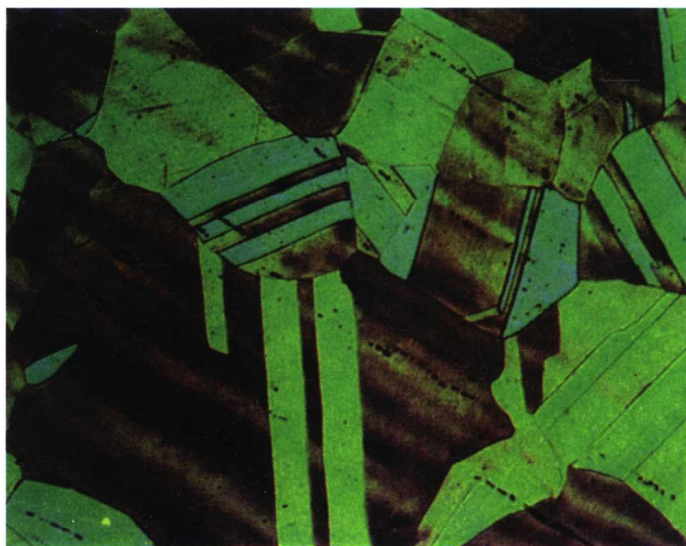


JINXIANGJIANYAN  
机械工业理化检验人员培训教材



# 金相检验

机械工业理化检验人员技术培训和资格鉴定委员会 编



5.21

上海科学普及出版社

机械工业理化检验人员培训教材

# 金 相 检 验

机械工业理化检验人员技术培训和资格鉴定委员会 编

上海科学普及出版社

## 内 容 提 要

本教材是在 1989 年原机械电子工业部理化检验人员资格培训教材《金相检验》的基础上编写而成的,在内容和篇幅方面作了比较大的调整,大幅删节了原教材中关系不密切的内容,更改了原教材中不合时宜的标准,对机械工业中使用越来越广的非铁金属的金相检验作了较详细的介绍,同时也介绍了金相检验的新方法、新设备、新技术等,强调了在金相检验的实践中贯彻国家标准,使本教材具有更强的针对性。

本教材共分十四章,包括:一、金属学基础;二、钢的热处理基础;三、钢的宏观检验技术;四、金相检验技术及设备;五、结构钢的金相检验;六、工模具钢的金相检验;七、不锈钢与耐热钢的金相检验;八、铸钢和铸铁的金相检验;九、钢的显微组织评定;十、零件表面处理后的金相检验;十一、焊接件的金相检验;十二、非铁金属和粉末冶金制品的金相检验;十三、缺陷分析;十四、失效分析。

本教材适用于一级和二级理化检验人员《金相检验》技术培训,也可作为三级理化检验人员的基础参考书。由于时间比较仓促,错误缺点在所难免,敬请读者批评指正。

### 图书在版编目(CIP)数据

金相检验/机械工业理化检验人员技术培训和资格鉴定委员会编. —上海:  
上海科学普及出版社, 2003. 5  
机械工业理化检验人员培训教材  
ISBN 7-5427-2373-1  
I. 金... II. 机... III. 金相组织—检验—技术培训—教材 IV. TG115. 21  
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 012904 号

机械工业理化检验人员培训教材

### 金 相 检 验

机械工业理化检验人员技术培训和资格鉴定委员会 编

上海科学普及出版社出版发行

(上海中山北路 832 号 邮政编码 200070)

各地新华书店经销 上海译文印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 18 字数 438 000

2003 年 5 月第 1 版 2003 年 5 月第 1 次印刷

印数 1—4 300

ISBN 7-5427-2373-1/TH·17 定价: 45.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题  
请向出版社联系调换

# 机械工业理化检验人员培训教材

## 编辑委员会名单

- 主任委员:** 杨学桐 (中国机械工业联合会)
- 副主任委员:** 贺大钝 (上海材料研究所)
- 阎育镇 (中国机械工业联合会)
- 房士义 (山东省机械工业办公室)
- 委    员:** 鄢国强 (上海材料研究所)
- 王  滨 (上海材料研究所)
- 马冲先 (上海材料研究所)
- 蔡宏伟 (上海材料研究所)
- 陈世朴 (上海交通大学)
- 马宝钿 (西安交通大学)
- 云大泰 (天津市检测技术研究所)
- 刘世良 (一汽集团公司工艺处)
- 杨明宪 (四川省机械工业理化计量中心)
- 王承忠 (上海钢铁研究所)
- 张  乔 (沈阳铸造研究所)

## 编审人员名单

**总  主  编:** 鄢国强 (上海材料研究所教授级高级工程师)

### 《力学性能试验》

**卷  主  编:** 王  滨 (上海材料研究所教授级高级工程师)

**编    写:** 陈运远 (上海材料研究所教授级高级工程师)

                  凌树森 (上海材料研究所教授级高级工程师)

奚建法 (上海材料研究所工程师)  
李振厦 (上海材料研究所教授级高级工程师)  
王承忠 (上海钢铁研究所教授级高级工程师)  
凌霄 (上海材料研究所高级工程师)  
丁富连 (宝钢股份有限公司技术中心高级工程师)  
李嘉清 (上海材料研究所高级工程师)  
何伟康 (上海汽轮机有限公司高级工程师)  
**卷主审:** 凌树森 (上海材料研究所教授级高级工程师)  
陈运远 (上海材料研究所教授级高级工程师)

### 《金相检验》

**卷主编:** 蔡宏伟 (上海材料研究所高级工程师)  
**写:** 曾振鹏 (上海交通大学教授)  
李晋 (上海材料研究所教授级高级工程师)  
强明道 (上海材料研究所高级工程师)  
龚应时 (上海材料研究所高级工程师)  
张静江 (上海汽车工业质量检测研究所高级工程师)  
陆慧 (上海材料研究所助理工程师)  
袁家栋 (上海工具厂高级工程师)  
杨力 (上海材料研究所高级工程师)  
**卷主审:** 唐汝均 (上海材料研究所教授级高级工程师)

### 《化学分析》

**卷主编:** 马冲先 (上海材料研究所教授级高级工程师)  
**写:** 胡晓燕 (北京钢铁研究总院教授级高级工程师)  
戴亚明 (上海材料研究所高级工程师)  
葛皓 (杭州制氧机研究所高级工程师)  
张宏鹤 (上海材料研究所工程师)  
陶美娟 (上海材料研究所工程师)  
刘瑾 (上海材料研究所工程师)  
**卷主审:** 吴诚 (上海材料研究所教授级高级工程师)

# 前 言

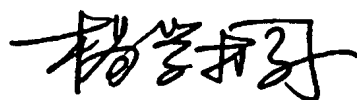
《机械工业理化检验人员培训教材》经编委会和编审组全体人员的努力,经过多位专家、作者的辛勤工作,现和广大理化检验人员见面了。

理化检验工作是一项理论和实践性都很强的工作,对于提高机械工业产品的内在质量和企业竞争力,对于开拓市场和提高用户满意度都是十分重要的,而切实提高机械工业理化检验人员的理论水平、业务素质及实际操作能力是当前机械工业理化检验工作的重要环节和基础工作。

机械工业理化检验工作有着非常良好的专业基础和规范性的科学程序,曾为机械工业的发展做出了重要的贡献。近年来,随着机械工业的发展和信息技术在机械工业的广泛应用,新技术、新材料、新仪器、新理论都不断对机械工业理化检验工作提出了新要求,而由于种种原因,机械工业理化检验工作没有得到应有的发展,理化检验人员也没有得到相应的重视和培养,这种局面必须得到改善。

这套教材就是为了在加强机械工业理化检验人员培训过程中,根据现行标准和技术要求精心编写的,作者皆为长期从事该项工作的专家,因此,这套教材具有先进性、实用性、科学性和权威性。

机械工业理化检验工作一贯得到质检总局有关司局领导的支持和帮助,得到上海材料研究所等单位的支持和协助,对此,一并表示感谢。



2003年2月

# 目 录

<b>第一章 金属学基础</b> ..... 1	二、不完全退火 ..... 37
<b>第一节 金属与合金的晶体结构</b> ..... 1	三、球化退火 ..... 37
一、纯金属的晶体结构 ..... 1	四、扩散退火 ..... 37
二、合金的晶体结构 ..... 6	五、去应力退火 ..... 38
<b>第二节 纯金属及合金的结晶</b> ..... 8	六、再结晶退火 ..... 38
一、纯金属的结晶 ..... 8	七、钢的正火 ..... 40
二、合金的凝固 ..... 12	<b>第七节 钢的淬火与回火</b> ..... 40
三、铸锭的组织与缺陷 ..... 14	一、淬火应力 ..... 40
<b>第三节 Fe-C(Fe-Fe<sub>3</sub>C)相图</b> ..... 16	二、淬火加热 ..... 41
一、相图中的点、线、区的意义 ..... 16	三、淬火冷却 ..... 42
二、相图分析 ..... 17	四、淬火方法 ..... 43
三、铁碳合金的平衡结晶过程及组织 ..... 18	五、钢的淬透性 ..... 43
<b>思考题</b> ..... 22	六、钢的回火 ..... 43
<b>第二章 钢的热处理基础</b> ..... 23	七、钢的回火脆性 ..... 44
<b>第一节 钢在加热时的转变</b> ..... 23	<b>思考题</b> ..... 45
一、奥氏体的形成过程 ..... 23	<b>第三章 钢的宏观检验技术</b> ..... 46
二、影响奥氏体形成速度的因素 ..... 24	<b>第一节 硫印试验</b> ..... 46
三、奥氏体晶粒的长大 ..... 24	一、硫在钢中的分布及影响 ..... 46
<b>第二节 钢在冷却时的转变</b> ..... 25	二、硫印的基本原理 ..... 46
一、过冷奥氏体等温转变曲线 ..... 26	三、硫印方法介绍 ..... 46
二、过冷奥氏体连续转变曲线 ..... 27	<b>第二节 酸蚀试验</b> ..... 47
<b>第三节 钢的珠光体转变</b> ..... 28	一、试样的选取 ..... 48
一、珠光体的组织形态与力学性能 ..... 28	二、试样的制备 ..... 48
二、珠光体的形成过程 ..... 29	三、热酸蚀试验 ..... 48
<b>第四节 钢的马氏体转变</b> ..... 29	四、冷酸蚀试验 ..... 49
一、马氏体的组织形态与力学性能 ..... 29	五、电解腐蚀试验 ..... 50
二、马氏体转变的特点 ..... 32	六、低倍组织缺陷的评定和标准贯彻 ..... 51
三、影响马氏体转变的因素 ..... 32	<b>第三节 断口检验</b> ..... 52
<b>第五节 钢的贝氏体转变</b> ..... 33	一、纵向断口制备方法 ..... 52
一、贝氏体的组织形态与力学性能 ..... 33	二、横向断口制备方法 ..... 53
二、贝氏体转变的特点 ..... 35	三、钢材断口的分类及各种缺陷形态的识别 ..... 53
三、魏氏组织的形成 ..... 35	<b>第四节 塔形试验</b> ..... 55
<b>第六节 钢的退火与正火</b> ..... 36	一、发纹的形成原因及分布规律 ..... 55
一、完全退火 ..... 36	

二、塔形试验介绍	55	一、冷冲压用钢的金相检验	84
思考题	56	二、冷拉结构钢的金相检验	85
<b>第四章 金相检验技术及设备</b>	57	<b>第四节 易切削结构钢的金相检验</b>	86
<b>第一节 金相试样的制备</b>	57	一、硫系易切削钢中夹杂物的形态	
一、金相试样的选取	57	特征	86
二、金相试样的镶嵌	57	二、铅系易切削钢中夹杂物的形态	
三、金相试样的磨制	58	特征	86
四、金相试样的侵蚀	60	三、易切削结构钢的金相检验	87
五、现场金相检验	62	<b>第五节 合金元素在结构钢中的作用</b>	87
<b>第二节 暗室技术</b>	63	一、锰	87
一、感光材料	63	二、硅	87
二、感光胶片的显影和定影	64	三、硼	88
三、印相	65	四、铬	88
<b>第三节 金相显微镜</b>	65	五、钒、钛和钨	88
一、显微镜简述	65	六、钼	88
二、显微镜的光学原理	66	七、镍	88
三、新型金相显微镜简介	70	<b>第六节 低碳马氏体钢的金相检验</b>	88
四、金相显微镜的操作与维护	71	一、低碳马氏体钢的热处理工艺	89
<b>第四节 显微硬度计</b>	71	二、低碳马氏体钢的金相检验	89
一、显微硬度测试原理	71	<b>第七节 低碳低合金钢的金相检验</b>	89
二、影响显微硬度值的因素	73	一、低碳低合金钢的分类	89
三、显微硬度试验的应用	73	二、低碳低合金钢的金相检验	90
四、新型显微硬度计简介	74	<b>第八节 调质钢的金相检验</b>	90
五、显微硬度计的维护	75	一、调质钢的热处理	90
思考题	75	二、调质钢的金相检验	91
<b>第五章 结构钢的金相检验</b>	76	<b>第九节 大截面用钢的金相检验</b>	92
<b>第一节 钢中非金属夹杂物的金相检验</b>	76	一、大截面锻件热处理后的组织、性能	
一、非金属夹杂物对钢性能的影响	76	特点	92
二、非金属夹杂物的金相检验	77	二、大型铸、锻件的金相检验	92
<b>第二节 碳素钢和低合金钢中的基本</b>		<b>第十节 高强度马氏体钢的金相检验</b>	93
组织	79	<b>第十一节 贝氏体钢的金相检验</b>	94
一、铁素体	79	<b>第十二节 非调质钢的金相检验</b>	94
二、渗碳体	80	<b>第十三节 弹簧钢的金相检验</b>	95
三、珠光体	80	<b>第十四节 双相钢的金相检验</b>	96
四、魏氏组织	81	<b>第十五节 轴承钢的金相检验</b>	97
五、贝氏体	81	一、铬轴承钢	98
六、奥氏体	82	二、渗碳轴承钢	100
七、马氏体	82	三、特殊用途的轴承钢	100
<b>第三节 冷变形钢的金相检验</b>	84	思考题	101



<b>第六章 工模具钢的金相检验</b> .....	103	二、灰铸铁	137
<b>第一节 碳素工具钢的金相检验</b> .....	103	三、球墨铸铁	142
一、成分特点	103	四、可锻铸铁	146
二、显微组织特点	103	<b>思考题</b>	149
三、不正常的退火显微组织	103	<b>第九章 钢的显微组织评定</b> .....	150
四、不正常的淬火组织	104	<b>第一节 钢中非金属夹杂物显微评定</b>	
<b>第二节 合金工具钢的金相检验</b> .....	104	方法(GB/T 10561—1989).....	150
一、合金工具钢的化学成分	105	一、主题内容与适用范围	150
二、合金工具钢的退火组织及其评定	105	二、试样的选取与制备	150
三、合金工具钢的淬火组织及其评定	106	三、非金属夹杂物的显微评定方法	150
四、合金工具钢的回火组织	106	<b>第二节 金属平均晶粒度测定法</b>	
<b>第三节 模具钢的金相检验</b>	106	(YB/T 5148—1993).....	152
一、冷作模具钢	106	一、主题内容与适用范围	152
二、热作模具钢	108	二、晶粒度级别指数	152
三、塑料专用模具钢	109	三、试样的制备及晶粒度显示方法	152
<b>第四节 高速工具钢的金相检验</b> .....	110	四、晶粒度的测定方法	155
一、高速工具钢的分类及其化学成分	110	<b>第三节 低碳钢冷轧薄板铁素体晶粒度</b>	
二、高速工具钢的显微组织	111	测定法(GB/T 4335—1984).....	159
三、金相检验	112	一、试样制取	159
<b>思考题</b>	113	二、晶粒度级数	159
<b>第七章 不锈钢与耐热钢的金相</b>		三、测定方法	160
<b>检验</b> .....	115	<b>第四节 钢的显微组织评定方法</b>	
<b>第一节 不锈钢的金相检验</b>	115	(GB/T 13299—1991).....	161
一、概述	115	一、试样制取	161
二、不锈钢金相分析的金属学基础	115	二、显微组织评定方法	161
三、不锈钢的金相检验	119	三、显微组织评定原则	161
<b>第二节 耐热钢的金相检验</b>	123	<b>第五节 钢的脱碳层深度测定法</b>	
一、概述	123	(GB/T 224—1987).....	164
二、耐热钢的金相检验	123	一、金相法	164
<b>思考题</b>	125	二、硬度法	164
<b>第八章 铸钢和铸铁的金相检验</b> .....	126	三、化学分析法	165
<b>第一节 铸钢的金相检验</b>	126	<b>第六节 中碳钢与中碳合金结构钢马氏体</b>	
一、铸钢的分类及常用牌号	126	等级(JB/T 9211—1999).....	165
二、铸钢组织特点	127	<b>第七节 钢质模锻件金相组织评级图与评定</b>	
三、铸造碳钢的金相检验	129	方法(GB/T 13320—1991).....	165
四、铸造低合金结构钢的金相检验	131	一、试样的选取与制备	166
五、铸造高锰钢的金相检验	132	二、评级图的分组与级别	166
<b>第二节 铸铁的金相检验</b>	134	三、金相组织评定	166
一、白口铸铁	135	<b>第八节 钢的共晶碳化物不均匀度评级法</b>	
		(GB/T 14979—1994).....	166

一、试样的选取与制备 .....	167	二、组织特征 .....	182
二、评定方法 .....	167	第九节 火焰加热表面淬火检验 .....	183
第九节 奥氏体不锈钢中 $\alpha$ -相面积含量金		一、火焰加热表面淬火工艺 .....	183
相测定法(GB/T 13305—1991) .....	167	二、硬化层深度检验 .....	183
一、试样的选取与制备 .....	167	第十节 热喷涂与喷焊金相检验 .....	184
二、 $\alpha$ -相面积含量的测定方法 .....	168	一、喷焊层 .....	184
第十节 外科植入物用不锈钢		二、喷涂层 .....	186
(GB 4234—1994) .....	168	三、热喷涂层的缺陷 .....	187
一、非金属夹杂物测定 .....	168	思考题 .....	187
二、晶粒度测定 .....	169	<b>第十一章 焊接件的金相检验</b> .....	189
三、游离铁素体相测定 .....	169	第一节 焊接接头的宏观检验 .....	189
思考题 .....	169	一、焊接接头外观质量检验 .....	190
<b>第十章 零件表面处理后的金相</b>		二、焊接接头的低倍组织检验 .....	190
<b>检验</b> .....	170	第二节 焊接区域显微组织特征 .....	191
第一节 概述 .....	170	一、焊缝金属的组织 .....	191
第二节 钢的渗碳层检验 .....	171	二、熔合线组织特征 .....	193
一、渗碳后缓冷状态组织 .....	171	三、焊缝热影响区组织特征 .....	193
二、渗碳后淬火、回火组织 .....	172	第三节 几种典型焊接组织识别 .....	196
三、渗碳层深度的测定 .....	172	一、低碳钢电焊后的显微组织 .....	196
四、渗碳零件的应用 .....	173	二、低碳合金钢焊接组织 .....	196
第三节 钢的碳氮共渗层检验 .....	174	三、调质钢焊接组织 .....	197
一、碳氮共渗后显微组织 .....	174	四、1Cr18Ni9Ti 不锈钢的焊接组织 .....	198
二、碳氮共渗层深度的测定 .....	175	五、异种钢对接焊 .....	198
第四节 钢的渗氮层检验 .....	175	第四节 焊接组织侵蚀方法 .....	198
一、气体渗氮层显微组织 .....	175	一、侵蚀剂 .....	198
二、低温氮碳共渗显微组织 .....	176	二、不锈钢对接焊 .....	198
三、渗氮层组织评定和深度测定 .....	176	三、异种钢焊接 .....	198
第五节 钢的渗硼层检验 .....	177	四、焊接试样宏观检验侵蚀剂 .....	199
一、渗硼层显微组织 .....	177	第五节 焊接接头常见缺陷 .....	199
二、渗硼层深度的测定 .....	177	一、裂纹 .....	199
第六节 钢的渗金属层检验 .....	178	二、孔穴 .....	201
一、渗金属层相组成 .....	178	三、固体夹杂 .....	201
二、渗金属层金相检验 .....	180	四、未熔合和未焊透 .....	202
第七节 表面热处理检验 .....	180	五、形状缺陷 .....	202
一、感应加热表面淬火 .....	180	六、其他缺陷 .....	203
二、金相检验 .....	181	思考题 .....	203
三、硬化层深度测定法 .....	181	<b>第十二章 非铁金属和粉末冶金制品</b>	
第八节 激光加热表面淬火检验 .....	182	<b>的金相检验</b> .....	204
一、激光加热表面淬火过程 .....	182	第一节 概述 .....	204

第二节 铝及铝合金的金相检验 .....	204	第一节 铸造缺陷 .....	243
一、概述 .....	204	一、气孔 .....	243
二、铝合金的宏观检验 .....	205	二、疏松 .....	244
三、铝合金的微观检验 .....	207	三、缩孔 .....	245
四、变形铝合金的金相检验 .....	210	四、夹杂 .....	246
五、铝合金中主要相的侵蚀特征 .....	214	五、偏析 .....	246
第三节 铜及铜合金的金相检验 .....	214	六、金相组织缺陷 .....	246
一、概述 .....	214	第二节 锻造缺陷 .....	247
二、铜合金的宏观检验 .....	214	一、原材料缺陷造成锻件缺陷 .....	247
三、铜合金的微观组织检验 .....	218	二、落料不当造成的锻件缺陷 .....	248
第四节 镁合金的金相检验 .....	225	三、锻造工艺不当造成的缺陷 .....	248
一、概述 .....	225	第三节 热处理缺陷 .....	249
二、镁合金的宏观检验 .....	226	一、淬火裂纹 .....	249
三、镁合金显微组织检验 .....	227	二、回火脆性 .....	251
第五节 钛合金的金相检验 .....	228	三、淬火变形 .....	251
一、概述 .....	228	四、其他缺陷 .....	252
二、金相样品制备与侵蚀 .....	229	思考题 .....	253
三、钛合金的金相组织 .....	230	<b>第十四章 失效分析</b> .....	254
四、钛合金金相检验标准 .....	230	第一节 失效分析的目的及意义 .....	254
第六节 硬质合金的金相检验 .....	230	一、失效分析的目的 .....	254
一、概述 .....	230	二、失效分析的意义 .....	254
二、金相样品制备与侵蚀 .....	231	第二节 机械构件失效的主要形式及其	
三、显微组织的鉴别 .....	232	分析 .....	255
四、硬质合金金相检验标准 .....	234	一、变形失效 .....	255
第七节 铁基、铜基粉末冶金制品的金相		二、断裂失效 .....	256
检验 .....	234	三、腐蚀失效 .....	259
一、概述 .....	234	四、磨损失效 .....	263
二、金相样品制备与侵蚀 .....	235	第三节 失效分析思路及方法 .....	265
三、显微组织的鉴别 .....	236	一、失效树分析方法 .....	265
四、粉末冶金制品的金相标准 .....	238	二、失效分析思路 .....	265
第八节 轴瓦合金的金相检验 .....	238	三、失效分析程序 .....	265
一、概述 .....	238	四、加强失效事故的预防措施 .....	268
二、金相样品制备与侵蚀 .....	238	思考题 .....	268
三、金相组织 .....	239	<b>附录 1 金相检验标准应用</b> .....	270
四、金相检验标准 .....	240	<b>附录 2 常用金相检验标准目录</b> .....	273
思考题 .....	241	<b>参考文献</b> .....	276
<b>第十三章 缺陷分析</b> .....	243		

# 第一章 金属学基础

## 第一节 金属与合金的晶体结构

金属和合金在固态时,通常都是晶体。晶体就是那种原子在三维空间中有规则作周期重复排列的物质,就是说,在金属和合金中,原子的排列都是有规则的,而不是杂乱无章的。

### 一、纯金属的晶体结构

#### (一) 金属原子间的结合

金属原子聚集在一起主要是靠金属键结合的。处于聚集状态的金属原子,将各自全部或大部分的价电子贡献出来,为其整个原子集体所共有。这些价电子或自由电子已不再只围绕自己的原子核运动,而是与所有的价电子一起在所有原子核周围按量子力学的规律运动,形成所谓的电子云或电子气。而贡献出价电子的原子则变成了正离子,沉浸在电子云中,它们依靠运动于其间的公有化的自由电子的静电作用而结合起来,这种方式的键合称为金属键。图1-1为其示意图。

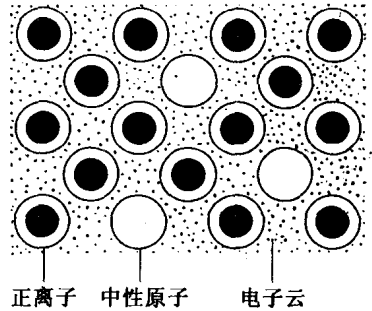


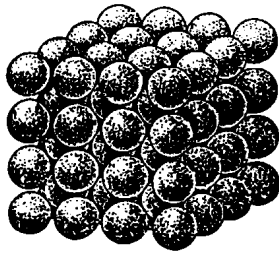
图 1-1 金属键模型

在固态金属中,众多的原子依靠金属键牢固地结合在一起,但是金属原子或正离子又是靠什么力量使它们规则地、紧密地排列在一起的呢?主要是靠原子间的结合能——原子间的排斥能与原子间的吸引能的代数和。在原子的平衡位置上,结合能最低,此时原子也最稳定。当大量金属原子结合成固体时,为使固体金属具有最低的能量,以保持其稳定状态,原子间就必须保持一定的平衡距离,这就是固态金属中的原子趋于规则排列的主要原因。

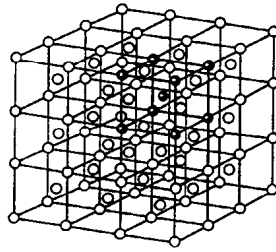
#### (二) 晶体学基础

1. 晶体中的空间点阵 晶体结构是指晶体中的原子或离子、分子等的具体排列情况,也就是它们在三维空间中有规律的周期性的重复排列方式。由于组成晶体的物质质点不同,排列的规律也就不一样,所以就存在各种各样的晶体结构。假设晶体中的物质质点都是固定的刚球,那么,晶体就是由这些刚球堆垛而成,其模型如图1-2a所示。从图可见,原子在各个方向的排列都是很有规律的。为了便于研究,往往把构成晶体的实际质点忽略掉,而将它们抽象地认为是纯粹的几何点,称为阵点或点阵。这种阵点有规则的周期性重复排列所构成的空间几何图形即称为空间点阵。为了方便,可把点阵用直线连接起来形成空间格子,称为晶格(图1-2b)。

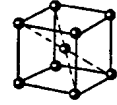
因为晶格中的阵点排列具有周期性,因此,为了研究方便,常从晶格中选取一个能够完全反映晶格特征的最小几何单元来分析阵点排列的规律性,这个最小的几何单元就称为晶胞(图1-2c)。晶胞的大小和形状常用晶胞的棱边长度  $a$ 、 $b$ 、 $c$  及棱边间的夹角  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  表示,



(a) 原子堆垛模型



(b) 晶格



(c) 晶胞

图 1-2 晶体中原子排列示意图

如图 1-3 所示。图中沿晶胞三条相交于一点的棱边也设置了三个坐标轴(又叫晶轴) $x$ 、 $y$ 、 $z$ 。一般以原点前、右、上为正方向。晶胞的棱边长度一般称为晶格常数或点阵常数,在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴上分别以  $a$ 、 $b$ 、 $c$  表示。晶胞的棱边间夹角又称为轴向夹角,通常把  $y-z$  轴、 $z-x$  轴和  $x-y$  轴的夹角分别用  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  表示。

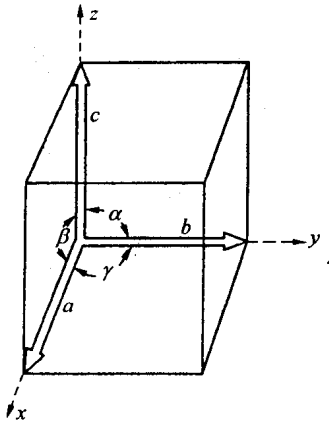


图 1-3 晶胞的晶格常数和轴间夹角表示方法

2. 晶面和晶向 晶体中由一系列原子所组成的平面叫晶面,任意两个原子之间连线所指的方向叫晶向,表示晶向和晶面的数字叫晶向指数和晶面指数。

3. 晶向指数 晶向指数的确定步骤如下:

(1) 以晶胞的三个棱边为坐标轴  $x$ 、 $y$ 、 $z$ ,以棱边长度(晶格常数)作为坐标轴的长度单位;

(2) 从坐标原点引一有向直线平行于待定晶向;

(3) 在所引的有向直线上任意取一点(为了分析方便,可取距原点最近的那个原子),求出该点在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  上的坐标值;

(4) 将三个坐标值按比例化为最小简单整数,依次写入方括号中,即为所求的晶向指数。

通常以  $[uvw]$  表示晶向指数的普遍形式,若晶向指向坐标为负方向时,则坐标值中出现负值,这时在晶向指数的这一数字之上冠以负号,如  $[\bar{1}10]$ 。

原子排列相同但空间位向不同的所有晶向称为晶向族,用  $\langle \quad \rangle$  表示。如  $\langle 100 \rangle$  晶向族表示立方晶系中的  $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 、 $[\bar{1}00]$ 、 $[0\bar{1}0]$ 、 $[00\bar{1}]$  六个晶向指数。

4. 晶面指数 晶面指数的确定步骤如下:

(1) 以晶胞的三条相互垂直的棱边为参考坐标轴  $x$ 、 $y$ 、 $z$ ,坐标原点  $O$  应位于待定晶面之外,以免出现零截距;

(2) 以棱边长度(即晶格常数)为度量单位,求出待定晶面在各轴上的截距;

(3) 取各截距的倒数,并化为最小简单整数,放在圆括号内,即为所求的晶面指数;晶面指数的一般表示形式为  $(hkl)$ ,如果所求的晶面在坐标轴上的截距为负值,则在相应的指数上加一负号,如  $(\bar{1}11)$ 。

与晶向指数相似,某一晶面也是代表一组相互平行的晶面,即所有相互平行的晶面都具有相同的晶面指数。

在同一晶体结构中,有些晶面虽然在空间的位向不同,但其原子排列的情况完全相同,这些晶面均属于一个晶面族,用大括号 $\{hkl\}$ 表示,如在立方晶系中, $\{100\}$ 包含有 $(100)$ 、 $(010)$ 、 $(001)$ 、 $(\bar{1}00)$ 、 $(0\bar{1}0)$ 、 $(00\bar{1})$ 晶面。

5. 六方晶格的晶面指数和晶向指数 如图 1-4 所示, $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $c$  为四个坐标轴, $a_1$  轴、 $a_2$  轴和  $a_3$  轴之间的夹角均为  $120^\circ$ , $c$  轴与  $a_1$  轴、 $a_2$  轴相垂直,其晶面指数以 $(hkil)$  四个指数表示,这样六个柱面的指数分别为 $(10\bar{1}0)$ 、 $(01\bar{1}0)$ 、 $(\bar{1}100)$ 、 $(\bar{1}010)$ 、 $(0\bar{1}10)$  和  $(1\bar{1}00)$ ,它们可归并为 $\{10\bar{1}0\}$ 晶面族。

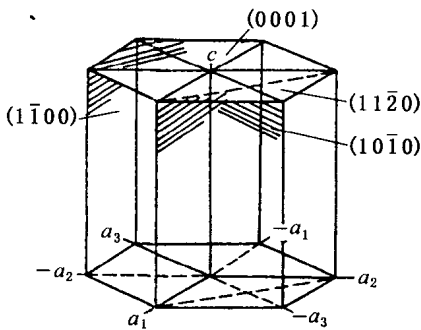


图 1-4 六方晶系的一些晶面指数

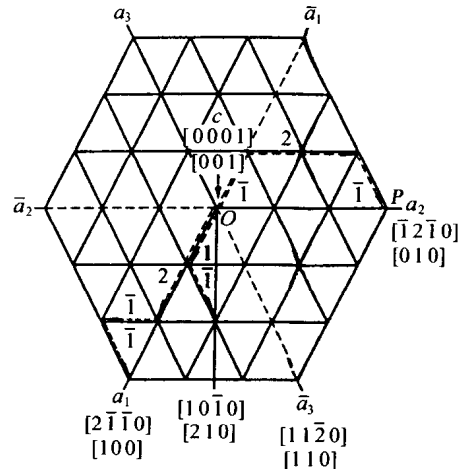


图 1-5 六方晶系晶向指数标定方法

六方晶系的晶向指数既可用三个坐标轴标定,也可用四个坐标轴标定。当用三个坐标轴时,其标定方法与立方晶系完全相同。当用四个坐标轴标定时,如图 1-5 所示,可从原点出发,沿着平行于四个坐标轴的方向依次移动,使之最后到达要标定方向上的某一结点。移动时必须选择适当的路线,使沿  $a_3$  轴移动的距离等于沿  $a_1$ 、 $a_2$  轴移动距离之和的负值(即  $u+v=-l$ ),将各个方向移动距离化成最小整数,加上方括号,即表示该方向的晶面指数。

比较简单的方法是用三个坐标轴求出晶向指数 $[UVW]$ ,然后再根据如下公式换算成四个坐标轴的晶向指数 $[uvw]$ 。

$$\begin{aligned} u &= 2/3U - 1/3V \\ v &= 2/3V - 1/3U \\ l &= -(u+v) \\ w &= W \end{aligned}$$

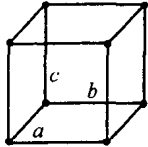
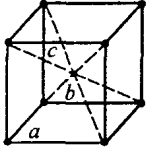
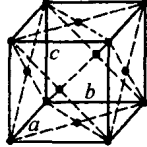
### (三) 纯金属的晶体结构

自然界中的晶体有成千上万种,虽然它们的晶体结构各不相同,但若根据晶胞的三个晶格常数和三个轴间夹角的相互关系进行分类,则可将所有的空间点阵归为 7 种类型,即 7 个晶系。按照“每个阵点的周围环境相同”的要求,布拉菲(Bravais A.)用数学方法推导出能够反映空间点阵全部特征的单位平行六面体只有 14 种,这 14 种空间点阵也称为布拉菲点阵,如表 1-1 所示。工业上使用的金属元素中,绝大多数都具有比较简单的晶体结构,其中

最常见的晶体结构有三种,即体心立方结构、面心立方结构和密排六方结构。前两者属于立方晶系,后一种属于六方晶系。

表 1-1 7 个晶系和 14 种点阵

晶系和实例	点阵类型			
	简单	底心	体心	面心
三斜晶系 $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ $K_2CrO_7$				
单斜晶系 $a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$ $\beta - S$				
正交晶系 $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ $\alpha - S, Fe_3C$				
六方晶系 $a_1 = a_2 = a_3 \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ $Zn, Cd, Mg$				
菱方晶系 $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ $As, Sb, Bi$				
四方晶系 $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ $\beta - Sn, TiO_2$				

晶系和实例	点阵类型			
	简单	底心	体心	面心
立方晶系 $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ Fe、Cr、Ca、Ag				

1. 体心立方晶格 体心立方晶格晶胞的三个棱边长度相等,三个轴间夹角均为  $90^\circ$ ,构成立方体。晶胞的八个角上各有一个原子,在立方体的中心还有一个原子,其模型如图1-6所示。具有体心立方结构的金属有  $\alpha$ -Fe、Cr、V、Nb、Mo、W 等 30 多种。

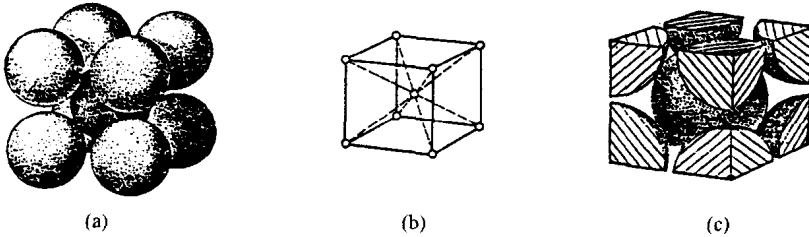


图 1-6 体心立方晶胞及点阵

体心立方晶胞中,原子沿立方体对角线紧密地接触,如假设晶胞的点阵常数(或晶格常数)为  $a$ ,则立方体对角线的长度为  $\sqrt{3}a$ ,它又等于 4 个原子半径,所以体心立方晶胞中的原子半径  $r = \sqrt{3}a/4$ 。体心立方晶胞的原子数则为  $8 \times 1/8 + 1 = 2$ 。在体心立方晶格中,以立方体中心的原子来看,与其最近邻、等距离的原子有 8 个,所以它的配位数为 8。体心立方晶格的晶胞中含有 2 个原子,晶胞的棱边长为  $a$ ,原子半径为  $\sqrt{3}a/4$ ,所以其致密度  $K = nV_1/V \approx 0.68$ (式中  $V_1$  为一个原子的体积,  $V$  为晶胞的体积),即有 68% 的体积为原子所占据,其余 32% 为空隙体积。

2. 面心立方晶格 面心立方晶格晶胞的八个角上各有一个原子,构成立方体。在立方体的 6 个面的中心各有一个原子,如图 1-7 所示。具有面心立方结构的金属有  $\gamma$ -Fe、 $\beta$ -Co、Ni、Al、Ag 等。

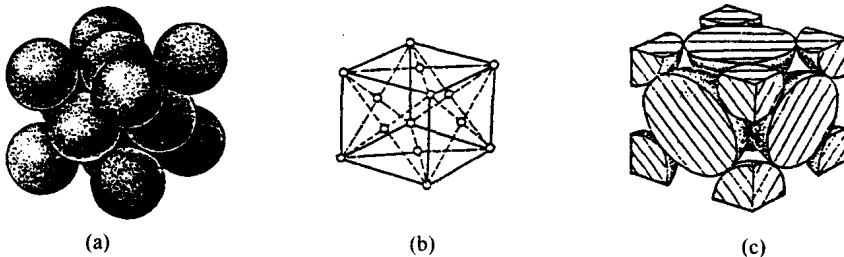


图 1-7 面心立方晶胞及点阵

面心立方晶胞中只有晶胞的 6 个面的对角线上的原子才是相互接触的,所以它的原子



半径为 $\frac{\sqrt{2}a}{4}$ 。每个面心立方晶胞有 4 个原子,其配位数为 12,致密度约为 74%。

3. 密排六方晶格 密排六方晶格的晶胞如图 1-8 所示。在晶胞的 12 个顶角上各有 1 个原子,构成六方柱体,上、下底面的中心也各有一个原子,晶胞内还有 3 个原子。具有密排六方结构的金属有 Zn、Mg、Be、 $\alpha$ -Ti、 $\alpha$ -Co、Cd 等。密排六方晶胞有 6 个原子,配位数为 12,致密度约为 74%。

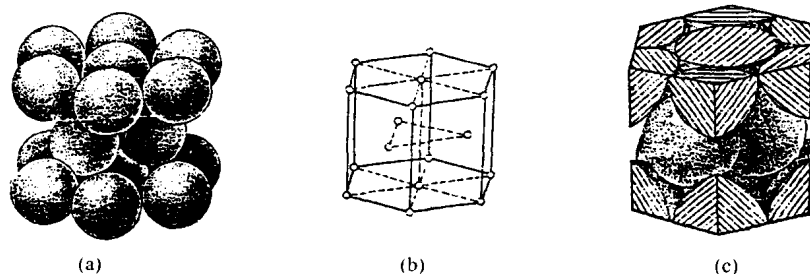


图 1-8 密排六方晶胞

表 1-2 列出了三种典型金属结构的晶体学特点,可供比较。

表 1-2 三种典型金属结构的晶体学特点

结构特征		晶体结构类型		
		面心立方(A1)	体心立方(A2)	密排六方(A3)
点阵常数		$a$	$a$	$a, c(c/a=1.633)$
原子半径 $r$		$\frac{\sqrt{2}}{4}a$	$\frac{\sqrt{3}}{4}a$	$\frac{a}{2}$ 或 $\frac{1}{2}\sqrt{\frac{a^2}{3} + \frac{c^2}{4}}$
晶胞内原子数		4	2	6
配位数		12	8	12
致密度		0.74	0.68	0.74
间隙	四面体间隙 数量 大小	8 $0.225r$	12 $0.291r$	12 $0.225r$
	八面体间隙 数量 大小	4 $0.414r$	6 $0.154r\langle 100 \rangle$ $0.633r\langle 110 \rangle$	6 $0.414r$

## 二、合金的晶体结构

工业上使用的金属材料大多数是合金。由两种或两种以上的金属或金属与非金属经熔炼、烧结或其他方法组合而成并具有金属特性的物质叫合金。如黄铜就是由铜和锌,碳钢就是由铁和碳所组成的合金。

组成合金最基本的、独立的物质称为组元,简称元。一般地说,组元就是组成合金的元素或是稳定的化合物。当不同的组元组成合金时,这些组元之间由于物理的和化学的相互作用,形成具有一定晶体结构和一定成分的相。相是指合金中结构相同、成分和性能均一,并以相界面相互分开的组成部分。由一种固相组成的合金叫单相合金,由几种不同的相组