

现代表面工程技术丛书

潘邻◎主编

XIANDAI BIAOMIAN
RECHULI JISHU

现代表面 热处理技术



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

现代表面工程技术丛书

现代表面热处理技术

主 编 潘 邻

编写人员 (以姓氏笔画为序)

肖钊方 张良界 吴 勉 赵俊平
夏春怀 陶锡麒 潘 邻

机械工业出版社

本书以工艺类型为主线,系统介绍了各种表面热处理技术及其应用,主要内容包括表面热处理的基本原理、工艺特点和工艺选择原则、工艺规范、工艺装备、质量检验等。本书对各种表面热处理技术的工艺参数和处理效果进行了重点介绍,同时,对近年来一些发展较快的表面热处理技术也做了介绍。本书面向工业生产,侧重于实际应用,以数据和实例为主要内容,尽可能多地吸收一些新的技术成果,实用性较强。

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

图书在版编目(CIP)数据

现代表面热处理技术/潘邻主编. —2版. —北京:
机械工业出版社, 2017. 8
(现代表面工程技术丛书)
ISBN 978-7-111-57471-2

I. ①现… II. ①潘… III. ①表面热处理
IV. ①TG156.99

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第159881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

责任印制:常天培 责任校对:李锦莉 任秀丽

北京京丰印刷厂印刷

2017年8月第2版·第1次印刷

184mm×260mm·20.25印张·501千字

0 001—2 500册

标准书号:ISBN 978-7-111-57471-2

定价:69.00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

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

前 言

构成各种机械的单元是零件，任何材料的优劣都将从零件的使用寿命上体现出来，特别是最直接参加工作的零件表面。据统计，机械产品中 80% 以上的零件的报废是由于表面失效造成的，而真正因材料整体强度不足产生断裂或变形的零件失效所占的比例很小（事实上，许多零件发生破裂，其裂纹也首先是从表面产生的）。因此，提高材料的表面耐磨性、耐蚀性、强度及抗疲劳性能，是延长零部件使用寿命、合理配置性能、保证系统稳定性的关键。另一方面，表面是材料最重要的部分，对大部分结构材料而言，它们的性能基本上都与表面状态有关。更重要的是，通过表面改性处理，可以大量节约资源和能源，充分发挥材料的潜力，减少优质材料消耗，降低生产成本。因此，包括表面热处理技术在内的表面工程技术得到人们的极大关注，发展很快，对各类构件的性能贡献度越来越高。

在表面热处理范围内，既有渗碳、渗氮等传统工艺，也有利用等离子体、高能量束进行表面改性的先进制造技术，内容十分丰富，应用非常广泛。近年来，我国正从制造大国向制造强国迈进，制造业得到飞速发展，表面热处理技术也将随之进步，并扮演更加重要的角色。本书编撰的目的是，面向表面热处理技术的实际工业生产应用，主要向热处理工程技术人员提供成熟的表面热处理技术资料，介绍表面热处理方面的新技术发展动态。本书侧重于实际应用，以数据和实例为主要内容，辅以少量的基础知识和基本原理，力争做到内容的科学性、实用性、可靠性和先进性。

本书是在《表面改性热处理技术与应用》（机械工业出版社出版）的基础上修订而成的。在修订过程中，注意反映表面热处理相关领域的技术进展情况，重点对原书进行了勘误，补充了一些工艺方法和技术参数，删除了部分过时的内容，并按新发布的热处理标准进行了更新。本书是在“特种表面保护材料及应用技术国家重点实验室”的组织、协调下完成的，在此，对相关人员的支持与付出表示深深的谢意。

全书以工艺类型为主线，共分为 9 章，另有附录两则。第 1、4、5 章由潘邻编写，第 2 章由赵俊平编写，第 3 章由肖钊方编写，第 6 章由张良界编写，第 7 章由潘邻和吴勉编写，第 8 章由陶锡麒编写，第 9 章由潘邻和夏春怀编写，全书由潘邻统稿。

由于表面热处理技术范围很广，更由于作者技术水平有限，可能出现挂一漏万之处，也难免存在缺点甚至错误，殷切地希望读者批评指正。

作 者

目 录

前言

第1章 表面热处理技术基础..... 1

1.1 表面淬火基础 3

1.1.1 表面淬火的工艺特点 3

1.1.2 表面淬火的相变特点 4

1.1.3 表面淬火的组织与性能特点 5

1.1.4 表面淬火常用材料 7

1.2 化学热处理基础 7

1.2.1 化学热处理的基本过程 8

1.2.2 扩散层形成规律 16

1.2.3 化学热处理后渗层的性能评估 17

1.2.4 常用化学热处理方法及用途 18

第2章 感应热处理 19

2.1 感应加热的基本原理 19

2.1.1 电磁感应和交流电的电效应 19

2.1.2 电流透入深度与感应加热 22

2.2 感应热处理工艺 27

2.2.1 感应热处理件的技术条件 27

2.2.2 感应热处理常用材料及其对原始组织的要求 27

2.2.3 感应加热设备频率和加热比功率的选择与确定 28

2.2.4 感应加热方式和冷却方式 31

2.2.5 感应淬火后的回火 33

2.2.6 感应加热工艺的编制 34

2.2.7 感应热处理的工艺调整 35

2.3 感应热处理件的质量检查 43

2.3.1 感应热处理件的质量检查项目 43

2.3.2 感应热处理件的质量检查方法及标准 43

2.3.3 感应热处理件的常见质量问题及返修措施 47

2.4 感应热处理设备 47

2.4.1 感应加热电源 47

2.4.2 感应加热机床 48

2.5 感应器 49

2.5.1 感应器的分类与结构 49

2.5.2 感应器的设计步骤 50

2.5.3 典型感应器的设计 52

2.5.4 磁屏 62

2.5.5 导磁体 62

2.6 应用实例 63

2.6.1 曲轴的感应热处理 63

2.6.2 半轴的感应热处理 67

2.6.3 三销轴和球头销的感应热处理 69

2.6.4 钢板弹簧的感应热处理 70

2.6.5 导轨的感应热处理 72

第3章 火焰淬火 74

3.1 火焰淬火的特点 74

3.2 火焰淬火用燃料和装置 74

3.3 火焰淬火工艺 76

3.3.1 火焰淬火的钢种及对钢原始组织的要求 76

3.3.2 火焰淬火加热温度的控制 76

3.3.3 火焰淬火硬化层深度的控制 77

3.3.4 火焰淬火常见缺陷与对策 79

3.4 应用实例 79

第4章 其他表面淬火方法 81

4.1 浴炉加热表面淬火 81

4.1.1 盐浴加热表面淬火 81

4.1.2 铅浴加热表面淬火 81

4.2 电解液淬火 82

4.3 接触电阻加热淬火 83

第5章 激光与电子束表面热处理 86

5.1 激光表面热处理 86

5.1.1 激光表面加热设备 86

5.1.2 激光表面热处理原理 90

5.1.3 激光表面热处理的分类及特点 92

5.1.4 激光淬火 93

5.1.5 激光表面熔凝 103

5.1.6 激光表面合金化 107

5.2 电子束表面热处理 109

5.2.1 电子束表面热处理装置及工作 原理	109	7.3.3 结构钢与工具钢的渗氮	166
5.2.2 电子束淬火	111	7.3.4 不锈钢与耐热钢的渗氮	169
5.2.3 电子束表面熔凝	111	7.3.5 铸铁的渗氮	170
5.2.4 电子束表面合金化	113	7.3.6 非渗氮部位的保护	170
第6章 渗碳及碳氮共渗	115	7.3.7 其他渗氮方法	171
6.1 渗碳及碳氮共渗简介	115	7.3.8 渗氮件的组织和性能	172
6.1.1 渗碳简介	115	7.3.9 渗氮件质量检验及常见缺陷 防止措施	173
6.1.2 碳氮共渗简介	115	7.3.10 应用实例	181
6.2 渗碳	116	7.4 氮碳共渗	182
6.2.1 常用渗碳钢	116	7.4.1 气体氮碳共渗	182
6.2.2 渗碳件的表面清理及防 处理	119	7.4.2 盐浴氮碳共渗	184
6.2.3 影响渗碳的因素	120	7.4.3 固体氮碳共渗	186
6.2.4 气体渗碳	122	7.4.4 奥氏体氮碳共渗	186
6.2.5 液体渗碳	126	7.4.5 氮碳共渗件的组织和性能	187
6.2.6 固体渗碳	128	7.4.6 氮碳共渗件的常见缺陷 防止措施	189
6.2.7 其他渗碳方法	130	7.4.7 应用实例	189
6.2.8 渗碳后的热处理	132	7.5 其他含氮多元共渗	191
6.2.9 渗碳件的组织和性能	135	7.5.1 氧氮共渗	191
6.2.10 渗碳件质量检验及常见缺陷防止 措施	136	7.5.2 硫氮共渗	191
6.2.11 应用实例	139	7.5.3 硫氮碳共渗	192
6.3 碳氮共渗	142	7.5.4 QPQ 处理	193
6.3.1 气体碳氮共渗	142	7.5.5 盐浴硫氮碳钒共渗	195
6.3.2 液体碳氮共渗	145	7.5.6 其他含氮多元共渗件的组织和 性能	195
6.3.3 固体碳氮共渗	146	7.5.7 应用实例	197
6.3.4 碳氮共渗件的技术条件	147	第8章 渗金属及非金属	201
6.3.5 碳氮共渗用钢及其后续热处理	147	8.1 渗金属及非金属简介	201
6.3.6 碳氮共渗件的组织和性能	150	8.1.1 固体法渗金属及非金属简介	202
6.3.7 碳氮共渗件质量检验及常见缺陷 防止措施	151	8.1.2 液体法渗金属及非金属简介	203
6.3.8 应用实例	153	8.1.3 气体法渗金属及非金属简介	203
第7章 渗氮及其多元共渗	157	8.2 渗硼、渗硅	204
7.1 渗氮及其多元共渗简介	157	8.2.1 渗硼、渗硅的渗剂组成和工 方法	204
7.1.1 渗氮简介	157	8.2.2 钢铁件的渗硼工艺及性能	209
7.1.2 氮碳共渗简介	160	8.2.3 其他材料的渗硼工艺及性能	215
7.1.3 其他含氮多元共渗简介	160	8.2.4 渗硅工艺及性能	218
7.2 常用渗氮及其多元共渗材料	161	8.2.5 共渗和复合渗	221
7.3 渗氮	164	8.3 渗铬、渗钒、渗铌、钛	227
7.3.1 气体渗氮装置及渗氮介质	164	8.3.1 渗金属工艺方法	227
7.3.2 气体渗氮工艺参数及操作 过程	165	8.3.2 渗铬工艺及性能	230
		8.3.3 渗钒、渗铌工艺及性能	234

8.3.4 渗钛工艺及性能	238	9.3.1 离子渗氮工艺	274
8.3.5 渗金属件的质量检验及常见缺陷 防止措施	241	9.3.2 离子渗氮层的组织与性能	280
8.3.6 共渗和复合渗	241	9.3.3 离子氮碳共渗工艺	287
8.4 渗锌和渗铝	243	9.3.4 钛及钛合金离子渗氮工艺	289
8.4.1 渗锌工艺及性能	244	9.3.5 稀土催渗离子渗氮技术	290
8.4.2 渗铝工艺及性能	246	9.3.6 活性屏离子渗氮技术	291
8.4.3 渗锌、渗铝件的质量检验及常见 缺陷防止措施	250	9.4 离子渗碳及碳氮共渗	292
8.5 应用实例	250	9.4.1 离子渗碳工艺	292
第9章 离子化学热处理	253	9.4.2 离子碳氮共渗工艺	293
9.1 离子化学热处理基础	253	9.5 离子渗硫及多元共渗	294
9.1.1 等离子体基本概念	253	9.5.1 低温离子渗硫工艺	294
9.1.2 辉光放电	254	9.5.2 离子硫氮共渗及离子硫氮碳共渗 工艺	294
9.1.3 离子化学热处理原理	256	9.5.3 离子渗硫及其多元共渗层的组织 与性能	296
9.2 离子化学热处理设备	258	9.6 离子渗金属	298
9.2.1 离子化学热处理设备简介	258	9.6.1 双层辉光离子渗金属	298
9.2.2 离子化学热处理设备的电气 控制系统	259	9.6.2 其他离子渗金属方法介绍	299
9.2.3 离子化学热处理炉炉体及 配套系统	263	9.7 离子化学热处理复合处理技术	300
9.2.4 离子渗氮炉及其基本操作	269	9.8 应用实例	302
9.2.5 离子渗碳炉及其基本操作	271	附录	306
9.2.6 日常维护及常见故障排除	272	附录 A 国内外表面热处理常用钢铁牌号 对照表	306
9.3 离子渗氮及氮碳共渗	274	附录 B 常用硬度值换算表	312
		参考文献	318

第 1 章 表面热处理技术基础

据统计，在国民经济各行各业所报废的构件中，80% 以上是由于表面失效造成的。因此，通过各种表面工程手段，改善构件的表面状态，提高抗腐蚀、耐磨损、抗疲劳等性能，对提高产品的使用寿命至关重要。

在表面工程领域，表面热处理占有重要的地位。表面热处理历史悠长、技术成熟，它几乎是与钢铁冶炼技术同时产生的，从上千年以前的渗碳工艺到今天广泛应用的表面淬火和化学热处理，再到随着先进的能源开发而出现的高能束表面改性等，内容十分丰富，为我们面对各种复杂的工况提供了充足的选择余地。总体来讲，表面热处理技术可划分为两大类：一类是只有表面组织结构变化的表面相变热处理，另一类是涉及表面成分变化的化学热处理。当然，在许多覆层技术中，存在着合金元素向基材中扩散或是表面组织结构转变，也可归入表面热处理之列。按照材料表面成分变化的情况，表面热处理的分类如图 1-1 所示，本书主要介绍表面相变热处理和化学热处理两部分。表 1-1 是几种表面强化处理的性能与效果。

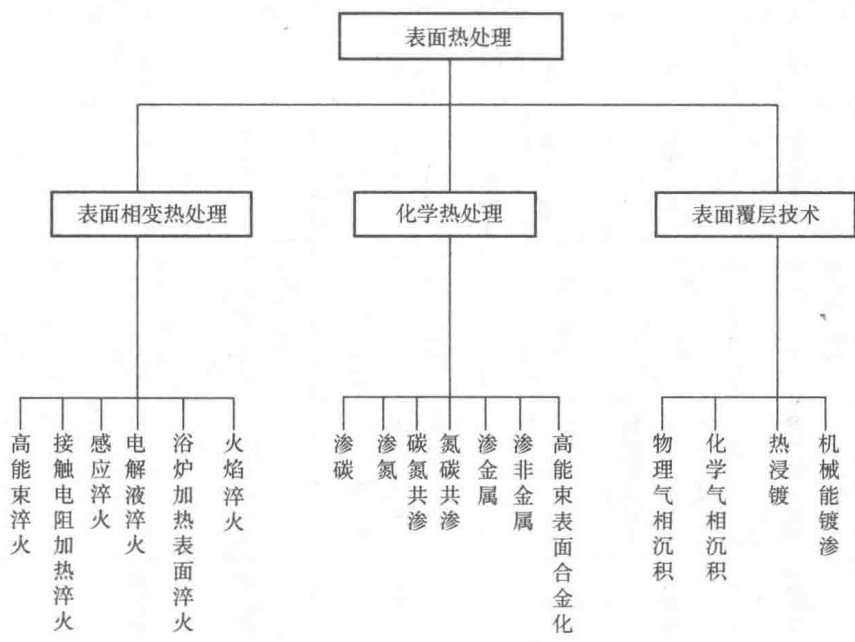


图 1-1 表面热处理的分类

表 1-1 几种表面强化处理的性能与效果

类型	表面层状态			性能特点					变形开裂倾向	钢材成本	设备投资	适用钢材
	层深/mm	处理后表面层变化	表层组织	表层应力状态	表面硬度HV	耐磨性	接触疲劳强度	弯曲疲劳强度				
渗碳淬火	中等 0.5~4.0	表面硬化	马氏体+碳化物+残留奥氏体	表面高残余压应力(提高55%)	650~850	高	好	好 (提高40%~120%)	较大变形, 不易开裂	低或中等	高	低碳钢, 低碳合金钢, 铁基粉末冶金重负载零件
碳氮共渗	较浅 0.1~1.0	表面硬化	碳氮化合物+含氮马氏体+残留奥氏体	表面高残余压应力	700~850	高	很好	很好	较小变形, 不易开裂	低或中等	中等	低碳钢, 中碳钢, 低、中碳合金钢, 铁基粉末冶金零件
渗氮	薄层 0.1~0.4	表面硬化	氮碳化合物+含氮固溶体	表面高残余压应力	800~1200	很高	好	好 (提高15%~180%)	变形甚小, 不易开裂	中等或高	中等	中碳合金渗氮钢, 球墨铸铁零件
氮碳共渗	扩散层 0.5~1.0 化合物层 5~20μm	表面硬化	表面氮碳化物层, 内部氮扩散	表面高残余压应力(提高22%~32%)	500~800	较高	较好	较好	变形甚小, 不易开裂	低或中等	中等	碳钢, 铸铁, 耐热钢等轻负载高速滑动零件
感应淬火	0.8~50	表面硬化	淬火马氏体	表面高残余压应力(提高68%)	600~850	高	好	好	较小	低	中等	碳钢或中碳合金钢, 低淬钢, 球墨铸铁零件
火焰淬火	1~12	表面硬化	淬火马氏体	表面高残余压应力	600~800	高	好	好	较小	低	低	中碳钢或中碳合金钢零件
表面滚压强化	0.5~1.5	表面硬化, 高压应力	位错密度增加	表面高残余压应力	可提高150	—	改善	较大提高	—	—	较高	碳钢或合金钢零件
		表面硬化, 表面有凹坑	位错密度增加	表面高残余压应力	最高到300	—	改善	较大提高	—	—	中等	碳钢, 合金钢, 球墨铸铁零件

1.1 表面淬火基础

1.1.1 表面淬火的工艺特点

在很多情况下，我们既希望构件有较高的强度（硬度），又希望它的韧性要好，但二者常常是矛盾的，因此，使构件心部保持韧性而表面得到强化成为理想的选择。它可以通过表面淬火等工艺来实现。所谓的表面淬火有两种工艺方法。一是淬火前将工件全部加热，在冷却时使其表面的奥氏体过冷转变为马氏体，而心部的奥氏体由于冷却速度较小只发生珠光体转变，达到表面淬火的目的。这种方法对材料及淬火冷却介质的选择、工艺过程把握要求很高，硬化层深度控制较难，因而工业上较少应用。二是采用特殊的加热方法，使工件表面受热，温度迅速升高，表层被加热到 $Ac_1 \sim Ac_3$ 以上的温度，然后急剧冷却，表层被淬硬，而心部受热时温度只到达 Ac_1 以下，甚至未受热，心部不会出现淬火现象，实现表面淬火。后者可选择的热源较广，工艺过程、硬化层深度及质量易于控制，因而成为一类应用非常普遍的表面强化工艺。

根据不同的加热方法，表面淬火主要分为两大类：一类是外热源加热法，包括火焰加热、浴炉加热和电解液加热；另一类是内热源加热法，主要有感应加热和接触电阻加热。表面淬火进行的是局部强化，加热方式与常规的整体加热完全不同，必须特别注意。

外热源加热时工件断面上温度的变化情况如图 1-2 所示。在加热刚开始的 τ_0 时刻，工件表面和心部的温度均处于室温。在采用外热源开始加热时，外层的加热速度总是高于内层，因此，经过一段时间后，断面上温度按 τ_1 所示的曲线分布，依此类推，在 τ_k 时刻工件内外的温度达到均匀，且等于外部加热介质的温度。从图中曲线还可以看出，加热时间越长，工件达到相变点 Ac_1 以上温度的层深越厚（如 τ_4 时 Ac_1 以上的层深等于线段 4， τ_5 时层深等于线段 5），因此，可通过改变工件的加热时间获得不同的淬硬层深度。但是，从曲线也可以看到，越接近表面处，曲线靠得越紧，因而通过改变加热时间的方法来控制淬硬层深度比较困难。图 1-3 所示为不同加热速度下工

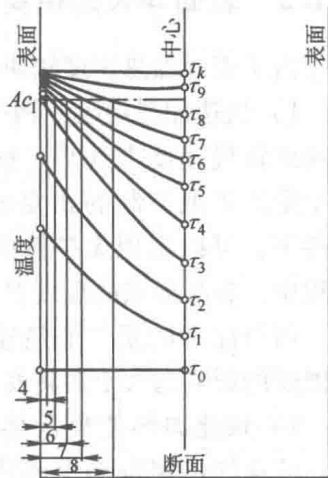


图 1-2 外热源加热时工件断面上温度的变化情况
 τ_0 —工件加热开始时刻
 τ_k —工件加热终了时刻
 $\tau_1 \sim \tau_9$ —工件加热的各阶段
4~8—淬火层深度

件达到相变点 Ac_1 以上温度的层深越厚（如 τ_4 时 Ac_1 以上的层深等于线段 4， τ_5 时层深等于线段 5），因此，可通过改变工件的加热时间获得不同的淬硬层深度。但是，从曲线也可以看到，越接近表面处，曲线靠得越紧，因而通过改变加热时间的方法来控制淬硬层深度比较困难。图 1-3 所示为不同加热速度下工

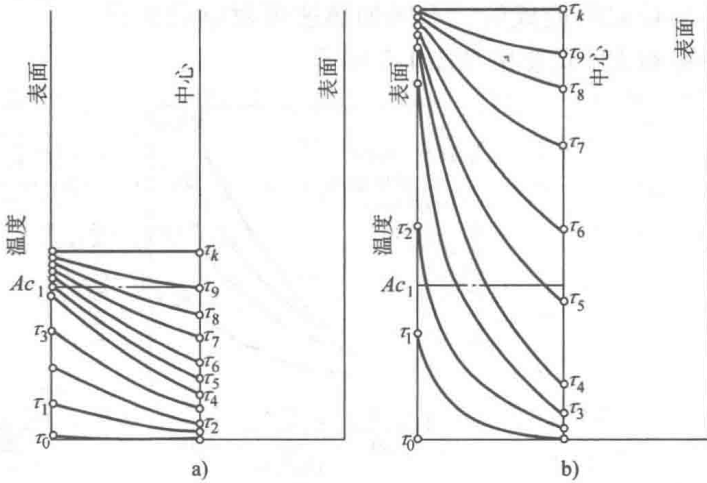


图 1-3 不同加热速度下工件断面上温度的变化情况
a) 缓慢加热 b) 快速加热

件断面上温度的变化情况。由图 1-3 可见，加热速度越快，工件内外的温差越大，近表面处曲线拉得较开，可以比较容易地控制淬硬层的深度。

在内热源加热时，主要是依靠金属对通过电流的阻力实现加热的。当在某种条件下电流通过预定的表层，该层被加热，而其他部位只有通过热传导的方法获得热量并升高其温度。因此，内热源加热表面淬火是通过调节被加热区电流的大小和电流的透入深度来控制淬硬层深度的。

1.1.2 表面淬火的相变特点

由于表面加热速度较快，其相变过程具有许多慢速加热时不具备的特点。

1) 快速加热将改变钢中临界点的温度。在平衡或较慢速度下加热，钢的奥氏体化过程是一个受碳扩散控制的相变过程，但在高速加热条件下，可以实现无扩散的奥氏体化，在这个过程中，各临界点的温度普遍升高，如图 1-4 所示。值得注意的是，加热速度对奥氏体转变终了温度的影响远大于对转变开始温度的影响。

2) 快速加热使奥氏体成分的不均匀性增加。快速加热使得奥氏体转变的孕育期缩短及马氏体点改变，可能导致淬火产物中出现不同形态的马氏体组织。特别是对合金钢进行快速加热，由于合金元素的扩散系数远远小于碳的扩散系统，更难实现成分均匀化。

3) 快速加热将使奥氏体晶粒显著细化。这是由于加热速度的提高，形成奥氏体的临界尺寸减小，并且在高速加热的条件下起始晶粒也不易长大所造成的。不同加热速度对钢的奥氏体晶粒大小的影响如图 1-5 所示。

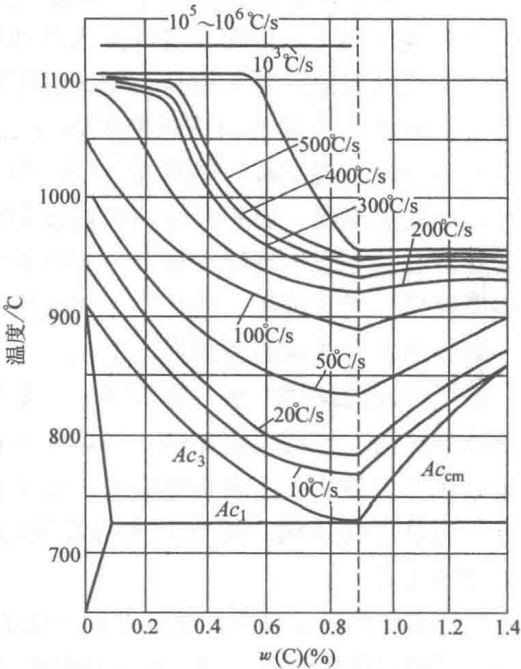


图 1-4 钢的非平衡加热相图

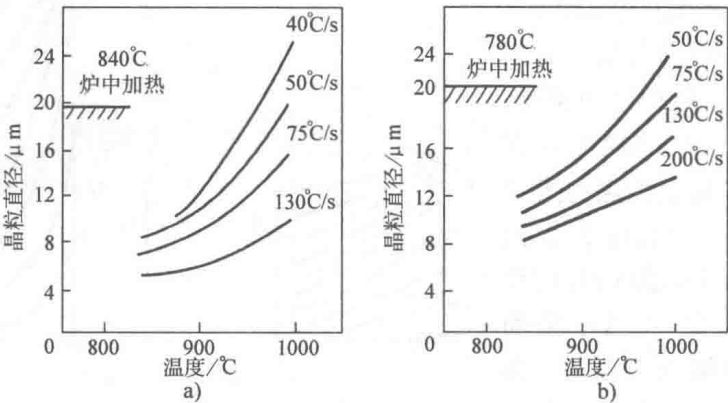


图 1-5 不同加热速度对钢的奥氏体晶粒大小的影响

a) 40 钢 b) T10 钢

常规的表面加热功率密度可达到 $10^4\text{W}/\text{cm}^2$ ，加热速度大于 $100^\circ\text{C}/\text{s}$ 。因此，在制订工艺规范时，必须提高奥氏体化温度。几种常用钢材表面淬火推荐的加热温度见表 1-2。

表 1-2 几种常用钢材表面淬火推荐的加热温度

牌号	预备热处理	原始组织	下列情况下的 加热温度 / $^\circ\text{C}$			
			炉中加热	A_{c1} 以上的 加热速度 / $(^\circ\text{C}/\text{s})$ A_{c1} 以上的 持续时间 / s		
				$\frac{30\sim60}{2\sim4}$	$\frac{100\sim200}{1.0\sim1.5}$	$\frac{400\sim500}{0.5\sim0.8}$
35	正火	细片状珠光体 + 铁素体	840 ~ 860	880 ~ 920	910 ~ 950	970 ~ 1050
	调质	索氏体	840 ~ 860	860 ~ 900	890 ~ 930	930 ~ 1020
40	正火	细片状珠光体 + 铁素体	820 ~ 850	860 ~ 910	890 ~ 940	950 ~ 1020
	调质	索氏体	820 ~ 850	840 ~ 890	870 ~ 920	920 ~ 1000
45	正火	细片状珠光体 + 铁素体	810 ~ 830	850 ~ 890	880 ~ 920	930 ~ 1000
	调质	索氏体	810 ~ 830	830 ~ 870	860 ~ 900	920 ~ 980
45Mn2 50Mn	正火	细片状珠光体 + 铁素体	790 ~ 810	830 ~ 870	860 ~ 900	920 ~ 980
	调质	索氏体	790 ~ 810	810 ~ 850	840 ~ 880	900 ~ 960
40Cr 45Cr	调质	索氏体	830 ~ 850	860 ~ 900	880 ~ 920	940 ~ 1000
	退火	珠光体 + 铁素体	830 ~ 850	920 ~ 960	940 ~ 980	980 ~ 1050
T8A T10A	退火	粒状珠光体	760 ~ 780	820 ~ 860	880 ~ 840	900 ~ 960
	正火或调质	片状珠光体或索氏体 (+ 渗碳体)	760 ~ 780	780 ~ 820	800 ~ 860	820 ~ 900
CrWMn	退火	粒状或粗片状珠光体	800 ~ 830	840 ~ 880	860 ~ 900	900 ~ 950
	正火或调质	细片状珠光体 + 铁素体	800 ~ 830	820 ~ 860	840 ~ 880	870 ~ 920

1. 1. 3 表面淬火的组织与性能特点

1. 表面淬火的组织特点

经表面淬火后，工件截面一般可分为淬硬层、过渡层和心部组织三部分（见图 1-6）。温度高于 A_{c3} 的部分加热淬火后得到全部马氏体，称为淬硬层（第Ⅰ区）；温度在 $A_{c3} \sim A_{c1}$ 之间，淬火后得到马氏体 + 铁素体组织，称为过渡层（第Ⅱ区）；加热温度低于 A_{c1} 为原始组织（第Ⅲ区）。表面淬火后的组织及其分布还与钢的化学成分、淬火规范和工件尺寸等因素有关。当加热层较深时，在硬化层中可能出现马氏体 + 贝氏体或马氏体 + 贝氏体 + 托氏体和少量铁素体的混合组织。

2. 表面淬火的性能特点

- （1）表面硬度 经高、中频感应加热喷射冷却的工件，其表面硬度比普通淬火高 2 ~ 5HRC。这种高硬度现象是由于奥氏体成分不均匀、奥氏体晶粒细化以及快速冷却表层产生高压应力共同作用所形成的，如图 1-7 所示。
- （2）耐磨性 表面淬火的淬硬层中马氏体晶粒极为细小，碳化物弥散度较大，硬度较高，并存在压应力状态，从而大幅度提高了材料的耐磨性，如图 1-8 所示。

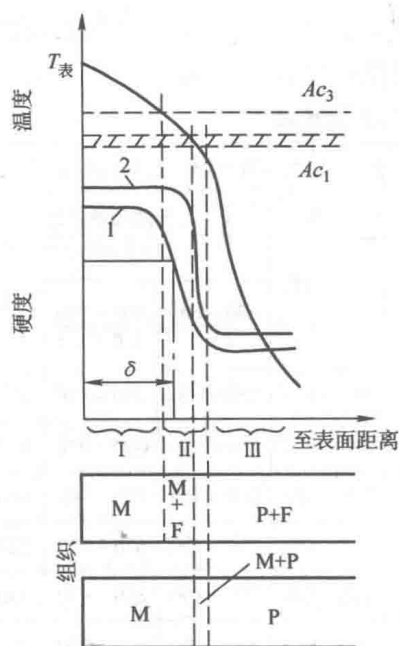


图 1-6 表面淬火后组织和硬度的分布

1—45 钢 2—T8 钢

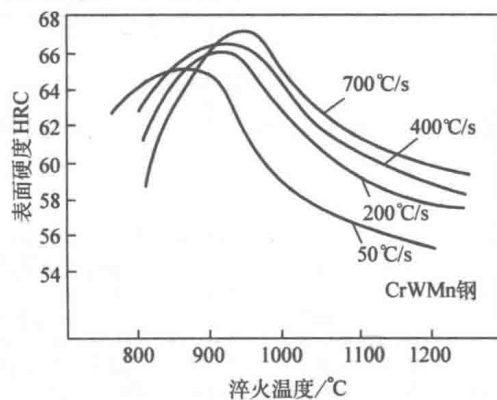
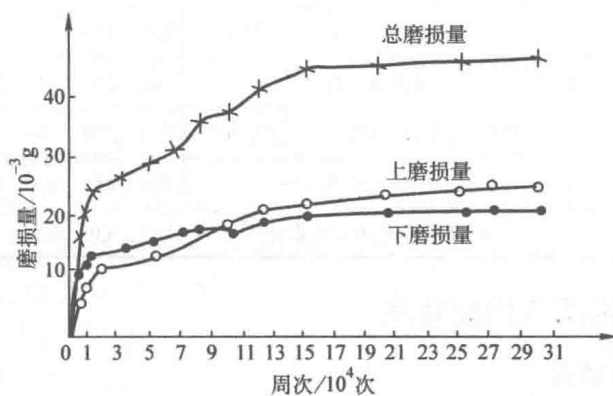
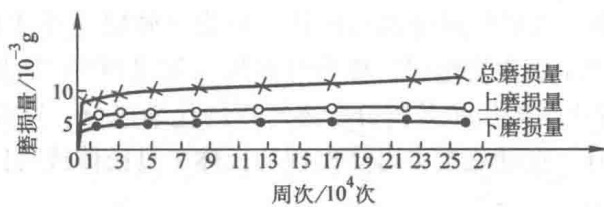
 δ —硬化层 I—淬硬层 II—过渡层 III—心部

图 1-7 不同加热速度下表面硬度与温度的关系



a)



b)

图 1-8 普通淬火与高频感应淬火件的耐磨性对比

a) 普通淬火 b) 高频感应淬火

(3) 疲劳强度 表面淬火显著提高工件的疲劳强度。例如, 采用高频感应淬火的 40MnVB 汽车半轴, 其使用寿命比整体调质处理提高 20 倍。表 1-3 列出了 40Cr 钢不同处理状态下的疲劳强度比较。

表 1-3 40Cr 钢不同处理状态下的疲劳强度比较（光滑试样）

处理状态	疲劳强度 $\sigma_{-1}/(\text{N}/\text{mm}^2)$
正火	200
调质	240
调质 + 高频感应淬火 ($\delta=0.5\text{mm}$)	290
调质 + 高频感应淬火 ($\delta=0.9\text{mm}$)	330
调质 + 高频感应淬火 ($\delta=1.5\text{mm}$)	480

1.1.4 表面淬火常用材料

进行表面淬火的工件不仅希望获得高硬度和强度的表面，而且要求心部保持较高的综合力学性能，因此， $w(\text{C})$ 为 0.40 ~ 0.50% 的中碳钢及球墨铸铁最适宜进行表面淬火处理。对于表面承受较小冲击和交变载荷下工作的工具、量具及高冷硬轧辊，也可采用高碳钢进行表面淬火。表面淬火常用材料见表 1-4。

表 1-4 表面淬火常用材料

类 别	材 料	用 途
碳素结构钢	35, 40, 45, 50	模数较小、负载较轻的机床传动齿轮及轴类零件
碳素工具钢	T8, T10, T12	锉刀、剪刀、量具
合金结构钢	40Cr, 45Cr, 40MnB, 45MnB	中等模数、负载较轻的机床齿轮或强度要求较高的传动轴
	30CrMo, 42CrMo, 42SiMn	模数较大、负载较重的齿轮和轴类零件
	55Tid, 60Tid(低淬透性钢)	用于负载不大、模数为 4 ~ 8mm 的齿轮的仿形硬化
	5CrMnMo, 5CrNiMo	负载大的零件
合金工具钢	GCr15, 9SiCr	工具、量具，直径小于 $\phi 100\text{mm}$ 的小型冷轧辊
	9Mn2V	精密丝杠、磨床主轴
	9Cr2, 9Cr2Mo	高冷硬轧辊
渗碳钢	20Cr, 20CrMnTi, 20CrMnMo	用于汽车、拖拉机上负载大、高耐磨的传动齿轮
铸铁	灰铸铁 ($\text{P} + \text{C}_{\text{片}}$)	机床导轨、气缸套
	球墨铸铁 ($\text{P} + \text{F} + \text{C}_{\text{球}}$)	曲轴、机床主轴、凸轮轴
	合金球墨铸铁 ($\text{P} + \text{K}_{\text{网、针}} + \text{C}_{\text{片、菊}}$)	农机零件
	可锻铸铁 ($\text{P} + \text{F} + \text{C}_{\text{团}}$)	农机零件

注：P—珠光体；F—铁素体； $\text{C}_{\text{片}}$ —片状石墨； $\text{C}_{\text{球}}$ —球状石墨； $\text{K}_{\text{网、针}}$ —网状或针状碳化物； $\text{C}_{\text{片、菊}}$ —一点状、菊状石墨； $\text{C}_{\text{团}}$ —团状石墨。

1.2 化学热处理基础

化学热处理是表面合金化与热处理相结合的一项工艺技术。它是将金属工件置于一定温度的活性介质中保温，使一种或几种元素渗入工件表层，以改变其化学成分、组织和性能的热处理工艺。

化学热处理是一项古老而又充满活力的表面改性技术，在整个热处理技术中，占有相当大的比重。通过表面合金化实现表面强化，在提高表面强度、硬度、耐磨性等性能的同时，

保持心部的强韧性,使产品具有更高的综合力学性能;表面合金化还可以在很大程度上改变表层的物理和化学性能,提高零部件的抗氧化性、耐蚀性;同时,化学热处理也是修复工程中修复热处理技术的重要组成部分。因此,化学热处理是机械制造、化工、能源动力、交通运输、航空航天等许多行业中不可或缺的工艺技术。

1.2.1 化学热处理的基本过程

要实现所需元素渗入工件表层,须经历一系列物理和化学反应,传统的化学热处理通常可归纳为渗剂的分解、工件表面对活性原子的吸收以及活性原子从工件表层向内部的扩散三个过程。

1. 渗剂的分解

介质中存在活性被渗原子是进行化学热处理的前提,这些活性被渗原子大多数来源于渗剂的分解(也有其他一些获得活性物质的方式,如电离等)。例如,渗碳时的活性碳原子 $[C]$,常由 CO 分解获得。而 CO 来源于一些化学反应:固体渗碳时,木炭在密封的渗碳罐中不完全燃烧产生 CO ;气体渗碳时,依靠丙酮、煤油等有机物的分解而产生 CO 。最终有下列反应式:



另外,也可以从某些碳氢化合物分解直接得到活性碳原子,例如:



在渗氮时,活性氮原子 $[N]$ 来源于渗氮剂的分解,如气体渗氮时常见的氨气分解:



渗剂的分解反应能否进行,应由该反应的热力学条件所决定,即需该反应的标准自由焓变化 $\Delta G^0 \leq 0$ 。事实上,在化学热处理过程所处的体系中,发生的化学反应是非常复杂的,除了渗剂本身的分解外,还存在与其他元素的相互作用,推动或者制约主要反应的进行。特别是在多元共渗时,既需要考虑到共渗介质内各扩散物质之间的相互作用,还必须注意每种扩散物质与被渗金属之间的反应,即参与扩散层形成的各种元素的化学亲和力都会影响共渗的效果。因此,在进行化学热处理时,只有充分考虑到存在的所有化学反应,才能准确预测处理的结果。

渗剂分解时,除考虑反应的热力学判据外,还应计算反应的动力学过程,即反应速度问题。一个在热力学上可行的化学反应,可能会因为反应速度太慢而失去实际应用的价值。影响化学反应速度的因素很多,其中包括化学介质的性质、反应物的浓度、压强、温度、工件表面状况及催化剂等。

在化学热处理中,常用渗剂的活性来衡量渗剂所能提供活性原子的能力。由于化学热处理常用混合渗剂,可将渗剂的化学反应写成通式:



式中, $[C]$ 为活性渗入组元; D 为反应生成物; A 、 B 为反应物。

则化学平衡常数为

$$K = \frac{p_C^c p_D^d}{p_A^a p_B^b} \quad (1-5)$$

从式(1-5)可知,为提高渗剂活性,促使反应正向进行,必须增加渗剂成分 A 与 B 的分压,即活性原子 $[C]$ 的浓度与炉气成分 A 、 B 的浓度成正比,而与炉气成分 D 的浓度成

反比。因此，可以用反应物质 A、B 的分压与反应生成物 D 的分压之比值来度量这种介质的活性。化学平衡常数 K 与活性的大小直接相关，且与温度之间符合阿累尼乌斯公式：

$$\ln K = -\frac{E}{RT} + \ln Z \tag{1-6}$$

式中， R 为摩尔气体常数； E 为激活能（J/mol）； Z 为频率因子。

对一定反应来说， E 、 Z 均为常数。化学热处理中常见反应的化学平衡常数与温度的关系见表 1-5。

表 1-5 化学热处理中常见反应的化学平衡常数与温度的关系

反 应 式	平 衡 常 数	平衡常数与温度的关系
$2\text{CO} \rightleftharpoons \text{C} + \text{CO}_2$	$K = \frac{p_{\text{CO}_2}}{p_{\text{CO}}^2}$	$\lg K = \frac{8720}{T} - 9.01$
$\text{CH}_4 \rightleftharpoons \text{C} + 2\text{H}_2$	$K = \frac{p_{\text{H}_2}^2}{p_{\text{CH}_4}}$	$\lg K = \frac{4775}{T} + 5.77$
$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$	$K = \frac{p_{\text{CO}_2} p_{\text{H}_2}}{p_{\text{CO}} p_{\text{H}_2\text{O}}}$	$\lg K = \frac{1725}{T} - 1.59$
$\text{NH}_3 \rightleftharpoons \frac{1}{2}\text{N}_2 + \frac{3}{2}\text{H}_2$	$K = \frac{p_{\text{N}_2}^{1/2} p_{\text{H}_2}^{3/2}}{p_{\text{NH}_3}}$	$\lg K = -\frac{28631}{T} + 6.1$
$\text{Fe} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{FeO} + \text{CO}$	$K = \frac{p_{\text{CO}}}{p_{\text{CO}_2}}$	$\lg K = -\frac{1080}{T} + 1.3$
$\text{Fe} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{FeO} + \text{H}_2$	$K = \frac{p_{\text{H}_2}}{p_{\text{H}_2\text{O}}}$	$\lg K = -\frac{960}{T} - 0.6$
$\text{Mn} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{MnO} + \text{CO}$	$K = \frac{p_{\text{CO}}}{p_{\text{CO}_2}}$	$\lg K = \frac{5240}{T} - 0.75$
$\text{Mn} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{MnO} + \text{H}_2$	$K = \frac{p_{\text{H}_2}}{p_{\text{H}_2\text{O}}}$	$\lg K = \frac{7250}{T} - 1.1$
$\frac{2}{3}\text{Cr} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \frac{1}{3}\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{CO}$	$K = \frac{p_{\text{CO}}}{p_{\text{CO}_2}}$	$\lg K = \frac{4970}{T} - 0.08$
$\frac{2}{3}\text{Cr} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \frac{1}{3}\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{H}_2$	$K = \frac{p_{\text{H}_2}}{p_{\text{H}_2\text{O}}}$	$\lg K = \frac{6325}{T} - 1.75$
$\frac{1}{2}\text{Mo} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \frac{1}{2}\text{MoO}_2 + \text{CO}$	$K = \frac{p_{\text{CO}}}{p_{\text{CO}_2}}$	$\lg K = -\frac{198}{T} + 0.65$
$\frac{1}{2}\text{Mo} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \frac{1}{2}\text{MoO}_2 + \text{H}_2$	$K = \frac{p_{\text{H}_2}}{p_{\text{H}_2\text{O}}}$	$\lg K = \frac{1710}{T} - 1.1$
$\text{Ti} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{TiO} + \text{CO}$	$K = \frac{p_{\text{CO}}}{p_{\text{CO}_2}}$	$\lg K = \frac{12200}{T} - 0.2$
$\text{Ti} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{TiO} + \text{H}_2$	$K = \frac{p_{\text{H}_2}}{p_{\text{H}_2\text{O}}}$	$\lg K = \frac{14100}{T} - 1.97$
$\text{TiCl}_4 + \text{CH}_4 \rightleftharpoons \text{TiC} + 4\text{HCl}$	$K = \frac{p_{\text{HCl}}^4}{p_{\text{TiCl}_4} p_{\text{CH}_4}}$	$\lg K = -\frac{13830}{T} + 12.57$

在诸多因素中，温度对反应速度的影响最大，大多数化学反应都随温度的升高而迅速加快。因此，化学热处理过程必须在一定的温度条件下进行。

另外, 催化剂在化学热处理过程中也起到非常重要的作用, 一些处理过程在无催化剂的条件下甚至难以进行。如式 (1-2) 的甲烷热分解反应, 在无催化剂时, 600°C 以下不会析出炭黑, 约在 600°C 时才有炭黑出现, 而甲烷在钢件表面的分解速度约为在陶瓷表面分解速度的 7 倍。又如式 (1-3) 的氨分解反应, 必须在铁、镍等金属的作用下, 才会分解出足够的活性氮原子。因此, 进行化学热处理时应充分考虑催化剂所产生的影响, 如 Fe、Co、Ni、Cr、Ti 等对 CO 分解起催化作用; Fe、Pt、W、Ni 等对 NH_3 分解起催化作用; Cr、Fe、Ni、Pt、W 等对碳氢化合物分解起催化作用等。

2. 活性原子在工件表面的吸收过程

吸附是物质在相界面上自动集聚的过程, 固体的吸附就是固体物质自发地把周围介质中的分子、原子或离子吸附到固体表面的现象。这是由于固体表面的分子 (或原子、离子) 具有一定的表面能, 它有吸附某种物质以降低其表面能的倾向。

吸附是一个放热过程, 根据平衡移动原理, 温度升高, 平衡向吸热方向转移。因此, 在相同的压力下, 温度升高, 将使吸附量下降。

吸附作用并非在固体表面均匀进行, 吸附中心往往出现在表面的一些缺陷处。固体表面吸附的同时, 还伴随着解吸 (即吸附质脱落) 的发生, 这一过程可用渗碳时 CO 与铁表面的相互作用进行说明。

如前所述, 气体渗碳时, CO 分解如式 (1-1) 所示。该反应的实质是一个 CO 分子从另一个 CO 分子中夺取氧原子而生成 CO_2 , 同时析出一个活性碳原子。碳和氧之间的结合力很强, 单靠两个 CO 分子间的猛烈碰撞来破坏 C—O 键、完成上述转化几乎是不可能的。因此, 在气相中进行这一反应需要很高的活化能。试验表明, 当存在金属铁时, 反应速度明显加快, 它不仅吸收分解出来的活性碳原子, 而且对 CO 分解起催化作用。此时, CO 的分解可做如下解释。

首先, CO 分子中的 C 和 O 分别被吸附在相邻的 Fe 原子上:



由于 Fe 晶格中原子核间距 (0.228nm) 差不多比 CO 分子中核间距 (0.115nm) 大一倍, 一旦发生化学吸附, CO 被强烈地变形, 从而削弱碳和氧之间原有的结合力, 为破坏 C—O 键提供了有利条件。这样, 被吸附在 Fe 上而产生变形的 CO 分子就很容易与 CO 作用成为 CO_2 和 $[\text{C}]$:



吸附在 Fe 上的 $[\text{C}]$ 可进一步渗入 Fe 的晶格而溶解。由此可见, 吸附作用在渗碳和其他化学热处理过程中是普遍存在的, 而且, 由于吸附 (特别是化学吸附) 加速了化学介质的分解过程和活性原子的形成过程, 使活性原子进一步向工件内部扩散成为可能。

3. 化学热处理中的扩散过程

在固体介质中, 原子在化学位梯度 (浓度、压力、电位、应力、磁场、晶体缺陷等) 驱使下而引起的物质的宏观定向迁移, 称为扩散。如当工件表层存在浓度梯度时, 高浓度区的原子向低浓度区扩散, 从而形成渗层, 其结果将导致系统的自由能降低。

(1) 扩散过程的宏观规律 渗入元素的原子在基体金属内部扩散的宏观规律, 可用 Fick 定律及其方程表达。

1) Fick 第一定律。在稳态扩散条件下 (即扩散通量不随时间而变化), 在单位时间内