



北京理工大学“双一流”建设精品出版工程

RECHULI GONGYI XUE

# 热处理工艺学

王迎春 程兴旺 ◎ 主编



 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

# 热处理工艺学

## RECHULI GONGYI XUE

主编 王迎春 程兴旺

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

---

图书在版编目 (CIP) 数据

热处理工艺学 / 王迎春, 程兴旺主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2021. 6

ISBN 978-7-5682-9866-7

I. ①热… II. ①王… ②程… III. ①热处理-工艺学-高等学校-教材 IV. ①TG156

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 098550 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 13

字 数 / 293 千字

版 次 / 2021 年 6 月第 1 版 2021 年 6 月第 1 次印刷

定 价 / 48.00 元

责任编辑 / 多海鹏

文案编辑 / 辛丽莉

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

---

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

# 前 言

金属材料是最重要的工程结构材料之一，其组织性能的合理调控关系着工程构件、机器零件及工模具的使用安全、使用寿命和经济成本等。热处理是金属材料，特别是钢铁材料组织性能调控最广泛、最常用的方法之一，因此，热处理技术是金属材料领域科技人员应该掌握的专业基础。热处理工艺学是研究热处理各种工艺原理和规律的一门学科，主要是解决热处理“怎么做”的问题，包括热处理工艺方法选择、工艺参数的确定和热处理缺陷的控制与预防等。

本书共分为6章，第1章阐述了金属加热的传热原理、加热参数的确定以及加热缺陷的预防与控制。第2章到第5章系统介绍了钢的常用热处理工艺，包括退火、正火、淬火、回火、表面淬火、化学热处理等工艺特点与应用，以及工艺参数的确定和常见热处理缺陷的预防与补救等。此外还结合近年来材料领域热处理技术和工艺的最新进展，实时地增加了各种先进工艺方法的简介。第6章通过独立章节全面地介绍了综合形变和相变的先进复合工艺——形变热处理的各种工艺方法。

本书在编写过程中参阅并引用了部分国内外相关教材、科技著作及论文内容，在此特向有关作者表示衷心感谢！

本书可作为高等学校金属材料专业教材，也可供从事金属材料及热处理工艺研究和生产的广大科技人员参考。

由于编者水平有限，书中的疏漏和缺点在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

## CONTENTS

---

---

<b>第 1 章 金属的加热</b> .....	001
1.1 金属加热的物理过程及其影响因素 .....	001
1.1.1 加热介质与工件表面的传热过程 .....	001
1.1.2 工件内部的传热过程 .....	005
1.2 金属加热参数的确定 .....	006
1.2.1 加热速度的确定 .....	006
1.2.2 加热温度的选择 .....	008
1.2.3 加热时间的确定 .....	009
1.2.4 金属在真空中的加热速度和加热时间 .....	013
1.3 钢加热时的氧化与脱碳反应及其控制 .....	014
1.3.1 钢加热时的氧化反应及氧化过程 .....	014
1.3.2 钢加热时的脱碳反应及脱碳过程 .....	017
1.3.3 氧化与脱碳的控制 .....	019
1.4 钢的过热和过烧 .....	021
1.4.1 过热 .....	021
1.4.2 过烧 .....	022
思考题 .....	023
<b>第 2 章 钢的退火与正火</b> .....	024
2.1 退火与正火概念 .....	024
2.2 常用退火工艺方法 .....	025
2.2.1 完全退火 .....	025
2.2.2 不完全退火 .....	027
2.2.3 球化退火 .....	027
2.2.4 扩散退火 .....	032
2.2.5 预防白点退火 .....	033

2.2.6 再结晶退火 .....	034
2.2.7 去应力退火 .....	036
2.3 正火 .....	037
2.4 退火、正火后的组织性能比较与工艺选择 .....	039
2.5 退火、正火常见缺陷与避免措施 .....	040
思考题 .....	042
<b>第3章 钢的淬火及回火 .....</b>	<b>044</b>
3.1 淬火概念 .....	044
3.2 淬火工艺参数的确定 .....	045
3.2.1 淬火加热方式及加热温度的确定原则 .....	045
3.2.2 淬火加热时间的确定原则 .....	046
3.2.3 淬火介质及冷却方式的选择与确定原则 .....	046
3.3 淬火介质 .....	047
3.3.1 淬火介质的分类 .....	048
3.3.2 工件在淬火介质中的冷却过程 .....	048
3.3.3 淬火介质冷却特性的测定 .....	049
3.3.4 常用淬火介质及其冷却特性 .....	050
3.4 钢的淬透性 .....	056
3.4.1 淬透性的基本概念及其影响因素 .....	057
3.4.2 淬透性的实验测定方法 .....	060
3.4.3 淬透性曲线的应用 .....	064
3.5 淬火方法及其应用 .....	065
3.6 淬火应力与变形、开裂 .....	069
3.6.1 淬火应力 .....	070
3.6.2 淬火变形 .....	074
3.6.3 淬火裂纹 .....	077
3.6.4 减少淬火畸变、防止淬火开裂的措施 .....	080
3.7 淬火新工艺的发展与应用 .....	082
3.7.1 淬火加热新方法 .....	082
3.7.2 数字化淬火冷却控制技术 .....	083
3.7.3 晶粒超细化淬火 .....	084
3.7.4 提高韧性的淬火新方法 .....	085
3.7.5 等温淬火的发展 .....	086
3.8 钢的回火 .....	087
3.8.1 回火工艺参数的确定 .....	088
3.8.2 回火的分类及应用 .....	091
3.9 淬火和回火缺陷及案例分析 .....	093
3.9.1 淬火缺陷及其预防与补救 .....	093
3.9.2 回火缺陷及其预防与补救 .....	094

3.9.3 淬火和回火处理案例与缺陷控制 .....	095
思考题 .....	098
<b>第4章 钢的表面淬火 .....</b>	<b>099</b>
4.1 表面淬火概念及应用 .....	099
4.2 表面淬火工艺原理 .....	100
4.2.1 钢在非平衡加热时的相变特点 .....	100
4.2.2 快速加热对相变后组织的影响 .....	102
4.2.3 原始组织对快速加热相变的影响 .....	103
4.3 表面淬火后的组织与性能 .....	103
4.3.1 表面淬火后的组织 .....	103
4.3.2 表面淬火后的性能 .....	105
4.3.3 表面淬火淬硬层深度及分布对工件承载能力的影响 .....	106
4.4 感应加热表面淬火 .....	108
4.4.1 感应加热基本原理 .....	108
4.4.2 感应加热的物理过程 .....	111
4.4.3 感应加热表面淬火工艺 .....	112
4.4.4 感应加热表面淬火前后的热处理 .....	113
4.4.5 感应加热淬火常见质量问题及返修 .....	114
4.5 其他表面淬火法 .....	115
4.5.1 火焰加热表面淬火 .....	115
4.5.2 激光加热表面淬火 .....	117
4.5.3 电子束加热表面淬火 .....	119
4.5.4 太阳能加热表面淬火 .....	120
思考题 .....	121
<b>第5章 钢的化学热处理 .....</b>	<b>122</b>
5.1 化学热处理基本概念 .....	122
5.2 化学热处理原理 .....	123
5.2.1 渗剂的分解与扩散 .....	123
5.2.2 活性原子在工件表面的吸附 .....	124
5.2.3 渗入元素由工件表面向里扩散 .....	126
5.2.4 化学热处理的质量控制 .....	129
5.3 钢的渗碳 .....	130
5.3.1 渗碳工件对渗层的技术要求 .....	131
5.3.2 气体渗碳 .....	132
5.3.3 固体、液体渗碳 .....	145
5.3.4 渗碳后的热处理 .....	146
5.3.5 渗碳后钢的组织与性能 .....	148

5.3.6	渗碳件常见缺陷及预防补救措施 .....	149
5.3.7	先进气体渗碳技术 .....	151
5.4	钢的渗氮 .....	152
5.4.1	渗氮的特点 .....	152
5.4.2	渗氮层的组织与性能 .....	153
5.4.3	气体渗氮 .....	156
5.4.4	离子渗氮 .....	161
5.4.5	渗氮后的质量检验及常见缺陷 .....	164
5.4.6	渗氮工艺的发展 .....	164
5.5	钢的碳氮共渗与软氮化 .....	165
5.5.1	碳氮共渗 .....	165
5.5.2	软氮化 .....	169
5.6	其他化学热处理 .....	170
5.6.1	渗硼 .....	171
5.6.2	渗硫 .....	173
5.6.3	渗铬 .....	174
5.6.4	渗铝 .....	176
	思考题 .....	177
<b>第6章</b>	<b>钢的形变热处理 .....</b>	<b>179</b>
6.1	低温形变热处理 .....	179
6.1.1	低温形变热处理工艺参数 .....	179
6.1.2	低温形变热处理后的组织变化 .....	182
6.1.3	低温形变热处理后的力学性能 .....	184
6.1.4	其他低温形变热处理 .....	186
6.2	高温形变热处理 .....	187
6.2.1	高温形变热处理工艺参数 .....	188
6.2.2	高温形变热处理后的组织变化 .....	189
6.2.3	高温形变热处理后的力学性能 .....	190
6.2.4	其他高温形变热处理 .....	191
6.3	表面形变热处理 .....	193
6.3.1	表面高温形变淬火 .....	194
6.3.2	表面冷形变强化 .....	194
6.4	形变化学热处理 .....	195
6.4.1	钢件化学热处理后冷变形 .....	195
6.4.2	钢件形变后化学热处理 .....	195
	思考题 .....	196
	<b>参考文献 .....</b>	<b>197</b>

# 第 1 章

## 金属的加热

金属热处理就是将金属工件放在一定的介质中加热到某一温度，并保温一定时间，然后以适当的冷速进行冷却，获得所需要的组织结构来满足工件的性能要求的技术。加热是热处理的首要工序。加热对热处理质量有直接的影响。

金属工件的加热方式分为直接加热和间接加热。直接加热为内阻直接加热，不需要加热介质，如直接通电进行电阻加热、电磁感应加热、低能粒子轰击加热（激光加热、电子束加热）等。间接加热是利用外热源的热量，通过加热介质，以对流、传导以及辐射的方式向工件传递热量，如电阻炉、盐浴炉或燃料炉加热等。

在加热过程中，材料内在的热力学状态、晶体结构、物理化学性质或化学成分分布会发生变化，随后在一定冷速下冷却，获得预期的组织性能。若加热不加控制，则可能会给工件带来性能恶化，如引起工件的氧化和脱碳，造成工件表面质量下降、硬度降低、使用寿命减少等情况。

加热参数主要包括加热速度、加热温度和加热时间等。合理的加热参数是保证工件顺利进行热处理，获得最终理想组织性能的关键因素之一。因此，热处理时对加热参数有一定的要求。

本章将讨论金属材料在热处理时的物理过程及其影响因素、加热参数的确定、钢加热时的氧化与脱碳反应及控制、加热缺陷及其预防等。

### 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，热量由炉内热源传递给工件表面，工件表面得到热量再向工件内部传递。由炉内热源把热量传递给工件表面的过程，可以借助辐射、对流及热传导的方式实现。工件表面获得热量后向工件内部传递的过程，则靠热传导方式进行。

#### 1.1.1 加热介质与工件表面的传热过程

##### 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将其热量又借热传导传递给工件表面。对流过程中，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。

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, °C;

$t_{\text{工}}$ ——工件表面温度, °C;

$\alpha_c$ ——对流传热系数, J/(m<sup>2</sup>·h·°C);

$F$ ——热交换面积 (工件与流体接触面积), m<sup>2</sup>。

由对流传热的物理过程可以看出, 对流传热过程的传热系数对热量的传递起着重要的作用, 影响传热系数  $\alpha_c$  的因素很复杂, 主要包括以下几种。

### 1) 传热流体运动情况

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。静止状态的液体或气体在加热过程中由于靠近热源与远离热源 (工件附近) 处的温度不同, 其密度也不同, 因而发生自然对流, 其热量的传递就靠自然对流进行, 因此其传热系数  $\alpha_c$  较小。

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, 则称为层流。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, 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。流体的这种不规则运动, 称为紊流。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

$$\alpha_c = (4.64 + 3.49 \times 10^{-3} \Delta T) - \frac{\omega^{0.61}}{D^{0.39}} \times 3600 \text{ J/(m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C)} \quad (1-2)$$

式中  $D$ ——圆柱体直径, m;

$\Delta T$ ——空气和圆柱体的温差, °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、比热及密度越大, 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

当物体的温度大于绝对零度时, 就能从表面放出辐射能, 温度越高, 辐射出的总能量就越大。辐射能的载体是电磁波。波长为 0.1~100 μm 的辐射能被物体吸收后变为热能, 而波长在此范围内的电磁波为热射线。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

$$E = c \left( \frac{T}{100} \right)^4 \text{ J/(m}^2 \cdot \text{h)} \quad (1-3)$$

式中  $T$ ——物体的绝对温度, K;

$c$ ——辐射系数, J/(m<sup>2</sup>·h·K<sup>4</sup>)。

$c = 20.52 \text{ kJ/(m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4)$  的物体称为绝对黑体, 即辐射来的能量全部吸收, 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  $c < c_0$ 。

工件放在炉内加热时，一方面要接受从发热体、炉壁等辐射来的能量，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，有部分热量要反射出去；另一方面，工件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  $Q_r$  可用下式表示，即

$$Q_r = A_n c_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F \quad (1-4)$$

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  $Q_r$  的表面积， $m^2$ 。

当发热体与工件之间存在挡板等遮热物时，将使辐射传热量减少。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，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，亦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，其能量在行进过程中逐渐被吸收，剩余的能量则透过气体。气体层的厚度越大，压力越大，吸收能力也越强。所有气体对射线的反射率都等于零。气体本身也辐射能量，其辐射能力与绝对温度的四次方成比例。

### 3. 传导传热

传导传热是通过传热物质质点间的相互碰撞进行热量传递。传热物质质点在原位做热振动时，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（内能较高）的物质向温度较低（内能较低）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  $q [J/(m^2 \cdot h)]$  表示，其公式为

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1-5)$$

式中  $\lambda$ ——热传导系数， $J/(m \cdot h \cdot ^\circ C)$ ；

$\frac{dT}{dx}$ ——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，上述三种传热方式往往同时存在，但会依据加热介质、加热温度的不同以其中一种或两种传热方式为主。同时考虑上述三种传热方式的称为综合传热，其

传热效果可以认为是三种传热的单独传热结果之和，即

$$Q = Q_c + Q_r + Q_{cd} \quad (1-6)$$

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

由于这三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：

$$Q = \alpha(t_{\text{介}} - t_{\text{工}}) \quad (1-7)$$

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

且  $\alpha = \alpha_c + \alpha_r + \alpha_{cd}$ ，其中  $\alpha_c$ 、 $\alpha_r$  和  $\alpha_{cd}$  分别表示对流传热、辐射传热和热传导传热的传热系数。

### 5. 加热介质对传热系数 $\alpha$ 的影响

热处理加热时，常用的加热介质有空气、惰性气体（氮气、氩气）、氨热分解气体、 $\text{CO}-\text{H}_2-\text{N}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2-\text{CO}-\text{H}_2$  混合气体、熔融盐类液体和熔融金属液体等。流态化炉（也称为流动粒子炉）在生产上也有应用，因为它的加热介质常为石墨粒子或砂粒（如石英砂等），因此可以把它视为固体介质。真空加热在热处理加热中也有广泛的应用，其本质是在稀薄的空气介质中加热。

#### 1) 流态化炉中加热的特点

采用石墨粒子作为流态化物质时，石墨粒子既作为电阻发热体，又作为加热介质（石英砂只作加热介质用）。因为内热式流态化炉（类似于内热式盐炉）中，石墨粒子放在两电极之间，石墨是导体，故两电极通过石墨导电。当流态化炉工作时，一定压力和流量的气流由炉底通入炉内，吹动石墨粒子上下翻滚，犹如加热液体沸腾一样，两极间石墨粒子之间时而接触，时而分离，产生一定电阻，电流流过时发热。与此同时，通过对流直接接触及辐射将热量传给工件。据试验，在流态化炉中加热时，在高温时辐射传热约占 50%。在  $850^\circ\text{C}$  时石墨粒子流态化炉的传热系数  $\alpha = 1\,758 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ，相当于中温盐炉的传热系数。

#### 2) 在液态介质（熔盐或金属）中加热的特点

工件在液体介质中加热时，以热传导为主，兼有辐射传热及对流传热。当以综合传热公式表示时，其传热系数则与液体的导热系数、比热、密度有很大关系。例如，在相同加热温度下，铅浴的传热系数比盐浴大一倍以上。有人测定 50% KCl+50% NaCl 盐浴在  $900^\circ\text{C}$  时的传热系数为  $2\,261 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

#### 3) 在气体介质中加热的特点

在气体介质中加热时，在高温区以辐射传热为主，而在低于  $600^\circ\text{C}$  的循环气体炉中则以对流传热为主，在中间温度区域（如中温淬火加热）两者均有一定作用，故在可控气氛加热时安装气流循环风扇，不仅对炉内气氛成分均匀有很重要的作用，而且对加速传热也有一定作用。表 1-1 为钢材在不同温度、不同介质中加热时的传热系数计算值  $\alpha_1$ （炉温与工件最终加热温度差为  $10^\circ\text{C}$ ）及不同气流速度下的经验传热系数  $\alpha_e$  值。由于用可控气氛光亮加热时工件表面光洁，黑度较小，故传热系数小。

#### 4) 真空加热的特点

真空加热时为辐射传热。由于表面光洁，黑度更小，因而传热系数计算值  $\alpha_1$  较光亮加热时更小。

表 1-1 传热系数计算值  $\alpha_t$  和经验传热系数  $\alpha_e$ 

炉温/ $^{\circ}\text{C}$	钢材 $\alpha_t/[\text{kJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}]$		气流速度/ $(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$\alpha_e/[\text{kJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}]$
	空气介质	光亮加热	自然对流	
300	75.4	46	2	63~75
500	184.3	105	5	92~121
700	368.6	209	10	147~167
900	615.5	355.9	15	251~335

### 1.1.2 工件内部的传热过程

工件表面获得热量以后，表面温度升高，表面与内部的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公式（1-5）表示，即

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

此处导热系数  $\lambda$  为被加热工件材料的热传导系数。热传导系数  $\lambda$  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热流量密度。

热传导系数  $\lambda$  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传导系数的影响。由图 1-1 可以看出，钢中合金元素会不同程度地降低钢的热传导系数。热传导系数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。热传导系数与温度的关系近似地呈线性关系：

$$\lambda = \lambda_0(1 + bt) \quad (1-8)$$

式中  $\lambda$ ——温度为  $t$   $^{\circ}\text{C}$  时的热传导系数；

$\lambda_0$ ——温度为  $0$   $^{\circ}\text{C}$  时的热传导系数；

$b$ ——热传导温度系数，与钢的化学成分及组织状态有关， $1/^{\circ}\text{C}$ 。

图 1-2 为不同钢的热传导系数与温度的关系。由图可见，在低温时合金元素强烈地降低热传导系数，随着温度的提高，其影响减弱。高于  $900$   $^{\circ}\text{C}$  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，奥氏体的热传导系数最小。纯铁和碳钢的热传导系数随着温度的升高而降低。

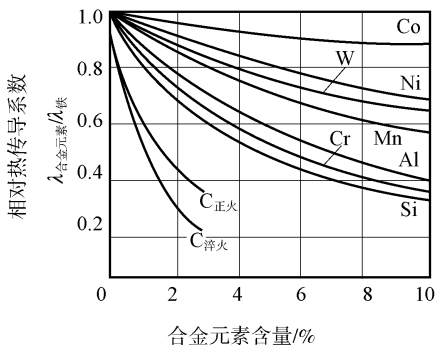


图 1-1 合金元素对二元铁合金热传导系数的影响

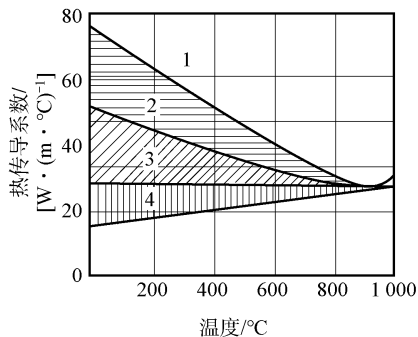


图 1-2 不同钢的热传导系数与温度的关系  
1—纯铁；2—碳钢；3—合金钢；4—高合金钢

## 1.2 金属加热参数的确定

热处理过程中的加热对工件热处理质量有直接影响。工件的加热状态取决于加热速度、加热温度、加热时间及加热方式等。因此，热处理时对加热参数有一定的要求。

### 1.2.1 加热速度的确定

加热速度通常是指钢件在加热时，单位时间内其表面温度升高的度数，单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 或 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，有时也用加热单位厚度钢件所需的时间（ $\text{min}/\text{cm}$ ）或单位时间内加热钢件的厚度（ $\text{cm}/\text{min}$ ）来表示。

生产中，为了提高生产率，总是希望快速加热工件，以提高炉子生产率，并减少氧化、脱碳，降低单位燃料消耗量，所以快速加热是提高炉子各项指标的重要措施。但在生产实践中，加热速度受到技术上可能达到的加热速度及具体工件所允许的加热速度两个因素的限制。

#### 1. 加热设备的类型及功率的影响

热处理中使用的加热设备不同，加热速度也不同。浴炉加热速度大于箱式炉中的加热速度（大约快1倍），而火焰炉的加热速度又大于电炉（大约快1/3），对于同一类型设备来说，其功率越大，即单位时间可以供给的热量越多，其加热速度也越快。此外，感应加热及穿透电流加热要比一般热处理炉的加热速度快得多。

#### 2. 工件的影响

在加热过程中如果加热速度控制不当，会造成工件的内外温差过大，导致工件的内部产生较大的热应力，从而使工件出现变形甚至产生裂纹。对厚大工件来说，其不仅受炉子给热能力的限制，而且受到钢件本身所允许的加热速度的限制，这种限制可归纳为加热初期断面上温差的限制、加热末期断面上透烧程度的限制和因炉温过高造成的加热缺陷的限制。

##### 1) 加热初期断面上温差的限制

在加热初期，钢件表面与中心产生温度差。表面的温度高，热膨胀较大；中心的温度低，热膨胀较小。而表面与中心是一个不可分割的金属整体，所以膨胀较小的中心部分将限制钢件表面的膨胀，使钢件表面受到压应力；同时，膨胀较大的表面部分将强迫中心部分一起膨胀，使中心受到拉应力。这种应力称为热应力。从断面上的应力分布可以看出，表面与中心处的热应力都是最大的，在表面与中心之间的某个位置上的金属则既不受压应力也不受到拉应力。

加热速度越大，内外温差越大，产生的热应力也越大。当热应力在钢的弹性极限以内时，对钢的质量没有影响，因为随着温度差的减小和消除，应力会自然消失。当热应力超过钢的弹性极限时，钢件将发生塑性变形。如果热应力再大，超过了钢的强度极限，就会破裂。这时热应力对钢件中心的危害性更大，因为中心受的是拉应力，一般钢的抗拉强度远低于其抗压强度，所以中心的热应力容易造成内裂。若温度差消除后所产生的热应力不能完全消失，即为残余应力。

加热过程中热应力的大小受材料成分、加热温度和工件截面尺寸的影响。

如果钢的塑性好，即使在加热过程中形成很大的内外温差，也只能引起塑性变形，以任

意速度加热，都不会因热应力而引起钢件开裂。如果钢的导热性好（导热系数大），则在加热过程中形成的内外温差就小，加热时所引起的塑性变形或开裂的可能性较小。低碳钢的导热系数大，高碳钢和合金钢的导热系数小，因而高碳钢和合金钢在加热时容易形成较大的内外温差，而且这些钢在低温时塑性差，所以在刚入炉加热时，容易发生因热应力而引起的开裂。

如果被加热工件的断面尺寸较小，则加热时形成的内外温差也较小；断面尺寸大的工件，因加热时形成较大的内外温差，故容易因热应力而导致钢件变形或开裂。

根据上述分析，可知：

(1) 在加热初期，限制加热速度的实质是减少热应力。加热速度越快，表面与中心的温度差越大，热应力越大，这种应力可能造成钢件的变形和开裂。

(2) 对于塑性好的金属，热应力只能引起塑性变形，危害不大。因此，对于低碳钢温度在 500℃ 以上时，可以不考虑热应力的影响。

(3) 允许的加热速度还与金属的物理性质（特别是导热性）、几何形状和尺寸有关，因此，对尺寸较大的高碳钢和合金钢工件进行加热时要特别小心，而对薄材则可以任意速度加热。

### 2) 加热末期断面上透烧程度的限制

加热末期，钢件断面仍然可能存在温差。加热速度越大，则形成的内外温度差越大，往往也需要限制钢件加热末期的加热速度。但是，实际和理论都说明，降低整个加热过程的加热速度是不可取的。因此，往往在快速加热后，为了减小温差可以降低加热速度或保温，以求得内外温度均匀。

上述的两个温度差（加热初期为避免裂纹与开裂所允许的内外温差和加热末期因透烧程度要求的内外温差）都对加热速度有所限制。一般低碳钢大多可以进行快速加热而不会给产品质量带来影响。但加热高碳钢和合金钢时，其加热速度就要受到一些限制，高碳钢和合金钢在 500℃ 以下时易开裂，故应限制加热速度。

## 3. 加热方式的影响

工件入炉方式有随炉升温、预热加热、到温入炉和高温入炉等几种。

(1) 随炉升温加热，即工件装入室温的炉膛内后，随着炉子升温而不断加热。此法加热速度慢，截面上温差小，装炉方便，但生产效率极低，适合于易畸变、开裂的工件或大件。

(2) 预热加热，即工件先在已升温至较低温度的炉子中加热，通电后工件随炉子一道升温，直至所需加热温度。预热加热的工件截面温差较小，可减少工件在高温段的停留时间，减轻氧化、脱碳。预热加热常用于大件、高合金钢工件。

(3) 到温入炉加热，又称热炉装料加热，即先把炉子升到工件要求的加热温度，然后再把工件装炉加热。此法是热处理生产中普遍采用的方法，特点是便于生产，加热较快，适用于多数中、小工件。

(4) 高温入炉加热，即工件装入比工件要求的加热温度高的炉内进行加热，直至工件达到要求的温度。此法加热速度快，截面温差大，操作较难掌握。高温入炉加热多用于对畸变要求不高或不易畸变的工件，如某些锻件的退火、正火加热等。

以上四种加热方式，主要表现为加热速度不同。它们的加热速度按随炉升温加热→预热加热→到温入炉加热→高温入炉加热的方向由慢到快，加热过程中产生的热应力则按随炉升温加热→预热加热→到温入炉加热→高温入炉加热的方向由小到大。高温入炉加热是一种节

能的快速方法，但是容易产生较大的热应力，因此针对不同的材料，适用的最小尺寸不同。可用高温入炉方式加热的中碳合金钢，直径应小于 400 mm；中碳钢和低碳合金钢直径应小于 600 mm；高碳高合金钢则不宜采用高温入炉的方式加热。

#### 4. 实际生产中加热速度的控制

在实际生产中，加热速度快一些，可以节约热能，提高生产率，还可以减小氧化、脱碳程度。考虑钢件加热速度时一般应注意以下几点。

(1) 塑性高的钢材加热速度可快一些，反之，脆性大的钢材加热速度应相对减慢。因此，对尺寸较小的碳钢及低合金钢工件，都可以采用较快的加热速度。

(2) 高碳钢、高铬钢、高速钢等高碳高合金钢的导热性差，如 T10 钢的导热能力相当于 20 钢导热能力的 2/3，W18Cr4V 高速钢的导热能力是 20 钢的 1/3，而高锰钢的导热能力仅为 20 钢的 1/6。导热能力差，则必然加大表面与心部的温差，其热应力也就相应增大。此外，此类钢不仅导热性差，而且塑性也较低。显然，截面大的高合金钢件，若加热速度过高，热应力易超过钢的弹性极限而发生扭曲变形，甚至超过钢的抗拉强度而出现裂纹。所以合金钢特别是高合金钢的加热速度不宜过快，在生产中常采用预热的方式进行加热。

(3) 工件的断面越大，则工件内部存在偏析、夹杂、组织不均匀等缺陷以及残余应力的可能性也越大，所以大工件热处理多数采用预热加热或缓慢加热的方式限制加热速度。

(4) 断面厚薄相差悬殊及形状复杂的工件易于产生应力集中，难以做到均匀加热，所以也要控制加热速度。

(5) 若加热前工件存在较大的残余应力，则当加热产生的热应力与内应力方向一致时，容易导致工件变形开裂，因此，加热速度应慢一些。例如，铸锻件在其锻后及铸造后的热处理过程中，由于工件内部不可避免地存在铸造及锻造应力，故必须控制其加热速度。如铸铁件退火时就是采用低温入炉、缓慢随炉升温的方式进行加热的。

(6) 固体渗碳、退火等工艺，由于工艺本身及设备特点的限制，通常不采用快速加热的方式。

(7) 如果钢中存在成分偏析严重、夹杂物较多的情况，就可能造成组织不均匀，导致钢中各部位导热性不一致，尤其是大块夹杂物与尖角状夹杂物，其尖端正是热应力所在之处，极易引起开裂，所以对这类钢件应缓慢加热。

(8) 低于 500 °C 加热时，一般钢的塑性较差，热应力及残余应力易导致工件开裂。而在温度较高的情况下，由于钢的塑性较好，可以通过塑性变形改变内应力的大小及分布而不致开裂，所以控制低温区的加热速度是很重要的，一般以 50~100 °C/h 速度加热。预热也是一项有效的措施。

### 1.2.2 加热温度的选择

工件加热温度基本上决定了其加热时所得到的组织，而工件冷却后的组织和性能也在很大程度上取决于加热时所得到的组织。因此，在实际生产中加热温度是非常重要的。对于不同的热处理工艺方法、不同材质的工件及不同的加热方式，加热温度可能有很大的区别。因此，必须结合实际的工艺具体确定加热温度。

确定加热温度最根本的依据是热处理的目的和钢的成分。碳钢和低合金钢加热温度的选择主要是借助于平衡相图，对于正火和淬火及一些退火工艺来说，其加热温度必须确保工件

加热时获得奥氏体组织，否则就难以保证在冷却后得到要求的组织和性能。这是一个基本原则，所以必须以其临界点  $Ac_1$ ， $Ac_3$  或  $Ac_{cm}$  作为确定其加热温度的依据。

不同成分的钢临界点不同，所以热处理时所采用的加热温度也不同。多数合金钢的加热温度也是依其临界点而定的。但是由于合金碳化物较难溶解，合金元素在奥氏体中扩散也慢，按照奥氏体化要求，往往采用较高的加热温度。如过共析钢的淬火加热温度一般选择在  $Ac_1$  以上  $30\sim 70\text{ }^\circ\text{C}$ ，9CrSi 钢的  $Ac_1$  为  $770\text{ }^\circ\text{C}$ ，但其淬火温度为  $850\sim 870\text{ }^\circ\text{C}$ ；再如 W18Cr4V 高速钢的  $Ac_1$  为  $820\text{ }^\circ\text{C}$ ，而其淬火加热温度为  $1\ 270\sim 1\ 290\text{ }^\circ\text{C}$ ，高于  $Ac_1$  达  $400\text{ }^\circ\text{C}$  之多。另外，大多数合金元素（除 Mn、N、Co 等）使钢的临界点提高，因此，合金钢的加热温度不能直接由 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图得出，可通过有关手册等资料查取。

此外，即使同一成分的钢进行同一种热处理，由于其工件的大小、形状、原始组织以及热处理要求的不同，其加热温度的选择也将有所不同。对一般碳钢工件，在其允许的加热温度范围内，综合考虑上述因素，决定采用上限或下限温度。

(1) 工件尺寸：小件取下限温度，大件取上限温度。因为小件加热快，棱边、角等处易发生过热；大件加热慢，心部加热到预定温度所需时间较长，为避免心部加热不足，应适当提高加热温度。

(2) 工件形状：形状复杂、易畸变开裂的工件，采用下限温度；简单工件采用上限温度。

(3) 冶金质量：用 Al 脱氧的本质细晶粒钢，取上限温度；用 Si、Mn 脱氧的本质粗晶粒钢，取下限温度。

(4) 原始组织：原始组织较细时，取下限温度；原始组织粗大又不均匀时，取上限温度。

(5) 加热速度：加热速度快时，取上限温度；反之，取下限温度。

对生产批量大的工件，在初步确定加热温度后，还需进行工艺试验，以最终确定合适的加热温度。

实际操作过程中要特别注意工件应放置在炉膛内有效加热区内进行加热，以保证工件的实际加热温度为预定的温度。有效加热区指能够保证由给定热处理工艺所要求加热温度的装料区域。具体加热设备的有效加热区范围是根据预先测温而设定的。而一般靠近炉门的温度比有效加热区内温度偏低，而热源附近的温度比有效加热区内温度偏高。

具体针对不同的热处理目的的加热温度的制定原则，在以后的章节中再分别介绍。

### 1.2.3 加热时间的确定

确定加热时间的基本原则是在规定的加热温度下，所选的加热时间应足以保证热处理质量。

工件的加热时间 ( $\tau_{加}$ ) 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，即

$$\tau_{加} = \tau_{升} + \tau_{透} + \tau_{保} \quad (1-9)$$

其中，升温时间是指工件入炉后表面达到炉内温度的时间，透热时间是指工件内部与表面都达到炉内温度的时间，保温时间是指为了达到热处理工艺要求而恒温保持的时间。这样的区分是由实际加热过程中这三部分时间的含义及其规律各不相同而确定的。升温时间主要取决于加热炉或加热装置的热功率、加热制度、加热介质以及装炉量；透热时间主要取决于被加热工件的形状、体积、截面尺寸，以及工件材料本身的导热性能，同时还与炉温的高低有关；保温时间主要取决于热处理工艺制度的要求，如是否需要得到