

组喷孔喷嘴对双对置柴油机喷雾及燃烧的影响

周健豪^{1,2}, 盛雪爽², 杨海青², 赵万忠², 宋廷伦²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016;
2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 针对双对置柴油机混合气形成困难的特点,采用 CONVERGE CFD 软件,建立双对置柴油机数值仿真模型。设计 3 种汇聚型组喷孔喷嘴的喷孔布置方案,研究在保持喷油压力不变的前提下,对 3 种方案下喷雾、混合气形成和燃烧过程进行分析。结果表明:与传统喷嘴相比,改进后的组喷孔喷嘴对喷雾贯穿距影响较小,有利于缸内湍流动能的提高,加快缸内混合气的形成速率。同时,组喷孔喷嘴使燃油分布更加均匀,分布区域也更广,有利于改善油气混合质量,提高双对置发动机气缸压力和燃烧效率,达到提升双对置发动机性能的效果。其中,第 3 种组喷孔布置方案下发动机指示功率可提高 7.6%。

关 键 词: 组喷孔喷嘴; 双对置柴油机; 喷雾; 混合气形成; 燃烧

中图分类号: V231; TK422

文献标志码: A

Influence of group-hole nozzles on spray and combustion of an opposed piston opposed cylinder diesel engine

ZHOU Jianhao^{1,2}, SHENG Xueshuang², YANG Haiqing²,
ZHAO Wanzhong², SONG Tinglun²

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,
College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: With focus on the difficulty of mixture formation of an opposed piston opposed cylinder diesel engine, CONVEGE CFD software was employed to establish the numerical simulation model of an opposed piston opposed cylinder diesel engine. Three arrangements of the converging group-hole nozzle were designed, and without modifying the injection pressure, the fuel spray, mixture formation and combustion process of an opposed piston opposed cylinder diesel engine model were analyzed. The results indicated that the group-hole nozzle had negligible influences on spray penetration distance compared with conventional nozzle. The group-hole nozzle was helpful in improving the in-cylinder turbulence kinetic energy and accelerating the air-fuel mixing rate. Meanwhile, the mixture was evenly

收稿日期: 2018-03-14

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(NJ20160018); 国家自然科学基金(51805254)

作者简介: 周健豪(1985—),男,副教授、硕士生导师,博士,主要从事新型发动机设计研究。

引用格式: 周健豪,盛雪爽,杨海青,等. 组喷孔喷嘴对双对置柴油机喷雾及燃烧的影响[J]. 航空动力学报,2019,34(1):18-26.
ZHOU Jianhao, SHENG Xueshuang, YANG Haiqing, et al. Influence of group-hole nozzles on spray and combustion of an opposed piston opposed cylinder diesel engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(1): 18-26.

distributed and widely spread, helping to improve the quality of mixture and increase the in-cylinder pressure and combustion efficiency as well as improve the engine performance. Among three designs, the indicated power of the engine with the third pattern of converging group-hole increased by 7.6%.

Key words: group-hole nozzle; opposed piston opposed cylinder diesel engine; spray; mixture formation; combustion

OPOC(双对置)发动机由对置活塞发动机和对置气缸发动机发展而来。OPOC 发动机功率覆盖范围可达 5~485 kW,不仅适用于军用飞机、小型无人机,在装甲车辆、混合动力汽车中也具有广泛运用前景,因而引起了广泛的关注和研究^[1-3]。

OPOC 柴油机属于低涡流燃烧系统,因此,喷油参数的选择对于 OPOC 柴油机缸内混合气的形成质量至关重要^[4]。为获得更好的混合气质量,提高空气利用率,改善 OPOC 柴油机燃烧性能,许多研究者对 OPOC 柴油机喷油参数进行研究。北京理工大学谢钊毅^[5]研究了油束夹角对缸内喷雾的扩散及混合气形成质量的影响。强永平等^[6]、杨峰^[7]从喷油策略的角度出发,分析了不同组合喷射方案对缸内燃烧的影响规律。刘军萍^[8]通过 CFD 仿真软件针对不同喷孔布置方案、喷孔数等参数对 OPOC 柴油机燃烧和排放性能的影响进行计算分析。可以看出,为达到较小的雾化粒径,需减小喷孔直径并增加喷油压力以保证喷雾贯穿距,但相同喷雾锥角设计下会影响喷雾的空间分布,对混合气形成产生不利影响^[9-11]。

组喷孔喷嘴^[12]可以在同等喷油压力下,明显减小喷雾贯穿距,同时获得更小的雾化粒径和更大的喷雾锥角。关于组喷孔喷嘴在直喷式柴油机上的应用, Kim 等^[13]发现,组喷孔喷嘴可以减少 20% 的碳烟排放和 5% 的燃油消耗。Park 等^[14]采用 KIVA 数值仿真软件研究了柴油机稀薄燃烧情况下组喷孔对柴油机燃烧和排放的影响,发现汇聚型组喷嘴可以提高混合气质量,从而减少碳烟排放。另有研究表明^[15],在进气节流条件下,对比传统单孔喷嘴,组喷孔喷嘴可以降低接近 3% 的燃油消耗。

本文针对 OPOC 柴油机混合气形成困难的特点,采用 CONVERGE CFD 软件建立 OPOC 柴油机计算模型,研究在喷油压力恒定的条件下,组喷孔喷嘴对 OPOC 柴油机混合气形成和燃烧过程的影响规律。设计 3 种组喷孔喷嘴的喷孔布置方案,对其混合气形成和燃烧规律进行计算分析。

1 模型标定与参数设置

1.1 CFD 网格模型建立

本文使用 CONVERGE CFD 软件,以 EM100 为原型机^[3],建立 OPOC 柴油机 CFD 仿真模型。具体参数见表 1。

表 1 OPOC 柴油机参数设置
Table 1 Specification of an OPOC diesel engine

参数	数值
缸径/mm	100
内、外活塞行程/mm	90、70
几何压缩比	19.9
转速/(r/min)	2 500

以 2.5 mm 为基础划分网格,同时对内、外活塞顶、气缸套、双喷口等边界位置网格进行加密。同时,为提高计算精度,对燃油喷射过程采用自适应网格加密技术使每个时间步长的网格密度随缸内流体的温度梯度和速度梯度变化。网格模型如图 1 所示。图 2 为活塞运动曲线图,以喷油器所在平面为基准平面,左侧位置为正,右侧位置为负,内、外活塞相对基准平面运动。

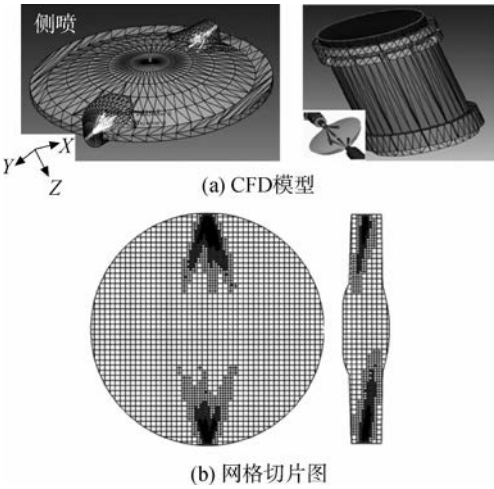


图 1 气缸的网格划分
Fig. 1 Mesh of the cylinder

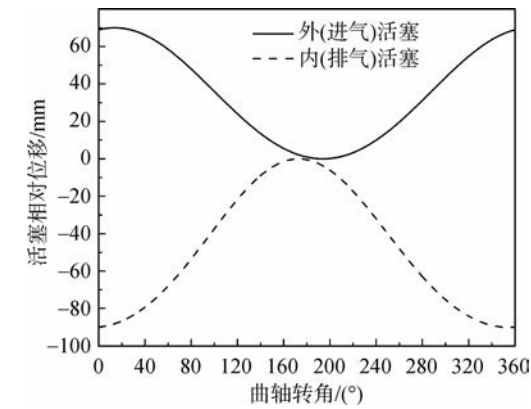


图 2 活塞运动曲线

Fig. 2 Curves of piston motion

1.2 边界条件设定与模型标定

柴油喷射的仿真模拟选用离散液滴模型,燃油雾化和破碎采用 KH-RT (Kelvin Hemholtz-Rayleigh Taylor) 模型,液滴的碰撞和聚合采用 NTC(no time counter)模型,使用碰壁模型对燃油碰壁进行模拟,湍流模型选用 $k-\epsilon$ 模型,燃烧模型选用 SAGE 模型。

为验证所选模型的可靠性,将计算得到的缸压与实验数据^[3]比较。图 3 所示为 2500r/min 转速,50%负载下的缸压对比图,其中,计算初始条件如表 2 所示。由图可知,CFD 计算结果可较为准确地预测出缸内压力的发展历程,无论是压缩、燃烧还是膨胀做功阶段都跟实验较为接近,证明 CFD 模型可以较为准确地模拟 OPOC 柴油机的工作过程。

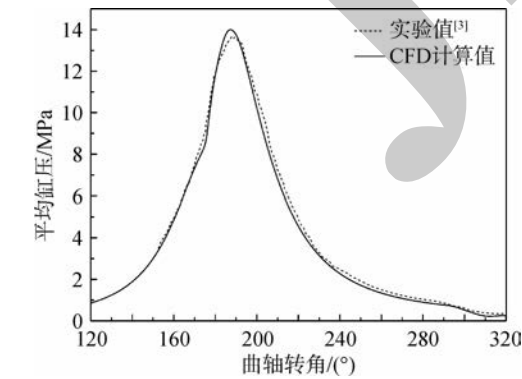


图 3 计算值与实验值的平均缸压对比图

Fig. 3 Comparison of computational and experimental averaged in-cylinder pressures

1.3 仿真方案设定

表 3 所示为喷孔参数设置。本文将原有的三孔喷嘴替换为具有三组子喷孔的组喷孔喷嘴。为保证喷油压力不变,保持每组子喷孔的有效喷油

表 2 初始条件

Table 2 Initial conditions

参数	数值
缸内初始压力/MPa	0.255
缸内初始温度/K	345
缸内初始湍流动能/(m^2/s^2)	65.3
涡流比	0.52

表 3 喷孔参数

Table 3 Nozzle specifications

参数	数值	
	组喷孔喷嘴	原喷嘴
子喷孔直径/mm	0.155	0.22
喷孔个数	6	3
喷孔间距/mm	0.5	
喷油压力峰值/MPa	65	65

面积与原喷孔面积一致,即组喷孔每组子喷孔直径为 0.155 mm。将每组子喷孔在空间的交汇点限定为距离喷油起始点 10 mm($\beta=2.86^\circ$)。由于 OPOC 柴油机的燃烧室形状较为扁平,为减少油束交汇使得油雾锥角过大造成燃油挂壁,相对于普通的组喷孔喷嘴,本文将组喷孔的每组子喷孔布置在同一圆周上,具体改变如图 4 所示。

本文对不同的组喷孔喷嘴的喷孔布置方案对 OPOC 柴油机的影响进行计算。图 5 所示分别为

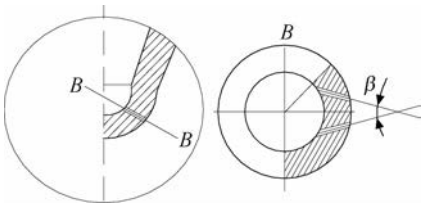
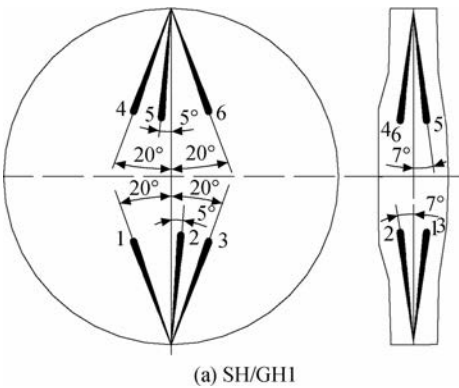


图 4 组喷孔结构图

Fig. 4 Group-hole nozzle structures



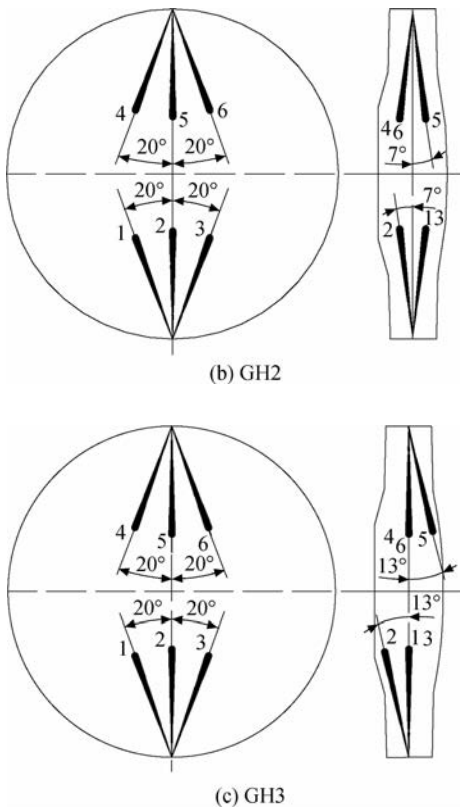


图 5 喷孔布置方案图
Fig. 5 Nozzle layout

方案 GH1、GH2、GH3,其中 GH1 喷孔布置方式与 SH(单孔)喷嘴一致。下文用 SH、GH1、GH2、GH3 分别代表单喷孔喷嘴、组喷孔喷嘴方案 1、2 和 3。

2 结果分析

2.1 喷雾和混合气形成分析

计算结果表明,SH 的贯穿距最大,约为 59 mm,而 GH1 贯穿距最小,约为 52 mm。GH2 和 GH3 的贯穿距略大于 GH1,接近 SH。由此证明,虽然组喷孔喷嘴对喷雾贯穿距略有影响,但喷雾仍然可以贯穿到气缸中心,并不会对喷雾的空间分布造成不利影响。

图 6 所示为曲轴转角 $\alpha=173^\circ$ 时,SH 和 GH1 喷雾速率对比图。可知,两者在喷雾空间分布上相似,但 GH1 喷雾空间分布范围较 SH 更加广泛。另外,由于 GH1 燃油液滴的索太尔平均直径较小导致液滴本身动量较小,所以 GH1 中低速液滴所占的比例要高于 SH。由组喷孔喷嘴喷雾的局部放大图可以清晰看出,虽然外围燃油颗粒的速度在贯穿过程中不断衰减,但子喷孔油束交汇处的液滴速度明显要大于外围液滴,证明油

束的汇聚确实可以抑制空气卷吸,保持喷雾动量,从而达到不明显减少贯穿距的效果^[16-18]。

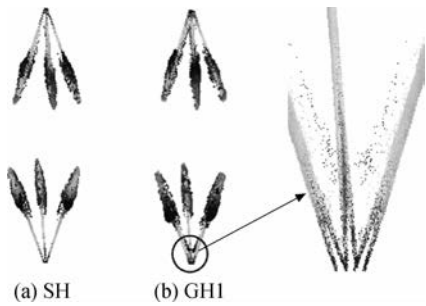


图 6 喷雾速度对比图
Fig. 6 Comparison of spray speed

图 7 为缸内湍流动能曲线图。由图可知,未燃之前,SH 和 GH(GH1、GH2、GH3)的缸内湍流动能基本相等;燃烧开始后,SH 的缸内湍流动能最小,GH3 的湍流动能最大,但衰减得最快。子喷孔夹角的存在抑制了空气对燃油的卷吸作用,减少了喷雾与缸内流体之间的动量交换。因此,在燃烧之前,GH 和 SH 的湍流动能之间没有明显差异。燃烧开始后,燃油颗粒边蒸发边燃烧,燃烧和湍流之间相互作用,燃烧使缸内气体密度和压力波动,造成湍流动能的升高,而湍流动能的增加又会进一步促进油气混合,加剧燃烧过程。喷油结束后,燃烧所提供的能量不足以克服气体黏性增加消耗的能量,湍流衰减。较大的湍流动能意味着 GH 的油气混合程度较好,燃烧反应也更加剧烈。

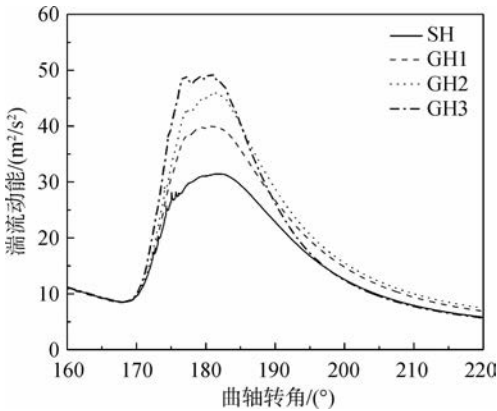


图 7 缸内湍流动能
Fig. 7 In-cylinder turbulent kinetic energy

图 8 为缸内湍流动能的等值线图。对比 SH 和 GH1 的缸内湍流分布发现,两者之间的分布形状基本一致,但 GH1 缸内高湍流动能区面积更大,说明同样喷孔布置的组喷孔喷嘴更有益于

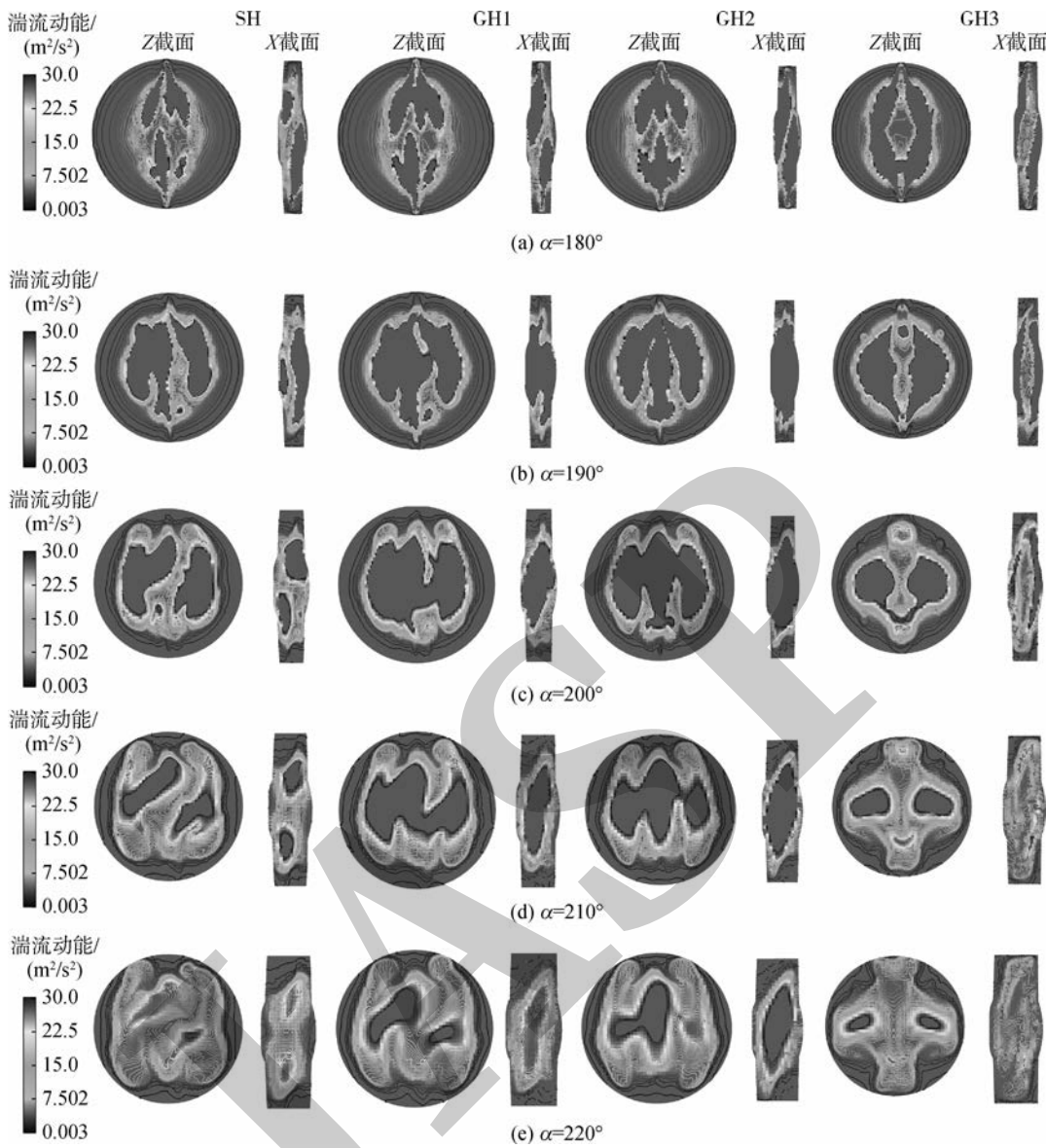


图 8 缸内湍流动能的 Z 截面和 X 截面的等值线图

Fig. 8 Turbulent kinetic energy isocontous on Z and X cross sections

油气混合速度和质量的提高。

由图 9 燃空当量比(ϕ)分布图可知,GH1 的燃油分布显然更加均匀,分布区域也更广,有利于燃油充分燃烧。通过对比 GH2 和 GH1 的湍流动能分布和未蒸发燃油量(图 10 所示)可以发现,GH1 中缸内出现平行于活塞运动平面的涡流,促进燃油蒸发,提高混合气质量。因此,初始阶段 GH1 未蒸发燃油相对较少。但 GH2 射入燃烧室中心的燃油量较多,随着气缸压缩和燃烧的进行,气缸中心区域的空气利用率相比于 GH1 有所提高,燃烧也更为剧烈,从而促进燃油迅速蒸发,最终未蒸发燃油量反而要低于 GH1。GH3 两侧油束的对撞一方面使部分燃油喷雾在碰撞过程中破碎成粒径更小的液滴,这部分液滴迅速蒸发,与空

气形成可燃混合气;另一方面使油雾扩散范围更广,提高燃油蒸发速度,因此其湍流动能的增加也更加显著。但是在燃烧后期,GH3 的燃油分布较为靠近气缸壁,容易造成传热损失和湿壁。

2.2 燃烧过程分析

图 11 为缸内平均压力曲线图。由图可知,GH 的缸内压力要明显高于 SH 的缸压,其中 GH2,GH3 平均压力最高,意味着组喷孔的应用有利于提高发动机性能。从图 12 的放热率曲线上看,预混合燃烧阶段,GH 放热率峰值相对于 SH 出现相位较早,放热率峰值大小呈现出 $\text{GH3} > \text{GH2} > \text{GH1} > \text{SH}$ 的规律,其中 GH3、GH2 明显大于 GH1 和 SH,GH1 和 SH 的峰值相近。虽然

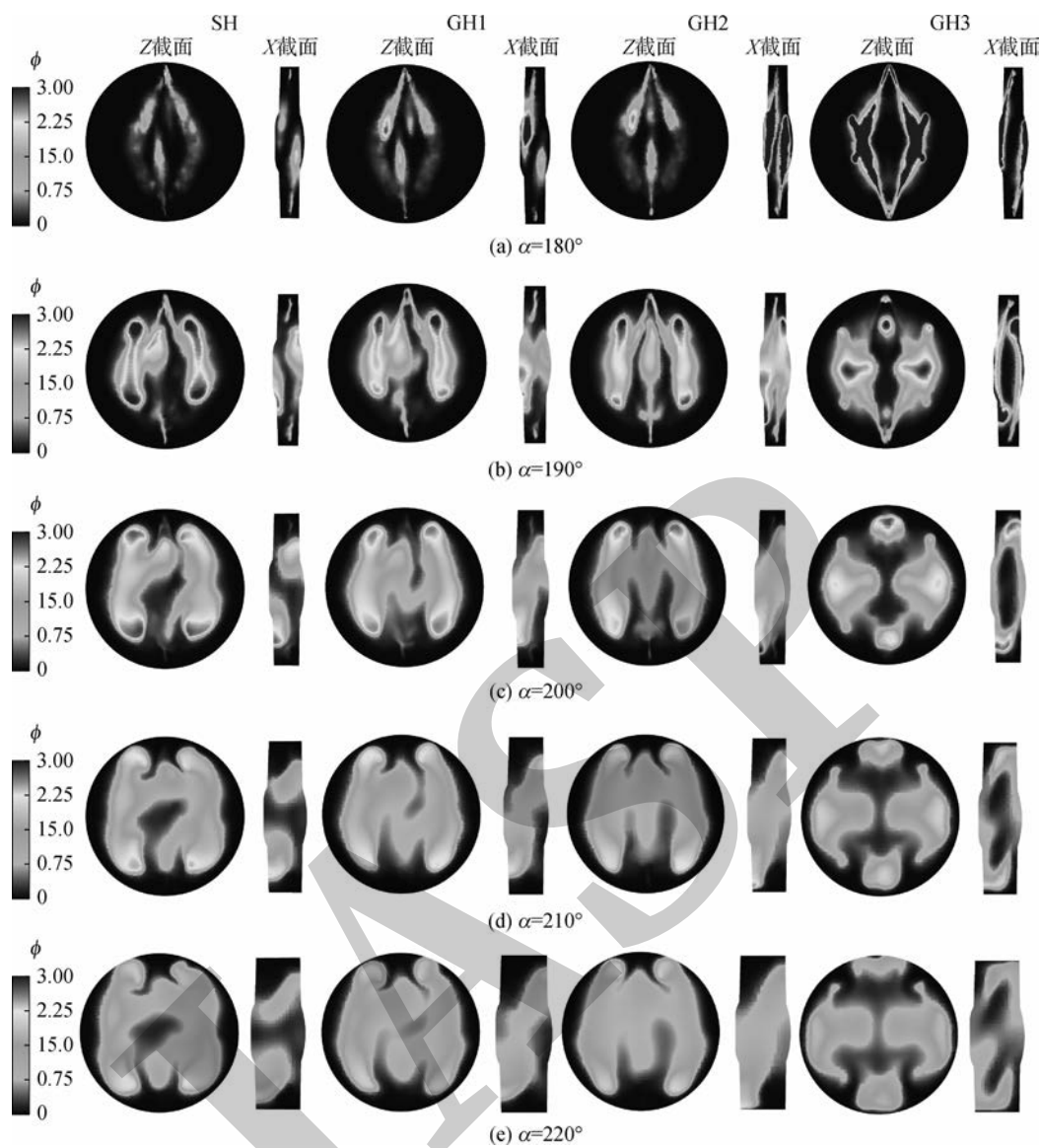


图 9 Z 截面和 X 截面的燃空当量比分布

Fig. 9 Fuel/air equivalence ratio distribution on Z and X cross sections

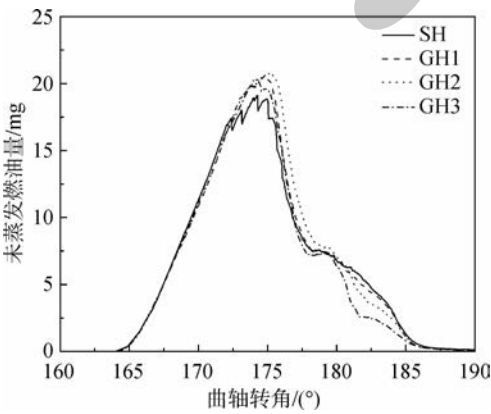


图 10 未蒸发燃油量

Fig. 10 Mass of liquid fuel

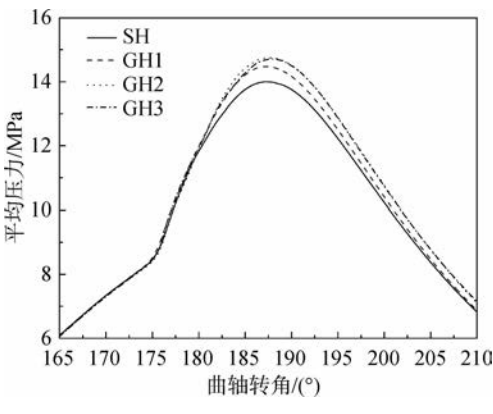


图 11 不同喷嘴对应的缸内平均压力

Fig. 11 Averaged in-cylinder pressure of different nozzles

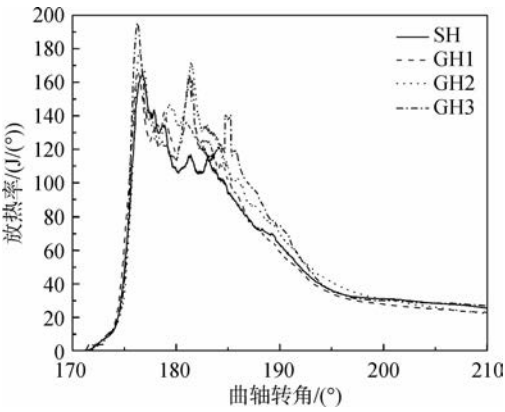


图 12 放热率
Fig. 12 Heat release rate

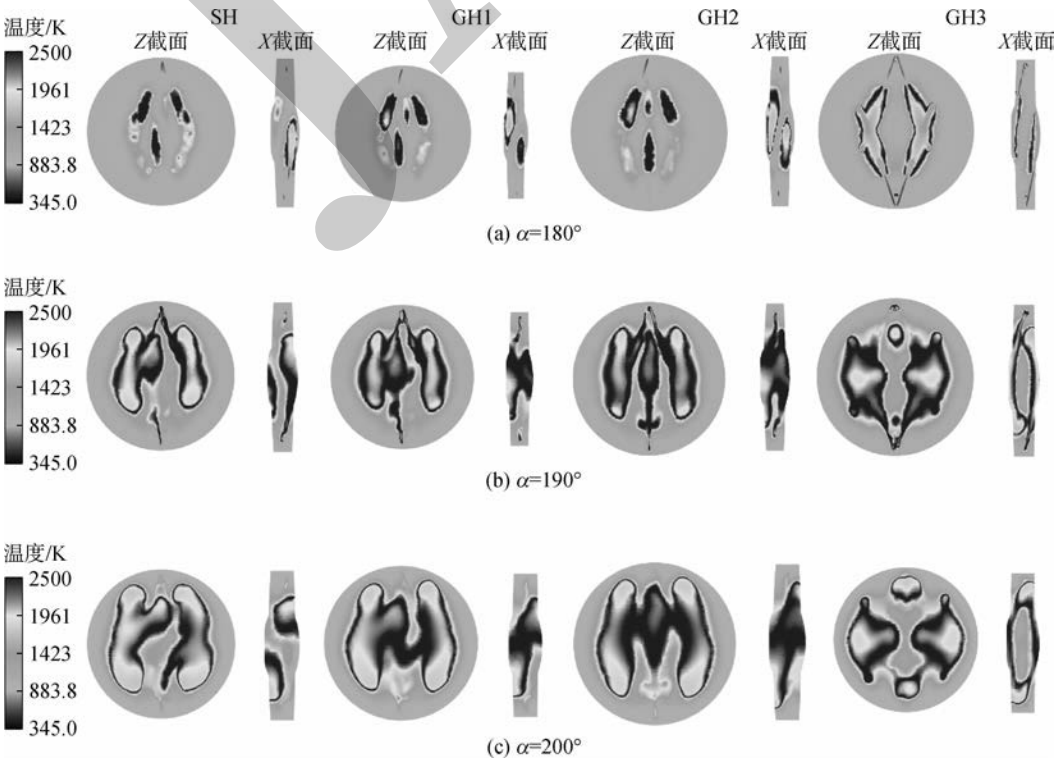
从未蒸发燃油量上看, GH1 中可燃混合气相对于 SH 略少, 但 GH1 中可燃混合气分布区域更广, 有利于提高理论空燃比附近的空气利用率, 因此放热进程较快, 导致放热率峰值较 SH 提前。GH2 和 GH3 中混合气比 GH1 更集中于燃烧室中心区域, 可利用的空气更多, 有利于放热率的增加, 另外 GH3 燃油对撞使其燃油蒸发量相对 GH2 较多, 因此放热速率峰值比 GH2 高。

扩散燃烧阶段, GH 放热率出现第 2 个峰值。这一阶段燃油蒸发量顺序为 $GH3 > GH2 > GH1$, 放热率峰值大小顺序为 $GH2 > GH3 > GH1$ 。GH1 燃油蒸发量最少, 放热率峰值最小。导致

GH3 放热率峰值小于 GH2 的原因可能是 GH3 中油束对撞区域形成的大面积富油区被外围的高温废气“包围”, 难以与新鲜空气形成可燃混合气, 阻碍燃烧进程。另外, 由于组喷孔喷嘴子油束的汇聚使得一部分燃油颗粒汇聚融合, 从而形成更大的燃油颗粒, 同时两侧油束的对撞使这一部分燃油颗粒破碎或融合, 形成更小或大的燃油颗粒。因此这部分较大的燃油颗粒蒸发燃烧导致 GH3 放热率出现第 3 个峰值。

图 13 所示为气缸温度分布切片图, 相比于 SH, GH1 的高温区域显然更大。在扩散燃烧阶段, GH1 中较小的索太尔平均直径和较大的喷雾扩散范围有利于提高缸内油气混合质量和空气利用率, 因此 GH1 比 SH 燃烧更为迅速。综合燃油当量比分布和温度切片分布, 可以明确看出, GH3 油束对撞造成燃油聚集, 使燃烧范围始终发生在燃油聚集区外围, 从而阻碍了燃烧进程。

由图 14 中的累计放热率可知, 总放热率大小依次为 $GH3 > GH2 > GH1 > SH$, 意味着组喷孔使燃烧更加充分, 燃烧效率更高, 且同样喷孔布置方案, 组喷孔喷嘴的应用使发动机指示功率提高 2.1%, GH3 将指示功率提高了 7.6%。由图 15 平均温度曲线图可知, GH 方案的缸内温度较 SH 要高, 尤其是 GH3, 其缸内温度不仅较高, 高温持续时间也较长。



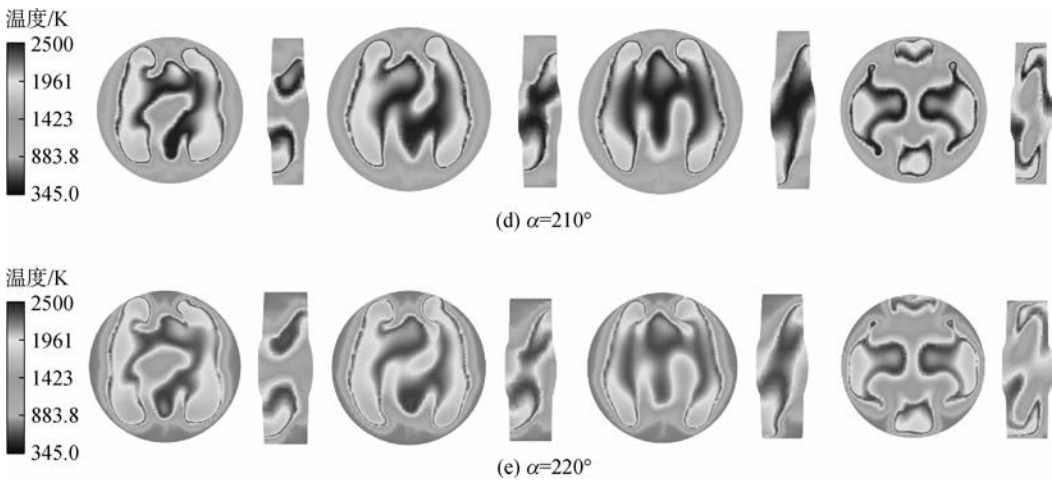


图 13 Z 截面和 X 截面的气缸温度分布

Fig. 13 In-cylinder temperature distribution on Z and X cross sections

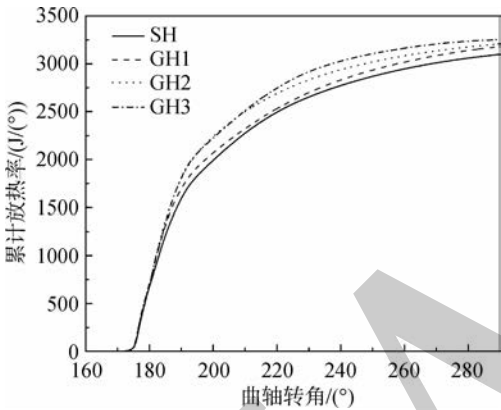


图 14 累计放热率

Fig. 14 Accumulated heat release rate

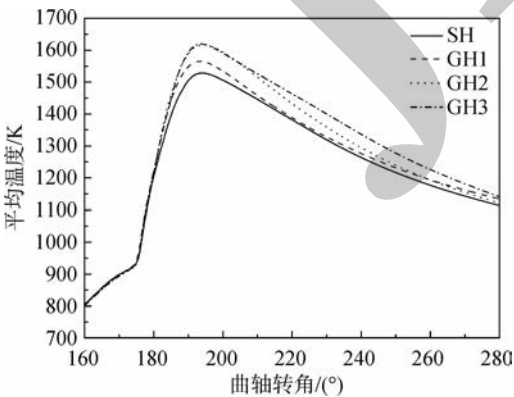


图 15 平均温度

Fig. 15 Averaged temperature

内混合气形成与燃烧的影响趋势,并得到如下结论:

- 1) 组喷孔喷嘴的应用有利于缸内湍流动能的提高,加速缸内混合气的形成速率,改善油气混合质量。
- 2) 组喷孔喷嘴的应用可以提高发动机燃烧效率,改善发动机性能。同样喷孔布置方案,组喷孔喷嘴下 OPOC 柴油机的指示功率可提高 2.1%,其中 GH3 下 OPOC 柴油机指示功率可提高 7.6%。
- 3) GH2、GH3 方案可以提高气缸中心区域的空气利用率,使燃烧更为充分。但 GH3 方案中燃油对撞在提高预混合燃烧阶段燃油蒸发速率的同时也造成了燃油的聚集,不利于扩散燃烧阶段混合气的形成。

参考文献:

[1] FRANKE M, HUANG H, LIU J P, et al. Opposed piston opposed cylinder (OPOC™) 450 hp engine; performance development by CAE simulations and testing[R]. SAE Technical Paper 2006-01-0277, 2006.

[2] KALKSTEIN J, RÖVER W, CAMPBELL B, et al. Opposed piston opposed cylinder (OPOC™) 5/10 kW heavy fuel engine for UAVs and APUs[R]. SAE Technical Paper 2006-01-0278, 2006.

[3] HOFBAUER P. Opposed piston opposed cylinder (OPOC) engine for military ground vehicles[R]. SAE Technical Paper 2005-12-1548, 2005.

[4] FLINT M, PIRAULT J P. Opposed piston engines: evolution, use, and future[M]. Detroit, US: SAE, 2009: 456-458.

[5] 谢钊毅. 对置活塞二冲程柴油机喷雾过程的试验研究与数值模拟[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.

3 结 论

本文利用 CONVERGE CFD 软件建立了 OPOC 柴油机燃烧过程仿真模型,分析了不同喷孔布置方案下的组喷孔喷嘴对 OPOC 柴油机缸

XIE Zhaoyi. Experimental study and numerical simulation of the spray process in an opposed-piston two-stroke diesel engine[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)

[6] 强永平,李耀宗,白洪林,等. 组合喷射对双对置二冲程发动机燃烧过程影响的计算研究[J]. 车用发动机, 2014(5): 46-53.

QIANG Yongping, LI Yaozong, BAI Honglin, et al. Influence of combined injection on OPOC two-stroke engine combustion[J]. Vehicle Engine, 2014(5): 46-53. (in Chinese)

[7] 杨峰. 双对置柴油机侧向组合喷雾-燃烧过程的数值模拟研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.

YANG Feng. Numerical simulation on lateral combined spray and combustion of dual opposed diesel engine[D]. Changsha: Hunan University, 2016. (in Chinese)

[8] 刘军萍. 高功率密度 OPOC 柴油机喷雾燃烧过程与喷油策略研究[D]. 太原: 中北大学, 2013.

LIU Junping. Research on spray-combustion process and injection methods of high power density diesel engine[D]. Taiyuan: North University of China, 2013. (in Chinese)

[9] BERGSTRAND P, FÖRSTH M, DENBRATT I. The influence of orifice diameter on flame lift-off length[R]. Zaragoza, Spain: ILSS-Europe Annual Conference, 2002.

[10] NISHIDA K, ZHANG W, MANABE T. Effects of micro-hole and ultra-high injection pressure on mixture properties of DI diesel spray[R]. SAE Technical Paper 2007-01-1890, 2007.

[11] 张扬, 谢侃, 岳明辉, 等. 流体喉部横流喷嘴的雾化特性[J]. 航空动力学报, 2017, 32(5): 1074-1081.

ZHANG Yang, XIE Kan, YUE Minghui, et al. Atomization characteristics of cross-flow injector in the fluidic nozzle throat[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(5): 1074-1081. (in Chinese)

[12] ZHANG Y, NISHIDA K, NOMURA S, et al. Spray characteristics of a group-hole nozzle for direct-injection diesel engines[J]. Atomization and Sprays, 2006, 16(1): 35-50.

[13] KIM S, NAMBA M, SHIMO D, et al. Numerical analysis of the mechanism in diesel mixture formation and emission reduction by group hole nozzle[C] // The 20th Internal Combustion Engine Symposium. Tokyo: The Japan Society of Mechanical Engineers, 2009: 1-3.

[14] PARK S, REITZ R D, KIM J. Combustion and emission characteristics of converging group-hole nozzle under lean engine operating conditions[J]. Fuel, 2011, 90(11): 3259-3267.

[15] KIM J, PARK S W, ANDRIE M, et al. Experimental investigation of intake condition and group-hole nozzle effects on fuel economy and combustion noise for stoichiometric diesel combustion in an HSDI diesel engine[J]. SAE International Journal of Engines, 2009, 2(1): 1054-1067.

[16] 齐文亮, 明平剑, 张文平, 等. 不同液滴破碎模型的验证及柴油机在燃气混合过程中的应用[J]. 航空动力学报, 2018, 33(9): 2093-2100.

QING Wenliang, MING Pingjian, ZHANG Wenping, et al. Evaluation of different breakup models and application to the mixture preparation process for diesel[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(9): 2093-2100. (in Chinese)

[17] JIAN G, MATSUMOTO Y, NISHIDA K. Effects of group-hole nozzle specifications on fuel atomization and evaporation of direct injection diesel sprays[R]. SAE Technical Paper 2007-01-1889, 2007.

[18] MOON S, MATSUMOTO Y, NISHIDA K, et al. Improving diesel mixture preparation by optimization of orifice arrangements in a group-hole nozzle[J]. International Journal of Engine Research, 2010, 11(2): 109-126.

(编辑: 陈 越)