

热处理工艺及设计

彭其凤 丁洪太 主编

上海交通大学出版社

TG156

P48

高等学校教材

热处理工艺及设计

主 编

彭其凤 丁洪太

上海交通大学出版社

(沪)新登字 205 号

内 容 提 要

本书是根据全国高等工业学校金属材料及热处理专业《热处理工艺》课程教学大纲的基本要求而编写的。书中特别注意理论联系实际,从基本理论、基本知识出发,归结到计算、应用及实际操作过程。全书共分十一章,包括热处理加热过程质量控制、基本热处理工艺和热处理新工艺、新技术(如离子渗氮、真空热处理、形变热处理、电火花放电硬化等)、热处理应力 变形和开裂及热处理工艺设计,并重点讨论了轴类、齿轮和模具的热处理。

本书主要作为高等学校金属材料及热处理专业学生的教材,也可供机械和材料工程方面广大工程技术人员和科研人员参考。

封面编辑 冯 愈

封面设计 雨 风

热处理工艺及设计

出版:上海交通大学出版社

(上海市华山路 1954 号 邮政编码:200030)

发行:新华书店上海发行所

印刷:常熟市印刷二厂

开本:787×1092(毫米)1/16

印张:16.25 字数:399000

版次:1991年8月 第1版

印次:1994年8月 第1次

印数:1—3000

科目:324-621

ISBN 7-313-01337-x/TG·15 定价:18.60元

序 言

随着科学技术的飞速发展,对材料的质量要求不断提高,性能要求日益严格,加以人们对材料微观结构与宏观性能之间的关系,有了进一步的了解,热处理作为提高材料性能和发挥材料潜力的手段更加显示其重要性,已成为一条使产品获得理想综合技术经济效能的重要途径。

“热处理工艺及设计”课程的目的是通过各种热处理工艺和工艺参数(如加热和冷却的温度、时间、速度、压力、电参数等)对材料组织、结构及性能的影响规律,阐述有关工艺操作、基本原理和效果,同时将热处理工艺与材料选用、零件设计相结合,阐述热处理工艺设计方法及其在机械设计和机械加工工艺过程的地位和作用,并讨论将其应用于机械产品的某些重要基础件(轴、齿轮)与工艺装备(模具)的情况。

本书的任务,不但要使学生了解热处理工艺的一些内容方法步骤、相应的相变原理及结合现场实践的工艺特点,更重要的是培养学生具有现代市场观念和商品竞争意识,以及运用热处理工艺保证产品质量的能力,以便在参与市场竞争过程中获得高的经济效益,为我国国民经济发展作出贡献。

本书主要是根据全国高等工业学校金属材料及热处理专业的《热处理工艺》课程的教学大纲,并结合当前国家经济技术及市场发展需要而编写的。全书共十一章,前七章包括一般热处理及热处理新工艺、新技术,后四章包括热处理工艺设计及在轴、齿轮、模具上的应用。书中绪论、第一、八、十一章由山东工业大学彭其凤编写,第二、三、六、七章由山东工业大学丁洪太编写,第五、十章由山东工业大学姜江编写,第四、九章由山东大学莫之民编写。全书由彭其凤、丁洪太担任主编,并由山东工业大学孟繁杰担任审订。

在编写过程中编者力图较深刻地阐明课程的基本原理及工艺技术方法特点,紧密联系生产实践,并全面反映当前国内外的热处理新工艺、新技术,但由于编者水平所限,加上编写时间仓促,书中错误和不妥之处在所难免,希望广大读者批评指正。本书引用了一些工厂、科研单位和兄弟院校的资料、数据、图表,在此谨向有关同志表示深切谢意。

编 者

一九九三·十

本书符号与计量单位

A	奥氏体
A_1	珠光体 $\rightleftharpoons$ 奥氏体的临界点, °C
A_{c_1}	珠光体 $\rightarrow$ 奥氏体的临界点, °C
A_{r_1}	奥氏体 $\rightarrow$ 珠光体的临界点, °C
A_s	铁素体 $\rightleftharpoons$ 奥氏体的临界点, °C
A_{s_1}	铁素体 $\rightarrow$ 奥氏体的临界点, °C
A_{r_s}	奥氏体 $\rightarrow$ 铁素体的临界点, °C
A_{cm}	渗碳体 $\rightleftharpoons$ 奥氏体的临界点, °C
a	导热系数或热扩散系数, cm^2/s
α	加热系数, s/mm 或 min/mm
a_0	活度
a_K	冲击韧性, J/cm^2
B	贝氏体
B_1	毕奥规范数
C	浓度, %
c	比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$
"C"	奥氏体等温或连续冷却转变曲线
D	直径, mm
D_0	临界直径, mm
d	直径, mm
d	有效厚度, mm
d	距离, mm
E	弹性模量, MPa
E	电势, V
e	感应电势, V
e	自然对数底
F	铁素体
F	面积, m^2
F	法拉第常数, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
F_0	傅立叶规范数
f	频率, Hz
H	急冷度, mm^{-1} 或 in^{-1}
h	高度, mm
HB	布氏硬度
HRA	洛氏 A 标度硬度
HRC	洛氏 C 标度硬度
HV	维氏硬度
HS	肖氏硬度

Hm	显微硬度	
I	电流, A	
I_r	涡流电流强度, A	
J	端淬试验	
J	惯性矩, J	
K	常数	
K	平衡常数	
L	距离, mm	
M	马氏体	
M_s	马氏体转变开始点, °C	
m	齿轮模数	
m	质量, kg	
P	珠光体	
P	功率, kW	
P	压力, Pa	
ΔP	单位表面功率, kW/cm ²	
Q	热量, J	
q	热流密度, W/m ²	
R	电阻, Ω	
R	半径, mm	
R	气体常数, J/(mol·K)	
r	半径, mm	
S	索氏体	
T	屈氏体	
T	温度, K	
t	温度, °C	
U	电压, V	
V	体积, m ³	
v	加热或冷却速度, °C/s	
v_0	上临界冷却速度, °C/s	
v_0'	下临界冷却速度, °C/s	
x	距离, mm	
X_L	感抗, Ω	
Z	电抗, Ω	
α	α 相	
α	热交换系数, W/(m ² ·°C)	
α_s	综合换热系数, W/(m ² ·°C)	
γ	密度, kg/m ³	
γ	γ 相	
γ'	γ' 相	
δ	硬化层深度, mm	
δ	渗碳层深度, mm	
ϵ	ϵ 相	

ϵ	变形
θ	居里点, $^{\circ}\text{C}$
η	效率
λ	导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$
μ	化学势, J/mol
μ	导磁率, $\text{Wb}/(\text{A} \cdot \text{m})$
ρ	电阻率, $\Omega \cdot \text{cm}$
σ	应力, MPa
σ_s	屈服强度, MPa
σ_b	抗拉强度, MPa
σ_{-1}	疲劳强度, MPa
τ	时间, s
Φ	磁通, Wb
ϕ	直径, mm
Δ	电流透入深度, mm

目 录

绪论.....	(1)
第一章 加热及质量控制	(5)
第一节 热处理加热过程.....	(5)
第二节 加热介质.....	(13)
第三节 钢在加热时的氧化脱碳及其控制.....	(16)
第二章 退火与正火.....	(24)
第一节 定义与分类.....	(24)
第二节 退火与正火工艺.....	(25)
第三节 退火与正火的选择.....	(30)
第三章 淬火与回火.....	(32)
第一节 淬火定义与目的.....	(32)
第二节 淬火介质(冷却介质、淬火剂、冷却剂).....	(33)
第三节 淬透性.....	(44)
第四节 淬火方法.....	(54)
第五节 淬火工艺确定原则.....	(55)
第六节 回火.....	(59)
第四章 表面淬火.....	(63)
第一节 感应加热表面淬火(高频淬火).....	(63)
第二节 火焰表面淬火.....	(74)
第三节 电解液加热表面淬火.....	(76)
第四节 电接触加热表面淬火.....	(77)
第五章 化学热处理.....	(79)
第一节 概述.....	(79)
第二节 化学热处理的基本过程.....	(79)
第三节 渗层的形成过程与结构.....	(81)
第四节 渗碳.....	(83)
第五节 渗氮.....	(98)
第六节 氮碳共渗(软氮化).....	(106)
第七节 碳氮共渗.....	(109)
第八节 渗硼.....	(113)
第九节 渗铬.....	(116)
第十节 渗铝.....	(118)
第六章 热处理新技术新工艺.....	(121)
第一节 板条马氏体强化.....	(121)

第二节	利用第二相淬火	(122)
第三节	离子渗氮	(125)
第四节	真空热处理	(130)
第五节	复合热处理	(135)
第六节	电火花放电硬化	(138)
第七节	形变热处理	(142)
第七章	热处理应力、变形与裂纹	(149)
第一节	热处理应力	(149)
第二节	热处理变形	(156)
第三节	热处理裂纹	(159)
第八章	热处理工艺设计	(164)
第一节	热处理件结构形状要求	(164)
第二节	正确选择热处理工件使用材料	(167)
第三节	热处理工艺设计	(174)
第四节	热处理工艺在加工工艺路线中的地位	(178)
第五节	热处理工艺设计的思路及设计效果评定	(181)
第九章	轴类零件	(184)
第一节	概述	(184)
第二节	轴类零件性能要求	(185)
第三节	轴类零件材料选用	(191)
第四节	轴类零件热处理	(196)
第十章	齿轮	(204)
第一节	概述	(204)
第二节	齿轮工作情况与性能要求	(204)
第三节	齿轮材料选用	(207)
第四节	齿轮结构与热处理工艺性及冷热加工工序安排	(208)
第五节	齿轮热处理	(210)
第六节	齿轮热处理质量分析	(216)
第七节	齿轮损坏形式及其分析	(219)
第十一章	模具	(223)
第一节	概述	(223)
第二节	冷塑性加工模具	(224)
第三节	成型模具	(233)
第四节	热塑性加工模具	(237)
第五节	压铸模具	(241)
第六节	减少模具热处理变形的措施	(243)

绪 论

热处理是通过加热和冷却的方法使金属内部组织结构(有的也包括表面化学成分)发生变化,以获得预期性能的工艺方法。这些性能包括工艺性能、机械性能、物理性能和化学性能,在现代机械制造工业中主要指材料的强度、硬度、韧性、耐磨性、耐热性和耐蚀性等。因此进行热处理是提高零件使用性能、保证产品质量、改善加工工艺性、发挥材料潜力和节约原材料的重要途径。

热处理最初只用于简单农具和小型工具、零件,因其性能要求不高,操作十分简单,控制也不甚严格,只用一般热源的简单设备将工件加热到适当温度保温后,再在一定介质中冷却即可。以后随着工业生产的发展和科学技术的进步,热处理技术也不断发展,工艺和理论日臻完善,现已发展成在理论和实际应用上都具有完整体系的一门现代科学。热处理的应用范围日益扩大,在整个国民经济建设中已占重要地位,在不少生产部门热处理已成为生产过程中一个不可缺少的环节。据统计,机床零件需要经过热处理的占60%~70%,汽车、拖拉机零件占70%以上,轴承、刀具、量具、模具则几乎是100%。而且有些零件在生产过程中要前后几次经过不同的热处理。

热处理是千百年来生产实践中发展起来的工艺方法,随着生产发展和不断经验总结而日益进步。热处理在我国有悠久历史,早在春秋战国时期已发明铸铁的石墨化退火和脱碳退火,应用于农具。西汉时代随钢铁兵器的兴起,已有文字记载应用淬火提高钢的硬度。三国时代已发现淬火介质对淬火工件质量的影响。例如,有记载“汉中水钝弱,不任淬;蜀水爽烈”,用成都的水所淬的剑比较锋利。说明水中所含盐类不同,淬火能力也不一样;此后又发现用动物尿和油作淬火介质。尿是含盐类的水,比普通水淬火能力强;油的冷却能力则比水弱,能避免因淬火应力而产生的裂纹。此外,唐代有马血淬火,清代有用硝黄、盐卤和人尿合成的淬火介质。在化学热处理方面,汉魏时期的刀剑已用低碳钢渗碳,利用骨粉作催渗剂。明代已熟练利用渗碳工艺制针。但是,由于历史的原因我国热处理技术比较落后,进步很慢。新中国成立后,我国的热处理技术才得到迅速发展,我国早已建成了完整的工业体系,并形成了一支素质较高,数量相当庞大的热处理专业队伍,现正在为祖国四化建设作出重大贡献。

随着工业的发展,产品质量不断提高,零件性能要求也日益严格和多样化,热处理的作用范围也日益扩大。除了改善工件组织结构和提高其使用性能外,现代热处理还可以赋予工件以新的性能,如红硬性、耐热性、耐蚀性、超高强度、韧性及永磁性等;可以改进其他加工工艺的工艺性,如锻压成形性、被切削性及被磨削性等;还可以改进零件的应力状态和保证零件形状、尺寸、精度及稳定性等。

热处理工艺是机械制造过程中一个重要组成环节,但与其他工艺相比,效果有很大差异,操作上也有许多特点,它们主要是:

(1) 切削、铸、锻、焊等工艺主要改变工件的外部形态,赋予一定的形状尺寸,热处理则主

要改变工件的内部组织形态,提高其内在质量,赋予各种使用性能。

(2) 热处理工艺有时为最后工序,也常为中间工序,穿插在其他工序之间进行。这时与前后工序都有关系、直接受前工序的影响,也对后工序的操作和质量起重要作用。

(3) 操作温度和过程时间范围广。随着产品质量要求的日益提高和多样性,材料的发展和热处理工艺方法的进步,现代热处理的操作温度和过程时间范围不断扩大、已远远超出了传统热处理的定义范围。在操作温度方面,升温已达 1300°C 以上甚至局部达到材料的熔点,降温则可达摄氏零度以下甚至达液氮温度。在过程时间方面长的达几十小时甚至上百小时,短的只不过几秒。

(4) 工艺控制精确。与其他工艺不同,大多数热处理要求精确控制工艺过程,例如,加热温度常需控制在 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 甚至 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 以下;加热时间的偏差常需控制在几分、几秒、甚至几毫秒以内;冷却速度和冷却方法也常有严格控制要求;还常要求准确控制工件在热处理过程中所处的状态,如处在水平或垂直位置,保持静止或运动状态,运动又可分为移动、摆动、振进、滚动或旋转运动等。

(5) 加热、冷却介质的多样性和严格性。热处理对所用加热、冷却介质的成分、状态、工作温度及某些物理化学性都常有不同要求,因而种类繁多,且应严格控制。加热常依工艺种类、工件变形开裂倾向、质量要求、钢材化学成分以及设备条件和工艺要求的不同而采用多种介质,包括固体、液体及气体介质;氧化性、还原性及中性介质;自然状态及控制状态的介质。冷却则主要要求冷却速度、冷却效果及最终冷却温度的不同而采用不同介质,但一般以液体介质为主,故常称淬火介质,又有静止、流动、喷射、雾化等不同状态。介质的种类、状态和性能一般都应严格控制。

(6) 加热冷却的均匀性和区分性。通常热处理都要求穿透和均匀加热和冷却,严格控制工件内外及表面各部分之间的加热冷却均匀一致程度,尽力保持热处理效果的一致性。但有些热处理工艺,如表面淬火、局部淬火、区分淬火,则要求工件各部分获得不同的热处理效果,因而加热和冷却也要保持一定的差别、即进行区分加热或冷却。

因要求工艺效果和操作方法不同,现代热处理工艺发展很快,种类已十分繁多,通常可依以下原则进行分类。

1. 依在机械加工过程中的位置和作用分类

(1) 最终热处理 为获得零件最后使用状态所需性能的热处理,常为加工过程的最后一道工序。

(2) 预先热处理 常在最终热处理之前进行,其作用在于改善其他工艺加工件的组织性能或为最终热处理或其他工艺作好适当组织性能准备。

(3) 补充热处理 精密零件经最终热处理或其他精加工后而施行的热处理,以进一步消除应力或稳定加工效果等。

2. 依工件热处理部位不同分类

(1) 整体热处理

(2) 局部热处理

(3) 表面热处理

(4) 区分热处理

3. 依工件化学成分是否要求变化分类

- (1) 普通热处理 不要求化学成分变化的热处理。
- (2) 化学热处理 要求材料化学成分变化的热处理,一般仅要求表面化学成分发生变化,但也有的要求整体变化,如穿透渗碳。

4. 依热处理温度分类

- (1) 高温热处理
- (2) 中温热处理
- (3) 低温热处理
- (4) 冷处理

5. 依工艺特点、组织转变及形状性能变化分类

- (1) 基本热处理——退火、正火、淬火、回火、冷处理、时效等;
- (2) 化学热处理——渗碳、渗氮、渗硼、渗金属、多元渗等;
- (3) 表面淬火——火焰淬火、感应淬火、浸液淬火、电接触淬火、激光淬火等;
- (4) 形变热处理——高温形变热处理、中温形变热处理、低温形变热处理;
- (5) 复合热处理——渗碳淬火、表面淬火自行回火、局部淬火自行回火、锻热淬火、铸造余热退火、焊接余热退火、发蓝淬火等。

由上所述,可见现代热处理操作种类十分繁多,工艺过程极其复杂,而且常要求严格、精确控制。因此,各种热处理件,都要求事先进行周密、详细而具体的工艺设计,并编制成热处理工艺规程,以便据以进行工艺操作和各项准备工作。

当前,我国热处理生产现状与工业发达国家相比,尚存在工艺水平低、质量差、耗能大、成本高,不仅资源浪费,而且产品也缺乏竞争能力。因此,热处理当前面临的任务是:一方面重视常规工艺和设备的改造,精心进行工艺设计,严格执行工艺规程和生产质量管理;另一方面注意采用和发展新工艺和设备,以达到改进产品质量,降低能源消耗,提高生产效率和获得最佳经济效益的目的。

现代科学技术的发展,正处在一个新兴技术和常规技术交替的时代,旧的技术日趋完善,新的技术不断出现,并在生产上应用,共同促进了生产的发展。例如,激光、电子计算机等新技术在热处理上的应用就是如此。加以产品质量的不断提高,环保要求的日益严格,以及节约能源的日趋重要,热处理技术进步非常迅速。今后热处理的主要发展趋势为:

- (1) 为提高热处理零件的尺寸精度和表面质量,大力推广少无氧化、防止脱碳和降低变形开裂的加热、冷却方法。
- (2) 重视节能节材,强化热处理工艺过程,积极采用化学催渗(如电解气相催渗、洁净催渗),物理催渗(如辉光放电、熔盐电解、真空、超声、电场、磁场、应力场)及复合热处理等新的热处理工艺。
- (3) 改造旧装备、采用新设备及调节控制装置,努力实现温度、介质等工艺参数及工艺动

作的精确自动控制,以达到生产过程的机械化、自动化、程序化。

(4) 采用少污染工艺,加强防止环境污染措施,重视对氰盐、油污、废水、废盐、烟尘的控制及无公害处理。

(5) 采用新能源、应用新技术、开发新工艺。

对化学工业污染环境的治理,应本着“预防为主,防治结合”的方针,采取综合措施,做到“三废”治理与生产同步进行,使污染物的排放符合国家标准。

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

化学工业污染防治

第一章 加热及质量控制

热处理加热的目的是使工件达到预定温度,并完成其内部组织转变,以便随后以一定速度冷却后可获得所需要的组织与性能。加热是各种热处理工艺成败的关键,它不仅影响工件的表面成分、内部组织、结构和性能,而且还会使其表面状态、形状尺寸发生变化,因此可直接影响到热处理质量。此外,所采用的加热方式、加热温度、加热速度和加热介质与热处理效果及生产效率和经济性都有密切关系。

第一节 热处理加热过程

一、加热的物理过程

热的传递以传导、对流与辐射三种形式进行。

1. 传导传热

传导传热常称导热,是指温度不同的接触物体间或一物体中各部分之间的热能传递过程。导热过程中,物体的微观粒子不发生宏观的相对移动,而在其热运动相互振动或碰撞中发生动能的传递,宏观上表现为,热量从高温部分传递至低温部分。微观粒子热能传递的方式随物质的结构而异,在气体与液体中靠分子的热运动和彼此碰撞;在不导电固体中靠晶格振动的弹性波的传播;在金属中则主要靠自由电子的运动。

2. 对流传热

对流传热是流体流动时,流体质点运动引起的热能传递过程,通常指流体内温度不同的各部分之间的传热,各部分中的质点相对运动相互混合引起热量传递。在工程上,对流传热常指相对运动的流体与所接触的固体表面之间的热交换过程,一般称对流换热。对流换热结果,热量从温度较高的一方传给较低的一方。热处理时炉气流过工件表面将其加热,就是对流传热的一个典型例子。

3. 辐射传热

任何物体高于热力学零度时,都会不停地向外发射粒子(光子),这种现象称为辐射。

按照经典电磁理论,物体中带电粒子热运动时,具有加速度会发射电磁波。带电粒子振动频率不同,可以发射出各种波长的电磁波。不同波长的电磁波投射到物体上,可产生不同效应。波长为 $0.1 \sim 100 \mu\text{m}$ 的电磁波的热效应最为显著,故称热辐射线,主要包括可见光($0.38 \sim 0.76 \mu\text{m}$)和红外线($0.76 \sim 100 \mu\text{m}$)。

物体间通过热辐射在空间传递热能的过程称辐射传热。当两物体间发生辐射传热时,不需要直接接触,也不需要中间介质。高温物体的热辐射线投落到低温物体上时,其辐射能即全部或部分被该物体吸收而转化为热能;同时低温物体也向高温物体辐射热能,只是高温物体辐射给低温物体的热量较多,故使低温物体加热。

4. 钢加热过程

工件在炉内的加热过程包括外部传热过程和内部传热过程,即炉膛及炉内介质连续以对流和辐射方式将热量传到工件表面,使其温度上升,而后工件表面的热量再以传导方式向工件内部传递。工件内部各点的温度不断随时间变化,为时间和坐标的函数。因此,工件内部的传热过程为不稳定导热。在直角坐标系中,单向不稳定导热常以傅立叶微分方程式描述,即

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (1-1)$$

式中: t 为温度, $^{\circ}\text{C}$; τ 为时间, s ; a 为导热系数或热扩散系数, $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$, cm^2/s ; x 为热量传播途径, mm ; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$; c 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; γ 为密度, kg/m^3 。

傅立叶方程的导出,是假定在钢件内传递热量与热流截面积、时间及温度梯度(沿热流运动途径上单位长度内的温度降落)成正比,即

$$Q = \lambda \cdot \frac{t_1 - t_2}{l} \cdot F \cdot \tau \quad (1-2)$$

式中: $\frac{t_1 - t_2}{l}$ 为温度梯度, $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$; Q 为热量, J ; F 为传热面积, m^2 。

对微小体积内传递的热量可用微分形式表示:

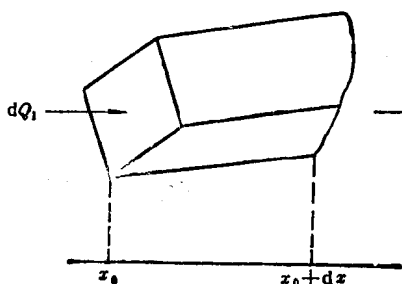
$$dQ = -\lambda \cdot \frac{dt}{dl} \cdot dF \cdot d\tau \quad (1-3)$$

现在假定最简单的情况,热量仅在单方向传播,就可推导出傅立叶微分方程式。设在加热空间有一平行六面体,热量沿箭头方向传播(图 1-1),其传入的热量为

$$dQ_1 = -\lambda \left(\frac{dt}{dx} \right)_{x_0} \cdot dF \cdot d\tau \quad (1-4)$$

流出的热量为

$$dQ_2 = -\lambda \left(\frac{dt}{dx} \right)_{x_0+dx} dF \cdot d\tau \quad (1-5)$$



如果流入六面体的热量比流出多,则该体积的钢件被加热;反之冷却。钢中剩余的热量 dQ 使温度升高,等于

$$dQ = dQ_1 - dQ_2 \quad (1-6)$$

又

$$dQ = c \cdot m \cdot dt = c \cdot \gamma \cdot dF \cdot dx \cdot d\tau \quad (1-7)$$

式中: m 为质量, kg 。

图 1-1 热量沿 x 方向传播示意图

因此

$$\begin{aligned} c \cdot \gamma \cdot dt \cdot dF \cdot dx &= \lambda \left[-\left(\frac{dt}{dx} \right)_{x_0} + \left(\frac{dt}{dx} \right)_{x_0+dx} \right] \cdot dF \cdot d\tau \\ &= \lambda \left[\left(\frac{dt}{dx} \right)_{x_0+dx} - \left(\frac{dt}{dx} \right)_{x_0} \right] \cdot dF \cdot d\tau \end{aligned}$$

故

$$dt = \frac{\lambda}{c\gamma} \cdot \frac{d^2t}{dx^2} \cdot d\tau \quad (1-8)$$

则

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\lambda}{c\gamma} \cdot \frac{d^2t}{dx^2} = a \frac{d^2t}{dx^2}$$

实际加热空间常不是一维的,而是多维的,故应转换为偏微分,即得傅立叶微分方程式(1-1)。

傅立叶微分方程式解的普遍形式为

$$\frac{t_m - t}{t_m - t_0} = f\left(\frac{a\tau}{R^2} \cdot \frac{\alpha_x R}{\lambda} \cdot \frac{x}{R}\right) \quad (1-9)$$

式中: t_m 为介质温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为钢件某点温度, $^{\circ}\text{C}$; t_0 为钢件开始温度, $^{\circ}\text{C}$; R 为圆柱体半径或板厚之半, mm; α_x 为综合换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\text{C})$; x 为某点离工件中心线的距离, mm;

$\frac{a\tau}{R^2}$ 为傅立叶规范数 (F_0); $\frac{\alpha_x R}{\lambda}$ 为毕奥规范数 (B_i)。

傅立叶规范数 ($F_0 = \frac{a\tau}{R^2} = \frac{\tau}{R^2/a}$) 可认为是两个时间相除的无量纲因次, 分子是加

热时间, 分母可看作使热传到 R^2 面积上所需时间。可见 F_0 值愈大, 热量就愈深入传到工件内部, 因而工件内各点温度愈接近炉温。毕奥规范数 ($B_i = \frac{\alpha_x R}{\lambda} = \frac{R/\lambda}{1/\alpha_x}$) 是工件内部导热热阻与热源向工件表面传热热阻之比。 B_i 值大表示内部热阻大而外部热阻小; 反之则工件内部温差小, 相当于厚度较小的工件。工程上常把 $B_i < 0.25$ 时的加热件称为“薄件”, $B_i > 0.25$ 的工件称为“厚件”。

方程式(1-1)为一个二阶偏微分方程, 求解非常困难, 函数 f 极其复杂, 且是无穷级数。必须根据给定条件列出补充方程, 通过计算和查阅有关资料求得各规范数之值, 再代入特定的函数 f 中求得解答。

对于“薄件”, 可以大大简化不稳定传热问题求解, 在这种情况下截面温度差很小, 一般可以忽略不计, 近似地视为整个工件在同一瞬间处于相同温度, 所求解的温度仅是时间的一元函数, 与坐标位置无关, 即 $t = f(\tau)$ 。这样一来, 就可直接利用热平衡方程来代替傅立叶方程。计算“薄件”加热时, 不需要计算均热时间。

在热处理生产上, 大多数工件属于“薄件”。根据计算, 在空气炉和燃料炉中进行中温淬火加热时, 最大薄件厚度为 100 mm, 低温回火加热时达 400 mm; 在盐浴炉高温淬火加热时, 最大薄件厚度为 12 mm, 低温回火时为 40 mm。此外, 对于 $B_i < 4$ 的厚件也可按“薄件”计算加热时间, 只是对计算结果再乘以系数 b 。对板材, $b = 1 + \frac{1}{3}B_i$; 对圆柱体, $b = 1 + \frac{1}{4}B_i$; 对球体,

$$b = 1 + \frac{1}{5}B_i.$$

二、影响加热过程的因素

1. 加热介质

工件在炉中加热时, 首先靠介质的热传递使其表面接受热能而升温。

通常低温空气炉中加热时, 炉温常在 600°C 以下, 主要靠炉气与工件之间的对流作用进行

传热。因此,为使工件均匀快速加热,可在炉内安装风扇强制对流。在 900℃ 以上的炉中加热时,主要靠辐射传热,并且温度愈高,辐射作用愈强,加热愈迅速。浴炉加热则主要依靠热的传导。传导传热比辐射传热有更大的热传递能力,所以在盐浴炉中加热更快,尤以铅浴炉最快。表1-1表示同一钢件在不同类型炉子中加热时加热速度比较。可以看出,盐浴炉加热比空气炉快一倍,铅浴炉又比盐浴炉快一倍,高温可以实现快速加热。

表 1-1 钢件在不同类型炉中相对加热速度比较

炉子类型	炉 温(°C)	相对加热速度
空气炉	800	1
盐浴炉	800	2
铅浴炉	800	4
盐浴炉	1200	8

2. 钢件成分

钢件加热时,热从表面向内部传导,传导速度与钢件成分有关。各种钢的化学成分不同,其比热、密度和导热系数也有差异。加热速度与导热系数成正比,与比热、密度成反比,即

$$v \propto \frac{\lambda}{c\gamma} \quad (1-10)$$

式中: v 为加热速度,℃/s。

表 1-2 为不同钢种加热速度比较,可知钢中碳或合金元素含量增加,将使加热速度降低。高合金钢由于合金元素过多而使其导热系数明显减小,密度增加,故不宜快速加热。

表 1-2 不同钢种的相对加热速度比较

钢种	低碳钢	中碳钢	高碳钢	低合金钢	中合金钢	高合金钢
相对加热速度	2.0	1.7	1.4	1.3	1.2	1.0

3. 钢件形状

各种形状的工件,其有效受热表面积与其体积之比(F/V)各不相同, F/V 愈大,相对加热速度也愈大。表 1-3 表示形状、 F/V 与相对加热速度的关系。可见钢球与立方钢的加热速度最快,而平板的加热速度最慢。

表 1-3 不同钢件形状相对加热速度比较

钢件形状	钢球	立方钢	圆钢	正方钢	长方钢	钢板
F/V	$6/D$	$6/D$	$4/D$	$4/D$	$2.66/D$	$2/D$
相对加热速度	1.5	1.5	1	1	0.67	0.5

注: D 为直径或厚度。

三、确定加热规范的一般原则

钢件热处理的加热规范主要决定于钢的成分及钢件形状、尺寸;此外,还与加热设备的类型、功率以及加热方式、装炉量及工艺要求等因素有关。