

对置活塞二冲程柴油机燃烧系统优化

秦 静¹, 杜天宇^{1,2}, 李尚书², 裴毅强², 李 红³

(1. 天津大学 内燃机研究所, 天津 300072; 2. 天津大学 先进内燃动力全国重点实验室, 天津 300072; 3. 中国北方发动机研究所, 天津 300400)

摘 要: 针对大缸径对置活塞二冲程(OP2S)柴油机存在空气利用率低、油气匹配差的问题, 利用三维 CFD 软件对一款 OP2S 柴油机开展了不同喷油器直径及燃烧室关键参数的优化设计研究, 明确其对喷雾混合及燃烧性能的影响。研究表明: 对于 OP2S 柴油机, 在相同燃烧室条件下, 燃烧室中央区域对缸内压力及放热率影响较大; 对于以涡流为主的 OP2S 柴油机, 采用浅坑形燃烧室可以增强涡流效果, 有利于喷雾混合, 增大发动机的火焰扩散区域, 提高燃烧性能。

关键词: 能源与动力工程; 对置活塞二冲程柴油机; 喷孔直径; 燃烧室; 空气利用率

中图分类号: TK421 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)06-1457-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241328

Optimization of opposed-piston two-stroke diesel engine combustion system

QIN Jing¹, DU Tian-yu^{1,2}, LI Shang-shu², PEI Yi-qiang², LI Hong³

(1. Internal Combustion Engine Research Institute, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. China North Engine Research Institute, Tianjin 300400, China)

Abstract: In order to solve the problems of low air utilization rate and poor fuel-air matching in a large bore opposed-piston two-stroke (OP2S) diesel engine, this paper uses three-dimensional CFD software to conduct an optimization design study on different injector diameters and key parameters of the combustion chamber of an OP2S diesel engine, clarifying their influence on spray mixing and combustion performance. The research results show that: for the OP2S diesel engine under the same combustion chamber conditions, the central area of the combustion chamber has a greater influence on the in-cylinder pressure and heat release rate; for the OP2S diesel engine mainly with swirl, the adoption of a shallow-pit-shaped combustion chamber can enhance the swirl effect, be beneficial to spray mixing, increase the flame diffusion area of the engine, and improve the combustion performance.

Key words: energy and power engineering; opposed-piston two-stroke diesel engine; injector nozzle diameter; combustion chamber; air utilization rate

收稿日期: 2024-12-13.

基金项目: 国家部委基础产品创新计划科研项目 (DEDP145DZHS).

作者简介: 秦静 (1979-), 女, 副研究员, 博士. 研究方向: 高效清洁发动机燃烧技术. E-mail: qinjing@tju.edu.cn

0 引言

由于对置活塞二冲程(Opposed-piston two-stroke, OP2S)柴油机具有高功率密度、高指示热效率等特点,在无人机、军用车辆、辅助动力装置及轻型载重车辆方面具有广泛的应用^[1]。与传统柴油机 ω 型燃烧室不同,OP2S 发动机没有气缸盖,燃烧空间由两个活塞顶部和气缸壁共同组成,混合气形成空间区域及形状皆与传统柴油机有显著不同。此外,由于没有缸盖,OP2S 柴油机的喷油器只能安装在气缸侧面缸套上,燃油油束由气缸一侧喷入气缸中心,此时,各油束沿其轴向至缸壁的距离皆不相同,传统的均一化喷油器喷孔参数设计难以满足使用要求。综上,因燃烧空间及喷油器喷射方向带来的差异使得 OP2S 柴油机燃烧系统设计尤为困难。

目前对于 OP2S 柴油机,大部分研究集中于扫气性能的优化改进,通过优化气道结构参数来改善扫气效率,降低缸内残余废气。部分人员研究了缸内涡流与燃油油束的相互作用。Pei 等^[2]研究了进气道数量、径向倾斜角和宽度的影响。结果表明,进气道数目的增加会在缸内某些区域产生涡流,降低扫气性能;增加进气倾斜角使排气的残余面积从气缸壁向气缸中心移动;进气道宽度的增加更有利于净化壁面附近的废气。O'Donnell 等^[3]的研究指出,随着进气涡流的增加,扫气性能先增加后降低。所有上述控制方法最终改变了缸内涡流的强度,并促进了性能提升。然而,二冲程模型的缸内涡流在整个喷射期间持续存在,并与油束的直接喷射发生碰撞,影响燃油雾化过程。Wang 等^[4,5]研究了进气道壁厚、进气道形状、进气道偏置量和进气道数量对进气道性能的影响。结果表明,进气道壁厚、进气道形状和进气道偏置量对燃烧性能有显著影响;进气涡流调节通过加速油雾的均匀分布来改善燃烧性能。

OP2S 柴油机油气混合及燃烧性能不仅和气道方面相关,还与喷油器参数、喷油器布置形式、燃烧室形状等相关。Zhou 等^[6-8]对 OP2S 的喷油器参数进行了研究,包括喷油规律曲线、喷油压力、喷孔直径、喷油提前角等。除了对喷油器的参数展开研究,刘彩明等^[9,10]也从喷油器布置形式对 OP2S 的喷雾及燃烧开展数值模拟和实验研

究,提出了合理的喷油角度及互不干涉的油束有利于喷射能量与湍动能之间的转化,使燃烧更充分。王豪等^[11,12]致力于 OP2S 发动机的燃烧室设计,探究燃烧室形状对发动机的喷雾及燃烧的影响,提出了对置凹坑活塞组成的滚流燃烧室,然而国内外针对 OP2S 柴油机进行喷油器与燃烧室组合匹配的研究较少,且大多数是基于缸径 100 以下的 OP2S 柴油机开展研究^[13],而大缸径结构下,边缘到气缸中心距离更长,中间燃油油束贯穿距大,而边缘油束距离缸壁近易撞壁,对各喷孔的要求差异加剧。如何协调燃烧室及各喷孔参数,综合提高燃烧室各区域的空气利用率变得更加困难。

本文以一款大缸径 OP2S 柴油机为研究对象,应用发动机三维仿真软件 CONVERGE,结合 OP2S 发动机的结构特点,综合开展喷油器喷孔参数、喷油器布置形式及燃烧室形状匹配研究,以明确燃烧室油气分配和燃烧室形状对缸内流动、喷雾混合和燃烧特性的影响,为 OP2S 发动机燃烧系统设计及其性能提升提供参考和依据。

1 模型的建立与验证

1.1 几何模型的建立

针对 OP2S 柴油机的工作过程及特点,在 CREO 三维建模软件中,建立原机的几何模型。为了加快计算速度,使用 CONVERGE 软件建立了该发动机的单缸数值模型,如图 1 所示。

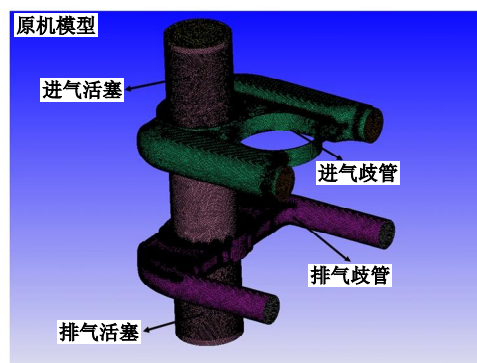


图 1 原机模型

Fig. 1 Prototype model

由于 OP2S 发动机的特殊结构,两个活塞并不处在相同的曲轴转角,存在 5°CA 时间间隔,这意味着这两个活塞将依次到达上止点(TDC)。

本文将靠近排气管的排气活塞的上止点标记为该发动机的上止点。本文湍流模型选用了RNG $k-\varepsilon$ 模型,燃烧模型为SAGE化学求解模型,喷雾湍流扩散模型为O'Rourke模型,喷雾破碎模型为KH-RT模型,碰撞模型为NTC碰撞模型。原机的几何参数、初始条件与边界条件、主要喷油参数见表1~表3,初始条件与边界条件参数通过一维计算得到,图2为原机喷油器及喷孔布置图。

表 1 原机结构参数

Table 1 Prototype geometric parameters	
参 数	数 值
缸 径/mm	120
转速/(r·min ⁻¹)	2 600
压缩比	18.5
冲程/mm	120×2
连杆长度/mm	165.8
进排气相位差/°CA	5

表 2 原机初始条件与边界条件

Table 2 Prototype Initial and boundary conditions	
参 数	数 值
进气压力/MPa	0.249
进气温度/K	373.2
缸内初始温度/K	1445.5
缸内初始压力/MPa	0.984
排气压力/MPa	0.119
排气温度/K	1 005.2
进气开启范围/°CA	136~234
排气开启范围/°CA	104~256

表 3 原机喷油参数

Table 3 Prototype injection parameters	
参 数	数 值
喷油器个数	2
单喷油器喷孔个数	3
喷孔直径/mm	0.28
喷雾锥角/(°)	10
喷射偏移角/(°)	30
喷油开始时刻/°CA	351
喷油持续期/°CA	20
单循环喷油量/mm	205.6

1.2 模型的验证

为验证喷雾模型的准确性,在定容燃烧弹实验装置安装了一款三喷孔的喷油器,利用纹影

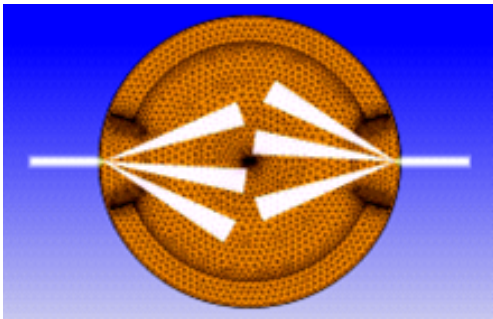


图 2 原机喷油器及喷孔布置

Fig. 2 Arrangement of injectors and nozzles on prototype

法^[14]研究了喷油器的喷雾特性,如图3所示。背景压力为5 MPa,喷油压力为100 MPa,喷油脉宽为1.5 ms的条件下,喷雾形态的实验和模拟结果对比如图4所示。喷雾贯穿距的实验结果和模拟结果比较如图5所示。模拟结果与实验结果非常接近,可用于本文模拟研究。

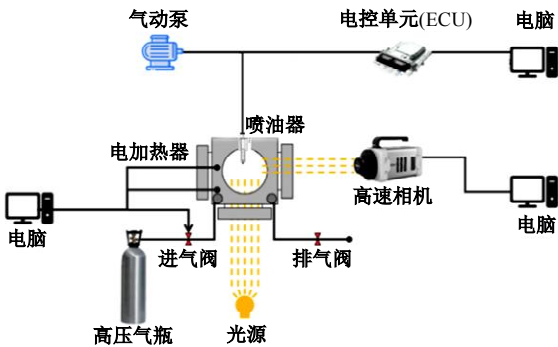


图 3 定容弹实验装置流程图

Fig. 3 Constant volume bomb experimental setup flow chart

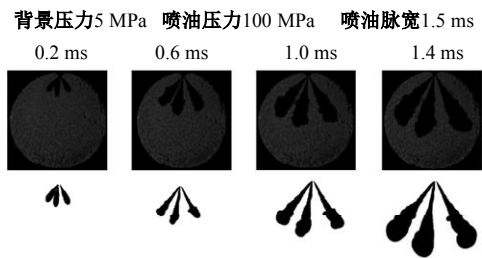


图 4 喷雾流形实验与模拟结果对比

Fig. 4 Comparison between experimental and simulated results of spray pattern

图6显示了所有3种网格尺寸的气缸压力比较。各网格尺寸均能准确反映燃烧过程的变化趋势,当网格尺寸为4.5 mm时,对气缸压力趋势的模拟足够准确,最大偏差为7.78%。考虑到计算时间和精度,进一步的模拟采用4.5 mm的网格尺寸。

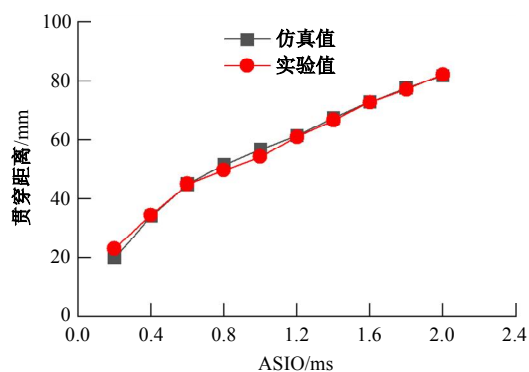


图 5 喷雾贯穿实验与模拟结果对比

Fig. 5 Comparison between experimental and simulated results of spray penetration

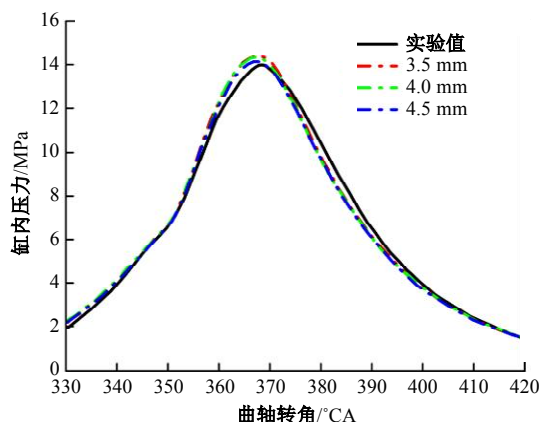


图 6 缸内压力对比

Fig. 6 Comparison of in-cylinder pressure

2 计算方案设计

2.1 燃烧室结构

对置活塞二冲程柴油的进、排气活塞镜像布置于气缸内,喷油器布置于燃烧室周向,燃烧室由进排气活塞顶面和气缸体组成。为便于分析混合气形成区域,进行喷孔直径设计,本文将上止点时的燃烧室空间分成a、b、c三部分区域。其中,a区域为进气活塞部分,b区域为燃烧室中央部分,c区域为排气活塞部分,如图7所示。

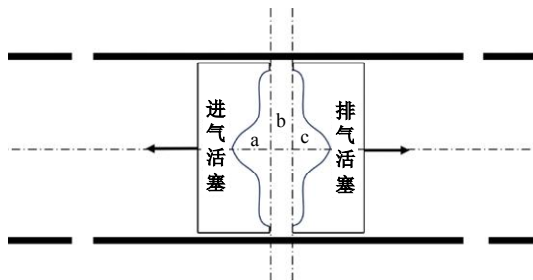


图 7 燃烧室区域划分示意图

Fig. 7 Combustion chamber area division diagram

2.2 燃烧室设计

原机采用了双层凹坑形状的燃烧室,且进排气活塞形状一致。为探究燃烧室形状对喷雾混合及燃烧过程的影响,通过对凹坑深度的调整保持压缩比不变,对原机进、排气活塞形状进行优化设计出燃烧方案A和燃烧室方案B,3种活塞模型示意图如图8所示。为增强涡流效果,实现缸内流动的定向组织,增加进、排气活塞与油束的接触面积,促进油气混合,在原机的基础上优化设计得到的浅坑形活塞即燃烧室方案A,如图9所示;为增强滚流效果,实现缸内流动的定向组织,探究非对称燃烧室结构下喷雾混合及燃烧效果,在原机的基础上将燃烧室方案B的进气活塞设计为平顶形活塞,排气活塞设计为深坑形活塞,以增强缸内滚流效果,得到深坑型活塞即燃烧方案B,如图10所示。对于燃烧室模型A、B及C,其三部分的体积比例见表4。

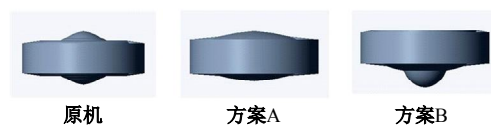


图 8 三种活塞模型示意图

Fig. 8 Schematic diagram of three piston models

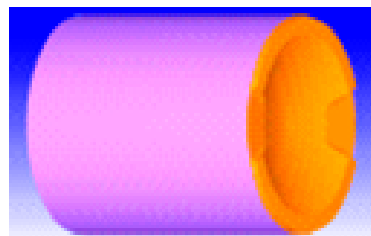
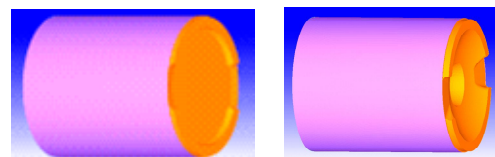


图 9 方案 A 进气(排气)活塞模型

Fig. 9 Intake (exhaust) piston model for scheme A



(a)进气活塞模型

(b)排气活塞模型

图 10 方案 B 进气及排气活塞模型

Fig. 10 Intake(exhaust) piston model for scheme B

表 4 各燃烧室体积比

Table 4 Volume ratio of combustion chamber

燃烧室方案	三部分体积比例(a:b:c)
原机	1.2:1:1.2
A	1.2:1:1.2
B	0.9:1:1.5

2.3 燃烧室与喷油方案匹配设计

对于喷油器布置形式,原机的喷油器布置形式 3 个喷孔的竖直面投影角 β 均为 0° ,本文的设计方案喷油器布置形式一致,均为对称的双喷油器,不同喷孔在水平面投影角 α 、竖直面投影角 β 均一致,如图 11 及表 5 所示。各方案通过改变喷孔直径来实现不同的油气分配,燃烧室几何空间与燃油的分配比 K 为:

$$K = P/Q \tag{1}$$

式中: P 为喷入油量占总油量的比例; Q 为燃烧室区域容积占总容积的比例。

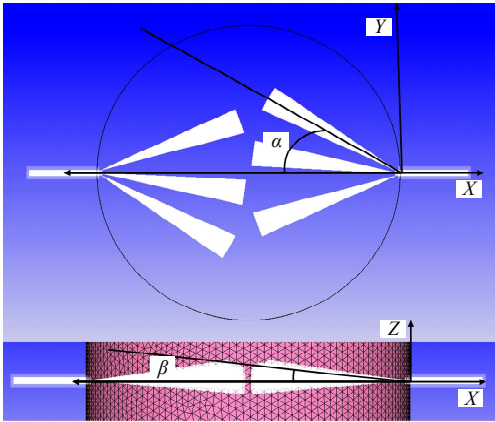


图 11 喷孔角度定义

Fig. 11 Nozzles angle define

表 5 喷油器喷孔角度

Table 5 Parameters of fuel injector nozzles

喷孔编号	水平面投影角/(°)	竖直面投影角/(°)
①	-20	5
②	8	0
③	30	-5

为探究 K 对喷雾混合及燃烧的影响规律,在保证喷油量不变的条件下,在原机的基础上通过不同的 K 设置了方案 1~3,在燃烧方案 A 的基础上设置了方案 4,在燃烧室方案 B 的基础上设置了方案 5,各燃烧室与喷油器匹配方案燃烧室三部分喷入油量比例见表 6。

表 6 各方案燃烧室三部分喷入油量比例

Table 6 Proportion of fuel injection into three sections of combustion chamber for each scheme

方案编号	各部分喷入油量比例(a:b:c)
1	1:1:1
2	1.2:1:1.2
3	1.32:1:1.32
4	1.2:1:1.2
5	0.9:1:1.5

3 仿真结果与分析

3.1 油气分配对燃烧的影响

空气利用率表明在当前曲轴角度下有多少可燃混合物可用,并且是指定气缸内燃料和空气混合速率的关键参数,这反过来又影响燃烧速率,是衡量不同方案油气混合和燃烧效果的重要指标。空气利用率 A_u 的定义为:某一曲轴转角下,燃烧室空间内过量空气系数 λ 在 $[0.5, 2]$ 之间的体积占当前缸内总体积的百分比^[15],即:

$$A_u = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{V_{total}}, 0.5 \leq \lambda \leq 2 \tag{2}$$

式中: V_i 为 $0.5 \leq \lambda \leq 2$ 的网格体积; V_{total} 为缸内气体总体积; λ 为过量空气系数。

图 12 显示了不同方案下的空气利用率。可以看出,方案 3 的整体空气利用率较低,意味着其混合速率较慢,气缸内瞬时可燃混合物较少,燃烧速率较低,这也可以从图 13 中得到验证。方案 1 和方案 2 的整体空气利用率较好。同时,方案 2 在综合方面优于方案 1,方案 2 刚开始具有较高的空气利用率,随着燃烧的进行,空气利用率出现了一个较为缓慢的增长阶段,后与方案 1 空气利用率相差不大。综合来看,方案 2 即 K 为理论值时能取得较好的油气混合效果,能够提升发动机的燃烧性能,在方案 1 即 a、c 两区域 K 偏稀时要比 K 偏浓时有更好的喷雾混合和燃烧效果。

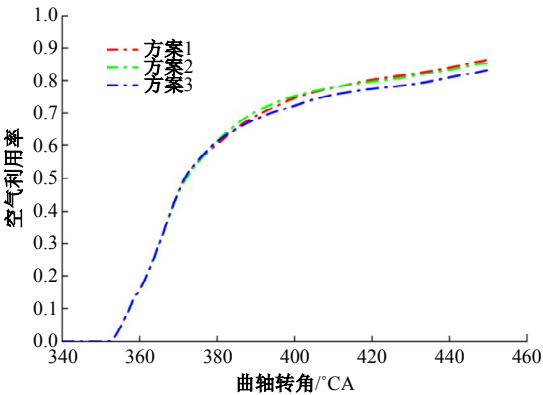


图 12 空气利用率曲线对比

Fig. 12 Comparison of air utilization rate curves

图 13 和图 14 显示了不同方案下的燃油当量比分布云图和缸温分布云图。图 13 为气缸纵向截面图,从图 13 可以看出,方案 2 和方案 3 由于增大了 a、c 两区域的喷油量,使得喷孔直径增大,获得了更大的贯穿距,有利于气缸纵向截面的油气混合,有利于燃烧。从图 14 可以看出,随着曲轴

转角的增加,在气缸横向截面上火焰随着缸内涡流影响逐渐由气缸边缘向气缸中心扩散,方案 1 和方案 2 的火焰扩散速度要明显快于方案 3,能够获得更好的燃烧性能。综上分析可知,在 a、c 两区域 K 偏稀和 K 为理论值时均能取得较好的燃烧效果,综合来看, K 为理论值时燃烧效果最好。

图 15 和图 16 显示了缸内压力及放热率随反应进程的变化曲线。可以看出,随着 K 逐渐变浓,

缸压峰值和放热率逐渐降低,这意味着燃烧主要集中在燃烧室 b 区域,燃烧室 b 区域对缸内压力及放热率影响较大,在燃烧室 b 区域适当增加喷油量能起到增大缸压,有加快燃烧速度的效果。虽然方案 2 在膨胀冲程结束时的气缸压力比方案 1 低,但由于后期空气利用率较高,在 20 °CA ATDC 到 60 °CA ATDC 内保持较高的压力,使得指示平均有效压力(IMEP)反而有所升高。这凸显

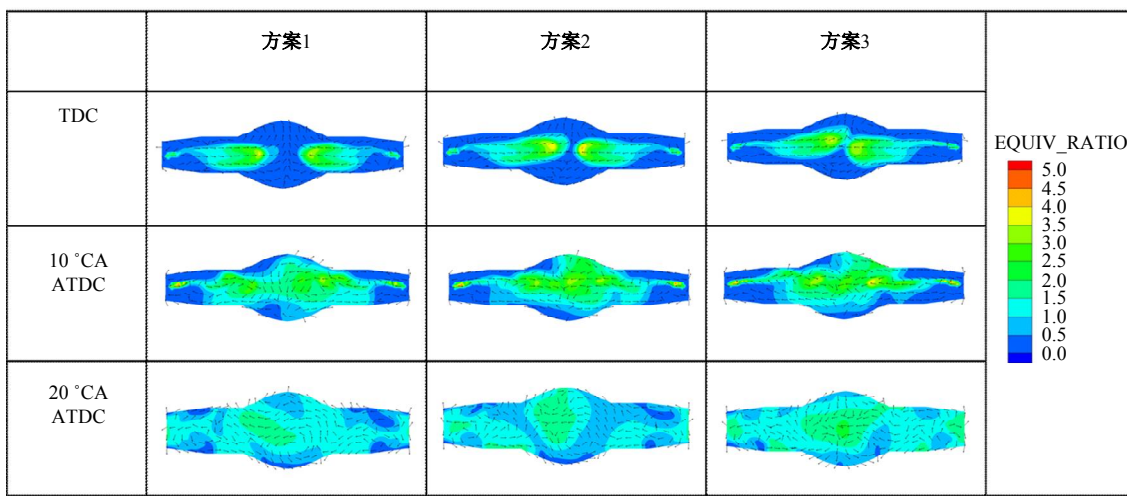


图 13 燃油当量比分布云图对比

Fig. 13 Comparison of fuel equivalence ratio distribution contour maps

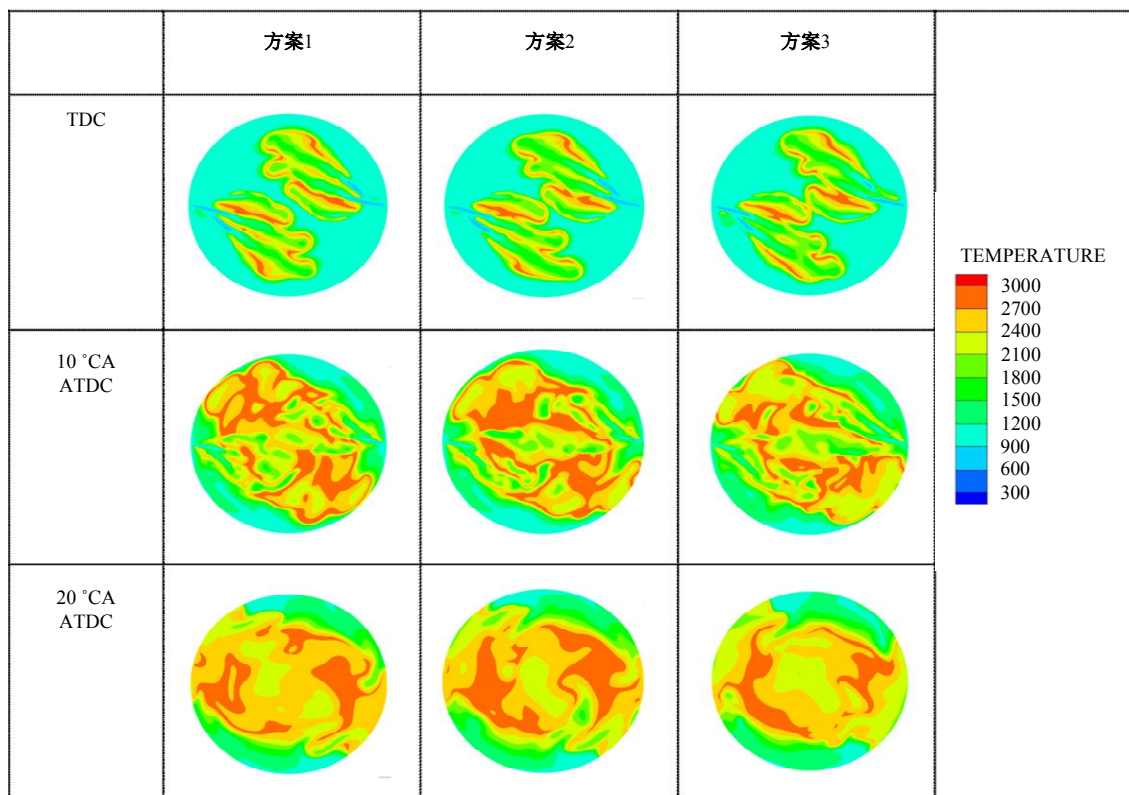


图 14 缸温分布云图对比

Fig. 14 Comparison of cylinder temperature distribution contour maps

了燃烧后期可燃混合气形成速率对发动机负荷的重要影响,这是优化喷油器设计过程中应该考虑的一个关键因素。在本研究中,方案1和方案2表现出较好的燃烧性能,IMEP 较高,如表 7 所示。

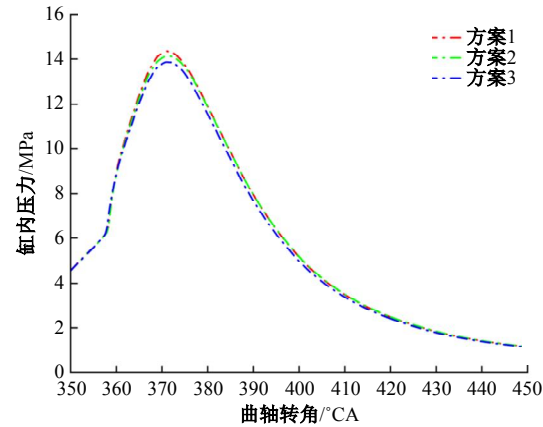


图 15 缸内压力曲线对比

Fig. 15 Comparison of in-cylinder pressure curves

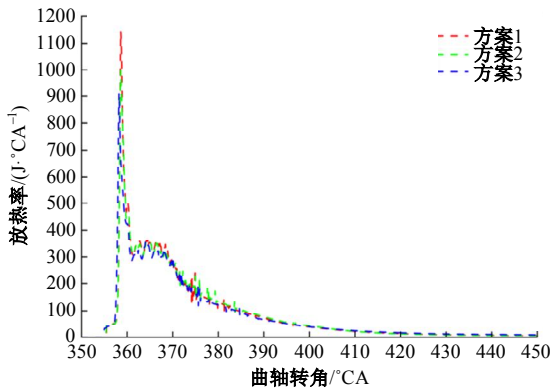


图 16 放热率曲线对比

Fig. 16 Comparison of heat release rate curves

表 7 IMEP 对比

Table 7 Comparison of IMEP	
方案	数值/MPa
1	1.449
2	1.453
3	1.389

3.2 燃烧室形状对燃烧的影响

不同的燃烧室结构会对缸内湍动能产生重要影响,缸内湍动能是反映缸内燃油混合气形成的重要指标。图 17 给出的是缸内湍动能特性曲线,从图中可以看出,3 种燃烧室方案在 K 均为理论值的条件下,湍动能随曲轴转角表现出先减小、再增大、最后减小的趋势。其中,在曲轴转角为 10°CA ATDC 附近均达到最大值。在缸内气体压缩前期,三者的变化规律基本相同,并在上止点处湍流动能达到最大值,方案 2 的湍流动能明

显比其他两种方案的大,能更好地组织缸内湍流;而在压缩后期,随着活塞由内止点到下止点移动,涡流的湍流动能呈现下降趋势。

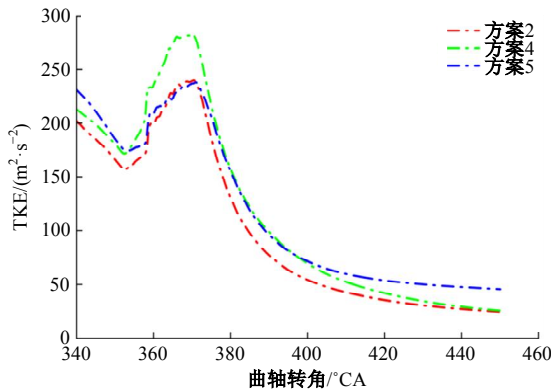


图 17 TKE 特性曲线对比

Fig. 17 Comparison of TKE characteristic curves

图 18 显示了不同燃烧室方案下的空气利用率。可以看出,方案 4 的整体空气利用率在整个燃烧过程都具有明显优势,意味着其混合速率较快,气缸内瞬时可燃混合物较多,燃烧速率较快,这也可以从图 19 中得到验证。综合来看,在 K 相同的条件下,方案 4 能取得更好的油气混合效果,能够提升发动机的燃烧性能,浅坑形活塞要比深坑形活塞有更好的喷雾混合和燃烧效果。

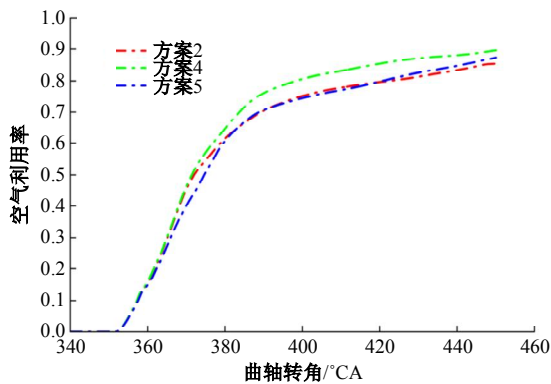
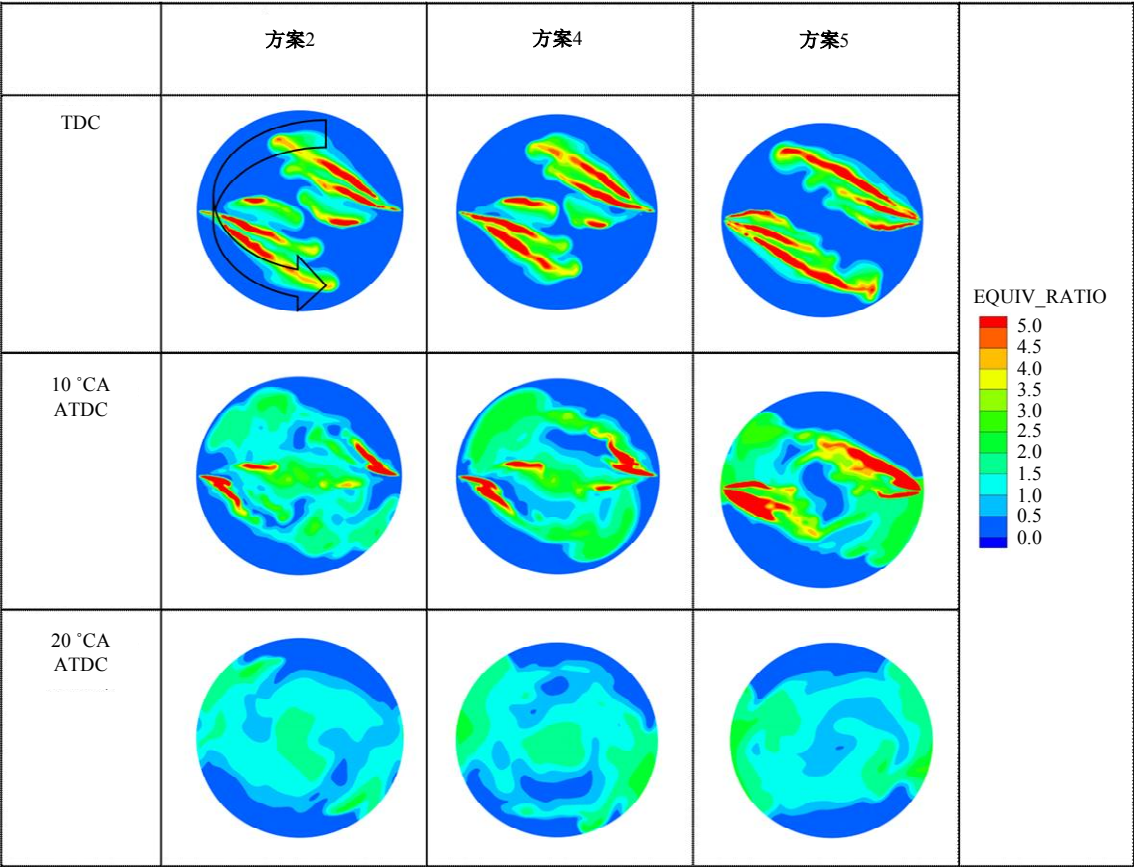


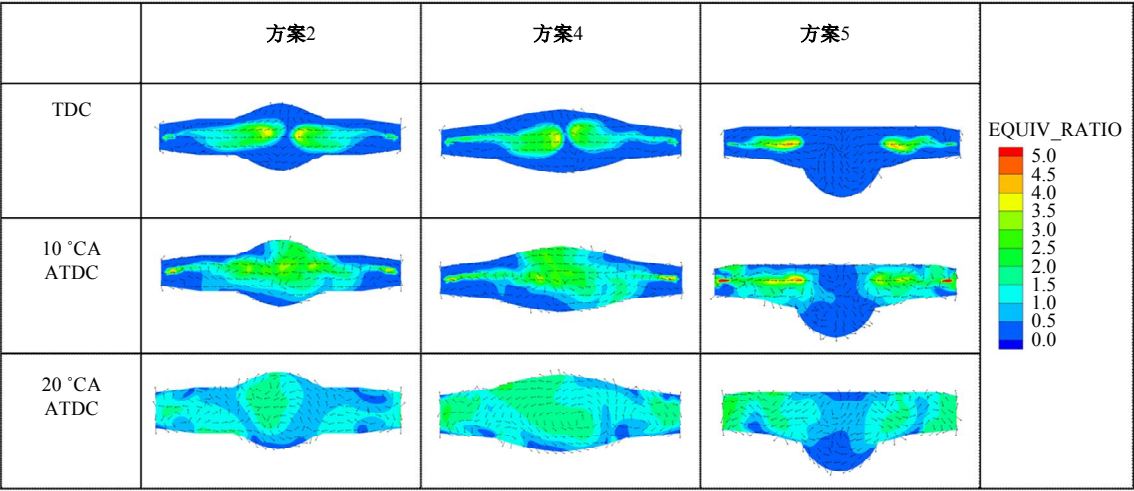
图 18 空气利用率曲线对比

Fig. 18 Comparison of air utilization rate curves

不同燃烧室方案下的燃油当量比分布和缸内温度分布云图分别由图 19 和图 20 给出。从图 19 (a)可以看出,方案 4 相较于方案 2 增大了涡流效果,使得喷雾的油气混合面积增大,增加了对气缸边缘部分空气的利用,有利于喷雾混合,提高燃烧性能;方案 5 相较于方案 2 由于使用了不对称的燃烧室结构设计,虽然在一定程度上增大了滚流效果,但是无论从气缸横向截面还是气缸纵向截面都不利于进行油气混合,不利于燃烧性能的提高。



(a)气缸横截面图



(b)气缸纵向截面图

图 19 燃油当量比分布云图对比

Fig. 19 Comparison of fuel equivalence ratio distribution contour maps

升,在气缸纵向截面上尤其明显。从图 20 可以看出,方案 5 增大发动机的火焰扩散区域,火焰扩散更加均匀,且没有在气缸壁面附近出现集中的热负荷,有利于发动机燃烧性能的提升。在本研究中,方案 4 和方案 5 表现出较好的燃烧性能,IMEP 较高,如表 8 所示。

表 8 IMEP 对比

Table 8 Comparison of IMEP

方案	数值/MPa
2	1.453
4	1.468
5	1.414

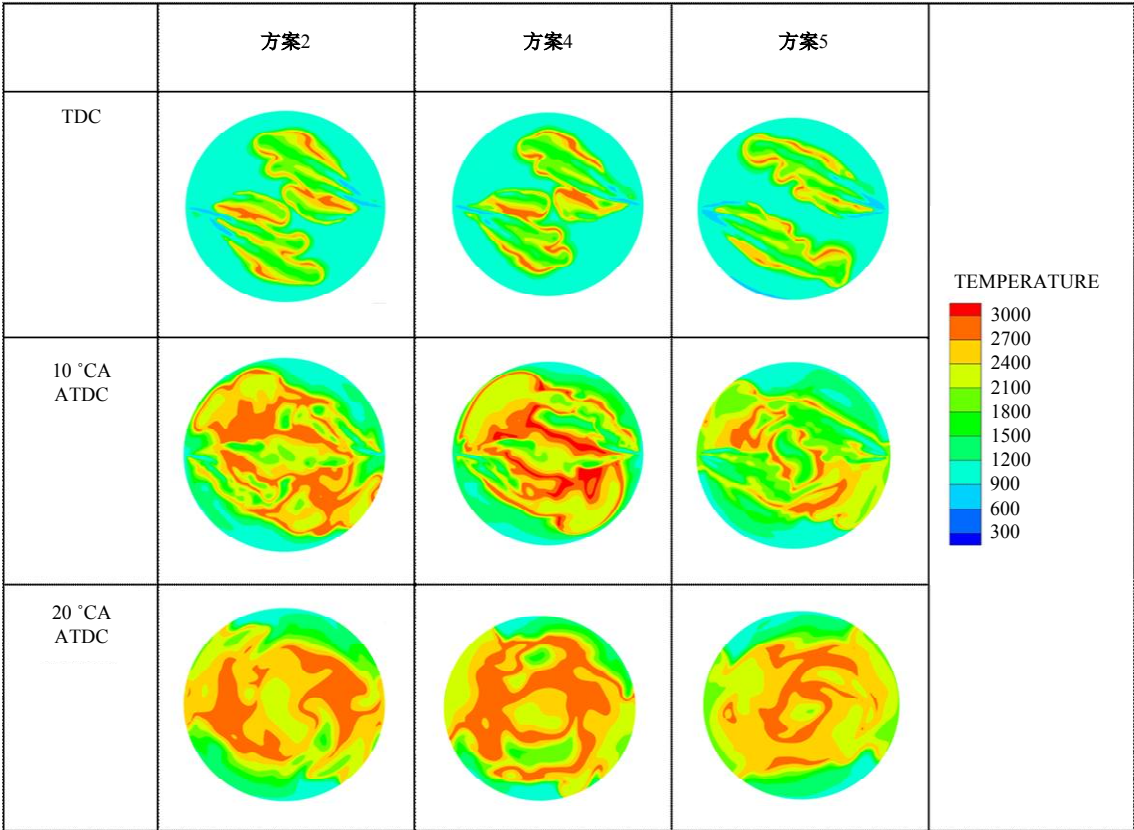


图 20 缸温分布云图对比

Fig. 20 Comparison of cylinder temperature distribution contour maps

4 结 论

(1)对置活塞二冲程发动机在燃烧室形状一致的情况下,由于燃烧室内强涡流的影响,燃烧室b区域油室分配对缸内压力及放热率影响较大,对于燃烧室a区域和c区域,K偏稀时要比K偏浓时有更好的喷雾混合和燃烧效果,K为理论值时喷雾混合及燃烧效果最好。

(2)对于以涡流为主的对置活塞二冲程发动机,燃烧室形状优化以增大涡流为目标能起到较好的喷雾混合及燃烧效果。浅坑形(A)燃烧室相较于原机增大了涡流效果,有利于喷雾混合,增大了发动机的火焰扩散区域,提高了燃烧性能。

参考文献:

[1] 章振宇. 对置活塞二冲程柴油机工作过程耦合仿真与试验研究[D]. 北京: 北京理工大学机械与车辆学院, 2015.

Zhang Zhen-yu. Coupling simulation and experimental study on working process of opposite-piston two-stroke diesel engine[D]. Beijing: School of Machinery and Vehicle, Beijing Institute of Technology, 2015.

[2] Pei T, Chen F, Qiu S, et al. Research on the intake port of a uniflow scavenging GDI opposed-piston two-stroke engine[J]. Energies, 2022, 15(6): No. 2148.

[3] O'Donnell P C, Gandolfo J, Gainey B, et al. Effects of port angle on scavenging of an opposed piston two-stroke engine[C]//SAE Paper, 2022-01-0590.

[4] Wang W, Liang Y, Zuo Z, et al. Effects of multi-type intake structures on combustion performance of different opposed-piston engines[C]//Applied Thermal Engineering, 2023, 235: No. 121438.

[5] Wang W, Liang Y, Zuo Z, et al. Study on the influence principle and application law of intake wall thickness on uniflow scavenging opposed-piston engine[J]. Energy, 2024, 291: No. 130271.

[6] Zhou L, Li H, Chen Z, et al. Numerical simulation and optimization for combustion of an opposed piston two-stroke engine for unmanned aerial vehicle(UAV) [C]//SAE Paper, 2020-01-0782.

[7] Shirvani S, Shirvani S, Shamekhi A H, et al. Effects of injection parameters and injection strategy on emissions and performance of a two-stroke opposed-piston diesel engine[C]//SAE Paper, 2020-01-5064.

- [8] Wang W, Liang Y, Zuo Z, et al. Effect of swirl-spray impact on the comprehensive performance of uniflow-scavenging opposed-piston engines[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 239: No. 122176.
- [9] 刘彩明, 续彦芳, 许俊峰, 等. 对置活塞二冲程柴油机喷油角度对油气混合的影响[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(2): 227-230.
Liu Cai-ming, Xu Yan-fang, Xu Jun-feng, et al. Effect of injection angle of opposed-piston two-stroke diesel engine on oil and gas mixing[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(2): 227-230.
- [10] 刘宇航, 赵振峰, 张付军, 等. 对置活塞二冲程柴油机双喷油器碰撞喷雾试验研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(10): 1881-1890.
Liu Yu-hang, Zhao Zhen-feng, Zhang Fu-jun, et al. Experimental study on collision spray of dual injectors of opposing-piston two-stroke diesel engine[J]. Acta Ordnance Engineering, 2017, 38(10): 1881-1890.
- [11] 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 Zhen-feng, Wang Bin, et al. Effect of roll-flow combustor on working process of opposed-piston two-stroke gasoline engine[J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technology, 2015, 44(3): 17-22.
- [12] Ma F, Zhao C, Zhang F, et al. Effects of scavenging system configuration on in-cylinder air flow organization of an opposed-piston two-stroke engine[J]. Energies, 2015, 8(6): 5866-5884.
- [13] 张子英, 杨贵春, 董雪飞. 对置活塞二冲程柴油机燃油系统设计研究[J]. 车用发动机, 2023(4): 80-85.
Zhang Zi-ying, Yang Gui-chun, Dong Xue-fei. Research on fuel system design of opposed piston two-stroke diesel engine[J]. Automotive Engine, 2023(4): 80-85.
- [14] 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: 湖南大学机械与运载工程学院, 2017.
Yang Feng. Numerical simulation of side-combination spray combustion process of dual opposed diesel Engine[D]. Changsha: College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, 2017.
- [15] 许汉君, 宋金瓯, 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.
Xu Han-jun, Song Jin-ou, Yao Chun-de, et al. Simulation study on mixture formation and combustion of opposable two-stroke diesel engine with in-cylinder flow pattern[J]. Transactions of CSICE, 2009, 27(5): 395-400.