

高等教育“十二五”规划教材

工程材料与成形工艺基础

徐晓峰 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高等教育“十二五”规划教材

工程材料与成形工艺基础

主 编	徐晓峰	
副主编	张万红	贾利晓
参 编	成国煌	张赛珍
	于 华	杨正海
主 审	刘舜尧	陈拂晓



机械工业出版社

本书为适应 21 世纪培养高级工程技术人才的需要,根据“宽口径、厚基础、重实践、广适应”的培养模式,遵循教育部工程材料与机械制造基础系列课程指导组对教学内容基本要求的精神,在总结多年来教学探索和实践经验的基础上编写而成。

本书内容包括工程材料、材料成形与机械加工工艺。工程材料部分除介绍金属材料的组织结构、性能、相图和热处理工艺外,还增加了金属材料的改性处理和强化处理方法,并介绍了非金属材料 and 复合材料;材料成形工艺部分介绍了零件毛坯的液态成形、塑性成形和焊接成形方法,还增加了非金属材料 and 复合材料的成形方法、材料成形新工艺、毛坯成形方法选择及质量控制的内容;机械加工工艺部分介绍了切削加工工艺的基础知识、零件表面加工方法的选择、机械加工零件结构工艺性与现代先进机械加工新技术等内容。

本书可作为高等工科院校本科机械类及近机类专业的教材,也可作为高等职业技术学校、高等专科学校相关专业的教材,还可供从事相关工程领域工作的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程材料与成形工艺基础/徐晓峰主编. —北京:机械工业出版社, 2010.5

高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-29833-5

I. ①工… I. ①徐… ①工程材料-成形-工艺-高等学校-教材
IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 029809 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:刘小慧 责任编辑:章承林

版式设计:霍永明 责任校对:张晓蓉

封面设计:王伟光 责任印制:杨 曦

北京京丰印刷厂印刷

2010 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·20 印张·335 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-29833-5

定价:34.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书根据“宽口径、厚基础、重实践、广适应”的培养模式，为适应 21 世纪培养高级工程技术人才的需要而编写。在内容选择上本着实用、精炼的原则，以介绍机械制造过程中的材料选用、毛坯生产、机械加工的基本理论和方法为主，既包括传统的加工方法，又吸收了生产实践中广泛应用的新技术、新工艺，以体现机械制造的发展方向，同时保证教材内容的科学性、继承性和相对稳定性。

本书共有 12 章，包括工程材料、金属的液态成形、金属的塑性成形、材料的焊接成形、非金属材料 and 复合材料的成形、现代成形技术及发展趋势、毛坯成形方法选择及质量控制、切削加工的基础知识、零件表面的加工方法、机械零件的结构工艺性、机械加工工艺过程和现代制造技术及发展趋势。在编写时，以工艺方法为主线，深入浅出地讲述了相关工艺知识，使学生不仅知其然，也能初步知其所以然，为后继课程的学习建立必要的工程概念和工程意识。

本书可作为高等学校工科院校本科机械类和近机类专业的教材，也可作为高等职业技术学校、高等专科学校相关专业的教材。使用本书时，可根据专业具体情况调整授课内容。本书还可供从事相关工程领域工作的技术人员参考。

本书由河南科技大学徐晓峰任主编，张万红、贾利晓任副主编。参加编写的有：河南科技大学徐晓峰（第 2 章，第 6 章 6.1、6.2 节，第 7 章）、成国煌（第 8 章，第 11 章）；洛阳理工学院贾利晓（第 1 章 1.1~1.5 节）；河南科技大学杨正海（第 1 章 1.6 节，第 5 章，第 12 章）、张万红（第 3 章，第 6 章 6.3、6.4 节）、于华（第 4 章，第 6 章 6.5、6.6 节）；洛阳理工学院张赛珍（第 9 章，第 10 章）。

本书由刘舜尧教授、陈拂晓教授审阅，在此表示衷心的感谢。在编写本书的过程中，参阅了部分国内外相关教材、科技著作及论文，在此一并向参考文献的作者表示感谢。

本书得到河南科技大学教材出版基金的资助，在此表示感谢。

本书编写力求适应高等教育改革与发展的需要，但由于编者学识所限，书中错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
第 1 章 工程材料	1
1.1 材料的种类与主要性能	1
1.2 金属材料的结构与结晶	6
1.3 铁碳合金	12
1.4 金属热处理	17
1.5 常用金属材料	29
1.6 非金属材料 and 复合材料	38
复习思考题	50
第 2 章 金属的液态成形	52
2.1 金属液态成形工艺原理	52
2.2 常用铸造合金	61
2.3 砂型铸造	72
2.4 特种铸造	82
2.5 铸件结构设计	90
复习思考题	97
第 3 章 金属的塑性成形	101
3.1 金属塑性成形工艺原理	102
3.2 金属塑性成形工艺方法	109
3.3 锻件与冲压件的结构设计	129
3.4 其他塑性成形工艺方法	132
复习思考题	135
第 4 章 材料的焊接成形	138
4.1 金属焊接成形工艺原理	138
4.2 常用焊接成形方法	148
4.3 常用金属材料的焊接	157
4.4 焊接成形金属件的工艺设计	162
复习思考题	169
第 5 章 非金属材料和复合材料的成形 ..	171
5.1 高分子材料的成形	171
5.2 陶瓷件的成形	175
5.3 复合材料的成形	178
复习思考题	182
第 6 章 现代成形技术及发展趋势	183
6.1 快速成形技术的类型及应用	183
6.2 半固态成形技术	185
6.3 精密成形和超塑性成形技术	190
6.4 高能率成形	192
6.5 焊接新技术	194
6.6 现代成形技术发展趋势	197
复习思考题	198
第 7 章 毛坯成形方法选择及质量控制 ..	199
7.1 毛坯成形方法选择	199
7.2 毛坯成形质量与质量控制	206
复习思考题	211
第 8 章 切削加工的基础知识	213
8.1 切削加工的分类	213
8.2 切削运动与切削要素	213
8.3 切削加工刀具	215
8.4 切削加工过程	222
8.5 材料的可加工性	228
8.6 加工质量与生产率	229
8.7 金属切削机床的基础知识	232
复习思考题	240
第 9 章 零件表面的加工方法	243
9.1 切削加工方法	243
9.2 零件表面加工方法的选择	260
复习思考题	270
第 10 章 机械零件的结构工艺性	271
10.1 零件结构设计的基本原则	271
10.2 切削加工对零件结构工艺性的要求 ..	271
复习思考题	276
第 11 章 机械加工工艺过程	278
11.1 机械加工工艺过程的基本概念	278
11.2 工件的安装与夹具的基本知识	281
11.3 机械加工工艺规程的制订	285
11.4 典型零件工艺过程分析	293
复习思考题	299
第 12 章 现代制造技术及发展趋势	301
12.1 超精密加工	301
12.2 纳米加工技术	303
12.3 超高速切削	306
12.4 柔性制造系统	306
12.5 虚拟制造技术	308
12.6 计算机辅助设计和计算机辅助制造 技术	309
复习思考题	311
参考文献	312
读者信息反馈表	313

第1章 工程材料

1.1 材料的种类与主要性能

1.1.1 材料的种类

材料是人类社会活动的物质基础，是人类赖以生存和发展的重要条件。材料科学与技术是衡量一个国家经济实力与技术水平的重要标志，因此世界各国都把对材料的研究开发放在突出的地位。

人们通常所说的材料是指可供人类使用的各种材料，即能够用于制造工程结构、零件或其他产品的物质。人类使用的材料种类繁多，性能各异，本节仅介绍常用的工程材料。常见的工程材料分类如下：

1. 按照组成分类

(1) 金属材料 金属材料可分为黑色金属和有色金属。黑色金属是指工业中广泛使用的钢铁材料；有色金属材料是指除钢、铁以外的金属材料，主要包括铝及铝合金、铜及铜合金、钛及钛合金等。

(2) 无机非金属材料 无机非金属材料包括水泥、玻璃、耐火材料和陶瓷等。它们的主要原料是硅酸盐矿物，又称硅酸盐材料。现代工业中的无机非金属材料是以某些元素的氧化物、碳化物、氮化物、卤素化合物、硼化物以及硅酸盐、铝酸盐、磷酸盐、硼酸盐等物质组成的材料，是除有机高分子材料和金属材料以外的所有材料的统称。

(3) 高分子材料 高分子材料按材料来源可分为天然高分子材料和人工合成高分子材料，按性能及用途可分为塑料、橡胶、纤维、胶粘剂和涂料。

(4) 复合材料 复合材料由基体材料和增强材料复合而成。基体材料有金属、塑料和陶瓷等，增强材料有各种纤维和无机化合物颗粒等。复合材料既保留了组成材料的各自优点，又具有单一材料所不具备的优异性能，其力学性能随基体材料与增强材料的种类、组成比例以及复合工艺而不同，可以根据用途和力学性能要求进行复合材料设计。

2. 按照性能特点分类

(1) 结构材料 结构材料是以强度、刚度、塑性、韧性、硬度、疲劳强度等力学性能为性能指标，用来制造承受载荷、传递动力的零件和构件的材料。结构材料可以是金属材料、无机非金属材料、高分子材料或复合材料。

(2) 功能材料 功能材料是以声、光、电、磁、热等物理性能为性能指标，用来制造具有特殊性能元件的材料。功能材料有很多，如超导材料、储氢材料、光学材料、激光材料等。

1.1.2 材料的性能

材料的性能直接关系到产品的质量、使用寿命和加工成本，是产品选材和拟定加工工艺方案的重要依据。材料的性能包括使用性能和工艺性能。使用性能是指材料在使用过程中所表现出来的特性，包括力学性能（强度、硬度、塑韧性等）、物理性能（导电性、导热性等）和化学性能（耐蚀性、抗氧化性等）。工艺性能是指材料在各种加工过程中所表现出来的性能，包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、热处理性能和切削加工性能等。本节只介绍材料的使用性能，材料的工艺性能将在后面的有关章节中进行讨论。

1. 静载荷下材料的力学性能

静载荷是指缓慢加载。在材料试验中，最常用的静载试验有拉伸、压缩、弯曲、扭转等，利用这些不同的试验，可测得材料的各种力学性能指标。本节仅介绍工程领域中应用广泛的几个静载荷下的力学性能指标。

(1) 强度 强度是指材料在外力作用下抵抗变形和断裂的能力。材料的强度指标通过拉伸试验测定。图 1-1a 所示为退火低碳钢的拉伸试样。试验时，将试样装夹在万能材料试验机上，缓慢加载拉伸。随着载荷的增加，试样逐渐伸长，直至试样被拉断。载荷 (F) 与相应的试样伸长量 (Δl) 可由试验机或人工绘成拉伸曲线。根据应力（单位面积上的内力）、应变（单位长度上的变形量）与载荷、伸长量之间的关系，可得到相应的应力-应变曲线（图 1-1b）。从应力-应变曲线上可读出材料的几个强度指标。

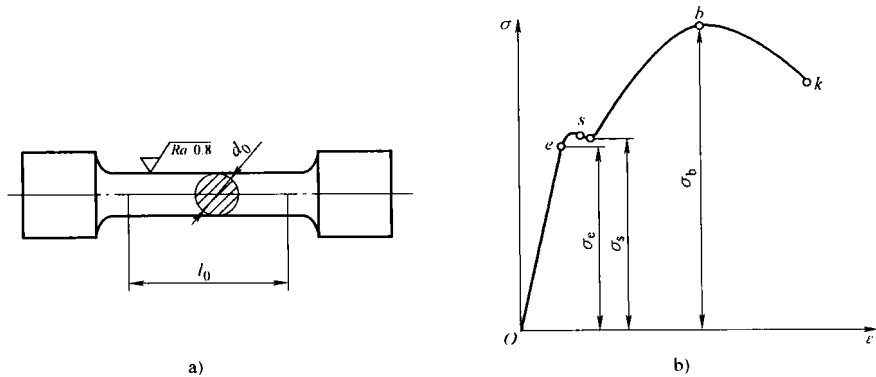


图 1-1 退火低碳钢的拉伸试样示意图及应力-应变曲线

a) 拉伸试样示意图 b) 应力-应变曲线

1) 弹性极限 σ_e 与弹性模量 E 。在应力-应变曲线上， σ_e 是弹性变形阶段的最大应力 (MPa)，称为弹性极限。当应力小于 σ_e 时，材料所产生的变形在应力去除后可以自行恢复，称为弹性变形。弹性极限的值可表示为

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S_0}$$

式中 F_e ——弹性变形阶段的最大载荷 (N)；

S_0 ——试样的原始横截面积 (mm^2)。

材料在弹性变形范围内的应力与应变的比值 (σ/ϵ) 称为弹性模量，用 E 表示。弹性模量 E 表征材料产生弹性变形的难易程度，在工程上称为材料的刚度。其大小主要取决于材

料内部原子间的作用力，而各种材料强化手段对其影响较小。

2) 屈服强度 σ_s 。屈服强度 σ_s 是指在拉伸过程中，材料产生屈服现象时的应力。或者说是在拉伸过程中，材料产生明显塑性变形时的最小应力。其值为

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0}$$

式中 F_s ——材料产生屈服现象时的最小载荷 (N)。

对于没有明显屈服现象的金属材料 (如铸铁、高碳钢等)，通常以产生 0.2% 塑性变形所对应的应力作为屈服强度，称为条件屈服强度，用 $\sigma_{0.2}$ 表示。

3) 抗拉强度 σ_b 。抗拉强度 σ_b 是指材料在拉断前所能承受的最大应力，表征材料抵抗断裂的能力。其值为

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0}$$

式中 F_b ——试样拉断前所承受的最大载荷 (N)。

屈服强度和抗拉强度都是机械零件设计和选材的重要依据。机械零件在工作时，一般不允许产生明显的塑性变形。

(2) 塑性 塑性是指材料在载荷作用下产生塑性变形而不断裂的能力。常用的塑性指标有断后伸长率 δ 和断面收缩率 ψ ，它们也是通过拉伸试验测得的。

1) 断后伸长率 δ 。断后伸长率是指试样被拉断后的伸长量 Δl 与原始长度 l_0 之比，即

$$\delta = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100\% = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中 l_k ——试样断裂后的标距长度 (mm)；

l_0 ——试样的原始标距长度 (mm)。

2) 断面收缩率 ψ 。断面收缩率 ψ 是指试样拉断后，拉断处横截面积的缩减量与原始横截面积之比，即

$$\psi = \frac{\Delta S}{S_0} \times 100\% = \frac{S_0 - S_k}{S_0} \times 100\%$$

式中 S_0 ——原始横截面积 (mm^2)；

S_k ——拉断处的最小横截面积 (mm^2)。

显然， δ 、 ψ 越大，表明材料断裂前产生的塑性变形量越大，即塑性越好。

(3) 硬度 硬度是指材料抵抗局部变形，特别是抵抗塑性变形、压痕或划痕的能力。材料的硬度是材料塑性与弹性的综合反映，是衡量材料软硬程度的指标。在材料制成的半成品和成品的质量检验中，硬度是标志产品质量的重要依据。常用的硬度指标有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等。

1) 布氏硬度。布氏硬度的测定方法是用一定的载荷 F 将硬质合金球压入被测材料表面，保持一定时间后卸除载荷，测量材料表面留下的压痕直径 d ，并由此计算出压痕的球缺面积，此球缺单位面积上所承受的载荷即为布氏硬度值。布氏硬度值的计算公式为

$$\text{HBW} = \frac{F}{S} = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

式中 F ——试验载荷 (N)；

S ——压痕表面积 (mm^2)；

D ——压头直径 (mm);

d ——压痕直径 (mm)。

布氏硬度试验的优点是压痕面积较大,能较好地反映材料的平均硬度;数据较稳定,重复性好。但测试麻烦,压痕较大,不适于薄壁试样的检验。

2) 洛氏硬度。洛氏硬度是将一个标准压头压入试样表面,通过测量压痕深度来确定材料的硬度。常用的压头有两种:顶角为 120° 的金刚石圆锥体压头和直径为 1.5875mm 的淬火钢球压头。洛氏硬度有 HRA、HRB、HRC 等多种表示方法,其中 HRC 最常用,大量用于淬火及回火钢件的硬度测试。其数值可以直接从硬度试验机的表盘上读出。

洛氏硬度试验的优点是压痕较小,可用于成品零件的质量检验,并且测试效率较高。但由于压痕较小,对组织较粗大且不均匀的材料,如灰铸铁、滑动轴承合金等测得的硬度值不够准确。

3) 维氏硬度。维氏硬度是将正四棱锥体形状的金钢石压头压入试样表面,测量压痕对角线长度,根据所加的载荷和对角线平均长度查表后得到材料的硬度值,用 HV 表示。

维氏硬度测量精确,硬度测量范围大,可很好地测量薄试样的硬度。维氏硬度所加载荷较小时又称为显微硬度,用 HM 表示,可用于测量试样表面各种组成相的硬度。

2. 动载荷下材料的力学性能

(1) 冲击韧度 冲击韧度是指在冲击载荷较大时,材料抵抗变形、断裂破坏的能力,其大小一般用一次摆锤冲击试验时试样缺口吸收的冲击吸收功来表示。

摆锤冲击试验的原理如图 1-2 所示。试验时,将加工好的带缺口标准试样放置在试验机的支座上,然后将质量为 m 的摆锤抬升到一定高度 H_1 ,使其获得位能 mgH_1 ;释放摆锤,冲断试样,摆锤继续上升到高度 H_2 。若忽略摩擦和空气阻力等,则冲断试样所消耗的能量,即冲击功为 $A_K = mg(H_1 - H_2) = G(H_1 - H_2)$,单位为 J。一般来说,对强度相近的材料,冲击功数值越大,则材料抵抗大能量冲击破坏的能力越好,即冲击

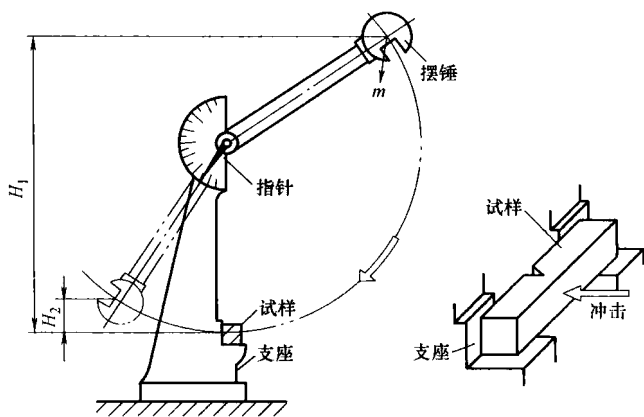


图 1-2 摆锤冲击试验原理

韧度越好,在受到冲击时不易断裂。但是,在冲击载荷作用下工作的零件,很少是受大能量一次冲击而破坏的,往往是经受小能量多次冲击,由于冲击损伤的积累引起裂纹扩展而造成断裂。 A_K 值对材料内部组织缺陷十分敏感。

(2) 疲劳强度 许多机械零件,例如轴、齿轮、轴承、弹簧等,在工作中承受的是交变载荷。在这种载荷作用下,虽然零件所受应力远低于材料的屈服强度,但在长期使用中往往会突然发生断裂,这种破坏过程称为疲劳断裂。

材料经无数次重复交变载荷作用下而不发生断裂的最大应力称为疲劳强度,用 σ_1 表示。实际上,工程上采用钢在经受 10^7 次、有色金属在经受 10^8 次交变应力作用下,不发生破坏时的应力作为材料的疲劳强度。它表征了材料抵抗疲劳的能力。

材料的疲劳强度与其化学成分、内部组织及缺陷、表面划痕及零件截面突然改变等有

关。设计零件时，为了提高零件的疲劳强度，应改善结构设计避免应力集中；提高加工工艺以减少内部组织缺陷；还可以通过降低零件表面粗糙度值和表面强化（如表面淬火、喷丸处理等）的方法提高表面加工质量。

(3) 断裂韧度 断裂韧度是表示材料抵抗裂纹失稳扩展能力的力学性能指标，用 K_{IC} 表示，单位为 $MN/m^{3/2}$ 。

在材料中存在着各种各样的缺陷，如气孔、夹杂物和微裂纹等，这些缺陷在材料受力时相当于裂纹，在其前端产生应力集中，形成应力场，该应力场的强弱用 K_I 表示，称为应力场强度因子。在载荷作用下， K_I 不断增大，当其增大到某一临界值 K_{IC} 时，材料会发生脆性断裂。这个临界值 K_{IC} 就称为材料的断裂韧度。断裂韧度与材料本身的成分、组织和结构有关。

3. 材料的物理、化学性能

(1) 材料的物理性能

1) 密度。单位体积某种物质的质量称为该物质的密度，用 ρ 来表示。对于金属材料，按照密度的大小可分为轻金属和重金属。一般，密度小于 $5g/cm^3$ 的金属称为轻金属，如铝、镁、钛及其合金；而密度大于 $5g/cm^3$ 的金属则称为重金属，如铁、铅、钨等。非金属材料的密度相对较小，例如，陶瓷的密度为 $2.2\sim 2.5g/cm^3$ ，各种塑料的密度更小，一般都在 $1.0\sim 1.5g/cm^3$ 之间。

实际生产中，一些零部件的选材必须考虑材料的密度，如汽车发动机中要求采用质量轻、运动时惯性小的活塞，多采用低密度的铝合金制成。在航空领域中，密度更是选用材料的关键性能之一。

2) 熔点。熔点是指材料的熔化温度，它是制订冶炼、铸造、锻造和焊接等热加工工艺规范的一个重要参数。

3) 导热性。材料传导热量的性能称为导热性，用热导率 λ 表示。导热性好的材料（如铜、铝及其合金）常用来制造换热器等传热设备的零部件。导热性差的材料（陶瓷、木材、塑料等）可用来制造绝热零件。

在制订铸造、焊接、锻造和热处理等热加工工艺时，必须考虑材料的导热性，防止材料在加热和冷却过程中形成过大的内应力而造成变形与开裂。

4) 导电性。材料传导电流的能力称为导电性。常用其电导率 ω 来表示，但用其倒数（电阻率 k ）更方便。金属的电阻率常随温度的升高而增加，而非金属的电阻率随温度的升高而降低。

5) 热膨胀性。材料随着温度变化而膨胀、收缩的特性称为热膨胀性。一般来说，材料受热时膨胀而使体积增大，冷却时收缩而使体积减小。热膨胀性的大小用线胀系数 α_l 和体胀系数 α_v 来表示。

6) 磁性。通常把材料被磁场吸引或磁化的性能叫做磁性，用磁导率 μ 来表示材料磁性的大小。具备显著磁性的材料称为磁性材料，可分为铁磁性材料、顺磁性材料和抗磁性材料。磁性只存在于一定的温度范围内，当温度升高到一定值时，磁性就会消失，这个温度称为居里点，如铁的居里点为 $770^\circ C$ 。

(2) 材料的化学性能 材料的化学性能主要是指材料在室温或高温时抵抗各种介质化学侵蚀的能力，主要包括耐蚀性、抗氧化性和化学稳定性等。

1) 耐蚀性。耐蚀性是指材料在常温下抵抗周围各种介质腐蚀的能力。金属材料在腐蚀性介质中常常会发生化学腐蚀或电化学腐蚀，因此，对金属制品的腐蚀防护十分重要。在金

金属材料中，碳钢、铸铁的耐蚀性较差；钛及其合金、不锈钢的耐蚀性较好；铝和铜也有较好的耐蚀性。非金属材料，如陶瓷材料和塑料等都具有优良的耐蚀性。

2) 抗氧化性。材料在加热时抵抗氧化作用的能力称为抗氧化性。金属及合金抗氧化的机理是材料在高温下迅速氧化后，能在表面形成一层连续而致密并与母体结合牢固的膜阻止进一步氧化。在钢中加入 Cr、Ni、Si 等元素，可大大提高钢的抗氧化性。在高温下工作的发动机气门、内燃机排气阀等零部件，就是采用抗氧化性好的 42Cr9Si2 等材料来制造的。

3) 化学稳定性。化学稳定性是材料耐蚀性和抗氧化性的总称。高温下的化学稳定性又称热稳定性。在高温条件下工作的设备（如锅炉、汽轮机、火箭等）上的零部件需要选择热稳定好的材料来制造。

1.2 金属材料的结构与结晶

1.2.1 金属的晶体结构

1. 金属的理想晶体结构

(1) 晶体结构的基本概念

1) 晶体与非晶体。自然界中的一切固态物质，按其内部粒子的排列情况可分为晶体和非晶体两大类。凡内部粒子呈规则排列的固态物质称为晶体，如食盐、雪花、固态金属等都是晶体。凡内部粒子呈无规则堆积的固态物质，称为非晶体，如普通玻璃、松香等都是非晶体。晶体具有固定的熔点，而非晶液体态与固态之间的转变是一个逐渐过渡的过程；晶体具有各向异性的特征，而非晶体则是各向同性的。

2) 晶格与晶胞。在晶体中，原子按一定的规律在空间有规则地堆垛在一起，如图 1-3a 所示。为了便于分析晶体中原子排列的规律，通常以通过各原子中心的假想直线把它们在三维空间里的几何排列形式描绘出来，形成如图 1-3b 所示的三维空间格架，这种表示晶体中原子排列形式的空间格架叫做晶格，晶格的结点代表原子中心的位置。由于晶体中原子排列具有规律性，我们就可以从晶格中取出一个能完全代表晶格结构特征的最基本的几何单元，这种基本单元叫做晶胞。晶胞的大小和形状常以晶胞的棱边长度 a 、 b 、 c 及棱边夹角 α 、 β 、 γ 来表示，如图 1-3c 所示。

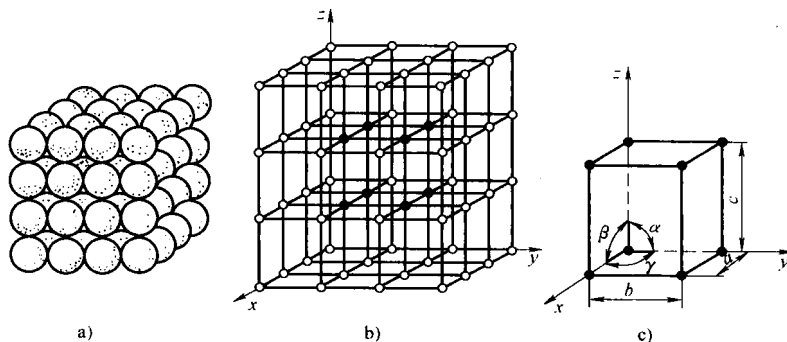


图 1-3 晶体中原子排列示意图

a) 原子堆垛模型 b) 晶格 c) 晶胞

(2) 三种常见的典型晶体结构 工业上使用的金属元素中，除少数具有复杂的晶体结构外，绝大多数都具有比较简单的晶体结构，其中最常见金属晶体结构有体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格三种类型，如图 1-4 所示。

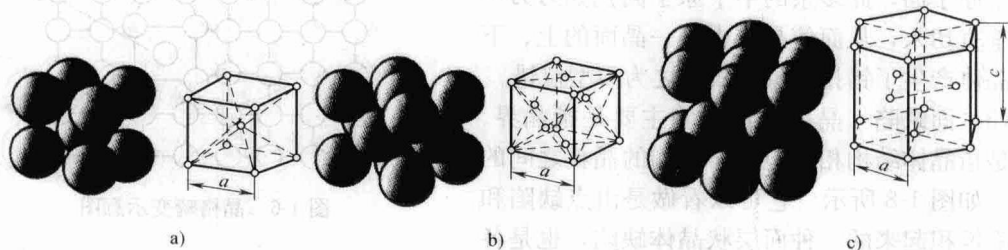


图 1-4 三种典型晶体结构示意图

a) 体心立方晶胞 b) 面心立方晶胞 c) 密排六方晶胞

1) 体心立方晶格。体心立方晶格的晶胞模型如图 1-4a 所示。晶胞的三个棱边长度相等，三个棱间夹角均为 90° ，构成立方体。除了在晶胞的八个顶角上各有一个原子外，在立方体的中心还有一个原子。具有体心立方结构的金属有 α -Fe、Cr、V、Nb、Mo、W 等 30 多种金属。

2) 面心立方晶格。面心立方晶格的晶胞如图 1-4b 所示。在晶胞的八个顶角上各有一个原子，构成立方体，在立方体六个面的中心各有一个原子。 γ -Fe、Cu、Ni、Al、Ag 等约 20 种金属具有这种晶体结构。

3) 密排六方晶格。密排六方晶格的晶胞如图 1-4c 所示。在晶胞的 12 个顶角上各有一个原子，构成六方柱体，上底面和下底面的中心各有一个原子，晶胞内还有三个原子。具有密排六方晶格的金属有 Zn、Mg、Be、 α -Ti、 α -Co、Cd 等。

2. 金属的实际晶体结构

研究发现，实际金属的结构与理想晶体的结构存在一定的差异，在实际金属中总是不可避免地存在着一些原子偏离规则排列的不完整区域，通常把这些不完整区域称为晶体缺陷。根据几何形态特征，可以将晶体缺陷分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三种类型。

(1) 点缺陷 点缺陷的特征是三个方向上的尺寸都很小，相当于原子的尺寸。常见的点缺陷有空位、间隙原子和置换原子三种，如图 1-5 所示。

空位是指未被原子占据的晶格结点；间隙原子是指处于晶格间隙中的原子；置换原子是指占据在原来基体原子平衡位置上的异类原子。它们的形成主要是由于在结晶过程中原子堆积不完善、外来原子溶入或已形成的晶体在高温、冷变形加工、高能粒子轰击、氧化等作用形成的。

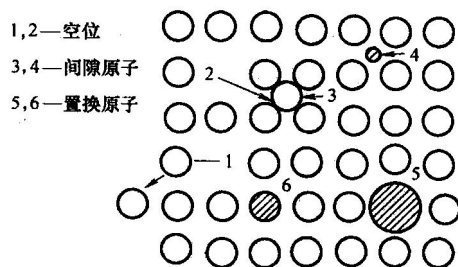


图 1-5 晶体中的各种点缺陷

点缺陷的存在使原子之间的作用力失去平衡，其周围的原子发生靠拢或撑开，使晶体结构的规律性遭到破坏，晶格发生歪扭，称为晶格畸变，如图 1-6 所示。

(2) 线缺陷 晶体中的线缺陷就是各种类型的位错，它是在晶体中某处有一列或若干列原子发生了有规律的错排现象，使长度达几百至几万个原子间距、宽约几个原子间距范围内

的原子离开其平衡位置，发生了有规律的错动。图1-7为刃型位错原子排列的示意图，这种位错可以描述为在一个完整晶体的某个晶面上，多出了半个原子面，此多余的半个原子面犹如刀刃一般地垂直切入，从而使晶体中某一晶面的上、下部分晶体产生了错排现象，故称之为刃型位错。

(3) 面缺陷 晶体的面缺陷主要是指晶界。晶界是指晶体结构相同但位向不同的晶粒之间的界面，如图1-8所示。它可以看做是由点缺陷和线缺陷堆积起来的一种面层状晶体缺陷，也是各种杂质原子聚集的场所。

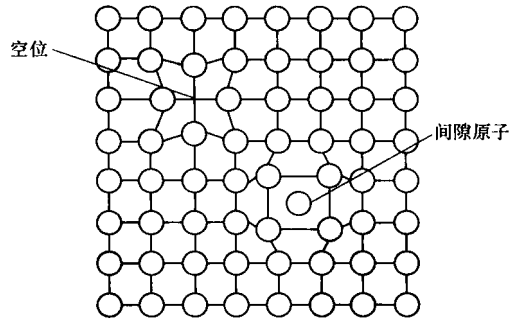


图 1-6 晶格畸变示意图

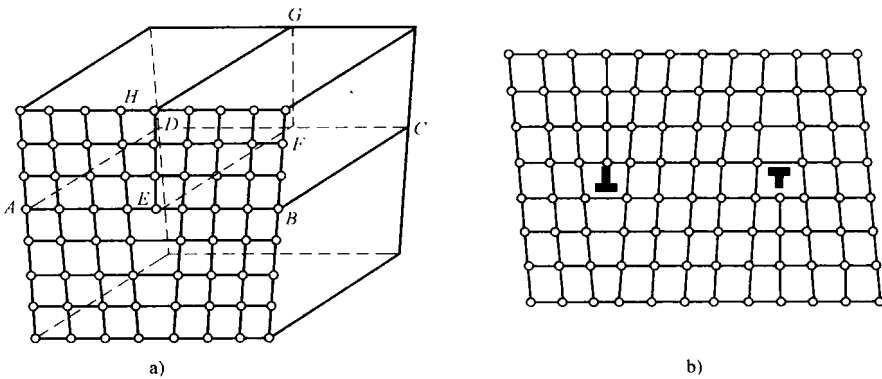


图 1-7 刃型位错原子排列示意图

a) 立体图 b) 垂直于位错线的原子平面

晶体缺陷的存在破坏了晶体的完整性，使晶格产生畸变，晶格能量增加，因而晶体缺陷相对于完整的晶体来说处于一种不稳定状态，它们在外界条件（温度、外力等）变化时会发生原子的扩散与迁移，从而引起金属的某些性能发生变化。

3. 合金的结构

合金是指两种或两种以上的金属元素，或金属元素与非金属元素，经熔炼或烧结，或用其他方法组合而成的具有金属特性的物质。例如，工业上广泛应用的碳钢和铸铁是铁碳合金，黄铜是铜锌合金等。组成合金最基本的能够独立存在的物质称为组元。一般来说，组元就是组成合金的元素，但也可以是稳定的化合物。根据组成合金组元数目的多少，合金可分为二元合金、三元合金和多元合金等。由相同组元组成的不同成分的一系列合金称为合金系。

合金中化学成分相同、晶体结构相同并与其他部分有界面分开的均匀组成部分称为相。用肉眼或借助于显微镜所观察到的内部组成相的数量、形态、大小、分布及各相之间的结合状态特征称为组织。相是组成组织的基本组成部分，仅由一个相组成的组织为单相组织，而由多个相组成的组织为多相组织。根据晶体结构特点，可以将合金中的相分为固溶体和金属

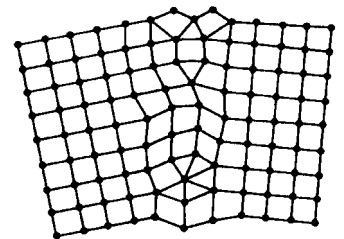


图 1-8 晶界示意图

化合物两大类。

(1) 固溶体 固溶体是指溶质组元溶入溶剂晶格中而形成的单一均匀的固体。固溶体的晶格类型与溶剂组元的晶体结构相同。

根据溶质原子在溶剂晶格中的位置不同,可以将固溶体分为置换固溶体和间隙固溶体。置换固溶体是指溶质原子位于溶剂晶格的某些结点位置而形成的固溶体,如图 1-9a 所示。间隙固溶体是指溶质原子填入溶剂晶格的间隙中形成的固溶体,如图 1-9b 所示。固溶体还可以根据溶质原子在溶剂晶格中的分布有无规律性,分为有序固溶体和无序固溶体;也可以根据溶质原子在固溶体中的溶解度不同,分为有限固溶体和无限固溶体。

固溶体中溶质原子的溶入必然导致溶剂晶格的畸变,使金属或合金的强度和硬度提高,塑性和韧性下降。这种通过溶入溶质原子形成固溶体而使金属强度、硬度提高的现象称为固溶强化。固溶强化是金属材料特别是有色金属材料的主要强化手段之一。

(2) 金属化合物 在合金系中,组元间发生相互作用,除了形成固溶体外,还可能形成一种晶体结构与两个组元都不相同、具有金属性质的新相,即金属化合物。它的晶格类型与组成它的两组元完全不同,性能差别也很大,金属化合物一般具有高熔点、高硬度和高脆性。表 1-1 给出了钢中常见碳化物的熔点和硬度。合金中出现金属化合物时,通常会使合金的强度、硬度和耐磨性提高,但也会使其塑性和韧性降低,因此,绝大多数的工程材料都将金属化合物作为重要的强化相。

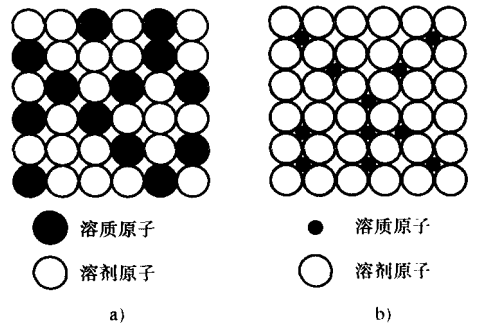


图 1-9 固溶体的两种类型

a) 置换固溶体 b) 间隙固溶体

表 1-1 钢中常见碳化物的熔点和硬度

类 型	间 隙 相								间隙化合物	
	NbC	W ₂ C	WC	Mo ₂ C	TaC	TiC	ZrC	VC	Cr ₂₃ C ₆	Fe ₃ C
熔点/°C	3770±125	3130	2867	2960±50	4150±140	3410	3805	3023	1577	1227
硬度 HV	2050	—	1730	1480	1550	2850	2840	2010	1650	~800

1.2.2 金属的结晶与同素异晶转变

1. 金属的结晶

(1) 纯金属的结晶 物质从液态到固态的转变过程称为凝固,如果所凝固成的固体是晶体,则此凝固过程又称为结晶。金属由液态到固态的转变过程就是结晶过程。

1) 结晶的过冷现象。图 1-10 是纯金属结晶时的冷却曲线示意图,由图可知:金属在结晶之前,温度连续下降,当液态金属冷却到理论结晶温度 T_m (熔点) 时,并未开始结晶,而是需要继续冷却到 T_m 之下某一温度 T_n ,液态金属才开始结晶。金属的实际结晶温度 T_n 与理论结晶温度 T_m 之差,称为过冷度,

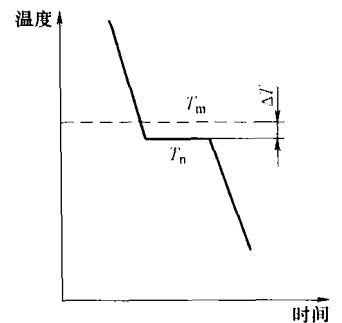


图 1-10 纯金属结晶时的冷却曲线示意图

用 ΔT 表示, $\Delta T = T_m - T_n$ 。过冷度越大, 则实际结晶温度越低。

影响过冷度的主要因素有金属的性质、纯度和冷却速度。金属不同, 过冷度的大小也不同; 金属的纯度越高, 则过冷度越大; 如果金属的种类和纯度都确定, 则过冷度主要取决于冷却速度, 冷却速度越大, 过冷度也越大。

2) 结晶的过程。金属的结晶过程是晶核的形成和长大的过程。结晶时首先在液体中形成具有某一临界尺寸的晶核, 然后这些晶核不断凝聚液体中的原子继续长大。图 1-11 是氯化铵的结晶过程照片及组织示意图。当液态金属过冷到理论结晶温度以下时, 晶核并未立即形成, 而是经过一段时间后才开始出现第一批晶核。结晶开始前的这段停留时间称为孕育期。随着时间的推移, 已形成的晶核不断长大, 同时不断产生新的晶核, 直到各个晶体相互接触, 液态金属耗尽, 形成由许多位向不同、外形不规则的晶粒所组成的多晶体。

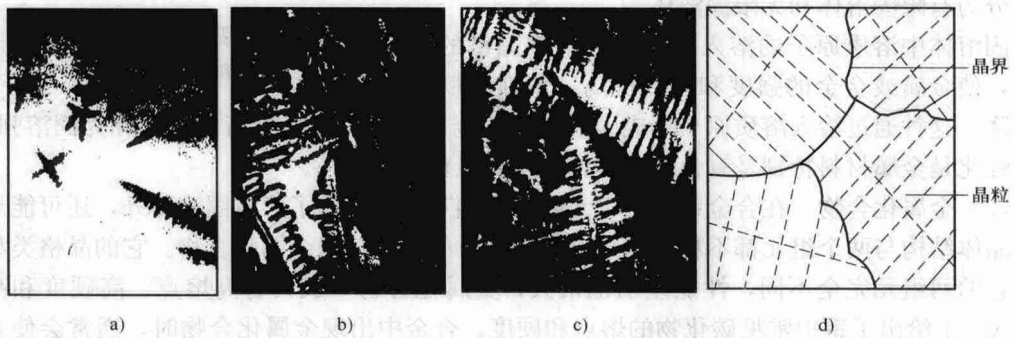


图 1-11 氯化铵的结晶过程照片及组织示意图

a) 形核 b) 长大 c) 结束 d) 组织示意图

3) 晶核的形成与长大。在过冷液体中形成固态晶核时, 可能有两种形核方式: 一种是均匀形核, 又叫自发形核; 另一种是非均匀形核, 也叫非自发形核。晶核形成之后, 就进入长大阶段, 晶核长大实质上是原子逐个从液相中扩散到晶核表面上, 并按照晶体点阵规律要求, 逐个占据适当的位置而与晶体稳定牢靠地结合起来的。

实际金属结晶时晶核大多以树枝状方式长大。在晶核成长初期, 由于晶体内部原子呈规则排列, 晶体基本上可以保持规则的外形。但由于受散热条件的影响, 晶核的生长呈现出各向异性, 散热有利的方向优先生长, 形成图 1-11 所示的树枝状晶体 (简称枝晶)。

(2) 合金的结晶 合金的结晶过程与纯金属的结晶过程基本相同, 都是晶核的形成与长大过程。但由于合金的成分较纯金属复杂, 因此其结晶过程具有一些特点。

1) 异分结晶。合金在结晶时, 所结晶出的固相成分与原液相的成分不同, 这种结晶出的晶体与母相化学成分不同的现象称为异分结晶, 也叫选择结晶。而纯金属结晶时, 所结晶出的晶体与母相的化学成分完全一样, 所以称之为同分结晶。

2) 合金的结晶在一定温度范围内进行。合金的结晶需要在一定的温度范围内进行, 在此温度范围内的每一温度下, 只能结晶出来一定数量的固相。随着温度的降低, 固相的数量增加, 同时固相和液相的成分也不断发生变化, 直到固相的平均成分与原合金的成分相同

时，才结晶完毕。

3) 晶内偏析。合金的结晶过程与液相及固相内的原子扩散过程密切相关，只有在极其缓慢的冷却条件下才能使每个温度下的扩散过程进行完全，使液相或固相的整体处处均匀一致。然而在实际生产条件下，液态金属浇入铸型时，冷却速度较快，在一定温度下扩散过程尚未完全时温度就继续下降，这样就使液相尤其是固相内保持着一定的浓度梯度，造成各组成相内成分的不均匀，这种现象称为晶内偏析。晶内偏析会导致合金的塑性、韧性降低，易于引起晶内腐蚀，还会给热加工带来困难。出现晶内偏析现象时，一般采用均匀化退火的方法来消除，即将铸件加热到低于固相线 150~200℃ 的温度，进行较长时间的保温，使偏析元素充分进行扩散，以达到成分均匀化。

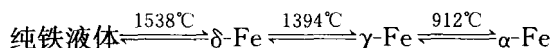
2. 金属的细晶强化

金属结晶后的晶粒大小对其力学性能影响很大。一般情况下，金属的强度、硬度、塑性和韧性都随晶粒的细化而提高，称为细晶强化。在生产中常采用增大过冷度和变质处理的方法进行细晶强化。增加冷却速度可增大过冷度，使晶核生成速度大于晶核长大速度，因而使晶粒细化。但增大过冷度受铸件大小、形状的限制。变质处理是在液态金属中加入变质剂作为人工晶核（非自发形核），增加晶核数目，使晶粒细化。此外，对即将凝固的金属进行振动和搅拌，也可细化晶粒。

3. 金属的同素异晶转变

某些金属，例如铁、锰、钛、锡、钴等，凝固后在不同的温度下具有不同的晶体结构形式，这种金属在固态下由于温度的改变而发生晶体结构改变的现象称为金属的同素异晶转变。这一转变与液态金属的结晶过程相似，也是晶核的形成和长大过程，故又称为二次结晶或重结晶。以不同晶体结构形式存在的同一金属元素的晶体称为该金属的同素异晶体。

铁是典型的具有同素异晶转变特性的金属。图 1-12 是纯铁的冷却曲线，它表示了冷却时纯铁的结晶和同素异晶转变过程。由图可见，液态纯铁在 1538℃ 时开始结晶，得到具有体心立方晶体结构的 δ -Fe；当温度降低至 1394℃ 时发生同素异晶转变， δ -Fe 转变为具有面心立方晶体结构的 γ -Fe；当温度降低至 912℃ 时再次发生同素异晶转变， γ -Fe 又转变为具有体心立方晶体结构的 α -Fe；在 912℃ 以下，铁的晶体结构不再发生变化。转变过程可表示为：



同素异晶转变不仅存在于纯铁中，而且存在于以铁为基的钢铁材料中。这是钢铁材料性能多种多样，用途广泛，并能通过热处理进一步改善其组织和性能的重要原因。

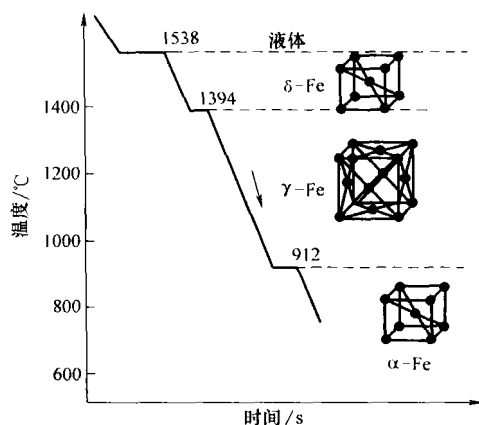


图 1-12 纯铁的冷却曲线

1.3 铁碳合金

1.3.1 二元合金相图

相图是表示合金系中合金的状态与温度、成分间关系的图解，也就是用图解的方式来表示合金系在平衡条件下，不同温度和不同成分的合金所处的状态，因此相图又叫做状态图或平衡相图。

1. 二元合金相图的建立

建立相图的方法有试验测定和理论计算两种。目前使用的相图大多是用试验测定法建立起来的，该方法是通过测定一系列合金的临界相变温度，来确定不同相存在的温度和成分区间而将相图建立起来的。测定临界相变温度的方法有多种，下面以 Cu-Ni 合金为例来说明用热分析法测定临界点和建立二元合金相图的过程。

1) 选用高纯度组元，配制几组成分（质量分数）不同的合金。例如，图 1-13 中给出的合金 I（纯铜）、合金 II（70%Cu+30%Ni）、合金 III（50%Cu+50%Ni）、合金 IV（30%Cu+70%Ni）和合金 V（纯镍）。组元越纯，配制的合金数目越多，试验数据之间的间隔越小，测得的合金相图越精确。

2) 测出以上合金在缓慢冷却条件下的冷却曲线（图 1-13a），并找出各冷却曲线上的临界点（转折点和平台）温度。

3) 将上述各临界点标注在温度-成分坐标平面内。

4) 把相同意义的临界点连成线，并根据已知条件和分析结果写上数字、字母和各相区所存在的相或组织的名称，就得到如图 1-13b 所示的 Cu-Ni 合金相图。

Cu-Ni 合金相图是一种最简单的相图。实际上，许多材料的相图都比较复杂，可以看成是由若干个简单的相图所组成。下面简要介绍几种基本类型的二元合金相图。

2. 常见的二元合金相图

(1) 二元匀晶相图 二元匀晶相图是指两组元在液态和固态都能无限互溶的二元合金相图（图 1-13b）。具有这类相图的合金系主要有 Cu-Ni、Cu-Au、Au-Ag、Mg-Cd 和 Fe-Ni 等。这类合金结晶时，都是从液相结晶出单相固溶体，这种结晶过程称为匀晶转变。

(2) 二元共晶相图 二元共晶相图是指两组元在液态时无限互溶，在固态时有限互溶，冷却时发生共晶转变，形成共晶组织的二元合金相图。具有这类相图的合金系主要有 Pb-Sn、Pb-Sb、Ag-Cu 等，在 Fe-C、Al-Mg 等相图中，也包含有共晶部分。这类合金在冷却到某一温度时发生共晶转变，即由一定成分的液相同时结晶出成分、结构不同的两个固相，

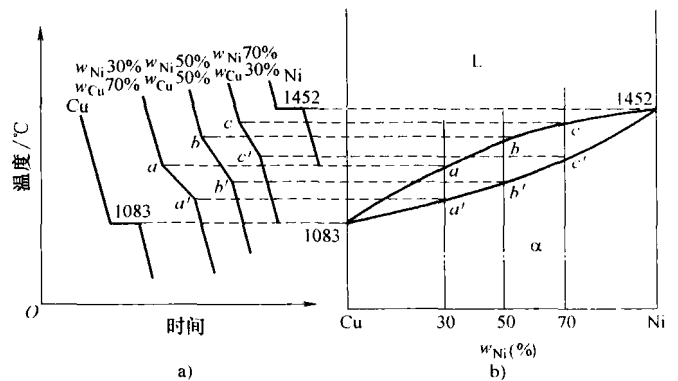


图 1-13 Cu-Ni 合金相图的建立

a) 冷却曲线 b) 相图