

多次喷射耦合 EGR 对船用柴油机燃烧及 NO_x 排放影响的模拟研究

Numerical Study on the Effects of Multiple-Injection Coupled with EGR on Combustion and NO_x Emissions in a Marine Diesel Engine

江泉泉 刘宗宽 袁成威

(天津大学内燃机国家重点实验室)

摘要: 本文采用 CONVERGE 三维仿真软件建立了柴油机的燃烧仿真模型, 研究了多次喷射耦合 EGR 改善低速二冲程柴油机 NO_x-BSFC (有效燃油消耗率) 折衷关系的潜力。研究表明, 随着 EGR 率的增加, NO_x 排放降低, 有效燃油消耗率升高, 放热率峰值降低, 最高爆发压力降低。总体上, NO_x 排放随着预主喷射间隔的增大而下降, 随着预喷量的增加而增加, 油耗水平变化趋势和 NO_x 排放相反, 大比例预喷匹配合适的预主喷射间隔容易获得较低的燃油消耗率; 后喷策略对燃油消耗率改善不明显, 随着主后喷间隔或后喷油量的增加, 燃油消耗率均呈增加的趋势, 但能有效改善 NO_x 排放; 预喷射结合后喷射的方案, 相比于单次预喷来说, 存在同时降低油耗与 NO_x 排放的可能。

关键词: 二冲程柴油机; NO_x 排放; BSFC; EGR; 多次喷射; CONVERGE

Abstract: In this article, multi-dimensional numerical model of diesel engine is established using CONVERGE, and is used to explore the potential of multi-injection strategies coupling with EGR to improve the trade-off relationship of NO_x-BSFC (Brake specific fuel consumption) in a low-speed two-stroke diesel engine. The studies obtain that with the increase of EGR rate, NO_x emission decreases, the effective fuel consumption rate increases, the peak heat release rate decreases, and the peak pressure decreases. As a whole, for the studies of pilot injection, NO_x emission decreases as injection interval (pre-injection and main-injection) increases, while increases as the amount of pre-injection increases. Simultaneously, the variation trend of fuel consumption is opposite to the NO_x's. Lower fuel consumption can be realized by using large proportion of pre-injection with proper injection interval. For the studies of post-injection, this work obtains that fuel consumption increases as the injection interval (post-injection and main-injection) or the amount of post-injection increases but NO_x emission can be effectively improved. While when using the pilot-injection combined with post-injection, it is possible to achieve the lower NO_x emission and fuel consumption simultaneously, compared with the pilot-injection only.

Keywords: Two-stroke diesel engine; NO_x emission; BSFC; EGR; Multi-injection

全球 80% 以上的商品运输主要是通过海上运输来完成的^[1], 柴油机因其功率范围大、效率高、能耗低、可靠性高等优势, 在世界船用机市场占据着主导地位, 目前世界上超过 90% 的船舶以柴油机作为动力源^[2]。于此同时, 柴油机也排放出了大量的硫化物、氮氧化物、颗粒物等污染物。据国际海事组织统计, 船舶排放的硫化物占全球比重约 4%; 氮氧化物排放

量约占 7%；二氧化碳排放量约占 3~3.5%^[3]。同时随着近年来环境污染的日益严重，人们环境保护意识的不断加强，国际上对船用发动机排放法规要求也越来越严格，1997 年，国际海事组织（IMO）通过国际防止船舶造成大气污染公约规定，并作为 MARPOL73/78 公约的附则 VI 颁布^[4]对船用柴油机的污染物排放进行限制，尤其针对 NO_x 排放。2008 年 10 月，国际海事组织（IMO）的海洋环境保护委员会（MEPC）在会上通过了 MARPOL (Marine Pollution) 协定附则 VI 的修正案，对船用柴油机尾气中 NO_x 的排放量做了明确的规定，如表 1 所示。2011 年达到 Tier II 限值，2016 年在排放控制区域 ECA 达更严格的排放限值 Tier III，其限值与第二阶段氮氧化物排放相比，降低约 80%。由此可见，开展船用柴油机 NO_x 减排研究至关重要。

表 1 IMO NO_x 排放限值

额定转速 n/(r/min)	n < 130	130 ≤ n ≤ 2000	n > 2000
Tier I (2000 年) /g/(kW·h)	17.0	45·n ^{-0.2}	9.84
Tier II (2001 年) /g/(kW·h)	14.36	44·n ^{-0.23}	7.66
Tier III(2016 年)/g/(kW·h)非 ECA	14.36	44·n ^{-0.23}	7.66
Tier III (2016 年) /g/(kW·h) ECA	3.4	9·n ^{-0.2}	1.97

对于大型船舶而言，通常单日航行耗油量达上百吨，由于 NO_x 排放和 BSFC（有效燃油消耗率）存在 Trade-off 关系，低 NO_x 排放的柴油机会存在 BSFC 升高的问题。因此，如何降低船用柴油机 NO_x 排放使其满足 Tier III 标准，同时维持较低的油耗，是当前重要的研究方向之一。控制船舶柴油机排放和油耗的主要方法是燃烧过程的优化。EGR 是降低 NO_x 的有效措施^[5]，但存在使用成本和油耗方面的问题。MAN 公司在 2S50ME-C 的实验中，当 EGR 率超过了 30%，燃油消耗恶化十分明显^[6]。而在其试验机 4T50ME-X 上使用 EGR 技术时，引入了 30%~40% 的循环废气量，试验机排放可满足 Tier III 法规要求，但油耗增加了 5%~6%^[7]。为了达到节能减排的目标，可以借鉴车用柴油机上的相关技术；同时随着高压共轨及电控技术在船用柴油机上广泛的应用，使得通过喷油策略来改善燃油消耗率，降低有害排放成为可能。

考虑到船用柴油机试验开发周期长，成本高，适用性差等缺点，采用多维数值模拟的方法，能够有效降低开发成本，缩短研究周期，因而已经被广泛应用于船用柴油机的研究和开发过程中。本文采用 CONVERGE（版本 2.3）三维仿真软件建立低速二冲程柴油机的燃烧仿真模型，主要通过采用预喷射，后喷射及预喷与后喷相结合等喷油策略，通过与 EGR 技术的耦合，研究对船用柴油机性能和排放的影响。

1 模型的建立及验证

本文所研究的船用柴油机是由沪东重机公司自主设计开发的某型号船用低速二冲程柴油机。计算模型及初始时刻的边界条件均由沪东重机提供。为了更加精确模拟船用柴油机的性能和排放，本文的计算网格包括完整的进气口和排气道，本文对该船用低速二冲程柴油机建立的三维计算模型如图 1 所示，基于该模型对其燃烧及排放过程开展数值模拟研究。模拟过程中使用的流动、传热、喷雾、液滴碰撞、燃烧和排放等模型如表 2 所示。针对 CONVERGE 中其他的喷雾模型，本文的液滴碰壁模型选用 Rebound/slide 模型，液滴碰撞模型选用 NTC 模型，液滴蒸发模型选用 Frossling 模型，液滴湍流扩散模型选用 O'Rourke 模型。同时本模型综合了计算能力和工程应用的适用性，基础网格尺寸为 2cm，最小网格尺寸为 2.5mm。



图 1 三维计算模型

表 2 主要计算的子模型

湍流模型	RNG $k-\varepsilon$ 模型
喷雾破碎模型	KH-RT 模型
燃烧模型	CTC 特征时间尺度燃烧模型
点火模型	Shell 自点火模型
NO _x 模型	Extended Zeldovich NO _x 排放模型

本文模拟工况转速为142.6r/min，循环喷油量为12.88g，相当于该转速下75%负荷工况。75%负荷是船机最常用的负荷，也是船机ISO8178E3测试循环中权重最大的负荷，占比50%^[3]。三维模拟以C₁₄H₃₀作为替代燃料^[8]，以此来研究该船机在142.6r/min转速、75%负荷下不同喷油策略耦合EGR对燃烧和排放的影响。模拟计算和实验缸压曲线对比如图2所示。可以看到，按照上述边界条件及网格策略设置的三维模型，在缸内压缩压力和燃烧压力峰值上与实验值误差均控制在2%以内，说明所建立的计算模型能够较好的再现试验结果，具有较高的可信度。

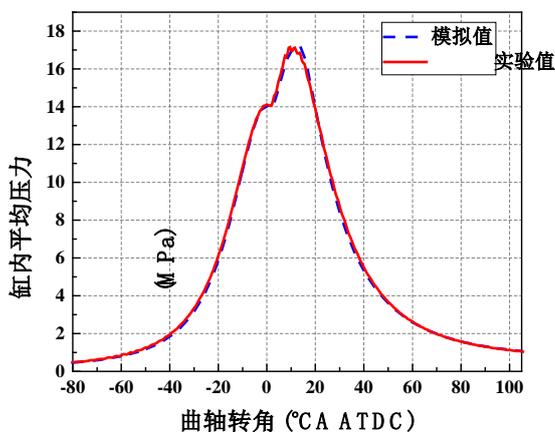


图2实验和模拟缸压曲线对比

2 计算结果讨论与分析

2.1 不同比例的EGR对燃烧和NO_x排放的影响

本文首先研究了不同比例的EGR对燃烧和NO_x排放的影响，EGR率的变化范围为8%~47%。图3是不同EGR率下NO_x和有效燃油消耗率（BSFC）的变化关系。图4是缸压、放热率随EGR率的变化关系。

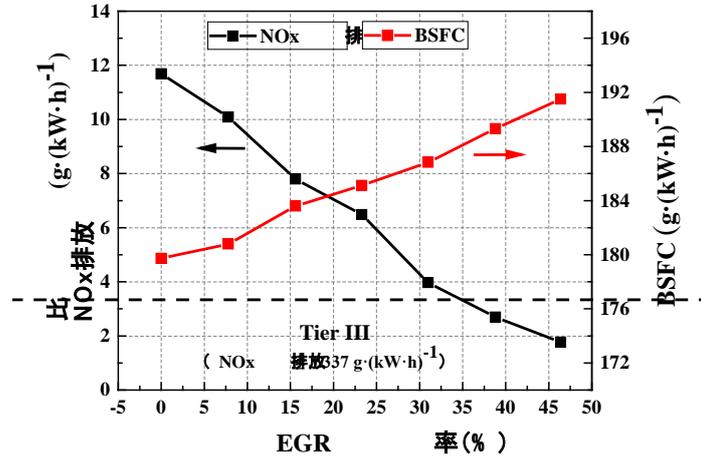


图3 NO_x和有效燃油消耗率随EGR率的变化关系

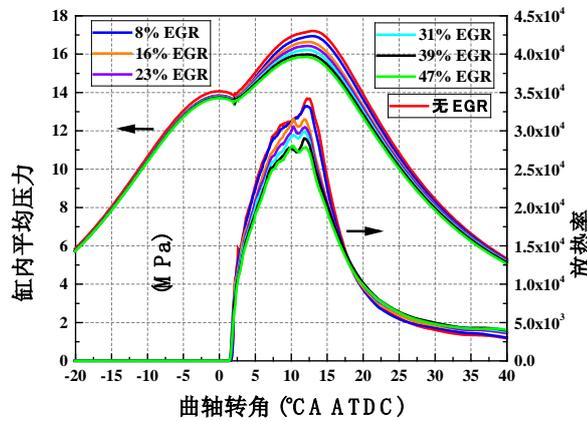


图4平均缸压和放热率随EGR率的变化关系

从图3和图4中我们发现，随着EGR率的增加，NO_x排放降低，有效燃油消耗率升高，放热率峰值降低，最高爆发压力降低。当EGR率为38.8%时，NO_x排放为2.69g/(kW·h)，可以满足Tier III法规的要求，但有效燃油消耗率相比无EGR时增加了5.33%，恶化明显。这是由于引入了大量废气后，进气中包含较多的N₂、CO₂和H₂O这些不活泼气体，相应的氧浓度降低，参与燃烧的氧气总量随之减小，燃烧反应程度减弱，进而燃烧速率降低，燃烧持续期增加，从而导致膨胀冲程后期仍维持着较大放热率，如图4所示，导致燃烧定容度变差，增大传热损失，恶化燃油消耗率。因此本文在此EGR率的基础上开展多次喷射的研究，即EGR率采用38.8%，通过与EGR的耦合寻求同时实现低NO_x排放及低油耗的喷油策略。

2.2 预喷射策略耦合EGR对燃烧和NO_x排放的影响

本文研究预喷对船用柴油机燃烧和排放的影响时,是在38.8%EGR的基础上开展的,采用的预喷策略保持了两个喷油器的喷油规律相同,主喷时刻及喷油压力与原机一致。图5为预喷示意图。具体研究方案为控制预喷质量占总喷质量的15%一定,改变预主喷射间隔分别为5°CA、10°CA、15°CA、25°CA、35°CA;控制预主喷射间隔为15°CA一定,改变预喷射量分别占总喷射量的5%、10%、15%、20%。探寻单变量对NO_x排放及油耗的影响规律,从而得出在EGR的基础上既能实现低NO_x排放又能实现低油耗的最佳预喷策略。其中,预主喷射间隔定义为预喷开始时刻和主喷开始时刻的间隔。

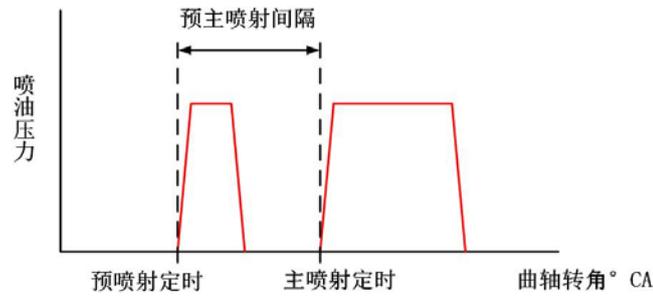


图5预喷射示意图

图6表达了保持预喷射量占总喷射量15%一定,改变预主喷射间隔对BSFC和比NO_x排放的影响,图7表达了保持预主喷射间隔为15°CA一定,改变预喷射量对BSFC和比NO_x排放的影响,图中黑色虚线以下区域代表符合Tier III排放法规的区域,红色虚线代表原机油耗水平。

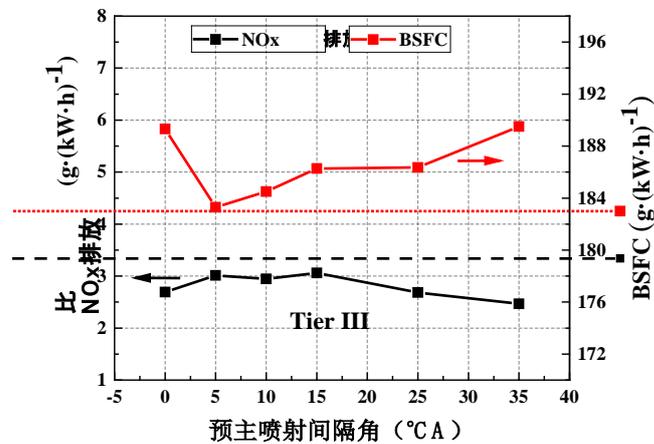


图6不同预主喷射间隔耦合EGR对BSFC和NO_x排放影响(预喷射量为15%)

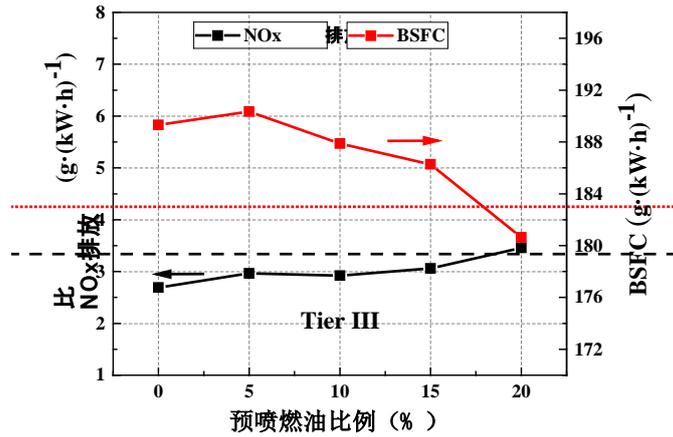


图7 不同预喷射量耦合EGR对BSFC和NO_x排放的影响（预主喷射间隔为15°CA）

结合图 6、7 可得，总体上，NO_x 排放随着预主喷射间隔的增大而下降，随着预喷量的增加而增加，油耗水平变化趋势和 NO_x 排放相反；预主喷射间隔为 5°CA、10°CA、15°CA 时，NO_x 排放呈先降低后增加的趋势，但总体变化不明显。从图 6 可以看出，当预主喷射间隔为 25°CA，相比于预主喷射间隔为 15°CA 的工况，油耗水平基本一致，NO_x 排放却降低了 12.2%，但当进一步扩大间隔，则油耗恶化明显。这从图 8 放热率曲线可以得到解释，预主喷射间隔为 15°CA、25°CA、35°CA 时，喷入缸内的柴油开始放热的时刻基本一致，即间隔大于 15°CA 时，先行喷入缸内的燃料所处的环境温度很低，柴油并没有发生着火，而随着压缩过程的进行，三个工况的预喷柴油几乎同时达到着火条件开始燃烧。这可能会对功率和油耗产生不利影响，且随着预主喷射间隔的增大，这种不利影响越明显，主要是因为部分燃料在喷入过程中由于未着火而吸附于缸壁，其蒸发、雾化和破碎的过程受到影响，且随着预喷时刻的提前，吸附于缸壁的燃料越多。图 9 可以明显看出，预主喷射间隔角为 35°CA 时，有大量的燃油吸附于壁面，致其燃料利用率下降，油耗上升明显。而当预主喷射间隔为 25°CA，相比于 15°CA 的工况，油耗恶化不明显，主要是因为该工况基本没有或仅有极少的燃油吸附壁面。同时提前喷入的这部分燃料有利于缸内温度的降低，使 NO_x 排放下降。如图 8 所示，随着预主喷射间隔的增大，第一阶段放热率减少，放热结束时缸内的平均温度越低。

图 6~7 可以得到，预主喷射间隔为 5°CA 时，油耗是该策略下的最低值，相较于仅采用 EGR 的工况，油耗降低了 3.3%；预喷射量占总喷射量的 20% 时，NO_x 排放不满足 Tier III 排放法规的要求，但油耗相对于其他工况来说大大降低，相比于仅采用 EGR 的工况，油耗降低了 4.7%，基本接近原机油耗，且其 NO_x 排放仅高于法规限值的 3.3%。因此，考虑在此基础上选取合适的预主喷射间隔，一方面改善大比例预喷带来的高 NO_x 排放问题，同时充分发挥其降低油耗的优势。

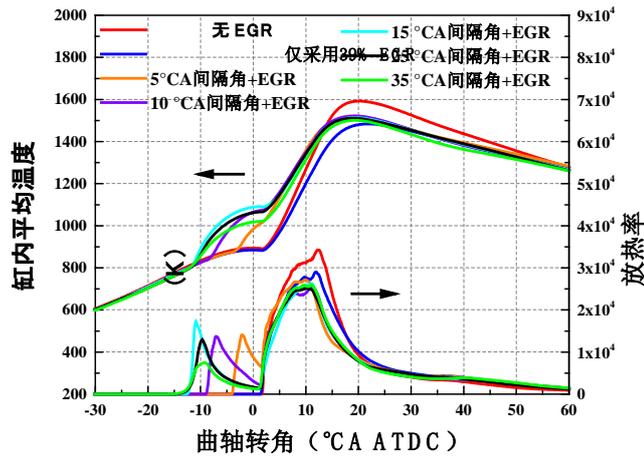


图 8 不同预主喷射间隔耦合 EGR 缸内温度和放热率变化曲线

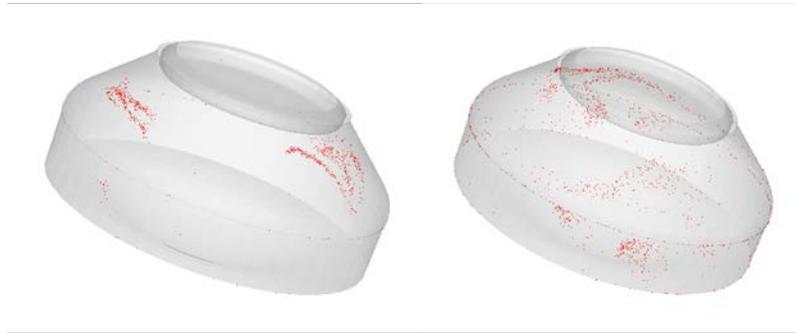


图 9 不同预主喷射间隔耦合 EGR 在-15°CA 处柴油粒子分布情况
(左为预主喷射间隔25°CA；右为预主喷射间隔 35°CA)

2.3 后喷射策略耦合EGR对燃烧和NO_x排放的影响

本文研究后喷射策略对船用柴油机性能和NO_x排放的影响时,是在 38.8%EGR 的基础上,保持两个喷油器的喷油规律相同,同时保持主喷时刻和喷油压力与原机一致。图 10 为后喷射策略示意图。具体研究方案为控制后喷射质量占总喷射质量的 10%一定,改变主后喷射间隔分别为 5°CA、10°CA、15°CA、20°CA;控制主后喷射间隔为 15°CA 一定,改变后喷射量分别占总喷射量的 5%、10%、15%、20%。探寻单变量对 NO_x 排放及油耗的影响规律,从而得出在 EGR 的基础上既能实现低 NO_x 排放又能实现低油耗的最佳后喷射策略。其中,主-后喷射间隔定义为后喷开始时刻和主喷结束时刻的曲轴转角。

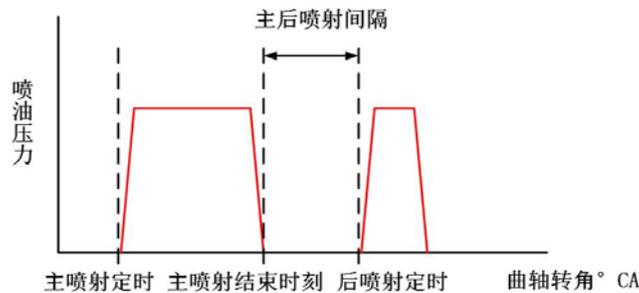


图 10 后喷射示意图

图 11 表达了保持后喷射量占总喷射量 10% 一定, 改变主后喷射间隔对 BSFC 和比 NO_x 排放的影响, 图 12 表达了保持主后喷射间隔为 15°CA 一定, 改变后喷射质量对 BSFC 和比 NO_x 排放的影响, 图中蓝色虚线以下区域代表符合 Tier III 排放法规的区域, 黑色虚线代表原机油耗水平。

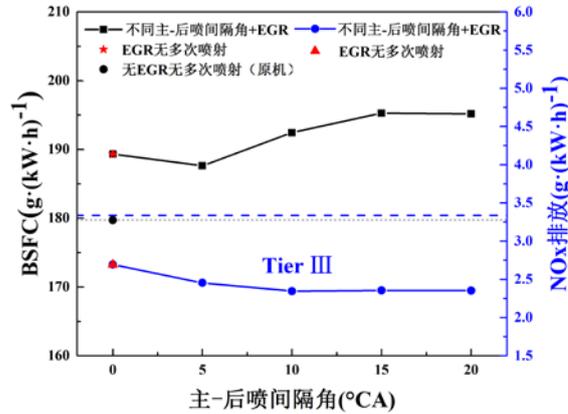


图 11 不同主后喷射间隔耦合 EGR 对 BSFC 和 NO_x 排放影响 (后喷射量为 10%)

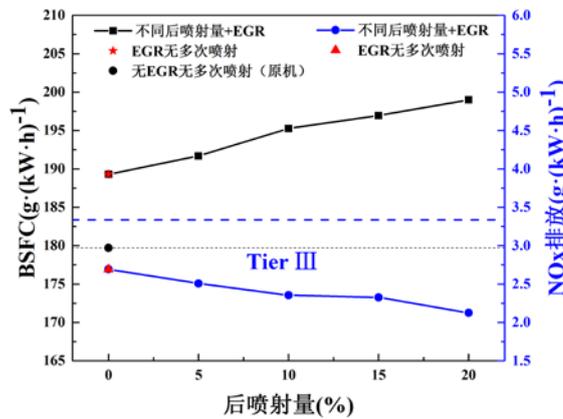


图 12 不同后喷射量耦合 EGR 对 BSFC 和 NO_x 排放影响 (主后喷射间隔 15°CA)

从图 11、13 可以看出, 采用后喷策略, 不论是增大间隔角还是增加后喷量, 总体上 NO_x 排放均呈下降趋势, 油耗则逐渐恶化, 仅在主后喷间隔较小时, 油耗低于仅采用 EGR 的工况。主要是由于后喷的引入使得高温区域燃烧的主喷燃油数量减少, 从而使整体燃烧温度下降, NO_x 排放下降, 且主后喷间隔角较大时后喷部分燃油的做功能力差, 从而油耗上升, 这种影响随着主后喷间隔及后喷量的增加而增大。图 11 可得, 主后喷间隔较小时, 相比于仅采用 EGR 的工况, 同时降低了 NO_x 排放及油耗, 后喷间隔角为 5°CA 时, NO_x 排放降低了 9%, 油耗降低了 1%。图 12 可得, 主后喷射间隔角较大时, 即使采用少的后喷量, 油耗恶化依旧十分明显, 如后喷量占总喷量的 5% 时, 相比于仅采用 EGR 的工况, 其 NO_x 排放降低了 7%, 但油耗增加了 1.1%。图 11、13 中所有工况均满足 Tier III 法规要求, 但油耗相比于无多次喷射的情况恶化显著。因此, 综合考虑低 NO_x 排放及低油耗, 应选取主后喷间隔角较小、后喷量较少的后喷策略, 同时可以考虑后喷与预喷射相结合的策略实现两者优势

互补，充分发挥后喷降 NO_x 的优势并通过预喷射改善其油耗，或耦合其他低油耗策略实现低 NO_x 排放及低油耗。

2.4 几种喷射策略耦合EGR综合影响

本文在单次预喷射及单次后喷射策略研究的基础上，研究了两次预喷射及单次预喷射结合单次后喷射对 BSFC 和比 NO_x 排放的影响，从而进一步完善多次喷射策略。具体研究方案如表 4 所示

表 4 不同多次喷油策略的喷射定时及燃油比例

喷射策略	第一次		第二次		第三次	
	喷射定时	燃油比例	喷射定时	燃油比例	喷射定时	燃油比例
预喷主喷	-15 °CA	15 %	0 °CA	85 %	—	—
主喷后喷	0 °CA	90 %	20.125°CA	10 %	—	—
两次预喷、主喷	-30 °CA	15 %	-15 °CA	15 %	0 °CA	70 %
预喷、主喷、后喷	-15 °CA	15 %	0 °CA	75 %	20.125 °CA	10 %

图 13 表达了在 38.8 % EGR 的基础上，研究不同喷射策略对 BSFC 和比 NO_x 排放的影响。从图中可以得到，预喷射有利于降低油耗，但会恶化 NO_x 排放，后喷射有利于降低 NO_x 排放，但是会恶化油耗。两者结合比如预喷射结合后喷射的方案，相比较于单次预喷射来说，NO_x 排放降低了 8 %，同时油耗降低了 0.8 %；相比于仅采用 EGR 的策略，油耗降低了 2.5 %，且该策略下 NO_x 排放依旧满足 Tier III 的法规要求。相比，两次预喷的策略 NO_x 恶化十分明显，即使耦合了 38.8 % 的 EGR，仍无法满足 Tier III 法规的要求。

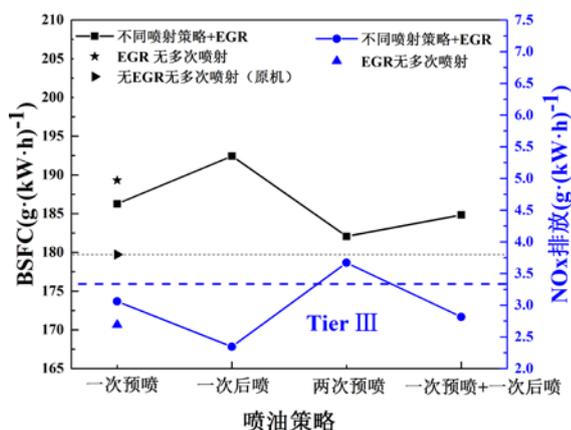


图 13 不同喷射策略耦合 EGR 对 BSFC 和比 NO_x 排放的影响

图 14 和图 15 是不同喷射策略下缸内局部温度和当量比分布云图，从图 14 可以看出，预喷射的引入会增加主喷射之前的缸内温度，从而主燃期缸内局部高温区更多，导致 NO_x 排放恶化，而后喷的影响则相反。同时，在一次预喷的基础上引入后喷，局部高温区得到了改善， NO_x 排放降低。从图 15 可以看出，采用一次后喷策略，其后燃烧期燃料浓区相比于其他策略增加明显，导致燃料燃烧不充分，燃烧持续期增大，油耗恶化。相比于一次预喷射，一次预喷射结合后喷射的策略，其主燃期的燃料浓区减少，燃烧后期虽然浓区有所增加，但增加的不明显，因此其油耗低于一次预喷时的油耗。从降低 NO_x 和油耗综合考虑，选取一次预喷结合一次后喷作为喷油策略更为合适。结合之前喷油策略的研究方案，本文认为，预主喷射间隔采用 25°CA ，预喷射量采用 20%，后喷选用小间隔角（如 5°CA ），小后喷量（如 5%）的策略较为合适。

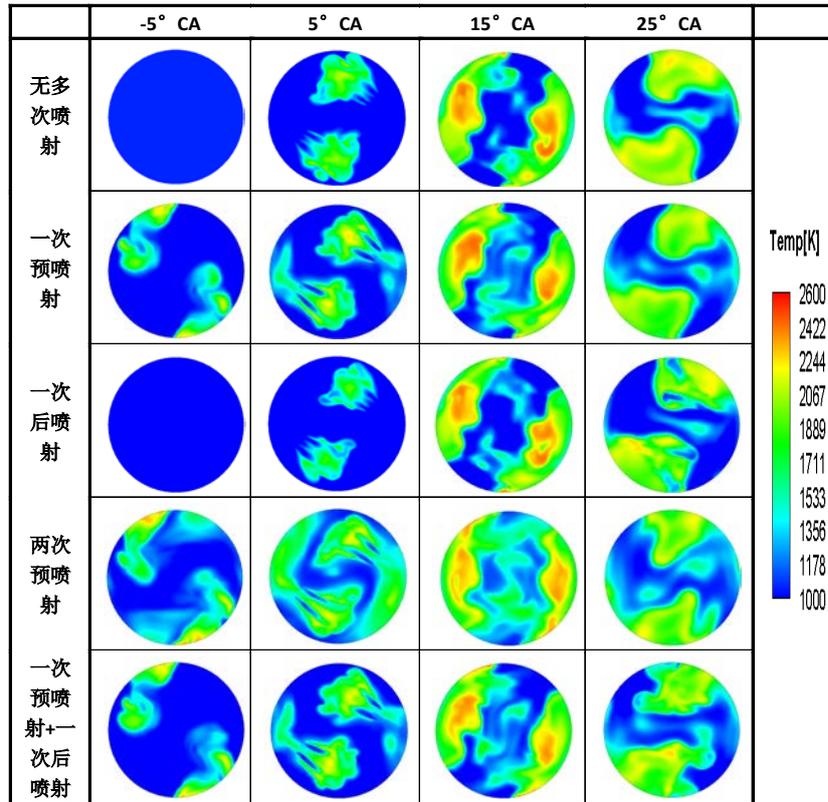


图 14 不同喷射策略耦合 EGR 缸内局部温度分布云图

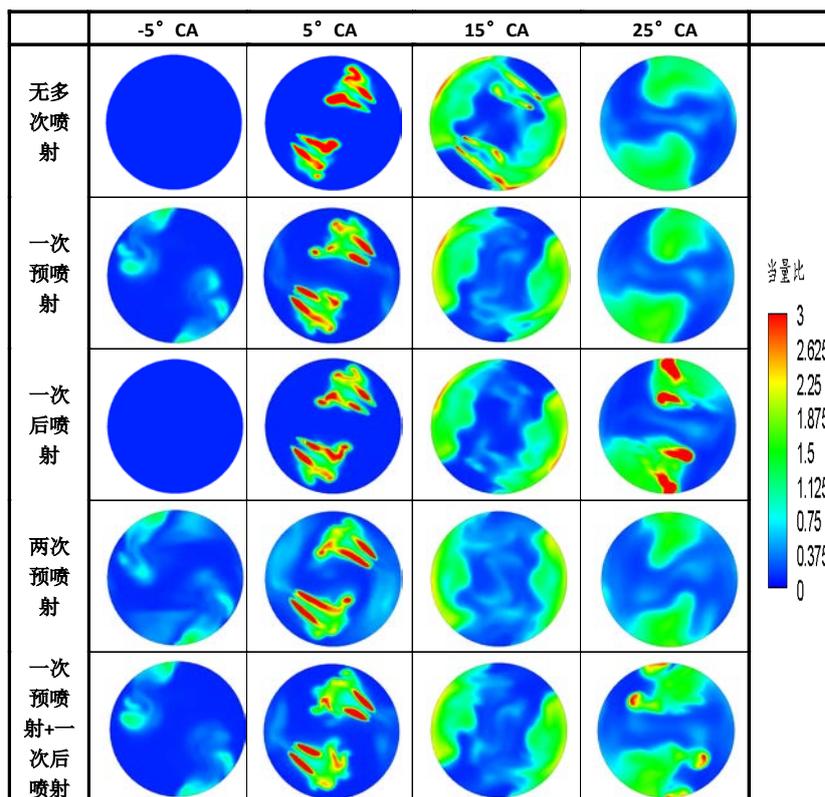


图 15 不同喷射策略耦合 EGR 缸内局部当量比分布云图

3 结论

- (1) 随着EGR率的增加，NO_x排放降低，有效燃油消耗率升高，放热率峰值降低，最高爆发压力降低。引入38.8%的EGR率，NO_x排放可以满足Tier III排放法规，但燃油消耗率显著增加，因此需要与其他策略相耦合从而实现低NO_x排放及低油耗，如与喷油策略相耦合。
- (2) 总体上，NO_x排放随着预主喷射间隔的增大而下降，随着预喷量的增加而增加，油耗水平变化趋势和NO_x排放相反。当预主喷射间隔为25°CA时，相比于预主喷射间隔为15°CA的工况，其油耗水平基本一致，NO_x排放降低明显，进一步扩大间隔，油耗恶化显著。在EGR的基础上降低油耗，应选取小间隔、预喷量大的策略。
- (3) 采用后喷策略，不论是增大间隔角还是增加后喷量，总体上NO_x排放呈下降趋势，油耗则逐渐恶化，仅在主后喷间隔较小时，油耗低于仅采用EGR的工况。综合考虑低NO_x排放及低油耗，应选取主后喷间隔角较小、后喷量较少的后喷策略。最佳选择应考虑与预喷射相结合的策略或者耦合其他低油耗策略实现低NO_x排放及低油耗。
- (4) 预喷射结合后喷射的方案，相比于单次预喷射来说，存在同时降低油耗与NO_x排放的可能，在此方案中，选取小间隔角小后喷量的后喷策略油耗效果最佳。相比，两次预喷的策略NO_x恶化十分明显，即使在有38.8% EGR的基础上，仍然无法满足Tier III的要求。

参考文献:

- [1] Asariotis R, Benamara H, Hoffmann J, et al. Review of Maritime Transport, 2013[J]. Review of Maritime Transport, 2013.
- [2] Kyrtatos N, Hellberg L, Poensgen C. Ten Years After: Results from the major programme HERCULES ABC on marine engine R&D[C]. CIMAC International Council on Combustion engines, 2013: 1-8.
- [3] 刘海峰, 张慧祥, 王泮, 等. 进气组分对低速船机 NO_x 排放的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2017, 23(4):313-319.
- [4] Corbett J J, Fischbeck P. Emissions from Ships[J]. Science, 1997. 278(5339):823-824.
- [5] 胡志龙, 崔毅, 邓康耀, 等. 柴油机米勒循环结合 EGR 的性能分析及优化[J]. 船舶工程, 2017(1):1-5.
- [6] Higashida M, N. T. O. I., Newly developed combined EGR & WEF system to comply with IMO NO_x regulation tier 3 for two-stroke diesel engine, in Proceedings of the 27th CIMAC Congress. 2013.
- [7] Emissions Control MAN B&W Two-Stroke Diesel Engines[J]. MAN B&W Diesel, CopenhagenDenmark, 2004.
- [8] 张俊军, 吴朝晖, 胡朝霞, 等. 船用低速二冲程柴油机燃烧与排放数值模拟研究[J]. 柴油机, 2012, 34(2):20-25.