

缸内流动对对置活塞二冲程发动机换气效果的影响

王苏飞¹, 章振宇¹, 张付军^{1, 2}

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081;

2. 北京理工大学 深圳研究院, 广东 深圳 518057)

摘 要: 换气过程中的缸内流动及废气分布对对置活塞二冲程(OP2S)发动机换气效果的影响规律目前缺乏充分的研究。采用 CONVERGE 建立了 OP2S 发动机的 CFD 模型并通过仿真计算研究了扫气口倾角、扫气口构型及转速通过改变扫气气流组织影响换气效果的规律。结果表明扫气口倾角对 OP2S 发动机缸内流动有显著且非单调的影响。扫气口倾角 $\alpha \leq 5^\circ$ 时, 扫气气流聚集于气缸轴线, 缸壁附近存在周边废气滞留区; 当扫气口倾角 $\alpha > 5^\circ$ 时, 换气过程初期扫气气流在扫气口附近汇聚为环状进气涡流, 在该进气涡流中心产生低压区, 并导致气缸中心流动方向与外围的扫气气流方向相反, 最终导致气缸轴线出现柱状的中心废气滞留区。随着扫气口倾角增大, 周边滞留区逐渐减小消失, 而中心滞留区出现并增强, 两者的变化规律共同造成了残余废气系数的非单调变化规律。大扫气口倾角下复合式气口的扫气气流可兼顾气缸中心和外围, 换气效果显著优于单层气口。相较于倒置组合气口, 组合气口的缸内流动组织更为合理, 扫气效率更高。

关 键 词: 对置活塞; 二冲程; 扫气; 缸内流动; 残余废气

中图分类号: V234; TK421

文献标志码: A

Effect of in-cylinder flow on gas exchange efficiency of opposed-piston 2-stroke engines

WANG Sufei¹, ZHANG Zhenyu¹, ZHANG Fujun^{1, 2}

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

2. Shenzhen Research Institute,

Beijing Institute of Technology, Shenzhen Guangdong 518057, China)

Abstract: The effect of in-cylinder flow and residual distribution on gas exchange of opposed-piston 2-stroke (OP2S) engines is yet to be thoroughly studied. The effects of scavenge port angle, scavenge port structure and engine speed on scavenge efficiency by directing scavenge flow in OP2S engine were investigated by modeling and CFD simulation with CONVERGE software. Result showed that scavenge port angle had significant and non-monotonic effect on in-cylinder flow. For scavenge port angle $\alpha \leq 5^\circ$, scavenge flow was collected around cylinder axis and a border residual area appeared next to liner; for scavenge port angle $\alpha > 5^\circ$, scavenging flow formed a circular downward flow around cylinder axis at the early stage of scavenging. A low-pressure area was induced by this circular flow at its center and drew nearby gas upwards, forming a column of central residual area along cylinder axis. As scavenge port angle increased, the border residual area declined and disappeared while central residual area came into being and got strengthened. The combined effects of both residual areas resulted in the non-monotonic trend in

收稿日期: 2022-02-28

作者简介: 王苏飞(1990—), 男, 博士生, 主要从事内燃机进排气及燃烧研究。

通信作者: 张付军(1966—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事发动机电控相关研究。E-mail: zjf123@bit.edu.cn

引用格式: 王苏飞, 章振宇, 张付军. 缸内流动对对置活塞二冲程发动机换气效果的影响[J]. 航空动力学报, 2023, 38(9): 2129-2141. WANG Sufei, ZHANG Zhenyu, ZHANG Fujun. Effect of in-cylinder flow on gas exchange efficiency of opposed-piston 2-stroke engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(9): 2129-2141.

residual ratio. Composite scavenge port produced drastically lower residual ratio than simple port at relatively larger scavenge port angle, since uniform scavenge flow suppressed the low-pressure area, weakening central residual area. This effect was less prominent for reversed composite scavenge port, rendering it less effective than composite scavenge port.

Keywords: opposed-piston; 2-stroke; scavenging; in-cylinder flow; residual gas

对置活塞二冲程(OP2S)发动机最早出现于 19 世纪中期。二战时期, 容克 Jumo205 由于其较高的动力性和经济性在航空领域得到了广泛应用, 成为了历史上最为知名的 OP2S 发动机, 另有一些型号的 OP2S 发动机应用于内燃机车或船用动力^[1]。进入 21 世纪后, 众多研究人员通过数值模拟等现代研究手段探索 OP2S 发动机在进排气等方面的规律, 以期保留其散热损失小的优点同时改进其在排放等方面的缺陷。FEV 公司的 Hofbauer^[2]、Franke 等^[3]和 Kalkstein 等^[4]发表了一些关于对置活塞对置气缸发动机(OPOC 发动机, 为 OP2S 发动机的一种类型)的设计和仿真研究工作, 其中 Franke 等在其针对 330 kW 车用对置活塞对置气缸发动机的研究中通过 CFD 仿真计算结果说明发动机转速和进排气压力对扫气过程中及结束后缸内废气空间分布规律有显著影响, 并指出残余废气被扫气气流“包裹”于气缸轴线附近的现象与进气涡流过强有关。文中并未进一步探讨该现象的成因和影响因素, 也未分析该现象对扫气效率的影响^[3]。董雪飞等结合采用示踪气体法的台架实验和基于 GT-Power 的一维流体仿真, 研究了 OP2S 发动机换气过程影响因素及增压匹配方法^[5-9]。李浩关于无人机用 OP2S 发动机的研究中也提及了换气过程的缸内废气分布^[10]。湖南大学的夏孝朗通过一维仿真研究了 OPOC 发动机的换气效果和增压匹配规律^[11]。Luo、Liu 等研究了扫气口倾角对换气效果、燃烧过程及发动机效率的影响^[12-13]。另有一些其他研究通过一维或三维仿真研究了 OP2S 发动机的换气过程^[14-15]。总的来说, 采用数值模拟方法研究并改进换气过程中的复杂流动是提高 OP2S 发动机性能的重要方法。

相当一部分针对 OP2S 发动机换气过程的 CFD 仿真研究中涉及了缸内废气的空间分布规律。章振宇等通过 CFD 仿真研究了扫气口倾角在 $10^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 范围内变化对 OP2S 发动机缸内废气分布规律及扫气效率的影响, 指出了扫气效率随扫气口倾角变化的非单调规律, 并初步讨论了扫气涡流与缸内密度分布及缸内废气分布的关系^[16]。

王豪等运用 CFD 仿真方法发现通过改变活塞顶结构组织缸内滚流有助于减少 OP2S 发动机气缸壁附近的废气滞留现象^[17]。吴丹在其针对 OP2S 发动机换气过程的研究中首次提出“废气滞留区”的概念, 比较了 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 的扫气口倾角范围下扫气过程中缸内轴向和径向速度分布, 得出了无论扫气口倾角的大小, 扫气气流均无法均匀分布在整个气缸截面上, 而气缸中流速较低的区域易于形成废气滞留区的结论, 但没有分析其生成的具体过程^[18]。Liu 等从扫气模型的角度研究了 OP2S 发动机的换气过程。文中展示了 CFD 仿真得出的换气过程中的残余废气分布, 但未探讨其影响规律^[19]。马富康等针对扫气系统参数对 OP2S 发动机的影响, 通过 CFD 仿真计算研究了进排气口高度、进排气口圆周长等参数对给气比和扫气效率的影响, 并对结果数据做了统计学分析。在给出的换气过程缸内废气分布三维结果中可见扫气口倾角对缸壁附近和气缸中心的废气滞留区域的不同影响规律, 但文中并未详细分析该规律的产生机理^[20]。Mattarelli 等结合基于 GT-Power 的一维仿真和基于 Kiva-4 的三维仿真系统地研究了 OPOC 发动机换气指标随转速和扫气口倾角的变化规律。在其给出的三维结果中, 气缸轴线附近存在显著的废气滞留, 缸壁附近则基本不存在废气^[21]。Yang 等通过 CFD 仿真研究了扫气口、排气口高度对残余废气系数和扫气模型的影响规律。从给出的三维结果可以看出, 扫气口、排气口高度对缸内废气分布影响不明显, 仅仅通过影响给气比而影响缸内残余废气量^[22]。Xie 等通过 CFD 仿真指出了废气在 OP2S 发动机扫气缸中部滞留的现象及转速对换气效果的影响^[23]。上述研究中多指出了扫气口倾角、转速等参数对缸内废气分布及换气效果的影响, 但并无文献明确指出废气分布与换气效果间的因果关系。

许汉君等^[24]探索比较了通过复合式气口组织缸内涡流及滚流对喷雾燃烧过程的影响。陈文婷等基于 AVL FIRE 通过 CFD 计算得出了复合式气口的 OPOC 柴油机扫气过程中缸内的残余废气及速度矢量分布, 但未探索扫气口结构对缸内

流动及缸内废气分布的影响^[25]。裴玉皎通过CFD计算对比了15°、25°、35°三种涡流排倾角对OP2S发动机残余废气及速度矢量分布的影响,指出适当的进气涡流有助于减少新鲜充量与缸内废气的混合,但过大的进气涡流会导致扫气气流过于接近气缸壁,导致气缸轴线附近残余废气过多^[26]。邹玉红等通过基于ANSYS Fluent的CFD仿真研究了具有复合式气口的OPOC发动机的换气过程,其中扫气口由涡流排和直流排组成。文中尽管展示了显著的缸壁附近的废气滞留,但在任何计算工况点上均未观察到气缸中心出现废气滞留现象^[27-28]。He等研究了扫气口轴向倾角、排气背压、扫气口相位等参数对复合式气口缸内废气分布及扫气效率的影响^[29]。总的来说,复合式气口实现了优于单层气口的换气效果,但其中机理缺乏研究。

上面列出的OP2S发动机换气过程缸内流动规律相关研究中,多数指出了扫气口倾角对缸内废气分布规律及扫气效率存在影响;还有一些讨论了发动机转速、扫气口高度等因素的影响作用。只有少数研究指出了扫气口结构通过改变缸内速度分布影响废气滞留区形态的规律。由于研究工况点选取等原因,目前鲜有研究详尽地分析废气滞留区的形成规律。另外,尽管有针对复合式气口的研究,但对复合式气口中涡流排、直流排气流各自在扫气过程中作用的讨论仍有不足。鲜有研究详细解释扫气口倾角对扫气效率的非单调影响原理。有鉴于此,本文将具体分析OP2S发动机换气过程中扫气口结构-缸内流动组织-废气分布-换气效率的逻辑关系,并在此基础上指出复合式气口通过改进扫气气流分布改善换气效果的原理。

1 研究方法

1.1 OP2S发动机结构与仿真模型的建立

本文研究的OP2S发动机气缸结构形式如图1所示。发动机缸径为100 mm,每个活塞的行程为110 mm,压缩比为18。排气活塞的相位比进气活塞提前17°。排气口开启相位为曲轴转角上止点后101.5°,关闭相位为曲轴转角上止点后245.5°;扫气口开启相位为曲轴转角上止点后126°,关闭相位为曲轴转角上止点后247.5°。该发动机为压燃式,采用两个三孔共轨喷油器以180 MPa的压力向缸内供入0#柴油,研究的转速

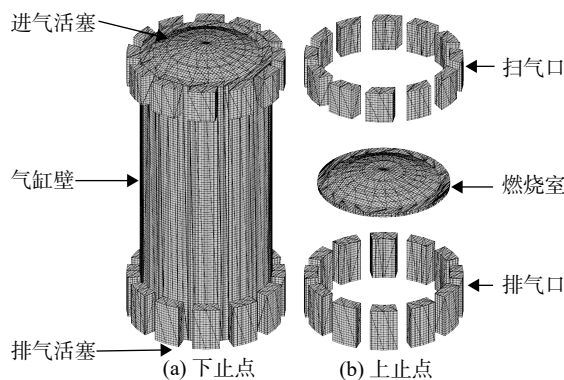


图1 OP2S发动机气缸结构

Fig. 1 Cylinder structure of OP2S engine

范围为1 500~4 500 r/min。

扫气口倾角 α 定义为扫气口轴线的切向夹角,如图2所示。参考Kalkstein等^[4]对扫气口的定义,将复合式气口倾角不为0°的扫气口称为涡流排扫气口,以下简称为涡流排;将扫气口倾角为0°的扫气口称为直流排扫气口,以下简称为直流排。将单层结构的扫气口称为单层气口;将涡流排位于内侧(靠近气缸中心)、直流排位于外侧的复合式气口称为组合气口;将涡流排位于外侧、直流排位于内侧的复合式气口称为倒置组合气口。三种扫气口的结构形式如图3。三种扫气口的总高度相同,因此扫气口开启、关闭相位也相同。本文所研究的扫气口倾角变化范围为0°~40°。

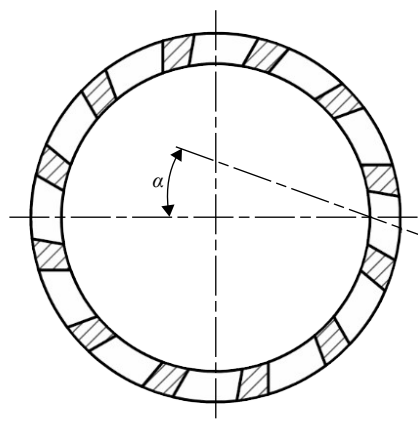


图2 扫气口倾角

Fig. 2 Scavenging port angle

1.2 三维仿真模型的建立

采用CONVERGE Studio前处理工具输入OP2S发动机的三维模型,划分边界并设置边界条件与初始条件。CONVERGE求解器依据设定的单元尺寸自动生成计算网格。本研究采用雷诺平均Navier-Stokes(RANS)方式计算缸内流动。湍

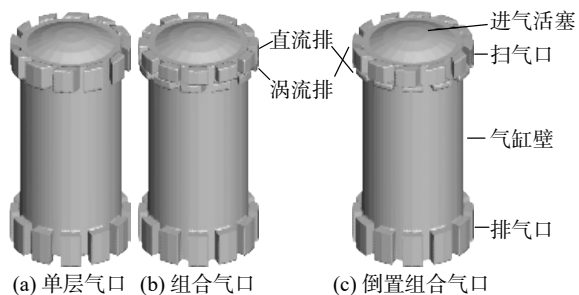


图 3 三种扫气口结构

Fig. 3 Three different scavenge ports

流模型为重整化群 $k-\varepsilon$ (RNG $k-\varepsilon$) 模型。湍流耗散模型为 O'Rourke 模型, 液滴碰撞模型为 no time counter (NTC) 碰撞模型, 喷雾模型为 Kelvin-Helmholtz Rayleigh-Taylor (KH-RT) 模型, 燃烧模型为 characteristic time combustion (CTC) / Shell, 燃油模型为 DIESEL2。以上模型均广泛用于内燃机工作过程仿真。由于并非研究重点, 本文不比较不同模型的计算结果差异。

1.3 网格无关性验证

由于计算网格密度对计算结果和计算资源开销均有显著影响, 故有必要进行网格无关性检验, 以保证计算结果准确性的前提下选用较稀疏的网格, 提高计算效率。图 4 是常规发动机计算模型的网格无关性检验结果, 其中单元尺寸为六面体单元边长的指导值。可以看出, 单元尺寸为 4 mm 与 2 mm 相比, 缸内压力及放热率计算结果均有明显差异; 而单元尺寸为 2 mm 和 1.4 mm 的计算结果差异很小。综合考虑结果准确性和计算效率, 选用 2 mm 的单元尺寸, 单元总数为 255 236 个。

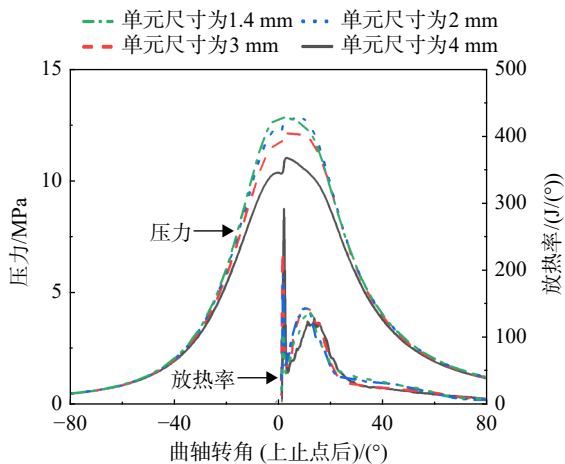


图 4 单元尺寸为 1.4~4 mm 的计算结果对比
Fig. 4 Comparison of computational results from cell size 1.4—4 mm

1.4 模型验证

为了验证仿真模型的准确性, 将仿真计算得出的缸压与瞬时放热率结果与实验数据相比较, 如图 5。验证工况为 $N=2800$ r/min, 循环喷油量 200 mg, 进气压力 0.3 MPa, 排气压力 0.25 MPa。仿真得出的缸压数据在压缩冲程与实验数据几乎一致, 只有做功冲程的后半段略低于实验数据。瞬时放热率同样与实验值几乎一致, 最大值略高于实验数据。总的来说, 该工况下仿真计算的结果复现了发动机台架实验的缸内过程, 结果可信。

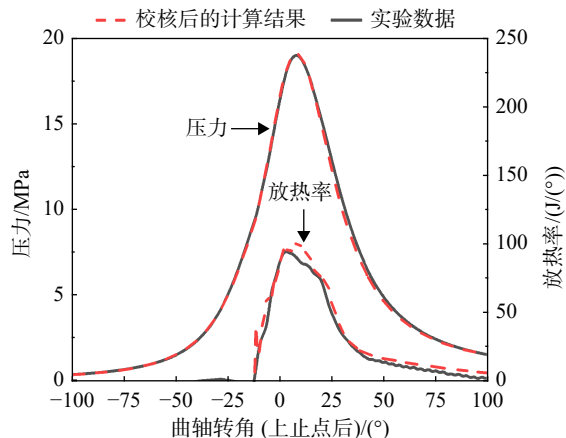


图 5 模型验证

Fig. 5 Model validation

2 研究结果

2.1 换气效果

扫气口结构对残余废气系数 (φ) 的影响规律如图 6 所示。组合气口、倒置组合气口的残余废气系数变化规律与单层气口有显著差异。扫气口倾角 $\alpha=10^\circ$ 时, 三种扫气口的残余废气系数较接近。扫气口倾角增大到 20° 时, 组合气口的残余废气系数显著下降, 低于单层气口, 而倒置组合气口的残余废气系数变化不明显。扫气口倾角继续增大到 30° 时, 单层气口的残余废气系数大幅增长, 而组合气口、倒置组合气口的残余废气系数均显著下降; 转速 $N=1500$ r/min 下, 组合气口的残余废气系数不到 1%, 只有单层气口的 1/5; 倒置组合气口的残余废气系数也只有 1.6% 左右, 大幅低于单层气口。4500 r/min 转速下, 组合气口的残余废气系数约为 7%, 不到单层气口的一半; 倒置组合气口的残余废气系数也显著低于单层气口。扫气口倾角继续增大到 40° 时, 1500 r/min 转速下, 组合气口的残余废气系数进一步降低到 0.4% 以下, 倒置组合气口的残余废气系数也有显

著下降; 4 500 r/min 转速下, 两种扫气口的残余废气系数相较于扫气口倾角 30° 的情况均有小幅度升高。总的来说, 相较于单层气口, 大扫气口倾角下组合气口和倒置组合气口均可以大幅降低残余废气系数, 改善发动机换气效果。

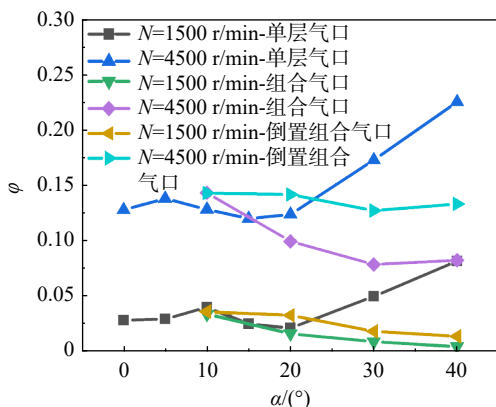


图6 转速及扫气口结构对残余废气系数的影响

Fig. 6 Effect of engine speed and scavenging port structure on residual ratio

2.2 换气初期的缸内流动

为了研究换气效果非单调规律产生的原因, 观察了转速为 4 500 r/min、扫气口倾角为 20° 时扫气过程早期(曲轴转角上止点后 $144^\circ \sim 160^\circ$)的缸内压力及轴向速度的三维分布, 如图 7。图 7 中 (a1)~(a5) 为缸内压力分布结果, (b1)~(b5) 为缸内轴向速度分布结果。轴向速度以向上(指向进气活塞)为正, 向下(指向排气活塞)为负。曲轴转角上止点后 144° 时, 扫气口附近已有显著流

动, 但缸内压力分布较为均匀, 只能观察到因自由排气过程导致的轴向压力分布, 在径向上缸内压力无差异; 曲轴转角上止点后 148° 时, 随着扫气气流的增强, 接近进气活塞的气缸中心位置出现高压区。从轴向速度分布可以看出, 高压区两侧的气流分别向上下两侧流动。从曲轴转角上止点后 152° 起, 高压区压力显著增加, 且逐渐成环形。在曲轴转角上止点后 160° , 环形高压区的中心位置出现一个显著的低压区。在该工况下, 此低压区的压力可低至 0.22 MPa, 比缸内平均压力小 0.01 MPa 左右, 与周边环形高压区的压差可达 0.03 MPa。相应地, 从该时刻的轴向速度分布可以看出, 低压区上下侧的流动方向与周边的高压区相反, 即低压区上侧向下流动, 下侧向上流动, 上下气流在低压区汇聚。这表明, 由扫气口倾角引起的轴向涡流, 其产生的离心力不仅显著影响了缸内的压力分布, 还对缸内流动产生影响。扫气口气流在缸内形成环状的下行气流的同时, 气缸中心低压区的出现导致气缸轴线附近低压区以下的缸内充量向上流动, 充入了上述环状下降气流的中部, 其挤压作用导致下降气流向缸壁运动, 直径增大, 从环状逐渐变为锥状。

图 8 所示为 4 500 r/min 转速下曲轴转角上止点后 168° 时刻不同扫气口倾角的缸内轴向速度分布。对 $\alpha \geq 10^\circ$ 的所有情况, 该时刻的缸内轴向速度分布类似, 均在气缸轴线靠近扫气口的一端出现了逆向流动区域。扫气口倾角越大, 自下而上的逆向流动速度越大, 逆向流动区直径越大,

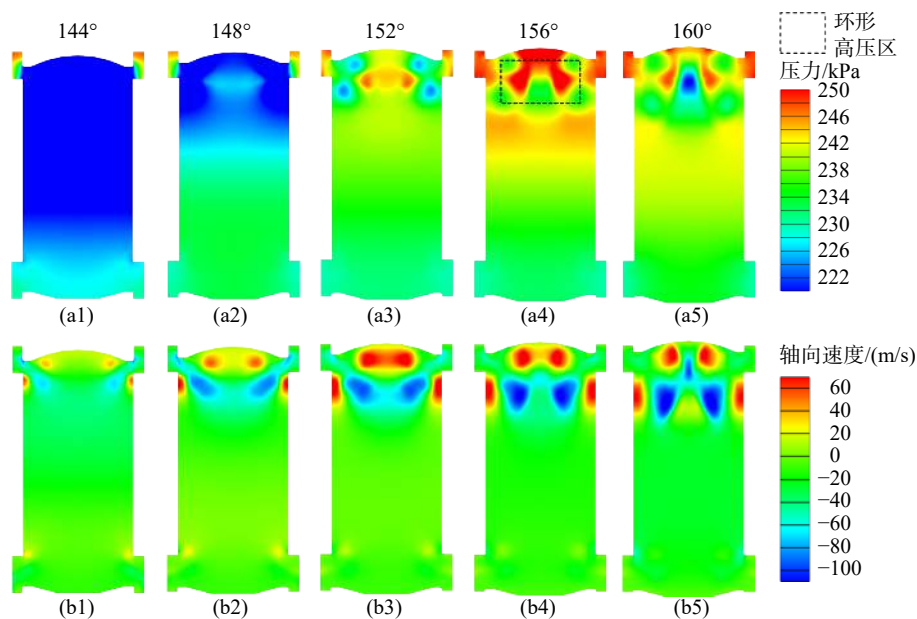


图7 缸内中心低压区的建立过程($N=4\ 500$ r/min, $\alpha=20^\circ$)

Fig. 7 Establishing of central low-pressure area ($N=4\ 500$ r/min, $\alpha=20^\circ$)

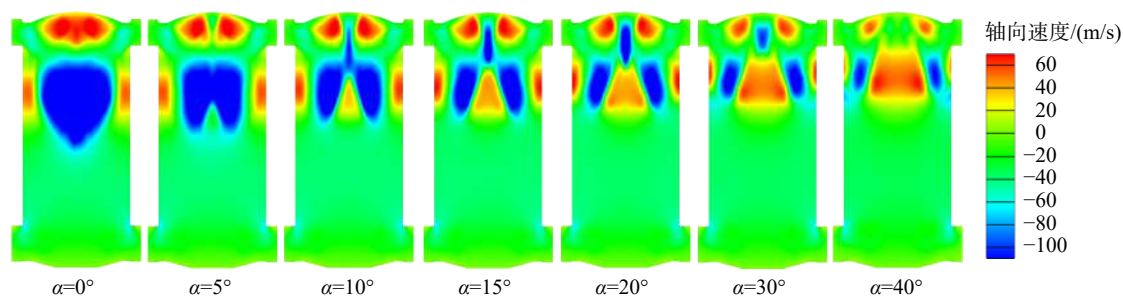


图 8 曲轴转角上止点后 168°时刻扫气口倾角对缸内轴向速度分布的影响($N=4\,500\text{ r/min}$)

Fig. 8 Effect of scavange port angle on axial velocity distribution at 168° after top dead center ($N=4\,500\text{ r/min}$)

而自上而下的逆向流动区则有缩小的趋势。对 $\alpha = 0^\circ$ 的情况, 气缸轴线附近没有逆向流动区域, 除了缸壁附近的一部分区域外, 缸内的流动整体向下; 值得注意的是 $\alpha = 5^\circ$ 的情况, 此时下行气流略呈环形, 其分布与更大扫气口倾角的情况有相

似之处, 但气缸轴线附近并没有逆向流动现象出现。

2.3 废气滞留区的形成与分布

由于低压区出现时缸内充量主要为废气, 所以气缸轴线附近向上流动的气体成分以废气为主。

图 9 是 4 500 r/min 转速下各扫气口倾角在换气过

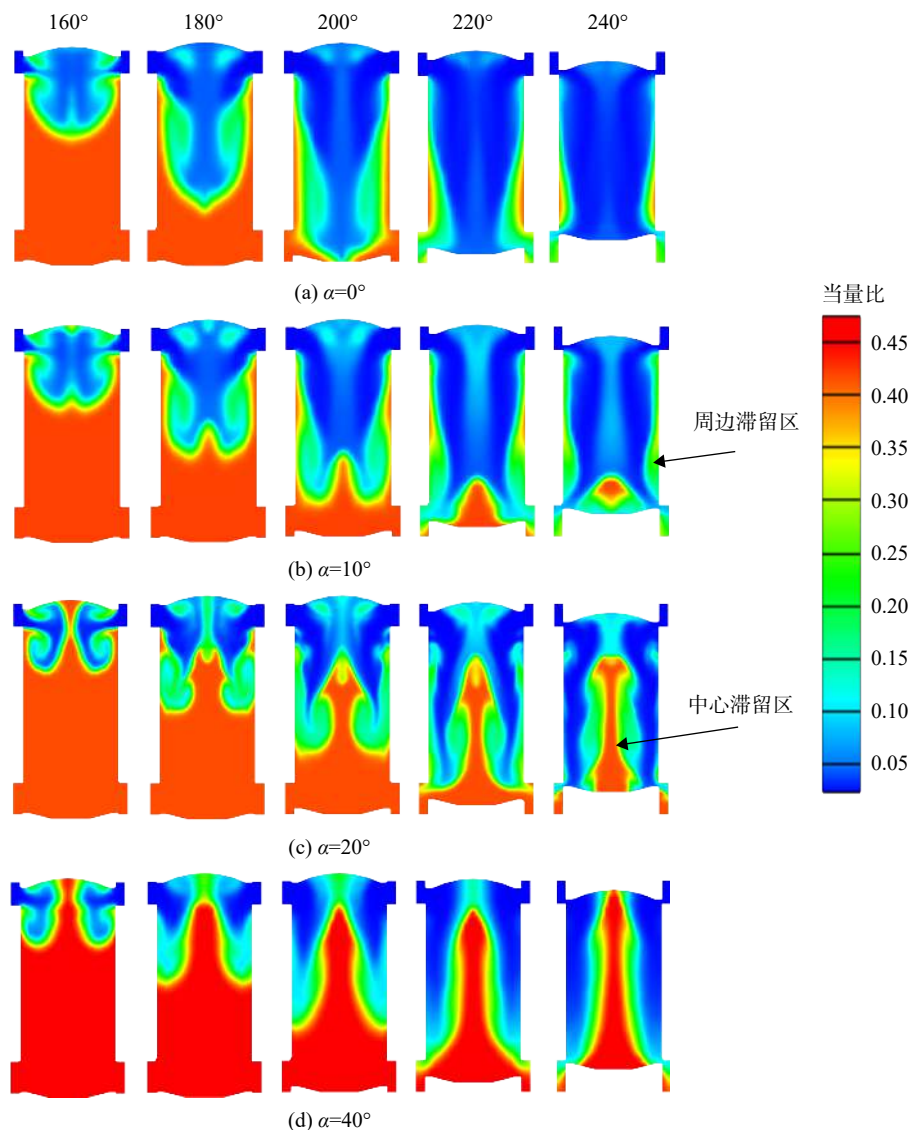


图 9 扫气口倾角对换气过程中缸内废气分布的影响($N=4\,500\text{ r/min}$)

Fig. 9 Effect of scavange port angle on residual distribution during scavenging ($N=4\,500\text{ r/min}$)

程中(曲轴转角上止点后 $160^\circ \sim 240^\circ$)的缸内当量比分布。由图中可见,换气过程的早期不同扫气口倾角形成的缸内废气空间分布较为相似,主要是扫气口涌入的气流向气缸中部汇聚的过程中出现的气缸轴线平面内的涡流(周向涡)。随着换气过程的推进,不同扫气口倾角引起的缸内流动及形成的缸内废气分布出现显著的差异。当扫气口倾角 $\alpha = 0^\circ$ 时,新鲜充量向气缸轴线集中并汇聚成一束气流下行,从进气活塞附近延伸至排气活塞。同时,扫气气流产生的周向涡在扫气口附近产生一定的废气回流。随着扫气过程的推进,气缸轴线的新鲜充量气柱逐渐扩张,将大部分废气挤出排气口,完成缸内充量的置换。一部分靠近缸壁的废气由于距离扫气气流较远而未能排出缸外,成为残余废气。

当扫气口倾角大于 0° 时,扫气气流的螺旋运动给新鲜充量的分布带来差异。对 $\alpha = 5^\circ$ 的情况,当曲轴转角为上止点后 180° 时,可以看到扫气气流的前段出现锥状分布,残余废气成柱状指向新鲜充量;随着扫气过程的推进,该柱状废气逐渐向排气活塞后退,直径有所增加,但高度变化不大。在扫气气流中可见残留的废气。换气过程临近结束时,该柱状废气仍然存在,并成为残余废气的重要部分。对 $\alpha > 0^\circ$ 的所有情况,扫气过程

临近结束时缸内均存在该柱状废气,形成中心滞留区,靠近缸壁的残余废气所占区域则称为周边滞留区。随着扫气口倾角的增大,中心滞留区的高度、直径均显著增加,周边滞留区的体积显著减小,直至几乎消失;同时,新鲜充量中气缸轴线附近残留的废气成分逐渐增加。当扫气口倾角达到 40° 时,中心滞留区贯穿整个气缸,新鲜充量只存在于气缸外围。进一步观察中心滞留区可发现,中心滞留区的顶部较宽,大致呈锥形。随着扫气过程的发展,该锥形的底部在缸内流动作用下逐渐变得锐利,随后又逐渐变钝。中心滞留区的底部同样随扫气过程的发展呈现不同的特征。当扫气气流达到排气活塞后,排气气流引起的涡流为中心滞留区底部带入新鲜充量,导致中心滞留区底部收缩。

2.4 转速的影响规律

由于扫气持续时间和进气涡流方面的差异, $1\,500\text{ r/min}$ 转速下换气过程中缸内废气分布与 $4\,500\text{ r/min}$ 转速下有较明显的差异。图 10 为扫气口倾角 20° 时,转速为 $4\,500\text{ r/min}$ 与 $1\,500\text{ r/min}$ 的换气过程中缸内废气分布对比。曲轴转角上止点后 160° 时, $1\,500\text{ r/min}$ 转速的三维结果中出现了与 $4\,500\text{ r/min}$ 转速时类似的中心滞留区,其形状接近于 $4\,500\text{ r/min}$ 转速下曲轴转角上止点后 $200^\circ \sim 220^\circ$ 的结

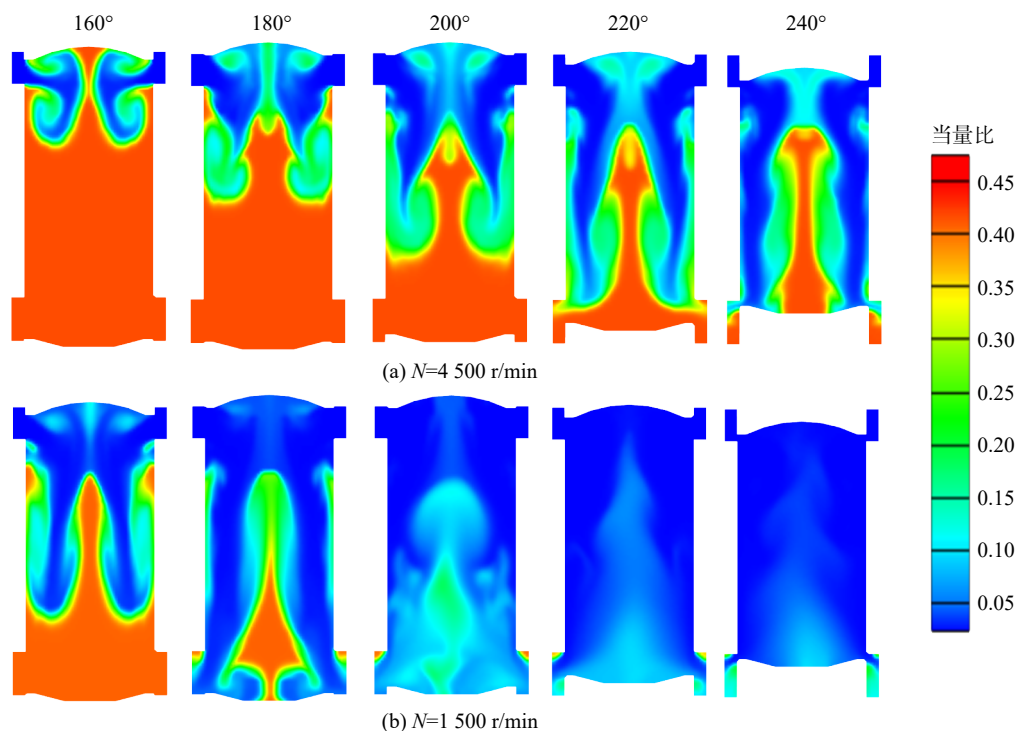


图 10 转速对换气过程中缸内废气分布的影响($\alpha=20^\circ$)

Fig. 10 Effect of engine speed on residual distribution during scavenging ($\alpha=20^\circ$)

果,表明 1 500 r/min 转速下换气过程的缸内流动与 4 500 r/min 转速下无质的变化。然而,由于换气时间达到了 4 500 r/min 转速的三倍,换气程度显著超过 4 500 r/min 转速的情况,因此在缸内废气分布上也体现出了独有的特点。曲轴转角上止点后 180°时,中心滞留区呈锥形,类似于 4 500 r/min 转速下换气过程末期中心滞留区的底部;不同之处有两点:①顶部尖细,没有观察到由涡流导致的箭头形头部;②底部收缩现象非常明显,直径大幅小于最宽处,表明此时排气口涡流已经对中心滞留区的形态产生了显著影响。曲轴转角上止点后 200°时,中心滞留区呈现崩溃趋势,不

再成规则的柱形或锥形;头部出现类似于 4 500 r/min 转速下的箭头形分布;原中心滞留区外围的区域出现显著的废气分布;最高废气当量比由 0.45 左右降至 0.2 左右。随着换气过程继续推进,曲轴转角上止点后 220°和 240°时,中心滞留区的当量比继续降低至 0.1 左右,其边界变得模糊,形状也不再规则。

2.5 复合式气口对废气滞留区的影响规律

图 11 所示为转速 $N=1\,500\text{ r/min}$ 下扫气口倾角对组合气口缸内当量比分布的影响。扫气过程前期,缸内废气分布与单层气口有相似之处;周边滞留区逐渐缩小,而中心滞留区出现。

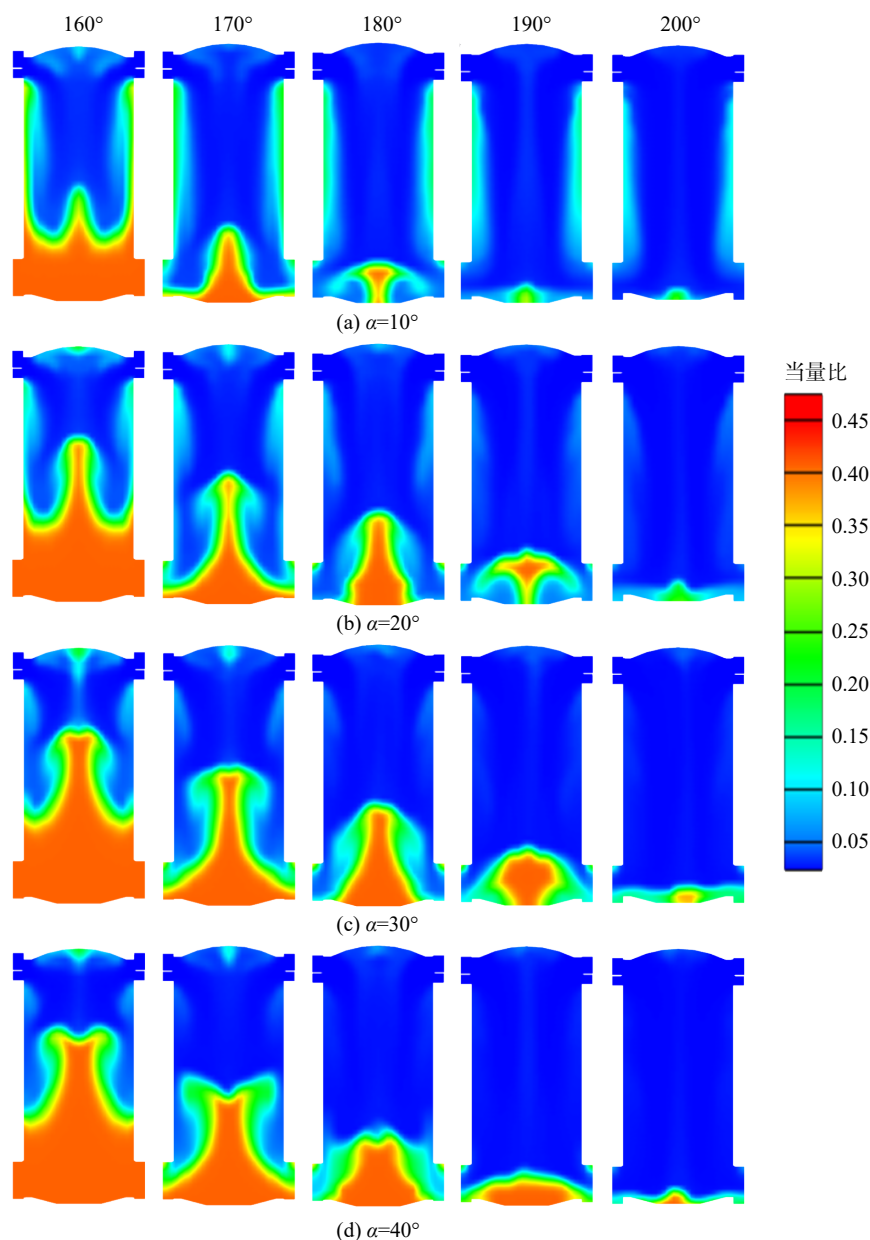


图 11 扫气口倾角对组合气口缸内当量比分布的影响($N=1\,500\text{ r/min}$)

Fig. 11 Effect of scavenge port angle on equivalence ratio distribution for composite port ($N=1\,500\text{ r/min}$)

周边滞留区的变化规律与单层气口基本一致, 随扫气口倾角的增大, 缩减的速度显著加快; 但中心滞留区的变化规律有所不同, 并未随着扫气口倾角的增大而显著增大; 尽管出现了中心滞留区, 但从曲轴转角上止点后 180° 开始, 中心滞留区的高度就逐渐降低, 至曲轴转角上止点后 200° 时, 各扫气口倾角下的中心滞留区高度均已接近于零。

根据图 12 给出的组合气口缸内轴向流速分布结果, 可以看出逆向流动(与扫气气流方向相反的流动)的分布与残余废气的分布有显著的相关关系。图中的流动方向以向上(指向进气活塞)为大于零, 故偏蓝色为下行的扫气气流, 偏红色为

上行的逆向气流。

在扫气口倾角较大时, 可清晰地观察到涡流排进气首先下行并扩张成锥形, 趋向于气缸壁, 随后直流排气流下行, 最终共同形成占据气缸大部分容积的扫气气流的过程。对所有扫气口倾角及所有时间点, 无论是中心滞留区还是周边滞留区, 其空间位置都与逆向流动重合。逆向流动随扫气口倾角增大而加强, 但当扫气过程进行到曲轴转角上止点后 200° 时, 除扫气口倾角 10° 下在缸壁附近仍有少量逆向流动存在外, 其他扫气口倾角均无逆向流动存在, 除壁面附近的流速较低外流速均为沿气缸轴线下行。相应地, 各算例在该曲轴转角下的残余废气也达到了极低的水平。

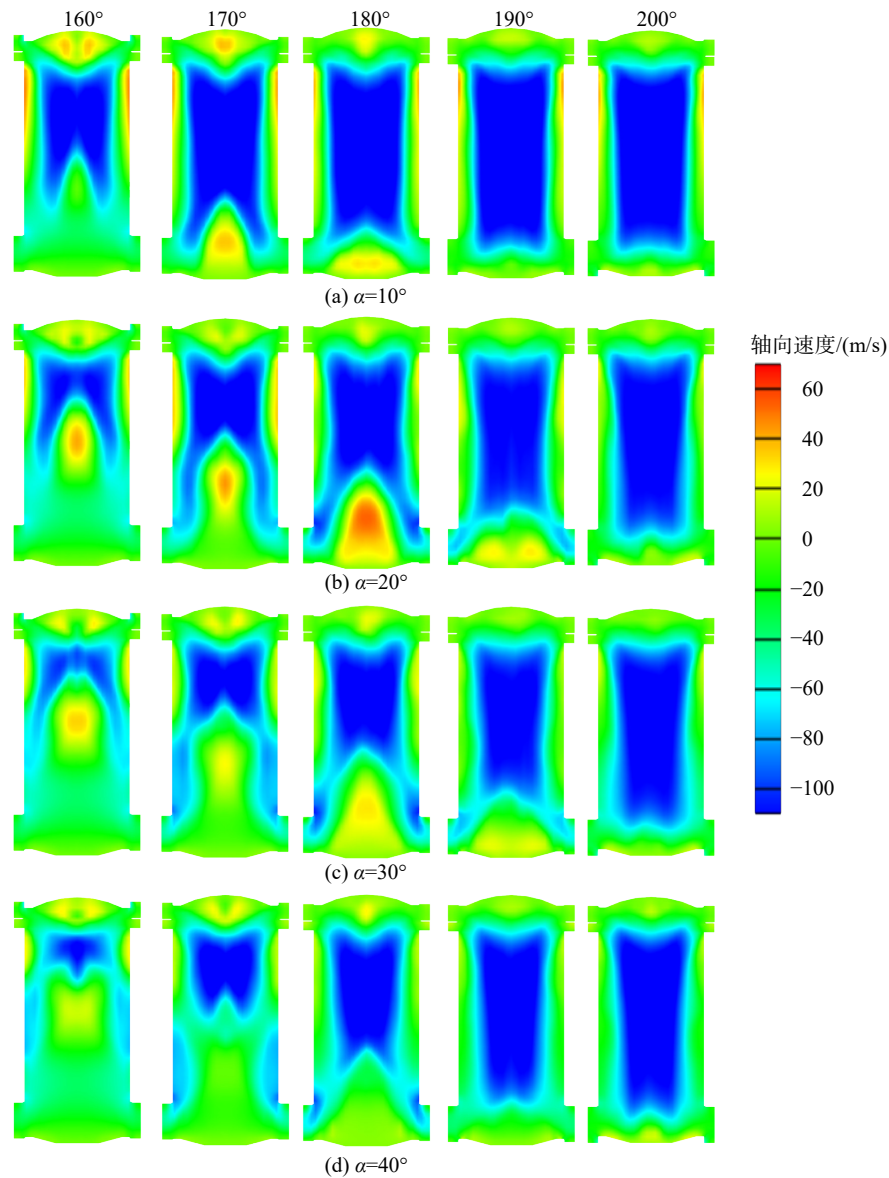


图 12 扫气口倾角对组合气口缸内轴向速度分布的影响($N=1\ 500\ \text{r/min}$)

Fig. 12 Effect of scavenging port angle on axial velocity distribution for composite port ($N=1\ 500\ \text{r/min}$)

据此可认为,对于组合气口,通过增大涡流排扫气口倾角强化进气涡流,在减少缸壁附近的逆向流动、削弱周边滞留区的同时没有对扫气过程后期的缸内流动和废气分布产生负面影响,故可显著降低残余废气系数。

图 13、图 14 所示分别为倒置组合气口换气过程的缸内当量比、轴向速度三维分布结果。在曲轴转角上止点后 160° , 各扫气口倾角形成的缸内轴向速度分布差异不大,主要区别在于较大的扫气口倾角使扫气气流呈现锥状甚至管状。

随着扫气过程从曲轴转角上止点后 160° 发展到 200° , 进气活塞附近的逆向流动的区域逐渐减小消失,而排气活塞附近出现逆向流动区域且逐

渐增强。扫气口倾角较大时,逆向流动区域可从排气活塞附近一直延伸至进气活塞,且流速加大。逆向流动的出现对残余废气分布,尤其是中心滞留区的形态产生了显著影响。扫气口倾角为 10° 时,中心滞留区不明显,残余废气主要由周边滞留区构成,废气分布与组合气口的情况差异不明显。扫气口倾角大于 10° 时,随着扫气过程的进行,中心滞留区的当量比逐渐下降,但高度逐渐增高,并逐渐脱离排气活塞表面。扫气口倾角越大,该现象越明显。扫气口倾角为 40° 时,中心滞留区呈柱状分布,体积显著大于扫气口倾角相对较小的情况。可以推断,随扫气口倾角增大而强化的中心滞留区是图 13 中倒置组合气口在扫

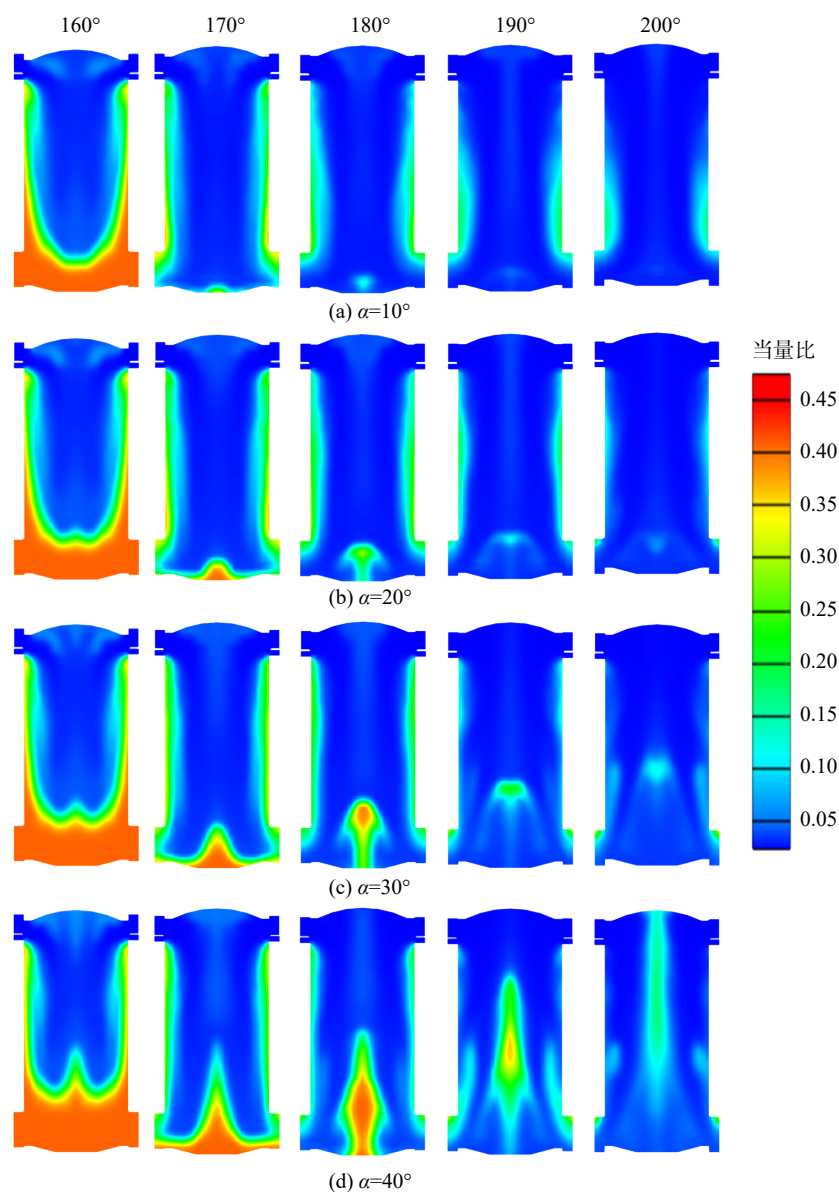
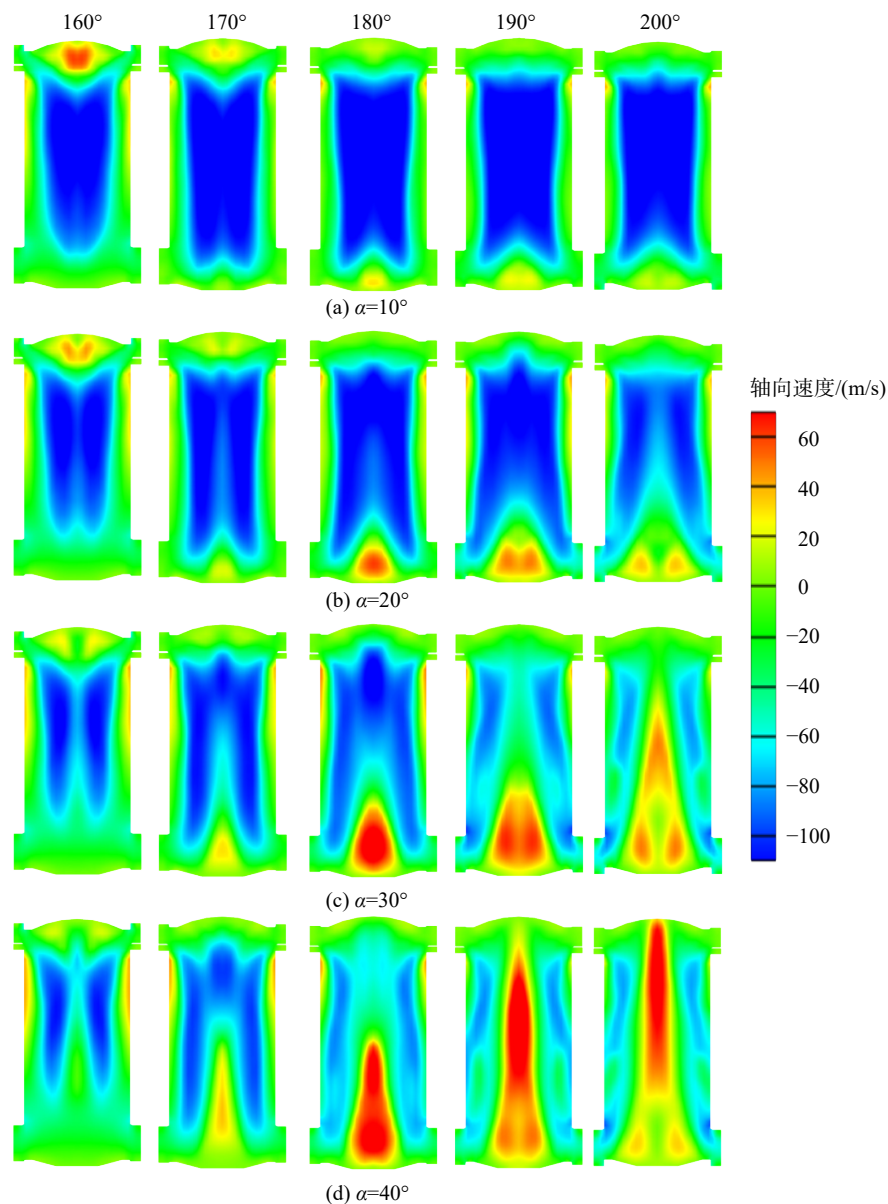


图 13 扫气口倾角对倒置组合气口缸内当量比分布的影响 ($N=1\ 500\ \text{r/min}$)

Fig. 13 Effect of scavenge port angle on equivalence ratio distribution for reversed composite port ($N=1\ 500\ \text{r/min}$)

图 14 扫气口倾角对倒置组合气口缸内轴向速度分布的影响($N=1\,500\text{ r/min}$)Fig. 14 Effect of scavenge port angle on axial velocity distribution for reversed composite port ($N=1\,500\text{ r/min}$)

气口倾角达到 40° 后残余废气系数不降反升的主要原因。

3 结 论

1) 扫气口倾角 $\alpha \leq 20^\circ$ 时, 扫气口构造及扫气口倾角对残余废气系数影响相对较小; 在 $\alpha > 20^\circ$ 后, 单层气口残余废气系数随扫气口倾角增大显著上升, 两种复合式气口则显著下降。4 500 r/min 转速下的残余废气系数变化规律与 1 500 r/min 转速下相同, 但数值更大。

2) 对于单层气口, 扫气口倾角越大, 进气涡流引导的逆向流动越强烈, 中心滞留区高度越高, 但同时缸壁附近的周边滞留区趋向于弱化, 两者

的变化趋势共同决定了扫气口倾角对残余废气系数的非单调影响规律。

3) 大扫气口倾角下组合气口的直流排气流可以有效抑制逆向流动的发展, 进而将中心滞留区的体积控制在极小的水平, 从而达到极低的残余废气系数。倒置组合气口的换气效果略弱于组合气口, 但仍显著强于单层气口。

参考文献:

- [1] PIRAULT J P, FLINT M. Opposed piston engines: evolution, use, and future applications[M]. Warrendale, US: SAE International, 2010.
- [2] HOFBAUER P. Opposed piston opposed cylinder (opoc) engine for military ground vehicles[C]//proceedings of the 2005 SAE World

- Congress. Detroit, US: SAE International, 2005.
- [3] FRANKE M, HUANG H, LIU J P, et al. Opposed piston opposed cylinder (opoc™) 450 hp engine: performance development by cae simulations and testing[C]//Proceedings of the 2006 SAE World Congress. Detroit, US: SAE International, 2006.
- [4] KALKSTEIN J, RÖVER W, CAMPBELL B, et al. Opposed piston opposed cylinder (opoc™) 5/10 kW heavy fuel engine for UAVs and APUs[C]//Proceedings of the 2006 SAE World Congress. Detroit, US: SAE International, 2006.
- [5] 董雪飞, 赵长禄, 胡清欣, 等. 对置活塞二冲程发动机机械增压匹配分析[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(2): 132-137.
DONG Xuefei, ZHAO Changlu, HU Qingxin, et al. The matching analysis of supercharging of opposed-piston two-stroke engine[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(2): 132-137. (in Chinese)
- [6] 董雪飞. 对置活塞二冲程柴油机换气过程及增压匹配研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
DONG Xuefei. Research on scavenging process and turbocharging matching of an opposed-piston two-stroke diesel engine[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [7] 董雪飞, 赵长禄, 张付军, 等. 对置活塞二冲程柴油机换气过程的试验[J]. 内燃机学报, 2015, 33(4): 362-369.
DONG Xuefei, ZHAO Changlu, ZHANG Fujun, et al. Experiment on the scavenging Process of opposed-piston two-stroke diesel engine[J]. Transactions of CSICE, 2015, 33(4): 362-369. (in Chinese)
- [8] 董雪飞, 赵长禄, 张付军, 等. 对置活塞二冲程发动机耗气特性研究[J]. 内燃机工程, 2016, 37(6): 216-221.
DONG Xuefei, ZHAO Changlu, ZHANG Fujun, et al. Study on the gas consumption characteristics of an opposed-piston two-stroke engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2016, 37(6): 216-221. (in Chinese)
- [9] 董雪飞, 赵长禄, 赵振峰. 进排气压力对增压对置活塞二冲程发动机的影响研究[J]. 内燃机工程, 2016, 37(4): 28-32.
DONG Xuefei, ZHAO Changlu, ZHAO Zhenfeng. Study on influence of intake or exhaust pressure on turbocharged opposed-piston two-stroke engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2016, 37(4): 28-32. (in Chinese)
- [10] 李浩. 无人机用对置活塞二冲程内燃机换气系统的仿真分析和优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
LI Hao. Simulation and optimization of opposed piston two-stroke engine ventilation system for UAV[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [11] 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.
XIA Xiaolang. Study on the key technologies of the opposed piston opposed cylinder two stroke diesel engine[D]. Changsha: Hunan University, 2013. (in Chinese)
- [12] LUO W, LIU H, LIU L, et al. Effects of scavenging port angle and combustion chamber geometry on combustion and emission of a high-pressure direct-injection natural gas marine engine[J]. *International Journal of Green Energy*, 2022, 1(1): 1-13.
- [13] LIU H, MA J, TONG L, et al. Investigation on the potential of high efficiency for internal combustion engines[J]. *Energies*, 2018, 11(3): 513-532.
- [14] MIKALSEN R, ROSKILLY A P. The design and simulation of a two-stroke free-piston compression ignition engine for electrical power generation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(5): 589-600.
- [15] GRABOWSKI L, PIETRYKOWSKI K, KARPINSKI P. The zero-dimensional model of the scavenging process in the opposed-piston two-stroke aircraft diesel engine[J]. *Propulsion and Power Research*, 2019, 8(4): 300-309.
- [16] 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, 35(5): 119-124.
ZHANG Zhenyu, ZHAO Zhenfeng, ZHANG Fujun, et al. Influence of scavenging port parameters on scavenging process in opposed-piston two-stroke diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014, 35(5): 119-124. (in Chinese)
- [17] 王豪, 赵振峰, 王斌, 等. 滚流燃烧室对对置活塞二冲程汽油机工作过程的影响[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2015, 44(3): 17-22.
WANG Hao, ZHAO Zhenfeng, WANG Bin, et al. Effect of tumble combustion chamber on working process of opposed-piston two-stroke gasoline engine[J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technique, 2015, 44(3): 17-22. (in Chinese)
- [18] 吴丹. 对置活塞二冲程柴油机换气过程研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
WU Dan. Investigation on the gas exchange progress of an opposed-piston two-stroke diesel engine[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [19] LIU Y, ZHANG F, ZHAO Z, et al. Study on the synthetic scavenging model validation method of opposed-piston two-stroke diesel engine[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 104: 184-192.
- [20] 马富康, 赵长禄, 赵振峰, 等. 对置活塞二冲程汽油机直流扫气系统参数研究[J]. 内燃机工程, 2016, 37(5): 152-159.
MA Fukang, ZHAO Changlu, ZHAO Zhenfeng, et al. In-cylinder tumble organization and utilization of an opposed-piston two-stroke gasoline engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2016, 37(5): 152-159. (in Chinese)
- [21] MATTARELLI E, RINALDINI C, SAVIOLI T, et al. Scavenge ports optimization of a 2-stroke opposed piston diesel engine [EB/OL]. [2022.07.15]. <https://doi.org/10.4271/2017-24-0167>.
- [22] YANG W, LI X-R, KANG Y-N, et al. Evaluating the scavenging process by the scavenging curve of an opposed-piston, two-stroke (OP2S) diesel engine[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 147: 336-346.
- [23] XIE Z, ZHAO Z, ZHANG Z. Numerical simulation of an opposed-piston two-stroke diesel engine[EB/OL]. [2022.07.15]. <https://doi.org/10.4271/2015-01-0404>.
- [24] 许汉君, 宋金瓯, 姚春德. 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 Hanjun, SONG Jinou, YAO Chunde. Simulation on in-cylinder flow on mixture formation and combustion in OPOC engine[J]. Transactions of CSICE, 2009, 27(5): 395-400. (in Chinese)
- [25] 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.
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, 25(6): 1322-1326. (in Chinese)
- [26] 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.
PEI Yujiao. Analysis and optimization on the uniflow scavenging process for the opposed piston two stroke diesel engine[D]. Taiyuan: North University of China, 2013. (in Chinese)
- [27] 邹玉红. 对置二冲程柴油机的扫气研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.

- ZOU Yuhong. Research on the scavenging process of the opposed piston opposed cylinder two stroke diesel engine[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016. (in Chinese)
- [28] 邹玉红, 卢勇, 裴普成, 等. 双对置二冲程柴油机扫气过程的进气口结构影响规律[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(1): 47-52.
- ZOU Yuhong, LU Yong, PEI Pucheng, et al. Influence of intake port structure on opposed piston opposed cylinder two stroke diesel engine scavenging process[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(1): 47-52. (in Chinese)
- [29] HE Changming, XU Sichuan. Transient gas exchange simulation and uniflow scavenging analysis for a unique opposed piston diesel engine[C]//Proceedings of the 2016 SAE World Congress. Detroit, US: SAE International, 2016.

(编辑: 陈 越)