

超高能点火对重型点燃式甲醇发动机性能、排放影响的试验研究

谢纯阳¹, 田华^{1*}, 王永健¹, 隆武强¹

(1. 大连理工大学 能源与动力学院, 大连 116000)

Experimental study on the influence of super high energy ignition on the performance and emission of heavy-duty ignited methanol engine

XIE Chunyang¹, TIAN Hua^{1*}, WANG Yongjian¹, LONG Wuqiang¹

(1. Energy and Power Academy, Dalian University of Technology, Dalian 116000, China)

Abstract: For spark-ignited internal combustion engines, increasing the ignition energy can increase the combustion speed and extend the operating limit of lean combustion. Based on a ignition intake port injection V-shaped 8-cylinder methanol machine, the differences in performance and emission characteristics of ultra-high energy ignition pairs of 1000r/min and 1500r/min and under different loads were analyzed. The results show that under different engine speeds and loads, ultra-high energy ignition has different effects on the performance and emission of methanol machines. At the same speed, ultra-high energy ignition can effectively improve fuel economy under small load conditions, but due to the influence of the change of charge density in the cylinder, the effect of ignition energy increase on fuel economy improvement weakens with the increase of load. Combustion analysis shows that ultra-high energy ignition can shorten the hysteresis period and advance the phase of the exothermic center of gravity (AI50), and the ignition energy change has almost no effect on the second half of the combustion duration. The effect of ultra-high energy ignition on emissions is: under the condition of increased ignition energy, NOx emissions increase except for 1500r/min small load conditions, while CO emissions increase at low speed and decrease at high speeds, and there is no obvious law in HC emission changes.

摘要: 对于火花点燃式内燃机, 提高点火能量可以提高燃烧速度, 扩展稀薄燃烧运行极限。基于一台点燃式进气道喷射 V 型 8 缸甲醇机, 分析了超高能点火对 1000r/min 和 1500r/min 两种转速、不同负荷下性能和排放特性的差异。结果表明: 不同发动机转速和负荷下, 超高能点火对甲醇机性能与排放的改善效果不同。在同等转速下, 超高能点火在小负荷工况时能有效提高燃油经济性, 但由于受缸内充量密度变化的影响, 点火能量增加对燃油经济性的改善作用随着负荷的增大而减弱。燃烧分析表明, 超高能点火可以缩短滞燃期并使放热重心相位 (AI50) 提前, 点火能量改变对于燃烧持续期后半段几乎无影响。随着转速的增加, 点火能量提高能够对燃烧相位产生明显改善的负荷逐渐减小。超高能点火对排放的影响是: 点火能量提高的条件下, 除 1500r/min 小负荷工况以外, NOx 排放升高, 而 CO 排在低转速下升高, 高转速下降低, HC 排放变化无明显规律。

关键词: 超高能点火; 甲醇发动机; 点火能量; 燃烧; 排放;

Key words: super high energy ignition; methanol engine; ignition energy; combustion; emission

中图分类号: TK421.2

文献标识码: A

收稿日期: 2023-08-30

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB4300700)

作者简介: 谢纯阳 (1999-), 男, 硕士生, 主要研究方向为低碳燃料发动机燃烧特性, E-mail: xiechunyang@mail.dlut.edu.cn;

田华(教授), E-mail: tianhua@dlut.edu.cn。

0 概述

在当前“碳达峰、碳中和”的时代背景下，随着能源短缺和大气污染问题的日益严重，世界各国都相继出台了严格的燃油消耗法规，减少温室气体排放，引进清洁替代燃料是加速向低碳经济社会转型的绿色环保方案之一。甲醇因其全球产量丰富、生产工艺成熟，需求量大、适用性广，始终被业界视为重要的新型清洁燃料^[1,2]，重型甲醇机也因此成为当下的研究热点^[3]。

近年来，高能点火在内燃机和燃气轮机等动力机械领域中的应用受到越来越多的关注^[4-6]，高能点火是指通过升级改造现有点火系统来实现放电时间延长和多次放电使得点火能量增大。Song^[7]等人采用四种不同点火系统研究了高点火能量对发动机性能的改善，发现高能点火可以缩短燃烧时间，提高发动机稳定性的同时降低油耗；Wei^[8]等人基于一台天然气光学单缸机研究稀燃条件下点火能量对燃烧特性的影响，研究结果表明：高能点火可以稳定燃烧早期的火焰发展进而促进燃烧后期的火焰传播；Shen^[9]等人在单缸直喷汽油机上进行了不同点火能量对燃烧性能的影响试验，发现点火能量增大会使电弧更长，火焰面积更大，促进初始火核形成且能够扩展稀薄燃烧运行极限。

国内外对于发动机上应用高能点火的相关研究中，点火能量改变大小范围主要集中在 300mJ 以下^[7-9]。由于受到材料和线路等的限制，300mJ 以上超高能点火的实验研究相对较少。而且，应用高能点火的相关研究主要集中在汽油发动机和天然气发动机上。甲醇是实现低碳排放的一种最有潜力的替代能源，研究超高能点火对于甲醇发动机的性能、燃烧和排放的影响尤为必要。

本文在一台稀薄燃烧重型甲醇机上开展了超高能点火对发动机性能、燃烧和排放影响的试验研究。分别测试了点火能量对不同转速和负荷下燃烧过程的影响，综合对比了在 200mJ、360mJ、540mJ 点火能量下整机燃油经济性、燃烧特性和排放特性的差异。为超高能点火对甲醇机性能影响机制研究提供了基础数据，为高效甲醇机设计提供了参考。

1 实验设置

1.1 发动机试验台架

本研究用试验发动机是一台点燃式进气道喷射 V 型 8 缸甲醇发动机，发动机的主要技术参数如表 1 所示。试验中，发动机 ECU 可根据要求在线实时修改点火正时等标定参数。

表 1 甲醇发动机主要技术参数

参数	指标
发动机型式	V 型 8 缸、增压中冷
缸径/mm	128
行程/mm	140
连杆长度/mm	255
压缩比	12
燃烧室形状	盆型
燃油喷射	进气道喷射

发动机试验台架如图 1 所示。试验过程中甲醇机转速与扭矩由电力测功机控制。Kistler 6054BR 压电式压力传感器用于测量缸内压力。用 AVL Xion 燃烧分析仪对采集到的缸压信号进行计算和分析，得到表征发动机燃烧状态的各种参数。用 HORIBA MEXA 7100D EGR 排放分析仪实时连续监测发动机尾气浓度。测试台架具体设备参数如表 2 所示。



图 1 发动机试验台架

1.2 试验流程

试验了三种不同点火能量对甲醇机性能、燃烧和排放的影响，点火能量分别为 200mJ（基准）、360mJ 和 540mJ，如表 3 所示。在发动机台架上分别选取 1000r/min 和 1500r/min 两种转速进行负荷扫掠测试。通过改变节气门开度改变进气量，使发动机能够在不同功率下工作。1000r/min 转速条件下选取 5 个工况点，1500r/min 转速条件下选取 7 个工况点，对于每一个工况点均连续测量 200 个燃烧循环，并计算其各项表征燃烧状态的特征参数，用于后续

的计算分析处理。

表 2 台架试验主要测试设备

设备	型号	量程	精度
电力测功机	AVL ASM 3000	560KW	±0.2%
燃烧分析仪	AVL Xion	±40V	±0.5%
缸压传感器	Kistler 6054BR	250bar	±0.6% F·S
排放分析仪	HORIBA MEXA 7100D EGR	—	±1% F·S
进气流量计	AVL FLOWSONIX Air 150	2900kg/h	0.1L/min
流量油耗仪	FC2212L	2500kg/h	±0.12%

表 3 不同能量等级的点火能量

序号	能量等级	点火能量 /mJ
1	Base	200
2	High-1	360
3	High-2	540

2 结果和讨论

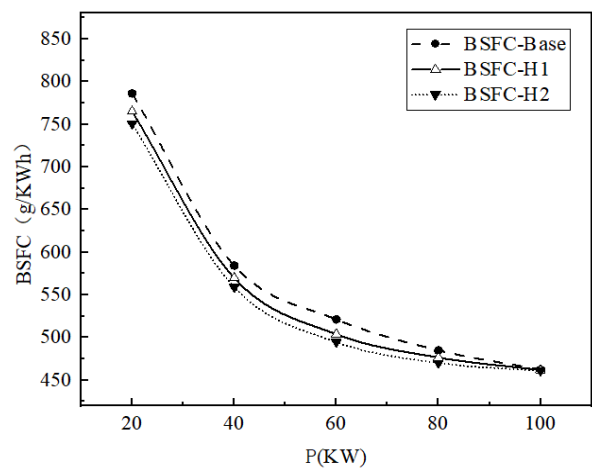
2.1 点火能量对性能的影响

图 2 所示为 1000r/min 和 1500r/min 转速下, 有效燃油消耗率 (BSFC) 在不同点火能量随负荷变化的变化趋势。相同功率点喷油脉宽、点火角、过量空气系数等保持不变, 只研究点火能量对燃油经济性的影响。可以看到在同等转速下, 随着负荷的增大, 点火能量提高对燃油经济性的改善作用逐渐变小。这是因为火花塞间隙处产生的火弧长度受充量密度影响, 小负荷下缸内充量密度小, 高点火能量下火弧长度增大使初始火核尺寸增大, 缩短了火核成长初期的时间, 进而整个燃烧过程得到优化, 改善了燃油经济性, 当负荷增大到一定程度, 点火能量对火弧长度作用减弱, 所以点火能量提高对油耗的降低作用变小。

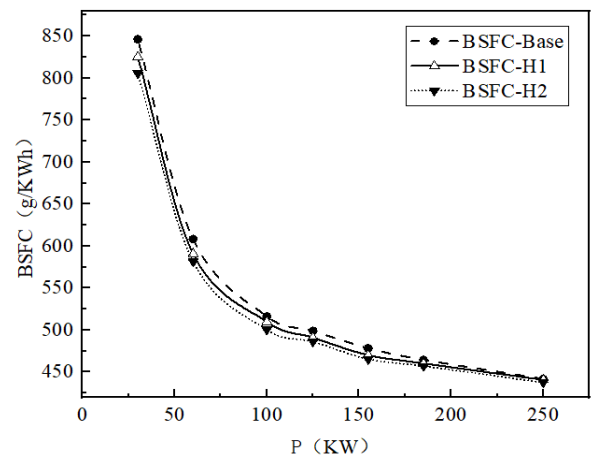
图 3 展示了在 1000r/min 和 1500r/min 转速下, IMEP、 P_{max} 、 COV_{IMEP} 在不同点火能量随负荷变化的变化趋势。1000r/min 转速时, 在小负荷工况下发现增加点火能量可以显著提高平均指示压力 (IMEP) 和缸压峰值 (P_{max}), 这是因为小负荷工况下点火时刻的缸内温度和压力都较低, 点火能量的提高对火核发展的加速作用更强, 促进了火焰传播, 使 IMEP 和 P_{max} 提高; 当负荷增大后, 此时缸内燃油与空气混合物的火焰传播速度很快, 所以点

火能量提高对于 IMEP 和 P_{max} 的提升作用并不明显。

图 3 (c) 可以看出在 1000r/min 和 1500r/min 两种转速下提高点火能量可以降低循环波动, 提高



(a) 1000r/min 转速下点火能量对 BSFC 的影响



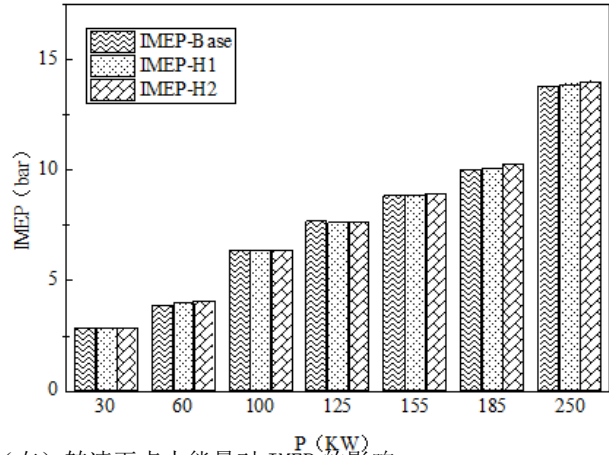
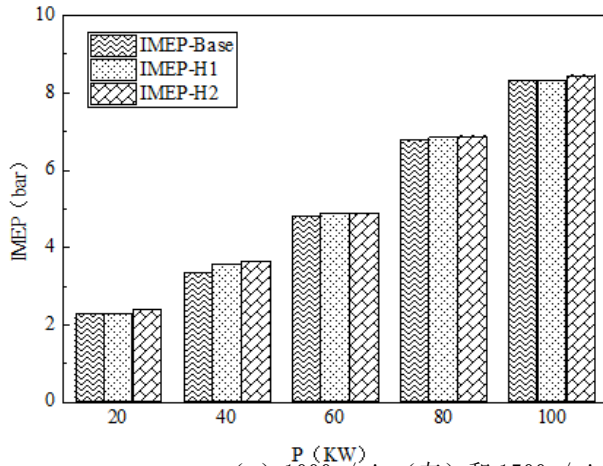
(b) 1500r/min 转速下点火能量对 BSFC 的影响

图 2 不同转速下点火能量对 BSFC 的影响

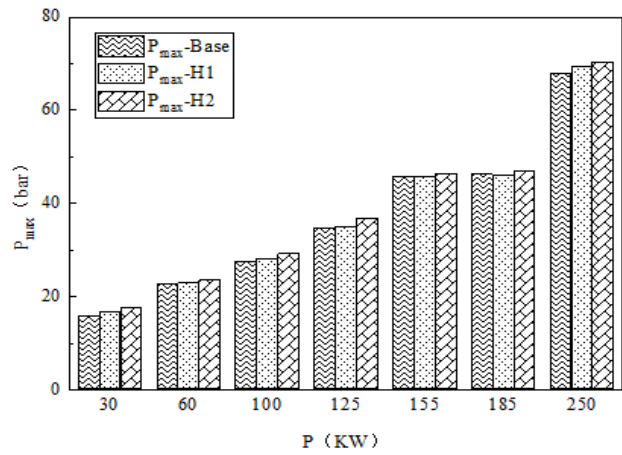
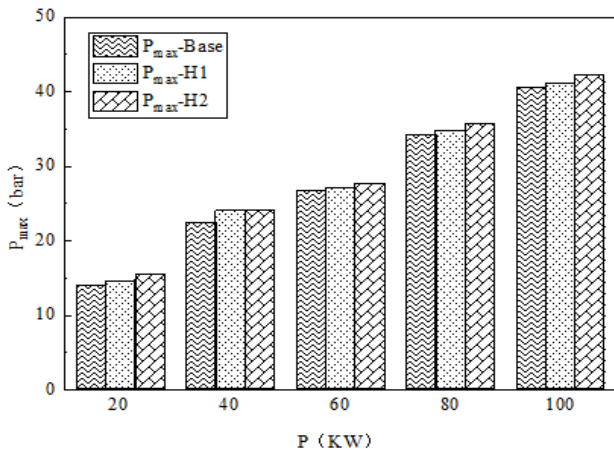
了点火稳定性, 具有扩展甲醇机稀燃极限的潜力, 并且在小负荷工况时提高点火能量的作用更加明显, 这与负荷较小时缸内燃烧品质差有关。在 1000r/min-20kw 工况下, 在原机上应用普通火花塞释放 200mJ 点火能量时 COV_{IMEP} 数值为 5.13%, 即使

在 540mJ 点火能量下, COV_{IMEP} 仍高达 4.61%, 说明此时燃烧极其不稳定, 在提高转速增大负荷后, 1500r/min-30kw 工况时超高能点火的应用使 COV_{IMEP}

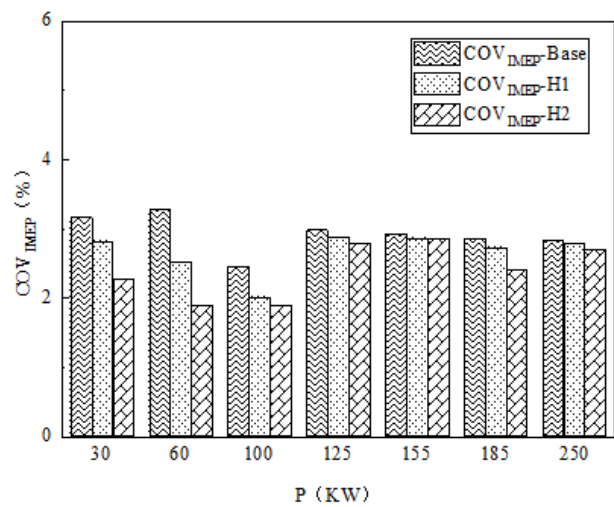
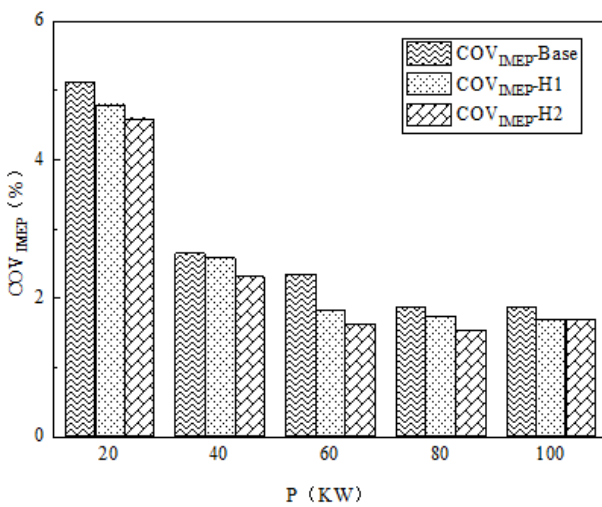
降低到了 2.71%。说明低转速低负荷下燃烧稳定性差的问题在提高转速增大负荷后得到了一定改善。



(a) 1000r/min (左) 和 1500r/min (右) 转速下点火能量对 IMEP 的影响



(b) 1000r/min (左) 和 1500r/min (右) 转速下点火能量对 P_{max} 的影响



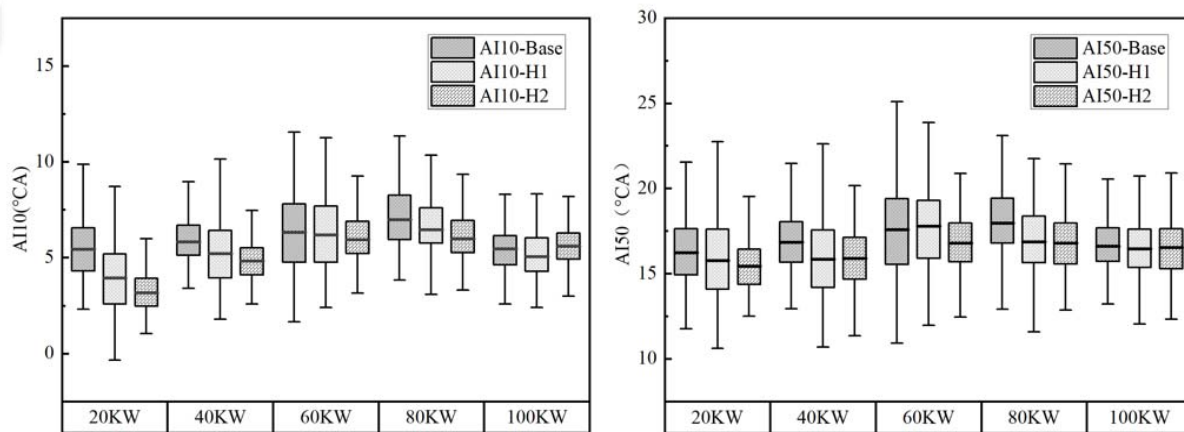
(c) 1000r/min (左) 和 1500r/min (右) 转速下点火能量对 COV_{IMEP} 的影响

图 3 1000r/min 和 1500r/min 转速下点火能量对 IMEP、 P_{max} 、 COV_{IMEP} 的影响

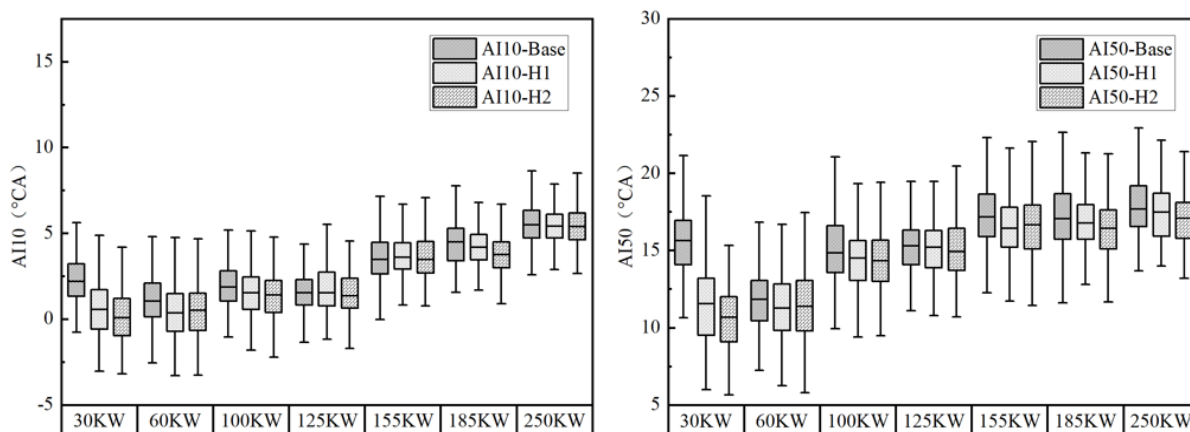
2. 2 点火能量对燃烧的影响

在相同功率点的喷油脉宽、点火角、过量空气系数保持不变的前提下，只研究 1000r/min 和 1500r/min 转速下点火能量对燃烧相位的影响。其中，ST 表示火花塞点火时刻，燃烧始点定义为已燃

燃料的质量分数达到 10%时所对应的曲轴转角。由于点火角不变，故滞燃期和燃烧始点变化规律一致，用 AI10 表示，燃烧重心表示为 AI50，AI10-AI50 和 AI50-AI90 分别用于表示燃烧持续期早期阶段和燃烧持续期后期阶段。



(a) 1000r/min 转速下 AI10、AI50 随点火能量的变化趋势



(b) 1500r/min 转速下 AI10、AI50 随点火能量的变化趋势

图 4 不同工况点下 AI10、AI50 随点火能量的变化趋势

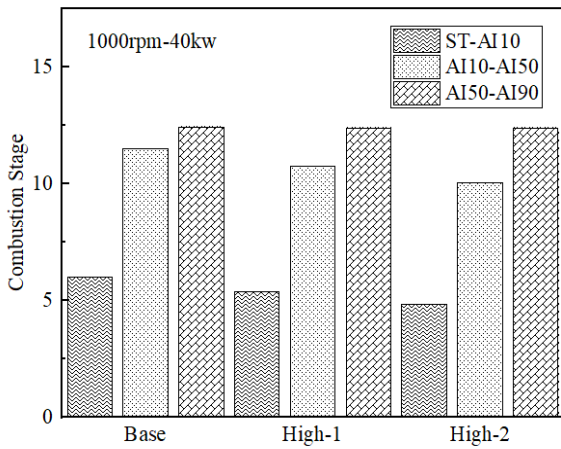
1000r/min 和 1500r/min 转速下，燃烧相位在不同点火能量随负荷变化趋势如图 4 所示。对于所有试验工况点，随着点火能量的提高，AI10、AI50 都发生不同程度的前移，这是因为超高能点火的应用使初始火核半径增大，火焰速度增加，优化了燃烧相位，可以发现在转速一定时，随着负荷的增大，高能点火对燃烧相位的优化作用逐渐减弱。在 1000r/min 转速下，当功率大于 80kw 时，不同点火能量对应的 AI10 和 AI50 几乎相同；在 1500r/min 转速下，当功率大于 60kw 时，点火能量提高对 AI10 和 AI50 的提前作用并不明显，

这表明随着转速的增加，点火能量增加能够产生明显改善的负荷逐渐减小。

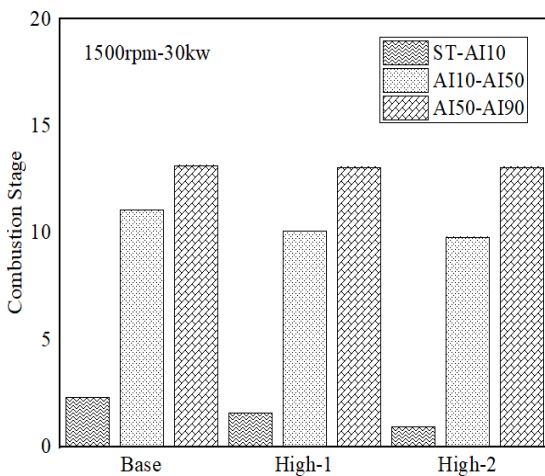
为更加深入探究高能点火的作用机制，在 1000r/min 和 1500r/min 转速下，分别选取 1000r/min-40kw 和 1500r/min-30kw 两个工况点用于比较分析点火能量对于燃烧相位的优化作用，如图 5 所示。在选定的工况下，随着点火能量的提高，燃烧持续期早期阶段显著缩短，但点火能量提高对于燃烧持续期后期阶段几乎无影响，说明高能点火主要作用于火焰发展初期，能够降低早期燃烧的不稳定性，进而降低发动机的循环波

动。对于整个燃烧过程来说，更高的点火能量导致燃烧持续期整体缩短，提高了燃烧等容度^[10]。

2. 3 点火能量对排放的影响



(a) 1000r/min-40kw 燃烧持续期随点火能量的变化趋势



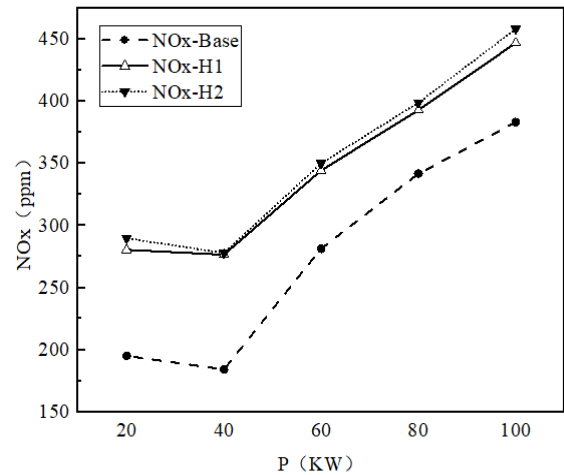
(b) 1500r/min-30kw 燃烧持续期随点火能量的变化趋势

图 5 不同工况下燃烧持续期随点火能量的变化趋势

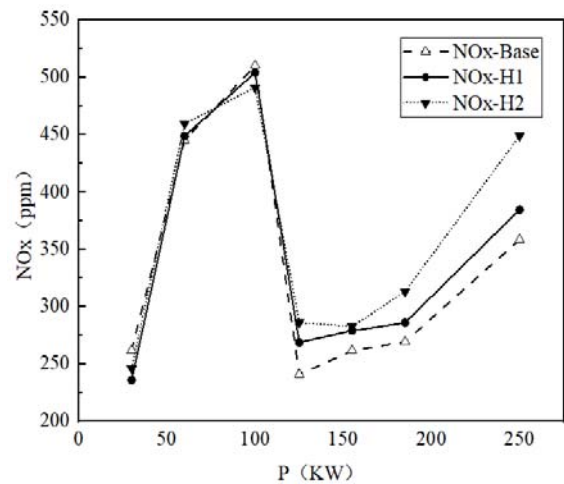
如图 6 所示为 1000r/min 和 1500r/min 两种转速下 NO_x 排放在不同点火能量下随负荷改变的变化趋势。

在 1000r/min 转速下，NO_x 排放随着点火能量增大而增大，当转速提高到 1500r/min 转速后，功率在 125kw 之前的小负荷工况 NO_x 排放随点火能量提高而变化的趋势并不明显，在 125kw 以后的大负荷工况 NO_x 排放继续随着点火能量增大而增加。一般认为，NO_x 的主要成分是 NO，根据热力型 NO 的形成机制，氧浓度、缸内最高温度和高温区域的停留时间是影响热力型 NO_x 形成的主要因素^[11]，由于在相同功率点过量空气系数保持

不变，所以氧浓度对本次试验结果没有影响。在 1000r/min 转速下，点火能量的提高使缸内压力峰值增大，相对应缸内最高燃烧温度也会增加，所以造成了 NO 排放的增加。转速提高后，高转速小负荷工况下点火能量的提高会使燃烧提前，缩短反应时间^[12]，燃烧持续期的整体缩短导致了高温区域停留时间的缩短，高温区域停留时间缩短与缸内最高温度升高的综合作用造成了 NO 的排放在小负荷工况下提升不明显的现象。当负荷提高后，点火能量提高对燃烧相位的优化减弱，NO 排放又会随点火能量增加而增大，这一现象可能是因为即便在高转速大负荷工况下，点火能量的提高对缸压峰值的提升作用和对燃烧相位的优化作用都会减弱，但由于缸内压力升高，超高能点火的应用导致缸内高温区域的局部温度过高造成了 NO 排放的增加。



(a) 1000r/min 转速下点火能量对 NO_x 排放的影响

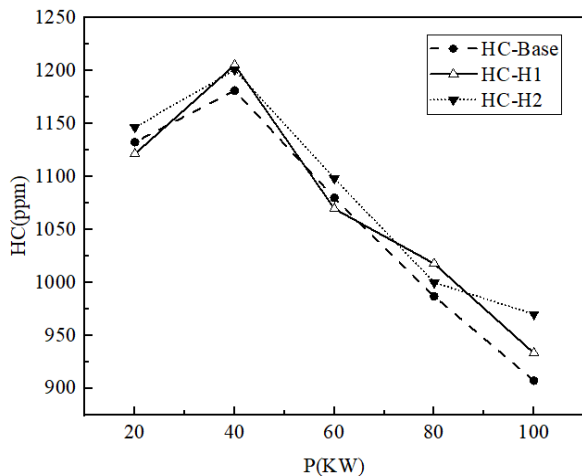


(b) 1500r/min 转速下点火能量对 NO_x 排放的影响

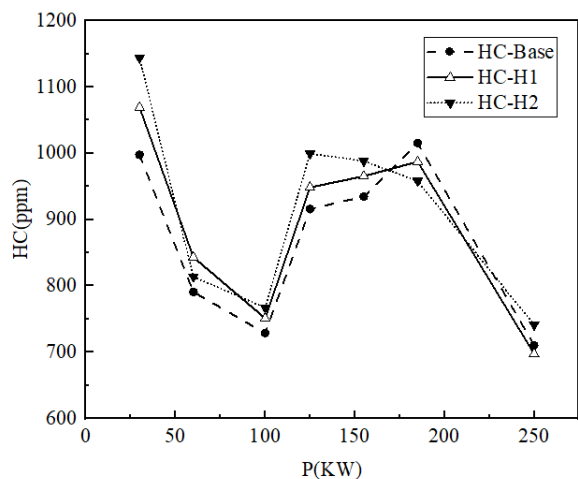
图 6 不同转速下点火能量对 NO_x 排放的影响

图 7 可以看出同一转速下，小负荷工况下 HC

排放相对大负荷工况明显要高，这是因为小负荷工况下发动机缸内温度相对较低，油气混合不均，燃烧品质差，导致了 HC 排放高。对于所有试验工况点，HC 排放随点火能量的变化没有明显规律^[13]。同时可以发现，HC 与 NO_x 之间存在着类似于柴油机中 NO_x 与 Soot 一样的“trade-off”效应。



(a) 1000r/min 转速下点火能量对 HC 排放的影响

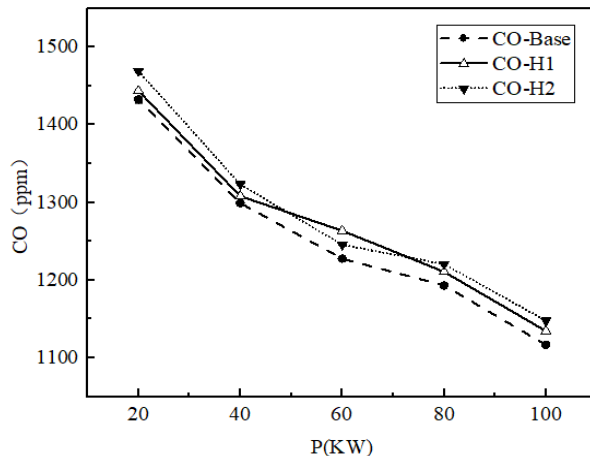


(b) 1500r/min 转速下点火能量对 HC 排放的影响

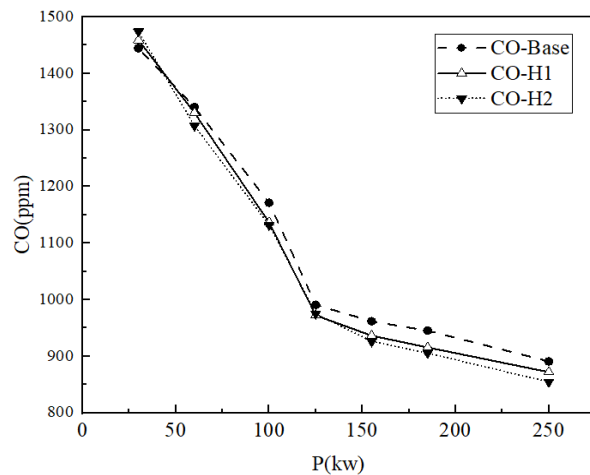
图 7 不同转速下点火能量对 HC 排放的影响

图 8 所示为 1000r/min 和 1500r/min 转速下 CO 排放在不同点火能量随负荷改变的变化趋势。CO 排放主要由燃油空气混合物的不完全燃烧引起^[14]，在 1000r/min 低转速下 CO 排放会随着点火能量增加而增大，1500r/min 高转速下 CO 排放功率大于 60kw 后随着点火能量增大而降低。造成以上现象的原因是：在低转速下随着点火能量的增加，燃烧相对提前，缩短了燃油与空气在缸内的混合时间，加剧了不完全燃烧现象，造成 1000r/min 低转速下点火能量提高反而使 CO 排放增多。当转速提高后，进入缸内的新鲜空气量增多，燃油与

空气混合相对均匀，并且基于前文的分析可知在 1500r/min 转速下的 60kw 以后的功率点提高点火能量对燃烧相位几乎无提前作用，但会使层流火焰速度增加，燃烧更加充分，所以在 1500r/min 高转速下点火能量增大使 CO 排放降低^[15]。



(a) 1000r/min 转速下点火能量对 CO 排放的影响



(b) 1500r/min 转速下点火能量对 CO 排放的影响

图 8 不同转速下点火能量对 CO 排放的影响

3 结论

本文对应用超高能点火的甲醇发动机进行了相关试验，研究了在两种不同转速下点火能量改变对于甲醇发动机性能和排放的影响，通过对以上结果的分析，我们得到以下结论：

(1) 同等转速下，小负荷工况应用超高能点火能够在显著提高 IMEP 和 P_{max} 的同时有效降低油耗，提高燃油经济性，但提高点火能量随着负荷的增大由于受缸内充量密度影响对燃油经济性

的改善作用减弱,对IMEP和 P_{max} 几乎无影响。

(2)在所有试验工况点,超高能点火能够明显降低甲醇机燃烧的循环波动,扩展稀薄燃烧运行极限,缩短滞燃期和燃烧持续期,但随着转速的增加,点火能量能够对AI10、AI50产生明显改善作用的负荷逐渐减小。超高能点火的主要作用是缩短燃烧持续期早期阶段,使燃烧重心更加接近上止点,进而优化燃烧相位,对于燃烧持续期后期阶段点火能量的改变几乎没有影响。

(3)在1000r/min转速下,由于缸内温度较低,当采用高能点火后,缸内温度明显升高,使NO_x排放增加,转速提高后,在小负荷工况下高能点火优化了燃烧相位,缩短了反应时间,使NO_x排放随点火能量的变化不明显,大负荷工况下由于高温区域局部温度过高使NO_x排放增加;在试验的工况下,HC排放会随着负荷的增大而降低,但点火能量的改变对于HC的形成几乎没有影响;CO排在低转速下由于燃油和空气混合不均匀,超高能点火的应用反而使CO排放增加,高转速下应用超高能点火能够有效降低CO排放。

参考文献:

- [1] Tian Z, Wang Y, Zhen X, et al. The effect of methanol production and application in internal combustion engines on emissions in the context of carbon neutrality: A review[J]. Fuel, 2022, 320:123902.
- [2] Oloruntobi O, Chuah L F, Mokhtar K, et al. Assessing methanol potential as a cleaner marine fuel: An analysis of its implications on emissions and regulation compliance[J]. Cleaner Engineering and Technology, 2023, 14:100639.
- [3] Zhen X, Wang Y. An overview of methanol as an internal combustion engine fuel[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 52:477-493.
- [4] Miao H, Zhang Z, He Y, et al. Ignition enhancement of liquid kerosene by a novel high-energy spark igniter in scramjet combustor at Mach 4 flight condition[J]. Aerospace Science and Technology, 2023, 139:108397.
- [5] Ye C, Sun Z, Cui M, et al. Ultra-lean limit extension for gasoline direct injection engine application via high energy ignition and flash boiling atomization[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(4):5829-5838.
- [6] Wang Z, Su X, Wang X, et al. Impact of ignition energy on the combustion performance of an SI heavy-duty stoichiometric operation natural gas engine[J]. Fuel, 2022, 313:122857.
- [7] Song J, Sunwoo M. An experimental study on engine performance with high ignition energy[J]. PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART D-JOURNAL OF AUTOMOBILE ENGINEERING, 2002, 216(D6):505-512.
- [8] Wei H, Zhang R, Chen L, et al. Effects of high ignition energy on lean combustion characteristics of natural gas using an optical engine with a high compression ratio[J]. Energy, 2021, 223:120053.
- [9] Shen K, Xu Z, Chen H, et al. Combined effects of high energy ignition and tumble enhancement on performance of lean combustion for GDI engine[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2021, 129:110464.
- [10] Zhen X, Li X, Wang Y, et al. Effects of the initial flame kernel radius and EGR rate on the performance, combustion and emission of high-compression spark-ignition methanol engine[J]. Fuel, 2020, 262:116633.
- [11] Wang Y, Long W, Dong P, et al. Numerical investigation on combustion regulation for a stoichiometric heavy-duty natural gas engine with hydrogen addition considering knock limitation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(48):18498-18513.
- [12] Shi W, Yu X, Zhang H, et al. Effect of spark timing on combustion and emissions of a hydrogen direct injection stratified gasoline engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(8):5619-5626.
- [13] Tian Z, Zhen X, Wang Y, et al. Comparative study on combustion and emission characteristics of methanol, ethanol and butanol fuel in TISI engine[J]. Fuel, 2020, 259:116199.
- [14] Elsemary I M M, Attia A A A, Elnagar K H, et al. Spark timing effect on performance of gasoline engine fueled with mixture of hydrogen - gasoline[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(52):30813-30820.
- [15] Zhen X, Tian Z, Wang Y, et al. A model to determine the effects of low proportion of hydrogen and the flame kernel radius on combustion and emission performance of direct injection spark ignition engine[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 147:1110-1124.