

金属热处理

(再版)

李松瑞 周善初 编写
田荣璋 审定



中南大学出版社

金属热处理

(再版)

李松瑞 周善初 编写
田荣璋 审定

中南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

金属热处理/李松瑞,周善初编. —长沙:中南大学出版社,2003.9

ISBN 7-81061-734-6

I. 金... II. ①李... ②周... III. 热处理
IV. TG156

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 082645 号

金属热处理

李松瑞 周善初 编写
田荣璋 审定

责任编辑 程 滨 可 耕

出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路 邮编:410083

发行科电话:0731-8876770 传真:0731-8710482

电子邮件:csucbs @ public. cs. hn. cn

经销 湖南省新华书店

印装 中南大学印刷厂

开本 889×1194 1/32 ☐印张 15 ☐字数 369 千字

版次 2003 年 9 月第 1 版 ☐2003 年 9 月第 1 次印刷

书号 ISBN 7-81061-734-6/TB·026

定价 38.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

前 言

18年前,根据(1984~1988)冶金高等院校教材编写出版5年规划,编者在多年实践、多次修改的讲义基础上,通过进一步的充实、提炼加工,于1985年以《金属热处理》书名,由冶金工业出版社正式出版。

该书由田荣璋任主编,第一章由田荣璋编写,第二三五七章由李松瑞编写,第四六八九章由周善初编写。编者力争能反映本学科的基本原理、新成就以及生产实际和发展前景。在内容编排上按金属热处理类型分章,突出有色金属,兼顾钢铁材料,成为该书的特点。书出版后,有些高等院校用作教材或者参考资料,大量工程技术人员作为常用的参考书。经过18个春秋,该书的内容及系统基本上获得了肯定。

为了跟进材料科学迅猛的发展以及满足高等院校教学和其他读者的需要,由田荣璋提议决定再版。在原书的基础上,保持特色不变,进行修改与补充,以便能更全面地反映金属热处理基本原理、生产工艺以及新观点和新技术,使读者能从中获得更多的助益。

经过协商,本版由李松瑞、周善初编写,其中第一四六八九章由周善初、第二三五七章由李松瑞修改补充,最后由田荣璋审定,中南大学出版社出版。

在编写出版过程中,曾得到许多同志的热情帮助和支持,在此表示感谢。

由于水平有限,缺点甚至错误在所难免,希望读者批评指正。

编 者

2003年5月

目 录

第一章 绪 论	(1)
1.1 引 言	(1)
1.2 热处理在金属材料生产中的作用	(2)
1.3 热处理的基本类型	(5)
第二章 均匀化退火	(9)
2.1 铸态合金的组织及性质	(9)
2.2 均匀化退火时合金组织及性能的变化	(14)
2.3 均匀化退火工艺	(22)
第三章 基于回复及再结晶过程的退火	(30)
3.1 回 复	(30)
3.2 再结晶	(36)
3.3 再结晶晶粒长大及晶粒大小	(46)
3.4 二次再结晶	(57)
3.5 退火织构	(62)
3.6 有序合金的回复与再结晶	(69)
3.7 复相合金的再结晶	(73)
3.8 回复退火及再结晶退火工艺规程	(86)
3.9 消除应力退火	(99)

第四章 基于固态相变的退火 (105)

- 4.1 固态相变的基本类型及其一般规律 (105)
- 4.2 钢的退火 (132)
- 4.3 有色金属合金的退火 (179)

第五章 无多型性转变合金的淬火和时效 (186)

- 5.1 固溶化及固溶处理 (187)
- 5.2 过饱和固溶体分解过程热力学 (189)
- 5.3 脱溶序列 (197)
- 5.4 时效后合金的组织特征 (214)
- 5.5 时效时合金性能的变化 (228)
- 5.6 影响时效过程及材料性能的因素 (238)
- 5.7 淬火(固溶处理)及时效规程 (244)
- 5.8 无序—有序转变及有序化强化 (266)

第六章 有多型性转变合金的淬火和回火 (276)

- 6.1 马氏体相变的基本理论 (276)
- 6.2 钢中的马氏体相变 (289)
- 6.3 钢的淬火 (305)
- 6.4 钢中贝氏体转变和等温淬火 (311)
- 6.5 钢的回火 (322)
- 6.6 钢的时效硬化 (343)
- 6.7 钢的表面淬火 (347)
- 6.8 有色金属贝氏体转变 (358)
- 6.9 有色金属马氏体和弹性马氏体 (361)
- 6.10 钛合金的淬火及时效(回火) (377)

第七章 形变热处理	(387)
7.1 热变形时金属组织的变化	(387)
7.2 时效型合金的形变热处理	(395)
7.3 马氏体转变型合金的形变热处理	(403)
第八章 化学热处理	(412)
8.1 化学热处理的基本过程	(412)
8.2 钢的化学热处理	(419)
8.3 钛合金的化学热处理	(428)
8.4 元素的扩散去除	(430)
第九章 热处理的工艺基础	(432)
9.1 加热方法	(432)
9.2 热处理加热气氛	(436)
9.3 冷却介质	(449)
9.4 热处理时的变形和裂纹	(458)
主要参考书目	(467)

第一章 绪 论

1.1 引 言

人类的发展史是与金属材料的应用及其发展紧密联系着的,特别是在近代,金属材料在人类文明中更占有特殊重要的地位。据统计,目前在各种机器设备、车辆、船舶、飞机、水利电力设备、仪器仪表及国防武器所用材料中,金属材料约占 90% 以上。没有各种性能符合要求的金属材料,近代文明的出现和发展是根本不可能的。为了使金属材料获得所需要的性能,热处理技术发挥着重要的作用。

我国是世界上最早掌握金属热处理技术的国家之一。出土的古代文物和历史科学著作都表明,我国古代在金属热处理技术方面取得了辉煌的成就,创造和积累了丰富的经验。早在殷商时代(公元前 1652 ~ 公元前 1066 年),就已发明了用退火方法软化金箔的技术。春秋战国时代(公元前 770 ~ 公元前 221 年)已掌握了用退火、淬火、正火和渗碳等热处理方法来改善钢和铸铁的性能。西汉司马迁所著《汉书·王褒传》中有“……巧治铸干将之朴、清水淬其锋”等记载。辽阳三道壕出土的西汉钢剑即为淬火马氏体组织;河北满城出土的西汉佩剑及书刀,其心部为低碳钢,而表面有明显的高碳层。三国时,蒲元对淬火工艺已经有了较深刻的了解,掌握了不同水质对淬火后钢的品质的影响规律。南北朝时的綦母怀文已经知道使用多种淬火冷却介质,了解淬火冷却速度与淬火后钢的性质的关系,提出了“浴以五牲之溺,淬以五牲之脂”。

明代科学家宋应星整理总结了我国古代的许多科学技术成就,写就《天工开物》一书。其中有不少热处理技术方面的论述,证明当时已普遍使用了固体渗碳方法,同时也掌握了固体渗碳过程中的检验方法。特别是对用途不同的针,已发现可采用不同热处理来达到其使用性能的要求。上述事实证明,早在欧洲工业革命之前,我国热处理技术已达相当高的水平。但是,近两个世纪以来,由于腐朽的封建制度和帝国主义的入侵,阻碍了劳动人民的智慧和创造性的发挥,热处理技术和其他科学技术一样,长期处于落后状态。

1949年建立新中国以后,全国人民积极努力地工作,热处理技术已获得了巨大的进步。新技术、新工艺和新设备不断地被应用于生产中,如可控气氛热处理、真空热处理、感应热处理、多元共渗、辉光离子氮化、软氮化以及新的淬火介质大力推广使用;机械化程度高的热处理作业炉和热处理流水线、自动生产线已在不少工厂中建立起来;在科研单位、高等学校和工厂试验中心已广泛使用近代化研究手段,如透射电子显微镜、扫描电子显微镜、电子探针、X射线衍射仪和放射性同位素等,使热处理理论得到发展,产品质量和生产率都有很大提高。许多企业在产品市场竞争中都凭借其所掌握的热处理技术来保证产品质量,赢得胜利。在所有的国家里,金属和合金,特别是经过热处理的金属和合金的需用量将会有明显的增长。

1.2 热处理在金属材料生产中的作用

所谓金属热处理,是借助于一定的热作用(有时兼之以机械作用、化学作用或其他作用)来人为地改变金属合金内部的组织和结构,从而获得所需要性能的工艺操作。在各种金属材料 and 制品的生产过程中,热处理是不可缺少的重要环节之一。

铸件通常需要进行消除内应力的低温退火,或完全退火,或正火;有的还需要淬火后回火(时效)。

钢材整个生产过程中的热处理,包括钢锭的热处理、压力加工过程中的和成品的热处理。钢锭的热处理主要是不同温度下的退火。钢材的热处理可依工艺性能和使用性能要求不同而异。例如各种钢材常须进行正火处理,以获得细而均匀的组织 and 较好的力学性能。高强度调质钢材则常进行淬火高温回火处理,以保证达到要求的综合力学性能。不锈钢板与钢带,大多数进行固溶处理以改善其耐蚀性。热锻(轧)钢材可根据用户的要求来决定产品的热处理工艺。冷拉(轧)钢材需进行坯料热处理、中间热处理和成品热处理。

有色金属及其合金的半成品或制品的生产与钢材和钢制零件生产大致相同,但在有色金属加工工艺流程中,热处理是更加重要的组成部分。有色金属及其合金板带生产基本流程如图 1-1 所示。从图中可以看出,没有热处理工序,板带材生产就不能进行。

一般粉末冶金制品似乎不需要热处理,但烧结实际上也是一种热处理的特殊形式。特别是一些由粉末冶金和压力加工配合生产的制品,更明显地需要热处理。如钨丝的生产,其流程大致为:制粉→压型→烧结(垂熔)→热旋锻→中间退火→温拉伸→中间退火→温拉伸→成品。

金属材料及制品生产过程中,之所以需要热处理,其主要作用 and 目的有二。

1. 改善工艺性能,保证后道工序顺利进行。如均匀化退火可以改善热加工性能。中间退火可以改善冷加工性能。用高碳钢制造的刀具,正火和球化退火是保证机械加工性能要求的必不可少的工序。

2. 提高使用性能,充分发挥材料潜力。如航空工业中应用广泛的 2A12 硬铝,经淬火和时效处理后,抗拉强度可从 196 MPa 提

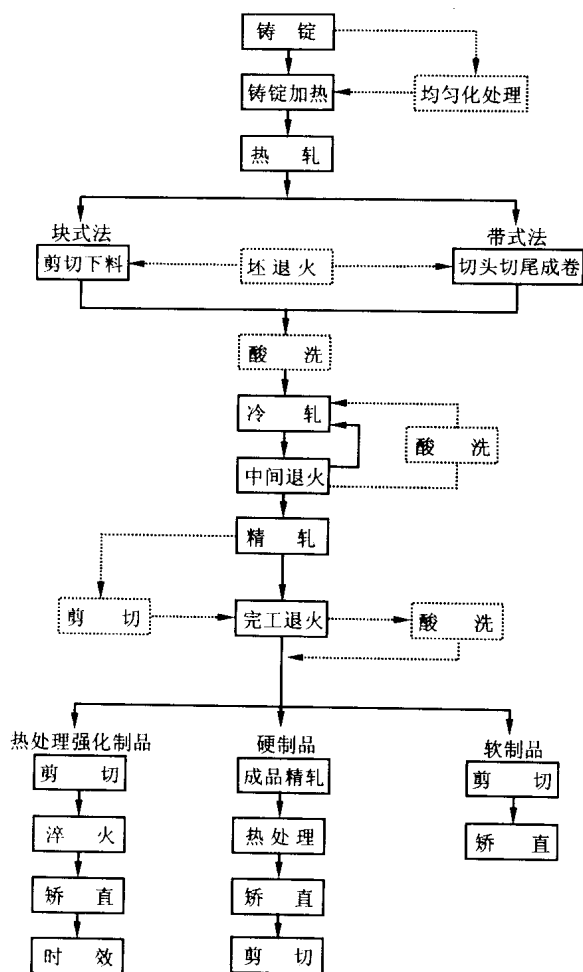


图 1-1 有色金属及其合金板带生产基本流程示意图

高到 392 ~ 490 MPa。共析碳钢经热轧空冷,硬度仅为 HRC 25 左右,加工成刀具后再进行淬火和低温回火,硬度可达 HRC 62 以上,抗拉强度可达 1372 MPa。至于某些特殊性能的金属材料,经不同的热处理甚至可使其性能由硬脆变强韧,或中心强韧而表面硬且耐磨等。正因为热处理对材料性能有如此巨大的作用,所以热处理在材料科学中才占有很重要的地位。

1.3 热处理的基本类型

在工业上实际应用的热处理工艺,尽管其形式和工艺参数各不相同,但就其热处理的基本过程(即热作用过程)来说,无论哪一种热处理工艺,都是由加热、保温和冷却三个阶段组成的,并且整个工艺过程都可以用加热速度、加热温度、保温时间、冷却速度以及总的延续时间(热处理周期)这几个基本工艺参数来描述。当然,具体的热处理工艺过程可能比较复杂,有关的工艺参数有时较多,特别是当热处理同时兼有机械作用或化学作用或其他作用时就更显出工艺的复杂性。不过,根据热处理时外界对金属材料施加的基本作用(主要是热作用、化学作用和机械作用等)以及材料内部组织、结构和状态变化的特点,可将常用的热处理形式分为三类,即基本热处理、化学热处理和形变热处理。

1.3.1 基本热处理

所谓基本热处理(有人称为常规热处理),是指以热作用为主要过程的热处理,即只有热作用对金属材料的内部组织、结构、状态和性能起决定性的影响,材料的化学成分、形状和尺寸在热处理前后并不发生大的变化。

基本热处理包括以下几种形式:

1. 均匀化退火(扩散退火) 均匀化退火是用于消除或减少铸态合金非平衡状态的热处理。其基本过程和主要目的是借助高

温时合金内部(固溶体)原子的扩散,使铸锭(或铸件)晶内化学成分均匀,组织达到或接近平衡状态,改善复相合金中第二相的形状和分布,提高合金塑性,改善加工性能和最终使用性能。

2. 基于回复、再结晶的退火 金属冷变形后组织处于亚稳状态,内能增高、强度硬度增加、组织发生变化,有时还出现织构。若将其加热到一定的温度,会发生回复、再结晶,变形织构也会发生变化,从而在一定程度上消除了由冷变形造成的亚稳定状态,使金属材料获得所需组织、结构和性能。这种热处理称为基于回复、再结晶的退火。这种热处理还包括消除应力退火。

3. 基于固态相变的退火 这是一种以固态金属合金经高温保温和冷却所发生的扩散型相变为基础的热处理,与上述均匀化退火及基于回复、再结晶退火的主要区别,是后者并不以固态相变为先决条件,或者不发生任何固态相变,而前者的先决条件和基本过程则是扩散型固态相变。由于扩散型固态相变的种类甚多(如多型性转变、共析转变、加热时第二相溶解和冷却时第二相析出等),对金属合金组织和性能影响颇大,因此这类退火有很多形式,在实际中已得到普遍的应用。

4. 淬火 将金属合金从固态下的高温状态以过冷或过饱和形式固定到室温,或使高温相在冷却时转变成另一种晶体结构的亚稳状态,称为淬火。

根据淬火金属合金内部所发生的过程,又可分为两种:(1)若淬火仅仅是使高温相以过冷或过饱和状态固定到室温,在淬火过程中晶体结构不发生变化,叫无多型性转变的淬火(一般称为固溶处理);(2)若淬火时金属合金的晶体结构类型发生改变(如马氏体相变),则称有多型性转变的淬火。与基于固态相变的退火相似,淬火的先决条件是必须在固态下有相变,如多型性转变或第二相的溶解和析出(即固溶度随温度降低而减小)。但与退火不同,在大多数情况下要快冷,使淬火时无扩散过程发生,或扩散不

是过程的控制因素。相图上有多种转变或随温度升高固溶度增加的合金,原则上都可进行淬火处理。

淬火的主要目的是为了获得过饱和固溶体,给随后的时效或回火作好组织准备。有些合金在淬火状态具有良好的塑性,因而这些合金的淬火可作为冷成型前的软化操作。此外,少数合金在淬火后具有最佳的性能,淬火就是这种合金的最终热处理形式。

5. 时效或回火 无论合金有无多种转变,淬火得到的过饱和固溶体,都是具有较高能量状态的亚稳相,只要可能(如加热到一定温度或在室温保持较长时间),它就会向较低能量的稳定状态转化,这种转化是通过过饱和固溶体的分解来实现的。室温保持或加热使过饱和固溶体分解的热处理,称为时效或回火。

应注意,时效和回火是合金淬火的后继工序,没有淬火(无论什么形式)就无所谓时效或回火。利用淬火和时效,或淬火和回火,可赋予合金优良的综合性能。

1.3.2 化学热处理

化学热处理是将热作用和化学作用有机地结合起来的一种热处理。由于热作用和化学作用同时发生,使某些元素(金属或非金属)渗入金属合金中,就是说化学热处理不仅可以改变金属材料的组织,而且还可以改变其化学成分(一般是表面成分)。在化学热处理时,金属材料的形状和尺寸通常不发生大的变化。

化学热处理的主要目的是改善材料的表面性能(如提高材料表面硬度、耐磨性和耐蚀性等)。在少数情况下,特殊形式的化学热处理可以去金属内部的有害元素。

1.3.3 形变热处理

形变热处理是一种将塑性变形和热作用结合起来的热处理。但是,并非任何将塑性变形与加热、冷却随意结合起来的工艺都是形变热处理,只有将那些能提高金属材料内部晶体缺陷密度的塑性加工与

能发生固态相变的热作用结合起来,能显著地改变材料的组织和结构,并明显地提高材料性能的工艺才算形变热处理。换言之,形变热处理是塑性变形的变形强化与热处理的两相强化相结合,使成型工艺及获得最终性能统一起来的综合热处理形式。其结果,合金性能将优于仅用基本热处理或仅用变形所达到的性能。

上述各种热处理的分类如图 1-2 所示:

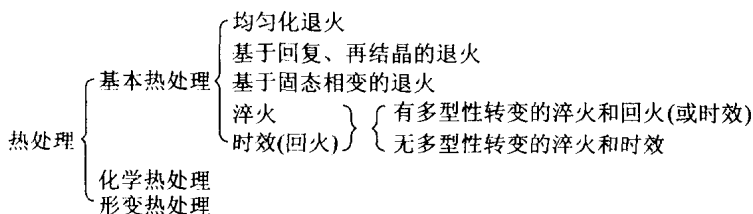


图 1-2 热处理分类

在实际应用中,无论哪一种具体的热处理工艺过程都可归诸于上述某种热处理类型,或上述几种热处理类型的结合。但必须指出,实际应用的热处理工艺多种多样,而且迄今为止,我国尚无统一的热处理分类标准,在生产中有些热处理也不一定按上述类别的名称命名。还须强调说明,各种形式的热处理在生产中不总是单独分开的,往往在一次热处理过程中,同一金属材料内部就发生了多种形式热处理的复杂过程,即在金属材料内部进行着多种固态转变,因此,在遇到实际问题时,必须从具体情况出发,进行全面、综合的分析。

第二章 均匀化退火

均匀化退火的对象是铸锭和铸件。其目的是在高温下通过扩散来消除或减小实际结晶条件下晶内成分不均匀性和偏离于平衡的组织状态,以改善合金材料的工艺性能和使用性能。

2.1 铸态合金的组织及性质

2.1.1 铸态合金的组织特征

铸态合金的组织通常偏离平衡。为简单起见,现以二元共晶系合金为例分析之。

图 2-1 表示一简单二元共晶系状态图以及非平衡固相线。设有一 x_1 成分的合金,在平衡结晶时, α 固溶体的成分沿 bs 线变化,并在 s 点结晶完毕,整个组织为成分均匀的固溶体。若在非平衡条件下结晶,首先结晶的固相与随后析出的固相成分来不及扩

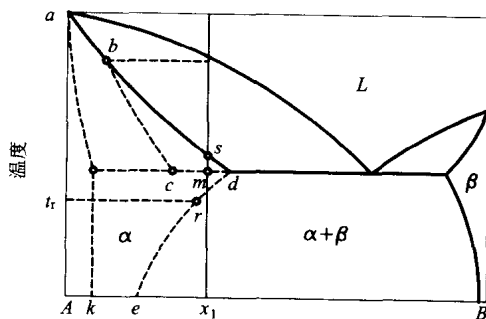


图 2-1 共晶系统状态图及非平衡固相线

散均匀,整个结晶过程中 α 固溶体平均成分将沿 bc 线变化,达到共晶温度的 c 点后,余下的液相则以 $(\alpha + \beta)$ 共晶的方式最后结晶。因此,在非平衡结晶条件下, x_1 合金的组织由枝晶状的 α 固溶体及非平衡共晶组成。合金元素 B 的浓度在枝晶网胞心部(最早结晶的枝晶干)最低,并逐渐向枝晶网胞界面的方向增加,在非平衡共晶中达到最大值。通常,非平衡共晶中的 α 相依附在 α 初晶上, β 相则以网状分布在枝晶网胞周围,在显微组织中观察不到典型的共晶形态。

在实际生产中,各种特定的铸造条件都有一个临界浓度 k ,凡组元浓度大于 k 的合金,在该种铸造的冷却条件下均会出现非平衡过剩相。下面列出几个合金系在平衡条件下,固溶体的极限固溶度 d (共晶或包晶温度下),以及在硬模铸造条件下,非平衡结晶出现的浓度极限 k :

系 统	Al - Cu	Al - Mg	Mg - Al	Cu - Sn
$d / \%$	5.7	15.4	12.7	13.5
$k / \%$	0.1	0.5	0.1	4.0

该数据表明,在生产条件下,铸造组织中出现非平衡过剩相是比较普遍的现象。

除上述主要特征外,根据图2-1中的 de 线可知, x_1 合金固溶体后结晶部分,第二组元浓度可能超过 e 点,若在结晶完毕后仍以较快速度继续冷却,合金元素来不及从固溶体中平衡析出,则此部分固溶体就会呈过饱和状态。

例如广泛应用的锡青铜 QSn6.5-0.1 平衡组织应为单相固溶体,但在实际结晶条件下,显微组织中除了有树枝状偏析的基体固溶体外,在枝晶网胞间可能出现少量 $(\alpha + \delta)$ 共析体,甚至还可能出现极少量 $(\alpha + \delta + \text{Cu}_3\text{P})$ 三相共晶[见图2-2(a)]。2A12 合金的平衡组织应为 α 固溶体,在晶界上有少量的 θ 、S、 Mg_2Si 、