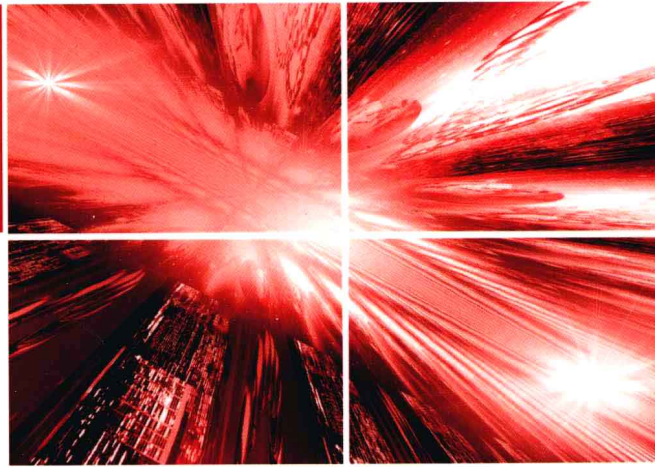


普通高等教育“十二五”规划教材



热处理 原理与工艺

赵乃勤 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

热处理原理与工艺

主 编 赵乃勤

副主编 季根顺 权高峰 翟红雁

参 编 郭铁明 师春生 何 芳 贾建刚

主 审 阎殿然

机械工业出版社

本书介绍了钢在加热过程中的奥氏体转变, 冷却过程中的珠光体转变、贝氏体转变、马氏体转变, 以及钢的回火转变。同时, 对一些典型合金的时效相变进行了概要介绍; 在热处理原理的基础上, 介绍了常规热处理方法和工艺, 以及表面热处理、化学热处理和一些新发展的相变与热处理技术, 并对热处理设备进行了基本介绍。

本书可作为金属材料工程专业本科生教材, 也可作为其他材料专业的本科生、研究生以及从事材料研究及热处理技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

热处理原理与工艺/赵乃勤主编. —北京: 机械工业出版社, 2011. 12
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-36090-2

I. ①热… II. ①赵… III. ①热处理 - 高等学校 - 教材 IV. ①TG15

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 207541 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 冯春生 责任编辑: 冯春生 罗子超

版式设计: 张世琴 责任校对: 张媛

封面设计: 张静 责任印制: 乔宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 20.75 印张 · 512 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-36090-2

定价: 39.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

普通高等教育“十二五”规划教材 编审委员会

主任委员 李荣德 沈阳工业大学

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

方洪渊	哈尔滨工业大学	王智平	兰州理工大学
朱世根	东华大学	许并社	太原理工大学
邢建东	西安交通大学	李大勇	哈尔滨理工大学
李永堂	太原科技大学	周 荣	昆明理工大学
聂绍珉	燕山大学	葛继平	大连交通大学

委 员 (按姓氏笔画排序)

丁雨田	兰州理工大学	文九巴	河南科技大学
王卫卫	哈尔滨工业大学 (威海)	计伟志	上海工程技术大学
邓子玉	沈阳理工大学	刘永长	天津大学
刘金合	西北工业大学	华 林	武汉理工大学
毕大森	天津理工大学	许映秋	东南大学
闫久春	哈尔滨工业大学	何国球	同济大学
张建勋	西安交通大学	李 尧	江汉大学
李 桓	天津大学	李 强	福州大学
李亚江	山东大学	邹家生	江苏科技大学
周文龙	大连理工大学	武晓雷	中国科学院
侯英玮	大连交通大学	姜启川	吉林大学
赵 军	燕山大学	梁 伟	太原理工大学
黄 放	贵州大学	蒋百灵	西安理工大学
薛克敏	合肥工业大学	戴 虹	西南交通大学

秘 书 长 袁晓光 沈阳工业大学

秘 书 冯春生 机械工业出版社

金属材料工程专业教材编委会

主任委员 许并社 太原理工大学

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

文九巴 河南科技大学

刘永长 天津大学

何国球 同济大学

李 强 福州大学

武晓雷 中国科学院

蒋百灵 西安理工大学

委 员 (按姓氏笔画排序)

卫英慧 太原理工大学

马 臣 佳木斯大学

马 勤 兰州理工大学

凤 仪 合肥工业大学

王章忠 南京工程学院

叶卫平 武汉理工大学

石巨岩 太原理工大学

任凤章 河南科技大学

刘宗昌 内蒙古科技大学

孙康宁 山东大学

毕大森 天津理工大学

严红革 湖南大学

吴 波 福州大学

张 志 河南理工大学

张厚安 厦门理工学院

张春华 沈阳工业大学

李玉海 沈阳理工大学

肖平安 湖南大学

陆 兴 大连交通大学

周细应 上海工程技术大学

庞国星 北华航天工业学院

范爱玲 北京工业大学

俞泽民 哈尔滨理工大学

赵乃勤 天津大学

赵玉涛 江苏大学

徐 江 南京航空航天大学

栾道成 西华大学

袁泽喜 武汉科技大学

高聿为 燕山大学

靳惠明 扬州大学

秘 书 长 梁 伟 太原理工大学

秘 书 冯春生 机械工业出版社

前 言

本书为普通高等教育“十二五”规划教材，是针对金属材料工程专业本科生的教学要求而编写的，也可作为其他材料专业的本科生、研究生以及从事新材料研究及热处理技术人员的参考书。

本书主要以金属热处理原理与工艺为主线，介绍了钢在加热过程中的奥氏体转变，冷却过程中的高温珠光体转变、中温贝氏体转变、低温马氏体转变，以及钢的回火转变。同时，针对有色金属及其合金的应用领域不断扩大的发展趋势，对一些典型合金的时效相变进行了概要介绍；在热处理原理的基础上，介绍了实现合金相变的手段——热处理方法和工艺，以及表面热处理、化学热处理和一些新发展的相变与热处理技术，并对热处理设备进行了基本介绍。

通过本书的学习，可以帮助读者掌握金属热处理方法、原理和工艺，并更深入地认识合金相变与成分-工艺的关系及对性能的影响，建立成分-工艺-组织-性能之间相互关联、相互影响的整体概念；了解钢中相变的一般规律，特别是学会掌握并运用基本理论和专业知识，掌握通过热处理方法提高金属材料性能的原理和工艺。

本书共12章。第1章和第5章由天津大学赵乃勤教授编写；第2章由天津大学师春生副教授编写；第3章和第4章由西南交通大学权高峰教授编写；第6章由兰州理工大学季根顺教授编写；第7章由天津大学何芳副教授编写；第8章由兰州理工大学贾建刚副教授编写；第9章和第10章由兰州理工大学郭铁明副教授编写；第11章和第12章由北华航天工业学院翟红雁教授编写。全书由赵乃勤担任主编，季根顺、权高峰、翟红雁担任副主编，河北工业大学阎殿然教授对全书进行了审阅。

本书力求保持热处理原理与工艺内容的基础性、系统性的特征，并将最新的研究成果以简单明了、适合本科生特点的方式献给读者。

由于水平有限，书中未能尽善尽美之处，恳请读者指正！

编 者

目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 热处理发展简介及研究内容	2
1.2.1 热处理的发展历史	2
1.2.2 热处理的研究对象	3
1.2.3 金属热处理方法及工艺	5
1.3 热处理典型相变举例	6
1.3.1 平衡相变	6
1.3.2 非平衡相变	7
1.4 固态相变的分类	7
1.4.1 按热力学分类	7
1.4.2 按相变方式分类	9
1.4.3 按原子迁移方式分类	9
1.5 固态相变的一般特征	10
1.5.1 固态相变的驱动力和阻力	10
1.5.2 相界面	11
1.5.3 新相的形状	12
1.5.4 新相与母相的位向关系和惯习面	13
1.5.5 固态相变的其它特点	13
1.6 固态相变的形核和长大	14
1.6.1 均匀形核	14
1.6.2 非均匀形核	15
1.6.3 晶核的长大	15
习题	17
参考文献	17
第2章 钢在高温加热时的奥氏体转变	18
2.1 奥氏体及其特点	18
2.1.1 奥氏体定义	18
2.1.2 奥氏体晶体结构	19
2.1.3 奥氏体的性能	21
2.2 钢的奥氏体等温转变	21
2.2.1 奥氏体转变热力学	21
2.2.2 奥氏体转变机制	22
2.2.3 奥氏体转变动力学	26
2.2.4 奥氏体转变的影响因素	29
2.3 钢中奥氏体的连续加热转变	31
2.3.1 连续加热转变动力学图	31
2.3.2 连续加热转变特点	31
2.4 奥氏体晶粒长大及控制	32
2.4.1 奥氏体晶粒度	32
2.4.2 奥氏体晶粒长大机理与控制方法	33
2.5 非平衡组织加热的奥氏体转变	38
2.5.1 针状奥氏体与颗粒状奥氏体	38
2.5.2 非平衡组织加热转变的影响因素	39
2.5.3 组织遗传现象及控制	41
习题	42
参考文献	43
第3章 钢的过冷奥氏体转变及热处理概述	44
3.1 过冷奥氏体的转变类型	44
3.1.1 珠光体转变	44
3.1.2 贝氏体转变	45
3.1.3 马氏体转变	45



3.2 过冷奥氏体等温转变	45	4.5.2 钢中碳化物的相间沉淀	92
3.2.1 过冷奥氏体等温转变动力 学图	45	习题	97
3.2.2 过冷奥氏体等温转变动力 学图的基本形式	47	参考文献	97
3.2.3 影响过冷奥氏体等温转变 的因素	49	第5章 马氏体与钢的淬火	99
3.3 过冷奥氏体连续冷却转变	54	5.1 马氏体的晶体学	99
3.3.1 过冷奥氏体连续冷却转变 动力学图	55	5.1.1 马氏体的晶体结构	99
3.3.2 CCT图与TTT图的比较	58	5.1.2 马氏体的取向关系和惯习面	101
3.3.3 钢的临界冷却速度	59	5.2 马氏体的类型及组织形态	102
3.3.4 过冷奥氏体转变图的应用	60	5.2.1 板条状马氏体	102
3.4 常规热处理方法	63	5.2.2 针状(透镜片状)马氏体	103
3.4.1 退火	63	5.2.3 蝶状马氏体	104
3.4.2 正火	64	5.2.4 薄板状马氏体	105
3.4.3 淬火	65	5.2.5 密排六方马氏体	105
3.4.4 回火	66	5.3 马氏体转变的主要特点	107
习题	67	5.3.1 表面浮凸与界面共格	107
参考文献	67	5.3.2 马氏体转变的无扩散性	108
第4章 珠光体与钢的退火	69	5.3.3 非恒温转变与转变的不完 全性	109
4.1 珠光体组织	69	5.3.4 马氏体转变的可逆性	110
4.1.1 珠光体的定义	69	5.4 马氏体转变机理	110
4.1.2 珠光体的组织形态	69	5.4.1 马氏体转变热力学	110
4.1.3 珠光体晶体学	71	5.4.2 马氏体转变动力学特点	115
4.2 珠光体转变过程	72	5.4.3 马氏体的形核与长大	120
4.2.1 珠光体转变热力学	72	5.5 淬火时的奥氏体稳定化	124
4.2.2 片状珠光体的形成机制	73	5.5.1 热稳定化	124
4.2.3 粒状珠光体的形成机制	75	5.5.2 力学(机械)稳定化	127
4.2.4 亚(过)共析钢珠光体转变	77	5.5.3 化学稳定化	127
4.3 珠光体转变动力学	82	5.5.4 相致稳定化	127
4.3.1 珠光体的形核率及长大速度	82	5.5.5 奥氏体稳定化的工程应用	127
4.3.2 珠光体等温转变动力学图	83	5.6 淬火马氏体的性能及其 应用	128
4.3.3 CCT图中的珠光体转变	84	5.6.1 马氏体的硬度、强度与钢的 强化	128
4.3.4 珠光体转变的影响因素	85	5.6.2 马氏体的塑性、韧性与钢的 韧化	130
4.4 珠光体的力学性能	87	5.6.3 马氏体中的显微裂纹	131
4.4.1 共析成分珠光体的力学性能	88	5.6.4 超弹性与形状记忆效应	132
4.4.2 亚(过)共析钢的珠光体转 变产物的力学性能	90	5.6.5 马氏体的物理性能与功能应用	134
4.5 珠光体的应用	91	习题	134
4.5.1 派登处理	91	参考文献	134
		第6章 贝氏体与钢的中温转变	137

6.1 贝氏体的组织结构和晶体学特征	137	8.1.1 合金时效过程的热力学	184
6.1.1 贝氏体的定义和分类	137	8.1.2 时效过程	185
6.1.2 贝氏体的显微组织特征	139	8.2 合金时效动力学及其影响因素	189
6.1.3 贝氏体铁素体的精细结构	143	8.2.1 合金时效时脱溶沉淀过程的等温动力学图	189
6.2 贝氏体的相变机制	145	8.2.2 影响合金时效动力学的因素	190
6.2.1 贝氏体相变的切变理论	145	8.3 时效后的微观组织	192
6.2.2 贝氏体相变的台阶-扩散理论	147	8.3.1 时效过程中的析出类型及其微观组织	192
6.3 贝氏体相变动力学	147	8.3.2 时效过程中微观组织的变化	194
6.3.1 贝氏体等温转变动力学	148	8.4 合金时效过程中性能的变化	195
6.3.2 贝氏体连续冷却转变动力学	150	8.4.1 时效硬化曲线及影响时效硬化的因素	195
6.4 贝氏体的力学性能与应用	151	8.4.2 时效硬化机理	198
6.4.1 贝氏体的强度和硬度	151	8.5 调幅分解	200
6.4.2 贝氏体的塑性和韧性	153	8.5.1 调幅分解的过程	200
6.4.3 贝氏体组织的应用	154	8.5.2 调幅分解的组织与性能	202
习题	155	8.6 典型合金的时效相变	203
参考文献	156	8.6.1 马氏体时效钢的时效	203
第7章 钢的回火转变	157	8.6.2 铝合金的类型及时效过程	205
7.1 淬火碳钢在回火过程中的组织变化	157	8.6.3 镁合金中的相变	207
7.1.1 马氏体中碳原子的偏聚	158	8.6.4 钛合金中的相变	209
7.1.2 马氏体的分解	158	8.6.5 铜合金中的相变	212
7.1.3 残留奥氏体转变	161	习题	214
7.1.4 碳化物类型的变化	162	参考文献	215
7.1.5 碳化物的聚集长大	166	第9章 常规热处理	216
7.1.6 基体 α 相状态的变化	167	9.1 钢的退火与正火	216
7.2 影响回火转变的因素	170	9.1.1 完全退火与不完全退火	216
7.2.1 合金元素	170	9.1.2 球化退火	218
7.2.2 回火温度与回火后的组织	173	9.1.3 均匀化退火	221
7.3 淬火钢回火时力学性能的变化	175	9.1.4 去应力退火与再结晶退火	222
7.3.1 硬度和强度的变化	175	9.1.5 正火及其应用	222
7.3.2 塑性和韧性的变化	176	9.2 钢的淬火	224
7.3.3 钢的回火脆性	176	9.2.1 淬火分类	225
7.4 非马氏体组织的回火	180	9.2.2 钢的淬透性	225
7.4.1 非马氏体组织及其回火转变	180	9.2.3 淬火介质	231
7.4.2 回火产物与奥氏体直接分解产物的性能比较	181	9.2.4 淬火工艺	234
习题	181	9.2.5 淬火缺陷与防止	238
参考文献	182	9.3 钢的回火	242
第8章 合金的脱溶沉淀与时效	183	9.3.1 低温回火与应用	242
8.1 合金的时效过程	183		



9.3.2	中温回火与应用	242	11.3.6	合金元素对渗氮层组织和性能的影响	294
9.3.3	高温回火与应用	243	11.3.7	离子渗氮	294
9.3.4	回火时间的确定	244	11.4	表面碳氮共渗	295
9.3.5	回火后的冷却	245	11.4.1	碳氮共渗介质的热分解反应及相互作用	295
9.4	有色金属的热处理	245	11.4.2	中温气体碳氮共渗	296
9.4.1	退火	246	11.4.3	氮碳共渗(软氮化)	297
9.4.2	固溶时效	246	11.5	渗硼	298
习题		247	11.5.1	渗硼层的组织	298
参考文献		247	11.5.2	渗硼层的性能	298
第10章	表面热处理及热处理新工艺	249	11.5.3	常用渗硼方法	299
10.1	表面热处理	249	11.5.4	渗硼前处理和渗硼后热处理	299
10.1.1	高频感应淬火	249	11.6	表面渗金属	300
10.1.2	激光表面处理	255	11.6.1	固体法渗金属	300
10.1.3	火焰表面处理	257	11.6.2	液体法渗金属	300
10.2	形变热处理	260	11.6.3	气体法渗金属	301
10.2.1	高温形变热处理	260	习题		302
10.2.2	低温形变热处理	263	参考文献		302
10.2.3	控轧控冷	265	第12章	常用热处理炉简介	303
10.3	其它热处理	266	12.1	热处理电阻炉	303
10.3.1	真空热处理	266	12.1.1	热处理电阻炉的基本类型	304
10.3.2	淬火-分配(Q-P)工艺	271	12.1.2	箱式电阻炉	305
10.3.3	亚共析钢的亚温淬火	272	12.1.3	井式电阻炉	306
10.3.4	超细化热处理(循环热处理)	273	12.1.4	台车式炉及罩式炉	307
习题		273	12.2	热处理浴炉	308
参考文献		274	12.2.1	热处理浴炉的特点	308
第11章	化学热处理	275	12.2.2	热处理浴炉的分类	309
11.1	化学热处理分类及基本过程	275	12.3	可控气氛热处理炉	310
11.2	表面渗碳	276	12.3.1	可控气氛热处理炉的分类	310
11.2.1	渗碳的目的、分类及应用	276	12.3.2	可控气氛热处理炉的结构特点	310
11.2.2	渗碳剂及渗碳化学反应	277	12.3.3	密封箱式炉	311
11.2.3	典型的气体渗碳方法简介	278	12.3.4	推杆式光亮淬火连续炉	312
11.2.4	渗碳工艺过程	279	12.4	真空热处理炉	313
11.2.5	渗碳后钢的组织与性能	282	12.5	表面热处理设备	316
11.2.6	渗碳缺陷及控制	285	12.5.1	感应加热设备	316
11.3	表面渗氮	287	12.5.2	离子渗氮炉	318
11.3.1	渗氮的特点	287	12.5.3	激光表面改性设备	319
11.3.2	钢的渗氮原理	287	习题		320
11.3.3	钢的气体渗氮工艺过程	288	参考文献		321
11.3.4	渗氮工艺方法	291			
11.3.5	渗氮层的组织和性能	293			

第 1 章 绪 论

1.1 引言

材料是人类赖以生存和发展的物质基础。20 世纪 70 年代，人们把信息、材料、能源作为社会文明的支柱。随着高技术的兴起，又把新材料与信息技术、生物技术并列作为新技术革命的重要标志。如今，材料已成为国民经济建设、国防建设和人民生活的重要组成部分。

在工程领域，金属材料一直是工程结构材料的主体。通常可将金属分为两大类，即黑色金属及有色金属。钢铁、铬、锰等为黑色金属，其它均为有色金属，也称为非铁金属。黑色金属是工程结构材料的主要材料，有色金属也占有越来越重要的地位，因为它不仅是制造各种优质合金钢及耐热钢所必需的合金元素，而且由于许多有色金属（如铝、镁、钛等）及其合金具有密度小，比强度高，导电性、导热性、弹性良好，以及一些特殊的物理性能，已成为现代工业，特别是国防工业中不可缺少的结构材料。

但是，随着材料科学与技术的不断发展，金属材料在工程领域的主体地位正面临着严峻的挑战。由于金属相比其它类别材料（如高分子材料、陶瓷材料）的密度较高，因此其比强度及比刚度较低（图 1-1），在一些以质量作为主要考虑因素的应用领域，例如航空及运动器材等，金属逐步被其它轻质高强材料所替代。如何致力于发展高性能金属材料，克服其不足，是金属材料未来发展的一个重要方向^[1]。

长期以来，研究者一直致力于提高金属材料的强度。通常，强化金属的途径是通过控制内部缺陷和界面来阻碍位错运动，如相变强化、固溶强化、弥散强化、细晶强化等。如何通过新的原理和技术进一步实现金属材料的强化，同时又能使其不损失或少损失塑性和韧性，是金属材料热处理原理和工艺研究的重要课题。

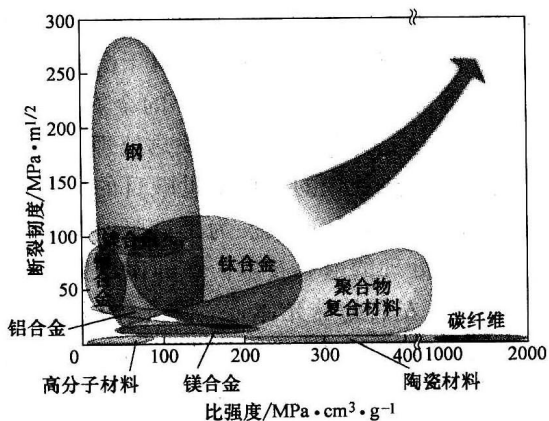


图 1-1 各类材料断裂韧度与比强度之间的关系^[2]

1.2 热处理发展简介及研究内容

1.2.1 热处理的发展历史

金属热处理是将金属工件放在一定的介质中加热到适宜的温度，并保温一定时间后，又以不同速度冷却的一种工艺。金属热处理是机械制造中的重要工艺之一，与其它加工工艺相比，热处理一般不改变工件的形状和整体的化学成分，而是通过改变工件内部的显微组织或工件表面的化学成分，赋予或改善其性能。

钢铁是机械工业中应用最广的材料，钢铁的显微组织复杂，可以通过热处理予以控制，因此，钢铁的热处理是金属热处理的主要内容。另外，铝、铜、镁、钛等及其合金也都可以通过热处理改变其力学、物理和化学性能，以获得不同的使用性能。人们从使用金属材料起，就开始采用热处理，其发展过程大致经历了三个阶段。

1. 民间技艺阶段

从石器时代发展到铜器时代和铁器时代的过程中，热处理的作用逐渐被人们所认识。中国古代的许多发明和技术在世界热处理史上处于遥遥领先的地位，对世界热处理技术的进步起到了直接的促进作用。

退火工艺的发明应该说是人类对金属进行热处理的开端。研究表明，早期的铜及其合金不经过退火是不适宜进行大形变量加工的^[3]。铜及其合金容易发生加工硬化，中间退火产生再结晶可使铜合金软化，以便进行进一步的加工，这一技术以后广泛应用于制造兵器和生活器具。国外采用锻造和退火的工艺对青铜进行加工处理很早就已经出现了^[4]。退火还在陨石加工中被应用，陨铁实际上属于高铁镍合金，居住在两河流域的人类从公元前3000多年以前就开始使用这种“天赐”的金属。为了制造刀具或小件物品，他们采用了退火或锻造工艺^[5]，这是人类最早的钢铁热处理。

我国古代热处理的一项举世瞩目的成就是发明了铸铁柔化术。大量的考古证实，我国铸铁的发明大约在春秋中期。为了克服白口铸铁的脆性，大约于公元前5世纪我国发明了适用于铸铁柔化处理的退火技术。在河南洛阳战国早期灰坑出土的铁铤，其内部组织为莱氏体，表面有1mm左右的珠光体带。珠光体层的存在，使白口铸铁具有韧性，很明显这是通过退火处理得到的组织。而欧洲同类型的可锻铸铁的出现是在1720年之后^[6]。

公元前6世纪，钢铁兵器逐渐被采用，为了提高钢的硬度，淬火工艺得到迅速发展。我国河北省易县燕下都出土的两把剑和一把戟，其显微组织中都有马氏体存在，说明是经过淬火的。随着淬火技术的发展，人们逐渐发现淬火介质对淬火质量的影响。三国蜀人蒲元曾在今陕西斜谷为诸葛亮打制了3000把刀，相传是派人到成都取水淬火的。这说明我国在古代就注意到不同水质的冷却能力了。我国出土的西汉（公元前206~公元24年）中山靖王墓中的宝剑，其心部碳的质量分数为0.15%~0.40%，而表面却达到0.60%以上，说明已应用了渗碳工艺。但当时作为个人“手艺”的秘密，不肯外传，因而发展缓慢。

2. 实验科学阶段

从1665年至1895年，热处理随着显微技术的发展，开始向实验技术发展。

1863年，英国金相学家和地质学家展示了钢铁在显微镜下的六种不同的金相组织，证

明了钢在加热和冷却时，其内部会发生组织改变，钢在高温时的相急冷时会转变为一种较硬的相。法国人奥斯蒙德确立的铁的同素异构理论，以及英国人奥斯汀最早制订的铁碳相图，为现代热处理工艺奠定了初步理论基础。

由下面这张时间表可以发现金相学对材料热处理研究的贡献：

1665年，显示了Ag-Pt组织以及钢刀片的组织；1772年，首次用显微镜检查了钢的断口；1808年，首次显示了陨铁的组织，后称为魏氏组织；1831年，应用显微镜研究了钢的组织和大马士革剑；1864年，发展了索氏体；1868年，发现了钢的临界点，建立了Fe-C相图；1871年，英国学者T. A. Blyth著《金相学用独立的科学》在伦敦出版；1895年，德国冶金学家Martens发现了马氏体。

与此同时，人们还研究了在金属热处理的加热过程中对金属的保护方法，以避免加热过程中金属的氧化和脱碳等。1850~1880年，应用各种气体（如氢气、煤气、一氧化碳等）进行保护加热获得了一系列专利。1889~1890年，英国人莱克获得了多种金属光亮热处理的专利。

3. 热处理理论科学研究阶段

1876年，美国的J. Willard Gibbs提出了相平衡的热力学理论，奠定了相变研究的理论基础。1887年，法国的Osmond利用刚问世的热电偶发现了钢在冷却过程中温度的异常变化（相变潜热释放所致），随后，Curie等人用磁性、电阻和热膨胀等测量方法，进一步研究了相变潜热现象；1889年，Arrhenius提出了热激活过程的基本公式；1896年，在相变研究的历程上发生了一件具有历史意义的重大事件，那就是Austen绘制的第一幅Fe-C相图。之后，通过对“S”曲线的研究、马氏体结构的确定及研究，以及K-S关系的发现，对马氏体的结构有了新的认识，建立了完整的热处理理论体系。

20世纪以来，金属物理的发展和其它新技术的移植应用，使金属热处理工艺得到了更大发展。一个显著的进展是1901~1925年，在工业生产中应用转筒炉进行气体渗碳；20世纪60年代，热处理技术运用了等离子场的作用，发展了离子渗氮、渗碳工艺；对激光及电子束技术的应用，又使金属获得了新的表面热处理和化学热处理方法。

金属热处理的发展历史是与热力学的发展密不可分的。热力学第一、第二、第三定律的发现，为固态相变研究提供了重要的理论基础，而现代实验技术的快速发展为热处理新工艺的发展提供了条件。

1.2.2 热处理的研究对象

材料的成分、工艺、组织结构及性能这四个基本因素是进行材料研究的基本对象和内容，因而称之为材料研究四要素。它们相互联系，相互影响，组成一个四面体，如图1-2所示。

不同化学成分的金属材料，经过各种热处理和加工工艺，获得不同的内部组织结构，可以在很大程度上改变材料的性能。即使同一成分的金属材料，如果采用不同的热处理工艺，其性能也会表现出截然不同的特征。例如，碳钢经过加热到一定温度缓慢冷却后，表现出良好的可加工变形性，而经过快速冷却工艺会表现出很高的强度和硬度。在一些情况下，基于经济性、可获得性、可靠性等方面的考虑，材料的选材范围有限。如何在材料成分基本固定的情况下有效地提高性能，是材料科学与工程研究的重要内容，其中一个重要的方法就是设

法改变材料内部的组织结构从而改变其性能。而通过对金属材料在一定的条件下进行热处理，是实现这一目的最常用和有效的手段。通过热处理，控制材料中的相变过程，从而提高材料性能，是热处理原理与工艺课程的核心内容。

对金属材料进行热处理后会使其材料的性能发生根本的变化，这个变化的实质是发生了固态相变。固态相变有三种基本变化：①化学成分的变化；②晶体结构的变化；③有序程度的变化。有些转变只包括一种基本变化，有些则同时包括两种甚至三种变化。如纯金属、固溶体或化合物发生同素异构转变时，只有晶体结构的变化；固溶体的调幅分解过程只有化学成分的变化；固溶体的有序无序转变只有有序程度的变化；而过饱和固溶体的脱溶沉淀及共析转变则既有化学成分的变化，又有晶体结构的变化。

固态相变是材料热处理的理论基础，材料的组织结构和性能在很大程度上是通过相的转变来进行调整的，能否热处理强化往往取决于是否存在固态相变。因此，金属热处理原理就是要阐明金属材料的化学成分-微观组织结构-热处理工艺-力学性能之间的相互关系。

迄今为止，对金属进行热处理从而使其发生相变，可以认为是改变金属材料性能的最重要的方法。以目前工业使用量最大的金属——钢铁材料为例，通过热处理改变其组织结构，可以使其强度提高或降低几倍。这样就可以根据需要使钢铁材料变软以便于冷热加工成形，而加工完成后再热处理使之变硬，以便于安全长期地使用。这种基于热处理的性能可变性，是钢铁材料在工业领域获得广泛应用的一个重要原因。图 1-3 反映了钢铁材料强度发展的过程。可见，通过热处理相变获得各种高强度的组织，以及通过形变提高其位错密度或者细化晶粒，是钢铁材料强度提高的主要手段。尽管目前钢铁材料的抗拉强度可以高达 4000MPa

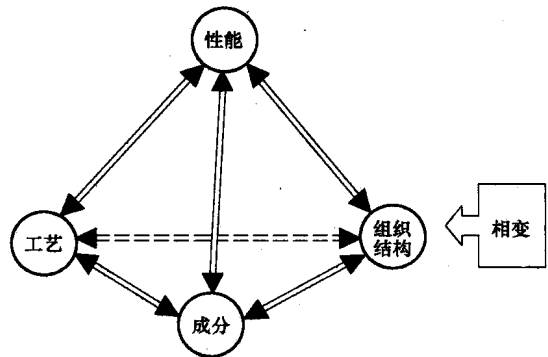


图 1-2 材料研究的四要素组成的四面体

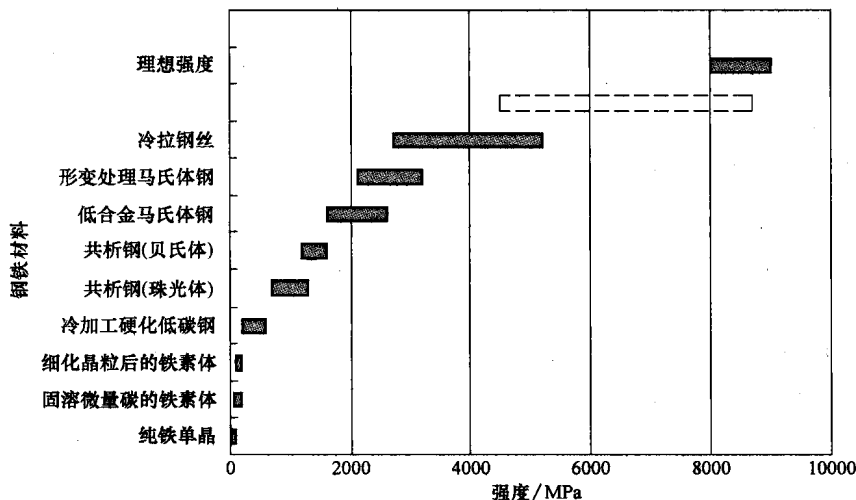


图 1-3 钢铁材料强度与种类^[7]



以上, 比普通的低碳钢强度已经提高了一个数量级, 但距离理想强度仍然有相当大的差距。进一步通过相变改变钢铁的组织结构, 从而达到理想强度, 是材料科学的一个重要和迫切的课题。

1.2.3 金属热处理方法及工艺

金属热处理工艺一般包括加热、保温、冷却三个过程。加热是热处理的重要工序之一, 而加热温度是其重要工艺参数之一, 选择和控制加热温度, 是保证热处理质量的关键。加热温度随被处理的金属材料的热处理目的不同而异, 但一般都是加热到相变温度以上, 以获得高温组织。另外, 转变需要一定的时间, 因此当金属工件表面达到要求的加热温度时, 还需在此温度保持一定时间, 使内外温度一致, 以便显微组织转变完全, 这段时间称为保温时间。采用高能密度加热和表面热处理时, 加热速度极快, 一般就没有保温时间, 而化学热处理的保温时间往往较长。冷却也是热处理工艺过程中不可缺少的步骤, 冷却方法因工艺不同而不同, 主要是控制冷却速度。

金属热处理大体可分为整体热处理、表面热处理和化学热处理三大类。根据加热介质、加热温度和冷却方法的不同, 每一大类又可分为若干小类。同一种金属采用不同的热处理工艺, 可获得不同的组织结构, 从而具有不同的性能。钢铁是工业上应用最广的金属, 而且钢铁显微组织也最为复杂, 因此钢铁的热处理工艺种类繁多。

整体热处理是对工件整体加热, 然后以适当的速度冷却, 以改变其整体力学性能的金属热处理, 大致有退火、正火、淬火和回火四种。一般退火的冷却速度最慢, 正火的冷却速度较快, 淬火的冷却速度更快。钢的退火和正火是常用的两种热处理, 主要应用于各类铸、锻、焊工件的毛坯或半成品, 以消除冶金及热加工过程中产生的缺陷, 并为以后的机械加工及热处理准备良好的组织状态, 因此, 退火和正火通常又称为预备热处理。此外, 通过正火可以细化组织, 适当提高硬度, 也可作为某些钢件的最终热处理。淬火的目的是为了提提高钢的强度、硬度、耐磨性等力学性能, 从而满足各种零件或工具的不同使用要求。但淬火处理所获得的淬火马氏体组织很硬、很脆, 并存在很大的内应力而易于突然开裂, 因此, 淬火工件必须经过回火处理后才能使用。这四种基本热处理方法随着加热温度和冷却方式的不同, 又演变出不同的热处理。为了获得一定的强度和韧性, 把淬火和高温回火结合起来的的处理, 称为调质处理; 某些合金淬火形成过饱和固溶体后, 将其置于室温或稍高的适当温度下保持较长时间, 以提高合金的硬度、强度或电性磁性等, 称为时效处理; 将压力加工形变与热处理有效而紧密地结合起来, 使工件获得很好的强度、韧性配合的方法称为形变热处理。

表面热处理是只加热工件表层, 以改变其表层力学性能的金属热处理。为了只加热工件表层而不使过多的热量传入工件内部, 使用的热源须具有高的能量密度, 即在单位面积的工件上给予较大的热能, 使工件表层或局部能短时或瞬时达到高温。表面热处理的主要方法有火焰淬火和感应淬火, 常用的热源有乙炔或氧丙烷等火焰, 以及感应电流、激光和电子束等。

化学热处理是通过改变工件表层的化学成分从而改变材料组织结构和性能的金属热处理。化学热处理与表面热处理的不同之处是前者改变了工件表层的化学成分, 它是将工件放在含碳、氮或其它合金元素的介质(气体、液体、固体)中加热, 并保温较长时间, 从而

使工件表层渗入碳、氮、硼和铬等元素。渗入元素后，有时还要进行其它热处理，如淬火及回火。化学热处理的主要方法有渗碳、渗氮、渗金属。

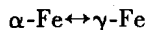
1.3 热处理典型相变举例

合金在热处理时，由于材料种类、成分和工艺条件不同，会发生各种相变。加热或冷却条件不同时，可以发生平衡相变和非平衡相变。以下列出了金属或合金的一些典型的相变。

1.3.1 平衡相变

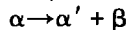
凡是在足够缓慢加热或者冷却过程中发生的相变，并符合相图中所描述的转变过程，都是平衡相变。

(1) 同素异构转变（多形性转变） 金属在温度和压力改变时，由一种晶体结构转变为另一种晶体结构的过程称为同素异构转变。例如，纯铁加热到 910°C ，由体心立方相（ α ）转变为面心立方相（ γ ），即



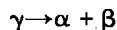
其它很多金属如钛、钴、锡等也可以发生同素异构转变。同素异构转变也称为多形性转变，不仅在纯金属中发生，在固溶体中也可以发生，是重新形核和晶核长大的过程。

(2) 平衡脱溶沉淀 在缓慢冷却的条件下，由过饱和的固溶体（ α ）析出脱溶相（ β ）的过程，称为平衡脱溶沉淀。随着新相的不断析出，母相的成分也发生变化（ α' ），但母相的晶体结构不变，表示为



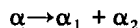
钢中二次渗碳体或者铁素体从奥氏体中的析出，还有铝合金中过饱和金属元素以化合物形式从固溶体中的析出，都属于脱溶沉淀。

(3) 共析转变 在冷却时，一个固相（ γ ）完全分解为两个更稳定相（ α 、 β ）的过程称为共析转变。共析转变的两种产物的成分与结构都与母相完全不同，表示为



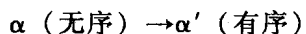
共析钢（Fe-0.77% C，质量分数）在冷却过程中由奥氏体母相同时析出铁素体和渗碳体，得到珠光体组织的过程是共析转变。

(4) 调幅分解 一个均匀的单相固溶体（ α ）分解为两种组织结构与母相相同，但成分有明显差别的两相（ α_1 、 α_2 ）的转变过程称为调幅分解，表示为



调幅分解的特点是溶质由低浓度区向高浓度区扩散的过程（称为上坡扩散），使均匀的单相固溶体变成两相不均匀的固溶体，属于非形核分解过程。

(5) 有序转变 固溶体中各组元原子从无规则排列（ α ）到有规则排列（ α' ），但组织结构不发生变化的过程，称为有序转变，表示为



Cu-Zn、Au-Cu等很多合金系中都可以发生有序转变，其转变的产物常称为有序金属间化合物。

1.3.2 非平衡相变

由于加热或者冷却的速度过快，平衡相变受到抑制，从而发生非平衡相变，得到亚稳的组织结构。在合金（钢铁为主）中常见的非平衡相变主要有以下几种：

(1) 马氏体转变 当钢中的高温奥氏体母相迅速过冷到很低的温度，原子来不及进行扩散而保留了含有过饱和碳的母相成分，晶体结构则由面心立方转变成体心正方，获得了马氏体组织，称为马氏体相变。除了钢以外，在很多合金（如 Cu-Zn、Ni-Al、Fe-Mn、Fe-Ni）以及陶瓷材料中，都能发生马氏体相变。

(2) 块状转变 在一定的冷速（小于马氏体相变需要的冷速）下，母相通过界面的短程扩散，转变为成分相同但晶体结构不同的块状新相，称为块状转变。与马氏体相不同，块状新相不是过饱和相。在低碳钢中，奥氏体（ γ ）可以通过块状转变成为 α 相；Cu-Zn、Ag-Al、Ti-Al 等合金也可以发生块状转变。

(3) 贝氏体转变 奥氏体快速冷却到低于先共析铁素体和珠光体相变温度、但高于马氏体形成温度的温区（对于中碳钢，例如 300 ~ 600℃）等温，可以得到一类特殊的组织，称为贝氏体。贝氏体由铁素体和碳化物组成，但其形态和分布与珠光体不同。

(4) 伪共析转变 接近共析成分的钢，在快速冷却到一定温度时，和共析成分的钢一样，也可以发生共析转变，同时析出铁素体和渗碳体，但其转变产物中的铁素体和渗碳体的比例随奥氏体成分而变化，故称为伪共析转变。

(5) 非平衡脱溶沉淀 由非平衡冷却得到的过饱和固溶体，在随后等温或加热时，由母相中析出成分与结构均与平衡沉淀相不同的新相的过程，称为非平衡脱溶沉淀。对于很多有色合金，非平衡脱溶是最主要的强化手段之一。

1.4 固态相变的分类

金属固态相变的种类很多，特征各异。按热力学参数在相变时变化的特点不同，可以分为一级相变和高级（二级以上）相变；按原子迁移方式的不同，可以分为扩散型相变和无扩散相变；按生长方式的不同，可以分为形核-长大型相变和连续型相变；按相变过程的控制因素不同，可以分为界面控制相变和扩散控制相变；按相变的程度和速度不同，可以分为平衡相变和非平衡相变等^[8]。

1.4.1 按热力学分类

对所有的相变，在母相向新相转变的两相平衡温度，两相的吉布斯自由能（ G ）相等，组成元素在两相中的化学位（ μ ）亦相等，即

$$G_1 = G_2$$

$$\mu_1 = \mu_2$$

其中，吉布斯自由能由系统的焓（ H ）和熵（ S ）所决定，即

$$G = H - TS \quad (1-1)$$

原子的化学位定义为在一定温度（ T ）和压强（ p ）下，每摩尔原子数量（ n_m ）变化所引起的吉布斯自由能的变化，即