

## 过浓系数与对置活塞发动机的燃烧效率

王苏飞<sup>1</sup>, 章振宇<sup>1</sup>, 张付军<sup>1, 2</sup>

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081;

2. 北京理工大学 深圳研究院, 广东 深圳 518057)

**摘 要:** 针对空气利用率用于描述对置活塞(OP2S)二冲程压燃式发动机油气相互作用规律时局限性较大的问题, 给出过浓系数的定义并以之作为对置活塞二冲程压燃式发动机缸内油气混合效果的评价指标。在此基础上通过基于 CONVERGE 软件的数值模拟研究了初始涡流比和喷油器倾角对 OP2S 燃烧效率的影响规律。结果表明: 过浓系数可以排除平均当量比的影响并有效反映喷油参数对油气混合效果的影响。提高涡流比可以强化喷油过程中的油气混合, 同时改变喷油过程形成的燃油径向分布。过小或过大的涡流比使燃油过度集中于气缸轴线附近或气缸壁附近, 造成局部过浓, 喷油结束后的燃烧效率下降。整个循环的燃烧效率由喷油过程中及喷油结束后的燃烧放热过程共同决定。在所研究的范围内, 涡流比对燃油径向分布的影响可以使燃烧效率在 0.6~1.0 的范围内变化。喷油器倾角同样可以改变燃油径向分布位置及燃烧效率, 且这一影响可以与涡流对燃油径向分布规律的影响相叠加。

**关 键 词:** 对置活塞(OP2S); 燃烧效率; 过浓系数; 涡流比; 油气混合

中图分类号: V234; TK421

文献标志码: A

## Coefficient of richness and combustion efficiency in opposed-piston engines

WANG Sufei<sup>1</sup>, ZHANG Zhenyu<sup>1</sup>, ZHANG Fujun<sup>1, 2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Shenzhen Research Institute,

Beijing Institute of Technology, Shenzhen Guangdong 518057, China)

**Abstract:** Opposed-piston 2-stroke (OP2S) compress ignition engines have different fuel-air interactions compared with ordinary CI engines, while air utilization has proved inadequate in measuring fuel-air mixing in CI engines. In this study, the concept of coefficient of richness was proposed as an index of fuel-air mixing in OP2S engines to replace air utilization. Numerical simulation was carried out with CONVERGE software to study the effect of swirl ratio and injector yaw on combustion efficiency in OP2S-CI. Results showed that the coefficient of richness was effective in representing fuel-air mixing regardless of average equivalence ratio. Larger swirl ratio could improve fuel-air mixing during injection while affecting radial distribution of fuel at end of injection. Fuel concentration near either cylinder axis or cylinder wall could hinder fuel-air mixing after injection, decreasing combustion efficiency. Combustion efficiency could vary between the range 0.6 and 1.0 of swirl ratio. Injector yaw may also impact radial distribution of fuel and in turn the combustion efficiency. This effect was taken into account jointly with that from swirl.

收稿日期: 2022-03-22

作者简介: 王苏飞(1990—), 男, 博士生, 主要从事内燃机进排气及燃烧方面的研究。E-mail: 327633899@qq.com

通信作者: 张付军(1966—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事内燃机电控及新概念动力系统相关研究。E-mail: zjf123@bit.edu.cn

引用格式: 王苏飞, 章振宇, 张付军. 过浓系数与对置活塞发动机的燃烧效率[J]. 航空动力学报, 2024, 39(1): 20220147. WANG Sufei, ZHANG Zhenyu, ZHANG Fujun. Coefficient of richness and combustion efficiency in opposed-piston engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(1): 20220147.

**Keywords:** opposed-piston 2-stroke (OP2S); combustion efficiency; coefficient of richness; swirl ratio; fuel-air mixing

航空活塞发动机由于燃油经济性高、结构简单等优势,在通用航空、小型无人机等方面得到了较多应用。目前航空活塞发动机使用的燃油多为航空汽油,其具有挥发性强、易爆炸的缺点,军舰上禁止贮存,各大航线也多不提供,一定程度上影响了航空技术在相关领域的推广应用。航空煤油、柴油等一般统称为航空重油,具有闪点高、安全性强、易贮存等特点,将在航空活塞发动机中得到越来越多的应用<sup>[1]</sup>。现有的航空重油活塞式发动机有点燃式及压燃式两大类。其中,点燃式发动机通常额定转速较高,功率密度大,但比油耗相对于压燃式发动机较高。压燃式发动机中相当一部分为车用柴油机改进而来,如 TAE Centurion 2.0、Austro AE300 等,因而也继承了车用柴油机燃油经济性较好的优点,但通常结构质量较大,功率密度偏小<sup>[2-3]</sup>。对置活塞二冲程发动机由于平衡性好、散热损失少的优点,早在 20 世纪前期便被用作航空动力<sup>[4]</sup>。Kalkstein 等<sup>[5]</sup>提出了一种点燃式航空重油对置活塞二冲程发动机,其升功率有望达到 123.5 kW。但是,由于喷油器布局等方面的特点,压燃式对置活塞二冲程发动机的燃烧系统设计尚不成熟。本文旨在研究压燃式对置活塞二冲程发动机的燃烧效率影响因素及规律,以推进这一构型作为航空重油发动机的应用。

目前 OP2S 相关研究多集中于在车用柴油机领域。Hofbauer<sup>[6]</sup>提出了一种车用对置活塞对置气缸二冲程柴油机,并提出采用空气利用率作为油气混合效果的评价指标并给出了定义。研究发现某些喷孔布局可能导致气缸中心出现油束碰撞,进而造成当地当量比过高,空气利用率恶化。Franke 等<sup>[7]</sup>在 Hofbauer<sup>[6]</sup>工作的基础上进一步通过 CFD 仿真研究了不同喷孔布局下喷射率和缸内涡流比等因素对燃烧效率、燃油碰壁量等指标的影响。结果表明所有的喷孔布局和喷射率均在涡流比为 0.5 时达到最高燃烧效率。许汉君等<sup>[8]</sup>采用 KIVA-3V 程序仿真对比了通过改变扫气口结构分别组织进气涡流和进气滚流时的缸内流动、喷雾和燃烧特性。结果表明,组织滚流有助于提高喷油过程中的湍动能,并提高混合气形成速率,提高燃烧速率,改善燃烧效率。Zhang 等<sup>[9]</sup>通过基于 AVL-FIRE 的 CFD 仿真发现涡流比对燃烧效率影响不明显,但对瞬时放热率影响较大,在

涡流比为 1.0 时有最大值。郭勇等<sup>[10]</sup>发现更大的扫气口倾角可以降低喷油过程中的液滴速度并加快液滴蒸发;不同扫气口倾角的滞燃期和燃烧效率基本一致,但增大扫气口倾角有助于提高瞬时放热率并缩短燃烧持续期,进而提高发动机效率。Zhang 等<sup>[11]</sup>通过 KIVA-3V 程序计算指出低涡流比下侧置双喷油器的布局燃油液滴碰撞更为强烈,有利于改善雾化,但高涡流比下对置双喷油器可以实现更均匀的油气混合。Zhao 等<sup>[12]</sup>提出了一种折叠曲柄对置活塞二冲程柴油机,通过 CFD 仿真发现喷孔方向对燃烧效率的影响较小。强永平等<sup>[13]</sup>研究了两个喷油器采用不同的循环喷油量、喷油相位、喷孔直径、喷油持续期对燃烧过程的影响。Ma 等<sup>[14]</sup>通过台架试验研究了对置活塞折叠曲柄二冲程柴油机的燃烧特性受负荷率影响的规律,指出了折叠曲柄系带来的运动规律较常规发动机的差异对放热规律的影响。刘彩明等<sup>[15]</sup>通过 CFD 仿真发现喷孔方向对燃烧效率的影响不大,但对燃油空间分布、燃烧过程中的湍动能及瞬时放热率均有一定影响,故优化喷孔方向有助于提高对置活塞二冲程柴油机的效率。章振宇等<sup>[16]</sup>通过仿真研究发现喷油规律对缸内混合速率、滞燃期、预混燃烧占比等均有一定影响。谢钊毅<sup>[17]</sup>结合容弹喷雾实验和 CFD 三维仿真,较系统地研究了喷孔方向对液滴碰撞和燃油空间分布的综合性影响,发现过大或过小的喷孔倾角都不利于提高燃烧效率。Zhang 等<sup>[18]</sup>针对对置活塞二冲程柴油机中出现的液滴碰撞现象,提出了一种用于描述高环境压力下碳氢燃料液滴碰撞规律的数值模型,并利用该模型在 CFD 仿真中研究了对置活塞二冲程柴油机中的液滴碰撞及燃烧规律。刘宇航等<sup>[19]</sup>通过容弹喷雾实验研究了单喷油器、双喷油器两种布局下喷射压力、弹体压力及喷油持续期对贯穿距离、空间扩散率等喷雾指标的影响。用纹影法观察了喷雾形态。马富康等<sup>[20]</sup>研究了对置活塞二冲程缸内直喷汽油机中的混合气形成特点,提出了进排气侧非对称喷雾方式,并研究了部分负荷下二次喷射策略对分层混合气形成和稀燃组织的影响规律。Zhou、陈泽玉等<sup>[21-22]</sup>研究了用于无人机的对置活塞二冲程柴油机。通过 CFD 仿真计算探索了喷油相位和喷孔方向对喷雾形态、温度分布及瞬时放热率的影响。文中

指出了喷孔方向对燃油碰壁现象的显著影响。Venugopal 等<sup>[23]</sup>提出了一种带有凸缘的活塞顶形状以组成一种组织挤流的纺锤形燃烧室,通过实验测试和 CFD 仿真相结合研究了活塞顶受热状况。Huo 等<sup>[24]</sup>提出了一种用于对置活塞对置气缸二冲程柴油机的环形燃烧室。通过台架试验和基于 CONVERGE 的 CFD 仿真比较了不同的燃烧室结构对换气效果、燃烧过程及活塞顶受热的影响规律。Shirvani 等<sup>[25]</sup>较系统地研究了对置活塞二冲程柴油机中喷孔夹角、喷油器倾角等参数与局部过浓、油束碰壁等现象的关系。

综合上述研究,OP2S 的喷油器布局及油气交互规律与常规发动机有显著差异,燃烧系统设计尚未有系统性的规律可循,相当一部分研究中出现了油气混合效果差、燃烧效率不高的问题。一些涉及了涡流比(或扫气口倾角)对燃烧效率的影响的研究均指出涡流比对燃烧效率的影响非单调。一些一维及三维结果展示了缸内涡流及喷孔布局对油气混合及燃烧效率的影响,但尚未有研究明确地阐释上述非单调规律的形成机理。本文将基于某型对置活塞车用柴油机,提出适用于描述 OP2S 油气混合效果的指标,解释涡流比(本文中为曲轴转角上止点后 $-110^{\circ}$ 的初始涡流比,记为 $r_s$ )非单调影响规律,探索喷油器倾角对燃烧效率的影响机理,为相关研究设计工作提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 OP2S 结构与仿真模型的建立

本文研究的 OP2S 气缸结构形式如图 1 所示,其中图 1(a)为活塞位于下止点(BDC)时的计算模型,图 1(b)为上止点(TDC)时。发动机缸径为 100 mm,每个活塞的行程为 110 mm,压缩比为 18。

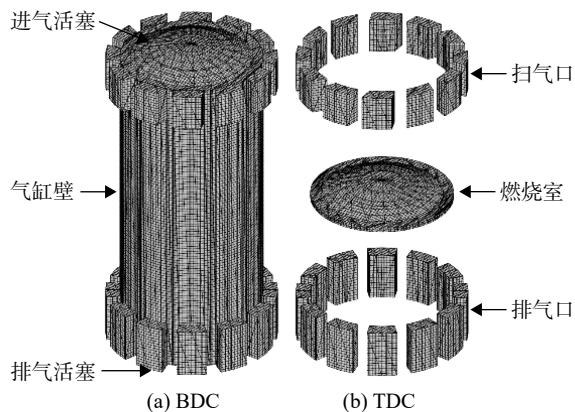


图 1 OP2S 气缸结构

Fig. 1 Cylinder structure of OP2S

排气活塞的相位比进气活塞提前  $17^{\circ}$ 。排气口开启相位为曲轴转角上止点后  $101.5^{\circ}$ , 关闭相位为曲轴转角上止点后  $245.5^{\circ}$ ; 扫气口开启相位为曲轴转角上止点后  $126^{\circ}$ , 关闭相位为曲轴转角上止点后  $247.5^{\circ}$ 。该发动机为压燃式, 采用 2 个三孔共轨喷油器以 180 MPa 的压力向缸内供入 0#柴油。喷油器布局将在对应各节中具体描述。喷孔均垂直于气缸轴线, 油束锥角根据试验工况采用文献<sup>[26]</sup>中给出的经验公式

$$\tan \beta = 0.13 \left( 1 + \frac{\rho_a}{\rho_l} \right) \quad (1)$$

其中 $\beta$ 为油束锥角的一半,  $\rho_a$ 为环境密度,  $\rho_l$ 为喷射流体的密度, 计算得油束锥角为  $15^{\circ}$ 左右。其他仿真参数设定见表 1。

表 1 仿真的初始条件及其他参数

Table 1 Initiation condition and other parameters of simulation

| 参数                                  | 数值及说明                      |
|-------------------------------------|----------------------------|
| 上止点后曲轴转角<br>(计算起止点)/( $^{\circ}$ )  | $-110 \sim 100$            |
| 初始压力/MPa                            | 0.37                       |
| 初始温度/K                              | 400                        |
| 循环充气量/mg                            | 4 320                      |
| 初始成分质量分数/%                          | 21( $O_2$ )<br>79( $N_2$ ) |
| 喷油压力/MPa                            | 177                        |
| 喷孔直径/mm                             | 0.142                      |
| 曲轴转角(喷油持续期)/( $^{\circ}$ )          | 31.5                       |
| 上止点后曲轴转角<br>(喷油起始时刻)/( $^{\circ}$ ) | $-15$                      |
| 燃油模型                                | DIESEL2                    |
| 气缸壁温度/K                             | 400                        |
| 进、排气活塞顶温度/K                         | 450                        |

采用 CONVERGE Studio 前处理工具输入 OP2S 发动机的三维模型, 划分边界并设置边界条件与初始条件。CONVERGE 求解器依据设定的单元尺寸自动生成计算网格。本研究采用 RANS(雷诺平均 Navier-Stokes)方式计算缸内流动。湍流模型为 RNG  $k-\varepsilon$ (重整化群  $k-\varepsilon$ )模型。湍流耗散模型为 O'Rourke 模型, 液滴碰撞模型为 NTC(no time counter)碰撞模型, 喷雾模型为 KH-RT(Kelvin-Helmholtz Rayleigh-Taylor)模型, 燃烧模型为 CTC(characteristic time combustion)/Shell, 燃油模型为 DIESEL 2。以上模型均广泛用于内燃

机工作过程仿真。由于并非研究重点,本文不比较不同模型的计算结果差异。

由于计算网格密度对计算结果和计算资源开销均有显著影响,故有必要进行网格无关性检验,以在保证计算结果准确性的前提下选用较稀疏的网格,提高计算效率。图 2 是计算模型的网格无关性检验结果,其中单元尺寸为六面体单元边长的指导值。可以看出,单元尺寸为 4、3 mm 与 2 mm 相比缸压( $p$ )及放热率( $R_{hr}$ )计算结果均有明显差异;而单元尺寸 2 mm 和 1.4 mm 的计算结果差异很小。综合考虑结果准确性和计算效率,选用 2 mm 的单元尺寸。单元总数为 255 236 个。

为了验证仿真模型的准确性,将仿真计算得出的缸压与瞬时放热率结果与实验数据相比较,如图 3。验证工况为转速为 2 800 r/min,循环喷油量为 200 mg,进气压力为 0.3 MPa,排气压力为 0.25 MPa。仿真得出的缸压数据在压缩冲程与实

验数据几乎一致,只有做功冲程的后半段略低于实验数据。瞬时放热率同样与实验值几乎一致,最大值略高于实验数据。总的来说,该工况下仿真计算的结果复现了发动机台架试验的缸内过程,结果可信。

## 1.2 油气混合过程评价指标

相关研究<sup>[6]</sup>中采用空气利用率评价 OP2S-CI 的油气混合效果,其定义如下:令计算域内共有  $n$  个单元,其中第  $i$  个单元的质量为  $m_i$ ,体积为  $V_i$ ,当量比为  $\phi_i$ ,则空气利用率  $A$  定义为

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n X_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (2)$$

其中

$$X_i = \begin{cases} 1 & \phi_i \geq 0.6 \\ 0 & \phi_i < 0.6 \end{cases} \quad (3)$$

即空气利用率为缸内总体积中当量比大于等于 0.6 的比例。从文献<sup>[6]</sup>中给出的结果发现,空气利用率受缸内平均当量比影响很大,难以用于比较不同工况下的油气混合效果。另外,空气利用率较适宜作为循环指标,用于描述具体燃烧过程则不易展示细节差异。上述问题存在的根源是,空气利用率以缸内空气为基准,不符合压燃式发动机燃烧过程的评价方式。燃烧效率通常定义为循环放热量与循环喷油量和燃油热值乘积的比值,应当以描述缸内燃油分布状态的指标作为油气混合效果的评价标准。

依据扩散燃烧过程的原理,假设燃烧室内空气温度满足混合气起燃的前提下,充足的空气是燃油充分燃烧的充要条件,则缸内某处的燃油能否充分燃烧取决于局部当量比。对于当量比大于 1 的混合气,认为该混合气可看作当量比等于 1 的混合气和过剩的燃油蒸汽(称为过浓燃油)组成,并假设前者可以充分燃烧,而后者无法参与燃烧。上述假设与碳氢燃料氧化还原反应的实际过程有差异,但仍可作为定量分析指标。将过浓燃油的质量与混合气燃油蒸汽总质量之比定义为过浓系数。对于当量比小于等于 1 的混合气,则认为其可以充分燃烧,过浓系数为 0。计算域内某一计算单元的当地过浓系数定义为

$$R_i = \frac{\max(\phi_i - 1, 0)}{\phi_i} \quad (4)$$

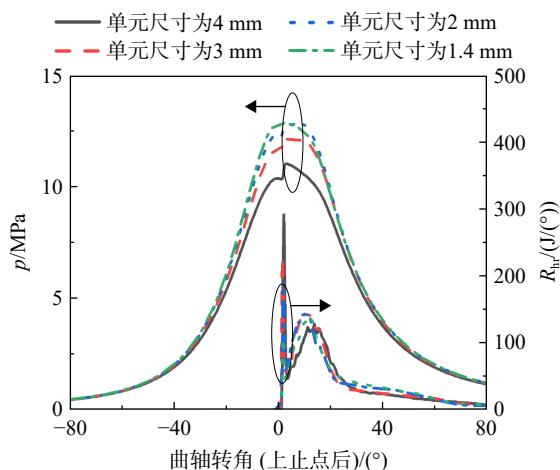


图 2 单元尺寸为 1.4~4 mm 的计算结果对比  
Fig. 2 Comparison of calculation results from cell size 1.4—4 mm

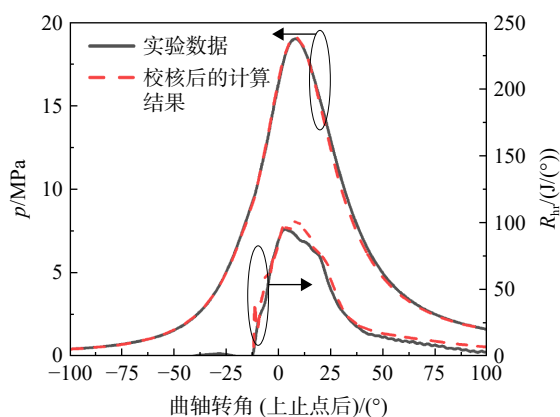


图 3 模型验证  
Fig. 3 Model validation

即

$$R_i = \begin{cases} \frac{\phi_i - 1}{\phi_i} & \phi_i \geq 1 \\ 0 & \phi_i < 1 \end{cases} \quad (5)$$

整个计算域的总过浓系数为

$$R_t = \frac{\sum_{i=1}^n R_i \phi_i m_i}{\sum_{i=1}^n \phi_i m_i} \quad (6)$$

则总过浓系数为整个计算域的过浓燃油总质量与所有气态燃油总质量之比, 它可以反映缸内总体的过浓程度而不受平均当量比的干扰。

若定义加权空气利用率为

$$A_w = \frac{\sum_{i=1}^n \min(\phi_i, 1) m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (7)$$

注意到

$$\min(\phi_i, 1) + \max(\phi_i - 1, 0) = \min(\phi_i, 1) + \max(\phi_i, 1) - 1 = \phi_i \quad (8)$$

且

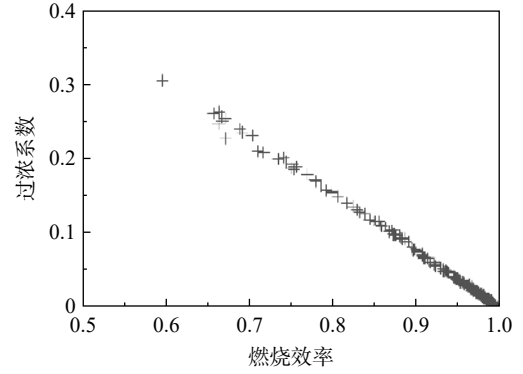
$$\phi = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (9)$$

故有

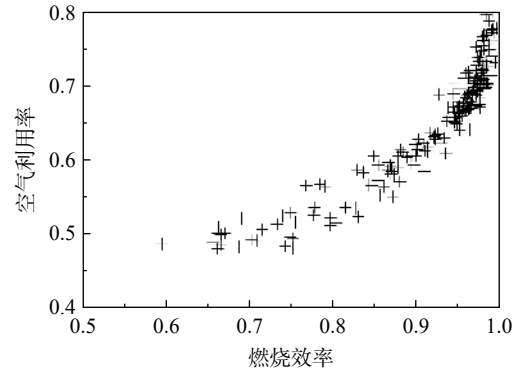
$$\frac{A_w}{\phi} + R_t = 1 \quad (10)$$

即总过浓系数也可看作依据当量比加权并剔除了平均当量比影响的空气利用率。

为了验证过浓系数作为压燃式发动机油气混合指标与燃烧效率的相关性及其相对于空气利用率的优劣, 在涡流比为 6~10, 喷油器倾角为 0°~15°的范围内选取共 228 个工况点进行了计算并提取了曲轴转角上止点后 100°(计算结束时刻)的总过浓系数与空气利用率数值, 分别如图 4(a)及图 4(b)。从图中数据点的分布可见, 总过浓系数与空气利用率均与燃烧效率相关, 但总过浓系数的数据点分布集中, 与燃烧效率几乎成线性关系; 而空气利用率的数据点则分布相对较为零散, 离差较大, 与燃烧效率的关系线性程度



(a) 总过浓系数与燃烧效率的关系



(b) 空气利用率与燃烧效率的关系

图 4 计算结束时刻总过浓系数、空气利用率与燃烧效率的关系

Fig. 4 Correlation between total coefficient of richness, air utilization and combustion efficiency at end of simulation

也较差。因此, 总过浓系数能更有效地反映油气混合效果对燃烧效率的影响。

用于描述油气混合效果随喷油燃烧过程的进行而变化的规律时, 过浓系数相较于空气利用率更能反映喷油参数的影响以及缸内的实际过程。图 5、图 6 分别是 4 种喷油器布置下过浓系数及空气利用率随曲轴转角变化的规律。其中 a、b、c 三种布置均采用两孔喷油器, 喷油器数量分别为 2、3、4 个, 在气缸壁圆周上均布; d 布置采用两个四孔喷油器, 在气缸两侧相对布置。所有的喷孔直径、喷油压力、喷油持续期均相同, 故 a、b、c 三者的总喷射率及循环喷油量随喷油器数目增加等比例增大, 而 d 布置的喷射率及循环喷油量与 c 布置相同。各布置喷油前缸内状态完全相同。图中用虚线标出了喷油结束时刻(EOI)。从图 5 中可以看出, 在喷油结束前, a、b、c 三种布置尽管喷射率差异明显, 但由于单个喷油器的参数完全一致, 其总过浓系数曲线几乎重合, 而 d 布置显著高于前三者; 这一现象说明以总过浓系数作为油气混合效果指标可以避免整个计算域平均当量

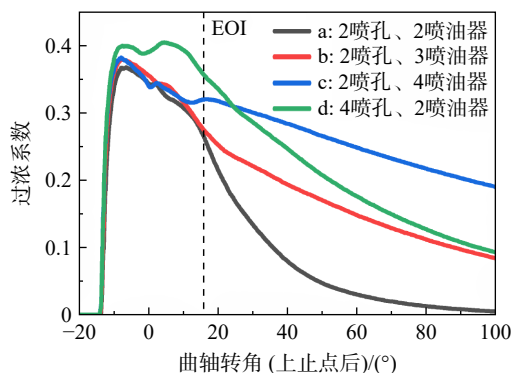


图5 喷嘴器布置对总过浓系数变化规律的影响

Fig. 5 Effect of nozzle layout on trend of total coefficient of richness

比的差异带来的干扰并灵敏地捕捉喷油参数的变化对油气混合效果的影响。喷油结束后,缸内已有的燃油液滴逐渐蒸发殆尽,燃油蒸汽与空气的相互扩散决定了油气混合及燃烧放热过程。由于热扩散速率取决于浓度梯度,随着扩散过程的进行,高浓度区域的浓度逐渐下降,扩散速率也降低。这一阶段总过浓系数随时间逐渐降低,而下降速率逐渐减小,反映了这一物理过程。

另一方面,空气利用率由于主要考察缸内空气的状态,故受喷射率的影响十分显著。在图6中,喷油过程中a、b、c三种布置的空气利用率上升率几乎与喷油器数量成正比。d布置尽管喷射率与c布置相同,但由于喷油器数量少,油束覆盖的空间范围小,故空气利用率低于c布置,反而与b布置十分接近。这一现象再次说明空气利用率难以准确反映缸内燃油状态受喷油参数的影响。喷油结束后,尽管燃油蒸汽的热扩散过程仍在进行,空气利用率却未表现出显著的变化规律,对缸内过程的刻画较为粗糙。总的来说,相对于空气利用率,过浓系数可以排除平均当量比的影响,

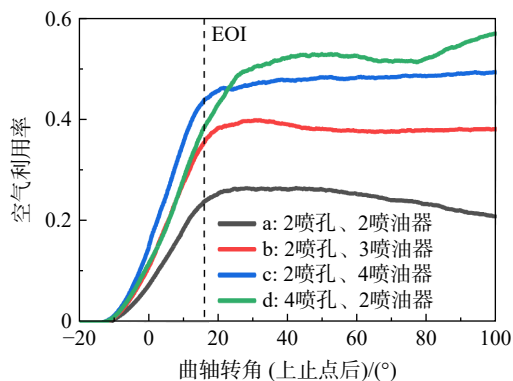


图6 喷嘴器布置对空气利用率变化规律的影响

Fig. 6 Effect of nozzle layout on trend of air utilization

且更适合反映喷油参数对喷雾燃烧过程中油气混合效果随曲轴转角变化规律的影响。本文主要以过浓系数作为油气混合指标研究对置活塞二冲程压燃式发动机喷雾燃烧过程的特性。

## 2 研究结果

### 2.1 涡流比对油气混合及燃烧效率的影响规律

喷孔布局如图7所示,为4喷油器位于同一垂直于气缸轴线的平面内并在气缸壁圆周均布,每个喷油器有四个呈扇形展开的喷孔,相邻喷孔间的夹角为15°。

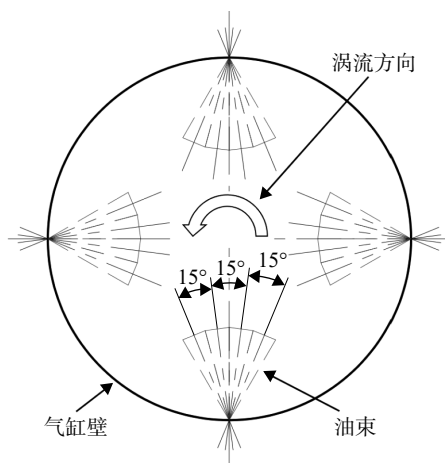


图7 喷嘴器倾角为0°时的喷孔布局

Fig. 7 Nozzle layout when injector yaw is 0°

图8展示了喷嘴器倾角为0°时各涡流比的缸内总过浓系数在燃烧过程中的变化规律,图9展示了各涡流比的瞬时放热率及燃烧效率(某曲轴转角下的累积放热量与每循环喷入燃油的化学能之比,记为 $E_c$ )在燃烧过程中的变化规律,以探索涡流比对油气混合及燃烧过程的影响规律。图中以虚线标出了喷油结束时刻(EOI),位于曲轴转

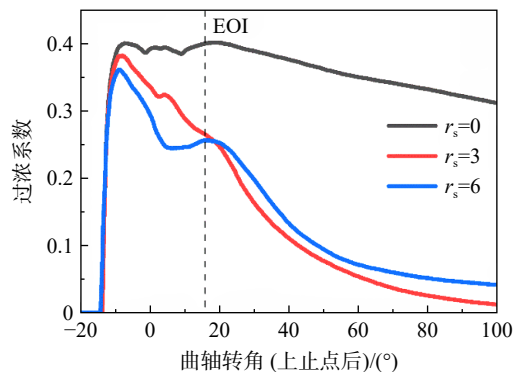


图8 涡流比对总过浓系数变化规律的影响

Fig. 8 Effect of swirl ratio on trend of total coefficient of richness

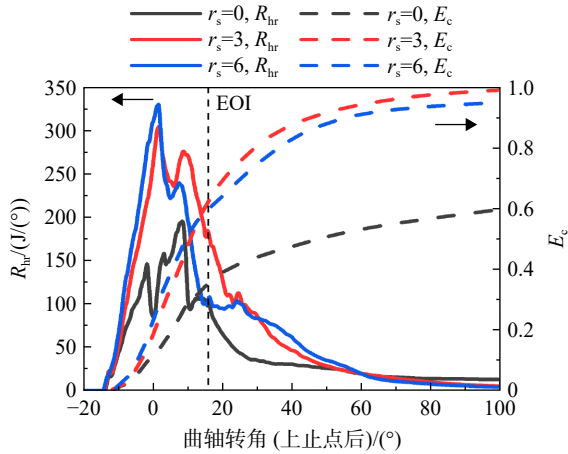


图 9 涡流比对瞬时放热率及燃烧效率变化规律的影响

Fig. 9 Effect of swirl ratio on trend of heat release rate and combustion efficiency

角上止点后 16.5°。由结果可见,在喷油结束前后,过浓系数受涡流比的影响规律有显著差异。

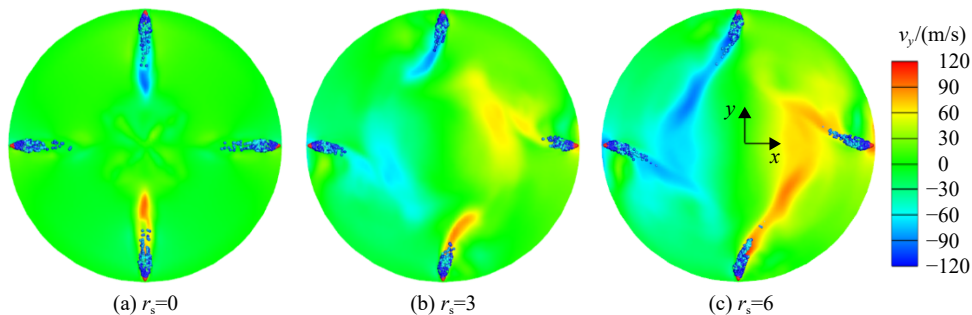
喷油开始后,所有情况的过浓系数都迅速达到了 0.35~0.4 左右,随后根据不同涡流比维持大致不变或逐渐下降。在整个喷油过程中,相同曲轴转角下过浓系数随涡流比的增大单调下降。涡流比等于零时,整个喷油过程的过浓系数大致维持在 0.4 上下,而涡流比等于 6 时,喷油结束时的过浓系数可低至 0.25。相应的,瞬时放热率峰值也随涡流比增大而单调增大,且出现的相位提前。在喷油结束时刻,涡流比等于 3 和 6 时的燃烧效率几乎相等,均显著高于涡流比为零时的燃烧效率。上述结果说明缸内流动强度对喷油过程前中期的油气混合及燃烧过程有显著影响,缸内流动强度越大则油气混合效果越好,喷油过程燃烧放热越快。

喷油结束后的热扩散过程中,相同曲轴转角下过浓系数总体上仍然随着涡流比的增大而减小,但 3 种涡流比下过浓系数的下降速度相差较大,且涡流比为 6 时反而高于涡流比为 3 时。在上止

点后 16°~60°的曲轴转角范围内,涡流比为 0 时的瞬时放热率显著低于其他两种情况,燃烧效率也增长缓慢,最终停留在 0.6 左右;涡流比为 3 时的瞬时放热率在上止点后 30°~60°的曲轴转角范围内略低于涡流比为 6 的情况,上止点后 60°之后不相上下,但在上止点后 10°~20°的曲轴转角范围内明显高于涡流比为 6 时,故燃烧效率也略高。

总的来说,从图 8 中的结果可知涡流比通过改变缸内油气混合效果显著影响了燃烧效率,但喷油过程中油气混合效果及瞬时放热率峰值随涡流比增大单调升高,而喷油结束后涡流比的影响规律非单调,其影响机理需进一步探究。

通过观察喷油过程中缸内速度分布规律可以研究涡流比对混合气团形态及径向贯穿的影响过程。图 10 为各涡流比下曲轴转角上止点后 8°时缸内  $y$  方向速度  $v_y$  分布。图中  $y$  方向为图片正上方,红色区域速度为正,表示方向向上;蓝色区域速度为负,表示方向向下;绿色区域速度较小。涡流比为零时,混合气团呈柱状分布,接近气缸轴线附近时速度降低至接近于零。涡流比等于 3 时,混合气团出现明显弯曲,径向贯穿距离减小;涡流比等于 6 时,由于涡流流速较大,混合气团被拉长,与相邻混合气团发生接触。图 11 为各涡流比下曲轴转角上止点后 16°时(喷油结束时刻)缸内当量比分布。从图 11 中可知,涡流比为零时,各喷油器的混合气团在气缸中心发生碰撞,燃油蒸汽在气缸中心聚集并存在一定的逆向流动。涡流比等于 3 时,混合气团在涡流的作用下发生显著偏转,燃油蒸汽在气缸中呈环形分布,气缸中心附近当量比低于 1.0;涡流比等于 6 时,燃油蒸汽分布同样呈环形分布,但分布直径更大,高当量比区域更接近气缸边缘。根据图 10、图 11 中的三维结果可以得出,缸内涡流会使混合气团向涡流下游方向偏转,这一偏转作用导致混合气在缸内的径向分布规律发生改变,从无涡流时聚集

图 10 涡流比对曲轴转角为 8°(上止点后)时缸内  $y$  方向速度分布的影响Fig. 10 Effect of swirl ratio on  $y$ -velocity distribution at 8° crank angle after TDC (ATDC)

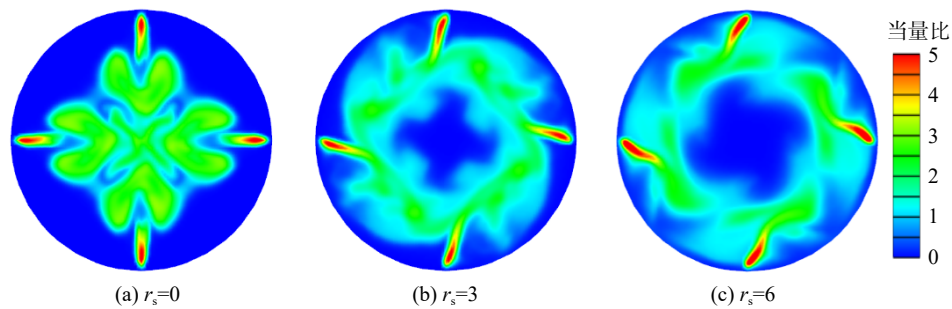


图 11 涡流比对曲轴转角为 16°(上止点后)时缸内当量比分布的影响

Fig. 11 Effect of swirl ratio on equivalence ratio distribution at 16° crank angle (ATDC)

在气缸中心附近随着涡流比的增大逐渐趋向气缸壁。这一燃油分布规律的改变对缸内油气混合效果有显著影响。

根据图 12 给出的过浓系数径向分布可以看出上述规律对缸内油气混合不均匀性的影响。过浓系数随径向位置和涡流比变化规律与当量比变化规律基本吻合。涡流比为 0 时,在接近气缸轴线的较大范围内有显著的过浓现象,过浓系数可达 1.0;涡流比为 3 时几乎不存在过浓;涡流比为 6 时,在接近气缸边缘的范围内有一定的过浓现象,过浓系数超过 0.1。

总结本节中的结果,喷油器倾角为 0°的条件下,提高涡流比可以强化喷油过程中的油气混合,同时改变喷油过程形成的燃油径向分布,进而对喷油结束后的燃烧效率产生非单调影响。当燃油分布区域与气缸壁、气缸轴线距离均较远时,有利于热扩散主导的油气混合,故而能达到较低的过浓系数,提高燃烧效率。过小或过大的涡流比

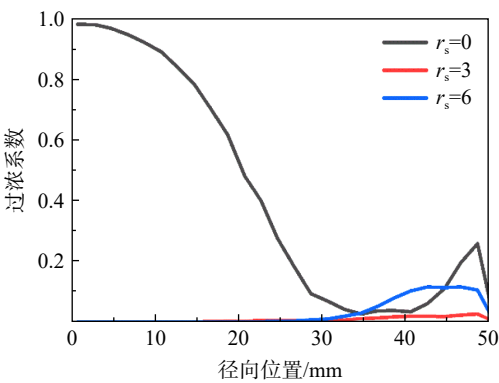


图 12 涡流比对曲轴转角为 100°(上止点后)时缸内过浓系数的径向分布的影响

Fig. 12 Effect of swirl ratio on radial distribution of coefficient of richness at 100° crank angle (ATDC)

使燃油过度集中于气缸轴线附近或气缸壁附近,造成局部过浓,都会对喷油结束后的燃烧放热产生负面影响。以上即为喷油器倾角为 0°时涡流比对燃烧效率的影响机理,在图 13 中进行了归纳。

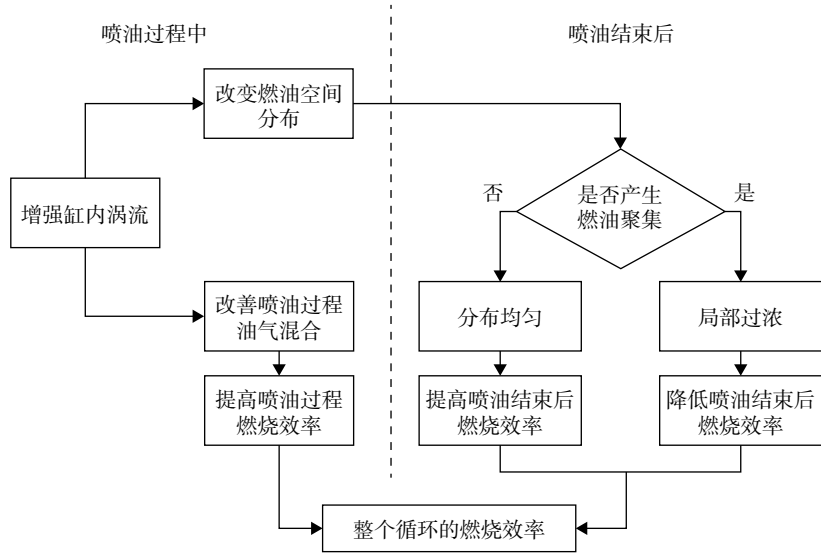


图 13 涡流比对燃烧效率的影响机理

Fig. 13 Mechanism of swirl ratio's effect on combustion efficiency

## 2.2 喷油器倾角对油气混合及燃烧效率的影响规律

为研究喷油器倾角对油气混合及燃烧效率的影响,在文中第2.1节中所述喷油参数的基础上增加 $22.5^\circ$ 的喷油器倾角,如图14,其他参数均相同,并进行计算。当喷油器倾角不为 $0^\circ$ 时,相同角速度但不同方向的涡流与油束的交互规律存在差异,故以正负涡流比加以区分。涡流比为正时喷油器指向涡流上游方向,为负时指向下游方向。

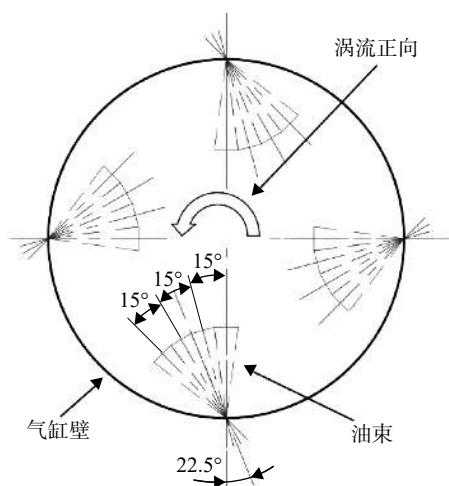


图14 22.5°喷油器倾角下的喷孔布局

Fig. 14 Nozzle layout when injector yaw is  $22.5^\circ$

图15中为喷油器倾角 $22.5^\circ$ 时各涡流比下总过浓系数随曲轴转角变化规律。图中可见,在喷油过程前期,各涡流比下的总过浓系数都迅速达到了 $0.35\sim 0.4$ ,且涡流越强( $|r_s|$ 越大),总过浓系数越小,且总过浓系数随曲轴转角下降越快。这一规律与图8中喷油器倾角为 $0^\circ$ 的结果没有显著差异。从喷油中后期开始,这一规律出现变化,涡流比为 $-6$ 及 $3$ 的总过浓系数随曲轴转角下降的速率显著低于其他情况,并导致曲轴转角上止点后 $100^\circ$ 时刻的过浓系数过大,对应的燃烧效率降低。这一现象需结合燃油及过浓区域的空间分

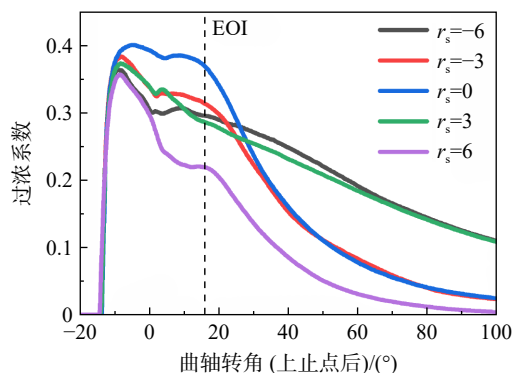


图15 22.5°喷油器倾角下涡流比对总过浓系数变化规律的影响

Fig. 15 Effect of swirl ratio on trend of total coefficient of richness at injector yaw is  $22.5^\circ$

布进一步分析。

$22.5^\circ$ 喷油器倾角下曲轴转角上止点后 $8^\circ$ 时 $y$ 方向速度结果及曲轴转角上止点后 $16^\circ$ 时缸内当量比分布结果在图16、图17中给出。由于喷油器倾角的存在,涡流比对混合气团空间分布的影响更为显著。涡流比小于零时,由于涡流方向与油束喷射方向相同,混合气团延伸范围相较于喷油器倾角为 $0^\circ$ 时更大,形成连贯的环形,各喷油器的混合气团间没有明显的界限;其中涡流比等于 $-6$ 时燃油分布区域过于靠近气缸壁,导致其分布宽度变窄,燃油分布更密集。涡流比等于零时,各喷油器的混合气团显著分离;由于喷油器倾角的存在,混合气团并不指向气缸中心,故气缸中心当量比较小,燃油分布略靠外。涡流比等于 $3$ 时,速度分布出现显著变化;由于涡流方向与喷雾方向相反,混合气团向涡流下游方向偏转并指向气缸中心;从当量比分布可以看出,此时燃油蒸汽集中于气缸中心,形成了连续的高浓度区域。涡流比等于 $6$ 时,由于气流流速过大,混合气团被反向吹向下游。此时形成的燃油分布区域又成为了环形,气缸边缘也存在一定的燃油分布,而气

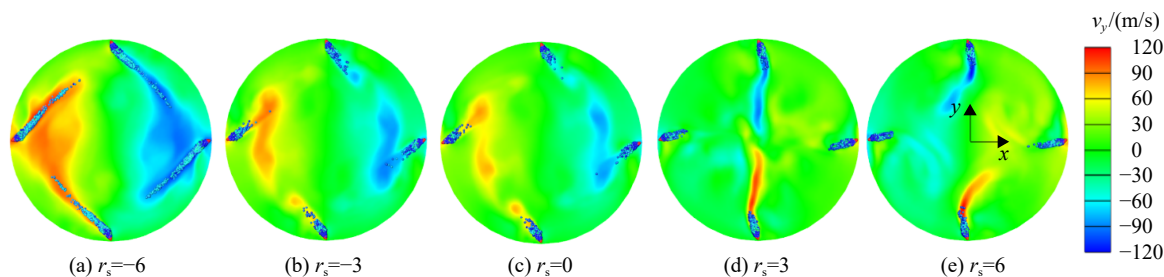


图16 22.5°喷油器倾角下涡流比对曲轴转角为 $8^\circ$ (上止点后)时缸内 $y$ 方向速度分布的影响

Fig. 16 Effect of swirl ratio on  $y$ -velocity distribution at  $8^\circ$  crank angle (ATDC) and injector yaw is  $22.5^\circ$

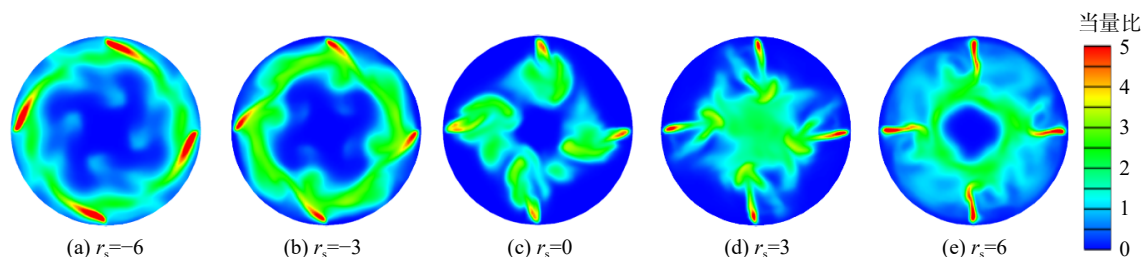


图 17 22.5° 喷油器倾角下涡流比对曲轴转角为 16° (上止点后) 时缸内当量比分布的影响

Fig. 17 Effect of swirl ratio on equivalence ratio distribution at 16° crank angle (ATDC) and injector yaw is 22.5°

缸中心当量比较低。

图 18 是 22.5° 喷油器倾角下曲轴转角上止点后 100° 时缸内过浓系数的径向分布。当涡流比为零时, 22.5° 的喷油器倾角可以在整个缸内空间中形成相对较为均匀的混合气径向分布, 此时在较广的空间范围内均有不大的过浓存在, 参考图 17 中给出的当量比分布, 经分析推测为燃油蒸汽周向分布不均匀所致。因此, 在不组织缸内涡流时, 相比于喷油器轴线正对气缸轴线的喷油方式, 采用一定的喷油器倾角可减小燃油混合气团的径向贯穿距离, 大幅改善缸内燃油分布的均匀性, 显著减小过浓现象。

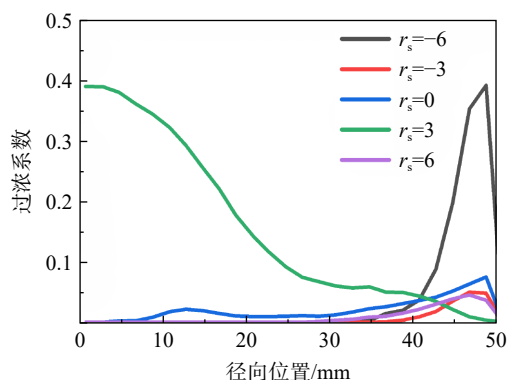


图 18 22.5° 喷油器倾角下涡流比对曲轴转角为 100° (上止点后) 时缸内过浓系数的径向分布的影响

Fig. 18 Effect of swirl ratio on radial distribution of coefficient of richness at 100° crank angle (ATDC) and injector yaw is 22.5°

当涡流比小于零时, 涡流流动方向与油束喷射方向一致, 并促使燃油分布接近缸壁。涡流比从 0 变化到 -3 时, 从图 17 可知燃油分布向外移动且在周向上分布更均匀, 故该涡流比下的过浓系数在整个径向范围内相比于涡流比为零时都有所减轻, 过浓现象主要出现在径向位置大于 40 mm 处。涡流比进一步变化到 -6 时, 燃油更加向气缸壁聚集, 在径向位置大于 40 mm 的范围内出现了

严重的过浓现象, 过浓系数最高可达 0.4 左右。

当涡流比大于零时, 过浓系数径向分布规律随涡流比变化规律同样非单调。涡流比达到 3 时, 整个径向范围内均有显著的过浓现象, 在径向位置小于 20 mm 的气缸中心附近尤其显著, 气缸轴线附近有最大值 0.4。涡流比达到 6 时, 随着燃油分布径向位置再次加大, 过浓现象又显著缓解。此时过浓系数分布类似于涡流比 -3 的情况, 整个径向范围内过浓系数均不超过 0.05。

归纳本节内容可知, 与喷油器倾角为 0° 时类似, 喷油器倾角为 22.5° 时, 涡流比同样通过影响喷油结束时的燃油径向分布决定喷油结束后的燃烧放热并进而影响了整个燃烧过程的燃烧效率。不同的是, 由于喷油器倾角的存在, 加强涡流并不一定使燃油的空间分布向气缸壁附近移动。例如, 涡流比等于 3 时, 燃油分布比涡流比等于零时更为接近气缸中心。涡流比不等于 3 时, 无论是更大或更小, 燃油分布范围均向气缸壁移动。从这一角度看, 可以把喷油器倾角对燃油空间分布的影响与涡流比的影响相类比, 且两者可互相叠加。在本节所涉及的结果中, 22.5° 的喷油器倾角大致“抵消”了涡流比为 3 的缸内涡流对燃油径向分布的影响。综上所述, 在喷油器倾角不为零时, 缸内涡流通过影响喷油结束时燃油径向分布改变燃烧效率的机理并未改变, 喷油器倾角的作用可以近似折算为一定的涡流比, 并与真正意义上的涡流比相叠加。

### 3 结 论

本文针对 OP2S 燃烧效率相关研究中存在的问题, 提出过浓系数的概念并通过数值模拟方法研究了 OP2S 中涡流比及喷油器倾角对油气混合效果及燃烧效率的影响规律, 主要结论如下:

1) 给出过浓系数的定义并以之作为对置活塞二冲程压燃式发动机喷雾燃烧过程缸内油气混

合效果的评价指标。仿真结果表明相较于空气利用率, 燃烧结束时刻的总过浓系数与燃烧效率的相关性更强。此外, 总过浓系数可以排除平均当量比的影响并反映喷油参数对喷雾过程中油气混合效果的影响并描述喷油结束后的燃油扩散过程。

2) 提高涡流比可以提高喷油过程中的油气混合效果及燃烧效率, 同时改变喷油结束时的燃油径向分布; 过小或过大的涡流比使燃油在气缸轴线或气缸壁附近局部过浓, 都会对喷油结束后的燃烧放热产生负面影响。整个循环的燃烧效率由喷油过程中及喷油结束后的燃烧放热过程共同决定。在本文研究的范围内, 涡流比对燃油径向分布的影响可以使燃烧效率在 0.6~1.0 的范围内变化。

3) 喷油器倾角同样可以改变燃油径向分布位置, 且这一影响可以与涡流对燃油径向分布规律的影响相叠加, 故在对置活塞二冲程压燃式发动机中喷油器倾角对燃油径向分布的作用可以近似折算为一定的涡流比。正向喷油器倾角类同于一定大小的负向涡流。

## 参考文献:

- [1] 卢东亮, 郑君, 胡崇波, 等. 通用航空活塞发动机的发展现状研究[J]. 内燃机与配件, 2019(8): 64-66.  
LU Dongliang, ZHENG Jun, HU Chongbo, et al. Research on development status of general aviation piston engine[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2019(8): 64-66. (in Chinese)
- [2] 郑君. 通用航空活塞发动机现状及发展趋势探讨[J]. 内燃机与配件, 2020(19): 196-198.  
ZHENG Jun. Discussion on the present situation and development trend of general aviation piston engine[J]. Internal Combustion Engine and Parts, 2020(19): 196-198. (in Chinese)
- [3] 丁水汀, 宋越, 杜发荣, 等. 航空重油活塞发动机发展趋势及关键技术分析[J]. 航空动力学报, 2021, 36(6): 1121-1136.  
DING Shuiting, SONG Yue, DU Farong, et al. Analysis on development trend and key technology of aircraft heavy fuel piston engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(6): 1121-1136. (in Chinese)
- [4] PIRAULT J P, FLINT M. Opposed piston engines: evolution, use, and future applications[R]. Warrendale, US: SAE International, 2010.
- [5] KALKSTEIN J, RÖVER W, CAMPBELL B, et al. Opposed piston opposed cylinder (opoc™) 5/10 kW heavy fuel engine for UAVs and APUs[R]. Warrendale, US: SAE International, 2006.
- [6] HOFBAUER P. Opposed piston opposed cylinder (opoc) engine for military ground vehicles[R]. Warrendale, US: SAE International, 2005.
- [7] FRANKE M, HUANG Hua, LIU Jing, et al. Opposed piston opposed cylinder (opoc™) 450 hp engine: performance development by CAE simulations and testing[R]. Warrendale, US: SAE International, 2006.
- [8] 许汉君, 宋金瓯, 姚春德, 等. 对置二冲程柴油机缸内流动形式对混合气形成及燃烧的模拟研究[J]. 内燃机学报, 2009, 27(5): 395-400.  
XU Hanjun, SONG Jinou, YAO Chunde, et al. Simulation on In-cylinder flow on mixture formation and combustion in OPOC engine[J]. Transactions of CSICE, 2009, 27(5): 395-400. (in Chinese)
- [9] ZHANG Zhenyu, ZHAO Changlu, XIE Zhaoyi, et al. Study on the effect of the nozzle diameter and swirl ratio on the combustion process for an opposed-piston two-stroke diesel engine[J]. Energy Procedia, 2014, 61: 542-546.
- [10] 郭勇, 续彦芳. 双对置二冲程柴油机不同扫气口结构对燃烧过程的影响[J]. 内燃机, 2016(1): 13-16.  
GUO Yong, XU Yanfang. Influence of different scavenging port structure on combustion process in opposed piston opposed cylinder two stroke diesel engine[J]. Internal Combustion Engines, 2016(1): 13-16. (in Chinese)
- [11] ZHANG Zhenyu, ZHANG Peng. Cross-impingement and combustion of sprays in high-pressure chamber and opposed-piston compression ignition engine[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 144: 137-146.
- [12] ZHAO Zhenfeng, WU Dan, ZHANG Fujun, et al. Design and performance simulation of opposed-piston folded-cranktrain engines [R]. Warrendale, US: SAE International, 2014.
- [13] 强永平, 李耀宗, 白洪林, 等. 组合喷射对双对置二冲程发动机燃烧过程影响的计算研究[J]. 车用发动机, 2014(5): 46-53.  
QIANG Yongping, LI Yaozong, BAI Honglin, et al. Influence of combined injection on OPOC two-stroke engine combustion[J]. Vehicle Engine, 2014(5): 46-53. (in Chinese)
- [14] MA Fukang, ZHAO Changlu, ZHANG Fujun, et al. An experimental investigation on the combustion and heat release characteristics of an opposed-piston folded-cranktrain diesel engine[J]. Energies, 2015, 8(7): 6365-6381.
- [15] 刘彩明, 续彦芳, 许俊峰, 等. 对置活塞二冲程柴油机喷油角度对油气混合的影响[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(2): 227-230.  
LIU Caiming, XU Yanfang, XU Junfeng, et al. Influence of fuel injection angle on air-fuel mixing and combustion of OPOC engine[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(2): 227-230. (in Chinese)
- [16] 章振宇, 赵长禄, 张付军, 等. 对置二冲程柴油机喷油规律曲线对燃烧过程影响的仿真研究[J]. 内燃机工程, 2015, 36(6): 32-37.  
ZHANG Zhenyu, ZHAO Changlu, ZHANG Fujun, et al. Simulation of the effect of fuel injection rate-shape on combustion process of an opposed-piston two-stroke diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2015, 36(6): 32-37. (in Chinese)
- [17] 谢钊毅. 对置活塞二冲程柴油机喷雾过程的试验研究与数值模拟[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.  
XIE Zhaoyi. Experimental study and numerical simulation of the spray process in an opposed-piston two-stroke diesel engine[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [18] ZHANG Zhenyu, ZHANG Peng, ZHAO Zhenfeng. Spray impingement and combustion in a model opposed-piston compression ignition engine[J]. Combustion Science and Technology, 2017, 189(11): 1943-1965.
- [19] 刘宇航, 赵振峰, 张付军, 等. 对置活塞二冲程柴油机双喷

- 油器碰撞喷雾试验研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(10): 1881-1890.
- LIU Yuhang, ZHAO Zhenfeng, ZHANG Fujun, et al. Experimental study of impingement spray of dual-fuel injector of opposed piston two-stroke diesel engine[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(10): 1881-1890. (in Chinese)
- [20] 马富康, 赵长禄, 张付军, 等. 对置活塞二冲程汽油机燃烧过程组织研究[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2017, 46(1): 1-9.
- MA Fukang, ZHAO Changlu, ZHANG Fujun, et al. Organization of combustion process on opposed-piston two-stroke gasoline engine[J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technique, 2017, 46(1): 1-9. (in Chinese)
- [21] ZHOU Lei, ZHANG Hongxing, ZHAO Zhenfeng, et al. Research on opposed piston two-stroke engine for unmanned aerial vehicle by thermodynamic simulation[R]. Warrendale, US: SAE International, 2017.
- [22] 陈泽玉. 对置活塞二冲程发动机缸内燃烧数值模拟及优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- CHEN Zeyu. Numerical simulation and optimization of In-cylinder combustion of opposed piston two stroke engine[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [23] VENUGOPAL R, ABANI N, MACKENZIE R. Effects of injection pattern design on piston thermal management in an opposed-piston two-stroke engine[R]. Warrendale, US: SAE International, 2013.
- [24] HUO Ming, HUANG Yuexin, HOFBAUER P. Piston design impact on the scavenging and combustion in an opposed-piston, opposed-cylinder (OPOC) two-stroke engine[R]. Warrendale, US: SAE International, 2015.
- [25] SHIRVANI S, SHIRVANI S, SHAMEKHI A. Effects of injection parameters and injection strategy on emissions and performance of a two-stroke opposed-piston diesel engine[R]. Warrendale, US: SAE International, 2020.
- [26] LEFEBVRE A H, MCDONELL V G. Atomization and sprays[M]. 2nd ed. Boca Raton, US: Taylor & Francis Group, 2017.

(编辑: 王碧珺)