

## 多参数对柴油机缸内局部瞬态火焰温度及碳粒浓度的影响\*

陈 硕<sup>1</sup>, 刘明安<sup>1</sup>, 潘克煜<sup>1</sup>, 马 震<sup>1</sup>, 张镇顺<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学 能源与动力工程学院汽车工程系, 陕西 西安 710049; 2. 香港理工大学机械工程系, 香港)

**摘要:**采用了一种新的基于微粒衍射理论的改进双色法来研究柴油机缸内局部瞬态火焰温度和碳粒浓度,并在缸盖火力面上布置了2个有代表性的测点:一个测点位置在缸盖鼻梁区,面对活塞凹坑;另一个测点位置面对活塞顶。在2个测点同时测得的缸内局部碳粒浓度和火焰温度,数值上有很大的差异,且均有一定相位差,其相位差约为10 °CA左右。面对活塞顶位置,火焰温度和碳粒浓度有较大的循环变动。分析了包括负荷、转速、进气温度、冷却水温度在内的多种参数对缸内局部瞬态碳粒浓度、火焰温度的影响。

**关键词:**柴油机; 衍射理论; 改进双色法; 火焰温度; 碳粒浓度

**中图分类号:**TK421.12 **文献标识码:**A

## 引言

柴油机火焰中形成的炽热碳粒其辐射光谱为连续光谱,与黑体十分相似。相对于化学发光辐射和气体辐射来说,柴油机中的碳粒辐射占绝对优势<sup>[1~4]</sup>。另一方面,研究柴油机缸内碳粒的生成与发展,对于降低柴油机碳粒排放也有其十分重要的意义。

作者采用一种新的方法,利用微粒的衍射理论对双色法进行改进,通过柴油机缸内火焰中碳粒的辐射来研究碳粒的浓度及火焰的温度。柴油机缸内燃烧过程的不均匀造成火焰温度和碳粒浓度在缸内不同位置有较大的差异,尤其是在鼻梁区所面对的活塞凹坑部位和活塞挤流区之间。采用上述方法对某柴油机进行了测试,获得了试验结果并对此进行了对比分析。

## 1 局部碳粒浓度、火焰温度测试原理及试验装置

采用双色法依照火焰亮度的大小来确定火焰的温度时,所得到的“假定温度”是火焰的光谱温度。根据 Lorentz-Mie 衍射理论,均匀连续的半透明介质其单色减弱系数为<sup>[5,6]</sup>

$$K_{\lambda} = \int_0^{\infty} \pi^2 N(r) Q_{\text{ext}} dr \quad (1)$$

式中: $r$ 为微粒半径; $Q_{\text{ext}}$ 为减弱因子; $N(r)$ 为微粒尺寸分布函数。

对于球形微粒,在 Rayleigh 准则范围内,碳粒的复折射率可通过消散(dispersion)模型来求解<sup>[7]</sup>。利用 Mie 理论,单色减弱系数可表示为

$$K_{\lambda} = 36\pi \cdot f_v \cdot \frac{F(\lambda)}{\lambda} \quad (2)$$

式中: $F(\lambda)$ 为与粒子复折射率有关的函数。单色发射率可表示为

$$\epsilon_{\lambda} = 1 - \exp(-36\pi \cdot f_v \cdot \frac{F(\lambda)}{\lambda} \cdot L) \quad (3)$$

式中: $L$ 为介质中的光路长度。根据 Planck 辐射定律及亮度温度定义,经过一系列推导,碳粒容积浓度可表示为

$$f_v = -\frac{\lambda}{36\pi F(\lambda)} \ln \left[ 1 - \frac{\exp(\frac{C_2}{\lambda T_a}) - 1}{\exp(\frac{C_2}{\lambda T_s}) - 1} \right] \quad (4)$$

式中: $T_a$ 为对应 $\lambda$ 波长下的辐射温度。若选用碳粒子的2个单色波长为 $\lambda_1, \lambda_2$ ,则有:

$$\left[ 1 - \frac{\exp(\frac{C_2}{\lambda_1 T_a}) - 1}{\exp(\frac{C_2}{\lambda_1 T_s}) - 1} \right]^{\frac{\lambda_2}{F(\lambda_1)}} = \left[ 1 - \frac{\exp(\frac{C_2}{\lambda_2 T_a}) - 1}{\exp(\frac{C_2}{\lambda_2 T_s}) - 1} \right]^{\frac{\lambda_1}{F(\lambda_2)}} \quad (5)$$

利用上式可计算碳粒的修正温度 $T$ 。利用式(4)可计算碳粒容积浓度。

在测试系统中选用人工蓝宝石作窗口,用来隔绝对流传热,保证只有辐射热流量可以通过。被测信号通

\* 收稿日期:2000-06-30;修订日期:2000-09-01。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59476026)。

作者简介:陈 硕(1969-),男,博士生,主要研究方向为内燃机传热。

过蓝宝石玻璃窗,经过直径为 3 mm、长 2 m 的光导纤维将光束传输至测量装置中。本试验中采用了分叉玻璃纤维光纤,从而省去了一套复杂的光学系统。将数千根 60 μm 细的光纤丝随机地分成 2 股,很好地起到了分离光线的作用。测试中所需要的 2 束单色光是靠光线分别通过 2 块干涉滤光片而获得的。

燃烧室内火焰温度及碳粒的生成和发展受燃烧室内的空气运动、喷雾、混合及燃烧室结构因素所制约。在燃烧室内不同区域,上述各参数差别很大。缸盖火力面接受到的火焰辐射能量受缸内火焰温度分布及碳粒浓度分布的影响,从而随缸盖上位置不同而形成差别。考虑到测点的布置受到缸盖的结构和空间位置的限制,本试验在缸盖火力面上布置 2 个测点来测量火焰温度和碳粒浓度:一个测点位置在缸盖鼻梁区,面对活塞凹坑,另一个测点位置面对活塞顶。图 1 是测点在缸盖上的分布图。

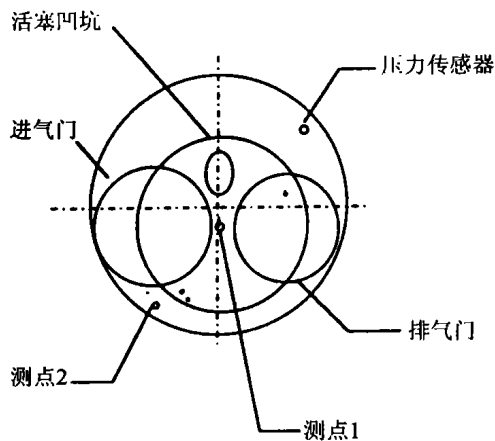


图 1 传感器测点布置图

Fig. 1 Arrangement of measurement points

## 2 测试结果及分析

利用上述系统,对 TY 1100 柴油机进行了测试。测试工况为变负荷、变转速、变进气温度、变冷却水温 4 种工况。

### 2.1 柴油机缸内活塞凹坑部位试验结果分析

图 2、图 3 所示为不同负荷下,在活塞凹坑部位所测得的缸内火焰温度和碳粒容积浓度随曲轴转角的变化规律。随着负荷的增大,缸内火焰温度也相应增大,同时,持续期也增长。在负荷为 4.41 kW 时,最高温度为 2 520 K。在负荷为 7.35 kW 时,最高火焰温度达 2 700 K。随着负荷增大,碳粒容积浓度也增大,其持续期也相应增长。在负荷为 4.41 kW 时,最大碳粒容积浓度为  $5.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。在负荷为 7.35 kW 时,最高碳粒容积浓度为  $6.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

的情况下,滞燃期内喷入的燃油量基本不变,滞燃期内形成的可燃混合气量基本不变,因而将使扩散燃烧的燃油量比例增大,导致碳烟生成量增大。

负荷增加,每循环喷油量增多,同时由于滞燃期内喷入的燃油量基本不变,因此最高火焰温度上升不多。由于单位时间内放出的热量增多,火焰辐射期增长。

图 4、图 5 所示为不同转速下燃烧火焰温度及碳粒容积浓度随曲轴转角的变化曲线。当转速为 2 300 r/min 时,火焰温度最高为 2 600 K,碳粒容积浓度最大为  $6.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3$ ,而当转速为 1 600 r/min 时,其火焰最高温度为 2 690 K,碳粒容积浓度的最大值为  $5.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

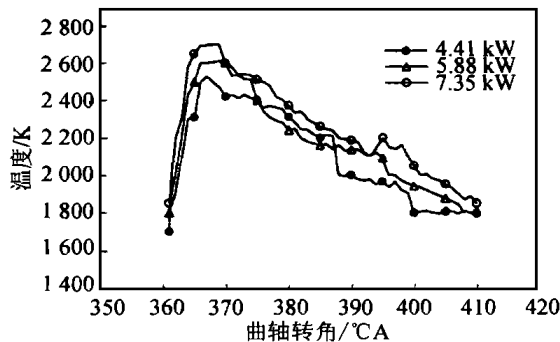


图 2 不同负荷下的火焰温度

Fig. 2 Flame temperatures under different loads

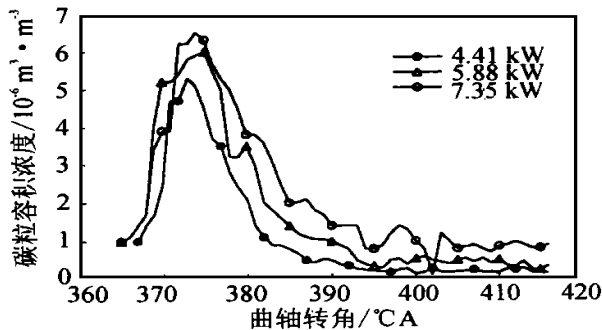


图 3 不同负荷下的碳粒容积浓度

Fig. 3 Soot volume concentrations under different loads

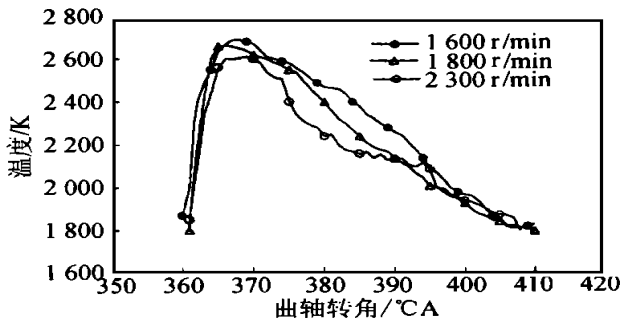


图 4 不同转速下的火焰温度

Fig. 4 Flame temperatures under different speeds

负荷增加,每循环供油量增加,在其它各因素不变

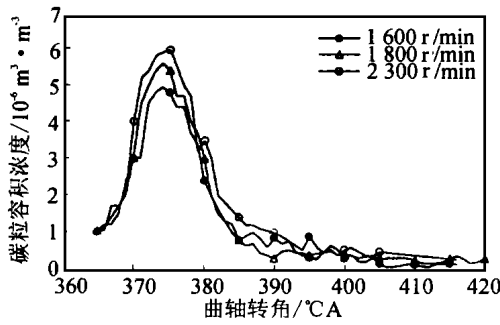


图 5 不同转速下的碳粒容积浓度

Fig. 5 Soot volume concentrations under different speeds

转速增高时, 充量系数下降, 特别是超过一定转速后, 下降的速度更快; 转速增高, 摩擦功率增加, 为保持平均有效压力不变, 又要适当增加每循环供油量, 同样致使过量空气系数减小, 使实际燃空比增加, 引起缺氧, 缸内燃烧不好, 火焰温度有可能降低, 碳烟生成量有可能增多。

转速增高时, 使气缸内气流速度增加, 燃料与空气混合均匀, 燃烧完善, 有利于火焰温度增高, 减小碳粒浓度。

转速增高时, 每循环气缸内工质的泄漏损失和向外传热损失减少, 有利于气缸内温度和压力上升, 改善工作过程的热力状态, 火焰温度可能有所增加。

转速的增加, 还会造成喷油规律曲线从狭长向矮胖方向发展, 使其峰值喷油速率下降。这是由于喷油系统是一个高压液力振动系统, 随着转速的升高, 燃油在运动中受到的阻力增加, 压缩性和惯性作用也随之增加, 从而使峰值喷油速率下降, 并有相位滞后效应。喷油规律随转速的这一变化直接影响着燃烧和放热进程, 使扩散燃烧阶段喷入缸内的油量增多, 有利于碳粒生成量增多。

图 4、图 5 显示, 随着转速的提高, 火焰温度减小, 相对而言碳粒浓度是上升的。

图 6、图 7 所示分别为火焰温度和碳粒容积浓度随着冷却水温的变化曲线。当冷却水温由 353 K 降到 323 K 时, 火焰温度变化不明显。但碳粒容积浓度有些变化, 由  $6.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3$  降低到  $5.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

随着冷却水温的降低, 在其它因素不变的情况下, 缸内燃空比降低。相对来说, 空气量显得充足, 有利于燃烧, 因此, 碳粒生成量降低, 火焰温度有可能增高。另一方面, 缸壁温度降低以后, 传热损失增加, 有可能使火焰温度降低, 两者综合作用, 使火焰温度变化不明显。

图 8、图 9 所示分别为火焰温度和碳粒容积浓度随着进气温度的变化曲线。当进气温度由 293 K 增加

到 313 K 时, 活塞凹坑部位火焰温度变化不明显, 碳粒容积浓度稍微有所增加。

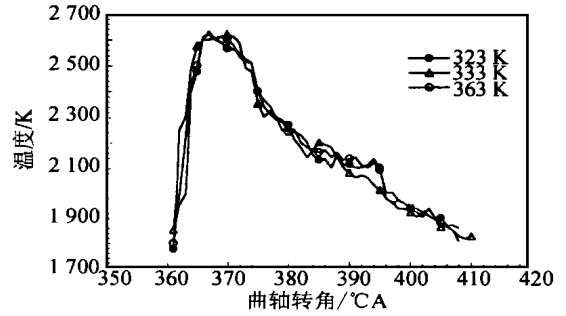


图 6 不同冷却水温下的火焰温度

Fig. 6 Flame temperatures under different cooling water temperatures

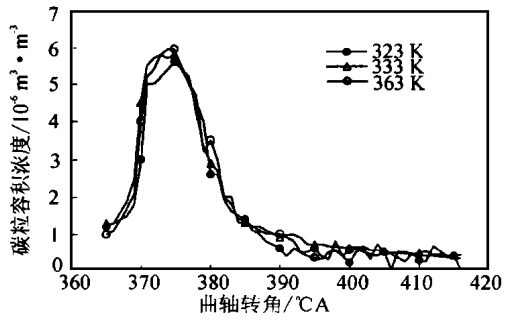


图 7 不同冷却水温下的碳粒浓度

Fig. 7 Soot volume concentrations under different cooling water temperatures

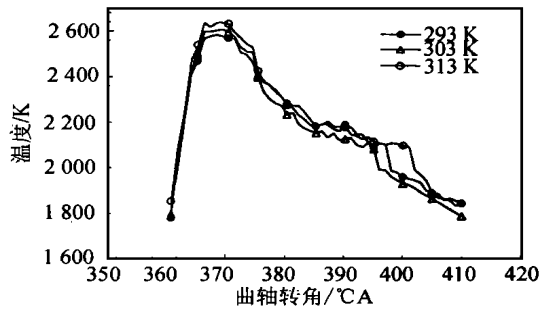


图 8 不同进气温度的火焰温度

Fig. 8 Flame temperatures under different intake air temperatures

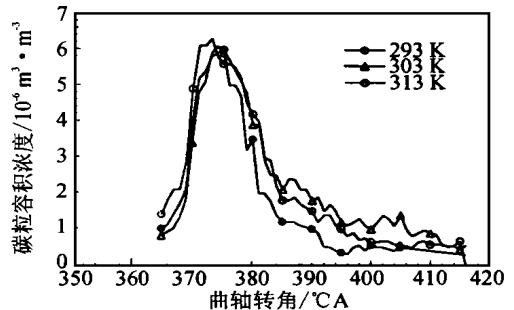


图 9 不同进气温度的碳粒浓度

Fig. 9 Soot volume concentrations under different intake air temperatures

进气温度的增加,降低了充气效率,使缸内燃空比增加,燃烧不好,造成火焰温度降低,碳粒浓度增加。

进气温度增加,使缸内燃气热力状态提高,有利于提高缸内火焰温度。

进气温度的变化同样使缸内火焰温度和碳粒浓度的变化趋势不确定。通过本文的试验结果可以归纳为:进气温度并不是影响缸内火焰温度的主要因素,随着进气温度的增加,缸内碳粒容积浓度有所上升,但其上升幅度不大。

## 2.2 柴油机缸内活塞挤流区试验结果分析

由前面试验结果可知,在活塞凹坑处,循环之间的变动较小,而在处于活塞挤流区的循环之间有较大的变动。

图 10 所示为活塞挤流区不同循环火焰温度的测量结果。当转速为 2 300 r/min、负荷为 7.35 kW、压缩比为 18.4 时,在活塞挤流区不同循环之间的变动较大。在有的循环,其缸内火焰温度最高达 2 600 K,而在有的循环,则可能为 1 980 K,甚至有的循环所采集到的信号相当弱。图 11 所示的活塞挤流区的缸内碳粒容积浓度也出现了类似的变化,有的循环的碳粒容积浓度为  $3.1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3$ ,有的循环的碳粒容积浓度

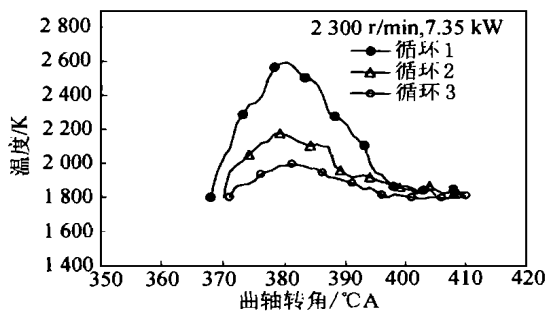


图 10 活塞挤流区不同循环的火焰温度测量结果

Fig. 10 Flame temperatures under different cycles in the piston squeeze zone

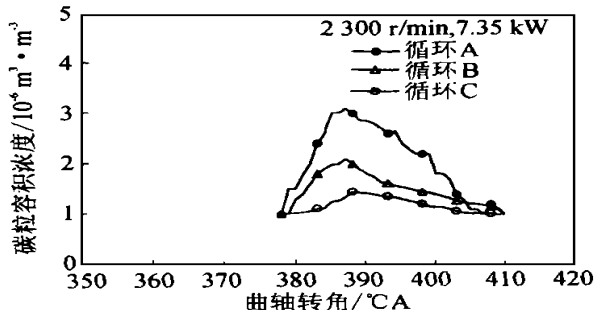


图 11 活塞挤流区不同循环的碳粒浓度测量结果

Fig. 11 Soot volume concentration under different cycles in the piston squeeze zone

为  $1.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

测试结果表明,活塞挤流区的火焰温度和碳粒浓度在大多数循环均比活塞凹坑处的火焰温度和碳粒浓度低。另外,活塞挤流区不同循环之间混合气的配比也有较大差别,从而导致循环变动很大。

在上述 2 个测点所得到的测量值分别具有一定的时间相位差,在活塞凹坑处,火焰温度峰值一般出现在上止点后  $9^\circ\text{CA}$ ,碳粒浓度峰值一般出现在上止点后  $15^\circ\text{CA}$ ;而在活塞挤流区,火焰温度峰值一般出现在上止点后  $20^\circ\text{CA}$ ,碳粒浓度峰值一般出现在上止点后  $26^\circ\text{CA}$ ,其时间相位差大约为  $10^\circ\text{CA}$ 。这是在逆挤流作用下,油滴、油雾、混合气、火焰等从处于凹坑部位的位置流动扩散到活塞顶部的位置所出现的时间差。

在活塞顶出现的较低的碳粒容积浓度表明,强烈的燃烧出现在活塞凹坑部位。在燃烧过程后期,由于燃烧气体内部混合而使两者差别减小。

## 3 结 论

(1) 活塞凹坑部位燃烧强烈。在该区域,火焰温度和碳粒浓度均较高,而在活塞挤流区,循环变动很大。

(2) 由于在逆挤流作用下,油滴、油雾、混合气、火焰等从处于凹坑部位的位置流动扩散到活塞顶部的位置需要一定时间,因此在活塞凹坑部位和活塞挤流区所测得的火焰温度和碳粒浓度有一定相位差。在本文试验条件下其相位差约为  $10^\circ\text{CA}$ 。

(3) 随着负荷增加,缸内火焰温度和碳粒浓度相应增加。

(4) 随着转速增加,火焰温度减小,碳粒浓度上升。

(5) 冷却水温度和进气温度对火焰温度的影响不明显。随着冷却水温度增加,碳粒浓度略微降低;随着进气温度增加,碳粒浓度略微增加。

## 参考文献:

- [1] 潘克煜. 柴油机缸内辐射传热的测量[J]. 车用发动机, 1995, (5): 51-55.
- [2] PINAR Menguc. Multidimensional Modeling of Radiative Heat Transfer in Diesel Engines[C]. SAE Paper 850503.
- [3] 魏建勤. 双色法测试精度影响因素分析[J]. 燃烧科学与技术, 1996, 2(1): 54-57.
- [4] 陆晓军. 双色法气缸内燃烧火焰瞬时温度测量装置的研制[J]. 内燃机工程, 1992, 13(1): 47-52.
- [5] TAYLOR P B. The Total Emissivities of Luminous and Non-Luminous Flames [J]. Int. J. Heat. Mass

Transfer, 1974, 17: 1591-1605 .

[6] KERKER M· The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation [ M ]· Academic Press, 1969 .

[7] HOANG X Q· A New Approach of the Two-Color Method for Determining Local Instantaneous Soot

Concentration and Temperature in a D· I· Diesel Combustion Chamber[C]· SAE Paper 900692.

[8] 许斯都· 用光导纤维多色法对柴油机燃烧室内火焰温度与碳粒生成的研究[J]. 内燃机学报, 1996, 14( 3) : 316-323.

## Influence of Multi-Parameters on Local Instantaneous Flame Temperature and Soot Concentration in Cylinder of Diesel Engines

CHEN Shuo<sup>1</sup>, LIU Ming-an<sup>1</sup>, PAN Ke-yu<sup>1</sup>, MA Zhen<sup>1</sup>, CHEUNG Chunshun<sup>2</sup>

( <sup>1</sup>·Department of Automobile Engineering, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

<sup>2</sup>·Department of Mechanical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, China)

**Abstract:** In the present study a new improved two-color method based on particulate diffraction theory was used to investigate the local instantaneous flame temperature and soot concentration in cylinder of diesel engines. Two representative measurement locations were arranged in the cylinder head which face the crown and the bowl of the piston separately. A significant difference of magnitude both in soot concentration and flame temperature was found between the two measurement locations, and the time difference of appearance was about 10 °CA. There was a large cycle variation at the measurement location facing the crown. The influence of multi-parameters including load, speed, intake air temperature and cooling water temperature on local instantaneous flame temperature and soot concentration in cylinder of diesel engines was discussed analytically.

**Key words:** Diesel engine; Diffraction theory; Improved two-color method; Flame temperature; Soot concentration

( 上接第 116 页)

## Quasi-Dimensional Combustion Simulation of Swirl Chamber Diesel Engine at Cold-Starting

LI De-tao<sup>1</sup>, YANG Wen-ming<sup>1</sup>, JIANG Shu-li<sup>1</sup>, LIU Tao-ying<sup>1</sup>, LU Bo-lin<sup>2</sup>

( <sup>1</sup>·School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212013, China; <sup>2</sup>·Jiangsu Jiangdong group corporation, Yancheng 224001, China)

**Abstract:** According to the P-V figure, we know that there are three types of unsteady combustion procedure during cold-starting of swirl chamber diesel engine. Based on a series of experimental study, a quasi-dimensional model is developed to simulate the unsteady combustion process of swirl chamber diesel engine at cold-starting. The heat release rate and emission formation both in main and swirl chamber of three combustion process is calculated in this paper. The results can be applied to improve the cold-starting of swirl chamber diesel engine.

**Key words:** Diesel engine; Swirl chamber; Unsteady combustion; Quasi-dimensional model