

分层扫气二冲程汽油机的数值模拟

马玉龙, 杨海青, 徐光荣
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为研究分层扫气发动机的扫气特性和工作机理,建立了分层扫气发动机三维模型,并利用三维 CFD 仿真软件 Fluent 在额定转速下分别对有无分层扫气系统的发动机流场进行仿真与分析,计算所需的边界条件通过对发动机进行一维模拟计算得到。结果表明:分层扫气发动机在工作过程中利用纯空气在新鲜混合气和废气之间形成分层,并由纯空气承担一部分扫气损失,使得未燃碳氢化合物的排放减少了 15%,提高了发动机的燃油经济性;有无分层扫气发动机扫气效率都是 75%,分层扫气系统对发动机扫气效率没有较大影响,研究结果可以为分层扫气发动机的设计提供参考。

关 键 词: 分层扫气; 二冲程; CFD 仿真; 一维性能仿真; 扫气损失

中图分类号: V234⁺.1 **文献标志码:** A

Numerical simulation of stratified scavenging two-stroke gasoline engine

MA Yulong, YANG Haiqing, XU Guangrong
(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A three-dimensional model of stratified scavenging engine was established to study the scavenging characteristics and working mechanism of stratified scavenging engine, then three-dimensional CFD software Fluent was used to simulate and analyze the fluid structure with or without stratified scavenging system at rated speed, and the boundary conditions required for its calculation were obtained by one-dimensional simulation calculation of the engine. Results showed that, the stratified scavenging engine used pure air to form a stratification between the fresh mixture and the exhaust gas during operation, a part of the scavenging loss was taken by the pure air, which reduced 15% of unburned hydrocarbon and improved the fuel economy of the engine; the stratified scavenging engine and the non-stratified scavenging engine had a scavenging efficiency of 75%, without significant effect on the scavenging efficiency. The results of the research can provide reference for the design of stratified scavenging engines.

Key words: stratified scavenging; two-stroke; CFD simulation;
one-dimension performance simulation; scavenging loss

小型二冲程发动机由于其功质比高、结构简单、技术成熟、成本较低等诸多优点,在无人机等小型航空飞行器上有着非常广泛的应用^[1]。然而

其扫气期间新鲜混合气的损失不可避免,高达 30%~40%^[2],使其燃油消耗率和未燃碳氢化合物(unburned hydrocarbon, UHC)排放量较高,

限制了飞行器的续航能力,也限制了二冲程汽油机的广泛应用^[3-7]。

二冲程发动机曲轴每转过一周,活塞上下两个行程,就完成一个工作循环,各缸做功一次。为了实现这种工作循环,必须要能提供足够高压力的新鲜充量来清除上一循环产生的废气。在二冲程发动机的换气过程中,最理想的情况是扫气气流直接将废气全部扫除,而扫气气流不与上一循环的废气进行混合,然而在实际工作过程中,废气与新鲜充量相混合是不可避免的,一部分废气留在气缸中,一部分新鲜充量由排气口逸出。传统二冲程汽油机在扫气过程中使用的是燃油-空气混合气进行扫气,任何混合气的外溢都意味着燃油的损失,这就造成了传统二冲程发动机燃油经济性的降低,以及 UHC 排放的增加。

分层扫气是使混合气和废气之间形成分层介质,并由其承担扫气损失的扫气方法。分层扫气介质可以是纯空气、废气、或者稀混合气等失不足惜的气体^[3]。分层介质先于混合气进入气缸形成分层扫气。

本文通过开展分层扫气发动机的性能标定试验,建立原机的一维性能仿真模型以及相应的 CFD 数值模拟,对分层扫气发动机在额定转速下的流场特性进行了研究,研究结果可以为分层扫气发动机的设计提供参考。

1 分层扫气发动机工作过程

本文对一款小型分层扫气发动机进行仿真试验。图 1 为分层扫气发动机的模型简图,此模型通过三维建模软件 UG(Unigraphics)NX 绘制而成,包括火花塞、散热片、燃烧室、扫气道、曲轴箱、双进气道、活塞和排气消声器。

表 1 为发动机的主要参数。发动机采用活塞

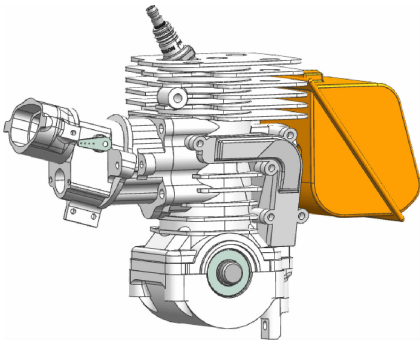


图 1 分层扫气发动机模型
Fig.1 Model of the stratified scavenged engine

表 1 发动机主要参数
Table 1 Main parameter of the engine

参数名称	数值及详情
气缸直径/mm	44
活塞冲程/mm	33
连杆长度/mm	58.5
进气方式	活塞阀式
扫气口开启时相位角/(°)	115(ATDC)
扫气口关闭时相位角/(°)	245(ATDC)
排气口打开时相位角/(°)	105(ATDC)
排气口关闭时相位角/(°)	255(ATDC)
主进气口打开时相位角/(°)	287(ATDC)
主进气口关闭时相位角/(°)	73(ATDC)
副进气口打开时相位角/(°)	284(ATDC)
副进气口关闭时相位角/(°)	76(ATDC)

阀控制进气,主进气口在上止点后 287°(after top dead center, ATDC)时打开,副进气口在上止点后 284°时打开。

图 2 为发动机进气过程简图,在进气过程中,活塞上行,曲轴箱内产生负压,副进气道与活塞表面凹槽联通,在内外压差的作用下,纯空气经过副进气道和活塞表面的凹槽进入扫气道上侧,同时混合气通过主进气道进入曲轴箱。

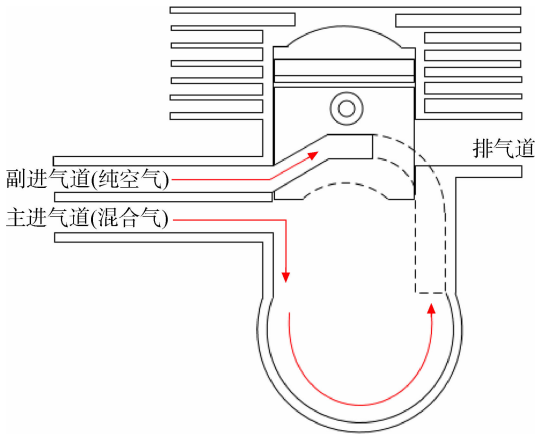


图 2 分层扫气发动机进气过程
Fig.2 Stratified scavenged engine during intake stroke

图 3 为发动机扫气过程简图,扫气过程中,活塞下行,主副进气道关闭,曲轴箱的压力升高,当气缸内压力小于扫气道内压力时,纯空气开始进入气缸进行强制排气,此时纯空气在气缸内沿着一定的方向驱赶废气,大量气体随着废气一起被

排出,最终浓混合气被扫入气缸,排气口关闭时浓混合气在气缸内继续流动混合直至点火燃烧。纯空气在扫气初期阶段进入气缸,承担了扫气损失,减少了新鲜充量的短路损失,达到了节油和减少 UHC 排放的目的^[8-9]。

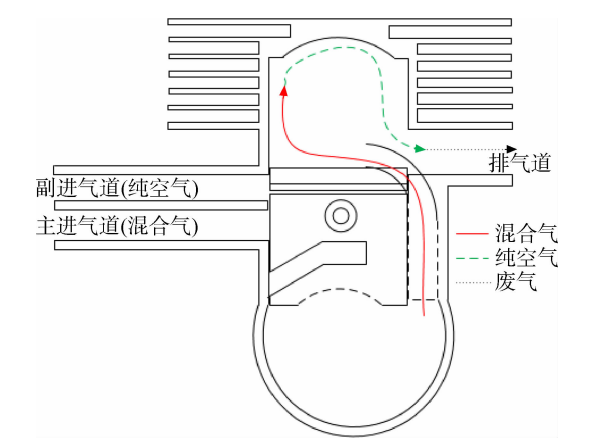


图 3 分层扫气发动机扫气过程

Fig. 3 Stratified scavenged engine during scavenging

2 仿真模型和设置

2.1 一维仿真模型搭建及标定

发动机工作过程试验研究周期长、成本高,提供的数据量有限。在工程实际中,采用计算机仿真可在抽象的模型上进行数值计算,解决真实试验难以解决的问题,不受时间、经费、场地等因素的限制,同时可以提供目前实验研究所不能提供的信息量,而且花费少、周期短^[10-12]。

为了充分了解分层扫气二冲程汽油机的性能,本文进行了各种负荷下的试验研究,得到这款发动机的外特性曲线,并使用 GT-Power 软件建立此发动机的一维仿真模型。建立发动机一维性能仿真模型,就是对实际发动机中气缸、管道等的工作过程进行数值模拟,采用适当的模拟理论和方法,确定边界条件^[10]。

本文仿真计算使用的 GT-Power 软件采用有限容积法对管内一维非定常流动的基本方程式进行数值计算。根据发动机数值仿真实理论以及相应的建模步骤^[12-14],利用 GT-Power 软件进行原型机整机模型搭建。其中的流体模型同时满足质量守恒、能量守恒、动量守恒^[15]。利用发动机台架(见图 4)试验所测量的数据对一维仿真模型进行标定,在模型计算的过程中对个别参数进行调整,最终得到比较准确的发动机仿真模型和仿真结果,一维性能仿真结果与试验结果曲线如图 5 所

示。发动机的功率和转矩数据误差在 5% 以内。

一维性能仿真模型能得到发动机工作过程中各种动态数据,得到压力、温度、流量等曲线,为三维数值模拟提供边界条件^[16-17]。本文主要的流场计算工况是额定转速全负荷工况,图 6、图 7、图 8 分别为额定转速全负荷工况下一维性能仿真计算得到的扫气口压力曲线、缸内压力曲线和排气口压力曲线。



图 4 发动机试验台架

Fig. 4 Engine test bench

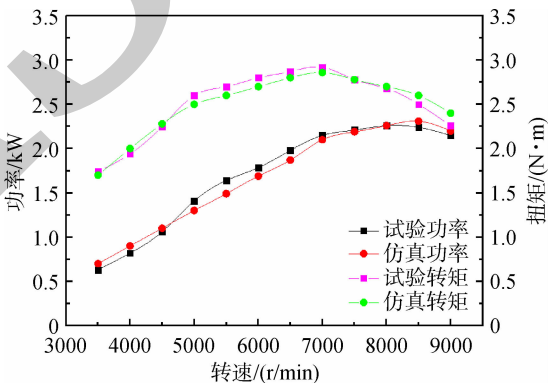


图 5 发动机外特性曲线

Fig. 5 Engine external characteristic curve

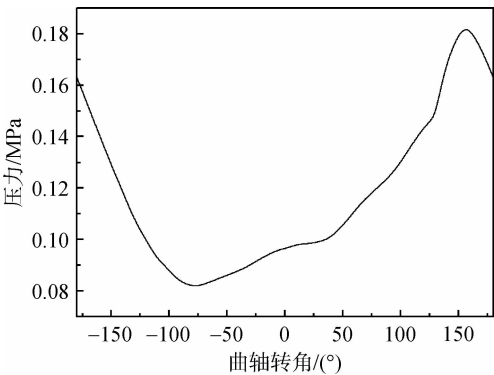


图 6 扫气口压力曲线

Fig. 6 Pressure curve of the scavenging port

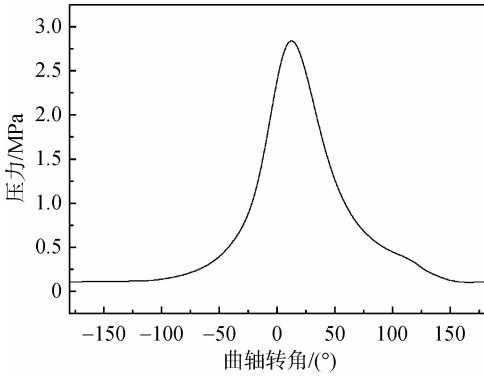


图 7 缸内压力曲线

Fig. 7 Pressure curve of the cylinder

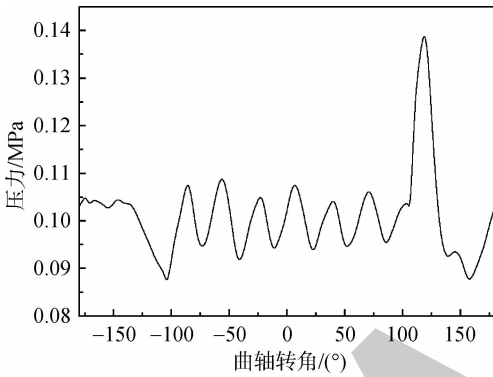


图 8 排气口压力曲线

Fig. 8 Pressure curve of the exhaust port

2.2 模型网格划分和边界条件设置

为了研究分层扫气发动机的工作过程和工作机理,对发动机模型进行了简化处理,取消了曲轴箱内的曲柄连杆机构,通过对曲轴箱和扫气道体积的测量,在保证曲轴箱压缩比的前提下对曲轴箱进行简化。最终计算域包括燃烧室、扫气道、活塞、曲轴箱、双进气道、排气消声器。其中扫气口、排气口和进气口的开闭均由活塞控制。

图 9 为模型网格,本文对三维计算模型的离散过程是通过软件 ICEMCFD(integrated computer engineering and manufacturing code for computational fluid dynamics)进行网格划分来实现。在划分网格时,除了考虑各个区域的网格质量,还需要考虑实现活塞运动的方法^[18],由于本文活塞结构比较复杂,故采用了非结构网格。为了保证计算精度和计算成本,对不同的计算区域设置了不同的网格大小,尝试多种网格划分之后,排气消声器和曲轴箱采用了较大的网格,网格大小保持在 3.0~3.5 mm 范围内以减小计算成本;副进气道、活塞和扫气道则采用了较小的网格,网

格大小保持在 1~2 mm 范围内以保证计算精度,经过计算得到网格总数为 994 775 个,网格质量均在 0.3 以上,计算误差较小且计算成本较低。

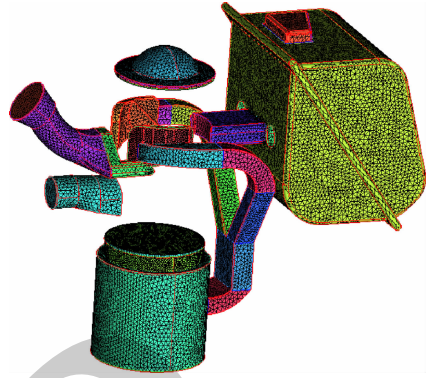


图 9 模型网格

Fig. 9 Mesh of the model

将网格导入到 Fluent 软件中进行计算,考虑到不同曲轴转角下气体的流动,本文采用非稳态计算方法,选择标准 $k-\epsilon$ 湍流模型和组分运输模型来计算流场域的发展,其中 $k-\epsilon$ 方程如式(1)和式(2),组分运输模型选用了数据库中的 noctane-air,同时使用动网格模型来模拟发动机活塞的上下运动。

k 方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \mu_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon - Y_m \tag{1}$$

ϵ 方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon \mu_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \tag{2}$$

式中 μ_t 是湍流黏度, ρ 为流体密度, G_k 为由于平均速度梯度而引起的湍动能产生项, Y_m 为可压缩湍流中脉动扩张的贡献, Pr_k 、 Pr_ϵ 分别为 k 、 ϵ 的湍流普朗特数, C_1 、 C_2 为经验公式。

各个初始条件的设定根据实际情况和一维性能仿真模型得到的结果设定。由于管道内的流动比较复杂,所以很难较为准确地给出扫气道内的压力,本文通过计算一个周期后,进气道、扫气道以及排气道已经形成比较准确的压力场,然后再以此作为初始条件进行第二个循环的计算。主副进气道、排气道、排气消声器内的初始压力设置为 0.1 MPa,曲轴箱和缸内的压力由一维性能仿真模型得到的压力曲线进行设置;分布给予进气口和消声器排气口压力入口和压力出口边界;排气

口入口、扫气口出口、拉伸的缸体、拉伸的曲轴箱体、进气口出口、活塞设置为交互面,随着活塞的上下移动各个交互面互相连接,实现气体的流动。

气缸内和各气道内物质组分的初始质量分数 w_{xx} ,其中下标为某物质的组分,如表 2 所示,扫气道、曲轴箱、主进气道内燃油的初始质量分数设置为 7.8%,其过量空气系数为 0.8;气缸内各组分的初始质量分数为一维仿真计算所得到的计算结果,副进气道、活塞、排气管和排气消声器内为纯空气。

表 2 各气道内物质组分的初始质量分数(分层扫气)
Table 2 Initial mass fraction of species in pipes
(stratified scavenging engine) %

参数	副进气道	气缸	曲轴箱	排气消声器
w_{O_2}	22	1.9	20.3	22
w_{N_2}	78	72.1	71.9	78
w_{fuel}	0	0	7.8	0
w_{CO_2}	0	18.8	0	0
w_{H_2O}	0	7.2	0	0

3 结果与分析

3.1 仿真结果

整个三维计算过程自上止点即曲轴转角(crank angle,CA)为 0°开始到 720°结束,共计两个工作循环。

图 10 为上止点 0°(CA)时 HC(hydrocarbon,燃油)的质量分数,红色区域表示质量分数为 7.8%的燃油-空气混合气,其过量空气系数为 0.8;白色区域表示不含燃油。其中主进气道、曲轴箱、扫气道内是过量空气系数为 0.8 的混合气,而副进气道、活塞、排气管、排气消声器、缸内不含燃油。

图 11 为 290°(CA)时燃油的质量分数,第一

个工作循环的扫气过程结束,副进气道、活塞与扫气道联通,由于外界压力大于扫气道内压力,纯空气沿着副进气道进入扫气道上侧,燃油-空气混合气从主进气道进入曲轴箱,缸内燃油的质量分数约为 5.9%;扫气结束后较稀的燃油-空气混合气沿着排气管进入排气消声器内。

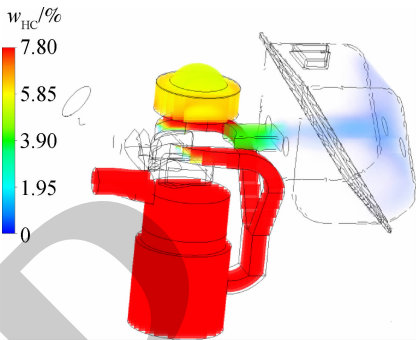


图 11 290°(CA)时 HC 的质量分数
Fig. 11 Mass fraction of HC at 290°(CA)

图 12 为 360°(CA)时燃油的质量分数,随着活塞上行,副进气道、活塞、扫气道联通面积逐渐变大,在压力的作用下,纯空气开始大量进入扫气道。当活塞达到上止点时,进气道与活塞接触的面积较少,纯空气进入扫气道的体积减少,扫气道上侧压力降低形成负压区,在压力波动的作用下混合气与纯空气在扫气道中部发生混合。

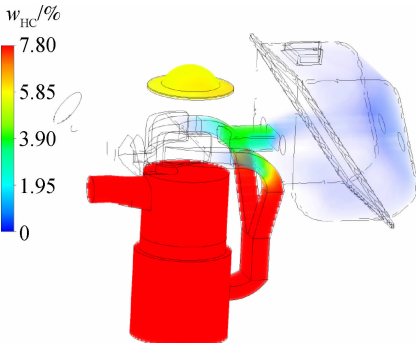


图 12 360°(CA)时 HC 的质量分数
Fig. 12 Mass fraction of HC at 360°(CA)

活塞下行压缩曲轴箱,曲轴箱内压力升高,扫气道入口压力升高,在压力作用下,混合气开始往扫气道上侧运动。图 13 为 450°(CA)时燃油的质量分数,图中可以看出燃油-空气混合气在压力的作用下已经到达扫气道上侧,此时扫气道、活塞、副进气道已经不再接触,扫气道上侧形成封闭区域,混合气在扫气道内压缩,扫气道内压力升高。

图 14 为 500°(CA)时燃油的质量分数,此时

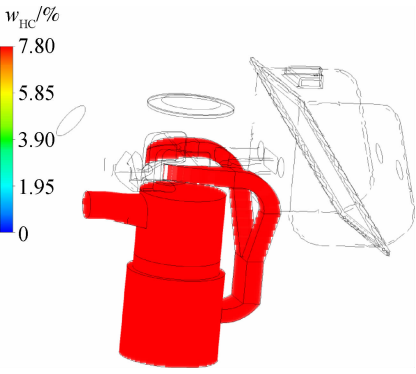


图 10 0°(CA)时 HC 的质量分数
Fig. 10 Mass fraction of HC at 0°(CA)

排气口与扫气口均已经打开,可以看出有少量较稀的燃油-空气混合气从扫气口进入气缸内,同时在缸内压力的作用下排气管内的混合气基本被排到排气消声器内。

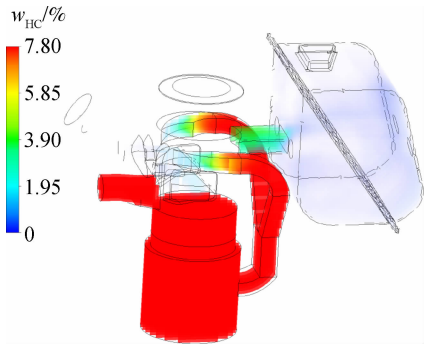


图 13 450°(CA)时 HC 的质量分数
Fig. 13 Mass fraction of HC at 450°(CA)

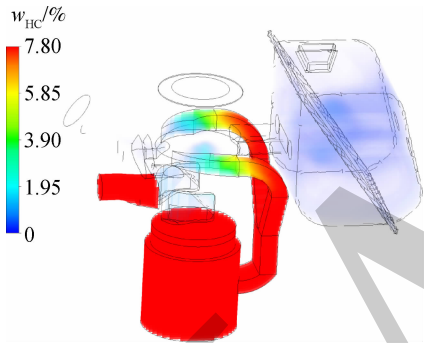


图 14 500°(CA)时 HC 的质量分数
Fig. 14 Mass fraction of HC at 500°(CA)

图 15 为 560°(CA)时燃油的质量分数,随着活塞下行,曲轴箱压力逐渐增大,混合气在压力作用下开始大量进入气缸参与扫气,有大量燃油经过扫气口进入气缸,大部分燃油经过扫气作用沿着气缸壁向上流动,但是有一部分燃油经过两个扫气口扫出气体的碰撞直接由排气口排出。在远离排气管的一侧燃油质量分数较高,燃油质量分数出现明显的分层现象,从远离排气口的一侧到排气口,燃油质量分数由高到低。可见首先被排出缸外的是空气和稀混合气,而浓混合气则被留在缸内。

图 16 为 620°(CA)时燃油的质量分数,扫气口和排气口已经关闭,新鲜混合气一方面受活塞压缩向上运动,另一方面由于其自身惯量作用产生旋转运动,同时还存在着湍流运动,这使得混合气在气缸内继续混合,而最终使燃油质量分数趋于均匀化。此时排气管内混合气质量分数较大,一部分混合气经过排气管进入排气消声器。

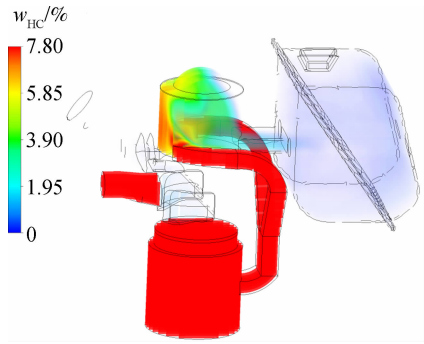


图 15 560°(CA)时 HC 的质量分数
Fig. 15 Mass fraction of HC at 560°(CA)

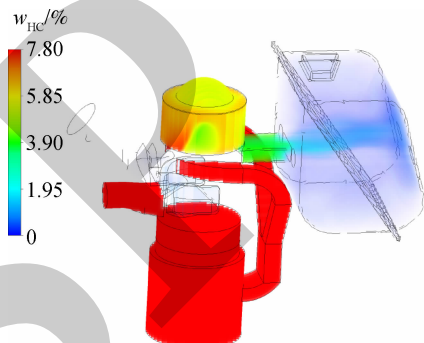


图 16 620°(CA)时 HC 的质量分数
Fig. 16 Mass fraction of HC at 620°(CA)

图 17 为 700°(CA)时燃油的质量分数,气缸内的燃油基本已经混合均匀,由于活塞上行,副进气道、活塞、扫气道联通,在压力的作用下,纯空气由副进气道进入扫气道,为下一次工作循环做准备。同时短路损失的燃油经过排气管进入排气消声器。

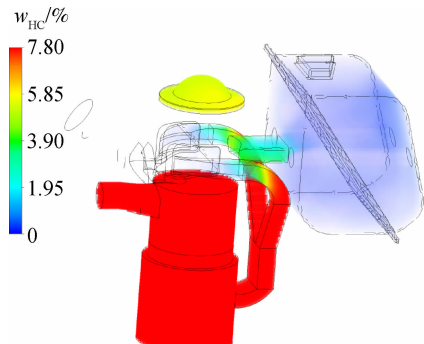


图 17 700°(CA)时 HC 的质量分数
Fig. 17 Mass fraction of HC at 700°(CA)

3.2 有无分层扫气对比

为了研究分层扫气系统的扫气特性,本文对无分层扫气系统的发动机也进行了三维数值模

拟,两者使用相同的边界条件,计算从上止点 0°(CA)开始到 720°(CA)结束,共计两个工作循环。有无分层扫气系统的主要区别在于扫气过程,为了保证分层扫气发动机和有无分层扫气发动机进入气缸内的燃油质量相同,本文对无分层扫气系统仿真使用的混合气质量分数进行修改。

图 18 为分层扫气发动机主副进气道在进气过程中的总质量流量,副进气道在 260°(CA)到 360°(CA)的曲轴转角范围内的质量流量逐渐增加,360°(CA)之后由于活塞下行压缩曲轴箱使得曲轴箱压力升高,导致储存在扫气道内的纯空气倒流。从图中可以计算出扫气过程中消耗的纯空气质量,通过计算得到分层扫气发动机在此工况下一个循环消耗的纯空气质量为 0.0047 g。

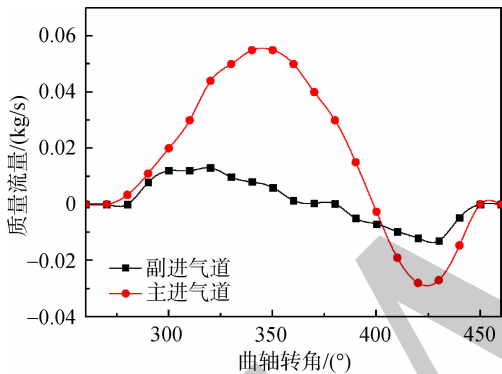


图 18 主、副进气道在进气过程的质量流量
Fig. 18 Mass flow of the primary and secondary intake ports during the intake stroke

图 19 为分层扫气发动机扫气过程中扫气口的总质量流量,从图中可以计算出扫气过程中消耗气体的总质量,通过计算得到分层扫气发动机在此工况下一个循环实际消耗的气体总质量为 0.057 g。

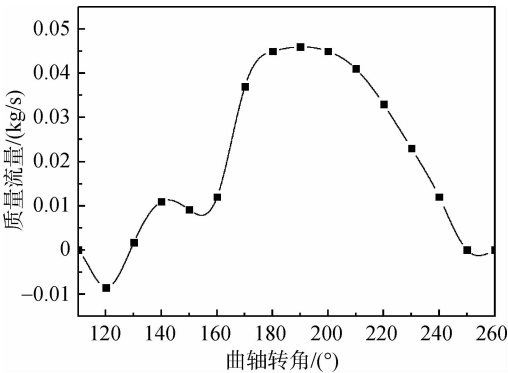


图 19 扫气口总质量流量
Fig. 19 Total mass flow of the scavenging port

为了保证有无分层扫气发动机一个循环实际消耗的燃油质量相同,计算出无分层扫气发动机燃油混合气的质量分数为 7.2%,其过量空气系数为 0.88,得到各区域内物质组分的初试质量分数。表 3 为计算得到的无分层扫气发动机仿真的初始条件。

表 3 各气道内物质组分的初始质量分数(无分层)

Table 3 Initial mass fraction of species in pipes (non-stratified scavenging)				%
参数	副进气道	气缸	曲轴箱	排气消声器
w_{O_2}	20.4	1.9	20.4	22
w_{N_2}	72.4	72.1	72.4	78
w_{fuel}	7.2	0	7.2	0
w_{CO_2}	0	18.8	0	0
w_{H_2O}	0	7.2	0	0

图 20 为计算得到的有无分层扫气系统燃油在扫气口和排气口的质量流量,发动机原机的扫气口在 116°(CA)打开,在废气倒流的作用下,无分层扫气发动机在 120°(CA)有微量的燃油进入气缸,而分层扫气发动机在废气倒流和前端纯空气的阻挡下,在 130°(CA)左右燃油开始进入气缸内。140°(CA)附近燃油在扫气口的质量流量有一个较小的凸起,这是由于扫气口刚打开时,扫气道内存在高压区域,在压力的作用下扫气道上侧的气体被压入气缸内,当扫气道内高压区随着扫气过程的继续进行消失的时候,燃油在扫气口的质量流量开始下降;而分层扫气发动机扫气道上侧是纯空气,高压波将纯空气压入气缸内,燃油质量流量变化不大。在 180°(CA)之前无分层扫气

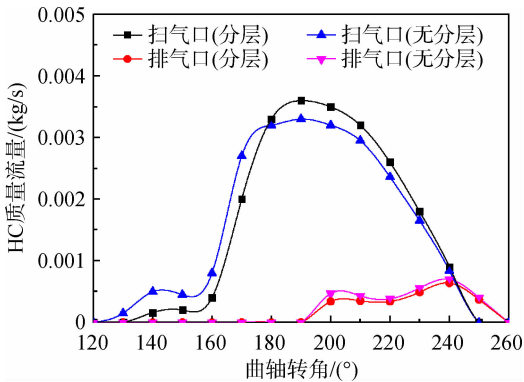


图 20 HC 在扫气口和排气口的质量流量
Fig. 20 Mass flow of HC at the scavenging and exhaust ports

发动机的燃油质量流量高于分层扫气发动机的燃油质量流量,燃油-空气混合气在分层扫气发动机的扫气过程中被纯空气稀释。到达 180°(CA)之后,扫气道内的纯空气已经全部被扫入气缸,分层扫气发动机混合气质量分数较高,所以分层扫气发动机的燃油质量流量比无分层扫气发动机的燃油质量流量大。分层扫气发动机和无分层扫气发动机都是在 190°(CA)时有燃油从排气口逸出,但是无分层扫气发动机排气口处的燃油质量流量比分层扫气发动机在排气口的燃油质量流量高。

表 4 为分层扫气发动机和无分层扫气发动机扫气结果比较,分层扫气发动机和无分层扫气发动机扫气效率都是 75%,分层扫气系统对扫气效率没有较大影响。发动机扫气结束后,气缸内剩余燃油混合气质量分数将影响发动机的燃烧,经过计算分层扫气发动机和无分层扫气发动机一个循环消耗的燃油质量都为 0.0041 g,然而分层扫气发动机扫气结束后缸内剩余燃油质量为 0.0036 g,而无分层扫气发动机扫气结束后缸内剩余燃油质量则为 0.00355 g。分层扫气发动机燃油扫气损失了 0.00047 g,而无分层扫气发动机的扫气损失为 0.00055 g。在消耗相同燃油的情况下,分层扫气发动机可以减少燃油的扫气损失。

表 4 有无分层扫气发动机扫气结果比较

Table 4 Comparison of scavenging results between stratified engine and non-stratified scavenging engine

参数	分层扫气	无分层扫气
总消耗燃油质量/g	0.0041	0.0041
剩余燃油质量/g	0.00363	0.00355
扫气效率/%	75	75

4 结 论

通过发动机台架试验对发动机性能参数进行标定,建立和简化发动机的三维模型,利用 GT-Power 和 Fluent 分别对其进行一维性能仿真和三维仿真计算,研究了分层扫气发动机的扫气过程和扫气特性,通过对比有无分层扫气发动机的扫气过程和结果得出:分层扫气二冲程发动机利用纯空气在新鲜混合气和废气之间形成分层,以部分纯空气承担了扫气过程的损失,在消耗相同燃油的条件下,从排气口排出的 UHC 较少,发动机的燃油经济性有一定的提高;分层扫气发动机

对扫气效率没有较大影响,扫气结束后缸内燃油质量分数较低,因此其废气中有害成分将得以改善。

在分层扫气发动机工作过程中,纯空气和燃油混合气的运动受到曲轴箱压力、缸内残余废气的压力以及活塞表面凹槽的相位影响,通过改变曲轴箱压缩比以及发动机扫气相位可以实现对扫气过程中纯空气质量的控制。

参考文献:

[1] 王思奇. 小型航模二冲程煤油发动机缸内直喷技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.

WANG Siqi. Research on GDI technology of small model two-stroke kerosene engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2017. (in Chinese)

[2] BLAIR G P. Reduction of fuel consumption of a spark ignition two-stroke cycle engine[R]. Society of Automotive Engineers,SAE Technical Paper 1983-830093,1983.

[3] 史宗庄,马其成,崔国起,等. 采用空气先导式分层扫气方法降低小型二冲程汽油机燃油消耗的试验研究[J]. 内燃机学报,1998,16(4):497-504.

SHI Zongzhuang, MA Qicheng, CUI Guoqi, et al. An investigation into reduction of fuel consumption of small two-stroke gasoline engine with air leading type stratified scavenging method[J]. Transactions of Csice, 1998, 16(4): 497-504. (in Chinese)

[4] 朱成,杨海青,汪明生. 基于 CFD 分析的二冲程发动机直喷燃烧室方案设计[J]. 航空动力学报,2013,28(12):2737-2745.

ZHU Cheng, YANG Haiqing, WANG Mingsheng. Design of combustion chamber program of two-stroke direct injection spark ignition engine based on the CFD[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(12): 2737-2745. (in Chinese)

[5] 陶晓雷. 二冲程缸内直喷发动机整机热负荷分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.

TAO Xiaolei. Thermal load analysis of two-stroke direct fuel injection engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2014. (in Chinese)

[6] MC ELLIGOTT S, DOUGLAS R, KEE R J. Stratified scavenging applied to a small capacity two-stroke scooter for the reduction of fuel consumption and emissions[R]. Society of Automotive Engineers, SAE Technical Paper 1999-01-3271,1999.

[7] YOUSHIDA Y, UENOYAMA K, KAWAHARA Y. Development of stratified scavenging two-stroke cycle engine for emission reduction[R]. Society of Automotive Engineers,SAE Technical Paper 1999-01-3269,1999.

[8] BERGMAN M, BERNEKLEV J. A novel method of tuning a stratified scavenged two-stroke engine[R]. Society of Automotive Engineers, SAE Technical Paper 2006-32-0055,2006.

[9] BERGMAN M,ENANDER N,LAWENIUS M. CFD scavenging simulation and verification of a sequentially stratified charged two-stroke engine[R]. Society of Automotive Engineers,SAE International Paper 2013-32-9079,2013.

[10] 朱访君,吴坚. 内燃机工作过程数值计算及其优化[M]. 北京:国防科技出版社,1997.

[11] 高孝洪. 内燃机工作过程数值计算[M]. 北京:国防工业出版社,1986.

[12] 林杰伦. 内燃机工作过程数值计算[M]. 西安:西安交通大学出版社,1986.

[13] 宋龙甫,王建昕,郑国世. B231 发动机性能优化及循环模拟计算[J]. 内燃机工程,2006,27(1):76-80.
SONG Longfu,WANG Jianxin,ZHENG Guoshi. Performance optimization and simulation of B231 engine[J]. International Combustion Engine Engineering,2006,27(1):76-80(in Chinese)

[14] 刘永长. 内燃机原理[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2001.

[15] 钟绍华,金国栋,谢田峰. 基于 GT-Power 软件的内燃机消声器设计与分析方法[J]. 汽车技术,2003(7):7-10.
ZHONG Shaohua, JIN Guodong, XIE Tianfeng. Design and analysis method for internal combustion engine mufflers based on GT-Power software[J]. Automobile Technology,2003(7):7-10. (in Chinese)

[16] 蒋炎坤,钟毅芳,罗马吉. 二冲程发动机扫排气道-缸内系统三维瞬态数值模拟研究[J]. 内燃机学报,2001,19(2):159-164.
JIANG Yankun, ZHONG Yifang, LUO Maji. Research of three dimensional transient numerical simulation of scavenging-exhaust duct and cylinder system of two-stroke [J]. Transactions of Csice,2001,19(2):159-164. (in Chinese)

[17] 魏明锐,刘永长,文华. 二冲程汽油机分层进气系统数值模拟及试验研究[J]. 内燃机学报,2003,21(6):395-400.
WEI Mingrui,LIU Yongchang,WEN Hua. Numerical simulation and experimental investigation of stratified scavenging system of two-stroke gasoline engine [J]. Transactions of Csice,2003,21(6):395-400. (in Chinese)

[18] 陈登. 二冲程缸内直喷汽油机扫气和喷油过程的多维数值模拟[D]. 天津:天津大学,2005.
CHEN Deng. Multi-dimensional numercial simulation of scavenging and injection process of two-stroke direct injection engine[D]. Tianjin:Tianjin University,2005. (in Chinese)

(编辑:李岩梅、张 雪)