

热处理操作 简明手册

RECHULI CAOZUO JIANMING SHOUCHE

王忠诚 编著



化学工业出版社

热处理操作 简明手册

RECHULI CAOZUO JIANMING SHOUCHE

王忠诚 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

发行所 电话

元 00.85 售 家

本手册简要地介绍了金属材料基本知识及热处理基本原理；重点对整体热处理、表面热处理和化学热处理等工艺过程及操作技术进行了归纳和总结，并列举了典型零件的热处理实例；针对常见的热处理质量缺陷产生的原因，提出了提高产品热处理质量的措施和方法；最后对热处理设备、检测设备等作了部分介绍。

本书注重实践操作技能，对于指导金属零件的热处理具有重要的作用，非常适合热处理行业的技术人员、管理人员和操作人员查阅参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

热处理操作简明手册/王忠诚编著. —北京: 化学工业出版社, 2008.1

ISBN 978-7-122-01818-2

I. 热… II. 王… III. 热处理-技术手册 IV. TG156-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 206199 号

责任编辑: 丁尚林 邢 浩

文字编辑: 颜克俭

责任校对: 郑 捷

装帧设计: 尹琳琳

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 刷: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市前程装订厂

850mm×1168mm 1/32 印张 13 字数 339 千字 2008 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: 28.00 元

版权所有 违者必究

前 言

我国具有悠久的历史，尤其是在淬火介质方面取得了不小的成就。随着科学技术的进步，许多工艺技术和理论研究有了新的突破，热处理的检测方法、新材料的开发、热处理新设备和新技术得到了长足的进步，真空热处理、可控气氛热处理、形变热处理以及化学热处理也得到了广泛的应用，热处理新设备的研制和制造使零件的热处理朝着无氧化脱碳、节能无污染、变形小和强韧化等技术领域发展，因此如何选用热处理设备和采用正确的金属零件的热处理工艺、获得要求的组织和性能是热处理工作者和操作者的重要职责。

本手册是基于我国热处理行业员工的技术水平和操作技能现状而编写的。内容全面，并尽量采用图表的形式对热处理工艺过程及操作技能进行归纳总结，语言精练，通俗易懂，体现了实用性、先进性和可操作性等，是从事热处理技术人员和操作者的重要参考工具书。

手册共分 10 章，简要介绍了金属材料的基础知识与钢铁材料的热处理原理，重点归纳总结了钢铁材料的热处理工艺和操作技术，钢铁材料的化学热处理工艺和操作技术，钢铁零件的表面处理、气相沉积（或涂覆处理）和操作技术，铸铁、有色金属的热处理工艺和操作技术，热处理新技术的发展和应用，热处理工艺规范的合理制定，并介绍了热处理常用设备及操作技术，零件的热处理质量控制、检测和操作技术。

作者从事金属零件的热处理工作 20 多年，先后进行过螺纹刀具、工模具、汽车零部件等常规热处理、表面处理和化学热

处理等工作，既有成功的喜悦，也有失败的教训。本书是作者辛勤耕耘和实践经验的结晶，希望能够给我国热处理同仁和操作人员提供有益的帮助。

本书可供热处理技术人员、管理人员和技术工人阅读，作为钢铁零件热处理实际生产过程的指导用书。

由于作者水平有限，书中难免存在一些不足，诚恳希望广大读者批评指正。

王忠诚

2008年1月

目 录

第 1 章 金属材料基础知识	1
1.1 合金相结构与晶体缺陷	1
1.1.1 合金相结构	1
1.1.2 合金的晶体缺陷	4
1.2 金属的扩散	5
1.2.1 金属扩散的原理	5
1.2.2 扩散的规律	6
1.2.3 影响扩散的因素	6
1.3 金属材料的性能	7
1.3.1 金属材料的物理性能	7
1.3.2 金属材料的化学性能	10
1.3.3 金属材料的力学性能	11
1.3.4 工艺性能	16
1.4 钢铁零件的分类及表示方法	17
1.4.1 钢铁的分类	18
1.4.2 钢号的表示方法及应用	20
1.4.2.1 碳素钢的表示方法和应用	20
1.4.2.2 合金钢的表示方法和应用	22
1.4.2.3 铸铁的表示方法、分类及应用	26
1.5 有色金属的分类、性能与用途	33
1.5.1 铝和铝合金	34
1.5.1.1 纯铝	34
1.5.1.2 铝合金	34
1.5.2 铜和铜合金	36
1.5.2.1 纯铜	36
1.5.2.2 铜合金	37

1.5.3 镁和镁合金	40
1.5.3.1 纯镁	40
1.5.3.2 镁合金	40
1.5.4 钛和钛合金	41
1.5.4.1 钛	41
1.5.4.2 钛合金	41
1.6 合金元素对钢的力学性能的影响	42
1.6.1 合金元素对退火（或正火）状态下钢的力学性能的影响	42
1.6.2 合金元素对钢的淬火回火状态下力学性能的影响	43
1.6.3 合金元素对钢在高温、低温时力学性能的影响	45
第2章 钢铁材料的热处理原理	46
2.1 奥氏体的形成过程和晶粒度的意义	46
2.1.1 钢在加热时的转变	46
2.1.1.1 奥氏体的形成和长大	47
2.1.1.2 奥氏体的晶粒度及其作用	49
2.1.1.3 影响奥氏体长大的因素	51
2.2 钢的过冷奥氏体的转变及其应用	52
2.2.1 过冷奥氏体的等温转变	53
2.2.2 奥氏体在连续冷却时的转变	57
2.3 淬火钢的回火转变	58
2.3.1 钢回火的目的	59
2.3.2 钢回火时的组织变化和回火的种类	59
第3章 钢铁材料的热处理工艺和操作技术	65
3.1 钢铁材料普通热处理工艺与操作	65
3.1.1 概述	65
3.1.2 钢的退火和正火	66
3.1.2.1 退火	66
3.1.2.2 正火	70
3.1.3 钢的淬火	71
3.1.3.1 淬火的目的是	72
3.1.3.2 钢的淬火温度的选择	73

3.1.3.3	钢的加热介质	73
3.1.4	钢的回火	90
3.1.5	淬火方法和冷却介质的选择	92
3.1.5.1	淬火方法	94
3.1.5.2	冷却介质	100
3.1.5.3	盐浴和碱浴、硝酸盐等冷却介质的特点及应用	104
3.2	典型零件的热处理工艺分析和操作技术	108
3.2.1	结构钢的热处理	110
3.2.1.1	渗碳钢的热处理	111
3.2.1.2	渗碳钢的热处理工艺规范	113
3.2.1.3	典型渗碳零件的热处理	114
3.2.2	调质钢的热处理	120
3.2.2.1	调质钢的特点和种类	120
3.2.2.2	调质钢的热处理	122
3.2.2.3	典型调质零件的热处理	122
3.2.3	弹簧钢的热处理	125
3.2.3.1	弹簧钢的一般特点	125
3.2.3.2	常见弹簧钢的种类、钢种和热处理工艺规范	126
3.2.3.3	弹簧的热处理	126
3.2.4	轴承钢的热处理	130
3.2.4.1	轴承用钢的类型和特点	131
3.2.4.2	轴承钢的热处理	132
3.2.5	工具钢的热处理技术	135
3.2.5.1	刃具钢	135
3.2.5.2	模具钢的热处理	145
3.2.5.3	量具钢的热处理	150
3.3	常见零件热处理缺陷分析及对策	153
3.3.1	钢的退火和正火缺陷与对策	154
3.3.2	钢的淬火和回火缺陷	155
3.4	钢的表面淬火与操作	158
3.4.1	概述	158
3.4.2	钢的感应加热表面淬火	159

3.4.2.1	感应表面加热的基本原理	159
3.4.2.2	常见感应加热设备的类型和特点	160
3.4.2.3	感应表面加热的特点和处理的材料	161
3.4.2.4	高频感应加热淬火工艺参数的选择和要求	162
3.4.3	火焰加热表面淬火	167
3.4.3.1	火焰加热淬火的特点	168
3.4.3.2	火焰淬火方法	168
3.4.3.3	影响火焰淬火表面质量的因素	170
3.4.4	电解液加热表面淬火	170
3.4.5	电接触加热表面淬火	172
3.5	典型零件的表面热处理工艺分析和操作技术	173
3.5.1	齿轮的表面淬火	173
3.5.1.1	齿轮的工作特点和技术要求	173
3.5.1.2	齿轮的表面淬火	174
3.5.2	机床导轨的表面淬火	176
3.5.2.1	机床导轨的工作条件和要求	176
3.5.2.2	机床的表面淬火方法	176
3.5.3	轴类零件的表面淬火	179
3.5.3.1	机床主轴的表面淬火	179
3.5.3.2	汽车半轴的热处理	181
3.6	常见表面淬火缺陷分析和对策	186
3.6.1	感应加热表面淬火的常见质量缺陷及返工措施	186
3.6.2	火焰淬火的常见质量缺陷	188
第4章	钢铁材料的化学热处理工艺和操作技术	190
4.1	概述	190
4.2	钢的渗碳和渗氮	191
4.2.1	钢的渗碳	191
4.2.1.1	钢的渗碳种类和工艺	192
4.2.1.2	渗碳钢的热处理工艺规范	196
4.2.2	钢的渗氮(简称硬氮化)	198
4.2.2.1	渗氮用钢	200
4.2.2.2	渗氮工艺	200

4.3	钢的氮碳共渗和碳氮共渗	205
4.3.1	钢的氮碳共渗(软氮化)	205
4.3.1.1	气体软氮化	206
4.3.1.2	液体氮碳共渗	207
4.3.1.3	固体氮碳共渗工艺	209
4.3.2	钢的碳氮共渗	210
4.3.2.1	钢的碳氮共渗材料	211
4.3.2.2	气体碳氮共渗	211
4.4	钢的渗铬和渗硼	213
4.4.1	钢的渗铬	213
4.4.2	钢的渗硼	217
4.5	典型零件的化学热处理工艺分析和操作技术	220
4.5.1	齿轮的化学热处理	220
4.5.1.1	齿轮的渗碳和碳氮共渗	221
4.5.1.2	齿轮的渗氮、低温氮碳共渗	226
4.5.2	丝杠和轴类的渗氮或渗碳	229
4.5.2.1	镗杆和磨床主轴的渗氮	229
4.5.2.2	20CrMnTi 钢汽车半轴的渗碳	230
4.5.2.3	15CrMn 丝杠的渗碳	232
4.5.3	模具的渗氮和氮碳共渗	233
4.5.3.1	3Cr2W8V 钢压铸模的渗氮工艺	233
4.5.3.2	3Cr2W8V 钢气门锻模的氮碳共渗工艺	234
4.5.4	凸轮轴、曲轴、气门的氮碳共渗	236
4.5.4.1	合金铸铁 SH760 凸轮轴的氮碳共渗	236
4.5.4.2	曲轴的氮碳共渗	238
4.5.4.3	气门的氮碳共渗	241
4.6	化学热处理常见缺陷分析和对策	245
4.6.1	渗碳缺陷分析与对策	245
4.6.2	渗氮缺陷分析与对策	249
4.6.3	氮碳共渗的缺陷分析与对策	253
4.6.4	碳氮共渗缺陷分析与对策	256

第5章	钢铁零件的表面处理、涂敷处理和操作技术	259
-----	---------------------------	-----

5.1	概述	259
5.2	表面处理工艺的应用	259
5.2.1	发黑(发蓝)	259
5.2.2	磷化	265
5.2.3	蒸汽处理	270
5.3	气相沉积(或碳化钛等涂覆工艺)	273
5.3.1	化学气相沉积(CVD)工艺	274
5.3.2	物理气相沉积(PVD)工艺	275
5.3.3	等离子化学气相沉积(PECVD)	276
5.4	部分典型零件的表面处理、涂覆处理操作技术	277
5.4.1	丝锥、圆板牙、钻头 and 高速钢刀具的发黑处理	277
5.4.2	挺杆的磷化处理	279
第6章	铸铁、有色金属的热处理工艺和操作技术	283
6.1	概述	283
6.2	铸铁的热处理	284
6.2.1	灰口铸铁的热处理	285
6.2.2	可锻铸铁的热处理	289
6.2.3	球墨铸铁的热处理	291
6.3	有色金属的热处理	297
6.3.1	铜和铜合金的热处理	297
6.3.1.1	黄铜的热处理	297
6.3.1.2	青铜的热处理	299
6.3.2	铝和铝合金的热处理	301
6.3.2.1	不能强化的铝合金的热处理	301
6.3.2.2	可强化铝合金的热处理	302
6.3.2.3	铸造铝合金的热处理	304
6.4	典型零件的热处理工艺分析和操作技术	305
6.4.1	C620-3 型车床铸铁导轨的热处理	306
6.4.2	有色金属零件的热处理	307
6.4.2.1	拖拉机用发动机中铸造铝合金活塞的热处理	307
6.4.2.2	铝青铜轴套的热处理	308
第7章	热处理新技术的发展和应	310

7.1	概述	310
7.2	真空热处理	311
7.3	形变热处理	315
7.4	激光热处理	318
7.5	离子渗碳和渗氮	321
7.6	电子束表面热处理	322
第8章	热处理工艺规范的合理制定	324
8.1	概述	324
8.2	工艺制定的原则和依据	325
8.2.1	热处理工艺标准制订的依据和思路	325
8.2.2	工艺守则或操作指导书编制的原则和依据	326
8.2.3	工艺规程(含流程)编制的原则和依据	326
8.2.4	热处理工艺的编制和修改	328
8.2.5	热处理技术文件	331
8.3	材料与热处理工艺的关系	331
8.3.1	零件材料的选择原则	331
8.3.2	零件的机械加工与热处理的相互关系	333
8.4	影响热处理工艺制定的因素	334
8.4.1	加热介质和加热设备对工艺制定的影响	334
8.4.2	装炉量、摆放或吊挂方式等对工艺制定的影响	335
8.4.3	材质、形状和截面尺寸对制定工艺的影响	335
8.4.4	零件的失效方式对于热处理工艺制定的影响	336
8.4.5	冷却介质的选择对热处理工艺制定的影响	337
第9章	热处理常用设备及操作技术	338
9.1	概述	338
9.2	耐火材料、保温材料及其特性	339
9.2.1	耐火材料和特性	339
9.2.2	保温材料和特性	340
9.3	热处理加热设备和测温仪表	341
9.3.1	加热设备的类别、型号和应用	342
9.3.1.1	设备的分类	342

9.3.1.2 加热设备的型号和应用	343
9.3.2 温度测量仪表	365
9.4 辅助设备	369
9.4.1 冷却设备	369
9.4.2 清洗设备	373
9.4.3 表面清理设备	374
9.4.4 校直(或校正)设备	376
9.4.5 起重设备	377
第10章 零件的热处理质量控制、检测和操作技术	379
10.1 概述	379
10.1.1 分析热处理产品质量的思路	379
10.1.2 热处理产品质量的控制手段和方法	380
10.2 热处理加热过程和加热介质	381
10.3 钢在加热过程中的氧化脱碳及其控制方法	384
10.3.1 氧化的原理	384
10.3.2 脱碳的原理	385
10.3.3 防止或减少氧化脱碳的控制方法	387
10.4 热处理质量缺陷	388
10.4.1 热处理变形和开裂	388
10.4.1.1 热处理变形	388
10.4.1.2 热处理裂纹	390
10.4.2 工件组织和力学性能不合格	392
10.5 检测设备和仪器	396
10.5.1 无损探伤检测设备	396
10.5.2 硬度检测设备	397
10.5.3 抗拉强度的检测	398
10.5.4 其他检测设备	399
参考文献	400

第1章 金属材料基础知识

1.1 合金相结构与晶体缺陷

1.1.1 合金相结构

(1) 合金的概念

纯金属尽管有较高的导电、导热性能等，但其强度和硬度一般都比较低，因此无法满足制作各种机械零件、刀具等技术要求，故在使用范围上受到了很大的限制，工业上大量使用的为合金。

① 合金 两种或两种以上的金属元素或金属元素与非金属元素熔合而成具有金属特性的物质。如普通黄铜是由铜和锌组成的合金，碳钢是碳和铁组成的合金等。

② 组元 组成合金的最基本的、独立的物质称为组元，一般而言组元就是组成合金的元素。组成黄铜的组元为铜和锌，稳定的化合物也可作为组元（如铁碳合金中的 Fe_3C ）。合金可以采用其组元的个数命名，例如二元合金、三元合金等。

③ 相 合金中成分、结构和性能都相同的部分称为相，相与相之间存在明显的界面，固态物质称为固相，液态物质称为液相。固态下的物质可以是单相的，也可以是多相组成的。

(2) 合金的结构

合金中各组元的原子在空间中是按一定的规则排列的，但合金的晶体结构比纯金属复杂，一般根据合金中组元之间的相互作用，合金的相结构分为固溶体、金属化合物和机械混合物三类。

① 固溶体 是合金中一组元溶解其他组元，或者组元之间相互溶解而形成的一种均匀相，合金中与固溶体晶格相同的组元为溶

剂，在合金中含量较多；另一组元为溶质，含量较少。根据溶质原子在溶剂晶格中所处的位置不同，固溶体分为间隙固溶体和置换固溶体两类。

a. 间隙固溶体 是指溶质原子分布于溶剂晶格间隙之中形成的固溶体，如图 1-1 中 (a)，只有溶质原子尺寸很小时，才能形成

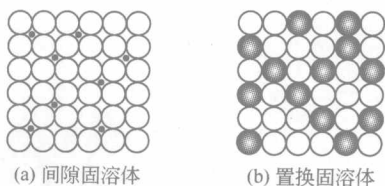


图 1-1 固溶体的结构示意图

○ 溶剂原子；● 溶质原子

间隙固溶体，通常组成间隙固溶体的溶质原子都是直径很小的非金属元素，加上溶剂晶格中的间隙是有限度的，故其只能为有限固溶体。

b. 置换固溶体 是溶质原子置换了溶剂晶格中某些结点位置上的溶剂原子而形成的固溶体，如图 1-1 中 (b)。一般而言，根据溶质原子和溶剂原子半径两者之间的差别不同，将在周期表中位置相近、原子半径差别较小、晶格类型相同的溶质和溶剂原子，可以以任意比例相互溶解的固溶体称为无限固溶体；反之则溶质在溶剂中的溶解度是有限度的，称为有限固溶体。

② 金属化合物 合金组元之间发生相互作用而形成一种具有金属特性的物质称为金属化合物，其组成可由化学式表示。金属化合物的晶格类型和性能完全不同于任一组元，合金中含有金属化合物后则强度、硬度和耐磨性有所提高，而韧性和塑性有所降低，为许多重要合金的组成相。金属化合物可以由金属与金属组成，也可以由金属和非金属组成，它们具有一定的金属性质。

③ 机械混合物 两种或两种以上的不同晶体结构的相（纯金属、固溶体或金属化合物）按一定的质量百分数组成的物质称为机械混合物，混合物中各组成部分仍保持自己原来的晶格，混合物的性能则取决于各组成相的形态、性能、分布形态、数量和大小等。

工业上大多数合金属于机械混合物，例如钢、生铁、青铜、轴承合金等，它们组成的合金比单一的固溶体具有更高的强度和硬度

等，因此得到了十分广泛的推广和应用。

这里需要说明的是相和组织是不同的两个概念，组织既可以是单相的，也可由几个相组合而成的集合体。在上述三种组织中，固溶体和金属化合物都是单相的，而机械混合物则为相的集合体。

(3) 铁碳合金的基本组织

钢与铸铁是在机械制造中应用最为广泛的金属材料，尽管钢铁的种类多、成分各不相同，但其共同点是以铁和碳两种元素为主而组成的铁碳合金。 $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$ 相图是表示在极其缓慢加热（或冷却）情况下，不同成分的铁碳合金在不同温度下具有的状态或组织的图形，在铁碳合金中，碳可以溶解在铁中形成固溶体，也可与铁组成化合物，而化合物与固溶体还可结合成机械混合物等，铁碳合金中出现以下几种基本组织。

① 铁素体 F 是碳溶解于 $\alpha\text{-Fe}$ 晶格间隙中形成的间隙固溶体，为体心立方晶格，含碳量愈低则铁素体的数量越多，碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的溶解度室温时为 0.005%，在 727℃ 达到最大值为 0.0218%。该组织的特点是强度、硬度低，而塑性和韧性高。

② 奥氏体 A 是碳溶于 $\gamma\text{-Fe}$ 的间隙式固溶体，为面心立方晶格，能溶解较多的碳，随着温度的提高，碳在 $\gamma\text{-Fe}$ 中的溶解度增加，在 727℃ 时为 0.77%，在 1148℃ 时达到最大值 2.11%。该组织的塑性很好，强度和硬度明显高于铁素体。

③ 渗碳体 Fe_3C 是铁和碳形成的化合物，其含碳量为 6.67%，晶体的结构复杂、硬度高、脆性大，熔点约为 1227℃。通常而言，铁碳合金中，渗碳体硬而脆，因此合金成分中对渗碳体的数量有一定要求，来满足一般零件和刀具的需要。

④ 珠光体 P 是铁素体和渗碳体组成的混合物，其平均的含碳量为 0.77%，性能介于铁素体和渗碳体之间。根据铁素体和渗碳体的分布规律，珠光体分为片状珠光体和球状珠光体（或粒状珠光体），两者之间的性能有较大的差异，通常球状珠光体具有切削加工性好、热处理变形与开裂的倾向小等特点，因此工具钢要求淬

火前的原始组织为球状珠光体组织。

⑤ 莱氏体 L_d 是奥氏体和渗碳体组成的机械混合物（共析体），为共晶转变产物，其含碳量为 4.3%，是以渗碳体为基体，特点是硬而脆，不能进行压力加工。

1.1.2 合金的晶体缺陷

在实际金属晶体中，原子的排列基本上是呈规则排列的，但由于种种原因，在晶体的局部区域原子的排列并不规则，称为晶体缺陷。合金的晶体缺陷根据其几何形态一般分为三种，即点缺陷、线缺陷和面缺陷，其对合金的力学性能有一定的影响。

(1) 点缺陷

点缺陷是指长、宽、高尺寸都很小的一种缺陷，包括空位、间隙原子和异类原子等。晶体中的空位和间隙原子处于不断的运动和变化过程中，这是金属中原子进行扩散的主要方式。点缺陷产生以后的晶体发生晶格的畸变，内能增加，从而造成金属的硬度和强度增大，电阻率增高。

(2) 线缺陷

线缺陷是指在一个方向上尺寸很大，而在另外两个方向上尺寸很小的线状缺陷，该类缺陷主要是各种位错，位错的基本类型为刃型位错和螺型位错。晶体中的位错密度发生变化以及位错在晶体内的

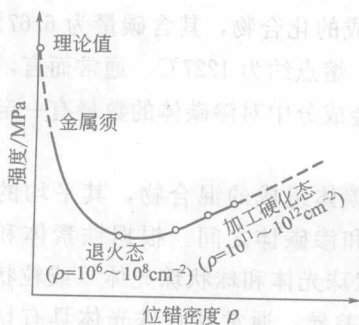


图 1-2 金属的强度与位错密度的关系

的运动，将对金属的性能、塑性变形以及组织转变等均有重要的影响，文献 [1~3] 介绍：金属的强度与位错密度的关系有一定的规律性，具体如图 1-2。从图中可以看出金属处于退火状态时的强度是最低的，随着位错密度密度的提高，强度逐渐增大，加工硬化状态的