

船用生活污水处理要求和技术发展现状

邵晓华, 陈 清

(上海船舶设备研究所, 上海 200031)

摘 要: 梳理 MARPOL 公约自 1973 年通过以来, 船舶生活污水相关法规的发展过程、国内外船舶生活污水处理技术的发展及应用, 分析国内外处理技术的发展及相关设备研制的现状, 并展望了法规和技术的发展趋势, 为行业内相关技术及设备的开发和标准研究提供参考。

关键词: 船舶生活污水; MARPOL 公约; 海洋环保; 污水处理

中图分类号: X55; U664.9⁺2 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbge.2018.12.013

Requirements and Technology Developing Status of Marine Domestic Sewage Treatment

SHAO Xiaohua, CHEN Qing

(Shanghai Marine Equipment Research Institute, Shanghai 200031, China)

Abstract: The thesis introduces the development process of laws and regulations about ship sewage since the adoption of MARPOL convention in 1973. It introduces the development and application of marine sewage treatment technologies. It analyzes the development status of processing technology and relative equipment at home and abroad. And the trend of future regulations and technologies is prospected. It can provide reference for the development of relative technology and equipment as well as standard study in the industry.

Key words: marine domestic sewage, MARPOL convention, marine environmental protection, sewage treatment

0 引言

为防止船舶排放生活污水污染海洋环境, 国际海事组织 (IMO) 海上环境保护委员会 (MEPC) 于 1973 年通过 MARPOL 公约, 该公约的附则 IV 防止船舶生活污水污染规则 (简称“附则 IV”) 是为了加强对船舶生活污水的管理, 以减少船舶对海洋环境的污染。几十年来, 在 MARPOL 公约的推动下, 船舶生活污水处理技术有了极大的发展和进步。

本文结合附则 IV 涉及船舶生活污水处理及排放等的技术要求演变, 分析国内外防止船舶生活污水污染技术发展的各阶段的技术特点, 以及技术发展的走向, 梳理目前各设备研制及应用的现状, 展望船舶生活污水处理技术要求的发展趋势。

1 法规的发展过程

1.1 国际公约对船舶生活污水处理要求的发展过程

MARPOL 公约附则 IV 规定了生活污水的定义、生活污水系统的形式和海域排放的控制等要求。而生

活污水处理设备的要求, 应当以政府间海事协商组织制定的污水排放标准和试验方法为基础。1976 年, 海上环境保护委员会通过 MEPC.2(VI) 决议, 提出《关于生活污水处理装置国际排出物标准的建议和性能试验指南》, 其中水质排放指标如表 1 所示。至此, IMO 公约和 MEPC 决议明确了生活污水处理的对象、海域排放控制要求、排放水的水质标准以及处理装置的试验方法。很多国家以此为标准开展生活污水处理设备的开发。此后, IMO 和 MEPC 也围绕这些要点开展后续的附则条款和技术要求的更新。

1983 年, MARPOL 73/78 公约生效, 建议船舶生活污水的排放满足 1976 年 MEPC.2(VI) 决议通过的《国际污水排放标准》, 但不做强制要求。并通过 MEPC-8/WP3 附则 2《生活污水处理装置型式试验和认可准则》, 对生活污水系统 3 种设施 (污水处理装置、粉碎与消毒系统、集污舱) 的型式认可试验提出完整要求。很多国家以此为依据制定本国的相关标准。

IMO 于 2000 年 3 月在 MEPC44 会上对附则 IV

收稿日期: 2018-12-03; 修回日期: 2018-12-26

作者简介: 邵晓华 (1977—), 女, 高级工程师, 研究方向: 船舶防污染技术。

进行修订。此后,至2002年9月26日,累计88个国家接受附则IV,这些国家所拥有的商船总吨位占世界商船总吨位的51%。2003年9月27日,MARPOL73/78的附则IV生效。

2004年4月1日,新版附则IV(MEPC.115(51))在MEPC51会上获得通过,在2005年8月1日生效。该修正案对附则IV进行了整体修订,包括对定义(新增“最近陆地”、国际航线、人员等)、适用范围、检验、证书的有效期和有效性、生活污水的排放、标准排放接头、生活污水证书格式等均进行了修订。

2006年10月,MEPC第55次会议通过MEPC.159(55)决议,提出《经修订的实施生活污水处理装置排出物标准和性能试验指南》,并撤销MEPC.2(VI)决议。该决议于2010年1月1日实施。在这个修正案中,对生活污水的达标排放标准作了大幅提高(表1),对污水的氯化消毒液作了明确限制。该决议在生活污水处理要求上,首次引入了灰水的概念,定义灰水包括洗碟水、淋浴水、洗衣水、洗澡水以及洗脸水,提出若灰水并入黑水收集系统,则应满足黑水同等的排放标准。但并未强制要求处理灰水。

2010年10月,澳大利亚等国家基于海洋赤潮问题,建议提高污水排放指标的要求。IMO对各国进行了意见征求。我国同意对MEPC.159(55)进行修订,并建议如果MEPC需要考虑氮源污染,控制海洋赤潮,可以考虑加入氨氮、总氮等标准指标和相关的标准检

测方法。

2011年7月,MEPC第62次会议通过MEPC.200(62)决议,指明波罗的海区域属于附件IV中的特殊区域,并且禁止客船排放污水进入特殊区域,除非该客船所运行的污水处理装置实施了《2012年实施生活污水处理装置废水排放标准和性能测试指南》中定义的污水排放标准和性能测试。所谓特殊区域,即在该区域内,涉及其海洋学和生态学的情况以及运输的特殊性质等公认的技术原因,要求采取特殊强制的办法以防止船舶造成污染。特殊区域是由一个或多个沿海国政府提出申请,明确该区域的地理位置信息、其作为特殊区域的科学依据、以及该区域内已配备足够适用的接收设施,由IMO在MEPC会议上通过,特殊区域都要求采取特殊的防污染措施^[1]。

2012年10月,MEPC第64次会议通过了MEPC.227(64)决议《2012年实施生活污水处理装置排出物标准和性能试验指南》,取代了MEPC.159(55)决议。这次修订增加了对生活污水中污染物排放总量控制的要求和客船在特定海域对氮和磷的排放要求。具体对比情况如表1所示。从表1可见,MEPC.227(64)对具有浓度限制的排出物标准授予一个稀释补偿系数(Q_i/Q_e),其中: Q_i 为流入污水处理装置的原污水水量; Q_e 为生活污水处理装置处理后的水量。如果处理工艺采用了稀释法, Q_e 就是 Q_i 和稀释水水量的和。

表1 新老标准水质要求对照表

| 排放水质指标 | MEPC.2(IV) (1983年建议实施,2004年实施) | MEPC.159(55) (2010年实施) | MEPC.227(64) (2016年实施,现行) |
|-----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| BOD ₅ /(mg·L ⁻¹) | ≤50 | ≤25 | ≤25 Q_i/Q_e |
| SS/(mg·L ⁻¹) | ≤50 | ≤35 | ≤35 Q_i/Q_e |
| 耐热大肠杆菌/(个/100毫升) | ≤250 | ≤100 | ≤100 |
| COD/(mg·L ⁻¹) | — | ≤125 | ≤125 Q_i/Q_e |
| pH | — | 6.0~8.5 | 6.0~8.5 |
| 余氯/(mg·L ⁻¹) | — | ≤0.5 | ≤0.5 |
| TN 总氮/(mg·L ⁻¹) | — | — | ≤20 Q_i/Q_e 或去除率≥70% |
| TP 总磷/(mg·L ⁻¹) | — | — | ≤1.0 Q_i/Q_e 或去除率≥80% |

1.2 国际公约和法规的污水排放管辖范围

现行MARPOL公约附则IV对生活污水的排放距最近陆路不同的距离分别规定为:船舶在在距离最近陆地3 n mile内,使用经认可的生活污水处理装置,排放污水必须满足IMO规定的排放标准;船舶在距离最近陆地3 n mile外,使用经认可的粉碎消毒系统,可排放经粉碎和消毒的生活污水;在距离最近陆地12 n mile以外可按相应的要求排放未粉碎和消毒的生活污水。

根据1982年联合国颁布的《联合国海洋法》,每个国家有200海里的专属经济区,在该区域内,航行

船只必须达到所属国的环保法规要求。国际法的约束高于国际公约,任何国家都可以以保护环境为由,管控他国进入其专属经济区的船舶的污水排放。这意味着海洋船舶生活污水的达标排放范围,实际上有扩大到距离最近陆地200 n mile的趋势。

1.3 我国法规的发展过程

我国是MARPOL公约的缔约国,但在2006年之前未加入附则IV。1983年我国颁布了《GB 3552—1983 船舶污染物排放标准》,1986年制定了《海船防污染结构与设备规范》,这些标准和规范都参照了《MARPOL 73/78 公约》附则IV的有关规定,结合我

国国情,对船舶生活污水排放标准和污水处理装置做出较为详细的规定。对于船舶生活污水处理装置,我国参照 MEPC.2(VI)决议,在 1990 年实施了《GB 10833—89 船用生活污水处理系统技术条件》,1997 年实施了《GJB 2957—97 舰船生活污水处理系统通用规范》。

2006 年 11 月 2 日,我国向 IMO 秘书处提交加入《MARPOL 73/78 公约》(简称“公约”)附则 IV 的文件,该附则已于 2007 年 2 月 2 日正式对我国生效。

根据公约的变化,我国根据 MEPC.159(55)要求,及时响应对国内标准的修订,在 2010 年及 2012 年分别修订了《GJB 2957—97 舰船生活污水处理系统通用规范》和《GB 10833—89 船用生活污水处理系统技术条件》。其中《GB/T 10833—2015 船用生活污水处理系统技术条件》已于 2015 年颁布实施。该标准现行有

效,但相关水质排放指标的要求已不能满足 MEPC.227(64)决议的要求。

我国各省市分别制定了要求高于国家标准的地方污水排放标准,船舶在内陆河流和沿海港口航行和停靠时,污水排放必须满足相应地区的地方标准。

2018 年 1 月,我国环境保护部与国家质量监督检验检疫总局发布了《GB 3552—2018 船舶水污染物排放控制标准》,替代了 1983 年版的标准,扩大了污染物控制范围,并提高了排放控制要求,新标准已于 2018 年 7 月实施。其中,在生活污水排放控制方面,对于海船,要求与国际公约一致;对于航行于内河的船舶,提出的自 2021 年 1 月 1 日起向内河排放生活污水的污染物排放控制要求,在指标数量和排放限制上均高于 MEPC.227(64),具体如表 2 所示。

表 2 水质要求对照表

| 参数 | MEPC.227(64)规定的限值 | GB 3552—2018规定的内河排放限值 |
|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| 五日生化需氧量 $BOD_5/(mg \cdot L^{-1})$ | 25 | 20 |
| 化学需氧量 $COD_{Cr}/(mg \cdot L^{-1})$ | 125 | 60 |
| 悬浮物 $SS/(mg \cdot L^{-1})$ | 35 | 20 |
| 耐热大肠菌群数/(个·升 ⁻¹) | 1 000 | 1 000 |
| pH (无量纲) | 6.0~8.5 | 6.0~8.5 |
| 余氯(总余氯)/(mg·L ⁻¹) | 0.5 | 0.5 |
| TN 总氮/(mg·L ⁻¹) | $\leq 20Q_0/Q_e$ 或去除率 $\geq 70\%$ | 20 |
| TP 总磷/(mg·L ⁻¹) | $\leq 1.0Q_0/Q_e$ 或去除率 $\geq 80\%$ | 1.0 |
| 氨氮/(mg·L ⁻¹) | — | 15 |

1.4 各国国内法对污水排放的特别要求

世界各国在某些海域提出了高于现行 IMO 标准的生活污水排放标准,如香港维多利亚港、美国阿拉斯加法规等。此外,在提高本国海域污水排放指标的同时,部分国家甚至在本国的海域内划出一定的区域禁止船舶排放污水,如美国“五大湖”地区、澳大利亚西海岸的部分地区等,禁止排放一切污水。此外,某些港口也禁止船舶排放一切污水,如我国的上海港、三亚以及韩国、澳大利亚、美国、荷兰的部分港口。

2 国内外生活污水处理技术发展情况

生活污水处理技术发展分为 2 个阶段,由于 2004 年《MARPOL 73/78 公约》附则 IV 生效,所以 2004 年是生活污水处理技术发展的阶段性分水岭。

2.1 公约附则 IV 生效前

2004 年前,生活污水处理装置的研发和船舶配置的顶层设计理念跟随公约的要求,在离岸 4 n mile 内达标处理排放,或贮存;在离岸 4 n mile~12 n mile,粉碎消毒排放,或贮存;12 n mile 外直接排放。生活污水处理技术及装置主要对应公约附则 IV 第 9 条生活污水系统所指的 3 类设施,即收集贮存、粉碎消毒和处理达标。

1) 收集贮存排放装置

这类装置对生活污水只做收集贮存,污水出路有驳岸、接收船接收、12 n mile 外排放等,这类装置的海域环保法规适航性比较差。

代表装置:国内的 WCH 型收集排放装置,用于收集、贮存排放生活污水;WCP 型排放装置,用于排放生活污水储存舱的污水。

2) 粉碎消毒排放装置

这类装置对生活污水进行粉碎消毒后排放,主要的处理工艺技术采用水泵粉碎及电解海水或直接投入消毒剂。这类装置主要在 4 n mile~12 n mile 及没有达标要求的海域使用,装置的海域环保法规适航性一般。

这类装置体积相对比较小,但不符合环保理念,原因有 2 点:(1)在污水中投入化学药剂会产生大量化学中间产物,目前的研究结果已经表明,这类中间产物有自然界难以降解的、致癌的物质;(2)水质达标主要是靠加大流程的冲洗水来稀释污水,并没有真正降解对环境有害的有机污染物质。

代表装置:美国早期的奥卡 I 型粉碎消毒装置。配备这类装置的船舶,一般还需考虑 4 n mile 内不能使用该装置排放污水的情况,因此还需配置污水储存舱。

3) 处理达标排放装置

这类装置对生活污水中的有机污染物进行降解,使出水达到达标排放要求后,向水体进行排放。我国通常采用生化法、物化法、电化学法及混合方法^[2]。目前采用生物法是世界各国的主流趋势。这类装置主要在 4 n mile 以内、港口以及达标有要求的海域内使用,装置的海域环保法规适航性好。

对于这类装置,2004 年前主要在提高生化能力、改进生化工艺以及提供装置可靠性可维性方面进行了大量的改进工作。但装置的技术水平、出水水质以及装置不太适应船舶产生的厨房灰水、洗涤灰水能力方面没有发生根本改变。

这类装置体积相对比较大,其处理机理是利用微生物将有机物降解成二氧化碳和水,所以更符合环保理念。

代表装置:WCB 型生活污水处理装置,应用于大量辅船。该装置是在引进了英国 Hamworthy 公司的 ST 型生活污水处理装置的技术后转化研制的。

WCV 型两级生化污水处理装置是针对真空收集的高浓度生活污水,是 2000 年前后国内自主研发的产品。

2.2 公约附则 IV 生效后

2.2.1 公约对生活污水处理技术要求的提升

在 2004 后,国内外的生活污水处理技术有了革命性提升和改进,主要表现在以下几个技术层面:

1) 处理对象越来越宽泛。主要是指目前的生活污水处理装置需具备处理生活污水、厨房灰水、厨房泔脚渗滤液以及洗涤废水。

2) 处理达标标准大大提高。MEPC.159(55)对生活污水的排放标准除了新增加的 2 个指标以外,其余几个原有指标的标准均大幅提高,对生活污水处理技术提出了新的挑战。

3) 对污水消毒技术也提出了新要求。以前对消毒剂余氯没有控制,现在对其有了明确的严格控制。

2.2.2 公约对生活污水处理装置使用产生的影响

1) 船舶污水需达标排放的区域越来越宽泛,船舶仅仅采用收集贮存或粉碎消毒排放的方法导致船舶环保适航性越来越差。

2) 船舶各类污水、废水达标排放的趋势和要求越来越高,船舶仅设置一套处理生活污水的收集处理装置,越来越不能满足环保的要求。

3) 真正以有机污染物无害化降解为处理技术的处理方法越来越受到社会各界重视。以化学药剂氧化及稀释处理的方式受到的技术限制及环保法规限制越来越明显。

2.2.3 物化法和生化法两类装置的发展

1) 粉碎消毒排放装置

这类装置在 2004 年后,一方面通过增加稀释比达

到出水污染物浓度的降低,另一方面采用添加其他化学物质来消耗出水中的余氯。但其出水的污染物总量未降解,在消除了余氯的同时,增加了其他化学产物,并未起到真正环保的作用。

2) 生化法处理达标排放装置

生化法处理工艺是通过微生物在一定环境下,降解水中以有机物形式存在的污染物。通过微生物的自身的生长过程将水中的有机物分解吸收,再通过其代谢过程自我消化,因此有机污染物的最终产物主要是二氧化碳和水。到目前为止,生化法仍是污水处理中最为彻底且处理过程中没有对环境产生二次污染副产品的工艺,被广泛研究和应用。

2004 年后,国内外均开发出以膜生物反应器为核心技术的膜生化法(MBR)处理工艺。由于 MEPC.159(55)对生活污水处理要求提高,一方面是对出水指标的提高,一方面是对船舶生活污水的范围扩大,厨房灰水和洗涤灰水纳入生活污水收集系统时,也必须满足同样的排放标准。国内外采用 MBR 工艺研制的装置,包括英国 Hamworthy 公司的膜生化法污水处理装置及德国 Deerberg 公司的 MBR 装置,而我国上海船舶设备研究所研发的 MBR 型生活污水处理装置达到了 MEPC.159(55)的排放标准,在该决议生效的当年,即提出了进行满足该决议型式认可的申请。并且,MBR 型装置具有综合处理生活污水和厨房灰水的能力。由于饮食文化的差异,国内的厨房灰水含油脂高、餐厨废料多,国内的 MBR 型装置针对该类污水进行了专门攻关,突破了高油脂高浓度厨房灰水的处理技术,而国外产品均不具备处理高油脂浓度厨房灰水的能力。到 2010 年 MEPC.159(55)正式实施时,国内很多生活污水处理装置生产商都在膜生化法的基础上研发出满足规范的装置,包括江苏南极的 WCMBR 型^[3],南京绿洲的 STC 型^[4]等。国外德国 Deerberg 公司研制的 MPWMS 多功能废弃物处理系统配置了 MBR 污水处理装置,对黑灰水进行达标处理,在德、英、法、澳等多国的舰船上配置使用^[5]。

此外,为了解决污染物零排放,上海船舶设备研究所在 MBR 型装置基础上研制了中水回用装置,已在多型舰船上应用。中水回用装置的应用,一方面减少了船上污水储存舱容,船舶可不设原污水舱,而改为中水储存舱,舱容可大大减小,减少对总体资源的消耗;另一方面,这类装置出水水质达到再生水标准,也符合 MEPC.227(64)决议,对于满足未来标准有了技术储备。

3 生活污水处理技术未来发展趋势

从技术发展的角度,就目前较成熟的生活污水处理新技术及新装备而言,以膜生物反应器为主体处理工艺的 MBR 型污水处理技术及装置为污水处理达标

中水回用打下了良好的技术基础和装备保障条件。国内上海船舶设备研究所等单位,已研制出具有中水回用功能的生活污水处理装置,在我国多型军、辅船上进行了实船应用,将中水回用至冲洗厕所和甲板,但在民船上尚未有中水回用的应用实例。美国、英国等发达国家对舰船污水的二次利用已进行多年研究,废水的循环利用也已经应用于实船^[5]。

国际防止船舶污染公约的一些技术措施要求是建立在技术发展的基础上的,防污染的技术性规定也随着技术的发展而变化,标准逐步提高。从最新 MECP 相关决议可知,国际海事组织将进一步提高生活污水处理装置排水指标要求,一方面对污染物指标的要求提高,另一方面还将继续提出新的指标要求。对全球海洋的排放限制,目前提出波罗的海海洋为特殊海域,今后也有增加特殊海域的可能。因此,生活污水收集处理从船舶系统来讲,目前面临着零排放和达标排放如何兼顾的问题^[6]。随着船舶生活保障水平的提高、船舶大型化以及中国游轮等产业的发展,全船污水(黑水、厨房灰水、洗涤灰水等)的综合处理,以及如何把污水处理与收集零排放最有效、合理地解决,是目前船舶设计制造中的一大现实需求,而中水回用技术的发展和运用可以很好地解决这一问题。

4 结论

生活污水处理技术的发展离不开海洋环保需求,防污染公约的发展对生活污水处理技术的发展有很大

的促进作用。几十年来,我国船用生活污水处理技术有了很大发展,从最初的跟进公约要求,发展到目前有了一定的技术储备。在船舶生活污水防污染领域,已形成多种具有自主知识产权的技术设备,满足我国各类船舶及海洋平台的建造需求。同时,技术发展也为进一步提高防污染标准提供了技术基础。在 MEPC 等研讨会上,中国代表能够发表体现我国技术水平的相关论点,积极参与相关决议的制定过程。

国内相关船舶生活污水处理装置的具体规范还有待进一步研究,以符合技术和设备发展的现状,为设备的制造商提供完整的设计开发依据。

参考文献:

- [1] 刘正江,张硕慧,张爽,等.防止船舶污染公约的制定和修改进程[J].中国海事,2009(2):26-30.
- [2] 吴国凡.我国船舶污染的现状与对策[J].船海工程,2016(4):51-54.
- [3] 殷峰.舰船用膜生化法生活污水处理自动控制[J].船海工程,2010(6):50-52.
- [4] 陈纪赛.船舶污水处理技术探讨[J].船海工程,2010(6):78-80.
- [5] 曾荣辉,付森宗,刘喜元,等.国外舰船污染物处理技术及启示[J].船海工程,2010(6):60-61.
- [6] 刘喜元,吴国凡,万婷婷,等.新型舰船环境保护技术构想[J].船海工程,2010(6):53-55.
- [12] 白敏冬,张芝涛,白希尧,著.海洋生物入侵性传播及绿色防治[M].北京:科学出版社,2005.
- [13] LIANG W J, LIN M, LIU H. Toluene Degradation by Non-thermal Plasma Combined with a Ferroelectric Catalyst [J]. Chemosphere, 2013, 10: 1390-1395.
- [14] CAL M P, SCHLUEP M. Destruction of Benzene with Non-thermal Plasma in Dielectric Barrier Discharge Reactors [J]. Environmental Process, 2001, 25: 151-156.
- [15] KIM H H, OGATA A, FUTAMURA S. Oxygen Partial Pressure-dependent Behavior of Various Catalysis for the Total Oxidation of VOCs using Cycled System of Adsorption and Oxygen Plasma [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2008, 79: 356-367.
- [16] OGNIER S, CAVADIAS S, AMOUROUX J. Aromatic VOC Removal by Formation of Microparticles in Pure Nitrogen Discharge [J]. Plasma Process and Polymers, 2007, 4: 528-536.
- [17] Office of Wastewater Management. Chlorine, Total Residual(spectrophotometric, DPD): US EPA Method 330.5[S]. 1978.
- [18] 环境保护部.水质 多环芳烃的测定 液液萃取和固相萃取高效液相色谱法: HJ 478—2009[S]. 2009.
- [19] STAEHELIN J, HOIGNÉ J. Decomposition of Ozone in Water: Rate of Initiation by Hydroxide Ions and Hydrogen Peroxide[J]. Environmental Science and Technology, 1982, 16: 666-681.
- [20] ADAMS C D, RANDTKE S J, THURMANN E M, et al. Occurrence and Treatment of Atrazine and its Degradation Products in Drinking Water[C]//Proceedings of the Annual Conference of American Water Works Association. 1990.
- [21] HEIL C, SCHULLERER S, BRAUCH H J. Untersuchung zur Oxidativen Behandlung PBSM-haltiger Wasser mit Ozon[J]. Vom Wasser, 1991, 77: 47-55.
- [22] GILBERT E. Kombination von Ozon/Wasserstoffperoxid zur Elimination von Chloressigsäure[J]. Vom Wasser, 1991, 77: 263-275.
- [23] GOTTSCHALK C. Oxidation Organischer Mikroverunreinigungen in Natürlichen und Synthetischen Wassern mit Ozon/ Wasserstoffperoxid[D]. TU-Berlin, Shaker Verlag, Aachen, 1997.

(上接第4页)