

有 色 金 属 加 工 丛 书

有色金属

★ 热处理技术 ★

王群骄 编著



化学工业出版社

有 色 金 属 加 工 丛 书

有色金属

热处理技术

王群骄 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书较系统地阐述了有色金属的成分、组织和性能的特征；热处理基本原理、热处理的类型及其工艺；各种工艺参数对材料组织及性能的影响，以及组织性能的变化规律；进一步改善材料的组织和性能的基本途径、具体的措施和效果；材料制品的制备及其相关的热处理工艺；实现材料特殊性能的新工艺和新技术，以及可达到的预期目标；材料的应用及发展展望等内容。

本书可供从事有色金属材料及热处理开发、研制及应用的工程技术人员使用，也可作为高等院校材料科学、加工、热处理、铸造等专业学生的教学参考书。

木苑野成感

著 王群

图书在版编目(CIP)数据

有色金属热处理技术/王群骄编著. —北京: 化学工业出版社, 2008.1

(有色金属加工丛书)

ISBN 978-7-122-01531-0

I. 有… II. 王… III. 有色金属-热处理 IV. TG166

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 177928 号

责任编辑: 邢 涛

文字编辑: 冯国庆

责任校对: 宋 玮

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 北京市彩桥印刷有限责任公司

850mm×1168mm 1/32 印张 15¼ 字数 421 千字

2008 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究

序

我国有色金属加工产业发展迅速,据有关部门提供的统计资料,目前铜加工材与铝加工材产量居世界首位。由于有色金属材料具有优异的性能,在航空、航天、电子、信息、能源、交通、冶金、电力、机械及建筑等领域得到了广泛应用。因此,可控制材料形状、尺寸、组织与性能有色金属加工技术,引起了人们广泛的关注。有色金属加工技术的发展与进步,对有色金属新材料的研究开发、应用及产业化具有决定性的作用,同时可有效地改善与提高传统材料的生产与使用性能,对国民经济的发展有重要的作用。

为了满足当今有色金属加工技术开发与生产的需要,我们编写了本套丛书,力图把有色金属锭坯制备、加工成形到材料热处理等全面系统地做一个总结。本丛书汇集了国内外有色金属材料加工工程领域的专家、学者及工程技术人员在有色金属材料加工方面所取得的重要研究成果,以及作者自身多年教学与科研工作中积累的经验,使读者系统地了解有色金属加工理论、工艺及设备等方面的知识,对有色金属加工工作者提高业务水平有所帮助。

考虑到有色金属加工企业中,不论是重金属、轻金属,还是稀有金属材料的加工,产品生产工序都是从加工坯料制备开始,经轧制、挤压、拉拔、锻造及冲压等加工成形工艺到材料热处理结束。所以,我们将本丛书划分为五个分册,分别是《有色金属锭坯生产技术》、《有色金属挤压与拉拔技术》、《有色金属轧制技术》、《有色金属锻造与冲压技术》及《有色金属热处理技术》,共约200万字,各分册既具有各自独立的体系,又相互关联,便于读者使用。

本丛书内容系统新颖，从基本理论入手，展开技术性叙述，尽力体现系统性、先进性、科学性及实践性，可供有色金属加工企业与科研院所的工程技术人员，以及高等院校从事有色金属加工教学和科研的教师与材料加工成型专业的学生参考。

《有色金属加工技术》系列丛书在撰写过程中，得到东北大学和郑州大学有关领导及老师的支持，在此一并表示感谢。

丛书主编 温景林

2007.05.18

前 言

在金属材料生产中,有色金属热处理技术占有重要的地位。许多有色金属材料,由于其各自的性能优势,如密度小、比强度高、耐热、耐蚀、良好的导电性和导热性等,在航空、航天、电子、电器、能源、交通、信息等领域得到了广泛的应用,并在其相关理论和技术方面也得到了迅速的发展,其中热处理理论和技术成为其中不可缺少的重要组成部分。

本书为有色金属加工丛书之一,其主要特点是内容比较全面和新颖,并具有较强的实用性。在金属材料方面,包含了铝、镁、铜、钛、钨、钼和镍基耐热合金,并专门讨论了形状记忆合金。在加工处理方面,除了重点论述有关热处理基本理论及工艺等方面的内容外,还对具有重大作用和发展前景的新工艺、新技术——形变热处理、急冷凝固处理、超塑性处理和定向凝固处理也进行了阐述。

本书根据 Al、Mg、Cu、Ti 等主要有色金属各自特点的不同,分别对其内容进行了有机的安排,实现以基本理论和基本知识为主,同时也注意到有关新工艺和新技术的介绍,使之既突出了重点,又顾及一般。对于有关数据及其变化规律,尽量采用图表方式表达。在本书的后面附有 Al、Mg、Ti、Cu 合金各国牌号对照表和有关符号的涵义。

本书在撰写过程中,参阅了大量文献资料,在此对提供参考资料的各位专家、学者表示感谢,特别对参与本书初稿和定稿审阅的温景林教授、王占学教授致以衷心的感谢。

由于时间仓促,以及编者水平有限,在本书中难免会有不足之处,敬请广大读者批评指正。

编者

2007 年 10 月 21 日

目 录

1 有色金属及合金的热处理概述 1

1.1 退火	2
1.1.1 去应力退火	2
1.1.2 再结晶退火	3
1.1.3 均匀化退火	5
1.1.4 重结晶退火	6
1.2 固溶处理	7
1.3 时效	8
1.4 形变热处理	12
1.5 化学热处理	12
参考文献	12

2 铝及铝合金的热处理 13

2.1 铝和铝合金	13
2.1.1 纯铝	13
2.1.2 铝合金及其强化方法	16
2.2 铝合金的热处理原理	21
2.2.1 过饱和固溶体的性质	21
2.2.2 时效过程	22
2.2.3 时效动力学	29
2.2.4 时效硬化原因	32
2.2.5 时效理论的应力	36
2.2.6 铝合金的形变热处理	44
2.3 铸造铝合金的热处理	49

2.3.1	铸造铝合金的特点和分类	49
2.3.2	高硅铸造铝合金的热处理	50
2.3.3	高镁铸造铝合金的热处理	69
2.3.4	高铜铸造铝合金的热处理	78
2.3.5	高锌铸造铝合金的热处理	86
2.4	变形铝合金的热处理	90
2.4.1	变形铝合金的特点及分类	90
2.4.2	防锈铝合金的热处理	91
2.4.3	硬铝合金	98
2.4.4	锻造铝合金的热处理	110
2.4.5	耐热铝合金的热处理	120
2.4.6	超硬铝合金(超硬铝)的热处理	129
参考文献		140

3 镁合金的热处理 142

3.1	镁及镁合金的基本特征	142
3.1.1	镁的基本性质	142
3.1.2	镁合金的特点	143
3.2	镁的合金化	143
3.2.1	镁合金的分类	143
3.2.2	合金中主要合金元素的作用	145
3.3	镁合金固态相变特点及热处理的主要类型	149
3.3.1	镁合金固态相变特点	149
3.3.2	镁合金热处理的主要类型	152
3.4	铸造镁合金热处理	155
3.4.1	高强铸造镁合金	155
3.4.2	耐热铸造镁合金	166
3.4.3	特殊耐热铸造镁合金	170
3.5	变形镁合金热处理	172
3.5.1	变形镁合金的塑性与合金化特点	172
3.5.2	高强变形镁合金	173
3.5.3	耐热变形镁合金	181

3.5.4 超轻镁合金	184
3.6 热处理缺陷及防治	188
3.6.1 变形	188
3.6.2 性能不足	189
3.6.3 力学性能不均匀	189
3.6.4 过烧	189
3.6.5 表面氧化	190
参考文献	190

4 铜及铜合金的热处理 191

4.1 工业纯铜及铜合金	191
4.1.1 工业纯铜	191
4.1.2 铜合金	199
4.2 黄铜热处理	200
4.2.1 黄铜分类	200
4.2.2 黄铜的热处理制度	213
4.3 青铜热处理	218
4.3.1 锡青铜	220
4.3.2 铝青铜	226
4.3.3 铍青铜	232
4.3.4 其他青铜	240
4.4 白铜热处理	251
4.4.1 结构白铜	251
4.4.2 电工白铜	254
4.5 铜及铜合金半成品的热处理	255
4.5.1 板带材的热处理	255
4.5.2 管材的热处理	257
4.5.3 线材的热处理	258
4.5.4 铜及铜合金半成品热处理后的酸洗	259
4.5.5 光亮退火	260
参考文献	261

5 钛和钛合金的热处理 262

5.1 钛及钛合金	262
5.1.1 纯钛	262
5.1.2 钛的合金化	267
5.2 钛合金的相变	286
5.2.1 同素异构转变	286
5.2.2 β 相转变	288
5.2.3 时效过程中亚稳定相的分解	297
5.3 钛合金的热处理	299
5.3.1 钛合金热处理的特点	299
5.3.2 钛合金热处理的主要类型	300
5.3.3 热处理缺陷和防治	327
5.4 钛合金的组织及其性能	328
5.4.1 钛合金相组成	329
5.4.2 钛合金组织类型	329
5.4.3 钛合金的热处理与组织、性能的关系	331
5.5 常用钛合金的热处理制度	336
5.5.1 结构钛合金	336
5.5.2 高温钛合金	345
5.5.3 钛铝化合物基高温钛合金	349
5.5.4 耐蚀钛合金	352
5.5.5 低温钛合金	356
参考文献	358

6 钨、钼及其合金的热处理 360

6.1 钨及钨合金	360
6.1.1 钨的主要性能	360
6.1.2 钨的合金化原理及钨合金	362
6.1.3 钨的粉末冶金	367
6.2 钼及钼合金	370

6.2.1	钼的性质和应用	370
6.2.2	钼的合金化原理及钼合金	372
6.2.3	钼的氧化和防氧化保护	379
6.3	钨和钼塑性加工中的热处理	381
6.3.1	钨、钼坯料旋转锻造中的热处理	381
6.3.2	钨和钼板材锻造、轧制中的热处理	385
6.3.3	钨和钼线材拉拔中的热处理	386
6.4	钨、钼性能的变化	390
6.4.1	冷加工对钨和钼性能的影响	390
6.4.2	温度对钨钼性能的影响	393
	参考文献	398

7 镍基耐热合金的热处理 399

7.1	镍基耐热合金	399
7.1.1	镍的特性和镍基耐热合金的牌号及主要成分	399
7.1.2	镍基耐热合金的合金化原理	399
7.1.3	镍基耐热合金热处理特点	404
7.1.4	镍基耐热合金热处理的类型	406
7.2	镍基变形耐热合金热处理	408
7.2.1	常用镍基变形耐热合金的热处理制度	408
7.2.2	常用镍基变形耐热合金的性能	411
7.3	镍基铸造耐热合金热处理	411
	参考文献	412

8 形状记忆合金的热处理 413

8.1	概述	413
8.1.1	形状记忆效应	413
8.1.2	形状记忆合金的发展与应用	413
8.2	形状记忆合金的理论基础	415
8.2.1	热弹性马氏体	415

8.2.2	形状记忆合金效应与伪弹性	417
8.2.3	形状记忆效应机制	419
8.2.4	单向形状记忆效应	420
8.2.5	双向形状记忆效应	421
8.2.6	全方位形状记忆效应	423
8.2.7	形状记忆合金的组织结构特征	423
8.3	形状记忆合金热处理	424
8.3.1	Ti-Ni 系形状记忆合金	424
8.3.2	铜系形状记忆合金	428
8.3.3	铁基形状记忆合金	432
8.4	影响合金形状记忆性能的因素	434
8.4.1	预变形量的影响	434
8.4.2	热处理的影响	435
8.4.3	成分控制和冶金质量的影响	436
	参考文献	437

9 材料特殊性能的处理

9.1	超急冷凝固处理	438
9.1.1	超急冷凝固处理的基本原理	438
9.1.2	超急冷凝固对组织性能的影响	439
9.1.3	急凝固方法	442
9.1.4	非晶态合金	444
9.1.5	非晶态合金的微观结构及变形机制特点	445
9.1.6	非晶态合金的性能	446
9.1.7	非晶态合金的主要特征及应用	449
9.2	超塑性性能处理	450
9.2.1	超塑性的基本概念	450
9.2.2	超塑性变形的力学特征	451
9.2.3	超塑性显微组织的变化	455
9.2.4	超塑性机理	456
9.2.5	超塑性合金	459
9.2.6	超塑性合金的力学性能	465

9.2.7 超塑性变形在工业技术上的应用	467
9.3 定向凝固处理	469
9.3.1 定向凝固的基本原理	469
9.3.2 定向凝固方法	470
9.3.3 定向凝固合金的组织	474
参考文献	475
 附录一 铸造铝合金、镁合金各国牌号对照表	 477
附录二 变形铝合金、镁合金各国牌号对照表	477
附录三 钛合金各国牌号对照表	479
附录四 铜合金各国牌号对照表	480
附录五 美国变形铝合金牌号及状态标记法	481

1 有色金属及合金的热处理概述

有色金属材料在国民经济及国防工业建设中占有重要地位。研究、应用和发展有色金属材料是我国经济建设中的重要任务之一。

有色金属材料分以下五类。

① 有色轻金属，即密度 $\leq 4.5\text{g/cm}^3$ 的有色金属，如铝、镁、钛、钙、锶等。

② 有色重金属，即密度 $> 4.5\text{g/cm}^3$ 的有色金属，如铜、铅、锌、镍、钴、锡等。

③ 贵金属，如金、银和铂等。

④ 稀有金属，包括：稀有轻金属，如锂、铍、铷、铯；稀有高熔点金属，如钨、钼、铌、锆等；稀土金属；分散金属，如镓、铟、锗、铊等；稀有放射性金属，如镭、钍、钷、铀等。

⑤ 半金属（半导体），如硅、硼、硒、碲、砷。

对许多有色金属和合金来讲，其性能不仅取决于它们的成分和组织，而且与其所承受的加工过程，特别是热处理有密切关系。

金属材料及其制品在生产过程中，热处理的主要作用和目的如下。

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。

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 LY12 硬铝，经淬火和时效处理后，其抗拉强度可以从 196MPa 提高到 392~490MPa。

所谓的热处理就是将金属及合金加热到所需的温度，在此温度下对金属及合金保温到所设定的时间，随后按一定的规程进行冷却。

有色金属及其合金最常用的热处理是退火、固溶处理（淬火）和时效。形变热处理也得到了较多的应用。化学热处理应用较少。现分别予以概述。

1.1 退火^[1]

在金属材料的半成品或制品中常常存在有残余应力、成分不均、组织不稳定等缺陷，严重影响合金的工艺性能和使用性能，如塑性低、耐蚀性差、力学性能不好等。要消除或减少这些缺陷，提高其工艺性能和使用性能，必须进行退火。所谓退火，就是把工件加热到适当温度，保持一定时间（称为保温），以缓慢的速度进行冷却的一种工艺过程。

根据退火所要达到的目的，退火可分为去应力退火、再结晶退火、均匀化退火和同素异构重结晶退火。

1.1.1 去应力退火

铸件、焊接件、切削加工件、塑性变形件（特别是冷变形件）在其内部往往存在很大的残余应力，使合金的应力腐蚀倾向大大增加，组织及力学性能的稳定性显著降低。因此，必须进行退火。去应力退火就是把合金加热到一个较低的温度（低于材料的再结晶开始温度），保持一定时间，以缓慢的速度冷却的一种热处理工艺（图 1-1，图中的冷却速度视合金能否热处理强化而定。对于可热处理强化合金要缓慢冷却，对不能热处理强化合金，冷却速度对性能无影响）。

在加热保温过程中，由于温度的升高，原子活动能力增加，使晶体晶格中的某些缺陷消除或数量减少，例如，在同一滑移系中不同符号位错的相互接近和抵消，空位及位错原子扩散可能产生的互相抵消等。这样，使晶格弹性畸变能下降，合金制件的内应力大大减小。因而使其尺寸稳定，应力腐蚀倾向减小。但其强度和硬度基本不下降，并使原来的加工硬化效果基本保存下来。去应力退火过

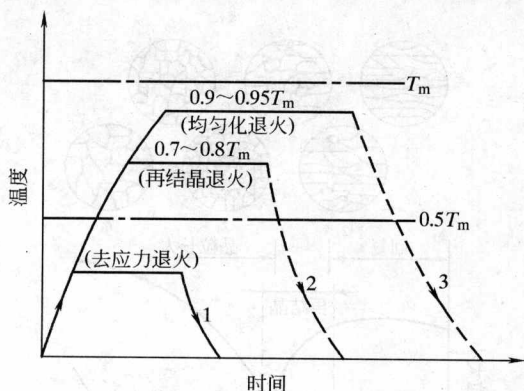


图 1-1 去应力退火、再结晶退火和均匀化退火规范

程是一个回复的过程。

影响去应力退火质量的主要因素是加热温度。加热温度选择过高，工件的强度和硬度降低较大，影响产品质量。若加热温度选择偏低，则需要很长的加热时间才能充分地消除内应力，影响生产效率。

1.1.2 再结晶退火

把工件加热到再结晶的温度以上，保持一定时间，而后以缓慢速度冷却（图 1-1，曲线 2）的工艺过程称为再结晶退火。再结晶退火的目的是细化晶粒，充分消除内应力，使合金的硬度降低、塑性提高（图 1-2）。对不能进行热处理强化的合金，冷速大小对性能无影响，而对于能热处理强化的合金需缓慢冷却。

再结晶过程是一个形核和核长大的过程。经冷变形的金属，其内应力大，很不稳定。当加热到一定温度后，那些弹性畸变（扭曲）最严重的地方，首先形成具有无扭曲的正常晶格的晶核。这些晶核逐渐“吃掉”周围晶格扭曲的旧晶粒而成为晶格无扭曲的新晶粒。当旧晶粒完全消失，新晶粒互相接触，即开始再结晶的另一个过程，即晶粒长大。晶粒长大过程一般称为聚集再结晶。

为了获得细小的晶粒组织，必须正确控制加热温度、保温时间

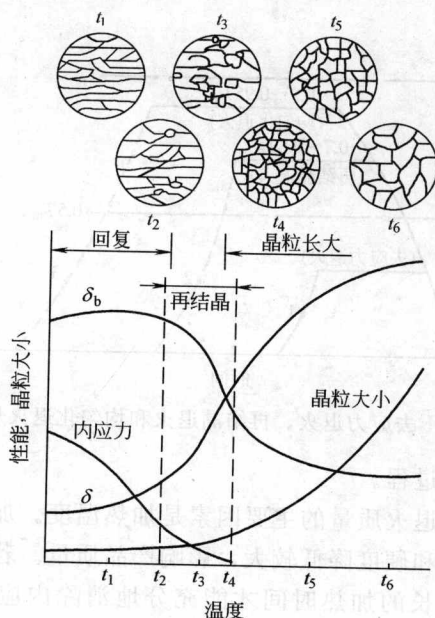


图 1-2 加热温度对冷塑性变形金属的性能、组织的影响^[1]

和冷却速度三个因素。

对同某一合金来讲，加热温度越高，保温时间就要越短。否则将进入聚集再结晶阶段，使晶粒长大；加热温度越低，保温时间就要越长。否则再结晶过程进行不充分，达不到再结晶退火目的。

对现有工业有色金属合金所使用的再结晶退火温度的统计表明，有色金属及其合金最佳的再结晶退火温度为 $0.7 \sim 0.8 T_m$ (T_m 为合金熔点的绝对温度)。

金属于冷变形后加热，开始再结晶的最低温度称为再结晶起始温度。一般所说的再结晶温度是指冷变形 70% 以上，在一小时的保温时间内能完全再结晶的最低温度。

影响再结晶温度的主要因素如下。

① 变形程度：变形程度越大，再结晶温度越低。