

美国金属学会 热处理手册

钢的热处理基础 和工艺流程

ASM Handbook

Volume 4A Steel Heat Treating Fundamentals and Processes

A 卷

美国金属学会手册编委会 组编
[美] 乔恩 L.多塞特 (Jon L. Dossett) 主编
乔治 E.陶敦 (George E. Totten) 等译
汪庆华



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

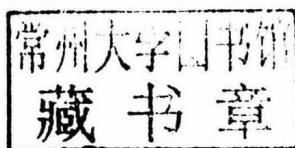
美国金属学会热处理手册

A 卷 钢的热处理基础和工艺流程

ASM Handbook

Volume 4A Steel Heat Treating Fundamentals and Processes

美国金属学会手册编委会 组编
[美] 乔恩 L. 多塞特 (Jon L. Dossett) 主编
乔治 E. 陶敦 (George E. Totten) 等译
汪庆华



机械工业出版社

本书主要介绍了钢的热处理基础知识和工艺流程,详细讲解了钢的热处理原理和淬火、渗碳、渗氮等热处理工艺。本书将热处理工艺作为整个产品生产过程中的一个环节加以综合考虑,为产品设计者和热处理工程师进行产品设计和工艺制订,提供了大量有权威性的、翔实的参考资料。本书由世界上钢铁材料热处理各研究领域的著名专家撰写而成,反映了当代热处理工艺的技术水平,具有先进性、全面性和实用性。

本书可供热处理工程技术人员参考,也可供产品设计人员和相关专业的在校师生及研究人员参考。

ASM Handbook Volume 4A Steel Heat Treating Fundamentals and Processes/ Edited by Jon L. Dossett and George E. Totten / ISBN: 978-1-62708-011-8

Copyright © 2013 by ASM International.

Authorized translation from English language edition published by ASM International, All rights reserved. 本书原版由 ASM International 出版,并经其授权翻译出版,版权所有,侵权必究。

This title is published in China by China Machine Press with license from ASM International. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由 ASM International 授权机械工业出版社在中国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区)出版与发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2015-1925 号。

图书在版编目(CIP)数据

美国金属学会热处理手册. A 卷, 钢的热处理基础和工艺流程/(美) 乔恩 L. 多塞特 (Jon L. Dossett), (美) 乔治 E. 陶敦 (George E. Totten) 主编; 汪庆华等译. —北京: 机械工业出版社, 2019. 1

书名原文: ASM Handbook, Volume 4A: Steel Heat Treating Fundamentals and Processes
ISBN 978-7-111-62059-4

I. ①美… II. ①乔… ②乔… ③汪… III. ①钢-热处理-技术手册 IV. ①TG15-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 032094 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 王海霞 武晋 程足芬

责任校对: 刘志文 郑婕 封面设计: 马精明

责任印制: 郜敏

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2019 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·52.75 印张·6 插页·1825 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-62059-4

定价: 279.00 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

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

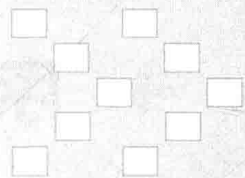
策划编辑: 010-88379734

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

→ 译者序 ←



自 1923 年美国金属学会发行小型的数据活页集和出版最早单卷《金属手册》(Metals Handbook) 至今, 已有 90 余年的历史。2014 年前后, 美国金属学会陆续出版了最新的《美国金属手册》(ASM Handbook), 该手册共计 23 分册 (34 卷), 热处理手册是其中的第 4 分册。一直以来, 该套手册提供了完整、值得信赖的参考数据。通过查阅《美国金属手册》(ASM Handbook), 可以深入了解各种工业产品最适合的选材、制造流程和详尽的工艺。

随着科学技术的发展, 以前出版的各版本该套手册已难以完全容纳和满足当今热处理领域的更新和热处理技术发展的需要, 出版更新和扩展日益增长的钢铁材料和非铁合金材料热处理数据手册显得尤为重要和刻不容缓。2014 年由美国金属学会 (ASM International) 组织全面修订再版了《美国金属手册》(ASM Handbook)。在该套手册中, 将 1991 年出版的仅 1 卷的热处理部分扩充为 5 卷。本书为其中的 A 卷《钢的热处理基础和工艺流程》, 主要介绍了钢的热处理基础知识和工艺流程, 详细讲解了钢的热处理原理和淬火、渗碳、渗氮等热处理工艺。

本书共 8 章, 由世界上钢热处理各研究领域的著名专家撰写而成。本书主要内容包括钢的热处理基础、钢的淬火原理与工艺、钢的热处理工艺、钢的表面淬火、钢的外加能量表面淬火、钢的渗碳和碳氮共渗、钢的渗氮和氮碳共渗、扩散覆层。

本书中的参考文献最早可追溯到 1913 年的专利。全书内容不仅反映了现代金属热处理技术最新的发展水平与方向, 且也包揽了经典的热处理知识, 尤其是以 20 世纪三四十年代创立的淬透性内容为代表。书中还对在我国存在争议的盐浴热处理设备及技术单独设立一节进行了论述。这些内容的存在也许对我国热处理技术的远景发展规划具有借鉴作用。

全书大部分内容主要由汪庆华、鲍欣、孙保明翻译。罗新民、徐二红、方恺萍、耿晓明、严韶云、汪昊、薛元强也参与了部分翻译工作。全书中的图片由汪庆华、鲍欣、汪昊、徐二红翻译整理。感谢郑梦婕、陆从兴、曹辉亮 (参考文献引用作者)、汪陈依的支持和帮助。译者所在单位无锡宏达热处理锻造有限公司对本书的翻译给予了大力支持, 在此表示感谢。

本书内容不仅仅局限于热处理, 还涉及物理、化学、电学、传热学、流体力学, 甚至科技简史等诸多领域, 因译者水平力所不及, 译文不妥之处在所难免, 恳请读者指正。

本书的引进与出版得到了好富顿国际公司的大力支持, 在此表示感谢!

汪庆华

Email: 188382262@qq.com

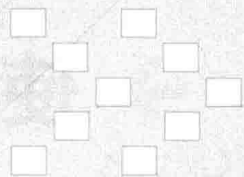
序

在美国金属学会成立一百周年之际，特别安排出版了《美国金属手册》的4A卷——《钢的热处理基础和工艺流程》。自1913年由底特律铁匠威廉·帕克·伍德赛德（William Park Woodside）组成钢的热处理俱乐部起，美国金属学会不断扩大其工作范围；然而，钢铁热处理仍然是学会工作的核心主体。伍德赛德（Woodside）对于热处理需要信息交流的观点和认识得到许多成功的出版物的进一步认可，包括著名的《金属手册》。

《美国金属手册》（原为《金属手册》）系列中的热处理内容扩展为5卷本。这反映了美国金属学会的根源所在，以及热处理学会（美国金属学会联盟学会）与不断成长的成员在热处理领域内的贡献。美国金属学会和热处理学会对本卷主编乔治 E. 陶敦（George E. Totten）和乔恩 L. 多塞特（Jon L. Dossett）表示特别感谢。他们的积极工作和贡献对本卷的编写出版起到了积极作用。感谢两位主编，以及本书的主题编辑、作者和审稿人。

热处理学会主席 Thomas E. Clements
美国金属学会主席 Gernant E. Maurer
美国金属学会常务董事 Thomas S. Passek

→ 前 言 ←



《美国金属手册》4A 卷——《钢的热处理基础和工艺流程》，是热处理分册中的第 1 卷。如书名所示，4A 卷集中介绍了钢的热处理基础知识和工艺流程。计划以后出版的 4B 卷，将涵盖多种类型钢与铸铁的热处理工艺及其性能。

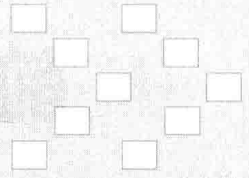
编辑人员认为，与本卷的上一个版本一样，就使用 4A 卷的研究人员、工程师、技术人员和学生的理解水平而言，其需求有所不同。在基础知识方面，提供了与钢铁热处理相关的深入背景和科学原理的文章，关于各种热处理工艺流程的文章更加接近实际。编辑人员也试图提出一个全面的参考依据，以便供多种多样的热处理社会团体使用。

本卷的所有篇幅均经过审读，以确保其能够反映目前的技术现状。对许多篇幅进行了扩展，如钢的渗碳和渗氮的基础知识和工艺方法等部分。钢的淬透性范围也有所扩展，并添加了一些淬火基本原理和工艺流程方面的新内容。对许多资料做了适当的更新，并努力采用新的资料，包括图表、例子和来自学会及其前身（美国金属学会和美国钢铁协会）的实体档案文件的参考资料。在美国金属学会成立一百周年之际，特别适合出版这本书。

感谢我们的许多同事，他们担任了本书的编辑，也要感谢那些单篇文章的作者们。特别的是，编辑们也要深深感激热处理学会（美国金属学会联盟学会）及其成员，他们为本书的出版以及其他事件、会议和教育培训提供了资金。如果没有他们的努力，本卷的出版将是不可能实现的。

Jon L. Dossett
George E. Totten

→ 使用计量单位说明 ←



根据董事会决议，美国金属学会同时采用了出版界习惯的米制计量单位和英美习惯的美制计量单位。在手册的编写中，编辑们试图采用国际单位制（SI）的米制计量单位为主，辅以对应的美制计量单位来表示数据。采用 SI 单位为主的原因是基于美国金属学会董事会的决议和世界各国现已广泛使用米制计量单位。在大多数情况下，书中文字和表格中的工程数据以 SI 为基础的米制计量单位给出，并在相应的括号里给出美制计量单位的数据。例如，压力、应力和强度都是用 SI 单位中帕斯卡（Pa）前加上一个合适的词头，同时还以美制计量单位（磅力每平方英寸，psi）来表示。为了节省篇幅，较大的磅力每平方英寸（psi）数值用千磅力每平方英寸（ksi）来表示（ $1\text{ksi}=1000\text{psi}$ ），吨（ $\text{kg}\times 10^3$ ）有时转换为兆克（Mg）来表示，而一些严格的科学数据只采用 SI 单位来表示。

为保证插图整洁清晰，有些插图只采用一种计量单位表示。参考文献引用的插图采用国际单位制（SI）和美制计量单位两种计量单位表示。图表中 SI 单位通常标识在插图的左边和底部，相应的美制计量单位标识在插图的右边和顶部。

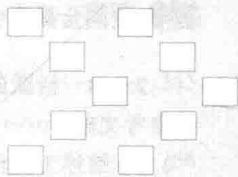
规范或标准出版物的数据可以根据数据的属性，只采用该规范或标准制定单位所使用的计量单位或采用两种计量单位表示。例如，在典型美制计量单位的美国薄钢板标准中，屈服强度通常以两种计量单位表示，而该标准中钢板厚度可能只用英寸（in）表示。

根据标准测试方法得到的数据，如标准中提出了推荐的特定计量单位体系，则采用该计量单位体系表示。在可行的情况下，也给出了另一种计量单位的等值数据。一些统计数据也只以进行原始数据分析时的计量单位给出。

不同计量单位的转换和舍入按照 IEEE/ASTM SI-10 标准，并结合原始数据的有效数字进行。例如，退火温度 1570°F 有三位有效数字，转换的等效温度为 855°C ，而不是更精确的 854.44°C 。对于一个发生在精确温度下的物理现象，如纯银的熔化，应采用资料给出的温度 961.93°C 或 1763.5°F 。在一些情况下（特别是在表格和数据汇编时），温度值是在国际单位制（ $^\circ\text{C}$ ）和美制计量单位（ $^\circ\text{F}$ ）间进行相互替代，而不是进行转换。

严格对照 IEEE/ASTM SI-10 标准，本手册使用的计量单位有几个例外，但每个例外都是为了尽可能提高手册的清晰程度。最值得注意的一个例外是密度（单位体积的质量）的计量单位使用了 g/cm^3 ，而不是 kg/m^3 。为避免产生歧义，国际单位制的计量单位中不采用括号，而是仅在单位间或基本单位间采用一个斜杠（对角线）组合成计量单位，因此斜杠前为计量单位的分子，而斜杠后为计量单位的分母。

目 录



译者序

序

前言

使用计量单位说明

第 1 章 钢的热处理基础 1

1.1 钢的热处理概论 1

1.1.1 引言 1

1.1.2 铁的晶体结构 2

1.1.3 钢的热处理组织 6

1.1.4 转变图 17

1.1.5 热应力和残余应力 23

参考文献 25

1.2 钢的硬度和淬透性 28

1.2.1 引言 28

1.2.2 乔米尼末端淬火试验 30

1.2.3 淬冷烈度 33

1.2.4 理想临界直径 35

1.2.5 淬透性相关曲线 37

1.2.6 其他淬透性试验方法 42

1.2.7 乔米尼末端淬火试验等效图表 45

1.2.8 淬透性要求的确定 47

1.2.9 影响淬透性的因素 51

1.2.10 乔米尼末端淬火数据集的
可变性 51

1.2.11 钢的淬透性计算 53

1.2.12 根据淬透性选择钢种 55

1.2.13 淬透性极限和 H 钢 57

1.2.14 根据末端淬火试验位置对 H 钢
进行分类 65

参考文献 69

1.3 碳钢和低碳低合金钢淬透性的计算 70

1.3.1 引言 70

1.3.2 淬透性计算原则 70

1.3.3 钢淬透性的建模方法 71

1.3.4 卡特彼勒淬透性计算器
(1E0024) 75

1.3.5 非硼钢 D_1 的计算 77

1.3.6 硼钢 D_1 的计算 80

1.3.7 根据成分估计末端淬火曲线 81

1.3.8 非硼钢 (8645 钢) 计算实例 82

1.3.9 硼钢 (86B45 钢) 计算实例 82

1.3.10 欧洲地区的淬透性回归分析
(报告) 91

参考文献 93

1.4 高碳钢淬透性的计算 95

1.4.1 背景 98

1.4.2 淬透性系数推导 100

1.4.3 淬透性系数 101

1.4.4 淬透性系数的使用 103

1.4.5 淬透性系数的局限性 104

致谢 104

参考文献 104

引用文献 104

第 2 章 钢的淬火原理与工艺 105

2.1 钢的淬火 105

2.1.1 淬火机理 105

2.1.2 淬火过程变量 108

2.1.3 冶金学特性 109

2.1.4 淬冷烈度 115

2.1.5 淬火冷却介质的检测和评估 119

2.1.6 冷却曲线试验 121

2.1.7 传热系数计算 128

2.1.8 普通淬火工艺参数 132

2.1.9 淬火系统 141

2.1.10 空气和水淬火冷却介质 143

2.1.11 盐水 (浓盐水) 溶液 144

2.1.12 熔融金属淬火冷却介质 147

2.1.13 熔融盐和热油淬火冷却介质 149

2.1.14 淬火油 153

2.1.15 淬火槽的维护保养 165

2.1.16 油淬火系统的监测 169

2.1.17 矿物油淬火冷却介质的安全
使用 171

2.1.18 聚合物淬火冷却介质 172

2.1.19 夹具 178

参考文献 179

2.2 淬火过程中的传热特性 188

2.2.1 传热基础 189

2.2.2 显微组织转变生成热 191

2.2.3 液体淬火传热 193



2.2.4 活跃的传热边界条件	198	2.7.5 冷却曲线	257
参考文献	203	2.7.6 心部硬度预测	259
2.3 描述工业淬火过程的大型探头	207	2.7.7 气流转向	260
2.3.1 评估液态淬火冷却介质冷却强度的 实验室测试	207	2.7.8 气冷淬火动力学	261
2.3.2 实验室测试与工业淬火过程表征的 区别	210	2.7.9 气冷淬火夹具	262
2.3.3 液态淬火冷却介质的临界热流 密度	211	2.7.10 高压气淬 (HPGQ) 变形控制	263
2.3.4 用温度梯度法评估车间条件下的冷却 强度	212	参考文献	263
2.3.5 Lišcić/Petrofer 探头	212	2.8 盐浴淬火	264
2.3.6 任意形状的轴对称工件淬火硬度 分布预测	215	2.8.1 盐浴淬火设备	265
2.3.7 热传导反问题的数值解法	217	2.8.2 时间和温度的选择	265
2.3.8 测量温度的平滑化	220	2.8.3 盐浴淬火系统的操作要点	266
2.3.9 工业实例	222	2.8.4 盐浴淬火中环境和安全注意 事项	268
参考文献	223	参考文献	269
2.4 淬火过程传感器*	224	引用文献	269
2.4.1 淬火中的流体流动	224	2.9 流态床淬火	270
2.4.2 流体流动的测量	225	2.9.1 淬火流态床设计	270
参考文献	229	2.9.2 淬火能力	271
2.5 钢件的强烈淬火	230	2.9.3 流态床淬火的应用	274
2.5.1 力学性能与淬火冷却速率	231	参考文献	276
2.5.2 强烈淬火与其他淬火方法	231	2.10 喷射淬火	276
2.5.3 淬火过程中的传热	233	2.10.1 概述	276
2.5.4 批量强烈淬火 (IQ-2)	234	2.10.2 水淬过程中的传热	278
2.5.5 单个零件的强烈淬火 (IQ-3)	236	参考文献	281
2.5.6 钢的显微组织、力学性能及应力 状态的改善	237	2.11 加压淬火	283
2.5.7 IQ 处理与零件变形	240	2.11.1 设备	284
2.5.8 强烈淬火生产系统设计	241	2.11.2 变形控制因素	287
2.5.9 强烈淬火工艺的实际应用	244	参考文献	288
参考文献	246	2.12 线材索氏体化淬火	288
2.6 逆淬火	247	2.12.1 线材索氏体化处理工艺	288
2.6.1 散热动力学	247	2.12.2 试验材料冷却行为和程序	288
2.6.2 冶金方面	249	2.12.3 冷却曲线和冷却速率曲线结果与 分析	289
2.6.3 可控预冷淬火的淬火冷却介质	251	2.12.4 浓度-雾流量效应	292
2.6.4 性能	252	2.12.5 加入 CMC 添加剂的可控雾冷 索氏体化处理	293
2.6.5 总结	253	2.12.6 结论	293
参考文献	253	参考文献	294
2.7 气冷淬火	254	第3章 钢的热处理工艺	296
2.7.1 概述	254	3.1 热处理工序中钢的清理	296
2.7.2 物理学原理	254	3.1.1 热处理零件表面污染物	297
2.7.3 气冷淬火设备	255	3.1.2 清理方法	298
2.7.4 气体类型	256	3.1.3 清洁度检测	303
		3.1.4 如何清理干净	304
		3.1.5 案例分析	304
		3.1.6 污染控制和资源回收	305

3.1.7 安全性	305	3.6.5 奥氏体中溶质浓度的控制	355
3.1.8 总结	307	致谢	356
参考文献	307	参考文献	356
引用文献	308	3.7 钢的淬火-碳分配热处理	357
3.2 钢的去应力热处理	308	3.7.1 化学成分与退火工艺	357
3.2.1 残余应力的来源	308	3.7.2 显微组织与力学性能	358
3.2.2 热处理去应力的方法	309	3.7.3 残留奥氏体的力学性能和 稳定性	360
3.2.3 弹簧的去应力处理	312	3.7.4 焊接性能	362
参考文献	313	致谢	366
3.3 钢的正火	313	参考文献	366
3.3.1 简介	313	3.8 钢的回火	367
3.3.2 加热和冷却	314	3.8.1 简介	367
3.3.3 不同钢种的正火工艺运用	314	3.8.2 主要变量	368
3.3.4 锻件	322	3.8.3 回火温度和回火阶段	369
3.3.5 棒材和管材产品	323	3.8.4 回火时间和回火温度	374
3.3.6 铸件	323	3.8.5 化学成分对回火的影响	378
3.3.7 板材和带材	324	3.8.6 回火过程中的尺寸变化	382
致谢	325	3.8.7 拉伸性能和硬度	382
参考文献	325	3.8.8 韧性和脆性	385
3.4 钢的退火	325	3.8.9 回火设备	387
3.4.1 冶金学原理	325	3.8.10 特殊回火工序	389
3.4.2 退火工艺	325	3.8.11 感应加热回火	392
3.4.3 退火指南	327	致谢	394
3.4.4 退火温度	328	参考文献	394
3.4.5 球化退火	330	引用文献	395
3.4.6 工序间退火	332	3.9 钢的等温淬火	396
3.4.7 适合机加工的退火组织	332	3.9.1 等温淬火的钢种	397
3.4.8 工业生产中的退火	333	3.9.2 截面厚度的限制	399
3.4.9 板材和带材的退火	335	3.9.3 应用	399
3.4.10 钢锻件的退火	339	3.9.4 尺寸控制	402
3.4.11 线材和棒材的退火	341	3.9.5 改良型等温淬火	405
3.4.12 板材和管材的退火	342	3.9.6 等温淬火存在的问题和解决 方案	406
3.4.13 快速循环退火	342	参考文献	407
参考文献	343	引用文献	407
3.5 亚温退火和正火	344	3.10 钢的分级淬火	407
3.5.1 亚温退火的温度	345	3.10.1 简介	407
3.5.2 时间和温度的关系	346	3.10.2 优势	409
3.5.3 正火	346	3.10.3 分级淬火介质	410
3.5.4 螺纹的软化感应退火	347	3.10.4 安全措施	412
致谢	347	3.10.5 分级淬火的钢种	415
参考文献	347	3.10.6 工艺参数的控制	417
3.6 钢的奥氏体化	347	3.10.7 尺寸控制	419
3.6.1 简介	347	3.10.8 应用	423
3.6.2 奥氏体化的目的及概述	347	3.10.9 奥氏体化设备的选择	425
3.6.3 奥氏体形成的热力学及动力学	348		
3.6.4 奥氏体晶粒的长大	354		

3.10.10 分级淬火设备的选择	426	5.1.10 淬火方法和设备	481
3.10.11 分级淬火盐浴的维护	429	5.1.11 淬火介质	481
3.10.12 装料架及其处理	430	5.1.12 火焰淬火存在的问题及原因 分析	482
3.10.13 清洗作业	430	5.1.13 火焰淬火零件的回火	482
参考文献	431	5.1.14 表面状态	483
3.11 钢的冷处理及深冷处理	431	5.1.15 尺寸控制	483
3.11.1 钢的冷处理	431	5.1.16 工艺选择	483
3.11.2 钢的深冷处理	433	5.1.17 材料选择	485
致谢	435	5.1.18 火焰退火	488
参考文献	435	参考文献	488
引用文献	436	引用文献	488
第4章 钢的表面淬火	437	5.2 钢的表面感应淬火	488
4.1 钢的表面淬火简介	437	5.2.1 感应加热原理	489
4.1.1 表面淬火的扩散方法	437	5.2.2 高温电、磁和热性能	490
4.1.2 渗碳和碳氮共渗	439	5.2.3 涡流分布	493
4.1.3 渗氮和氮碳共渗	442	5.2.4 感应淬火和回火	496
4.1.4 外加能量方法	444	5.2.5 通用设备和工艺因素	503
4.1.5 其他方法	445	5.2.6 表面感应淬火参数	508
4.1.6 工艺选择	446	5.2.7 应用技巧和故障排除	511
参考文献	446	致谢	513
4.2 热处理防渗技术	447	参考文献	514
4.2.1 机械屏蔽	447	5.3 电子束表面淬火	514
4.2.2 镀铜	448	5.3.1 电子束的产生及其材料的交互 作用	515
4.2.3 防渗涂料	448	5.3.2 工艺技术	517
致谢	453	5.3.3 电子束表面淬火技术	519
4.3 钢的硬化层深度测量方法	453	5.3.4 电子束设备和电子束集成制造 系统	523
4.3.1 简介	453	5.3.5 实际应用	525
4.3.2 测量规范	453	致谢	528
4.3.3 化学法	454	参考文献	528
4.3.4 机械法	456	引用文献	529
4.3.5 视觉检测法	461	5.4 激光表面淬火	530
4.3.6 无损检测法	462	5.4.1 常规表面淬火技术	534
致谢	463	5.4.2 激光表面淬火	535
参考文献	463	5.4.3 吸收率	536
引用文献	464	5.4.4 激光扫描技术	537
第5章 钢的外加能量表面淬火	465	5.4.5 激光退火	537
5.1 钢的火焰淬火	465	5.4.6 激光熔覆	537
5.1.1 火焰淬火方法	466	5.4.7 激光冲击强化	541
5.1.2 燃气	467	5.4.8 激光热处理	541
5.1.3 燃烧器及相关设备	470	5.4.9 热动力学相变	544
5.1.4 操作过程与控制	473	5.4.10 获得特定硬度的挑战	547
5.1.5 预热	477	5.4.11 冷却速度的影响	547
5.1.6 硬化层深度及硬度分布	477	5.4.12 工艺参数对温度、显微组织和	
5.1.7 设备维护	478		
5.1.8 预防性维护	480		
5.1.9 安全注意事项	480		

硬化层硬度的影响	548	6.4.6 渗碳箱	634
5.4.13 非铁基金属激光表面淬火	551	6.4.7 装渗碳箱	634
参考文献	556	参考文献	635
引用文献	565	6.5 钢的液体渗碳和碳氮共渗	635
第6章 钢的渗碳和碳氮共渗	567	6.5.1 氰化物液体渗碳盐浴	635
6.1 渗碳和碳氮共渗简介	567	6.5.2 氰化处理 (液体碳氮共渗)	637
6.1.1 简介	567	6.5.3 无氰化物液体渗碳	638
6.1.2 历史	567	6.5.4 碳浓度梯度	642
6.1.3 一般渗碳过程的描述	568	6.5.5 硬度梯度	642
6.1.4 如何渗碳	571	6.5.6 工艺过程控制	643
6.1.5 渗碳基本反应	571	6.5.7 渗层深度控制	644
6.1.6 渗碳的优点和局限性	575	6.5.8 尺寸变化	646
6.1.7 渗碳钢	576	6.5.9 淬火冷却介质	646
6.1.8 质量保证	577	6.5.10 残盐的清除 (清洗)	648
6.1.9 可能出现的复杂情况	579	6.5.11 典型应用实例	648
6.1.10 渗碳和碳氮共渗方法	580	6.5.12 氰化物盐使用中的注意事项	650
致谢	583	6.5.13 氰化物废料处置	652
参考文献	583	参考文献	654
引用文献	584	6.6 低压渗碳	654
6.2 渗碳零件碳浓度控制评估	584	6.6.1 工艺	654
6.2.1 硬度测试	584	6.6.2 物理基础	656
6.2.2 显微镜检查	584	6.6.3 低压渗碳设备	657
6.2.3 连续剥层分析	585	6.6.4 渗碳对策	658
6.2.4 定碳片分析	587	6.6.5 碳浓度分布预测	659
6.2.5 定碳轧丝分析	589	6.6.6 应用	659
6.2.6 光谱分析	589	6.6.7 大批量生产中的低压渗碳工艺的 质量控制	661
6.2.7 电磁测试	589	6.6.8 高温低压渗碳	662
6.3 气体渗碳	590	参考文献	663
6.3.1 热力学和动力学	590	引用文献	664
6.3.2 碳源和气氛类型	596	6.7 等离子渗碳	664
6.3.3 碳传递机制	599	6.7.1 等离子渗碳原理	664
6.3.4 渗碳建模和渗碳层深度预测	600	6.7.2 等离子渗碳反应	666
6.3.5 渗碳设备	602	6.7.3 优缺点	667
6.3.6 炉温和气氛控制	604	6.7.4 生产设备	668
6.3.7 渗碳周期进展	609	6.7.5 应用实例	669
6.3.8 工艺设计	613	参考文献	670
6.3.9 尺寸控制	623	6.8 钢的碳氮共渗	670
6.3.10 渗碳层深度的评估	624	6.8.1 工艺概述	672
致谢	627	6.8.2 渗层成分	674
参考文献	627	6.8.3 渗层深度	675
6.4 固体渗碳	629	6.8.4 渗层深度均匀性	675
6.4.1 介绍	629	6.8.5 渗层的淬透性	676
6.4.2 优缺点	630	6.8.6 硬度梯度	678
6.4.3 渗碳介质和复合物	630	6.8.7 空洞的形成	678
6.4.4 过程控制	631	6.8.8 残留奥氏体的控制	679
6.4.5 固体渗碳炉	633		

6.8.9 炉子气氛	680	7.2.16 常见问题	751
6.8.10 温度的选择	683	7.2.17 经验法则	751
6.8.11 淬火冷却介质和实践	685	7.2.18 安全注意事项	752
6.8.12 回火	685	7.2.19 设备	752
6.8.13 硬度测试	687	致谢	755
6.8.14 应用	687	参考文献	755
6.8.15 粉末冶金零件的碳氮共渗	688	7.3 钢的液体渗氮	757
6.8.16 氮气氛指南	689	7.3.1 液体渗氮的应用	757
6.8.17 安全事项	689	7.3.2 液体渗氮系统	758
参考文献	689	7.3.3 液体压力渗氮	759
第7章 钢的渗氮和氮碳共渗	691	7.3.4 通气液体渗氮	759
7.1 渗氮和氮碳共渗的基本原理	691	7.3.5 渗层深度和渗层硬度	761
7.1.1 简介	691	7.3.6 操作程序	761
7.1.2 渗氮技术的出现	691	7.3.7 设备	763
7.1.3 渗氮/氮碳共渗后的显微组织； 热力学和动力学	692	7.3.8 维护计划	763
7.1.4 铁氮相图——多孔性的产生和 解释	693	7.3.9 安全预防措施	764
7.1.5 氮势和莱勒 (Lehrer) 图	694	7.3.10 液体氮碳共渗	764
7.1.6 可控渗氮	695	7.3.11 无毒盐浴氮碳共渗	766
7.1.7 碳势和可控渗碳	697	7.3.12 在盐浴中形成化合物层的 耐磨损与抗划伤特性	766
7.1.8 可控氮碳共渗	698	附录1 无氰盐浴液体渗氮	768
7.1.9 局部平衡和稳态	699	附录2 液体盐浴渗氮	769
7.1.10 化合物层显微组织的发展	701	7.4 钢的等离子体渗氮和氮碳共渗	769
7.1.11 化合物层增长的动力学	707	7.4.1 引言	769
7.1.12 扩散层显微组织的发展	708	7.4.2 工艺历史及其发展	770
7.1.13 扩散层长大动力学	713	7.4.3 辉光放电过程	772
7.1.14 结束语	716	7.4.4 离子渗氮炉	774
致谢	717	7.4.5 工艺控制	776
参考文献	717	7.4.6 渗层结构及形成	777
7.2 钢的气体渗氮和氮碳共渗	721	7.4.7 工件因素	779
7.2.1 简介	721	7.4.8 离子渗氮的应用	780
7.2.2 气体反应术语	723	7.4.9 离子氮碳共渗	781
7.2.3 低温渗氮和氮碳共渗	724	7.4.10 致谢	782
7.2.4 渗氮	726	参考文献	783
7.2.5 铁素体和奥氏体氮碳共渗	732	引用文献	783
7.2.6 其他高温工艺	733	第8章 扩散覆层	784
7.2.7 渗氮过程	735	8.1 固体装箱渗金属工艺	784
7.2.8 气氛控制	740	8.1.1 渗铝	785
7.2.9 氮势测量	743	8.1.2 渗硅	785
7.2.10 温度控制	746	8.1.3 渗铬	786
7.2.11 测量误差的影响	746	参考文献	786
7.2.12 渗氮工艺的模拟	746	8.2 金属渗硼	786
7.2.13 检查和质量控制	747	8.2.1 渗硼层的特征	786
7.2.14 实验室设备和样品制备	748	8.2.2 铁基材料渗硼	791
7.2.15 局部渗氮	751	8.2.3 非铁基材料渗硼	794
		8.2.4 热力学渗硼技术	795

8.2.5 热力学渗硼的应用	799	8.3.9 高温流态床碳化物覆层	816
8.2.6 化学气相沉积	801	8.3.10 低温盐浴氮化物覆层	817
参考文献	802	8.3.11 覆层零件的性能	818
8.3 钢的表面反应沉积/扩散硬化工艺	803	8.3.12 实践应用	819
8.3.1 引言	803	致谢	820
8.3.2 覆层机理和类型	805	参考文献	820
8.3.3 碳化物覆层的形核和生长	806	引用文献	822
8.3.4 氮化物覆层的形核和生长	808	8.4 超饱和渗碳	822
8.3.5 覆层生长速率的控制因素	809	8.4.1 普通渗碳钢的超饱和渗碳	823
8.3.6 覆涂工艺	811	8.4.2 多种钢的超饱和渗碳	825
8.3.7 覆层渗剂状态的控制	813	参考文献	828
8.3.8 高温盐浴碳化物覆层	814		

第1章

钢的热处理基础

1.1 钢的热处理概论

1.1.1 引言

热处理可以大致定义为控制固体材料的加热和冷却过程，从而改变其显微组织，并获得预期性能的工艺。按照这个最广义的定义，几乎所有的金属和合金都可以进行某种形式的热处理，只是不同的金属和合金会有不同的热处理方式。在冷加工后几乎所有金属都可以通过退火软化，而较少的合金系列可以通过热处理强化或硬化。因为钢对热处理硬化和强化非常敏感，所以其热处理效果非常显著。

钢的热处理机制是基于铁元素的某些重要性能和碳在铁中的冶金反应。从根本上说，所有的钢都是混合物，或者更确切地说，钢是铁和少量的碳（同时含有不同数量的其他合金元素，如锰、铬、镍、钼）的合金。碳原子相对于铁原子的大小，是影响钢的热处理机制的一个重要因素。碳原子的尺寸只有铁原子的1/30，其尺寸足够小，可以适应较大的铁原子之间的空隙。其他可以适应铁原子间隙的小原子有氢、氮和硼。通常，间隙原子可以很容易地扩散——从一个间隙位置跳跃到另一个间隙位置，而较大的原子则只能通过置换进入晶格中的空位。由于以上原因以及温度对扩散的影响，使得碳原子在固态加热期间具有可移动性。

另一个重要的冶金现象是铁的同素异构体，即铁原子排列成一种以上的晶体结构或金相组织。例如，在室温下，铁原子排列成体心立方（bcc）的晶体结构，称为铁素体或 α -铁；在更高的温度下，铁原子形成面心立方（fcc）的晶体结构，称为奥氏体或 γ -铁。这两种相的存在，以及碳的合金化是钢的热处理的基础。

铁素体与奥氏体的一个重要区别是铁原子的间距不同，奥氏体中铁原子的间距比铁素体中的更大（图1-1）。因此，奥氏体的晶格间隙中能够容纳更多的碳原子。固体溶解度用来衡量基体晶格中可以溶解（或合并）多少溶质。温度影响固体溶解度的大小，因为在较高的温度下基体晶格将扩大，从而为

溶质溶解在晶格间隙中提供了一个更有利的条件。然而，碳在 α -铁中几乎不溶解——溶解度范围是从接近室温时的0.008%（质量分数）到727℃（1340°F）时的0.02%（极限溶解度），如图1-2所示。

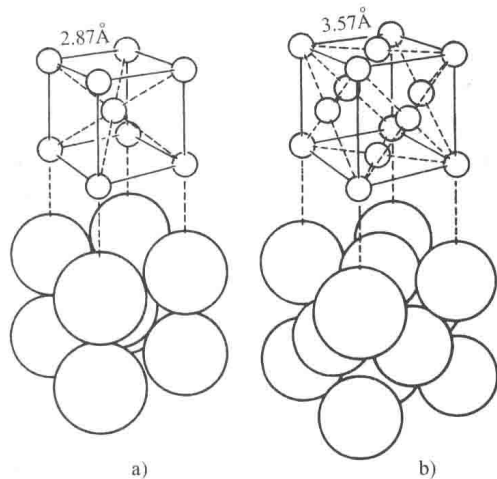


图 1-1 铁原子的晶体结构和晶格间距

a) 体心立方晶体结构（铁素体）

b) 面心立方晶体结构（奥氏体）

注：1Å = 10⁻¹⁰ m。

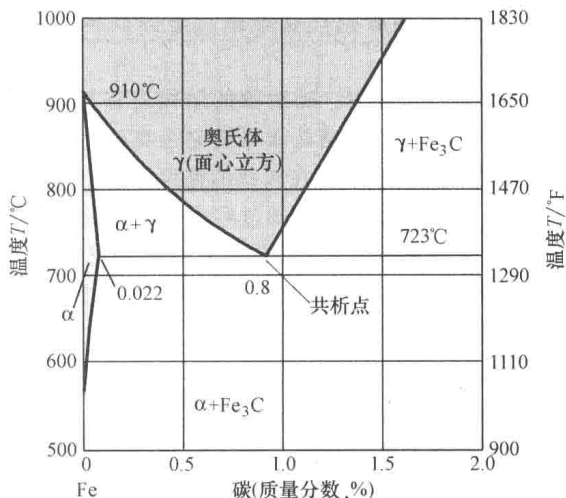


图 1-2 碳钢的部分 Fe-Fe₃C 相图

（面心立方晶体结构）

当奥氏体或铁素体中的碳含量超过其极限溶解度时，有些碳原子将无法被容纳在铁原子之间的间隙位置，多余的碳原子将相互结合形成石墨，或者更典型的是，钢中的多余碳原子将形成被称为渗碳体 (Fe_3C) 或 θ -碳化物的铁碳化合物。渗碳体具有斜方晶体结构，其中可以容纳更多的碳原子。在这种铁碳化合物中，每个碳原子对应 3 个铁原子，所以碳的摩尔分数是 25%。相应地，渗碳体中碳的质量分数是 6.7%。

与铁素体的体心立方 (bcc) 结构和奥氏体的面心立方 (fcc) 结构相比，渗碳体的斜方晶体结构要稍复杂一些。渗碳体也不是完全稳定的，因为随着时间的推移，它最终分解出的单质碳为石墨。但当碳含量超过其在铁中的极限溶解度时，所产生的渗碳体被认为是一种亚稳定相，它是足够稳定的，并且可以通过热处理工艺调整渗碳体的形态和分布。与奥氏体和铁素体相比，渗碳体化合物具有较高的强度和较低的延展性，通过调整其形态和分布，可以以不同的方式对钢进行强化、成形和切断。

渗碳体的硬度很高，根据铁原子置换元素的不同，其硬度范围为 800~1400HV。热处理可以改变钢的显微组织中硬质渗碳体颗粒的数量、形状和分布。例如，当铁素体相转变为奥氏体相时，硬质渗碳体相将分解成单一的铁-碳相。这一过程称为奥氏体化，在此期间渗碳体将被溶解。这是因为碳在奥氏体中更易溶解，在 1150℃ (2100°F) 的温度下，其极限溶解度约为 2%，这比碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的极限溶解度大 2 个数量级。因此，奥氏体化温度经常是生成一种单相固溶体的开始点。然后，通过在奥氏体区进行冷却，根据强度要求控制铁素体和渗碳体的形成，以使普通碳钢热在处理后的能够获得广泛的性能。

在热处理过程中，碳对铁的结构还有其他两个重要影响。第一个影响是碳可使完全奥氏体化温度降低 (图 1-2)，从而可在较低的温度下使渗碳体完全溶解，并且在随后的冷却过程中导致碳化物的形成。第二个影响是当奥氏体钢迅速冷却 (淬火) 时，随着含碳量的不同，会产生不同的相变机理。在奥氏体向铁素体快速转变期间，过量的碳原子没有足够的时间进行扩散，从而形成了体心立方的铁素体和渗碳体的混合物。因此，一些 (或全部) 碳原子被铁素体晶格捕获，形成了含碳量刚好超过碳在铁素体中的极限溶解度 (0.02%) 的化学成分。这就导致了晶格畸变，以至于变形的体心立方晶格迅速转变成一种称为马氏体的新亚稳相。马氏体在铁碳相图中不作为一个相出现，因为它是通过快速冷却

产生的一个亚稳 (非平衡) 相。

马氏体的晶胞为体心四方 (bct) 的晶体结构，除了其中一条边 (称为 c 轴) 比其他两条边 (轴) 长以外，其结构类似于 bcc 晶胞 (图 1-3)。变形的体心四方 (bct) 结构处于一种过饱和状态，它容纳了过量的碳。体心四方结构占有的原子体积也比铁素体和奥氏体占有的原子体积大，表 1-1 中列出了不同显微组织的成分与含碳量的关系。因此，马氏体的密度比铁素体的密度小 (奥氏体的密度比铁素体的密度大)。由此导致的体积膨胀使马氏体具有更高的硬度，这是通过热处理对钢进行强化的基础。

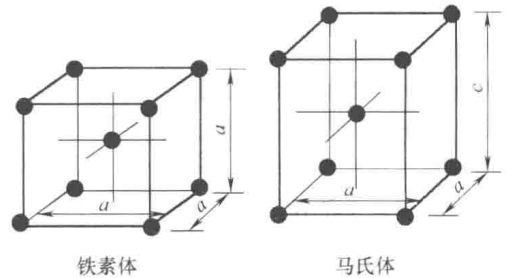


图 1-3 铁素体 (体心立方) 和马氏体 (体心四方) 的结构

表 1-1 铁基合金中显微组织的原子体积

相	表观原子体积/ \AA^3
铁素体	11.789
渗碳体	12.769
铁素体+碳化物	$11.786 + 0.163w(\text{C})$
珠光体	11.916
奥氏体	$11.401 + 0.329w(\text{C})$
马氏体	$11.789 + 0.370w(\text{C})$

1.1.2 铁的晶体结构

平衡条件下，固体中的原子通常排列成唯一的晶体结构，但有些元素和化合物具有多晶型性，即随着温度和压力的变化，它们会由一种晶体结构转变为另一种晶体结构，每种晶体结构都是一种独立的固态相。热激活了原子扩散运动，所以加热会使原子重新排列成不同类型的晶格结构。

晶体结构的固态转变称为同素异构转变 (以另一种形式存在)。例如，铁和碳有许多同素异构体。碳可以以金刚石、碳烟、石墨的形式存在，以及以最近发现的富勒烯的形式存在。然而，碳的同素异构现象并不是导致铁碳合金具有不同结构的重要因素。相比之下，铁的同素异构性才是钢的热处理重要基础。铁是一种同素异构元素，这种元素的结构在转变温度 (临界温度) 下将发生改变 (图 1-4)。

在加热或冷却条件下，铁 (或其他材料) 从一种原子排列形式转变为另一种原子排列的过程称为

相变。图 1-4 所示为在非常缓慢（近似平衡）地加热或冷却的过程中，纯铁的相变情况。铁在相变期间，加热（或冷却）温度保持不变，直至完全转变为止。这就是在熔化或凝固过程中纯金属的相变温度平台相同。铁发生相变时的临界温度用字母“A”表示，它来自法语单词 arrêter。字母“A”后接字母“c”或“r”，分别表示加热或冷却。加热使用的字母“c”是法语单词 chauffant 的首字母，意思是加热。如果是冷却状态，则临界温度用“Ar”表示，其中“r”是法语单词 refroidissant 的首字母，意思是冷却。

在熔点温度 1540℃（2800°F）以下，当固态铁发生相变时，有三个温度平台。首先分析液态铁从

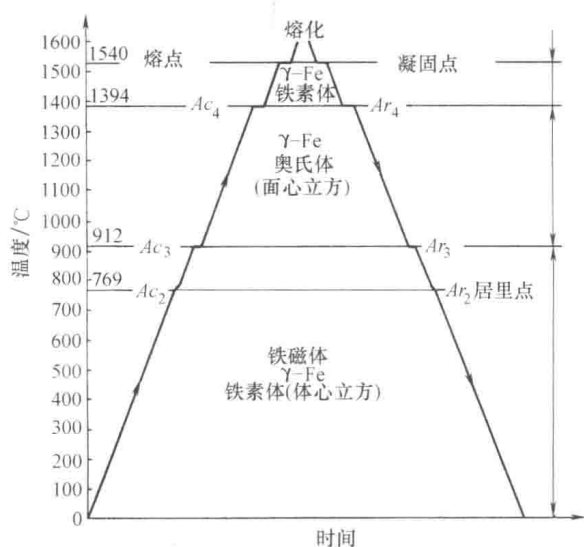


图 1-4 纯铁的平衡转变温度

熔点温度 1540℃（2800°F）冷却凝固的过程。开始凝固时，温度没有进一步下降，直到液态铁完全转变成固态铁，这种形态的铁称为 δ -Fe 或 δ -铁素体。铁素体具有体心立方的晶体结构， δ -Fe 是铁的高温体心立方体相。在完全凝固之后，温度匀速下降，直到达到 1394℃（2541°F）。这个温度标志着体心立方的 δ -Fe 转变为面心立方晶体结构的开始，该面心立方晶体称为奥氏体或 γ -Fe。转变时温度保持不变，直到转变完成为止，即直到所有的铁都具有奥氏体（面心立方）结构为止。

γ -Fe (fcc) 继续以匀速进一步冷却，直到温度达到 912℃（1674°F）。此时， γ -Fe 开始转换成一种非磁性体心立方的晶体结构，912℃ 就是本阶段的转变温度。在冷却过程中，温度保持稳定，直到所有的铁原子完全转换为体心立方的晶体结构。铁的这种低温体心立方晶体结构的相称为 α -Fe 或 α -铁素体。最后，在 769℃（1416°F）的温度处出现类似的冷却平台，这是非磁性的 α -Fe 变成一种磁性 α -Fe 的转变温度，即居里温度。在低于居里温度的铁磁材料中，相邻原子的磁矩是相互平行的，所有磁矩均沿一个方向排列。

这种可以进行得非常慢的相变称为平衡相变，这意味着在一个给定的相变过程中，金属要达到平衡状态需要足够长的时间。为完成一种平衡转变，必须添加或者释放足够的能量，这种能量称为潜热。纯铁转变温度下的相变潜热试验值见表 1-2。就居里温度（ T_C ）而言，使铁的磁偶极子失去方向性所需的额外能量用比热容急剧增加的图形（图 1-5）来表示。

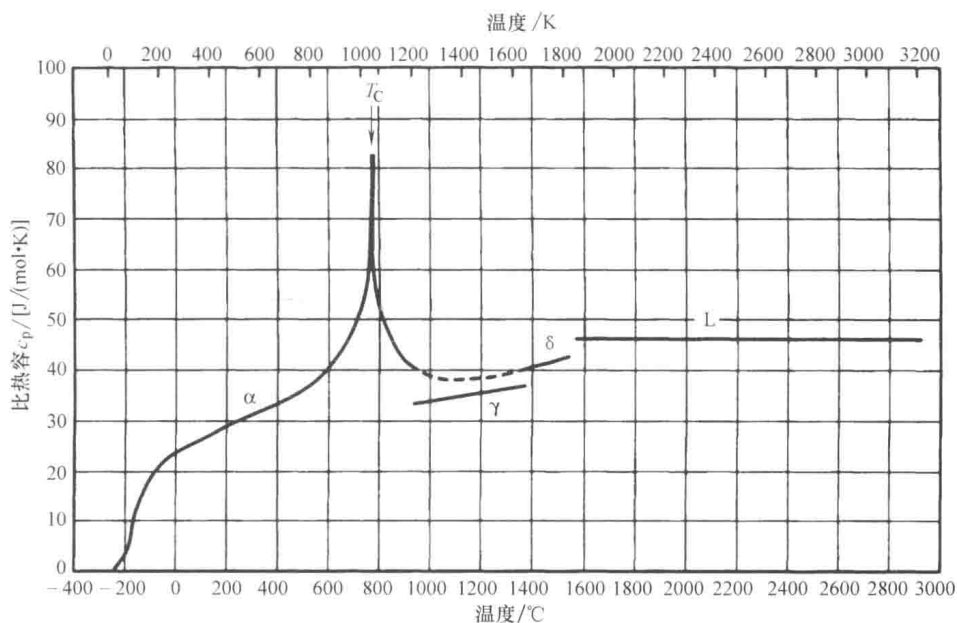


图 1-5 居里温度下铁的比热容（0~3200K）