

966320

TG156.99
4434

高等学校教材

高能率热处理

赵家萍 李保成 编著

兵器工业出版社

99

(京)新登字049号

内容简介

本书集中讲述了近几年来国内外迅速发展的新型热处理技术——高能率热处理的基本原理、组织转变机理、性能特征、工艺装置以及应用，其中包括感应热处理、离子轰击热处理、激光热处理、电子束热处理和电化学热处理；并对相关的技术基础，如等离子体技术、激光技术、电子束技术等作了有针对性的论述。对正在发展的与高技术相联系的有关技术也作了介绍。

本书可供高等学校材料科学与工程、金属材料及热处理、表面工程等有关专业师生使用，也可供机械电子工程类、能源工程类等专业的工程技术人员和高校师生参考。

高能率热处理

赵家萍 李保成 编著

兵器工业出版社出版

(北京市海淀区车道沟10号)

新华书店总店科技发行所发行

各地新华书店经销

北京昊海印刷厂印装

开本: 787×1092 1/16 印张: 13.125 字数: 319千字

1992年9月第1版 1992年9月第1次印刷

印数: 1—1400 定价: 3.43 元

ISBN 7-80038-463-2/TG·33(课)

出版说明

遵照国务院关于高等学校教材工作的分工，原兵器工业部教材编审室自成立之日起就担负起兵工类专业教材建设这项十分艰巨而光荣的任务。由于各兵工院校、特别是参与编审工作的广大教师积极支持和努力，及国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的紧密配合，自1985年到1988年共编审出版了89种教材。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映兵工科学技术的先进水平，达到打好基础、精选内容、逐步更新、利于提高教学质量的要求，在总结第一轮教材编审出版的基础上，制订了兵工教材编审工作的五个文件。指导思想是：以提高教材质量为主线，完善编审制度，建立质量标准，明确岗位责任，充分发挥各专业教学指导委员会的学术和咨询作用，加强从教材列选、编写到审查整个教材编审过程的科学管理。

1985年根据教学需要，我们组织制订了“七五”教材编写规划，共列入教材176种。这批教材主要是从经过两遍教学使用、反映较好的讲义中遴选出来的，较好地反映了当前兵工教材的科学性和适合我国情况的先进性，并不同程度的更新了教材内容，是一批较好的新型教材。

本教材由沈达钧主审，杨实诚为责任编委，兵工教材编审室陈永胜主任审定。

限于水平和经验，这批教材的编审出版难免有错误之处，希望广大读者批评指正。

机械电子工业部兵工教材编审室

1991年9月

EAC58103

前 言

现代科技产业的发展,尤其是高技术产业的发展,如计算机产业、微电子产业、通信技术、航天航空、机器人、生物工程等,传统的热处理技术无论在加工精度、性能保证、新产品开发、生产效率,还是在能源消耗、环境效应等方面都远远不能适应。随着相关技术的发展,高能率热处理得到了迅速的发展,并越来越显示出其重要性。

近年来出版的有关科技著作和教科书中虽对高能率热处理的一些内容作了介绍,由于学科的差异,不仅系统性差,而且极不完整,难以实用。近三年来教学和科研的实践以及有关工程技术人员的意见,是本书的基础,并收集了近年来,特别是近三年来国内外有关资料,不仅使读者可接受较系统的理论基础和丰富的实用资料,也可以得到许多发展趋向的信息。

本书共分为六章,第一、二章是基础理论部分,讲述高能率加热、高能率热处理和高能率加热条件下金属相变特点及组织和性能。其后分别对感应热处理、离子轰击热处理、激光热处理、电子束热处理和电化学热处理,从基本原理、组织与性能、工艺装置、应用特点、发展趋势诸方面加以讲述,并列举了一系列实例和图表,可供科研和生产应用。对有关技术基础,如等离子体物理、激光物理、电子束物理(包括电子光学)等,作了有针对性的论述。书中回避了深奥和繁琐的数理推导过程,着重于物理概念和本质的讲述,深入浅出,可使大多数工程技术人员看懂并应用。本教材可根据学员的基础用40~60学时讲授为宜。

本书在编写过程中得到了太原机械学院学报编辑部赵纪兰同志和教材科有关同志的支持和帮助,编后经沈达钧教授主审并经机械电子工业部兵工教材编审室审定,在出版过程中杨实诚老师和其他有关同志都付出了艰辛的劳动,在此一并表示感谢。

由于水平有限,缺点和错误在所难免,诚恳希望同行和读者批评指正。

作 者

1991年4月

目 录

第一章 高能率加热和高能率热处理	(1)
1.1 高能率加热	(1)
一 概述.....	(1)
二 高能率加热的特点.....	(2)
三 现代科学技术与高能率加热.....	(3)
1.2 高能率热处理	(4)
一 高能率热处理的类型.....	(4)
二 高能率热处理的特点.....	(5)
主要参考文献.....	(6)
第二章 金属快速加热时的相变特征	(7)
2.1 加热速度对相变温度的影响	(7)
一 快速加热对纯铁相变点的影响.....	(7)
二 快速加热对钢相变点的影响.....	(8)
三 关于快速加热相变机理的讨论.....	(9)
2.2 加热速度对奥氏体组织的影响	(12)
一 快速加热使奥氏体不均匀.....	(12)
二 快速加热使奥氏体晶粒细化.....	(14)
三 快速加热时非平衡组织的奥氏体化及组织遗传.....	(21)
2.3 快速加热回火	(23)
一 关于回火参数的几个问题.....	(23)
二 快速回火后的组织和性能.....	(26)
三 快速回火时的尺寸效应.....	(30)
主要参考文献.....	(33)
第三章 感应热处理	(34)
3.1 感应热处理的特征	(34)
一 感应热处理的基本原理.....	(34)
二 影响感应加热硬化层深度的因素.....	(36)
三 感应加热表面淬火后的组织和性能.....	(38)
四 感应表面淬火的工艺特征.....	(40)
3.2 感应热处理用装置	(46)
一 高频感应加热装置的基本原理和组成.....	(46)

二 感应加热用感应器	(48)
三 感应热处理设备的现代化	(53)
3.3 其它形式感应热处理	(56)
一 穿透感应热处理	(56)
二 超高频感应热处理	(59)
三 双频感应加热和超音频感应加热淬火	(62)
主要参考文献	(64)

第四章 离子轰击热处理 (66)

4.1 等离子体与气体放电	(66)
一 等离子体的一般概念	(66)
二 电极间气体放电的一般特征	(67)
三 气体放电理论及气体放电的分类	(68)
四 辉光放电	(71)
4.2 渗氮概述	(75)
一 渗氮的基本原理	(76)
二 渗氮的强化机制	(81)
三 渗氮层的性能	(84)
四 关于渗氮钢	(85)
五 渗氮前处理	(87)
六 渗氮工艺	(90)
4.3 离子渗氮	(94)
一 离子渗氮的原理	(94)
二 离子渗氮加速渗氮机理	(96)
三 离子渗氮层组织及其控制	(97)
四 离子渗氮层的性能	(100)
五 离子渗氮设备和工艺	(105)
4.4 离子渗碳及其它	(108)
一 离子渗碳的基本原理	(109)
二 离子渗碳的工艺特点	(110)
三 离子渗碳的其它特征	(111)
四 离子碳氮共渗	(112)
五 离子硫氮共渗	(113)
4.5 CVD和PVD	(114)
一 CVD的基本原理	(115)
二 中温CVD	(116)
三 等离子CVD	(116)
四 PVD基本原理	(118)
五 离子溅射	(119)

六 离子镀	(120)
七 离子注入	(122)
主要参考文献	(124)
第五章 激光与电子束热处理	(126)
5.1 激光物理基础	(126)
一 辐射与物质的相互作用	(126)
二 激光的概念	(127)
三 泵浦过程	(130)
四 激光特性	(132)
5.2 激光器的类型	(134)
一 固体激光器	(134)
二 气体激光器	(136)
三 其它类型激光器	(140)
5.3 激光照射过程分析	(142)
一 激光束与金属的交互作用	(142)
二 激光束形式及其控制	(145)
三 脉冲激光照射成形面分析	(147)
四 激光束和工件相对移动时热作用区的形成	(150)
5.4 激光强化技术	(152)
一 激光相变强化 (LTH)	(152)
二 激光表面熔化 (LSM)	(155)
三 激光表面合金化 (LSA)	(159)
四 激光表面包覆 (LSC)	(162)
5.5 电子束热处理	(164)
一 电子束的性质及产生	(164)
二 电子束与固体的作用	(167)
三 电子束表面处理的特征	(169)
四 电子束表面处理	(172)
主要参考文献	(174)
第六章 电化学热处理	(176)
6.1 电化学热处理的基本原理	(176)
一 化学热处理的基本过程	(176)
二 快速电加热对渗剂分解和吸附过程的作用	(182)
三 快速电加热对扩散过程的作用	(183)
四 高的温度梯度对化学热处理的作用	(184)
6.2 电化学渗金属	(185)
一 钢铁电化学渗铬	(185)

二 钢的电化学渗铝.....	(191)
三 渗其它金属元素的电化学方法.....	(194)
6.3 电化学渗非金属	(196)
一 电化学渗硼.....	(196)
二 电化学渗硅.....	(197)
三 钢的电化学渗碳渗氮.....	(199)
主要参考文献.....	(201)

第一章 高能率加热和高能率热处理

1.1 高能率加热

一 概述

高能率加热是指加热某物体时,热源可以向其单位面积上提供比一般加热多的能量,从而获得很大的加热速度。工程上通常把加热时提供的能量密度高于炉中加热时的密度($>0.5\text{W}/\text{mm}^2$)就称作高能率加热,也称高能量密度加热。

1 炉中加热时的能量传递 一般加热炉由发热体和炉体组成,发热体发出的热量主要以对流、辐射方式将能量传递给工件,随温度的上升,传热方式逐渐以辐射为主。对于辐射来说,要想给工件以高的能量密度,首先发热体发出的能量必须高。根据辐射定律可知,黑体的辐射能力 E_R 由下式给出:

$$E_R = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 (\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

式中 T 为物体温度,单位K; C_0 是有关常数。当物体温度为1000K, $C_0=20.4\text{kJ}/\text{mm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4$ 时, $E_R=2\text{kJ}/\text{mm}^2 \cdot \text{h}$,相当于 $7.6\text{W}/\text{mm}^2$ 。如果以这样的能量密度定向发射,可以达到高能率加热,但实际上是以球面发射,能量密度随接收物体的距离平方而衰减。当物体距发热体10mm时,接收的能量密度仅 $1.6\text{J}/\text{mm}^2 \cdot \text{h}$ ($0.06\text{W}/\text{mm}^2$)。要提高能量密度,从理论上讲,一方面要提高发热体温度,另一方面要减小能量传递距离。这在工程上都是很困难的。前者受到发热体(器件)软化温度的限制;后者由于操作和被加热物体(工件)的形状以及装卡条件都必须要求与发热体之间有一定的距离,所以,炉内加热时能量密度都很低,加热速度也很小($<1^\circ\text{C}/\text{s}$)。

同时,用炉子加热这种传热方式,发热体发出的热量只有一小部分供给被加热物体,有相当一部分传给炉壁、炉门等并随之传向空间而散失掉。能量密度愈低,加热速度愈慢,能源利用率也就更低。所以,传统的加热方式受到现代科学技术发展和能源、环境问题的严重挑战。

2 高能率加热的形式 针对传统加热方式的缺陷,随着现代科学技术的发展,开发了一系列新型的加热方式:

(1) 内部发热式 通过感应或者直接通电的方式将能量传给被加热物体,如电磁感应、超声振动、电阻加热、电火花加热等都属这一类。这种方式是将电能、机械能等能量通过物体本身的物理变化而将其直接转换成热能,不通过中间物体的传递,而只需提供能发出高密度能量的装置,就可以提高加热时的能量密度。

(2) 定向传递(发射)式 是将能量集中并定向传给物体,从而大幅度地提高了能量密度和传递效率。如激光束、电子束、离子束加热等都属这一类。它们不仅可采用一系列措施,使能源发出的能量会聚成密度很高的能源,而且可以定向地传给物体。

(3) 等离子体加热 是利用等离子体中的高速粒子与被加热物体直接接触, 将很高的能量传给它, 从而获得很高的能量密度。

(4) 化学反应式 是利用在被加热物体周围的化学反应放出的热量直接对工件进行加热。电解加热就属于这一类, 化学反应的速度越快, 提供的能量就越多。

(5) 直接接触式 将热源与被加热物体直接接触, 用传导的方式传热。火焰表面加热就属于这一类。

图1-1-1是常见高能率加热可以达到的能量密度。

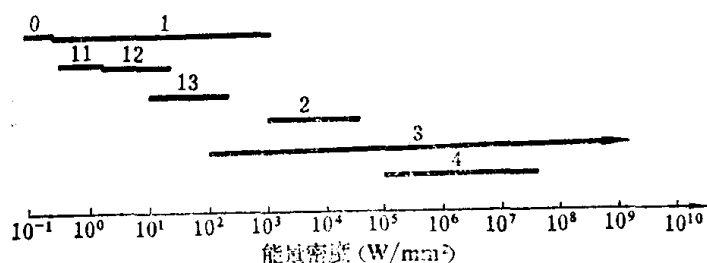


图1-1-1 加热方法与能量密度

0—炉中加热；1—感应加热；11—工频；12—中频；13—高频；
2—离子轰击；3—激光加热（包括大功率）；4—电子束加热

2 加热精度高 加热能量密度的提高, 能够实现在很小范围内的加热, 这样可以用于表面或局部加热。由于加热层薄, 虽然加热速度很快, 但热应力很小, 变形开裂的倾向也很小, 可以应用在尺寸很小的工件或大工件中凹陷部分、盲孔的底部等用普通加热方法难以实现的特殊部位。

同时, 能量密度上升到一定程度, 不仅可以加热物体, 而且也会使物体表面发生一系列特殊变化。表面状态、化学成分、组织组成等都发生超常变化, 所以不仅可以用作加热手段, 还可以进行打孔、焊接、熔化等不同形式的加工。

3 节省能源, 无二次环境污染是高能率加热效益和潜在社会效益的最重要组成部分

首先, 高能率加热已改变了传统的在炉膛内加热方式, 既无炉子升温、保温时吸收和耗散的能量, 也无工件出炉时向周围散失的热量, 更无空载时炉体保温或装炉不满时空耗的能

其次, 加热速度快, 减少了在加热过程中向环境中散失热量的时间。对于炉子加热来说, 加热过程占总时间的70%, 占总耗能的80%, 所以, 加热时间如果减少50%, 则可节能30~40%。同样理由, 也可以缩短保温时间来减少能耗。缩短作业时间意味着提高劳动生产率, 减少设备占用率, 这都可以成为节省能源和资源的重要组成部分。高能率加热大都采用新型能源, 如电磁波、光、电子束、机械波等, 不因使用煤、油等燃料造成的有害气体、粉尘等污染; 也就是说, 在使用这些能源时不再出现新的污染(即无二次污染)。同时, 这些能源大都易于使用微型计算机等先进手段进行控制, 不仅可以进一步提高能源利用率, 而

二 高能率加热的特点

1 加热速度快 图1-1-2是用不同方法加热可达到的加热速度, 有些甚至可以达到 $10^{11}^{\circ}\text{C/s}$ 。这样加热到预定温度所需的时间就很短, 在工件表面仅发生轻微的氧化, 甚至不发生氧化。这样不仅不会因氧化而造成材料的损失和产生缺陷, 而且也不会产生大量的氧化物一类的废物而污染环境。

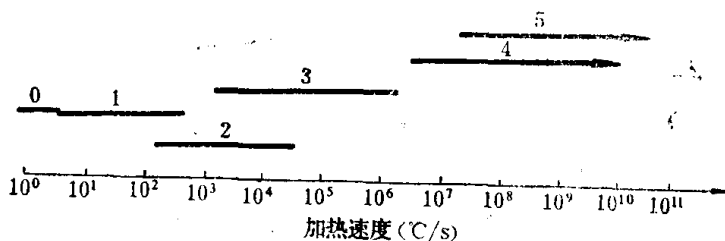


图1-1-2 加热方法与加热速度

0—炉中加热；1—工频加热；2—高频加热；3—超高频加热；
4—电子束加热；5—激光加热（包括激光冲击）

且也便于整个系统自动化,从而成为高效能源系统。

4 大多数高能率加热设备都比较复杂,造价也比较高,相对来讲成本也比较高,普及困难。在目前的技术水平下,许多高能率加热设备功率还比较小,如超高频加热装置仅可达200~300kW,激光和电子束加热装置仅可达几十个千瓦,这与目前已广泛应用的燃料炉和电阻炉能装料上百吨的生产能力是不可相比的。

三 现代科学技术与高能率加热

1 现代科学技术的发展要求高能率加热技术的发展 现代科学技术,包括日益蓬勃发展的高技术的发展,传统的加热方式既不能满足制造技术的需要,也不能满足工作中能源的使用:

(1) 制造技术的要求 现代科技产品要求“三高”,即高精度、高寿命和高效率。高精度和高寿命是可靠性的保证,二者既统一又矛盾。高精度则要求零部件易于加工,而高寿命(尤其是耐磨性)则要求强度大、硬度高而又难加工。按传统方式进行冷、热加工,势必造成生产效率低,成本高。高能率加热就是少变形,表面质量高的热加工手段,保证热加工后(强化后)不再机械加工或仅作少量加工。所以,高能率加热广泛应用于计算机、音响器材、航天航空、机器人、通信器材、铁路运输、高效发动机等行业和部门。不言而喻,高能率加热技术也就是低能耗、无污染的制造技术之一。

高能率加热为现代科技提供了制造新型材料的重要手段,如非晶态镀层、金属非金属之间的镀层、超薄复合材料、非平衡态合金等,从而大幅度地提高产品的性能,如电磁性能、耐磨性、抗咬合性、抗蚀性、抗辐射能力等。

(2) 现代科学技术和现代生活要求的新型能源之一——高能率加热 实际上,新型的加热方式已深入到各个领域,如电磁灶、微波炉、激光枪、电子束焊、电子切割、等离子切割机等,并将会向更广阔的领域扩展。同时,使用高能率加热可以有力地促进高技术产业的“三同步”,即效益、能源、环境效应三者同时达到先进水平。尤其在人口稠密的大城市发展新兴产业,高能率加热是必不可少的。

2 现代科学技术的发展不断为高能率加热提供新型能源和装备

众所周知,新型能源的利用和发展都是在现代科技发展的基础上,尤其是一些高技术发展的基础上实现的。如激光、电子束、等离子技术的应用是在微电子技术、真空技术、材料技术、现代测试技术在一些方面取得突破性进展后才实现的。当然,也势必随着它们的发展应用更加广泛,并出现更加新型的加热方式。

同时,新型高能率加热设备的运转,依靠现代控制技术才能正常工作并获得优异的质量和最佳效益。如微机控制、机器人、新型传感器等,都促进了高能率加热技术的发展。

当然,高能率加热技术某个分支的发展,又会促进另一分支的发展,也即高能率加热技术的发展,促进了自身的发展。如大功率激光器反射镜的镀膜技术就是在等离子技术发展的基础上得到解决,使得大功率激光器飞速发展,成为高能率加热技术的重要支柱。

新材料的飞速发展,是现代科技的重要组成部分,所以新材料的发展,尤其是新型功能材料的研究和制备技术的进展,也会为新型高效高能率加热装置的发展开辟新途径。如半导体技术、激光材料、超导材料等的发展会出现诸如先进变频器、连续工作大功率激光器、大功率电子枪、新型等离子发生器等先进的高能率加热装置。

1.2 高能率热处理

一 高能率热处理的类型 凡应用高能率加热方式去进行的热处理,就称作高能率热处理。

1 按加热方式分

(1) 感应热处理

- a 低频感应热处理(包括工频),处理时电流频率约为50~1000Hz;
- b 中频感应热处理,其电流频率约在1000~10000Hz之间;
- c 高频感应热处理,电流频率通常大约为10~20kHz;
- d 超音频热处理,指加热电流频率为20~50kHz这样超声波频率范围内的感应热处理,也可以称作高频感应热处理;
- e 超高频热处理,也称脉冲淬火、感应脉冲冲击淬火,使用的电流频率为27.12MHz。最近开发的大功率感应脉冲淬火使用的电流频率为300~1000kHz,也属超高频范围。

(2) 离子轰击热处理

- a 离子渗氮、渗碳及其共渗;
- b 离子渗金属;
- c PVD,包括溅射、离子镀和离子注入等;
- d CVD,包括高温沉积、中温CVD和等离子CVD等。

(3) 激光热处理

- a 激光相变强化;
- b 激光表面熔化(包括细化晶粒);
- c 激光表面合金化;
- d 激光表面包覆。

(4) 电子束热处理。

(5) 电火花表面强化。

(6) 电解热处理。

(7) 火焰加热热处理

- a 火焰穿透加热淬火;
- b 火焰表面淬火。

(8) 电阻加热热处理。

2 按热处理工艺分

(1) 穿透加热

- a 感应加热,又分为低频和中频感应穿透加热,大都用作调质;
- b 火焰加热淬火,多用于小型工件;
- c 电阻加热,多用于截面均匀的工件。

(2) 局部热处理(大都为表面处理)

- a 高频淬火(包括高频、超高频);
- b 火焰表面淬火;
- c 电解热处理;

- d 激光表面强化;
- e 电子束表面强化;
- f 电火花表面强化。

(3) 化学热处理

- a 离子轰击热处理, 渗氮、渗碳、渗金属、碳氮共渗等;
- b 电化学热处理, 渗非金属(硼、氮、碳、硅等), 渗金属(铬、铝、镍、钨等);
- c 激光化学热处理, 渗硼、渗氮以及合金化。

(4) 表面工程

- a PVD, 有纯金属和化合物, 如Au、Ni、Pt、Mo、TiN、 SO_2 、 Si_3N_4 、TaN等;
- b CVD, TiN、TiC、Ti(CN)、 Al_2O_3 、纯金属和合金等;
- c 包覆, 激光包覆、电子束包覆等;
- d 表面熔化。

二 高能率热处理的特点

高能率热处理除具有高能率加热的特点外, 同其它加热的热处理相比有如下特点:

1 可以提高处理质量 比如感应穿透加热淬火回火后的工件比用炉中加热淬火回火后的工件, 在同一强度的条件下有较高的韧性。在快速加热时, 钢铁材料经淬火后可以得到比普通加热有更高的强度(硬度), 而变形开裂倾向又小。

2 发展了新型的热处理方法 如等离子技术(PVD、CVD等)、激光表面包覆、熔化等都是—般热处理方法实现不了的。同理, 用这些方法处理出新的具有特殊性的物质, 这更是一—般热处理不可比拟的。所以, 也把某些高能率热处理方法称作新型的冶金方法。

3 既可以处理金属, 也可以用来处理非金属, 如在陶瓷、高分子材料表面沉积金属和化合物, 并可获得复合镀层和超薄(二维)材料。

4 节省能源和资源 前文已述及, 高能率加热就是节省能源和资源的加热方法, 对于高能率热处理来说, 除了高能率加热带来的好处外, 在热处理过程中也比普通热处理节约能源、资源和优良的环境效应。主要表现在以下几个方面:

首先, 高能率加热加快了热处理过程, 对于相变来说, 由于高能率加热时间短, 晶粒不易长大, 可以使相变在较高的温度下进行而不损害性能。对于大多数相变来说, 大的过热度无疑会明显地加快相变过程; 高能率加热可以加快化学热处理过程, 如离子渗氮比—般气体渗氮快三至五倍, 电化学热处理会使渗硼、渗铬、渗硅等过程加快五至十倍, 自然这将会有明显的节能效果和效益。

第二, 在名目繁多的化学热处理中, 大都对环境有不利的影响, 它排出的气体和废弃物许多都是对人类有害的, 如 NH_3 、 CO_2 、HCN、 NaCO_3 等。如果使用高能率热处理, 不仅会使这些过程缩短, 减少污染时间, 更重要的是改变了传统的方法, 在处理过程中不再排出或很少排出有害物质, 如离子渗碳不再排出 CO_2 , 离子碳氮共渗也不会排出含(CN)的气体等。

第三, 更令人感兴趣的是大大提高了资源的利用率。如渗金属铬, 在普通加热时, 使用铬粉及催化剂, 在漫长的加热过程中, 仅有10%的铬原子可以得到利用, 其余则被氧化或混入杂质而被废弃。如果采用激光、高频等加热方法, 可以将铬涂(或镀)在工件表面, 由于渗速快, 表面来不及氧化即可完成工艺, 元素利用率可达80%以上, 可以说是节能、省资源的

“洁净”工艺。

第四,大多数高能率相变强化,可以自激冷却,有的冷却速度达 10^6°C/s 以上,这样不仅会提高硬化层性能,而且也不使用冷却剂,这不仅省去了冷却装置,也省去了资源和能源的耗费。

第五,自动化程度高,不仅改善了劳动条件,而且也大大提高了工艺质量和生产力。比如使用微机控制的汽车半轴感应淬火设备,可使产品返修率降至1%以下,而且性能分布集中,多处于最佳值附近。

第六,就目前的技术水平来说,大多数高能率热处理设备机构复杂,造价高,热处理成本也比较高,在许多部门还不能推广应用,有待于进一步改进和发展。

可以预见,随着现代科学技术的发展,尤其是高科技的发展,将会促进高能率热处理技术水平的提高,创造更新的产品和更高的效益。

主要参考文献

- (1) Bevan G G et al. Energy Conservation in Heat Treatment. Heat Treatment of Metals, 1981, (3): 53~60
- (2) Hick A J. Rapid Surface Heat Treatment—A Review of Laser and Electron Beam Hardening. Heat Treatment, 1983, (1): 3~11
- (3) 李保成等. 节能热处理工艺综述. 太原机械学院学报, 1982, (2): 10~18
- (4) 仲复欣. 热处理生产管理与节能. 南京: 中国机械工程学会热处理学会第四届年会论文集, 1987, 5: 1~7
- (5) 金子秀夫. 先端技術と熱処理. 熱処理, 1986, 26(1): 107~112
- (6) 刘伯操等. 大力发展航空热工艺. 工艺技术与新技术革命. 北京: 国防工业出版社, 1990: 19~34
- (7) 冯宝富等. 工艺与技术革命. 工艺技术与新技术革命. 北京: 国防工业出版社, 1990: 105~120

第二章 金属快速加热时的相变特征

高能率加热的主要特点就是加热速度快，其加热速度从 10^2K/s 到 10^9K/s 以上。在这样快的加热速度下，金属加热时的相变不再是一般的平衡态相变，而是非平衡态相变。同平衡态相变一样，非平衡态相变也要受到材料成分、冶金方法、原始组织、加工历史等的影响。本章主要研究由于加热速度上升对金属相变的影响，如相变温度、相变过程、相变产物以及由此带来的工艺特征等。

2.1 加热速度对相变温度的影响

以具有同素异构转变特征的钢的奥氏体化为例进行研究。

一 快速加热对纯铁相变点的影响

1 快速加热使相变点 A_{c3} 分离 在普通的加热速度下，纯铁的同素异构转变点 A_3 和 A_4 ，尽管随着加热条件的改变有所变化，但它仍然是恒温转变，在热分析曲线上有明显的平台（见图2-1-1）。随着加热速度的上升，它的实际转变温度发生分离现象。尤其是相变点 A_{c3} 的分离更为明显（见图2-1-2），使相变在一个较宽的温度范围内进行，它的开始转变点为 A_{c3i} ，终止转变点为 A_{c3f} 。这说明快速加热不仅不会抑制钢铁加热时的相变，反而使相变点分离。在相变温度范围内，不同温度下生成的奥氏体将具有不同的形态，这是快速加热增大奥氏体不均匀性的重要原因之一。

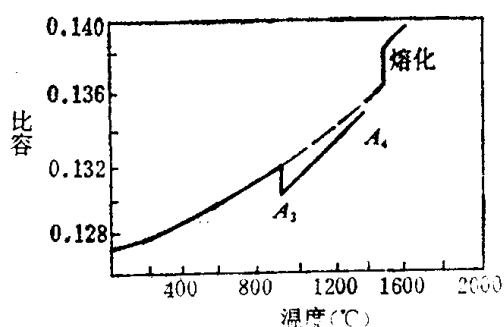


图2-1-1 纯铁的热分析曲线

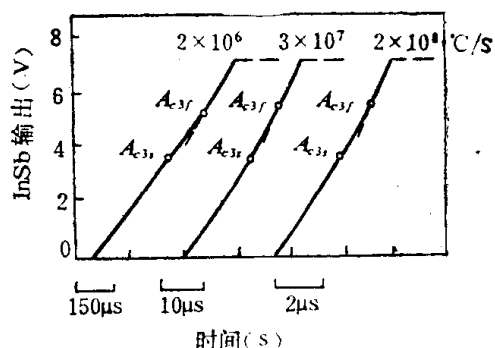


图2-1-2 快速加热使纯铁 A_{c3} 分离

图2-1-3是加热速度在 $0\sim 10^9\text{°C/s}$ 范围内 A_{c3} 的变化曲线。从图中可以看出，加热速度愈快，相变温度范围也随之增大，当达到 10^4°C/s 左右时，其相变温度范围逐渐趋于稳定。当加热速度超过 10^7°C/s 时，相变温度范围又继续增大，随后又趋于稳定。表明加热速度可以使相变机制发生改变，在加热速度——相变温度曲线上出现两个明显的拐点。

2 加热速度使纯铁相变点上升 图2-1-3不仅说明加热速度使纯铁的 A_{c3} 点分离，且随加热速度上升而分离加大，同时也看到 A_{c3} 随加热速度的增大而上升。从图中还可以看出， A_{c3i} 和 A_{c3f} 上升幅度不一致。在 $0\sim 10^4\text{°C/s}$ 之间，后者明显快于前者。在 $10^4\sim 10^6\text{°C/s}$ 之

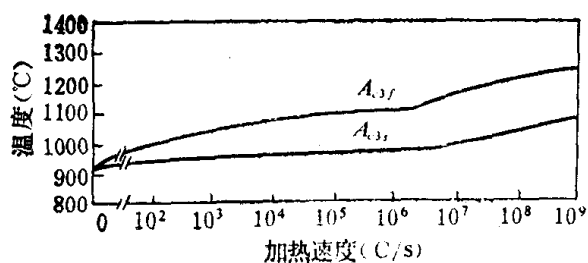


图2-1-3 加热速度在 $0 \sim 10^9$ °C/s范围内纯铁 A_{c3} 点变化曲线

图, 加热速度在 200 °C/s以下, 随加热速度的上升, 不同含碳量的 A_{c3} 和 A_{cm} 与平衡状态图上的 A_{c3} 和 A_{cm} (即GS线和ES线) 大致保持平行上升。当加热速度高于 200 °C/s时, A_{c3} 和 A_{cm} 仍随加热速度的提高而上升, 但低碳钢 ($C < 0.4\%$) 的 A_{c3} 和过共析钢的 A_{cm} 值与含碳量无关, 大体上数值保持一致。对于亚共析钢来说, 加热速度再上升, A_{c3} 为恒定值的含碳量上升, 若达到 10^3 °C/s, $C < 0.6\%$ 以下各成分钢的 A_{c3} 都一样; 当加热速度上升至 $10^5 \sim 10^6$ °C/s时, A_{c3} 与含碳量无关, 达到 1130 °C, 成为定值。过共析钢则不同, 当加热速度超过 200 °C/s时, A_{cm} 上升缓慢, 再提高加热速度 A_{cm} 不再上升, 大致保持在 950 °C左右。

2 快速加热使钢的相变点 A_{c1} 分离 图2-1-5是共析钢的 A_{c1} 与加热速度的关系。加热速度小于 10^5 °C/s时, A_{c1} 和 A_{c1f} 同时随加热速度增大而上升, 只不过 A_{c1} 上升缓慢一些。当加热速度大于 10^5 °C/s时, A_{c1} 上升速率更加缓慢, 但加热速度达到 10^7 °C/s左右时, 突然上升, 发生“跃变”现象, 之后又以较低的速率上升。 A_{c1f} 早在加热速度为 10^5 °C/s附近时, 就已发生了“跃变”, 其后仍以较快的速率上升。

将图2-1-3和图2-1-5作一比较, 在加热速度小于 10^5 °C/s时, 二者形式上基本一致, 加热速度再上升, 出现了明显的差别, 前者在加热速度为 10^7 °C/s附近时, 相变点上升速率突增, 但仍是连续上升; 后者却在一定的加热速度下发生了“跃变”。“跃变”后的温度与纯铁的 A_{c3} 相近。研究还发现, 不同含碳量钢的 A_{c3f} 在快速加热时, 也有“跃变”现象发生 (见图2-1-6), 随着含碳量的增加, 发生“跃变”的加热速度上升, “跃变”后的温度也和纯铁的 A_{c3f} 相近, 说明“跃变”后的相变与钢中含碳量是无关的。

间, A_{c3} 和 A_{c3f} 几乎与加热速度无关, A_{c3} 保持在 950 °C左右, A_{c3f} 约在 1100 °C左右。在 $5 \times 10^7 \sim 5 \times 10^8$ °C/s之间, 二者以较大的速率上升, A_{c3} 增加至 1050 °C, A_{c3f} 达 1250 °C, 随后, 逐渐趋于稳定。这一点和相变点分离现象一致, 它是与相变机制的改变相关。

二 快速加热对钢相变点的影响

1 快速加热使钢的相变点 A_{c1} 、 A_{c3} 和 A_{cm} 上升 图2-1-4是钢的非平衡加热状态

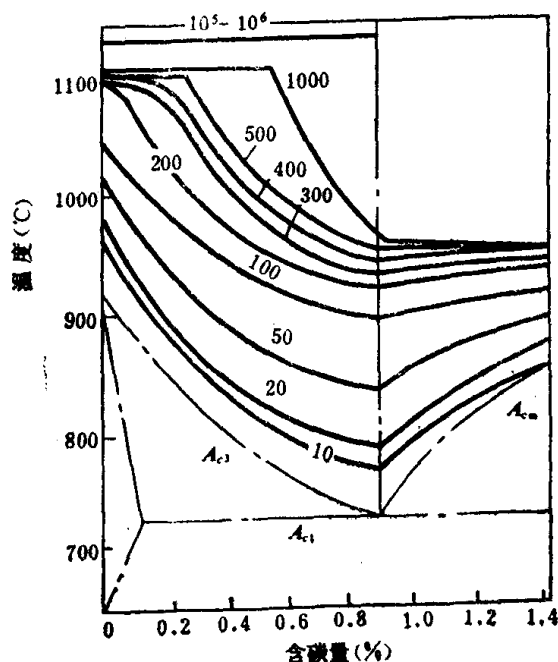


图2-1-4 钢的非平衡加热状态图 (图中数字为加热速度, °C/s)

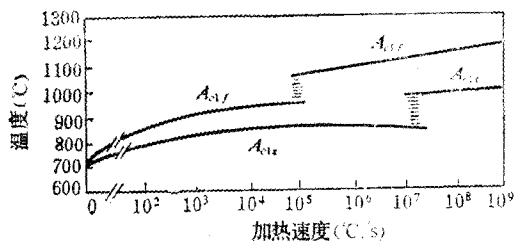


图2-1-5 加热速度对共析钢 A_{c1} 点的影响

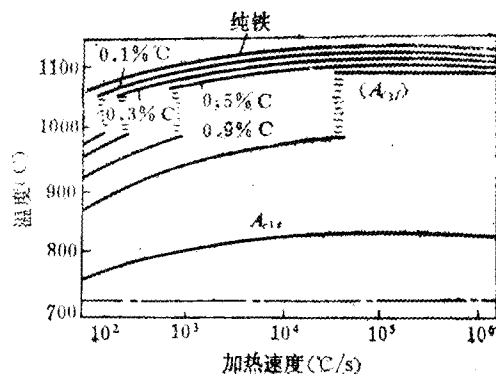


图2-1-6 加热速度对碳钢 A_{c3} 点的影响

三 关于快速加热相变机理的讨论

在如此高温和快的加热速度下研究钢铁相变机理是很困难的，所以对钢铁快速加热条件下相变机理的研究，在深度和广度上同冷却相变相比有很大的差距。近几年来伴随着加热手段和测试技术的发展，研究工作有了进一步的深入，概括起来有如下几种理论。

1 非扩散相变的热力学理论 关于奥氏体的非扩散形成在40年代初便有研究。A.A. Попов认为珠光体向奥氏体转变时，当达到相当高的加热温度，铁素体可以全部以无扩散

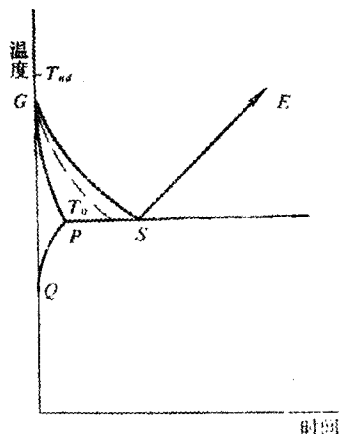


图2-1-7 奥氏体无扩散形成的热力学条件

方式转变为低碳奥氏体，随后碳化物在奥氏体中溶解，最终成为均匀的奥氏体。用热力学观点解释了这一现象，认为含碳的铁素体与含同一碳量的奥氏体间有一平衡温度 T_0 ，在该温度，两者的自由能相等（见图2-1-7）。如果将铁素体快速加热足以防止铁素体成分变化时，当达到此温度，就有可能发生铁素体到奥氏体的无扩散转变。实际上发生无扩散相变的温度高于 T_0 ，把这个温度记为 $T_{n,d}$ 。如果温度达到 $T_{n,d}$ 时，即发生无扩散相变，奥氏体中的含碳量和铁素体一致。这种转变仅是由体心立方（bcc）晶格转变为面心立方（fcc）晶格，不需要任何原子大距离移动，如同马氏体相变一

样，瞬时即完成。A.A. Попов用实验间接证明了这一现象，并作出了另一种形式的动力学曲线（见图2-1-8），图中出现了一个新的临界点 $T_{n,d}$ （奥氏体无扩散形成点），在这个温度以下的动力学曲线，同一般的扩散型相同，高于这个温度，便不出现奥氏体开始形成曲线和铁素体转变终了曲线，只是 $T_{n,d}$ 成为一条水平线。也就是说此时铁素体在一瞬间形成了奥氏体，而后只进行碳化物的溶解过程。对比一下图2-1-3、2-1-4、2-1-5和2-1-6中转变点的变化，可以发现，加热速度对 A_{c1} 的提高是很有限的，即使以 10^6 °C/s的速度加热，仅升高到840°C，表明 $T_{n,d}$ 的存在。加热速度对转变终了点 A_{c1} 有显著的影响，当加热速度达 10^7 °C/s时， A_{c1} 可达1100°C。对于亚共析钢来说， A_{c3} 温度曲线在高速加热下发生