

空气辅助雾化对活塞式航空煤油发动机燃烧特性的影响研究^{*}

张雨生, 周 磊, 刘丰年, 华剑雄, 刘昌文, 卫海桥

(天津大学 内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 为了满足无人机燃料的安全性、单一化战略, 并实现发动机高功重比指标, 将航空煤油应用在点燃式活塞发动机上, 使用自主开发的空气辅助喷雾系统, 在节气门全开条件下进行了不同过量空气系数、喷气压力、喷气脉宽、喷射时刻对于活塞式航空煤油发动机燃烧特性的影响研究, 并将空气辅助雾化系统和 120MPa 高压共轨系统进行对比试验。结果表明, 0.95 为活塞式航空煤油发动机的最佳过量空气系数; 提高喷气压力和喷气脉宽均会提高发动机的动力性和经济性, 提高燃烧稳定性, 并且提高喷气压力可以明显缩短燃烧持续期; 360°CA BTDC 喷气时刻时航空煤油的雾化效果最好; 喷射参数优化后的空气辅助雾化系统对于航空煤油的雾化效果接近高压共轨系统水平。

关键词: 空气辅助喷射; 航空煤油; 活塞式发动机; 喷射参数; 燃烧特性

中图分类号: TK46⁺¹ **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2022) 08-210265-09

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 210265

Effects of Air-Assisted Atomization on Combustion Characteristics of Piston Aviation Kerosene Engine

ZHANG Yu-sheng, ZHOU Lei, LIU Feng-nian, HUA Jian-xiong, LIU Chang-wen, WEI Hai-qiao

(State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to meet the safety and simplify strategy of UAV fuel, and to achieve the high power-weight ratio index of the engine, aviation kerosene is applied to the ignition piston engine in this paper. Using the self-developed air-assisted spray system, the effects of different excess air coefficient, air injection pressure, air injection pulse width and injection time on the combustion characteristics of piston aviation kerosene engine were studied under the condition of fully open throttle. And the comparative test was conducted between the air-assisted spray system and 120MPa high pressure common rail system. The results show that 0.95 is the optimal excess air coefficient of piston aviation kerosene engine. The performance of power, economy and combustion stability of the engine will be improved by increasing the air injection pressure and pulse width, and increasing air injection pressure can significantly shorten the combustion duration. The atomization effect of aviation kerosene is the best at 360°CA BTDC air injection time. The atomization effect of air assisted atomization system with optimized injection parameters for aviation kerosene is close to the level of high-pressure common rail system.

^{*} 收稿日期: 2021-04-30; 修订日期: 2021-08-23。

基金项目: 装备预研领域基金 (6140311040101)。

作者简介: 张雨生, 硕士生, 研究领域为发动机电控技术。

通讯作者: 周 磊, 博士, 副教授, 研究领域为湍流燃烧理论。

引用格式: 张雨生, 周 磊, 刘丰年, 等. 空气辅助雾化对活塞式航空煤油发动机燃烧特性的影响研究[J]. 推进技术, 2022, 43(8): 210265. (ZHANG Yu-sheng, ZHOU Lei, LIU Feng-nian, et al. Effects of Air-Assisted Atomization on Combustion Characteristics of Piston Aviation Kerosene Engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(8): 210265.)

Key words: Air-assisted injection; Aviation kerosene; Piston engine; Injection parameters; Combustion characteristic

1 引言

无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)因其零人员伤亡,具备全天候、全区域侦察打击能力,受到了世界各个国家重视。点燃式活塞发动机具有经济性好、功重比高、热效率高等优点,逐渐成为了中小型无人机的主流动力装置^[1]。目前大部分的点燃式活塞航空发动机主要采用航空汽油为燃料,但由于其闪点低、挥发性强、遇明火易着火的特性,导致在运输、储存和使用上存在很大的危险性,不能适应当前对于舰载航空发动机的燃料要求^[2]。因此,以航空煤油等重油为燃料是活塞式航空发动机的发展趋势^[3-6]。

汽油与航空煤油在燃料物性参数上存在较大差异,航空煤油比汽油闪点高,安全性能好,但运动粘度高,燃油雾化困难。为了提高航空煤油的雾化水平,目前主要采取两种技术方式:高压共轨喷射和空气辅助雾化喷射。高压共轨系统利用100MPa以上的喷射压力进行燃油雾化,存在重量大、成本高、安全性差的问题,主要应用于民用车辆。而空气辅助喷射利用压缩空气离开空气喷嘴时的超声速气动力来克服燃油表面张力,从而促进液滴破碎,在相对较低的喷射压力(1MPa以下)产生较小的液滴直径,索特平均直径 $SMD < 10\mu\text{m}$ ^[7-8]。低喷射压力使空气辅助雾化系统具有重量轻、成本低以及安全性好的优点,适合应用于航空发动机上。综上所述,将航空煤油应用于点燃式发动机上,满足燃料的安全性、单一化战略,实现发动机高功重比指标,并利用空气辅助雾化技术解决航空煤油粘度高雾化困难的问题,具有十分重要的工程价值。

近年来,国内外众多学者关于空气辅助喷射以及实际发动机应用展开了研究。Hu等^[9]研究了空气辅助雾化航空煤油与汽油喷雾特性对比,试验表明航空煤油的喷雾形态比汽油更细,具有更大的贯穿距和更小锥角,航空煤油索特平均直径 SMD 比汽油大。Diwakar等^[10]利用数值模拟和试验结合的方式,发现空气辅助雾化促进了喷嘴附近区域的雾化。Houston等^[11]在一台多缸四冲程发动机上研究了基于空气辅助雾化的活塞式发动机的燃烧特性以及排放特性。试验结果表明,利用Orbital公司的空气辅助雾化技术实现了稀薄和分层燃烧,燃油经济性提高

20.1%,HC和 NO_x 排放降低,并且可以实现高效废气循环(EGR)。Cathcart等^[12]详细研究了空气辅助雾化系统特性对发动机性能的影响。试验结果表明,喷气压力为0.65MPa时,综合考虑排放、燃油消耗、系统成本时性能最佳,可以改善燃烧稳定性及提高EGR率。天津大学基于光学机试验平台研究了发动机缸内混合气形成过程,试验结果表明,进气气流会将喷雾场吹偏^[13-14]。

上述研究对理解空气辅助雾化系统提供了参考,但由于国内对于活塞式航空煤油发动机的研究尚未成熟,大多采取的方式是将航空煤油直接应用到原有汽油机上进行试验,而航空煤油爆震倾向明显的特征直接导致发动机只能部分负荷运行,无法实现节气门全开。本文自主设计开发了一套空气辅助喷雾系统,基于一台单缸热力学发动机,通过降低压缩比至6的方式使其运行在节气门全开条件下,进行了空气辅助雾化对活塞式航空煤油发动机燃烧特性的影响研究。

2 试验系统

2.1 发动机台架及测控装置

本文所做试验基于一台单缸四冲程试验机,发动机试验台架示意图如图1所示,主要参数如表1所示。试验台架经自主电控设计,可采用空气辅助喷射电控系统精确控制喷射参数。电控单元采用MoTec-M400,可精准控制发动机的喷油时刻及点火时刻,分辨率为 0.5°CA ^[15]。

试验中主要测试量包括发动机转速、扭矩、燃油流量、缸内压力、冷却水温度以及过量空气系数。发动机由直流电力测功机控制,并监测发动机转速、扭矩,最大功率为20kW。燃油流量由杭州博皓瞬态油耗仪进行测量,量程为0~5kg/h,相对误差为 $\pm 0.2\%$ ^[16-19]。发动机缸内动态压力测量采用安装在燃烧室顶部的Kistler 6118B水冷式缸压传感器,压力信号由光电编码器采集,经电荷放大器放大信号后,由National Instruments PC-6123数据采集卡将缸压数据保存。发动机冷却水和机油温度采用PT-100铂电阻传感器进行测量,由德国SIEMENS比例积分控制器分别控制,误差范围保持在 $\pm 3^\circ\text{C}$ 。过量空气系数通过采用美国ECM公司Lambda CAN模块进行实时监测。表2给出了主要测试设备的测试精度。

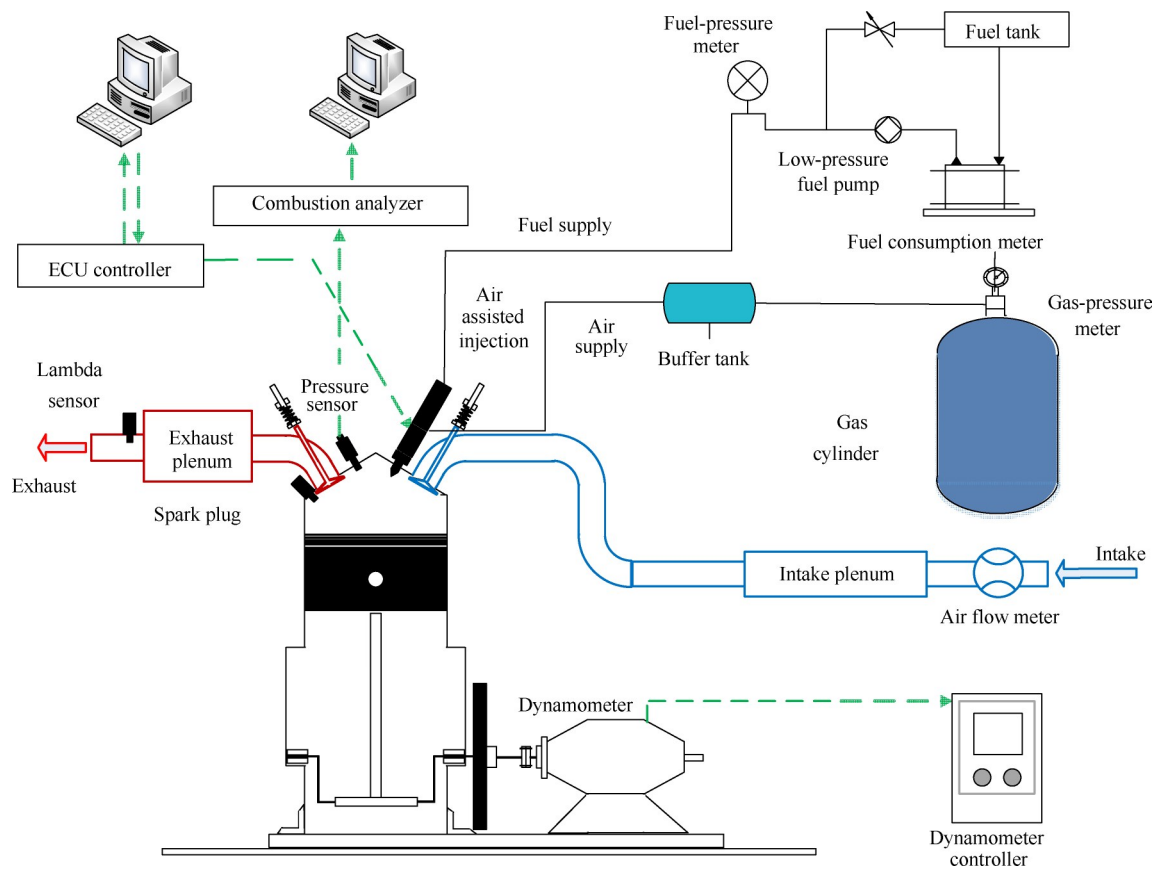


Fig. 1 Schematic of experimental engine setup

Table 1 Engine specifications

Parameter	Value
Engine type	Single cylinder, 4-stroke
Bore/mm	80
Stroke/mm	100
Fuel	Kerosene
Sweep volume/L	0.5
Compression radio	6~17.5
Valve mechanism	Dual-overhead camshaft, 2-valve
Control unit	MoTec-M400

Table 2 Measurement equipment parameters

Measurement equipment	Resolution
Speed measurement/(r/min)	1
Torque measurement/(N·m)	0.01
Fuelmass meter/(kg/h)	0.01
Pressure transducer/CAD	0.1
Coolant control system/°C	1
Wideband lambda sensor	0.001

本文主要探究基于空气辅助雾化的活塞式航空煤油发动机燃烧特性,试验燃料为三号航空煤油(RP-3),其理化特性^[20-21]如表3所示。

2.2 空气辅助雾化系统

图2为空气辅助喷油器内部结构简图,图3为

Table 3 Physical and chemical properties of kerosene

Fuel	Kerosene
Components	C7~C16
Kinematic viscosity 20°C/(mm ² /s)	1.814
Net heat of combustion/(MJ/kg)	≥42.8
10%~100% distillation range/°C	205~300
Freezing point/°C	≤-47
Flash point/°C	38
Autoignition temperature/°C	220

气辅助喷射控制波形图。压缩空气由进气口进入混合腔内,并充满混合腔。在接收到单片机发出的触发信号后,经过短暂喷油延时(1ms),在喷油脉宽时间内,燃油经喷油器进入混合腔,与压缩空气进行混合,完成初次破碎。经油气间隔时间(1ms)后,燃油和空气的混合气经空气喷嘴高速喷入燃烧室内,完成燃油的喷射及雾化过程。燃油电磁阀和空气电磁阀分别由喷油脉宽和喷气脉宽控制。为了保证燃油可以喷入混合腔内,喷油压力应高于喷气压力。

2.3 参数定义及发动机运行工况

为了分析发动机燃烧过程,需要将燃烧分析仪采集到的缸压数据分析得到发动机的一系列参数,这些参数主要有:平均指示压力(Indicated mean ef-

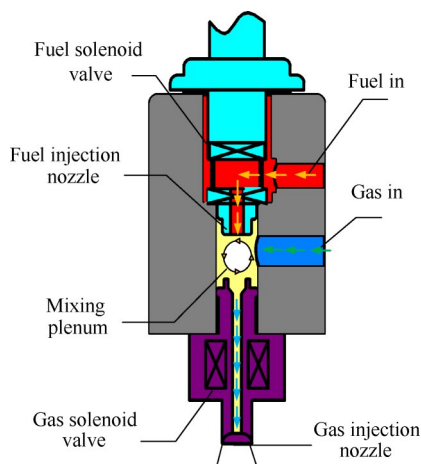


Fig. 2 Schematic of air-assisted system

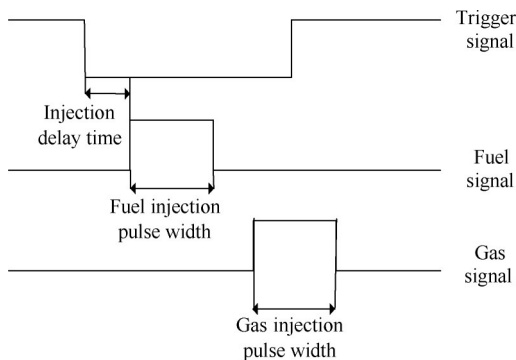


Fig. 3 Sequence diagram of air-assisted injection

fective pressure, $IMEP$)、指示燃油消耗率 (Indicated specific fuel consumption, $ISFC$)、放热率 (Heat release rate, HRR)、滞燃期 (CA0–CA10)、主燃烧相位 (CA50)、燃烧持续期 (CA10–CA90)、平均指示压力波动系数 (Coefficient of variation, COV)。具体物理定义及计算方法^[22–24]如下所示：

(1) 平均指示压力是指单位气缸容积在一个循环所做的指示功, 计算公式为

$$IMEP = \frac{W}{V} = \int_{-360}^{360} p dV \quad (1)$$

式中 W 为发动机一个循环的指示功, V 为发动机气缸工作容积, p 是燃烧室的压力。

(2) 指示燃油消耗率 ($ISFC$) 是指单位指示功的耗油量, 计算公式为

$$ISFC = \frac{B}{P} \times 10^3 \quad (2)$$

式中 B 为每小时油耗量, P 为指示功率。

(3) 放热率 (HRR): 进行发动机试验, 一般都需要分析缸内燃烧过程, 进行放热率计算。放热率的计算主要是根据热力学第一定律的标准单区放热模型进行分析, 燃烧放热等同于缸内能量变化, 作用于活

塞上的功, 壁面传热和缝隙损失, 计算公式如下:

$$\frac{dQ}{d\varphi} = mc_v \frac{dT}{d\varphi} + \frac{p dv}{d\varphi} + \frac{A \bar{h} (T - T_w)}{d\varphi} + h_{cr} \frac{dm_{cr}}{d\varphi} \quad (3)$$

式中 Q 代表燃烧放热, φ 为曲轴转角, m 和 c_v 是瞬时缸内质量和恒定体积下的平均比热, T 和 T_w 代表缸内温度和壁面温度, A 代表燃烧室的表面积, $\bar{h}$ 为传热系数, m_{cr} 和 h_{cr} 定义为缝隙吹出物质的质量和比焓。

(4) 滞燃期 (CA0–CA10): 滞燃期的定义是以电点火作为起点, 直到形成火焰核心并开始火焰传播的一段时间。本文以火花塞点火到已燃燃料的质量分数^[25]为 10% 所持续的曲轴转角表示滞燃期。

(5) 主燃烧相位 (CA50): 主燃烧相位指已燃燃料的质量分数为 50% 时所对应的曲轴转角, 能够较好地反应发动机燃烧过程的能量分布。

(6) 燃烧持续期 (CA10–CA90): 燃烧持续期指已燃燃料的质量分数从 10% ~ 90% 所持续的曲轴转角, 整个燃烧过程的能量大多在此阶段释放。

(7) 采用平均指示压力循环波动系数 (COV) 作为度量燃烧循环变动的参数, 本文将平均指示压力循环波动系数高于 5% 判定为不稳定燃烧, 计算公式为

$$COV_{IMEP} = \frac{\sigma_{IMEP}}{\overline{IMEP}} \times 100\% \quad (4)$$

式中 $\overline{IMEP}$ 是平均指示压力的平均值, σ_{IMEP} 代表 N 个循环平均指示压力的标准偏差。

表 4 为试验中发动机详细运行参数。试验中, 冷却剂和润滑油的温度保持恒定, 节气门开度全开。待发动机稳定工作后记录发动机的相关参数, 每个工况点采集 200 个循环缸内压力数据。为了使数据更加可靠, 每个工况点进行三次试验。文中点火时刻统一以上止点作为参照点, 点火时刻正数表示上止点之前, 点火提前角负数表示上止点之后。点火时刻从正常燃烧扫描到发动机出现爆震为止, 然后寻找非爆震工况中平均指示压力 ($IMEP$) 最大的工况点, 此时的点火时刻为最大制动扭矩 (MBT) 点火时刻。

表 5 为不同试验组详细喷射参数, 由于节气门开

Table 4 Operation parameters

Parameter	Value
Engine speed/(r/min)	1500
Throttle position/%	100
Compression ratio	6
Intake temperature/°C	30±2
Coolant temperature/°C	75±3
Oil temperature/°C	85±3

Table 5 Parameters for different test groups				
Test group	Excess air coefficient	Gas pressure/MPa	Gas width/ms	Gas timing/°CA BTDC
1	0.8, 0.9, 0.95, 1.0, 1.05, 1.1	0.5	5	360
2	0.95	0.4, 0.5, 0.6	5	360
3	0.95	0.5	3, 5, 7, 9	360
4	0.95	0.5	5	330, 340, 350, 360, 370

度保持不变,故通过调整循环喷油量来达到目标过量空气系数,喷油压力始终和喷气压力保持 0.2MPa 的压差,油气间隔 1ms,从而保证燃油与压缩空气在混合腔内充分混合。

3 试验结果与分析

3.1 不同过量空气系数对燃烧特性的影响

基于测试组 1 中的试验参数,针对不同过量空气系数下航空煤油的燃烧特性展开研究。图 4 表示不同过量空气系数下发动机的动力性与经济性。可以看出,最大制动扭矩(MBT)点火时刻下,过量空气系数为 0.8,0.9,0.95 时,平均指示压力(IMEP)较高,约为 0.796MPa;而这三者中,0.95 的平均指示燃油消耗率(ISFC)较小,为 330.2g/(kW·h)。

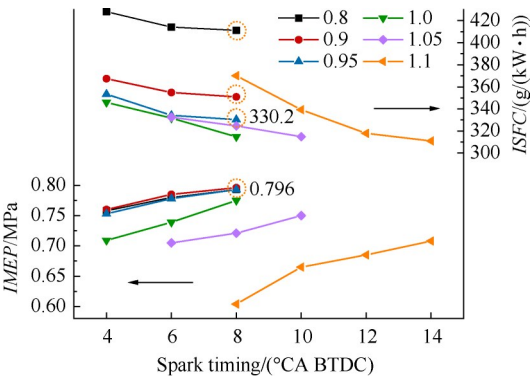


Fig. 4 Effects of different excess air coefficient on the power and economy

图 5 表示不同过量空气系数下发动机的循环变动系数(IMEP-COV)。在 MBT 点火时刻下,过量空气系数为 0.8,0.9,0.95,1.0 的循环变动均小于 5%,为稳定燃烧工况。并且在所记录的三个点火时刻下,都处于稳定燃烧工况。

而由于航空发动机长时间处于高空作业,工作环境恶劣,以及高机动性要求,动力性和工作稳定性是发动机的首要指标,经济性其次。综合考虑,0.95 是航空活塞式发动机最佳的过量空气系数,此时,发动机的动力性强、工作稳定性高,经济性较佳。

3.2 不同喷气压力对燃烧特性的影响

基于测试组 2 中的试验参数,针对不同喷气压力

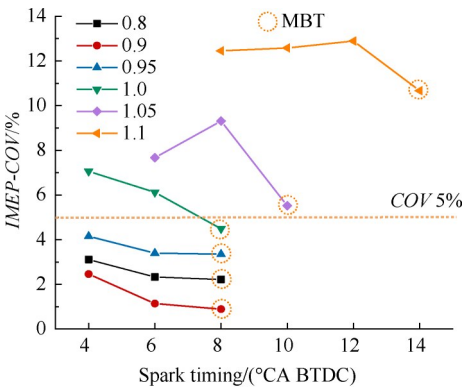


Fig. 5 Coefficient of variation at MBT spark timing in different excess air coefficient

下航空煤油的燃烧特性展开研究。图 6 表示不同喷气压力对发动机动力性与经济性的影响。在同一点火时刻下,随着喷气压力的提高,IMEP 逐渐增加,ISFC 逐渐减小。在 MBT 点火时刻下,喷气压力 0.6MPa 的 IMEP 达到 0.786MPa,相较于喷气压力 0.4MPa 动力性提高约 1.6%;ISFC 减小至 323g/(kW·h),经济性上升约 4%。可以看出,提高喷气压力,动力性提升较为有限,经济性提升明显。

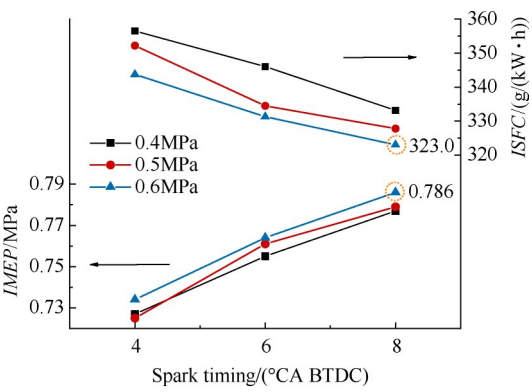


Fig. 6 Effects of different gas pressures on the power and economy

图 7 为 MBT 点火时刻下,不同喷气压力时发动机燃烧相位对比。可以看出,喷气压力从 0.4MPa 提高到 0.6MPa,滞燃期几乎没有变化(约为 21.0°CA);而燃烧持续期由 34.1°CA 减小至 31.1°CA,缩短了大约 3°CA。这是因为滞燃期受燃料自身理化性质影响较

大,而均采用航空煤油作为燃料,滞燃期基本没有变化。而燃烧持续期的缩短,说明燃烧放热更为集中,这也解释了提高喷气压力可以提高动力性和经济性这一现象。

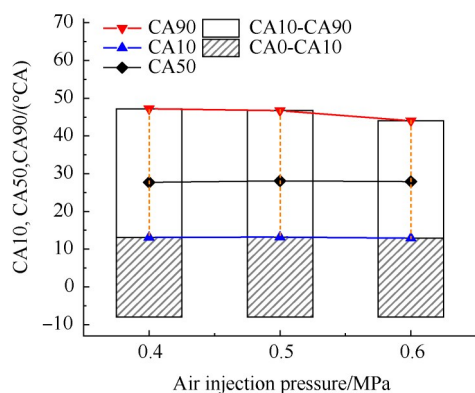


Fig. 7 Combustion phase at MBT spark timing in different gas pressure

图8表示不同喷气压力下发动机的循环变动系数($IMEP-COV$)。可以看出,MBT点火时刻下,循环变动均小于5%,均为稳定燃烧工况。而且随着喷气压力的提高,循环变动系数逐步递减,燃烧稳定性提高。推测是由于喷气压力的提高,航空煤油雾化效果更好,同时缸内带来了更多的新鲜空气,改善了燃烧过程,提高了燃烧稳定性。

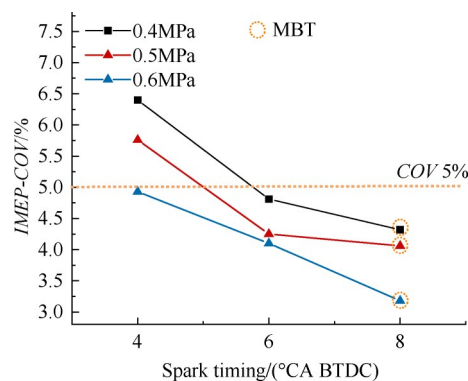


Fig. 8 Coefficient of variation in different gas pressure

3.3 不同喷气脉宽对燃烧特性的影响

基于测试组3中的试验参数,针对不同喷气脉宽下航空煤油的燃烧特性展开研究。图9为不同喷气脉宽下缸内压力及放热率变化情况。可以看出,随着喷气脉宽的提高,缸内压力及放热率均略有提高,特别是喷气脉宽为7ms时,缸内压力提升明显。

图10为不同喷气脉宽对于动力性及经济性影响。随着喷气脉宽提高,同一点火时刻下 $IMEP$ 不断提高, $ISFC$ 不断降低。在MBT点火时刻下,7ms喷气

脉宽的 $IMEP$ 达到了7.88MPa,相较于1ms喷气脉宽动力性提高4%; $ISFC$ 降至325.4g/(kW·h),经济性提高3.8%。

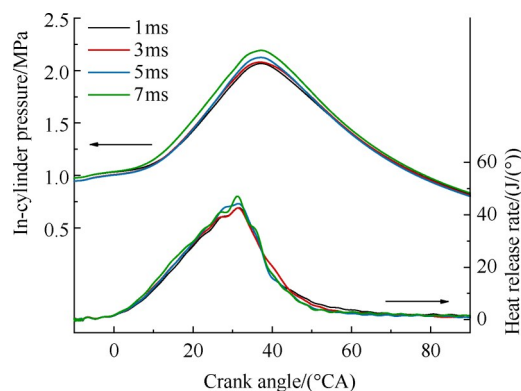


Fig. 9 Comparison of the cylinder pressure and HRR of different gas pulse width

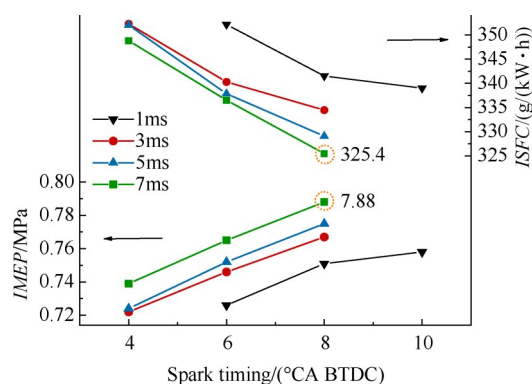


Fig. 10 Effects of different gas pulse width on the power and economy

图11为MBT点火时刻下,不同喷气脉宽时发动机的燃烧相位对比。可以看出,喷气脉宽从1ms提高到7ms,滞燃期几乎没有变化(约为21.0°CA);同时燃烧持续期也保持在33°CA左右,说明改变喷气脉宽对燃烧相位没有太大影响。

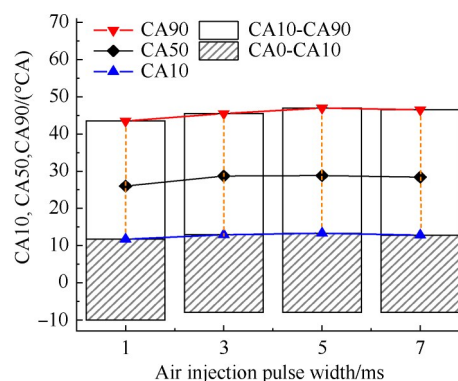


Fig. 11 Combustion phase at MBT spark timing in different gas pulse width

图 12 为不同喷气脉宽对于燃烧稳定性的影响,从图可以看出,在喷气脉宽为 1ms 时,由于空气量过低导致航空煤油雾化效果差,燃烧过程恶化, $COV > 5\%$, 为不稳定燃烧工况。将空气脉宽提高至 3ms, COV 降低到 3.0%~3.5% 内,实现稳定燃烧。然而继续增加喷气脉宽至 5ms 和 7ms, COV 没有明显的变化。

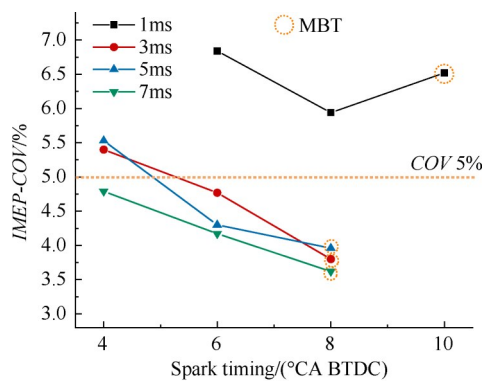


Fig. 12 Coefficient of variation in different gas pulse width

综上所述,为了保证航空煤油的雾化效果,空气辅助雾化的喷气脉宽在 3ms 以上,而进一步加长喷气脉宽对燃烧稳定性帮助不大,但可以提高发动机的动力性和经济性。而如果过度延长喷气脉宽,一方面空气喷嘴打开时间过长,电磁线圈持续受到电流作用,会削减空气喷嘴的寿命;另一方面需要的空气量也会越多,提高空气辅助雾化系统的使用成本。

3.4 不同喷气时刻对燃烧特性的影响

基于测试组 2 中的试验参数,针对不同喷气时刻下航空煤油的燃烧特性展开研究。图 13 为不同喷气时刻对发动机动力性与经济性的影响。可以看出,在 360°CA BTDC 时, $IMEP$ 达到最大值 7.83MPa; $ISFC$ 达到最小值 325.9g/(kW·h)。并且空气辅助雾化航空煤油对喷气时刻十分敏感。这是因为如果航空煤油在 360°CA BTDC 之前喷油会使得一部分燃油随废气

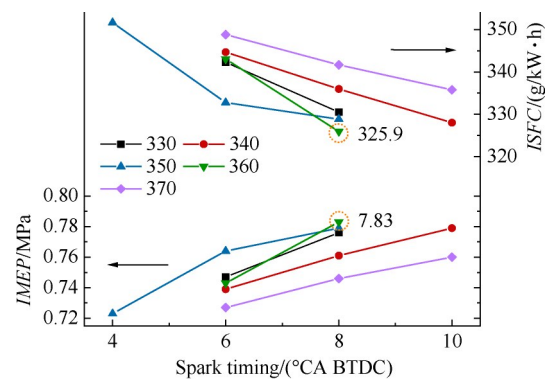


Fig. 13 Effects of different injection times on the power and economy

经排气门排出;而推迟喷油,将会有一部分燃油喷射在气缸壁上,这两种情况都会导致参与实际做功的燃油量减少,最终导致动力性和经济性下降。

图 14 为 MBT 点火时刻下不同喷气时刻的燃烧相位变化情况。可以看出,不同喷气时刻下,滞燃期变化不大,约为 23.4°CA。在以 360°CA BTDC 作为喷气时刻时,燃烧持续期最短为 41.7°CA,而喷气时刻提前或推迟都会使燃烧持续期变长。这是由于在 360°CA BTDC 附近作为喷气时刻,更有利于形成均质混合气,改善燃烧过程。

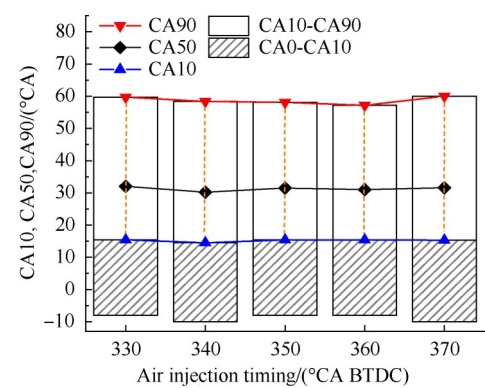


Fig. 14 Combustion phase at MBT spark timing in different injection times

图 15 为不同喷气时刻对 COV 的影响。MBT 点火时刻下,循环变动均小于 5%,为稳定燃烧工况。360°CA BTDC 喷油时刻的 COV 最小,燃烧最稳定,提前喷气时刻或者推迟喷气时刻均会导致 COV 增加。

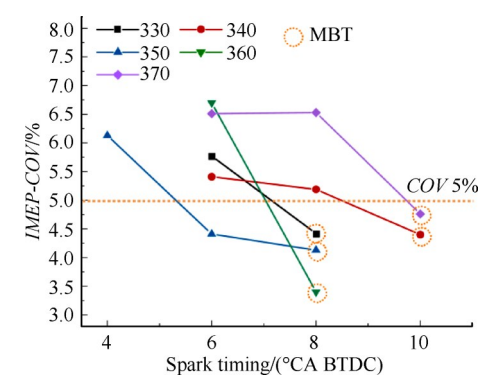


Fig. 15 Coefficient of variation in different injection times

3.5 空气辅助雾化和高压共轨系统对比

为了证明空气辅助雾化系统良好的工作性能,本文采用喷油压力为 120MPa 的高压共轨系统与其进行对比试验。试验参数见表 6。

图 16, 17 为空气辅助雾化系统和高压共轨系统 200 个循环的平均指示压力及最大爆发压力散点图。

可以看出,在MBT点火时刻下,空气辅助雾化航空煤油平均指示压力达到了高压共轨系统的92.1%,而最大爆发压力则仅相差0.14MPa。这说明喷射参数优化后的空气辅助雾化系统对于航空煤油的雾化效果接近高压共轨系统水平。

Table 6 Parameters of two injection modes		
Parameter	Air assisted injection	Common rail injection
Injection pressure/MPa	0.6	120
Gas pulse width/ms	7	—
Injection timing/ $^{\circ}$ CA		360
Excess air coefficient		0.95
Fuel		Kerosene

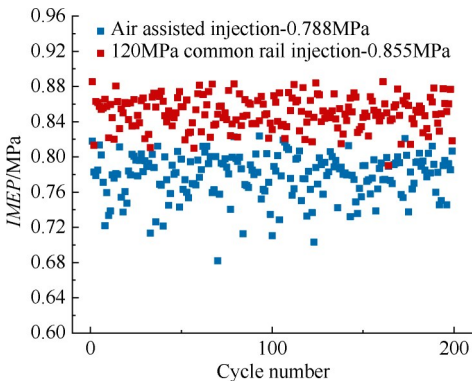


Fig. 16 Comparison of IMEP between air-assisted injection and 120MPa common rail injection

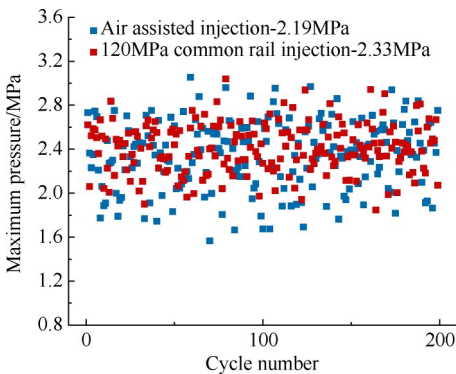


Fig. 17 Comparison of maximum pressure between air-assisted injection and 120MPa common rail injection

4 结 论

通过本文研究,得到如下结论:

(1)0.95为活塞式航空煤油发动机的最佳过量空气系数。提高喷气压力和喷气脉宽均会提高发动机的动力性和经济性,提高燃烧稳定性,并且提高喷气压力可以明显缩短燃烧持续期,对航空煤油雾化效

果提升显著。

(2)360 $^{\circ}$ CA BTDC 喷气时刻时航空煤油的雾化效果最好,容易形成均质混合气,推迟或提前喷气时刻均会导致燃烧不稳定,循环波动变大。

(3)喷射参数优化后的空气辅助雾化系统对于航空煤油的雾化效果接近高压共轨系统水平,结合其整体重量轻、成本低以及安全性好的优势,空气辅助雾化系统更加适合应用于航空发动机上雾化航空煤油。

致 谢:感谢装备预研领域基金的资助。

参考文献

[1] 尹泽勇,李上福,李概奇. 无人机动力装置的现状与发展[J]. 航空发动机, 2007(1): 10-15.

[2] 郭凌崧,王 昊,黄克菲. 航空重油在航空活塞式发动机的应用[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2018, 47(1): 84-93.

[3] Chen L, Ding S, Liu H, et al. Comparative Study of Combustion and Emissions of Kerosene (RP-3), Kerosene-Petrol Blends and Diesel in a Compression Ignition Engine[J]. *Applied Energy*, 2017, 203: 91-100.

[4] 赵乐文,张 哲,甘斌林. 点燃式航空重油活塞发动机关键技术概述[C]. 洛阳: 中国航天第三专业信息网第三十九届技术交流会暨第三届空天动力联合会议, 2018.

[5] 任连岭. 美军单一燃料的发展及对我军用油单一化的启示[C]. 兰州: 中国汽车工程学会燃料与润滑油分会第13届年会, 2008.

[6] 王兴海,马 震,郑 勇. 无人机用小型航空活塞发动机的发展[C]. 北京: 尖兵之翼——2006中国无人大会, 2006.

[7] Jin S H, Brear M, Watson H, et al. An Experimental Study of the Spray from an Air-Assisted Direct Fuel Injector[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2008, 222(10): 1883-1894.

[8] Cathcart G, Tubb J. Application of Air Assisted Direct Fuel Injection to Pressure Charged Gasoline Engines[R]. *SAE Technical Paper*, 2002-01-0705, 2002.

[9] Hu J, Liu B, Zhang C, et al. Experimental Study on the Spray Characteristics of an Air-Assisted Fuel Injection System Using Kerosene and Gasoline [J]. *Fuel*, 2019, 235: 782-794.

[10] Diwakar R, Fansler T D, French D T, et al. Liquid and Vapor Fuel Distributions from an Air-Assist Injector-An Experimental and Computational Study[J]. *SAE Transactions*, 1992, 101: 646-666.

[11] Houston R, Cathcart G. Combustion and Emissions Char-

- acteristics of Orbital's Combustion Process Applied to Multi-Cylinder Automotive Direct Injected 4-Stroke Engines[J]. *SAE Transactions*, 1998, 107: 234-245.
- [12] Cathcart G, Dickson G, Ahern S. The Application of Air-Assist Direct Injection for Spark-Ignited Heavy Fuel 2-Stroke and 4-Stroke Engines[R]. *SAE Technical Paper*, 2005-32-0065, 2005.
- [13] 武 珊. 空气辅助缸内直喷汽油机混合气形成的仿真研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [14] 白洪林. 空气辅助雾化汽油机喷雾特性及缸内混合气形成的研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- [15] 潘明章. EGR对燃用不同燃料小型强化SI发动机性能及爆震的影响研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [16] Zhou L, Hua J, Wei H, et al. Knock Characteristics and Combustion Regime Diagrams of Multiple Combustion Modes Based on Experimental Investigations[J]. *Applied Energy*, 2018, 229: 31-41.
- [17] Kang R, Zhou L, Hua J, et al. Experimental Investigation on Combustion Characteristics in Dual-fuel Dual-injection Engine[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 181: 15-25.
- [18] Pan M Z, Qian W W, Huang R, et al. Effects of Dimethyl Carbonate and 2-Ethylhexyl Nitrate on Energy Distribution, Combustion and Emissions in a Diesel Engine under Different Load Conditions [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 199: 1-11.
- [19] 康 瑞, 冯登全, 卫海桥. 乙醇DI/汽油PFI发动机性能与排放特性[J]. 内燃机学报, 2019, 37(1): 29-35.
- [20] Wang C, Zhang F, Wang E, et al. Experimental Study on Knock Suppression of Spark-Ignition Engine Fuelled with Kerosene via Water Injection [J]. *Applied Energy*, 2019, 242: 248-259.
- [21] ANSI/ASTM D1655-2010. Standard Specification for Aviation Turbine Fuels[S].
- [22] Rakopoulos C D, Antonopoulos K A, Rakopoulos D C. Experimental Heat Release Analysis and Emissions of a HSDI Diesel Engine Fueled with Ethanol-Diesel Fuel Blends[J]. *Energy*, 2007, 32(10): 1791-1808.
- [23] Heywood J B. Internal Combustion Engine Fundamentals [M]. Singapore: McGraw-Hill Education, 2018.
- [24] 周龙保, 刘巽俊, 高宗英. 内燃机学第三版[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [25] Rassweiler G M, Withrow L. Motion Pictures of Engine Flames Correlated with Pressure Cards[J]. *SAE Transactions*, 1938, 33: 185-204.

(编辑:朱立影)