



新型材料 特性及其应用

胡德昌 胡 滨 编著

广东科技出版社

新型材料特性及其应用

胡德昌 胡 滨 编著

广东科技出版社

图书在版编目(CIP)数据

新型材料特性及其应用/胡德昌等编
著. —广州:广东科技出版社,1996. 9

ISBN 7-5359-1524-8

- I. 新…
- II. 胡…
- III. 金属材料加工性能-手册
- IV. TG14

出版发行: 广东科技出版社

(广州市环市东路水荫路11号 邮码:510075)

经 销: 广东省新华书店

印 刷: 番禺市印刷厂

(番禺市市桥镇环城西路工农大街45号 邮码:511400)

规 格: 787×1092 1/16 印张46.25 字数1097千

版 次: 1996年9月第1版

1996年9月第1次印刷

印 数: 1—3 200册

ISBN 7-5359-1524-8

分 类 号: TG·15

定 价: 80.00元

新书信息电话: 16826202

如发现因印装质量问题影响阅读,请与承印厂联系调换。

内 容 简 介

这是一部介绍当今世界新材料现状及科学技术前沿的工具书,论述了新型金属结构材料,非晶、准晶及纳米材料,高性能复合材料,新型功能材料的组织结构、加工工艺、各种特性以及实际应用等各个领域。全书共9章,包括:微合金化高强度钢;超高强度钢;不锈钢;低温钢;新型高温合金;新型轻合金;非晶、准晶态合金与纳米材料;新型复合材料;新型功能材料。

本书涉及领域广泛而深入,引用的数据新颖全面,论述严谨。既反映了新材料发展的最新水平,又概括了我国在新材料方面的新成就。每章自成一体,各章彼此呼应,全书连贯性、系统性好。

本书可供从事材料、冶金、机械、化工、国防建设等领域的广大科技人员及大专院校有关专业师生参考。

序 言

材料是人类进步的里程碑,是现代文明的重要支柱。一般而言,材料可分为传统材料与新材料两大类。新材料是指那些新近开发或正在开发的、具有优异性能的材料。新材料是高科技的一部分,同时它又为高科技服务,是许多高科技的基础。新材料是多种学科相互交叉和相互渗透的结果,是大量研究工作的结晶。新材料对高科技和新技术具有非常关键的作用,没有新材料就没有发展高科技的物质基础。掌握新材料是一个国家在科技上处于领先地位的标志之一。因此,世界各工业发达国家都把新材料的研究与开发列为发展国民经济的重要组成部分。

面向 21 世纪,新材料的发展趋势有下列几方面:

(一) 继续重视高性能的新型金属结构材料

所谓高性能的结构材料就是具有高强度、高韧性、耐高温、耐低温、抗腐蚀、抗辐射……等性能的材料,这种材料对发展空间技术、核能、海洋开发、石油、化工及交通运输……,有极其密切的关系。面向 21 世纪的新型结构材料中,金属材料仍占主导地位。这种发展主要是采用新技术和新工艺,例如合金成分的合理物理冶金设计,微量元素的加入与控制,特殊组织结构的控制,从而大幅度提高材料的性能。

(二) 研究与开发非晶合金和纳米材料

非晶合金(金属玻璃)作为一种新材料,在国内外受到极大重视。今天非晶合金在电子、能源、抗蚀材料等领域得到日益广泛的应用,显示了它的无比生命力。随着生产工艺的不断完善,研究的不断深化,非晶合金逐渐成为一种具有广阔前景的新材料。

纳米材料(nano materials)是近年来为材料科学家和材料生产企业所注目的新型材料。纳米材料是由直径为纳米(nm)数量级的粒子压缩而成。它包括体积分数相等的两部分:(1)直径为几个纳米的粒子,它具有长程序的晶状结构;(2)粒子间的分界面,是既没有长程序也没有短程序的无序结构。这种结构特点使纳米材料具有与传统材料极不相同的性能,从而显示了它发展成为高科技领域中的一种新材料的潜力。

(三) 复合材料是高性能新型结构材料最重要的发展趋势

现代复合材料的开发经历了以下几个阶段:第一代是玻璃钢;第二代是树脂与碳纤维的复合;第三代则是正在发展中的金属基、陶瓷基和碳/碳复合材料。目前国际国内重点开发研究第三代复合材料,其品种与性能日新月异。例如

美国“星球大战”计划中的材料部分主要为第三代复合材料。B-2 隐形轰炸机的构架和蒙皮大部分用复合材料制成。金属基复合材料则正用于宇宙飞船大口徑天线系统等方面。碳/碳复合材料的使用温度可达 2200 C,它是火箭壳体的理想材料,现已应用于火箭发动机喷管和烧蚀层。

(四) 新材料中的佼佼者——功能材料,如异军突起,建立奇功

功能材料是当代新技术如能源技术、信息技术、计算技术、空间技术、海洋技术、生物工程技术……的物质基础,是新技术革命的先导和引爆剂。功能材料是 90 年代材料研究与生产中最活跃的领域,其中以信息功能材料(如光学纤维与光通讯、信息存储材料、敏感材料等)和能源功能材料(如永磁材料、超导材料、太阳能转换材料、贮氢合金等)发展最为迅猛。

(五) 新材料工程日新月异,它促进了新材料的发展

今天传统材料工程与工艺已不适应新材料的蓬勃发展。新材料工程与工艺(如材料表面改性与优化工程和工艺、激冷凝固工程和工艺、低维材料工程和工艺、超塑性加工工程和工艺……)便应运而生,不断涌现,它加速了新材料的发展。

本书围绕 90 年代国际国内新材料的研究开发重点与中心,并根据国内外最新研究成果与文献资料,试图对高科技领域中新材料的成分、组织结构、性能、应用,新材料工程与工艺以及新材料的发展趋向作一综合概括和分析;为了使编写的内容简明扼要,在各章节中采用了某些表格对各类新材料进行归纳和对比,以供读者选用新材料时参阅。全书共分九章,第一~第六章为新型金属结构材料;第七~第九章为非晶、准晶、纳米材料,新型复合材料和新型功能材料。其中第九章为长沙交通学院胡滨撰写,其余各章为胡德昌撰写,全书由胡德昌修改定稿。曹军同志为本书绘制全部插图。

作者希望本书能对广大科技人员开拓新材料科学知识领域稍有裨益。由于水平有限,错误与缺点在所难免,敬希读者批评指正。

胡德昌 1995 年 9 月于湖南大学
(长沙 岳麓山)

目 录

第一章 微合金化高强度钢	1
第一节 微合金化低碳高强度钢的物理冶金设计	1
一、强化机制	1
二、钢的组织和成分设计	6
三、控制轧制	11
四、控制夹杂物形态	13
第二节 微合金化低碳高强度钢	15
一、高强度低合金钢(HSLA)的发展简史	15
二、常用微合金化低碳高强度钢	16
三、海洋用微合金化低碳高强度钢	20
四、抗大气腐蚀用微合金化低碳高强度钢	23
五、抗氢蚀用微合金化低碳高强度钢	25
六、压力容器用微合金化低碳高强度钢	27
第三节 微合金化低碳铁素体-马氏体双相钢	28
一、概述	28
二、“双相钢”组织与性能的变化规律	29
三、“双相钢”的组织和成分设计	31
四、热处理“双相钢”和热轧“双相钢”	32
五、“双相钢”的发展趋势	33
第四节 微合金化中碳非调质钢	34
一、概述	34
二、微合金化元素的作用	35
三、组织与性能的变化规律	36
四、组织-成分设计	40
五、微合金化中碳非调质钢的现状及其发展趋势	41
第二章 超高强度钢	43
第一节 概论	43
第二节 低合金超高强度钢	44
一、低合金超高强度钢的物理冶金设计	44
二、低合金超高强度钢的强化机制	46
三、低合金超高强度钢的强韧性	49
四、低合金超高强度钢的现状及其发展趋势	51
第三节 低碳马氏体型超高强度钢	54
一、低碳马氏体型超高强度钢的成分-组织设计	54
二、低碳马氏体型超高强度钢的韧化机制	55
第四节 马氏体时效钢	56

一、相图与合金相结构	58
二、马氏体时效钢的物理冶金设计原则及应用	61
三、马氏体时效钢的强韧化机制	62
四、马氏体时效钢的性能	64
五、马氏体时效钢的热处理	65
六、马氏体时效钢的发展趋势	67
第五节 超高强度钢的应力腐蚀断裂	69
一、概述	69
二、应力腐蚀断裂机理	70
三、超高强度钢的应力腐蚀性能	71
四、影响超高强度钢的应力腐蚀性能的因素	73
第三章 不锈钢的新进展	75
第一节 不锈钢的物理冶金学	75
一、概述	75
二、与不锈钢相关的合金相图	75
三、不锈钢的抗蚀性与合金化	81
第二节 铁素体不锈钢的进展	84
一、概述	84
二、铁素体不锈钢的脆性	85
三、超纯铁素体不锈钢的新进展	86
第三节 奥氏体不锈钢	90
一、奥氏体不锈钢的物理冶金设计	90
二、典型奥氏体不锈钢	93
三、新型奥氏体不锈钢	95
第四节 其他新型不锈钢	98
一、奥氏体-铁素体双相不锈钢的发展	98
二、新型易切削不锈钢	99
第五节 不锈钢的发展趋势	99
第四章 低温钢	110
第一节 低温脆断失效	110
一、温度对转变过程的影响	110
二、缺口韧性与断裂韧性	111
第二节 低温钢的物理冶金学问题	114
一、冶金因素与韧-脆断裂转变	114
二、合金化原理	115
三、低温钢的成分-组织的物理冶金设计原则	115
四、改善低温钢韧性的措施	116
第三节 新型低温钢	117
一、中国的低温钢系列	117
二、含镍低温钢的新进展	119
三、超低温奥氏体钢的发展	123
第五章 新型高温合金	125

第一节 高温合金的物理冶金学	125
一、概述	125
二、高温合金的强化机制	126
三、高温合金的物理冶金学	129
第二节 高温失效	130
一、蠕变	130
二、热疲劳	133
三、热腐蚀	133
第三节 铁基和铁镍基高温合金	136
一、概述	136
二、中国的铁基、铁镍基高温合金	138
三、美、英、俄、德等国的铁基与铁镍基高温合金	144
第四节 镍基高温合金	150
一、变形镍基高温合金	150
二、铸造镍基高温合金	161
三、美、英等国的镍基高温合金	170
第五节 钴基高温合金	182
一、概述	182
二、中国的钴基高温合金	183
三、美、英等国的钴基高温合金	184
第六节 定向凝固高温合金	191
一、概述	191
二、中国的定向凝固高温合金	191
第七节 单晶高温合金	194
一、概述	194
二、单晶高温合金成分-组织的物理冶金设计原则	195
三、单晶高温合金的制备方法	196
四、中国的单晶高温合金	197
五、新型单晶高温合金	200
第八节 粉末冶金高温合金	206
一、概述	206
二、粉末冶金高温合金零件的工艺流程	207
三、粉末冶金高温合金	207
四、存在的问题	207
第九节 快速凝固高温合金	208
一、快速凝固镍基高温合金	208
二、快速凝固钴基高温合金	211
第十节 金属间化合物高温合金	211
一、概述	211
二、 Ni_3Al 金属间化合物	212
三、 NiAl 金属间化合物	214
四、 Ti_3Al 金属间化合物	214

五、TiAl 金属间化合物	215
六、应用前景	215
第十一节 难熔金属及其合金——在超高温下使用的合金	216
一、概述	216
二、钽及钽合金	216
三、铌及铌合金	218
四、钨及钨合金	223
五、钼及钼合金	225
六、铱及铱合金	228
第六章 新型轻合金	237
第一节 铝合金的物理冶金学	237
一、概述	237
二、铜、锌、镁、锂在铝中的固溶度	237
三、铝合金的固溶处理与时效	239
四、铝合金的时效强化原理	240
第二节 变形铝合金	247
一、概述	247
二、硬铝合金	248
三、超硬铝合金	249
四、中国的变形铝合金	250
五、变形铝合金的国际牌号系统(IADS)	259
六、铝合金状态和热处理命名法	261
七、世界各国的变形铝合金	265
八、变形铝合金的应力腐蚀	271
九、高强度变形铝合金的断裂韧性	272
第三节 铸造铝合金	273
一、概述	273
二、中国的铸造铝合金	273
三、美、英的铸造铝合金	278
第四节 快速凝固新型铝合金	281
一、快速凝固高强度铝合金	282
二、快速凝固高温铝合金	282
第五节 新一代铝合金——铝锂系合金	283
一、概述	283
二、合金化原理	285
三、新型铝锂系合金的生产方法	289
四、铝锂系合金的热处理制度	290
五、新型铝锂系合金的力学性能	291
六、铝锂系合金的疲劳性能	292
七、快速凝固铝锂系合金	293
八、铝锂系合金的应用及展望	293
第六节 钛合金的物理冶金学	294

一、概述	294
二、钛的特性	295
三、钛合金相图	296
四、钛合金化原理	297
五、钛合金的分类	300
第七节 钛合金的热处理	302
一、钛合金的热处理原理	302
二、钛合金的热处理工艺	305
第八节 面向 21 世纪的钛合金	306
一、中国钛合金	306
二、世界各国钛合金	312
三、新型高温钛合金	320
四、快速凝固新型钛合金	322
第九节 镁合金的物理冶金学	323
一、概述	323
二、镁合金化原理	324
三、镁合金的热处理	325
第十节 新型镁合金	327
一、中国的镁合金	327
二、世界各国镁合金	333
三、快速凝固新型镁合金	337
四、Mg-Li 系合金——新型超轻合金	338
第七章 非晶、准晶态合金与纳米材料	340
第一节 非晶合金概论	340
一、非晶合金的结构特征	340
二、非晶态结构模型	342
三、非晶合金的结构缺陷	344
四、非晶转变	345
五、非晶合金的分类	346
第二节 非晶合金形成的热力学	348
一、合金成分的影响	348
二、原子的相互作用	349
三、原子尺寸效应	349
四、位形熵(S)	349
五、组元之间键合特性的影响	349
第三节 非晶合金形成的动力学	350
一、结晶动力学的理论基础	350
二、非晶合金形成的动力学	352
三、非晶态形成的判据	355
第四节 非晶合金的制造工艺	357
一、非晶合金膜的制造工艺	357
二、液体激冷法	358

三、机械合金化(Machanical Alloying)	360
第五节 非晶合金的结构稳定性	360
一、结构弛豫	361
二、非晶合金的晶化	361
三、影响非晶合金结构稳定性的因素	363
第六节 非晶合金的抗蚀性能	364
一、非晶合金抗蚀性能的主要特征	364
二、非晶合金的抗蚀机理	367
第七节 非晶合金的磁性	369
一、概述	369
二、非晶合金的磁化曲线	371
三、非晶磁性合金的分类	372
四、非晶软磁合金	373
第八节 非晶合金的电学性能	378
一、非晶合金的电性特点	378
二、非晶合金的电阻率与温度的关系	379
三、控制非晶合金的电阻温度系数的途径	379
四、非晶电性材料的应用	380
第九节 非晶合金的力学性能	381
一、强度与硬度	381
二、变形与断裂	383
三、韧性	384
四、疲劳	385
第十节 非晶合金的应用	385
一、用于制作软磁、低损耗磁性器件	386
二、用于制作高导磁器件(表 7-29)	389
三、非晶合金的其他应用(表 7-35)	393
四、铝基非晶合金的性能	393
五、中国非晶合金的研制与应用	394
第十一节 非晶合金的新进展	400
一、非晶合金制备的新进展	400
二、非晶永磁合金的演进	401
三、新型非晶结构材料	401
四、功能非晶合金的应用	402
五、展望	402
第十二节 准晶态合金	402
一、概述	402
二、准晶的分类	403
三、准晶的形成和制备方法	403
四、准晶的结构	404
五、准晶的性能	405
六、准晶态合金的稳定性	407

第十三节 纳米材料	407
一、基本概念	407
二、纳米材料的制备方法	408
三、纳米材料的结构	410
四、纳米材料的性能	411
五、纳米材料的应用与展望	413
第八章 新型复合材料	415
第一节 概论	415
一、历史的回顾	415
二、复合材料的定义	416
三、复合材料的分类	416
四、复合材料质量检验方法	418
五、复合材料是新型材料发展的重点	419
第二节 聚合物基复合材料的新进展	420
一、聚合物基体相	421
二、增强材料	432
三、聚合物基复合材料的界面	437
四、纤维增强树脂复合材料(Fiber Reinforced Plastics, 简称FRP)的进展	442
第三节 金属基复合材料	450
一、金属基复合材料的分类	451
二、纤维增强金属基复合材料	451
三、晶须增强金属基复合材料	460
四、定向凝固共晶型复合材料	460
五、TiAl 基复合材料	467
六、金属基复合材料的界面	468
七、金属基复合材料的应用前景	470
第四节 陶瓷基复合材料	471
一、提高陶瓷材料韧性的方法	471
二、纤维增强陶瓷(FRC)	472
三、陶瓷基复合材料的应用前景	476
第五节 碳纤维增强碳基复合材料	477
一、概述	477
二、碳纤维	478
三、碳/碳复合材料的制造工艺	480
四、碳/碳复合材料的性能	481
五、碳/碳复合材料的发展前景	483
第六节 混杂纤维增强复合材料	485
一、概述	485
二、混杂化的作用	485
三、混杂复合材料的性能	487
四、纤维增强铝合金层板	487
五、混杂复合材料的应用	492

第七节 功能复合材料	492
一、概述	492
二、导电高分子复合材料	493
三、精细复合功能材料	498
四、树脂基、金属基、陶瓷基功能复合材料述评	499
第八节 复合材料的应用	501
一、复合材料在宇航、航空领域中的应用及发展	501
二、复合材料在船舰上的应用	507
三、复合材料在车辆制造中的应用	508
四、复合材料在电子工业中的应用	510
五、复合材料在化学工业中的应用	511
六、复合材料在其他方面的应用	512
七、复合材料的发展前景	515
第九章 新型功能材料	517
第一节 功能材料概论	517
一、功能材料的定义及其特点	517
二、功能材料的分类	517
三、功能材料的新进展	523
四、新材料工程的涌现,将促进新型功能材料的发展	524
第二节 减振合金	525
一、概述	525
二、减振机制和表征合金减振性能的参数	525
三、减振合金	527
四、减振合金的应用	532
第三节 形状记忆合金	534
一、热弹性型马氏体相变	535
二、形状记忆效应和相变伪弹性	539
三、单程 SME、双程 SME、全方位 SME	542
四、Ti-Ni 形状记忆合金	544
五、铜基形状记忆合金	552
六、铁基形状记忆合金	558
七、形状记忆合金的应用及其发展	562
第四节 磁学功能材料	566
一、磁学功能材料的理论基础	567
二、软磁材料	581
三、永磁材料概论	594
四、稀土钴永磁材料	606
五、钕铁硼永磁材料	611
第五节 电学功能材料	621
一、超导材料	621
二、半导体材料	632
第六节 光学功能材料	649

一、激光晶体材料	649
二、非线性光学材料	667
三、光学纤维材料	672
第七节 功能陶瓷材料	686
一、概述	686
二、功能陶瓷的组织结构	688
三、功能陶瓷的制造工艺	693
四、电子功能陶瓷	695
五、热学功能陶瓷	705
六、生物功能陶瓷	714
七、功能陶瓷的发展	715
注释	717
主要参考文献	722

第一章 微合金化高强度钢

第一节 微合金化低碳高强度钢的物理冶金设计

微合金化低碳高强度钢^①是在普通低合金钢基础上迅速发展起来的新型工程结构用钢。它在高压容器、输油管道、船舶、桥梁、建筑、车辆、石油、化工和大型军事工程结构上获得日益广泛的应用,具有很高的经济效益。微合金化低碳高强度钢通过化学成分的合理设计、运用各种强化机制以及控制轧制、控制冷却等工艺的有机结合,使钢具有较高的屈服强度和屈强比,优良的韧性、塑性,高的脆断抗力和低的脆性转变温度,以及良好的成型性和焊接性能。

一、强化机制

微合金化低碳高强度钢主要通过下列几种机制进行强化:①固溶强化;②第二相粒子沉淀强化;③细化晶粒强化;④形变强化(因加工硬化而引入的位错强化);⑤相变强化等。这类钢的强化并非单一的强化机构所决定的,即它的强度是由几种强化机制迭加而获得的。当各种强化机制之间交互作用很小时,微合金化低碳高强度钢的组织-性能关系式可用(1-1)式表达:

$$\sigma_s(\text{MPa}) = \sigma_{\text{PN}} + \sigma_{\text{IN}} + \sigma_{\text{R}} + \sigma_{\text{G}} + \sigma_{\text{SG}} + \sigma_{\text{D}} + \sigma_{\text{ph}} + \sigma_{\text{pear}} + \sigma_{\text{T}} \quad (1-1)$$

式中 σ_s —— 屈服强度(MPa);

σ_{PN} —— 派纳力(MPa),即点阵内摩擦力;

σ_{IN} —— 间隙固溶强化项(MPa);

$$\sigma_{\text{IN}} = K_{\text{C}}[\text{C}] + K_{\text{N}}[\text{N}] \quad (1-2)$$

[C]、[N]分别为处于间隙固溶态的碳、氮含量百分数, K_{C} 、 K_{N} 为比例系数。

σ_{R} —— 置换固溶强化项(MPa);

σ_{SG} —— 亚结构强化项(MPa);

$$\sigma_{\text{SG}} = K_{\text{SG}} f_{\text{SG}} d_{\text{SG}}^{-1} \quad (1-3)$$

其中 d_{SG} 为亚晶平均直径, f_{SG} 为亚晶体积分数, K_{SG} 为比例系数。

σ_{G} —— 细化晶粒强化项(MPa);

σ_{D} —— 位错强化项(MPa);

$$\sigma_{\text{D}} = \sigma_i + \alpha \mu b \rho^{1/2} \quad (1-4)$$

^① 对于钢的强度等级分类,目前尚无明确的界限。但一般认为: $\sigma_b \geq 600$ MPa的钢称为高强度钢, $\sigma_b \geq 1500$ MPa、 $\sigma_{0.2} > 1400$ MPa,且具有较高的比强度和一定韧性的钢,称为超高强度钢。

其中 σ_i 等于位错密度为零时的流变应力, μ 是切变模量, b 是柏氏矢量, ρ 是位错密度。

σ_{ph} —— 沉淀强化项(MPa);

σ_{pear} —— 珠光体强化项(MPa);

σ_T —— 织构强化项(MPa), 随织构类型和织构强度而变, 并造成钢材各向异性。

(一) 固溶强化

当溶质原子溶入基体金属中形成固溶体时, 将使金属强化, 称为固溶强化, 它是强化金属的基本途径之一。固溶强化可分为间隙固溶强化和置换固溶强化两种。

1. 间隙固溶强化

在微合金化低碳高强度钢中, 碳、氮等溶质原子可嵌入基体 α -Fe 晶体点阵的八面体间隙中, 使点阵产生不对称正方性畸变 ($c/a > 1$), 造成强硬化效应。钢基体的屈服强度随着间隙原子(C、N) 含量的增加而增大, 强化增量与碳原子含量的平方根呈直线关系。在钢中由于溶质原子(C、N) 的应力场与位错应力场要发生弹性交互作用, 产生交互作用能。因此溶质原子(C、N) 将聚集在位错线邻近以降低体系的畸变能, 形成溶质原子气团——柯氏气团(Cottrell Atmosphere)。室温下带有柯氏气团的位错在外力作用下, 只要溶质原子的扩散速度和位错线移动的速度相当, 位错线可以拖着气团一起运动。当位错被气团钉扎时, 移动阻力增大, 为使位错挣脱气团而运动, 就必须施加更大的外力, 因此增加了钢的塑性变形抗力, 从而使钢的屈服强度提高。

此外, 间隙原子(C、N) 还可以与螺型位错的切应力场发生交互作用, 使 C、N 原子在位错线附近呈有规则的排列, 构成斯鲁克(Snoek)气团。当螺型位错被气团钉扎时, 亦使钢产生强化。

必须指出, 微合金化低碳高强度钢在力学性能上的一个重要特点是对钢中微量杂质、主要是间隙杂质极为敏感, 即钢中基体(铁素体)的间隙固溶强化效应非常显著, 但它却严重地损害了钢的塑性和韧性以及焊接性能。 α -Fe 的碳、氮间隙固溶量非常有限, 其使用量的变化幅度很小。对于新型微合金化低碳高强度钢不仅强度高于高强度低合金钢(HSLA), 而且碳含量控制在 0.03%。由于采用新的精炼方法, 钢中杂质元素被严格监控, 以尽量避免采用脆性矢量较大的 C、N 间隙固溶强化。

2. 置换固溶强化

置换固溶强化的一般规律为: 当溶质和溶剂原子半径相近、结构相似、化学性质也类似时, 则极限固溶度可能很大, 但其强化效应却很小。当溶质元素改变时, 其强化效应亦相应发生变化。图 1-1 是置换式元素对 α -Fe 屈服强度的影响。当形成置换固溶体时, 由于溶质原子在基体中产生的点阵畸变都是球面对称的, 因而强化效应比间隙固溶强化约小两个数量级。但置换固溶元素可使基体的强度平缓增加, 而且韧性、塑性基本不降低。对于微合金化低碳高

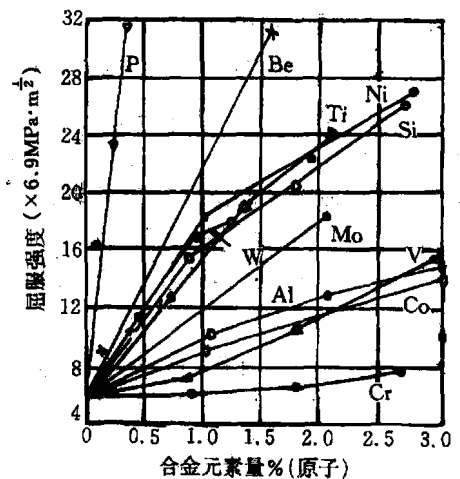


图 1-1 置换元素对 α -Fe 屈服强度的影响

强度平缓增加, 而且韧性、塑性基本不降低。对于微合金化低碳高