



# The Study on the Effect of Gasoline/Diesel Ratio and EGR Rate on Performance of Gasoline/Diesel Dual-Fuel Engine

Lu Yanqun<sup>1,\*</sup>, He Mingyue<sup>1,\*</sup>, Li Xucong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, China

<sup>2</sup>Warburg Automobile (China) Co. LT, Beijing, China

## Email address:

khy7055@126.com (Lu Yanqun), aheminyue@163.com (He Mingyue), m\_bigm@tju.edu.cn (Li Xucong)

\*Corresponding author

## To cite this article:

Lu Yanqun, He Mingyue, Li Xucong. The Study on the Effect of Gasoline/Diesel Ratio and EGR Rate on Performance of Gasoline/Diesel Dual-Fuel Engine. *Asia-Pacific Journal of Mechanical Engineering*. Vol. 1, No. 4, 2019, pp. 17-27.

Received: November 28, 2018; Accepted: January 29, 2019; Published: April 23, 2020

**Abstract:** Taking a diesel engine as a prototype, the intake port gasoline injection system was added to realize the combustion mode that the fuel ignited by premixed injection of gasoline in intake port and direct injection of diesel oil in cylinder, and the performance of gasoline/diesel dual-fuel engine was deeply studied. The results shows: 1. The peak in-cylinder combustion pressure and heat release rate of gasoline/diesel dual-fuel engines gradually decrease with the increase of gasoline/diesel ratio; 2. The fuel consumption acquires optimal value at 65% of gasoline/diesel ratio; 3. Both NO<sub>x</sub> emission and Soot emission decrease and got significantly low value with the increase of gasoline/diesel ratio. So it can be concluded: the increase of EGR rate make combustion pressure peak in-cylinder and heat release rate peak firstly rise and then decrease. Meanwhile, CA50 shows the trends of advancing first and retarding then. Low EGR rate promotes NO<sub>x</sub> emission and high EGR rate restrains NO<sub>x</sub> emission. And EGR rate has little impact on Soot.

**Keywords:** Gasoline/Diesel Dual-Fuel Engine, Gasoline/Diesel Ratio, EGR Rate, Injection Timing, Engine Performance

## 汽柴油比例和EGR率对汽柴油双燃料发动机性能影响研究

卢彦群<sup>1,\*</sup>, 赫明月<sup>1,\*</sup>, 李旭聪<sup>2</sup>

<sup>1</sup>河北工程大学, 机械与装备工程学院, 邯郸, 中国

<sup>2</sup>沃宝汽车(中国)有限公司, 北京, 中国

## 邮箱

khy7055@126.com (卢彦群), aheminyue@163.com (赫明月), m\_bigm@tju.edu.cn (李旭聪)

**摘要:** 以一台柴油机为原型机, 增加进气道汽油喷射系统, 实现进气道预混喷射汽油、缸内直接喷射柴油引燃的燃烧模式, 对汽柴油双燃料发动机进行深入的性能研究。研究过程中发现: 1. 汽柴油双燃料发动机缸内燃烧压力和放热率峰值随着汽柴油比例的提升逐渐降低; 2. 油耗在汽柴油比例为65%左右取得最佳值; 3. NO<sub>x</sub>排放和烟度排放均随着汽柴油比例的提升呈现降低趋势, 并且能够取得极低值。所以可以得出结论: EGR率的提升使得汽柴油双燃料发动机缸内燃烧压力和放热率呈现先升高后降低趋势, 同时, CA50具有先提前后推后的趋势。低EGR率促进NO<sub>x</sub>排放的生成, 高EGR率抑制NO<sub>x</sub>排放的生成。EGR率对烟度排放影响甚微。

**关键词:** 汽柴油双燃料, 汽柴油比例, 喷油正时, 发动机性能

1. 前言

飞涨的石油价格和恶化的大气污染推动着发动机向节能减排趋势发展。压燃式内燃机因其高热效率越来越得到广泛关注。但是，传统柴油机内燃机固有的燃烧特Soot和NO<sub>x</sub>排放物，柴油机尾气管加装大量的后处理设备。消除排放物的同时，后处理设备加装会带来油耗的提升和二次能源的消耗。所以，为了发动机效率的最大化，后处理设备必须尽量简化甚至不用。

为了能够在机内净化有害排放物，内燃机专家学者进行了诸多试验和模拟研究。目前，绝大多数内燃机燃烧模式均能够归为预混低温燃烧（LTC）模式。LTC模式其较低的燃烧温度可以抑制NO的生成而减少NO<sub>x</sub>排放物。再者，LTC可以延长燃料滞燃期为燃料与空气混合提供充分的时间形成更为均质的混合气，进而有效降低Soot排放。许多专家推荐HCCI和PCCI燃烧模式，其可以同时降低NO<sub>x</sub>和Soot排放。相比于传统的扩散燃烧，预混的LTC燃烧不仅可以大幅降低NO<sub>x</sub>和Soot排放，同时还可以提升热效率。其热效率提升主要有两条重要因素：①预混LTC燃烧通常在混合气较稀（混合气的稀释通常采用增压进气或者增加EGR率手段）的工况模式和范围内工作。缸内稀混合气燃烧温度会得到有效降低，进而减少传热损失，提升发动机热效率；②发动机热效率还可以通过采用改善着火和燃烧结束正时手段提升。相比于传统扩散燃烧，预混LTC燃烧期受控于化学反应进程而得到有效缩短[1-7]。

预混压缩点燃PCI (Premixed Compression Ignition)燃烧方式能够同时有效降低Soot、NO<sub>x</sub>排放和提升发动机热效率，具有光明的应用前景。然而，若实现上述良好效果，需要密切耦合燃料喷射正时和燃烧相位之间的关系而形成合适的混合气充量。但传统柴油机的燃料喷射策略则不能满足PCI要求，因为PCI燃烧受控于燃料化学反应进程，

对进气温度要求十分苛刻。为了能够在发动机运行全工况范围内满足PCI燃烧要求，可以通过改变缸内燃料化学特性实现。近年来，威斯康辛大学提出RCCI(Reactivity Controlled Compression Ignition)新型燃烧方式，可以通过进气道喷入汽油预混，再通过缸内直接喷入柴油引燃的方式实现预混压缩点燃[8-16]。

本研究以传统柴油机为原型机在进气道加装汽油喷射系统，采用汽油预混柴油扩散燃烧的新型燃烧模式，实现汽柴油双燃料在缸内混合燃烧降低有害排放物的目标。本文主要研究汽柴油比例和EGR率对汽柴油双燃料发动机性能影响，为汽柴油双燃料技术广泛推广和应用提供良好的技术支持。

2. 试验设备与方法

试验原型机其主要技术参数见表1。试验装置系统如图1。

表1 发动机主要技术参数。

参数名称/单位	参数值
排量(L)	1.996
气缸数	4
缸径×冲程(mm)	83.1×92
压缩比	15
额定功率/相应转速(kW/rpm)	110/4000
最大扭矩/相应转速(N·m /rpm)	310/1600~2800
最大缸压(Mpa)	16
最大轨压(bar)	1600

如下图1所示，在原柴油机的基础上增加了一套汽油进气道喷射的供油系统，来形成进气道喷射汽油燃料，缸内喷射柴油燃料的双燃料燃烧模式。双燃料发动机的两种燃料的喷射轨压、喷射正时、喷射持续期以及两种燃料的供给比例均可以灵活调节。

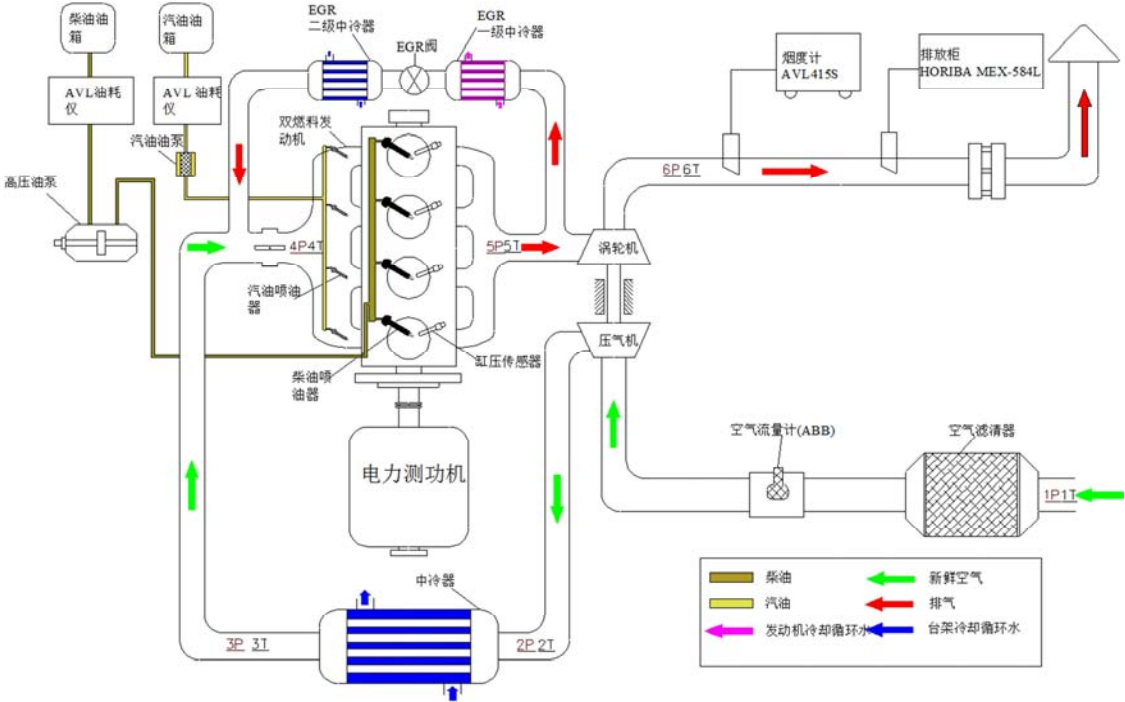


图1 发动机台架示意图。

在此试验研究中,发动机与AVL公司生产的电涡流测功机相连,采用AVL公司生产的AVL GH13P压电式传感器连接AVL 4P3G电荷放大器进行缸内燃烧压力数据的测取;采用AVL燃烧分析仪对测取的燃烧。

数据进行整理分析;采用HORIBA 7500DEGR排放设备对NO<sub>x</sub>, THC (total hydrocarbon) 和CO常规排放物进行检测;采用AVL 415S烟度计对尾气中的PM进行检测;试验中所用汽油为93#牌号,柴油为0#欧五柴油。

本文中所提到的汽柴油比例和油耗消耗率均指以下定义:

$$\text{汽柴油比例} \left( \frac{\text{汽油}}{\text{汽油}+\text{柴油}} \right) = \frac{\text{汽油消耗量}}{\text{汽油消耗量}+\text{柴油消耗量}} \quad (1)$$

$$\text{燃油消耗率 (BFSC)} = \frac{(\text{汽油消耗量}+\text{柴油消耗量}) \times 1000}{\text{功率}} \quad (2)$$

汽柴油双燃料发动机采用进气道喷射汽油和缸内喷射柴油两种供油方式,形成汽油预混柴油引燃的燃烧模式。其中,进气道喷入的汽油,在进气行程中与空气充分混合形成均质混合气;缸内直喷柴油采用预喷和主喷两次喷射,预喷柴油引燃预混汽油做功,主喷柴油弥补汽油燃烧不足的一部分功率。

### 3. 试验结果与分析

#### 3.1. 汽柴油比例对汽柴油双燃料发动机性能影响研究

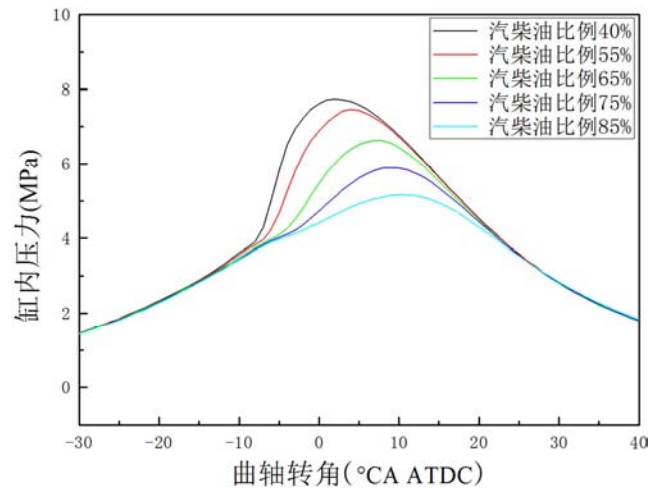
为了研究在不同增压压力下不同汽柴油比例对汽柴油双燃料发动机性能影响,本文以1800rpm\_50Nm工况为例进行试验研究。汽柴油双燃料发动机试验工况具体运行参数见表2。试验中,汽柴油双燃料发动机不引入EGR,柴油喷射轨压固定在500bar,主喷正时为28°CA BTDC。

表2 发动机具体运行参数(1)。

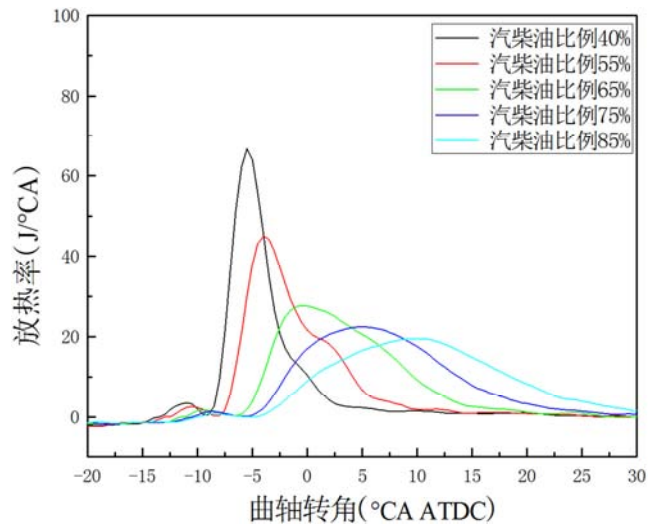
1800rpm_50Nm							
柴油喷油次数	1						
主喷正时	-28°CA ATDC						
轨压	500bar						
EGR率	0						
增压压力 (bar)	1.3	1.2	1.1				
汽柴油比例 (%)	40	55	65	75	85	85	

##### 3.1.1. 汽柴油比例对缸内燃烧特性的影响

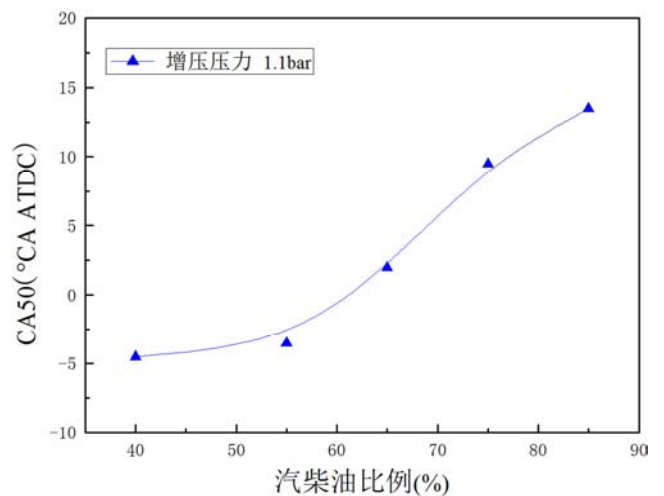
为了探究不同汽柴油比例混合燃料在发动机缸内燃烧特性,本次试验在1800rpm\_50Nm工况点以增压压力1.1bar为例进行了五种汽柴油比例燃料缸内燃烧特性测试试验和分析,如下图2所示。



a) 缸内燃烧压力曲线图



b) 缸内燃烧放热率曲线图



c) 不同汽柴油比例燃烧CA50规律

图2 不同汽柴油比例缸内燃烧特性。



图2为汽柴油比例对汽柴油双燃料发动机缸内燃烧压力、燃烧放热率和CA50的影响。从图中可以看出, 汽柴油双燃料在发动机缸内燃烧的最大压力随着汽柴油比例的增加呈现出逐渐递减的趋势。对于放热率, 汽柴油混合燃料的放热率峰值同样呈现出随着汽柴油比例的增加而降低的趋势, 并且峰值对应的曲轴转角依次后推。同时, 汽柴油混合燃料的放热率峰型随着汽柴油比例的升高由尖而窄的形状逐渐变为低而宽的形状。再者, 汽柴油混合燃料CA50随着汽柴油比例升高呈现单调升高。

汽柴油混合燃料发动机采用进气道喷射汽油预混柴油缸内直喷引燃的燃烧模式。故, 汽柴油双燃料发动机兼有预混燃烧和扩散燃烧二者的燃烧特性。由于汽油低十六烷值的固有物理化学特性, 汽油与空气的混合气并不能在缸内压燃, 而需要柴油引燃着火。故, 汽油预混柴油引燃燃烧模式采用柴油正时和柴油比例来控制燃烧特性。本试验采用柴油单次喷射, 且喷射时刻保持在 $-28^{\circ}\text{CA}$  ATDC固定不变。因此, 柴油比例即汽柴油比例对汽柴油混合燃料的燃烧特性影响很大。随着汽油比例升高即柴油比例降低, 燃料活性降低进而会延长混合燃料滞燃期, 同时会降低混合燃料燃烧速率。如图2所示, 缸内混合气的缸内燃烧压力和放热率最大峰值会随着汽柴油比例的提升而降低。

### 3.1.2. 汽柴油比例对燃油消耗率的影响

图3为汽柴油比例 (G/D ratio) 对汽柴油双燃料发动机燃油消耗率的影响曲线。由图可知, 在不同增压压力工况下, 燃油消耗率随着汽柴油比例的增加呈现先降低后升高的趋势。在相同汽柴油比例工况下, 增压压力越大汽柴油双燃料发动机燃油消耗率越高; 同时, 随着汽柴油比例的增加汽柴油双燃料发动机燃油消耗率呈现单调升高的趋势。

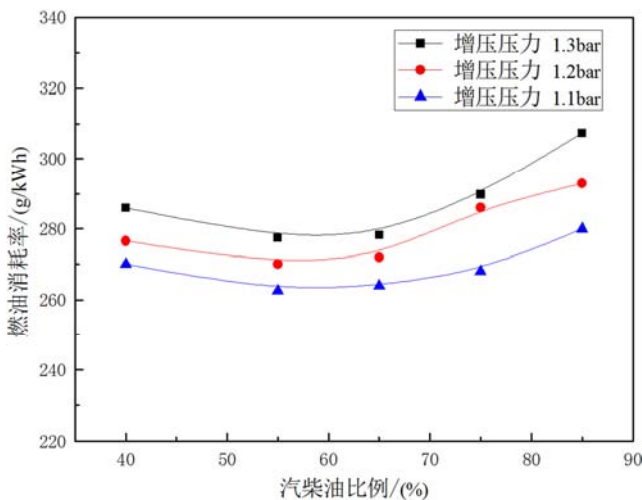


图3 汽柴油比例对燃油消耗率的影响。

在本文试验条件和试验工况下, 增压压力的提升会增加发动机的泵吸损失。因为提高增压压力是通过改变涡轮增压器叶片从而减小废气流通截面积而实现的。因此, 若使增压压力提高, 则发动机排气阻力增加, 必然导致泵气损

失增加。故, 在相同汽柴油比例条件下, 增压压力越大, 汽柴油双燃料发动机的燃耗消耗率越高。

汽柴油双燃料发动机采用汽油预混柴油引燃的燃烧模式。在汽柴油比例较低时, 混合燃料的预混燃烧比例较低会导致一定程度上的燃烧损失。汽柴油比例较大时, 混合燃料中用于引燃的活性物质较少会导致滞燃期延长, 进而燃料在活塞下行期间还继续放热导致此部分燃料燃烧做功能力下降, 而使得油耗消耗率恶化。综合上述因素, 汽柴油双燃料发动机燃油消耗率随着汽柴油比例的升高而呈现出先降低后升高的趋势。

### 3.1.3. 汽柴油比例对排放的影响

为了探究汽柴油比例对汽柴油双燃料发动机排放性能的影响, 本试验分别测试了 $\text{NO}_x$ 、PM、THC和CO常规排放物。试验中, 发动机具体运行参数可见表2。

图4为汽柴油比例对汽柴油双燃料发动机 $\text{NO}_x$ 排放的影响。由图可知, 汽柴油双燃料发动机在三种不同增压压力工况下均呈现随着汽柴油比例的升高而单调降低的趋势。同时, 在汽柴油比例40%~65%之间, 相同汽柴油比例条件下增压压力越大, 汽柴油双燃料发动机 $\text{NO}_x$ 排放越高。至于在汽柴油比例65%~85%之间, 由于 $\text{NO}_x$ 排放数值很小, 增压压力对其影响甚微。

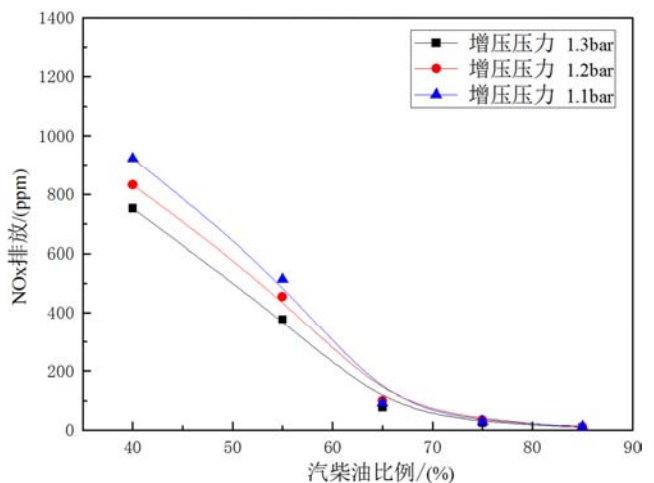


图4 汽柴油比例对 $\text{NO}_x$ 排放的影响。

在发动机排放的 $\text{NO}_x$ 中占压倒多数的是NO, 其主要来源是参与燃烧的空气中的氮。空气中的氮生成NO的化学机理是扩展的泽尔多维奇机理。NO的生成随温度的提高而呈指数函数急剧增加。当温度低于1800K时, NO的生成速率极低; 到2000K就达到很高的速率。故发动机气缸内所达到的最高燃烧温度为影响 $\text{NO}_x$ 生成量的最重要因素。汽柴油双燃料发动机采用汽油预混柴油引燃的燃烧模式。随着汽柴油比例的升高, 做为引燃燃料的柴油比例逐渐降低, 推迟了缸内混合气的燃烧相位进而降低了缸内温度。故, 随着汽柴油比例的升高, 汽柴油双燃料发动机的 $\text{NO}_x$ 排放单调降低。在相同汽柴油比例条件下, 随着增压压力的升高, 发动机的排气背压会升高, 进而导致发动机缸内废气残留量越高。较高的残余废气能够起到内部EGR

作用,有效抑制NO<sub>x</sub>排放的生成。故,相同汽柴油比例条件下,增压压力越高,NO<sub>x</sub>排放越低。

图5为汽柴油比例对汽柴油双燃料发动机Soot排放的影响。由图可知,随着汽柴油比例的提升,汽柴油双燃料

发动机Soot排放呈现单调递减趋势,在汽柴油比例85%时接近于零排放。同时,在汽柴油比例40%~65%区间,汽柴油双燃料发动机增压压力越大,Soot排放越高。

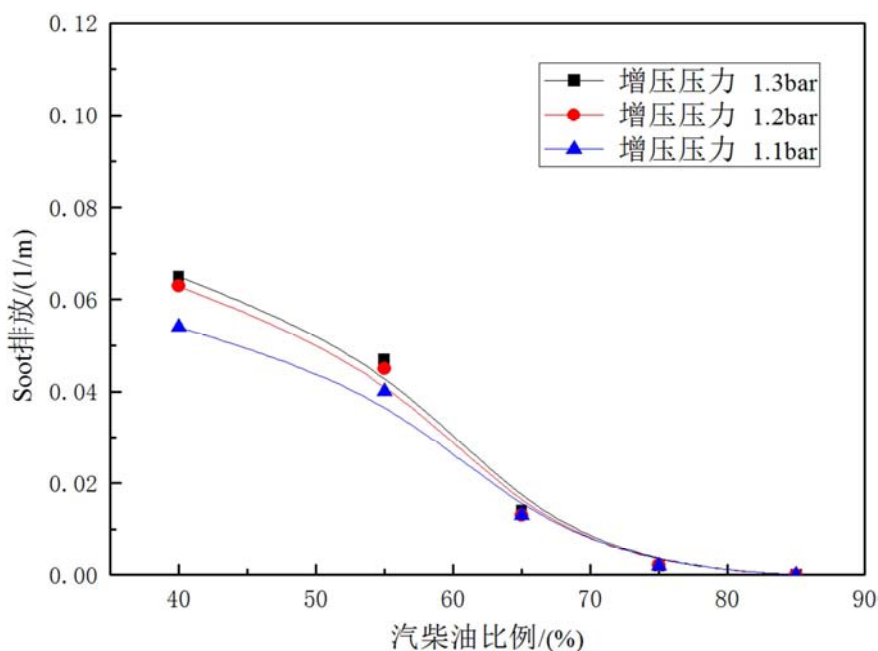


图5 汽柴油比例对Soot排放的影响。

发动机Soot排放主要由燃料中含有的碳产生,其生成条件是高温缺氧。虽然汽柴油双燃料发动机总体是富氧燃烧,但是喷入缸内的柴油因其扩散燃烧局部缺氧还是会导致Soot的生成。正如上文所述,汽柴油双燃料发动机采用汽油预混柴油引燃的新型燃烧模式。随着汽柴油比例的升高,预混汽油比例增加,缸内混合气混合更加均匀,有效降低Soot排放物的产生。故,随着汽柴油比例的升高,Soot排放呈现单调降低的趋势。如上文所述,汽柴油双燃料发

动机增压压力提升会造成排气背压升高而提升缸内废气残余量。缸内废气残余量的存在导致缸内燃料缺氧而生成较多的Soot排放。

图6和7分别为汽柴油比例对THC排放和CO排放的影响。如图所示,汽柴油双燃料发动机THC排放和CO排放均远高于传统纯柴油机。同时,THC排放和CO排放均随着汽柴油比例的升高而呈现单调升高的趋势。

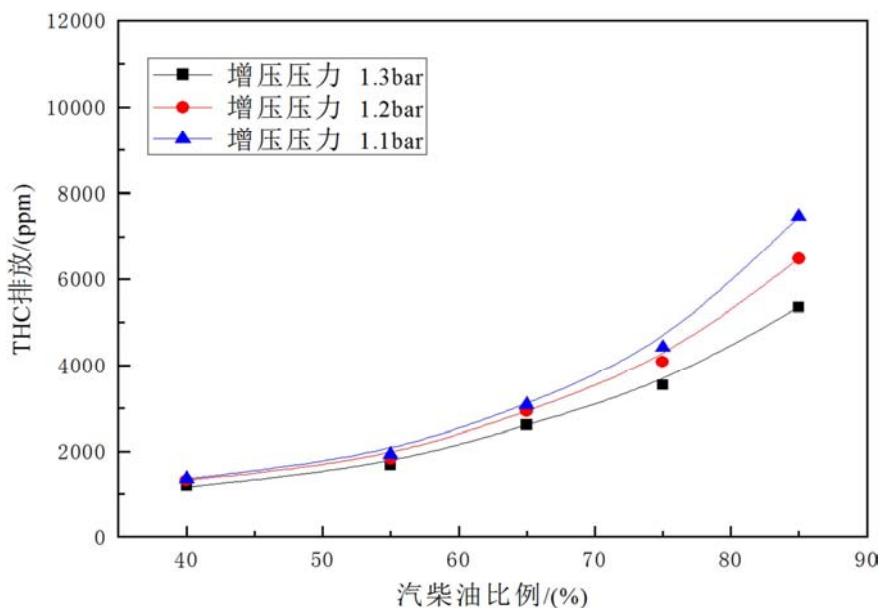


图6 汽柴油比例对THC排放的影响。

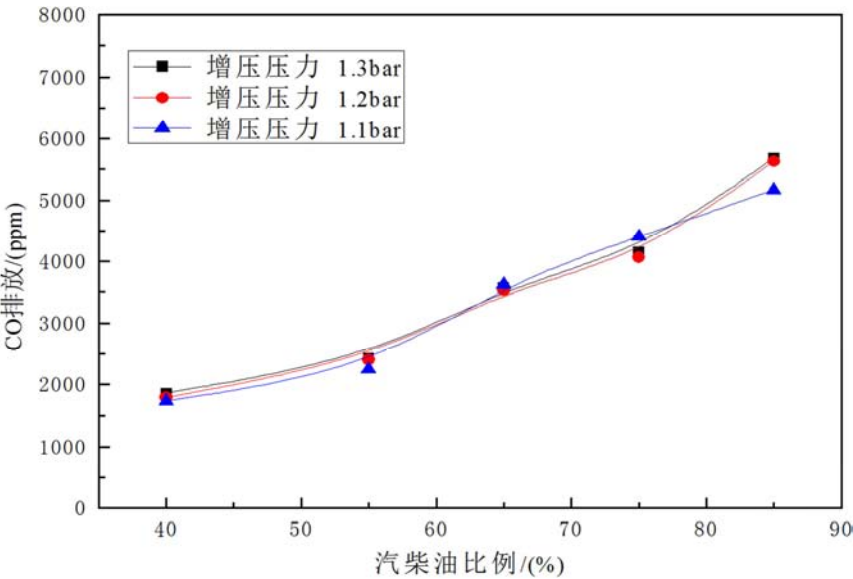


图7 汽柴油比例对CO排放的影响。

正如上文所示，汽柴油双燃料发动机采用进气道喷射汽油预混缸内直喷柴油引燃新型燃烧模式。进气道喷入的汽油有足够时间在缸内与空气形成均质混合气，并且进入缸内各种罅隙中。故，汽柴油双燃料发动机THC排放和CO排放远高于传统纯柴油机，并且随着汽柴油比例的升高而呈现单调升高的趋势。

3.2. EGR率对汽柴油双燃料发动机性能影响

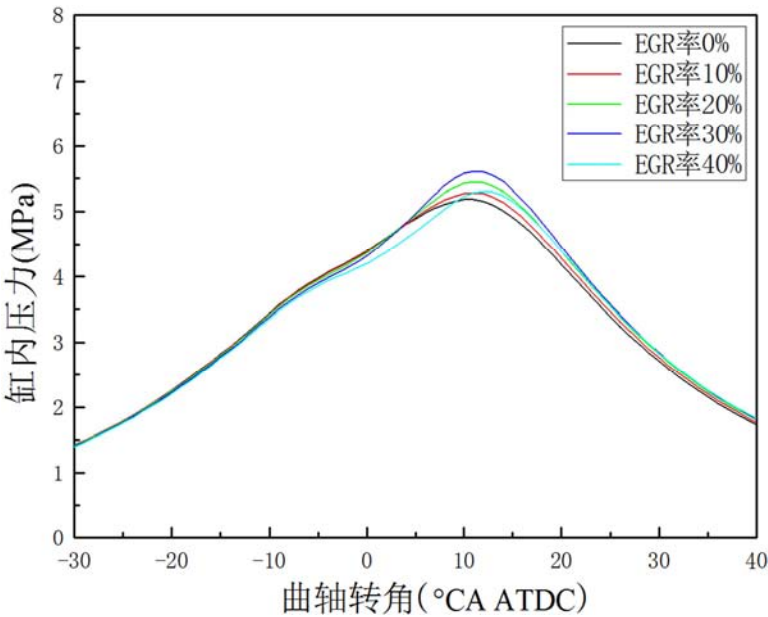
为了探究在三种不同增压压力下EGR率对汽柴油双燃料发动机性能的影响，本试验以1800rpm\_50Nm工况点为例进行研究。汽柴油双燃料发动机试验工况具体运行参数可见附表3。试验中，汽柴油双燃料发动机汽柴油比例固定为75%，柴油喷射轨压固定在500bar，增压压力为1.1bar。

表3 发动机具体运行参数(2)。

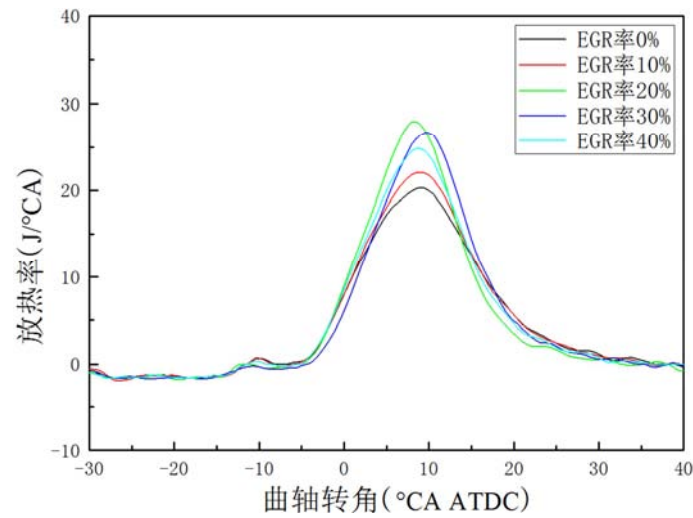
柴油喷射次数	1				
轨压	500bar				
增压压力	1.1bar				
汽柴油比例	75%				
主喷正时	23°CA BTDC	28°CA BTDC	33°CA BTDC		
EGR率	0	10%	20%	30%	40%

3.2.1. EGR率对缸内燃烧特性的影响

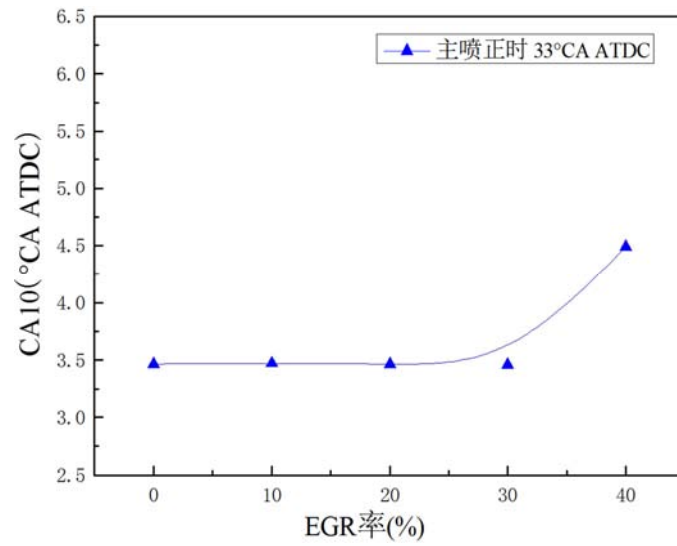
为了研究不同EGR率对汽柴油双燃料发动机缸内燃烧特性的影响，本次试验在1800rpm\_50Nm工况点以主喷正时33°CA BTDC为例选取五种不同EGR率进行详细的试验研究。如图8所示，不同EGR率对汽柴油双燃料发动机缸内燃烧特性的影响。由图可知，随着EGR率的增加，汽柴油双燃料发动机缸内燃烧压力峰值出现先增加后降低的趋势。



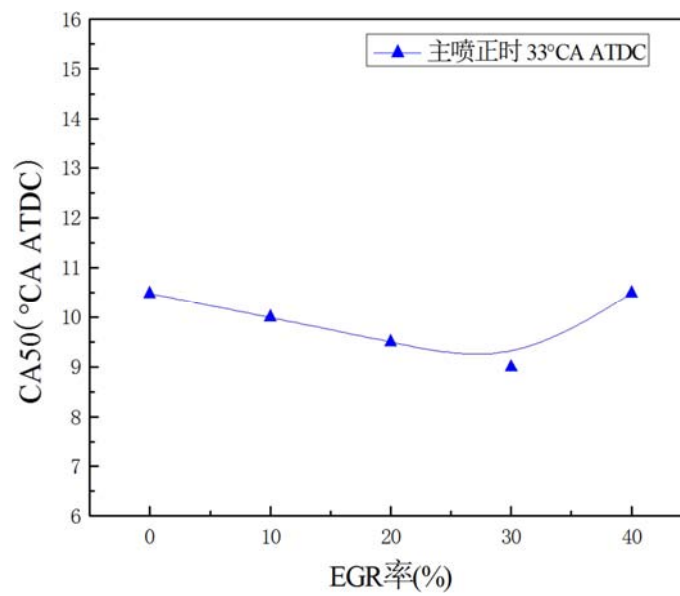
a) 缸内燃烧压力曲线图



b) 缸内燃烧放热率曲线图



c) 不同EGR率燃烧CA10规律



d) 不同EGR率燃烧CA50规律

图8 不同EGR率的缸内燃烧特性。

同时，随着EGR率增加，放热率峰值变化趋势也呈现出先升高后降低的趋势。不同EGR率下，CA10逐渐后推，CA50呈现先提前后推后的趋势。

本试验 1800rpm\_80Nm 工况点为例进行研究。1800rpm\_80Nm 工况点属于低速小负荷工况点。EGR对缸内燃烧有促进和抑制两方面的影响因素：一方面，小EGR率可以有效提升进气温度，进而提高缸内压缩终了温度，提高燃烧速度起到促燃作用。另一方面，大EGR率稀释缸内燃料和空气混合气，同时降低缸内燃烧温度，抑制缸内燃料混合气的燃烧即抑制燃烧。在本试验中，EGR率区间为0~40%，故上述两种因素兼而有之。EGR率在0~20%区

间起到促燃作用，随之增加缸内燃烧压力峰值和放热率峰值均增加，且CA50依次提前。EGR率在30%~40%区间起到抑制燃烧的作用，故缸内燃烧压力峰值和放热率峰值开始下降，并且CA50推后。

3.2.2. EGR率对燃油消耗率的影响

图9为EGR率对汽柴油双燃料发动机燃油消耗率的影响。如图所示，EGR率在0~40%区间，汽柴油双燃料发动机燃油消耗率呈现出先下降再略有上升的趋势。同时，在相同EGR率条件下，主喷正时越提前，其燃油消耗率越高。

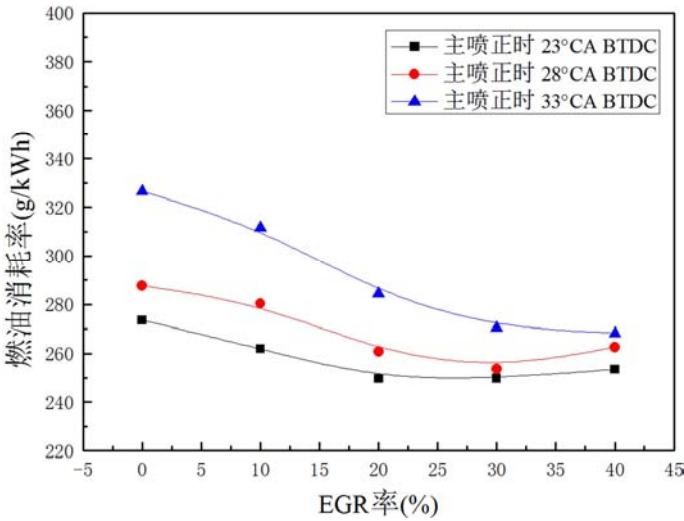


图9 不同EGR率的燃油消耗率。

正如前文缸内燃烧特性分析，在1800rpm\_50Nm 工况EGR率对缸内混合气的燃烧有促进和抑制两方面的影响。在低EGR率区间，EGR率的增加能够提升缸内混合气进而促进缸内燃烧提升燃料燃烧效率，减低双燃料发动机的燃油消耗率；而在高EGR率区间，EGR率的增加会稀释缸内燃料与空气的混合气而降低缸内混合气的燃烧效率，增加双燃料发动机的燃油消耗率。

3.2.3. EGR率对排放性能的影响

为探究EGR率对汽柴油双燃料发动机排放性能的影响，本文在1800rpm\_50Nm 工况对汽柴油双燃料发动机的NO<sub>x</sub>、烟度、THC和CO常规排放物进行测试与分析。

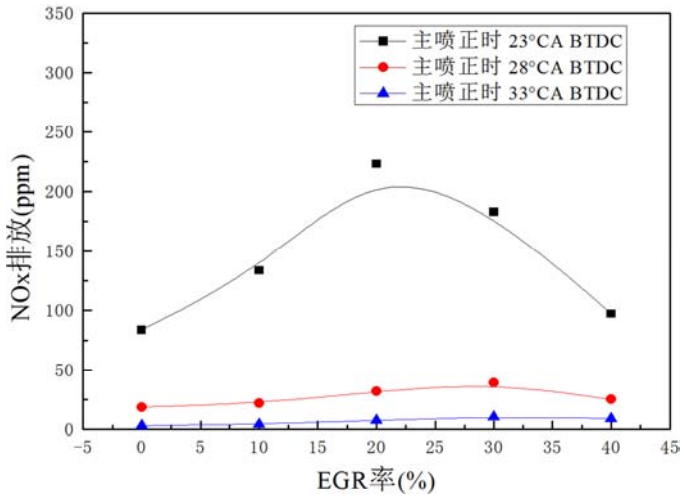


图10 EGR率对NO<sub>x</sub>排放的影响。



图10为汽柴油双燃料发动机EGR率对NO<sub>x</sub>排放性能的影响曲线图。如图所示, NO<sub>x</sub>排放随着EGR率的增加呈现出先升高后降低的变化趋势。同时, 相同EGR率, 三种不同柴油主喷正时23°CA BTDC、28°CA BTDC和33°CA BTDC工况下, 主喷正时越推后则NO<sub>x</sub>排放越高。

如前文2.1.3部分所述, 缸内燃烧温度对NO<sub>x</sub>排放影响明显。故, 汽柴油双燃料发动机缸内EGR率的变化会影响NO<sub>x</sub>排放特性。在低EGR率区间0~20%, EGR率的增加会提升活塞压缩终了温度, 进而提升缸内燃烧温度, 有利于NO<sub>x</sub>排放物的生成; 在高EGR率区间20%~30%, EGR率的进一步提升, 缸内氧气含量降低而抑制缸内温度, 进而有效抑制NO<sub>x</sub>排放的生成。因此, 随着EGR率的提升, NO<sub>x</sub>排放呈现出先升高后降低的趋势。对于相同EGR率工况, 柴油主喷正时提前会提升喷入缸内的柴油与空气的混合均匀度, 有效抑制由于局部混合气不均的过高温而降低NO<sub>x</sub>排放物生成。

图11为EGR率对汽柴油双燃料发动机烟度排放的影响。如图所示, 直喷柴油主喷正时23°CA BTDC、28°CA BTDC和33°CA BTDC工况下, 汽柴油双燃料发动机烟度均保持极低水平。对于相同EGR率, 柴油主喷正时越提前, 其烟度排放水平越低。

烟度的生成主要是由于燃料和空气混合不均导致。汽柴油双燃料发动机采用汽油预混柴油引燃的燃烧模式, 并且在此工况下预混燃烧的汽油占总燃料量的75%, 故发动机燃料与空气混合均匀, 进而烟度排放水平低。

其中, 烟度的生成主要是由于柴油扩散燃烧导致。故柴油主喷正时提前, 形成更为均质混合气, 进而降低烟度排放。因此, 在相同EGR率工况下, 柴油主喷正时33°CA BTDC时的烟度最低。

汽柴油双燃料发动机由于其采用进气道汽油预混缸内直喷柴油扩散新型燃烧模式, 故THC排放和CO排放具有传统汽油机的特性。对于传统柴油机, THC排放和CO排放数值高出许多, 如下图12和13所示。

汽柴油双燃料发动机汽油燃料在进气行程中采用进气道喷射方式, 其进入缸内与空气混合时间充分形成均质混合气。均质混合气在缸内存在时间长, 其会进入的缸内罅隙中不能够燃烧或燃烧不完全而增加THC排放和CO排放。因汽柴油双燃料发动机采用的是柴油引燃的点燃方式, 故柴油主喷正时越提前, THC排放和CO排放越高。

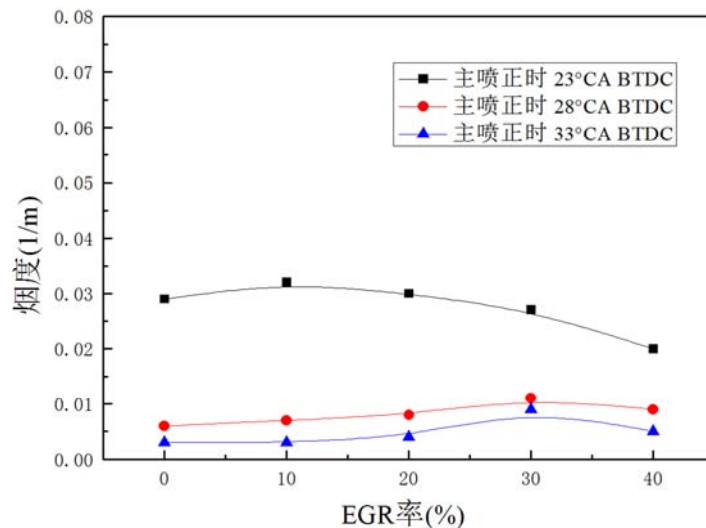


图11 EGR率对烟度的影响。

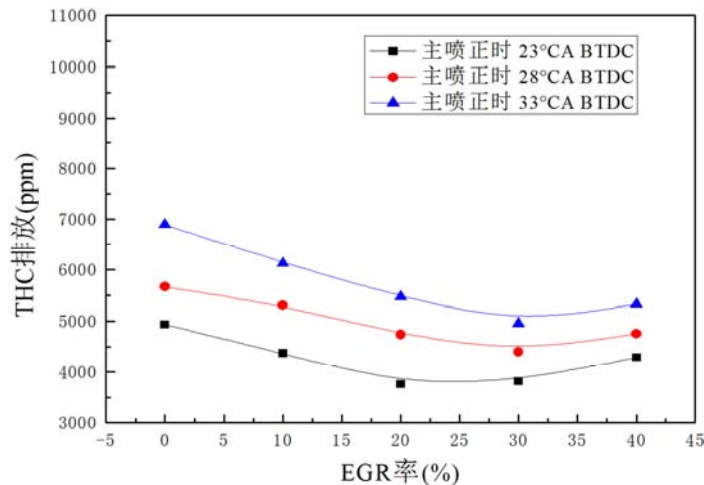


图12 EGR率对THC排放的影响。

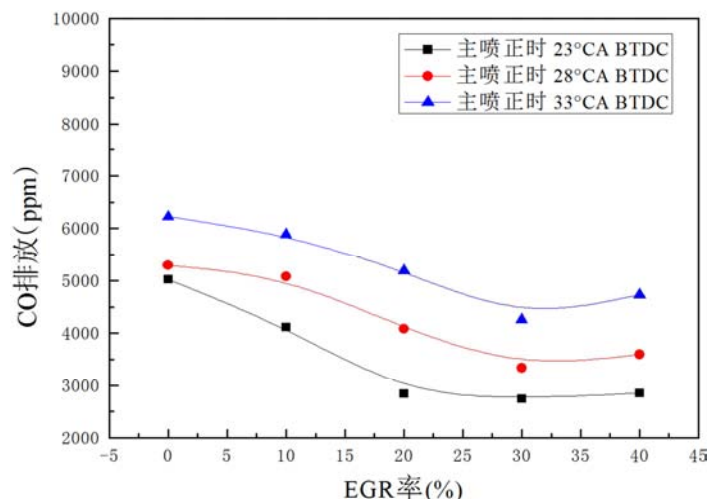


图13 EGR率对CO排放的影响。

#### 4. 结论

在本文研究条件,通过研究汽柴油比例和EGR率对汽柴油双燃料发动机性能的影响,得出以下结论:

在1800rpm\_50Nm工况点,增压压力保持在1.1bar,汽柴油双燃料发动机缸内燃烧压力和燃烧放热率峰值均随着汽柴油比例的提升而呈现逐渐降低。CA50随汽柴油比例的增加而逐渐推后。油耗呈现出先降低后升高趋势;

汽柴油比例的提升能够同时降低NO<sub>x</sub>排放和Soot排放。然而,相对于柴油机,汽油的存在使得汽柴油双燃料发动机THC排放和CO排放大幅升高。同时,随着汽柴油比例的增加,THC排放和CO排放呈现单调升高趋势;

EGR率的提升使得汽柴油双燃料发动机缸内燃烧压力和放热率峰值呈现出先升高后降低趋势,CA50呈现先降低后升高的趋势;油耗呈现逐渐降低趋势。

汽柴油双燃料发动机NO<sub>x</sub>排放随着EGR率的提升呈现出先降低后升高的趋势;烟度受EGR率的影响并不大,能够保持在较低水平;THC排放和CO排放排放较高。

#### 基金项目

河北省科技厅大智移云应用专项-圆锥滚子轴承双层复合智能化生产线研发(18211832D)。

#### 参考文献

- [1] Lu X, Qian Y, Yang Z, et al. Experimental study on compound HCCI (homogenous charge compression ignition) combustion fueled with gasoline and diesel blends[J]. Energy, 2014, 64(1):707-718.
- [2] Cheikh K, Sary A, Khaled L, et al. Experimental assessment of performance and emissions maps for biodiesel fueled compression ignition engine.[J]. Applied Energy, 2016, 161(5-6):320-329.
- [3] Kumar B R, Saravanan S. Partially premixed low temperature combustion using dimethyl carbonate (DMC) in a DI diesel engine for favorable smoke/NO<sub>x</sub> emissions[J]. Fuel, 2016, 180:396-406.
- [4] 刘斌、苏万华、王辉等。调制多脉冲喷油模式放热特征和能量分布及其对热效率和排放的影响[J]。内燃机学报, 2006,(24) 5:385-393。
- [5] 黄豪中、苏万华、裴毅强等。MULINBUMP复合燃烧系统多次脉冲喷油控制参数的优化研究 II: 5次脉冲喷油控制参数的优化[J]。内燃机学报, 2009, (27)4:289-297。
- [6] Mei D, Shan Y, Zhao X, et al. Effects of center of heat release on combustion and emissions in a PCCI diesel engine fuelled by DMC-diesel blend[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 114:969-976.
- [7] Ingesson G, Yin L, Johansson R, et al. A Double-Injection Control Strategy For Partially Premixed Combustion[J]. Ifac Papersonline, 2016, 49(11):353-360.
- [8] Torregrosa A J, Broatch A, García A, et al. Sensitivity of combustion noise and NO<sub>x</sub> and soot emissions to pilot injection in PCCI Diesel engines[J]. Applied Energy, 2013, 104(4):149-157.
- [9] Lee J, Chu S, Kang J, et al. Operating strategy for gasoline/diesel dual-fuel premixed compression ignition in a light-duty diesel engine[J]. International Journal of Automotive Technology, 2017, 18(6):943-950.
- [10] Zhang J, Li Z, Zhang K, et al. An experiment study of homogeneous charge compression ignition combustion and emission in a gasoline engine[J]. Thermal Science, 2014, 18(1):295-306.
- [11] Zheng M, Han X, Asad U, et al. Investigation of butanol-fuelled HCCI combustion on a high efficiency diesel engine[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 98:215-224.
- [12] Salarifard, Amir. A Numerical Investigation on Ignition Characteristics of n-Heptane/Methane in Homogenous Systems and HCCI[J]. Clinical Pediatrics, 2015, 49(6):560-568.

- [13] Min X, Yong G, Yi C, et al. Effects of injection pressure, exhaust gas recirculation and intake pressure on the cycle-to-cycle variations of HCCI combustion[J]. Journal of the Energy Institute, 2016, 89(2):293-301.
- [14] Veloo P S, Wang Y L, Egolfopoulos F N, et al. A comparative experimental and computational study of methanol, ethanol, and n-butanol flames[J]. Combustion and Flame, 2010, 157(10):1989-2004.
- [15] Jafarmadar S, Nemati P. Exergy analysis of diesel/biodiesel combustion in a homogenous charge compression ignition (HCCI) engine using three-dimensional model[J]. Renewable Energy, 2016, 99:514-523.
- [16] Maurya R K, Agarwal A K. Statistical analysis of the cyclic variations of heat release parameters in HCCI combustion of methanol and gasoline[J]. Applied Energy, 2012, 89(1):228-236.

## 作者简介



**卢彦群**，男，教授，硕士，出版专著5部，发表论文30余篇；主要从事车辆工程及其应用技术研究。



**赫明月**，男，讲师，博士，主要从事车辆发动机及其节能技术研究。