

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.005

流速和氧浓度对乙醇氧化生成醛排放的影响*

刘方杰¹ 刘圣华² 魏衍举² 徐斌¹ 吴健¹ 马志豪¹

(1. 河南科技大学车辆与交通工程学院, 洛阳 471003; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 西安 710049)

摘要: 利用发动机排气温度环境和气相色谱-氢离子化检测器(PDHID)快速检测方法,在醇类燃料流反应器中研究了流速和氧浓度对乙醇氧化生成乙醛、甲醛排放的影响。研究表明:温度为733~933 K时乙醇质量浓度随流速增加而增加,乙醇氧化需要有氧环境,富氧环境有利于乙醇氧化。温度低于833 K时延长乙醇氧化反应时间会导致乙醛、甲醛排放量增加,温度高于833 K时延长乙醇氧化反应时间有利于降低乙醛、甲醛排放量,温度高于933 K时流速对乙醛的生成和氧化影响较小。无氧环境下乙醛、甲醛的生成和氧化反应受到抑制,低于临界温度时富氧环境促进乙醛、甲醛生成,高于临界温度时富氧环境有利于乙醛氧化。

关键词: 乙醇 醛排放 流速 氧浓度 气相色谱仪

中图分类号: TK46⁺4; TK411⁺.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)08-0027-06

引言

乙醇具有辛烷值高、抗爆性好、含氧量高、燃烧清洁、可再生等优点使其成为一种优良燃料和燃油品质改善剂,美国、巴西、欧洲等积极发展并广泛应用燃料乙醇。目前,我国已在多个省市推广使用燃料乙醇,随着乙醇燃料汽车的推广应用,未燃醇、醛排放问题逐步引起了人们的重视,成为乙醇燃料发动机的研究热点之一^[1-6]。目前对于乙醇燃料发动机的非常规醇醛排放研究主要集中在醇醛排放检测方法^[7-10]与发动机负荷、转速^[11-12]、燃料掺混比^[13]等参数的变化对醇醛排放的影响以及催化剂前后^[14-15]醇醛排放量对比等,而对于未燃乙醇在发动机排气管后氧化过程中的醛排放生成机理未进行深入研究。乙醇燃料发动机的醇醛排放受到发动机负荷和转速的影响^[15],负荷和转速的改变影响醇、醛在高温排气中的反应时间,而发动机负荷和转速对醇、醛在高温排气中的反应时间影响较为复杂,另外,排气管中氧浓度对醇、醛氧化较为重要,因此,本文在醇类燃料流反应器试验台上,研究流速和氧浓度对乙醇氧化、乙醛和甲醛生成及氧化的影响。

1 试验装置和试验方法

1.1 试验装置和方法

设计搭建的醇类燃料流反应器试验台如图1所示,

考虑到换热问题,流反应器选用304不锈钢管,流反应器外径为3 mm,壁厚为0.2 mm,长度为100 cm。将流反应器置于发动机排气管中,利用排气管内高温排气以对流换热方式对流反应器进行加热,通过调节发动机负荷和转速,控制流反应器所在发动机排气管段的排气温度即可控制流反应器的温度,使流反应器内温度达到试验要求的高温环境。采用乙醇标准气在流反应器中氧化来研究乙醇汽油发动机排气管中未燃乙醇的后氧化过程。

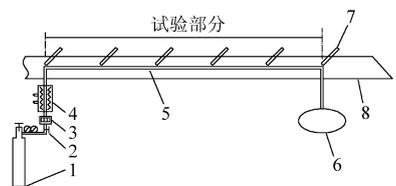


图1 乙醇氧化试验系统简图

Fig. 1 Schematic diagram of ethanol oxidation

1. 乙醇标准气
2. 针阀
3. 流量计
4. 预热器
5. 流反应器
6. 采样袋
7. 温度传感器
8. 发动机排气管

乙醇标准气质量浓度为180 $\mu\text{g/L}$,流反应器长度为100 cm,所用温度见1.2节所述。研究流速对醇、醛氧化的影响时,乙醇标准气过量空气系数 $\Phi_a = 1.0$,在恒温环境下研究流速对醇、醛氧化的影响,参照发动机不同工况下的排气流速,标准气流速设定为5、10、15、20和25 m/s,通过流量计控制标准气在流反应器中的流速,流速反映标准气在流反应

收稿日期: 2013-08-10 修回日期: 2013-09-11

* 国家自然科学基金资助项目(50876088)、河南科技大学青年科学基金资助项目(2013QN002)和河南科技大学博士科研启动资金资助项目(09001719)

作者简介: 刘方杰,讲师,博士,主要从事内燃机代用燃料燃烧与排放研究,E-mail: liufangjie2012@gmail.com

器中的反应时间。研究氧浓度对醇、醛氧化的影响时,采用过量空气系数分别为 0、0.9、1.0 和 1.1 4 种乙醇标准气,流速选取 5 m/s 和 15 m/s。待发动机排气管温度稳定后,将乙醇标准气通入流反应器内,采用 1 L 聚氟乙丙烯(FEP)采样袋在流反应器出口端采样,采样袋无吸附,满足试验要求。用日本岛津 GC-2010 型气相色谱仪配 Gs-OxyPLOT 毛细柱和脉冲放电氦离子化检测器^[16]进行检测,通过对 3 次试验结果分析,研究发现 3 次试验结果没有出现大的试验误差,试验数据采用 3 次试验结果平均值。流反应器密封性良好,发动机排气成分对流反应器内乙醇氧化不产生影响。

1.2 流反应器内温度变化特性

流反应器内通入乙醇标准气时,标准气温度由常温升至高温需要一个升温过程,为缩短标准气升温所需时间,通入流反应器之前将乙醇标准气预先加热至 300 °C,采用外径为 0.4 mm 的 K 型热电偶测量不同流速下流反应器不同位置的温度。图 2 给出入口温度为 833 K 时流反应器内不同流速下的温度变化曲线,流速为 0 m/s 时流反应器内温度和排气温度相同。流速为 5 m/s 时,乙醇标准气在流反应器前 6 cm 有一个升温过程,在 6 cm 处乙醇标准气温度与排气温度相同,此温度定义为乙醇标准气所达到的温度最大值(T_{\max}),随后温度随流反应器长度增加而降低。随流速增加,流反应器内标准气升温过程需要的时间和长度逐渐增加,流反应器入口温度相同时标准气温度最大值随流速增加而降低。图 3 为流反应器内乙醇标准气温度最大值(T_{\max})随流速的变化曲线,温度最大值随流速增加而降低。研究氧浓度对醇醛氧化的影响时所用温度为变温环境不同流速下乙醇标准气在流反应器内所达到的温度最大值。研究流速影响时采用恒温环境,所用温度分别为 733、783、833、883、933 和 983 K,恒温环境下流反应器内标准气温度不变。通过对发动机排气管隔热保温,在发动机工况稳定后,可以实现放置流反应器排气管试验段恒温。如去除保温层,则该段就是发动机实际的排气变温环境。

2 试验结果与分析

2.1 乙醇氧化特性

2.1.1 流速对乙醇氧化的影响

图 4 为恒温环境下流速对乙醇氧化的影响。乙醇质量浓度随流速增加而增加,流速增加缩短了乙醇在高温下的反应时间,乙醇氧化反应受到反应时间制约,流速为 25 m/s 时乙醇质量浓度比流速为

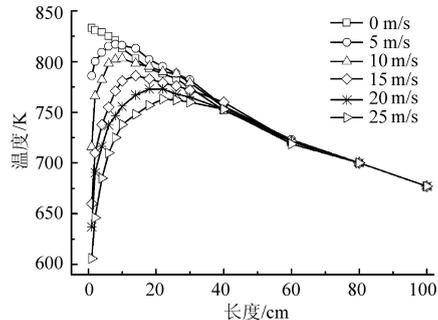


图 2 入口温度为 833 K 时不同流速下温度变化曲线

Fig. 2 Temperature profiles along flow reactor (entrance temperature 833 K)

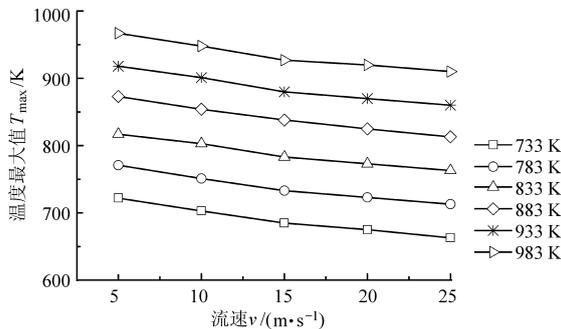


图 3 流反应器内温度最大值(T_{\max})随流速的变化曲线

Fig. 3 Effects of velocity on maximum temperature in flow reactor

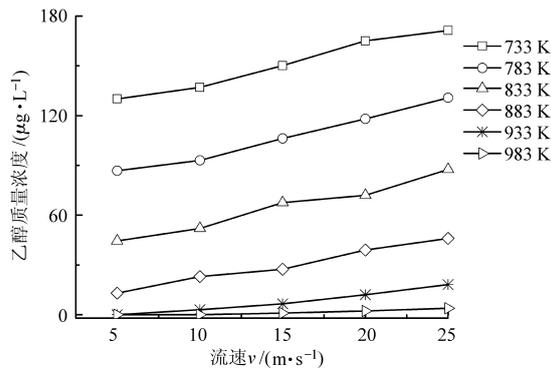


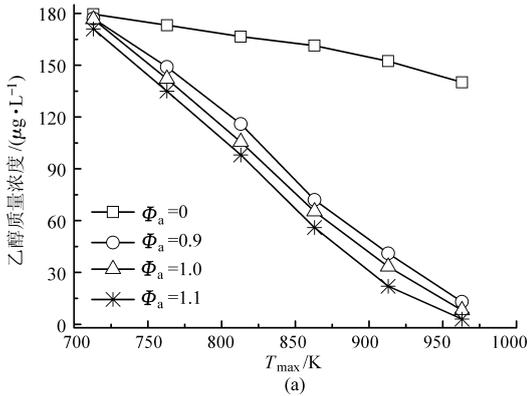
图 4 恒温环境下流速对乙醇氧化的影响

Fig. 4 Effects of velocity on ethanol oxidation at constant temperature environment

5 m/s 时平均高约 40 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。温度高于 933 K 时乙醇质量浓度受流速的影响减小,温度高于 933 K 时乙醇氧化反应速率较大,乙醇主要通过反应: $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + \text{OH} = \text{CH}_3\text{CH}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$ 快速氧化,乙醇氧化主要受温度影响。因此,温度为 733 ~ 933 K 时,延长乙醇氧化反应时间有利于降低乙醇排放,温度高于 933 K 时乙醇氧化主要受温度影响,流速是次要因素。因此,排气温度高于 733 K 时,对排气管隔热保温改造,利用排气余热使发动机排气管保持一段高温环境,以便在发动机排气进入三效催化器之前大幅降低未燃醇、醛排放,避免因未燃乙醇的氧化导致醛排放的增加。

2.1.2 氧浓度对乙醇氧化的影响

图 5 为变温环境下过量空气系数对乙醇氧化的影响。乙醇质量浓度随过量空气系数 Φ_a 增加而降低。当过量空气系数 $\Phi_a = 0$ 时, 无氧环境下乙醇氧化反应受到抑制, 高温环境下乙醇质量浓度缓慢降低, 流速为 5 m/s 时乙醇质量浓度由 180 $\mu\text{g/L}$ 降至 140 $\mu\text{g/L}$, 无氧环境下缺少自由基, 化学链反应不能



快速传播, 乙醇氧化需要有氧环境。有氧环境下 $\Phi_a = 0.9 \sim 1.1$ 时, 乙醇质量浓度随过量空气系数增加而降低, 富氧环境下 OH、HO₂ 等自由基浓度较高, 乙醇与羟基 OH 反应产生重要的中间产物 CH₃CH₂O、CH₃CHOH 和 C₂H₄OH, 与 HO₂ 反应产生 CH₃CHOH 和 H₂O₂^[17], 高温下化学链反应快速传播, 富氧环境有利于乙醇氧化。

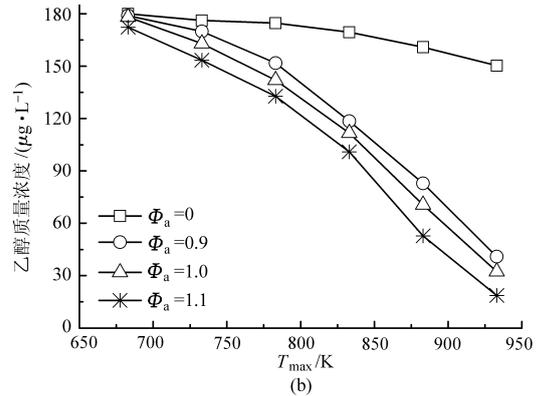


图 5 不同过量空气系数下乙醇质量浓度随温度的变化曲线

Fig. 5 Effects of excess air coefficient on ethanol oxidation

(a) 流速为 5 m/s (b) 流速为 15 m/s

2.2 乙醛生成和氧化特性

2.2.1 流速对乙醛生成和氧化的影响

图 6 为恒温环境下流速对乙醛质量浓度的影响。温度低于 833 K 时乙醛质量浓度随流速增加而降低, 此温度区间乙醛的生成反应速率大于其氧化反应速率, 乙醛以生成为主, 随流速增加, 乙醇在高温下氧化反应时间缩短, 乙醛的生成反应受到制约, 因此乙醛质量浓度随流速增加而降低。高于 833 K 时乙醛质量浓度随流速增加而增加, 乙醛的生成和氧化反应速率随温度升高而增大, 乙醛生成期缩短, 生成乙醛的反应路径随乙醇浓度降低而减少, 高温下乙醛氧化反应占据优势, 流速增加缩短了乙醛的氧化反应时间, 不利于乙醛氧化。温度高于 933 K 时流速对乙醛影响明显减小, 高温下乙醛快速氧化, 流速对乙醛影响不大。因此, 温度高于 833 K 时延长乙醇和乙醛在高温下的反应时间有利于降低乙醛排放量, 低于 833 K 时延长乙醇氧化反应时间会导致乙醛排放增加。

2.2.2 氧浓度对乙醛氧化的影响

乙醇脱氢产生的中间产物 CH₃CHOH 和 CH₃CH₂O 氧化生成乙醛, 乙醛的主要生成反应为: CH₃CHOH + O₂ = CH₃HCO + HO₂ 和 CH₃CH₂O + M = CH₃HCO + H + M, 生成的乙醛主要与 OH、HO₂ 等自由基反应, 乙醛的主要氧化反应为: CH₃HCO + HO₂ = CH₃CO + H₂O₂, CH₃HCO + OH = CH₂HCO + H₂O 和 CH₃HCO + OH = CH₃ + HCOOH^[17], 乙醛的生成和氧化反应受氧浓度和自由基浓度的影响。图 7 给

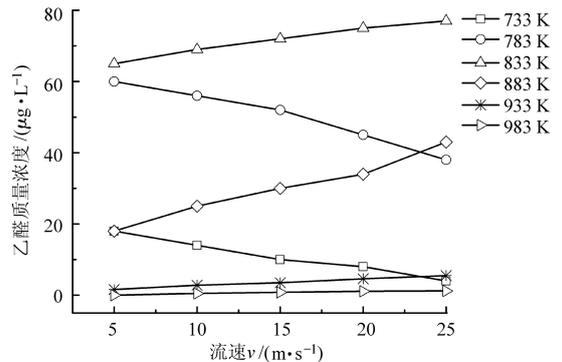


图 6 恒温环境下流速对乙醛质量浓度的影响

Fig. 6 Effects of velocity on acetaldehyde at constant temperature environment

出变温环境下过量空气系数对乙醛质量浓度的影响, 过量空气系数 $\Phi_a = 0$ 时, 乙醛质量浓度随流反应器内温度升高而略有增加, 乙醛质量浓度低于 20 $\mu\text{g/L}$, 无氧环境下自由基浓度较低, 不利于乙醇氧化反应链传播。有氧环境下 $\Phi_a = 0.9 \sim 1.1$ 时, 乙醛质量浓度最大时对应的温度称为临界温度, 低于临界温度时乙醛质量浓度随过量空气系数增大而增加, 富氧环境促进乙醛生成; 高于临界温度时乙醛质量浓度随过量空气系数增大而降低, 表明此温度区间富氧环境有利于乙醛氧化。乙醛的生成和氧化需要有氧环境, 高温富氧环境有利于乙醛氧化。

2.3 甲醛生成和氧化特性

2.3.1 流速对甲醛生成和氧化的影响

乙醇氧化生成中间产物 CH₃CH₂O, 中间产物

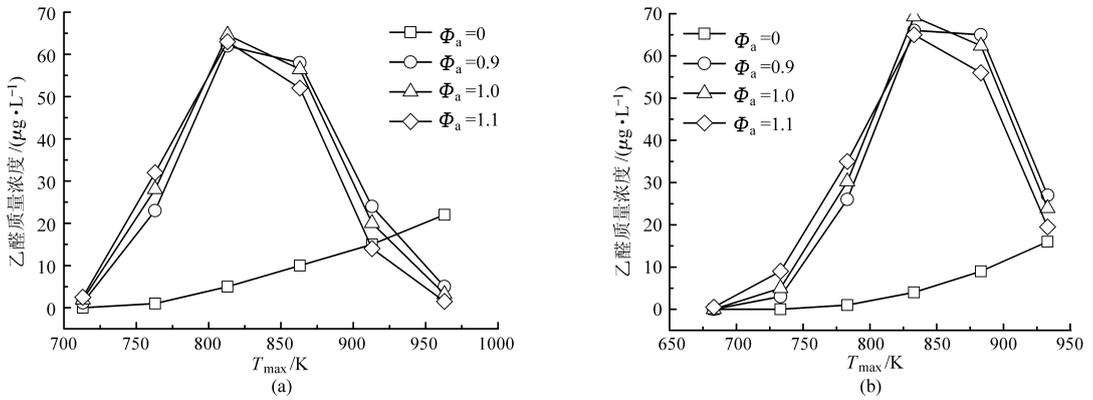


图7 过量空气系数对乙醛质量浓度的影响

Fig. 7 Effects of excess air coefficient on acetaldehyde concentration

(a) 流速为 5 m/s (b) 流速为 15 m/s

$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{O}$ 氧化生成乙醛和甲醛, 甲醛也是乙醇氧化过程中一个重要的中间产物。图 8 为恒温环境下流速对甲醛质量浓度的影响, 温度低于 833 K 时, 甲醛氧化反应速率较小, 甲醛以生成为主, 甲醛质量浓度随流速增加而减小。温度高于 883 K 时甲醛质量浓度随流速增加而增加, 随温度升高, 甲醛的生成和氧化反应速率增大, 甲醛生成期缩短, 甲醛的氧化反应占据优势, 流速增加缩短了甲醛氧化反应时间, 因此甲醛质量浓度随流速增加而增加。因此, 温度高于 883 K 时可延长甲醛的氧化反应时间, 降低甲醛排放。

乙醇氧化生成甲醛的最高质量浓度低于 $5 \mu\text{g}/\text{L}$, 而生成乙醛的最高质量浓度为 $78 \mu\text{g}/\text{L}$, 表明乙醇氧化主要生成乙醛排放。乙醇氧化主要生成中间产物 CH_3CHOH 和 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{O}$, 中间产物 CH_3CHOH 氧化生成乙醛, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{O}$ 氧化生成乙醛和甲醛, 乙醛的生成路径相对较多^[17], 因此乙醇氧化主要生成乙醛。乙醇汽油发动机甲醛排放一部分来自汽油中 HC 氧化, 一部分来自乙醇氧化, 乙醇氧化生成的甲醛相对较少, 汽油中添加乙醇不会导致甲醛排放大幅增加, 与汽油机相比, E10 乙醇汽油发动机甲醛排

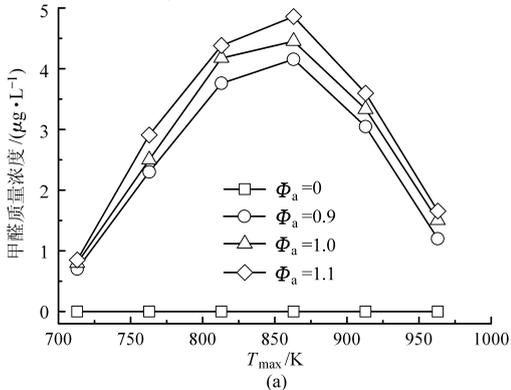


图9 不同过量空气系数下甲醛质量浓度随温度的变化曲线

Fig. 9 Effects of excess air coefficient on formaldehyde concentration

(a) 流速为 5 m/s (b) 流速为 15 m/s

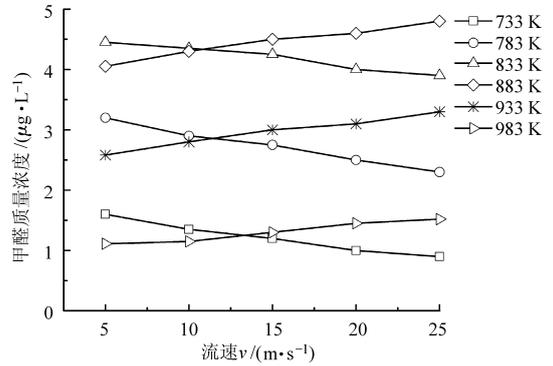


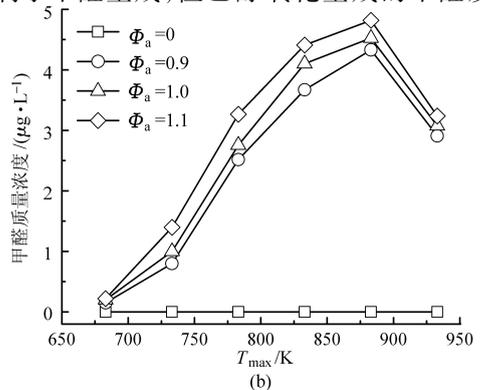
图8 恒温环境下流速对甲醛质量浓度的影响

Fig. 8 Effects of velocity on formaldehyde at constant temperature environment

放没有明显增加^[15]。

2.3.2 氧浓度对甲醛生成和氧化的影响

图 9 为过量空气系数对甲醛质量浓度的影响。过量空气系数 $\Phi_a = 0$ 时, 无氧环境下排气中没有检测到甲醛排放, 由于乙醇与氧气的反应决定乙醇氧化反应能否进一步进行, 无氧环境下乙醇氧化反应受到抑制, 基本无甲醛生成。有氧环境下 $\Phi_a = 0.9 \sim 1.1$ 时, 甲醛随过量空气系数增加而增加, 富氧环境有利于甲醛生成, 但乙醇氧化生成的甲醛质量浓度



低于 5 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。

3 结论

(1) 温度为 733 ~ 933 K 时乙醇质量浓度随流速增加而增加, 流速为 25 m/s 时乙醇质量浓度比流速为 5 m/s 时的乙醇质量浓度平均高约 40 $\mu\text{g}/\text{L}$, 延长乙醇在高温下的反应时间有利于乙醇氧化, 温度高于 933 K 时乙醇氧化主要受温度影响, 流速反映的反应时间是次要因素。乙醇氧化需要有氧环境, 富氧环境有利于乙醇氧化。

(2) 温度低于 833 K 时降低流速会导致乙醛排放增加, 高于 833 K 时延长乙醛反应时间有利于降低乙醛排放, 温度高于 933 K 时乙醛的生成和氧化

主要受温度影响, 流速是次要因素。无氧环境下乙醛的生成和氧化反应受到抑制, 低于临界温度时富氧环境促进乙醛生成, 高于临界温度时富氧环境有利于乙醛氧化。

(3) 温度低于 833 K 时甲醛质量浓度随流速增加而降低, 高于 833 K 时甲醛质量浓度随流速增加而增加, 延长反应时间有利于甲醛氧化。无氧环境下无甲醛生成, 甲醛质量浓度随过量空气系数增大而增加。

(4) 乙醇氧化生成甲醛的最高质量浓度低于 5 $\mu\text{g}/\text{L}$, 乙醇氧化生成乙醛的最高质量浓度为 78 $\mu\text{g}/\text{L}$, 乙醇氧化主要生成乙醛排放。

参 考 文 献

- Pang X B, Shi X Y, Mu Y J, et al. Characteristics of carbonyl compounds emission from a diesel-engine using biodiesel-ethanol-diesel as fuel[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(36): 7057 - 7065.
- 刘圣华, 魏衍举, 吕胜春, 等. 乙醇汽油发动机排放特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(7): 745 - 747, 775. Liu Shenghua, Wei Yanju, Lü Shengchun, et al. Study on emission characteristics of gasohol engine[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(7): 745 - 747, 775. (in Chinese)
- Shi X Y, Pang X B, Mu Y J, et al. Emission reduction potential of using ethanol-biodiesel-diesel fuel blend on a heavy-duty diesel engine[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(14): 2567 - 2574.
- 彭美春, 王贤烽, 王海龙. 柴油-生物柴油-乙醇混合燃料发动机的醛类化合物排放特性研究[J]. 内燃机学报, 2010, 28(2): 127 - 132. Peng Meichun, Wang Xianfeng, Wang Hailong. Study on aldehydes emission of BE-D blend fuel engine[J]. Transactions of CSICE, 2010, 28(2): 127 - 132. (in Chinese)
- 刘方杰, 魏衍举, 刘圣华, 等. 乙醇汽油发动机非常规排放及其催化转化的研究[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(1): 13 - 16, 116. Liu Fangjie, Wei Yanju, Liu Shenghua, et al. Unregulated emissions and their three-way catalytic conversion of a spark ignition engine fueled with ethanol-gasoline[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(1): 13 - 16, 116. (in Chinese)
- 姚春德, 刘军恒, 阳向兰, 等. 电控共轨柴油机应用柴油/乙醇组合燃烧的气体排放及燃料经济性[J]. 内燃机学报, 2011, 29(2): 105 - 111. Yao Chunde, Liu Junheng, Yang Xianglan, et al. Emissions and fuel economy of a common rail engine using diesel/ethanol blended with water compound combustion mode[J]. Transactions of CSICE, 2011, 29(2): 105 - 111. (in Chinese)
- 宋崇林, 黄齐飞, 宋景景, 等. 醇类燃料发动机非常规排放物直接进样分析测量方法的研究[J]. 内燃机学报, 2006, 24(6): 531 - 536. Song Chonglin, Huang Qifei, Song Jingjing, et al. Study on the analytical method of unregulated emissions by direct sampling from alcohol engine exhaust[J]. Transactions of CSICE, 2006, 24(6): 531 - 536. (in Chinese)
- 洪伟, 贾宜群, 吕庆胜, 等. 乙醇/柴油发动机醇醛排放的测试技术研究[J]. 车用发动机, 2007(6): 47 - 50. Hong Wei, Jia Yiqun, Lü Qingsheng, et al. Research on test technology for ethanol and acetaldehyde emissions from ethanol-diesel blend engine[J]. Vehicle Engine, 2007(6): 47 - 50. (in Chinese)
- Wei Y J, Liu S H, Liu F J, et al. Direct measurement of formaldehyde and methanol emissions from gasohol engine via pulsed discharge helium ionization detector[J]. Fuel, 2010, 89(9): 2179 - 2184.
- 张凡, 王建海, 于津涛, 等. 使用不同方法对甲醇汽油车非常规污染物排放的测量[J]. 汽车安全与节能学报, 2012, 3(4): 347 - 354. Zhang Fan, Wang Jianhai, Yu Jintao, et al. Measurements of unregulated emissions from a methanol-gasoline blend vehicle using different methods[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2012, 3(4): 347 - 354. (in Chinese)
- 刘生全, 马志义, 刘丹丹, 等. 含醇类燃料非常规排放污染物甲醛的实验研究[J]. 汽车工程, 2008, 30(9): 775 - 778. Liu Shengquan, Ma Zhiyi, Liu Dandan, et al. A study on formaldehyde emissions from alcohol fuels[J]. Automotive Engineering, 2008, 30(9): 775 - 778. (in Chinese)
- 张学敏, 裘博, 谭建伟, 等. 柴油机燃用乙醇-生物柴油-柴油的醛酮类排放物研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(7): 13 - 18. Zhang Xuemin, Qiu Bo, Tan Jianwei, et al. Carbonyl compounds emission from engine fueled with ethanol-biodiesel-diesel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 13 - 18. (in Chinese)

- 13 Graham L A, Belisle S L, Baas C L. Emissions from light duty gasoline vehicles operating on low blend ethanol gasoline and E85 [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(19): 4498 – 4516.
- 14 董素荣, 宋崇林, 赵昌普, 等. 乙醇-汽油燃料汽油机非常规污染物的排放特性[J]. *天津大学学报*, 2006, 39(1): 68 – 72.
Dong Surong, Song Chonglin, Zhao Changpu, et al. Unregulated emissions from gasoline engine using ethanol-blended gasoline as fuels[J]. *Journal of Tianjin University*, 2006, 39(1): 68 – 72. (in Chinese)
- 15 Liu F J, Liu P, Zhu Z, et al. Regulated and unregulated emissions from a spark-ignition engine fuelled with low-blend ethanol-gasoline mixtures[J]. *Proc. IMech E, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2012, 226(4): 517 – 528.
- 16 魏衍举, 刘杰, 朱赞, 等. 甲醇汽油发动机甲醛排放快速检测方法研究[J]. *内燃机学报*, 2008, 26(6): 533 – 537.
Wei Yanju, Liu Jie, Zhu Zan, et al. Fast measurement of formaldehyde emission from methanol/gasoline fueled engine[J]. *Transactions of CSICE*, 2008, 26(6): 533 – 537. (in Chinese)
- 17 Alzueta M U, Hernández J M. Ethanol oxidation and its interaction with nitric oxide[J]. *Energy & Fuels*, 2002, 16(1): 166 – 171.

Influence of Flow Velocity and Oxygen Concentration on Aldehyde Emissions from Ethanol Oxidation

Liu Fangjie¹ Liu Shenghua² Wei Yanju² Xu Bin¹ Wu Jian¹ Ma Zhihao¹

(1. *College of Vehicle and Traffic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China*

2. *School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

Abstract: The influence of flow velocity and oxygen concentration on acetaldehyde and formaldehyde emissions from ethanol oxidation was investigated in a flow reactor under the temperature environment of engine exhaust pipe. Unregulated emissions were detected by a gas chromatography with a pulsed discharge helium ionization detector (PDHID). Experimental results showed that ethanol concentration increased with the increase of flow velocity at temperature range of 733 ~ 933 K. Ethanol oxidation reaction was inhibited in anaerobic conditions, and oxygen-rich environment was conducive to ethanol oxidation. Acetaldehyde and formaldehyde emissions increased with prolonging the reaction time of ethanol oxidation when the temperature was lower than 833 K, while the opposite trend to acetaldehyde was observed when the temperature was above 833 K, and the influence of flow velocity on acetaldehyde emission was not obvious when the temperature was higher than 933 K. The generation and oxidation reactions of acetaldehyde were inhibited in anaerobic conditions. Below the critical temperature, the oxygen-rich environment was conducive to acetaldehyde and formaldehyde generation. Above the critical temperature, the oxygen-rich environment was conducive to acetaldehyde oxidation.

Key words: Ethanol Aldehyde emissions Flow velocity Oxygen concentration Gas chromatography