

国六排放天然气发动机的开发

陈本林¹, 袁卫波², 王舒¹, 王国华¹

(1. 重庆凯瑞动力科技有限公司, 重庆 401122; 2. 中国汽车工程研究院, 重庆 401122)

摘要: 将柴油机改造为点燃式单点集中喷射预混天然气发动机。该发动机采用无废气再循环 EGR 的当量比燃烧 + 三元催化器的技术路线, 通过匹配增压器、三元催化器和电控系统的优化标定, 按全球统一瞬态循环 WHTC 进行排放试验。结果表明, 所开发的国六天然气发动机动力性和燃料经济性达到设计指标, 排放满足 GB17691—2018《重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》的要求。

关键词: 天然气发动机; 排放; 三元催化器; 当量比燃烧制

中图分类号: U464.32

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2021.01.06

Development of China VI Emission Natural Gas Engine

CHEN Benlin¹, YUAN Weibo², WANG Shu¹, WANG Guohua¹

(1.Chongqing CAERI Power Technology Co., Ltd., Chongqing 401122, China;

2. China Automobile Engineering Research Institute, Chongqing 401122, China)

Abstract: In this paper, a diesel engine was transformed into a natural-gas-premixed engine with single-point injection. The engine adopted the technical route of the equivalence-ratio combustion without exhaust gas recirculation(EGR) plus the three-way catalytic converter. By matching the optimized calibrations of the supercharger, the three-way catalytic converter and the electronic control system, the emission test was carried out according to the world harmonized transient cycle(WHTC). The results show that the dynamic performance and fuel economy of the developed China VI natural gas engine meet the design targets, and the emissions meet the requirements of GB17691—2018 *Limits and Measurement Methods for emissions from diesel-fueled heavy-duty Vehicles(China VI)*.

Keywords: natural gas engine; emissions; three way catalyst; stoichiometric operation

近年来, 我国的经济高速发展, 对石油的需求越来越大, 由此产生了能源短缺和环境污染问题。中国石油集团经济技术研究院发布的《2018 年国

内外油气行业发展报告》称, 2018 年中国的石油进口量为 4.4 亿吨, 同比增长 11%, 石油对外依存度升至 69.8%, 已严重影响到我国的能源安全。作为

收稿日期: 2020-06-01 改稿日期: 2020-06-15

基金项目: 重庆市科学技术委员会重点产业共性关键技术创新专项(cstc2017zdcy-zdyfx0097)

参考文献引用格式:

陈本林, 袁卫波, 王舒, 等: 国六排放天然气发动机的开发[J]. 汽车工程学报, 2021, 11(1): 47-52.

CHEN Benlin, YUAN Weibo, WANG Shu, et al. Development of China VI Emission Natural Gas Engine [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2021, 11(1): 47-52. (in Chinese)



用油大户的汽车行业,近几年也获得快速发展。到 2018 年底,我国的汽车保有量已达到 2.4 亿辆,汽车消耗了大量的石油,同时也排放了大量的污染物。

为缓解石油短缺带来的问题,改善大气环境,发展天然气汽车和天然气发动机是一个有效的替代方案。近几年,我国的页岩气、煤层气的产量获得较大的提高,为天然气汽车的发展提供了能源基础。

2018 年 6 月 22 日,生态环境部正式发布了 GB17691—2018《重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》标准^[1],并从 2019 年 7 月 1 日起开始实施。因此,急需开发满足国六排放标准的天然气发动机。在国五排放阶段,天然气发动机一般采用稀薄燃烧+氧化型催化器 DOC (Diesel Oxidation Catalyst, DOC) 的技术路线。采用这种技术路线,天然气发动机的 NO_x 和 CH_4 排放都很高。文献[2]和[3]研究了重型稀薄燃烧天然气发动机的 NO_x 和 HC 排放,试验数据表明,在催化器后天然气发动机外特性上 NO_x 的体积浓度在 $100 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ 范围内,HC 的体积浓度在 $120 \times 10^{-6} \sim 240 \times 10^{-6}$ 范围内。文献[4]和[5]研究的稀薄燃烧天然气发动机,在欧洲瞬态循环 ETC (European Transient Cycle, ETC) 下, NO_x 、 CH_4 的比排放分别达到 2.31 g/kWh、1.07 g/kWh 和 1.855 g/kWh、0.995 g/kWh。要满足国六排放标准的要求,天然气发动机需要采用当量比燃烧+三元催化器的技术路线。文献[6]在中型商用车天然气发动机上进行了当量比燃烧+三元催化器的技术研究。在 ETC 循环下, NO_x 和 CH_4 的排放分别达到 1.32 g/kWh 和 0.28 g/kWh。文献[7]在重型天然气发动机上进行了当量比燃烧+EGR+三元催化器的技术研究。在 WHTC 循环下, NO_x 和 THC 的排放分别达到 0.15 g/kWh 和 1.8 g/kWh。在过量空气系数 $\alpha=0.99$ 附近,三元催化器对 CO 、NMHC、 CH_4 、 NO_x 都有很高的转换效率^[8]。天然气发动机采用当量比燃烧,活塞等零部件的热负荷较大,发生爆震的趋势较大^[9], NO_x 排放也较高。采用冷却的 EGR 技术,可有效降低热负荷和爆震倾向^[9],同时减少 NO_x 排放。但采用 EGR 技术会

带来生产成本增加、冷却系统的散热量增加,以及可靠性等问题。因此,是否采用 EGR 技术,需要进行综合评估。

通过匹配增压器、三元催化器和电控系统的优化标定,开发的天然气发动机的动力性和燃料经济性达到设计指标,按 GB17691—2018 进行 WHTC 循环试验,排放满足国六限值要求。

表 1 原柴油机基础参数

发动机型式	直列、水冷、四冲程
气缸工作容积 /L	2.892
气缸数	4
缸径 d/mm	95
活塞行程 /mm	102
每缸气门数	4
压缩比	17.5 : 1
缸心距 /mm	106
燃烧类型	缸内直喷、压燃
进气方式	增压、中冷
气缸工作顺序	1-3-4-2
缸套型式	无缸套

1 发动机技术方案

1.1 本体改进

在原柴油机的基础上,对汽缸盖、活塞等结构进行了改进,压缩比调整为 12。燃烧室的形状为敞口碗形,如图 1 所示。基于发动机的 4 气门结构,燃烧室中置,结构对称,机械应力和热应力分布均匀。为降低活塞的热负荷,采用有机油腔的油冷活塞。活塞的材料选用 BH135+ 铝硅合金,耐高温,

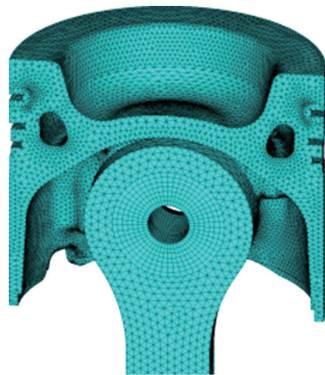


图 1 天然气发动机的活塞

热稳定性好。为尽量提高发动机低速时增压器的压力，增压器的压比约为 2。增压器的涡轮采用耐高温的材料。为保证天然气发动机的可靠性，将原柴油机水泵的流量增加了 30%。对天然气发动机加装了电控系统、天然气供气系统和点火系统。

1.2 电控系统

电控系统包括电子控制单元 ECU、电子节气门、转速传感器、相位传感器、进气温度压力传感器、水温传感器、氧传感器（前宽域氧传感器、后普通氧传感器）、专用线束等。天然气发动机工作时，ECU 接收各传感器传来的信号，进行计算和判断，输出天然气的喷射脉宽和点火时刻，实现对空燃比和点火提前角的精确控制。氧传感器用于对空燃比进行闭环控制，使天然气发动机的空燃比在三元催化器的高效转换窗口内。

1.3 供气系统

是否采用 EGR 技术是关注的重点。在无 EGR 的条件下，对天然气发动机进行了活塞温度场试验和可靠性试验，证明了天然气发动机的可靠性较好，无爆震发生。因此，天然气发动机采用无 EGR 的增压中冷 + 当量比燃烧 + 三元催化器的技术路线，点火系统采用各缸顺序点火，天然气的供给采用单点集中喷射预混合方案^[10]。单点集中喷射预混合方案的优点是对原柴油机的进气管改动小，各缸空燃比的均匀性好。

1.4 点火系统

点火系统对天然气发动机的性能和排放有重要的影响，它包含点火线圈和火花塞。天然气发动机采用各缸顺序点火方式，每缸 1 个点火线圈，点火线圈直接安装在汽缸盖上。为保证可靠的点火，选用的点火线圈输出电压为 33 kV（最小），火花能量为 69 mJ（最小）。火花塞为铱金火花塞，耐高温，采用针状电极，点火能力强。

1.5 催化器

天然气发动机使用的三元催化器与汽油机使用的三元催化器有相似之处，但又有别于汽油机的三

元催化器。主要原因是天然气发动机的 HC 排放中，主要成分是 CH_4 ，其分子结构稳定，很难被氧化^[8]。因此，天然气发动机的三元催化器需要采用更多的贵金属。通过试验，选定的三元催化器的参数见表 2。

表 2 催化器的参数

催化器载体的体积 /L	3.712
目数	400
贵金属的总含量 /g	14.714

2 试验设备

试验用的设备包含日本 HORIBA 公司的电力测功机、全流稀释系统、排放分析仪等，见表 3。各种排放测试设备的测量原理、测量精度符合 GB17691—2018 的规定。试验台的布置如图 2 所示。

表 3 试验用的仪器、设备

名 称	型 号
测功机	DYNAS3 HT 350
空气流量计	DN150 FC
排放分析仪	MEXA-ONE-DC
CVS 定容取样系统	CVS-ONE-MV-HE
颗粒取样控制系统	DLS-ONE
颗粒物计数器	MEXA-2000SPCS
傅里叶红外光谱气体分析仪	MEXA-ONE-FT-E
微量天平	XP2U
CNG 流量计	RHM015

3 天然气发动机的试验

3.1 天然气发动机的参数

天然气发动机的主要技术参数见表 4。

表 4 天然气发动机主要技术参数

发动机型式	直列 4 缸，4 冲程，水冷
发动机排量 /L	2.892
缸径 d/mm	95
活塞行程 /mm	102
每缸气门数	4
压缩比	12 : 1
进气方式	增压、中冷
额定净功率 P/kW	96 (2 800 r/min)
最大净转矩 $T_{\max}/\text{Nm}$	360 (1 400 ~ 2 400 r/min)
最低燃气消耗率 / $[\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}]$	≤ 205

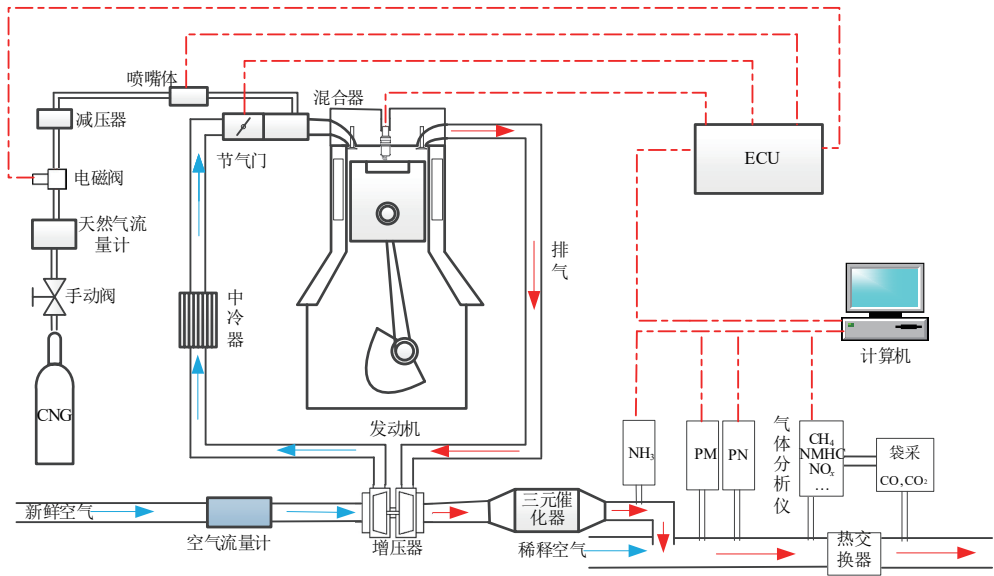


图 2 试验台架的布置

3.2 天然气发动机的标定

在天然气发动机的结构和零部件确定以后，影响发动机性能和排放的主要参数是过量空气系数和点火提前角。为与三元催化器配合，过量空气系数标定在 0.99 附近。能够影响天然气发动机性能和排放的主要参数就有点火提前角。在保证动力性、燃料经济性的前提下，适当减小点火提前角，能够减小汽缸内的最高爆发压力，减小爆震趋势，降低 NO_x 和 CH₄ 的原始排放，提高排气温度。提高排气温度，能够提高三元催化器进口处的温度，使三元催化器快速起燃，减少催化器后的污染物排放。

3.3 天然气发动机的净功率试验

在完成对发动机的优化标定后，进行了天然气发动机的净功率试验，试验结果如图 3 所示。

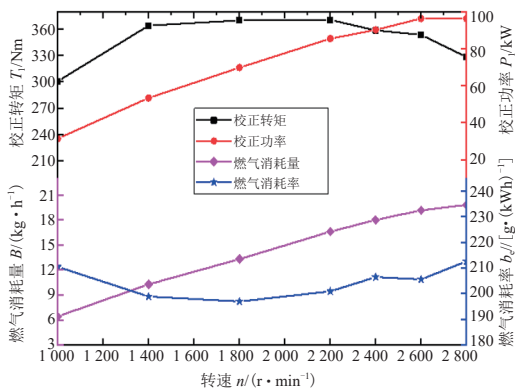


图 3 发动机净功率试验曲线

由图 3 可知，天然气发动机的额定功率为 96.3 kW；在 1 400 ~ 2 200 r/min 转速范围内，转矩曲线平坦，最大扭矩为 370.7 Nm。燃气消耗率曲线平坦，最小燃气消耗率为 197.0 g/kWh，额定功率点的燃气消耗率为 212.6 g/kWh。

3.4 天然气发动机的原始排放试验

在不装催化器的条件下，对天然气发动机进行了 WHTC 循环排放试验。按照 GB17691—2018，天然气发动机先做 1 个冷启动的 WHTC 循环试验，之后经过 10 min 的热浸期，再做 1 个热启动的 WHTC 循环试验。最终的排放结果通过式（1）计算得到：

$$e = \frac{(0.14 \times m_{\text{cold}}) + (0.86 \times m_{\text{hot}})}{(0.14 \times W_{\text{act, cold}}) + (0.86 \times W_{\text{act, hot}})} \quad (1)$$

式中： e 为 WHTC 循环最终排放结果； m_{cold} 和 m_{hot} 分别为冷、热启动循环各排放物组分的质量； $W_{\text{act, cold}}$ 、 $W_{\text{act, hot}}$ 分别为冷、热启动循环的实际循环功。

天然气发动机的原始排放试验结果见表 5。

表 5 天然气发动机的原始排放试验结果

项目	冷、热启动加权结果
CO/[mg·(kWh) ⁻¹]	23 413.709
NMHC/[mg·(kWh) ⁻¹]	541.134
CH ₄ /[mg·(kWh) ⁻¹]	3 545.298
NO _x /[mg·(kWh) ⁻¹]	10 283.54
NH ₃ /10 ⁻⁶	0

由表 5 可知，天然气发动机原始排放中的 CO、NMHC、CH₄、NO_x 都很高，不能够满足发动机国六排放限值的要求。

3.5 安装催化器后天然气发动机的排放试验

对天然气发动机的过量空气系数进行了精细标定，使其在三元催化器的高效转换窗口范围内。在安装催化器的条件下，对天然气发动机进行了 WHTC 循环排放试验，试验结果见表 6。

3.6 排放试验结果分析

(1) 安装催化器后，天然气发动机冷、热启动排放试验的加权结果乘以指定的劣化系数^[5]后满足发动机国六排放标准。

(2) 冷、热启动试验加权结果与国六排放限值的比值如图 4 所示。由图 4 可知，CO、NMHC、CH₄、NO_x 的排放量与国六限值的比值在 35% 以内；颗粒物 PM (Particulate Matter, PM) 和粒子数量 PN (Particle Number, PN) 的排放量与国六限值的比值在 10% 以内。NH₃ 的排放较高，接近排放限值。

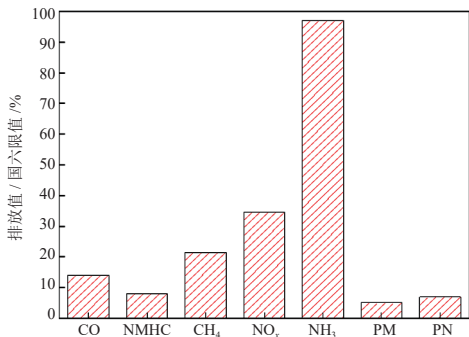


图 4 排放值与国六限值的比值

(3) 冷启动试验的 CO、NMHC、CH₄ 排放高于热启动试验。主要原因是，热启动试验时，催化器的温度较高^[10]，催化器起燃时间短，催化器的转换效率高。其次，热启动试验时，发动机汽缸内的温度较高，有利于 CO、NMHC、CH₄ 的燃烧和氧化，使发动机的 CO、NMHC、CH₄ 原始排放降低。

(4) 冷启动试验的 NO_x 排放高于热启动试验。冷启动试验 NO_x 排放高的主要原因是催化器前的排气温度低，在发动机冷启动时，催化器的进口温度在 25℃ 左右^[5]，催化器升温慢，达到起燃温度的时间长，转换效率低，使催化器后的 NO_x 排放高。

(5) 天然气发动机的原始排放中没有 NH₃，NH₃ 是在三元催化器中产生的，在三元催化器中，NO、CO、H₂ 发生化学反应生成 NH₃^[11]。冷启动试验的 NH₃ 排放低于热启动试验，这是因为在热启动试验中，催化器中的温度较高，有利于 NH₃ 的生成。

(6) 在不安装颗粒过滤器的条件下，天然气发动机的 PM 和 PN 排放量都很低。天然气发动机的燃烧，是空气与天然气在分子级别上的混合燃烧，一般不会产生颗粒物排放。天然气发动机的颗粒物排放主要来自机油^[12]。只要控制好机油消耗量，天然气发动机的颗粒物排放就能够满足国六排放标准。

(7) 将天然气发动机的原始排放和安装催化器后的排放进行比较，可以得到三元催化器的循环平均转换效率，循环平均转换效率的定义如下：

循环平均转换效率 = (原始排放加权结果 - 装催化器加权结果) ÷ 原始排放加权结果 × 权结果。

表 6 安装催化器后天然气发动机的排放试验结果

项目	标准限值	冷启动	热启动	加权结果	劣化系数	劣化修正结果
CO/[mg · (kWh) ⁻¹]	4 000	1 039.5	483.9	561.6	1.3	730.1
NMHC/[mg · (kWh) ⁻¹]	160	68.4	3.6	12.7	1.4	17.8
CH ₄ /[mg · (kWh) ⁻¹]	500	514.4	40.9	107.1	1.4	149.9
NO _x /[mg · (kWh) ⁻¹]	460	326.3	132.0	159.1	1.15	183.0
NH ₃ /10 ⁻⁶	10	6.5	10.2	9.7	1.0	9.7
PM/[mg · (kWh) ⁻¹]	10	0.7	0.5	0.5	1.05	0.5
PN/[# · (kWh) ⁻¹]	6.0 × 10 ¹¹	8.11 × 10 ¹⁰	3.53 × 10 ¹⁰	4.17 × 10 ¹⁰	1.0	4.17 × 10 ¹⁰

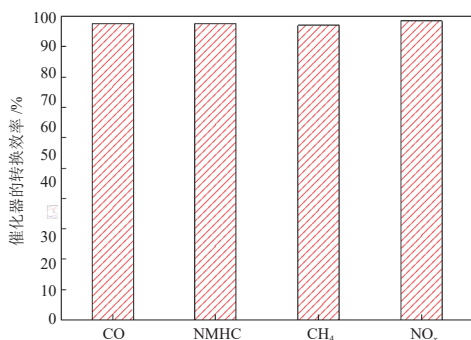


图 5 催化器的循环平均转换效率

催化器的循环平均转换效率如图 5 所示。

由图 5 可知,三元催化器对 CO、NMHC、CH₄、NO_x 四种气体污染物都有较高的转换效率,其中对 NO_x 的转换效率最高,达到 98.45%;对 CH₄ 的转换效率最低,为 96.99%,即 CH₄ 最不容易被转换。

4 结论

(1) 开发的天然气发动机的动力性和燃料经济性达到设计指标。

(2) 在无 EGR 的条件下,天然气发动机的冷、热启动排放试验加权结果乘以指定的劣化系数后,能够满足国六排放限值。

(3) 在不装过滤器的条件下,天然气发动机的 PM 和 PN 排放量都很低。天然气发动机的颗粒物排放主要来自机油,只要控制好机油消耗量,天然气发动机的颗粒物排放就能够满足国六排放标准。

(4) 选用的三元催化器对 CO、NMHC、CH₄、NO_x 四种气体污染物的循环平均转换效率在 96.99% 以上。

(5) 天然气发动机的原始排放中不存在 NH₃, NH₃ 是在三元催化器中产生的。

参考文献 (References)

- [1] GB17691—2018. 重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
GB17691—2018.Limits and Measurement Methods for Emissions from Diesel Fueled Heavy-Duty Vehicles (China VI) [S]. Beijing: China Standard Press, 2018. (in Chinese)
- [2] 李娜, 张强, 邵思东, 等. 重型稀燃天然气发动机 NO_x 排放试验研究[J]. 车用发动机, 2012(6): 61-64.
LI Na, ZHANG Qiang, SHAO Sidong, et al. NO_x Emission Test of Heavy Lean Burn Natural Gas Engine [J]. Vehicle Engine, 2012 (6): 61-64. (in Chinese)
- [3] 李娜, 张强, 邵思东, 等. 重型车用稀燃天然气发动机碳氢排放特性[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 45-51.
LI Na, ZHANG Qiang, SHAO Sidong, et al. HC Emission Characteristics of Heavy Vehicle Equipped with Lean-Burn Natural Gas Engine [J]. 2013, 29(2): 45-51. (in Chinese)
- [4] 郑尊清, 尧命发, 林志强, 等. 满足国-IV 排放的电控稀燃天然气发动机燃烧系统开发[J]. 内燃机工程, 2009, 30(5): 7-11.
ZHENG Zunqing, YAO Mingfa, LIN Zhiqiang, et al. Development of Combustion System of an Electronic Controlled Lean Burn CNG Engine for Meeting China Stage IV Emission Regulations [J]. Internal Combustion Engine Engineering, 2009, 30(5): 7-11. (in Chinese)
- [5] 翟康, 施崇槐, 韩志强, 等. 过量空气系数和点火提前角对 CNG 发动机 NO_x 排放性能的影响[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2014, 28(4): 13-17.
ZHAI Kang, SHI Chonghuai, HAN Zhiqiang, et al. Impact of Excess Air Ratio and Ignition Timing on CNG Engine Emissions [J]. Journal of Hubei University of Automotive Technology, 2014, 28(4): 13-17. (in Chinese)
- [6] 谢云臣, 牛丹峰, 郭涛, 等. 中型商用车 CA6SH-NE3 天然气发动机的开发[J]. 汽车工程师, 2009(1): 21-25.
XIE Yunchen, NIU Danfeng, GUO Tao, et al. Research on CA6SH-NE3 CNG Engine Medium Commercial Vehicle [J]. Auto Engineer, 2009(1): 21-25. (in Chinese)
- [7] ZHANG Qiang, LI Menghan, LI Guoxiang, et al. Transient Emission Characteristics of a Heavy-Duty Natural Gas Engine at Stoichiometric Operation with EGR and TWC [J]. Energy, 2017, 132: 225-237.
- [8] 马凡华, 许忠厚. 天然气发动机专用催化转化器的研究与发展[J]. 车用发动机, 2000(1): 1-3.
MA Fanhua, XU Zhonghou. Research and Development of Dedicated Catalytic Converts for Natural Gas Engine [J]. Vehicle Engine, 2000(1): 1-3. (in Chinese)

(下转第 71 页)