

材料科学及测试技术丛书

# 马氏体相变与马氏体

徐祖耀 著

科学出版社

76.2/254  
511

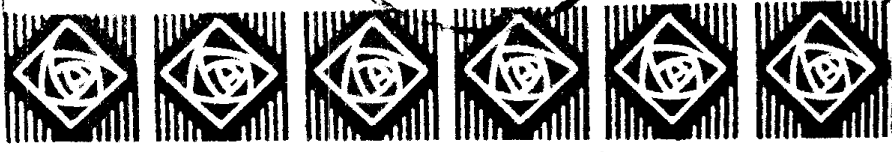
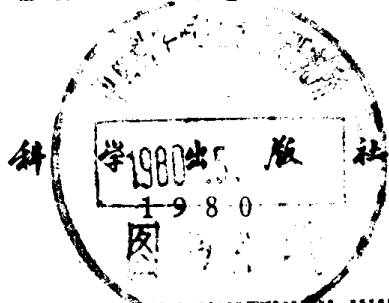


材料科学及测试技术丛书

# 马氏体相变与马氏体

徐祖耀 著

1108202



## 内 容 简 介

本书介绍马氏体相变的特征及对生产有关的一般规律, 综述钢中马氏体的形态、性质及其应用, 简单介绍有色金属马氏体及弹性马氏体, 评述马氏体相变热力学、动力学、晶体学和形状记忆效应的研究进展及现状。全书分十章, 前三章着眼于普及, 偏重联系生产实践, 后七章重点在提高, 注重理论分析。

本书可供金属材料及热处理工作者以及有关高等院校师生参考。

## 马氏体相变与马氏体

徐祖耀 著

\*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1980年3月第一版	开本: 787×1092 1/32
1980年3月第一次印刷	印张: 16 3/4
印数: 精 1—5,640	插页: 精 13 平 11
平 1—3,920	字数: 383,000

统一书号: 15031·262

本社书号: 1628·15—2

定价: 纸面精装 2.70 元  
平 装 2.30 元

# 材料科学及测试技术丛书

## 出版说明

材料科学是现代技术的基础，是具有全局性的重要科学技术领域之一。往往在某些领域中由于材料的限制而影响了国民经济和国防现代化的的进程。因此，必须把材料科学搞上去，为各个部门提供充足和优质的材料。出版这套材料科学及测试技术丛书，目的在于促进科学技术人材的培养，为提高我国材料科研工作的理论水平和材料生产的技术水平服务。本丛书从内容上分为材料科学与测试技术两部分。材料科学部分主要介绍金属、非金属及其他新型材料的研究成果、原理与理论；测试技术部分主要介绍上述材料的微观组织与结构及其观测技术，也介绍有关性能测试和过程机理。读者对象为从事材料科学和科研工作者和从事材料测试的工程技术人员以及大专院校有关专业的师生。在编写方法上，我们力求丛书能反映我国材料科学研究工作者和材料工程技术人员的实践经验与成就，以及他们在发展材料科学与技术方面的见解；同时也要反映国外的最新经验和成果。

通过丛书的出版，我们不仅期望对我国的材料科学与技术的发展能起到一定的推动作用，还会对材料科学与技术领域内为实现四个现代化作出新贡献的科技工作者有所启发，从而进一步写出反映我国科学技术水平和发展方向的专著，以满足广大读者的需要。

材料科学及测试技术丛书编辑委员会

1979年10月

D-92 62

材料科学及测试技术丛书

编辑委员会

主 编: 李 薰  
副主编: 柯 俊 颜鸣皋  
编辑委员: 冯 端 刘嘉禾 孙珍宝 师昌绪  
许顺生 严东生 肖纪美 沈华生  
李恒德 范 棠 柯 成 徐祖耀  
钱人元 郭可信 郭慕孙 章守华  
葛庭燧

# 前 言

谨以此书献给为祖国四个现代化、在材料及热处理的科学战线上奋力征战的同业们。

本书概略地总结五十年来人们对马氏体相变及相变产物——马氏体的研究进展。全书分十章,前三章为综述,着重介绍基本规律并联系生产实际;后七章为分论,侧重理论分析和专题评述。在相变晶体学一章(第六章)内删略了需要较多晶体学知识的内容,只叙述晶体学梗概。鉴于目前对马氏体相变机制的研究尚不成熟,有关这方面的内容分别在晶体学(第六章)和形核模型(第八章)内讨论,不另立一章。各章之间互有联系但基本上各章又自成体系,可供独立阅读。全书引用文献(1977年11月以前)千余篇,有的仅一提而过,有的则较详转录;限于作者水平,取舍之间或有不当之处,评述难免有管窥之见;有待广采众议,再作补正。

写作此书虽酝酿已久,但起草于数年前条件困难之际,定稿于坎坷病患之中(有时甚至辗转挣扎勉强执笔),每以读者的殷切期望引为有力的鞭策。承出版社及朋友们的真诚鼓励与盛情帮助,金相照片的摄制和翻拍又得到多方面的支援,使书稿于1978年春如期完成;周济源同志为本书的出版付出了大量的劳动;均谨此致谢。

作者以本书能在伟大祖国国庆三十周年之际作为献礼而出版感到无限欣幸,但又以本书水平未能满足读者的要求而深自惶愧,热忱地企望读者对本书多加教正,愿共同为壮丽的科学事业而奋发努力。

徐祖耀

一九七八年,上海。

# 目 录

<b>第一章 马氏体相变综述</b> .....	1
1-1 绪言 .....	1
1-2 马氏体相变的特征 .....	7
1. 无扩散型过程 .....	8
2. 表面浮突和形状改变 .....	9
3. 惯习面及其不应变性 .....	12
4. 新旧相之间保持一定的位向关系 .....	13
5. 马氏体内往往具有亚结构 .....	15
6. 相变的可逆性 .....	15
1-3 马氏体相变的类型 .....	21
1. 按相变驱动力分类 .....	21
2. 按形成方式分类 .....	23
1-4 马氏体相变的开始和停止 .....	37
1. 马氏体相变开始温度 ( $M_s$ ) 的意义及其测定.....	37
2. 影响 $M_s$ 温度的因素 .....	41
3. 相变的停止 .....	59
1-5 奥氏体的热稳定化 .....	61
1. 奥氏体的热稳定化现象 .....	61
2. 使奥氏体稳定化的等温淬火 .....	70
3. 冷处理中奥氏体的稳定化 .....	76
4. 逆转变中母相的稳定化 .....	79
参考文献.....	81
<b>第二章 钢中马氏体的结构、形态、性质及其应用</b> .....	87
2-1 概述 .....	87
2-2 钢中马氏体的晶体结构 .....	88

1. Fe-C 马氏体在室温时的点阵	89
2. 马氏体的反常点阵	92
3. 碳原子在马氏体点阵中的位置	94
2-3 一般钢中马氏体的形态	96
1. 低碳型马氏体的形态	97
2. 高碳型马氏体的形态	103
3. 综述	112
4. 影响亚结构形态的因素	114
5. 马氏体的浮突	122
2-4 铬镍不锈钢及高锰钢马氏体的形态	128
2-5 Fe-Ni 及 Fe-Ni-C 合金的相变马氏体和形变马氏体	132
2-6 马氏体的力学性质	149
1. 马氏体的强度	150
2. 马氏体的韧性	168
3. 综述	173
4. 相变塑性	175
2-7 高碳马氏体内的微裂缝	178
2-8 马氏体的应用	191
1. 形变热处理	191
2. 应变时效热处理	197
3. 低碳马氏体的应用	198
4. 马氏体时效钢	201
5. 相变塑性钢	203
6. 马氏体组成复合材料	206
参考文献	207

### 第三章 有色合金马氏体及弹性马氏体 214

3-1 概述	214
3-2 铜合金中的马氏体	217
3-3 钛及锆合金中的马氏体	224
3-4 弹性马氏体	228



参考文献	234
------	-----

## 第四章 马氏体相变热力学 237

4-1 概述	237
4-2 Fe-C 合金马氏体相变热力学	241
1. 以往工作介评	241
2. 进一步处理的概念	253
3. 进一步处理的运算途径及结果	258
4-3 Fe-X 系马氏体相变热力学	264
1. 概况	264
2. 处理方法	267
3. Fe-Ni 系	271
4. Fe-Cr 系	275
5. Fe-Mn 系	278
6. Fe-Si 系	280
7. Fe-X 系的相变热力学性质	281
4-4 纯铁马氏体相变 ( $\gamma \rightarrow M$ ) 热力学	284
4-5 Fe-X-C 系马氏体相变热力学	287
1. 过去的工作	287
2. 处理方法	289
3. Fe-Ni-C 系	290
4. Fe-Cr-C 系	292
5. Fe-X-C 系的相变热力学性质	294
4-6 $\beta(\gamma) \rightarrow \epsilon$ 马氏体相变热力学	295
1. 钴及其合金马氏体相变热力学	295
2. 铁基合金马氏体相变热力学	297
3. $\beta(\gamma) \rightarrow \epsilon$ 马氏体相变的机制	300
4. 对相变驱动力的讨论	303
4-7 弹性马氏体相变热力学	309
1. 热弹性平衡及相变温度	309
2. 应力和温度对相变驱动力的关系	313

3. 有序度和弹性能对相变热力学的影响 .....	317
参考文献 .....	320
<b>第五章 马氏体相变动力学</b> .....	<b>328</b>
5-1 概述 .....	328
5-2 变温相变动力学 .....	330
1. 变温马氏体的形成 .....	330
2. 变温相变动力学方程 .....	332
5-3 等温转变动力学 .....	335
1. 等温转变动力学的一些特征 .....	335
2. 均匀形核动力学 .....	337
3. 自催化形核动力学 .....	339
5-4 变温转变和等温转变动力学之间的相关性 .....	348
5-5 爆发型转变动力学 .....	350
5-6 表面马氏体 .....	353
5-7 奥氏体稳定化的机制 .....	356
1. 低温时效 .....	357
2. 高温时效 .....	365
3. 其他 .....	368
参考文献 .....	371
<b>第六章 马氏体相变晶体学</b> .....	<b>376</b>
6-1 概述 .....	376
6-2 晶体学的经典模型 .....	378
6-3 晶体学的矩阵式处理 .....	384
6-4 晶体学的原始表象理论 .....	391
6-5 晶体学的近代表象理论 .....	399
1. 复切变理论 .....	399
2. 协作形变效应 .....	400
3. 其他理论 .....	402
6-6 关于形成不同惯习面的理论 .....	403
参考文献 .....	405

<b>第七章 应力和形变对马氏体相变的影响</b> .....	407
7-1 概述 .....	407
7-2 应力和形变诱发马氏体相变 .....	409
7-3 形变对奥氏体稳定化的影响 .....	415
7-4 相变塑性 .....	418
7-5 形变对马氏体结构的影响 .....	422
7-6 氢致脆 .....	424
参考文献.....	427
<b>第八章 马氏体的形核及长大模型</b> .....	430
8-1 概述 .....	430
8-2 位错圈相界面模型 .....	434
8-3 应变核胚模型 .....	439
8-4 层错形核 .....	442
1. 面心立方→六方(六角) .....	442
2. 面心立方→体心立方 .....	446
3. 体心立方→面心立方 .....	450
4. 其他 .....	451
8-5 对形核模型的讨论 .....	452
8-6 马氏体的长大 .....	457
参考文献.....	458
<b>第九章 催化作用和逆转变</b> .....	462
9-1 奥氏体的催化作用 .....	462
9-2 奥氏体在回火时的稳定化现象 .....	468
9-3 催化作用的机制 .....	471
9-4 催化作用的进一步应用 .....	474
1. 高速钢回火的新工艺 .....	474
2. 减少工具变形的回火工艺 .....	478
9-5 逆转变概述 .....	479
9-6 形变和应力对逆转变的影响 .....	484
参考文献.....	489

<b>第十章 形状记忆效应</b> .....	492
10-1 概述.....	492
10-2 出现形状记忆效应时内部组织的条件.....	497
10-3 形状记忆效应合金的力学行为.....	502
1. 马氏体形成时的伪弹性和形状记忆效应 .....	502
2. 再取向所形成的伪弹性 .....	505
3. 由相变及再取向共同形成伪弹性 .....	506
4. 相变及再取向形成形状记忆效应 .....	506
5. 力学性质 .....	509
10-4 具备形状记忆效应合金的条件.....	510
10-5 具有形状记忆效应合金示例.....	513
1. Ti-Ni .....	513
2. Cu-Zn-Ga .....	515
3. In-Tl .....	516
4. Cu-Zn .....	518
5. Cu-Al-Ni .....	519
6. Cu-Zn-Si .....	519
10-6 形状记忆效应的热力学和动力学.....	520
1. 热弹性马氏体的消长 .....	520
2. 伪弹性 .....	522
3. 形状记忆效应 .....	524
参考文献.....	524

# 第一章 马氏体相变综述

## 1-1 绪 言

劳动人民在生产实践中很早就认识到，将钢淬火会使钢变硬。据历史记载，我国在战国时代已进行钢的淬火<sup>[1]</sup>。金相检验揭示，由辽阳三道壕出土的西汉时代钢剑为经淬火的组织(马氏体)，如图 1-1<sup>[1]</sup>所示。但直到十九世纪后期，人们才知道钢经加热和冷却时，在其内部发生组织改变，钢在加热时所呈现的一种相在淬火急冷时就转变为较硬的相。为了纪念英国科学家 Robert Austen (他对 Fe-C 相图的建立作出过贡献)，将钢在高温时呈现的相命名为奥氏体。为了纪念德国冶金学家 Adolph Martens (他于 1878 年已应用光学显微镜观察钢的内部组织，为这方面工作的先驱者之一)，将在淬火后

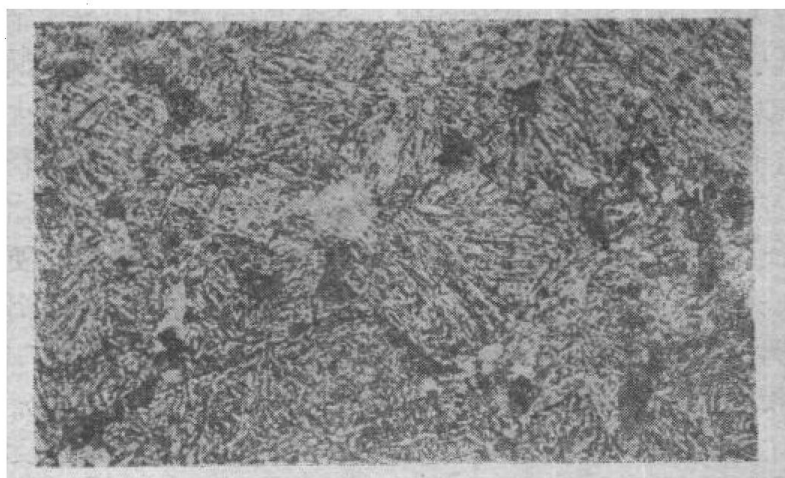


图 1-1 三道壕出土的西汉时代钢剑的显微组织——马氏体

形成的相称为马氏体(1895年由法国人 Osmond 命名<sup>[2]</sup>)。人们最早只把钢中由奥氏体转变为马氏体的相变称为马氏体相变。

由于工业生产上广泛地应用钢的淬火,因此钢中的马氏体相变和马氏体形态的研究首先得到重视,由此对钢中马氏体相变的特征逐步积累了较多的知识。但在二十世纪初对马氏体相变的研究只限于钢,而且往往只限于高碳钢和中碳钢。

1929年周志宏等<sup>[3]</sup>首先将电解铁淬至水银,得到马氏体组织(具有表面浮突,证明为马氏体组织,但可能为表面马氏体)。以后的实验<sup>[4]</sup>指出,纯铁必须以大于 $10^5\text{C}/\text{秒}$ 的速度淬火,才能淬成马氏体。四十年代前后,不但在铁合金(Fe-Ni、Fe-Mn等),而且在很多有色金属和合金中也发现具有马氏体相变。现在知道,在Ce、Co、Hf、La、Li、Hg、Tl、Ti、Pu、U及Zr等纯金属中<sup>[5]</sup>,在Au-Cd、Cu-Al、Cu-Sn、Cu-Zn、In-Tl、Au-Mn、Ag-Cd、Ag-Zn、Ti-Ni等合金中<sup>[6]</sup>,以及半导体BaTiO<sub>3</sub>和KTa<sub>0.65</sub>Nb<sub>0.35</sub>(KTN)和非金属化合物V<sub>3</sub>Si中都具有马氏体相变,并确定它们的相变晶体学特征<sup>[7]</sup>。这些金属和化合物中形成马氏体的基本特征都和钢中相似。因此到五十年代,马氏体的名称不只用于钢的淬火产物,不仅以其组织形态及性质来定义,而是以形成过程的基本特征来定义:凡符合马氏体相变基本特征的相变产物统称为马氏体<sup>[8]</sup>。这和最早只把钢的淬火产物——针状组织、硬度高、具有铁磁性称为马氏体,只将奥氏体转变为马氏体的相变称为马氏体相变比较,不但名称的应用范围扩大,而且对马氏体相变和马氏体赋以一定的物理含义。本章以后各节将分别阐述马氏体相变的基本特征、马氏体相变的基本类型以及和生产有关的一般规律。

钢的淬火和马氏体相变具有密切的关系。在此需就下列问题先加以说明:

1) 钢的淬透性是表征钢淬成马氏体的能力,它和马氏体相变本身无关。

2) 钢在淬火时开始形成马氏体的温度 ( $M_s$ ) 往往决定淬至室温时钢内含有马氏体及残余奥氏体的相对量。钢的淬透性较大的,其  $M_s$  温度往往较低(加硼能增加淬透性的,  $M_s$  就不一定较低)。

3) 钢的淬火冷却速度不但和淬透性有关,也往往影响淬火后钢内的残余奥氏体量。

4) 钢件经淬火后的变形和开裂问题,和工件在淬火加热及冷却时内部所形成的应力有关,和马氏体的形成也有关连。

在生产实践中,我们知道一定成分的钢经一定温度加热后具有一定的淬透性。在淬火冷却时,必须超过一定的冷却速度(临界冷却速度)才可能形成马氏体(淬至室温时不一定全部得到马氏体,可能还有部分残余奥氏体),为淬成马氏体所需的临界冷却速度愈大,钢的淬透性就愈小。含碳在 0.8% 以下的钢,含碳量愈低,淬成马氏体所需的临界冷却速度愈大,即淬透性愈小。假如淬火时冷却速度小于临界冷却速度,如所用淬火介质的冷却能力不够大,或者在淬火冷却时在空中的预冷时间过长,则淬火时在马氏体开始形成的温度 ( $M_s$ ) 以上,就已先形成了部分或全部(当冷却速度过小时)非马氏体组织(铁素体、珠光体、贝氏体等扩散性相变产物),则淬火后得到的马氏体数量就少,或者(当冷却速度过小时)得不到马氏体。所谓淬透性,即形成马氏体的能力,或者说避免形成珠光体等扩散性相变的能力,和扩散性相变有关,但和马氏体相变本身无关。

钢在淬火时开始形成马氏体的温度 ( $M_s$ ) 主要随奥氏体的成分(尤其是碳)而改变。含碳(及合金元素)愈高, 其  $M_s$  温度愈低, 如图 1-2。同时, 一般钢在淬火冷却时形成马氏体的数量随温度下降而增多; 这样, 钢的  $M_s$  温度愈高, 淬火时由  $M_s$  冷至室温的温度范围愈大, 淬至室温所形成的马氏体数量也就愈多, 未经转变、因而残留下来奥氏体(残余奥氏体)的数量就愈少, 见图 1-2。因此钢经淬火到室温时形成马氏体的数量就主要决定于钢的  $M_s$  温度(也即主要决定于奥氏体的含碳量)。

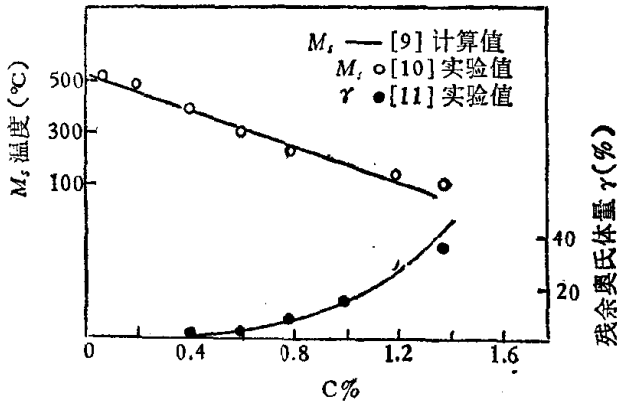


图 1-2 Fe-C 合金(碳钢)的  $M_s$  温度和淬至室温时的残余奥氏体量

淬透性较大的高碳高合金钢在空冷时就能避免产生珠光体而得到马氏体, 但由于其  $M_s$  温度较低, 淬至室温时的残余奥氏体含量可高达 20% 以上。中等淬透性的钢, 在不大的冷却速度淬火(如淬油)时也能避免形成铁素体和珠光体, 而形成马氏体, 其  $M_s$  温度不高, 淬至室温时还有一些残余奥氏体未经转变。含碳低于 0.4% 的钢, 淬透性较小, 需较大的淬火冷速(如 0.2% C 钢需很快淬至盐水)才能避免形成铁素体和珠光体, 得到马氏体, 由于其  $M_s$  较高, 淬至室温基本上不含



残余奥氏体。残余奥氏体可经冷处理或经一定温度回火(催化处理)使继续转变为马氏体。含碳不高,但含合金量很高的钢,如 18Cr-8Ni 不锈钢,其  $M_s$  低于室温,淬至室温时仍保留全部奥氏体,故称奥氏体钢。含碳很低的特殊高合金钢,其淬透性大而  $M_s$  较高,经不大冷速淬火至室温后,得到全部的马氏体。因此在一些特殊合金钢中,因含有不同的合金元素及数量又有它特有的规律性。

淬火冷却速度除和钢的淬透性有关外,对马氏体相变本身也具有影响。在保证能淬成马氏体条件下,即在大于临界冷速淬火的条件下,淬火冷速愈大,往往得到略多量的马氏体(较少的残余奥氏体);相反,淬火冷速愈小,往往形成略少的马氏体(较多的残余奥氏体),这是由于在淬火过程中奥氏体经在不同温度停留后显示转变为马氏体的稳定化作用,也可能由于快速淬火时产生较大的内应力有助于马氏体的形成。

工件经淬火后有时会变形和开裂。这部分是由于工件的形状尺寸的关系(形状复杂或局部尺寸变化过大),或工件内部存在组织的不均匀性(如存在大的夹杂物、碳化物或加工裂纹),或由于设备和工艺上操作原因使工件在加热和冷却过程中各部分的温度很不均匀引起大的应力所致;部分地由于形成马氏体的先后不一,因而在工件内部产生应力;也和高碳马氏体的脆性以及高碳马氏体形成时产生显微裂纹(或在夹杂物、碳化物附近形成微裂纹)有关。当工件内保留略多的残余奥氏体时,就能减少变形和开裂,这是由于奥氏体的范性较大,能避免应力过分集中,也由于形成马氏体量较少,减少了应力、脆性(及微裂纹)的缘故。因此,除设法在加热和冷却时使工件各部分减小温度的不均匀性以外,利用增加奥氏体的含量,可以减少工件的变形和开裂;也可以由改变马氏体的成分和形态以增加马氏体的韧性和减少微裂纹的数目来避免或