

活塞式航空煤油发动机冷启动性能试验

苏思源^{1,2}, 胡春明^{1,2}, 刘娜^{1,2}, 赵英博^{1,2}, 王 旻^{1,2}

(1. 天津大学 内燃机研究所, 天津 300072;

2. 天津大学 机械工程学院, 天津 300072)

摘 要: 针对启喷转速、燃油温度、点火能量等影响因素,在一台排量 650 mL 的单缸试验机上,开展了对航空煤油发动机冷启动性能的试验研究。结果表明:随着启喷转速的提高,启动时间呈现先变短后变长的趋势,启喷转速为 1200 r/min 时启动时间最短;燃油温度的提高对冷启动性能和燃烧特性都有提升,在本文试验条件下,燃油温度为 50 ℃ 时即可成功启动;提升点火能量对火核形成和火焰传播都有积极影响,可显著缩短启动时间,但当点火能量增大到 75 mJ 之后,其改善作用已不明显。

关 键 词: 冷启动; 航空煤油; 启喷转速; 燃油温度; 点火能量

中图分类号: V234⁺.1; TK46⁺.1

文献标志码: A

Experiment on cold start of piston aviation kerosene engine

SU Siyuan^{1,2}, HU Chunming^{1,2}, LIU Na^{1,2},

ZHAO Yingbo^{1,2}, WANG Yang^{1,2}

(1. Internal Combustion Engine Research Institute,

Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Targeting the influencing factors such as starting speed, fuel temperature and ignition energy, an experimental research on the cold start performance of aviation kerosene engine was carried out on a single-cylinder testing machine with a displacement of 650 mL. The results showed that with the increase of the starting speed, the starting time became shorter but then longer, the starting time was the shortest when the starting speed was 1200 r/min. The rise of the fuel temperature improved the cold starting performance and combustion characteristics. Under the given test conditions, the engine can be successfully started when the fuel temperature was 50 ℃. Increasing ignition energy had a positive effect on the formation of the fire core and the flame propagation, which can significantly shorten the starting time, but when the ignition energy increased to 75 mJ, the improvement effect was not obvious.

Key words: cold start; aviation kerosene; starting speed; fuel temperature; ignition energy

收稿日期: 2019-07-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51476112)

作者简介: 苏思源(1995—),男,硕士生,研究方向为内燃机电子控制技术。

通信作者: 胡春明(1967—),男,研究员,博士,主要从事内燃机电控技术的应用。E-mail:cmhu@tju.edu.cn

引用格式: 苏思源,胡春明,刘娜,等. 活塞式航空煤油发动机冷启动性能试验[J]. 航空动力学报,2020,35(1):97-105. SU Siyuan, HU Chunming, LIU Na, et al. Experiment on cold start of piston aviation kerosene engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(1): 97-105.

近年来,飞机工业发展迅猛,活塞式航空煤油发动机开始逐渐应用于军用、民用领域^[1],相比涡轮、涡扇式的大型航空发动机而言,活塞式发动机制造工艺简单、成本低廉,广泛应用于小功率的低速飞行装置上,并且在未来拥有着很好的发展前景^[2]。目前,轻型无人机主要采用航空煤油作为燃料,与汽油相比,航空煤油闪点更高,常温下遇明火不易自燃,而汽油的沸点较低,易沸腾,汽油蒸汽易阻塞油路,从而造成空中停机,因此使用煤油安全性更高^[3]。航空煤油虽有以上优点,但其不易挥发的特性也导致其难以像汽油那样快速形成均质、易燃的混合气,这就直接导致航空煤油发动机冷启动的难度远高于汽油机^[4]。

国外对活塞式航空煤油发动机的研究从 20 世纪初便已开展,迄今为止很多公司都已涉及活塞式航空发动机的研发,如美国的 Insitu 公司、Sonex 公司,奥地利的 Rotax 公司,德国的 Limbach 公司和 Hirth 公司等^[5-6]。国外学者针对航空煤油发动机冷启动问题开展了相关研究。Hooper 等使用柴油机预热塞对煤油进行 2 min 预热的前提下,对煤油发动机进行了冷启动试验,试验结果为发动机成功冷启动时,缸头最低温度为 50℃。若缸头温度在 50℃ 以上时,不需对燃油加热即可成功启动,但若缸头温度低于 50℃,则需电热塞预热才能够顺利启动^[7]。Cathcart 等以一款 V 型对置式 6 缸机为试验平台,采用奥必托公司的空气辅助直喷夹气喷嘴进行了冷启动试验,结果表明在不使用任何加热设施和辅助雾化设备的前提下,正常启动的最低温度可达零下 15℃^[8]。

国内高校和研究机构对活塞式航空发动机的研究工作开展较晚,最近工作的开展也在新世纪之初,主要研究工作一般在各大以航空研究为主要方向的高校中进行^[9]。天津大学的胡春明等对航空煤油发动机冷启动过程进行了仿真和试验研究,并得出航空煤油在不加热、不采用辅助雾化的条件下,能够成功启动的最低缸温为 46℃^[10]。南京航空航天大学的杨光针对一款二冲程活塞式航空重油发动机改烧航空煤油后冷启动性能不佳的现象,对发动机最小点火能量进行仿真研究,并设计高能点火系统,为点燃式活塞发动机改烧航空煤油后解决冷启动问题提供了理论依据和改进方案^[11]。

1 试验装置

1.1 试验发动机

作为本文试验平台的发动机,其基本参数如

表 1 所示。

表 1 试验机基本参数
Table 1 Basic parameters of single cylinder engine

参数	数值及说明
缸径/mm	100
行程/mm	83
排量/cm ³	650
冷却方式	水冷+风冷
喷油方式	低压空气辅助直喷
润滑方式	压力润滑

1.2 台架系统

台架系统主要由试验发动机、电力测功机系统、燃油供给系统、冷却系统、数据采集系统以及发动机控制系统等组成。

数据采集系统用于采集试验所需参数,如缸压、压力升高率、放热率等,由德维创公司研发的 DEWESoft X3 燃烧分析仪、李斯特公司(AVL)缸压传感器、增量型光电编码器组成。燃烧分析仪内置数据采集卡和电荷放大器。数据采集卡可依据光电编码器提供的时钟信号和触发信号获得电荷放大器处理后的模拟信号,与其配套的软件 APP 可以读取数据采集卡采集的数据,从而对缸内压力显示、处理和分析,其界面如图 1 所示,图中左上角为缸压-曲轴转角图,右侧明细栏中 Max pressures 为最高燃烧压力,Derivates 为压力升高率,Heat release 为放热率。发动机控制系统上位机是基于 Labview 开发平台自主开发的,与电子控制单元(ECU)之间基于 CCP(CAN calibration protocol)协议,通过 CAN(controller area network)总线进行通信,可以对发动机的电喷参数进行灵活控制;下位机是基于英飞凌 TC1766 单片机自主开发的 ECU,可根据上位机所给参数



图 1 燃烧分析仪界面图

Fig. 1 Burning analyzer interface diagram

来灵活调节执行器输出脉宽。采用 ETAS 的 LA4 型空燃比分析仪实时观察空燃比。

本文试验采用的燃料为 RP-3 航空煤油,别称火箭推进剂-3 号,其热物性参数如表 2 所示。

表 2 RP-3 航空煤油热物性参数

Table 2 RP-3 aviation kerosene thermal property parameters

参数	数值范围
成份	$C_7 \sim C_{16}$
闪点/ $^{\circ}C$	28~45
沸点/ $^{\circ}C$	150~280
饱和蒸气压/kPa	57.5~88
热值/(MJ/kg)	41.8~42.8

2 试验方法及意义

混合气制备与火核形成难易程度是影响发动机冷启动性能的最主要因素,因此本文以一台自主研发的单缸航空发动机为试验平台,针对启喷转速、燃油温度、点火能量对航空煤油发动机冷启动性能的影响开展了试验研究,并对燃烧特性进行分析。试验过程中,启喷转速通过调整测功机来改变;燃油由 PTC(positive temperature coefficient)加热片进行加热,其温度由 ECU 控制;点火能量大小与充磁时间有关,充磁时间由 ECU 来控制。

活塞式航空发动机与涡轮式相比,有结构简单、成本较低、升功率大等优点,但由于活塞式发动机在冷启动工况下无法提供较高转速,因此混合气雾化质量较差,冷启动难度较高,提高其冷启动性能已成为亟待解决的问题。本文针对启喷转速、燃油温度、点火能量三者对冷启动性能的影响,从尽量节省能耗的角度出发,对其进行逐步优化,使活塞式航空煤油发动机的冷启动性能有了明显提高,且所采取的措施简单易行。

3 试验结果及分析

3.1 启喷转速对冷启动性能影响的研究

启喷转速(N)为开始喷油点火时测功机的转速,将启喷转速分别设置为 900、1 200、1 500 r/min,每个转速下重复进行 3 次试验,将启动时间取平均值,点火能量 60 mJ,燃油温度 50 $^{\circ}C$,环境温度 5 $^{\circ}C$,图 2 为 3 次试验的启动时间(从开始喷油、点火到发动机成功启动所经历的时间)。

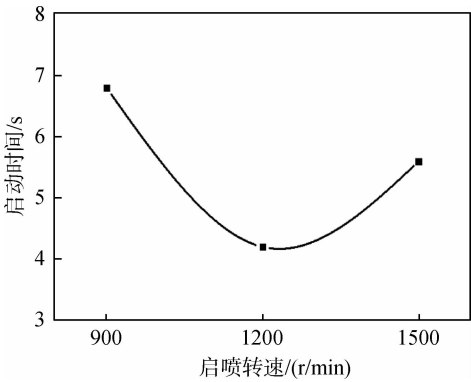


图 2 各启喷转速下的启动时间
Fig. 2 Starting time at each starting speed

从图 2 可以看出,启喷转速为 1 200 r/min 时启动时间最短,启动时间呈现随转速升高先缩短后延长的趋势。原因如下:①高转速倒拖时缸温升高的较快,有助于燃油分子的活化,且转速升高也加强了缸内的气流运动,有助于形成缸内滚流,对可燃混合气的形成起到了促进作用^[12];②由于气流运动,火焰中心就不一定在电极间隙处,会被吹到电极侧面,对电极间混合气的击穿作用减弱,增大了形成火核的难度^[13]。以上两点因素相互抵消,所以会呈现启动时间随启动转速先缩短后延长的趋势。

图 3、图 4 为各启喷转速下首循环的燃烧情况,图中缸压、放热率由燃烧分析仪测得,每循环取 7 200 个点,并将所有点连接成平滑的曲线。当启喷转速为 900 r/min 时,用缸压表测得发动机倒拖时的缸压仅为 600 kPa(1 200 r/min 时为 720 kPa,1 500 r/min 时为 785 kPa),燃油雾化的条件比较苛刻,并且由于转速较低,不利于燃油与空气的混合,因此 900 r/min 时滞燃期最长,燃烧滞后,做功能力下降,放热率也比较低。对比 1 200 r/min 和 1 500 r/min 的燃烧状况,从缸压曲线来

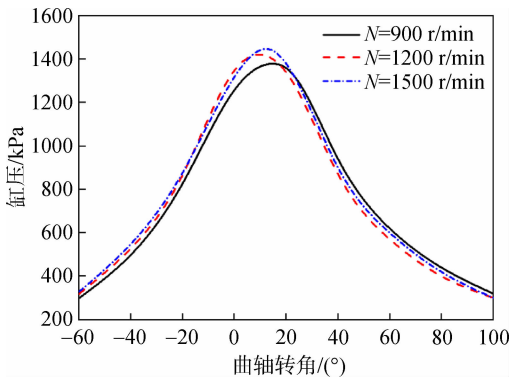


图 3 各启喷转速下首循环缸压
Fig. 3 First cycle cylinder pressure at each starting speed

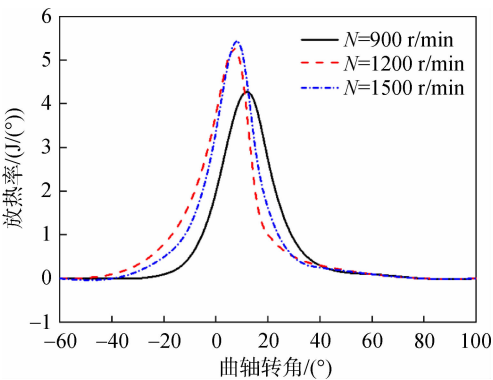


图 4 各启喷转速下首循环放热率

Fig.4 First cycle heat release rate at each starting speed

看,缸压的峰值虽然无明显差异,但从放热率曲线来看,1500 r/min 的放热始点稍有滞后,因为转速越高,相同时间内曲轴转过的角度就越大,虽然峰值略高,但其燃烧放热最集中处的相位靠后,不利于转化为对外输出的有用功^[14]。

因此,从启动时间和首循环燃烧情况来看,1500 r/min 与 1200 r/min 相比并无明显优势,从节省能耗的角度来考虑,选取 1200 r/min 作为最佳启喷转速。

3.2 燃油温度对冷启动性能的影响

煤油因黏度大,不易挥发,所以难以形成易于燃烧的均质混合气。表 3 为煤油与汽油在各温度下的运动黏度对比。

表 3 汽油与煤油运动黏度对比

Table 3 Comparison of kinematic viscosity between gasoline and kerosene

燃料	温度/℃	运动黏度/(mm ² /s)
汽油	0	1.30
	10	0.85
	20	0.76
	30	0.70
	50	1.34
煤油	70	0.86
	90	0.78
	110	0.72

由表 3 可以看出,煤油的温度在 50℃ 以上时,其运动黏度才与常温下的汽油相当,雾化效果才接近汽油,因此本文将试验条件选在 50℃ 以上,分别在 50、70、90、110℃ 燃油温度下重复进行

3 次试验,并将启动时间取平均值,启喷转速 1200 r/min,点火能量 60 mJ,环境温度为 5℃,图 5 为各燃油温度下的启动时间。

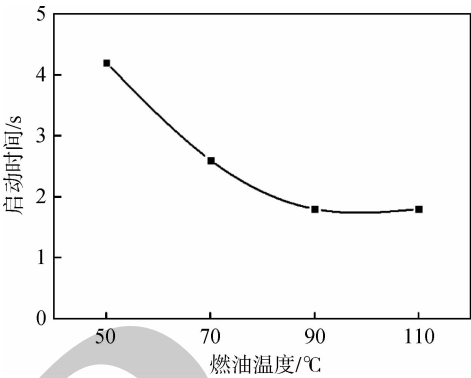


图 5 各燃油温度下的启动时间

Fig.5 Starting time at each fuel temperature

从图 5 可以看出,随着燃油温度的升高,启动时间呈逐渐缩短的趋势。因为温度升高加强了分子热运动,活化分子数目增多,从而降低燃烧反应所需活化能^[15],宏观表现为运动黏度降低,雾化得到加强。但当燃油温度达到 90℃ 以上时,启动时间不再变化,分析原因为:燃烧反应的吉布斯自由能为正数,是非自发反应,活化分子数不能无限增多,活化能降低到某一程度时,活化分子数不再增加,多余的能量用来降低分子间作用力,对冷启动性能已无显著影响,所以在此本文的环境温度下,活化能对冷启动性能的改善已达最优,针对此问题进行了如下计算。活化能具体降低多少可根据比热容公式求出

$$\Delta E = cM\Delta t \tag{1}$$

式中 ΔE 为活化能变化量, c 为煤油比热容, M 为煤油的摩尔质量, Δt 为温度变化量。

将该室温下能够成功启动的最低燃油温度 t_0 时的 ΔE 定为零,此最低燃油温度在先前的试验中已得知,因此将 1 mol 煤油加热至 50、70、90、110℃ 所需的能量 ΔE 可由式(1)求出。图 6 为启动时间与 ΔE 的变化关系图。

图 6 中曲线经拟合后的公式为

$$t = 0.0057(\Delta E)^2 - 0.25\Delta E + 4.4 \tag{2}$$

式中 t 为启动时间,将此式求导可得到 t 随 ΔE 的变化率

$$t' = 0.0114\Delta E - 0.25 \tag{3}$$

式中 t' 为启动时间 t 的 1 阶导数。

当 $t' = 0$ s 时,启动时间变化率为 0,即已经达到了最小值,将此时的 ΔE 带入式(1),所得的 t

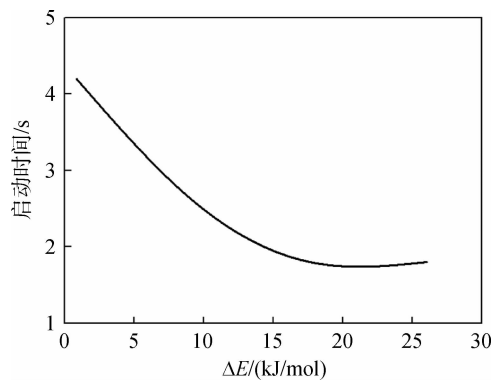


图 6 启动时间随 ΔE 变化趋势图

Fig. 6 Starting time change trend with ΔE

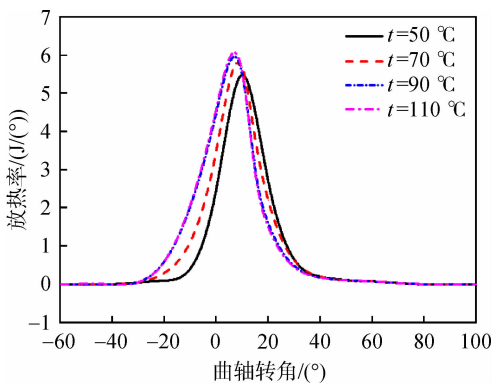


图 8 各燃油温度下首循环放热率

Fig. 8 First cycle heat release rate at each fuel temperature

与 t_0 相加的结果约为 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，即当燃油温度达到 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时，启动时间几乎不会再有变化，冷启动性能达到最优，与试验所得结论相符，但本文是在环境温度 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下计算的，室温改变时应当根据此方法重新计算。

图 7 为各燃油温度下启动后 20 个循环最高燃烧压力的变化趋势图。由图可知，燃油温度越高，最高燃烧压力越高，且达到稳定燃烧所需的循环数越少， $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时需仅 9 个循环， $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时需 16 个循环。因为提升燃油温度有利于缩短滞燃期，使燃烧相位提前，燃烧情况得到优化，因此最高燃烧压力会增大。图 8 为首循环放热率曲线，随着燃油温度升高，放热率峰值升高且更加靠近上止点，活塞做功能力增强，缸温迅速上升，所以达到稳定燃烧的速率加快^[16]。

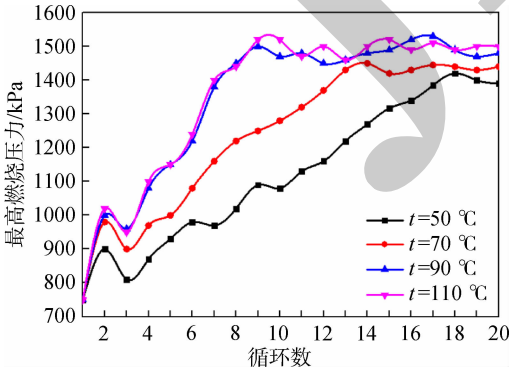


图 7 各燃油温度下的最高燃烧压力

Fig. 7 Maximum combustion pressure at each fuel temperature

综上，提高燃油温度可显著缩短启动时间，并加快启动后达到稳定燃烧的速率，在本文的试验条件下， $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 即可成功启动，但达到 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时，对冷启动性能的优化效果不再明显。

3.3 点火能量对冷启动性能的影响

3.3.1 点火能量对燃烧特性的影响

本文采用自主设计的点火系统进行试验，点火能量的大小指的是点火线圈储存的能量，可由式(4)计算得到

$$E_i = \frac{UI}{2R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}T_i} \right) \tag{4}$$

式中 E_i 为点火能量， U 为蓄电池电压， I 为初级线圈断开电流， R 为初级回路电阻， L 为初级线圈电感， T_i 为线圈充磁时间。

由式(4)可知，点火能量的大小与充磁时间有关，因此试验时可通过在上位机上改变充磁时间来改变点火能量，根据公式拟合出点火能量随充磁时间变化的规律，其结果如图 9 所示。

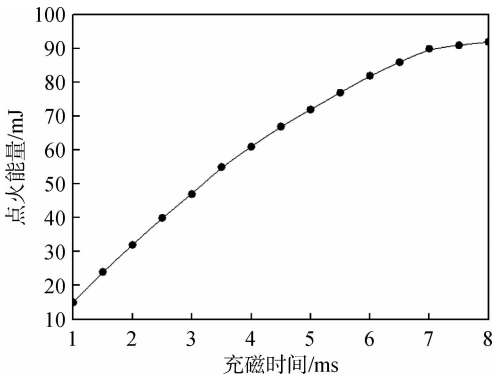


图 9 充磁时间与点火能量的关系

Fig. 9 Relationship between magnetization time and ignition energy

在启喷转速 1200 r/min ，燃油温度 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，环境温度 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下，分别采用 30、45、60、75、90 mJ 的点火能量重复进行 3 次冷启动试验，并将启

启动时间取平均值。图 10 为各点火能量下的启动时间。

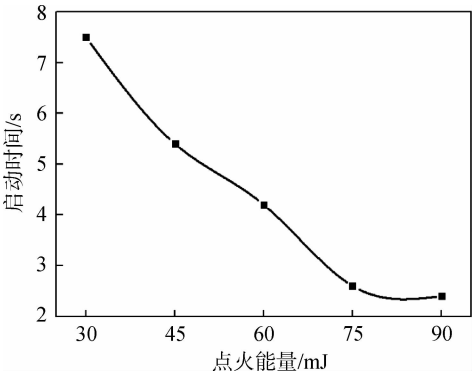


图 10 各点火能量下的启动时间

Fig. 10 Starting time at each ignition energies

从表中可以看出,点火能量越高,启动时间越短。原因为:点火能量的提高改善了反应条件,也相当于降低了反应所需的活化能,宏观表现为促进了火核形成,且能量越高火核越稳定,从而降低了失火概率,提升了冷启动性能^[17],但达到 75 mJ 以上时,启动时间的变化已经不明显,用 3.2 中的结论来解释,就是此时活化能对冷启动性能的提升已达到最大限度。

图 11 和图 12 分别为各点火能量下滞燃期(从火花塞开始点火到形成火焰中心的曲轴转角)和急燃期(从形成火焰中心到火焰前锋面传遍整个燃烧室的曲轴转角)的变化趋势。

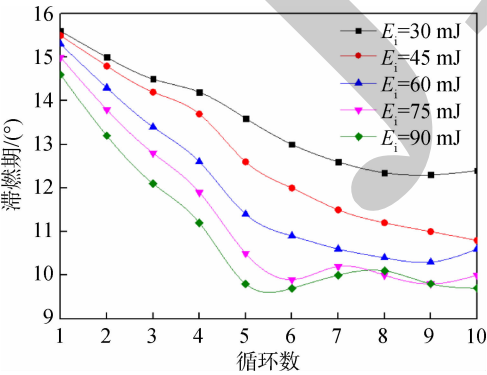


图 11 各点火能量下的滞燃期

Fig. 11 Retardation period at each ignition energy

由图 11、图 12 分析可得:

1) 滞燃期缩短说明提高点火能量有利于火核形成。滞燃期包括燃油加热、蒸发、扩散并与气流混合等物理准备过程,以及分解、氧化等化学准备过程^[18]。点火能量越高,火花塞跳火时产生的扰动越强,加强了缸内流体的运动^[19],加快了物

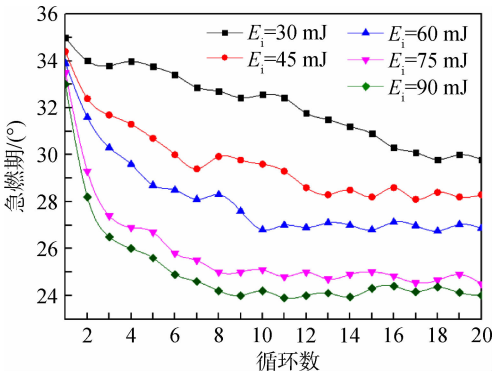


图 12 各点火能量下的急燃期

Fig. 12 Explosion period at each ignition energy

理混合过程,火星温度的提升促进了化学准备过程,所以火核的形成变得容易。

2) 急燃期显著缩短说明提高点火能量有利于火焰传播。因为点火能量越高,火星的贯穿距离越长,在点火瞬间能够引燃的混合气越多,所以火焰传播速度加快。

图 13、图 14 分别为首循环的缸压曲线和压力升高率曲线,可以看出两者都随点火能量的提升而增大,从缸压曲线来看,点火能量越高,峰值越高且其所对应的曲轴转角略有提前,因此等容度提高,做功能力增强;从压力升高率曲线来看,其值越大,燃烧速率越快,有利于转化为对外输出的有效功。

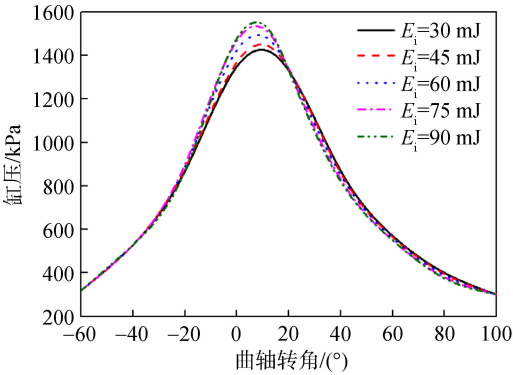


图 13 各点火能量下的首循环缸压

Fig. 13 First cycle cylinder pressure at each ignition energy

提升点火能量对火核形成和火焰传播都有促进作用,因此首循环放热率曲线峰值增大,并且相位更加靠近上止点,如图 15 所示,有利于缸温的迅速升高,因此达到稳定燃烧所需的循环数减少,90 mJ 时仅需 8 个循环,而 30 mJ 时需 18 个循环,如图 12。

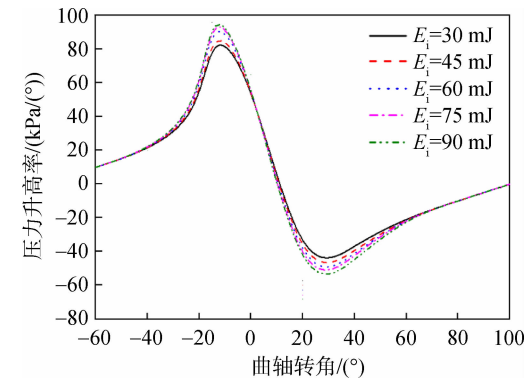


图 14 各点火能量下的首循环压力升高率
Fig. 14 First cycle pressure increase rate at each ignition energy

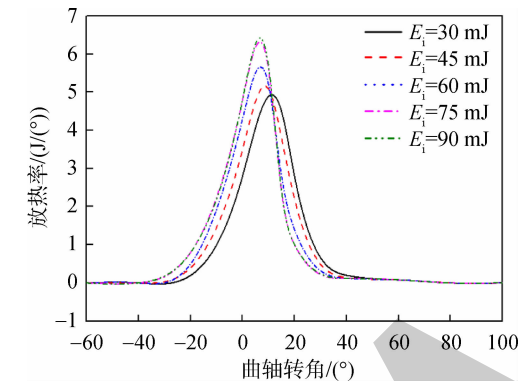


图 15 各点火能量下首循环放热率
Fig. 15 First cycle heat release rate at each ignition energy

综上,从启动时间和达到稳定燃烧所需循环数来看,点火能量的提升对冷启动性能有显著的提升,但达到 75 mJ 以上时,对冷启动性能的优化效果已变得不太明显。

3.3.2 点火能量对燃油温度的影响

提升点火能量和燃油温度都可降低燃烧反应所需活化能,因此点火能量的提升对燃油温度具有补偿作用,即降低了燃油温度的下限值(刚好能够成功启动的燃油温度),图 16 为各点火能量下能够成功冷启动的最低燃油温度和预热时间。

由图 16 可以看出,点火能量的提升显著降低了燃油温度的下限值,但当达到 75 mJ 以上时,温度下限值和预热时间几乎不再变化,说明 75 mJ 和 90 mJ 对燃烧反应的活化作用已基本相同,再次印证了上文的结论。

3.3.3 点火能量对过量空气系数的影响

点火能量对冷启动工况所需的最大过量空气

系数 λ (能够成功启动的最稀混合气对应的过量空气系数)的影响比较明显。图 17 为各点火能量下能够成功启动的最大过量空气系数。

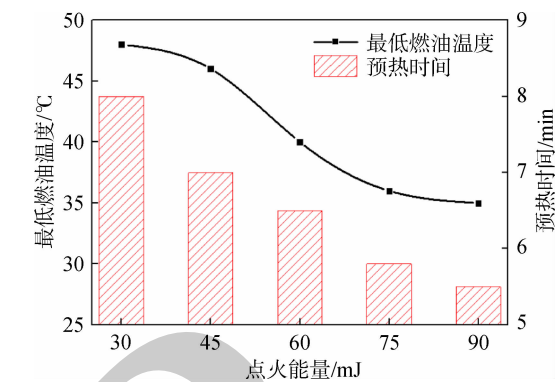


图 16 各点火能量下的最低燃油温度
Fig. 16 Minimum fuel temperature at each ignition energy

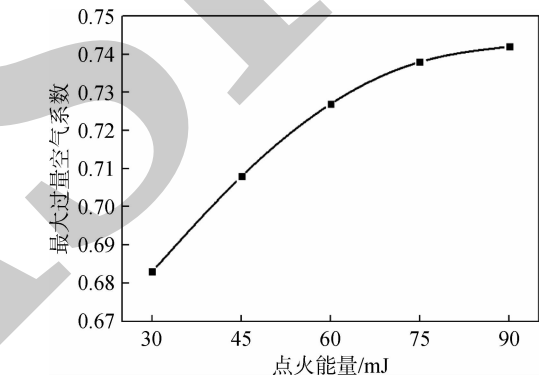


图 17 各点火能量下的最大过量空气系数
Fig. 17 Maximum excess air ratio at each ignition energy

冷启动工况下,通常给发动机供给浓混合气,因为此时缸温较低,火花塞点火后,即使形成了火核,但由于淬息效应,火焰可能无法顺利传播到整个燃烧室^[20],从而造成失火,而点火能量的提高可大大改善火焰传播的稳定性,降低了失火概率,因此混合气浓度可适当降低,拓宽了冷启动工况的 λ 边界。由图 17 也可以看出,点火能量到达 75 mJ 以上时,冷启动的燃烧边界变化已不明显,说明 75 mJ 和 90 mJ 对火焰传播的影响差异不大。

4 结 论

1) 启喷转速过高或过低都会对冷启动性能带来不利影响,过低时可燃混合气的形成条件恶化,过高时不利于火核的形成,因此启喷转速

存在最佳值,本文试验的最佳启喷转速为 1 200 r/min。

2) 提升燃油温度可显著缩短启动时间、优化燃烧,本文是在环境温度 5℃ 进行试验的,将燃油温度为 50℃ 时即可成功启动,其实质是降低了反应所需活化能,但活化能降低到一定程度时,冷启动性能不会再有提升。

3) 提高点火能量对火核形成和火焰传播稳定性都有改善作用,因此可显著提高冷启动性能,除此之外还可降低能够成功启动的燃油温度下限,以及拓宽过量空气系数的边界。但达到 75 mJ 以上时,对冷启动性能的改善作用已不明显。

4) 本文试验将启动时间由最初的 7 s 左右优化到了最终的 2 s 左右,极大地改善了活塞式航空煤油发动机的冷启动性能,且措施简单易行,所用能耗较低。从节省能耗的角度考虑,启喷转速应在 1200 r/min 左右,燃油温度控制在 50℃ 到 90℃ 之间,点火能量应控制在 75 mJ 以内。

参考文献:

- [1] LI S H, JIN Y, NI K S. Study on the ignition factor of piston kerosene engine[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 779-780: 705-710.
- [2] KALGHATGI G T. Fuel anti-knock quality: Part I engine studies[R]. SAE Technical Paper 2001-01-3584, 2001.
- [3] DUDDY B J, LEE J, WALLUK M, et al. Conversion of a spark-ignited aircraft engine to JP-8 heavy fuel for use in unmanned aerial vehicles[J]. *SAE International Journal of Engines*, 2011, 4(1): 82-93.
- [4] WEINZIERL S, WILDEMANN R, HANULA B. The design and development of a light-weight, high-speed, diesel engine for unmanned aerial vehicles[R]. SAE Technical Paper 2002-01-0160, 2002.
- [5] FALKOWSKI D T, ABATA D L, CHO P. The performance of a spark-ignited stratified-charge two stroke engine operating on a kerosine based aviation fuel[R]. SAE Technical Paper 972737, 1997.
- [6] 苏鑫鑫, 洛静. 美国军用无人机的发展新动态[J]. *飞航导弹*, 2007(5): 27-30.
SU Xinxin, LUO Jing. New developments in the US military drones[J]. *Flying Missile*, 2007(5): 27-30. (in Chinese)
- [7] HOOPER P. Experimental experience of cold starting a spark ignition UAV engine using low volatility fuel[J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2015, 89(1): 106-111.
- [8] CATHCART G, DICKSON G, AHERNS. The application of air-assist direct injection for spark-ignited heavy fuel 2stroke and 4stroke engines[R]. SAE Technical Paper, 2005-32-0065, 2005.
- [9] 毕延飞. 航空重油直喷发动机冷启动性能优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
BI Yanfei. Research on cold start performance optimization of aviation heavy oil direct injection engine[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017. (in Chinese)
- [10] 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.
HU Chunming, LI Jiqi, BAI Honglin, et al. Experiment of in-cylinder mixture formation process low-pressure GDI engine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(9): 1921-1927. (in Chinese)
- [11] 许善珍, 魏民祥, 杨光. 二冲程煤油发动机稳态工况最小点火能量[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(7): 60-66.
XU Shanzhen, WEI Minxiang, YANG Guang. Minimum ignition energy of steady-state conditions for two-stroke kerosene engine[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(7): 60-66. (in Chinese)
- [12] 刘锐, 魏民祥, 杨海青, 王伟伟, 贝太学等. 二冲程点燃式直喷煤油发动机冷启动控制策略[J]. *航空动力学报*, 2017, 32(1): 213-220.
LIU Rui, WEI Minxiang, YANG Haiqing, et al. Cold start-control strategy of a two-stroke direct injection spark-ignited kerosene engine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2017, 32(1): 213-220. (in Chinese)
- [13] 刘志敏, 李理光, 邓宝清, 等. 基于首次着火循环的低温冷启动特性[J]. *燃烧科学与技术*, 2005, 11(4): 554-559.
LIU Zhimin, LI Liguang, DENG Baoqing, et al. Combustion characteristics of cold start at low temperature based on the first firing cycle analysis[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2005, 11(4): 554-559. (in Chinese)
- [14] 马帅. 点燃式航空直喷发动机冷启动工作过程的仿真研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
MA Shuai. The simulation study on the cold starting process of ignition aviation direct injection engine[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese)
- [15] 何邦全, 张岩, 谢辉, 等. 过量空气系数对 HCCI 汽油机燃烧特性的影响[J]. *燃烧科学与技术*, 2007, 13(4): 287-292.
HE Bangquan, ZHANG Yan, XIE Hui, et al. Effect of lambda on combustion characteristics of an hcci gasoline engine[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2007, 13(4): 287-292. (in Chinese)
- [16] 张君才. 吉布斯自由能变的计算及应用[J]. *咸阳师范专科学校学报*, 1999, 14(3): 49-53.
ZHANG Juncai. Calculation and application of Gibbs free energy change[J]. *Journal of Xianyang Teachers College*, 1999, 14(3): 49-53. (in Chinese)
- [17] 梁金虎, 王苏, 张灿, 等. RP-3 航空煤油点火特性研究[J]. *力学学报*, 2014, 46(3): 352-360.
LIANG Jinhu, WANG Su, ZHANG Can, et al. Studies on

the autoignition characteristics of RP-3 aviation kerosene [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2014, 46(3): 352-360. (in Chinese)

[18] 郑大勇, 颜勇, 张卫红. 氢氧火箭发动机性能敏感性分析 [J]. 火箭推进, 2011, 37(4): 18-23.
ZHENG Dayong, YAN Yong, ZHANG Weihong. Analysis for performance parameter sensitivity of hydrogen/oxygen rocket engine [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2011, 37(4): 18-23. (in Chinese)

[19] 王都, 盛利, 冒晓建, 等. 点火能量对稀燃增压 CNG 发动机性能影响的试验研究 [J]. 汽车工程, 2009, 31(10): 915-918.
WANG Du, SHENG Li, MAO Xiaojian, et al. Experimental research on the influence of ignition energy on the performance of lean burn supercharged CNG engine [J]. Automotive Engineering, 2009, 31(10): 915-918. (in Chinese)

[20] 周龙保, 刘忠长, 高宗英, 等. 内燃机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

(编辑: 张 雪)