

特 殊 钢 丛 书

# 低合金高强度钢

王祖滨 东 涛 等编著

原子能出版社

TG142.7  
W50

414241

特殊钢丛书

# 低合金高强度钢

王祖滨 东涛 等编著

刘嘉禾 主审



00414241

原子能出版社

北京

## 内 容 简 介

《低合金高强度钢》是由中国金属学会特殊钢专业学会组织编写的《特殊钢丛书》之一。本书汇总了建国以来我国低合金高强度钢的开发成果，同时集中体现了改革开放十余年来与国际并轨的发展水平。从本书可以了解钢类的沿革、现行标准状况、合金设计及强韧化基本原理，并按焊接高强度钢、低合金冲压钢、低合金耐腐蚀钢、低合金耐磨钢、混凝土结构用低合金钢筋、低合金钢轨等几个主要类别，全面介绍了合金元素的影响，钢的冶炼、锻轧、热处理工艺，钢的冷热加工适应性，腐蚀、焊接特点，以及从国内各大钢铁公司收集的主要钢号的生产和使用数据。书后列有国内外低合金高强度钢钢号对照表。本书可作冶金、机械、核电、交通运输、石油化工、建筑和国防等工业部门及海洋开发、矿山采掘等领域的生产、设计、科研等工程技术人员合理选择和正确使用钢材的依据，也可供大专院校材料专业师生参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

低合金高强度钢/王祖滨、东涛等编著. — 北京: 原子能出版社, 1996.8

(特殊钢丛书)

ISBN 7-5022-1538-7

I. 低… II. ①王… ②东… III. 低合金钢: 高强度钢—  
金属加工—科技成果—中国 IV. TG142.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 12487 号

### 低合金高强度钢

王祖滨、东涛等编著

©原子能出版社, 1996

责任编辑: 赵守林

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

北京昌平百善印刷厂印刷 新华书店经销

开本: 850×1168mm  $1/32$  印张 11 字数 270 千字

1996 年 9 月北京第 1 版 1996 年 9 月北京第 1 次印刷

印数: 1-2000

定价: 26.00 元

# 《特殊钢丛书》编辑工作委员会

(按姓氏笔划为序)

主任委员	刘嘉禾	杨 栋	
委 员	马绍弥	王建英	王洪发
	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，从经济建设、国防建设到日常生活用品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，中共中央和国务院作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。

本套丛书将分卷撰写，陆续出版。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参加编写这套《特殊钢丛书》，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

低合金高强度钢的发展已有 100 多年历史。本世纪 50 年代以后逐渐形成钢类。近 20 年来,由于质高价廉材料需求的牵引和钢铁冶金技术的进步,低合金高强度钢得到了很大的发展。作为一类量大面广的工程结构材料,它在世界各国的钢铁生产和使用中有着举足轻重的作用。

我国低合金高强度钢的科研和生产起始于 1957 年。到 1993 年,低合金钢的年产量已经达到 1300 万吨以上,占全国钢总产量的 15.2%。它由于合金含量低,加工工艺较简单,品种规格全,综合性能好,因此使用范围越来越广,在某些用途方面逐步取代碳素钢和高合金钢。目前,它的使用遍及建筑、铁路、汽车、船舶、石油、化工、电站、核能及工程机械等国民经济和国防建设各个工业部门。1985 年、1990 年及 1995 年三次国际低合金高强度钢会议在我国召开,说明中国在发展低合金高强度钢方面取得的成就已引起世界的重视。

虽然我国低合金高强度钢研究、生产和应用在将近 40 年的发展过程中取得了很大成绩,但是除了曾经出版过一些介绍低合金高强度钢的手册之类书籍外,我国至今还没有出版过一本系统介绍基础理论知识和生产实践的专著。《低合金高强度钢》是由中国金属学会特殊钢专业学会组织编写的《特殊钢丛书》之一,是一本全面介绍我国低合金高强度钢的发展水平和专业技术知识的实用参考书。本书的出版意在填补这方面空白,使低合金高强度钢生产和使用部门的工程技术人员和科研人员能全面了解低合金高强度钢国内外发展趋势,更好地推动它的发展。

本书共分 8 章。前 2 章介绍基础知识和工艺性能特点;后面 6 章系统地介绍了各种低合金高强度钢。由于低合金高强度钢包括的钢类世界上还没有统一的规定,本书仍按我国习惯处理。第 1 章由王祖滨执笔;第 2 章由东涛执笔;第 3 章由徐建国执笔;

第4章由钟定忠和凤佩华执笔；第5章由陈贵杰执笔；第6章由谢仕柜执笔；第7章由何成杰执笔；第8章由朱桂兰和赵坚执笔。本书由特殊钢学会刘嘉禾理事长担任主审。全书最后由王祖滨、东涛校阅并进行了修改和补充。

中国金属学会前副秘书长刘福魁教授对本书进行了审阅并给予了指导，全国低合金钢协调组贺永康、兰德年、刘志波等理事提出了宝贵意见。鞍山钢铁公司和武汉钢铁公司对本书的出版给予大力支持，特殊钢学会秘书处和盛筱仁、张彦华等同志为本书的编辑出版给予了帮助，对此一并表示感谢！

由于作者水平所限，加之编写持续时间较长，及其它因素影响，书中难免会有错误和不当之处，欢迎读者批评指正。同时衷心希望低合金高强度钢生产和使用部门的同行们与作者联系，共同切磋低合金高强度钢发展的理论和实践问题，以便搞好此书的修订再版工作。

**编著者**

1996年1月于钢铁研究总院

# 目 录

## 前 言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 低合金高强度钢的定义 .....	1
1.2 低合金高强度钢的发展 .....	4
1.2.1 国外发展概况 .....	4
1.2.2 国内发展概况 .....	9
1.3 低合金高强度钢的标准 .....	10
1.3.1 中国标准 .....	10
1.3.2 ISO 标准 .....	17
1.3.3 美国标准 .....	17
1.3.4 日本标准 .....	23
1.4 低合金高强度钢的分类 .....	29
参考文献 .....	30
<b>第 2 章 性能和组织特征</b> .....	31
2.1 概述 .....	31
2.2 合金元素的作用及钢的合金设计 .....	33
2.2.1 合金元素的作用 .....	33
2.2.2 低合金高强度钢中的主要强化机制 .....	35
2.2.3 钢的合金设计 .....	38
2.3 对生产工艺的要求 .....	45
2.3.1 现代低合金高强度钢的生产技术特点 .....	45
2.3.2 冶炼 .....	46
2.3.3 钢包冶金 (精炼) .....	46
2.3.4 连铸 .....	48
2.3.5 夹杂物的形态控制 .....	48
2.3.6 控制轧制 .....	49
2.3.7 控制冷却 .....	49



2.3.8	热处理	50
2.4	组织类型及其特征	50
2.4.1	铁素体-珠光体钢	50
2.4.2	低碳贝氏体钢	52
2.4.3	针状铁素体钢	54
2.4.4	超低碳贝氏体钢	57
2.4.5	低碳马氏体钢	59
2.4.6	双相钢	59
2.5	钢的性能要求	60
2.5.1	强度	60
2.5.2	韧度	62
2.5.3	成形性	64
2.5.4	焊接性	67
2.5.5	耐腐蚀性	72
2.5.6	其它特殊性能要求	74
	参考文献	75
<b>第3章</b>	<b>焊接高强度钢</b>	<b>76</b>
3.1	概述	76
3.2	焊接高强度钢的性能要求	81
3.2.1	强度	81
3.2.2	韧性	86
3.2.3	塑性	90
3.2.4	焊接性	91
3.3	焊接高强度钢的生产	101
3.3.1	焊接高强度钢的基本成分系列	101
3.3.2	合金元素的选用及钢的组织	101
3.3.3	焊接高强度钢的生产工艺概要	108
3.4	焊接高强度钢钢种简介	112
3.4.1	一般结构用钢	112
3.4.2	桥梁用钢	113

3.4.3	压力容器用钢	116
3.4.4	锅炉用钢	121
3.4.5	造船和海上采油平台用钢	132
3.4.6	工程机械用钢	135
3.4.7	建筑用钢	143
3.4.8	油气输送管线用钢	149
3.4.9	车辆用钢	157
	参考文献	159
<b>第4章</b>	<b>低合金冲压钢</b>	<b>162</b>
4.1	概述	162
4.2	板成形概念	163
4.2.1	由拉伸试验测定的基本成形参数	164
4.2.2	由冲压模拟试验测定的成形参数	166
4.3	高强度热轧钢板	167
4.3.1	性能要求	167
4.3.2	合金设计特点	168
4.3.3	生产工艺特点	169
4.3.4	典型钢种介绍	172
4.3.5	应用与效益	179
4.4	高强度冷轧钢板	183
4.4.1	性能要求	183
4.4.2	合金设计特点	183
4.4.3	生产工艺特点	187
4.4.4	典型钢号介绍	190
	参考文献	193
<b>第5章</b>	<b>低合金耐腐蚀钢</b>	<b>195</b>
5.1	概述	195
5.2	低合金耐大气腐蚀钢	196
5.2.1	大气环境、腐蚀及腐蚀种类	196
5.2.2	耐大气腐蚀钢的发展历史	198

5.2.3	耐大气腐蚀钢的成分设计特点 .....	200
5.2.4	耐大气腐蚀钢的生产 .....	209
5.2.5	耐大气腐蚀钢的使用 .....	210
5.2.6	耐大气腐蚀钢的典型钢号 .....	214
5.3	低合金耐海水腐蚀钢 .....	220
5.3.1	耐海水腐蚀钢的发展历史 .....	221
5.3.2	耐海水腐蚀钢的性能 .....	223
5.3.3	耐海水腐蚀钢的成分设计特点 .....	225
5.3.4	耐海水腐蚀钢的生产 .....	228
5.3.5	耐海水腐蚀钢的典型钢号 .....	228
	参考文献 .....	233
<b>第 6 章</b>	<b>低合金耐磨钢</b> .....	<b>234</b>
6.1	概述 .....	234
6.2	磨损机制及对耐磨钢的性能要求 .....	236
6.3	耐磨钢的合金成分设计 .....	237
6.4	耐磨钢的生产 .....	240
6.4.1	板、管、型材 .....	240
6.4.2	丝、绳 .....	241
6.4.3	铸件 .....	241
6.5	典型钢种介绍 .....	241
6.5.1	L203 履带板用钢 40Mn2Si .....	241
6.5.2	大型推土机刀刃用钢 31Si2CrMoB .....	242
6.5.3	机引犁犁铧用型钢 65SiMnRE, 65Mn .....	244
6.5.4	耐磨耐蚀轻轨钢 36CuPCr, 55P V .....	245
6.5.5	耐磨重轨钢 U74SiMnV .....	246
6.5.6	矿用耐磨钢 NM150K, NM360 .....	247
6.5.7	矿用液压支架用钢 YZ350K .....	249
6.5.8	矿用支撑钢——U型钢 .....	250
6.5.9	高强度圆环链用钢 25MnVK, 35SiMnVK .....	251
6.5.10	抽油杆用钢 40Mn2Nb .....	253

6.5.11	耐磨筛网用低碳 Si-Nb 双相钢	254
6.5.12	低合金高强度钢丝绳用钢 75MnNb, 95MnNb	254
6.5.13	耐磨铸钢 90Cr6MoRE	255
6.5.14	大型和高水头电站压力钢管用钢	256
6.5.15	槽钢和刮板钢 24Mn2K	256
6.5.16	矿柱用 U, Π 型钢 30MnK, 34SiMnK	258
	参考文献	258
<b>第 7 章 混凝土结构用低合金钢筋(钢丝)</b>		<b>259</b>
7.1	概述	259
7.2	低合金钢筋分类	260
7.3	钢筋的性能要求	261
7.3.1	强度	262
7.3.2	塑性	262
7.3.3	焊接性	263
7.3.4	疲劳性能	264
7.3.5	低温性能	266
7.3.6	应力松弛性能	267
7.3.7	与混凝土之间的粘结性能	267
7.4	低合金钢筋的发展和钢种系列	268
7.5	钢筋的生产工艺及其特点	272
7.5.1	钢筋的调质热处理	272
7.5.2	钢筋的轧后余热处理	273
7.5.3	钢筋的冷加工	275
7.6	低合金钢筋的品种、性能和应用	276
7.6.1	热轧钢筋	277
7.6.2	余热处理Ⅲ级钢筋	283
7.6.3	预应力混凝土用热处理钢筋	283
7.6.4	预应力混凝土用钢丝、钢绞线	285
7.6.5	低合金(中强)钢丝和冷拔低碳钢丝	287
7.6.6	冷轧带肋钢筋	288

<b>第 8 章 低合金钢轨钢</b> .....	290
8.1 概述 .....	290
8.2 低合金钢轨的性能要求 .....	290
8.2.1 耐磨性 .....	291
8.2.2 耐压溃性 .....	291
8.2.3 抗脆断性 .....	291
8.2.4 抗疲劳性 .....	293
8.2.5 焊接性 .....	293
8.3 钢轨钢的强化 .....	293
8.3.1 钢轨钢的合金化 .....	294
8.3.2 钢轨钢的热处理 .....	294
8.4 钢轨钢的生产工艺特点 .....	297
8.5 低合金钢轨钢的典型钢种 .....	298
参考文献 .....	301
<b>附录</b> .....	302
<b>附录 1</b> 美国、加拿大低合金高强度钢种表 .....	302
<b>附录 2</b> 日本低合金高强度钢种表 .....	311
<b>附录 3</b> 前苏联低合金高强度钢种表 .....	313
<b>附录 4</b> 我国耐大气腐蚀钢种表 .....	315
<b>附录 5</b> 我国耐海水腐蚀钢种表 .....	319
<b>附录 6</b> 国外耐大气腐蚀钢种表 .....	321
<b>附录 7</b> 国外耐海水腐蚀钢种表 .....	323

# 第1章 绪论

## 1.1 低合金高强度钢的定义

低合金高强度钢是在碳素钢基础上，加入少量合金元素，提高强度，并改善其使用性能而发展起来的一类工程结构用钢。低合金高强度钢的最早钢种出现在19世纪70年代。直到本世纪50年代以后才逐渐形成钢类，比较大量地生产，并获得广泛的应用。

低合金高强度钢作为一类量大面广的工程结构材料，至今还没有共同认可的名称和严格的定义。

在美国，这一类材料叫高强度低合金钢（High Strength Low Alloy Steels 或简称HSLA Steels）。在日本叫高强度钢（高张力钢）。在前苏联曾叫低合金建筑钢（Низколегированные Строительные Стали）。1988年苏联国家标准把这一类材料取名高强度钢（Стали Повышенной Прочности）。在我国，这一类钢的名称也有过几次变化。50年代末，钢种发展初期，曾叫低合金高强度钢。60年代中期，大量推广时，曾易名为普通低合金钢。70年代以后，为了强调这类钢的优质方面，以区别于普通碳素钢，因而去掉了“普通”二字，叫做低合金结构钢，简称低合金钢。

由于名称不同，各国低合金高强度钢所包含的内容也各异。这给统计带来相当大的困难。例如，美、日的这一类钢主要包括桥梁、船舶、容器、建筑、车辆等方面用的可焊接结构钢。而在前苏联的低合金建筑钢标准中，除上述用途钢种外，还包括低合金钢筋钢。在我国，钢种发展初期，也只包括桥梁、船舶、容器、建筑等方面使用的钢种和低合金钢筋钢，以后在推广过程中，范围越

来越大，纳入了矿山机械用耐磨低合金钢和铁路用低合金钢轨钢。因此，在使用各国低合金高强度钢统计数字以及我国低合金高强度钢发展各历史时期的统计数字时应注意其可比性。

关于低合金高强度钢的定义，各国的专门机构和科学工作者的见解也不尽相同。

美国钢铁学会 (AISI) 曾对这类钢给了如下的定义：“高强度低合金钢是一种专门类别的钢，在这类钢中，由于除碳而外，有意地加入一种或多种合金元素，从而使力学性能提高，并且在大多数情况下，具有良好的抗腐蚀性能。这类钢通常以轧制状态，或根据焊接要求以退火、正火或消除应力状态，一般地以保证最低力学性能来供应。”

日本的《高强度钢低温用钢的焊接》一书中对高强度钢有如下的叙述：“高强度钢是考虑焊接性的抗拉强度在 490MPa (50kgf/mm<sup>2</sup>) 以上的低碳低合金结构用钢。”

И.М.Лейкин 和 В.Г.Чернашкин 认为，将钢分为低合金钢与否，不仅应当依据钢的合金含量（合金元素达 4% ~ 4.5%），而且还应当根据钢的用途及物理性能来决定。例如，应当将在热轧状态下具有不低于 325MPa(33kgf/mm<sup>2</sup>) 的屈服强度的钢划分为低合金高强度建筑钢。

我国的《材料科学和工程百科全书》对高强度低合金钢的介绍如下：“高强度低合金钢是屈服强度大于 275MPa 的钢，加入合金元素的目的在于提供特定的所需的综合性能，例如强度、韧性、成形性、焊接性和耐大气腐蚀性。高强度低合金钢是传统的，以型、板、棒材，用于铆接、栓接或焊接的桥梁和建筑结构材料的低碳软钢的优良的替用品”。

我们认为，上述定义或介绍都各有一定的侧重面，但是从总体上看应更加明确。低合金高强度钢的定义中应该对合金元素含量、强度（屈服强度或抗拉强度）的起点，具备的性能特点和主要的应用方面有比较明确具体的规定。凡是合金元素总量在 5% 以下，屈服强度在 275MPa 以上，具有良好的焊接性、耐蚀性、

耐磨性和成形性，通常以板、带、型、管等钢材形式直接供使用的结构钢种可称之为低合金高强度钢。

众所周知，碳素钢和合金钢的区分是比较明确的。

碳素钢是指含铁、碳和为了生产技术所需的正常数量的硅（达 0.5%）和锰（达 0.8%）以及不可避免的磷和硫等杂质元素的钢。合金钢是指为了获得一定的性能组合而加入某种特殊的元素或元素组合的钢，其中也包括含硅量在 0.5% 以上或者含锰量在 0.8% 以上的钢。

绝大部分熔炼的碳素钢或多或少地都含有合金元素。但是这些合金元素不是故意加入的，而且量都不高，一般在 0.5% 以下。这些合金元素的来源有二：一是废钢中带来的；二是用共生矿冶炼的生铁带来的。废钢带来的合金元素一般量较少，例如镍、铬、铜、钼等元素，都在 0.3% 以下。但是共生矿带来的合金元素有时多一些。例如用有些矿冶炼的生铁为原料的工厂所熔炼的碳素钢中含铜量达到 0.5%。

但是，在低合金钢与碳素钢、低合金钢与合金钢之间，有时很难作出明确的区分。

有的作者建议用下列的方式来划分：主要合金元素在 2% 以下，或者各种合金元素的总量达 3% ~ 5% 的钢叫低合金钢；当主要合金元素的含量达 5% 和合金元素的总量达 8% ~ 10% 时，叫中合金钢；当合金元素的含量更高时，称为高合金钢。

作者认为，根据低合金高强度钢的发展，虽然一般用途的钢种中的合金元素含量都不太高（在 2% 以下），但是在一些特殊用途和特定性能的钢种，例如调质的高强度高韧性钢中，元素的含量还要高些，达到 3% ~ 5% 左右。因此，把元素含量的上限定到 5% 还是适宜的。

近 30 年来，一种微合金钢得到了迅猛发展。Noren 曾经给出微合金钢的如下定义：“微合金钢的基本化学成分同于未合金化的结构用钢，在很多情况下它是一种含锰合金钢或低合金钢，其中添加了少量合金元素……，这种元素对钢的一种或几种性



能具有很强的或者是显著的影响，而其添加的量比钢中传统意义的合金元素含量小1~2个数量级。如铝处理钢就是一例，其中铝的作用无疑是微合金元素，这种元素的其它例子是钒、钛、铌和硼”。由此可见，微合金钢实际是属低合金高强度钢范畴。

关于强度，在不同结构设计中采用不同的设计准则，但是大部分结构设计采用屈服强度。有的作者认为，屈服强度比普通碳素软钢高50%以上的才叫高强度钢，因为这样才能发挥高强度钢的优越性。普通碳素结构钢的屈服强度在235MPa(24kgf/mm<sup>2</sup>)左右，那么高强度钢的下限值应为355MPa(36kgf/mm<sup>2</sup>)。但是，从综合性能考虑，有些结构，特别是一些轻型薄壁结构中，为了确保成形性、耐腐蚀性和焊接性，屈服强度不宜太高，比235MPa高一个档次即能带来明显的效益。因此，把低合金高强度钢的屈服强度下限值定为275MPa(28kgf/mm<sup>2</sup>)是适宜的。

关于供货状态，定义中不宜加以限制，应该允许采用现代冶金工艺的最新发展，例如调质、控制轧制和控制冷却、连续退火等工艺来充分发挥低合金钢的潜力，得到更好的综合性能。

在应用方面，低合金高强度钢可用于各种铆接、栓接和焊接工程结构。但是应指出的是它不经过机械切削加工，而以钢厂供货状态直接使用，以区别于机械制造用的结构钢。

## 1.2 低合金高强度钢的发展

### 1.2.1 国外发展概况

低合金高强度钢的发展已有100多年历史。1870年美国圣路易城附近一座横跨密西西比河的桥梁的拱型桁架(跨度158.5m)采用了含铬1.5%~2.0%的低合金钢。这种钢的抗拉强度大约为685MPa(70kgf/mm<sup>2</sup>)，弹性极限大约为410MPa(42kgf/mm<sup>2</sup>)。1895年俄国曾用3.5%镍钢建造了“鹰”号驱逐舰。该钢的抗拉强度为590~635MPa(60~65kgf/mm<sup>2</sup>)，屈服强度在355MPa(36kgf/mm<sup>2</sup>)以上，伸长率大于18%。稍后，这类抗拉强度为685MPa(70kgf/mm<sup>2</sup>)的镍钢用于建造大跨度桥梁。