

氩-氧氛围下天然气缸内燃烧的离子电流特性

邓俊¹, 龚学海¹, 吴志军¹, 李理光^{1,2}

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学中德学院, 上海 200092)

摘要: 在一台改装的直列双缸火花点火发动机上, 将进气由空气改为具有更高比热比的氩气和氧气的混合气, 进气道喷射天然气, 研究了氩-氧氛围下天然气缸内燃烧的离子电流特性。结果表明, 相比于空气氛围, 氩-氧氛围下缸内离子电流信号强度显著增强; 在氩气体积分数为 79% 及以下时, 离子电流信号特征值与基于缸压计算的燃烧特征值具有很强的一致性; 离子电流信号能够检测缸内的爆震燃烧, 具有很好的可靠性, 但对爆震强度的敏感程度较弱。

关键词: 氩-氧氛围; 离子电流; 天然气发动机; 爆震

中图分类号: TK431

文献标志码: A

Study on Ion Current of Natural Gas in Cylinder under Ar-O₂ Atmosphere

DENG Jun¹, GONG Xuehai¹, WU Zhijun¹, LI Liguang^{1,2}

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

Abstract: Experimental study on the effects of Ar-O₂ atmosphere on ion current characteristic of natural gas in an SI (spark ignition) engine was conducted. Engine fueled by natural gas was modified base on an inline two-cylinder diesel engine. Air was replaced by oxygen and argon (with higher specific heat ratio) mixture as engine intake gas. Results show that the ion current strength increase significantly under Ar-O₂ atmosphere compared with air. When argon percentage is 79% or lower, the eigenvalue of ion current is corresponding very well with combustion characteristics calculated by pressure. Ion current can detect knock reliably, but it is insensitive to knock's intensity.

Key words: Ar-O₂ atmosphere; ion current; natural gas engine; knock

随着人们对全球能源和环境问题担忧的加剧, 提升发动机热效率、降低发动机排放显得愈发重要, 以使汽车能满足日趋严苛的油耗和排放法规要求。一种高效零排放氩气循环发动机概念使同时解决上述问题成为可能^[1], 即在传统内燃机燃烧循环中, 将氢气(H₂)作为燃料喷入以氩气(Ar)和氧气(O₂)作为工质的缸内热氛围中, 其燃烧产物只有水蒸汽, 可通过冷凝去除, 而剩下的氩气可循环使用, 利用氩气的高比热比, 提升发动机的热效率。以天然气替代 H₂ 应用在氩气循环发动机中, 其新增燃烧产物 CO₂ 可利用分离捕集技术去除^[2-3], 对于传统内燃机实现高效零排放具有重要理论意义和应用价值。

氩气循环发动机可视为一种特别的闭循环内燃机形式, 后者作为常规潜艇的不依赖空气的动力装置(air independent propulsion), 技术发展较为成熟。目前的闭循环内燃机主要以柴油作为燃料^[4], 也有研究在进气道喷射少量乙醇或汽油以改善燃烧和排放^[5], 张卫东等^[6]建立了基于神经网络的闭循环柴油机氧气供应控制策略。

氩-氧氛围下发动机缸内的燃烧特性发生了较大改变, 相关研究显示发动机的爆震倾向增加, 需要对缸内燃烧过程进行更精确地控制^[1,7-8]。离子电流技术被认为是一种有效的缸内燃烧诊断方法, 用于估算空燃比、燃料燃烧量, 检测点燃式发动机的不正常燃烧, 如爆震、失火、早燃等, 以及实现缸内燃烧的闭环控制^[9-10]。曹银波等^[11]对离子电流信号与 HCCI (homogeneous charge compression ignition) 燃烧相位的研究发现, 最大放热率的曲轴相位和离子电流差分最小值相位具有最高的相关性, 其次是 50% 放

收稿日期: 2016-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(51576141, 91441125); 同济大学中德学院 KSPG 基金教席项目

第一作者: 邓俊(1978—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为内燃机喷雾、燃烧与排放控制、湍流燃烧。

E-mail: eagledeng@tongji.edu.cn

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

热量对应的曲轴相位(简称 CA50)和离子电流信号最小值相位. 康哲等^[12]发现柴油机燃烧过程中的离子电流信号特征值与燃烧相位的相关性系数在不同工况下均接近或大于 0.8,属高度相关,此外两者之间相关性受燃烧循环变动的直接影响. Yoshiyama S 等^[13]认为,离子电流大小与离子浓度有关,而离子电流信号差分值与离子的生成速率有关.

本文基于改装的直列双缸火花点火发动机,将进气由空气改为氩-氧混合气,进气道喷射天然气,研究氩-氧氛围及空气氛围下天然气缸内燃烧的离子电流特性,并进一步研究氩-氧氛围下点火时刻、氩气体积分数(φ)以及非正常燃烧对离子电流特性的影响,探索基于离子电流的氩气循环发动机燃烧控制方式的可行性.

1 试验设备和方案

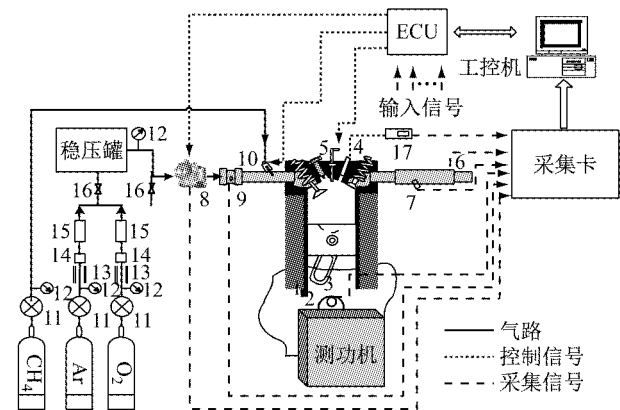
1.1 试验发动机和测试仪器

试验发动机是在一台自然吸气式直列双缸四冲程缸内直喷柴油机的基础上改装的,参数如表 1 所示. 试验台架布置如图 1 所示(图中 ECU 为电子控单元(electronic control unit)),在柴油发动机的基础上,增加节气门、天然气喷射控制系统、氧传感器、火花塞点火系统以及 Ar, CH₄, O₂ 的进气管路,试验系统的搭建仅围绕发动机的某一缸进行.

表 1 发动机参数

Tab.1 Engine specifications

缸径/mm	冲程/mm	排量/L	压缩比	燃烧室
95	114	0.808	10.5	敞口 ω 型



1—发动机; 2—联轴器; 3—光电编码器; 4—缸压传感器; 5—火花塞; 6—氧传感器; 7—尾气温度传感器; 8—电子节气门; 9—空气流量计; 10—气体喷嘴; 11—减压阀; 12—压力表; 13—温控加热带; 14—节流阀; 15—体积流量计; 16—球阀; 17—电荷放大器

图 1 试验台架示意

Fig.1 Schematic figure of engine testing bench

CH₄ 通过减压阀将压力减小到 0.8 MPa,进气道喷射,各脉宽下的喷射量通过前期标定获得. 通过自行开发的 ECU 控制喷射时刻、喷射脉宽和点火时刻(θ_{ig}). Ar 和 O₂ 分别通过减压阀将压力降至 0.1 MPa(温度为 280 K 左右),然后进入稳压罐混合,通过体积流量计控制进气 Ar 体积分数(进气中 Ar 占 Ar-O₂ 混合气的体积分数). 发动机的转速和转矩由电涡流测功机控制,采用瑞士 Kistler 公司的压力传感器(Kistler6052C)、电荷放大器(5018A)和美国国家仪器公司的信号采集卡(NI-PCI 6250)对缸内压力和离子电流等试验数据进行采集. 过量氧气系数(λ)由氧传感器测得, λ 为实际氧气供给质量与理论上燃料完全燃烧所需的空气质量之比.

离子电流信号检测系统如图 2 所示. 该系统为基于外置电源电阻式离子电流检测方案,该方案通过外接可调式偏置电源提供电压,并通过直流/直流升压模块进行升压. 其正极通过高压硅堆连接到火花塞的正极,并通过高压硅堆隔离火花塞点火时的高压. 本系统中偏置电源的调节范围为 40~80 V. 负极通过 2 个可调式电阻器与缸体相连. 通过电阻的分压将离子电流信号进行放大并转化为电压信号.

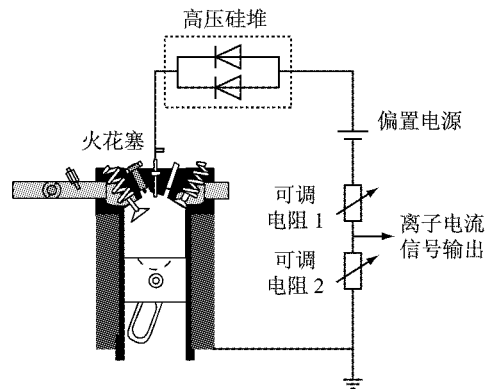


图 2 离子电流信号检测示意

Fig.2 Ion current detection system setup

1.2 试验工况

试验在转速为 1 200 r · min⁻¹下进行,发动机节气门开度(f_{Thr})分别为零(旁通进气)和 10°,以下若无特别指出,均为零节气门开度工况. 试验工况均为化学当量比工况($\lambda=1$). 定义上止点为 0°曲轴相位(简称 0°),上止点之前相位以负值表示. 每 0.5°采集一次缸压和离子电流信号,每个工况点连续采集 100 个循环. 试验开始时先让发动机在进气为空气的状态下稳定运行一段时间,然后再切换至进气为氩-氧混合气的状态,当前后每 100 个循环 CA50 的平均值相差小于 0.2°时,认为工况切换完成. 其余工况参

数如表 2 所示,其中氩-氧氛围下点火时刻的提前会受到爆震的限制,而空气氛围下点火时刻的推迟则会受到失火的限制。

表 2 试验工况

Tab.2 Test conditions

参数	数值
$\theta_{ig}/(^{\circ})$	-30, -25, -20, -15(空气) -15, -10, -5, 0(氩-氧)
$\varphi/\%$	75, 79, 82

定义压力峰值相位 dP_{max} 和放热率峰值相位 dQ_{max} 来表征发动机的燃烧过程,而对于离子电流信号特征,则采用离子电流信号峰值相位 I_{min} 和离子电流信号差分量(离子电流信号对曲轴转角的导数)峰值相位 dI_{min} 来表征。

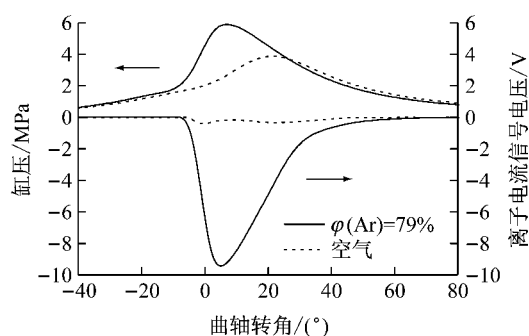
2 试验结果及分析

2.1 空气和氩-氧氛围下离子电流特性

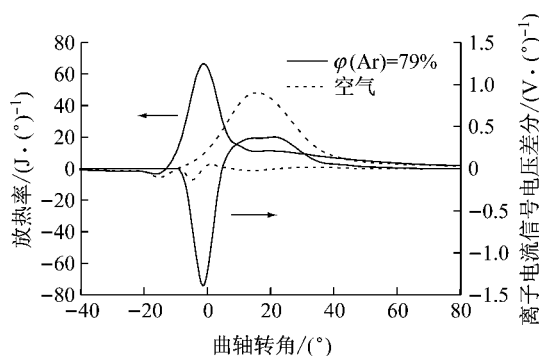
图 3 为空气及氩-氧氛围下缸内离子信号特征对比,其中图 3a 和图 3b 点火时刻均为 -15° 。在氩-氧工况下,氩气的体积分数为 79%,与空气中氮气所占比例相同。根据图 3a 和图 3b 可以看出,氩-氧氛围下缸内离子电流信号非常强,而在空气氛围下,缸内离子信号则不明显。此外,氩-氧氛围下缸内天然气燃烧速率加快使得离子电流信号峰值相位前移。

图 3c 示出了氩-氧及空气氛围下离子电流信号强度的显著差异。在节气门开度为零、点火时刻为 -15° 时,氩-氧氛围下反向离子电流信号电压峰值达到了 9.5V,相比空气氛围增加了近 9V。此外,随着节气门开度增加及点火时刻的提前,离子电流信号强度有所增加。

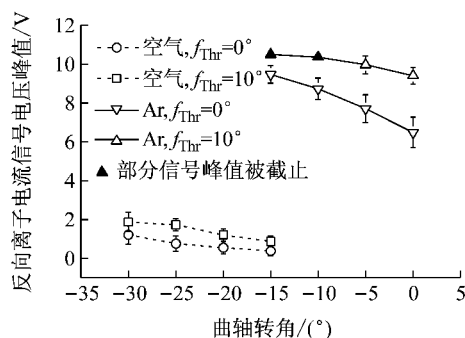
分析认为氩-氧氛围下缸内混合气具有更高的比热比,这使得氩-氧氛围下缸内混合气在压缩过程中升温迅速,在点火时刻更高的温度促进了化学反应的进行。图 4 为理论计算得出的缸内混合气比热比随温度的变化。在温度为 300K 时,氩-氧氛围下缸内混合气比热比为 1.60,显著高于空气氛围下的 1.39。此外,氩-氧氛围下缸内混合气比热容小,缸内混合气总的热容降低,如图 5 所示在温度为 300K 时,氩-氧氛围下缸内混合气的热容仅为空气氛围下的 78%,且随着温度升高而增大的速率不如在空气氛围下,这在燃料放热量相同时,氩-氧氛围下缸内混合气可获得更高的温度升高量,而更高的温升



a 缸内压力与离子电流信号电压



b 放热率与离子电流信号电压差分



c 不同节气门开度下反向离子电流信号电压峰值

图 3 空气和氩-氧氛围下缸内离子电流特性

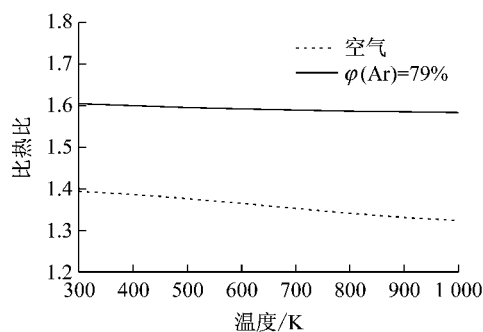
Fig.3 Comparison of ion current under air and Ar-O₂ atmosphere

图 4 不同温度时发动机进气比热比

Fig.4 Specific heat ratio under Ar-O₂ and air condition at different temperature

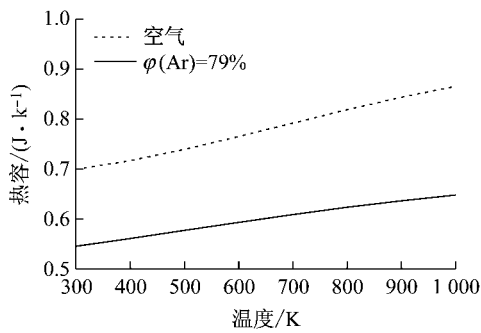


图5 不同温度时发动机缸内混合气热容

Fig.5 Heat capacity under Ar-O₂ and air condition at different temperature

量又会促进燃烧的发生. 以上因素使得相比于空气氛围, 氩-氧氛围下离子电流信号显著增强.

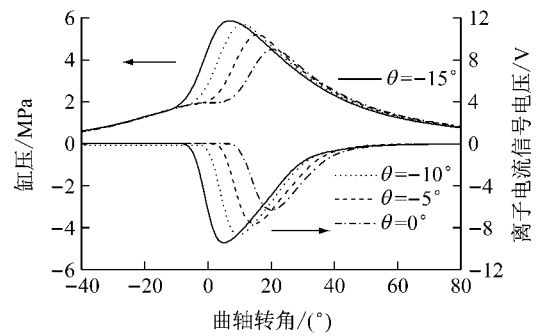
2.2 点火时刻对离子电流的影响

图6中氩气体积分数均为79%. 根据图6a可以看出, 随着点火时刻由-15°推迟到0°, 缸内压力降低, 压力峰值相位后移, 缸内离子电流信号表现出与缸内压力相似的特征. 根据图6b可知随着点火时刻推迟, 缸内燃烧相位后移, 放热率峰值有所增加, 缸内离子电流信号差分值同样随着点火时刻的推迟而后移, 但是离子电流信号电压峰值的绝对值随着点火时刻的推迟而显著降低, 由9.4 V降低为6.3 V. 分析认为, 由于燃烧主要发生在上止点以后, 虽然由于点火时刻推迟, 点火时刻缸内温度增加, 从而导致火焰传播速率增加, 放热更加迅速, 但是由于活塞下行, 燃烧室容积增加, 导致火花塞间隙之间的混合气浓度降低, 进而导致火花塞之间由化学电离产生的离子浓度降低, 离子电流强度减弱.

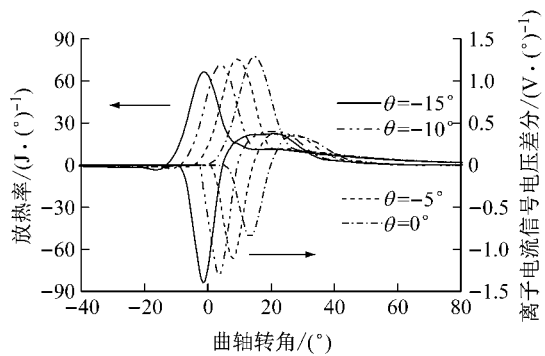
由图6c可知, 在不同点火时刻下, 缸压峰值相位与离子电流信号峰值相位之间、放热率峰值相位与离子电流信号差分峰值相位之间有很好的对应关系, 相位值相差最大不超过1.5°. 当点火时刻在-5°之前时, 相比于缸压峰值相位和放热率峰值相位的循环变动, 离子电流信号及其差分量峰值相位的循环变动并未显著增加, 循环变动均处在±1.4°以内, 但随着点火时刻往后推移, 相比于dP_{max}和dQ_{max}的循环变动, I_{min}和dI_{min}的循环变动有所增加. 此外, 对比图6b离子电流信号峰值和放热率峰值随点火时刻的增减规律, 说明相比于离子电流信号的强度, 离子电流信号的相位更适合表征离子电流的特征.

2.3 氩气体积分数对离子电流的影响

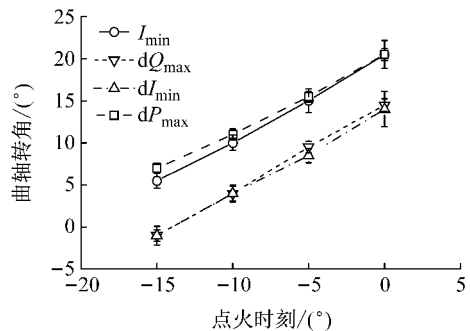
图7的点火时刻为0°. 从图7a和图7b可以看出, 随着进气中氩气体积分数的增加, 氩-氧氛围下缸内燃烧着火延迟期拉长, 燃烧相位和压力峰值相



a 缸内压力和离子电流信号电压



b 放热率与离子电流信号电压差分值



c 缸压、放热率、离子电流信号及其电压差分峰值相位

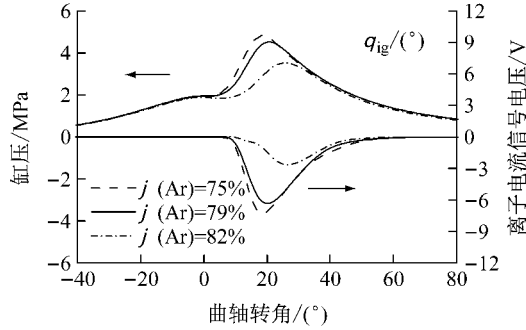
图6 点火时刻对缸内离子电流特性的影响

Fig.6 Influence of spark timing on in-cylinder ion current characteristics

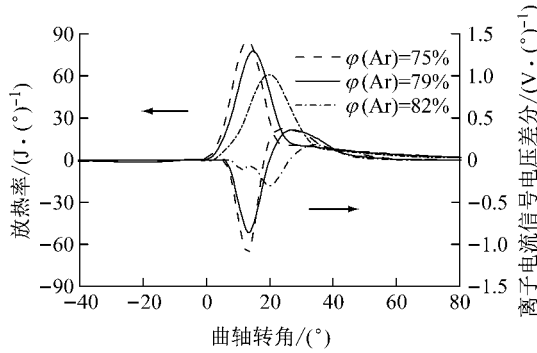
位后移, 这是由于氧气体积分数降低, 缸内燃烧受到抑制. 离子电流信号和其差分量峰值相位也随着氩气体积分数的增加而后移, 分析认为, 随着氩气体积分数增加, 燃烧室内单位体积内的燃料量降低, 导致燃烧时化学电离产生的带电粒子浓度降低, 此外由于放热滞后, 因活塞下行导致燃烧室容积增加, 进一步降低了火花塞之间的离子浓度.

根据图7c可知, 在不同氩气体积分数下, 缸压峰值相位与离子电流信号峰值相位之间, 放热率峰值相位与离子电流信号差分量峰值相位之间总体上具有较好的一致性, 相位相差最大均不超过1.5°, 说明离子电流信号特征值能有效反映缸内的燃烧情况. 当氩气体积分数的增加至82%时, dP_{max}和dQ_{max}

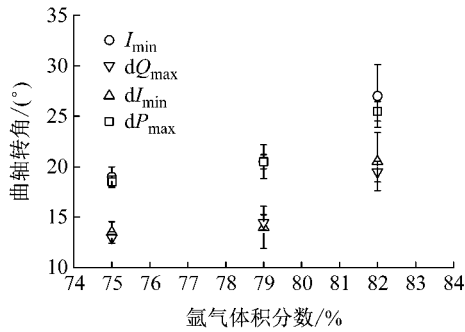
的循环变动仍处在 $\pm 1^\circ$ 的范围内,但 I_{\min} 和 dI_{\min} 的循环变动分别迅速增加到了 $\pm 3.1^\circ$ 和 $\pm 2.9^\circ$,开始影响到离子电流作为缸内燃烧诊断时的稳定性.



a 缸内压力和离子电流信号电压



b 放热率与离子电流信号差值电压



c 缸压、放热率、离子电流信号及其电压差分峰值相位

图 7 氩气体积分数对缸内离子电流特性的影响

Fig.7 Influence of Ar percentage on in-cylinder ion current characteristics

2.4 非正常燃烧工况下缸内离子电流信号特征

天然气辛烷值很高,但由于氩-氧氛围下缸内温度显著升高,使得爆震的倾向增加.图 8 为一个典型爆震循环下的缸压和离子电流信号对比,其中氩气体积分数为 75%,点火时刻为 -5° .从图 8 可以发现,在离子电流信号迅速达到峰值之后,出现了明显的高频震荡现象,与缸压信号记录到的缸内压力波高频震荡很好地对应.文献[14]认为:爆震时压力波传播速率能达到 $800\sim 1\,000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,远大于缸内正

常火焰传播速率($30\sim 70\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),压力波在气缸和活塞间高速震荡,使得火焰中浓度分布不均的带电粒子在火花塞间隙之间剧烈震荡,而离子电流记录到了这种震荡.此外,在 45° 附近,离子电流信号出现了一段因“后燃”造成的峰值.

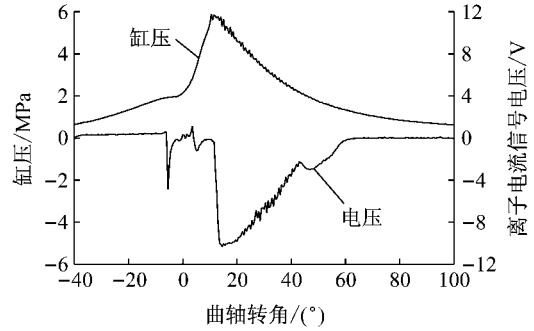


图 8 爆震工况下典型的离子电流信号电压特征
Fig.8 Typical ion current under knock condition

文献[15]对压力示功图用快速傅里叶变换 (FFT)进行带通滤波,以消除测量过程中混入的压力谐波的影响,并定义爆震强度指标 K_{I_pre} :

$$K_{I_pre} = \int_{t_1}^{t_2} |dp_k| \quad (1)$$

式中: t_1, t_2 分别为燃烧开始和结束的时刻; p_k 为带通滤波后缸压振荡的瞬时值.

当多个循环的 K_{I_pre} 平均值超过某一阈值之后,认为发动机处于爆震状态,根据试验工况的缸压特征,该阈值取 $1\text{ MPa}\cdot(^\circ)$.该方法体现了爆震时压力波的振荡特征,并考虑了背景噪声的影响和压力波作用的时间,可作为对爆震进行实时控制的强度指标[16].

图 9 为滤波后的离子电流信号.在进行滤波前,对受点火干扰的离子电流信号区间进行了“置零”处理,以消除点火对离子电流信号的干扰.按照与式(1)相似的方法,定义基于离子电流信号的爆震强度指标 K_{I_ion} :

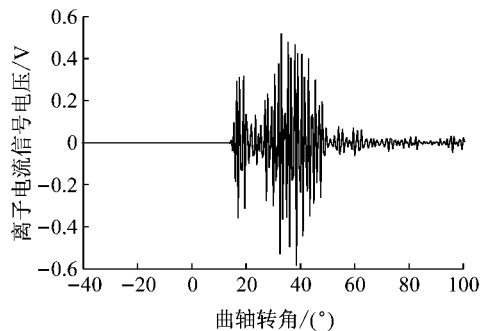


图 9 滤波后的离子电流信号电压
Fig.9 Bandpass filtered ion current traces

$$K_{I_{ion}} = \int_{t_3}^{t_4} |di_k| \quad (2)$$

式中: t_3, t_4 分别为离子电流信号开始和结束的时刻, i_k 为带通滤波后离子电流信号振荡的瞬时值。

图10和图11中 $K_{I_{pre}}$ 和 $K_{I_{ion}}$ 均为100个循环的平均值。在不同工况下,根据式(2)计算得出的 $K_{I_{ion}}$ 与根据式(1)计算得出的 $K_{I_{pre}}$ 均随着点火时刻的提前或 Ar 体积分数的降低而增加,说明滤波后的离子电流信号积分值能很好地反映缸内压力波的震荡现象。但是当氩气体积分数由79%降低到75%时, $K_{I_{pre}}$ 显示当点火时刻提前至 -5° 时缸内爆震程度急剧增加。当点火时刻为 -10° 、Ar 体积分数为75%时的 $K_{I_{pre}}$ 相比于 Ar 体积分数为79%时增加近6倍,而相同工况下 $K_{I_{ion}}$ 的增长幅度不如 $K_{I_{pre}}$ 明显,说明离子电流对爆震强度灵敏程度不如缸压信号。

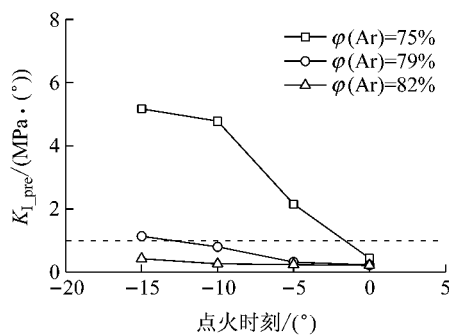


图10 基于缸压信号的 $K_{I_{pre}}$ 值

Fig.10 $K_{I_{pre}}$ base on pressure

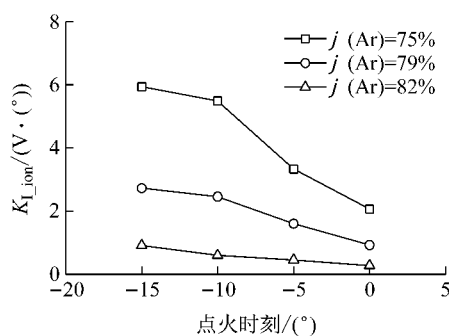


图11 基于离子电流信号的 $K_{I_{ion}}$ 值

Fig.11 $K_{I_{ion}}$ base on ion current signal

分析认为,这是由缸压和离子电流不同的测量原理造成的。缸压信号是由缸内压力压迫压电晶体产生的,缸压信号的震荡特征与冲击波的强度和频率相关;而离子电流信号是由于带电粒子在电场作用下定向移动产生的,当电场强度一定时,离子电流信号震荡现象与火花塞间隙周围浓度分布不均的带电粒子随压力波震荡相关。由于进气道喷射天然气,

燃料在缸内与工质混合均匀,导致当缸内爆震强度增加时,虽然燃烧产生的带电粒子随压力波震荡加剧,但是火花塞间隙之间带电粒子浓度的变化并未显著增加。

3 结论

(1) 在试验工况中(节气门开度为零及 10°),氧氛围下天然气缸内燃烧时的离子电流信号很微弱,而氩-氧氛围下离子电流信号强度显著增加,这为怠速和小负荷工况下利用离子电流检测氩-氧氛围下缸内燃烧状况提供了前提条件。

(2) 在氩气体积分数为79%及以下时,离子电流信号特征值循环变动很小,与基于缸压计算的燃烧特征值具有很强的一致性,表明可使用离子电流信号特征值对氩-氧氛围下缸内燃烧相位进行预测。

(3) 离子电流信号能检测缸内爆震燃烧状态,具有很好的可靠性,但对爆震强度的敏感性较弱。

参考文献:

- [1] KILLINGSWORTH N J, RAPP V H, FLOWERS D L, *et al.* Increased efficiency in SI engine with air replaced by oxygen in argon mixture[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2010, 33(2):3141.
- [2] DANTAS T L P, LUNA F M T, JR I J S, *et al.* Carbon dioxide-nitrogen separation through pressure swing adsorption [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 172(172):698.
- [3] MIRACCA I, CROMBIE M, FORSYTH J, *et al.* The CO₂ capture project status and prospects of the capture program [J]. Energy Procedia, 2013, 37:7825.
- [4] FOWLER A. Closed-cycle diesel engine as underwater power generators[J]. The North East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders, 1990, 106(2): 67.
- [5] WU H W, WANG R H, CHEN Y C, *et al.* Influence of port-induced ethanol or gasoline on combustion and emission of a closed cycle diesel engine[J]. Energy, 2013, 64(1): 259.
- [6] 张卫东, 李燕飞, 陈国骏. 闭循环柴油机配氧及其控制策略试验研究[J]. 内燃机学报, 2005, 23(6): 567. ZHANG Weidong, LI Yanfei, CHEN Guojun. Experimental study on neural strategy of closed cycle diesel oxygen replenishment[J]. Transactions of CSICE, 2005, 23(6): 567.
- [7] BOER P C T D, HULET J F. Performance of a hydrogen-oxygen-noble gas engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1980, 5(4): 439.
- [8] IKEGAMI M, MIWA K, SHJOJI M. A study of hydrogen fuelled compression ignition engines[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1982, 7(4): 341.
- [9] HENEIN N A, BRYZIK W, ABDEL-REHIM A, *et al.* Characteristics of ion current signals in compression ignition and spark ignition engines[C] //SAE. Detroit: SAE, 2010:

- 2010-01-0567.
- [10] 童孙禹, 贺孝愚, 邓俊, 等. 增压汽油机早燃在线检测与诊断[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(10): 1609.
TONG Sunyu, HE Xiaoyu, DENG Jun, *et al.* Board boosted gasoline engine pre-ignition diagnostic[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(10): 1069.
- [11] 曹银波, 张志永, 白云, 等. 喷油策略对离子电流信号与 HCCI 燃烧相位相关性的影响[J]. 内燃机学报, 2013, 31(1): 31.
CAO Yinbo, ZHANG Zhiyong, BAI Yun, *et al.* Influence of injection strategy on interdependency between ion current characteristics and HCCI combustion phase[J]. Transactions of CSICE, 2013, 32(1): 31.
- [12] 康哲, 吴志军, 张志强, 等. 工况参数对柴油机离子电流与燃烧相位相关性的影响[J]. 内燃机学报, 2014, 32(3): 230.
KANG Zhe, WU Zhijun, ZHANG Zhiqiang, *et al.* Influence of operation parameters on the interdependency between diesel ion current and combustion phase[J]. Transactions of CSICE, 2014, 32(3): 230.
- [13] YOSHIYAMA S, TOMITA E, MORI M, *et al.* Ion current in a homogeneous charge compression ignition engine[C] // SAE. Detroit: SAE, 2007; 2007-01-4052.
- [14] GAO Z, LI B, LI C, *et al.* Investigation on characteristics of ion current in a methanol direct-injection spark-ignition engine[J]. Fuel, 2015, 141(141): 185.
- [15] FERRARO C V, MARZANO M, NUCCIO P. Knock-limit measurement in high-speed SI engines[C] // SAE. Detroit: SAE, 1985; 850127.
- [16] 武得钰, 傅茂林, 李建权, 等. 火花点火发动机爆震强度评价指标的研究[J]. 内燃机学报, 1997, 15(1): 62.
WU Deyu, FU Maolin, LI Jianquan, *et al.* A study on knock intensity indices in spark ignition engines[J]. Transactions of CSICE, 1997, 15(1): 62.
-
- (上接第 753 页)
- PENG Feng. Optimization of tram signal control at intersection under semi-independent way condition [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [2] 张志新, 肖守讷, 阳光武, 等. 高速列车乘员碰撞安全性研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(10): 24.
ZHANG Zhixin, XIAO Shounei, YANG Guangwu, *et al.* Research on collision safety of high-speed train crews & passengers[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(10): 24.
- [3] 聂天琦, 任尊松, 孙守光, 等. 高速动车组碰撞安全性研究[J]. 铁道机车车辆, 2015, 35(4): 11.
NIE Tianqi, REN Zunsong, SUN Shouguang, *et al.* Research on collision safety of high-speed EMU[J]. Railway Locomotive & Car, 2015, 35(4): 11.
- [4] 单其雨. 高速列车车体耐碰撞结构研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
SHAN Qiyu. The study of crash-resistant structure for high-speed trains [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [5] HAN H S, KOO J D. Simulation of train crashes in three dimensions[J]. Vehicle System Dynamics, 2003, 40(6): 435.
- [6] XUE X, SMITH R A, SCHMID F. Analysis of crush behaviours of a rail cab car and structural modifications for improved crashworthiness[J]. International Journal of Crashworthiness, 2005, 10 (2): 125.
- [7] 谢素超, 田红旗, 周辉. 耐冲击地铁车辆设计及整车碰撞研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2008, 5(5): 65.
XIE Suchao, TIAN Hongqi, ZHOU Hui. The design of crashworthy subway vehicle and crash research of whole car - body[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2008, 5(5): 65.
- [8] 张乐乐, 张啸雨, 崔进, 等. 地铁头车车体耐撞性仿真分析[J]. 铁道学报, 2012, 34(3): 22.
ZHANG Lele, ZHANG Xiaoyu, CUI Jin, *et al.* Numerical analysis on crashworthiness of subway head-car body [J]. Journal of The China Railway Society, 2012, 34(3): 22.
- [9] 吴克明. 地铁列车连挂碰撞仿真及吸能特性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
WU Keming. The simulation of subway train coupling collision and analyses of energy absorption property [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [10] 沈训梁, 陆云, 李俊, 等. 100% 低地板有轨电车及其转向架发展现状[J]. 都市快轨交通, 2013, 26(5): 21.
SHEN Xunliang, LU Yun, LI Jun, *et al.* Development of 100% low-floor trams and their bogies[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2013, 26(5): 21.
- [11] 黎宏飞, 王锴, 陈晶晶, 等. 100% 低地板有轨电车车体碰撞仿真[J]. 技术与市场, 2014, 21(2): 7.
LI Hongfei, WANG Kai, CHEN Jingjing, *et al.* 100% low-flow tram carbody crash simulation [J]. Technology & Market, 2014, 21(2): 7.
- [12] 王文斌, 康康, 赵洪伦. 列车耐碰撞系统有限元和多体动力学联合仿真[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(10): 1552.
WANG Wenbin, KANG Kang, ZHAO Honglun. Joint simulation of crashworthy train set based on finite element and multi-body dynamic[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(10): 1552.
- [13] 王卉子, 罗超, 伊召锋, 等. 100% 低地板城市有轨电车车辆碰撞仿真分析[J]. 大连交通大学学报, 2015, 36(3): 35.
WANG Huizi, LUO Chao, YI Zhaofeng, *et al.* Crash simulation and analysis of 100% low floor LRV crashworthiness [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2015, 36(3): 35.
- [14] European Committee for Standardization. DIN EN 15227 Railway applications-crashworthiness requirements for railway vehicle bodies[S]. Berlin: Beuth Press, 2010.
- [15] 中国国家标准化管理委员会. 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范: GB5599—1985 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1985.
Standardization Administration of the people's Republic of China. Railway vehicles-Specification for evaluation the dynamic performance and accreditation test: GB5599—1985 [S]. Beijing: China Standard Publishing House, 1985.