

液压自由活塞柴油机缸内气体流动数值仿真^{*}

罗国良 张付军 赵振峰 郭 锋

(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 基于所研制的单活塞式液压自由活塞柴油机原理样机,对缸内气体流动规律进行了数值仿真。研究结果表明,缸内气流运动规律受活塞运动规律的影响,与传统内燃机相比,HFPDE缸内气流运动规律如下:压缩冲程初始阶段,由于活塞运动速度较小,缸内平均气体速度较小;压缩冲程后期,活塞在上止点附近运动速度增大,缸内气体加速径向流出燃烧室,平均径向速度增大,挤流效果增强;膨胀冲程早期,活塞较大的运动速度使得平均径向速度大幅增大,逆挤流效果也明显增强;上止点附近挤流和逆挤流受活塞瞬时速度影响,随着相同活塞位置所对应的活塞运动速度的增大,平均径向速度增大,挤流和逆挤流效果增强。

关键词: 自由活塞发动机 三维模拟 缸内气流 数值仿真

中图分类号: TK417 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)02-0047-06

引言

内燃机缸内气体流动和换气过程是内燃机工作过程中各个物理化学过程的基础,是控制柴油机燃油和空气混合及燃烧过程的主要因素之一。它决定了可燃混合气的浓度场和温度场,同时也影响缸内传热过程以及有害排放物的生成。液压自由活塞柴油机(Hydraulic free piston diesel engine, HFPDE)由于其结构和工作原理与传统内燃机存在较大差异^[1-5],活塞运动规律与传统内燃机也有很大不同^[6-7],活塞位移曲线关于上止点呈现明显的不对

称性^[8],在上止点附近具有更快的活塞运动速度^[9-10],这些特点都会对缸内的气体流动产生影响。因此,本文研究 HFPDE 活塞运动规律对缸内气体流动的影响规律。

1 HFPDE 工作原理及样机

1.1 工作原理

HFPDE 工作原理如图 1 所示,主要由内燃机部分、液压泵部分和压缩部分组成。内燃机部分为气口-气门式直流扫气二冲程柴油机,液压泵部分按柱塞式液压泵工作原理运行,压缩部分利用高压蓄能

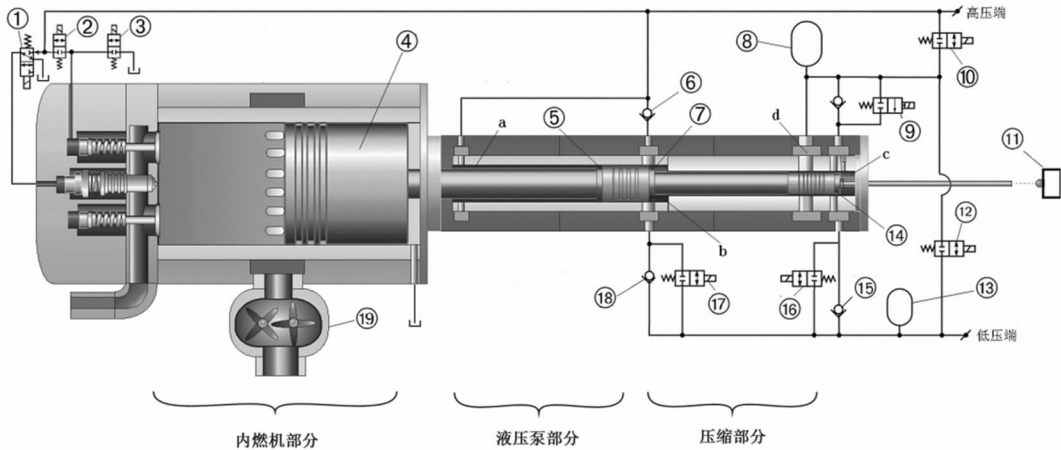


图 1 HFPDE 工作原理图
Fig.1 Configuration of HFPDE

1. 控制喷油用三通电磁阀 2. 控制排气门开电磁阀 3. 控制排气门关电磁阀 4. 动力活塞 5. 泵和回弹活塞 6. 压缩单向阀 7. 泵活塞
8. 压缩蓄能器 9. 频率控制阀 10. 蓄能器补油阀 11. 位移传感器 12. 蓄能器泄油阀 13. 低压蓄能器 14. 压缩活塞 15. 低压单向阀
16. 低频活塞回位阀 17. 失火活塞回位阀 18. 吸油单向阀 19. 罗茨泵

器中的液压能推动活塞组件完成压缩冲程。动力活塞、泵活塞和压缩活塞通过活塞杆刚性连接为活塞组件,活塞组件在压缩蓄能器压力作用下和缸内气体作用下做往复运动,在活塞组件往复运动过程中将燃料燃烧的能量转化为液压能输出^[11-13]。

1.2 原理样机及试验平台

根据上述原理设计了液压自由活塞柴油机的原理样机并搭建了试验平台,如图 2 所示,通过活塞位移传感器测试了活塞的运动规律,主要设计参数如表 1 所示。

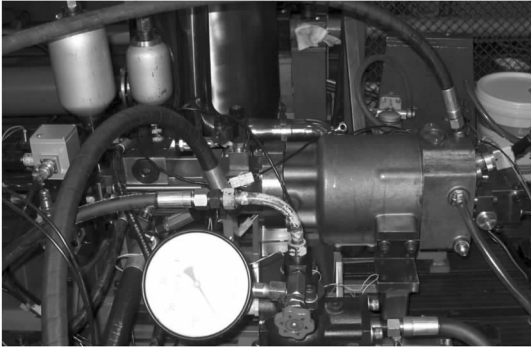


图 2 HFPDE 原理样机及试验平台
Fig. 2 HFPDE prototype and test bed

表 1 原理样机主要技术参数
Tab. 1 HFPDE specifications

参数	数值
气缸直径/mm	98.5
活塞冲程/mm	119 ~ 135
进气压力/MPa	0.12
工作频率/Hz	0 ~ 33
压缩系统压力/MPa	14 ~ 25
低压供油压力/MPa	1.0
输出流量/(L·min ⁻¹)	0 ~ 47
额定输出压力/MPa	25
输出功率/kW	15

2 仿真模型的建立

2.1 计算网格

图 3 为 HFPDE 燃烧室的几何形状。CFD 仿真的一个重要前提条件是对研究对象几何形状的精确描述^[14],在保证对仿真计算结果影响不大的前提

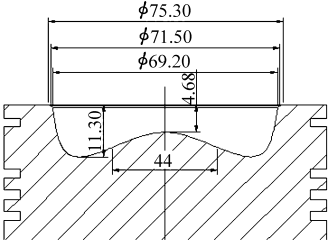


图 3 燃烧室几何形状
Fig. 3 Combustion chamber shape

下,为了避免在网格划分时产生网格尺度的巨大差异,对 HFPDE 的燃烧室几何形状进行了一些等效简化处理,主要有:①略去了气缸套与活塞之间的配合间隙,活塞与缸套之间完全密封。②略去了某些过渡圆角、倒角等。

根据仿真模型校核结论,燃烧室网格尺寸取 0.1 mm,燃烧室网格如图 4 所示,其他区域可适当加粗,这样可得到既保证计算精度又减少计算时间的最佳计算网格。

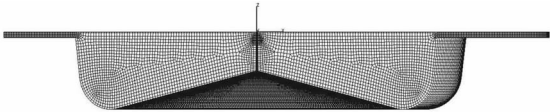


图 4 燃烧室网格
Fig. 4 Combustion chamber mesh

另外,FIRE 软件中动网格是依据曲轴转角生成的,但是 HFPDE 没有曲轴转角概念,解决方法为:依据循环工作时间换算为等效转速,同时将活塞位移数据按时间间隔等分,定义一个循环为 360°转角,将 360°转角按时间等分,因此每个活塞位移都对应一个等效曲轴转角,然后将活塞位移数据通过文本文件输入软件。

2.2 边界条件与求解器设置

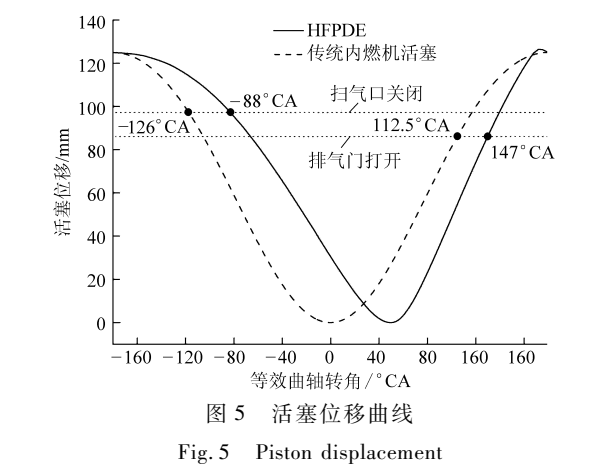
数值仿真中,进气涡流通过给定压缩始点的涡流/转速比确定,各壁面温度使用软件推荐值。压缩初始压力和温度由一维仿真结果提供。时间步长依据仿真模型校核结果取 0.25°CA,相当于 2.4×10^{-5} s;等效转速依据循环时间定义为 2 083 r/min;流场求解采用 SIMPLE 算法,松弛因子采用计算稳定的最大值;计算时质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程都必须求解,湍流模型采用 $k-\epsilon$ 模型;收敛准则采用标准残差,所有方程都取 1×10^{-4} ,最大迭代步数为 100 次,最小迭代步数为 10 次。

3 缸内气体流动数值仿真

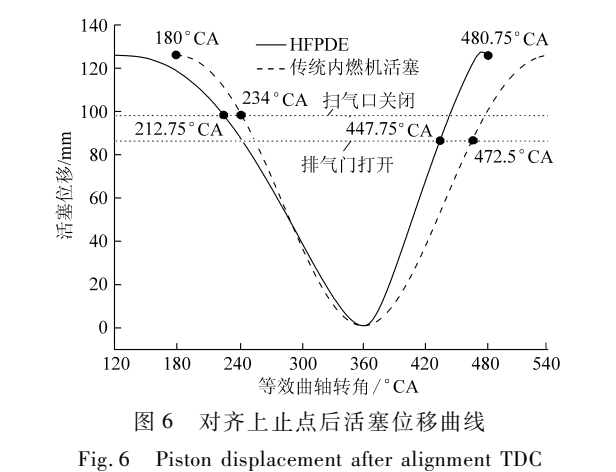
HFPDE 内燃机部分采用柴油机的工作原理,因此,其燃烧过程和传统柴油机的差异一定与缸内的气流相关^[15]。从传统内燃机缸内气流的分析可知,涡流是进气系统使进入气缸的进气流具有初始角动量而产生的。由于在压缩冲程期间的涡流动量损失受活塞运动规律不同的影响较小,因而,HFPDE 缸内气流运动规律的特点最有可能在挤流中找到。

图 5 为试验测试获得的 HFPDE 活塞运动规律与传统内燃机的活塞位移曲线对比。为了保证两种活塞运动规律的缸内气体流动 CFD 计算结果具有可比性,对 HFPDE 的自由行程长度进行了调整,使两种发动机的实际行程相同。仿真分析中两者对应

的进气口关闭位置和排气门打开位置相同,在将时间轴转换为等效曲轴转角后,HFPDE 对应的进气口关闭时刻为 -88°CA ,排气门开启时刻为 147°CA ;传统内燃机活塞运动规律对应的进气口关闭时刻为 -126°CA ,排气门开启时刻为 112.5°CA 。



如图 6 所示,根据 CFD 软件设置要求,同时为方便对比分析两种活塞运动型线的仿真结果,将两种活塞运动型线的上止点对应的转角都定义为 360°CA 。数值仿真计算从进气口关闭点开始,排气门开启前结束,因此,在重新定义上止点对应的等效曲轴转角后,HFPDE 仿真计算转角区间为 $212.75 \sim 447.75^{\circ}\text{CA}$,传统内燃机活塞运动规律的仿真计算转角区间为 $234 \sim 472.5^{\circ}\text{CA}$ 。



3.1 活塞运动型线分析

如图 7 所示,对比两者的活塞速度曲线可知,与传统内燃机活塞运动规律相比,HFPDE 的活塞位移曲线和速度曲线关于上止点呈现明显的不对称性^[16-20]。相同循环工作时间条件下,HFPDE 压缩冲程耗时更长,膨胀冲程耗时更短,其压缩冲程中的活塞速度较膨胀过程小,但是,在上止点附近 HFPDE 活塞的运动速度较传统内燃机活塞运动规律要大,有改善缸内气流组织的预期。

图 8 和图 9 为等效曲轴转角下活塞速度和加速

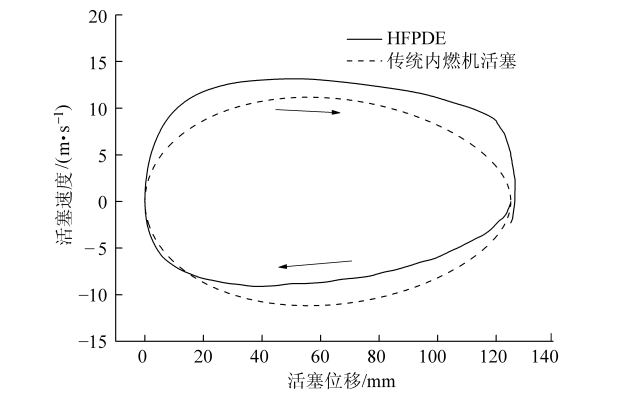


图 7 活塞速度-位移曲线对比
Fig. 7 Comparison curve of piston velocity - displacement

度对比。从图中可以看出,在上止点附近,HFPDE 活塞具有较大的加速度和速度,而上止点附近正是组织缸内气流的重要时段,为了研究上止点附近活塞较大的速度和加速度对缸内气流组织的影响,对两种活塞运动规律的缸内气体流动的数值仿真结果进行分析。

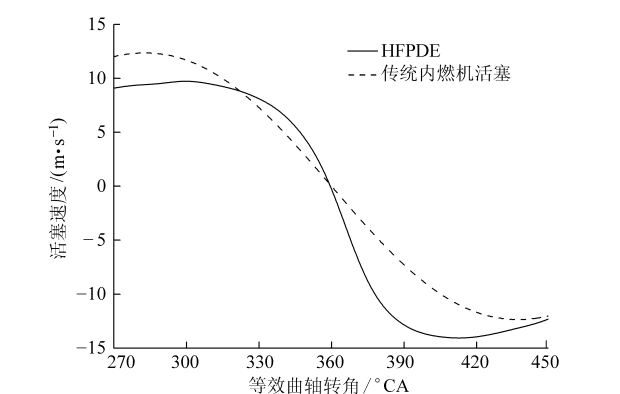


图 8 等效曲轴转角下活塞速度对比
Fig. 8 Comparison of piston velocity in equivalent crank angle situation

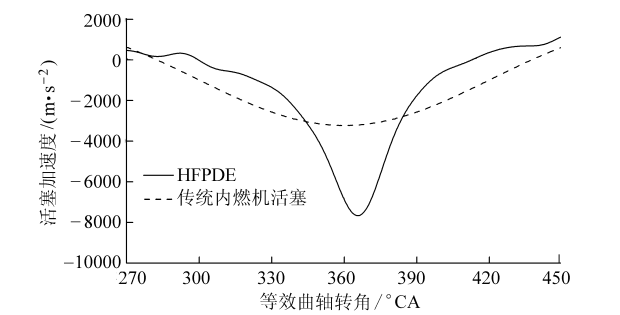


图 9 等效曲轴转角下活塞加速度对比
Fig. 9 Comparison of piston acceleration in equivalent crank angle situation

3.2 结果分析

(1) 缸内气流运动特点

图 10 和图 11 为两种活塞运动规律的缸内气体质量平均湍流速度和平均湍流动能的变化情况。由图可知,在压缩冲程初始阶段,由于传统内燃机活塞运动规律在压缩冲程的活塞速度比 HFPDE 高,因此

其缸内气体平均湍流速度较大。

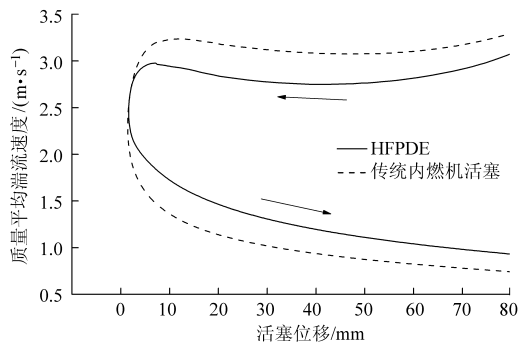


图 10 缸内气体质量平均湍流速度对比
Fig. 10 Average in-cylinder gas mass turbulence velocity

从图 11 平均湍流动能变化情况可知,就两种活塞运动规律而言,压缩过程中,缸内气体平均湍流动能都呈现先减小后增加的趋势。这是因为在压缩过程初始段,缸内气体没有形成统一的涡流和滚流运动,小尺度的涡流和滚流之间的相互摩擦较强,使得气体流动的脉动能量迅速减小,湍流动能随之变小;在压缩过程后期,活塞不断向上止点方向运动,活塞在靠近上止点时,大尺度滚流破碎成湍流,因而湍流动能有所增大。同时,由于 HFPDE 在压缩冲程大部分时间内活塞速度都低于传统内燃机的活塞速度,因而其在压缩冲程阶段的平均湍流动能较小。

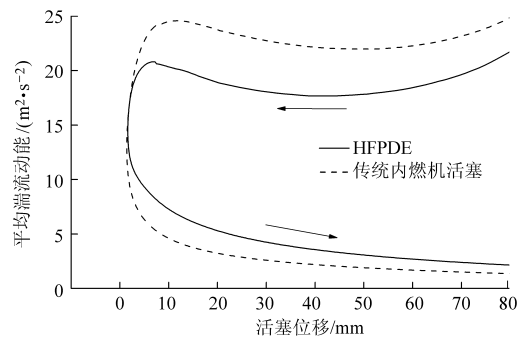


图 11 缸内气体平均湍流动能对比
Fig. 11 Average in-cylinder gas turbulence kinetic energy

(2)缸内挤流变化规律

挤流是由于活塞靠近上止点使得气流受迫流经燃烧室产生,挤流的作用主要体现在压缩冲程的最后阶段,因为此时活塞和缸盖之间的间隙迅速减少,而且此时的挤流很大程度上取决于活塞的瞬时速度。图 12 为两种活塞运动规律缸内挤流的仿真预测。

由图 12 缸内气体的平均径向速度(挤流)曲线可知,在压缩冲程开始阶段,两种活塞运动规律的平均径向速度几乎等于零,随着活塞向上止点方向运动,气缸容积不断减小,气体在径向流进或流出燃烧室,平均径向速度逐渐增大,挤流也相应增大。由于在压缩冲程的初始段,传统内燃机的活塞运动速度略高,因此其平均径向速度略高于 HFPDE。在压缩

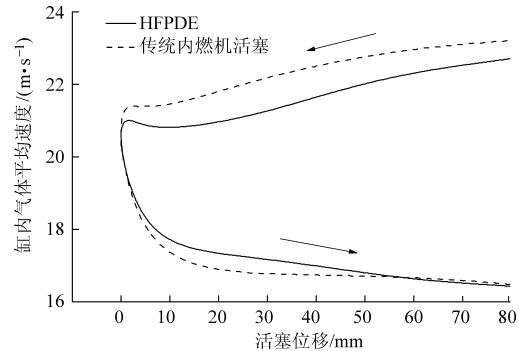


图 12 缸内气体平均径向速度(挤流)
Fig. 12 Average radial velocity of in-cylinder gases (squish)

冲程后期,由于 HFPDE 的活塞运动速度高于传统内燃机,因此,在压缩冲程靠近上止点附近,HFPDE 的挤流效果更好一些,平均径向速度对称式活塞运动规律高 20% 左右。对于膨胀冲程早期产生的逆挤流,由于 HFPDE 没有曲柄连杆机构约束,活塞运动速度明显高于传统内燃机,因此,其逆挤流效果也明显好,平均径向速度的极值比传统发动机高 45% 左右。

而且,由于活塞速度在上止点处反向,并且活塞加速度指向下止点,在挤流段的上方会产生一个低压区,气体从活塞燃烧室回流至气缸区域。当涡流水平衰弱时,这个反转挤流对于燃烧的后期就会显得很重要。并且,HFPDE 膨胀冲程快速的特点也会加强这一效果,这些都将有利于缸内燃烧。

(3)活塞速度对缸内挤流的影响

上述数值仿真分析结果表明,HFPDE 在上止点附近较大的活塞运动速度对缸内挤流具有明显的提升效果,为了进一步验证这一结论,对 HFPDE 不同活塞运动速度对挤流的影响进行数值仿真。图 13 为不同压缩压力下的 HFPDE 活塞位移曲线,由图可知,随着压缩压力的提高,HFPDE 在压缩冲程的速度随之增大。从图 14 可以看出,活塞在上止点附近的运动速度也随压缩压力的提高而增大。

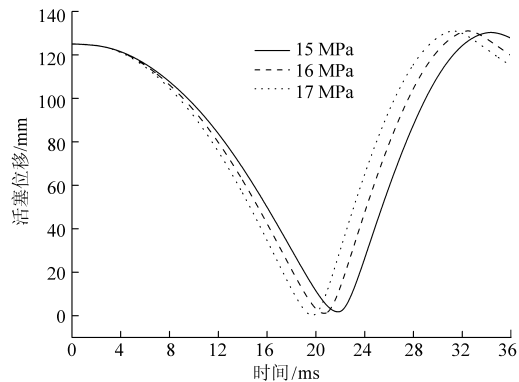


图 13 不同压缩压力下活塞位移曲线
Fig. 13 Piston displacement curve at different compression pressures

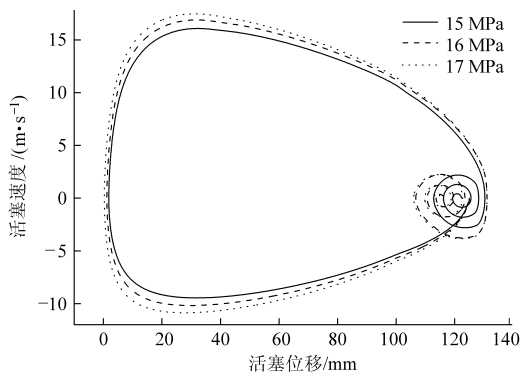


图 14 不同压缩压力下活塞位移-速度曲线

Fig. 14 Piston displacement – velocity cure at different compression pressures

图 15 为不同压缩压力下的缸内气体平均径向速度曲线,由数值仿真结果可知,随着压缩压力的提高,压缩冲程上止点附近的气体平均径向速度有所增加,即缸内挤流效果有所增强。这是由于在压缩冲程上止点附近相同活塞位置所对应的活塞瞬时速度有所增大,加速了气体径向流出燃烧室运动,从而增强了挤流效果。

4 结论

(1) HFPDE 缸内气流运动规律与传统内燃机活塞运动规律相似,但由于活塞运动速度的不同存

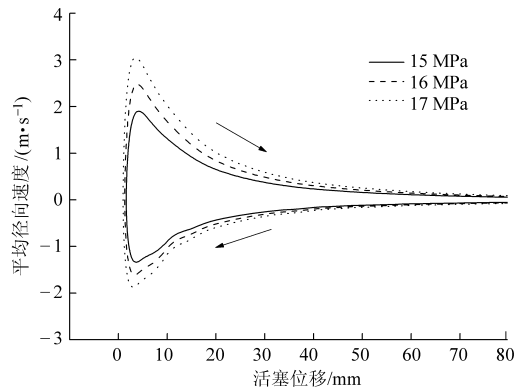


图 15 不同压缩压力下的缸内气体平均径向速度

Fig. 15 Average radial velocity of the in-cylinder gases at different compression pressures

在如下差异:与对称式活塞运动规律相比,HFPDE 压缩冲程初始阶段的活塞速度较低,因此其平均气体湍流速度较小,平均湍流动能较小,平均气体速度也要低一些;在上止点附近,由于 HFPDE 的活塞速度较高,导致缸内气体平均径向速度增大,挤流和逆挤流增强。

(2) HFPDE 缸内气流运动规律与活塞瞬时速度相关,随着上止点附近相同活塞位置对应的活塞速度的提高,气体平均径向速度有所增加,对缸内挤流和逆挤流具有明显的提升效果。

参 考 文 献

- 1 杨华勇,夏必忠,傅新. 液压自由活塞发动机——未来的动力之星[J]. 中国机械工程,2001,3(3):353–357.
Yang Huayong, Xia Bizhong, Fu Xin. Hydraulic free piston engine (HFPE)—It is the power star in the future[J]. China Mechanical Engineering,2001,3(3): 353–357. (in Chinese)
- 2 周盛,徐兵,杨华勇,等. 双活塞式液压自由活塞发动机仿真研究[J]. 机械工程学报,2005,41(4):92–96.
Zhou Sheng, Xu Bing, Yang Huayong, et al. Simulation on dual hydraulic free piston engine[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2005,41(4):92–96. (in Chinese)
- 3 夏必忠,汪劲松,傅新,等. 双活塞液压自由活塞发动机原理样机的研制及其压缩比[J]. 机械工程学报,2006,42(3):117–122.
Xia Bizhong, Wang Jinsong, Fu Xin, et al. Development of a dual piston hydraulic free piston engine prototype and its compression ratio[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2006,42(3):117–122. (in Chinese)
- 4 杨华勇,夏必忠,傅新. 液压自由活塞发动机的发展历程及研究现状[J]. 机械工程学报,2001,37(2):1–7.
Yang Huayong, Xia Bizhong, Fu Xin. Hydraulic free piston engine evolution process and recent studies[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(2):1–7. (in Chinese)
- 5 赵振峰,赵长禄,张付军. 一种新型混合动力系统:液压自由活塞发动机整体推进系统[J]. 兵工学报,2009,30(6):773–778.
Zhao Zhenfeng, Zhao Changlu, Zhang Fujun. A new type of hybrid-driven power system: integrated propulsion system based on hydraulic free piston engine[J]. Acta Armamentarii, 2009,30(6):773–778. (in Chinese)
- 6 刘嘉,黄英,张付军,等. 液压自由活塞发动机活塞运动规律动态仿真研究[J]. 内燃机工程,2011,32(3):88–92.
Liu Jia, Huang Ying, Zhang Fujun, et al. Research on piston movement dynamical simulation of hydraulic free piston engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering,2011,32(3):88–92. (in Chinese)
- 7 吴维,苑士华,荆崇波,等. 液压自由活塞发动机工作过程仿真模型研究[J]. 兵工学报,2011,32(9):1 059–1 064.
Wu Wei, Yuan Shihua, Jing Chongbo, et al. Research on working process simulation model of hydraulic free-piston engine[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(9):1 059–1 064. (in Chinese)
- 8 吴维,苑士华,胡纪滨,等. 液压自由活塞发动机的活塞运动不对称特征研究[J]. 兵工学报,2012,33(7):800–814.
Wu Wei, Yuan Shihua, Hu Jibin, et al. Study on the asymmetry characteristics of piston motion of the hydraulic free piston engine [J]. Acta Armamentarii, 2012,33(7):800–814. (in Chinese)
- 9 Zhao Zhenfeng, Zhang Fujun, Huang Ying, et al. An experimental study of the hydraulic free piston engine[J]. Applied Energy, 2012,99(11):226–233.

- 10 苑士华,吴维,胡纪滨,等. 单活塞液压自由活塞发动机压缩冲程特性[J]. 机械工程学报,2010,46(18):134-138.
Yuan Shihua, Wu Wei, Hu Jibin, et al. Compression stroke characteristics of single piston hydraulic free-piston engine[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2010,46(18):134-138. (in Chinese)
- 11 Mikalsen R, Roskilly A P. A review of free-piston engine history and applications [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(14-15): 2 339-2 352.
- 12 Achten P A J, van Den Oeven, Jeroen Potma, et al. Horsepower with brains: the design of the CHIRON free piston engine[C]. SAE Paper 2000-01-2545, 2000.
- 13 夏必忠,周华,傅新,等. 液压自由活塞发动机的节能方式研究[J]. 农业机械学报,2001,32(6):8-10.
Xia Bizhong, Zhou Hua, Fu Xin, et al. Research on energy-saving mode of hydraulic free piston engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2001,32(6):8-10. (in Chinese)
- 14 Mikalsen R, Roskilly A P. A computational study of free-piston diesel engine combustion [J]. Applied Energy, 2009,86(7-8):1 136-1 143.
- 15 Tikkanen S, Vilenius M. Control of a dual hydraulic free piston engine[J]. International Journal of Vehicle Autonomous Systems, 2006, 4(1):3-23.
- 16 Wu W, Yuan S H, Hu J B, et al. Design approach for single piston hydraulic free piston diesel engines [J]. Frontiers of Mechanical Engineering in China, 2009, 4(4): 371-377.
- 17 王谦,徐飞,刘春生,等. 自由活塞初速度对微发动机燃烧特性的影响[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2006, 27(6): 520-523.
Wang Qian, Xu Fei, Liu Chunsheng, et al. Effect of initial velocity on combustion character in micro HCCI free-piston engine [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2006,27(6):520-523. (in Chinese)
- 18 Farmer H O. Free-piston compressor-engines [J]. Nature, 1947,159: 413.
- 19 Tikkanen S, Lammila M, Herranen M, et al. First cycles of the dual hydraulic free-piston engine[C]. SAE Paper 2000-01-2546, 2000.
- 20 吴维,苑士华,胡纪滨,等. 液压自由活塞发动机止点位置控制研究[J]. 兵工学报,2013,34(5):513-518.
Wu Wei, Yuan Shihua, Hu Jibin, et al. Dead center control of hydraulic free-piston engines[J]. Acta Armamentarii,2013, 34(5):513-518. (in Chinese)

Numerical Simulation on In-cylinder Gas Motion of Hydraulic Free Piston Diesel Engine

Luo Guoliang Zhang Fujun Zhao Zhenfeng Guo Feng

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the development of the single-piston hydraulic free piston diesel engine prototype, numerical simulation on in-cylinder gas motion was studied. The study results showed that the in-cylinder gas motion was influenced by the piston motion. Compared with the traditional internal combustion engine, the in-cylinder gas motion characteristics of hydraulic free piston engine are as follows: in early compression stroke, the average velocity of in-cylinder gas is smaller due to the smaller piston velocity; in late compression stroke, the piston movement velocity increases near the TDC, in-cylinder gas accelerated radial flow out from the combustion chamber, the average radial velocity increases, the squish enhancement; in early expansion stroke, the higher piston movement velocity lead to the average radial velocity substantial increases and the inverse squish significantly enhanced in this period. The piston instantaneous velocity influenced the squish and inverse squeeze nearby TDC, with the piston velocity increasing at the same piston position, the average radial velocity increasing, squish and reverse squish enhancement.

Key words: Free piston engine 3-D simulation In-cylinder gas motion Numerical simulation