

双对置二冲程发动机扫气过程研究

Research on the Scavenging Process of the OPOC Engine

刘 胜 曹 杰 丁 技 峰

(中国北方发动机研究所)

摘要: 针对某型双对置二冲程发动机采用 GT-Power 开展性能匹配计算, 提取扫气过程瞬态边界条件, 采用 Converge 软件进行扫气过程的 CFD 仿真分析, 获得了不同转速工况下内部流场组织形成及其发展过程。评估左右两个气缸的扫气效率, 发现左缸的扫气效率在各转速下均高于右缸, 标定工况下扫气效率在 0.8 左右, 通过仿真计算为发动机气口结构的优化设计提供了技术支持。同时对比了多种 CFD 软件, 认为采用 Converge 软件计算双对置二冲程这种特殊结构发动机的扫气过程更为便利有效。

关键词: 双对置发动机; 扫气过程; 数值计算; GT-Power; Converge

Abstract: Carried out performance match for an OPOC engine in GT-Power, gained the boundary condition, then analyzed the Scavenging Process in Converge software, obtained the conformation and develop process of inside flow field develop. Evaluated the efficiency of the scavenging process of the left and right cylinder, found that the scavenging efficiency of the left cylinder higher then the right one in every speed, the scavenging efficiency is 0.8 at demarcate point. The simulation calculates provided technical help for intake port structure optimization design. Compared multiple CFD software, the Converge is more valid in this special structure engine.

Key words: OPOC Engine; Scavenging Process; Numerical Simulation; GT-Power; Converge

1 概述

双对置发动机是指对置活塞对置气缸发动机, 简称 OPOC (Opposed Piston Opposed Cylinder), 相比传统的二冲程发动机, 该产品在设计上独树一帜。创新性地将对置活塞发动机 (junkers 发动机) 和对置气缸发动机 (boxer 发动机) 结合起来, 在充分发挥二者优势的基础上实现了动力输出的最大化^[1]。对置活塞和对置气缸发动机在国外进行了多年的研究和探索, 而且都有典型的成熟产品。而双对置发动机的研究还处于创新阶段, 有其它机型所不具备的优点^[2]。其结构形式如图 1。

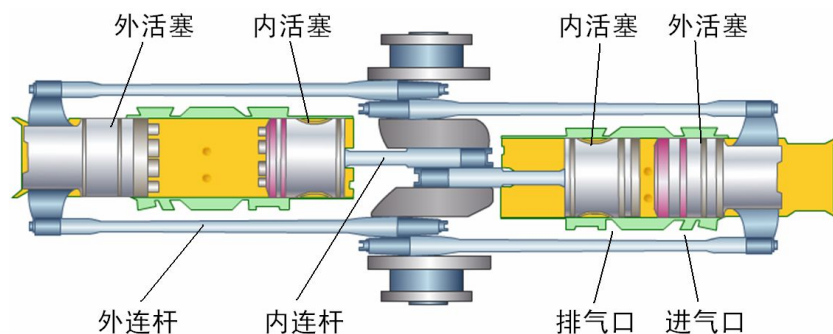
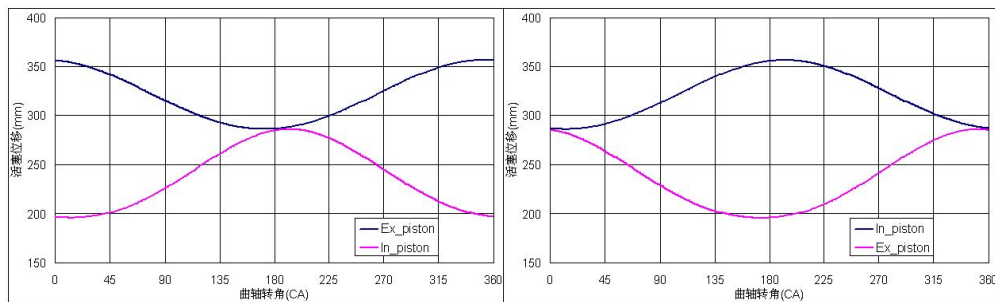


图 1 双对置二冲程柴油机结构示意图

二冲程发动机扫气过程组织的好坏直接影响到发动机的动力性、经济性。组织好的二冲程发动机扫气过程，一方面要保证发动机废气的充分排出，另一方面要尽可能减少新鲜气体的流失。加强对二冲程发动机扫气过程的研究，对提高和改善二冲程发动机的性能具有重要意义^[3]。

2 定解条件的确定

根据该双对置二冲程发动机的基本结构参数及活塞运动规律（图 2）等特征参数，建立基于 GT-POWER 的一维性能仿真分析模型（图 3），对三种不同转速工况（1500 转、2500 转、3600 转）下的整机特性进行分析。根据计算结果提取进出口的动态压力、温度边界和缸内初始值，获得进排气管入口的边界条件和初始条件。



(a) 右缸

(b) 左缸

图 2 进、排气活塞随曲轴转角的运动规律

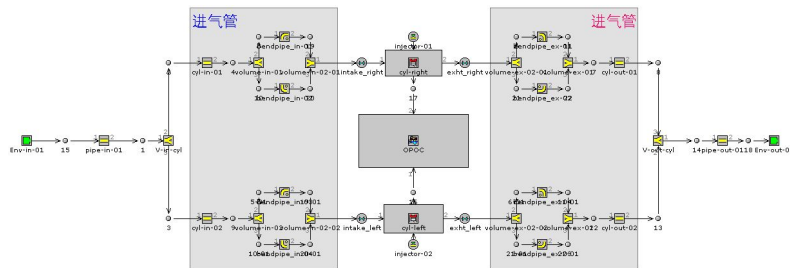


图 3 ED100 发动机一维性能仿真模型

以右缸 1500r/min 为例，提取的瞬态压力、温度边界如图 4 所示：

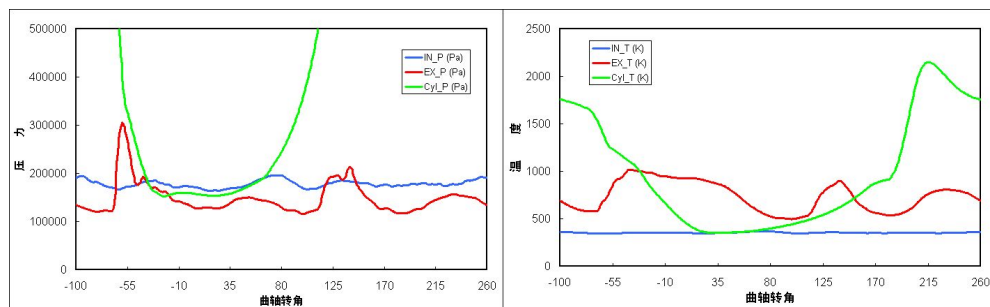


图 4 进出口瞬态压力、温度边界条件

表 1 发动机左右气缸初始条件

项 目		右缸			左缸		
转 速	r/min	1500	2500	3600	1500	2500	3600
曲轴转角	° CA	250	250	250	75	75	75
进气压力	Pa	186951.8	205356.8	234350.8	193916.2	211416.5	219696.8
进气温度	K	357.17	356.21	345.48	348.51	349.34	330.89
排气压力	Pa	148477.7	143486.6	155643.2	141994.0	154315.3	150870.4
排气温度	K	761.82	838.84	793.68	749.68	875.87	778.14
缸内压力	Pa	2616905.6	2226237.5	2379027.5	2122231.7	1780670.4	1863048.8
缸内温度	K	1797.01	1529.72	1422.3	1710.49	1478.42	1351.64

3 扫气过程 CFD 分析

3.1 三维扫气模型及设置



图 5 发动机 Converge 计算模型

图 5 为计算初始状态时左右气缸的表面三角网格，Converge 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 Boundary 加载不同边界条件。计算过程中控制网格数 ≤ 100 万。计算周期为 200 度，包含了整个扫气持续期。流体介质为空气与废气的混合物，均为可压缩实际气体，具有随压力、温度变化的物理特性。初始化时，通过分别设定进气管、缸内及排气管的新鲜空气比例来指定气体成分。同时，各部分的压力、温度取自对应曲轴转角的一维性能计算结果。

计算扫气过程中重点考虑流动分析，不考虑壁面传热，主要控制方程及设置参数如下：

气流运动采用 RNS 流动控制方程，主要包括偏微分方程（连续性方程、动量方程）、Redlich-Kwong 真实气体状态方程、湍流模型（RNG k- ϵ 两方程模型）；能量方程；传质模型，求解组分运输和相互作用。以 0.2°CA 为一时间步，共 1000 步，对于每个时间步，能量的残差为 0.00001，其余相应变量的收敛残差设为 0.001，每步最大迭代次数为 50 步。

3.2 扫气过程结果分析

为便于结果分析，采用新鲜空气（Fresh）和湍流动能（tke）来综合分析扫气流场，其中 Fresh 为新鲜空气在流场所占的比例，tke 表明湍流脉动长度和时间尺度的大小。以下只对 1500r/min 工况时右缸

的流场分布进行讨论，右缸其它转速工况及左缸的流场分布限于篇幅不再详述。

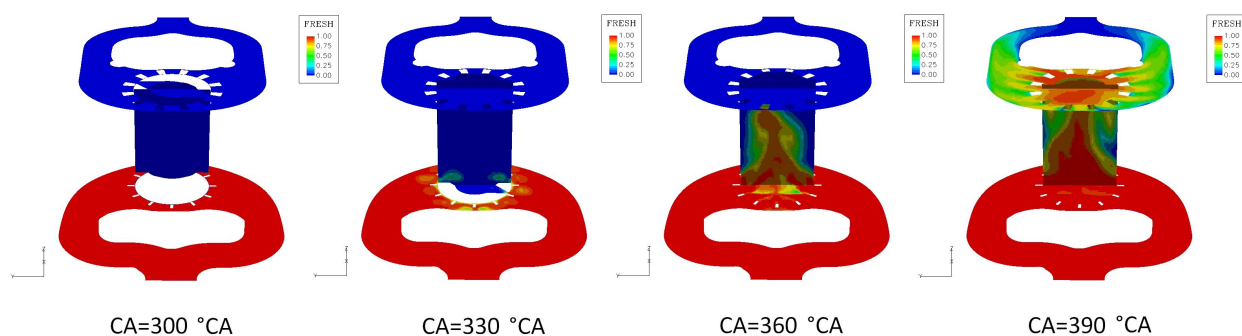


图 6 1500r/min 时扫气过程中新鲜空气分布

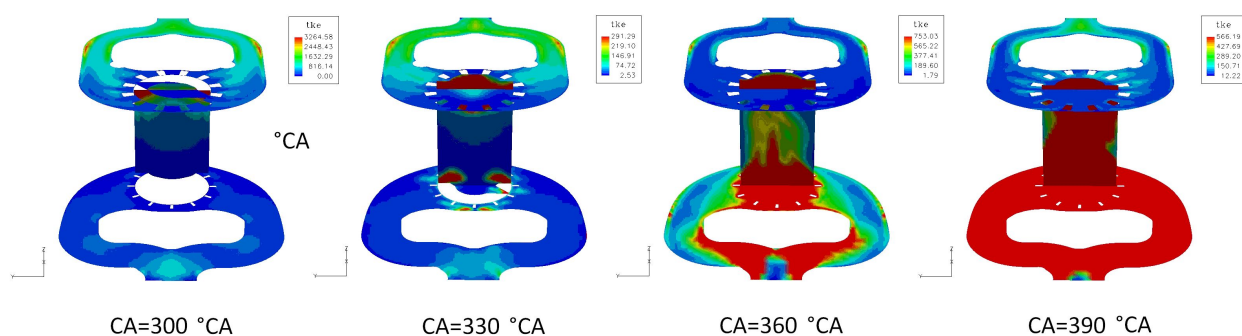
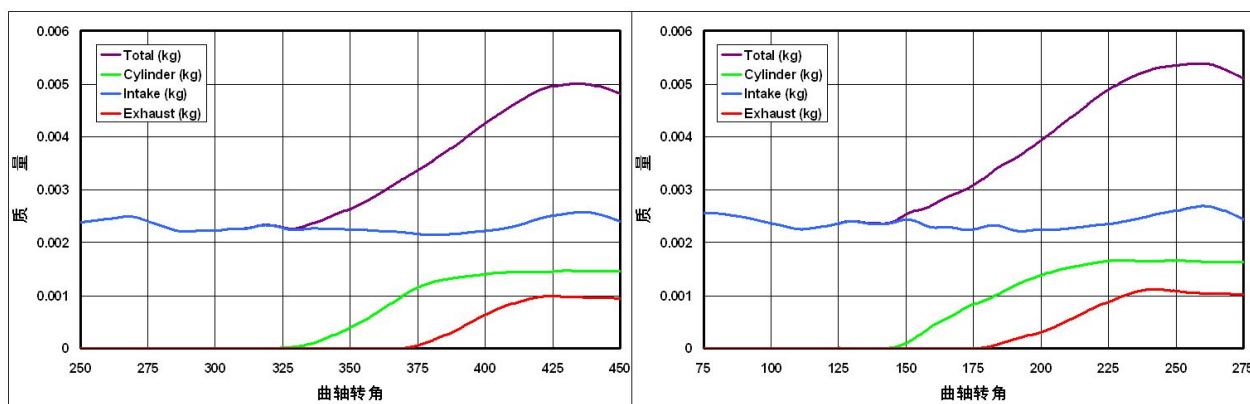


图 7 1500r/min 时扫气过程中湍动能分布

可以看出在排气口打开时（300°CA），自由排气阶段湍流动能比其它时刻的值都大，说明此时的湍流脉动强，排气流速高，排气口左右两侧由于通道比较大流动比较畅通；进气口打开初期（330°CA）由于进排气系统的波动效应，部分新鲜充量回流到进气道，其中夹杂部分残余废气，产生轻微的废气倒灌现象，随着进气口的完全打开可以看到新鲜充量高速流入气缸，贯穿距离最大达 2/3 气缸长度（360°CA）此时的湍流动能也比较小；随后，扫气中后期（390°CA）可看到明显的直流扫气过程，进排气口全部打开后流动阻力降低，湍流动能也逐渐变小。



(a) 右缸

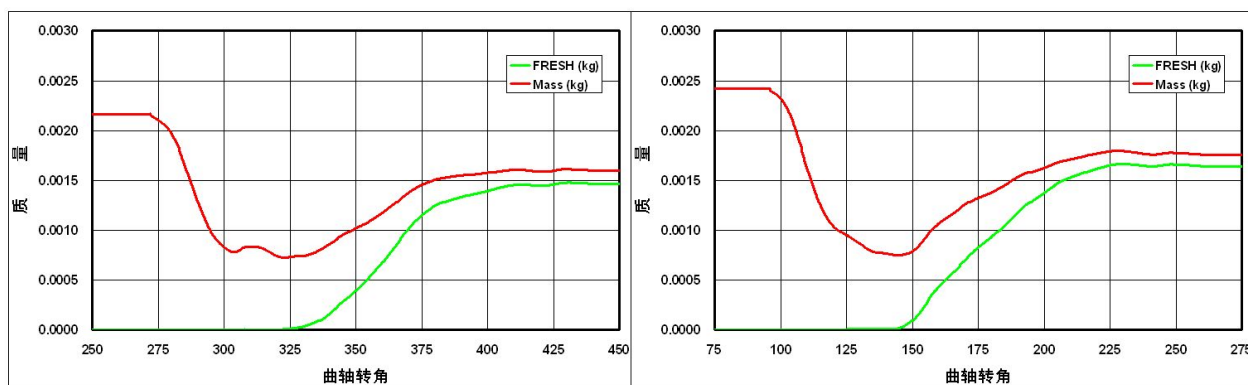
(b) 左缸

图 8 转速 1500r/min 时新鲜空气质量变化

图 8 所示为 1500r/min 时缸内 (Cylinder)、进气管 (Intake)、排气管 (Exhaust) 中以及总的 (Total) 新鲜空气的质量变化情况。对于右缸: 在 308°CA 时进气口打开, 此时缸内新鲜空气略有升高, 在 325°CA 后明显增加, 在经历了约 45°CA 后 (370°CA) 在排气管中的新鲜空气明显增加, 约 400°CA 时缸内新鲜空气质量基本不变, 进气管中新鲜空气流量增加直至排气口关闭, 直流扫气过程大致经历了 62°CA。左缸的情况与之类似, 直流扫气过程大致经历了 69°CA, 且扫气量略高于右缸。

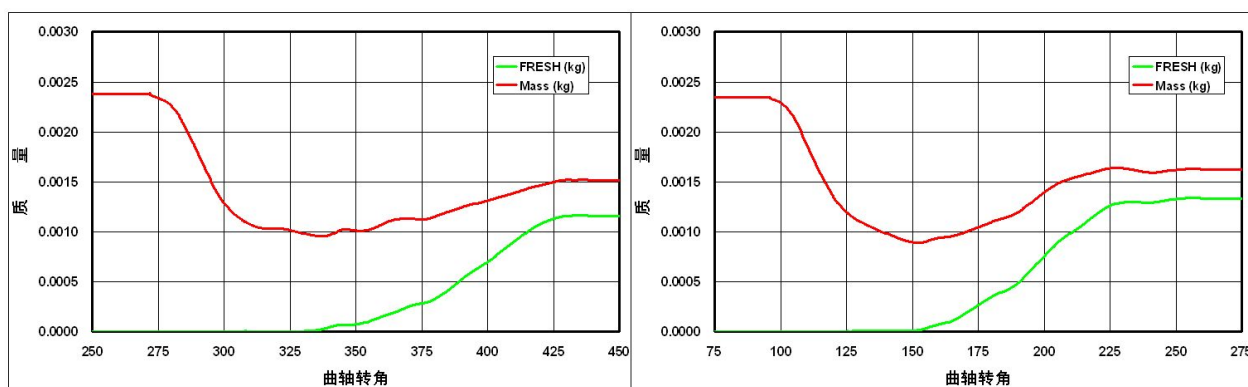
3.3 扫气效率分析

扫气效率是指进气口关闭时刻留在缸内新鲜充量的质量与缸内总质量的比值, 可表征扫气过程结束后缸内新鲜空气比重, 是评价两冲程发动机扫气过程是否良好的重要指标。通过仿真结果后处理, 获得了不同转速下缸内新鲜空气质量与总质量随曲轴转角的变化规律 (图 9), 由图可以看出, 当进气口关闭后新鲜空气的质量和缸内气体的总质量保持不变, 取此时的两个值的比值, 获得不同转速工况下左右气缸的扫气效率如图 10 所示。



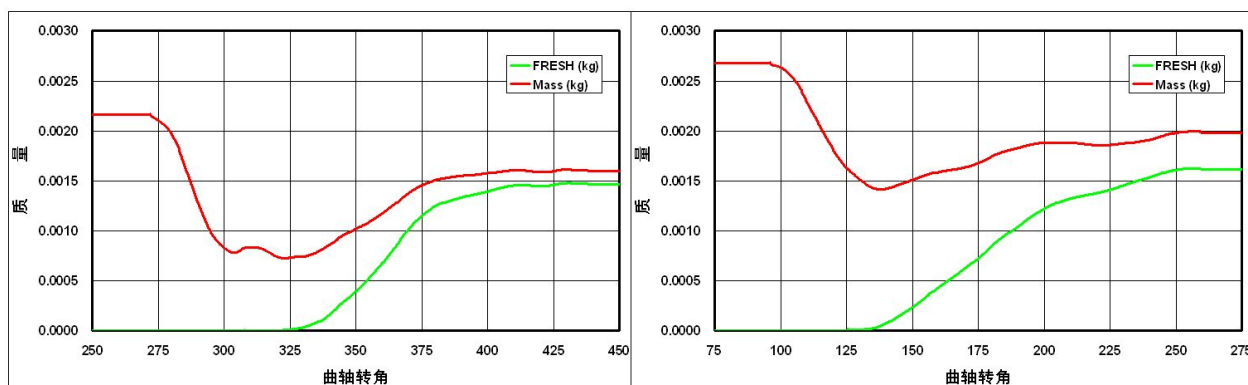
(a) 1500r/min 时右缸

(b) 1500r/min 时左缸



(c) 2500r/min 时右缸

(d) 2500r/min 时左缸



(e) 3600r/min 时右缸

(f) 3600r/min 时左缸

图 9 转速 3600r/min 时缸内新鲜空气质量与总质量对比

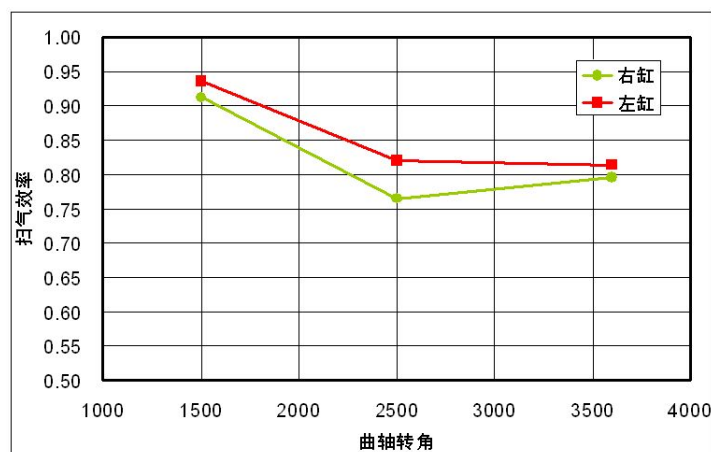


图 10 不同转速工况下左、右缸扫气效率对比

根据不同转速下左右气缸扫气效率的对比可以看出,随着转速的升高扫气效率逐渐降低,且左缸的扫气效率均高于右缸,在 1500r/min 时扫气效率均大于 0.9,左缸最大为 0.936;效率最低点为 2500r/min 的右缸,从前述的流场计算结果中也可以看出,此时的扫气效率仅为 0.766,而在标定转速 3600r/min 时右缸扫气效率为 0.796,左缸扫气效率为 0.814。

4 结论

- 1) 通过对扫气过程 CFD 计算的分析,形象描述了不同转速工况下内部流场组织形成及其发展过程,对正确理解气腔内涡流、湍流、挤流运动的形成与发展规律具有指导作用;
- 2) 根据仿真计算结果,左缸的扫气效率在各转速下均高于右缸,同时在 3600 转的标定工况下扫气效率在 0.8 左右,需进一步通过改型设计开展流场优化工作;
- 3) 进排气道总体结构设计在低转速工况下较为合理,具有一定的优化潜力,要实现高转速工况下高的扫气效率,可采用加高扫气口的高度,拓宽“U”型管底端区域以及切向气口的导向角等措施;
- 4) 前期对比了几种 CFD 软件,采用 Converge 计算双对置二冲程发动机扫气过程更为便利有效。

5 参考文献

- [1] 赵晓辉, 张翼, 许俊峰. OP0C 发动机研究综述[J]. 内燃机与配件, 2012 (11): 24-29
- [2] 刘长振, 刘广丰, 郝勇刚, 李建新. 双对置二冲程柴油机性能分析方法探讨[J]. 柴油机, 2012 (1): 27-31
- [3] 白京元, 刘兵, 曾科. 二冲程汽油机扫气过程多维数值模拟及扫气系统优化设计[J]. 内燃机工程, 2005 (1): 36-43