

热处理手册

工艺基础

中国机械工程学会热处理学会 编



第4版
修订本



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本手册是一部热处理专业的综合工具书，是第4版的修订本，共4卷。本卷是第1卷，共11章，内容包括基础资料、金属热处理的加热、金属热处理的冷却、钢铁件的整体热处理、表面加热热处理、化学热处理、形变热处理、非铁金属的热处理、铁基粉末冶金件及硬质合金的热处理、功能合金的热处理、其他热处理技术。本手册由中国机械工程学会热处理学会组织编写，具有一定的权威性；内容系统全面，具有科学性、实用性、可靠性和先进性。

本手册可供热处理工程技术人员、质量检验和生产管理人员使用，也可供科研人员、设计人员、相关专业的在校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

热处理手册. 第1卷, 工艺基础/中国机械工程学会热处理学会编.
—4版(修订本). —北京: 机械工业出版社, 2013.7
ISBN 978-7-111-42741-4

I. ①热… II. ①中… III. ①热处理—手册②热处理—工艺—手册
IV. ①TG15-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 117381 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: 陈保华 责任编辑: 陈保华 版式设计: 霍永明
责任校对: 丁丽丽 封面设计: 姚毅 责任印制: 李洋
三河市宏达印刷有限公司印刷
2013 年 10 月第 4 版第 1 次印刷
184mm × 260mm · 48.75 印张 · 2 插页 · 1680 千字
0001—3000 册
标准书号: ISBN 978-7-111-42741-4
定价: 136.00 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

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

中国机械工程学会热处理学会
《热处理手册》第4版编委会 名单

主任委员 潘健生

副主任委员 周敬恩 王广生 徐跃明

委 员 方其先 石康才 吕反修 安运铮 许并社

宋余九 张冠军 李儒冠 陈乃录 武兵书

侯增寿 戚正风 黄国靖 董企铭 廖 波

蔡 珣 潘 邻

顾 问 雷廷权 樊东黎 孙大涌 崔 崑

《热处理手册》总主编 周敬恩

副 总 主 编 王广生 徐跃明

本 卷 主 编 徐跃明 黄国靖

修订本出版说明

《热处理手册》自1984年出版以来，历经4次修订再版，凝聚了几代热处理人的集体智慧和科技成果。她承载着传承、指导和培育一代代中国热处理界科技工作者的使命和责任，并成为热处理行业的权威出版物和重要参考书。

《热处理手册》第4版于2008年1月出版，至今已有5年多了，这期间出现了一些新材料、新技术、新设备、新标准，广大读者也陆续提出了一些宝贵意见，给予了热情的鼓励和帮助，例如王金忠先生对四卷手册进行了全面审读，提出了许多有价值的修改意见。因此，为了保持《热处理手册》的先进性和权威性，满足读者的需求，中国机械工程学会热处理学会、机械工业出版社商定出版《热处理手册》第4版修订本，以便及时反映热处理技术新成果，并更正手册中的不当之处。鉴于总体上热处理技术没有大的变化，本次修订基本保持了第4版的章节结构。在广大读者所提宝贵意见的基础上，中国机械工程学会热处理学会组织各章作者对手册内容，包括文字、技术、数据、符号、单位、图、表等进行了全面审读修订。在修订过程中，全面贯彻了现行的最新技术标准，将手册中相应的名词术语、引用内容、图表和数据按新标准进行了改写；对陈旧、淘汰的技术内容进行了删改，增补了相关热处理新技术内容。

最后，向对手册修订提出宝贵意见的广大读者表示衷心的感谢！

第4版前言

按照中国机械工程学会热处理学会第二届三次理事扩大会议关于《热处理手册》将逐版修订下去的决议,为了适应热处理、材料和机械制造等行业发展的需要,应机械工业出版社的要求,热处理学会决定对2001年出版的《热处理手册》第3版进行修订。本次修订的原则是:去掉陈旧和过时的内容,补充新的科研成果、实践经验和先进成熟的生产技术等相关内容,保持其实用性、可靠性、科学性和先进性,使《热处理手册》这一大型工具书能对热处理行业的技术进步持续发挥推动作用。

根据近年来热处理技术进展和《热处理手册》第3版的使用情况,第4版仍保持第3版的体例。主要读者对象为热处理工程技术人员,也可供热处理质量检验和生产管理人员、科研人员、设计人员、相关专业的在校师生参考。《热处理手册》第4版仍为四卷,即第1卷工艺基础,第2卷典型零件热处理,第3卷热处理设备和工辅材料,第4卷热处理质量控制和检验。

《热处理手册》第4版与第3版相比,主要作了以下变动:

第1卷增加和修订了第1章中的热处理标准题录,由第3版的71个标准增加到了94个,并对热处理工艺术语等按新标准进行了修订。第2章增加了“金属和合金相变过程的元素扩散”;在“加热介质和加热计算”一节中,增加了“金属与介质的作用”与“钢铁材料在加热过程中的氧化、脱碳行为”;充实了加热节能措施的内容。第6章增加了近年来生产中得到广泛应用的“QPQ处理”一节;补充了“真空渗锌”的内容;“离子化学热处理”一节增加了“离子渗氮材料的选择及预处理”、“离子渗氮层的组织”、“离子渗氮层的性能”等内容;对“气相沉积技术”的内容进行了调整和补充,反映了该技术的快速发展;在“离子注入技术”中,增加了“非金属离子注入”、“金属离子注入”和“几种特殊的离子注入方法”。第8章增加了“高温合金的热处理”和“贵金属及其合金的热处理”两节,使其内容更加完整。第10章增加了“电性合金及其热处理”一节,对各种功能合金的概念和性能作了一定的补充。增加了“第11章其他热处理技术”,包括“磁场热处理”、“强烈淬火”和“微弧氧化”三节。这些热处理技术虽然早已有之,但从20世纪90年代以来,在国内外,特别在一些工业发达国家得到了快速发展,并受到日益广泛的重视,从这个意义上也可称为热处理新技术。

第2卷修订时增加了典型零件热处理新技术、新材料和新工艺。第3章增加了“齿轮的材料热处理质量控制与疲劳强度”一节。第5章增加了55CrMnA、60CrMnA、60CrMnMoA钢等新钢种的热处理。第6章全部采用最新标准,增加了不少新钢种的热处理。第8章增加了“如何得到高速钢工具的最佳使用寿命”一节。第11章补充了“涨断连杆生产新工艺”。第12章增加了数控机床零件热处理的内容。第13章重写了“凿岩用钎头”一节,增加了很多新钢种及其热处理工艺。第14章增加了“预防热处理缺陷的措施”一节。第16章增加了“天然气压缩机活塞杆的热处理”一节。第17章补充了柱塞泵热处理新工艺(真空热处理、稳定化热处理等)。第19章补充了飞机起落架新材料16Co14Ni10Cr2Mo热处理工艺、涡轮叶片定向合金和单晶合金热处理工艺。

第3卷的修订注意反映热处理设备相关领域的技术进展情况,增加了近几年开发的新技术和新设备方面的内容,增加了热处理节能、环保和安全方面的技术要求。各章增加的内容有:第5章增加了“活性屏离子渗氮炉”。第9章增加了“淬火冷却过程的控制装置”和“淬火槽

冷却能力的测定”。第10章增加了“溶剂型真空清洗机”。第11章增加了“热处理过程真空控制”与“冷却过程控制”。第12章增加了“淬火冷却介质的选择”与“淬火冷却介质使用常见问题及原因”。

第4卷中对各章节内容进行了调整和充实，部分章节进行了重新编写。第1章充实了“计算机在质量管理中的应用”一节。第3章改写并充实了“光谱分析”与“微区化学成分分析”两节的内容。第7章重新编写了“内部缺陷检测”与“表层缺陷检测”，更深入地介绍了常用无损检测方法的原理与技术。第10章充实了金属材料全面腐蚀的内容，增加了液态金属腐蚀。第11章调整了部分内容结构，增加了相关的实用数据。

近年来，我国的国家标准和行业标准更新速度加快。2001年至今，与热处理技术相关的相当数量的标准被修订，并颁布了一些新标准，本版手册内容基本上按新标准进行了更新。对于个别标准，如GB/T 228—2002《金属材料 室温拉伸试验方法》^①，新旧标准指标、名称和符号差异较大，又考虑到手册中引用的资料、数据形成的历史跨度长，目前在手册中贯彻新标准，似乎尚不成熟。为了方便读者，我们采用了过渡方法，参照GB/T 228—2002《金属材料 室温拉伸试验方法》^②，在第4卷附录部分列出了拉伸性能指标名称和符号的对照表，供读者查阅参考。

本次参与修订工作的人员众多，从编写、审定到出版的时间较紧，手册不足之处在所难免，恳请读者指正。

中国机械工程学会热处理学会
《热处理手册》第4版编委会

① GB/T 228—2002《金属材料 室温拉伸试验方法》已被GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》替代，本次修订采用了最新标准。

目 录

修订本出版说明

第 4 版前言

第 1 章 基础资料 1

1.1 金属热处理工艺分类及代号 1

1.1.1 基础分类 1

1.1.2 附加分类 1

1.1.3 常用热处理工艺及代号 1

1.2 合金相图 3

1.2.1 铁碳系合金相图 3

1.2.2 其他铁基合金相图 8

1.2.3 铝基、铜基及钛基合金相图 11

1.3 现行热处理标准题录 14

参考文献 17

第 2 章 金属热处理的加热 18

2.1 金属和合金相变过程中的元素扩散 18

2.1.1 扩散的一般规律 18

2.1.2 碳在钢中的扩散 18

2.2 钢的加热转变 19

2.2.1 珠光体—奥氏体转变 19

2.2.2 铁素体—珠光体向奥氏体的等温转变 20

2.2.3 连续加热时的奥氏体形成过程 22

2.2.4 钢加热时的奥氏体晶粒长大 24

2.2.5 过热和过烧 25

2.2.6 钢的晶粒度对性能的影响 26

2.2.7 奥氏体晶粒度的显示和测定 26

2.3 加热介质和金属与介质的作用 28

2.3.1 加热介质分类 28

2.3.2 金属在各种介质中加热时的行为 29

2.4 加热计算公式及常用图表 39

2.4.1 影响加热速度的因素 39

2.4.2 钢件加热时间的经验算法 40

2.4.3 从节能角度考虑的加热时间算法 41

2.5 加热节能措施 44

2.5.1 加热设备的节能 44

2.5.2 加热工艺措施节能 46

2.5.3 合理的生产管理 49

2.6 可控气氛 49

2.6.1 分类及用途 49

2.6.2 制备方法 57

2.6.3 炉气控制原理 76

2.6.4 炉气检测方法 80

2.7 加热熔盐和流态床 84

2.7.1 加热熔盐的成分及用途 84

2.7.2 盐浴的脱氧及脱氧剂 89

2.7.3 长效盐 92

2.7.4 流态床加热的特点 93

2.8 真空中的加热 95

2.8.1 金属在真空中加热时的行为 95

2.8.2 金属在真空中的加热速度 96

参考文献 97

第 3 章 金属热处理的冷却 98

3.1 钢的过冷奥氏体转变 98

3.1.1 过冷奥氏体的高温分解 98

3.1.2 马氏体转变与马氏体 100

3.1.3 贝氏体转变与贝氏体 105

3.1.4 过冷奥氏体等温分解转变动力学 108

3.2 钢件热处理的冷却过程 112

3.2.1 热处理的各种冷却方式 112

3.2.2 钢冷却时的内应力 113

3.2.3 淬火裂纹 115

3.2.4 淬火畸变 117

3.3 淬火冷却介质 119

3.3.1 淬火冷却介质应具备的特性及其分类 119

3.3.2 淬火冷却介质冷却特性的评价方法 120

3.3.3 常用淬火冷却介质及冷却方式 127

3.4 淬火冷却过程的计算机模拟 139

3.4.1 导热计算 139

3.4.2 相变量的计算 139

3.4.3 应力场分析 141

3.4.4 复杂淬火操作的模拟以及非线性处理 141

3.4.5 借助于计算机模拟进行热处理虚拟生产 141

参考文献 142

第 4 章 钢铁件的整体热处理 143

4.1 钢的热处理 143

4.1.1 钢的退火与正火 143

4.1.2 钢的淬火 149

4.1.3 钢的回火 166

4.1.4 钢的感应穿透加热调质	173	6.2.3 其他碳氮共渗方法	304
4.2 铸铁的热处理	175	6.2.4 碳氮共渗用钢及共渗后的 热处理	305
4.2.1 铸铁的分类和应用	175	6.2.5 碳氮共渗层的组织和性能	308
4.2.2 铸铁热处理基础	179	6.2.6 碳氮共渗工件质量检查与常见 缺陷及防止措施	309
4.2.3 白口铸铁的热处理	186	6.3 渗氮及以氮为主的共渗	310
4.2.4 灰铸铁的热处理	188	6.3.1 渗氮	310
4.2.5 球墨铸铁的热处理	195	6.3.2 氮碳共渗	326
4.2.6 可锻铸铁的热处理	208	6.3.3 氧氮共渗	331
参考文献	213	6.3.4 硫氮共渗	331
第5章 表面加热热处理	214	6.3.5 硫氮碳共渗	333
5.1 感应加热热处理	214	6.4 渗金属及碳氮之外的非金属	334
5.1.1 感应加热原理	214	6.4.1 渗硼	334
5.1.2 钢件感应加热时的相变特点	217	6.4.2 渗铝	337
5.1.3 感应器	221	6.4.3 渗锌	340
5.1.4 感应淬火工艺	235	6.4.4 渗铬	342
5.1.5 超高频脉冲和大功率脉冲感应 淬火	249	6.4.5 熔盐碳化物覆层工艺	345
5.1.6 感应淬火件的回火	251	6.4.6 渗硫	347
5.1.7 感应淬火常见的质量问题及 返修	251	6.4.7 渗硅、钛、铌、钒、锰	347
5.2 火焰淬火	252	6.4.8 多元共渗与复合渗	347
5.2.1 火焰加热方法	252	6.5 离子化学热处理	352
5.2.2 火焰喷嘴和燃料气	253	6.5.1 离子化学热处理基础	352
5.2.3 火焰淬火工艺规范	257	6.5.2 离子渗氮	355
5.3 激光、电子束热处理	260	6.5.3 离子氮碳共渗	364
5.3.1 激光热处理的特点	260	6.5.4 离子渗碳及碳氮共渗	366
5.3.2 电子束热处理的特点	262	6.5.5 离子渗硫及含硫介质的多元 共渗	368
5.3.3 表面相变硬化	262	6.5.6 离子渗硼	371
5.3.4 表面熔化快速凝固硬化	271	6.5.7 离子渗金属	372
5.3.5 表面合金化和熔覆	274	6.6 气相沉积与离子注入技术	373
5.3.6 激光热处理设备	276	6.6.1 气相沉积技术	373
5.4 其他表面热处理方式	278	6.6.2 离子注入技术	388
5.4.1 接触电阻加热表面淬火	278	参考文献	395
5.4.2 电解液加热表面淬火	279	第7章 形变热处理	396
5.4.3 浴炉加热表面淬火	279	7.1 概述	396
参考文献	280	7.2 低温形变热处理	398
第6章 化学热处理	281	7.2.1 低温形变热处理工艺	398
6.1 钢的渗碳	282	7.2.2 钢低温形变热处理的组织变化	401
6.1.1 渗碳原理	282	7.2.3 钢低温形变热处理后的力学 性能	403
6.1.2 渗碳方法	284	7.2.4 其他低温形变热处理	409
6.1.3 渗碳用钢及渗碳后的热处理	296	7.3 高温形变热处理	415
6.1.4 渗碳层的组织和性能	298	7.3.1 高温形变热处理工艺	415
6.1.5 渗碳件质量检查、常见缺陷及 防止措施	300	7.3.2 钢高温形变淬火的组织变化	418
6.2 钢的碳氮共渗	301	7.3.3 钢高温形变热处理后的力学 性能	420
6.2.1 概述	301		
6.2.2 气体碳氮共渗	302		

7.3.4 钢的锻热淬火	426	8.5.1 高温合金的分类和牌号表示法	515
7.3.5 控制轧制	429	8.5.2 高温合金中的合金化元素及其作用	516
7.3.6 非调质钢	431	8.5.3 高温合金强化机制简介	516
7.4 表面形变热处理	431	8.5.4 高温合金的热处理	517
7.4.1 表面高温形变淬火	431	8.6 贵金属及其合金的热处理	526
7.4.2 预冷形变表面形变热处理	433	8.6.1 贵金属及其合金的应用范围	526
7.4.3 表面形变时效	434	8.6.2 贵金属基合金的热处理	538
7.5 形变化学热处理	434	参考文献	546
7.5.1 形变对扩散过程的影响	434	第9章 铁基粉末冶金件及硬质合金的热处理	547
7.5.2 钢件化学热处理后的冷形变	435	9.1 概论	547
7.5.3 钢件化学热处理后的表面高温形变淬火	436	9.1.1 粉末冶金的应用范围	547
7.5.4 钢件晶粒多边形化处理后的化学热处理	436	9.1.2 粉末冶金方法	547
参考文献	437	9.1.3 粉末冶金材料的分类	547
第8章 非铁金属的热处理	438	9.2 铁基粉末冶金件及其热处理	552
8.1 铜及铜合金的热处理	438	9.2.1 铁基粉末冶金材料的分类	553
8.1.1 铜及铜合金的性能及用途	438	9.2.2 铁基粉末冶金材料的标记方法	553
8.1.2 铜及铜合金的热处理概述	448	9.2.3 铁基粉末冶金件的制造工艺流程	553
8.1.3 黄铜的热处理	449	9.2.4 粉末冶金用铁和铁合金粉末	553
8.1.4 青铜的热处理	451	9.2.5 烧结铁、钢粉末冶金件的性能	556
8.1.5 白铜及其热处理	458	9.2.6 提高铁基粉末冶金件性能的方法	556
8.2 铝及铝合金的热处理	460	9.2.7 铁基粉末冶金件的应用	558
8.2.1 纯铝的特性	460	9.2.8 铁基粉末冶金件的热处理	560
8.2.2 铝合金的分类	461	9.2.9 国外铁基粉末冶金件的牌号、成分和性能	575
8.2.3 变形铝合金	461	9.3 钢结硬质合金及其热处理	582
8.2.4 铸造铝合金	465	9.3.1 钢结硬质合金的特点、牌号、性能和用途	582
8.2.5 变形铝合金的退火	465	9.3.2 钢结硬质合金的热处理	584
8.2.6 变形铝合金的固溶处理与时效	470	9.3.3 钢结硬质合金的组织与性能	586
8.2.7 其他热处理	479	9.4 粉末高速钢及其热处理	591
8.2.8 变形铝合金加工及热处理状态代号	482	9.4.1 粉末高速钢类别和性能	591
8.2.9 铸造铝合金的热处理	485	9.4.2 热等静压和热挤压粉末高速钢	592
8.2.10 铝合金的热处理缺陷	487	9.5 硬质合金及其热处理	593
8.3 镁合金的热处理	490	9.5.1 硬质合金的分类和用途	593
8.3.1 镁及镁合金	490	9.5.2 影响硬质合金性能的因素	594
8.3.2 镁合金热处理的主要类别	493	9.5.3 硬质合金的牌号、性能和用途	595
8.3.3 热处理设备和操作	496	9.5.4 硬质合金的热处理	597
8.3.4 热处理缺陷及防止方法	496	9.5.5 国外硬质合金牌号、性能及用途	599
8.3.5 镁合金热处理安全技术	497	参考文献	601
8.4 钛及钛合金的热处理	497	第10章 功能合金的热处理	602
8.4.1 钛合金中的合金元素	499	10.1 电性合金及其热处理	602
8.4.2 工业纯钛及钛合金的分类	499	10.1.1 金属的导电性	602
8.4.3 钛合金中的不平衡相变	504		
8.4.4 钛合金的热处理	510		
8.4.5 影响钛合金热处理质量的因素	515		
8.5 高温合金的热处理	515		

10.1.2 导电合金	605	10.5.4 形状记忆合金的应用	747
10.1.3 电阻合金	621	参考文献	754
10.2 磁性合金的热处理	633	第11章 其他热处理技术	755
10.2.1 金属磁性的物理基础	633	11.1 磁场热处理	755
10.2.2 软磁合金的热处理	636	11.1.1 磁场对材料固态相变的影响	755
10.2.3 永磁合金的热处理	649	11.1.2 磁场热处理对材料性能的影响及 应用	757
10.3 膨胀合金的热处理	667	11.1.3 磁场淬火设备及存在的问题	759
10.3.1 金属的热膨胀特性	667	11.2 强烈淬火	759
10.3.2 低膨胀合金的热处理	669	11.2.1 强烈淬火原理	759
10.3.3 铁磁性定膨胀合金的热处理	676	11.2.2 强烈淬火对钢组织性能的影响及 其应用	761
10.3.4 无磁性定膨胀合金的热处理	684	11.2.3 强烈淬火设备	762
10.3.5 高膨胀合金的热处理	688	11.3 微弧氧化	763
10.4 弹性合金的热处理	691	11.3.1 微弧氧化的发展过程	763
10.4.1 金属的弹性性能	691	11.3.2 微弧氧化基本原理	763
10.4.2 高弹性合金的热处理	694	11.3.3 微弧氧化工艺及其装置	765
10.4.3 恒弹性合金的热处理	716	11.3.4 微弧氧化的应用实例	765
10.5 形状记忆合金及其定形热处理	724	参考文献	769
10.5.1 超弹性和形状记忆效应	725		
10.5.2 钛镍形状记忆合金	729		
10.5.3 铜基形状记忆合金	739		

(2005—2006) 金属材料热处理工艺学 热处理工艺学 热处理工艺学 热处理工艺学 热处理工艺学 热处理工艺学 热处理工艺学 热处理工艺学 热处理工艺学 热处理工艺学

第1章 基础资料

太原理工大学 侯增寿

山西工程职业技术学院 孙亦惠

西安交通大学 周敬恩

1.1 金属热处理工艺分类及代号

1.1.1 基础分类

按照工艺总称、工艺类型和工艺名称，将热处理工艺按三个层次进行分类，见表1-1。

表 1-1 热处理工艺分类及代号 (GB/T 12603—2005)

工艺总称	代 号	工艺类型	代号	工 艺 名 称	代 号	
热处理	5	整体热处理	1	退火	1	
				正火	2	
				淬火	3	
				淬火和回火	4	
				调质	5	
				稳定化处理	6	
				固溶处理;水韧处理	7	
				固溶处理+时效	8	
	表面热处理	2	表面热处理	2	表面淬火和回火	1
					物理气相沉积	2
					化学气相沉积	3
					等离子体增强化学气相沉积	4
					离子注入	5
	化学热处理	3	化学热处理	3	渗碳	1
					碳氮共渗	2
					渗氮	3
					氮碳共渗	4
渗其他非金属					5	
渗金属					6	
多元共渗					7	

1.1.2 附加分类

附加分类是对基础分类中某些工艺的具体条件更细化的分类。热处理加热方式、退火工艺、淬火冷却介质和冷却方法及代号见表1-2。

1.1.3 常用热处理工艺及代号

表1-3列出常用热处理工艺及根据基础分类代号和附加分类代号编成的工艺代号。

表 1-2 热处理加热方式、退火工艺、淬火冷却介质和冷却方法及代号 (GB/T 12603—2005)

加热方式	可控气氛 (气体)	真空	盐浴 (液体)	感应	火焰	激光	电子束	等离子体	固体 装箱	流态床	电接触		
代号	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11		
退火工艺	去应力退火	均匀化退火	再结晶退火	石墨化退火	脱氢处理	球化退火	等温退火	完全退火	不完全退火				
代号	St	H	R	G	D	Sp	I	F	P				
淬火冷却 介质和冷却 方法	空气	油	水	盐水	有机聚合 物水溶液	热浴	加压 淬火	双介质 淬火	分级 淬火	等温 淬火	形变 淬火	气冷 淬火	冷处理
代号	A	O	W	B	Po	H	Pr	I	M	At	Af	G	C

表 1-3 常用热处理工艺及代号

工 艺	代 号	工 艺	代 号
热处理	500	淬火及冷处理	513-C
整体热处理	510	可控气氛加热淬火	513-01
可控气氛热处理	500-01	真空加热淬火	513-02
真空热处理	500-02	盐浴加热淬火	513-03
盐浴热处理	500-03	感应加热淬火	513-04
感应热处理	500-04	流态床加热淬火	513-10
火焰热处理	500-05	盐浴加热分级淬火	513-10M
激光热处理	500-06	盐浴加热盐浴分级淬火	513-10H + M
电子束热处理	500-07	淬火和回火	514
离子轰击热处理	500-08	调质	515
流态床热处理	500-10	稳定化处理	516
退火	511	固溶处理,水韧化处理	517
去应力退火	511-St	固溶处理 + 时效	518
均匀化退火	511-H	表面热处理	520
再结晶退火	511-R	表面淬火和回火	521
石墨化退火	511-G	感应淬火和回火	521-04
脱氢处理	511-D	火焰淬火和回火	521-05
球化退火	511-Sp	激光淬火和回火	521-06
等温退火	511-I	电子束淬火和回火	521-07
完全退火	511-F	电接触淬火和回火	521-11
不完全退火	511-P	物理气相沉积	522
正火	512	化学气相沉积	523
淬火	513	等离子体增强化学气相沉积	524
空冷淬火	513-A	离子注入	525
油冷淬火	513-O	化学热处理	530
水冷淬火	513-W	渗碳	531
盐水淬火	513-B	可控气氛渗碳	531-01
有机水溶液淬火	513-Po	真空渗碳	531-02
盐浴淬火	513-H	盐浴渗碳	531-03
加压淬火	513-Pr	固体渗碳	531-09
双介质淬火	513-I	流态床渗碳	531-10
分级淬火	513-M	离子渗碳	531-08
等温淬火	513-At	碳氮共渗	532
形变淬火	513-Af	渗氮	533
气冷淬火	513-G	气体渗氮	533-01

(续)

工 艺	代 号	工 艺	代 号
液体渗氮	533-03	渗铬	536(Cr)
离子渗氮	533-08	渗锌	536(Zn)
流态床渗氮	533-10	渗钒	536(V)
氮碳共渗	534	多元共渗	537
渗其他非金属	535	硫氮共渗	537(S-N)
渗硼	535(B)	氧氮共渗	537(O-N)
气体渗硼	535-01(B)	铬硼共渗	537(Cr-B)
液体渗硼	535-03(B)	钒硼共渗	537(V-B)
离子渗硼	535-08(B)	铬硅共渗	537(Cr-Si)
固体渗硼	535-09(B)	铬铝共渗	537(Cr-Al)
渗硅	535(Si)	硫氮碳共渗	537(S-N-C)
渗硫	535(S)	氧氮碳共渗	537(O-N-C)
渗金属	536	铬铝硅共渗	537(Cr-Al-Si)
渗铝	536(Al)		

1.2 合金相图

热处理的主要工艺过程是加热和冷却。对绝大多数热处理工艺而言,不论在加热和冷却过程中材料化学成分是否发生变化,都是通过改变材料的力学性能或物理、化学性能来改善坯料的加工工艺性能或工件的服役能力。不论最终获得何种组织,加热过程中材料的组织都将向平衡或稳定的状态变化,掌握热处理全过程中材料组织发生的变化,首先必须熟悉材料的化学成分、温度与其平衡组织间的关系。合金相图全面地表述了这种关系。

1.2.1 铁碳系合金相图

1.2.1.1 Fe-Fe₃C及Fe-C二元合金相图

铁碳合金(钢和铸铁)碳含量超过它在铁中的溶解度后,在不同条件下将分别以Fe₃C(渗碳体)或石墨两种形式存在。过剩的碳以前一种状态存在时,合金组织处于准平衡状态;以后一种状态存在时,合金组织处于平衡状态。Fe-Fe₃C合金相图及Fe-

C合金相图分别表述铁碳合金的准平衡组织和平衡组织与碳含量和温度的关系(见图1-1)。

相区中标出的符号及各特性点、特性线和含义见表1-4~表1-6。

表1-4 Fe-Fe₃C及Fe-C合金相图相区中的代号

代号	相的名称	结 构
F	铁素体	碳在 α -Fe中的间隙固溶体,体心立方结构,有时以 α 为代号
A	奥氏体	碳在 γ -Fe中的间隙固溶体,面心立方结构,有时以 γ 为代号
δ	δ 固溶体	碳在 δ -Fe中的间隙固溶体,体心立方结构
Fe ₃ C	渗碳体	以分子式Fe ₃ C表述的金属化合物,正交点阵
G	石墨	游离的碳晶体,密排六方结构
L	液相	铁碳合金的熔融液体

表1-5 Fe-Fe₃C及Fe-C合金相图中的特性点

点	温度/°C	w(C)(%)	说 明
A	1538	0	纯铁的熔点
B	1495	0.53	包晶线的端点
C	1148	4.3	共晶点(Fe-Fe ₃ C系)
C'	1154	4.26	共晶点(Fe-C系)
D	1227	6.69	渗碳体的熔点(在图外)
D'	3927	100	石墨的熔点(在图外)
E	1148	2.11	碳在A中的最大溶解度(Fe-Fe ₃ C系)
E'	1154	2.08	碳在A中的最大溶解度(Fe-C系)
F	1148	6.69	共晶线的端点(Fe-Fe ₃ C系)
F'	1154	6.69	共晶线的端点(Fe-C系)

(续)

点	温度/°C	w(C) (%)	说明
G	912	0	$\alpha\text{-Fe} \rightleftharpoons \gamma\text{-Fe}$ 同素异构转变点
H	1495	0.09	包晶线的端点
J	1495	0.17	包晶点
K	727	6.69	共析线的端点(Fe-Fe ₃ C系)
K'	738	6.69	共析线的端点(Fe-C系)
M	770	0	$\alpha\text{-Fe}$ 的磁性转变点
N	1394	0	$\gamma\text{-Fe} \rightleftharpoons \delta\text{-Fe}$ 同素异构转变点
O	770	≈0.50	铁素体的磁性转变点
P	727	0.0218	Fe-Fe ₃ C系碳在F中的最大溶解度
P'	738	0.02	Fe-C系碳在F中的最大溶解度
Q		0.008	碳在F中的常温溶解度
S	727	0.77	Fe-Fe ₃ C系中的共析点
S'	738	0.68	Fe-C系中的共析点

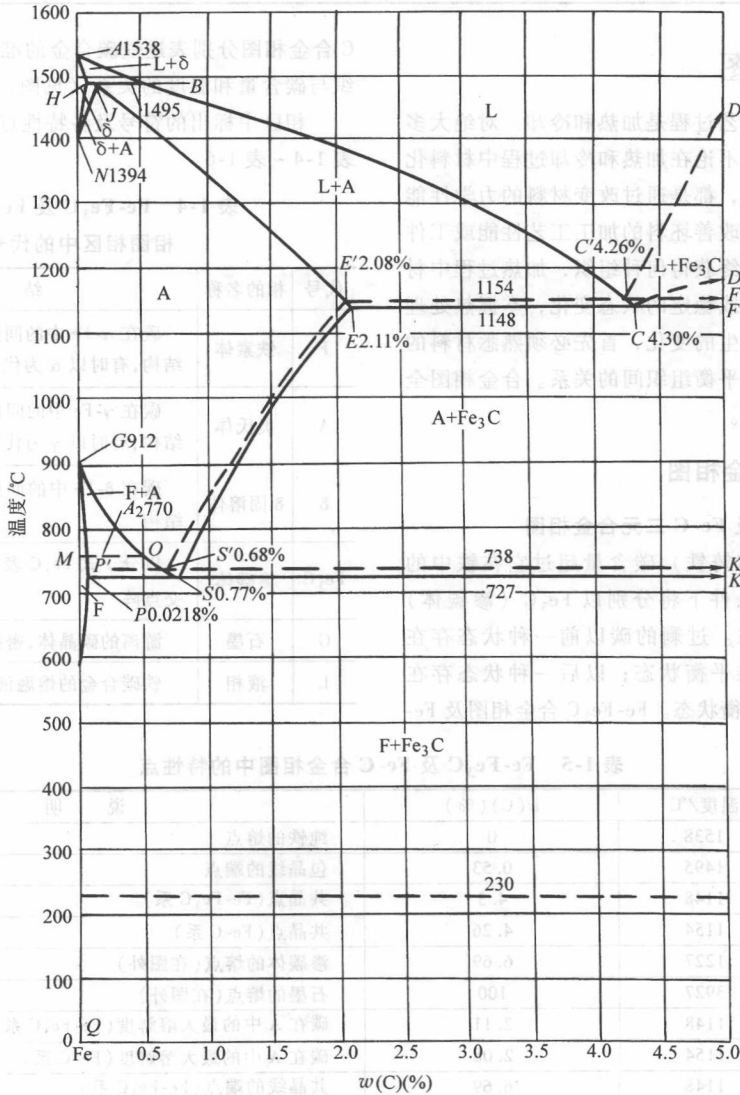


图 1-1 Fe-Fe₃C 及 Fe-C 合金相图

表 1-6 Fe-Fe₃C 及 Fe-C 合金

相图中的特性线	
特性线	说 明
AB	δ 相的液相线
BC	A 的液相线
CD	Fe ₃ C 的液相线
CD'	G 的液相线 (Fe-C 系)
AH	δ 的固相线
JE	A 的固相线
JE'	A 的固相线 (Fe-C 系)
HN	δ→A 始温线
JN	δ→A 终温线
GS	A→F 始温线 (A ₃ 线)
GS'	A→F 始温线 (Fe-C 系)
230℃ 水平线	Fe ₃ C 的磁性转变线
GP	A→F 终温线
ES	A→Fe ₃ C 始温线 (A _{cm} 线)
ES'	A→G 始温线 (Fe-C 系)
PQ	碳在 F 中的溶解度线
P'Q	碳在 F 中的溶解度线 (Fe-C 系)
MO	F 的磁性转变线 (A ₂ 线)
HJB	L _B + δ _H ⇌ A _J 包晶转变线
ECF	L _C ⇌ A _E + Fe ₃ C 共晶转变线
E'C'F'	L ⇌ A _{E'} + G 共晶转变线 (Fe-C 系)
PSK	A _S ⇌ F _P + Fe ₃ C 共析转变线 (A ₁ 线)
P'S'K'	A _S ⇌ F _{P'} + G 共析转变线 (Fe-C 系)

1.2.1.2 主要合金元素对钢铁平衡组织及平衡相变温度的影响

1. 对共晶组织、共析组织碳含量及碳在奥氏体中溶解度的影响 钢铁中常用主要合金元素对共晶组织、共析组织碳含量及碳在奥氏体中的最大溶解度可用 C、

S、E 点成分坐标的偏移量粗略表示 (见表 1-7)。

表 1-7 Si、Mn、Ni、Cr 对 C、S、E 点成分 (质量分数) 坐标的影响

元素名称	(ΔC% / 1% Me) ^①		
	C	S	E
Si	-0.3	-0.06	-0.11
Mn	+0.03	-0.05	+0.04
Ni	-0.07	-0.05	-0.09
Cr	-0.05	-0.05	-0.07

① 表示每增加 1% 的合金元素, C、S、E 点对应的碳含量变化。

2. 常用主要合金元素对 C、S、E 点温度坐标的影响 如表 1-8 所示。

表 1-8 Si、Mn、Ni、Cr 对 C、S、E 点温度坐标的影响

元素名称	(ΔT (°C) / 1% Me) ^①		
	C	S	E
Si	-(15~20)	-8	-(10~15)
Mn	+3	-9.5	+3.2
Ni	-6	-20	+4.8
Cr	+7	+15	+7.3

① 表示每增加 1% 的合金元素, C、S、E 点对应的温度变化。

3. 合金元素在钢铁中形成的碳化物 Cr、Mo、W、V、Nb、Ta、Zr、Ti 等在钢铁中均可能形成合金碳化物或溶入 Fe₃C。合金碳化物一般并非化学计量相而有一定成分范围, 其中还可能溶入其他元素。WC 还能以分子形式溶入 VC、NbC、TaC、ZrC、TiC。钢中合金元素在碳化物中的可溶性见表 1-9。

表 1-9 钢中合金元素在碳化物中的可溶性

碳化物的分子式	Fe	Mn	Cr	Mo	W	V	Nb	Ta	Zr	Ti	常见其他分子式
Fe ₃ C	0	无限	16	≈16	1.3	0.6	≈0.1		0.1	0.15 ~ 0.25	(Fe, M) ₃ C、(Fe, Cr) ₃ C
Cr ₇ C ₃	55	多									(Cr, Fe) ₇ C ₃
Cr ₂₃ C ₆	35	多	溶	溶	溶	溶					(Cr, Fe) ₂₃ C ₆ 、Cr ₄ C
Fe ₂₁ W ₂ C ₆	溶	溶	溶	溶	溶	溶					M ₂₃ C ₆ 、(W, Fe) ₂₃ C ₆
FeMo ₂ C ₆	溶	溶	溶	溶	溶	溶					M ₂₃ C ₆ 、(Mo, Fe) ₂₃ C ₆
WC				无限		不溶	不溶	不溶	不溶	不溶	
MoC				60~70	无限						
				原子							
W ₂ C			≈50	无限							

合金 C-Fe 系 C₃-Fe-Cr 系 (续)

碳化物的分子式	Fe	Mn	Cr	Mo	W	V	Nb	Ta	Zr	Ti	常见其他分子式
Mo ₂ C			≈50		无限						
VC				多	85~90	50~57	无限	无限	1原子	无限	V ₄ C ₃
					分子	原子					
NbC				溶	75~80	无限	52~56	无限	无限	无限	Nb ₄ C ₃
					分子		原子				
TaC				溶	75~80	无限	无限	50~55	无限	无限	
					分子			原子			
ZrC				溶	60~65	5原子	无限	无限	50~67	无限	
					分子				原子		
TiC			溶	溶	92分子	无限	无限	无限	无限	50~75	M ₆ C, Fe ₃ W ₃ C (W, Fe) ₆ C
										原子	
Fe ₄ W ₂ C	溶		溶	溶	溶	溶					M ₆ C, Fe ₃ Mo ₃ C
Fe ₄ Mo ₂ C	溶		溶	溶	溶	溶					(Mo, Fe) ₆ C

- 注: 1. 只填数字者为质量分数。
- 2. 原子者为摩尔分数 (原子) (%)。
- 3. 分子者为摩尔分数 (分子) (%)。

1.2.1.3 Fe-C-Me 三元合金相图

铁碳合金中的第三组元 (合金元素) 使包晶、共晶、共析等三相平衡相变成为变温转变过程, 不能在一定温度下完成相变, 只能在一定温度范围内完成相变。与此同时, 对合金元素添加量较多的 Fe-C-Me 三元合金还将发生三元包晶、三元共晶、三元共析、包共晶、包共析五相平衡转变。这些相平衡转变可在恒温下完成。图 1-2 ~ 图 1-5 是作为示例展示的 Fe-Fe₃C-Si、Fe-C-Si、Fe-C-Cr、Fe-C-Cr 三元合金相图。

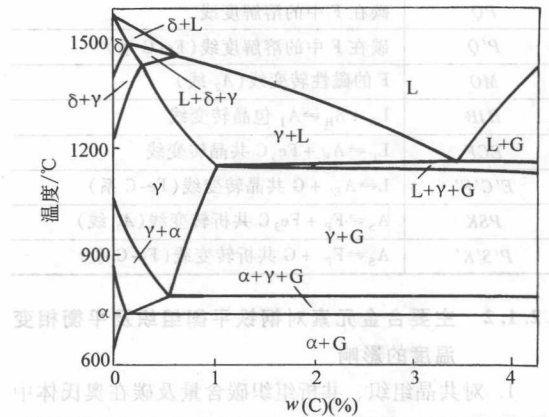


图 1-3 Fe-C-Si [w(Si) = 2.4%] 三元合金相图

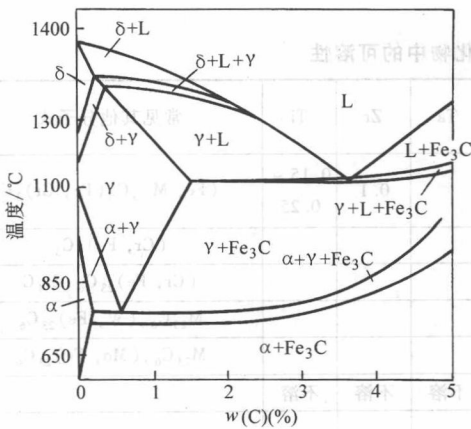


图 1-2 Fe-Fe₃C-Si [w(Si) = 2%] 三元合金相图

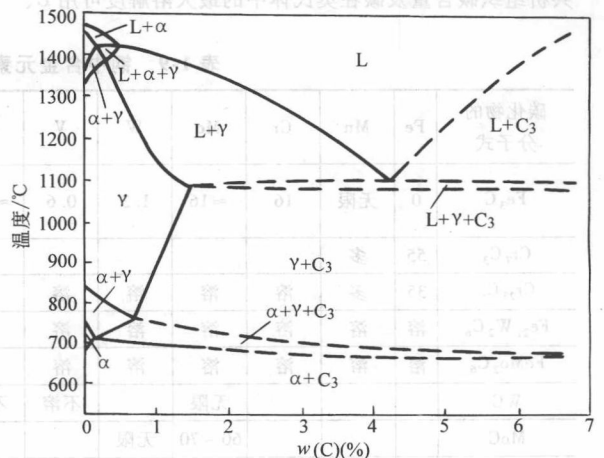


图 1-4 Fe-Fe₃C-Cr [w(Cr) = 1.6%] 三元合金相图

