

# 对置二冲程柴油机流动过程的仿真研究

## Simulation Analysis on Flow Process of an Opposed Piston Two-stroke Diesel Engine

吴丹 赵振峰 章振宇

(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

**摘要:** 基于对置二冲程柴油机直流扫气过程的流动特点, 建立该发动机流动过程瞬态流动三维计算流体力学 (CFD) 仿真模型, 应用 Converge 软件对该发动机怠速工况下 (转速 1000rpm) 缸内的流动过程进行了仿真研究, 分析了缸内流场的变化过程, 并针对气体质量、瞬时气体流量、缸内涡流、湍动能进行了分析。通过流动过程不同时刻流场分析发现, 缸内气流的流量主要受气口开启面积大小的影响, 直流扫气过程可较好避免新鲜充量与废气的相互掺混。

**关键词:** 对置; 二冲程; 流动过程; Converge

**Abstract:** According to the flow characteristics of the opposed two-stroke diesel engine, the computational fluid dynamics three-dimensional model was established. The simulation analysis was finished based on the Converge. The in cylinder flow working process was analyzed, and the air mass, instant air flow, in cylinder eddy and turbulence energy were analyzed separately. The flow analysis of different moment of the flow process shows that the flow was mainly affected by the port area, and the uniflow can avoid the mixing of the fresh air and the exhaust gas.

**Key words:** Opposed; Two-stroke; Flow Process; Converge

### 1 研究背景介绍

对置活塞发动机最早起源于 19 世纪末的德国, Hugo Junkers 在 20 世纪初将该发明工业化。对置活塞二冲程发动机凭借其工艺性、高功率密度和高燃油效率, 主要应用于包括飞机、船舶、坦克、卡车和机车等诸多领域。理论上, 活塞式内燃机采用二冲程相对于四冲程升功率可以提高一倍, 而对置二冲程柴油机在普通二冲程柴油机基础上采用对置活塞机构, 取消了气缸盖结构, 其平衡性大幅度提高。<sup>[1~5]</sup>

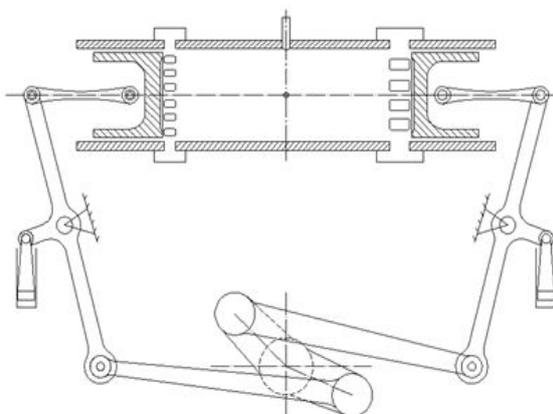


图 1 对置二冲程发动机结构图

二冲程柴油机具有结构对称，功率密度高的优点；发动机每循环做一次功，理论上平均指示功是四冲程的一倍；传热损失小，效率高、功率大、工作可靠。但不同于四冲程发动机，二冲程发动机没有单独的换气行程，因而换气质量相对于四冲程较差，所以工作性能很大程度上取决于换气过程的完善程度。换气过程进行得完善，压缩过程时气缸内的残留废气量少，新鲜空气量多，为燃油的良好燃烧创造了条件，从而提高柴油机的动力性，减少排放污染。因此，扫气过程是二冲程发动机的重要组成，它在很大程度上影响了柴油机可燃混合气形成的质量，组织好缸内气体流动对驱赶缸内废气，提高柴油机的燃油空气混合速率，提高燃烧效率有重要作用；进而使柴油机发出更大功率，提高了热效率，降低排放和油耗，且使结碳减少，并降低循环平均温度，增加了柴油机的可靠性。

对二冲程柴油机来讲，换气过程中进气与排气同时进行导致流入气缸的一部分新鲜充量不起扫气作用而直接从排气口流出造成扫气损失，降低了发动机的性能。二冲程柴油机的扫气形式可分为横流扫气、回流扫气和直流扫气三类。<sup>[4]</sup>直流扫气结构形式的进排气口沿气缸相反方向的两端周向均匀布置，其中进气口的径向设计角度使得进入气缸的新鲜充量产生绕气缸轴线旋转和同时沿气缸轴线的螺旋推进运动，这种方式可较好避免新鲜充量与废气的相互掺混，有效克服了传统高速二冲程发动机的扫气缺点。因此，直流扫气的扫气品质最好。

本文基于对置二冲程柴油机直流扫气过程的流动特征，应用 IDAJ 公司的 Converge 软件搭建了该发动机扫气过程瞬态流动三维计算流体力学（CFD）仿真模型。针对发动机怠速工况（0kW 1000rpm）下的扫气过程进行了瞬态仿真计算，并对扫气过程不同时刻缸内流场进行了分析。

## 2 对置二冲程柴油机换气系统的介绍

对置二冲程柴油机采用气口形式的直流扫气方式，扫气口和排气口位于缸套的两侧，通过活塞的位移控制气口的开闭，从而实现二冲程柴油机的换气过程。如图所示，当活塞的上沿位于气口外侧时，气口处于开启状态，当活塞的上沿位于气口内侧时，气口处于关闭状态。

进排气道的设计对对置二冲程柴油

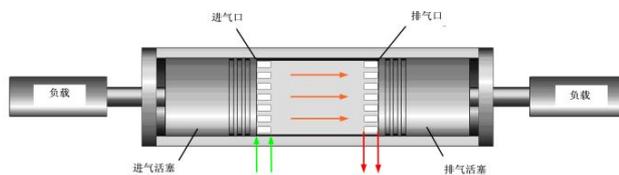


图 2 对置二冲程柴油机换气系统示意图

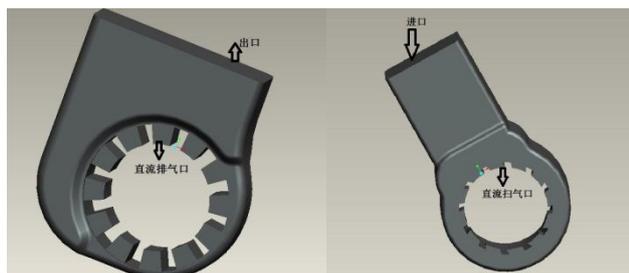


图 3 进排气道结构图

机的扫气过程有着很大的影响。如图所示为发动机扫气道和排气道的结构图。此种气道的设计使得进气管内侧的流通截面得到充分利用。扫气口、排气口位于发动机的两端，气口的开闭由对置的活塞控制。新鲜充量由扫气口进入，在活塞的推动下沿气缸轴线向前推进，将废气逐渐由排气口推出气缸，从而实现直流扫气过程。

### 3 三维模型的建立

对置二冲程柴油机扫气过程中气体是复杂的三维黏性运动，其内部存在漩涡、分离等复杂的流动现象。随着运行工况的变化，其内部流动状况变化非常明显。为了更好的研究发动机扫气过程中缸内气体的流动机理，本文借助 Converge 软件研究发动机的扫气过程。Converge 软件在计算过程中自动实时动态生成三维计算网格，因此无需创建三维网格模型，只需对几何进行适当整理，即对整个封闭的几何表面分割成不同的边界加载不同的边界条件，如右图所示。

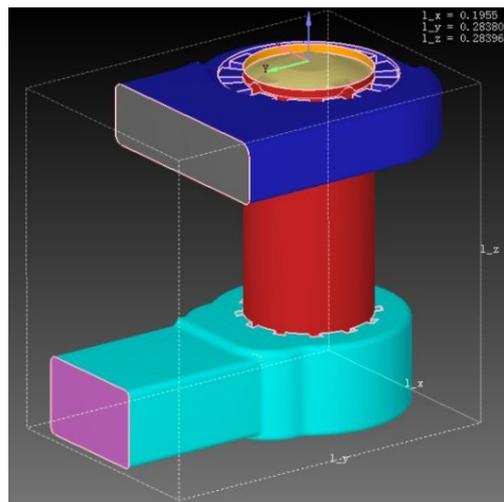


图 4 扫气系统三维模型

模型由 7 个边界组成：进气活塞，排气活塞，气缸壁，进气歧管壁，进气口，排气歧管壁，排气口。

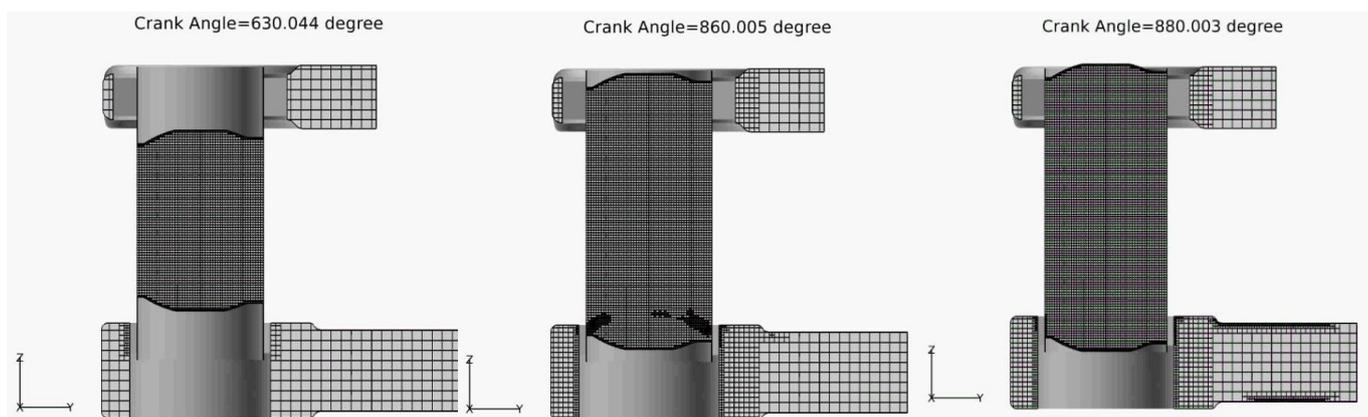


图 5 工作过程中网格自动加密

Converge 软件在计算过程中自动实时动态生成三维计算网格，并根据结构复杂程度以及计算过程中工作环境自动加密网格，如图 5 所示。图 5 左 1 显示，在活塞由外止点向内止点运动时或由内止点向外止点运动过程中，缸内网格以及气道网格都为均布网格。图 5 左 2、显示，当活塞运动到接近下止点位置时，由于此时扫气口、排气口的开启，缸内气体开始流动，此时气口附近以及进气道内网格自动加密，确保计算的准确度。

计算过程中, 选用 RNS 方程作为三维模型的流动控制方程, 选取 RNG  $k-\zeta$  模型作为湍流模型, 并采用 Redlich-Kwong 真实气体状态方程模拟缸内气体的状态。三维模型的最大网格尺寸 8mm, 最小尺寸 1mm。体网格数为 100000 到 500000 单元。

表 1 CFD 计算边界条件

项目	值
计算起止角( $^{\circ}$ CA)	180-980
转速 (rpm)	1000
缸径 (mm)	100
冲程 (mm)	220
扫气压力 (MPa)	0.25
排气压力 (MPa)	0.21
进气道温度 (K)	320
排气道温度 (K)	600

## 4 仿真结果的分析

二冲程柴油机的换气过程分为自由排气阶段, 扫气阶段和过后排气或过后充气阶段。从排气口开启到扫气口开启, 缸内压力高于排气背压, 燃气可以自由地流出缸外, 称为自由排气阶段。从扫气口打开到活塞运动到下止点后上行将扫气口关闭为止, 这一时期称为扫气阶段。在扫气阶段, 扫气和排气同时进行。对于本文研究的二冲程发动机, 其扫气口的关闭迟于排气口, 这样, 从排气口关闭到扫气口关闭这一阶段称为过后充气阶段。

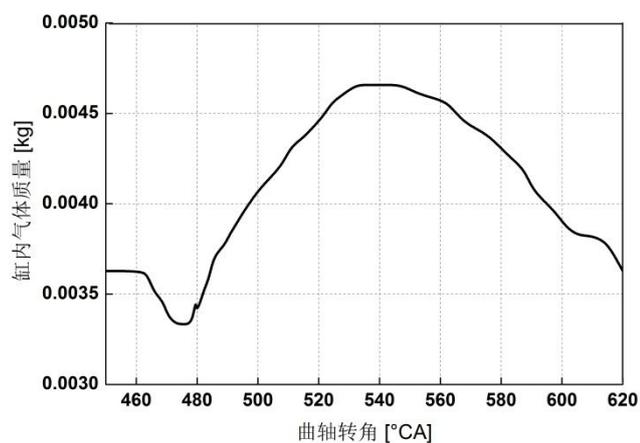


图 6 缸内气体质量随曲轴转角变化示意图

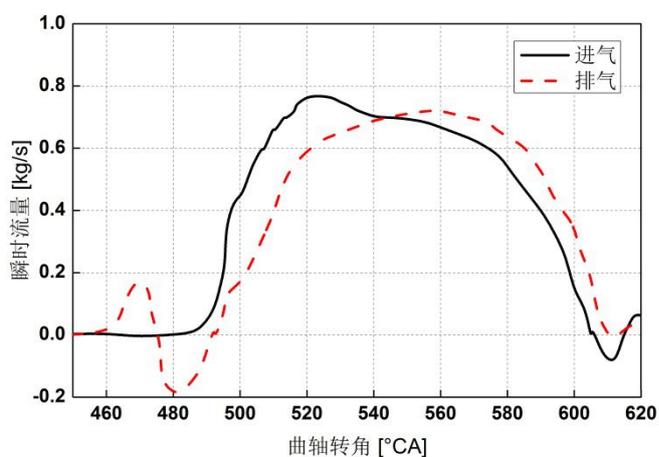


图 7 缸内瞬时气体质量随曲轴转角变化的示意图

### 4.1 缸内气体质量分析

如图 6 所示为缸内气体质量随曲轴转角变化的示意图。从图中可以看出，曲轴转角从 480 度曲轴转角到 540 度时，气体质量随着曲轴转角的增加而增加，排气口和扫气口都开启，但由于进气压力高于排气压力，新鲜气体充入的速度高于排气排放的速度，所以缸内气体质量总量随着曲轴转角的增加而增加；从 540 度到 620 度时，活塞由下止点向上止点运动，此时气体排出的速度高于新鲜充量充入的速度，所以气体质量随曲轴转角的增大而减小，在 620 度以后，扫气口和排气口都关闭，缸内气体质量一定，随着活塞向内止点的运动进入压缩及燃烧过程。

## 4.2 缸内瞬态流场的分析

图 7 所示为缸内瞬时气体质量随曲轴转角变化的示意图。从图中可以看出，排气口早于扫气口开启，当曲轴转角从 480 度到 540 度时，活塞由内止点向外止点运动，此时缸内压力较大，缸内废气在活塞和新鲜充量的推动下由排气口排出，新鲜充量由扫气口进入缸内，气体流动速度快较快，瞬时气体流量较大，由于进气压力高于排气压力，所以新鲜气体充入的速度高于废气排出的速度，瞬时进气流量高于瞬时排气流量；当曲轴转角从 540 度到 600 度时，活塞由外止点向内止点运动，这时扫气过程进入尾期，缸内压力较低，气体流量较小；当曲轴转角到达 620 度时，扫气口和排气口都关闭，扫气过程结束，活塞向内止点运动，开始压缩及燃烧过程。

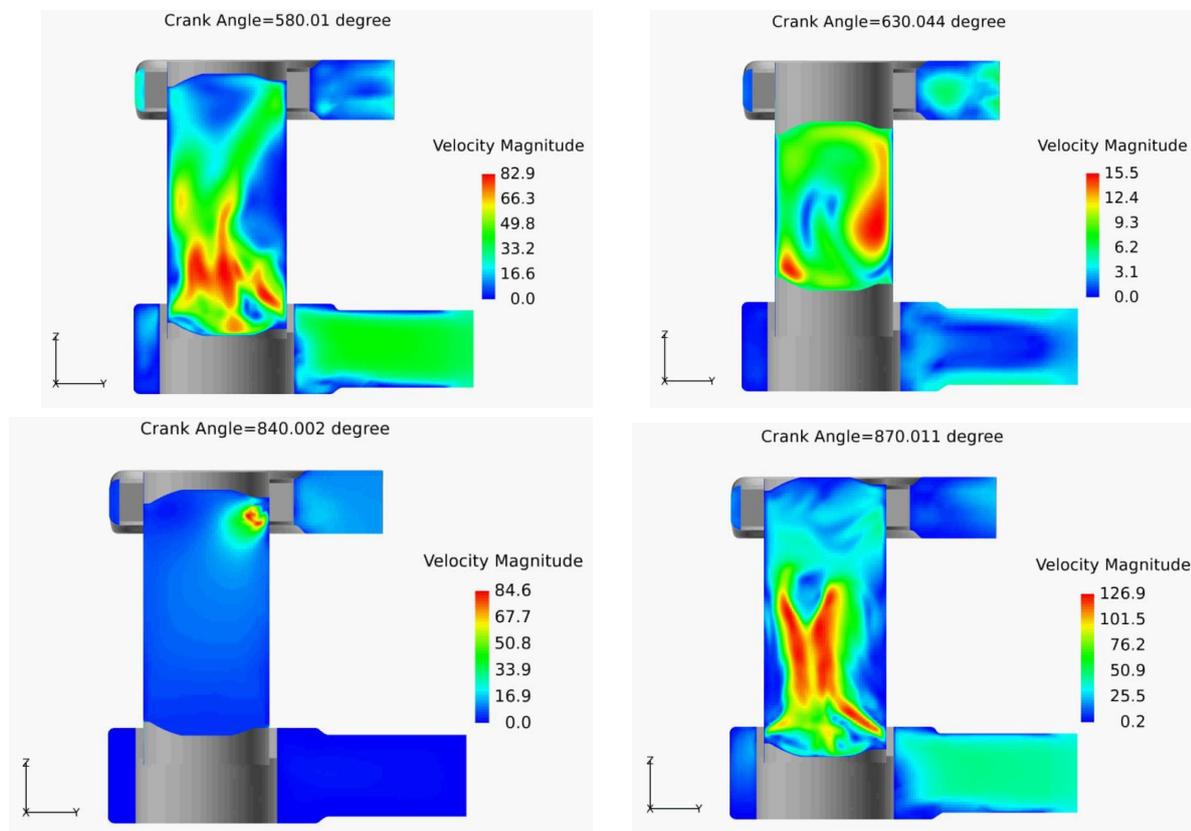


图 8 曲轴转角不同时缸内的速度场分布图

图 8 所示为不同曲轴转角时缸内速度场的分布图。左上所示为当曲轴转角为 580 度时，活塞由下止点向上止点运动，此时排气口已经关闭，扫气口也将要关闭，所以扫气口附近气体流动较剧烈，缸内气体在活塞的推动下运动；右上所示为当曲轴转角为 630 度时，活塞继续压缩缸内气体，气体在活塞的推动下在缸内运动，气体进行剧烈地湍流流动，流动形式主要为涡流及滚流；左下所示为当曲轴转角为 840 度时，活塞由下止点向上止点运动，此时排气口先开启，扫气口未开启，缸内压力较高，废气由排气口排出；右下所示曲轴转角到 870 度时，扫气口开启，进气压力较高，新鲜充量迅速由扫气口充入缸内。

### 4.3 缸内涡流、滚流的分析

图 9 所示为缸内涡流随曲轴转角的变化规律。扫气前期（480 度-520 度），新鲜充量刚开始充入气缸，废气也由排气口排出，还未在缸内形成较强的气体流动，所以缸内涡流强度十分微弱，接近于 0；进入扫气中期（520 度-560 度），缸内已经充入了一定的新鲜充量，并且在活塞的推动作用下，缸内涡流逐步增强，涡流比开始增加；扫气后期（560 度-600 度），缸内气体量趋于稳定，气口即将关闭，所以缸内气体流动状态也逐渐稳定，涡流比又稳定了下来。

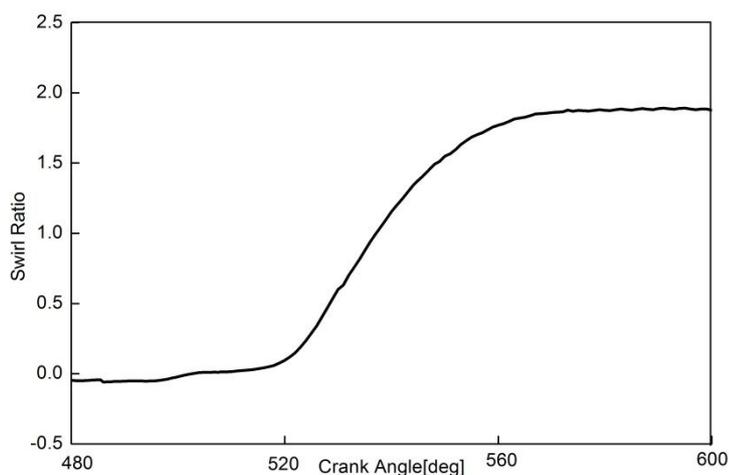


图 9 涡流比随曲轴转角的变化

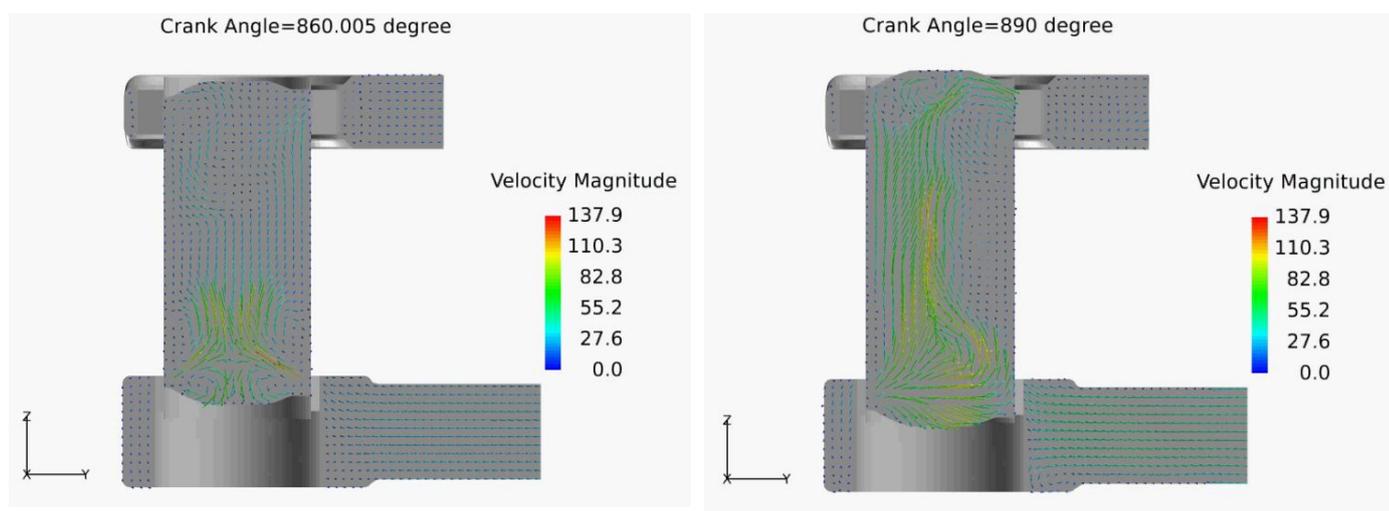


图 10 不同曲轴转角下缸内气体速度分布矢量图

图 10 所示为不同曲轴转角时刻下缸内气体速度分布矢量图。由图中可看出，曲轴转角在 860 度左右时处于扫气前期，缸内气体运动不是很强烈；曲轴转角在 890 度左右时处于扫气中后期，缸内气体运动增强，并逐步趋于稳定。

#### 4.4 缸内流动过程湍动能、湍动能变化率的分析

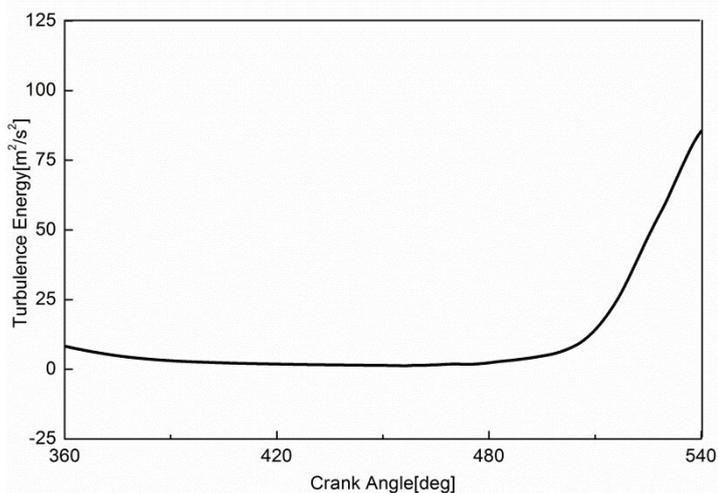


图 11 湍动能随曲轴转角的变化

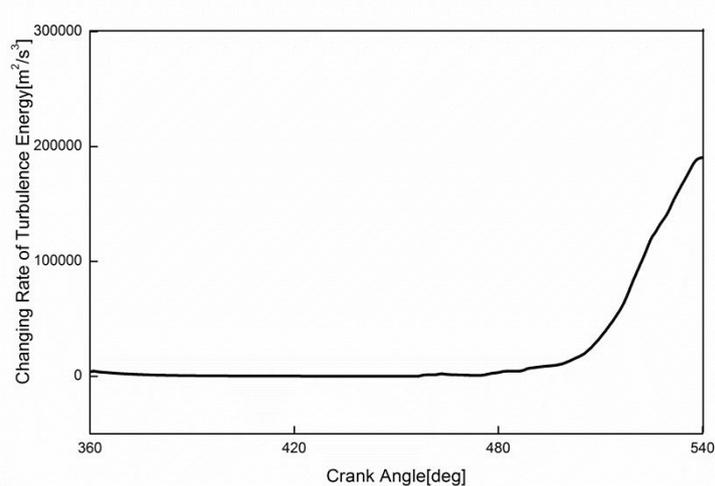


图 12 湍动能变化率随曲轴转角的变化

如图 11、12 所示为随着活塞由内止点向外止点运动过程中缸内湍动能随曲轴转角的变化情况。随着扫气过程的进行，缸内的湍动能开始变高。发动机采用直流扫气的结构形式，因此在整个活塞运动过程中，湍动能的变化并不明显。并且由于发动机运转在怠速工况，所以缸内湍动能变化并不是很剧烈，平均湍动能也不高。湍动能很好地反应了缸内湍流的发展或衰退情况。

## 5 结论

对置二冲程柴油机具有结构简单对称、功率密度高、传热损失小等优点，通过采用直流扫气结构能够有效改善发动机的换气过程，从而提高发动机性能。

本文基于对置二冲程柴油机流动过程的特点，应用 Converge 软件建立了该发动机瞬态流动过程的三维 CFD 仿真模型。通过仿真计算，分析了缸内流动过程，包括缸内气体流动、瞬态气体流量的变化、缸内涡流的变化以及缸内湍动能及其变化率。

在使用 Converge 时，无需创建体网格模型，只需对几何边界进行适当整理分类即可；网格设置中采用了 AMR 加密、体加密、边界加密等手段，最大限度提高了网格效率，提高计算精度。

## 6 参考文献

- [1] Peter H. Opposed Piston Opposed Cylinder (opoc) Engine for Military Ground Vehicles, [C]. SAE Paper 2005-01-1548, 2005.
- [2] Regner G, Herold, R., et al. The Achates Power Opposed-Piston Two-Stroke Engine: Performance and Emissions Results in a Medium-Duty Application [J]. SAE Int J Engines 4(3): 2726-2735, 2011.
- [3] Francisco Brojo, Antonio Santos, Jorge Gregorio 等. Computational Analysis of the Scavenging of a two-stroke Opposed Piston Diesel Engine [J]. Lecture Notes in Engineering and Computer Science, 2010, 2184(1).
- [4] 周龙保. 内燃机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. Zhou Longbao. Internal combustion engine [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [5] 陈文婷, 诸葛伟林, 张扬军, 等. 双对置二冲程柴油机扫气过程仿真研究 [J], 航空动力学报, 2010, 25(6): 1322-1326
- [6] 裴玉姣. 对置活塞式二冲程柴油机直流扫气过程仿真分析及优化 [D]. 中北大学, 2013.
- [7] 高翔. 双对置柴油机换气过程数值模拟研究 [D]. 中北大学, 2013.
- [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 han-jun, Song jin-ou, Yao chun-de, et al. Simulation on In-Cylinder Flow on Mixture Formation and Combustion in OPOC Engine [J]. Transactions of CSICE, 2009, 27(5): 395-400.