

重油活塞发动机的燃烧关键技术分析*

朱呈祥 杨日炯

(厦门大学航空航天学院 福建 厦门 361005)

摘要:随着通用航空产业的发展,活塞发动机技术的改造升级使活塞发动机呈现出可观的市场需求,以提高活塞发动机燃油经济性为目标的技术改造将发动机的燃烧问题推向了关键位置。针对重油活塞发动机的燃烧关键技术进行了分析,重点探讨了发动机点火技术、喷射雾化技术以及燃烧技术的现有手段和国内外研究水平,分析了未来的燃烧关键技术方向,为我国重油活塞发动机的燃烧技术取得突破提供了参考。

关键词:活塞发动机 点火 喷射雾化 燃烧

中图分类号:V231.2 文献标识码:A 文章编号:2095-8234(2018)02-0091-06

Analysis on the Combustion Key Technologies of Heavy Oil Piston Engines

Zhu Chengxiang, Yang Rijiong

School of Aerospace Engineering, Xiamen University (Xiamen, Fujian, 361005, China)

Abstract: With the development of general aviation, a large market requirement has shown up for the updating of heavy oil piston engines. To increase their fuel economy, development of the combustion technology becomes more and more crucial. In the present work, combustion key technologies of heavy oil piston engines have been analyzed, with focuses on the introduction of engine ignition technology, fuel impingement technology and combustion technology. The future directions of technology development have also been provided, which would support the technical breakthrough of combustion for piston engines.

Keywords: Piston engine; Ignition; Impingement; Combustion

引言

随着我国低空空域的逐步开放,通用航空作为一项极具吸引力与发展前景的新兴产业,已得到越来越多的企业和研究机构的关注,质量轻、体积小、功率高、结构简单且经济性好的活塞发动机将拥有巨大的市场需求。然而,国内的活塞发动机研发起步较晚,在可靠性、产品类型、数控系统等方面仍有不少关键技术问题需要攻克。在航空燃料的单一化发展趋势下,重油活塞发动机将是未来活塞发动机的一个主要发展方向。本文着重分析了重油活塞发动机的相关燃烧关键技术,包括发动机点火技术、燃料

喷射雾化技术以及燃烧技术等,总结了重油活塞发动机的技术现状及未来发展趋势。

1 发动机点火技术

根据燃料着火方式的不同,活塞发动机主要分为点燃式与压燃式两类。点燃式发动机的实际工作循环可等价于等容加热循环(Otto循环),压燃式发动机的实际工作循环则可等价于等压加热循环(Diesel循环)。压燃式发动机虽然也会面临冷启动的问题,但利用一般的电热塞技术就可以很好地解决。所以,活塞发动机的点火技术问题主要体现在利用火花塞点火的点燃式发动机上。目前,点燃式发动机

* 基金项目 福建省软科学基金资助(2017R0099)。

作者简介 朱呈祥(1986-)男,讲师,主要研究方向为航空发动机。

的先进点火技术主要有双火花塞点火技术和高能点火技术等。

1.1 双火花塞点火技术

点燃式活塞发动机由单火花塞技术向双火花塞技术的发展升级,不仅很好地保证了点火的可靠性,同时还有效地提升了发动机的高空性能。目前,国内外对双火花塞技术的研究与应用已相对成熟。

Hillyer 等人^[1]以福特 PROCO 车用发动机为研究对象。研究表明,使用分层充气技术与双火花塞点火技术可以使发动机在稀混合气和高 EGR 的情况下实现稳定燃烧,并且还能在一定程度上减少 CO、HC 等污染物的排放量。

自 2003 年开始,德国宝马公司在新型 R110S、R1150GS、R1150R、R1150RS 和 R1150RT 等双缸摩托车上应用双火花塞点火技术,进一步改善了尾气排放质量,提高了燃烧稳定性,实现了发动机在较大的转速范围内有较好的燃烧放热一致性^[2]。

重庆大学的黄琪^[3]等人基于车用汽油机双火花塞点火研究设计了一种能适应多工况的三段式速燃 VVT 系统,该系统可实现不同工况下的配气定时优化,并且双火花塞能够根据工况条件自动实现单点火、同相点火或异相点火。研究表明,双火花塞点火有助于加速燃烧,在明显燃烧期(发动机燃烧室内从火焰中心形成到火焰传播至燃烧末端的过程)内双火花塞点火燃烧锋面(预混气体的反应区)、燃烧体积等指标均优于单火花塞点火;而且双火花塞点火温度升高较快、最高温度也大于单火花塞点火。

装甲兵技术学院的陈明飞等人^[4]在一台四冲程车用发动机上进行的单、双火花塞性能对比试验表明,采用双火花塞技术,不但可以通过双火花塞同时点火来提高发动机着火概率,保证发动机着火的可靠性,还提高了循环的等容度和循环热效率,降低了散热损失,从而提高了发动机的动力性能。

天津内燃机研究所的阎希成等人^[5]对一台采用电控燃油喷射技术的国产摩托车发动机上的点火系统进行了改造,实现了双火花塞点火,并研究了摩托车在 ECER40 排放循环下的发动机尾气排放特征。研究表明,双火花塞点火系统配合点火提前角优化,可明显降低摩托车启动初期的 HC、CO 排放,但 NO_x 排放略有上升。

双火花塞点火技术尽管在车用汽油机和摩托车用汽油机上应用不多,但在航空发动机上应用已比较成熟。航空发动机应用双火花塞点火系统已有将近四十年的历史,其中,ROTAX 系列高空汽油机是

应用双火花塞点火技术成功的典范。该系列发动机采用具有噪声抑制功能的双火花塞无触点电容式点火系统,怠速时 2 个火花塞同时点火,目的是加快发动机在高空运行时的缸内火焰传播速度,提升高空汽油机的高空动力性和经济性。该系列发动机已逐步应用到“捕食者”、“猛禽”、“彩虹”等系列无人机上^[6]。

1.2 高能点火技术

一般情况下,点火系统的初级储能级达到 100 mJ 左右即可定义为高能点火。相对于传统点火技术,高能点火技术提高了点火能量,从而提高了燃烧的速率与效率,扩大了空燃比,进而可实现超稀混合气燃烧,达到提高发动机的动力性、经济性以及降低排气污染物的目的。车用汽油机的高能点火技术在世界先进国家已应用多年,现已发展到用微机控制点火,部分已采用直接点火系统。寿命长、工作可靠且不需周期性维护保养的全晶体管高能电子点火系统,20 世纪 70 年代即在美国、日本、苏联等国家使用。例如,美国克莱斯勒公司在 1971 年开始使用全晶体管电子点火系统,并在 1972 年推广应用于克莱斯勒的许多型号发动机上,使这一新的科研成果很快转化为生产力,形成产业化。但我国的高能点火技术产业化程度和普及率远远低于工业发达国家^[7]。

虽然国内高能点火技术的应用还相对较少,但对高能点火技术的研究已有一定成果。

天津大学内燃机研究所的刘建等人^[8]针对摩托车单缸汽油机设计开发了高能点火装置。试验证明,大幅度提高点火能量,有利于火核的形成,从而可以拓宽混合气的燃烧极限。强大的点火能量,可以保证火核生长快,不失火,从而提高发动机的动力性、经济性和降低排气污染。

天津大学的刘迎澍等人^[9]将高能点火系统应用到 CG125 汽油机上进行了研究。试验结果表明,采用高能点火系统以后,不仅降低了油耗,还在一定程度上提高了发动机的输出功率和转矩,而且这种优势在发动机整个工作转速范围内都比较明显,特别是在低速区油耗降低更加明显。

南京航空航天大学的吴恩会等人^[10]把 RCC 变换器应用到航空发动机的直流高能点火系统中,保证了航空发动机直流高能点火可靠工作。

天津大学的边靖洲等人^[11]针对目前高能点火器主要使用振子式与晶体管式的设计方式存在可靠性和工作寿命受限制的问题,设计了一种基于脉宽调制原理的集成电路式新型稳频直流高能点火器,不仅使航空发动机点火器实现了从模拟电路到数字电

路的转变,还解决了航空点火器频率不稳的问题,并开发出了一种更为安全可靠的放电电路,有效地提高了航空发动机点火器的可靠性和使用寿命。

2 喷射雾化技术

在汽油机中使用的燃油喷射方式主要有:低压进气歧管喷射、低压半直接喷射、高压缸内直接喷射、压缩空气辅助喷射等。其中,低压半直接喷射、高压缸内直接喷射与压缩空气辅助直喷技术目前在国外的应用比较成熟。

2.1 低压半直接喷射

低压半直接喷射技术是奥地利 AVL 公司的 Laimbock 等人^[12-13]提出的一种将喷油器布置在扫气口的喷射技术。根据喷油器的不同喷射位置及方向提出 4 种喷射方案,在各方案中对扫气口的高度进行调整,使喷油器所在扫气口先于其他扫气口开启。将喷油器布置在扫气口,可以利用扫气气流加速喷油嘴的冷却,防止积碳的产生。试验表明,半直接喷射系统通过合理优化喷油,可有效减少二冲程发动机的扫气损失,提高燃油经济性。

吉林工业大学的罗滇生等人^[14]研制了一套适用于二冲程汽油机的电控半直接喷射系统。试验表明,喷油时刻对于降低燃油消耗率有很大影响,小负荷时必须对喷油时刻进行精确控制;采用电控低压半直接喷射系统后,发动机在全负荷时的燃油消耗率下降明显,功率与转矩稍有增加。

2.2 高压缸内直喷技术

活塞发动机缸内直喷技术的工作原理与高压共轨燃油喷射系统相类似,但活塞发动机缸内直喷系统的油轨压力远低于高压共轨系统。缸内直喷技术可实现对燃油的精确控制,并能通过提升压力来实现燃油雾化质量的提高,从而提高发动机的动力性,大幅改善燃油经济性。重油的挥发性差,缸内直接喷射有利于重油燃料的喷射雾化,重油的辛烷值低,使用缸内直喷技术,可以通过控制喷油提前角来实现对爆震的控制^[15]。

高压旋流喷射是高压直喷技术中的典型代表,在高压旋流喷射系统(如图 1 所示)中,受到高压作用的燃油通过切向入口进入喷嘴内部旋流腔,从而产生涡流,涡流使空气与喷雾的相互作用增强,并且使燃油的雾化蒸发速率加快。燃油由于离心力的作用积聚在旋流腔的壁面上,从而产生气液分离,气体在喷孔中心形成空气卷吸现象,液体则以液膜形式紧贴喷孔壁面喷出。同时,切向的旋转动量限制了喷

雾的贯穿距离,减少了湿壁现象的发生^[16]。受结构限制,结构紧凑的二冲程发动机很难布置高压共轨系统。

Heimberg^[17]在 1993 年提出了一种新型无需高压油泵的 FICHT 压力冲击喷射系统(FICHT pressure surge injection system)。该系统主要利用低压油泵产生的流体动能,通过控制喷油器内撞针使燃油在喷嘴处突然减速,将其动能转变为压力将燃油喷出。

加拿大 Bombardier 公司的 Strauss^[18]于 2003 年对该系统进一步优化,开发出了喷射压力更高的 ETEC 喷油系统,采用外开式旋流喷嘴,使燃油粒径的分布更加均匀,针阀升程进一步减小,最终实现了对喷油量的精确控制。与 FICHT 喷油器相比,该系统喷雾的索特平均直径 SMD 及 DV90 分别降低了 38%和 50%。

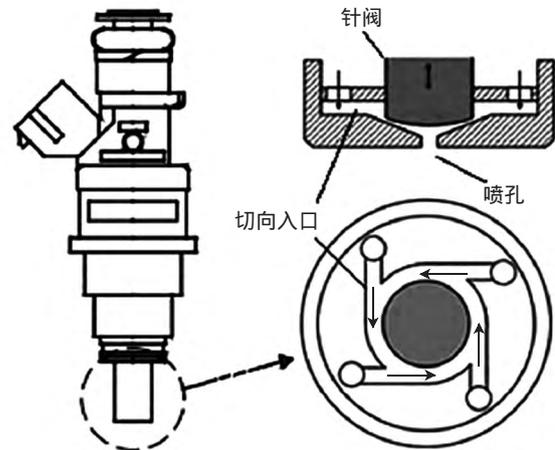


图 1 高压直喷系统的旋流式喷油器结构示意图

2.3 压缩空气辅助直喷技术

20 世纪 90 年代,以澳大利亚 Orbital 公司为代表的多家研究机构先后提出了低压空气辅助喷射系统,为二冲程缸内直喷技术带来了革命性的发展^[19-21]。该系统的主要特征是喷油器上部的燃油喷嘴将燃油以一定压力输送到下部的储气腔中,充分利用燃油与压缩空气的相互作用进行预混,然后将油气混合物直接喷入燃烧室中。由燃油喷嘴实现燃油的计量,由混合气喷嘴执行喷油,二者相互独立。因此,可以通过调节燃油喷嘴与混合气喷嘴开启的时间差来控制燃油和压缩空气的混合时间,从而提高混合气质量。该类预掺混系统的喷雾特性对缸内压力十分敏感,压力的高低直接决定最终的喷雾角及燃油液滴直径。压缩空气辅助直喷技术对燃油的适应性较强,粘度较大的重油燃料仍可以保证良好的雾化效果。试验中,煤油雾化粒径可达到 5~12 μm 。

2.4 电控燃油喷射技术

按照驱动方式的不同,发动机的供油方式可以分为机械喷射系统和电控燃油喷射系统。目前,电控燃油喷射系统在大排量汽车发动机上的应用已比较成熟。其中典型的系统有澳大利亚 Orbital 公司的 AADI (air assistant direct injection) 空气辅助喷射系统、美国 NWUAV 公司的基于 MEMS 微机电技术的喷射系统、美国 JM Harwood 公司的 DFI 微型高压直喷系统以及北京航空航天大学提出的 MFVI (multiple fixed-volume injection) 小尺度微量多次喷射系统等,小尺度微量多次喷射系统的基本结构如图 2 所示^[22]。电控燃油喷射技术的创新较多,可以借鉴的经验也相对较多。航空活塞发动机燃油喷射系统的电控化程度远远落后于汽车,可借鉴发展相对成熟的汽车发动机电控高压共轨技术,开发出适用于航空重油发动机的电控高压共轨燃油喷射系统,利用高压共轨系统的高压喷射及其灵活的控制能力,改善重油燃料的雾化和燃烧。

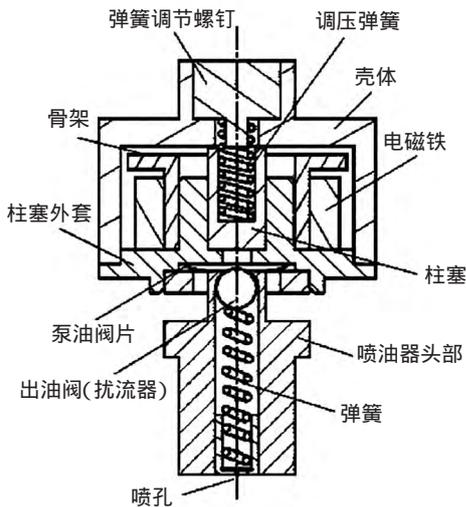


图 2 小尺度微量多次喷射系统的基本结构示意图

3 燃烧技术

燃烧技术是决定燃油效率的关键因素。

南京航空航天大学的高岩飞等人^[23]以某空气辅助喷嘴进口样件为研究对象,通过数值计算与试验方法对其喷雾特性开展研究。研究表明,随着喷油脉宽的增大以及燃油压力的提高,燃油的质量流量也相应增加。

北京交通大学的莫胜钧等人^[24]分析了定容燃烧弹中柴油和煤油混合气预混层流点火特性。结果表明,柴油和煤油的最小点火能量随初始压力的增加

而增大。在同一初始压力下,柴油所需的最小点火能量大于煤油。

石允等人^[25]以 HS-700 小型航空二冲程发动机为基础建立了发动机模型,分别从发动机结构参数、喷油参数和进气参数等 3 个方面就不同燃油喷射方式对重油混合气的影响进行了研究。结果表明,5 扫气口更适合缸内半直接喷射,双扫气口更适合缸内直接喷射,楔形燃烧室更适合缸内半直接喷射,球形燃烧室更适合缸内直接喷射。

李长胜等人^[26]以 TKDI600 发动机为原型机,对发动机的混合气及燃烧过程进行了分析。结果表明,燃油撞壁主要受燃烧室形状和燃油喷射角度影响,涡流比的增大有利于混合气的均匀性,喷油角度为 50° 时没有燃油撞壁现象。喷油提前角越大,缸内涡流衰弱越早,同一转角的涡流比越小。

天津内燃机研究所的胡春明等人^[27]基于一台 4 缸对置水冷航空活塞式发动机的结构特点,自主研发了单缸低压直喷全透明光学发动机,并利用高速摄影技术对缸内混合气的形成进行了试验研究。结果表明,偏心碗型活塞顶面(如图 3 所示)能有效引导燃油喷雾向燃烧室顶部卷吸,从而使燃油液滴聚集在双侧火花塞附近。

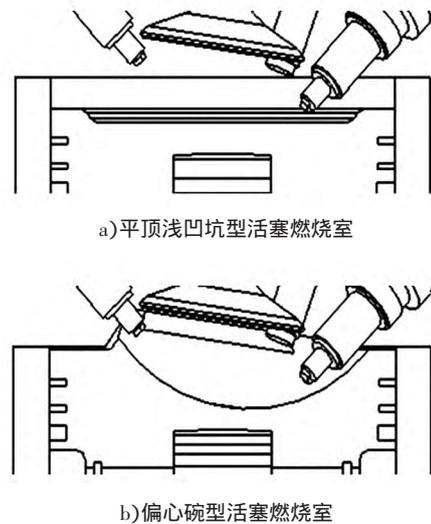


图 3 平顶浅凹坑活塞结构与偏心碗型活塞结构示意图

胡春明等人^[28]在 ROTAX914 化油器式活塞航空发动机的结构基础上,自主研发了一台航空低压空气辅助直喷单缸试验机,分析了不同喷射开始时刻、点火提前角、过量空气系数对重油活塞发动机燃烧特性的影响,对比了航空煤油与汽油在混合气形成、滞燃期、火焰传播速度、抗爆性等方面的差异^[29]。结果表明,航空煤油比汽油更适合在燃油摩尔分数较

大的混合气下燃烧,在过量空气系数为 0.80~0.85 的范围内,航空煤油的滞燃期最短,燃烧循环变动率最小。试验结果还显示,存在一个能保证发动机燃烧效率最高、循环变动最低的最佳喷射时刻。降低喷射脉宽和喷射压力均会引起发动机最大爆发压力和压力升高率降低,快速燃烧期延长,循环变动增加。

胡春明等人^[30]针对航空活塞式直喷发动机中瞬态空燃比难以精确控制的问题,采用 PID 神经网络控制策略对发动机瞬态工况的空燃比进行控制。结果表明,相比于 PID 控制,PID 神经网络控制下的过量空气系数超调量可减少 25%左右,节气门开度在 5%~30%之间以不同速率变化时,PID 神经网络能实现良好的控制效果。

南京航空航天大学的贝太学等人^[31]为研究异步点火相位对二冲程航空活塞发动机燃用煤油时的爆震影响,建立了发动机燃烧室的计算模型,研究了异步点火相位对火焰面密度分布、爆震强度的影响,并进行了试验验证。结果表明,随着双火花塞异步点火相位差的增大,缸内平均压力、放热率及累积放热量均呈现减小的趋势,2 个火花塞附近的湍动能增大,火焰传播速度加快,火焰发展期缩短,爆震强度表征物的浓度逐步减小。

沈阳发动机研究所的赵明龙等人^[32]通过单头部、扇形和全环燃烧室试验件的点火性能试验,对比了 3 种试验件贫油点火边界的关联与差异。结果显示,在相同的进口条件下,全环试验件的贫油点火油气比明显低于单头部和扇形。这主要是因为侧壁会影响试验件气动热(高温气体与侧壁存在相对运动而形成的传热)和燃油液滴分布,并且不同类型的试验件之间存在点火过程差异。

4 结论

本文分析了重油活塞发动机相关燃烧关键技术的发展现状及未来趋势,得出以下结论:

1)高能点火技术由于可靠性及成本问题,目前在航空发动机上应用较少。双火花塞点火经过不断的技术升级,在航空发动机上的应用已较为成熟。

2)以更优的燃油雾化效果为目标,燃油喷射技术从高压直喷到低压直喷,再到半直喷,在持续革新,雾化技术的新突破将是未来活塞发动机重点解决的问题。

3)燃烧效率与燃油经济性由燃烧的有效组织性直接决定,这不仅与点火技术和雾化技术相关,也与进气量、混合气形式、气动型面等有直接关联,值得

深入研究。

参考文献

- Hillyer B, Wade W. Single-cylinder proco engine studies—fuel and engine calibration effects on emissions, fuel economy and octane number requirement[C]. SAE Paper 780593
- 吴正权. 双火花塞点火新技术[J]. 摩托车技术, 2005(1):37-38
- 黄琪. 小型高速汽油机双火花塞速燃多工况 VVT 系统研究[D]. 重庆:重庆大学, 2009
- 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
- 阎希成,张俊杰,林漫群,等. 摩托车双火花塞点火技术分析与应用[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2015, 44(6):68-70, 85
- 张文建,刘瑞林,梁志峰,等. 活塞式航空发动机高空性能提升技术现状及发展趋势[J]. 内燃机与配件, 2016(7):5-10
- 刘健,陶俊卫,李志军,等. 汽油机的高能点火及其在我国的应用[J]. 小型内燃机与摩托车, 2005, 34(1):38-41
- 刘健. 汽油机高能点火试验装置的研究开发[D]. 天津:天津大学, 2005
- 刘迎澍,陈振东,李家国. 高能点火系统在 CG125 发动机上的应用研究[J]. 小型内燃机与摩托车, 2007, 36(2):14-16
- 吴恩会,陈新. 应用于航空发动机直流高能点火装置的 RCC 变换器研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(s1):305-308
- 边靖洲,车延博,冯宝国. 一种航空发动机稳频高能点火器[J]. 应用科技, 2015, 42(5):14-18
- Laimbock FJ, Simon G, Gerhard M. AVL SDIS_MkII—low cost automotive FI applied to two-stroke engines for future CARB-regulations [C]. SAE Paper 1999-01-3285
- Laimbock FJ. Two-stroke internal combustion engine with crankcase scavenging: The United States, US 6539900 [P]. April, 2003
- 罗滇生,钱耀义,于秀敏,等. 电控半直接喷射二冲程汽油机的研究与试验[J]. 内燃机学报, 2001, 19(1):51-54
- 冯光烁,周明. 重油航空活塞发动机技术路线分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(10):1114-1121
- 马帅,刘娜,胡春明. 二冲程重油发动机技术现状及发展方向[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2015, 44(2):87-91
- Wolfgang Heimberg. Ficht pressure surge injection system [C]. SAE Paper 931502
- Sebastian Strauss, Yang Bing Zeng, David T Montgomery. Optimization of the E-TEC™ combustion system for direct-injected two-stroke engines toward 3-star emissions[C]. SAE Paper 2003-32-0007
- Geoffrey Cathcart, John Tubb. Application of air assisted di-

- rect fuel injection to pressure charged gasoline engines[C]. SAE Paper 2002-01-0705
- 20 Houston R, Cathcart G. Combustion and emissions characteristics of Orbital's combustion process applied to multicylinder automotive direct injected 4-stroke engines [C]. SAE Paper 980153
- 21 Jin S, Brear M, Watson H, et al. An experimental study of the spray from an air-assisted direct fuel injector [J]. IMech E Part D: Journal of Automobile Engineering, 2008, 222 (10): 1883-1894
- 22 张奇, 杜发荣. 小功率航空活塞发动机重油技术进展[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2014, 43(4): 81-85
- 23 高岩飞. 点燃式煤油发动机燃油雾化技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010
- 24 莫胜钧. 重油预混层流点火特性的仿真分析[J]. 内燃机与动力装置, 2012(3): 30-33
- 25 石允. 小型点燃式二冲程活塞重油发动机混合气形成的模拟研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012
- 26 李长胜. 小型高速航空重油活塞发动机混合气形成及燃烧特性的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014
- 27 胡春明, 李骥琦, 白洪林, 等. 航空直喷发动机缸内混合气形成的试验[J]. 航空动力学报, 2012, 27(9): 1921-1927
- 28 胡春明, 谷俊, 周浩. 活塞式航空直喷发动机的燃烧特性[J]. 航空动力学报, 2015, 30(10): 2368-2375
- 29 胡春明, 王书典, 毕延飞, 等. 活塞式航空煤油直喷发动机的燃烧特性[J]. 航空动力学报, 2017, 32(5): 1035-1042
- 30 胡春明, 仲伟军, 刘娜, 等. 航空活塞式发动机瞬态空燃比控制与实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2017, 23(2): 140-146
- 31 贝太学, 魏民祥, 刘锐, 等. 异步点火相位对二冲程发动机爆震燃烧的影响[J]. 航空动力学报, 2017, 32(2): 322-329
- 32 赵明龙, 杨志民, 林宇震, 等. 单头部/扇形/全环燃烧室贫油点火性能换算[J]. 航空动力学报, 2017, 32(8): 1822-1826
- (收稿日期: 2017-12-01)

(上接第 84 页)

从图 7 可看出, NO_x 排放随燃料喷射时间的变化较小。EOI 在 $360\sim 450\text{ }^\circ\text{CA}$ 之间, NO_x 的排放值相对较小。

从图 6、图 7 所反映的各排放物随燃料喷射时间的变化趋势可知, 合理调整控制参数, 可实现最佳的排放水平。

4 结论

1) 通过对 CNG 发动机不同燃料喷射时间燃油经济性和排放的研究可知, 在 2000 r/min 、 1 MPa 工况下, 最佳 EOI 为 $400\text{ }^\circ\text{CA}$ 。根据 CNG 发动机喷嘴的喷射特性, 可将喷射脉宽定为 10 ms , 燃料喷射开始时刻定为 $280\text{ }^\circ\text{CA}$, 即将 CNG 发动机的主要燃料喷射时间定在进气门开启阶段内, 此过程为开阀喷射。

2) CNG 发动机燃料喷射时间对发动机的经济性、动力性、排放均有较大影响, 标定过程中, 确定最

佳的喷射时间, 不但能提高发动机性能, 同时可降低发动机排放。

参考文献

- Hall Jonathan, Bassett Mike, Hibberd Benjamin, et al. Heavily downsized demonstrator engine optimised for CNG operation [C]. SAE Paper 2016-01-2363
- 黄海波. 燃气汽车结构原理与维修(第一版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002
- 孙济美, 郭英男, 洪伟, 等. 代用燃料汽车技术(二)世界汽车技术发展跟踪研究(五)[J]. 汽车工艺与材料, 2002(12): 1-5
- 姚勇. CNG 发动机和汽油机燃烧的比较分析[J]. 车用发动机, 2005(5): 31-33
- 卓斌. 天然气发动机燃烧特征与功率恢复[J]. 车用发动机, 1999(1): 11-17

(收稿日期: 2017-11-28)