



“十三五”
国家重点图书

海洋工程材料丛书

Series
on Materials
for Marine Engineering

Nonferrous Metal Materials for Marine Applications

海洋工程 有色金属材料

马朝利 李周 李廷举 赵丕植 等编著



化学工业出版社



“十三”
国家重点图书出版项目

海洋工程材料丛书

Series
on Materials
for Marine Engineering

Nonferrous
Metal Materials
for Marine Applications

海洋工程 有色金属材料

马朝利 李 周 李廷举 赵丕植 等编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

《海洋工程有色金属材料》是国家出版基金项目“海洋工程材料丛书”的分册之一。

针对海洋工程有色金属材料,本书重点关注海洋工程装备及设施中用量最大、使用最普遍的铝、铜两类合金。本书论述了国内外海洋工程用铝合金、铜合金的现状以及发展趋势,同时重点介绍了铝合金与铜合金的主要分类、合金化原理,海洋工程常用铝合金与铜合金,在海洋环境下的腐蚀特征与腐蚀机理,有色金属材料腐蚀试验的方法与标准,熔炼、热加工、表面处理技术,在海洋工程装备中的应用实例等。

本书可作为从事海洋工程装备结构铝合金与铜合金材料的科研人员、生产技术人员使用,可为海洋工程装备设计技术人员在装备设计时提供选材参考,同时也可作为大专院校师生的参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

海洋工程有色金属材料/马朝利等编著. —北京:化学工业出版社, 2016. 10
(海洋工程材料丛书)
ISBN 978-7-122-27760-2

I. ①海… II. ①马… III. ①海洋工程-有色金属-金属材料 IV. ①P75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 180421 号

责任编辑: 赛 臻 晁景岩
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 李 玥
装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 三河市航远印刷有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 18 字数 356 千字 2017 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 88.00 元

版权所有 违者必究

“海洋工程材料丛书”

编委会

顾问：徐匡迪^{院士} 周济^{院士} 干勇^{院士} 王曙光

主任：周廉^{院士}

副主任：丁文江^{院士} 薛群基^{院士} 翁宇庆^{院士} 周伟斌

委员：(按姓名汉语拼音排序)

才鸿年 ^{院士}	蔡斌	常辉	陈建敏	陈祥宝 ^{院士}	陈蕴博 ^{院士}
丁文江 ^{院士}	窦臻	方志刚	高从堦 ^{院士}	宫声凯	韩恩厚
何季麟 ^{院士}	侯保荣 ^{院士}	黄国兵	蹇锡高 ^{院士}	李贺军	李鹤林 ^{院士}
李晓刚	李仲平 ^{院士}	李宗津	刘敏	刘振宇	马朝利
马伟明 ^{院士}	马运义	阮国岭	尚成嘉	沈晓冬	苏航
宿彦京	唐明述 ^{院士}	屠海令 ^{院士}	王国栋 ^{院士}	王景全 ^{院士}	王向东
王一德 ^{院士}	翁宇庆 ^{院士}	吴有生 ^{院士}	徐芑南 ^{院士}	薛群基 ^{院士}	杨雄辉
曾恒一 ^{院士}	张金麟 ^{院士}	赵解扬	肇研	周克崧 ^{院士}	周廉 ^{院士}
周守为 ^{院士}	周伟斌	朱英富 ^{院士}	左家和		

编委会办公室

主任：李贺军 马朝利 常辉 贾豫冬

成员：(按姓名汉语拼音排序)

陈俊 邓桢桢 丁洁 丁陵 杜伟 冯余其 李伟峰
陶璇 王帅 王媛 徐克 姚栋嘉 余启勇 眭景岩

《海洋工程有色金属材料》

编委会

主任 周 廉^{院士}

副主任 丁文江^{院士} 蹇锡高^{院士} 王国栋^{院士}

委员 (按姓氏汉语拼音排序)

曹国辉	曹建国	陈汉文	陈志强	丁文江 ^{院士}	窦保杰	高新宇
郭富安	贾栓孝	蹇锡高	黎晓桃	李华清	李廷举	李忠良
李 周	林 林	刘 成	刘海涛	刘先兵	刘 炎	刘 艳
柳瑞清	吕新宇	马朝利	倪慧峰	牛立业	彭朝晖	曲信磊
阮国岭	孙永辉	谭乃芬	王国栋 ^{院士}	王国军	王国仕	王 硕
王维鹤	熊伟轩	徐 克	徐 勋	张春明	张 海	张克勤
张 空	张日恒	张荣明	张士新	赵红月	赵丕植	赵晓东
赵解扬	郑开红	周 廉 ^{院士}				

编写人员名单

马朝利 李 周 李廷举 赵丕植 李华清 邓桢桢 张 曦
潘琰峰 王 方 孙锋山 刘茂文

序

进入 21 世纪以来,材料特别是新材料已被视为新技术革命的基础和先导。海洋材料长期以来并未被纳入新材料体系范畴,发展速度远远落后于航空、航天材料。21 世纪是海洋的世纪,人类生存和发展越来越依赖于海洋。党的十八大后,建设海洋强国成为重要国策,海洋工程装备及海洋材料作为拓展海洋空间、开发海洋资源的物质前提,是实施海洋科技创新、建设海洋生态文明的物质基础,是提升海洋国防实力、维护海洋权益的物质保障。发展好我国的海洋材料,对实现海洋强国目标将产生重要的积极作用。

海洋的重要性主要体现在三个方面。首先,海洋经济是国民经济的重要组成部分,而海洋经济的发展离不开海洋资源的开发和利用,海洋资源的合理利用能够实现海洋经济的可持续发展。其次,海洋安全是国土安全的重要支撑,因此维护海洋安全至关重要,是国家海洋发展战略的重要组成部分。再次,海洋面积之大,海洋中物质、生物之多及自然现象之复杂,其重要性不亚于陆地及空天,对海洋的科学研究有助于人们认识海洋、了解自然。鉴此,海洋不仅已成为人类赖以生存、社会借以发展、濒海国家持续安泰昌盛的战略发展空间和基地,而且已成为当今世界军事和经济竞争的重要领域,军事竞争的焦点日益转向争夺海上控制权。

海洋资源主要有海洋矿产资源、海水资源、海洋生物资源、海洋旅游资源等。对海洋资源的利用包括海洋交通运输、海洋油气矿业、海洋渔业及生物资源、风力发电、潮汐发电、海水淡化等。海洋材料包括对这些海洋资源开发利用的工程装备(各种离岸、近岸工程建设以及勘探开采油气矿物资源所需的机械工程装备、海洋交通运输装备等)用材料。

海洋材料也包括涉及海洋安全的军用舰船(如航空母舰、护卫舰、潜艇等)和执法船用材料,以及用于各种海洋科学研究的装备和仪器(如海洋考察船、极地科考船、深海装备、海底电缆等)用材料。

2013—2014 年,中国工程院分别启动了“中国海洋工程材料研发现状及发展战略初步研究”“中国海洋工程中关键材料发展战略研究”两个咨询项目,中国工程院化工、冶金与材料工程学部联系机械、环境、能源等学部 30 余位院士,组织了全国 200 余位海洋工程领域的专家、学者,历时两年多的时间完成了咨询项目,对海洋工程材料领域的共性问题、关键技术和特殊应用领域进行了深入的调查和研究,为建立我国海洋工程材料完善的科学体系提供咨询建议,使“一代海洋材料,一代海洋装备”的理念更加深入人心,被誉为至理名言。以此为基础,本项目组组织国内材料领域的众多知名专

家、学者，编撰了这套“海洋工程材料丛书”。丛书凝聚了 200 余位科学家和工程技术专家的群体智慧。

海洋材料应是海洋中各种工程装备应用材料的总称，是指在能适应海洋恶劣的环境、抵抗海水和生物体的侵蚀、能满足各类海洋工程装备应用需求的环保的可持续发展的材料。本套丛书内容除了包括海洋工程装备范畴的海洋资源利用开发等涉及的材料，还包括海洋安全、海洋科学研究涉及的材料。

丛书紧扣国家海洋强国的战略需求，从“材料”“腐蚀防护”“工程装备”三个层面，总结和梳理了改革开放 30 年来我国海洋材料及应用方面的基础理论积累、重大研究和应用成果，重点突出了关键技术，介绍了国内外在该领域的先进技术、装备和理论研究，并展望了海洋材料和材料技术的发展趋势。丛书共有十一个分册，分别是《中国海洋工程材料发展战略咨询报告》《海洋工程钢铁材料》《海洋工程钛金属材料》《海洋工程有色金属材料》《海洋工程聚合物基复合材料》《海洋工程水泥与混凝土材料》《船舶装备与材料》《海洋石油装备与材料》《海水资源综合利用装备与材料》《海洋工程材料腐蚀行为与机理》《海洋工程材料和结构的腐蚀与防护》。其中，海洋工程装备材料的腐蚀与防护是解决海洋工程材料应用的核心技术，除在各材料分册有关章节予以描述之外，《海洋工程材料和结构的腐蚀与防护》及《海洋工程材料腐蚀行为与机理》分册又对海洋腐蚀的特点、腐蚀机理、材料防腐要求等方面进行了专门论述。这套丛书另一个突出亮点是材料与海洋工程装备应用的结合，专设三个分册分别叙述了船舶装备、海洋石油钻井平台及海水综合利用等几个主要海洋工程领域的发展现状、发展趋势以及对各种材料的需求。

丛书内容颇为广泛，具有较强的创新性、理论性和实用性，较好地反映了海洋工程材料及应用的全貌，文字深入浅出，简洁明了，系统介绍了相关材料的特点和应用，能为读者从不同应用范围、不同材料及技术等角度了解海洋工程材料提供很好的帮助，具有较高的学术水平和应用价值。本丛书增强了材料科学与应用的结合，必将对推动我国海洋材料的发展起到积极的作用。

希望本丛书的出版，能够对从事船舶、海洋工程基础及应用研究、生产单位的科技工作者系统地了解 and 掌握本领域的发展现状和未来，在重大工程和装备的选材设计、制备加工、防护技术、服役安全等方面提供理论支撑和技术指导，对进一步开展创新研究工作有所帮助，同时也可以作为广大材料专业的本科生及研究生的参考教材。

中国工程院院士



2016 年 3 月

前言

占地球面积 71% 的辽阔的海洋不仅是巨大的资源宝库，而且是人类生存与发展不可缺少的空间环境，是解决人口剧增、资源短缺、环境恶化三大问题的希望所在。我国海洋资源丰富，不仅拥有 18000 多千米的海岸线、37 万平方千米的领海，还拥有近 300 万平方千米的管辖海域，这为发展我国海洋经济、沿海工业提供了十分广阔的天地。同时海洋也是自然界中对海洋工程装备、设施构成最严酷腐蚀的环境之一，这为开发海洋和利用海洋提出了巨大的挑战。海洋钻井平台、海洋运输船舶、海洋岛礁建筑，等等，所有承载这些海洋工程设施的结构材料与技术无疑是这些海洋工程设施的安全保证，也是发展海洋经济的安全保证。自从人们关注海洋以来，钢铁材料、有色金属材料、复合材料以及混凝土材料等已大规模应用到海洋工程结构中。人们不断地从海洋工程装备、设施等的事故中学习结构材料在海洋环境中损伤破坏的知识，发现结构材料在海洋环境中的破坏机理，不断地开发抵御海洋环境损伤的新技术与新材料。随着人们对海洋环境的深入了解，随着科学技术的不断进步，人们不但开发出了各种海洋环境的防蚀技术，同时也开发出了具有耐海洋腐蚀的应用于大型舰船、大型海上桥梁、大型海上平台、海洋输油管线等海洋工程装备的高性能结构钢、钛合金、铝合金、铜合金、复合材料，以及应用于近海和离岛建筑的混凝土。

随着国内经济结构的转型升级，海洋经济已成为国民经济的主要组成部分，海洋产业迅速崛起。在这种背景下，归纳、总结海洋工程结构材料在海洋工程中的应用，对发展海洋工程装备产业具有重要作用。“海洋工程材料丛书”系统总结了海洋工程装备中的关键结构材料，包括钢铁材料、有色金属材料、复合材料以及混凝土材料等在海洋工程装备中的应用。

《海洋工程有色金属材料》是“海洋工程材料丛书”的分册之一。有色金属品种繁多，由于篇幅有限，本书着重讨论在海洋工程装备及设施中用量最大、使用最普遍的铝、铜两类合金。作为有色金属材料中的海洋金属材料——钛合金已在本丛书的《海洋工程钛金属材料》单独成册，本书不再赘述。本书结合国内外文献资料及有色金属材料在国内外海洋工程中使用的具体情况，重点综述了国内外海洋工程用铝合金、铜合金的现状以及发展趋势，可为我国铝合金、铜合金材料在海洋工程领域的应用技术研究及发展提供一定的借鉴作用。同时重点介绍了海洋工程装备用铝合金、铜合金，包括有关合金材料的成分设计、制备、工程部件的加工制造以及在海洋工程装备中的应用实

例等。

本书由苏州有色金属研究院负责组织，全国 30 多家有色金属生产企业、研究院所以及大专院校的 50 多位专家参与了本书的编写工作。最后由北京航空航天大学马朝利教授、中南大学李周教授、大连理工大学李廷举教授以及苏州有色金属研究院赵丕植研究员、李华清研究员共同统稿，完成全书的编撰工作。

由于时间有限以及编者的水平限制，本书也许有不尽如人意之处，敬希读者指正。

编著者

2016 年 4 月

目录

第 1 章 海洋工程用有色金属材料及其合金化原理

1.1 海洋工程用铝合金	1
1.1.1 海洋工程用铝合金的发展历程	1
1.1.2 海洋工程用铝合金的特点	4
1.1.3 铝合金合金化原理	4
1.1.3.1 主要合金元素的影响	5
1.1.3.2 微量元素和杂质的影响	11
1.1.4 铝合金的分类	15
1.1.5 主要铝合金的合金化及相组成	16
1.1.5.1 1XXX 系铝合金	19
1.1.5.2 2XXX 系铝合金	21
1.1.5.3 3XXX 系铝合金	27
1.1.5.4 4XXX 系铝合金	29
1.1.5.5 5XXX 系铝合金	30
1.1.5.6 6XXX 系铝合金	36
1.1.5.7 7XXX 系铝合金	39
1.1.6 典型海洋工程用铝合金	43
1.2 海洋工程用铜合金	48
1.2.1 铜合金的分类及合金化原理	48
1.2.1.1 铜合金的分类	48
1.2.1.2 耐蚀黄铜合金化原理	49
1.2.1.3 耐蚀白铜合金化原理	51
1.2.1.4 耐蚀青铜合金化原理	51
1.2.2 铜合金在海洋工程中的应用	52
1.2.2.1 舰船用铜及铜合金	53
1.2.2.2 其他海洋工程用铜合金	54
1.2.2.3 典型铜合金管材、板材及线材	55
1.3 其他海洋工程用有色金属结构材料	58
1.3.1 海洋工程用钛合金	58
1.3.2 海洋工程用镍基合金	59

1.3.3 海洋工程用镁合金 61

参考文献 63

第 2 章 有色金属材料海洋腐蚀基础

2.1 海洋环境及其腐蚀特征 65

2.1.1 我国海洋环境特点 66

2.1.2 海洋环境腐蚀特征 67

2.2 铝合金海洋环境腐蚀 71

2.2.1 铝合金的耐腐蚀特性 71

2.2.2 铝合金在海水中的耐腐蚀特性 72

2.2.3 铝合金的海洋环境腐蚀机理 74

2.3 铜合金海洋环境腐蚀 88

2.3.1 铜合金在不同海洋环境的腐蚀特征 88

2.3.2 铜合金在海水中的腐蚀机理 92

2.4 有色金属材料海洋环境腐蚀试验方法与标准 94

2.4.1 腐蚀试验方法分类 94

2.4.2 腐蚀试验设计 95

2.4.3 腐蚀类型及评价方法 95

2.4.4 实际海洋环境暴露试验 127

参考文献 130

第 3 章 海洋工程用有色金属材料生产技术

3.1 海洋工程用铝合金主要制备技术 132

3.1.1 铝合金熔铸技术 132

3.1.2 铝合金变形加工技术 142

3.1.3 铝合金热处理技术 149

3.1.4 铝合金焊接技术 163

3.1.5 铝合金表面处理技术 167

3.2 海洋工程用铜合金主要制备技术 176

3.2.1 铜合金熔铸技术 176

3.2.2 铜合金板带加工技术 178

3.2.3 铜合金管材加工技术 184

3.2.4 铜合金热处理技术 198

3.2.5 铜合金表面处理技术	206
参考文献	211

第 4 章 有色金属材料在海洋工程中的应用

4.1 铝合金在船体结构中的应用	213
4.1.1 铝合金材料在船舶上的应用及发展历史	213
4.1.2 船舶用铝合金材料的种类、用途及性能	217
4.2 铝合金在 LNG 船中的应用	225
4.2.1 LNG 船简介及发展现状	225
4.2.2 铝合金的应用	227
4.2.3 船用铝合金国产化面临的问题及展望	233
4.3 铜合金在推进系统中的应用	234
4.4 铜合金在管路系统中的应用	241
4.5 铝合金在海洋平台中的应用	250
4.5.1 在直升机停机坪上的应用	251
4.5.2 在居住单元上的应用	253
4.6 铝合金钻杆	255
4.7 铝合金的其他应用	258
参考文献	260

第 5 章 有色金属材料在能源工程中的应用

5.1 海水淡化中常用有色金属材料	261
5.2 温差发电用铝合金	264
5.3 风能发电用铝合金	266
参考文献	268

索引	269
----------	-----

第 | 章

海洋工程用有色金属材料及其合金化原理

- 1.1 海洋工程用铝合金
- 1.2 海洋工程用铜合金
- 1.3 其他海洋工程用有色金属结构材料

海洋环境是自然界中最严酷的腐蚀环境之一。有色金属及其合金材料在海洋工程中有着广泛的应用。

有色金属材料中，铝合金作为轻质结构材料的代表，已在船舶、石油钻井平台、石油钻探、风力发电、牺牲阳极保护以及海水淡化等海洋工程领域得到了广泛的使用。铝材取代钢材作为海洋工程用结构材料已成为一种发展趋势。铜合金具有特殊的耐海洋生物腐蚀等特性，一直是舰船等推进系统以及热交换系统的关键材料。由有色金属材料在海洋工程中的应用历史分析，技术进步是有色金属材料在海洋工程中应用的主要推动力，而随着社会的发展，有色金属材料设计思想将日趋成熟、加工成本将逐渐降低、新的连接技术与装配方法也将不断涌现，这些都强有力地推进有色金属材料在海洋工程上的应用。

1.1 海洋工程用铝合金

1.1.1 海洋工程用铝合金的发展历程

铝合金在海洋工程上的应用经过了很长的历程，大体分为四个阶段。

(1) 1891~1920 年，应用起步阶段 铝最早应用到海洋工程上，是 1891 年瑞士的 Echer Wyss 首次建造的一艘可载 8 人的全铝船，随后其他国家也开始陆续建造。1895

年,全铝船“Defender”号赢得了代表船舶速度冠军的“美国杯”,自此人们充分认识了铝质船轻、速度快的优点。此后二十几年世界各国对铝质船的研究兴趣大增,促进了铝质船的发展。这一阶段的铝质船通常具有以下几个共同点:一是使用单一的铝锰或铝铜合金,材料产量低、成本高,单位质量的价格是钢材的30倍左右;二是铝质船的耐蚀性差,对铝材的腐蚀机理认识有限,船舶的设计寿命显著低于使用寿命;三是采用铆接进行装配,结构内部存在装配应力,易产生疲劳腐蚀;四是船舶表面缺少有效的保护措施与方法。

(2) 1920~1962年,理性发展阶段 英国于1920年开发出耐海水腐蚀性良好的Al-Mg合金,并于1929年获得了Al-Mg-Mn合金专利。这一创造性发明为铝合金用于造船业奠定了基础。Al-Mg合金为耐蚀铝合金,这是因为铝中加入镁元素后,铝合金的电极电位会发生变化,基体为阴极,第二相为阳极,使合金具有较高的耐蚀性。英国伯明翰铝业铸造公司(Birmingham Aluminum Casting Co.)于1931年建造了声名显赫的快速巡航艇“DianaII”号,长16.75m,用含3.5%Mg的Al-Mg合金制作,该艇于1942年被海军征用,第二次世界大战后于1951年被British Aluminium公司购买,1955年参加伦敦展览时,对船体进行了检查,经20多年使用后仍然保持良好的状态,足见Al-Mg合金具有良好的耐海水腐蚀性能。

除本身特性外,技术进步则是推进铝质船得以发展的重要因素。20世纪50年代,铝合金TIG技术已逐步成熟,相比于铆接,TIG焊接大大降低了连接接头的装配应力,接头减重20%~30%,提高连接强度10%~20%,同时也提高了生产的效率;熔炼技术的发展是另外一个重要因素。20世纪初,铝合金的年产量不足1万吨,到20世纪40年代,铝产量已达100万吨,而在20世纪50年代发展起来的大型阳极电解槽技术,则使铝材的产量大增,已达1000万吨,大大降低了铝合金的成本。

(3) 1962~1970年,逐步走向成熟阶段 自20世纪60年代开始,各国(包括美国、苏联、日本、英国等)开始普遍使用Al-Mg合金作为船壳材料,这是因为Al-Mg系合金及其焊接接头具有优良的耐海水腐蚀性能。为了获得高强度的Al-Mg合金,需增加合金中Mg的含量,但这样会导致合金中 β 相的增多,影响了铝材的耐蚀性。为此美国雷纳公司曾建议作如下规定:只允许5086合金(含3.5%~4.5%Mg)用作船壳材料,而5456合金(含4.7%~5.5%Mg)虽力学性能较高,但使用时建议要加保护。提出这样的建议是出于对 β 相的影响考虑。因此,如何控制Al-Mg合金中 β 相析出的数量、形态和分布就成为此后几十年合金研究的重点。

20世纪60年代,美国海军先后开发出属于Al-Mg系合金的5086 H32和5456 H321合金板材、5086 H111和5456 H111合金挤压型材,由于采用了H116和H117调质状态,最终获得不连续的晶间 β 相组织,由此消除了铝材沿晶沉淀网膜,解决了剥落腐蚀和晶间腐蚀的问题,这是20世纪60年代船用铝合金开发取得的重大进步。

此阶段技术进步依然是推动铝合金在船舶上应用的主要动力。20世纪60年代,美国

苏联已掌握了大型板材的轧制技术和大型型材的挤压技术,促进了铝质船的高速发展;同时出现的多级时效热处理技术,有效消除了金属晶粒沿晶沉淀网膜,解决了剥落腐蚀和晶间腐蚀的问题。另外,随着变截面挤压技术的出现,苏联已开始了铝质钻探管的试验与开发工作,1963年研制出首批用于石油钻探的铝合金变截面管材,并于1970年在莫斯科全苏轻金属研究院古比雪夫冶金工厂和卡明斯克冶金工厂分别建成了几条专门生产铝钻探管的生产线,年产量达10万吨以上。同时,美国雷诺公司也开展了此方面的研究,并获得了相关专利,其生产的铝钻探管主要用于海洋和沙漠地区的石油开采。此外,铝材表面的磷化处理和热喷涂涂层技术已成熟,使铝材表面得到有效保护;MIG焊接技术也已成熟,进一步推动了铝质船的发展。

(4) 1970年至今,推广应用阶段 尽管船舶和海洋结构物的强度在很大程度上取决于材料的选择,但与设计也密切相关。极限强度设计方法(ULS)在航空航天、陆上金属结构物设计等方面广泛应用,也成了船舶与海洋结构物设计的一种基本方法。铝合金良好的耐久性和 ULS 设计方法的结合,以及在计算机辅助设计(CAD/CAE)技术的帮助下,可根据需求设计和加工出截面更为复杂的铝型材,使得船舶和海洋结构物的重量更轻。

自1991年TWI发明搅拌摩擦焊接(FSW)以来,该项技术就在全球范围得到应用,特别是用于铝合金部件和拼板的制造。北欧斯堪的纳维亚铝合金制造商Trendsetters在1995年首次将该工艺用于空心结构低温冷藏柜体壁板、船甲板及舱壁铝板的制造。搅拌摩擦焊接结构正在改变由轻型部件构成的高速渡轮、气垫船和游轮等制造手段。商用的搅拌摩擦焊设备已经投入使用,可进行长达16m的焊接。

我国海洋工程用铝合金的研究和应用起步较晚。20世纪50年代开始规划,60年代初步形成了舰船及装甲板用铝合金系列,如LF系、LD30(6061)、LD31(6063)、2103(与5456合金相当)、北京航空航天大学研制的4201铝合金(含7%Mg,与5090合金相当)和东北轻合金加工厂研制的180合金等。20世纪70年代已能制造铝质鱼雷快艇,80年代造出铝质巡逻艇、铝质舢板(广州约50只)和游艇(哈尔滨飞机制造公司制造数十只),90年代又逐渐扩展到主船体采用全铝合金焊接的中小型高速船舶,如某小型铝质导弹快艇,PS30自控水翼客船及大、中型穿浪双体船等。全铝合金焊接工艺已在国内造船中得到了广泛的应用。采用铝合金材料建造高速船舶已成为当前船舶建造领域的一个热点。

目前国内各种中、小型高速船舶,如高速巡逻船、缉私船、高速客船、高速穿浪双体船及高速小水线面双体船、气垫船等,其上层建筑、主船体结构均采用铝合金材料。国内船厂在铝合金船舶的制造上已开始采用搅拌摩擦焊技术并获得成功。在大连、武汉、上海、广州及广西等多家造船厂已经采用搅拌摩擦焊对铝合金船体结构的甲板、壁板、隔板等进行拼焊,船舶制造的总体质量和生产效率明显提高。尤其是我国研制的第一艘双体穿浪艇,其宽幅铝合金壁板的拼焊成功应用了搅拌摩擦焊技术,提升了我国的铝合金船舶制造能力。

我国的石油工业和地质事业都是新中国成立以后才开始发展起来的,历史不长,虽然开发了几个大油田,地质勘探事业也有了长足的进步,但我国在石油(天然气)开采及石化设备主体结构上使用铝合金较少。如:钻探所用的钻探管几乎全部采用钢质钻探管,而且大部分是从日本、德国等进口的,而铝合金钻探管更是依赖于进口。

总体来说,我国对海洋工程用铝合金缺乏系统认识,没有系统安排和重点投资,未能形成规模性生产,其发展和推广非常缓慢。与世界铝工业强国相比,在合金研制、工艺探索和设备开发等方面均存在着较大的差距。

1. 1. 2 海洋工程用铝合金的特点

铝合金能够作为海洋工程用材料,主要归因于以下优点:

(1) 密度小 可减轻结构重量。对船舶,可减小发动机单机容量,可提高速度;可减少燃料耗费,节约燃油;可以改善船的长宽比,提高稳定性,使船易于操纵。对平台或船舶的上层结构,可提高结构的稳定性,降低结构对系泊系统的要求,节约成本;在提高船速方面,像油轮和货船这样的普通船,船重减少 20%,可提高 4.5% 的船速;像长 30m 等级的高速船,船重减轻 20%,在发动机功率相同时,可提高 14% 左右的船速。

(2) 耐蚀性好 约为钢的 30~100 倍。可减少涂装和维修等工作量和费用,并延长使用年限(通常在 20 年以上,最多可达 50 年),提高结构的生命周期。

(3) 加工成形性能好 易于进行切割、冲压、冷弯、成形和切削等各种形式的加工,适合船体和结构的流线化;可挤出大型宽幅薄壁型材,减少焊缝数,使船体结构合理化和轻量化。

(4) 焊接性能好 可用 TIG、MIG、搅拌摩擦焊和激光焊接等方法实现铝-铝、铝-钢接头的焊接,易于切割,提高连接强度,提高劳动效率,降低制造成本。

(5) 弹性模量小 吸收冲击应力的能力大,有较大的安全性,适于制作防撞击和防跌伤的结构,如伸缩舷梯、风力涡轮叶片等。

(6) 铝废料容易回收 可以循环使用,满足环保设计的要求。

(7) 低温性能好 无低温脆性,导热性好。最适合用于低温设备及换热管,如极地地区的建筑和深水工作的钻探管、深潜船和深海无人探测器等。

(8) 非磁性 罗盘不受影响。全铝船可以避免水雷攻击,适合作扫雷艇,也适于制作深潜船、深水无人探测器等。

1. 1. 3 铝合金合金化原理

铝是元素周期表中第三周期主族元素,具有面心立方点阵,无同位素异构转变,具有密度小、耐蚀性好、导电和导热性能好、反射性强、无磁性、耐核辐射等物理特性,同时通过添加镁、锌、铜、锰、硅、锂、钪、铬、锆等元素合金化,辅以适当的工艺措施,可

以调控合金的力学、工艺和理化性能等,在海洋工程、航空航天、轨道交通等领域具有广泛的应用。

1.1.3.1 主要合金元素的影响

(1) 锰(Mn) 锰对铝及铝合金的再结晶过程有明显的影响,Al-Mn合金的再结晶温度与锰含量的关系见图1-1。

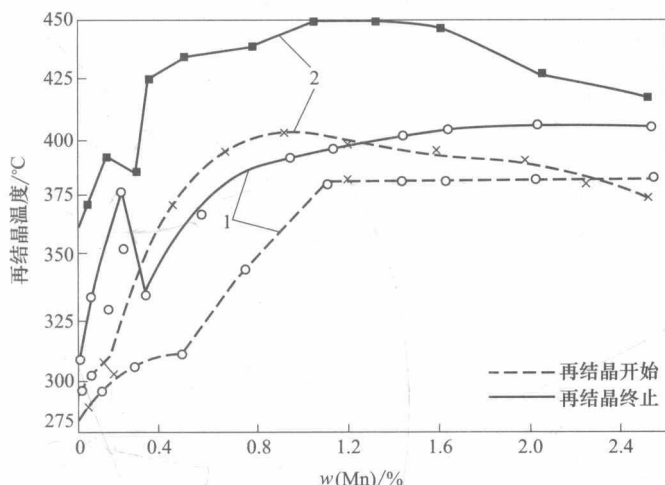


图1-1 Al-Mn合金的再结晶温度与锰含量的关系

1—高纯合金; 2—工业纯合金

锰能阻止铝及铝合金的再结晶过程,提高再结晶温度,并能显著细化再结晶晶粒。锰固溶于铝中,可提高再结晶温度20~100K,铝越纯,锰含量越高,作用越明显。对再结晶晶粒细化主要是通过 Al_6Mn 弥散质点对再结晶晶粒长大起阻碍作用而产生的。

Al_6Mn 是与Al-Mn固溶体相平衡的相,它除了能提高合金的强度,细化再结晶晶粒外,另一重要作用是能溶解杂质铁,形成 $\text{Al}_6(\text{Fe},\text{Mn})$,减小铁有害影响。同时 Al_6Mn 的电极电位与铝的电极电位相等(-0.85V),所以对铝的耐蚀性没有影响,故Al-Mn合金有与工业纯铝相当的耐蚀性。

锰是铝合金的重要合金化元素,可以单独加入形成二元Al-Mn合金(如3A21合金),更多的是和其他合金元素一同加入,因而大多数铝合金含有锰(高纯铝及高纯铝合金除外)。另外,锰会明显地增大铝的电阻,所以用作电导材料时应控制锰的含量。合金中锰含量过多时,会形成粗大、硬脆的 Al_6Mn 化合物,将损害合金的性能。

(2) 镁(Mg) 镁对铝的强化作用是明显的,每增加1%镁,抗拉强度大约升高34MPa。镁可以单独加入形成二元Al-Mg合金,含镁量在7%以下的合金在室温时稳定,一般加工铝合金含镁量在6%以下。镁也可与其他合金元素一同加入。

与固溶体平衡的相为 Al_8Mg_5 ,其热处理强化作用不明显,故二元Al-Mg合金为热