

船体结构钢

《船体结构钢》编写组 编

国防工业出版社

船 体 结 构 钢

《船体结构钢》编写组编

國防工業出版社

内 容 简 介

本书介绍对船体结构钢的要求、船体结构钢的主要性能，以及各种船体结构钢的化学成分、机械性能、物理性能、工艺特点和正确选择、使用的意见。对国外船体钢的情况也作了一般介绍。

本书可供船舶设计、建造、使用单位和船体结构钢研究、生产单位的工人、技术人员及有关人员参考。

船体结构钢

《船体结构钢》编写组编

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

国防工业出版社印刷厂印装 内部发行

*

850×1168 1/32 印张 107/16 266千字

1977年10月第一版 1977年10月第一次印刷 印数：0,001—1,000册

统一书号：N15034·1553 定价：1.30元

目 录

前言	5
第一章 对船体结构钢的要求	9
第二章 船体结构钢的性能	15
第一节 强度与塑性	15
第二节 抗脆性破坏性能	22
第三节 耐海水腐蚀性能	46
第四节 冷热弯曲工艺性能	69
第五节 可焊性	85
第三章 碳素船体结构钢	107
第四章 35~45 公斤/毫米 ² 级船体结构钢	113
第一节 901 钢	113
第二节 902 钢	127
第三节 903 钢	136
第五章 60 公斤/毫米 ² 级船体结构钢	147
第一节 921 钢	147
第二节 904 钢	166
第六章 特殊用途的船体结构钢	195
第一节 917 钢	195
第二节 F-1 钢	207
第七章 国外船体钢	217
第一节 普通强度钢	217
第二节 低合金高强度钢	229
第三节 高强度调质钢	233
第四节 马氏体时效钢和双强化钢	239
第八章 断裂韧性与低周疲劳	246
第一节 断裂韧性	246

第二节 低周疲劳	272
第九章 船体结构钢的应用与发展	302
第一节 船体结构钢的选择	302
第二节 结构建造试验	307
第三节 验收试验	311
第四节 努力发展高强度造船新钢种	313
附表 船体结构钢焊接材料选用表	315
附录 I 裂纹源落锤试验方法 (暂行)	317
附录 II 爆炸鼓胀试验方法 (暂行)	321

前 言

我国冶金和造船系统广大职工以阶级斗争为纲，坚持党的基本路线，在“鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义”的总路线光辉照耀下，贯彻执行“独立自主，自力更生，艰苦奋斗，勤俭建国”的方针，研制成功并生产了各种船体结构钢，为发展我国的造船工业打下了较好的基础。

解放前，我国冶金工业和造船工业是相当落后的，当时连普通的船用碳素钢都不能生产，造船用钢几乎全部依赖进口。解放后，在党和伟大领袖毛主席的英明领导下，我国的冶金和造船工业获得了迅速地发展。早在第一个五年计划期间就生产了“3船”、“4船”等牌号的碳素船体结构钢。1958年我国已开始研制低合金高强度钢，取得了重大的进展。在苏联社会帝国主义撤走专家，撕毁合同，企图用断绝船体结构钢材的供应来扼杀我国的造船工业，破坏我国海军建设的时候，我国广大工人阶级、革命干部和工程技术人员自力更生，奋发图强，相继试制成功多种优质的船体结构钢，满足了造船工业需要，加强了我国海军的建设，粉碎了苏修的封锁。无产阶级文化大革命摧毁了刘少奇、林彪两个资产阶级司令部，彻底批判了他们推行的反革命修正主义路线，大大地提高了冶金和造船工业战线广大职工的政治觉悟和革命干劲，进一步贯彻落实了毛主席的无产阶级革命路线，在毛主席“为了反对帝国主义的侵略，我们一定要建立强大的海军”的伟大号召鼓舞下，我国的造船工业和冶金工业得到了更加迅速的发展。近几年来，无论是碳素钢，或是普通低合金钢和特殊用途的船体结构钢，产量日益增加，质量不断提高，品种、规格逐渐齐全，生产船体结构钢的钢厂已扩大到全国大中型钢铁企业。

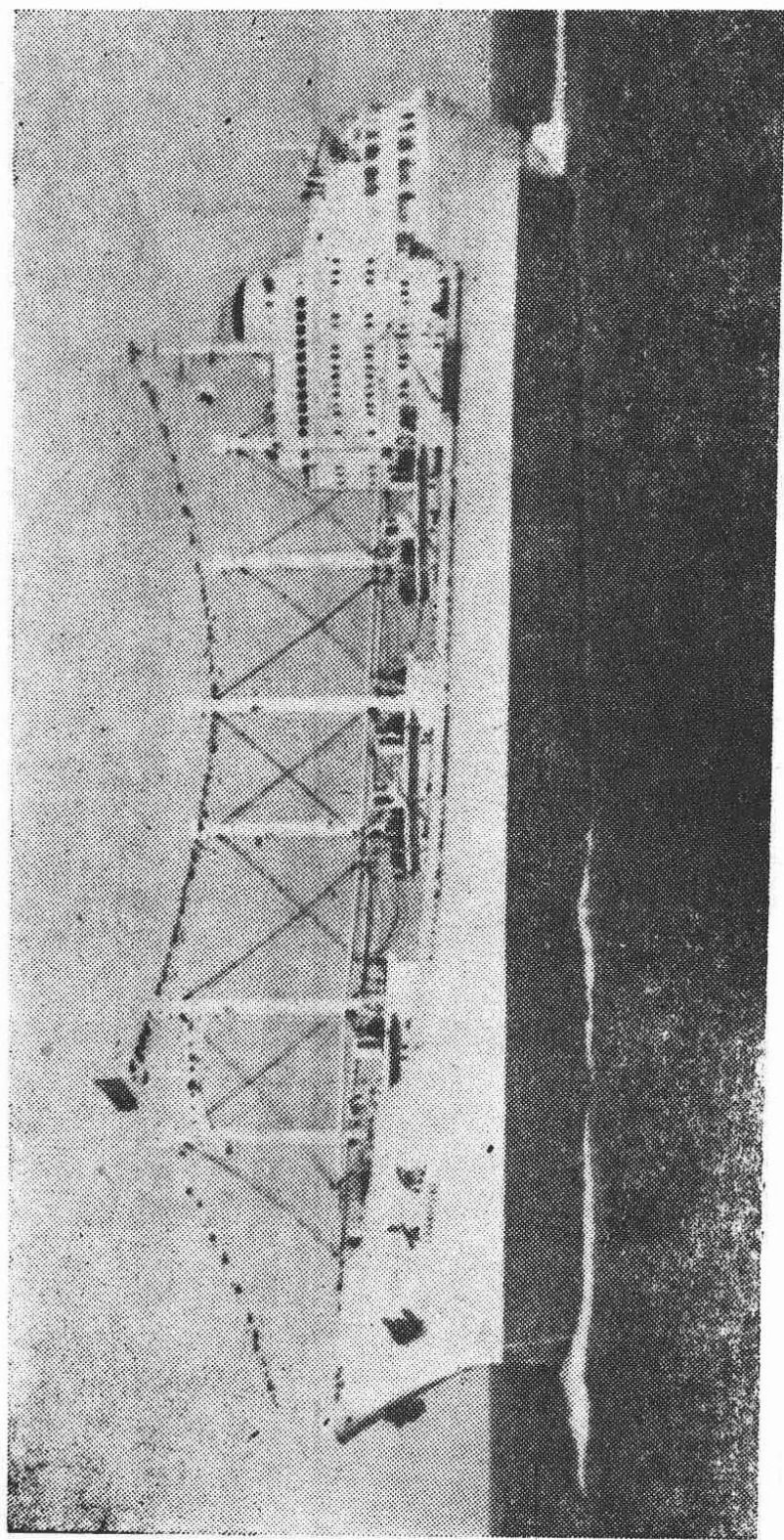
在船体结构钢的研究方面，实行工人、领导干部和科技人员以及科研、生产与使用相结合，取得了很大的成绩。目前，我国的船体结构钢已经初步形成系列，一批性能更好的新钢种正在研制，船体结构钢的使用性能和工艺性能的研究正在深入开展。

我们编写这本书的目的，就是为了适应我国造船工业飞速发展形势的需要，普及船体结构钢的基本知识，总结和推广我国船体结构钢的科研和生产成果，交流使用经验。遵照伟大领袖毛主席“洋为中用”的教导，对国外船体钢亦作了一些介绍，仅供参考。但是，由于我们水平有限，时间仓促，本书难免会有缺点和错误，希读者提出批评指正。

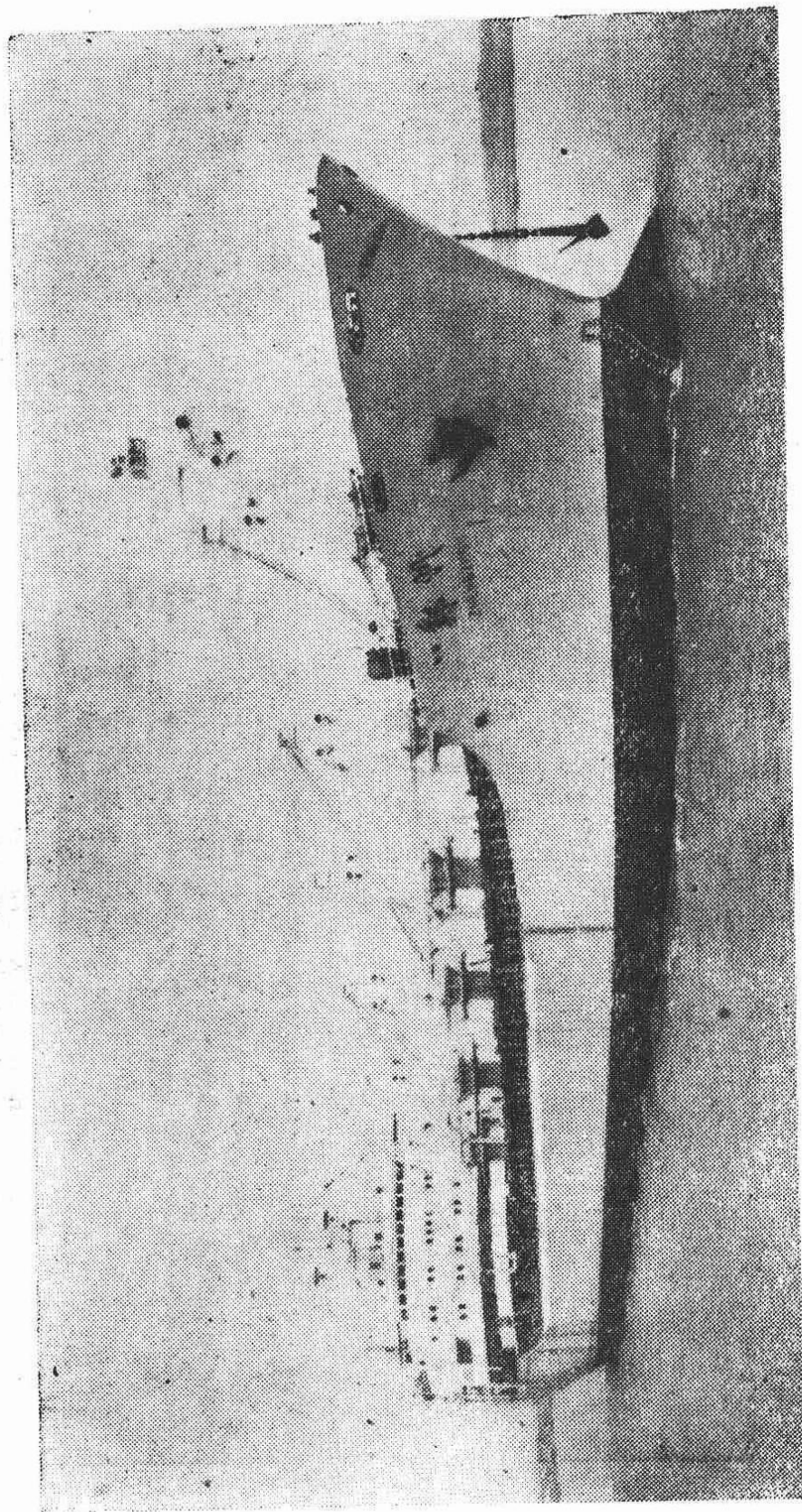
本书在编写过程中得到了冶金、造船方面有关生产、科研、使用单位和同志们的大力帮助，在此谨致谢意。

《船体结构钢》编写组

一九七六年八月



图一 用普通低合金船体结构钢建造的“长风”号远洋散货轮



图二 用普通低合金船体结构钢建造的“郑州号”远洋货轮

第一章 对船体结构钢的要求

船体结构钢是用来制造船舶的船体及其附属结构的最主要金属材料。为使船体结构能在现代造船生产条件下顺利建造，为保证船舶的使用安全、可靠，除需要合理的设计和施工工艺要求外，还要求用作船体结构的钢材必须具有各项良好的技术性能，如强度、塑性、韧性、耐疲劳性能、耐海水腐蚀性能以及某些特殊性能；必须具有良好的工艺性能，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，因此在钢的生产和供应方面还要求做到自力更生，立足国内；钢材质量优良、品种配套、规格齐全、价格便宜。

一、强度与塑性

钢的屈服强度是进行船体强度计算、确定结构尺寸的最基本的参数，因此，对各种船体结构钢的屈服强度都有明确的要求。提高钢的屈服强度可以减小构件的断面积，减轻船体重量，有利于提高船舶的使用性能。

钢的抗拉强度虽然不用于船体结构的强度计算，但为了保证钢材的冶金质量，充分发挥钢的韧性和塑性潜力，一般对于船体结构钢的抗拉强度也有规定。

同时，为避免船体结构因钢材强度过高而引起过度应力集中和给造船生产带来困难，对钢的强度范围也有明确要求。

伸长率和断面收缩率表示钢材塑性变形的能力，在某种意义上可以反映钢材的冶金质量。船体结构钢的塑性指标应根据冶金、造船和舰船使用经验，以及钢的强度等级作合理的规定。目前已实际使用的船体结构钢，伸长率 δ_5 一般为16~23%，断面收缩

率 ψ 不小于 50%。

二、韧 性

韧性表示钢材抵抗脆性破坏的能力，因而也称为抗脆性破坏性能。钢结构发生脆性破坏时的名义应力通常接近或低于屈服强度，甚至低于结构的设计应力，因此只满足强度和塑性要求的钢材还不能防止脆性破坏。为了保证船体安全，防止低应力脆性断裂，船体结构钢还必须具有良好的韧性。

船体结构钢的韧性试验方法主要有冲击试验、断口试验、缺口试样静弯试验（即缺口敏感性试验）、裂纹源落锤和爆炸鼓胀试验、爆炸撕裂试验、动态撕裂试验、双重拉伸试验以及断裂韧性试验等。这些方法是随着人们对韧性认识的深化而逐步发展起来的。对于具体钢种的韧性，应采用相应的试验方法进行评定。目前，冲击试验和断口试验是船体结构钢的验收试验项目。各种船体结构钢的冲击韧性（又称冲击值， α_K ）和断口纤维量的指标，在其验收技术条件中都有明确的规定。

但是，冲击值指标是根据以往使用船舶的经验而得来的。由于冲击试样的尺寸和缺口等与实际情况有较大差别，因此只有根据足够充分的接近船舶使用状态的大型脆性破坏试验结果及其与冲击值的关系，并结合大量的使用实践经验，才能制订出更科学、更合理的钢的冲击值指标。

三、耐疲劳性能

船体结构在使用条件下承受着交变载荷，其中以低频率高应力低周疲劳最为突出。低周疲劳能直接造成船体结构的破损，疲劳裂纹往往又能成为脆性破坏的裂纹源。因此，必须要求船体结构钢具有良好的耐低周疲劳性能。但是，目前对船舶结构材料的低周疲劳性能尚处于研究阶段，对船体结构钢虽然做了一些工作，但还没能制订出确切的指标。

此外，由于船体结构的某些部位存在着高频振动疲劳，在这种情况下也应考虑船体结构钢的低应力高频疲劳性能。

四、耐海水腐蚀性能

海洋大气和海水对船体结构的腐蚀会降低船体的寿命，影响船舶使用性能，增加停航修理的次数，因此船体结构钢应具有一定的耐海水腐蚀性能。目前，一般规定各种船体结构钢的耐海水腐蚀性能不低于碳素钢，并希望不出现非均匀腐蚀的情况。当使用屈服强度超过 100 公斤/毫米^2 的高强度钢、不锈钢、一般奥氏体结构钢以及使用奥氏体焊接材料时，还应十分注意应力腐蚀和晶间腐蚀问题。

五、特殊性能

对于某些特殊用途的船体结构钢，要求它们必须具有特定的性能，如低磁性、抗弹性、耐蚀性和耐放射线辐照损伤性能等。

六、冷热弯曲工艺性能

船体结构钢要经受各种形式的冷热弯曲。冷弯曲加工，如冷矫、辊弯、模压、卷边、折边弯曲和爆炸成形等；热弯曲加工，如热弯、热模压、水火弯板和火工矫形等。为了保证钢材能够顺利地制造各种船体结构，必须要求钢材具有良好的冷热弯曲工艺性能，即钢材在加工时易于成形，不产生裂纹等缺陷；在加工后钢材仍能满足强度、塑性和韧性的要求，并保证在使用过程中性能稳定。

对船体结构钢必须进行全面的冷热弯曲工艺性能鉴定，如冷弯、热弯、水火弯板、火工矫形、形变时效和热时效敏感性等项试验。

（一）冷弯

冷弯试验是船体结构钢验收试验的重要项目之一。要求钢材

在规定的弯心直径下弯曲到一定角度时不出现裂纹、裂断或分层等缺陷。在试验钢材冷弯性能的同时,也可以检验钢的冶金质量。在冷弯试验中,钢材开始出现裂纹时的弯曲角度以及裂纹的扩展情况显示了钢的抗裂能力,在一定程度上反映出钢的韧性。

(二) 热弯

热弯是把需弯曲的构件放在炉内进行整体或局部加热到较高的温度(但不高于钢的晶粒长大温度)后,进行弯曲加工,加工終了温度应不低于 650°C 。

船体结构钢的热弯试验,是将试样均匀加热到一定的温度后进行弯曲,要求钢材在规定的弯心直径下,弯曲到一定角度时没有裂纹等缺陷。对新研制的船体结构钢,除需进行上述工艺试验外,还要掌握钢材经试验后性能变化情况,并提出使性能恢复的热处理方法。

(三) 水火弯板与火工矫形

水火弯板是一种热弯新工艺。凡需成形的船体外板,包括那些形状复杂的帆形板、马鞍形板等都可以用这种新工艺很方便地加工成形。水火弯板工艺现已在船厂广泛采用。为了检验船体结构钢对水火弯板和火工矫形的适应性,要求钢材必须作这种工艺试验和性能试验。性能试验包括火焰加热区和热影响区的拉力试验、冲击试验和冷弯试验等,各项试验结果均应满足技术要求。但要注意的是,钢材水火弯板和火工矫形的工艺性能试验不能用一般的回火弯曲和不淬硬性弯曲试验来代替。

(四) 形变时效和热时效

1 形变时效:经冷加工塑性变形后的钢材在船舶的使用过程中,由于间隙原子碳、氮在 α 铁的晶体缺陷处脱溶沉淀而使钢材机械性能发生变化(主要是塑性和韧性下降)的现象称为形变时效效应。形变时效敏感性的试验方法是将样坯预拉伸10%(或5%)永久变形,随即再进行 250°C 、1小时的人工时效处理后作冲击试验,要求测定的试样室温冲击值不低于规定的要求,或者

形变时效敏感性（即形变时效前后的冲击值下降率）不大于50%。

随着钢材屈服强度的提高，均匀伸长率会相应降低。当均匀伸长率小于10%时，如仍沿用预拉伸10%的规定，就无法进行试验，因此应根据船体建造过程中的实际冷加工变形量和钢的均匀伸长率水平，选择适当的预拉伸变形量。

2. 热时效：热轧钢材在低于 A_{c1} 温度下快速冷却并经时效后，由于溶质原子碳、氮从 α 铁中脱溶沉淀而使钢材变脆的现象称为热时效。热时效的试验方法是將钢材经 $670\sim 680^{\circ}\text{C}$ 水淬和随后在 $50\sim 70^{\circ}\text{C}$ 进行 4 小时人工时效后作冲击试验，要求冲击值满足规定的指标。经正火和调质热处理的钢材无热时效现象。

七、焊接工艺性能

焊接是现代造船工业中最普遍使用的基本工艺方法。船体结构钢应具有良好的焊接工艺性能，即在焊接船体结构时，要求焊接工艺简便，质量良好，焊接接头（包括焊缝和热影响区）具有相应的强度、韧性、耐疲劳和耐海水腐蚀等性能。对一个新钢种应该进行全面的焊接工艺性能试验，在满足船舶建造和使用要求后才能用于造船。

八、生产与供应

造船工业所用的船体结构钢数量大，品种、规格多。如建造一艘万吨轮船就需钢材 5,000 吨左右。因此，钢的生产与供应要做到自力更生，资源和冶炼方法立足国内，数量充足、品种配套、规格齐全。当然，还应注意钢的生产工艺简便、成本低廉，以满足造船工业的需要。

船体结构钢应有良好的冶金质量，非金属夹杂和气体含量低，没有白点，减少分层等缺陷。为提高钢的表面质量，应尽量减少氧化铁皮、麻点、划痕、辊印等缺陷。因为良好的表面可以减少钢在海水中的点腐蚀。此外，成品钢材的外观、尺寸、公差等也

应符合规定。

以上概述了现代造船工业对船体结构钢的要求。这些要求是经过长期的生产实践、使用实践和科学实验而逐步认识并发展了的，它对于改善钢材质量、保证舰船产品质量、促进造船工业的发展起了重要的作用。但是，**“在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。”**因此，随着造船、冶金工业的进一步发展和生产、技术水平的不断提高，对船体结构钢的要求也将会不断得到修订，使之更加完善、更加合理。

第二章 船体结构钢的性能

第一章叙述了对船体结构钢的全面要求。作为船体结构钢，应具有满足上述各项技术要求的综合性能。在这些性能中，拉力试验的性能是钢材主要的机械性能。长期以来，大量船舶破损实例表明，船体结构的破损形式主要有脆性破坏、疲劳损伤和腐蚀破坏。因此，钢材的强度与塑性、抗脆性破坏性能、耐海水腐蚀性能和耐疲劳性能都是船体结构钢的主要使用性能。在现代造船工业条件下，船体结构钢材都要经过冷热弯曲成形和焊接。因此，冷热弯曲工艺性能和焊接工艺性能是船体结构钢的主要工艺性能。

这些主要使用性能和工艺性能是船体结构钢的重要内容。长期以来，这些研究作业已取得了不少成绩。结合大量的生产和使用实践，这些研究成果已成为制订船体结构钢验收技术条件和制订其他技术文件的依据。

第一节 强度与塑性

光滑试样静态拉力试验的强度和塑性指标是船体结构钢的重要力学性能。强度指标是指屈服强度——物理屈服强度 σ_s 或条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 和抗拉强度 σ_b ；塑性指标是指伸长率 δ （或称延伸率）和断面收缩率 ψ 。

一、屈服强度

船体结构钢的屈服强度（当有明显物理屈服现象时，一般指下屈服点或屈服平台。如果没有明显屈服现象，则指条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ ）表征钢材对微量宏观塑性变形的抗力，它是一项主要的

力学性能指标。屈服强度是进行船体结构强度计算从而决定结构重量的最基本的参数。船体结构设计，如果选用屈服强度较高的钢材，就可以减小结构的截面积、降低材料消耗、减轻船体重量，从而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，当按强度计算选择结构剖面时，就可能造成结构的稳定强度不足，船体的刚性较差。因此，对不同的船舶，应选择强度等级适当的钢材来建造。随着造船工业的发展和对产品技术性能要求的不断提高，船体结构钢的屈服强度指标有着相应增高的趋势。

二、抗拉强度

抗拉强度标志钢材对最大均匀塑性变形的抗力。由于抗拉强度是试样承受的最大载荷与试样原始截面积的比值，所以它并不是钢材可承受的最大真应力。

在以往的船舶设计中，抗拉强度曾是许用应力选择的主要参数。某些压力容器等结构的设计，现仍以抗拉强度作为材料的主要强度指标。在一般的材料实验室，测定钢材的抗拉强度比测定屈服强度更为方便、准确、可靠，特别是对于物理屈服现象不明显的钢材。因此，目前抗拉强度还是船体结构钢的一项必测指标。

三、强度范围

从船体结构建造和船舶使用方面考虑，船体结构钢的强度需控制在一定的范围内。控制的方式一般是规定抗拉强度或屈服强度的上、下限指标。控制强度的上、下限可以起到控制钢的冶金质量的作用。例如：强度过低意味着钢的生产工艺不正常，冶金质量不良（钢中的气体、非金属夹杂物过多等）；强度过高则意味着钢材因终轧温度太低（钢以热轧状态供应时）或回火工艺不当（以回火为最终热处理时）而过度硬化，从而引起钢材塑性、韧性的下降。另一个重要原因是，规定了钢材强度的上、下限就可以使钢材与钢材之间、钢材与焊缝之间的强度较为接近，这就有利于