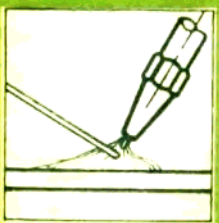
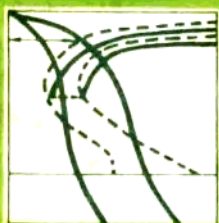
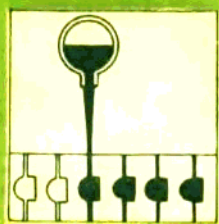


高等学校试用教材



热处理工艺学

陕西机械学院安运铮 主编



机械出版社

TG156

6

3

高等学校试用教材

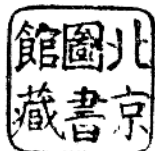
热处理工艺学

陕西机械学院安运铎 主编

6743/14



机械工业出版社



A-909609

机械工业出版社

热处理工艺学

陕西机械学院安运铮 主编

热处理工艺学

陕西机械学院安运铮 主编

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

沈阳市第二印刷厂印刷

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21 $1/2$ ·字数524千字

1982年7月北京第一版·1982年7月北京第一次印刷

印数 00,001—15,000·定价2.20元

统一书号: 15033·5087

前 言

本教材是根据一九七八年一机部金属材料及热处理专业修订的《热处理工艺学》教学大纲而编写的。作为《金属学》《金属热处理原理》的后续课程，本书将着重阐明钢铁热处理工艺对其组织与性能影响的规律以及有关的工艺原理，并从技术与经济统一的观点分析热处理工艺优化设计的基本原则。全书共分八章。

近卅年来，随着材料科学及机械制造加工工艺科学技术的发展，金属热处理的基本工艺——退火、正火、淬火（包括表面淬火），回火、化学热处理不断丰富和发展，传统工艺发生了许多重大的变革。因此，在第1~5章中分别增加了可控气氛热处理原理；碳化物球化工艺原理；淬透性的预测与计算；新型淬火介质；淬火、回火工艺的发展；快速加热表面淬火时相变与组织的特点；在高频电流、激光、电子束等高能量密度下超快速加热表面冲击淬火，化学热处理工艺原理及新工艺的进展等方面的内容。

由于各学科和加工工艺之间的相互渗透，近二十年来热处理技术领域也日益扩大，为了将比较成熟或有广阔发展前景的热处理新技术反映到教材内容中，书中增加了“热处理新技术”一章。此外，为进一步培养学生从材料加工工艺的总体上了解热处理的作用，建立热处理系统工程的概念，在《热处理工艺优化设计》一章中提供了一些原则和方法。编者希望这一章能够对从事金属材料及热处理科研和生产的工作者提供有益的启示。

鉴于本课程的任务不是主要讨论具体的热处理工艺方法，我们希望这本书能够成为联系一般相变原理和具体热处理工艺方法之间的桥梁。

本书是高等学校金属材料及热处理专业《热处理工艺学》课程的通用教材，也可供从事金属材料及热处理工作的广大科技人员参考。

本书由陕西机械学院安运铮主编，吉林工业大学刘景科主审。参加编写工作的有：上海工业大学董宁辉（第五章），陕西机械学院葛文驷（第六章），华南工学院肖继闻（第七章），其余一、二、三、四、八章由安运铮编写。

在编写过程中，得到北京、上海、成都、广州、西安等许多院、所、工厂企业有关部门和同志的大力支持协助，为本书提供了许多宝贵的资料，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，整个编写过程时间又较仓促，书中的错误及不妥之处敬希广大读者批评指正！

目 录

绪论	1	三、退火 正火的缺陷	69
第一章 金属加热与控制	3	第三章 淬火与回火	72
§ 1-1 确定加热规范的一般原则	3	§ 3-1 淬火的概念及分类	72
一、加热温度的确定	3	§ 3-2 钢的淬透性	73
二、加热速度的确定	8	一、淬透性的基本概念	73
三、加热时间的确定	11	二、淬透性的试验方法	75
§ 1-2 金属加热的物理过程及介质	15	三、淬透性的预测与计算	80
一、金属加热的物理过程	15	四、淬透性曲线的应用	84
二、加热方式及加热介质的类型	16	五、关于表面淬透性	86
§ 1-3 钢铁在加热时气体腐蚀的原理 及控制	17	§ 3-3 淬火介质	87
一、钢铁加热气体腐蚀的形式	17	一、淬火介质冷却能力测定及评价	87
二、氧化与脱碳层的组织结构	18	二、淬火介质的种类及特性	89
三、钢材表面与炉气间的化学反应	25	§ 3-4 淬火工艺规范	97
§ 1-4 在保护介质中的无氧化加热	34	一、淬火加热规范	98
第二章 退火与正火	36	二、淬火冷却方法	102
§ 2-1 退火工艺的分类及基本原则	36	§ 3-5 钢的回火	114
一、退火工艺的分类	36	§ 3-6 淬火回火工艺的发展	117
二、退火工艺的基本原则	38	一、钢中奥氏体晶粒及自由碳化物 相的超细化热处理	117
§ 2-2 扩散退火	39	二、控制马氏体、贝氏体组织形态 的淬火	118
一、脱氢退火	39	三、利用淬火钢中存在塑性第二相 的强韧化淬火	121
二、均匀化退火	40	§ 3-7 淬火回火的工艺缺陷	123
§ 2-3 退火规范对钢的组织的影响	46	一、淬火变形	123
一、临界点以下加热的影响	46	二、淬火裂纹	123
二、临界点以上加热时温度及时间 的影响	48	三、硬度不足	123
三、过冷奥氏体的分解温度, 停留 时间和冷却速度的影响	49	四、软点	124
§ 2-4 退火规范对钢中残余应力的影响	50	五、组织缺陷	124
§ 2-5 球化退火	51	第四章 表面淬火强化	126
一、碳化物球化的机理	52	§ 4-1 表面淬火用材料	127
二、影响碳化物球化的因素	55	§ 4-2 快速加热表面淬火时相变特点	128
三、球化退火工艺	59	§ 4-3 表面加热淬火后的组织和性能	135
§ 2-6 钢的正火	61	一、表面加热淬火后的金相组织	135
§ 2-7 退火、正火后的组织性能及 工艺缺陷	65	二、表面淬火后的性能	136
一、退火、正火后的组织特点	65	§ 4-4 感应加热淬火	138
二、退火、正火后组织与性能的关系	67	一、感应加热的基本原理	138
		二、感应加热淬火工艺	141

三、感应加热用感应器	149	§ 5-6 其它化学热处理	240
四、工频感应加热表面淬火特点	154	一、渗硼	240
§ 4-5 火焰加热表面淬火	154	二、渗硫	242
一、火焰淬火的分类	155	三、渗硅	243
二、火焰淬火的燃料和装置	157	四、渗金属	244
三、火焰淬火的工艺控制	159	五、铬铝共渗	246
§ 4-6 其它表面淬火法	162	六、铝硅共渗	247
一、电阻加热表面淬火	162	七、碳氮硼三元共渗	247
二、冲击淬火	164		
三、激光热处理	165	第六章 热处理应力及其作用	250
四、电子束热处理	171	§ 6-1 热处理应力形成及其分布	250
第五章 化学热处理	174	一、热应力	250
§ 5-1 化学热处理的分类及特点	174	二、组织应力	252
§ 5-2 化学热处理基本原理	175	三、热处理残余应力的分布	252
一、化学热处理的基本过程	175	四、表面强化处理的残余应力	255
二、化学热处理渗剂及其反应机理	176	§ 6-2 热处理应力对机械性能影响	259
三、化学热处理的相界面反应		一、残余应力对硬度影响	259
——吸附和解吸过程	180	二、残余应力对疲劳强度的影响	260
四、化学热处理中的扩散及		三、应用预应力的热处理	261
渗层相结构的形成	182	§ 6-3 工件热处理变形	264
五、实现加速化学热处理过程的途径	191	一、淬火变形	264
§ 5-2 钢的渗碳	192	二、影响淬火变形的因素及防止措施	266
一、碳在钢中的扩散	193	§ 6-4 工件热处理裂纹	270
二、渗碳层的技术要求及对机械		一、纵向裂纹	272
性能的影响	195	二、横向裂纹和弧形裂纹	275
三、渗碳工艺	197	三、网状裂纹	275
四、渗碳后的热处理	203	四、剥离裂纹	277
五、渗碳及渗碳淬火后钢的金相组织	205	五、显微裂纹	277
六、渗碳件的质量检查	206		
七、渗碳件的常见缺陷	207	第七章 热处理新技术	279
八、国内外渗碳工艺的发展	209	§ 7-1 真空热处理	279
§ 5-4 钢的氮化	210	一、真空加热的特征	279
一、氮化的基本原理	210	二、真空热处理方法及其应用	283
二、氮化工艺	222	§ 7-2 离子轰击热处理	290
三、氮化后质量检查	226	一、离子氮化	290
四、氮化常见缺陷	228	二、离子渗碳	298
五、氮化工艺发展概况	229	三、离子碳氮共渗	300
§ 5-5 钢的碳氮共渗	229	四、离子硫氮共渗	301
一、碳氮共渗的特点及分类	229	五、离子沉积	303
二、气体碳氮共渗	230	§ 7-3 形变热处理	307
三、气体软氮化	238	一、形变热处理的分类及工艺特点	307
		二、形变热处理强化的机理	310

三、影响形变热处理 强韧化效果的因素	312	一、工艺流程设计的基本要求	326
§ 7-4 复合热处理	313	二、程序技术在热处理 工艺设计中的应用	329
一、复合热处理工艺方法	314	三、热处理工艺参数的优选	332
二、热处理工艺复合的原则	316	四、热处理后性能的预测	332
第八章 热处理工艺的优化设计	318	§ 8-3 热处理与其它冷热加工 工艺的关系	333
§ 8-1 热处理与零部件设计的关系	319	一、热处理与材料生产的关系	333
一、正确的选择材料	319	二、热处理与冷热加工 工艺的合理配合	333
二、工件设计应有好的结构工艺性	323	三、热处理与其它加工 工艺之间的相互渗透和组合	335
三、合理制订热处理的技术条件	324		
§ 8-2 热处理工艺流程 及规范的优化设计	326		

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,早在商代就已经有了经过再结晶退火的金箔饰物,在洛阳出土的战国时代的铁剑,系由白口铁经脱碳退火制成。在战国时代燕下都遗址出土的大量兵器,向人们展示了在当时钢件已经采用淬火、正火、渗碳等工艺。近代出土的秦兵马俑佩带的长剑、箭簇,又有力证实当时已出现铜合金的复合材料,而且还掌握了精湛的表面保护处理方法,从而保持数千年不锈。

热处理工艺最早的史料记载见于《汉书·王褒传》中“清水淬其锋”之说,我国古代的热处理工艺部份的记载于明代科学家宋应星《天工开物》一书中。他对于退火、淬火、固体渗碳、形变强化等均有生动的描述。大量事实表明,我国曾是世界上发展和应用热处理技术最早的国家之一。

新中国成立以来,随着冶金工业及机械制造工业的发展,我国的热处理科学技术也取得了较大的进步,它主要表现在:已经培养和造就了一支从事金属材料及热处理专业科学研究、生产、教学的宏大队伍;已经拥有相当可观的各种类型的热处理工艺装备;在诸如低碳马氏体应用、辉光离子热处理、软氮化及碳氮共渗、化学气相沉积等部份技术领域中已经接近世界先进水平,并取得了一批重要的科研成果。

金属热处理的基本工艺是退火、正火、淬火、回火(包括时效)、化学热处理(表面合金化)。近卅年来,随着材料科学的发展,传统的热处理工艺内容不断丰富,由于对组织与性能关系认识的深化,基本热处理工艺也随之发生了许多变革,并派生了许多优质和高效能的工艺方法,如可控气氛热处理、真空热处理、辉光离子热处理等等。

为了最大限度的发挥金属材料的性能潜力,许多科技工作者加强了对材料早期失效过程及其物理本质的研究,即把宏观的破坏与微观的组织结构变化及破坏发生、发展的物理过程的研究结合起来,从而找到了材料强化的新途径,推动了热处理工艺的发展。当代机械设计、材料工程(材料加工)与材料科学之间的紧密结合,以及各学科及工艺技术之间的相互渗透,已使热处理的技术领域日益扩大,向着优质、高效率、节约能源、及无公害方向发展。如为了提高金属材料的强韧性,发展了强韧化热处理工艺(超细晶粒处理、低碳马氏体淬火,二相区淬火,复合组织淬火,贝氏体淬火及低温回火,高碳钢的低温淬火、形变热处理等等)。为了强化零部件表面,除了表面淬火、化学热处理工艺之外,还发展了表面快速熔铸扩散合金化(利用电子束及激光的高能热源),离子注入,表面覆层强化等方法。另外,对零件表面进行冷变形强化(如辊压或喷丸)和通过相变使零件表面获得高的残余压应力的“预应力热处理强化”,也得到了应用。出于寻求既节约能源消耗又能得到优异性能的热处理方法的需要,还发展了将整体强化、表面强化等热处理工艺相互交叉组合的复合热处理方法。

为了满足各种热处理工艺的实施,近廿年来各种高效率(机械化、自动化)的通用热处理设备及专用热处理设备也有了较大的发展,并已采用了由计算机辅助热处理生产的成套装

备，这一切都改变着热处理生产的面貌。

和当代世界先进水平比较，我国的热处理技术仍较落后，生产、测试等装备陈旧，劳动生产率还很低。为了使我国的热处理科学技术早日跨入世界先进水平，我们一定要刻苦学习和吸收工业发达国家的一切先进技术，发展具有我国特色的热处理技术，我们相信，在不久的将来，我国古老的热处理技术科学一定会在祖国实现四化的征途中重放异彩。

第一章 金属加热与控制

金属热处理工艺就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的或内部的组织结构来控制其性能的工艺。

热处理基本工艺方法是：退火、正火、淬火、回火、化学热处理（表面合金化）。热处理时的加工程序是极其重要的环节，这是因为工件在加热过程中一方面内部发生成分及组织结构的变化，同时还使其表面状态、尺寸、形状发生变化。在加热过程中形成的缺陷不仅关系到整个热处理工艺的成败，而且还直接影响到工件的加工工艺性和使用性能。

由于工件加热是热处理工艺中消耗能源最大的工序，研究如何提高加热效率，缩短加热周期或减少加热次数，具有十分重要的经济意义。因此，我们首先研究金属及其合金在热处理时加热的一般规律及质量控制的有关问题。

§ 1-1 确定加热规范的一般原则

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，还往往通过调节诸如电的、热的及其它参量来间接地控制它，如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。这些参量与加热参数之间都有一定的函数关系。

随着各类检测仪表及传感元件的发展，使加热过程中取得的信息可以更准确、迅速和更全面，这就为发展按指定的加热曲线实现加热过程的自动程序调节创造了条件。

工件热处理加热规范由所选定的材料及工件的形状、尺寸决定。同时还与所采用的加热装置的功率、加热方式、装炉数量、以及热处理的工艺要求等因素有关。

一、加热温度的确定

在实际生产中，加热温度的选择和加热温度的控制是不可分割的。在很多情况下出现的热处理事故，并不是由于错误的选定了温度，而是没有按规定控制温度，或由于设备本身的问题不能保证正确规范的实施所造成。

如前所述，对于各种不同的热处理工艺方法、不同的原材料，加热温度可以有很大的区别，因此，必须结合有关工艺具体讨论，在这里我们仅介绍最普遍的某些规律。

（一）确定加热温度的依据

金属及其合金的状态图指明了成分、温度和组织之间的关系，也是我们确定加热温度的主要理论依据。金属及其合金的相变临界点可以从有关手册中查出。近十多年来，人们为了能根据合金的化学成分预测其临界点，一直探索建立成分与临界点之间关系的数学模型。临界温度 $T_c(Ac_1, Ac_2, Accm)$ 与钢材成分的关系一般用下列形式表达：

表1-1 钢材成分与临界点的关系

临界点	Al(C/wt%)											K (°C)	适用范围	参考资料
	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Zr	Nb	Al	B	其它
Ac ₁	-26.6	+17.6	-22.9	-22.9	-23.0	+24.1	+22.5	-39.7	-5.7	+31.9	+233	-169	-895	751 低碳 合金钢
		+22.2	-13.9		-14.4	+23.3								723 中碳 合金钢
	-32.3	+23.3	-17.8			+17.1	+4.5	+15.6						755 中碳 Si-Cr-Mo-V钢
		+29.1	-10.7		-16.9	+16.9								723 碳钢(0.08~1.4%)
	-16.3	+34.9	-27.5	-5.5	-15.9	+12.7	+3.4							751 低碳 合金钢
Ac ₃	-476.5	+56.0	-19.7	-16.3	-26.6	-4.9	+38.1	+124.8	+136.3	+35	-19	+198	+3315	937 低碳 合金钢
	-179.4	+44.4	-13.9		-17.8	-1.7								854 中碳 合金钢
	-384.8	+55.0	-14.4		+5.8	+24.5	+83.4							930 中碳 Si-Cr-Mo-V钢
	-203	+44.7	-30	-20	-15.2	-11	+31.5	+104	+400			+450		910 碳钢(0.08~0.59%)
	-205.7	+53.1	-15.0	-26.5	-20.1	-0.7	+41.1							881 低碳 合金钢

$$T_c(^{\circ}\text{C}) = \sum A_i X_i + K$$

式中 A_i ——系数 ($^{\circ}\text{C}/\text{wt}\%$)

X_i ——合金元素含量 ($\text{wt}\%$)

K ——常数

钢材成分与临界点的关系见表1-1。

根据表中所提供的数据预测临界点的温度还有不同程度的误差。

一般金属材料的再结晶温度 T_R (K)与熔点 T_M (K)之间有下列关系:

$$T_R(\text{K}) = 0.4T_M(\text{K})$$

$$T_R(^{\circ}\text{C}) = 0.4[T_M(^{\circ}\text{C}) + 273] - 273$$

各种金属的再结晶温度参阅表1-2。

表1-2 金属的再结晶温度

金 属	再结晶温度 ($^{\circ}\text{C}$)	金 属	再结晶温度 ($^{\circ}\text{C}$)
铁	450	镁	150
镍	600	铋	100
金	200	钛	550~600
银	200	钨	1200
铜	220	钼	900
黄铜	400	锌	70
铝	200	铅	-3
铂	450	锡	0
		镉	7

(二) 加热温度的确定

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, 但还不能就凭此来确定各种不同热处理工艺的加热温度, 而应当根据具体工件热处理目的来决定, 况且工件的原材料及尺寸, 加工过程与拟采用的工艺方法都对加热温度的选定有影响。选择的具体原则将在以后的具体工艺原理中讨论, 但从图 1-1 中可以看到, 选择加热温度是一个较复杂的多因素问题, 这里仅用程序方框图简单地描述加热温度优选时可能采用的程序。

碳钢中热处理工艺常用的加热温度范围见图1-2。

(三) 加热温度不适当导致的热处理缺陷

加热温度不适当将使工件发生欠热、过热、过烧等缺陷。

1. 过烧 又称烧熔或烧毁。经常产生在高温扩散退火或高速钢淬火过程中。其基本特征是在粗大晶粒的晶界上出现局部熔化或氧化现象见图 1-3。高速钢过烧后, 晶界上产生莱氏体共晶, 并极易导致淬火开裂。在铝合金中, 过烧将会产生严重的晶界裂纹(沿晶界有网状共晶体析出), 并在工件表面出现气泡及粒状凸起。

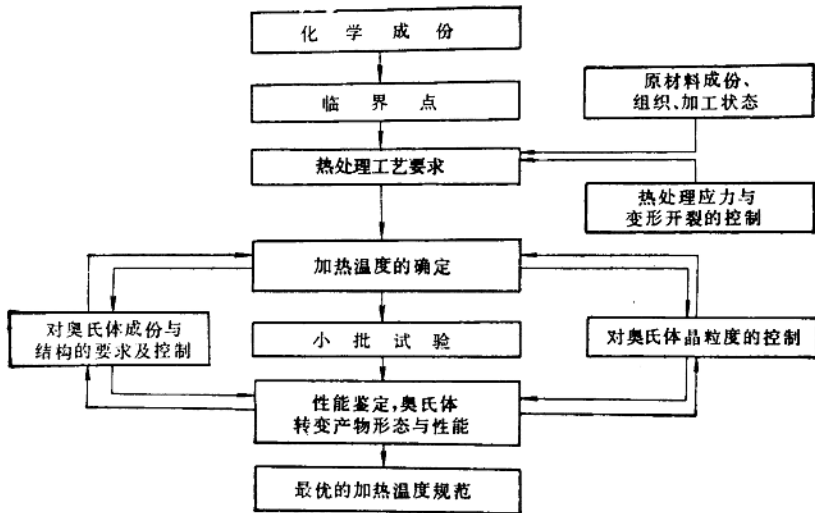


图1-1 加热温度优选的程序图

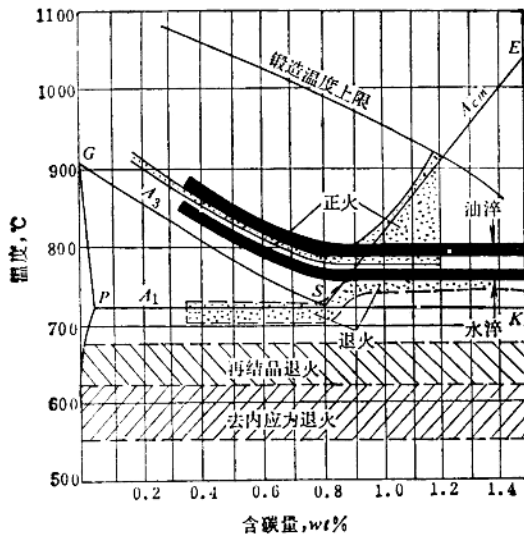


图1-2 碳钢中各种热处理工艺常用的加热温度范围

2. 过热 加热温度过高或保温时间过长将导致奥氏体晶粒剧烈长大,并在以后的退火、正火过程中形成粗大的铁素体晶粒或魏氏组织,或在淬火后形成粗大淬火马氏体。高碳的粗大针状马氏体内部及原奥氏体晶间存在着明显的显微裂缝,它是导致淬火开裂及脆断的策源地(见图1-4a,b)。

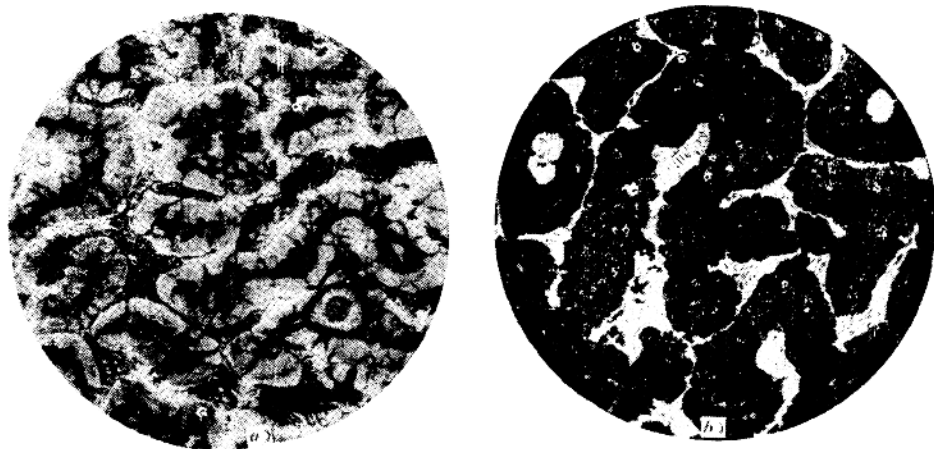


图1-3 W18Cr4V 淬火过烧组织5%硝酸酒精腐蚀 500×

a) 淬火后 马氏体+残余奥氏体+莱氏体+黑色组织 ($A+Fe_3W_3C$)

b) 回火后 回火马氏体+莱氏体+碳化物+残余奥氏体

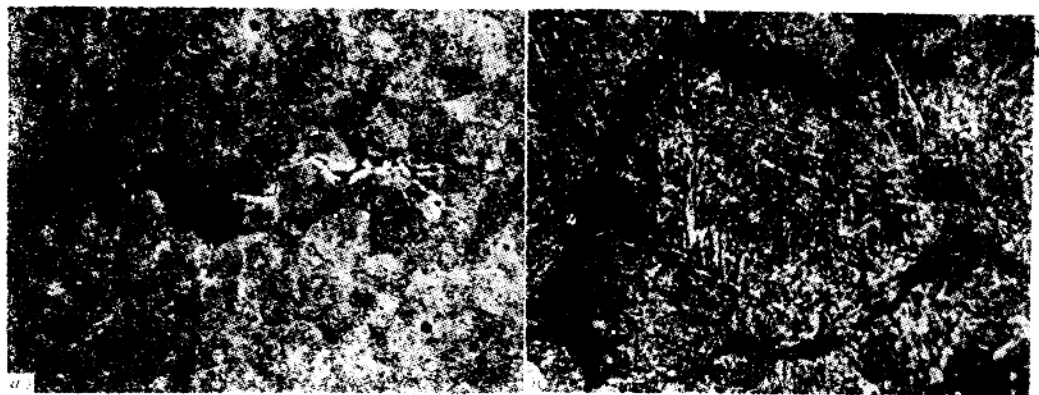


图1-4 高速钢直柄钻头柄部淬火过热后粗大马氏体针及沿晶界裂纹2%硝酸酒精腐蚀

a) 50×

b) 500×

在马氏体-铁素体或奥氏体-铁素体不锈钢及耐热钢中，过热将使 δ -铁素体量增多，使热加工性恶化，淬火后硬度下降，回火后的冲击韧性显著降低。

图 1-5 是共析碳钢淬火、回火后的冲击韧性与奥氏体晶粒度的关系。可以看出随着奥氏体晶粒的长大，冲击值将大幅度下降。

从图 1-6 中也可看到随着加热温度升高，保温时间的延长，在退火及正火后低碳钢中自由铁素体的晶粒也显著粗化。粗大的自由铁素体晶粒降低钢的拉伸强度及屈强比，并使加工表面光洁度大大下降。对于冷冲压拉伸成型的低碳钢板，尤应注意控制适当的晶粒大小。

3. 欠热 当加热不足时，由于未充分奥氏体化，钢中的第二相未能完全溶解，因此，

在冶炼及热加工过程中存在的成分及组织上的缺陷如偏析、粗大自由铁素体（或魏氏组织）、网状碳化物等等，就不能充分消除。欠热也不能消除因结构遗传性带来的某些过热缺陷（如高速钢二次淬火后形成的莱氏体断口）。淬火加热不足还经常发生明显的淬火软点，硬度不均或不足，以及红硬性显著下降。

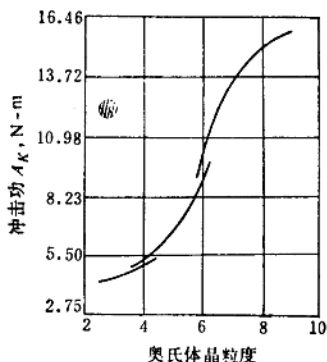


图1-5 共析碳钢淬火回火后冲击韧性与奥氏体晶粒度的关系淬火回火，HRC50

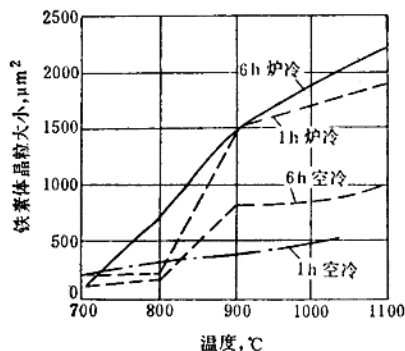


图1-6 含碳0.15%钢的加热温度、保温时间与铁素体晶粒度的关系

二、加热速度的确定

加热速度主要由被加热工件在单位时间内、单位面积上所接受的热能来决定。根据材料的成分、工件的尺寸、以及热处理工艺要求的不同，对加热速度也有不同的规定。

由奥氏体等温形成动力学曲线得知，钢在加热时加热速度越快， Ac_1 、 Ac_3 、 Ac_m 诸临界点的温度提高越多，奥氏体形成的各个阶段均移向较高的温度，完成奥氏体化的时间也相应缩短。加热速度升高还使奥氏体形成时的起始晶粒显著细化，对于改善和提高材料的机械性能将产生有益的影响，特别是快速加热使奥氏体晶粒超细化并随之淬火，可以使工件具有高的表面硬度、强度、耐磨性，而且塑性及韧性也较高。此外，快速加热还具有表面质量好、不易氧化脱碳、大量节约能源、提高劳动生产率等优越性。从上述技术和经济效果考虑，希望采用尽可能快的速度加热。

但是，随着加热速度的提高，工件截面的温差增加，增大了由体积变化的不同期而产生的热应力。对于导热性差、原材料塑性又低、截面很大的高合金钢或大型铸锻件，如果热应力值超过材料的弹性极限，将发生变形或扭曲；当超过材料的强度极限时，甚至产生开裂。

因此，在高合金钢及大型铸锻件中（一般直径大于700mm）采用规定的加热速度。通常，可以把加热速度区分为允许的加热速度与技术上可能的加热速度。

（一）允许的加热速度：

由传热学得知，对无限长圆柱形工件表面均匀等速升温时，在加热前工件无温差条件下，傅立叶传热方程的解有以下形式：〔18〕

$$t = t_0 + v\tau + \frac{vR^2}{4a} \left(\frac{r^2}{R^2} - 1 \right) + \frac{vR^2}{a} \phi \left(\frac{a\tau}{R^2}, \frac{r}{R} \right)$$

式中 t ——工件半径 r 处经历时间 τ 后的温度；

t_0 ——工件起始温度；

v ——工件表面升温速度;

τ ——升温时间;

$\phi\left(\frac{a\tau}{R^2}, \frac{r}{R}\right)$ ——函数。

在等速加热时表面与中心的最大温差 Δt_m 是

$$\Delta t_m = K \cdot \frac{vR^2}{4a} \quad (1-1)$$

式中 R ——板厚的1/2或圆棒半径;

a ——材料导温系数, m^2/h ;

$a = \frac{\lambda}{c\gamma}$, λ ——导热系数, c ——比热, γ ——比重;

K ——形状系数 (无限长板 $K = 0.5$, 无限长圆柱 $K = 0.25$, 立方体 $K = 0.221$, 球体 $K = 0.167$)。

对钢来说, 允许加热速度与工件尺寸成反比关系:

$$v_{允} = \frac{5.6a\sigma_{热}}{\alpha_t ER^2} \quad (\text{圆柱体工件})$$

$$v_{允} = \frac{2.1a\sigma_{热}}{\alpha_t Ex^2} \quad (\text{板材})$$

式中 $\sigma_{热}$ ——热应力, 对圆柱形工件 $\sigma_{热} = 0.72 \cdot \alpha \cdot E \cdot \Delta t$;

Δt ——截面温差, $^{\circ}C$;

a ——材料导温系数, m^2/h ;

α_t ——材料线膨胀系数, $^{\circ}C^{-1}$;

E ——材料弹性模量, N/m^2 ;

R ——圆棒半径;

x ——板材厚度的1/2, m 。

由 1-1 式可知, 工件的截面温差与加热速度 v 及工件尺寸 R 平方成正比, 与材料的导温系数成反比。工件的允许加热速度则与钢的化学成分、工件的尺寸 (R 、 x) 以及加热的温度范围有关。

当前, 在国内外均对大型锻件在加热过程中的热应力进行预测计算。譬如, 对直径为 400~800mm 的工件在炉温为 850、950 $^{\circ}C$ 实行快速加热时, 工件心部轴向应力为拉应力, 经计算最大值可以达到 700~750 N/mm^2 ; 已接近材料的强度极限, 产生开裂的危险很大, 但实际上该应力超过屈服极限时可以通过发生塑性变形而松弛, 一般情况下不致产生开裂, 即可以进行快速加热。

(二) 技术上可能的加热速度

技术上可能的加热速度主要取决于加热设备在单位时间内所能提供给工件单位表面积的热量 ($kcal/cm^2, h$) 或比功率的大小 (W/cm^2), 显然该值又与我们采用的加热介质类型、加热方式与加热制度等因素有关。

按应用需要, 可将加热方式分为五种, 见表 1-3。

表1-3 几种常用的加热方式及特点

加热方式名称	加 热 曲 线	特 点
随炉升温		加热速度缓慢, 截面温差小, 用于大型铸件及高合金钢复杂零件
到温入炉		加热速度较快, 截面温差较大, 多用于退火、正火、淬火、回火、化学热处理等工序
高温入炉		加热速度快, 截面温差大, 热应力高, 常用于锻件退火、正火时加热
高温入炉 到温出炉		截面温差及热应力大, 一般碳钢及低合金钢锻件 ($\phi < 700\text{mm}$) 均可采用, 一般小零件及工具淬火加热用
预热—加热		预热后可缩短高温加热时间, 减少热应力, 适用于大型铸锻件, 较大截面的高合金工具钢工模具淬火加热