

高等学校教学用书

金属热处理

冶金工业出版社

高等学校教学用书

金属热处理

中南矿冶学院 田荣璋 主编

冶金工业出版社

高等学校教学用书

金属热处理

中南矿冶学院 田荣璋 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 16 $\frac{1}{4}$ 字数 383 千字

1985年5月第一版 1985年5月第一次印刷

印数00,001~7,700册

统一书号: 15062·4266 定价3.10元

前 言

本书是根据(1981~1988)冶金高等院校教材编写、出版五年规划,在多年实践、多次修改的讲义基础上,通过进一步的充实、提炼加工而成。编者力争反映本学科的基本原理、新成就以及当前生产实际和发展前景。在内容编排上基本上按热处理类型分章,突出有色金属,兼顾钢铁材料。本书是(有色)金属材料及热处理专业的教材,也可作为教学要求相近专业的参考教材,以及供有关技术人员参考之用。

本书采用当前我国通用的有关标准、资料和国际单位制(SI),引用的某些图表仍沿用原著中的单位。考虑到某些读者对国际单位制不太熟悉,把几个常用的主要单位换算关系抄列如下,以供参考: $1\text{kgf}/\text{mm}^2=9.807\text{MN}/\text{m}^2$ (或MPa), $1\text{kgf}/\text{mm}^{3/2}=0.315\text{MN}/\text{mm}^{3/2}$ (或MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$), $1\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2=0.09807\text{MJ}/\text{m}^2$; 硬度仍沿用 kgf/mm^2 为单位。

本书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,由田荣璋担任主编。在编写过程中,曾得到许多同志的热忱帮助和支持。书稿完成后召开了审稿会,有关院校的一些同志提出了不少宝贵意见,在此一并表示感谢。

由于我们水平有限,经验不多,缺点和错误在所难免,希望读者批评指正。

编 者

一九八四年七月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 引言	1
第二节 热处理在金属材料生产中的作用	2
第三节 热处理的基本类型	3
第二章 均匀化退火	6
第一节 铸态合金的组织及性质	6
第二节 均匀化退火时合金组织及性能的变化	8
第三节 均匀化退火工艺	12
第三章 基于回复及再结晶过程的退火	17
第一节 回复	17
第二节 再结晶	20
第三节 再结晶晶粒长大及晶粒大小	25
第四节 二次再结晶	32
第五节 退火织构	35
第六节 复相合金的再结晶	39
第七节 回复退火及再结晶退火工艺规程	47
第八节 消除应力退火	55
第四章 基于固态相变的退火	59
第一节 固态相变的基本类型及其一般规律	59
第二节 钢的退火	73
第三节 有色金属合金的退火	97
第五章 无多型性转变合金的淬火和时效	102
第一节 固溶化及固溶处理	102
第二节 过饱和固溶体分解过程热力学	104
第三节 时效后合金的组织特征	108
第四节 脱溶序列	115
第五节 时效时合金性能的变化	126
第六节 影响时效过程及材料性能的因素	132
第七节 淬火(固溶处理)及时效规程	136
第八节 无序—有序转变及有序化强化	145
第六章 有多型性转变合金的淬火和回火	151
第一节 马氏体相变的基本理论	151
第二节 钢中的马氏体相变	159
第三节 钢的淬火	168
第四节 钢中贝氏体转变和等温淬火	171
第五节 钢的回火	178
第六节 马氏体时效钢的淬火及回火(时效)	190
第七节 钢的表面淬火	191

第八节	有色合金马氏体和弹性马氏体	194
第九节	钛合金的淬火及时效（回火）	201
第七章	形变热处理	207
第一节	热变形时金属组织的变化	207
第二节	时效型合金的形变热处理	213
第三节	马氏体转变型合金的形变热处理	216
第八章	化学热处理	221
第一节	化学热处理的基本过程	221
第二节	钢的化学热处理	223
第三节	钛合金的化学热处理	229
第四节	元素的扩散去除	231
第九章	热处理的工艺基础	232
第一节	加热方法	232
第二节	热处理加热气氛	234
第三节	冷却介质	241
第四节	热处理时的变形和裂纹	246

第一章 绪 论

第一节 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技著作都表明，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《史记·天官书》中有“水与火合为淬（淬）”；东汉班固所著《汉书·王褒传》中有“……巧冶铸干将之朴、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质量的影响规律。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。上述事实指出，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。

解放以后，在中国共产党领导下，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、感应加热、形变热处理、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。

第二节 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。在各种金属材料和制品的生产过程中，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；有的还需要淬火和回火(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 较好的综合机械性能。高强度调质钢材则常进行淬火回火处理，以保证达到要求的机械性能。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

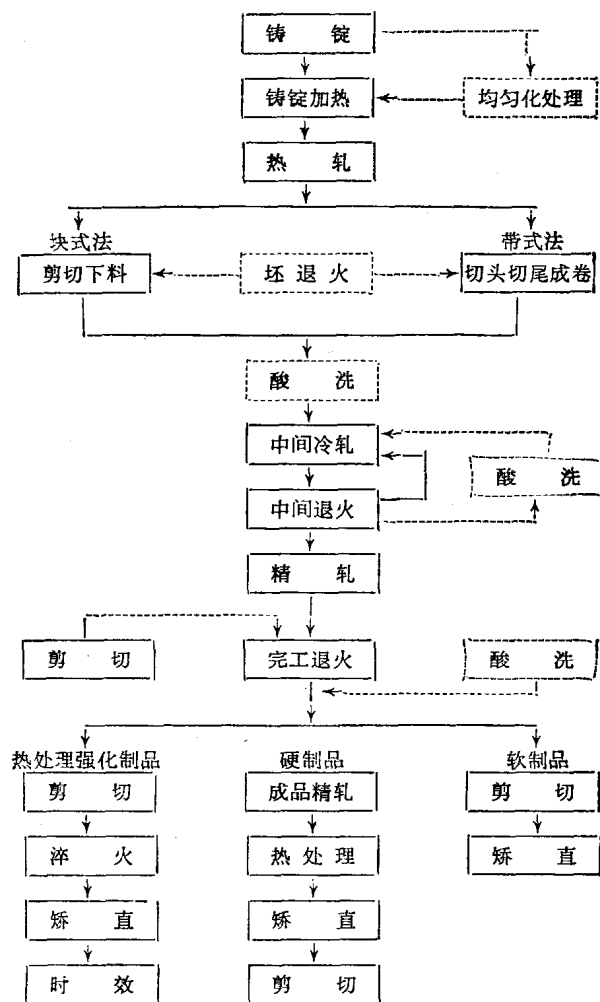


图 1-1 有色金属及其合金板带生产基本流程示意图

金属加工工艺流程中，热处理是极其重要的组成部分。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，其主要作用和目的有二。

其一，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。如用高碳钢制造刀具，正火和球化退火是保证机械加工性能要求必不可少的工序。

其二，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，抗拉强度可从 196MN/m^2 提高到 $392\sim 490\text{MN/m}^2$ 。共析碳钢经热轧空冷，硬度仅为 HRC25 左右，加工成刀具后再进行淬火和低温回火，硬度可达 HRC62 以上。再如 25SiMn 低合金钢筋，轧制后空冷，抗拉强度为 588MN/m^2 ，若经淬火和低温回火，抗拉强度可达 1372MN/m^2 。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非常重要的地位。

第三节 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。

一、基本热处理

所谓基本热处理，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。

根据淬火时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（即马氏体相变），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。相图上有多型性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 无论合金有无多型性转变，淬火得到的都是过饱和固溶体，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，叫时效或回火。

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）就无所谓时效和回火。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。

二、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除金属内部的有害元素。

三、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时的相变强化相结合，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综合性能。

综上所述，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是多种多样的，而且我国目前并无统一的热处理分类标准，在生产中，有些热处理不一定都按上述类别的名称命名。还须强调，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。

第一节 铸态合金的组织及性质

一、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

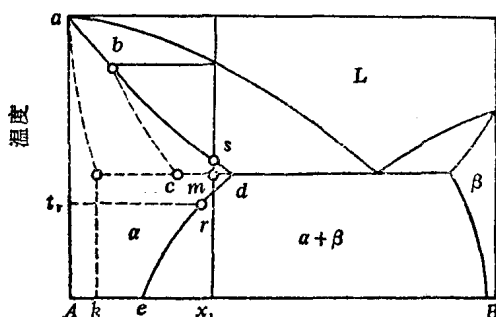


图 2-1 共晶系状态图及非平衡固相线

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 $(\alpha + \delta + Cu_3P)$ 三相共晶〔见图2-2(a)〕。LY12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 、 $MnAl_6$ 等化合物以及由 α 固溶体内析出的二次相。在实际的铸造条件下， α 固溶体呈现树枝状，在枝晶网胞间及晶界上除不溶的少量金属间化合物外，还出现很多非平衡的共晶体〔见图2-2(b)〕。LY12合金的枝晶组织不那么典型，如果用阳极氧化覆膜并在偏光下观察，就可看出每个晶粒的范围

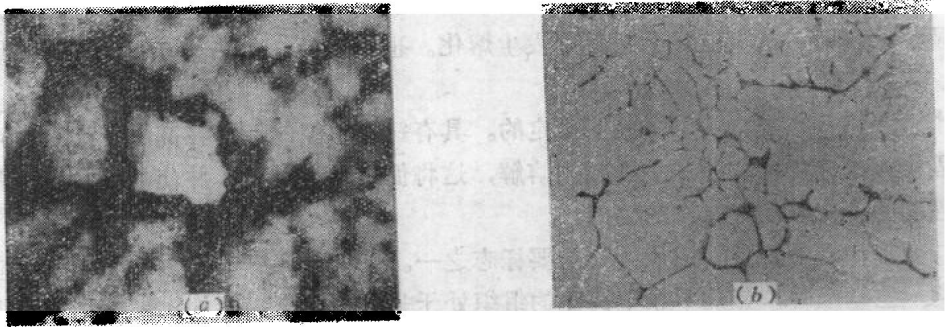


图 2-2 $QSn6.5-0.1$ (a) 及LY12合金半连续铸锭 (b) 的显微组织

及晶粒内的枝晶网胞结构 (图2-3)。

综上所述可知，在通常工业生产的冷却条件下，铸造组织的不平衡特征表现在下列几个方面：

(1) 基体固溶体成分不均匀，晶内偏析，组织上呈现树枝状。

(2) 可溶相在基体中的最大固溶度发生偏移。在某些情况下，平衡状态为单相成分的合金可能出现非平衡的第二相（如 $QSn6.5-0.1$ 组织中的 δ 相），而多相合金过剩相的数量会增多（如LY12中出现的非平衡共晶）。

(3) 高温形成的不均匀固溶体，其浓度高的部分在冷却时来不及充分扩散，因而可

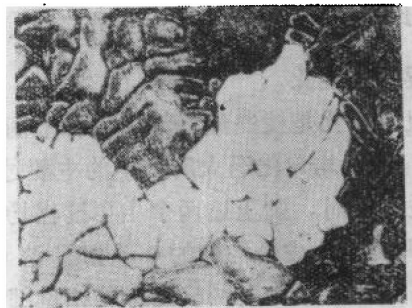


图 2-3 LY12 半连续铸锭组织
电解抛光，阳极覆膜偏振光下拍照

能处于过饱和状态。

以上非平衡结晶状态的组织特征无疑会对铸造状态合金的性能带来很大的影响。

二、铸态合金的性能特征

铸态合金性能的主要特征如下：

(1) 若枝晶偏析使组织中出现非平衡脆性相，则合金塑性降低，特别在枝晶网胞边缘生成连续的粗大脆性化合物网状壳层时，合金的塑性将急剧下降。

(2) 枝晶网胞心部与边部化学成分不同，可形成浓差微电池。因此降低材料的电化腐蚀抗力。固溶体中出现的非平衡过剩相一般也降低耐蚀性。

(3) 铸造坯料（铸锭）进行轧制及挤压时，具有不同化学成分的各显微区域拉长并形成带状组织。这种组织可促使成品工件产生各向异性和增加晶间断裂（如所谓“层状断口”）倾向。

(4) 固相线温度下移，使工艺过程的一些参数难以掌握。例如，在压力加工前的加热及热处理时，局部区域会过早地发生熔化。也就是说，加热稍有不慎，就会发生过烧现象。

(5) 铸态合金的组织是亚稳定的。具有铸态组织的制件在高温工作时，可能逐渐发生固溶体成分均匀化和非平衡相的溶解，这将促进蠕变过程，并使性能发生不断变化，有时性能的变化可超过容许的范围。

变形塑性是衡量铸锭质量的重要标志之一。为保证良好的变形塑性，除了应防止铸锭中的一些缺陷外，显然不希望铸锭的组织处于非平衡状态。此外，考虑到铸造组织对半成品及制品性能的遗传影响，也应采取措施尽可能消除铸锭组织的成分不均匀现象。

对于铸件来说，非平衡的组织状态对其使用条件下的机械性能、耐蚀性能以及性能的稳定性的都是不利的，特别是在高温下工作的零件更需要组织稳定化。

由于产生非平衡状态的原因是结晶过程中扩散受阻，因此这种状态在热力学上是亚稳定的，有自动向平衡状态转化的趋势。铸态合金组织及性能不稳定正是这种自动过程的体现。人们可利用这一趋势，将铸态合金加热到一定温度，提高原子扩散能力，较快地完成由非平衡向平衡状态的转化过程。这种为使铸态合金组织向平衡状态转化的专门热处理称为均匀化退火或扩散退火。

生产中，均匀化退火工序的首要目的在于提高合金铸锭的变形性能，以利于随后的热、冷压力加工过程。对于铸件，均匀化过程一般在固溶处理时同时完成。

第二节 均匀化退火时合金组织及性能的变化

一、均匀化退火时的主要组织变化

均匀化退火时，主要的组织变化是枝晶偏析消除和非平衡相溶解。对于非平衡状态下仍为单相的合金（如Cu-Ni合金），均匀化退火所发生的主要过程为固溶体晶粒内成分均匀化；当合金中含有非平衡过剩相时，则上述两个主要过程均会发生。例如，经均匀化退火后，QSn6.5-0.1合金的组织转变为成分均匀的 α 单相固溶体〔图2-4(a)〕，而LY12合金晶内偏析基本消除，枝晶网胞及晶界上网状化合物相也部分溶解〔图2-4(b)〕。

枝晶偏析消除及非平衡相溶解是相互制约的两个过程。在均匀化过程开始阶段，枝晶网胞与非平衡相的界面处将建立相应于该均匀化温度下的浓度平衡关系。例如图2-1中所

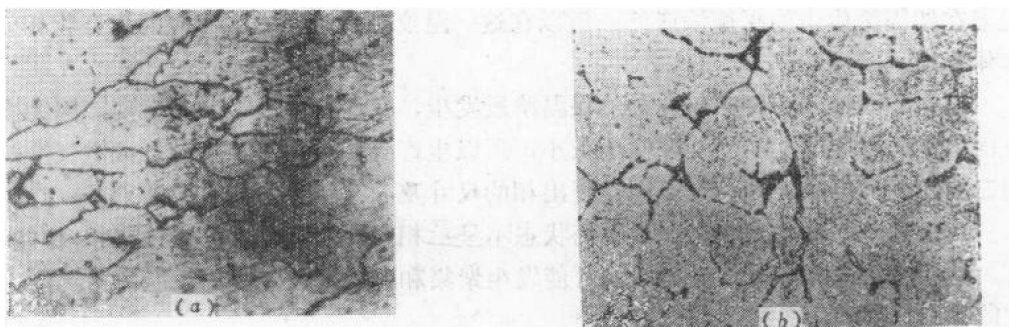


图 2-4 铸锭均匀化退火后的显微组织
(a) QSn6.5-0.1均匀化组织；(b) LY12均匀化组织

示的 x_1 合金，在 t_r 温度下均匀化时，首先 α 固溶体成分发生均匀化过程，使 α 枝晶与 β 界面处 α 固溶体浓度达到低于 r 所表示的浓度值。由于界面处浓度关系破坏， β 相将溶入 α 基体中，因而 α 固溶体枝晶边部浓度又升至平衡浓度。这样的过程不断进行， α/β 界面将逐渐向 β 相的方向移动，而固溶体内部成分逐渐均匀化。若合金在均匀化温度下的平衡状态为单相，则 β 相将完全溶解；若不为单相，则仍将保留一部分过剩相或共晶体。

通常，在非平衡过剩相溶解后，固溶体内成分仍为不均匀的，还需保温一定时间才能使固溶体内成分充分均匀化。实验指出，铝合金的固溶体成分充分均匀化的时间仅稍长于非平衡相完全溶解的时间，故多数情况下可用非平衡相完全溶解的时间来估计均匀化完成的时间，而非平衡相完全溶解的时间可以通过显微镜观察来确定。

应该指出，均匀化退火只能消除或减小晶内偏析，而对区域偏析的影响却极其微弱。因为消除偏析必须通过原子扩散。由扩散定律可知，扩散路程（ δ ）与扩散所需时间（ τ ）之间有如下关系：

$$\tau \approx \delta^2 / 2D \quad (2-1)$$

根据铝合金的计算，扩散距离为枝晶网胞尺寸时，在均匀化温度下原子扩散需数小时；而对于区域偏析所达的距离（假设为几厘米），则需扩散数年之久。显然，这是生产条件所不容许的。此外，消除区域偏析需要晶间相互扩散，这种晶间扩散也因受到晶界夹杂及空隙等的阻碍而难以实现。

二、均匀化退火时的其它组织变化

除上述主要的组织变化外，均匀化退火时还可能发生下列组织变化。

1. 过饱和固溶体的分解 多组元合金中，不同组元所形成的相在固溶体中的固溶度与温度的关系具有不同的变化规律。在通常所选择的均匀化退火温度下，主要的过剩相在固溶体中有很高的固溶度，因此它们将发生溶解。但若在结晶时的快冷条件下，某些元素所形成的相来不及从固溶体中析出而呈过饱和状态，并且在均匀化退火温度下，其固溶度仍然较小时，则这些相在均匀化退火的加热和保温阶段就会从固溶体中析出。例如，大多数铝合金中含有锰，某些合金含有锆及铬。在快速结晶（如半连续铸造）条件下，会形成溶有这些元素的过饱和固溶体。这些元素在共晶（或包晶）温度（Al-Mn系，658.5℃；Al-Zr系，660.5℃；Al-Cr系，661.4℃）以及在均匀化退火温度（500℃）时的固溶度相应为1.4及0.34% Mn，0.28及0.05% Zr，0.72及0.19% Cr。由于均匀化退火温度下这些

元素在铝固溶体中的平衡浓度低，所以在这一温度加热时，它们相应的化合物相就会从固溶体析出。

过饱和固溶体分解不仅在加热保温阶段发生，在冷却阶段也常有发现。因为多数情况下固溶体的平衡浓度随温度降低而减小，所以生产条件下炉料随炉冷却或空气冷却时将伴随二次相的析出。冷却速度不同，析出相的尺寸及分布情况也将有所区别。

2. 聚集与球化 若合金在平衡状态不呈单相，则均匀化退火时过剩相不能完全溶解。这些未溶的相在退火过程中就可能发生聚集和球化，以减小界面能，达到热力学更稳定的状态。

所谓聚集就是过剩相质点粗化过程，其特征是小尺寸质点溶解而大尺寸质点长大。球化是聚集的一种特殊形式，即非等轴的过剩相质点（如片状、针状、树枝状及其它无规则形状）转变为接近于等轴的形状。

3. 晶粒长大 均匀化退火时，基体无多型性转变的合金，一般不会发生晶粒长大现象，但发生多型性转变的合金晶粒可能粗化。例如，合金钢在高温加热时奥氏体晶粒会发生粗化。晶粒粗化的钢锭可在随后的压力加工过程中使晶粒碎化，而为了消除钢铸件奥氏体晶粒粗大化的不良影响，必须在均匀化退火后再进行一次退火或正火处理。

4. 淬火效应 铸态合金经均匀化退火后，过快的冷却可能产生淬火效应。基体无多型性转变的合金（大多数有色合金），淬火效应表现为得到一定过饱和度的固溶体；而对于有多型性转变的合金钢锭，均匀化退火后空冷时可能引起表层淬火，形成一定深度的马氏体层。因为马氏体表层会影响铸锭铣面等机械加工，故在均匀化退火后有时还需进行一次软化回火。

5. 上坡扩散现象 根据扩散理论，扩散的驱动力为化学位梯度 $\partial\mu_i/\partial x$ 。在多组元合金系中，由于固溶体内各组元相互的复杂作用，合金元素的扩散运动也呈现出各种复杂情况。为使化学位梯度减小，有些元素向减小其浓度梯度的方向迁移，而有的元素则向增加其浓度梯度的方向移动。后一种情况即所谓上坡扩散现象。

由溶液理论可知，实际溶液中某组元的活度决定了其化学位，即

$$\mu_i = \mu_i^{\circ} + RT \ln a_i \quad (2-2)$$

式中 μ_i° ——标准状态下*i*组元的化学位；

a_i ——*i*组元的活度。

应用到固溶体中，若在固溶体的相邻各区域中*i*组元活度相同，则此组元原子就不会迁移。

有一个典型实验说明活度梯度所造成的上坡扩散。将两个紧贴在一起的Fe+0.49%C+3.8%Si及Fe+0.57%C+6.45%Mn合金薄片在单相(γ)状态下退火，退火后在距薄片分界面不同距离处测量碳浓度。结果发现，碳并非由浓度高的片向浓度低的片转移，而是含有0.49%C合金中的碳原子移向含有0.57%C的合金片中。硅及锰的扩散能力较碳小得多（小几个数量级），因而在开始阶段只发生碳原子扩散。实验证明，合金中的硅提高了碳在 γ 相中的活度而锰则使其减小，因而含硅合金片中的碳将向含锰合金片中扩散直至碳在试样两侧的活度相同为止。若延长退火时间使硅及锰原子向两试样中相互迁移，则又将造成碳原子自高碳片向低碳片的方向移动。经过相当长时间后，硅、锰、碳浓度在试样的两片将会相同。这就是该实验中发现的先进行上坡扩散，后发生成分均匀化

的过程。

在含有硅等元素的钢中，由于枝晶偏析而造成的固溶体内成分不均匀性，在均匀化退火时也可能观察到与上述相似的情景。含硅高的区域碳的活度高，在均匀化退火的开始阶段，碳将自高硅区向低硅区扩散，使碳在固溶体内各显微区域间的浓度差加大。若硅等元素的均匀化过程未完成，则冷却后高硅低碳区会形成铁素体，而低硅高碳区形成珠光体组织。这样，均匀化退火不仅没有消除组织的显微不均匀性，有时反而会增强这种不均匀性。

由此可见，均匀化退火时的上坡扩散是应该引起重视的。

三、均匀化退火对铸锭工艺性能的影响

铸锭经均匀化退火后，由于发生了非平衡相的溶解及过剩相的聚集、球化等组织变化，使室温下塑性提高并使冷、热变形的工艺性能大为改善。表2-1数据表明，均匀化退火后LC4合金的变形抗力(σ_b)降低，而塑性(δ)大大增加。由此可降低铸锭热轧开裂的危险，改善热轧带板的边缘质量，提高挤压制品的挤压速度。同时，由于降低了变形抗力，还可减少变形功消耗，提高设备生产效率。

表 2-1 LC4合金铸锭均匀化退火前后的机械性能

铸锭直径 mm	取样方向	取样部位	机 械 性 能					
			未经均匀化		445℃均匀化		480℃均匀化	
			σ_b (MN/m ²)	δ (%)	σ_b (MN/m ²)	δ (%)	σ_b (MN/m ²)	δ (%)
200	纵 向	表层	240	0.6	191	4.1	196	6.7
		中心	274	1.8	197	4.9	219.5	7.1
	横 向	中心	265.5	0.6	216.6	4.4	218.5	7.9
315	纵 向	表层	219.5	0.7	202	4.2	201	6.0
		中心	197	1.0	192	3.8	196	5.6
	横 向	中心	218.5	0.4	205	4.2	222	6.4

除上述作用外，半连续铸锭的特点之一是存在较大的残余内应力，影响铸锭的锯切、铣面等机械加工的顺利进行（因可能发生翘曲等弊端）。如果残余应力过大，还可能造成铸锭爆裂，危及操作人员及设备的安全。均匀化退火可消除铸锭内的残余应力，改善铸锭的机械加工性能。因此，对于残余应力较大且需进行均匀化退火的合金铸锭（例如热处理强化铝合金半连续铸锭），分段、铣削等机械加工应在均匀化退火后进行。

四、均匀化退火对半成品及制品性能的影响

成型铸件经均匀化退火，可改善综合机械性能（提高塑性指标），提高耐蚀性，稳定零件的尺寸和形状，防止使用过程中产生蠕变及机械性能的逐渐变化。

对变形合金来说，铸锭的组织状态不仅直接关系到铸锭的变形性能，而且对后续的加工工序以及制品的最终性质都会带来影响。也就是说，铸锭组织的影响会遗传下来，有时这种遗传性是非常稳定的。这是因为铸锭热变形时虽使组织破碎及“搅乱”，但不能完全消除成分的显微不均匀性。因此，未经均匀化退火的铸锭，非平衡结晶状态的影响会一直延续到制成品的性质上。