综述与机型

船舶柴油机 IMO Tier III 减排技术趋势研究

何志卿,康志忠,季建新,罗如新

(上海沪江柴油机排放检测科技有限公司, 上海 200136)

摘　要: 在简单介绍 IMO Tier II 减排技术的基础上, 着重阐述了应对 IMO Tier III 的减排技术, 包括 SCR、EGR 和 LNG 发动机等, 分析了这些技术的减排性能与存在的关键问题, 以把握 IMO 规范下减排技术发展动态与趋势, 为应对日益严苛的排放法规寻求良策。

关键词: 船舶柴油机; 减排技术; 性能

中图分类号: TK421⁺.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1001-4357(2014)06-0001-05

IMO Tier III Abatement Tech Trends of Marine Diesel Engines

He Zhiqing, Kang Zhizhong, Ji Jianxin, Luo Ruxin

(Shanghai Hujiang Diesel Engine Emission Test Scie-Tech. Co., Ltd., Shanghai 200136)

Abstract: Based on the brief introduction of the IMO Tier II abatement technologies, the IMO Tier III abatement technologies, including SCR, EGR and LNG engines are expounded in detail. The emissions reduction capabilities and the major issues of these technologies are analyzed to master the abatement technology trends and find out the solutions under the IMO regulations.

Keywords: marine diesel engine; emissions reduction technology; performance

0 引　言

海洋运输支撑着近 85% 的国际贸易, 其中有 70% 航行在离海岸 400km 范围内[1]。尽管与陆运、铁路和空运等相比, 航运业是一种最具碳效率(the most carbon-efficient)的运输模式, 但随着经济全球化和世界贸易的繁荣, 船舶废气对近海岸数百公里范围内的空气质量的影响日益严重。国际海事组织(IMO)通过旗下海洋环境保护委员会(MEPC)致力于制定和改进政策, 努力减少船舶对海洋及大气的污染。

据估计[1], 商用航运部门能源需求约占 1.75% 的世界总能源需求和 5% 的世界原油消耗。因此, 海事部门被期望将其对全球大气污染的影响限制在化石燃料燃烧排放的 5% 以内[2]。根据 MAN 公司参与欧盟项目 "关于使用低硫燃料及其对海洋产业影响" 的试验结果, 以 HFO(重油)为燃料的二冲程低速柴油机燃烧(燃料: 175 ($g\cdot(kW\cdot h)^{-1}$)、97% HC、3% S; 空气: 8.5 ($g\cdot(kW\cdot h)^{-1}$)、21% O_2、79% N_2; 润滑油: 1 ($g\cdot(kW\cdot h)^{-1}$)、97% HC、2.5% Ca、0.5% S)后典型废气组成为: 13% O_2、75.8% N_2、5.2% CO_2、5.35% H_2O、$1500\times10^{-6}NO_x$、$600\times10^{-6}SO_x$、60×10^{-6} CO、180×10^{-6} VOC(挥发性有机物)、120 ($mg\cdot Nm^{-3}$) DPM(柴油颗粒物)[5]。其中, 船舶排放的 NO_x 至少占全球总量的 15%(高于全球车辆排放的总和), GHG(温室气体)约占 2.5% ~ 4%, SO_x 约占 3% ~7%, BC(黑炭)约占 5%[2]。

为了减少船舶的环境足迹(the environmental footprint), 1997 年 IMO 通过了 MARPOL 73/78 公约 1997 年议定书, 新增附则 VI, 即 "防止船舶造成空气污染规则"。2008 年 10 月, MEPC 通过了 MARPOL 附则 VI 修正案, 并于 2010 年 7 月 1 日生效。该修正案要求逐步减少船舶 SO_x 排放和船用发

收稿日期: 2014-04-29; 修回日期: 2014-06-12

作者简介: 何志卿,女,高级工程师,主要研究方向为内燃机排放检测,E-mail:office@hjtest.com。

万方数据

动机 NO_x 排放；对于特殊的排放控制区，设定船舶排放的 SO_x 和 PM(颗粒物)或 NO_x，或全部三种类型的限值。

IMO 关于船用燃油最高含硫量标准：从 2012 年 1 月 1 日开始由 4.50% 降低到 3.50%，到 2020 年 1 月 1 日则降低到 0.5%(根据 2018 年关于所需燃油可用性的审核结果，这一日期可能被推迟到 2025 年 1 月 1 日)；在排放控制区(ECA)内：从 2010 年 7 月 1 日起燃油最高含硫量标准为 1.00%，到 2015 年 1 月 1 日降到 0.1%。

对 NO_x 的控制要求，根据其安装日期，新主机执行更为严格的 NO_x 排放标准，Tier II 相对于 Tier I 降低排放 20% 左右，Tier III 相对于 Tier I 降低排放 80%。2014 年 4 月在伦敦召开的 MEPC 66 次会议对原 Tier III 条款做了修订：增加对娱乐性游艇推迟至 2021 年执行的条款；原 Tier III 实施日期 2016 年 1 月 1 日继续适用于目前的 NO_x 排放控制区(NECAs)；在一个新 ECA 通过之日或以后建造的船舶，或者在指定该 ECA 修正案中规定的更迟的日期或以后建造的船舶(取晚者)应符合 Tier III。Tier III 只适用于运行在 NECAs 内的指定船只。目前，波罗的海区域和北海区域(包括英吉利海峡)仅为 SO_xECA，而北美区域和美国加勒比海区域为 SO_x、NO_x 和 PM 三者的 ECA。尽管北海国家于 2010 年启动了“关于设立北海 NECA 的环境和经济影响”的研究，但根据 MEPC 66 次会议精神，北海和波罗的海以及其他区域不会在 2016 年之前成为 NECA。

2011 年 7 月，MEPC 通过对 MARPOL 73/78 Annex VI 的修订，新增了船舶能源效率条例，是第一个全球性的强制性温室气体减排制度。从 2013 年开始，所有船只被要求实施能源效率管理计划，包括监测燃料消耗。由于存在“柴油困境(the diesel dilemma)”，船舶能源效率管理计划必将促进新的减排技术和更好的船舶运营模式。

本文在简单总结 IMO Tier II 减排技术的基础上，着重阐述 IMO Tier III 减排技术，分析这些技术的减排性能与存在的关键问题，以把握 IMO 规范下减排技术的发展动态与趋势，为应对日益严苛的排放法规寻求良策。

1 船舶柴油机 IMO TierII NO_x 减排技术

船舶柴油机 IMO TierII NO_x 减排技术一般为初级技术，即在 NO_x 生成之前，通过对发动机参数进行调整或在发动机之前采取措施来减少发动机 NO_x 的形成，这些措施主要包括发动机内部修正技术和水-基 NO_x 削减技术。

1.1 发动机内部修正技术

柴油发动机 NO_x 排放可以通过发动机的设计和校准来进行控制。涡轮增压、滑阀、燃料供应策略和燃烧室优化等都具有高达 20% 的 NO_x 减排潜力，但可能对燃油消耗产生不利影响。米勒气门正时结合涡轮增压可减少 NO_x 排放，而不增加燃油消耗。在共轨燃料喷射技术中，计算机系统控制燃料喷射正时和喷射压力。然而，由于“柴油困境”问题，须要权衡考虑 NO_x 排放控制与燃油消耗。

1.2 水-基 NO_x 削减技术

水-基 NO_x 削减技术是通过将水引入气缸来降低燃烧温度，包括：混合水、燃料(WIF)，水直接喷射入气缸(DWI)或以增压空气引入湿度(HAM)等方法。WIF 通过乳化加水至 HFO，增加黏度，发动机制造商已证明仅使用燃料-水乳液可以实现高达 50% 的 NO_x 削减[4]。DWI 是通过控制水量，在燃烧前将水注入到二冲程或四冲程发动机气缸内。据报道，当使用 40% ~70% 的水/燃料比时，DWI 可以降低 NO_x 排放 50% ~60%，而不影响发动机功率。HAM 系统是在燃烧过程中使用富含蒸发海水的增压空气来减少 NO_x 排放，也被用来取代传统的发动机空气冷却器，HAM 发动机可以减少 NO_x 高达 70%，但目前的研究还不能确定 HAM 能满足 Tier III 标准。

上述 Tier II 减排技术，目前均还没有被考虑作为一种能满足 Tier III 的独立方法，但通过与其他方法的结合有望满足 Tier III 减排标准。

2 船舶柴油机 IMO TierIII NO_x 减排技术

目前，主要发动机厂商关注的 Tier III 技术包括：初级技术 EGR、次级技术 SCR 和 LNG(双燃料)技术，且各有侧重点，例如 MAN 对于二冲程发动机，考虑 SCR 和 EGR 技术[7]，Wärtsilä 则倾向于 SCR 和双燃料发动机[9]。

2.1 选择性催化还原(SCR)技术

SCR 已在全球范围内的工业、陆运及航运业用柴油机中得到应用，已有 500 多套 SCR 系统被安装到海洋船舶上，实现最高达 95% NO_x 减排。SCR 是唯一的次级技术，即在 NO_x 生成之后，再减少 NO_x 排放的技术。调查显示：在四冲程船用发动机

万方数据

使用蒸馏燃油时，应用的 SCR 是一项成熟技术；而对二冲程发动机(前置-涡轮增压)，SCR 仍处于小规模试验阶段。SCR 的主要优点是它允许在开/关模式之间切换，针对 NECAs 内外改变排放策略。它最适合于在稳定的高负荷运行工况下使用，而不太适合于在沿海和港湾区域低负荷运行时使用 。

2.1.1　SCR 基本原理

SCR 的基本原理是：来自发动机的排气被引导通过催化剂，在反应温度高于 500K(温度取决于燃料成分)时，氨(NH_3)还原 NO_x 成 N_2 和水：

$$NO + NO_2 + 2NH_3 \rightarrow 2N_2 + 3H_2O$$

氨在正常的存储温度 20℃(沸点 -33 ℃)下是气体，有毒性和腐蚀性，因此必须在高压或低温下存储。为便于贮存，采用尿素的水溶液 $CO(NH_2)_2$ 在高温的排气存在下加热分解，再与空气和水反应后形成氨和异氰酸；所生成的氨在 SCR 催化剂表面反应，以完成 NO_x 的还原。

2.1.2　SCR 关键技术

SCR 的三个关键技术问题为：低温下运行 SCR 系统；氨逃逸及催化剂退化。

2.1.2.1　燃料硫含量、发动机运行工况与废气温度

废气温度同时受 SCR 上游(为了避免还原剂的氧化)和下游(为防止形成副产物如硫酸铵)的约束；过低的废气温度会降低氨的 NO_x 还原速率，氨还可能与燃料中的硫反应生成硫酸铵，堵塞催化剂，进一步退化 SCR 的 NO_x 还原能力。因此，燃料中的硫也是 SCR NO_x 减排技术的挑战之一。燃料硫含量与 SCR 还原温度之间的关系见图 1。

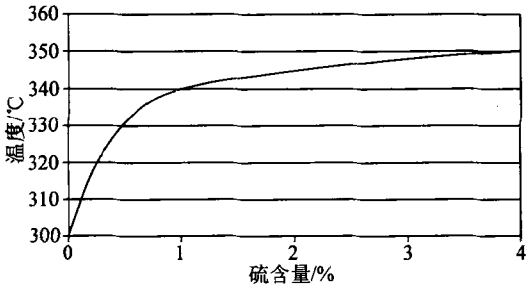

图 1　燃油中的硫含量(%)与推荐的催化剂最低运行温度[8]

曲线示出了最小排气温度和燃料中硫含量之间的权衡，以达到良好的效率和耐久性。当使用 0.1% 含硫量的船舶馏分燃料时，SCR 系统进行有效还原的最低排气温度须接近 270 ℃；使用重油时，硫含量接近 2.5%，要求排气温度约为 345 ℃。因此，SCR 系统必须被安装在废气温度足够高的地方，以确保化学反应的效率。对于二冲程发动机，其废气温度通常比四冲程发动机低，因此，其 SCR 必须被放置在涡轮增压器的前面，在这种情况下，SCR 系统可以与用于除去 SO_x 的湿式或干式洗涤器结合使用，从而可以以高硫燃料运行。

由于 SCR 是一项后置技术，当船舶在 15% ~ 50% 的低负荷下运行时，要保持足够高的温度是一个挑战。一般采用降低增压空气的冷却水平或修改喷射定时，或在低功率运行期间使用燃烧器系统等来提高废气温度。因此，较低的排气温度可能限制二冲程发动机和双级涡轮增压发动机的 SCR 效率，由此 SCR 被放置在涡轮系统之前，在发动机室内，而不是在烟囱中，这又存在一个空间约束问题。

2.1.2.2　NO_x 转化率与 NH_3 逃逸间的平衡

有些氨可能穿过反应器而没有参与任何的化学反应，这称为氨逃逸(Ammonia Slip)。氨逃逸会产生令人不愉快的气味，会导致一些沉积；同时也是一种浪费。在高温废气(大于 250 ℃)的存在下，尿素水解形成 NH_3，NH_3 在 SCR 催化剂表面完成 NO_x 还原反应。理论上，如果 NH_3/NO_x 的比例 α 为 1 ∶ 1，催化剂内的空间速度不会过大(即有充足的时间使反应发生)，可以实现 100% 的 NO_x 转化率。

尿素消耗量主要取决于 NO_x 的减排量和氨逃逸的控制水平，尿素喷射策略以及期望的 α 值则取决于废气条件，即废气的温度和 NO_x 的数量。由于船舶的空间限制，通常取 α 值为 0.85 ~ 1.0 以平衡高的 NO_x 转化率与低的 NH_3 逃逸。在一个正常运行的催化剂和喷射系统中，一般氨逃逸不会高于 10×10^{-6} 的限制。可以通过连续监测 SCR 催化剂出口处的 NO_x 排放值，及更精确地调节尿素溶液的喷射来防止氨逃逸[10]。

2.1.2.3　SCR 催化剂活性退化问题

催化剂单元位于 SCR 反应器内的钢架包中，砖形催化剂单元具有蜂窝状结构，以增加催化反应表面积。商用 SCR 催化剂最常见的是以二氧化钛(TiO_2)为支撑的五氧化二钒(V_2O_5)，并含有三氧化钨(WO_3)作为助催剂。由于钒基 SCR 催化剂在典型的发动机排气温度窗口内具有高活性和对硫的耐受性，所以被大量用于船舶。

影响催化剂性能的主要因素是排气温度低、燃料含硫量高和低负荷运行，使得 SCR 催化剂性能不可避免地随时间退化。催化剂性能的退化不仅影响 NO_x 减排效率，也影响催化剂的使用寿命和更换的周期，从而影响 SCR 的成本。安装于使用典型船舶燃料船只的催化剂单元的预期催化剂寿命一般为：满足 3 ~ 6 年或 12 000 ~ 24 000 运行小时。

万方数据

解决催化剂退化的方法包括：仅在ECAs内采用SCR；使用低硫燃料；将还原剂扩散技术引入到催化剂；加热催化剂数小时，在预定的低排气温度下关闭系统等。堵塞催化剂毛孔的沉积物如硫酸盐可以通过高温蒸汽去除，其他如硫酸钙和烟尘可以在一定条件下，通过压缩空气的烟尘吹扫(soot blowing)措施减轻。在发动机运行过程中，吹灰应被定期激活，即催化剂应始终保持清洁，即使在尿素喷射被关闭时。

2.2 废气再循环(EGR)技术

EGR技术是基于将一部分废气返回到燃烧室，从而降低燃烧温度的原理。MAN公司对其4T50MEX二冲程发动机的试验表明，采用该技术获得了80%的NO_x减排[6]。因此，EGR被MAN公司纳入到其Tier III NO_x减排技术中。2010年3月，MAN还首次将EGR系统应用于马士基航运公司的集装箱船MV Alexander Maersk的低速二冲程发动机上。

MAN公司的EGR工作原理为：来自排气储气罐的部分废气先通过一个湿式洗涤器(Scrubber，不仅可以清洁气体还能降低废气温度)，再通过一个冷却器和水雾捕雾器，最后再经EGR鼓风机将压力提升到扫气压力。用一套水处理系统为洗涤器供应循环淡水，水中添加NaOH，以中和硫酸和硝酸，避免影响发动机寿命。

EGR系统的特点是扫气中的一小部分O_2被来自燃烧产生的CO_2替换，扫气的热容量会稍微增加，而燃烧温度的峰值会降低。因此，燃烧室内产生的NO_x量会减少，而NO_x减少的值取决于循环气体的比率。该系统的不足之处在于：EGR系统须要在发动机建造期间安装，且不能改型，因此，新建发动机可以为EGR系统做改型准备。

2.3 LNG发动机

自从使用蒸发气体(BOG)开始，天然气被安全地用作船只燃料已有近50年，然而，单独以LNG为燃料的船只始于2000年。目前，有超过25艘船正式营运，其中大约50%是渡船，考虑2013年已确认的订单，总数增加到了近50艘，而且使用范围扩展到了如滚装船和平台供应船只，预计会进一步扩展到渔船、集装箱船和LNG运输船等。挪威的NO_x税刺激了航运业使用LNG作为燃料的兴趣；挪威设立的NO_x基金，也促进了LNG技术的发展。

2.3.1 LNG发动机特点

LNG具有低的能量密度(约为柴油的60%)，故LNG船通常须要更多的燃料储存以保持相同的航行范围；LNG具有低的自燃特性，故使用LNG作为船用燃料须要某种形式的气缸内混合气点火源。在双燃料发动机结构中，燃烧气是天然气，但点火源则是柴油或重油的引燃喷射。LNG发动机技术节省的燃料成本可观，大型货船的燃料成本节约预计每年可达100万美元。与MGO当前成本相比，LNG作为燃料在长期的经济和环境效益方面是积极的，排放可降低80%～90%以上，实际达到的水平取决于发动机大小、所使用的引燃燃料量和循环模式。但燃气发动机要避免未燃烧的甲烷气体泄漏，甲烷作为温室气体比二氧化碳具有更强的温室效应(22倍)。

当前已有多种双燃料推进发动机可用或者正在开发中。Wärtsilä的中速四冲程双燃料发动机20DF、34DF、50DF功率覆盖范围0.8～17.5MW，转速为500～1 200($r \cdot min^{-1}$)，在气体模式下符合Tier III标准；截止到2010年底，已经积累了超过150万运行小时，装机总功率超过4 000 MW。MAN的中速四冲程双燃料机51/60DF满足Tier III(气体燃料模式下)，功率范围为6 000～18 000 kW。MAN的低速二冲程双燃料发动机4T50ME-GI正在测试，也能满足Tier III。目前，使用预混合燃料喷射技术的双燃料发动机已有能力达到Tier III NO_x标准，但采用直喷技术的还不能达标。针对更大的二冲程双燃料高压发动机须要结合其他减排技术(EGR或SCR)。

2.3.2 使用LNG发动机的技术问题

安全问题：LNG为液态天然气，不易燃也不易爆，但储存容器的材料选择是关键，标准船用钢材在天然气的冷喷流(约-163 ℃)下会变得很脆弱。天然气泄漏引起爆炸的温度必须大于等于600 ℃(明火火源)，与空气的混合物必须在5%～15%(v/v)的可燃性限值内；而重油的爆炸极限0.5%～5%(v/v)，自燃温度为250 ℃左右，所以天然气没有特别的爆炸危险。

成本问题：LNG发动机的投资成本主要受船舶类型、大小和LNG储存容量的影响。从运营的角度来看，LNG发动机由于更低的燃油消耗率(达20%)、维护需求和相比HFO更有竞争力的价格，在ECA(NO_x或SO_x)内运营的总成本较带废气后处理的柴油或重油发动机更有竞争力。

基础设施/加气：天然气船舶的加气有几种方式，如直接从LNG接收站通过卡车、码头加气，船-船加气或使用LNG储存容器。LNG接收站的数量在世界各地不断增长。目前，LNG发动机推广

万方数据

不存在技术障碍，其最大障碍是燃料物流和加气站的可用性，因此，目前 LNG 运输船仍是 LNG 作为燃料的主要消费者。LNG 必须在-161 ℃下被存储在专门设计的罐中，不可用泵长距离输送，这些要求使得航运业从使用重油、柴油或汽油转换到运行 LNG，不只是安装一个不同的发动机的问题，除了船舶直接的投资，还要求一系列的供应链设施和服务。预计 LNG 发动机装置的数量将占 5% ~10% 的全球市场份额[1]，它们中的大部分安装在 LNG 运输船和在公海贸易的其他大型船只上。

3 总　结

IMOTier III 标准相对于 Tier II 要求有 75% 的 NO_x 减排，使发动机制造商聚焦于 SCR、EGR 和 LNG 发动机技术来满足 Tier III 标准，而不是改进 Tier II 技术。目前这三者都是成熟技术，发动机厂商正努力降低安装与运行成本，并继续强化这些技术。

基于市场和成本考虑，Tier III 减排技术须要接受含硫燃料的兼容性。在可预见的未来，发动机设计趋向于多种燃料选择，减排技术须考虑能运行高硫燃料。二冲程发动机采用 SCR，须保持高的催化剂温度和满足使用硫含量大于 1% 燃料；采用 EGR 技术的发动机则须在内部的 EGR 洗涤器中使用 NaOH 溶液以运行高硫燃料。辅机也须要减排技术，SCR 系统被期望能得到船级社批准应用于主辅助发动机的混合排气处理。

成本-收益最佳的 Tier III 减排技术将由船东基于安装和运行成本两者来选择。具体的船型、贸易或预期负荷状况决定着每一 Tier III 减排技术的利弊，因此对船东来说有着独特的最佳技术选择。而船厂和发动机制造商更偏好于预先准备的和船级社已批准的解决方案，而不是为客户定制的解决方案，这更适合于新船建造。

总之，船舶排放问题日益受到关注，排放控制区将不断扩大，这将进一步刺激 Tier III 减排技术的发展。除上述已建立和正在考虑的 ECAs 外，有香港研究机构提出设立“珠江三角洲排放控制区”[11]。可见，国际、区域和地方层面将对船舶排放实施更为严格的监管控制，因此，无论是主机制造商还是船东、船厂以及排放检测机构，都要积极应对。

参考文献

[1] World Energy Council, 2011, Global transport scenarios 2050, www. worldenergy. org/documents/wec _ transport _ scenarios_2050. pdf, accessed 20/01/2013.

[2] Di Natale F., Carotenuto C., D'Addio L., et al. 2013, New technologies for marine diesel engine emission control [J]. Chemical Engineering Transactions 32, 361-366.

[3] From http://www. mandiesel-greentechnology. com/0000488/Technology/Primary-Measures. html.

[4] US-EPA. (2009). Regulatory impact analysis: control of emissions of air pollution from category 3 marine diesel engines-chapter 4 technological feasibility[R].

[5] MAN B&W Diesel A/S. (2004). Emission control MAN B&W two-stroke diesel engines[R].

[6] MAN-DIESEL, & Turbo. (2010). Tier III compliance-low speed engines[R].

[7] MAN-DIESEL, & Turbo. (2011). Current status of Tier III engines[R].

[8] Wärtsilä. (2010). Environmental product guide 2010[R].

[9] Wärtsilä. (2011). Wärtsilä successfully tests new 2-stroke dual-fuel gas engine technology to comply with IMO Tier III emission limits[R].

[10] IMO MEPC 65/4/7, 8 February 2013, Air pollution and energy efficiency, final report of the correspondence group on assessment of technological developments to implement the Tier III NO_x emission standards under MARPOL Annex VI[R].

[11] 思汇政策研究所. 吴家颖、高慧嘉、冯淑慧. 共同迈往优质生活区：设立珠江三角洲排放控制区[R]. 2013. 11.

万方数据