

高/低压 EGR 分布对两级增压柴油机性能影响的研究

石磊^{1,2}, 尹晓军^{1,2}, 李志杰^{1,2}, 王波^{1,2}

(1. 内燃机可靠性国家重点实验室, 山东潍坊 261061; 2. 潍柴动力股份有限公司, 山东潍坊 261061)

摘要: 在一台两级增压高压共轨柴油机上, 进行了高压废气再循环 (HP-EGR) 与低压废气再循环 (LP-EGR) 的配合及冷却器温度的改变对柴油机性能影响的研究。结果表明: 在不同工况下通过 HP-EGR 与 LP-EGR 的合理配合产生的泵气损失较小、缸内传热及燃油消耗率较低。在 1200r/min-1300Nm 工况点下, 随着 LP-EGR 比例的提高, 过量空气系数增加, 传热损失缸内降低, 排气温度降低, 最高压力升高。但是由于泵气损失增加, 油耗先降低升高。此外, 通过冷却器温度的控制能够进一步对油耗进行优化。

关键词: 内燃机; 柴油机; 两级增压; 废气再循环

0 前言

废气再循环 (EGR) 通过将一部分废气重新引入气缸参与燃烧, 降低缸内氧浓度和最高燃烧温度, 达到降低 NO_x 排放的效果, 是柴油机满足排放法规的重要技术手段之一^[1-5]。废气再循环技术 (EGR) 在混合燃烧控制策略中得到大量使用, 由于废气本身比热较大, 冷却后的废气通入进气能推迟着火始点, 增加混合时间; 另外废气导入气缸导致缸内氧浓度下降, 抑制化学反应速度, 降低缸内平均燃烧温度, 对 NO_x 的降低有极大的帮助; 除此之外, 废气本身对进气有稀释作用, 进一步抑制燃烧反应速率。而加入过量的 EGR, 会使缸内局部缺氧, 碳烟生成加剧。如何合理利用高增压技术, 增加新鲜充量, 降低 Soot 排放的同时, 适当加入部分 EGR 来降低 NO_x 排放, 是增压系统与 EGR 系统匹配的关键问题^[6-8]。由于取气和引入位置的不同, EGR 主要存在三种循环方式。分别是高压级 EGR (HP-EGR)、低压级 EGR (LP-EGR) 和高低压复合 EGR。其中 HP-EGR 在涡轮前引出废气, 重新引入到压气机后进气管; LP-EGR 则在涡轮后引出排气, 重新引入到压气机前。其中 HP-EGR 由于结构响应快, 结构简单, 应用较为广泛。但 HP-EGR 会明显减少新鲜进气量, 因此在过量空气系数较低的工况往往会导致排放和燃油经济性恶化。而 LP-EGR 则对新鲜进气量的影响相对较小些^[9,10]。

不管是 HP-EGR 还是 LP-EGR 都对柴油机的进气增压系统提出新的要求。传统单级增压器采用 EGR 通常会造成空燃比降低, 导致烟度、CO 和 HC 排放升高, 燃油经济性变差。而采用两级增压能实现较高的增压比, 增加进气流量, 提高柴油机功率密度, 并减小由于采用 EGR 带来的不利影响^[11-13]。

基于此本文在一台匹配了两级增压的高压共轨柴油机上对这三种不同的 EGR 方式在一

台两级增压柴油机上进行了对比研究，为两级增压柴油机 EGR 系统优化匹配提供依据，具有一定工程应用价值。

1 模型的建立

研究对象为某四冲程两级增压柴油机。基于 GT-Suite 软件建立整机的一维仿真模型。基于校核的整机模型，引入高低压级 EGR 系统。如图 1 所示，高压级 EGR 系统从涡轮前引出废气经高压级 EGR 冷却器之后在压气机后与新鲜进气混合。低压级 EGR 系统从 DPF 后引出废气经低压级 EGR 冷却器之后在压气机前与新鲜进气混合。废气从排气管经中冷后引入进气系统，与新鲜充量混合进入气缸的 EGR 系统。通过中冷器对废气进行冷却、降低混合气温度，同时又能在各工况下通过控制 EGR 孔径来控制 EGR 率。

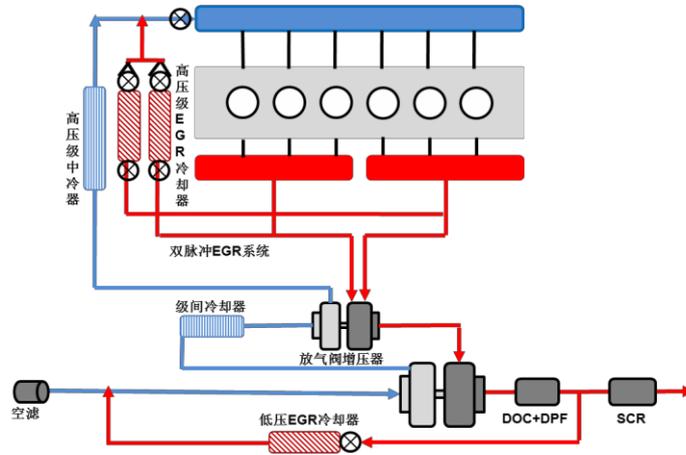


图 1 高低压级 EGR 系统

2 结果分析

2.1 高低压级 EGR 分布对发动机外特性影响

图 2 为不同 EGR 供给方式在外特性条件下燃油消耗率（BSFC）的变化曲线。在转速较低时，LP-EGR 的燃油消耗率较低；在转速较高时，HP-EGR 的燃油消耗率较低；而在同时打开高低压 EGR 时，整体燃油消耗率维持在较低水平。HP-EGR 在低速高负荷时由于 EGR 率较低导致燃油消耗率较高。随着转速的增加，EGR 率逐渐增加，BSFC 逐渐降低。而 LP-EGR 虽然能够在较大转速范围采用较高的 EGR 率，但是由于涡轮前与进气压差的增加使得泵气损失增加，发动机机械效率降低，导致燃油消耗率随转速的增加而快速增加。此外，由于 HP-EGR 温度较高导致进气量较小造成燃烧相位推迟，以及由于氧含量较低造成反应速度减慢，使其油耗率在低转速时高于 LP-EGR。而高转速时 HP-EGR 主要通过废气热容作用降低燃烧温度来优化空燃比，从而降低油耗。

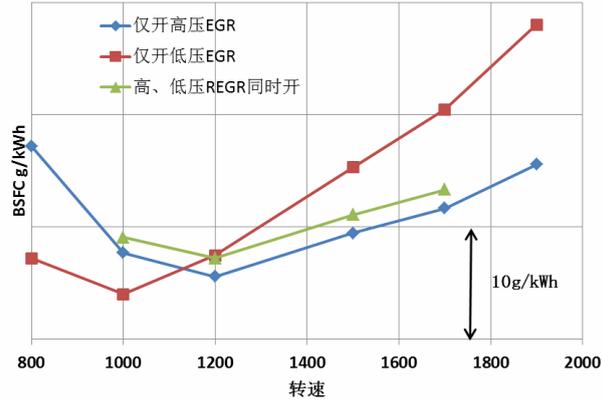


图 2 不同 EGR 供给方式对燃油消耗率的影响

图 3 为不同 EGR 供给方式在外特性条件下实现最大 EGR 率的变化曲线。由图可知，高低压 EGR 同时打开的策略能够实现 EGR 率达到最大。随着转速提高，HP-EGR 可实现的较大 EGR 率增大，LP-EGR 可实现的最高 EGR 率变化较小。这是由于随着转速的提高，发动机涡轮前与压气机后的压差不断升高，HP-EGR 的 EGR 实现能力相应增强，而涡轮后与压气机前的压差受转速影响较小，因此 LP-EGR 的最大 EGR 率变化不大。LP-EGR 可以在无需其他辅助技术情况下实现较高 EGR 率，更有效地控制 NO_x 排放。因此，低速工况更适合采用 LP-EGR。

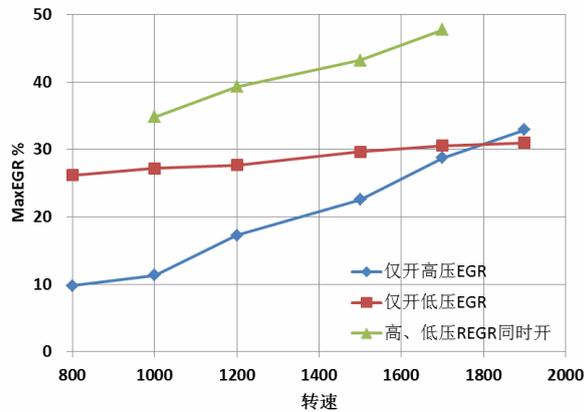


图 3 不同 EGR 供给方式对实现最大 EGR 率的影响

图 4 为不同 EGR 供给方式在外特性条件下泵气损失的变化曲线。如图 4 所示，在转速较低时，泵气损失较低。随转速增大，HP-EGR 及高低压 EGR 同时开启的泵气损失明显低于 LP-EGR。在低转速时，LP-EGR 对泵气损失影响不大，但转速增大，燃烧相位推迟，燃烧反应速度减慢，进而导致泵气损失的增加。另外，在高转速时，HP-EGR 的开启能够降低涡前与进气压差，从而降低了泵气损失。这对柴油机换气过程和燃油经济性产生积极的影响。

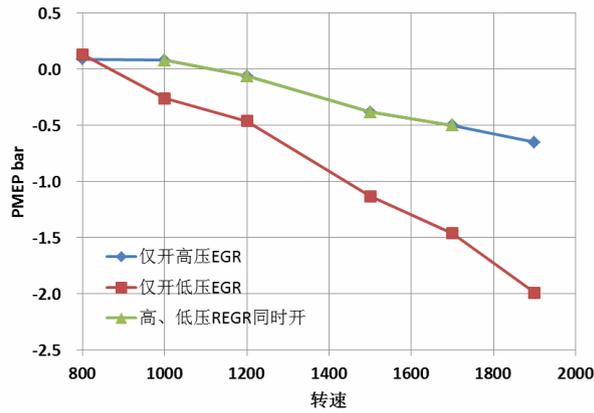


图 4 不同 EGR 供给方式对泵气损失的影响

图 5 为不同 EGR 供给方式在外特性条件下缸内传热的变化曲线。以上分析得知，随着转速增加，缸内温度升高，缸内传热量进而增加。HP-EGR 在低转速时缸内传热量较高；LP-EGR 在高转速时缸内传热量较高；同时打开高低压 EGR 时，缸内传热较合理。LP-EGR 采用较大 EGR 率能够降低缸内燃烧温度，减少了燃烧传热损失，热效率升高。而 HP-EGR 在高速高负荷时较高的 EGR 率使得缸内温度降低，缸内传热下降。

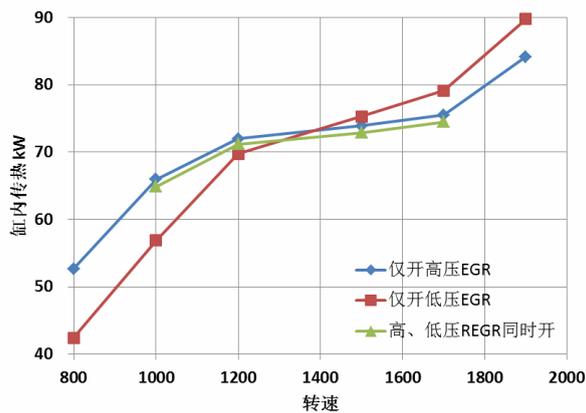


图 5 不同 EGR 供给方式对缸内传热的影响

2.2 不同高、低压 EGR 分布对其影响

在 1200r/min-1300Nm 工况点下，研究不同高低压 EGR 阀直径 DOE 与泵气损失 (PMEP)、过量空气系数 (λ)、排气温度 (T_{em-Exh})、最大 EGR 率和 BSFC 的变化关系。从图 6 中可知，随着 LP-EGR 比例的提高，LP-EGR 的废气经过了 LP-EGR 冷却器和中冷器，相对于 HP-EGR 而言，EGR 出气温度更低，进气歧管的温度基本接近中冷后的温度，由于进气歧管温度较低，进气密度增加，改善了过量空气系数，BSFC 降低，缸内压缩压力和最大爆发压力提高，进气量的增加提高了后期扩散燃烧速率，缩短了燃烧持续期，改善传热损失

(In-cylinder Heat Transfer)，排气温度降低。但是随着 LP-EGR 比例的进一步提高，由于涡前压力升高，涡前与节气门后压差变大，进而导致泵气损失增多，BSFC 升高。

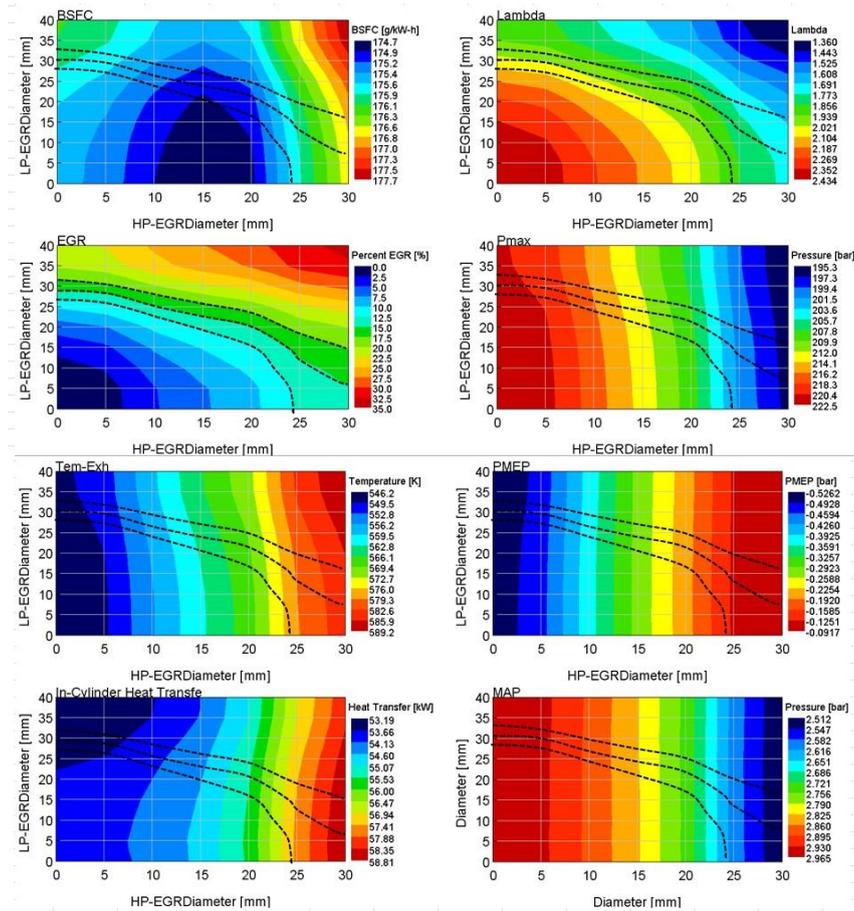


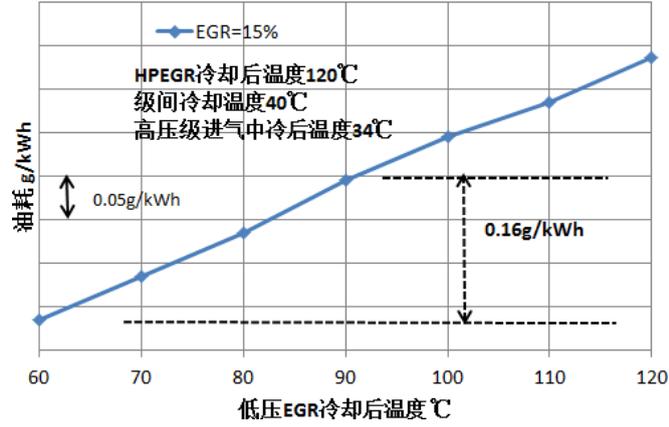
图 6 不同高低压 EGR 阀直径 DOE

2.3 冷却器温度对性能的影响

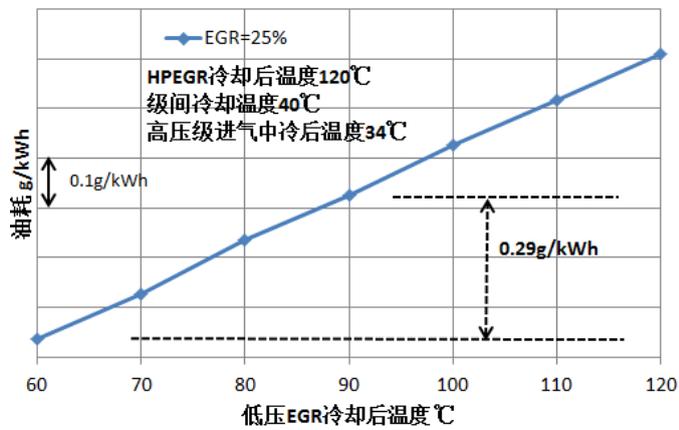
由于柴油机排气温度较高，废气如果不经冷却直接引入缸内参与燃烧，会造成燃烧初温增高，使缸内爆压和燃烧温度增加，对柴油机噪声、寿命和排放性能不利。EGR 冷却温度对柴油机性能有重要的影响，下面对在 1200r/min-1300Nm 工况点 EGR 率为 15% 和 25% 两种情况研究 EGR 冷却温度与柴油机性能之间的关系。

2.3.1 LP-EGR 冷却后温度对其影响

图 7 (a) 与 (b) 为不同 EGR 率工况条件下油耗随 LP-EGR 冷却温度的变化曲线。从图中可以看出，EGR 冷却温度越低，柴油机经济性越好。随着 EGR 率的升高，油耗下降比例增加。主要原因是较低的废气冷却温度缩小了与进气的温差，充量系数增加，提高了后期扩散燃烧速率，缩短了燃烧持续期，柴油机经济性变好。



(a)

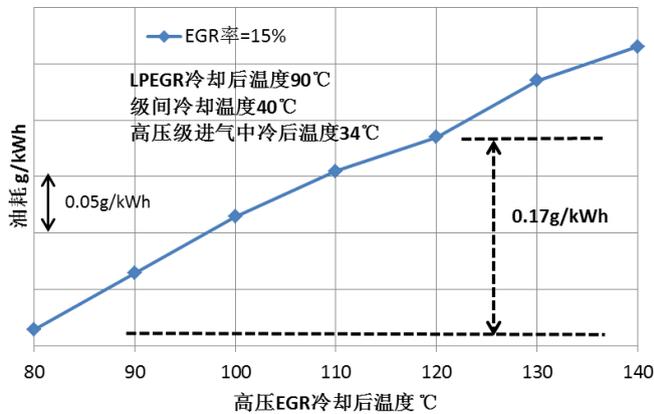


(b)

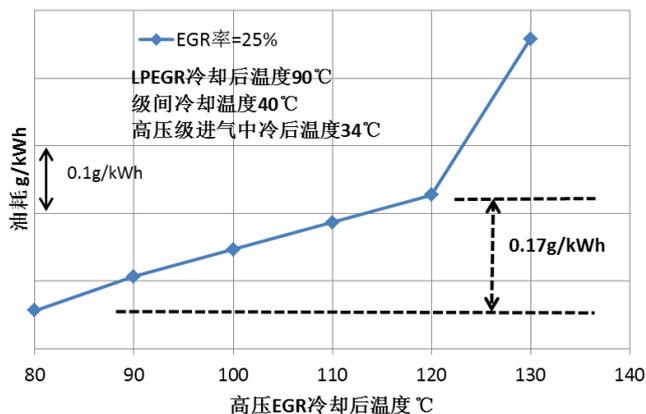
图 7 LP-EGR 冷却后温度对其影响

2.3.2 HP-EGR 冷却后温度对其影响

图 8 (a) 与 (b) 为不同 EGR 率工况条件下油耗随 HP-EGR 冷却温度的变化曲线。从图中可以看出，HP-EGR 冷却温度越低，柴油机经济性越好。这是由于较低的废气冷却温度使缸内温度降低，进而延长着火延迟期并增加预混燃烧的比例，油耗降低。



(a)

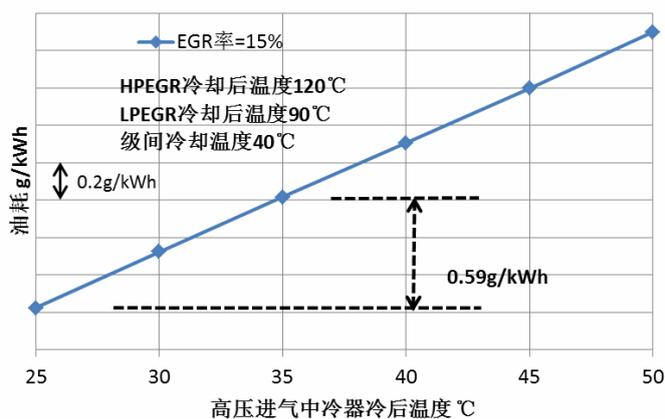


(b)

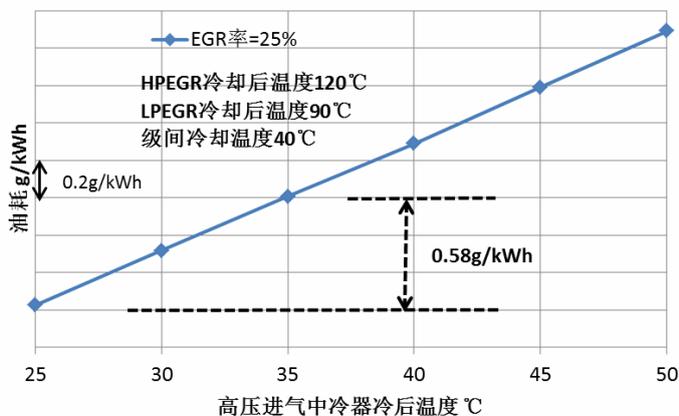
图 8 HP-EGR 冷却后温度对其影响

2.3.3 高压进气中冷器冷后温度的影响

图 9 (a) 与 (b) 为不同 EGR 率工况条件下油耗随高压进气冷却器冷后温度的变化曲线。从图中可以看出, 随着高压进气中冷器冷后温度的降低, 油耗降低。主要原因是较低的冷却温度使进气充量系数增加, 柴油机经济性变好。



(a)

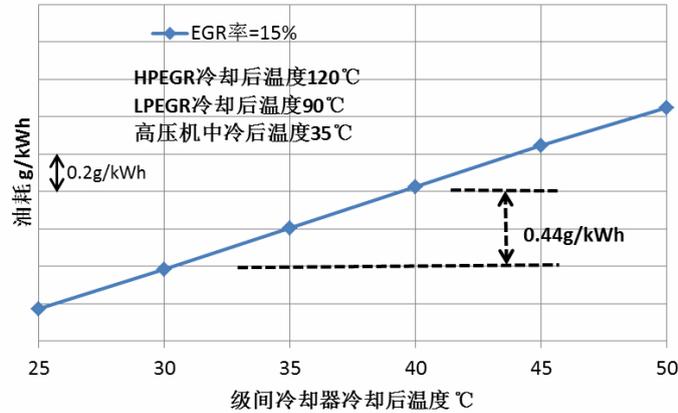


(b)

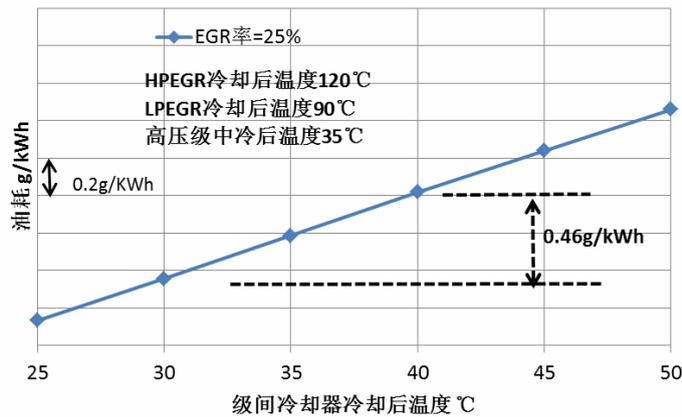
图 9 高压进气中冷器冷后温度的影响

2.3.4 级间冷却后温度对其影响

图 10 (a) 与 (b) 是不同 EGR 率条件下级间冷却温度对两级增压总效率的影响。如图 10 所示, 两级增压总效率会随压间冷却温度的降低而线性提高。在本研究设定的边界条件下, 级间冷却后温度每降低 5K, 总油耗下降 0.2g/kWh。级间冷却可以增加发动机进排气压差(即降低泵气损失), 提高进气压力、空燃比, 有利于提高充量密度, 改善燃烧和排放。



(a)



(b)

图 10 高压进气中冷器冷后温度的影响

3 结论

1) 基于高/低压 EGR 分布对两级增压柴油机性能影响的研究得出, 在低速高负荷推荐采用 LP-EGR 能够获得较高的燃油经济性, 而在高速高负荷推荐采用 HP-EGR 能够获得较高的燃油经济性。而其他工况推荐采用 LP-EGR 和 HP-EGR 配合使用。这是因为低速高负荷时, 采用 LP-EGR 能获得更充足的新鲜进气量, 增大过量空气系数, 有效改善燃油经济性。而高速高负荷时, 采用 HP-EGR 降低了进排气压差, 降低泵气损失, 提高发动机热效率。

2) 在 1200r/min-1300Nm 工况点下, 随着 LP-EGR 比例的提高, EGR 出气温度更低, 进气密度增加, 改善了过量空气系数, BSFC 降低, 改善传热损失缸内, 排气温度降低。但

是随着 LP-EGR 比例的进一步提高,泵气损失增加,BSFC 升高。在相同工况点下高低压级冷却器温度、高压进气中冷器冷后温度及级间冷却后温度的降低均能使得发动机油耗得到提升,而高压进气中冷器冷后温度的降低对油耗改善更加明显。

参考文献:

- [1]马天一,李澍冉,钱跃华,刘博,石磊.船用低速机高低压 EGR 系统仿真研究[J].船舶工程,2019,41(S1):188-191.
- [2]王小燕,俞思豪,崔兴龙,张振东.废气再循环对涡轮增压GDI汽油机性能影响的仿真研究[J].农业装备与车辆工程,2018,56(11):43-46.
- [3]严永华.国六柴油机废气再循环系统开发技术的研究[J].汽车与新动力,2018,1(04):92-96.
- [4]曾契,沈凯,张振东,尹丛勃,周文平.高/低压 EGR 对汽油机和增压器影响的试验研究[J].内燃机工程,2018,39(04):33-38.
- [5]李澍冉,王大为,石磊,邓康耀,桂勇.高低压 EGR 系统对低速柴油机性能和排放影响的研究[J].柴油机,2018,40(04):1-6+24.
- [6]高官龙. 喷射与加载策略协同控制实现柴油机瞬变性能优化[D].吉林大学,2018.
- [7]吴旭陵,高祥,胡建月,尚明,曹家骏.基于 WLTC 工况的柴油机高低压 EGR 分配策略的试验研究[J].汽车与新动力,2018,1(02):70-75.
- [8]李子非,王鹏,孙爱洲,丁波.高低压回路 EGR 对柴油机燃烧过程影响的试验研究[J].现代车用动力,2018(01):35-38+43.
- [9]毛斌. 燃烧边界条件对低活性燃料低温燃烧影响的研究[D].天津大学,2017.
- [10]狄磊. 高原环境下柴油机两级增压系统优化及性能提升研究[D].昆明理工大学,2017.
- [11]贾亢. 低速二冲程船用柴油机高效清洁燃烧技术仿真研究[D].天津大学,2017.
- [12]邹泽宇. 不同增压系统对重型柴油机性能和排放影响的试验研究[D].天津大学,2017.
- [13]苏博浩,刘占强,张春辉,屈伟,邬偌青,王一望,田海洋.高低压 EGR 及喷射策略对柴油机排放影响的试验研究[J].小型内燃机与车辆技术,2016,45(03):9-15.