

基于 C 链分布的乙醇汽油 PN 排放特性分析

王长卉, 孙运才, 郭孔鲁, 庞二喜, 刘奇峰, 孙兴玉, 徐林勋

(山东京博新能源控股发展有限公司, 滨州市, 256000)

Analysis of PN Emission Characteristics of Ethanol Gasoline Based on C-chain distribution

Wang Changhui, Sun Yuncai, Guo Konglu, Pang Erxi, Liu Qifeng, Sun Xingyu, Xu Linxun

(Shandong Chambroad New Energy Holding Development Co., Ltd., Binzhou, 256600)

Abstract: With the implementation of the dual carbon policy, energy conservation and emission reduction is still the current importance. Ethanol fuel plays an important role in the process of medium-term emission reduction substitution. Ethanol fuel composition has a great influence on PN emission of GDI engine. Based on a China VI engine (not equipped with GPF), different components of ethanol fuel were tested and analyzed. The results show that THC emissions in gaseous emissions are positively correlated with PN emissions. This is mainly due to the condensation of unburned HC, which is easy to form nuclear particles, resulting in an increase in PN emissions. The paraffins with lower carbon number of C7 and below in ethanol gasoline will help reduce PN emissions, while the paraffins with C7 + will help fuel combustion and reduce PN emissions. The proportion of C8 + aromatics in ethanol gasoline is one of the main factors affecting PN emission.

摘要: 随着双碳政策推行, 节能减排仍是当前之重。乙醇燃料在中期减排替代过程中承担着举足轻重的地位。乙醇燃料组分对于 GDI 发动机的 PN 排放的影响重大。基于一款国六发动机(未配备 GPF)对不同组分的乙醇燃油进行测试分析, 结果表明: 气态排放中的 THC 排放与 PN 排放呈现正相关, 这主要是由于未燃 HC 是冷凝易形成核态颗粒物, 从而导致 PN 排放的增加; 乙醇汽油中降低 C7 及以下碳数的链烷烃将有助减少 PN 排放, 而 C7+ 的链烷烃是有助于燃料燃烧和降低 PN 排放; 降低乙醇汽油中 C8+ 芳烃的占比将有效减少 PN 排放。

关键词: 乙醇; PN 排放; 相关性; 烃; 碳分布

Key words: Ethanol, PN emission, Correlation, Hydrocarbon, Carbon distribution

中图分类号: TK41

文献标识码: A

0 概述

化石能源占全球能源消耗的约 84%, 其中运输行业消耗占总化石燃料 1/4 左右^[1], 能源安全和环境污染备受关。乙醇组分来源更为广泛, 作为一种部分替代燃料更为被接受。乙醇汽油在中长期的过渡阶段可以替代部分化石燃料, 缓解能源紧缺和环境污染问题^[2,3]。

直喷 (GDI) 汽油机因其高效经济而被广泛应用。然而, GDI 汽油机相较于进气道喷射 (PFI) 汽

油机产生更多的颗粒物 (PN 和 PM) 排放^[4]。GDI 发动机自身优化和更新迭代能够降低部分 PN 和 PM 排放, 但是面临严苛的排放法规仍杯水车薪, 同时外载颗粒物捕捉器又承担巨大的成本费用。通过协同燃料的优化, 能够进一步降低 PN 与 PM 排放。

乙醇来源更为广泛, 比如生物醇: 第一代的多糖生物质 (糖与淀粉), 第二代纤维素生物质 (非食用性材料), 第三代藻类^{[1,2][5]}; 化学合成: 乙烯和

收稿日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (xxxxxxx); *****基金项目 (****)

作者简介: 王长卉 (1995-), 男, 硕士, 主要研究方向为燃油及特种燃油排放及性能, E-mail: changhui_wang@yeah.net。

热化学：高温催化^[6]。乙醇相较于传统汽油具有高的汽化潜热和辛烷值^[7]，从而拥有更大的缸内压力和热效率的提升空间。汽油中添加乙醇，增加的含氧成分有利于缸内燃烧，减少部分气态污染物（CO和THC）、温室气体（CO₂）和PN排放^{[3][8]}。但由于乙醇自身热值是汽油的2/3左右，其体积燃油消耗率会随之增加^[9]，一些文献也指出乙醇汽油会增加PM和PN排放^[10,11]，这可能是除乙醇外其他组分造成的该现象。

乙醇汽油是基础汽油与固定比例的乙醇组成。基础汽油由烷烃、环烷烃、烯烃和芳烃类物质组成，乙醇的添加对其物理特性产生变化^[12]，因此相较于普通汽油，乙醇汽油种基础组分的差异对发动机的燃烧和排放特性影响可能产生变化。现阶段主要是以市售汽油掺混不同比例的乙醇来进行测试分析，然而对基础汽油指标对于乙醇汽油的影响研究较少。本文基于一款国六汽油机对不同基础组分的E10汽油进行模拟WLTC循环测试，并结合6种E10中基础汽油指标及C链分布参数对排放特性影响及规律进行分析。

1 试验设备及方法

1.1 试验设备及方法

试验台架系统主要有测功机、AVL489颗粒物数量分析仪、温度压力采集系统、油耗仪、上位机等设备组成，其中试验环境仓温度保持在25°C±2，相对湿度保持在25%左右，大气压力维持在101kpa左右。试验台架中发动机是一款满足国VI排放的量产机型，其主要参数如表1所示。

表1 发动机参数

项目	参数
排量/L	2.0
缸数	4
气缸排列方式	直列
进气方式	增压中冷
最大功率/kW	167

WLTC循环包括低速（589s）、中速（433s）、高速（455s）、超高速（323s）4个阶段，总运行时间1800s，行驶里程23.27km，相较于NEDC循环其工况覆盖范围更加广泛。为了研究燃料在瞬态循环下PN排放与燃油经济性的差异，使用发动机台架开环控制模拟整车转鼓测试的WLTC循环，其中发动机

台架测试与整车转鼓测试中的发动机型号一致。通过台架模拟WLTC循环进行测试能够发动机在车辆使用过程中的真实运行区间和瞬态的影响，同时能够实现测试过程中工况的一致性，更有利于反馈油品组分和指标对于排放和油耗的影响。WLTC循环与模拟WLTC循环如图1所示。图1中上图（a）为模拟WLTC循环（转速*扭矩），下图（b）为WLTC循环。

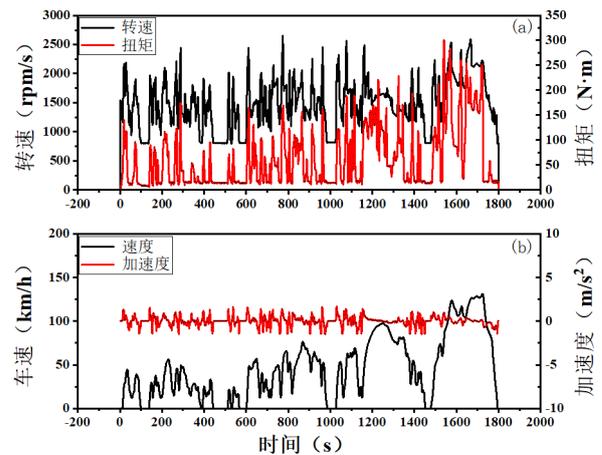


图1 WLTC循环及模拟循环对比

1.2 试验燃料

为研究乙醇汽油中组分对于气态排放和颗粒物排放的影响，本文设计了6种E10燃料，其中主要特性如表2所示，所有燃料辛烷值均在95以上，芳烃与烯烃含量均满足国VI乙醇汽油要求。

表2 燃料理化特性

燃料属性	1#	2#	3#	4#	5#	6#
辛烷值	95.5	96	96.2	95.6	96.2	95.4
密度	734.6	740.6	746.5	746.7	750.9	739.3
蒸汽压	57.5	55.7	50.9	50.6	49.9	60.8
乙醇含量	9.83	9.66	9.81	9.06	9.08	9.67

6种燃油烃类组成如图2所示，主要包含环烷烃（Na）、链烷烃（Pa）、烯烃（Ol）、芳烃（Ar）和氧含量（Ox）。图3展示了不同燃油类型的C链占比分布，其中C7-为C7链及以下的占比，C10+C11+为C10/C11链及以上的占比，T为总占。

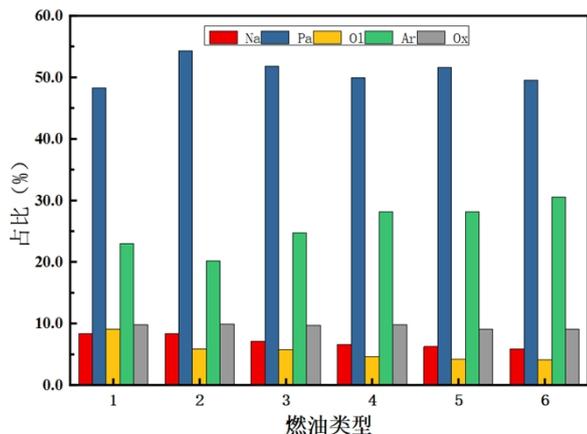


图 2 不同烃类组成占比分布

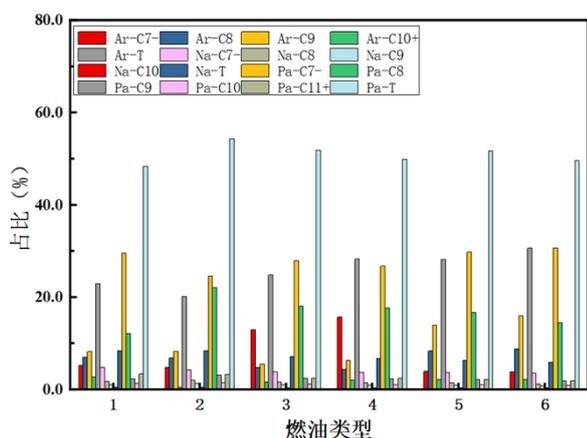


图 3 不同燃油类型的 C 链占比分布

皮尔逊相关系数 (Pearson correlation coefficient), 用来反映两个随机变量之间的线性相关程度, 本文中使用时皮尔逊相关系数将 PN 排放与气态排放、燃油烃类组成等变量进行相关性分析, 其公式如 (1) 所示。

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \bar{X}}{\sigma_X} \right) \left(\frac{Y_i - \bar{Y}}{\sigma_Y} \right) \quad (1)$$

其中 σ 是标准差。

2 试验结果及讨论

图 4 展示 6 种燃料在模拟 WLTC 循环测试中的 PN 排放的变化曲线。循环起始位置, 所有测试燃油的 PN 排放的峰值最高, 其中 3 号与 4 号燃油远低于其他测试燃油。众所周知。冷启动阶段发动机由于热状态、喷射策略和后处理系统等问题, 造成了启动阶段的峰值排放。

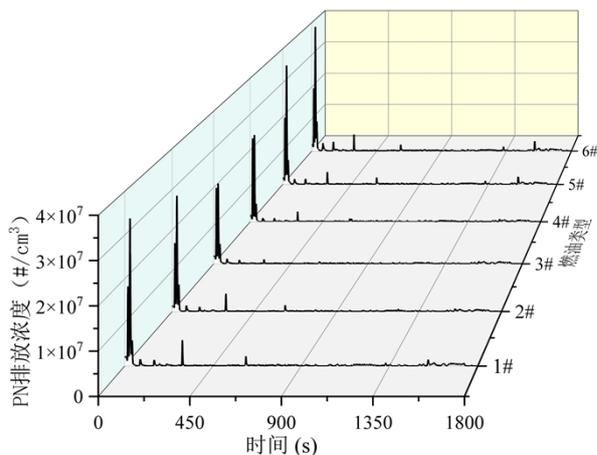


图 4 不同燃料的 PN 排放瞬态变化规律

图 5 展示了基于 WLTC 模拟循环下, 不同阶段下和整体循环下 PN 排放的对比。WLTC 循环下不同阶段 PN 排放量对比: 低速阶段中 $6 > 5 > 1 > 2 > 3 > 4$, 中速阶段下 $6 > 5 > 1 > 4 > 2 > 3$, 高速阶段下 $6 > 5 > 1 > 4 > 3 > 2$, 超高速阶段下 $6 > 5 > 1 > 3 > 4 > 2$ 。WLTC 模拟循环下 PN 排放: $6 > 5 > 1 > 2 > 3 > 4$ 。综合对比下, 不同阶段下和整体循环下对比发现, 6 号、5 号和 1 号的 PN 排放远高于 2 号、3 号和 4 号燃油。

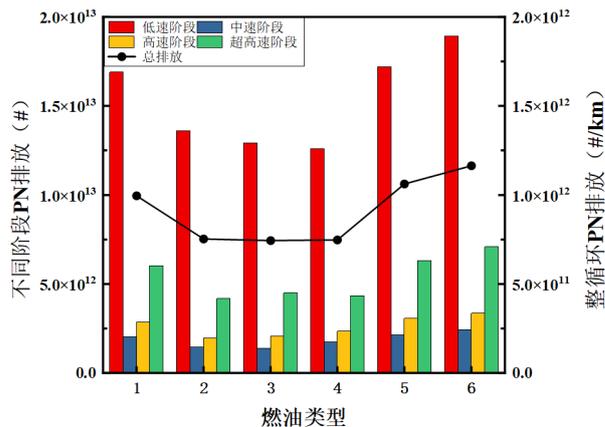


图 5 WLTC 循环及不同阶段 PN 排放对比

为进一步探究乙醇汽油的 PN 排放影响因素, 通过皮尔逊相关性系数对 PN 排放、PM 排放、气态排放物与燃油烃类组成分布进行计算与分析, 如下图 6 所示。

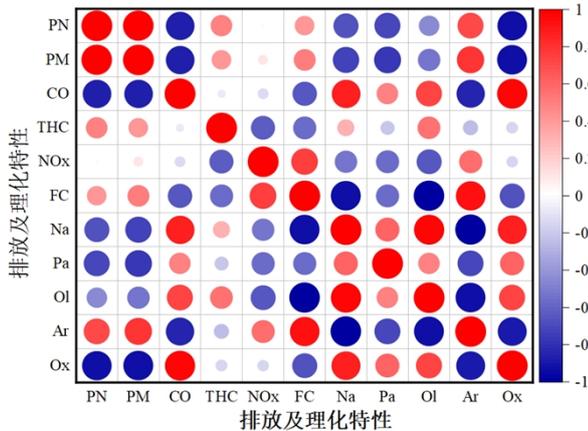


图 6 排放与燃油烃类组成分布相关性对比

图 6 中 PN 排放与 PM 和 THC 排放以及燃油组分中的芳烃含量呈现正相关的趋势。PN（颗粒物数量）与 PM（颗粒物质量）是颗粒物的两种表征，两者本身之间存在的强相关性。未燃 HC 是冷凝易形成核态颗粒物，从而导致 PN 与 PM 排放的增加。燃油中芳烃含量与 PN 排放呈现正相关性。而芳烃也一直被认为造成颗粒物排放的主要因素之一^[15]。含氧量（O_x）、烯烃（O₁）、烷烃含量（环烷烃 Na 与链烷烃 Pa）与 PN 和 PM 排放呈现负相关性，乙醇汽油中氧含量的增加有助于减少 PN 与 PM 排放，这与前人学者研究相符^[16]。而乙醇中烯烃增加能够适当减少 PN 排放，这与传统汽油中结果不一致^[17]。烷烃含量的降低伴随 PN 与 PM 排放的增加，这可能是由于燃油中芳烃（Ar）含量的增加，导致烷烃的减少。

图 6 中气态排放（CO、THC 和 NO_x）与燃油组分之间的相关性较弱，其中 CO 和 THC 排放与环烷烃（Na）和烯烃(OI)呈正相关性，CO 排放与氧含量的变化呈现正相关性，乙醇的加入有助于改善缸内燃烧，但乙醇加注量的增加可能会导致 CO 排放的增加。NO_x 排放与燃油组分的相关性更弱。燃油消耗率（FC）与烷烃和烯烃呈现负相关性，与芳烃含量呈现正相关性。烷烃与烯烃均有助于改善缸内燃烧，而芳烃馏程重，喷雾雾化差，与空气混合不均匀，进而导致燃烧恶化与不完全的现象。

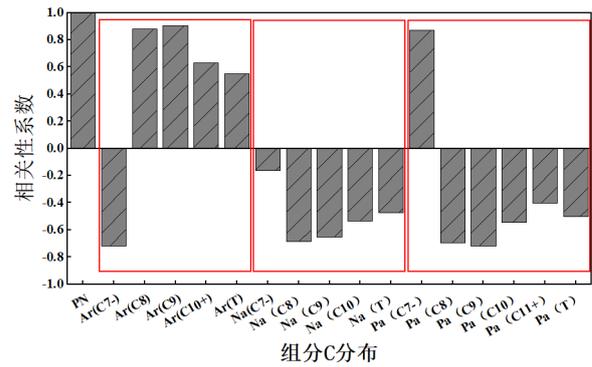


图 7 PN 排放与组分相关性对比

PN 与 PM 与燃油理化特性间存在较强的相关性，图 7 展示了 PN 与燃油芳烃和烷烃间相关性的强弱。芳烃中 C8~C10+ 与 PN 排放呈正相关性，C8+ 芳烃的挥发性低，易导致缸内油气混合不均匀和湿壁现象^[18-19]。C7 芳烃（甲苯）和 PN 排放呈现负相关性。以上述结果来看，降低 C8+ 芳烃将有助于减少 PN 排放。C7-链烷烃 PN 呈现正相关性，C8+ 烷烃的增加均有助于减少 PN 排放。有学者研究认为芳烃含量的增加致使 C8+ 烷烃的减少是导致 PN 与 PM 排放增加的主要因素之一^[20]。

3 结论

（1）乙醇汽油中 C7 及以下碳数的链烷烃与 PN 排放呈现正相关趋势，降低其占比将有助减少 PN 排放，而 C7+ 的链烷烃的增加是有助于降低 PN 排放。

（2）随 C8+ 芳烃的增加，PN 排放随之增加，乙醇汽油中的 C8+ 芳烃的占比是影响 PN 排放的主要因素之一。

（3）乙醇汽油测试中 THC 排放与 PN 排放呈现正相关，这可能是由于未燃 HC 冷凝易形成核态颗粒物，从而导致 PN 排放的增加。

参考文献:

- [1] Thompson H. The geopolitics of fossil fuels and renewables reshape the world[J]. Nature, 2022, 603(7901): 364-364.
- [2] Abrar I, Arora T, Khandelwal R. Bioalcohols as an alternative fuel for transportation: Cradle to grave analysis[J]. Fuel Processing Technology, 2023, 242.
- [3] Shirazi S A, Abdollahipoor B, Windom B, et al. Effects of blending C3-C4 alcohols on motor gasoline properties and performance of spark

- ignition engines: A review[J]. Fuel Processing Technology, 2020, 197.
- [4] Yang Z, Ge Y, Thomas D, et al. Real driving particle number (PN) emissions from China-6 compliant PFI and GDI hybrid electrical vehicles[J]. Atmospheric Environment, 2019, 199: 70-79.
- [5] Branco R, Serafim L, Xavier A. Second Generation Bioethanol Production: On the Use of Pulp and Paper Industry Wastes as Feedstock[J]. Fermentation, 2018, 5(1).
- [6] Sarathy S M, Oßwald P, Hansen N, et al. Alcohol combustion chemistry[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2014, 44: 40-102.
- [7] Koç M, Sekmen Y, Topgül T, et al. The effects of ethanol - unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in a spark-ignition engine[J]. Renewable Energy, 2009, 34(10): 2101-2106.
- [8] Schifter I, Diaz L, Rodriguez R, et al. Combustion and emissions behavior for ethanol - gasoline blends in a single cylinder engine[J]. Fuel, 2011, 90(12): 3586-3592.
- [9] 张传奇, 文铭升, 董芳, 等. 乙醇汽油燃料特性对直喷增压乘用车性能影响研究[J]. 内燃机工程, 2020, 41(05): 54-61.
- [10] Khalek I. Particle emissions from direct injection gasoline engines[J]. Technology Today, 2011, 7.
- [11] Chen L, Braisher M, Crossley A, et al. The influence of ethanol blends on particulate matter emissions from gasoline direct injection engines[M]. SAE International Warrendale, PA, USA, 2010.
- [12] 宋涛, 郑义, 郭津. 我国替代燃料乙醇汽油发展现状[J]. 小型内燃机与摩托车, 2013, 42(06): 92-96.
- [13] Masum B M, Masjuki H H, Kalam M A, et al. Effect of ethanol - gasoline blend on NOx emission in SI engine[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 24: 209-222.
- [14] Yinhui W, Rong Z, Yanhong Q, et al. The impact of fuel compositions on the particulate emissions of direct injection gasoline engine[J]. Fuel, 2016, 166: 543-552.
- [15] Kim Y, Kang J, Jun S Y, et al. Fuel effect on particle emissions of a direct injection engine [R]. SAE Tech Paper, 2013-01-1559.
- [16] Storey J M E, Barone T L, Norman K M, et al. Exhaust particle characterization for lean and stoichiometric DI vehicles operating on ethanol-gasoline blends [R]. SAE Tech Paper, 2012-01-0437.
- [17] WANG Yinhui, ZHENG Rong, QIN Yanhong, et al. The impact of fuel compositions on the particulate emissions of direct injection gasoline engine [J]. Fuel, 2016, 166: 543-552.
- [18] He X, Ratcliff M A, Zigler B T. Effects of Gasoline Direct Injection Engine Operating Parameters on Particle Number Emissions[J]. Energy & Fuels, 2012, 26(4): 2014-2027.
- [19] Karavalakis G, Short D, Vu D, et al. Evaluating the Effects of Aromatics Content in Gasoline on Gaseous and Particulate Matter Emissions from SI-PFI and SIDI Vehicles[J]. Environ Sci Technol, 2015, 49(11): 7021-31.
- [20] Zhang M, Ge Y, Wang X, et al. Particulate emissions from direct-injection and combined-injection vehicles fueled with gasoline/ethanol match-blends - Effects of ethanol and aromatic compositions[J]. Fuel, 2021, 302.