

# 二冲程柴油航空发动机混和扫气数值仿真

陈欠根<sup>1,2</sup>, 张祥剑<sup>1</sup>, 潘钟键<sup>1</sup>, 徐小龙<sup>1</sup>

1. 中南大学高性能复杂制造国家重点实验室, 长沙 410083
2. 山河智能装备股份有限公司, 长沙 410199

**摘要** 为建立某型二冲程柴油航空发动机气缸内部三维扫气模型和缸内气相流动数学模型, 并对气口结构进行分析, 采用分块耦合方法和应用黏接技术对模型进行网格划分, 使用GT-power获取仿真边界条件, 利用Fluent软件对缸内气体流动进行三维数值模拟。研究表明: 横流扫气在弱流动区域容易形成扫气盲点; 回流扫气可以形成较好的径向涡流, 但轴向涡流速度较低, 降低扫气效率; 混合扫气能减小扫气盲区, 形成较好的螺旋涡和速度较高的轴向涡流, 与回流、横流扫气相比, 排气速度提高12.6%和125.2%, 极大地提高了扫气效率。

**关键词** 二冲程航空柴油发动机; 混合扫气; CFD仿真

**中图分类号** V234\*.2

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.22.002

## Numerical Simulation of Mixed Scavenging Methods for Two-stroke Diesel Aero Engines

CHEN Qiangen<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiangjian<sup>1</sup>, PAN Zhongjian<sup>1</sup>, XU Xiaolong<sup>1</sup>

1. Key State Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083, China
2. Sunward Intelligent Equipment Limited Liability Company, Changsha 410199, China

**Abstract** This paper establishes a three-dimensional scavenging model and a gas flow mathematical model of the inner cylinder for one type of two-stroke diesel aero engine, and analyzes the structure of the gas ports. The calculation domain of the model is meshed by the methods of the multiple block coupling and bonding technology, and the boundary conditions are set by the GT-power. The Fluent software is applied to simulate the three-dimensional gas flow in the inner cylinder. The research results show that the cross scavenging easily produces scavenging blind spots at the weak flow area; the loop scavenging can form a preferable backflow at the radial direction, but the axial velocity is lower, decreasing the scavenging efficiency; The mixed scavenging reduces the scavenging blind spots and forms better spiral vortexes and higher axial swirls, and increases the exhaust velocity by 12.6% and 125.2%, respectively compared with the loop scavenging and the cross scavenging.

**Keywords** two-stroke diesel aero engine; mixed scavenging; CFD simulation

二冲程柴油航空发动机属于国际先进新型发动机, 中国目前尚未见相关研制报道。活塞式二冲程发动机以其杰出的燃油经济性、较高的功重比而广泛应用于轻型通用飞机及中小型无人机<sup>[1]</sup>。近年来, 由于使用航空汽油燃料会对排放产生污染, 加之汽油的闪点低, 其在军事领域和通用航空领

域的使用受到了限制, 各国加紧了对活塞航空柴油机的研发。二冲程发动机换气过程的特点是进、排气过程基本同时进行, 并利用新鲜充量扫除废气, 但若新鲜充量与废气混合, 废气排出不彻底, 将很容易损失新鲜充量, 从而恶化扫气质量, 影响发动机的性能。因此, 对二冲程发动机扫气程的研

收稿日期: 2014-04-15; 修回日期: 2014-05-09

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2009AA045103)

作者简介: 陈欠根, 教授, 研究方向为机电液一体化与小型无人机开发, 电子邮箱: Chenqg@sunward.com.cn; 张祥剑(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为航空发动机, 电子邮箱: zxj19882012@163.com

引用格式: 陈欠根, 张祥剑, 潘钟键, 等. 二冲程柴油航空发动机混和扫气数值仿真[J]. 科技导报, 2014, 32(22): 23-28.

究具有很高的价值。

二冲程柴油发动机的扫气形式可分为横流扫气、回流扫气和直流扫气3种基本类型<sup>[2]</sup>,在小型机上主要使用前2种,并以回流扫气居多<sup>[3]</sup>。针对不同的扫气方式,Rinaldini等<sup>[4]</sup>比较了二冲程航空柴油机回流扫气与直流扫气时缸内流场的异同,以及发动机运行条件对2种扫气方式的影响;Mattarelli等<sup>[5]</sup>提出了一种二冲程航空柴油机扫气模型的建立方式,并研究了发动机转速对横流扫气质量的影响。国内对二冲程航空柴油发动机还处于基础研究阶段<sup>[6,7]</sup>,大多在汽油机上更换柴油作为燃料进行实验,还没有见到活塞航空柴油发动机研制的报告<sup>[8]</sup>。杜发荣等<sup>[9]</sup>研究了横流扫气气口仰角、流通面积及开启时刻对与发动机容积效率和扫气损失的影响;蒋炎坤等<sup>[10]</sup>对回流扫气缸内流场进行了三维瞬态模拟,但对混合扫气的专门研究比较少。

本研究针对某型二冲程柴油发动机进行混和扫气流场仿真,运用三维计算流体力学(CFD)软件Fluent研究此发动机的混合扫气过程,揭示混和扫气的缸内流场分布情况,并研究对比横流扫气、回流扫气和混和扫气3种扫气方式各自的特点,为发动机的气口参数优化、扫气效率提升提供理论依据。

## 1 某型发动机的主要参数和进排气结构

某型发动机使用柴油或航空煤油作为燃料,具有较高的功重比,搭载涡轮增压器,在高空性能优越,该发动机采用回流扫气与横流扫气相结合的混合扫气方式,主要参数见表1。

表1 某型发动机的主要参数

Table 1 Main parameters of the engine

性能	参数
缸径/cm	10.2
冲程/cm	10.1
气缸数	4
冲程数	2
压缩比	16.5:1
每缸排量/L	0.83
功率/kW	123
额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	2700
冷却方式	液冷
曲轴转角(排气门打开)/(°)	114(ATDC)
曲轴转角(排气门关闭)/(°)	246(ATDC)
曲轴转角(进气门打开)/(°)	129(ATDC)
曲轴转角(进气门关闭)/(°)	231(ATDC)

由于进排气系统结构复杂、流域随活塞运动具有多变性,为简化系统模型,只考虑气缸和进排气阀之间的进排气

歧管部分<sup>[5]</sup>。图1和图2是原型机扫气道即扫气口—气缸—排气口(从头部看)的径向横剖面示意图及该机的缸套气口位置展开图。该发动机有3个排气口(排气口9~排气口11)、关于气缸中心轴平面对称的4个回流扫气口(气口1、气口2、气口7、气口8)、位于排气口相对一侧的4个横流扫气口(气口3~气口6)。

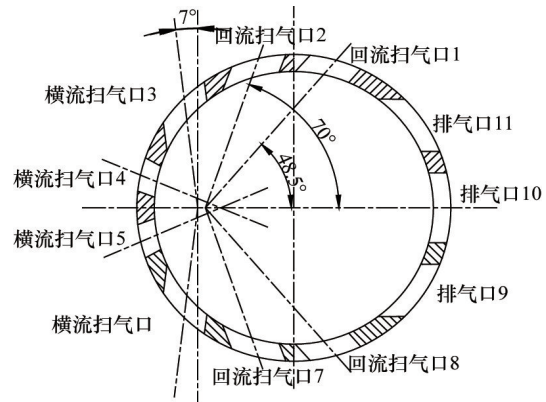


图1 气口径向横剖面示意

Fig. 1 Radial transverse section view of ports

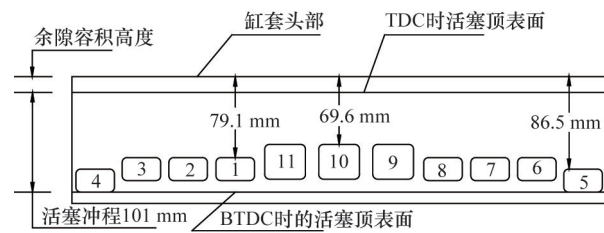


图2 气口位置展开

Fig. 2 Expanded view of ports location

原型机横流扫气口的仰角值为60°(图3)。最主要的扫气结构参数是横流扫气口的仰角<sup>[2]</sup>,随着仰角的增大,缸内新鲜空气充量随之增大,但是气口通透性降低,目前尚缺少理论确认该角度的值,但已有许多学者通过数值模拟的方法得到了该角度最优范围。

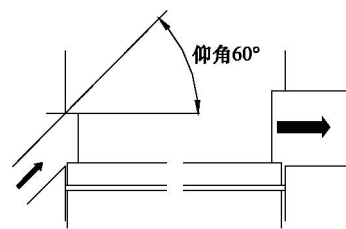


图3 横流扫气口仰角

Fig. 3 Upsweep angle of cross scavenging

## 2 缸内流动数学模型分析及选取

柴油机扫气过程缸内气相流动模型是以经典的流体力

学可压缩流体的 Navier-Stokes 方程为基础的,并根据质量、动量、能量、组分的守恒定律及理想气体状态方程,用1组偏微分方程组描述缸内气体流动的过程<sup>[9]</sup>。

质量守恒方程的数学描述为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中,  $\rho$  为流体混合总密度,  $\text{kg/m}^3$ ,  $\rho = \sum_i \rho_i$ ;  $u, v, w$  分别为速度矢量在  $x, y, z$  方向的分量。

动量守恒方程的数学描述为

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \text{div}(u \text{ grad } u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = \text{div}(v \text{ grad } v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = \text{div}(w \text{ grad } w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $p$  为流体微元体上的压力;  $u$  为动力黏度;  $S_u, S_v, S_w$  为动量守恒方程的广义源项, 其中,  $S_u = F_x + s_x, S_v = F_y + s_y, S_w = F_z + s_z$ ;  $F$  为微元体的质量力;  $S$  为微元体的表面力。

能量守恒方程的数学描述为

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{ grad } T\right) + S_T \quad (3)$$

式中,  $c_p$  为比热容,  $T$  为温度,  $k$  为流体的传热系数,  $S_T$  为流体的内热源及由于黏性作用流体机械能转换为热能的部分, 有时简称为黏性耗散项。

组分质量守恒的数学描述为

$$\frac{\partial(\rho c_s)}{\partial t} + \text{div}(\rho u c_s) = \text{div}(D_s \text{ grad}(\rho c_s)) + S_s \quad (4)$$

式中,  $c_s$  为组分  $s$  的体积分数,  $\rho c_s$  是该组分的质量分数,  $D_s$  为该组分的扩散系数,  $S_s$  为系统内部单位时间内单位体积通过化学反应产生的该组分的质量。

根据发动机的仿真目的,通过 GT-power 仿真获得上述方程的初、边界条件,最终建立二冲程发动机的仿真模型,二冲程发动机换气过程的模型分为3种类型:单相模型、多区模型和流体动力学模型。单相模型假定扫气过程是完全扫气或者完全混合,以此代替复杂的换气过程,计算精度低;多区模型中的典型代表为两区模型,即分层扫气模型和混合-分层组合扫气模型,后者通过一个介于0~1之间的比例因子  $S_f$ ,将气缸容器分为2部分<sup>[11]</sup>;流体动力学模型是在单相模型和多区模型基础上提出来的,模拟精度较高,但此模型还处于完善阶段,尚不成熟。因此本研究将选用二区模型中的混合-分层组合扫气模型,借助三维计算流体力学(CFD)软件 Fluent 求解模型的数值解,获得对缸内流场的总和描述<sup>[12]</sup>。

混合-分层组合扫气模型原理如图4<sup>[11]</sup>所示。其中,  $m_A, T_A, V_A, P$  分别表示缸内 A 区新鲜工质的质量、温度、区域容积、压力;  $m_B, T_B, V_B, P$  分别表示缸内 B 区新鲜工质的质量、温度、区域容积、压力;  $m_2, T_2, V_s, P_s$  分别表示扫气箱内新鲜工质

的质量、温度、容积、压力;  $dm_i/dt$  表示扫气口处充入新鲜工质的质量流量,  $dm_e/dt$  表示排气口处排出气体的质量流量,  $dm_{in}/dt$  表示进气道处进入气体的质量流量。

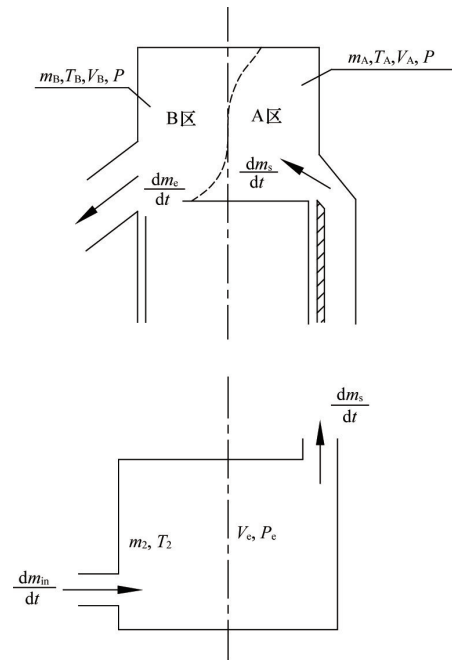


图4 混合-分层组合扫气原理

Fig. 4 Schematic diagram of mixed-layering combination scavenging

### 3 仿真计算及分析

#### 3.1 模型建立及网格生成

利用三维建模软件 PROE 建立了气缸内部气体所能够流到的空间的零件模型,并采用 Fluent 专用网格划分工具 Gambit 进行网格划分,计算网格生成的好坏将直接影响到计算结果的准确性。考虑扫排气口-气缸结构的复杂性和活塞运动的实现,为提高计算效率,采用分块耦合方法和应用黏接技术,结合使用六面体和非结构化四面体网格<sup>[11]</sup>,将区域分为扫气口、气缸和排气口3部分,分别进行网格划分,混和扫气三维模型如图5所示。由于扫排气口结构复杂,所以特别对各个气道口处的网格进行了加密以更好的反应流动情况,相联结的各区域之间设置内部边界条件。

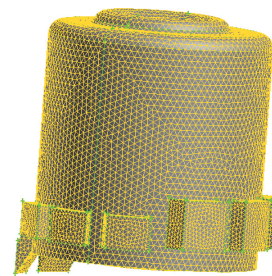


图5 混合扫气三维网格模型

Fig. 5 Three-dimensional flow calculation grid of the mixed scavenging

### 3.2 初始条件及边界值条件

模拟过程中,进气口压力、缸内压力及排气道口压力对扫气气流的速度及缸内燃烧废气的排出速度有直接影响,因此将进出口边界设定为压力边界,压力值由一维仿真软件GT-power模型给定,该仿真模型已经通过台架实验验证。当转速为2700 r/min时,扫气口压力、排气口压力随曲轴转角变化的值,如图6、图7所示,在曲轴转角为172°ATDC时,扫气口压力及缸内压力分别为 $2.3 \times 10^5$  Pa、 $1.7 \times 10^5$  Pa。

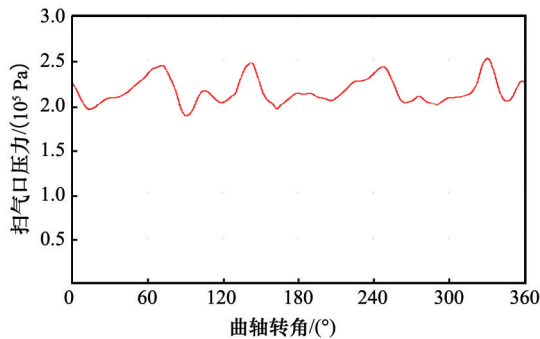


图6 扫气口压力

Fig. 6 Pressure of scavenging ports

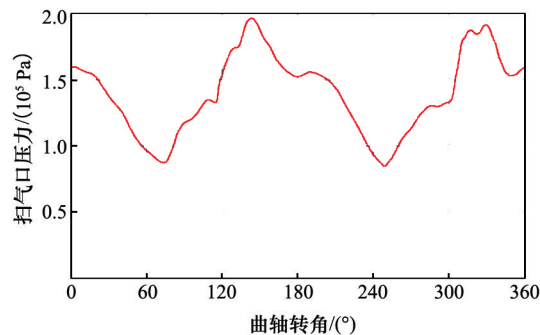


图7 排气口压力

Fig. 7 Pressure of exhaust ports

### 3.3 计算结果及分析

模型建立的主要研究目的是通过比较3种扫气方式的优劣选取最为合理的扫气形式,所以可假定3种扫气方式具有相同的边界条件,并进行全场模拟。扫气气流在缸内的运动对二冲程发动机性能的影响主要体现在新鲜充量驱赶废气的速度及驱赶的干净程度2个方面<sup>[1]</sup>,本研究依据新鲜空气的充量速度及缸内气体流动状态分析不同扫气方式的特点。

1) 混合扫气。原型机所采用的混合扫气方式下进排气口-缸内系统速度矢量分布见图8。

因扫/排气口之间存在较大压差,气流以射流形式迅速进入气缸,以各气口终点速度为研究对象,横流扫气口径向、切向、轴向速度的最大值分别为107.0、83.6、128.0 m/s,回流扫气口的径向、切向、轴向速度的最大值分别达64.4、85.5、42.5

m/s,排气口径向、切向、轴向最大值达259.0、1.3、-1.4 m/s。从图8可看出,受回流扫气口之间的射流相互作用,在缸内形成绕缸轴向的螺旋涡,并沿着轴向对称面向上偏转,同时逐渐减弱。由于横流扫气口布置在排气口相对一侧,气口射流之间相互影响削弱,气口轴向喷流速度矢密集,而且速度值较大,横流扫气口在轴向射流速度对回流扫气所产生的螺旋涡轴向移动具有很好的辅助推动作用而且降低其减弱的速度。在这2种扫气口射流的相互作用下,缸内轴向各流速层的速度差形成了速度更高且影响区域更广的轴向涡流,推动废气以较高的速度排出缸内;由于缸内新鲜空气充量是以涡流的方式驱赶缸内废气,经排气口直接排出的新鲜空气明显减少,即降低了短路损失,但是,该种扫气方式在活塞头部中间部分仍形成较小区域扫气盲点,使得此二处的废气困在气缸内,降低了扫气效率。

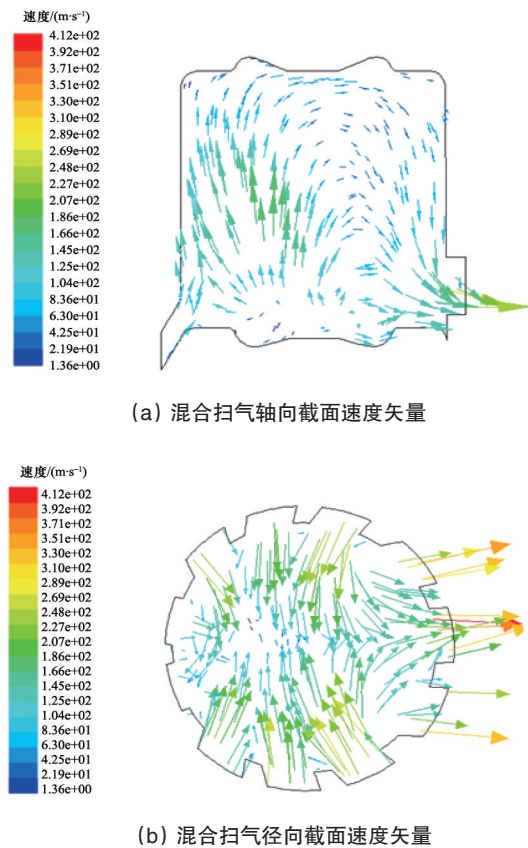


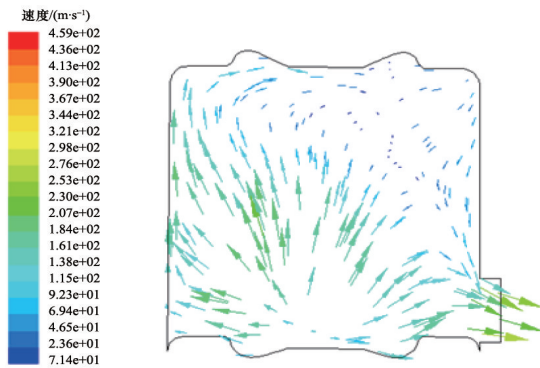
图8 混合扫气轴向、径向截面速度矢量

Fig. 8 Radial and axial section velocities of the mixed scavenging

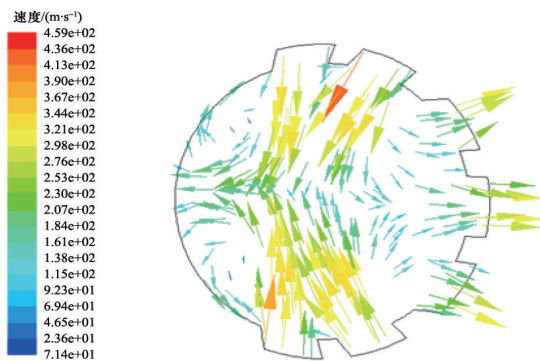
2) 回流扫气。回流扫气速度矢量如图9所示。

由图9可看出,扫气口具有较大的径向扫气速度,最大值可达270.0 m/s,切向和轴向速度相对较小,最大值分别达69.4、92.3 m/s,排气口径向、切向、轴向最大值达230.0、6.9、-18.4 m/s,沿周向对称布置的扫气口射流前锋以较大的径向速度在缸内汇合,形成了螺旋涡,并沿着轴向对称面向

上偏转,随着时间的推移,漩涡沿着扫气回路逐渐移动至气缸盖附近,开始驱赶缸内废气,经气缸盖的阻碍后形成纵向螺旋涡并朝排气口移动,将废气推出气缸,同时还可看出,由于扫气口沿着气缸圆周布置在排气口同侧,在各扫气口射流前锋的相互作用下,短路损失降低。与混合扫气缸内流场相比,由于免受横流扫气口的影响,此方式形成的径向涡流速度是混和扫气形式的2.5倍左右,但形成轴向涡流的速度却下降近28.0%,排气口废气排出速度下降11.2%,而且轴向回流涡旋更早的到达排气口附近,降低了扫气气流在缸内的扫气范围,气缸盖附近扫气力度不足,进而囤积大量废气,明显降低扫气效率,这在发动机转速较大时尤为明显。



(a) 回流扫气轴向截面速度矢量



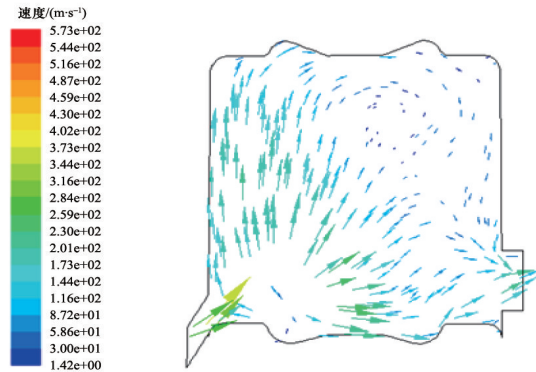
(b) 回流扫气径向截面速度矢量

图9 回流扫气轴向、径向截面速度矢量  
Fig. 9 Radial and axial section velocities of the loop scavenging

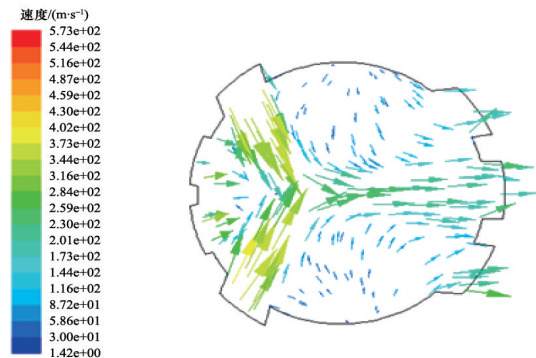
3) 横流扫气。横流扫气速度矢量如图10所示。

横流扫气口具有很高的轴向进气速度,速度最大值达207.0 m/s,最大切向速度、径向速度分别达7.1、92.3 m/s,排气口径向、切向、轴向的最大速度分别达115.0、7.1、1.3 m/s,由于横流扫气的气口布置在排气口的相对位置,使得气流以气缸中心线为界分成明显的强流动区域和弱流动区域,排气口处的气流速度较混合扫气降低55.6%,在发动机转速较高的情况下,弱流动区域将形成大区域扫气盲点,而且从图中

可看出,这种气口的布置方式不利于缸内径向回流的产生,有部分新鲜空气充量直接由排气口排除,短路损失较为严重。



(a) 横流扫气轴向截面速度矢量



(b) 横流扫气径向截面速度矢量

图10 横流扫气轴向、径向截面速度矢量  
Fig. 10 Radial and axial section velocities of the cross scavenging

#### 4 讨论

通过对仿真数据的分析,得出混合扫气较横流扫气和回流扫气来说具有更高的气体排出速度,气体在缸内的流动状态更为理想的结论,这说明混合扫气对扫气效率的提高乃至对二冲程发动机整体性能的提高更为有利。这为二冲程柴油航空发动机的研发提供了部分理论支持,同时降低发动机的研发成本和研发周期。

一些学者对二冲程发动机换气过程已进行深入研究,从气场流域网格划分到流场计算形成了较为完善的理论,但主要对回流扫气和横流扫气二者中的某一种方式进行研究。本研究在前人研究基础上,结合某型发动机所独有的混合扫气形式,建立了混合扫气流场模型,对网格划分进行优化,采用实验与仿真相结合的方式获得更为准确的边界条件,进而得到更为准确的缸内气体流动状态。研究表明,在相同的气口结构参数下,混合扫气对提升发动机扫气效率具有明显优势,但由于这种扫气方式是回流扫气与横流扫气的结

合,所以影响扫气效率的因素也将明显增多,如何在混合扫气方式下,匹配扫气效率和气口结构是下一步研发的重点。而就发动机整体性能的提高而言,缸内气体燃烧过程、发动机转速、活塞运动过程中缸内压力及缸壁温度的变化等因素对扫气过程同样具有重要影响,因此将来研究应综合考虑各种不同的影响因素,使仿真得到的缸内气场流动状态更加接近实际状态。

## 5 结论

1) 回流扫气有利于形成轴向的螺旋涡,但轴向移动速度较慢,在横流扫气辅助作用下,不仅发挥了回流扫气的优势,而且在各气口的影响下产生了速度较高且扫气范围更广的轴向涡流,明显缩小了气缸盖附近的盲点区域。

2) 与回流扫气、横流扫气相比,混合扫气排气口处的排气速度分别提高了12.6%、125.2%,当发动机转速很高时,这对扫气效率的提高是极为有利的。

3) 通过对3种扫气方式的对比,可以分析出不同扫气方式下缸内流场流动形式,为以后发动机的研发、性能的提高提供理论支持。

### 参考文献(References)

- [1] Mattarelli E, Paltrinieri F, Perini F, et al. 2-Stroke diesel engine for light aircraft[J]. SAE International Journal Engines, 2011, 4(2): 2338-2360.
- [2] Gordan P B. Design and simulation of two-stroke engines[M]. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1996.
- [3] 张航. 二冲程船用柴油机扫气过程CFD模拟分析[D]. 大连: 大连海事大学, 2011.  
Zhang Hang. CFD simulation and analysis of scavenging process for two-stroke marine diesel engine[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011.
- [4] Rinaldini C, Mattarelli E, Golovitchev V. CFD analyses on 2-stroke high speed diesel engines[J]. SAE International Journal Engines, 2011, 4(2): 2240-2256.
- [5] Mattarelli E, Rinaldini C A, Cantore G, et al. 2-Stroke externally scavenged engines for range extender applications[J]. SAE Technical Paper, 2012-04-16, doi:10.4271/2012-01-1022.
- [6] 潘钟键, 何清华, 杨晶. 活塞航空重油发动机发展现状[J]. 科技导报, 2013, 31(34): 65-68.  
Pan Zhongjian, He Qinghua, Yangjing. Development situation of piston aviation heavy oil engine[J]. Science & Technology Review. 2013, 31(34): 65-68.
- [7] 陈林林. 二冲程煤油发动机性能数值模拟与喷油控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.  
Chen Linlin. Research on numerical simulation of performance and fuel injection control for two-stroke kerosene engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [8] 顾诵芬. 关于使用航空煤油活塞式发动机的评估[R]. 北京: 中国航空运输协会通用航空委员会, 2008.  
Gu Songfen. Evaluation of piston engines on the use of aviation kerosene[R]. Beijing: General Aviation Committee of Chian Air Transportation Association, 2008.
- [9] 杜发荣, 蒋彬. 气口参数对二冲程重油发动机扫气性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(3): 528-531.  
Du Farong, Jiang Bin. The effects of ports parameters has on scavenging performance of two-stroke heavy oil engines[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(3): 528-531.
- [10] 蒋炎坤, 钟毅芳, 罗马吉, 等. 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.  
Jian Yankun, Zhong Yifang, Luo Maji, et al. Three-dimensional transient numerical simulation research for the scavenging system and the cylinder of two-stroke engines[J]. Transactions of CSICE, 2001, 19(2): 159-164.
- [11] 蒋炎坤. CFD辅助发动机工程的理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
Jiang Yankun. The theory and application of engine engineering assisted by CFD[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [12] 蒋炎坤, 钟毅芳, 罗马吉, 等. 二冲程发动机换气过程数理模型研究的现状与发展[J]. 小型内燃机. 2000, 29(4): 1-4, 34.  
Jiang Yankun, Zhong Yifang, Luo Maji, et al. Current situation and development of model research of mathematics- physics in the gas exchange process for a two-stroke engine[J]. Small Internal Combustion Engine. 2000, 29(4): 1-4, 34.

(编辑 陈华姣)

### 《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约2000字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。