

上海市船舶与海洋工程学会 2020 年学术年会轮机专场论文专栏

36 000 DWT 多用途船加装 SCR 装置的方案设计与实船应用

沈 鹏, 李良乾, 彭云霞, 朱端祥, 宋丽杰, 曾建辉

(上海船用柴油机研究所, 上海 200090)

摘 要: 针对某 36 000 DWT 多用途船 NO_x 排放须符合 IMO Tier III 排放法规的需求, 在对几种可能技术分析论证的基础上, 结合该船实际情况制定了加装 SCR 装置的方案: 主机加装 HP-SCR, 发电机组加装 LP-SCR。基于该方案对船舶结构和布置以及涉及的相关设备做了相应修改。系泊及航行试验表明: 加装 SCR 装置后主机和发电机组的 NO_x 排放满足 IMO Tier III 排放法规要求。

关键词: NO_x 排放; SCR; 试验

中图分类号: TK 421⁺.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2021)03-0001-05

Program Design and Onboard Application of a 36 000 DWT Multipurpose Ship Retrofitted With SCR System

Shen Peng, Li Liangqian, Peng Yunxia, Zhu Duanxiang, Song Lijie, Zeng Jianhui

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090)

Abstract: The NO_x emission of a 36 000 DWT multipurpose ship has to meet with IMO Tier III emission regulations. Based on analysis and verification of several potential technologies, and combined with the ship's condition, retrofitting with SCR system was determined. The main engine was retrofitted with HP-SCR, the genset was retrofitted with LP-SCR. Based on this program, the structure and layout of this ship, as well as relative equipments were refitted accordingly. Mooring and sea trial show that retrofitting with SCR system, both the main engine and the genset can meet with IMO Tier III emission regulations.

Key words: NO_x emission; SCR system; trial

0 引言

船舶运营过程中产生的废气对环境的影响已引起普遍关注, 为此国际海事组织 (IMO) 出台了 Tier III 排放法规。为满足该法规要求, 许多船舶柴油机须经改造或加装减排装置。本文以某 36 000 DWT 多用途船为例, 从方案论证、设计修改、安装及试验等方面对 SCR 装置加装方案进行探讨和分析。

1 36 000 DWT 系列船简介

该 36 000 DWT 多用途系列船一共 3 条, 由于

最后一条船选择的生效日期在 2016 年 1 月 1 日以后, 故该船的排放标准须由满足 Tier II 修改为满足 Tier III。考虑到该系列船的图纸和设备均已经按照前面两条船的要求进行设计和订货, 为了最大限度地缩短因设计修改而增加的建造周期, 减少设备和物料的废返, 应尽量减小该系列船中最后一条船的设计修改量, 并尽可能利用原订货设备。

该系列船总长 189.99 m, 型宽 28.50 m, 型深 15.8 m, 结构吃水 11 m; 配备 4 台克令吊, 最大并吊能力 200 t; 设计有 4 个货舱, 大舱口、箱型舱底, 货舱内为吊离式甲板; 全船装货面积达 14 000 多 m^2 , 散装货舱容积 31 000 多 m^3 , 适货性

强,覆盖各类特种货物。该系列船为 CCS Ice Class B1 冰级,可通行于 0.8 m 厚的当年冰航区。

该系列船动力系统为单机单桨设计。主机为一台由沪东重机有限公司生产的 WinGD 6RT-flex50D 二冲程低速柴油机,满足 IMO Tier II 排放标准;主机最大输出功率 (CMCR) $\times$ 转速为 10 470 kW $\times$ 124 r/min,常用持续输出功率 (CSR) $\times$ 转速为 6 806 kW $\times$ 107.4 r/min。发电机组采用三台由中船动力有限公司生产的 MAN 6L23/30H 四冲程中速柴油机作为原动机,满足 IMO Tier II 排放标准;发电机组额定功率 $\times$ 转速为 950 kW $\times$ 900 r/min。锅炉为一台由 SAACKE 生产的 CMB-VS-1.8 + 1.12/7 烟管式组合锅炉,其燃油侧蒸发量为 1 800 kg/h,废气侧蒸发量为 1 120 kg/h。

2 方案论证

当前业界普遍认可的使船舶柴油机满足 IMO Tier III 排放标准的方式有三种:柴油机加装废气再循环装置 (EGR);使用双燃料发动机 (DF);柴油机加装选择性催化还原装置 (SCR)。

加装 EGR 装置,布置相对简单,但对增压器影响较大,并会导致柴油机油耗增加,因此经济性较差;而且 WinGD 柴油机目前没有开发 EGR 功能及接口,故此方案不适合该船。

由于该系列船的主机和发电机组已经按照前两条船的技术要求进行订货并投入生产,如果使用双燃料发动机,外围还须额外配置供气系统和 LNG 储罐,对该船改动极大,故该方案不予考虑。

而加装 SCR 装置无须对柴油机做较大改动,涉及的船舶修改也在可控范围,且 SCR 装置在工业上的应用相对成熟,因此加装 SCR 装置对该船来说是一种比较可行的方案。

SCR 装置又可分为高压 SCR 装置 (HP-SCR) 和低压 SCR 装置 (LP-SCR),二者的区别是 HP-SCR 安装在增压器上游,LP-SCR 则安装在增压器下游。由于 SCR 装置的反应温度一般在 300 ~ 400 $^{\circ}\text{C}$,如果采用 LP-SCR,则须要增加一套助燃装置,这样会增加燃油消耗,而且安装 LP-SCR 后柴油机的排气背压会相应增大,也会造成柴油机油耗的增加。而 HP-SCR 由于安装在增压器上游,增压器前的废气温度较高,不用助燃装置也能达到 SCR 装置的反应温度要求,且不会增大柴油机的排气背压,也即不会增加柴油机油耗,因此该船主机选用 HP-SCR。

由于发电机组增压器后的排温相对较高,能够

满足 LP-SCR 的反应温度要求,根据发电机组的实际布置情况,考虑到 LP-SCR 的布置较为灵活,将该装置布置在烟囱里,可减小对机舱结构和布置的修改,故该船发电机组选用 LP-SCR。

液氨、氨水和尿素等都可以作为 SCR 装置的还原剂,由于尿素水溶液具有安全无毒、便于储存,制作方便等优势,因此该船选择尿素水溶液作为 SCR 装置的还原剂。通常选用质量分数为 32.5% 和 40% 的尿素水溶液 AUS 32 和 AUS 40 做还原剂,考虑到尿素水溶液的需求量较大,采用浓度较高的尿素水溶液,可以减小尿素舱的容积,因此该船 SCR 装置选用 AUS40 作为还原剂。

3 设计修改

3.1 柴油机修改

6RT-flex50D 为 WinGD 二冲程柴油机中的老款机型,WinGD 没有针对该机型安装 HP-SCR 进行升级开发和接口设计,仅允许在该机型外围安装 LP-SCR。该船主机若要安装 HP-SCR,则废气旁通管路及旁通阀均须安装在柴油机外部的管路上。相比前面两条船的主机,该船主机本体结构主要修改如下:(1) 主机废气涡轮增压器的废气进口由面朝主机排气集管修改为竖直朝上,以便与外围的排气管连接;(2) 对主机排气集管两端开孔,并增加 DN700 排气接管及阀。Tier III 模式下,主机废气由位于排气集管飞轮端的接管流出,经 SCR 反应器后流向废气涡轮增压器,然后流经废气锅炉后排向大气。Tier II 模式下,主机废气由位于排气集管自由端的接管流出,直接经过废气涡轮增压器后排向废气锅炉。主机 HP-SCR 及外围排气管的具体布置见图 1。

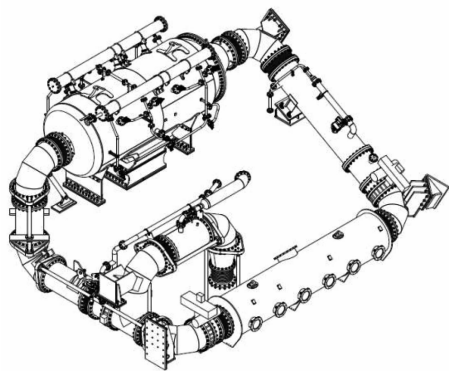


图 1 主机 HP-SCR 布置图

该船发电机组由于安装的是 LP-SCR,柴油机本体结构基本无须修改,只须将柴油机的最大允许排气背压由 3 kPa 增大到 5 kPa。

3.2 布置修改

SCR 系统中尺寸最大的两个装置当属反应器和混合管, 须优先考虑这两个装置的布置。由于混合管可以作为排气管使用, 故可在设计排气管时一并考虑, 因此重点考虑 SCR 反应器的布置。该船机舱左舷为集控室, 而 SCR 系统的排气管须从右舷主机排气侧引出, 故主机 SCR 系统的反应器布置在机舱右舷比较合适。由于机舱下平台层高较低, 相比之下机舱上平台有充足的层高布置主机 SCR 反应器, 同时还能利用上平台的风管给 SCR 反应器周围通风, 改善周围热量过大的问题, 因此主机 SCR 反应器选择布置在机舱右舷上平台。主机排气集管飞轮端引出的排气接管可直接倾斜向上右行, 与机舱上平台的主机 SCR 反应器连接。为了避免与机舱右舷的下行梯道发生干涉, 主机排气集管自由端引出的排气接管先水平右行, 通过该梯道底部后引至机舱下平台处, 然后再上行穿过机舱上平台甲板, 与主机 SCR 反应器连接。

确定主机 SCR 反应器布置在机舱右舷上平台后, 须对原布置在该处的设备进行调整: 将锅炉燃油泵单元和主机供油单元均质器等设备移位; 将主机供油单元和燃油分油机均质器由右舷上平台移至右舷下平台。考虑到主机 SCR 反应器布置在该处后通道宽度不够, 故将右舷上平台的四个燃油日用舱和燃油澄清舱靠船舯侧舱壁向舷侧移一档。经计算: 舱容减小后四个油舱的容积仍满足规范要求。修改前后的布置见图 2 和图 3。

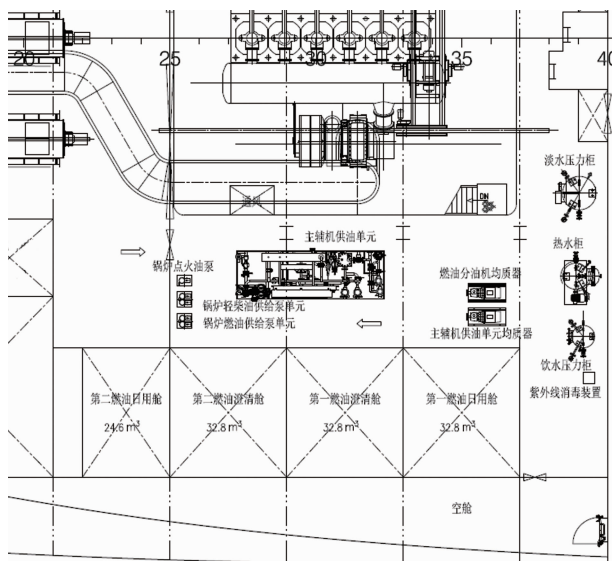


图 2 原机舱上平台右舷布置

在机舱上平台开口艏艙内侧船体结构上各增加一个排气管支撑底座, 用于支撑主机排气集管两端

引出的排气接管, 并根据受力分析对支撑底座处的结构做加强。在机舱上平台右舷处对主机 SCR 系统中的反应器、混合管及排气管等进行支撑, 并对相应的船体结构做加强, 具体布置见图 1。

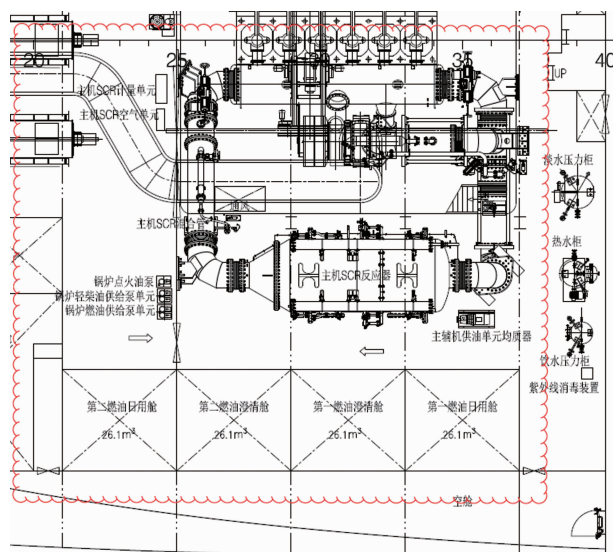


图 3 修改后机舱上平台右舷布置

根据船东提供的该船在 NO_x ECA 航行的时间, 预估主机和发电机组在 NO_x ECA 航行时段的负荷分布情况, 参考主机 HP-SCR 和发电机组 LP-SCR 在各负荷下的尿素消耗量, 计算出尿素储存舱所需容积, 并留一定余量, 最终尿素储存舱容积取 46 m^3 。

SCR 系统中的尿素泵单元进口须有一定的正压头, 故尿素舱布置在机舱上平台为佳。经综合平衡后决定将机舱左舷上平台后侧的机舱备件间靠船艙侧舱壁向船艙移五档, 用此空间布置尿素舱。修改前后的布置对比见图 4。

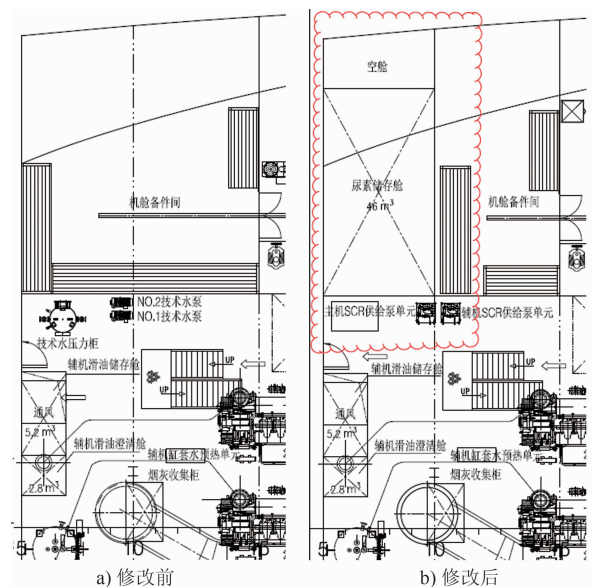


图 4 机舱上平台左舷后侧布置修改前后对比

尿素溶液的推荐储存温度为5~35℃,考虑到机舱温度较高,故对暴露在机舱内的尿素舱舱壁表面包覆热绝缘。由于该船设计为冰区航行船舶,考虑到室外空气温度太低,且机舱上平台的船体外板正好暴露在水线上与空气接触,故在尿素舱与船体外板之间设置一个隔离空舱,并对尿素舱的该面舱壁也包覆热绝缘,以保证尿素舱内的温度相对恒定,防止尿素水溶液变质或结晶。

尿素水溶液具有很强的腐蚀性,而使用不锈钢舱室储存成本太高,且焊接复杂,因此该船尿素储存舱采用钢制结构,对舱室内壁做特涂处理。在尿素储存舱靠船舯舱壁处设置一大范围拦水扁铁,并对拦水扁铁内区域同样做特涂处理,以防止设备检修时流出的尿素水溶液对甲板造成腐蚀;尿素储存舱上的各附件尽量布置在此面舱壁上,主机和发电机组的SCR系统的尿素泵单元也布置在此拦水扁铁内。拦水扁铁内设置一不锈钢地漏,泄放接管引至生活污水舱。生活污水舱内壁做与尿素储存舱内壁同样的特涂处理。

主机在Tier III模式下运行时,废气经废气涡轮增压器后温度会大幅降低。在低温废气环境下燃油中的硫会与尿素溶液中的氨发生反应,生成黏性物质ABS(硫酸氢铵 NH_4HSO_4),ABS会黏附在锅炉的烟管上,对管束造成腐蚀,并导致排气阻力增大。但如果为锅炉增加旁通管路和阀的话,首先耐高温的大口径阀门价格昂贵;再者在狭小的烟囱区域已增加了三个LP-SCR反应器,再增加一个DN900旁通管路,势必会导致烟囱结构的大范围修改,对该船影响太大。考虑到该船主机安装的是HP-SCR装置,废气温度较高,正常运行工况下不会生成过多ABS,因此,经锅炉生产厂家同意:该船在Tier III模式下,主机废气不用做旁通处理,但须定期对锅炉进行检查保养。此方案得到船东认可。

发电机组安装的是LP-SCR,系统布置具有很大的灵活性,混合管可代替部分排气管;反应器尺寸相对较小,可错层布置在烟囱里。

由于省去了锅炉的旁通管路,烟囱主体结构不用修改。最后,还须对机舱和烟囱区域的布置及修改进行建模和放样,做综合平衡。

3.3 系统修改

根据HP-SCR、LP-SCR生产厂家推荐的系统配置,对该船增加主辅机氮氧化物排放控制系统,并对涉及的机舱压缩空气系统、机舱排气系统、冷却海水系统进行相应修改。

主辅机氮氧化物排放控制系统通过尿素泵单元将尿素溶液从尿素储存舱输送至计量单元,然后经喷射混合单元喷射至主机和发电机组排出的废气中。尿素溶液用的管路及阀附件均采用SUS316L材质;垫片采用聚四氟乙烯(PTFE)材质以防止腐蚀。尿素储存舱上设置温度传感器、液位传感器、液位开关、液位计、温度计等附件,用于自动控制和监控尿素溶液状态;并设置尿素溶液注入和排出管路。尿素储存舱出口设置快关阀以实现远程快速切断。主机和发电机组的尿素泵单元均为两套,一用一备,每套泵单元的容量均按照100%工况下尿素的消耗量进行设计。

尿素溶液喷射、SCR系统吹扫密封、SCR反应器灰灰及各气动阀门驱动均需要压缩空气,故须对原机舱压缩空气系统做修改。由于主机计量单元所需的压缩空气压力较高(1.0 MPa),因此对冰区航行时防冻用吹泡系统的工作空压机和工作空气瓶型号做修改,提高工作空压机的排量和压力,相应提高工作空气瓶的容积和压力。此管路为SCR系统的主要供气管路,因此从主空气瓶增加一路管路,减压后作为SCR系统的备用供气管路。根据系统各接口的不同用气压力,配置相应的减压阀组和安全阀。由于SCR系统对气源质量有严格要求,故增加一台空气干燥器用于去除空气中的水分和杂质。

按照主机和发电机组SCR推荐系统配置对机舱排气系统做修改。主机废气由排气集管排出后接至SCR混合管,然后进入SCR反应器,再进入涡轮增压器,最后经组合锅炉后排至大气。排气集管和涡轮增压器之间设置一套DN700废气旁通管路及阀。增压器透平侧进出口两端设置一套DN100废气旁通管路及阀。主机SCR反应器后的排气管路上设置一套DN125空气吹扫管路及阀,以及一套DN100压力释放管路及阀,并接至涡轮增压器后的排气管路上。发电机组废气经涡轮增压器排出后接至SCR混合管,然后再进入SCR反应器,最后经消音器后排至大气。

为保证尿素储存舱内尿素溶液的温度保持在5~35℃,在尿素储存舱内设置一根SUS316L材质的冷却海水盘管,与尿素溶液进行热交换。该冷却海水盘管接入冷却海水泵后增加的一路海水冷却管,然后接至舷外排出。

4 安装及试验

该船主机SCR装置须与主机一起在主机厂进

行台架试验,故主机 SCR 反应器到货时间较晚,不具备预装的条件。在该船下水后,先将主机 SCR 反应器按照安装方向,从机舱棚吊至机舱右舷上平台处,然后将主机 SCR 装置的排气管、膨胀节、阀门、尿素泵单元等附件和设备也吊至机舱内,最后吊装主机。

轴系校中、主机定位完成后,从主机排气集管侧向主机 SCR 反应器侧顺序安装膨胀节、排气管、阀门等附件。待外围各排气管及附件安装完成后,对主机 SCR 反应器进行最终定位安装。部分排气管法兰须先点焊固定,以便安装排气管时对中调整;待主机 SCR 反应器、排气管和附件全部安装完成后,再将这些法兰焊妥。

针对主机 SCR 反应器的安装底脚及排气管的安装支架,须在相应的船体结构处焊接一块安装底板,二者间采用螺栓连接。在主机废气涡轮增压器前的排气管段上,两个排气管法兰间须安装一个不锈钢滤网,以防止 SCR 反应器中的催化剂块脱落进入增压器。主机 HP-SCR 装置安装完成后的实景见图 5。

发电机组 LP-SCR 系统中的反应器为弹性安装,反应器的一个底脚采用固定式安装的圆螺孔,其他三个底脚采用活动式安装的腰圆螺孔,以吸收反应器受热膨胀后的位移量。发电机组 SCR 装置的混合管及反应器可在烟囱总段内预装好,然后将烟囱总段整吊上船安装。

当主机 HP-SCR 装置安装完成后,先对整个装置进行完整性检查,然后在码头对主机 SCR 系统

采用模拟信号进行安保试验。当主机在码头动车时,再次对系统的密封性进行检查。主机与 HP-SCR 装置的整合试验在航行试验阶段进行。

发电机组 LP-SCR 装置安装完成后,将反应器调至旁通状态,发电机组进行系泊试验。待发电机组对外交验完毕后,发电机组结合 LP-SCR 系统在各个负荷下进行整合试验。

该 36 000 DWT 多用途船加装 SCR 装置后,经系泊试验和航行试验证明:主机和发电机组的 NO_x 排放符合 IMO Tier III 排放法规。

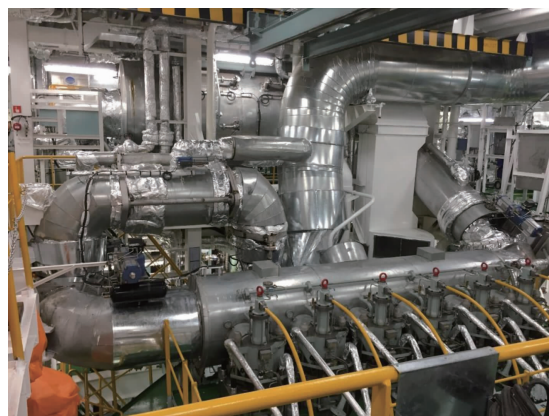


图 5 主机 HP-SCR 安装后实景

5 总结

目前该船已经交付船东运营近 3 年,未接到船东关于该船 SCR 装置的任何保修意见,说明该船加装 SCR 装置后运行稳定。加装方案的正确性和可靠性得到验证。