

低温环境下柴油机冷起动性能试验研究

吕恩雨,余磊,朱波,贺捷

安徽全柴动力股份有限公司,安徽 滁州 239500

摘要:为改善柴油机冷起动性能,对某排量为2.5 L、采用进气加热器预热的柴油机开展环境温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 极寒条件下的冷起动试验,研究压缩比、节气门开度、预热方式、控制策略等对柴油机冷起动性能的影响。试验结果表明:压缩比为17.0,采用进气加热器时,柴油机加热时间较长,功率消耗大,无法正常起动;增大压缩比和节气门开度,能够提高压缩终了时缸内混合气的压力和温度,改善低温时柴油机的冷起动性能,但效果不佳;采用预热塞预热,柴油机起动迅速,起动时间为3.95 s,可有效提高柴油机冷起动性能;预热塞和燃油油束的相对距离通常设置为0.4~2.0 mm。

关键词:柴油机;冷起动性能;压缩比;预热方式;控制策略;节气门开度

中图分类号:TK421.1

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2024)01-0023-07

引用格式:吕恩雨,余磊,朱波,等. 低温环境下柴油机冷起动性能试验研究[J]. 内燃机与动力装置,2024,41(1):23-29.

LÜ Enyu, YU Lei, ZHU Bo, et al. Experimental study on low-temperature cold start performance of a diesel engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024,41(1):23-29.

0 引言

高压共轨柴油机具有热效率高、动力性和燃油经济性好的特点,广泛应用于各种运输车辆、工程农业机械等领域。冷起动性能直接影响发动机的动力性、经济性及排放性能,在低温环境尤其在冬季环境温度 $-30\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高寒地区,实现柴油机的快速冷起动至关重要。

低温条件下,由于进气温度较低,柴油机零部件之间的间隙增大,气缸漏气现象更加明显,导致实际压缩比小于理论压缩比。此外,低温时燃油蒸发雾化效果较差,润滑油黏度大,机械摩擦阻力较大,导致柴油机冷起动状态下燃油经济性较差,排放污染物较多,有时甚至难以起动。提升柴油机冷起动性能是柴油机发展的关键技术。为了保证柴油机在低温条件下正常工作,应深入研究提高冷起动性能的关键技术措施和控制策略。

冷起动性能受诸多因素影响,主要包括压缩比、涡流比等发动机结构参数,喷射次数、预喷射量、主喷正时、起动轨压、预热时间等控制策略,燃油品质、十六烷值等燃料特性,进气加热器、火焰加热、预热塞等辅助措施,起动机拖转矩、转速,润滑油黏度,蓄电池性能等^[1-2]。国内外众多学者对柴油机的冷起动性能进行了大量研究,主要集中于优化柴油机结构、调整起动控制策略、加装预热系统等。常用的柴油机预热系统包括缸内加装预热塞和进气预热装置^[3]。Broatch等^[4]采用火焰进气加热的辅助措施,使柴油机在环境温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的低温条件下顺利起动。杜巍等^[5]基于V型柴油机设计了进气火焰预热系统并开展试验研究,结果表明,采用进气火焰预热,起动时间明显缩短,最大燃烧压力和输出转矩波动减小,滞燃期缩短,着火过程发生后燃、循环失火的概率减小,燃烧更充分。Li等^[6]通过在单缸柴油机和

收稿日期:2023-11-08

基金项目:中国博士后科学基金项目(2021M690181)

第一作者简介:吕恩雨(1995—),女,河南开封人,工学硕士,助理工程师,主要研究方向为内燃机燃烧与排放,E-mail:lv_sey@163.com。

燃烧弹上进行试验研究,发现混合气体温度最低为 413 ℃,最低空气、燃料当量比为 0.15~0.35 时,预热塞与喷雾边缘的距离、预热塞温度及气体温度是影响着火的重要因素。张怡军等^[7]采用不同预热系统对柴油机进行冷起动试验,发现空气预热的最低使用温度为-25 ℃;火焰预热的最低使用温度为-35 ℃。Payri 等^[8]采用电热式预热器对进气预热 11 s,发现柴油机转速由 0 升高至 1 150 r/min 的时间仅为 1.14 s,成功起动后转速的波动范围为±70 r/min。Pastor 等^[9]基于一台高速可视化光学柴油机进行了预热塞温度和位置对缸内燃烧影响的试验研究,发现安装预热塞可以有效促进缸内火焰的发生,且由于预热塞的空气流动可限制先导火焰发生。

虽然国内外对冷起动性能研究进行了一系列试验,但是在不同低温条件下柴油机仍然存在冷起动困难的问题,还需要进一步研究影响柴油机冷起动性能的关键因素,以改善低温下冷起动性能,使柴油机在较宽温度范围内正常工作^[10]。

本文中对柴油机进行冷起动试验,通过改变柴油机的压缩比、预热方式和控制策略,研究并分析其对冷起动性能的影响,寻找解决柴油机冷起动困难、改善冷起动性能途径。

1 试验装置及试验方法

本文中匹配某轻型车排量为 2.5 L 的 4 缸、四冲程、直列、高压共轨柴油机为研究对象,柴油机结构示意图和试验装置图如图 1 所示,柴油机主要技术参数如表 1 所示。

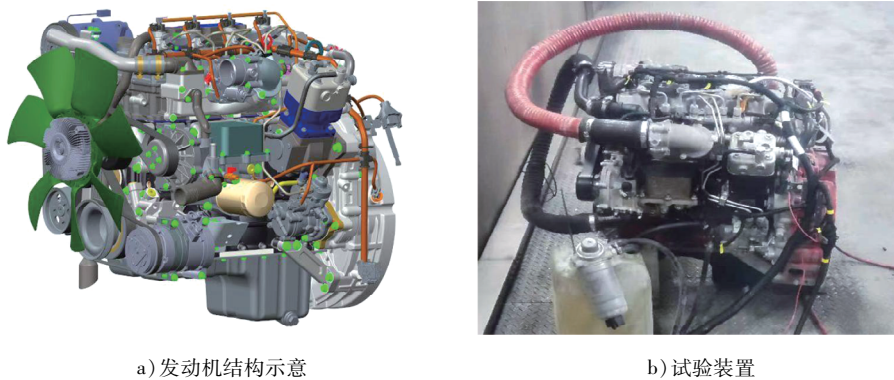


图 1 发动机结构示意图与试验装置图

表 1 柴油机主要技术参数

缸径/mm	行程/mm	压缩比	额定功率/kW	额定功率转速/(r·min ⁻¹)	最大扭矩/(N·m)	最大扭矩转速/(r·min ⁻¹)
90.5	97.2	17.0	116	3 000	475	2 000

柴油机压缩比为 17.0,采用进气加热器预热,加热器功率为 1.5 kW,在环境温度为-30 ℃的低温条件下无法起动。冷起动是瞬态过程,冷起动持续时间是衡量冷起动性能的重要指标,气缸压缩结束时缸内温度也是决定柴油机能否正常起动的基本因素^[11-13]。本文中主要通过柴油机冷起动时间和压缩终了时缸内压力及温度分析其冷起动性能。

已知循环过程中某一时刻的缸内压力和体积,忽略窜气质量损失,通过理想气体状态方程可计算出缸内混合气对应的温度。

气缸体积

$$V = \pi D^2 R [\lambda (1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}) + (1 - \cos \alpha)] / 4 + V_c, \quad (1)$$

式中: D 为气缸直径,m; R 为气缸半径,m; λ 为曲柄连杆比, $\lambda = R/L$,其中 L 为连杆长度,m; α 为曲柄连杆夹角,°; V_c 为燃烧室容积,m³。

理想气体状态方程^[14]为:

$$pV = mR_g T, \quad (2)$$

式中: p 为循环过程中某一时刻气缸内压力,MPa; R_g 为气体状态常数, $R_g = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; m 为气缸内空气质量,kg; T 为气缸内气体的热力学温度,K。

试验前,发动机和起动电池在设定的低温条件下冷浸8 h左右,记录润滑油温度、冷却液温度、电池电压及冷库大气温度;使用起动马达起动发动机,马达最大许用拖动时间为15 s,若发动机起动失败,切断起动马达,待发动机冷却后重复起动,本次记录为起动失败;若起动成功,起动过程中使用Inca和Indicom软件记录缸压、油压、起动时间等参数,评估冷起动性能。

2 试验结果及分析

2.1 压缩比对冷起动性能的影响

为探究压缩比对冷起动性能的影响,在环境温度为 $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,采用进气加热器预热方式,柴油机进行倒拖试验和冷起动试验,倒拖转速为 $130 \sim 180 \text{ r}/\text{min}$,基本满足起动需求。由于原机冷起动时间超过15 s,且无法起动,选取压缩比分别为17.5、18.5,开展柴油机倒拖和冷起动试验。不同压缩比下倒拖缸内压力及温度分别如图2、3所示,起动过程中柴油机转速随时间的变化曲线如图4所示。

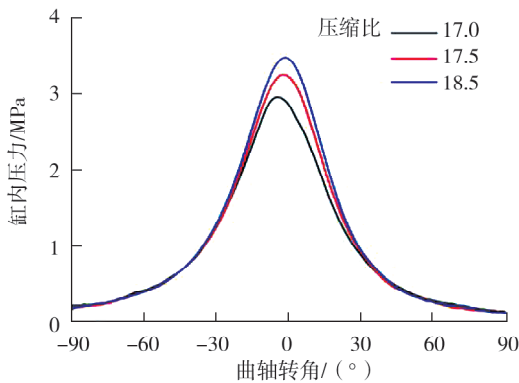


图2 不同压缩比下倒拖缸内压力

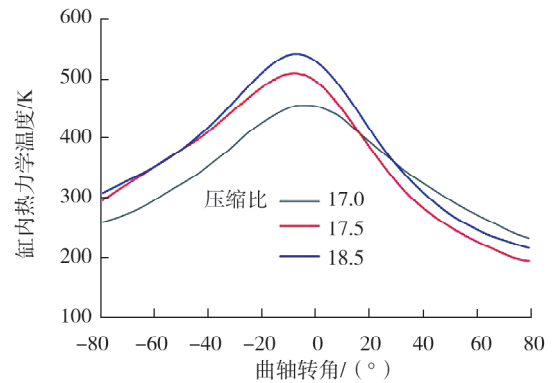


图3 不同压缩比下缸内热力学温度

由图2~4可知:当原机压缩比为17.0时,压缩终了时缸内压力仅为3.0 MPa,缸内热力学温度为451 K,柴油着火临界热力学温度为520 K左右,因此压缩比为17.0时柴油机无法起动;当压缩比为17.5时,压缩终了时缸内压力为3.3 MPa,热力学温度升高至517 K左右,起动时间为17.95 s;当压缩比为18.5时,压缩终了时缸内压力到达3.6 MPa,热力学温度升高至553 K左右,起动时间为15.62 s。随着压缩比增大,缸内气体与燃烧室壁面接触面积减小,散热损失较小,压缩终了时缸内压力和温度均增大。因此,压缩比越大,压缩终了时缸内温度和压力越大,当压缩终了时缸内压力达到3.5 MPa以上,温度达到柴油最低着火温度520 K时,柴油机顺利起动。增大压缩比,冷起动性能虽然得到一定程度改善,但起动时间仍大于15 s,可见增大压缩比对柴油机的冷起动性能改善效果不明显。

2.2 节气门开度对冷起动性能的影响

环境温度较低时,柴油机的进气温度也较低,温度较低的空气与燃油在燃烧室内混合,混合气温度低于柴油的燃点,导致柴油机无法起动^[15-16];虽然在某些条件下能够起动但混合气燃烧不稳定,易发生失

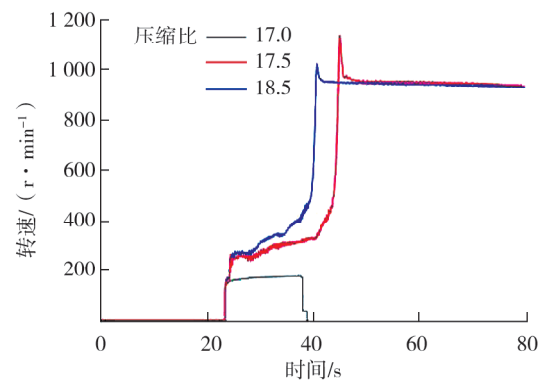


图4 不同压缩比下柴油机转速随时间的变化曲线

火现象^[17]。为提高进入气缸内空气的温度,在环境温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时通过调节节气门开度研究其对冷起动性能的影响。不同节气门开度下的缸内倒拖压力如图5所示,缸内倒拖压缩热力学温度如图6所示,起动过程中转速随时间的变化曲线如图7所示。

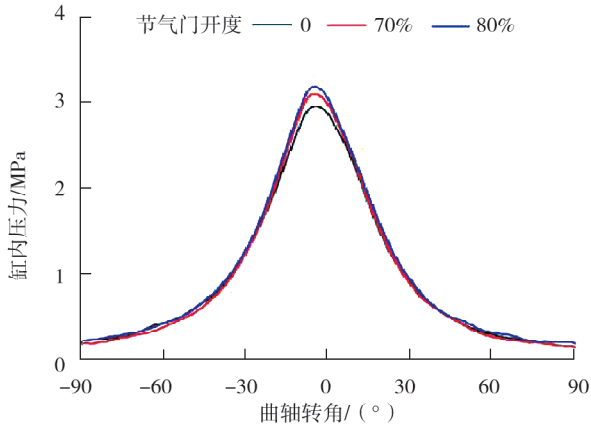


图5 不同节气门开度下缸内倒拖压力

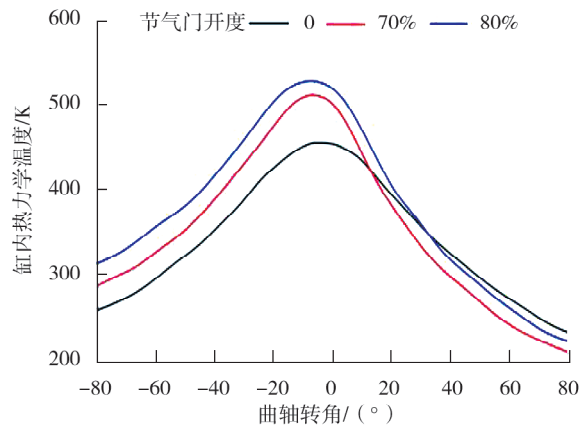


图6 不同节气门开度下缸内倒拖热力学温度

由图5~7可知:当节气门开度为0时,压缩终了时缸内压力仅为 3.0 MPa ,压缩终了缸内温度为 451 K ,而柴油着火临界温度在 520 K 左右,柴油机无法起动;当节气门开度为70%时,压缩终了时缸内压力为 3.2 MPa ,温度为 507 K ,柴油机无法起动;当节气门开度为80%时,压缩终了时缸内压力为 3.5 MPa ,温度为 529 K ,柴油机顺利起动,起动时间为 15 s 。主要原因为节气门开度越大,进入气缸内的低温空气越少,低温空气引起的热能损失越少,缸内燃烧室壁面温度越高,倒拖缸内压力和温度也越高,压缩上止点时刻缸内温度更接近柴油的自燃温度,柴油机更容易起动,冷起动性能更好。

2.3 控制策略对冷起动性能的影响

试验原机所采用的冷起动控制策略为单次预喷射和主喷射,采用进气加热器预热,前预热时间为 30 s ,起动转矩为 $300\text{ N}\cdot\text{m}$ 。由于轨压对燃油雾化起决定作用,开展环境温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、不同起动轨压下的冷起动试验,研究轨压对于冷起动性能的影响,不同轨压下柴油机起动过程中转速随时间的变化曲线如图8所示。

由图8可知:原机起动轨压为 35 MPa 时,柴油机无法起动;当轨压增大至 50 MPa 时,柴油机顺利起动,但排气伴有浓黑烟,起动时间为 6.95 s ;起动轨压进一步增大至 60 MPa ,柴油机迅速起动,起动时间为 4.30 s 。这是因为随着轨压增大,燃油雾化效果更好,起动后转速稳定较快,且烟度较小,柴油机冷起动性能得到有效改善。轨压较高有利于燃油雾化,提升缸内温度和压力,缩短着火延迟期,但轨压不宜设置过大或过小,轨压过小,燃油雾化效果较差,油气混合气易燃烧不完全,起动困难;轨压过大,油束贯穿距较大,油束与空气混合时间较短,燃油落在燃烧室上方,燃烧性能较差。此外,若怠速阶段轨压设置过高,发动机怠速运行时,轨压不易达到设定轨压,或即使达到设定轨压,但波动

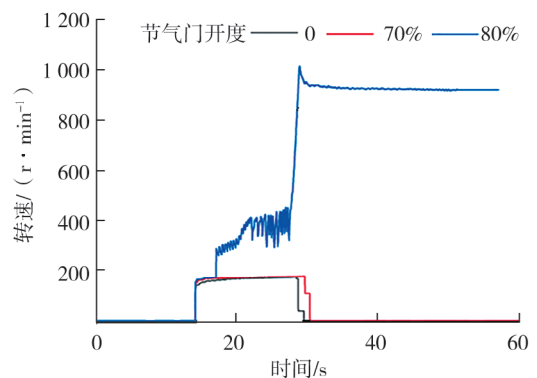


图7 不同节气门开度下转速随时间的变化曲线

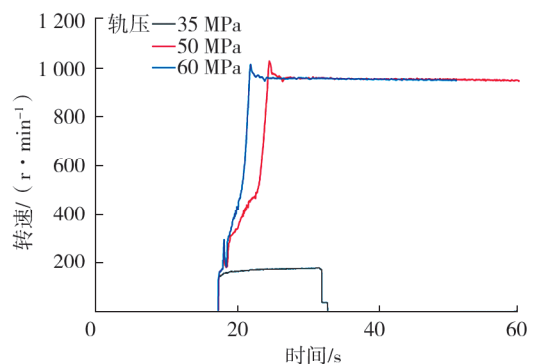


图8 不同轨压下转速随时间的变化曲线

较大,怠速运转鲁棒性较差,因此该方案虽能实现快速起动,但不是最佳方案。

2.4 预热方式对冷起动性能的影响

进气加热器和预热塞是常见的冷起动辅助装置,进气加热器结构简单、成本较低,但耗电较大、热量损失较大,预热时间为3~6 min;预热塞的预热时间小于55 s,升温速率快、耗电少,但结构复杂、加热范围较小。进气加热器通过加热吸入气缸的空气,为柴油机提供足够高的空气温度,起动速度较快。预热塞对缸内油束进行加热,为稳定着火和燃烧提供更丰富、更有利的环境。预热塞能够快速升温至工作温度,通电时间为3~7 s,电热丝的最高温度可达1 000~1 100 ℃。预热塞材料一般有金属型和陶瓷型2种,陶瓷型预热塞比金属型预热塞加热温度高200 ℃左右,加热时间较长,成本较高。在原机进气加热器预热方式基础上,优化压缩比和节气门开度后,柴油机虽成功起动,但起动时间仍较长,不能有效改善柴油机冷起动性能,因此在原机基础上,将预热方式改为金属型预热塞预热。

压缩比为17.0、环境摄氏温度为-30 ℃时,对柴油机进行冷起动试验,不同预热方式下柴油机起动转速随时间的变化曲线如图9所示。由图9可知:柴油机采用进气加热器预热,起动失败;当采用预热塞预热,预热时间为12~15 s时,柴油机迅速起动,起动时间仅为3.95 s,冷起动性能大幅改善。主要原因是:加热器预热时,进气管到缸内过程中被加热的空气热损失较多,缸内混合气温度不能达到柴油最低着火温度;而预热塞预热方式直接加热缸内混合气,加热效率更高,燃油开始汽化的时间提前,扩散速度加快,燃油汽化量增大,着火延迟期缩短,柴油机迅速起动,可实现燃烧较稳定。另外,预热塞耗电较少,对蓄电池性能要求不高,更适合本试验中排量为2.5 L柴油机。

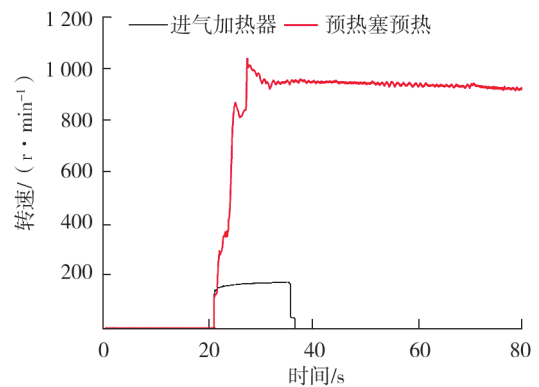


图9 不同预热方式下转速随时间的变化

综上,在原机基础上采用金属型预热塞预热方式为本文中柴油机冷起动试验的最佳方案,排量小于3 L的小排量柴油机宜采用预热塞辅助装置以满足在极寒条件下的冷起动要求。排量大于3 L的柴油机,考虑成本及复杂的结构,一般采用进气加热器预热。主要原因为:1) 预热塞加热范围较小,加热不均匀,燃烧循环波动较大,振动噪声大,柴油机成功起动后,预热塞影响燃油喷射发展,造成燃烧特性恶化;排量大于3 L的柴油机缸径较大,相同功率的预热塞加热效果较差;2) 排量大于3 L的柴油机起动时喷油量较多,相当于增大了压缩比,缸内压缩压力和温度更高,混合气更容易着火,柴油机采用进气加热器即可顺利起动,采用预热塞成本较高,且缸盖结构复杂,影响进气涡流形成和缸内燃烧过程,因此排量大于3 L的柴油机宜采用进气加热器预热。

2.5 预热塞和油束的相对位置对冷起动性能的影响

当采用预热塞预热时,预热塞和油束的相对位置至关重要,两者相对距离影响冷起动性能。预热塞与油束之间的最小距离 L_1 的示意如图10所示。

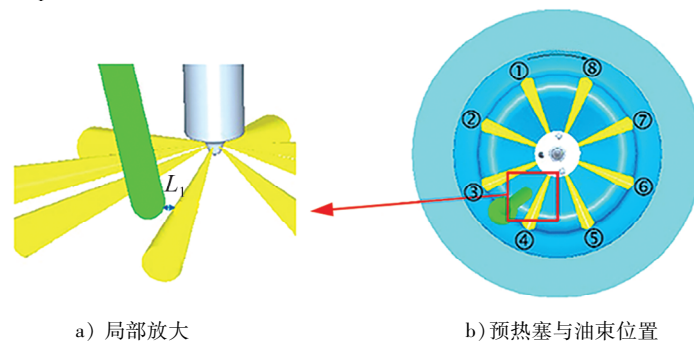


图10 预热塞与油束位置示意图

预热塞和油束之间的距离过大,油束温度较低,雾化效果较差,不易起燃;距离过小,部分油束落在预热塞上,该部分油束可能直接发生高温裂解,燃油燃烧性能变差,造成油耗和排放较高,但距离越小冷起启动性能越好。不同发动机的预热塞位置不同,但多布置在进气涡流方向下沿,且预热塞与油束之间应设计适宜的距离,通常 $L_1 = 0.4 \sim 2.0$ mm。柴油机启动时,部分油束借助涡流被吹到预热塞附近,燃油被快速加热,燃油迅速蒸发,能够快速提高混合气的温度,达到混合气的燃点,一旦局部发生着火,燃烧体积快速膨胀,进而点燃缸内混合气,柴油机顺利启动。

3 结论

1) 增大压缩比、增大节气门开度、优化冷启动控制策略和采用预热塞预热方式均能改善冷启动性能;增大压缩比、节气门开度均可提高柴油机缸内压缩压力,仅当压缩终了时缸内倒拖压力不小于 3.5 MPa、温度不低于 520 K 时,柴油机能够顺利启动,但启动时间仍较长。

2) 合适的冷启动控制策略可以显著改善冷启动性能,当启动轨压为 35~60 MPa 时,轨压越大,启动时间越短,冷启动性能越好。

3) 预热塞预热方式能够有效提高柴油机缸内混合气温度,启动时间为 3.95 s,冷启动性能得到大幅改善;3 L 以下小排量柴油机宜采用预热塞辅助装置。

4) 预热塞与油束之间的距离影响冷启动性能,通常设计为 0.4~2.0 mm,距离越小冷启动性能越好。

参考文献:

- [1] 陈月春,吴心波,曾笑笑,等. 柴油机启动性能及烟度优化的试验研究[J]. 内燃机与动力装置,2023,40(5):27-30.
- [2] 王霞,陈月春,李素婷,等. 不同海拔高度下柴油机低温启动性能试验研究[J]. 内燃机与动力装置,2022,39(1):7-11.
- [3] 王东方,王奕,黎一锴,等. 柴油机进气火焰预热系统着火临界温度的研究[J]. 内燃机学报,2021,39(4):289-296.
- [4] BROATCH A, LUJÁN J M, SERRANO J R, et al. A procedure to reduce pollutant gases from diesel combustion during European MVEG-A cycle by using electrical intake air-heaters[J]. Fuel, 2008, 87(12):2760-2778.
- [5] 杜巍,黄伟伟,何圣华,等. 进气预热对柴油机启动过程动力性能影响的试验分析[J]. 车用发动机,2015(2):28-32.
- [6] LI Q, SHAYLER P J, MCGHEE M, et al. The initiation and development of combustion under cold idling conditions using a glow plug in diesel engines[J]. International Journal of Engine Research, 2016, 18(3):240-255.
- [7] 张怡军,段春霞. 进气预热对柴油机低温启动影响的研究[J]. 内燃机与动力装置,2008(3):10-13.
- [8] PAYRI F, BROATCH A, SERRANO J R, et al. Study of the potential of intake air heating in automotive DI diesel engines [C]//Proceedings of SAE 2006 World Congress & Exhibition. Detroit, USA:SAE International, 2006.
- [9] PASTOR J V, BERMÚDEZ V, GARCÍA-OLIVER J M, et al. Influence of spray-glow plug configuration on cold start combustion for high-speed direct injection diesel engines[J]. Energy, 36(9):5486-5496.
- [10] 蒋齐泰,刘伍权,朱岩,等. 车用柴油机冷启动燃烧过程研究及相关技术分析[J]. 小型内燃机与车辆技术,47(5):81-86.
- [11] SINDAREH-ESFAHANI P, GHAFARI A, AHMADI P. Thermodynamic modeling based optimization for thermal systems in heat recovery steam generator during cold start-up operation [J]. Applied thermal engineering: Design, Processes, Equipment, Economics, 2014, 69(1/2):286-296.
- [12] ROYO R, ALBERTOS-ARRANZ M A, CARCEL-CUBAS J A, et al. Thermographic study of the preheating plugs in diesel engines[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 37:412-419.
- [13] ZHANG C, LIU B, HU J, et al. Study on cold starting performance of a low compression ratio diesel engine by using intake flame preheating[J]. Thermal Science 2020, 24:51-62.
- [14] 曾丹苓. 工程热力学[M]. 北京:人民教育出版社,1980.
- [15] 周乃君,裴海灵,包生重,等. 风冷柴油机冷启动性能的研究[J]. 车用发动机,2006(5):16-19.
- [16] 周乃君,裴海灵,王本亮,等. 小型农用风冷柴油机冷启动性能提高试验研究[J]. 中北大学学报(自然科学版),2007(15):402-406.
- [17] 魏崇帆. 高压共轨柴油机低温启动性能研究[J]. 内燃机,2013(6):47-49.

Experimental study on low-temperature cold start performance of a diesel engine

LÜ Enyu, YU Lei, ZHU Bo, HE Jie

Anhui Quanchai Power Co., Ltd., Chuzhou 239500, China

Abstract: In order to improve the cold start performance of diesel engine, based on a 2.5L diesel engine with preheating mode of intake heater, a cold start experiment is carried out under extremely cold ambient temperature of $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. And the effects of compression ratio, throttle opening, preheating mode and fuel injection control strategy on the cold start performance of diesel engine are studied. The experiment results show that when the compression ratio is 17.0 and the intake heater is used, the diesel engine takes a long time to heat up and consume a lot of power, it cannot be started normally. Increasing the compression ratio and throttle opening can increase the pressure and temperature of the mixture in the cylinder at the end of compression, and improve the cold start performance of diesel engine at low temperature, but the effect is limited. The diesel engine starts quickly with the preheating plug, and the starting time is 3.95 s, which can effectively improve the cold start performance of diesel engine. The relative distance between the glow plug and the fuel beam is usually 0.4–2.0 mm.

Keywords: diesel engine; cold start performance; compression ratio; preheating mode; control strategy; throttle opening

(责任编辑:刘丽君)

.....
(上接第16页)

Analysis of spray, combustion and emission performance of biodiesel-diesel-DEC fuel blends

ZHAO Lifei, ZHU Xianbiao, WANG Yunpeng

Anhui Jianghuai Automobile Group Co., Ltd., Hefei 230601, China

Abstract: The schlieren method is used to observe the macro spray characteristics of the fuel under the high-pressure common rail system, and the combustion and emission tests of the external characteristics are carried out on the high-pressure common rail diesel engine to analyze the spray, combustion and emission characteristics of the biodiesel-diesel-DEC blend fuel. The fuel mixed with biodiesel and diesel in a volume ratio of 3 : 7 is referred to as B30, while the fuel mixed with DEC and B30 in a volume ratio of 2 : 8 is referred to as B30DEC20. The test results show that B30DEC20 fuel atomization effect is improved, the spray shape is symmetrical and full, and the spray cone angle and spray concentration are close to diesel fuel. In the external characteristics, the torque of the engine fueled with B30DEC20 is $27.4\text{ N}\cdot\text{m}$ lower than that of a diesel engine, but its thermal efficiency is higher. When the engine speed is $2\,400\text{ r/min}$, the thermal efficiency of the engine fueled with B30DEC20 is 1.5% higher than diesel engine. The oxygen-containing properties of B30DEC20 result in fewer PM and CO emissions, with PM emissions of the engine fueled with B30DEC20 reduces by 65%–85% and THC emissions is lower than diesel engine. Although the NO_x emissions of the engine using B30DEC20 are higher than other fuels engine, but the test found that when speed over $2\,400\text{ r/min}$, NO_x emissions are lower than those of diesel.

Keywords: biodiesel; diesel; DEC; spray; combustion; emission

(责任编辑:刘丽君)