

焊接结构分析

〔日〕 增淵興一 著

Analysis of Welded Structures

机械工业出版社

焊 接 结 构 分 析

〔日〕 增淵興一 著

张 伟 昌 等译



机 械 工 业 出 版 社

本书全面论述了焊接力学问题。书中从基础理论的分析出发,讨论了焊件的应力与变形的机理,以数值分析的方法定量地说明了实际焊接构件上应力与变形的规律;同时以大量的实测数据和数学计算结果为依据,系统分析了影响焊接结构的强度、断裂韧性、脆性断裂、疲劳寿命、使用性能和可靠性的各种因素。此外,书中还列有对制造焊接结构有实际指导意义的大量图表、规范和标准及相应的建议和评述。本书可作为高等院校焊接结构的教学参考书,也可为设计和制造焊接结构的工程技术人员在解决实际生产问题时提供帮助。

Analysis of Welded Structures

Residual Stresses, Distortion, and their Consequences

by

KOICHI MASUBUCHI

Professor of Ocean Engineering and Materials Science

Massachusetts Institute of Technology, U.S.A.

PERGAMON PRESS Ltd. 1980

* * *

焊接结构分析

〔日〕增淵興一 著

张伟昌 等译

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $30 \frac{1}{4}$ · 字数 747 千字

1985 年 11 月北京第一版·1985 年 11 月北京第一次印刷

印数 0,001—5,010 · 定价 6.20 元

*

统一书号: 15033 · 6023

译 校 者 序

焊接结构在许多重要工程承力构件上的应用日益广泛。自六十年代以来,焊接力学作为一门指导焊接结构正确设计与选材、制订合理的生产工艺和评定其使用可靠性的工程应用学科,有了较快的发展。从七十年代开始,把断裂力学与数值分析技术应用于焊接结构分析后,又使焊接力学的发展明显地加速。

增淵興一教授的专著“焊接结构分析”以丰富的生产应用实例、试验研究数据和理论分析结果较全面地反映了焊接力学的发展进程。作者在五十年代到六十年代期间曾与日本老一辈的焊接力学专家木原博教授合作,在研究焊接残余应力、变形及其对结构的影响和在探索将断裂力学用于焊接结构分析方面做出过有益的贡献。七十年代,作者主要在美国麻省理工学院从事海洋工程、船舶建造方面的焊接力学研究,推进了数值分析技术在预测焊接瞬态与残余应力、变形方面的应用。

本书的内容包括了焊接力学的两个主要方面:其一,从基础理论分析出发,详细地论述了焊接过程中焊件内引起的瞬态和残余应力与变形的机理,给出了计算方法,推荐了测试技术,说明了实际构件上应力与变形的规律;其二,以浩瀚的实验测试数据与计算结果为依据,系统地分析了影响焊接接头和结构的强度、断裂韧性、脆性断裂、疲劳寿命、使用性能和可靠性的各种因素。

本书的可贵之处还在于作者从约六百余份参考资料中援引并整理出对实际工程应用有直接指导意义的图表、规范和标准、建议与评述。诸如,焊接结构选材标准、焊接应力与变形的许用标准、对接头焊缝开裂试验方法的评述等。作者还推荐了减少与控制焊接应力、变形的各种技术,提高焊接结构安全性的措施和保证结构可靠性的途径。此外,书中有多处富有哲理性的讨论,这对于从事实际焊接结构设计、制造与研究的工程技术人员来说,也是很难得的。

我们把这本书介绍给我国读者的目的,除了可作为高等院校教材的补充和从事焊接力学研究的参考之外,更希望能帮助焊接工程技术人员在解决实际问题时,从中能有所借鉴,促进焊接力学在我国的发展。

原书虽较系统地介绍了日本、美国在焊接力学方面的成就,但对于苏联及欧洲一些国家在这一领域中卓有成效的研究工作却反映得太少。还应当指出,近几年来,焊接力学,尤其是断裂力学在焊接结构上的应用又有了新的进展;在阅读本书时,仅局限于原著的某些论点,会嫌不足。

译校时对原文中明显的印刷和文字错误已作了更正。由于原书中引用文献的许多日本作者很难译成正确的日文原字,故本书中对人名一律保留英文形式,未作汉译。但对地名、单位名和通用的试验方法(除个别以人名命名的外)均作了汉译。

参与本书翻译工作的同志有王正方(第一、九、十五章)、叶赐麒(第二、十二、十四章)、宋甲荫(第三、四、十三章)、张伟昌(第五、六、七章)和霍立兴(第八、十、十一、十六章)。全书由张伟昌汇总整理。田锡唐教授在百忙中为本书部分章节译稿作了审校。全书由关桥同志总校定。

一九八三年四月

目 录

第一章 导论	1	热应力是如何产生的	118
1.1 焊接结构的优缺点以及本书的主要内容	1	5.2 焊接过程中热应力和金属运动研究的历史发展	119
1.2 历史回顾和发展趋势	3	5.3 一维分析	120
1.3 对材料的要求	8	5.4 二维分析	125
1.4 结构钢	10	5.5 三维状态的应力分析	129
1.5 铝合金	22	5.6 关于热应力和金属运动的实验研究	130
1.6 钛合金	29	5.7 高强钢焊件的热应力实验	132
1.7 焊接工艺方法	38	5.8 关于沿板条纵向边缘焊接时的热应力和金属运动的实验	136
第二章 焊件中的热流	48	5.9 计算机模拟	142
2.1 焊接热的产生和耗散	48	5.10 关于现状和前景的评述	146
2.2 焊件中热流的数学分析——基本原理和现状	50	第六章 焊件内残余应力的分布	148
2.3 焊件中热流分析的几个典型例题	55	6.1 焊件残余应力分析技术的发展	148
2.4 热影响区的热循环	60	6.2 焊接残余应力和反作用应力	149
2.5 焊条和焊缝金属的热流问题	68	6.3 受拘束的对接焊缝内残余应力的分析	151
第三章 有关残余应力的基础知识	71	6.4 残余应力的分布（一些典型情况）	157
3.1 应力、应变和金属的机械性能	71	6.5 各种材料焊件的残余应力	162
3.2 残余应力	74	6.6 试件尺寸对残余应力的影响	171
3.3 焊件中残余应力和变形的分析以及它们对构件使用性能的影响	87	6.7 大型焊件内的残余应力	172
第四章 焊接构件内残余应力的测定	90	6.8 焊接顺序的影响	175
4.1 残余应力测定方法的分类	90	第七章 焊件变形	180
4.2 用应力松弛法测定残余应力	91	7.1 变形的基本形式	180
4.3 $\times$ 射线衍射测定残余应力	99	7.2 焊接变形概述	181
4.4 通过测量应力敏感特性确定残余应力	104	7.3 现有的变形许用标准	190
4.5 用氢致开裂和应力腐蚀开裂方法确定残余应力	106	7.4 对接接头的横向收缩	195
4.6 合理测定方法的选择和应用及其对结果的评定	108	7.5 角焊缝的横向收缩	211
4.7 焊接过程瞬态应变的测定	111	7.6 对接焊缝的角度变化	211
4.8 数学分析在残余应力和变形的实验研究中的应用	114	7.7 角焊缝的角度变化及其引起的平面外变形	213
第五章 焊接过程中的瞬时热应力和金属运动	118	7.8 各种参数对角焊缝角度变化的影响及减小变形的办法	222
5.1 焊接过程中的热应力——		7.9 对接焊缝的纵向收缩	225
		7.10 角焊缝的纵向收缩	226
		7.11 纵向弯曲变形	226
		7.12 压曲变形	230

7.13 减少焊件变形的的方法	238	第十二章 残余应力在应力腐蚀开裂	
7.14 消除变形的的方法	246	和氢脆中的作用	365
第八章 焊接结构强度(基础知识)	251	12.1 应力腐蚀开裂	363
8.1 “理想的”和“实际的”结构强度	251	12.2 氢脆	364
8.2 在承受拉伸载荷的焊接接头中		12.3 残余应力在焊件应力腐蚀开裂	
残余应力的变化	251	和氢致开裂中的作用	365
8.3 平面外变形所引起的局部应力		12.4 裂纹花纹的分析	366
集中	252	第十三章 变形及残余应力对焊接	
8.4 压缩载荷下柱的失稳	253	结构压曲强度的影响	374
第九章 断裂韧性	257	13.1 承受压载荷的柱体	374
9.1 断裂的基本概念	257	13.2 承受压载荷的板及板结构	376
9.2 焊接结构的脆性断裂	261	13.3 焊接船只的皱折损坏及船底板的	
9.3 缺口韧性的评定	268	许用变形	380
9.4 评定缺口韧性的各种试验	278	13.4 承受外部压力的球形壳体及圆柱	
9.5 焊接结构在低作用应力下的断裂	285	形壳体	387
9.6 化学成分和制造方法的影响	289	第十四章 焊缝开裂和接头拘束	394
9.7 对材料的缺口韧性要求和断裂		14.1 焊缝裂纹的分类	394
控制	293	14.2 热裂纹	395
9.8 焊缝金属和缺口韧性	294	14.3 冷裂纹	401
第十章 焊接结构脆性断裂的理论		14.4 焊缝开裂试验	412
和实验研究	305	14.5 焊缝开裂试验用试件和实际结构	
10.1 脆性断裂理论	305	接头拘束系数的理论分析和实验	
10.2 断裂力学理论	308	测定	426
10.3 断裂韧性值和不同材料的临界		14.6 开裂的力学分析,特别是运用断	
裂纹长度	315	裂力学理论所取得的进展	433
10.4 由亚临界裂纹造成的焊接结构		第十五章 焊接缺陷对服役行为的	
灾难性破坏	318	影响	439
10.5 焊件脆性断裂的理论分析研究	326	15.1 焊缝缺陷	439
第十一章 与残余应力有关的焊件		15.2 焊缝缺陷引起的应力集中	441
疲劳断裂	341	15.3 缺陷对塑性断裂的影响	445
11.1 关于疲劳断裂的简介	341	15.4 缺陷对脆性断裂的影响	449
11.2 高周疲劳	344	15.5 缺陷对疲劳断裂的影响	450
11.3 低周疲劳	348	15.6 焊缝的无损检验	456
11.4 对疲劳裂纹扩展的研究	350	15.7 焊接结构可靠性的评价	459
11.5 焊接接头的疲劳强度	353	第十六章 对某些问题的进一步讨论	467
11.6 残余应力对疲劳断裂的影响	355	16.1 焊接设计	468
11.7 改善焊件疲劳强度的一些方法	356	16.2 焊接制造	472
		附录 计量单位	479

第一章 导 论

这一章介绍有关结构材料和焊接方法的一些知识，以便帮助在这些方面了解不足的读者便于对本书内容的理解。

1.1 焊接结构的优缺点以及本书的主要内容

因为本书将详细讨论焊接结构设计和制造的有关问题，所以有可能产生这样一种错觉：即由于存在着许多特殊问题和断裂倾向就认为焊接结构不实用。实际上却正相反，与铆接结构、铸件和锻件相比，焊接结构在许多方面要优越得多。正是由于这种原因，焊接已被广泛应用于制造建筑结构、桥梁、船舶、石油钻机、管线、宇宙飞船及核反应堆和压力容器。

第二次世界大战前，大多数船舶和其他结构都是铆接的，而现在几乎都改用焊接方法制造。事实上，目前正在建造的许多结构，如宇宙火箭、深海潜艇以及核反应堆的巨型壳体，若不采用相应的焊接工艺是不能建造的。

1.1.1 焊接结构与铆接结构相比的优点

1. 接头系数高 接头系数的定义为：

$$\frac{\text{接头断裂强度}}{\text{母材断裂强度}} \times 100 (\%)$$

与大多数铆接接头相比，焊接接头系数较高。例如，一般优质的对接焊缝的接头系数高达100%。对于铆接接头来说，随着铆钉直径和间距的变化，其接头系数是不同的，但决不可能达到100%。

2. 水密性和气密性 在使用过程中，铆接结构很难保持完全的水密性和气密性，象潜艇外壳和贮罐等要求水密性和气密性高的结构，采用焊接结构是比较理想的。

3. 重量减轻 如果采用焊接结构，可使壳体的重量减轻10~20%。

4. 厚度不限 当厚度大于两英寸时，板件就很难铆接。在焊接结构中对所选用的板厚实质上没有限制。

5. 简化结构设计 与铆接结构相比，焊接结构的接头设计要简单得多。在焊接结构中，构件可以简单地对接或者用角焊焊接在一起。而铆接结构要求复杂的接头型式。

6. 减少制造时间和费用 采用定型预制结构技术，即先在厂内预先做好许多分装件，然后在工地上组装，能在短期内制造成焊接结构。在现代化造船厂里，一个200000吨(自重)的焊接油船可在不到三个月的时间内下水。同样的油船如用铆接制造，恐怕需要一年多的时间。

1.1.2 采用焊接结构的问题

绝不能说焊接结构是没有问题的。采用焊接结构的主要问题如下：

1. 难以阻止断裂 在焊接结构中，裂纹一旦开始扩展是很难阻止的。因此，对焊接结构断裂的研究是很重要的。如果在铆接结构中产生裂纹，则裂纹将会扩展到板材的边缘而终止，尽管在第二块板材上还可能出现新的裂纹，但是至少暂时阻止了断裂。正是由于这种原

因，常常在焊接结构中把铆接接头作为止裂件。

2. 产生缺陷的可能性 焊缝内常常有气孔、裂纹、夹渣等各种类型的缺陷。

3. 对材料的敏感性，有些材料是比较难焊的。例如，强度较高的钢材焊接时一般很难不产生裂纹，而且对很小的缺陷也比较敏感。铝合金焊缝金属容易产生气孔。

4. 缺少可靠的无损探伤技术 目前虽然研究和采用了许多无损检测方法，但无论是在费用和可靠性方面，还没有一种方法是完全满意的。

5. 残余应力和变形 由于焊接时的局部加热，会在焊接过程中产生复杂的热应力，在焊后又形成残余应力与变形。热应力、残余应力和变形引起开裂和错边；在某些情况下，近缝区的高拉伸残余应力会引起断裂；母材内的变形和压缩残余应力会降低结构的压曲强度。

所以，为了设计和制造优质的焊接结构，关键是要做到：（1）合理的设计；（2）正确的选择材料；（3）采用适宜的焊接设备和制订正确的焊接工艺；（4）良好的技艺；（5）严格的质量控制。

1.1.3 本书的主要内容

图 1.1 表示在设计和制造焊接结构时残余应力和变形的重要性。

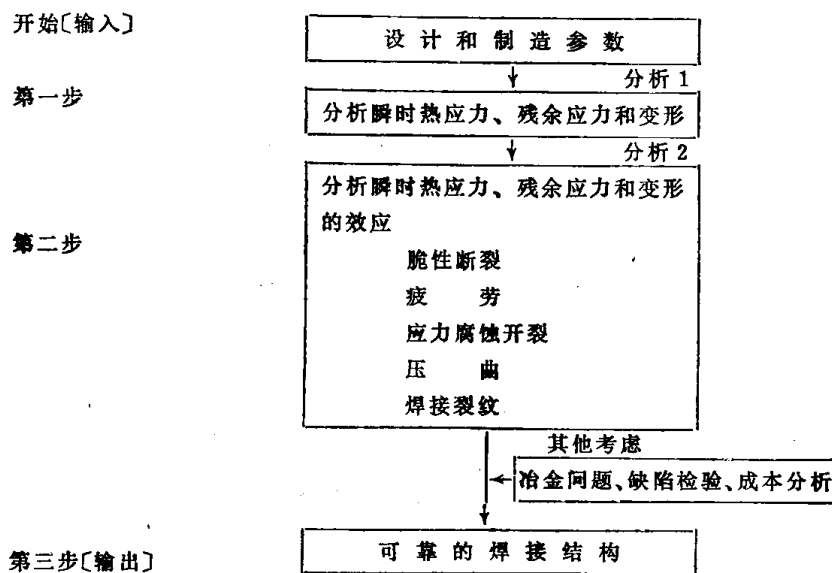


图 1.1 设计和制造焊接结构时残余应力和变形的重要性

当一个从事于实际工作的工程师，会考虑残余应力和变形这些因素对他设计和制造的结构使用性能的不良影响。近缝区内的高拉伸残余应力会促进脆性断裂、疲劳或应力腐蚀开裂。压缩残余应力和初始变形会降低构件的压曲强度。问题的复杂性在于残余应力的影响程度不仅取决于残余应力本身，而且也受材料脆性的制约。当材料呈脆性时，残余应力会显著降低焊件的断裂强度；另一方面，当材料呈塑性时，残余应力的影响实际上等于零。

事实上，一个从事实际工作的工程师希望能通过改变设计和制造参数，如板厚、接头设计、焊接条件、焊接顺序等等，以便使残余应力和变形的影响降低到可以接受的程度。为更好地达到此目的，最好是能在设计和制造的最初阶段，而不是在制造的后期才来处理上述问题。

为了完成这个任务，至少需要两种分析：

1) 瞬时热应力、残余应力和变形的分析。(图 1.1 分析 1，从开始到第 1 步)；

2) 热应力、残余应力和变形对焊接结构使用行为影响的分析。(分析2, 从第一步到第二步)。

本书的主要内容包括上述两种分析的现有知识。第2章至第7章介绍分析1, 第8章至第14章介绍分析2。

除了残余应力、变形及它们的影响外, 还必须考虑许多其他课题。这些课题包括冶金、出现焊缝缺陷的可能性、检验、制造费用等。例如, 能得到最小变形的焊接条件则往往由于会造成较差的冶金性能和过高的制造费用而无法使用。因此, 需要有一个系统的综合分析; 但即使研究出这种系统分析, 也会因其内容过于广泛而无法包括在一本书内。

本书主要包括与残余应力、变形及其效应有关的一些问题。力求尽可能减少与现有的图书内容重复。例如, 在一些图书中对于脆断、疲劳、应力腐蚀开裂、压曲等已经作了阐述。本书着重讨论焊接结构的特性, 尤其是与残余应力和变形有关的一些课题。

在编写本书时, 把有关焊接方法、材料、焊接冶金的讨论压缩到最低程度。作者打算在以后出版的丛书中介绍这些问题, 并期望有一天能完成上述的一个完整的分析系统[⊖]。

1.2 历史回顾和发展趋势

在预测将来会发生什么情况时, 通常首先应该考察过去和现在曾经发生过的和正在发生的事情, 因为可以把将来看作是现在和过去的延伸(虽然经常会发生突然事变)。图1.2列出近代世界历史上的一些重要事件、船舶和其他大型结构用的材料、连接方法及其应用。

1.2.1 大型结构用的材料

从木材到钢材 大约在1850年前, 木材一直是船舶、桥梁和其它结构的基本材料。十九世纪中叶, 铁才作为一种结构材料被推广应用。然而, 到了二十世纪初期, 铁也逐渐不用。自那时以来, 钢, 即铁与碳和其他元素的合金便成为船舶和各种其它结构的主要材料。尽管也发展了其它结构用材, 但目前, 钢仍然是船舶和其他大型结构最广泛采用的材料。低碳钢用得最广, 然而, 高强钢的使用范围正在不断扩大。

图1.3表示了美国海军潜艇用材屈服强度不断提高的情况^(101, 102)。在二十世纪四十年代早期, 军用潜艇大部分采用低碳钢制造。这种材料的屈服强度约为32000psi (220MN/m²)。从1940年到1958年, 在多数潜艇结构中采用屈服强度为50000psi (344.7MN/m²)的高强钢(HTS)。1958年, 一种最低屈服强度为80000psi (552MN/m²)的调质钢HY-80首次在潜艇壳体上应用。几年后, 采用了HY-100钢, 这是一种最低屈服强度达100000psi (689MN/m²)并与HY-80成分很相似的钢材。今天, HY-80和HY-100已是制造潜艇壳体的基本用钢。

后来, 又出现了HY-130钢, 该钢种最初被称为HY-140, 后来才发现焊缝的屈服强度只能达到130000psi (896MN/m²)。1969年, 洛克希德导弹和空间公司采用HY-130钢制造了第一艘深水救援艇。深水救援艇可以潜入6000ft (1830m)的深度。美国海军还打算用HY-180建造潜入深度可达20000ft (6100m)的深水考察艇。

图1.4是深水考察艇示意图, 设计这种考察艇时要求其运行的最大深度为20000ft (6100m)。

⊖ 正在编写下面三本书: (1) 焊接工程; (2) 焊接结构断裂; (3) 海洋工程用材[参考资料(102)的修订本]。

年份	主要事件	用于船舶结构的材料	连接方法
1776	美国独立	木结构	
1800			
1850	内战时期	铁结构 铁	高温钎焊, 锻接
1900		钢结构	发明了现代连接方法
1950	第一次世界大战 华盛顿会议 第二次世界大战	钢 轻金属飞机	涂料焊条 发明了惰性气体保护 焊接和埋弧焊 自由轮
1976	苏伊士危机 阿波罗登月 石油禁运	铝	电子束焊接 激光焊接
2000			

图1.2 一些主要事件

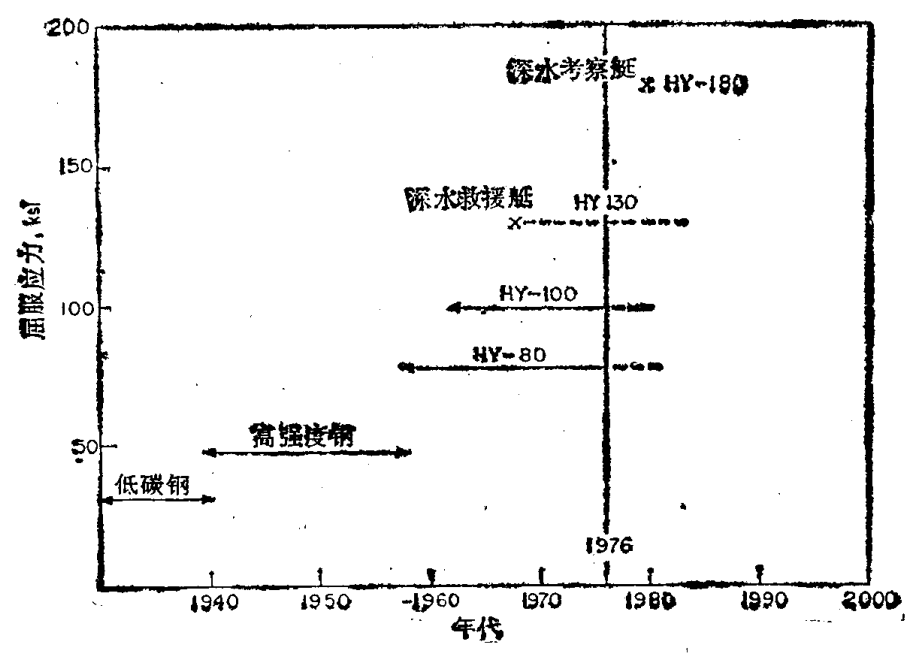


图1.3 用于美国海军潜艇的高强钢

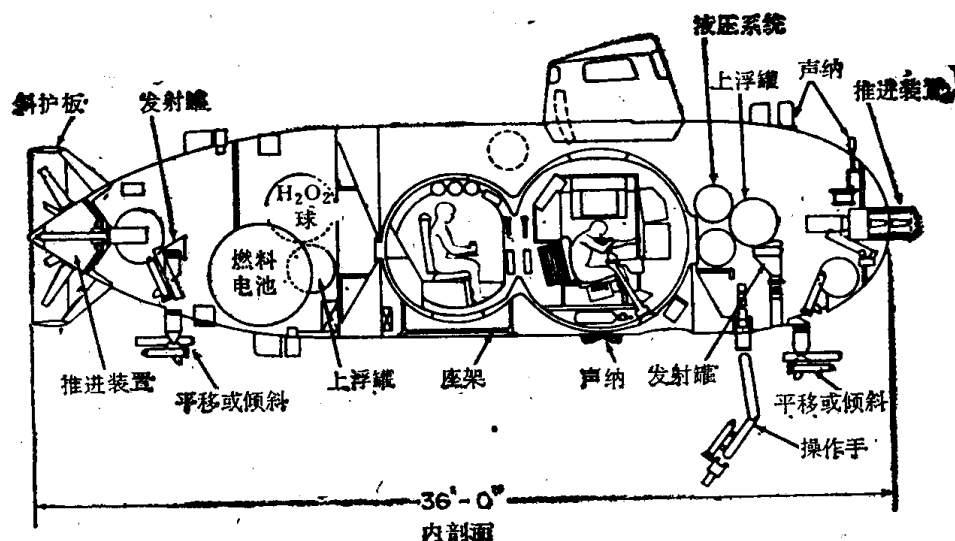


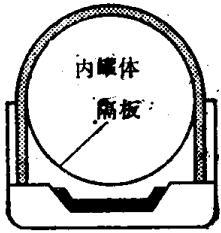
图1.4 20000ft(6100m) 深水考察艇示意图〔该图取自参考资料(103), 在设计上可能有更改〕

几年以后, 在船舶、桥梁、压力容器等工业结构上也采用了高强度钢; 而在大多数应用场合, 钢材的屈服强度被限制在 120000psi (或 827MN/m^2) 以下。除了海军的 HY-80 和 HY-100 以外, 还有一些工业用的调质钢, 如 ASTM A514/517。这些钢种有很好的低温断裂韧性, 并已广泛应用于各种类型的结构。

迄今为止, 注意力一直集中在高强钢的发展上。另外, 在研究具有良好深冷断裂韧性的材料方面也有了一些重要进展。这些材料主要用于运送液化天然气的槽罐上。表 1.1 列出至今研制成的几种槽罐结构⁽¹⁰¹⁾。从选材和焊接技术观点考虑, 以深冷贮罐最为典型。已使用的合金钢包括有:

- 1) 9% 和 $5\frac{1}{2}\%$ 镍钢;
- 2) 奥氏体不锈钢;

表1.1 运送液化天然气的槽罐结构

罐体系统	独 立 罐					
	球 形			方 形		
中部截面						
特许公司	Moss-Kvaener	Techni-Gaz	Gaz-Transport	Conch	ESSO (单罐)	ESSO Conch (双罐)
罐体材料	9%镍钢和铝	9%镍钢	9%镍钢	铝	9%镍钢	铝
中部截面						
特许公司	Techni-Gaz	Gaz-Transport	Bridgestone Liq. Gas	Ishikawajima-Harima		
罐体材料	不 锈 钢	36%镍钢(因瓦合金)	9%镍钢和铝	铝		

3) 36%镍钢 (Invar)。

铝 第一次把铝用在船舶上是在十九世纪九十年代, 稍晚于钢材。1889 年美国海军鱼雷艇采用了铝。

从二十世纪三十年代以来, 由于铝合金重量轻, 得以在飞机上广泛应用。铝合金也已用于其它结构, 例如, 在船舶上, 铝合金主要用于上层结构。铝合金广泛应用于先进的高性能船舶的壳体结构, 包括气垫船, 如图 1.5 所示。

除了重量轻之外, 铝合金在很低温度时还有良好的韧性, 因而也被广泛用于贮装深冷物品的槽罐。例如, 在阿波罗计划中, 土星 V 号宇宙火箭盛燃料 (煤油和液氢) 和氧化剂 (液氧) 的大型容器就是采用铝合金焊接结构 (见图 1.6)。

如表 1.1 所示, 铝合金也是运送天然气深冷贮罐的重要结构材料。

钛合金 在宇航工业中首次采用钛合金是在五十年代末期。今天, 钛合金已用于飞机结构 (特别是超音速飞机) 和喷气发动机的各种部件。但直到 1963 年, 美国海军的钛潜艇壳体计划实际上还未开始执行。除去在航空、宇航和化工的应用之外, 在结构上采用钛合金至今还是十分有限的。

钛合金的主要优点是高的比强度和优良的抗腐蚀性能。高昂的材料费和加工费是其主要缺点。

1.2.2 连接技术

焊接技术的发展历史可追溯到纪元前。在公元前 3000 年, 人们用铜-金合金和铅-锡合金进行低温钎焊。然而, 直到大约 1850 年, 木材和煤炭乃是可以得到的仅有热源。由于温度较低, 所以采用的连接方法仅限于低温钎焊、高温钎焊和锻接。

现代焊接技术的发展开始于十九世纪后期, 当时电能已开始在生产中使用。与现代焊接技术有关的重要发明, 大多是在 1880 年到 1900 年间实现的。在这段时期内发明的焊接技术有: 碳弧焊、金属电弧焊、氧-乙炔焊、电阻焊。涂料焊条的采用约在 1910 年。

在第一次世界大战期间, 在船舶结构中, 首次采用了金属电弧焊, 主要是为维修之用。1921 年建成第一艘全焊远洋轮船。从此开始, 在二十世纪三十年代, 焊接技术的采用逐步扩大。焊接飞机用轻金属合金需要有可靠的方法, 这就加速了惰性气体保护电弧焊的发展。埋弧焊法也是在二十世纪三十年代得到采用的。

在第二次世界大战期间, 发生了船舶建造上由铆接改成焊接的巨大变化。为了满足战时对大量船只的紧迫要求, 美国在历史上首次开始大规模生产焊接船舶。当时, 焊接钢板的技术已经成熟, 然而, 关于设计和制造大型焊接结构及其断裂特性方面的知识和经验还远远不够。

在大约 5000 条美国于第二次世界大战期间所建造的商船中, 约有 1000 条发生了结构性

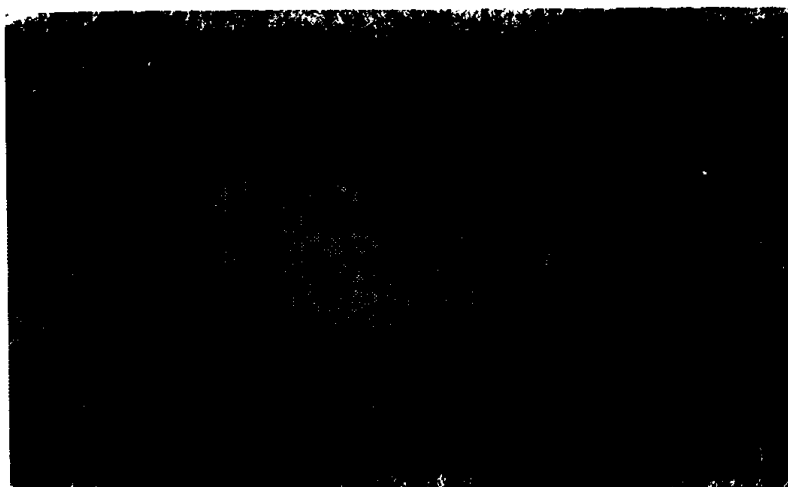


图1.5 气垫船—SES100⁽¹⁰¹⁾

该船为 100 吨级, 由皮尔宇航公司为美国海军建造。船的巡航速度超过 80 哩/时。美国海军拟建造 2000 吨级的巡航速度为 100 哩/时的气垫船

的破坏。其中约 20 条断成两段或由于结构性的破坏而不得不废弃。这些破坏事例促使对断裂和焊接进行广泛的研究，并在 1954 和 1955 年间掌握了制造焊接船舶和其他结构的技术。到 1960 年时，世界上大多数的船舶都采用焊接方法制造。

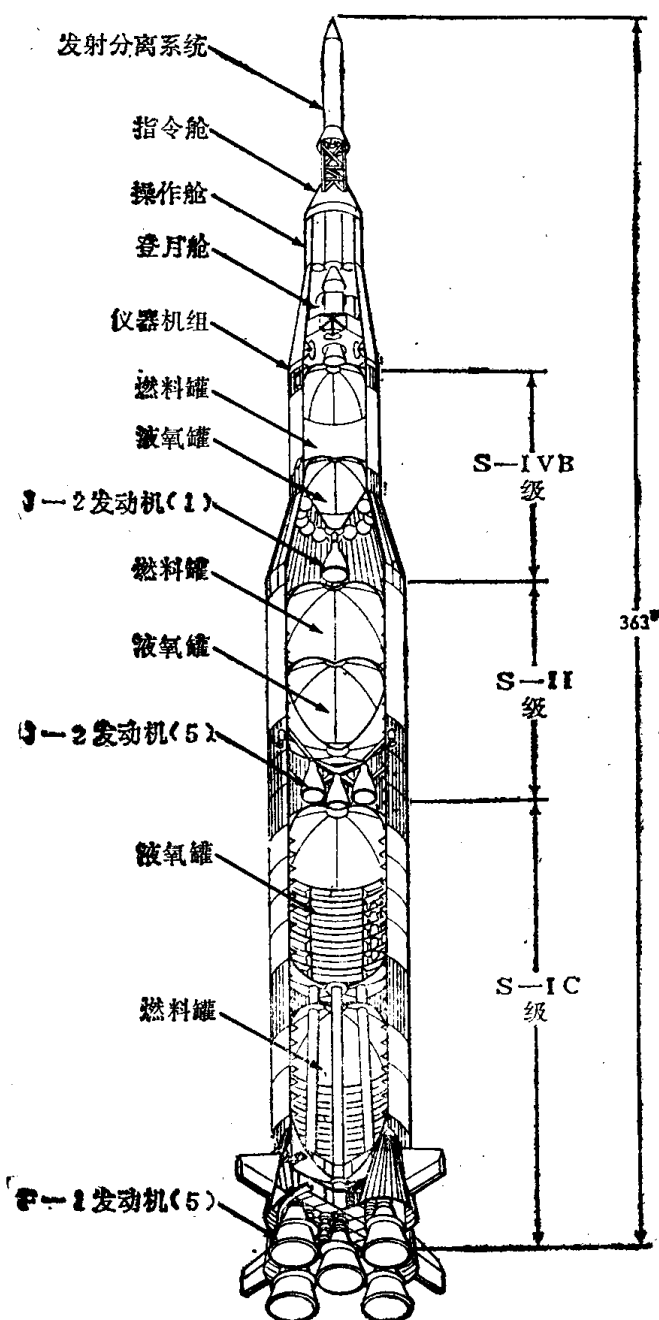


图1.6 土星V号宇宙火箭⁽¹⁸⁴⁾。包括阿波罗宇宙飞船在内，土星V号宇宙火箭的直立高度为363ft(110.6m)，最大直径为33ft(10m)。第一级称为S-IC，由五个F-1发动机推动。燃料为煤油和液氧。第二级S-II和第三级S-IVB由J-2发动机推动，燃料为液氢和液氧。

就重量而言，可以把土星V号看成是一个大型的燃料和氧化剂贮罐的组装体。充满燃料和液氧的土星V号约重2700吨，而其净重只有170吨。

2014铝合金和2219铝合金用作燃料和氧化剂贮罐的结构材料，其原因是在工作温度范围内铝合金有优良的比强度。接头板厚为 $1/8 \sim 1\text{in}$ (3.2~25.4mm)。贮罐用钨极氩弧焊和熔化极氩弧焊接

在最近三十年间,发展了许多新的焊接方法。其中包括: CO_2 气体保护焊、电渣焊、气电焊、超声波焊、摩擦焊、电子束焊、等离子焊以及激光焊接。这样,现在使用的大多数金属都可以焊接了。

1.3 对材料的要求⁽¹⁰²⁾

1.3.1 对性能的要求

下面讨论受力结构件材料所必须具有的一些重要性能。

比强度 材料的重度通常是一个关键特性,其原因是设计时常常把结构的重量作为主要考虑的一个问题。在许多情况下,不单是材料比重本身很重要,而且比强度也很重要。通常用屈服应力或极限应力对重度之比表示材料的比强度。当要求保持某一强度等级而又要使结构重量最小时,常用这一参数。

在各种海洋工程结构中,对潜艇壳体的问题最难解决。图 1.7 曲线为各种材料的近似球形受压壳体的计算性能⁽¹⁰⁵⁾。这里所表示的是导致壳体压塌的潜水深度和压塌或压曲应力(取决于几何形状)对重度比值之间的关系。在水深较大的情况下,高比强度材料的优点是特别明显的。

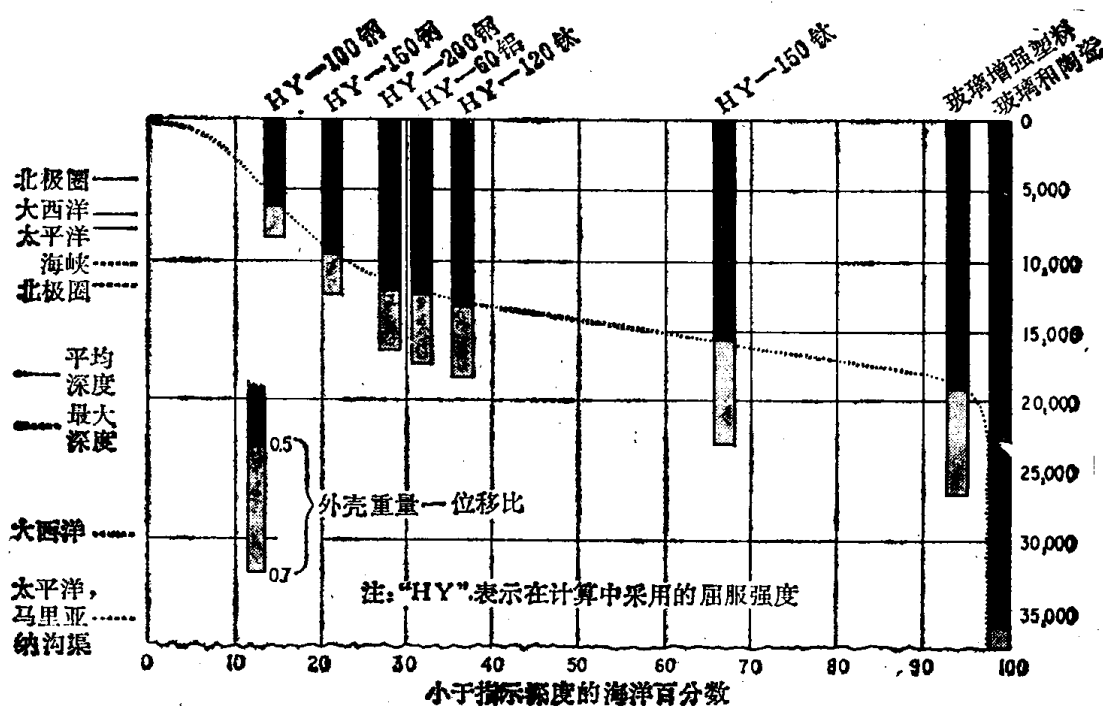


图 1.7 用不同材料制造的潜艇的潜水深度

应该指出,目前未必有实用的制造不同材料潜艇壳体的技术。海军是按照具体情况和经验对材料进行分类的。

第一类材料包括诸如 HY-80 和 HY-100 等合金。对于这些材料已有丰富的技术数据和操作经验。

第二类材料包括如 HY-130、马氏体时效钢、HP9-4-25 和退火 Ti-Al-4V 等合金。对于这些材料也有丰富的数据,但在运行环境方面的经验很有限。

第三类材料包括那些在技术数据和经验上都很少的材料。有几种第三类材料具有高的压塌应力对重度的比值。它们包括热处理钛合金、超高强度钢、玻璃、氧化铝陶瓷、先进的金属基体和树脂基体的复合材料、孪生合金、扩散连接板材。

断裂韧性 断裂韧性是衡量材料在断裂前通过塑性变形吸收能量能力的一种度量。“塑性”、“缺口韧性”和“断裂韧性”等几种术语均用于描述材料对断裂的抗力。例如，缺口韧性是指材料存在冶金或机械裂纹（或缺口）时抵抗脆断的能力。一般说来，吸收的能量愈多，则材料的塑性和韧性愈好。在第九章内将详细讨论断裂韧性。

当考虑用高强度材料时，断裂韧性往往是一个关键问题。这是因为普遍存在着随强度提高而断裂韧性下降的倾向。当结构在低温下使用时，缺口韧性也变成一个关键问题。

疲劳强度 在一次加载下不会引起断裂的载荷，在反复作用时则会导致断裂。疲劳破坏的机理是很复杂的。通常认为，从表面开始产生微小裂纹；继之，在反复载荷下裂纹扩展。第十一章介绍与疲劳破坏有关的问题。

对腐蚀和应力腐蚀开裂的抗力 在海水和其他环境中使用的结构件材料，必须有对腐蚀和应力腐蚀开裂足够的抗力。

腐蚀是一种由环境产生的化学和电化学反应对金属的破坏性侵蚀。而应力腐蚀开裂是在应力和某种环境同时存在的条件下材料的断裂。第十二章介绍应力腐蚀开裂及氢脆。

其他性质 值得考虑的材料其他特性，包括加工的难易程度、焊接性、耐久性、维修保养、一般可得性，最后（并非不重要）还有价格。在对任何一种应用场合，作出最佳材料选择之前，必须反复研究如下事项：每一结构件可能发生的几种断裂方式；把重量和造价降到最低程度；或把使用性能提到最高。

1.3.2 通用的或有发展前途的材料

可以把目前通用的和今后有发展前途的材料分成四大类：黑色金属、有色金属、非金属、复合材料。

钢 钢会有很大发展，这主要是由于可通过新的热处理技术使钢得到很高的强度。这些新的钢种包括：HY-80、HY-100、HY-130、HY-180 以及马氏体时效钢。屈服应力从HY-80 的 80000psi（或 552MN/m²）到某些马氏体时效钢的 300000psi（或 2068MN/m²）。除了疲劳寿命增加不多之外，这些高强度钢的主要缺点是有脆性倾向和低的缺口韧性。

当钢的强度等级提高后，要在焊接时不产生裂纹和其他缺陷是比较困难的。有些高强度钢对应力腐蚀开裂也比较敏感。1.4 节详细讨论有关结构钢的问题。

铝 铝受到重视的原因主要是比重小。低温时铝合金有很好的断裂韧性，而且铝是非磁材料。一些新的铝合金在屈服强度和抗拉强度方面可以与某些钢相比美。与钢一样，当强度提高时，铝合金也有降低缺口韧性的倾向，而且可能出现疲劳寿命问题。

一些高强度铝合金，特别是那些热处理强化铝合金，也是难以焊接的，并对应力腐蚀开裂较敏感。1.5 节讨论结构用铝合金。

钛 钛兼有较小的比重、很高的强度、很好的疲劳性能、耐腐蚀性及防磁性。可以认为钛合金是一种用于高性能空间飞船和海洋结构的很有前途的材料，但它的价格和加工费较高。1.6 节讨论结构用钛合金。

其他金属 除了钢、铝合金、钛合金以外，还有其他金属也可用于制作工程结构的各种构件。它们包括镍合金，青铜和其他铜合金等等。

复合材料 复合材料是在某种基体材料内按一定方向排列某些纤维材料制成的。这些纤维材料可以是金属的也可以是非金属的，通常用玻璃和硼。目前正在研制有更高比强度的纤维复合材料。复合材料当前的主要问题是连接问题和在压力作用下经过长期使用的分层撕裂现象。

玻璃和陶瓷 玻璃和陶瓷受到重视的原因，是它们在受压状态下有很高的强度。它们也有很好的抗腐蚀性。此外，玻璃还有透明的优点。玻璃和陶瓷的主要缺点是它们的脆性行为。

其他材料 胶合板和水泥已用于各种结构。两者的主要优点是价格便宜。此外，水泥有良好的抗压强度，容易得到，抗腐蚀以及很好的成形特性。其主要缺点是抗拉强度有限。

因为本书主要论述结构材料的焊接，所以下面将讨论钢、铝合金和钛合金。

1.4 结 构 钢(102)

下面介绍在结构中已被采用或可采用的各种钢材。这些钢是：碳钢、低合金高强度钢、调质钢和时效钢。

1.4.1 屈服强度小于80000psi的低碳钢和高强钢

屈服强度小于 80000psi (或 522MN/m²) 的低碳钢和高强度钢，是结构材料中应用最广泛的钢种。

多年来，ASTM A7 钢是一种用于焊接结构的基本碳素结构钢，其最低屈服强度为33ksi (或 228MN/m²)⁽¹⁰⁶⁾。ASTM A373 钢的最低屈服强度为 32ksi (或 220MN/m²)，也被经常使用。1960 年采用了屈服强度为 36ksi (或 248MN/m²) 的ASTM A-36 钢，其焊接性优于 A7 钢。

关于船舶壳体的钢种，美国商用船体是按照美国海岸警卫队和美国船舶局编制的要求建造的。海军作战船体和许多商用型海军船体是按照美国海军规程建造的。

从美国船舶局关于钢制船体的建造和分类规定中可以找到相应的要求。这些规定每年修订一次。表 1.2 和表 1.3 为 1977 年颁布的美国船舶局关于普通船体和高强度船体结构用钢的要求。现有规定包括屈服强度约 46000~51000psi (32.3~35.9kg/mm²) 的高强钢。表 1.4 列出对高强钢的热处理要求。美国船舶局关于船体用钢的规定，考虑了 1948 年来由于按级别分类时不同板厚相应的缺口韧性的变化，分别规定了对 D, E, DH32, EH32, DH36 和 EH36 级钢材缺口韧性的要求。表 1.5 和表 1.6 列出这些钢种的应用。

美国海军关于钢板、碳钢、船舶结构用钢的 MIL-S2269 A 规范与美国船舶局对普通强度船体用钢要求本质上是一致的，如下所示：

1. HT 级，屈服强度下限为 42000~50000psi (29.5~35.2kg/mm²或 290~345MN/m²) 的一种碳钢，屈服强度具体数值取决于板厚；
2. QT50，淬火处理的一种碳锰钢，其屈服强度的下限为 50000~70000psi (35.2~49.2 kg/mm²或 345~483MN/m²)。

关于最后提到的 QT 钢，淬火是为了阻止高温奥氏体相转变为不希望得到的显微组织。这种组织是在 400~1250°F (204~677°C) 温度区间经一到几小时的缓慢冷却转变所造成的。最高的回火温度得到最低的强度和最高的断裂韧性；反之亦然。

表1.2 美国船舶局对普通强度船体结构的A、B、D、E、DS和CS等级的要求。
冶炼方法：平炉、碱性氧气顶吹转炉或电炉

等 级	A	B	D	E	DS	CS
脱氧	任意方法除沸腾钢外①	任意方法除沸腾钢外	镇静钢细晶粒作业②⑩	镇静钢细晶粒作业⑩	镇静钢细晶粒作业⑩	镇静钢细晶粒作业⑩
化学成分③ (铁水包分析)						
C %	≤0.23④	≤0.21	≤0.21	≤0.18	≤0.16	≤0.16
Mn %	⑤	0.80~1.10⑦⑧	0.70~1.50⑦⑨	0.70~1.40⑦	1.00~1.35⑦	1.00~1.35⑦
P %	≤0.04	≤0.04	≤0.04	≤0.04	≤0.04	≤0.04
S %	≤0.04	≤0.04	≤0.04	≤0.04	≤0.04	≤0.04
Si %		≤0.35	0.10~0.35	0.10~0.35	0.10~0.35	0.10~0.35
拉伸试验						
抗拉强度	对所有的等级：41~50kg/mm ² 或58000~71000psi⑪, ⑫					
屈服点, 最低值	对所有的等级：24kg/mm ² 或 34000psi⑬					
延伸率, 最低值	对所有的等级：标距：200mm(8 in)时为21% 标距：50mm(2 in)时为24%或5.65√A时为22%(A为试件截面积)⑭					
冲击值 V 形缺口却贝值						
温度	-20°C(-4°F)		-40°C(-40°F)			
冲击功平均最低值 纵向试件	2.8kg-m (20ft-lb)		2.8kg-m (20ft-lb)			
横向试件	2.0kg-m (14ft-lb)		2.0kg-m (14ft-lb)			
试件数	每40吨三件⑮		每块板三件			
热处理			超过35mm (1 3/8 in)厚 正火⑯	正火	超过35mm (1 3/8 in)厚 正火	正火
印记	AB A	AB B	AB⑯ D	AB E	AB⑯ DS	AB CS

注：① 厚度等于或小于12.5mm(0.50in)的A级钢可用沸腾钢。

② 厚度达35mm(1.75in)的D级钢可用半镇静钢，如果厚度超过25.5mm(1.00in)的钢板要进行正火处理。在这种情况下，关于对Si、Al的下限要求和注10中的细化晶粒作业不能应用。

③ 除了A级钢的型钢和棒料外，对于其余所有各级钢来说，其含碳量与1/6的含锰量之和不能超出0.40%。

④ 对钢板厚度等于或小于12.5mm(0.50in)的A级钢和所有尺寸的A级型钢和棒料，最大含碳量为0.26%是合格的。

⑤ 板厚超过12.5mm(0.50in)的A级钢，锰的最低含量必须不小于含碳量的2.5倍；A级钢的型钢和棒料不受Mn/C比为2.5的限制。

⑦ 如果碳的含量加上1/6锰的含量不超出0.40%时，对所有各级钢，锰的标称上限可以达到1.65%的最大值。对B级钢，当Si的含量为0.10%或更多时(镇静钢)，锰的下限可降到0.60%。

⑧ 经特别批准，用作冷轧扁钢的B级钢，锰含量范围可降到0.60~0.90%。

⑨ 对于厚度等于或小于25.5mm(1.00in)的D级钢，锰的最低含量为0.60%是合格的。

⑩ 见上。

⑪ 冷轧压花钢板的抗拉强度规定为39~46kg/mm²(55000~65000psi)；屈服点最低为21kg/mm²(30000psi)，标距为200mm(8.00in)试件的延伸率最低为23%。

⑫ A级钢的型材和棒料的抗拉强度范围规定可为41~56kgf/mm²(58000~80000psi)。

⑬ 对板厚超过25.5mm(1.00in)的A级钢最低屈服点可降为23kg/mm²(32000psi)。

⑭ 当用全镇静细晶粒冶炼作业时，对正火处理的D级钢不必进行冲击试验。

⑮ 对D级钢的可控轧制可看作是代替正火处理，在上述情况下每加热20吨材料需要作一次冲击试验。

⑯ D级钢或DS级船体用钢经正火处理作特殊应用时，按43.3.8b规定分别加盖 $\frac{AB}{DN}$ 或 $\frac{AB}{DSN}$ 印记。