

文章编号:1674-8190(2018)04-611-06

燃烧室尺寸优化下的航空发动机排放性能研究

潘钟健^{1,2}, 周凯², 程立志^{1,3}

(1. 长沙学院 机电工程学院, 长沙 410003)

(2. 山河智能装备股份有限公司 航空研究院, 长沙 410100)

(3. 中南大学 机电工程学院, 长沙 410083)

摘要: 航空活塞发动机的排放问题始终备受关注,其燃烧室的尺寸对发动机排放性能具有一定的影响,以某航空活塞发动机为研究对象,从燃烧喷雾模型出发,利用 Fire 建立其燃烧室模型,在现有燃烧室几何参数的基础上提出改进,利用新的方案进行仿真分析,在某一瞬态下对比新旧方案的氮氧化合物和碳烟排放。结果表明:新的燃烧室结构下发动机氮氧化合物排放降低 23%,碳烟排放降低 2.8%,总体排放下降;将修正后的燃烧室装配到发动机上,经实验台架测试后,发动机功率和扭矩不变,排放物明显降低,该设计方案可行。

关键词: 活塞发动机;燃烧室;几何参数;排放;台架测试

中图分类号: V234

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2018.04.021

Research on Aero Engine Emission Based on Combustion Chamber Size Optimization

Pan Zhongjian^{1,2}, Zhou Kai², Cheng Lizhi^{1,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Changsha University, Changsha 410003, China)

(2. Aviation Institute, Sunward Intelligent Equipment Co., Ltd., Changsha 410100, China)

(3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The emission of aero piston engines has been a focused problem. The combustion chamber size is of certain effect on engine emissions performance. A piston engine is taken as the object of study. Fire is used to establish a type of engine combustion chamber model from the perspective of combustion spray model. Improvement based on geometric parameters of existing combustion chamber are proposed; and simulation analysis is carried out under the new program; the nitrogen and oxygen compounds and carbon emissions between the old and new program are compared in a transient state. The results show that the emission of nitrogen and oxygen compounds under the new combustion chamber structure is reduced by 23%, the carbon emission is reduced by 2.8%, and the overall emission is decreased. After installing the modified combustion chamber into the engine and maintaining the engine power and torque unchanged, a reduction in emission is clearly shown, which proves that the design program is feasible.

Key words: piston engine; combustion chamber; geometric parameters; emission; bench test

0 引言

活塞发动机是目前地面交通工具、通用航空装

备的主要动力^[1],特别是燃油经济性好的重油(航空煤油或者柴油)发动机,其排放问题越来越受到人们的关注^[2],尤其是针对即将开放的通用航空市场。通用航空近几年增长迅猛,截止到2017年,美国的通用航空飞机数量超过了300 000架,一些轻型飞机从航空汽油发动机更换成航空重油发动机,但排放污染问题仍一直存在。国内外在发动机的

收稿日期:2018-05-23; 修回日期:2018-07-01

基金项目:长沙市科技计划项目(K1705041)

通信作者:程立志,chenglizhi@csu.edu.cn

排放上进行了大量研究,提出了多种控制排放的方法,但绝大部分都是从发动机后处理、喷油控制策略等方面进行研究。国外, M. Capobianco 等^[3]对带有旁通阀的涡轮增压器进行了非定常流动性能试验,研究排放物的生成规律; T. Tang 等^[4]研究了柴油氧化催化剂和颗粒物过滤之间的关系以改善排放; N. Stamoudis 等^[5]对重油蒸发燃料液滴模型的对流传热进行了适当处理,精确模拟了燃烧排放物的生成。国内, 杨帅等^[6]设计了一套电子 EGR 系统, 确保不同工况下的 EGR 率, 来降低 NO_x 的排放; 楼狄明等^[7]、孙万臣等^[8]从氧化传感器和微粒捕集器方面对排放进行了大量研究, 以改善柴油排放颗粒物的生成; 倪计民等^[9]采用可变涡轮增压和废气循环的方法对排放进行改善; 邹宪等^[10]对不同喷油策略下的排放和油耗进行了研究。

本文从燃烧室的基本参数出发, 通过改变结构参数, 对发动机某一瞬态下的排放进行研究, 总结不同燃烧室结构参数对排放的影响, 以期对发动机的排放研究提供参考。

1 喷雾数学模型建立

在直喷发动机缸内, 高压喷入的重油会发生一系列物理变化, 例如重油液滴的蒸发、破碎、碰撞、耗散等。为了更好地研究燃烧过程中的重油特性, 针对上述过程对其建立数学模型。

1.1 重油液滴蒸发模型

采用 Dukowicz 模型建模, 并做如下假设: ①整个重油液滴内部的温度相等; ②球形液滴; ③液滴周围具有稳态气相流场; ④液滴表面准静态; ⑤气液相交处热力学平衡。

根据以上假设, 重油液滴被喷入气缸内, 重油液滴吸收的能量主要用于自身加热和蒸发, 方程为

$$m_d c_{pd} \frac{dT_d}{dt} = L \frac{dm_d}{dt} + \alpha A_s (T_\infty - T_s) \quad (1)$$

式中: m_d 为液滴的质量; c_{pd} 为重油定压比热容; L 为液滴的蒸发潜热; α 为对流传热系数; A_s 为重油液滴表面积。

根据热力学平衡条件, 质量流的表达方程为

$$\frac{dm_d}{dt} = Q \frac{f_{vs}}{q_s} \quad (2)$$

式中: f_{vs} 为蒸发质量流量; q_s 为重油液滴表面热流密度; Q 为气流传给液滴的热量。

$$\frac{f_{vs}}{q_s} = \frac{\rho \beta}{\kappa} \left(\frac{1}{1 - \mu_{vs}} \right) \frac{Le}{c_\rho} \left[\frac{h_{sv} - h_s}{\mu_{v,sv} - \mu_{vs}} - h_{sv} + h_{gs} \right] \quad (3)$$

设 $Le=1$ 且质量传递系数:

$$B_y = \frac{\mu_{v\infty} - \mu_{vs}}{1 - \mu_{vs}} \quad (4)$$

由单滴关联性理论得到, Nusselt 数值由下式所得

$$N_\mu = 2 + 0.6 R_e^{1/2} P_r^{1/3} \quad (5)$$

式中: R_e 和 P_r 可通过实验获得。

综合式(1)~式(5), 用 Nusselt 数替代对流传热系数 α , 重油液滴从周围吸收的热量为

$$Q = D_d \pi \lambda N_\mu (T_\infty - T_s) \quad (6)$$

式中: D_d 为液滴的直径; λ 为波长。

1.2 重油破碎模型

重油喷入气缸后发生破碎, 初级破碎发生在距高压喷嘴较近的区域, 次级破碎发生区域较远。选用 Wave 模型估算液滴半径。

$$r = 2\pi\sigma B / \rho_2 U^2 \quad (7)$$

式中: B 为量级常数 1; U 为气液两相运动速差; σ 为液滴表面张力。

实际计算公式为

$$\begin{cases} r = BA & (BA < a) \\ r = \min \begin{cases} (3\pi a^2 U / 2\Omega)^{0.33} \\ (3a^2 \Lambda / 4)^{0.33} \end{cases} & (BA > a) \end{cases} \quad (8)$$

式中: Λ 为对应波长; a 为振幅临界值; Ω 为最大扰动波增长速率。

当不稳定波振幅大于临界值, 重油液滴发生破碎分裂。

1.3 碰壁模型

由于活塞式发动机体积较小, 其工作的气缸直径亦较小, 重油喷射过程中, 不可避免地会与气缸壁面发生碰撞, 碰撞后产生多种运动轨迹, 例如粘附、反弹、贴壁运动等。

采用 walljet 液滴碰壁模型, 并假设液滴碰壁后, 壁面液膜对液滴运动不产生影响, 碰撞后的运动形式根据参数 We 来判断, 液滴撞击壁面后粒径

大小与韦伯数相关,其方程为

$$\begin{cases} d_1 = d_0 & (We < 50) \\ d_1 = d_0 \cdot f(We_{\perp, in}) & (50 \leq We \leq 300) \\ d_1 = 0.2d_0 & (We > 300) \end{cases} \quad (9)$$

式中: d_1 为撞壁前液滴直径; d_0 为撞壁后液滴直径。

当 We 值低于 50 时,用反射碰壁模型;当 We 值大于 50 时,采用射流碰壁模型。

1.4 湍流扩散模型

重油在喷入缸体内受到气体湍流场作用,湍流涡团的无规则运动使得重油液滴受到一种干扰力,湍流扩散模型主要是用来分析这种随机干扰运动的。液滴越小,湍流场对其作用越明显,液滴的运动轨迹也不光滑,采用 Gosman 提出的模型,在气体平均速度 u_g 上附加一个脉动 u'_i 来描述湍流扩散对液滴的扰动效应,其方程为

$$u'_i = \left(\frac{2}{3}k\right)^{1/2} \cdot \text{sign}(2Rn_i - 1) \cdot \text{erf}^{-1}(2Rn_i - 1) \quad (10)$$

式中: Rn_i 为速度分量随机数(0~1); k 为液滴的湍动能; erf^{-1} 高斯函数反函数。

重油液滴与气体湍流作用的时间 t_{turb} 为

$$t_{\text{turb}} = \min\left\{C_r \frac{k}{\epsilon}, C_r \frac{k^{3/2}}{\epsilon} \frac{1}{|u_g + u'_i - u_d|}\right\} \quad (11)$$

式中: C_r, C_r 均为经验系数; k 为湍流脉动能; ϵ 为湍流能量耗散率; u'_i 为气流脉动; u_g 为气体速度; u_d 为重油液滴的运动速度。

重油液滴在湍流团中的作用时间 $t > t_{\text{turb}}$ 时,液滴进入下一湍流涡团^[11]。

2 燃烧室模型的建立与分析

将重油燃烧的喷雾燃烧模型应用到燃烧分析软件中,Fire 软件是发动机燃烧模拟方面的专业软件,由美国 AVL 公司推出,目前大部分发动机研发公司都在使用该软件对发动机燃烧进行模拟^[12]。根据发动机公司提供的发动机参数,输入到 Fire 相应的模块中,例如喷油孔直径、上止点间隙等,但燃烧室的形状需要发动机公司提供具体图纸获得。在 AVL Fire 软件中,模拟燃烧过程是从

进气门关闭到排气门开启为止,该发动机提供的原始数据是进气门关闭角度为下止点后 36° ,排气门开启角度为下止点前 48° ,按通用设计原则,定义上止点为 720°CA ,下止点为 540°CA ,燃烧模拟过程是从 576°CA 到 848°CA ,设定发动机转速为 $2\,300\text{ r/min}$ 。

在进行精确的燃烧模拟之前,需要对燃烧室进行网格划分,燃烧过程中,某曲轴转角下的动态网格,由 Fire 软件对其进行网格划分,如图 1 所示。

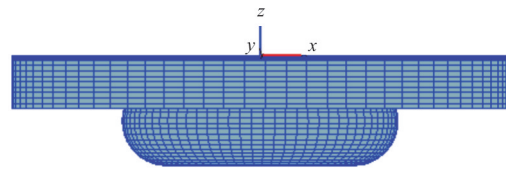


图 1 740 °CA 时的燃烧室模型网格

Fig. 1 Meshes of combustion chamber under 740 °CA

为了对燃烧室进行优化设计,在原有方案的基础上,提供新的优化方案,具体数据如表 1 所示。

表 1 燃烧室基本尺寸

Table 1 Basic size of combustion chamber

方案	最大直径/mm	缩口直径/mm	中间深度/mm	最大深度/mm
原始	51.3	42.4	8.1	17.0
方案一	49.0	38.0	8.1	17.0
方案二	49.0	38.0	9.5	19.5

燃烧室基本尺寸示意图如图 2 所示。为了研究哑铃型燃烧室基本尺寸对排放的影响,在优化时,选定两组方案,一组改变燃烧室的最大直径和缩口直径,另一组在前一组的基础上继续改变中间深度和最大深度。对两组设计方案进行燃烧数值模拟分析。

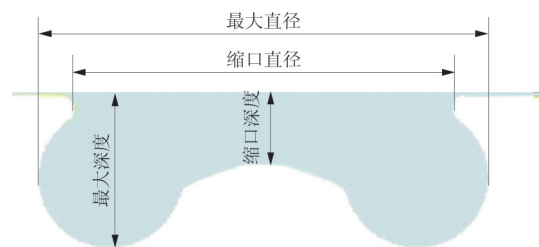


图 2 燃烧室基本尺寸

Fig. 2 Geometry and size of combustion chamber

对三种方案进行燃烧分析,并进行对比。由于燃烧主要在活塞达到上止点附近进行,在活塞下行 10°CA 时出现最大压力和最大温度,由于 NO_x 和Soot的生成与温度有直接关系,选定 730°CA 作为分析的瞬时状态,该状态下 NO_x 和Soot排放量的多少直接反映最终排放物的多少,因此对该角度进行分析,缸内温度场如图3所示。

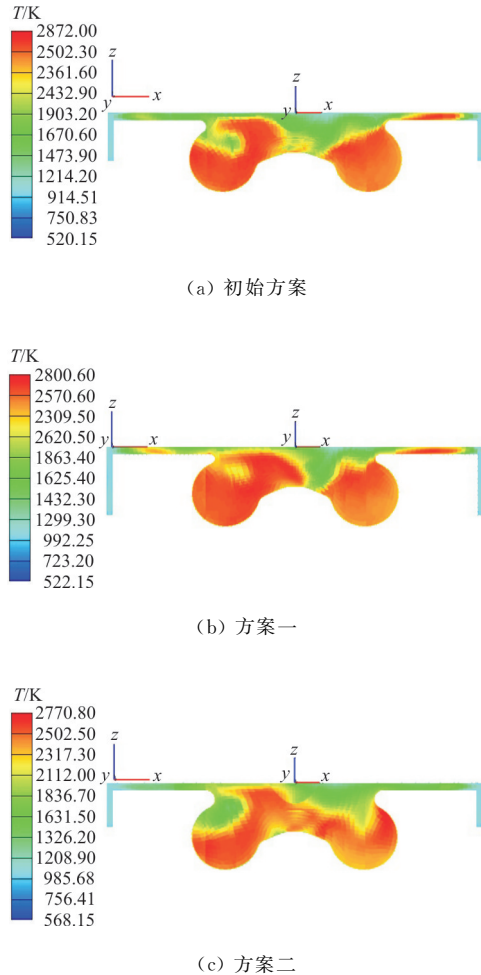


图3 三种方案 730°CA 时的温度场

Fig. 3 Temperature field under 730°CA of three different schemes

从图3可以看出:燃烧室的结构尺寸发生变化后,缸内温度值也发生了变化,火焰传播规律基本没有发生较大的变化,最大温度出现位置基本和火焰传播路径相同;方案一的温度较原方案降低了 71.4 K ,方案二较原方案温度降低了 101.2 K ,温度的降低对 NO_x 和Soot的生成起到了一定的抑制效果。

730°CA 下的 NO_x 浓度分布情况如图4所

示,用质量分数来表示其生成速率和浓度分布,分布位置与缸内温度场基本相似,温度是 NO_x 生成的主要原因。

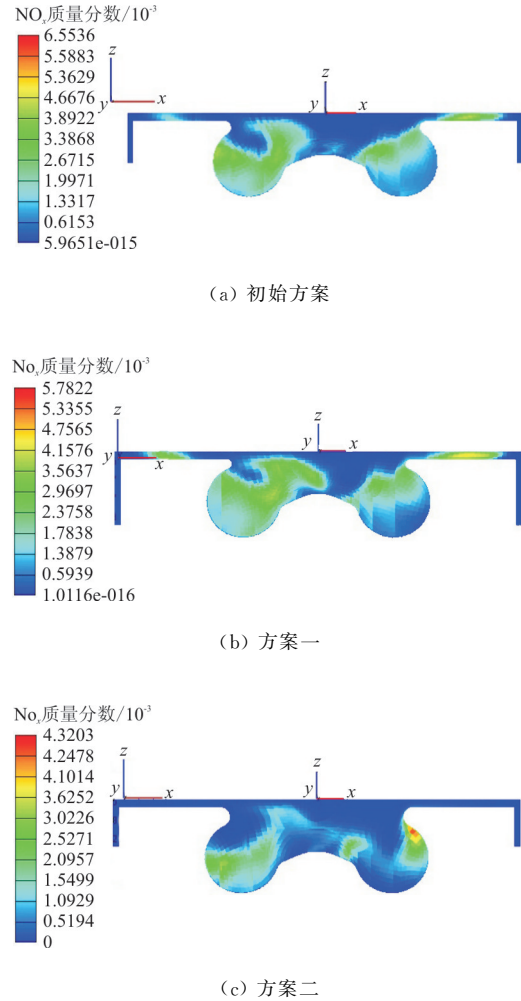
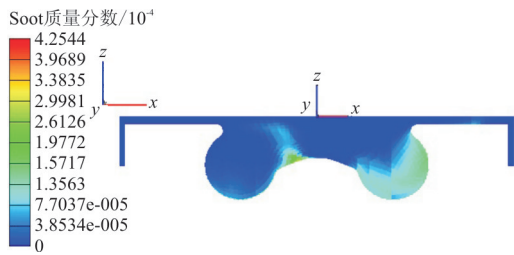


图4 三种方案 730°CA 时的 NO_x 浓度分布

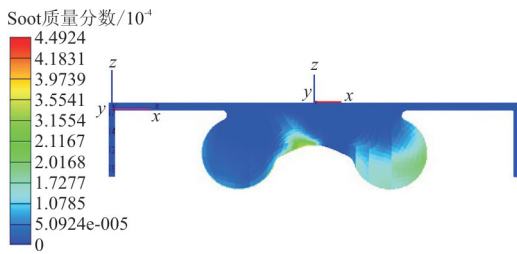
Fig. 4 Concentration distribution of NO_x under 730°CA of three different schemes

从图4可以看出: NO_x 化合物最大生成量有所下降,方案一在原方案基础上下降了 10.7% ,方案二在原方案基础上下降 23% ,总体下降趋势明显。

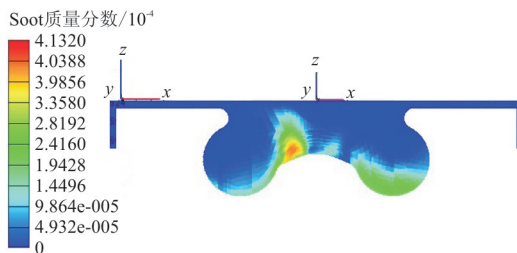
对 730°CA 下修改前后的方案进行Soot生成进行分析,如图5所示,用质量分数表示Soot的生成速率和浓度分布情况。Soot生成主要发生在扩散燃烧阶段,因此其分布与温度场分布略有不同,从图5可以看出:方案一在原方案基础上Soot的最大浓度上升了 5.6% ,方案二在原方案基础上Soot的最大浓度下降了 2.8% 。



(a) 初始方案



(b) 方案一



(c) 方案二

图 5 三种方案 730 °CA 时的 Soot 浓度分布
Fig. 5 Concentration distribution of Soot under 730 °CA of three different schemes

综上所述,方案二带来的 NO_x 排放下降明显, Soot 生成也略有降低,从总的结果来看,排放趋于降低趋势。

3 实 验

按方案二的燃烧室尺寸进行制造,完成装配后进行台架测试,接入 AVL 分析仪,实验如图 6 所示。

对发动机进行测试,记录发动机基本参数和排放数据,记录数据如表 2 所示。



图 6 发动机排放测试

Fig. 6 Engine emission test

表 2 不同工况下的排放数据

Table 2 Emission data under different operating conditions

转速/ rpm	功率/ kW	扭矩/ (N·m)	不透光烟度/m ⁻¹		NO _x /ppm	
			原机	方案二	原机	方案二
2 700	71	250	0.25	0.24	863	685
2 500	62	235	0.17	0.16	671	528
2 300	43	180	0.07	0.07	478	375
2 100	30	136	0.02	0.02	298	232

从表 2 可以看出:发动机功率扭矩基本没有发生变化,方案二所对应的排放与原机测得数据确有下降趋势,下降数据与仿真计算的数据基本相符,表明仿真计算方法真实可信。

4 结 论

(1) 缩小发动机燃烧室的最大直径尺寸和缩口尺寸能降低发动机缸内燃烧温度,能降低 NO_x 的生成,但 Soot 生成量有所增加。最大直径尺寸降低 4.4%,温度降低 71.4 K,NO_x 生成降低 10.7%,Soot 的最大生成量上升了 5.6%。

(2) 燃烧室最大深度和中间深度也能对缸内温度以及排放产生影响,中间深度增加 17.2%,最大深度增加 14.7%,NO_x 生成降低 23%,Soot 最大生成降低 2.8%。

(3) 对修改后的燃烧室进行台架实验,发现发动机功率和扭矩基本无变化,但排放物生成确有减少,证明燃烧室的优化是可行。

参考文献

- [1] 王建华, 熊兴旺, 于津涛. 柴油机 DPF 后颗粒物排放研究[J]. 内燃机工程, 2018, 39(1): 81-85.
Wang Jianhai, Xiong Xingwang, Yu Jintao. A study on diesel particle number emission downstream of DPF[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2018, 39(1): 81-85. (in Chinese)
- [2] 贾和坤, 刘胜吉, 尹必峰. EGR 对轻型柴油机缸内燃烧及排放性能影响的可视化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 44-49.
Jia Hekun, Liu Shengji, Yin Bifeng. Visualization of influence of ERG on combustion process and emission performance for light-duty diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5): 44-49. (in Chinese)
- [3] Capobianco M, Marelli S. Experimental analysis of unsteady flow performance in an automotive turbocharger turbine fitted with a waste-gate valve[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2011, 225(8): 1087-1097.
- [4] Tang T, Cao D, Zhang J, et al. Experimental study of catalyzed diesel particulate filter with exhaust fuel injection system for heavy-duty diesel engines[R]. SAE 2014-01-1496, 2014.
- [5] Stamoudis N, Chryssakis C, Kaiktsis L. A two-component heavy fuel oil evaporation model for CFD studies in marine diesel engines[J]. Fuel, 2014, 115(1): 145-153.
- [6] 杨帅, 李秀元, 应启夏. EGR 率对柴油机排放特性影响的试验[J]. 农业工程学报, 2006, 35(5): 28-33.
Yang Shuai, Li Xiuyuan, Ying Qijia. EGR rates optimization rule and experimental study about influence of EGR rates on diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 35(5): 28-33. (in Chinese)
- [7] 楼狄明, 林浩强, 谭丕强. 氧化催化转化器对柴油机颗粒物排放特性的影响[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2015, 43(6): 888-893.
Lou Diming, Lin Haoqiang, Tan Piqiang. Effects of diesel oxidation catalyst technology on characteristics of particle from a diesel engine[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2015, 43(6): 888-893. (in Chinese)
- [8] 孙万臣, 刘高, 郭亮. 微粒捕集器对高压共轨柴油机超细微粒捕集特性[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2016, 46(1): 133-139.
Sun Wanchen, Liu Gao, Guo Liang. Efficiency of DPF on ultrafine particles in a common-rail diesel engine[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2016, 46(1): 133-139. (in Chinese)
- [9] 倪计民, 刘越, 石秀勇. 可变喷嘴涡轮增压及废气再循环系统改善柴油机排放性能[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 82-88.
Ni Jimin, Liu Yue, Shi Xiuyong. Variable nozzle turbine combined with Venturi exhaust gas recirculation system improving emission performance of diesel engines[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(16): 82-88. (in Chinese)
- [10] 邹宪, 郑尊清, 王许. 燃料物性和喷油策略对船用柴油机性能和排放影响的模拟研究[J]. 内燃机工程, 2017, 38(6): 15-22.
Zou Xian, Zheng Zunqing, Wang Hu. Numerical study on effects of fuel properties and injection strategies on performance and emissions of a marine diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2017, 38(6): 15-22. (in Chinese)
- [11] 曹东晓, 张俊, 郭恒杰. DPF 主动再生柴油喷雾氧化的试验及模拟研究[J]. 内燃机工程, 2017, 38(2): 59-66.
Cao Dongxiao, Zhang Jun, Guo Hengjie. Experimental and simulation study on diesel spray oxidation during active regeneration of DPF[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2017, 38(2): 59-66. (in Chinese)
- [12] 吴亦宁, 汪洋, 关帅. 对置式液压自由活塞发动机的 HCCI 燃烧过程仿真分析[J]. 内燃机工程, 2016, 37(2): 26-32.
Wu Yining, Wang Yang, Guan Shuai. Simulation study on the working process of an opposed-piston hydraulic free piston engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2016, 37(2): 26-32. (in Chinese)

作者简介:

潘钟键(1983—),男,博士,工程师。主要研究方向:内燃机燃烧模拟、航空活塞发动机性能分析。

周凯(1972—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:发动机性能数值模拟。

程立志(1978—),博士研究生,讲师。主要研究方向:流场碰撞分析。

(编辑:马文静)