

现代

XIANDAI NIGANG
CHANGTIAOCAI

铌钢长条材

孟繁茂 付俊岩 编著

Nb



冶金工业出版社

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

现代铌钢长条材

孟繁茂 付俊岩 编著



北 京
冶金工业出版社
2006

内 容 简 介

铌钢是钢材市场最具竞争力的产品之一。本书介绍了铌在优化长条钢材性能方面的作用和含铌长条钢材新产品的开发技术与应用。具体内容包括:铌钢物理冶金,比较全面地介绍了铌在钢中的物理冶金知识、微合金化技术设计以及铌钢的金属学和形变热处理;高强度钢的延迟断裂研究的现状与方法,重点阐述了铌的吸氢行为与抗氢脆的物理机制、铌在高强度钢螺栓应用的现状;含铌二次加工用钢的新产品开发技术与应用;含铌棒线、大小型钢等长条材的性能应用、工艺要点及新产品开发技术,主要包括高强度棒线、非调质钢棒、汽车用二三次加工的棒线材、建筑用型钢、钢筋、轨钢、铁塔、角钢等小型材、大型工字钢等。

本书可供钢铁材料生产和钢铁研究所等相关部门的工程技术人员、研究人员以及相关大专院校的教师和研究生等参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代铌钢长条材/孟繁茂等编著. —北京:冶金工业出版社,2006.10

ISBN 7-5024-4105-0

I. 现… II. 孟… III. 铌—合金钢 IV. TG146.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 117734 号

出 版 人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 李 梅(电话:010-64027928) 王雪涛

美术编辑 李 心 责任校对 侯 璐 李文彦 责任印制 牛晓波

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

2006 年 10 月第 1 版,2006 年 10 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 12.125 印张; 322 千字; 370 页

45.00 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

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)



孟繁茂



付俊岩

孟繁茂教授、付俊岩教授，曾在钢铁研究总院长期合作从事航天、航空用特种不锈钢新材料的研制工作，曾先后为中国长征系列火箭、直九直升机、斯贝发动机等工程研制多种新型材料，并获得国家科委发明二等奖和

多项科学技术进步奖。20世纪90年代后，在中信镍钢发展奖励基金和CBMM-CITIC中信微合金化技术中心，共同与巴西CBMM公司合作，在中国推广镍微合金化技术，以促进中国钢铁工业结构调整，加速发展含镍微合金化钢和合金钢。

前言

我国钢铁工业连续多年快速增长,现在开始从高速增长期逐渐进入平稳发展期。随着国内经济消费结构升级,钢材消费市场也开始进入从建筑业向制造业过渡的转型期,即从普通低合金钢向具有综合性能的高强度钢发展,特殊钢材也从低端产品向高端产品转移。国防现代化建设、新兴高新技术产业、汽车、机械制造业的快速发展,带动了专用特殊钢材的市场需求快速增长,并对传统特殊钢材料提出了更新换代的迫切要求。但是,我国特殊钢行业在钢材品种结构和质量方面与世界工业发达国家相比,还有很大的差距,不能满足制造业市场,尤其是汽车工业对高端零部件产品的需求。我国每年平均进口特殊钢产品 200 万 t,90% 是特殊钢的高端产品。为此,提高我国整体冶金科学技术的水平,尤其要增强生产工艺技术和高端特殊钢钢材品种的自主开发能力,不断进行技术创新才能有望提高我国特殊钢工业的整体技术水平,加速我国从钢铁大国向钢铁强国发展的进程。

微合金化技术是 20 世纪 70 年代发展起来的现代冶金工艺和新型材料科学。当时是在普碳软钢基础上降低碳含量并添加铌、钒、钛作为微合金化元素,通过控制轧制工艺来提高钢的强度和韧性。20 世纪 70 年代中东能源危机促进了以石油天然气长输大口径管线钢为代表的高强度微合金化钢的发展和控轧(CR)技术的广泛应用,80 年代在线加速冷却技术(ACC)在高强度板带材钢的广

泛应用,促进了汽车工业用无间隙原子 IF 钢的发展。90 年代可焊接高强度结构钢厚板等高科技钢材的开发生产,使铌成为热机械处理工艺(TMCP)和在线直接淬火(DQ)技术等必选的重要微合金元素,从而广泛使用。众所周知,在低碳微合金化钢中,铌的作用主要是细化晶粒,在提高钢的强度的同时,改善钢的韧性,并通过固溶铌和 Nb(C,N)的析出和相变控制提高钢的强度。随着冶炼技术的进步,钢中的碳含量逐步降低,从而提高了铌在奥氏体中的固溶度,允许添加更多的铌,进一步发挥了铌对奥氏体调节的作用。奥氏体中的固溶铌有降低奥氏体-铁素体相转变温度的作用,在其相转变的过程中和相变后在铁素体中有更多的 Nb(C,N)析出,提高钢的强度。同时,奥氏体中的固溶铌还可提高钢的淬透性,在相同条件下,尤其在高的冷却速度下,铌可促进更多的低温转变产物,如针状铁素体、贝氏体铁素体等的形成。在很低的碳含量(0.02% C)下,允许钢中加入的铌含量更高(约 0.10% Nb),这正是近年来国外在中厚板轧机和炉卷轧机采用高温轧制工艺(HTP 技术)生产高强度抗 H₂S 腐蚀 X70/X80 管线钢合金设计的基本点。当前,虽然在学术上对析出强化和固溶强化的作用哪一个大的问题上有争论,但是,铌微合金化在低碳高强度板带材中的重要作用已是毋庸置疑的,铌已成为高强度低合金钢(HSLA)中最有效的微合金化元素。

铌在钢中的物理冶金特性和作用是随着冶金技术的进步和制造业市场对高性能钢材需求的增长过程中,由世界冶金和材料专家们逐渐认识的。到 20 世纪 80 年代以后,冶金和材料专家们根据铌的物理化学特性将铌在

板带材的物理冶金知识开始应用到“长条材产品”——棒线材、型材、热/冷锻件、油井管和铸钢等工程用热处理钢材上,开发和改善建筑用高强度钢筋、紧固件钢、弹簧钢、渗碳齿轮钢、油井管、工模具钢、不锈钢耐热钢及铸钢铸件的性能,进一步扩大和丰富了铌应用科学与技术的知识宝库。

应特别指出的是,最近 20 年来,汽车工业对零部件用特殊钢材,如紧固件、弹簧和曲轴、连杆、齿轮等表面硬化零件的钢材,在抗疲劳极限和韧性方面的要求发生了很大的变化,即对疲劳极限强度和韧性的要求都同时有很大提高。这正是近年来,国外冶金专家率先把铌添加到含钒微合金化非调质钢(49MnVS3 钢)中的初衷。从调质处理钢向微合金化非调质处理钢的转变中铌-钒复合微合金化技术将是特殊钢技术发展的必然趋势,也将进一步增强铌微合金化的技术在特殊钢领域的应用和发展。

国际上丰富的铌资源和 CBMM 公司铌铁价格长期稳定的政策,已成为保持和激发世界冶金和钢铁材料专家对铌应用科学技术研究活力的基础。铌在技术与经济方面的双重优势使得众多工业应用领域把铌作为微合金化设计时的首选,并不断扩大其应用领域。

我国微合金化非调质钢研究和生产始于 20 世纪 80 年代初期,20 多年来,开发了 15 个微合金化非调质钢,并已取得很大成绩。但是,推广应用的进程步履艰难,以汽车工业用零部件为例,在欧、美、日等工业发达国家里,采用微合金化非调质钢的比例达到 50% 以上,我国的这一比例不足 10%。究其原因,主要是这些国产的非调质钢

的强度有余,韧性不足。非常遗憾的是,在中国国家技术监督局颁布的 GB/T15712—1995 非调质钢国家标准中,全部是以钒系为主体的钢种,忽视和限制了铌的应用。要改变这种状况,应尽快修订该标准,发挥利用铌细化晶粒、析出强化和控制相变的作用。采取铌-钒复合微合金化技术是改善非调质钢韧性,提高其抗疲劳强度等性能的最佳技术路线。

特殊钢技术的范围极其广泛,本书不能涉及全部内容,本书反映的是铌微合金化和 TMCP 工艺技术发展的一个侧面,作者用两年多的时间总结和归纳了近 20 年来国际钢铁工业铌在长条钢中应用的历史以及铌微合金化技术的发展经验,主要包括铌-钒、铌-钛等复合微合金化技术方面的研究成果。希望本书的出版能对我国特殊钢企业的工程师们改造老产品、开发和生产高端专用特殊钢材有参考价值,为我国传统特殊钢材料更新换代提供一条可供选择的新技术路线。

最后,感谢中信金属公司和 CBMM 公司鲍迪侬先生对本书的出版给予的大力支持。

付俊岩 孟繁茂
2006 年 6 月

目 录

1 概述	1
1.1 我国长条材发展现状及前景.....	2
1.2 铌在钢中的作用.....	3
1.3 长条材的种类与用途.....	4
1.4 棒线材生产新工艺.....	7
1.5 吨钢铌铁消耗.....	8
1.6 本书内容概要.....	9
2 TMCP 的发展和 Nb 的作用	10
2.1 Nb 的细化晶粒作用	10
2.2 Nb 的延迟相变作用	11
2.3 二次加工用棒线材的省略工程的形变热处理.....	13
2.4 Nb 微合金化钢的屈服强度升级和物理冶金	13
2.5 TMCP 中铌的作用	14
3 铌钢物理冶金	15
3.1 Nb(C, N)的溶度积	15
3.2 γ 晶粒的粗化、细化和 NbC、Nb(C, N)溶解度的关系	16
3.3 Nb、V、Ti 的溶度积和 NbC 析出动力学曲线	19
3.4 Nb 的阻止再结晶作用	22
3.5 Nb 在中、高碳钢中的溶解度.....	26
3.6 Nb 对 0.1C-Mn 钢的 TTT 图的影响	27
3.7 Nb 对淬透性的影响及其相变组织	28
3.8 Nb 对 0.2%C 钢再结晶行为的影响	30

3.9 Nb 的拖曳作用	31
3.10 Nb、V、Ti 的强韧化效果	32
3.11 Nb 钢的高温抗力	33
3.12 Nb 钢的金相组织与轧制工艺	34
3.13 IF(无间隙)钢的成分设计和 Nb IF 化	43
3.14 各种间隙元素的难熔化合物在钢中的争先 反应与溶度积	48
4 微合金化技术设计	50
4.1 微合金化技术和 TMCP	50
4.2 非调质钢生产过程中的 TMCP 和合金化技术 的互动关系	51
4.3 Nb、Ti、V 等微合金元素对 γ 晶粒的控制	52
4.4 溶度积和析出物的计算	56
4.5 Nb 抑制再结晶效果最强	57
4.6 合金元素对冷却中的相变的影响	61
4.7 合金元素对 γ/α 相界面易动度(λ)的影响	61
5 控制轧制金属学	63
5.1 再结晶控轧	63
5.2 动态再结晶	64
5.3 静态再结晶	67
5.4 非再结晶 γ 区的热轧	68
5.5 双相区轧制特性	69
5.6 含 Nb 中高碳棒线材热加工时组织的变化	70
5.7 固溶 Nb 对铁素体再结晶的抑制	74
5.8 珠光体转变生核顺序	77
5.9 快速冷却超细组织的形成	77
6 形变热处理技术	79
6.1 棒线材的特性和形变热处理	79

6.2	二次加工用棒线材生产工艺概略	80
6.3	棒线材生产线后续冷却设备及冷却速度	80
6.4	热轧道次变形量与 γ 晶粒尺寸	84
6.5	热轧条件对力学性能的影响	85
6.6	直接淬火技术	86
6.7	形变热处理在锻件生产中的应用及其扩展	92
6.8	省略球化退火工艺的热轧棒材时的温度控制	99
6.9	控轧控冷软质化退火原理	100
6.10	软质化线材生产技术	101
6.11	棒材软质化技术	103
6.12	非调质螺栓线材的生产技术	104
6.13	快速球化技术	106
6.14	高频热处理高强度钢棒线材	107
6.15	低C高Nb钢HTP(高温工艺)技术要点	112
7	氢致延迟断裂研究	118
7.1	延迟断裂	118
7.2	钢中的氢和延迟断裂	119
7.3	钢中氢存在状态的观察	121
7.4	延迟断裂是第1峰氢所致	123
7.5	铌在高强度钢的氢陷阱中作用研究	124
7.6	微合金化元素Nb、V、Ti、Mo等的沉淀强化和 氢陷阱行为	130
8	齿轮钢	133
8.1	Nb在各种齿轮钢中的应用	133
8.2	合金元素对渗碳异常层的影响	134
8.3	析出物对晶粒长大行为的影响	136
8.4	超级冷锻高温渗碳齿轮钢	139
8.5	高强度变速齿轮钢	143

8.6	高温渗碳 γ 晶粒粗大化防止技术及 1050℃ 高温 渗碳钢的开发	145
8.7	Nb、Ti、B 复合应用以及形变热处理型高强度齿轮钢	151
8.8	HS822H 钢和 SCM922H 钢	153
8.9	等离子高温渗碳钢(渗透时间缩短)	155
8.10	高面压渗碳用双相钢	155
8.11	低变形齿轮钢	156
8.12	差动齿轮强化技术	157
8.13	超细晶粒渗碳齿轮钢	157
8.14	“ATOM”钢加 Al、Nb 后防止晶粒粗大化 作用的差别	160
9	弹簧钢	164
9.1	高强度弹簧钢的发展课题	164
9.2	弹簧钢丝	166
9.3	2000 MPa 级悬挂弹簧用微合金钢的开发	169
9.4	直接淬火工艺生产 1750 MPa 级板簧	171
9.5	新型高强度弹簧钢 ND120S 的开发	179
9.5	结论	182
10	非调质钢	183
10.1	低合金高强度钢的淬透性	183
10.2	Nb 处理低碳贝氏体型高强度钢 Si、Mn 的互相抵消	187
10.3	直接淬火的 γ 组织的细化与相变组织的微细化	188
10.4	马氏体型微合金非调质钢	189
10.5	900 MPa 高强度高韧性非调质钢	190
10.6	TPCP 新概念及其非调质高强度钢开发	191
10.7	低合金高强度钢的 γ 晶粒超细化和超塑性	198
10.8	Nb 在热锻和冷锻钢中的应用	201
10.9	高强度高断裂韧性钢 HITS 钢	208

10.10	中碳 Nb、V 微合金化非调质棒钢的控制轧制	209
10.11	中碳 Nb、V 微合金化控制轧制棒钢的强度与韧性 ..	213
11	螺栓钢	216
11.1	高强度钢的延迟破坏和氢陷阱的热处理作用	216
11.2	调质螺栓钢的抗延迟断裂性能的改善方法	217
11.3	80 kg 级和 90 kg 级高韧性非调质螺栓用线材	218
11.4	抗延迟断裂螺栓钢 ADS-2	221
11.5	13 T 高强度螺栓钢 ADS-3	223
11.6	耐火螺栓钢(JISB-1186-1995)	225
11.7	无晶界碳化物马氏体新概念及高强度螺栓 钢的新进展	225
12	直接冷加工棒线材	229
12.1	冷锻线材	229
12.2	超级冷锻盘圆钢	230
12.3	省略球化退火冷加工用超级冷锻钢(ALFA 钢)	237
13	含 Nb 无 Pb 快削钢	239
13.1	Fe-Nb-S 三元平衡图	239
13.2	无 Pb 加 Nb 超级快削钢	240
14	轴类钢	242
14.1	曲轴实用 γ 形变热处理马氏体型非调质易削钢 ..	242
14.2	SAE 1541 中碳钢的 Nb 微合金化后的切削性能 改善和强韧性优化	246
14.3	Nb 对轴承钢寿命的影响	247
15	含 Nb 轨钢的新发展	250
15.1	性能优越的含 Nb 贝氏体轨钢和性能改善的	

珠光体轨钢·····	250
15.2 含 Nb 贝氏体钢的新发展·····	254
15.3 含 Nb 轨钢小结·····	256
16 高强度钢筋·····	257
16.1 超大直径螺纹钢·····	258
16.2 双相区轧制生产 500~650 MPa 级大圆钢筋·····	262
16.3 提高 PC 钢棒的抗剪切应变能·····	264
16.4 低温用热轧钢筋的控制轧制生产·····	265
16.5 通用热轧钢筋·····	269
16.6 无应变时效倾向 20MnSiNb400 MPa 级热轧钢筋·····	288
17 铌在高强度可焊接建筑型钢中的应用·····	300
17.1 型钢欧美标准中含 Nb 钢号·····	300
17.2 生产工艺·····	300
17.3 铁塔用高强度钢材(JIS3129)·····	306
17.4 日本桥梁铁塔耐候型钢的发展·····	307
17.5 钢管·····	309
17.6 耐火钢·····	319
18 含 Nb 微合金化锻钢·····	322
18.1 锻钢·····	322
18.2 锻件的微合金元素对性能的影响·····	323
18.3 钢的淬透性的定量描述·····	325
19 Nb 和多相钢的发展·····	329
19.1 概述·····	329
19.2 多相钢家族·····	329
19.3 热轧多相钢的组织与力学性能·····	332
19.4 Nb、Ti 对多相钢 $\sigma_b \cdot \delta_t$ 的影响·····	339

19.5 小结	340
20 铌微合金化超细晶粒技术研究现状及实用化	341
20.1 前言	341
20.2 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变超细化 α 晶粒	342
20.3 双相区大变形的应用	348
20.4 小结	350
附录 1 铌铁合金化技术	351
1.1 标准铌铁	351
1.2 化学性质	352
1.3 物理性能	352
1.4 合金化技术	353
1.5 结果	353
附录 2 铌的发现和铌资源	354
2.1 铌的宇宙丰度和地球铌的发现	354
2.2 铌的经济资源	359
2.3 巴西阿拉沙的铌	361
2.4 中国铌资源	364
参考文献	366

1 概 述

随着社会的发展,城镇建设、环保事业、海洋事业以及交通事业都有了长足的进步,在这些现代化建设事业中,高强度长条钢材发挥了重要作用。例如,无论是超高层大厦、超大跨度地下停车场、巨大的体育场馆,还是纵横千里的输电铁塔、大跨度桥梁、沿海长桥、海洋平台、大型舰艇、大型船舶、航天城的发射装置以及航空港建筑等等,均为钢结构,轻快节能的交通工具也以高强度、高韧性、高可焊性的钢材为基础进行制造,而有些建筑必须以高比强度为前提,如拉桥索等。

我国以 C、Mn 钢为主的传统钢材在以上这些现代化建设方面,远不能满足要求。传统钢材强度低、韧性差、焊接性差,特别是大断面材尤为不足,钢中由于缺乏固定氮的元素所带来的诸多缺点是传统生产工艺以及靠经典化学成分所不可能克服的。

近十年来,钢铁工业的成就之一是长条材性能的高速发展。

长条材和其他板带材一样,都是以 Nb、V、Ti、Al、B 等微合金化钢为基础,以广义的 TMCP(控制轧制、控制冷却)操作为手段而生产的。我国长条材的产量已超过 1 亿 t,但是微合金化钢份额很小,且强度很低,远远满足不了社会要求。材质的更新换代,迫在眉睫,势在必行。

我国的二三次加工品,主要用于汽车行业。在汽车的轻快节能和安全保证方面,优质的长条钢材,应用份额较大,本书也有相当篇幅论述。特别是通过省略工艺生产的高强度、高韧性钢材和其他特殊钢材,在我国的汽车行业应用正在起步,微合金化钢正向该领域推进。汽车用钢的升级换代是汽车升级换代的前提,是环保、安全、节能的一个重要环节,也是城市机能高速发展中的一个重要方面。

1.1 我国长条材发展现状及前景

我国是产钢大国,但不是钢铁强国,人均钢占有率还相当低,高强度钢比例低,生产工艺总体说也较发达国家落后,能耗和生产成本相对较高。从图 1-1 可看出我国钢产量发展态势还处于“初始阶段”。根据美、日、欧等的钢发展历史看,钢的产量发展曲线呈 S 形,分起步、平稳发展、加速发展、减速发展和成熟期。到成熟期,钢的生产量与社会消耗和国家的社会生产力相平衡。人均消耗钢铁量取决于人口数量和技术发展,这时钢产量接近于 S 形曲线的上平台。我国科学技术快速发展的时期,也是钢铁加速发展时期。我国自 21 世纪起,钢铁工业开始进入加速发展阶段,预计到 2010 年钢产量可达 4 亿 t,此后经过 S 形曲线拐点开始减速发展。到 2020~2030 年钢产量预计为 5~7 亿 t,中国可进入钢铁强国行列。到 21 世纪 30 年代后,我国钢铁的社会保有量可达 100 亿 t。

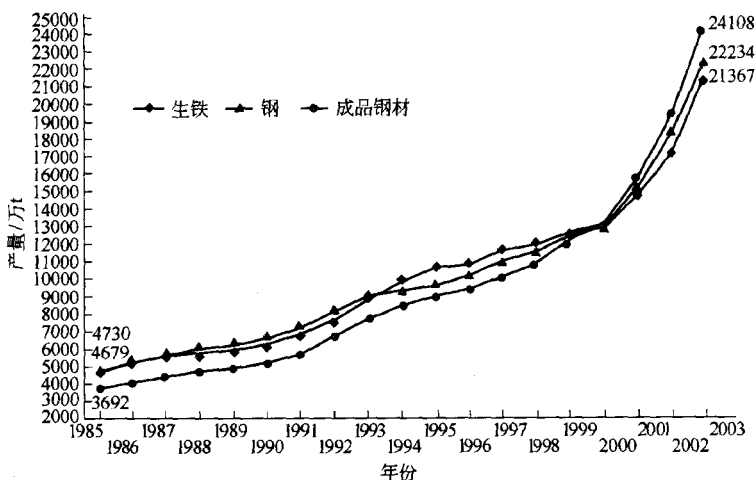


图 1-1 我国钢产量发展态势

从图 1-2 看出,我国钢材品种的发展主要是型材和线材,这是长条材的主要品种。这两项的产量之和超过 1 亿 t。这两种钢材