

EGR 和冷 EGR 对柴油机燃烧和排放的影响

朱瑞军, 王锡斌, 冉帆, 苗海燕, 黄佐华, 高兢

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 设计了一种带冷却系统的柴油机废气再循环(EGR)装置,并进行了 EGR 及冷 EGR 对柴油机燃烧和排放性能影响的试验研究. 结果表明,在各种工况下,EGR 都可以显著降低 NO_x 排放,当 EGR 率为 15% 时,中高负荷下 NO_x 排放可以降低 50% 左右,当 EGR 率为 30% 时,高负荷下 NO_x 排放可以降低 75% 左右. 但是,EGR 率的增加会给柴油机的动力性、燃油消耗率、烟度、CO 和 HC 排放带来不同程度的负面影响,使柴油机的最大爆发压力及放热率峰值下降且出现的位置略微后移. 使用冷 EGR、中高负荷下, NO_x 排放可以减少 15% 左右,烟度排放略有降低.

关键词: 废气再循环;冷废气再循环;燃烧;排放;柴油机

中图分类号: TK421 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)09-0023-04

Effects of EGR and Cooled EGR on Combustion and Emission of a Diesel Engine

ZHU Ruijun, WANG Xibin, RAN Fan, MIAO Haiyan, HUANG Zuohua, GAO Jing

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An EGR unit with a cooling system was developed for a diesel engine and the effects of cooled EGR and uncooled EGR on combustion and emission were investigated experimentally. The results show that EGR can reduce NO_x emission of the diesel engine significantly under various operation conditions. NO_x emission can decrease by about 75% at the EGR rate of 30% under high loads but the increase of the EGR rate has negative influence on torque output, brake specific fuel consumption, and emissions of smoke, CO and HC. Moreover, peak values of combustion pressure and heat release rate decrease. The cooled EGR system can reduce NO_x and smoke emission more effectively compared with the uncooled EGR system under high and normal loads.

Keywords: EGR; cooled EGR; combustion; emission; diesel engine

柴油机具有低油耗、高效率的特点,有着良好的经济性和动力性,但柴油机同时具有 NO_x 和微粒排放高等缺点,在不采取其他措施的情况下,二者呈现 trade-off 的曲线关系. 废气再循环(EGR)系统是目前用于降低发动机 NO_x 排放的一种有效措施^[1-2],可分为内部 EGR 和外部 EGR 两大类. 由于废气再循环增加了混合气中 CO_2 、 H_2O 等多原子气体的含量,混合气比热容增加,缸内燃烧温度降低,同时过量空气系数下降,氧浓度下降,使 NO_x 生成和排放降低^[3]. 其中,外部 EGR 将排气中部分废气经 EGR

阀导入进气系统,再进入气缸,从而实现废气再循环. 由于外部 EGR 便于根据工况灵活调节 EGR 率,实现性能和排放的最佳折衷,冷 EGR 系统在 EGR 的基础上,对废气冷却后再进入下一循环,对发动机性能有更进一步的提高,因而将是今后降低柴油机排放的方向.

由于 EGR 在降低 NO_x 排放的同时,使微粒排放又有所增加,而含氧燃料的采用将有助于加快燃烧速度,促进燃料中间产物和碳粒的后期氧化,从而有助于微粒排放的降低^[4-5]. 本文针对一台柴油机开

展 EGR 和冷 EGR 对柴油机燃烧特性、经济性和排放性能影响的研究,为今后柴油机采用含氧燃料和 EGR 降低排放的研究提供参考。

1 试验台架布置及主要仪器设备

为了研究 EGR 和冷 EGR 对发动机性能和排放的影响,设计了带冷却系统的 EGR 装置,如图 1 所示。系统设置了 EGR 控制阀门以控制 EGR 率,以便研究 EGR 率对燃烧和排放的影响。

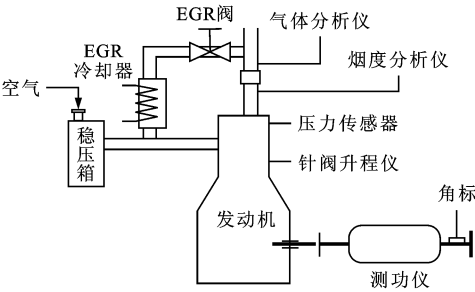


图 1 试验用发动机及 EGR 系统简图

试验用发动机参数如表 1 所示。

表 1-1 试验用柴油机参数

立式单缸、水冷、四冲程、直喷	
缸径/mm	105
冲程/mm	115
排量/cm ³	996
针阀启喷压力/MPa	18.13
燃烧室形状	ω 型
压缩比	18
标定功率/kW	12.1
标定转速/r·min ⁻¹	2 300
发动机供油提前角/(°)	26

排放测量所用的装置为 AVL 公司的 AVL Di-Gas 4000 light 五组分汽车尾气分析仪和 AVL Dis-moke 4000 不透光烟度计。五组分气体分析仪可测量 HC、CO、CO₂、O₂、NO_x 及过量空气系数 ϕ_a ，不透光烟度计用于柴油机微粒污染物的检测。瑞士 KISTLER 公司的压力传感器和角标用来测量缸压等数据,以便进行燃烧分析。

利用进、排气中 CO₂ 浓度确定 EGR 率,即

$$R_{\text{EGR}} = \frac{\varphi_i(\text{CO}_2) - \varphi_a(\text{CO}_2)}{\varphi_c(\text{CO}_2) - \varphi_a(\text{CO}_2)}$$

式中: $\varphi_i(\text{CO}_2)$ 为进气管中 CO₂ 的体积分数; φ_c

(CO₂) 为排气管中 CO₂ 的体积分数; $\varphi_a(\text{CO}_2)$ 为进气管空气中 CO₂ 的体积分数,通常情况下 $\varphi_a(\text{CO}_2) = 0$ 。此方法需要同时测量排气口和进气口的 CO₂ 的体积分数。

2 结果与分析

本文针对 EGR 率为 0、15%、30% 分别进行了发动机试验研究,并进行了 EGR 和冷 EGR 的对比分析。通过对不同工况下发动机的燃烧过程、经济性和排放性能进行对比分析,研究了 EGR 和冷 EGR 对发动机性能、排放的影响。

2.1 EGR 对柴油机充气效率的影响

图 2 给出了柴油机采用 EGR 后充气效率 η 及过量空气系数 λ 的变化图。从图中可知,在 $n=2\,000\text{ r/min}$ 、最大负荷时,随着 EGR 率的增加,柴油机的过量空气系数和充气效率都显著下降。由于 EGR 一方面导致残余废气系数增加,使更多残余废气进入发动机循环,影响了新鲜充量进入缸内;另一方面,采用 EGR 导致的进气节流会造成进气阻力增加,也减少了吸入的新鲜充量。不采用 EGR、全负荷时,过量空气系数为 1.78,而 EGR 率为 15% 和 30% 时,过量空气系数下降为 1.51 和 1.19。由于柴油机缸内为不均匀混合气,则局部混合气将更浓。可见,在较大的 EGR 率下,过量空气系数将显著下降,势必对混合气的形成和燃烧进程产生不利影响。

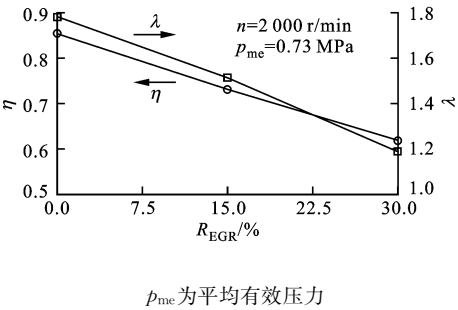


图 2 EGR 率对柴油机充气效率及过量空气系数的影响

2.2 EGR 对燃烧过程及燃油经济性的影响

图 3 和图 4 示出了 $n=2\,000\text{ r/min}$ 时, EGR 率对柴油机燃烧过程及燃油经济性的影响。由图中可以看出,随 EGR 率的增加,柴油机的最大爆发压力下降,最大爆发压力出现的位置略微后移。从上述的分析可知, EGR 导致柴油机的充气效率降低,过量空气系数下降,从而导致燃烧速率下降,加上废气中的 CO₂ 和 H₂O 等多原子分子气体较多,使得混合气比热容升高,缸内燃烧温度下降,进一步降低了反

应速率. 以上因素导致预混燃烧量下降,放热率峰值 $d\theta/d\varphi$ 下降且其相位后移,因而燃烧的定容度下降. 在小负荷时,由于此时循环喷油量小,过量空气系数较大,因而EGR率对燃油的经济性影响不大,而在中大负荷及全负荷时,随着EGR率的增加,过量空气系数减小,燃油经济性变差. 如图4所示,在转速为2000 r/min,各负荷工况下最大EGR率为50%、75%和100%时,燃油消耗率 B_e 分别上升了7.5%、6.5%、和12%,且发动机能发出的最大 p_{me} 随EGR率的增加而有所减小. 为避免发动机动力性和经济性的过多下降,大负荷时应采用较小的EGR率.

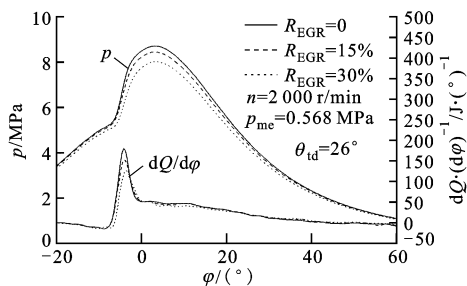


图3 不同EGR率下柴油机的压力与放热率曲线对比

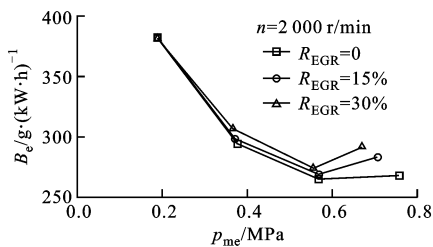


图4 EGR率对柴油机燃油消耗率的影响

2.3 EGR对柴油机排放的影响

由图5可以看出:在EGR率为15%、低负荷时, NO_x 排放 $\varphi(\text{NO}_x)$ 下降不明显,降低了18%左右;中、高负荷时 NO_x 排放降低效果明显,降低了50%;当EGR率为30%、高负荷时, NO_x 排放甚至可降低75%左右.

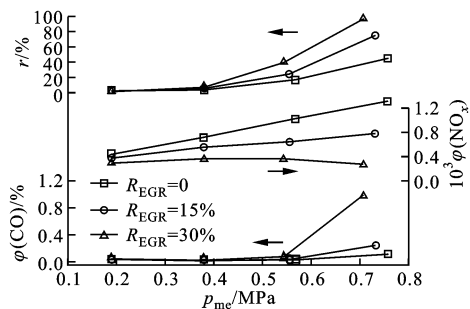
另一方面,随着EGR率的增加,发动机排气烟度也随之增加. 由于EGR一方面导致残余废气系数增加,更多残余废气进入发动机循环;另一方面,采用EGR导致的进气节流会造成进气阻力增加,新鲜充量减少. 以上两种因素都导致缸内混合气的过量空气系数降低,从而引起烟度的增加^[3-7]. 在中、高负荷时,柴油机过量空气系数只有1.2左右,远低于无EGR柴油机的对应工况,因此烟度增加的幅

度较大. 在小负荷时,柴油机过量空气系数较大,EGR对过量空气系数的影响相对减弱,烟度恶化的趋势也相对较小. 随着废气的引入, NO_x 排放降低,但烟度排放值升高,大负荷工况时烟度恶化更明显.

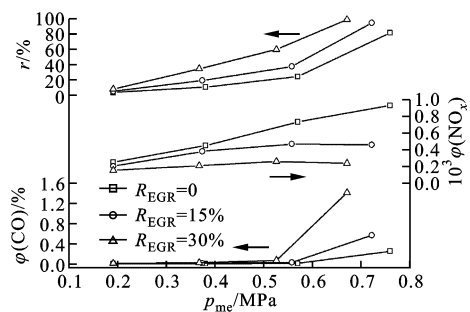
由图5还可以看出:中、低负荷时CO排放受EGR率影响很小,而在高负荷高转速下,EGR率对CO排放影响较大,这是因为CO的生成主要受到过量空气系数的影响;当柴油机负荷很大时,燃烧室中局部缺氧地区增加,造成CO排放增加很快;随着EGR率的增加,气缸内燃烧过程中的氧浓度及燃烧温度有所降低,废气中的CO浓度随之增加.

由于试验中HC排放极低,采用EGR后虽略有增加,但绝对数值很小,故不详加讨论.

总体而言,当EGR率为30%时,高负荷下发动机的 NO_x 排放可降低75%左右,但烟度上升过大,难以同时满足降低 NO_x 和烟度排放(用不透光度 r 表示)的要求,另外经济性和动力性明显下降.



(a) $n=1600$ r/min



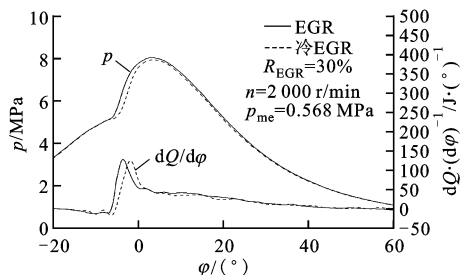
(b) $n=2200$ r/min

图5 EGR率对 NO_x 、CO和碳烟排放的影响

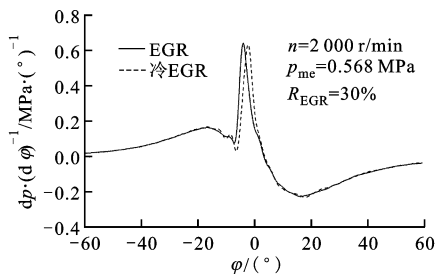
2.4 冷EGR对柴油机燃烧、经济性及排放的影响

由于单纯采用EGR难以达到同时降低 NO_x 和烟度排放的要求,本文在采用EGR的基础上,对废气进行冷却后再进入下一循环,研究此种情况(即冷EGR)下的发动机性能和排放. 图6为EGR和冷EGR对柴油机燃烧特性影响的对比曲线,图7表明了EGR温度对烟度、 NO_x 排放及燃油消耗率的影响.

响.由图6可以看出,在相同负荷下,采用冷EGR时,燃烧初期的压力和压力升高率均较不使用EGR时低,最高爆发压力也较低.由于冷EGR使废气经过冷却后再进入下一循环,进气充量的温度降低,节流损失降低,新鲜进气充量相应有所增加,过量空气系数增加.混合气温度降低使滞燃期有所增加,同时放热率曲线和放热率峰值相位后移,燃烧最高温度降低.因此,采用冷EGR后,有利于降低 NO_x 及烟度的排放.如图7所示,与EGR相比,采用冷EGR后,在中高负荷下, NO_x 排放减少15%左右,碳烟排放也有所降低,比油耗变化不大,但发动机达到的最大负荷有所增加.从图7还可以看出,对本柴油机来说,采用冷EGR时各方面性能虽有所提高,但燃烧性能、经济性和排放的改善有限.

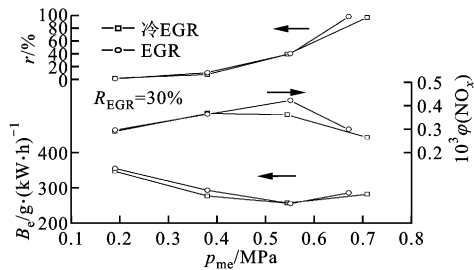
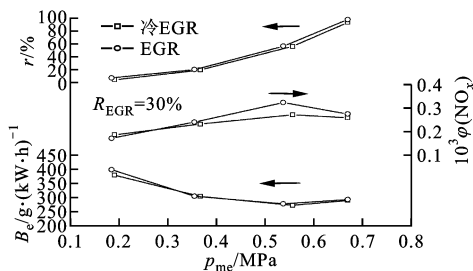


(a)EGR



(b)冷EGR

图6 EGR和冷EGR对柴油机燃烧特性的影响

(a) $n=1\ 600\ \text{r/min}$ (b) $n=2\ 200\ \text{r/min}$ 图7 EGR温度对燃油消耗率、烟度及 NO_x 排放的影响

明,由于EGR导致燃烧速度减慢,燃烧持续期延长,烟度和微粒排放增加,若要进一步改进该发动机的燃烧和排放性能,有必要配合其他技术,如燃用清洁含氧燃料等,以加快燃烧速度,降低排放,尤其是碳烟和微粒排放,以达到满足更严格的排放法规的目的.

3 结论

(1)EGR系统对于改善柴油机 NO_x 的排放效果显著,各种工况下均能有效降低 NO_x 排放水平,EGR率为30%时,高负荷下 NO_x 排放可以降低75%左右.但是,随着EGR率的增加,发动机的碳烟、CO等排放逐渐恶化,制约了EGR的应用.

(2)中、低负荷时EGR系统对于柴油机动力及经济性影响较小,高负荷时影响较大.从试验结果得出:低负荷时不用EGR或者选取较小的EGR率;中负荷时选取较大的EGR率以充分降低 NO_x 排放;高负荷则应适当减少EGR率以免动力性和经济性下降太多.

(3)EGR率对柴油机燃烧过程有一定的影响.随着EGR率的增加,柴油机的最大爆发压力及放热率峰值下降,最大爆发压力及放热率峰值出现的位置后移,燃烧速度减慢,缸内温度降低.

(4)使用冷EGR有利于减少 NO_x 及烟度排放,燃油消耗率变化不大.

参考文献:

- [1] 邹敏,孙跃东,张振东.柴油机EGR系统的应用技术分析[J].机械设计与制造,2006,(11):82-84.
ZOU Min, SUN Yuedong, ZHANG Zhendong, et al. The application and technical analysis of EGR in diesel engine [J]. Machinery Design & Manufacture, 2006, (11):82-84.
- [2] 李彩芬,李国岫.柴油机废气再循环技术的应用研究.柴油机[J].柴油发动机,2004(1):20-22.

以上研究表明,本机所采用的EGR系统及其冷却系统仍有待进一步的改进,另一方面研究也表

LI Caifen, LI Guoyou. The application and research of EGR in diesel engine [J]. Diesel Engine, 2004(1):20-22.

[3] 平银生,张逸敏,蔡东波,等. 利用 EGR 降低柴油机排放的研究[J]. 内燃机工程,2000,21(4):6-10.

PING Yinsheng, ZHANG Yimin, CAI Dongbo, et al. Investigation on improvement of exhaust emission from diesel engines with EGR [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2000,21(4):6-10.

[4] WANG Hewu, HUANG Zuohua, ZHOU Longbao, et al. Investigation on emission characteristics of a compression ignition engine with oxygenated fuels and exhaust gas recirculation [J]. Journal of Automotive Engineering,2000,214 (5):503-08.

[5] 蒋德明. 内燃机燃烧与排放学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.

[6] 姚春德,敬章超,傅晓光,等. 冷却废气再循环对发动机性能影响的试验研究[J]. 汽车工程,2003(5):537-541.

YAO Chunde, JING Zhangchao, FU Xiaoguang, et al. Effects of cooled EGR on NO_x emissions and performances of gasoline engine[J]. Automotive Engineering, 2003(5):537-541.

[7] ZELENKA P, AUFINGER H, RECZED W, et al. Cooled EGR; a key technology for future efficient HD diesels, SAE Paper 980190 [R]. Detroit, Michigan, USA; SAE, 1998.

(编辑 王焕雪)