

微合金化钢

齐俊杰 黄运华 张跃 编著



冶金工业出版社

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

微合金化钢

齐俊杰 黄运华 张 跃 编著

北 京
冶金工业出版社
2006

内 容 提 要

本书介绍了微合金化钢的概念和强韧化机理、微合金化元素在钢中的作用以及微合金化钢的控制轧制和控制冷却技术,还介绍了高强高韧微合金化钢的最新研究进展、超细晶粒钢技术的发展现状及应变诱导相变的相关理论,特别介绍了微合金化钢的生产和应用,包括微合金化非调质钢、高强度油气管线钢、耐候钢、建筑用结构钢等的微合金化及控制轧制和控制冷却的工艺特点与产品性能特征。

本书可作为高等院校钢铁材料、冶金及机械制造等相关专业的高年级本科生及研究生、教师参考用书,也可供相关领域的研究人员、钢铁冶金及机械制造专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

微合金化钢/齐俊杰,黄运华,张跃编著. —北京:冶金工业出版社,2006.5

ISBN 7-5024-3969-2

I. 微… II. ①齐… ②黄… ③张… III. 低合金钢—研究 IV. TG142.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 022993 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 张 卫(联系电话:010-64027930,电子信箱:bull2820@sina.com)

王雪涛(联系电话:010-64062877,电子信箱:2bs@cnmip.com.cn)

美术编辑 李 心 责任校对 栾雅谦 李文彦 责任印制 丁小晶

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 5 月第 1 版,2006 年 5 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 7.375 印张; 234 千字; 227 页; 1-4000 册

25.00 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)

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定 价
超细晶钢——钢的组织细化理论与控制技术	翁宇庆	188.00 元
新材料概论	谭 毅 李敬锋	89.00 元
2004 年材料科学与工程新进展	中国材料研究学会	238.00 元
2002 年材料科学与工程新进展	中国材料研究学会	280.00 元
多孔材料检测方法	刘培生 马晓明	45.00 元
二元合金状态图集	[日]长崎诚三 平林真 编	
	刘安生 译	38.00 元
功能陶瓷的显微结构、性能与制备工艺	殷庆瑞 等著	58.00 元
现代材料表面技术科学	戴达煌 等	99.00 元
材料加工新技术与新工艺	谢建新 等	26.00 元
超强永磁体——稀土铁系永磁材料(第 2 版)	周寿增 董清飞	56.00 元
材料的结构	余永宁 毛卫民	49.00 元
薄膜材料制备原理技术及应用(第 2 版)	唐伟忠	28.00 元
Ni-Ti 形状记忆合金在生物医学领域的应用	杨大智 等著	33.00 元
电子衍射物理教程	王 蓉	49.80 元
金属固态相变教程	刘宗昌	30.00 元
金刚石薄膜沉积制备工艺与应用	戴达煌 周克崧	20.00 元
金属凝固过程中的晶体生长与控制	常国威 王建中	25.00 元
复合材料液态挤压	罗守靖	25.00 元
陶瓷材料的强韧化	穆柏春 等	29.50 元
超磁致伸缩材料制备与器件设计	王博文	20.00 元
Ti/Fe 复合材料的自蔓延高温合成工艺及应用	邹正光	16.00 元
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 元
金属材料学	吴承建	32.00 元
金属学原理(第 2 版)	余永宁	53.00 元
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 元
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 元
X 射线衍射技术及设备	丘 利 胡玉和	45.00 元
金属塑性加工有限元模拟技术与应用	刘建生 等著	35.00 元
陶瓷腐蚀	[美]罗纳德 著	
	高 南 张启富 译	25.00 元
陶瓷基复合材料导论(第 2 版)	贾成厂	23.00 元
陶瓷-金属复合材料	李久荣	69.00 元
合金相与相变	肖纪美 主编	37.00 元
钎·科学与技术	中信金属公司	149.00 元
未来 创新发展——第 7 届北京冶金青年优秀论文集	北京金属学会	99.00 元
金属材料与冶金——第 8 届北京冶金青年优秀论文集	北京金属学会	39.00 元

前 言

微合金化和控制轧制控制冷却相结合的技术是 20 世纪 70 年代出现的新型冶金学科,是传统钢铁生产向现代钢铁生产转变的重要标志。20 世纪 80 年代是微合金化钢的迅速发展时期。特别是 90 年代后期,世界主要钢铁生产国相继制定和实施了新一代钢铁材料研究发展计划,超细晶粒、高洁净度、高均匀度和微合金化是钢铁材料的重要发展趋势,微合金化钢的研究与生产应用获得了更为广泛的认同和重视。微合金化钢的生产 and 应用已成为衡量一个国家钢铁工业发展水平的重要指标。钢的微合金化不仅能改进钢的生产工艺、降低生产成本,更重要的是大大改善了钢的力学性能和使用工艺特性。在钢加热、冷却和形变过程中,微合金化元素的碳氮化物具有溶解-析出行为,对钢的微观结构及物理、化学性质和力学性能有明显的影响。微合金化钢通常在热机械处理(包括控轧控冷)状态下作为工程和机械结构用材或冷冲压用材,典型的应用领域为油气输送管线、桥梁、船舶、工程机械、输电线塔、高层建筑、汽车、铁轨以及电站、码头等。

与世界发达国家相比,我国在钢的微合金化和控制轧制控制冷却领域的科研和生产能力及水平尚有一定差距。随着科学研究和生产技术的不断进步,我国现有的一些相关专业书籍的内容已显得比较陈旧,已经不能覆盖该领域技术的最新发展,难以满足读者的实际需求。作者根据在这一领域多年从事科研和生产实践的经验和体会,参考最新的相关书籍和文献,并跟踪微合金化钢研究发展的最新动态,吸收近年来微合金化钢新的研究成果,完成了本书的编著工作。本书不仅仅侧重于理论或者

应用的单一方面,而是将两者结合。希望本书能对钢铁冶金、材料加工及机械制造等领域从事材料研究、生产、开发和教学的科技人员及高校师生具有一定的参考价值,对他们的科研、生产开发和教学有所裨益。

本书内容共分6章。第1章主要讲述了微合金化钢的概念、定位及其强韧化机理;第2章讲述了微合金化元素在钢中的作用,主要介绍钒、钛、铌、氮、稀土等微合金化元素的析出强化规律、对组织和性能的影响及其强韧化机理;第3章阐述了微合金化钢的控制轧制和控制冷却,主要介绍了微合金元素化合物在热轧中的溶解和析出,控轧控冷技术的基本特点及其对组织和性能的影响;第4章介绍了高强高韧微合金化钢的最新研究进展,介绍了超细晶粒钢技术的发展现状及应变诱导相变的相关理论;第5章介绍了微合金化非调质钢的种类、生产工艺及性能等;第6章介绍了微合金化钢的生产和应用,包括高强度油气管线钢、耐候钢、建筑用结构钢等在生产中控制轧制及控制冷却的工艺特点与产品性能特征等。

本书的出版得到了国家自然科学基金(50325209)及北京科技大学研究生教育基金资助。

鉴于作者在上述领域的理论与实践方面的局限性,本书存在的不妥之处,恳请有关专家及广大读者提出宝贵意见。

作 者

2006年2月于北京科技大学

目 录

1 微合金化钢的概念和强韧化机理	1
1.1 微合金化钢的概念.....	1
1.2 微合金化钢技术发展历程.....	3
1.3 微合金化钢的强韧化机理.....	6
1.3.1 钢的强韧化理论.....	6
1.3.2 微合金化钢的强化机理.....	7
1.3.3 微合金化钢的韧化机理.....	19
参考文献	23
2 微合金化元素在钢中的作用	25
2.1 微合金化的资源优势.....	25
2.2 合金化热力学和动力学基础.....	27
2.2.1 溶解度积表达式.....	27
2.2.2 碳氮化物析出的热力学模型.....	27
2.2.3 碳氮化物析出的动力学模型.....	30
2.3 钒在钢中的作用.....	31
2.3.1 概述.....	31
2.3.2 钒微合金化对组织的影响.....	32
2.3.3 钒微合金化对性能的影响.....	36
2.3.4 钒微合金化的强韧化机理.....	37
2.4 钛在钢中的作用.....	39
2.4.1 概述.....	39
2.4.2 钛微合金化对组织的影响.....	40
2.4.3 钛微合金化对性能的影响.....	42
2.4.4 钛微合金化的强韧化机理.....	44

2.5 铌在钢中的作用·····	45
2.5.1 铌微合金化技术与含铌微合金化钢·····	45
2.5.2 铌微合金化钢的强韧化机理·····	45
2.5.3 铌微合金化对组织和性能的影响·····	47
2.6 稀土在钢中的作用·····	49
2.6.1 钢中稀土的固溶度及固溶规律·····	50
2.6.2 钢中稀土对晶界的影响·····	51
2.6.3 钢中稀土与微合金元素的相互作用·····	53
2.6.4 稀土对相变和组织的影响·····	53
2.6.5 稀土对性能的影响·····	57
2.7 氮在钢中的作用·····	60
2.7.1 强化作用·····	60
2.7.2 细化晶粒作用·····	63
2.7.3 氮对钛微合金化的影响·····	64
2.7.4 氮对钒微合金化的影响·····	64
2.8 其它微合金化元素在钢中的作用·····	68
2.8.1 硼在钢中的作用·····	68
2.8.2 铝在钢中的作用·····	69
2.9 复合微合金化·····	70
参考文献·····	71
3 微合金化钢的控制轧制和控制冷却·····	75
3.1 微合金元素化合物在热轧中的溶解和析出·····	76
3.1.1 微合金化元素及其碳氮化物在奥氏体中的溶解·····	77
3.1.2 微合金化元素碳氮化物的析出·····	79
3.2 微合金元素在控轧控冷中的作用·····	85
3.2.1 铌的作用·····	86
3.2.2 钒的作用·····	88
3.2.3 钛的作用·····	90
3.2.4 微合金碳氮化物对奥氏体再结晶及晶粒长大的影响·····	92
3.3 微合金化钢的控轧控冷技术·····	93

3.3.1 控轧控冷技术的基本特点	94
3.3.2 控轧控冷工艺对组织和性能的影响	98
参考文献	103
4 高强高韧微合金化钢	105
4.1 超细晶粒钢技术	105
4.1.1 晶粒细化技术	106
4.1.2 超细晶粒钢国内外研究现状	108
4.1.3 微米级晶粒细化技术的应用	115
4.2 奥氏体的形变与再结晶	115
4.2.1 热形变过程中钢的再结晶行为	115
4.2.2 再结晶发生的条件	119
4.2.3 热形变过程中的动态和亚动态再结晶	121
4.2.4 合金元素对再结晶行为的影响	123
4.3 铁素体的形变与再结晶	125
4.3.1 铁素体动态再结晶及其对细化晶粒的贡献	125
4.3.2 铁素体动态再结晶机理	128
4.3.3 铁素体的静态再结晶	131
4.4 应变诱导相变	132
4.4.1 应变诱导相变对晶粒细化的贡献及其研究进展	132
4.4.2 工艺参数对应变诱导相变的影响	139
4.4.3 应变诱导相变的热力学基础	140
4.4.4 应变诱导相变的基本特征	141
4.4.5 应变诱导相变组织演变的基本特点	142
4.4.6 应变诱导相变细化晶粒的机理	143
参考文献	146
5 微合金化非调质钢	151
5.1 非调质钢的微合金化	151
5.1.1 合金元素的基本作用	151

5.1.2	微合金化对奥氏体的影响	154
5.1.3	微合金化元素在铁素体中的析出	155
5.1.4	微合金元素析出对强化的影响	156
5.1.5	微合金化元素对韧性的影响	157
5.2	非调质钢的加工工艺	159
5.2.1	概述	159
5.2.2	控轧控冷对奥氏体相变组织的影响	161
5.2.3	控轧控冷对力学性能的影响	165
5.3	非调质钢的种类	166
5.3.1	铁素体-珠光体型非调质钢	167
5.3.2	贝氏体型非调质钢	170
5.3.3	马氏体型非调质钢	179
5.3.4	其它类型的非调质钢简介	180
	参考文献	181
6	微合金化钢的应用	184
6.1	高强度油气管线钢	184
6.1.1	管线钢的发展	184
6.1.2	管线钢的微合金化	189
6.1.3	管线钢的微观组织和性能	193
6.1.4	管线钢生产	197
6.2	耐候钢	206
6.2.1	耐候钢的发展及现状	206
6.2.2	耐候钢的合金化	209
6.2.3	耐候钢的微观组织和性能	212
6.3	建筑用结构钢	216
6.3.1	建筑钢筋的技术要求	217
6.3.2	建筑钢筋的微合金化	218
6.3.3	建筑钢筋的生产	224
	参考文献	225

1 微合金化钢的概念和强韧化机理

随着技术的进步,对钢的性能要求越来越高,不仅要求具有高的强度,并且要具有良好的塑韧性、低的韧脆转变温度以及优异的加工性能。在微合金化和控轧控冷技术应用于生产之后,钢材的强度和韧性指标达到了一个新的水平。

钢的微合金化是材料和冶金领域的一项高新技术,即在钢中加入微量的铌(Nb)、钒(V)、钛(Ti)、硼(B)等碳化物、氮化物形成元素,在热循环或应变的作用下,通过 C、N 化合物的溶解和析出机制,钢铁材料的物理、化学及力学性能会产生十分明显的变化。

微合金化元素在钢中的作用很大程度上取决于工艺的配合,它不仅是细化晶粒和析出强化的效果,而且对钢的耐蚀性、耐热性、耐磨性以及其它的物理、化学性质的影响也是十分重要的。因此,微合金化技术的科研开发具有重要的意义。

1.1 微合金化钢的概念

微合金化技术是 20 世纪 70 年代在国际冶金界出现的新型冶金学科。微合金化钢是采用现代冶金生产流程生产的高技术钢铁产品。它是在普通的 C-Mn 钢或低合金钢中添加微量(质量分数通常小于 0.1%)的强碳氮化物形成元素(如铌、钒、钛等)进行合金化,通过高纯洁度的冶炼工艺(脱气、脱硫及夹杂物形态控制)炼钢,在加工过程中施以控制轧制/控制冷却等新工艺,通过控制细化钢的晶粒和碳氮化物沉淀强化的物理冶金过程,在热轧状态下获得高强度、高韧性、高可焊接性、良好的成形性能等最佳力学性能配合的工程结构材料——微合金化钢。

合金化与“冶炼”反应及结晶过程中元素参与形成或影响夹杂或生成有害的共晶相等产物和作用机理是不同的。从存在形态、结构与组织、性能三方面来描述,合金化的物理本质是:通过元素的固溶及其固态反应,影响微结构乃至结构、组织和组分,从而使金属获得要求的性能^[1]。

“微合金化”是指这些元素在钢中的含量较低,通常低于 0.1%(质量

分数)^[2]。与钢中不需要的残余元素不同,微合金化元素是为改善钢材的性能有目的地加到钢中的。合金化元素与微合金化元素不仅在含量上有区别,而且其冶金效应也各有特点:合金化元素主要影响钢的基体,而微合金化元素除了溶质原子的拖曳作用外,几乎总是通过第二相的析出而影响钢的显微组织结构。

根据各元素在周期表中的位置,可以大致确定其对钢的性能产生何种可能的影响。观察元素周期表4~6周期的IVB~VIB族元素,它们均有形成碳化物和氮化物的趋势,并且从元素周期表的右上角向左下方逐渐增强;形成氮化物的倾向要强于形成碳化物的倾向。第IVB族还有更高的形成氧化物和硫化物的倾向,而VIB族元素与非金属化合物的亲和力比IVB族和VB族元素低。此外,VIB族元素的碳化物具有正斜方体和六角体的晶体结构,而IVB族和VB族元素的碳化物具有面心立方结构,面心立方结构与钢的立方基体具有一定的共格性,这对钢的性能有益。有效影响钢的显微组织结构的析出质点是在热加工中形成的,因此要求微合金化元素首先必须固溶在基体中。化学元素在钢基体中的固溶能力取决于该元素的原子尺寸与铁原子尺寸之差。表1-1为各种难熔元素的原子半径^[3]。

表 1-1 难熔元素原子半径

元 素	原子半径/nm	与铁原子半径之比
Ti	0.147	1.15
V	0.136	1.06
Cr	0.128	1.00
Zr	0.160	1.25
Nb	0.148	1.16
Mo	0.140	1.09
Hf	0.168	1.31
Ta	0.148	1.16
W	0.141	1.10

通常称之为微合金化元素的多数指的是铌(Nb)、钒(V)、钛(Ti),有时还包括硼(B)、铝(Al)及稀土(RE)。

微合金化元素在钢中应用的基本原理(见表 1-2^[4])在于其在钢中的固溶、偏聚和沉淀作用,尤其是微合金化元素与碳、氮交互作用,产生了诸如晶粒细化、析出强化、再结晶控制、夹杂物改性等一系列的次生作用,这些因素对钢的强韧化所起的作用被广泛地应用于各类钢铁产品。

表 1-2 微合金化元素在钢中的主要作用

基本作用	固溶作用	
	偏聚作用	
	与 C、N、S、P 的交互作用和固定它们的作用	
	沉淀	
次生作用	硫化物形状控制	IF 状态
	晶粒细化	再结晶控制
	热影响区(HAZ)韧性控制	织构的发展
	淬硬性提高	晶界强化
		在搪瓷时成为氢陷阱
在镀锌时控制扩散		
主要有关产品	热轧的	冷轧的

微合金化钢的开拓是钢的微合金化最为突出的技术进展,其原因不仅在于改进工艺、降低成本的需要,主要是大大改善了钢的力学性能和使用工艺特性。在钢加热、冷却和形变过程中其碳氮化物具有溶解-析出行为,对钢的物理、化学性质和力学性能有明显的影响。微合金化钢通常在热机械处理(包括控轧控冷)状态下作为工程和机械结构用材或冷冲压用材,典型的应用领域为油气输送管线、桥梁、船舶、工程机械、输电线塔、高层建筑、汽车、铁轨以及电站、码头等。

1.2 微合金化钢技术发展历程

微合金化技术是 20 世纪 70 年代出现的新型冶金学科,是传统钢铁生产向现代化冶金生产转变的重要标志。

20 世纪 60~70 年代是微合金化钢的理论和技術取得重要进展的时期。将 Hall-Petch 关系式应用于描述低碳钢和微合金钢的强度与晶粒尺寸的关系,明确提出了晶粒细化不仅可有效提高钢的强度而且还可提高

钢的韧性,特别是改善钢的韧脆转折温度。观测到含铌钢的屈服强度与晶粒尺寸关系明显偏离传统的 Hall-Petch 关系,并由此发现在铁素体中沉淀析出了非常微细的碳化铌、氮化铌或碳氮化铌沉淀相导致附加强化。这一期间的重要研究进展包括^[5]:第二相阻止晶粒粗化原理的提出及微合金碳氮化物用于控制奥氏体晶粒;微合金碳氮化物在奥氏体中的固溶度积公式及微合金元素的溶解与微合金碳氮化物的沉淀规律;稀溶体中第二相的 Osterwald 熟化过程及微合金碳氮化物的粗化规律;微合金化元素对形变奥氏体再结晶行为的影响;微合金化钢的控轧控冷技术;微合金化钢中夹杂物对性能的影响规律和夹杂物改性控制技术;微合金化钢中渗碳体或珠光体对性能的影响规律及低珠光体钢和针状铁素体钢的研制开发;微合金化钢的组织-性能关系式与微合金化钢设计。标志性的国际会议——“Microalloying'75”对这一时期微合金化钢的研究开发及生产应用工作进行了充分的总结^[6],确立了微合金化钢的地位和进一步发展的方向,使得微合金化钢成为重要发展方向。

20 世纪 80 年代是微合金化钢的迅速发展时期。特别是 90 年代后期,世界主要钢铁生产国相继制定和实施新一代钢铁材料研究发展计划,超细组织、高洁净度、高均匀度和微合金化是钢铁材料的重要发展趋势;微合金化钢的研究与生产应用获得了更为广泛的认同和重视。这一时期的主要工作有:复合微合金化原理;微合金碳氮化物的沉淀析出次序;高等级石油管线钢的研发;微钛处理奥氏体晶粒尺寸的原理及其普遍应用;微合金碳氮化物在铁素体中的固溶度积公式及其在铁素体中沉淀析出强化原理;微合金化奥氏体的形变热处理原理及控制轧制技术,特别是控制动态再结晶轧制技术的广泛应用;微合金化钢连铸连轧生产技术;微合金化原理的系统理论;钢铁基体组织的超细化技术与超细晶粒钢的研发;无珠光体钢乃至无间隙原子钢(IF Steels)的研发,特别是在汽车用钢方面的生产应用;形变诱导铁素体相变(DIFT)技术;短流程紧凑生产(TSCR)微合金钢技术;高洁净度微合金化钢等。

微合金化钢的生产和应用已成为衡量一个国家钢铁工业发展水平的重要指标。目前,微合金化钢占钢材总量的比例,世界平均水平为 10%~15%,工业化国家达到 30%左右,而我国不足 5%。全世界微合金钢生产中钒的消耗强度已经达到吨钢 0.05 kg,铌的消耗强度已经达到吨钢 0.6~0.8 kg;而中国钒的消耗强度约为吨钢 0.025 kg,铌的消耗强度为

吨钢 0.01~0.12 kg。目前,微合金化钢的主要品种有微合金化高强度抗震钢筋、高强度薄板坯连铸连轧带钢、微合金化耐候钢、微合金化管线钢、微合金化非调质钢等。

微合金化技术之所以得到迅速的发展和广泛应用,在于世界各国材料研究工作者 20 多年的通力研发,以及美国、前苏联和其它一些国家的石油、天然气管线工程对管线钢不断提出高强度、高韧性、高可焊接性及耐腐蚀性的要求。

我国自 1979 年引入钢的微合金化技术以来,经历了 3 个不同的进展阶段^[7]:

- (1) 用微合金化技术改造我国原有的低合金高强度钢体系;
- (2) 微合金化技术与控轧控冷技术的结合,开发市场急需的微合金化钢新品种;
- (3) 微合金化技术在新一代钢铁材料研发中的应用。

国外进展及其发展趋势大致可归纳如下:

(1) 微合金化技术的应用,以晶粒细化强化最为重要。晶粒细化和碳氮化物析出是微合金化钢强韧化的基础。钢的组织性能的关系以及以晶粒尺寸为主导的强度表达式,仅适于常规轧制的铁素体-珠光体类型组织。正试图探讨涵盖微珠光体、针状铁素体、超低碳贝氏体等组织类型、以碳氮化物析出等诸参数为主导的强度表达式。

(2) 热机械处理(TMCP)的出发点在奥氏体调节,归宿于 $\gamma \rightarrow \alpha$ 的富化生核。由此把控制轧制归纳为高温再结晶控轧和正常化控轧两类。第一类控轧钢的微合金化设计,主要基于对再结晶的延缓力和再结晶驱动力的影响因素的考察,主要由形变诱导机制进行的第二类控轧钢的合金设计,构成 TMCP 工艺物理冶金的核心。

(3) 生产装备和生产工艺现代化对钢的性能的影响集中体现在钢的精炼、连铸及轧后的控制冷却,亦即钢的洁净化、铸坯结构及精细组织、最终的相变动力学三者建立起了新的微合金化钢强韧化理论。

(4) 复合微合金化得到了广泛的应用。近 10 年来开发了高温塑性连铸钢、大线能量焊接无裂纹钢、深冲冷成形钢、烘烤硬化钢、抗硫化氢应力腐蚀钢、无时效倾向桥梁钢、低屈强比抗震钢等一系列钢材新品种,在钢的性能高级化方面获得了极大的进步。

(5) 已成功开拓了铌在低碳建筑材料中的应用,在中碳锻钢和高碳

线材中的应用,以及在合金钢和高合金钢中的应用。

目前,微合金化钢进一步的开拓将致力于获得特优性能的物理冶金以及微合金化元素的溶解-析出行为等领域。

1.3 微合金化钢的强韧化机理

1.3.1 钢的强韧化理论

技术的进一步发展对钢的性能要求越来越高,不仅要求具有高的强度,并且要具有良好的塑韧性、低的韧脆转变温度以及优异的加工性能(焊接性能、冷成形性能等)。除对钢材性能的全面要求提高之外,在钢材的使用上,不断要求降低材料用量、减少工艺环节、削减生产成本。正是在这种背景下,微合金化钢的性能在不断提高,生产微合金化钢所应用的技术也越来越先进。在微合金化和控轧控冷技术应用于生产之后,钢材的强度和韧性指标达到了一个新的水平。同时,材料的强韧化理论研究也随之发展。在钢材应用上,其室温屈服强度 σ_s (或条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$)、抗拉强度和韧脆转变温度 T_c 是钢材的几项基本的力学性能指标。在大多数条件下, σ_s 和 T_c 是设计选材的最基本标准。因此,提高钢的 σ_s 和降低 T_c ,一直是钢铁材料研究和开发的重点。

材料的强化方式包括沉淀析出强化、细晶强化、相变强化、固溶强化(置换强化和间隙强化)、位错及亚晶强化等。对于不同种类的钢,其强化方式各有特色,既可以是单一的强化方式,也可以是多种强化方式的复合。对材料强度的影响可以用修正的 Hall-Petch 公式表示^[8]:

$$\sigma_y = \sigma_0 + \sigma_{ss} + \sigma_{int} + \sigma_{ppt} + \sigma_{trnsf} + \sigma_{disl} + k_y d^{-1/2} \quad (1-1)$$

式中 σ_0 ——晶格摩擦力(阻碍位错运动的力和晶格阻力);

σ_{ss} ——置换强化增量;

σ_{int} ——间隙强化增量;

σ_{ppt} ——析出强化增量;

σ_{trnsf} ——相变强化增量;

σ_{disl} ——位错及亚结构强化增量;

k_y ——晶界强化因子;

d ——晶粒直径。

虽然,钢的强化可以简化为用各项强化增量迭加来表达,但是,在钢中同时加入多种微量元素,它们共同和各项强化机制对强化量的影响,并不是每个元素单独加入时影响量的简单数学迭加,而是呈指数关系增加,以达到多元微量代替单元多量的效果,甚至获得单元或少元合金化难以达到的效果。

材料的**韧脆转变温度** T_c 是衡量材料韧性的**重要指标**,一般采用 50%FATT(**裂纹扩展转变温度**)作为转变温度。在其它条件相当的情况下,随着晶粒尺寸的变小,材料的**韧脆转变温度**下降。Pickering 等对低碳钢提出了**韧脆转变温度**的表达式:

$$T_c = a - b d^{-1/2} \quad (1-2)$$

式中, a 包括了除晶粒直径以外的其它所有因素对**韧脆转变温度**的影响,而 $b d^{-1/2}$ 为晶粒直径对**韧脆转变温度**的影响。一般 $b = 11.5^\circ\text{C}/\text{mm}^{1/2}$ 。当铁素体直径由 $20\ \mu\text{m}$ 细化到 $5\ \mu\text{m}$ 时,可使 T_c 下降 81°C 。晶粒细化的脆化矢量为 $-0.80^\circ\text{C}/\text{MPa}$,而析出强化和相变强化的脆性矢量为 $0.46^\circ\text{C}/\text{MPa}$,因此晶粒细化可以在有效提高强度的同时,使**韧脆转变温度**大幅度降低,而其它能有效提高钢材强度的强化方式都将导致**韧脆转变温度**提高。

1.3.2 微合金化钢的强化机理

1.3.2.1 晶粒细化强化

晶粒细化是钢最主要的强化方式之一,同时,它也是钢铁材料大幅度提高韧性的最重要的**韧化方式**。

晶粒细化之所以既能提高钢的强度,又能提高钢的韧性,其原因是:材料的晶粒越细,晶界面积就越大,而晶界两边的晶粒的取向完全不同且完全无规则,并且晶界是原子排列相当紊乱的地区。因此,当塑性形变和微裂纹由一个晶粒穿过晶界进入另一个晶粒时,由于晶界阻力大,穿过晶界就比较困难;另外,穿过晶界后滑移方向和裂纹扩展又需改变。与晶内的形变及裂纹扩展相比,这种既要穿过晶界而又要改变方向的形变及裂纹扩展将要消耗很大的能量,故晶界的存在将使材料的强度和韧性都得到提高,并且材料的晶粒越细,材料的强度和韧性就越高。

Hall 和 Petch 首先独立地得出了晶粒细化强化的 Hall-Petch 公式,晶粒细化对屈服强度的贡献可用下式表示: