

# 喷油规律曲线对OPOC柴油机的性能影响分析

张鑫楠

天津市特种设备监督检验技术研究院, 天津

收稿日期: 2023年5月22日; 录用日期: 2023年12月31日; 发布日期: 2024年1月5日

## 摘要

针对OPOC柴油机与传统柴油机结构、喷油方式的差异, 研究分析了四种不同的喷油规律曲线对OPOC柴油机性能的影响情况, 寻找燃烧、油耗和排放最优时的喷油规律。在AVL-FIRE中建立了燃烧室的动网格模型, 模拟得到了四种喷油规律曲线下的发动机性能曲线。结果表明: 三角形曲线的爆发压力峰值最大, 升压最快; 矩形曲线的初期混合迅速, 预混燃烧放热量大; 梯形曲线的后期混合最优, 扩散燃烧阶段放热量大。

## 关键词

喷油规律, OPOC柴油机, 燃烧, 排放

# Influence of Injection Curve on OPOC Diesel Engine Performance

Xinnan Zhang

Tianjin Special Equipment Inspection Institute, Tianjin

Received: May 22<sup>nd</sup>, 2023; accepted: Dec. 31<sup>st</sup>, 2023; published: Jan. 5<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Aiming at the difference in structure and fuel injection between OPOC and traditional diesel engine, the influence of four different injection regular curves on the performance of OPOC diesel engine was studied to research the fuel injection rule when combustion, fuel consumption and emission are optimal. The dynamic grid model of the combustion chamber was established in AVL-FIRE, and the engine performance curves under four injection regular curves were simulated. The results show that the peak pressure of the triangular curve is the largest and the boost is the fastest. The initial mixing of the rectangular curve is rapid and the premixed combustion is large. The late mixing of the trapezoidal curve is optimal, and the heat release in the diffusion combustion stage is large.

## Keywords

Injection Rate, OPOC Diesel Engine, Combustion, Emission

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来,我国工业发展迅猛带动汽车行业的迅速发展。目前我国汽车产量和销量均居世界第一,但是汽车行业的迅猛发展所带来的能源问题和环境问题日益紧迫,在这种全球大环境下,OPOC柴油机在结构、运动学、热力学、循环以及经济和排放等各个方面的优势日益明显,使其在发动机行业愈受瞩目。OPOC柴油机只有两个气缸,以水平对置分布于曲轴两侧,每一个气缸拥有两个运动活塞,以连杆为纽带做水平往复运动,完成缸内空气的压缩和扩散[1]。在结构上消除了配气机构,平衡性极强,减轻了振动、噪音和整机重量;喷油、混合方式独特[2]。与传统发动机一样,喷油规律亦是影响OPOC柴油机性能的重要因素,喷油参数改变会影响缸内燃烧过程[3][4][5],研究喷油参数对OPOC柴油机燃烧和排放的影响具有重要意义[6]。本文通过仿真分析,得到了四种喷油规律曲线对OPOC柴油机燃烧和排放特性的影响规律。

## 2. 模型建立和喷油规律

### 2.1. 研究对象和模型的建立

OPOC柴油机结构特殊,燃烧室形状与传统发动机存在极大的差异,由气缸壁和内外活塞顶部凹坑共同组成;其中进气活塞(外活塞)顶部为圆形浅坑,以便提高扫气效率,如图1(a);排气活塞(内活塞)为椭圆深坑,保证喷油嘴突出且距活塞顶部燃烧室边缘的切除部分最近,避免油束接触壁面,废气的顺利排出以及活塞深度最大化,如图1(b)。因对置特性,只对左侧气缸进行仿真分析。

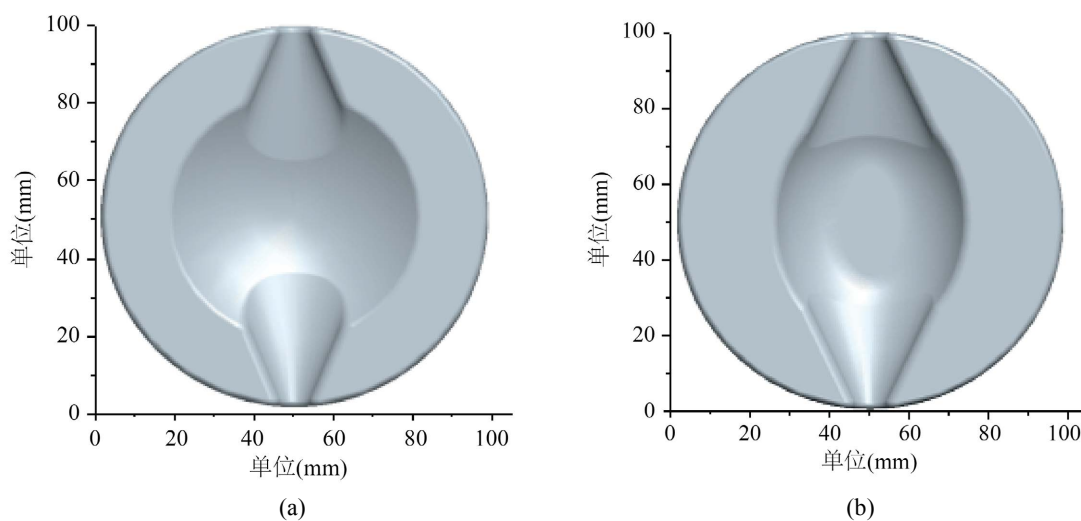
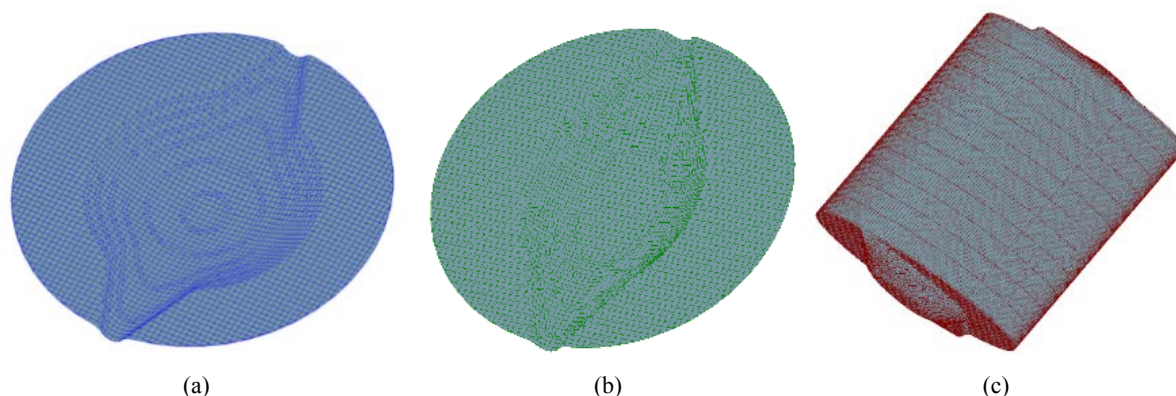


Figure 1. Intake and exhaust piston model. (a) Intake piston top surface; (b) exhaust piston top surface  
图 1. 进排气活塞模型。(a) 进气活塞顶部; (b) 排气活塞顶部

在 Pro/E 中绘制燃烧室模型，然后将表面网格文件导入到 FIRE 中运算。为了提高运算速度，简化模型，不考虑排气问题，只计算从进气口关闭开始到排气口打开结束。活塞运动过程中，顶部气缸容积是不断变化的，网格数和网格大小呈规律性变化，但燃烧室内部网格数和大小不会改变。180°CA 时，利用 FIRE 生成六面体体网格，通过 Refine 工具对不同曲轴转角的体网格进一步划分，提高精度。360°CA 时的燃烧室和气缸模型如图 2 所示。



**Figure 2.** Intake and exhaust piston and Air cylinder finite element model. (a) Intake piston top surface; (b) exhaust piston-top surface; (c) air cylinder

**图 2.** 进排气活塞顶面及气缸有限元模型。(a) 进气端活塞顶面；(b) 排气端活塞顶面；(c) 气缸部分

## 2.2. 数学模型的选择和边界条件的设定

为了仿真结果可以更好的接近真实情况，对比分析了多种数学模型，结合理论和实际要求，对计算数学模型进行了最优选择，见表 1。因燃烧过程中，缸内气流运动十分复杂，为保证计算的精度和稳定性，选择 k-ε 模型；因燃烧室呈扁状，多喷孔喷射，选择 WAVE 模型；因忽略壁面油膜对液滴质量和运动影响，选择 Walljet1 模型；因缸内水平放置了两个喷油器，燃油喷入后会出现多处燃油混合区，着火点多，选择 Diesel\_MIL 模型；因缸内燃烧属于湍流燃烧，选择涡团破碎即 EBU 模型。

**Table 1.** Setup of model

**表 1.** 模型的设置

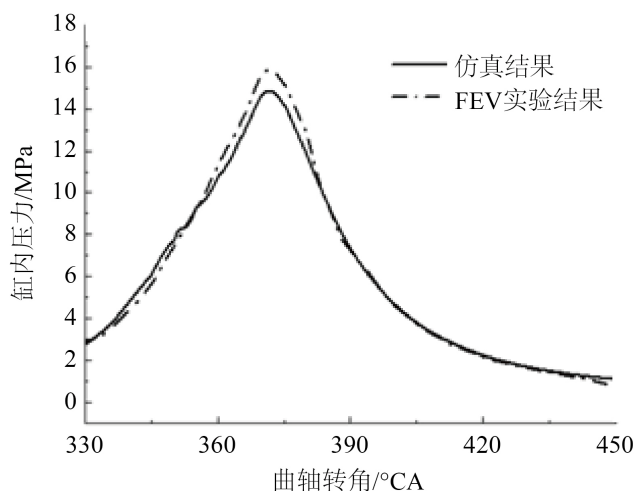
项目	模型
湍流	k-ε
液滴破碎	WAVE
液滴撞壁	Walljet1
液滴蒸发雾化	Dukowicz
液滴湍流扩散	ENABLE
着火模型	Diesel_MIL
湍流燃烧	EBU

同时依据实验测得的数据，对发动机的结构和工作的初始条件进行了设定，见表 2。

**Table 2.** Main structure and initial parameters**表 2.** 主要结构和初始参数

项目	参数
内活塞行程	90
外活塞行程	80
转速/rpm	2500
温度/K	343
压力/MPa	0.28
喷孔直径/mm	0.22
压比	15.17

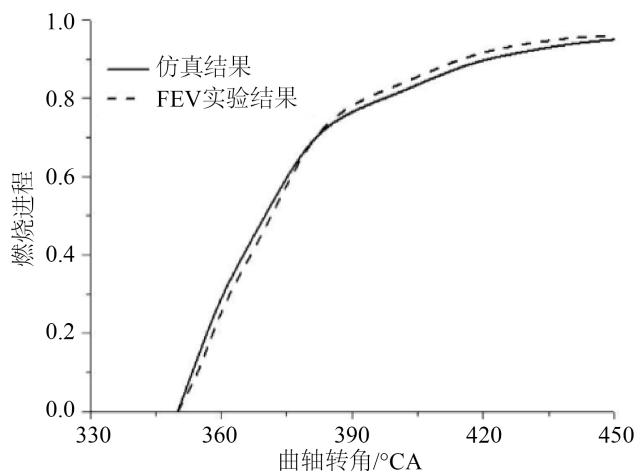
为了保证仿真计算的准确性,必须进行模型的校验,以仿真得到的缸内压力值和 FEV 试验值的对比曲线为参考,如图 3 所示。由图可知,两组数据在压缩和膨胀阶段吻合良好;370°CA~372°CA 时误差变化较大,此时缸内最大仿真压力为 14.86 MPa,最大实验压力值为 15.74 MPa,仿真压力与 FEV 试验值误差不超 6%。经验证,该模型可以为进一步的仿真分析提供可靠的基础。

**Figure 3.** Comparison of simulated pressure and FEV test value**图 3.** 仿真压力与 FEV 试验值的对比

为了进一步说明仿真分析的可靠性,以燃烧进程的仿真和 FEV 试验值的对比曲线为参考,如图 4 所示。由图可知,仿真状态下的燃烧进程在曲轴转角小于 380°CA 时,略高于 FEV 实验下的结果;当曲轴转角大于 380°CA,仿真状态下的燃烧进程略低于 FEV 实验下的结果。但总体来看,仿真结果和 FEV 试验状态下的燃烧进程相当接近,模型是较为可靠的。

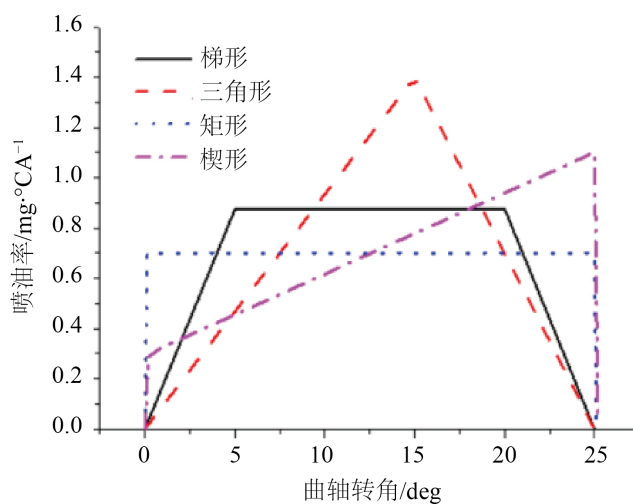
### 2.3. 喷油规律曲线

常见的柴油机供油系统有泵-管-嘴系统(直列泵、转子分配及单体泵),泵-喷嘴系统及共轨式系统;常见的喷油规律形状有三角形、梯形(直列泵)、楔形(泵喷嘴,单体泵)和矩形(共轨),如图 5 所示。为了仿真结果具有针对性,保持喷油正时,喷油持续期等条件不变。



**Figure 4.** Comparison of simulation of combustion process and FEV test value

**图 4.** 燃烧进程的仿真与 FEV 试验对比



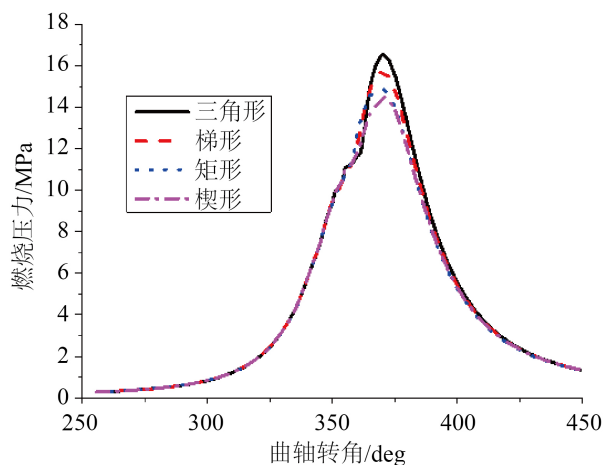
**Figure 5.** Four kinds of fuel injection curve rule

**图 5.** 四种喷油规律曲线

### 3. 燃烧过程的仿真结果与分析

#### 3.1. 缸内燃烧压力

四种喷油曲线对缸内燃烧压力的影响如图 6 所示。在  $358^{\circ}\text{CA}$  之前，喷油规律曲线对缸内燃烧压力的变化影响较小，四条曲线差异微弱。 $358^{\circ}\text{CA}$  之后，矩形喷油规律曲线下的缸压超过另三种喷油曲线迅速上升；而三角形喷油规律曲线的缸内燃烧压力陡然升高时刻最迟，为  $362^{\circ}\text{CA}$ ，之后缸内燃烧压力升高最快，直至最大压力；梯形和楔形处于两者之间。这是由于矩形喷油规律曲线在开始时刻喷油量大，使得缸内燃烧压力陡然升高最早，之后均匀喷油，从而缸内燃烧压力升高趋势变缓；而三角形喷油规律曲线由于开始喷油量较少，缸内燃烧压力陡然升高最晚，但之后其喷油量持续增加，所以缸内燃烧压力升高趋势变陡。三角形喷油规律曲线最高燃烧压力发生在  $370.1^{\circ}\text{CA}$ ，是  $16.5\text{ MPa}$ ；三角形曲线于  $370.1^{\circ}\text{CA}$ ，缸内压力达到峰值  $16.5\text{ MPa}$ ，高于其余三者；楔形曲线于  $370.3^{\circ}\text{CA}$ ，缸内压力达到峰值  $14.5\text{ MPa}$ 。



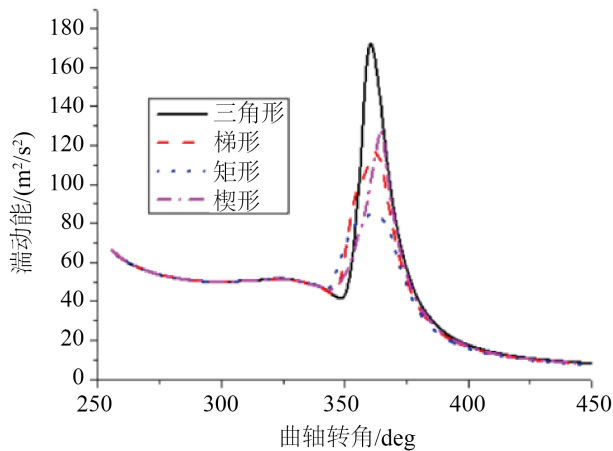
**Figure 6.** Influence of four fuel injection laws on combustion pressure in cylinder

**图 6.** 四种喷油规律对缸内燃烧压力的影响

由于喷油规律曲线的改变会影响最高缸压以及最高缸压出现时刻所对应的曲轴转角；但是缸压随曲轴转角的变化趋势相同；三角形喷油规律曲线最高缸压高于另外三种喷油规律，但由于其喷油量持续增加，可能会出现燃烧进行太快进而造成的缸震现象发生。

### 3.2. 缸内湍动能

湍动能的变化可以反应缸内油气的混合程度。图 7 是四种喷油曲线对湍动能的影响。可以看出，三角形曲线的湍动能升高最快，峰值最大；初始喷油量小，湍动能变化最晚，但随着喷油量增加，燃烧剧烈，缸内湍动能变化迅猛。

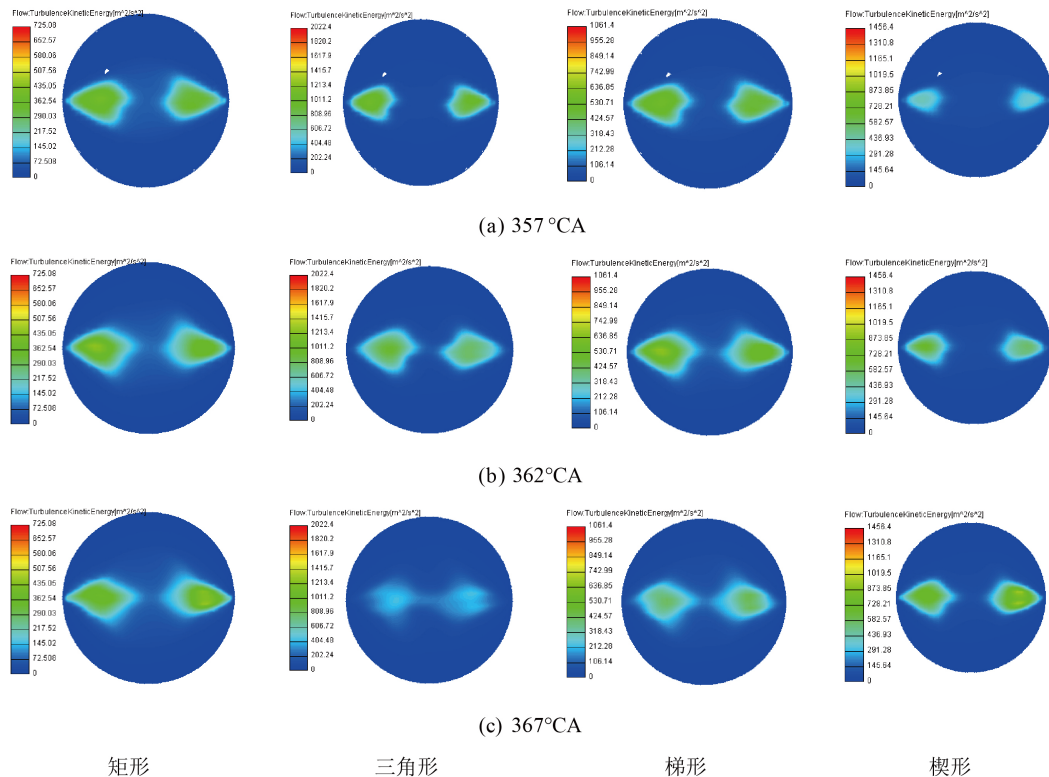


**Figure 7.** Influence of four kinds of injection laws on turbulent kinetic energy in cylinder

**图 7.** 四种喷油规律对缸内湍动能的影响

图 8 是四种喷油曲线下缸内湍动能云图。由图 8 可以看出，357°CA 时矩形曲线的混合速率明显高于其余曲线。随着曲轴转角变化，梯形和三角形曲线的混合速率逐步增高，其中梯形曲线的混合速率有超过矩形曲线的迹象。楔形曲线的混合速率与其余相比较慢。但是矩形曲线的喷油速率相对均匀，燃烧末

期当其余曲线的湍动能逐渐减弱时，湍动能依然能够较好保持。



**Figure 8.** Cloud map of turbulent kinetic energy in the cylinder under four fuel injection rules  
**图 8.** 四种喷油规律下缸内湍动能云图

### 3.3. 放热率和累计放热量

图 9 是四种喷油规律下放热率的变化情况，三角形和楔形曲线滞燃期长短相似，较梯形和矩形长，矩形曲线滞燃期最短。喷射初期，矩形曲线单位时间内喷油量大，喷射率高，滞燃期内缸内燃料多且可燃分子活跃，油气混合速率快，单位时间放热量高于其余曲线，瞬时放热率值为  $140 \text{ J}^\circ\text{CA}$ 。

$360^\circ\text{CA}$  后，三角形曲线单位时间喷油量超过矩形曲线且持续增加，参与扩散燃烧期的燃油分子量多，更多燃油分子参与燃烧增大了放热量，瞬时放热率达  $250 \text{ J}^\circ\text{CA}$ 。梯形曲线由于初始时刻没有矩形曲线喷油率大，滞燃期比矩形大，喷油率又小于三角形曲线，所以瞬时放热率小于三角形曲线，处于两者之间。综上所述，梯形曲线下扩散燃烧阶段放热率占 70% 左右，与其余三种曲线相比最高；而矩形曲线在预混燃烧阶段放热率所占比例比其余曲线高出 10% 以上。

图 10 是四种曲线下累积放热量的变化情况，反应了缸内燃烧等的剧烈程度。从燃烧开始到内容积止点，矩形曲线放热量最大，高于梯形和三角形曲线；楔形曲线放热量最少，其中矩形曲线最高是楔形的 37%。

由于矩形曲线的初始喷油量大，燃烧室单位面积燃油多，燃烧迅速从而放热量最大。而随着曲轴转角的变化，三角形和梯形曲线的喷油率超过矩形；燃烧进行至扩散燃烧期，瞬时放热率的增大造成累积放热量增幅较大，最终梯形和三角形曲线的累积放热量高于矩形曲线；楔形曲线由于燃烧开始放热量小而后放热率增幅也不大，使得累积放热量一直小于矩形曲线， $460^\circ\text{CA}$  之后与矩形曲线放热量几乎相当；梯形曲线的累积放热量比楔形曲线高出 3%。

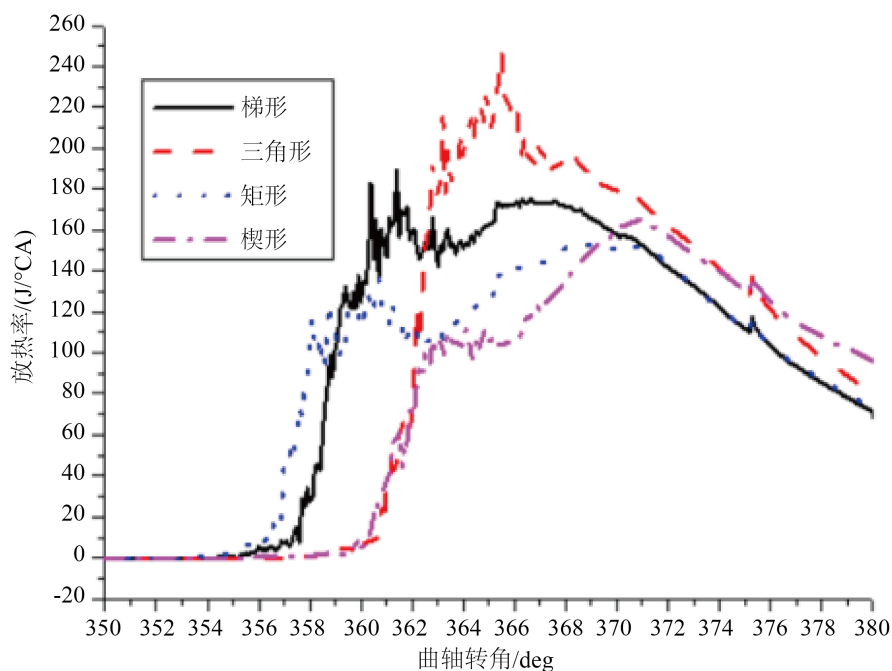


Figure 9. Variation of heat release rate under four fuel injection rules

图 9. 四种喷油规律下放热率变化

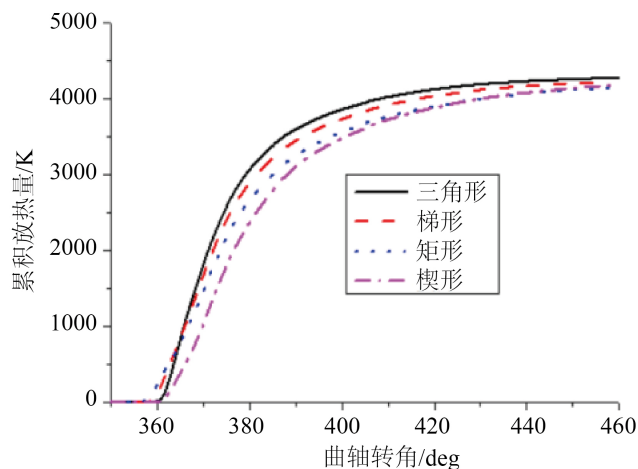


Figure 10. Cumulative heat release under four fuel injection rules

图 10. 四种喷油规律下累计放热量

#### 4. 总结

- 1) 三角形曲线的缸内爆发压力峰值最高，压力升高迅速，易发生缸震，工作平稳性较差。
- 2) 四种喷油曲线下，初期矩形曲线的缸内混合速率最快，后期梯形规律曲线的油气混合效果更好。
- 3) 矩形曲线的预混燃烧放热量最大，梯形曲线的扩散燃烧阶段放热量最大，但最终缸内平均温度趋于相同。

#### 参考文献

- [1] Zhang, L., Su, T., Feng, Y., *et al.* (2019) Numerical Investigation of the Effects of Rate-Shaped Main Injection on



---

Combustion and Emission in an OPOC Two-Stroke Diesel Engine. *Journal of Beijing Institute of Technology*, **28**, 8.

- [2] 郭慧乐. EGR 冷却温度和多段喷射对 OPOC 发动机燃烧与排放的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2019.
- [3] 刘若凡, 续彦芳, 许俊峰, 等. 不同工况下对 OPOC 柴油机全周期循环的仿真分析[J]. 内燃机, 2016(6): 27-31.
- [4] 杨海涛. OPOC 尾气余热再利用及控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2018.
- [5] 张磊, 苏铁熊, 冯云鹏, 等. 双对置二冲程柴油机高原环境燃烧过程的模拟研究[J]. 车用发动机, 2019(1): 58-63+71.
- [6] 郭勇. 双对置二冲程柴油机工作循环研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2016.