气所占混合气的比重增大，工质的绝热指数逐渐接近于空气的绝热指数。同时由于稀薄燃烧的燃烧温度较低，火焰传播速度较慢，燃烧室的壁面传热损失得到降低，从而提高燃烧热效率。此外，稀薄燃烧能够采用较高的压缩比，稀薄燃烧时发动机一般不会受到高负荷爆震极限限制，压缩比的提高有效的提高了发动机热效率。
2. 稀薄燃烧能够降低排放污染物的绝对数量。稀薄燃烧时燃烧温度低， $\text{NO}_x$  排放总量减少，同时混合气中氧成分较高，有利于 HC 以及 CO 的氧化，降低 HC 和 CO 的排放。
3. 稀薄燃烧能够改善发动机部分负荷特性。稀薄燃烧发动机在功率改变时，能够采用质调节，而不是传统汽油机通过调节节气门开度的方法调整负荷，这样可以有效降低节流损失、泵吸损失、降低燃料的消耗量。

正是由于稀薄燃烧拥有上述优点，使得广大汽车制造厂商和研究人员高度重视稀薄燃烧技术，稀薄燃烧技术也逐渐成为了目前发动机发展的一种趋势。

### 1.2.4 稀薄燃烧存在的主要问题

稀薄燃烧存在着成本高的问题，并且伴随着排放法规的日趋严格，稀薄燃烧系统面临的最大问题就是  $\text{NO}_x$  排放问题。

1. 成本高。这是由于稀薄燃烧系统的结构较为复杂，对于燃油喷射系统的要求相当严格，使得喷油系统的结构也较为复杂，因此制造成本较高。
2.  $\text{NO}_x$  排放控制困难。在理论空燃比燃烧过程中，传统的三效催化剂能够将未燃碳氢与一氧化碳在催化剂的作用下作为还原剂，将尾气中的氮氧化物还原成无害的氮气，同时 HC 与 CO 则被氧化成水和二氧化碳。在理论空燃比周围的很小的工作窗口下，HC、CO 和  $\text{NO}_x$  的转化效率能够达到 90% 以上。但是在稀薄燃烧的状态下，随着尾气中富氧含量的增加，HC 和 CO 在排气高温下被多余的氧气所氧化，使得  $\text{NO}_x$  的还原剂减少，并且富氧条件下  $\text{NO}_x$  的还原反应速率降低， $\text{NO}_x$  并不能很好的得到还原，传统三效催化剂在稀薄燃烧的条件下对  $\text{NO}_x$  转化作用很小，面对日趋严格的排放法规，稀薄燃烧系统的应用受到了一定的限制。

稀薄燃烧所存在的上述问题，限制了其在发动机领域的广泛应用，也使得研究人员将更多的精力集中在上述问题的解决上。

### 1.3 汽油机稀薄燃烧排放控制概述

汽油机稀薄燃烧排放的主要污染物包括 HC、CO、 $\text{NO}_x$ ，目前比较主流的控制方式主要是通过改善发动机燃烧过程以及采用稀燃催化剂两个途径。其中改善稀薄燃烧过程主要是通过 EGR 手段，降低缸内燃烧温度和燃烧压力来减少  $\text{NO}_x$  的生成。稀燃催化剂降低  $\text{NO}_x$  排放主要是通过以下途径，一是在发动机稀薄燃烧产生富氧情况下，将  $\text{NO}_x$  储存于催化器中，然后利用发动机浓燃产生的还原性气体 HC、CO 将存储于催化器中的  $\text{NO}_x$  进行还原，即吸附还原催化器。另一种方案是在稀燃条件下，利用某些催化剂的特殊作用，使得排气中的还原性气体选择性的与  $\text{NO}_x$  发生化学反应，产生无害的  $\text{N}_2$ ，即选择性还原催化剂。还有一种技术是利用催化剂直接将  $\text{NO}_x$  分解成无害的  $\text{N}_2$  和  $\text{O}_2$ ，即催化剂直接分解技术。

#### 1.3.1 EGR 降低稀燃发动机 $\text{NO}_x$ 排放技术

EGR（废气再循环）技术用于汽油机主要是为了降低  $\text{NO}_x$  排放，EGR 分为内部 EGR 和外部 EGR，外部 EGR 是指把排出的废气通过带控制阀的管路再引入到进气系统中。内部 EGR 则是通过增加重叠角来实现的，它要求一改进的凸轮轴来实现任意可变的气门正时，否则，就无法独立有效地控制 EGR 流量，这就大大地限制了内部 EGR 的应用。目前外部 EGR 的应用相对比较广泛。

NO<sub>x</sub>在发动机燃烧过程中高温富氧条件下易生成，EGR降低汽油机NO<sub>x</sub>排放是通过降低缸内燃烧温度以及最高燃烧压力来实现的。EGR降低缸内燃烧温度主要是通过以下途径来实现的：

1. 提高混合气的比热容，在混合气中，CO<sub>2</sub>的比热容是O<sub>2</sub>的1.5倍左右，而作为EGR引入气缸内的废气中主要包括水和二氧化碳，通过引入废气与新鲜充量混合，提高CO<sub>2</sub>在混合气中的比重，降低O<sub>2</sub>的比重，从而提高了混合气的比热容，降低了燃烧温度。
2. 降低燃烧速度，混合气中的O<sub>2</sub>浓度降低，从而导致了燃烧过程中燃烧速度的降低，提高了燃烧时的散热，从而降低了燃烧温度。但是，传统的均质EGR在增大EGR率上受到限制，这是因为随着EGR比率的增加，燃烧速率降低，增加燃烧持续期，影响燃烧的完善程度及其稳定性，从而使热效率下降，油耗上升，同时还会导致CO与HC浓度上升。早在上世纪70年代末期和80年代初期，Nissan汽车公司的研究者就通过数学模拟和实验研究确认，EGR所造成的循环变动是燃油经济性恶化的主要原因，同时EGR的稀释使燃烧速率降低也是一个原因。

采用分层EGR技术，即将EGR引入废气与混合气中可燃新鲜充量分层，利用废气热容量大的特点，降低缸内燃烧温度，同时减少缸内燃烧过程中的循环变动，提高分层EGR率，不仅可以进一步降低NO<sub>x</sub>排放，同时也可以减少部分负荷下的泵吸损失，提高燃油率，分层EGR技术是降低NO<sub>x</sub>排放的主要技术措施<sup>[17]</sup>。

### 1.3.2 吸附还原催化剂降低NO<sub>x</sub>排放

吸附还原催化转化器最早是由丰田公司于1994年在CARINA轿车中使用<sup>[18-19]</sup>，该催化器的存储材料由碱土金属（如Ba）氧化物构成，贵金属（如Pt）充当氧化还原反应中的催化剂，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>作为碱土金属和贵金属的载体。该形式催化器目前应用比较广泛。吸附还原催化器的工作过程分为两个周期性阶段，吸附阶段和还原阶段，当发动机处于稀燃工作状态下，尾气中的NO<sub>x</sub>在贵金属Pt的作用下，和碱土金属发生反应，生成硝酸盐存储于催化器中。当催化器中NO<sub>x</sub>存储量达到一定程度时，需要发动机进行浓燃，对催化器进行还原再生，将存储于硝酸盐中的NO<sub>x</sub>转化为无害N<sub>2</sub>。如此两个阶段周期性进行，对NO<sub>x</sub>转化效率能够达到90%以上。

2008年已有汽车生产厂家将LNT技术投入市场<sup>[20]</sup>。例如由奥迪、戴姆勒克莱斯勒、大众合作开发的车用Bleutec平台，LNT技术是Bleutec平台的一

部分,该平台致力于引领清洁柴油车辆的技术标准<sup>[21]</sup>,目前市场上在售的丰田 Avensis 和梅赛德斯 E-320 两款车都是基于 Bleutec 平台制造的。

吸附还原催化器存在的最主要问题是硫中毒问题<sup>[22]</sup>,当前吸附还原催化器对尾气中的硫含量要求在 50ppm 以下<sup>[23-25]</sup>,否则就会发生硫中毒,催化剂失活,这一要求也限制了吸附还原催化器的广泛应用。但是由于其在较宽范围内对 NO<sub>x</sub> 高达 90%转化效率<sup>[26-33]</sup>,而且随着国家油品发展,笔者认为吸附还原催化器是未来稀燃汽油机 NO<sub>x</sub> 后处理技术的主要发展趋势,所以本课题应用吸附还原催化器搭载稀燃汽油机,研究其对 NO<sub>x</sub> 排放影响。

### 1.3.3 选择性还原催化器降低 NO<sub>x</sub> 排放

选择性还原催化器降低 NO<sub>x</sub> 排放<sup>[34-44]</sup> 工作原理是将发动机尾气中注入 HC、尿素以及氨等还原剂,与富氧状态下 NO<sub>x</sub> 发生反应,生成无害的水和 N<sub>2</sub><sup>[45]</sup>。其中氨是目前选择性还原催化器应用比较普遍的还原剂。

选择性还原催化器面临的主要问题是 NH<sub>3</sub> 的储存和运输问题,并且因为需要向尾气中注入还原剂,所以需要额外的还原剂喷射系统。该催化剂的耐水性和稳定性较差,在实际的发动机排气条件下,催化剂易失活。因为上述原因,选择性还原催化器的应用受到一定限制,目前主要运用在大型车辆上。

### 1.3.4 NO<sub>x</sub> 直接催化分解技术

催化分解法<sup>[46-48]</sup>是利用催化剂直接将 NO<sub>x</sub> 分解成无害的 N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub>,该方法不具有二次污染,不消耗还原剂,经济性好,工艺性简单,上述优点使得催化分解技术受到人们广泛关注。

最早用于对 NO<sub>x</sub> 进行催化分解的是贵金属催化剂,一般来说贵金属以 Pt 和 Pd 为佳,载体以三氧化二铝性能最好。但是对 NO<sub>x</sub> 进行直接分解的催化剂还包括金属氧化物、钙钛矿及类钙钛矿型复合氧化物、离子交换的 ZSM-5 型分子筛、杂多化合物和水化石类材料等几类催化剂,马涛等<sup>[49]</sup>对上述几类催化剂的 NO<sub>x</sub> 分解机理、反应动力学及催化性能等及国内外研究进展方面进行了详细介绍并指出离子交换的 ZSM-5 型分子筛催化剂是近年来最活跃的研究对象,特别是 Cu 离子交换的 ZSM-5 型分子筛是迄今为止发现的 NO 低温分解活性最好的催化剂。

此外,在对 NO<sub>x</sub> 分解催化剂进行的过程中人们发现催化剂表面易吸附氧而失去活性,即“氧阻抑(oxygen inhibition)”现象。Amirnazmi 等人<sup>[50]</sup>在 1973 年研究了金属氧化物和 Pt 催化分解 NO 的氧阻抑现象,并得到了 NO 分解的反应动力学方程,在 1975 年 Amirnazmi<sup>[51]</sup>等人对 NO 在 Pt 表面催化分解的研究

也表明了氧的阻抑性，在反应器的进料中加入氧气后导致分解速率的缓慢下降，使催化剂产生了非活性的氧化表面。Pt 低活性的氧化表面分子包括两个 O 原子和一个 Pt 原子，该氧化表面是在高温且氧气充足的条件下，由非氧化表面的缓慢重组形成的。然而，铜离子交换型沸石分子筛 Cu-ZSM-5, Cu-Y, Cu-M 对 NO 的分解具有良好的活性，尤其是 Cu-ZSM-5 催化剂在反应中表现有较强的抗氧阻抑性。离子交换型沸石分子筛及钙钛矿型金属氧化物在 NO 催化分解反应中是最具研究价值的催化剂。

### 1.4 课题研究背景及意义

汽油机稀薄燃烧技术能够有效的提高燃油利用率，降低排放物总量，是汽油机节能减排的重要技术手段和发展趋势。但是如何降低稀燃汽油机 NO<sub>x</sub> 排放问题制约了该技术实际应用的发展。

吸附还原催化剂能够有效的降低 NO<sub>x</sub> 排放，该技术在还原过程中要求稀燃发动机进行浓燃，不同的浓稀燃持续时间对 NO<sub>x</sub> 排放会有影响，本课题以降低稀燃汽油机 NO<sub>x</sub> 排放为出发点，在理解吸附还原催化剂工作原理的基础上，通过对发动机不同浓稀燃持续时间比例对 NO<sub>x</sub> 排放的影响进行实验研究，并结合外部 EGR 技术与吸附还原催化器相耦合，通过实验研究两种技术对发动机 NO<sub>x</sub> 排放的影响，为汽油机稀薄燃烧技术进一步实用化提供理论依据和技术支撑，以达到节能减排作用。

本课题的研究内容是国家 863 探索类课题“EGR 与催化耦合技术降低稀燃汽油机 NO<sub>x</sub> 排放研究”（项目编号：2008AA06Z322）的一部分，具体研究内容如下：

1. 实现发动机稀薄燃烧
2. 吸附还原催化剂工作机理研究
3. 吸附还原催化剂降低 NO<sub>x</sub> 特性和稀燃汽油机优化匹配技术实验研究。
4. 外部 EGR 技术与吸附还原催化器耦合降低汽油机 NO<sub>x</sub> 排放实验研究。

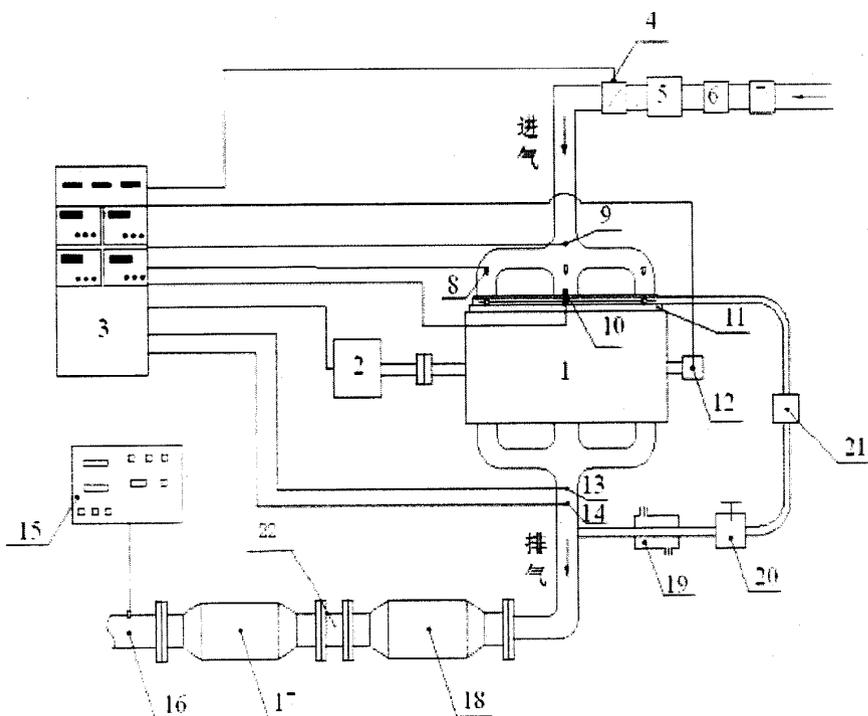
## 第二章 试验装置与研究方法

本章主要介绍实验台架布置情况,包括实验所用天津一汽生产的 CA3GA2 三缸 12 气门汽油机,以及相关实验设备;介绍实验方案的确定以及实验工况点的选取。

## 2.1 实验装置

## 2.1.1 实验总体布置

为实现发动机稀薄燃烧,并且为后续研究吸附还原催化器和 EGR 对稀燃汽油机  $\text{NO}_x$  排放的影响,本课题组自主设计了可变进气系统、EGR 进气环路和进气方式控制系统、尾气后处理布置,冷却水路,以满足实验要求,其总体布局如图 2-1 所示。



1-发动机 2-测功机 3-稀燃控制系统 4-节气门位置传感器 5-稳压腔 6-涡街流量计 7-空气滤清器 8-喷油器 9-进气温度传感器 10-火花塞 11-配有废气再循环的可变涡流进气结构 12-

角标编码器 13-排气温度传感器 14-线性空燃比传感器 15-HORIBA 排放仪 16-LNT 后端温度传感器 17-吸附还原催化器 18-三效催化器 19-EGR 中冷器 20-EGR 阀 21-转子流量计  
22-LNT 前端温度传感器

图 2-1 实验总体布置

### 2.1.2 配有废气再循环的可变涡流进气系统

本课题组自主设计了配有废气再循环的可变进气涡流发生装置,且已申请专利(专利申请号 201110350121.5)。本发明的目的在于通过在进气歧管处安装导气板,减少进气流通面积,进而改变进气流动形式,增加进气涡流强度,实现发动机稀薄燃烧。该导气板可通过位置连续调整,连续改变进气流通面积,实现不同的进气涡流强度。

通过将 EGR 废气导管连接于发动机进气歧管一侧,如图 2-2 所示,实现新鲜混合充量与废气分层,含有废气的混合气经导气板增强涡流强度,提供一种配有废气再循环(EGR)的汽油机进气涡流发生装置,该装置能够实现废气进入汽缸时产生涡流,从而可以在传统 EGR 的基础上进一步改善稀燃汽油机的动力性、经济性和排放性,特别是控制 NO<sub>x</sub> 的排放,进而提高稀燃汽油机的稀燃极限值。

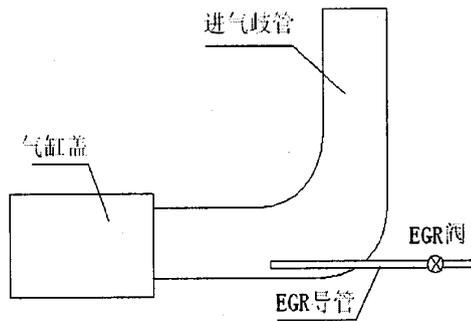


图 2-2 EGR 导管与进气歧管相对位置侧视图

配有废气再循环(EGR)的汽油机进气涡流发生装置包括气缸盖,进气门,位于气缸盖内的进气道,进气歧管以及于进气歧管与气缸盖之间设置挡板及滑动挡片,同时还包括与进气歧管相连通的 EGR 导管和 EGR 阀。

现以单缸发动机为例,介绍配有废气再循环的可变涡流进气系统的实现。EGR 阀门控制是否搭载废气再循环系统,当 EGR 阀门关闭时,进气歧管中只含有新鲜充量,通过可变涡流进气系统实现发动机稀薄燃烧。当 EGR 阀门开启时,

通过调整节气门开度以及 EGR 阀开度,使新鲜混合气与不同含量的 EGR 废气同时进入进气歧管,因为 EGR 导气管进入进气歧管较长且布置在进气歧管一侧,减少 EGR 废气与新鲜充量混合时间,实现废气与新鲜充量分层,进气歧管内的分层混合气流经进气歧管与汽缸盖之间的挡板,通过调整连续可调的滑动挡片位置,减少进气歧管流通截面面积,进气流通过截面大小与涡流强度成反比,当混合充量经过滑动挡板时,废气与新鲜充量混合气实现涡流,进入汽缸,如图 2-3 所示。

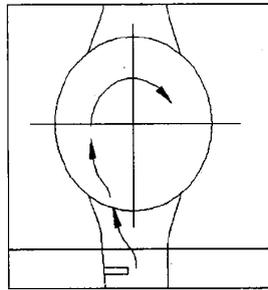


图 2-3 涡流形成示意图

挡板的具体结构方案:在汽缸盖与进气歧管之间安装挡板,挡板上开有与汽缸盖上通气孔截面相同的导气孔,且具有沿挡板方向(即 X 方向)的滑道或滑槽,如图 2-4 所示;在滑道或滑槽一侧开有一个侧孔,侧孔连通进气歧管。当滑动挡片运行到一侧时,就会产生涡流,而且涡流运动的强度与单边气道被遮住的面积成正比,遮住的面积越大进气涡流强度越大。在进气歧管内的遮挡面积大于或等于 0,且小于或等于该处进气歧管截面积的 1/2。

通过调整 EGR 阀门开度,可以实现 EGR 废气与新鲜充量中任何一种气体的进气比例为 0%-100%;在不使用 EGR 系统时,可将 EGR 阀门关闭,通过导板控制,使新鲜充量形成涡流,实现发动机稀燃。

对于多缸发动机来说,需要按照汽缸的数量并联 N 个配有废气再循环(EGR)的汽油机进气涡流发生装置,  $N \geq 2$  时,所述 N 个挡气板由一个沿 Z 方向延伸的顶板连接,实现同步控制。

传统的废气再循环技术(EGR)将废气引入进气总管中与新鲜空气均匀混合在一起以普通的混合流动方式送入汽缸,如果 EGR 混入的废气含量过多有及混合流动方式不当会造成火花塞附近废气含量过多,从而使火花塞附近燃气浓度降低进而降低燃气被点燃的可能性,即使燃气被点燃也会使火焰的传播速度降低从而使得汽油机的燃油经济性下降,功率下降,严重的影响了汽油机的经济性、动力性等方面的性能,这些都在一定程度上限制了稀燃汽油机的稀燃极限。而本发

明相对于传统的废气再循环技术，可以通过实现废气与新鲜充量分层，在一定程度上降低稀燃汽油机的  $\text{NO}_x$  排放，而且可以在增大 EGR 率的同时能对汽油机的经济性、动力性起到一定的改善作用，从而提高稀燃汽油机稀燃的极限值。

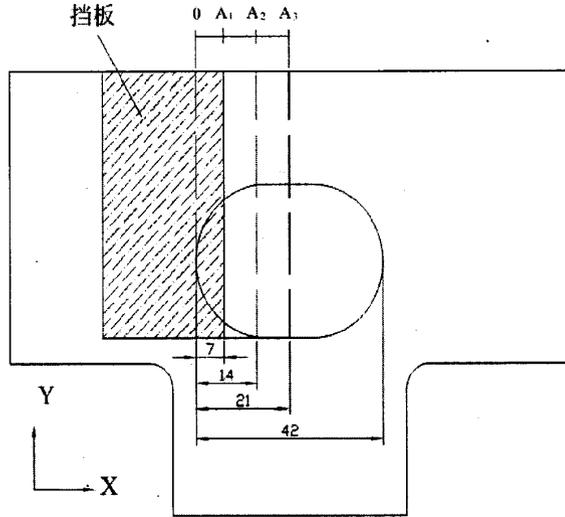


图 2-4 单缸发动机挡板示意图

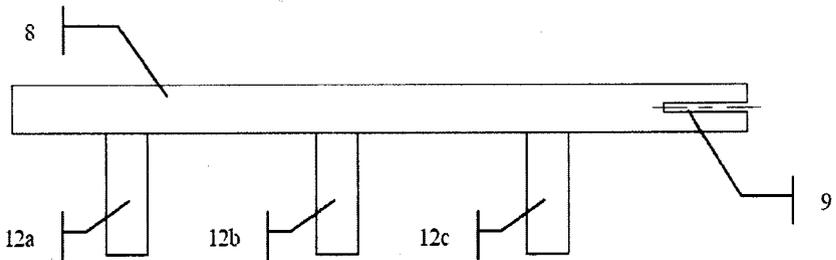


图 2-5 挡气板和顶板连接示意图

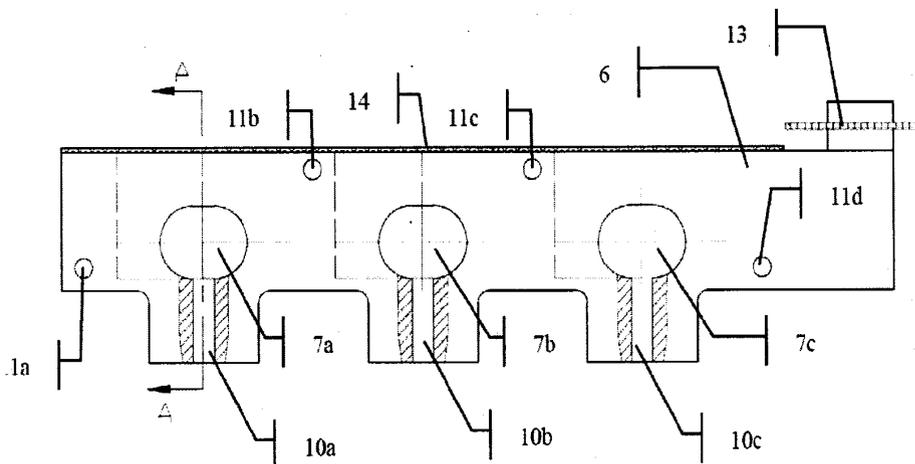


图 2-6 挡气板局部剖示意图

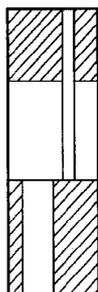


图 2-7 A-A 方向剖视图

图 2-5 至图 2-7 为本实验该配有废气再循环的可变进气涡流发生装置, 图中各数字代表如下:

6-挡板, 7a、7b、7c-与进气歧管相匹配导气孔, 8-顶板, 9-滑道, 10a、10b、10c-侧孔, 11a、11b、11c、11d-固定螺孔, 12a、12b、12c-第一挡气板, 13-丝杠螺纹孔, 14-密封垫。

本实验主要运用该系统进行发动机稀燃改制, 并为后续 EGR 系统的添加做出准备。

### 2.1.3 EGR 冷却环路的设计

本实验在EGR循环环路上设计了冷却系统, 用换热器来实现EGR管路里废气和冷却水套的热交换, 可以实现EGR的最佳换热。EGR冷却水路的原理见图2-8所示。通过调节冷却的循环水量来控制冷却水的温度, 保证EGR废气温度不会过高。

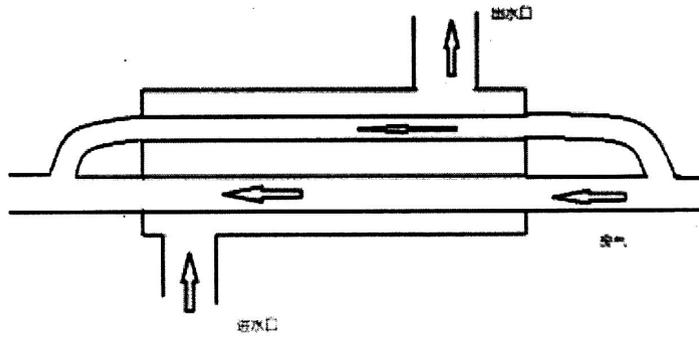


图 2-8 冷却水路示意图

## 2.2 实验用发动机及主要仪器设备

### 2.2.1 实验用发动机

本实验采用一台有天津一汽生产的 CA3GA2 汽油发动机,如图 2-9 所示,该发动机双顶置凸轮轴、十二气门,具有电控燃油喷射系统,采用顶棚型燃烧室,火花塞布置于燃烧室中央,其主要参数如表 2-1 所示。

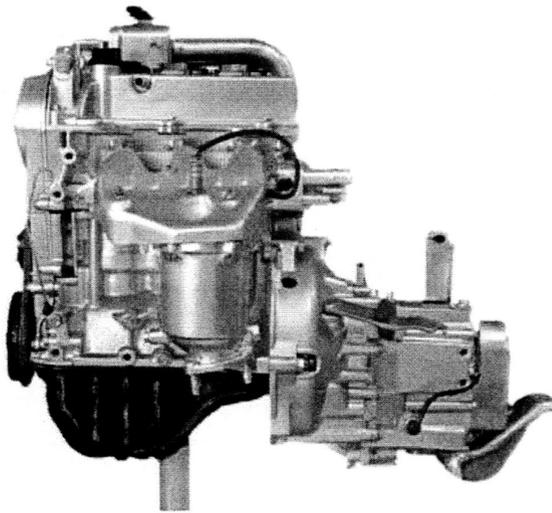


图 2-9 CA3GA2 发动机<sup>[52]</sup>

表2-1 发动机的主要参数

名称	CA3GA2汽油机
排量 (L)	0.993
型式	3缸直列、水冷、四冲程
缸径 (mm) × 冲程 (mm)	76×73
最大扭矩 (Nm / rpm)	90 / (3600~4400)
最大总功率 (Kw / rpm)	50 / 6000
比油耗 (g / Kw · h)	270
压缩比	10
燃烧室	棚顶
油气混合方式	外部混合
初定气道喉口直径 / mm	23.5 / 20

### 2.2.2 主要仪器和设备

本实验所采用的主要仪器及设备如表2-2所示。

表2-2 主要仪器和设备

FC3000发动机测控系统	湘仪动力测试仪器有限公司
CW100电涡流测功机	湘仪动力测试仪器有限公司
HORIBA废气分析仪	日本堀场HORIBA株式会社
发动机状态参数测量仪	北京昆仑海岸传感技术中心
FC2Z10Z智能油耗仪	湘仪动力测试仪器有限公司

## 2.3 实验方案及工况点选取

### 2.3.1 实验方案

本实验采用 CA3GA2 发动机，并配合已申请配有废气再循环的可变进气涡流发生装置，关闭 EGR 阀门，通过进气涡流实现发动机稀燃。并以此为原机模型，研究 LNT 对稀燃汽油机  $\text{NO}_x$  排放影响。LNT 工作要求发动机浓稀燃交替进行，在 LNT 吸附阶段，要求发动机进行稀薄燃烧，当吸附还原催化剂吸附到一定阶段，需要发动机进行短时间浓燃，将已吸附的  $\text{NO}_x$  进行还原，生成  $\text{N}_2$ ，使吸附还原催化剂进行还原再生。

本实验主要研究在利用吸附还原催化剂降低稀燃汽油机  $\text{NO}_x$  排放时，发动机转速、负荷、浓燃时空燃比大小、浓稀燃不同的持续时间，主要包括在一定浓稀燃时间比例下，浓稀燃切换频率以及不同浓稀燃持续时间比例条件下对 LNT

降低尾气中  $\text{NO}_x$  影响以及对发动机油耗影响。从而权衡油耗以及排放选取最佳的浓稀燃持续时间。

根据发动机实际工作情况以及空燃比控制系统,本实验中选取的稀浓燃持续时间分别为:定比例、变频率阶段稀浓燃持续时间比例为8,绝对值时间分别为56:7、72:9、88:11、104:13、120:5(时间单位:s);变比例持续时间比分别为8、10、12、14、16,具体持续时间比例为56:7、70:7、84:7、98:7、112:7(时间单位:s)。

在得到最佳浓稀燃持续时间基础上,增加EGR装置,EGR因能够通过降低发动机燃烧温度以及燃烧压力,从而降低  $\text{NO}_x$  排放。本实验通过运用LNT时最佳浓稀燃持续时间与不同EGR率相耦合,得到最佳LNT与EGR耦合结果,降低  $\text{NO}_x$  排放和燃油消耗率。

本实验中所采用的EGR率分别为8%、15%、24%。

### 2.3.2 工况点选取

稀薄燃烧主要运用在发动机中小负荷工况下,并且转速较低。而车辆常用工况也以低转速、中小负荷居多。改善中小负荷汽油机燃油经济性以及降低  $\text{NO}_x$  排放对提高车辆产品的市场竞争力、改善大气环境具有十分重要的意义。

根据CA3GA2发动机外特性曲线图,本着稀薄燃烧主要应用于中低转速以及中小负荷的原则,本实验具体工况点的选取如表2-3所示。

表 2-3 实验工况点

工况	转速 (r/min)	扭矩 (Nm)	平均有效压力 (MPa)
1	1800	15.8	0.2
2	1800	23.7	0.3
3	1800	31.6	0.4
4	2100	15.8	0.2
5	2100	23.7	0.3
6	2100	31.6	0.4
7	2400	15.8	0.2
8	2400	23.7	0.3
9	2400	31.6	0.4
10	2700	15.8	0.2
11	2700	23.7	0.3
12	2700	31.6	0.4

## 2.4 本章小结

本章主要为实验前期准备工作,以天津一汽生产的 CA3GA2 十二气门电控燃油喷射系统汽油机为基础,进行前期实验台架布置,实验方案的确定,并结合稀薄燃烧主要运用于发动机中小负荷和当前车辆行驶过程中的主要特点,选择了较为合理的实验工况点。

1. 实验台架搭建部分,运用自主设计的配有废气再循环的可变进气涡流发生装置,并辅以 EGR 系统布置,作为后续实验原机。并且配有废气再循环的可变进气涡流发生装置能够实现废气与新鲜充量分层,形成分层 EGR,并辅以本课题组自行设计的 EGR 冷却系统,为后续实验奠定基础。

2. 实验方案确定部分,根据 LNT 降低稀薄燃烧汽油机工作特点,确定研究对象为发动机转速、负荷、还原过程中浓燃空燃比大小、发动机不同浓稀燃持续时间比例,以及相同持续时间比例不同持续时间量对该催化剂降低  $\text{NO}_x$  和对发动机油耗影响,找到最佳的浓稀燃时间持续时间。并在此基础上增加 EGR 系统,研究 EGR 与 LNT 相耦合对  $\text{NO}_x$  排放以及油耗的影响。

3. 实验工况点确定部分,根据稀薄燃烧主要运用于发动机中小负荷以及当前车辆的主要行驶情况为中低转速的中小负荷情况,课题组确定了四个转速点,每个转速点上选取三个负荷点,共十二个实验工况点。

## 第三章 吸附还原催化剂降低 NO<sub>x</sub> 特性试验研究

本章主要运用第二章所介绍的配有废气再循环的可变涡流进气系统,对 CA3GA2 汽油机进行稀燃改制,并研究稀燃发动机在不同空燃比下 NO<sub>x</sub> 排放特性以及燃油消耗率变化情况。对吸附还原催化剂工作机理进行研究,并且改制后的稀燃发动机进行实验研究。本章主要包括发动机在中小负荷条件下,吸附还原催化剂与稀燃发动机结合,通过实验探讨发动机转速、负荷、还原过程中空燃比大小、不同浓稀燃时间比例以及相同浓稀燃时间比例、不同浓稀燃持续时间对吸附还原催化剂降低 NO<sub>x</sub> 以及发动机油耗的影响。找到吸附还原催化剂对该发动机比较适当的浓稀燃时间量。

### 3.1 稀燃改制

本课题组通过仿真实验计算(同组其他成员完成),发现发动机在组织进气时涡流比较小时,缸内的涡流运动较弱,不利于点火和火焰传播,燃烧速率缓慢;当涡流比过大时,由于压缩行程后期的挤流速度大幅度增高,造成点火时刻火花塞附近的气流运动过强,难以可靠点火。综合考虑经济性与排放性,CA3GA2 汽油机工作的最佳涡流比应在 0.8-1.2 之间。

运用本课题组自主设计的可变涡流进气系统,当挡片位置位于 A2 时(见图 2-4),能够达到涡流比为 0.8-1.2 之间,并通过调整节气门开度、点火提前角以及喷油脉宽,辅以二次喷油技术,实现原机稀燃改制。该发动机通过稀燃改制,能够达到空燃比为 22,并且能够通过调整节气门开度和喷油模态,实现在对外输出扭矩变化较小条件下,改制后的稀燃发动机进行精确的浓稀燃切换,符合吸附还原催化剂降低 NO<sub>x</sub> 实验要求。

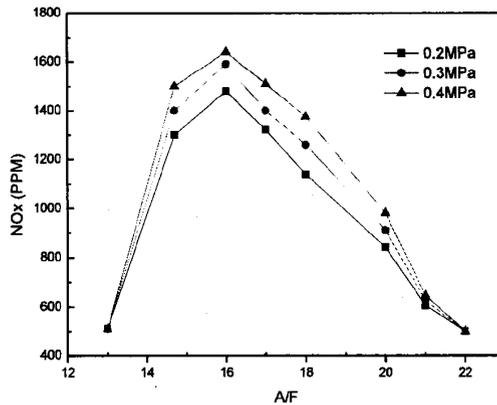


图 3-1 稀燃发动机不同负荷下 NO<sub>x</sub> 排放特性 (n=2100r/min)

如图 3-1 所示, 该图为改制后的稀燃发动机在转速为 2100r/min 时, 不同负荷下 NO<sub>x</sub> 的排放曲线。由图中可以看出, 当空燃比处于 16-18 之间时, 发动机的 NO<sub>x</sub> 排放达到最大值, 这主要是由于空燃比 16-18 时, 正处于较理论空燃比略稀阶段, 存在富氧的燃烧条件, 混合气燃烧最完全、燃烧温度最高、高温持续时间长。而高温富氧的环境有利于 NO<sub>x</sub> 的生成, 所以空燃比 16-18 阶段, NO<sub>x</sub> 排放值最大。从图中还可看出, 随着负荷的增大, 缸内燃烧温度随负荷的增大而升高, NO<sub>x</sub> 的排放也有所上升, 且当空燃比大于 18 后, 由于混合气处于较稀状态, 缸内燃烧温度下降的效果大于氧含量增大的效果, 导致 NO<sub>x</sub> 生成减小, 说明稀薄燃烧技术有助于 NO<sub>x</sub> 排放的降低。

图 3-2 所述为改制后的稀燃发动机在不同转速下, 空燃比对 NO<sub>x</sub> 排放影响, 从图中可以看出, 随着空燃比的增大, NO<sub>x</sub> 排放表现为先增大后减小的趋势, 且当空燃比处于 16-18 之间时, NO<sub>x</sub> 排放达到最高值。转速对 NO<sub>x</sub> 排放有一定的影响, 在整个空燃比范围内, 随着发动机转速的不断增加, NO<sub>x</sub> 排放有比较明显的增大, 这是因为发动机转速增大后, 发动机单位时间内工作的循环次数变多, 传热损失减小, 缸内的燃烧温度增高, 导致 NO<sub>x</sub> 排放上升。

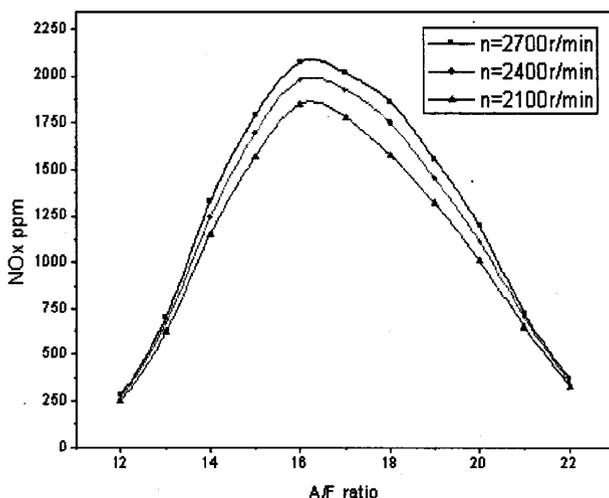


图 3-2 稀燃发动机不同转速下 NO<sub>x</sub> 排放特性 (P<sub>me</sub>=0.2MPa)

### 3.2 吸附还原催化器机理研究

应用吸附还原催化器降低 NO<sub>x</sub> 排放需要进行发动机浓稀燃周期性切换,其工作原理可以认为是:发动机处于稀燃工作状态下,排放出的 NO<sub>x</sub> 主要为 NO,吸附还原催化器运用贵金属催化剂使 NO 与氧气发生反应,生成 NO<sub>2</sub>,贵金属催化剂中含有碱土金属,碱土金属将 NO<sub>2</sub> 氧化成硝酸盐,并存储于催化器内,而排气中的 HC 以及 CO 则被氧化成水和二氧化碳排出;当催化器中硝酸盐存储到一定阶段后,需要将催化器进行还原再生,这就需要发动机进行一段时间的浓燃,在浓燃状态下,催化器中的硝酸盐不稳定,重新分解成 NO<sub>2</sub>,排气中比较多的还原剂如 H<sub>2</sub>、CO、HC 将 NO<sub>2</sub> 还原成无害 N<sub>2</sub>,而自身则被氧化成水和二氧化碳, N<sub>2</sub>、水以及二氧化碳均被排除催化器外。

其具体的反应机理如下:

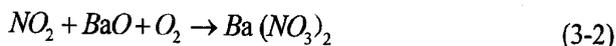
#### A. 吸附阶段 (Storage)

吸附阶段发动机处于稀混合气工作状态,尾气中的 NO<sub>x</sub> 绝大多数以 NO 的形式存在, NO<sub>x</sub> 的吸附分为两步进行:

首先 NO 在铂 (Pt) 的催化作用下与富氧条件下的氧气 O<sub>2</sub> 生成 NO<sub>2</sub>。



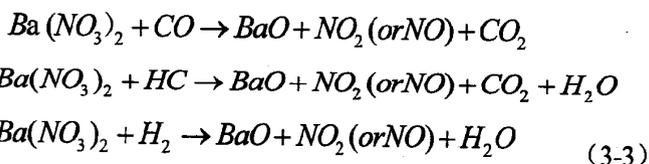
其次, NO<sub>2</sub>与贵金属Pt中加入的碱或碱土金属(主要是Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>和Ba<sup>+</sup>)氧化物作用生成硝酸盐,并以硝酸盐的形式吸附在碱土金属氧化物表面。以碱土金属氧化物BaO为例,在富氧条件下与BaO反应生成Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>反应如下:



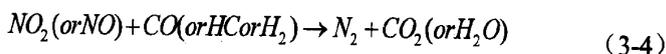
此过程被称为NO<sub>x</sub>的吸附阶段。

#### B 还原阶段 (Purge)

当LNT催化剂中吸附的NO<sub>2</sub>逐渐增多时,NO<sub>x</sub>的吸附效率就会下降,当NO<sub>x</sub>吸附到一定程度时就需要对LNT催化剂进行再生。此时需要加浓混合气,使尾气中出现较浓的未燃HC、CO,而Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>在还原剂较浓的尾气中由于其热力学特性变得不稳定会分解重新释放出NO<sub>2</sub>和NO,此时LNT的吸附空位得到恢复,相关的化学反应方程式为:



与三效催化转化器中的还原机理一样,氮氧化物NO<sub>2</sub>和NO在还原剂的作用下还原为无害的氮气N<sub>2</sub>,具体化学反应为:



稀燃发动机在采用吸附还原催化剂作为后处理技术时,需要进行浓稀燃切换。其中稀燃时间较长,即催化剂处于吸附状态。稀燃持续时间的长短一般取决于催化剂本身材料的吸附能力、催化剂容量以及稀燃发动机NO<sub>x</sub>排放量,吸附能力越大、催化剂容量越大、稀燃发动机本身NO<sub>x</sub>排放量越小,则稀燃持续时间越长,燃油经济性越好。相反如果发动机浓燃持续时间较长(即还原时间较长),则发动机燃油经济性越差。

发动机在进行浓稀燃切换时,要保证其输出扭矩和功率基本稳定,转速波动较小,本课题是通过调整节气门开度以及点火提前角来实现的。当发动机由稀薄燃烧转为浓燃时,需要减小节气门开度,并且推迟点火提前角,增加喷油脉宽,以实现发动机恒扭矩输出。

### 3.3 实验主要内容

本章运用上述经稀燃改制后的CA3GA2发动机作为原机,经第二章实验所述试验台架布置进行实验。主要研究稀燃发动机在中小负荷条件下,吸附还原催化剂对稀燃发动机NO<sub>x</sub>排放以及燃油经济性影响,其具体的实验工况点见本文第二章。

主要研究内容包括:

- 1) 稀燃发动机转速、负荷对发动机排放、吸附还原催化剂转化率以及燃油经济性的影响。
- 2) 不同浓燃条件下空燃比对稀燃发动机有害气体排放以及燃油经济性的影响。
- 3) 稀燃发动机浓稀燃持续时间比值对吸附还原催化剂转化率以及燃油经济性的影响。
- 4) 在相同稀燃发动机浓稀燃持续时间比值的条件下,不同浓稀燃持续时间绝对值对吸附还原催化剂转化稀燃发动机NO<sub>x</sub>的转化率影响,以及对发动机燃油经济性影响。
- 5) 不同EGR率与吸附还原催化剂相耦合,研究不同EGR率对发动机有害气体排放、燃油消耗率、催化剂转化效率影响。

$$\text{在此, NO}_x\text{转化率定义为: } C_{NO_x} = \frac{C_{NO_x, in} - C_{NO_x, out}}{C_{NO_x, in}} \times 100\% \quad (3-5)$$

其中 $C_{NO_x}$ 为吸附还原催化剂对NO<sub>x</sub>的转化效率;  $C_{NO_x, in}$ 为吸附还原催化剂前端入口处NO<sub>x</sub>浓度;  $C_{NO_x, out}$ 为吸附还原催化剂出口处NO<sub>x</sub>浓度。

### 3.4 吸附还原催化剂对稀燃发动机有害气体排放以及燃油经济性影响

#### 3.4.1 转速、负荷对稀燃发动机有害气体排放及燃油经济性影响

##### 1. 转速对稀燃发动机有害气体排放、燃油经济性影响

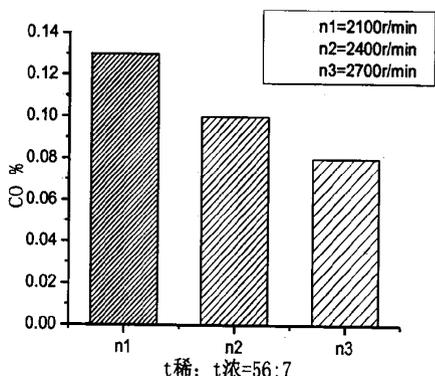


图 3-3 转速对 CO 排放影响

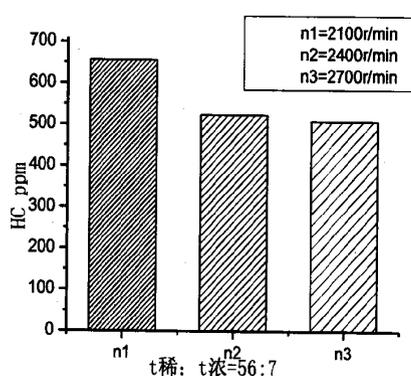


图 3-4 转速对 HC 排放影响

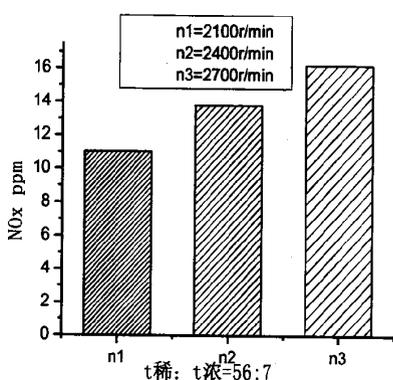


图 3-5 转速对 NO<sub>x</sub> 排放影响

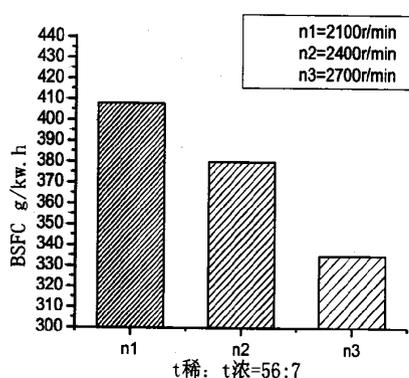


图 3-6 转速对油耗影响

图 3-3 至 3-6 分别表示了在规定时间内，发动机负荷为 0.2MPa，且稀燃发动机浓稀燃时间比值一定的情况下，发动机转速变化（2100r/min、2400r/min、2700r/min）对 CO、HC 和 NO<sub>x</sub> 三种有害气体排放的影响，以及在上述条件下，发动机转速对油耗的影响。其中 CO、HC、NO<sub>x</sub> 排放浓度单位分别是%、ppm、ppm，燃油消耗率单位为 g/kw.h。发动机浓燃时空燃比为 12，稀燃为 20，且按稀燃 56 秒，然后浓燃 7 秒进行循环工作。

由图 3-3 和 3-4 可以看出，在发动机工作时间一定，且浓稀燃持续时间比例一定，发动机负荷为 0.2MPa 时，CO 和 HC 随转速的升高（2100r/min、2400r/min、2700r/min）而降低。这是因为伴随着稀燃发动机转速的上升，发动机缸内氧化条件变好，未燃 HC 和 CO 进行充分氧化，使得 HC 以及 CO 排放数值下降。

由图 3-5 所示，在发动机工作时间一定，且浓稀燃持续时间比例一定，发动机负荷为 0.2MPa 时，NO<sub>x</sub> 随转速的升高（2100r/min、2400r/min、2700r/min）是略有上升的，这主要是由于在发动机工作时间一定，且浓稀燃持续比例时间一

定的条件下，并伴随着转速的上升，一定时间内稀燃发动机的工作循环数增加，使得缸内温度略有上升，优化了 NO<sub>x</sub> 生成条件，使得排放略有提高。

由图 3-6 所示，在发动机工作时间一定，且浓稀燃持续时间比例一定，发动机负荷为 0.2MPa 时，燃油消耗率随转速的升高(2100r/min、2400r/min、2700r/min)是呈下降趋势，这主要是由于伴随着发动机转速的提高，缸内紊流强度增大，提高了缸内燃烧状况，使得燃油消耗率降低。当然，如果发动机转速过高，缸内紊流强度过于强烈，会增大缸内工质的传热损失，使得燃油消耗率上升。由于本机是在中小负荷下进行实验，紊流强度增大对燃烧状况的提高作用要大于因转速增大而带来的工质传热损失，所以在本试验工况下，即发动机负荷为 0.2MPa，转速变化范围为 2100r/min-2700r/min，发动机燃油消耗率随着转速的增大而降低。

如图 3-7 所示，该图表示在发动机工作时间一定，且浓稀燃持续时间比例一定，发动机负荷为 0.2MPa 时，NO<sub>x</sub> 转化效率随转速的升高(2100r/min、2400r/min、2700r/min)变化趋势，从该图中可以看出，吸附还原催化剂对 NO<sub>x</sub> 转化效率能够达到 94%以上，但是随着转速的变化，其变化趋势不是特别明显，这主要是因为随着发动机转速提高，虽然发动机 NO<sub>x</sub> 排放会因温度增加而提高，但是因为排放尾气温度增高，使得吸附还原催化剂吸附能力增强，使得 NO<sub>x</sub> 经吸附还原催化剂后排放数量降低。

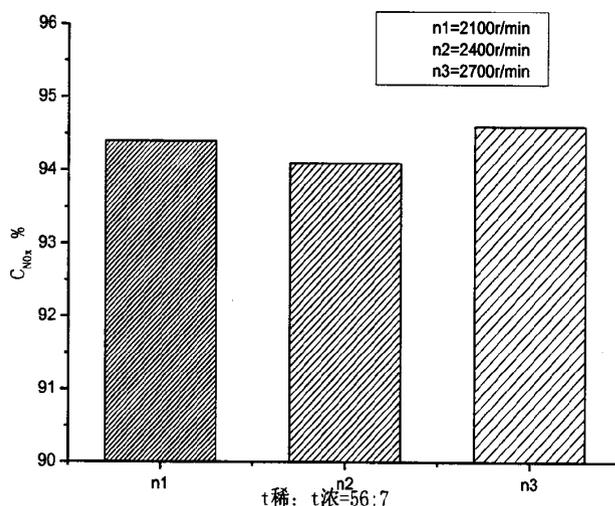


图 3-7 发动机转速对 NO<sub>x</sub> 转化效率影响

综上所述，在稀燃发动机处于中小负荷状态下，负荷一定，工作时间一定，且浓稀燃持续时间比例一定时，伴随着转速的提高，发动机有害排放物 CO、HC 呈下降趋势，而 NO<sub>x</sub> 是呈一定的上升趋势的，并且燃油消耗率伴随着转速的提高而降低。而吸附还原催化器对 NO<sub>x</sub> 转化效率随转速的提高变化不大。

### 2. 负荷对转速对稀燃发动机有害气体排放、燃油经济性影响

图 3-8 至 3-11 分别表示了相同时间内，发动机转速为 2100r/min，且稀燃发动机浓稀燃时间比值一定的情况下，发动机负荷变化(0.2MPa、0.3MPa、0.4MPa)对 CO、HC 和 NO<sub>x</sub> 三种有害气体排放的影响，以及在上述条件下，发动机转速对油耗的影响。其中 CO、HC、NO<sub>x</sub> 排放浓度单位分别是%、ppm、ppm，燃油消耗率单位为 g/kw.h。发动机浓燃时空燃比为 12，稀燃为 20，且按稀燃 56 秒，然后浓燃 7 秒进行循环工作。

由图 3-8、3-9 可以看出，在相同时间内，发动机转速为 2100r/min，且稀燃发动机浓稀燃时间比值一定的情况下，CO 和 HC 排放量随负荷提高(0.2MPa、0.3MPa、0.4MPa)而降低的，这主要是由于负荷的提高使得发动机缸内燃烧温度上升，有利于混合气燃料的完全氧化，同时减少了缸内混合气的失火现象。并且，由于燃烧温度升高，使得气缸内缸壁表面的附面层厚度降低，附面层内的 HC 减少，降低了 HC 的排放。因此，在转速和浓稀燃持续比例时间以及总工作时间一定的条件下，CO 和 HC 随发动机负荷的增大而减少。

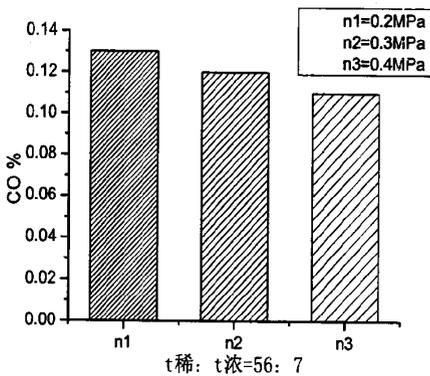


图 3-8 负荷对 CO 排放影响

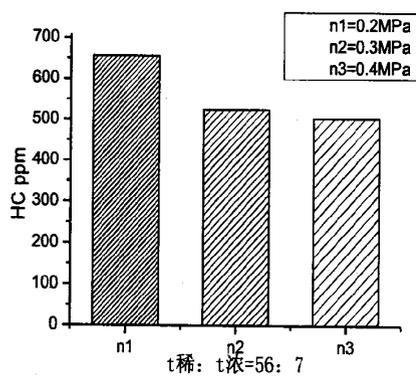


图 3-9 负荷变化对 HC 排放影响

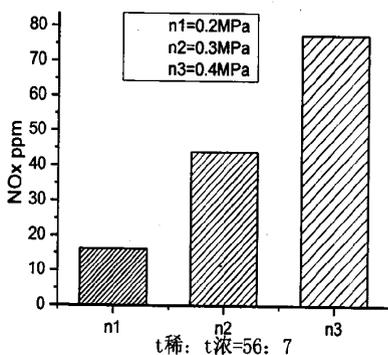


图 3-10 负荷对 NO<sub>x</sub> 排放影响

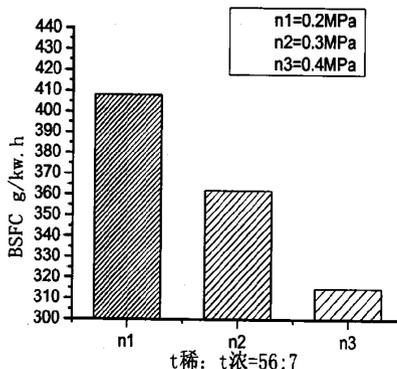


图 3-11 负荷对油耗影响

由图 3-10 可以看出，在相同时间内，发动机转速为 2100r/min，且稀燃发动机浓稀燃时间比值一定的情况下，伴随着发动机负荷的上升，NO<sub>x</sub> 排放量是上升的，这主要是由负荷上升引起发动机缸内燃烧温度的提高所致。

由图 3-11 所示，在相同时间内，发动机转速为 2100r/min，且稀燃发动机浓稀燃时间比值一定的情况下，稀燃发动机燃油消耗率随着负荷的增加而下降明显，发动机负荷对燃油消耗率的影响很大。发动机负荷增大，使得缸内温度增加，一方面会使燃油雾化程度变好，改善燃烧状况；另一方面，缸内整体温度的提高会使得发动机相对散热损失较小，提高发动机热效率，并且提高发动机机械效率。

由于以上两点原因，发动机负荷提高会改善燃烧状况，并且提高发动机热效率以及机械效率，所以负荷增大，发动机燃油消耗率下降。

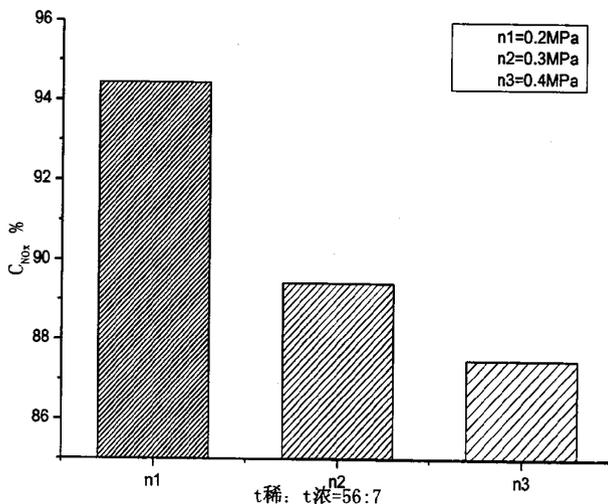


图 3-12 负荷对 NO<sub>x</sub> 转化效率影响

如图 3-12 所示, 在相同时间内, 发动机转速为 2100r/min, 且稀燃发动机浓稀燃时间比值一定的情况下, 吸附还原催化剂对 NO<sub>x</sub> 转化效率随负荷的变化而变化的趋势较为明显, 当发动机负荷处于 0.2MPa 时, 吸附还原催化剂对 NO<sub>x</sub> 的转化效率能够达到 94% 以上, 但是随着负荷的增加, 其转化效率下降较为明显, 到负荷为 0.4MPa 时, 转化效率下降到 87% 左右。随着负荷的增大, 缸内燃烧温度上升, 气缸内排放的 NO<sub>x</sub> 总量上升, 并且吸附还原催化剂的转化效率也呈下降趋势, 由此可以看出, 吸附还原催化剂催 NO<sub>x</sub> 转化除与发动机浓稀燃持续时间有关外, 与负荷还有很大关系, 负荷越大, 其吸附效率越低。由于稀薄燃烧只是工作于中小负荷点下, 该催化剂在中小负荷下转化效率仍然很高, 所以可应用于稀燃后处理中。

综上所述, 在稀燃发动机处于中小负荷状态下, 转速一定, 工作时间一定, 且浓稀燃持续时间比例一定时, 伴随着负荷的提高, CO 和 HC 逐渐减小, 而 NO<sub>x</sub> 则随之略有增高, 燃油消耗率随负荷的提高而降低较为明显。吸附还原催化剂对 NO<sub>x</sub> 的吸附能力随负荷的上升, 下降比较明显。

### 3.4.2 还原过程中空燃比大小对发动机排放及油耗影响

该实验设定稀燃发动机工作时, 空燃比为 20, 转速为 2100r/min, 负荷为 0.2MPa, 发动机工作时间一定, 且发动机浓稀燃持续时间比值一定, 设置变量为吸附还原催化剂在还原过程中空燃比分别为 A/F=11、A/F=12、A/F=13, 考虑该变量的对稀燃发动机有害气体 CO、HC、NO<sub>x</sub> 排放的影响, 以及对燃油消耗率和 NO<sub>x</sub> 转化率的影响。

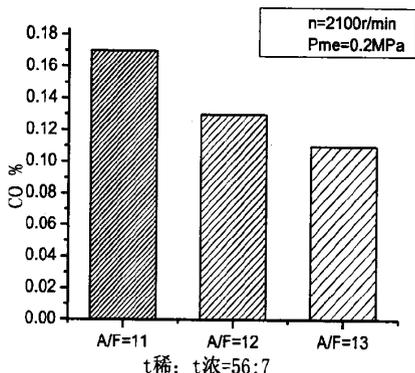


图 3-13 还原空燃比对 CO 影响

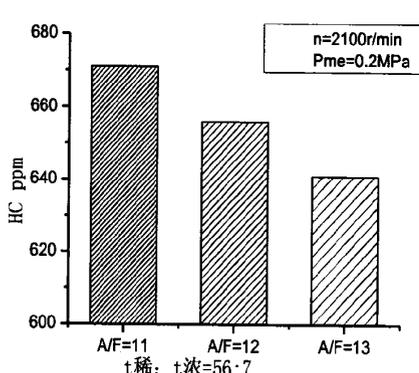


图 3-14 还原空燃比对 HC 影响

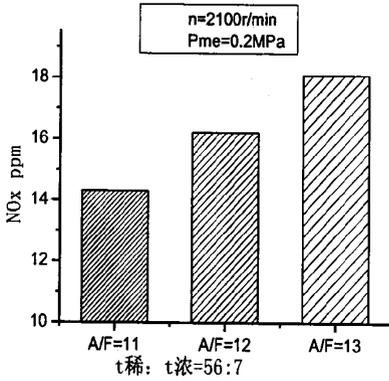


图 3-15 还原空燃比对  $\text{NO}_x$  影响

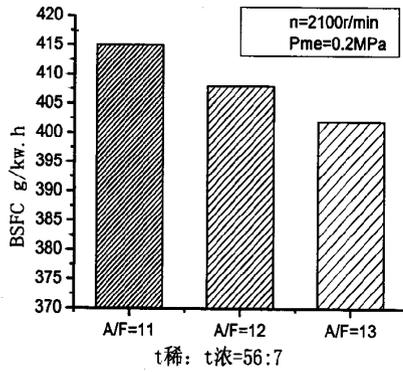


图 3-16 还原空燃比对燃油消耗率影响

图 3-13 至图 3-16 分别表示了转速、负荷一定 ( $n=2100\text{r/min}$ ,  $P_{me}=0.2\text{MPa}$ ), 在相同的浓稀燃持续时间比以及发动工作时间一定条件下, 不同浓燃空燃比

( $A/F=11$ 、 $A/F=12$ 、 $A/F=13$ ) 对稀燃发动机  $\text{CO}$ 、 $\text{HC}$ 、 $\text{NO}_x$  以及燃油消耗率的影响。

由上述图中不难看出, 伴随着还原混合气变浓, 混合气中氧含量降低, 燃料燃烧不完全, 未燃  $\text{HC}$  和  $\text{CO}$  增多, 使得稀燃发动机  $\text{CO}$  和  $\text{HC}$  排放量增加。但是由于还原过程中, 混合气变浓,  $\text{HC}$  和  $\text{CO}$  进入吸附还原催化剂的含量增加, 使得催化剂中被吸附的  $\text{NO}_x$  还原变得更加彻底, 同时催化剂中吸附的  $\text{NO}_x$  越少, 其吸附能力越强, 使得尾气通过吸附还原催化剂后,  $\text{NO}_x$  含量越少。总体来说由于发动机整个燃烧过程中大部分处于稀燃状态下在整个工作过程中,  $\text{HC}$  以及  $\text{CO}$  排放总量增加并不是很多, 在可以接受的范围内。

伴随着还原过程中混合气变浓, 使得发动机燃油经济性变差, 这主要是由于燃料燃烧不完全, 发动机燃烧热效率降低。

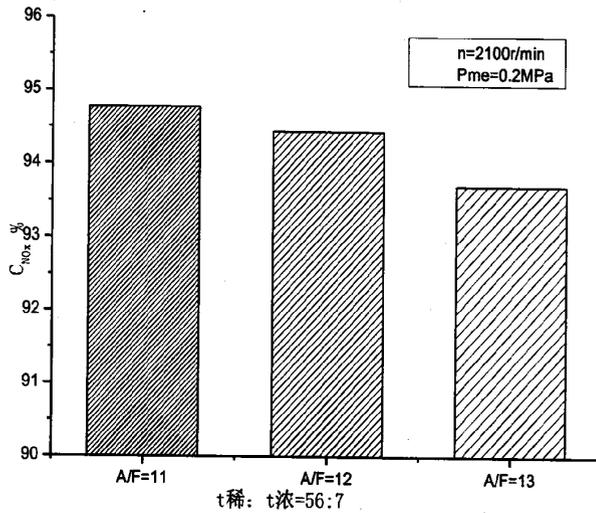


图 3-17 还原空燃比对 NO<sub>x</sub> 转化效率影响

图 3-17 给出了吸附还原催化剂对 NO<sub>x</sub> 转化率随还原过程中混合气空燃比的变化而变化趋势，从图中可以看出，催化剂对 NO<sub>x</sub> 转化效率随还原混合气变浓而升高。还原混合气越浓，进入催化剂中的未燃 HC 与 CO 越多，对催化剂还原的越彻底，使得催化剂的吸附效率越高。

综上所述，在发动机工况点（ $n=2100\text{r/min}$ 、 $P_{me}=0.2\text{MPa}$ ）一定，发动机工作时间一定，且浓稀燃持续时间比值一定的情况下，还原混合气越浓，HC 与 CO 的排放量越大，并且发动机燃油消耗率越大。但是，按随着还原过程中混合气变浓，NO<sub>x</sub> 排放量越小，吸附还原催化剂对 NO<sub>x</sub> 转化效率越高。考虑到发动机在整个工作过程中，稀薄燃烧所占时间比例很大，虽然在浓燃过程中，HC、CO 以及燃油消耗率上升，但在其恶化时间在整个工作过程中所占比例很小，恶化程度在整个工作范围内是可以接受的。

### 3.4.3 不同浓稀燃持续时间比值对发动机排放及油耗影响

本实验环节主要考虑不同浓稀燃持续时间比值对发动机排放以及油耗的影响，选定稀燃发动机工况点为转速  $n=2100\text{r/min}$ ，负荷  $P_{me}=0.2\text{MPa}$ ，发动机进行稀燃时空燃比  $A/F=20$ ，进行浓燃还原时空燃比  $A/F=12$ ，设定变量  $t_{稀}/t_{浓}=A$ ，其中 A 分别等于 8、10、12、14、16，即  $t_{稀}:t_{浓}$  分别等于 7:56、7: 70、7: 84、7:98 以及 7:112（时间单位：s）。

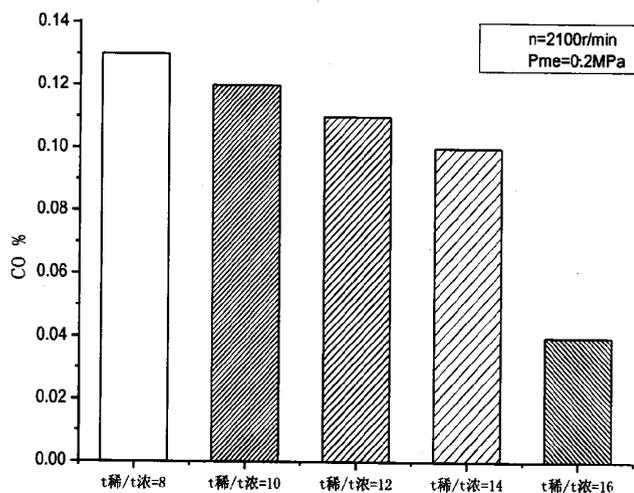


图 3-18 t<sub>稀</sub>/t<sub>浓</sub>对 CO 排放影响

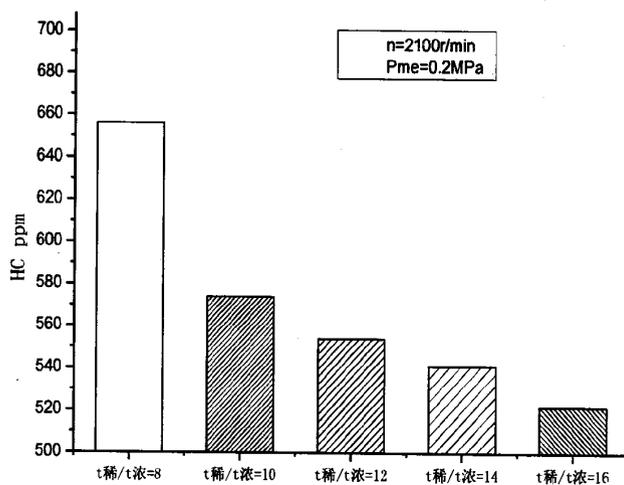


图 3-19 t<sub>稀</sub>/t<sub>浓</sub>对 HC 排放影响

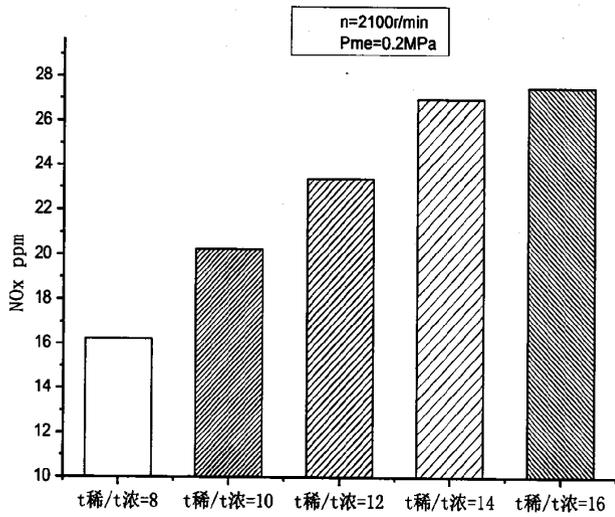


图 3-20 t<sub>稀</sub>/t<sub>浓</sub>对 NO<sub>x</sub> 排放影响

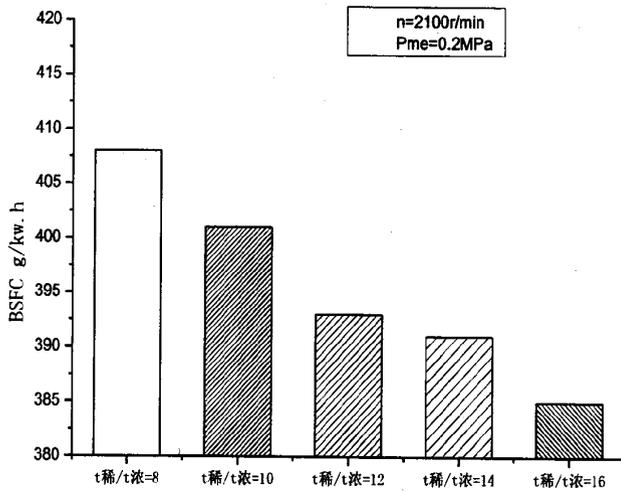


图 3-21 t<sub>稀</sub>/t<sub>浓</sub>对燃油消耗率影响

上述图3-18至图3-21分别表达了在定稀燃发动机工况点为转速  $n=2100\text{r/min}$ ，负荷  $P_{me}=0.2\text{MPa}$ ，发动机进行稀燃时空燃比  $A/F=20$ ，进行浓燃还原时空燃比  $A/F=12$ ，设定变量  $t_{稀}/t_{浓}$  分别等于 8、10、12、14、16，即  $t_{稀} : t_{浓}$  分别等于 7:56、7:70、7:84、7:98 以及 7:112 时，对稀燃发动机有害气体 CO、HC、NO<sub>x</sub>、以及燃油消耗率的影响。

由图 3-18 和图 3-19 可以看出,随着比值的变大,发动机 CO、HC 的排放量是逐渐减少的,这主要是由于随着比值的增大,在整个工作过程中稀燃时间所占比重增大,而稀燃状态下存在富氧现象,使得未燃 HC 和 CO 被充分的氧化,致使发动机排放量减少。

由图 3-20 中可以看出,随着比值的增大,稀燃发动 NO<sub>x</sub> 排放量是逐渐上升的。这主要是由于稀燃所占整个燃烧时间的比例增大,增加了 NO<sub>x</sub> 由催化剂溢出的机会。另外随浓燃相对时间变短,催化剂内吸附的 NO<sub>x</sub> 不能得到完全彻底的还原,另外吸附还原催化剂的吸附能力随催化剂内 NO<sub>x</sub> 含量的增加而降低,因此,NO<sub>x</sub> 随发动机稀浓时间比值的增大而排放量上升。

由图 3-21 可以看出,随着稀浓时间比值的增大,稀燃发动机燃油消耗率呈下降趋势,这主要是因为比值增大,稀燃持续时间较长,在稀燃工作状态下燃料燃烧较为充分,发动机热效率高。若该比值增大到无穷大,即完全处于稀燃状态下,发动机燃油消耗率则处于最理想状态。

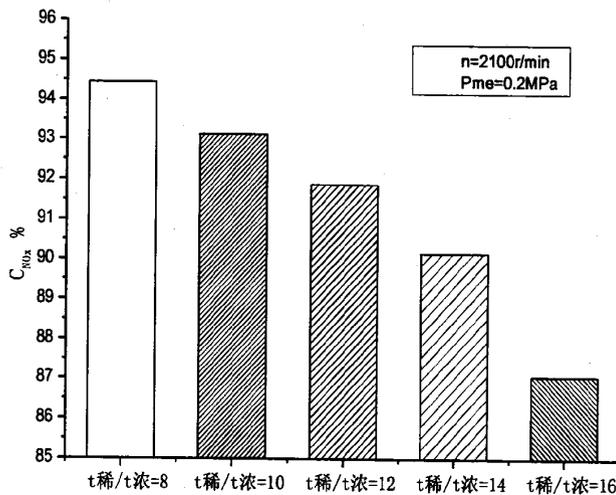


图 3-22 t<sub>稀</sub>/t<sub>浓</sub>对 NO<sub>x</sub> 转化效率影响

由图 3-22 可以看出,随着稀浓时间比值的增大,吸附还原催化剂对 NO<sub>x</sub> 的转化效率是逐渐降低的。这主要是因为稀燃持续时间过长,HC、CO 进入催化剂中的相对量减少,使得催化剂中的 NO<sub>x</sub> 不能够得到及时、充分的还原,致使催化剂中 NO<sub>x</sub> 中储存量过高,降低吸附还原催化剂的吸附能力,同时由于稀燃时间过长,增加了 NO<sub>x</sub> 逸出的机会,所以随着稀浓时间比值的增大,吸附还原催化剂的转化效率降低。

综上所述，在稀燃发动机工况点为转速  $n=2100\text{r/min}$ ，负荷  $P_{me}=0.2\text{MPa}$ ，发动机进行稀燃时空燃比  $A/F=20$ ，进行浓燃还原时空燃比  $A/F=12$ ，设定变量  $t_{稀}/t_{浓}$  分别等于 8、10、12、14、16，即  $t_{稀}:t_{浓}$  分别等于 7:56、7:70、7:84、7:98 以及 7:112 时，随着该比值的增大，CO、HC 排放量逐渐减少，发动机燃油消耗率也由于发动机长时间处于稀燃状态而降低。但是由于催化器不能得到及时、充分的还原，使得发动机 NO<sub>x</sub> 排放量增加，催化器的转化效率降低。

#### 3.4.4 相同浓稀持续时间比例、不同持续时间绝对值对排放油耗的影响

为研究稀燃发动机在相同的浓稀燃持续时间比例，不同的持续时间绝对值状态下（即浓稀转换频率）对发动机排放性和燃油经济性的影响，设定如下实验：

稀燃发动机工况点一定（ $n=2100\text{r/min}$ 、 $P_{me}=0.2\text{MPa}$ ），稀燃时空燃比为  $A/F=20$ ，还原状态下发动机空燃比为  $A/F=12$ ， $t_{稀}/t_{浓}=8$ ，设定变量  $t_{稀}:t_{浓}$  分别等于 7:56、9:72、11:88、13:104、15:120，考察在相同浓稀燃时间比例上，不同的浓稀燃切换频率对发动机 CO、HC、NO<sub>x</sub> 排放影响，以及对燃油消耗率和 NO<sub>x</sub> 转化率的影响。

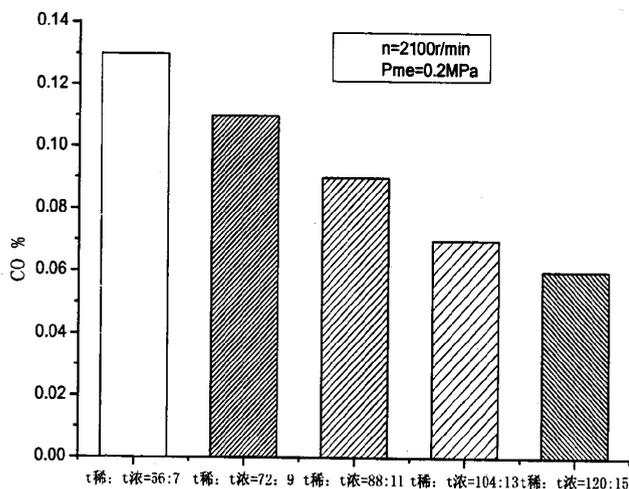


图 3-23  $t_{浓}:t_{稀}$  对 CO 排放影响

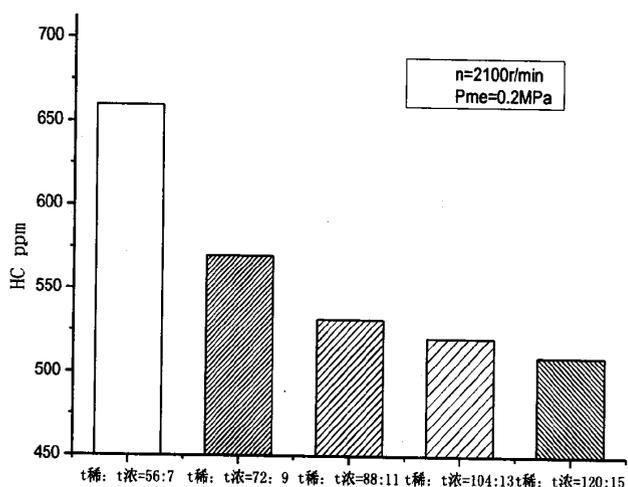


图 3-24 t<sub>浓</sub>: t<sub>稀</sub>对 HC 排放影响

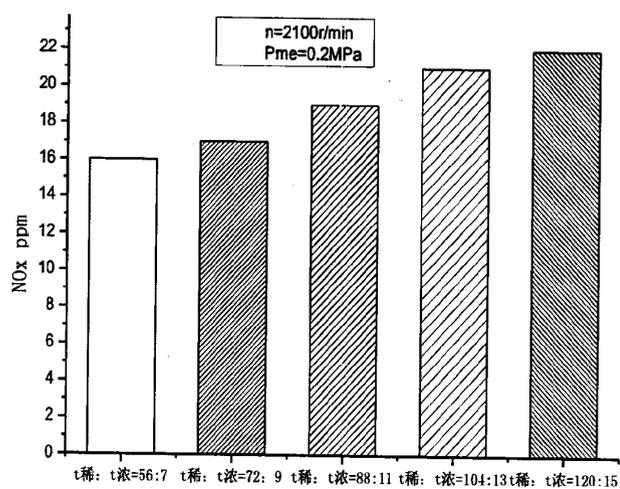


图 3-25 t<sub>浓</sub>: t<sub>稀</sub>对 NO<sub>x</sub> 排放影响

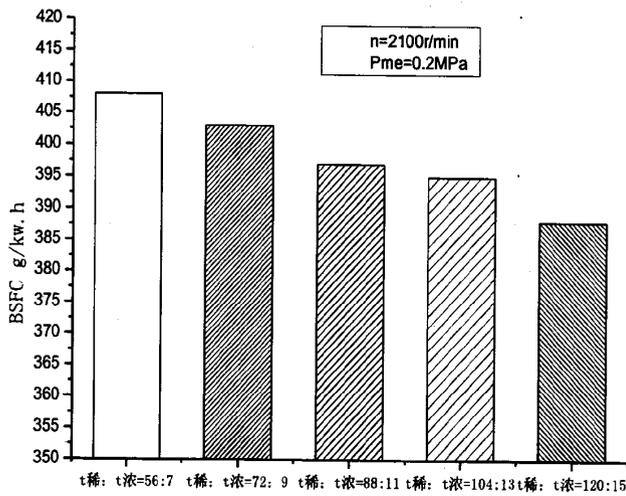


图 3-26 t<sub>浓</sub>: t<sub>稀</sub>对燃油消耗率影响

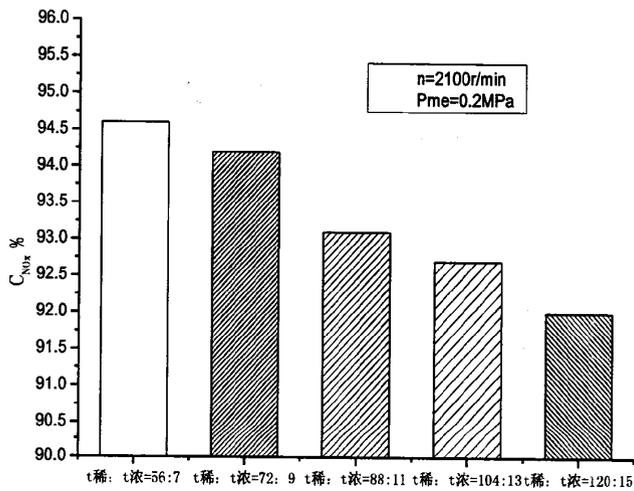


图 3-27 t<sub>浓</sub>: t<sub>稀</sub>对 NO<sub>x</sub> 转化效率影响

图 3-23 至图 3-27 分别给出了在该实验环节, 随 t<sub>浓</sub>: t<sub>稀</sub>的变化, CO、HC、NO<sub>x</sub> 排放变化情况, 以及燃油消耗率和 NO<sub>x</sub> 转化效率变化情况。从图中可以看出, HC 和 CO 对浓稀切换频率的增大 (即 t<sub>浓</sub>: t<sub>稀</sub> 绝对时间变小) 而上升, 而 NO<sub>x</sub> 以及 NO<sub>x</sub> 转化效率是随浓稀切换频率的增大而增大的, 油耗随浓稀切换频率的增大而上升。

HC 和 CO 随浓稀切换频率增大而增大主要是由于, 发动机浓稀切换过于频繁, 使得其处于过度工况时间段增多, 使得 HC 以及 CO 排放量增大。而 NO<sub>x</sub> 转化效率随浓稀切换频率增加而提高, 主要是由于发动机浓燃还原较为频繁, 使得吸附还原催化剂能够得到及时再生, 催化剂本身内存储的 NO<sub>x</sub> 不是很高, 提高了催化剂的转化效率。催化剂转化效率的提高, 也使得发动机 NO<sub>x</sub> 排放量减少, 因而 NO<sub>x</sub> 排放量随浓稀燃切换频率增加而降低。

发动机燃油消耗率随浓稀切换频率增加而增高, 但是整体变化不大, 这主要是过于频繁的发动机空燃比切换使得发动机处于过度工况的时间量增加, 燃烧不完全, 提高了燃油消耗率, 但是从整体上看, 整个实验点范围内燃油消耗率变化不超过 5g/kw.h, 属于可以接受的变化范围。

综上所述, 在其他条件不变的情况下, 浓稀切换频率增加使得 CO、HC 排放量增加, 而催化剂对 NO<sub>x</sub> 转化效率上升, 同时降低了 NO<sub>x</sub> 排放量, 发动机在真个工作过程中燃油消耗率略有上升。

### 3.5 本章小结

本章主要对 CA3GA2 发动机进行稀燃改制, 经改制的发动机空燃比达到 22, 并且在对外输出扭矩变化较小条件下, 能够实现发动机浓稀燃切换, 符合后续实验要求, 得到实验所需原机, 并研究了不同空燃比转速、负荷对稀燃原机 NO<sub>x</sub> 排放影响。研究了吸附还原催化剂转化 NO<sub>x</sub> 反应机理, 分别考察了发动机转速、负荷、还原阶段空燃比大小、浓稀燃持续时间比值变化、浓稀燃持续时间比值不变但绝对值变化对发动机有害气体排放、燃油消耗率以及催化剂对 NO<sub>x</sub> 转化效率的影响。得到等到以下结论:

1. 配有废气再循环的可变涡流进气系统能够成功实现发动机稀燃改制, 经改制后的发动机稀燃空燃比可达 22。
2. 在不同空燃比范围内 (12-22), 发动机 NO<sub>x</sub> 排放呈先上升后下降趋势, 且在空燃比达到 14-18 范围内, NO<sub>x</sub> 排放达到峰值。并且在同一空燃比下, 随着转速的提高, NO<sub>x</sub> 排放呈上升趋势, 在同一空燃比下, 随着负荷的提升, NO<sub>x</sub> 排放呈上升趋势。
3. 稀燃原机能够有效的降低 NO<sub>x</sub> 排放量数值, 但是因传统三效催化剂对稀燃汽油机 NO<sub>x</sub> 排放作用极为有限, 当稀燃原机不具有相关后处理技术 (即稀催化剂) 时, 发动机排放 NO<sub>x</sub> 不能满足当前排放法规要求。

4. 吸附还原催化器能够有效的降低稀燃发动机 NO<sub>x</sub> 排放, 在本实验设置所有工况点下, 转化效率均在 85% 以上, 在某些工况点甚至能够达到 94%。
5. 在其他条件一定的情况下, 发动机转速的提高使得 HC 和 CO 排放量下降, 燃油消耗率下降, 而 NO<sub>x</sub> 排放量略有上升, 吸附还原催化器对 NO<sub>x</sub> 转化效率变化不大。
6. 在其他条件一定的情况下, 发动机负荷的提高会降低 CO 和 HC 的排放量, 大幅度降低发动机油耗, 但是负荷上升也使得 NO<sub>x</sub> 排放量增加, 吸附还原催化器对 NO<sub>x</sub> 转化效率随负荷增加而降低变化明显。负荷是影响吸附还原催化器的转化效率的重要因素之一。
7. 在其他条件不变的情况下, 发动机还原过程中, 浓燃空燃比降低 (及混合气变浓) 会提高 CO 以及 HC 排放量, 提高燃油消耗量, 但是还原过程中浓燃空燃比越小, 吸附还原催化器还原越彻底, 其对 NO<sub>x</sub> 转化效率越高, NO<sub>x</sub> 排放量越低。
8. 在其他条件一定的情况下, 发动机浓稀燃持续时间比例变化对发动机排放及油耗影响较为明显, 当浓稀燃持续时间比例上升时, HC 和 CO 呈下降趋势, 发动机油耗降低, 但是 NO<sub>x</sub> 排放量增加, 而催化器由于不能得到及时的还原, 使得其对 NO<sub>x</sub> 转化效率降低。
9. 在其他条件一定的情况下, 发动机浓稀燃持续时间比值不变, 但是绝对时间的变化 (即发动机浓稀燃切换频率的变化) 对发动机排放有影响。当切换频率增加时, HC 和 CO 由于发动机处于过度工况时间较多而升高, 燃油消耗率也随之略有提升。但是随着浓稀燃切换频率的增加, 催化器能够及时、充分的得到还原再生, 使得其对 NO<sub>x</sub> 转化效率得到提高, 而发动机 NO<sub>x</sub> 排放量也随之下降。
10. 上述各因素在发动机不同工况下对排放及油耗的影响权重有所不同, 油耗降低与 NO<sub>x</sub> 排放降低总是有一定矛盾的, 而且发动机在不同工况下对油耗及排放的侧重点不同。当发动机负荷较小时, 应优先考虑发动机油耗, 可以通过提高发动机浓稀燃持续时间比值, 或减少发动机浓稀燃切换频率来保证油耗率低。当发动机所处负荷较大时, 负荷对 NO<sub>x</sub> 排放以及催化器对 NO<sub>x</sub> 转化效率影响很明显, 应着重考虑发动机 NO<sub>x</sub> 排放, 此时可以提高发动机浓稀燃切换频率, 或减少浓稀燃持续时间比值。

## 第四章 EGR 与吸附还原催化剂耦合降低 NO<sub>x</sub> 试验研究

本章主要在第三章研究基础上，权衡稀燃发动机油耗以及 NO<sub>x</sub> 排放，选取较为优化的试验工况点，并搭载 EGR 技术，研究不同 EGR 率与吸附还原催化剂相耦合降低 NO<sub>x</sub> 排放特性。

### 4.1 试验研究内容提出

EGR 技术作为降低稀燃汽油机 NO<sub>x</sub> 排放的主要技术手段，主要是通过提高缸内工质比热容，以及降低燃烧速度，从而降低稀燃发动机燃烧温度，减少 NO<sub>x</sub> 生成，从而降低了稀燃汽油机 NO<sub>x</sub> 排放，属于机内净化。吸附还原催化剂通过稀燃汽油机周期性进行浓稀燃切换，实现催化剂对 NO<sub>x</sub> 的吸附与还原再生，能够有效的降低 NO<sub>x</sub> 排放，转化效率能够达到 90% 以上（见第三章），属于机外后处理技术。

本实验主要考察以上两种技术相耦合，是否能够有效的降低 NO<sub>x</sub> 排放，是否能够起到增益效果，并研究两种技术是否相互影响，以及具体的影响关系。

### 4.2 EGR 率对稀燃发动机 NO<sub>x</sub> 排放及燃油消耗率影响

通过调整配有废气再循环的可变涡流进气系统中 EGR 阀门开度，使原稀燃发动机搭载废气再循环系统。本实验环节设定 EGR 开度分别为 8%、15%、24%，并去掉吸附还原催化剂系统，单独研究不同 EGR 率对 NO<sub>x</sub> 以及发动机燃油消耗率影响。本实验环节中设定发动机转速为  $n=2400\text{r/min}$ ， $P_{me}=0.4\text{MPa}$ 。其具体实验结果如图 4-1 和图 4-2 所示。

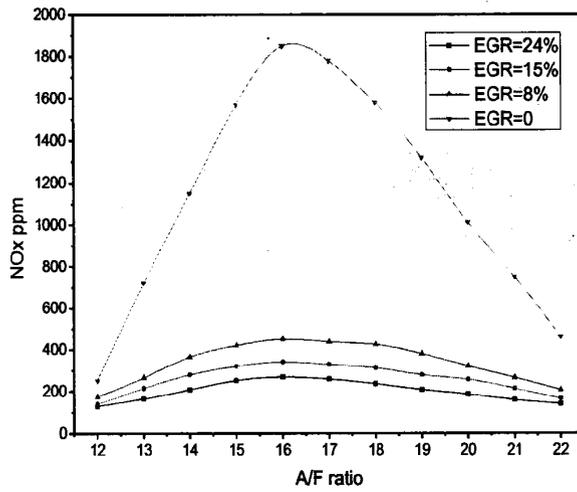


图 4-1 不同 EGR 率下的 NO<sub>x</sub> 排放特性

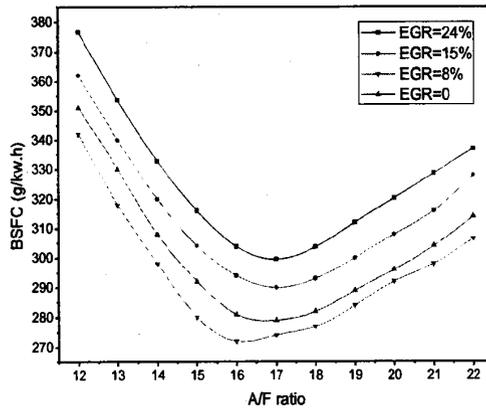


图 4-2 不同 EGR 率下的燃油消耗率特性

由图 4-1 可以看出,增加 EGR 系统能够在发动机整个空燃比范围内(A/F=12 至 A/F=22)有效的降低发动机 NO<sub>x</sub> 排放,这主要是由于通过 EGR 系统将废气引入气缸,增加了工质比热容,降低缸内燃烧温度,有效抑制了 NO<sub>x</sub> 的生成。同时在某一空燃比条件下,随着 EGR 率增大,NO<sub>x</sub> 排放量呈下降趋势。当空燃比大于 20 以后,由于发动机内混合气毕竟很稀,增加 EGR 率使得 NO<sub>x</sub> 排放数值下降不是很明显。

由图 4-2 所示, 随着 EGR 率的逐渐上升, 发动机的燃油消耗率先下降后上升的趋势, 适当的 EGR 率能够有效的增加发动机充量, 减少泵吸损失, 同时 EGR 的加入能够降低缸内温度, 减少散热损失, 提高发动机热效率, 所以能够有效的降低发动机油耗。但是当 EGR 率过高时, 混合气中废气含量过高, 使得发动机缸内燃烧困难, 燃烧速度降低, 燃烧不稳定, 使得发动机整体燃油消耗率较原机呈上升趋势。

综上所述, 本实验中自主设计的 EGR 系统能够运用到发动机当中, 并且对发动机 NO<sub>x</sub> 排放有很大改善, 随着 EGR 率增加, 发动机 NO<sub>x</sub> 排放是逐渐减少的。同时, 发动机燃油消耗率随 EGR 率增加呈先下降后上升趋势, 当 EGR 率超过 10% 左右时, 发动机燃油消耗率超过稀燃原机。

### 4.3 耦合实验工况点选取

通过第三章研究结论可知, 发动机转速提高会降低 HC、CO 排放, 使得 NO<sub>x</sub> 排放略有上升, 燃油消耗率略有改善; 而负荷的上升则会大幅度降低发动机燃油消耗率、HC 以及 CO, 但是会使得 NO<sub>x</sub> 排放明显上升, 催化剂对 NO<sub>x</sub> 转化效率下降明显。综合考虑发动机油耗以及有害气体排放, 以及稀薄燃烧主要应用于发动机中低转速和中小负荷下。本实验选取发动机工况点为转速  $n=2400\text{r/min}$ , 负荷  $P_{me}=0.3\text{MPa}$ 。

发动机浓稀燃切换频率越大, 稀燃发动机 NO<sub>x</sub> 排放越低, 催化剂对 NO<sub>x</sub> 转化效率越高, 但是由于发动机处于过度工况时间较长, HC、CO 排放和燃油消耗率都会有所上升。发动机浓稀燃持续时间比例越大, HC、CO 排放以及燃油消耗率均会得到改善, 但是 NO<sub>x</sub> 排放量增大, 催化剂对 NO<sub>x</sub> 转化效率严重降低。综合上述考虑, 本实验选取浓稀燃持续时间比例为 8, 绝对值时间比例为 7:56。

综合上述分析, 本实验具体工况为转速  $n=2400\text{r/min}$ , 负荷  $P_{me}=0.3\text{MPa}$ , 发动机稀燃工作状态下空燃比为  $A/F=20$ , 还原过程中空燃比为  $A/F=12$ , 浓稀燃持续时间比值为 8, 绝对值为 7:56。设置变量为 EGR 率 (分别为 0%、8%、15%、24%), 考察 EGR 与吸附还原催化剂相耦合时, 不同 EGR 率对有害气体排放, 燃油消耗率以及催化剂对 NO<sub>x</sub> 转化率的影响。

### 4.4 耦合技术对有害气体排放及燃油消耗率影响

图 4-3 至图 4-7 分别表示了在其他条件一定的情况下, EGR 与吸附还原催化剂相耦合, 不同 EGR 率对有害气体排放以及燃油消耗率的影响。

从图 4-3 中可以看出,随着 EGR 率的增大,CO 排放量变化基本不大,这说明了当发动机混合气很稀时,CO 的排放量已经很低了,EGR 对 CO 排放影响不大,CO 的排放主要与空燃比有关。

从图 4-4 中可以看出,随着 EGR 的增大,HC 的排放呈上升趋势,在稀燃状态下(A/F=20),缸内混合气很稀,随着 EGR 率的持续增大,燃烧速度和火焰传播速度不断减慢,缸内燃烧温度不断降低,燃料燃烧愈发不完全,使得未燃 HC 生成量增加,造成了 HC 的排放量增加。

从图 4-5 和图 4-6 中可以看出,EGR 与吸附还原催化器相耦合能够降低 NO<sub>x</sub> 排放量,但是耦合效果不是很明显,并且在 EGR 率为 8%到 24%之间,随着 EGR 率增加,NO<sub>x</sub> 排放量呈上升趋势。一方面是由于当 EGR 率为零时,NO<sub>x</sub> 排放量已经很低(18.5ppm),另一方面由于稀燃发动机增加 EGR 系统,使得排放尾气温度降低,吸附还原催化器前端入口处温度变低,降低了催化剂活性,使得 NO<sub>x</sub> 吸附量降低。另外,EGR 系统的增加,使得缸内混合气废气含量上升,进入催化器前端的废气中水蒸气等影响催化器活性的成分升高,降低其转化效率。

从图 4-7 中可以看出,随着 EGR 率的上升,发动机燃油消耗率呈先下降后上升的趋势,当 EGR 率为 8 时,EGR 系统与吸附还原催化器相耦合能够有效的降低发动机燃油消耗率,但是随着 EGR 率上升,发动机缸内废气量增加,造成缸内燃烧困难,燃烧速度降低,并且燃烧不稳定,使得发动机燃油经济性下降。由此可以看出,适当的 EGR 率与吸附还原催化器相耦合能够降低发动机燃油消耗率,但是过高的 EGR 率与 LNT 相耦合反而提高发动机燃油消耗率。

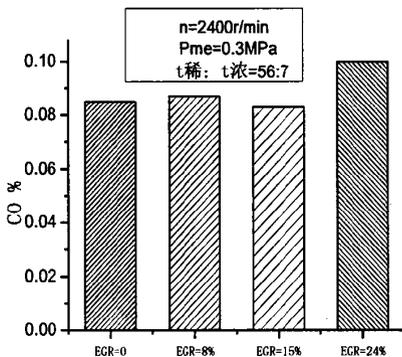


图 4-3 EGR 率对 CO 排放影响

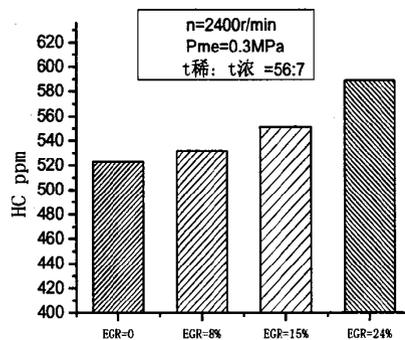


图 4-4 EGR 率对 HC 排放影响

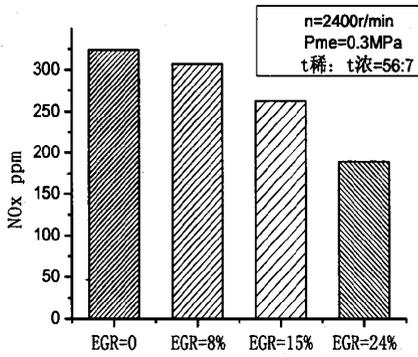


图 4-5 EGR 率对 LNT 前端 NO<sub>x</sub> 浓度影响

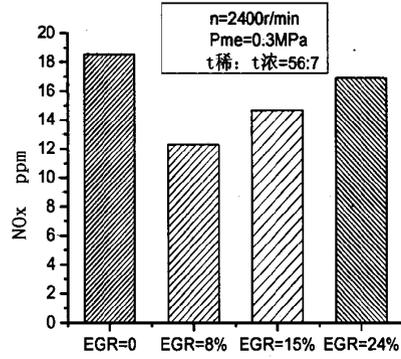


图 4-6 EGR 率对 LNT 后端 NO<sub>x</sub> 浓度影响

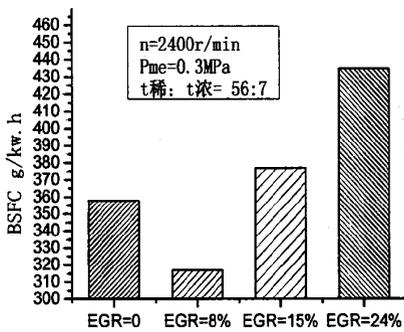


图 4-7 EGR 率对油耗影响

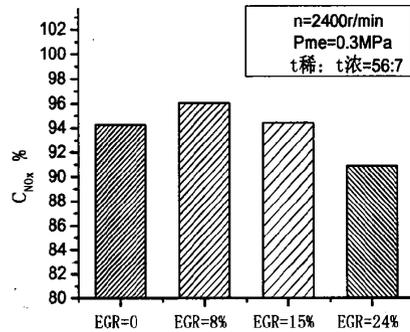


图 4-8 EGR 率对 LNT 转化效率的影响

从图 4-8 中可以看出，当 EGR 率为 8% 时，能够提高 NO<sub>x</sub> 转化效率，但是之后随着 EGR 率的上升，吸附还原催化剂对 NO<sub>x</sub> 转化效率逐渐下降，至 15% 时基本与 EGR 率为零时转化效率相等，至 24% 时其转化效率要远远低于 EGR 率为零时的转化效率，这主要是由于 EGR 率的增加降低缸内燃烧温度，使得催化剂入口端温度降低比较明显，从而降低了催化剂活性。并且由于废气引入气缸，使得尾气中水和二氧化碳含量提高，当水和二氧化碳同时存在于催化剂中时，无论温度高低，都会影响吸附还原催化剂对 NO<sub>x</sub> 的吸附，催化剂的饱和和吸附量都会受到不同程度的降低，而且使得 NO<sub>x</sub> 还原速率降低。

综合上述分析，可以得出，在本实验条件下，EGR 率的改变对 CO 排放影响不大，而随着 EGR 率的上升，HC 排放量呈上升趋势。适当的 EGR 率与吸附还原催化剂耦合，能够降低发动机燃油消耗率，如本实验 EGR 率为 8% 处，但是随着 EGR 率的上升，发动机燃烧困难，燃烧速度缓慢，使得燃油经济性下降，油耗升高。不同 EGR 率下 EGR 与吸附还原催化剂相耦合，相较于稀燃发动机结合催化剂技术，NO<sub>x</sub> 排放数值有所下降，但是随着 EGR 率的提升，吸附还原催

化器对 NO<sub>x</sub> 转化效率呈下降趋势。两种技术存在着相互影响关系, EGR 技术存在使得尾气中水和二氧化碳成分增加, 降低了吸附还原催化剂的活性, 影响其转化效率, 对吸附还原催化剂转化效率有一定的制约作用。

#### 4.5 本章小结

本章通过配有废气再循环的可变涡流进气系统, 对稀燃改制后的 CA3GA2 发动机进行 EGR 搭载, 考察 EGR 对稀燃发动机 NO<sub>x</sub> 排放以及燃油消耗率的影响。通过第三章研究权衡燃油消耗率以及 NO<sub>x</sub> 排放, 选取适当工况点, 进行吸附还原催化剂与 EGR 耦合, 研究不同 EGR 率下耦合技术对 NO<sub>x</sub> 排放以及燃油消耗率的影响, 得到以下结论:

1. 单独采用 EGR 系统能够降低稀燃汽油机 NO<sub>x</sub> 排放, 且降低幅度较为明显, 随着 EGR 率的升高, NO<sub>x</sub> 排放量呈下降趋势。EGR 系统对发动机油耗有一定影响, 随着 EGR 率的上升, 油耗呈先下降后上升的趋势。
2. EGR 系统与吸附还原催化剂相耦合, 对 CO 排放影响不大, CO 排放主要与空燃比有关; 耦合系统与原 LNT 系统相比较, 随着 EGR 率的上升, HC 呈上升趋势, 这主要是由于 EGR 系统的引入, 使得原混合气变稀, 燃烧速度和火焰传播速度不断减慢, 缸内燃烧温度不断降低, 燃料燃烧愈发不完全, 使得未燃 HC 生成量增加, 造成了 HC 的排放量增加。
3. EGR 系统与吸附还原催化剂相耦合, 相较于原吸附还原催化剂系统, 随着 EGR 率上升, 油耗呈先下降后上升趋势, 在本实验中, EGR 率超过 8%, 燃油经济性开始恶化。这主要是因为, 适当的 EGR 率能够有效的增加发动机充量, 减少泵吸损失, 降低缸内温度, 减少散热损失, 提高发动机热效率, 提高燃油经济性。但是过高的 EGR 率会造成燃烧困难、燃烧速度降低, 使得燃油经济性变差。
4. EGR 系统与吸附还原催化剂相耦合, 相较于原吸附还原催化剂系统, 能够有效降低 NO<sub>x</sub> 排放, 这主要是由于 EGR 系统的加入, 增加了发动机机内净化效果, 减少催化剂入口端 NO<sub>x</sub> 浓度。但是随着 EGR 率的上升, 过高的 EGR 率会降低催化剂入口处温度, 降低催化剂活性, 而且 EGR 的引入会使得尾气中水和二氧化碳含量上升, 影响催化剂对 NO<sub>x</sub> 吸附, 所以在本实验中, 超过 8% 之后, 随着 EGR 率上升, 催化剂对 NO<sub>x</sub> 吸附率呈下降趋势。
5. 适当的 EGR 率与吸附还原催化剂相耦合能够有效降低发动机燃油消耗率以及 NO<sub>x</sub> 排放量, 两者相耦合能够对发动机节能和排放起到增益效果, 如本实

验工况点下，EGR 率为 8%与催化剂耦合，能够有效的降低 NO<sub>x</sub> 排放，并大幅提高燃油经济性。

6. EGR 与吸附还原催化剂相耦合技术，能够有效降低 NO<sub>x</sub> 排放，但是由于两者的作用原理的不同，EGR 技术的引入，过高的 EGR 率，会降低吸附还原催化剂的转化效率。

## 第五章 全文总结及工作展望

### 5.1 全文总结

节能环保是当今汽车发展的两大主题。伴随着我国汽车保有量的增加,发动机燃油消耗问题以及有害气体排放问题越来越受到人们的重视。汽油机稀薄燃烧技术能够有效的降低发动机燃油消耗率和减少有害气体排放,是当今发动机技术发展的主要趋势之一。

但是传统三效催化剂在发动机稀燃富氧的条件下,对降低 $\text{NO}_x$ 排放作用有限,如何降低稀燃汽油机 $\text{NO}_x$ 排放成为了限制稀燃技术实际应用的主要问题。

本文采用CA3GA2发动机,通过运用课题组自主设计的可变进气系统进行稀燃改制,并自主设计了EGR系统,结合吸附还原催化器,研究吸附还原催化器降低 $\text{NO}_x$ 排放特性,并进行EGR系统与吸附还原催化器相耦合,研究耦合效果对稀燃汽油机 $\text{NO}_x$ 排放的影响。得到以下结论:

1. 通过运用可变进气系统,并结合调整节气门开度、点火提前角和喷油脉宽,对天津一汽CA3GA2发动机进行稀燃改制,改制后发动机空燃比能够达到22,并且能够实现在发动机对外输出扭矩变动较小的条件下进行浓稀燃切换,该改制对发动机内部改动较小,有利于该技术产业化。
2. 吸附还原催化器能够有效的降低稀燃汽油机 $\text{NO}_x$ 排放,在本实验所设中小负荷工况点下,催化器对 $\text{NO}_x$ 转化效率达85%以上,甚至在某些工况点达到94%。
3. 发动机转速提高会降低HC排放,提高燃油经济性。负荷上升会使得 $\text{NO}_x$ 排放数值上升,催化器对 $\text{NO}_x$ 转化效率随负荷上升而下降趋势比较明显。但是符合上升会降低HC、CO排放,大幅提高燃油经济性。
4. 发动机还原过程中,随着还原过程中浓燃空燃比越小,吸附还原催化器还原越彻底,对 $\text{NO}_x$ 转化效率越高, $\text{NO}_x$ 排放量越低。但是浓燃空燃比降低(即混合气变浓)会提高CO以及HC排放量,提高燃油消耗量。
5. 发动机浓稀燃持续时间比例变化对发动机排放及油耗影响较为明显,当浓稀燃持续时间比例上升时, $\text{NO}_x$ 排放量增加,催化器由于不能得到及时的还原,对 $\text{NO}_x$ 转化效率降低。HC和CO随浓稀燃持续时间比例上升呈下降趋势,发动机油耗降低。发动机浓稀燃持续时间比值不变,但是绝对时间的变化(即

发动机浓稀燃切换频率的变化)对发动机排放有影响。当切换频率增加时, 催化器对  $\text{NO}_x$  转化效率得到提高, 发动机  $\text{NO}_x$  排放量也随之下降。但是会引起 HC、CO 排放量以及燃油经济性下降。

6. EGR 与吸附还原催化器相耦合能够有效的降低  $\text{NO}_x$  排放, 但是 EGR 率过高, 会使得催化器转化效率降低; 适当的 EGR 率与催化器耦合能够降低燃油消耗率, EGR 率过高则会使燃油经济性变差。

## 5.2 工作展望

为进一步研究 EGR 与吸附还原催化器耦合降低  $\text{NO}_x$  排放情况, 对今后工作提出以下建议:

1. 定量研究入口温度对催化器转化效率影响。
2. 研究尾气成分, 如水和二氧化碳对催化器转化效率的影响。
3. 进一步改善 EGR 系统, 使其结构紧凑, 密封性提高, 为产业化做出基础。

## 参考文献

- [1] 史绍熙,李德桃,郑杰等, 关于建立和完善我国汽车排放法规若干问题的探讨和建议.内燃机学报,1996,2
- [2] Shi Shao-xi, Recent Process in Combustion Technologies for Automotive Engines.燃烧科学与技术, 2001, (1): 1-15
- [3] Hiromistu Ando and Kazunari Kuwahara, A Keynote on Future Combustion Engines SAE 2001-01-0248
- [4] 濂古俊之, 汽车排放法规及燃油消耗动向和与之相适应的发动机燃烧技术, 国外内燃机, 2001, (3): 9-15
- [5]大众汽车(中国)投资有限公司, European Union Council Directive, 2001.7
- [6]Kimiyoishi Nishizawa , Sukenori Momoshima , Masaki Koga , etc. Development of New Technologies Targeting Zero Emission for Gasoline Engines. SAE 2000-01-0890: 605-610
- [7]李志军, 吸附还原净化准均质稀燃汽油机氮氧化物排放实验研究: [博士学位论文], 天津: 天津大学, 2003
- [8] Yufeng Li, Hua Zhao, et.al, Analysis of Tumble and Swirl Motions in a Four-Valve SI Engine, SAE Technical Paper, 2001
- [9] Furuno,Shigeo,Kiyohiko Oishi et al, The effects of inclination angle of swirl axis on turbulence characteristics in a 4-valve lean burn engine with SCV,SAE Paper902139,1990
- [10] Teruhiro Sakurai and masanori Iko, Basic research on combustion chambers for lean burn gas engines,SAE Paper932710,1993
- [11]Akihide Takami, Takasi Takemoto, et al. Development of Lean Burn Catalyst. SAE Paper 950746, 1995
- [12] Inoue,Matsushita,S,et al,Development of the Toyota lean combustion system,SAE Paper 850044, 1985
- [13] Takefumi Hosaka,et al,Development of the Variable Valve Timing and Lift(VTEC) Engine for the Honda NSX, SAE Paper 910008, 1991
- [14] [http://en.wikipedia.org/wiki/Gasoline\\_direct\\_injection](http://en.wikipedia.org/wiki/Gasoline_direct_injection)
- [15] [http://www.mitsubishi-motors.co.za/featuresites/mm\\_history/GDI.asp](http://www.mitsubishi-motors.co.za/featuresites/mm_history/GDI.asp)

- [16] Yuhiko Kiyota, Katsuo Akishino, Hiromitsu Ando, Concept of Lean Combustion By Barrel-Stratification, SAE920678:1333-1345
- [17] 姚春德、刘增勇等, 四气门汽油机分层 EGR 的试验研究, 工程热物理学报, 2005, 25(6): 1053~1056
- [18] P. Forzatti, L. Castoldi, I. Nova, L. Lietti, E. Tronconi, NOx removal catalysis under lean conditions, Catalysis Today 117 (2006) 316-320
- [19] Shin'ichi Matsumoto, DeNOx Catalyst for Automotive Lean-Burn Engine, Catalysis Today 29 (1996) 43-45
- [20] Klaas Martijn Nauta, Model Reduction of a Lean NOx Trap Catalyst Model, Doctor thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2007
- [21] PROCO:Ford's V8 Engine, Popular Mechanics, December 1979
- [22] W. Strehlau, J. Leyrer, et al, New Developments in Lean NOx Catalysis for Gasoline Fueled Passenger Cars in Europe, SAE Paper 962047
- [23] 刘丽红、刘咏等, 稀燃 NOx 储存-还原催化剂, 化学进展, 第 21 卷第 5 期 964-970
- [24] David P. Sczomak, Overview of Central-Injection Air-Assisted SIDI Technology Emission and Fuel Consumption, SAE Paper 2003-01-0545, 2003
- [25] Huan Liu, Kebin He, et al, Analysis of the impacts of fuel sulfur on vehicle emissions in China, Fuel, 87 (2008) 3147-3154
- [26] 内田谦一 排气净化系统及排放测试技术 天津大学-丰田汽车公司技术研讨会资料(一)1999,9
- [27] N.Miyoshi, S.Matsumoto, K.Katoh, T.Tanakak, et al, Development of new concept three-way catalyst for automotive leanburn engines, SAE950809, 1995
- [28] W.S.Brogan, et al "Evaluation of NOx storage Catalysts as an Effective system for NOx Removed from the Exhaust Gas of Lean Burn Gasoline Engines" SAE 952490, 1995.
- [29] W.Strehlau, J. et al "Lean NOx catalysis to gasoline fueled European cars" Automotive Engineering 1997,2
- [30] Gregory D., Marshall R.A. Eves B., Dearth M., Hepburn J.S., Brogan M.S., Swallow D., Evolution of lean NOx-traps on PFI and DISI lean burn vehicles, SAE Paper 1999-01-3498115
- [31] Brogan, M.S., Clark A.D., Brisley R.J., Recent progress in NOx-trap technology, SAE Paper 980933, 1998

- [32] M.S .Brogan,et al "CoMpaarison of De-NOx and Adsorber Catalyst to Reduce NOx Emissions of Lean-Burn Gasoline Engines"SAE962046,1996.
- [33] Fekete N.,Kemmler R.,Krutzsich B.,et al "Evaluation of NOx Storage Catalysts for Lean Burn Gasoline Fueled Passenger Cars" SAE 970746,1997
- [34] H.Bosch and F.J.J.G.Janssen,Catal.Today,2,(1988),p.369.
- [35] T.Tabata,M.Kokitsu and O.Okada,Catal.Today,22,(1994),p.147.
- [36] David R et al Evaluation of a Cu/Zeolite Catalyst to Remove NOx from Lean Exhaust .SAE 930737, 1993
- [37] Akihide Takami et al Development of Lean Burn Catalyst SAE950746,1995
- [38] Axel Konig,Thomas Richter and Edward Jobson et al Research Results on Processes and Catalyst Materials for Lean NOx Conversion .SAE 962041,1996
- [39] G.Lutkemeyer,R.Weinowski,and G.lepperhoff et al CoMpaarison of De-NOx and Adsorber Catalysts to Reduce NOx-Emissions of Lean-Burn Gasoline Engines.SAE 962046,1996
- [40] Masao Hori,Akihisa Okumura,Hideki Goto et al Development of New Selective NOx Reduction Catalyst for Gasoline Leanburn Engines.SAE 972850,1997
- [41] P.Ciambelli,P.Corbo,F.Migliardini et al Potentialities and limitations of lean de-NOx catalysts in reducing automotive exhaust emissions Catalysis Today 59(2000) 279-286
- [42] A.Raj,T.H.N.Le,S.Kaliaguine et al Involvement of nitrate species in the SCR of NO by NH3 at ambient conditions over TS-1 catalysts Applied Catalysis B:Environmental 15(1998)259-267
- [43] Boehman,Andre L.Numerical modeling of NO Reduction over Cu-ZSM-5 under Lean Conditions.SAE 970752,1997
- [44] Burch,R.,Millington,P.J. Selective reduction of nitrogen oxides by hydrocarbons under lean-burn congditions using supported platinum group metal catalysts.Catal Today vol.26,no.2 page.185206 (1995)
- [45] Burch,R., Millington,P.J. Selective reduction of nitrogen oxides by hydrocarbons under lean-burn conditions using supported platinum group metal catalysts, Catal. Today 26 (2) 1995: 185-206
- [46]Iwamoto M, Hamada H. Catalyst Today, 1991,10:57

- [47] Teraoka Y, Fukuda H, Kagawa S. Chem Lett, 1990, 1
- [48] 韩一帆等 “一氧化氮分解催化剂的研究进展” 工业催化 1996, 4.
- [49] 马涛、王睿, NO<sub>x</sub> 催化分解研究, 化学进展, 2008, (20) 6: 798~810
- [50] A. Amirnazmi, J. E. Benson, et al, Oxygen inhibition in the decomposition of NO on metal oxides and platinum, Journal of Catalysis, Volume 30, Issue 1, July 1973, Pages 55-65
- [51] A. Amirnazmi, M. Boudart, Decomposition of nitric oxide on platinum, Journal of Catalysis, Volume 39, Issue 3, September 1975, Pages 383-394
- [52] <http://www.pcauto.com.cn/news/changshang/0611/409447.html>

## 发表论文和参加科研情况说明

### 发表的论文:

[1] Xuyan Jia, Zhijun Li, Ying Zhang, Haining Zhao, Lei Liu, Study on Simulation of Lean NOx Trap for Lean Burn Gasoline Engine, The 2nd International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. Neimenggu, China. 2011.7.15-17 (EI: 20114314453826 )

### 参与的科研项目:

国家高技术研究发展计划(863 计划)《EGR 与催化耦合技术降低稀燃汽油机 NOx 排放研究》(批准号: 2008AA06Z322)

国家自然科学基金(批准号:50776062)《吸附还原催化法同时降低柴油机 NOx 和 PM 排放机理及应用基础研究》

## 致 谢

本论文的工作是在我的导师李志军教授的悉心指导下完成的。李志军教授以其渊博的学识以及严谨的治学态度指引我进入了汽油机节能减排领域。李志军教授诲人不倦、严谨求实的治学态度是我学习的榜样。在两年半的研究生学习生活中，李志军为我提供了宽广的求知平台和宽松的学习环境，我两年半以来取得的每一点成绩都离不开李老师的帮助和鼓励。李老师不仅在学习上对我悉心指导，生活上也提供了无微不至的关怀，在此论文完成之际，我谨向李志军教授致以由衷的感激。

感谢高文志老师对本实验提供热情无私的帮助以及在我本科期间对我的关心、教育和指导。

感谢重点实验室刘文胜高工，在整个实验台架搭建过程中为我提供了无私的帮助和鼓励。

感谢张瀛博士、陈朝晖博士、焦鹏昊博士、陈韶舒博士在我两年半的研究生学习生活中给我工作上的指导和学习上的关怀。

感谢高立波硕士、张文斐硕士、袁行波硕士对我工作的支持和鼓励，以及本论文撰写过程中的帮助。

感谢刘磊师弟对本实验提供的帮助。

感谢我的父母的养育之恩，感谢他们对我求学道路上一如既往的理解和支持，感谢他们对我提供的精神上和经济上的帮助，对此我深感内疚。

感谢我的女友李静对我的理解、支持和鼓励。

贾旭岩 于 2011 年 12 月