

Marine Exhaust Gas Cleaning Project  
of Magnesium Method

# 镁法船舶废气脱硫工程



朱益民 唐晓佳 李 铁 赵 娇 著



科学出版社

本书由

大连市人民政府资助出版

# 镁法船舶废气脱硫工程

朱益民 唐晓佳 李铁 赵娇 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书针对船舶废气污染的热点问题,介绍船舶硫氧化物排放控制领域的立法进程、控制技术发展概况、镁法船舶废气脱硫系统关键技术突破、工程样机的设计、安装、调试及实船检验等。重点阐述关键技术中的高效低阻脱硫技术、洗涤水处理技术、脱硫剂高效制备技术、脱硫系统测控技术等。通过数值仿真计算以及大量宝贵的实船试验数据,系统深入地介绍镁法船舶废气脱硫系统中的设计、建造、安装、运行的注意事项。

本书所涉及的内容在船舶废气脱硫领域属新技术,本书内容属于环境保护与航运领域的交叉,可供环境科学与工程专业教师、学生,以及船舶防污染领域专业人员阅读参考,也可用作环境相关专业本科生、研究生教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

镁法船舶废气脱硫工程/朱益民等著. —北京: 科学出版社, 2016.11

ISBN 978-7-03-050114-1

I. ①镁… II. ①朱… III. ①舰船发动机—发动机排气—气体脱硫—研究 IV. ①U664.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 235184 号

责任编辑: 顾英利 高 微 / 责任校对: 彭珍珍

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

http://www.sciencep.com

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016 年 11 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2016 年 11 月第一次印刷 印张: 13 1/2

字数: 252 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



## 前 言

船舶柴油机排放废气造成的污染已不容忽视，其中硫氧化物（ $\text{SO}_x$ ）对环境和人类的影响最为直接。为此，国际海事组织（IMO）及其海洋环境保护委员会（MEPC）设置了严格的船舶燃油含硫量标准。为满足 IMO 强制执行船舶防污染公约的履约需求，国际上开展了大量的研究，主要技术为直接使用低硫油、采用清洁燃料以及使用废气后处理措施。综合经济、环境及安全性考虑，废气后处理措施最具有发展前景。

目前国际上主流的船舶废气脱硫技术包括海水法、钠碱法（淡水）以及两种技术的混合。国内做了跟进研究，迄今尚未实现实船应用。本书涉及的镁法船舶废气脱硫技术具有完全自主知识产权，针对船舶工况，将镁法与海水法有机结合，形成独具特色的船舶废气脱硫技术。与国内外同类技术比较，镁基-海水法的优点在于：脱硫效率高；对环境变化体现较强的适应性和较宽的容量范围；脱硫剂为廉价的氧化镁；海水更新量及废水量较海水法极大减少。该方法综合了镁法脱硫和海水法脱硫的优势，从原理上克服了海水法和淡水+氢氧化钠法的缺点，风阻小、运行成本低。

通过长达六年的技术研发，镁法船舶废气脱硫技术已实现实船应用。2015年5月27日，在中远集装箱运输有限公司“凌云河”轮上完成实船试验，经第三方机构检测和中国船级社见证，相关数据指标满足 IMO 相关要求。产品图纸和文件业经中国船级社批准，获得原理认可证书；授权 10 项发明专利、申请 3 项国际 PCT 专利。2015年12月22日，交通运输部科技司组织科技成果鉴定，该成果总体处于国际领先水平。协同产业单位于 2016年5月获得法国 BV 船级社、英国劳氏船级社原理认可证书。这标志着我国的船舶废气脱硫技术打破国际垄断、产品跻身世界一流水平。

有关船舶废气脱硫的书籍较少，国外主要是美国国家环境保护局、丹麦环境

保护部等政府机构以及瓦锡兰、阿法拉伐等厂家的技术及调研报告，内容未涉及镁法船舶废气脱硫技术。国内除本书作者发表的一些学术论文外，未见相关报道，因此本书所涉及的内容在船舶废气脱硫领域属新技术，望与相关工作者交流。

我们所从事的船舶废气脱硫研发与国家行业需求相关且显成效。我们会继续努力，真正用技术支撑国家需求，以求达到一种自我实现，为海运与蓝色海天相融作出有成效的贡献！

本书由大连市人民政府资助出版，作者对大连市人民政府的支持表示衷心的感谢。

限于时间和水平，不足之处在所难免，敬请广大读者不吝指正。

著 者

2016年6月



# 目 录

---

第 1 章 国际公约及相关国家排放控制区法规 .....	1
1.1 国际海事组织排放要求 .....	1
1.1.1 硫氧化物排放要求 .....	1
1.1.2 洗涤水排放要求 .....	2
1.2 硫排放要求进展 .....	5
1.2.1 排放控制区扩大 .....	5
1.2.2 履约难度加大 .....	6
1.3 地区排放要求 .....	6
1.3.1 欧盟地区 .....	6
1.3.2 北美地区 .....	7
1.4 中国排放要求 .....	8
1.4.1 排放控制区水域 .....	8
1.4.2 排放控制要求 .....	9
参考文献 .....	10
第 2 章 硫氧化物排放控制研究现状 .....	11
2.1 低硫燃油 .....	11
2.2 替代燃料液化天然气 .....	11
2.3 船舶废气脱硫技术 .....	12
2.3.1 海水法 .....	13
2.3.2 淡水+氢氧化钠法 .....	14
2.3.3 混合系统 .....	14
2.3.4 CSNO <sub>x</sub> 系统 .....	15
2.3.5 镁法 .....	16

2.3.6 干法 .....	16
总结 .....	17
参考文献 .....	18
<b>第3章 高效低阻镁法船舶废气脱硫技术 .....</b>	<b>20</b>
3.1 脱硫效率因素 .....	20
3.1.1 船舶废气脱硫装置 .....	20
3.1.2 液气比对脱硫效率影响 .....	22
3.1.3 镁硫比对脱硫效率影响 .....	22
3.1.4 不同方法脱硫效率对比 .....	23
3.1.5 喷淋液 pH 对比 .....	24
3.1.6 喷淋液中 $\text{CO}_3^{2-} / \text{HCO}_3^-$ 浓度分析 .....	25
3.2 $\text{SO}_x$ 吸收塔优化设计 .....	26
3.2.1 吸收塔塔型选择 .....	26
3.2.2 初级冷却系统设计 .....	27
3.2.3 喷嘴选型 .....	27
3.2.4 壁流现象对策 .....	28
3.2.5 喷淋层设计 .....	28
3.2.6 除雾器设计 .....	29
3.3 镁法脱硫效率模型 .....	29
3.3.1 响应面设计 .....	29
3.3.2 模型分析 .....	31
3.3.3 灵敏性分析 .....	33
3.3.4 参数优选 .....	35
3.4 气-液-固三相水化高效制备高活性脱硫剂 .....	36
3.4.1 试验建立 .....	36
3.4.2 三相水化结果与分析 .....	37
3.4.3 海水/淡水体系试验结果与分析 .....	39
3.5 实船验证试验 .....	41
3.5.1 脱硫剂连续高效制备装置 .....	41
3.5.2 废气脱硫连续实船验证试验 .....	43

总结 .....	48
参考文献 .....	49
<b>第 4 章 船舶废气脱硫洗涤水处理技术 .....</b>	<b>51</b>
4.1 脱硫废液处理系统功能要求和工艺过程 .....	51
4.1.1 主要功能要求 .....	51
4.1.2 工艺流程 .....	52
4.2 脱硫废液水质分析 .....	53
4.2.1 分析方法及仪器 .....	54
4.2.2 水质分析结果 .....	55
4.3 镁法脱硫副产物高效氧化装置 .....	59
4.4 废水固液分离 .....	61
4.5 废渣无害化处理研究 .....	62
4.6 实船验证试验 .....	62
4.6.1 现场安装调试 .....	62
4.6.2 验证试验 .....	63
总结 .....	67
参考文献 .....	68
<b>第 5 章 船舶废气脱硫自动控制系统 .....</b>	<b>70</b>
5.1 系统总体分析与设计 .....	70
5.1.1 控制需求分析 .....	70
5.1.2 脱硫控制系统组成 .....	72
5.1.3 控制方法分析 .....	73
5.2 系统功能设计 .....	74
5.2.1 SO <sub>2</sub> 排放浓度控制系统 .....	75
5.2.2 循环槽液位控制 .....	76
5.2.3 脱硫液 pH 控制系统 .....	78
5.2.4 海水控制系统 .....	78
5.2.5 制浆控制系统 .....	78
5.2.6 废水处理控制系统 .....	79
5.3 系统电气设计与实现 .....	80




5.3.1	系统电源设计	80
5.3.2	总控柜设计	81
5.3.3	电控柜与动力柜	82
5.3.4	安全保护设计	82
5.3.5	接地与滤波	84
5.4	系统结构设计	85
5.4.1	电控柜结构设计	85
5.4.2	动力柜结构设计	86
5.4.3	脱硫控制计算机设计	88
5.5	系统软件设计	88
5.5.1	PLC 控制软件设计	88
5.5.2	上位机组态软件设计	92
5.5.3	现场触控屏软件设计	96
	总结	99
<b>第 6 章</b>	<b>船舶废气洗涤脱硫系统仿真</b>	<b>100</b>
6.1	镁法船舶废气脱硫系统	100
6.1.1	脱硫吸收塔子系统	100
6.1.2	脱硫废液处理与排放子系统	101
6.1.3	自动控制子系统	101
6.2	脱硫吸收塔子系统仿真	101
6.2.1	网格模型	101
6.2.2	数学模型	103
6.2.3	仿真结果与分析	106
6.2.4	脱硫效率仿真模拟	111
6.3	脱硫废液处理与排放系统仿真	113
6.3.1	Aspen Plus 模拟步骤	113
6.3.2	工艺流程模型	114
6.3.3	模拟结果与分析	115
6.4	自动控制子系统仿真	117
6.4.1	仿真模拟运行条件与过程介绍	117

6.4.2 自动控制系统模拟及结果	119
总结	126
参考文献	127
<b>第7章 船舶废气脱硫系统集成设计</b>	<b>128</b>
7.1 主体脱硫系统设计	128
7.1.1 处理技术方法	128
7.1.2 系统功能设计	129
7.1.3 主体脱硫系统结构布局	131
7.2 脱硫废液处理系统设计	132
7.2.1 系统设计任务	132
7.2.2 系统功能设计	133
7.2.3 脱硫废液处理系统结构布局	134
7.3 抗恶劣环境设计	135
7.3.1 防腐蚀设计	136
7.3.2 热设计	137
7.3.3 隔震、防冲击设计	138
7.3.4 与船舶配套兼容设计	139
7.3.5 可靠性设计	140
7.3.6 电磁兼容设计	142
7.4 安装性、测试性、维修性设计说明	143
7.4.1 安装性设计	143
7.4.2 测试性设计	144
7.4.3 维修性设计	144
7.5 通用化、标准化、模块化、组合化设计说明	145
7.5.1 通用化、标准化设计	145
7.5.2 模块化、组合化设计	145
总结	146
<b>第8章 镁法船舶废气脱硫系统适用性</b>	<b>147</b>
8.1 公约及法规适用性分析	147
8.1.1 脱硫效果	147

8.1.2	洗涤水水质	148
8.1.3	地区法规适用性	149
8.2	与船舶配套兼容分析	149
8.2.1	高效性	149
8.2.2	可靠性	152
8.2.3	操作性	152
8.2.4	安全与应急	153
8.2.5	安装与维护	154
8.3	经济性分析	156
8.3.1	市场需求分析	156
8.3.2	市场价值分析	157
8.3.3	成本核算	158
	总结	160
<b>第 9 章</b>	<b>船舶废气脱硫系统工程样机设计</b>	<b>161</b>
9.1	船舶工况调研	161
9.2	工程样机总体设计	162
9.2.1	工程样机系统组成	162
9.2.2	测绘及工程样机整体布局	166
9.3	工程样机细化设计	168
9.3.1	工程样机设备清单	168
9.3.2	加工部件细化设计	171
<b>第 10 章</b>	<b>船舶废气脱硫系统工程样机安装和调试</b>	<b>175</b>
10.1	工程样机布置	175
10.2	工程样机安装	176
10.3	工程样机调试	177
10.3.1	分步调试	177
10.3.2	子系统调试	178
10.3.3	整体调试	180
<b>第 11 章</b>	<b>船舶废气脱硫系统试验和检验</b>	<b>182</b>
11.1	示范工程手动操作手册	182

---

11.1.1 准备阶段.....	182
11.1.2 脱硫阶段.....	183
11.1.3 水处理阶段.....	183
11.1.4 收尾阶段.....	184
11.2 示范工程试验.....	184
11.3 示范工程检验.....	189
11.3.1 实船检验.....	189
11.3.2 检验结果.....	189
总结.....	198
附录 缩略语.....	199



## 第 1 章

# 国际公约及相关国家排放控制区法规

船舶是当今国际贸易中最主要的货物运输工具，全球接近 90% 的贸易是通过海洋运输来完成的。运输船舶采用的动力装置主要是燃烧重质柴油的主机，其在航行过程中排放出大量废气。

1988 年，国际海事组织海洋环境保护委员会（International Maritime Organization, Maritime Environment Protection Committee, IMO MEPC）将挪威提交的关于空气污染范围问题纳入其工作计划。1990 年，挪威向 IMO MEPC 提交了一份关于船舶造成空气污染的报告。该报告说明了全球船舶所产生的硫氧化物、氮氧化物等有害物对空气的污染程度。其中，船舶每年排放的  $\text{SO}_x$  为 450 万~650 万 t，约占全球  $\text{SO}_x$  排放总量的 4%。据有关机构最新研究统计，从事国际贸易的船舶柴油机所产生的  $\text{SO}_x$  占世界  $\text{SO}_x$  排放总量的 7%，而近年大量新造大型船舶投入营运，推算认为船舶柴油机每年产生  $\text{SO}_x$  超过 900 万 t。在交通密集的海峡、港口，船舶柴油机使空气污染越来越严重，并随外贸激增而加重。在很多城市，船舶运输业已成为空气恶化的最大污染源。据统计，北美大陆因航运污染患癌致死人数占全球因航运污染而患癌症者总数的十分之一。因此，船舶废气污染问题，尤其是船舶硫氧化物污染已经达到刻不容缓的地步。

### 1.1 国际海事组织排放要求

#### 1.1.1 硫氧化物排放要求

##### 1. $\text{SO}_x$ 排放标准

《国际防止船舶造成污染公约》（MARPOL, *International Convention for the*

Prevention of Pollution from Ships) 附则VI第 14 条第 1~4 款中规定了船上使用任何燃油的硫含量的极限值和履约时间, 同时规定了排放控制区域及其内燃油硫含量的极限值和履约时间, 见图 1-1。



图 1-1 MARPOL 附则VI硫排放标准图示

## 2. 排放控制区

排放控制区现共有波罗的海、北海、北美、美国加勒比海四大排放区域<sup>[1]</sup>。其中, 波罗的海和北海这两个排放控制区仅控制  $\text{SO}_x$  的排放, 即硫化物排放控制区 (sulphur emission control area, SECA); 北美排放控制区和美国加勒比海排放控制区限制排放  $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$  和颗粒物 (PM) 这三种污染物。

### 1.1.2 洗涤水排放要求

MARPOL 73/78 公约附则VI要求船舶使用的燃油含硫量应满足第 14.1 款或第 14.4 款的规定。同时, 附则VI第 4 条提出, 当事国主管机关可允许在船上安装任何装置、材料、设备或器具, 或允许使用其他程序、替代燃油或符合方法, 以代替附则VI的要求, 条件是这些装置、材料、设备或器具或其他程序、替代燃油或符合方法在减排方面至少与附则VI的要求等效, 包括第 13 条和第 14 条所述的任

何标准。MEPC.184 (59) 号决议通过了《废气清洗系统导则 (2009)》，该导则主要用于明确废气清洗 (exhaust gas cleaning, EGC) 系统的试验、发证和检验，以证明 EGC 系统能够提供相等的效果来满足公约第 14.1 款和 14.4 款的要求<sup>[2]</sup>。

EGC 系统的洗涤介质通常是海水、沿海水或港口水，这就要求对不同的清洗物质需要测试表 1-1 所列最小因素。

表 1-1 清洗物质最小测试因素

清洗物质	最小测试因素
硫氧化物	pH 和 COD
氮氧化物	氮对海洋环境的影响
碳氢化合物 (氧化和不氧化)	在海洋环境中的影响和积累
烟尘和非燃烧物	在海洋环境中的影响和积累

注：COD (chemical oxygen demand, 化学需氧量)。

当 EGC 系统在码头、港口或河口内工作时，应对洗涤水进行连续监测和记录。监测和记录参数包括 pH、PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons, 多环芳烃) 值、浊度和温度。在其他地区，只要 EGC 系统投入运行，连续监测和记录装置也要投入工作 (短时间的维护和清洗除外)。排放水 pH、PAHs、浊度、硝酸盐含量、添加剂与其他化学物质应分别符合以下有关规定。

### 1. pH

洗涤水 pH 应符合以下要求之一，并记录在 ETM-A (EGC system—Technical Manual for Scheme A, EGC 系统—技术手册方案 A) 或 ETM-B 中：

(1) 排放洗涤水的 pH 不小于 6.5 (在舷外排放中测量)，但在船舶机动操纵时，进口水、排放水之间的酸碱度允许相差最大不超过 2pH 单位 (分别在船舶进水口和舷外排放中测量)。

(2) 船舶停靠港口进行 EGC 装置安装后交付试验期间，在舷外洗涤水排放水流中测量 pH，当离排放点 4m 处的排放水流 pH 等于或大于 6.5 时，记录船舶舷外监测点的排放水 pH，取得最小 6.5 时的舷外监测 pH 将作为洗涤水排放 pH 限值。

### 2. PAHs

洗涤水 PAHs 应符合下列要求，相应差值限值在 ETM-A 或 ETM-B 中予以说明：

(1) 洗涤水连续最大 PAHs 浓度应不超过进口水 PAHs 浓度的  $50\mu\text{g/L}$ 。洗涤水 PAHs 浓度应在排放前测量, 测量点安排在水处理设备下游, 但在任何洗涤水稀释或其他药剂添加装置(如使用)的上游。

(2) 上述  $50\mu\text{g/L}$  限值是流量为  $45\text{t}/(\text{MW}\cdot\text{h})$  的洗涤水通过 EGC 装置后的标准值(其中, MW 是燃油燃烧装置的 MCR 或 80%额定功率的单位)。

(3) 考虑到存在 EGC 装置非正常启动的情况, 允许每 12h 运行周期内有一个 15min 的时间段, 洗涤水连续 PAHs 浓度超过上述限额的 100%。

### 3. 浊度/悬浮颗粒物

洗涤水浊度/悬浮颗粒物应符合下列要求, 并在 ETM-A 或 ETM-B 中记录浊度限值:

(1) 洗涤水处理系统的设计应尽可能减少悬浮颗粒物, 包括重金属和灰分。

(2) 洗涤水连续最大浊度应不超过进口水浊度的 25FNU 或 25NTU 或等效单位。当进口水浊度很高时, 测量仪器的精度及进出口浊度测量时间的延迟将可能导致这种差值限值方法不可靠, 因此所有浊度差值的读数应取 15min 内的滚动平均值, 最大差值为 25FNU。洗涤水浊度应在排放前测量, 测量点安排在水处理设备下游、洗涤水稀释装置或其他药剂添加装置的上游。

(3) 允许每 12h 运行周期内有一个 15min 的时间段, 洗涤水连续浊度超过上述排放限值的 20%。

### 4. 硝酸盐含量

洗涤水硝酸盐含量应符合下列要求:

(1) 洗涤水处理系统应防止硝酸盐的排放超过清除废气中 12%  $\text{NO}_x$  所对应的硝酸盐量或  $60\text{mg/L}$  [洗涤水排放速率为  $45\text{t}/(\text{MW}\cdot\text{h})$  时的标准值], 取大者。

(2) 每次换证检验时, 应能提供每个 EGC 系统检验前 3 个月的舷外硝酸盐排放数据, 验船师可根据情况要求提取附加的样本并进行分析。硝酸盐排放数据和分析证书应作为 EGC 记录簿的一部分保留在船上, 检查需要时应能提供。有关取样、储存、处理、分析方面的要求应在 ETM-A 或 ETM-B 文件中予以详细说明。为了保证硝酸盐排放速率的评估结果具有可比性, 取样程序应考虑 (1), 明确洗涤水流量与硝酸盐排放浓度限值的对应关系, 硝酸盐



分析应根据 Grasshoff 等编著的《海水分析方法》一书所述的标准海水分析方法进行。

(3) 所有的系统都应测量排放水中的硝酸盐含量, 如通常的硝酸盐量均高于排放上限的 80%, 应在 ETM-A 或 ETM-B 中进行记录。

如废气清洗系统采用化学物质、添加剂、制剂或系统中有相关化学物质产生, 则应对洗涤水进行评估。洗涤水评估可考虑相关的指南 [如 MEPC.126 (53) 决议——使用活性物质的压载水管理系统的认可程序 (G9)], 如有必要, 可另外制定洗涤水排放标准。

此外, EGC 系统的洗涤水排放出口应尽量远离船舶海水进口, 洗涤水 pH 在各种工作条件下都应维持在合适的水平, 而不会对船舶的防污底系统、螺旋桨、舵及其他易受酸性排放影响的部件产生破坏作用或者加速关键金属部件的腐蚀。

## 1.2 硫排放要求进展

MEPC 从 20 世纪 80 年代开始致力于减少船舶废气污染的立法研究。经过二十几年的发展, 形成了完整的防止船舶废气污染的国际公约——MARPOL 附则 VI, 提出了船舶废气排放的标准以及相关的技术导则。随着公约的执行, 履约防止船舶废气污染成为 IMO 成员国迫在眉睫的任务。

### 1.2.1 排放控制区扩大

目前在全球范围内, MARPOL 附则 VI 所确定的四个排放控制区中, 波罗的海和北海是硫排放控制区, 而北美排放控制区和美国加勒比海排放控制区则将控制  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$  和 PM 这三类物质。

中国交通运输部于 2015 年 12 月 4 日发布了《珠三角、长三角、环渤海(京津冀)水域船舶排放控制区实施方案》(以下简称《中国排放控制区实施方案》), 该方案已于 2016 年 1 月 1 日生效。

随着研究机构对船舶废气污染程度和危害的研究, 发现在世界上船舶流量大的海港, 船舶废气污染已成为当地污染源之一。各国政府已逐渐意识到控制船舶废气污染的紧迫性, 相关政府机构将会更多地向 IMO 提出建立排放控制区的提