doi:10.11887/j.cn.201804021 http://journal.nudt.edu.cn

靴形喷油速率耦合预喷射对超高压共轨柴油机性能的影响*

周 磊,杨 昆,刘振明,安士杰,欧阳光耀
(海军工程大学 动力工程学院,湖北 武汉 430033)

摘 要:在介绍超高压共轨系统工作原理的基础上,基于GT-Power软件建立单缸超高压共轨柴油机的仿真模型,并利用试验验证模型的准确性,而后通过模型分析不同喷油速率、靴形喷油速率耦合不同预喷油量和靴形喷油速率耦合不同预喷提前角对超高压共轨柴油机动力性、经济性以及燃烧排放特性的影响。结果表明:通过调整超高压共轨系统中电控增压器电磁阀和喷油器电磁阀的开启时间,能够实现喷油速率的柔性可调。随着喷油速率从矩形变化到靴形,柴油机缸内压力、温度以及NO_x排放量均逐渐降低,而soot排放量逐渐升高,且靴形喷油速率可使柴油机获得最大的功率(扭矩)和最低的油耗率。靴形喷油速率耦合较小的预喷油量可以使柴油机获得更好的动力性、经济性和燃烧特性,但同时也会导致NO_x排放量的升高。靴形喷油速率耦合较大的预喷提前角有助于改善柴油机排放特性,但受到预喷油量的限制,效果并不明显。

关键词:超高压;靴形喷油速率;预喷油量;预喷提前角
中图分类号:TK421.8 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2018)04-134-08

Effect of saddle-shaped fuel injection rate coupled with pilot injection on the performance of ultra-high pressure common-rail diesel engine

ZHOU Lei, *YANG Kun*, *LIU Zhenming*, *AN Shijie*, *OUYANG Guangyao*
(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: On the basis of introducing the working principle of ultra-high pressure common-rail system, the simulation model of ultra-high pressure common-rail diesel engine of single cylinder was built by using GT-Power software, and the accuracy of this model was verified via experiment, then the effects of different fuel injection rate, saddle-shaped fuel injection rate coupled with different pilot injection fuel mass and different pilot injection advance angle on the power, economy, combustion and emission characteristics of ultra-high pressure common-rail diesel engine were analyzed by this model. The results show that the variable fuel injection rate can be realized by adjusting the opening time of the electric-controlled pressure amplifier solenoid valve and the injector solenoid valve in ultra-high pressure common-rail system. With the fuel injection rate varying from rectangular to saddle-shaped, the cylinder pressure, temperature and NO_x emissions of diesel engine decrease gradually, while the soot emissions rise gradually. The saddle-shaped fuel injection rate can make the diesel engine acquire the maximum power (torque) and the lowest fuel consumption rate. The saddle-shaped fuel injection rate coupled with lesser pilot injection fuel mass can make the diesel engine power, economy and combustion characteristics better, but it also leads to the rise of NO_x emissions. The saddle-shaped fuel injection rate coupled with larger pilot injection advance angle can improve the emission characteristics of diesel engine, but the effect is not obvious due to the limit of pilot injection fuel mass.

Key words: ultra-high pressure; saddle-shaped fuel injection rate; pilot injection fuel mass; pilot injection advance angle

柴油机燃烧过程主要受燃油喷射特性所控制,特别是喷油压力和喷油规律,其对柴油机性能会产生直接影响[1-3]。燃烧理论的发展,对喷油压力和喷油规律提出了很高的要求,以期实现柴油机不同工况下更灵活的喷射控制,但传统的高压共轨系统喷油规律近似于矩形,且难以实现超高压喷射[4-5]。

超高喷射压力和可调喷油规律是改善柴油机经济性和排放性的有效手段[6-7]。普遍意义上,将压力高于200 MPa的喷射称之为超高压喷射。为实现超高压喷射,通常采用以下两种方法:一是通过超高压油泵直接产生超高压[8-10];二是在喷油器中集成液压放大机构,采用“高基压低增压比”的方法实现超高压喷射[11]。但方法一对高压

* **收稿日期**:2017-10-13
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51379212);国家部委基金资助项目(3020401030301);海军工程大学博士研究生创新基金资助项目(XYBJ1611)
作者简介:周磊(1991—),男,江西乐平人,博士研究生,E-mail:15345811275@163.com;
杨昆(通信作者),男,副教授,博士,E-mail:150006224@qq.com

油泵的泵油能力以及系统中各部件的结构强度提出了很高的要求,而方法二则需重新设计结构复杂的喷油器,对喷油器的加工工艺要求很高。

众所周知,喷射压力对柴油机的燃烧过程有很大影响,喷射压力提高后,有利于改善雾化质量,有效解决 NO_x 和颗粒物质(Particulate Matter, PM)排放之间的矛盾[12],但在高压下会有大量的燃油喷入缸内,这就需要通过对喷油规律的调节来控制预混燃烧过程,比较理想的方式是靴形喷射和多次喷射模式。靴形喷射在喷油初始阶段速率小,随着活塞压缩过程的进行,缸内压力及温度逐渐升高,有利于均匀混合气的形成,在提高柴油机动力性和经济性上显示出很大的潜力[13]。预喷射是让一小部分燃油在主喷之前先进行预反应,进而提高缸内温度和压力,使得主喷射燃油的滞燃期缩短,一方面有助于提升柴油机的动力输出和经济性;另一方面能够抑制 NO_x 排放量和燃烧噪声的产生[14]。

因此,为充分挖掘取得柴油机经济性、动力性和排放性三者最佳平衡的潜力,本文在介绍超高压共轨系统工作原理的基础上,基于 GT-Power 软件建立了单缸超高压共轨柴油机的仿真模型,并利用试验验证了模型的准确性,而后通过模型分析了不同喷油速率、靴形喷油速率耦合不同预喷油量以及靴形喷油速率耦合不同预喷提前角对超高压共轨柴油机动力性、经济性以及燃烧排放特性的影响。

1　超高压共轨系统工作原理

超高压共轨系统总体结构如图 1 所示,整个系统由油箱、高压油泵、共轨管、电控增压器以及喷油器等部件组成。

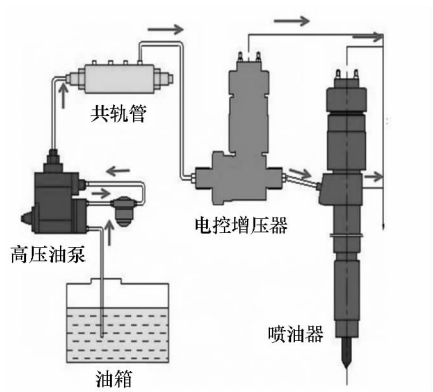


图 1　超高压共轨系统总体结构

Fig. 1　Overall structure of ultra-high pressure common-rail system

电控增压器作为系统的关键部件,其性能对系统实现超高压喷射和可变喷油速率喷射起着决定性作用,其结构示意如图 2 所示,内部设有增压活塞、电磁阀、单向阀以及油孔等部件。具体工作原理为:在部分负荷时,共轨管内燃油(基压油)通过单向阀和进油孔分别向增压室和控制室供油,保证增压活塞两端的压力相等,使增压活塞达到平衡态,此时向喷油器提供基压燃油。在高负荷时,电控增压器电磁阀开启,阀芯向线圈方向运动,关闭进油孔的同时使得阀芯头部与阀座脱离,高压燃油从出油孔流回油箱,导致增压活塞向增压室方向运动,增压室压力随即升高,此时向喷油器提供高压燃油。当电磁阀关闭后,来自共轨管的高压燃油通过进油孔流入控制室,同时在复位弹簧的作用下,增压活塞向基压室方向运动,最终又回到平衡态。

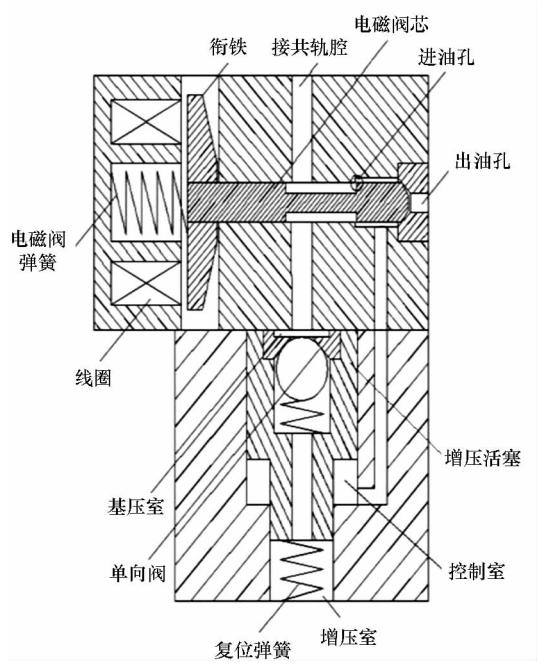


图 2　电控增压器结构

Fig. 2　Structure of electric-controlled pressure amplifier

超高压共轨系统不仅能在无增压喷射和增压喷射之间进行选择,而且能够实现喷油速率的柔性可调。图 3 为基于 AMESim 软件建立的超高压共轨系统模型,其中高压油泵和共轨管用理想的高压源替代。

通过调整模型中电控增压器电磁阀和喷油器电磁阀的开启时间,得出的 3 种喷油速率曲线如图 4 所示。当喷油时刻相对增压时刻滞后 0.5 ms 时,即先增压后喷油,近似于矩形喷油速率;当喷油时刻与增压时刻同步时,即增压与喷油同时开始,近似于斜坡形喷油速率;当喷油时刻相对增压时刻提前 0.5 ms 时,即先喷油后增压,相当于靴形喷油速率。

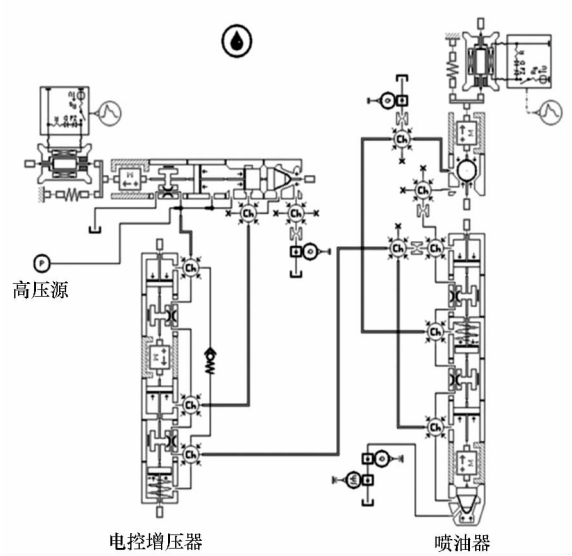


图 3　超高压共轨系统模型

Fig. 3　Model of ultra-high pressure common-rail system

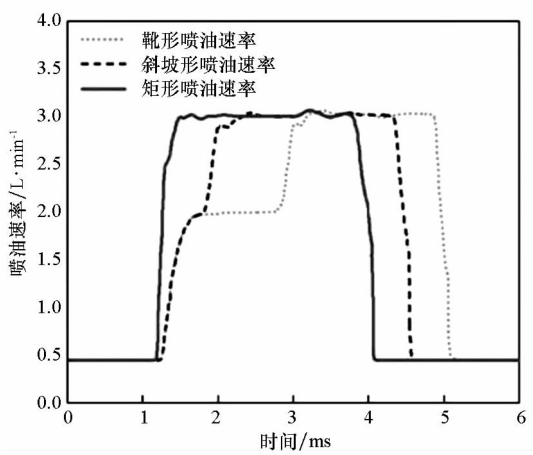


图 4　喷油速率曲线

Fig. 4　Fuel injection rate curves

2　超高压共轨柴油机仿真模型建立及验证

模型建立是开展仿真研究的基础，根据单缸超高压共轨柴油机的实际结构和参数，基于 GT-Power 软件建立的仿真模型如图 5 所示，该模型主要由曲轴箱模型、气缸模型、喷油器模型、进(排)气门模型、进(出)口边界模型以及相应连接管路组成。柴油机的主要参数如表 1 所示。

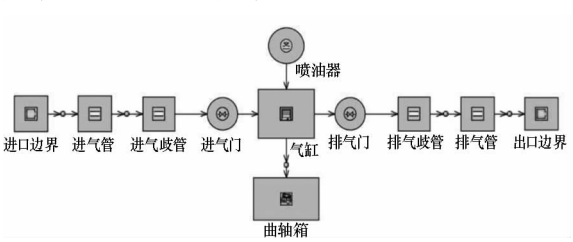


图 5　单缸超高压共轨柴油机仿真模型

Fig. 5　Simulation model of ultra-high pressure common-rail diesel engine of single cylinder

表 1　柴油机的主要参数

Tab. 1　Main parameters of diesel engine

参数	数值
转速/r · min^{-1}	1500
缸径/mm	130
冲程/mm	120
连杆长度/mm	170
压缩比	18.5
喷孔直径/mm	0.2
喷孔数量	6
喷孔长度/mm	1

在柴油机模型建立过程中，气缸模型中的燃烧和传热模型、喷油器模型的选择直接影响着整个模型的计算精度。为准确预测柴油机整体性能，选取了 EngCylCombDIJet 准维多区燃烧模型，在使用该模型时，由于其对喷射型线和时间非常敏感，因此要保证喷油型线和时间跟实际喷油器一致。传热模型选取了 Woschni 模型[15]，其采用准则关系式来描述燃烧室内燃气的放热过程。喷油器模型选取了 InjProfileConn 模型，在参数设置过程中，需要提供循环喷油量，根据系统中喷油器的实际需求，选择了最大喷油量作为输入。

为验证仿真模型的准确性，搭建了超高压共轨柴油机试验装置，其原理如图 6 所示，该装置主要由测功机及其控制系统、柴油机、单片机、缸压传感器、电荷放大器、油耗仪、燃烧分析仪、排放分析仪以及数据采集系统等组成。试验过程中，通过缸压传感器测量缸内压力，并经过电荷放大器放大，通过燃烧分析仪进行燃烧数据处理，通过排放分析仪采集排放物浓度，最后利用数据采集系统记录所测参数。试验工况同仿真工况保持一致。

图 7 为柴油机缸内压力仿真值与试验值对比图，由图可知，缸内压力的仿真值和试验值基本吻合，达到了较好的一致性，表明所建立的仿真模型较为合理，可以用来模拟实际情况。

排放物浓度仿真值与试验值的对比结果如表 2所示，由表可知，NO_x、soot(碳烟)、CO 以及 HC 排放物浓度的仿真值和试验值相近，误差均在 6% 以内，进一步验证了仿真模型的精确性。

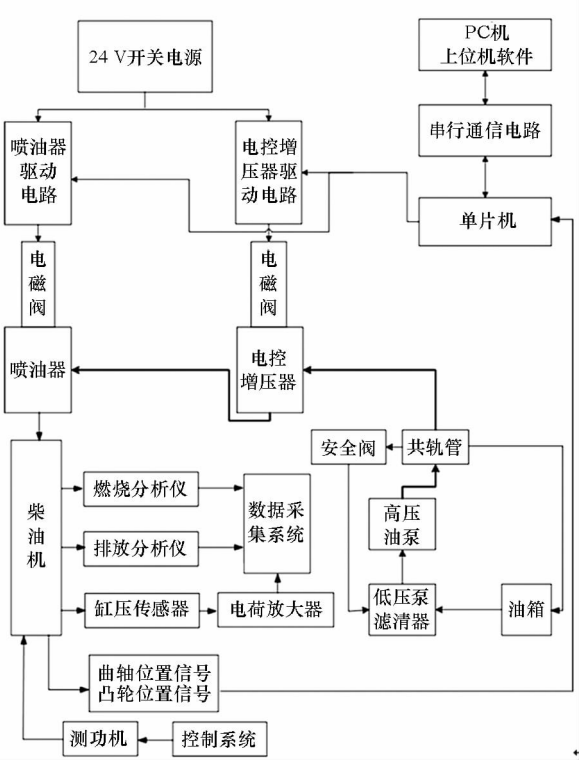


图 6　超高压共轨柴油机试验装置原理

Fig. 6　Experimental equipment principle of ultra-high pressure common-rail diesel engine

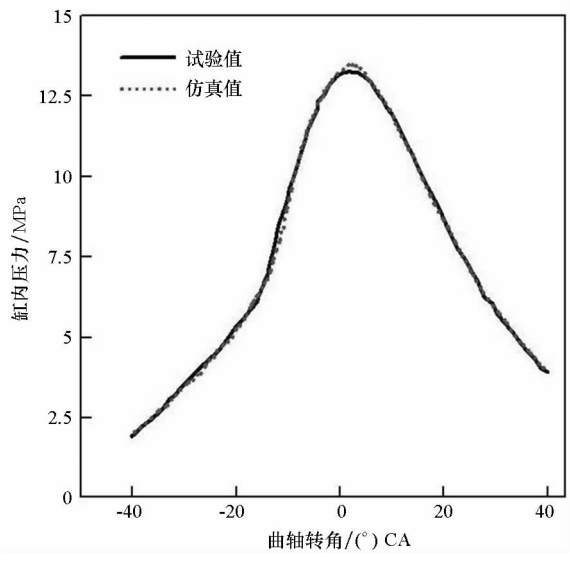


图 7　缸内压力仿真值与试验值对比图

Fig. 7　Cylinder pressure comparison between simulation value and experimental value

表 2　排放物浓度仿真值与试验值的对比结果

Tab. 2　Emission concentration comparison between simulation value and experimental value

排放物	仿真值	试验值
NO_x 排放/ppm	1130	1160
soot 排放/ppm	1874	1912
CO 排放/%	0.06	0.057
HC 排放/ppm	228	240

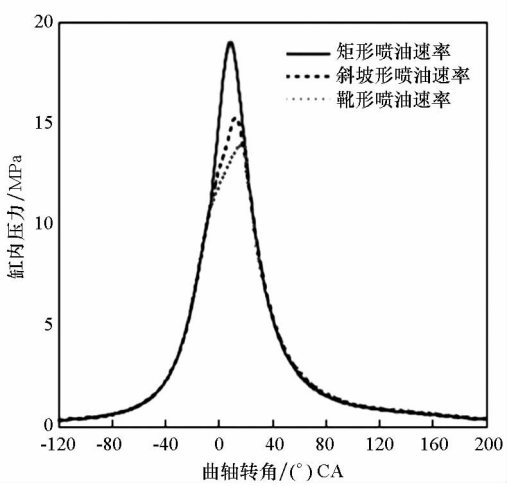
3　仿真结果与分析

3.1　不同喷油速率的影响

为分析不同喷油速率对超高压共轨柴油机性能的影响,将 3 种喷油速率曲线(见图 4)导入到柴油机仿真模型中,分别进行计算,得出的不同喷油速率对柴油机燃烧排放特性的影响如图 8 所示。

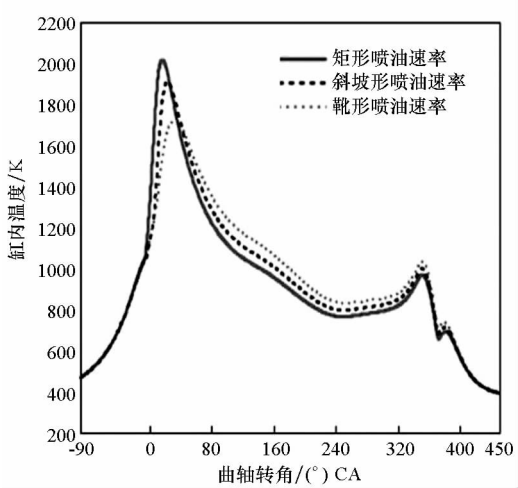
由图 8 可知,随着喷油速率由矩形变化到靴形,缸内压力和温度均逐渐降低,且达到各自峰值的时间均有所滞后。这是因为矩形喷油速率的增压时刻先于喷油时刻,其一开始就达到较高的喷射压力且一直保持到喷油结束,使得燃油与空气混合充分,缸内形成的可燃混合气增多,且混合速率明显高于其他两种喷油速率,造成了在速燃期内可燃混合气燃烧过程的加剧和燃烧始点的提前,故其缸内压力和温度最大,且到达峰值的时间最早。在排放物生成方面,随着喷油速率由矩形变化到靴形,NO_x 排放量逐渐降低,而 soot 排放量逐渐升高。这是因为 NO_x 主要在高温富氧条件下产生,随着喷油速率由矩形变化到靴形,即增压时刻的滞后,燃烧初期的压力强度降低、缸内温度降低,进而使得 NO_x 排放量逐渐降低。soot 产生条件是高温缺氧,具体则由生成、氧化过程的变化决定。随着增压时刻的滞后,一方面会造成油气混合时间不充分,喷油持续期更长,使得 soot 生成量最高;另一方面会造成缸内温度的下降,减缓 soot 的氧化,使得 soot 氧化量最低,故最终导致了 soot 排放量的升高。

不同喷油速率对柴油机动力性和经济性的影响如表 3 所示。由表可知,随着喷油速率由矩形变化到靴形,柴油机的功率(扭矩)逐渐上升,而油耗率逐渐减小,即柴油机的动力性和经济性均逐渐提升。相比于矩形喷油速率,靴形喷油速率时的功率(扭矩)上升了 6.55%,油耗率减小了 6.02%。这是由于采用靴形喷油速率时,一方面有助于减小滞燃期所准备的可燃混合气量,对控制参与速燃期燃烧的油量有一定作用,即可改善速燃;另一方面可以加强稳燃期内燃油与空气的混合,提高空气利用率,使得稳燃期内可以燃烧更多的燃油,进而改善燃烧。



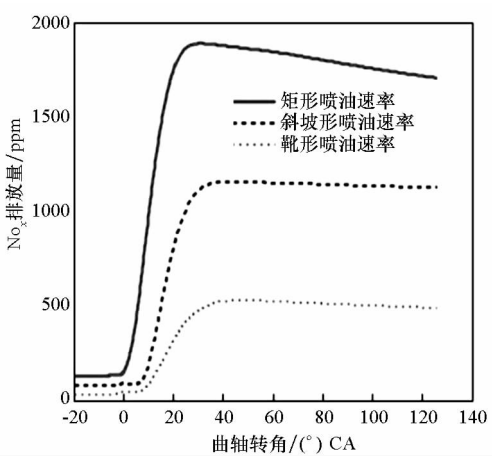
(a) 喷油速率对缸内压力的影响

(a) Effect of fuel injection rate on cylinder pressure



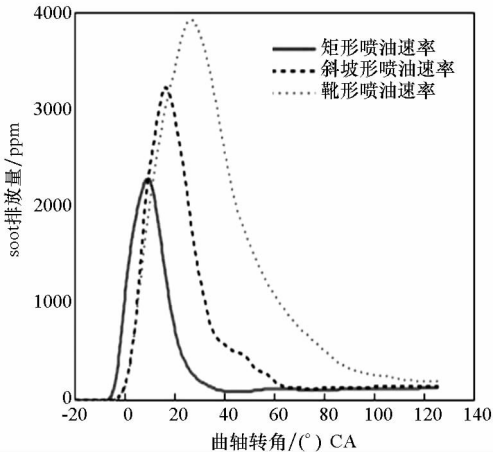
(b) 喷油速率对缸内温度的影响

(b) Effect of fuel injection rate on cylinder temperature



(c) 喷油速率对 NO_x 排放量的影响

(c) Effect of fuel injection rate on NO_x emissions



(d) 喷油速率对 soot 排放量的影响

(d) Effect of fuel injection rate on soot emissions

图 8　喷油速率对柴油机燃烧排放特性的影响

Fig. 8　Effect of fuel injection rate on diesel engine combustion and emission characteristics

表 3　喷油速率对柴油机动力性和经济性的影响

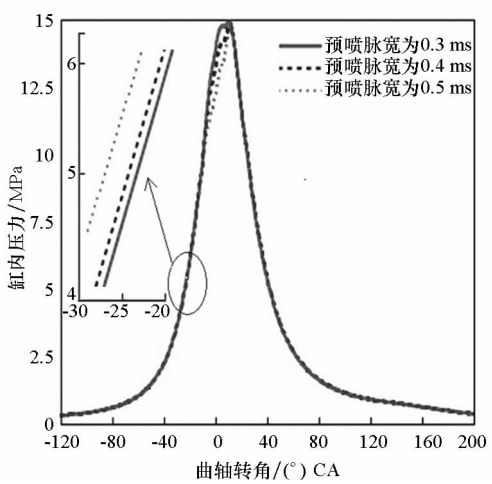
Tab. 3　Effect of fuel injection rate on diesel engine power and economy performance

喷油速率	功率/kW	扭矩/N·m	油耗率/[g·(kW·h)$^{-1}$]
矩形	27.5	175.08	222.5
斜坡形	28.2	179.54	217.0
靴形	29.3	186.54	209.1

3.2　靴形喷油速率耦合不同预喷油量的影响

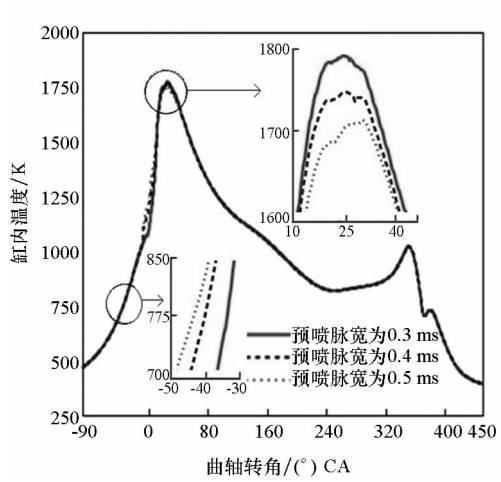
为分析靴形喷油速率耦合不同预喷油量对超高压共轨柴油机性能的影响,针对 3 种预喷脉宽(0.3 ms、0.4 ms 以及 0.5 ms),分别进行计算,得出的靴形喷油速率耦合不同预喷油量对柴油机燃烧排放特性的影响如图 9 所示。

由图 9 可知,随着预喷油量的增加,预喷阶段缸内压力和温度升高,而主喷阶段缸内压力和温度降低。这是由于在主喷燃油燃烧之前,预喷燃油开始燃烧,预喷油量越多,燃烧越充分,故预喷阶段缸内压力和温度越高。与此同时,预喷阶段缸内压力和温度的升高会缩短主喷阶段燃油的滞燃期,降低预混合燃烧与扩散燃烧的比率,使得燃烧持续期增加,主喷燃烧更加柔和,故主喷阶段的缸内压力和温度降低。在排放物生成方面,随着预喷油量的增加,NO_x 排放量逐渐降低,而 soot 排放量逐渐升高。这是因为预喷油量的增加会使得主喷阶段的滞燃期缩短、缸内温度降低,同时主喷油束也因卷吸了预喷燃油而抑制了放热率的增大,故 NO_x 排放量逐渐降低。soot 排放量逐渐升高的原因在于预喷油量的增加使得预喷阶段消耗



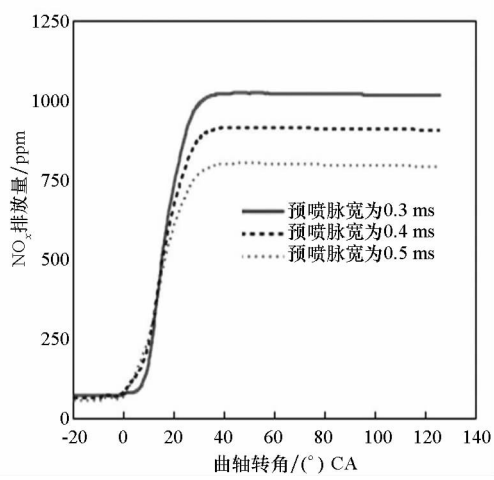
(a) 预喷油量对缸内压力的影响

(a) Effect of pilot injection fuel mass on cylinder pressure



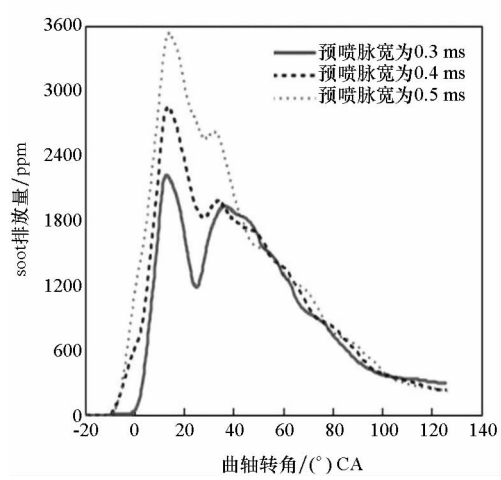
(b) 预喷油量对缸内温度的影响

(b) Effect of pilot injection fuel mass on cylinder temperature



(c) 预喷油量对 NO_x 排放量的影响

(c) Effect of pilot injection fuel mass on NO_x emissions



(d) 预喷油量对 soot 排放量的影响

(d) Effect of pilot injection fuel mass on soot emissions

图 9　预喷油量对柴油机燃烧排放特性的影响

Fig. 9　Effect of pilot injection fuel mass on diesel engine combustion and emission characteristics

的氧含量增大,从而造成了主喷阶段氧浓度下降,一方面会明显缩短主喷阶段燃油的滞燃期,减小燃料与空气的混合时间;另一方面会使得燃烧后期的 soot 不能得到很好的氧化。

靴形喷油速率耦合不同预喷油量对柴油机动力性和经济性的影响如表 4 所示。由表可知,随着预喷油量的增加,柴油机的功率(扭矩)逐渐下降,而油耗率逐渐增大,即柴油机的动力性和经济性均逐渐恶化。相比于预喷脉宽为 0.3 ms,预喷脉宽为 0.5 ms 时的功率(扭矩)下降了 4.14%,油耗率增大了 4.35%。这是由于随着预喷油量的增加,一方面使得预喷阶段放热增加,压缩负功增加,造成了主喷阶段燃油量和放热量的减少;另一方面使得燃烧持续期增加,造成了混合气燃烧的等容度减小,燃烧效率下降,故最终导致了柴油机动力性和经济性的恶化。

表 4　预喷油量对柴油机动力性和经济性的影响

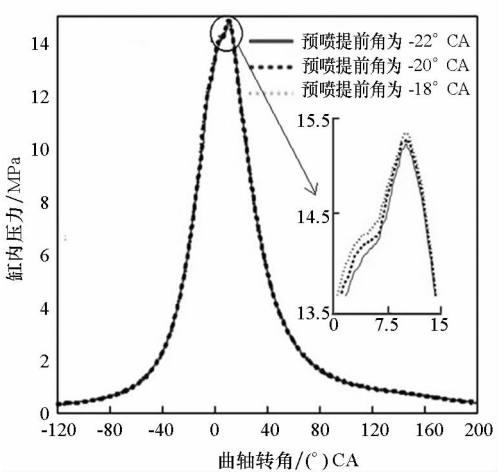
Tab. 4　Effect of pilot injection fuel mass on diesel engine power and economy performance

预喷脉宽/ms	功率/kW	扭矩/N·m	油耗率/[g·(kW·h)$^{-1}$]
0.3	31.4	199.91	195.2
0.4	30.6	194.82	199.9
0.5	30.1	191.63	203.7

3.3　靴形喷油速率耦合不同预喷提前角的影响

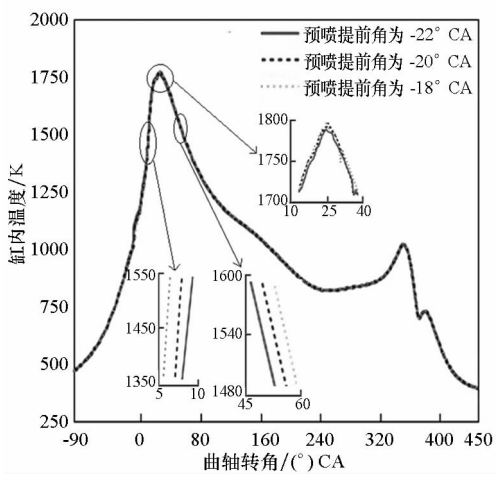
为分析靴形喷油速率耦合不同预喷提前角对超高压共轨柴油机性能的影响,针对 3 种预喷提前角(-22° CA、-20° CA 以及 -18° CA),分

别进行计算,得出的靴形喷油速率耦合不同预喷提前角对柴油机燃烧排放特性的影响如图 10 所示。



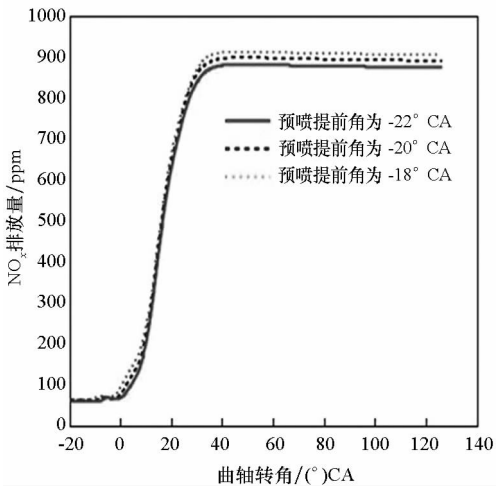
(a) 预喷提前角对缸内压力的影响

(a) Effect of pilot injection advance angle on cylinder pressure



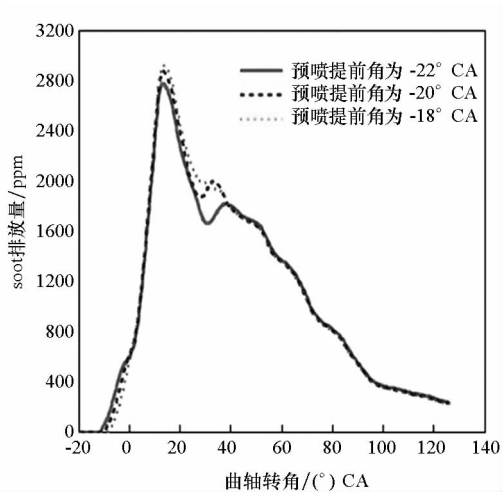
(b) 预喷提前角对缸内温度的影响

(b) Effect of pilot injection advance angle on cylinder temperature



(c) 预喷提前角对 NO_x 排放量的影响

(c) Effect of pilot injection advance angle on NO_x emissions



(d) 预喷提前角对 soot 排放量的影响

(d) Effect of pilot injection advance angle on soot emissions

图 10 预喷提前角对柴油机燃烧排放特性的影响

Fig. 10 Effect of pilot injection advance angle on diesel engine combustion and emission characteristics

由图 10 可知,随着预喷提前角的增加,缸内压力和温度均逐渐降低,且达到各自峰值的时间均有所提前。这是因为当预喷提前角增加时,此时缸内初始温度较低,尽管滞燃期增大,但其燃烧始点仍然较为提前,并且远离上止点,预喷阶段燃烧速率较低,减弱了主喷阶段燃油燃烧的活化作用,故导致了缸内压力和温度的降低。缸内压力和温度达到各自峰值的时间均有所提前的原因是当预喷提前角增加时,缸内燃油提前进行预热,吸收的热量相对较多,达到着火点的时间提前,而且由于燃料混合充分,燃烧更加迅速平滑,因此缩短了缸内压力和温度达到各自峰值的时间。在排放物生成方面,随着预喷提前角的增加,NO_x 排放量和 soot 排放量均逐渐降低。NO_x 排放量逐渐降低是因为预喷提前角的增加,一方面使得在预喷阶段的预喷射燃油被喷入挤流区,部分燃油不能完全燃烧,预喷阶段燃烧放热量减少,缸内温度下降;另一方面使得在主喷阶段缸内温度不能快速达到高温条件,主燃烧反应的温度也降低。soot 排放量逐渐降低则是由于预喷提前角增加后,预喷阶段燃烧时间延长,使得燃油与缸内空气有足够的混合时间,提高了空气利用率,形成了更多的均匀可燃混合气,导致主喷阶段燃油燃烧更加充分造成的。同时由图可以发现,随着预喷提前角的增加,燃烧和排放参数的变化均不明显,这是由于预喷油量的限制造成的。

靴形喷油速率耦合不同预喷提前角对柴油机动力性和经济性的影响如表 5 所示。由表可知,

随着预喷油提前角的增加,柴油机的功率(扭矩)逐渐下降,而油耗率逐渐增大,即柴油机的动力性和经济性均逐渐恶化。相比于预喷提前角为 -18° CA,预喷提前角为 -22° CA 时的功率(扭矩)下降了 2.89%,油耗率增大了 2.95%。这是由于预喷提前角的增加,一方面使得燃油在压缩上止点前很远的位置上就开始燃烧,抑制了柴油机活塞的压缩过程,另一方面使得放热重心推迟,增加了燃烧持续期,导致混合气燃烧的等容度减小,燃烧效率降低,故最终造成了柴油机动力性和经济性的恶化。

表 5　预喷提前角对柴油机动力性和经济性的影响

Tab. 5　Effect of pilot injection advance angle on diesel engine power and economy performance

预喷提前角/(°)CA	功率/kW	扭矩/N·m	油耗率/[g·(kW·h)$^{-1}$]
-22	30.2	192.28	202.6
-20	30.6	194.82	199.5
-18	31.1	198.01	196.8

4　结论

1)超高压共轨系统能够通过加装在共轨管和喷油器之间的电控增压器将燃油压力放大至超高压状态,并且通过调整电控增压器电磁阀和喷油器电磁阀的开启时间实现喷油速率的柔性可调。

2)随着喷油速率由矩形变化到靴形,柴油机缸内压力、温度以及 NO_x 排放量均逐渐降低,而 soot 排放量逐渐升高,且靴型喷油速率可使得柴油机获得最大的功率(扭矩)和最低的油耗率。

3)靴形喷油速率耦合较小的预喷油量可以使柴油机获得更好的动力性、经济性和燃烧特性,但同时也会导致 NO_x 排放量的升高。

4)靴形喷油速率耦合较大的预喷提前角有助于改善柴油机排放特性,但受到预喷油量的限制,效果并不明显。

参考文献(References)

[1] Hwang J, Qi D H, Jung Y J, et al. Effect of injection parameters on the combustion and emission characteristics in a common-rail direct injection diesel engine fueled with waste cooking oil biodiesel [J]. Renewable Energy, 2014, 63: 9 - 17.

[2] Yan F, Wang J. Common rail injection system iterative learning control based parameter calibration for accurate fuel injection quantity control [J]. International Journal of Automotive Technology, 2011, 12(2): 149 - 157.

[3] Allocca L, Andreassl L, Ubertini S. Enhanced splash models for high pressure diesel spray[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007, 129(2): 609 - 622.

[4] Agarwal A K, Srivastava D K, Dhar A, et al. Effect of fuel injection timing and pressure on combustion, emissions and performance characteristics of a single cylinder diesel engine[J]. Fuel, 2013, 111: 374 - 383.

[5] Liu Y, Zhang Y T, Qiu T, et al. Optimization research for a high pressure common rail diesel engine based on simulation[J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(5): 625 - 636.

[6] Lee T W, Reitz R D. The effects of split injection and swirl on a HSDL diesel engine equipped with a common rail injection system [J]. SAE Transactions, 2003, 112(3): 508 - 521.

[7] 李煜辉,崔可润,朱国伟. 柴油机超高增压的电控技术[J]. 内燃机学报, 2002, 20(6): 541 - 545.
LI Yuhui, CUI Kerun, ZHU Guowei. The electronic control technology on ultra-high supercharged diesel engine [J]. Transactions of Csice, 2002, 20(6): 541 - 545. (in Chinese)

[8] Shinohara Y, Takeuchi K, Hhrrmann O E, et al. 3000 bar common rail system[J]. MTZ worldwide eMagazine, 2011, 72(1): 4 - 9.

[9] Ghsemi A, Barron R M, Balzvhandar R, et al. Spray-induced air motion in single and twin ultra-high injection diesel sprays[J]. Fuel, 2014, 121: 284 - 297.

[10] Matsumoto S, Date K, Taguchi T, et al. The new Denso common-rail diesel solenoid injector[J]. Auto Tech Review, 2013, 2(11): 24 - 29.

[11] Leinhard R, Parche E M, Alvarez-Avila C, et al. Pressure-amplified common rail system for commercial vehicles[J]. MTZ worldwide, 2009, 70(5): 10 - 15.

[12] Park S H, Suh H K, Lee C S. Nozzle flow and atomization characteristics of ethanol blended biodiesel fuel [J]. Renewable Energy, 2010, 35(1): 144 - 150.

[13] 冷先银,隆武强,冯立岩,等. 喷射率对柴油机性能和排放影响数值模拟研究[J]. 大连理工大学学报, 2011, 51(2): 180 - 187.
LENG Xianyin, LONG Wuqiang, FENG Liyan, et al. Numerical simulation research into effects of injection rates on performances and emissions of diesel engine[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011, 51(2): 180 - 187. (in Chinese)

[14] 张洪涛,邵昆,姜峰,等. 预喷射对柴油机排放性能的仿真研究[J]. 装备制造技术, 2014(6): 39 - 42, 50.
ZHANG Hongtao, SHAO Kun, JIANG Feng, et al. Simulation study on pilot injection for diesel engine exhaust performance[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2014(6): 39 - 42, 50. (in Chinese)

[15] Heywoode J B. Internal combustion engine fundamentals[M]. New York, USA: McGraw-Hill Inc, 1988.