

特 殊 钢 丛 书

合金结构钢

顶程云 主编



冶 金 工 业 出 版 社

特殊钢丛书

合金结构钢

项程云 主编

冶金工业出版社

1999

内 容 简 介

本书是近 40 多年来国内首次较全面地介绍合金结构钢发展现状与动向的专著。

全书共分 14 章,较系统地介绍了冶金和材料界对结构钢的淬透性、回火脆性、冷脆性和焊接性等问题研究的进展与动向,并对调质钢、高强度钢、冷锻钢、弹簧钢、抗硫化氢钢、渗碳钢、渗氮钢、低淬透性钢和易切削钢等的合金化特点、用钢质量现状和工艺控制等进行了较全面的阐述。

本书是从事结构钢科研、生产、开发和使用等部门技术人员的较好的参考资料,并对有关大专院校师生有一定参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

合金结构钢/项程云主编. — 北京:冶金工业出版社,
1999.8

(特殊钢丛书)

ISBN 7-5024-2309-5

I. 合… II. 项… III. 结构钢:合金钢 IV. TG142.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 01840 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 王成蓓 王雪涛 美术编辑 李 心 责任校对 王永欣
北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1999 年 8 月第 1 版,1999 年 8 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 14.875 印张; 997 千字; 459 页; 1—2000 册
34.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64013877

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100711) 电话: (010) 65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

《特殊钢丛书》编辑工作委员会

(按姓氏笔画为序)

主任委员	刘嘉禾	杨 栋	
委 员	马绍弥	王洪发	王建英
	关玉龙	刘福魁	那宝魁
	杨昌乐	范小媛	林慧国
	侯树庭		

秘 书 长	林慧国
-------	-----

序

特殊钢是钢铁工业的一个重要领域。特殊钢的品种繁多,性能各异,质量要求高,应用范围广,国家的经济建设、国防建设乃至人民的日常生活都与特殊钢有密切关系。因而通常把特殊钢品种、质量、产量作为衡量一个国家钢铁工业科学技术和工业化水平的重要尺度。

当前,我国的四化建设和改革开放正向深广方向发展,中共中央和国务院做出关于加强科学技术进步的决定,广大职工积极要求掌握科学技术专业知识。在这样的形势下,中国金属学会特殊钢专业学会发起并组织编写一套具有自己特色的《特殊钢丛书》,是有时代意义的。

这套丛书分卷撰写,陆续出版。本丛书是由中国金属学会特殊钢专业学会及其 15 个专业学术委员会组织国内冶金与材料界的知名专家教授编写的,因此具有一定的权威性。编写这套丛书是为了介绍中国特殊钢工业的发展情况和科学研究成果以及国外在这方面的进展情况,总结和整理国内老一辈专家们的丰富学识和实践经验。这套《特殊钢丛书》将重点介绍特殊钢的现代生产工艺技术、特殊钢各大钢类钢种的性能特点和应用指南,为特殊钢生产、科研和使用部门的科技人员在职学习提供素材,为有关大专院校师生提供教学参考。

组织编写特殊钢方面的系列图书,在国内尚属首次,在国外也不多见,难免存在疏漏和不足之处,欢迎指正。期望这套《特殊钢丛书》能在普及提高科学知识、合理生产和合理使用钢材方面发挥积极作用。

《特殊钢丛书》编委会

前 言

合金结构钢是特殊钢中用量大、应用面广和品种较多的一类重要钢种,与现代工业密切相关,尤其在机械、汽车、军工等制造部门被广泛应用。国内在 20 世纪 50 年代曾翻译出版过《合金结构钢》(俄文)一书,至今仍未见新的专著问世。此后 40 多年中,由于使用部门对质量与经济的综合效益的要求越来越高,从而促使材料科学工程和冶金技术高速发展,结构钢的科技含量明显提高,形成了“现代结构钢”的新概念。因此,传统的结构钢知识就显得不完全适用了。

本书采用新的编写思路,把材料学与工艺学结合起来介绍目前结构钢的主要进展,力图实现材料、工艺、质量和效益相结合,为合理使用和生产结构钢提供较佳途径。这一新的编写特点,使该书与以往的同类书相比,从结构到内容均大不相同,因此从目录安排到内容选择不得不重新开始。由于我们知识和实践的局限性,不可避免地会出现不周之处,敬请有关专家和广大读者指正。

本书共 14 章,分为结构钢综合性问题介绍(前 5 章)和专用钢种特性问题介绍(后 9 章)。各章编写者为:

第 1、8、10 章项程云;第 2、4 章白玉光;第 3 章孙振岩;第 5 章刘德富;第 6 章项程云、顾文俊;第 7 章朱应波;第 9 章许洪新;第 11 章杨培义、杨其萃;第 12 章火树鹏;第 13 章陈政松、项程云;第 14 章李春生。全书由项程云主编,刘德富协编。

本书是在特殊钢学会、《特殊钢丛书》编委会的组织领导下进行的。对特殊钢学会理事长刘嘉禾、秘书长林慧国、原齐齐哈尔钢厂厂长范广举、北满特钢股份公司经理高崇等的大力支持与指导,深表谢意。

作 者

1998.11.7

目 录

1 现代结构钢概述	1
1.1 引言	1
1.2 使用性能和要求性能	1
1.2.1 力学性能	2
1.2.2 工作可靠性	8
1.2.3 工作寿命	11
1.3 成分、组织和性能	18
1.3.1 淬火和低温回火钢	19
1.3.2 淬火和高温回火钢	22
1.3.3 淬火和中温回火钢	25
1.3.4 特殊热处理的双相钢	26
1.3.5 特殊热处理的多相钢	29
1.3.6 马氏体时效钢	32
1.3.7 正火和回火钢	32
1.3.8 非热处理钢	35
1.4 冶金工艺、质量和效益	37
1.4.1 冶炼	38
1.4.2 热加工	43
1.4.3 热处理	46
1.4.4 形变热处理	57
参考文献	60
2 淬透性	64
2.1 引言	64
2.2 淬透性与组织性能的关系	65
2.2.1 淬透性的意义	65
2.2.2 淬透性与组织性能关系	67

2.3	淬透性的测定及表示方法	68
2.3.1	临界直径测定法	68
2.3.2	端淬法	70
2.4	影响淬透性的因素	75
2.4.1	奥氏体化学成分的影响	75
2.4.2	奥氏体晶粒大小的影响	82
2.4.3	奥氏体化温度及时间的影响	82
2.5	淬透性(D_1 值)的几种求法	84
2.5.1	按化学成分计算的方法	84
2.5.2	根据淬透性曲线求 D_1 的方法	87
2.6	用计算求端淬曲线的方法	89
2.6.1	理想临界直径法(Field 法)	90
2.6.2	回归方程计算法	91
2.7	淬透性的应用	94
2.7.1	在设计选材方面的应用	95
2.7.2	截面硬度分布曲线的应用	96
2.7.3	在热处理工艺中的应用	97
	参考文献	98
3	冷脆性	99
3.1	引言	99
3.2	冷脆性的试验评定	100
3.2.1	缺口冲击试验	100
3.2.2	落锤试验	102
3.2.3	断裂韧性试验	103
3.3	影响冷脆性的因素	106
3.3.1	钢的内在因素	106
3.3.2	钢的外在因素	121
3.4	冷脆性的控制	124
3.4.1	冶炼	124
3.4.2	压力加工	126

3.4.3	热处理	128
	参考文献	130
4	回火脆性、热脆性及蓝脆	132
4.1	引言	132
4.2	低温回火脆性	133
4.2.1	低温回火脆性及主要特征	133
4.2.2	低温回火脆性形成机理	135
4.3	高温回火脆性	137
4.3.1	高温回火脆性及主要特征	137
4.3.2	高温回火脆性机理	138
4.4	影响回火脆性的因素	142
4.4.1	化学成分的影响	142
4.4.2	组织因素对回火脆性的影响	144
4.5	避免及减轻回火脆性常用方法	145
4.6	热脆性	146
4.6.1	低熔点共晶体 FeS 造成的脆性	146
4.6.2	低熔点杂质铜造成的脆性	148
4.6.3	第二相引起的热脆性	150
4.6.4	长期高温时效引起的脆性	152
4.7	蓝脆性	156
	参考文献	157
5	焊接性	159
5.1	引言	159
5.2	化学成分对钢的焊接性的影响	160
5.2.1	合金元素对钢的焊接性的影响	160
5.2.2	化学成分对钢的焊接性的综合影响	174
5.3	钢的纯净度对焊接性的影响	180
5.3.1	钢中杂质元素的影响	180
5.3.2	非金属夹杂物的影响	183
5.4	结构因素的影响	186

5.4.1	结构因素对产生延迟裂纹的影响	186
5.4.2	接头形式对焊缝及热影响区冷却速度的影响	189
5.4.3	接头形式及坡口对熔合比的影响	190
5.5	不同钢种的焊接工艺特点	191
5.5.1	热轧及正火钢的焊接工艺特点	191
5.5.2	低碳调质钢的焊接工艺特点	194
5.5.3	中碳调质钢的焊接工艺特点	196
5.5.4	珠光体耐热钢的焊接工艺特点	196
5.5.5	低温用钢的焊接工艺特点	197
5.5.6	低合金耐蚀钢的焊接工艺特点	198
5.5.7	高强度钢的焊接工艺特点	199
	参考文献	200
6	调质钢	201
6.1	引言	201
6.2	化学成分特点	201
6.3	调质钢钢种实践	206
6.4	工艺控制	220
	参考文献	226
7	弹簧钢	227
7.1	引言	227
7.2	成分设计	228
7.2.1	设计弹簧钢化学成分时应考虑的性能因素	228
7.2.2	弹簧钢所含合金元素及其作用	232
7.3	钢种实践	235
7.3.1	各国弹簧钢标准简介	235
7.3.2	国内外弹簧钢的最新动向	242
7.4	工艺实践	248
7.4.1	弹簧钢冶炼技术	248

7.4.2	弹簧钢的浇注工艺	256
7.4.3	弹簧钢钢材的加工技术	258
7.4.4	弹簧钢钢丝的生产技术	260
7.4.5	弹簧钢的热处理工艺	261
7.5	失效分析	264
7.5.1	非金属夹杂物	266
7.5.2	表面脱碳	268
7.5.3	表面缺陷	272
7.5.4	弹性减退	273
	参考文献	273
8	高强度结构钢	277
8.1	引言	277
8.2	低合金中碳结构钢(马氏体强化型)	279
8.3	中合金中碳结构钢(二次沉淀硬化型)	284
8.3.1	HST 型(Cr-Mo-V 型)	284
8.3.2	H 型(Cr-Mo-V-Si 型)	285
8.3.3	ARDE 型(Si-Cu-Mo-V 型)	288
8.4	高合金中碳结构钢	289
8.4.1	Ni-Co 型中碳结构钢(非二次硬化型)	289
8.4.2	Ni-Co-Cr-Mo 型中碳结构钢(二次硬化型)	292
8.5	超低碳马氏体时效钢(时效硬化型)	296
8.5.1	成分特点	296
8.5.2	钢的化学成分、性能与应用	299
8.5.3	生产工艺特点	303
	参考文献	311
9	冷锻钢	313
9.1	引言	313
9.2	一般冷锻钢	314
9.3	低碳低合金高强度冷锻钢	316

9.4	热轧双相冷锻钢	322
9.4.1	热轧双相冷锻钢的成分设计	322
9.4.2	影响双相钢力学及工艺性能的因素	328
9.4.3	热轧双相冷锻钢的生产工艺	332
	参考文献	334
10	抗硫化氢结构钢	335
10.1	引言	335
10.2	在硫化氢介质中钢的破坏行为	335
10.3	钢的组织 and 化学成分的优化	341
10.3.1	钢的组织优化	341
10.3.2	钢的化学成分优化	345
10.4	调质型钢的钢种实践	349
10.5	正火型钢的钢种实践	356
10.6	工艺控制	359
	参考文献	360
11	渗碳钢	363
11.1	引言	363
11.2	成分特点	363
11.2.1	心部组织和性能	364
11.2.2	渗层组织和性能	364
11.2.3	化学成分设计	365
11.3	钢种实践	374
11.3.1	国内外常用渗碳钢系列简介	374
11.3.2	钢种应用(选材)	380
11.3.3	失效分析	382
11.3.4	新材料的发展	383
11.4	工艺控制	385
11.4.1	窄淬透性带控制	385
11.4.2	低氧含量控制	385
	参考文献	386

12 渗氮钢	387
12.1 引言	387
12.2 成分设计	390
12.3 钢种实践	395
12.3.1 含铝渗氮钢	395
12.3.2 不含铝渗氮钢	395
12.3.3 快速渗氮钢	397
12.3.4 沉淀硬化型渗氮钢	398
12.3.5 易切削渗氮钢	398
12.4 工艺实践	401
12.4.1 调质	402
12.4.2 消除应力退火	403
12.4.3 渗氮	403
参考文献	404
13 低淬透性钢	406
13.1 引言	406
13.2 化学成分特点	406
13.3 钢种实践	410
13.4 工艺控制	416
参考文献	419
14 易切削钢	420
14.1 引言	420
14.1.1 易切削钢的发展	420
14.1.2 易切削钢分类与用途	421
14.2 钢的切削性能及影响因素	423
14.2.1 评定切削性能的标准	423
14.2.2 影响切削性能的因素	425
14.3 钢的易切削机理	430
14.3.1 有利夹杂物的应力集中作用	430
14.3.2 有利夹杂物对裂纹扩展的影响	431

14.3.3	有利夹杂物的减摩作用	432
14.3.4	覆盖膜的形成	432
14.3.5	对超硬质点的包裹作用	433
14.4	各种易切削钢及性能特点	433
14.4.1	硫易切削结构钢	433
14.4.2	铅易切削结构钢	440
14.4.3	钙易切削结构钢	444
14.4.4	硒和碲易切削结构钢	450
14.4.5	自动机用钢	453
14.5	易切钢的冶炼与轧制	455
14.5.1	易切钢的冶炼	455
14.5.2	易切钢的轧制	457
	参考文献	459

1 现代结构钢概述

1.1 引言

材料是人类文明的基础,而金属材料则是其中最重要的组成部分,它涉及所有现代工业部门,如航空航天、海洋、原子能、能源、交通和建筑等。这些部门的日新月异的技术进步,要求相应的金属材料同步发展,甚至先行发展。

结构钢作为量大面广和品种繁多的一类金属材料,与现代工业的发展关系密切。合金钢的工业应用就是从结构钢开始的(例如 1870 年用铬结构钢制作密西西比河上跨度为 158.5m 的拱型桁架大桥等);而现代高速飞机的发展,宇航火箭、原子能技术的开发利用,海洋的开发,高效机械装备的应用等,都与结构钢的应用相关。合金的品种,在 140 多年来,以惊人速度增长⁽¹⁾: 1850 年为 50 个,1900 年为 1000 个,1950 年为 25000 个,2000 年预计能到 250000 个。如此庞大的品种增殖,显然是用发明电灯丝式的传统经验研究方法(作过 3 万次材料试验!)所不可能实现的。由于金属学科学的发展和相应材料科学与工程的形成,使人们从经验性研究阶段进入了科学性研究阶段,这才使品种的迅速发展成为现实。一种使构件行为(使用性能)、要求性能、组织结构、工艺和装备五个环节统一起来的系统工程科学研究方法出现了⁽²⁾,从而避免了盲目性和片面性,大大缩短了新材料的研究与应用周期,促进了新材料的蓬勃发展,特别是近 50 年来,几乎是日新月异了。

1.2 使用性能和要求性能

工件的使用性能决定了其要求的条件——质量要求标准或技术条件。对结构件来说,最重要的质量要求是钢的力学性能,而工作的可靠性和寿命则是其最高的质量判定依据。

1.2.1 力学性能

力学性能包括强度、塑性和韧性等；其中强度是第一位的，它是工件设计和选材的主要依据，可以通过工作应力下的允许残留塑性变形量而计算确定；而塑性和韧性目前仍处于经验确定阶段。对于大多数机器零件，允许的残留塑性变形量为小于 0.2%，故其允许的上限应力值则为该变形量下的屈服极限，以 $\sigma_{0.2}$ 表示。对于弹簧及弹性部件，允许的残留变形量为小于 0.001% ~ 0.002%，故其允许的上限应力值以 $\sigma_{0.001 \sim 0.002}$ 表示。显然，当工件要求不超过某一定弹性变形量时，那么此弹性变形量下的应力则为其强度判据。

随着高效机械装备的不断发展，设计者在不断提高其允许工作应力，以提高效益。因此，对结构材料的强度要求也在不断提高，而相应强度储备却在不断降低，见表 1-1。说明效益在技术进步中不断提高。

表 1-1 构件材料强度不断提高后的强度储备变化⁽¹⁾

年份	机器或构件中的 最大应力/MPa	达到的强度 /MPa	强度储备
1800	49	294	6
1850	98	491	5
1900	196	980	5
1950	980	2453	2.5
2000 ⁽¹⁾	2453	4910	2.0
2050 ⁽¹⁾	9810	9810	1.0

① 预测。

对于结构钢来说，目前的强度水平如何？根据有关数据典型性地汇总列入表 1-2 中。可见随材料成分不同，强度变化很大；而处理状态不同，强度变化也较大。如果把形变热处理或超细晶粒热处理等方法的强度贡献考虑进去的话，目前能达到 σ_b 3000MPa 和 $\sigma_{0.2}$ 2500MPa 这样的强度水平（指中碳合金钢）。但是，如果以理论强度（0.1E，约为 20000MPa）来衡量的话，

表 1-2 结构钢的强度水平现状

材 料	状 态	力学性能	
		σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa
低碳钢 (C<0.2%)	热轧	400	250
低碳低合金钢: 16Г2АФ	正火	600	400
	淬火+ 高温回火	750	580
09Г2ФБ	控轧	680	600
06MnMoNb	控轧	670	560
15CrMnMoVB	正火+ 回火	750	650
中碳钢: 40, 40Г	淬火+ 回火	800	600
中碳合金钢: 40XH, 30ХГСА	淬火+ 高温回火	1300	1000
	淬火+ 低温回火	1800	1500
45XHMΦ(Л5)	淬火+ 低温回火	2500	1800
40X5MΦ	淬火+ 高温回火	2200	2000
30H12K10M6	淬火+ 高温回火	2450	2250
超低碳马氏体时效钢:			
00H18K9M5T	淬火+ 高温时效	2100	1900
00H18K12M4T2	淬火+ 高温时效	2400	2350
00H13K15M10	淬火+ 高温时效	2800	2700

低碳低合金钢强度最高不到其 4%，中碳合金钢强度最高不到其 13%，而马氏体时效钢强度最高也不到 15%。因此提高强度的潜力是巨大的。

提高钢的强度的方法主要有^[3~6]:

(1) 位错强化(加工硬化), 其强度贡献($\Delta\sigma_{\text{位错}}$)为

$$\Delta\sigma_{\text{位错}} = aGb\sqrt{\rho} \quad (1-1)$$

式中 ρ ——位错密度, 在铁素体中约为 $10^7 \sim 10^8 \text{cm}^{-2}$, 在马氏体中约为 $10^{10} \sim 10^{12} \text{cm}^{-2}$;

a ——常数;

G ——剪切模量;

b ——布氏矢量。

位错密度与钢的显微组织、变形温度和变形量密切相关, 人工方法可使其提高到 $5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 。

(2) 固溶强化, 其强度贡献($\Delta\sigma_{\text{固溶}}$)为