

热处理工艺学

高等学校试用教材

热处理工艺学

陕西机械学院 安运铮 主编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO BEN

CG156

2:2

出版社

机械工业出版社

高等学校试用教材

热处理工艺学

陕西机械学院 安运铮 主编



机械工业出版社

本教材是根据1983年全国高等工业学校机械类金属材料及热处理专业教材分编审委员会审定的〈热处理工艺学〉教学大纲来编写的。

全书包括金属的加热、退火与正火、淬火与回火、表面淬火、化学热处理及热处理工艺设计等六章,着重阐明了钢的热处理工艺原理以及热处理工艺对组织性能的影响规律,并从技术与经济统一观点分析了热处理工艺优化设计的准则。

全书在专业名词术语、工艺过程控制的有关章节中采用我国1986年前颁发的有关热处理工艺的国际标准及专业标准,并介绍了相应的部分国际标准。

根据理论分析及国内外预测,重点介绍了具有广阔发展前景的热处理新技术,如可控气氛原理、真空热处理原理、等离子化学热处理原理、激光电子束热处理原理、覆层强化原理等。在化学热处理一章中根据作者的多年工作及与国外专家合作的成果介绍了热力学在化学热处理工艺中的应用原理,并对计算机控制渗碳的过程作了扼要介绍,对各种热处理技术发展的趋势作了评述和分析。

全书突出了重点章节的论述,为了使学生能充分理解课程内容及培养分析解决问题的能力,在每章后均附有习题。每章后的参考文献可供读者进一步深入了解时查阅。

本书的读者对象为高等学校金属材料及热处理专业的学生及该专业科技人员。

热处理工艺学
机械工业出版社 安逢仲 主编

责任编辑:丁孝模
版式设计:张伟行

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/16·印张 14 1/4·字数 346 千字

1982年7月沈阳第一版

1988年6月北京第二版·1988年6月北京第七次印刷

印数 41,401—46,900·定价:2.40元

ISBN 7-111-00272-5/TG·90(课)

前 言

本教材是根据 1983 年全国高等工业学校机械类金属材料及热处理专业教材分编审委员会审定的《热处理工艺学》教学大纲而编写的。

本教材着重阐明了钢的热处理工艺的基本原理及热处理工艺对组织与性能影响的规律,并从技术与经济统一的观点分析热处理工艺优化的准则。

本课程的任务不是具体讨论各种热处理工艺方法,而是作为联系一般相变原理和热处理具体工艺方法间的桥梁,为学生进一步扩大和深化有关热处理工艺的知识打下基础。

本教材以 1978 年教学大纲编写的试用教材《热处理工艺学》为基础,为了更加符合教学要求,内容和体系均做了较大的修改,删繁就简、突出了重点内容的论述,并有选择地反映了近年来热处理技术领域中较成熟的新成就,以适应我国经济技术的发展并便于教学。

这次编写的教材在专业名词术语、定义以及工艺过程的有关论述中,以 1986 年前颁发的新国家标准、专业标准或部颁标准为依据,以推动新标准的贯彻实施,并尽量与国际上的通用名词术语及概念统一。

全书共分六章、分别为:金属的加热,退火与正火、淬火与回火、表面淬火、化学热处理及热处理工艺设计。为了能充分理解课程内容,培养初步运用这些知识解决实际问题的能力,在每章最后附有习题及参考文献,可供读者查阅。

本书由陕西机械学院安运铨主编(编写一、二、三、四、六章),华南工学院蒙继龙协编(编写第五章),由天津大学苏德达教授主审。在编写过程中得到国内许多工厂、研究单位及高等院校同行和朋友们的大力支持和帮助,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中错误及不妥之处敬希广大读者批评指正!

编 者

一九八六年十二月

本书常用物理量代号、名称及若干常量单位换算关系

q 热流密度或热通量 W/m^2	F_M 淬透性系数 无量纲
λ 热导率, (导热系数) $W/(m \cdot ^\circ C)$	D 扩散系数 $s^{-1}cm^{-1}$
T 温度 $^\circ C, K$	Q 扩散激活能 $J \cdot mol^{-1}$
τ 时间 $h, min \cdot s$	σ_{-1} 弯曲疲劳强度 MPa
α 给热系数 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$	CVN V型缺口冲击韧性 J/cm^2
c 比热容 $J/(kg \cdot ^\circ C)$	a_K U型缺口冲击韧性 J/cm^2
ρ 密度 g/cm^3	I_f 涡流强度 A
p 分压力 Pa	P_w 工件表面吸收功率 W
α 热扩散率 $\left(\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \right) m^2/h$	ρ 电阻率 $\Omega \cdot m$
σ 斯忒潘-玻耳兹曼常数 $(5.67032 \pm 0.00071) \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$	μ 磁导率 $H \cdot m^{-1}$
α_l 线膨胀系数 K^{-1}	Δ 电流透入深度 mm
E 弹性模量 MPa	μ_0 真空磁导率 $H \cdot m^{-1}$
B_i 毕氏准数 无量纲	ΔP 比功率 $kW \cdot cm^{-2}$
Fo 傅氏准数 无量纲	K_{Ic} 平面应变断裂韧性 $MPa \cdot mm^{3/2}$
θ 温度准数 无量纲	(HV) _{HL} 极限硬度
A 奥氏体	(HV) _{MS} 零件要求的最低表面硬度
F 铁素体	n 气体分子密度数 m^{-3}
M 马氏体	w_C 或 $w(C)$ 溶质C的质量分数 $w_0 = 0.1\%$ (即含碳重量百分数是0.1%)
P 珠光体	r_C 或 $r(C)$ 溶质C的摩尔比 $r_C = 0.1\%$ (即含碳原子百分数是0.1%)
T 托氏体	ϕ_x 或 $\phi(x)$ 某物质x的体积分数
B 贝氏体	c 某物质的浓度 mol/L
V_c 临界淬火冷速 $^\circ C/s$	f_B 物质B的活度系数
H 淬火烈度 m^{-1}	a_B 溶质B的相对活度
D_i 理想临界直径 mm	
D_0 临界直径 mm	

目 录

绪论	1	五、退火、正火后的组织与性能	50
第一章 金属的加热	2	六、退火、正火的缺陷	52
一、金属加热的物理过程	2	复习思考题	53
(一) 一般概念	2	第三章 淬火与回火	56
(二) 加热介质的类型及特点	4	一、淬火的定义、目的及分类	56
(三) 真空中的加热特点	5	二、淬火介质	57
二、影响零件加热的因素	7	(一) 对淬火介质的要求	57
(一) 加热设备的影响	8	(二) 淬火介质冷却能力的测定与评价	57
(二) 原材料及热处理工艺要求的影响	8	(三) 淬火介质的种类及特性	59
(三) 零件尺寸及形状对加热时间的影 响	9	三、淬透性	65
(四) 加热制度的影响	13	(一) 淬透性的基本概念	65
三、钢铁在加热时的腐蚀	14	(二) 淬透性的试验方法	66
(一) 氧化性气氛中加热的多种腐蚀形 式	14	(三) 淬透性的计算	72
(二) 氧化与脱碳层的组织结构	16	(四) 淬透性曲线的应用	74
(三) 氧化脱碳的化学过程	20	四、淬火应力与控制	76
(四) 炉气碳势控制的概念	25	(一) 淬火应力形成的一般规律	77
四、氧化脱碳的控制	27	(二) 热处理变形及其控制	81
(一) 在可控气氛中无氧化加热	27	(三) 淬火裂纹及其防止	85
(二) 敞焰少无氧化加热	27	五、淬火工艺	89
(三) 在熔融浴炉中无氧化加热	28	(一) 淬火加热规范的确定	90
(四) 在真空中无氧化加热	28	(二) 淬火冷却方法的选择与应用	93
(五) 防氧化涂层	28	六、钢的回火	101
复习思考题	29	(一) 回火的定义与目的	101
第二章 退火与正火	31	(二) 回火参量方程	101
一、退火工艺的分类	31	(三) 回火工艺的分类及应用	103
二、第一类退火	31	七、淬火回火工艺的发展	104
(一) 均匀化退火	32	(一) 形变热处理	105
(二) 去氢退火	34	(二) 钢中奥氏体晶粒超细化处理	109
(三) 再结晶退火	35	(三) 控制马氏体、贝氏体组织形态的 淬火	110
(四) 去内应力退火	37	(四) 改善钢中第二相分布形态的强韧 化淬火	111
三、第二类退火	38	八、淬火回火缺陷与预防	112
(一) 完全退火	39	(一) 淬火缺陷与预防	113
(二) 等温退火	40	(二) 回火缺陷与预防	114
(三) 不完全退火	41	复习思考题	115
(四) 球化退火	41	第四章 表面淬火	117
四、正火	49	一、表面淬火的分类	117

二、快速加热对表面淬火时相变的影响	118	五、钢的碳氮共渗与氮碳共渗	186
三、表面淬火后的组织与性能	121	(一) 碳氮同时渗入的特点	186
四、感应加热淬火	124	(二) 碳氮共渗	187
(一) 感应加热的基本原理	124	(三) 氮碳共渗	189
(二) 感应加热用感应器	127	(四) 碳氮共渗工艺的发展趋势	190
(三) 感应加热淬火工艺控制	129	六、钢的渗硼	190
(四) 感应加热的应用与发展	133	(一) 渗硼层的组织与性能	190
五、火焰加热表面淬火	133	(二) 渗硼工艺	191
六、其它高能密度表面加热淬火	134	七、渗金属	192
(一) 高频脉冲淬火	134	(一) 渗金属的一般原理	192
(二) 激光热处理	136	(二) 渗铬	193
(三) 电子束热处理	138	(三) 渗铝	194
复习思考题	139	(四) 渗钒、铌	195
第五章 化学热处理	141	八、多元共渗	195
一、化学热处理概论	141	(一) 铝铝共渗	195
二、化学热处理原理	142	(二) 铝硅共渗	195
(一) 化学热处理基本过程	142	(三) 钒铝共渗	196
(二) 渗剂反应与热力学	143	(四) 硫碳氮共渗	196
(三) 渗剂中的扩散 (外扩散)	145	九、离子轰击化学热处理	196
(四) 相界面反应	146	(一) 概述	196
(五) 工件表面层中的扩散过程	146	(二) 离子氮化	197
(六) 多元共渗时的某些规律	151	十、表面覆层合金化	200
(七) 加速化学热处理过程的途径	153	(一) 化学气相沉积 (CVD)	200
三、钢的渗碳	154	(二) 物理气相沉积 (PVD)	201
(一) 概述	154	复习思考题	203
(二) 渗碳用钢	155	第六章 热处理工艺设计	205
(三) 渗碳介质及其化学反应	155	一、热处理工艺优化设计的一般概念	205
(四) 渗碳介质与工件表面反应的控制参量	158	二、热处理工艺与机械设计的关系	207
(五) 渗碳工艺	159	(一) 正确的选择材料	207
(六) 渗碳后的热处理	168	(二) 结构工艺性良好	208
(七) 渗碳后的质量检验	169	(三) 合理制订热处理的技术条件	208
(八) 渗碳件的常见热处理缺陷及防止	170	三、热处理与其它冷热加工工艺的关系	211
(九) 渗碳后组织与性能的关系	171	(一) 热处理与材料生产的关系	211
(十) 渗碳工艺的发展	173	(二) 热处理与冷热加工工艺的合理配合	212
四、钢的渗氮	173	(三) 热处理与其它加工工艺之间的相互渗透和组合	213
(一) 渗氮基本原理	173	四、热处理工艺流程及规范的设计	214
(二) 渗氮用钢	178	(一) 工艺流程设计的基本要求	214
(三) 渗氮工艺	179	(二) 热处理工艺参数的优选	215
(四) 渗氮层的性能	182	(三) 热处理后性能的预测	218
(五) 渗氮层的质量检验	183	(四) 热处理工艺复合的原则及方法	218
(六) 氮化件常见缺陷及预防	185	复习思考题	221

绪 论

金属热处理工艺在我国已有悠久的历史。根据史料记载及考古的发现,我国在16世纪以前在冶金学及金属材料加工工艺与应用方面居世界先进地位。早在商代就已经有了经过再结晶退火的金箔饰物,在春秋中叶,即公元前7世纪,就开始利用渗碳原理将海绵铁制成钢。公元前5世纪,我国发明了通过热处理使白口铁局部石墨化制造韧性铸铁的技术,从而使其广泛应用于农具、工具及兵器的生产。在洛阳出土的战国时代的铁剑是由白口铁经脱碳退火制成,说明了在当时又进一步掌握了利用生铁脱碳制钢的技术。到公元前1世纪又发明了炒钢炼钢法,这种炼钢法要比西欧约早1800年。

我国早在公元前3世纪就在刀剑制作中应用了淬火技术,并见之于公元前2世纪司马迁的著作《史记·天官传》。在《汉书·王褒传》中也有“清水淬其锋”的记载。公元2世纪末,刀师蒲元已掌握了水质对淬火的影响。在公元前6世纪的有关著作中还记载了蔡母怀文将灌钢刀“浴以五牲之溺,淬以五牲之脂”,可能是有关双液淬火最早的记录。在东汉时期(公元1~2世纪),我国还发明了利用生铁液对熟铁进行渗碳。关于我国古代热处理工艺方面较为丰富的记载是在明代科学家宋应星的《天工开物》一书中,他对于退火、淬火、固体渗碳、形变强化、防氧化技术等均有生动的描述。

随着冶金及机械制造业的发展,热处理工艺技术和基础理论的研究在本世纪有了极大进步,尤其是在近30年来,由于科学技术领域之间的相互渗透和世界性的能源危机,使热处理技术向优质、高效率、节约能源及无公害方向发展,并使热处理的技术领域日益扩大,如计算机在优化热处理工艺及自动化生产中的应用,高能量密度表面淬火及表面合金化,表面覆层强化技术、离子热处理技术、形变热处理等等。因此,热处理工艺日益成为一种由多种学科为基础的综合技术。

为了使我国的热处理科学技术达到世界先进水平,我们既要认真学习国外的先进技术,同时也要努力发展具有我国特色、适应我国国情的热处理技术。我们相信,在不久的将来,我国的热处理科学技术一定会在祖国实现四化的征途中得到更大发展。

第一章 金属的加热

金属热处理的基本过程是将工件放在一定的介质中加热、保温和冷却。通过改变金属及其合金表面或内部的显微组织结构来改善其性能。

在施行各项热处理作业中，加热是最基本的、首要的工序。通过工件加热可以改变其热力学状态、晶体结构、物理化学性质及化学成分分布等，从而实现预期的组织结构以至化学成分的改变，获得所需的性能。由此看来，工件加热过程将直接影响到其内在质量。由于金属在一定的环境介质中加热时表面与介质之间发生一系列化学反应，造成工件表面的某些缺陷（如氧化、脱碳、腐蚀等），同时又由于在加热冷却过程中工件的比容要发生变化，这种变化的不同期性会在工件内部造成热处理应力，这是工件发生尺寸变化和形状畸变的主要原因，因此，工件加热也直接影响外部质量。在金属加热中如何减少能耗、提高效率具有重要经济意义。

一、金属加热的物理过程

热处理加热工序大多在各类热处理炉中进行。由于在炉膛与工件之间建立了温度梯度 $\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)$ ，在温度场内的金属工件依靠辐射、对流、传导这三个基本物理过程而使工件升温。实际上，工件的升温又可被描述成加热介质与工件表面热量传输，或表面向内部的热量传导这两个过程的复合作用。

（一）一般概念

当加热介质与加热工件表面相互接触时，或受热工件表面与心部之间、受热工件的某一部分与未受热部分之间发生热量传输，称为传导传热。气体及液体的传热主要是由于分子运动或碰撞作用，在固体中的传热则是通过晶体点阵的弹性振动波（这种振动波因呈现粒子的特性又称为声子）与自由电子的迁移的综合作用来实现。热传导的唯象规律由傅里叶(Fourier)热传导定律来描述：

$$q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \quad (1-1)$$

式中 q_y ——在 y 方向的热流密度或热通量，单位为 W/m^2 ；

$\frac{\partial T}{\partial y}$ ——在 y 方向的温度梯度；

λ ——在某温度下的热导率，系指在单位温度梯度下允许通过的比热流量，单位为 $W/(m \cdot K)$ 。

理论计算与实验表明大多数非导电物质以声子传送热量为主，热导率随温度升高而减小；在良好的导体金属中，传热以电子导热为主。在电子运动的平均自由程不依温度升高而减小的前提下，热导率随温度升高而增加〔1〕，直接计算固体的热导率很困难，只能在理论上粗略的估算热导率与温度的关系。实验表明：大多数金属的热导率 λ 值随温度升高而减小；

纯铁、镍等在高温下，可能由于电子传热占主导， λ 值随温度升高反而增加。钢在合金化后形成的置换固溶体或第二相均使热导率降低。实验表明钢的热导率取决于成分、组织结构及温度。

气相中及液体介质中的热传导主要靠能量较高的受热分子与运动速度慢的分子碰撞，通过分子间的运动能量变化来传输热量。

辐射传热的特征与传导传热完全不同。所谓热辐射就是通过加热体在高温下产生的电磁波来传递能量的现象。发热体发射这种能量的速率取决于其表面温度、自身及表面的状态等因素。发热体向各个方向放射辐射能，其载体是电磁波。波长从1微米到若干米，包括X射线、紫外线波、红外线波、无线电波等。其中由于原子外层电子的跃迁形成的可见光、依分子振动而形成的近红外线波及由分子转动形成的远红外线波可被物体吸收并能重新转化为热能。这类热辐射的波长范围大约为 $0.1 \sim 100 \mu\text{m}$ 。

在辐射传热过程中，热辐射波的发射能力可用比能流 e_r 与辐射物质绝对温度的四次方成正比，其关系式为：

$$e_r = \sigma T^4 \quad (1-2)$$

式中 T ——辐射物质的热力学温度；

σ ——斯忒藩-玻耳兹曼常数， $(5.67032 \pm 0.00071) \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

所以在高于 700°C 温度下加热金属时，主要靠热辐射传热。

工件受热辐射后，一部分能量被反射掉，多数能量被吸收。能够吸收全部辐射能的表面称为绝对黑体。但实际上金属工件在加热时都不是绝对黑体，即热辐射能量并不能全部被吸收。

当发热体与加热工件之间被物体遮挡，将使辐射传热作用大大下降，二者之间的气体介质（除单原子气体 H_2 、 O_2 、 N_2 外）将吸收部分辐射能，但不同气体对于射线波长有一定的选择性，气体层的厚度、压力愈大，吸收能力愈大。受热后的气体也同时向工件表面辐射能量，但气体只能在很窄的波长范围内发射和吸收辐射光谱。所以，采用辐射传热为主要形式加热工件时，应尽量使工件表面均匀的接受辐射热，尽量避免遮热现象。

对流传热主要依靠液态或气体加热介质中的分子相对运动，也就是说对流是一种涉及流体质量迁移的过程，而不是一种独特的传热方式^[1]。更确切的讲，对流传热是具有分子运动形式的传热，流体内部任何地方的传热方式仍然是传导和辐射，不过这种流体的传热总是伴随着流体的运动。

对流传热时，单位时间内加热介质传递给工件表面的热量（ Q ）与加热介质与工件表面的温度差及工件与流体的接触面积成正比，其数值关系为

$$Q = \alpha F(t_M - t_s) \quad (1-3)$$

式中 α ——对流给热系数 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})]$ ；

F ——工件与加热介质接触面积 (m^2) ；

t_M ——加热介质温度 $(^\circ\text{C})$ ；

t_s ——工件表面温度 $(^\circ\text{C})$ 。

对流传热的量用对流给热系数 α 表示，其值与流体的物理性质（热导率、比热容、密度及粘度）、流体的流动状态（强迫流动或自然流动）、在工件周围流体的运动，以及工件表面的形状、放置位置等因表有关。

金属在加热时往往同时以几种方式传热，但又依工作温度、炉型结构、加热介质的不同而以某一种传热方式为主导。例如在箱式或井式电炉、盐浴炉、煤气炉等，在大于 700°C 加热工件时，主要靠对流及辐射传热；在小于 200°C 低温回火炉（油浴或空气介质）中则主要靠对流及传导传热，而在真空炉中则主要靠辐射传热。

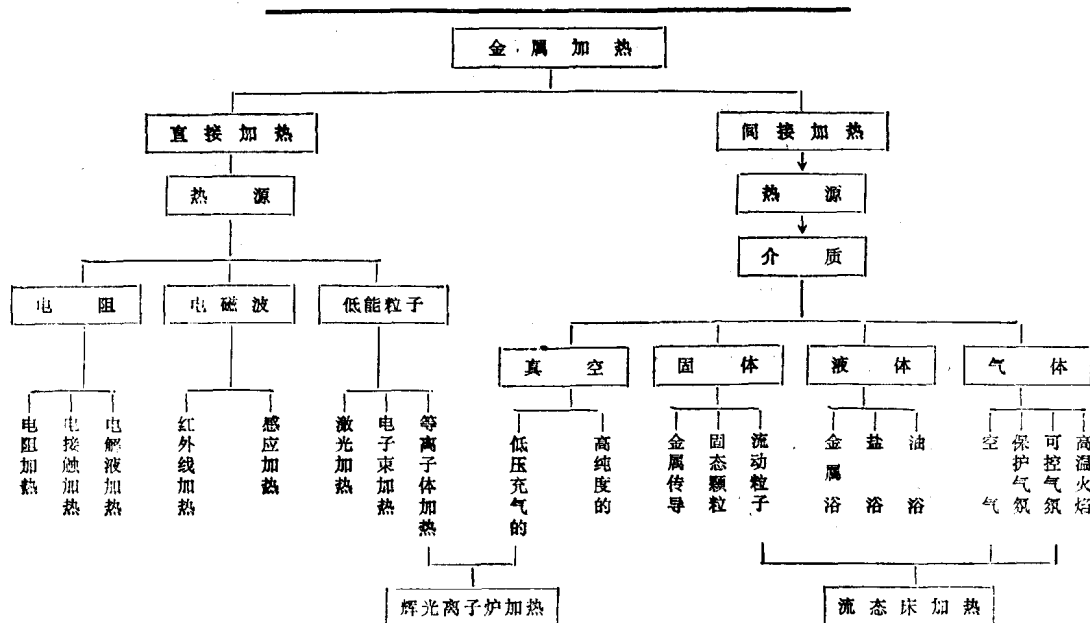
目前，热处理生产中对工件的加热已不仅在各种加热炉中进行，而且也可以在各种类型的加热装置中实现。如靠电-热能量转换而发展起来的电解加热、电阻加热，靠电磁波-热能量转换而进行的感应加热、高频脉冲感应加热，靠高能量火焰进行的火焰及等离子焰的表面加热，靠低能粒子轰击阴极工件的等离子加热以及电子束加热、激光加热等。这些均使工件加热过程复杂化。

（二）加热介质的类型及特点

金属加热的方式分为直接加热和间接加热两类：直接加热是利用金属内部的电能-热能转换，电磁-热能转换，低能粒子轰击的能量-热能转换，不需要通过加热介质向被加热金属传递热量；间接加热则是依靠固体、液体、气体等媒介以对流、传导、辐射的方式向工件表面传递热量。表 1-1 指出了工业上常用加热方式及介质的分类。

将金属直接埋入固体燃料的碎块中（木炭、煤）加热是最古老的方法。为了防止工件表面氧化，利用干燥木炭、固体渗碳剂、生石灰、铸铁屑、碳化硅粉、硅钙合金粉等作为填充保护剂进行“装箱加热”，加热效率很低。50年代以来，国外发展了流态床加热（流动粒子加热），开始采用外热源间接加热惰性粒子（石英砂、刚玉砂）的流化床加热，以后又利用导电粒子的内热式流动粒子炉，并采用煤气-空气混合燃烧气体代替空气的外热式流动粒子炉。在我国内热式流动粒子炉已应用于一些生产部门。作为加热介质的流动粒子（粒子尺度 $0.05 \sim 2.0\text{mm}$ ）实质上是固体颗粒与气体的混合物。其传热方式是辐射、对流、传导共存的综合传热。由于在颗粒之间、颗粒与加热工件表面之间存在着气膜，辐射传热仍占有重要地位。

表1-1 工业上常用的加热方式及介质的分类



对于内热式的石墨粒子流动床,石墨粒子之间在电场作用下产生的电火花将释放一定的能量。在流动粒子炉中平均传热系数值比在空气炉中高一倍以上,比盐浴炉中加热高64%。流态床中传热系数值取决于自身的粒子形状、尺寸、密度、比热容、流化气体的特性及流态床的参数等因素。在流态床中适宜形状不十分复杂的中小件加热及化学热处理。

熔融金属、熔盐、油是工业上广泛采用的液体加热介质。在液体介质中其传热方式主要是以传导为主并兼有对流及辐射传热,其给热系数与液体的热导率、比热容、密度等因素有关。由于液体加热介质的给热系数较气体介质高的多,如在 900°C 时50%KCl+50%NaCl盐浴中加热工件时其给热系数比在空气炉中高3.6倍。铅浴中则高7倍。因之液体加热介质具有加热速度快、温度均匀、表面氧化脱碳倾向小、工件变形小、易于实现局部或表面加热等优点。改变介质的化学成分或通入特定的气体可以在加热过程中进行化学热处理,若在熔盐中施加电场还可以使加热介质中某些原子离子化、并向工件表面定向移动,从而加速化学热处理的过程。

在燃油炉、燃气炉、电阻炉内加热时,在不同温度下以不同形式传热,在高温下以辐射传热为主,而在低于 600°C 下当炉气能循环时以对流传热为主。炉气作为介质参与热交换,但对工件加热速度没有显著影响。在低温下强制循环将显著提高对流传热的效果。

在上述炉子中加热具有生产率高、炉气可以调节、易于实现机械化自动化生产等优点。因之在热处理生产中占有主导地位。

(三) 真空中的加热特点^[2]

金属在真空度为 $133\sim 133\times 10^{-6}\text{Pa}$ ($1\sim 10^{-6}\text{Torr}$)的物质空间中加热时,引起了表面物理状态及化学成分的显著变化,随着真空度的提高,加热室内气体分子数密度 n ,在 10^5Pa 下由 $2.7\times 10^{25}\text{m}^{-3}$ 降低到 $3\times 10^{-7}\text{m}^{-3}$ (此时真空度为 $133\times 10^{-6}\text{Pa}$)。与此同时,氧的分压降到极低,因此,不仅使金属不会在加热过程中发生氧化、脱碳以及其它化学腐蚀,而且还具有表面净化、脱脂、除气等作用,可以得到洁净光亮的表面。由于在真空中加热时气体分子稀薄,气体分子的平均自由程随压力的下降显著增加,工件的加热将主要靠辐射方式进行,对流传热的作用显著减少,从而使加热速度更为缓慢。

真空热处理已成为当代重要的热处理技术领域,在真空室内加热可以完成退火、正火、淬火、化学热处理、表面覆层等一系列工艺。因此,我们需要了解金属在真空中加热时的基本特征。

(1) 加热速度缓慢 由于在真空中加热主要靠热辐射方式传热,在真空中的加热速度要比在空气中或盐浴中慢的多。一般在真空中加热时间为在盐浴炉中的六倍。在低于 600°C 时,辐射传热作用很弱,在极稀薄的气氛中加热靠对流传热,时间需要更长,而且加热不均匀。因此,在真空炉中回火往往需要充入惰性气体并进行强制循环。

在真空中加热时,靠近发热体一侧的工件升温速度要比背向辐射体的一面“背阴处”要快,因此,工件的装炉方式与炉型结构配置上应尽量均匀面向辐射体;适当延长保温时间,以保证均匀加热。

在周期作业的真空炉中,工件实际温度往往低于炉温仪表指示温度,即工件升到预期温度比仪表到温滞后一段时间。工件尺寸越大,这种滞后就越显著,如直径20mm的试样在加热到 800°C 时(炉温到温)试样温度滞后 100°C ;直径50mm试样温度滞后达 150°C ,但该试样在 850°C 停留30 min再继续升温,则这种滞后现象消失。图1-1指出了在真空中加热时

工件升温滞后时间与工件尺寸之间的关系。为了正确掌握在真空中加热时工件实际温度滞后炉温的规律,必须事先测出滞后的时间数据以指导生产。采用预热升温可以缩短高温下保温时间,容易加热均匀。由此也可以看出,在真空中加热工件的截面温差小,热处理后的应力与变形也较小。

(2) 氧化作用被抑制 在真空中加热,由于氧气分子稀薄,氧的分压很低,从而抑制了金属表面的氧化,图 1-2 为各种氧化物的平衡分压。从理论上说,为了达到无氧化的目的,必需使氧的分压低于氧化物的分解压。但炉气中氧的分压很低的情形下,金属氧化速度已极慢,即使在氧的分压稍高于氧化物分解压的气氛中,也不会形成可见氧化物,因此,对真空度要求不需这样高。如氧化铁的分解压低到 $1.33 \times (10^{-8} \sim 10^{-12}) \text{ Pa}$ (即 $10^{-8} \sim 10^{-14} \text{ Torr}$),但真空度在 $1.33 \times (10^{-1} \sim 10^{-3}) \text{ Pa}$ (即 $10^{-8} \sim 10^{-5} \text{ Torr}$) 条件下已实现了无氧化加热要求。

(3) 表面净化 工业上在较低真空度 ($< 1.33 \times 10^{-4} \text{ Pa}$) 加热金属时,在高于金属氧化物的分解压的条件下,表面的金属氧化物将转变为低价的亚氧化物,而亚氧化物在真空加热过程中极易升华而挥发掉,从而得到光亮的金属表面。

工件表面附着的油脂等污物在真空加热中也将挥发,油脂是碳、氢、氧的化合物。加热时将分解为水蒸气和二氧化碳等。在一定真空度下,油脂也可在到达分解温度之前即行挥发并由真空泵排出。

(4) 脱气作用 在真空下加热金属时,首先从工件表面将溶于其中的氢、氮、氧等气体排除。此时将在工件表面与内层之间形成气体的浓度梯度,在它的驱使下金属中气体不断向表面扩散,而金属表面的气体在真空下又脱附逸出。真空泵不断将排出的气体抽出炉外。

金属中的氮化物、氧化物、氢化物在真空加热条件下,由于金属化合物的分解压力不同以及分解的这些气体在金属中的扩散系数不同,形成其逸出能力的差别,其中以氢最容易排出,而氮及氧就较为困难。所以金属及其合金的脱气温度应尽量选择得高一些,以利于气体的扩散逸出。

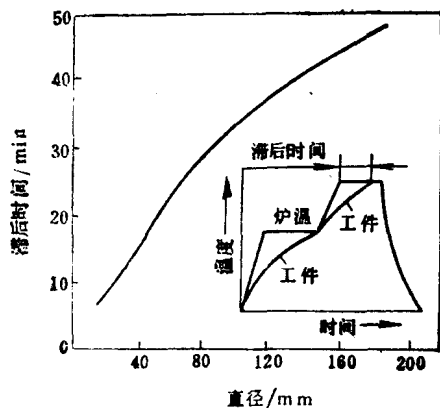


图 1-1 在真空炉中加热时工件直径与工件升温滞后时间的关系⁽⁴⁾

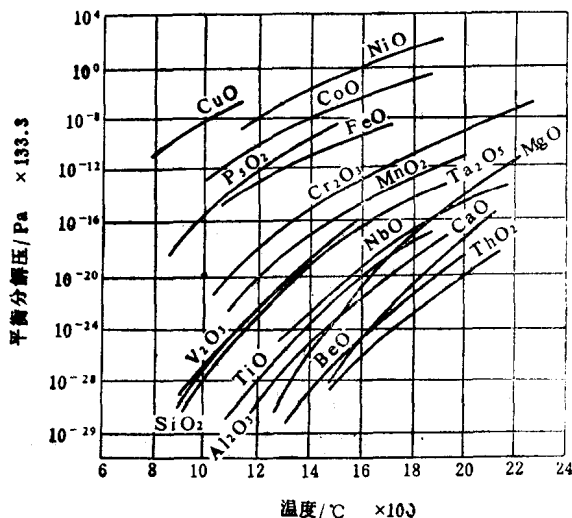


图 1-2 各种氧化物的平衡分解压⁽⁴⁾

(5) 蒸发现象 图 1-3 列出了各种金属的蒸气压与温度的关系。可看出某些蒸气压高的合金元素在一定温度、一定真空度下将挥发。蒸发出来的气体金属粘附在炉子的低温部分,

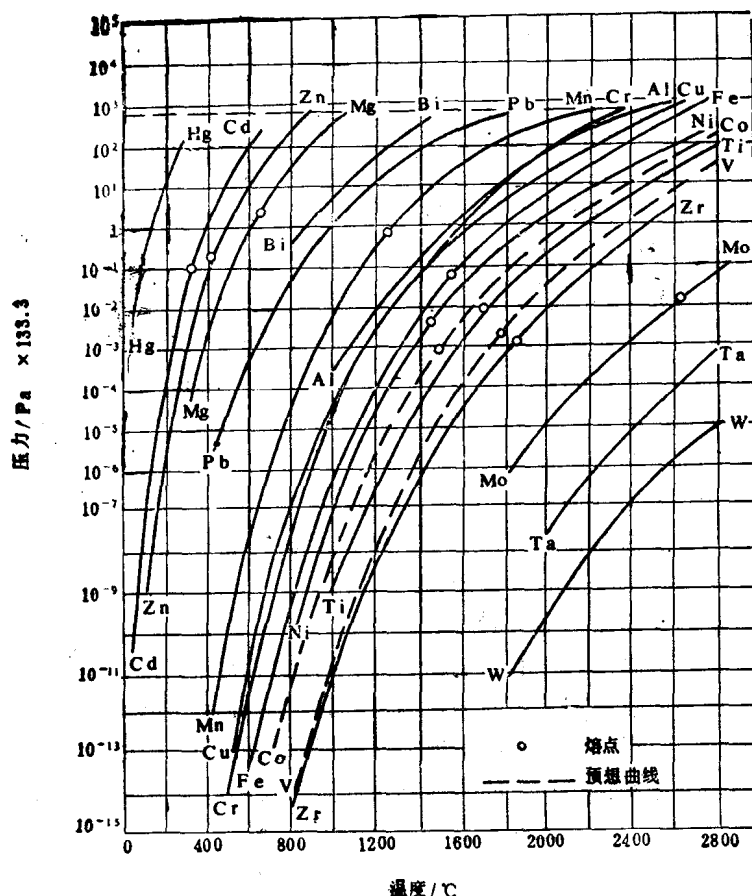


图1-3 金属的蒸气压与温度的关系⁽⁴⁾

既污染工件表面，又损害真空炉。从图中还可看出在真空状态下金属的熔点将显著降低，如锰、铬等元素，在真空度为 $1.33 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ （即 10^{-4} Torr ）条件下其熔点分别降低到 825°C （锰）、及 1040°C （铬）。在此真空度下温度高于其熔点时就会被蒸发，合金中金属的蒸气压比其在纯金属状态还要低。为了防止这种蒸发现象，在高温加热时通常通入高纯度的惰性气体，此时可以使真空度下降到 $20 \sim 26 \text{ Pa}$ 即 $[(1.5 \sim 2) \times 10^{-1} \text{ Torr}]$ 低真空。

二、影响零件加热的因素

在加热规范中，加热温度、加热速度及保温时间是基本工艺参数。它们决定了加热后金属内部的组织结构及各相的成分。

钢的加热规范依热源和加热方式的不同，还可以通过调节燃料的单位消耗、改变输出比功率（ W/cm^2 ）、变换工件在加热区的运动速度、调整电加热装置的功率因数等等来控制。

制订和实施热处理加热规范，要考虑下面一系列的影响因素，主要有：热处理设备的条件；原材料及热处理的工艺要求；零件的尺寸及形状；加热制度及方式以及装炉数量与排列方式等等。下面我们将分别讨论上述这些因素对加热的影响。

(一) 加热设备的影响

为了正确的选定与执行热处理加热规范，必须要考虑设备条件，因为加热设备的介质状况，设备的输出功率大小，炉膛内有效加热区范围及温度均匀性等均影响加热工艺的制订和实施。不同加热设备所采用的加热介质将直接影响工件的加热速度及表面质量，设备的输出功率决定了工件的装炉量以及生产率，对加热速度及可达到的加热温度也有重要影响。

所谓“有效加热区”是指根据预先测温而假设的、能够保证由给定热处理工艺所要求的加热温度的装料区域^[17]。不同炉型的炉膛有效加热区测定方法由有关标准规定^①，只有在炉膛内有效加热区中装料作业才能达到预定的控温精度及均匀度的要求，对于不同技术要求的热处理件，进一步规定了在不同热处理工序中必须保证的控温精度范围：如对要求控温较严格的钢的球化退火、渗碳、渗氮、淬火、回火等，规定有效加热区内控温精度在 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 以内；对普通件的淬火、回火、渗碳，则要求在 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 以下；对钢的正火、退火、一般调质件，则要求控温在 $\pm 25^{\circ}\text{C}$ 以内。有关规定详见我国在1985年已正式颁发了钢的淬火、回火处理（JB3877-85）及钢的正火与退火处理（JB3184-85）两个工艺标准。

按照上述标准，我国许多企业的热处理加热设备已不能满足要求，加热质量不能保证，因之面临着设备更新与技术改造的繁重任务。

(二) 原材料及热处理工艺要求的影响

确定加热温度时，金属及合金的相变临界点、再结晶温度等是基本的理论依据，但还不能就此来确定各种不同热处理工艺的加热温度，而应当根据具体零件热处理的目的来决定。图1-4为加热温度优选的程序图。可看出根据原材料及热处理工艺要求选择加热温度是一个较复杂的多因素问题，每种工艺温度的具体确定原则将在以后有关章节中讨论。

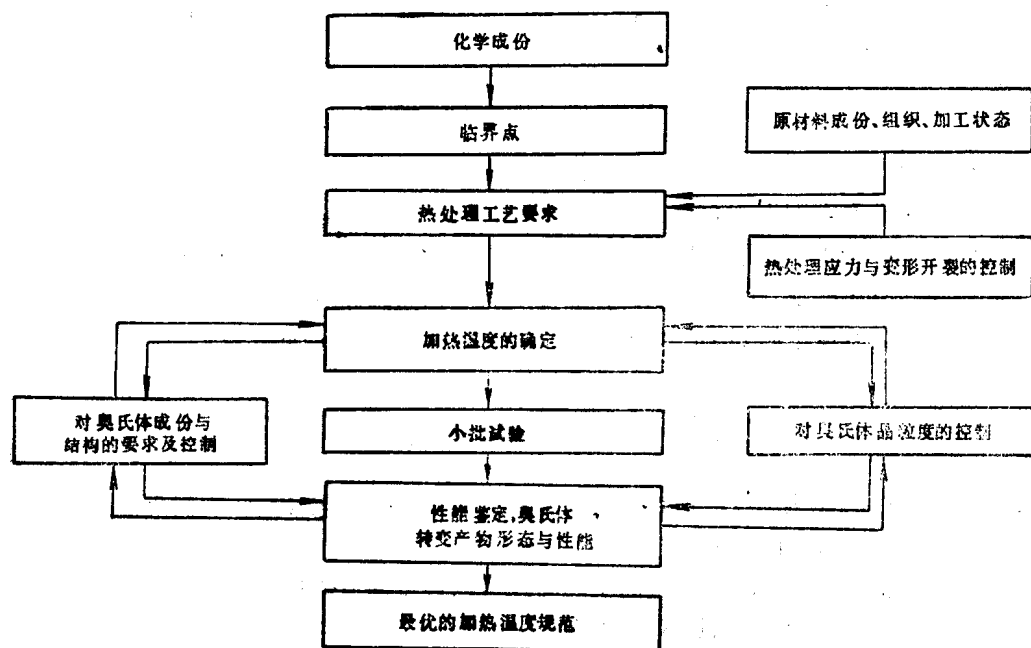


图1-4 加热温度优选的程序图

① 在我国有关“热处理炉有效加热区测定标准”未颁布前，可参照日本JHS C-1 1974《热处理加热炉有效加热区的试验方法》（日本金属热处理工业会标准）。

(三) 零件尺寸及形状对加热时间的影响

零件的尺寸及形状对确定热处理加热时间有决定性的影响, 本节着重讨论加热时间的确定原则和方法。

1. 加热时间的概念

零件加热时的热处理曲线如图 1-5 所示。热处理加热过程的时间 ($\tau_{加}$) 应当是工件升温时间 ($\tau_{升}$)、透热时间 ($\tau_{透}$)、与保温时间 ($\tau_{保}$) 的总和:

$$\tau_{加} = \tau_{升} + \tau_{透} + \tau_{保} \quad (1-4)$$

上式中, 升温时间是指工件入炉后表面到达炉内指示温度的时间; 透热时间是指工件心部与表面温度趋于一致时的时间; 保温时间是指为达到热处理工艺要求而恒温保持的一段时间。这样的严格区分是由于实际加热过程中这三部分时间的含义及其规律各不相同。升温时间主要取决于炉子或加热装置的热功率、加热介质、加热制度、以及装炉数量及零件尺寸。透热时间则主要取决于零件的截面尺寸、材料导热性及炉温高低等因素。保温时间往往是为了满足一定的热处理工艺要求, 如消除内应力、均匀化学成分、溶解难溶碳化物等均需要充分考虑保温时间。例如普通碳钢中珠光体向奥氏体转变在炉中加热只需一分钟, 在此情况下, 当零件透烧后相变过程已经完成, 所以并不需另外增加保温时间, 但对实施扩散退火、去应力退火、扩氢退火、球化退火、回火等工序时, 情况就完全不同。

图 1-6 是在 1000°C 的盐浴炉中加热不同直径的钢棒的实例〔7〕, 可看出直径等于 100mm 的钢棒在加热升温的开始阶段表面温度总比心部高, 当温度越接近炉子指定温度, 表面与中心的温差越小, 当零件表面到炉温

时, 心部也已热透。再如 $\phi 25\text{mm}$ 的钢棒加热时, 表面与心部趋于同时升温。所以直径较小的零件不需要把加热与透烧的时间严格分开。只有在大件加热时才有现实意义。对于大件的加热时间可以根据传热学原理进行计算。

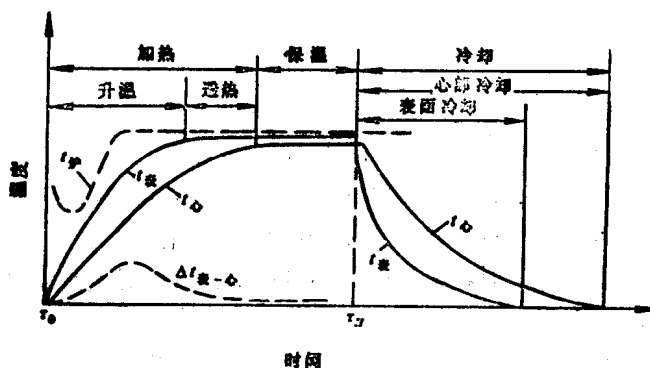


图 1-5 工件加热时的热处理曲线

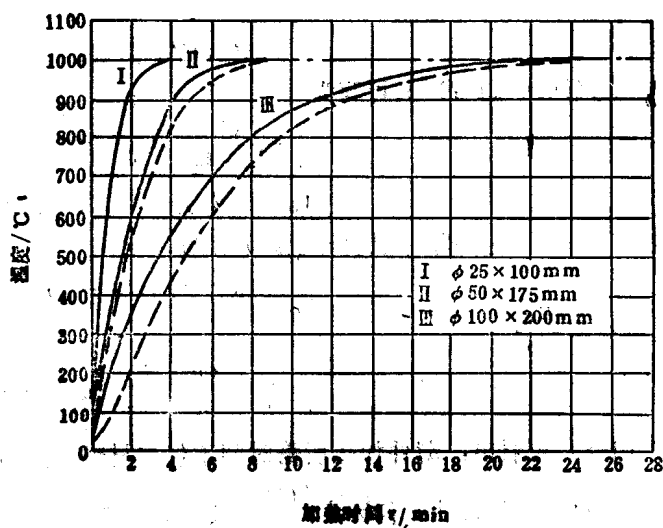


图 1-6 在盐浴炉中 1000°C 加热钢棒的时间-温度曲线〔7〕
(实线为表面温度, 虚线为中心温度)

2. 加热时间的计算

传热学计算与实验表明, 工件在加热升温时如果零件截面尺寸(或厚度)较薄时, 加热时间 τ 与厚度 s 之间呈线性关系, 其关系式为

$$\tau(\text{薄件}) = Ks \quad (1-5)$$

式中 K 为加热系数, $[K] = \text{min/mm}$ 。

K 值为 $\frac{c\rho}{\alpha}$, V/F , $\Delta t_{\text{升-工}}$ 的函数。其中 c 为比热容, ρ 为密度, α 为给热系数, V 为工件体积, F 为工件表面积。

大多数热处理件属于薄件^①。当零件尺寸超过薄件规定的尺寸时, 加热时间 τ 与厚度 S 的关系式为

$$\tau(\text{厚件}) = KS^n \quad (1-6)$$

式中 n 为指数, $n = 1 \sim 2$, 即已不呈线性关系。

薄件的具体概念^[3], 对于碳钢零件, 炉温小于 400°C , 薄件尺寸限于 300mm 以下。炉温在 $500 \sim 800^\circ\text{C}$, 薄件尺寸限于 200mm 以下。炉温在 $800 \sim 1000^\circ\text{C}$ 时, 零件尺寸小于 100mm 的属于薄件。在盐浴炉中加热时, 当炉温在 $100 \sim 400^\circ\text{C}$ 之间, 小于 40mm 为薄件。炉温在 $500 \sim 800^\circ\text{C}$ 范围内, 小于 300mm 可认为是薄件。

在薄件加热时, 零件平均温度可用其表面温度来表示, 在接受热量 dQ 之后温度升高了 dt , 此时

$$dt = \frac{dQ}{cV\rho} = \frac{\alpha F}{cV\rho} (t_{\text{升}} - t_{\text{工}}) d\tau$$

令 $K' = \frac{\alpha F}{cV\rho}$, 则上式可写成

$$dt = K'(t_{\text{升}} - t_{\text{工}}) d\tau \quad (1-7)$$

将 K' 值代入式 (1-7) 又可写为

$$\frac{dt}{t_{\text{升}} - t_{\text{工}}} = K' d\tau \quad \text{双方积分}$$

$$\ln(t_{\text{升}} - t_{\text{工}}) = -K'\tau + \ln c$$

上式中当 $\tau = 0$ 时, 零件温度等于起始温度, 则

$$\ln c = \ln(t_{\text{升}} - t_{\text{始}})$$

代入上式后

$$\tau = \frac{c\rho}{\alpha} \frac{V}{F} \ln \frac{t_{\text{升}} - t_{\text{始}}}{t_{\text{升}} - t_{\text{工}}} \quad (1-8)$$

从式 (1-8) 可看出: 薄件加热所需时间不仅与材料本身的成分、加热介质的种类、炉温等因素有关, 还与零件形状几何因素 $\left(\frac{V}{F}\right)$ 有关。表 1-2 为几何因素与零件形状的关系

由于热处理零件绝大多数是薄件, 为了简化加热时间的计算, 大多采用经验系数法估算。

常用的是一种以几何因素 $W = \frac{V}{F}$ 为基础的计算。即

$$\tau_{\text{加}} = KW$$

① 例如在 $800 \sim 1000^\circ\text{C}$ 箱式炉中加热, 厚度小于 100mm 零件。