

# 分层喷孔对船舶柴油机燃烧排放的影响研究

蒋志远, 刘龙\*, 王洋

(哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001)

## Study on the effect of multi-row nozzles on combustion emissions of Marine diesel engine

JIANG Zhiyuan, LIU Long\*, WANG Yang

(College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, 150001, Harbin)

**Abstract:** The model of Marine diesel engine is established with multi-row nozzles as the research object. The combustion characteristics and pollutant generation mechanism of traditional nozzles and multi-row nozzles were analyzed through simulation. The results show that the propagation speed of the upper row flame is faster than that of the lower row, which can strengthen the premixed combustion, improve the utilization of the combustion chamber volume of the spray flame, reduce the flame backflow, and reduce the flame wall collision. Aiming at the characteristics that multi-row nozzles layout can effectively reduce fuel-rich accumulation and make SOOT later oxidation more intense, we designed multi-row nozzles cases with different nozzle diameter combinations, which can reduce the combustion duration and increase the constant volume. Based on the comprehensive consideration of combustion and emission of the case, the optimal case with multi-row nozzles can increase the indicated thermal efficiency by 1.77%, reduce SOOT emission by 43.06%, reduce unburned HC by 58.93%, and not increase NOx emission.

**摘要:**以分层喷孔为研究对象,建立了船舶柴油机模型,通过仿真计算,分析了传统多喷孔与分层喷孔燃烧特性和排放污染物生成的机理。结果表明,分层喷孔上排火焰传播速度相比于下排更快,可以加强预混燃烧,提高喷雾火焰对燃烧室容积的利用,改善火焰回流,并减少火焰撞壁。针对分层喷孔布置能有效减少富油聚集,使SOOT后期的氧化更剧烈的特性,设计不同孔径配比分层喷孔方案,降低了燃烧持续期,提高了等容度。综合考虑方案的燃烧、排放情况,分层喷孔最优方案在传统多喷孔方案的基础上指示热效率提升1.77%,SOOT排放降低43.06%,未燃HC降低58.93%,且不提高NOx排放。

**关键词:**船舶柴油机; 分层喷孔; 指示热效率; 排放

**Key words:** marine diesel engine ; multi-row nozzles ; indicated thermal efficiency ; emission

中图分类号: TK422

文献标识码: A

## 0 概述

在实际的生产生活中,内燃机燃料在燃烧前已经在高温下部分雾化或完全雾化,所以如何使燃油在燃烧前形成均匀或相对均匀的混合气就成了内

燃需要解决的问题之一<sup>[1-2]</sup>。燃油经喷油器的喷嘴进入气缸形成可燃混合气,喷油器的喷油参数和几何参数对混合气形成起到十分重要的作用。喷雾液滴尺寸随喷油器的喷孔直径减小而减小,喷油压力增

收稿日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金“叶企孙”科学基金; 基金项目(编号: U2241262)

作者简介: 蒋志远 (1998-), 男, 硕士研究生; 主要研究方向为内燃机仿真研究, E-mail: 2256911672@hrbeu.edu.cn;

刘龙\* (1980-), 男, 博士, 教授; 主要研究方向为内燃机燃烧技术, E-mail: liulong@hrbeu.edu.cn。

大可促进液滴雾化,综合两种策略有利于增大燃油和空气的接触面积,与空气充分混合。然而,贯穿距随着喷孔直径的减小而减小,并且喷油压力过大时燃料会和气缸壁发生碰撞,降低燃油经济性并导致排放增加,因此降低燃料的利用率。这就又限制了喷孔的直径和喷油压力<sup>[3-5]</sup>。

在喷嘴的流通面积受限时可以减小喷孔直径并增加喷孔数量以期改善燃油雾化和混合气的形成过程,但实际问题的影响因素时多方面且复杂的,上述问题并不能通过简单的措施解决<sup>[6-7]</sup>。采用小喷孔时,喷孔个数增大到临界值之后对雾化的促进效果较小。结合以往的研究经验,有研究提出了改进喷嘴的喷孔形式,设计了一种能兼顾贯穿距与喷雾雾化的分层喷孔,其布置形式如图1所示<sup>[8]</sup>。图1(a)中A1、A2分别表示上、下排喷雾油束;图1(b)中展示了分层喷孔的喷雾油束位置。

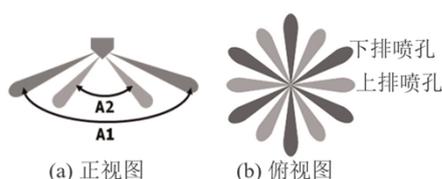


图1 分层喷孔布置形式图

目前国内外学者对分层喷孔已经做了大量研究。黎一锴等人通过对缸内燃烧和排放模拟计算,得出分层喷孔能减小油滴的索特平均直径(Salter mean diameter,后文简称SMD),降低SOOT排放的结论<sup>[9]</sup>。王谦等人研究了柴油机喷嘴内部两相流动,其结果表明上层喷孔与下层喷孔相比,空穴发展更加迅速,空穴区域更大,影响其瞬时流量<sup>[10-11]</sup>。金天宇等人建立了分层喷孔喷嘴内部流动三维模型,计算结果表明下排喷孔的喷油速率和循环喷油量比上排喷孔高出4%~8%<sup>[12]</sup>。黄康等人建立了分层喷孔喷雾及燃烧排放模型,结果表明分层喷孔可提高喷雾扩散性,结合适当的预喷射策略可实现燃油和空气良好混合,避免了部分区域燃空比过大和燃料挂壁的不良后果,可提高柴油机预混合气均匀度,优化燃烧<sup>[13-17]</sup>。Choi等人,将分层喷孔与两级活塞结合起来,其方案增强了空气燃料混合和喷雾的空间分

布,同时避免了喷雾重叠,可同时降低PM、CO、HC排放而不增加NOx排放。Addepalli等人,用CFD对上下排喷孔单独建模,上排喷孔在准稳态期间具有更高的流量,且上排开启瞬时斜率大于下排,导致下排射流速度和贯穿长度较低<sup>[18]</sup>。

在关于分层喷孔喷雾特性、喷嘴瞬时流动特性登的先前研究中,其结论并不统一。将分层喷孔应用于发动机上,研究其对整机的燃烧排放特性影响时,喷孔孔径主要集中于0.2mm左右、发动机缸径主要集中于100mm左右。对于缸径大于200mm、喷孔孔径普遍在0.4mm以上的船舶柴油机,其结论并不一定适用。此次,不同孔径喷孔喷雾的液滴分布及火焰发展并不一样,其对燃烧的影响也不相同<sup>[19]</sup>。

本文主要研究了大孔径分层喷孔应用于船舶柴油机燃烧排放的影响。通过对比了传统多喷孔和分层喷孔的燃烧、排放特性,分析了优化燃烧降低排放的核心原因,并基于其结果进一步研究了不同孔径配比对指示热效率等燃烧性能提升的可能性。

## 1 研究方法

图2为分层喷孔船舶柴油机CFD模型,该模型简化了进排气道,红色边界为缸盖,黄色边界为缸壁,橙色部分为活塞。本工作旨在研究分层喷孔相比于传统多喷孔对燃烧排放的影响,因此选取了三组不同方案与原机型传统多喷孔方案进行对比。分层喷孔喷油器位于缸盖中心,其上下两排喷孔交错分布,紫色为下排喷孔,蓝色为上排喷孔,统一取1mm作为上下排间距,避免喷孔间距离的影响。

发动机的缸径为270mm,冲程为330mm,压缩比为15.5,运行工况为100%。本工作中所有的喷孔角度都是喷孔与气缸轴线夹角为74°,喷油压力为160Mpa,喷射时刻为-9.8°CA,按单次脉冲喷油率将约2.905g燃油喷入燃烧室。表1为具体的发动机参数。本研究中所有负曲柄角度均对应燃烧上止点之前的值(BTDC),所有正曲柄角度都对应上止点之后的值(ATDC)。

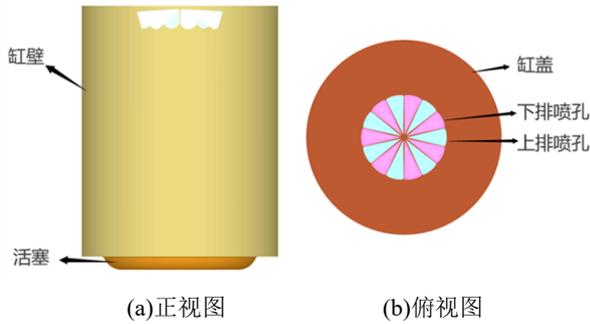


图2 分层喷孔船舶柴油机 CFD 模型

本研究选用 Frossling 蒸发模型对燃油液滴蒸发进行仿真模拟, 选用 KH-RT 模型对喷雾破碎进行仿真模拟, 详细的物理模型如表 2 所示。表 3 为本研究中所有的边界条件, 且发动机模型已经与试验数据进行了缸压以及放热率的验证<sup>[20]</sup>。

表 1 发动机参数

参数名称/单位	值
缸径/mm	270
冲程/mm	330
连杆长度/mm	660
转速/(r·min <sup>-1</sup> )	1065
工况/%	100
压缩比	15.5

表 2 仿真中的物理模型

模型	Name
蒸发模型	Frossling
液滴碰撞模型	NTC collision
液滴飞溅模型	O'Rourke
液滴破碎模型	KH-RT
燃烧模型	CTC/Shell
排放模型	Zeldovich(NOx)
	Hiroyasu(SOOT)
湍流模型	RNG k-ε

表 3 仿真边界条件

参数名称/单位	值
缸盖温度/K	625
缸壁温度/K	475
活塞温度/K	620
燃油温度/K	313
喷射压力/MPa	160

## 2 结果与讨论

本工作在喷孔总的通流截面积一致的前提下进行, 研究了孔数及对应孔径对燃烧排放的影响, 并进一步探究孔径配比的影响, 基于其结果对方案进行取舍, 总结规律选出最优方案。

### 2.1 不同孔数分层喷孔对比分析

本研究引入原机传统多喷孔方案 CASE0 做对照, 不同分层喷孔方案分别用 CASE1 等代指, 分层喷孔及传统多喷孔边界条件如表 4 所示。

表 4 不同孔数边界条件

方案名	CASE0	CASE1	CASE2	CASE3
上排孔数	10	6	7	8
下排孔数		6	7	8
上排孔径/mm	0.51	0.466	0.431	0.403
下排孔径/mm		0.466	0.431	0.403

图 3 中随着孔数增多, 燃烧效率与指示热效率先增大后减小, 且分层喷孔方案燃烧效率与指示热效率都高于 CASE0, 其中, CASE2 燃烧效率在 CASE0 的基础上提升了 5.4%, 其指示热效率在提升了 1.67%。图 4 为方案缸压及放热率曲线图。

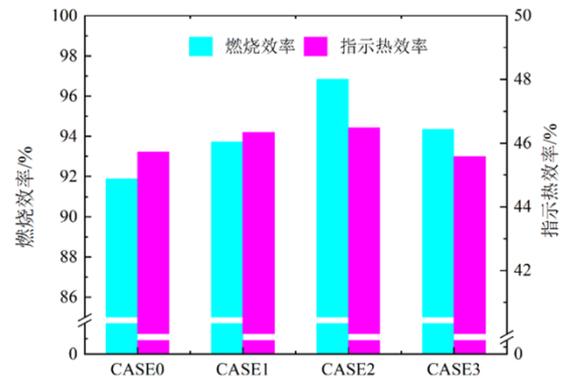


图 3 不同孔数下的燃烧效率及指示热效率

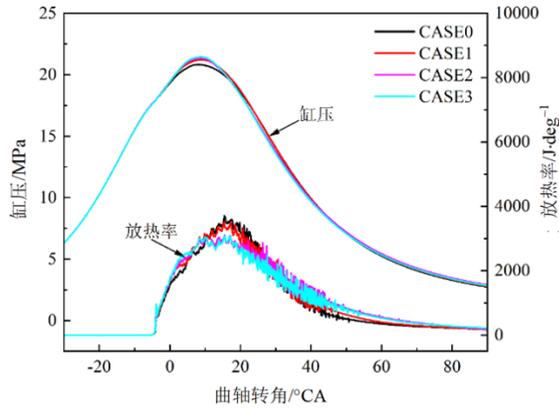


图4 不同孔数下的缸压及放热率

图5为缸内温度切片云图,图5(a)表示分层喷孔方案的切片图分别选取一束上排和下排火焰,并在图5(b)中左侧为下排火焰图、右侧为上排火焰图,图5(c)为局部放大图,左侧火焰更靠近活塞,右侧火焰更靠近缸盖。图6为不同曲轴转角下不同方案的火焰图及1800K火焰等温面。图6(a)对比传统多喷孔与分层喷孔火焰图,其缸内扩散火焰发展差别较大。首先,传统多喷孔两束扩散火焰传播速度一致,基本对称;而分层喷孔扩散火焰普遍存在左侧火焰贯穿比右侧短。

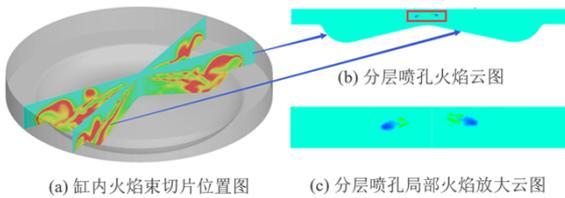
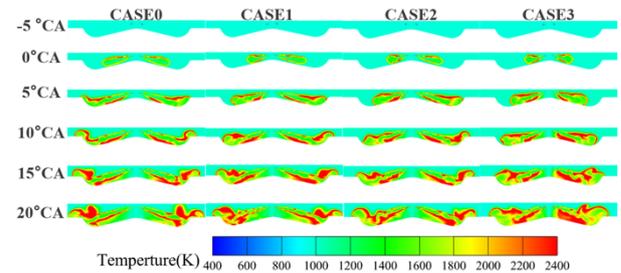


图5 分层喷孔火焰切片

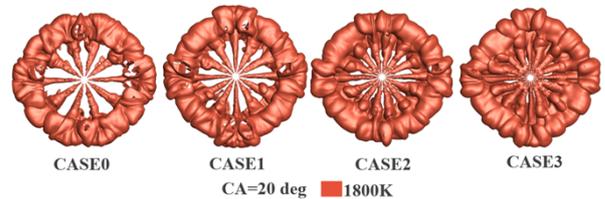
图6(a)中-5°CA时,喷雾近喷孔处点火,随即向喷雾头部扩散,随着孔数增多,火焰传播速度差异较小,但火焰束越多,瞬时放热更多,表明分层喷孔能有效加强预混燃烧。其中,CASE3孔数最多,其放热率上升更快,压升率最大。0°CA和5°CA时,随着孔数增多,瞬时放热量更多,缸压峰值随之增大;但孔径随之减小,火焰贯穿随之减小,且分层喷孔方案火焰贯穿相比于CASE0更短。分层喷孔两束火焰沿着活塞凸台斜坡延展扩散,但右侧火焰传播速度相比于左侧更快,更早从活塞凹坑延展到挤流区,而左侧火焰扩散锥角更大。表明分层喷孔上下排孔径相等,但喷孔准稳态期间实际的瞬时流量并不一样,上排喷孔瞬时流量更大,分配的油量更多,火焰贯穿更长<sup>[10-12]</sup>。

图6(a)中10°CA时,分层喷孔左侧火焰束,在沿着斜坡扩散时形成逆挤流,其火焰沿着和喷雾扩散相反的方向蔓延到凸台。与传统多喷孔火焰相比,虽然使火焰传播速度下降,但其对斜坡上方区域空气利用提高。CASE3火焰束多但火焰贯穿最短,其瞬时放热达到峰值。15°CA时,左侧火焰从凹坑延展至挤流区,右侧火焰向缸壁延展,但不碰壁。CASE1火焰贯穿达到最长,瞬时放热到达峰值。20°CA时,CASE0和CASE1挤流区火焰撞壁,并且CASE0沿缸盖火焰回流;但CASE3火焰贯穿短,对挤流区空间利用率低。

图6(b)比较CASE0与分层喷孔方案,后者对缸内周向空间利用率高,火焰更加均匀分布在缸内,但CASE3油束过多,喷雾分布密集,不利于对空气利用,恶化了燃烧。结果表明,CASE2能良好利用凹坑上方空间的同时能较好利用挤流区空间,兼顾火焰贯穿和火焰总数,改善火焰回流,并减少火焰撞壁,使燃烧效率提高。



(a) 不同孔数下的缸内火焰



(b) 不同孔数下的1800K火焰等温面

图6 不同孔数下的火焰及等温面

图7分层喷孔方案能有效降低SOOT和未燃HC排放,且不提高NO<sub>x</sub>排放;其中,未燃HC排放随着燃烧效率提高而降低。图8展示了SOOT、NO<sub>x</sub>生成区间以及受燃烧氧化影响的程度。结果表明,SOOT生成主要受燃烧前期的燃料富集影响,其氧化受燃烧后期影响巨大;而NO<sub>x</sub>生成受燃烧前期和后期缸内高温富氧条件影响,但燃烧末期氧化对其影响极小。

图9中0°CA到40°CA之间,随着平均温度上

升率及峰值增大, NO<sub>x</sub> 生成随之增大; 60° CA 之后燃烧末期, CASE3 平均温度下降最平缓, 故 CASE3 最终排放稍低, 总体上相差极小。图 11 分别在 5° CA、15° CA、25° CA 及 35° CA 做 SOOT、NO<sub>x</sub> 缸内云图切片。随着孔数增多, NO<sub>x</sub> 生成区域及浓度随之减小, 但总体喷雾油束增加。综上所述, 分层喷孔对 NO<sub>x</sub> 影响较小。

图 10 中 0° CA 到 20° CA 的准稳态喷雾期间, SMD 能一定程度反映缸内混合气的均匀程度。随着孔径减小, SMD 随之减小, 混合气更加均匀, SOOT 生成随之减少。图 11 中 5° CA 和 15° CA 时 SOOT 生成区域及浓度随之减小。其中, 在 5.03°CA 时 CASE0 的 SOOT 生成主要来自于喷雾撞壁之后的燃油富集, 而分层喷孔 SOOT 生成主要由于喷雾头部液滴动量减小, 从而产生的富油区; 在 15.03°CA 时, CASE0 与分层喷孔 SOOT 生成均来自于喷雾沿着凹坑延展到挤流区, 湍动能减小后形成的富油区, 但分层喷孔右侧 SOOT 生成明显小于左侧。表明分层喷孔布置能有效减少富油聚集, 改善 SOOT 生成, 且上排喷孔产生 SOOT 更少。在 25.01°CA 及 35.02°CA 时, 随着孔径减小, 混合气更均匀, 燃烧后期氧化越剧烈, SOOT 区域及浓度随之减小。但图 4 中 CASE2 燃烧末期相比于 CASE3 放热稍多, 燃烧氧化更剧烈, 故 CASE2 的最终 SOOT 排放更低。

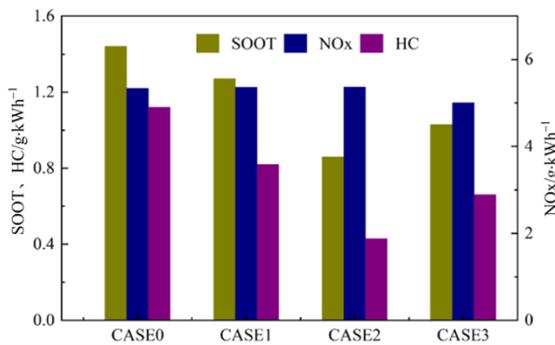


图 7 不同孔数下的排放

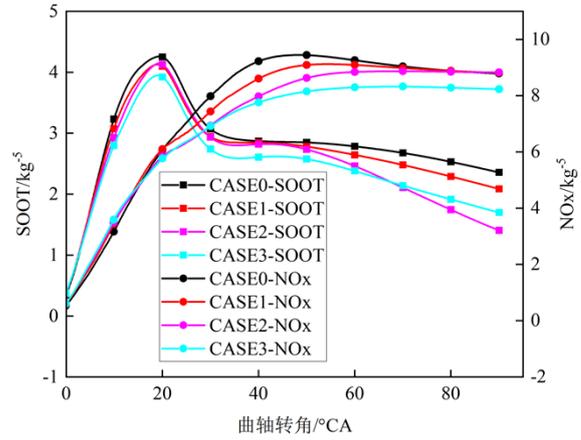


图 8 不同孔数下的 SOOT 及 NO<sub>x</sub>

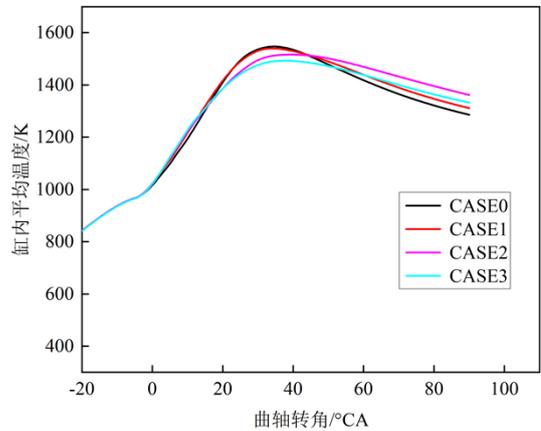


图 9 不同孔数下的平均温度

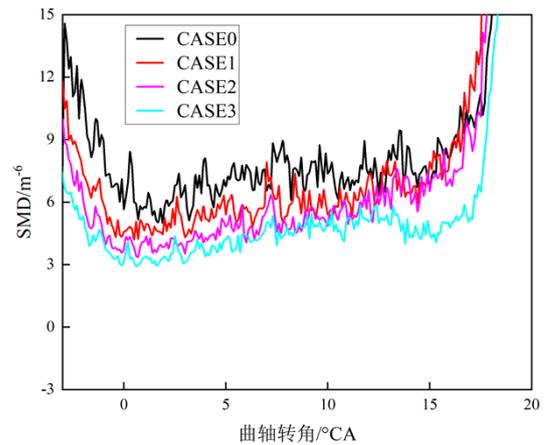


图 10 不同孔数下的 SMD

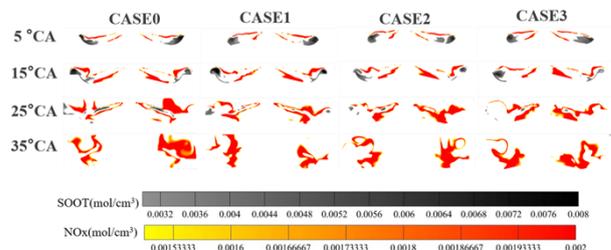


图 11 不同孔数下的 SOOT 及 NO<sub>x</sub> 云图

综上所述, CASE2 的 SOOT 排放相比于 CASE0 降低 40.28%, 未燃 HC 降低 61.61%, 且不提高 NO<sub>x</sub>

排放，打破了传统多喷孔 SOOT 与 NO<sub>x</sub> 的 trade-off 关系。

## 2.2 不同孔径配比分层喷孔对比分析

上一节计算结果表明，分层喷孔上排喷孔分配的油量更多，火焰贯穿更长，SOOT 生成更少。本工作提出上下排孔径不一致情况下，研究不同孔径配比下对燃烧和排放的影响规律，其中，定义孔排面积差为上排单孔总截面积比下排单孔总截面积，边界条件如表 5 所示。

表 5 不同孔径配比边界条件

方案名	CASE4	CASE2	CASE5	CASE6
上排孔数	7	7	7	7
下排孔数	7	7	7	7
孔排面积差/%	-5	0	5	10
上排孔径/mm	0.420	0.431	0.442	0.452
下排孔径/mm	0.442	0.431	0.420	0.410

图 12 随着孔径差增大，燃烧效率与指示热效率先增加后减少，且不同孔径配比方案燃烧效率与指示热效率都高于 CASE0。其中，CASE5 燃烧效率在 CASE0 的基础上提升了 5.11%，相比于 CASE2 提升 5.40% 有所降低；CASE5 指示热效率在 CASE0 的基础上提升了 1.77%。图 13 随着孔径差增大，燃烧持续期先减小后增大，其中，CASE5 在 CASE2 的基础上燃烧持续期缩短。

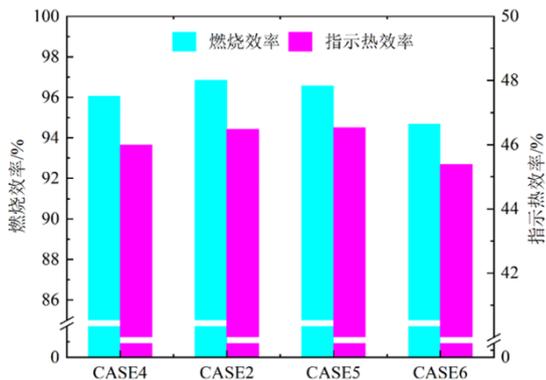


图 12 不同孔径配比下的燃烧效率及指示热效率

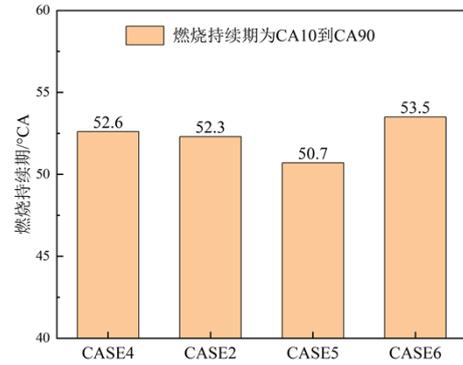


图 13 不同孔径配比下的燃烧持续期

图 14 对比不同孔径配比方案火焰云图，10° CA 和 15° CA 其燃烧前期扩散火焰差别较小。20° CA 时，CASE4 右侧火焰回流，随后撞壁缸盖并沿着缸盖向中心扩散。表明孔径差小于 0 时，容易造成回火，降低燃烧效率。在 20° CA、25° CA 及 30° CA 时，比较 CASE2、CASE5 与 CASE6，随着孔径差的增大，上排喷孔火焰区域随之增大，但下排喷孔火焰贯穿随之降低，不利于挤流区空气利用。综合而言，CASE5 缸内火焰更加合理，能良好利用挤流区空间的同时保证火焰贯穿，使燃烧放热更加集中，降低了燃烧持续期，有利于提高等容度，降低热负荷和传热损失，提高指示热效率。

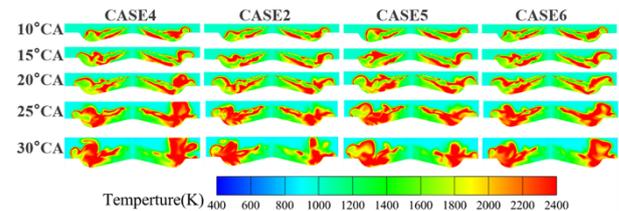


图 14 不同孔径配比下的火焰

图 15 随着孔径差增大，SOOT 和未燃 HC 排放随之先减小后增大；NO<sub>x</sub> 排放随之先增大后减小。其中，比较 CASE4、CASE2 与 CASE5，排放差异极小，表明较小范围孔径差对排放影响极小。CASE6 下排火焰贯穿不足使燃烧效率降低，增加了未燃 HC 排放。

图 16 在 5° CA 时四个方案 SOOT 生成区域差别较小；在 15° CA 时比较 CASE4、CASE2 与 CASE5，其 SOOT 生成区域先减小后增大，CASE2 的 SOOT 生成量最少。相比于其他方案 CASE6 的 SOOT 生成明显更多，且后期氧化作用较弱，故 CASE6 最终 SOOT 排放增多。在 25° CA 及 35° CA 时，CASE5 燃烧后期火焰分布空间利用率最高，加强了 SOOT

后期氧化,其 SOOT 排放最少。比较 CASE4、CASE2 与 CASE5,其 NO<sub>x</sub> 生成区域差异极小,其中 CASE5 稍多,而 CASE6 相比于其他方案 NO<sub>x</sub> 生成明显减少。

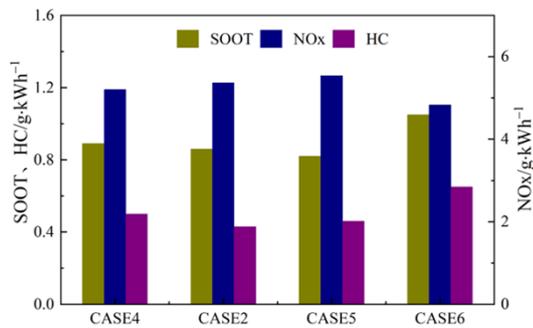


图 15 不同孔径配比下的排放

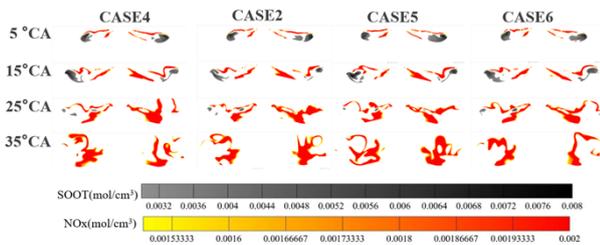


图 16 不同孔径配比下的 SOOT 及 NO<sub>x</sub> 云图

### 3 结论

(1) 分层喷孔能有效加强预混燃烧;传统多喷孔的火焰贯穿对称,而分层喷孔上排火焰传播速度相比于下排更快。分层喷孔方案能良好利用凹坑上方空间,同时能较好利用挤流区空间,提高了喷雾火焰对燃烧室容积的利用,改善火焰回流,并减少火焰撞壁,从而提升燃烧效率及指示热效率。

(2) 分层喷孔对 NO<sub>x</sub> 生成影响较小;传统多喷孔与分层喷孔 SOOT 生成机理不同,且分层喷孔布置能有效减少富油聚集,其燃烧后期的氧化也更加剧烈,能有效减少 SOOT 排放。

(3) 合理的孔径配比能使缸内火焰分布更加均匀,有效缩短燃烧持续期,提高等容度,降低热负荷和传热损失,从而提升指示热效率,同时能加强 SOOT 后期氧化。

(4) 综上所述,相比于传统多喷孔 CASE0,分层喷孔能同时降低 SOOT、未燃 HC 排放,且几乎不提高 NO<sub>x</sub> 排放,打破了传统多喷孔 SOOT 与 NO<sub>x</sub> 的

trade-off 关系。其中, CASE5 指示热效率在 CASE0 的基础上提升 1.77%, SOOT 排放降低 43.06%, 未燃 HC 降低 58.93%。

### 参考文献:

- [1] 鹿盈盈,苏万华,裴毅强.喷射参数对柴油机预混燃烧和排放的影响[J].内燃机学报,2016,34(01):9-15.DOI:10.16236/j.cnki.nrxj.201601002.
- [2] 缪雪龙.柴油机超多喷孔预混合燃烧研究[D].上海交通大学,2009.
- [3] 王俊乐.柴油机低温燃烧碳烟生成特性研究[D].北京交通大学,2019.
- [4] 张文正,黄震,冯明志,闫萍,刘瑞,吕兴才.大缸径船用柴油机部分预混压燃的试验研究[J].内燃机工程,2020,41(06):11-18.DOI:10.13949/j.cnki.nrgc.2020.06.002.
- [5] 李文睿,朱建军,魏运浩,黄禀通.喷油系统参数对高功率柴油机喷雾的影响[J/OL].机械设计与制造:1-5[2023-04-13].DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.20230302.013.
- [6] Zhai Chang, Jin Yu, Wu Qing, Nishida Keiya, Ogata Yoichi. Diesel spray and combustion of multi-hole injectors with micro-hole under ultra-high injection pressure – Combustion characteristics[J]. Fuel, 2021, 300.
- [7] Chang Zhai, Yu Jin, Keiya Nishida, Yoichi Ogata. Diesel spray and combustion of multi-hole injectors with micro-hole under ultra-high injection pressure – Non-evaporating spray characteristics[J]. Fuel, 2021, 283.
- [8] Choi, Seong-Ho & Shin, Seung-Hyup & Lee, Jeongwoo & Min, Kyoungdoug & Choi, Hoimyoung. (2014). The effects of the combustion chamber geometry and a double-row nozzle on the diesel engine emissions. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 229. 590-598. 10.1177/0954407014547748.
- [9] 黎一锴, 李云清, 成传松等.双层喷孔喷油器喷油压力对增压柴油机排放影响的研究[J].农机化研究, 2011, 33(01):173-178.DOI:10.13427/j.cnki.njyi.2011.01.006.
- [10] 王谦, 李念, 何志霞等.柴油机双层多孔喷油嘴内部空穴两相流动研究[J].江苏大学学报(自然科学版), 2015, 36(02):142-147.
- [11] 王谦, 李念, 何志霞, 钟汶君, 高志胜.柴油机双层多孔喷油嘴瞬态流动特性[J].江苏大学学报(自然科学版), 2015, 36(04):373-379.
- [12] 金天宇, 姜苏, 王楚翘, 罗彤, 罗福强.柴油机两层 8 孔喷油器各孔喷油规律模拟验证[J].江苏大学学报(自然

科学版), 2021, 42(01):40-46.

- [13] 黄康, 欧阳光耀, 安士杰等. 双层交错布置多孔喷嘴设计与仿真研究[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(03):434437+443. DOI:10.16183/j.cnki.jsjtu.2013.03.019
- [14] 黄康, 欧阳光耀, 安士杰等. 双层交错布置多孔喷嘴预混合燃烧排放特性研究[J]. 内燃机工程, 2013, 34(S1):42-46. DOI:10.13949/j.cnki.nrjgc.2013.s1.011.
- [15] 黄康, 欧阳光耀, 安士杰等. 双层交错布置多孔喷嘴喷射特性仿真与试验研究[J]. 内燃机工程, 2015, 36(05):7-11. DOI:10.13949/j.cnki.nrjgc.2015.05.002.
- [16] 黄康, 欧阳光耀, 安士杰等. 双层交错布置多孔喷嘴燃烧排放性能试验研究[J]. 内燃机工程, 2015, 36(04):81-84. DOI:10.13949/j.cnki.nrjgc.2015.04.016.
- [17] 黄康, 欧阳光耀, 安士杰等. 双层交错多孔喷嘴喷雾特性仿真与试验研究[J]. 汽车工程, 2015, 37(05):506-509. DOI:10.19562/j.chinasae.qcgc.2015.05.004.
- [18] Addepalli, S.K., Scarcelli, R., Wang, Y., Vojtech, R. et al., "Numerical Investigation of the Impact of Fuel Flow Rate on Combustion in a Heavy-Duty Diesel Engine with a Multi-Row Nozzle Injector, " SAE Technical Paper 2022-01-0395, 2022, doi:10.4271/2022-01-0395.
- [19] Liu Long, Fu Shiyi, Han Changfu. Investigation on diesel spray flame evolution and its conceptual model for large nozzle and high-density of ambient gas[J]. Fuel, 2023, 339.
- [20] Long Liu, Yan Peng, Wenzheng Zhang, Xiuzhen Ma, Concept of rapid and controllable combustion for high power-density diesel engines[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 116529. Volume 276, 2023, 116529, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116529>.