



普通高等教育“十三五”规划教材

材料理化分析

许天旱 王党会 张雅妮 编著



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

普通高等教育“十三五”规划教材



材料理化分析

许天早 王党会 张雅妮 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

《材料理化分析》系统介绍了材料性能检测与控制所涉及的各种物理方法和化学方法,并对其检测分析原理进行阐述。全书共分六章,包括材料的组成与分析、材料的显微组织与分析、材料的力学性能分析与检测、材料的物理性能与检测、材料的腐蚀性能分析、无损检测技术。《材料理化分析》注重将基础与理论、性能和检测手段有机结合在一起,易于将所学知识融会贯通,并注重引入新的检测手段。

《材料理化分析》可作为材料类专业本科生的教材或主要教学参考书,也可作为性能检测领域、材料科学与工程领域相关科技工作者的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

材料理化分析 / 许天旱,王党会,张雅妮编著. —北京:
中国石化出版社,2016.9
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5114-4268-0

I. ①材… II. ①许… ②王… ③张… III. ①工程材料-
物理化学分析-高等学校-教材 IV. ①TB302

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 215457 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何
方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京柏力行彩印有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 13.25 印张 330 千字

2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷

定价:38.00 元

前 言

“材料性能”属于材料科学与工程类一级学科掌握的目标对象,“材料理化分析”是掌握和控制“材料性能”的重要工具,通过学习《材料理化分析》,使得材料工程理论与实践结合更紧密、深入。从而有利于学生掌握测试材料性能的方法;有利于学生提高社会实践能力,使得学生具有初步的材料理化分析、材料失效分析及材料性能评估技能。

材料科学与工程主要研究有关材料组织、结构、制备工艺与材料固有性能和使用(服役)性能之间的关系。材料的固有性能包括材料本身所具有的力学性能(硬度、强度、韧性、疲劳性能等)、物理性能(热、光、电、磁等性能)、化学性能(抗氧化和抗腐蚀等)。

材料的使用性能是把材料固有性能和产品设计、工程应用能力联系起来,综合考量材料寿命、能量利用率、安全可靠程度和成本等因素。它以固有性能为基础,而固有性能必须借助必要的检测手段来表征。

过去材料类专业开设的有关材料性能的课程往往只限于某一方面,或者纯粹讲解理论或检测方法,使得学生在学习过程中不易将相关知识很好地结合起来,无法融会贯通。因此,编写一本适应新形势需要的综合性教材是当务之急。

《材料理化分析》具有鲜明的特点,除了兼顾其他材料外,主要以石油工程材料为基础,呈现了材料的各种不同性能的检测方法,从而有利于学生将所学的知识融会贯通。因为同一材料的不同性能并非孤立存在,而是密切相关,是相同材料在不同激励下呈现出的不同反应,如高强度的材料通常具有较高的熔点,但抗腐蚀性能通常较差。

《材料理化分析》由西安石油大学许天旱担任主编,宋海洋担任主审。编写分工如下:绪论、第1章、第2章、第6章由许天旱编写;第3章由王党会和张雅妮共同编写;第4章由王党会编写;第5章由张雅妮编写;许天旱对全书进行了统稿。

《材料理化分析》在编写过程中参考了大量国内外有关教材、科技著作和学术论文,在此特向有关作者表示深切的感谢。同时得到了西安石油大学教材建设项目基金的资助,在此一并提出感谢。

由于作者学识所限,疏漏和不妥之处在所难免,敬请同行和读者指正。

编 者

目 录

绪论	(1)
第 1 章 材料的组成与分析	(5)
1.1 纯金属的结构	(5)
1.1.1 晶体	(5)
1.1.2 常见的晶格类型	(5)
1.1.3 纯金属的实际晶体结构	(6)
1.2 合金的结构	(7)
1.2.1 合金的晶体结构	(7)
1.2.2 合金的相结构	(7)
1.2.3 金属间化合物的性质和应用	(15)
1.3 合金元素的作用	(15)
1.3.1 合金元素的存在形式	(16)
1.3.2 合金元素对钢组成相的影响	(17)
1.3.3 合金元素对材料工艺性能的影响	(18)
1.3.4 合金元素对材料力学性能的影响	(20)
1.3.5 合金元素对材料物理性能的影响	(24)
1.3.6 合金元素对材料化学性能的影响	(24)
1.3.7 合金元素对管线钢性能的影响	(25)
1.4 材料成分的光谱分析	(27)
1.4.1 原子吸收光谱法	(27)
1.4.2 气体分析法	(27)
1.5 材料成分的化学分析	(29)
1.5.1 钢铁中硫含量的测定	(29)
1.5.2 钢铁中磷含量的测定	(31)
第 2 章 材料的显微组织与分析	(32)
2.1 材料组织形态及分布	(32)
2.1.1 组织形态的获取方法	(32)
2.1.2 钢中典型的组织形态	(35)
2.2 材料组织与性能的关系	(39)
2.2.1 材料力学性能与组织的关系	(40)
2.2.2 材料组织对性能的影响	(40)

2.2.3	材料力学性能的估算	(44)
2.3	材料组织及结构的鉴别	(44)
2.3.1	宏观组织和结构的鉴定	(45)
2.3.2	微观组织和结构的鉴定	(46)
2.4	钢中夹杂物的分析	(52)
2.4.1	非金属夹杂物的分类	(52)
2.4.2	非金属夹杂物的鉴定	(55)
2.4.3	非金属夹杂物对钢力学性能的影响	(58)
第3章	材料的力学性能分析与检测	(60)
3.1	材料拉伸性能的分析与检测	(60)
3.1.1	拉伸试验的意义和用途	(60)
3.1.2	金属材料的拉伸变形	(60)
3.1.3	常用拉伸设备类型及试样制备	(61)
3.1.4	金属材料常规力学性能指标的测定	(62)
3.2	材料硬度的分析与检测	(65)
3.2.1	布氏硬度的测量	(65)
3.2.2	洛氏硬度	(66)
3.2.3	维氏硬度	(68)
3.2.4	其他硬度	(69)
3.3	材料磨损性能的分析与检测	(70)
3.3.1	金属零件的磨损	(70)
3.3.2	磨损试验机	(72)
3.3.3	磨损参量的测量	(73)
3.4	材料冲击韧性的分析与检测	(75)
3.4.1	材料的冲击韧性	(75)
3.4.2	材料的韧脆转变	(76)
3.5	材料断裂韧性的分析与检测	(77)
3.5.1	材料断裂韧性的用途与重要性	(77)
3.5.2	断裂韧性理论	(78)
3.5.3	断裂韧度 K_{Ic} 的测定	(78)
3.5.4	裂纹张开位移(COD)的原理和方法	(80)
3.5.5	断裂韧性 J_{Ic} 的原理和方法	(83)
3.6	金属的疲劳测试与分析	(84)
3.6.1	金属的疲劳	(84)
3.6.2	疲劳指标	(86)
3.6.3	疲劳性能的测试	(89)
3.7	材料高温力学性能的分析与检测	(90)

3.7.1	金属的高温力学行为	(90)
3.7.2	材料的高温力学性能指标	(92)
3.7.3	材料高温力学性能指标的测定	(92)
第4章	材料的物理性能与检测	(96)
4.1	热学性能与检测	(96)
4.1.1	材料比热容的检测	(97)
4.1.2	材料热膨胀性能的检测	(101)
4.1.3	材料热传导性能的检测	(104)
4.1.4	材料热稳定性能的检测	(107)
4.2	材料的光学性能及其检测	(109)
4.2.1	材料反射率与折射率的检测	(110)
4.2.2	材料对光的吸收的检测	(113)
4.3	材料的电学性能及其分析与检测	(117)
4.3.1	材料电导率和电阻率测试的目的和意义	(117)
4.3.2	材料的介电特性及其检测	(122)
4.4	材料的磁性能分析与检测	(124)
4.4.1	磁场测量	(125)
4.4.2	磁化强度与磁化率的测量	(128)
4.4.3	磁化曲线或磁滞回线的测量	(129)
4.4.4	居里温度的测量	(133)
4.4.5	磁致伸缩系数的测量	(134)
4.4.6	其他磁参数的测试	(137)
第5章	材料的腐蚀性能与分析	(141)
5.1	腐蚀的性质	(141)
5.1.1	热力学性质	(141)
5.1.2	腐蚀动力学性质	(143)
5.2	腐蚀指标	(144)
5.2.1	均匀腐蚀指标	(144)
5.2.2	不均匀腐蚀指标	(145)
5.3	腐蚀速率测试	(147)
5.3.1	重量法测定金属的腐蚀速率	(147)
5.3.2	线性极化法测试材料的腐蚀速率	(148)
5.3.3	暂态测试方法	(151)
5.3.4	交流阻抗技术	(152)
5.4	孔蚀测试	(152)
5.4.1	化学浸泡法	(153)
5.4.2	电化学测量法	(153)

5.5 环境促进破裂测试	(155)
5.5.1 环境促进破裂的形式	(155)
5.5.2 环境促进破裂的测试	(156)
第6章 无损检测技术	(161)
6.1 无损检测概述	(161)
6.2 超声波检测	(162)
6.2.1 超声检测的基础知识	(162)
6.2.2 超声波在介质中的传播特性	(167)
6.2.3 超声检测的原理	(168)
6.2.4 超声检测的设备及器材	(172)
6.2.5 超声检测的用途	(174)
6.3 射线检测	(174)
6.3.1 射线检测的基础知识	(175)
6.3.2 射线检测的工作原理	(177)
6.3.3 射线检测设备及器材	(178)
6.3.4 射线检测法的特点	(180)
6.4 磁粉检测	(180)
6.4.1 磁粉检测的基础知识	(181)
6.4.2 磁粉检测的工作原理	(182)
6.4.3 磁粉检测设备和器材	(184)
6.4.4 磁粉检测的应用	(185)
6.5 渗透检测	(187)
6.5.1 渗透检测的基础知识	(188)
6.5.2 渗透检测的设备及器材	(190)
6.5.3 渗透检测工作原理	(191)
6.5.4 渗透检测的应用	(193)
6.6 涡流检测	(195)
6.6.1 涡流检测的基础知识	(195)
6.6.2 涡流检测的设备及器材	(196)
6.6.3 涡流检测的工作原理	(197)
6.6.4 涡流检测的应用	(199)
参考文献	(201)

绪 论

理化分析又称仪器分析，是基于物理或物理化学原理和物质的物理或物理化学性质而建立起来的分析方法，用以确定物质成分、性能、微观、宏观结构和用途等。理化分析应用广泛，从日常的生活产品到外太空的探索，都涉及理化分析。在材料科学领域，从原材料的提炼到成品的检验、新产品的研发，都离不开理化分析。

• 理化分析的意义

在日常生产中，理化分析是生产的“眼睛”。通过对原材料和产品质量的理化分析，可以及时检查生产工艺的正常与否，及时发现生产问题，减少废品，降低成本，提高产品质量；通过理化检测，了解工业物料消耗情况，生产设备运行状况，确保充分发挥设备潜力。通过理化分析，监督三废的排放情况，达到文明、安全、清洁生产 and 环境保护的目的。

在科学研究上，理化分析为新产品的开发、研究提供依据。在材料研发过程中，要了解材料组成、结构和性能以及这三者间的相互关系及其变化规律，就必须进行理化检测和分析。在材料的组成研究中，对金属材料 and 无机非金属材料的主量和痕量元素测定的常用方法有：原子光谱法、分子光谱法和常规化学法；对有机高分子材料，常用的测定方法有：红外光谱、拉曼光谱、核磁共振、荧光光谱、质谱等。对于相结构研究，则以 X 射线衍射和选区电子衍射较为常用；而 X 射线光电子能谱、X 射线荧光光谱等技术，则常用于研究材料的晶态、异构及其元素的价态；光学显微镜可进行材料的金相组织结构观察及低倍微观形貌分析，电子显微镜可进行材料内部的微孔洞、裂纹和夹杂物的形态分析以及断口形貌观察等。

在构件失效分析领域，理化分析为最终结论提供支撑。以某厂生产的 50552 型轴承为例：该产品已连续生产十多年，质量稳定并得到用户认可。但在 2006 年 2 月连续二次发生轴承保持架在使用了三个月左右即发生破裂的现象，并且破裂的形式、位置都一样。针对此种现象，做了如下分析：首先，取破裂的保持架和完好的保持架试样作化学成分分析、金相分析，检测结果表明保持架材料合格，组织属正常组织。接着对有裂纹的轴承套圈取样作化学成分分析、金相分析，硬度分析、宏观裂纹检测、冷酸洗检测和热酸洗检测。分析结果排除了材质、锻造、热处理和磨削加工等方面的因素，最后根据检测所发现的轴承外圈滚道表面裂纹的走向和裂纹周围均出现不同程度的贫脱碳现象，证明裂纹是在热处理前产生于冷辗扩加工中，与冷辗扩工艺和辗压比有关。后经调整冷辗扩加工工艺参数，解决了轴承圈的开裂问题。

此外，理化分析在其他领域也有着重要意义。在环境保护方面，理化检测起到了“哨兵”的作用；在商检外贸进出口方面，理化检测起到了“把关”的作用。在海洋生物技术、外太空探索、防治疾病、核武器研究等方面理化检测提供着重要的数据。

俗话说，“工欲善其事，必先利其器”，科技的创新、工企效益的提高都离不开理化分析。现代的理化分析已不是简单的作为工具和手段，而是通过对理化检测到的数据的解析，最大限度地提供科学信息。当前理化分析的水平高低，反映了一个单位、一个国家的实力。

● 理化分析的分类

理化分析包括物理分析和化学分析。物理分析是通过对材料的分析和检验，确定其物理变化过程的方法。物理分析主要包括材料金相分析、力学性能分析、电子光学分析、X 射线衍射分析、材料物理性能分析等。化学分析主要指根据各种元素及其化合物的独特化学性质，利用与之有关的化学反应，对物质进行定性或定量分析。

1. 物理分析

1) 金相分析

金相分析是金属材料试验研究的重要手段之一，采用定量金相学原理，由二维金相试样磨面或薄膜的金相显微组织的测量和计算来确定合金组织的三维空间形貌，从而建立合金成分、组织和性能间的定量关系。金相分析一般包括：焊接金相检验、铸铁金相检验、热处理质量检验、各种金属制品及原材料显微组织检验及评定，如铸铁、铸钢、有色金属原材料低倍缺陷检验，如显微组织晶粒度评级、非金属夹杂物含量测定、脱碳层/渗碳硬化层深度测定等。

2) 力学性能分析

材料的力学性能是指材料在不同环境(温度、介质、湿度)下，承受各种外加载荷(拉伸、压缩、弯曲、扭转、冲击、交变应力等)时所表现出的力学特征。表 1 为常见力学性能的分析项目。

表 1 常见力学分析项目

分析大类	分析意义	分析指标
硬度	体现固体材料局部抵抗硬物压入其表面的能力	洛氏硬度、维氏硬度、显微维氏硬度、布氏硬度、肖氏硬度、纳米压痕硬度等
拉伸、扭转、弯曲与压缩性能	强度体现了材料在外力作用下抵抗变形、断裂的能力； 塑性体现了金属材料在载荷作用下产生塑性变形而不致破坏的能力	抗拉强度、屈服强度、断后伸长率、断面收缩率、弹性模量、泊松比、拉伸应变硬化指数、应变硬化、弯曲强度、弯曲模量、压缩强度、压缩屈服点、压缩弹性模量、抗扭强度等
冲击韧性	材料抵抗冲击载荷的能力，冲击韧度指标的实际意义在于揭示材料的变脆倾向	冲击强度、冲击韧度、低温脆性
断裂韧度	测定带裂纹构件抵抗裂纹失稳扩展能力	断裂韧度、裂纹张开位移、动态断裂韧度
疲劳性能	主要目的在于精确地估算材料结构零部件的疲劳寿命，保证在服役期内零部件不会发生疲劳失效	P-S-N 曲线、疲劳裂纹扩展值
高温力学性能	高温下零部件因抵抗外力作用而产生各种变形和应力的能力	蠕变极限、持久强度、剩余应力
磨损性能	测定材料抵抗磨损的能力，用于比较材料的耐磨性优劣	磨损量、摩擦系数、摩擦温度

3) 电子光学分析

一般是以高能电子束为照明系统，用一定形状的静电场或磁场进行聚焦，照射被观察样

品,再将照明束与样品的作用结果经由放大系统处理,构成适合观察分析的图像。常用的仪器如电子显微镜、电子能谱等都涉及到了电子光学体系。以透射电镜为例,是把经加速和聚焦的电子束投射到非常薄的样品上,电子与样品中的原子碰撞而改变方向,从而产生立体角散射。散射角的大小与样品的密度、厚度相关,因此可以形成明暗不同的影像。透射电子显微镜的分辨率为 $0.1 \sim 0.2\text{nm}$,放大倍数为几万~百万倍,用于观察超微结构,即小于 $0.2\mu\text{m}$,光学显微镜下无法看清的结构。

4) X 射线衍射相分析

利用 X 射线在晶体物质中的衍射效应进行物质结构分析的技术。通过测定衍射角位置(峰位)可以进行化合物的定性分析,测定谱线的积分强度(峰强度)可以进行定量分析,而测定谱线强度随角度的变化关系可进行晶粒的大小和形状的检测。

5) 材料物理性能分析

材料物理性能主要包括材料的热、光、电、磁等性能。材料的热学性能包括热容、热膨胀和热传导等性能,通过对材料热学性能的分析,可以快速准确地测定物质的晶型转变、熔融、升华、吸附、脱水、分解等变化。材料的光学特性是指光和物质相互作用所产生的特性,研究指标主要有折射率、色散和透过率。材料的电学性能主要包括导电性和介电性。材料磁学性能的研究主要是针对磁性材料而言,包括材料的磁场强度、居里温度、磁致伸缩系数等。

作为功能材料的基础,材料物理性能分析的重要性毋庸置疑。如超导材料与材料的电性能相关,隔热材料与材料的热学性能相关,光导纤维与材料的光学性能有关,音像技术与材料的磁学性能有关等。当今人类进入了信息时代,功能材料越来越重要,发展极其迅速。如信息技术、电子计算机技术、机器人、太空领域、海洋领域等,要求材料具有很高的功能性。通过对材料物理性能的分析,明确影响各种性能的因素,有助于新材料的开发,有利于新技术的发展。

6) 无损检测分析方法

无损检测是在不损坏受检件的物理和化学性能的前提下,对受检件内部及其表面的不连续和物理量进行检查和(或)测试的方法,是一种不损害或不影响其未来使用性能或用途的检测手段。其中以检测缺陷应用最广,故常称为“无损探伤”。“不损伤被检物体的完整性”首先表现在它不需要从物体上截取试样,因而也就不会破坏被检物体的完整性;其次,它不引起被检测物体任何物理及化学变化,因而利用无损检测技术可对试件进行全部的而不是抽样的检测,乃至对生产过程中的产品进行“在线检测”,所以无损检测已成为一种监督产品质量的可靠方法。

2. 化学分析

以物质的化学反应为基础的分析,称为化学分析。通过化学分析,可以鉴定物质由哪些元素(或离子)组成及各组分间量的关系(通常以百分比表示)。材料的化学分析方法可分为经典化学分析和仪器分析两类。前者基本上采用化学方法来达到分析的目的,后者主要采用化学和物理方法(特别是最后的测定阶段常应用物理方法)来获取结果,这类分析方法中有的要应用较为复杂的特定仪器。

1) 经典化学分析

经典化学分析历史悠久,是分析化学的基础。经典化学分析是根据样品的量、反应产物

的量或所消耗试剂的量及反应的化学计量关系,通过计算获得待测组分的量。主要包括重量分析法、滴定分析法和气体容量法三种。

重量分析法:使被测组分转化为化学组成一定的化合物或单质与试样中的其他组分分离,然后用称重方法测定该组分的含量。

滴定分析法:将已知准确浓度的试剂溶液(标准溶液)滴加到被测物质的溶液中,直到所加的试剂与被测物质按化学计量定量反应完为止,根据所用试剂溶液的体积和浓度计算被测物质的含量。

气体容量法:通过测量待测气体(或者将待测物质转化成气体形式)被吸收的容积来计算待测物质的量。这种方法应用天平滴定管和量气管等作为最终的测量手段。

2) 仪器分析

光学分析法:根据物质与电磁波(包括从 γ 射线至无线电波的整个波谱范围)的相互作用,或者利用物质的光学性质来进行分析的方法。最常用的有吸光光度法(红外、可见和紫外吸收光谱)、原子吸收光谱法、原子荧光光谱法、发射光谱法、荧光分析法、浊度法、火焰光度法、X射线衍射法、X射线荧光分析法、放射化分析法等。

电化学分析法:根据被测物质的浓度与电位、电流、电导、电容或电量间的关系来进行分析的方法。主要包括电位法、电流法、极谱法、库仑(电量)法、电导法、离子选择性电极法等。

色谱分析法:通过色谱柱,利用静止不动的高沸点液体或固体吸附剂(固定相)对各组分的吸附能力或溶解能力的不同及化学反应时平衡常数的差别,使被测气体或液体的各组分因吸附向前移动的速度不同而彼此分离,再进入检测器鉴定的方法。

质谱分析法:试样在离子源中电离后成为快速运动的正离子,然后在由扇形电场和磁场组成的质量分析器中进行分离,在检测器中鉴定的方法。

此外,还有一些为达到特殊目的而使用的仪器分析方法,如色谱-原子吸收光谱法、色谱-质谱联用法等。

第1章 材料的组成与分析

1.1 纯金属的结构

1.1.1 晶体

材料分为晶体和非晶体，通常纯金属具有晶体结构，金属的原子按照一定规则重复排列，如图 1-1(a)所示。

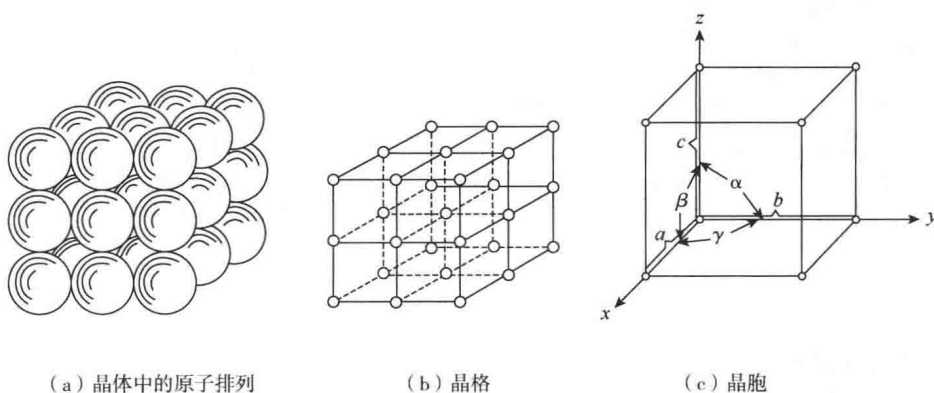


图 1-1 简单立方晶格与晶胞示意图

为便于分析晶体中原子排列规律，可将原子近似地看成一个点，并用假想的线条(直线)将各原子中心连接起来，便形成一个空间格子，见图 1-1(b)。这种抽象的、用于描述原子在晶体中规则排列方式的空间几何图形，称为晶格。晶格中直线的交点称为结点。晶格是由一些最基本的几何单元周期重复排列而成的，这种最基本的几何单元称为晶胞，见图 1-1(c)。分析晶胞即可从中找出晶体特征及原子排列规律。晶胞大小和形状可用晶胞的三条棱边长 a 、 b 、 c (单位为 $\text{\AA}$ ， $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$) 和棱边夹角 α 、 β 、 γ 来描述，其中 a 、 b 、 c 称为晶格常数。

各种晶体由于其晶格类型和晶格常数不同，故呈现出不同的物理、化学及力学性能。

1.1.2 常见的晶格类型

1. 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞为一立方体，八个顶角各排列着一个原子，立方体中心有一个原子，见图 1-2。其晶格常数 $a=b=c$ 。属于这种晶格类型的金属有 α -Fe、铬(Cr)、钨(W)、钼(Mo)、钒(V)等。体心立方晶格的致密度为 0.68。

2. 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞也是一个立方体，立方体的八个顶角和六个面的中心各排列着一个

原子，见图 1-3。属于这种晶格类型的金属有 γ -Fe、铝(Al)、铜(Cu)、镍(Ni)、金(Au)、银(Ag)等。面心立方晶格的致密度为 0.74。

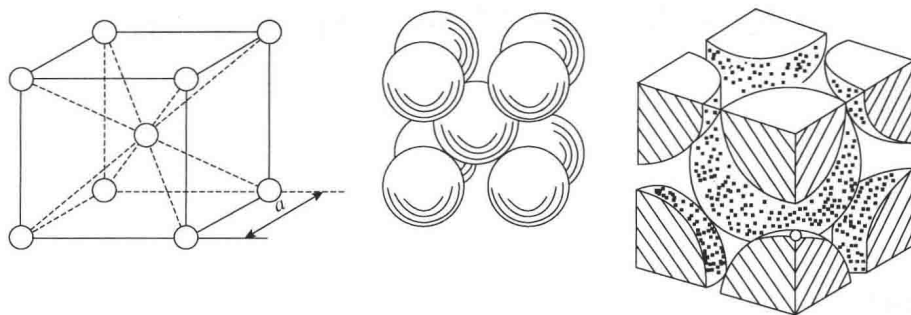


图 1-2 体心立方晶胞示意图

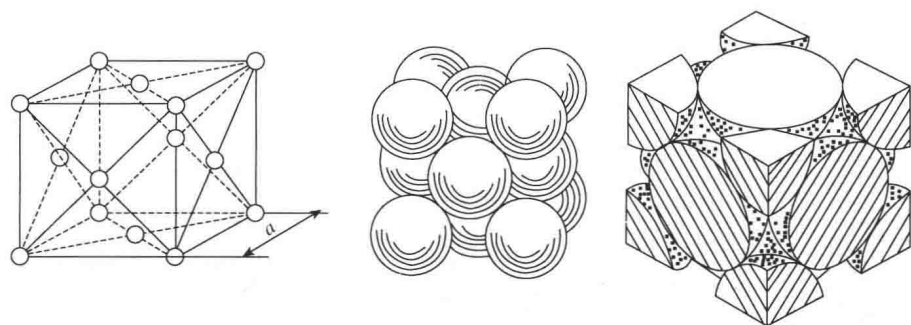


图 1-3 面心立方晶胞示意图

3. 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞是一个六方柱体，柱体的十二个顶角和上、下面中心各排列着一个原子，在上、下面之间还有三个原子，如图 1-4 所示。属于这种晶格类型的金属有镁(Mg)、锌(Zn)、铍(Be)、 β -Ti 等。密排六方晶格的致密度为 0.74。

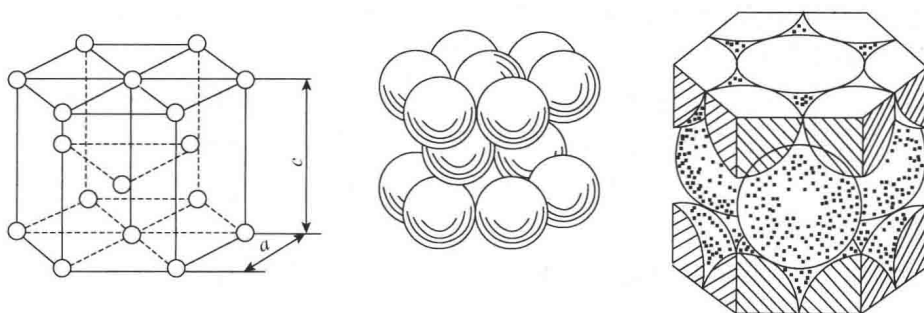


图 1-4 密排六方晶胞示意图

晶格类型不同，原子排列的致密度(晶胞中原子所占体积与晶胞体积的比值)也不同。晶格类型发生变化，将引起金属体积和性能的变化。

1.1.3 纯金属的实际晶体结构

晶体内部晶格位向(即原子排列方向)完全一致的晶体称为单晶体，单晶体具有各向异性的特征。实际使用的金属材料，即使体积很小，其内部仍包含许多小晶体。

由于这些晶格位向基本相同的小晶体外形不规则,且呈颗粒状,故称“晶粒”。每个晶粒内的晶格位向一致,但各个晶粒之间彼此位向都不相同(相差 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$),如图1-5所示。由许多晶粒组成的晶体称为多晶体,一般金属材料都是多晶体。多晶体材料中相邻晶粒的界面称为“晶界”。由于多晶体是由许多位向不同的晶粒组成,故可认为金属(多晶体)是各向同性的。

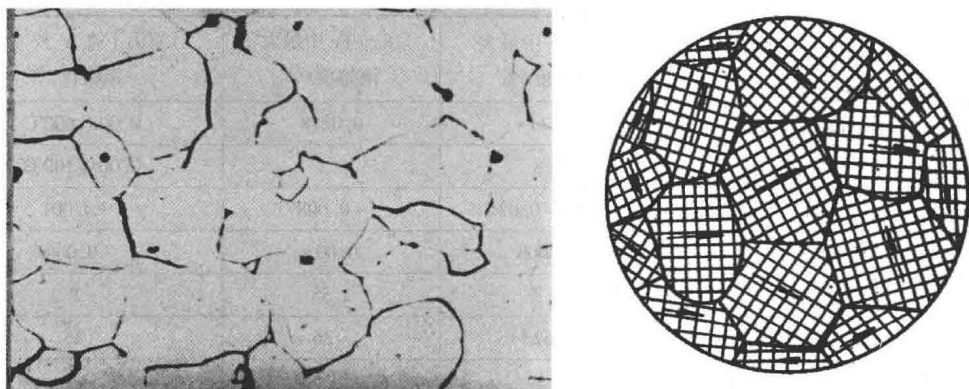


图1-5 金属的多晶体结构

钢铁材料的晶粒尺寸一般为 $10^{-1}\sim 10^{-3}\text{mm}$,只有在显微镜下才能观察到。这种在显微镜下观察到的各种晶粒的形态、大小和分布等情况,称为显微组织或金相组织。有色金属的晶粒尺寸一般都比钢铁材料的晶粒尺寸大,有的用肉眼可以看到。

1.2 合金的结构

1.2.1 合金的晶体结构

虽然纯金属在工业中有着重要的用途,但由于其强度较低等原因,在工业上广泛使用的金属材料绝大多数是合金。

合金是指由两种或两种以上的金属或金属与非金属经熔炼、烧结或利用其他方法组合而成并具有金属特性的物质。组成合金最基本的、独立的物质称为组元(简称元)。通常组元就是指组成合金的元素。例如普通黄铜的组元是铜和锌,铁碳合金的组元是铁和碳。按组元数目,合金分为二元合金、三元合金和多元合金等。可以由给定组元按不同比例配制出一系列不同成分的合金,这一系列合金就构成了一个合金系。例如各种牌号的碳钢就是由不同铁、碳含量的合金所构成的铁碳合金系。

在纯金属或合金中,具有相同的化学成分、晶体结构和相同物理性能的组分称为“相”。例如纯铜在熔点温度以上或以下,分别为液相或固相,而在熔点温度时则为液、固两相共存。合金在固态下,可以形成均匀的单相组织,也可以形成由两相或两相以上组成的多相组织,这种组织称为两相或复相组织。“组织”是泛指用金相观察方法看到的由形态不同、尺寸不同和分布方式不同的一种或多种相构成的总体。

1.2.2 合金的相结构

按照合金组元间相互作用的不同,合金在固态下的相结构分为固溶体和金属化合物

两类。

1. 固溶体

固溶体是指合金在固态下，组元间相互溶解而形成的均匀相。与固溶体晶格类型相同的组元称为溶剂，其他组元称为溶质。表 1-1 列出了合金元素在铁中的溶解度。

表 1-1 合金元素在铁中的溶解度

元素	结构类型	在 γ -Fe 中最大溶解度/%	在 α -Fe 中最大溶解度/%	室温下在 α -Fe 中的溶解度/%
C	六方金刚石型	2.11	0.0218	0.008(600℃)
N	简单立方	2.8	0.1	0.001(100℃)
B	正交	0.018~0.026	~0.008	<0.001
H	六方	0.0008	0.003	~0.0001
P	正交	0.3	2.55	~1.2
Al	面心立方	0.625	~36	35
Ti	β -Ti 体心立方(>882℃) α -Ti 密排六方(<882℃)	0.63	7~9	~2.5(600℃)
Zr	β -Zr 体心立方(>862℃) α -Zr 密排六方(<862℃)	0.7	~0.3	0.3(385℃)
V	体心立方	1.4	100	100
Nb	体心立方	2.0	α -Fe1.8(989℃) δ -Fe4.5(1360℃)	0.1~0.2
Mo	体心立方	~3	37.5	1.4
W	体心立方	~3.2	35.5	4.5(700℃)
Cr	体心立方	12.8	100	100
Mn	δ -Mn 体心立方(>1133℃) γ -Mn 面心立方(1095~1133℃) α , β -Mn 复杂立方(<1095℃)	100	~3	~3
Co	β -Co 面心立方(>450℃) α -Co 密排六方(<450℃)	100	76	76
Ni	面心立方	100	~10	~10
Cu	面心立方	~8	2.13	0.2
Si	金刚石型	2.15	18.5	15

根据溶质原子在溶剂晶格中所占位置不同，固溶体分为置换固溶体和间隙固溶体。

1) 置换固溶体

置换固溶体是指溶质原子占据了部分溶剂晶格结点位置而形成的固溶体，如图 1-6(a) 所示。

按溶解度的不同，置换固溶体又分为无限固溶体和有限固溶体两种。例如铜镍合金，铜原子和镍原子可按任意比例相互溶解，形成无限固溶体；而铜锌合金只有在 $\omega_{Zn} \leq 39\%$ 时，锌能全部溶入铜中形成单相的 α 固溶体。当 $\omega_{Zn} > 39\%$ 时，组织中除 α 固溶体，还出现铜与锌形成的金属化合物。溶解度的大小主要取决于组元的晶格类型、原子半径及温度等。

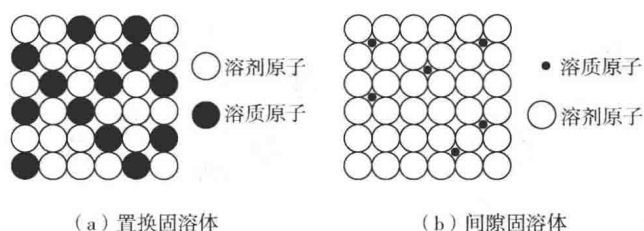


图 1-6 固溶体结构示意图

只有当组元之间的原子能够无限的互相代替才能形成无限固溶体。因此形成无限固溶体条件如下:

(1) 形成固溶体的各组元应具有相同类型的晶体结构。表 1-2 列出了能形成无限固溶体的金属;

(2) 两组元应具有相近的原子结构, 相差不超过一个价电子, 并且在元素周期表中的位置相距很近;

(3) 两组元的原子半径(或晶格常数)之差不超过 15%; 而铁基合金中, 只有当他们的原子半径之差不超过 8% 时, 才形成无限固溶体, 否则只能形成有限固溶体。有限固溶体的溶解度还与温度有关, 随温度的升高, 溶解度增加。

表 1-2 形成无限固溶体的金属

第一个组元	点阵类型	点阵常数	原子序数 (Z)	原子价	熔点/℃	第二个组元	点阵类型	点阵常数	原子序数 (Z)	原子价	熔点/℃	$\Delta d/\%$	$\Delta V/\%$
Au	面心立方	4.07	79	1	1063	Cu	面心立方	3.61	29	1	1083	12.5	30
Au	面心立方	4.07	79	1	1063	Ni	面心立方	3.52	28	0	1450	13.2	34
Bi	菱面体	6.56	83	5	271	Sb	菱面体	6.2	51	5	631	7.5	14
Cu	面心立方	3.61	29	1	1083	Ni	面心立方	3.52	28	0	1450	2.6	5
Co	面心立方	3.54	27	0	1480	Ni	面心立方	3.52	28	0	1450	1.0	0
Cu	面心立方	3.61	29	1	1083	Pd	面心立方	3.88	46	0	1550	7.0	21
Fe- γ	面心立方	3.56	26	0	1539	Co	面心立方	3.54	27	0	1480	0.7	1.5
Fe- γ	面心立方	3.56	26	0	1539	Ni	面心立方	3.52	28	0	1450	1.5	5
Fe- γ	面心立方	3.56	26	0	1539	Pd	面心立方	3.88	46	0	1550	8.1	21
Fe- γ	面心立方	3.56	26	0	1539	Pt	面心立方	3.92	78	0	1750	9.0	22
Fe- α	体心立方	2.86	26	0	1539	Cr	体心立方	2.87	24	—	1600	6.5	6
Fe- α	体心立方	2.86	26	0	1539	V	体心立方	3.03	23	—	1700	0.7	20

根据溶质原子在置换固溶体中的位置, 固溶体分为无序固溶体和有序固溶体。无序固溶体是指溶质原子完全随意分布在溶剂晶格的结点上, 如铜镍固溶体晶胞, 如图 1-7 所示。事实上, 置换固溶体大多数情况下都是无序排列。但在某些合金中, 由于缓冷或在某一温度下长时间停留, 溶质原子在空间点阵的某些结点上占据一定位置, 这样的固溶体叫做有序固溶体。例如铜金合金在缓冷后, 点阵的一组晶面上分布着铜原子, 而另一组晶面上分布着金原子(见图 1-8), 在每个晶胞中有 2 个铜原子和 2 个金原子且按层有序分布。