

E22 乙醇汽油发动机的早燃特性试验研究及优化

张宗澜^{1,2}, 陈泓², 赖开昌², 李钰怀², 咎磊², 李云龙²

1. 广州汽车集团股份有限公司, 广东 广州 511434;

2. 广东省汽车清洁动力与能源应用技术重点实验室, 广东 广州 511434

摘要:针对某排量为1.5 L、增压、进气道喷射发动机,制备乙醇体积分数为22%的乙醇汽油(记为E22),通过试验研究E22发动机的早燃特性,并进一步分析低钙机油、喷油器优化、过量空气系数对E22发动机早燃的影响。结果表明:在低速大负荷工况,E22发动机的早燃频次是纯汽油(记为E0)发动机的1~3倍;使用低钙机油可降低发动机早燃频次,转矩为240 N·m时的E22发动机早燃频次较常规机油降低了65%;将喷油器喷孔数由4孔增加至8孔且位置前移,转矩为240 N·m时E22发动机早燃频次较优化前降低了61%;减小过量空气系数,早燃频率逐步降低。采用低钙机油结合喷油器优化的措施,E22发动机早燃频次显著降低,通过了早燃测试,转速为1750~4000 r/min时转矩提高到240 N·m,转速为5500 r/min时达到最大功率(120 kW)。

关键词:E22;早燃;低钙机油;喷油器优化;过量空气系数

中图分类号:TK462

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)06-0054-04

引用格式:张宗澜,陈泓,赖开昌,等. E22 乙醇汽油发动机的早燃特性试验研究及优化[J]. 内燃机与动力装置, 2025,42(6):54-57.

ZHANG Zonglan, CHEN Hong, LAI Kaichang, et al. Experimental study on pre-ignition characteristics of an E22 ethanol gasoline engine and its optimization[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(6):54-57.

0 引言

为了满足日益严格的排放与油耗标准要求,发动机呈现小型化、增压化的发展趋势^[1]。发动机增压技术通过提高进气量,在减小排量、降低油耗的同时,实现了更大的动力输出。然而,增压发动机在追求高性能和高效率的同时,也面临着诸多技术挑战,其中突出的问题之一是低速早燃。增压过程提高了进气压力,导致气缸内的混合气温度升高,从而增加了发动机早燃风险^[2]。早燃会导致发动机工况恶化,严重时甚至引发爆震,对关键部件造成结构性损伤,直接危及车辆的可靠性^[3-4]。

乙醇是一种重要的清洁可再生燃料,在国内外能源转型与碳减排政策的持续推动下,其作为汽油替代品或添加剂的应用范围正逐步扩大。使用乙醇汽油能够有效降低发动机的CO、THC、颗粒物等有害物质排放^[5-6],且其相对较高的辛烷值及汽化潜热有助于提高抗爆震能力。然而,这并不意味着完全消除乙醇汽油在高温高压下的早燃风险,甚至在某些特定工况下(如高负荷、高增压或进气温度较高),早燃倾向可能更为明显。目前,国内外对乙醇汽油发动机早燃问题的相关研究较少且结论存在较大差异^[7-9],还需进一步研究。因此,深入分析乙醇汽油增压发动机的早燃机理,探索有效的控制策略及优化措施,对推动其广泛应用具有重要的理论与现实意义。

本文中,通过试验研究乙醇汽油发动机的早燃特性,并分析低钙机油、喷油器优化、过量空气系数对乙醇汽油发动机早燃的影响,为提高乙醇汽油发动机动力性和可靠性提供参考。

收稿日期:2025-05-07

基金项目:广东省科技计划项目(2024B1212020006)

第一作者简介:张宗澜(1986—),男,重庆人,工学硕士,工程师,主要研究方向为内燃机燃烧系统设计,E-mail: zhangzonglan@gacrrnd.com。

1 试验方法

试验用某4缸直列增压乙醇汽油发动机的排量为1.5 L,供油方式为进气道喷射(port fuel injection, PFI),喷射策略为开阀喷射,其主要参数如表1所示。

以92#无铅汽油为基准汽油,记为E0。向E0中添加乙醇,制备成乙醇体积分数为22%

的乙醇汽油,记为E22。E0和E22的燃油成分及物化特性检测结果如表2所示。由表2可知:E22的辛烷值为94.3,抗爆性好于E0;热值为39.52 MJ/kg,比E0低7.0%。

表1 乙醇汽油发动机主要参数

缸径/ mm	行程/ mm	压缩比	进气门开启相位 ^① / (°)	排气门开启相位 ^② / (°)
74	87	9.9	22~28	1~51

①为至上止点前曲轴转角。②为下止点前曲轴转角。

表2 E0和E22的燃油成分及物化特性

燃油	乙醇的 体积分数/%	辛烷值	50%蒸发 温度 ^① /°C	90%蒸发 温度 ^② /°C	芳烃的 体积分数/%	烯烃的 体积分数/%	热值/ (MJ·kg ⁻¹)
E0	0	92.0	≤110.0	≤190.0	≤35.0	≤15.0	42.50
E22	22	94.3	72.6	153.7	17.9	4.9	39.52

①蒸发出的燃油体积为原始样品的50%时的温度。②蒸发出的燃油体积为原始样品的90%时的温度。

发动机早燃现象通常发生在低转速、大负荷的工况下,因此,早燃试验工况设定为:发动机冷却水和机油温度分别为90、100 °C,进气温度(中冷后)为35 °C,排温不高于950 °C,转速为1 750 r/min,转矩分别为220、230、240 N·m,试验时间为1 h,统计早燃次数并计算每10 000次循环的早燃频次。通过控制进气压力实现目标转矩,其中转矩为240 N·m的进气压力为0.22 MPa,排气压力为13.1 kPa。

2 E22发动机的早燃试验结果及分析

2.1 E22发动机的早燃特性

在低速外特性测试过程中,E22燃烧过程存在偶发早燃的情况。转速为1 750 r/min、转矩为230 N·m时,E22正常燃烧和早燃的发动机缸内压力(缸压)曲线如图1所示。由图1可知:发动机缸内正常燃烧时点火角为至上止点后曲轴转角7°;在上止点前曲轴转角8°时出现早燃现象,其缸压曲线开始偏离正常燃烧缸压曲线,最终演变成爆震,最大缸压达到18 MPa,并伴随剧烈的压力振荡。该工况下,进气压力为0.21 MPa,排气压力为12.4 kPa。

发动机转速为1 750 r/min,转矩分别为220、230、240 N·m时,每10 000次循环中,E0的早燃频次分别为

0.4、1.1、1.9,E22的早燃频次分别为1.5、3.4、3.8。随着转矩的增加,两种燃油的早燃频次均增大,原因为:转矩越大,进气量越多,压缩上止点的温度及压力越高,早燃发生的概率越大。相同转矩下,E22的早燃频次均高于E0。转矩为220 N·m时,E22的早燃频次约为E0的4倍;转矩为240 N·m时,E22的早燃频次约为E0的2倍,增加幅度相对放缓。虽然乙醇潜热大、辛烷值高,理论上可降低缸内温度,但在PFI供油方式下,乙醇喷射位置远离进气门,混合气在压缩过程中吸热不充分,局部冷却效果较差,无法有效降低燃烧室热点温度;同时,E22中汽油的体积分数为78%,汽油的辛烷值偏低,使得其抗爆性较弱

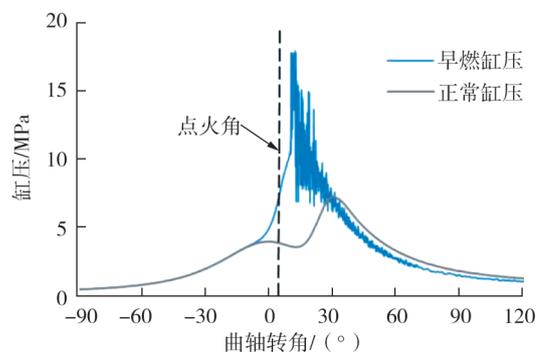


图1 E22正常燃烧与早燃时缸压对比曲线

的组分在高温高压下更易发生自燃。

2.2 低钙机油对 E22 发动机早燃的影响

在相同条件下,对加注 E22 的发动机分别使用常规机油和低钙机油进行早燃测试,分析机油中钙含量对 E22 发动机早燃的影响。低钙机油中钙的质量分数为 1.036‰,比常规机油(钙的质量分数为 2.100‰)降低约 50%。

试验结果表明:发动机转速为 1 750 r/min、转矩分别为 220、230、240 N·m 时,每 10 000 次循环中,常规机油的早燃频次分别为 1.5、3.4、3.8,低钙机油的早燃频次分别为 0.6、1.1、1.3。不同转矩下低钙机油均能明显降低 E22 发动机的早燃频次,其中转矩为 240 N·m 时的早燃频次较常规机油相同转矩时降低约 65.8%。另外,随着转矩的增加,早燃频次均增大,但幅度变缓。在相同的边界下,减少机油中钙的含量,能明显减少 E22 发动机的早燃现象。原因为低钙机油可以抑制高温沉积物的生成,减少活塞顶部和火花塞周围的积碳,避免燃烧室内形成热点,减少早燃的触发源。

2.3 喷油器优化对 E22 发动机早燃的影响

为分析喷油器对 E22 发动机早燃的影响,对喷油器进行优化:将喷油器孔数由 4 孔增加到 8 孔,静态流量保持不变;将安装位置前移至燃烧室附近,使喷雾指向进气门后方,降低喷雾在进气道内的湿壁倾向。喷油器优化前、后对比如图 2 所示。

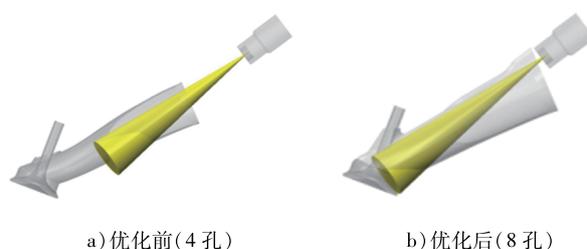


图 2 喷油器优化前、后对比

使用 E22、常规机油进行不同喷油器的发动机早燃试验。试验结果表明:转速为 1 750 r/min、转

矩分别为 220、230、240 N·m 时,每 10 000 次循环,原喷油器发动机早燃频次分别为 1.5、3.4、3.8,而优化后喷油器发动机早燃频次分别为 0、1.0、1.5。优化后喷油器的早燃频次大幅降低,其中转矩为 220 N·m 时未出现早燃,转矩为 240 N·m 时的早燃频次较优化前降低约 60.5%。优化后的喷油器安装位置更靠前,喷雾指向气门背面,配合开阀喷射策略,可将更多液体燃油直接引入气缸,从而使得更多气化吸热过程发生在缸内,降低缸内温度;此外,喷孔数量增加,喷雾粒径更小,燃油雾化更好,提高燃油分布的均质度,因此优化喷油器有效减少了早燃的发生。

2.4 过量空气系数对 E22 发动机早燃的影响

使用优化喷油器、常规机油,在发动机为转速 1 750 r/min、转矩为 240 N·m 的工况下,测试不同过量空气系数对 E22 发动机早燃的影响。试验结果表明:过量空气系数为 1.00、0.95、0.90、0.85 时,每 10 000 次循环的早燃频次分别为 1.5、0.8、0.4、0。E22 发动机早燃频次随过量空气系数的降低而减少。与过量空气系数为 1.00 时相比,过量空气系数为 0.90 时的早燃频次降低了 73.3%;当过量空气系数为 0.85 时,试验 1 h 未观察到早燃事件。过量空气系数降低,混合气加浓,进入气缸的液体燃料增多,由于汽化吸收热量,因而可显著降低缸内混合气温度,减少早燃频次。但是,增大混合气浓度将导致油耗增加、CO 和 THC 排放加剧,故不宜采用。

3 发动机性能验证

基于优化喷油器、低钙机油、过量空气系数为 1.00、发动机转速为 1 750 r/min、转矩为 240 N·m 的条件进行早燃试验。试验结果表明:每 10 000 次循环,E22 发动机早燃频次为 0.38,通过了每 10 000 次循环早燃频次不大于 1 的测试标准。基于优化喷油器、低钙机油的 E22 发动机外特性曲线如图 3 所示。

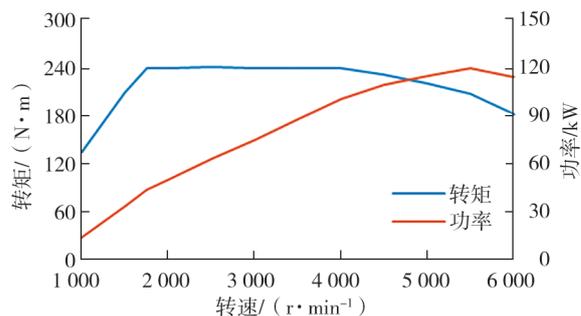


图 3 E22 发动机外特性曲线

由图3可知:转速为1 750~4 000 r/min时,转矩由220 N·m提高到240 N·m;转速为5 500 r/min时功率最大,为120 kW。

4 结论

1) E22发动机的低速早燃频次是纯汽油发动机的1~3倍,且转矩越大,早燃次数越多,早燃限制了低速转矩的提升。

2) 使用低钙机油可有效减少早燃频次,转矩为240 N·m时的早燃频次较常规机油降低了65.8%;喷油器喷孔数由4孔增加至8孔且位置前移,转矩为240 N·m时,早燃频次较优化前降低了61%;降低过量空气系数,早燃频次减少,当过量空气系数降为0.85时,在持续1h的试验中未出现早燃事件。

3) 结合低钙机油和喷油器优化的措施,E22发动机早燃频次显著降低,通过了早燃测试标准,转速为1 750~4 000 r/min时转矩提高到240 N·m,转速为5 500 r/min时达到最大功率,为120 kW。

参考文献:

- [1] 刘晓东. 涡轮增压器瞬态响应性的影响因素[J]. 内燃机与动力装置, 2023, 40(5): 13-19.
- [2] AMANN M, MEHTA D, ALGER T. Engine operating condition and gasoline fuel composition effects on low-speed pre-ignition in high-performance spark ignited gasoline engines [J]. SAE International Journal of Engines, 2011, 4(1): 274-285.
- [3] WANG Z, LIU H, REITZ R D. Knocking combustion in spark-ignition engines [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2017, 61: 78-112.
- [4] KHOSRAVI M, RUHLAND H, LORENZ T, et al. Investigation into occurrence of megaknock and auto-ignition in GTDI engines [C]//Proceedings of SAE World Congress Experience 2017. Detroit, USA: SAE International, 2017.
- [5] 李庆宇,付建勤,刘敬平,等. 喷射策略对乙醇汽油发动机颗粒物排放的影响[J]. 内燃机学报, 2023, 41(5): 450-457.
- [6] 赵哲. 乙醇/汽油/布朗气三元燃料复合供给发动机燃烧及排放特性试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [7] HAENEL P, KLEEBERG H, DE BRUIJN R, et al. Influence of ethanol blends on low speed pre-ignition in turbocharged, direct-injection gasoline engines [J]. International Journal of Fuels and Lubricants, 2017, 10(1): 95-105.
- [8] SINGH E, DIBBLE R. Knock, auto-ignition and pre-ignition tendency of fuels for advanced combustion engines (FACE) with ethanol blends and similar RON [C]//Proceedings of SAE World Congress Experience 2020. Detroit, USA: SAE International, 2020.
- [9] RÖNN K, SWARTS A, KALASKAR V, et al. Low-speed pre-ignition and super-knock in boosted spark-ignition engines a review [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2023, 95: 101064.

Experimental study on pre-ignition characteristics of an E22 ethanol gasoline engine and its optimization

ZHANG Zonglan^{1,2}, CHEN Hong², LAI Kaicang², LI Yuhuai², ZAN Lei², LI Yunlong²

1. GAC Group Co., Ltd., Guangzhou 511434, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Clean Automotive Propulsion and Energy Application Technology, Guangzhou 511434, China

Abstract: An ethanol gasoline (E22) with a volume fraction of 22% ethanol is prepared for a 1.5-liter turbocharged and port fuel injection engine. The pre-ignition characteristics of the E22 engine are studied through experiments. And the effects of low calcium engine oil, injector optimization, and excess air coefficient

(下转第64页)

Wear diagnosis method for key friction pairs of high-strengthened diesel engines based on random forest method

LIU Jie¹, FENG Haibo¹, LIU Fengchun¹, XIE Jun¹,
CHEN Chuang¹, DONG Hongxia², LI Chuang¹, MAO Yuxin¹

1. China North Engine Research Institute, Tianjin 300406, China;

2. Shanxi Diesel Engine Industry Co., Ltd., Datong 037000, China

Abstract: To clarify the friction pair wear information contained in diesel engine lubricating oil, spectral analysis is performed on 170 groups of lubricating oil samples collected during the durability test of a high-strengthened diesel engine. The nonlinear fitting method is adopted to analyze the correlation between the mass fractions of Fe, Cu, and Al elements in the oil and the wear of key friction pairs. A Python programming software is used to construct a random forest prediction model based on Fe element, and the receiver operating characteristic (ROC) curve is combined to evaluate the accuracy of the model. The results show that the mass fractions of Fe, Cu, and Al elements, which are mainly correlated with the wear of key friction pairs, are significantly concentrated in specific intervals. The mass fractions of Fe-Al elements can be used to correlate the wear of piston-piston ring-cylinder liner friction pairs, while the mass fractions of Fe-Cu elements can be used to correlate the wear of crankshaft-crankshaft bearing friction pairs. The normal wear interval and wear alert interval are set according to the mass fractions of Fe, Cu, and Al elements, and the accuracy of the constructed Fe-element random forest prediction model reaches 88.24%. There is a strong nonlinear correlation among the three main metal elements of Fe, Cu, and Al, and the wear alert interval can be used as a supplementary basis for diagnosing abnormal wear of piston-piston ring-cylinder liner and crankshaft-crankshaft bearing friction pairs in high-strengthened diesel engines.

Keywords: friction pairs; spectral analysis; wear interval; wear alert; nonlinear correlation; ROC

(责任编辑:胡晓燕)

.....
(上接第 57 页)

on the pre-ignition characteristics of the E22 engine are further analyzed. The results show that under low-speed and high load conditions, the pre-ignition frequency of the E22 ethanol gasoline is 1–3 times that of pure gasoline (E0). The use of low calcium engine oil can reduce the frequency of pre-ignition. When the torque is 240 N·m, the pre-ignition frequency of the E22 engine is reduced by 65% compared to conventional engine oil. Increasing the number of fuel injector holes from 4 to 8 and shifting the injection, the pre-ignition frequency of the E22 engine is decreased by 61% compared to before optimization when the torque is 240 N·m. Reducing the excess air coefficient can gradually decrease the frequency of pre-ignition. By using low calcium engine oil combined with optimized fuel injection, the pre-ignition frequency of the E22 engine is significantly reduced, and it passed the pre-ignition test standard. The engine produces a peak torque of 240 N·m within the speed range of 1 750–4 000 r/min, and achieves a maximum power of 120 kW at 5 500 r/min.

Keywords: E22; pre-ignition; low-calcium engine oil; injector optimization; excess air ratio

(责任编辑:臧发业)