

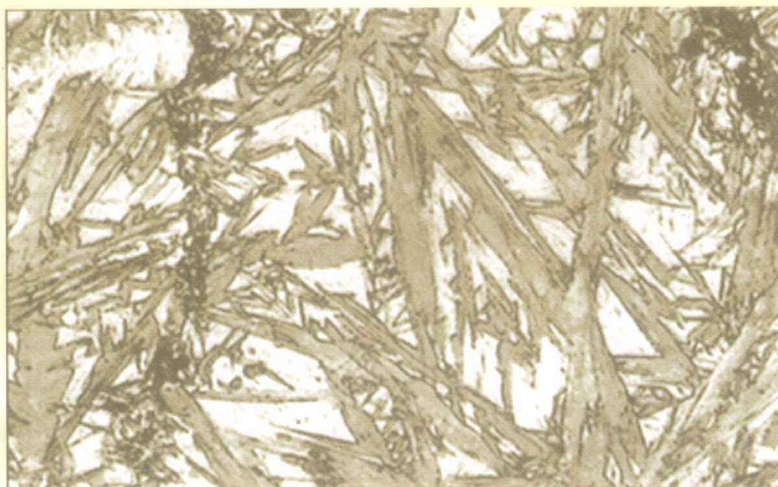


普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

金属材料学

齐锦刚 王冰 李强 于景媛 赵作福 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

金属材料学

齐锦刚 王 冰 李 强 于景媛 赵作福 编著

北 京

冶金工业出版社

2012

内 容 简 介

本书按照“金属材料学”课程大纲要求,比较全面系统地阐述了金属材料的成分、组织结构、热处理工艺与性能之间的关系以及应用范围。全书可划分为钢铁材料、有色金属合金与新型金属材料三部分。钢铁材料部分主要介绍了钢铁合金化理论、工程结构钢、机械零件结构钢、工具钢、不锈钢、耐热钢、铸铁;在有色金属合金中着重介绍了铝合金、铜合金、镁合金;此外,对新型金属材料——形状记忆合金与金属间化合物也做了相关介绍。通过对本书的学习,学生可以掌握金属材料学的基本理论与应用知识,可以培养分析问题与解决问题的能力。

本书适合普通高等院校材料科学与工程专业师生使用,也可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料学/齐锦刚等编著. —北京:冶金工业出版社,
2012. 1

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-5660-3

I. ①金… II. ①齐… III. ①金属材料—高等学校—
教材 IV. ①TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 256541 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 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 李 梅 李 臻 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5660-3

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销

2012 年 1 月第 1 版, 2012 年 1 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 16.25 印张; 394 千字; 247 页

36.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

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(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

人类文明的发展和社会的进步同金属材料关系十分密切。继石器时代之后出现的铜器时代、铁器时代，均以金属材料的应用为其时代的显著标志。现代，种类繁多的金属材料已成为人类社会发展的物质基础。金属材料通常分为黑色金属、有色金属和特种金属材料。其中黑色金属又称钢铁材料，在产量上，钢铁材料具有绝对优势，占世界金属总产量的95%；有色金属因其应用范围广，近年来产量逐年攀升。特种金属材料包括不同用途的结构金属材料 and 功能金属材料，在各种新兴工业中得到广泛应用，其市场和应用前景十分广阔，也是今后相当长时期新材料发展的热点之一。在可以预见的未来，金属材料的研究与应用依然是材料科学的重点领域。

金属材料学是研究金属材料的成分、组织结构与性能之间关系的一门技术科学，它对生产、使用和发展金属材料起着重要的指导作用。本课程的目的是讲授金属材料学的物理冶金问题，使学生掌握金属材料中的化学成分、组织结构、生产过程、环境对金属材料各种性能的影响的基本规律，并用来分析各种金属材料的化学成分设计、生产、热处理和使用中的问题。全书可划分为三部分：钢铁材料、有色金属材料和金属功能材料。其中钢铁材料是全书重点，该部分以合金化原理为核心，阐述了钢铁材料的成分、组织、工艺和性能间的关系；有色金属合金包括铝合金、铜合金和镁合金等；金属功能材料主要介绍了形状记忆合金与金属间化合物。本书的教学目的在于使学生掌握如何根据机件的服役条件和对材料的性能要求，正确地选择材料和合理地制定工艺，并对合金设计的思路有初步了解。

本书在编写过程中，力求结构合理，内容通俗易懂，更适合于非“211”高校的材料科学与工程本科专业本科教学使用。同时力求围绕材料科学的核心内容

“成分—组织—工艺—性能—效能”间的关系来安排章节，便于学生能够抓住基础理论，进而透过纷繁复杂的材料问题掌握事物的本质。本书第1、3章由齐锦刚教授编写；第4、7、8、9章由王冰副教授编写；第5、10、11章由李强副教授编写；第6、12章由于景媛博士编写；第2章由赵作福博士编写。

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者
2011年8月

目 录

1 钢铁合金化理论	1
1.1 引言	1
1.2 合金元素在钢中的作用	1
1.2.1 合金元素在钢中的分布	1
1.2.2 铁基固溶体	2
1.2.3 碳化物与氮化物	2
1.2.4 金属间化合物	3
1.2.5 非金属夹杂物	4
1.3 合金元素对 Fe - C 相图的影响	5
1.4 合金元素对钢加热转变的影响	7
1.4.1 合金元素对奥氏体形成的影响	7
1.4.2 合金元素对奥氏体晶粒长大的影响	8
1.5 合金元素对过冷奥氏体转变的影响	8
1.6 合金元素对珠光体转变的影响	9
1.6.1 碳化物形核	9
1.6.2 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变	9
1.6.3 先共析铁素体的析出与碳化物的相间沉淀	10
1.7 合金元素对贝氏体转变的影响	11
1.8 合金元素对马氏体转变的影响	11
1.9 合金元素对淬火钢回火转变的影响	12
1.9.1 马氏体的分解	12
1.9.2 合金碳化物的析出	13
1.9.3 残余奥氏体的分解	14
1.9.4 α 相的回复与再结晶	15
1.10 钢的强化与韧化	15
1.10.1 钢的强化	15
1.10.2 钢的韧化途径	17
1.11 合金钢的分类与编号	18
1.11.1 钢的分类	18
1.11.2 钢的编号	19
习题	20
参考文献	21

2 工程结构钢	22
2.1 工程结构钢的工艺性能及基本要求.....	22
2.1.1 良好的冷变形性能.....	22
2.1.2 足够的强度和韧性.....	22
2.1.3 良好的焊接性.....	22
2.1.4 良好的耐腐蚀性.....	23
2.2 低合金高强度结构钢合金化.....	23
2.2.1 工程结构钢的强化机制.....	23
2.2.2 焊接性和耐大气腐蚀性能.....	25
2.3 低碳贝氏体和马氏体钢.....	26
2.4 双相钢应用及其特点.....	27
2.5 低合金高强度钢的研究发展趋势.....	28
2.6 工程结构钢典型合金化实例.....	29
2.6.1 30CrMo 钢.....	29
2.6.2 14MnMoVBRE 钢.....	30
2.6.3 铌在紧固件用高强度淬火回火钢中的应用.....	31
2.6.4 12MnPRE 钢.....	31
2.6.5 10MnPNbRE 钢.....	31
2.6.6 14MnVTiRE 钢.....	31
2.6.7 14MnMoV 钢.....	31
习题.....	32
参考文献.....	32
3 机械零件结构钢	33
3.1 引言.....	33
3.2 机械零件的服役条件与性能要求.....	33
3.3 机械零件用钢的合金化特点.....	34
3.3.1 淬透性.....	34
3.3.2 含碳量的选择与回火温度的确定.....	35
3.4 调质钢.....	36
3.4.1 调质钢的服役条件及性能要求.....	37
3.4.2 调质钢的合金化.....	37
3.4.3 调质钢的热处理.....	38
3.4.4 常用调质钢.....	38
3.5 弹簧钢.....	39
3.5.1 弹簧的服役条件与性能要求.....	39
3.5.2 弹簧钢的化学成分.....	39
3.5.3 弹簧成形及热处理.....	39

3.5.4 典型弹簧钢种	40
3.6 滚动轴承钢	41
3.6.1 滚动轴承的工作条件及性能要求	41
3.6.2 滚动轴承钢的化学成分	41
3.6.3 滚动轴承钢的热处理	42
3.6.4 滚动轴承钢的牌号	42
3.7 渗碳钢和氮化钢	42
3.7.1 渗碳钢服役条件及性能要求	43
3.7.2 渗碳钢化学成分与热处理	43
3.7.3 常用渗碳钢种	44
3.7.4 氮化用钢	44
3.8 其他机械制造用钢	45
3.8.1 易削钢	45
3.8.2 高锰耐磨钢	46
习题	46
参考文献	47
4 工具钢	48
4.1 工具钢概述	48
4.2 刀具用钢	48
4.2.1 刀具钢的工作条件及性能要求	48
4.2.2 刀具钢的钢种类	49
4.3 高速钢	51
4.3.1 高速钢的化学成分特点与合金碳化物的类型	51
4.3.2 高速钢的铸态组织及热加工	55
4.3.3 高速钢的热处理	57
4.3.4 典型的高速钢及其应用	62
4.4 冷变形模具钢	63
4.4.1 低合金冷作模具钢	63
4.4.2 高铬和中铬冷作模具钢	64
4.4.3 基体钢	68
4.4.4 新型冷作模具钢	69
4.5 热变形模具钢	70
4.5.1 热作模具钢的化学成分、热处理工艺特点	71
4.5.2 典型的热作模具钢及应用	72
4.6 量具用钢	75
习题	77
参考文献	77

5 不锈钢	78
5.1 不锈钢概述.....	78
5.1.1 不锈钢的分类.....	78
5.1.2 合金元素对不锈钢组织的影响.....	80
5.2 不锈钢的耐腐蚀特性.....	81
5.2.1 微电池腐蚀原理.....	81
5.2.2 不锈钢的腐蚀类型.....	84
5.3 铁素体不锈钢.....	85
5.3.1 Fe-Cr 二元合金相图	85
5.3.2 合金元素对铁素体不锈钢组织与性能的影响.....	86
5.3.3 铁素体不锈钢中的相.....	89
5.3.4 铁素体不锈钢性能特点.....	90
5.4 奥氏体不锈钢.....	92
5.4.1 奥氏体不锈钢的分类.....	92
5.4.2 合金元素对奥氏体不锈钢组织与性能的影响.....	92
5.4.3 奥氏体不锈钢中的相.....	96
5.4.4 高氮奥氏体不锈钢的冶炼方法及存在的问题.....	99
5.5 马氏体不锈钢	102
5.6 不锈钢研究发展趋势	104
习题.....	105
参考文献.....	105
6 耐热钢	107
6.1 耐热钢概述	107
6.1.1 耐热钢的发展	107
6.1.2 耐热钢的分类	108
6.1.3 合金元素对耐热钢的影响	109
6.1.4 耐热钢的显微组织及特点	111
6.1.5 耐热钢的高温强化机制	111
6.2 奥氏体型耐热钢	112
6.2.1 成分设计特点	113
6.2.2 合金元素的影响	113
6.2.3 热处理	113
6.2.4 典型的奥氏体耐热钢	114
6.3 铁素体型耐热钢	116
6.3.1 合金成分设计	116
6.3.2 合金元素的影响	117
6.3.3 强化机制	117

6.3.4 高 Cr 铁素体钢的脆性	118
6.4 珠光体耐热钢	119
6.4.1 珠光体耐热钢的特点	119
6.4.2 珠光体耐热钢的组织稳定性	120
6.4.3 珠光体耐热钢的热强性能	120
6.4.4 典型的珠光体耐热钢	121
6.5 马氏体型耐热钢	123
习题	124
参考文献	125
7 铸铁	126
7.1 铸铁概述	126
7.1.1 铸铁的特点	126
7.1.2 铸铁的分类	126
7.2 铸铁的石墨化	127
7.2.1 铸铁的结晶	127
7.2.2 铸铁的石墨化	130
7.2.3 影响铸铁石墨化的因素	132
7.3 灰铸铁	133
7.3.1 灰铸铁的化学成分及显微组织	133
7.3.2 灰铸铁的牌号、性能和应用	134
7.3.3 灰铸铁的孕育处理	136
7.4 球墨铸铁	136
7.4.1 球墨铸铁的化学成分及显微组织	136
7.4.2 球墨铸铁的牌号、性能和应用	136
7.4.3 球墨铸铁的球化处理	138
7.5 蠕墨铸铁	139
7.5.1 蠕墨铸铁的化学成分及显微组织	139
7.5.2 蠕墨铸铁的牌号、性能和应用	139
7.5.3 蠕墨铸铁的石墨蠕化强化	140
7.6 可锻铸铁	140
7.6.1 可锻铸铁的化学成分及显微组织	140
7.6.2 可锻铸铁的牌号、性能和应用	141
7.6.3 可锻铸铁的石墨化退火	143
7.7 特殊性能铸铁	144
7.7.1 耐热合金铸铁	144
7.7.2 耐磨合金铸铁	146
7.7.3 耐蚀合金铸铁	148
习题	149

参考文献	150
8 铝合金	151
8.1 铝及其合金概述	151
8.1.1 纯铝的特性	151
8.1.2 铝的合金化	152
8.1.3 铝及铝合金的分类	154
8.2 变形铝合金	155
8.2.1 变形铝及铝合金概述	155
8.2.2 典型的变形铝合金	159
8.3 铸造铝合金	172
8.3.1 铸造铝合金及其状态的标记和命名	172
8.3.2 典型的铸造铝合金	173
习题	179
参考文献	179
9 铜合金	180
9.1 铜及其合金概述	180
9.1.1 纯铜	180
9.1.2 铜的合金化	180
9.1.3 铜合金的分类及编号	181
9.2 黄铜	183
9.2.1 普通黄铜	183
9.2.2 复杂黄铜	184
9.2.3 黄铜的脱锌和应力腐蚀开裂	185
9.3 青铜	186
9.3.1 锡青铜	186
9.3.2 铝青铜	186
9.3.3 铍青铜	187
9.4 白铜	187
9.4.1 结构白铜	187
9.4.2 精密电阻合金用白铜（电工白铜）	187
习题	188
参考文献	188
10 镁合金	189
10.1 引言	189
10.2 镁及镁合金的特点	189
10.3 镁合金的牌号与分类	191

10.3.1 镁合金成分与牌号的标记方法	191
10.3.2 镁合金的分类	192
10.4 影响镁合金组织与性能的因素	193
10.4.1 镁的合金化	193
10.4.2 镁合金的晶粒细化	193
10.4.3 镁合金的热处理	195
10.5 新型高性能镁合金的研发	196
10.5.1 变形镁合金	196
10.5.2 稀土变形镁合金	197
10.6 镁合金的应用现状	198
10.6.1 在交通工具上的应用	198
10.6.2 电子电器产业	199
10.6.3 航空航天	199
10.6.4 军工兵器	200
10.6.5 生物医学	200
10.6.6 自行车及其他行业	200
10.7 镁合金的发展前景	200
习题	202
参考文献	202
11 形状记忆合金	204
11.1 形状记忆合金的发展历程	204
11.1.1 萌芽阶段	204
11.1.2 迅速发展阶段	204
11.1.3 稳定、深入发展并酝酿新突破的阶段	205
11.2 形状记忆合金的特性	205
11.2.1 形状记忆效应	205
11.2.2 超弹性	208
11.3 形状记忆合金的种类	209
11.3.1 NiTi 形状记忆合金	209
11.3.2 Cu 基形状记忆合金	214
11.3.3 Fe 基形状记忆合金	217
11.4 形状记忆合金性能的制备方法	217
11.4.1 熔炼方法	217
11.4.2 粉末冶金法	218
11.5 形状记忆合金性能的主要影响因素	219
11.5.1 成分的影响	219
11.5.2 相组成的影响	219
11.5.3 晶粒取向的影响	220

11.5.4 晶界的影响	220
11.5.5 热处理的影响	220
11.5.6 滑移变形的影响	220
11.6 形状记忆合金的应用	220
11.6.1 机械工程领域中的应用	220
11.6.2 SMA 在医疗器械方面的应用	221
11.6.3 SMA 在航空航天工业中的应用	221
11.6.4 SMA 在现代机器人中的应用	221
11.6.5 建筑领域中的应用	222
11.7 多孔 NiTi 合金简介	222
11.7.1 多孔 NiTi 合金的特性	222
11.7.2 多孔 NiTi 形状记忆合金的制备方法	224
11.7.3 多孔 NiTi 形状记忆合金的应用	227
11.7.4 多孔 NiTi 形状记忆合金的研究现状	228
习题	229
参考文献	229
12 金属间化合物	231
12.1 金属间化合物概述	231
12.2 NiAl 基金属间化合物	232
12.2.1 NiAl 金属间化合物的塑性	234
12.2.2 NiAl 金属间化合物的屈服强度	234
12.2.3 NiAl 金属间化合物的抗氧化性	234
12.3 TiAl 基金属间化合物	235
12.4 FeAl 基金属间化合物	236
12.5 金属间化合物制备方法	239
12.5.1 熔炼和熔铸技术	239
12.5.2 机械合金化	241
12.5.3 自蔓延高温合成法	241
12.6 金属间化合物的应用	245
习题	246
参考文献	246

1 钢铁合金化理论

1.1 引言

钢铁材料具有资源丰富、生产简单、加工容易、成本低廉、性能多样等特点，因此，在可以预见的将来，还没有哪一种材料可以替代钢铁材料。此外，经济和社会发展对钢铁材料提出了“高性能、低成本、易加工、高精度、绿色化”的需求，要求不断地研发满足上述需求的先进钢铁材料。显然，普通碳素钢并不能满足上述要求。

在碳钢的基础上特别添加一种或几种合金元素，用以保证一定的生产和加工工艺以及所要求的组织与性能的铁基合金即为合金钢。钢铁合金化后，其性能将有很大变化，例如较高的强度与韧性的配合、高的低温韧性、高的蠕变强度以及具有良好的耐蚀性等，此外在工艺性能方面，可能具有更好的热塑性、冷变形性、切削性、淬透性和焊接性等。这主要是合金元素的添加改变了钢和铁的组织结构，产生了一些新相，改变了相变历程，导致了最后材料性能的变化。

目前钢铁中常用合金化元素包括：B、C、N、Al、Si、P、S、Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zr、Nb、Mo、W 和稀土等。当钢中合金元素总含量小于或等于 5% 时，称为低合金钢；合金元素总含量在 5% ~ 10% 范围内，称为中合金钢；合金元素含量超过 10% 时称为高合金钢。

1.2 合金元素在钢中的作用

1.2.1 合金元素在钢中的分布

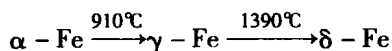
一般说来，合金元素加入到钢中后，它们或溶于碳钢原有的相（如铁素体、奥氏体、渗碳体等）中，或者形成普通碳钢中原来没有的新相。可分为以下四种存在形式：

- (1) 溶入铁素体、奥氏体和马氏体中，形成间隙或置换固溶体；
- (2) 形成各类强化相，如碳化物、氮化物、合金渗碳体以及金属间化合物等；
- (3) 形成非金属夹杂物，如合金元素与 O、N、S 作用形成氧化物、氮化物、硫化物和硅酸盐等。非金属夹杂物并不参与钢中的组织转变，因而对组织转变的影响不大，但在相当程度上影响钢的力学性能和物理、化学性能；
- (4) 某些元素如 Pb 等既不溶于铁，也不形成化合物，而是在钢中以游离状态存在。在高碳钢中碳有时以自由状态（石墨）存在。

由于钢的组织与性能主要取决于相的成分和结构以及它们在组织中的分布和本身之间的交互作用，因此必须了解上述合金元素存在形式的形成规律及其特性。

1.2.2 铁基固溶体

铁基置换固溶体的形成一般遵循 Hume-Rothery 准则, 该规律阐述了原子尺寸、晶体结构、价电子浓度和电负性等对元素间形成固溶体的影响。运用该条件分析合金元素在铁中的溶解度时, 必须考虑纯铁在加热和冷却过程存在如下的多型性转变:



其中 $\alpha - \text{Fe}$ 和 $\delta - \text{Fe}$ 为体心立方点阵, 而 $\gamma - \text{Fe}$ 为面心立方点阵。Ni、Co、Mn、Cr 和 V 与 Fe 可形成无限互溶固溶体。Ni、Co 和 Mn 形成以 $\gamma - \text{Fe}$ 为基的无限固溶体, 而 Cr 和 V 则形成以 $\alpha - \text{Fe}$ 为基的无限固溶体。这里符合溶剂与溶质点阵相同的第一个条件。如果组元的点阵不同, 则不能形成无限固溶体。形成固溶体的第二个条件是原子尺寸因素。当形成无限或有限固溶体时, 溶质与溶剂的原子半径差, 应不大于 $\pm 15\%$ 。铁基和其他难溶金属基的无限固溶体, 两者原子半径之差应不大于 $\pm 8\%$ 。此外, 合金元素在铁中溶解度还取决于这些元素在周期表中的相互排列位置。合金元素与铁在同一周期以及排列在最接近 V ~ VIII 族时, 将在铁中具有最大溶解度。

铁的间隙固溶体由 Fe 与较小原子尺寸的元素组成, 这些间隙原子元素主要包括 B、C、N、O、H。间隙固溶体总是有限固溶体, 其溶解度取决于溶剂元素的晶体结构和间隙元素的原子尺寸。一般说来, 间隙原子在固溶体中优先占据的位置, 对 $\alpha - \text{Fe}$ 中为八面体间隙, 而 $\gamma - \text{Fe}$ 则为八面体或四面体间隙。这里, C、N 原子在 $\alpha - \text{Fe}$ 中并不占据比较大的四面体间隙, 而是位于八面体间隙, 这是由于间隙原子溶入以后相邻两个铁原子移动引起的应变比较轻微。对四面体间隙而言, 存在 4 个相邻铁原子, 移动这 4 个原子需要更高的应变能。此外, 间隙原子的溶解度随其原子尺寸的减小而增加, 即按 B、C、N、O、H 的顺序增加。

1.2.3 碳化物与氮化物

碳化物和氮化物是钢铁中的重要组成相, 其类型、成分、数量、尺寸、形状及分布对钢的性能具有极其重要的影响。碳化物和氮化物与纯金属相比, 具有高硬度、高弹性模量和脆性特点, 并具有高熔点。其中碳化物的熔点和硬度如表 1-1 所示。

表 1-1 合金钢中碳化物的硬度和熔点

碳化物	TiC	ZrC	NbC	VC	WC	Mo ₂ C	Cr ₂₃ C ₆	Cr ₇ C ₃	Fe ₃ C
HV	3200	2890	2400	2094	2200	1500	1650	2100	860
$T_m/^{\circ}\text{C}$	3150	3530	3500	2830	2867	2600	1520	1780	1650

过渡族金属按其 与碳和氮的亲合力、碳化物和氮化物的强度和稳定性, 可以按照如下降低顺序排列:

Zr、Ti、Ta、Nb、V、W、Mo、Cr、Mn、Fe

一般说来, 碳化物和氮化物的晶体点阵不同于相应的过渡族金属的晶体点阵。对于过渡族金属, 沿周期自左向右 (即从 Ti 到 Ni), d 层和 s 层电子填满程度增大, 产生从体心立方点阵到面心立方或密排点阵的过渡。第 IV 与 V 族金属的碳化物和氮化物具有简单的

NaCl 型面心立方点阵, 而第 VI 族的碳化物与氮化物则是复杂六方点阵。

按照碳化物晶格类型以及成分的不同, 碳化物可分为以下几类:

(1) 当 $r_C/r_{Me} > 0.59$ (其中 r_C 为碳原子半径, r_{Me} 为合金元素的原子半径) 时, 碳与合金元素形成一种复杂点阵结构的碳化物。Cr、Mn、Fe 属于此类元素。

(2) 当 $r_C/r_{Me} < 0.59$ 时, 形成简单点阵的碳化物。Mo、W、V、Ti、Nb、Zr 等均属于此类元素, 它们形成的碳化物存在 MeX 型 (如 WC、VC 等) 和 Me_2X (如 W_2C 、 Mo_2C 等)。

(3) 形成合金渗碳体, 如 $(Fe, Cr)_3C$ 、 $(Fe, Mn)_3C$ 等。

(4) 生成具有复杂结构的合金碳化物, 如 Fe_3W_3C 、 Fe_4W_2C 、 Fe_3Mo_3C 等。

按照合金元素与碳的作用情况, 可将合金元素分为两大类:

(1) 非碳化物形成元素。包括 Ni、Si、Co、Al、Cu 等, 通常固溶于铁素体或奥氏体中, 起固溶强化作用, 有的可形成非金属夹杂物和金属间化合物, 如 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Ni_3Al 等。Si 元素含量高时, 可使碳以游离石墨形态存在, 即所谓石墨化作用。

(2) 碳化物形成元素。按照与碳亲和力的大小, Zr、Ti、Ta、Nb、V 为强碳化物形成元素, 一般与碳形成碳化物; W、Mo、Cr 为中强碳化物形成元素, 这类元素含量较少时, 多溶于渗碳体形成合金渗碳体, 含量较高时, 则形成碳化物; Mn 属于弱碳化物形成元素, 除少量可溶于渗碳体中形成合金渗碳体外, 几乎都溶解于铁素体和奥氏体中。

氮化物的结构、稳定性与碳化物类似。氮化物之间可以相互溶解, 形成完全互溶或有限溶解的复合氮化物。氮化物和碳化物之间也可以相互溶解, 形成碳氮化物, 如含氮的不锈钢中氮原子可置换 $(Cr, Fe)_{23}C_6$ 中部分碳原子, 形成 $(Cr, Fe)_{23}(C, N)_6$ 的碳氮化物。

在微合金化钢中, 可以利用氮化物细化奥氏体晶粒和弥散强化来提高钢的强韧性。钢表面氮化后, 除表面形成铁的氮化物外, 还形成合金氮化物如 Mo_2N 、VN 和 AlN 等, 提高钢的疲劳强度和耐磨性。高速钢表面氮化也可形成 W、Mo、V、Cr 等元素的氮化物, 提高工具的切削速度和寿命。

1.2.4 金属间化合物

钢中合金元素之间和合金元素与铁之间相互作用, 可以形成各种金属间化合物。金属间化合物对于奥氏体不锈钢、马氏体时效钢和许多高温合金的强化有较大的影响, 其中常见的是 σ 相、Laves 相和 AB_3 相。

1.2.4.1 σ 相

在不锈钢、耐热合金中, 均会出现 σ 相。伴随着 σ 相的析出, 钢的塑性、韧性显著下降, 脆性增加。 σ 相属于正方晶系, 单位晶胞中含 30 个原子, σ 相具有高硬度, 在 Fe-Cr 合金中, 其硬度为 11000MPa。在合金设计中, 应尽可能避免形成 σ 相。

1.2.4.2 Laves 相

在含 W、Mo、Nb 和 Ti 的复杂成分耐热钢和耐热合金中, 均存在 AB_2 相, 即 Laves 相。它是现代耐热钢和合金中的一种强化相。其组元 A 与 B 的原子半径之比为 1.2:1。 AB_2 相的晶体结构存在三种类型: $MgCu_2$ 型复杂立方点阵, $MgZn_2$ 型复杂六方点阵和 $MgNi_2$

型复杂六方点阵。

AB_2 相是尺寸因素起主导作用的化合物,但它具有哪一种点阵,则受到电子浓度的影响。元素周期表中的任何两族金属元素,只要符合原子尺寸比为 1.2:1,都能形成 AB_2 相。在钢和合金中主要的 AB_2 相是具有复杂六方结构的 $MgZn_2$ 型,它们是 $MoFe_2$ 、 WFe_2 、 $NbFe_2$ 、 $TiFe_2$ 。铁基合金中存在复合 AB_2 相,如 $(W, Mo, Nb)(Fe, Ni, Cr)_2$ 。

1.2.4.3 AB_3 相 (有序相)

钢和合金中存在多种有序结构的相,它们各个组元之间尚不能形成稳定的化合物,处于固溶体到化合物之间的过渡状态。其中一部分有序相的有序无序转变温度较低,超过了就形成无序固溶体,如 Ni_3Fe 、 Ni_3Mn 等;另一部分其有序状态可以保持到熔点,更接近金属间化合物,如 Ni_3Al 、 Ni_3Ti 、 Ni_3Nb 。以 Ni_3Al 为例, $\gamma' - Ni_3Al$ 为面心立方结构,是耐热合金中重要的强化相,它可以溶解多种合金元素。 Ni_3Al 点阵常数随溶入不同合金元素而变化,点阵常数在 0.356 ~ 0.360nm 范围。原子半径较大的 Ti、Nb 等,溶入后点阵常数有所增加,Ti 可以置换 Ni_3Al 中 60% 的铝原子,Nb 可置换 40% 的铝原子。在耐热合金中, $\gamma' - Ni_3Al$ 中溶解的 Al/Ti 和 Al/Nb 比值对该材料的持久强度具有很大影响。

1.2.5 非金属夹杂物

铁及合金元素生成的氧化物、硫化物和硅酸盐等一般都不具有金属性或者金属性很弱,这些非金属相称为非金属夹杂物。它们常具有复杂的成分、结构和性能,并随着钢中化学成分和一系列冶炼过程的条件而变化,具体可分类如下:

(1) 氧化物。包括简单氧化物,如 FeO 、 MnO 、 TiO_2 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 等;复杂氧化物,如 $MgO \cdot Al_2O_3$ 、 $MnO \cdot Al_2O_3$ 等。低碳钢 Al 脱氧期间的 Al_2O_3 夹杂物,如图 1-1 所示。

氧化物的特点是性脆易断裂,一般无可塑性,只有 FeO 和 MnO 有低的可塑性。所以,这些氧化物在钢材轧锻以后,沿加工方向呈链状分布。

(2) 硫化物。钢中常见的有 MnS 、 FeS 等,它们一般具有较高的塑性,热加工时沿钢材加工方向强烈地伸长。

(3) 硅酸盐。硅酸盐是钢中常见的一类非金属夹杂物。这些夹杂物有的与硫化物类似,沿加工方向伸长,呈线段状,如 $2MnO \cdot SiO_2$ 、 $MnO \cdot SiO_2$ 等;有的硅酸盐与氧化物相似,不易变形,沿加工方向呈链状分布,如各种不同配比的 Al_2O_3 、 SiO_2 和 FeO 夹杂物;还有一类硅酸盐夹杂物,经加工后并不变形,以点状形式存在,称为点状不变形夹杂物,如 SiO_2 、 $CaO \cdot SiO_2$ 等。

非金属夹杂物对钢材质量具有重要影响,这种影响不仅和夹杂物的成分、数量有关,而且和它的形状、大小特别是分布状况有关。无塑性的非金属夹杂物在钢进行热加工时可能引起开裂或其他缺陷;塑性的非金属夹杂物在变形后将增加钢材的各向异性。非金属夹杂物在结构钢中可导致塑性、韧性及疲劳强度的降低,降低钢的耐蚀性和耐磨性,影响钢

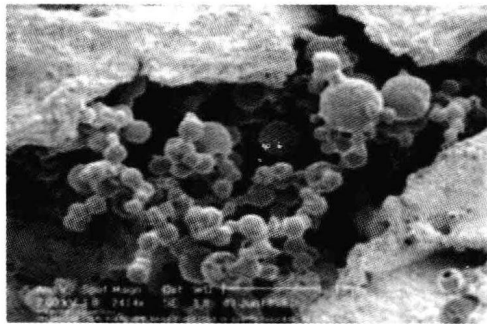


图 1-1 点簇状 Al_2O_3 非金属夹杂物