

微合金钢

——物理和力学冶金

雍岐龙 马聘国 吴宝椿 编著

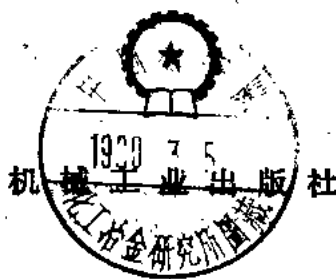
机械工业出版社

71.12.
6-2

微合金钢——物理和力学冶金

雍歧龙 马鸣图 吴宝榕 编著

210523/13



内 容 简 介

本书主要论述微合金钢的物理和力学冶金学原理及其在微合金钢研制和生产中的应用。书中首先概述微合金钢的发展历史及其意义,然后重点讨论组织-性能关系及强化原理,继而详尽分析晶粒细化问题及微合金碳化物的沉淀问题,由此深入阐述微合金钢的控制轧制、控制冷却及控制沉淀的原理和方法,同时论述了微合金钢的化学成分设计及生产工艺方案的制定。详细讨论了微合金双相钢及微合金非晶钢的有关问题,最后还扼要介绍了微合金钢的实际生产和应用情况。

本书主要供钢铁材料的研究、生产和应用单位的专业技术人员及高等院校有关专业的师生参阅。

微合金钢——物理和力学冶金

雍岐龙 马鸣图 吴宝椿 编著

责任编辑:张绪江 责任校对:宁秀娥
封面设计:方 芬 版式设计:张伟行

机械工业出版社出版 (北京阜成门内大街25号)

(北京市书刊出版业营业所登记证出字第117号)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168 1/32 印张23 1/4·插页2·字数 627千字

1989年12月北京第一版·1989年12月北京第一次印刷

印数 001—915·定价:31.30元

科技新书目, 203—40715

ISBN 7-111-01627-0/TG·421

前 言

微合金钢最初产生于20世纪初,当时是在普通低碳钢中添加少量的钒,以改善结构钢的强韧性。近30年来,随着人们认识的深入,工艺过程和改进,微合金化与控轧技术的有机结合,使微合金钢已发展成为具有良好的综合力学性能、可焊性、成形性及其它使用性能的工程结构用钢的新钢类。又由于它适合于大规模工业生产、成本低、能耗低、经济效益显著、用途广泛等特点,并由于各国的物理冶金学者对描述这类钢的工艺过程、组织和性能各种关系的新理论、新概念进行了大量研究工作和取得的新成果,大大丰富了物理和力学冶金的内容,有力地推动对物理和力学冶金认识的不断深化和前进,从而使微合金钢成为近30年来物理和力学冶金领域的重大进展之一。各工业发达国家均将微合金钢作为钢铁工业中最重要的研制和发展方向,我国也将其列为钢铁和机械制造业的研制和应用的重大课题之一。

微合金钢的产生和发展改变或丰富了人们关于钢的组织和性能的物理和力学冶金的一些概念和内容:经典的Hall-Petch关系的深化与发展;控轧与再结晶的热力学和动力学;沉淀相与晶粒长大;Ostwald过程;形变和相变诱发沉淀;奥氏体晶粒度与相变后铁素体晶粒度的关系;周围环境和拘束度对马氏体精细结构的影响;钢的强韧化机制;加工硬化和Bauschinger效应等等就是其中一些例子。本书将归纳、评述近30年来关于微合金钢的物理和力学冶金研究成果及其生产、应用的发展,其中也包括了近年来作者在这一领域中的研究成果。

书中第1章简要概述微合金钢的发展历史及其性能、经济特点、发展微合金钢的重大意义。第2章详细分析讨论微合金钢的组织-性能关系及强韧化机理,由此确定微合金钢中的主要强韧化

方式,此外,对微合金钢的焊接性能及成形性能也进行了深入讨论。第3~5章则着重讨论微合金钢中的两种最重要的强韧化方式——晶粒细化和沉淀强化——的有关问题,由此深入分析了微合金钢的控制轧制(传统控轧与再结晶控轧)、控制冷却及控制沉淀的原理与方法,并结合讨论了微合金钢的化学成分设计和生产工艺方案制定的原则及其在实际生产中的应用。鉴于微合金双相钢及微合金非调质钢的研制生产中存在一些特殊的问题,故专设第6、7章进行详尽的讨论。最后,为适应实际研制及生产的需要,在第8章中具体讨论了微合金钢的实际生产及应用情况,并列出各国所研制生产的微合金钢种的牌号和性能以供参考。

任何一门学科,只有当其基本规律可用数学的形式较为完整地准确表述时,才能真正被称之为成熟的科学,微合金钢的物理和力学冶金学正在步入这一成熟的阶段。本书将力图在有关的物理和力学冶金学的基本原理的基础上,阐明有关问题的基本概念及物理意义,同时引入定量化或半定量化的处理,对有关参量进行定量或相对定量的理论计算。为此,本书中还收集整理了大量有关的基础数据,以利有关读者参阅。

孙珍宝先生一直关注和支持本书的编写工作;刘嘉尔教授、何译福教授审阅本书部分章节,并提出许多宝贵意见;左晓鸣、蒋素芳同志对本书的编写工作亦给予了有力的支持;机械工业出版社的张绪江高工及编辑、出版部门工作人员为本书的编印工作付出许多心血,并提供许多帮助使得本书以较好的面貌和读者见面;云南工学院对本书出版提供资助,在此并致谢意。

本书涉及物理和力学冶金的广大领域,限于作者水平,编著中可能有不当之处,热情希望读者多加指正。

作者

1989年5月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 普通碳素钢、普通低合金钢与微合金钢的定义、范畴	1
1.2 微合金钢的产生和发展	4
1.2.1 早期的经验性工作——微合金钢的萌芽	4
1.2.2 扩展的 Hall-Petch 关系式——微合金钢产生的理论基础	6
1.2.3 沉淀强化原理与微合金钢的产生	9
1.2.4 控制轧制——微合金钢的发展	10
1.3 微合金钢的特点	13
1.3.1 微合金钢的化学成分特点	13
1.3.2 微合金钢的生产工艺特点	14
1.3.3 微合金钢的力学性能特点	15
1.3.4 微合金钢的工艺性能特点	17
1.4 微合金钢的技术经济特点	21
1.4.1 钢铁材料发展现状和新型材料对钢铁工业的挑战	22
1.4.2 钢铁工业的发展对策与微合金钢	24
1.4.3 丰富的微合金元素资源	26
1.4.4 微合金钢的经济效益	28
1.5 微合金钢的理论意义	30
1.5.1 组织-性能关系	30
1.5.2 相变理论	31
1.5.3 合金的强韧化	32
1.5.4 形变与再结晶	33
1.5.5 加工硬化与包辛格 (Bauschinger) 效应	34
1.5.6 其它理论问题	35
1.6 微合金钢的实际应用	36
1.7 展望	38
参考文献	39
第2章 微合金钢的性能	44

2.1	概述	44
2.2	微合金钢组织-性能关系的一般形式	46
2.2.1	性能指标	46
2.2.2	显微缺陷组织参量	48
2.2.3	组织-性能关系的一般表达形式	49
2.2.4	微合金钢中的假设	51
2.2.5	微合金钢中组织-性能关系的一般形式	56
2.3	微合金钢的强化方式	57
2.3.1	晶粒细化强化和 Hall-Petch 公式	57
2.3.2	固溶强化及其与有关因素的交互作用	62
2.3.3	位错与亚结构强化	68
2.3.4	沉淀强化及质点与位错的相互作用	73
2.3.5	微合金钢中沉淀强化的机制及作用效果	81
2.3.6	织构强化	86
2.3.7	微合金钢的组织-强度关系式	90
2.4	微合金钢的韧化方式	92
2.4.1	韧性及其表征参量	92
2.4.2	间隙固溶及置换固溶元素的影响	94
2.4.3	脆化矢量	99
2.4.4	晶粒细化韧化	102
2.4.5	第二相的影响	105
2.4.6	位错的影响	120
2.4.7	织构的影响	123
2.4.8	微合金钢的组织-冲击转折温度关系式	123
2.5	微合金钢的成形性	125
2.5.1	成形性和成形性试验	125
2.5.2	有几何约束的成形性试验	128
2.5.3	无几何约束的成形性试验	140
2.5.4	微合金钢成形性的一些实验结果	142
2.5.5	微合金钢成形构件的其它特性	147
2.6	微合金钢的可焊性	153
2.6.1	可焊性	153
2.6.2	焊接强度	155

2.6.3	焊接应力	156
2.6.4	焊接裂纹与焊接脆性	158
2.7	微合金钢强韧化方式选择	171
2.7.1	晶粒细化	172
2.7.2	间隙固溶强化	173
2.7.3	置换固溶强化	174
2.7.4	珠光体强化	175
2.7.5	夹杂物	176
2.7.6	M(CN)相沉淀强化	177
2.7.7	位错强化及位错亚结构强化	178
2.7.8	织构强化	179
	参考文献	180
第3章 微合金钢的晶粒细化(一)——第二相阻止		
	晶粒长大	188
3.1	概述	188
3.1.1	晶粒细化方法	188
3.1.2	晶粒间界的一般概念	189
3.1.3	晶界的运动	191
3.2	第二相阻止晶粒长大的理论	201
3.2.1	晶粒尺寸的阈值	201
3.2.2	存在第二相质点时晶粒的长大问题	206
3.3	固溶度积公式及理想化学配比——第二相质点的体积	
	分数问题	209
3.3.1	固溶度积公式	209
3.3.2	理想化学配比	216
3.3.3	第二相质点体积分数的计算及有关问题的考虑	216
3.4	Ostwald 熟化——第二相质点的尺寸问题	224
3.4.1	第二相质点尺寸的控制因素	224
3.4.2	Ostwald 熟化过程的热力学分析	225
3.4.3	点阵扩散控制的熟化过程	230
3.4.4	界面反应控制的熟化过程	232
3.4.5	晶界扩散控制的熟化过程	234

3.4.6 位错扩散控制的熟化过程	235
3.4.7 第二相体积分数对熟化过程的影响	235
3.5 微合金碳氮化物的粗化问题	239
3.5.1 一般考虑	239
3.5.2 微合金碳氮化物与奥氏体基体间的界面能	240
3.5.3 扩散系数与溶质浓度	245
3.5.4 微合金碳氮化物的粗化速率	251
3.6 微合金钢中微合金碳氮化物质点阻止晶粒长大的理论 的实际应用	254
3.6.1 一般考虑	254
3.6.2 均热过程中 M(CN)相质点阻止晶粒长大的有关问题	256
3.6.3 轧制过程中 M(CN)相质点阻止晶粒长大的有关问题	266
3.6.4 焊接过程中 M(CN)相质点阻止晶粒粗化	276
附录 I 微合金碳氮化物的化学组成式的理论计算	278
参考文献	281
第 4 章 微合金钢的晶粒细化(二)——相变与再结晶 细化晶粒	284
4.1 概述	284
4.2 微合金钢 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变细化晶粒	287
4.2.1 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变的一般规律及其细化晶粒作用的 主要影响因素	287
4.2.2 奥氏体晶粒有效直径与 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变细化晶粒作用	295
4.2.3 相变温度范围内冷却速率与 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变细化晶粒作用	304
4.2.4 合金元素及奥氏体化温度与 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变细化晶粒作用	308
4.2.5 形变储存能与 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变细化晶粒作用	315
4.3 微合金钢的形变与再结晶	320
4.3.1 奥氏体塑性热形变时组织结构的变化及其影响因素	321
4.3.2 形变奥氏体回复再结晶的一般规律	324
4.3.3 影响形变奥氏体再结晶的因素	336
4.3.4 形变晶粒细化与再结晶晶粒细化方法的基本考虑	348
4.4 微合金钢的形变晶粒细化与传统控制轧制工艺	350
4.4.1 形变晶粒细化的基本原理	350

4.4.2	热形变机制的影响因素	356
4.4.3	阻止再结晶的因素及影响规律	357
4.4.4	传统控制轧制钢种的成分设计	371
4.4.5	传统控制轧制工艺方案的制定	375
4.5	微合金钢的再结晶晶粒细化与再结晶控制轧制工艺	379
4.5.1	再结晶晶粒尺寸的影响因素和影响规律	379
4.5.2	促进再结晶的因素及影响规律	390
4.5.3	再结晶控制轧制钢种的成分设计	394
4.5.4	再结晶控制轧制工艺方案的制定	397
参考文献		400
第5章 微合金碳氮化物的沉淀析出		405
5.1	概述	405
5.1.1	微合金碳氮化物的作用	405
5.1.2	微合金碳氮化物的控制要求	406
5.1.3	微合金碳氮化物沉淀析出过程的控制方法	409
5.2	微合金碳氮化物脱溶沉淀的一般理论	411
5.2.1	脱溶沉淀的基本理论	411
5.2.2	微合金碳氮化物脱溶沉淀过程的有关理论考虑	421
5.3	微合金碳氮化物在奥氏体中的沉淀析出	436
5.3.1	微合金碳氮化物在奥氏体中沉淀析出的基本实验规律	436
5.3.2	微合金碳氮化物在奥氏体中沉淀析出的理论分析计算	456
5.3.3	微合金碳氮化物在奥氏体中的沉淀析出规律的应用	483
5.4	微合金碳氮化物在铁素体中的沉淀析出	489
5.4.1	微合金碳氮化物在铁素体中沉淀析出的基本实验规律	489
5.4.2	微合金碳氮化物在铁素体中沉淀析出的理论分析计算	502
5.4.3	微合金碳氮化物在铁素体中的沉淀析出规律的应用	513
参考文献		517
第6章 微合金双相钢		522
6.1	概述	522
6.2	微合金双相钢的组织	524
6.3	微合金双相钢的性能	532

6.3.1 微合金双相钢的单轴拉伸变形特性	532
6.3.2 微合金双相钢的几个变形特性参量之间的关系	536
6.3.3 影响微合金双相钢变形特性的因素	538
6.4 微合金双相钢的疲劳	549
6.4.1 微合金双相钢的疲劳强度	549
6.4.2 微合金双相钢疲劳裂纹的萌生和扩展	549
6.4.3 影响微合金双相钢疲劳性能的因素	552
6.5 微合金双相钢的成形性	554
6.6 微合金双相钢的组织 and 性能的关系	559
6.6.1 混合物定律	560
6.6.2 等应变模型和应变分配模型	561
6.6.3 几种变形模型图示	564
6.6.4 微观力学模型	565
6.6.5 综合变形模型	566
6.7 微合金双相钢的包辛格(Bauschinger)效应	567
6.7.1 包辛格(Bauschinger)效应及其描述方法	567
6.7.2 双相钢中的 BE	569
6.7.3 BE 的微观力学分析	571
6.7.4 BE 和磁软化效应	574
6.7.5 拉、压时效对双相钢 BE、流变特性和矫顽力的影响——关于背应力测试方法的建议	576
6.7.6 拉、压变形时背应力与矫顽力各向异性变化的关系——应力各向异性分析	579
6.8 微合金双相钢的应用	584
参考文献	585
第7章 微合金非调质钢	591
7.1 概述	591
7.2 微合金非调质钢的性能	593
7.2.1 硬度	593
7.2.2 强度和韧性	598
7.2.3 尺寸效应和疲劳强度	604
7.2.4 切削加工性	608

7.2.5	高频淬透性和氮化性能	612
7.2.6	可焊性和耐磨性	616
7.3	非调质钢的合金设计和钢种选用	618
7.3.1	非调质钢的组织 and 性能之间的关系	618
7.3.2	非调质钢的成分、性能和固溶度积方程	621
7.3.3	非调质钢钢种的选用	626
7.4	高韧性非调质钢的发展	629
7.4.1	非调质钢的强韧化机制与高韧性非调质钢的合金设计	629
7.4.2	影响非调质钢韧性的因素	631
7.4.3	合金元素、加工因素与组织性能之间关系的定量处理	634
7.4.4	高韧性非调质钢的研制 and 开发	638
7.5	贝氏体型非调质钢的发展	642
7.5.1	贝氏体型非调质钢的种类 and 性能	642
7.5.2	影响贝氏体型非调质钢性能的因素	644
7.6	非调质钢的成分、性能、生产和应用	647
7.6.1	一些主要国家或钢公司生产的非调质钢的牌号和性能	647
7.6.2	非调质钢的应用	654
	参考文献	656
第 8 章	微合金钢的工业生产和应用	660
8.1	概述	660
8.2	微合金钢的分类	662
8.2.1	按微合金钢的成分分类	662
8.2.2	按轧制品种分类	664
8.2.3	按最终产品分类	666
8.2.4	按 ASTM 标准分类	671
8.3	微合金钢的生产	675
8.3.1	大直径管线钢的合金设计	676
8.3.2	轧制工艺	681
8.3.3	夹杂物的影响	684
8.3.4	焊接性能	686
8.3.5	管线钢生产时性能、组织 and 控制因素概貌	692
8.4	微合金钢的应用	693

8.4.1 车辆	693
8.4.2 桥梁	697
8.4.3 船舶和采油平台	698
8.4.4 锅炉与压力容器	700
8.4.5 建筑结构	701
8.4.6 油气管线	703
参考文献	705
附表	708

第1章 绪 论

1.1 普通碳素钢、普通低合金钢与微合金钢的定义、范畴

微合金化高强度低合金钢^[1~2a] (Microalloyed High Strength Low Alloy Steel) 简称微合金钢 (Microalloy Steel), 是近 30 年来在普碳软钢和普通低合金高强度钢的基础上迅速发展起来的工程结构用钢, 这些钢可在相当低的生产成本下达到良好的强度、韧性、延性、成形性及焊接性相结合的综合使用性能, 从而广泛应用于桥梁、建筑物、船舶、车辆, 压力容器、采油平台、输油管道等各种工程结构, 获得了相当显著的经济效益和社会效益, 成为世界各国 (特别是发达的工业化国家) 都竞相研制和生产的新钢类。国际上著名的物理冶金学家一致认为: 微合金钢的产生和发展是近 30 年来重大的物理冶金学进展之一。

微合金钢与普碳钢、合金钢、普低钢的意义不同。

碳钢是未用除碳之外的元素来有意地合金化的钢, 而合金钢则是有意地采用了除碳之外的元素来合金化的钢, 且所添加的合金元素有预先规定的含量范围。然而, 这一定义并不把为消除钢中的有害组元或冶金缺陷 (如气孔) 而添加了少量百分数的锰、硅、铝、钛或其它元素的钢计入合金钢。

普通低碳钢在国外普遍称之为软钢 (Mild Steel), 它是指碳含量小于或等于 0.25%, 且 S、P 等杂质元素的含量控制范围比优质钢稍宽的碳钢。“软钢”意味着软、易于加工。软钢一词的最初出处为 1868 年出版的 Johnson 的《金属》一书中, 当时系指由舍菲尔德钢公司首先生产的商品中所说的均质软铁。19 世纪初期所给出的一般工程用途的“软钢”的典型化学成分为 (%)^(2a): 0.18C, 0.50Mn, 0.2Si, 0.05S 和 0.05P。直至 19 世纪后期, 酸性转炉和平炉工艺的发展, 才使得软钢可以大规模

地生产和应用。目前软钢的典型的化学成分范围是 (%)：0.10~0.25 C, 0.40~0.70 Mn, 0.10~0.50 Si, 一定量的 S、P 和其它残存元素。软钢的生产量占世界总钢产量的 70% 以上；我国亦如此，其典型钢号为 A₃。

普通低合金高强度钢（简称普低钢），国外称之为高强度低合金钢（HSLA Steel），被定义为屈服强度大于 275 MPa 的钢^[80]，有人也将其定义为屈服强度在 350~750 MPa 的钢^[81]，至于该术语的“低合金”部分，则一直没有一个普遍采用的标准。

美国钢铁学会将高强度低合金钢一词的意义解释为^[82]：“HSLA 钢由专门的一组钢所组成，它具有特别研制的化学成分以赋予其较高的力学性能，在某些钢中还赋予比传统碳钢明显高的抗大气腐蚀性，HSLA 钢的生产通常侧重于力学性能的要求，而不是化学成分的范围；因此，HSLA 钢并不属于合金钢，尽管有意地添加合金元素使其在技术上归属于合金钢。”

高强度低合金钢与普通软钢一样，主要是以热轧或正火状态交货，应用于一般工程构件。其高强度仅仅是相对于普碳软钢而言，并且这类钢还应具有良好的韧性和焊接性以及其它一些特殊的性能（如抗大气腐蚀性，低温韧性等等）。为此，普低钢的化学成分为：小于或等于 0.20% C，低于 3% 的其它合金元素含量，其 S、P 等杂质元素的含量控制范围较宽，冶金质量属普通钢的质量级别。普低钢的性能比普碳软钢明显的高或/和具有其它特殊性能，普低钢的生产中主要侧重于性能要求而不是化学成分范围。随着工业生产技术的不断发展和对钢材性能要求的不断提高，普低钢的性能和冶金质量正在向合金钢和优质钢的方向发展；我国普低钢的典型钢号为 16Mn。

微合金钢——瑞典的 Noren^[83]首先提出了这一术语。尽管多年来不少文献资料中将其称之为“微合金化钢”（Microalloyed Steel），但基于国际国内都通用“合金钢”而非“合金化钢”这一事实，我们认为还是称之为微合金钢合适。Noren^[83]在 1962 年给美国船舶结构委员会的信中提出了下述的微合金钢的定义：

“微合金钢的基本化学成分类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、硼、钛和铌。”

为了进一步说明微合金钢的意义和范畴，尚需进一步澄清和说明以下几个概念。

首先应该澄清“微量”这一概念。钢中添加的传统上应用的合金元素的量通常是以1%为单位的，当添加量较少时，对钢的性能影响较小，则不能称为合金元素，这样的常量合金元素主要有Mn、Si、Cr、Ni、W等。另一些合金元素，当添加量大于或等于0.20%时，即能对钢的性能产生显著的影响，可称之为少量合金元素，如合金结构钢中的Mo、V等。近几十年来发现，有些合金元素，当添加量不超过0.2%（有时甚至低至0.001%）时，即能对钢的某一性能或某些性能产生显著的影响，如B、Nb、Ti、V、RE等，它们被称为微合金元素。显然，有些合金元素，在不同的钢种中能产生有效作用的添加量是大不相同的，故在某些钢中它们是微合金元素，但在另外的一些钢中它们可能是少量合金元素，甚至是常量合金元素，这要视具体情况而定。

从广义来说，凡是在基体化学成分中添加了微量（不大于0.20%）的合金元素，从而使钢的一种或几种性能具有明显变化的钢都可称微合金钢。

根据这一定义和微合金钢基体的化学成分，就可将微合金钢分为微合金不锈钢、微合金调质钢（或非调质钢）、微合金渗碳钢、微合金高强度低合金钢等等。

通常所说的微合金钢系指微合金高强度低合金钢，它是在软钢或高强度低合金钢基体化学成分中添加了微量合金元素（主要是强烈的碳化物形成元素，如Nb、V、Ti、Al等）的钢。显然，这类微合金钢仍属高强度低合金钢，大部分文献资料中所述的微

合金钢也是指这类微合金钢。本书将主要论述这类微合金钢的物理和力学冶金问题，同时专设一章讨论基体组织和性能特殊的微合金双相钢。由于微合金非调质钢近年来发展很快，而这类钢的强韧化原理与微合金高强度低合金钢大体类同，故本书所述的微合金钢的物理和力学冶金原理也适合于微合金非调质钢，后者所涉及的特殊问题及应用亦设一章论述。

1.2 微合金钢的产生和发展

简要地回顾一下微合金钢的发展历史，将会有助于深入讨论和理解微合金钢的产生、发展及其有关的物理和力学冶金问题。

1.2.1 早期的经验性工作——微合金钢的萌芽

高强度低合金钢研制伊始，人们就注意到了微合金元素在提高和改进软钢性能方面的一些作用。

最早引起人们注意的微合金元素是钒。早在1916年，美国人 Bullens^[86]就发展了添加0.12~0.20% V的软钢。1934年，Cone^[86]论述了一种0.2% C、0.10~0.18% V、0.45~0.75% Mn的钢，该钢在轧制状态的屈服强度为275~345MPa，同时比普碳钢具有更细、更均匀的晶粒尺寸。Cone还报导了化学成分为0.18% C，1.45% Mn，0.08~0.10% V的主要以板材和带材形式在轧制状态使用的锰-钒钢。随后，美国钒公司研制了具有高的冲击韧性和疲劳寿命的钒钢。钒还被用作含铜的耐大气腐蚀钢中的微合金添加元素。

德国比美国更早认识到氮在含钒钢中的重要性。1945年，Neumeister和Wiester^[87]论述了在0.18% C，1.5% Mn钢中添加0.1% V可使屈服强度超过390MPa，他们将强度的提高归功于VC、VN或V(CN)对晶粒的细化作用。而美国伯利恒钢公司的Frame和Melloy^[88]在1962年才认识到钒和氮在屈服强度为310~450MPa的轧态钢的生产中的复合作用。

铝脱氧的碱性转炉镇静钢的生产实践导致了一个重要的发现，在这些高氮钢的正火过程中，AlN的沉淀析出造成了铁素体