

不同工况下 EGR 率对发动机性能的影响

韩立伟, 史明杰, 徐金辉, 旷云龙

比亚迪汽车工业有限公司, 广东 深圳 130022

摘要:为研究不同工况下 EGR 率对发动机性能的影响, 调整 EGR 阀开度、节气门开度和点火角, 对某 1.5 L 自然吸气发动机进行台架试验, 分析不同 EGR 率下发动机的泵气损失、爆震趋势、燃烧持续期。试验结果表明: 在低负荷时, 随着 EGR 率增加, 泵气损失降低, 燃烧持续期增加, EGR 率为 10% 时, 泵气损失和燃烧持续期达到平衡, 比油耗最低; 在中负荷时, 随着 EGR 率增加, 节气门接近全开时, 泵气损失最低, 比油耗最低; 在外特性时, EGR 率小幅度增加(由 0 增加到 4%), 抑制爆震趋势明显, 燃烧中心显著提前, 比油耗显著降低。该研究可为发动机性能优化和 EGR 的标定提供参考。

关键词:EGR 率; 比油耗; 泵气损失; 燃烧持续期

中图分类号:TK411.5

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)04-0067-05

引用格式:韩立伟, 史明杰, 徐金辉, 等. 不同工况下 EGR 率对发动机性能的影响[J]. 内燃机与动力装置, 2022, 39(4): 67-71.

HAN Liwei, SHI Mingjie, XU Jinhui, et al. Influence of EGR rate on engine performance under different operating conditions[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022, 39(4): 67-71.

0 引言

为实现我国提出的“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和”^[1]目标, 需要进一步提高发动机的热效率以降低油耗, 废气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)技术是广泛应用的技术之一。EGR 技术从排气管引出部分废气, 经进气管重新进入燃烧室参与燃烧。相同工况点下引入废气可以使节气门开度增加, 降低了泵气损失从而降低发动机油耗^[2-4]。引入废气可以使燃烧温度降低, 降低 NO_x 排放, 同时抑制爆震, 使点火角提前, 降低比油耗^[5-8]。但是, 引入废气的同时使燃烧速度降低, 增加燃烧持续期, 从而影响发动机的指示功^[9-10]。EGR 率为废气与进气量之比, 是评判 EGR 对发动机性能影响的重要量化指标, EGR 率增加, 降低泵气损失和爆震趋势, 降低油耗, 增加燃烧持续期, 降低动力性, 导致发动机不能兼顾油耗和动力性^[11-13]。研究 EGR 率对发动机的泵气损失、爆震趋势、燃烧持续期的影响以及它们之间的相互关系, 对优化发动机性能具有重要意义。

本文中基于某台 1.5 L 自吸发动机, 通过发动机台架试验研究不同 EGR 率对泵气损失、爆震趋势、燃烧持续期的影响, 找出各参数之间的平衡关系, 为发动机性能优化提供理论支持, 为 EGR 标定提供参考。

1 试验设备与方法

1.1 试验设备

试验采用某 1.5 L 直列 4 缸、自然吸气、气道喷射汽油机, 主要技术参数如表 1 所示。

收稿日期: 2022-04-14

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2018B090911002)

第一作者简介: 韩立伟(1979—), 男, 蒙古族, 内蒙古赤峰人, 工学博士, 高级工程师, 主要研究方向为新能源汽车动力系统, E-mail: hanliweiwin@126.com。

表 1 发动机主要技术参数

缸径/mm	压缩比	额定功率/kW	额定转速/(r·min ⁻¹)	额定转矩/(N·m)	额定转矩下转速/(r·min ⁻¹)
72	15.5	81	6000	135	4500

试验台架示意如图 1 所示。EGR 采用催化器后取气方式,通过 EGR 冷却器降温后流经 EGR 阀进入发动机进气管。采用 AVL 台架及测功机控制目标工况点,使用 AVL 油耗仪测量比油耗,采用 AVL 燃烧分析仪测量稳态工况点 100 个循环的平均值,计算燃烧始点、燃烧中心、燃烧终点、泵气损失和平均指示压力波动率等参数,分析燃烧过程,采用 HORIBA 废气分析仪测量进气与排气中 CO₂ 的体积分数,计算 EGR 率。

1.2 试验方法

试验室环境温度为 21 ℃,发动机冷却液温度保持恒定为 90 ℃,发动机转速为 2400 r/min,平均有效压力分别为 350、700 和 965 kPa,EGR 率在 0~20%按一定间隔选取。部分负荷工况点试验时,控制 EGR 阀开度、节气门开度和点火角,保证稳定在同一工况点,同时保证燃烧过程中燃烧中心在上止点后对应的曲轴转角为 8°附近或在爆震边界内,从而实现最低油耗;在外特性工况点试验时,控制 EGR 阀开度、节气门开度(全开)和点火角,保证稳定在同一工况点,同时保证在爆震边界内燃烧。

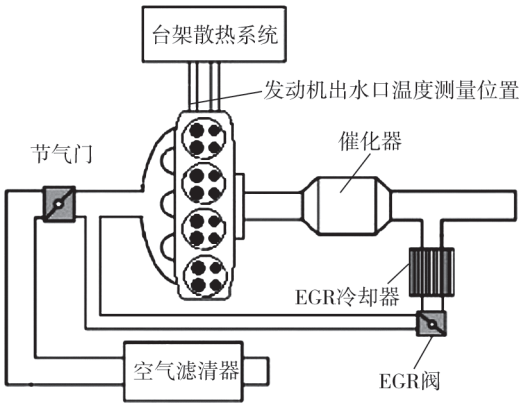


图 1 发动机台架示意图

2 数据分析

由燃烧始点和终点可得到燃烧持续期,燃烧分析仪根据缸压计算得到泵气损失,根据平均指示压力计算得到循环波动率,表征该工况点的燃烧稳定性。

2.1 低负荷工况下 EGR 率对发动机性能的影响

发动机转速为 2400 r/min、平均有效压力为 350 kPa 时 EGR 率对发动机性能的影响如图 2 所示。

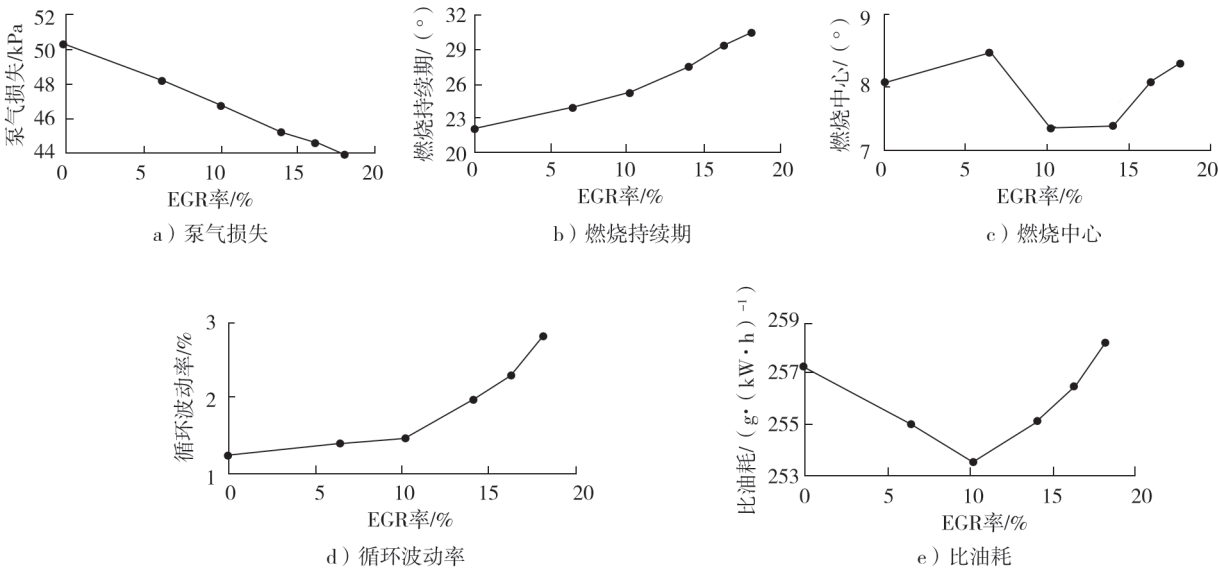


图 2 转速为 2400 r/min、平均有效压力为 350 kPa 时 EGR 率对发动机性能的影响

由图 2a)可知:EGR 率由 0 增加到 17%,泵气损失从约 50 kPa 降低到 44 kPa,这是因为随着 EGR 率增加,节气门开度逐渐增大,导致泵气损失逐渐降低。由图 2b)、c)可知:随着 EGR 率从 0 到 17%逐渐增加,燃烧持续期逐渐增大,为了保证燃烧中心在上止点后对应的曲轴转角约为 8° ,控制点火角逐渐提前,此外从燃烧持续期和燃烧中心变化趋势可推算出点火角和燃烧始点逐渐提前;EGR 率从 0 增加到 17%,燃烧持续期对应的曲轴转角从 22° 增加到 31° ,EGR 率大于 10%后,EGR 率对燃烧持续期的影响更加明显。由图 2d)可知:随着 EGR 率增加,循环变动逐渐增大,但 EGR 率超过 10%后,燃烧持续期显著增加。由图 2e)可知:EGR 率从 0 增加到 17%,比油耗随 EGR 率增加先降低后升高,EGR 率为 10%时比油耗最低;表明该工况下 EGR 率大于 10%后,随着 EGR 率的增加,燃烧稳定性逐渐恶化。

比油耗是机械效率和指示热效率综合影响的结果,泵气损失和燃烧持续期分别影响机械效率和指示热效率,二者随 EGR 率变化的趋势相反,当二者变化率达到平衡即 EGR 率为 10%时,比油耗最低。

2.2 中负荷工况下 EGR 率对发动机性能的影响

发动机转速为 2400 r/min、平均有效压力为 700 kPa 时 EGR 率对发动机性能的影响如图 3 所示。

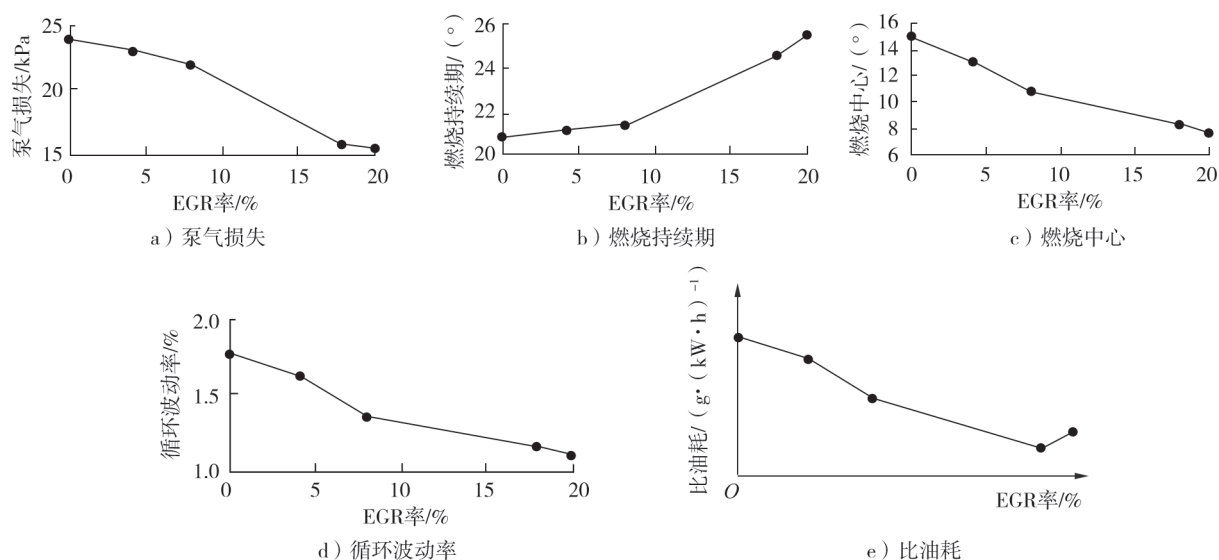


图3 转速为 2400 r/min、平均有效压力为 700 kPa 时 EGR 率对发动机性能的影响

由图 3 可知:EGR 率由 0 增加到 20%,泵气损失从 24 kPa 降低到 15 kPa,这是因为随着 EGR 率的增加,节气门开度逐渐增加,泵气损失逐渐降低^[14],当 EGR 率增加到 18%时,节气门开度接近全开,所以继续增加 EGR 率到 20%时,泵气损失降低幅度很小;EGR 率从 0 增加到 20%,燃烧中心对应的曲轴转角由 15° 降低到 8° 附近,因为此时为中等负荷,存在爆震趋势(一般通过燃烧中心是否在 8° 附近可以判断是否有爆震),EGR 率增加可以降低燃烧速度、燃烧温度,抑制爆震,增加点火角,所以燃烧中心逐渐提前^[15];随着 EGR 率从 0 增加到 20%,燃烧持续期对应的曲轴转角从 21° 增加到 25.5° ,原因与低负荷时相同;因为燃烧中心提前,燃烧循环变动略有下降;EGR 率从 0 增加到 18%,比油耗显著降低,EGR 率由 18%增加到 20%,比油耗增加了 $2 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,表明 EGR 率从 18%增至 20%时,泵气损失下降对机械效率的改善幅度较小,无法弥补燃烧持续期增加以及工质多变指数下降对指示热效率的影响。

2.3 外特性工况下 EGR 率对发动机性能的影响

因为本发动机为自然吸气发动机,外特性节气门全开,增加 EGR 率会降低进入缸内新鲜空气的质量,导致动力性降低。

发动机转速为 2400 r/min、平均有效压力为 965 kPa(外特性负荷)时 EGR 率对发动机性能的影响如图 4 所示。

由图 4 可知:EGR 率由 0 增加到 4%,泵气损失基本不变,约为 7.5 kPa,这是因为外特性节气门全开,增加 EGR 率会降低进入缸内新鲜空气的质量,进气压力保持不变,所以泵气损失几乎不变;EGR 率由 0

增加到4%,燃烧中心对应的曲轴转角由 25.0° 降低到 21.7° ,EGR率增加很小,燃烧中心提前较为显著,因为此时为外特性工况,爆震趋势较严重,EGR率增加可以降低燃烧速度和燃烧温度,抑制爆震,从而使点火角提前,燃烧中心也随之提前且较为明显;EGR率由0增加到4%,燃烧持续期不但没有恶化,反而轻微降低,这是由于EGR率的增加抑制爆震且使点火角提前的综合作用结果;EGR率由0增加到4%,燃烧稳定性相对改善但趋势不明显,这同样是抑制爆震且使点火角提前的综合作用结果;EGR率由0逐渐增加到4%,比油耗降低 $8\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,EGR率增加幅度很小,但比油耗降低幅度较大,因为在外特性工况点EGR率增加可以显著抑制爆震,提前点火角,从而显著降低油耗。因此,针对自然吸气发动机,在外特性工况如果轻微增加EGR率,不但不会降低动力性,而且可使油耗显著降低。发动机在该工况点的EGR率可以增加到4%,如果是增压发动机,提高进气压力,可以进一步增加EGR率,油耗降低将更为显著。

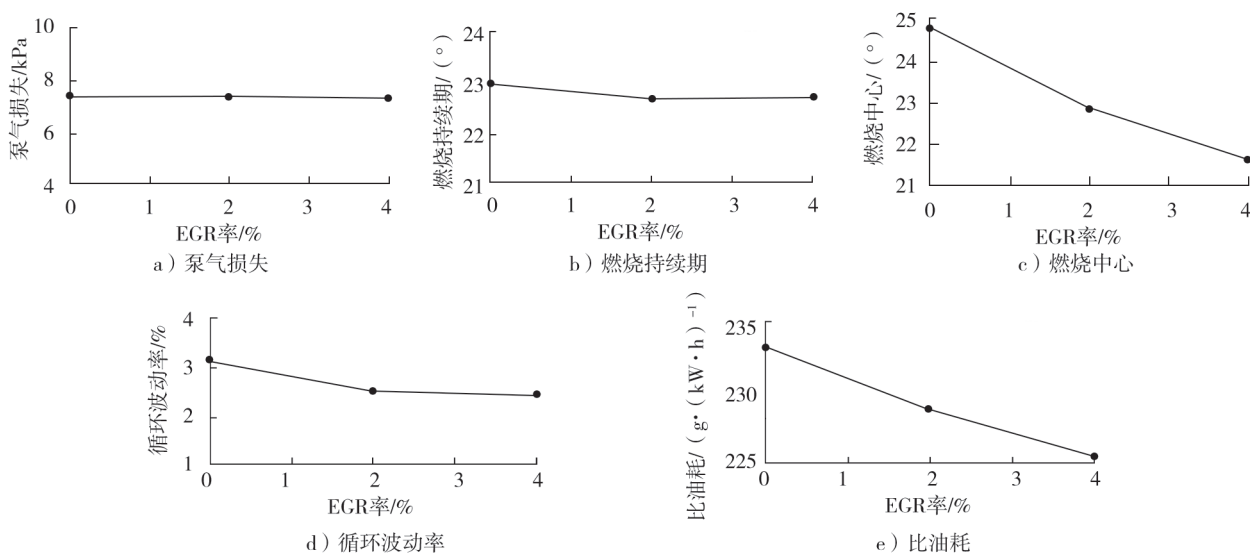


图4 转速为2400 r/min、平均有效压力为965 kPa时EGR率对发动机性能的影响

3 结论

1) 低负荷工况下,无爆震趋势,随着EGR率的增加,泵气损失显著降低,燃烧持续期显著增加,二者达到平衡,EGR率为10%时的油耗率最低。

2) 中负荷工况下,存在爆震趋势,随着EGR率的增加,燃烧持续期显著增加;当EGR增加到18%时,节气门接近全开,此时油耗最低;若继续增加EGR率,泵气损失降低幅度很小,不能弥补燃烧持续期增加带来的热效率损失,导致油耗增加。

3) 外特性工况下,爆震趋势较为严重,EGR率小幅度增加(4%),抑制爆震趋势明显,燃烧中心显著提前,油耗率显著降低。

参考文献:

- [1] 曾雪兰. 碳达峰一诺千金 广东先行示范再出发[J]. 环境, 2020(11): 58-61.
- [2] 潘锁柱, 宋崇林, 裴毅强, 等. EGR对GDI汽油机燃烧和排放特性的影响[J]. 内燃机学报, 2012, 30(5): 749-754.
- [3] 吴达, 许敏, 李铁. 废气再循环对增压直喷汽油机热效率的影响[J]. 车用发动机, 2013(3): 50-55.
- [4] ALGER T, ROBERTS C. Cooled exhaust gas recirculation for economy and emission improvement in gasoline engines [J]. International Journal of Engine Research, 2011, 12(3): 252-264.
- [5] DINGELSTADT R, EWERT S, WERZ M, 等. 废气再循环在汽油机上的潜力[J]. 范明强, 译. 国外内燃机, 2015, 47(3): 53-56.
- [6] 贾宁, 高定伟, 郭向阳, 等. EGR对增压进气道喷射汽油机的影响研究[J]. 内燃机工程, 2016, 37(2): 43-47.

- [7]高尚志,潘建考,杨陈,等. 低压 EGR 对 GDI 发动机燃烧和燃油经济性的影响[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2018,47(6): 7-9.
- [8]秦博,张宗澜,林思聪. 低压冷 EGR 对小型汽油机的节油贡献[J]. 小型内燃机与车辆技术,2017,46(4):19-25.
- [9] LIU F, PFEIFFER J. Estimation algorithms for low pressurecooled EGR in spark-ignition engines [J]. SAE International Journal of Engines, 2015, 8(4): 1652-1659.
- [10]吉田慎一郎,伊藤行伸,平井直树,等. 低压冷却 EGR 系统在小型增压式汽油机上的应用[J]. 彭惠民,译. 国外内燃机, 2017,49(2): 49-53.
- [11]郭玉彬. EGR 与变压缩比协同作用对汽油机性能及排放影响的研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2014.
- [12]朱天宇. EGR 对进气道喷射发动机性能及循环波动影响的研究[D]. 天津:天津大学,2012.
- [13]BOGARRA-MACIAS M, HERREROS-ARELLANO J M M, TSOLAKIS A, et al. Reformate exhaust gas recirculation (REGR) effect on particulate matter (PM), soot oxidation and three way catalyst (TWC) performance in gasoline direct Injection (GDI) engines[J]. Bioresources, 2015, 9(1):597-598.
- [14]FRANCQUEVILLE L, MICHEL J B. On the effects of EGR on spark-ignited gasoline combustion at high load [J]. SAE International Journal of Engines,2014, 7(4):1808-1823.
- [15]黄德永,张振东. 高压 EGR 率和温度对汽油机性能和排放的影响[J]. 农业装备与车辆工程,2020,58(5):119-122.

Influence of EGR rate on engine performance under different operating conditions

HAN Liwei, SHI Mingjie, XU Jinhui, KUANG Yunlong

BYD Auto Industry Company Limited, Shenzhen 130022, China

Abstract: In order to study the effect of EGR rate on engine performance under different operating conditions, a 1.5 L naturally aspirated engine is tested on the bench to analyze the pumping loss, knock trend and combustion duration of the engine under different EGR rates by adjusting the EGR valve opening, throttle valve opening and ignition angle. The test results show that at low load, with the increasing of EGR rate, the pumping loss decreases and the combustion duration increases. When the EGR rate is 10%, the pumping loss and the combustion duration reach a balance, and the fuel consumption is the lowest. At medium load, with the increase of EGR rate, when the throttle valve is close to full opening, the pumping loss is the lowest, and the fuel consumption rate is the lowest at this time. At full load, the EGR rate is slightly increased (4%), which can result that the knocking suppression trend is obvious, the combustion center is significantly advanced, and the fuel consumption rate is significantly reduced. The study can provide a reference for engine performance optimization and provide guidance for EGR calibration.

Keywords: EGR rate; fuel consumption rate; pumping loss; combustion duration

(责任编辑:刘丽君)