



高等学校统编教材

造船材料与防腐

李平 金士峻 曾守昌 编

国防工业出版社

268068

造船材料与防腐

李 平 金士峻 曾守昌 编



国防工业出版社

内 容 简 介

本书阐述了船体结构钢、船用铝合金、钛合金和铜合金等金属材料的成份和性能；船舶对材料性能的要求和目前国内外的应用情况和发展趋向；船用塑料、船用涂料等非金属材料的组成、性能和应用；船舶的腐蚀原理及防腐方法。

本书可作为高等工业院校船舶设计与制造专业的教材，也可供有关船舶工程专业的技术人员参考。

造船材料与防腐

李 平 金士峻 曾守昌 编

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张 $9\frac{3}{4}$ 322千字

1987年6月第一版 1987年6月第一次印刷 印数：0,001—1,100册

统一书号：15034·3231 定价：1.45元

前 言

DU27/17

本书系根据1983年船舶工程专业教材编审小组的意见,在上海交通大学和镇江船舶学院所编教材的基础上,根据统编教学大纲编写而成的。可供高等学校船舶设计与制造专业使用,计划为32学时。

“造船材料与防腐”作为统编教材对造船专业来说还是首次,考虑到学时的安排及先修课情况,对金属学的基础理论部分没有作很多阐述,本书着重介绍造船工业对金属材料和非金属材料的性能要求、评介试验方法、有关规范或标准的规定等内容。对金属腐蚀机理及防腐措施作了说明,编者注意到本课程实用性较强,所以加强了与实际的联系,介绍国外目前在造船材料方面的动向,各国规范对造船材料的规定和要求等,因之也可作为自学参考。

本书的金属材料部分由镇江船舶学院李平及曾守昌同志编写,非金属材料与防腐部分由上海交通大学金士峻同志编写。武汉水运学院夏炳仁同志作了审阅,提出了许多宝贵的修改意见,并提供了资料,特致深切的谢意。

本书系第一次公开出版的有关造船材料的教材,由于编者业务水平有限,编写时间仓促,难免有错误和不妥之处,恳切地希望读者不吝指正。

编 者



目 录

第一章 绪论	1
第一节 造船材料的分类	1
一、金属材料	1
二、非金属材料	1
第二节 对造船材料的主要性能要求	2
一、具有一定的机械性能	2
二、良好的工艺性能	2
三、较好的耐腐蚀性能	2
四、适合的使用性能	2
五、良好的经济性	2
第三节 船用材料的检验	2
一、化学成份分析	3
二、机械性能试验	3
三、工艺性能试验	4
四、内外缺陷的检验	4
第二章 船体结构钢的性能要求	5
第一节 强度和塑性	5
一、屈服强度	5
二、抗拉强度	6
三、屈服比 σ_s/σ_b	6
四、延伸率和断面收缩率	7
五、提高船体结构钢机械性能的途径	7
第二节 抗脆性破坏性能	12
一、脆性断裂和韧性断裂	12
二、钢的脆性断裂及断裂事例分析	13
三、钢构件破坏的断口特征	14
四、脆性状态及脆性转变温度	14
五、脆性破坏的评价——试验方法的简介	16
第三节 疲劳性能	18
一、疲劳现象及一般规律	18
二、低周疲劳的特征和破坏过程	20
三、低周疲劳断裂的评价与控制	21
第四节 焊接结构钢的层状撕裂	22
一、层状撕裂现象	23
二、产生层状撕裂的有关因素	23
三、防止层状撕裂的方法	23
四、对于钢材抗层状撕裂的评价——试验方法简介	24
第五节 船体结构钢的工艺性能	25
一、冷加工对钢材的要求	25
二、热加工对钢材性能的影响	25
三、钢材冷、热加工性能的评价——冷、热弯曲试验	26
四、钢的可焊性	27

五、可焊性试验	28
第三章 船体结构钢	30
第一节 船体结构钢的发展概况	30
一、我国船体结构钢的现状和发展	30
二、国外船体结构钢的现状和发展	31
第二节 钢材的分类、钢号表示方法及碳素钢的成分和机械性能	32
一、钢材的分类	32
二、钢锭缺陷对钢材性能的影响	34
三、碳及其它杂质对钢的组织与性能的影响	35
四、牌号表示方法及碳素钢的成分与性能	38
第三节 规范对船用碳素结构钢的要求及有关规定	41
一、造船用碳素结构钢的技术条件	41
二、规范对一般强度船体结构钢(碳素结构钢)的要求	42
三、船用普通碳素钢	44
四、船体结构的锻钢件	45
五、船体结构用铸钢件	45
第四节 船用合金钢及特种钢	46
一、概述	46
二、合金钢的种类和用途	46
三、船用低合金高强度钢	47
四、耐大气及海水腐蚀用钢	53
五、低温用钢	55
第五节 船体结构钢的选用和施工中钢材的代用	57
一、船体结构钢材选用的原则	57
二、关于高强度船体结构钢的选用	58
三、合理使用船体结构钢	59
四、施工中钢种的代用原则及换算	60
五、钢材规格和品种代用原则	62
第六节 国外规范对船体钢材的要求	62
一、国外主要船级社及规范	62
二、国外规范关于一般强度船体结构钢的标准与我国规范标准的比较	63
三、国外高强度船体结构用钢	69
四、国外高强度调质船体钢的发展	73
第四章 船用有色金属材料	74
第一节 船用铝合金	74
一、铝合金在造船工业中的应用	74
二、铝合金的分类及对船用铝合金性能的基本要求	75
三、船用变形铝合金	76
四、船用铸造铝合金	78
五、船用铝合金结构的设计和材料选用要求	80
六、铝合金的加工及时效	81
七、铝合金的腐蚀与防腐	83
第二节 船用钛合金	84
一、钛及钛合金在造船工业中的应用	84
二、钛及钛合金的种类和性能	85
三、钛及钛合金的腐蚀性能	90
四、船用钛合金的使用展望	90
第三节 船用铜合金	91

一、铜的性能	91
二、船用铜合金的种类	92
三、黄铜	93
四、青铜	94
五、铜合金的腐蚀	95
第五章 金属材料的腐蚀及海船电化学保护	98
第一节 腐蚀的种类及破坏的形式	98
一、化学腐蚀	98
二、电化学腐蚀	98
第二节 电化学腐蚀的机理	99
一、电极电位	99
二、腐蚀电池	101
三、腐蚀微电池	103
四、金属腐蚀速度	103
第三节 金属结构在海洋环境中的腐蚀	104
一、海洋大气区	104
二、飞溅区	104
三、潮沙区	104
四、全浸区	104
五、泥浆区	105
第四节 影响船体钢材耐海水腐蚀的因素	105
一、含氧量	105
二、船舶与海水的相对速度	105
三、温度	106
四、海生物	106
五、水线处条件的影响	106
六、含盐量	106
七、异种金属接触	106
八、变形与应力状态	107
九、结构设计的合理性	107
十、杂散电流的影响	107
第五节 钢质船体电化学防腐措施	108
一、牺牲阳极保护法	108
二、外加电流阴极保护法	110
第六章 船用塑料	114
第一节 塑料的组成及分类	114
一、塑料的组成	114
二、塑料的分类	115
第二节 塑料的特性及其在造船工业中的应用	116
一、塑料的特性	116
二、塑料在造船上的应用	116
第三节 热固性玻璃纤维增强塑料(玻璃钢)	117
一、玻璃钢的组成	117
二、玻璃钢的特点	118
三、玻璃钢的成型方法	118
第四节 造船工业中的常用塑料	122
一、聚氯乙烯	122
二、聚乙烯	123

三、聚酰胺	123
四、聚甲醛	123
五、ABS塑料	124
六、酚醛塑料	124
七、环氧树脂	125
第五节 舱室绝缘及甲板敷盖塑料	126
一、船舶舱室常用的绝缘材料	126
二、聚氯乙烯塑料敷盖层及其施工	128
三、聚氨酯弹性体敷盖层及其施工	128
第六节 塑料涂层在防腐方面的应用	128
一、火焰喷涂法	129
二、沸腾床法	129
三、静电喷涂法	129
第七节 塑料制品的检验及劳动防护	130
一、外观检验	130
二、尺寸检验	130
三、物理、机械性能等检验	130
四、劳动防护	130
第七章 船用涂料	131
第一节 涂料的作用及船舶漆的分类	131
一、涂料的作用	131
二、船舶漆的分类	131
第二节 船舶漆的基本原料及牌号表示方法	132
一、油料	132
二、树脂	133
三、颜料	134
四、溶剂	136
五、辅助材料	136
第三节 船舶漆的种类、性能及用途	138
一、船底漆	138
二、水线以上的船舶漆	140
第四节 船用钢材表面处理及车间底漆	142
一、船用钢材的表面处理	142
二、对车间底漆(预处理底漆)的要求	143
三、车间底漆的种类	143
第五节 船用漆的配套及施工中常见的弊端	146
一、船用油漆的配套原则	146
二、施工中可能出现的弊端	147
第六节 新型船舶漆的发展及其应用	148
一、水系漆	148
二、船底漆	149
三、带锈底漆	150

第一章 绪 论

第一节 造船材料的分类

造船工业是一个复杂的综合性工业，采用的材料品种多，数量大。据粗略估计，建造一艘排水量为1000 t的军舰约需1300多种材料，其中还不包括电气设备材料。消耗材料的总重量约1000 t左右；建造一艘10000 t货轮，仅钢材就需要5000 t左右；至于工程船，船体钢材重量相对于排水量的比例就更高，这就充分说明了材料对于造船工业具有十分重大的意义。

造船工业中所用的材料，总的来说，可以分为金属材料和非金属材料两大类。

一、金属材料

随着造船工业的发展和冶金技术的进步，造船工业所用的金属材料种类不断增加，但归纳起来可分为黑色金属和有色金属两大类。

黑色金属：

黑色金属是最先被用来建造船体的金属材料，虽然在最近几年来轻金属、塑料和水泥等在造船中的应用取得了很大的发展，但就目前实际情况而言，无论在用量和重要性方面，黑色金属在造船中仍然占着最主要的地位。

在船舶建造中，应用的黑色金属品种虽然很多，但仍可分为船用钢材和铸铁两类。

造船用钢可分为碳素钢与合金钢两类，实际上广泛使用的有下列各种钢：

普通碳素钢、造船专用热轧碳素钢、低合金高强度钢和特种性能钢。

铸铁主要是普通灰铸铁，可锻铸铁和球墨铸铁三类，其中普通灰铸铁使用得最普遍。

钢和铸铁被广泛应用主要是由于它们的机械性能良好，具有优良的加工工艺性，而且成本较低。

有色金属：

除了黑色金属之外的所有金属均称为有色金属，在工程上所采用的有色金属及其合金通常可以分为三类：

比重大，熔点高的金属：钢、镍及以铜、镍为基的合金。

比重大，熔点中等的金属：铝、镁及以铝镁为基的合金。

比重小，熔点低的金属：锌、锡及以锌、锡为基的合金。

其中以铝、铜及其合金在造船中应用最广泛。另一种是钛及其合金，它是一种比较新的有色金属材料，因为它具有良好的综合性能和许多特点，已成为大有发展前途的金属材料。但由于它的成本高，加工工艺方面还存在一些问题待解决，故实际使用量还较少。

二、非金属材料

非金属材料按其来源可分为：

有机非金属材料：如船上广泛采用的木材，塑料，人工合成的橡胶和石油化工产品

等等都属有机的非金属材料。

无机的非金属材料：如水泥、石棉等属无机的非金属材料。

此外麻绳、棕绳、绝热隔音材料和油脂等非金属材料也有广泛的应用。

第二节 对造船材料的主要性能要求

为了使设计和制造出来的船舶具有性能优良，使用可靠，加工修理方便和成本低廉，因而对建造船舶所采用的材料提出下列的基本要求：

一、具有一定的机械性能

要求造船材料具有足够的机械强度，并保证一定的塑性。由于舰船工作条件的特殊性和复杂性，缺口韧性对造船钢材也是一个十分重要的性能，同时还有疲劳强度和硬度。

二、良好的工艺性能

由于造船材料在生产过程中要经过加工成形，装配连接等工艺过程，所以它必须能承受、适应这些加工和连接的方法，如冷、热弯曲，切削加工和焊接、锻、铸等。在船体建造中，最多的加工操作是弯曲和焊接，因此钢材的冷弯性能，可焊性是最主要的工艺性能标志。

三、较好的耐腐蚀性能

船舶受到周围介质的腐蚀是很严重的。如船体外板外面与海水接触，舱内装载石油或其他液货，受到所装载物质和海水的腐蚀。此外，上层建筑和船舶设备在潮湿空气中也遭受大气腐蚀，因而要求造船材料须具有较好的耐腐蚀性能，以免材料因受腐蚀而性能降低，甚至发生破坏。据统计，浸于静止海水中的碳钢，其年平均腐蚀深度约0.1mm，长期航行在海洋中的舰船，年平均腐蚀深度约在0.25mm以上，严重的可达1~2mm/年。腐蚀不仅降低了材料强度，缩短使用年限，而且增加了停航修理次数，降低了船舶营运的经济性，同时还会由于锈蚀使航行阻力增加，航速降低，影响使用性能。因此材料的抗腐蚀性能也是造船材料很重要的指标。

四、适合的使用性能

由于舰船的复杂性和特殊性，对于材料提出了许多不同的使用要求，如要求材料是无毒的，不燃的等等。另外，根据不同的使用情况，还要求材料应具有绝缘、绝热，隔音，无磁，不反射雷达波等技术要求。

五、良好的经济性

造船材料要求成本低，质量好，自重轻，供应量充足等，以使船舶获得良好的经济性。

当然，同时满足上述各项要求有时是有矛盾的，但我们的任务是正确处理这些要求，以使问题得到合理的解决。

第三节 船用材料的检验

为了保证船用金属材料的质量能符合技术规范或订货合同的要求，便于船舶在生产过程中能顺利地施工，在建造完成后有良好的机械性能和运营可靠性，必须对材料或制品进行细致的检验工作。

船用材料的检验一般可分为两种：

产品检验：是指船用材料（或制品）由制造工厂根据我国船舶检验局所颁布的船舶建造规范中对材料的有关规定和订货条件所作的检验，检验后制造工厂应提供船用材料（或制品）的质量证书。

验船部门如认为有必要时，可指派检验人员参加制造厂的检验，如产品检验合格，在产品上打上验船部门的检验合格印记。如图1-1所示的标记。

复查检验：是指船厂按船舶建造规范对材料的有关规定，对所使用的船用材料（或制品）进行的抽查或补充试验。

凡经产品检验并具有完整质量证书的船用材料，无特殊情况，船厂一般不需要复查检验。如果材料（或制品）的质量不明，质量证书所包括的项目不符合规范的要求，则须作补充检验。

在船体结构钢的验收技术条件中，除规定钢的验收试验项目和标准外，还对生产工艺、供应状态、规格、外观、尺寸公差以及验收规则等作了规定。

根据船舶建造规范对材料试验的有关规定，其中对金属材料的验收主要内容可归纳为：

一、化学成份分析

金属材料的化学成份与它的性能有着密切的关系，制造厂可采用适当的方法，测定材料的化学成份，试验部门应保证其分析的可靠性和准确性，验船部门认为有必要时，可以进行抽查。

二、机械性能试验

材料拉伸试验是金属材料最重要的机械性能试验之一，主要测试数据有抗拉强度、屈服强度、伸长率、断面收缩率。还有硬度试验和冲击韧性试验等。

抗拉强度 σ_b 是指材料在受拉过程中，对最大均匀塑性变形的抵抗能力。在以往船舶设计中，抗拉强度曾是许用应力的选择的主要参数。

屈服强度 σ_s 是指材料在受拉时，抵抗微量塑性变形的能力。屈服强度是进行船体结构强度计算的最基本参数。

伸长率 δ 是指试样拉断后的总伸长同原始长度之比的百分率，用来度量材料塑性变形能力的大小。

断面收缩率 ψ 是指试样拉断后，断口截面积的缩减量与原截面面积之比的百分率。一般说来，塑性材料的 δ 或 ψ 较大，而脆性材料较小。由于 δ 的大小随试样尺寸而变化，因此它不能充分地代表材料的塑性，而断面收缩率与试样尺寸无关，它能较好地代表金属材料的塑性，对于材质因素所引起的塑性降低， ψ 比 δ 反应敏感些。

伸长率和断面收缩率是船体钢材加工工艺性能的重要指标。塑性良好的钢材一般能顺利地进行冷弯等加工成形，另一方面对减缓船体结构在建造和使用过程中产生的应力集中有重要意义；它可以通过钢材的塑性变形使结构应力重新分布，从而消除或减低结构的应力集中，随着钢材强度等级的提高， δ ， ψ 都有下降的趋势，因此，它们的指标可能有少降低。

机械性能试验除用拉力试验以确定金属材料的抗拉强度、屈服强度、伸长率和断面

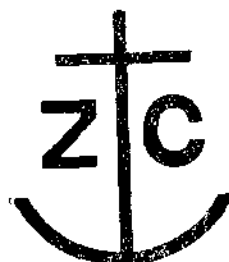


图1-1 验船部门的材料合格印记式样

收缩率等机械性能外，所谓硬度试验是金属材料抵抗压入物压陷能力的大小，也可以说是材料对局部塑性变形的抵抗能力。一般情况下，材料的硬度高时，耐磨性也较好。通常材料的硬度由于试验方法不同而有不同的表达。一般用布氏硬度（HB）表示。材料的硬度与强度之间有一定的关系，根据经验，硬度与抗拉强度有下列近似关系：

低碳钢	$\sigma_b = 0.36HB$
高碳钢	$\sigma_b = 0.34HB$
调质合金钢	$\sigma_b = 0.325HB$

冲击试验是测定金属材料在冲击载荷下抵抗脆性断裂的能力，常用摆锤式冲击试验机进行试验，以带有V型缺口或U型缺口的试样来测定冲断试样时所消耗的能量。

有时为了更深入地判断金属材料的机械性能和特殊条件下的强度，除了上述试验外，还采用疲劳试验，切口试样的拉伸试验等。这些仅作为对造船金属材料或成品性能的特殊要求时应用。

三、工艺性能试验

船舶建造过程中，几乎所有的金属材料都要经过各种工艺加工程序，如剪切、弯曲、冲压、锻制和焊接等不同种类的加工，为了检验材料是否能很好地承受这些加工工序，在规范里就分别规定了不同材料所应进行的不同工艺性试验，其中对造船钢材具有重要意义的是冷弯试验和可焊性试验。

四、内外部缺陷的检验

在金属材料的加工和制造过程中，常常不可避免地要出现一些降低制品质量的内外缺陷。如铸件表面的斑疤、裂缝、分层和表面粗糙等。至于内在缺陷则更加多样，如残留的气泡、缩孔和非金属杂质的严重偏析等。这些内外部缺陷常常会引起材料的报废。一般用肉眼、放大镜或显微镜来观察制品的外部缺陷，而用X光或γ射线来检查材料的内部缺陷，有时也用磁力探伤和超声波探伤来检查。

关于造船材料试验用的试样的截取方法，机械性能和工艺性能试验用的试样尺寸及试验方法，在1983年钢质海船入级与建造规范第八篇“材料”的有关章节内已有明确的规定，可以遵照执行。

第二章 船体结构钢的性能要求

船体材料, 结构设计和建造工艺是保证船体结构获得性能优异和安全可靠的三个主要方面。其中船体材料是开展结构设计和制订建造工艺的基础, 而船体结构钢又是用来建造船体及其附属设备的最主要的金属材料。因此, 对于船体结构的钢材提出了各项技术性能要求, 如强度、塑性、韧性、抗脆性破坏性能、耐疲劳性能、耐海水腐蚀性能以及其他某些特殊性能, 同时还提出了应有良好加工工艺性能, 如冷热弯曲工艺性能和焊接工艺性能等。此外, 由于船体结构较复杂, 钢材用量很大, 因此在钢材的选用上还需要注意生产和供应方面的问题, 要求钢材质量优良、品种配套、规格齐全和价格低廉。

现对船用钢材的性能要求作简介。

第一节 强度和塑性

船体构件在工作时受到不同外力的作用, 如航行中的船舶在重力、浮力和波浪的作用下, 时而“中拱”时而“中垂”, 使甲板和船底的受力处于拉伸和压缩交变的情况下, 为使船体形状不发生改变和不致破损, 就要求钢材有各种合适的机械性能。船用钢材最常用的机械性能指标是屈服强度、抗拉强度、屈强比、延伸率和断后收缩率等。

一、屈服强度

材料在拉伸过程中, 载荷不增加而试样继续伸长时的恒定载荷所对的应力称为材料的屈服点, 以 σ_s 表示:

$$\sigma_s = P_s / F_0 \quad \text{N/mm}^2, \text{ (或 kgf/mm}^2\text{)}$$

P_s ——材料屈服时的载荷, N(或 kgf),

F_0 ——试样原横截面面积(mm^2)。

屈服点是具有屈服现象的材料特有的强度指标, 但除退火或热轧的低碳钢和中碳钢等少数合金有屈服现象外, 大多数金属合金都没有明显的屈服点, 因此, 规定产生0.2%残余伸长的应力作为屈服强度, 以 $\sigma_{0.2}$ 表示:

$$\sigma_{0.2} = P_{0.2} / F_0 \quad \text{N/mm}^2 \text{ (或 kgf/mm}^2\text{)};$$

$P_{0.2}$ ——产生0.2%残余伸长的载荷, N(或 kgf);

F_0 ——试样原横截面面积(mm^2)。

屈服强度和屈服点一样, 表征金属发生明显塑性变形的抗力, 在一般叙述金属材料强度指标时, 于物理意义上泛指皆用 σ_s , 但在具体测试时, 常根据材质而定。

屈服强度是造船材料机械性能的主要指标, 在我国通常以此作为船体强度计算的技术依据, 从而决定船体构件的尺寸。船体结构设计如果选用屈服强度较高的钢材, 就可以减少结构的截面积, 降低材料的消耗, 减轻船体的重量, 因之能提高船舶的装载能力或航速; 但如果选用钢材的屈服强度过高, 当按强度要求计算选择结构剖面时, 可能造成结构的稳定性不足, 船体刚性较差。因此, 对不同的船舶, 应选择屈服强度适当的钢材来建造。我国在1983年海船建造规范中对一般强度船体结构钢的屈服强度要求不小于

235 N/mm²(24kgf/mm²)[●], 对高强度船体结构钢的屈服强度要求不小于315 N/mm²(32kg·f/mm²)和355 N/mm²(36kg·f/mm²)。

二、抗拉强度

抗拉强度是由试样拉断前最大载荷所决定的条件临界应力, 即试样所能承受的最大载荷除以原始截面积, 以 σ_b 表示:

$$\sigma_b = P_b / F_0 \quad \text{N/mm}^2 (\text{kg} \cdot \text{f/mm}^2);$$

P_b ——试样拉断前所承受的最大载荷, N(或kg·f);

F_0 ——试样原来的横截面积(mm²)。

抗拉强度在技术上是重要的, 它的物理意义是表征材料对最大均匀变形的抗力, 表征材料在拉伸条件下所能承受的最大载荷的应力值, 它是设计和选材的主要依据之一, 也是材料的重要机械性能指标。我国在1983年海船建造规范中规定, 一般强度船体结构用钢的抗拉强度为400~490 N/mm²(41~50kg·f/mm²), 高强度船体结构用钢的抗拉强度为440~550 N/mm²(45~60kg·f/mm²)和490~620 N/mm²(50~63kg·f/mm²)。

三、屈强比 σ_s/σ_b

屈强比是屈服强度与抗拉强度之比, 实为钢材强度储备的一个指标。它与钢材的屈服强度及形变强化性能有关。所谓形变强化是指金属经塑性变形而引起强度升高的现象。在金属整个变形过程中, 当应力超过屈服强度之后, 塑性变形并不像屈服平台那样连续流变下去, 而需要继续增加外力才能继续进行, 这说明金属有一种阻止继续塑变的抗力, 这种抗力就是形变强化性能。因此, 屈强比反映了金属结构具有一定的抗偶然过载能力的大小, 也反映了金属均匀塑变的冷变形加工工艺性能。

随着船体结构钢屈服强度等级的提高, 屈强比也逐渐增加, 有的可达0.95以上。

目前, 船舶结构的设计, 其应力都处于弹性应力范围, 在船体的个别部位, 结构的应力集中及建造施工带来的附加应力可能达到材料的屈服强度。在这种情况下, 由于材料发生塑性变形, 可使应力重新分布, 应力重新分布所需的钢材塑性变形是很小的, 结构钢材的一般塑性性能都满足, 因此, 船体结构钢在一般的船舶结构使用条件下, 不会承受高于屈服强度的应力, 这样对于结构的通常使用条件, 可不必考虑屈强比对船体安全的影响。

但是屈强比在船舶结构承受塑性过载的情况下是有意义的。所谓塑性过载是指船体因偶然情况, 如特异海况、冲击或搁浅触礁, 在战时遭受爆炸冲击等而发生局部结构塑性过载, 这时结构和材料将发生较大的塑性变形, 由于形变强化, 材料承受的应力将会超过屈服强度, 在这种情况下, 钢材的屈强比是有意义的, 即钢材屈强比越小, 延缓结构损坏过程的潜力越大, 结构可靠性越高。但也不能过分强调 σ_s/σ_b 的作用, 因为高强度船体结构钢的屈强比虽比一般强度船体结构钢高, 但经合金化和完全热处理的高强度钢较之一般强度船体结构钢具有高出许多的耐脆性破坏的抗力指标, 因而不论在常温下或较低温度下, 都可以保证船体结构具有良好的形变能力和使用可靠性。

一般强度船体结构钢的屈强比为0.48~0.59, 高强度船体结构钢的屈强比为0.53~0.71(或0.57~0.72)。

● 235 N = 24 kg·f, F同。

四、延伸率和断面收缩率

金属在外力作用下,当超过弹性极限后就开始塑性变形,塑性变形是一种不可逆变形。随着外力的增加,金属的塑性变形量也增加,当达到断裂时,塑性变形量达到极限值。一般将这个相对塑性变形极限值简称为塑性,即塑性表示了材料塑性变形能力的性能。对船用钢材来说,塑性亦是重要的性能指标之一。材料具有良好的塑性,才能在加工过程中经受冷热加工,在航行过程中避免因局部受力而破坏。钢材常用的塑性指标是由拉伸试验而测得的伸长率(δ)和断面收缩率(ψ)。

(一) 伸长率

伸长率 δ 是断裂后试样标距长度的相对伸长值,它等于标距的绝对伸长值除以原试样的长度,用百分数表示,即:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\%$$

l_k ——拉断后标距部分长度;

l_0 ——原标距长度。

由于 δ 要受试样尺寸的影响,我国和世界大多数国家,选定试样的尺寸为 $\frac{l_0}{\sqrt{F_0}} = 5.65$ 或 11.30 (F_0 为试样原截面积)。对圆形试样来说,即相当于 $\frac{l_0}{d_0} = 5$ 或 10 (d_0 为试样直径)。用 $l_0 = 5d_0$ 试样测出的伸长率用 δ_5 表示,用 $l_0 = 10d_0$ 试样测出的伸长率用 δ_{10} 表示。但应指出同一材料的 δ_5 和 δ_{10} 数值是不相等的,因而不能直接用 δ_5 和 δ_{10} 进行比较。一般 $\delta_5 = 1.2 \sim 1.5\delta_{10}$ 。由于短试样 $\left(\frac{l_0}{d_0} = 5\right)$ 可以节约原材料且加工较方便,故目前各国标准中优先选用短试样,我国亦同样,即伸长率一般用 δ_5 表示。

伸长率决定了钢材承受总塑性变形的能力,我国在1983年海船建造规范中,对一般强度船体结构钢要求 $\delta_5 \geq 22\%$,高强度船体结构钢中 A_{32} 、 D_{32} 、 E_{32} 等级的 $\delta_5 \geq 22\%$, A_{36} 、 D_{36} 、 E_{36} 等级的 $\delta_5 \geq 21\%$ 。

(二) 断面收缩率

断面收缩率是断裂后试样截面的相对收缩值,它等于截面的绝对收缩除以试样的原始截面积,用百分数表示:

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \times 100\%$$

F_0 ——原截面积;

F_k ——断裂后最小截面积。

ψ 的数值一般采用光滑圆柱试样的拉伸试验来获得,它表示钢材的局部延伸率。局部延伸率亦是钢材的重要性能——钢材承受局部塑性变形的能力。这种局部集中塑性变形的情况是有可能在船体中产生的,如在圆弧或直角槽口的角部边缘附近,在壳板上的凹坑边缘处(这里的金属承受着弯曲和拉伸应力)以及在不连续结构的端部等。

经验证明,等于和大于50%的断面收缩率数值,对于船体钢来说是足够了,但在规范中没有明确的规定。

五、提高船体结构钢机械性能的途径

对于金属材料,特别是结构材料来说,希望通过各种手段尽可能提高其强度而又保

证有足够的塑性与韧性。而所有这些性能都与金属的组织、结构有着密切的关系。因之可以从改变金属组织、结构的冶金、工艺等方面来着手设法提高其各种性能。

对船用钢材来讲，提高其强度和其他机械性能的途径，大致可以有以下几种：

（一）合金化

金属元素同类原子间结合力与异类原子间结合力相等，即组成合金的元素在固态时相互溶解，形成均匀组织，叫固溶体。固溶体由溶剂和溶质组成。保持原有晶格的元素叫溶剂，而原子晶格消失的元素叫溶质。所谓固溶强化即是当溶剂晶格内溶入溶质原子而产生的一种强化现象。

固溶强化是由于溶质原子和溶剂原子尺寸的差异，因而造成晶格畸变，从而使金属塑性变形阻力增大，强度和硬度得到不同程度的提高。凡是在溶剂中的溶解度较小，而对溶剂晶格产生较大畸变的溶质原子，其固溶强化效果就更明显。一般的讲，在铁中溶入 Mn、Si 等元素（置换性溶质）较之溶入 C、N 等元素（间隙性溶质）所造成的晶格畸变程度要小些，因此后者的强化效果更大些。

对于船用钢材，既要求有高的强度，又要求有良好的工艺性能，因之含碳量不能高（一般 $C \leq 0.15\%$ ）。提高钢材的强度是加入可溶于铁素体内的元素，以达到固溶强化，一般以加入 Mn、Si 等元素较适宜，但其含量也不宜大于 2%，否则对冷态塑性和焊接性都不利。单纯利用固溶强化使合金达到很高的强度是不太现实的，还需依靠采取其他措施。

（二）细化晶粒

金属结晶后的晶粒大小，对金属机械性能影响很大，通常晶粒愈细，性能愈好。对船用钢材来说，也希望是细晶粒组织，因此在实际生产中往往采用一定措施，以获得金属或合金的细晶粒组织，细化晶粒的方法有：

1. 增加液态金属的冷却速度（即增加过冷度），使形成的晶核多，晶粒就细。
2. 加入高熔点物质，增加非自发核心。
3. 用热处理或冷热加工方法细化晶粒。

（三）改变金相组织

钢与铸铁都是铁、碳与其他少量元素所组成的合金。由于含碳量的不同，铁与碳发生不同的相互作用，产生了铁素体、渗碳体、奥氏体、珠光体和莱氏体等几种基本的组织。铁素体是碳溶解于 α -Fe 中的固溶体，由于 C 在 α -Fe 中的溶量极小，因此铁素体的力学性能近于纯铁，其强度、硬度很低、面塑性、韧性很高。渗碳体是 C 与 Fe 相互作用形成的化合物，其含碳量高达 6.67%，它硬度高，而塑性和韧性极差（ δ 与 α_k 接近于零）。同时它是一种不稳定组织。铁素体和渗碳体均为 Fe—C 合金的常温组织，它们的力学性能都不够理想，本身实用价值不大，若能使两者按一定比例配合，就可调整它们的性能。奥氏体是 C 原子溶解于 γ -Fe 中所形成的固溶体，是一种高温组织；但当钢中含有较高的 C 和其他合金元素时，奥氏体组织可在常温下保持下来。奥氏体较软，强度亦不高，但具有较大的塑性。珠光体就是含 C 量为 0.8% 的奥氏体缓慢冷却到 723°C 时发生共析转变，生成铁素体和渗碳体的机械混合物，它是一种常温组织。一般珠光体具有铁素体和渗碳体的优点，有较高的强度和硬度，并具有良好的塑性。珠光体内的层片越细，强度越高。如果其中的渗碳体球化，成了粒状珠光体，则有更好的塑性和韧性。

对共析钢(含C量为0.8%)在冷却速度过快时,奥氏体来不及形成铁素体和渗碳体的机械混合物,但面心排列的奥氏体晶格却能变成体心排列的晶格,面心晶格中过饱和的C因温度低,也不能析出,所获得的组织是过饱和的 α 固溶体,称之为马氏体。体心晶格中的过饱和C存在,使晶格发生畸变,因而增加了塑性变形的抗力,所以马氏体组织具有很高的硬度,且含碳量愈高,硬度愈大。马氏体组织晶格畸变也引起内应力增加,因之脆性很大。

由于Fe—C合金在不同成分和不同温度下有不同的金相组织,而不同的金相组织其机械性能亦各不相同,所以我们可以根据使用要求,通过控制成分,加热或冷却温度和速度来改变钢材的金相组织,以获得需要的机械性能。

(四) 热处理

热处理是利用钢材在固态范围内加热与冷却的方法,改变合金的内部组织,从而得到所要求的性能的一种工艺方法。热处理既可消除由前道工序所产生的缺陷,亦可为后道工序创造条件,也是进一步提高合金性能的重要途径。

碳钢在室温下的组织基本上是由铁素体和渗碳体两个相构成,热处理的首要工序是将钢材由低温加热到高温,使其组织由铁素体和渗碳体的混合物转变为均匀的奥氏体,只有钢呈奥氏体状态,才能通过不同的冷却方式转变为不同的组织,从而获得所需要的性能。

钢材的热处理通常分为退火、正火、淬火、回火和表面热处理等几种主要工艺方法。

退火是把钢加热至超过相变温度,一般是加热至 A_1 Fe—C状态图上或 A_1 线以上某一温度(30~50°C),保温一段时间后,随炉缓慢冷却,从而得到接近于平衡组织的热处理方法。它主要用于亚共析钢(含C量<0.8%)和合金钢的铸件及锻压件,目的在于使钢晶粒细化,改善组织以提高机械性能,或减低钢的硬度,或消除焊接的内应力。

正火是将构件加热至 A_3 (亚共析钢)或 A_{cm} (过共析钢)以上30~80°C,适当保温后,在空气中冷却。由于正火冷却速度较退火快,形成的组织比退火要细一些,因此同样的构件在正火后的强度和硬度较退火后的为高,而且钢的含C量愈高,用这两种方法处理后的差别愈大。

正火的目的是使钢组织正常化,细化晶粒以提高性能,低碳钢经正火后其强度和硬度与退火处理相差不多,但正火是在炉外冷却的,不占用设备和场地,生产效率较高,所以低碳钢大多采用正火代替退火。一般船用钢板是以轧制状态供应的,有特殊要求时作正火处理。

淬火是将钢加热到 A_1 或 A_1 以上30~50°C,保温一定时间,然后急速冷却,从而得到高硬度(马氏体)组织的一种热处理方法。钢的淬火组织为马氏体和少量残余奥氏体,它们都是一种不稳定组织,有转变为较稳定组织的倾向;另外,淬火后的钢处于高应力状态,具有较大的硬度和脆性,韧性很差,因此淬火后的钢一般不直接使用,须经回火后再使用。钢的含C量愈高,淬火后的硬度愈大。

回火是把淬火后的钢重新加热到相变温度 A_1 以下某一温度,保温一段时间后以水冷却或油冷却至室温,以得到预期的性能。高温回火处理使构件具有良好的综合机械性能;消除零件淬火后的内应力,降低钢的脆性,使它具有一定的韧性,稳定组织等作用。

虽然一般船体结构钢都是以热轧状态供应的,需要热处理的较少,但随着船用合金