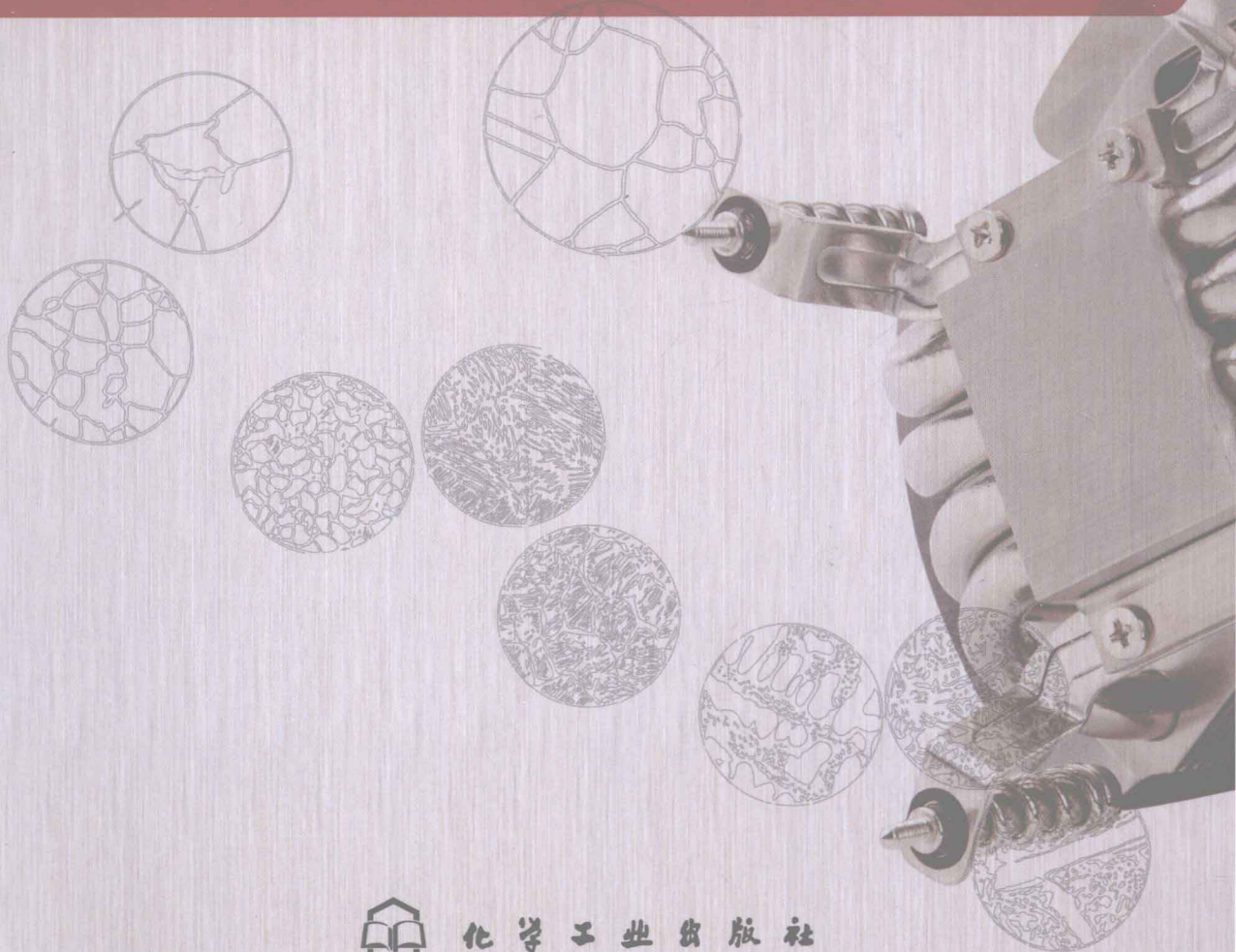


高等学校材料成形类专业规划教材

金属材料与热处理

JINSHUCAILIAO YU RECHULI

● 叶宏 主编 沟引宁 张春艳 副主编



化学工业出版社

高等学校材料成形类专业规划教材

金属材料与热处理

叶 宏 主编

沟引宁 张春艳 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书着重介绍了金属材料及热处理的知识,也介绍了一些常用的非金属材料 and 新型材料,同时介绍了当前工程材料的新工艺、新进展。全书共分3篇12章。第1篇讲述了金属的热处理,简要介绍了金属材料基础知识,重点介绍了钢的热处理原理与工艺。第2篇讲述了金属材料,在介绍钢合金化原理的基础上,分别介绍了常用金属材料的性能、成分、热处理及用途,包括结构钢、工具钢、不锈钢与耐热钢、铸铁和有色金属及合金。第3篇讲述了其它材料,简要介绍了高分子材料、陶瓷材料、复合材料以及新型材料。

本书适用于材料成型与控制工程专业、冶金工程专业及表面工程专业方向的本科教学,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

金属材料与热处理/叶宏主编. —北京:化学工业出版社, 2009.1

高等学校材料成形类专业规划教材

ISBN 978-7-122-04188-3

I. 金… II. 叶… III. ①金属材料-高等学校-教材 ②热处理-高等学校-教材 IV. TG14 TG15

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第193785号

责任编辑:陶艳玲

责任校对:周梦华

装帧设计:周遥

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张13½ 字数346千字 2009年3月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:24.00元

版权所有 违者必究

前 言

“金属材料与热处理”课程是材料科学与工程一级学科专业的一门专业技术课，是全面介绍金属材料的成分、热处理工艺、组织结构与性能之间关系的一门课程，它对金属材料的研究、应用和发展起着重要作用。随着教学改革的不断深入，本课程也进行了适当的调整，我们根据新的教学大纲和学时的要求，编写了本教材。本书可作为高等院校材料类及相关专业的教材和主要参考书，也可供有关专业的工程技术人员自学与参考。

本书着重介绍了钢的热处理原理与工艺，在详细介绍金属合金化原理的基础上，对钢、铸铁、有色合金的成分、热处理工艺、组织结构、性能及应用作了介绍。同时，简要介绍了常用非金属材料及新型材料。

本书在内容上精练和压缩了传统的热处理和金属材料方面的内容，力求内容简练、重点突出、理论联系实际，同时又注意到新材料、新工艺的发展方向。

全书由重庆工学院叶宏担任主编，沟引宁和张春艳担任副主编。其中第5~9章由叶宏编写；第2~4章由沟引宁编写；第11章、第12章由张春艳编写；第1章、第10章由闫忠琳编写。全书由叶宏教授统稿。

在编写过程中，本书参阅并引用了部分国内外相关教材、科技著作及论文内容，在此特向有关作者深表感谢！此外，本书在编写过程中得到武汉理工大学孙智富教授的指导，并得到了重庆工学院材料科学与工程学院及教务处的大力支持，在此也表示感谢。

由于新材料、新工艺及新技术的发展日新月异，加之编者水平有限，错误及不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2008年9月

目 录

第 1 篇 金属的热处理

第 1 章 金属材料基础知识	1	2.4.3 回火脆性	40
1.1 金属材料的性能	1	第 3 章 钢的热处理工艺	42
1.1.1 金属材料的力学性能	1	3.1 钢的退火与正火	42
1.1.2 金属材料的物理性能	3	3.1.1 钢的退火	42
1.1.3 金属材料的化学性能	4	3.1.2 钢的正火	45
1.2 金属材料的晶体结构	4	3.1.3 退火和正火的选用	45
1.2.1 晶体与非晶体	4	3.2 钢的淬火	46
1.2.2 金属的实际晶体结构	5	3.2.1 淬火及其目的	46
1.2.3 合金的相结构	6	3.2.2 淬火工艺	46
1.3 铁碳合金的基本组织与铁碳相图	7	3.2.3 淬火方法	48
1.3.1 纯铁的同素异构转变	7	3.2.4 钢的淬透性	50
1.3.2 铁碳合金的基本相	7	3.2.5 淬火缺陷及其防止	53
1.3.3 铁碳合金相图	8	3.3 钢的回火	59
第 2 章 钢的热处理原理	11	3.3.1 回火温度	59
2.1 概述	11	3.3.2 回火保温时间	60
2.1.1 热处理的作用	11	3.3.3 回火后的冷却	60
2.1.2 钢的临界温度	11	3.4 钢的表面热处理	61
2.2 钢在加热时的转变	12	3.4.1 表面淬火	61
2.2.1 奥氏体形成的热力学条件	12	3.4.2 化学热处理	63
2.2.2 奥氏体的形成过程	12	3.5 热处理与表面处理新技术	68
2.2.3 影响奥氏体形成速度的因素	14	3.5.1 可控气氛热处理	68
2.2.4 奥氏体的晶粒度及其影响因素	16	3.5.2 真空热处理	69
2.3 钢在冷却时的转变	18	3.5.3 形变热处理	71
2.3.1 过冷奥氏体的等温转变曲线	19	3.5.4 表面技术	72
2.3.2 珠光体转变	21	第 4 章 有色金属及合金的热处理	76
2.3.3 马氏体转变	26	4.1 固溶处理	76
2.3.4 贝氏体转变	30	4.1.1 基本概念	76
2.3.5 过冷奥氏体的连续冷却转变 曲线	34	4.1.2 合金固溶处理后的性能变化	77
2.4 钢的回火转变	37	4.2 合金的时效	77
2.4.1 淬火钢在回火时的组织转变	37	4.2.1 时效过程中的组织变化	78
2.4.2 淬火钢回火时力学性能的变化	38	4.2.2 时效过程中的性能变化	79
		4.2.3 时效方式	80

第 2 篇 金属材料

第 5 章 钢的合金化基础	82	5.1.2 合金元素与铁的相互作用	82
5.1 合金元素与铁和碳的相互作用	82	5.1.3 合金元素与碳的相互作用	84
5.1.1 合金元素及其在钢中的分布	82	5.1.4 合金元素对 Fe-Fe ₃ C 相图的	

影响	85	7.1.1 刀具钢的基本性能	113
5.2 合金元素对钢的热处理的影响	86	7.1.2 碳素刀具钢	113
5.2.1 合金元素对钢加热时奥氏体形成过程的影响	86	7.1.3 低合金刀具钢	115
5.2.2 合金元素对钢的过冷奥氏体分解转变的影响	87	7.1.4 高速钢	117
5.2.3 合金元素对淬火钢的回火的影响	88	7.2 模具钢	123
5.3 合金元素与钢的强韧化	89	7.2.1 冷作模具钢	123
5.3.1 合金元素对钢的强度的影响	89	7.2.2 热作模具钢	128
5.3.2 提高钢韧性的途径	90	7.3 量具钢	131
5.4 钢的分类及编号	91	7.3.1 量具用钢应具有的基本性能	131
5.4.1 碳钢的分类	91	7.3.2 量具钢的选择	132
5.4.2 碳钢的编号	92	7.3.3 量具钢的热处理	132
5.4.3 合金钢的分类	92	第8章 不锈钢与耐热钢	133
5.4.4 合金钢的编号	93	8.1 不锈钢	133
第6章 结构钢	95	8.1.1 金属腐蚀的概念	133
6.1 工程结构钢	95	8.1.2 不锈钢的化学成分特点	134
6.1.1 工程结构钢的性能要求	95	8.1.3 常用不锈钢	134
6.1.2 工程结构钢的化学成分特点	95	8.2 耐热钢	138
6.1.3 碳素结构钢	96	8.2.1 耐热钢的一般概念	138
6.1.4 低合金结构钢	96	8.2.2 常用的耐热钢	139
6.1.5 提高低合金结构钢性能的途径	98	第9章 铸铁	142
6.2 渗碳钢	98	9.1 铸铁的分类及石墨化	142
6.2.1 渗碳钢的性能要求	98	9.1.1 铸铁的分类	142
6.2.2 渗碳钢的化学成分特点	99	9.1.2 Fe-Fe ₃ C 和 Fe-C 双重相图	143
6.2.3 典型渗碳钢及其应用	99	9.1.3 铸铁的石墨化	143
6.2.4 渗碳钢的热处理特点	99	9.2 灰铸铁	144
6.3 调质钢	102	9.2.1 灰铸铁的成分、牌号及组织	145
6.3.1 调质钢的性能要求	102	9.2.2 灰铸铁的性能	146
6.3.2 调质钢的化学成分特点	103	9.2.3 灰铸铁的热处理	146
6.3.3 典型调质钢及其应用	103	9.3 可锻铸铁	147
6.3.4 调质钢的热处理特点	103	9.3.1 可锻铸铁的成分、牌号及用途	147
6.4 弹簧钢	106	9.3.2 可锻铸铁的石墨化退火	148
6.4.1 弹簧钢的性能要求	106	9.4 球墨铸铁	148
6.4.2 弹簧钢的化学成分特点	107	9.4.1 球墨铸铁的成分、牌号及用途	149
6.4.3 典型弹簧钢及应用	107	9.4.2 球墨铸铁的热处理	150
6.4.4 弹簧钢的热处理特点	107	9.5 蠕墨铸铁	151
6.5 滚动轴承钢	109	9.6 合金铸铁	151
6.5.1 滚动轴承钢的性能要求	109	9.6.1 耐磨铸铁	152
6.5.2 滚动轴承钢的化学成分特点	109	9.6.2 耐热铸铁	152
6.5.3 典型滚动轴承钢及应用	110	9.6.3 耐蚀铸铁	152
6.5.4 滚动轴承钢的热处理特点	111	第10章 有色金属及合金	154
第7章 工具钢	113	10.1 铝及铝合金	154
7.1 刀具钢	113	10.1.1 纯铝	154
		10.1.2 铝合金分类及热处理	154
		10.1.3 变形铝合金	156
		10.1.4 铸造铝合金	158

10.2 镁及镁合金	160	10.3.3 常用钛合金	164
10.2.1 纯镁的性质	160	10.3.4 钛合金的热处理	165
10.2.2 镁的合金化及热处理	160	10.4 铜及铜合金	166
10.2.3 常用镁合金	161	10.4.1 纯铜	166
10.3 钛及钛合金	162	10.4.2 黄铜	166
10.3.1 纯钛	163	10.4.3 青铜	168
10.3.2 钛的合金化及钛合金的分类	163	10.4.4 白铜	170
第3篇 其它材料简介			
第11章 非金属材料	171	12.1.1 形状记忆效应的机理	187
11.1 高分子材料	171	12.1.2 形状记忆合金	188
11.1.1 高分子材料基础知识	171	12.1.3 形状记忆合金的应用	189
11.1.2 塑料	172	12.2 非晶态合金	190
11.1.3 橡胶	174	12.2.1 非晶态金属的结构特点	191
11.1.4 纤维	176	12.2.2 非晶态金属性能特点及应用	192
11.1.5 胶黏剂	177	12.3 超导材料	194
11.1.6 涂料	178	12.3.1 超导现象及超导材料的基本 性质	194
11.2 陶瓷材料	179	12.3.2 超导材料的分类及性能	195
11.2.1 陶瓷的概念与分类	179	12.3.3 超导材料的应用	196
11.2.2 陶瓷材料的特点	179	12.4 贮氢合金	197
11.2.3 传统陶瓷	180	12.4.1 金属氢化物贮氢技术原理	198
11.2.4 特种陶瓷	180	12.4.2 金属氢化物贮氢材料应具备的 条件	198
11.3 复合材料	183	12.4.3 贮氢合金分类及开发现状	199
11.3.1 复合材料的概念	183	12.4.4 储氢合金的应用	199
11.3.2 复合材料的特点	184	12.5 纳米材料	201
11.3.3 常用复合材料的分类	185	12.5.1 纳米粒子的特性	201
11.3.4 常用纤维增强复合材料简介	185	12.5.2 纳米材料分类	203
第12章 新型材料简介	187	12.5.3 纳米材料的性能及应用	204
12.1 形状记忆合金	187		
参考文献			206

第 1 篇 金属的热处理

第 1 章 金属材料基础知识

金属材料是由金属元素或以金属元素为主要材料构成的，并具有金属特性的工程材料。金属材料种类繁多，用途广泛，按化学组成分类，金属材料分为黑色金属和有色金属两大类。黑色金属主要是指以铁或以铁为主形成的金属材料，即钢铁材料，如钢和生铁。有色金属是指除钢铁材料以外的其它金属，如金、银、铜、铝、镁、钛、锌、锡、铅等。

1.1 金属材料的性能

材料的性能一般分为使用性能和工艺性能两大类。使用性能是指材料在使用过程中所表现的性能，包括力学性能、物理性能和化学性能。工艺性能是指材料在加工过程中所表现的性能，包括铸造、锻压、焊接、热处理和切削性能等。这里主要介绍金属材料的使用性能。

1.1.1 金属材料的力学性能

材料在加工和使用过程中，总要受到外力作用。材料受外力作用时所表现的性能称为力学性能，如强度、塑性、硬度、韧性及疲劳强度等。合理的力学性能指标，为零件的正确设计、合理选用、工艺路线制订提供了主要依据。

(1) 强度

材料在外力作用下抵抗变形和破坏的能力称为强度。根据外力作用的方式，强度有多种指标，如屈服强度、抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度等。

测定金属材料强度的基本方法是拉伸试验。在试验中，试样通常为光滑圆柱状，其两端被拉伸试验机的夹头夹紧，然后缓慢而均匀地施加轴向拉力。如图 1-1 所示，随拉力的增大，试样开始被拉长，直至断裂为止。自动记录装置将负荷-拉长过程绘出拉伸曲线图。

在应力-应变曲线上，OA 段为弹性阶段，其变形称为弹性变形。当应力超过 A 点时，试样除了弹性变形外，还产生塑性变形。在图 1-1 中，在 BC 阶段，应力几乎不增加，但应变继续增加，称为屈服阶段。CD 段称为大量变形阶段。在此阶段，因产生加工硬化，欲使试样继续变形必须加大载荷。DE 阶段称为局部变形阶段。D 点以后，试样产生“颈缩”，应力明显下降，试样继续伸长，直至 E 点断裂。

① 屈服强度 在应力-应变曲线上，B 点应力称为 σ_s ，定义为屈服强度。有些材料没有明显屈服现象，因此规定拉伸时产生 0.2% 残余变形所对应的应力为条件屈服强度，用 $\sigma_{0.2}$ 表示。

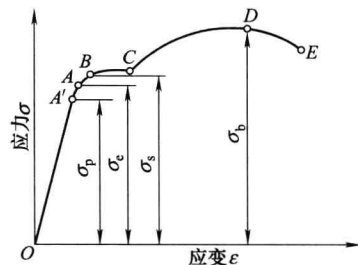


图 1-1 低碳钢应力-应变曲线

屈服强度表示材料抵抗微量塑性变形的能力。在大多数情况下，材料不允许产生塑性变形，故屈服强度是零部件设计的主要依据。

② 抗拉强度 在应力-应变曲线上，D 点应力称为 σ_b ，定义为抗拉强度。抗拉强度反映材料抵抗断裂破坏的能力，也是零件设计和材料评价的重要指标。

(2) 塑性

塑性是指材料受力破坏前承受最大塑性变形的能力，指标为伸长率 (δ) 和断面收缩率 (ψ)。

伸长率的数值和试样的标距长度有关，标准圆形试样有长试样 ($l_0 = 10d_0$ ， d_0 为试样直径) 和短试样 ($l_0 = 5d_0$) 两种，分别用 δ_{10} 和 δ_5 表示。

断面收缩率的数值不受试样尺寸的影响，所以用 ψ 表示塑性更接近材料的真实应变。

δ 与 ψ 值越大，材料的塑性越好。良好的塑性是材料进行压力加工的必要条件。

(3) 弹性与刚度

在图 1-1 中，A 点的应力 σ_e 称为弹性极限；A' 点的应力 σ_p 称为比例极限。由于 A 点与 A' 点很接近，一般不做区分。

在弹性变形范围内，应力与应变的比值称为弹性模量 E 。其物理意义是产生单位弹性变形时所需应力的数值。弹性模量是材料最稳定的性质之一，它的大小主要取决于材料的本性，除随温度升高而逐渐降低外，其它强化材料的手段如热处理、冷热加工、合金化等对弹性模量的影响很小。材料受力时抵抗弹性变形的能力称为刚度，其指标即为弹性模量。可以通过增加横截面积或改变截面形状的方法来提高零件的刚度。

(4) 硬度

材料表面局部区域抵抗更硬物体压入的能力称为硬度。硬度越高，表示材料抵抗局部塑性变形的能力越大。在一般情况下，硬度高耐磨性就好。根据测量方法不同，常用的硬度指标有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等。

① 布氏硬度 用一定直径的钢球或硬质合金球，在一定载荷的作用下压入试样表面，保持一定时间后卸除载荷，所施加的载荷与压痕表面积的比值即为布氏硬度。布氏硬度值可通过测量压痕平均直径 d 查表得到。当压头为钢球时，布氏硬度用符号 HBS 表示，适用于布氏硬度值在 450 以下的材料。压头为硬质合金时用符号 HBW 表示，适用于布氏硬度在 650 以下的材料。

布氏硬度的优点是测量误差小，数据稳定；缺点是压痕大，不能用于太薄件或成品件。最常用的钢球压头适于测定退火钢、正火钢、调质钢、铸铁及有色金属的硬度。

② 洛氏硬度 利用一定载荷将夹角为 120° 的金刚石圆锥体或直径为 1.588mm 的淬火钢球压入试样表面，保持一定时间后卸除载荷，根据压痕深度确定的硬度值称为洛氏硬度。洛氏硬度用符号 HR 表示，根据压头类型和主载荷不同，分为 9 个标尺，常用的标尺为 A、B、C，如表 1-1 所示。

表 1-1 常用洛氏硬度的符号、试验条件及应用

硬度标尺	硬度符号	压头类型	初载荷 P_0/N	主载荷 P_1/N	K	表盘刻度颜色	硬度范围	应用举例
A	HRA	金刚石圆锥	98.07	490.3	100	黑色	20~88	碳化物、硬质合金、表面淬火钢等
B	HRB	1.588mm 钢球	98.07	882.6	130	红色	20~100	软钢、退火钢、铜合金等
C	HRC	金刚石圆锥	98.07	1373	100	黑色	20~70	淬火钢、调质钢等

实际测量时，硬度值可直接从洛氏硬度计的表盘上读出；洛氏硬度的优点是操作简便，压痕小，适用范围广；缺点是测量结果分散度大。

③ 维氏硬度 维氏硬度其测定原理基本与布氏硬度法相同，但使用的压头是锥面夹角为 136° 的金刚石正四棱锥体。维氏硬度保留了布氏硬度和洛氏硬度的优点，既可测量由极软到极硬的材料硬度，又能互相比较。既可测量大块材料、表面硬化层的硬度，又可测量金相组织中不同相的硬度。

(5) 冲击韧性

材料抵抗冲击载荷作用而不被破坏的能力称为冲击韧性。通常用冲击功 A_k 来度量。 A_k 是冲击试样在摆锤冲击试验机上一次冲击试验时所消耗的冲击功。 A_k 越大，表示材料的韧性越好。 A_k 值对材料的缺陷（如晶粒大小、夹杂物等）十分敏感，其大小不仅决定于材料本身，而且还随试样尺寸、形状和试验温度的不同而变化。

(6) 疲劳强度

实际工作中的构件常常是在受交变载荷的作用。所谓交变载荷是指大小或方向随时间而变化的载荷。在这种载荷的作用下，材料常常在远低于其屈服强度的应力下发生断裂，这种现象称为疲劳。如发动机的轴、齿轮等均受交变载荷作用。实际服役的金属材料有 90% 是因为疲劳而破坏。疲劳破坏是脆性破坏，它的一个重要特点是具有突发性，因而更具灾难性。

材料在规定次数（钢铁材料为 10^7 次，有色金属为 10^8 次）的交变载荷作用下，不发生断裂时的最大应力称为疲劳强度，用 σ_{-1} 表示。

提高零件的疲劳抗力，除应合理选材外，还应注意其结构形状，避免应力集中，减少缺陷，降低表面粗糙度和进行表面强化等。

1.1.2 金属材料的物理性能

(1) 密度

单位体积材料的质量称为材料的密度。对于运动构件，材料的密度越小，消耗的能量越少，效率越高。材料的抗拉强度与密度之比称为比强度。在航空航天领域，选用高比强度的材料就显得尤为重要。元素周期表中原子序数越小的元素，其密度越小。

(2) 熔点

熔点是指材料的熔化温度。一般来说，材料的熔点越高，材料在高温下保持高强度的能力越强。在设计高温条件下工作的构件时，需要考虑材料的熔点。

(3) 热膨胀性

大部分固体材料在加热时都发生膨胀，材料的热膨胀性通常用线膨胀系数表示。它是温度升高 1°C 时单位长度材料的伸长量。对于特别精密的仪器，应选择热膨胀系数低的材料。在材料热加工和热处理过程中更要考虑其热膨胀行为，如果表面和内部热膨胀不一致，就会产生内应力，导致材料变形或开裂。

(4) 导热性

材料导热性的常用热导率表示。热导率是指在单位温度梯度下，单位时间内通过垂直于热流方向单位截面积上的热流量。材料的导热性越差，在加热和冷却时表面和内部的温差越大，内应力越大，越容易发生变形和开裂。金属中，导热性最好的是银，铜和铝次之。

(5) 导电性

材料的导电性与材料的电阻密切相关，常用电阻率表示。金属通常具有较好的导电性，其中最好的是银，铜和铝次之。金属具有正的电阻温度系数，即随温度升高，电阻增大。含有杂质或受到冷变形会导致金属的电阻上升。

1.1.3 金属材料的化学性能

(1) 耐蚀性

腐蚀是指材料在外部介质作用下发生逐渐破坏的现象。材料抵抗各种介质腐蚀破坏的能力称为耐蚀性。在金属材料中，碳钢、铸铁的耐蚀性较差，而不锈钢、铝合金、铜合金、钛及其合金耐蚀性较好。

(2) 抗氧化性

材料抵抗高温氧化的能力称为抗氧化性。抗氧化的金属材料常在表面形成一层致密的保护性氧化膜，阻碍氧的进一步扩散，这类材料的氧化一般遵循抛物线规律，而形成多孔疏松或挥发性氧化物材料的氧化则遵循直线规律。

耐蚀性和抗氧化性统称为材料的化学稳定性。高温下的化学稳定性称为热化学稳定性。在高温下工作的设备或零部件，如锅炉、汽轮机和飞机发动机等应选择热化学稳定性高的材料。

1.2 金属材料的晶体结构

金属材料的性能主要由其化学成分和内部组织结构决定。金属材料在固态下通常是晶体。研究金属材料的内部结构即研究其晶体结构，是了解金属材料性能、正确选用材料的基础。

1.2.1 晶体与非晶体

物质都是由原子组成的，根据原子排列的特征，固态物质可分为晶体与非晶体两类。晶体是其内部原子在空间呈一定的有规则排列 [图 1-2 (a)]，具有固定熔点和各向异性的特征，如金刚石、石墨及一般固态金属与合金等均是晶体。非晶体是指其内部原子在空间上排列没有规则性，如玻璃、沥青、石蜡、松香等都是非晶体。

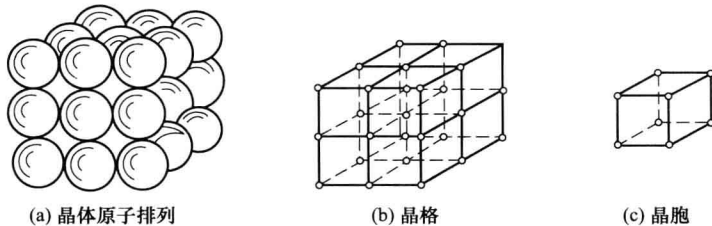


图 1-2 晶体示意图

(1) 金属的晶体结构

① 晶格 为了便于描述和理解晶体中原子在三维空间排列的规律性，可以用一些假想的直线将各原子中心连接起来，形成一个空间格子 [图 1-2 (b)]。这种抽象地用于描述原子在晶体中排列形式的几何空间格子，称为晶格。

② 晶胞 根据晶体中原子排列规律性和周期性的特点，通常从晶格中选取一个能够充分反映原子排列特点的最小几何单元进行分析。这个最小的几何单元称为晶胞 [图 1-2 (c)]。

(2) 常见金属的晶格类型

在已知的 80 多种金属元素中，大部分金属的晶体结构分别属于下述三种类型。

① 体心立方晶格 这种晶格的晶胞是立方体，立方体的八个顶角和中心各有一个原子，如图 1-3 所示。具有这种晶格的金属有钨 (W)、钼 (Mo)、铬 (Cr)、钒 (V)、 α -铁 (α -Fe) 等。

② 面心立方晶格 这种晶格的晶胞也是立方体，立方体的八个顶角和六个面的中心各

有一个原子，如图 1-4 所示。具有这种晶格的金属有金 (Au)、银 (Ag)、铝 (Al)、铜 (Cu)、镍 (Ni)、 γ -铁 (γ -Fe) 等。

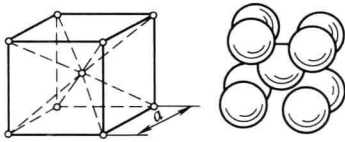


图 1-3 体心立方晶格示意图

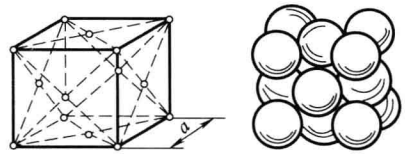


图 1-4 面心立方晶格示意图

③ 密排六方晶格 这种晶格的晶胞是密排六方柱体，在六方柱体的十二个顶角和上下底面中心各有一个原子，另外在上下面之间还有三个原子了，如图 1-5 所示。具有此种晶格的金属有镁 (Mg)、锌 (Zn)、铍 (Be)、 α -钛 (α -Ti) 等。

1.2.2 金属的实际晶体结构

如果一块晶体内部的晶格位向 (即原子排列的方向) 完全一致，称这块晶体为单晶体。只有采用特殊方法才能获得金属单晶体。实际使用的金属材料即使体积很小，其内部仍包含了许多颗粒状的小晶体，各小晶体中原子排列的方向不尽相同，如图 1-6 所示。这些外形不规则的小晶体称为晶粒。晶粒与晶粒之间的界面称为晶界。这种实际上由许多晶粒组成的晶体称为多晶体。

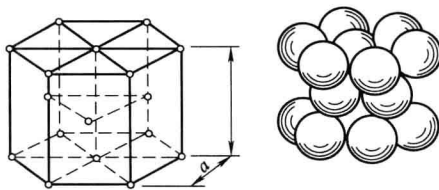


图 1-5 密排六方晶格示意图

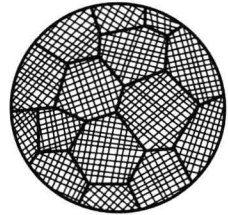


图 1-6 金属的多晶体结构示意图

由于一般金属是多晶体结构，故通常测出的性能是各个位向不同的晶粒的平均性能，结果使金属显示出各向同性。

晶界原子的排列不像晶粒内部那样有规则性，这种原子排列不规则的部位称为晶体缺陷。根据晶体缺陷的几何特点，可将晶体缺陷分为以下三种。

(1) 点缺陷

点缺陷是指在晶体中长度、宽度、高度尺寸都很小的一种缺陷。最常见的缺陷是晶格空位和间隙原子。原子空位的位置叫空位；存在于晶格间隙位置的原子叫间隙原子，如图 1-7 所示。

(2) 线缺陷

线缺陷是指在晶体中呈线状分布 (在一维方向上的尺寸很大，而别的方向则很小) 原子排列不均衡的晶体缺陷，如图 1-8 所示。这种缺陷主要是指各种类型的位错。所谓位错是指晶格中一系列或若干列原子发生了某种有规律的错排现象。由于位错存在，造成金属晶格畸变，并对金属的性能，如强度、塑性、疲劳性能及原子扩散、相变过程等产生重要影响。

(3) 面缺陷

面缺陷是指在二维方向上尺寸很大，在第三个方向上的尺寸很小，呈面状分布的缺陷，如图 1-9 所示。通常面缺陷是指晶界。在晶界处，由于原子呈不规则

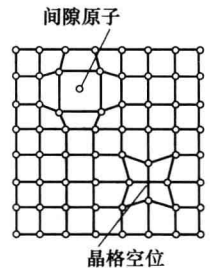


图 1-7 晶格空位和间隙原子示意图

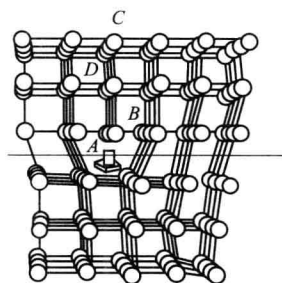


图 1-8 刃型位错示意图

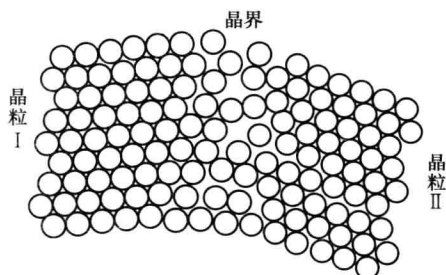


图 1-9 晶界过渡结构示意图

排列,使晶格处于畸变状态,它在常温下对金属的塑性变形起阻碍作用,从而使金属材料的强度和硬度有所提高。

1.2.3 合金的相结构

纯金属因强度、硬度等力学性能较低,在应用上受到一定限制。所以工程上使用的金属材料大多是合金。合金是指由两种或两种以上的金属元素(或金属与非金属元素)组成的,具有金属特性的一类物质。组成合金的最基本独立单位叫做组元。由两个组元组成的合金称为二元合金,由三个组元组成的合金称为三元合金。以此类推。

组成合金的元素相互作用会形成各种不同的相。相是指合金中具有同一化学成分、同一结构和原子聚集状态,并以界面互相分开的、均匀的组成部分。由于形成条件不同,各相可以以不同数量、形状、大小和分布方式组合,构成了我们在显微镜下观察到的不同组织。所谓组织是指用肉眼或显微镜观察到的不同组成相的形状、尺寸、分布及各相之间的组合状态。

由于合金的性能取决于组织,而组织又首先取决于合金中的相,所以,为了掌握合金的组织 and 性能,首先必须了解合金的相结构。合金的相结构是指合金中相的晶体结构。根据合金中各元素间的相互作用,合金中的相可以分为固溶体和金属化合物两大类。

(1) 固溶体

合金在固态下一种组元的晶格内溶解了另一组元的原子而形成的晶体相,称为固溶体。在固溶体中晶格类型保持不变的组元称为溶剂。因此,固溶体的晶格类型与溶剂相同,固溶体中的其它组元称为溶质。根据溶质原子在溶剂晶格中所占位置,可将固溶体分为置换固溶体和间隙固溶体两种类型。

① 置换固溶体 溶质原子替换了一部分溶剂原子而占据溶剂晶格部分结点位置而形成的固溶体称为置换固溶体,如图 1-10 (a) 所示。按溶质溶解度不同,置换固溶体又可分为有限固溶体和无限固溶体两种。其溶解度主要取决于组元间的晶格类型、原子半径和原子结构。

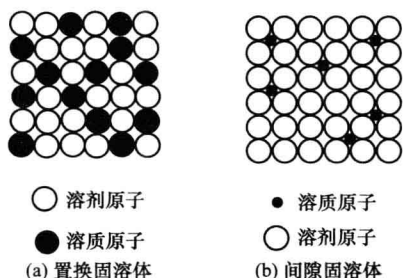


图 1-10 固溶体的类型

实践证明,大多数合金只能有限固溶,且溶解度随着温度的升高而增加,只有两组元晶格类型相同,原子半径相差很小时,才可以无限互溶,形成无限固溶体。

② 间隙固溶体 溶质原子在溶剂晶格中不占据溶剂结点位置,而是嵌入各结点之间的间隙而形成的固溶体称为间隙固溶体。如图 1-10 (b) 所示。

由于溶剂晶格的间隙有限,所以间隙固溶体只能

有限溶解溶质原子，同时只有在溶质原子与溶剂原子半径的比值小于 0.59 时，才能形成间隙固溶体。间隙固溶体的溶解度与温度、溶剂溶质原子半径比值和溶剂晶格类型等有关。

无论是置换固溶体，还是间隙固溶体，异类原子的溶入都将使固溶体晶格发生畸变。增加位错运动的阻力，使固溶体的强度、硬度提高。这种通过溶入溶质原子形成固溶体、从而使合金强度、硬度升高的现象称为固溶强化。固溶强化是强化金属材料的重要途径之一。同时，只要适当控制固溶体中溶质的含量，就能在显著提高金属材料强度的同时仍然使其保持较高的塑性和韧性。

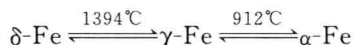
(2) 金属化合物

金属化合物是指合金组元间发生相互作用而形成的具有金属特性的合金相。例如铁碳合金中的渗碳体就是铁和碳组成的化合物 Fe_3C ，金属化合物具有与其构成组元晶格截然不同的特殊晶格，熔点高，硬而脆。合金中出现金属化合物时，通常能显著地提高合金的强度、硬度和耐磨性，但合金的塑性和韧性则会明显地降低。

1.3 铁碳合金的基本组织与铁碳相图

1.3.1 纯铁的同素异构转变

大多数金属结晶完成后晶格类型不会再发生变化。但也有少数金属如铁、锰、钴等，在结晶成固态后继续冷却时晶格类型还会发生变化。这种金属在固态下晶格类型随温度发生变化的现象，称为同素异构转变，如图 1-11 所示。由纯铁的冷却曲线可以看出，液态纯铁在结晶后具有体心立方晶格，称为 $\delta\text{-Fe}$ ，当其冷却到 1394°C 时，发生同素异构转变，由体心立方晶格的 $\delta\text{-Fe}$ 转变为面心立方晶格的 $\gamma\text{-Fe}$ ；再冷却到 912°C 时，原子排列方式又由面心立方晶格转变为体心立方晶格，称为 $\alpha\text{-Fe}$ 。上述转变过程可由下式表示：



纯铁同素异构转变的特性决定了钢和铸铁固态的组织转变，它是钢铁能够进行热处理的理论依据，也是钢铁材料性能多样化、用途广泛的主要原因之一。

1.3.2 铁碳合金的基本相

铁碳合金中，因铁和碳在固态下相互作用不同，所以可以形成固溶体和金属化合物，其基本相有铁素体、奥氏体和渗碳体。

(1) 铁素体

铁素体是指 $\alpha\text{-Fe}$ 或其内固溶有一种或数种其它元素所形成的晶体结构为体心立方的固溶体，用符号 F (或 α) 表示。

碳原子较小，在 $\alpha\text{-Fe}$ 晶格中碳处于间隙位置。铁素体溶碳量很小，在 727°C 时溶碳量最大 $w_c = 0.0218\%$ ，随着温度的下降其溶碳量逐渐减少，其性能几乎和纯铁相同，即强度和硬度 ($\sigma_b = 180 \sim 280\text{MPa}$, $50 \sim 80\text{HBS}$) 较低，而塑性和韧性 ($\delta = 30\% \sim 50\%$, $A_{ku} = 128 \sim 160\text{J}$) 较高。铁素体在 770°C (居里点) 有磁性转变，在 770°C 以下具有铁磁性，在

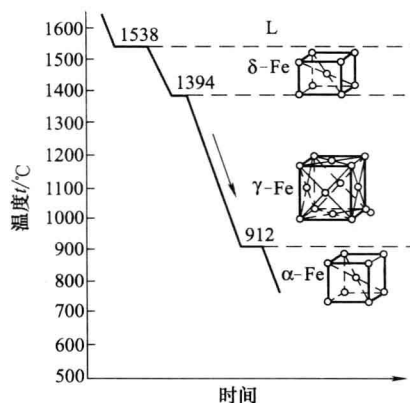


图 1-11 纯铁的冷却曲线

770℃以上则失去铁磁性。

(2) 奥氏体

奥氏体是指 γ -Fe 内固溶有碳和（或）其它元素所形成的晶体结构为面心立方的固溶体，常用符号 A（或 γ ）表示。

奥氏体溶碳能力较大，在 1148℃ 时溶碳量最大 $w_C = 2.11\%$ ，随着温度下降，溶碳量逐渐减少，在 727℃ 时的溶碳量为 $w_C = 0.77\%$ 。奥氏体具有一定的强度和硬度（ $\sigma_b \approx 400\text{MPa}$ ，160~220HBS），塑性好（ $\delta \approx 40\% \sim 50\%$ ），在压力加工中，大多数钢材要加热至高温奥氏体状态进行塑性变形加工。

稳定的奥氏体属于铁碳合金的高温组织，当铁碳合金缓冷到 727℃ 时，奥氏体发生转变，转变为其它类型的组织。奥氏体是非铁磁性相。

(3) 渗碳体

渗碳体是铁和碳的金属化合物，具有复杂的晶体结构，用化学式 Fe_3C 表示。渗碳体的晶格形式，与碳和铁都不一样，是复杂的晶格类型。渗碳体碳的质量分数是 6.69%，熔点为 1227℃。渗碳体的结构比较复杂，其硬度高，脆性大，塑性与韧性极低。渗碳体在钢和铸铁中与其它相共存时呈片状、球状、网状。

渗碳体没有同素异构转变，但有磁性转变，在 230℃ 以下具有弱铁磁性，而在 230℃ 以上则失去磁性。渗碳体是碳在铁碳合金中的主要存在形式，是亚稳定的金属化合物，在一定条件下，渗碳体可分解成石墨，这一过程对于铸铁的生产具有重要意义。

1.3.3 铁碳合金相图

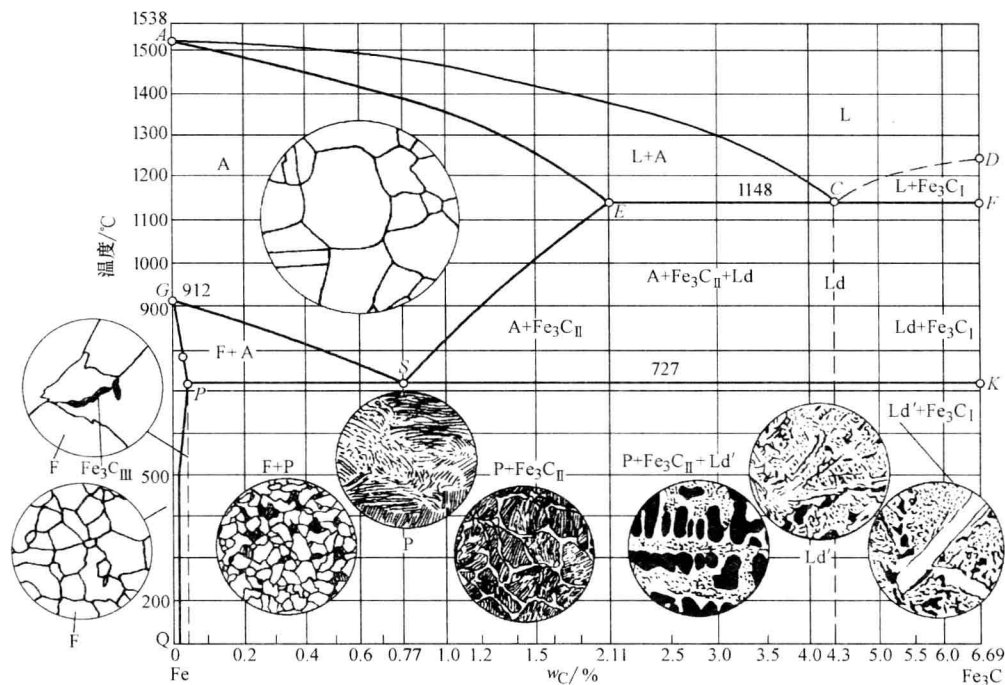
铁碳合金相图是铁碳合金在极缓慢冷却（或加热）条件下，不同化学成分的铁碳合金，在不同温度下所具有的组织状态的图形。碳的质量分数 $w_C > 5\%$ 的铁碳合金，尤其当 w_C 增加到 6.69% 时，铁碳合金几乎全部变为金属化合物 Fe_3C 。这种化学成分的铁碳合金硬而脆，机械加工困难，在机械制造方面很少应用。所以，研究铁碳合金相图时，只需研究 $w_C \leq 6.69\%$ 这部分。而 $w_C = 6.69\%$ 时，铁碳合金全部为亚稳定的 Fe_3C ，因此， Fe_3C 就可看成是铁碳合金的一个组元，实际上研究铁碳合金相图，就是研究 Fe- Fe_3C 相图部分，如图 1-12 所示。

(1) 铁碳合金相图中的特性点

铁碳合金相图中主要特性点的温度、碳的质量分数及其含义见表 1-2。

表 1-2 铁碳合金相图中的特性点

特性点	温度/℃	$w_C/\%$	特性点的含义
A	1538	0	纯铁的熔点或结晶温度
C	1148	4.3	共晶点,发生共晶转变 $L_{4.3} \rightarrow A_{2.11} + \text{Fe}_3\text{C}$
D	1227	6.69	渗碳体的熔点
E	1148	2.11	碳在 γ -Fe 中的最大溶碳量,也是钢与生铁的化学成分分界点
F	1148	6.69	共晶渗碳体的化学成分点
G	912	0	α -Fe \rightleftharpoons γ -Fe 同素异构体转变点
S	727	0.77	共析点,发生共析转变 $A_{0.77} \rightarrow F_{0.0218} + \text{Fe}_3\text{C}$
P	727	0.0218	碳在 α -Fe 中的最大溶解量

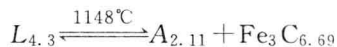
图 1-12 简化后的 Fe-Fe₃C 相图

(2) 铁碳合金相图中的主要特性线

① 液相线 ACD 在液相线 ACD 以上区域，铁碳合金处于液态，冷却下来时碳的质量分数 $w_C \leq 4.3\%$ 的铁碳合金在 AC 线开始结晶出奥氏体 (A)；碳的质量分数 $w_C > 4.3\%$ 的铁碳合金在 CD 线开始结晶出渗碳体，称一次渗碳体，用 Fe_3C_I 表示。

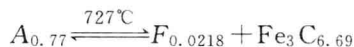
(2) 固相线 $AECF$ 在固相线 $AECF$ 以下区域，铁碳合金呈固态。

(3) 共晶线 ECF ECF 线是一条水平 (恒温) 线，称为共晶线。在此线上液态铁碳合金将发生共晶转变，其反应式为：



共晶转变形成了奥氏体与渗碳体的机械混合物，称为莱氏体 (Ld)。碳的质量分数 $w_C = 2.11\% \sim 6.69\%$ 的铁碳合金均会发生共晶转变。

④ 共析线 PSK PSK 线也是一条水平 (恒温) 线，称为共析线，通常称为 A_1 线。在此线上固态奥氏体将发生共析转变，其反应式为：



共析转变的产物是铁素体与渗碳体的机械混合物，称为珠光体 (P)。碳的质量分数 $w_C > 0.0218\%$ 的铁碳合金均会发生共析转变。

⑤ GS 线 GS 线表示铁碳合金冷却时由奥氏体组织中析出铁素体组织的开始线，通常称为 A_3 线。

⑥ ES 线 ES 线是碳在奥氏体中的溶解度变化曲线，通常称为 A_{cm} 线。它表示铁碳合金随着温度的降低，奥氏体中碳的质量分数沿着此线逐渐减少，多余的碳以渗碳体形式析出，称为二次渗碳体，用 Fe_3C_{II} 表示，以区别于从液态铁碳合金中直接结晶出来的 Fe_3C_I 。

⑦ *GP* 线 *GP* 线为铁碳合金冷却时奥氏体组织转变为铁素体的终了线或者加热时铁素体转变为奥氏体的开始线。

⑧ *PQ* 线 *PQ* 线是碳在铁素体中的溶解度变化曲线，它表示铁碳合金随着温度的降低，铁素体中的碳的质量分数沿着此线逐渐减少，多余的碳以渗碳体形式析出，称为三次渗碳体，用 $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$ 表示。由于 $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$ 数量极少，在一般钢中对性能影响不大，故可忽略。

(3) 铁碳合金的分类和室温平衡组织

铁碳合金相图中的各种合金，按其碳的质量分数和室温平衡组织的不同，一般分为工业纯铁、钢、白口铸铁（生铁）三类，见表 1-3。

表 1-3 铁碳合金分类

合金类别	工业纯铁	钢			白口铸铁		
		亚共析钢	共析钢	过共析钢	亚共晶白口铸铁	共晶白口铸铁	过共晶白口铸铁
$w_{\text{C}}/\%$	$w_{\text{C}} \leq 0.0218$	$0.0218 < w_{\text{C}} \leq 2.11$			$2.11 < w_{\text{C}} \leq 6.69$		
		< 0.77	0.77	> 0.77	< 4.3	4.3	> 4.3
室温组织	F	F+P	P	P+ Fe_3C	Ld'+P+ $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$	Ld'	Ld'+ $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{I}}$