

# 煤制乙醇在柴油机上的高效清洁利用研究

尹朋<sup>1</sup>, 王玉娜<sup>2</sup>

(1. 黄淮学院 能源工程学院, 河南 驻马店 463000; 2. 河南科技大学 车辆与交通工程学院, 河南 洛阳 471000)

## Research on the efficient and clean use of coal-derived ethanol in diesel Engines

YIN Peng<sup>1</sup>, WANG Yu Na<sup>2</sup>

(1. School of Energy Engineering, HuangHuai University, 463000, China;

2. School of Vehicles and Transportation, Henan University of Science and Technology, 471000, China)

**Abstract:** In order to effectively reduce the exhaust emissions of traditional combustion fuels on the engine and alleviate the problem of energy shortage. On the basis of analyzing the physical and chemical properties of coal derived ethanol, the design optimizes some parameter selection when using coal derived ethanol in the diesel engine, and studies the dynamic performance, economic performance and emissions of the engine with ethanol, and the research results show that when 20% coal derived ethanol is mixed on the diesel engine, its power and emission performance are best improved, and the equivalent fuel consumption rate decreases most significantly when 25% coal derived ethanol is blended.

**摘要:** 为了有效降低传统燃料在发动机上的排放, 缓解能源短缺问题。在分析了煤制乙醇理化性质的基础上, 设计优化了柴油机使用煤制乙醇时的部分参数选择, 对发动机掺烧乙醇后的动力性能、经济性能以及废气排放等方面进行了研究。研究表明: 柴油机上掺烧 20% 的煤制乙醇时, 其动力性与排放性得到最佳改善, 在掺烧 25% 的煤制乙醇时当量燃油消耗率下降最明显。

**关键词:** 煤制乙醇; 柴油机; 扭矩; 燃油消耗率; 排放

**Key words:** coal-derived ethanol; diesel engine; torque; fuel consumption rate; emissions

中图分类号: TK42

文献标识码: A

## 0 概述

能源是经济文明社会发展的物质基础, 是如今人类赖以生存的基础。目前, 全球五大传统能源分别为: 石油、核电、煤炭、天然气、水力, 其中对石油的利用主要以内燃机和汽车工业为主。随着我国机动车市场的快速发展, 机动车数量急剧增加,

对燃油的需求量也越来越大<sup>[1]</sup>。

我国资源基础呈现富煤、贫油、少气的特征, 因此现代煤化工生产的煤制油、煤制天然气, 都作为清洁能源使用。此外, 甲醇、烯烃和乙醇下游的化工产品则是支撑国民经济发展的基础性物品, 如果不利用现代煤化工生产, 最终还会以原油作为

收稿日期: 2023-06-15

基金项目: 河南省重点研发与推广专项 (科技攻关) (232102320224); 河南省高等学校重点科研项目 (23A460030)

作者简介: 尹朋 (1983-), 女, 博士生, 主要研究方向为内燃机新型燃烧技术与代用燃料开发, E-mail:yinpeng821427@126.com。

原料进行生产，这将进一步加大原油、天然气的进口量。从这个角度来讲，煤化工生产出甲醇、烯烃和乙醇之后，在一定程度上能降低我国对国际原油、天然气的依赖度，有助于保障我国的能源安全。

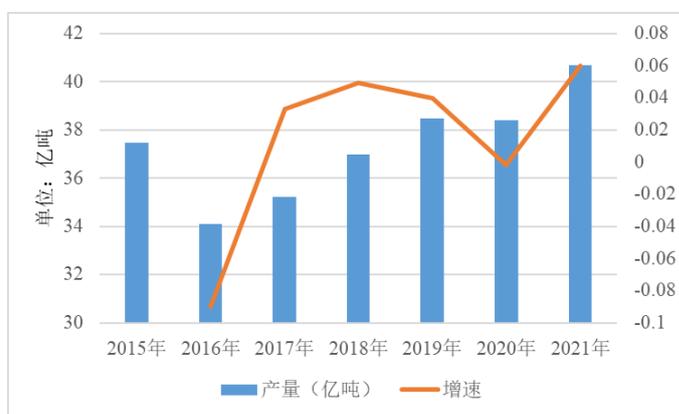
为促进煤化工产业健康有序发展，2021年5月发布的《现代煤化工“十四五”发展指南》和《关于石化产业调结构促转型增效益的指导意见》强调，应加快煤制油产业化，并重点开展煤制乙醇、煤基石脑油等现代煤化工产品的高效清洁利用。煤炭资源的高效清洁利用不但是优化我国能源结构，解决我国能源安全问题的重要对策，也是推动产业集聚、清洁、低碳、高质量发展和可持续发展的重要手段之一，如图1为我国的对外石油依存情况。



图1 我国的对外石油依存情况

在汽车数量迅速增长的同时，人们对汽车所造成的另外一个后果——全球暖化问题，也越来越重视。发展替代清洁燃料，一方面可以缓解化石能源危机，尤其是石油和天然气，另一方面也可以降低环境污染，缓解或彻底解决全球气候变暖问题。总体来看，我国仍处于早期发展阶段的车用替代燃料，正在推动工业化发展。在政策的支持下，已经出现了技术路线多元化、发展速度逐渐加快、市场份额不断增加的态势，车用天然气、醇类汽油、生物柴油、煤制油等替代车用燃料已经开始在国内使用[2]。

2015-2021年我国的原煤产量及增速情况如图2所示，由图可知，近年来我国的原煤产量一直呈上升趋势，说明了我国利用煤炭能源制备燃料乙醇的有利性。煤制乙醇产品作为我国“十三五”以来主要的现代煤化工企业，克服了低油价、全球经济增长放缓及新冠疫情等的不利影响，我国煤制乙醇产业已形成强有力的技术和产能储备，对于提升我国的能源战略安全保障能力，丰富我国的乙醇生



产，都有着重大的战略意义。

图2 2015-2021年我国的原煤产量及增速

## 1 乙醇在发动机上应用分析

醇类燃料是指乙醇、甲醇、甲基叔丁基醚等液体燃料，醇类含量小于10%时，称为低浓度混合燃料，醇类含量达到85%以上时，又称为燃料醇。目前有两种醇类燃料：燃料甲醇和燃料乙醇，均属于含氧燃料。甲醇也被称作木精和木醇，它具有较高的能量密度，很好的流动性、运输性以及无污染性，这都符合汽车燃料的需求，而且它使用安全，投资小，风险低，是一种非常理想的车用替代燃料。乙醇通常被称为酒精，在传统上，它是由玉米、小麦、薯类等作为原材料，经过发酵蒸馏而大量生产出来的，再经过进一步地脱水，并加入适量的变性剂后，就变成了一种变性燃料乙醇，将变性

燃料乙醇按照一定的比例与汽油进行混合后，所形成的混合车用燃料称为汽油掺醇，也按照一定的比例与柴油进行混合后，所形成的混合燃料称为柴油掺醇<sup>[1]</sup>。

### 1.1 乙醇在发动机上应用历程

早在 20 世纪初，乙醇燃料已应用于发动机，但后来，廉价、优质的石化燃料被大规模地制造出来，成为了内燃机中最主要的燃烧燃料。一直到上世纪七十年代，世界上出现了“石油危机”，对机动车尾气进行了越来越多的限制，乙醇燃料在内燃机中的应用得到了快速地发展，2013 至 2020 年燃料乙醇的产量如图 3 所示。

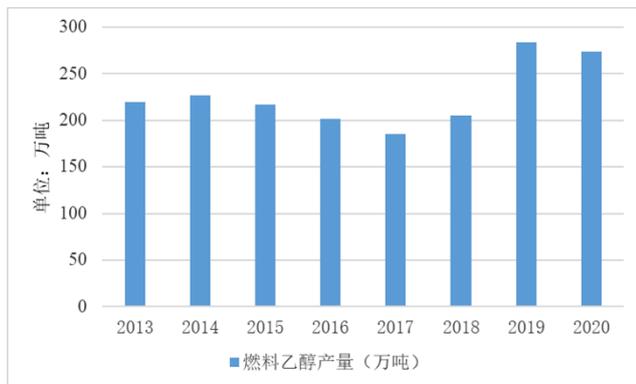


图 3 2013 至 2020 年燃料乙醇的产量

当前美国和巴西是世界上使用乙醇汽油最多的国家，早在上世纪初，美国就开始利用乙醇的物理性质，将其与汽油或柴油进行掺烧；巴西不但率先以法律形式推行了乙醇汽油的普及，而且还成为了全球唯一一个没有将纯乙醇作为车辆燃油的国家，20 世纪初，巴西政府曾发布了一项法律，要求在国内市场上出售的汽油中，加入 2%~5% 的乙醇含量<sup>[3]</sup>。

进入新世纪，由于石油价格震荡、环境污染等原因，使燃用煤制乙醇燃料的优势更加凸显，与石油和天然气相比，我国拥有着更多的煤炭资源，在

煤制乙醇方面，拥有了相当的资源保证，而且技术也已经相当成熟，可以实现规模化生产。我国已经开始大力谋划布局煤制乙醇产业，来作为国家能源的重要补充<sup>[4]</sup>。

### 1.2 煤制乙醇的主要理化特性

煤制乙醇是一种无色透明、易挥发、易燃的液体燃料，从分子组成上来看，煤制乙醇的分子式为  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ，含有 2 个碳原子、6 个氢原子和 1 个氧原子，而汽油、柴油中没有氧元素<sup>[3]</sup>，与相同原子数的烷烃相比，烷基醇的分子量、沸点及常压沸点下的汽化热、比重等都较高，表 1 给出了煤制乙醇与汽油、柴油的物理化学性质。

表 1 煤制乙醇、汽油及柴油的理化性质

理化性质	煤制乙醇	汽油	柴油
分子式	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$	$\text{C}_{5-12}$ 烃类	$\text{C}_{10-21}$ 烃类
分子量	46	-	-
含氧量/%	34.73	0	0
密度 (20°C) / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	0.7893	0.72~0.78	0.83~0.86
沸点/°C	78.4	40~210	180~370
凝点/°C	-117.3	-60~-56	-35~10
闪点 (闭) /°C	13~14	-45~-38	65~88
粘度 (20°C) / $\text{mPa}\cdot\text{S}$	1.2	0.28~0.59	3.0~8.0
汽化热/ $\text{KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.854	0.31~0.34	0.25~0.30
低热值/ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	26.778	43.9~44.4	42.5~42.8
着火温度/°C	434	350~468	270~350
火焰传播速度	-	0.38~0.58	-

/m.s <sup>-1</sup>			
着火界限/%	3.5~18.	1.3~7.6	-
	0		
理论空燃比	8.45	14.7~15.0	14.3~14.6
/kg.kg <sup>-1</sup>			
理论混合气热值/MJ.kg <sup>-1</sup>	2670	2780~2786	2720~2790
十六烷值 CN	8	5~25	45~65
辛烷值 RON	~110	80~90	~20

与汽油、柴油相比,煤制乙醇作燃料时具有以下特点:

(1) 根据其分子结构可知,汽、柴油中不含氧元素,而煤制乙醇的含氧量为 34.7%,可促进燃油的完全燃烧。

(2) 煤制乙醇的热值较石油燃料低,是柴油和汽油的 63%和 64%,与常规燃料相比,煤制乙醇的经济性要差一些,但其混合气的理论热值与汽油相近,对车辆的动力性能影响不大。

(3) 煤制乙醇沸点 (78.4℃) 比汽油 (40~210℃) 低,有利于汽化。

(4) 醇混合燃料存在着较大的脱层现象,醇的吸水性强,很容易被水分子所吸附,因此燃用醇混合燃料时要加助溶剂。

(5) 汽油机中燃料的辛烷值是衡量其抗爆性能的重要指标,煤制乙醇的辛烷值比汽油高得多,所以它不仅是一种很好的汽油机替代品,而且还是一种很好的助溶剂,可以改善汽油的辛烷值。煤制乙醇十六烷值低,着火性能差,在柴油机中燃用时比较困难<sup>[6]</sup>Error! Reference source not found.。

## 2 柴油掺煤制乙醇对柴油机的影响

### 2.1 柴油掺煤制乙醇对柴油机动力性的影响

柴油机因具有较高的热效率和较低的碳氢化合物(HC)排放而被广泛使用,但随着石油燃料的价格波动,由于石油柴油的不可再生性和不同程度的有害排放,急需寻求一种适合柴油机的可再生能源。而煤制乙醇是有前途的替代燃料之一,可用于动力柴油发动机。

由图 4 可以看出,掺烧煤制乙醇的发动机相比燃用纯柴油,在中低转速下扭矩随转速的增加而升高,在高转速下,随转速的增加而下降。这种现象的出现有几方面的原因:(1) 因为煤制乙醇的沸点较低,当煤制乙醇和柴油的混合燃料喷射到汽缸内后,混合燃料更容易汽化,燃料的雾化效果极大地得到了提高,油气混合更加均匀,因此混合燃料在中低速时的扭矩相对会升高;(2) 在中低转速时煤制乙醇的微爆效应会扩大,从而也会使扭矩升高;(3) 同时由于煤制乙醇的汽化潜热值较大,当柴油加入煤制乙醇后,使得着火过程的滞燃期延长,火焰温度降低,所以在高速时混合燃料的扭矩相对会降低,所以掺烧煤制乙醇时的发动机外特性不同于原柴油机<sup>[7]</sup>。

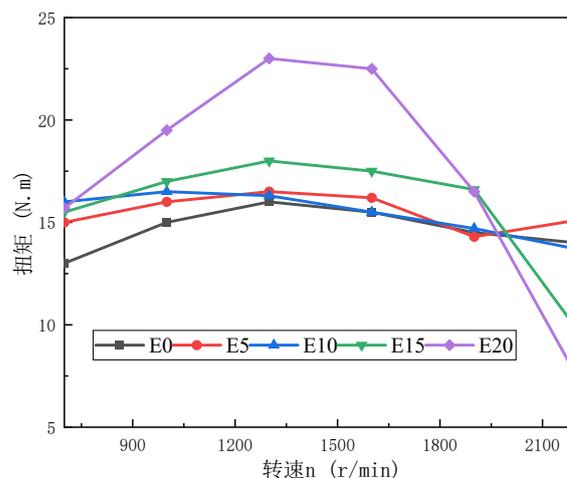


图 4 不同掺醇率下柴油机外特性对比

通过图 4 还可以观察到,当掺烧比例在 0%至 20% 范围内变化时,发动机在中等转速下的扭矩会随着

煤制乙醇比例的增加而增加。这是因为煤制乙醇是一种含氧燃料，它在燃烧时可以提供氧气，特别是在富燃料区时，可以使燃料燃烧更加充分，因此混合燃料的燃烧效率得到了提高，有效热效率得到了改善，从而扭矩和功率随着掺烧比例的增加而增加。虽然煤制乙醇的热值比柴油低，理论上可能会降低发动机的动力性能，但煤制乙醇中含有 34.8% 的氧，可以使柴油中不能充分燃烧的部分加以充分燃烧，从而使发动机的功率上升，动力性得到改善。一项研究表明，当负载处于中低水平时，煤制乙醇柴油混合燃料的输出功率与纯柴油相差不大；当负载增加时，煤制乙醇柴油混合燃料的输出功率略有下降，但下降幅度很小；对于含有 5% 至 20% 煤制乙醇的混合燃料，最大输出功率降低幅度小于 5%。同时，煤制乙醇所含的比例越高，最大输出功率的下降幅度就越大。

## 2.2 柴油掺煤制乙醇对柴油机经济性的影响

由于煤制乙醇和柴油的热值不同，有效燃油消耗率无法准确评价燃料的实际利用效率，为此，提出了当量燃油消耗率的概念。如下图 5 是不同乙醇掺烧比例下的发动机的当量燃油消耗率变化曲线图，从图中可知，发动机的当量燃油消耗率随乙醇加入量的增加下降得越明显，燃用 E25 的乙醇与柴油的混合燃料的发动机与原机相比，当量燃油消耗率下降的幅度最大<sup>[8]</sup>

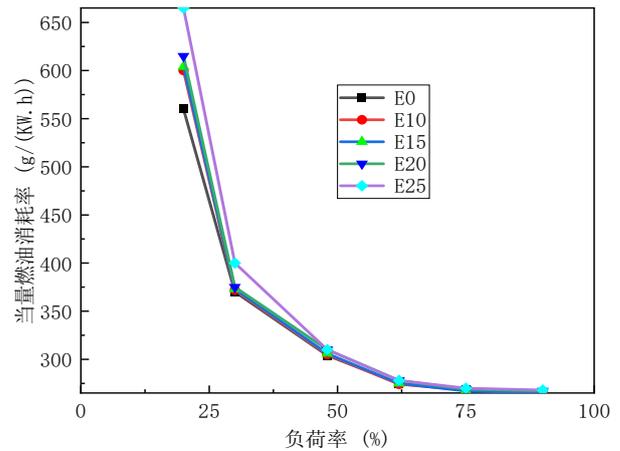


图 5 当量燃油消耗率随柴油机负荷率的变化规律

以上变化的原因是由于在柴油中加入了煤制乙醇，煤制乙醇具有低沸点的特性，易于蒸发，这有利于混合气的形成。此外，煤制乙醇含有氧元素和更强的挥发性，从而使燃料更加迅速充分地燃烧，提高了热效率，因此降低了发动机的油耗。

## 2.3 柴油掺煤制乙醇对柴油机排放性的影响

从图 6 可以看出，在燃用掺烧 5% 乙醇的混合燃料时，柴油机 NO<sub>x</sub> 的排放是最多的，而在燃用 20% 乙醇与柴油时，NO<sub>x</sub> 的排放低于原发动机。而 HC 和 CO 的排放量则基本呈现出随乙醇掺烧率的增大而增大的趋势，在使用一般柴油时，HC 的排放量是最小的，CO 的排放量为 1.583g/(kW.h)；在 E20 燃烧时，HC 排放为 1.702g/(kW.h)，CO 排放高于原始发动机<sup>[9]</sup>。

在这些物质当中，HC 排放的升高，主要是因为煤制乙醇的高汽化潜热值、低十六烷值等物理化学性质，导致了缸内温度的降低，所以随着乙醇掺入量的增大，HC 排放量也随之升高。在高负载情况下，由于汽油机缸内和燃烧室壁表面的温度升高，使得汽油机中的可燃气体生成速率更快，并在一定程度上降低了汽油机中的 HC 排放。

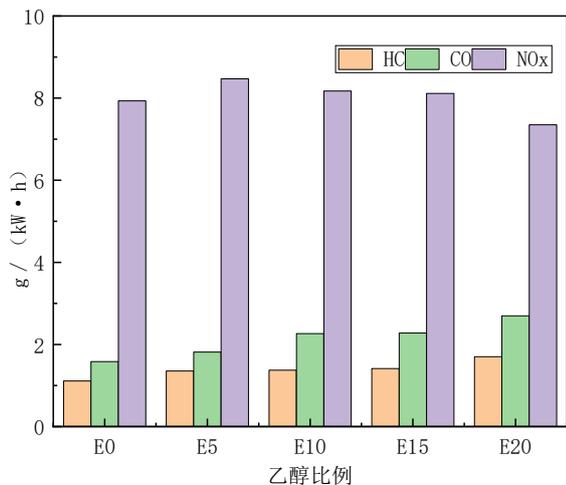


图6 掺烧不同比例乙醇的 (HC、NO<sub>x</sub>、CO) 排放规律

高汽化潜热值的乙醇致使缸内温度降低, 阻碍了CO的氧化反应, 因此CO排放随乙醇掺比的增大而逐渐增加。

由图7可知<sup>[9]</sup>, 在同一转速下, 柴油机燃用乙醇/柴油混合燃料后的可见烟度量随乙醇掺入量的增加而减少, 在高转速时, 可见烟度的排放量随乙醇掺烧比例的增加下降的幅度更明显。

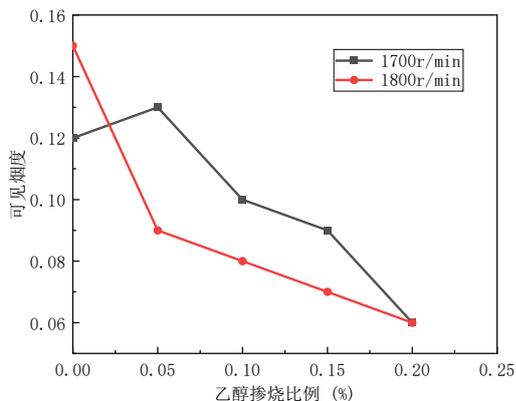


图7 柴油机燃用乙醇-柴油混合燃料后可见烟度随乙醇掺入量的变化规律

综合上述分析结果表明: 煤制乙醇高汽化潜热与含氧的理化特性是气体排放物变动的主要原因。

### 3 煤制乙醇在柴油发动机上清洁利用的优势及建议

煤炭能源是我国所依赖的一次能源, 能否高效、洁净地开发和利用丰富的煤炭资源, 已成为解决能源持续的战略课题, 对保护环境和我国煤炭工业的可持续发展有着重要的战略意义, 发展煤制乙醇新的替代燃料符合我国国情, 有利于体现环保和节能两大主题, 煤制乙醇掺混燃烧的优势也是明显的, 国外已有可供借鉴的成功经验。在发动机上应用煤制乙醇也会带来一些挑战, 因此是非常有必要和有意义地进行这一方面的实用研究。

在发动机上掺烧煤制乙醇的优势有:

(1) 煤制乙醇/汽油混合燃料作为发动机代用燃料, 缓和了能源矛盾, 在废气排放方面也起到了很好的缓解作用。

(2) 结合煤制乙醇的理化特性知, 煤制乙醇的辛烷值较汽油高, 且煤制乙醇的沸点低, 更容易汽化, 汽油中掺入煤制乙醇使得混合气更均匀, 燃烧更充分, 故煤制乙醇适宜作发动机代用燃料, 又因其着火极限宽、燃烧速度快, 有利于净化排气及降低油耗。

(3) 使用煤制乙醇汽油混合燃料, 可得到较高的功率, 即发动机的动力性得到提高。有研究表明: 汽油机燃用煤制乙醇汽油后, 燃油消耗率升高, 经济性变差, 降低了HC和CO的排放, 随负荷NO<sub>x</sub>的排放有不同的变化。

(4) 来源较丰富, 我国煤炭能源丰富, 发展煤炭资源产乙醇, 供给于发动机上, 能显著降低汽车尾气排放量并缓解石油资源匮乏的压力, 有利于保护环境 Error! Reference source not found.。

发动机上燃用煤制乙醇/汽油、煤制乙醇/柴油混合燃料也存在着油耗高、经济性差、腐蚀发动机、积炭多、启动困难等缺点和问题, 以及煤制乙醇在与柴油掺混时易出现分层现象等, 这些缺点和问题

是可以通过采取一定的措施改善或解决的，汽车燃用煤制乙醇时应注意的问题有：

(1) 煤制乙醇的低热值比汽油低，故煤制乙醇燃烧时所需的理论空气量也较少。此时应增大缸内的供油量，从而使混合气混合均匀，燃烧充分，从而使发动机在燃用煤制乙醇时能保持动力性能基本不变。

(2) 因煤制乙醇汽油蒸发潜热高，从而使混合气在燃料蒸发时温降大，所以，不利于燃料在低温下的蒸发，尤其在冬季寒冷时，易造成发动机冷启动困难。可通过在进气道应用加热装置，细化燃油粒，从而达到改善起动性能的效果。

(3) 煤制乙醇是极性物质，亲水性好，在与非极性物质的碳氢化合物掺混时，只要有少量的水存在，就会引起乙醇与之分离。而且，乙醇汽油保质期短，容易产生分层现象。所以，加乙醇汽油要选择质量可靠的加油站。

(4) 长期使用乙醇汽油混合燃料或乙醇柴油混合燃料，润滑油酸值和黏度会增加，容易在发动机进气系统中产生油污，导致拉缸，所以应在润滑油中添加清洁剂及中和酸性物质的添加剂。

## 4 结论

本文基于煤制乙醇的理化特性，展开了不同掺烧比例下的煤制乙醇对发动机的动力性、经济性、排放性等三方面的研究，探索了不同掺混比例的煤制乙醇对发动机性能的影响，从中得到的结论如下：

(1) 掺烧煤制乙醇的发动机相比纯柴油，在中低转速下扭矩和功率都随转速的增加而升高，但在高转速下功率下降，升降幅度在 10%以内。在中低负荷工况时，当量燃油消耗率随混合燃料中煤制乙醇掺

混比的增大而升高；在高负荷工况时，当量燃油消耗率随掺混比的增大而降低。在低负荷工况下，发动机燃烧煤制乙醇柴油混合燃料比燃烧普通柴油时的 CO 排放量更高。中高负荷工况下，二者相差不大。在所有工况下，发动机燃烧煤制乙醇柴油混合燃料都高于燃烧普通柴油时的 HC 排放。但燃烧煤制乙醇柴油混合燃料时 NO<sub>x</sub> 排放量和碳烟排放量均低于纯柴油时的排放量。

(2) 在国内外多所知名高校中，对煤制乙醇柴油发动机展开了台架实验。在此过程中，煤制乙醇在柴油机上的燃烧试验研究结果表明：乙醇柴油当量燃油消耗率与纯柴油相较有所降低，改善了发动机的经济性能，从而提升了发动机的热效率。因此，在低负荷时，废气排放会有所上升，而在高负荷时会有所下降。

(3) 试验发现，燃用煤制乙醇/汽油混合燃料的能耗率比原机有明显下降，故掺入乙醇后经济性要好于汽油。排放性方面，煤制乙醇掺混后，使用混合燃料可以降低 CO 的排放量，同时改善发动机怠速状态下的 HC 排放，并显著减少怠速工况下 NO<sub>x</sub> 的排放量。

## 参考文献：

- [1] 臧继嵩. 乙醇在压燃式发动机上的应用研究[D]. 天津大学, 2010.
- [2] 汤湘华, 李雪峰, 罗艳托, 孔劲媛. 国内车用替代燃料的发展现状及展望[J]. 石油规划设计, 2012, 23(03).
- [3] 陈绪平. 柴油乙醇组合燃烧及其在发动机上应用的研究[D]. 天津大学, 2010.
- [4] 麻冬, 李昕. 国内煤基乙醇燃料发展现状及趋势研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(17): 153-154.
- [5] 张静, 郭尊礼, 王军, 任珂. 煤制乙醇技术研究进展及前景[J]. 云南化工, 2017, 44(08): 10-13.

- [6] 邓元望, 刘放浪, 刘学英. 乙醇燃料及其在发动机中的应用[J]. 小型内燃机与摩托车, 2005(01): 28-30.
- [7] 刘晓辉. 乙醇柴油混合燃料发动机特性研究[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2008(01): 17-22+32.
- [8] 陈泓. 乙醇柴油和 BED 混合燃料的稳定性试验及发动机性能研究[D]. 昆明理工大学, 2010.
- [9] 刘朋, 宋崇林, 张延峰, 王守元, 贾贵启, 杨润东. 乙醇-柴油混合燃料对柴油机性能及排放的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2003(04): 300-305.
- [10] 孙杰. 汽油机燃用乙醇汽油混合燃料的仿真研究[D]. 浙江大学, 2010.