



高等学校经典畅销教材

# 金属热处理工艺学

(修订版)

夏立芳 编

HEAT TREATMENT  
TECHNOLOGY OF METALS



哈尔滨工业大学出版社  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

 高等学校经典畅销教材

# 金属热处理工艺学

(修订版)

夏立芳 编

HEAT TREATMENT

TECHNOLOGY OF METALS

哈尔滨工业大学出版社

## 内 容 简 介

本书经审定为工科高等学校金属材料与热处理专业教材,内容包括金属加热、退火、正火、淬火、回火、表面淬火、化学热处理及热处理工艺设计等有关金属热处理的工艺原理。

本书结合金属热处理及化学热处理近年来的成就,着重在工艺原理上进行了阐述,并对热处理及化学热处理的发展趋势在理论上进行了分析;介绍了真空热处理,可控气氛热处理,形变热处理,激光、电子束表面淬火,真空渗碳,等离子化学热处理及复合热处理等新工艺;最后阐述了热处理工艺与设计及其他加工工艺间的关系,并结合实例介绍了热处理工艺设计的基本方法及最优化工艺设计的概念。

本书也可供从事金属材料及热处理研究和生产的广大科技人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

金属热处理工艺学/夏立芳编.—4版(修订本).—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2008.4

ISBN 978-7-5603-0954-5

I.金… II.夏… III.热处理-高等学校-教材

IV.TG15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 044702 号

责任编辑 许雅莹

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 肇东粮食印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 12 字数 288 千字

版 次 2008 年 5 月第 4 版 2008 年 5 月第 9 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-0954-5

定 价 22.80 元

---

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

## 修订版前言

本书自 1985 年作为我国工科高等学校金属材料与热处理专业热处理工艺学课程的通用教材出版以来,已有二十多年,随着科学技术的迅速发展,热处理工艺也有很大发展。这二十多年来,我国工科高等学校的专业设置也有很大变化,原来的金属材料与热处理专业已扩展为材料科学与工程专业。由于专业的拓宽,课程也进行了拓宽,因而有些院校的材料科学与工程专业已不再专门设置这门课程,但是许多机器制造厂,无论是否有专门的热处理车间,都有大量的热处理工业生产,需要材料科学与工程专业毕业生去面对,需要他们在原有课程学习的基础上,去学习掌握材料热处理工艺原理与技术;对继续进行研究生学习的学生,在制订研究方案、进行试验时,由于本科生阶段没有专门学习过热处理工艺学,因而也需要自学补充这方面知识;有的工程技术学院,针对我国国情,设立了金属材料与热处理专业,因此希望能有一本合适的热处理工艺学教材或参考书。这些,都要求本教材作必要的修订,以适应上述各方面的需要。

根据以上情况,这次修订遵循了以下原则。

(1)保留了本书着重阐述工艺原理及在此基础上以技术与经济相统一的观点,讲述热处理工艺设计的基本原则的特点。

(2)根据现代制造技术数字化与信息化的趋势,补充了热处理工艺过程数值模拟及智能控制原理的阐述。

(3)由于节约能源、减少排污、保护环境已是对现代制造业的必定要求,热处理工业生产的节能、环保已是非常突出的问题,因此修订版也突出介绍了节能、环保热处理。

由于编者学识有限,不当之处,请广大读者不吝指正。

编者

2008 年 1 月

## 第 1 版 前 言

本教材是根据一九八三年机械工业部金属材料与热处理专业教材分编委员会修订的《热处理工艺学》教学大纲编写的,并经一九八四年十月在武汉召开的分编委扩大会议审定为工科高等学校金属材料与热处理专业热处理工艺学课程的通用教材。

本课程是金属热处理原理的后续课程,也是从一般相变原理到解决具体热处理工艺之间的桥梁。本书着重阐述金属热处理工艺对其组织与性能的影响及有关的工艺原理,最终以技术与经济统一的观点,讲述热处理工艺设计的基本原则。全书共分六章,第一章为热处理的共性问题,主要阐述金属加热的传热过程及在加热过程中表面与介质所发生的物理化学作用;第二、三章为一般热处理,主要阐述退火、正火、淬火和回火;第四章为表面淬火;第五章为化学热处理;最后一章为热处理工艺设计。本书系在哈尔滨工业大学原教材《金属热处理工艺学》基础上根据新大纲要求编写的,在内容上主要作了如下修改:(1)根据新大纲规定的学时数,精炼了内容,削减了篇幅,适合于讲授 40~45 学时;(2)加强对热处理基本工艺理论的阐述,尽可能以热处理工艺本身规律来讲述问题,把原来“钢的热处理新技术”一章内容,分散到有关章节中,这样既便于讲述,也便于学生掌握,且可达到削枝强干的作用。当有些问题可能在讲述几种工艺时同时出现,我们尽可能把它们合并在一中工艺中讲透,而在讲述其他工艺时捎带而过;(3)根据近代热处理生产逐渐实现电脑控制的趋势,加强了对热处理工艺过程的数学分析及计算方法。

本书也可供从事金属材料、热处理工艺研究和生产的广大科技人员参考。

本书由重庆大学李春信同志主审,对此深表谢意。

由于编著者水平所限,本书不当之处在所难免,敬希广大读者批评指正。

编 者

一九八五年六月

# 目 录

第0章 绪论	1
0.1 金属热处理工艺学的发展过程	1
0.2 学习金属热处理工艺学的目的、任务及要求	3
0.3 学习金属热处理工艺学的方法	4
参考文献	4
第1章 金属的加热	5
1.1 金属加热的物理过程及其影响因素	5
1.1.1 加热介质与工件表面的传热过程,影响传热系数 $\alpha$ 的因素	5
1.1.2 工件内部的热传导过程	8
1.1.3 热处理加热时间的确定	8
1.1.4 影响热处理工件加热的因素	9
1.2 金属和合金在不同介质中加热时常见的物理化学现象及加热介质的选择	12
1.2.1 金属在加热时的氧化反应及氧化过程	12
1.2.2 钢加热时的脱碳及脱碳过程	15
1.2.3 加热介质的选择	19
习题	21
参考文献	22
第2章 退火和正火	23
2.1 退火、正火的定义、目的和分类	23
2.2 常用退火工艺方法	24
2.2.1 扩散退火	24
2.2.2 完全退火	25
2.2.3 不完全退火	25
2.2.4 球化退火	25
2.2.5 再结晶退火和消除应力退火	28
2.3 钢的正火	29
2.4 退火、正火后钢的组织 and 性能	30
2.5 退火、正火缺陷	31
习题	32
参考文献	33

第3章 钢的淬火及回火 .....	34
3.1 淬火的定义、目的和必要条件 .....	34
3.2 淬火介质 .....	35
3.2.1 淬火介质的冷却作用 .....	35
3.2.2 淬火介质冷却特性的测定 .....	36
3.2.3 常用淬火介质及其冷却特性 .....	37
3.3 钢的淬透性 .....	40
3.3.1 淬透性的基本概念及其影响因素 .....	40
3.3.2 淬透性的实验测定方法 .....	42
3.3.3 淬透性的计算方法 .....	44
3.3.4 淬透性在选择材料和制订热处理工艺时的应用 .....	46
3.4 淬火应力、变形及开裂 .....	48
3.4.1 淬火时工件的内应力 .....	48
3.4.2 淬火时工件的变形 .....	52
3.4.3 淬火裂缝 .....	55
3.5 确定淬火工艺规范的原则、淬火工艺方法及其应用 .....	57
3.5.1 淬火加热方式及加热温度的确定原则 .....	57
3.5.2 淬火加热时间的确定原则 .....	58
3.5.3 淬火介质及冷却方式的选择与确定 .....	59
3.5.4 淬火方法及其应用 .....	59
3.5.5 淬火过程的计算机数值模拟及应用 .....	61
3.6 钢的回火 .....	61
3.6.1 碳钢的回火特性 .....	62
3.6.2 回火工艺的制订 .....	64
3.7 淬火新工艺的发展与应用 .....	66
3.7.1 循环快速加热淬火 .....	66
3.7.2 高温淬火 .....	66
3.7.3 高碳钢低温、快速、短时加热淬火 .....	67
3.7.4 亚共析钢的亚温淬火 .....	67
3.7.5 等温淬火的发展 .....	68
3.7.6 其他淬火方法 .....	69
3.8 淬火、回火缺陷及其预防、补救 .....	69
3.8.1 淬火缺陷及其预防、补救 .....	69
3.8.2 回火缺陷及其预防、补救 .....	71
习题 .....	72
参考文献 .....	72
第4章 钢的表面淬火 .....	73
4.1 表面淬火的目的是、分类及应用 .....	73

4.2	表面淬火工艺原理	74
4.2.1	钢在非平衡加热时的相变特点	74
4.2.2	表面淬火的组织与性能	76
4.3	表面淬火方法	80
4.3.1	感应加热表面淬火	80
4.3.2	火焰加热表面淬火	88
4.3.3	其他表面淬火法	91
	习题	94
	参考文献	94
<b>第5章</b>	<b>金属的化学热处理</b>	<b>96</b>
5.1	化学热处理的基本原理	97
5.1.1	化学热处理的基本过程	97
5.1.2	化学热处理渗剂及其在化学热处理过程中的化学反应机制	97
5.1.3	化学热处理的吸附过程及其影响因素	98
5.1.4	化学热处理的扩散过程	99
5.1.5	加速化学热处理过程的途径	106
5.2	钢的渗碳	108
5.2.1	渗碳的目的、分类及应用	108
5.2.2	滴注式可控气氛渗碳与吸热式气氛气体渗碳工艺原理	110
5.2.3	氮基气氛渗碳	114
5.2.4	气体渗碳过程的计算机数值模拟和渗碳层碳浓度分布曲线的自适应调整	115
5.2.5	真空渗碳	117
5.2.6	渗碳后的热处理	119
5.2.7	渗碳后钢的组织与性能	120
5.2.8	渗碳缺陷及控制	123
5.3	金属的渗氮	124
5.3.1	钢的渗氮原理	124
5.3.2	渗氮层的组织和性能	127
5.3.3	渗氮钢及其发展	133
5.3.4	渗氮工艺控制	134
5.3.5	气体渗氮过程的数学模式及可控渗氮	139
5.4	钢的碳氮共渗	143
5.4.1	碳和氮同时在钢中扩散的特点	144
5.4.2	中温气体碳氮共渗	145
5.4.3	氮碳共渗(软氮化)	149
5.5	渗硼	150
5.5.1	渗硼层的组织性能	150



5.5.2	渗硼方法	151
5.5.3	渗硼后的热处理	152
5.6	渗金属	152
5.7	辉光放电离子化学热处理	154
5.7.1	离子化学热处理的基本原理	154
5.7.2	离子渗氮	155
5.7.3	离子渗碳、碳氮共渗和氮碳共渗	156
5.7.4	离子渗硼和渗金属	157
	习题	157
	参考文献	158
<b>第6章</b>	<b>热处理工艺设计</b>	<b>160</b>
6.1	热处理工艺与机械零件设计的关系	160
6.2	热处理工艺与其他冷、热加工工艺的关系	165
6.3	加工工艺之间的组合与复合热处理	167
6.3.1	形变热处理	167
6.3.2	复合热处理	168
6.4	热处理工艺设计的步骤和方法	170
	参考文献	172
<b>附    录</b>		<b>173</b>
附录 1	铁、碳钢及合金钢的热导率	173
附录 2	常用钢材加热和冷却时的临界点	173
附录 3	常用钢淬火后硬度与截面厚度的关系	174
附录 4	常用钢的临界直径	174
附录 5	常用钢不同温度回火后的硬度	175
附录 6	感应加热表面淬火频率选择表	176
附录 7	感应加热时不同工件直径允许使用的最低频率	176
附录 8	感应加热时轴类零件硬化层深度与比功率关系表	176
附录 9	不同模数齿轮的设备比功率( $f=200\sim 3\ 000\text{ kHz}$ )	176
附录 10	几种常用钢材表面淬火时推荐的加热温度	177
附录 11	零件直径与单匝感应圈高度的关系	177
附录 12	感应圈与工件的间隙	178
附录 13	结构钢、模具钢渗氮工艺规范	178
附录 14	不锈、耐热钢渗氮工艺规范	179
附录 15	测定渗氮层硬度时荷重的选用	179

# 第 0 章

## 绪 论

通过加热、保温和冷却的方法使金属和合金内部组织结构发生变化,以获得工件使用性能所要求的组织结构,这种技术称为热处理工艺。研究热处理工艺规律和工艺原理的学科称为热处理工艺学。

学习和研究这门学科,首先要了解它的发展过程。

### 0.1 金属热处理工艺学的发展过程

金属热处理工艺学和其他自然科学相同,是随着生产力的发展而发展的,同时和其他科学技术的发展紧密相关。热处理工艺是古代冶金技术发展的结果,是作为冶金技术的一部分,逐渐发展而形成一门学科的。

在我国历史上,热处理工艺出现于铁器时代。当铸铁一出现,就出现了如何提高其韧性的问题。铸铁的柔化处理就是根据这一要求最早出现的热处理工艺,它包括石墨化退火及脱碳退火<sup>[1]</sup>。这种处理方法出现于春秋时期(公元前 770 ~ 公元前 470 年),至西汉已发展比较成熟。例如 1974 年在洛阳出土的战国早期的几件铁器,经分析,发现其中一件铁铤、一件铁铲都是生铁铸成的,其表面脱碳,稍向内为相当于黑心可锻铸铁的组织。

我国古代的炼钢是采用铸铁脱碳退火及反复锻打方法进行的,即所谓“百炼成钢”。随着炼钢技术的发展,热处理技术也得到发展。1974 年河北省易县燕下都出土了一批战国中、晚期钢铁兵器,据分析,其中的两把剑和一把戟都经过淬火处理,金相组织中有马氏体存在<sup>[2]</sup>,这说明在战国中、晚期,我国已发明了淬火技术,在这些兵器中也发现曾进行过正火处理及淬火钢的回火处理。至西汉,我国的热处理技术已发展到相当水平,不仅能进行一般热处理,而且还能进行局部热处理。当时,化学热处理主要是渗碳和碳氮共渗两个方面,例如出土的西汉中期刘胜(中山靖王)的佩剑和错金书刀内层碳的质量分数最低处为 0.05%,而表面碳的质量分数却高达 0.6% 以上,有一定的碳浓度梯度,说明那时已有渗碳技术。

从汉代开始,我国的热处理技术已有文字记载,内容包括一般淬火技术、淬火介质及渗碳工艺等,几乎涉及热处理技术的各个方面。例如《史记·天官书》中载有:“火与水合为焠”,《汉书·王褒传》中载有:“巧冶铸干将之璞,清水淬其锋”,其中“焠”、“淬”同义,均为淬火的意思。在《晋书》中所载“大夏龙雀”是被称为“名冠神都”和“威服九区”的利器,与西汉中期的刀剑相比,其组织均匀,含碳适中(均为 0.6% ~ 0.7%),经淬火,刀口锋利,表面

经氧化处理,抗腐蚀性能良好。在淬火介质方面,三国(公元 222 ~ 265 年)的蒲元和南北朝的綦母怀文都作过较大贡献。据《蒲元别传》所载,蒲元在今陕西郿县一带的斜谷为诸葛亮制剑三千把,他说“汉中的水钝弱,不任淬;蜀水爽烈”,于是派人到成都取水,淬之果然锋利。削装铁珠的竹筒“应手虚落,若雉生雏,称绝当世,因曰神刀”。《北史·艺术烈传》中记载了綦母怀文用牲畜之尿或脂(油)作淬火介质的史实;在《新唐书》卷 222 中谈到了用马血淬火;元朝《格致粗谈》中记有用地溲(可能是石油)淬火;清朝《续广博物志》第八卷谈到用一种硝黄、盐卤、人尿合成淬火剂,这些都说明我国在使用淬火介质方面已经积累了丰富的经验。在化学热处理方面也有记载。明代宋应星在《天工开物》卷十中谈到一种制针的渗碳工艺,渗碳在釜中进行,有消除应力过程,采用“松木”、“火矢”、“豆豉”作渗碳剂,用试验针指示渗碳程度等,记载相当详细,已是成熟的工艺。明《便民图纂》卷十五制造类,清陈克怒《篆刻针度》卷七“炼刀法”等分别介绍了几种膏剂渗碳法。此外还使用一些含氮渗剂,实际上是进行了碳氮共渗。

从上面出土文物的考证及一些文字的记载可以清楚地看出,我国热处理工艺历史悠久,其技艺曾发展到非常高超的程度,这是当时其他国家所不及的,作为中国的热处理工作者应当引以为荣。但是长期的封建统治,阻碍着我国科学技术的发展,也阻碍着热处理技术的发展,在以后相当长的一段时间内,我国的热处理技术的发展处于停滞状态,有的技术甚至失传。直到 20 世纪五十年代,由于社会主义制度解放了生产力,热处理技术在我国才又重新迅速发展起来。今天热处理技术已遍及各个生产部门,形成了一支庞大的专业队伍,并有相应的各级学术研究团体,每年均有热处理专业的研究生、大学生和中专毕业生参加工作。广大的热处理工作者正为祖国的现代化作出重大贡献。

在国外,历史上出现热处理技术较我国晚;但是在产业革命以后,资本主义发展时期,热处理技术却得到迅速发展,特别是光学显微镜的出现,使借助显微镜来观察钢和铸铁的组织成为可能。例如 19 世纪中期,英国的索拜(H. C. Sorby)和德国的马登斯(A. Martens)等采用抛光、腐蚀等方法,并用光学显微镜成功地显示钢的显微组织,大大推动了热处理技术的发展<sup>[3]</sup>。与此同时,俄国的切尔诺夫(Д. К. Чернов)发现了钢的组织影响它本身的性质,并发现了钢在加热和冷却过程中存在着组织变化的临界点,为钢的热处理技术奠定了理论基础<sup>[4]</sup>。不久,英国的奥斯汀(O. Robert Austen)和法国的奥斯摩特(F. Osmord)应用相律建立了 Fe - C 平衡图,使得钢的热处理有了依据。1930 年贝茵(E. C. Bain)研究了过冷奥氏体的等温变化,建立了钢的过冷奥氏体等温转变曲线,创立了等温淬火工艺,为以后制订各种热处理工艺提供了科学依据<sup>[5]</sup>。至此,热处理才真正形成了一门较完整的科学。

此后随着其他科学技术的发展,热处理技术也得到迅速的发展。从热处理技术的发展过程中我们看到有如下特点。

(1) 实验手段和技术的不断完善,对金属中的组织转变规律及组织与性能之间的关系得以不断加深了解,从而发展了不少新的热处理工艺。例如,电子显微技术的发展,使我们不仅可以看到一般组织,而且可以看到组织内部微细结构,如马氏体内的亚结构等;从而了解到更细微的问题,发展了新的热处理工艺,如板条马氏体的应用、高温淬火、复相热处理等。

(2) 由于在基础理论方面不断取得成就,才能从本质上来认识金属组织与性能之间的关系,从而能动地发展热处理工艺。例如断裂物理和位错理论的成就,对发展金属的强韧

化热处理工艺起着指导作用。而位错理论目前不仅是强度理论的基础,也是相变理论的基础。

(3)工业机械化、自动化的成就及表面化学的研究,发展了各种表面防护热处理及表面强化热处理。例如保护气氛热处理、真空热处理及渗碳、渗氮等可控化学热处理。

(4)电子计算机、自动控制技术的发展,以及热处理工艺过程的数学模式和数值模拟的研究,使热处理工艺过程得以用计算机自适应控制和智能控制。

(5)其他新能源、新技术的开发,使热处理工艺发展成为许多复合的工艺。如高频及超高频热处理、激光束热处理、电子束热处理、形变热处理、等离子体基化学热处理等。

到目前为止,我们可以把热处理工艺分成如下4大类。

(1)普通热处理。即退火、正火、淬火及回火等。这类热处理根据其处理过程中是否采取防护及所采取的防护方法,又分为无保护热处理、保护气氛热处理及真空热处理等。

(2)化学热处理。目前根据钢在处理过程中所具有的组织状态而分为奥氏体化学热处理及铁素体化学热处理。

(3)表面热处理。指仅在工件表面一定深度范围内进行热处理的一类处理工艺,如各种表面淬火方法。

(4)复合热处理。

当前金属及合金热处理发展的总趋势如下<sup>[6~8]</sup>。

(1)在金属及合金的总产量中,经热处理的部分所占比例不断增加。

(2)成品、半成品零件热处理比率进一步增加。

(3)降低热处理能耗及热处理成本。

(4)减少排污,发展绿色热处理。

(5)发展数字化的热处理智能技术。

为了适应新世纪科学技术和工业发展的需要,热处理技术水平也需相应提升。因此美国能源部提出的有关热处理工业2020年远景报告中提出了以下目标:①保证热处理质量、热处理质量分散度为零;②热处理畸变为零;③热处理能源利用率达到80%;④热处理对环境的影响为零;⑤工艺时间减少50%,成本降低75%。为了达到这些目标,对热处理生产过程实现全面精确控制,并广泛采用热处理计算机模拟技术<sup>[9]</sup>。

## 0.2 学习金属热处理工艺学的目的、任务及要求

金属热处理工艺学是金属材料及热处理专业的一门必修课。其任务是通过学习来掌握各种基本的热处理工艺原理及热处理工艺对金属合金组织与性能的影响规律,熟悉主要的热处理工艺,了解我国发展热处理技术的方向、任务和当代热处理工艺科学的最新成就,为分析、制订热处理工艺和探索发展新的工艺打下基础。金属热处理工艺学是从一般相变原理到解决具体热处理工艺技术之间的桥梁。

学完金属热处理工艺学后,应达到下列要求。

(1)掌握钢铁热处理的基本工艺:退火、正火、淬火、回火、感应热处理、化学热处理的原理。

(2)熟悉提高机械零件、工具等产品质量和寿命所应采取的各种热处理方法及其强化规律和适用范围。

(3)熟悉钢铁热处理后的各种主要的组织形态及性能。

(4)了解当代化学热处理及表面热处理新技术发展的领域及趋势,熟悉真空热处理、可控气氛热处理、激光束、电子束、离子束及等离子体热处理和复合热处理等新技术的原理及特点。

### 0.3 学习金属热处理工艺学的方法

根据金属热处理工艺学的特点,学习时应注意如下几点。

(1)要抓住热处理工艺的普遍规律。金属热处理工艺学牵涉面广,内容又比较繁杂,但是不论哪一种热处理工艺,它们的基本规律都是加热—保温—冷却问题,决定热处理工艺性质的也主要是这三个问题。例如不同热处理工艺,可能它们之间的加热方式、加热介质、加热温度区域不同,但是不论哪一种热处理工艺都要考虑加热问题,对保温和冷却也类似。因此,在学习各种热处理工艺时,如能从这三个基本问题出发,来研究它们的异同点,则问题就变得简单明了。

(2)要抓住每种热处理工艺的特殊规律或特点。每种热处理工艺都是由其特殊规律所决定的,例如退火与淬火的基本差别是得到的组织状态不同。由此,它们的加热、保温和冷却就有其特殊要求和许多特殊问题,将它们进行对比,抓住其特点,则可清楚地熟悉各种热处理工艺。

(3)要注意实现某种热处理工艺的技术问题。这是一种工艺能否应用于生产,有无生命力的关键。有些工艺,虽然从小试样上可以得到很好的结果,但往往由于某些技术问题没有解决,就不能在生产上应用。因此在学习或发展某种热处理工艺时必须注意到这一问题,这样才能学得灵活,掌握得牢固。

(4)要注意与其他加工工艺之间的关系。例如工艺路线、处理前后的组织状态及后续工艺等。

### 参 考 文 献

- [1] 北京钢铁学院“中国古代冶金”编写组. 中国古代冶金[M]. 北京:文物出版社,1978.
- [2] 何堂坤. 金属热处理,1981,3.
- [3] SZPUNÄR E, BURAKOWSKI T. HTM,1980,35(2).
- [4] КОНТРОВИЧИ Е. Термическая обработка стали и чугуна[M]. МАШГИЗ,1951.
- [5] GROSSMAN M A. Principles of heat Treatment[M]. ASM,1955.
- [6] 徐祖耀. 材料热处理学报,2003,24(1).
- [7] 潘健生,张伟民,陈乃录,等. 金属热处理,2004,29(1).
- [8] 樊东黎. 金属热处理,2007,32(4).
- [9] 陈再良,阎承沛. 先进热处理制造技术[M]. 北京:机械工业出版社,2002.

# 第 1 章

## 金属的加热

金属制品在热处理加热时,其热量的来源可以从邻近的发热体以一定的方式进行热交换而获得,如一般加热炉加热;也可以工件自身作为发热体,把别种形式的能量转变为热能而使工件加热,如直接通电加热、感应加热、离子轰击加热等。工件加热时是在一定的环境中进行,因而除了与周围环境进行热交换外,还将发生其他物理化学过程。本章将介绍钢在热处理时的加热过程、加热时工件表面与周围介质的作用、加热缺陷及其防止。

### 1.1 金属加热的物理过程及其影响因素

金属工件在加热炉内加热时,由炉内热源传给工件表面,工件表面得到热量并向工件内部传播。由炉内热源把热量传给工件表面的过程,可以借辐射、对流及传导等方式来实现;工件表面获得热量以后向内部的传递过程,则靠热传导方式。下面分别介绍这些问题。

#### 1.1.1 加热介质与工件表面的传热过程,影响传热系数 $\alpha$ 的因素

##### 1. 对流传热

对流传热时,热量的传递靠发热体与工件之间流体的流动进行。流体质点在发热体表面靠热传导获得热量,然后流动至工件表面时把其热量又借热传导给工件表面(当然,相互对流的粒子相遇时也要发生热交换)。因此,对流传热和流体的转移密切相关。

实验证明,对流传热时单位时间内加热介质传递给工件表面的热量有如下的关系

$$Q_c = \alpha_c F (t_{\text{介}} - t_{\text{工}}) \quad (1.1)$$

式中  $Q_c$ ——单位时间内通过热交换面对流传热给工件的热量, J/h;

$t_{\text{介}}$ ——介质温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{\text{工}}$ ——工件表面温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\alpha_c$ ——对流传热系数,  $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;

$F$ ——热交换面积(工件与流体接触面积),  $\text{m}^2$ 。

从对流传热的物理过程可以看出,影响传热系数  $\alpha_c$  的因素很复杂,包括如下因素。

##### (1) 流体运动的情况

作为传递热量的流体,其运动状态可分为静止和强迫流动两种状态。静止状态的液体或气体在加热过程中由于近热源与远离热源(工件附近)处的温度不同,其密度也不同,因而发生自然对流,其热量的传递就靠此种对流进行,因此其传热系数  $\alpha_c$  较小。例如在气

体炉中加热,其传热系数  $\alpha_c = (6.12 \sim 10.8) \times 10^4 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ;长度和直径相等的圆柱在盐浴中加热时,  $\alpha_c = 296 \times 10^4 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ <sup>[1]</sup>。

强迫流动是指用外加动力强制流体运动,如气体炉用风扇强制气体循环等。由于此时流体运动速度快,因此传热系数较大。强迫流动时,如果流体沿着工件表面一层层有规则地流动,这种流动称为层流,它使流体质点与工件表面热交换后不能及时离开,影响传热。当流体不规则地流过工件表面时,使流体质点能在热交换后较快地离开工件表面,因而有利于传热。流体的不规则运动,称为紊流。可见紊流的传热系数大于层流的传热系数。当以空气作为加热介质并沿着单个的圆柱方向流动时,其对流传热系数为<sup>[1]</sup>

$$\alpha_c = (4.64 + 3.49 \times 10^{-3} \Delta T) - \frac{\omega^{0.61}}{D^{0.39}} \times 3600 \quad (1.2)$$

式中  $D$ ——圆柱体直径, m;  
 $\Delta T$ ——空气和圆柱体的温差,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $\omega$ ——空气流动速度, m/s。

## (2) 流体的物理性质

流体的导热系数  $\lambda$ 、比热容  $c$  及密度  $\gamma$  越大,传热系数  $\alpha_c$  越大;黏度系数越大,越不易流动,传热系数则越小。

## (3) 工件表面形状及其在炉内放置位置

工件表面形状及其在炉内放置位置(或方式)不同,传热系数也不同。工件形状和放置位置对流体流动越有利,则传热系数越大。

## 2. 辐射传热

任何物体,只要其温度大于绝对零度,就能从表面放出辐射能。辐射能的载体是电磁波。在波长为  $(0.4 \sim 40) \times 10^{-6} \text{ m}$  范围内的辐射能被物体吸收后变为热能,波长在此范围内的电磁波称为热射线。热射线的传播过程称为热辐射。物体在单位时间内由单位表面积辐射的能量为

$$E = c \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (1.3)$$

式中  $E$ ——物体在单位时间内由单位表面积辐射的能量,  $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;  
 $T$ ——物体的绝对温度, K;  
 $c$ ——辐射系数,  $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4)$ 。

$c$  值为  $20.52 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4)$  的物体称为绝对黑体,常以  $c_0$  表示。在相同温度下,一切物体的辐射能以黑体为最大,即  $c < c_0$ 。

$$\frac{c}{c_0} = \epsilon \quad (1.4)$$

$\epsilon$  称为黑度系数,简称黑度,它说明一物体的辐射能力接近黑体的程度。黑度的数值取决于物体的物理性质、表面情况,它和温度的关系可以近似地认为是直线关系。

工件放在炉内加热时,一方面它要接受从发热体、炉壁等辐射来的能量(热量),但一般金属材料均非绝对黑体,因此对辐射来的能量不可能全部吸收,而有部分热量要反射出去;另一方面,如前所述,其本身也要辐射出去一部分热量。因而用来加热工件的热量应由发热体、炉壁等辐射来的热量,减去反射的热量及自身辐射的热量。在辐射传热时工件表面所吸收的热量为

$$Q = A_n c_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F \quad (1.5)$$

式中  $A_n$ ——相当吸收率,与工件表面黑度、发热体表面黑度、工件相对于发热体的位置及炉内介质等有关;

$T_1$ ——发热体(或炉壁)的绝对温度, K;

$T_2$ ——工件表面的绝对温度, K;

$F$ ——工件吸收热量  $Q_r$  的面积,  $m^2$ 。

当发热体与工件之间存在有挡板等遮热物时,将使辐射换热量减少。例如,两平行板间发生辐射传热时,若中间放置另一块平板,计算表明,其辐射传热量将减少一半,这种作用称为遮热作用。

当发热体与工件之间存在气体介质时,则这些气体将吸收辐射能。有些气体吸收辐射能的数量极少,可以近似地认为它们不吸收辐射能,例如单原子气体  $H_2$ 、 $O_2$ 、 $N_2$  等;但是另外一些气体,如  $CO_2$ 、 $H_2O$  等都能吸收较多的能量。气体吸收射线的波长具有选择性,即对有些波长范围内的射线不吸收,而对另一些波长范围内的射线有吸收作用。当射线经过气体时,其能量在进程中逐渐被吸收,剩余的能量则透过气体。气体层的厚度越大,压力越大,吸收能力也越大。所有气体对射线的反射率都等于零。气体本身也辐射能量,其辐射能力也与绝对温度的四次方成比例。

### 3. 传导传热

传导传热是这样一种传热过程,其热量的传递不依靠传热物质的定向宏观移动,而仅靠传热物质质点间的相互碰撞。传热物质质点在原位作热振动时,由于它们之间的互相碰撞,促使具有较高能量的质点把部分能量(热量)传递给能量较低的质点。温度是表征物体内能高低的一种状态参数,因此,热传导过程是温度较高(即热力学能较高)的物质向温度较低(热力学能较低)的物质传递热量的过程。热传导过程的强弱以单位时间内通过单位等温面的热量即热流量密度  $q$  表示

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1.6)$$

式中  $q$ ——热流量密度,  $J/(m^2 \cdot h)$ ;

$\lambda$ ——热导率,  $J/(m \cdot h \cdot ^\circ C)$ ;

$\frac{dT}{dx}$ ——温度梯度。

负号表示热流量方向和温度梯度方向相反。

### 4. 综合传热

在实际工件加热过程中,上述3种传热方式往往同时存在,所不同的仅仅是有的场合以这种传热方式为主,另一种场合以另一种传热方式为主。同时考虑上述3种传热方式的称为综合传热,其传热效果可以认为是3种传热的单独传热结果之和,即

$$Q = Q_c + Q_r + Q_{cd} \quad (1.7)$$

式中  $Q_c$ 、 $Q_r$  和  $Q_{cd}$  分别表示对流传热、辐射传热、传导传热的热量。

由于这3种传热过程很难截然分开,所以在工件加热时往往综合考虑,并以下式表示

$$Q = \alpha(t_{介} - t_{工}) \quad (1.8)$$

式中  $\alpha$ ——综合传热系数,  $J/(m^2 \cdot h \cdot ^\circ C)$ 。



$$\text{且} \quad \alpha = \alpha_c + \alpha_r + \alpha_{rd} \quad (1.9)$$

$$\text{显然} \quad \alpha_r = \frac{A_n c_0 \left[ \left( \frac{T_{介}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{工}}{100} \right)^4 \right]}{T_{介} - T_{工}} \quad (1.10)$$

### 1.1.2 工件内部的热传导过程

工件表面获得热量以后,表面温度升高,表面与内部温度存在着温度梯度,因此发生热传导过程。如前所述,其传热强度可以用比热流量表示,即

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}$$

此处热导率  $\lambda$  应为被加热工件材料的热导率。

热导率  $\lambda$  是材料的热物理参数,它说明材料具有单位温度梯度时所允许通过的流量密度。

热导率的数值,对钢来说和它的化学成分、组织状态及加热温度有关。图 1.1 为钢中合金元素含量对热导率的影响。由图 1.1 可以看出,钢中合金元素(包括含碳量)不同程度地降低钢的热导率<sup>[1]</sup>。热导率随着钢中各组织组成物,按奥氏体、淬火马氏体、回火马氏体、珠光体的顺序增大。热导率与温度的关系近似地呈线性关系<sup>[2]</sup>,即

$$\lambda = \lambda_0(1 + bt) \quad (1.11)$$

式中  $\lambda$ ——温度为  $t$  °C 时的热导率;

$\lambda_0$ ——温度为 0 °C 时的热导率;

$b$ ——热传导温度系数,与钢的化学成分及组织状态有关,1/°C。

图 1.2 为不同钢的热导率与温度的关系。由图可见,在低温时合金元素强烈地降低热导率,随着温度的提高,其影响减弱。高于 900 °C 时,合金元素的影响已看不出来,因为此时已处于奥氏体状态,奥氏体的热导率最小。纯铁和碳钢的热导率随着温度的升高而降低。

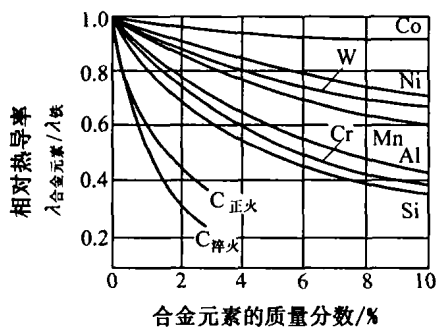


图 1.1 合金元素对二元铁合金热导率的影响

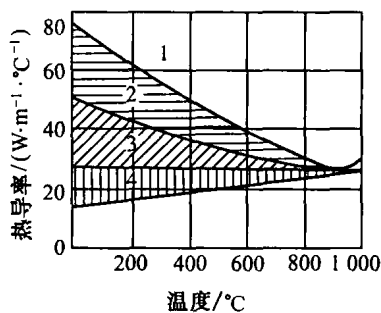


图 1.2 不同钢的热导率与温度的关系

1—纯铁;2—碳钢;3—合金钢;  
4—高合金钢

### 1.1.3 热处理加热时间的确定

热处理加热时间包括两部分,一是工件达到热处理规范所要求温度的时间(整体热处理应为工件心部达到要求温度的时间);另一部分是完成组织转变及其他热处理目的所要求的组织结构状态变化所需要的时间。可以采用计算方法或经验方法确定加热时间,但最