

文章编号:1000-582X(2010)02-0104-06

# 天然气发动机预混室内喷射双氧水排放特性试验

闫云飞<sup>1</sup>, 张力<sup>1</sup>, 冷锁林<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 动力工程学院, 重庆 400044; 2. 中国东方电气集团股份有限公司, 成都 610036)

**摘要:**为使天然气更加高效清洁燃烧,进一步降低发动机的污染排放,在三缸燃油发动机改装的天然气发动机上利用雾化喷嘴向预混室内喷射双氧水( $H_2O_2$ ),研究了喷射双氧水对发动机排气温度、动力性能、经济性能及HC、CO、 $NO_x$ 排放特性的影响。结果表明,添加 $H_2O_2$ 可降低天然气发动机HC、CO、 $NO_x$ 排放,同时发动机的动力性能和经济性能都有所提高。 $H_2O_2$ 可降低发动机燃烧温度但同时增加了氧气浓度,温度和氧气浓度是影响 $NO_x$ 生成量的主要因素。得到了气耗率及污染排放整体效果较好时的天然气与双氧水质量比为4.5~5.8。

**关键词:**天然气发动机;预混室;双氧水;排放特性;试验

中图分类号:TK464

文献标志码:A

## Emission characteristics on nature gas engine by additional injection of hydrogen peroxide into the premix chamber

YAN Yun-fei<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>, LENG Suo-lin<sup>2</sup>

(1. College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China

2. Dongfang Electric Corporation, Chengdu 610036, P. R. China)

**Abstract:** In order to improve combustion efficiency of natural gas(NG) and reduce pollution emission in nature gas engine, additional injection of hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ) into the premix chamber is proposed. With the test of CO, HC and  $NO_x$  concentration, exhaust temperature, NG consumption etc., it is found that the emission of HC, CO and  $NO_x$  decreased and the dynamic and economic performance of CNG engine is improved.  $H_2O_2$  can make reduction of the combustion temperature while increase of the oxygen concentration. The pivot factors affecting  $NO_x$  emission are temperature and oxygen concentration. The optimum mass proportion of nature gas and  $H_2O_2$  is between 4.5 and 5.8 for NG consumption and pollution emission.

**Key words:** CNG engine; premix chamber; hydrogen peroxide; emission characteristic; experimentation

天然气(CNG)与柴油、汽油等其他常用燃料相比,具有良好的燃料可获得性和低污染性,在今后相当长时间内将成为发动机非常实用的代用燃料<sup>[1]</sup>。随着人们对环境空气质量重视程度的增加,制定出的汽车尾气排放标准也越来越严格。尽管CNG是

一种经济、清洁的燃料,但是没有适当的技术措施,并非可以自然地实现高效清洁燃烧。仍然需要对天然气车用发动机的排放特性进行更深入的研究,以实现其高效清洁燃烧,进一步降低污染排放,减少对大气环境的污染。目前,为改善天然气发动机的燃

收稿日期:2009-10-27

基金项目:重庆市科技攻关重大项目(CSTC, 2008AC2051)

作者简介:闫云飞(1978-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事燃烧与环保的研究。(Tel)023-65103114;

(E-mail)yunfeiyan@yahoo.com.cn。

烧和排放特性,国内外研究者更多的是采用直接添加部分氢气的方式来实现,并进行了较多的研究<sup>[2-9]</sup>。研究表明天然气发动机掺混少量氢气可降低HC、CO和CO<sub>2</sub>排放,然而NO<sub>x</sub>排放会有所增加。而H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>水溶液中的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>在高温下分解成2个氢氧根(OH)。氢氧根是一种强氧化剂,有助于强化燃烧。同时,由于H<sub>2</sub>O和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>的汽化作用可以降低燃烧最高温度,能够使NO<sub>x</sub>也有所降低。因此,向发动机内喷射双氧水来进一步强化天然气的燃烧过程,降低燃烧温度可能成为一种减少NO<sub>x</sub>排放的有效方式。国内外,对向发动机内喷射双氧水来降低排放性能的研究目前仅有少量报道。Carolin Born等人<sup>[10]</sup>实验研究了直喷式柴油机燃烧室内喷射双氧水时的燃烧和排放性能,表明喷射双氧水可以减少柴油机的烟尘和NO<sub>x</sub>的排放。方显忠等人<sup>[11]</sup>在单缸直喷柴油机上利用第2个喷嘴向燃烧室内喷射H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,对其降低柴油机排烟消光度和NO<sub>x</sub>的效果进行了试验验证,认为H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>降低排放的效果基本上与其喷射量成正比。Trapel Frica<sup>[12]</sup>的研究表明柴油发动机内喷射双氧水的水溶液可以降低碳氢化合物和颗粒物的排放。王益军<sup>[13]</sup>研究了进气道喷射过氧化氢对直喷式柴油机燃烧和排放的影响,表明在进气道内喷射H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>可显著改善发动机的燃烧,同时可降低NO<sub>x</sub>排放和燃油消耗率,且烟度变化不大。王宪成等人<sup>[14]</sup>在135单缸柴油机上对过氧化氢组液参与柴油机燃烧过程进行了研究,表明可改善柴油机的燃烧过程,同时使油耗、碳

烟和NO<sub>x</sub>排放降低。

目前,对天然气发动机的降排措施主要为直接掺氢,喷射双氧水来降排污染物的研究主要是针对柴油发动机。对喷射双氧水来降低天然气发动机污染物排放研究的报道极少。由于氢气的大量制备困难和价格较高等因素的制约,且氢气的加入会造成NO<sub>x</sub>排放的增加,增加NO<sub>x</sub>污染。因此,考虑向天然气发动机内喷射双氧水,以达到降低污染物排放的目的。在已有试验台上利用雾化喷嘴向发动机预混室内喷射雾化双氧水,对其排放效果(特别是NO<sub>x</sub>)进行试验研究,对研究天然气发动机减排降耗技术及其应用具有重要意义。

## 1 试验装置及方法

### 1.1 试验系统

图1是试验发动机台架的示意图,整个发动机台架主要由JL368Q3油改气发动机、电涡流测功机、汽车尾气五组分分析仪以及水系统、气系统组成。原机中天然气与空气在预混合室混合后平均分配给3个缸,试验时将双氧水雾化后直接喷入发动机预混室,燃料和空气一起进入发动机燃烧室。双氧水的雾化采用介质雾化,试验系统包括1台空压机和1个雾化喷嘴。图2为发动机整体实验台架,图3为雾化喷嘴。雾化喷嘴安装在发动机预混合室的空气进口面上,喷嘴的喷头与空气进口管平行,催化剂雾化后直接喷入发动机预混合室。

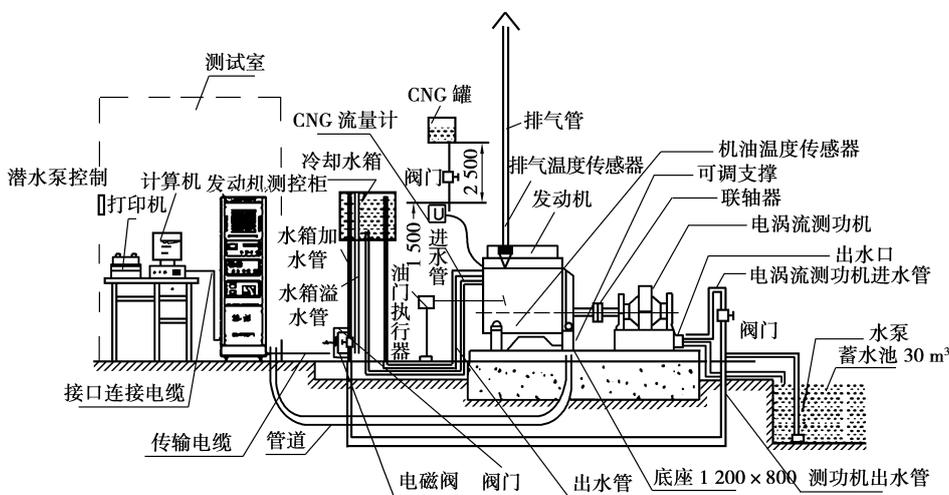


图1 发动机试验系统示意图

### 1.2 试验方法

采用对比法进行试验。即先测试原机的性能,记录原机经济性能及排放性能的相关数据;然后利

用雾化喷嘴将H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>喷入预混室,改变H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>的喷射流量,记录不同流量下的对应性能参数,再与原结果进行对比。为了减少对比试验条件稳定性对实验



图 2 发动机整体实验台架



图 3 雾化喷嘴

结果的影响,每个工况均做 2~3 次,剔除极个别偏差较大的工况,再求平均值,整个试验过程中的稳定性和复现性较好。双氧水的流量由毛细管的长度以及空压机的工作压力调节。空压机工作压力增大,可使双氧水的喷射流量增大;毛细管长度减小,也可使双氧水的流量增大。试验中所用的  $H_2O_2$ ,为分析纯,质量分数为 10%,密度为  $1.020 2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,由重庆东试化工有限公司提供。试验在发动机某一定负荷下进行,经试验整定测得的各试验工况如表 1 所示。

表 1 试验工况

工况	工作压力 /MP	毛细管长度 /cm	$H_2O_2$ 流量 /( $L \cdot h^{-1}$ )
1	0.28	26.2	0.746
2	0.28	19.6	0.921
3	0.28	13.0	1.050
4	0.28	6.4	1.235

## 2 试验结果及分析

### 2.1 25% 负荷,不同 $H_2O_2$ 流量对排气温度、 $O_2$ 浓度及 $NO_x$ 排放的影响

通过测量排气温度可以间接反映燃烧室内的燃烧情况。排气温度随双氧水流量的变化曲线如图 4 所示。从图 4 中看出,加入双氧水,排气温度降低,并随双氧水流量的增加,排气温度逐渐减小。一方

面说明双氧水加入后, $H_2O_2$  和  $H_2O$  的汽化降温起到了作用,使机内的平均燃烧温度降低,从而使排气温度降低,且流量越大降低的越多。另一方面  $H_2O_2$  的催化作用会加快燃烧,使燃烧过程结束得较早,也会使从排气温度降低。

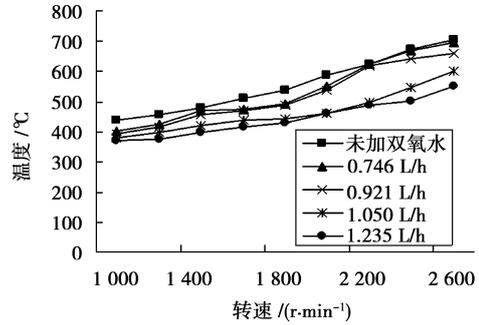


图 4 不同流量  $H_2O_2$  下排气温度变化

燃烧温度降低所引起的直接效果就是使  $NO_x$  的产生量减小, $NO_x$  浓度随双氧水流量的变化关系如图 5 所示。从图 5 中看出, $NO_x$  浓度和温度的变化趋势一致,均随转速的升高而增加,加入双氧水使燃烧温度降低后,产生的  $NO_x$  浓度也随之减少,且流量越大,产生的  $NO_x$  浓度越小。

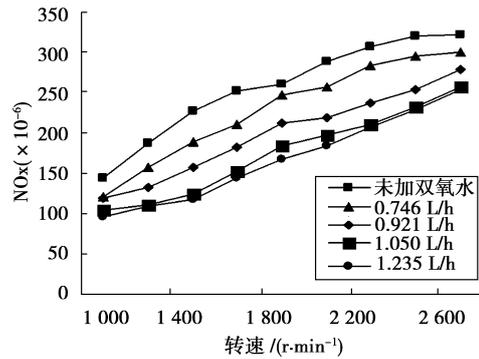


图 5 不同  $H_2O_2$  流量下  $NO_x$  浓度变化

因为发动机内的燃烧温度超过  $1800 \text{ }^\circ\text{C}$ ,在此温度下,产生的  $NO_x$  主要是热力型  $NO_x$ ,按照捷里道维奇机理,热力型  $NO_x$  的产生是通过下列不分支的链式反应进行<sup>[15-16]</sup>:



$$(E_1 = 314 \text{ kJ/mol}, E_{-1} = 0),$$



$$(E_2 = 29 \text{ kJ/mol}, E_{-2} = 165 \text{ kJ/mol})$$

$NO_x$  的产生速率符合公式:

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 3 \times 10^{14} [\text{N}_2][\text{O}_2]^{1/2} \exp(-542000/RT) \quad (5)$$

式中 $[\text{O}_2]$ , $[\text{N}_2]$ , $[\text{NO}]$ 分别为 $\text{O}_2$ , $\text{N}_2$ , $\text{NO}$ 的浓度, $\text{mol}/\text{cm}^3$ ;  $T$ 为绝对温度, $\text{K}$ ;  $t$ 为时间, $\text{s}$ ;  $R$ 为通用气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

由 $\text{NO}_x$ 产生速率表达式可知, $\text{NO}_x$ 产生速率与氧气浓度的平方根成正比,并且受温度的影响非常明显。试验测得不同双氧水流量时发动机内氧气平均浓度和平均燃烧温度见表 2。

表 2 不同流量下氧气浓度和燃烧温度

	未加	流量 1	流量 2	流量 3	流量 4
氧气浓度 $(/10^{-6} \text{mol}/\text{cm}^3)$	6.81	6.87	6.91	7.01	7.08
平均燃烧 温度/ $^{\circ}\text{C}$	2 012	1 976	1 923	1 859	1 823

由捷里道维奇机理,热力型 $\text{NO}_x$ 的产生速率分别为 $9.68 \times 10^{-6} \text{mol}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$ 、 $6.16 \times 10^{-6} \text{mol}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$ 、 $3.06 \times 10^{-6} \text{mol}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$ 、 $1.47 \times 10^{-6} \text{mol}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$ 和 $0.754 \times 10^{-6} \text{mol}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$ ,即双氧水流量越大,降低的温度越多, $\text{NO}_x$ 的生成速度越小。同时双氧水流量越大,氧气浓度也越大。温度降低使得 $\text{NO}_x$ 的生成速度减慢,但氧气浓度增加又加快 $\text{NO}_x$ 产生,两者相互作用,最终当双氧水流量增加到一定程度时, $\text{NO}_x$ 排放下降很小或基本不再下降。这与图 5 中大流量 $\text{H}_2\text{O}_2$ 条件下, $\text{NO}_x$ 的浓度变化是一致的。

### 2.2 50%负荷,额定转速下不同双氧水流量影响

图 6 为负荷为 50%,额定转速为 2 800 r/min 时,随双氧水流量增加,气耗率、 $\text{CO}$ 、 $\text{HC}$ 、 $\text{NO}_x$  相对原机所减少的百分比。气耗率减少量一直增大,在流量为 1.05 L/h 时达到最大,之后又减小。随着双氧水流量的增加,喷射的 $\text{H}_2\text{O}_2$ 在气缸内吸热分解生成大量的羟基、过氧化物离子、单态氧、氢过氧化物基、三态氧等活性粒子,促进了燃烧,使燃烧速度加快,燃烧完全,使燃烧提前结束,提高了热效率,从而使气耗率的减少量增加。但双氧水流量过大时,由于吸收的热量有限,一方面不能使 $\text{H}_2\text{O}_2$ 完全分解,另一方面过量 $\text{H}_2\text{O}_2$ 水溶液的汽化作用可能使燃烧室内温度降低较多,造成燃烧不充分,从而又会使气耗率的减少量变小,甚至会使气耗率增大。而 $\text{HC}$ 、 $\text{CO}$ 和 $\text{NO}_x$ 的减少量则随流量的增加而递增,但趋于平缓。

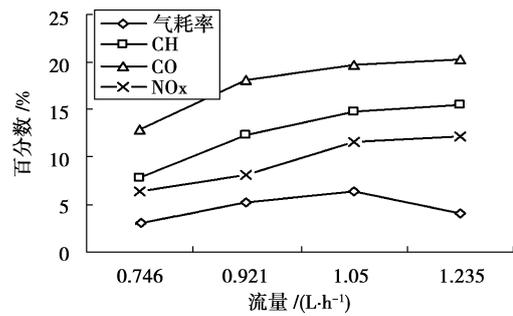


图 6 50%负荷,  $n=2 800 \text{ r}/\text{min}$  时气耗率、 $\text{HC}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_x$  减少率随流量的变化曲线

### 2.3 天然气、双氧水质量比对燃烧的影响

加入双氧水一方面降低燃烧温度,不利于燃烧;另一方面却促进了天然气的氧化,有利于燃烧的进行。因此,天然气与双氧水的质量比是影响燃烧效果的一个重要参数。发动机负荷为 25%,不同质量比时,气耗率、 $\text{CO}$ 、 $\text{HC}$  和  $\text{NO}_x$  生成量与未加双氧水时相比减少的质量百分数变化如图 7 所示。当质量比为 5.8 时气耗率的减小量最大,质量比为 4.5 时 $\text{HC}$ 的降低量最多。对于 $\text{CO}$ 和 $\text{NO}_x$ 的减小量最大时的质量比分别为 5.0 和 5.8,质量比太大或太小都不利于天然气的燃烧。综合考虑气耗率的减少量以及 $\text{CO}$ 、 $\text{HC}$ 和 $\text{NO}_x$ 降排效果,认为质量比为 4.5~5.8 时整体效果较好。

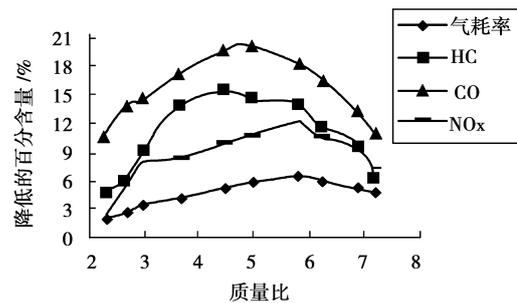


图 7 不同质量比下气耗率、 $\text{HC}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_x$ 降低的百分含量

由于双氧水的喷射量较少,且发动机内的温度较高,双氧水会很快分解为水和氧气,对环境是没有污染的。但天然气/双氧水质量比过小(或双氧水喷射量过大)时,会造成发动机内天然气的燃烧不完全,动力性能、经济性下降和 $\text{HC}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_x$ 的减排量减小,同时也可能会造成新的污染(即双氧水在缸内燃烧不彻底,排放到环境中)。因此可通过采取控制双氧水的喷射量、双氧水与天然气的质量比等措施,使双氧水在缸内分解、燃烧充分,减少或避免双氧水因分解、燃烧不完全而造成的新污染。

## 2.4 双氧水对动力性能的影响

由图8可知,功率随着转速上升逐渐增大,在2500 r/min附近功率达到最大值,之后随着转速的增大功率有逐渐减小趋势。当双氧水喷射流量为1.05 L/h时,发动机的功率有少量增加,这表明双氧水的加入,强化了燃烧,提高了效率,发动机动力性能得到提高。

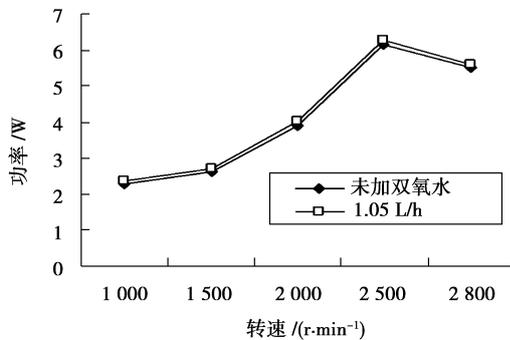


图8 50%负荷,双氧水流量1.05 L/h下的动力性能

添加双氧水后,污染物排放量与排放标准的对比见表3。

表3 污染物排放量与排放标准对比表

项目名称	生效年份	有害物含量(g/(kW·h))			
		NO <sub>x</sub>	CO	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	固体颗粒
欧-3	1999	5.0	2.0	0.10	
欧-4	2002	3.5	1.0	0.02	
欧-5	2008	2.0	1.0	0.02	
天然气		25~50	5~10	1~10	无
天然气 (50%负荷, n=2800 r/min)		32.8	6.87	4.3	—
天然气+双氧水 (50%负荷, 1.05 L/h H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , n=2800 r/min)		31.16	5.63	3.74	—
污染物降低量		5%	18%	13%	—

双氧水雾化喷射系统由空气滤清器、空压机、双氧水溶液储存器、输送软管、喷嘴毛细管、雾化喷嘴等组成,系统装置简单、改装成本低。运行时,增加了双氧水的消耗量,但减少了天然气的消耗量,且强化了燃烧,提高了效率,运行成本增加很少。经优化设计和进一步研究,掌握更准确详细的运行参数和规律,可以实现整车安装。由表3可知,安装该系统后,可在原有基础上降低HC、CO、NO<sub>x</sub>的排放量分

别为13%,18%,5%,从源头上减少了污染物的产生量,实现天然气发动机的高效清洁燃烧,进一步降低污染排放,减少对大气环境的污染。

## 3 结论

1)定负荷下,天然气发动机工作时向预混室内喷射H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>水溶液可以降低发动机燃烧温度,降低NO<sub>x</sub>排放,动力性能和经济性能都有所提高。

2)随双氧水流量增加,NO<sub>x</sub>降排效果越好,但在较大双氧水流量下,NO<sub>x</sub>降排效果明显变缓。

3)温度和氧气浓度是影响NO<sub>x</sub>生成量的主要因素。温度降低减慢NO<sub>x</sub>生成速度,氧气浓度增加又加快NO<sub>x</sub>产生,两者综合作用最终使NO<sub>x</sub>生成量减少。

4)当天然气与双氧水质量比控制范围为4.5~5.8时,气耗率降低及CO、HC、NO<sub>x</sub>降排整体效果较好。采取控制双氧水的喷射量、双氧水与天然气的质量比等措施,可减少或避免双氧水因分解、燃烧不完全而造成的新污染。

## 参考文献:

- [1] 张纪鹏,夏元东. 天然气柴油双燃料准均质燃烧过程的研究[J]. 燃烧科学与技术,2004,10(2):146-148.  
ZHANG JI-PENG, XIA YUAN-DONG. Study on para homogeneous charge compression ignition process of the dual fue[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2004,10(2):146-148.
- [2] BAUER C G, FOREST T W. Effect of Hydrogen Addition on the performance of the performance of methane fueled vehicles. Part I: effecton S. I engine performance[J]. Int J Hydrogen Energy,2001, 26: 55 - 70.
- [3] BLARIGAN P V, KELLER J O. A Hydrogen fueled internal combustion engine designed for single speed / power operation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2002, 23 (7) : 603 - 609.
- [4] 刘兵,黄印玉,黄佐华,等. 天然气掺氢火花点火发动机性能与排放研究[J]. 西安交通大学学报,2006, 40 (11): 1268-1272.  
LIU BING, HUANG YIN-YU, HUANG ZHUO-HUA. et al. Experimental study on performance and emissions of a spark ignition engine fuelled with cng hydrogen mixtures [J]. Journal of xi' an jiao tong university, 2006,40(11): 1268-1272.
- [5] EROL KAHRAMAN, S. CIHANGIR OZCANL, BARIS OZERDEM. An experimental study on performance and emission characteristics of a hydrogen

- fuelled spark ignition engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007 (32):2066-2072.
- [6] 姜磊,李兴虎,王宇,等. 天然气/氢气混合燃料发动机的稀燃极限和排放特性试验研究[J]. 汽车工程 2008, 30(3):197-201.
- JIANG LEI, LI XING-HU, WANG YU, et al. An experimental study on lean burn limits and emission characteristics of an engine fuelled with CNG/hydrogen blends [J]. Automotive Engineering, 2008, 30 (3): 197-201.
- [7] 刘海全,马凡华,王宇,等. 不同掺氢比天然气发动机的燃烧排放特性[J]. 农业机械学报, 2008,39(8):1-5.
- LIU HAI-QUAN, MA FAN-HUA, WANG YU, et al. Combustion and emission characteristics of an engine fueled with hydrogen enriched nature gas of various blend ratios [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(8):1-5.
- [8] 李从心,张欣,刘建华. 天然气掺氢发动机性能试验[J]. 北京交通大学学报,2008,32(4):6-9.
- LI CONG-XIN, ZHANG XIN, LIU JIAN-HUA. Experimental study on the performance of HCNG engine[J]. Journal of beijing jiaotong university, 2008, 32(4):6-9.
- [9] TIEN HO, VISHY KARRI, DANIEL LIM, et al. An investigation of engine performance parameters and artificial intelligent emission prediction of hydrogen powered car [J]. International journal of hydrogen energy, 2008 (33) :3837 - 3846.
- [10] CAROLIN BORN, NORBERT PETERS. Reduction of soot emission at a DI diesel engine by addition injection of hydrogen peroxide[J]. M TZ, 1998,59(10).
- [11] 方显忠,刘巽俊,阎淑芳,等. 通过喷射过氧化氢降低直喷式柴油机排放的研究[J]. 内燃机学报,2003,21(3): 194-196.
- FANG XIAN-ZHONG, LIU XUN-JUN, YAN SHU-FANG, et al. Reduction of exhaust emissions from a diesel engine by additional injection of hydrogen peroxide [J]. Transactions of CSICE, 2003, 21 (3): 194-196.
- [12] TRAPEL FRICA, IFEACHO PASCA, ROTH PAUL. Injection of hydrogen peroxide into the combustion chamber of diesel engine; effects on the exhaust gas behaviour [J]. Society of Automotive Engineers,2004, 113: 1744-1748.
- [13] 王益军,高希彦,唐运榜,等. 进气道喷射过氧化氢对直喷式柴油机排放的影响[J]. 车用发动机, 2005, 160 (6):39-41.
- WANG YI-JUN, GAO XI-YAN, TANG YUN-BANG. Reduction of exhaust emissions from a DI diesel engine by the additional injection hydrogen peroxide in the intake port[J]. Vehicle engine,2005,160 (6):39-41.
- [14] 王宪成,高希彦,王益军. 过氧化氢改善柴油机燃烧试验研究[J]. 大连理工大学学报,2006,46(2):194-197.
- WANG XIAN-CHENG, GAO XI-YAN, WANGYI-JUN. Experimental study of application of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> additive to improve diesel combustion [J]. Journal of Dalian University of Technology,2006,46(2):194-197.
- [15] 栗工,高泰荫,陈中洲,等. 甲烷-空气燃烧过程中 NO<sub>x</sub> 生成机理和影响因素分析[J]. 燃烧科学与技术,2005, 11(2):142-148.
- LI GONG, GAO TAI-YIN, CHEN ZHONG-ZHOU, et al. Analysis on reaction mechanism and influence factors of NO<sub>x</sub> emission in the CH<sub>4</sub>-air premixing combustion [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2005,11(2):142-148.
- [16] 岑可法,姚强. 高等燃烧学[M]. 杭州:浙江大学出版社,2002.

(编辑 陈移峰)

(上接第 103 页)

- [11] 闻新,周露,王丹力,等. MatLab 神经网络应用设计 [M]. 北京:科学出版社,2000, 207-212.
- [12] 楼顺天,施阳. 基于 Matlab 的系统分析与设计——神经网络[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1988.
- [13] SWINGLER K. Applying Neural Networks; a Practical Guide [M]. New York: Academic Press, 1996.
- [14] FU L. Neural Networks in Computer Intelligence [M]. New York: McGraw-Hill, 1995.
- [15] 杨忠平. 长春市城市重金属污染的生态地球化学特征及其来源解析[D]. 长春:吉林大学,2008.
- [16] DALIAKOPOULOS I N, COULIBALY P, TSANIS, I. Groundwater level forecasting using artificial neural networks [J]. Journal of Hydrology, 2005, 309, 229-240.

(编辑 陈移峰)