

6-4-2020

In-cylinder Flow Analysis and Verification of Opposed-piston Two-stroke Engine

Fukang Ma

1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;;2. School of Mechanical and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;;

Changlu Zhao

1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;;

Zhenfeng Zhao

1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;;

Wang Hao

1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

In-cylinder Flow Analysis and Verification of Opposed-piston Two-stroke Engine

Abstract

Abstract: The effects of flat piston uniform scavenging chamber, flat piston non-uniform scavenging chamber and pit piston non-uniform scavenging chamber on the in-cylinder flow were analyzed. *Uniflow scavenging zero-dimensional model was used to qualitative analysis in-cylinder flow organizational process and influence rule* for opposed-piston two-stroke engine. Results show that *uniform scavenging chamber can organize swirl and increase scavenging efficiency and non-uniform scavenging chamber can organize tumble and increase turbulent kinetic energy*. Scheme 3 is favorable to organize tumble and maintain the in-cylinder turbulence intensity, which is increased by 150 percent.

Keywords

opposed-piston two-stroke, flow, zero-dimensional model, simulation

Authors

Fukang Ma, Changlu Zhao, Zhenfeng Zhao, Wang Hao, Yu Xia, Cao Yan, and Jiqing Zhang

Recommended Citation

Ma Fukang, Zhao Changlu, Zhao Zhenfeng, Wang Hao, Yu Xia, Cao Yan, Zhang Jiqing. In-cylinder Flow Analysis and Verification of Opposed-piston Two-stroke Engine[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(7): 1567-1574.

对置活塞发动机缸内流动的组织分析与仿真验证

马富康^{1,2}, 赵长禄¹, 赵振峰¹, 王豪¹, 于霞³, 曹艳³, 张吉庆⁴

(1. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 中北大学 机械与动力工程学院, 太原 030051;

3. 山西柴油机工业有限责任公司, 大同 037036; 4. 中国国际工程咨询公司, 北京 100042)

摘要: 为分析对置活塞二冲程发动机缸内流动的组织方法与影响规律, 分别设计均匀和非均匀进气腔以及平顶和凹坑活塞进行缸内流动计算。通过建立缸内流动的零维模型, 对缸内流动的组织 and 影响规律进行定性分析。同时, 通过三维计算流体动力学仿真验证了零维模型的分析结论。研究表明, 均匀进气可组织较强的缸内涡流, 非均匀进气配合活塞顶面的凹坑导流结构, 可实现缸内流动的合理组织和平均湍动能变化, 相比平顶活塞缸内湍动能提高了 1.5 倍。

关键词: 对置活塞二冲程; 流动; 零维模型; 仿真

中图分类号: TK412

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 07-1567-08

In-cylinder Flow Analysis and Verification of Opposed-piston Two-stroke Engine

Ma Fukang^{1,2}, Zhao Changlu¹, Zhao Zhenfeng¹, Wang Hao¹, Yu Xia³, Cao Yan³, Zhang Jiqing⁴

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. School of Mechanical and Power Engineering,

North University of China, Taiyuan 030051, China; 3. Shanxi Diesel Engine Industry co., LTD, Datong 037036, China;

4. China International Engineering Consulting Corporation, Beijing 100042, China)

Abstract: The effects of flat piston uniform scavenging chamber, flat piston non-uniform scavenging chamber and pit piston non-uniform scavenging chamber on the in-cylinder flow were analyzed. *Uniflow scavenging zero-dimensional model* was used to qualitative analysis in-cylinder flow organizational process and influence rule for opposed-piston two-stroke engine. Results show that *uniform scavenging chamber can organize swirl and increase scavenging efficiency and non-uniform scavenging chamber can organize tumble and increase turbulent kinetic energy*. Scheme 3 is favorable to organize tumble and maintain the in-cylinder turbulence intensity, which is increased by 150 percent.

Keywords: opposed-piston two-stroke; flow; zero-dimensional model; simulation

引言

对置活塞二冲程发动机是一种结构区别于传统发动机的往复活塞式内燃机, 取消了气缸盖和配气机构, 依靠气缸套上的进排气口实现换气过程, 具有高效、高功率密度和平衡性好等优点^[1]。在能源与环境危机的背景下, 随着现代设计技术的应用,

对置活塞二冲程发动机已被重新重视起来^[2-5]。对置活塞二冲程汽油机由于取消了气缸盖结构, 所以燃烧室由对置活塞顶面组成, 喷油器和火花塞均在气缸套侧壁布置。此外, 对置活塞二冲程汽油机的缸内气流运动主要依靠进气口的流通特性和进气腔内对气流的组织方式。

对于传统发动机而言, 直喷式汽油机可以利用的缸内气流运动主要有 3 种形式: 涡流、滚流和挤流。缸内气流运动的组织和强度取决于进气道的设计、进气门的形状、缸径行程比以及燃烧室的形状等^[6]。针对对置活塞二冲程发动机缸内流动, Nak



收稿日期: 2015-01-30 修回日期: 2015-04-08;

基金项目: 国家部委科研基金(B2220110005);

作者简介: 马富康(1979-), 男, 山西, 博士, 讲师, 研究方向为内燃机工作过程建模与仿真; 赵长禄(1963-), 男, 辽宁, 博士, 教授, 研究方向为动力系统仿真及控制。

<http://www.china-simulation.com>

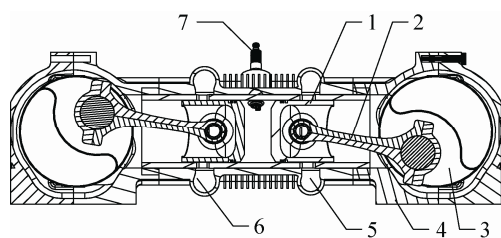
• 1567 •

Won Sung 研究了气口结构对发动机缸内流动的影响,指出进气口倾角能促使缸内涡流产生;Francisco Brojo 等人通过数值模拟的方法研究了进气口倾角对扫气过程的影响,结果证明适当的进气口径向倾角有利于缸内废气的排出^[7]。许汉君等通过设计滚流进气口,即一侧进气口沿气缸轴线向上倾斜,另一侧进气口沿气缸轴线向下倾斜,使得进气过程中来自两侧进气口的气流在气缸中心处相互作用形成滚流^[8]。此外,天津大学、北京理工大学、中北大学以及大连海事大学等均对对置活塞二冲程发动机的缸内流动和工作过程开展了研究^[9-13]。本文针对对置活塞二冲程缸内直喷汽油机直流扫气过程的特点,建立其扫气和压缩过程缸内流动组织的零维分析模型,并通过三维计算流体动力学仿真进行模型验证,同时分析了不同进气腔和对置活塞顶结构对缸内流动的影响规律,可为对置活塞二冲程直喷式汽油机缸内气流运动的组织与匹配提供依据。

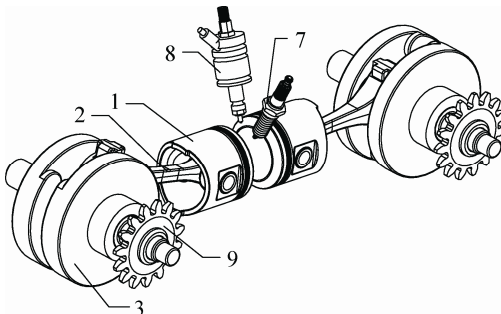
1 对置活塞二冲程汽油机扫气系统

1.1 对置活塞二冲程汽油机

对置活塞二冲程汽油机原理样机结构见图 1。



(a) 结构剖视图



1 为活塞, 2 为连杆, 3 为曲轴, 4 为箱体及油底壳, 5 为进气口, 6 为排气口, 7 为火花塞, 8 为喷油器, 9 为链轮

(b) 对置曲柄连杆机构

图 1 对置活塞二冲程汽油机结构原理

对置活塞二冲程汽油机采取无气缸盖和气门机构的设计、喷油器和火花塞在气缸套周向布置、直流扫气系统、两对置活塞组成燃烧室系统,并通过链传动实现对置曲柄连杆机构的同步工作。采用平顶活塞和非均匀进气腔结构时,原理样机的主要结构和技术参数见表 1。

表 1 对置活塞二冲程汽油机主要参数

参数名称	参数值
气缸数	1
气缸直径/mm	56
活塞冲程/mm	49.5(×2)
实际压缩比	10.5
标定转速/(r/min)	6 000
标定功率/kW	15

1.2 直流扫气系统缸内流动的组织

对置活塞二冲程发动机缸内涡流的组织可通过进气口径向倾角的设计而获得,如图 2(a)。由于进气口径向倾角的导流作用,所以缸内气流进入气缸的同时会形成绕气缸轴线方向运动的涡流动量。同时,通过进气腔的结构设计对缸内流动进行组织,包括均匀进气腔结构和非均匀进气腔结构,如图 3(a)和(b)。通过非均匀进气腔结构可以使进气过程中远离进气腔入口的气口附近气流受气腔壁面的摩擦及结构突变而造成沿程损失,气流速度和流量降低;而靠近进气腔入口的气口附近气流动量损失较少,气流运动速度和流量较大,如图 2(b)所示。两侧气流进入气缸后相互作用形成绕垂直气缸轴线的滚流动量。此外,通过对活塞顶面导流凹坑的设计,见图 3(c),可实现在进排气初始和终了过程中对缸内流动的定向引导,并且在压缩过程可利用凹坑的导流作用进一步组织缸内滚流,如图 2(c)。同时,对置活塞的凹坑结构可在压缩内止点附近产生较强的挤流运动,如图 2(d)所示。

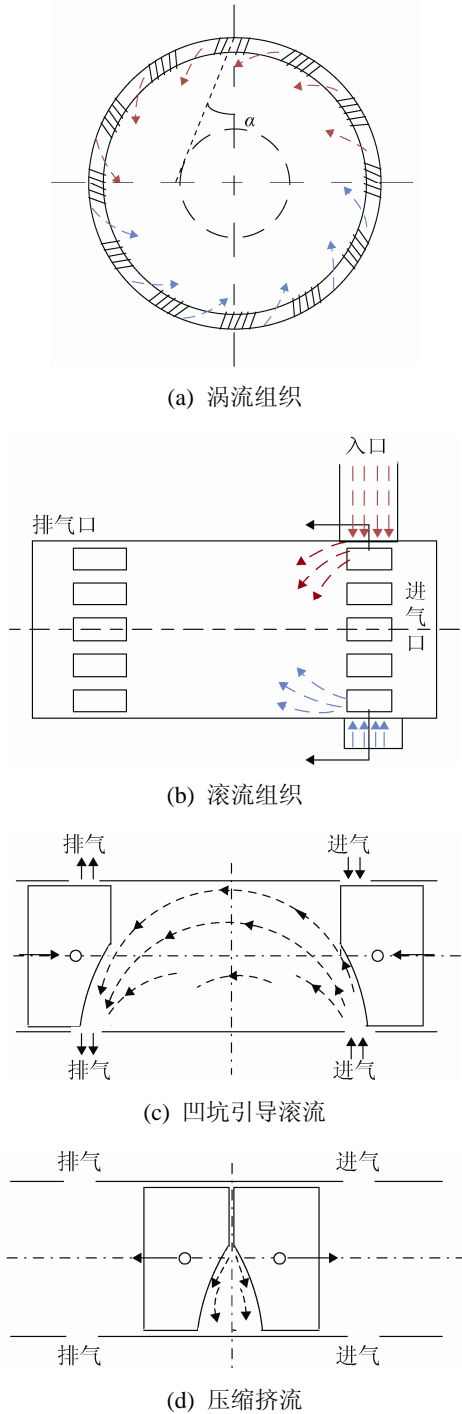
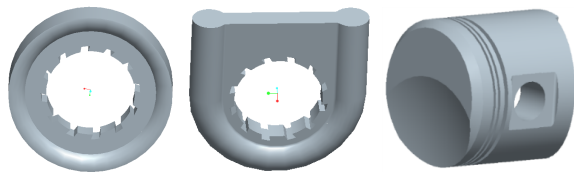


图 2 缸内流动组织示意图



(a) 均匀进气腔 (b) 非均匀进气腔 (c) 凹坑活塞

图 3 不同进气腔和活塞结构

2 缸内流动零维模型分析

2.1 非均匀扫气过程的缸内滚流组织

对置活塞二冲程发动机扫气过程气口的流动可视为一维气体等熵流动, 其进气过程质量流量可按照亚临界状态描述为:

$$\frac{dm_s}{d\phi} = \frac{\mu_s F_s}{6n} \sqrt{\frac{2gk}{k-1}} \cdot \frac{p_s}{\sqrt{RT}} \sqrt{\left(\frac{p_z}{p_s}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_z}{p_s}\right)^{\frac{k+1}{k}}} \quad (1)$$

式中: $dm_s/d\phi$ 为进气口处的质量流量; μ_s 为进气口流量系数; n 为发动机转速; F_s 为进气口流通面积随曲轴转角变化的函数; p_s 为进口压力; p_z 为出口压力; g 为重力加速度; k 为绝热指数; R 为气体常数; T 为气体温度。

假设通过进气口的瞬时流动速度为 v_{in} , 通过进气口体积流量可表示为:

$$\frac{dV_s}{d\phi} = v_{in} F_s \quad (2)$$

将式(2)带入式(1)得:

$$v_{in} = \frac{\mu_s}{6n \cdot \rho} \sqrt{\frac{2gk}{k-1}} \cdot \frac{p_s}{\sqrt{RT}} \sqrt{\left(\frac{p_z}{p_s}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_z}{p_s}\right)^{\frac{k+1}{k}}} \quad (3)$$

由于进气腔的非均匀进气组织导致各进气口的瞬时流动速度不同, 所以通过进气口的瞬时流动速度为 v_{in} 可视为各进气口流动速度 v_{in_i} 的平均值, 见图 4。

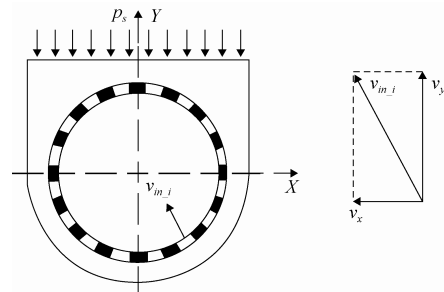


图 4 进气口流动速度分解

设进气口总数为 m , 对进入各进气口的气流速度进行分解, 见图 4。分解在 X 方向的分量和为

0, 分解在 Y 方向的分量和为:

$$v_y = \sum_{i=1}^m v_{in_i_y} = v_{T_s} \quad (4)$$

由于非均匀进气, 所以分解在 Y 方向的分量可合成产生扫气过程中缸内滚流运动的气流速度 v_{T_s} , 见图 5。

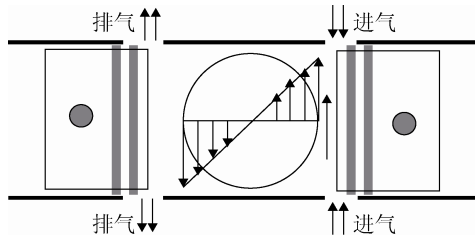


图 5 扫气过程缸内滚流组织

v_{T_s} 主要由非均匀进气产生, 可引入系数 K_1 来表征与各进气口气流运动速度的近似关系:

$$v_{T_s} \propto K_1 m v_{in} \quad (5)$$

式(3)代入(5)得扫气过程中滚流运动的气流速度:

$$v_{T_s} \propto K_1 m \frac{\mu_s}{6n \cdot \rho} \sqrt{\frac{2gk}{k-1}} \cdot \frac{p_s}{\sqrt{RT}} \sqrt{\left(\frac{p_z}{p_s}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_z}{p_s}\right)^{\frac{k+1}{k}}} \quad (6)$$

由于扫气过程中滚流运动的气流速度主要取决于气口的流量系数, 所以在扫气过程缸内滚流比先增大后减小。

2.2 压缩过程的缸内滚流组织

在压缩过程, 由于对置活塞之间的距离缩短, 滚流被压缩破碎, 滚流旋转惯量 I 减小, 而滚流旋转速度 ω_T 增加^[14-15], 所以切向分量增加、滚流速度提高, 见图 6。

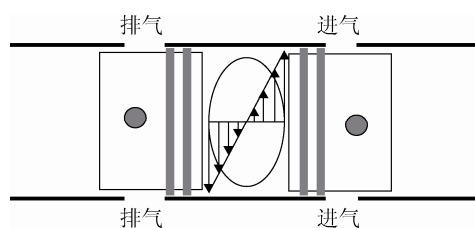


图 6 压缩过程缸内滚流组织

在压缩过程, 滚流速度分量和湍动能增加, 旋转角速度为:

$$\omega \propto \frac{v_{T_c}}{r_T} \quad (7)$$

式中: v_{T_c} 为压缩过程中缸内滚流的气流速度; r_T 为滚流旋转半径, 由对置活塞之间距离的一半来表示, 记为 h 。

由式(7)可得进气口关闭时的滚流动量矩为:

$$J_{IPC} = I_{IPC} \frac{v_{T_IPC}}{h_{IPC}} \propto I_c \frac{v_{T_c}}{h_c} \quad (8)$$

旋转惯量定义为旋转质量与 h^2 的乘积, 由式(8)可得压缩过程中滚流运动的气流速度为:

$$v_{T_c} \propto v_{T_IPC} \frac{I_{IPC}}{I_c} \cdot \frac{h_c}{h_{IPC}} \quad (9)$$

$$\propto v_{T_IPC} \frac{h_{IPC}^2}{h_c^2} \cdot \frac{h_c}{h_{IPC}} \propto v_{T_IPC} \frac{h_{IPC}}{h_c}$$

即, $v_{T_c} \propto v_{T_IPC} \frac{h_{IPC}}{h_c}$ 。

h_{IPC} 与 h_c 分别为进气口关闭时和压缩过程中对置活塞之间距离的一半, 二者之比表征压缩过程中滚流的破碎程度, 其值越大滚流破碎程度越大。在压缩初期缸内滚流比增加, 在内止点前滚流破碎, 滚流比减小。

2.3 内止点前的缸内挤流速度

在内止点前, 对置活塞相向运动, 挤流容积减小, 混合气向燃烧室中心流动, 见图 7。

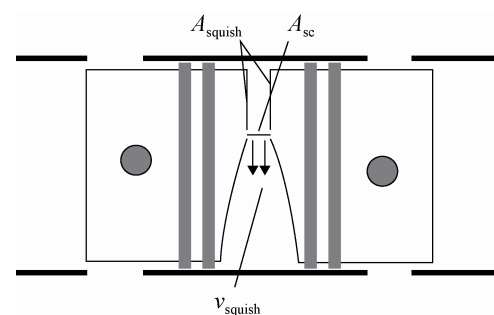


图 7 内止点附近缸内挤流组织

由质量守恒得:

$$V_{squish} \cdot A_{sc} \propto \frac{dh_s}{dt} \cdot A_{squish} \quad (10)$$

式中: V_{squish} 为挤流速度; A_{sc} 为挤流出口面积;
 A_{squish} 为挤流压缩面积; h_s 为瞬时挤流高度;
 dh_s/dt 为对置活塞瞬时相对运动速度。

挤流运动速度主要取决于挤流面积与气缸截面积之比 K_2 和对置活塞相对运动速度 V_p [15]。

2.4 进气过程的缸内涡流组织

缸内涡流主要通过进气口径向倾角组织, 由式 (3) 得各进气口的流动速度为:

$$v_{in_i} = \frac{\mu_{s_i}}{6n \cdot \rho} \sqrt{\frac{2gk}{k-1}} \cdot \frac{p_{s_i}}{\sqrt{RT}} \sqrt{\left(\frac{p_z}{p_{s_i}}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_z}{p_{s_i}}\right)^{\frac{k+1}{k}}} \quad (11)$$

由于扫气过程中涡流运动的气流速度主要取决于气口的流量系数 μ_{s_i} , 所以在扫气过程缸内涡流比先增大后减小。

由于非均匀进气腔结构使得进气过程中远离进气腔入口的气口的气流运动速度和流量较小, 而靠近进气腔入口的气口的气流运动速度和流量较大, 所以均匀进气过程缸内涡流比大于非均匀进气过程。同时, 在进气口关闭后的压缩过程, 缸内涡流受壁面的剪切耗散, 涡流运动速度降低, 涡流比减小。

3 模型建立及校验

3.1 模型建立

利用 AVL-Fire 软件建立对置活塞二冲程汽油机工作过程计算流体动力学仿真模型如图 8 所示。采用六面体网格, 构建排气口打开至进气口关闭的扫气过程及进排气口关闭的压缩和膨胀过程的气缸工作容积动网格, 其中: 进气腔网格数为 43 804, 排气腔网格数为 59 083, 气缸网格数为 306 723, 总网格数为 409 610。内止点附近网格重构后, 气缸最小网格数为 45 702。

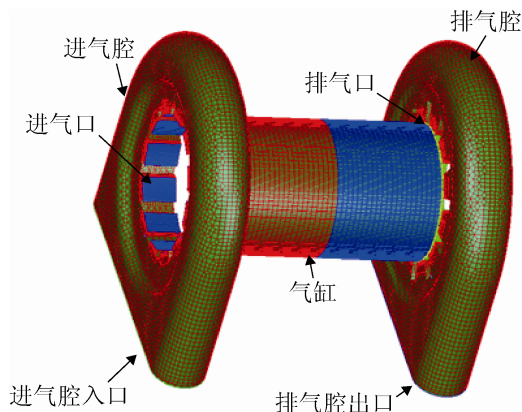


图 8 扫气过程计算流体动力学仿真模型

3.2 模型校验

流体动力学计算的边界条件和初始条件通过一维缸内工作过程仿真来确定。同时, 可通过一维、三维的耦合仿真来进行模型校验 [4]。针对 4.1 节中方案 2, 在转速 1 200 r/min 进行倒拖实验、一维性能预测和三维扫气过程的缸内压力对比, 见图 9。

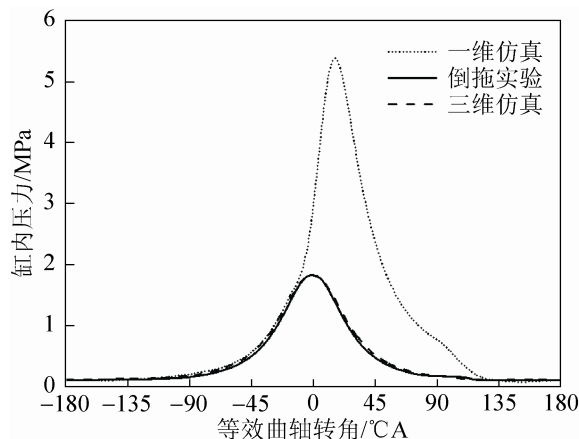


图 9 扫气过程缸内压力对比

4 缸内流动的组织过程分析

4.1 分析方案

选择进气口径向倾角为 15°, 分别设计均匀进气腔和非均匀进气腔结构以及平顶活塞和凹坑活塞结构, 研究标定转速 6 000r/min 时扫气和压缩过程缸内流动的组织特点和影响规律。缸内流动的不同组织方案见表 2。

表 2 不同的缸内流动组织方案

方案	扫气系统结构	说明
1		平顶活塞+ 均匀扫气
2		平顶活塞+ 非均匀扫气
3		凹坑活塞+ 非均匀扫气

4.2 缸内流动分析

缸内气流运动可分解为绕气缸轴线运动的涡流和绕垂直气缸轴线运动的滚流,可分别用涡流比和滚流比来表征其强度。图 10 为不同方案的缸内滚流对比。方案 1 和 2 结果表明:采用平顶活塞时,均匀进气对应的缸内气流几乎没有滚流运动,而非均匀进气对应的缸内滚流比在进气初期和中期以及压缩过程中均不断上升,分别在 200°CA 和 310°CA 时达到最大值。在进气和压缩后期,滚流受压缩破碎,滚流比不断降低。仿真结论与 2.1 和 2.2 节中零维模型的定性分析一致。

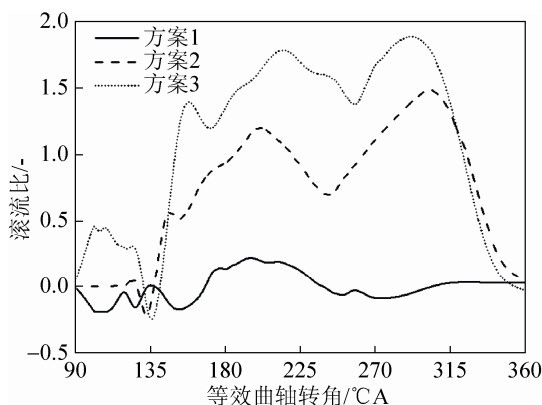


图 10 不同方案缸内滚流对比

方案 2 和 3 采用非均匀进气方式,缸内滚流变化趋势一致,方案 3 的滚流比大于方案 2。由于凹坑活塞对应的排气口开启较早以及排气活塞凹坑的导流作用,所以排气初期方案 3 的缸内滚流比较

大,此过程的缸内滚流主要由于非均匀排气产生。随着扫气过程的进行,非均匀进气和进气活塞凹坑导流所产生的滚流逐步增强,缸内滚流比增大。在外止点过后的扫气后期,随着缸内气流运动速度的降低,缸内滚流比减小,直到进气口关闭时缸内滚流比达到最小值。在压缩过程,气流运动的惯性效应和对置活塞对缸内气流的定向组织,缸内滚流比增加。由于活塞的凹坑结构在扫气终了对进气过程的定向引导和在压缩过程对缸内气流的定向组织,所以方案 3 的滚流比大于方案 2。随着压缩过程的进行,大尺度定向流动被压缩破碎,缸内滚流比降低,并在内止点前二者趋于一致。

图 11 为不同方案的缸内涡流的对比。方案 1 和 2 结果表明:在相同的进气口径向倾角时,均匀进气方式组织的缸内涡流水平明显高于非均匀进气方式;采用非均匀进气方式配合进气口径向倾角可有效组织缸内斜轴滚流;分析结论与 2.4 节中零维模型的预测结论一致。针对非均匀进气方式的平顶活塞和凹坑活塞,其缸内涡流变化趋势一致,方案 3 的涡流比小于方案 2。凹坑活塞顶面的凹坑结构使得进气口提前打开导致方案 3 中缸内涡流的组织较方案 2 提前。同时,由于活塞凹坑的设计加剧了进气口周向流动的不均匀性,滚流动量增强而涡流动量减弱,影响缸内涡流的组织,所以在扫气和压缩过程中方案 3 的涡流比均低于方案 2。在外止点过后,随着扫气过程的结束,缸内气流涡旋运动速度降低;同时,随着对置活塞的压缩,缸内大尺度涡流被压缩破碎,涡流比降低。

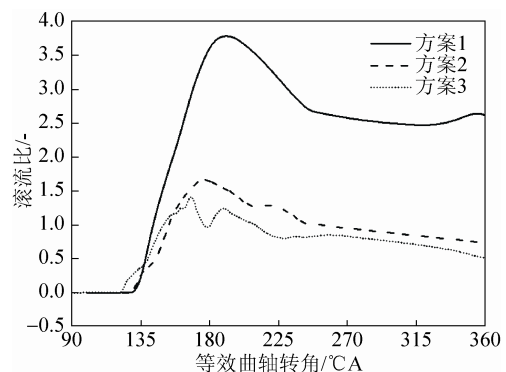


图 11 不同方案缸内涡流对比

对比方案 2 和 3 的不同活塞顶面结构在压缩内止点附近缸内挤流运动情况, 见图 12。方案 2 中, 平顶活塞在内止点附近对缸内径向挤流作用极小, 即气流径向运动速度趋于 0。方案 3 中, 凹坑活塞在内止点附近对缸内径向挤流作用较大, 气流径向运动速度相对于内止点对称出现。

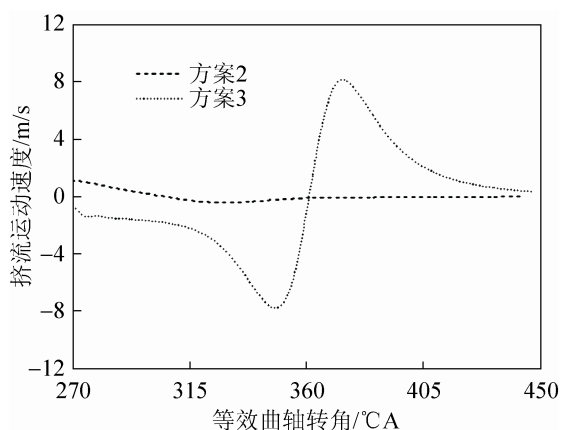


图 12 不同方案缸内挤流对比

图 13 为不同方案的缸内湍动能的对比。方案 1 和 2 结果表明: 在扫气初期, 非均匀进气方式对应的缸内滚流不断产生和发展, 其湍动能水平较高, 在 190°CA 时达到峰值。在压缩过程中, 非均匀进气方式组织的缸内滚流受压缩不断破碎成湍流, 但同时由于涡流的衰减和后期滚流的产生, 所以缸内湍动能下降较慢, 并在点火时刻(340°CA)出现较小的峰值; 均匀进气方式对应的缸内流动滚流分量极小而涡流比较大, 涡流在压缩作用不断衰减导致缸内湍动能水平也随压缩过程的进行不断下降。在压缩内止点前, 非均匀进气方式对应的缸内湍动能高于均匀进气方式。采用非均匀进气结合进气口径向倾角可组织缸内斜轴滚流, 并在压缩过程中滚流成分不断破碎形成湍流, 缸内湍动能在内止点前出现峰值。

方案 2 和 3 结果表明: 采用非均匀进气方式的平顶活塞和凹坑活塞时, 缸内湍动能在扫气过程中不断增强; 在压缩过程中涡流不断剪切耗散, 湍动能下降; 而在压缩内止点附近, 受压缩挤流的影响, 湍动能增强。在扫气初始的缸内湍动能变化趋势一

致, 且方案 3 的湍动能较方案 2 大。在外止点过后, 由于方案 3 对滚流和涡流的持续组织, 所以湍动能变化较小; 而方案 2 中滚流比较小, 湍动能下降明显。方案 3 由于能够组织相对稳定的滚流和涡流, 所以压缩过程缸内具有较高的湍动能, 并在压缩内止点附近受挤流的影响, 湍动能增加, 且相比方案 2 增加显著。分析表明, 持续的滚流和涡流可实现缸内较高的湍动能持续, 且有效的挤流组织能够进一步增强缸内湍动能。

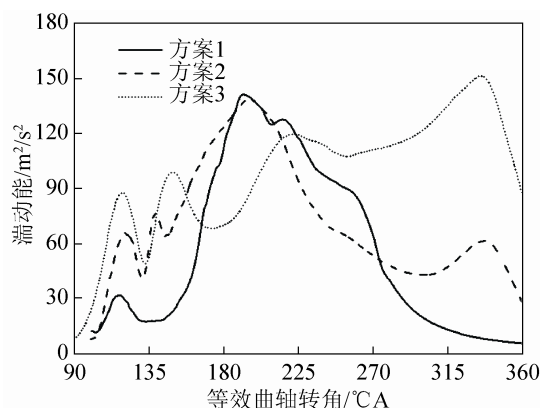


图 13 不同方案缸内湍动能对比

5 结论

(1) 缸内流动的零维模型可定性分析流动过程的组织特点和影响规律, 与三维计算流体力学仿真结论相符。

(2) 扫气过程缸内滚流比先增大后减小, 在压缩初期缸内滚流比增加, 在内止点前滚流破碎, 滚流比减小; 均匀进气过程缸内涡流比大于非均匀进气过程; 凹坑活塞在组织缸内滚流和产生挤流的同时减弱缸内涡流。

(3) 方案 1 采用均匀进气方式可组织较强的缸内涡流; 方案 2 和 3 采用非均匀进气方式在组织涡流的同时可组织滚流, 有利于提高压缩过程缸内的湍动能水平。

(4) 方案 3 通过非均匀进气方式和活塞顶面导流凹坑结构, 可实现缸内流动的合理组织和湍动能变化; 在点火时刻, 方案 3 的平均湍动能较方案 2 提高了 1.5 倍。

参考文献:

- [1] Pirault J P, Flint M. Opposed Piston Engines: Evolution, Use, and Future Applications [M]. USA: SAE International, 2010.
- [2] 朱敏慧, 张颖. 继承与创新: 阿凯提斯动力公司致力开发对置活塞二冲程内燃机 [J]. 汽车与配件, 2011, 30(7): 54-56.
- [3] Naik S, Johnson D, Koszewnik J, et al. Practical Applications of Opposed-Piston Engine Technology to Reduce Fuel Consumption and Emissions [R]// SAE Technical Paper, 2013. USA: SAE, 2013.
- [4] Hofbauer P. Opposed-Piston Opposed-Cylinder (OPOC) Engine for Military Ground Vehicles [R]// SAE Technical Paper, 2005. USA: SAE, 2005.
- [5] 张付军, 郭顺宏, 王斌, 等. 对置活塞二冲程内燃机折叠曲柄系方案设计研究 [J]. 兵工学报, 2014, 35(3): 289-297.
- [6] Zhao F, Lai M C, Harrington D L. Automotive Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline Engines [J]. Progress in Energy and Combustion Science (S0360-1285), 1999, 25(5): 437-562.
- [7] Brójo F, Santos A, Gregório J. Computational Analysis of the Scavenging of a two-stroke Opposed Piston Diesel Engine [C]// Proceedings of the World Congress on Engineering (S2078-0958), London, UK, 2010.
- [8] 许汉君, 宋金瓿, 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.
- [9] Xu S, Wang Y, Zhu T, et al. Numerical analysis of two-stroke free piston engine operating on HCCI combustion [J]. Applied Energy (S0306-2619), 2011, 88(11): 3712-3725.
- [10] Zhang Z, Zhao C, Wu D, et al. Effect of Piston Dynamic on the Working Processes of an Opposed-Piston Two-Stroke Folded-Crank train Engine [R]// SAE Technical Paper, 2014. USA: SAE, 2014.
- [11] Ma F, Zhao C, Zhang S, et al. Scheme Design and Performance Simulation of Opposed-Piston Two-Stroke Gasoline Direct Injection Engine [R]// SAE Technical Paper, USA: SAE, 2015.
- [12] 裴玉姣. 双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.
- [13] 赵峰. 直流扫气柴油机扫气过程仿真分析及优化 [D]. 大连: 大连海事大学, 2010.
- [14] Falfari S, Brusiani F, Bianchi G M. Assessment of the Influence of Intake Duct Geometrical Parameters on the Tumble Motion Generation in a Small Gasoline Engine [R]// SAE Technical Paper, USA: SAE, 2012.
- [15] Falfari S, Brusiani F, Bianchi G M. Numerical Analysis of In-cylinder Tumble Flow Structures-Parametric 0D Model Development [J]. Energy Procedia (S1876-6102), 2014, 45(1): 987-996.
- [11] 周炳海, 周琪, 王腾. 基于滚动时域的整体式自动物料搬运系统避碰调度方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(7): 1691-1699.
- [12] 周炳海, 胡新宇, 孙超. 基于改进型多目标粒子群算法的晶圆制造系统瓶颈工作站调度 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2014, 35(1): 63-68.
- [13] 沈正花, 陆志强. 基于仿真的半导体自动物料搬运系统调度优化 [J]. 工业工程与管理, 2011, 16(1): 85-90.
- [14] 廖伟志, 古天龙, 王汝凉, 等. 基于混杂 Petri 网的柔性制造系统免疫调度算法 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22(1): 205-209.
- [15] 黄波, 赵春霞, 孙亚民. 基于 Petri 网与动态加权启发策略的 FMS 调度优化 [J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2010, 34(4): 482-486.

(上接第 1566 页)