

# 2004 Mack MD11 柴油机燃料加氢后 NO<sub>x</sub> 与微粒排放特性

杨振中<sup>1\*</sup>, Hailin Li<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电学院机械学院, 郑州 450011; 2. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, West Virginia University, Morgantown 26506, WV, USA)

**摘要:** 为了降低柴油机的排放, 氢作为柴油机燃料的研究正在引起研究者的关注。该文进行了在 2004 Mack MD11 柴油机中添加不同比例氢气(最高氢气比例达 7%)与柴油形成混合燃料的 NO<sub>x</sub>、微粒(PM, particulate matter)排放特性研究。研究表明: 负荷工况不同, 添加氢气对 NO<sub>x</sub> 排放特性的影响不同; 随着添加氢的增加, 有 NO 转化为 NO<sub>2</sub> 现象; NO<sub>x</sub> 排放很大程度还与发动机可变截面涡轮增压系统(VGT, variable-geometry gas turbine)和废气再循环系统(EGR, exhaust gas recirculation)工作状况有关; 添加氢气后即使在大、全负荷下, NO<sub>x</sub> 排放量也没有明显增加。这主要归因于 2004 Mack MD11 采取了 EGR, 并且随着负荷增加, EGR 率也在增加。在各种负荷工况下, 添加氢气对降低 PM 排放量的作用明显, PM 排放量减小率一般达 50%以上, 最高达 75%。

**关键词:** 氢燃料, 柴油机, NO<sub>x</sub>, 排放特性, 微粒

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.12.011

中图分类号: TK91

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-12-0062-06

杨振中, Hailin Li. 2004 Mack MD11 柴油机燃料加氢后 NO<sub>x</sub> 与微粒排放特性[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 62-67. Zhenzhong Yang, Hailin Li. NO<sub>x</sub> and particulate emission characteristics of 2004 Mack MD11 diesel engine with addition of H<sub>2</sub>[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(12): 62-67. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

柴油机以高的热效率和宽广的功率范围在工程建设领域中应用广泛, 但其较多的 PM (particulate matter, 微粒)、NO<sub>x</sub> (氮氧化物) 排放问题一直为人们所关注。氢燃料在内燃机上的良好性能以及在降低发动机排放方面的优势吸引着众多研究者对氢燃料在柴油机中的应用进行探索<sup>[1-8]</sup>。对氢—柴油双燃料发动机的研究开始阶段主要是探索氢气在柴油机中作为替代燃料的可行性和如何改善发动机性能, 随着人们环保意识的增强和环保法规的趋严, 近期较为关注的是对 CO<sub>2</sub> 排放以及氢气在减少颗粒物 PM 和 NO<sub>x</sub> 等排放物方面的潜能如何<sup>[9-17]</sup>。在国内, 2011 年 12 月的《环境空气质量标准》(二次征求意见稿)显示, 京津冀、长三角、珠三角三大地区的 9 个城市群可能会被强制要求先行监测并公布 PM<sub>2.5</sub> 数据, 这使得对减少柴油机的 PM 排放要求更为迫切。在柴油中掺氢有望降低 PM 排放, 应用前景良好。作者在 2004 Mack MD11 柴油机中添加不同比例的氢气与柴油形成混合燃料, 对混合燃料在各种负荷下 CO、CO<sub>2</sub>、HC、NO<sub>x</sub> 与 PM 的排放特性进行了研究。关于 CO、CO<sub>2</sub>、HC 排放特性研究参见文献[18]。本文着重对 NO<sub>x</sub> 与 PM 排放特性进行分析。

收稿日期: 2011-10-29 修订日期: 2012-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(51076046); 河南省创新型科技人才队伍建设工程(创新型科技团队, 2011-39)、郑州市科技创新人才专项(096SYJH25086)和河南省重点科技计划项目(102102210034)资助。

作者简介: 杨振中, 教授, 主要从事氢燃料发动机燃烧与优化控制方面的研究, 作者曾在美国西弗吉尼亚大学(West Virginia University)做访问研究。郑州 华北水利水电学院机械学院, 450011。Email: yzzho@163.com

## 1 发动机及测试系统

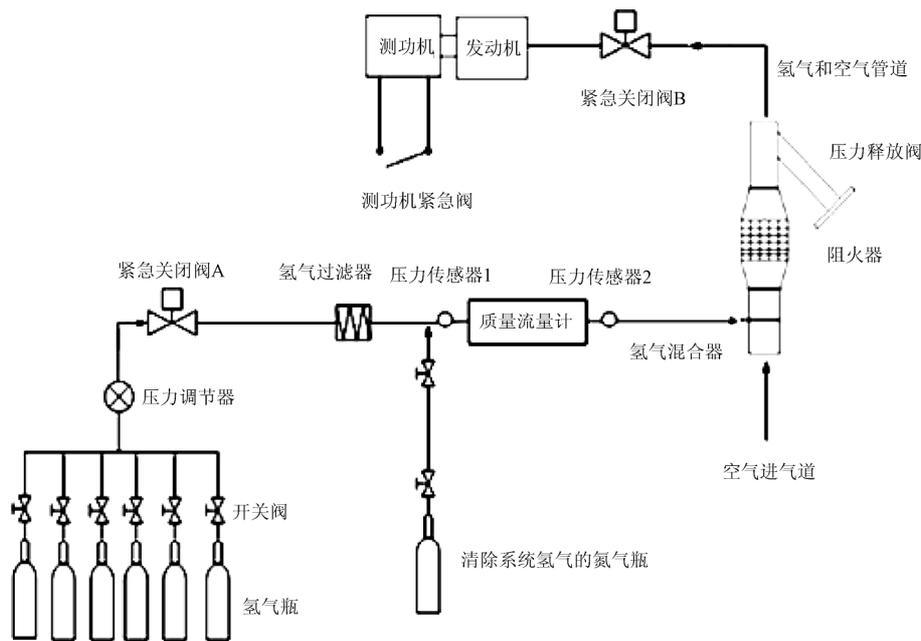
### 1.1 试验发动机概况

试验在美国西弗吉尼亚大学(West Virginia University)进行。发动机为一台直列 6 缸、采取涡轮增压、并带有冷却 EGR (exhaust gas recirculation) 系统的 2004 Mack MD11 重型柴油机。在该机上加装了氢气供应系统。发动机安装在 404.5 W (550 马力) 的通用电气直流测功机上。发动机和测试仪器详细说明见文献[18]。

### 1.2 氢气燃料供应系统

图 1 为氢气燃料供应系统的原理图, 包括 2 个子系统: 上游氢气燃料系统(从燃料箱到紧急关闭阀 A)和下游氢气燃料系统(从紧急关闭阀 A 到进气歧管)。上游氢气燃料系统主要包括氢气瓶、开关阀、2 套压力调节器(图中仅画出 1 套)、紧急关闭阀 A、安全阀(图中未画出)。氢气瓶最大压力为 13.79 MPa (2 000 psi)。当出现紧急情况时, 紧急关闭阀 A 关闭, 停止氢气燃料的供应。安全阀是为了防止氢气反向流动而设置。压力调节器可以调节氢气燃料, 使之保持一个稳定的压力。上游氢气燃料系统的主要功能是在恒压下连续不断地提供氢气, 并在紧急情况下切断氢气的供应。下游氢气燃料系统包括质量流量计、压力传感器、氢气混合器、阻火器、压力释放阀、紧急关闭阀 B 等。下游氢气燃料系统的主要功能是计量、用恰当方式保证将氢气送入发动机进气系统, 并防止产生回火。氢气燃料混合器安装在阻火器前 15.25 cm (0.5 feet) 处。由于阻火器体积较大, 可以满足氢气与空气的混合气顺利通过。在进气系统中

安装阻火器能阻断由回火引起的氢气火焰传播。压力释放阀能减小由于回火引起的进气系统的压力。



注：紧急关闭阀 A 安装在压力调节器后；紧急关闭阀 B 安装在靠近发动机位置。

图 1 氢气燃料供应系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of H<sub>2</sub> fuel system

## 2 加氢量对 NO<sub>x</sub> 排放特性的影响

### 2.1 发动机运行在低负荷下的 NO<sub>x</sub> 排放特性

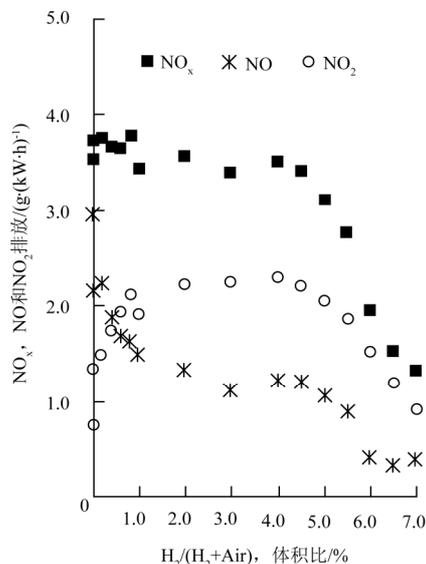
如图 2a 所示，10%的低负荷工况下，当进气管添加氢的体积比例小于 4%时，随着添加氢气的增加，NO<sub>x</sub> 排放量稍有降低；NO 排放量先迅速下降，之后缓慢下降，直至 4%趋于稳定；而 NO<sub>2</sub> 随氢气比例变化的规律与此正好相反。NO 下降的幅度和数值正好与 NO<sub>2</sub> 上升的幅度大致吻合。这是由于随着添加氢的比例增加，部分 NO 转化为 NO<sub>2</sub>。当增加氢气比例超过 4%以后，NO<sub>x</sub> 排放大幅度下降，这是由于氢气添加比例增加时，柴油燃料比例减小，总燃料质量减少，总体当量比减小。稀薄燃烧使燃烧温度降低的结果。NO 与 NO<sub>2</sub> 也同步下降，在氢气的体积比为 6%附近时，NO 迅速减少，NO 转化为 NO<sub>2</sub> 比例增加，然后，NO 转化为 NO<sub>2</sub> 比例趋于稳定，表明随着添加氢气比例增加，部分 NO 转化为 NO<sub>2</sub> 呈现跳跃式增加趋势。

图 2b 和 2c 示出了的分别运行在 15%和 20%负荷下，添加氢对 NO<sub>x</sub> 排放的影响。在 15%的负荷下，氢的添加使 NO<sub>x</sub> 的排放略有增加，添加比例超过 6%直至 7%时，NO<sub>x</sub> 的排放又有所降低。但就总体而言，随着氢的添加，NO<sub>x</sub> 变化不大。在 20%负荷下，添加氢气在 4%至 5.0%时有所降低，超过 5.0%后又有所增加，总体而言，氢气的添加对 NO<sub>x</sub> 排放的影响同样不大。NO 排放量先迅速下降，在氢气比例为 1%以后，趋于稳定；而 NO<sub>2</sub> 随氢气比例变化的规律与此正好相反。这与 10%情况下 NO 和 NO<sub>2</sub> 的变化趋势基本一致。

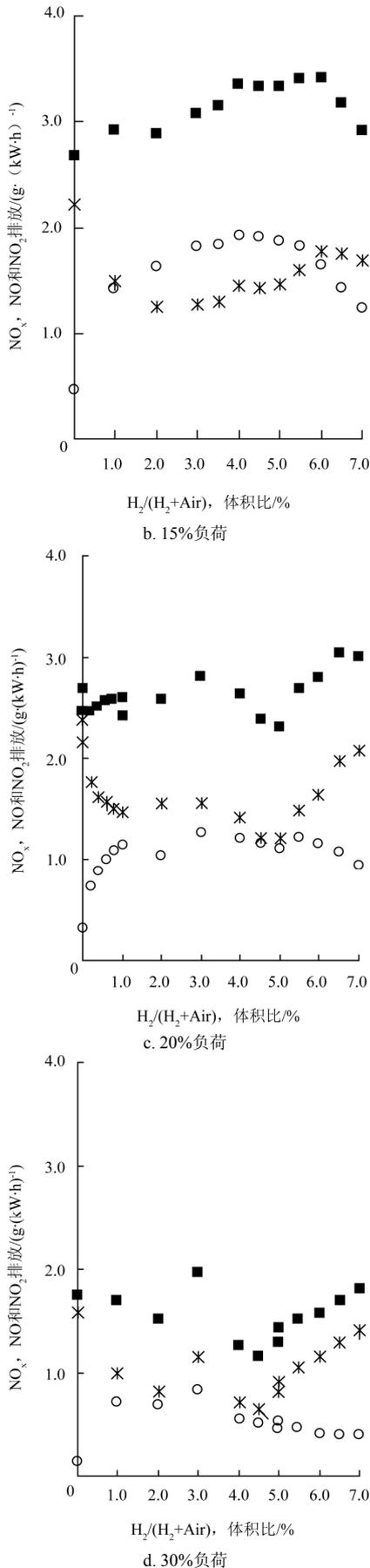
如图 2d 所示，当发动机运行在 30%的负荷下，加氢后，开始时 NO<sub>x</sub> 排放稍有降低，但随后 NO<sub>x</sub> 排放又有所增加，直至加氢达到 3%时，NO<sub>x</sub> 达到最大值 2 g/(kW·h)。

此后，随着加氢量增加，NO<sub>x</sub> 开始降低。在加氢比例为 4.5%时，NO<sub>x</sub> 达到最小值 1.15 g/(kW·h)。进一步增加氢气超出 5%以后，可以发现 NO<sub>x</sub> 的排放逐步增加。在氢的添加体积比为 6%时，NO<sub>x</sub> 排放与纯柴油时相当。

总之，添加氢气对柴油机 NO<sub>x</sub> 排放的影响有 2 方面：一方面随着氢气添加量增加，混合气燃烧速度增加，从而缸内温度升高，有利于 NO<sub>x</sub> 增加；另一方面，随氢气添加比例增加，柴油燃料比例减小，总燃料质量减少，总体当量比减小。稀薄燃烧使燃烧温度降低，促使 NO<sub>x</sub> 下降；究竟哪一因素占矛盾的主导位置，还与发动机本身所处负荷工况有关。一般而言，低负荷时，后者影响更大些，随负荷增加，前者影响因素逐步占主导地位。



a. 10%负荷



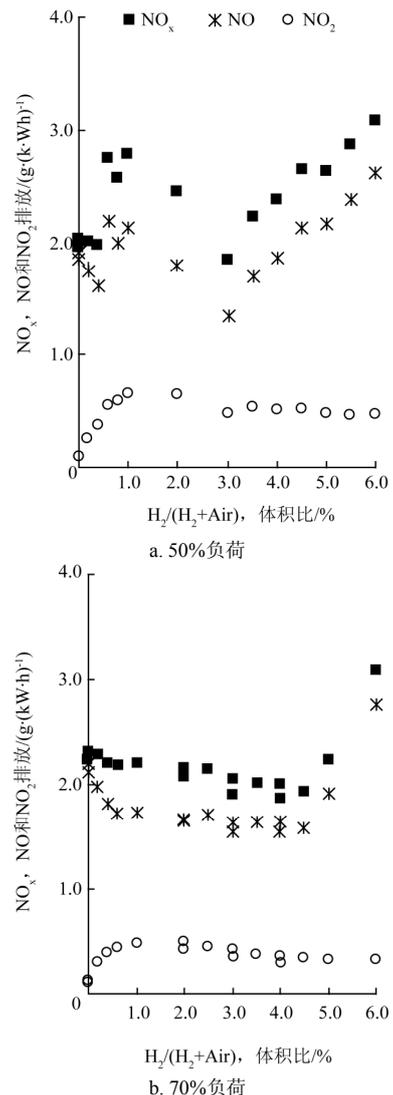
注: 转速  $N=1200$  r/min.

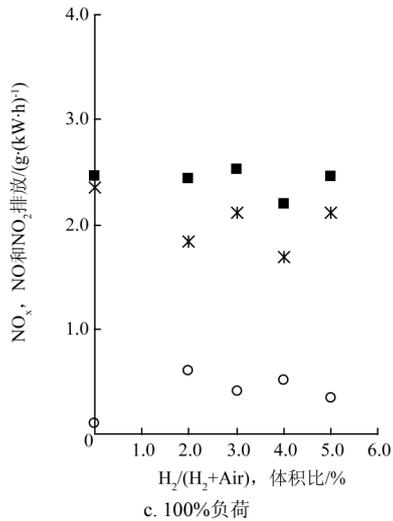
图2 低负荷下加氢对  $NO_x$ 、NO 和  $NO_2$  排放的影响

Fig.2 Effect of  $H_2$  addition on emissions of  $NO_x$ , NO and  $NO_2$  at low load operation

## 2.2 发动机运行在中、高负荷下的 $NO_x$ 排放特性

图3表明了发动机运行在中、高负荷下,添加氢气对  $NO_x$  排放的影响。图3a为50%负荷的情况,可以看出0.2%和0.4%的氢气添加量对  $NO_x$  的排放量几乎没有影响。然而,当氢的添加量在0.4%至1%时,  $NO_x$  的排放量有一个突然的增加。此时  $NO_x$  排放的突然增加是由于:本机可变截面涡轮增压系统VGT(variable-geometry gas turbine)和废气再循环系统(EGR)工作状态在控制策略作用下发生突然变化所致,这在很大程度上依赖于发动机转速和表征发动机负荷的柴油燃料的流量。氢的添加量超过1%以后,  $NO_x$  排放量降低。直至加氢达到3%时,  $NO_x$  达到最小值  $1.9$  g/(kW·h),  $NO_x$  的排放与纯柴油时基本相当。此后,随着加氢量增加,  $NO_x$  排放量又开始增加。图3b表明了发动机运行在的70%的负荷下,添加氢气对  $NO_x$ 、NO 和  $NO_2$  排放量的影响。从图中可以看出添加氢气降低了  $NO_x$  和 NO 的排放量,  $NO_x$  的最小值发生在添加氢气为4.5%时。进一步增加氢气的添加量,  $NO_x$  和 NO 的排放量伴随着  $NO_2$  排放量的减少明显增加。图3c示出在全负荷下添加氢气对  $NO_x$  排放几乎没有影响(其中加氢比例为2%和4%是在1225 r/min测得的)。由此可见,当氢气添加到这台2004 Mack MD11后,即使在大、全负荷下,  $NO_x$  排放量也没有明显增加,这主要归因于这台2004 Mack MD11采取了EGR,并且随着负荷增加,EGR率也在增加。



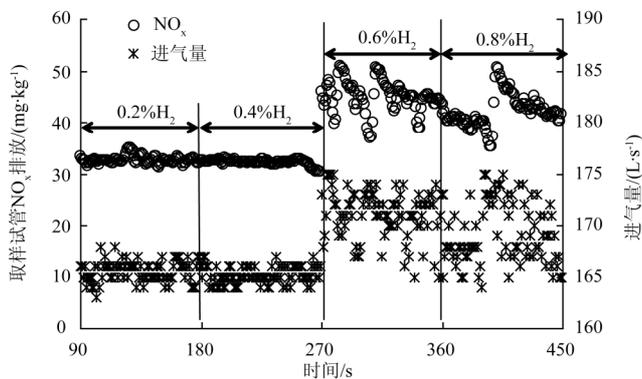


注:  $N=1\ 200\ \text{r/min}$ 。

图 3 中、高负荷下加氢对 NO<sub>x</sub>、NO 和 NO<sub>2</sub> 排放的影响

Fig.3 Effect of H<sub>2</sub> addition on emissions of NO<sub>x</sub>, NO and NO<sub>2</sub> at medium load operation

图 4 揭示了当氢气体积比在 0.4%至 1%时, NO<sub>x</sub> 的排放量突然增加与 VGT 和 EGR 工作状态发生变化的情况, 即进气管空气流动速度发生变化时对 NO<sub>x</sub> 的影响。氢气体积比在 0.4%和 0.6%时, 减小废气循环速率, 进气管空气流动速度增加, 缸内新鲜充量比例增加, 燃烧温度增加。从而, NO<sub>x</sub> 排放量增加。



注:  $N=1\ 200\ \text{r/min}$ , 50%负荷。

图 4 进气管空气流量与加氢对 NO<sub>x</sub>、NO 和 NO<sub>2</sub> 排放的影响

Fig.4 Effect of H<sub>2</sub> addition and intake air flow on NO<sub>x</sub>, NO and NO<sub>2</sub> Emissions

### 3 加氢量对 PM 排放特性的影响

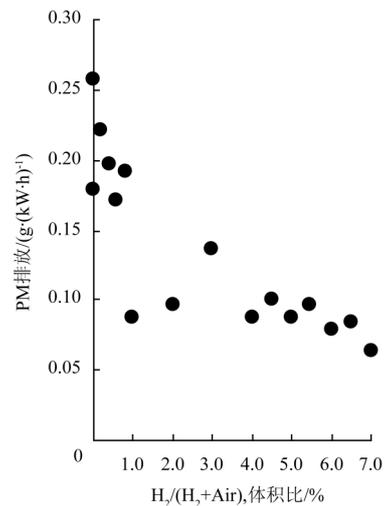
在柴油机转速为 1 200 r/min 下, 分别在发动机负荷从 10%至全负荷下, 进行了添加氢气直至 7%体积比时对 PM 排放影响的试验研究。

#### 3.1 发动机运行在低负荷下的 PM 排放特性

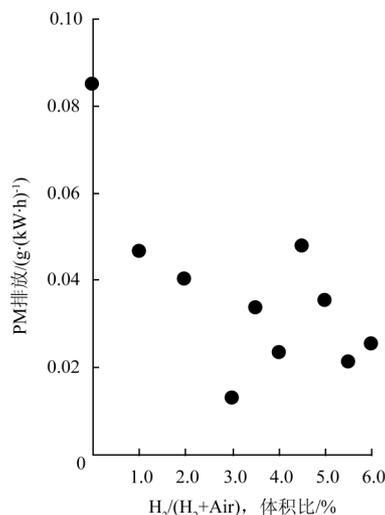
在 10%负荷下, PM 排放量随着氢气添加量的变化趋势如图 5a 所示。随着添加氢气增加直至 1%时, PM 排放量迅速减少, PM 排放量从纯柴油运行的大约 0.20 g/(kW·h) 减小到添加氢气体积比为 1%时的 0.082 g/(kW·h), 减小率大约为 60%。添加氢气超过 1%, 直至 4%范围内, 氢气添加量增加对 PM 排放量的影响作用减弱, PM 排放量有些起伏, 呈现先扬后抑之势; PM

排放量大约在 0.082 至 0.14 g/(kW·h)之间变化。添加氢气超过 4%以后, PM 排放量变化不明显, 稍有降低。图 5b 和图 5c 分别示出负荷为 15%和 20%情况下, PM 排放量随着氢气添加量变化趋势。同 10%负荷类似, 在 15%负荷和 20%下, 随着添加氢气增加直至 1%附近时, PM 排放量迅速减少, PM 排放量从纯柴油运行的大约 0.082 g/(kW·h)减小到添加氢气容积比为 1%时的 0.043 g/(kW·h), 减小率接近 50%。添加氢气超过 1%以后, 氢气添加量增加对 PM 排放量的影响作用减弱, PM 排放量总体呈现缓慢降低的趋势。15%负荷下, 当添加氢气在 2%至 4%范围内, PM 排放量仍然有些起伏, 只是与 10%负荷不同, 呈现先抑后扬的趋势; 20%负荷下, 当添加氢气在 2%至 4%范围内, PM 排放量平稳减小, 未有明显起伏。

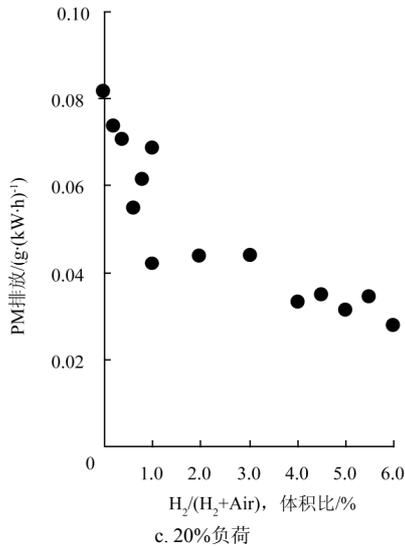
此外, 10%负荷工况比 15%负荷或 20%负荷工况的 PM 比排放高, 一方面, 是由于负荷很小时, 发动机温度低, 柴油混合气形成不良所致, 当负荷稍有增加后, 情况即大为缓解, PM 排放量下降。另一方面, 比排放也为负荷增加后 PM 比排放下降做出贡献。



a. 10%负荷



b. 15%负荷



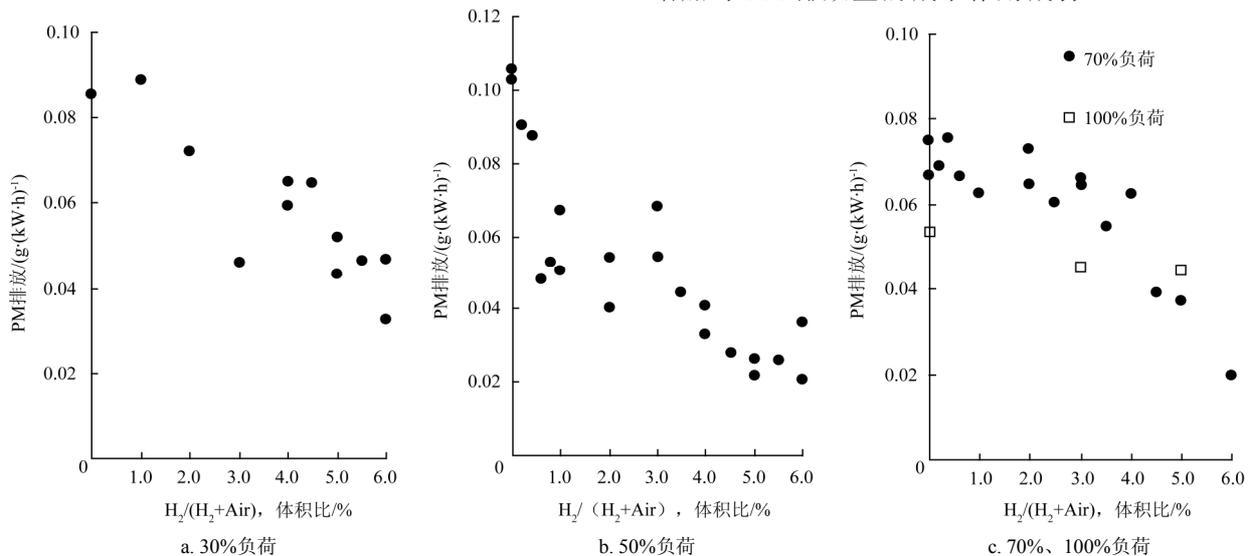
注:  $N=1\ 200\ \text{r/min}$ 。

图5 低负荷下加氢对PM排放的影响

Fig.5 Effect of  $\text{H}_2$  addition on PM emissions at low load operation

### 3.2 发动机运行在中、高、全负荷下的PM排放特性

发动机运行负荷分别为30%和50%情况下,PM排放量随着氢气添加量变化趋势如图6所示。当添加



注:  $N=1\ 200\ \text{r/min}$ 。

图6 中、高、全负荷下加氢对PM排放的影响

Fig.6 Effect of  $\text{H}_2$  addition on PM emissions at medium, high and full load operation

总之,除全负荷工况的其余各种负荷工况下,随着添加氢气增加,PM排放量减少。而且,PM排放量平均减小率一般在50%以上,最高达75%。因此,添加氢气对降低PM排放量的作用明显,这表明添加氢气有助于改善混合气形成与燃烧状况。

## 4 结论

1) 在低、中负荷下,添加氢气对柴油机 $\text{NO}_x$ 排放的影响有以下2方面:一方面随着氢气添加量增加,增加了混合气燃烧速度,从而增加缸内温度,有利于 $\text{NO}_x$ 增加;另一方面,随氢气添加比例增加,柴油燃料比例减小,总燃料质量减少,总体当量比减小。稀薄燃烧使燃烧温度降低,将促使 $\text{NO}_x$ 下降。一般而言,低负荷时,

氢气逐步增加,PM排放量逐步减少。在30%负荷工况(图6a),PM排放量从纯柴油运行的大约 $0.11\ \text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 至 $0.082\ \text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 范围减小到氢气添加量为6%的 $0.031\ \text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。PM排放量减小率大约为62%。发动机工作在50%负荷工况(图6b)附近时,当添加氢气在2%至4%范围内,PM排放量有所起伏,或先扬后抑,或先抑后扬,但变化趋势不呈规律性。因此,无法说明是添加氢气变化引起,这可能与柴油机本身优化控制策略、可变截面涡轮增压系统和废气再循环系统工作状态有关。图6c为发动机运行在大、全负荷工况即负荷分别为70%和100%情况下,PM排放量随着氢气添加量变化趋势。由图可见,PM排放量随着氢气添加量增加而减小。其中,在70%负荷下,PM排放量从纯柴油运行的大约 $0.078\ \text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 减小到添加氢气容积比为6%时的 $0.020\ \text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,减小率大约为74%;在100%负荷下,PM排放量从纯柴油运行的大约 $0.053\ \text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 减小到添加氢气容积比为5%时的 $0.043\ \text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,减小率大约为19%。在全负荷工况下,由于发动机运行温度高,氢气添加量增加对PM排放量的减小作用减弱。

后者影响更大些,随负荷增加,前者影响因素逐步占主导地位。本文的试验结果显示,10%负荷下后者为主要因素,15%与20%负荷下,前者逐步上升为主要因素;而在中等负荷下,加氢量增加到一定程度后, $\text{NO}_x$ 排放量有所增加,前者为主要因素。而且中负荷以后, $\text{NO}_x$ 排放的影响很大程度还受到发动机可变截面涡轮增压系统(VGT)和废气再循环系统(EGR)工作状态的影响。在高、全负荷柴油机的 $\text{NO}_x$ 排放量没有明显增加,这主要归因于这台2004 Mack MD11柴油机采取了EGR。由于随着负荷增加,EGR率也在增加,抑制了发动机温度的增加。此外,随着添加氢的比例增加,部分NO转化为 $\text{NO}_2$ ,且这种转化呈现跳跃式增加趋势。

2) 在各种负荷工况下,随着氢气添加量的增加,PM

排放量减少。而且, PM 排放量减小率一般达 50%以上, 最高达 75%。在全负荷下, 由于发动机运行温度高, 氢气添加量增加对 PM 排放量的减小作用有所减弱。总体而言, 添加氢气对降低 PM 排放量的作用明显。

#### [参 考 文 献]

- [1] Gomes J M, Antunes Rk, Mikalsen A P Roskilly. An experimental study of a direct injection compression ignition hydrogen engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(15): 6516—6522.
- [2] Murari Mohon Roy, Eiji Tomita, Nobuyuki Kawahara, et al. An experimental investigation on engine performance and emissions of a supercharged H<sub>2</sub>-diesel dual-fuel engine[J]. *International Journal Hydrogen Energy*, 2010, 35(2): 844—853.
- [3] Tsolakis A, Megaritis A. Partially premixed charge compression ignition engine with on-board H<sub>2</sub> production by exhaust gas fuel reforming of diesel and biodiesel[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2005, 30(7): 731—745.
- [4] Mohammadia A, Shiojib M, Nakaib Y, et al. Performance and combustion characteristics of a direct injection SI hydrogen engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(2): 296—304.
- [5] Gomes Antunes J M, Mikalsen R, Roskilly A P. An investigation of hydrogen-fuelled HCCI engine performance and operation[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(20): 5823—5828.
- [6] 左承基, 钱叶剑, 徐天玉, 等. EGR 与富氢进气对柴油机能和排放的影响[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(4): 12—15.  
Zuo Chengji, Qian Yejian, Xu Tianyu, et al. Effect of EGR intake hydrogen enrichment on performance and emissions of automotive diesel engine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(4): 12—15. (in Chinese with English abstract)
- [7] Shirk M G, McGuire T P, Gary L, et al. Investigation of a hydrogen-assisted combustion System for a light-duty diesel vehicles[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(23): 7237—7244.
- [8] Stanislaw Szwaja, Karol Grab-Rogalinski. Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(10): 4413—4421.
- [9] Saravanan N, Nagarajan G. An experimental investigation of hydrogen-enriched air induction in a diesel engine system[J]. *International Journal Hydrogen Energy*, 2008, 33(6): 1769—1775.
- [10] Adrian Birtas, Iulian Voicu, Cristian Petcu, et al. The effect of HRG gas addition on diesel engine combustion characteristics and exhaust emissions Original Research Article[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(18): 12007—12014.
- [11] 宋云超, 宁智, 刘耀东, 等. 氢气/柴油发动机 NO<sub>x</sub> 和微粒排放特性的数值模拟[J]. *内燃机学报*, 2011, 29(6): 495—503.  
Song Yunchao, Ning Zhi, Liu Yaodong, et al. Numerical simulation of NO<sub>x</sub> and particulate emission characteristics of hydrogen/diesel engine[J]. *Transactions of CSICE*, 2011, 29(6): 495—503. (in Chinese with English abstract)
- [12] 梁晨, 纪常伟, 刘达洋, 等. 混氢对柴油机燃烧及排放影响的试验研究[J]. *汽车工程*, 2009, 31(7): 669—673.  
Liang Chen, Ji Changwei, Liu Dayang, et al. An experimental study on the effects of hydrogen addition on the combustion and emissions of a diesel engine[J]. *Automotive Engineering*, 2009, 31(7): 669—673. (in Chinese with English abstract).
- [13] Yuji Harada, Atsushi Sakane. An experimental investigation on engine performance and emissions of a supercharged H<sub>2</sub>-diesel dual-fuel engine[J]. *International Journal Hydrogen Energy*, 2010, 35(2): 844—853.
- [14] Sitshebo S, Tsolakis A, Theinnoi K. Promoting hydrocarbon-SCR of NO<sub>x</sub> in diesel engine exhaust by hydrogen and fuel reforming[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(18): 7842—7850.
- [15] Thomas Wallner, Henning Lohse-Busch, Stephen Gurski, et al. Fuel economy and emissions evaluation of BMW Hydrogen 7 Mono-Fuel demonstration vehicles[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(24): 7607—7618.
- [16] Bika A S, Franklin L M, Kittelson D B. Emission Effects of hydrogen as a supplement fuel with diesel and bio-diesel[C]//SAE 08010648, 2008.
- [17] McWilliam L, Megaritis T, Zhao H. Experimental investigation of the effects of combined hydrogen and diesel combustion on the emissions of a HSDI diesel engine[C]//SAE 08010156; 2008.
- [18] 杨振中, Hailin Li. 2004 Mack MD11 柴油机燃用氢-柴油混合燃料的排放特性[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(5): 39—43.  
Yang Zhenzhong, Hailin Li. Emission performances of 2004 Mack MD11 engine fueled with hydrogen-diesel blend[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(5): 39—43. (in Chinese with English abstract)

## NO<sub>x</sub> and particulate emission characteristics of 2004 Mack MD11 diesel engine with addition of H<sub>2</sub>

Yang Zhenzhong<sup>1\*</sup>, Hailin Li<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China;  
2. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, West Virginia University, Morgantown 26506, WV, USA)

**Abstract:** In order to reduce emissions of diesel engines, hydrogen for fuel of heavy-duty diesel engines paid more attention in recent years. Effect of the addition of hydrogen on the emissions of NO<sub>x</sub> and PM at different proportion (the highest volume proportion of the hydrogen is 7% of hydrogen air mixture in inlet pipe) into 2004 Mack MD11 diesel engine have been conducted. Research showed that the addition of hydrogen on NO<sub>x</sub> emission characteristics had different effects with the increase of hydrogen added in various load. And a change from NO to NO<sub>2</sub> had been found. It was found that emission of NO<sub>x</sub> related to the variable-geometry gas turbine (VGT) and exhaust gas recirculation(EGR). And NO<sub>x</sub> emission was not significantly increased after adding hydrogen gas even at large or full load operating condition, which was mainly attributed to the EGR of the diesel engine, and the EGR rate was increased as the load increasing. Research also showed that adding hydrogen can reduce PM emission under different load conditions.

**Key words:** Hydrogen fuels, diesel engines, NO<sub>x</sub>, emissions, particulate matter