

美国金属学会 热处理手册

钢铁材料的热处理

ASM Handbook

Volume 4D Heat Treating of Irons and Steels

D 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)

叶卫平 王天国 沈培智

等 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



美国金属学会热处理手册

D 卷 钢铁材料的热处理

ASM Handbook

Volume 4D Heat Treating of Irons and Steels

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)

叶卫平 王天国 沈培智 等译



机械工业出版社

本书主要介绍了各类典型钢铁材料的热处理工艺,深入探讨了钢铁材料的热处理与性能的关系,详细介绍了整体淬火钢和表面强化钢的选材过程与步骤。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,为热处理工程技术人员和产品设计人员提供了大量的实用技术资料。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 4D Heat Treating of Irons and Steels/ Edited by Jon L. Dossett and George E. Totten/ ISBN: 978-1-62708-066-8

Copyright © 2014 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:01-2015-1922 号。

图书在版编目(CIP)数据

美国金属学会热处理手册.D 卷,钢铁材料的热处理/(美)乔恩·L.多塞特(Jon L. Dossett), (美)乔治·E.陶敦(George E. Totten)主编;叶卫平等译. —北京:机械工业出版社,2018.1

书名原文:ASM Handbook, Volume 4D: Heat Treating of Irons and Steels

ISBN 978-7-111-58736-1

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第310722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 臧弋心

责任校对:张晓蓉 张 征 封面设计:马精明

责任印制:常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2018年7月第1版第1次印刷

184mm×260mm·44印张·2插页·1511千字

标准书号:ISBN 978-7-111-58736-1

定价:239.00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

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

策划编辑:010-88379734

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

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, 美国金属学会陆续更新出版了《金属手册》(ASM Handbook), 该手册共计 23 分册 (34 卷), 热处理手册是其中第 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《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, 以前出版的该套手册已难以完全容纳和满足当今热处理领域的数据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有色金属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《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 D 卷《钢铁材料的热处理》, 主要介绍了典型钢铁材料的热处理工艺。

本书共 6 章, 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。本书深入探讨了钢铁材料的热处理与性能的关系, 详细介绍了整体淬火钢和表面强化钢的选材过程与步骤。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, 为热处理工程技术人员和产品设计人员提供了大量的实用技术资料。本书反映了当代热处理技术水平, 翻译该书对推动我国金属热处理工艺的科学研究, 技术改造, 促进和提高产品零件的热处理质量具有较大的作用, 可为产品设计者和热处理工程师借鉴和参考。

作为一名已从事金属材料热处理教学和科研 30 余年的专业人员, 可以说《金属手册》(ASM Handbook) 的热处理分册伴随着译者的专业成长。能承担 2014 年版的热处理分册 D 卷《钢铁材料的热处理》的翻译工作, 译者感到非常荣幸, 也倍感责任重大。该书的翻译工作量浩大繁重, 好在有相关互联网词典, 大大提高了工作效率。在翻译过程中, 译者也努力学习更新专业知识, 力求翻译做到“正确、专业、易懂”。

在家人的理解和默默支持下, 经过一年多的不懈努力, 翻译工作得以顺利完成。本书主要由译者本人翻译和统稿, 王天国, 沈培智翻译了第 2 章中的部分小节。参加翻译工作的其他人员还有孙伟、闵捷、任坤、耿泳、罗干、杨帆、李威、陈鹏。

由于本书篇幅大, 且内容涉及热处理及诸多相关领域, 加之译者水平有限, 错误之处在所难免, 恳请各位读者斧正, 在翻译过程中, 还发现了原书中存在的部分问题, 也进行了注解和更正。

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!

叶卫平

yeweip@whut.edu.cn



序



美国金属手册 (ASM Handbook) 第 4 分册热处理部分共有 5 卷。本书为 D 卷《钢铁材料的热处理》，该卷主要介绍典型钢铁材料的热处理工艺。A 卷介绍了钢的热处理基础和热处理工艺流程，B 卷介绍了钢的热处理炉设备与控制，C 卷介绍了钢的感应加热热处理，E 卷介绍了有色金属材料的热处理。

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。本书主要介绍了各类典型钢材和铸铁的热处理与性能方面问题，详细介绍了整体直接淬火钢和表面强化钢的选材过程与步骤，为产品设计人员和热处理工作人员提供了大量的实用技术资料。

我们非常感谢主动自愿参与该书编写工作的编辑、作者和审阅人，是他们投入了大量心血和不懈的努力才使得该书得以出版。书中真实可信的研究成果反映出了热处理学会 (Heat Treating Society) 和美国金属学会 (ASM International) 一直坚持的承诺——致力于为解决生产实际中的问题提供有用的工具，此外，还要特别感激该卷主编 Jon L. Dossett 和 George E. Totten。

热处理学会主席 Roger A. Jones

美国金属学会主席 C. Ravi Ravindran

美国金属学会常务董事 Thomas S. Passek

前言



回顾 1991 年美国金属学会出版的美国金属手册 (ASM Handbook) 第 4 分册热处理部分, 可以清楚地认识到, 当时该手册仅一卷, 现已完全无法容纳和满足当今热处理领域的不断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有色金属材料热处理数据手册显得尤为重要和刻不容缓。此外, 考虑到美国金属学会已收集和出版的大量有关钢铁材料热处理的参考资料, 仅钢铁材料热处理原理和工艺流程的内容就需要一整册篇幅, 才能将其囊括其中。在还未介绍特殊工艺过程和典型钢铁材料热处理和性能前, 仅热处理基础及工艺流程控制、热处理炉和感应加热等重要内容, 也各需要 1 册的篇幅才能确保将其涵盖。

通过艰苦卓绝的努力, 在这次出版的金属手册 (ASM Handbook) 的热处理分册中, 包括了 D 卷《钢铁材料的热处理》在内的 5 卷。

本手册详细介绍了不同类型钢铁材料的热处理和性能, 介绍了热处理工艺对不同合金钢工艺过程选择和性能的影响。新出版的手册不仅在内容上进行了更新, 而且在内容上也进行了较大扩充。例如, 增加了工业中齿轮钢和轴承钢热处理的重要内容, 增加了含硼钢、含铜钢和锻钢的热处理, 扩充了作为主体钢铁材料的碳钢和低合金钢的热处理。此外, 工具钢和不锈钢的热处理内容也进行了深度的扩充。虽然该手册进行了大量更新, 但我们还得承认, 本书不可避免地会存在一些缺点和错误。

在此, 我们要由衷地感谢所有为该书出版付出辛勤劳动的编辑、作者、审阅人和美国金属学会的工作人员。此外, 我们还要特别感谢自始至终在整个出版工作中起到至关重要作用的编辑们, 他们是:

- 感应热处理设备公司 (美) (Inductoheat Inc. INDUCTOHEAT), Valery Rudnev.
- 阿贾克斯托科感应设备有限公司 (Ajax Tocco Magnethermic Inc.), Ronald R. Akers.
- 汉诺威莱布尼兹大学 (Leibniz Universität of Hannover), Egbert Baake.
- 美国金属学会 (ASM International), Vicki Burt.
- 鲍迪克技术有限公司 (Bodycote), Madhu Chatterjee.
- 新莱昂州圣尼古拉斯·德洛斯加尔萨大学 (Universidad Autónoma de Nuevo León), Rafael Colás.
- 墨尔本皇家理工学院 (RMIT University), Edward (Derry) Doyle.
- 变形控制技术有限公司 (FASM, Deformation Control Technology, Inc.), ASM 会员 B. Lynn Ferguson.
- 德纳有限公司 (Dana Corporation), Gregory A. Fett.
- 移动和卫星通信技术研究所 (顾问) (IMST Institute (Consultant)), Kiyoshi Funatani.
- 迪尔公司 (美) (Deere & Company), Robert J. Gaster.
- 迪肯大学 (澳), 前沿材料学院 (Institute for Frontier Materials, Deakin University), Peter Hodgson.
- 不来梅大学材料科学研究所 (德) (IWT Bremen), Franz Hoffmann.
- 卡尔斯鲁厄理工学院 (德) (Karlsruhe Institute of Technology), Jürgen Hoffmeister.
- 耐世特汽车公司 (Nexteer Automotive Corp.), Ron Hoppe.

- 美国金属学会 (ASM International), Steve Lampman.
- 材料科学基础研究所 (德) [Stiftung Institut für Werkstofftechnik (Foundation Institute of Materials Science)], Thomas Lübken.
- 好富顿国际公司 (Houghton International), D. Scott MacKenzie.
- 科罗拉多矿业大学 (Colorado School of Mines), David Matlock.
- 威廉尔金属公司 (Villares Metals SA), Rafael A. Mesquita.
- 汉诺威大学 (Leibniz Universität of Hannover), Bernard Nacke.
- 伊利诺伊斯理工大学 (Illinois Institute of Technology), Philip Nash.
- 美国金属学会 (ASM International), Amy Nolan.
- 阿贾克斯托科 股份有限公司 (Ajax Tocco Incorporated), George Pfaffmann.
- 铁姆肯公司 (The Timken Company), Michael J. Schneider.
- 上奥地利应用科学大学 (University of Applied Sciences, Upper Austria-Wels), Reinhold E. Schneider.
- 卡尔斯鲁厄理工学院 (Karlsruhe Institute of Technology), Volker Schulze.
- 伍斯特理工学院 (FASM, Worcester Polytechnic Institute), ASM 会员 Richard Sisson.
- 科罗拉多矿业大学 (Colorado School of Mines) Chester J. Van Tyne.
- 凯特林大学 (退休) (Kettering University (retired)), Charles V. White.
- 铁热股份有限公司 (Ferrotherm Incorporated), Stan Zinn.

Jon L. Dossett
Dr. 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公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）的公制计量单位为主，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公制计量单位。在大多数情况下，书中文字和表格中的工程数据以 SI 为基础的公制计量单位给出，并在相应的括号里给出以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（磅每平方英寸，psi）来表示。为了节省篇幅，较大的磅每平方英寸（psi）数值用千磅每平方英寸（ksi）来表示（1ksi=1000psi），吨（ $\text{kg}\times 10^3$ ）有时转换为兆克来表示（Mg），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采用了英寸（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特定的计量单位体系，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效单位。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（每单位体积质量）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，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 概论	1
1.1 钢的选材和热处理设计问题	1
1.1.1 简介	1
1.1.2 热处理零件的钢种选择	4
1.1.3 残余应力	6
1.1.4 变形	9
1.1.5 尺寸变形计算	12
1.1.6 变形控制技术	15
1.1.7 脱碳	17
1.1.8 加热中的问题	19
1.1.9 热处理裂纹	20
1.1.10 与材料相关的问题	22
1.1.11 与设计相关的问题	23
1.1.12 热处理设计实例	24
参考文献	29
1.2 淬火钢的选择	30
1.2.1 合金化	31
1.2.2 合金的选择	35
1.2.3 淬火硬化层深度	39
1.2.4 拉伸力学性能	43
1.2.5 硬度和淬透性与耐磨性	45
1.3 钢的淬火开裂倾向模拟	48
1.3.1 淬火开裂的早期研究	48
1.3.2 淬火开裂的分析和模拟	54
1.3.3 淬火开裂模拟实例	57
1.3.4 使用模拟预防淬火开裂	61
参考文献	62
1.4 表面硬化钢的选择	64
1.4.1 渗碳钢	65
1.4.2 碳氮共渗钢	71
1.4.3 渗氮钢	72
1.4.4 感应或火焰淬火钢	73
参考文献	74
1.5 渗碳钢的选择	75
1.5.1 渗碳钢的淬透性	75
1.5.2 淬火冷却介质	76

1.5.3 渗碳应力分析	76
1.5.4 渗碳层深度和类型	77
1.5.5 热处理工艺	79
1.5.6 渗碳齿轮钢	81
参考文献	85
1.6 渗碳钢的微观组织和性能	85
1.6.1 渗碳浓度和硬度梯度	86
1.6.2 马氏体和残留奥氏体	86
1.6.3 合金元素的影响	88
1.6.4 奥氏体晶间断裂	89
1.6.5 渗碳钢中的微裂纹	91
1.6.6 过多的残留奥氏体和碳化物	91
1.6.7 残余应力	93
1.6.8 表面和内氧化	94
1.6.9 疲劳机制	95
参考文献	96
1.7 渗氮层组织和性能	99
1.7.1 渗氮层	99
1.7.2 渗氮钢类型	99
1.7.3 渗氮工艺及其对组织和性能的影响	101
1.7.4 展望	106
参考文献	106

第 2 章 碳钢和低合金钢的热处理	108
2.1 碳钢的热处理	108
2.1.1 统一编号系统 (UNS)	110
2.1.2 热处理工艺	112
2.1.3 碳钢的热处理分类	115
2.1.4 组织转变图	116
2.1.5 碳钢的淬透性	122
2.1.6 回火	127
2.1.7 热处理指导	128
2.1.8 易切削钢	132
2.1.9 铸造碳钢	133
参考文献	135
选择阅读	135
2.2 低合金钢的热处理	136
2.2.1 低合金钢的分类	136
2.2.2 合金元素的作用	145
2.2.3 锰系低合金钢	156

2.2.4 钼系低合金钢	161	2.7.4 整体淬火	266
2.2.5 铬-钼系低合金钢	168	2.7.5 马氏体热处理	266
2.2.6 镍-铬-钼系低合金钢	175	2.7.6 热处理变形控制	266
2.2.7 镍-钼系低合金钢	187	2.7.7 整体淬火轴承钢尺寸的稳定性	267
2.2.8 铬系低合金钢	192	2.7.8 整体淬火轴承钢晶粒尺寸	268
2.2.9 铬-钒系低合金钢	199	2.7.9 影响整体淬火轴承钢的淬火 问题	268
2.2.10 硅-锰系低合金钢	200	2.7.10 52100 轴承钢系列中的高淬 透性钢	270
参考文献	202	2.7.11 贝氏体热处理（贝氏体等温 淬火）	270
2.3 空冷淬火高强度结构钢的热处理	202	2.7.12 特殊用途整体淬火轴承钢	272
2.3.1 空冷淬火钢的热处理原理	203	2.7.13 复合强化	277
2.3.2 空冷淬火高强度结构钢的热处理 实践	204	2.7.14 渗碳	277
2.3.3 空冷淬火马氏体不锈钢的热处理 实践	211	2.7.15 专用渗碳钢	279
参考文献	215	2.7.16 专用钢的渗碳和渗氮	281
2.4 硼钢的热处理	215	2.7.17 碳氮共渗	283
2.4.1 硼钢的淬透性	215	2.7.18 感应淬火	285
2.4.2 硼钢的热处理工艺	217	参考文献	286
2.4.3 硼钢热处理模拟	223	2.8 锻造直接热处理工艺与技术	288
2.4.4 硼钢的应用	224	2.8.1 锻热淬火和直接热处理的定义和 用途	288
参考文献	226	2.8.2 直接热处理的微合金钢	291
2.5 铜析出强化钢的热处理	226	2.8.3 控制轧制技术生产细晶组织棒材和 线材	294
2.5.1 概述	227	2.8.4 碳含量对微合金直接热处理（DHT） 钢韧性的影响	294
2.5.2 应用	227	2.8.5 微合金钢生产典型汽车零部件的 应用	297
2.5.3 美国材料和试验协会标准	227	2.8.6 连杆	298
2.5.4 铜析出强化钢的相组织	229	2.8.7 锻热直接热处理设备	299
2.5.5 铜析出强化钢的成分和合金元素 作用	230	参考文献	300
2.5.6 形变热处理	231	2.9 粉末冶金钢的热处理	301
2.5.7 热处理工艺	231	2.9.1 粉末冶金工艺概述	302
2.5.8 热处理工艺、微观组织和力学性能 之间的关系	239	2.9.2 粉末冶金钢的牌号命名	305
致谢	241	2.9.3 粉末冶金钢热处理简介	307
参考文献	241	2.9.4 孔隙率对粉末冶金钢热处理的 影响	307
2.6 钢制齿轮的热处理	245	2.9.5 合金元素含量对粉末冶金钢淬透性 的影响	310
2.6.1 齿轮热处理的概述	246	2.9.6 原料粉对均质性的影响	312
2.6.2 大型齿轮的热处理	257	2.9.7 淬火和回火	313
2.6.3 工艺过程建模与设计优化	258	2.9.8 烧结硬化	316
2.6.4 综合计算材料工程和设计优化	261	2.9.9 温压成形	317
参考文献	262	2.9.10 粉末锻造	317
2.7 轴承的热处理	264	2.9.11 表面硬化	318
2.7.1 轴承类型	264		
2.7.2 轴承的设计参数、性能特点和 材料要求	265		
2.7.3 金相组织要求和热处理工艺 选择	265		

2.9.12 渗氮	319	3.6 冷加工工具钢的热处理——中合金空气 淬硬钢、高碳高铬钢和高钒粉末 冶金钢	383
2.9.13 蒸汽处理	320	致谢	391
2.9.14 发黑处理	320	参考文献	391
2.9.15 感应淬火	321	3.7 热加工工具钢的热处理	392
致谢	322	3.7.1 低合金和 H 系列热加工工具钢 热处理	396
参考文献	322	3.7.2 热加工工具的热处理实例	404
第 3 章 工具钢的热处理	324	3.7.3 NADCA 模具钢和热处理推荐 规范	405
3.1 工具钢热处理简介	324	致谢	406
3.1.1 工具钢的分类	324	参考文献	406
3.1.2 工具钢的生产	330	3.8 高速工具钢的热处理	407
3.1.3 工具钢的热处理	330	3.8.1 推荐的热处理工艺	412
参考文献	337	3.8.2 专用机械工具淬火	419
3.2 工具钢热处理过程与设备	337	致谢	420
3.2.1 工具钢奥氏体化、淬火和回火的 设备	337	参考文献	420
3.2.2 工具钢渗氮和气体氮碳共渗 设备	347	3.9 塑料模具钢和耐腐蚀工具钢的 热处理	420
参考文献	350	3.9.1 塑料模具钢	420
扩展阅读	350	3.9.2 推荐的热处理工艺	421
3.3 工具钢的变形	351	3.9.3 耐腐蚀工具钢	421
3.3.1 变形的性质和原因	351	3.9.4 推荐的热处理工艺	423
3.3.2 工艺对变形的影响	354	致谢	425
3.3.3 材料对变形的影响	355	参考文献	425
3.3.4 变形和残余应力预测的数值 模拟	358	第 4 章 不锈钢和其他特殊钢的 热处理	427
致谢	363	4.1 铁素体不锈钢的热处理	427
参考文献	363	4.1.1 铁素体不锈钢的冶金	427
扩展阅读	363	4.1.2 合金类型	431
3.4 工具钢变形的控制	364	4.1.3 退火	431
3.4.1 设计	364	4.1.4 稳定化处理	432
3.4.2 化学成分	365	4.1.5 铸造合金	433
3.4.3 原材料状态	366	4.1.6 性能	433
3.4.4 机加工过程	366	致谢	434
3.4.5 主要热处理工序	367	参考文献	434
3.4.6 稳定化处理	369	4.2 奥氏体不锈钢和双相不锈钢的 热处理	434
3.4.7 工业实践	372	4.2.1 不锈钢的合金化和金相组织	434
参考文献	372	4.2.2 敏化问题	438
3.5 冷加工工具钢的热处理——水淬和 油淬碳素、低合金工具钢	373	4.2.3 中间相 (σ 、 χ 和 Laves 相)	439
3.5.1 水淬工具钢	373	4.2.4 均匀化处理	439
3.5.2 耐冲击工具钢	376	4.2.5 退火	439
3.5.3 油淬冷加工工具钢	378	4.2.6 光亮退火	445
3.5.4 低合金特殊用途工具钢	381	4.2.7 消除应力	445
3.5.5 碳-钨系特殊用途工具钢	382		
致谢	383		
参考文献	383		

4.2.8 双相不锈钢	448	(背景和竞争工艺)	536
致谢	451	4.7.3 工艺过程	536
参考文献	451	4.7.4 低温渗碳层的组织	538
4.3 马氏体不锈钢的热处理	451	4.7.5 低温渗碳层的性能	540
4.3.1 钢的合金化	452	致谢	544
4.3.2 热加工的组织	453	参考文献	544
4.3.3 热处理前准备	454	扩展阅读	545
4.3.4 退火	456	4.8 高镍-钴合金钢的热处理	546
4.3.5 淬火	456	4.8.1 9Ni-4Co (HP 9-4) 合金	547
4.3.6 消除应力	459	4.8.2 AF 1410 合金	548
4.3.7 回火	459	4.8.3 AerMet 合金	551
4.3.8 铸造合金	465	参考文献	554
致谢	469	4.9 马氏体时效钢的热处理	554
参考文献	469	4.9.1 简介	554
4.4 析出硬化型不锈钢和铁基超合金的 热处理	469	4.9.2 合金的发展	555
4.4.1 析出硬化过程	471	4.9.3 马氏体形成	556
4.4.2 热处理设备	471	4.9.4 马氏体的时效	560
4.4.3 保护气氛	471	4.9.5 固溶退火	563
4.4.4 有关表面的问题	472	4.9.6 循环热处理细化晶粒	565
4.4.5 常规热处理过程	473	4.9.7 时效强化	565
4.4.6 马氏体析出硬化不锈钢	477	4.9.8 相变诱导塑性马氏体时效方法	568
4.4.7 半奥氏体型析出硬化不锈钢	482	4.9.9 其他处理	569
4.4.8 奥氏体析出硬化不锈钢 (A-286) ...	487	参考文献	569
4.4.9 铸造析出硬化不锈钢	487	第5章 铸铁的热处理	571
4.4.10 Fe-Ni 析出硬化超合金	489	5.1 铸铁热处理简介	571
致谢	497	5.1.1 铸铁类型	572
参考文献	498	5.1.2 临界温度范围	573
4.5 不锈钢渗氮	498	5.1.3 通常考虑	573
4.5.1 不锈钢	498	5.1.4 热处理工艺	574
4.5.2 S 相	500	5.1.5 温度控制	574
4.5.3 渗氮处理的热化学	510	5.1.6 气氛控制	575
4.5.4 未来发展方向	521	5.1.7 消除应力	575
参考文献	521	5.1.8 退火	579
4.6 不锈钢低温表面强化	522	5.1.9 正火	579
4.6.1 不锈钢低温表面强化历史回顾	522	5.1.10 整体淬火	579
4.6.2 膨胀奥氏体的物理冶金	523	5.1.11 表面强化	580
4.6.3 奥氏体不锈钢气体低温表面 强化	526	5.1.12 硬度检测	582
4.6.4 其他不锈钢的低温渗氮和氮碳 共渗	529	致谢	582
4.6.5 工业应用	531	参考文献	582
参考文献	533	5.2 灰铸铁热处理	582
4.7 奥氏体不锈钢的低温渗碳	535	5.2.1 概述	582
4.7.1 概述	535	5.2.2 灰铸铁的分类	583
4.7.2 奥氏体不锈钢表面强化历史与现状		5.2.3 消除应力	583
		5.2.4 消除应力实例	586
		5.2.5 退火	586
		5.2.6 正火	588

5.2.7 相变强化	589
5.2.8 淬火加回火	594
5.2.9 贝氏体等温淬火	596
5.2.10 马氏体分级淬火	596
5.2.11 火焰淬火	598
5.2.12 感应淬火	600
5.2.13 其他表面强化方法	601
致谢	601
参考文献	601
5.3 球墨铸铁热处理与性能	601
5.3.1 球墨铸铁热处理标准	601
5.3.2 基本特点	602
5.3.3 球墨铸铁的奥氏体化	604
5.3.4 球墨铸铁的退火	606
5.3.5 球墨铸铁的淬透性	607
5.3.6 球墨铸铁的正火	608
5.3.7 球墨铸铁的淬火和回火	609
5.3.8 球墨铸铁的马氏体分级淬火	610
5.3.9 球墨铸铁的贝氏体等温淬火	610
5.3.10 球墨铸铁的表面强化	613
5.3.11 球墨铸铁的消除应力处理	614
5.3.12 热处理对疲劳强度的影响	614
致谢	615
参考文献	615
5.4 可锻铸铁和蠕墨铸铁热处理	616
5.4.1 蠕墨铸铁	617
5.4.2 可锻铸铁	617

参考文献	621
5.5 高合金白口铸铁热处理	621
5.5.1 合金类型和性能	622
5.5.2 镍-铬白口铸铁	622
5.5.3 高铬白口铸铁	625
参考文献	633
扩展阅读	633
5.6 高合金石墨铸铁的热处理	633
5.6.1 镍合金奥氏体石墨铸铁	633
5.6.2 奥氏体球墨铸铁的热处理	636
5.6.3 高硅耐高温铸铁	636
5.6.4 耐蚀高硅铸铁	637
致谢	638
参考文献	638
第6章 参考资料	639
6.1 铁碳相图	639
6.2 钢的奥氏体化和典型热处理温度	641
参考文献	647
6.3 钢的回火色	647
参考文献	648
6.4 合金钢的淬透性带	648
参考文献	659
6.5 SAE 与其他国家的钢牌号对照表	659
6.6 其他国家与 AISI 的钢牌号对照表	673
6.7 钢的硬度转换	678
6.8 碳钢和低合金钢的物理性能	686

第1章

概论



1.1 钢的选材和热处理设计问题

1.1.1 简介

成功的热处理取决于以下因素：

- 1) 零件设计正确。
- 2) 合适的材料。
- 3) 在加工能力范围内的工程要求。
- 4) 适当的加热设备。
- 5) 正确的淬火工艺。
- 6) 有责任心的员工。
- 7) 经验。

并不是所有这些要求总是能得到满足，当存在

某些不足（或者存在疏忽或风险）时，问题就可能发生。发生的问题通常归因于以下方面：

- 1) 错误的零件设计。
- 2) 材料不合适。
- 3) 工程需求难度大。
- 4) 不正确的加热和其他操作。
- 5) 不均匀淬火。

图 1-1 所示为钢的热处理开裂或过度变形因素图，表 1-1 中列出了与其相关的细节。畸变和开裂是淬火硬化过程中的热应力和相变应力产生的主要问题，在本章中重点介绍了调质钢的变形和开裂。成功的淬火硬化不仅取决于热处理过程，还与合理的钢材选择、零件设计及加工过程要求密切相关。

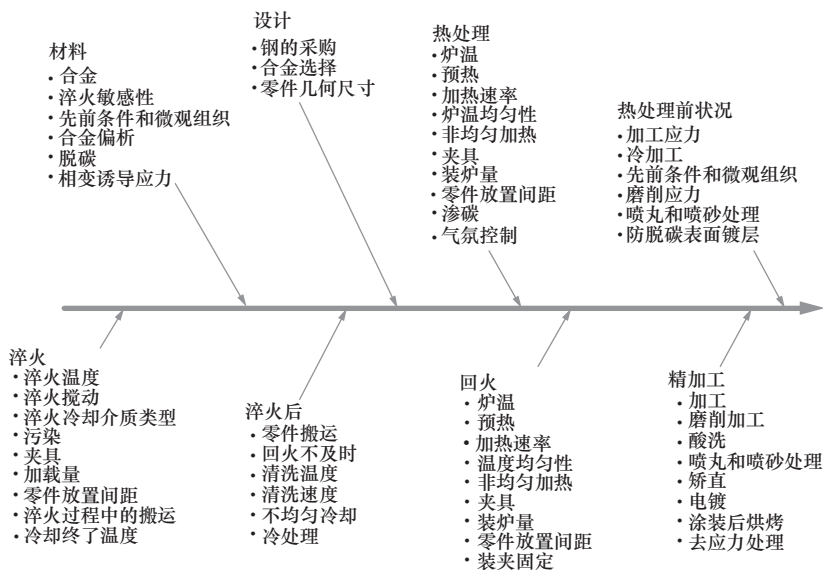


图 1-1 钢的热处理开裂或过度变形因素图

评定成功热处理的另一个重要方面是通过工艺评定和过程控制，来确保工件在热处理中进行适当的加热和冷却。必须采用合适大小与类型的热处理炉，每一操作步骤的温度必须严格控制在规定的范围内，以防止过热或非均匀加热/冷却。对热处理进行全面控制的唯一途径是，熟知每一操作步骤，并

适当对工艺过程进行记录。如没有对工艺过程进行很好的如实记录，确定和消除热处理缺陷的根本原因是极其困难的。因此，大多数制造企业都需要有统计质量控制和统计过程控制程序，对材料及其制造工艺进行记录并分析。其中一些监测控制程序也集成到了现代热处理设备中。

表 1-1 钢的热处理变形或开裂原因及纠正措施

材料因素 - 合金 - 当马氏体转变温度提高,畸变和开裂倾向降低 - 奥氏体晶粒尺寸与淬火开裂之间的相关性不大 - 淬火敏感性 - 钢中碳当量(C_{eq})提高,变形和开裂增加 - 如果 $C_{eq} > 0.52\%$, 钢的裂纹敏感性增大 $C_{eq} = w(C) + \frac{w(Mn)}{5} + \frac{w(Mo)}{5} + \frac{w(Cr)}{10} + \frac{w(Ni)}{10}$ - 先前条件和微观组织 - 合金偏析 - 引起局部硬度和组织不均匀 - 增加开裂倾向 - 脱碳 - 表面贫碳 - 抗拉强度低,开裂倾向增加 - 相变诱导应力 - 奥氏体转变马氏体引起体积变化 - 增加体积增加了畸变和开裂倾向 - 只有通过控制碳含量进行控制	- 局部应力 - 如果磨削不当,局部产生马氏体组织 - 表面拉应力,而次表面压应力 - 喷丸和喷砂处理 - 局部表面应力 - 极浅层表面压应力 - 次表面拉应力 - 防脱碳表面镀层 - 表面状况的变化 - 由于辐射系数改变,可能导致非均匀加热
设计 - 钢的采购 - 指定表面状况(最小的脱碳和氧化层) - 在牌号内,许可化学成分范围大 - 性能和变形方面变化 - 合金化学规范(“H”牌号) - 淬透性的规范(在特定末端淬火“J”位置的硬度) - 合金选择 - 某些牌号的钢易于铬的宏观偏析(条带)或锰的宏观偏析(AISI 1340、1536、4140H、4340) - 淬火敏感性 - 当 C_{eq} 增加变形和开裂可能性增加 - 如 $C_{eq} > 0.52\%$, 钢的裂纹敏感性大 - 残留奥氏体数量增加也会增大变形和开裂趋势 - 转变温度(马氏体转变开始温度) - 零件几何尺寸 - 大长径比零件或薄片状零件 - 厚薄截面过渡剧烈变化的不对称形状零件 - 有孔、深键槽和凹槽存在 - 大的曲率半径 - 非均匀加热和冷却	热处理因素 - 炉温 - 增高炉温或零件温度,增大变形 - 可能会导致不均匀的晶粒长大或整体晶粒长大 - 增加淬透性 - 可能引起局部淬透性变化 - 可能引起逆正火或局部偏析和条带 - 预热 - 消除应力 - 缓解前工序应力 - 加工 - 磨削 - 冷加工/形成 - 使体积膨胀均匀一致 - 加热速率 - 与预热类似 - 快速加热消除了工件薄截面处应力而未消除厚截面
热处理前状况 - 加工应力 - 冷加工 - 先前条件和微观组织 - 碳和合金元素的局部偏析 - 某些牌号的钢易于铬的宏观偏析(条带)或锰的宏观偏析(AISI 1340、1536、4140H、4340) - 存在氧化皮或脱碳 - 磨削应力	处应力 - 局部产生温度梯度,导致体积增长不均匀 - 炉温均匀性 - 零件经历均匀温度加热 - 均匀的组织 - 均匀的体积增长 - 非均匀加热 - 之前的残余应力消除不均匀 - 局部产生温度梯度 - 夹具 - 将零件屏蔽热源 - 支撑零件不下垂 - 保证气氛均匀通过工件 - 装炉量 - 高密度装炉量屏蔽了加热零件的热源 - 可能导致过热和非均匀加热 - 零件放置间距 - 在高温下零件软化 - 由于其他零件或夹具,容易造成零件弯曲和表面损坏 - 渗碳 - 具有碳梯度 - 改变局部的碳当量 - 可增大变形或开裂趋势 - 由于相变应力,造成体积变形不一致

(续)

iv. 表面和芯部间马氏体转变开始温度不同 · 气氛控制 淬火因素 · 淬火温度 a. 通过较慢的加热速度降低温度梯度 b. 产生较小的变形 · 淬火搅动 a. 使工件所有表面热传导均匀 b. 使工件间淬火冷却介质有足够的流动性 c. 非均匀搅动使工件间和工件产生温度梯度 d. 如可能造成非均匀性 i. 轧制表面不利于淬火搅动 ii. 必须进行测量或模拟 · 淬火冷却介质类型 a. 盐、水、油、聚合物、气体、空气 b. 淬火速度须在保证性能的前提下,尽可能地慢,以减少变形 · 污染 a. 有机污染(液压油)产生气相 i. 增加了冷却速率产生对流 ii. 增加了冷却速率 iii. 增大了变形和开裂的倾向 b. 氧化 i. 增加了黏度 ii. 淬火速度放缓;可能无法达到性能要求 iii. 增加了废酸洗液 iv. 增加了工件污染 c. 水 i. 增大了汽相的稳定 ii. 最大冷却速率的温度大大降低 iii. 冷却速率在对流区间显著增强 iv. 造成工件质量不一致和促使了变形和开裂 v. 如果含水量超过 0.1%(质量分数),会造成安全隐患 d. 烟尘 i. 提高了莱顿弗罗斯特温度(Leidenfrost temperature)和降低了气相的稳定性 ii. 增加最大的冷却速率和降低了最大冷却速率的温度 iii. 增加对流阶段的冷却速率 iv. 增加氧化率和污染工件 e. 制订维护计划是必要的 · 夹具 a. 必须保证淬火冷却介质均匀流动 b. 空气动力学要求 i. “工件应切入淬火冷却介质,而不是拍入淬火冷却介质 ii. 工件最重的部分应该先进入淬火冷却介质 iii. 应首选垂直夹持工件 · 加载量 a. 在工件间保证淬火冷却介质均匀流动 b. 减少邻近工件的局部温度梯度 · 零件放置间距 a. 工件缓慢进入淬火冷却介质 b. 工件由于淬火冷却介质流动受阻,造成局部热点 · 淬火过程中的搬运 工件的机械搬运会引起变形 i. 不平稳搬运会导致工件相互撞击或与装载篮筐碰撞 ii. 工件被夹持 · 冷却终了温度	冷却终了温度取决于马氏体转变开始温度 i. 较高的温度会减少变形和开裂 ii. 因为工件表面温度高,可能使淬火油减少 iii. 因为工件表面积大和有氧的存在,会增加油的氧化 淬火后因素 · 零件搬运 · 回火不及时 a. 增大开裂倾向 b. 回火转移时间取决于工件截面厚度、残留奥氏体数量和钢牌号 · 清洗温度 a. 影响清洁和去除表面污垢的效率 b. 对工件造成应力和可能导致开裂 c. 通常变形和开裂受钢中残留奥氏体量影响 · 清洗速度 · 不均匀冷却 · 冷处理 a. 消除残留奥氏体 b. 提高硬度和马氏体百分比 c. 降低由于残留奥氏体的存在造成的残余应力 回火因素 · 炉温 a. 消除残余应力不均匀现象 b. 局部有温度梯度 · 预热 · 加热速率 a. 类似于预热 b. 快速加热释放了工件薄截面处应力,但未释放厚截面处应力 c. 局部造成温度梯度,导致体积增大不均匀 · 温度均匀性 · 非均匀加热 · 夹具 要求能够均匀传热 · 装炉量 · 零件放置间距 · 装夹固定 精加工因素 · 加工 a. 进给量和速度 b. 刀具形状与磨损 · 磨削加工 a. 磨削介质 b. 磨削量 · 酸洗 a. 去除表面层 b. 造成应力再分配 · 喷丸和喷砂处理 造成浅表面压应力层 · 矫直 造成应力再分配 · 电镀 · 涂装后烘烤 · 去应力处理
---	--

1.1.2 热处理零件的钢种选择

在生产实践中，因为零件设计与钢种选择往往是相互依存的，因此很难将这两个方面分开。一般来说，需采用液体淬火冷却介质的钢种都需要 ([进行工艺设计。相比之下，空气淬火（高淬透性）钢对工艺要求则没有那么严格。

由设计师根据总体技术要求确定选择合适的钢牌号，它仅是总体设计过程的一部分。对某个特定的应用的需求，对零件的性能要求（包括强度、韧性、耐磨性等）、零件几何尺寸和公差、零件某部位的硬度等也是不同的。当零件的服役条件包括加载（拉伸、弯曲、扭转、疲劳等）时，零件的关键部位就要求具有一定的硬度值，或要求零件具有与拉伸性能相对应的硬度值。

当轧制、锻造、正火或冷拔等工艺条件不能满足钢铁材料强度或强韧性配合时，必须采用淬火加回火获得所需要的性能。碳钢成本相对较低，通常需要对其进行合金化，以提高其淬透性。只有通过淬火和回火，合金钢的强度和韧性才能得到充分发挥和提高。不过也有例外。例如，低合金钢有类似于低碳结构钢成形或焊接的性能要求，同时又改善了力学性能。

根据零件强度和韧性的要求，选择调质钢时，首先应根据硬度，确定钢的最低碳含量。钢的硬度与淬火后马氏体量和钢中的碳含量有关（见图 1-2）。当钢的微观组织 95% 为回火马氏体时，所需的强度与钢中最低碳含量的关系如图 1-3 所示，该最低碳含量为钢的力学性能优化组合提供了依据。在图 1-3 中，只要选择了高于该最低碳含量，淬火组织为 95% 马氏体时，就能得到零件所对应的最低硬度值。

一旦确定了所需的硬度，材料工程师（在设计阶段）必须解决如何在零件某些位置或整个零件，确保得到该硬度。钢的硬度与钢的成分和淬火方式相关，而采用的淬火冷却介质类型由合金成分和零件所要求的淬透性（淬硬层深度）来决定。

为满足不同的需求，选择不同的淬火冷却介质类型：

- 1) 无过度或无法预料的变形。
- 2) 无淬火裂纹。
- 3) 得到正确的微观组织。
- 4) 产生正确的残余应力分布。
- 5) 利用合适的淬火设备。

材料工程师看零件图通常面对两个问题：如何在淬火硬化中不产生裂纹？如何在达到变形要求的前提下淬火硬化？这两个问题常常是在理论的指导下，依据实践经验进行解决。

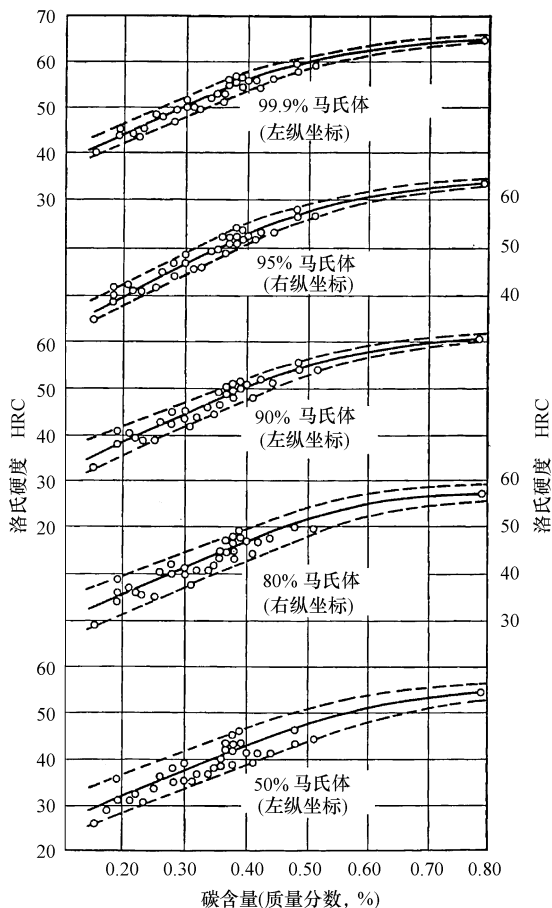


图 1-2 马氏体组织硬度与碳含量的关系

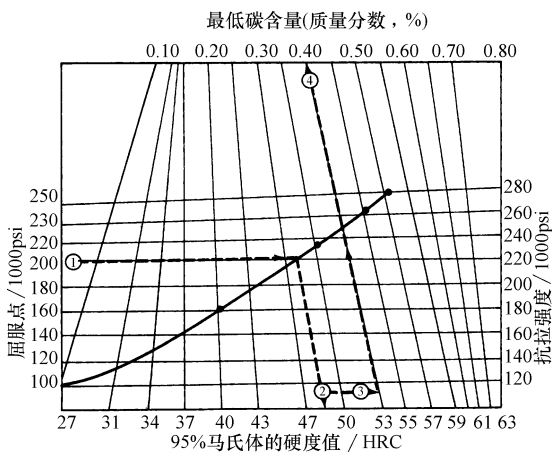


图 1-3 根据屈服强度或抗拉强度确定最低碳含量和对应的硬度值

注：示例中，选择的材料屈服强度为 200000psi（①点），相当于最终硬度值（回火后）为 48HRC（②点）。推荐的淬火态硬度值至少应高 5 个点，即 53HRC（③点），选择钢的最低碳含量建议为 0.40%（④点。）