

增压汽油机早燃在线检测与诊断

童孙禹¹, 贺孝愚², 邓俊¹, 李理光^{1,2}

(1. 同济大学汽车学院; 2. 同济大学中德学院, 上海 200092)

摘要: 基于缸内离子电流检测技术, 在一台增压进气道多点喷射汽油机上研究了进气温度、负荷、点火提前角、空燃比对于早燃发生频率的影响。试验结果表明, 在一定范围内提升进气温度并不会增加早燃发生频率, 增大负荷及增大点火提前角将会增加早燃发生频率, 缸内混合气加浓将有效抑制早燃发生频率但是会增加油耗。采用的离子电流检测技术, 可以实时快速检测早燃循环。并与缸压阈值法相比, 离子电流信号判断早燃更准确, 能够识别全部早燃循环, 包括燃烧压力较小的早燃循环, 同时离子电流检测法能够在上止点前 25°CA 检测到早燃发生的特征信号, 这为发动机采取早燃消除方法提供了技术可能。

关键词: 增压汽油机; 离子电流检测; 早燃检测

中图分类号: TK417

文献标志码: A

Board Boosted Gasoline Engine Pre-ignition Diagnostic

TONG Sunyu¹, HE Xiaoyu², DENG Jun¹, LI Liguang^{1,2}

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Chinesisch Deutsches Hochschul Kolleg, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The experiment was conducted on a MPI boosted gasoline engine to analyze the influence of intake temperature, engine load, ignition timing and lambda on pre-ignition frequency on the basis of the in-cylinder ion-current detection. The results show that small variation of intake pressure will not increase pre-ignition events significantly. Higher engine load and advancing ignition timing will lead to higher pre-ignition frequency. In-cylinder enrichment will decrease its frequency but a higher fuel consumption instead. At the start of pre-ignition event, obvious ion current signal can be detected. Compared with the cylinder pressure threshold method, ion current detection can find out all the pre-ignition events, including the cycles with lower combustion pressure. Especially, the characteristic ion

current signal of pre-ignition can be detected 25°CA BTDC. This provides a potential control to suppress pre-ignition events for modern engines.

Key words: boosted gasoline engine; ion-current detection; pre-ignition detection

当代增压小排量汽油机由于热负荷的大幅提升, 发生一种非正常的燃烧现象——早燃(在火花塞点火之前已经产生了不断扩散的火焰前锋面)的困扰^[1-5]。事实上, 早燃在火花点燃发动机不同发展过程中, 不断的受到关注。1950~1960年间, 发动机压缩比迅速提高, 由此产生的早燃对发动机造成了非常严重的后果^[6-10]。与爆震相比, 早燃一度被认为会对发动机产生更大的损害, 并且阻碍进一步提升发动机性能^[9]。

在火花塞点火之前, 早燃会导致缸内压力迅速上升并且超过压缩缸压。早燃的前期燃烧阶段会导致未燃的终燃混合气压力及温度上升速度大大快于正常火花塞点火产生的火焰前锋面的速度。如果在高压高温的终燃混合中产生自燃, 将会导致非常剧烈的爆震, 即“超级爆震”。超级爆震产生的极高的燃烧压力及剧烈的缸压震荡将会对发动机造成很大的危害^[4-8]。

由于早燃很有可能会产生超级爆震, 并对发动机造成潜在的危害, 目前国内外对抑制早燃已经开展了不少研究, 早燃发生在低转速($< 3\ 000\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)及高负荷(BMEP $> 1.0\ \text{MPa}$), 并具有如下特点: 早于火花塞点火之前着火并开始燃烧; 燃烧初期速度相对缓慢与汽油机正常燃烧速度相近。燃烧速度会突然提高, 剧烈反应产生极高的缸压及震荡^[9]。

Dahnz^[11]研究发现早燃发生频率随着试验汽油

收稿日期: 2015-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(51376139; 51006075); 博士点基金(20120072110015); 上海科委项目(11DZ2260400); KSPG 教席基金

第一作者: 童孙禹(1986—), 男, 博士生, 主要研究方向为增压发动机早燃及离子电流检测。E-mail: solongt@163.com

通讯作者: 李理光(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制、清洁代用燃料、混合动力汽车的动力系统。E-mail: liguang@tongji.edu.cn

辛烷值增大而降低,同时存放时间较久的 RON100 汽油早燃发生频率较高. Zahdeh^[12] 提出加浓混合气,可以减少早燃发生频率,抑制早燃发生. KIT 的 Palaveev^[13] 提出通过在压缩行程喷射燃油,形成分层混合气可以降低早燃及超级爆震的发生频率. 美国西南研究院的 Amann 等人^[14] 通过实验发现,中冷废气循环对早燃有明显的抑制作用,然而增加中冷 EGR 将影响发动机功率密度并且增加硬件成本.

由于早燃是一种偶发的非正常燃烧现象,非常难以捕捉. 并且由早燃引发的超级爆震极易损坏发动机. 因此是当前小排量和高增压汽油机所面临的共性问题,也成为当前行业研究的重点. 尽管围绕早燃的产生机理和影响因素的研究较多,但在线诊断,特别是提前预报诊断的研究未见报道. 本文基于缸内离子电流检测技术,研究进气温度、负荷、点火提前角、空燃比对于早燃发生频率的影响和在线诊断技术,为早燃的提前预报和控制提供研究方法和技术支持.

1 试验装置与方法

1.1 增压进气道多点喷射汽油机试验平台

增压进气道多点喷射(PFI)汽油机试验台架如图 1 所示. 发动机为 1.8 T 涡轮增压进气道多点喷射发动机,测功机为凯迈电力测功机,通过 AVL 油耗仪来供油,油压在 0.4 MPa,通过改造冷却水路和进气中冷使得发动机能正常运行. 并通过 Kistler 6118B 型火花塞式缸压传感器来测缸压,及定制的集成在点火线圈中的离子电流采集电路采集离子电流信号,离子电流检测系统如图 2 所示.

发动机控制单元为博世提供,通过 ES590 连接电脑,试验中发动机负荷、点火时刻、喷油量等均可通过 ES590 对 ECU 进行调节.

试验发动机为 1.8L 涡轮增压多点喷射汽油机,具体参数如表 1 所示.

表 1 试验用发动机主要参数

Tab1. Engine Specifications

项目	参数
发动机类型	4 冲程, PFI, SI, 涡轮增压
排量/cc	1 798
最大功率/kW	130
最大扭矩/N·m	230
缸径/mm	86
行程/mm	77.4

1.2 试验方法

早燃一般在低速大负荷工况较易产生. 本试验选取最大转矩点的最低转速工况进行研究. 早燃试验工况见表 2. 该发动机负荷由充气效率定义. 在加浓抑制早燃试验中,通过调整喷油脉宽以此调节空燃比.

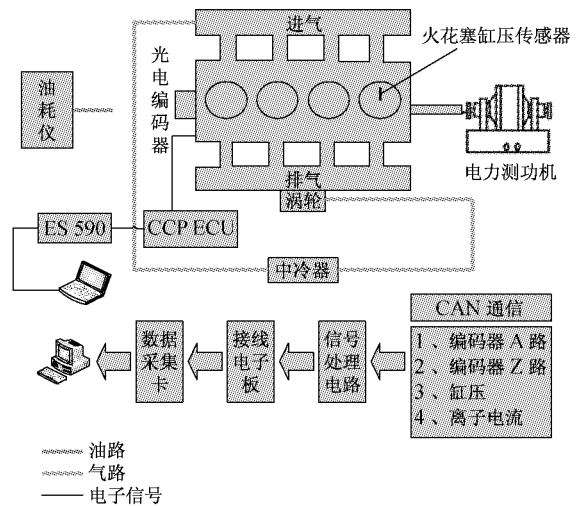


图 1 增压 PFI 汽油机试验系统

Fig.1 Test bench diagram

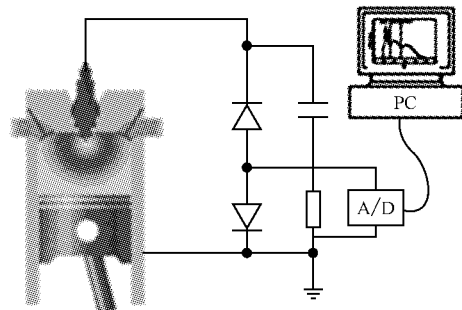


图 2 离子电流检测电路

Fig.2 Ion current circuit

表 2 早燃试验工况

Tab.2 Pre-ignition operation condition

参数名称/单位	参数值
转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	1 700
进气压力/MPa	0.17
中冷器温度/ $^{\circ}\text{C}$	38
点火提前角/ $^{\circ}\text{CA ATDC}$	0
负荷率	130
空燃比	14.5

由于早燃现象具有随机性,试验过程中,在稳定工况下连续采集 5 000 个循环记录发生的早燃循环次数,每组试验进行 3 次并取平均值,以此评价每种工况下早燃发生频率.

2 试验结果和讨论

在试验过程中,发动机持续工作在满负荷,如图 3 所示,在连续循环中,早燃随机产生,又自行消失.第一个早燃循环最高缸压达到 12 MPa,紧随着两个正常燃烧循环,缸压都超过 5 MPa,之后随机出现的早燃引发超级爆震,最高缸压超过 20 MPa,大大高于该发动机在此工况下正常燃烧压力 4 MPa 左右.如图 4 所示,正常燃烧循环及不同早燃循环,可以看到当早燃发生时,燃烧起始时刻先于点火时刻,混合气发生自燃,缸压脱离压缩线,产生较高燃烧压力.不同早燃循环产生缸压峰值压力也有所不同.在本文中,将缸压超过 10 MPa 的循环,定义为疑似早燃循环,并在采集卡中记录当前疑似早燃循环,同时记录该循环前 20 个及后 20 个燃烧循环.并在后续数据处理时,识别是否是早燃循环,并做分析.

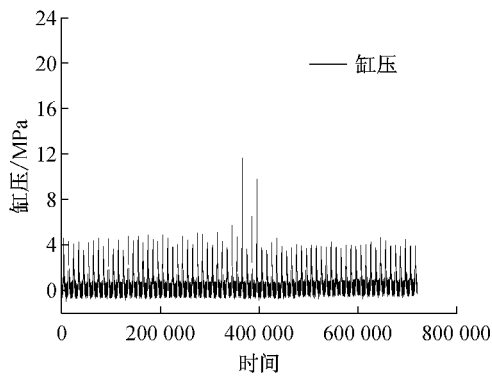


图 3 连续循环中的早燃循环
Fig.3 Pre-ignition events in continuous cycles

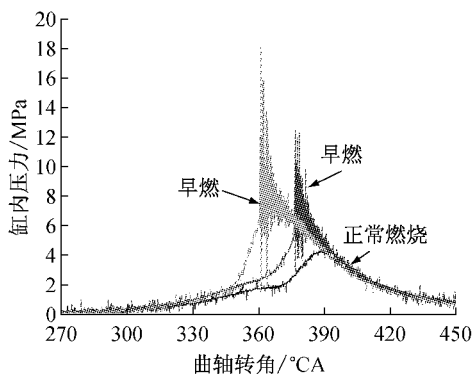


图 4 典型早燃循环的缸内压力实测曲线
Fig.4 Typical pre-ignition pressure curve

2.1 进气温度对早燃发生频率影响

进气温度上升将直接导致混合气压缩终了温度上升,但是由于进气温度上升后,混合气密度下降,充气效率下降,负荷降低,影响早燃发生频率.从图 5

知,当进气温度从 40℃(早燃发生次数为 3,2,2)上升到 45℃(早燃发生次数为 2,1,2),并达到 52℃时(早燃发生次数为 1,1,1),负荷依次下降为 130%,121%,106%.早燃发生频率有下降趋势.由此说明进气温度上升虽然会导致混合气压缩终了温度上升,但是由于充气效率降低影响负荷.故早燃发生频率随着进气温度上升呈下降趋势.

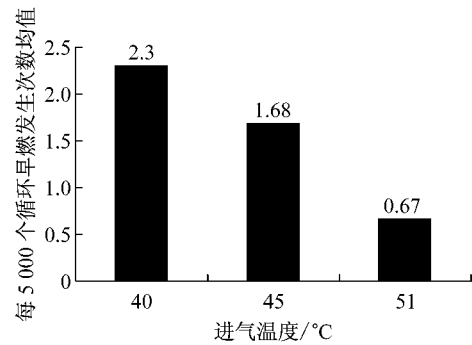


图 5 进气温度对早燃发生频率的影响
Fig.5 Intake air temperature influence on pre-ignition frequency

2.2 发动机负荷对早燃发生频率的影响

在实验中通过台架油门控制器控制发动机油门踏板,油门踏板信号发送至 ECU,ECU 根据封装的计算模型结合节气门开度,进气温度,压力及踏板行程计算出当前发动机负荷,负荷信号通过 CAN 连接采集卡并记录.所以试验时通过调节台架油门控制器实现发动机负荷调节,当负荷稳定时,完成工况记录.负荷分别为 90%,100%,116%,120%和 130%.如图 6 所示,早燃发生频率依次为 0,0.3,1.68,1.68,2.3.可见早燃发生频率随着负荷不断增加而不断增大.这是由于在固定转速下,发动机节气门加大,负荷不断增加,充气效率不断增大,进气压力增大,导致混合气压缩终了温度上升,燃烧温度上升,增加了燃烧室内热点,更易造成混合气自燃,最终增加早燃发生频率.

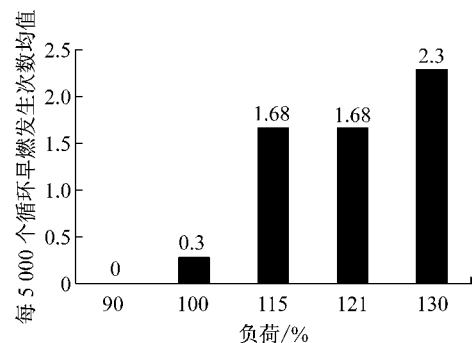


图 6 发动机负荷对早燃发生频率的影响
Fig.6 Engine load influence on pre-ignition frequency

2.3 点火提前角对早燃发生频率的影响

点火提前角标定是发动机标定过程中非常重要的一个参数,如果点火提前角推迟将造成发动机排气温度较高,同时影响当前工况下发动机功率及转矩表现,不利于燃油经济性,如果点火提前角过于提前,将易使发动机产生爆震,使燃烧室内更容易形成热点,从而影响早燃产生频率.在试验中,设定发动机点火角为固定值,同时关闭 ECU 中的爆震控制程序,避免当发动机产生早燃或爆震后,ECU 自动推迟点火提前角.如图 7 所示,在实验中,当点火角固定为 3°CA 上止点后,未检测到早燃循环.当点火角固定在 3°CA 上止点前时,在第一轮测试中发生 11 次早燃,早燃循环增加趋势非常明显,为了保护发动机,故未进行第二及第三轮测试.试验发现随着点火角不断提前,早燃发生频率不断增加,由于实验中 ECU 爆震控制程序关闭,故点火角不会由于爆震的发生而自动推迟.当缸内发生爆震后,燃烧室壁面温度上升,随着爆震不断产生,在火花塞及排气门处很容易形成热点积聚,早燃发生频率迅速上升.此实验证明由于燃烧室设计不合理,造成缸内热点较多,容易增加爆震倾向,而当缸内发生大量爆震也会增加发生早燃倾向.

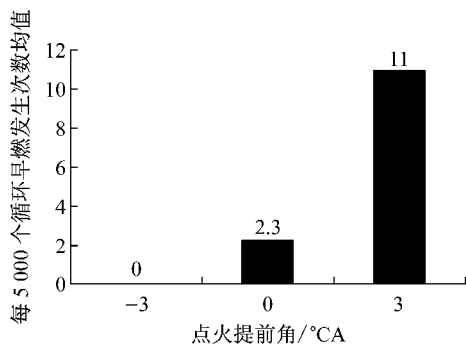


图 7 点火提前角对早燃发生频率的影响

Fig.7 Spark timing influence on pre-ignition frequency

2.4 空燃比对早燃发生频率影响

混合气加浓后,可以降低压缩终了混合气温度.这是由于当更多燃油喷入气缸后,可以使混合气的绝热指数 κ 减小.根据绝热等熵压缩公式

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\kappa} = \epsilon^{\kappa} \quad (1)$$

式中: T_1 为压缩终了的混合气温度; T_2 为压缩始点的混合气温度; V_1 为压缩终了的燃烧室体积; V_2 为压缩始点的燃烧室体积; ϵ 为压缩比.由式(1)可知,当 κ 值减小时,发动机压缩终了的混合气温度降低,使缸内的热点难以达到自燃的温度,从而抑制了早

燃的产生.

如图 8 所示,在试验中,通过不断加大喷油脉宽,从而增加喷油量,使空燃比不断减小,从 14.5~12.3,混合气不断变浓,早燃发生频率呈下降趋势.当空燃比为 14.5 时,三次试验发生早燃次数分别为 3,2 和 2,平均为 2.3;当空燃比为 13.2 时,三次试验发生早燃次数分别为 1,2 和 1,平均为 1.3;当空燃比为 12.3 时混合气已经大幅加浓,没有早燃循环产生.由此可见,加浓混合气可以有效地抑制早燃循环的产生.

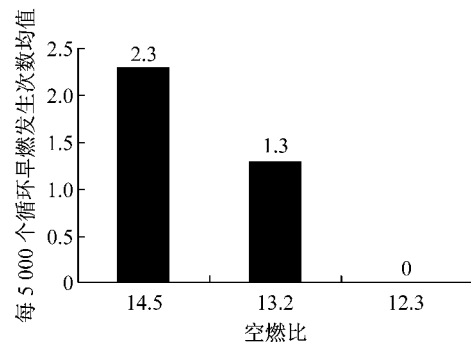


图 8 不同空燃比早燃循环发生频率

Fig.8 Lambda influence on pre-ignition frequency

2.5 离子电流检测早燃

当今汽油机广泛采用发动机小型化、降低发动机转速、涡轮增压等手段,同时对缸内燃烧状况的精确控制也提出了更高的要求,以此进一步降低 CO_2 排放,实现更低燃油消耗率.传统缸压传感器虽然能够检测缸内燃烧状况,但是由于造价高昂,安装不便而一直未能在量产汽车上广泛采用.此外,缸压检测通常是在早燃所引发的超级爆震结果已经发生后的检测,有可能检测到时已经产生了对发动机的破坏.

与火花塞集成在一起的离子电流传感器具有体积小,安装方便,成本低廉等特点.研究表明,离子电流信号对于缸内燃烧温度,空燃比,发动机负荷及燃料种类都较为敏感,采用离子电流传感器能够实现检测失火、爆震、部分燃烧、等缸内燃烧状况^[15-21].本文的研究重点是如何实现离子电流用于缸内早燃和超级爆震的实时在线检测,特别是探讨在线检测和反馈控制的可行性.

图 9 为研究离子电流检测系统获得的正常燃烧循环离子电流典型波形图,黑色为缸压信号曲线,灰色为离子电流信号曲线,由于该离子电流电路与火花塞集成在一起,第一个峰值为火花塞点火前对电路的产生的充电蓄能干扰信号,第二个峰值信号为火花塞点火放电后对离子电流电路产生的放电干

扰,第三个信号峰值为缸内燃料燃烧后,产生的自由离子,通过离子电流电路采集.通过第一个及第二离子电流干扰信号,可以表明火花塞对缸内点火,并且随后第三个离子电流信号证明缸内混合气正常燃烧.

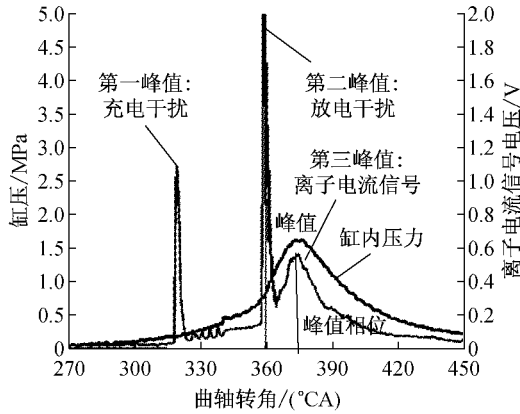


图 9 1 250 r/min,20%负荷下缸压与离子电流信号波形
Fig.9 Cylinder pressure and ion current curve at 1 250 r · min⁻¹ and 20% load

如图 10 所示转速固定为 1 500 r · min⁻¹时,随着负荷不断上升时,缸压峰值不断上升,离子电流峰值也不断上升,并在 80%负荷时达到 1.5 V 左右.这是由于随着负荷增大,缸内燃烧更充分,燃烧产生的离子浓度增大,离子电流信号峰值增大.

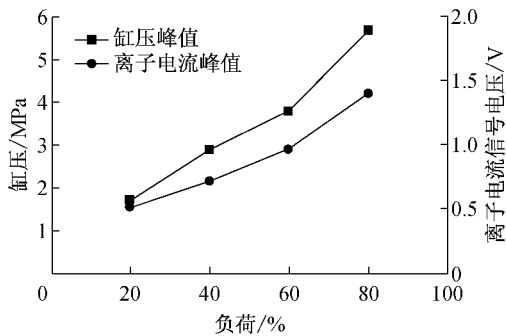


图 10 1 500 r · min⁻¹,不同负荷下的缸压和离子电流信号峰值
Fig.10 Cylinder peak pressure and ion current peak curves at 1 500 r · min⁻¹ and different loads

如图 11 所示为离子电流峰值相位与缸压峰值相位对应关系,随着负荷不断上升,ECU 点火时刻不断推迟(点火时刻由原厂 ECU 控制,该实验中并未人为推迟),导致燃烧缸压峰值相位也不断推迟,由于离子电流信号强度是由于缸内燃烧情况决定的,故随着缸压峰值相位推迟,离子电流信号峰值相位也不断推迟.

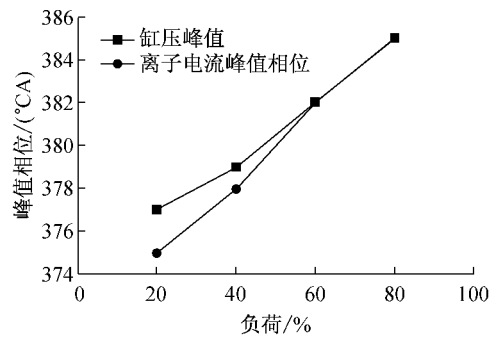


图 11 1 500 r · min⁻¹,不同负荷下的缸压和离子电流信号峰值相位

Fig.11 Cylinder peak pressure phase and ion current peak phase at 1 500 r · min⁻¹ and different loads

图 12 所示为 1 500 r · min⁻¹下不同负荷缸压峰值相位及离子电流峰值相位的相关性分析.可以发现缸压峰值相位与离子电流峰值相位在相同转速不同负荷下,都呈现了高度线性相关.所以由图 9~图 12 可得离子电流信号强度与缸内燃烧状况密切相关,随着负荷增大,缸内燃烧剧烈时,离子电流信号也呈现增大趋势,同时离子电流信号峰值相位也与缸压信号峰值相位保持一致.离子电流信号与缸压信号有很好的跟随性,离子电流信号可以反映缸内燃烧状况.

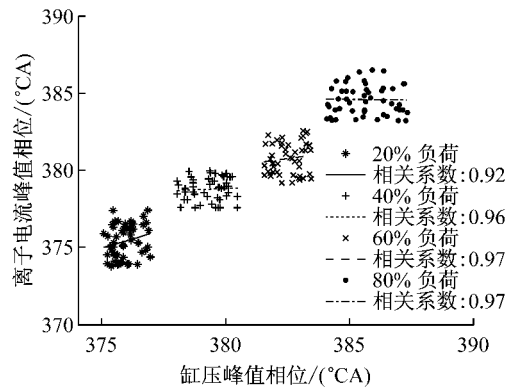


图 12 转速 1 500 r · min⁻¹下缸压峰值相位与离子电流信号峰值相位相关性

Fig.12 Correlation between cylinder peak pressure phase and ion current peak phase at 1 500 r · min⁻¹ and different loads

在正常燃烧循环,混合气通过火花塞点火后发生燃烧.离子电流信号需通过缸内燃烧产生.故在第一和第二干扰信号之间无离子电流信号.实验中,发动机在 1 700 r · min⁻¹,满负荷时发生早燃现象,通过离子电流检测发现:如图 13 所示,当早燃现象发生时,缸内混合气在火花塞正常点火之前发生自燃,

并且火焰快速传播,缸内压力迅速上升,最高燃烧压力达到 12 MPa,属于超级爆震,同时燃烧产生大量离子,离子电流信号迅速增大,幅值及持续期显著大于正常燃烧循环.如图 9 所示,在正常燃烧循环发生时,离子电流信号依次产生顺序为:第一峰值充电干扰;第二峰值放电干扰;第三峰值离子电流信号.但在如图 13~图 14 所示的早燃循环中,离子电流信号产生顺序产生了显著的变化,当火花塞发生点火蓄能后(产生第一峰值充电干扰信号),由于在缸内发生早燃现象,混合气发生自燃,自燃初期就产生了离子电流信号,并且随着缸内压力不断上升,缸内温度不断上升,离子电流信号强度也不断上升(第三峰值早燃离子电流信号),同时早燃离子电流信号持续期 t_d 也显著大于第一峰值及第二峰值信号,早燃离子电流信号的幅值及积分面积也显著大于正常燃烧循环离子电流信号.之后由于正常火花塞点火放电,产生第二峰值放电干扰信号.

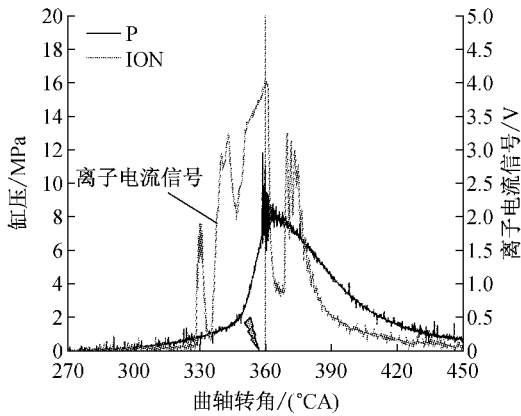


图 13 典型早燃循环离子电流信号

Fig. 13 Typical pre-ignition ion current signal

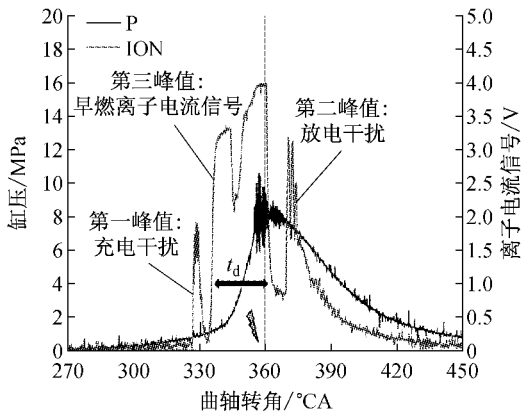


图 14 离子电流信号检测早燃

Fig. 14 Ion current signal detection on pre-ignition

通过判断点火蓄能信号后,火花塞点火之前是

否出现燃烧离子电流信号(早燃离子电流上升沿信号),即可判断缸内是否发生早燃:通过判断三个信号出现的顺序能够有效判断缸内是否发生早燃.或者通过判断正常点火时刻之前的离子电流信号持续期 t_d 是否大于阈值(正常燃烧循环点火时刻前只有第一峰值充电干扰信号产生,并且持续期较短,一般小于 10°CA),也可判断该循环是否发生早燃.如本次实验工况下,发动机在 $1700\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 满负荷时发生早燃,检测到的早燃离子电流信号 t_d 值为 25°CA 左右.故对于本台发动机,采用离子电流检测早燃时,当 t_d 值大于 20°CA 即可认为发生早燃.

根据前文所述触发采集方法,采集到大量疑似早燃循环,并通过离子电流信号判断,识别出大量早燃循环.图 15 是所有采样循环 CA10_heat(10% 累计放热量对应曲轴转角)的值,图中红圈显示的早燃循环和星号表示的非早燃循环是通过分析每个循环离子电流波形中在点火时刻之前是否出现早燃离子电流信号作为判断依据,逐一筛选的.结果显示所有点火时刻前出现离子电流并判断为早燃的循环,其 CA10_heat 普遍早于非早燃循环的 CA10_heat,可见以点火时刻前是否发生燃烧并产生早燃离子电流信号作为早燃判断依据是合理的,并同时证明了使用离子电流来检测早燃具有可行性.虽然试验时,关闭了 ECU 的爆震控制程序,即爆震时,理论上,ECU 不再会自动通过推迟点火提前角减少爆震,然而试验时发现,当缸内发生多次早燃,并多次产生极高燃烧压力后,可能是 ECU 配备有底层保护控制程序,其仍然会自行推迟点火角,避免发动机由于连续强烈的早燃而损坏,导致图 15 右上角所示一些循环 CA10 推迟.但是由于研究重点是离子电流信号与早燃时缸压信号的关系,ECU 推迟点火角不会影响离子电流信号及缸压信号的对应关系.

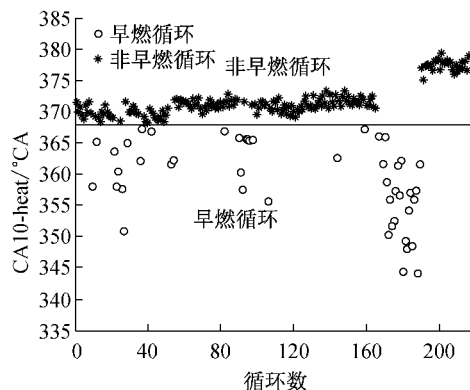


图 15 所有循环 CA10_heat 分布

Fig. 15 Distribution of CA10_heat of all cycles

如前文所述,有些早燃循环会产生超高燃烧压力,变为超级爆震,而有些早燃循环产生的燃烧压力较小,所以单纯依靠缸压幅值判断早燃的方法具有一定局限性.通过触发采集的方法,设置缸压大于 10 MPa 定义为早燃循环触发条件,并将早燃循环前后 20 个循环的数据采集记录.如图 16 所示为所有触发采集早燃以及比对离子电流信号与点火时刻的典型早燃循环,样本总量 216 个循环,共有 91 个早燃循环.如图 16 所示,通过对比点火时刻前是否出现燃烧离子电流信号获得的典型早燃循环,而十字所示的循环为通过缸压阈值判定法判断出的早燃循环.由于阈值设定为 10 MPa,所以采集到的早燃循环都位于 10 MPa 分界线上.虽然依靠设置缸压阈值法可以快速准确的判断出早燃循环(超级爆震),但是不能识别一些缸压小于设定阈值的典型早燃循环(燃烧离子电流信号明显早于点火时刻,但是未产生超过 10 MPa 的燃烧压力),如图 16 中箭头所示两个早燃循环.所以缸压阈值判定法有一定的局限性,而通过离子电流信号判断能够准确识别早燃及非早燃循环,所以离子电流证明是一种极具潜力的判断早燃的方法.

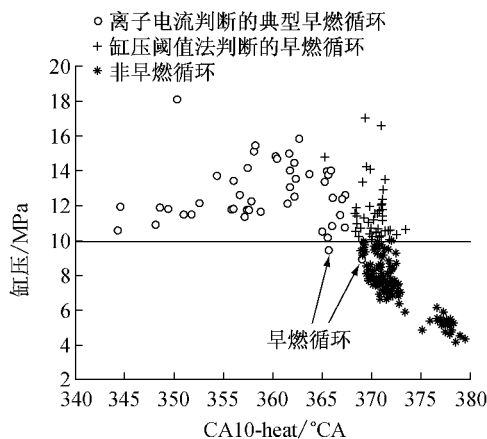


图 16 不同判断方法获得的早燃循环

Fig. 16 Comparison of different analysis methods on pre-ignition detection

可以发现,本实验中点火时刻为 0 °CA BTDC,早燃离子电流信号出现时刻先于点火信号约 25 °CA,使 ECU 有较多时间采取缸内喷油,降低缸内温度,切断点火信号,以及打开排气门排出缸内高温工质,以此抑制早燃,避免产生超级爆震损坏发动机,这些措施将在未来试验中进一步验证.

3 总结

(1) 随着发动机负荷降低,或者进气温度上升

时早燃发生频率降低.这是由于负荷降低后,较少工质被压缩,并进入燃烧室.压缩上止点附近温度也降低,早燃倾向降低.

(2) 随着点火提前角增加,早燃倾向显著增加,这是由于点火角提前后,发动机容易发生普通爆震,由于试验发动机点火角固定不变,当爆震连续发生后,缸内积聚大量热点,极易引发早燃.目前国际上认为早燃可能产生机理为:润滑油与汽油混合物自燃,缸内积碳热点引燃混合气.实验中发现当缸内发生普通爆震后,可以推测缸内热点(如火花塞负极,缸内颗粒物及排气门温度上升)增加,早燃发生频率升高.

(3) 通过加浓混合气以改变缸内空燃比试验发现:随着混合气不断变浓,早燃发生频率呈现下降趋势.这是由于加浓混合气可以降低燃烧室内压缩终了温度,并降低早燃倾向.

(4) 离子电流能够很好地反映缸内燃烧状况,通过离子电流可以检测缸内正常燃烧;在早燃循环发生时,离子电流能够检测到自燃产生的燃烧离子电流信号,并有效区别早燃循环及非早燃循环.而缸压阈值判断早燃法有一定局限性.由于早燃离子电流信号出现时刻先于点火信号约 25 °CA,这就使 ECU 有较宽裕的时间采取措施,如打开排气门,向缸内喷射过量燃油等,以实现抑制早燃的目的.

参考文献:

- [1] Okada Y, Miyashita S, Izumi Y, Hayakawa Y. Study of low-speed pre-ignition in boosted spark ignition engine [C]//SAE. Detroit: SAE, 2014; 2014-01-1218.
- [2] Dahnz C, Spicher U. Irregular combustion in supercharged spark ignition engines pre-ignition and other phenomena [J]// International Journal of Engine Research, 2010, 11(6): 485.
- [3] Manz P W, Daniel M, Jippa K N. Pre-ignition in highly-charged turbo-charged engines analysis procedure and results. [C]// 8th international symposium on internal combustion diagnostics. Baden-Baden:[s. n.], 2008; 27-30.
- [4] Zahdeh A, Rothenberger P, Nguyen W, Anbarasu, M. Fundamental approach to investigate pre-ignition in boosted SI engines [C]// SAE. Detroit: SAE, 2011; 2011-01-0340.
- [5] Han K M, Sauter W, Spicher U. 3D visualization of spark-ignition combustion practical examples of flame propagation [C]// Abnormal combustion and controlled compression ignition. Baden-Baden: 8th International Symposium on Combustion Diagnostics, 2008; 41-43.
- [6] Winch R, Mayes F. A method for identifying pre-ignition [C]// SAE. Detroit: SAE, 1953; 530246.
- [7] Hirschler D, McCullough J. Deposit induced ignition evaluation

- in a laboratory engine [C] // SAE. Detroit; SAE, 1954; 540220.
- [8] Melby A, Diggs D, Sturgis B. An investigation of pre-ignition in engines [C] // SAE. Detroit; SAE, 1954; 540219.
- [9] Sturgis B M, Cantwell E N, Morris W E, Schultz D L. The pre-ignition resistance of fuels [C] // API. [S. l.]: API, 1954; 34, 256-269.
- [10] Pahnke A. Surface ignition factors affecting its occurrence in engines [C] // SAE. Detroit; SAE, 1963; 630489.
- [11] Dahnz C, Han K, Spicher U, Magar M. Investigations on pre-ignition in highly supercharged SI engines [C] // SAE. Detroit; SAE, 2010; 2010-01-0355.
- [12] Zahdeh A, Rothenberger P, Nguyen W, Anbarasu, M. Fundamental approach to investigate pre-ignition in boosted SI engines [C] // SAE. Detroit; SAE, 2011; 2011-01-0340.
- [13] Palaveev S, Magar M, Kubach H, Schiessl R. Premature flame initiation in a turbocharged DISI engine numerical and experimental investigations [C] // SAE. Detroit; SAE, 2013; 2013-01-0252.
- [14] Amann M, Alger T, Mehta D. The effect of EGR on low speed pre-ignition in boosted SI engines [C] // SAE. Detroit; SAE, 2011; 2011-01-0339.
- [15] Eriksson L, Nielsen L, Glavenius M. Closed loop ignition control by ionization current interpretation [C] // SAE. Detroit; SAE, 1997; 970854.
- [16] Eriksson L, Nielsen L. Ignition control by ionization current interpretation [C] // SAE. Detroit; SAE, 1996; 960045.
- [17] Zhu G, Haskara I, Winkelman J. Stochastic limit control and its application to knock limit control using ionization feedback [C] // SAE. Detroit; SAE, 2005; 2005-01-0018.
- [18] Cavina N, Moro D, Poggio L, *et al.* Individual cylinder combustion control based on real-time processing of ion current signals [C] // SAE. Detroit; SAE, 2007; 2007-01-1510.
- [19] VanDyne E, Burckmyer C, Wahl A. Misfire detection from ionization feedback utilizing the smart fire plasma ignition technology [C] // SAE. Detroit; SAE, 2000; 2000-01-1377.
- [20] Ohashi Y, Fukui W, Tanabe F, Ueda A. The application of ionic current detection system for the combustion limit control [C] // SAE. Detroit; SAE, 1998; 980171.
- [21] Tong S, Li H, Yang Z, Deng J. Cycle resolved combustion and pre-ignition diagnostic employing ion current in a PFI boosted SI engine [C] // SAE. Detroit; SAE, 2015; 2015-01-0881.

• 下期文章摘要预报 •

高温后植筋胶黏结力学性能试验研究

张 宇, 楼国标, 李国强, 孙友谊

为了测试工程中植筋胶在高温后的安全性能,对3种常用植筋胶分别在25,60,100,160和260℃恒温加载自然冷却后的黏结力学性能开展试验研究.首先,测试了这3种植筋胶的玻璃转化温度.其次,通过拉伸试验,得出了恒温加载、自然冷却后试件受力与滑移曲线关系,极限黏结承载力和其随温度的损失规律.对试验数据拟合,得出受力与滑移三阶段和四阶段数学模型.研究表明,温度会造成植筋试件力学性能的退化,热塑性植筋胶比热固性植筋胶刚性和耐热性均较差.玻璃转化温度是植筋胶高温后承载力的突变点,是植筋胶正常使用的温度上限并影响着它的高温后使用性能.