

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.03.023

残余废气系数对内燃机缸内热功转换性能影响的实验

车海威¹, 马震², 何嘉航³

(1. 西安爱生技术集团有限公司, 陕西 西安 710065;

2. 西北工业大学第 365 研究所, 陕西 西安 710065;

3. 航空工业一飞院, 陕西 西安 710089)

摘要:为提高残余废气系数对内燃机缸内热功转换性能影响的研究,利用 1 台自然吸气单缸机开展台架测试,分析 RGF 引起的内燃机热功转换效果与排放特性变。研究结果表明:提高残余废气系数后,燃烧阶段快速单调升高。缸内残余废气可以起到稀释新鲜混合气的效果,导致燃烧速率减小,从而引起燃烧持续期的快速升高。提高残余废气系数的过程中,由初始点火时刻到 50% 燃烧点都保持单调递增;当转速提高时,从点火到 50% 燃烧点的曲轴转角也明显升高。提高残余废气系数后,高压循环指示热效率表现为小幅升高。缸内燃烧温度与残余废气系数之间呈现负相关变化;50% 燃烧点发生了燃烧恶化结果。本方法具有较高的预测精度,可大大降低传感器成本,具有很高的实际应用价值。

关键词:内燃机;残余废气系数;燃烧;排放

中图分类号:U467.2⁺1 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)03-0109-04

Test on Effect of Residual Exhaust Gas Coefficient on Thermal Work Conversion Performance of Internal Combustion Engine Cylinder

CHE Haiwei¹, MA Zhen², HE Jiahang³

(1. Xi'an Aisheng Technology Group Co., Ltd., Xi'an 710065, China;

2. 365th Institute of Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China;

3. The First Flying Academy of Aviation Industry, Xi'an 710089, China)

Abstract:In order to study the effect of residual exhaust gas coefficient on the thermal power conversion performance of internal combustion engine cylinder, a naturally aspirated single cylinder machine was used to carry out bench test, and the thermal power conversion effect and emission characteristics of internal combustion engine caused by RGF were analyzed. The results show that the combustion phase increases rapidly and monotonically after increasing the residual gas coefficient. The residual exhaust gas in the cylinder can play the role of diluting the fresh mixture, resulting in a decrease in the combustion rate and a rapid increase in the combustion duration. In the process of increasing the residual gas coefficient, it keeps monotonically increasing from the initial ignition time to the 50% combustion point. When the speed increases, the crankshaft angle from ignition to 50% combustion point also increases significantly. After the residual gas coefficient is increased, the thermal efficiency of high pressure circulation indicates a small increase. There is a negative correlation between combustion temperature and residual gas coefficient in the cylinder. Combustion deterioration occurs at 50% of the combustion points. This method has high prediction accuracy, can greatly reduce the cost of sensor, and has high practical application value.

Keywords:gasoline engine; residual gas coefficient; combustion; emission

0 引言

发动机运行过程形成的残余废气中主要为高温混合气,会对后续循环吸入的气体发挥加热效果,并且废气组分主要是由不燃成分组成,跟新鲜气体发生混合时将会引起燃烧速率的变化,从而干扰发动机的热量转换与排放效果。

为深入分析发动机运行性能与残余废气量的关系,有学者开发了废气再循环(EGR)方法来控

制缸内的残余废气量,由此判断残余废气量对发动机特性产生的影响^[1-4]。李长铨等^[5]通过设置排气门的开闭时刻实现内部 EGR 率的调节效果,同时探讨了柴油机处于低负荷状态下的低温燃烧与排放性能,结果显示增大 EGR 率有助于获得更高的排放量并提升热效率。陈砚才等^[6]对各类 EGR 废气组分下的颗粒开展热重测试,对比了不同 EGR 废气组分下的颗粒物差异性,结果显示当 EGR 废气内存在 CO₂ 时将会对颗粒燃烧特性

第一作者简介:车海威(1971—),女,陕西西安人,高级工程师,研究方向为飞机动力系统与辅助设计,xc35773@163.com。

产生显著作用。朱赞等^[7]选择高低压燃料发动机作为测试对象,分析了 EGR 率在不同喷油提前角下引起双燃料发动机特性的变化,结果显示引入 EGR 的情况下,需设置较大的喷油提前角,从而有效控制 NO_x、HC 与 CO 排放量并减少碳烟量。唐利纲等^[8]同时运用动态压力测试和数值分析方法分析内燃机处于瞬变工况下的 RGF,同时确定了合适的参数范围、变化特征与作用机制。

虽然到目前为此针对发动机缸内残余废气进行预测的精度已满足实际应用需求,但考虑需要通过一个或多个动态压力传感器进行精确测试的方式来获得模型输入^[9],导致成本偏高并且较易发生破坏失效,实际算法也较为复杂,并不适合对整车实际道路循环过程开展测试。根据以上研究结果,本文利用 1 台自然吸气单缸机开展台架测试,同时分析了 RGF 引起的内燃机热功转换效果与排放特性的变化情况,选择 1 台增压直喷 4 缸内燃机开展验证分析。

1 试验

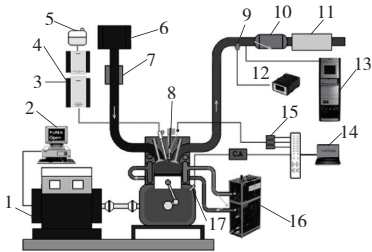
1.1 台架试验

为分析内燃机特性与缸内残余废气的关系,对 1 台自然吸气单缸机进行了稳态台架测试。按照表 1 设定发动机的各项性能指标参数。图 1 给出了单缸机台架的结构图。根据图 1 可知,缸压传感器可以对缸压信号进行实时测试,再将结果传输至燃烧分析仪,以此判断残余废气系数引起的燃烧特性差异^[10];同时,还在台架中加入排放分析仪来实现发动机排气成分的取样过程,从而

为分析缸内残余废气系数引起的排放变化提供参考依据。表 2 为测试设备与装置的具体结构参数,数据选用的是 PUMA 系统,测功机控制选用的是 PUMA 自带的 OPEN1.4.1 系统。

表 1 发动机基本参数

形式或参数	数值或类型
发动机类型	单缸、气道喷射、带轮流控制阀
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°~100°
额定功率/kW	32.5
最大扭矩/Nm	55



1—测功机;2—PUMA 控制系统;3—燃油温度控制箱;
4—油耗仪;5—油箱;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—燃烧分析仪;15—电荷放大器;
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

表 2 主要测试设备型号和基本参数

设备	型号	基本参数
电力测功机	WH-DL30	额外吸收转矩 795 Nm、200~3 000 r/min;上限转速为 7 000 r/min
油耗仪	Meter 735S	分辨率 0.1 s;精度≤0.5%
空气流量计	TP16A.00	准确度±6.0%;重复性±0.1%
过量空气系数分析仪	ETAS ES630.I_E	功率 80 W;分辨率 0.1%;过量空气系数 α;0~3.0
燃烧分析仪	FZ-M-900	测量精度±0.2%;工作电压 DC6 V;充电电压 AC165~265 V;取样探头 φ6×400 mm
进气压力传感器 排气压力传感器	4049A5S	范围 0~60 MPa;0.075 级精度误差;4~20 mA;RS485 信号输出
缸压传感器	MPXHZ6115A6T1	
排气分析仪	MQW-511	电源参数:AC220 V±10%,(50±1) Hz;相对误差±5%;预热时间不大于 15 min

1.2 试验工况

以某台4缸增压缸内直喷乘用车为对象,单缸机利用EGR阀控制的方式来实现缸内残余废气系数调控的功能。为台架测试设定下述工况参数:转速保持1500 r/min固定值,将指示压力设定在0.36 MPa;保持转速2000 r/min以及指示压力均值为0.32 MPa,控制EGR率从0按照5%增长到不稳定燃烧状态^[12]。影响内燃机排气性能的因素主要有转速、压力和阀门启闭3个因素。以下从这3个因素方面,给出了4组仿真条件开展测试研究:

第1组,转速1500 r/min,压力0.36 MPa,阀门关闭;

第2组,转速1500 r/min,压力0.36 MPa,阀门开启;

第3组,转速2000 r/min,压力0.32 MPa,阀门关闭;

第4组,转速2000 r/min,压力0.32 MPa,阀门开启。

2 残余废气对缸内热功转换过程的影响

图2给出了10%~90%燃烧阶段的动力参数与残余废气系数的关系。根据图2可知,提高残余废气系数后,在上述燃烧阶段发生了快速单调升高的趋势。这是由于残余废气内存在之前循环过程的CO₂产物等,从而抑制了缸内的燃烧反应,导致燃烧速度变慢的现象。相比较其他3组,第2组的测试结果更具有代表性。

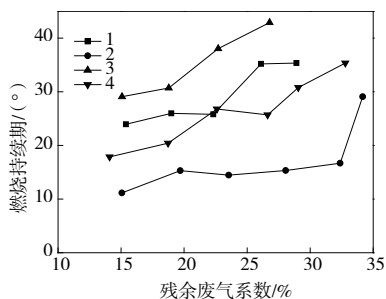


图2 10%~90%燃烧持续期变化

图3给出了缸内燃烧温度的测试结果。通过分析图3可以发现,缸内残余废气可以起到稀释新鲜混合气的效果,并且缸内残余废气具备很高热容,因此当残余废气系数提高时发生了燃烧温度下降的现象,导致燃烧速率的减小;处于较大残余废气系数下,燃烧速率受到残余废气的影响程度更大,从而引起燃烧持续期的快速升高;另一方

面,控制阀开启状态下,10%~90%燃烧持续期显著缩短。这是因为开启控制阀时,缸内产生了更大气流运动,有助于更快完成缸内燃烧过程,从而减弱残余废气系数引起缸内燃烧状态的变化,形成更短燃烧持续期。以第2组为例,残余废气系数在25%之前,缸内具有较高的燃烧温度。

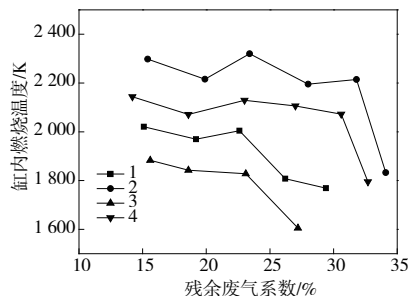


图3 缸内燃烧温度变化

图4给出了50%燃烧部位与残余废气系数之间的变化关系。分析结果发现,在一定区间内随着残余废气含量提高后,50%燃烧位置点设置更高点火提前角也保持相对稳定的状态,通常位于压缩上止点后8°的部位,属于工程应用方面获得认可的最优50%燃烧部位;继续提高残余废气系数时,除了转速2000 r/min与IMEP值0.32 MPa以及控制阀处于开启状态的情况以外,剩余工况都发生了50%燃烧点推迟结果。这是因为缸内存在过高比例的残余废气时降低了缸内燃烧速度,引起燃烧波动或发生失火的情况,由此引起无法实现最优50%的燃烧状态。当转速为1500 r/min,IMEP值为0.36 MPa以及控制阀关闭的情况下,提高残余废气系数时,50%燃烧位置发生了明显提前情况。这是因为缸内存在过高比例的残余废气时会产生不稳定燃烧现象,此时循环变动系数增大至30%,产生波动变化的50%燃烧位置,引起测试过程产生较大误差,残余废气系数绝对误差最大值为1.25。

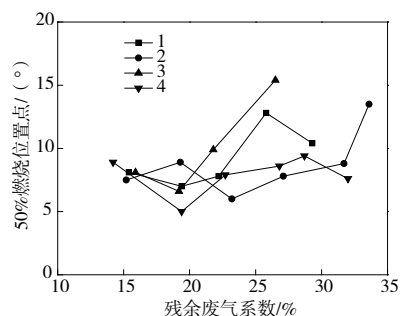


图4 50%燃烧位置点变化

图5给出了从点火时刻过渡到50%燃烧位置

的过程中受到残余废气系数的影响状态。图5显示,并提高残余废气系数的过程中,由初始点火时刻到50%燃烧点都保持单调递增的特点,因此初期内燃机燃烧速率与缸内残余废气系数之间呈现负相关的规律;开启控制阀时,缸内形成了更强滚流运动,有助于更快完成缸内燃烧过程,从而缩短点火与50%燃烧点之间的时间段;同时发现,当转速提高时,从点火到50%燃烧点的曲轴转角也明显升高;开启控制阀可以有效减小各转速间偏差,这是由于缸内气流运动速度提高促进了燃烧速率升高。以第2组为例,残余废气系数在25%之前,50%燃烧点相对比较集中。

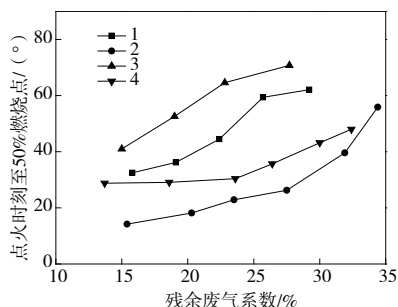


图5 点火时刻至50%燃烧位置点变化

图6为高压循环指示热效率变化。由图6可知,提高残余废气系数后,高压循环指示热效率表现为小幅升高的特点,基本稳定在34%~40%之间,具有很高的测试精度。这是因为残余废气对50%燃烧点与10%~90%燃烧点的影响程度很弱,同时发现缸内燃烧温度与残余废气系数之间呈现负相关的变化趋势;10%~90%阶段形成了更长的燃烧持续期,并且50%燃烧点也发生了推迟的现象,可以推断此时已经发生了燃烧恶化结果。这是因为当缸内存在过多残余废气时,会引起燃烧速率减慢以及发生不稳定燃烧的情况。随着燃烧持续期增加,发动机有效膨胀比下降,无法确保缸内工质的充分膨胀。图6显示,开启控制阀的条件下缸内获得了更快燃烧速度,从而使发动机能够承受更高比例残余废气依然实现了很高的热效率。

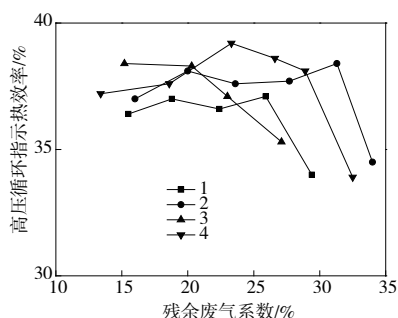


图6 高压循环指示热效率变化

3 结语

1) 提高残余废气系数后,燃烧阶段快速单调升高。缸内残余废气可以起到稀释新鲜混合气的效果,导致燃烧速率的减小,从而引起燃烧持续期的快速升高。

2) 在提高残余废气系数的过程中,由初始点火时刻到50%燃烧点都保持单调递增;当转速提高时,从点火到50%燃烧点的曲轴转角也明显升高。提高残余废气系数后,高压循环指示热效率表现为小幅升高。缸内燃烧温度与残余废气系数之间呈现负相关变化;50%燃烧点发生了燃烧恶化结果。

3) 转速1500 r/min、压力0.36 MPa、阀门开启条件下,残余废气系数控制在25%内是比较合理的。

参考文献:

- [1] 陈贵升,魏峰,李冰,等. 不同进气氛围耦合废气再循环对双燃料发动机工作过程的影响[J]. 内燃机工程,2022,43(2):1-11.
- [2] 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.
- [3] 王文超,姚安仁,任家潮,等. 高低压废气再循环系统(EGR)对进气道喷射式柴油甲醇双燃料发动机的影响[J]. 环境科学学报,2021,41(11):4467-4476.
- [4] 瞿磊,刘帅,谢纬安,等. EGR对煤制油-生物柴油气体及颗粒排放特征的影响[J]. 车用发动机,2020(1):62-68,75.
- [5] 李长锟,王天友,孙凯,等. 进气加湿结合废气再循环技术对高压直喷双燃料低速机燃烧及排放的影响[J]. 内燃机工程,2021,42(1):1-6.
- [6] 陈砚才,李云龙,林思聪,等. 有效压缩比及再循环废气对直喷汽油机燃油消耗的影响[J]. 车用发动机,2021(6):24-29.
- [7] 朱赞,董伟,罗坤,等. 高低压EGR对增压天然气发动机燃烧与排放的影响[J]. 车用发动机,2021(5):8-14.
- [8] 唐利纲,张尊华,龙焱祥,等. 废气重整再循环船用LNG发动机闭环系统模拟研究[J]. 内燃机学报,2022,40(1):29-37.
- [9] 廖诚,刘敬平,任承钦,等. 基于试验和数值模拟耦合计算的汽油机缸内RGF检测方法对比及分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2020,51(1):59-67.
- [10] 赵智超,王书千,刘敬平,等. 缸内残余废气系数对汽油机性能的影响及测试方法研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2018,49(11):2723-2730.
- [11] 陈权,谢辉,江维海,等. NVO策略下HCCI汽油机缸内残余废气率估计[J]. 燃烧科学与技术,2016,22(6):499-505.

收稿日期:2022-10-12