

文章编号: 1007-6735(2024)05-0509-08

DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.20230514001

汽油机点火系统控制参数对缸内燃烧特性的影响

李浩然, 赵校伟, 孙跃东

(上海理工大学机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 利用电力测功机和自然吸气汽油机组成的测试平台, 通过设计的4种火花塞对发动机点火性能进行了实验研究, 结果表明: 发动机点火平均需求电压与发动机的负荷、火花塞间隙相关, 间隙每增大0.1 mm, 平均需求电压上升约1 kV。发动机点火需求能量与发动机的转速、负荷相关; 点火可用能量相对于点火需求能量需要保持一定的余量; 过渡工况点火电压和点火需求能量均低于稳态工况。点火线圈充磁时间与点火能量之间近似呈线性变化, 只有当充磁时间减小到40%以下时, 燃烧稳定性才会产生显著劣化。

关键词: 发动机; 点火; 需求电压; 可用电压; 点火能量

中图分类号: TK 412 **文献标志码:** A

Effect of ignition system control parameters on in-cylinder combustion characteristics of gasoline engines

LI Haoran, ZHAO Xiaowei, SUN Yuedong

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: An experimental study on the engine ignition performance using a test platform consisting of an electric dynamometer was conducted, and a naturally aspirated gasoline engine with four types of spark plugs was designed. The results show that the average demand voltage of engine ignition is related to the engine load and spark plug gap, and the average demand voltage increases by about 1 kV for every 0.1 mm increase in gap. The demand energy of the engine ignition is related to the speed and load of the engine, the available energy of the ignition needs to maintain a certain margin relative to the demand energy of the ignition, and the voltage of the ignition in transition condition and the demand energy of the ignition are lower than that of the steady state condition. The ignition coil magnetization time and ignition energy are approximately linear, and the combustion stability will deteriorate significantly only when the magnetization time is reduced to less than 40%.

收稿日期: 2023-05-14

基金项目: 上海市科技计划项目(21010503000)

第一作者: 李浩然(1998-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 发动机先进点火技术研究. E-mail: lihaoran1227190974@163.com

通信作者: 孙跃东(1965-), 男, 教授. 研究方向: 车辆动力匹配技术, 车辆发动机性能测试研究. E-mail: syd@usst.edu.cn

引文格式: 李浩然, 赵校伟, 孙跃东. 汽油机点火系统控制参数对缸内燃烧特性的影响[J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(5): 509-516.

Citation: LI Haoran, ZHAO Xiaowei, SUN Yuedong. Effect of ignition system control parameters on in-cylinder combustion characteristics of gasoline engines[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2024, 46(5): 509-516.

Keywords: gasoline engine; spark ignition; required voltage; available voltage; ignition energy

随着能源与环境问题日益加剧,法规对于节能减排的要求日趋严格^[1-2]。对于汽车工业来说,减少排放污染,提高燃烧效率一直是汽车发动机研发的主要目标之一。近几年,世界各国对新能源汽车都极为重视,这对缓解目前的能源危机和温室效应有着一定帮助^[3],然而对于目前的汽车工业来讲,在未来很长一段时间内,火花点火(SI)仍将是主流的汽车驱动方式^[4-5]。对于点燃式发动机来说,点火系统是内燃机的必要组成部分,其对整个发动机的动力性、平稳性、燃油经济性以及废气排放有重要影响^[6-7],稳定可靠的点火系统是保证发动机正常工作必不可少的重要一环^[8]。点火系统及其本身的性能指标直接影响发动机的缸内燃烧状况,需要它在规定的极短的时间内完成复杂的点火任务^[9],因此它影响着发动机的动力性、经济性、排放性和振动、噪声特性等^[10-13]。在点火系统中,点火线圈和火花塞是实现发动机可靠点火极为重要的部件。

点火可用电压表征点火系统击穿可燃混合气的最大能力。点火需求电压表征一定工况下击穿可燃混合气的需求^[14]。点火能量表征点火系统击穿可燃混合气后向火焰核传递的能量^[15],点火能量关系着可燃混合气被成功击穿、形成火焰核后能否顺利点燃可燃混合气形成燃烧^[16-17]。点火线圈的充磁时间是点火系统的核心控制参量,决定了点火系统的性能^[18]。

Alger等^[14]开发了一种连续感应放电点火系统,可以在火花点火发动机中完成可变持续时间的点火。增加连续放电模式在燃烧速度和稳定性方面的改善要大于单线圈在多冲击模式下或两个线圈在多冲击模式下同时放电所取得的改善。这种连续放电模式很好地改善了燃烧速率和稳定性,进而优化了燃油消耗率,特别是在低功率水平和高发动机转速下改善更为明显。

Yu等^[18]对不同初级电感、次级电感和匝数比的感应线圈进行了实验,研究了不同充电电压和充电时间等参数下,感应点火系统参数对火花放电特性的影响。基于测量的结果采用简化的电路模型来进行系统的研究,以改进感应点火系统的性能。并且在另一个实验中,提出了一种提高电流火花策略,以研究火花放电电流水平和放电持续时间对燃烧过程的影响。分别在化学计量比以

及稀燃情况下进行实验,结果表明,放电电流增大时,火花通道更加稳定,且被拉长,缩短点火延迟时间,控制燃烧相位^[17]。

Tan等^[19]研究了一种自适应火花点火系统。在火花放电期间,任何时候被中断,该系统具有重建导电离子通道的能力。此外,由于增加了火花能量管理模块,放电电流的幅度和持续时间都是可控的。结果发现放电电流的幅度可以在火花放电的持续时间内保持在相对较高的水平。

Windarto等^[15]通过实验和模拟研究了火花放电能量对缸内特性的影响。根据点火正时变化的六种选定情况,应用范围从50~200 mA的3种火花点火策略来增强点火放电能量。结果发现同时点火策略释放的总能量最大,其次是成对点火策略和单独点火策略。该研究团队的研究思路 and 实验方法给本文作者带来很大启发,本研究一定程度上学习了此团队的研究思路。

近几年稀薄燃烧技术在内燃机领域受到很多学者的重视,其带来的优势是显而易见的,一定程度上提高的发动机的热效率^[20],排放废气也得到了改善,但随之而来的就是点火稳定性的问题^[21]。本文基于之前研究者的内容,对点火的一些基本参数及其对燃烧的影响做出一些基础研究。前文所述的研究者的研究内容已经包含了火花点火的很多方面,但对于点火的瞬态以及稳态工况下点火电压,需求电压及点火能量的研究不够详细。本文在一款自然吸气发动机的基础上,建立了由电力测功机和自然吸气发动机组成的实验平台,借助点火性能实验台和相关测试设备,对发动机点火需求电压和点火能量进行实验研究,从发动机实验入手研究点火需求电压和点火需求能量的变化规律,并在此基础上,研究点火性能对发动机燃烧的影响,希望能对本课题未来的稀薄燃烧技术研究有所帮助。

1 实验设置

1.1 实验装置

本文实验所用自然吸气发动机的特征参数如表1所示。

实验中用到的4种火花塞样件的主要参数如表2所示。进行相关测试后,将这4种火花塞安装

进发动机进行实验。图1为火花塞实物图, 图1(a)为1.2 mm 电极间隙火花塞, 图1(b)为无侧电极火花塞。

1.2 实验方法及内容

使用的火花塞点火线圈电路图如图2所示。

在线圈充放电的过程中有能量损耗, 主要是由电阻引起的, 分为2个部分: 初级电路中的能量损耗 $E_{p,loss}$ 和次级电路中的能量损耗 $E_{s,loss}$ 。存储在初级线圈中的能量 E_p 的计算为

$$E_p = 0.5L_p i_{p_max}^2 \quad (1)$$

式中: L_p 是初级线圈的电感量; i_{p_max} 是初级截止电流。当 R_p 为初级线圈电阻时, $E_{p,loss}$ 的计算为

$$E_{p,loss} = \int i_p^2 R_p dt \quad (2)$$

表1 发动机参数

Tab.1 Engine parameters

项目	参数值
排量/L	1.5
缸数	4
冲程数	4
每缸气门数	4
进气方式	自然吸气
额定功率/kW	80
额定功率转速/(r·min ⁻¹)	6000

表2 火花塞样品主要参数

Tab.2 Main parameters of spark plug samples

编号	中心电极材质	火花塞间隙/mm
1	镍合金	1.0
2	镍合金	1.1
3	镍合金	1.2
4	镍合金	无侧电极



(a) 侧电极火花塞 (b) 无侧电极火花塞

图1 火花塞实物图

Fig.1 Physical picture of spark plug

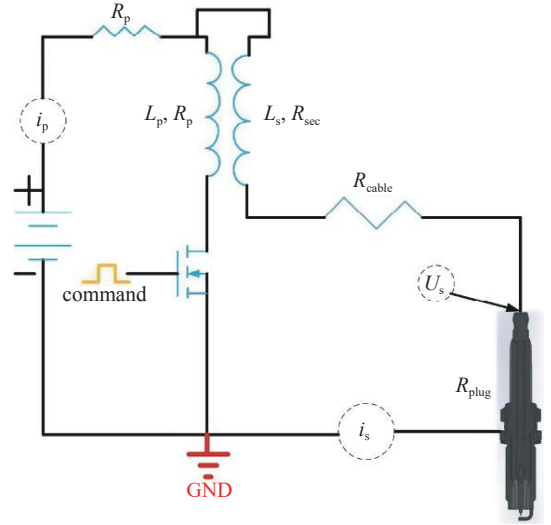


图2 火花塞点火线圈电路图

Fig.2 Diagram of spark plug ignition coil circuit

式中, i_p 为初始电流。

在次级线圈侧, 次级电路中的能量损耗为

$$E_{s,loss} = \int i_s^2 (R_{sec} + R_{cable} + R_{plug}) dt \quad (3)$$

式中: i_s 为放电电流; R_{sec} 为二级线圈电阻; R_{cable} 为高压电缆的电阻; R_{plug} 为火花塞电阻。

传递到火花隙的能量为

$$E_{spark} = \int (U_s i_s - i_s^2 R_{plug}) dt \quad (4)$$

式中: E_{spark} 为提供给火花间隙的能量; U_s 为放电电压。

点火系统的能量传递效率 (η) 可以表示为

$$\eta = E_{spark} / (E_p + E_{p,loss}) \quad (5)$$

根据气体间隙击穿的帕邢定律(巴申定律), 当气体成分和电极材料一定时, 气体间隙击穿电压是气压和极间距离乘积的函数; 当气体温度不定时, 气体间隙击穿电压是气体密度和极间距离的函数, 表示为

$$u_b = f(\delta d) \quad (6)$$

式中: u_b 为气体间隙击穿电压; δ 为气体相对密度, 指气体密度与标准大气条件下密度之比; d 为极间距离。

类比点火电压, 点火系统的点火能量也有可用点火能量(即线圈输出能量)和需求点火能量两个不同概念。

线圈输出能量的计算公式为

$$E = \int_0^t u(t)i(t)dt \quad (7)$$

式中: $u(t)$ 为点火击穿电压; $i(t)$ 为点火电流; t 为

点火持续时间(点火持续期)。

发动机及点火系统的工作示意图如图3所示。在建成的实验台上,首先对发动机的外部特性进行检查,确认发动机性能符合实验要求,外部特性实验的主要内容是发动机的额定功率和额定扭矩。在此基础上,对表1中第一个火花塞的温度特性进行测试,中心电极的最高温度为600~800℃,侧电极的最高温度为800~1000℃。由于温度较低的气缸所需的点火电压和点火能量较高,因此可以根据温度实验找到温度最低的气缸;其次,对温度最低的气缸进行稳态和瞬态点火性能实验,发动机台架实验主要是稳态实验,其目的是获得发动机在稳态工作条件下的性能。瞬态实验用于模拟实际行驶条件下的整车性能。最后,研究了线圈磁化时间控制对点火性能和燃烧的影响,实验条件是:保持发动机转速和负荷稳定,只调整点火线圈的磁化时间。实验步骤为:首先搭建实验平台,然后确定发动机性能,接着需要进行火花塞电极温度测量和各缸一致性检查,完成准备工作后准备具体实验内容,首先是稳态点火电压研究,其次是稳态点火能量研

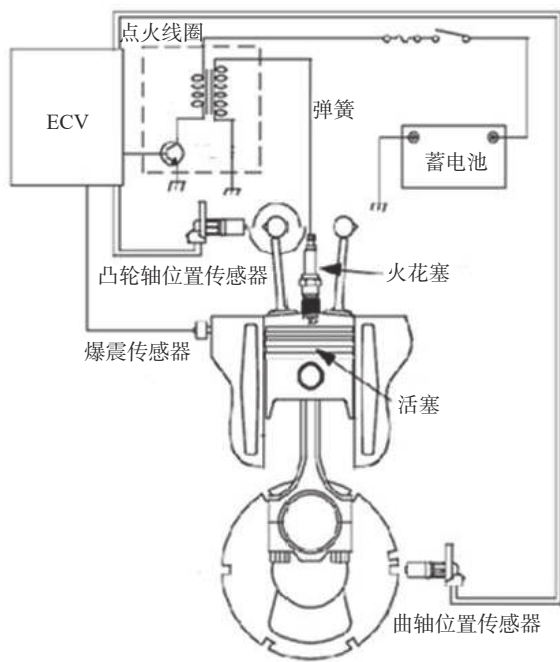


图3 火花点火发动机工作示意图

Fig.3 Schematic diagram of spark ignition engine operation

究,瞬态点火特性研究,磁化时间对点火性能和燃烧的影响。具体实验流程图见图4,发动机实验台架如图5所示。

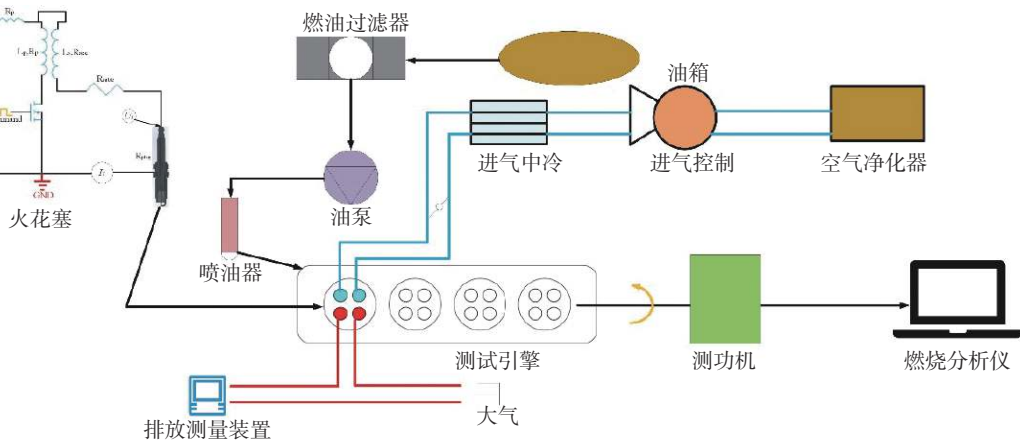


图4 发动机实验台示意图

Fig.4 Engine test rig schematic

2 实验结果及分析

2.1 发动机外特性与火花塞电极温度

对发动机的外特性进行了检查,发动机的外特性测试结果如图6所示,发动机转速6000 r/min时,最大功率达到80.6 kW。最大功率与额定功率80 kW相差2%以内,发动机性能满足进一步研究的条件。

外特性工况下的空燃比和点火角如图7所

示,为了兼顾发动机的动力性和排放,在发动机转速超过4000 r/min之后才进行功率加浓;在转速4000 r/min以内,保持理论空燃比,以维持三元催化器较高的转化效率。

火花塞温度测试需要用到测温火花塞,其测试的目的是为找到温度最低的那一缸,为后续进行点火性能实验做准备。本次测试所用的测温火花塞是中心电极测温火花塞。

从图8可以看出,在外特性工况下,火花塞



图5 发动机实验台架图

Fig.5 Diagram of the test bench for the engine

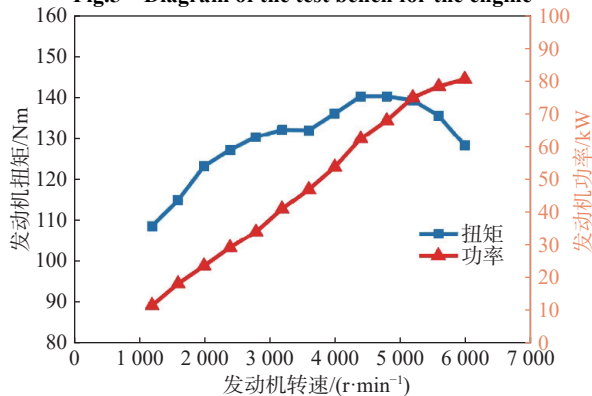


图6 发动机外特性

Fig.6 External characteristics of the engine

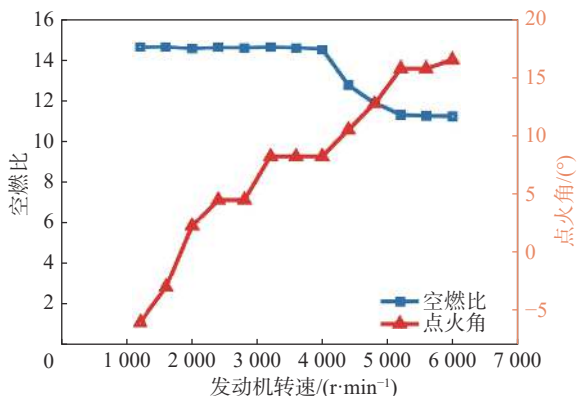


图7 发动机外特性下的空燃比和点火角

Fig.7 Air-fuel ratio and ignition angle under external characteristic of the engine

中心电极温度随着转速的升高而升高。火花塞中心电极温度在 1 200 r/min 时为 400 °C, 在额定功率点 (6 000 r/min@WOT) 时达到最高温度 800 °C, WOT 是指节气门全开, 即全负荷状态。根据实验结果: 外特性工况下, 第 4 缸火花塞温度最高, 第 1 缸最低, 各缸火花塞温度一致性较好。

外特性工况下, 火花塞温度主要取决于缸内的燃烧温度, 随着转速的升高, 缸内混合气紊流加强、火焰传播速度提高, 使得最高燃烧温度升高; 另外, 当发动机转速升高时, 燃烧室向冷却

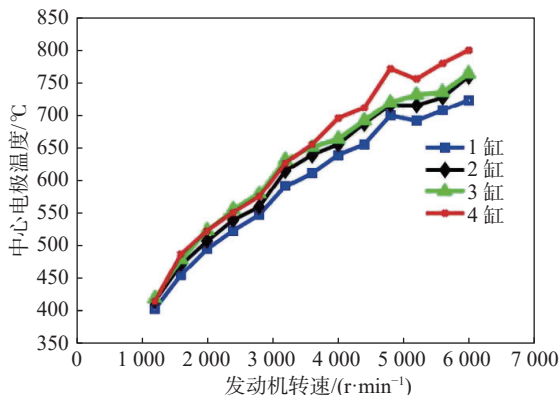


图8 外特性条件下各缸火花塞温度

Fig.8 Spark plug temperature of each cylinder under external characteristics

液传递热量的时间减少, 热力过程的时间损失减少, 也促使缸内压力和温度提高, 从而造成火花塞温度的升高。

2.2 点火电压在稳态工况下的变化规律

点火性能实验在温度最低的第 1 缸上进行。

为了保证火花塞的正常点火, 必须确保在所有工况下点火系统可用电压始终高于火花塞需求电压。

外特性条件下, 火花塞点火电压随间隙的变化规律如图 9 所示。可以看出, 火花塞点火电压 (需求电压) 随火花塞间隙增大而升高, 火花塞间隙每增大 0.1 mm, 平均需求电压上升约 1 kV。这主要是由于火花塞的需求电压主要取决于火花塞间隙和火花塞中心电极和侧电极间的介质的性质如温度、压力等。火花塞电极间隙越大、缸内压力越高、温度越低, 则需求电压越高^[22], 这也是在电压实验中选择第 1 缸进行实验的原因。在相同的介质性质下, 电极间隙小的火花塞需求电压也会有所降低, 也就意味着间隙小的火花塞更容易点火。

无侧电极火花塞代表间隙无穷大的火花塞, 可以用来测试点火系统的可用电压。根据图 9 所示结果可以得出: 点火需求电压始终低于点火可用电压, 以代表老化火花塞的极限间隙 (1.2 mm) 火花塞, 低于点火可用电压 15 kV 以上, 高于行业普遍适用的 4 kV 的要求, 因此该点火系统可用电压设计有足够余量, 可以保证可靠点火。

在 2 000 r/min 使用第 3 种极限火花塞 (电极间隙 1.2 mm) 条件下, 点火电压随发动机负荷的变化规律如图 10 所示, 可以得出, 点火电压随负荷近似呈线性变化。

根据式 (6), 当发动机的转速和极间距离一定时, 随着发动机缸内平均有效压力的增大, 气体

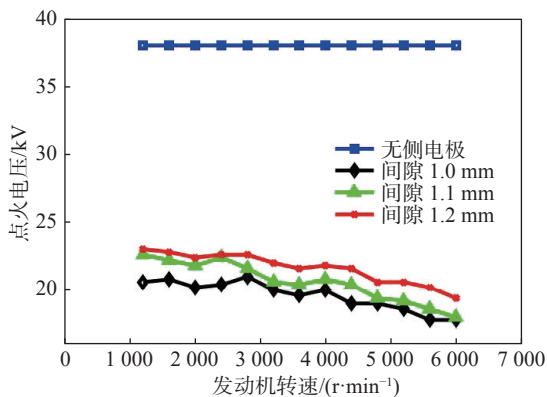


图9 点火电压随火花塞间隙的变化

Fig.9 Variation of ignition voltage with spark plug gap

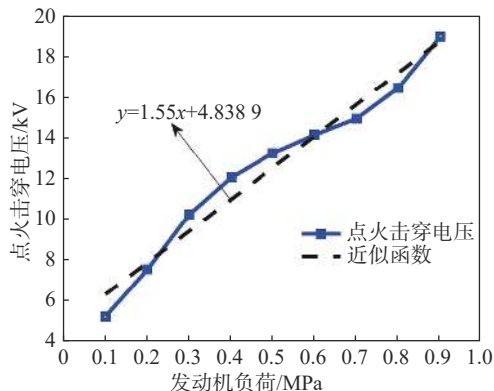


图10 外特性条件下点火电压随负荷的变化

Fig.10 Variation of ignition voltage with load under external characteristics

相对密度呈线性增大, 点点击穿电压也随着负荷线性增大。

2.3 点火能量在稳态工况下的变化规律

对各工况下的点火能量进行测试, 根据发动机转速 2 000 r/min 时的示波器测试界面, 利用示波器的内置函数运算, 依据式(7)对点火持续期内的点点击穿电压、点火电流、点火持续时间进行积分, 得到点火能量。

对发动机进行转速和负荷扫描, 得到外特性和负荷特性下点火能量的变化趋势, 如图 11 所示。可以看出, 点火线圈输出能量在达到最大值后, 逐渐降低。这主要是由于点火线圈的充磁时间受线圈最高温度的限制, 随着发动机转速的升高, 线圈的工作频率加快, 线圈散热间隔时间缩短。为了维持线圈温度在安全可控范围内, 发动机逐步缩短充磁时间以应对高温和散热。因此, 点火能量随着发动机转速的升高有下降的趋势, 尤其是在转速高于 3 200 r/min 后, 点火线圈能量下降明显。点火需求能量随转速的变化不明显,

在 2 800 r/min 达到峰值点火需求能量 21 mJ, 之后缓慢降低。点火线圈输出能量相对于点火需求能量有约 40 mJ 的余量, 高于行业普遍适用的 10 mJ 的要求, 因此该点火系统线圈输出能量设计有足够余量, 可以保证可靠点火。

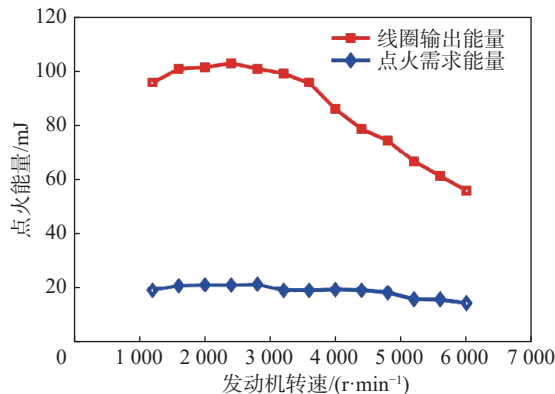


图11 外特性条件下点火能量随转速的变化

Fig.11 Variation of ignition energy with speed under external characteristics

从图 12 可以看出, 不同转速下, 点火线圈输出能量随发动机负荷变化趋势不明显, 大致规律是在中等负荷达到最大值后, 逐渐降低。

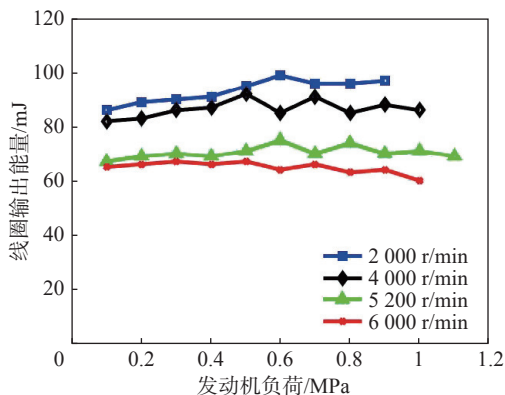


图12 不同转速下点火能量随负荷的变化

Fig.12 Variation of ignition energy with load at different speeds

2.4 点火性能在瞬态工况下的变化规律

在稳态研究的基础上, 进行瞬态工况下的点火性能研究。实验选择第 3 种极限火花塞(电极间隙 1.2 mm)在最大扭矩转速点 4 400 r/min 进行负荷动态切换控制研究。实验时, 将发动机从工况 1: 4 400 r/min@15 Nm 切换到工况 2: 4 400 r/min@WOT 设定为 2 s, 记录该动态变化下的击穿电压和点火能量的分布, 考核负荷波动、空燃比波动以及电极温度对点火性能的影响。

工况 1 选择 15 Nm 的负荷, 是考虑到测试条件并结合发动机在 4 400 r/min 下的最低稳定负荷

设定的, 其代表了发动机在该转速下的接近怠速的最低稳定负载。

从图 13 可以看出, 瞬态工况下, 点火极限击穿电压为 20 kV, 低于稳态值。从数据也可以看出, 在接近怠速的低负荷工况下, 点火击穿电压很低, 为 4~5 kV。

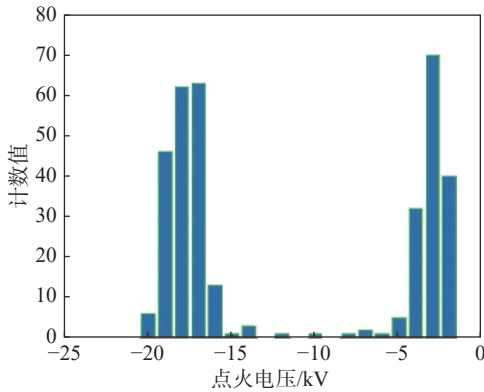


图 13 瞬态工况下点火击穿电压的变化

Fig.13 Variation of ignition energy with load at different speeds

从图 14 可以看出, 瞬态工况下, 极限点火需求能量为 16.96 mJ, 低于稳态需求。在接近怠速的低负荷工况下, 点火需求能量很低, 为 1~2 mJ。

从瞬态工况下的点火极限击穿电压和点火能量结果可以确定, 点火系统的设计有足够的余量, 完全可以满足发动机在稳态和瞬态工况下的需求。

2.5 充磁时间对点火性能和燃烧的影响

点火线圈属于点火执行元件, 是通过线圈的充磁时间来进行控制的。充磁时间对点火线圈的次级电压和点火能量有决定性影响, 进而影响发动机的燃烧质量。

实验选择发动机的两个典型工况: 2 000 r/min@0.2 MPa 和 4 400 r/min@WOT 进行研究。在实验时, 以 BASE 充磁时间开始, 充磁时间逐步缩短, 直至燃烧循环变动 (Coefficient of variation, COV) 产生突变, 即发动机燃烧显著恶化为止。燃烧循环变动是指发动机在某一工况稳定运行时, 每一循环和下一循环的燃烧过程进行情况不断变化, 具体表现在压力曲线、火焰传播情况及发动机功率输出均不相同。本研究的燃烧循环变动以 3% 作为燃烧恶化的界限。

从图 15 和图 16 可以看出, 充磁时间对点火电压和点火能量产生显著影响, 且近似呈现出线性变化趋势。充磁时间适当减小, 并不会对燃烧产生影响。当充磁时间进一步缩短, 直至缩短至基础点火充磁时间的 40% 以下, 才能够影响到缸内

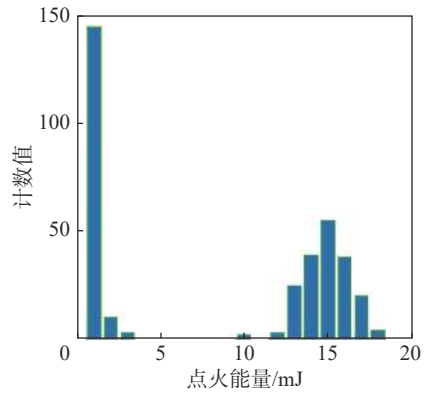


图 14 瞬态工况下点火能量的变化

Fig.14 Variation of ignition energy under transient operating conditions

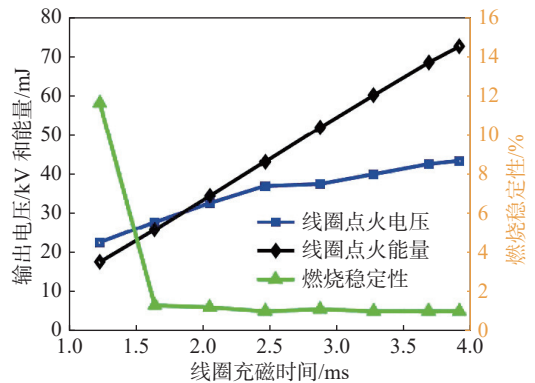


图 15 2 000 r/min@0.2 MPa 下充磁时间对点火性能和燃烧的影响
Fig.15 Effect of magnetization time on ignition performance and combustion at 2 000 r/min@0.2 MPa

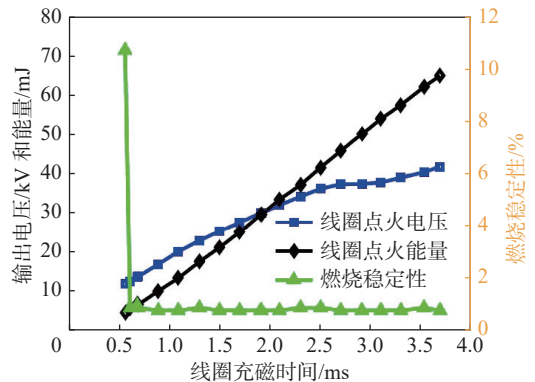


图 16 4 400 r/min@WOT 下充磁时间对点火性能和燃烧的影响
Fig.16 Effect of magnetization time on ignition performance and combustion at 4 400 r/min@WOT

的燃烧质量。

一旦点火能量低破阈值, 则燃烧迅速恶化, 这个过程有一个明确的拐点。

3 结 论

a. 外特性工况下, 发动机点火平均需求电压

在 2 800 r/min 时达到最高；同一转速下，点火平均需求电压随着发动机负荷增大而升高、随着火花塞间隙增大而升高，火花塞间隙每增大 0.1 mm，平均需求电压上升约 1kV；点火线圈可用电压高于点火平均需求电压，并能保持有足够余量。

b. 外特性工况下，发动机点火需求能量在 2 800 r/min 时达到最高；在外特性的高转速区域，点火能量随转速升高而增大；在外特性的中低转速区域，点火能量随转速变化不明显；同一负荷下，点火需求能量随发动机转速升高而增大；点火线圈输出能量高于点火需求能量，并能保持有足够余量。在过渡工况区域，点火电压和点火需求能量均低于稳态工况。

c. 点火线圈充磁时间与点火能量之间近似呈线性变化，当充磁时间小幅减小时，对发动机稳态燃烧稳定性影响不明显。当充磁时间减小至 40% 以下时，燃烧稳定性发生显著劣化。

参考文献:

- [1] AYALA F A, HEYWOOD J B. Lean SI engines: the role of combustion variability in defining lean limits[R]. Chicago: SAE, 2007.
- [2] CONTI J, HOLTBERG P, DIEFENDERFER J, et al. International energy outlook 2016 with projections to 2040[R]. Washington: USDOE Energy Information Administration (EIA), 2016.
- [3] WANG Q, JIANG B, LI B, et al. A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 64: 106–128.
- [4] OPEC. World oil outlook 2045[R]. Vienna: OPEC, 2020.
- [5] RAIMI D, CAMPBELL E, NEWELL R G, et al. Global energy outlook 2022: turning points and tension in the energy transition[R]. Washington: Resources for the Future, 2022.
- [6] ZHENG M, CHEN G Y, TJONG J, et al. Spark-based advanced ignition control for future diluted gasoline engines[C]//Proceedings of the 4th International Conference Ignition Systems for Gasoline Engines. Berlin: M. Günther, 2018: 1.
- [7] LA CIVITA G, ORLANDI F, MARIANI V, et al. Numerical characterization of corona spark plugs and its effects on radicals production[J]. *Energies*, 2021, 14(2): 381.
- [8] RÓŻOWICZ S, ZAWADZKI A, WŁODARCZYK M, et al. Modeling of internal combustion engine ignition systems with a circuit containing fractional-order elements[J]. *Energies*, 2022, 15(1): 337.
- [9] LIU S, TAN Q Y, IVES M, et al. Parametric analysis of ignition circuit components on spark discharge characteristics[R]. Chicago: SAE, 2016.
- [10] KAZMOUZ S J, SCARCELLI R, BRESLER M, et al. A comprehensive model to capture electrical discharge and spark channel evolution during spark-ignition processes[J]. *Combustion and Flame*, 2023, 248: 112589.
- [11] LI W, WANG Y B, LIU Y P, et al. Experimental investigation of ignition mode and performance of the annular combustor[J]. *Fuel*, 2022, 328: 125295.
- [12] ULUDAMAR E, ÖZGÜR C. Optimization of exhaust emissions, vibration, and noise of a hydrogen enriched fuelled diesel engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(87): 37090–37105.
- [13] KOLAKOTI A, KOTEN H. Effect of supercharging in neat biodiesel fuelled naturally aspirated diesel engine combustion, vibration and emission analysis[J]. *Energy*, 2022, 260: 125054.
- [14] ALGER T, GINGRICH J, MANGOLD B, et al. A continuous discharge ignition system for EGR limit extension in SI engines[J]. *SAE International Journal of Engines*, 2011, 4(1): 677–692.
- [15] WINDARTO C, LIM O. Spark discharge energy effect on in-cylinder characteristics performance of rapid compression and expansion machine with spark ignition direct injection strategy[J]. *Fuel*, 2023, 337: 127165.
- [16] LESMANA H, ZHU M M, ZHANG Z Z, et al. An experimental investigation into the effect of spark gap and duration on minimum ignition energy of partially dissociated NH₃ in air[J]. *Combustion and Flame*, 2022, 241: 112053.
- [17] YU X, YANG Z Y, YU S, et al. Boosted current spark strategy for lean burn spark ignition engines[R]. Chicago: SAE, 2018.
- [18] YU X, YU S, YANG Z Y, et al. Improvement on energy efficiency of the spark ignition system[R]. Chicago: SAE, 2017.
- [19] TAN Q Y, ZHENG M, WANG L Y, et al. Energy enhanced adaptive spark ignition for lean combustion initiation[R]. Chicago: SAE, 2020.
- [20] PIELECHA I, SZWAJCA F. Lean methane mixtures in turbulent jet ignition combustion system[J]. *Energies*, 2023, 16(3): 1236.
- [21] ZHAO S L, XIAO H, LI Y F. Research on the ignition process and flame stabilization of a combination of step and strut: experimental and numerical study[J]. *Energies*, 2023, 16(6): 2832.
- [22] SHY S S, NGUYEN M T, HUANG S Y. Effects of electrode spark gap, differential diffusion, and turbulent dissipation on two distinct phenomena: turbulent facilitated ignition versus minimum ignition energy transition[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 205: 371–377.