

废气再循环阀开度对柴油机排放特性的影响

楼狄明, 朱衍, 张允华, 谭丕强, 胡志远, 房亮

(同济大学汽车学院, 上海 201804)

Influence of Exhaust Gas Recirculation Valve Opening on Diesel Engine Emission Characteristics

Lou Diming, Zhu Kan, Zhang Yunhua, Tan Piqiang, Hu Zhiyuan, Fang Liang

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Exhaust Gas Recirculation (EGR) system is an important means to reduce the NO_x emission of diesel engine, but it will have different degrees of impact on the emission of other pollutants. Based on the engine bench, the steady-state orthogonal tests of EGR and variable geometry turbocharger (VGT) were carried out on a high-pressure common rail heavy-duty diesel engine, and the influence of EGR valve opening on diesel engine NO_x, CO, CO₂, soot, and other pollutants under steady-state conditions was investigated. The results shows that the NO_x emission decreases with the increase of EGR valve opening. When the EGR valve opening exceeds 50%, the NO_x emission decreases slowly. The CO emission of diesel engine increases with the increase of EGR valve opening, which is obviously under high load conditions; EGR has little effect on CO₂ emissions under low and medium load conditions of diesel engine, while CO₂ emission increases significantly with the increase of EGR valve opening under high load conditions. The exhaust smoke intensity increases with the increase of EGR valve opening, especially when the EGR valve opening exceeds 50%. When the EGR valve is fully open, the exhaust smoke increases by an average of 146.6% compared with that without EGR.

摘要: 废气再循环 (EGR) 系统是降低柴油机 NO_x 排放的重要手段, 但会对其他污染物排放带来不同程度的影响。本文基于发动机台架在一台高压共轨重型柴油机上进行 EGR 与可变截面涡轮增压 (VGT) 稳态正交试验, 探究了稳态工况下 EGR 阀开度对柴油机 NO_x、CO、CO₂ 和碳烟等污染物的影响。研究表明, NO_x 排放随 EGR 阀开度升高呈下降的趋势, 当 EGR 阀开度超过 50% 时, NO_x 排放降幅变缓。柴油机 CO 排放随 EGR 阀开度的升高呈上升趋势, 这一趋势在高负荷工况下尤为明显; 柴油机中低负荷工况下, EGR 对 CO₂ 排放影响较小, 高负荷工况下, CO₂ 排放随 EGR 阀开度增大明显升高。排气烟度随 EGR 阀开度增大呈上升趋势, EGR 阀开度超过 50% 时, 这一趋势尤为明显。EGR 阀全开时的排气烟度较无 EGR 时平均涨幅达到 146.6%。

关键词: 柴油机; EGR; NO_x; 碳排放; 碳烟

Keywords: Diesel engine, EGR, NO_x, Carbon emissions, Soot

中图分类号: TK427

文献标志码: A

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52206167); 中央高校基本科研业务费专项资金资助; 江西省技术创新引导类计划项目

(20212BDH80015)

楼狄明 (1963-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为混合动力技术、低碳/碳中和燃料技术、移动源智能排放控制技术等, E-mail:

loudiming@tongji.edu.cn

0 概述

由于具有优秀的安全性能、长久的使用寿命,柴油机正广泛应用于工业、农业及交通运输业等领域。全球汽车保有量目前已超过 12 亿辆,2023 年这一数值预计将达到 20 亿辆。其中,柴油机在道路与船舶为主战场的商用领域占主导地位^[1,2]。汽车尾气中的主要污染成分主要包括碳氢化合物、氮氧化物 (NO_x), CO , CO_2 , SO_2 、颗粒物 (Particulate Matter, PM) 以及醛类等^[3,4]。相较于汽油机,柴油机排放中的 NO_x 以及 PM 含量较高。目前,能源安全与环境问题正广泛受到国际社会的关注,内燃机作为污染物排放的来源之一,不断受到越来越严格的控制与约束^[5]。国 VI 排放法规对柴油机 NO_x 排放限值为 $460 \text{ mg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, 相较国 V 排放法规严格了 80%^[6]。

废气再循环 (Exhaust Gas Re-circulation, EGR) 系统对于改善柴油机 NO_x 的排放效果显著^[7,8]。目前,国内外研究人员对 EGR 对柴油机排放产生的影响展开了广泛研究^[9-11]。王俊等人使用海拔高度模拟装置,探究了不同海拔下 EGR 对柴油机性能和排放的影响,结果表明与平原地区相比,是高原环境下 CO 比排放和烟度对 EGR 更为敏感^[12]。张海燕等人研究了不同转速低负荷工况下 EGR 率对 M100 甲醇发动机排放特性的影响,研究表明,随着 EGR 率的增加,未燃甲醇和甲醛的排放呈现上升的趋势^[13]。王凤滨等人对 EGR 和米勒循环进行了研究,发现大 EGR 率可通过降低燃烧温度,牺牲效率,避开 NO_x 和 Soot 生成区域^[14]。谷雨等人对柴油机排气污染物中的颗粒数量 (Particulate Number, PN) 开展了研究,结果表明, EGR 率的增加会导致 PN 排放量增大^[15]。Guo Zexian 等人将高活性汽油 (High Reactivity Gasoline, HRG) 喷入柴油机进行研究,发现高

EGR 率下, HRG 和柴油均以积聚模态颗粒为主;在低 EGR 率下,柴油比 HRG 产生更多的成核模式颗粒^[16]。Valeika Gintaras 等人研究了 EGR 率对使用氢化植物油的发动机的影响,试验表明,高 EGR 率对热释放速率显著增加有较大影响^[17]。Feng Shiquan 等人通过对柴油机的燃烧机理进行简化,分析了不同 EGR 率下缸内温度与压力的变化,并绘制了温度的空间分布图^[18]。现有研究表明, EGR 可对柴油机产生的 NO_x 排放进行高效的控制。

研究人员已对 EGR 对 NO_x 的影响展开了一系列研究,然而,由于 EGR 将废气引入进发动机气缸中,改变了燃烧条件,因此, CO , CO_2 与碳烟等污染物的排放同时发生了改变。因此,分析 EGR 对多种排放污染物的影响尤为重要。本文通过对 EGR 阀和可变截面涡轮增压系统 (Variable Geometry Turbocharger, VGT) 的开度进行精确控制,在一台高压共轨重型柴油机进行 EGR 与 VGT 稳态正交试验,分析了 EGR 阀的开度对发动机排气中 NO_x 、 CO 、 CO_2 与烟度排放的影响。本研究为对柴油机全工况下 EGR 阀最佳开度的优化提供了试验依据,对深入分析 EGR 瞬态工况下的影响特性、优化过度路径具有指导意义。

1 试验系统与方法

1.1 试验系统

EGR 阀开度对柴油机排放特性影响试验系统如图 1.1 所示。试验系统中使用的柴油机为一台某型带有 EGR 与 VGT 的高压共轨增压中冷重型柴油机。该柴油机的主要技术参数如表 1.1 所示。试验时使用基于控制器域网校准协议 (CAN Calibration Protocol, CCP) 的 ETAS INCA 软件,对 EGR 阀与 VGT 的开度、喷油量、喷油提前角以及轨压等参数进行了标定,当试验控制台给 ECU 上电后, INCA 打开并与 ECU 通信,当发动

机运转时, INCA 可实时改变上述参数, 并且记录 ECU 中喷油、轨压、EGR 与 VGT 开度等参数。

试验系统的分析测试部分由 AVL-PEUS 多组分气体测试仪、AVL-i60 气体测试仪与 439 烟度仪等设备构成。AVL-PEUS 与 AVL-i60 的采样频率为 10 Hz, 可对柴油机排气中的 NO_x、CO 和 CO₂ 等气态污染物的含量进行分析; 使用 439 烟度仪测量了柴油机排气的瞬态烟度。

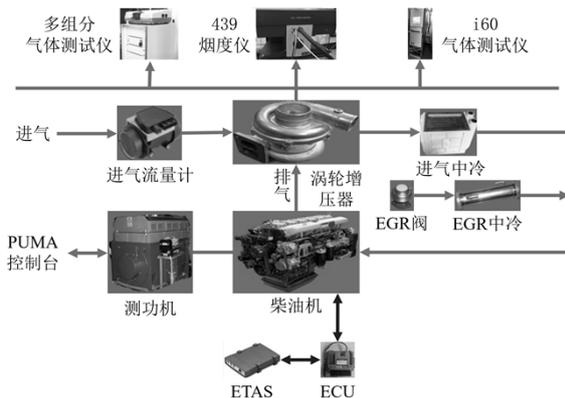


图 1.1 EGR 阀开度对柴油机排放特性影响试验系统
Fig.1.1 Test system for influence of EGR valve opening on diesel engine emission characteristics

表 1.1 某型柴油机主要技术参数

Tab.1.1 Main technical parameters of the diesel engine

| 项目 | 单位 | 参数 |
|----------|-------|-----------|
| 额定功率 | kW | 274 |
| 额定转速 | r/min | 2100 |
| 最大扭矩 | N·m | 1525 |
| 最大扭矩转速 | r/min | 1200~1500 |
| 涡轮后排气温度 | °C | ≤700 |
| 中冷器后进气温度 | °C | 50±5 |
| 最高爆发压力 | MPa | ≤17 |

1.2 试验方法

通过搭建 EGR 阀开度对柴油机排放特性影响试验系统, 进行 EGR 与 VGT 稳态正交试验。使用 INCA 对柴油机进行控制, 精确调整 EGR 与 VGT 开度, 在欧洲稳态测试循环 (European Steady-State Cycle, ESC) 十三工况点稳态工况下改变 EGR 阀开度与 VGT 开度, 对柴油机排放特性随 EGR 阀开度变化的规律进行了研究。ESC 十三工况点对应的 A, B, C 转速分别为 1295 r/min, 1590 r/min 和 1885 r/min。在 EGR 与 VGT 稳态正交试验中, EGR 阀开度分别为 0%, 25%, 50%,

75% 和 100%; VGT 开度分别为 40%, 50% 和 65%。

2 结果与讨论

2.1 EGR 阀开度对 NO_x 排放的影响

柴油机排气中 NO_x 的主要成分为 NO, NO₂, N₂O 等, 其中 NO 占主要地位, 根据 Zeldovitch 理论, NO 的反应过程可表示如式 (2.1) ~ 式 (2.4) 所示。高温、富氧以及氧与氮在高温下滞留的时间决定了 NO_x 含量的变化^[19]。

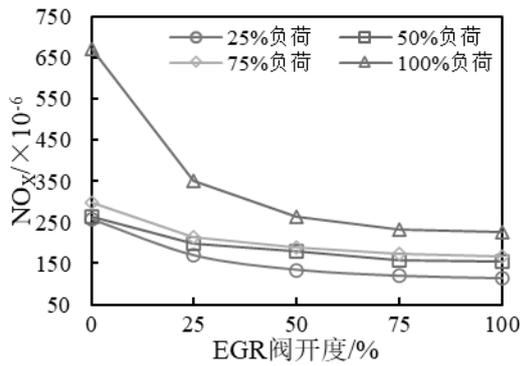


试验结果表明, 所有工况下, EGR 均使 NO 排放降低。当 EGR 阀开度大于 50% 时, NO 含量的下降趋势趋于平缓。当转速为 1590 r/min, VGT 65% 开度、EGR 阀 100% 开度时, NO 达到 86.21% 的最大降幅。EGR 引入的回流废气通过降低缸内温度、减少氧含量, 对柴油机排气中的 NO 含量有较为显著的降低作用。

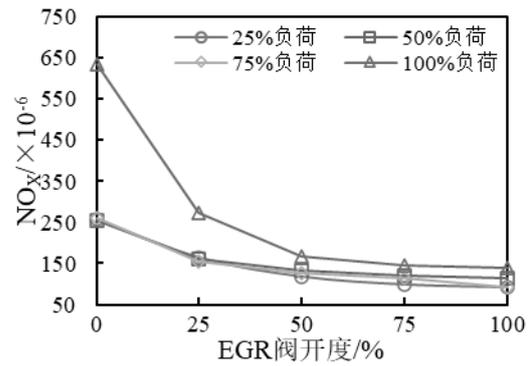
对 NO₂ 含量的分析表明, NO₂ 在排气中含量较少, 除 EGR 阀全关时各转速的 100% 负荷以及 1885 r/min, 75% 负荷时 NO₂ 排放高于 200 × 10⁻⁶ 外, 其余工况点 NO₂ 的排放均未超过 25 × 10⁻⁶。当 EGR 阀开度为 25% 时, 排气中 NO₂ 含量降幅较大, 在柴油机转速为 1885 r/min, VGT 开度为 50% 时, NO₂ 降幅达到最大值 98.01%。

不同工况下排气中 NO_x 含量随 EGR 阀开度的变化如图 2.1 所示。由于 NO 在柴油机排气中 NO_x 的中占主要地位, NO 的变化规律通常与 NO_x 基本一致^[20]。NO_x 的排放水平随着 EGR 阀开度的升高而呈下降趋势, 当 EGR 阀开度超过 50% 时, NO_x 含量的下降趋势放缓。当柴油机转速为 1295 r/min, VGT 开度为 65% 时, 在 EGR 阀全开时, NO_x 含量的降幅达到了最大值 82.40%。所有工况下, EGR 均使排气中 NO_x 的含量降低了 37.23% 以上, 表明 EGR 对 NO_x 具有良好的抑制

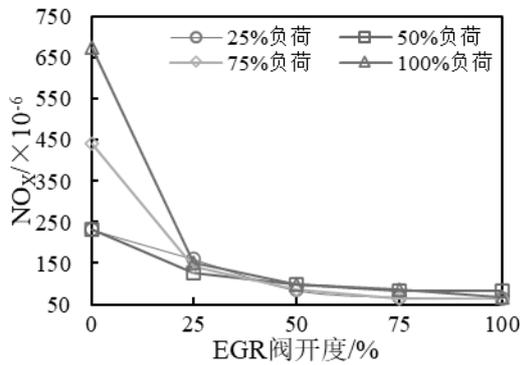
作用。



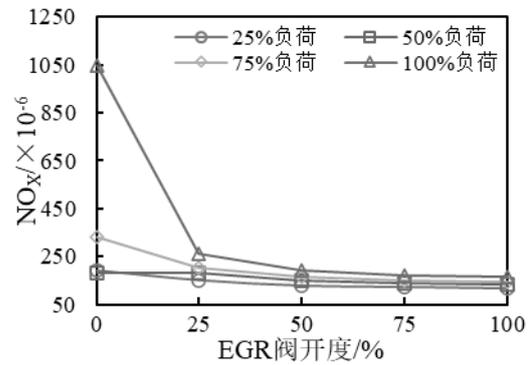
(a) 1295 r/min, VGT 40%



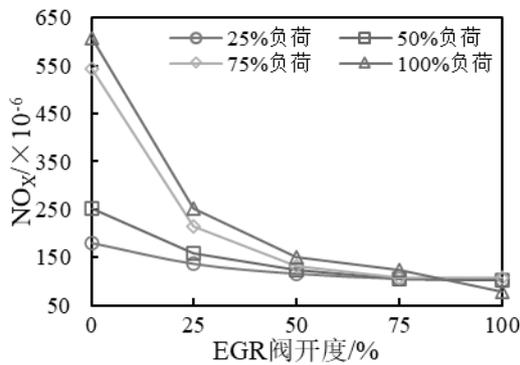
(b) 1295 r/min, VGT 50%



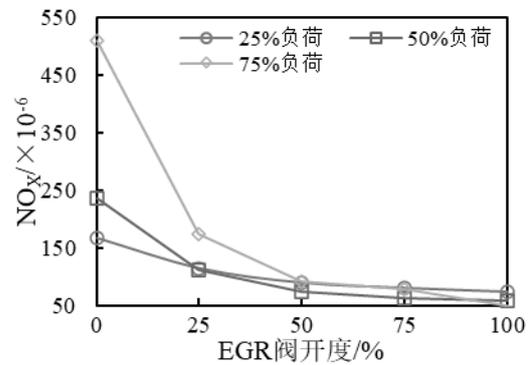
(c) 1295 r/min, VGT 65%



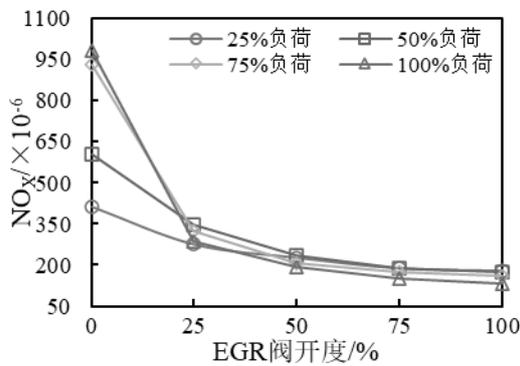
(d) 1590 r/min, VGT 40%



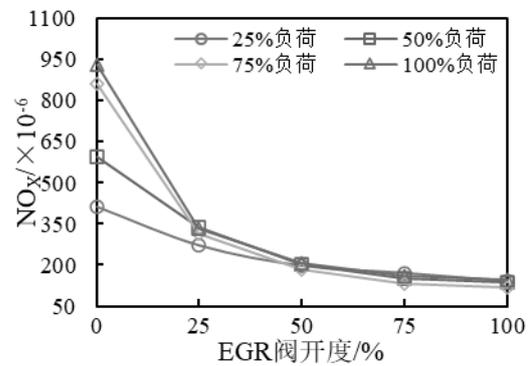
(e) 1590 r/min, VGT 50%



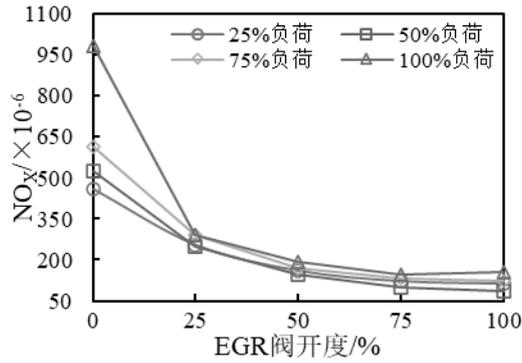
(f) 1590 r/min, VGT 65%



(g) 1885 r/min, VGT 40%



(h) 1885 r/min, VGT 50%



(i) 1885 r/min, VGT 65%

图 2.1 不同工况下排气中 NO_x 含量随 EGR 阀开度的变化

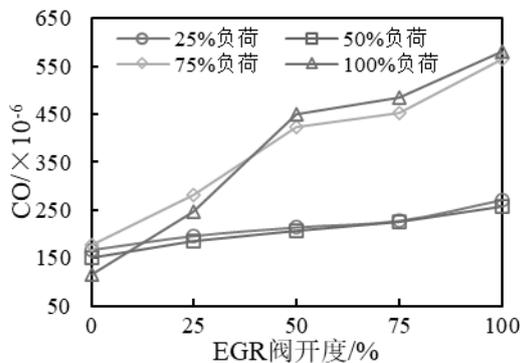
Fig.2.1 Changes of the NO_x in the exhaust gas with EGR valve opening under different working conditions

由于 NO_x 的形成条件包括高温富氧环境与较长的燃烧持续期，由 EGR 引入的回流废气具有较高的比热容，使得缸内温度下降，同时，回流废气使缸内空燃比下降，混合气中的含氧量降低，最终抑制了 NO_x 的生成。当柴油机处于不同负荷时，EGR 抑制 NO_x 的原理不尽相同。柴油机小负荷时，由于喷油量较少，高比热容的回流废气对缸内温度的降低是 NO_x 排放量降低的主要原因；高负荷时，缸内温度较高，回流废气对混合气的氧浓度的降低作用成为控制 NO_x 排放的关键因素。

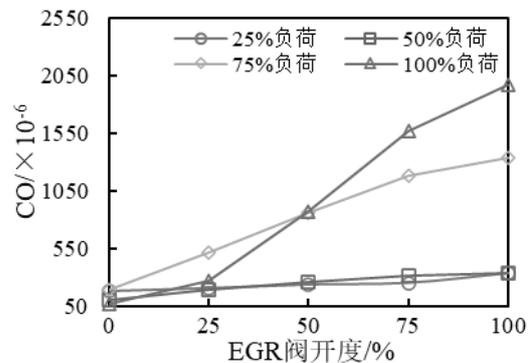
2.2 EGR 阀开度对 CO 排放的影响

CO 是柴油燃烧时的中间产物与不完全燃烧产物，不均匀的混合气、不恰当的燃烧温度均可造成柴油机 CO 排放含量的升高。因此，CO 排放水平表明了柴油机缸内混合气燃烧的完善程度。不同工况下排气中 CO 含量随 EGR 阀开度的变化如图 2.2 所示。各工况下，排气中的 CO 含量随着

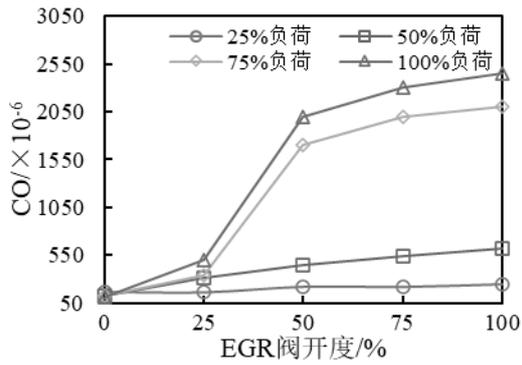
EGR 阀开度的增加呈上升趋势，柴油机高负荷下，这一上升趋势尤为明显。当柴油机为 1885 r/min，100%负荷，VGT 40%开度，EGR 阀全开时，排气中 CO 的含量与 EGR 关闭时相比，涨幅达到了 1271.31%；25%负荷时，EGR 阀全开时的涨幅为 25.29%。空燃比的变化是造成 EGR 不同开度在柴油机高低负荷下对 CO 排放影响差异显著的主要原因。当柴油机负荷较小时，喷油量较低，即使在 EGR 引入回流废气后缸内依然具有充足的氧气，EGR 对柴油机的影响主要为降低燃烧温度；当柴油机负荷较大时，由于喷油量较大，回流废气使得空燃比明显降低，造成缸内燃烧条件恶化，大量 CO 开始生成，同时，引入缸内的回流废气中的水蒸气与 CO₂ 在高温条件下发生裂解反应，生成 CO，这两点原因共同造成了大负荷下 EGR 阀全开时排气中 CO 的含量显著增加的现象。



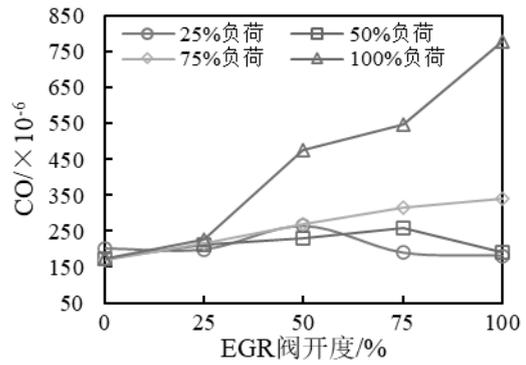
(a) 1295 r/min, VGT 40%



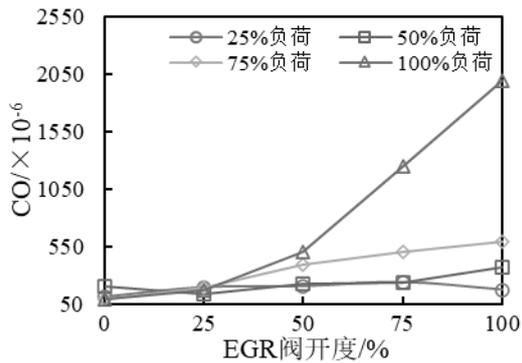
(b) 1295 r/min, VGT 50%



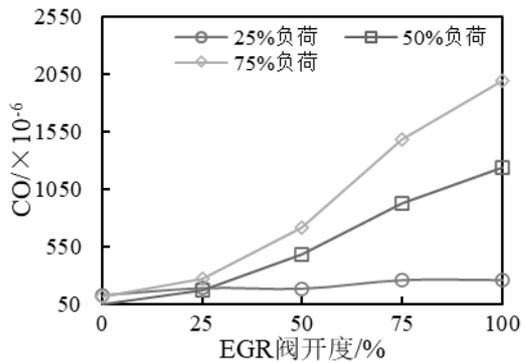
(c) 1295 r/min, VGT 65%



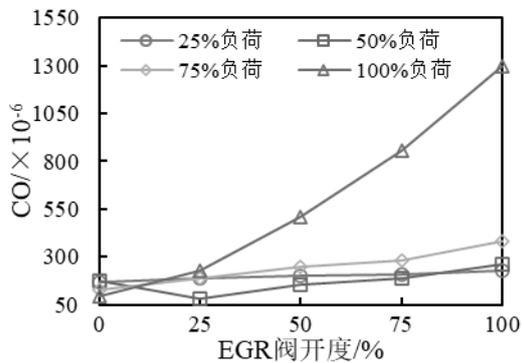
(d) 1590 r/min, VGT 40%



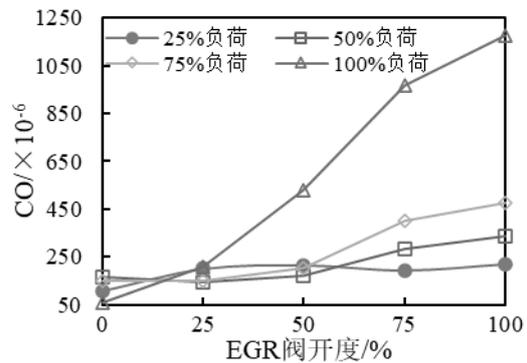
(e) 1590 r/min, VGT 50%



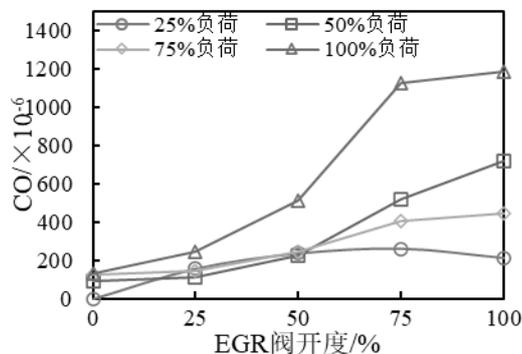
(f) 1590 r/min, VGT 65%



(g) 1885 r/min, VGT 40%



(h) 1885 r/min, VGT 50%



(i) 1885 r/min, VGT 65%

图 2.2 不同工况下排气中 CO 含量随 EGR 阀开度的变化

Fig.2.2 Changes of the CO in the exhaust gas with EGR valve opening under different working conditions

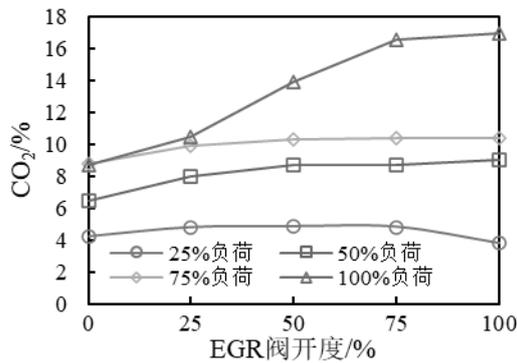
2.3 EGR 阀开度对 CO₂ 排放的影响

图 2.3 为不同工况下排气中 CO₂ 含量随 EGR

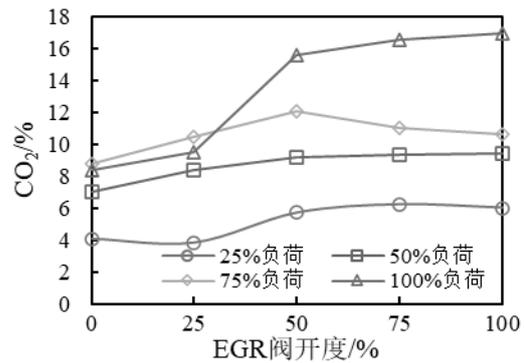
阀开度的变化。如图 2.3 所示,在各柴油机转速下,中低负荷时, EGR 对 CO₂ 含量的影响程度较低,

负荷升高后, EGR 阀开度较大时, 排气中 CO_2 的含量出现了明显的上升。当柴油机转速为 1590 r/min, 负荷为 25%、VGT 开度为 40%时, EGR 阀 25%、50%、75%和 100%开度对比 EGR 阀全关时 CO_2 的升幅分别为 14.06%、14.77%、22.14%和 22.99% ; 而 100% 负荷下对应的升幅分别为 7.6%、16.76%、70.82%和 71.90%。柴油机 25%负荷、VGT 开度为 40%, 在柴油机转速为 1295 r/min

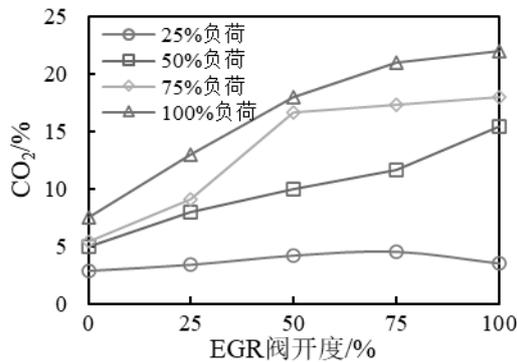
时, EGR 阀 100%开度较其他开度下的 CO_2 含量出现了下降, 与 EGR 阀 75%开度时相比, 降幅为 21.22%。EGR 废气中的 CO_2 是排气中 CO_2 排放的一部分来源, 排气中 CO 含量的上升也是造成 CO_2 排放升高的原因之一。低负荷时 CO_2 下降趋势的产生可能是由该工况下废气回流造成的缸内温度过低, 燃烧恶化导致。



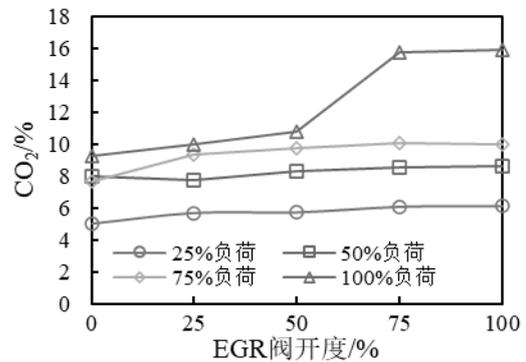
(a) 1295 r/min, VGT 40%



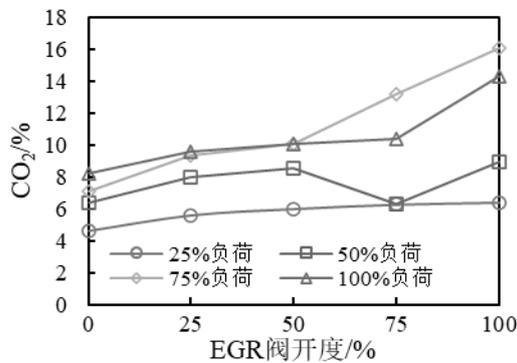
(b) 1295 r/min, VGT 50%



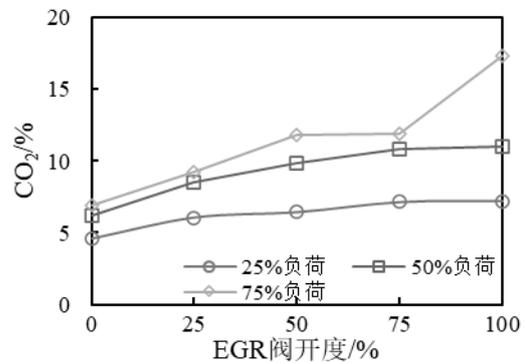
(c) 1295 r/min, VGT 65%



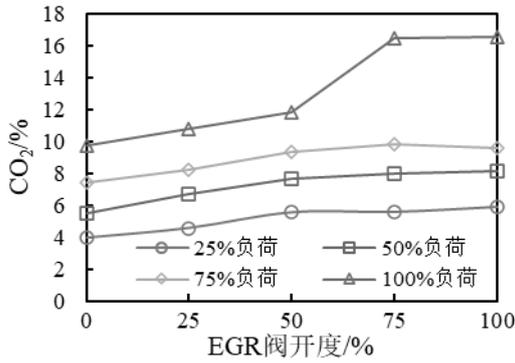
(d) 1590 r/min, VGT 40%



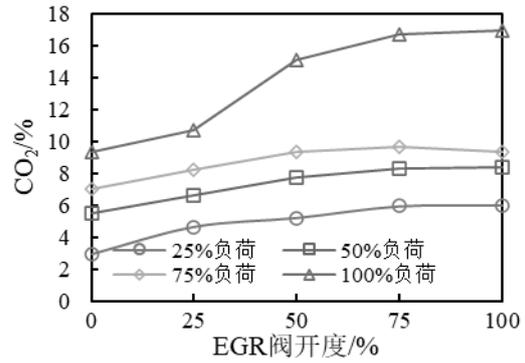
(e) 1590 r/min, VGT 50%



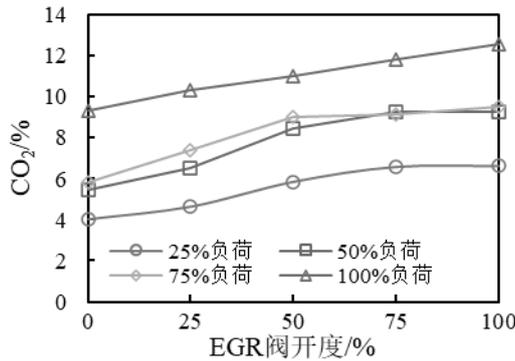
(f) 1590 r/min, VGT 65%



(g) 1885 r/min, VGT 40%



(h) 1885 r/min, VGT 50%



(i) 1885 r/min, VGT 65%

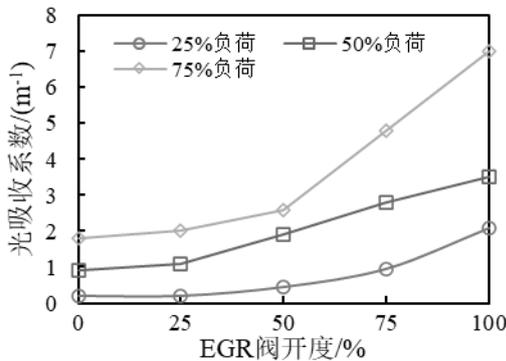
图 2.3 不同工况下排气中 CO₂ 含量随 EGR 阀开度的变化

Fig.2.3 Changes of the CO₂ in the exhaust gas with EGR valve opening under different working conditions

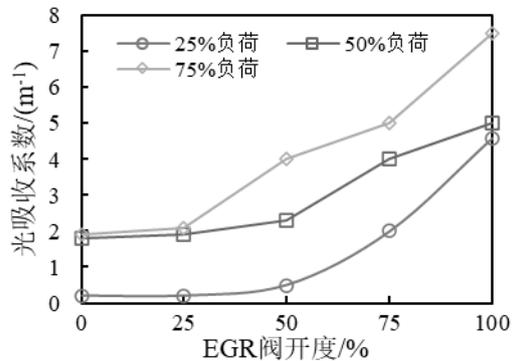
2.4 EGR 阀开度对柴油机烟度的影响

EGR 将回流废气引入缸内后, 缸内空燃比降低, 导致柴油机的烟度排放增加。为探究烟度排放随 EGR 阀开度变化的规律, 以光吸收系数表征了柴油机烟度排放的水平。1885 r/min 时排气光吸收系数随 EGR 阀开度的变化如图 2.4 所示。各负荷下, EGR 均使排气光吸收度出现上升, 且升高

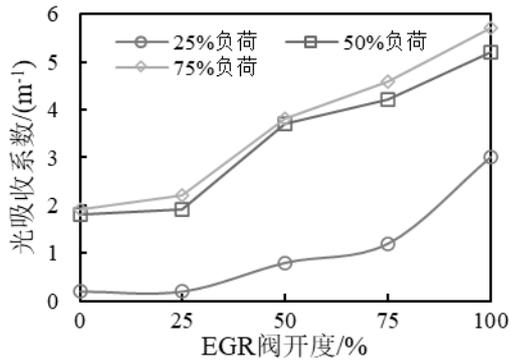
的程度随着 EGR 阀开度的增大而增加。在 VGT 开度为 25%, EGR 阀全开时, 所有负荷下排气光吸收度相较无 EGR 时平均涨幅达到最大值 146.6%。EGR 将废气引入气缸内, 减少了缸内的新鲜充量, 降低了空燃比, 使燃烧条件恶化, 从而导致排气中烟度增加。随着 EGR 阀的增大, 缸内新鲜充量进一步降低, 造成了柴油机烟度排放随 EGR 阀门开度增大而上升。



(a) VGT 40%



(b) VGT 50%



(c) VGT 65%

图 2.4 1885 r/min 时排气光吸收系数随 EGR 阀开度的变化

Fig.2.4 Changes of exhaust light absorption coefficient with EGR valve opening at 1885 r/min

3 总结

基于发动机台架开展高压共轨重型柴油机的 EGR 与 VGT 稳态正交试验, 通过分析柴油机排气中 NO_x、CO、CO₂ 和碳烟等组分含量的变化规律, 探究稳态工况下 EGR 阀开度对柴油机排放污染物的影响, 主要结论如下:

- (1) EGR 对 NO_x 具有显著的抑制作用, 所有发动机工况下, 各 EGR 阀开度均使排气中 NO_x 的含量降低 37.23% 以上。随着 EGR 阀开度升高, NO_x 排放水平呈下降趋势。柴油机转速为 1295 r/min, VGT 开度为 65% 时, 在 EGR 阀全开时, NO_x 含量的降幅在柴油机转速 1295 r/min, VGT 65% 开度, EGR 阀全开时, 达到了最大值 82.40%。
- (2) 随着 EGR 阀开度增加, 排气中 CO 的含量呈上升趋势, 这一趋势在柴油机高负荷时尤为明显。高负荷时, EGR 阀全开时排气中 CO 含量出现显著增加。与 EGR 阀关闭时相比, 柴油机为 1885 r/min, 100% 负荷, VGT 40% 开度, EGR 阀全开时, 排气中 CO 含量增幅达到了 1271.31%。
- (3) 在柴油机中低负荷时, EGR 阀开度对排气

中 CO₂ 含量的影响较小。VGT 40% 开度, 柴油机 1295 r/min、25% 负荷时, EGR 阀 100% 开度对比其他开度, 排气中 CO₂ 的含量出现了下降。低负荷时废气回流造成的缸内温度过低可能导致了 CO₂ 含量下降。在大负荷时, 较大的 EGR 阀开度使 CO₂ 含量出现显著的上升。

- (4) 排气吸光度随 EGR 阀开度增加而上升, EGR 阀开度较大时, 这一趋势尤为明显。在 VGT 25% 开度, EGR 阀全开时, 所有负荷下排气光吸收度相较无 EGR 时平均涨幅达到最大值 146.6%。

参考文献:

- [1] Kalghatgi G. Development of Fuel/Engine Systems—The Way Forward to Sustainable Transport[J]. Engineering, 2019, 5(3): 510-518.
- [2] Zhu K, Cai Y, Shi Y, et al. The effect of nonthermal plasma on the oxidation and removal of particulate matter under different diesel engine loads[J]. Plasma Processes and Polymers, 2021, 19(1).
- [3] 王浩浩, 葛蕴珊, 谭建伟. 颗粒捕集器中沉积灰分对柴油机非常规污染物排放影响研究[J]. 内燃机工程, 2021, 42(03): 81-85+92
- [4] 袁志国. 船用柴油机排放污染物组分浓度/温度场在线测试技术研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2021.
- [5] 张凡, 郭冬冬, 李昂, 等. 国五和国六柴油机颗粒物

-
- 数量排放测试影响因素的试验研究[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2022, 51(3): 51-57.
- [6] 陈栋栋, 彭丽娟, 高慎勇, 等. 基于 OBD 监测的国六柴油机 NO_x 排放方法研究[J]. 内燃机与动力装置, 2022, 39(04): 48-53.
- [7] 晁岳栋, 陆海峰, 李理光, 等. 基于理论循环的汽油机 EGR 技术节油机理[J]. 内燃机学报, 2017, 35(03): 208-214.
- [8] Stefano D A, Alessandro M, Andrea M. Utilization of Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) in a Euro 6 Dual-Loop EGR Diesel Engine: Behavior as a Drop-In Fuel and Potentialities along Calibration Parameter Sweeps[J]. *Energies*, 2022, 15(19): 7202.
- [9] 杜家益, 张翰亮, 张登攀, 等. EGR 对生物柴油颗粒物氧化活性及微观结构的影响[J]. 内燃机学报, 2021, 39(02): 138-146.
- [10] 杜家益, 常真真, 张登攀, 等. EGR 对生物柴油颗粒物微观结构及官能团的影响[J]. 内燃机学报, 2020, 38(02): 140-146.
- [11] José G, Héctor C, Joaquín D L M, et al. Assessment of air management strategies to improve the transient response of advanced gasoline engines operating under high EGR conditions[J]. *Energy*, 2023, 262(PB), DOI: 10.1016/j.energy.2022.125586.
- [12] 王俊, 申立中, 毕玉华, 等. 不同海拔下 EGR 对轻型柴油机性能和排放的影响[J]. 车用发动机, 2022, 263(06): 35-40.
- [13] 张海燕, 孟雨航, 陈学东, 等. EGR 对点燃式大功率甲醇发动机的影响研究[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(12): 3374-3382.
- [14] 王凤滨, 于晓洋, 廖清睿, 等. 混合控制低温燃烧策略对柴油机性能的影响[J]. 车用发动机, 2022, 262(05): 1-7.
- [15] 谷雨, 宫宝利, 徐辉, 等. 柴油机颗粒数量排放特性研究[J]. 车用发动机, 2022, 260(03): 38-43.
- [16] Guo Z, Wang B, Liu Shi, et al. Experimental investigation on emission characteristics of high reactivity gasoline compression ignition with different EGR and injection pressure strategies[J]. *Fuel*, 2023, 332(P2), 126176.
- [17] Gintaras V, Jonas M, Alfredas R. Research of the impact of EGR rate on energy and environmental parameters of compression ignition internal combustion engine fuelled by hydrogenated vegetable oil (HVO) and biobutanol – Castor oil fuel mixtures[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 270, 116198.
- [18] Feng S, Zhong X, Wu S. Simulation of the effect of EGR rates on combustion and emission of a diesel engine[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2343(1), DOI: 10.1088/1742-6596/2343/1/012023.
- [19] 朱昌吉. 车用柴油机电控 EGR 系统设计及性能研究[D]. 吉林大学, 2005.
- [20] Lin Y, Wang H, Fang S, et al. Chemical looping combustion of lignite using iron ore: C-gas products (CO₂, CO, CH₄) and NO_x emissions[J]. *Energy*, 2022, 256, 124602.