

缸内残余废气系数对汽油机性能的影响及测试方法研究

赵智超¹, 王书千^{2,3}, 刘敬平^{2,3}, 付建勤^{2,3}, 关尽欢^{2,3}, 刘琦^{2,3}

(1. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆, 401122;

2. 湖南大学 先进动力总成技术研究中心, 湖南 长沙, 410082

3. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙, 410082)

摘要:为研究缸内残余废气对汽油机性能及排放的影响,在1台单缸机上进行排气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)扫描试验。为降低残余废气系数、测试成本并简化计算流程,提出1种两稳态传感器测量方法并推导简化数模。采用2个稳态压力传感器测取进气和排气压力,与气门开闭时刻、转速、预存的气门升程、气道流量系数联立求解得到残余废气系数。在1台先进乘用车汽油机上进行试验验证。研究表明:残余废气的热容及充量稀释作用降低了燃烧温度,减缓了燃烧速率,使10%~90%燃烧持续期和点火至50%燃烧位置点持续期明显延长;残余废气加热效应促进燃油雾化混合,热容作用降低了燃烧温度从而减少了散热损失,因此,高压循环指示热效率先略微增加,随后由于燃烧性能下降而迅速降低;残余废气可有效抑制NO_x生成,但废气过多会导致HC和CO排放增加;本方法具有较高的预测精度,与三动态传感器方法相比,此方法可大大降低传感器成本,具有工程应用价值。

关键词:汽油机;残余废气系数;燃烧;排放

中图分类号:U467.2⁺1;U467.2⁺2;TK417⁺.4

文献标志码:A

文章编号:1672-7207(2018)11-2723-08

Effects of residual gas on gasoline engine performance and research on test method for residual gas

ZHAO Zhichao¹, WANG Shuqian^{2,3}, LIU Jingping^{2,3}, FU Jianqin^{2,3}, GUAN Jinhuan^{2,3}, LIU Qi^{2,3}

(1. China Automotive Engineering Research Institute Co. Ltd., Chongqing 401122, China;

2. Research Center for Advanced Powertrain Technology, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The sweeping test of EGR(exhaust gas recirculation) rate was conducted in a single cylinder engine to research the effects of residual gas fraction(RGF) on engine performance and emission. In order to reduce the cost of RGF measurement and simplify mathematical model, a method by two steady-state sensors was introduced and simplified mathematical model was deduced. Two steady-state pressure sensors were adopted for the measurement of intake and exhaust pressure which was used to solve RGF based on the measured valve timing, engine speed, valve lift and flow coefficient. The test method was verified experimentally on an advanced gasoline engine of passenger car. The results show that the combined effects of thermal capacity and dilution of residual gas decrease combustion temperature and velocity, which obviously prolongs the 10%—90% combustion duration and the period from spark timing to 50%

收稿日期:2018-03-10;修回日期:2018-05-11

基金项目(Foundation item):国家重点研发规划专项(2017YFB0103503);中国科协青年人才托举工程项目(2017QNRC001)(Project(2017YFB0103503) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project(2017QNRC001) supported by the Young Talents Sponsorship Program of China Association for Science and Technology)

通信作者:王书千,博士研究生,工程师,从事动力总成性能开发研究;E-mail:1350800863@qq.com

combustion location. The heating effect of residual gas promotes the fuel atomization and the effect of thermal capacity lowers combustion temperature and decreases heat loss, which slightly increases indicated thermal efficiency in high-pressure cycle. With the increase of RGF, the indicated thermal efficiency in high-pressure cycle decreases rapidly due to combustion deterioration. Moreover, residual gas reduces NO_x emission but too much residual gas increases HC and CO emissions. The test method has good precision and can lower the cost greatly for engineering application compared with the method by three dynamic pressure sensors.

Key words: gasoline engine; exhaust gas recirculation; combustion; emission

动机残余废气主要由混合气燃烧产物构成, 其高温对于下一循环吸入的新鲜充量具有加热作用, 同时废气组分多为不可燃烧成分, 与新鲜混合气混合后对燃烧反应速度产生影响, 进而对发动机热功转换过程和排放产生影响。为了研究不同残余废气量下发动机性能的变化规律, 当前研究者主要通过废气再循环(EGR)技术调节缸内残余废气量, 进而研究不同残余废气量下发动机性能的变化规律和影响因素^[1-5]。张翔宇等^[6-7]控制系统控制排气门开闭时刻调节内部 EGR 率, 对柴油机小负荷工况下低温燃烧的燃烧和排放特性进行了试验研究, 发现提高 EGR 率可以提高排放和热效率。赵洋等^[8]针对不同 EGR 废气组分条件下产生的颗粒, 采用热重分析的方法, 分析了 EGR 废气组分对颗粒中主要物质含量的影响, 发现 EGR 废气中的 CO_2 可以显著改善颗粒的氧化燃烧性能。朱赞等^[9]对柴油-天然气双燃料发动机进行试验, 研究了 EGR 率随喷油提前角变化对双燃料发动机影响, 发现采用 EGR 时, 应适当增大喷油提前角, 以达到同时降低 NO_x , HC 和 CO 排放以及降低碳烟排放的目的。JAMSRAN 等^[10]研究了 EGR 和增压对均质充量压燃天然气发动机着火特性的影响, 发现合理调整 EGR 和增压压力可以扩大着火极限, 同时避免爆震。现有研究多以 EGR 率作为研究指标, 以指标缸内废气对发动机性能的影响, 但没有对缸内总残余废气量进行精准测量和评价, 尤其无法估计无 EGR 条件下不同工况下缸内的残余废气量, 从而不能对发动机性能进行相关优化。随着可变气门正时技术(variable valve timing, VVT)的逐渐普及, 通过调节气门开闭时刻控制缸内残余废气量可实现发动机性能和排放的优化控制, 但换气过程中压力波动导致的复杂气体流动使得缸内残余废气量的准确估计成为当前一大难题。FOX 等^[11]提出一种半经验模型, 将缸内残余废气分为气门重叠期内排气倒流至缸内和气门关闭时刻余隙容积的残余废气, 但需要通过试验标定经验方程系数后才能用于预测。SHAYLER 等^[12]开发了一种 RGF 模型, 虽然没有经验系数, 但该模型对容积效率的预测精度要求较高。

LARIMORE 等^[13]基于实测动态缸压提出一种 RGF 计算方法, 同时基于实测燃烧相位结合自适应参数估计方法实现 RGF 的预测修正。KAKO 等^[14]提出一种基于物理模型的瞬态残余废气预测手段, 并研究了 RGF 对瞬时空燃比的影响。付建勤等^[15]基于动态压力实测与数值计算相结合的方法, 对汽油机瞬变工况下 RGF 进行计算, 并分析其变化范围、变化规律和影响因素。虽然目前发动机缸内残余废气的预测精度已经达到实机应用的要求, 但由于其大多依赖于 1 个或多个动态压力传感器的精确测量作为模型输入, 成本较高, 容易损坏, 并且算法复杂, 因而不宜用于整车实际道路循环的测量。为此, 本文作者首先基于 1 台自然吸气单缸机进行台架试验, 探究 RGF 对汽油机热功转换性能和排放的影响, 然后提出一种简化的残余废气测试方法和计算模型, 并对 1 台增压直喷四缸汽油机进行试验验证。

1 试验

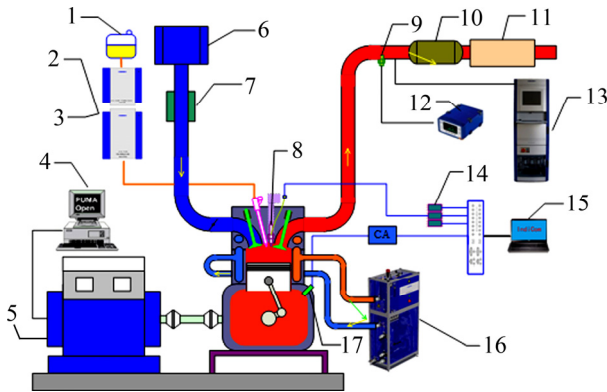
1.1 台架试验

为了探究缸内残余废气对汽油机性能的影响, 基于 1 台自然吸气单缸机展开稳态台架试验研究。试验发动机主要参数如表 1 所示。图 1 所示为单缸机台架

表 1 发动机基本参数

Table 1 Main technical parameters of test engine	
形式或参数	数值或类型
发动机类型	单缸、气道喷射、带滚流控制阀
缸径/mm	88
活塞行程/mm	98
排量/L	0.7
压缩比	10.5
气门形式	双 VVT, 变化范围为 $0^\circ \sim 100^\circ$
额定功率/kW	32.5
最大扭矩/(N·m)	55

试验示意图。测试设备和装置如表 2 所示。从图 1 可以看出: 缸压传感器安装于发动机缸盖上, 实时测量缸压信号并传递给燃烧分析仪, 以用于分析残余废气系数对燃烧性能的影响; 此外, 台架配备排放分析仪对发动机排气成分进行取样分析, 为研究缸内残余废气系数对排放的影响提供数据支撑。



- 1—油箱; 2—油耗仪; 3—燃油温度控制箱;
- 4—PUMA 控制系统; 5—测功机; 6—进气空调;
- 7—空滤器; 8—缸压传感器; 9—氧传感器;
- 10—催化转化器; 11—排气消声器;
- 12—过量空气系数分析仪; 13—排气分析仪;
- 14—电荷放大器; 15—燃烧分析仪;
- 16—冷却液温度控制系统; 17—转速传感器。

图 1 单缸机台架试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bench test for sing cylinder engine

表 2 测试设备和装置型号

Table 2 Main specifications of main test instruments and equipment

设备	型号
电力测功机	INDY S22-2/0525-1BV-1
测功机控制系统	PUMA OPEN1.4.1
油耗仪	AVL Fuel Mass Flow Meter 735S
数据处理系统	PUMA
空气流量计	TP16A.00
过量空气系数分析仪	ETAS ES630.1_E
燃烧分析仪	AVL IndiSet641 & IndiCom
电荷放大器	Kistler 5015
进气压力传感器	6052CS31U20
排气压力传感器	4049A5S
缸压传感器	Kistler 6115BCD65Q01
排气分析仪	AVL DiGas 4000 light

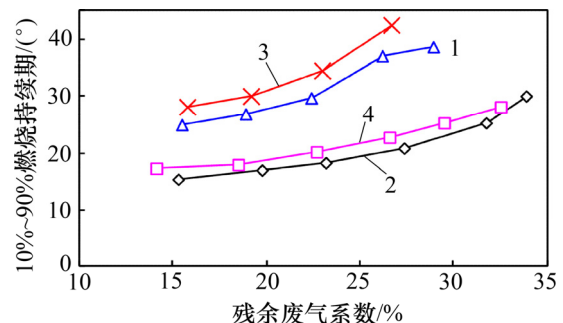
1.2 试验工况

单缸机通过调节 EGR 阀改变缸内残余废气系数。台架测试试验工况选取以下工况: 转速为 1 600 r/min, 平均指示压力(indicated mean effective pressure, IMEP)为 0.35 MPa; 转速为 2 000 r/min, IMEP 为 0.33 MPa; 滚流控制阀开启和关闭状态分别测量, EGR 率从 0 开始以间隔为 5% 依次增加直至燃烧不稳定。本次试验 RGF 率基于刘敬平等^[16-17]提出的三动态压力传感器法进行测量。

2 残余废气对汽油机性能的影响分析

2.1 残余废气对缸内热功转换过程的影响

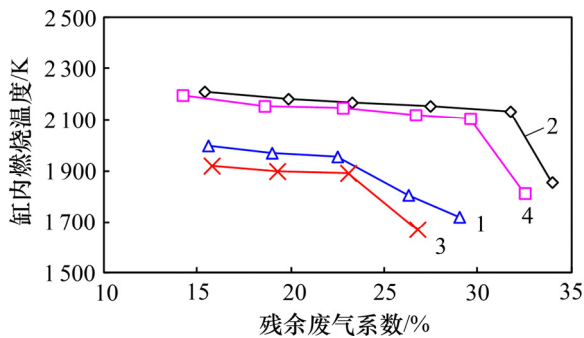
图 2 所示为 10%~90% 燃烧持续期随残余废气系数变化规律。由图 2 可以看出: 随着残余废气系数增加, 10%~90% 燃烧持续期单调增加, 且上升速度越快。这是因为残余废气中含有大量上一个循环产生的燃烧产物如 CO₂ 等, 对缸内燃烧过程的化学反应动力学具有抑制作用, 降低燃烧速度。缸内燃烧温度变化规律如图 3 所示。从图 3 可见: 由于缸内残余废气对新鲜混合气起稀释作用, 且缸内残余废气的热容较高, 致使缸内燃烧温度随残余废气系数增加而降低, 进而降低了燃烧速率; 随着残余废气系数增加, 残余废气对燃烧速率的影响越明显, 导致燃烧持续期上升速率变快; 此外, 当滚流控制阀开启时, 10%~90% 燃烧持续期明显缩短。这是由于滚流控制阀开启时, 缸内气流运动增强, 促进了缸内燃烧, 即削弱了残余废气系数对缸内燃烧的不利影响, 提升了缸内燃烧温度, 从而使燃烧持续期明显缩短。



- 1—1 600 r/min, 0.35 MPa, 滚流控制阀关;
- 2—1 600 r/min, 0.35 MPa, 滚流控制阀开;
- 3—2 000 r/min, 0.33 MPa, 滚流控制阀关;
- 4—2 000 r/min, 0.33 MPa, 滚流控制阀开。

图 2 10%~90% 燃烧持续期变化规律

Fig. 2 Changing rules of 10%~90% combustion duration

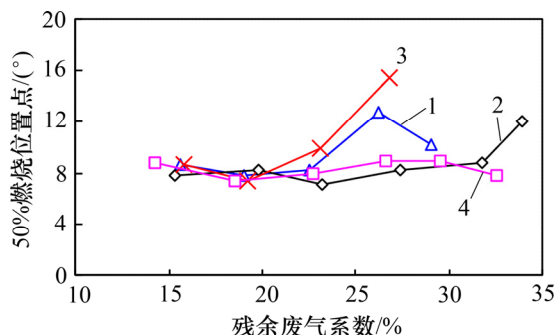


- 1—1 600 r/min, 0.35 MPa, 滚流控制阀关;
 2—1 600 r/min, 0.35 MPa, 滚流控制阀开;
 3—2 000 r/min, 0.33 MPa, 滚流控制阀关;
 4—2 000 r/min, 0.33 MPa, 滚流控制阀开。

图 3 缸内燃烧温度变化规律

Fig. 3 Changing rules of in-cylinder combustion temperature

图 4 所示为 50% 燃烧位置点随残余废气系数的变化趋势图。从图 4 可知：当残余废气在一定范围内增加时，50% 燃烧位置点通过点火提前角的相应提前而基本上保持不变，维持在压缩上止点后 8° 左右，即工程上认可的最佳 50% 燃烧位置点；随着残余废气系数进一步增加，除转速为 2 000 r/min, IMEP 为 0.33 MPa, 滚流控制阀开启的工况外，其他工况均出现 50% 燃烧位置点推迟的趋势。这主要是由于缸内残余废气过多，导致缸内燃烧过于缓慢，出现燃烧不稳定甚至失火现象，进而导致无法保持最佳 50% 燃烧位置。其中，在转速为 1 600 r/min, IMEP 为 0.35 MPa, 滚流控制阀关闭工况下，50% 燃烧位置随残余废气系数进一步增加而提前。这主要是由于缸内残余废气过多导致燃烧不稳定，循环变动系数达到 30.8%，从而导致 50% 燃

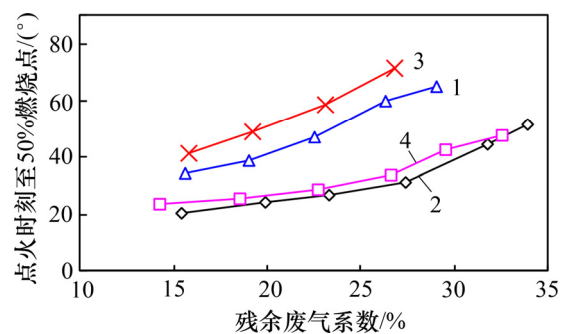


- 1—1 600 r/min, 0.35 MPa, 滚流控制阀关;
 2—1 600 r/min, 0.35 MPa, 滚流控制阀开;
 3—2 000 r/min, 0.33 MPa, 滚流控制阀关;
 4—2 000 r/min, 0.33 MPa, 滚流控制阀开。

图 4 50% 燃烧位置点变化规律

Fig. 4 Changing rules of 50% combustion location

烧位置波动，造成测量误差。此外，通过对比滚流控制阀开启和关闭这 2 种工况可以发现：滚流控制阀开启的工况可以承受更多的残余废气，并保持 50% 燃烧位置点保持在最佳燃烧点。这主要是由于滚流控制阀开启对缸内气流运动起到促进作用，提高了缸内燃烧速度。图 5 所示为点火时刻至 50% 燃烧位置点随残余废气系数变化规律。从图 5 可以看出：随着残余废气系数增加，点火时刻至 50% 燃烧位置点呈单调递增趋势，这说明汽油机燃烧初期燃烧速率随着缸内残余废气系数增加而降低，这是残余废气中不可燃成分对化学反应的抑制作用以及比热容降低缸内燃烧温度所致；随着滚流控制阀打开，缸内滚流运动加强，促进了缸内燃烧，有效缩短了点火时刻至 50% 燃烧位置点所需的时间；此外，随着转速增加，点火时刻至 50% 燃烧位置点所对应的曲轴转角增加；而滚流控制阀的开启有效降低了不同转速之间的点火时刻至 50% 燃烧位置点的差异，这是缸内气流运动加快了燃烧 所致。



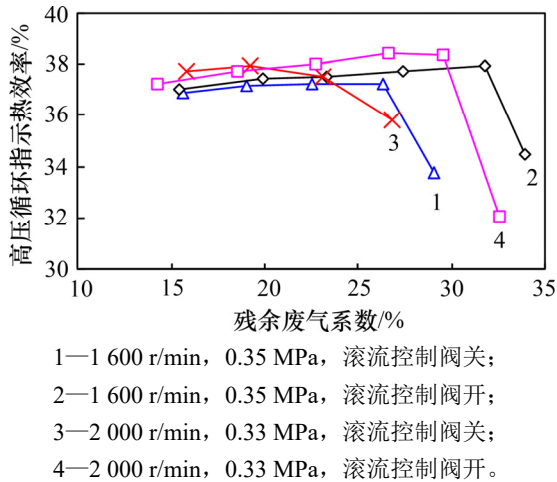
- 1—1 600 r/min, 0.35 MPa, 滚流控制阀关;
 2—1 600 r/min, 0.35 MPa, 滚流控制阀开;
 3—2 000 r/min, 0.33 MPa, 滚流控制阀关;
 4—2 000 r/min, 0.33 MPa, 滚流控制阀开。

图 5 点火时刻至 50% 燃烧位置点变化规律

Fig. 5 Changing rules of spark timing to 50% combustion location

图 6 所示为高压循环指示热效率随缸内残余废气系数的变化规律。从图 6 可以看出：随着残余废气系数增加，高压循环指示热效率首先呈略微增加趋势。这主要是由于此时残余废气对 50% 燃烧位置点和 10%~90% 燃烧位置点影响较小，而缸内燃烧温度随残余废气系数的升高而降低；而随着缸内残余废气系数进一步增加，高压循环指示热效率急剧下降，从图 2 和图 4 可知此时 10%~90% 燃烧持续期明显增加，同时 50% 燃烧位置点明显推迟，说明此时燃烧状况十分恶劣。这主要是由于缸内残余废气过多导致燃烧速率降

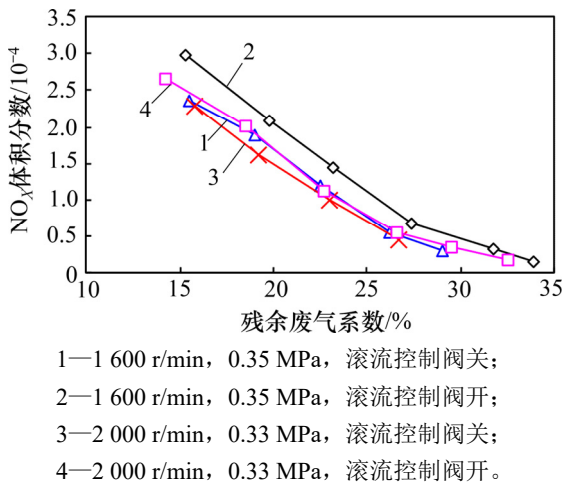
低, 燃烧不稳定。同时, 燃烧持续期过长, 导致发动机有效膨胀比降低^[18], 缸内工质不能完全膨胀做功。此外, 由图 6 还可以看出: 当滚流控制阀打开时, 缸内燃烧加速, 使得发动机可以承受更多的残余废气而仍保持较高的高压循环指示热效率。



1—1 600 r/min, 0.35 MPa, 滚流控制阀关;
2—1 600 r/min, 0.35 MPa, 滚流控制阀开;
3—2 000 r/min, 0.33 MPa, 滚流控制阀关;
4—2 000 r/min, 0.33 MPa, 滚流控制阀开。
图 6 高压循环指示热效率变化规律
Fig. 6 Changing rules of indicated thermal efficiency in high-pressure cycle

2.2 残余废气对排放的影响

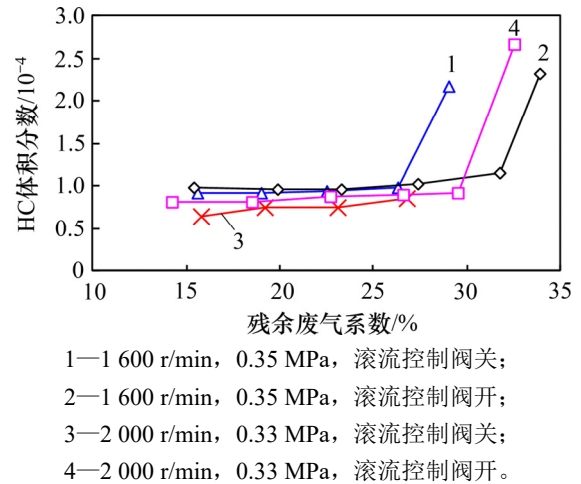
缸内残余废气在影响燃烧的同时, 也对发动机的排放产生了一定的影响。图 7 所示为 NO_x 排放量(体积分数)随残余废气系数的变化规律。从图 7 可见: 随着残余废气系数增加, NO_x 排放量呈单调下降趋势。这主要是由于残余废气中多数组分化学分子式由三原子构成, 比热容较高, 稀释了缸内混合气, 降低了燃烧速率, 进而降低缸内燃烧温度。而 NO_x 排放主要产生于高温富氧状态, 因此, 残余废气对 NO_x 排放的生



1—1 600 r/min, 0.35 MPa, 滚流控制阀关;
2—1 600 r/min, 0.35 MPa, 滚流控制阀开;
3—2 000 r/min, 0.33 MPa, 滚流控制阀关;
4—2 000 r/min, 0.33 MPa, 滚流控制阀开。
图 7 NO_x 体积分数变化规律
Fig. 7 Changing rules of volume fraction of NO_x emission

成有良好的抑制作用。此外, 当滚流阀开启时, 相同转速和负荷工况下的 NO_x 排放量明显升高, 这主要是由于滚流阀开启在缸内形成了良好的气流运动, 使燃烧速率加快, 最大缸内燃烧温度升高(如图 2 和图 3 所示)。

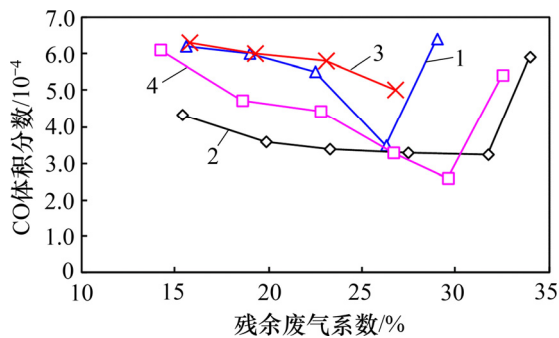
图 8 所示为未燃 HC 体积分数随残余废气系数变化。从图 8 可知: 当缸内残余废气系数增加时, 在一定范围内, HC 体积分数变化趋势不明显。这是由于此时缸内燃烧仍然稳定, 缸内混合气仍能实现充分燃烧; 而当残余废气系数进一步增加时, 由于残余废气对缸内新鲜充量过于稀释, 燃烧速率降低, 燃烧不稳定甚至出现失火, 导致燃料燃烧不完全, 从而产生了大量未燃 HC。此外, 由图 6 还可以看出: 滚流控制阀开启可以有效扩展残余废气系数极限, 改善了气流运动。



1—1 600 r/min, 0.35 MPa, 滚流控制阀关;
2—1 600 r/min, 0.35 MPa, 滚流控制阀开;
3—2 000 r/min, 0.33 MPa, 滚流控制阀关;
4—2 000 r/min, 0.33 MPa, 滚流控制阀开。
图 8 HC 体积分数变化规律
Fig. 8 Changing rules of volume fraction of HC emission

图 9 所示为 CO 体积分数随缸内残余废气系数变化规律。由图 9 可知: 除转速为 2 000 r/min, IMEP 为 0.33 MPa, 滚流控制阀关闭工况, CO 体积分数排放随着残余废气系数的增加先降低后增加。由于残余废气加热了缸内新鲜充量, 汽油雾化蒸发更完全, 进而燃烧更加充分, 从而 CO 体积分数降低; 而随着残余废气进一步增加, 在废气稀释作用和热容作用的双重影响下, 燃烧效率下降, 进而导致 CO 体积分数急剧上升; 此外, 滚流控制阀的开启促进了良好的缸内气流运动, 加快了混合气燃烧速率, 同时缸内燃烧温度升高, 加速了 CO 氧化过程, 进而导致 CO 排放量降低。

综上所述, 缸内残余废气对于汽油机的热功转换性能和排放性能均有着显著的影响, 因此, 缸内残余废气的精准测量对于进一步研究和控制具有重要意



- 1—1 600 r/min, 0.35 MPa, 滚流控制阀关;
 2—1 600 r/min, 0.35 MPa, 滚流控制阀开;
 3—2 000 r/min, 0.33 MPa, 滚流控制阀关;
 4—2 000 r/min, 0.33 MPa, 滚流控制阀开。

图 9 CO 体积分数变化规律

Fig. 9 Changing rules of volume fraction of of CO

义。然而,上述测量结果均是基于三动态压力传感器测量方法进行测量的,虽然有较高精度,但由于动态传感器成本很高,且容易损坏,无法在工程上广泛使用。为此,本文基于原测试方法,提出一种新的缸内残余废气系数测量方法,并推导简化后的计算模型。

3 残余废气系数测试方法及计算模型

3.1 残余废气测试方法和参数分析

本文提出一种基于两稳态压力传感器的残余废气测试方法。图 10 所示为残余废气在线测试方法的传感器布置方案。原三动态压力传感器各缸需要 3 个动态高频压力传感器才能对残余废气进行测量,为此,本方法取消缸内动态压力传感器,同时将 2 个动态高频压力传感器改用为常规稳态压力传感器。分别在发动机进气歧管和排气歧管与气缸盖交接面处设压力和

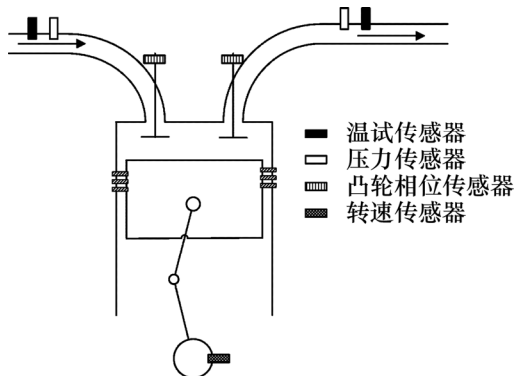


图 10 残余废气在线测试方法中的传感器布置方案

Fig. 10 Sensor layout of RGF online measurement

温度传感器,测量进气和排气的温度和压力。转速传感器和凸轮相位传感器均为发动机自带传感器,可通过本团队开发的 ECU 信号破解读取方法进行测试,获取发动机转速、进气与排气门开闭时刻^[15, 18]。

通过实测得到的进气和排气压力、温度、曲轴转角信号以及凸轮轴转角信号实时传递到计算机中的残余废气系数计算数模中,与预存的气门升程、气道流量系数联立求解得到通过气门的瞬时气体流量。根据气体状态方程得到气门关闭时期缸内残余废气量。本方法结合现代传感器与数值模拟技术,与整机数模相比,计算网格数及计算时间大大减少,使得在发动机台架上进行在线诊断成为可能。

3.2 残余废气计算数模

发动机缸内残余废气主要包括 2 部分:一部分为气门重叠期从排气道倒流回气缸的残余废气,另一部分为排气门关闭时仍未排出气缸的残余废气。

气门重叠期时,倒流至进气管中的废气量 m_{RG_INP} 按下式计算可得^[19]:

$$m_{RG_INP} = \frac{\varphi_{EVC} - \varphi_{IVO}}{6n} \cdot C_d A_\varphi \cdot \frac{P_{\varphi_CYL}}{\sqrt{RT_{\varphi_CYL}}} \cdot \left[\frac{P_{\varphi_IN}}{P_{\varphi_CYL}} \right]^{\frac{1}{\gamma}} \cdot \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{\varphi_IN}}{P_{\varphi_CYL}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: φ_{EVC} 为排气门关闭时的曲轴转角; φ_{IVO} 为进气门开启时刻的曲轴转角; C_d 为气门流量系数; A_φ 为曲轴转角为 φ 时的气门流通面积; P_{φ_CYL} 和 T_{φ_CYL} 分别为缸内气体压力和温度; R 为气体常数; P_{φ_IN} 为进气歧管处进气压力; γ 为气体绝热指数。

排气门关闭时,仍未排出气缸的残余废气量 $m_{RG_CYL_EVC}$ 可根据气体状态方程即下式求解计算:

$$m_{RG_CYL_EVC} = \frac{P_{EX} \cdot V_{CYL_EVC}}{R \cdot T_{CYL_EVC}} \quad (2)$$

式中: P_{EX} 为排气门关闭时刻排气压力; V_{CYL_EVC} 为排气门关闭时刻气缸内工作容积; T_{CYL_EVC} 为排气门关闭时刻气缸温度,此时,气缸温度可近似认为与排气温度相同,因此,取排气门关闭时的排气温度。

进气门关闭时刻缸内循环总残余废气量 m_{RG} 通过联合式(1)和(2)求解得到:

$$m_{RG} = m_{RG_INP} + m_{RG_CYL_EVC} \quad (3)$$

进气门关闭时刻缸内气体总质量 m_{gas} 可根据气体状态方程计算求解:

$$m_{\text{gas}} = \frac{p_{\text{IVC}} \cdot V_{\text{IVC}}}{R \cdot T_{\text{gas}}} \quad (4)$$

式中: p_{IVC} 为进气门关闭时刻缸内气体压力; V_{IVC} 为进气门关闭时刻气缸工作容积; T_{gas} 为缸内气体工质温度。其中, 进气门关闭时刻缸内气体压力可认为与进气歧管压力相同, 因此, 取进气门关闭时的进气压力。缸内气体工质温度可与排气温度相同, 因此, 取此时的排气温度。

缸内残余废气系数 ϕ_{RGF} 表示每循环进气门关闭时, 缸内残余废气量 m_{RG} 与每循环缸内总气体质量 m_{gas} 之比, 即

$$\phi_{\text{RGF}} = \frac{m_{\text{RG}}}{m_{\text{gas}}} \quad (5)$$

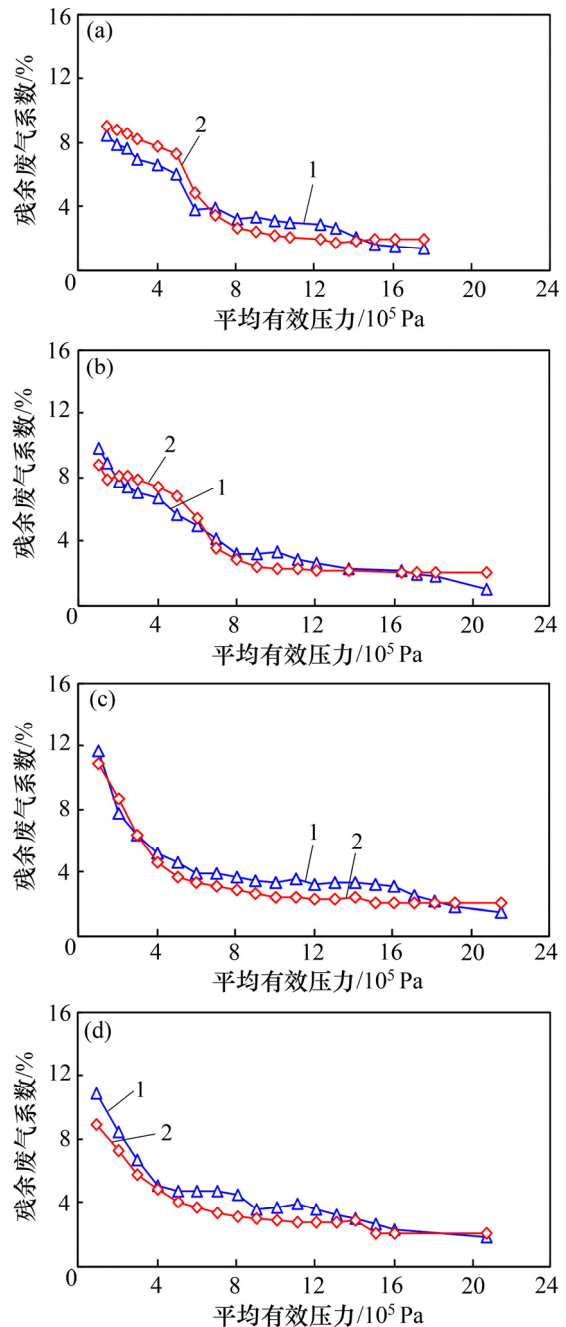
上述计算缸内残余废气量及残余废气系数的各公式中, 进气和排气压力由压力传感器实测得到; 进气和排气门开启、关闭时刻对应的气缸容积由实测的进气和排气阀开闭时刻计算得到; 而进气和排气阀开闭时刻的实时测量可通过检测 ECU 的控制信号得到。

3.3 计算模型验证

为验证本测试方法和计算数模的精度和适用性, 将在单缸机试验基础上导出的模型移植到多缸机上。以某台先进 4 缸增压缸内直喷乘用车汽油机为验证对象, 主要参数如表 3 所示。本试验所用试验设备与表 2 所示的相同, 测试转速为 1 500, 2 000, 3 000 和 4 000 r/min, 在不同负荷工况下进行测试。采用两稳态传感器法与三动态压力传感器法测试残余废气系数, 所得对比结果如图 11 所示。从图 11 可以看出: 采用两稳态压力传感器方法对汽油机残余废气的检测结果与三动态压力传感器测试所得残余废气系数基本接近; 在转速 1 500, 2 000, 3 000 和 4 000 r/min 和不同负荷工况下, 2 种残余废气方法测试所得残余废气系数绝对误差最大值分别为 1.30, 1.08, 1.21 和 1.90, 平均值分别为 0.80, 0.60, 0.73 和 0.80, 具有足够高的精度, 满足试验研究要求。

表 3 乘用车发动机基本参数

参数	数值或类型
发动机类型	四缸四冲程, 缸内直喷
吸气方式	涡轮增压
缸径/mm	79
活塞行程/mm	76.5
排量/L	1.499
压缩比	10
气门形式	双 VVT
额定功率/kW	133
最大扭矩/(N·m)	240



转速/(r·min⁻¹): (a) 1 500; (b) 2 000; (c) 3 000; (d) 4 000
1—三动态压力传感器法; 2—二稳态传感器简化方法。

图 11 2 种测试方法所得残余废气系数对比

Fig. 11 RGF comparison of two test methods

4 结论

1) 缸内残余废气系数对汽油机热功转换过程有显著影响。随着缸内残余废气系数增加, 10%~90%燃烧持续期变长, 且增长速度变快。50%燃烧位置点开始仍保持最佳位置点不变, 随着残余废气进一步增加

而迅速推迟。高压循环指示热效率随残余废气系数增加呈现先增加后急剧降低趋势。

2) 增加缸内残余废气系数可以有效降低 NO_x 排放, 但是当残余废气过多时, 会导致未燃 HC 和 CO 体积分数急剧增大。

3) 滚流控制阀开启可以增强缸内气流运动, 对于加速燃烧过程具有显著作用, 可以使汽油机在较高的残余废气系数下仍具有良好的工作性能。

4) 提出一种基于两稳态压力传感器的缸内残余废气的简化测试方法。该两稳态传感器法具有较高的测试精度, 并且价格低廉, 方法简便, 可以实现整车在线测试应用。

参考文献:

- [1] 李虎强, 褚超美, 邱国平. 应用内部热 EGR 改善柴油机排放性能的研究[J]. 车辆与动力技术, 2011(2): 6-8.
LI Huqiang, CHU Chaomei, QIU Guoping. Research on improvement of emission performance for a diesel engine with internal hot EGR[J]. Vehicle & Power Technology, 2011(2): 6-8.
- [2] 褚超美, 王成润, 洪佳骏. 进气门预开启对柴油机内部废气再循环率控制适应性研究[J]. 内燃机工程, 2016, 37(6): 205-209.
CHU Chaomei, WANG Chengrun, HONG Jiajun. Control of the internal EGR rate by means of intake-valve pilot-opening[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2016, 37(6): 205-209.
- [3] 信松岭, 陆云春. 双 VVT 对汽油机内部 EGR 影响的试验研究[J]. 柴油机设计与制造, 2017, 23(4): 31-34.
XIN Songling, LU Yunchun. Effect of dual VVT on internal EGR of gasoline engine[J]. Design and Manufacture of Diesel Engine, 2017, 23(4): 31-34.
- [4] 祝宇轩, 王游, 张翔宇, 等. 汽油压燃小负荷燃烧过程优化[J]. 内燃机学报, 2016, 34(5): 415-422.
ZHU Yuxuan, WANG Hu, ZHANG Xiangyu, et al. Gasoline compression ignition low-load combustion optimization based on double exhaust valve opening and injection strategy[J]. Transactions of CSICE, 2016, 34(5): 415-422.
- [5] MILLO F, MALLAMO F, ARNONE L, et al. Analysis of different internal EGR solutions for small diesel engines[R]. Detroit, USA: SAE Technical Paper, 2007: 1-11.
- [6] 张翔宇, 郑尊清, 李研芳, 等. 内外 EGR 和喷油压力对柴油机低温燃烧的影响[J]. 车用发动机, 2017(5): 1-5.
ZHANG Xiangyu, ZHENG Zunqing, LI Yanfang, et al. Effects of internal and external EGR and injection pressure on low temperature combustion of diesel engine[J]. Vehicle Engine, 2017(5): 1-5.
- [7] ZHANG Xiangyu, WANG Hu, ZHANG Zunqing, et al. Effects of late intake valve closing(LIVC) and rebreathing valve strategies on diesel engine performance and emissions at low loads[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 98: 310-319.
- [8] 赵洋, 李铭迪, 许广举, 等. EGR 废气组分对柴油机颗粒氧化活性的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(23): 58-63.
ZHAO Yang, LI Mingdi, XU Guangju, et al. Effect of EGR exhaust gas components on oxidation activity of particle from diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(23): 58-63.
- [9] 朱赞, 潘玉萍, 杨升, 等. EGR 对柴油-天然气双燃料发动机稀燃的影响[J]. 车用发动机, 2017(1): 49-53.
ZHU Zan, PAN Yuping, YANG Sheng, et al. Effects of EGR on lean burn of diesel-natural gas dual fuel engine[J]. Vehicle Engine, 2017(1): 49-53.
- [10] JAMSRAN N, LIM O. Effects of EGR and boosting on the auto-ignition characteristics of HCCI combustion fueled with natural gas[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2016, 35: 1015-1024.
- [11] FOX J W, CHENG W K, HEYWOOD J B. A model for predicting residual gas fraction in spark-ignition engines[J]. SAE Transactions, 1993, 102(3): 1538-1544.
- [12] SHAYLER P J, WINBONR L D, HILL M J, et al. The influence of gas/fuel ratio on combustion stability and misfire limits of spark ignition engines[R]. Detroit, USA: SAE Technical Paper, 2000: 1-12.
- [13] LARIMORE J, JADE S, HELLSTROM E, et al. Online adaptive residual mass estimation in a multicylinder recompression HCCI Engine[C]// ASME 2013 Dynamic Systems and Control Conference. Palo Alto, California, USA, 2013: 1-9.
- [14] KAKO J, SATA K, OHATA A, et al. Effect of transient residual gas fraction for gasoline engines[C]// Control Conference. Xi'an, China: IEEE, 2013: 588-593.
- [15] 付建勤, 刘敬平, 阳辉勇, 等. 瞬变工况下残余废气系数对车用汽油机热功转换过程的影响[J]. 汽车工程, 2016, 38(1): 1-9.
FU Jianqin, LIU Jingping, YANG Huiyong, et al. Influences of residual gas fraction on heat-work conversion process of vehicle gasoline engine under transient conditons[J]. Automotive Engineering, 2016, 38(1): 1-9.
- [16] 刘敬平, 赵智超, 唐琦军, 等. 一种内燃机瞬变过程状态与性能参数的准确检测方法[J]. 内燃机学报, 2014, 32(1): 64-71.
LIU Jingping, ZHAO Zhichao, TANG Qijun, et al. A diagnostic and analysis method for process and performance parameters of IC engines under transient operation conditions[J]. Transactions of CSICE, 2014, 32(1): 64-71.
- [17] LIU Jingping, KLEEBERG H, TOMAZIC D, et al. A model for on-line monitoring of in-cylinder residual gas fraction(RGF) and mass flowrate in gasoline engines[R]. Detroit, USA: SAE Technical Paper, 2006: 1-10.
- [18] YUAN Zhipeng, LIU Jingping, FU Jianqin, et al. Quantitative analysis on the thermodynamics processes of gasoline engine and correction of the control equations for heat-work conversion efficiency[J]. Energy Conversion & Management, 2017, 132: 388-399.
- [19] HEYWOOD J B. Internal combustion engine fundamentals[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1988: 225-226.

(编辑 陈灿华)