

2004 Mack MD11 柴油机燃用氢-柴油混合燃料的排放特性

杨振中¹, Hailin Li²

(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。该文对 2004 Mack MD11 柴油机燃用不同比例(最高氢气比例达 7%)的氢气与柴油组成的混合燃料的 CO、CO₂、HC、排放特性进行了研究。结果表明: 在各种负荷下, 氢气和柴油的混合燃料有助于降低 CO、CO₂ 和 HC 的比排放。随氢气添加量增加(或添加超过一定量以后), CO、CO₂ 和 HC 各自排放量随着负荷降低的规律不尽相同, 在低负荷下排放量的降低更为显著一些。如在 10% 负荷下, CO 排放量减少 50% 以上; CO₂ 量减少 60% 以上; HC 排放量减少 40% 以上。

关键词: 氢燃料, 柴油机, 排放特性, CO、CO₂ 和 HC

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.05.007

中图分类号: TK91

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-05-0039-05

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)

0 引言

氢燃料在内燃机上的良好性能使人们对火花点火式汽油机中应用氢作为燃料的研究保持多年^[1-5]。同时, 燃料电池的迅速发展, 有力地推进了燃料电池汽车和氢内燃机汽车在制氢、储氢、车载氢源等方面的共性之处的相关研究, 也进一步激发了人们在内燃机中应用氢的研究兴趣。与火花点火式汽油机相比, 柴油机以高的热效率和宽广的功率范围在工程建设领域应用广泛, 而其较多的 PM, NO_x 与温室气体排放一直困扰着研究人员。与应用在点燃式发动机不同, 由于氢的自燃温度高达 858 K, 这使得氢几乎不可能采取类似于柴油的压燃着火方式应用在压燃式发动机上。美国康奈尔大学(Cornell University)的相关研究表明: 在压缩比高达 29 的发动机中仍不能使氢通过压燃方式着火^[6-7]。这意味着也许氢不适合作为一种单一燃料应用在柴油机中, 如果氢作为柴油机的单一燃料, 则需要加装点火装置解决其着火问题^[8]。解决氢柴油机的着火问题的另一途径是采取引燃方式, 这种引燃式双燃料氢发动机仅是通过将少量柴油喷入到发动机燃烧室内(引燃喷射)以期形成着火点, 解决在发动机中氢空气混合气的着火问题^[9]。

近年, 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^[10-17], 本文在 2004 Mack MD11 柴油机中燃用不同比例的氢气与柴油组成的混合燃料, 对在不同负荷下的 CO、CO₂、HC 排放特性进行了研究。试验时保持发动机转速不变, 通过进气管添加氢气, 并以整个进气管氢气占空气和氢气之和的容积百分数计量, 最大氢气添加量不超过 8%, 测定发动机的排放特性。以期探索在不同工况下, 不同加氢量对重型柴油机的排放变化规律, 为通过优化加氢量改善柴油机排放提供参考。

1 发动机及测试系统

1.1 试验发动机概况

试验是在美国西弗吉尼亚大学(west virginia university)完成的, 试验发动机为加装了氢气供应系统的直列 6 缸 2004 Mack MD11 重型柴油机。该机采用涡轮增压、并带有冷却 EGR 系统。该机安装在一个 550 hp (404.5 W) 的通用电气直流测功机上。发动机仪表盘可以直接显示进气管空气压力、进气管温度、进气阻力、总排气背压、排气温度、冷却水温度和油温等。试验所用发动机和测功设备如图 1 所示。发动机技术参数见表 1。

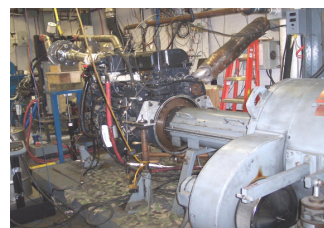


图 1 2004 Mack MD11 柴油机测试系统
Fig.1 2004 Mack MD11 diesel engine mounted to 550 hp DC dynamometer

收稿日期: 2011-05-06 修订日期: 2011-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(5107604640)、河南省科技创新型团队(2011年)、郑州市科技创新人才专项(096SYJH25086)资助

作者简介: 杨振中(1957-), 男, 博士, 教授, 主要从事氢燃料发动机燃烧与优化控制方面的研究, 2010 年在美国 West Virginia University, Morgantown 做访问研究。郑州 华北水利水电学院机械学院, 450011。
Email: yzzho@163.com.cn

表 1 2004 Mack MD11 柴油机技术参数
Table 1 Specifications of 2004 Mack MD11 diesel engine

柴油机 制造商	柴油机 型号	生产年	发动机 排量/L	标定功率/ kW	标定扭矩/ (N·m)	气缸数	缸径×行程	每循环 行程数	燃油供 应形式	冷却 EGR	可变截面涡轮 增压系统 (Variable geometry turbocharger-VGT)
Mack	MD11	2004	10.8	261 kW/ 1800 r/min	1 843.9/ 1 200 r/min	6	4.84 in(123 mm)× 5.98 in(152 mm)	4	缸内直喷, 电子喷射	是	是

1.2 氢气燃料供应系统

图 2 为氢气燃料系统的原理图,可分为两个子系统 a 上游氢气燃料系统,从燃料箱到紧急关闭阀 A, b 下游氢气燃料系统,从紧急关闭阀 A 到进气歧管。上游氢气燃料系统包括氢气瓶、两套压力调节器(图中仅画出一套)、安全阀(图中未画出)、紧急关闭阀 A。压力调节器与最大压力为 288 kPa 的氢气瓶相连。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。压力调压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一个紧急关闭阀 B、过滤器,氮气清除开阀、质量流量计、氢气混合器、阻火器、压力释放阀等。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 15.24 cm 处。由于阻火器体积较大,可以满足氢气与空气混合气顺利通过的需要。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。

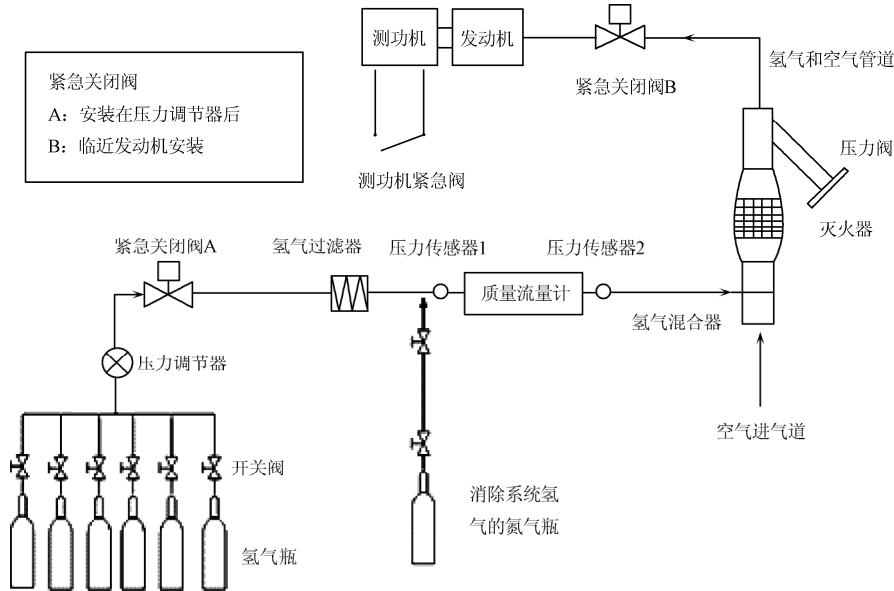


图 2 氢气燃料系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of H₂ fuel system

1.3 发动机排放测试系统

发动机排出的废气经管道输送到一个容积为直径 0.46 m, 长 6.1 m 的取样器中,用临界流量文丘里一定容取样器(CFV-CVS)来控制管道的流量。距管道入口 0.9 m 处有一个直径为 0.25 m 的孔口,孔口是为了确保排气在到达排放物采样区之前与稀释空气完全混合。管道下游 3.05 m 处是排放物采样区,通过测试程序,CFV-CVS 控制稀释气体标称流量为 67.8 m³/min。通过文丘里装置入口处的快速反应热电偶和压力传感器来测量该取样器的瞬时流量。通过热试样探头和探针通道从管道中提取稀释气体样品,并送到专用排放分析仪中。根据美国联邦法规(code of federal regulations)CFR 40 第 86 部分要求,气体分析仪工作台安装了气体样品调节和分析系统。HC、CO、CO₂ 等,以单位制动燃油消耗率的排放量形式被测

量和记录。用非分光红外法(NDIR)来测量 CO 和 CO₂,用火焰离子化检测器(HFID)来测量 HC。从排气分析仪,采样器,双倍稀释管道和发动机得到的数据以 1 Hz

表 2 废气测试分析仪技术规格
Table 2 Specifications of exhaust gas analyzer

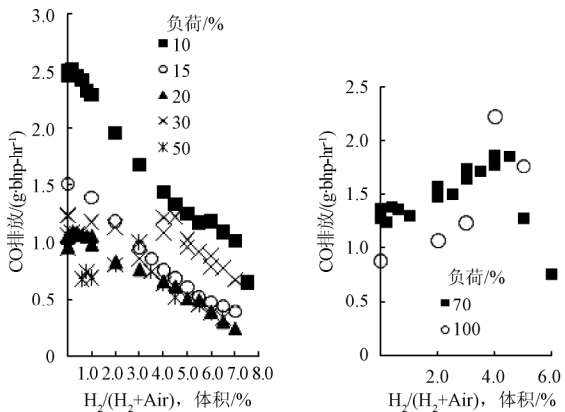
废气成分	测量原理或方法	制造商	型号
二氧化氮等	荧光法	Eco Physics	CLD822CMH
一氧化氮	荧光法	Eco Physics	CLD822CMH
总碳氢	常温型氢火焰离子化法或加热型氢火焰离子化法	California Analytical Instruments	600M HFID
一氧化碳	非分光红外	Horiba	AIA-210
二氧化碳	非分光红外	Horiba	AIA-210
微粒	稀释法	PM sampling according to CFR 40 Part 86	N.A.
氢	电脉冲电离质谱仪	V & F LCC	H-Sense

的速度存储。根据 CFR 40 第 86 条款对柴油机的要求有相应的校准程序和时间，在收集数据之前按照该条款要求的程序进行了检验。表 2 给出废气测试分析方法或仪器规格。

2 不同加氢量下 2004 Mack MD11 柴油机的 CO、CO₂ 与 HC 排放特性

2.1 CO 排放特性

图 3a 表明了运行在小负荷下，随着氢气添加量的增加，CO 排放降低，即添加氢气有助于柴油完全燃烧，这是由于氢气增强火焰传播速度，有利于燃烧的及时与完全进行；改善了小负荷下纯柴油运行时较低温度的不完全燃烧。CO 排放量最大降低幅度发生在 10% 负荷，在 10% 负荷下，在加氢量为 7% 时，CO 排放量从纯柴油的 3.4 g/kW·h 减小到不足 1.63 g/kW·h，减少幅度达到 50% 以上。随着负荷增加，缸壁温度上升，这种改善作用相对弱化，CO 排放降低的趋势减缓。如图运行在大于 30% 负荷便是如此。并且，随着氢气添加量增加，氢气促进燃烧，从而继续减少 CO 排放的作用逐步降低。图 3b 示出。在大负荷时，随着氢气的添加，在添加量较小时，反而使 CO 的排放增加，直至添加量大约超过 4% 以后才使 CO 的排放量下降，这可能是由于一方面，氢气增强火焰传播速度，有利于燃烧的及时与完全进行；另一方面，在高负荷时，氢本身燃烧也消耗大量的空气。这可能使柴油缺氧导致 CO 的排放增加。二者相互作用结果，这使得大负荷时，在氢添加量较小时，柴油缺氧导致 CO 的排放增加占据上峰，从而，CO 的排放增加。但注意到，同一负荷下，随着氢气的添加量增加（缺氧程度增加），柴油相对数量减少（燃料中碳含量降低），这些因素相互作用的结果是：随氢气添加量增加，后者作用逐步占据主导地位，在氢气添加量超过某一比例后，又使 CO 的排放量下降。



a. N=1200 转/min, 10~50% 负荷 b. N=1 200 转/min, 70% 和 100% 负荷

注：1 g/bhp-hr=1.36 g/kW·h, 下同。

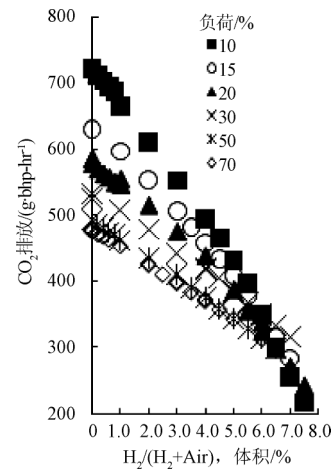
图 3 添加氢气以及发动机负荷对 CO 排放的影响

Fig.3 Effect of H₂ addition and engine load on CO emissions

2.2 CO₂ 排放特性

图 4 表明了氢的添加对 CO₂ 排放的影响。正如所期

望的那样，随着氢的添加量的增加，CO₂ 的排放量逐渐减小。这是由于柴油燃料的减少和当氢相对充足时有效热效率的提高。当负荷愈小时，随着添加氢气率的增加使 CO₂ 排放下降的作用愈加明显。例如，在 10% 负荷下，CO₂ 排放从纯柴油的 972.8 g/kW·h 到氢气添加量为 7% 时的 285.7 g/kW·h；而在 70% 负荷下，CO₂ 排放则从纯柴油的不足 680.3 g/kW·h 到氢气添加量为 7% 时的 360.5 g/kW·h。至于在相同加氢量下，低负荷下的纵坐标值高于高负荷时的纵坐标值。这是由于图中 CO₂ 的排放值是比排放，而非 CO₂ 的排放量的绝对值。由于高负荷下，发动机的功率大于低负荷，因而，其 CO₂ 的比排放值小于低负荷。事实上，就 CO₂ 的排放量的绝对值而言，高负荷要大于低负荷。



注：N=1 200 r/min, 10%~70% 负荷

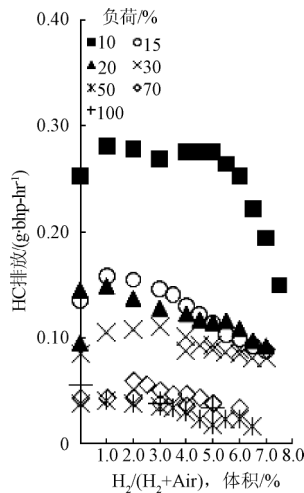
图 4 添加氢气及发动机负荷对 CO₂ 排放的影响

Fig.4 Effect of H₂ addition and engine load on CO₂ emissions

2.3 HC 排放特性

从图 5 中可以看出，在小负荷范围内，添加少量氢气，对 HC 的排放影响不大。但继续增加氢气添加量，HC 的排放量开始明显下降。随着负荷增加，氢气添加对 HC 的比排放的影响减弱，一般而言，随着氢气添加量增加，开始时，HC 的排放量稍有增加，随后，开始下降，但下降趋势缓慢。例如，运行在 10% 的负荷下，混合气中添加少量氢气对 HC 的排放影响不大。但继续增加氢气添加量，当其超过 5% 以后，HC 的排放开始明显减少。而在 15% 至 70% 负荷下，混合气中添加氢气达到 1%~2% 以后，HC 的排放开始下降，下降趋势随负荷增加逐步减缓。在 100% 负荷下，氢的添加对 HC 的排放量影响轻微。这可能是由于较小的氢气添加率对应的氢气量较小，对混合气燃烧的改善作用尚不明显。继续增加氢气添加率，才能起到对混合气燃烧改善的作用。大负荷下，随氢气添加量的增加，HC 的排放量下降趋势缓慢，其原因可能是由于在大负荷下，即使是小的加氢率下的加氢量对改善燃烧已经有明显的作用，再继续增加氢气添加量，对燃烧的影响也不会明显改变了，也不会对 HC 的排放产生更大影响。此外，随着负荷增加，HC 的比排放下降主要

归于功率的增加。



注: $N=1200$ r/min, 10%~100%负荷

图5 添加氢气及发动机负荷对HC排放的影响

Fig.5 Effect of H_2 addition and engine load on HC emissions

3 结论

1) 在各种负荷下,在柴油机中应用氢气和柴油的混合燃料有助于降低 CO 、 CO_2 和 HC 的比排放。一般而言,在低负荷下排放量的降低更为显著。且在一定范围内(本研究的氢气率在7%以内),随氢气添加量增加(或添加超过某一定量以后), CO 、 CO_2 和 HC 的比排放下降。

2) 在小、中负荷下,随着氢气添加量的增加, CO 排放降低;在大负荷时,随着氢气的添加,在添加量较小时,反而使 CO 的排放增加,直至添加量较大时才使 CO 的排放量下降。

3) 随着氢的添加量的增加, CO_2 的排放量逐渐减小。负荷愈小,随着添加氢气率的增加使 CO_2 排放下降的作用愈加明显。

4) 在小负荷范围内,增加氢气添加至一定量以后, HC 的排放量开始明显下降。随着负荷增加,氢气添加对 HC 的比排放的影响减弱。

[参考文献]

[1] Furuhashi S. State of the art and future trends in hydrogen-fuelled engines[J]. International Journal of Vehicle Design, 1983, 4(3): 359-385.

[2] Karim G A. Hydrogen as a spark ignition engine fuel[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2003, 28(5): 569-577.

[3] White C M, Steeper R R, Lutz A E. The hydrogen-fuelled internal combustion engine: a technical review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006, 31(10): 1292-1350.

[4] Nafiz Kahraman, Bilge Çeper S, Orhan Akansu, et al. Investigation of combustion characteristics and emissions in a spark-ignition engine fuelled with natural gas-hydrogen blends[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(2): 1026-1034.

[5] Yang Zhenzhong, Wang Lijun, Li Shilei. Investigation into the optimization control technique of hydrogen fueled engines based on genetic algorithms[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(22): 6780-6791.

[6] Homan H S. An experimental study of reciprocating internal combustion engines operated on hydrogen[J]. Ithaca, New York, Cornell University, 1978.

[7] Homan H S, Reynolds R K, Deboer P C T, et al. Hydrogen-fuelled diesel engine without timed ignition[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1979, 4(4): 315-325.

[8] Barreto L, Makihira A, Riahi K. The hydrogen economy in the 21st century a sustainable development scenario[J]. International Journal Hydrogen Energy, 2003, 28(3): 267-284.

[9] Das L M. Hydrogen engine: research and development (R&D) programmes in Indian Institute of Technology (IIT), Delhi[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2002, 27(9): 953-965.

[10] Gomes J M, Antunes, Mikalsen R, et al. An experimental study of a direct injection compression ignition hydrogen engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(15): 6516-6522.

[11] Murari Mohon Roy, Eiji Tomita, Nobuyuki Kawahara, et al. An experimental investigation on engine performance and emissions of a supercharged H_2 -diesel dual-fuel engine[J]. International Journal Hydrogen Energy, 2010, 35(2): 844-853.

[12] Yuji Harada, Atsushi Sakane. An experimental investigation on engine performance and emissions of a supercharged H_2 -diesel dual-fuel engine[J]. International Journal Hydrogen Energy, 2010, 35(2): 844-853.

[13] Bika A S, Franklin L M, Kittelson D B. Emission effects of hydrogen as a supplement fuel with diesel and Bio-Diesel[J]// SAE 08010648, 2008.

[14] 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.

[15] 左承基, 钱叶剑, 徐天玉, 等. EGR 与富氢进气对柴油机性能和排放的影响[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)

[16] 宋云超, 宁智, 刘耀东, 等. 氢气/柴油发动机 NO_x 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_x and particulate emission characteristics of hydrogen/diesel engine[J]. Transactions of CSICE, 2011, 29(6): 495-503. (in Chinese with English abstract)

[17] 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)

Emission performances of 2004 Mack MD11 engine fueled with hydrogen-diesel blend

Yang Zhenzhong¹, Hailin Li²

(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, researchers have paid attention to the research on hydrogen as fuel of diesel engines in recent years. Investigation into the effect of the addition of hydrogen at different proportion (the highest proportion of the hydrogen is 7%) into 2004 Mack MD11 diesel engine on the emissions of CO, CO₂ and HC were carried out. Results showed that corresponding to pure diesel operation, the addition of hydrogen into the engine helped to reduce the emissions of CO, CO₂ and HC in various load. Moreover, as the increase of amount of hydrogen (or the more H₂ added), law of the emission change for them was different with the change of load. Furthermore, the emissions of CO, CO₂ and HC had a more significant reduction at low load. For example, for operation at 10% load, CO emission reduced more than 50%, CO₂ emissions reduced more than 60%, and HC emission reduced more than 40%.

Key words: hydrogen fuels, diesel engines, emissions, CO, CO₂ and HC