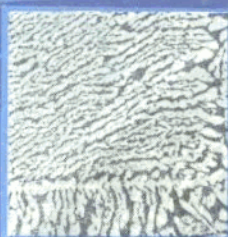
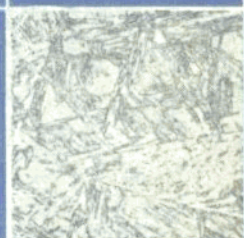
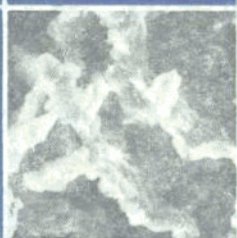


上海交通大学 主编

船用材料 金相图谱



国防工业出版社

241383

船用材料金相图谱

上海交通大学 主编



国防工业出版社

内 容 简 介

本图谱编入了船体结构钢、船机用钢铁材料、船用有色金属三类材料的金相图谱，比较系统地介绍了我国造船工业中使用的主要金属材料的成分、热处理工艺及显微组织特征。同时收入了分析组织所需要的相图与过冷奥氏体转变曲线（即TTT及CCT曲线）。图谱中除光学金相照片外，还有电子显微分析图片。

本图谱可供从事造船及其它行业的金相工作者参考，也可供科研和教学工作的有关人员参考。

DV10/15

船用材料金相图谱

上海交通大学 主编

*

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刷

*

787×1092¹/₁₆ 印张17 394千字

1986年2月第一版 1986年2月第一次印刷 印数：0,001—1,000册

统一书号：15034·2754 定价：6.30元

前 言

建国以来,随着国民经济和国防工业的发展,我国造船工业在逐步成长壮大。船用金属材料是保证造船质量的基础,金相分析既是检验构件和材料质量的重要方法之一,也是研究金属材料和改进热加工工艺的一个重要手段,而显微组织的识别与评定则是进行金相检验的先决条件。因此,造船工业的发展迫切要求编制一本《船用材料金相图谱》。

本图谱的编制原则是注重实用性和科学性。在编制前曾广泛收集有关单位的意见,在编制过程中各承制单位从本厂的生产实际出发,经过分析研究,选择有代表性的材料和工艺,确定典型的金相组织图片,力求使图谱内容既可作为生产检验的借鉴,又可作为研究工作的参考。

本书编入了船体结构钢、船机用钢铁材料、船用有色金属三类材料的金相图谱,比较系统地介绍了我国造船工业中使用的主要金属材料的显微组织特征。全书分两部分:第一部分是文字说明,介绍金属材料的特性、成分、热处理工艺及组织特点,并收入了有关的相图和过冷奥氏体等温转变曲线及连续冷却转变曲线,供分析组织时参考。第二部分是图谱,所列图片以光学金相照片为主,辅以必要的电镜照片及电子探针分析的成分数据。书后的附录列出了船用材料的常用金相试剂。考虑到当时的测试条件和使用习惯,图谱中的性能数据仍引用原有的单位,但目前我国已大力推广国际单位,因此将单位换算关系表列入附录。

本图谱由上海交通大学朱钰如、李朋兴负责主编。

参加编制的单位和人员有:上海交通大学 刘建民、张惠娟、方莲华、江伯鸿、王承德、杨安静;七院二十五所吴国信、王佩倩;十二所王桂森;十一所唐翠宝、卢意蔚;上海钢铁研究所陆兴荣;河南柴油机厂方之岳、郭训;江南造船厂潘素红、施英芳、顾亚培、沈彬;沪东造船厂汤伟成、龚坤龙;求新造船厂倪丽华;武汉锻造厂夏正良、谭月枝;上海航海仪器厂杜式连;四川万县衡山机械厂赵常林、曹士英;陕西柴油机厂高庆钧;渤海造船厂施永和;南京船用辅机厂王乃炎;中华造船厂计明复;武昌造船厂张良环;上海船厂陆国栋;新中动力机厂沈忠民;上海导航仪器厂陆慧娟;江津永进机械厂何金华;四川柴油机厂况新义、杨本莲;大连造船厂杨凤兰;柳州西江造船厂李泽容、王金珠等。上海交通大学金相室、电镜室为图谱做了大量的工作;铸造教研组金相室也参加了部分工作。本书承桂立丰高级工程师和徐祖耀教授评阅,并提出许多宝贵意见,谨此致谢。

在编写过程中,自始至终得到原六机部科技局的关心和支持,并得到国内许多单位的协助。六〇一所、六〇三所、国防工业出版社、上海材料所、上海有色所、西安交通大学、上海柴油机厂、船检局上海办事处、镇江船舶学院、上海汽轮机厂、戚墅堰机车车辆工艺研究所、无锡七二一厂等单位共同参加了最后审稿,在此一并表示感谢。

本图谱虽经多次讨论审查,但限于编者的水平和条件,疏漏和错误之处在所难免,殷切希望读者批评和指正。

一九八二年十月

目 录

第一部分 总 论

第一章 船体结构钢	2
§ 1.1 船体结构钢概述	2
§ 1.2 钢的基本组织形态	6
§ 1.3 焊接金相	8
第一章主要参考文献	10
第二章 船机用钢铁材料	11
§ 2.1 船机用钢铁材料的化学成分	11
§ 2.2 船机用钢材	12
§ 2.3 船机用铸铁材料	32
第二章主要参考文献	38
第三章 船用有色金属	39
§ 3.1 铝合金	39
§ 3.2 铜合金	55
§ 3.3 轴承合金	71
第三章主要参考文献	74

第二部分 图 谱

第四章 船体结构钢图谱	76
§ 4.1 3C 钢	76
§ 4.2 907 钢 (20 毫米)	80
§ 4.3 903 钢 (5 毫米、16 毫米)	86
§ 4.4 904 钢 (20 毫米)	96
§ 4.5 607 铸钢	107
§ 4.6 922 钢 (65 毫米)	112
§ 4.7 921 钢 (22 毫米)	118
§ 4.8 921 钢断口、夹杂物分析	127
第五章 船机用钢铁材料图谱	135
§ 5.1 18Cr2Ni4WA	135
§ 5.2 12CrNi3A	150
§ 5.3 35CrMo	153
§ 5.4 38CrMoAlA	157
§ 5.5 50CrVA	162

§ 5.6	CrWMn	165
§ 5.7	W18Cr4V	168
§ 5.8	2Cr13	170
§ 5.9	4Cr13	172
§ 5.10	1Cr17Ni2	173
§ 5.11	1Cr18Ni9Ti	175
§ 5.12	4Cr9Si2	177
§ 5.13	4Cr10Si2MoA	178
§ 5.14	4Cr14Ni14W2Mo	179
§ 5.15	灰铸铁	183
§ 5.16	球墨铸铁	187
§ 5.17	蠕虫状石墨铸铁	192
第六章	船用有色金属图谱	194
§ 6.1	铝合金	194
§ 6.1.1	ZL102	194
§ 6.1.2	ZL101	198
§ 6.1.3	ZL104	201
§ 6.1.4	ZL105	205
§ 6.1.5	ZL108	209
§ 6.1.6	ZL201	211
§ 6.1.7	ZL301	215
§ 6.1.8	LY11	216
§ 6.1.9	LY12	219
§ 6.1.10	LD5	222
§ 6.1.11	LD7	226
§ 6.1.12	LF6	228
§ 6.2	铜合金	229
§ 6.2.1	ZH70	229
§ 6.2.2	ZH62	229
§ 6.2.3	ZHMn55-3-1	230
§ 6.2.4	ZHA167-5-2-2	231
§ 6.2.5	ZHSn62-1	233
§ 6.2.6	ZHPb59-1	234
§ 6.2.7	ZHSi80-3	234
§ 6.2.8	ZQSn10-1	235
§ 6.2.9	ZQSn10-2	236
§ 6.2.10	ZQSn3-7-5-1	237
§ 6.2.11	ZQA19-2	237
§ 6.2.12	ZQA19-4	239
§ 6.2.13	ZQA112-8-3-2	240
§ 6.2.14	ZQAlNi9-4-4-2	244

§ 6.2.15 QBe2	246
§ 6.3 轴承合金	252
§ 6.3.1 ZchSnSb11-6	252
§ 6.3.2 ZchSnSb7.5-3	254
§ 6.3.3 ZQPb30	255
§ 6.3.4 ZQPb5-25	255
§ 6.3.5 铝锡轴承合金	256

附 录

一、船用材料常用金相侵蚀剂	257
二、机械性能单位换算表	260

第一部分

总 论

第一章 船体结构钢

§ 1.1 船体结构钢概述

船体结构钢是建造船舶的船体及其附属结构最主要的金属材料，为确保船舶顺利建造和使用安全，船体结构钢必须具备一定的强度、塑性和足够的韧性，特别是低温韧性、良好的耐海水腐蚀性能、耐疲劳性能以及良好的焊接工艺性能和冷热弯曲工艺性能。

我国常用的船体结构钢，按屈服强度级别可分为三类，如表 1-1 所示。

表1-1 船体结构钢按强度等级分类

屈服强度 (公斤/毫米 ²)	24	35~45	60
合金成分系列	C ≤ 0.22% 的碳素钢、C-Mn 钢、C-Mn 铝脱氧细晶粒普通强度钢	C ≤ 0.20%，Mn 为主要合金元素，并添加少量 Ti、V、稀土等元素的低合金高强度钢。主要有 C-Mn、Mn-Ti、Mn-Ti-V 稀土系	C ≤ 0.18%，Cr、Ni、Mo、Mn 为主要合金元素的低合金高强及调质钢。主要有 Cr-Ni-Mo-V 度和 Cr-Ni-Mn-Mo-B 系
显微组织	铁素体 + 珠光体	铁素体 + 珠光体	回火低碳马氏体或贝氏体
使用状态	热轧或正火	热轧正火或调质	调质

各类钢号的主要技术要求列于表 1-2~表 1-7。

一、碳素船体结构钢(普通强度钢)

表1-2 化学成分(GB712-80)

钢 号		化 学 成 分 (%) ^①				
牌 号	代 号	C	Mn	Si	S	P
2 船	2C ^②	≤ 0.22	≥ 2.5 C	0.10~0.35	≤ 0.050	≤ 0.045
3 船	3C ^③	≤ 0.21	0.60~1.00	0.10~0.35	≤ 0.040	≤ 0.040
4 船	4C ^{④⑤}	≤ 0.21	0.60~1.10	0.10~0.35	≤ 0.040	≤ 0.040
5 船	5C ^⑤	≤ 0.18	0.70~1.20	0.10~0.35	≤ 0.040	≤ 0.040

① 厚度 ≤ 12 毫米的 2C 钢中含钒的下限可低于表 1-2 的规定。

② 钢中 $C + \frac{Mn}{6} \leq 0.40\%$ ，在此条件下 3C、4C 钢的含锰量可达 1.20%。

③ 4C、5C 钢中酸溶铝量 ≥ 0.015%，或总含铝量 ≥ 0.020%。

④ 钢中残余元素含量：Cr ≤ 0.30%，Ni ≤ 0.30%，Cu ≤ 0.35%。

⑤ 厚度大于 25 毫米至 35 毫米的 4C 钢，如正火处理，则含铝量可低于注 ④ 规定。

表1-3 机械性能(GB712-80)

钢 号	屈服强度	抗拉强度	伸 长 率	V 型 冲 击 试 验②			窄 冷 弯	宽冷弯
	σ_s	σ_b ①	δ_5	温 度	平均冲击功 A_k (公斤·米)		$b = 2a$	$b = 5a$
	(公斤/毫米 ²)	(公斤/毫米 ²)	(%)	(℃)	横 向	纵 向	180°	120°
2C	≥24	41~52	≥22	—	—	—	$d = 2a$ 和 $3a$	
3C②	≥24	41~52	≥22	0	2	2.8	$d = 2a$ 和 $3a$	$d = 3a$
4C①	≥24	41~52	≥22	-20	2	2.8	$d = 2a$ 和 $3a$	$d = 3a$
5C	≥24	41~52	≥22	-40	2	2.8	$d = 2a$ 和 $3a$	$d = 3a$

① 在保证其他性能要求时, 钢板 σ_b 上限可达52公斤/毫米², 型钢可达54公斤/毫米²。

② 厚度≤25毫米3C钢不做冲击试验, 但要求较高时, 3C钢板可做冲击试验。

③ 可用横向冲击试样或纵向冲击试样, 但需在合同中注明。如未注明, 即采用纵向试样。

④ 厚度>35毫米4C钢, 应正火状态供货。

二、35~45公斤/毫米²级低合金高强度船体结构钢

表1-4 化学成分 (GB712-80及901、902、903、907钢验收技术条件)

钢 号		化 学 成 分 (%)								
牌 号	代 号	C	Mn	Si	V	Ti	Nb	S	P	Xt
12锰船	12MnC	≤0.16	1.10~1.50	0.20~0.60	—	—	—	≤0.040	≤0.040	—
16锰船	16MnC	0.12~0.20	1.20~1.60	0.20~0.60	—	—	—	≤0.040	≤0.040	—
	901	0.12~0.20	1.30~1.60	0.40~0.60	—	—	—	≤0.040	≤0.040	—
15锰钛船	15MnTiC	0.12~0.18	1.20~1.60	0.20~0.60	—	0.12~0.20	—	≤0.040	≤0.040	—
	902	0.12~0.18	1.35~1.50	0.30~0.60	—	0.12~0.20	—	≤0.040	≤0.040	—
14锰钒钛稀土船	14MnVTiXtC	≤0.18	1.30~1.60	0.2~0.60	0.04~0.10	0.09~0.16	—	≤0.040	≤0.040	≤J.20
903①	①	0.10~0.15	1.20~1.60	0.30~0.60	0.03~0.09	0.07~0.16	—	≤0.030	≤0.035	0.10~0.15
	②	0.13~0.18	1.25~1.60	0.30~0.60	0.03~0.09	0.07~0.16	—	≤0.030	≤0.035	0.10~0.15
907		≤0.12	0.50~0.80	0.80~1.10	0.60~0.90	0.50~0.80	0.40~0.60	≤0.035	≤0.035	—

① 903①为3~5毫米厚钢板成分; 903②为6~16毫米厚钢板和型钢化学成分。

表1-5 机械性能 (GB712-80及901、902、903、907钢验收技术条件)

钢 号	热 处 理	厚 度 (毫米)	屈服强度 σ_s (公斤/毫米 ²)	抗拉强度 σ_b (公斤/毫米 ²)	伸 长 率 δ_5 (%)	V型冲击试验			窄 冷 弯 $b=2a$ 180°	宽 冷 弯 $b=2a$ 120°	断口纤维量 ^① (%)
						温 度 (°C)	平 均 冲 击 功 (公斤-米)	试 验 方 向			
12MnC	热 轧	≤16	≥30	≥45	≥21	0	≥3.0	纵 向	$d=2a$	$d=2a$	—
		17~25	≥28	≥44	≥19	0	≥3.0	≥5.0	$d=3a$	$d=3a$	
16MnC	热 轧	26~36	≥26	≥43	≥19	0	≥3.0	纵 向	$d=2a$	$d=2a$	—
		≤16	≥35	≥52	≥21	0	≥3.0	≥5.4	$d=2a$	$d=2a$	
		17~25	≥33	≥50	≥19	0	≥3.0	≥5.4	$d=3a$	$d=3a$	
		26~36	≥31	≥48	≥19	0	≥3.0	≥5.4	$d=3a$	$d=3a$	
901	热轧(某些厚板有时采用正火处理)	37~50	≥29	≥48	≥19	0	≥3.0	纵 向	$d=2a$	$d=2a$	—
		4~10	≥35	≥52	≥22	0	≥3.0	≥5.4	$b=7a, 120^\circ$	$d=2a$	
		11~20	≥35	≥52	≥22	0	≥3.0	≥5.4	$d=2a$	$d=2a$	
		21~32	≥34	≥52	≥22	0	≥3.0	≥5.4	$d=2a$	$d=2a$	
15MnTiC	正 火	≤25	≥35	≥52	≥22	0	≥3.0	纵 向	$d=2a$	$d=2a$	—
		26~40	≥38	≥52	≥19	0	≥3.0	≥5.8	$d=3a$	$d=3a$	
902	正 火	≤10	≥40	54~75	≥22	-40	≥4.0 ^①	—	$b=7a, 120^\circ$	$d=2a$	≥50
		11~15	≥40	54~66	≥22	-40	≥5.0 ^①	—	$d=2a$	$d=2a$	
		16~32	≥40	54~66	≥22(ψ≥50)	-40	≥3.0 ^①	—	$d=2a$	$d=2a$	
		型钢≤8	≥40	54~75	≥22(ψ≥50)	-40	≥3.0 ^①	—	$d=2a$	$d=2a$	
14MnVTiXtC	正 火	型钢>8	≥40	54~66	≥22	-40	≥3.0 ^①	—	$d=2a$	$d=2a$	—
		≤12	≥45	≥56	≥18	-40	≥4.0 ^①	—	$d=2a$	$d=2a$	
		13~20	≥45	≥54	≥18	-40	≥5.0 ^①	—	$d=3a$	$d=3a$	
		<10	≥45	56~70	≥20	-40	≥3.5 ^①	—	$b=7a, 120^\circ$	$d=2a$	
903	正火(但对3~5毫米的连轧钢板允许高温回火供应)	10	≥45	56~70	≥20	-40	≥3.5 ^①	—	$d=2a$	$d=2a$	—
		11~16	≥45	56~70	≥20	-40	≥5.0 ^①	—	$d=2a$	$d=2a$	
907	3~5毫米连轧板以热轧或高温回火态供应。6~15毫米钢板, 热轧态非调质热处理状态。16~32毫米钢板, 调质热轧或非调质热处理状态。	型 钢	≥45	56~70	≥20	-40	≥5.0 ^①	—	$d=2a$	$d=2a$	—
		3	≥40	≥54	≥16	-40	≥4.0 ^①	—	$d=2a$	$d=2a$	
		4~5	≥40	54~70	≥18	-40	≥5.0 ^①	—	$d=2a$	$d=2a$	
		6~10	≥40	54~70	≥19	-40	≥4.0 ^①	—	$d=2a$	$d=2a$	
907	3~5毫米连轧板以热轧或高温回火态供应。6~15毫米钢板, 热轧态非调质热处理状态。16~32毫米钢板, 调质热轧或非调质热处理状态。	11~15	≥40	54~70	≥19	-40	≥4.0 ^①	—	$d=2a$	$d=2a$	—
		16~32	≥40	54~70	≥19	-40	≥5.0 ^①	—	$d=2a$	$d=2a$	
		型 钢	≥40	54~70	≥19(ψ≥50)	-40	≥4.0 ^①	—	$d=2a$	$d=2a$	
		11~15	≥40	54~70	≥19(ψ≥50)	-40	≥5.0 ^①	—	$d=2a$	$d=2a$	
907	3~5毫米连轧板以热轧或高温回火态供应。6~15毫米钢板, 热轧态非调质热处理状态。16~32毫米钢板, 调质热轧或非调质热处理状态。	16~32	≥40	54~70	≥19(ψ≥50)	-40	≥4.0 ^①	—	$d=2a$	$d=2a$	—
		型 钢	≥40	≥54	≥21(ψ≥50)	-40	≥4.0 ^①	—	$d=2a$	$d=2a$	
		11~15	≥40	54~70	≥19	-40	≥4.0 ^①	—	$d=2a$	$d=2a$	
		16~32	≥40	54~70	≥19(ψ≥50)	-40	≥5.0 ^①	—	$d=2a$	$d=2a$	

① 为梅氏试样的冲击值, 单位公斤-厘米/厘米², 钢厂还应做Charpy-V冲击试验, 并将冲击功记录于原保书上, 以供参考。

② 12MnC、16MnC等的宽冷弯试验仅供参考, 不作交货条件。

③ 14MnTiVXtC钢的冲击功, 由供需双方议定。

④ 厚度≥10毫米的902、903和907钢板作断口纤维组织检验。折断面不允许有贯穿底面的裂开流纹, 长度大于2/3折断面的裂开流纹不得大于2条。断口纤维量如表中

⑤ 规定。

⑥ 宽冷弯试样尺寸, 板厚3~15毫米, 样宽100毫米, 16~32毫米, 样宽150毫米。

三、60公斤/厘米²级高强度船体结构钢

(主要用于建造水下舰艇的耐压壳体或其他耐压容器)
表1-6 化学成分(%) (921系统钢及904系统钢的验收技术条件)

钢号	品 种 规 格	C	Mn	Si	S ^①	P ^①	Cr	Ni	Mo	V	Cu	备 注
921	钢板厚度10~32毫米	0.09~0.14	0.30~0.60	0.17~0.37	≤0.035	≤0.035	0.9~1.20	2.60~3.00	0.20~0.27	0.04~0.10	②	
922	厚度36~70毫米	0.09~0.14	0.30~0.70	0.17~0.37	≤0.035	≤0.035	1.20~1.60	2.20~2.50	0.20~0.27	0.04~0.10	0.80~1.10	
923	厚度5~9毫米	0.09~0.14	0.30~0.70	0.17~0.37	≤0.035	≤0.035	0.70~1.00	2.00~2.30	0.17~0.25	0.04~0.10	0.80~1.10	
925	锻 钢	0.13~0.18	0.30~0.60	0.17~0.37	≤0.030	≤0.035	0.90~1.20	2.60~3.00	0.20~0.27	0.03~0.08	—	多与921钢配套使用,制造环形零件,焊接热交换器及设备的承压零部件
604	铸 钢	≤0.10	0.60~1.00	0.15~0.40	≤0.040	≤0.040	≤0.30	1.15~1.55	—	≤0.10	0.80~1.20	Ti: 0.04 Al: 0.07
607	铸 铝	0.13~0.18	0.30~0.50	0.17~0.35	≤0.030	≤0.030	0.90~1.20	2.60~3.00	0.20~0.27	0.05~0.08	—	Al: 0.08
904	钢板厚度10~32毫米	0.09~0.14	0.60~1.00	0.15~0.35	≤0.030	≤0.030	0.40~0.80	0.70~1.00	0.40~0.60	0.03~0.08	0.15~0.50	③
904D	锻 钢	0.12~0.17	1.20~1.50	0.17~0.37	≤0.030	≤0.030	0.80~1.20	0.70~1.00	0.40~0.60	0.05~0.10	0.15~0.50	—
606	铸 钢	0.09~0.14	1.20~1.15	≤0.50	≤0.025	≤0.025	0.80~1.10	0.70~1.00	0.40~0.60	0.03~0.10	0.70~1.00	Re: 0.50 与904钢配套使用

① 硫磷总和应不超过0.060%。

② 允许921钢的硫磷含量不超过0.35%。

③ 904钢加入2公斤/吨的5号合金(铝、钛、硼和硅的复合物)进行炉外脱氧,故含有微量硼、钛、铝、硅等元素。

④ 为计算加入量。

表1-7 机械性能(921系统钢及904系统钢的验收技术条件)

钢号	品 种	热 处 理	规 格 厚度(毫米)	屈服强度 σ_s (公斤/厘米 ²)	抗拉强度 σ_b (公斤/厘米 ²)	伸长率 δ_5 (%)	断面收缩率 ψ (%)	冲击值(室温) A_k (公斤-米/厘米 ²)
921	钢板	调质	10~35	≥ 60	67~85	≥ 16	≥ 50	11~30毫米 ≥ 8 厚度 31~35毫米 ≥ 11 ①
	球扁钢	热轧(在造船厂成型后再调质)	各型号	≥ 60	67~85	≥ 16	≥ 50	≥ 9.0
922	钢板	调质	36~70	≥ 52	62~82	≥ 16	≥ 50	≥ 11.0 ①
923	钢板	调质	5~9	≥ 52	62~82	≥ 16	—	—
925	锻钢件	正火+调质	最大使用壁厚120	≥ 52	≥ 59	—	≥ 40	≥ 9.0
604	铸钢件	正火+回火②	最大使用壁厚250	≥ 38	≥ 50	≥ 20	≥ 10	-10℃, ≥ 3.0
		调质		≥ 40	≥ 50	≥ 20	≥ 10	-40℃, ≥ 3.0
607	铸钢件	正火+调质	最大使用壁厚130	≥ 52	≥ 59	—	≥ 40	-10℃, ≥ 3.0
904	钢板	调质	10~32	≥ 60	67~82	≥ 16	≥ 50	≥ 8.0
	球扁钢	热轧(在造船厂成型后再调质)	各型号	≥ 60	67~85	≥ 13	≥ 50	≥ 9.0
606	铸钢件	正火+调质	最大使用壁厚120	≥ 60	≥ 67	—	≥ 40	-40℃, ≥ 6.0

① 为钥匙型缺口大试样的冲击值。

② 604铸钢件一般以调质态供应,对形状复杂,淬火变形严重的铸件可以正火+高温回火供应。

§ 1.2 钢的基本组织形态

船体结构钢一般都是低碳钢或低碳低合金钢,有的以热轧态供应,也有的以正火或调质等热处理状态供应。更重要的是它们都要进行焊接,或水火成型等工艺处理。因此船体结构钢的实际金相组织是多样的、复杂的,但其组织类型均应属钢中可能出现的基本显微组织之列,这些组织的特征列于表1-8。

表1-8 钢中的显微组织特征

组织名称	相 组 成	类 型	形 态 特 征
铁素体	碳在 α -Fe中的 单相固溶体	多边形铁素体	多边形或块状
		魏氏组织中 铁素体	呈针状或片状。从奥氏体晶界开始沿一定方向析出于晶内,铁素体内的位错密度较低
珠光体	铁素体+渗碳体	层片状珠光体	铁素体与渗碳体交替呈片层状。一颗原奥氏体晶粒内可能有几个位向不同的珠光体领域
		粒状珠光体	珠光体内的渗碳体呈粒状或球状
贝氏体	铁素体(具有一定位错密度)+ 渗碳体(或碳化物)	粒状贝氏体	位错密度较高的铁素体基体上分布有不规则的孤立的富碳小岛区。因冷速或成分不同,这些小岛可能是铁素体+碳化物;也可能是马氏体+残余奥氏体(即M/A组织)或保留为奥氏体
		上贝氏体	在有一定位向的平行针状铁素体条间析出有断续杆状碳化物,且随转变温度降低针条细密,呈羽毛状
		下贝氏体	在针状铁素体内沿一定方向析出碳化物,在中、高碳钢中铁素体呈针片状,低碳低合金钢中呈平行条状

组织名称	相组成	类 型	形 态 特 征
马氏体	碳在 α -Fe中的过饱和固溶体	板条状马氏体	马氏体呈板条状,大致平行排列,组成马氏体束,束与束之间有一定交角。原奥氏体晶粒内可形成数个马氏体领域。亚结构为高密度的位错。当 M_s 温度较高时产生“自回火”,碳化物在条内各方向析出。称自回火马氏体
		片状马氏体	在含碳量较高的钢中或低碳低合金的钢中的局部高碳区中形成,呈片状。亚结构为微孪晶
回火索氏体	铁素体+渗碳体	回火索氏体	马氏体经高温回火后,渗碳体呈颗粒状析出在已回复或再结晶的铁素体基体上。合金元素较高或回火温度较低时,铁素体仍保留有马氏体条的外形 淬火组织中贝氏体经高温回火后的组织有时亦称回火索氏体(一般称贝氏体回火组织)

应该指出的是,低碳钢中温区域转变的组织尤为复杂,不易辨认,其表现为:

1. 低碳钢中的上、下贝氏体不如中、高碳钢的典型上、下贝氏体容易区分。有人甚至认为,低碳钢中所出现的贝氏体本质上均为上贝氏体的不同类型。

2. 在贝氏体转变的上部区域出现的组织形态不同于典型的羽毛状上贝氏体,名称也各不相同。有称为粒状贝氏体的,是指在贝氏体铁素体基体上有小岛,这小岛最常见的是所谓 M/A 组织;亦有称为无碳贝氏体的,指的是组织中仅有贝氏体铁素体及奥氏体,而无碳化物。这些组织有人主张不单独列出而归入上贝氏体之中。此外,还有人称为颗粒状或块状组织。本图谱中暂称为粒状贝氏体。

3. 在含碳约0.06~0.08%、锰~1.8%的钢中,快冷时还可能形成针状铁素体,这种针状铁素体与魏氏组织相比,形成于较快冷速和较低的温度,形状不规则,且原始奥氏体晶界不复可见,并具有较高的位错密度。

4. 由于低碳马氏体的 M_s 点较高,常有自回火现象。因此,低碳钢中针条状贝氏体与低碳马氏体也不易区分,只是在侵蚀适度时,贝氏体组织较黑一些。

实际结构的金相组织,均系连续冷却后形成,往往为多种组织组成的混合组织。为了便于分析,可借助于该钢的过冷奥氏体连续冷却转变图(即CCT曲线)。

图1-1为连续冷却转变图示意图。图中示意标出了表1-8中所列出的各种组织形成

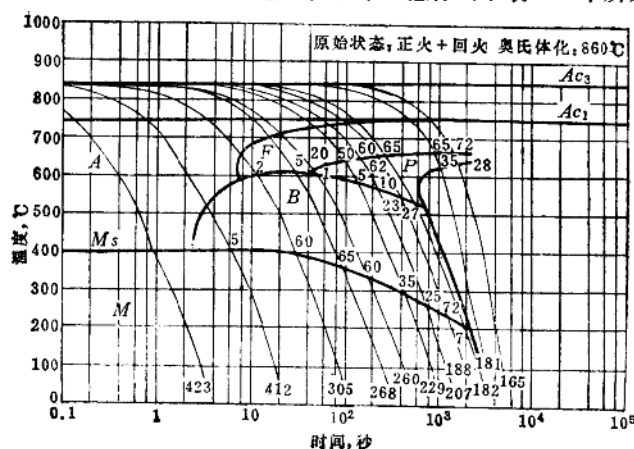


图1-1 钢的连续冷却转变图(CCT曲线)
A—奥氏体; F—铁素体; P—珠光体; B—贝氏体; M—马氏体。

温度范围和冷速范围。

应当指出的是，连续冷却转变图是用小规格标准试样测制的，与实际构件的冷却条件有一定差别，仅供组织分析时参考。在具体分析时，应根据具体构件的实际冷速进行分析。

§ 1.3 焊接金相

焊接金相主要研究焊接接头（包括焊缝、热影响区和母材三部分）的宏观和微观组织，分析焊接缺陷的类型和成因，以了解金属材料的可焊性，确定合理的焊接工艺，为提高焊接接头的性能和质量提供依据。

一、焊缝区的组织

船体结构钢焊接接头的焊缝区均被加热至熔化，而后冷却时经历凝固结晶（一次结晶）和固态相变（二次结晶）的过程，因此焊缝组织不仅取决于焊缝的化学成分（指焊料和母材熔合后的平均成分），还取决于凝固时的结晶条件和固态相变的冷却条件（例如加热熔化温度、熔池形状、尺寸，接头散热条件等），这些均可归结为焊接线能量（电流、电压和焊接速度）、钢板厚度、接头形式等焊接工艺参数的影响。

由于焊接熔池的特殊结晶条件，凝固后的奥氏体大多形成柱状晶，通常垂直于熔池壁向中心伸长。一般结构钢中含有多种元素和杂质，所以柱状晶的亚结构多为树枝晶，出现树枝状偏析（较少出现胞状晶和胞状偏析）。如果熔池很宽或焊接速度较快，焊缝中心有可能出现等轴晶。

奥氏体随后转变为什么组织，取决于焊缝成分和冷却条件，可借助于相应成分的不断冷却转变图（最好选用高温奥氏体化的 CCT 图）来分析。一般船体钢的焊缝含碳量较低，所以大多数出现沿柱状晶界生长的块状铁素体，柱状晶内部为针片状铁素体和少量珠光体（魏氏组织）。因受树枝晶偏析的影响，这些针状铁素体往往垂直地交织。随含碳量增加和冷速增大，块状铁素体数量减少，珠光体数量增加，且针状铁素体变细。

随合金元素含量的增加，焊缝组织中也可能出现粒状贝氏体、上贝氏体和马氏体等组织。

二、热影响区的组织

靠近焊缝的母材，在焊接热源的影响下被加热到熔点以下的各种温度，然后又冷至室温。这些受热部分称为热影响区。热影响区各部位的划分主要依据各部分受到的最高加热温度，可借助于相图进行分析。各影响区冷却后的组织主要取决于钢的成分和冷速，可借助于连续冷却转变曲线来分析。分析的重点是接近熔合线的粗晶区，该部分晶粒粗大，且熔合线区成分极不均匀，是焊接接头性能最易恶化的部位。

船体钢热影响区的组织列于表 1-9。

表1-9 船体结构钢焊接热影响区组织

钢 种	被加热的 温度范围	1100℃			
		粗晶区 (过热区)	细晶区 (相变重结晶区)	Ac ₃ ← 部分相变区 → Ac ₁	未转变区
碳素钢		粗大针状铁素体 + 珠光体 (魏氏组织)	细小铁素体 + 珠光体	未转变的铁素体 + 细小珠光体、铁素体	铁素体 + 珠光体
35~45公斤/毫米 ² 级低合金高强度钢		粗大粒状贝氏体①	粒状贝氏体	未转变的铁素体 + 粒状贝氏体	铁素体 + 珠光体
60公斤/毫米 ² 级低合金高强度钢		粗大板条状马氏体②	板条状马氏体	回火索氏体 + 马氏体或粒状贝氏体	回火索氏体

① 有时熔合线附近因贫碳会出现铁素体。

② 若焊接线能量大，冷速慢时会出现马氏体 + 贝氏体混合组织；904钢还可能出粒状贝氏体。

三、焊 接 缺 陷

焊接接头中常见缺陷，如气孔、夹渣、未焊透、咬边、焊瘤等。一般通过宏观检验即可识别和区分。但最重要和危害最大的是焊接裂纹，其种类繁多，成因复杂，难以判断，需经宏观、微观、断口金相，并结合焊接工艺条件和构件应力状态等加以综合分析。

表 1-10 为常见焊接裂纹一般简介。

表1-10 常见焊接裂纹

类型	裂纹形成温度范围	名 称	裂纹发生部位	微 观 形 貌	断 口 特 征	形 成 条 件
热裂纹	Ac ₃ 以上至凝固温度	凝固裂纹	焊缝(包括弧坑)	沿柱状晶界或树枝晶、胞状晶界；裂纹末端钝钝	晶间型断口，有时有树枝晶状浮凸，断口上常发现低熔点共晶型化合物	某些合金元素或杂质元素(如S、P等)偏析于晶界，形成低熔点化合物；收缩应力
		液化裂纹(热影响区热裂)	邻近熔合线处的热影响区	裂纹沿奥氏体晶界，有时呈网状	晶间型断口，断口上常有低熔点第二相	母材晶界上存在低熔点化合物；应力
冷裂纹	Ar ₃ 以下至室温的冷却过程中或冷却后	氢致裂纹(延迟裂纹)	焊道下裂纹	焊道下的热影响区中扩展，平行于焊缝	通常为穿晶，但有时沿混合组织的交界面扩展；一般无分枝，断续地延伸，末端较尖锐	氢、应力和淬硬组织
		焊趾裂纹	在焊缝和母材截面不连续处或咬边等应力集中部位起源，向热影响区或焊缝扩展			应力集中、氢、淬硬组织
		焊根裂纹	在焊根附近或未焊透等缺口部位起源，向热影响区或焊缝扩展			
层状撕裂		层状撕裂	从热影响区扩展到母材，平行于母材轧制方向	沿带状组织分层扩展，不同层间的裂纹被细小的裂纹连系着，呈台阶状	由平台和直壁两部分构成的台阶。平台部分为等轴微坑，内有各类夹杂。剪切直壁部分为拉长的切变微坑。有时受氢的影响呈准解理断口	存在于严重的带状夹杂或带状组织；厚度方向存在高的拉应力。有时亦受扩散氢的影响
焊后热处理裂纹	焊后500~700℃退火	再热裂纹	热影响区	沿原奥氏体晶界	晶间型断口；晶界上无明显析出物	含Cr、Mo、V、Nb、Ti等能发生二次硬化的合金元素，应力

第一章 主要参考文献

- 〔1〕 造船用结构钢技术条件, GB712-80。
- 〔2〕 船体结构钢, 船体结构钢编写组编, 国防工业出版社, 1977。
- 〔3〕 焊接金属学, 上海交通大学金相、焊接教研组等编, 上海市教育局工农教材编审学组出版, 1978。
- 〔4〕 金相分析, 上海交通大学《金相分析》编写组编, 国防工业出版社, 1982。
- 〔5〕 金相图谱, 金相图谱编写组编, 电力工业出版社, 1980。