



“十三五”国家重点图书出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列

金属热处理原理与工艺

(第2版)

Metal Heat Treatment Principles and Process

● 王顺兴 主编

哈尔滨工业大学出版社

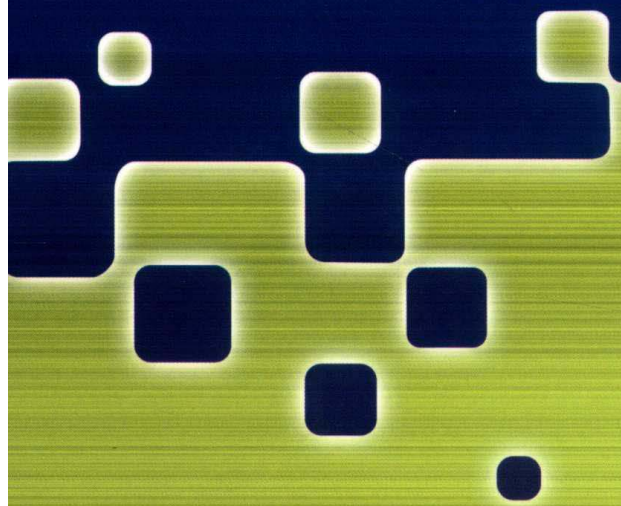
策划编辑 张秀华
杨 桦
责任编辑 张秀华
封面设计 卞秉利



院士专家著书 体现先进性 前瞻性 反映材料领域的研究成果

学科融合贯通 注重交叉性 学术性 立足材料科学的人才培养

内容丰富翔实 追求研究性 实用性 促进材料工程的创新发展



ISBN 978-7-5603-6728-6



9 787560 367286 >

定价 36.00 元

“十三五”国家重点图书出版规划项目

材料科学研究与工程技术系列

金属热处理原理与工艺 (第2版)

王顺兴 主编



哈爾濱工業大學出版社

内容简介

本书主要阐述有关钢的热处理基本原理和工艺,共 11 章,内容包括金属热处理概述、金属的加热、合金的时效、钢中奥氏体的形成、过冷奥氏体转变动力学、珠光体转变和钢的退火与正火、马氏体转变、贝氏体转变、钢的淬火和回火、表面淬火和化学热处理,并适当反映了近年来国内外在这方面的某些新理论、新成果和新发展。

本书是高等工科院校金属材料工程专业的教材,也可供从事金属材料热处理工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属热处理原理与工艺/王顺兴主编.—2 版.—哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2019.1
ISBN 978-7-5603-6728-6

I. 金… II. 王… III. 热处理-高等学校-教材 IV. TG15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 148305 号

策划编辑 张秀华 杨 桦
责任编辑 张秀华
封面设计 卞秉利
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 肇东市一兴印刷有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 19.5 字数 450 千字
版 次 2009 年 9 月第 1 版 2019 年 1 月第 2 版
2019 年 1 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-6728-6
定 价 36.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

“金属热处理”是金属材料工程专业(原金属材料及热处理专业)的必修课程之一。该门课程应安排在学习“材料科学基础”之后,完成了专业认识实习并已基本掌握某些热处理相关基础知识的情况下进行。

学习“金属热处理原理”的目的是使学生了解奥氏体、珠光体、马氏体、贝氏体及回火转变的基本过程、主要特征及转变的晶体学、热力学和动力学,以及组织与性能方面的基本知识;掌握过冷奥氏体转变的等温及连续冷却动力学图及其应用;熟悉有色金属时效过程、转变机制及组织性能;掌握钢的加热、退火、正火、淬火、回火工艺,以及表面淬火和化学热处理工艺。

全书共 11 章。第 1 章为金属热处理概述,简要介绍金属的主要性能、强韧化机制、热处理分类、典型钢种及用途,以及固态相变概述。第 2 章为金属的加热,介绍金属加热方法与设备、工件表面的热交换、加热温度和时间、相变和组织应力,以及加热时发生的化学反应。作为从平衡到非平衡的过渡,第 3 章介绍合金的时效及应用。在第 4 章介绍奥氏体的形成之后,第 5 章介绍过冷奥氏体转变动力学。以固态相变的形核和长大理论为基础,以数学为工具,阐述了在非平衡冷却条件下随冷却速度的变化,相变温度改变从而导致组织和性能的变化,出现了在非平衡冷却条件下的伪共析、贝氏体、马氏体等非平衡组织。第 6~8 章则分别介绍珠光体转变以及退火和正火工艺,马氏体转变和贝氏体转变。第 9~11 章分别介绍钢的淬火和回火工艺,表面淬火和化学热处理。

随着科学技术的飞速发展,新材料、新设备、新工艺的不断涌现,使传统热处理工艺得到长足发展和丰富。本书在加强阐述热处理基本原理的前提下,注意紧密联系实际,结合近年来材料领域热处理技术和工艺的最新进展,增加了一些高能密度加热表面淬火工艺方法的知识,如高频脉冲加热、激光加热和电子束加热等;同时,结合计算机模拟技术的发展,增加了“淬火过程数值模拟”的内容。

本书由王顺兴(第 1 章、第 5 章)、刘勇(第 2 章、第 3 章、第 4 章)、宁向梅(第 6 章、第 10 章)、马景灵(第 7 章、第 8 章)、张凌峰(第 9 章)、熊毅(第 11 章)等编写。全书由王顺兴统稿,河南科技大学郑世安审稿。

本书在编写过程中参考了大量相关文献,谨此对有关中外学者表示衷心感谢。参考文献仅列举了参考书目,其他参考文献未列出,敬请海涵。

感谢河南科技大学材料科学与工程学院和哈尔滨工业大学出版社在本书编写和出版的过程中给予的大力支持和帮助。

由于编者水平有限,书中的疏漏和缺点在所难免,敬希广大师生和读者批评指正。

作 者

2009 年 3 月 31 日

于河南科技大学

目 录

第1章 金属热处理概述	1	第2章 金属的加热	25
1.1 金属的主要性能	1	2.1 加热方法及设备	25
1.1.1 金属的物理性能	1	2.1.1 箱式电阻加热炉	25
1.1.2 金属的化学性能	3	2.1.2 井式加热炉	27
1.1.3 金属的力学性能	3	2.1.3 浴炉	27
1.1.4 金属的工艺性能	4	2.2 工件表面的热交换	28
1.1.5 金属的经济性	5	2.2.1 对流传热	28
1.2 金属的强化与韧化机制简介	5	2.2.2 辐射传热	29
1.2.1 固溶强化	5	2.2.3 传导传热	30
1.2.2 细晶强化	6	2.3 加热温度和时间	30
1.2.3 位错强化	6	2.3.1 加热时间概念	31
1.2.4 第二相强化	7	2.3.2 加热温度	31
1.3 金属热处理分类	8	2.4 相变和组织应力	32
1.3.1 热处理概念	8	2.4.1 过饱和固溶体的脱溶与第二相溶解	32
1.3.2 热处理分类	9	2.4.2 成分均匀化	33
1.4 典型钢种及用途	10	2.4.3 多形性转变	33
1.4.1 钢的分类	10	2.4.4 回复、再结晶和应力变化	33
1.4.2 合金元素在钢中的作用	10	2.4.5 组织应力	33
1.4.3 低碳钢	12	2.5 加热时发生的化学反应	33
1.4.4 中碳钢	13	2.5.1 金属加热时的氧化与脱碳	33
1.4.5 高碳钢	15	2.5.2 钢在渗碳气氛中的渗碳反应	35
1.5 固态相变概述	17	2.5.3 钢在氨气氛中的氮化反应	36
1.5.1 固态相变的一般特征	17	2.5.4 金属与其他气氛间的相互作用	36
1.5.2 固态相变的形核	19	2.5.5 氧化脱碳的控制	36
1.5.3 晶核的长大	21	本章小结	37
1.5.4 固态相变动力学	23	思考题	38
本章小结	23		
思考题	24		

第3章 合金的时效	39	第4章 钢中奥氏体的形成	55
3.1 脱溶沉淀过程的热力学	39	4.1 奥氏体的结构、组织与性能	55
3.2 脱溶沉淀过程	40	4.1.1 奥氏体的结构	55
3.2.1 G.P.区的形成	40	4.1.2 奥氏体的组织	56
3.2.2 θ' 的形成	41	4.1.3 奥氏体的性能	56
3.2.3 θ'' 的形成	41	4.2 奥氏体的形成	56
3.2.4 θ 的形成	42	4.2.1 钢的临界温度	56
3.3 脱溶沉淀后的显微组织及性能	43	4.2.2 奥氏体核的形成	58
3.3.1 固溶态 Cu - Ag - Cr 合金	43	4.2.3 奥氏体核的长大	59
显微组织及性能	43	4.2.4 渗碳体的溶解和奥氏体成	60
3.3.2 形变对固溶态 Cu - Ag -	44	分的均匀化	60
Cr 合金性能的影响	44	4.3 奥氏体形成动力学	60
3.3.3 时效对 Cu - Ag - Cr 合金	44	4.3.1 奥氏体等温形成动力学	61
导电率和硬度的影响	44	4.3.2 奥氏体连续加热形成动力	65
3.3.4 形变时效对 Cu - Ag - Cr	45	学图	65
合金导电率和硬度的影	45	4.4 奥氏体晶粒长大及其控制	66
响	45	4.4.1 晶粒度概念及奥氏体晶粒	66
3.4 时效工艺的应用	46	长大现象	66
3.4.1 时效工艺在铜合金中的应	46	4.4.2 奥氏体晶粒长大现象	67
用	46	4.4.3 控制奥氏体晶粒尺寸的工	68
3.4.2 时效工艺在铝合金中的应	48	艺措施	68
用	48	4.5 过热过烧及其校正	70
3.4.3 时效工艺在镁合金中的应	50	4.5.1 过热及其校正	71
用	50	4.5.2 过烧及其校正	71
3.4.4 时效工艺在钛合金中的应	52	本章小结	72
用	52	思考题	72
3.4.5 时效工艺在不锈钢中的应	54	第5章 过冷奥氏体转变动力学	73
用	54	5.1 四种冷却类型	73
3.4.6 时效工艺在高碳钢中的应	54	5.1.1 平衡冷却	73
用	54	5.1.2 等温冷却	73
本章小结	54	5.1.3 恒速冷却	73
思考题	54	5.1.4 变速冷却	74

5.2 过冷奥氏体等温转变动力学图	第 6 章 珠光体转变和钢的退火与正火
..... 74	..... 94
5.2.1 等温转变动力学图的测定方法	6.1 铁素体和珠光体的组织与性能
..... 74	..... 94
5.2.2 过冷奥氏体等温转变动力学图基本形式	6.1.1 铁素体的组织与性能
..... 74	..... 94
5.2.3 影响过冷奥氏体等温转变动力学图的因素	6.1.2 片状珠光体的组织与性能
..... 77	..... 94
5.2.4 过冷奥氏体等温转变动力学图的应用	6.1.3 粒状珠光体的组织与性能
..... 79	..... 96
5.3 过冷奥氏体连续转变动力学图	6.1.4 铁素体和片状珠光体混合组织与性能
..... 79	..... 97
5.3.1 常见过冷奥氏体连续转变动力学图的基本形式	6.1.5 魏氏组织与性能
..... 79	..... 98
5.3.2 过冷奥氏体连续转变动力学图的测定	6.2 珠光体形成机制
..... 80	..... 99
5.3.3 过冷奥氏体连续转变动力学图的应用	6.2.1 珠光体形成的热力学特点
..... 81	..... 99
5.4 相变动力学形式理论	6.2.2 片状珠光体形成机制
..... 82	..... 99
5.4.1 约翰逊-迈尔方程	6.2.3 粒状珠光体形成机制
..... 82	..... 101
5.4.2 形核率和长大速率	6.3 亚(过)共析钢的珠光体转变
..... 83	..... 103
5.4.3 各向异性生长	6.3.1 伪共析转变
..... 85	..... 103
5.4.4 非恒速长大	6.3.2 先共析相的析出
..... 86	..... 104
5.4.5 形核率不为常数的情况分析	6.4 珠光体转变动力学
..... 88	..... 106
5.4.6 JMA 方程	6.4.1 珠光体等温转变的形核率及长大速率
..... 88	..... 106
5.4.7 单位体积内晶粒数	6.4.2 珠光体等温转变动力学曲线
..... 88	..... 107
5.4.8 等温转变动力学曲线和动力学图的数学关系	6.4.3 影响珠光体转变动力学的因素
..... 89	..... 108
5.4.9 可叠加性和连续转变动力学图	6.5 退火概念及其分类
..... 89	..... 110
5.4.10 相变的独立性假设	6.5.1 退火概念
..... 91	..... 110
5.4.11 k 与温度的经验关系	6.5.2 退火工艺的分类
..... 91	..... 110
本章小结	6.6 退火工艺
..... 92	..... 110
思考题	6.6.1 去氢退火
..... 93	..... 110
	6.6.2 再结晶退火
	..... 111
	6.6.3 去应力退火
	..... 113

6.6.4 均匀化退火	114	7.3.2 马氏体的异常正方度	133
6.6.5 亚共析钢的等温退火	114	7.3.3 惯习面与位向关系	133
6.6.6 球化退火	115	7.3.4 马氏体转变的形核理论	134
6.7 正火	118	7.3.5 马氏体转变的切变模型	135
6.8 退火、正火的缺陷	119	7.4 马氏体转变的热力学和动力学	137
本章小结	120	7.4.1 马氏体转变的热力学条件	137
思考题	120	7.4.2 马氏体转变的驱动力	139
第7章 马氏体转变	122	7.4.3 影响 Ms 点的因素	139
7.1 马氏体组织与性能	122	7.4.4 马氏体转变动力学	140
7.1.1 马氏体的形态	123	7.5 热弹性马氏体与形状记忆效应	143
7.1.2 影响马氏体形态的因素	125	7.5.1 形状记忆效应	143
7.1.3 马氏体的强度和硬度	126	7.5.2 热弹性马氏体	144
7.1.4 马氏体的韧性	127	7.5.3 伪弹性	145
7.1.5 马氏体转变超塑性	128	7.5.4 形状记忆效应的本质	145
7.1.6 马氏体的物理性能	128	7.5.5 形状记忆合金的应用	145
7.1.7 高碳马氏体的显微裂纹	128	本章小结	146
7.2 马氏体转变主要特征	129	思考题	146
7.2.1 马氏体转变的非恒温性	129	第8章 贝氏体转变	147
7.2.2 马氏体转变的表面浮凸现象和共格性	130	8.1 贝氏体组织和性能	147
7.2.3 马氏体转变的无扩散性	130	8.1.1 无碳化物贝氏体	147
7.2.4 马氏体转变的位向关系及惯习面	131	8.1.2 上贝氏体	147
7.2.5 马氏体转变的可逆性	131	8.1.3 下贝氏体	148
7.3 马氏体转变的晶体学和转变机制	132	8.1.4 粒状贝氏体	149
7.3.1 马氏体的晶体结构	132	8.1.5 其他类型贝氏体	149
		8.1.6 贝氏体的力学性能	149

8.2 贝氏体转变基本特征	151	9.1.2 淬火工艺方法分类	166
8.2.1 贝氏体转变温度	151	9.1.3 淬火方法(冷却方式)	166
8.2.2 贝氏体转变产物	152	9.1.4 回火	167
8.2.3 贝氏体转变	152	9.2 淬火介质	167
8.2.4 贝氏体转变不完全性	153	9.2.1 对淬火介质的要求	167
8.2.5 贝氏体转变的扩散性	153	9.2.2 淬火介质冷却能力的测定与评价	168
8.2.6 贝氏体转变晶体学特征	153	9.2.3 水基淬火介质	170
8.3 贝氏体转变动力学	154	9.2.4 淬火油	170
8.3.1 贝氏体等温转变动力学	154	9.2.5 熔盐(碱)	171
8.3.2 贝氏体转变时碳的扩散	155	9.3 钢的淬透性和淬硬性	172
8.3.3 影响贝氏体转变动力学的因素	156	9.3.1 淬透性和淬硬性概念	172
8.4 贝氏体转变机制	157	9.3.2 淬透性测试方法	172
8.4.1 贝氏体相变的形核	157	9.3.3 影响淬透性的因素	174
8.4.2 贝氏体转变切变机制	157	9.3.4 淬透性的计算	175
8.4.3 贝氏体转变的台阶机制	158	9.3.5 淬透性曲线的应用	175
8.5 贝氏体钢	159	9.4 淬火应力及其控制	176
8.5.1 贝氏体钢的分类	160	9.4.1 热应力	176
8.5.2 空冷贝氏体钢的应用	161	9.4.2 组织应力	178
8.6 等温淬火及其应用	162	9.4.3 热处理变形及其控制	178
8.6.1 等温淬火	162	9.4.4 淬火裂纹及其预防	180
8.6.2 等温淬火后工件的力学性能及应用	163	9.5 回火时的转变及性能变化	181
本章小结	164	9.5.1 回火转变概述	181
思考题	164	9.5.2 马氏体中碳原子的偏聚	181
第9章 钢的淬火和回火	165	9.5.3 马氏体的分解	181
9.1 淬火和回火概述	165	9.5.4 碳化物的析出、转变及聚集长大	183
9.1.1 淬火概念	165	9.5.5 α 相状态的变化	184

9.5.6 残余奥氏体的转变	184	10.2.1 提高相变临界温度	208
9.5.7 回火后力学性能的变化	185	10.2.2 奥氏体起始晶粒得到细化	208
9.5.8 二次硬化现象	187	10.2.3 奥氏体成分均匀性降低	209
9.5.9 回火脆性	187	10.2.4 降低过冷奥氏体的稳定性	210
9.6 制定淬火和回火工艺的基本原则	189	10.2.5 自回火现象	211
9.6.1 淬火加热规范的确定	189	10.3 表面淬火后的组织及性能	212
9.6.2 淬火冷却方法的选择	191	10.3.1 表面淬火后的组织	212
9.6.3 回火工艺的确定	194	10.3.2 表面淬火后的有效硬化层深度	213
9.7 淬火回火新工艺	195	10.3.3 表面残余应力	213
9.7.1 形变热处理	195	10.3.4 表面淬火后的性能	214
9.7.2 奥氏体晶粒超细化	196	10.4 感应加热表面淬火	216
9.7.3 控制马氏体组织形态的热处理	197	10.4.1 感应加热的基本原理	217
9.7.4 改善钢中第二相形态的热处理	198	10.4.2 感应加热用感应器	221
9.8 淬火过程数值模拟简介	199	10.4.3 感应加热淬火工艺控制	223
9.8.1 热处理数值模拟的基本特点	200	10.4.4 感应加热的应用与发展	228
9.8.2 数学模型	200	10.5 其他高能密度加热淬火	232
9.8.3 一维问题计算模型	201	10.5.1 火焰加热表面淬火	232
9.8.4 计算方法	202	10.5.2 高频脉冲淬火	236
本章小结	204	10.5.3 激光加热表面淬火	237
思考题	205	10.5.4 电子束加热表面淬火	239
第 10 章 表面淬火	206	本章小结	240
10.1 表面淬火工艺分类	207	思考题	240
10.1.1 实现表面淬火的基本条件	207		
10.1.2 表面淬火方法分类	207		
10.2 快速加热时的相变特点	208		

第 11 章 化学热处理	241	11.4.1 渗氮基本原理	273
11.1 化学热处理概述	241	11.4.2 渗氮用钢	276
11.2 化学热处理原理	242	11.4.3 渗氮工艺	276
11.2.1 化学热处理基本过程	242	11.4.4 渗氮层的性能	278
11.2.2 渗剂的化学反应机理与热力学	242	11.4.5 渗氮层的质量检验	279
11.2.3 渗剂中的扩散(外扩散)	244	11.4.6 氮化件常见缺陷及预防	280
11.2.4 相界面反应	245	11.5 钢的碳氮共渗与氮碳共渗	282
11.2.5 工件表层的扩散过程	245	11.5.1 碳氮同时渗入时的特点	282
11.2.6 多元共渗时的某些规律	250	11.5.2 碳氮共渗	283
11.2.7 加速化学热处理过程的途径	252	11.5.3 氮碳共渗(软氮化)	287
11.3 钢的渗碳	253	11.5.4 碳氮共渗工艺的发展	289
11.3.1 渗碳概念	253	11.6 钢的渗硼	290
11.3.2 渗碳件的主要技术要求和渗碳用钢	253	11.6.1 渗硼方法	290
11.3.3 渗碳方法及工艺	255	11.6.2 渗硼工艺	291
11.3.4 渗碳工艺控制	263	11.7 渗金属	293
11.3.5 渗碳后的热处理	267	11.7.1 直接扩散渗金属法的原理	293
11.3.6 渗碳后的质量检验	269	11.7.2 渗金属层的组织和性能	294
11.3.7 渗碳件的常见热处理缺陷及预防	269	11.8 多元共渗	295
11.3.8 渗碳后组织与性能的关系	271	11.8.1 铬铝共渗工艺	295
11.3.9 渗碳工艺的发展	272	11.8.2 硼铝共渗工艺	296
11.4 钢的渗氮	273	本章小结	297
		思考题	298
		参考文献	299

第1章 金属热处理概述

材料是现代文明的支柱之一。在三大材料(金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料)中,因金属材料具有许多优异的力学性能,在过去和将来,都是最重要的结构材料。金属材料优异的性能与其成分和组织有着密切关系。热处理是改变金属材料组织,发挥金属材料潜力的最有效手段之一。本章从不同角度,对金属材料及其热处理相关问题作一概括叙述,为学习后续各章打下基础。

1.1 金属的主要性能

金属具有许多优异的性能,本节从5个方面简要介绍金属的性能,即物理性能、化学性能、力学性能、工艺性能和经济性。

1.1.1 金属的物理性能

金属的物理性能包括:热学性能、电阻、热电性、磁性、膨胀、内耗等,下面主要对与热处理关系密切的几个物理性能进行简要介绍。

1. 比容和线膨胀系数

① 比容。由于晶体结构不同,其致密度不同,所以比容是一个对组织敏感的物理参数。例如 γ -Fe的比容小于 α -Fe的比容。固溶体的比容还与合金成分有关,表1.1是碳钢中各种组织的比容。根据比容可以计算相对线膨胀量或收缩值,其计算公式为

$$\epsilon = \frac{\sqrt[3]{\gamma_1} - \sqrt[3]{\gamma_2}}{\sqrt[3]{\gamma_1}} \quad (1.1)$$

例如, α -Fe转变成 γ -Fe时体积收缩,相对收缩量为 $\frac{\sqrt[3]{0.1271} - \sqrt[3]{0.1212}}{\sqrt[3]{0.1271}} = 0.01572$ 。这个数值相当于钢承受1100 MPa弹性应变的3倍。

表 1.1 碳钢中各种组织的比容(20℃)

组 织	比容 / (cm ³ · g ⁻¹)
铁素体	0.127 1
渗碳体	0.130 ± 0.001
ε 碳化物	0.140 ± 0.002
马氏体	0.127 1 + 0.002 65(C%)
奥氏体	0.121 2 + 0.003 3(C%)
铁素体 + 渗碳体	0.127 1 + 0.000 5(C%)
贝氏体	0.127 1 + 0.001 5(C%)

金属经过热处理可以改变其组织结构,由于各种组织的比容不同,将会在工件内部形成内应力,这种内应力称为组织应力。如果形成的是混合组织,在组织与组织之间将产生第二类内应力。如果在不同部位存在的组织不同或成分不同,也会产生内应力。例如,表面淬火的钢件在表面得到了马氏体组织而次表面和心部没有转变成马氏体,所以表面呈现压应力;经过化学热处理的工件,因为从表面到心部碳的质量分数出现由大到小的变化,从而改变了 M_s 点,导致次表面先转变成马氏体而在表面出现压应力;淬硬层深度不同的工件,表面的应力状态也不同,通常淬硬层浅的时候,表面是压应力,而淬硬层深的时候表面是拉应力。当工件表面是残余压应力时能提高工件的力学性能,因此,合理利用组织的比容变化使表面产生残余压应力可以提高零件的使用寿命,但如果使用不当,在表面形成残余拉应力会降低零件使用寿命。

② 线膨胀系数。热胀冷缩是金属的一种普遍现象,通常用线膨胀系数 α 表示金属的热胀冷缩特性。钢的线膨胀系数与其碳质量分数无关,合金元素的影响也不大(一般小于 15%),但对组织敏感,如表 1.2 所示。从表 1.2 看出,马氏体的线膨胀系数最小,而奥氏体的线膨胀系数最大,铁素体和渗碳体介于两者之间。

表 1.2 钢中组织的线膨胀系数

组织	线膨胀系数 $\alpha / \times 10^6 K^{-1}$
奥氏体	23.0
铁素体	14.5
马氏体	7.15*
渗碳体	12.5

*:参考值

由线膨胀系数和温度差计算相对膨胀量的计算公式为

$$\epsilon = \alpha \times \Delta t \quad (1.2)$$

由表 1.2 中的数据可知,温度升高 100 K,奥氏体的相对膨胀量为 0.002 3,也是比较大的,但与组织转变造成的相对变形相比还是小得多,当然,温度升高越多,相对膨胀量越大。

在热处理过程中,零件的加热或冷却属于非稳态传热过程,不仅各点温度不同,而且各点的温度随时间的变化而变化,因而导致各点的热胀冷缩量也不相同,从而在工件内部形成应力,这种应力称为热应力。当热应力超过材料的屈服强度时将发生塑性变形,当超过材料的断裂强度时还会产生裂纹,甚至整个零件断裂。

在热处理过程中产生的热应力和组织应力对热处理后的零件质量产生重要影响。零件经过热处理后产生的变形和开裂问题与这两种应力大小有直接关系,而这两种应力的大小又与零件内的温度分布有直接关系,温度越均匀,应力越小,反之应力越大。

2. 质量定压热容和热导率

工件内部温度用热传导方程描述为

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (1.3)$$

式中, λ 为热导率, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$; ρ 为密度, $kg \cdot m^{-3}$; c_p 为质量定压热容, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ 。

在非稳态传热过程中,热导率越大或质量定压热容越小,温度差越小。所以,对于热导率比较小的材料,加热或冷却速度要慢些。在碳钢中加入合金元素形成合金钢后,通常热

导率减小,加热或冷却时速度应该慢一点。

1.1.2 金属的化学性能

金属的化学性能中最重要的是耐腐蚀性和高温抗氧化性。通过热处理可以改变成分分布、组织结构,可以提高耐腐蚀性和高温抗氧化性。例如通过固溶处理可以改善不锈钢抗晶间腐蚀能力,处理成单相组织也能提高耐腐蚀性能。通过表面合金化、表面渗氮、渗铝、渗铬等工艺也能提高钢铁的耐腐蚀性和高温抗氧化性。

1.1.3 金属的力学性能

力学性能是结构材料中最重要的性能。通过热处理可以显著提高材料的力学性能,满足零件服役要求,提高零件使用寿命。

1. 强度

强度是指材料抵抗变形和断裂的能力,是材料最重要的力学性能之一。

在弹性变形阶段的主要力学性能指标包括比例极限(σ_p)、弹性极限(σ_e)和弹性模量(E)等。

在塑性变形阶段的主要强度指标包括规定微量塑性伸长应力(σ_r)、抗拉强度(σ_b)和断裂强度(σ_k)等,其中最重要的规定微量塑性伸长应力是规定发生0.2%塑性伸长应力 $\sigma_{0.2}$ (也称为屈服强度)。绝大多数零件都在弹性状态下服役,所以,微量塑性伸长应力是评价材料强度的最重要的力学性能指标。通过热处理方法提高材料的微量塑性伸长应力,可以减轻机件质量,节约材料,降低成本,并不易产生塑性变形失效。

在高温下服役的零件,还要求蠕变极限、持久强度等高温力学性能。

在变动载荷作用下,材料的主要强度指标包括疲劳极限(σ_r)、过载持久值、疲劳裂纹扩展速率等。

除了弹性模量之外,其他强度指标都是对组织敏感的性能指标,其中比例极限、弹性极限以及疲劳极限不仅对组织敏感,而且对残余应力也敏感,通过热处理可以在很大范围内改变其数值,满足性能要求。

2. 塑性和韧性

塑性指材料断裂前发生塑性变形的能力。常用的塑性指标有断后伸长率 δ (δ_{10} 或 δ_5)、断面收缩率 φ 。

虽然金属的塑性指标通常并不能直接用于机件的设计,因为塑性与服役行为之间无直接联系,但对静载下工作的机件,都要求材料具有一定塑性,以防止机件偶然过载时,产生突然破坏。这是因为塑性变形有缓和应力集中、削减应力峰的作用。就这个意义上说,金属材料的塑性指标是安全力学性能指标;塑性对金属压力加工是很有意义的,金属有了塑性才能通过轧制、挤压等冷热变形工序生产出合格产品来;为了使机器装配、修复工序顺利完成,也需要材料有一定塑性;塑性大小还能反映材料冶金质量的好坏,故可以用于评定材料质量。

韧性或韧度指材料吸收变形功和断裂功的能力。常用的韧度指标有冲击功 A_k 、韧脆转变温度 t_k 、断裂韧度 $K_C(K_{IC})$ 等。与塑性指标一样,韧性也是安全指标。

热处理是提高材料塑性和韧性的主要手段。

3. 硬度

硬度是表征金属材料软硬程度的性能指标。其物理意义随试验方法不同而不同。例如,划痕法硬度值主要表征材料对切断的抗力;回跳法硬度值主要表征材料弹性变形功的大小;压入法硬度值则表征材料的塑性变形抗力及应变硬化能力。因此,“硬度”不是材料独立的力学性能。

生产中常用的硬度有布氏硬度和洛氏硬度。前者用于测试硬度较低材料的硬度,如检测有色金属、退火钢件、调质钢件、铸铁件等的硬度;而后者主要测试硬度较高材料的硬度,如淬火钢件、调质钢件等。这两种硬度试验方法都属于压入法,它们的数值与材料静强度和疲劳强度都有比较好的对应关系。

由于硬度试验方法具有设备简单、操作方便迅速,同时又能反映出材料的化学成分和组织结构的差异,因而被广泛用于检查材料的性能、热加工工艺的质量或研究金属组织结构的变化。另外,由于硬度与强度之间存在非常好的对应关系,在实际中“硬度”几乎成了“强度”的代名词。

4. 耐磨性

机件表面相互接触并作相对运动时,表面逐渐有微小颗粒分离出来形成磨屑,使表面材料逐渐损失、造成表面损伤的现象称为磨损。耐磨性是材料抵抗磨损的性能,这是一个系统性质。迄今为止,还没有一个统一的意义明确的耐磨性指标。通常是用磨损量来表示材料的耐磨性,磨损量越小,耐磨性越高。磨损量既可用试样磨损表面法线方向的尺寸减小来表示,也可用试样体积或质量损失来表示。前者称为线磨损,后者称为体积磨损或质量磨损。若测量单位磨损距离、单位压力下的磨损量等,则称为比磨损量,为和通常概念一致,有时还用磨损量的倒数来表征材料的耐磨性。

热处理是提高机件耐磨性的有效途径。如表面淬火、表面化学热处理等是生产上最常用的提高耐磨性的工艺方法。

1.1.4 金属的工艺性能

金属通过铸造、焊接、塑性加工和切削加工而成形,通过热处理改变组织和性能以及内应力状态。良好的工艺性能不仅能保证工艺的顺利进行,而且能降低加工成本。

合金的流动性是影响熔融金属充型能力的主要因素之一,对铸件的质量有很大的影响。纯金属和共晶成分的合金是在恒温下进行结晶的,属层状凝固方式。结晶时由铸件断面的表层开始往中心逐层推进,在断面上只存在固相区和液相区,固-液界面比较平滑,对中心未凝固的液态金属的流动阻碍力小,因而流动性好,铸造性能良好。

焊接是一种工业上常用来形成永久性连接的工艺方法。为使两个零件形成牢固的原子间的结合,需使两个零部件的原子接近到晶格常数 $(3 \sim 5) \times 10^{-10} \text{ m}$ 的距离。焊接是通过加热、加压或加热加压,并且用或不用填充材料,使焊件达到原子结合的一种加工方法。金属的焊接性与金属成分有很大关系而与组织几乎无关。对钢来说,碳的质量分数越小,焊接性能越好。

塑性加工的方法很多,如锻造、冲压、轧制、冷拔等。低强度和高塑性的金属材料具有好的塑性加工性能。强度低变形抗力小,容易进行成形。塑性高,一次可以进行大的塑性变形而不产生裂纹等缺陷。通过热处理方法可以降低强度,提高塑性,改善塑性加工性能。

绝大多数零件需要用车、铣、刨、磨的切削加工方法进行加工。强度高切削加工困难,塑性太高容易粘刀,切削加工性也不好。

热处理不仅是改善机件力学性能的主要手段,也是改善材料工艺性能的有效方法。通过退火或正火,可以减轻或消除铸造、焊接、塑性成形或切削加工后的残余应力。通过再结晶退火可以降低冷变形金属的强度、提高塑性,是冷拉、冷轧和冷拔工艺中的重要中间工序。通过退火或正火工艺还可以降低硬度、提高切削加工性能。例如,经过锻造后的中碳或中碳合金钢毛坯,多数采用退火方法,消除锻造产生的应力、降低硬度、提高切削加工性;经过锻造后的高碳钢或高碳合金钢毛坯,多数采用球化退火方法,消除锻造产生的应力、降低硬度、提高切削加工性并为淬火作组织准备。

1.1.5 金属的经济性

零件的生产成本由多方面因素构成,在选择材料或制定热处理方案时主要应考虑以下三个方面。

1. 原材料费

对钢铁材料而言,钢的价格高于普通铸铁价格;Ni、W、Mo、V、Nb、Ti、Re 等是贵重的合金元素,含量越高,价格越高,而 Si、Mn、Cr 等是廉价的合金元素,其含量对价格的提高不明显,例如,0Cr18Ni9 的价格大约是普通碳钢的 10 倍,W18Cr4V、Cr25Ni20 的价格更高;S、P、O 等元素含量越低,价格越高,因而,成分相同的优质钢价格高于普通钢。在考虑价格时,还需要考虑钢种的产量问题,常用钢产量大,供货渠道多,价格相对低些,而一些不常用的钢用量少,价格相对高些,如在碳素调质钢中 40、45 钢用量最大,合金钢中 40Cr、42CrMo 等用量大,应尽可能选用。

2. 加工费

加工费在生产成本中占有较大比重,与材料费相当。碳素钢具有良好的加工性能,无论是锻造还是切削加工费都是最低的。为了提高加工性能,往往需要在加工的工序之间进行热处理,降低加工成本。对中碳合金钢锻造后进行退火处理,高碳钢锻造后进行球化退火处理,其目的之一是为了降低硬度从而改善切削加工性能。

3. 热处理

热处理成本主要由能源费、设备折旧费、工时费等构成。除表面淬火外,一般按零件质量计算热处理费,根据热处理工艺不同,每千克 1 ~ 10 元不等。普通箱式炉价格最低,可控气氛炉、盐浴、真空炉价格高。从工艺上来说,正火最低,其次是退火和调质处理,化学热处理价格最高。表面感应淬火节约能源,价格较低。

1.2 金属的强化与韧化机制简介

当金属的成分一定之后,通过各种冷热加工工艺可以改变其强度、塑性、韧性和耐磨性等。我们把能提高材料强度、塑性和韧性的工艺统称为强韧化工艺。这类工艺非常多,但是,从机理来说并不多,掌握好这些机理,就能够分析各种工艺的强韧化原因。

1.2.1 固溶强化

当溶质原子溶入溶剂原子而形成固溶体时,都能提高强度、硬度,而塑性、韧性有所下