

燃油喷射型线对船用低速二冲程柴油机燃烧与排放影响的模拟研究

The Effect of Injection Rate Shape on Combustion and Emission of Marine Low-speed Two-stroke Diesel engine

冀雯霞, 朱磊*

(上海交通大学动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200240)

摘 要: 本文基于 CFD 软件 CONVERGE 2.3 对测试船用二冲程柴油机进行了数值模拟计算, 研究了燃油喷射型线对 75% 负荷下的船用柴油机燃烧与排放性能的影响。模拟结果与实验结果有较好的吻合度。模拟结果显示, 不同燃油喷射型线会对低速二冲程船用柴油机燃烧过程与排放物造成显著影响。相比梯形喷射型线, 三角形型线喷油速率峰值最大, 缸内平均温度峰值和放热率峰值最大, 燃烧性能较好, 有利于发动机做功, 指示功率最大。三角形喷射型线由于燃烧温度较高导致 NO_x 排放值较高, 楔形和斜坡形喷射型线缸内平均温度较低, 有利于改善 NO_x 排放, 但油耗较大。

关键词: 燃油喷射型线; 低速二冲程船用柴油机; 燃烧; 排放

Abstract: The performance of marine low-speed diesel engine was simulated by CFD software CONVERGE 2.3 in this paper. The effect of injection rate shape on the combustion and emissions of marine diesel engine under 75% load was investigated. The simulation results are in good agreement with the experimental data. The results show that different fuel injection rate shape can affect the combustion process and emissions of low-speed two-stroke marine diesel engine significantly. Compared with that of trapezoidal injection rate shape, the peak value of temperature and heat release rate of triangle injection rate shape is the maximum, and it has better combustion performance, which is beneficial to the work of the engine, thus it has maximum indicated power. The triangle injection rate shape has higher NO_x emissions due to the higher combustion temperature. The mean temperature in the cylinder of wedge and slope injection rate shape is lower, which is conducive to the decrease of NO_x emissions, but the fuel consumption is higher.

Key words: Injection rate shape; Marine low-speed two-stroke diesel engine; Combustion; Emission

1. 前言

柴油机热效率高、经济性好、功率大、工作可靠、对各类船舶适应性较好, 被广泛用作船舶推进动力, 已经成为民用船舶、中小型舰艇和常规潜艇的主要动力。但其带来的排放问题同样不容忽视。2016 年国际海事组织 (IMO) 推出了严苛的 Tier III 排放标准^[1-3], 将 NO_x 排放值限制在 3.4 g/kW.h 以下。随着环境污染问题受到越来越广泛的关注, 严格的排放法规对船用柴油机经济性能的优化以及排放性能的改善提出了巨大的挑战。而柴油机燃烧过程的改进是降低柴油机有害排放物并直接影响油耗的一种较为有效的机内处理措施, 其缸内燃烧过程的好坏又受到燃油和空气混合情况的影响, 其中喷油规律对油气混合的影响较大^[4]。

相对于传统机械喷油系统, 电控共轨系统的出现使燃油喷射规律的进一步探索更容易实现。关于多段喷射、燃油喷射压力、喷油正时等喷射规律对柴油机燃烧与排放的影响国内外

研究较多。美国威斯康辛大学的 Reitz 等学者从上个世纪九十年代以来,进行了一系列关于多段喷射和改变喷油规律降低柴油机颗粒与 NO_x 排放的研究^[5-7]。Suhan Park^[8]等人通过实验对一台直喷式单缸柴油机的喷射策略进行研究,结果显示较短的喷油间隔、在上止点附近开始喷油、适当的喷射压力可以有效的改善柴油机的经济性和排放性。但关于燃油喷射型线对柴油机燃烧与排放的影响研究较少,尤其是大型二冲程船用柴油机。Kun Lin Tay 等人^[9]通过数值模拟研究了三角形与斜坡形喷射型线对直喷式柴油机燃烧与排放的影响。研究结果显示,喷射型线不仅可以在不改变喷油时刻和喷油持续期的条件下影响初始燃烧相,还可以控制燃烧相以及燃烧持续期,所以会对燃烧过程产生一定影响,同时对排放物的生成造成显著影响。Balaji Mohan 等人^[10]采用 CFD 软件 KIVA-4 对一台直喷式柴油机的喷油规律进行了数值模拟研究,研究采用长中短三种不同的靴形型线。结果显示,不管采用哪种燃油喷射型线均可以减少 NO_x 排放以及燃烧噪声。Shijin Shuai 等人^[11]通过 KIVA-CHEMKIN 模拟了早喷、晚喷以及几种喷射型线对柴油机的喷雾以及燃烧过程的影响。研究发现,早喷可以减少 soot、HC 以及 CO 排放,但 NO_x 排放较高。相比其他燃油喷射型线,矩形型线以及靴形型线可以减少 soot、HC、CO 排放。

考虑到大功率低速船用柴油机在传统的试验研究上需要耗费的人力、物力、财力,数值模拟研究以其开发周期短、计算方便等优势逐渐成为船舶柴油机研发的重要工具。本文应用 CFD 软件 CONVERGE 详细研究了燃油喷射型线对船用低速二冲程柴油机燃烧与排放的影响,望对实际船舶主机燃油喷射规律的控制具有一定的指导作用。

2.CFD 模型的建立

本文基于 CFD 软件 CONVERGE 2.3 对一台测试船用二冲程柴油机构建了三维几何模型,如图 1 所示,包括扫气箱、气缸、排气道三部分。使用 $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$ 作为柴油的替代燃料^[12],模拟工况为 75% 负荷工况。通过实验测得的缸压和排放物数据来校正模型的准确性。

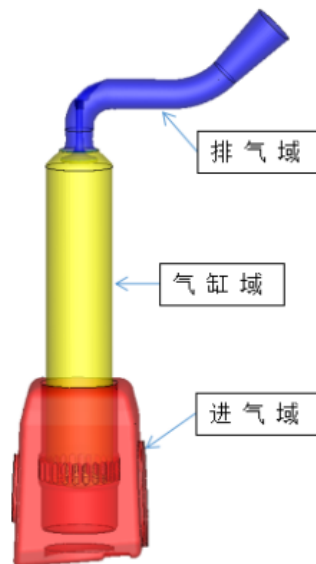


图 1 三维几何模型

湍流模型、燃烧模型、排放模型等各相关子模型的选用如表 1 所示,液滴喷射初始温度设置为 295K,燃油喷射持续期设置为 17°CA ,喷油时刻为 360.2°CA 。

表 1 主要的计算模型

相关子模型	模型的选择
湍流模型	RAN $k-\varepsilon$ 模型
油滴飞溅模型	O' Rourke 模型
油滴碰撞模型	NTC collision 模型
喷雾破碎模型	KH-RT 模型
燃烧模型	CTC 特征时间燃烧模型
点火模型	SHELL 自点火模型
NO _x 排放模型	Extended Zeldovich NO _x 模型
Soot 排放模型	Hiroyasu Soot 模型

3. 模型可靠性的验证

实验与模拟计算所得的缸压曲线对比如图 2 所示。最大压缩压力 (Max Com. p) 与最大爆发压力 (Max Cyl. p) 的误差率分别为 0.42% 和 0.73%。模拟的缸压与实验吻合度较好，模型可以较为准确的预测船舶柴油机的缸压。

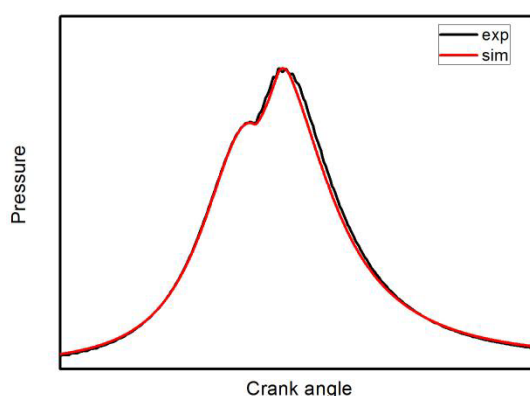


图 2 实验和模拟缸压曲线对比

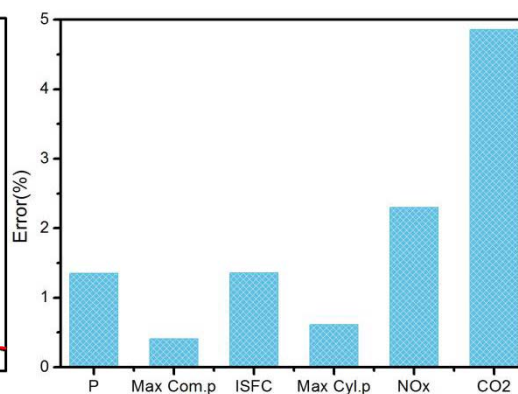


图 3 相关数据的误差率

为了使模型可以更准确的预测船用柴油机的燃烧与排放性能，图 3 给出了功率 (P)、指示比油耗 (ISFC)、NO_x 以及 CO₂ 等性能参数实验与模拟计算之间的误差率。功率与指示比油耗的误差率分别为 1.35% 和 1.36%。NO_x 排放量的误差为 2.3%。相比 NO_x，CO₂ 的误差值略大，达到了 4.86%。这可能是由于使用单一组分正十四烷作为柴油的替代燃料来模拟柴油机的燃烧过程引起的。同时，为了减少计算时间，模型采用的是简化的燃烧机理，这必将牺牲掉一部分 CO₂ 的反应机理。结果表明，本文构建的三维几何模型能够较好的预测实验中燃烧性能以及排放物的变化，可用来对柴油机燃烧与排放性能的改善作进一步的分析探究。

4. 模拟结果与分析

柴油机的燃烧过程与排放性能受燃油和空气的混合情况影响较大，油气混合情况与燃油喷射参数的设置息息相关。因此，柴油机的燃烧性能与排放特性常常通过优化相关燃油喷射参数进行改善。本文通过 CFD 软件 CONVERGE 着重分析了燃油喷射型线对柴油机燃烧与排放带来的影响。

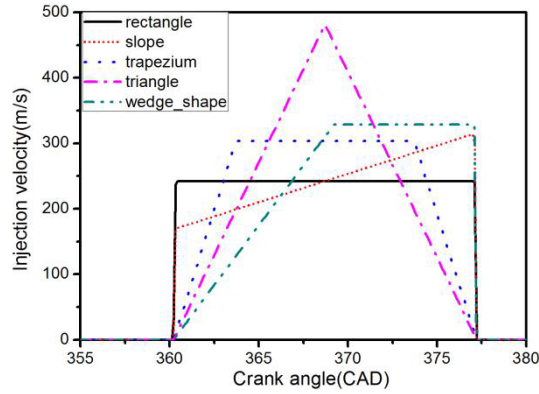


图 4 不同喷射型线下的燃油喷射速率曲线

实验所用的测试船用柴油机对称配置有两个喷油器，选择了五种不同的燃油喷射型线，如图 4 所示，分别为矩形喷射型线、斜坡形型线、梯形型线、三角形型线以及楔形型线。研究了燃油喷射规律对低速二冲程船用柴油机燃烧和排放性能的影响。其中两个喷油器的喷射持续期均为 17° CA，喷油时刻为上止点后 0.2° CA，梯形喷射型线是模拟的基准型线。

4.1 燃油喷射型线对低速二冲程柴油机燃烧的影响

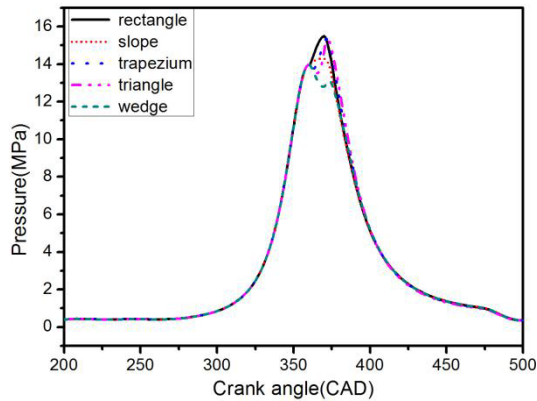


图 5 不同喷射型线下的缸压分布曲线

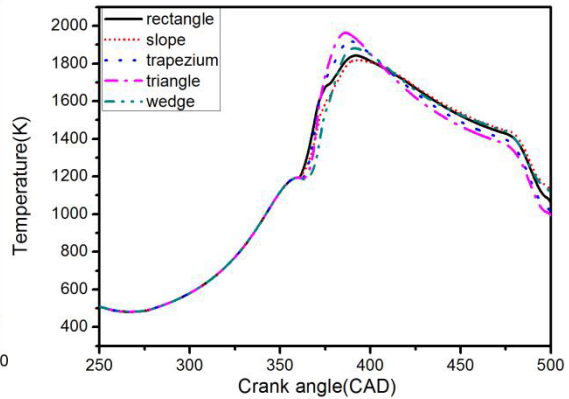


图 6 不同喷射型线下的温度分布曲线

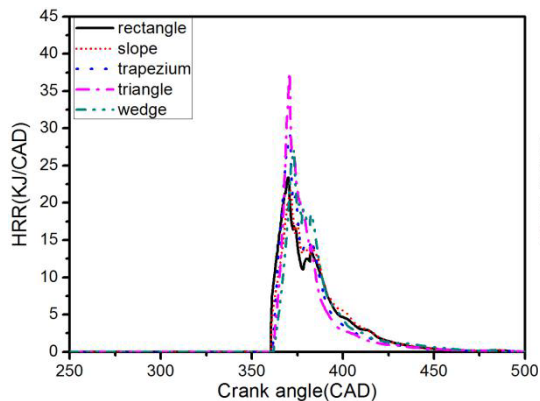


图 7 不同喷射型线下的放热率分布曲线

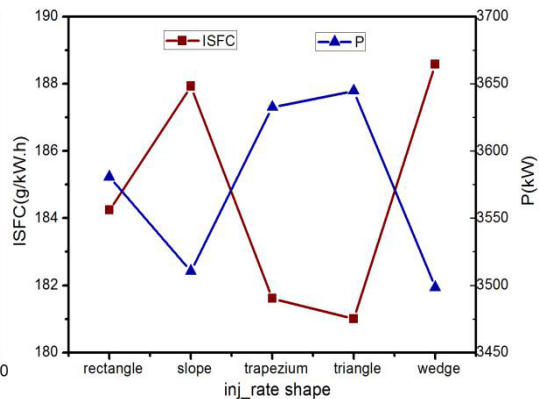


图 8 不同喷射型线下的油耗和指示功率

图 5 和图 6 所示为不同燃油喷射型线下的缸内压力与温度曲线。从缸压曲线可以看出，采用 5 种喷射型线最大压缩压力均相同，矩形喷射型线的最大爆发压力最大。楔形型线的最大爆发压力相比其他喷射规律最小。相比梯形喷射型线，矩形与斜坡形型线压力升高较早，

这是因为矩形和斜坡形型线初始喷油速率较大,而三角形和楔形型线由于初始喷油速率增长缓慢,所以压力升高趋势略有滞后,压力峰值出现较晚。楔形喷射型线的缸压曲线出现双峰,最大燃烧压力甚至低于最大压缩压力,这是由于楔形型线初始喷油速率增长过于缓慢,而且喷油持续期内喷油速率较小,燃烧相位已偏离上止点。从缸内平均温度曲线可以看出,温度升高趋势与各喷射型线的初始喷射速率关系密切,矩形由于初始喷射速率大所以温度最先开始升高,不过由于三角形型线的喷油持续期能达到的喷油速率较大,具有最大缸内平均温度。图 7 是不同喷射型线下的放热率分布曲线。由图可知,三角形喷射型线的放热率峰值最大,与梯形型线相比,矩形和斜坡形初始喷油速率剧增,初始放热量较早。而三角形和楔形初始喷油速率增长缓慢,其初始放热率出现滞后规律。同时受较高速率型线峰值的影响,两者的放热率峰值较高,三角形型线由于具有最高的喷油速率峰值放热率峰值最大。由此可以看出,燃油喷射型线对燃烧放热过程影响显著。图 8 所示是不同喷射型线下的油耗与功率。从图中可以看出,相比梯形型线,三角形喷射型线的指示比油耗更小,楔形和斜坡形的指示比油耗较高。各喷射型线下的指示功率与指示比油耗的趋势相反。

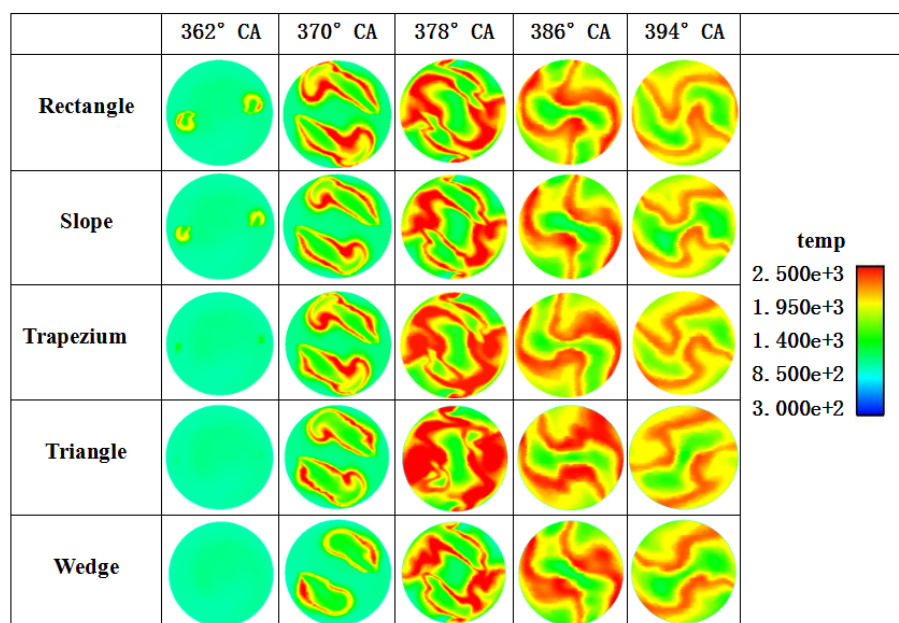


图 9 不同喷射型线下的温度分布云图

图 9 表示的是不同喷射型线下的温度分布云图。相比其他三种喷射型线,三角形喷射型线具有最高的喷油速率峰值,有利于燃油更好地雾化,可以更好的与空气进行混合,燃烧会更加充分,同时也增大了未燃油气混合气和扩散火焰的接触面积,高温燃烧区域面积也有所增大。0.2° CA ATDC 为燃油的喷射时刻。从温度分布云图中可以看出,与梯形喷射型线相比,因为矩形和斜坡形型线初始喷油速率较大,燃油与空气混合较好,较早出现着火点,同时由于有较多高速燃油与空气混合,增大了着火区域,局部高温面积相对缓解。与之相反,三角形初始喷射速率缓慢,但最大喷射速率大于其他的喷射型线,所以局部燃烧高温面积较大。378° CA 云图中,三角形型线下的低温区域面积最大,可以促进 NO_x 生成。喷油后期,矩形和楔形的燃油喷射速率仍然较快,缸内燃烧放热过程也比较剧烈,但是,因为已经偏离了上止点,错过了最佳燃烧点。

4.2 燃油喷射型线对低速二冲程柴油机排放的影响

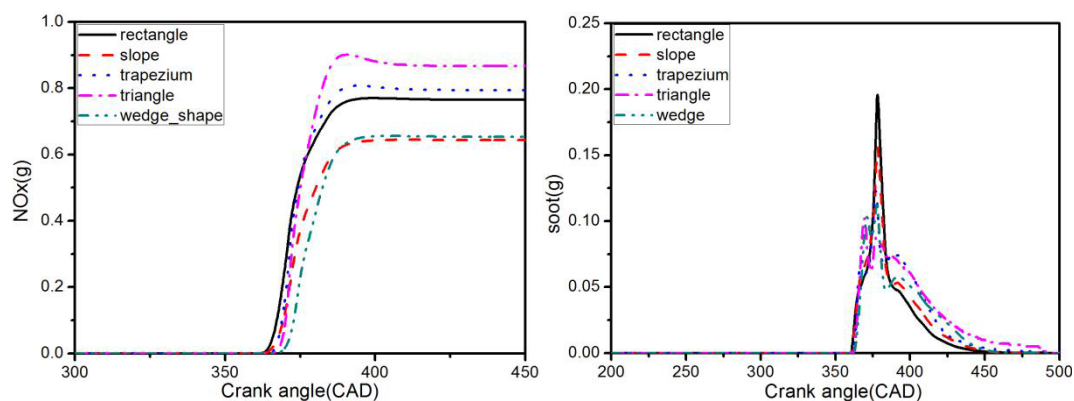


图 10 不同喷射型线下 NOx 随曲轴转角的变化曲线 图 11 不同喷射型线下 soot 随曲轴转角的变化曲线

图 10 是不同喷射型线下 NOx 随曲轴转角的变化曲线，从图中可以看出三角形喷射型线的 NOx 排放值最高，斜坡形的 NOx 排放最低，这是因为 NOx 排放物的生成主要受高温、氧气浓度以及高温持续时间三个因素影响。三角形喷射型线缸内平均温度较高，从云图中也可以看出局部高温面积较大，所以导致 NOx 排放物较多。楔形和斜坡形相比梯形喷射型线型线 NOx 排放物较少。图 11 所示为不同喷射型线下 soot 随曲轴转角的变化曲线。从图中可以看出，矩形型线的 soot 生成量最多。因为矩形喷射型线的初始喷射速率较高，短时间内燃油喷射较多，碳烟更容易生成，同时因为矩形型线燃烧过程的缸内温度较低，不利于碳烟氧化，所以造成碳烟排放较高。梯形、三角形以及楔形三种喷射型线的碳烟生成较少。

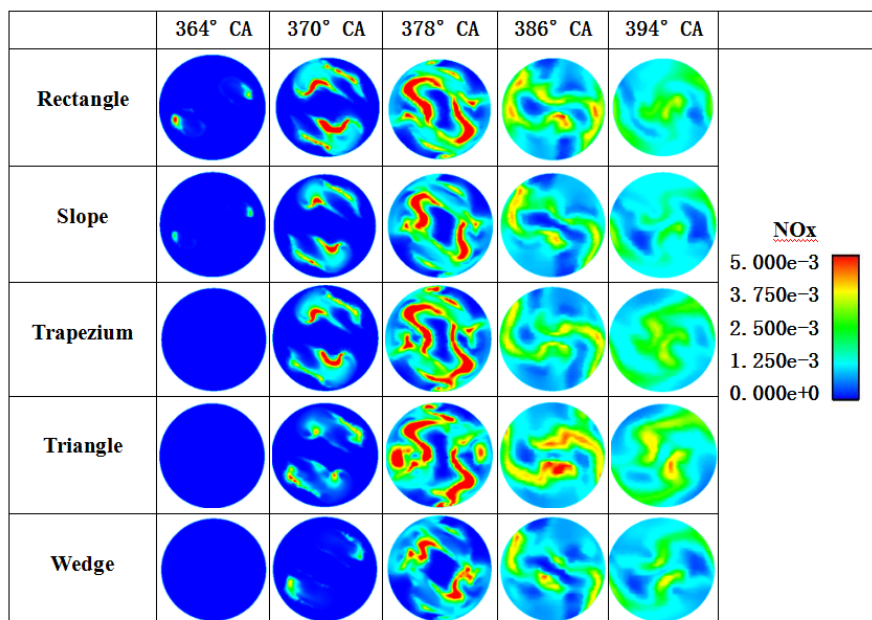


图 12 不同喷射型线下的 NOx 分布云图

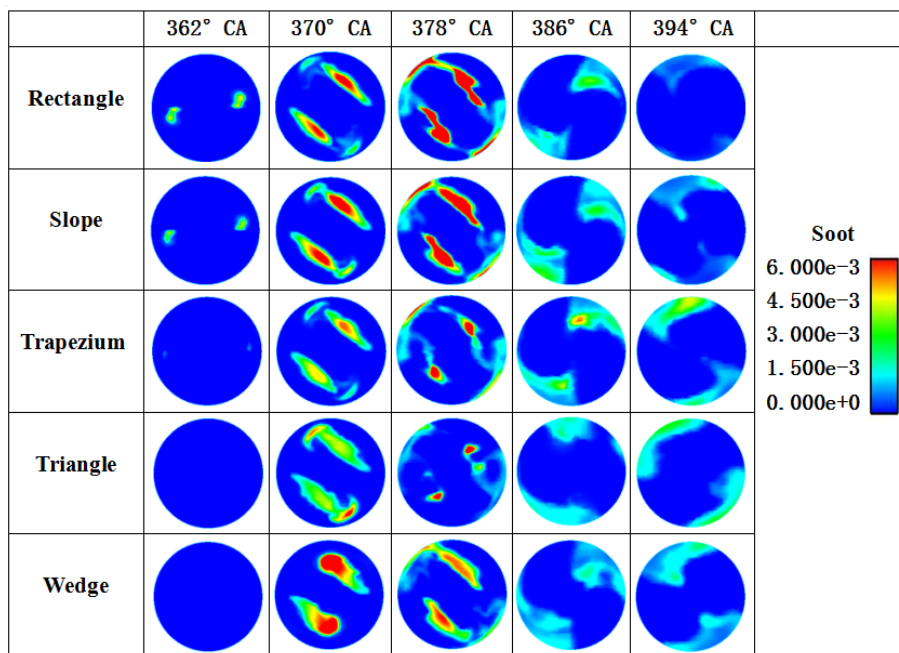


图 13 不同喷射型线下的 soot 分布云图

图 12 和图 13 是不同喷射型线下的 NO_x 和 soot 分布云图,从云图中可以看出,三角形和梯形喷射型线因为缸内温度较高,NO_x 生成较多,soot 生成则明显低于矩形和斜坡形型线。受燃烧后期温度整体偏低影响,soot 氧化较慢,三角形和梯形在燃烧后期近壁面区域有明显的 soot 分布。

5. 结论

本文基于 CFD 软件 CONVERGE 2.3 对一台测试船用二冲程柴油机进行了数值模拟计算,研究了燃油喷射型线对 75% 负荷下的船用柴油机燃烧与排放性能的影响。研究发现:

- (1) 不同燃油喷射型线会对低速二冲程船用柴油机燃烧过程与排放物造成显著影响。
- (2) 相比梯形喷射型线,三角形型线由于喷油速率峰值最大,具有最大的缸内平均温度峰值和放热率峰值,燃烧性能较好,有利于发动机做功,指示功率最大。
- (3) 三角形喷射型线由于燃烧温度较高导致 NO_x 排放值较高,楔形和斜坡形喷射型线缸内平均温度较低,有利于改善 NO_x 排放,但油耗较大。

6. 参考文献

- [1] Emission Standards (Internal: IMO Marine Engine Regulations). <<http://www.DieselNet.com/standards>>.
- [2] M. Troberg, D. Delneri, Tier III emission roadmap for marine engine application, MTZ Worldwide, 71 (2010) 12-17.
- [3] MARPOL 73/78: Annex VI. Regulations for the prevention of air pollution from ships and NO_x technical code.
- [4] 温江舟. 喷油参数对某型柴油机混合气形成及性能影响的实证研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [5] Tow T C, Pierpont D A, Reitz R D. Reducing Particulate and NO_x Emissions by Using Multiple Injections in a Heavy Duty D. I. Diesel Engine[C]// International Congress & Exposition. 1994.

- [6] Nehmer D A, Reitz R D. Measurement of the Effect of Injection Rate and Split Injections on Diesel Engine Soot and NO_x Emissions[C]// International Congress & Exposition. 1994.
- [7] Montgomery D T, Reitz R D. Optimization of Heavy-Duty Diesel Engine Operating Parameters Using A Response Surface Method[C]// CEC/SAE Spring Fuels & Lubricants Meeting & Exposition. 2000.
- [8] Park S, Kim H J, Shin D H, et al. Effects of various split injection strategies on combustion and emissions characteristics in a single-cylinder diesel engine[J]. Applied Thermal Engineering, 2018.
- [9] Tay K L, Yang W, Zhao F, et al. Numerical investigation on the combined effects of varying piston bowl geometries and ramp injection rate-shapes on the combustion characteristics of a kerosene-diesel fueled direct injection compression ignition engine[J]. Energy Conversion & Management, 2017, 136:1-10.
- [10] Mohan B, Yang W, Yu W, et al. Numerical investigation on the effects of injection rate shaping on combustion and emission characteristics of biodiesel fueled CI engine ☆[J]. Applied Energy, 2015, 160(1):737-745.
- [11] Shuai S, Abani N, Yoshikawa T, et al. Evaluation of the effects of injection timing and rate-shape on diesel low temperature combustion using advanced CFD modeling[J]. Fuel, 2009, 88(7):1235-1244.
- [12] Sun X, Liang X, Shu G, et al. Effect of Different Combustion Models and Alternative Fuels on Two-stroke Marine Diesel Engine Performance[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 115.