

# 乙醇掺混燃烧对柴油机碳烟和 $\text{NO}_x$ 排放影响的实验研究

党 帅, 钟北京, 龚景松, 袁 振

(清华大学 航天航空学院 热科学与动力工程教育部重点实验室 北京 100084)

**摘 要:** 改造制成了如下的柴油机系统: 将乙醇通过安装在柴油机排气管上的小型高效换热器, 在没有外部加热的情况下吸收尾气余热, 部分热解后混合气体由进气道通入柴油机燃烧室改善燃烧。前面的研究表明, 该系统可以有效节油。为了研究该系统对柴油机碳烟和  $\text{NO}_x$  排放的影响, 在该系统上进行了定功率-不同转速和额定转速以及不同功率下的实验研究。研究结果表明, 该系统在小功率-低转速工况下碳烟排放降低不明显, 其它工况可实现碳烟排放的有效降低, 最高可降低 35.7%; 在全工况条件下可实现  $\text{NO}_x$  排放的有效降低, 最高可降低 64.7%。功率和转速越高, 碳烟和  $\text{NO}_x$  排放量随着增加, 污染物排放降低效果越好。对污染物排放降低的原理进行了分析。

**关 键 词:** 柴油机; 乙醇; 碳烟;  $\text{NO}_x$

中图分类号: TK421

文献标识码: A

## 引 言

与其它形式的内燃机相比, 柴油机具有油耗低、热效率高、适应性好、节能和低排放(HC 和 CO 的排放较汽油机低一个数量级)等优点, 正逐渐成为主要动力设备之一<sup>[1]</sup>。然而, 柴油机在工作过程中会排放出较多的碳黑颗粒物<sup>[2~5]</sup>, 同时  $\text{NO}_x$  排放也不容忽视。

柴油机的颗粒物排放量较高, 大约有 0.2% ~ 0.5% 的燃油成为小颗粒(直径约 0.1  $\mu\text{m}$ )物质被排放出去<sup>[6]</sup>。这些颗粒物大部分由吸附了碳氢化合物(包括芳香烃物质)的碳黑颗粒组成。悬浮在空气中的微小颗粒物, 对人类的身体健康都有许多不利的影响。据文献报道微小颗粒物与不断增加的呼吸道疾病密切相关<sup>[7]</sup>。

为了减缓石油燃料的消耗, 早在 1908 年, 就有人做过用乙醇作为燃料的尝试。目前, 巴西销售的全部小汽车中, 乙醇汽车约占 30% ~ 40%, 其它新

车都是燃用乙醇/汽油混合燃料<sup>[8]</sup>。然而乙醇和柴油不易互溶, 致使乙醇在柴油机上的应用存在困难。但目前国内外有关公司已经研制出使乙醇和柴油互溶的助溶添加剂, 可以生成柴油醇<sup>[8]</sup>, 只是实用性有待提高。清华大学汽车工程系也在柴油机上研究了乙醇/柴油混合燃料的燃烧特性<sup>[9]</sup>。Ajav 和 Noguchi 等人也就柴油机燃用乙醇-柴油混合燃料, 使用乙醇蒸汽作为柴油机辅助燃料以及把乙醇作为辅助燃料喷入柴油机分别进行了研究<sup>[10~12]</sup>。本课题组在之前的研究工作中已就利用外部供能对乙醇进行高温分解, 产生的分解气体进入柴油机燃烧室掺混燃烧做过研究<sup>[13]</sup>。

本研究将乙醇通过安装在柴油机排气管上的小型高效换热器, 吸收尾气余热后由进气道通入柴油机燃烧室, 进行了定功率-变转速和额定转速-变功率下的实验研究。这种利用乙醇作为吸热介质回收尾气余热的系统具有很好的节油效果<sup>[14]</sup>, 同时也有利于降低柴油机碳烟和  $\text{NO}_x$  的排放, 并对该系统的碳烟和  $\text{NO}_x$  排放状况进行实验研究和分析。

## 1 实验系统

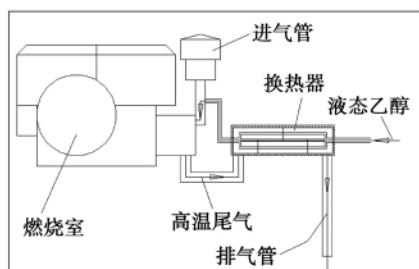
本实验系统图如图 1 所示。图 1(a) 为实验系统示意图, 图 1(b) 为实验系统实物图。图中柴油机为 ZS1100 型单缸直喷式柴油机, 柴油机参数如表 1 所示。测功仪为水力测功仪。碳烟测量装置为 FBY-201 型全自动滤纸式烟度计, 气体分析仪为 KM900 型烟气检测仪。该系统的工作过程是: 柴油机启动, 并稳定运行后, 乙醇经过换热器, 吸收柴油机的排气管尾气的热量, 高温条件下气化, 部分或全部分解, 产生氢气、一氧化碳、甲烷等小分子碳氢化合物的混合气体<sup>[15]</sup>, 混合气体经过换热器后, 通入

收稿日期: 2011-11-10; 修订日期: 2011-12-08

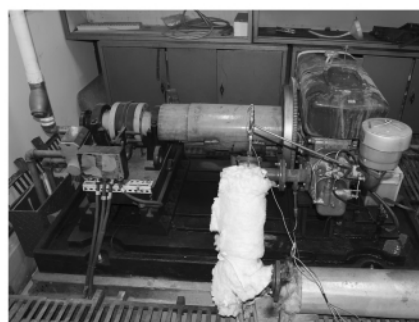
基金项目: 国家高新技术研究发展规划(863 计划) 基金资助项目(2009AA05Z219)

作者简介: 党 帅(1984-), 男, 山东潍坊人, 清华大学博士研究生。

柴油机的进气管与空气混合,然后进入燃烧室参与燃烧。经过实验测量,在排气管上安装换热器后,排气背压略有增加,但对油耗影响很小,对发动机实际功率影响不大。另外,进气道通入混合燃料气体后,进气充量略有下降,实际功率略有下降。二者的影响叠加,实际功率下降约为 1% ~ 2%。实验对固定功率  $P = 3 \text{ kW}$ ,转速分别取 1 500、1 750 和 2 000 r/min 的工况以及转速为额定转速 2 000 r/min,功率分别取为  $P = 1 \sim 10 \text{ kW}$  的工况进行了实验测量。针对每种工况,液体状态下乙醇流量分别取为  $q = 2, 4, 6, 8, 10 \text{ mL/min}$ ,通过 101 kPa 加压进行定压控制流量,测量工况如表 2 所示。随着乙醇流量的加大,耗油量不断降低。实验过程中维持柴油机系统进气量基本保持不变。



(a) 试验系统示意图



(b) 试验系统实物图

图 1 改造后的乙醇为吸热载体的柴油机系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a diesel engine system with the ethanol serving as an endothermic carrier after modification

## 2 实验结果与分析

### 2.1 定功率 - 不同转速的实验结果

实验所采用的柴油机经测量,在系统改造前后对柴油机各项性能没有明显影响。首先进行了 3 kW 工作状态下,转速分别在 1 500、1 750 和 2 000

r/min 的工作对比。

表 1 柴油机参数表

Tab. 1 Table of diesel engine parameters

| 型号: ZS1100                | 四冲程、蒸发水冷、单缸直喷式柴油机 |
|---------------------------|-------------------|
| 气缸直径/mm                   | 100               |
| 活塞行程/mm                   | 115               |
| 活塞排量/L                    | 0.903             |
| 标定功率/kW                   | 10.3              |
| 超负荷功率/kW                  | 11.3              |
| 标定转速/ $r \cdot \min^{-1}$ | 2000              |
| 压缩比                       | 17.5              |
| 供油提前角/ $^\circ$           | $20 \pm 1$        |
| 针阀开启压力/kPa                | $18.1 \pm 0.5$    |
| 压缩余隙/mm                   | $0.9 \pm 0.1$     |
| 进气门开/ $^\circ$            | 上止点前 15           |
| 进气门关/ $^\circ$            | 下止点后 43           |
| 排气门开/ $^\circ$            | 下止点前 43           |
| 排气门关/ $^\circ$            | 上止点后 15           |
| 进气门间隙/mm                  | 0.35              |
| 排气门间隙/mm                  | 0.45              |

表 2 柴油机测量工况表

Tab. 2 Table of the operating conditions for measurement of a diesel engine

| 柴油机转速/ $r \cdot \min^{-1}$ | 柴油机功率/kW             | 乙醇流量/ $\text{mL} \cdot \min^{-1}$ |
|----------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| 1 500 1 750 2 000          | 3                    | 2 4 6 8 10                        |
| 2 000                      | 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 | 2 4 6 8 10                        |

图 2 是定功率 - 不同转速条件下的碳烟生成随乙醇流量的变化图。由图 2 可见,柴油机在未通入乙醇以前的原始工作条件下,转速为 1 500 r/min 时,碳烟的排放量最低,仅为  $Rb = 0.8$ 。说明该柴油机在小功率 - 低转速工作条件下,碳烟的排放量本就较少,这也通过该柴油机生产厂家得到了印证。而转速为 2 000 r/min 的工况次之,1 750 r/min 的工况最差。通过实验发现,转速为 1 500 r/min 的工况下,加入乙醇后碳烟生成量反而增加。转速为 2 000 r/min 时,碳烟在加入乙醇后减少较为明显,排放量最高可降低 20%。转速为 1 750 r/min 时,碳烟在加入乙醇前后无明显变化。不过由于小功率 - 低转速工作条件下的碳烟的排放量较少,加入乙醇后虽然略有增加,排放量仍然不大。

图 3 是 3 种转速条件下的 NO 排放量随乙醇流量的变化图(文中气体污染物测量均取摩尔分数)。

由图3可见,随着乙醇添加量的增加,在柴油机转速为1 500和2 000 r/min的工作条件下 $\text{NO}$ 减少明显,其中转速为1 500 r/min时 $\text{NO}$ 排放曲线接近线性下降变化,在乙醇加入10 mL/min时降幅可达到45.9%。而转速为2 000 r/min时,当乙醇流量达到6 mL/min时 $\text{NO}$ 排放量降幅最大,可达48.3%,之后随着乙醇添加量的增加而又有所增加。转速为1 750 r/min时 $\text{NO}$ 排放量降幅较小。

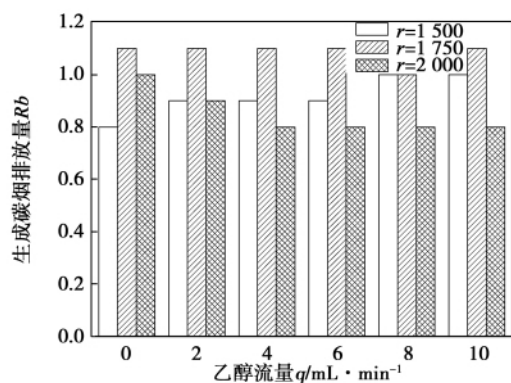


图2 不同转速工况下的碳烟生成随乙醇流量变化图

Fig. 2 Chart showing a change of the carbon soot formed with the ethanol flow rate at various rotating speeds

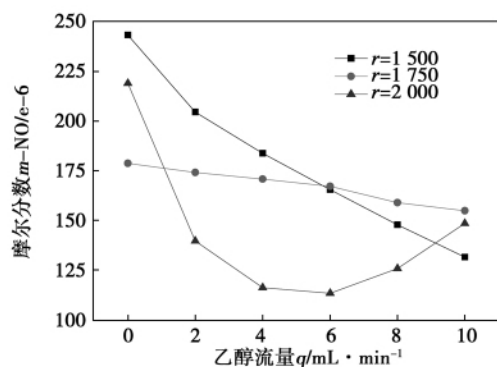


图3 不同转速工况下的 $\text{NO}$ 生成随乙醇流量的变化图

Fig. 3 Chart showing a change of the nitrogen monoxide formed with the ethanol flow rate at various rotating speeds

综上所述,该系统在低功率-变转速工作条件下均能实现 $\text{NO}_x$ 排放量的有效降低,而碳烟排放量的降低在低功率-小转速工作条件下并不明显,低功率-高转速工作条件下比较明显。由于该柴油机系统低功率-小转速工作条件下的碳烟排放量较

小,添加乙醇后,虽然碳烟排放量略有增加,但总量仍然不大,且可以实现 $\text{NO}_x$ 排放量的大幅降低。

## 2.2 额定转速-不同功率的实验结果

针对ZS1100柴油机,其工作状态最常出现的是额定转速2 000 r/min的情况。所以,着重进行了额定转速2 000 r/min下,功率 $P=1 \sim 10$  kW的测试实验。针对每种柴油机工况,分别取乙醇添加量 $q$ 为2, 4, 6, 8, 10 mL/min进行5组实验。如图4所示,通入乙醇后,发动机的排气温度均有所下降,最多可达30~40℃,说明燃烧室内燃烧温度有所下降。

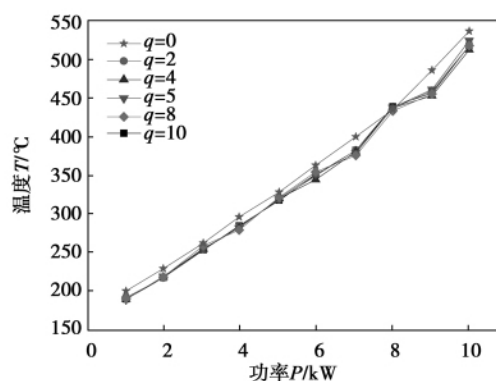


图4 不同功率下排气温度对比图

Fig. 4 Chart showing the contrast of the exhaust gas temperatures at various powers

图5是各柴油机工作条件下的碳烟生成随柴油机功率的变化图。可见,在柴油机各个功率的实验中,乙醇加入后,各工况均比未添加乙醇的工况下碳烟排放量有所降低。在 $P=10$  kW,乙醇添加量为8和10 mL/min时,最高可降低35.7%;在所有测量工况中,碳烟排放量最低降幅也可超过10%。图6是柴油机各工作条件下的 $\text{NO}$ 排放图。可见,加入乙醇后, $\text{NO}_x$ 排放也得到了很好的控制和减少。在低功率条件下摩尔分数可降到 $100 \times 10^{-6}$ 以下,高功率条件下排放量降幅可达到64.7%。另外,图6中各乙醇流量不为零的曲线均比乙醇流量 $q=0$ 的曲线低很多, $\text{NO}_x$ 排放量均下降明显,这也证明了乙醇分解气和气化乙醇进入燃烧室,可充分改善燃烧状况,使燃烧室核心燃烧区温度下降,从而减少 $\text{NO}_x$ 的生成。

此外,图7是为了全面检测污染物排放状况,采集测量的额定转速-不同功率下CO的排放量图。可见,在低功率条件下随着乙醇添加量的增加,CO排放量增加,但总量仍然不大;而到了高功率条件下,乙醇添加量的增加并没有引起CO排放量的明

显增加。

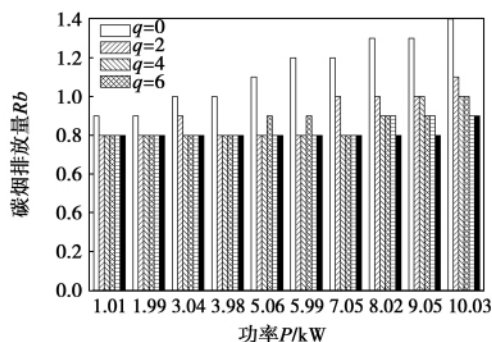


图 5 碳烟生成随柴油机功率的变化图

Fig. 5 Chart showing a change of the carbon soot formed with the power of the diesel engine

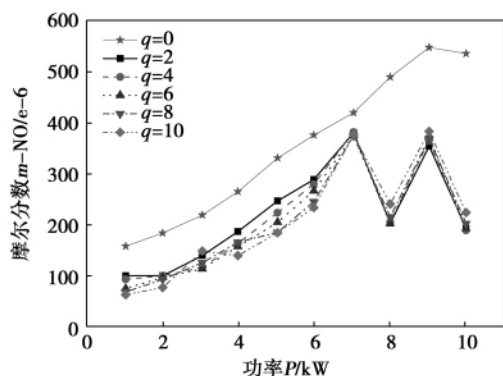


图 6 NO 生成随柴油机功率的变化图

Fig. 6 Chart showing a change of the nitrogen monoxide formed with the power of the diesel engine

综上所述,在额定转速-变功率实验中,各功率下加入乙醇均可实现碳烟和  $\text{NO}_x$  排放的大幅降低,达到降低污染物排放的目的。随着乙醇添加量的增加,低功率条件下 CO 排放量增加,但总量不大,高功率条件下 CO 排放量变化不明显。

### 2.3 污染物排放状况分析

低功率工作条件下,乙醇通过小型高效换热器进行预热,吸收尾气余热,变成乙醇蒸汽,但由于尾气温度较低,不能达到热解温度,所以未产生  $\text{H}_2$  等小分子气体。热的乙醇蒸汽通过进气道进入柴油机燃烧室,由于乙醇热值相比柴油要低,相比纯柴油燃烧,燃烧室温度略有降低,这就使热力型  $\text{NO}_x$  产生受到抑制。而柴油含 N 很少,所以燃料型  $\text{NO}_x$  产生很少,快速型  $\text{NO}_x$  总体产量也很低,所以在热力型  $\text{NO}_x$  受到抑制之后,就意味着总体的  $\text{NO}_x$  生成受到

抑制,排放量下降。而低功率条件下,进入乙醇蒸汽之后,耗油量会有所降低,在额定转速条件下,碳烟生成量也会略有下降,部分原来产生碳烟的柴油颗粒不完全燃烧,产生了图 7 所示的 CO 排放量增加的情况。在低功率-小转速工作条件下,因为转速低,加入的乙醇和柴油混合后燃烧在局部产生燃料过剩的现象会比较严重,这导致了在低功率-小转速条件下,碳烟产生没有明显减少,甚至在某些工况还略有增加的情况。

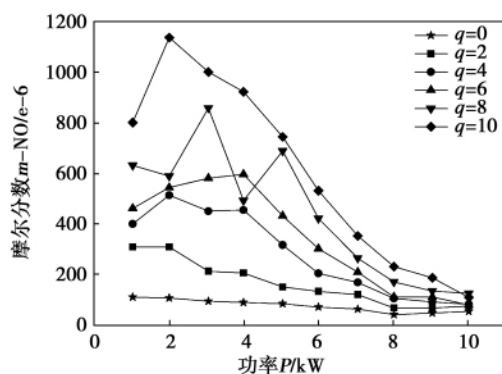


图 7 CO 生成随柴油机功率的变化图

Fig. 7 Chart showing a change of the carbon monoxide formed with the power of the diesel engine

在额定转速的高功率条件下,乙醇流经小型高效换热器后,部分会热解产生小分子如  $\text{H}_2$  等气体,部分热解为乙醇蒸汽,然后通过进气道进入燃烧室参与燃烧。 $\text{H}_2$  的扩散系数比其它大多数可燃性气体大得多,因此如果着火时有  $\text{H}_2$  存在,则  $\text{H}_2$  能快速地将空间的高温热量输送到油滴的表面,与此同时,这些存在在油滴表面附近的氢气也会燃烧,氢气燃烧释放的热量也会使油滴加热,经过这两个途径,油滴的蒸发加快。因此,油滴尺寸会迅速减小,燃烧更加充分,从而强化了燃烧<sup>[16]</sup>。其它热解气的气体分子通过类似  $\text{H}_2$  的途径也参与了改善燃烧。此时,油滴燃烧会相对充分,则产生的碳烟会相应减少,CO 含量也不会明显上升。同低功率工作条件下一样,燃烧改善后,由图 4 可以看出,排烟温度略低,对应燃烧室的温度也较低,因此热力型  $\text{NO}_x$  的生成受到抑制。这就使得在高功率条件下,碳烟和  $\text{NO}_x$  排放量都显著降低。

### 3 结 论

为了研究乙醇吸热掺混燃烧的碳烟及  $\text{NO}_x$  污

染物排放性能,对改造过的柴油机整机系统进行了定功率-不同转速和额定转速-不同功率的实验和分析,得出以下结论:

(1) 采用该改造后的柴油机系统,可在除小功率-低转速工况下的其它工况,均实现碳烟排放的有效降低,最高可降低 35.7%;在全工况条件下可实现  $\text{NO}_x$  排放的有效降低,最高可降低 64.7%。功率和转速越高,碳烟和  $\text{NO}_x$  排放量随着增加,污染物排放降低效果越好。

(2) 对污染物排放状况的分析表明,该系统降低碳烟和  $\text{NO}_x$  排放的主要原因是:掺混乙醇热解产物后可以改善燃烧室的燃烧状况,并使其温度略有降低。前者增大了碳烟的氧化速度,而后者抑制热力型  $\text{NO}_x$  的生成。

#### 参考文献:

- [1] Shigeki D, Yoshitada K, Takayuki I, et al. Analysis of soot accumulation inside diesel engines[J]. JSAE Rev 2000 21: 303-308.
- [2] Clague A D H, Donnet J B, Wang T K, et al. A comparison of diesel engine soot with carbon black[J]. Carbon, 1999, 37: 1553-1565.
- [3] Pickett L M, Siebers D L. Soot in diesel fuel jets: effects of ambient temperature, ambient density, and injection pressure[J]. Combustion and Flame 2004, 138: 114-135.
- [4] Wen J Z, Thomson M J, Park S H, et al. Study of soot growth in a plug flow reactor using a moving sectional model[C]//Proc Combust Institute 2005, 30: 1477-1484.
- [5] Xu Y B, Jay P G. Two-dimensional soot distributions in buoyant turbulent fires[C]//Proc Combust Institute 2005, 30: 719-726.
- [6] Heywood J B. An extensive text and professional reference on the fundamentals behind engine operation and design. Internal Combustion Engine Fundamentals [C]//McGraw-Hill International, 1988, 4: 371-490.
- [7] Stanmore B R, Brilhac J F, Gilot P. The oxidation of soot: A review of experiments, mechanism and models [J]. Carbon, 2001, 39: 2247-2268.
- [8] 金福祥, 张武高, 周校平, 等. 乙醇燃料的研究发展与应用[J]. 柴油机 2002(5): 44-46.  
JIN Fu-xiang, ZHANG Wu-gao, ZHOU Xiao-ping, et al. Advances in the study of ethanol fuel and its applications[J]. Diesel Engine, 2002(5): 44-46.
- [9] He B Q, Shuai S J, Wang J X, et al. The effect of ethanol blended diesel fuels on emissions from a diesel engine[J]. Atmospheric Environment 2003, 37(35): 4965-4971.
- [10] Ajav E A, Singh B, Bhattacharya T K. Experimental study of some performance parameters of a constant speed stationary diesel engine using ethanol-diesel blends as fuel[J]. Biomass and Bioenergy, 1999, 17(4): 357-365.
- [11] Ajav E A, Singh B, Bhattacharya T K. Performance of a stationary diesel engine using vapourized ethanol as supplementary fuel[J]. Biomass and Bioenergy, 1998, 15(6): 493-502.
- [12] Noguchi N, Terao H, Sakata C. Performance improvement by control of flow rates and diesel injection timing on dual-fuel engine with ethanol[J]. Bioresource Technology, 1996, 56(1): 35.
- [13] 张波, 傅维铤. 燃料热解制氢在柴油机上的节油研究[J]. 内燃机工程 2006, 27(4): 77-80.  
ZHANG Bo, FU Wei-biao. Study of the oil saving of a diesel engine during the preparation of hydrogen through fuel pyrolysis[J]. Internal Combustion Engine Engineering 2006, 27(4): 77-80.
- [14] 党帅, 钟北京, 龚景松, 等. 乙醇掺混燃烧对柴油机油耗影响的实验研究[J]. 热能动力工程 2012, 27(2): 242-245.  
DANG Shuai, ZHONG Bei-jing, GONG Jing-song, YUAN Zhen. Experimental study of the effect of the diesel combustion mixed and diluted with ethanol on the oil consumption of a diesel engine [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2012, 27(2): 242-245.
- [15] 龚景松, 杨庆涛, 侯凌云, 等. 乙醇煤油混合燃料热解特性实验研究[J]. 工程热物理学报 2009, 30(9): 1617-1619.  
GONG Jing-song, YANG Qing-tao, HOU Ling-yun, ZHONG Bei-jing. Experimental study of the pyrolysis characteristics of ethanol-kerosene blended fuel [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(9): 1617-1619.
- [16] Hou Ling-Yun, Fu Wei-Biao. Study on the mechanism of saving fuel consumption for emulsified fuel with wall catalytic reforming reaction [J]. Combustion Science and Technology, 2005, 177(4): 671-675.

( 辉 编辑)

#### • 书 讯 •

#### 《绿色能源》

本书主要包括以下内容:从生物质能源的化学组成、能量生产到农作物燃料等角度出发介绍生物质能源的优越性;生物乙醇、生物柴油、生物炼制,以及生物气体的性质、利用现状、展望及生产原理工艺;从液化石油气、压缩天然气、电力、海洋能、生物可再生液体及氢气的角度出发介绍能量的转化过程;氢能的优越性和几种非传统制氢的方法;新型的制氢方法-微生物厌氧制氢、光合制氢、热化学制氢,并在此基础上详细介绍几种新型制氢方法的制氢机理,目前较新的热化学生物质制氢的方法-生物质热裂解制氢、生物质气化制氢、生物质超临界水气化制氢、光裂解水生物制氢、超临界水气化生物质制氢;储氢技术;燃料电池的工作原理、几种不同分类、与电机相比之下的优点以及在各个领域的应用,同时详细介绍质子交换膜燃料电池、直接甲醇燃料电池、磷酸燃料电池、固体氧化物燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池以及特种燃料电池等不同燃料电池的原理、应用和发展;氢经济及氢政策。

作者: 刘关君, 李永峰, 陈红

开本: 16 开 定价: 32.00

出版时间: 2012 年 7 月

(5) . -610 ~614

In an artificial environment laboratory ,simulated was the process of ice covering the surface of a blade of a wind turbine and explored was the influence of the change of the main meteorological parameters ( air temperature and relative humidity) on the ice covering the surface of the blade of the wind turbine. The test results show that when the air temperature is in a range from  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  ,it is most favorable for the water contained in the air to be condensed to ice and the water contained in the air is an important source for icing. At a relative humidity ,the lower the temperature and the higher the freezing speed. When the air temperature is kept constant ,the icing speed will assume a monotone increment relationship with the relative humidity. When the air temperature and humidity are constant ,the longer the icing time duration and the thicker the ice layer. After the freezing time duration has been prolonged ,the freezing thickness growth speed assumes a certain slowing-down tendency. **Key words:** wind turbine , blade ,ice covering ,experimental study

乙醇掺混燃烧对柴油机碳烟和  $\text{NO}_x$  排放影响的实验研究 = **Experimental Study of the Influence of Diesel Combustion Diluted and Mixed with Ethanol on the Soot and  $\text{NO}_x$  Emissions of a Diesel** [刊 ,汉] DANG Shuai ZHONG Bei-jing ,GONG Jing-song ,YUAN Zhen ( Education Ministry Key Laboratory on Thermal Science and Power Engineering ,College of Aeronautics and Astronautics ,Tsinghua University ,Beijing ,China ,Post Code: 100084) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2012 27( 5) . -615 ~619

The following diesel system was formed through a reconstruction: through a small-sized high efficiency heat exchanger installed on the exhaust gas pipe of a diesel ,the ethanol absorbed the waste heat of the exhaust gas under the condition of having no heat from the outside world and after partially pyrolyzed ,the mixed gas was fed into the combustion chamber of the diesel to improve the combustion via the gas inlet passage. The research results show that the system under discussion can effectively save oil. To study the influence of the system on the soot and  $\text{NO}_x$  emissions of the diesel ,an experimental study was performed of the system at constant power-various speeds and rated speed-various powers. It has been found that the reduction of soot emissions of the system under a small power-low speed operating condition is not conspicuous ,capable of being lowered by 64.7% to the maximum extent. The higher the power and rotating speed ,the greater the soot and  $\text{NO}_x$  emissions and the better the effectiveness of the reduction of the pollutant emissions. The principle for reducing the pollutant emissions was analyzed. **Key words:** diesel ,ethanol ,soot , $\text{NO}_x$