

进气组分对低速船机燃烧及排放的模拟研究

Numerical Study about Components of the Air Intake Impact on Combustion and NO_x Emissions in Low-speed Marine Diesel Engine

江泉泉, 安世佳, 陈曦

天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室

摘 要: 低速二冲程船用柴油机中的燃烧具有大空间和大时间尺度的特点, 降低燃烧室内局部燃烧高温是降低 NO_x 排放的最有效措施之一。进气加湿和 EGR (废气再循环) 可改变进气中 N₂、O₂、CO₂ 和水蒸气的比例, 通过稀释效应和热效应降低缸内燃烧温度进而降低 NO_x 排放。本文基于 Converge 采用多维数值模拟方法研究了进气加湿、EGR 以及进气加湿耦合 EGR 对船用柴油机燃烧和 NO_x 排放的影响。研究表明, 随着进气加湿比例增大, 进气混合气比热容增大且氧浓度下降, 燃烧反应强度减弱, 缸内温度和压力下降, NO_x 排放减少; EGR 的稀释效应和热效应是降低缸内燃烧温度的主要原因, 由于 EGR 引入 CO₂ 导致进气混合气的比热容增大且氧浓度减小, 燃烧反应程度减弱, 缸内平均压力和温度峰值降低, NO_x 排放减少。在 EGR 和进气加湿的耦合作用下, 缸内 NO_x 明显减少, 其中 EGR30%和进气加湿比例 50%时对缸压影响相对较小, NO_x 排放影响较大, 可以作为 NO_x 减排方案的参考。

关键词: 二冲程柴油机; CONVERGE ; NO_x 排放; 进气加湿; 废气再循环

Abstract: The combustion in low-speed two-stroke marine diesel engines can be characterized as large spatial and temporal scales combustion. One of the most effective measures to reduce NO_x emissions is to reduce the local maximum combustion temperature. Intake humidifying and EGR (exhaust gas recirculation) can change the concentrations of N₂, O₂, CO₂ and water vapor in the scavenge box, which could effectively reduce the combustion temperature and thus lower NO_x. Based on the multi-dimensional numerical simulation method using Converge, the influence of intake humidifying and EGR and coupling with each other on the combustion and NO_x emission of marine diesel engines was studied. The results show that, with the increase of the proportion of the intake humidifying, the specific heat capacity increases and the oxygen concentration decreases, the combustion reaction intensity decreases, the temperature and pressure drop in the cylinder, so the NO_x emission decreases; The main reasons of the combustion temperature decrease are the dilution effect and thermal effect of the EGR. The specific heat capacity of the air intake mixture increases and the oxygen concentration decreases due to the introduction of CO₂, leading that the combustion reaction is weakened, the average pressure and temperature peak in the cylinder are reduced and the NO_x emission is reduced. Because of the coupling of EGR and intake humidification, the NO_x in the cylinder is obviously reduced. The influence on the pressure in cylinder of the EGR 30% and the humidification ratio of 50% is relatively small, but the influence on the NO_x emission is obvious. So the study can be used as a reference for NO_x emission reduction program.

Key words: two-stroke marine diesel engines; CONVERGE; NO_x emissions; HAM; EGR

柴油机以其高的热效率和可靠性占据了全球船舶动力系统 95%以上的市场份额。一方面,柴油机作为船舶的主要动力源,完成了全球贸易 70%的输运工作,另一方面也产生了大量的硫化物、NO_x 及颗粒物等污染物。为了限制以及控制船舶有害物质的排放,1997 年 9 月 27 日国际海事组织与各与会国达成《73/78 国际防止船舶造成污染公约》,其中附则 VI 中对船用柴油机 NO_x 排放作出了明确规定,并于 2005 年 5 月 19 日对所有签署协议国的船只生效^[1]。2008 年,IMO 批准了 MAPROL 公约附则 VI 修正案,会议明确要求降低 NO_x 的排放,要求 NO_x 排放控制分为三个阶段进行: Tier I 阶段从 2000 年起开始实施,低速机 NO_x 排放不超过 17g/kWh; Tier II 从 2011 年起开始实施,低速机 NO_x 排放不超过 14.4g/kWh,相比 Tier I 降低了 15%; 2016 年起在 NO_x 排放控制区域 ECA (Emission Control Areas) 实行 Tier III,低速机 NO_x 排放不超过 3.4g/kWh,相比上一阶段降低了 76%。由此可见,开展船用柴油机 NO_x 减排研究至关重要。

对于低速二冲程船用柴油机,其压缩比高,循环喷油量大,易形成许多局部高温区;同时,其转速低,高温区形成的时间长,因此其 NO_x 排放较高;针对当前 Tier III 阶段 NO_x 排放限制的要求,可采用机内净化和后处理两种途径来实现,如采用废气再循环 (EGR)、进气加湿 (HAM)^[2] 和选择性催化还原 (SCR) 等多种措施^[3]。由于船用低速二冲程柴油机通常以重油作为燃料,这种劣质燃油含硫量较高,燃烧后产生的硫化物容易导致催化剂中毒,使催化剂失活。因此应用 SCR 技术较为复杂,且成本较高,降低 NO_x 较困难。另一方面,采用基于 EGR 的技术路线,通过机内优化燃烧来控制 NO_x 排放是很有市场前景的技术途径之一,其主要面临的问题是船机常使用重油燃料,其中含硫量较高,导致排气中含有较多 SO_x,直接引入进气系统会造成涡轮增压系统的损坏。因此使用外部 EGR 要先对废气进行中和洗涤,然后利用鼓风机将处理后的废气引入气缸,一般使用的 EGR 率低于 40%。MAN 公司在一台船用低速二冲程柴油机上对外部 EGR 系统进行了实验。研究发现通过调节 EGR 率可以使发动机 NO_x 排放达到 Tier III 水平,但油耗增加了 5-6%^[4]。

船用柴油机机的空燃比较大,中小比例的 EGR 对油耗影响较小。但船机重油模式下,外部 EGR 需要特殊尾气处理系统对废气进行处理,这使得外部 EGR 降低 NO_x 的使用成本增加,因此需要探寻其他技术结合低比例 EGR 率来降低 NO_x 排放。进气加湿技术 (HAM) 是指在燃烧过程中通过加入水,借助水的汽化潜热吸收燃烧放热量来降低燃烧温度,抑制 NO_x 产生的技术手段。研究表明,三倍燃油质量的水蒸气可以降低 70%的 NO_x 排放^[5]。

EGR 和 HAM 技术都能有效降低 NO_x 的排放,EGR 存在成本和油耗方面的问题,HAM 对经济性影响较小,但其单独使用难以满足 Tier III 阶段对 NO_x 减排的要求。对柴油机的燃烧及排放过程可以采用实验及数值模拟的方法,但对外形庞大、结构复杂、输出功率高的船用柴油机来说,采用实验方法成本高、周期长、适用性差,同时,数值模拟的方法能解决实验方法的不足。

本文主要应用 Converge 建立低速二冲程船机的 CFD 计算模型,系统研究了 EGR 和 HAM 对低速二冲程船机燃烧和排放的影响,探讨通过使用 EGR、HAM 等技术耦合策略,以此来满足 Tier III 排放法规的技术路线。

1 模型的建立及验证

本文中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 340 缸径的船用低速二冲程柴油机。由于本文主要对柴油机缸内燃烧及排放过程开展研究,为了节省计算成本,提高计算效率,本文在建立三维计算模型中除去柴油机扫气系统和排气系统,只计算柴油机扫气口及排气阀关闭的燃烧阶段。为了正确模拟扫气结束后缸内流场,根据沪东重机对该船用柴油机扫气过程实验和

模拟计算后提供的涡流比数据, 本文将计算初始时刻涡流比设置为 4。计算模型及初始时刻的边界条件均由沪东重机提供。本文对该船用低速二冲程柴油机燃烧室建立三维计算模型如图 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 1 所示。针对 Converge 中其他的喷雾模型, 本文的液滴碰壁模型采用 Rebound/slide 模型, 液滴碰撞模型采用 NTC 模型, 液滴蒸发模型采用 Frossling 模型, 液滴湍流扩散模型采用 O'Rourke 模型。

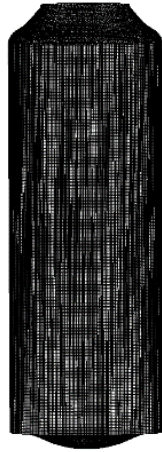


图 1 低速二冲程船用柴油机计算模型

表 1 主要计算的子模型

湍流模型	RNG $k-\epsilon$ 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

本文中重油物性参数取自 Kyriakides^[6]的研究结果, 其中包括动力粘度, 表面张力, 蒸汽压, 蒸发热和比热容。重油的热导率设为与柴油的热导率相同。以此来研究该船机在此计算工况下, EGR、HAM 及两者耦合策略对缸内燃烧及排放的影响。由于缺少所研究机型燃用重油时的实验数据, 天津大学的卫海桥、陈曦等人基于定容弹对重油的喷雾特性进行标定, 标定后喷雾模型与喷雾的实验数据吻合较好^[7]。本文采用的重油物性参数与标定采用的一致, 因此本文基于此模型继续开展进气组分对低速船机燃烧及 NO_x 排放的模拟研究。

2 计算结果讨论及分析

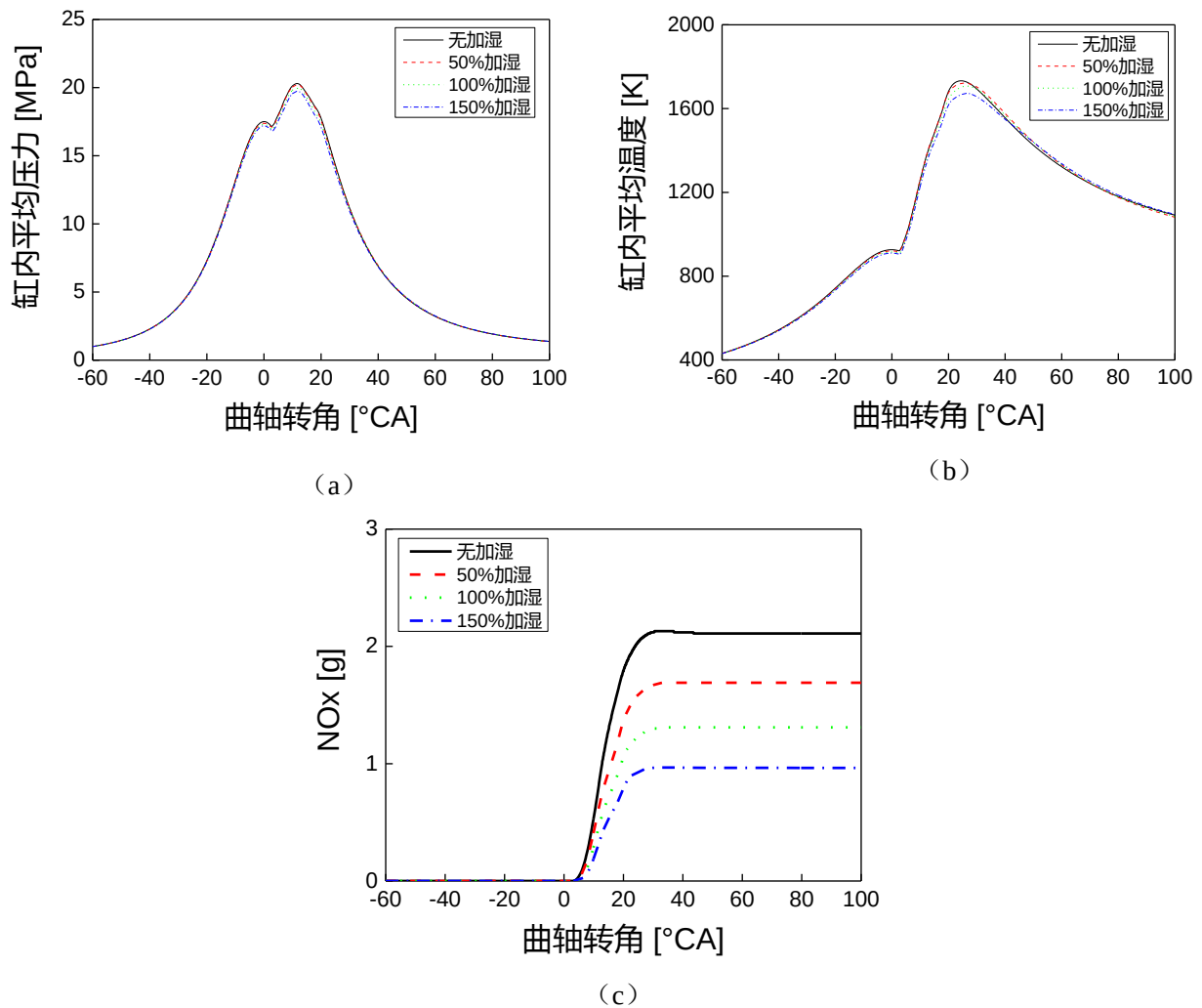
2.1 不同加湿比例的 HAM 对燃烧和 NO_x 排放的影响

为了研究进气加湿技术对船用低速二冲程柴油机燃烧和排放的影响, 本文对不同进气加湿比例下船用柴油机燃烧和 NO_x 排放进行了研究。其中加湿比例定义为进气中水蒸气与每循环燃油质量之比, 具体加湿比例下进气中各组分质量分数如表 2。

表 2 不同加湿比例下各组分质量分数

加湿比例	O ₂	N ₂	H ₂ O
无加湿	23.30%	76.70%	0%
50%加湿	22.90%	75.38%	1.72%
100%加湿	22.49%	74.04%	3.47%
150%加湿	22.07%	72.66%	5.26%

本文对不同加湿比例船用柴油机燃烧和排放进行数值模拟，缸内平均压力、温度和 NO_x 排放结果如图 2 所示。从图 2 可以看出，随着进气加湿比例从 0%增大到 50%，缸内平均压力峰值降低 1bar，缸内平均温度峰值降低 11K，NO_x 排放质量减小 20%；加湿比例从 50%增大到 100%，缸内平均压力峰值降低 3bar，缸内平均温度峰值降低 25K，NO_x 排放质量减小 38%；加湿比例增大到 150%，缸内平均压力峰值降低 5bar，缸内平均温度峰值降低 60K，NO_x 排放质量减小 55%。由此可见，随着进气加湿比例增大，其对缸内燃烧和排放的影响程度也相应增大。总体来说，随着进气加湿比例增大，缸内平均压力和温度峰值降低，NO_x 排放降低。

图 2 不同加湿比例对船机燃烧和 NO_x 排放的影响

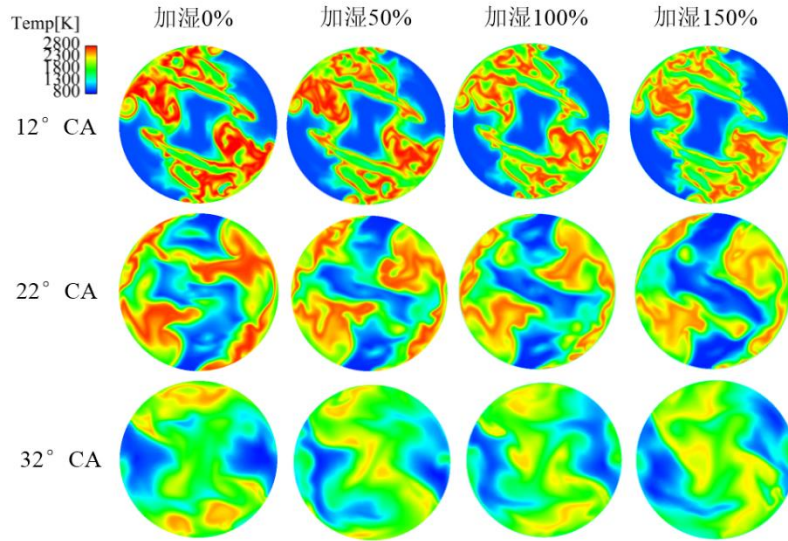
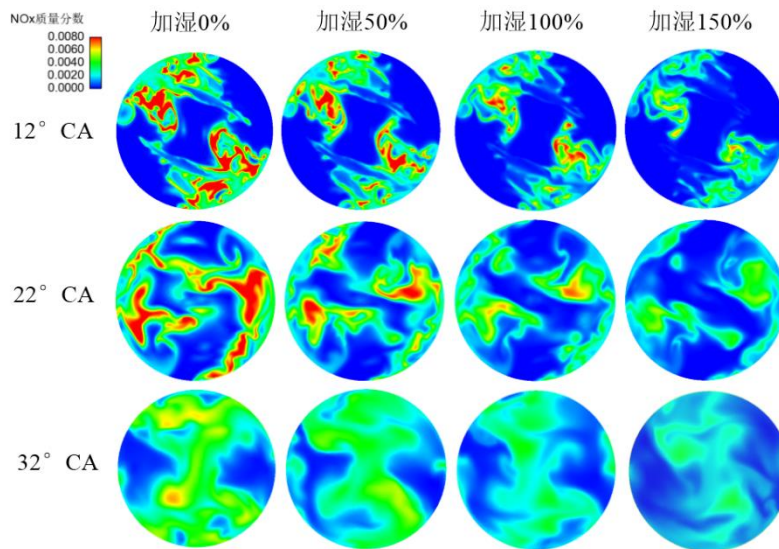


图 3 不同进气加湿比例下缸内温度分布

图 3 所示是不同进气加湿比例下缸内温度的分布图。从图中可以看出随着进气加湿比例增大，高温区的温度明显下降，且高温区范围变小，这是由于增加进气混合气中水的比例导致混合气比热容增大，吸热能力增强，同时混合气中氧气的比例有一定的下降导致燃烧反应强度减弱。而高温富氧区域是 NO_x 产生的主要区域，因此燃烧温度和氧浓度的降低会导致 NO_x 的生成减少。图 4 所示是不同进气加湿比例下缸内 NO_x 的分布图。从图中可以看出 NO_x 的分布区域与图 4 中高温区基本重合，随着进气加湿比例增大， NO_x 质量分数逐渐减少且分布区域减小。

图 4 不同进气加湿比例下 NO_x 分布

2.2 不同比例 EGR 对燃烧和 NO_x 排放的影响

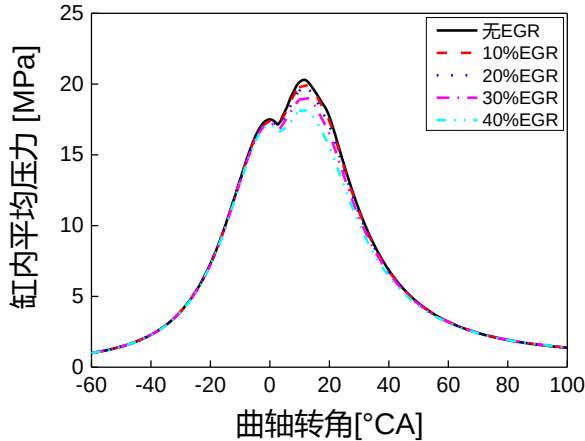
本文通过改变 EGR 率研究不同比例 EGR 船用柴油机缸内压力、温度、 NO_x 排放的变化。其中 EGR 率定义为进气中 EGR 气体的质量和总进气混合气质量之比^[8]。为了简化计算，环境空气中 CO_2 和排气中 H_2O 忽略不计。考虑到船用柴油机的循环变动和燃烧稳定性，本文研究最大 EGR 率为 40%，不同 EGR

率下各组分质量分数如表 3 所示。

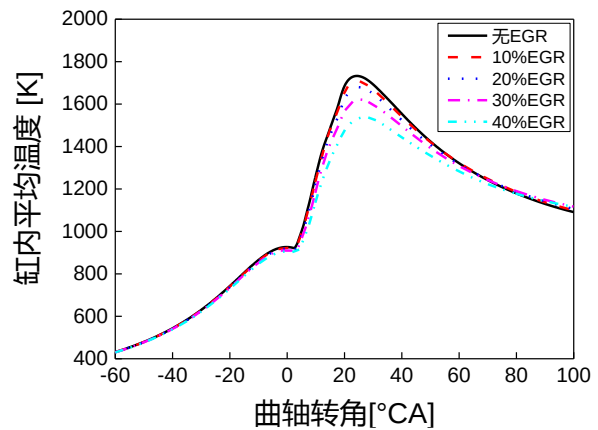
表 3 不同 EGR 率各组分质量分数

EGR 率	O ₂	N ₂	CO ₂
无 EGR	23.30%	76.70%	0%
10%EGR	22.17%	76.70%	1.13%
20%EGR	20.77%	76.70%	2.53%
30%EGR	18.99%	76.70%	4.31%
40%EGR	16.64%	76.70%	6.66%

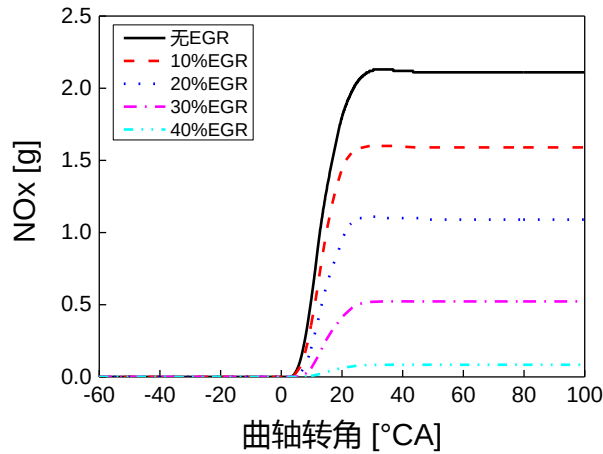
本文对不同 EGR 率下船用低速二冲程柴油机燃烧和排放过程进行数值模拟研究, 缸内平均压力、温度和 NO_x 排放结果如图 5 所示。从图 5 可以看出, 从无 EGR 到 EGR 率为 10%, 缸内平均压力的峰值下降 3bar, 缸内平均温度峰值下降 23K, NO_x 排放减少 25%; EGR 率升高到 20%, 缸内平均压力的峰值下降 6bar, 缸内平均温度峰值下降 53K, NO_x 排放减少 48%; 当 EGR 率升高到 30%, 缸内平均压力的峰值下降 12bar, 缸内平均温度峰值下降 111K, NO_x 排放减少 75%; 当 EGR 率升高到 40%, 缸内平均压力的峰值下降 22bar, 缸内平均温度峰值下降 195K, NO_x 排放减少 96%。由此可见, 缸内温度、压力和 NO_x 排放并非随 EGR 率均匀变化, EGR 率越高, 其对缸内燃烧和排放过程的影响越大。总体来说, 随着 EGR 率升高, 由于 EGR 引入 CO₂ 导致进气混合气的比热容增大且氧浓度减小, 燃烧反应程度减弱, 缸内平均压力和温度峰值降低, NO_x 排放减少。通过 EGR 与进气加湿对 NO_x 排放影响的对比可以发现, HAM 降低 NO_x 排放的能力弱于 EGR, 即使在加湿比例 150% 时, NO_x 排放也无法满足 Tier III 排放法规。



(a)



(b)



(c)

图 5 不同 EGR 率对船机燃烧和 NOx 排放的影响

2.3 进气加湿耦合 EGR 对船机燃烧和 NOx 排放的影响

模拟研究发现 EGR 和 HAM 都是降低 NOx 的有效措施。根据沪东重机提供的实验数据, 相对于 EGR 率从 0% 到 30% 变化, EGR 率从 30% 增加到 40% 时, 循环变动增大, 功率和油耗严重恶化。由于燃烧过程中功率、油耗与 NOx 排放存在折衷关系, 为了在降低 NOx 排放的过程中实现燃烧过程最优化, 本文选择 30%EGR 下对不同进气加湿比例船用柴油机燃烧和排放过程进行了数值模拟研究。30%EGR 下不同进气加湿比例进气各组分质量分数如表 4 所示。

表 4 不同进气加湿比例下各组分质量分数

进气加湿比例	O ₂	N ₂	CO ₂	H ₂ O
原机	23.30%	76.70%	0%	0%
30%EGR	18.99%	76.70%	4.31%	0%
30%EGR+50%加湿	18.67%	75.42%	4.24%	1.67%
30%EGR+100%加湿	18.36%	74.18%	4.17%	3.29%
30%EGR+150%加湿	18.06%	72.98%	4.11%	4.85%

如图 6 所示是在 30%EGR 率下不同进气加湿比例对缸内燃烧和 NOx 排放的影响。从图中可以看出, 相比原机, 随着 EGR 率从 0% 升高到 30%, 缸内平均压力的峰值下降 12bar, 缸内平均温度峰值下降 111K, NOx 排放减少 75%; 随着进气加湿比例从 0% 增大到 50%, 缸内平均压力峰值降低 17bar, 缸内平均温度峰值降低 180K, NOx 排放质量减小 88%; 加湿比例从 50% 增大到 100%, 缸内平均压力峰值降低 19bar, 缸内平均温度峰值降低 180K, NOx 排放质量减小 92%; 加湿比例增大到 150%, 缸内平均压力峰值降低 23bar, 缸内平均温度峰值降低 208K, NOx 排放质量减小 96%。总之, 随着进气加湿比例增大, 缸内平均压力峰值变化增大, 但 NOx 排放均匀变化, 因此选取 30%EGR 和 50% 进气加湿耦合对缸压影响较小, NOx 排放影响较大, 可以作为 NOx 减排方案的参考。

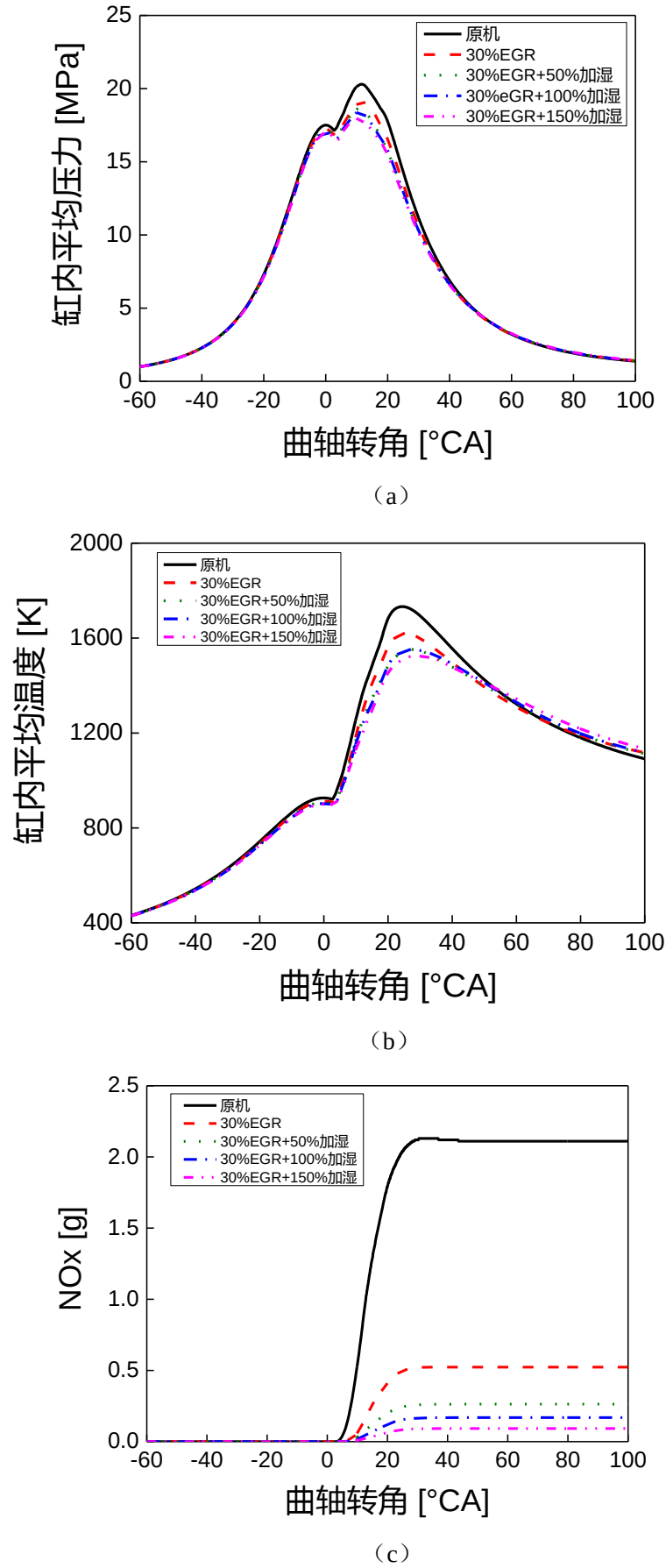


图 6 EGR 和进气加湿耦合对船机燃烧和 NOx 排放的影响

图 7 所示是 EGR 和进气加湿耦合下缸内温度的分布图。从图中可以看出随着引入 EGR 和进气加湿技术，缸内温度明显下降，且随着进气加湿比例增大，温度下降更加明显。这是由于进气混合气通过 EGR 和进气加湿引入 CO_2 和 H_2O ，导致混合气比热容增大，吸热能力增强，同时 O_2 浓度下降，燃烧反应程度减弱，因此缸内温度下降。而高温富氧是 NO_x 生成的必要条件，图 8 所示是 EGR 和进气加湿耦合下缸内 NO_x 的分布图，可以看出随着进气加湿比例增大到 150%，缸内基本没有 NO_x 产生。

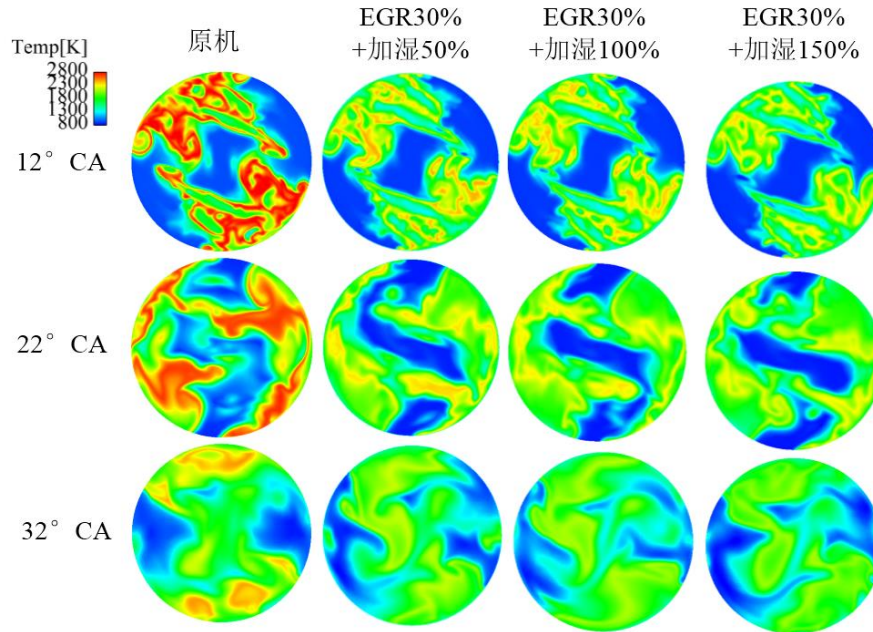


图 7 EGR 和进气加湿耦合下缸内温度的分布图

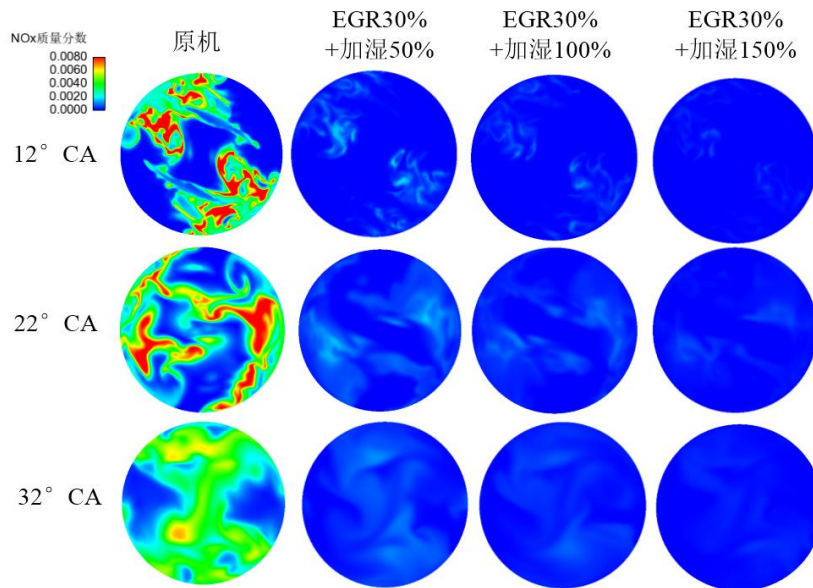


图 8 EGR 和进气加湿耦合下缸内 NO_x 的分布图

3 结论

本文通过采用多维数值模拟的方法,系统研究了进气加湿、EGR 以及进气加湿耦合 EGR 对船用柴油机燃烧和 NO_x 排放的影响,主要结论如下:

(1) 随着进气加湿比例增大,进气混合气比热容增大且氧浓度下降,燃烧反应强度减弱,缸内温度和压力下降,NO_x 排放减少。但即使较高比例的加湿量也不能满足 Tier III 的排放法规要求。

(2) 随着 EGR 率升高,由于 EGR 引入 CO₂ 导致进气混合气的比热容增大且氧浓度减小,燃烧反应程度减弱,缸内平均压力和温度峰值降低,NO_x 排放减少。

(3) 在 EGR 和进气加湿的耦合作用下,缸内 NO_x 明显减少,其中 EGR30%和进气加湿比例 50%时对缸压影响相对较小,NO_x 排放影响较大,因此可以作为 NO_x 减排方案的参考。

参考文献:

- [1] Wilcox R, Burrows M, Ghosh S, et al, Risk-Based Technology Method for the Safety Assessment of Marine Compressed Natural Gas Fuel Systems[J], Marine Technology, 2001, 38(38):193-207.
- [2] 冷先银, 隆武强, 现代船用柴油机 NO_x 排放的机内净化技术[J], 柴油机, 2009, 31(2):19-25.
- [3] Emissions Control MAN B&W Two-Stroke Diesel Engines[J], MAN B&W Diesel, CopenhagenDenmark, 2004.
- [4] Diesel MAN. Exhaust gas emission control today and tomorrow[J], Copenhagen: MAN Diesel, 2009, 36.
- [5] Prior, Andrew, Hannu Jaaskelainen, and Janette Walsh. Nox Emission Study: an Investigation of Water-Based Emission Control Technologies, No. TP 14497E. 2005.
- [6] Stamoudis N, Chrysakakis C, Kaiktsis L. A two-component heavy fuel oil evaporation model for CFD studies in marine Diesel engines[J], Fuel, 2014, 115(1):145-153.
- [7] 卫海桥, 陈曦, 周磊, 等, 涡流对船用柴油机喷雾燃烧及排放影响的数值研究[J], 天津大学学报(自然版)(已录用).
- [8] Ladommatos N, The dilution, chemical, and thermal effects of exhaust gas recirculation on diesel engine emissions. Part 2: Effects of carbon dioxide[J], Fuel & Energy Abstracts, 1997, 38(3):186-186.