

多火花塞点火实现快速燃烧的试验研究

李国田¹, 汪 洋¹, 徐帅卿^{1,2}, 肖 欢¹, 田相龙¹, 李冀辉¹

(1. 天津大学 内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072;

2. 潍柴动力股份有限公司 发动机技术研究院, 潍坊 261000)

Experimental Study on Achieving Rapid Combustion with Multi-Spark Ignition

LI Guotian¹, WANG Yang¹, XU Shuaiqing^{1,2}, XIAO Huan¹, TIAN Xianglong¹, LI Jihui¹

(1. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Research Institute of Engine Technology, Weichai Power Industry Co., Ltd., Weifang 261000, China)

Abstract: On a multi-spark ignition experimental platform retrofitted from a rapid compression and expansion machine, the influence of the number of spark plugs on indicated work, maximum combustion pressure, maximum pressure rise rate, heat release rate and knock characteristics was studied. The conclusions are as follows: when hydraulic pressure and mixed gas concentration are kept constant, the indicated work increases at first and then decreases with the advancement of the ignition phase from 5 to 35 mm before TDC. There is an optimum ignition time, and it is delayed accordingly as the number of spark plugs increases. The heat release rate, maximum combustion pressure, pressure rise rate and indicated work with multi-spark ignition are significantly higher than those with single spark ignition, and their increase rates are not linear with the number of spark plugs; increased burning rate and indicated work are more obvious in thin mixed gas with more than one spark plug. Multi-spark ignition is more inclined to cause knock at the same ignition phase with higher hydraulic pressure.

摘要: 使用快速压缩-膨胀机改装的多火花塞点火试验台架,研究了火花塞数目对指示功大小、最高燃烧压力和最大压升率、燃料放热速率及爆震特性的影响。得到结果如下:液压源压力及混合气浓度相同,点火相位从上止点前5~35 mm逐渐增大时,指示功先增大后减少,即存在最佳点火相位;随着火花数目的增加,最佳点火时刻后移;多火花塞点火的放热速率、最高燃烧压力和压升率、指示功均比单火花塞点火有明显提升,提升幅度和火花塞数目并不成线性关系;在混合气稀薄时,多火花塞点火对燃烧速率及指示功的提升作用更加明显;随着液压源压力的增大,相同点火相位时,多火花塞比单火花塞点火爆震倾向更加严重。

关键词: 液压自由活塞发动机; 多火花塞点火; 快速压缩-膨胀机; 快速可控燃烧

Key words: hydraulic free piston engine; multi-point ignition; rapid compression and expansion machine; rapid and controllable combustion

DOI: 10.13949/j.cnki.njgc.2017.05.005

中图分类号: TK441

文献标识码: A

收稿日期: 2016-05-24

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51176137, 51476113); 国家青年基金项目(51406135)

Fund Project: National Natural Science Foundation of China (51176137, 51476113); National Youth Fund (51406135)

作者简介: 李国田(1986—),男,硕士生,主要研究方向为内燃机燃烧过程, E-mail: liguotian@tju.edu.cn;

汪 洋(联系人),男,教授,博士生导师,主要研究方向为内燃机电控技术、内燃机新型燃烧过程, E-mail: wang_yang@tju.edu.cn.

0 概述

液压自由活塞发动机是一种将内燃机和液压泵集成为一体的特种发动机。其热功转换效率高,传动链短,但是上止点停留时间较短,对燃烧速度要求较高。快速燃烧技术因具有燃烧进行的时间短、有较高的燃烧稳定性、热传导损失较少、可以明显改善燃料的消耗、提高燃烧效率、可更好地控制废气的排放量等优点而被广泛研究^[1]。

作为快速燃烧技术之一,均质充量压燃(HCCI)燃烧方式以预混合燃烧和低温反应为主要特征,成为目前内燃机燃烧领域的研究热点,在自由活塞发动机上也有较多应用。HCCI 使已混合均匀的可燃混合气多点同时达到自燃条件,使燃烧在多点同时发生,燃烧反应迅速,但具有燃烧时刻难以控制、运行工况范围狭窄等缺点^[2-3]。实现快速又直接可控的燃烧一直是内燃机工作者的追求目标。采用双火花塞或者多火花塞点火是实现可控快速燃烧的重要途径之一。

对于多火花塞点火,国内外大量发动机试验验证了多火花塞点火能够缩短火焰传播距离,加速燃烧,有利于提高火花点火性能和燃烧速率,增大发动机等容度从而改善发动机性能。但不同学者就多点点火对发动机的动力性和经济性的影响效果存在争

议,关于多点点火对爆震的抑制作用方面的观点也有差异^[4-8]。本文对多点点火燃烧特性进行研究,以期解决争议,并提出自由活塞发动机的快速可控燃烧模式,对自由活塞发动机合理组织燃烧,提高热功转换效率具有理论指导意义。

1 试验设备仪器与试验方法

1.1 液压快速压缩-膨胀机

快速压缩-膨胀机(rapid compression expansion machine, RCEM)是一种用于模拟内燃机单循环过程的设备,被广泛应用于 HCCI 燃烧、爆震现象的观测及不同燃料着火延迟等研究中^[9-12]。相对于传统曲柄连杆发动机,快速压缩-膨胀机的运动规律更接近液压自由活塞发动机,而且其特殊的缸盖结构适合多火花塞的布置。本文在现有快速压缩-膨胀机单火花塞的基础上,在缸顶上增设 6 个火花塞,通过分析火花塞数目分别为 1、4、7 时的指示功大小、快速燃烧期及爆震特性等,对比得出多点点火的快速燃烧特性。

该快速压缩-膨胀机系统主要由液压驱动系统、燃烧室和加热系统、数据采集和控制系统等组成。其结构原理图及具体参数如图 1 和表 1 所示。快速压缩-膨胀机基于液压驱动原理,详细的结构特征、工作过程及所用试验仪器参见文献^[13]。

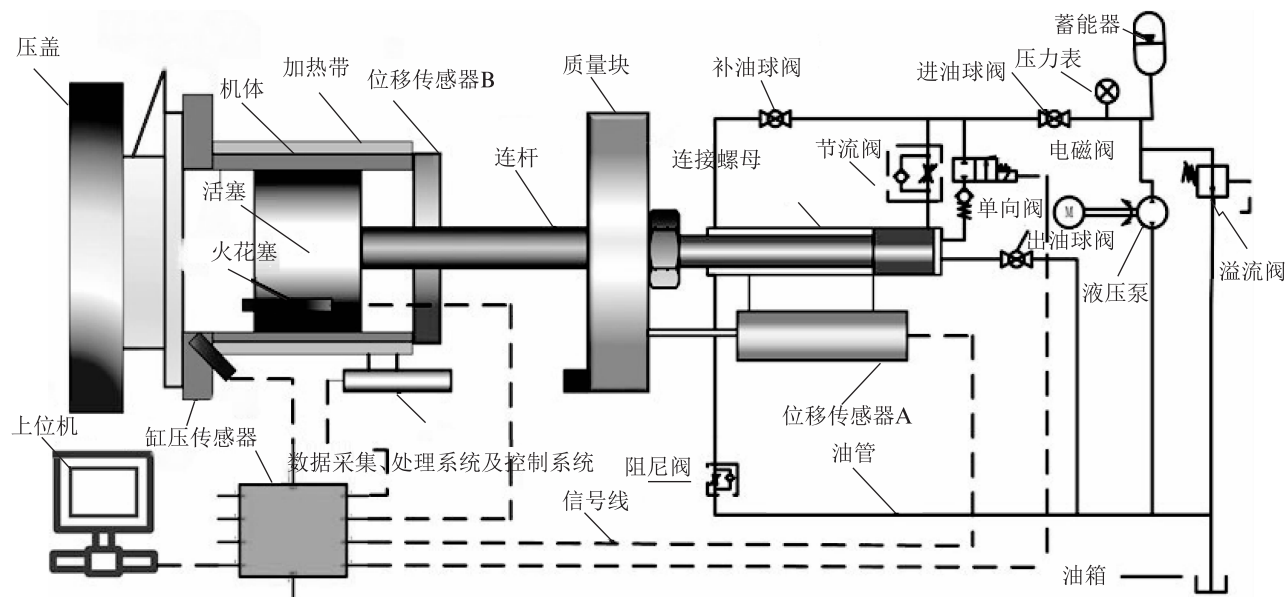


图 1 RCEM 结构原理图

1.2 试验设备介绍及改装

为了对缸壁温度进行准确控制,在缸壁上安装了温度传感器,并使加热带连接温控仪,该温控仪如图 2 所示。甲醇沸点 65°C ,在试验开始之

前,通过加热带迅速加热缸壁温度至目标温度(80°C),并在试验过程中保证温度的准确稳定。结果表明,通过 PID 控制能实现 $(80\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 的准确控制。

多火花塞布置参见图 3。为研究火花塞数目对燃烧和爆震的影响,将缸盖打孔,每孔安装有 1 个火花塞,并通过 ECU 控制每个火花塞点火电路通断与点火时刻,以实现不同数目的点火。其中,中间火花塞上的引线是缸压传感器线,该缸压传感器与火花塞集成于一体,见图 4(a)。

表 1 液压 RCEM 参数表

项目	参数
缸径/mm	100
最大行程/mm	102
压缩比	6~30 可变
压缩时间/ms	20~40
柱塞直径/mm	30/25
耐压/MPa	30
运动件质量/kg	15
缸数	1
火花塞数目	1(中心)+6(周围)
燃烧方式	火花点燃/压燃/HCCI



图 2 快速压缩机上的温控仪

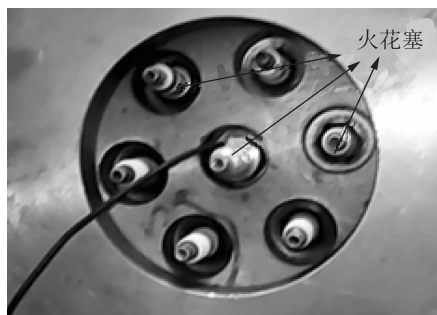


图 3 火花塞布置图

缸压传感器选用 KISTLER 公司生产的 Type 6118B 压电式压力传感器,该缸压传感器与 M14 火花塞相集成,安装时无需额外打孔,便于缸盖上多火花塞的布置。该传感器可以测量的压力范围为 0~25 MPa,工作温度为 -50~400 ℃,测量频率高达 100 kHz,满足高转速工况下缸压数据的采集要求。



(a) Type 6118B 压力传感器 (b) Type 5018 电荷放大器

图 4 试验平台使用的压力传感器和电荷放大器

电荷放大器选用了 KISTER 公司生产的 Type 5018 电荷放大器,图 4(b)为实物图。通过处理,电荷放大器可以将作用在缸压传感器上的压力转化成线性变化的电压输出,并可根据试验条件 and 需求设置相应的缸压测量范围和精度。

2 试验结果与分析

2.1 点火相位和液压源压力对压缩比的影响

由于快速压缩机中不存在曲柄连杆机构,本文用点火相位来表征点火时刻,即活塞距离极限上止点的位移。

快速压缩机在运行过程中上止点不固定,实际压缩比的大小取决于上止点的相应位置。图 5 分别为过量空气系数 $\lambda=1$ 时不同点火相位和液压源压力所对应的压缩比大小。由图 5 可见:点火相位越大,即点火越提前,活塞能到达的最大位移越小,对应的压缩比也越小。同样液压源压力提高,快速压缩-膨胀机的压缩比也会随之增大。其中液压源压力 5 MPa 时在上止点后(ATDC)5~30 mm 的点火相位内,试验系统的压缩比在 6~9 范围内变化,而液压源压力提高到 8 MPa 后,压缩比的范围也相应地提高到 16~20 之间。

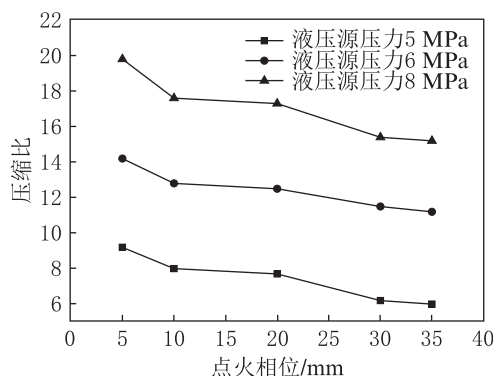


图 5 点火相位和液压源压力对压缩比的影响

2.2 火花塞数目和点火相位对指示功大小的影响

图6为液压源压力6 MPa、过量空气系数 $\lambda=1$ 时,不同火花塞数目和点火相位时快速压缩-膨胀机的指示功大小。可以看出,在整个5~35 mm的点火相位范围内,多火花塞点火使发动机的指示功明显增大。火花塞数目为1、4、7时最大的指示功为424.5 J、449.2 J、566.0 J,其中4个火花塞时相对1个火花塞时提升5%,7个火花塞时提升33%,提升效果明显。但是多火花塞点火对指示功的提升程度并不与数目的增多成线性变化。

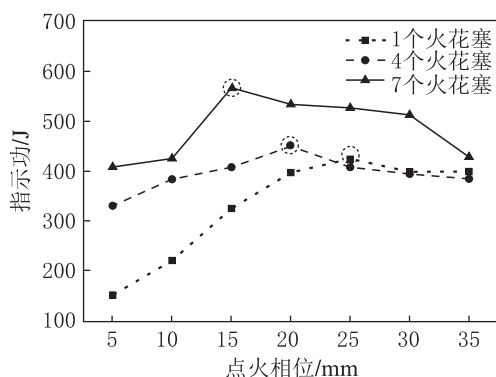


图6 火花塞数目和点火相位对指示功的影响

点火相位对燃烧的影响直接可以表现为:随着点火相位的增大(即点火时刻的提前),发出的指示功会先增大后减少,存在一个最佳的点火相位。如图6中3个虚线圈处所示,火花塞数目为1、4、7时所对应的最佳点火相位分别为25 mm、20 mm、15 mm。这是由于多火花塞的作用下,火焰传播距离缩短,燃烧速度加快,相同的点火相位时,多火花塞点火生成较大的燃烧压力,造成压缩负功较大,传热损失增多,故要想获得较大的指示功,需要进一步推迟点火,即最佳点火时刻相应地推迟。

此外,即使在偏离最佳点火相位时,多火花塞也能发出多于单火花塞的指示功,尤其是在单火花塞点火相位25 mm之后的点火时刻。例如点火相位10 mm时,单火花塞指示功为221.5 J;而4个火花塞点火时发出指示功383.6 J,提高了近75%;7个火花塞发出425.0 J,提高91%。可见多点点火对燃烧的加速作用十分明显,尤其是在比最佳点火时刻稍迟时,这也充分证明了多点点火是快速燃烧技术的有效实现方法之一。

2.3 火花塞数目对最高燃烧压力和最大压力升高率的影响

最高燃烧压力是计算和评判内燃机零部件强度的主要依据之一,最高燃烧压力出现的位置是评判燃烧放热的及时性和偏离上止点程度的科学依据。

图7为液压源压力6 MPa、过量空气系数 $\lambda=1$

时不同火花塞数目对应的最高燃烧压力。在火花塞数目为1、4、7时,最高燃烧压力分别为3.88 MPa、4.24 MPa、4.98 MPa,按照等效转速变换的思路^[14],其出现位置分别等效于上止点后4°曲轴转角、7°曲轴转角、11°曲轴转角。由于多火花塞点火使压力快速升高,从而使活塞较快地回退至下止点,对应以曲轴转角计的峰值压力出现时刻也相应偏迟。单火花塞点火时,一般希望气缸最高压力出现在上止点后10°~15°曲轴转角;而快速压缩机中单点点火在最佳点火相位时最高燃烧压力出现在上止点后4°曲轴转角,比传统发动机的理想最高压力出现位置稍早,这与快速压缩机上止点停留时间较短有关。

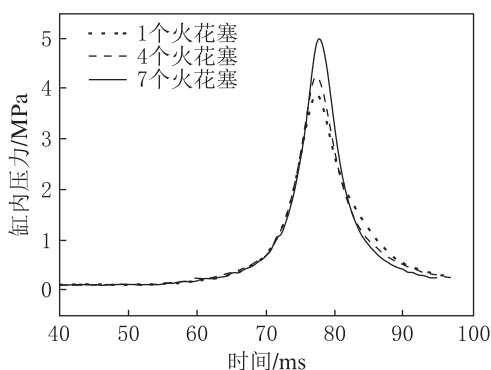


图7 最佳点火相位时火花塞数目对最高燃烧压力的影响

图8为压力升高率的大小。当火花塞数目为1、4、7时,最大压升率分别722.3 MPa/s、853.5 MPa/s、1189.5 MPa/s。多点点火的最大压升率较高,其中7个火花塞比单火花塞提高了近65%,提升效果明显。这是由于多点同时着火,火焰传播速度较大,燃料放热较快,等容度高。当然如果压升率过大,则可能会导致燃烧的粗暴,反而会降低发动机性能。

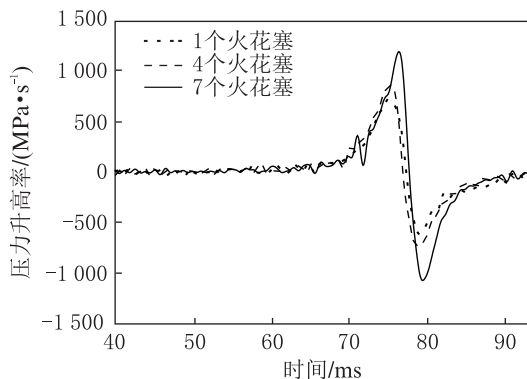


图8 最佳点火相位时火花塞数目对压力升高率的影响

2.4 火花塞数目对燃料放热特性的影响

图9为液压源压力为6 MPa、过量空气系数 λ 为1、不同火花塞数目时的累计放热率曲线,图中所示的三角形、圆形和方形分别标示累计放热率达到10%、

50%、90%的时刻^[15]。分别定义火焰发展期为点火开始到燃料累计放热 10%的时间,快速燃烧前期为燃料累计放热 10%~50%的时间,快速燃烧后期为燃料累计放热 50%~90%的时间。具体时间见表 2。

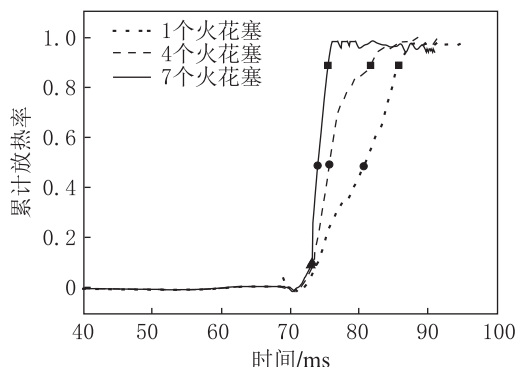


图 9 不同火花塞数目时的累计放热率

表 2 累计放热率时刻表($\lambda=1$)

时期	时间/ms		
	1 个火花塞	4 个火花塞	7 个火花塞
火焰发展期	11.0	7.6	5.5
快速燃烧前期	7.0	2.4	1.7
快速燃烧后期	5.1	5.4	1.3

可以看出,在过量空气系数 $\lambda=1$ 时,4 个火花塞点火时的火焰发展期为 7.6 ms,比单火花塞的火焰发展期 11.0 ms 缩短 3.4 ms。对于快速燃烧前期,4 个火花塞点火时为 7.0 ms,比单火花塞的 2.4 ms 缩短了 4.6 ms,缩短近 65%。说明多火花塞对加速火焰传播速度的效果主要体现在缩短快速燃烧前期(累计放热达到 10%~50%),7 个火花塞点火时快速燃烧前期继续缩短至 1.7 ms,缩短效果更为明显。这是因为多火花塞点火,有利于火核早期形成和发展,同时燃烧初期火焰前锋面积增大,从而加快了前期燃烧速率。

而在快速燃烧后期上,4 个火花塞点火相对于 1 个火花塞效果不明显,只有火花塞数目增加到 7 个时才将快速燃烧后期由 5.1 ms 缩短至 1.3 ms。可见,7 个火花塞时使快速燃烧前期和燃烧后期都明显缩短。

为进一步研究多点点火对稀燃混合气燃烧的加速效果,进行了过量空气系数为 1.1 时火花塞数目分别为 1、7 的点火试验。图 10 为液压源压力 6 MPa 时在上述条件下分析得到的放热率曲线。具体累计放热率时刻见表 3。可以看出,稀燃时采用 1 个火花塞时火焰发展期及快速燃烧期都会比当量比燃烧时间增长,这与当量比时火焰传播速度较快有关。

而稀燃时采用 7 个火花塞的火焰发展期为 5.8 ms,快速燃烧前期 1.9 ms,比 1 个火花塞时的 12.0 ms 和 7.6 ms 缩短明显。此外,稀燃时 7 个火

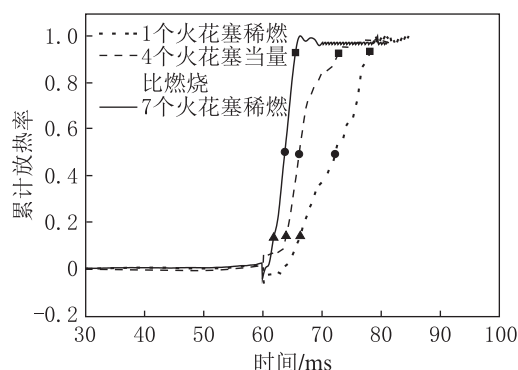


图 10 稀燃($\lambda=1.1$)时不同火花塞数目时的累计放热率

表 3 稀燃累计放热率时刻表

项目	时间/ms		
	1 个火花塞 ($\lambda=1.1$)	4 个火花塞 ($\lambda=1.0$)	7 个火花塞 ($\lambda=1.1$)
火焰发展期	12.0	7.6	5.8
快速燃烧前期	7.6	2.4	1.9
快速燃烧后期	5.5	5.4	1.7

花塞的效果仍然优于 4 个火花塞时的当量比燃烧,分别使快速燃烧前期和后期减少 0.5 ms 和 3.8 ms,快速燃烧前期的缩短十分明显。此外,表 4 对比了最佳点火相位时过量空气系数分别为 1.0、1.1 时多火花塞点火的指示功大小。其中,在 $\lambda=1.1$ 时,多火花塞对指示功提升 48%,比 $\lambda=1.0$ 时的提升幅度(33%)更大。可见,火花塞数目的增多使燃烧速度加快并优化了燃烧的效果,可以弥补稀混合气时火焰传播速度过慢的不足。

表 4 不同混合气浓度下多火花塞的最大指示功

项目	最大指示功/J		最大指示功提升幅度/%
	1 个火花塞	7 个火花塞	
$\lambda=1.0$	424.5	566	33
$\lambda=1.1$	326.0	524	48

2.5 多点点火的爆震分析

图 11 为 7 点点火在过量空气系数 $\lambda=1$ 、不同液压源压力时的指示功。6 MPa 的指示功均比 5 MPa 的指示功大,这是因为提高液压源压力可以增大压缩比,进一步提高多点点火指示功。而将液压源压力继续提高至 8 MPa 时,图 11 显示在点火相位为 10 mm 时缸内发生爆震现象(用符号 * 表示),而相同条件下单点点火在整个 5~30 mm 点火相位范围内均未出现爆震,如图 12 所示。

图 13 显示,液源压力 8 MPa 下最高燃烧压力为 16.36 MPa,压力升高率达到 0.28 MPa/ μ s,符合爆震的基本特征^[16]。此外其指示功仅有 381 J,这是由于爆震导致漏气损失和散热损失加大,发动机功率降低。

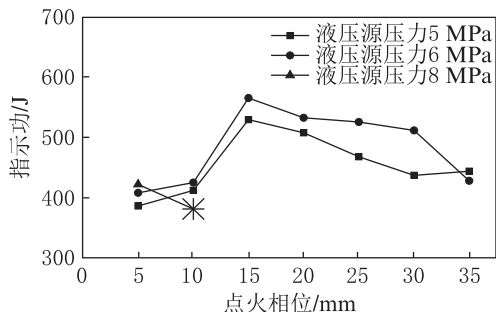


图 11 7 点点火在不同液压源压力时的指示功

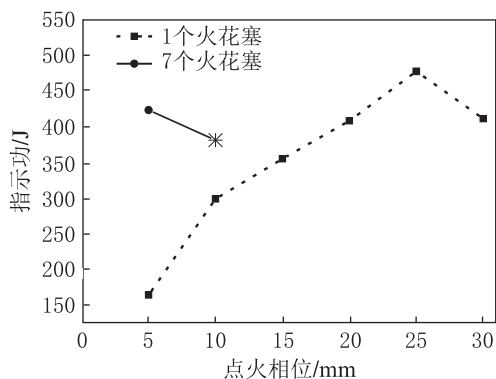


图 12 液压源压力 8 MPa 下不同火花塞数目的指示功

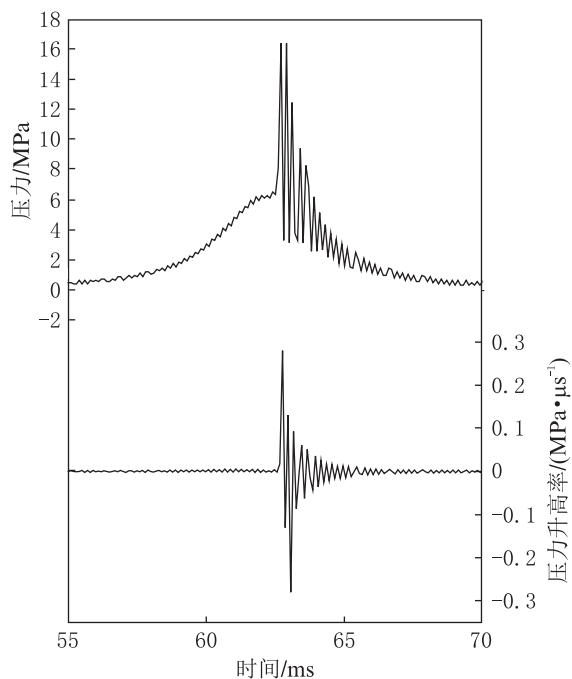


图 13 液源压力 8 MPa 下爆震时的压力和压力升高率曲线

在火花塞数目对最高燃烧压力影响的分析中得知,相同点火提前角下,多火花塞点火压力升高明显,这与单火花塞点火增大点火提前角的效果相当,故更容易出现爆震^[4]。其本质原因可用末端混合气自燃理论解释。虽然相同点火相位时多火花塞与单火花塞点火相比明显缩短了火焰传播时间 t_1 ,但是由甲醇滞燃期经验

公式(1)得知^[17],其压力和温度的升高使末端混合气自燃时间 t_2 大幅缩短, $t_1 > t_2$, 出现爆震现象。

$$\tau_i = \frac{0.3634}{(0.1p)^{1.18}} e^{6994.84/T} \quad (1)$$

式中, τ_i 为滞燃期, ms; p 为燃烧室内压力, MPa; T 为燃烧室内温度, K。

3 结论

(1) 在液压源压力及混合气当量比相同的情况下,随着点火相位的逐渐增大,快速压缩-膨胀机的指示功经历由小变大再变小的过程,即存在最佳点火相位。随着火花数目的增加,最佳点火相位减小,即最佳点火时刻后移。

(2) 多火花塞点火的放热速率、最高燃烧压力和压升率、指示功均比单火花塞点火有明显提升,其提升幅度和火花塞数目不成线性关系,7个火花塞点火提升比例更大。

(3) 在混合气稀薄时,多火花塞点火对燃烧速率及指示功的提升作用更加明显,可以弥补稀混合气时火焰传播速度过慢的不足。

(4) 随着液压源压力的增大,相同点火相位时多火花塞比单火花塞点火的爆震倾向更加严重。

参考文献:

- [1] ISMAIL A, BILGIN A. A parametric study on the performance parameters of a twin-spark SI engine[J]. Energy Conversion & Management, 2009, 50(8): 1902-1907.
- [2] SAXENA S, BEDOYA I D. Fundamental phenomena affecting low temperature combustion and HCCI engines, high load limits and strategies for extending these limits[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2013, 39(5): 457-488.
- [3] 常国峰, 郭英男, 张纪鹏, 等. 采用快速压缩机对甲醇燃料的 HCCI 燃烧特性的研究[J]. 燃烧科学与技术, 2008, 14(3): 233-238.
CHANG G F, GUO Y N, ZHANG J P. Study on HCCI of methanol by rapid compression machine [J]. Combustion Science and Technology, 2008, 14(3): 233-238.
- [4] 尚会超, 张力, 陈海, 等. 汽油机双火花塞燃烧室点火控制策略的测试分析[J]. 内燃机工程, 2014, 35(6): 106-112.
SHANG H C, ZHANG L, CHEN H, et al. Experimental analysis of ignition control strategy for gasoline engine with dual spark plug [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering. 2014, 35(6): 106-112.
- [5] 杨万里, 许敏, 辛军, 等. 发动机缸盖耦合热应力分析[J]. 内燃机工程, 2007, 28(2): 47-50.
YANG W L, XU M, XIN J, et al. Coupling thermal stress analysis of engine cylinder head [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2007, 28(2): 47-50.

(下转第 40 页)

- [6] 陈明飞,黄永生,张力,等. 发动机单双火花塞点火性能对比研究[J]. 小型内燃机与摩托车,2011,40(3):23-26.
CHEN M F, HUANG Y S, ZHANG L, et al. Studies about performance of single and dual spark plug ignition on an ICE[J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2011, 40(3): 23-26.
- [7] NAKAMURU N, BAIKA T, SHIBATA Y. Multipoint spark ignition for lean combustion[C]//SAE Paper. Detroit, MI, USA, 1985, 852092.
- [8] 张博. 基于快速压缩装置的天然气和二乙醚多点点火燃烧特性研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2013.
- [9] MITTAL G, CHOMIER M. Effect of crevice mass transfer in a rapid compression machine[J]. Combustion and Flame, 2014, 161(2):398-404.
- [10] MITTAL G, BHARI A. A rapid compression machine with crevice containment[J]. Combustion and Flame, 2013, 160(12):2975-2981.
- [11] KATSUMATA M, MORIKAWA K, TANABE M. Behavior of shock wave and pressure wave of SI knocking with super rapid compression machine[C]//SAE Paper. Kobe, Japan, 2011, 2011-01-1875.
- [12] AN H, CHUNG J, LEE S, et al. The effects of hydrogen addition on the auto-ignition delay of homogeneous primary reference fuel/air mixtures in a rapid compression machine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40: 13994-14005.
- [13] 陈昱锦,汪洋,尹述君,等. 火花点火式液压自由活塞发动机的模拟试验研究[J]. 内燃机工程, 2016, 37(4):70-75.
CHEN Y J, WANG Y, YIN S J, et al. Study on simulation experiment of spark ignition-hydraulic free piston engines [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2016, 37(4): 70-75.
- [14] 许洪瑜,冯慧华,宋豫,等. 基于活塞运动规律的自由活塞发动机燃烧放热规律[J]. 内燃机学报, 2015, 33(5):413-419.
XU H Y, FENG H H, SONG Y, et al. Heat release rate of FPEG based on the piston motion[J]. Transactions of CSICE, 2015, 33(5):413-419.
- [15] YELIANA Y, COONEY C, WORM J, et al. The calculation of mass fraction burn of ethanol-gasoline blended fuels using single and two-zone models[C]//SAE Paper. Detroit, MI, USA, 2008, 2008-01-0320.
- [16] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京:机械工业出版社, 2010:1-2.
- [17] 孙志远,王树奎. 在高温高压容弹中甲醇滞燃期的研究[J]. 小型内燃机与摩托车, 1994(3):1-4.