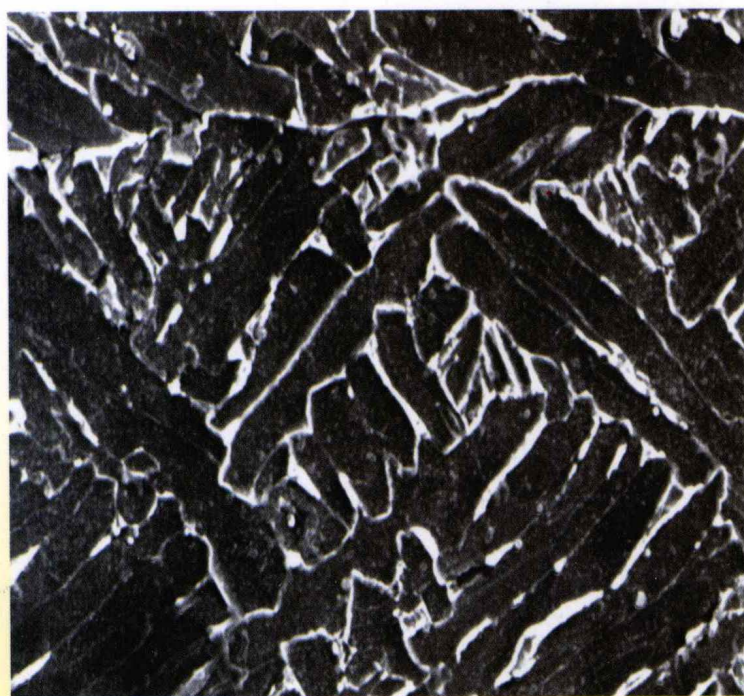


高性能低碳贝氏体钢

——成分、工艺、组织、性能与应用

贺信莱 尚成嘉 杨善武 王学敏 郭 晖 编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

本研究项目获

2006 年冶金科学技术奖一等奖

2006 年辽宁省科学技术奖一等奖

2007 年教育部科学技术进步奖一等奖

高性能低碳贝氏体钢

——成分、工艺、组织、性能与应用

贺信莱 尚成嘉 杨善武 编著
王学敏 郭 晖

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2008

内 容 提 要

新一代低碳贝氏体钢(包括针状铁素体钢)是近年来国内外新发展起来的并与目前大量使用的铁素体加珠光体钢及传统回火马氏体调质钢并列的一大类新钢种。它具有高强度、低成本、节能、环保及优良的可焊性等特点,已被广泛使用在国民经济各重要工业领域,代表了现代高性能钢的发展方向。

本书较全面地阐述了这类新钢系成分设计,物理冶金原理,冶炼与轧制工艺,组织与性能控制方法,钢种的实物性能、可焊性、热稳定性、耐腐蚀性等内容,并介绍了其在几个典型工业领域的应用现状。

本书可供研究院所、冶金企业从事材料研究的科技人员、工艺制定人员阅读,尤其是对使用高性能钢的各重要工业领域的设计及科研人员具有重要参考价值。同时,本书也可作为高校冶金材料专业教学用书及培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

高性能低碳贝氏体钢:成分、工艺、组织、性能与应用/
贺信莱等编著. —北京:冶金工业出版社, 2008. 1

ISBN 978-7-5024-4411-2

I. 高… II. 贺… III. 贝氏体—低碳钢 IV. TF761

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 187484 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 张 卫 王雪涛 美术编辑 李 心 版式设计 张 青

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4411-2

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2008 年 1 月第 1 版, 2008 年 1 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 17.5 印张; 340 千字; 267 页; 1-3000 册

56.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

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

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
电子背散射衍射技术及其应用	杨 平	59.00
材料的晶体结构原理	毛卫民	26.00
材料科学基础	陈立佳	20.00
钒钛材料	杨绍利 等	35.00
不锈钢的金属学问题(第2版)	肖纪美	58.00
动力与能源用高温结构材料		
——第十一届中国高温合金年会论文集	中国金属学会高温材料分会	149.00
有序金属间化合物结构材料物理金属学基础	陈国良(院士) 等	28.00
材料的结构	余永宁 毛卫民	49.00
泡沫金属设计指南	刘培生 等译	25.00
多孔材料检测方法	刘培生 马晓明	45.00
金属材料的海洋腐蚀与防护	夏兰廷 等	29.00
超细晶钢——钢的组织细化理论与控制技术	翁宇庆 等	188.00
功能陶瓷显微结构、性能与制备技术	殷庆瑞 祝炳和	58.00
超强永磁体——稀土铁系永磁材料(第2版)	周寿增 董清飞	56.00
材料评价的分析电子显微方法	[日]进藤大辅 及川哲夫	
	刘安生 译	38.00
材料评价的高分辨电子显微方法	[日]进藤大辅 平贺贤二	
	刘安生 译	68.00
耐磨高锰钢	张增志	45.00
材料组织结构转变原理	刘宗昌 等	32.00
金属材料工程概论	刘宗昌 等	26.00
材料腐蚀与保护	孙秋霞	25.00
铝阳极氧化膜电解着色及其功能膜的应用	[日]川合 慧 著	
	朱祖芳 译	20.00
合金相与相变	肖纪美 主编	37.00
薄膜材料制备原理技术及应用(第2版)	唐伟忠	28.00
金属材料学	吴承建	32.00
2004 年材料科学与工程新进展	中国材料研究学会	238.00
现代材料表面技术科学	戴达煌	99.00
材料加工新技术与新工艺	谢建新 等	26.00
Ni-Ti 形状记忆合金在生物医学领域的应用	杨大智 等	33.00
金属固态相变教程	刘宗昌	30.00
新材料概论	谭 毅 李敬锋	89.00
二元合金状态图集	[日]长崎诚三 平林 真	
	刘安生 译	38.00

前 言

钢铁材料使用已上千年，但长期以来，人们主要使用的是铁素体加珠光体钢，这种钢强度较低，钢中碳含量较高，组织类型比较简单。国内外大量的研究表明，在这类钢中，即使加入一定量合金元素，或采用了像应变诱导相变等使铁素体晶粒超细化技术，若在保证钢材强度、塑性、韧性、可加工性等综合性能，其实际可以使用的屈服强度（特别是对大尺寸中厚钢板）最高也只能在 500MPa 左右。当需要更高强度级别的钢材时，传统的办法只能是使用回火马氏体调质钢，这类钢中需要加入较高的合金量以保证淬透性，造成钢种的成本大幅度增加，贵重合金资源的大量消耗，同时生产过程长，工艺设备投入增多，能耗明显加大。钢种经调质处理后虽然强度可以达到 500~1000MPa，综合力学性能也可适当调整，但钢种的焊接性能较差。为了解决既要高强韧性和高可焊性，又要满足节约资源，降低成本和节能环保等要求，迫切需要对钢种的基体组织本身进行改造，发展出新一代钢铁材料。

近年来国内外均在大力发展以低碳贝氏体为基体的新钢种，这类钢中碳含量大幅下降（常用碳含量在 0.05% 左右），它在常用的冷速冷却时，不会发生铁素体加珠光体相变，生成的组织是具有较高位错密度的各类中温转变产物。由于组织中不出现脆性的渗碳体，因此钢种在具有高强度的同时，塑性和韧性极佳，特别是由于钢中碳含量很低，它的焊接性能很好。这类钢种可以直接采用控轧控冷工艺生产，生产工艺比调质钢大大简化，能耗明显下降，因此说这类新钢种代表了大量使用的高强韧低成本焊接结构钢的发展方向。但是由于这类钢种的发展时间较晚，钢种的强韧化及组织控制、组织细化等问题并未很好解决，对这类新钢种的发展与使用造成一定的困难，钢种的系列化、钢种的生产控制技术及新钢种的品种、使用范围也有待全面扩展。

我国国民经济正在快速发展，随着装备制造业全面发展，赶超国际先进水平，在煤矿采挖设备、各类工程机械、大型桥梁、车辆、油气管线、船舶、

海上采油平台、港口机械等领域都对大量使用的钢铁材料提出了高强度、高韧性、易焊接、长寿命、低成本和节能、环保的要求，迫切需要屈服强度为 500 ~ 1000MPa 级、具有优良综合性能及高可焊性的新一代系列钢种。尽管我国钢产量已居世界首位，但长期以来大量使用的低合金钢主要仍是屈服强度为 350MPa 的 16Mn 类型钢种，不能满足工业现代化的迫切需要。

为了适应国民经济发展的需要，赶上和超越国际钢铁强国的水平，我国进行了十多年比较系统的研究与开发工作。特别是在国家“973”课题支持下，从基础理论研究出发，提出了使低碳贝氏体组织高强韧化和超细化的理论原理，发明了有自主知识产权的弛豫-析出-控制相变（RPC）专利工艺技术。在国家“十五”“863”项目的推动下，这种理论和专利技术在大型钢铁企业实现了产业化，形成了我国具有优良综合性能及很高热稳定性的，以超细低碳贝氏体组织为基体的高强度、低成本、节能型新钢种系列。目前，该系列钢种已在我国主要冶金企业的不同生产工艺条件下，采用控轧控冷工艺大批量生产，取消了高耗能的调质工艺，合金用量大幅度下降，性能达到了合金含量高的国内外调质钢实物水平。新钢系列已发展到有 8 个强度级别，近 20 个牌号，产量已超过 40 万 t，大批量在重要工程领域中应用，使我国高性能焊接结构钢的研究与生产水平进入国际前列。

例如，目前大批量生产 600 ~ 800MPa 级新一代钢已用于我国几千台煤矿液压支架制造，使矿用液压支架自重由原来每台 32t（主要采用 16Mn 钢制造）降为 24t（降 25%），产品的性能已可完全取代采用调质钢制造的德国 DBT 公司产品，并且国产化后的液压支架价格比进口价格大幅度降低，使一条由 150 ~ 200 台支架组成的煤矿生产线的设备投入降低近亿元。又如，以低碳贝氏体为基体的新一代桥梁用钢，已大批量用于我国大型公路和铁路桥梁建设，鞍钢生产的 6000 多吨 16 ~ 80mm 厚新一代桥梁钢已用于世界上最大跨度的钢桁架拱桥——重庆朝天门长江大桥，武钢的低碳贝氏体桥梁钢已大批量使用于京沪高速铁路南京大胜关长江大桥，使我国高强高可焊性桥梁钢达到国际上第二代桥梁钢的先进水平。近年来，以低碳贝氏体为基体的我国高强度海洋平台及船舶用钢已取代进口调质钢应用于我国最大的 4000t 深海打捞船（华天号）及春晓油田海上采油平台的制造，在我国工程机械、汽车

吊、高空作业车及军用重载舟桥上新一代 600 ~ 800MPa 高强度低碳贝氏体钢也已得到广泛应用, 并正在向 1000MPa 级钢种方向发展, 使我国制造业产品赶上了国际先进水平, 并取得了巨大的经济效益和社会效益。

本书的目的是较系统地介绍以低碳贝氏体为基体组织的这一类新钢种。各章主要内容涉及:

(1) 介绍这类钢种的国内外发展概况, 叙述这一类新钢种的合金设计原理、低碳贝氏体钢的组织类型、相转变行为及各种合金元素间综合作用等基本物理冶金原理;

(2) 介绍这类钢种的冶炼、铸造、控轧控冷 (TMCP) 工艺及回火处理的生产要点和控制方法;

(3) 介绍这类钢种中各种形态贝氏体组织的特点, 钢种强韧化原理及性能预测。不同类型贝氏体组织配比的控制方法及不同组织状态对实物综合性能的影响;

(4) 介绍新发展的低碳贝氏体钢的组织强韧化和超细化的理论原理和弛豫-析出-控制相变 (RPC) 专利工艺技术;

(5) 讨论这类钢微合金元素的作用、析出相的成分、类型、分布及其演变规律;

(6) 论述这类低碳贝氏体钢的可焊性及耐蚀性。

最后重点介绍了我国新一代低成本高性能低碳贝氏体钢的生产及在几个典型工业领域的应用现状。但本书不对目前国内外有明显争论的贝氏体相变机制进行评述。

由于本书内容涉及新一代高性能低成本低碳贝氏体及贝氏体钢研究与生产的各个领域, 因此适合在大学、研究院所以及钢铁企业有关领域进行工作的各类科研人员、研究生及工厂实际操作人员阅读参考, 也可作为各类微合金化技术、高性能钢组织、工艺、性能控制等领域的培训班及大学有关专业学生的教学参考书。对于在新一代高性能钢使用领域工作的工程技术人员, 则可以通过本书对这类钢种的特点、性能范围、使用领域及发展状况有一个较全面的了解, 以便为我国各类制造业在用钢领域全面达到国际先进水平提供帮助。

本书力求把低碳贝氏体钢有关领域的基本情况及目前进展作一个较全面的分析,但由于编者的水平有限,加上目前国内外在有些问题上的看法不同,本书的论述肯定有不少不足与值得商榷的地方,敬请读者批评指正。

本书由北京科技大学材料物理系贺信莱、尚成嘉、杨善武、王学敏、郭晖等人编写,鞍钢于功利、侯华兴、马玉璞、武钢郭爱民、陈庆丰等参加了本书关于冶金生产工艺技术研究、可焊性及使用情况的编写工作。书中引用了鞍钢、武钢等企业目前已公开的资料中有关贝氏体钢性能数据及新钢种的实际应用情况,在此,作者深表感谢。

编 者

2007 年 5 月

目 录

1 低碳贝氏体钢国内外发展概况	1
1.1 低碳贝氏体钢的发展需求	1
1.1.1 600MPa 级以上钢种的社会需要	2
1.1.2 回火马氏体调质钢的综合性能及成本	2
1.1.3 降碳的趋势及新钢种的发展	3
1.2 低碳贝氏体钢的成分设计及主要生产技术	4
1.2.1 成分设计及微合金元素的作用	4
1.2.2 低碳贝氏体钢的主要生产技术	6
1.3 国内外低碳贝氏体钢的发展与应用	8
1.3.1 早期的贝氏体钢	8
1.3.2 以铜析出强化的贝氏体钢	9
1.3.3 以相变强化为主的低碳贝氏体钢的应用	11
1.4 我国贝氏体钢的发展	17
参考文献	18
2 低碳贝氏体钢的物理冶金基础	25
2.1 贝氏体相变的基本特征	25
2.1.1 贝氏体相变热力学	26
2.1.2 贝氏体相变动力学	30
2.1.3 贝氏体相变晶体学	32
2.1.4 贝氏体相变机制问题	35
2.2 钢中贝氏体的基本类型	37
2.2.1 上贝氏体	38
2.2.2 下贝氏体	39
2.2.3 粒状贝氏体	41
2.2.4 无碳化物贝氏体	42
2.3 低碳钢的连续冷却转变	43
2.3.1 过冷奥氏体的转变行为	43

2.3.2	连续冷却转变产物的特征与分类	45
2.3.3	低碳钢贝氏体转变与转变产物的特征	49
2.4	合金元素对低碳钢贝氏体转变的影响	50
2.4.1	合金元素对过冷奥氏体热稳定性的影响	51
2.4.2	合金元素在奥氏体晶界的偏聚	52
2.4.3	合金元素的相界偏聚与拖曳作用	53
2.4.4	合金元素在相变中的重分布问题	54
	参考文献	55
3	低碳贝氏体钢的控轧与控冷技术	58
3.1	热机械处理工艺技术 (TMCP)	58
3.1.1	TMCP 的发展过程	58
3.1.2	TMCP 的工艺	59
3.1.3	TMCP 的冷却控制	60
3.2	TMCP 的物理冶金学	63
3.2.1	再结晶与非再结晶轧制	64
3.2.2	奥氏体内晶体缺陷密度对相变产物细化的影响	71
3.3	TMCP 工艺应用及新进展	73
3.3.1	TMCP 应用	73
3.3.2	TMCP 工艺技术的新进展	76
	参考文献	81
4	低碳贝氏体钢组织转变类型及其控制	85
4.1	低碳贝氏体钢的主要组织	85
4.2	Mn-Mo-Cu-Nb-B 低碳贝氏体钢的组织类型	88
4.2.1	连续转变组织	88
4.2.2	等温转变	89
4.2.3	中温亚稳组织转变机理	92
4.3	针状铁素体的转变与控制	93
4.3.1	针状铁素体相变及生长过程热模拟研究	93
4.3.2	连续冷却过程中不同阶段组织转变特征	94
4.3.3	间断冷却过程多相组织的形成	96
4.4	粒状贝氏体及粒状组织的形成与控制	97
4.5	奥氏体变形及变形后弛豫对其相变行为的影响	99
4.6	多相组织的控制与力学性能	103

参考文献	106
5 低碳贝氏体钢组织超细化技术	108
5.1 组织超细化技术思路	108
5.1.1 变形对中温转变组织细化的作用	108
5.1.2 中温转变组织进一步超细化的新思路	110
5.1.3 TMCP + RPC 技术的基本思想	112
5.2 超细化工艺的实际细化效果、性能及典型组织	113
5.2.1 选取能充分发挥超细化工艺效果的微合金成分范围	113
5.2.2 弛豫-析出-控制相变 (RPC) 技术的典型工艺	115
5.3 中温转变组织细化工艺参数的热模拟研究	116
5.3.1 不同温度下变形及弛豫后的组织演变规律	117
5.3.2 贝氏体束尺寸的定量统计	120
5.4 RPC 工艺下的典型细化组织及与其他工艺的比较	122
5.4.1 弛豫时间的影响	126
5.4.2 终轧温度的影响	128
5.4.3 冷却速度对组织及性能的影响	129
5.5 中温组织超细化的原理分析	130
5.5.1 针状铁素体空间分布的分割作用	131
5.5.2 弛豫阶段变形晶体内位错胞状结构的形成与演变	131
5.5.3 弛豫阶段的微细析出钉扎效应	134
5.6 超细化贝氏体组织的变形行为	138
5.7 细化组织钢回火过程组织性能变化规律及其原因分析	140
5.7.1 细化组织钢与同成分调质钢回火过程硬度的变化 及其差异	141
5.7.2 回火过程的组织稳定性	142
5.7.3 回火温度对钢种力学性能的影响	145
参考文献	146
6 低碳贝氏体钢中析出相的类型及溶解与析出过程	148
6.1 低碳贝氏体钢中析出相的类型	149
6.1.1 析出相的基本类型	149
6.1.2 析出相与基体的取向关系	150
6.1.3 析出相的空间分布与尺寸分布	151
6.2 微合金元素碳化物的析出热力学	152

6.2.1 析出过程体系自由能的变化	153
6.2.2 析出过程中析出相-基体界面形态的演化	154
6.3 微合金元素碳化物的析出动力学	155
6.3.1 析出相形核	161
6.3.2 析出相长大	162
6.3.3 析出相粗化	167
6.4 奥氏体中应变诱导析出与变形奥氏体回复再结晶的相互作用	167
6.5 析出物的溶解过程	172
6.5.1 析出物的热稳定性	173
6.5.2 溶解过程的成分变化	178
6.6 低碳贝氏体钢的时效强化	182
6.6.1 碳化物的时效析出	183
6.6.2 铜的时效析出	187
参考文献	194
7 低碳贝氏体钢的可焊性及耐蚀性	199
7.1 焊接热循环过程中钢的组织结构变化	200
7.2 钢的化学成分对可焊性的影响	202
7.3 高性能低碳贝氏体耐候钢的发展思路	203
7.4 碳含量与显微组织对钢的耐蚀性的影响	207
7.4.1 不同碳含量钢种的周浸腐蚀实验	207
7.4.2 进一步的周浸腐蚀试验	211
7.4.3 实验样品锈层宏观形貌和微观形貌	211
7.4.4 低碳贝氏体钢在盐雾试验中的腐蚀行为	215
7.4.5 盐雾腐蚀行为的进一步研究	217
7.4.6 贝氏体钢盐雾实验样品表面锈层分析和电化学规律	218
参考文献	221
8 低碳贝氏体典型钢种的成分、性能及相关领域的应用概况	222
8.1 低碳贝氏体型高强度工程机械用焊接结构钢	222
8.1.1 500~690MPa 级低碳贝氏体钢系列的合金设计 及强度预测	223
8.1.2 Q500CF、Q600CF、Q690CF 级钢实物性能	226
8.1.3 不同级别钢种 CCT 曲线、高温变形再结晶及 应变诱导析出曲线	230

8.1.4 不同强度级别系列钢的金相组织	236
8.1.5 回火制度对 Q600CF 级别钢中铌的存在形式影响的分析	242
8.2 高性能桥梁用钢	243
8.2.1 高性能桥梁钢板的成分设计	245
8.2.2 低碳贝氏体高性能桥梁钢的组织类型与控制	248
8.2.3 低碳贝氏体桥梁钢的力学性能及组织结构	251
8.2.4 大厚度尺寸低碳贝氏体桥梁钢性能与组织关系	253
8.2.5 大厚度尺寸桥梁钢的回火力学性能	259
8.2.6 桥梁钢的工业化生产	262
参考文献	263
名词索引	265

1 低碳贝氏体钢国内外发展概况

1.1 低碳贝氏体钢的发展需求

现代低碳贝氏体钢（ULCB, ultra-low carbon bainitic steels）是一类高强度、高韧性、多用途新型钢种。它的出现是近三十年来社会需求和现代冶金技术发展的必然结果。由于这类钢中的碳含量已大幅度降低，因而彻底消除了碳对贝氏体组织韧性的不利影响，在控轧控冷后可得到极细的含有高位错密度的贝氏体基体组织。这类钢的强度不再依靠钢中的碳含量，而主要通过细晶（组织）强化，位错及亚结构强化，铌、钛、钒微合金元素析出强化，以及 ϵ -Cu 沉淀强化等方式来保证，钢的强韧性匹配极佳，尤其是具有优良的野外焊接性能和抗氢致开裂能力。

从低合金钢的发展过程来看，在低碳贝氏体钢出现以前，通常用的低合金钢组织为铁素体加珠光体，由于这类钢具有令人满意的韧性，从而在很长时间占据了结构钢使用中的主流位置。经过长期的研究、生产与开发，目前传统的铁素体-珠光体钢的发展已经相当成熟，体现在它的组织-性能-成分关系已经基本确定，对生产工艺过程控制的基本要求也已明确。几十年来，世界各大钢铁公司经过大量的生产实践对这类钢已经积累了丰富的生产经验，各企业根据各自的生产条件，掌握了这类钢种成分、强度、韧性、组织之间的经验关系，以及成分对焊接性能、加工性能等的影响规律，并能根据各企业已形成的数据库及统计结果，按照用户的性能需求来进行钢种的合金成分设计，其水平已达到只要生产工艺正常，产品性能就基本可以符合设计要求。同时，人们对这类钢生产中工艺控制要点也已比较明确，例如，要使热变形奥氏体在冷却时能转变成尽可能细的铁素体；要控制钢中微合金碳氮化物的析出状态；要采用微钛处理，减少奥氏体在加热时的晶粒粗化；要在控轧过程中抑制奥氏体再结晶（利用晶界偏聚、再结晶前的变形诱导析出等手段），并且变形后期采用大压下量来细化最终组织等。因而从技术路线上看，传统的铁素体-珠光体型钢种，其潜力已得到了较好的发挥。通过再结晶控轧等措施，目前工业生产碳素结构钢的最小铁素体晶粒尺寸已小于 $20\mu\text{m}$ ，热轧低合金高强度钢的铁素体晶粒尺寸也已小于 $10\mu\text{m}$ ，在采用应变诱导相变等超细化技术后，晶粒尺寸可以进一步缩小。总之，其晶粒度已接近大生产条件下的极限值。研究也发现，由于这类钢中铁素体内部结构单纯，而钢的强度

主要来自较高的碳含量，因此从经济上、工艺上考虑所能利用的实际综合性能已难以进一步发展。随着人们对更高强度级别同时又有高韧性可焊接钢种的需求越来越大，必然需要考虑发展一类具有新型基体组织的钢种来满足社会需求。

1.1.1 600MPa 级以上钢种的社会需要

在世界范围内，具有优良焊接性能的低合金高强度中厚钢板具有用量大且用途多的特点。目前，在能源、交通、原材料等工业领域以及各种工程施工中使用最多的装备，如各类工程机械、大型电铲、推土机、自卸车、油气管线、钻井平台、钻机及煤炭综采机械（液压支架、刮板运输机）等大量使用这类钢制造。这些应用的共同特点是要求这类钢具有高强度（一般抗拉强度在 600 ~ 1000MPa 范围）、较高的韧性或低温韧性（特别是在寒冷地区施工及工作的装备）、良好的焊接性能及冷成形性（一般最好要求焊接工艺简单，焊前及焊后不需要处理）、性能良好的材料冷弯性（包括宽冷弯），另外，还要具有良好的抗疲劳性能及一定的抗腐蚀性。从降低制造各种装备的成本及改善工艺性能考虑，通常还希望这类钢的碳含量较低，合金元素含量不高，在性能、规格等方面有较宽的选择余地，能适应不同需要，以便满足用户各种不同的要求。又如，在油气管线的建设中，若选用屈服强度大于 550MPa 的 X80 或更高的 X100 型号的输线管，由于管壁可大幅度减薄而节省大量材料，也可以提高管压来输送更多的能源。对于桥梁、采油平台、工程船舶及高层建筑等其他大型构件，为满足这些构件的减重要求，对高强韧可焊接钢种的需求也越来越大，传统的材料已不能满足高性能、低成本的使用要求。从钢种的发展史上看，在低碳贝氏体系列钢种出现以前，国内外使用的强度大于 600MPa 级的高强度钢主要采用回火马氏体钢。

1.1.2 回火马氏体调质钢的综合性能及成本

工业上长期使用的强度在 600MPa 以上的钢是调质钢。它的优点是强韧性匹配能够较好控制，具有很高的综合性能，主要用于大尺寸、大截面部件，如装甲板、航母板、大型高压容器板等，但对于大尺寸构件，为了在截面上得到低碳马氏体组织，钢中必然需要添加相当数量提高淬透性的合金元素，所以这类钢一般合金元素的加入量较大、生产周期长、工艺复杂，需要投入较多专用设备，因此钢种生产过程的能耗及成本高，在保证板形及表面质量方面需要很多的投入。同时，调质钢的马氏体强度水平主要受碳含量和回火温度控制，随着强度水平要求的提高，钢中合金含量需要上升，而为了保证得到低碳马氏体组织，钢中碳含量又难以下降，因此钢种的碳当量较高，结果是这类钢经淬回火处理后虽然可以获得较好的强度性能，但低温韧性和焊接性能却较差。合金含量高的高强度调质钢在焊接时常需要进行焊前预热与焊后处理，这给使用——特别是大型构件中的

使用——造成困难。因此，调质钢的强度虽然可以达到很高 ($\sigma_s \geq 600\text{MPa}$)，但难以解决既要综合性能大幅度提高，又要节能降成本这一对矛盾。

1.1.3 降碳的趋势及新钢种的发展

为解决钢种强度水平的提高与焊接性能下降这一矛盾，以及降低制造成本，提高综合性能，世界各国均进行了大量研究工作。例如，1978 年 Graville^[1] 对高强度低合金钢焊接后，热影响区冷裂纹敏感性和钢中碳含量以及计算的碳当量之间的关系作了较系统的研究，结果如图 1-1 所示。发现按冷裂纹敏感性可把已有钢种分成三个区，当钢中碳含量在 0.10% 以下时（即位于区域 I 中时），钢的碳当量对冷裂纹敏感性影响不大，即使钢中加入合金量较多，碳当量较高时，钢种仍具有较佳的焊接性能。若把世界各国在 20 世纪 50 年代至 90 年代发展的不同级别钢种画在 Graville 图上，可以看到其发展轨迹是随着钢的强度要求不断提高，为保证焊接性能明显改善，必须要把钢中碳含量大幅度下降，特别是低碳贝氏体钢的出现，这种趋势更为明显了^[2~6]。

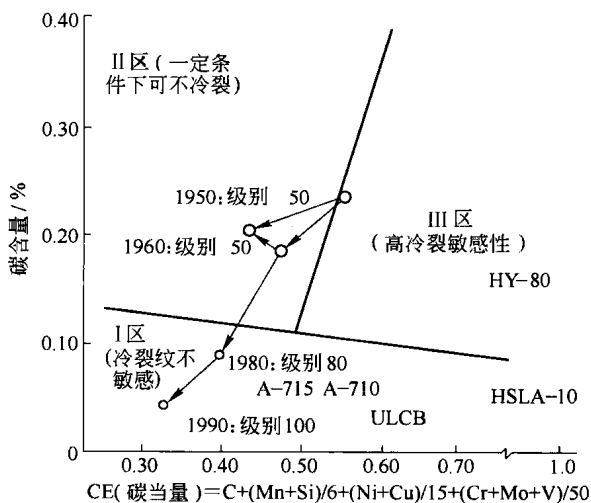


图 1-1 20 世纪 50 年代到 90 年代各国钢种发展情况及典型钢种成分的变化^[1]

社会的需要，高强韧钢生产及使用成本的降低，以及焊接等工艺要求的全面满足是发展低碳贝氏体钢的主要动力。当然，在实际工业性大生产中能出现大批量商业性低碳贝氏体钢还有两个关键技术因素。一个是冶金生产技术的发展。钢包冶金技术的大规模应用，使得可同时大幅度降低 C、S、P 等杂质含量。低碳高净化钢液可以大规模生产，使低碳钢的大生产成为可能。这样在冶炼时，当碳

含量大幅度降低后,钢中氧、氮等气体含量仍能得以降低,各种微量元素的回收得到控制。在热加工技术上,TMCP 技术全面发展,使钢种生产全过程的控制得以实现。另一个关键技术因素是铌、钛、钒、硼等微合金元素的研究与应用得到全面发展,特别是微量铌以及 Nb-B、Nb-Cu-B 等元素的综合作用研究和应用在这一发展过程中起到了突出的作用。

1.2 低碳贝氏体钢的成分设计及主要生产技术

1.2.1 成分设计及微合金元素的作用

低碳含量的贝氏体钢可以在高强韧化后还能保持优良的焊接性能,其主要原因是碳含量大幅下降后,基本消除了贝氏铁素体基体中的渗碳体,因此钢的韧性及可焊性得到进一步的改善。但为了保证钢种的强度和贝氏体转变的淬透性良好,应该适量添加其他合金元素,大量的研究工作证明了这种认识^[3,4,7~12],从而引导了 ULCB 钢在世界范围的发展。

这类钢的合金设计主要涉及碳、锰、铜、镍、钼及铌、钒、钛、硼等微量元素的选取。

在这类低碳贝氏体钢中各种主要合金元素的作用综述如下。

1.2.1.1 碳含量的控制

低碳贝氏体钢中的碳含量一般控制在 0.02%~0.06% 范围。取此碳含量的目的是:

(1) 从国内外已有的研究结果看:当钢中碳含量降到 0.05% 以下时,这种钢在经过高温奥氏体化以及热变形后,在以超过 5℃/s 的冷速冷却过程中,不再发生奥氏体向铁素体与渗碳体的两相分解,过冷奥氏体将直接转变成各种形态的铁素体并留下少量富碳的残留奥氏体。

(2) 由于这类钢的碳含量已很低,并且无渗碳体生成,这类钢中得到的贝氏体一般已无法区分上、下贝氏体。实验证明,由于这时针状(或板条状)铁素体内及板条间均没有连续的渗碳体,因此韧性极佳,碳含量和室温冲击韧性的关系如图 1-2 所示^[12]。

(3) 由于大幅度降低碳含量,因此钢种的可焊性很好,可以保证在一

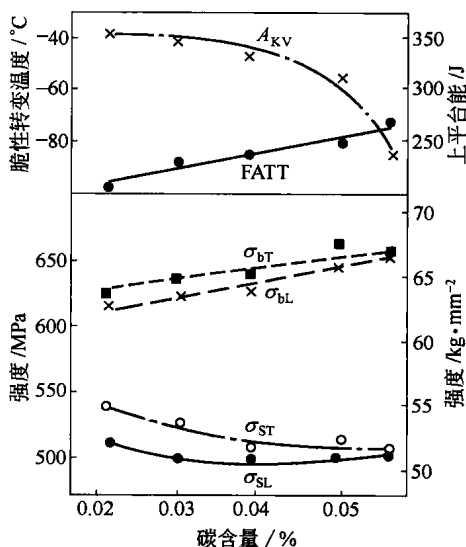


图 1-2 钢中碳含量和强度及韧性的关系^[12]