

# 预燃室湍流射流点火增压直喷发动机稀薄燃烧试验研究

赵校伟, 孙跃东, 张振东, 尹丛勃, 秦文瑾  
(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

## Experimental Study on Lean Combustion of Pre-Chamber Turbulent Jet Ignition Gasoline Direct Injection Engine

ZHAO Xiaowei, SUN Yuedong, ZHANG Zhendong, YIN Congbo, QIN Wenjin

(College of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Based on high-compression-ratio four-cylinder turbo-charged gasoline-direct-injection (GDI) engine and pre-chamber turbulent jet ignition (TJI) system, experimental study of lean combustion characteristics under low and medium loads was carried out. The results show that the combustion stability of TJI has obvious load boundary. Under light load of indicated mean effective pressure (IMEP) 0.4 MPa the cylinder pressure and peak transient heat release rate of TJI decrease significantly and the ignition delay is long compared with conventional spark ignition (SI). The coefficient of variation (COV) is deteriorated to 5% at IMEP 0.7 MPa. The combustion boundary and indicated fuel consumption and emission of TJI is close to SI at IMEP 1.1 MPa. With increasing of load during light and medium load, the ignition delay is shortened, 50% mass fraction burn crank angle (CA50) is moving forward, the combustion stability is improved, and emissions of total hydrocarbon (THC) and CO are reduced. For TJI application, high-energy ignition is benefit for shortening the ignition delay period, accelerating combustion process, and improving the combustion stability and emission performance.

**摘要:** 基于一台高压缩比四缸增压直喷(gasoline direct injection, GDI)发动机和预燃室湍流射流点火(turbulent jet ignition, TJI)系统,开展中低负荷稀燃特性试验研究。研究结果表明:预燃室射流点火的燃烧稳定性存在着明显的负荷边界;在平均指示压力(indicated mean effective pressure, IMEP)为 0.4 MPa 的低负荷,预燃室射流点火的缸压和瞬时放热率峰值较常规火花点火(spark ignition, SI)下降明显,峰值相位后移,滞燃期长;在平均指示压力为 0.7 MPa 时其平均指示压力循环波动率(coefficient of variation, COV)达 5%;在平均指示压力为 1.1 MPa 的最佳指示燃油消耗率工况,预燃室射流点火的稀燃边界、指示燃油消耗率、排放等可以达到和常规火花点火相当的水平。中低负荷下,随着负荷增加,预燃室射流点火的滞燃期缩短,燃烧重心提前,燃烧稳定性改善,全碳氢(total hydrocarbon, THC)和 CO 排放降低。高能点火可以缩短预燃室射流点火的滞燃期,加快燃烧速度,提高燃烧稳定性,改善排放。

**关键词:** 预燃室;湍流射流点火;高能点火;稀燃;热效率

**Key words:** pre-chamber; turbulent jet ignition; high-energy ignition; lean combustion; thermal efficiency

收稿日期: 2024-08-21

修回日期: 2024-09-23

基金项目: 上海市科技计划项目(21010503000)

Foundation Item: Shanghai Science and Technology Plan Project (21010503000)

作者简介: 赵校伟(1980—),男,博士生,主要研究方向为车辆电控系统开发及应用, E-mail: zhaoxw07@163.com;

孙跃东(通信作者), E-mail: syd@usst.edu.cn。

DOI: 10.13949/j.cnki.njgc.2025.02.006

中图分类号: TK411<sup>+</sup>.24

## 0 概述

历经百余年发展,内燃机已成为推动人类社会文明进步的强大动力,但也伴随着严峻的能源和环境问题。实现内燃机高效清洁燃烧已成为内燃机科技工作者关注的热点问题之一。作为乘用车用主要动力源之一的汽油机采用均质混合气,可最大限度发挥三元催化转化器的效率,改善排放。但不足之处有:空燃比范围狭窄,低负荷时的燃油经济性较差,浓混合气燃烧时容易爆燃,热效率低,油耗高,排气污染严重。基于分层混合气的稀薄燃烧可突破传统汽油机空燃比燃烧边界,实现低温燃烧,能够提高汽油机热效率,减少 $\text{NO}_x$ 排放,而且在深度稀燃时这些优势会更加明显<sup>[1]</sup>。与此同时,稀薄燃烧会减缓着火和燃烧过程,过低的着火速度会使燃烧相位大幅推迟,增加平均指示压力循环波动率。研究表明,实现缸内稀薄燃烧需要高的点火能量和较长的点火持续时间<sup>[2]</sup>。在目前已经开发出来的稀燃汽油机上,燃烧不稳定和三元催化剂不兼容是两大主要问题<sup>[3-4]</sup>。近年来,针对稀燃条件下采用传统火花点火汽油机难以实现高质量稳定燃烧的问题<sup>[5]</sup>,已开发出许多新的点火技术,如预燃室射流点火<sup>[6-10]</sup>和高能点火。

预燃室湍流射流点火可大幅度提高点火能量,将汽油机点火方式从单点火源点火模式拓展到多点火源的空间点火模式。高能点火通常通过提高点火线圈的次级放电电流和延长放电时间两种方式实现。

国内方面,文献[11-16]中研究表明,在中等及以上负荷工况尤其是外特性工况下,湍流射流点火(turbulent jet ignition, TJI)的使用可有效拓展发动机的稀燃极限,滞燃期和燃烧持续期均更短,放热率更高,燃油经济性有一定提升。文献[17]中的研究表明,TJI和火花点火(spark ignition, SI)发动机的压力振荡存在明显差异,TJI发动机的压力振荡产生于燃烧初期,且持续时间较长,这主要与射流发展及多点点火有关。

文献[18]中研究理论空燃比条件下中低负荷在内的转速负荷特性,结果表明预燃室射流点火在低负荷时燃烧相位不变而指示燃油消耗率略微上升。文献[19]中研究了高能点火和被动预燃室对汽油机燃烧和排放的影响,结果表明高能点火的被动预燃室可以将稀燃极限由1.4小幅拓宽至1.5~1.6之间。文献[20]中采用快速压缩机(rapid compression machine, RCM)进行了点火燃烧试验研究,研究表明在高负荷工况下,预燃室式射流点火方式的点火稳

定性和燃烧稳定性优于传统点火。文献[21]中对一台被动预燃室增压直喷汽油机的燃烧过程进行了三维数值模拟分析,研究工况为转速2000 r/min,平均指示有效压力1.2 MPa。研究表明,预燃室射流点火优于常规火花塞点火的重要原因是主燃烧室内着火点增多,同时点火后预燃室内产生的高速冲击射流会提升主燃室内的湍流强度,从而加快湍流火焰的传播。

目前已有关于预燃室射流点火的研究,尤其是被动预燃室研究主要针对中等及以上负荷工况,而针对平均指示压力低于0.5 MPa及理论空燃比条件下的中低负荷工况的研究涉及较少;在被动预燃室射流点火研究中,所用的发动机在常规火花点火条件下到达稀燃极限时的 $\lambda$ 普遍在1.4~1.6。在稀燃极限1.6及以上的发动机上进行中低负荷工况被动预燃室射流点火的研究尚不完善。因此,为全面认识稀燃条件下被动预燃室射流点火对发动机的影响,在基础稀燃极限即过量空气系数 $\lambda$ 更大的发动机上进行中低负荷稀燃特性研究具有现实意义。

## 1 试验装置及研究方法

### 1.1 试验装置

试验搭建的多缸机测试平台由发动机、预燃室火花塞、台架测控系统组成。试验所采用的发动机为4缸水冷式增压直喷发动机,其主要技术参数如表1所示。

表1 发动机主要技术参数

Table 1 Key parameters of the experimental engine

项目	参数
气缸数量	4
缸径/mm	72
行程/mm	92
压缩比	15.5
排量/L	1.5
每缸气门数量	4

预燃室火花塞为被动式6孔结构,其主要技术参数如表2所示。

台架测控系统的主要仪器设备如表3所示,发动机台架布置示意图如图1所示。

### 1.2 试验方案

本文试验研究工况见表4。其中转速2400 r/min、平均指示压力(indicated mean effective pressure, IMEP)1.1 MPa、过量空气系数1.6为发动机最低指示燃油消耗率工况。

表 2 预燃室火花塞主要技术参数

Table 2 Structural characteristics of TJI spark plugs

项目	参数
预燃室型式	被动式
喷孔数量	6
孔径/mm	1.2
预燃室容积与主燃室容积之比/%	2.85
预燃室孔总面积与容积之比/ $\text{cm}^{-1}$	0.092
喷孔锥角/ $^{\circ}$	60
侧电极数量/个	2
预燃室和缸盖的密封方式	平垫片密封

表 3 台架测控系统主要仪器及型号

Table 3 Experimental measurement equipment specification

仪器名称	型号
测功机	AC 交流异步测功机 202/12
测控系统	AVL PUMA
进气模拟增压系统	AVL 515
油水恒温控制系统	AVL 577
燃烧分析仪	AVL INDICOM
角标仪	AVL 365C
缸压传感器	KISTLER 6052CU20
油耗仪	AVL 735
气体排放物分析仪	HORIBA MEXA-7100

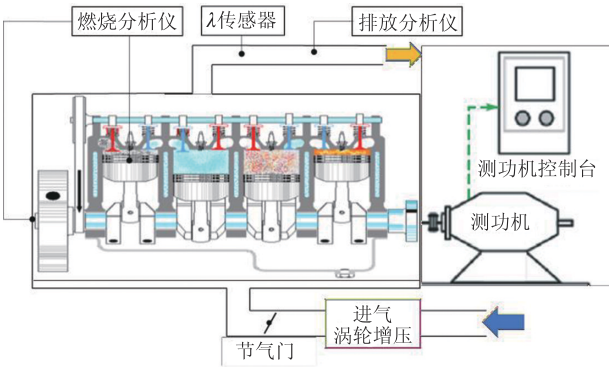


图 1 发动机台架布置示意图  
Figure 1 Experimental test bench layout

表 4 试验研究工况

Table 4 Experimental study conditions

IMEP/MPa	过量空气系数 $\lambda$
0.4	1.0、1.6、1.8
0.7	1.0、1.6、1.8
1.1	1.0、1.6、1.7、1.8

试验首先以 SI 点火模式作为基础,进行不同 IMEP、不同过量空气系数的稀燃研究。在此基础上,更换为预燃室火花塞,进行 TJI 方式的稀燃研究。最后,进行 TJI 协同高能点火的稀燃研究。

试验控制边界:中冷后进气温度  $45\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,冷却水温度  $85\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,平均指示压力循环波动率(coefficient of variation, COV)为 5%。为定量对比燃烧特性,定义从火花塞点火时刻(spark angle, SA)到燃料燃烧 10% 所对应的曲轴转角(10% mass fraction burn crank angle, CA10)为滞燃期;定义从火花塞点火时刻到燃料燃烧 50% 所对应的曲轴转角(CA50)为燃烧重心。

试验中各个工况点火提前角按照最优点火提前角选取。过量空气系数为 1 时,即理论空燃比条件下,最佳点火提前角对应的 CA50 为  $6^{\circ}\sim 8^{\circ}$ 。对于过量空气系数大于 1 的稀燃工况,点火提前角越大,最佳点火提前角对应的 CA50 越靠前,则发动机指示燃油消耗率越低。点火提前角的调整边界为爆震。定义压缩上止点对应的曲轴转角度数为  $0^{\circ}$ ,压缩上止点前曲轴转角度数为负数,压缩上止点后曲轴转角度数为正数。

发动机各缸布置有独立的缸压传感器安装通道,当发动机火花塞孔装配预燃室火花塞之后,仍可用缸压传感进行缸内燃烧数据采集。

为改善低负荷下的燃烧稳定性,试验前对可变气门正时(variable valve timing, VVT)相位、喷油次数、喷油相位等进行了优化。

2 结果与讨论

2.1 预燃室射流点火稀薄燃烧过程

基于  $2\text{ }400\text{ r/min}$ 、IMEP  $0.4\text{ MPa}$ 、过量空气系数 1.6 这一工况,研究低负荷下预燃室射流点火 TJI 与常规火花点火 SI 的稀薄燃烧过程。

低负荷稀燃条件下,TJI 和 SI 的缸压曲线对比如图 2 所示。由图 2 可知,TJI 相对于 SI 的缸压峰值从  $4.16\text{ MPa}$  下降至  $2.77\text{ MPa}$ ,降幅超 30%,峰值缸压对应的曲轴角度推迟了  $6.5^{\circ}$ 。

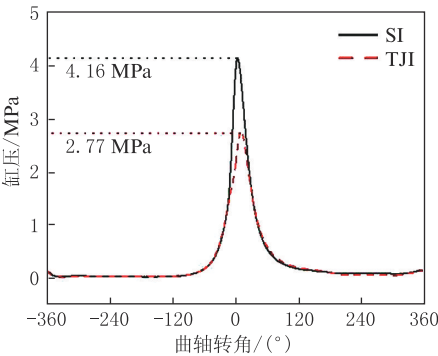


图 2 IMEP  $0.4\text{ MPa}$  下稀燃缸压对比( $\lambda=1.6$ )  
Figure 2 Cylinder pressures of lean combustion under IMEP  $0.4\text{ MPa}$ ( $\lambda=1.6$ )

图3为TJI和SI的放热率对比。从累计放热率来看,TJI的滞燃期相对于SI明显加长,燃烧重心也大幅推迟,从 $0^\circ$ 推迟到 $17^\circ$ 。瞬时放热率方面,低负荷下TJI的瞬时放热率峰值下降了26%,峰值对应的曲轴相位推迟了 $9^\circ$ 。

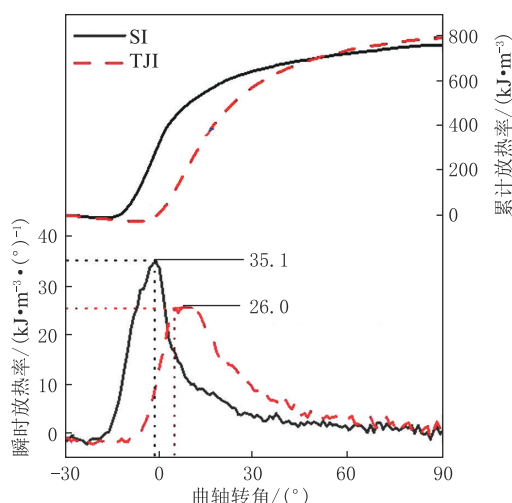


图3 IMEP 0.4 MPa下稀燃放热率对比( $\lambda=1.6$ )

Figure 3 Heat release rates of lean combustion under IMEP 0.4 MPa( $\lambda=1.6$ )

综合图2和图3可知,在低负荷稀燃工况下,预燃室射流点火TJI的缸压峰值和瞬时放热率峰值下降明显,峰值相位后移,滞燃期长,燃烧重心推迟。这是预燃室射流点火TJI在低负荷下的稀薄燃烧特征。表明在低负荷下,预燃室射流点火TJI相对于常规火花点火SI存在不足。分析认为造成这种结果的主要原因是:低负荷工况下,被动预燃室内的残余废气无法扫除干净,点火时刻预燃室内的可燃混合气质量较差,导致燃烧不稳定,缸压峰值下降,燃烧相位后移。

## 2.2 不同负荷的稀燃特性

基于2400 r/min、过量空气系数1.6,研究不同负荷下预燃室射流点火TJI与常规火花点火SI的稀燃特性,结果如图4所示。图中THC为全碳氢(total hydrocarbon)排放。下文从燃烧、油耗、排放三个方面,就预燃室射流点火自身、预燃室点火与常规点火的差异进行分析说明。

随着进气歧管压力上升,发动机负荷升高,在发动机负荷IMEP高于0.7 MPa以后,涡轮增压器介入,发动机进入增压模式,可燃混合气着火条件改善,预燃室射流点火的滞燃期减小。

从预燃室射流点火和常规点火比较来看,预燃室由于和主燃室之间存在着物理隔离,在预燃室内的可燃混合气点火燃烧后,高温高压的射流火焰传

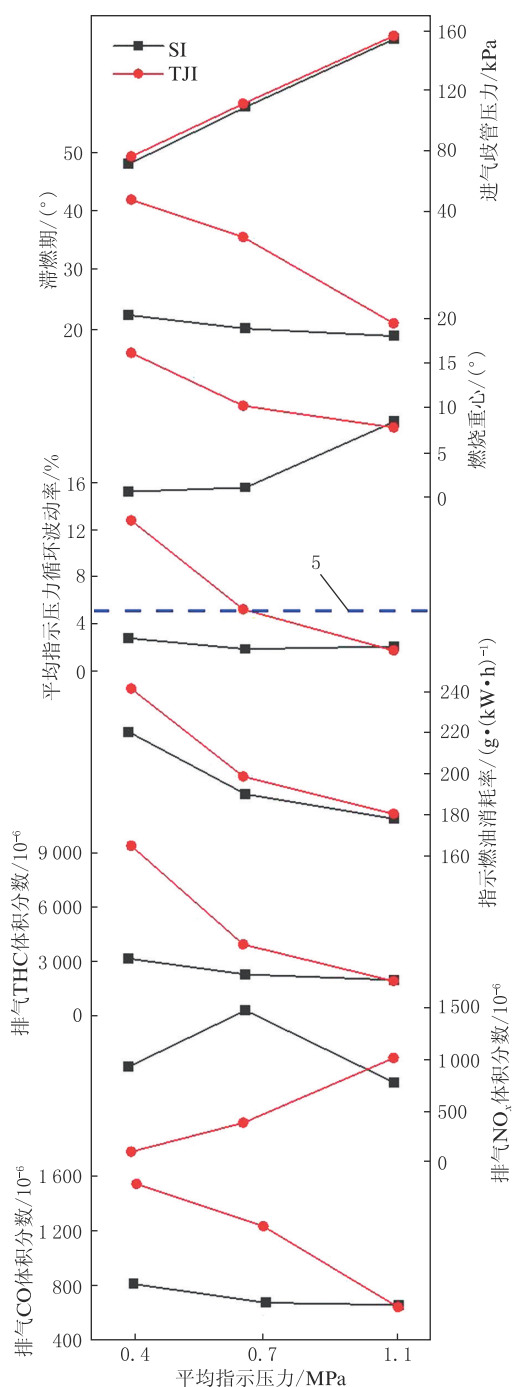


图4 不同负荷下的稀燃特性( $\lambda=1.6$ )

Figure4 Lean combustion characteristics under different engine loads ( $\lambda=1.6$ )

入主燃室,主燃室内的可燃混合气才开始燃烧。因此预燃室点火的滞燃期要长于常规点火。同样,由于物理隔离的存在,预燃室要获得稳定的点火燃烧,其点火提前角相对于常规点火要提前 $6^\circ$ 。预燃室点火提前角有增加的潜力。

随着负荷的进一步提高,一直到最佳油耗工况点,预燃室点火和常规火花塞点火的点火提前角和滞燃期差距从 $6^\circ$ 逐步缩小,在到达最低指示燃油消耗率点的1.1 MPa时,两者趋于一致。



由于中低负荷下,发动机进气量小,预燃室内的扫气不彻底,造成滞燃期长,进而燃烧相位推迟,燃烧重心后移。随着负荷增加,预燃室内的扫气效果改善,滞燃期缩短,燃烧重心前移。和常规点火相比,燃烧重心从落后于常规点火约  $15^\circ$  逐步缩小,在到达最低指示燃油消耗率点的  $1.1 \text{ MPa}$  时两者基本一致。

从图4中可以看出,预燃室在  $0.4 \text{ MPa}$  的低负荷下燃烧很差,COV 达到  $12.7\%$ ;随着负荷增加,COV 迅速改善。在  $0.7 \text{ MPa}$  时,COV 为  $5.2\%$ ,达到试验确定的燃烧稳定性限值  $5\%$  附近。当负荷进一步增加到  $1.1 \text{ MPa}$  时,COV 优化到  $1.7\%$ ,达到和常规点火相同的水平。由此可见,预燃室点火存在着燃烧稳定性的负荷边界,这个边界在 IMEP  $0.7 \text{ MPa}$  附近。

从常规点火的平均指示压力循环波动率 COV 来看,本研究中的发动机基础燃烧较好,可以在过量空气系数为  $1.8$  的条件下依然稳定燃烧。

随着稀燃条件下发动机负荷增加,指示燃油消耗率降低,且预燃室点火的指示燃油消耗率随负荷的降幅要显著大于常规点火。这是由预燃室的特殊结构所造成的,预燃室点火稳定性边界较常规点火低,因此预燃室点火的指示燃油消耗率相对于常规点火指示燃油消耗率在平均指示压力  $0.4 \text{ MPa}$  的负荷时高出  $9.5\%$ ;在燃烧稳定性边界负荷平均指示压力  $0.7 \text{ MPa}$  时高出  $4.6\%$ ;在最低指示燃油消耗率工况点两者指示燃油消耗率基本持平。指示燃油消耗率对应着发动机的指示热效率,从指示热效率的角度考量,TJI 发动机可以达到和 SI 发动机相当的指示热效率。

汽油机形成 HC 排放主要有 3 个要素:狭缝效应、燃烧不完全性和后期氧化过程。在中低负荷下采用预燃室点火技术时,燃烧持续期变长,火焰传播速度慢,燃烧温度低,燃烧不完全,促使 HC 排放相对于常规点火上升。当发动机负荷接近最低指示燃油消耗率工况时,THC 排放达到和常规火花塞相同的水平。

汽油发动机  $\text{NO}_x$  生成的条件是高温、富氧和高温持续时间,改变任一条件将直接影响  $\text{NO}_x$  的生成量。相比于传统点火,预燃室点火在低负荷时燃烧持续期加长,降低了缸内燃烧温度,抑制了缸内  $\text{NO}_x$  的生成量;当负荷逐渐提高至最低指示燃油消耗率工况时,预燃室点火模式下  $\text{NO}_x$  排放接近常规点火模式,且有小幅上升。

在中低负荷下,预燃室点火的燃烧稳定性差,造

成 CO 排放较高。随着负荷增加,缸内燃烧条件改善,CO 排放较常规点火的差距明显缩小,到最低指示燃油消耗率工况时,预燃室点火模式下 CO 排放接近常规点火模式。

### 2.3 不同过量空气系数 $\lambda$ 的稀燃特性

IMEP 为  $0.4 \text{ MPa}$ 、 $0.7 \text{ MPa}$ 、 $1.1 \text{ MPa}$  下预燃室射流点火 TJI 与常规火花点火 SI 的稀燃特性分别如图 5~图 7 所示。

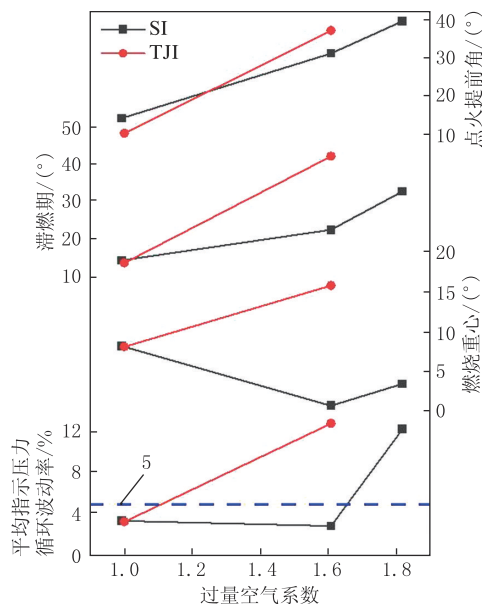


图5 不同过量空气系数下的稀燃特性(IMEP=0.4 MPa)

Figure 5 Lean combustion characteristics under different excess air coefficients (IMEP=0.4 MPa)

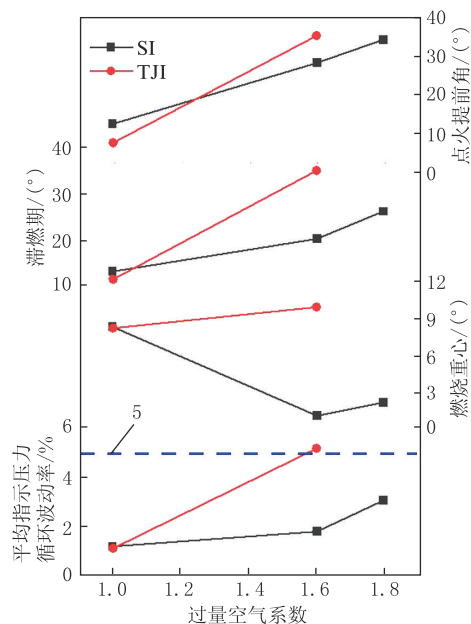


图6 不同过量空气系数下的稀燃特性(IMEP=0.7 MPa)

Figure 6 Lean combustion characteristics under different excess air coefficients (IMEP=0.7 MPa)

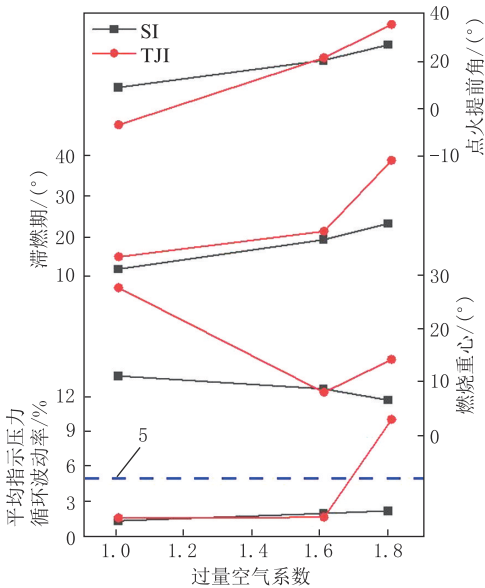


图7 不同过量空气系数下的稀燃特性(IMEP=1.1 MPa)

Figure 7 Lean combustion characteristics under different excess air coefficients(IMEP=1.1 MPa)

由图5~图7可知,点火提前角随过量空气系数 $\lambda$ 的变化呈单调变化关系,即随着过量空气系数 $\lambda$ 的增加,点火提前角增大。这是由于稀燃条件下,可燃混合气浓度降低,平均指示压力循环波动率增大,滞燃期变长,为了实现可靠稳定燃烧,需要加大点火提前角。

滞燃期随着过量空气系数增加,即可燃混合气越稀,其滞燃期越长。如前述分析,这是由于预燃室特殊的物理结构,造成在中低负荷预燃室的滞燃期相对于常规火花塞点火更长。

由于预燃室射流点火在中低负荷下的滞燃期比常规点火或火花塞点火要长,因此其燃烧重心后移,且随着过量空气系数增加,燃烧重心相应后移。当负荷增加到最低指示燃油消耗率点附近时,其燃烧重心和常规点火相当。

中低负荷下,在常规点火可以达到的稀燃极限内,预燃室射流点火COV随着过量空气系数增加而升高,稀燃边界 $\lambda$ 随负荷变化规律详见表5。

表5 预燃室射流点火的稀燃边界  
Table 5 Lean combustion boundaries of TJI

IMEP/MPa	稀燃边界对应的 $\lambda$
0.4	$1.1 < \lambda < 1.2$
0.7	$\lambda \approx 1.6$
1.1	$\lambda \approx 1.7$

从表5中可以直观看出,随着中低负荷条件下的负荷增长,预燃室射流点火的燃烧趋于稳定,其稀

燃边界逐步提高。在最低指示燃油消耗率工况下两者的稀燃边界接近。

2.4 高能点火协同预燃室射流点火的稀燃特性

高能点火系统是在保持原有点火系统的基础上,额外增加一个续能模块给点火线圈次级电流续流,实现次级高点火能量输出,其基本原理如图8所示。图8中,MCU为微控制单元(microcontroller unit)。

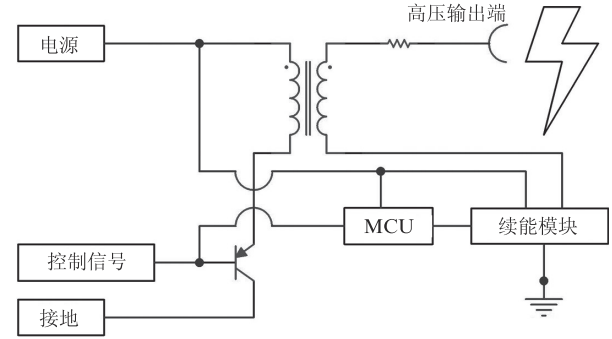


图8 高能点火原理图

Figure 8 Principle of high energy ignition system

预燃室射流点火的主要不足之一在于中低负荷下预燃室内的扫气不彻底,造成的后果就是预燃室内残余废气系数高、点火困难。高能点火通过提高点火能量来提高点火稳定性,进而改善燃烧。因此,研究在中低负荷下高能点火协同预燃室射流点火的稀燃特性很有意义。

高能点火对TJI稀燃特性的影响如图9所示。试验中,高能点火次级输出能量设定为300 mJ。

从图9可以得出,在最低指示燃油消耗率工况,提高点火能量,稀燃工况下的点火提前角和滞燃期有小幅改善。提高点火能量,燃烧重心明显提前,平均指示压力循环波动率有改善,说明点火能量对稀燃条件下的燃烧速度和燃烧稳定性有正向促进作用,对拓展稀燃边界有促进作用。从图9中还可以看出,燃烧重心在 $\lambda=1.6$ 时最靠前,在 $7^{\circ}\sim 8^{\circ}$ 范围内;随着可燃混合气进一步减稀,燃烧重心后移。点火能量对于稀燃有正向作用,体现在燃油经济性上,表现为提高点火能量对稀燃条件下的指示燃油消耗率有改善效果,但改善效果随着过量空气系数增加逐渐减小。指示燃油消耗率曲线的最低点出现在 $\lambda$ 为1.6和1.7附近,随着过量空气系数进一步增加,指示燃油消耗率上升。这一趋势和燃烧重心的变化趋势一致,由此可知,燃烧重心的后移是造成过量空气系数 $\lambda$ 从1.6继续增加,而指示燃油消耗率上升的原因。

整体来看,高能点火对于排放有正向改善作用。

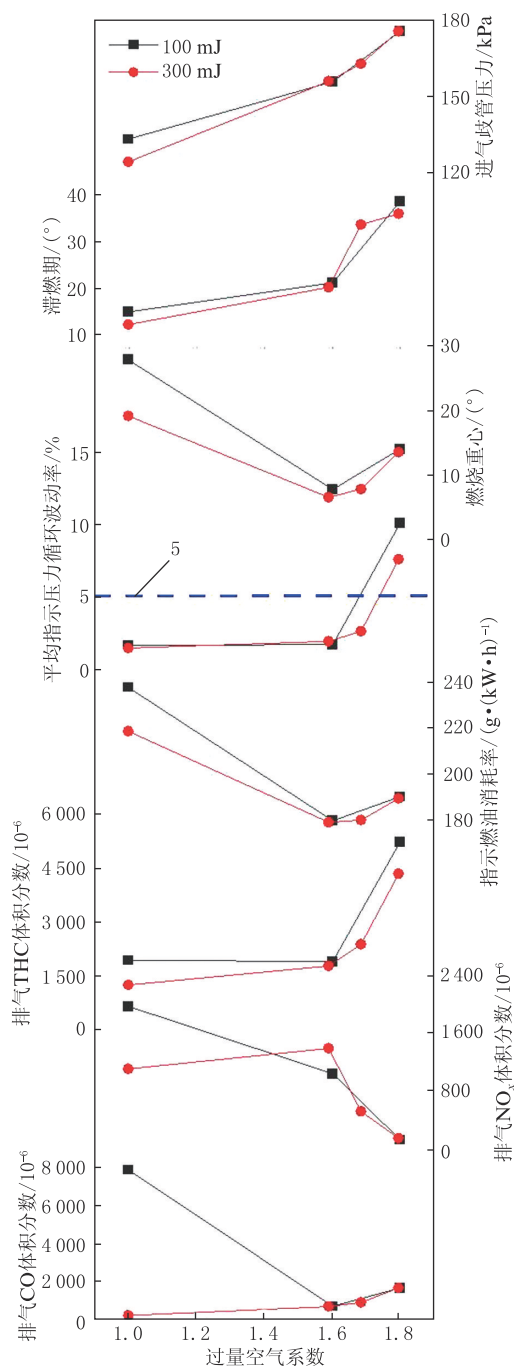


图9 高能点火对TJI稀燃特性的影响

Figure 9 Lean combustion characteristics of TJI integrated with high energy ignition

这是由于增加点火能量后,预燃室射流点火稀燃工况下的燃烧速度和燃烧稳定性得到改善,THC和CO排放有降低趋势。 $\text{NO}_x$ 排放主要与温度、富氧相关,在最低指示燃油消耗率点,高能点火的重心提前,燃烧温度提高, $\text{NO}_x$ 排放升高,但升高幅度不大。

### 3 结论

(1) 在低负荷工况下,预燃室射流点火的缸压和瞬时放热率峰值下降明显,峰值相位后移,滞燃期延

长,燃烧重心推迟,这是预燃室射流点火在低负荷下稀燃的显著特征。

(2) 在中负荷以下,随着负荷增加,预燃室射流点火TJI的滞燃期缩短,燃烧重心提前,燃烧稳定性改善,THC和CO排放降低;在最佳指示燃油消耗率工况点,可达到与常规火花点火SI相当的水平;以平均指示压力循环波动率为考量,预燃室射流点火存在着明显的负荷分界线,0.7 MPa时COV达5%。在该负荷分界线以下,预燃室射流点火的稀燃稳定性低于火花点火。

(3) 高能点火可以缩短滞燃期,促进燃烧速度和燃烧稳定性改善,对于排放整体上有改善。发动机最佳指示燃油消耗率出现在 $\lambda$ 为1.6和1.7附近,随着过量空气系数进一步增加,预燃室射流点火的指示燃油消耗率上升。

### 参考文献:

- [1] SALVI B L, SUBRAMANIAN K A. Experimental investigation and phenomenological model development of flame kernel growth rate in a gasoline fueled spark ignition engine [J]. Applied Energy, 2015, 139(14): 93 - 103.
- [2] SANTOS N, ALVARVZ C E C, ROSO V R, et al. Combustion analysis of a SI engine with stratified and homogeneous pre-chamber ignition system using ethanol and hydrogen [J/OL]. Applied Thermal Engineering, 2019: 113985 (2020-09-17) [2024-06-12]. DOI: 10.1016/j.applthermaleng. 2019. 113985.
- [3] ELISA T, HAROLD J S, WILLIAM P A. A review of pre-chamber initiated jet ignition combustion systems [C/OL]// SAE Technical Paper, 2010: 2010-01-2263 (2010-10-25) [2024-06-12]. DOI: 10.4271/2010-01-2263.
- [4] BADAWY T, BAO X C, XU H M. Impact of spark plug gap on flame kernel propagation and engine performance [J]. Applied Energy 2017, 191: 311 - 327.
- [5] MASTORAKOS E, ALLISON P M, OLIVEIRA P M, et al. Fundamental aspects of jet ignition for natural gas engines [J]. SAE International Journal of Engines, 2017, 10 (5): 2429 - 2438.
- [6] SASAKI H, SEKIYAMA S, NAKASHIMA K. A new combustion system of a heat-insulated natural gas engine with a pre-chamber having a throat valve [J]. International Journal of Engine Research, 2022, 3(4): 197 - 208.
- [7] CARLOS E C A, GISELLE E C, VINICIUS R R, et al. A review of prechamber ignition systems as lean combustion technology for SI engines [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 128(14): 107 - 120.
- [8] LI X, ZHANG W Z, HUANG Z, et al. Pre-chamber turbulent jet ignition of methane/air mixtures with multiple orifices in a large bore constant volume chamber: effect of air-fuel equivalence ratio and premixed pressure [J]. Frontiers in Energy, 2019, 13(3): 483 - 493.
- [9] BENAJES J, NOVELLA R, GOMEZ-SORIANO J, et al.

- Evaluation of the passive pre-chamber ignition concept for future high compression ratio turbocharged spark-ignition engines [J]. *Applied Energy*, 2019, 248(15): 576 - 588.
- [10] XU G, KOTZAGIANNI M, KYRTATOS P, et al. Experimental and numerical investigations of the un-scavenged pre-chamber combustion in a rapid compression and expansion machine under engine-like conditions [J]. *Combustion and Flame*, 2019, 204(6): 68 - 84.
- [11] 车胜楠, 冯钟辉, 刘宗宽, 等. 湍流射流点火对天然气发动机燃烧特性影响的试验研究[J]. *内燃机工程*, 2021, 42(6): 37 - 44.  
CHE S N, FENG Z H, LIU Z K, et al. Experimental investigation on the effect of turbulent jet ignition on the combustion characteristics of natural gas engine [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2021, 42(6): 37 - 44.
- [12] 高强, 周磊, 华剑雄, 等. 不同过量空气系数下射流点火发动机燃烧、排放和爆震特性的试验研究[J]. *内燃机工程*, 2021, 42(4): 8 - 15.  
GAO Q, ZHOU L, HUA J X, et al. Experimental study on combustion, emission and knock characteristics of turbulent jet ignition engine under different excess air coefficients [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2021, 42(4): 8 - 15.
- [13] 吴坚, 陈佳雯, 杜家坤, 等. 稀燃条件下主动预燃室式直喷汽油机燃烧和排放特性研究[J]. *内燃机工程*, 2021, 42(3): 55 - 60.  
WU J, CHEN J W, DU J K, et al. Combustion and emission characteristics of a lean burn gasoline direct injection engine with active pre-chamber [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2021, 42(3): 55 - 60.
- [14] 胡柯, 晁岳栋, 胡伟诺, 等. 高效稀燃发动机预燃室试验研究[J]. *内燃机工程*, 2023, 44(1): 84 - 89.  
HU K, CHAO Y D, HU Y N, et al. Experimental study of the pre-chamber of high thermal efficiency lean burn engine [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2023, 44(1): 84 - 89.
- [15] 丁以雄, 宋运通, 刘宗宽, 等. 高压比下扫气式预燃室湍流射流点火对废气再循环稀燃汽油机性能影响研究[J]. *内燃机工程*, 2023, 44(1): 52 - 59.  
DING Y X, SONG Y T, LIU Z K, et al. Study on the effects of turbulent jet ignition of swept pre-combustion chamber on the performance of exhaust gas recirculation diluted gasoline engine at high compression ratio [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2023, 44(1): 52 - 59.
- [16] 占文峰, 罗亨波, 陈泓, 等. 预燃室射流点火对汽油发动机性能的影响[J]. *内燃机学报*, 2022, 40(3): 193 - 199.  
ZHAN W F, LUO H B, CHEN H, et al. Effect of pre-chamber jet ignition on gasoline engine performance [J]. *Transactions of CSICE*, 2022, 40(3): 193 - 199.
- [17] 周磊, 刘宗宽, 李潇, 等. 不同压缩比对湍流射流点火发动机性能和爆震影响的试验研究[J]. *天津大学学报*, 2022, 55(8): 876 - 885.  
ZHOU L, LIU Z K, LI X, et al. Experimental study of the effects of different compression ratios on the performance and knock characteristics of turbulent jet ignition engine [J]. *Journal of Tianjin University*, 2022, 55(8): 876 - 885.
- [18] 陈泓, 李钰怀, 罗亨波, 等. 预燃室火焰射流点火对汽油机性能影响的研究[J]. *内燃机工程*, 2021, 42(3): 61 - 66.  
CHEN H, LI Y H, LUO H B, et al. Effects of pre-chamber flame jet ignition on performance of a gasoline engine [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2021, 42(3): 61 - 66.
- [19] 施佳叶, 王金秋, 邓俊, 等. 基于两级高能点火和被动预燃室的高压缩比汽油机燃烧及排放特性研究[J]. *汽车工程*, 2021, 43(9): 1300 - 1307.  
SHI J Y, WANG J Q, DENG J, et al. Study on combustion and emission characteristics of high compression ratio gasoline engine based on two-stage high energy ignition and passive pre-chamber [J]. *Automotive Engineering*, 2021, 43(9): 1300 - 1307.
- [20] 王博远, 齐运亮, 王颖迪, 等. 预燃室射流点火装置的设计与性能研究[J]. *汽车工程*, 2018, 40(1): 7 - 13.  
WANG B Y, QI Y L, WANG Y D, et al. An investigation into the design and performance of pre-combustion chamber jet igniter [J]. *Automotive Engineering*, 2018, 40(1): 7 - 13.
- [21] 周昊, 韩志玉, 吴振阔, 等. 被动预燃室汽油机当量燃烧特性的数值分析[J]. *内燃机工程*, 2022, 43(6): 18 - 26.  
ZHOU H, HAN Z Y, WU Z K, et al. Numerical analysis of the stoichiometric-combustion characteristics of a gasoline engine with a passive pre-chamber [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2022, 43(6): 18 - 26.