

DOI: 10.7652/xjtuxb201601008

双对置二冲程柴油机扫气过程的 进气口结构影响规律

邹玉红^{1,2}, 卢勇^{1,2}, 裴普成^{1,2}, 李鹏程^{1,2}, 徐广辉³, 郝勇刚³, 刘长振³

(1. 清华大学汽车工程系, 100084, 北京; 2. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 100084, 北京;

3. 中国北方发动机研究所, 300000, 天津)

摘要: 针对对置活塞、对置汽缸(OPOC)柴油机的结构特点, 基于 ANSYS Fluent 软件对一款典型的 OPOC 柴油机扫气过程建立了三维仿真模型, 模型主要涉及柴油机进气道和进气口部分、排气道和排气口部分以及内、外活塞之间的气缸部分, 由此研究了进气口结构对双对置内燃机扫气过程的影响规律。研究表明: 当涡流排高度比从 0.37 增大到 0.63 时, 进气口面积随之减小, 进气量减少, 扫气效率下降; 当涡流排高度比为 0.5 时, 涡流排径向倾角由 8° 增大到 40° , 缸内涡流比和实际进气量均随之增大, 涡流排倾角为 34° 时缸内涡流比和实际进气量达到最大且扫气过程最为理想。该结果可为二冲程柴油机的动力性、经济性和排放性研究提供参考。

关键词: 对置活塞对置汽缸; 扫气过程; 进气口结构

中图分类号: TK411.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)01-0047-06

Influence of Intake Port Structure on Opposed Piston Opposed Cylinder Two-Stroke Diesel Engine Scavenging Process

ZOU Yuhong^{1,2}, LU Yong^{1,2}, PEI Pucheng^{1,2}, LI Pengcheng^{1,2}, XU Guanghui³,
HAO Yonggang³, LIU Changzhen³

(1. Department of Automotive Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. China North Engine Research Institute, Tianjin 300000, China)

Abstract: Allowing for the unique structure of opposed piston opposed cylinder (OPOC) diesel engine, a 3D simulation model of a typical OPOC diesel engine was established with ANSYS Fluent software to investigate the influence of intake port structure on the scavenging process. The simulation model mainly includes intake and exhaust ports, inlet, outlet, and cylinder between the opposed pistons. The simulation shows that with the increase of port height-ratio of swirl row from 0.37 to 0.63, the area of intake port decreases leading to reduced intake air. As a result, the scavenging efficiency decreases. When the port height-ratio of swirl row reaches 0.5, swirl ratio and actual air input of cylinder increases with the port tangential angle of swirl row raising from 8° to 40° and achieve the maximum at 34° tangential angle, which is an ideal scavenging process for this OPOC engine. This result provides a reference for the further research on power performance, fuel economy, and exhaust for the OPOC diesel engine.

Keywords: opposed piston opposed cylinder; scavenging process; intake port structure

收稿日期: 2015-03-13。 作者简介: 邹玉红(1990—),女,硕士生;裴普成(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51176082)。

网络出版时间: 2015-10-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20151023.1106.014.html>

双对置二冲程(opposed piston opposed cylinder, OPOC)柴油机采用了对置活塞、对置气缸的新结构^[1],如图1所示,其功率密度较高,可达2 kW/kg^[2],结构简单且同时能够实现模块化设计^[3],作为重型卡车发动机^[1]、无人机动力及部分商业、军用的辅助动力单元^[4]具有良好的发展前景。

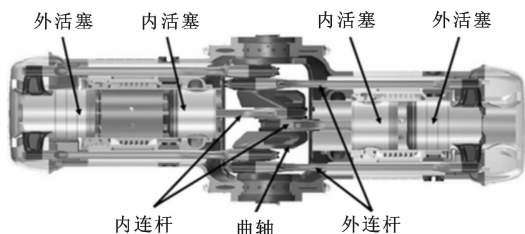


图1 双对置二冲程柴油机单组模块结构图

扫气过程的优劣直接影响着二冲程发动机的动力性、经济性和排放性^[5-7],OPOC柴油机也不例外^[8]。为了改善扫气过程,OPOC柴油机一般在进气口处布置两排,即涡流排和直流排扫气口,如图2所示。涡流排扫气口在前,直流排扫气口在后,两排扫气口可以使得进入气缸的新鲜充量一边绕气缸轴线旋转,一边沿气缸轴线向前推进,从而实现直流扫气。这种换气方式可较好地避免新鲜充量与废气的相互掺混,有效提高OPOC柴油机的换气性能。

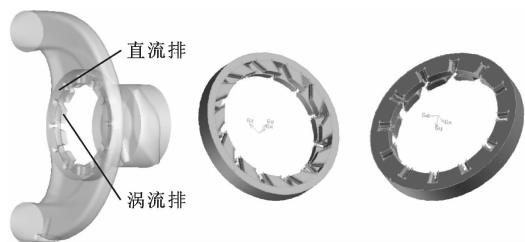


图2 OPOC柴油机进气道及涡流排、直流排结构

扫气过程是OPOC柴油机的研究热点之一。OPOC柴油机的气口高度和位置决定了发动机的配气正时。受结构因素的影响,气口高度越大,有效压缩比和有效膨胀比越小^[9]。Hofbauer研究了OPOC柴油机在不同转速下气口高度对扫气过程的影响^[1],认为气口高度需要根据发动机转速工况进行优化。Kalkstein等人通过一维仿真研究了同一工况下不同高度的进、排气口,并确定了最优的排气口高度^[4]。Peng等人通过三维计算流体力学(CFD)仿真研究了OPOC发动机进、排气口高度对扫气效率、新鲜充量捕集率的影响^[10]。

除了进、排气口高度以外,涡流排和直流排的高

度分配比例(简称涡流排高度比 R)和涡流排的角度同样对OPOC柴油机的扫气过程有着重要影响。涡流排的径向倾角能够让进气产生涡流,倾角越大,产生的涡流越强^[11]。涡流过小,尚不足以形成有效的扫气面;反之,涡流过大,新鲜空气主要沿壁面运动,将废气包围在涡流中心,这样扫气效果也不理想。涡流排高度比越大,则涡流排产生涡流的作用越明显;反之,直流排向前推进的作用越明显。本文采用ANSYS Fluent软件对OPOC柴油机建立了三维CFD仿真模型。在进气口总高度不变的情况下,采用该模型分别研究了涡流排高度比和涡流排径向倾角对OPOC柴油机扫气效率和给气比的影响规律。

1 仿真模型

1.1 计算模型

本文研究的OPOC柴油机进、排气道以及缸内流场结构如图3a所示,在Gambit软件中建立的网格尺寸为2 mm的网格模型如图3b所示。进气道和进气口、排气道和排气口均采用以四面体网格为主的四面体/混合网格,内、外活塞之间的气缸采用以六面体网格为主的六面体/楔形网格。进气道入口边界为压力入口,排气道出口边界为压力出口。OPOC柴油机扫气过程的三维CFD仿真的湍流模型选择标准 $k-\epsilon$ 模型。

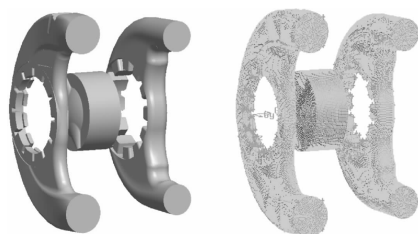


图3 双对置二冲程柴油机

1.2 模型验证

采用双对置二冲程柴油机气道稳流实验的入口流量数据对Fluent中建立的三维CFD模型进行了验证。仿真模型的边界条件与稳流实验相同,如表1所示。仿真结果与实验数据的对比如图4所示。进气口进气流量随气口开度的增大而增大,由于直流排与涡流排之间存在非流通截面,所以流量的增加出现了一小段平台期。由图4可见,计算值与实验值吻合较好,表明该模型可用于后续研究。

表 1 气道稳流实验边界条件

进气口开度/ mm	入口压力/ kPa	出口压力/ Pa	空气密度/ kg·m ⁻³
0.5	102.8	99 817	1.222
1.5	102.8	99 822	1.220
2.5	102.7	99 734	1.219
3.5	102.7	99 726	1.219
4.5	102.7	99 715	1.219
5.0	102.4	99 425	1.212
6.0	102.4	99 404	1.212
7.0	102.4	99 444	1.213
8.0	102.4	99 434	1.213
9.0	102.4	99 421	1.213
10.0	102.4	99 438	1.213
11.0	102.4	99 379	1.213
12.0	102.4	99 376	1.213
13.0	102.4	99 389	1.213
14.0	102.4	99 377	1.213
15.0	102.4	99 384	1.214
16.0	102.4	99 381	1.214
17.0	102.5	99 477	1.215

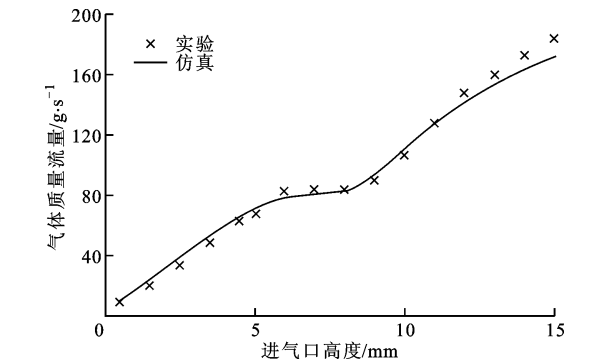


图 4 气道稳流入口流量实验值与仿真值对比

2 涡流排高度比对扫气过程的影响

涡流排高度比的计算式如下

$$R = \frac{h_1}{h_1 + h_2}$$

式中: h_1 为涡流排高度; h_2 为直流排高度。涡流排、直流排气口高度示意如图 5 所示。

本节中除了涡流排高度比以外,其他参数保持不变,其中进气口总高度(直流排高度与涡流排高度之和)为 15 mm,涡流排径向倾角为 8°,发动机的转速为 3 200 r/min 且功率为 157.4 kW。CFD 仿真计算起始曲轴转角为 60°,边界条件由 GT-Power 一

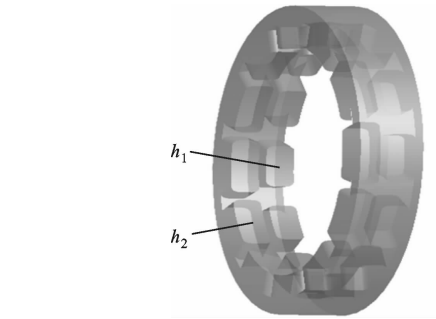


图 5 涡流排、直流排气口高度示意图

维仿真模拟计算所得,如表 2 所示。

表 2 影响涡流排高度比的边界条件

入口压力/kPa	177
入口温度/K	362.8
缸内初始压力/MPa	3.66
缸内初始温度/K	1 588.7
出口压力/kPa	80
出口温度/K	837

2.1 扫气过程性能参数

进气量是指进气口关闭、换气结束时气缸内的新鲜充量的多少,其对 OPOC 柴油机的性能有较大影响。涡流排高度比从 0.37 增加到 0.63 时,进气量、扫气效率和给气比都随之变化。同样高度的涡流排、直流排进气口,直流排进气口面积更大,因此随着涡流排高度比的增大,进气口面积(直流排进气口面积与涡流排进气口面积之和)几乎线性减小,这进一步导致进气量减少,如图 6 所示。涡流排高度比小于 0.5 时,进气量减少的规律与进气口面积一致;高度比为 0.5 时,进气量减少最为缓慢;高度比大于 0.5 时,进气量减少得较进气口面积减小得快。其原因是:涡流排高度比较小时,气流轴向移动速度慢,部分气体沿径向移动,因此进气量减少的速度得到了控制;涡流比较大时,气流轴向移动速度较慢,

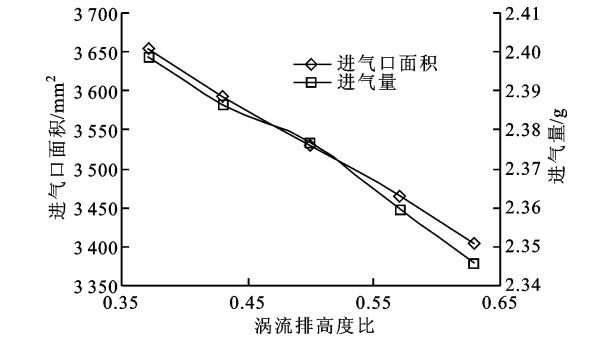


图 6 涡流排高度比对进气口面积、进气量的影响

缸内新鲜充量受到了影响。

扫气效率为扫气结束后缸内新鲜空气质量与缸内气体总质量的比值。扫气效率越大,扫气效果越好。给气比是每次循环通过扫气口的新鲜空气质量与在进气状态下充满气缸总容积的理论空气质量之比。给气比越大,耗气量越多,增压器消耗功率多,发动机功率下降。理想的扫气过程是在消耗尽可能少的机械功的前提下,获得了最大的新鲜充量,即给气比尽可能小,而扫气效率最大。

当涡流排高度比增加,其他参数保持不变时,由于进气口截面积减小,所以 OPOC 柴油机的扫气效率减小,给气比降低,如图 7 所示。虽然扫气效率和给气比同时下降,但是可以明显地看到,涡流排高度比为 0.5 时给气比下降幅度较大,相对而言,扫气效率减小得较为缓慢。这说明在该工况下,扫气过程消耗的新鲜空气大幅减少,扫气效率却变化不大,依然能达到较好的扫气效果,该结果有进一步研究的价值。

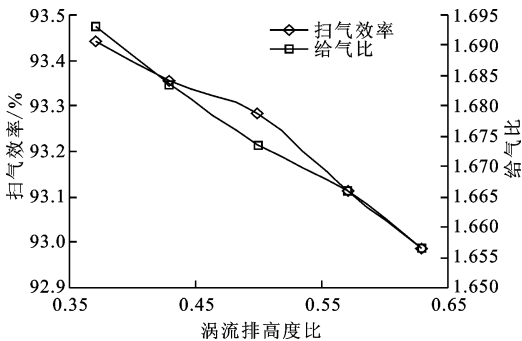


图 7 涡流排高度比对扫气效率、给气比的影响

2.2 涡流比

在进气口处增加涡流排的主要作用就是组织进气涡流。涡流的强弱,即涡流比的大小,在一定程度上决定了换气质量。涡流比等于涡流的转速除以发动机转速。涡流的转速可根据某一气缸横截面上所有流体微元对中心轴转动的平均角度 $\bar{\omega}$ 计算得到。由角动量守恒可得

$$\sum_{i=1}^n \rho_i V_i | \mathbf{v}_i \times \mathbf{r}_i | = \bar{\omega} \sum_{i=1}^n \rho_i V_i (\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{r}_i)$$

则

$$\bar{\omega} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i V_i | \mathbf{v}_i \times \mathbf{r}_i |}{\sum_{i=1}^n \rho_i V_i (\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{r}_i)}$$

式中: n 为横截面上网格单元个数; V_i 为网格单元体积; ρ_i 为密度; $\mathbf{r}_i$ 为网点单元在横截面上的位置矢量;

$\mathbf{v}_i$ 为节点在横截面上的速度矢量。横截面上第 i 个网格单元的坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 速度坐标为 (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}) 。模型中活塞沿 x 轴运动, 那么 $\mathbf{r}_i = (y_i, z_i)$, $\mathbf{v}_i = (v_{yi}, v_{zi})$, 则有

$$\bar{\omega} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i V_i (x_i v_{yi} - y_i v_{xi})}{\sum_{i=1}^n \rho_i V_i (x_i x_i + y_i y_i)}$$

从而涡流转速 $n_D = \frac{60\bar{\omega}}{2\pi} = \frac{30\bar{\omega}}{\pi}$ 。考虑到涡流的稳定性, 选取气缸中间截面为研究对象, 计算了曲轴转角为 187.5° 时不同涡流排高度比对应的涡流比, 如图 8 所示。涡流排高度比增加导致涡流比从 1.107 8 增大到 2.086, 即缸内涡流增强。

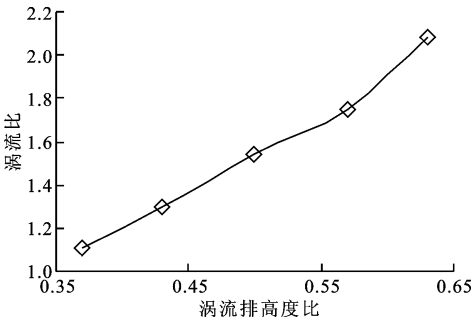


图 8 涡流排高度比对涡流比的影响

2.3 缸内流场分布

残余废气的分布可以用来评价二冲程发动机换气过程。涡流排高度比增加, 进气口面积减小导致进气量降低, 但缸内涡流增强, 因此气流逐渐集中于气缸轴线处, 形成了扫气面, 且有效地清除了缸壁附近的废气, 如图 9 所示。综上所述, 涡流排高度比增大导致扫气效率下降的原因是进气量减少。此外, 增强进气涡流对扫气过程是有利的, 也可进一步尝试改变涡流排径向倾角进行研究。

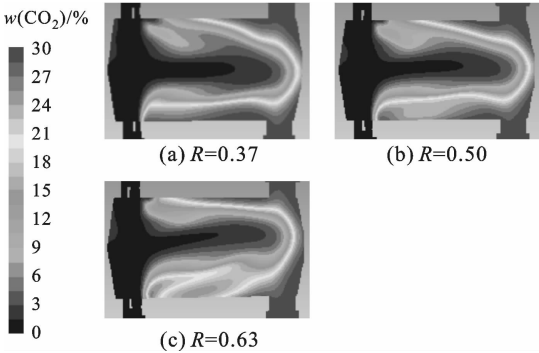


图 9 曲轴转角为 187.5° 时不同涡流排高度比下缸内残余废气分布

3 涡流排径向倾角对扫气过程的影响

涡流排径向倾角是指涡流排气口的进气方向与气缸直径的夹角,如图 10 所示,它的作用是产生进气涡流。由于本文仅研究径向倾角的变化,所以下文中统称倾角。涡流排高度比保持 0.5 不变,通过逐渐增大涡流排倾角来分析 OPOC 柴油机扫气过程的变化规律。

3.1 扫气过程性能参数

涡流排倾角增大,进气口面积微弱减小,进气量先减后增且在 34°倾角下达到最大值,如图 11 所示。因此,进气量并不简单地与进气口面积呈正比关系。倾角的增加,大大增加了缸内新鲜充量,尤其是从 18°到 23°,进气量显著升高,该曲线斜率非常大。由此可见,缸内流场的形式对 OPOC 柴油机扫气过程的影响很大。

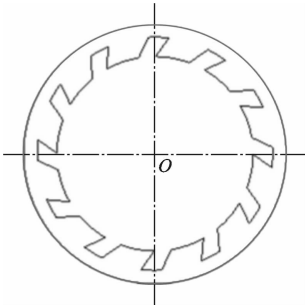


图 10 涡流排倾角示意

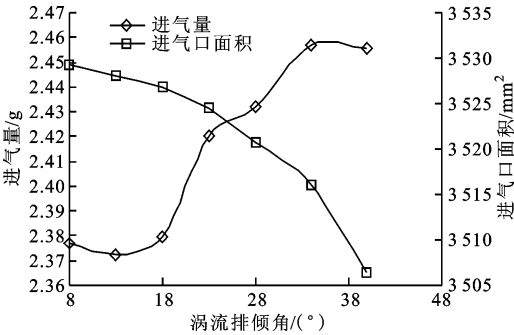


图 11 进气量、进气口面积随涡流排倾角的变化

扫气效率和给气比随涡流排倾角的变化如图 12 所示。从图中可以看出,OPOC 柴油机的扫气性能随着涡流排倾角的增大而提升,随着涡流排倾角的增加,扫气效率提高的同时给气比下降。当倾角从 8°增加到 13°时,扫气效率略微下降,这是因为此时的进气量略有减少。涡流排倾角增大到 18°,扫气效率基本呈线性上升,同时给气比几乎直线下降。

3.2 涡流比

涡流排倾角增大,进气涡流增强,涡流比升高,

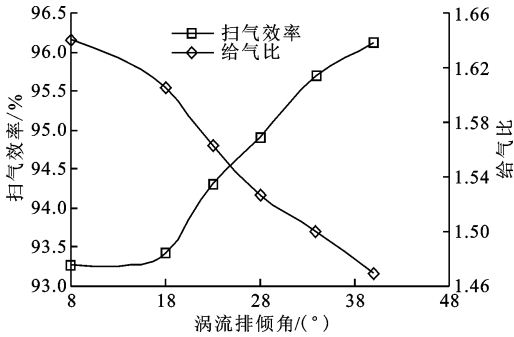


图 12 涡流排倾角对扫气效率、给气比的影响

如图 13 所示。34°倾角时涡流比达到最大值,此时进气量最大。继续增大倾角,涡流比开始降低,进气量减少。然而,涡流比从最大值 4.15 回落到 3.86,扫气效率依然升高。其原因是涡流比减小是涡流排倾角增大导致的,涡流的转速虽然有所降低,但此时扫气面增大保证了较好的扫气效果。

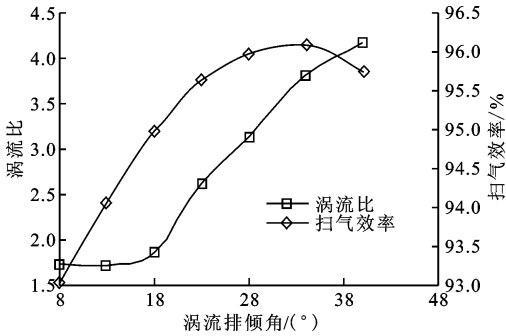


图 13 涡流排倾角对涡流比、扫气效率的影响

3.3 缸内流场分布

涡流排倾角增加,换气质量提升,主要原因是缸内形成了有效的进气涡流。倾角较小时,涡流较弱,气缸壁面周围的废气无法清除干净,如图 14a 所示。倾角增大到 23°时,缸内涡流增强,缸壁附近的残余废气较少,如图 14b 所示。倾角为 40°时,气流一边绕气缸轴线旋转,一边向前推进,由于此时的涡流较

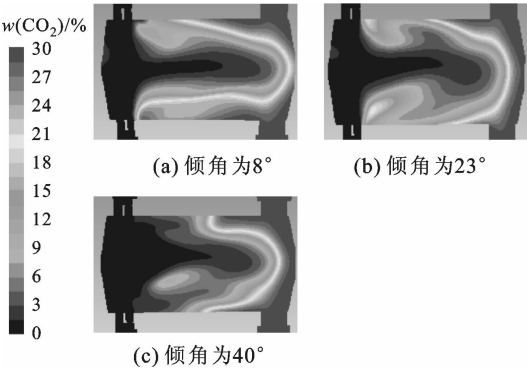


图 14 曲轴转角为 187.5°时不同涡流排倾角下缸内残余废气分布

强,扫气面基本充满气缸横截面,新鲜充量沿缸壁运动,有小部分废气被包裹在气缸中心,如图 14c 所示。那么,可以推测,如果继续增大涡流排倾角,包裹在气缸中心的废气将增多,它会导致进气流短路损失增加,扫气效率下降,给气比增加,这对扫气过程是不利的。

由图 14 还可知,增大涡流排倾角能更有效地扫除缸内残余废气,但是进气气流的轴向移动速度略有降低。3.1 节中缸内新鲜充量在倾角为 40° 时有所减少的结论,在此得到了解释。由于扫气过程进行得良好,缸内残余废气大大减少,所以扫气效率依然增大。

4 结 论

本文利用 ANSYS Fluent 软件建立了双对置二冲程柴油机扫气过程的三维仿真模型,分析了涡流排高度比和涡流排倾角对扫气过程的影响,并得到如下结论:

(1)增大涡流排高度比,缸内涡流比有所增加,但此时进气口面积减小的幅度较大,进气量下降,从而导致扫气效率下降;

(2)增大涡流排倾角,涡流比和扫气面随之增大,双对置二冲程柴油机扫气过程的扫气效率升高,给气比下降,扫气效率可达 96% 以上;

(3)OPOC 柴油机在扫气结束时缸内的新鲜空气质量并不是简单地随着扫气效率的增加而增大,涡流排倾角为 40° 时的扫气效率比倾角为 34° 时增加了 0.42%,但是 34° 倾角下的进气量更多,因此在本文研究工况下倾角为 34° 时的换气质量更好;

(4)通过改变涡流排高度比和倾角都能组织进气涡流,但是倾角对进气涡流的影响要大于气口高度,在其他参数相同的情况下,涡流比越大,换气质量越好。

参考文献:

- [1] HOFBAUER P. Opposed piston opposed cylinder (OPOC) engine for military ground vehicles [M]. Washington, DC, USA: SAE, 2005.
- [2] 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(6): 1322-1326.
CHEN Wenting, ZHUGE Weilin, ZHANG Yangjun,

et al. Simulation on the scavenging process of the opposite two-stroke diesel engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2010(6): 1322-1326.

- [3] 高翔. 双对置柴油机换气过程数值模拟研究 [D]. 太原: 中北大学, 2013.
- [4] KALKSTEIN J, RÖVER W, CAMPBELL B, et al. Opposed piston opposed cylinder (OPOC™) 5/10 kW heavy fuel engine for UAVs and APUs [M]. Washington, DC, USA: SAE, 2006.
- [5] 章振宇, 赵振峰, 张付军, 等. 对置二冲程柴油机扫气口参数对扫气过程的影响 [J]. 内燃机工程, 2014(5): 119-124.
ZHANG Zhenyu, ZHAO Zhenfeng, ZHANG Fujun, et al. Study on the influence of scavenging port parameters on the scavenging process on an opposed-piston two-stroke diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014(5): 119-124.
- [6] 夏孝朗. 新型二冲程柴油机性能研发关键技术研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [7] PENG L, TUSINEAN A, HOFBAUER P, et al. Development of a compact and efficient truck APU [M]. Washington, DC, USA: SAE, 2005.
- [8] 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]. 太原: 中北大学, 2013.

[本刊相关文献链接]

- 高忠权, 李春艳, 蔺子雨, 等. 采用离子电流法的甲醇发动机失火诊断. 2015, 49(11): 44-48. [doi:10.7652/xjtuxb201511008]
- 魏衍举, 王坤, 李东华, 等. 柴油重质组分对有机可溶物中烷烃成分及其分布的影响. 2014, 48(11): 15-19. [doi:10.7652/xjtuxb201411003]
- 赵玉伟, 汪映, 雷雄, 等. 预混均质充量压缩燃烧发动机燃烧与排放特性. 2014, 48(7): 23-28. [doi:10.7652/xjtuxb201407005]
- 杨博, 刘亦夫, 尉星, 等. 双燃料发动机电控单元的设计与控制策略. 2014, 48(5): 8-14 + 26. [doi:10.7652/xjtuxb201405002]
- 周磊, 宁小康, 郑瑜, 等. 含氧燃料添加对引燃式天然气发动机细颗粒排放的影响. 2014, 48(1): 19-24. [doi:10.7652/xjtuxb201401004]
- 盛新堂, 黄瑾, 王小荣, 等. 自然吸气二甲醚发动机排气再循环 NO_x 满足国 IV、V 排放标准的研究. 2013, 47(7): 18-22. [doi:10.7652/xjtuxb201307004]

(编辑 苗凌)