

# 燃用橡胶籽生物柴油柴油机的性能与排放特性

张建春<sup>1,2</sup> 金付强<sup>1</sup> 杨 儒<sup>1\*</sup> 李 敏<sup>1</sup> 郝新敏<sup>2</sup> 张 华<sup>2</sup>

(1. 北京化工大学 化工资源有效利用国家重点实验室, 北京 100029; 2. 总后勤部军需装备研究所, 北京 100088)

**摘 要:** 按体积比将 20% 的橡胶籽油生物柴油与 80% 的 -10<sup>#</sup> 柴油混合配制了 B20 生物柴油, 在 12150ZL 型涡轮增压柴油机和福田风景 BT6516B1DBA 型面包柴油车上研究了燃用 B20 时的外特性、负荷特性、万有特性以及自由加速烟度与排放特性。结果表明, 与燃用 -10<sup>#</sup> 柴油相比, 柴油机燃用 B20 时燃油消耗升幅不高于 1.7%, 而功率和转矩分别升高 0.16%~1.16% 和 0.07%~1.17%, 最大爆发压力变化不大, 并且排气温度和烟度值均有所降低。燃用 B20 有助于降低污染物排放, 与燃用 -10<sup>#</sup> 柴油相比, 自由加速烟度的净化率达 15.79%。

**关键词:** 生物柴油; 混合燃料; 柴油机; 燃料试验

**中图分类号:** TK464

## 引 言

生物柴油是以动植物油脂、废餐饮油等为原料制成的液体燃料, 是一种可以替代普通柴油的环保燃油<sup>[1-2]</sup>。它具有十六烷值高、硫含量低、芳香烃含量低、挥发性低和燃油分子中含氧原子等特点, 并以其良好的环境效益受到越来越多的关注<sup>[3]</sup>。目前, 我国研究者已对生物柴油汽车的道路试验和发动机动力性、经济性、排放特性、柴油机启动特性等方面进行了较为深入的研究<sup>[3-8]</sup>, 发现在柴油机中燃用生物柴油, 综合排放性能大幅度改善, 而动力性能变化不大, 油耗略有上升, 可以使用按一定比例与石化柴油复配的生物柴油来替代石化柴油。

不同来源和种类的生物柴油原料油具有不同的脂肪酸组成, 导致生物柴油的十六烷值、运动粘度、闪点和碘值等理化性能存在差异<sup>[1]</sup>, 从而影响燃用生物柴油的柴油机性能。本文将 20% 的橡胶籽油生物柴油与 80% 的 -10<sup>#</sup> 柴油混合配制了 B20 生物柴油, 研究了 12150ZL 型涡轮增压柴油机燃用 B20 的外特性、负荷特性和万有特性以及福田风景 BT6516B1DBA 型面包车燃用 B20 时的自由加速烟度和排放特性, 考察了 B20 在 12150ZL 型涡轮增压柴油机上的适用性。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料与设备

橡胶籽油, 以云南省西双版纳的橡胶籽为原料经冷榨工艺提取而得, 其酸值为 28.1 mgKOH/g, 经气相色谱-质谱联用分析得其脂肪酸组成为: 棕榈酸 10.28%, 硬脂酸 6.87%, 油酸 28.18%, 亚油酸 37.48%, 亚麻酸 17.08%; 无水甲醇为分析纯, 北京化工厂; -10<sup>#</sup> 柴油和 -35<sup>#</sup> 柴油加油站直接购买, 其理化指标列于表 1。

12150ZL 型涡轮增压柴油机, 标定功率 537 kW, 最大转矩 2992 N·m, 标定功率转速 2000 r/min, 最大转矩点转速 1200 r/min, 标定功率点燃油消耗率 238 g/kW·h; 福田风景 BT6516B1DBA 型面包车, 北汽福田汽车股份有限公司。

### 1.2 生物柴油的制备

橡胶籽油生物柴油 B100 是由橡胶籽油和甲醇经酸催化酯化、固体碱催化酯交换、精制而得到的混合脂肪酸甲酯。按体积比将 20% 的 B100 与 80% 的 -10<sup>#</sup> 柴油混合配制得生物柴油 B20。

### 1.3 台架试验

以 12150ZL 型涡轮增压柴油机为试验载体, 试验对象为 B20, 对比燃油为 -10<sup>#</sup> 柴油和 -35<sup>#</sup> 柴油。外特性试验: 外特性试验测量点为 2000 (标定点转速), 1800, 1600, 1400, 1200 (最大转矩点转速) 和 1000 r/min。负荷特性: 发动机分别在 2000, 1750 和 1200 r/min, 按 500 N·m 间隔逐渐降低负荷。主要测量参数: 柴油机转矩 (N·m), 功率 (kW), 转速

收稿日期: 2008-05-14

第一作者: 男, 1958 年生, 教授级高级工程师

\* 通讯联系人

E-mail: yangru@bbn.cn

表 1 B100、B20、-10<sup>#</sup>柴油和-35<sup>#</sup>柴油的理化指标Table 1 The properties of B100, B20, -10<sup>#</sup> diesel and -35<sup>#</sup> diesel

燃油	密度 (20℃)/ g·mL <sup>-1</sup>	w(硫)/ %	w(灰分)/ %	w(10%蒸 余物残 炭)/%	w(水)/ %	酸值/ mgKOH·g <sup>-1</sup>	运动粘度/ mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	冷滤点/ ℃	闪点 (闭口)/ ℃	十六烷 值	w(游离 甘油)/ %	w(总 甘油)/ %	90%回收 温度/ ℃
B100	881.0	0.009	0.011	0.25	0.003	0.22	4.059 <sup>a)</sup>	-1	150	49.6	0.016	0.02	353
B20	825	0.083	0.0026	0.0041	痕迹	0.014	4.168 <sup>b)</sup>	-10	83	50.5	—	—	321
-10 <sup>#</sup> 柴油	815	0.119	0.0022	0.0032	痕迹	0.013	4.043 <sup>b)</sup>	-9.5	85	50.9	—	—	289
-35 <sup>#</sup> 柴油	834.9	0.034	0.0010	0.020	痕迹	0.314	3.74 <sup>b)</sup>	-38	81	47.5	—	—	335
GB/T 20828	820~ 900	0.05/ 0.005	≤0.020	≤0.3	≤0.05	0.80	1.9~6.0 <sup>a)</sup>	报告	≥130	49	0.020	0.240	360
测试方法	GB/T 1884—00	SH/T 0253	GB/T 508—85	ASTM D4530	SH/T 0246—92	GB/T 264	ASTM D445	IP 309	ASTM D93	GB/T 386—91	ASTM D 6854—00	ASTM D 6854—00	GB/T 6536

a) 40℃测定值; b) 20℃测定值

(r/min),烟度(FSN),爆发压力(MPa),燃油消耗量(kg/h),燃油消耗率(g/(kW·h)),大气环境参数(气压、气温、湿度),柴油机油压、油温、水温等参数。

#### 1.4 自由加速烟度和污染物排放试验

试验用车为福田风景 BT6516B1DBA 型面包车,自由加速烟度检测按国标 GB/T14951—2007 和 JT/T306—2007 进行,M1 类车排放 I 型检测按国标 GB/T18352.3—2005 进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 橡胶籽油生物柴油的油品分析

表 1 列出了纯橡胶籽生物柴油 B100 的理化指标和国家相关标准以及橡胶籽生物柴油 B20 与 -10<sup>#</sup>柴油和 -35<sup>#</sup>柴油的特性指标。由表 1 可知,B100 各项理化指标均达到了国家标准《柴油机燃料

调合用生物柴油(BD100)》GB/T20828—2007,B20 与 -35<sup>#</sup>柴油相比,十六烷值和冷滤点较高;B20 与 -10<sup>#</sup>柴油相比,硫含量降低,馏程、残炭和灰分有所升高,其他性能指标相近。

生物柴油的十六烷值、运动粘度、闪点和碘值等物化性能与原料油的脂肪酸组成有关<sup>[9]</sup>。表 2 列出了橡胶籽油与一些其他原料油的脂肪酸组成及其生物柴油的性能指标,从表 2 可知,本文采用的橡胶籽油的脂肪酸组成中含有 17.15% 的饱和脂肪酸和 82.74% 的不饱和脂肪酸,与文献[10]相近。橡胶籽油与大豆油、葵花籽油、大麻籽油均含有较高的亚油酸,而菜籽油、水黄皮油和麻疯树油则含有较高的油酸,脂肪酸组成的差异直接导致了生物柴油性能的差异。由表 2 可见,橡胶籽油生物柴油的冷滤点为 -1℃,高于菜籽油生物柴油和大麻籽油生物柴油,

表 2 纯橡胶籽油生物柴油与其他原料油生物柴油的脂肪酸组成及其性能

Table 2 Fatty acid composition and properties of rubber seed oil biodiesel in comparison with other biodiesels

原料油	脂肪酸组成 $w/\%$						生物柴油物化指标				文献
	棕榈酸 C16:0	硬脂酸 C18:0	油酸 C18:1	亚油酸 C18:2	亚麻酸 C18:3	其他 脂肪酸	十六烷值	冷滤点/ ℃	闪点 (闭口)/℃	运动粘度(40℃)/ $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	
大豆油	11.0	4.0	23.4	53.2	7.8	0.6	58.1		160	4.00	[9]
水黄皮油	9.8	6.2	72.2	11.8	—	—	55.1		141	4.16	[9]
葵花籽油	4.8	5.7	20.6	66.2	0.8	1.9	55.6		180	4.10	[9]
棕榈油	40.3	3.1	43.4	13.2	—	—	54.6	12	135	4.50	[9]
麻疯树油	14.2	6.9	43.1	34.4	—	1.40	57.1	2	163	4.40	[9]
菜籽油	5.51	2.17	58.33	19.89	9.13	4.97	50.4	-9	165	4.15	[10]
大麻籽油	5.31	2.60	11.12	57.68	18.26	5.03	47.4	-9	111	4.23	[11]
橡胶籽油	10.2	8.7	24.6	39.6	16.3	0.6	—	—	130	5.81	[12]
橡胶籽油*	10.28	6.87	28.18	37.48	17.08	0.11	49.6	-1	150	4.059	

\* 本文采用的橡胶籽油

而低于棕榈油生物柴油和麻疯树油生物柴油,说明脂肪酸组成中的饱和脂肪酸含量高低决定生物柴油冷滤点的大小。橡胶籽油生物柴油的十六烷值低于以大豆油、水黄皮油、棕榈油、麻疯树油和菜籽油为原料制备的生物柴油。

## 2.2 燃用生物柴油 B20 的柴油机外特性

柴油机在 1000~2000 r/min 范围内,燃用橡胶籽生物柴油 B20、-10# 柴油和 -35# 柴油时的外特性曲线分别示于图 1~图 4。

### 2.2.1 动力性和经济性

图 1 为柴油机燃用 B20, -10# 柴油和 -35# 柴油时的功率、转矩和燃油消耗率对比。由图 1 可以

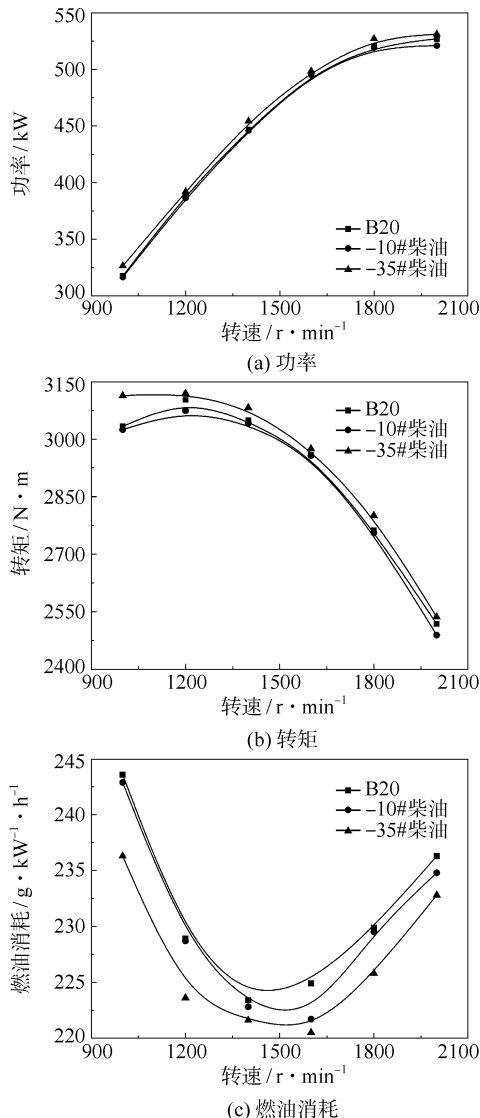


图 1 发动机外特性功率、转矩和燃油消耗对比

Fig.1 Power, torque and brake specific fuel consumption obtained from engine external performance tests using different fuels

看出,燃用生物柴油 B20 时柴油机的功率和转矩比燃用 -10# 柴油时略有升高,升幅分别为 0.16%~1.16% 和 0.07%~1.17%,表明动力性能略有提升。虽然生物柴油的热值低于普通柴油,可是生物柴油的密度、粘度较高,并且属于含氧燃料,有助于燃烧,使得掺混了生物柴油的 -10# 柴油燃烧更完全,促使转矩和功率提高。而柴油机燃用 -35# 柴油时的功率和转矩均比燃用 B20 和 -10# 柴油时高。

由图 1 还可以看出,燃用生物柴油 B20 时的燃油消耗高于燃用 -10# 柴油和 -35# 柴油时的燃油消耗,但升幅分别小于 1.7% 和 3.1%,可见在掺混生物柴油后经济性略有降低,这主要是因为生物柴油的热值比柴油低,相同质量的 B20 释放的能量比柴油低,导致燃用 B20 的燃油消耗升高。

### 2.2.2 最大爆发压力

图 2 示出了柴油机燃用 B20, -10# 柴油和 -35# 柴油时的最大爆发压力对比。由图可以看出,最大爆发压力均随转速的增大呈先降低后升高而后再降低的变化趋势。这是由于转速的增大会使循环供油量降低,在着火前形成的可燃混合气减少,从而使最大爆发压力减小。而在中等转速区,燃料燃烧比较完全,使最大爆发压力在 1600~1800 r/min 范围内随转速的增大而增大。

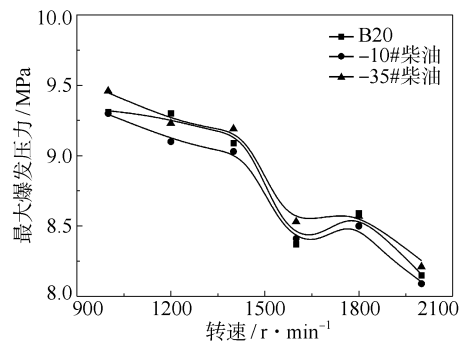


图 2 发动机外特性最大爆发压力对比

Fig.2 Maximum combustion pressure obtained from engine external performance tests using different fuels

由图 2 还可以看出,除在转速点 1600 r/min 外,燃用 B20 时的最大爆发压力均高于燃用 -10# 柴油时的最大爆发压力。这是由于生物柴油的十六烷值较高,在燃用 B20 时燃烧始点在工作转速范围内提前于燃用普通柴油,导致更多的燃料在上止点附近燃烧,从而使最大爆发压力升高。但是转速在 1600 r/min 附近时,B20 和 -10# 柴油均能够较充分的燃

烧,而生物柴油的热值较低,使得燃用 B20 时最大爆发压力稍低。可见, -10<sup>#</sup> 柴油添加 20% 的纯橡胶籽生物柴油后,提高了生物柴油燃烧爆发瞬间的爆发压力,而与燃用 -10<sup>#</sup> 柴油、-35<sup>#</sup> 柴油相比,其最大爆发压力变化不大,完全能保证柴油机的安全运行。

### 2.2.3 烟度

图 3 为柴油机燃用生物柴油 B20, -10<sup>#</sup> 柴油和 -35<sup>#</sup> 柴油时烟度随转速的变化情况。由图 3 可以看出,在各转速下,燃用 B20 时烟度值均小于燃用 -10<sup>#</sup> 柴油时的烟度值,说明 -10<sup>#</sup> 柴油中添加生物柴油能改善柴油的燃烧性能。这一方面是由于生物柴油中含芳香烃较少,一般芳香烃含量愈高的油,其烟度愈大;另一方面是因为生物柴油是高含氧燃料,其含氧量可以达到 10%,氧原子在燃料燃烧过程中起到了助燃作用,有利于降低碳烟的排放<sup>[5]</sup>。

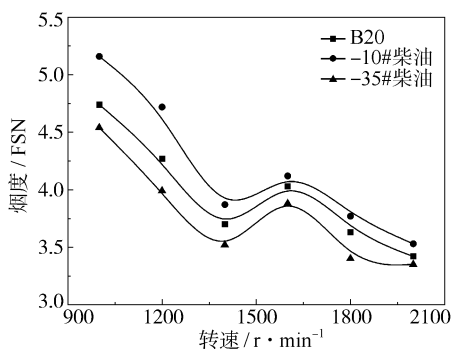


图 3 发动机外特性烟度对比

Fig. 3 Smoke densities obtained from engine external performance tests using different fuels

### 2.2.4 排气温度

图 4 为柴油机燃用 B20, -10<sup>#</sup> 柴油和 -35<sup>#</sup> 柴油时排气温度随转速的变化情况。由图可以看出,

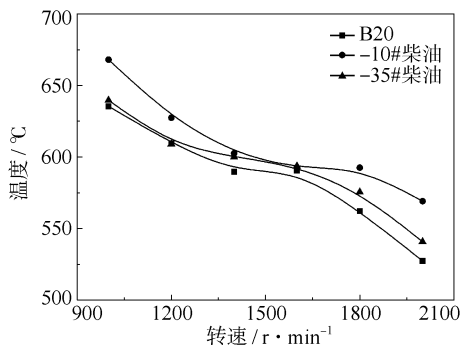


图 4 发动机外特性排气温度对比

Fig. 4 Exhaust gas temperature obtained from engine external performance tests using different fuels

排气温度均随转速增大呈下降趋势,这是由于转速的增大会使循环供油量降低,相对增大了过量空气系数,使燃料燃烧更完全,排气温度降低。而燃用 B20 时的排气温度低于 -10<sup>#</sup> 柴油和 -35<sup>#</sup> 柴油,表明燃用 B20 可以改善柴油机的热负荷。

### 2.3 燃用生物柴油 B20 的柴油机负荷特性

柴油机在 1200 r/min 和 2000 r/min 转速下,分别燃用 B20, -10<sup>#</sup> 柴油和 -35<sup>#</sup> 柴油时的燃油消耗示于图 5。由图 5 可以看出,除在测定点 (2000 r/min, 420 kW) 外,燃用 B20 的燃油消耗均高于燃用 -10<sup>#</sup> 柴油的燃油消耗,而在小功率 (<150 kW) 时和大功率 (>450 kW) 时两种燃油消耗较为接近,这是因为生物柴油的热值较低,将导致燃油消耗上升;生物柴油属于含氧燃料,其中的氧原子可以起到助燃作用,并且由于在小功率时和大功率时燃油消耗较大,使得这一作用更为显著,燃油消耗的增幅得以降低<sup>[5]</sup>。

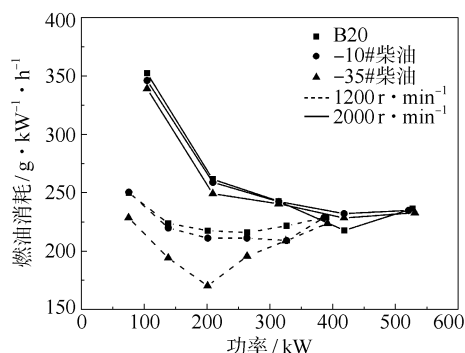


图 5 发动机负荷特性燃油消耗对比

Fig. 5 Specific fuel consumption obtained from engine load characteristic tests using different fuels

图 6 示出了柴油机燃用生物柴油 B20, -10<sup>#</sup> 柴油和 -35<sup>#</sup> 柴油时排气温度的对比。由图可以看

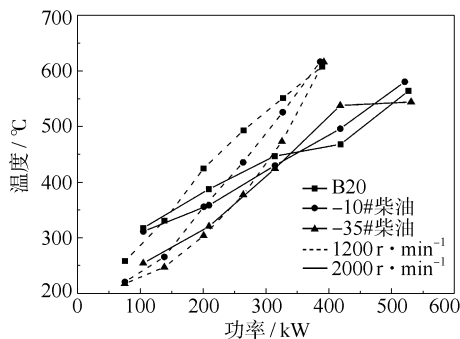


图 6 发动机负荷特性排气温度对比

Fig. 6 Exhaust gas temperature obtained from engine load characteristic tests using different fuels



出,排气温度均随功率增大呈上升趋势,在功率较大( $>300\text{ kW}$ )时,燃用 B20 时排气温度的上升随着转速和功率的增大而减缓。

#### 2.4 燃用生物柴油 B20 的柴油机万有特性

图 7 是万有特性曲线,可以看出,燃用 B20,  $-10^\#$  和  $-35^\#$  柴油时,最低等油耗线分别为 215, 210 和  $190\text{ g/kW}\cdot\text{h}$ 。燃用 B20 时,最佳经济工作区处于转速为  $1260\sim 1420\text{ r/min}$ 、转矩为  $1500\sim 2100\text{ N}\cdot\text{m}$  范围内,而燃用  $-10^\#$  柴油时处于转速为  $1210\sim 1470\text{ r/min}$ 、转矩为  $1330\sim 2170\text{ N}\cdot\text{m}$  范围内,燃用  $-35^\#$  柴油时处于转速为  $1000\sim 1290\text{ r/min}$ 、转矩为  $920\sim 1950\text{ N}\cdot\text{m}$  范围内,可见燃用  $-10^\#$  柴油时经济区范围较宽,燃用  $-35^\#$  柴油时最宽。

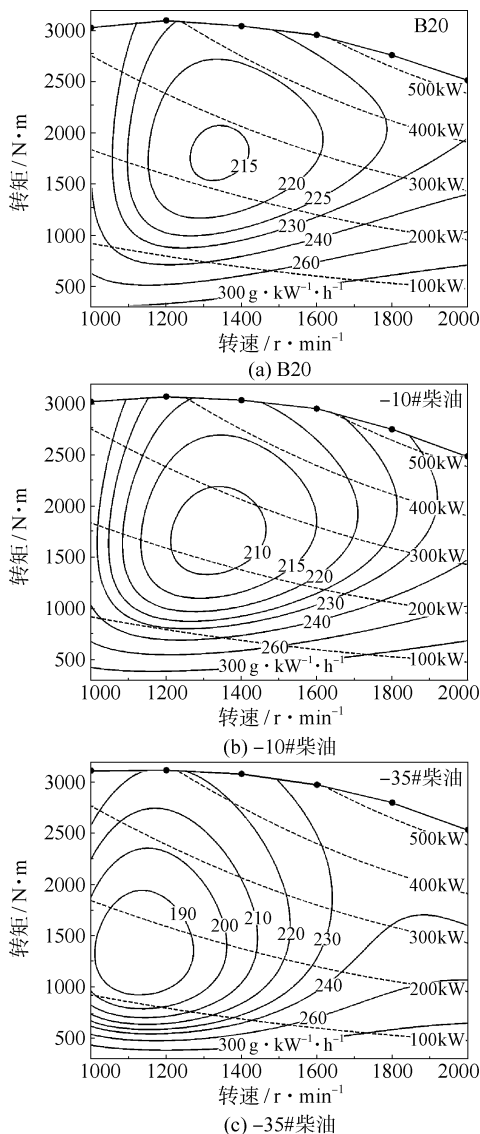


图 7 发动机万有特性

Fig.7 The universal characteristics of the engine

#### 2.5 燃用生物柴油 B20 的柴油机自由加速烟度和排放特性

表 3 列出了燃用 B20 和  $-10^\#$  柴油时自由加速烟度和 M1 类车排放 I 型的检测结果。从表 3 可知,燃用 B20 和燃用  $-10^\#$  柴油相比,自由加速烟度的净化率  $R_{KJ}$  达 15.79% (标准要求  $\geq 0$ )。燃用 B20 和燃用  $-10^\#$  柴油相比,CO 排放率降低 20.6%,颗粒物排放率降低 26.13%,HC 排放率降低 16.1%; $\text{NO}_x$  排放率呈增加趋势,增加幅度为 4.04%。结果表明,燃用 B20 能够显著改善柴油机自由加速烟度和污染物排放。

表 3 燃用 B20 和  $-10^\#$  柴油的自由加速烟度和污染物排放  
Table 3 Smoke emission at free acceleration and pollutant emission using B20 and  $-10^\#$  diesel

燃油	污染物排放量/ $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$					加速烟度/净化率/ $\text{m}^{-1}$ %	
	$\text{NO}_x$	HC	HC+ $\text{NO}_x$	CO	颗粒物	$\text{m}^{-1}$	%
$-10^\#$	1.955	0.23	2.19	1.04	0.15	0.76	—
B20	2.034	0.19	2.23	0.82	0.11	0.64	15.79

### 3 结论

(1) 与燃用  $-10^\#$  柴油相比,柴油机燃用 B20 时燃油消耗升幅不高于 1.7%,而功率和转矩分别升高 0.16%~1.16%和 0.07%~1.17%,烟度明显降低,排气温度和最大爆发压力均在发动机要求的正常范围内。

(2) 燃用 B20,  $-10^\#$  柴油和  $-35^\#$  柴油时,最低等油耗线分别为 215, 210 和  $190\text{ g/(kW}\cdot\text{h)}$ ,并且燃用 B20 时经济区范围比燃用  $-10^\#$  柴油时窄,燃用  $-35^\#$  柴油时最宽。

(3) 燃用 B20 可改善柴油机自由加速烟度和污染物排放,与燃用  $-10^\#$  柴油相比,自由加速烟度的净化率达 15.79%。

(4) B20 的整体性能优于  $-10^\#$  柴油,但略低于  $-35^\#$  柴油,B20 可以作为环保燃油以替代  $-10^\#$  柴油。

#### 参考文献:

- [1] Ma F R, Hanna M A. Biodiesel production: A review [J]. Bioresource Technology, 1999, 70(1): 1-15.
- [2] 梅德清,袁银南,王忠,等. 生物柴油燃料特性的研究[J]. 可再生能源, 2004, 117(5): 20-22.
- [3] 葛蕴珊,张世鹰,郝利君,等. 生物柴油在柴油机中

- 的应用研究[J]. 内燃机工程, 2004, 25(2): 12–14.
- [4] 葛蕴珊, 陆小明, 吴思进, 等. 车用增压柴油机燃用不同掺混比生物柴油的试验研究[J]. 汽车工程, 2005, 27(3): 278–280.
- [5] 袁银南, 江清阳, 孙平, 等. 柴油机燃用生物柴油的排放特性研究[J]. 内燃机学报, 2003, 21(6): 423–427.
- [6] 葛蕴珊, 陆小明, 高力平, 等. 废食用油生物柴油的制备及其掺烧时的动力与排放特性[J]. 环境科学, 2005, 26(3): 12–15.
- [7] 葛蕴珊, 何超, 韩秀坤, 等. 柴油机燃用生物柴油的多环芳香烃排放试验研究[J]. 内燃机学报, 2007, 25(2): 125–129.
- [8] 覃军, 刘海峰, 尧命发, 等. 生物含氧燃料成分对柴油机性能影响的试验研究[J]. 内燃机学报, 2007, 25(3): 281–287.
- [9] 金付强, 张建春, 杨儒, 等. 大麻籽油合成生物柴油[J]. 应用化学, 2007, 24(1): 100–104.
- [10] Ramadhas A S, Jayaraj S, Muraleedharan C. Biodiesel production from high FFA rubber seed oil[J]. Fuel, 2005, 84(4): 335–340.

## Performance and emission of diesel engine fuelled with rubber seed oil biodiesel

ZHANG JianChun<sup>1,2</sup> JIN FuQiang<sup>1</sup> YANG Ru<sup>1</sup> LI Min<sup>1</sup> HAO XinMin<sup>2</sup> ZHANG Hua<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Chemical Resource Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. The Quartermaster Institute of General Logistics Department of CPLA, Beijing 100088, China)

**Abstract:** Engine performance tests, including external, load and universal characteristics as well as smoke at free acceleration and pollutant emission were carried out on a 12150ZL turbo diesel engine and a BT6516B1DBA Futian-Fengjing microbus fuelled with B20 (a blend of 20% rubber seed oil biodiesel and 80% – 10<sup>#</sup> diesel). The results showed that the specific fuel consumption of the engine fuelled with B20 was increased by a maximum of 1.7%, compared with – 10<sup>#</sup> diesel. The power and the torque were increased by 0.16% – 1.16% and 0.07% – 1.17% respectively. The maximum combustion pressure did not change significantly. The exhaust gas temperature and the smoke density were decreased. The pollutant emission was decreased and the purification of the smoke at free acceleration was increased by up to 15.79%.

**Key words:** biodiesel; mixed fuel; diesel engine; fuel experiment