

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.09.001

柴油机富氧进气燃用乳化柴油的循环变动与燃烧特性*

张 韦^{1,2} 舒歌群¹ 彭益源² 毕克刚²

(1. 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072; 2. 昆明理工大学交通工程学院, 昆明 300024)

【摘要】 在直喷柴油机上采用进气增氧(氧气在进气中的体积分数为21%、23%、25%和30%)技术,对燃用不同掺水比乳化柴油(水在乳化柴油中的体积分数为0%、10%、20%和30%)的循环变动及燃烧特性进行研究;实验工况为发动机经济转速、中等负荷,采集20个连续循环,取最大爆发压力值,计算循环变动率。研究表明:在纯柴油条件下,随氧含量的增加,缸内最大爆发压力增加,循环变动率降低,燃烧始点提前;在使用乳化柴油时,着火点随水乳化率的增加而推后,但其依然遵循随进气O₂体积分数增加而提前的规律;含水率达30%时,着火延迟加大,燃烧组织恶化,循环变动加大。

关键词: 直喷柴油机 富氧进气 富氧燃烧 水乳化柴油 循环变动 燃烧特性

中图分类号: TK421+.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)09-0001-07

Cycle-by-cycle Variations of a DI Engine Fueled with Water Emulsion Diesel and Oxygen Enriched Intake Air

Zhang Wei^{1,2} Shu Gequn¹ Peng Yiyuan² Bi Kegang²

(1. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2. Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 300024, China)

Abstract

The combustion characteristic and cycle-to-cycle variations of a DI engine using oxygen-enriched intake air (the volume fraction of oxygen as follows: 21%, 23%, 25% and 30%) and water-diesel fuel emulsions (the amount of water was 0%, 10%, 20% and 30% by volume) were investigated. In-cylinder pressures of 20 combustion cycles and maximum pressures under economic speed and medium load operation were recorded. Consequently, cycle-to-cycle variations of maximum pressures and combustion characteristic were analyzed. The results reveal that, under the conditions of pure diesel, with the increase of oxygen concentration, the maximum cylinder pressures increase, and the cyclic variability of the maximum cylinder pressures and the ignition timing decrease. Using water emulsion diesel, with the increase of volume fraction of water, the ignition timing increases, but it still decreases with the oxygen concentration increasing. When the fraction of water is over 30%, the ignition delay increases dramatically, the in-cylinder burning deteriorates, and the variations of maximum pressure grow.

Key words DI-diesel engine, Oxygen-enriched intake air, Oxygen-enriched combustion, Water emulsion diesel, Cycle-by-cycle variation, Combustion characteristic

引言

目前,对于乳化柴油的研究大多集中在燃油经济性^[1-2]、降低污染物排放^[3]、提升动力性及加强乳

化柴油稳定性^[4]等方面的研究,而较少考虑燃用乳化柴油发动机的燃烧特性和循环变动率的变化。柴油中掺入一定比率的水之后,气缸内水蒸气会大量吸收火焰温度,导致滞燃期变长^[5],引起机器工作

收稿日期: 2009-11-24 修回日期: 2010-05-05

* 国家自然科学基金资助项目(50976077)

作者简介: 张韦, 博士生, 昆明理工大学讲师, 主要从事内燃机燃烧和排放控制研究, E-mail: koko_575@yahoo.com.cn

粗暴,发动机的燃烧特性和循环变动率也会因此而变差。富氧燃烧会缩短缸内的燃烧准备时间,使着火时刻提前^[6-7]。乳化柴油与富氧的搭配使用可以部分抵消这两种方法单独使用所产生的燃烧平顺性方面的消极因素,改善循环变动率。燃用水乳化柴油,可以降低缸内燃烧温度,降低 NO_x ^[8]和颗粒物的排放^[9-10],但是会引起HC和CO的增加^[11]。在进气内掺氧,实现缸内富氧燃烧,可以有效降低碳烟、HC和CO排放^[12-13],但 NO_x 将随进气 O_2 体积分数的提升而增加^[14-15]。乳化柴油和富氧的混合使用也可以在各种污染物的生成上相互制衡。由此可以看出,单纯依靠一种技术已经越来越难以应对日益严苛的发动机使用要求。富氧燃烧所引起的缸内温度升高可以依靠乳化柴油在缸内产生大量水蒸气的吸热反应来克服;相反,由乳化柴油引起的滞燃期变长则可通过富氧引起的着火时刻提前而得到一定程度的改善。所以本文同时采用以上两种技术手段,从分析发动机的燃烧及缸内最大压力循环变动着手,探讨富氧燃烧与乳化柴油两种技术有机融合的可行性,为将来从燃料及进气设计等前处理的角度优化燃烧、控制污染物排放做探索性研究。

1 实验装置及乳化柴油的配制

1.1 实验装置及实验方法

在内燃机进气中吸入富氧空气是内燃机富氧燃烧研究一开始就采用的技术^[16]。近年来,随着材料科学技术的发展,运用渗透膜技术^[17]分离空气为内燃机提供进气富氧的技术日趋成熟,这些膜具有选择性和渗透性,能根据发动机的需要在车上产生理想的富氧空气成分^[14]。利用膜分离技术可以使 O_2 体积分数最高达到35%^[18],满足发动机富氧燃烧的需要。但是氧渗透膜还存在分离效率偏低,气体通过阻力大,成本相对较高等方面的缺点。目前在内燃机富氧燃烧的研究中绝大多数采取富氧进气的供气方式,采用液氧储罐供气可得到持续而稳定的氧气供给,便于实验过程中准确控制氧气供给量。实验采用4100QBZL-2型增压中冷柴油机,发动机性能参数如表1所示。

实验所用主要设备与仪器及各个设备之间的联接如图1所示;由于实验所用的氧气来源为低温绝热储存液氧,使用时需要用汽化器使液氧吸热汽化,此时氧气在温度达到环境温度的同时,体积膨胀、压力增加,为了控制氧气的出口压力与压缩机空气压力匹配,必须使高压氧气通过减压阀组;减压后的氧气与压缩机压缩空气在进气稳压混合罐内混

表1 4100QBZL-2型柴油机主要参数

Tab.1 Main parameters of 4100QBZL-2 diesel engine

项目	参数
型式	立式、直列、水冷、四冲程
最低空载稳定转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	650
缸径 D/mm	100
压缩比	17.5
行程 S/mm	115
标定功率/ $\text{kW}(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	80(3 200)
气缸数	4
供油提前角/ $(^\circ)$	12.5
燃烧室型式	直喷 ω 型
各缸工作顺序	1—3—4—2
进气方式	涡轮增压中冷
冷却方式	强制循环水冷式

合。测试工况为稳态工况,在被测柴油机较常用的经济转速下进行。发动机转速达到1 600 r/min ,将输出转矩调整到100 $\text{N}\cdot\text{m}$;打开氧气供给阀,在进气稳压罐内通入氧气,调节氧气供给阀的开度使进气 O_2 体积分数达到测试要求,保持发动机工作稳定,记录数据。实验采用分组对比,分别对水乳化率为0% (纯柴油,不掺水)、10%、20%、和30%进行21% (正常大气,不加氧)、23%、25%和30% 4组不同 O_2 体积分数的对比。

1.2 乳化柴油的配置

乳化柴油采用在线实时乳化方式配置,现用现配;乳化剂为Span-80/Tween-80/正丁醇,乳化剂用量约1% (体积分数)。为使进入气缸参与燃烧的乳化柴油混合更加均匀,保证在喷入燃烧室时,均匀雾化,使水分能充分吸热,实现富氧进气的低温燃烧,抑制污染物,需要使用超声波乳化仪。通过超声波在乳化液内部产生的热效应、空化效应和机械效应,使乳化液中分散相(小水滴)的平均粒径减小,从而实现油水大分子团的破碎与混合。

2 实验结果及分析

2.1 进气 O_2 体积分数及水乳化率对最大压力及其变动率的影响

燃烧循环变动是指发动机以某一工况稳定运转时,这一循环和下一循环燃烧过程进行情况的不断变化,具体表现在压力曲线、火焰传播情况以及发动机功率输出均不相同。燃烧循环变动大对发动机有不利的影响,导致发动机的动力性、燃料经济性、排放性能及操纵性能全面恶化。本文选用最大燃烧压力的循环变动率作为评价燃烧循环变动的主要参

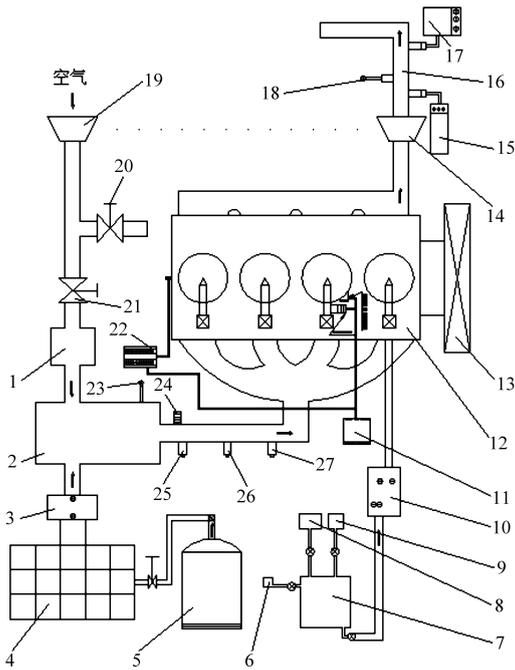


图1 台架实验装置

Fig. 1 Layout of experimental setup

- 1. 中冷器 2. 稳压混合罐 3. 减压阀 4. 液氧汽化器 5. 液氧罐 6. 乳化剂 7. 乳化仪 8. 柴油 9. 水 10. 油耗仪 11. 数据采集仪 12. 发动机 13. 测功机 14. 涡轮机 15. 烟度计 16. 排气管 17. AVL 排气分析仪 18. 排气压力表 19. 压缩机 20. 溢流控制阀 21. 进气节流阀 22. 光电编码器 23. 进气压力表 24. 流量计 25. 氧传感器 26. 进气压力传感器 27. 进气温度传感器

数。其表达式为

$$\delta = \frac{P_{maxSTD}}{\bar{P}_{max}} \times 100\% = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (p_{imax} - \bar{p}_{max})^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{imax}}$$

式中 p_{maxSTD} ——最大燃烧压力的标准偏差
 \bar{p}_{max} —— n 个连续循环最大燃烧压力平均值
 p_{imax} ——第 i 个循环的缸内最大燃烧压力
 n ——采样循环数。实验从连续采样的数据

中取出连续的 20 个循环进行计算分析
 由图 2 可知, 燃用纯柴油时缸内连续最大压力点, 随 O_2 体积分数的增加没有明显变化; 由此可知, 在经济转速的中等负荷时, 燃用纯柴油, 缸内的压力最大值的波动对进气 O_2 体积分数的变化并不特别敏感。

由图 3 可知, O_2 体积分数为 23% 时的最大压力值波动比其他 3 组大; 而从最大压力值的整体对比来看, O_2 体积分数为 23% 和 25% 时缸内总体压力值要大于其他两组。

图 4 可以看出, 使用 20% 的乳化柴油时, 加入富氧的曲线整体增长幅值全面高于以空气助燃的曲线, 循环变动率也整体大于空气助燃的曲线。

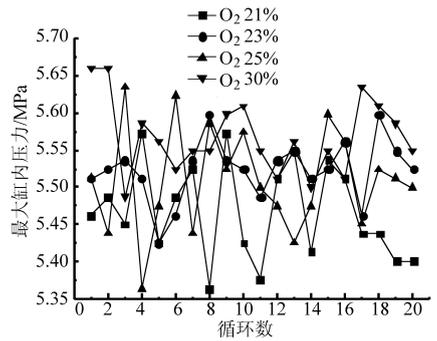


图2 燃用纯柴油时进气 O_2 体积分数对缸内 20 个连续循环压力最大值分布的影响

Fig. 2 Influence of O_2 concentration on 20 cycles

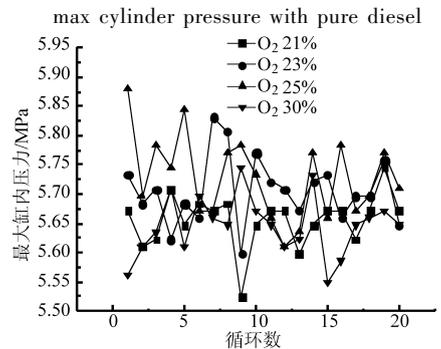


图3 燃用 10% 乳化柴油时进气 O_2 体积分数对缸内 20 个连续循环压力最大值分布的影响

Fig. 3 Influence of O_2 concentration on 20 cycles

max cylinder pressure with 10% emulsion

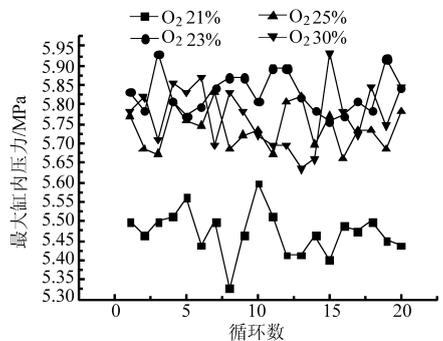


图4 燃用 20% 乳化柴油时进气 O_2 体积分数对缸内 20 个连续循环压力最大值分布的影响

Fig. 4 Influence of O_2 concentration on 20 cycles

max cylinder pressure with 20% emulsion

由图 5 可知, 随着掺水比率的提升, 富氧进气对燃烧的影响逐渐显得明显, 缸内最大压力分布随 O_2 体积分数的升高从大到小分布。缸内压力增加的同时, 循环变动加大, 燃烧变得不稳定, 振动加剧。

由图 6 可知, 在纯空气助燃、30% 乳化率下的发动机最大压力变动率比 0% ~ 20% 乳化率要大得多。说明在经济转速中等负荷燃用较高比率 ($\geq 30\%$) 含水柴油发动机的燃烧会变得不稳定; 10% ~ 20% 乳化率下发动机的循环变动率比纯柴油的好, 说明在此工况下恰当的掺水率能降低发动机的循环

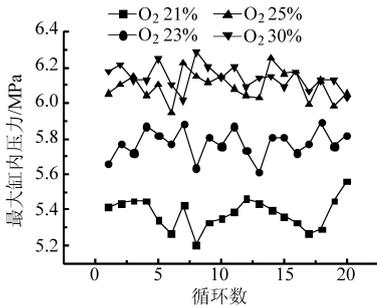


图5 燃用30%乳化柴油时进气 O_2 体积分数对缸内20个连续循环压力最大值分布的影响

Fig. 5 Influence of O_2 concentration on 20 cycles max cylinder pressure with 30% emulsion

变动率。含水率20%和30%乳化柴油的两条曲线在 O_2 体积分数上升到30%时,变动率增加,平顺性有变差趋势。从4条曲线的综合对比来看,30%乳化柴油的循环变动率均高于纯柴油的;20%乳化柴油只在不掺氧(O_2 体积分数21%)的情况下好于纯柴油;10%的乳化柴油拥有较好的平顺性,变动率总体较低,除了在 O_2 体积分数为23%时稍差于纯柴油外,其他各点都接近或好于纯柴油的表现。燃用纯柴油添加富氧后的发动机循环变动率均小于纯空气助燃的情况。

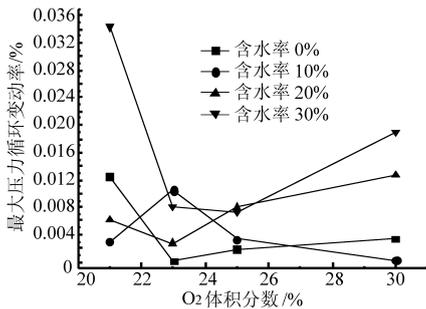


图6 O_2 体积分数对不同乳化油缸内最大压力变动率的影响

Fig. 6 Influence of O_2 concentration on cyclic variability of max pressures with 0% ~ 30% emulsion

2.2 进气 O_2 体积分数及水乳化比率对缸内燃烧特性的影响

从图7a缸内压力曲线看,在燃烧纯柴油时,发动机的压力最大值随 O_2 体积分数的提升略有小幅增加,从21%的5.34 MPa增至30%时的5.49 MPa;着火始点不断提前,21%时进入气缸的油料在 5° ATDC开始着火,加入30%富氧后,着火始点提前了 3° CA,在 2° ATDC时开始着火, O_2 体积分数为23%和25%的着火点分别为 4° ATDC和 3° ATDC。燃用纯柴油时,进气 O_2 体积分数在21%~30%范围内,着火点时刻几乎呈线性随 O_2 体积分数增加而提前。从图7b压力升高率看,在中小负荷时(1600 r/min, 100 N·m),虽然最大压升率随着 O_2 体积分数的增

加而相应提前,但是其最大值随 O_2 体积分数增加而减小;此时的燃烧随着 O_2 体积分数的提升而变得相对柔和一些。压力升高率在21%时最大,发动机的冲击也高于其他 O_2 体积分数下的情况。在部分发动机燃烧延迟比较明显的工况,采用进气掺氧的技术可以减小燃烧延迟,改善燃烧品质,降低发动机振动。从图7c瞬时放热率看,最大瞬时放热率的出现时刻也和压力升高率最大值及压力最大值类似,随 O_2 体积分数提升而提前。在21%时,缸内的放热主要集中在 $5^\circ \sim 12^\circ$ ATDC的一次剧烈燃烧,以预混合燃烧为主,燃烧短促而激烈;在30%时,缸内的放热过程可以看出由2个部分组成,第一部分为 $2^\circ \sim 6^\circ$ ATDC,以预混合燃烧为主,第二部分为 $6^\circ \sim 16^\circ$ ATDC以扩散燃烧为主,由于燃烧和放热过程不再像 O_2 体积分数21%时那样集中,所以在最大爆发压力增大的情况下压力升高率曲线最大值却是在降低。从图7d累计放热率曲线来看,随着 O_2 体积分数的提升,缸内的放热时间提前,放热率也有小幅提升。在21%的放热基本完成时(40° CA ATDC)放热率达到76%;30%时,在相同的时刻放热率达到84%,从放热率变化曲线看,在中低负荷时,通入富氧可以对缸内的燃烧及放热情况有一定的改善,提高了缸内的温度。

从缸内压力图8a看,掺入10%水以后着火延迟普遍加大, O_2 体积分数为21%的曲线着火点与纯柴油时比较延迟了 2° CA,着火时刻变为 7° ATDC;最大压力点也相应延迟了 2° CA,在 12° ATDC出现,且最大压力由5.57 MPa减小到5.34 MPa;压力升高率、瞬时放热率和累计放热率3组曲线,与图7对比除了着火延迟加大外,其他变化不大。

燃用20%乳化柴油时的缸内燃烧状况如图9,缸压、压力升高率、瞬时放热率及累计放热率的变化趋势与10%乳化柴油近似,与之相比着火延迟进一步加大,放热集中,压力升高率增加。

图10a与图7a相比,随着乳化柴油水含量的提升,各个 O_2 体积分数下的缸内着火时间均明显地向上止点后移动。与此同时燃烧起始时刻还是严格保持着随进气 O_2 体积分数提升依次提前的规律。燃用空气时,着火时刻从纯柴油的 5° BTDC推迟到了30%乳化柴油的 8° BTDC,着火延迟期增加了 3° CA;在30%富氧进气的时候,着火时刻为 5° CA ATDC,对比纯柴油时着火延迟期增加了 3° CA;由此可以看出,随着含水率的增加,在相同进气 O_2 体积分数下,着火延迟期所推后的时间几乎是一致的。对比图7b~图10b,压力升高率曲线的变化出现一个规律性的现象,随着含水率的增加压力升高率最大值

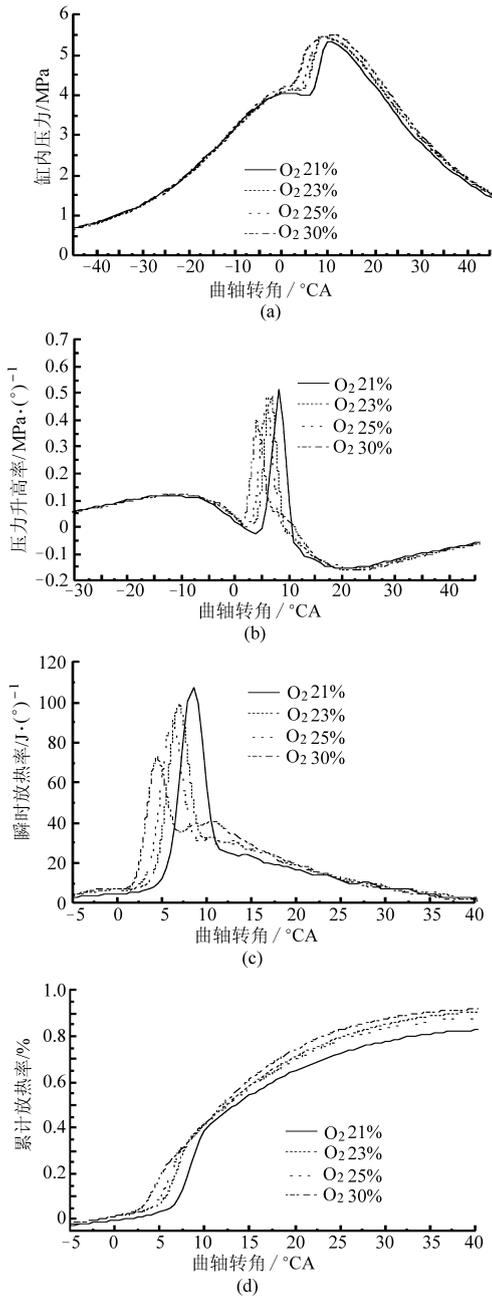


图7 0% 乳化柴油时不同 O₂ 体积分数对缸内压力、压力升高率、瞬时放热率及累计放热率的影响

Fig.7 Influence of O₂ concentration on cylinder

pressure, rise rate of cylinder pressure, rate of heat release and total heat release with 0% emulsion

(a) 缸内压力 (b) 压力升高率 (c) 瞬时放热率
(d) 累计放热率

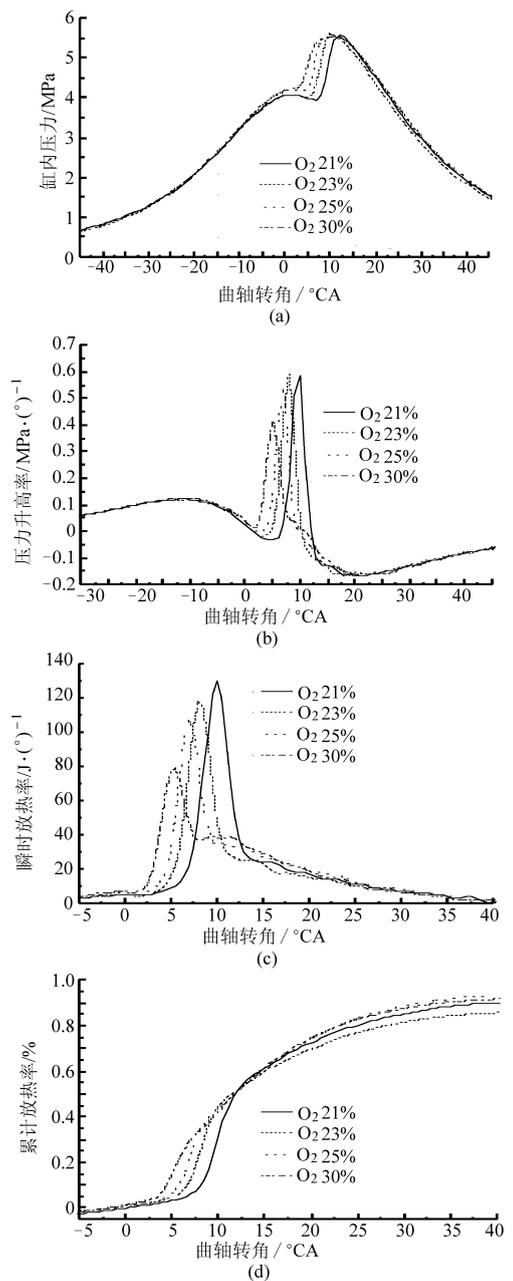


图8 10% 乳化柴油时不同 O₂ 体积分数对缸内压力、压力升高率、瞬时放热率及累计放热率的影响

Fig.8 Influence of O₂ concentration on cylinder

pressure, rise rate of cylinder pressure, rate of heat release and total heat release with 10% emulsion

(a) 缸内压力 (b) 压力升高率 (c) 瞬时放热率
(d) 累计放热率

出现的时刻不断向后移动,这与压力曲线的着火延迟期随含水率而延长的实验结果吻合。由图 10c 看出,30% 的乳化柴油,由于燃烧准备期延长,燃料累积在同一时刻放热的趋势增加,瞬时放热率曲线最大值均高于其他各组水乳化柴油的曲线,放热持续时间缩短了。由图 10d 可知,燃用 30% 乳化柴油、O₂ 体积分数为 30% 时,在 40°CA ATDC 累积放热率为 96%,与纯柴油、O₂ 体积分数为 30% 时的 84% 相

比提升了 12%。30% 乳化柴油、O₂ 体积分数为 21% 的累积放热率为 87%,比纯柴油、O₂ 体积分数为 21% 时的 76% 高 11%;由此可以看出,随着水乳化率的提升,累积放热率也会有小幅提升,但是由于掺入的水要吸热、蒸发,所以将消耗更多的燃油。

3 结论

(1) 在经济转速中等负荷使用乳化柴油不掺富

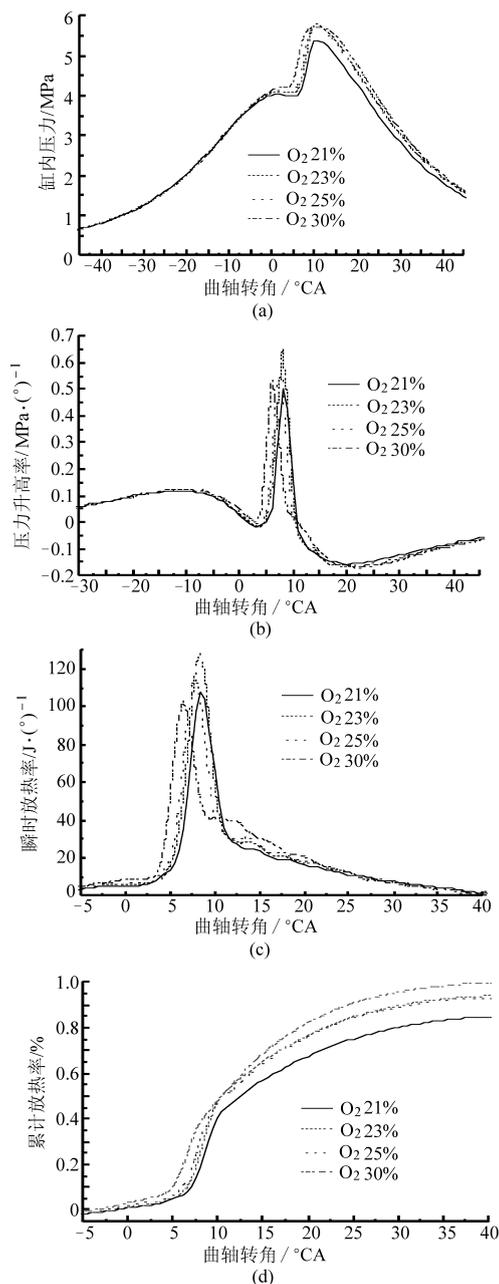


图9 20%乳化柴油时不同 O_2 体积分数对缸内压力、压力升高率、瞬时放热率及累计放热率的影响

Fig.9 Influence of O_2 concentration on cylinder pressure, rise rate of cylinder pressure, rate of heat release and total heat release with 20% emulsion

(a) 缸内压力 (b) 压力升高率 (c) 瞬时放热率
(d) 累计放热率

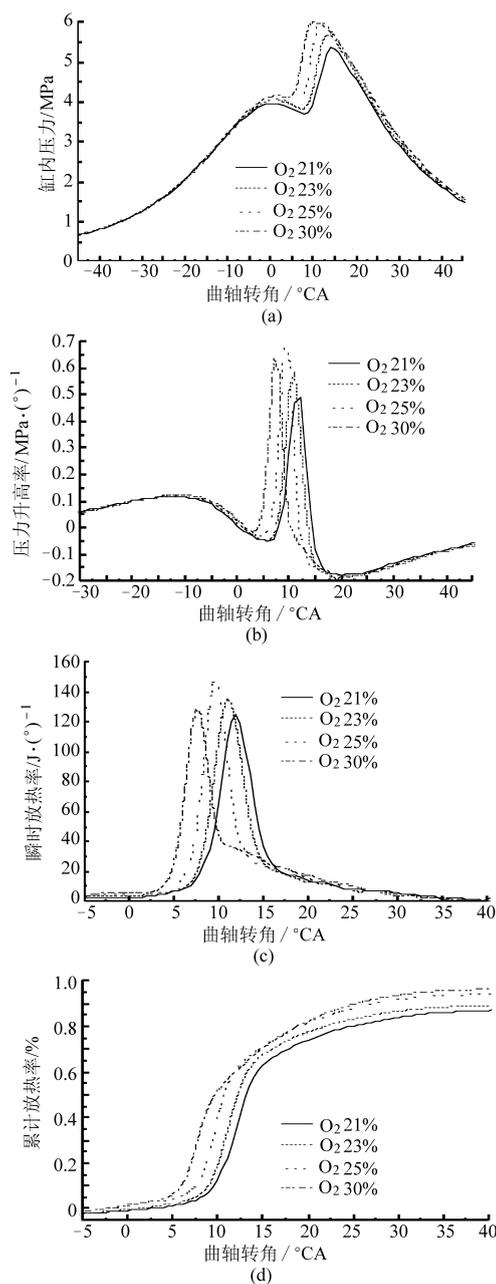


图10 30%乳化柴油时不同 O_2 体积分数对缸内压力、压力升高率、瞬时放热率及累计放热率的影响

Fig.10 Influence of O_2 concentration on cylinder pressure, rise rate of cylinder pressure, rate of heat release and total heat release with 30% emulsion

(a) 缸内压力 (b) 压力升高率 (c) 瞬时放热率
(d) 累计放热率

氧的时候,10%~20%的水乳化率可使发动机的循环变动率小于燃用纯柴油时的循环变动率,而30%的乳化柴油则会大大加强循环变动率;掺入富氧后,10%的乳化柴油在 O_2 体积分数超过25%以后循环变动率优于纯柴油的情况,而其他不同的乳化率下情况则相对较差,其中30%的乳化柴油在 O_2 体积分数30%时由于燃烧组织不良而使循环变动率迅速恶化。

(2) 进气掺氧,实现缸内的富氧燃烧可以在发动机部分燃烧延迟的工况(部分中低转速、中小负荷时)下有效地提前燃烧开始时刻,使放热更加平顺,减小发动机的循环波动。以此相反,乳化柴油的作用会使发动机缸内的燃烧温度降低,推迟缸内化学反应时间,使燃烧延迟加大,水乳化率越高则燃烧延迟越大。通过对进气 O_2 体积分数及乳化柴油含水率的调节,可以控制发动机的燃烧起始时刻及缸

内温度。掺入的燃料的水要吸热、蒸发,将消耗一定的燃油,所以燃用高比率水乳化柴油会使油耗增加。

(3)在经济转速的中等负荷时,燃用乳化柴油及缸内富氧燃烧将会提升发动机的累计放热率;因

参 考 文 献

- 傅维标,侯凌云,王利坡,等. 柴油机燃用掺水燃料的节油机理的定量分析[J]. 内燃机,2005(2):1~6.
Fu Weibiao, Hou Lingyun, Wang Lipo, et al. A quantitative analysis of mechanism for saving fuel by using emulsion fuel in diesel engines[J]. Internal Combustion Engines, 2005(2):1~6. (in Chinese)
- 刘闯,张波,傅维标. 柴油机燃用乳化油时提高节油率的试验研究[J]. 内燃机工程,2006,27(2):25~28.
Liu Chuang, Zhang Bo, Fu Weibiao. Experiment on saving fuel consumption of emulsified fuel in diesel engines[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2006, 27(2):25~28. (in Chinese)
- 龚景松,王超,张波,等. 乳化油对柴油机油耗和环保性能影响的再研究[J]. 内燃机,2005(6):44~46.
Gong Jingsong, Wang Chao, Zhang Bo, et al. A re-study on the effect of emulsion on the BSFC and environmental protection in the diesel engine[J]. Internal Combustion Engines, 2005(6):44~46. (in Chinese)
- 楼少敏,许沧粟,魏建勤. 添加乙醇对w/O、O/W/O柴油乳化液乳化特性的影响研究[J]. 内燃机工程,2007,28(3):30~34.
Lou Shaomin, Xu Cangsu, Wei Jianqin. Study on effects of ethanol on emulsification characteristics of two-and three-phase diesel oil emulsions[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2007, 28(3):30~34. (in Chinese)
- 王利坡,傅维标. 含易燃添加剂乳化油的着火延迟特性[J]. 燃烧科学与技术,2000,6(3):252~257.
Wang Lipo, Fu Weibiao. Study on ignition characteristics of emulsified oil containing flammable addition [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2000, 6(3):252~257. (in Chinese)
- 李胜琴,关强,张文会. 富氧燃烧发动机缸内过程试验研究[J]. 公路交通科技,2008,25(3):143~146,158.
Li Shengqin, Guan Qiang, Zhang Wenhui. Test study on combustion process of oxygen-enriched gasoline engine[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(3):143~146,158. (in Chinese)
- 左承基,李海海,徐天玉,等. 柴油机富氧燃烧排放特性的试验研究[J]. 热科学与技术,2003,2(1):70~73.
Zuo Chengji, Li Haihai, Xu Tianyu, et al. Study on emission characteristics of rich oxygen combustion for diesel engines[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2003, 2(1):70~73. (in Chinese)
- 栗工,乔信起,李理光,等. LPG点燃式发动机冷起动首循环进气富氧试验研究[J]. 内燃机学报,2007,25(1):53~59.
Li Gong, Qiao Xinqi, Li Liguang, et al. Experimental study of oxygen-enriched combustion in the first cycle of cold start in a LPG SI engine[J]. Transactions of CSICE, 2007, 25(1):53~59. (in Chinese)
- 肖广飞,乔信起,孙恺,等. 膜法富氧进气改善直喷式柴油机的起动性能[J]. 上海交通大学学报,2007,41(10):1629~1632.
Xiao Guangfei, Qiao Xinqi, Sun Kai, et al. Improvement on starting performance of a DI diesel engine by using membrane-based oxygen-enriched intake air[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(10):1629~1632. (in Chinese)
- 肖广飞,乔信起,栗工,等. 膜法富氧进气降低点燃式发动机冷起动排放[J]. 上海交通大学学报,2006,40(8):1298~1306.
Xiao Guangfei, Qiao Xinqi, Li Gong, et al. Reducing cold-start emissions of an spark-ignition engine using membrane-based oxygen-enriched intake air[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(8):1298~1306. (in Chinese)
- Lin Chengyuan, Chen Liwei. Engine performance and emission characteristics of three-phase diesel emulsions prepared by an ultrasonic emulsification method[J]. Fuel, 2006, 85(5~6):593~600.
- Norimasa Iida, G Takeshi Sato. Temperature and mixing effects on NO_x and particulate[C]. SAE Paper 880424, 1988.
- Hongsik Byun, Byungpyo Hong, Byoungsoo Lee. The effect of oxygen membranes from enriched air obtained by gas separation the emission gas of diesel engines[J]. Desalination, 2006, 193(1~3):73~81.
- Poola R B, Sekar R. Reduction of NO_x and particulate emissions by using oxygen-enriched combustion air in a locomotive diesel engine[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125(2):524~533.
- Song J, Zello V, Boehman A L, et al. Comparison of the impact of intake oxygen enrichment and fuel oxygenation on diesel combustion and emissions[J]. Energy & Fuels, 2004, 18(5):1282~1290.
- Karim G A, Ward G. Examination of combustion processes in compression-ignition engine by changing the partial pressure of oxygen in the intake charge[C]. SAE Paper 680767, 1968.
- 林向东,陈新海,黄飞,等. 富氧膜技术及其装置试验研究[J]. 热能动力工程,1999,14(80):99~101.
- Assanis D N, Poola R B, Sekar R, et al. Study of using oxygen-enriched combustion air for locomotive diesel engines[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001, 123(1):157~166.