

柴油机燃用丁醇-柴油燃料的非常规排放特性

楼狄明, 樊晓旭, 张 涛, 范文佳

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 对某共轨柴油机燃用国 V 柴油(简称 D100)、丁醇-柴油混合燃料的 CO_2 , CH_4 , N_2O , SO_2 和醛类等非常规排放特性进行了研究. 在未对原机做任何改动的情况下, 分别燃用丁醇体积比为 0, 10%, 20%, 30% 和 50% 的 5 种丁醇-柴油混合燃料, 分析比较了不同丁醇-柴油比对发动机非常规排放的影响. 结果表明: 共轨柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料后, 在外特性下, 与 D100 相比, 各掺混比的混合燃料 CO_2 、 N_2O 、醛类和 SO_2 排放升高且均随着丁醇掺混比的增加呈升高趋势, CH_4 整体排放较低; 在最大转矩转速 $1\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 和额定转速 $2\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 负荷特性下, 与 D100 相比, 随着负荷的增加, 丁醇-柴油混合燃料 CO_2 、 N_2O 、醛类和 SO_2 排放升高, CH_4 排放放在 1.0×10^{-6} 以内.

关键词: 共轨柴油机; 丁醇-柴油混合燃料; 配比; 非常规排放

中图分类号: TK427

文献标志码: A

Unregulated Emission Characteristics of Common Rail Diesel Engine Fueled with Butanol-diesel Blends

LOU Diming, FAN Xiaoxu, ZHANG Tao, FAN Wenjia

(College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Unregulated emissions of CO_2 , CH_4 , N_2O , SO_2 and aldehydes were tested on a common rail China stage V diesel engine fueled with diesel (D100) and butanol-diesel blends. Without any modification to the engine, five different blends were tested to analyze the effect to unregulated emission by the ratio. The volume ratios of butanol were 0, 10%, 20%, 30% and 50% respectively. The results show that in comparison with D100, the blends' emission of CO_2 , N_2O , SO_2 and aldehydes increase and all of them present a trend of rise under the full load condition. With the ratio increasing, all of the fuels have a low emission of CH_4 . At the maximum torque speed $1\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ and rated speed $2\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, the

blends' emission of CO_2 , N_2O , SO_2 and aldehydes increase with the increasing of the load, CH_4 is below 1.0×10^{-6} .

Key words: common rail diesel engine; butanol-diesel blends; ratio; unregulated emissions

汽车行业的迅猛发展导致了石油的供不应求, 为缓解能源问题带来的压力, 人们开始研究替代燃料. 丁醇是一种清洁燃料, 具有较好的理化特性和燃烧特性^[1], 来源广泛, 与柴油互溶性好, 其含氧特性有利于降低柴油机 CO 和 HC 的排放, 在柴油中添加丁醇, 不仅可以降低常规排放物的含量, 而且可以缓解能源短缺问题带来的压力.

然而在柴油中添加丁醇虽然降低了常规排放污染物的含量, 却增加了非常规排放污染物(比如温室气体和醛类)的排放^[2]. 相关研究表明, 甲醇汽车排放与汽油车相比, 总醛排放增加 3~6 倍^[3].

目前多为丁醇-汽油非常规排放物的研究, 而对于丁醇-柴油混合燃料的非常规排放物, 如醛类、 SO_2 和 CO_2 等的研究较少, 但其对环境及人类健康的危害是不容忽视的^[4]: CO_2 , CH_4 等为温室气体, 产生温室效应, 导致全球变暖, 生态失衡; SO_2 和醛类为有毒气体, 威胁人类健康. 各国的大气排放法规中对醛类和 SO_2 排放均有明确规定, 欧盟已推行新的 CO_2 排放标准, 2012 年起在欧盟新售汽车的 CO_2 排放量上限设定为 $120\text{ g}\cdot\text{km}^{-1}$.

因此, 对丁醇-柴油混合燃料的非常规排放物进行研究是十分必要的. 发动机的非常规排放物有几十种, 本文选取 CO_2 , CH_4 , N_2O , SO_2 和醛类等主要非常规排放物作为研究对象, 在某共轨柴油机上燃用国 V 柴油和不同掺混比的丁醇-柴油混合燃料对其排放规律进行了试验研究^[5].

收稿日期: 2013-04-12

基金项目: 上海市科委科技攻关项目(10dz1210400)

第一作者: 楼狄明(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为柴油机替代燃料与性能优化.

E-mail: loudiming@tongji.edu.cn

1 试验设备和燃料特性

1.1 试验柴油机和测试设备

试验样机为一台四冲程、直列增压中冷、电控高压共轨 6 缸柴油发动机,排量 8.82 L,压缩比为 17.3,额定功率 184 kW,额定转速 $2\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,最大扭矩转速 $1\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,满足国 V 排放标准。

本研究采用 AVL PUMA 全自动试验台,发动机的转速-转矩运行范围由 AVL PUMA 发动机全自动电涡流测功机控制,非常规气体排放由 AVL-PEUS 多组分排放仪测量,AVL-PEUS 多组分排放仪由未稀释废气的浓度测量装置 PEGASys FTIR 和体积流量测量装置 PEGAS VVS 两个部件组成,特别适用于满足 ULEV 和 EU4/EU5 排放标准发动机非常规排放的在线测量。

1.2 试验燃料

燃料为国 V 柴油(D100)和丁醇体积比分别为 10%,20%,30%,50%的丁醇-柴油混合燃料(Bu10, Bu20, Bu30, Bu50)。表 1 为燃料的主要理化特性。

表 1 试验燃油的主要理化特性

Tab.1 Physicchemical property of the test fuel

燃油	十六烷值	低热值/ (MJ·kg ⁻¹)	质量分数/%			
			碳	氢	氧	硫
D100	52.3	43.88	86.12	13.84	0.35	$<1\times 10^{-4}$
Bu10	47.8	42.62	83.85	14.08	2.07	4×10^{-4}
Bu20	42.6	41.32	81.98	13.62	4.40	7×10^{-4}
Bu30	37.3	40.42	80.10	13.16	6.73	10×10^{-4}
Bu50	28.6	37.76	75.74	14.26	9.99	13×10^{-4}

1.3 试验方法

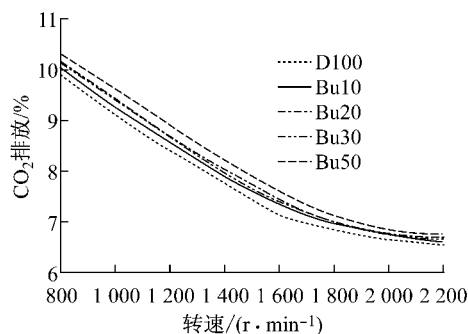
针对上述 5 种试验燃油,进行柴油机外特性试验和负荷特性试验。其中:① 外特性试验——在发动机工作转速范围内,保持油门开度全开,由高到低依次改变转速,测量工况点包括 800,1 000,1 200,1 400,1 600,1 800,2 000,2 200 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。② 负荷特性试验——在额定转速 $2\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 和最大扭矩转速 $1\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下,负荷分别取 25%,50%,75%和 100%。

2 试验结果与分析

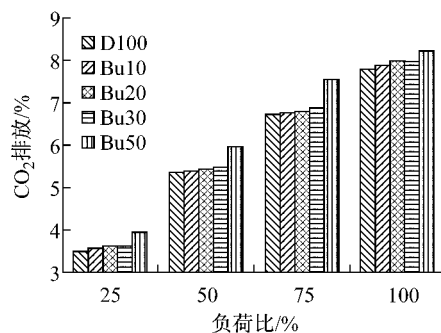
2.1 不同丁醇含量对柴油机 CO₂ 排放的影响

图 1 为柴油机燃用不同掺混比的丁醇-柴油混合燃料,在外特性以及最大扭矩转速 $1\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 和额定转速 $2\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 负荷特性下,CO₂ 排放

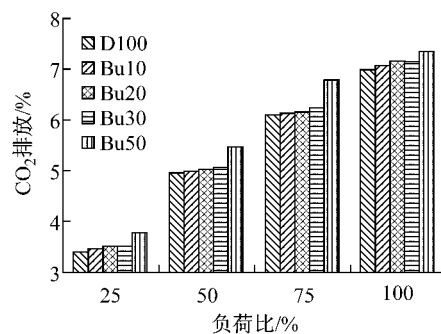
的变化规律。



a 外特性



b 最大扭矩转速 $1\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$



c 额定转速 $2\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$

图 1 柴油机不同工况下的 CO₂ 排放

Fig.1 CO₂ emission of different fuels

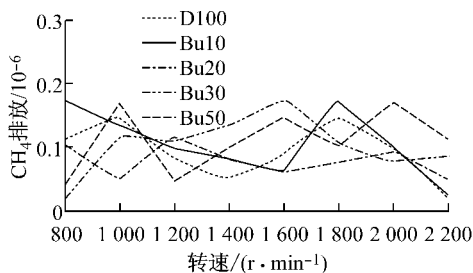
由图 1a 可知,在外特性下,随着发动机转速的升高,不同比例丁醇-柴油混合燃料的 CO₂ 排放逐渐降低,以 Bu50 为例,其在 $2\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的 CO₂ 排放量比 $800\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时降低了 34.4%。同一转速下,随着丁醇比例的升高,丁醇-柴油混合燃料的 CO₂ 排放整体呈升高趋势。CO₂ 是燃料完全燃烧的产物之一^[6],由于丁醇低密度低热值的特点导致混合燃料的比油耗和循环油耗量升高,且随着丁醇含量的增加不断升高,由于丁醇的含氧特性使燃烧更加充分,从而导致 CO₂ 排放升高。

由图 1b,1c 可知,在负荷特性下,随着负荷的升高,各种燃料的 CO₂ 排放逐渐升高,且随着丁醇含量的升高呈升高趋势。以最大扭矩转速 $1\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$

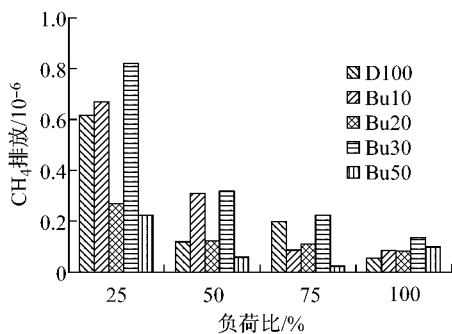
为例,与 D100 相比,燃用 Bu50 的 CO_2 排放平均升幅为 9.2%。由于丁醇的热值较低,在相同转矩下,丁醇-柴油混合燃料的油耗高于 D100,且随着丁醇掺混比的增加而升高,导致 CO_2 排放量升高。

2.2 不同丁醇含量对柴油机 CH_4 排放的影响

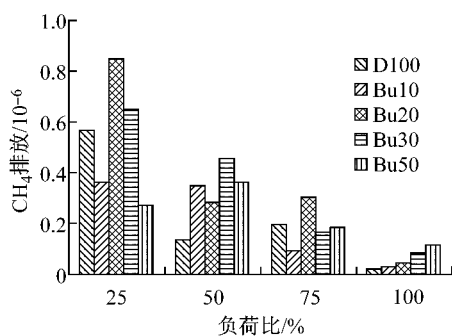
图 2 为柴油机燃用不同掺混比的丁醇-柴油混合燃料,在外特性以及最大转矩转速 $1\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 和额定转速 $2\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 负荷特性下, CH_4 排放的变化规律。



a 外特性



b 最大转矩转速 $1\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$



c 额定转速 $2\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$

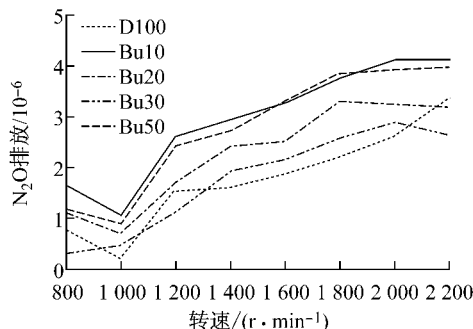
图 2 柴油机不同工况下的 CH_4 排放

Fig.2 CH_4 emission of different fuels

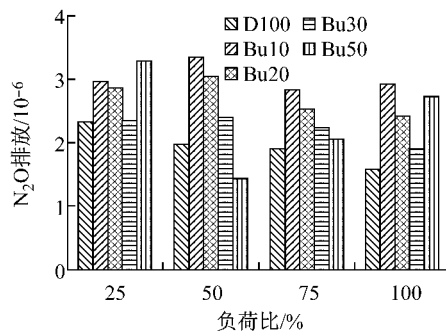
由图 2 可知,在外特性和负荷特性下,随着发动机转速和负荷的变化,各种燃料的 CH_4 排放水平整体较低,均在 1.0×10^{-6} 内变动;随着负荷的升高,各燃料的 CH_4 排放降低,这是由于低负荷时,缸内稀燃低温有利于 CH_4 排放的生成。

2.3 不同丁醇含量对柴油机 N_2O 排放的影响

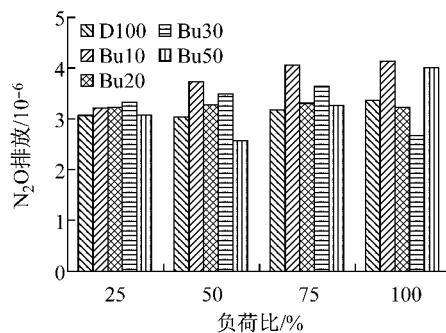
柴油机的 NO_x 排放中绝大部分为 NO ,约占整个 NO_x 排放的 98.1%, NO_2 约占 1.8%, N_2O 约占 0.1%,虽然 N_2O 排放量较少,但由于它是温室气体,会对环境造成有害影响。图 3 为柴油机燃用不同掺混比的丁醇-柴油混合燃料,在外特性以及最大转矩转速 $1\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 和额定转速 $2\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 负荷特性下, N_2O 排放的变化规律。



a 外特性



b 最大转矩转速 $1\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$



c 额定转速 $2\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$

图 3 柴油机不同工况下的 N_2O 排放

Fig.3 N_2O emission of different fuels

由图 3a 可知,在外特性下,随着转速的增大,各种燃料的 N_2O 排放逐渐升高,丁醇-柴油混合燃料的 N_2O 排放和 D100 变化趋势一致,但排放量有所升高。由图 3b,3c 可知,在负荷特性下,各种丁醇-柴油混合燃料的 N_2O 排放浓度很低,最大值不超过 4.14×10^{-6} ,丁醇-柴油混合燃料平均排放量和

D100 相比有所升高,以额定转速 $2\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 为例,各比例丁醇-柴油和 D100 相比 N_2O 排放量平均升幅为 19.43%,2.81%,3.43% 和 1.86%。丁醇的汽化潜热较高,蒸发过程进行较慢,缸内燃烧温度较低,燃料雾化较差,是生成微量 N_2O 的原因。

2.4 不同丁醇含量对柴油机醛类排放的影响

醛类是醇类替代燃料的重要非常规排放之一,虽然整体排放量较少,但却对环境对人类造成很大的伤害。图 4 为柴油机燃用不同掺混比的丁醇-柴油混合燃料,在外特性以及最大转矩转速 $1\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 和额定转速 $2\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 负荷特性下,醛类排放的变化规律。

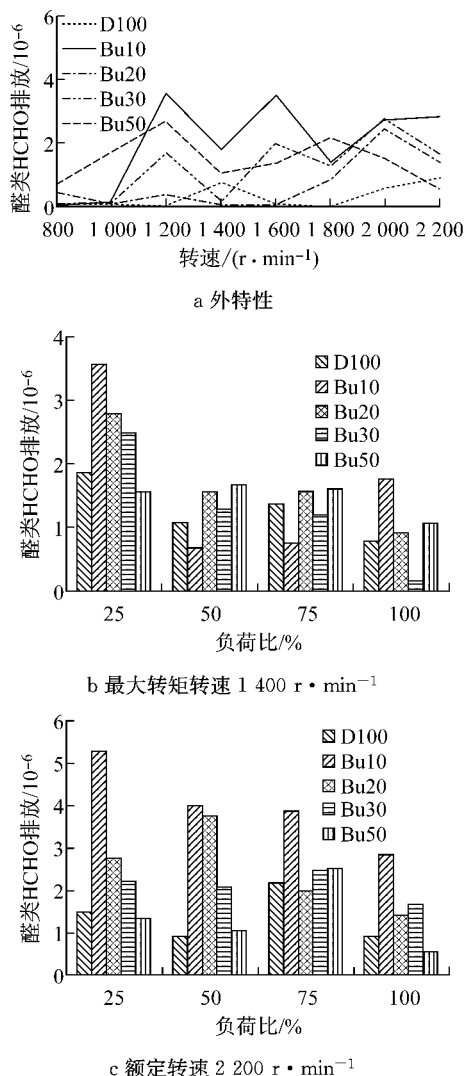


图4 柴油机不同工况下的醛类排放

Fig.4 Aldehydes emission of different fuels

由图 4a 可知,在外特性下,随着发动机转速的升高,各种燃料的醛类排放整体较低,最大不超过 4.57×10^{-6} ,掺混丁醇后发动机的醛类排放增加,丁醇-柴油和 D100 相比平均升高幅度在 135.84%~

628.51%之间。

由图 4b,4c 可知,在负荷特性下,各种丁醇-柴油混合燃料的醛类排放浓度很低,最大值不超过 5.29×10^{-6} 。丁醇-柴油混合燃料的醛类排放与 D100 相比略有升高,其原因一方面由于丁醇的汽化潜热较柴油高,蒸发过程较慢,缸内燃烧温度较低,燃料雾化较差,未燃 HC 排放增加,有利于醛类物质的形成^[7];另一方面,丁醇含氧,促进了气缸和排气系统中未燃 HC 的部分氧化,醛类排放增加。此外,随着丁醇-柴油混合燃料中丁醇含量的增加,燃烧过程中相当量的醇类被氧化成了醛类,也导致了醛类排放的增加。

2.5 不同丁醇含量对柴油机 SO_2 排放的影响

图 5 为柴油机燃用不同掺混比的丁醇-柴油混合燃料,在外特性以及最大转矩转速 $1\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 和额定转速 $2\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 负荷特性下, SO_2 排放的变化规律。

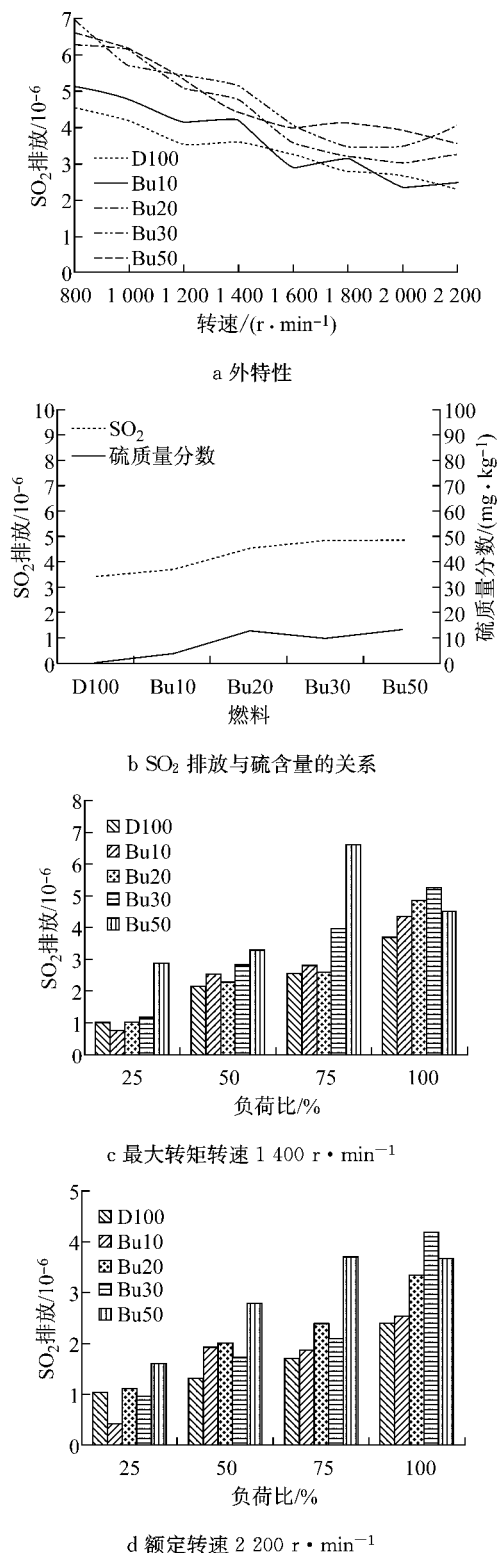
由图 5a 可知,在外特性下,随着转速的增加,各比例的丁醇-柴油混合燃料的 SO_2 排放呈降低趋势。与 D100 相比,随着丁醇-柴油混合燃料中丁醇含量的增加, SO_2 排放升高且整体呈上升趋势。Bu10 和 Bu50 和 D100 相比 SO_2 排放量平均升幅分别为 8.43% 和 41.99%,与图 5b 中丁醇-柴油混合燃料的硫含量曲线趋势一致。

由图 5c,5d 可知,在负荷特性下,随着负荷的升高,各种燃料的 SO_2 排放量逐渐升高,这是由于喷入缸内燃油量增加,硫含量升高, SO_2 排放量升高;与 D100 相比,随着丁醇含量的增加,丁醇-柴油混合燃料的 SO_2 排放升高,与外特性的变化趋势一致。其中,最大转矩转速 $1\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下,Bu10,Bu30,Bu50 和 D100 相比 SO_2 排放量平均升幅为 31.55%,67.20% 和 118.76%,与图 5b 中燃料的硫含量曲线一致。

3 结论

(1)与 D100 相比,柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料的 CO_2 排放升高。在外特性下,随着发动机转速的升高,不同比例丁醇-柴油替代燃料的 CO_2 排放逐渐降低,且随着丁醇比例的升高而整体呈升高趋势。在负荷特性下,随着负荷的升高 CO_2 排放逐渐升高,随着丁醇含量的升高,混合燃料的 CO_2 排放增高。

(2)与 D100 相比,柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料的 CH_4 排放相差不大,均在 1.0×10^{-6} 内变动;在

图5 柴油机不同工况下的 SO_2 排放Fig.5 SO_2 emission of different fuels

负荷特性下,各种燃料的 CH_4 排放随着负荷的升高呈降低的趋势。

(3)与 D100 相比,柴油机燃用丁醇-柴油混合燃

料的 N_2O 排放略有升高。在外特性下,随着转速的升高各种燃料的 N_2O 排放逐渐升高,丁醇-柴油混合燃料的 N_2O 排放量和 D100 相比有所升高;在负荷特性下,各种丁醇-柴油混合燃料的 N_2O 排放浓度很低,最大值不超过 4.14×10^{-6} 。

(4)柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料的醛类平均排放量和 D100 相比有所升高。在外特性下,各种燃料的醛类排放整体排放水平较低,最大不超过 4.57×10^{-6} ;在负荷特性下,各种丁醇-柴油混合燃料的醛类排放浓度很低,最大值不超过 5.29×10^{-6} 。

(5)与 D100 相比,柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料 SO_2 排放升高。在外特性下,随着丁醇含量的增加,丁醇-柴油混合燃料的 SO_2 排放整体呈上升趋势。在负荷特性下,随着负荷的增加, SO_2 排放量逐渐上升。

参考文献:

- [1] JIN Chao, YAO Mingfa, LIU Haifeng, et al. Progress in the production and application of n-butanol as a bio-fuel [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(8): 4080.
- [2] 朱天乐,王建昕,傅立新,等. 掺混乙醇对汽油机排放和三效催化转化器性能的影响[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 42(12): 1609.
- [3] 周芹. 室内空气中甲醛的危害及测定方法[J]. 湖北化工, 2002(5): 47.
- [4] ZHOU Qin. Physical harm and determination of formaldehyde in indoor air [J]. Hubei Chemical Industry, 2002(5): 47.
- [5] Sawyer R F, Harley R A, Cadle S H, et al. Mobile sources critical review: 1998 NARSTO assessment [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34: 2161.
- [6] 范文佳. 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料的数值模拟与试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2013.
- [7] FAN Wenjia. A Study of a diesel engine fueled with butanol-diesel blends on numerical stimulation and test-bed [D]. Shanghai: Tongji University, 2013.
- [8] 王晓薇,夏峥. 浅析稀薄燃烧与汽油机的排放[J]. 移动电源与车辆, 2001(3): 12.
- [9] WANG Xiaowei, XIA Zheng. The study for external combustion engine question in mobile electric power plant [J]. Movable Powerstation & Vehicle, 2001(3): 12.
- [10] Wallner T, Miers S A, McConnell S. A comparison of ethanol and butanol as oxygenates using a direct-injection spark-ignition engine[J]. Journal of Engineering of Gas Turbines and Power, 2009, 131(3): 032802.