

Study on Performance and Emission of a Port-Fuel Injected SI Engine Fueled with Acetone-Butanol-Ethanol (ABE)

Weiqliang Wang, Xin Gao, Pan Ding

School of Automobile and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei
Email: wangwq03@163.com

Received: Oct. 7th, 2015; accepted: Oct. 27th, 2015; published: Oct. 29th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

ABE (Acetone-Butanol-Ethanol, ABE) fermentation is one of the major methods to produce bio-butanol. The goal of this study is to investigate the combustion characteristics of the intermediate product in the production of butanol, namely ABE in a spark-ignited engine and hence to make an attempt to affirm its potential used as an alternative fuel for ICEs. Acetone, n-butanol and ethanol were blended in a 3:6:1 volume ratio and then blended with pure ethanol-free gasoline with different ratios to create various fuel blends. These blends were tested in a port-fuel injected spark ignited engine and their performance was evaluated through measurements of in-cylinder pressure, and various exhaust emissions. ABE is combusted faster than gasoline and n-butanol due to its higher laminar flame speed. Brake Specific Fuel Consumption (BSFC) was seen to increase and NO_x was seen to decrease with ABE fraction increasing, with pure ABE achieving near-zero NO_x.

Keywords

ABE, Gasoline, Fuel Blends, Spark Ignition Engine, Port-Fuel Injection

ABE燃料在气道喷射汽油机中的性能与排放特性的研究

王维强, 高欣, 丁攀

武汉科技大学汽车与交通工程学院, 湖北 武汉
Email: wangwq03@163.com

收稿日期: 2015年10月7日; 录用日期: 2015年10月27日; 发布日期: 2015年10月29日

摘要

ABE (丙酮-丁醇-乙醇, Acetone-Butanol-Ethanol, ABE)是发酵生成丁醇过程中的中间产物, 来源广泛, 价格低廉。本研究的目的是揭示ABE燃料在火花点燃发动机中的燃烧特性, 并且希望证实它有潜力成为内燃机中替代燃料。丙酮, 正丁醇和乙醇以3:6:1的体积比混合, 然后与无酒精汽油以不同比例混合成不同的燃料。这些混合燃料在一台进气道喷射式汽油机上进行测试, 它们的性能通过测量其气缸压力以及排放物的含量来进行评价。随着ABE成分的增加, 有效燃油消耗率会有所增加, 但 NO_x 排放减少。若只使用ABE燃料, NO_x 排放可以几乎为零。

关键词

ABE, 汽油, 混合燃料, 火花点燃发动机, 进气道喷射

1. 引言

近年来, 公众对汽油、柴油和其他化石燃料的经济性和环境可持续发展性的持续关注, 推动了人们对含氧燃料的研究[1]。常用含氧化合物包括丁醇, 乙醇, 甲醇, 甲基或乙基酯或醚。由于它们具有容易获得, 成本低, 氧含量高, 用于现代发动机无需改良等特性, 生物乙醇已经占据了美国和巴西 20%~30% 的燃料市场。然而, 随着乙醇使用的增多, 人们逐渐意识到乙醇的一些缺点, 比如, 在较低温度下低相位置富含乙醇时, 易导致发动机停转等[2]。因为丁醇的性能与汽油更接近, 因此, 许多代用燃料的研究转向丁醇的使用。与汽油十分接近的空燃比, 使得丁醇可以和汽油更大比例的混合, 能量密度比乙醇高 30%。而且, 正丁醇的使用节省 39%~56% 的化石原料, 同时, 在一个生命循环周期内可以减少 48% 的温室气体排放。妨碍丁醇在发动机内使用的主要问题是它相对高昂的价格, 很多研究机构就此进行了很多相关研究[3]-[10]。

ABE (丙酮-丁醇-乙醇, Acetone-Butanol-Ethanol, ABE)主要是由供给的生物质原料经细菌发酵形成的, 其中丙酮, 丁醇和乙醇的含量分别占体积含量的 22%~33%, 62%~74%, 和 1%~6%, 比例大致为 3:6:1。由于石油价格的上升和化石燃料来源的减少, 人们对生产生物丁醇的 ABE 发酵法的研究兴趣日益提升。这篇文章的目的就是探究 ABE 在火花点燃发动机里的燃烧特性, 试图证实它作为内燃机替代燃料的潜力。

人们进行了很多在传统内燃机中应用丁醇, 乙醇和其它含氧燃料的研究。Alasfour [5] [6]研究了单缸发动机使用了醇/汽油的混合燃料, 其中丁醇占体积的 30%。结果表明在相同的空燃比期间, 发动机热效率有所下降, 但 NO_x 排放比使用纯汽油要低些。Dernotte 等[7]评估了丁醇汽油混合燃料在进气道喷射火花点燃发动机里的燃烧和排放特性。主要结果表明, 丁醇 40%/汽油 60%混合燃料 HC 排放最小, 氮氧化物排放无显著变化。Wallner 等[8]研究了纯汽油、10%乙醇(E10)和 10%丁醇(Bu10)混合燃料在缸内直喷(DI)四缸火花点燃发动机的最大扭矩 220 Nm 条件下的燃烧性能和排放情况。结果表明, Bu10 的燃烧速度高于 E10 和汽油。他们的进一步研究[10]中发现, 添加醇类的混合燃料无论何种工况, NO_x 排放都有所下降。

最近, ABE 方面的研究包括 ABE-柴油混合燃料在柴油机中燃烧[9]和 ABE 燃烧实验和动力学建模[10], 迄今为止, ABE 在汽油机中的应用没有涉及。这就是本研究的主要目的。

2. 测试用燃料的特性

首先, 按照 ABE 发酵产品的组成将丙酮(Acetone, 纯度 99.5%), 丁醇(Butanol, 纯度 99.5%)和乙醇(Ethanol, 纯度 99.8%)以体积比为 3:6:1 进行混合成 ABE 燃料。然后, 将 ABE 燃料与基础汽油一起均匀混合。ABE 在汽油中所占的体积分数为 20%时, 简称为 ABE20; 以此类推。纯汽油简称为 G100, 纯丁醇简称为 B100, 纯 ABE 简称为 ABE100。表 1 是各种燃料的物理化学性质。表 2 为混合燃料的特性。

3. 试验装置与测试方法

试验在一台单缸四冲程汽油机上进行, 采用双顶置凸轮轴, 每缸 4 气门与中间安装一个火花塞。发动机连接到一台 GE 型 TLC-15 级 4-35-1700 的测功机上。缸内压力用 Kistler 型 6125 b 压力传感器和一个 AVL 3057-A01 电荷放大器测量, 曲轴位置信号由 BEI XH25D 轴编码器输出。实验原理图如图 1 所示。

Table 1. The chemical and physical properties of the fuel [8] [10]

表 1. 燃料的物理化学性质[8] [10]

项目	汽油	乙醇	丁醇	丙酮
化学分子式	C ₄ -C ₁₂	C ₂ H ₅ OH	C ₄ H ₉ OH	C ₃ H ₆ O
组分(C, H, O) (%)	86, 14, 0	52, 13, 35	65, 13.5, 21.5	62, 10.5, 27.5
低热值(MJ/kg)	43.4	26.8	33.1	29.6
密度(kg/m ³)	715~765	790	810	790
能量密度(MJ/l)	32.20	21.17	26.81	23.38
辛烷值((R + M)/2)	90	100	87	
沸点(°C)	25~215	78	118	56.2
气化潜热(25°C) (kJ/kg)	380~500	904	716	518
自燃温度(°C)	~300	420	343	465
理论空燃比	14.7	9.0	11.2	9.5
混合物热值(MJ/m ³)	3.72	3.85	3.82	4.04
20°C 下水溶性(ml/100ml H ₂ O)	<0.1	—	7.7	—

Table 2. The characteristics of the mixed fuel tested

表 2. 测试的混合燃料的特性

燃油类型	比重	低热值(MJ/kg)	理论空燃比下的能量密度(MJ/l)	理论空燃比
G100	0.739	43.44	31.78	14.7
ABE20G80	0.751	41.05	30.85	13.84
ABE40G60	0.763	38.74	29.60	12.98
ABE60G40	0.776	36.50	28.32	12.13
ABE80G20	0.788	34.33	27.08	11.27
ABE100	0.800	32.23	25.78	10.42
B100	0.810	33.10	26.81	11.2

表 3 是发动机的主要技术参数。发动机由 Megasquirt II V3.0 ECU 控制。这种控制根据容积效率表调整燃料的供给量，根据发动机转速(RPM)和发动机载荷(歧管压力, MAP)调整点火正时(点火提前角)。喷油器使用的是博世喷油器，在喷油压力为 3 bar 时，其额定喷油量为 440 每分钟立方厘米。

NO_x 和 λ 由装在发动机的排气歧管上 Horiba MEXA-720 氮氧化物的非采样型仪表测量。未燃烧的碳氢化合物和一氧化碳用 Horida MEXA-554JU 采样型仪表测量。探针装在发动机的排气歧管上，使得采样管能将废气传到仪表。

在这项研究中，首先燃用纯汽油，将发动机负荷固定在 70 KPa。点火正时设定在 20°BTDC，有效转矩、λ 和 NO_x 平均每 60 秒测一次，而未燃的碳氢化合物、一氧化碳、二氧化碳和排放气体的温度直接由排放分析仪记录。此外，所有燃料的缸内压力曲线表明其缸压峰值的差异。

使用基准汽油时，测量其转矩值，对于其他燃油，调整负载的变化使得其获得与纯汽油下的一致转矩。这些测试是在三个不同的发动机速度下进行的(900, 1200 和 1500 RPM)。测试的情况列于表 4。

4. 试验结果与分析

图 2~图 8 展示的是实验条件下对燃油性能和排放的测量结果。

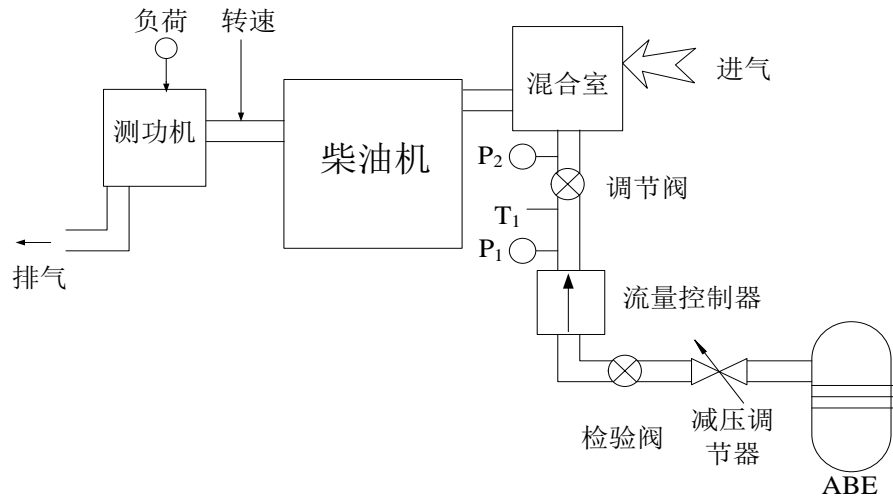


Figure 1. Test unit diagram
图 1. 试验装置示意图

Table 3. Main technical parameters of engine
表 3. 发动机主要技术参数

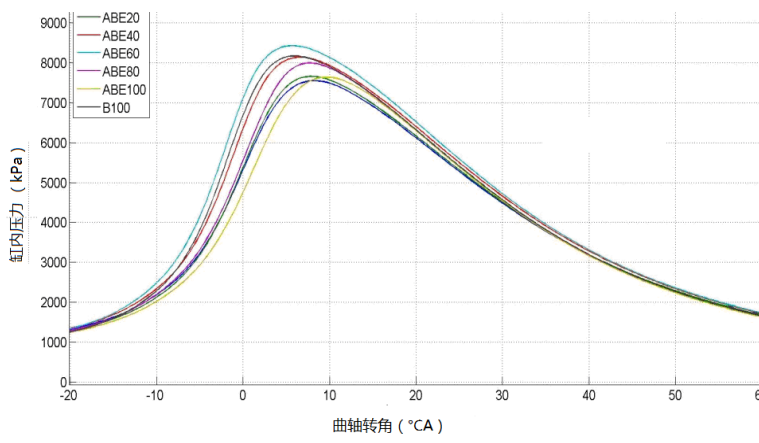
项目	参数
缸径/mm × 行程/mm	95 × 115
工作容积/L	0.8
压缩比	13
气门升程/mm	6
进气门开启(IVO)/°CA ABDC	70
进气门关闭(IVC)/°CA BTDC	-80
排气门开启(EVO)/°CA BBDC	70
排气门关闭(EVC)/°CA BTDC	-80

缸内压力曲线

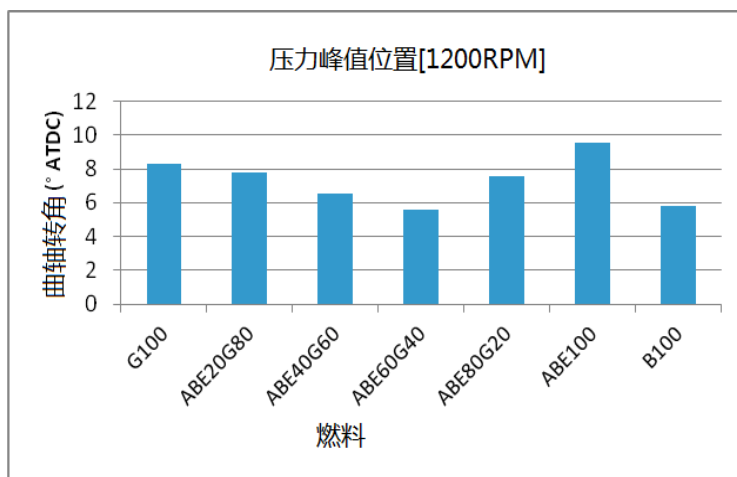
图 2(a)显示的是所有被测燃油在转速为 1200 RPM 时的压力曲线。这些曲线所示的是在 60 秒内记录的发动机连续循环的几个 25 样本的平均曲线。图 2(b)显示的是不同燃油压力峰值的位置。

Table 4. The test conditions
表 4. 测试条件

发动机转速(RPM)	900	1200	1500
转矩(Nm)	19.2	17.2	15.8
载荷(进气 MAP)	调节后达到(~70)		
当量比	0.95~1.05		
点火正时	20°BTDC		
燃油压力	3 bar		



(a)



(b)

Figure 2. (a) Different fuel pressure curve at 1200 RPM; (b) The position of peak pressure

图 2. (a) 在 1200 RPM 时不同燃油的压力曲线; (b) 压力峰值位置

可以看到,缸内压力峰值随着 ABE 含量的增加而增大,到 ABE60 后开始缓慢下降。当 ABE 的体积分数低于 50% 时,汽油为燃料的主要成分,由于汽油的汽化潜热较低,这将导致更快的蒸发,燃烧峰值增大。当 ABE 的体积分数高于 50% 时,ABE 为燃料的主要成分,由于汽化潜热过高,这会引发燃烧峰值减低。

表面热释放率可以通过压力曲线变化计算出来,用到热力学第一定律中的公式(1)。

$$\frac{dQ_n}{dt} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dp}{dt} \quad (1)$$

其中, γ ——比热容比; p ——缸内压力; V ——气缸容积; Q_n ——热释放量。

从图 3 可以得出,燃烧质量分数与曲轴转角的关系。燃烧持续期缓慢增加,到 ABE 体积分数为 60% 时下降,并且出现在更早的位置。从表 2 中分析知道,丙酮、丁醇、乙醇的层流火焰速度比汽油的高,需要对 ABE 较短的点火延迟进行调整。

有效燃油消耗率(BSFC)

如图 4 所示的是不同燃料在三种转速下测得的有效燃油消耗率。

可以看到,BSFC 稳步增加。在 1200 RPM 时,最小有效燃油消耗率汽油最低,为 351 g/kWh,与其相对的,ABE100 为 501 g/kWh, B100 为 466 g/kWh。与汽油相比,ABE100 的油耗增加约为 35%, B100 的约为 26%。这些差异是低容积能量密度(见表 3)的混合以及由于 ABE 混合燃料燃烧相位的不合适,造成燃料转换效率的减少所形成的。

排放数据(UHC、CO 和 CO₂)

在不同转速下,UHC、CO 和 CO₂ 的排放量分别如图 5、图 6 和图 7 所示。

随着 ABE 含量的增加,UHC 的排放量稳步增加。在 1200 RPM 时,纯汽油的 UHC 排放量约为 200 ppm,纯 ABE 的 UHC 排放量接近 960 ppm。和 ABE100 的未燃碳氢化合物排放量相比,ABE20 到 ABE80 都很低。这表明,含有少量汽油可以显著提高燃烧质量。

氮氧化物

不同燃料的 NO_x 排放测试结果如图 8 所示。

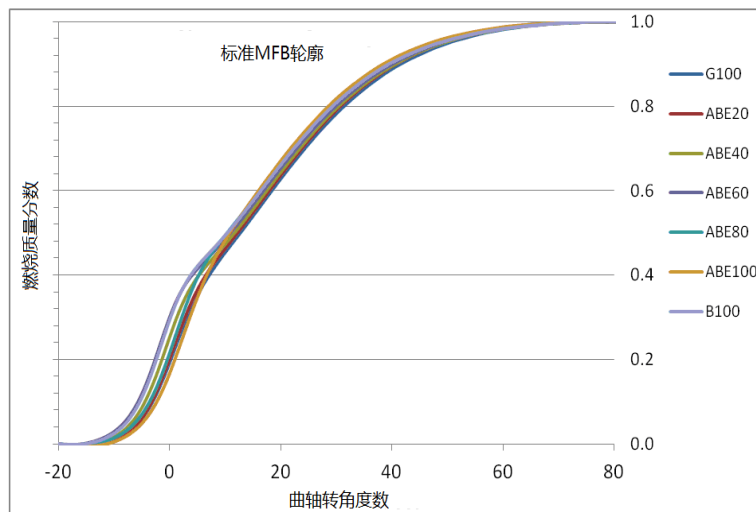


Figure 3. Combustion quality score distribution for different fuel in 70 kPa, 1200 RPM (20° BTDC)

图 3. 不同燃油在 70 kPa, 1200 RPM (点火正时 20° BTDC) 时的燃烧质量分数分布图

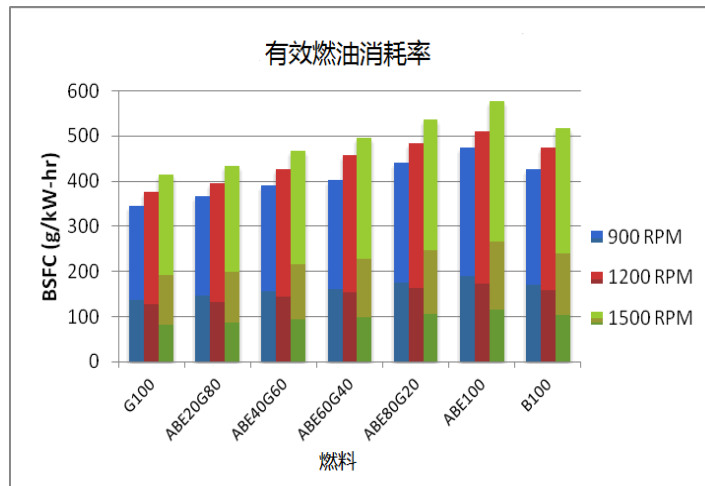


Figure 4. Different fuel effective specific fuel consumption (BSFC)
图 4. 不同燃料的有效燃油消耗率(BSFC)

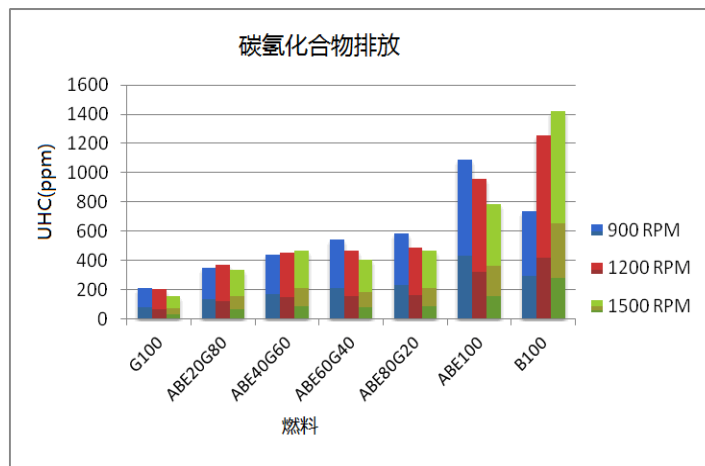


Figure 5. Different fuel unexploded hydrocarbon emissions
图 5. 不同燃料的未燃碳氢化合物排放

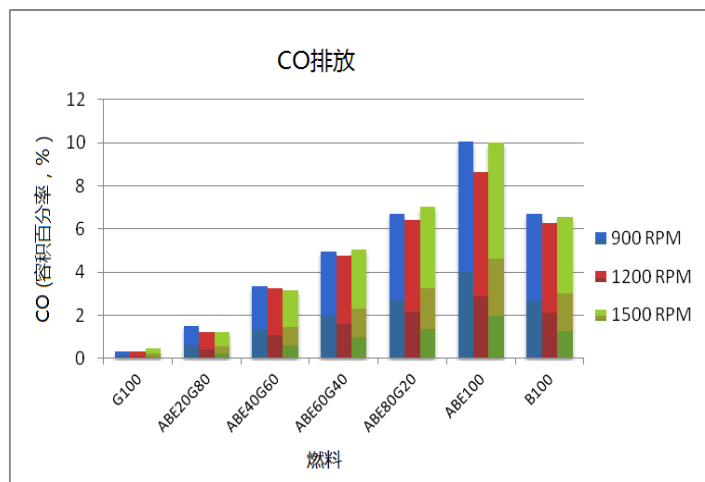


Figure 6. Carbon monoxide emissions of different fuels
图 6. 不同燃料的一氧化碳排放

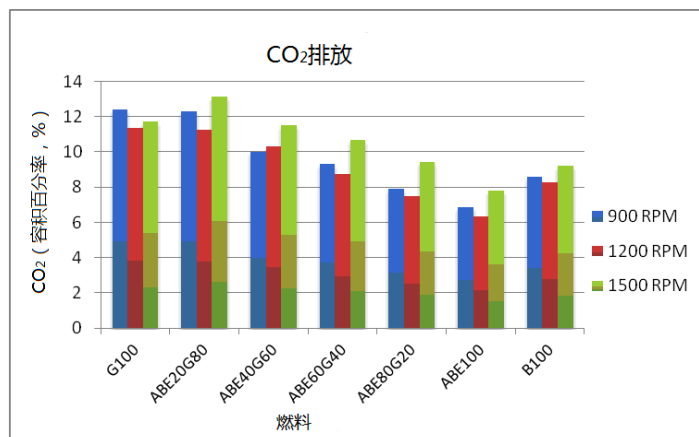


Figure 7. Different fuel CO₂ emissions
图 7. 不同燃料的 CO₂ 排放

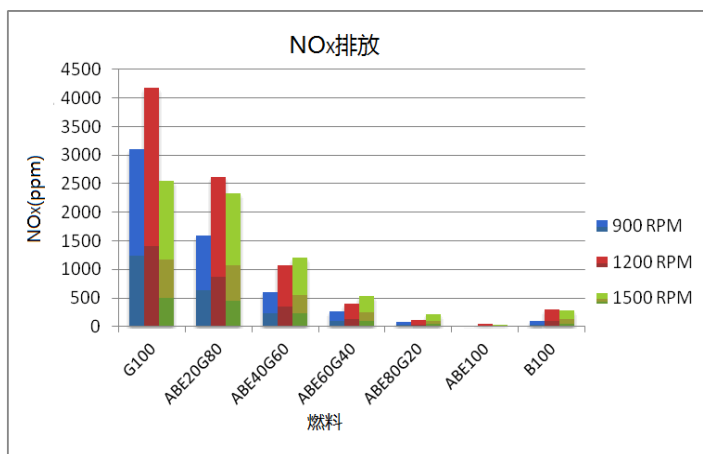


Figure 8. Different fuel NO_x emissions
图 8. 不同燃料的 NO_x 排放

NO_x大幅度减少, 仅体积分数为 20%的 ABE 就减少了近 40%的氮氧化物。纯 ABE 的 NO_x 排放量几乎为零, 相对于汽油减少近 99%的 NO_x, 相对于纯丁醇减少了 80%。这是由于汽化潜热高、热值较低的乙醇和丁醇引起的, 降低了缸内温度。

5. 结论

1) 缸内压力数据表明, 相对汽油机而言, 在 ABE 体积占 60%以前, 最高爆发压力会提前和升高, 然后降低和延迟。这是由于汽油的气化潜热较低, ABE 的层流火焰速度较高导致。ABE 混合物的 50% MFB 位置比汽油机要提前, 纯 ABE 的燃烧持续期比纯汽油要短。

2) 由于混合物中低能量成分的含量增多, 平均燃油消耗率 BSFC 会随 ABE 成分的增加而增加。

3) 排放数据显示: UHC 和 CO 稳定增加, 而 CO₂ 随 ABE 增加而持续减少, 表明燃烧不完全, 这是不恰当的燃烧相位造成的。纯 ABE 相对汽油而言, 可以减少 99% NO_x 的排放, 因为高汽化潜热导致低的绝热火焰温度。

综上所述, 纯 ABE 燃料可以在火花点燃式发动机中燃烧, NO_x 的排放极大降低。随着 ABE 燃烧相位最优化研究的深入, 其主要缺点可能克服, 因而得到汽油和 ABE 间的最佳混合比。

参考文献 (References)

- [1] 覃军, 刘海峰, 尧命发, 等 (2007) 生物含氧燃料成分对柴油机性能影响的试验研究. *内燃机学报*, **3**, 381 .
- [2] Kumar, S., Cho, J.H., Park, J. and Moon, I. (2013) Advances in diesel-alcohol blends and their effects on the performance and emissions of diesel engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **22**, 46-72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.017>
- [3] Kumar, M., Goyal, Y., Sarkar, A. and Gayen, K. (2012) Comparative economic assessment of ABE fermentation based on cellulosic and non-cellulosic feedstocks. *Applied Energy*, **93**, 193-204. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.079>
- [4] Rajasekar, E., Murugesan, A., Subramanian, R. and Nedunchezian, N. (2010) Review of NO_x reduction technologies in CI engines fuelled with oxygenated biomass fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 2113-2121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.005>
- [5] 庄幸, 姜克隽 (2008) 生物燃料在我国公路交通中替代油品潜力分析. 国家发改委能源研究所报告, 北京.
- [6] 刘娅, 刘宏娟, 张建安, 等 (2008) 新型生物燃料——丁醇的研究进展. *现代化工*, **28**, 28-31.
- [7] 杨小龙, 杨靖, 林铁平 (2010) 丁醇汽油对发动机性能影响的实验研究. *湖南大学学报(自然科学版)*, **37**, 32-35.
- [8] Williams, J. and Goodfellow, C. (2009) Impact of butanol and other bio-components on the thermal efficiency of prototype and conventional engines. SAE Technical Paper 2009-01-1908.
- [9] Chang, Y.-C., Lee, W.-J., Lin, S.-L. and Wang, L.-C. (2013) Green energy: Water containing acetone-butanol-ethanol diesel blends fueled in diesel engines. *Applied Energy*, **109**, 182-191. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.086>
- [10] Cairns, A., Stansfield, P., Fraser, N., Blaxill, H., Gold, M., Rogerson, J., *et al.* (2009) A study of gasoline-alcohol blended fuels in an advanced turbocharged DISI engine. SAE Technical Paper 2009-01-0138. <http://dx.doi.org/10.4271/2009-01-0138>