

新版钢铁技术讲座



钢材的性能与试验

日本钢铁协会编

上海科学技术出版社

新版钢铁技术讲座

第 3 卷

钢材的性能与试验

日本钢铁协会 编

简光沂 译

万永阮乃扬 校

上海科学技术出版社

内 容 提 要

日本“新版钢铁技术讲座”共5卷:1.炼钢与炼铁;2.钢材生产;3.钢材的性能与试验;4.钢材加工;5.铸铁与铸钢。

本书为其第3卷。

本书内容计三篇:(一)钢材的基础:①晶体结构,②平衡状态图,③热处理引起的组织变化,④塑性变形和位错;(二)钢材的性能、规格和用途:①以强度和韧性为主的钢材,②以可焊性为主的钢材,③以耐腐蚀性为主的钢材,④以硬度为主的钢材,⑤以耐热性为主的钢材,⑥以成形性为主的钢材,⑦以电磁特性为主的钢材,⑧以切削性为主的钢材;(三)检验与试验方法:①金属物理测量法,②分析试验,③材料试验,④腐蚀试验,⑤材料检验方法等。

本书反映了日本钢铁工业70年代的新水平;而且说理清晰,文字清新,表达清楚,正如原序所述是一本较好的参考书。

本书读者对象为从事钢铁材料生产、研究与使用的广大工人和技术人员;高等院校有关专业师生亦可参考。

上海工业大学赵子伟同志参加了本书译稿的审校工作。

新版钢铁技术讲座

第 3 卷

钢 材 的 性 能 与 试 验

日本钢铁协会 编

简 光 沂 译

万 永 阮乃扬 校

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 20.25 字数 481,000

1981年4月第1版 1981年4月第1次印刷

印数 1—8,500

书号: 15119·2093 定价: (科四) 1.90 元

CAH/46/03

序

日本钢铁协会曾于1959年(昭和34年)以钢材用户为对象,以讲述材料的正确选择及合理使用为目的,出版了一套《钢铁技术讲座》,共五卷。在刚出版的时候,日本钢铁工业的粗钢产量仅为1663万吨,勉强达到法国的水平。但至1963年则达到了3400万吨,超过英国、西德,跃居世界第三位。以后又取得了举世共知的惊异发展,今天日本粗钢产量已超过1亿吨,成为居世界领先地位的钢铁生产国之一。

在这钢铁工业的发展时期,我们认为作为一本珍贵的参考书,本书的出版不仅对钢铁工业的同行们,就是对其他有关企业来说,也是有所裨益的。

然而,如上所述,此后钢铁技术的发展是惊人的,原来讲座的内容在目前已显得陈旧落后了,有关读者也迫切希望能修订讲座内容。因此,为满足读者的要求,现邀请活跃在第一线的科技工作者重新执笔,修订内容,作为《新版钢铁技术讲座》出版,共五卷。

日本钢铁工业还面临着许多难题,为解决这些难题,今后钢铁产业界及钢铁材料用户仍须共同努力。我们确信,本书的出版对今后钢铁技术的发展和普及对钢铁的新认识,也是大有帮助的。

本书用途广泛,不仅可供从事于钢铁工业的技术工作者参考,而且可供钢材用户及专科学校作教学材料或贵重的参考书使用。若进而能对日本各工业部门的发展有所帮助的话,则更感荣幸了。

最后,在本讲座发行之际,谨向以编辑委员长东京大学松下教授为首的各位编辑委员及作者们致意,对他们的共同努力,表示衷心的感谢。

日本钢铁协会会长 小林佐三郎

1976年9月

序

本书为早在 50 年代后期出版的五卷《钢铁技术讲座》的新版,是为适应 70 年代的需要而重新修订出版的。这期间,关于钢铁科学技术的惊人发展暂且不谈,但就我国钢铁工业在世界经济中所起的作用,以及在进入 80 年代将要承担的责任来说,也许是应该正视的现实。

本书初版的问世,是当时日本钢铁协会会长盖沢正一先生,及《钢铁技术讲座》编辑委员长伊藤正夫领导有关人士共同努力的结果。我们的先辈为我们树立了关于钢铁材料“实用参考书”的样板。去年以来,由于有关方面的迫切要求,决定对书稿进行修订,但出版宗旨依然不变,即以钢材用户为对象,以讲述材料的正确选择和合理使用为目的;为了适应当前社会节约资源和节约能源的需要,力求使工业界人士对钢铁加深认识,同时也考虑使本书能作为高等工业专科学校或大学教科书使用。

内容编排方面,第 1~4 卷的标题与初版相同,但第 5 卷则根据铸钢、铸铁的现状作了改动。第一卷的重点在于掌握钢铁生产的全貌—叙述炼铁技术的发展、直接炼铁、从平炉到转炉的变迁、连续铸钢、钢的特殊处理等。第 2 卷叙述钢铁成品化过程中的轧制和表面加工。第 3 卷介绍钢铁性能的系统概念。第 4 卷则以钢材二次加工为中心进行讲述。总之,本讲座以避免高深的理论,讲述通俗易懂的内容为宗旨。

值得庆幸的是,由于得到各专业委员会主编、编委们的积极协助,以及第一线的各位执笔者的共同努力,本书出版计划进行得很顺利。当此发行之际,协会编辑及地人书馆有关人员,无不感到喜悦。

《新版钢铁技术讲座》编辑委员长 松下幸雄

1976 年 9 月

封面设计 任 意

科技新书目: 189 •

统一书号: 15119 •

定 价: (科四) 1.4

目 录

第一篇 钢材的基础

第一章 晶体结构	1
金属材料技术研究所 渡边 敏	
一、金属的晶体结构	1
(一) 晶体与点阵	1
(二) 晶系与布喇菲点阵	1
(三) 晶向与晶面	3
(四) 面间距	4
二、单晶体与多晶体	5
(一) 单晶体与多晶体	5
(二) 单晶体与多晶体性质的差异	6
三、固溶体与合金	6
(一) 固溶体	6
(二) 合金	6
四、纯铁的相变	7
(一) 纯铁的同素异构转变	7
(二) 加热转变和冷却转变	7
五、钢与马氏体转变	8
(一) 铁与碳的固溶体	8
(二) 钢的马氏体转变	9
(三) 马氏体的晶体取向关系	9
(四) 伴随马氏体转变的膨胀	10
六、点阵缺陷	10
(一) 点阵缺陷的种类和特征	10
(二) 塑性变形与位错	10
第二章 平衡状态图	12
金属材料技术研究所 中岛宏興	
一、热力学和平衡状态图	12
(一) 相和平衡状态图	12
(二) 相律、杠杆定律	12
(三) 自由能和平衡状态图	13
1. 二元合金的状态图	14
2. 三元合金的状态图	15
3. 压力也作为变数的状态图	16
(四) 平衡状态图的实验求法	17
二、铁系二元合金的状态图	17
三、碳钢的平衡状态图	18
第三章 热处理引起的组织变化	22
石川島播磨重工业株式会社 利岡靖继	
一、热处理的意义	22
二、过冷奥氏体的转变	23
(一) 等温转变	24
(二) 连续冷却转变	25
(三) 顶端淬火法	25
(四) 影响过冷奥氏体转变的因素	28
(五) 淬透性倍数	30
(六) 转变相的机械性能	31
三、退火和正火	32
(一) 退火	32
(二) 正火	34
四、淬火	34
(一) 固溶处理	35
(二) 冷却介质和冷却能力	35
(三) 质量效应	37
(四) 顶端淬火试验法的应用	41
五、回火	41
(一) 回火引起的组织变化	41
(二) 回火引起的机械性能的变化	42
(三) 时效变形	45
(四) 回火脆性	45
(五) 时效	46
六、表面硬化处理	49
(一) 渗碳淬火	49
(二) 氮化	50
(三) 渗硫和渗金属保护处理	51
七、利用等温转变图的热处理和形变热处理	51

第四章 塑性变形和位错	52
金属材料技术研究所 中村森彦	
一、拉伸引起的金属变形	52
二、滑移与孪晶	54
(一) 滑移变形	55
(二) 孪晶变形	55
(三) 滑移变形的机理	56
三、位错与钢的性能	57
(一) 位错的性质	57
(二) 位错的增殖	58
(三) 钢铁的强度与位错	59
(四) 固溶强化	60
(五) 析出强化	61
(六) 晶界强化	63
(七) 铁的屈服现象	63
四、加工硬化与回复	64
五、再结晶	66
参考文献	68

第二篇 钢材的性能、规格和用途

第一章 以强度和韧性为主的钢材	71
-----------------	----

株式会社神戸制钢所 高田 寿

一、强度、韧性与断裂	71	(二) 合金机械结构钢	84
(一) 强度	71	1. 种类和机械性能	84
(二) 韧性	74	2. 确保淬透性的结构钢	85
(三) 合金元素对强度和韧性的影响	76	(三) 机械结构钢的用途	85
(四) 延迟断裂	77	四、表面硬化处理	86
(五) 断裂与断口	78	(一) 渗碳	86
1. 晶内断裂	78	1. 固体渗碳法	86
2. 晶间断裂	80	2. 液体渗碳法	86
二、淬透性及各种因素对淬透性的影响	80	3. 气体渗碳法	86
(一) 淬透性	80	(二) 氮化	88
(二) 评价淬透性的方法	80	(三) 高频淬火和火焰淬火	88
(三) 各种因素对淬透性的影响	81	五、超高强度钢	89
1. 合金元素的影响	81	(一) 马氏体钢	89
2. 晶粒度的影响	83	(二) 二次硬化钢	91
3. 淬透性倍数	83	(三) 形变热处理钢	92
三、机械结构钢	83	(四) PH 不锈钢	95
(一) 碳素机械结构钢	84	(五) 马氏体时效钢	96
第二章 以可焊性为主的钢材	97		

日本钢管株式会社 天明玄之輔 田中淳一

一、钢材的可焊性	98	(一) 焊接用软钢的性质	104
(一) 焊接热影响区的性质	98	1. 强度、韧性和塑性	104
1. 焊接区的热滞后	98	2. 可焊性	105
2. 焊接热影响区的材质	99	3. 其他性能	105
(二) 焊接裂纹敏感性	101	4. 焊接结构用软钢的种类和用途	105
1. 低温裂纹与钢材的化学成分	101	三、高强度钢	106
2. 分层	102	(一) 非调质高强度钢	106
(三) 焊接后热处理的影响	103	1. 强度和韧性	108
1. 消除应力退火(SR) 裂纹	103	2. 可焊性	110
2. 消除应力退火脆化	104	3. 其他性能	110
二、焊接结构用软钢	104	4. 非调质高强度钢的种类和用途	110

(二) 调质型高强度钢	114	1. 铝镇静钢	119
1. 强度和韧性	114	2. 低镍钢	119
2. 可焊性	114	3. 8~9% Ni 钢	119
3. 其他性能	115	4. 特殊热处理型 5~7% Ni 钢	119
4. 调质型高强度钢的种类和用途	117	五、具有优良焊接性能的钢	121
四、低温用钢	117	1. 大热量输入自动焊接用高强度钢	121
(一) 低温用钢的性能	117	2. 裂纹敏感性低的高强度钢	121
(二) 低温用钢的种类和用途	118	3. 不易产生分层的钢	122
第三章 以耐腐蚀性为主的钢材	123		
新日本制铁株式会社 细井祐三 岡田秀彌			
一、钢的腐蚀	123	(二) 合金元素对钢耐海水腐蚀性的影响	133
(一) 关于腐蚀的观点	123	(三) 耐海水腐蚀钢的标准和用途	133
1. 阳极和阴极	123	四、不锈钢	136
2. 电池的种类	123	(一) 合金元素对铁的耐酸性的影响	136
3. 电极电位	124	(二) 不锈钢的组织	137
4. 电位-pH图与极化曲线	125	(三) 不锈钢的种类及其特征	139
5. 极化曲线	125	1. 马氏体系不锈钢	139
6. 钝态	126	2. 铁素体系不锈钢	139
(二) 应力与腐蚀(应力腐蚀裂纹)	127	3. 奥氏体系不锈钢	140
(三) 铁在水溶液中的腐蚀	128	4. 双相不锈钢	141
(四) 非金属夹杂物与腐蚀	129	5. 沉淀硬化型不锈钢	142
二、耐大气腐蚀钢	129	(四) 奥氏体系不锈钢耐蚀性方面的缺点	142
(一) 关于钢的耐大气腐蚀性	129	1. 晶间腐蚀	142
(二) 合金元素对钢耐大气腐蚀性的影响	129	2. 点腐蚀和间隙腐蚀	143
(三) 耐大气腐蚀钢的标准和用途	132	3. 应力腐蚀裂纹	143
三、耐海水腐蚀钢	132	(五) 不锈钢的标准和用途	148
(一) 钢被海水腐蚀的特征	132		
第四章 以硬度为主的钢材	152		
大同特殊制钢株式会社 藤原達雄			
一、回火引起的合金钢碳化物的变化	152	(一) 碳素工具钢	162
二、碳化物与耐磨性	154	(二) 合金工具钢	163
三、轴承钢	156	1. 切削工具钢	165
(一) 轴承钢与标准	156	2. 耐冲击钢	166
(二) 轴承钢的性质	156	3. 冷加工用工具钢	166
1. 淬透性	156	4. 热加工用工具钢	167
2. 气体成分和夹杂物含量	157	(三) 高速钢	168
3. 切削性	158	五、中空钢	170
4. 滚动疲劳寿命	158	六、刀具用不锈钢	171
(三) 特殊轴承钢	159	七、高锰钢	172
四、工具钢	160		
第五章 以耐热性为主的钢材	174		
住友金属工业株式会社 行俊照夫			
一、耐热材料的性能要求	174	(二) 短时间抗拉强度	175
二、高温强度	174	(三) 蠕变和蠕变断裂强度	176
(一) 许用抗拉应力	174	三、耐热材料的高温特性	178

四、锅炉用材料	179	(一) 化学工业用高温装置	187
(一) 锅炉用材料	179	(二) 使用材料的特性和存在问题	188
(二) 锅炉用材料使用上的问题	180	1. Incoloy 800 合金	188
1. 美国 TP 321 钢过热器管发生的事故分析	180	2. 耐热铸钢	189
2. 锅炉管使用中的损坏	183	七、原子能用材料	191
3. 不锈钢过热器管的水垢问题	184	(一) 原子反应堆的特征	191
五、透平用材料	185	(二) 使用材料的特性和存在问题	191
(一) 蒸气透平用材料	185	1. 加压水冷反应堆	191
(二) 燃气透平用材料	185	2. 快中子增殖反应堆	192
六、化学工业用材料	187	3. 高温气体反应堆	194
第六章 以成形性为主的钢材	194		
川崎制铁株式会社 大橋延夫			
一、热轧钢板	195	(一) 冷轧钢板的特性与成形性的关系	199
(一) 有关热轧钢板成形性的因素	195	(二) 冷轧钢板的制造要素与深冲成形性的关系	205
二、冷轧钢板	198		
第七章 以电磁特性为主的钢材	208		
新日本制铁株式会社 市山 正			
一、钢铁的电磁性能	208	(二) 各向同性硅钢带的性能和用途	213
(一) 磁化和磁性	208	(三) 各向同性硅钢带的制造方法	214
(二) 磁性的方向性	209	(四) 取向硅钢带的性能和用途	215
(三) 磁性的冶金学因素	209	(五) 取向硅钢带的制造方法	215
二、电工纯铁	211	四、坡莫合金	216
(一) 电工纯铁的性能和用途	211	(一) 铁镍合金的特性	216
(二) 电工纯铁的制造方法	211	(二) 坡莫合金的种类、性能和用途	217
三、硅钢板	213	(三) 坡莫合金的制造方法	217
(一) 硅钢板的种类	213		
第八章 以切削性为主的钢材	219		
爱知制钢株式会社 山本俊郎			
一、钢的切削性	219	(二) 关于易切削元素改善切削性的机理	223
(一) 切削性的评价标准	219	(三) 含铅易切削钢	224
(二) 切屑的形成机理	219	(四) 含硫易切削钢	225
(三) 切削性与化学成分的关系	220	(五) 含钙易切削钢	226
(四) 切削性与显微组织的关系	220	(六) 复合易切削钢	227
(五) 切削性与硬度、塑性的关系	221	三、易切削不锈钢	227
(六) 切削性与冷加工的关系	221	(一) 易切削不锈钢的种类、标准和用途	227
(七) 适于切削加工的热处理组织	222	(二) 易切削不锈钢的耐蚀性和切削性	228
二、易切削钢	222	参考文献	229
(一) 易切削钢的种类、标准和用途	222		

第三篇 检验与试验方法

第一章 金属物理测量法	235
川崎制铁株式会社 藤元克己	

一、组织观察	235	4. 气体温度计	244
(一) 宏观组织检验	235	(二) 热分析法	244
(二) 显微组织检验	235	(三) 热膨胀测定法	245
1. 试样的制取	235	五、弹性与滞弹性	245
2. 试样的研磨	235	(一) 弹性模量的测定	245
3. 试样的腐蚀	236	1. 杨氏模量的测量方法	245
二、晶体分析(X射线衍射)	239	2. 刚性模量 G 的测量方法	246
(一) X射线的产生及衍射	239	(二) 内耗的测量方法	246
(二) 实验方法	239	1. 内耗的测定	247
1. 劳埃法	239	2. 用振动法(动态法)测量弹性常数	249
2. 转动晶体法(摆动晶体法)	239	3. 内耗测量的实例(Snoek Peak)	250
3. 粉末法(D-S法)	240	六、电学性质的测量	250
4. 计数管法(X射线衍射仪测定法)	240	(一) 电阻测量方法	250
(三) X射线衍射的应用	241	七、磁性测量	251
三、电子显微镜及电子衍射的应用	241	(一) 静态特性(直流磁化特性)的测量	251
(一) 电子显微镜的构造和机能	241	1. 电子磁通计	251
1. 电子显微镜的概念	241	2. 直流磁化特性自动记录装置	252
2. 电子光学系统	242	(二) 交流磁化特性的测量	252
3. 电磁透镜系统	242	(三) 铁损的测量	253
(二) 电子衍射	243	(四) 25厘米爱泼斯坦铁损试验	253
1. 限制视场衍射法	243	(五) 转矩计	254
2. 高分辨率电子衍射	243	八、金属状态的物理分析法	254
四、热性质的测定	243	1. 微区(超微粒子)分析用 FEG 电子显微镜	254
(一) 温度测定法	243	2. 离子测微器	255
1. 热电偶	243	3. 俄歇电子分光光谱和低能电子衍射(LEED)	255
2. 电阻温度计	243		255
3. 辐射高温计与光学高温计	243	4. X射线荧光光谱法	255
第二章 分析试验	255		255
川崎制铁株式会社 岸高 寿		(一) 仪器分析的种类	258
一、引言	255	1. 发射光谱分析法	258
二、化学分析	255	2. X射线荧光分析法	259
(一) 化学分析法的种类	256	3. 原子吸收分析法	259
1. 重量法	256	(二) 现行的仪器分析法	260
2. 容量法	256	四、抽样	261
3. 吸光光度法	256	(一) 从液体中取样	261
4. 气化法	256	(二) 从固体中取样	261
5. 电量分析法	256	(三) 从粉块混合物中取样	262
(二) 现行的化学分析法	256	五、分析误差	262
三、仪器分析	258		264
第三章 材料试验	264	新日本制铁株式会社 南雲道彦	
一、拉伸试验	264	1. 杠杆式万能材料试验机	268
(一) 应力和应变	265	3. 其他拉伸试验机	268
(二) 弹性变形和塑性变形	265	(四) 吨位计及伸长计	268
(三) 拉伸试验机	267	(五) 试验及试验值的计算程序	269
1. 油压式万能材料试验机	267	1. 试样平行部分的原始截面积	269

2. 屈服点的测定	269	2. 试验机	275
3. 屈服强度的测定	269	(三) 布氏硬度试验	275
4. 抗拉强度的测定	269	(四) 肖氏硬度试验	276
5. 伸长率的测定	269	(五) 硬度的换算	276
6. 断面收缩率的测定	270	(六) 显微硬度试验	276
二、压缩试验	270	五、冲击试验	276
三、弯曲试验和抗弯试验	270	六、断裂韧性试验	279
(一) 弯曲试验	271	(一) 应力放大系数与断裂韧性	279
1. 弯曲试验	271	(二) 断裂韧性试验方法	280
2. 压弯法	271	七、加工性试验	281
3. 卷弯法	271	(一) 胀凸成形性试验	281
4. V形法	271	1. 杯突试验	281
5. 180° 弯曲及贴紧弯曲	272	2. 液压胀形试验	282
(二) 抗弯试验	272	(二) 圆筒深冲试验	282
四、硬度试验	273	(三) 圆锥模杯突试验	282
(一) 维氏硬度试验	273	八、疲劳试验	283
1. 维氏硬度	273	九、蠕变试验	285
2. 试验机	274	1. 拉伸蠕变试验方法 (JIS Z 2271)	285
3. 压痕的测量	274	2. 拉伸蠕变断裂试验方法 (JIS Z 2272)	285
(二) 洛氏硬度试验	274	十、磨损试验	285
1. 洛氏 C 和 B 标度的硬度	275		
第四章 腐蚀试验	286		
新日本制铁株式会社 湯川 憲一 岡田 秀彌			
一、腐蚀试验概述	286	2. 腐蚀量的表示	290
(一) 腐蚀试验的见解	286	3. 耐蚀性的评价	290
(二) 腐蚀试验中应注意的事项	286	三、实验室的试验方法	291
1. 试样	287	(一) 耐大气腐蚀试验法	291
2. 试验环境	287	(二) 晶间腐蚀试验法	291
二、腐蚀的评价方法	288	(三) 各种晶间腐蚀试验法的意义	293
(一) 耐蚀性的判断方法	288	(四) 点腐蚀、间隙腐蚀试验法	294
1. 外观变化	288	1. 电化学的测定	294
2. 重量及厚度的变化	288	2. 浸渍试验	294
3. 电化学方法	289	(五) 应力腐蚀裂纹的试验法	295
4. 电阻法	289	1. 应力附加法和应力腐蚀裂纹试样的种类	296
(二) 腐蚀试验结果的表示和耐蚀性的评价	290	2. 试剂的选择	297
1. 腐蚀形式的表示	290	四、现场试验	298
第五章 材料检验方法	299		
日本钢管株式会社 天明玄之輔・伊藤 篤			
一、组织检查	299	(四) 断口	308
(一) 宏观组织	299	三、无损检验	309
(二) 奥氏体晶粒度	301	(一) 渗透探伤法	309
(三) 铁素体晶粒度	304	(二) 磁粉探伤法	310
(四) 脱碳层深度	304	(三) 涡流探伤法	310
(五) 显微组织	305	(四) 放射线透射探伤法	311
二、质量检验	306	(五) 超声波探伤法	311
(一) 非金属夹杂物	306	(六) 声波法	313
(二) 发纹	307	参考文献	313
(三) 硫印	308		

第一篇

钢材的基础

第一章 晶体结构

一、金属的晶体结构

(一) 晶体与点阵

金属都是由晶体构成的。所谓晶体即指其原子在三维空间内规则而周期性地排列的固体。由于构成晶体的原子间的结合力相互作用,使能抵抗外力而保持晶体的形状。

晶体的基本性质取决于构成原子的位置或排列。因此,将原子用几何学的点来代替,看作是表示它们位置关系的一种骨架是十分方便的。这样的骨架我们叫它点阵,骨架的交点就叫做阵点^①。

图 1-1 示出了普通点阵的一个示例。图中粗线所包围的平行六面体叫做晶胞,图 1-1(b) 示出了从图 1-1(a) 中取出的一个晶胞。晶胞是表示其晶体特征的最小单位。其形状和大小,可以通过以 O 为原点并从该点引出的三个矢量 a 、 b 、 c 来表示。这三个矢量也可以用来表示点阵位置的坐标轴。此时,叫做 a 轴, b 轴, c 轴,总称为晶轴。因为轴长 a 、 b 、 c 及轴间夹角 α 、 β 、 γ 是该晶胞固有的常数,所以称其为点阵常数。

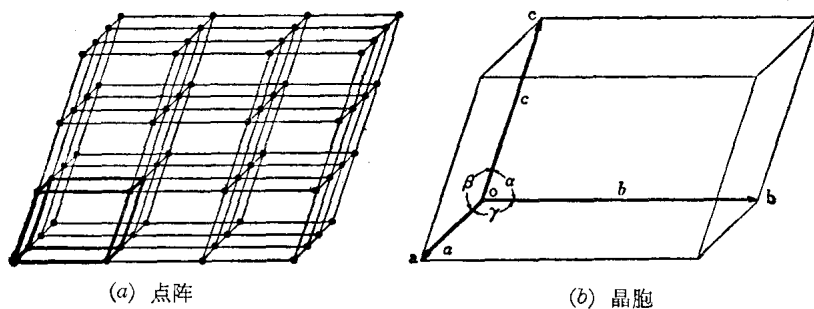


图 1-1 晶体结构

如果假设点阵在三维空间内无限扩展,则可以说,所有阵点相互间均处于完全相同的环
境之下。这是点阵重要的基本性质。

(二) 晶系与布喇菲点阵

根据点阵常数的数值可以认为有无数个点阵。然而考虑到点阵的对称性^②,可以把它们分为表 1-1 中所列的 7 个系列。称其为晶系。图 1-2 上示出了各晶系的晶胞。

① 通常原子都存在于阵点上,但在复杂的晶体中也有几个原子形成一组分布在阵点周围的情况。这时,阵点只不过是表示晶胞的几何学的点罢了,因此,严格地说晶体和点阵是可以分开来的。但在本书中大都混同起来使用。

② 利用 X 射线和电子射线研究晶体性质时,基于固有的原子排列,对对称性起着重要的作用。因此,晶体的分类根据晶胞对称性的观点来进行最为妥当。

表 1-1 晶系

晶 系	立 方	正 方	斜 方	菱 方	六 方	单 斜	三 斜
轴 长	$a=b=c$	$a=b \neq c$	$a \neq b \neq c$	$a=b \neq c$	$a=b \neq c$	$a \neq b \neq c$	$a \neq b \neq c$
轴 角	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	$\alpha=\beta=90^\circ$ $\gamma=120^\circ$	$\alpha=\gamma=90^\circ$ $\beta \neq 90^\circ$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$

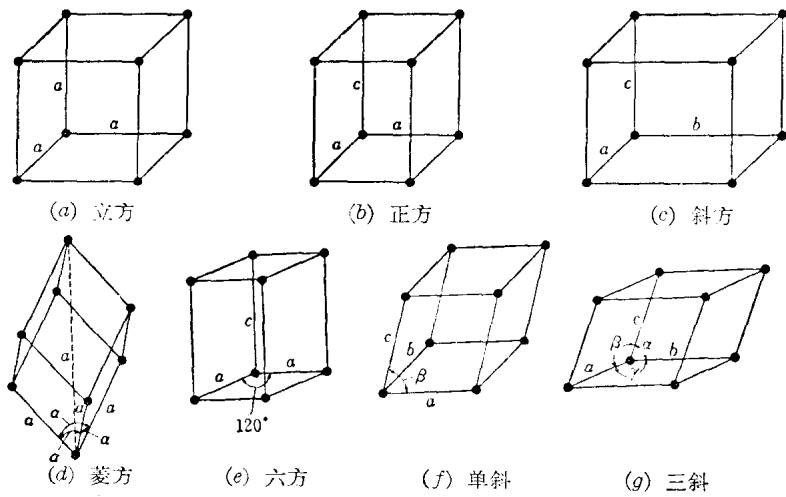


图 1-2 晶系与晶胞

由此可知,所有晶体可分类为这 7 种晶系中的一种,此外,还要考虑能满足作为阵点所需要的条件(即全部阵点都保持同样环境这样一种条件)的其他排列。图 1-3 示出了其中的一个示例。

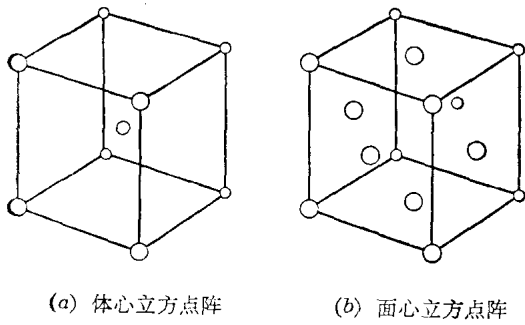


图 1-3 非简单点阵

(a)称之为体心立方点阵,不仅在晶胞的 8 个角上有原子,而且在晶胞中心,即在体心位置上也有原子。(b)称之为面心立方点阵,除了 8 个角之外,在六个面的中心,即面心位置上也各有一个原子。这两种晶胞与表 1-1 的基本晶胞不同,其最大特点是内部也含有原子。这样的晶胞人们称之为非简单点阵。同时,我们把内部不含有原子的叫做简单点阵。

处于非简单点阵特殊位置上的原子,归根到底,与各个角上的原子仍处于完全相同的环境,因此,这样的点阵也满足于晶胞的基本性质。

图 1-4 是以二维表示的体心立方点阵,白圈是各个角的阵点,黑圈是体心的阵点。当然,黑圈并不在纸面上。此时,晶胞以连接白圈的正方形来表示。但是,如果变换一种观察方法,把黑圈看作是各个角的阵点,相反,白圈便占据体心的位置了。在这种情况下,晶胞是连接黑圈的正方形。这一事实表明,白圈和黑圈作为阵点是完全等同的,处于同一环境中。上述关系对于面心立方点阵也同样成立。

上面已经叙述了所有晶体都可以分属于表 1-1 中所列的

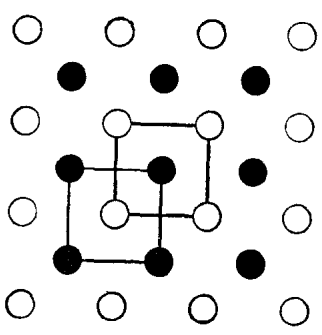


图 1-4 体心立方阵点的等同性

7 种中的一种。非简单点阵最终也可还原为简单点阵。图 1-5(a) 表示仅改变一下晶轴的选择方式便可以使体心立方点阵变为三斜晶系的简单点阵。而其中 b 是占有体心位置的原子。(b) 表示在两个面心立方点阵中间存在有体心正方点阵。这可进一步通过选择虚线所示的晶胞还原成(c)的菱方晶系。

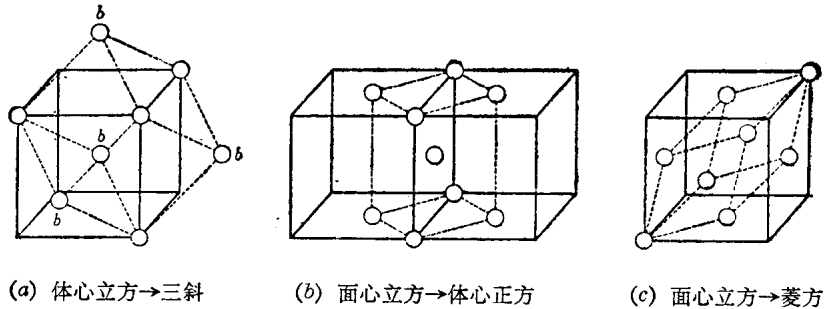


图 1-5 非简单点阵向简单点阵的变换

既然非简单点阵包含在简单点阵之中，又何必进一步定义复杂的非简单点阵呢？因为晶体的性质可用 X 射线和电子束来研究，在这种情况下，晶体的对称性具有特别重要的意义，而且其结果也容易在观测数据上得到反映。在图 1-5(c) 的情况下，测量所得到的信息作为对称性良好的立方晶胞比作为对称性不好的菱方和正方晶胞来分析要容易得多，因此，选择立方晶系作为晶胞。但并不因为改变晶胞的选择方法而对测量数据本身会产生影响。

如果从既保持三维周期性而又尽量提高对称性的角度考虑各角以外的阵点来选择晶胞，则共计有 14 种。并以发明者的名字来命名，称之为布喇菲点阵。当然其中也包括 7 种简单点阵。体心立方点阵和面心立方点阵是布喇菲点阵中的一种。

(三) 晶向与晶面

为了表示晶体内的某个方向，选择晶轴本身作为坐标轴最为方便。此时，任意点的坐标 u 、 v 、 w 可以以各自的轴长为单位来量度。

将坐标 u 、 v 、 w 与原点 O 相连的方向表示为 $[uvw]$ 。当这些指数含有分数时，需将某个数乘以全部指数，化为一组最简单的整数来标记。图 1-6 的 $\overrightarrow{OA}$ 为 $[100]$ ， $\overrightarrow{OF}$ 为 $[111]$ ， $\overrightarrow{OH}$ 为 $[310]$ 。与某一方向平行的方向都看作是等价的。因此，不通过原点的方向则以通过原点与该方向平行的方向来表示。这种作法可以通过由表示方向的矢量端点的坐标减去起点的坐标来进行。此时，若某指数为负值，就在该指数上面标出负号。这样 $\overrightarrow{EG}$ 便为 $[\bar{1}10]$ ， $\overrightarrow{OI}$ 为 $[12\bar{2}]$ 。存在对称关系的方向，用其中的一组指数来表示，可写成 $\langle uvw \rangle$ 。例如，立方晶系的 4 面体对角线 $[111]$ 、 $[\bar{1}\bar{1}1]$ 、 $[\bar{1}1\bar{1}]$ 、 $[1\bar{1}1]$ 可全部用 $\langle 111 \rangle$ 表示。

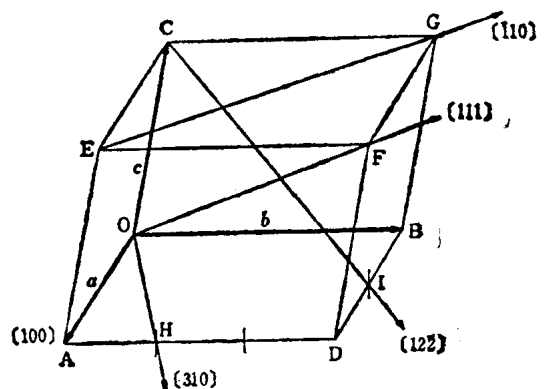


图 1-6 晶向
($\overrightarrow{AH}=1/3b$, $\overrightarrow{BI}=1/2a$)

所谓晶面，是指包含有原子的晶体内部的任意平面。这样的面如图 1-7 所示，就一个晶体来说也可以看出是什么类型的。实际晶体都是三维的，故可进一步看成是具有各种倾斜度的晶面。通常，晶面只有倾斜度是重要的，

与某一晶面相平行的面都是等同的。

晶面也可采用晶胞的晶轴来表示。设某晶面和各晶轴交点距原点长度的倒数为 h 、 k 、 l ，这个晶面即可用 (hkl) 表示之。 h 、 k 、 l 叫做密勒 (miller) 指数，均应将其化为正或负的整数。

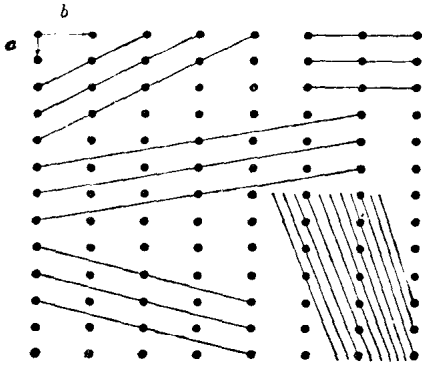


图 1-7 二维表示的晶面

在图 1-8 中，考虑在 a_1 、 b_1 、 c_1 处与晶轴相交的晶面。若设 $\overline{Oa_1} = 1/2a$ ， $\overline{Ob_1} = b$ ， $\overline{Oc_1} = 2/3c$ ，因长度是以各自的轴长为单位测量的，结果分别得 $1/2$ 、 1 和 $2/3$ 。因此，其倒数为 2 、 1 、 $3/2$ 。将这些值各乘以 2 ，结果以密勒指数表示的面就变为 (423) 。立方晶体典型晶面的密勒指数示于图 1-9。由于与晶轴平行的面其交点处于无限远 (无交点)，所以其指数为零。与表示晶向的情况一样，存在对称关系的晶面可以用 $\{hkl\}$ 表示。例如，立方晶体的六个面 (100) 、 (010) 、 (001) 、 $(\bar{1}00)$ 、 $(0\bar{1}0)$ 、 $(00\bar{1})$ ，即可由 $\{100\}$ 表示。

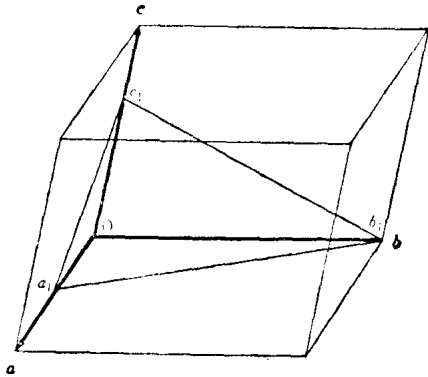


图 1-8 晶胞内的 (423) 面
($\overline{Oa_1} = 1/2a$; $\overline{Ob_1} = b$; $\overline{Oc_1} = 2/3c$)

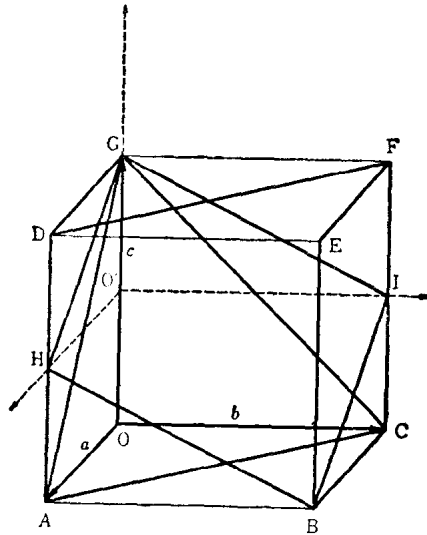


图 1-9 立方晶体典型的晶面
ACGF 面 = (111) ; BCDE 面 = (010) ; ACDF 面 = (110) ;
AOGD 面 = $(0\bar{1}0)$, BIGH 面 = (112)

六方晶体晶面指数的表示方法稍有不同。图 1-10 中的粗线所示为晶胞，然而考虑一下用虚线所表示的包含晶胞的六角柱体，便可知对称性是极好的。所以，除 a_1 、 a_2 、 c 等三个轴外，还同时采用了 a_3 轴，以 $(hkil)$ 表示任意晶面。但是，却存在 $h+k=-i$ 的关系。实际上，根据密勒的表示方法确定晶面的 (hkl) 之后，最好按上述关系增加 i 。补加 i 的理由在于可以在存在对称关系的晶面上附加同类指数。这样，只要一看六角柱体的侧面 $(10\bar{1}0)$ 、 $(01\bar{1}0)$ 、 $(\bar{1}100)$ 、 $(\bar{1}010)$ 、 $(0\bar{1}10)$ 、 $(1\bar{1}00)$ ，便可获知是同类的面，而以 (hkl) 表示时却不具有这种优点。

(四) 面间距

两个相邻的平行晶面之间的距离叫做面间距。利用 X 射线衍射研究晶体结构时，面间

① 若将原点移至 O 位置就容易理解 BIGH 面。AOGD 面在其原来状态下很难用指数来表示，但因强调了 (010) 面在 b 轴上平行移动，所以可以使用这样的指数。

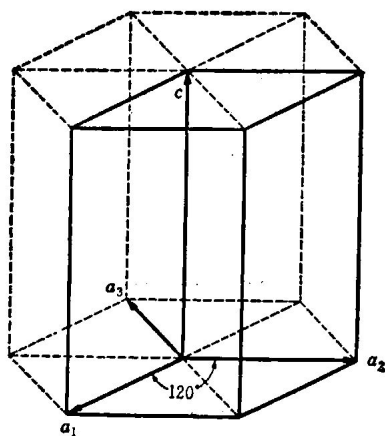
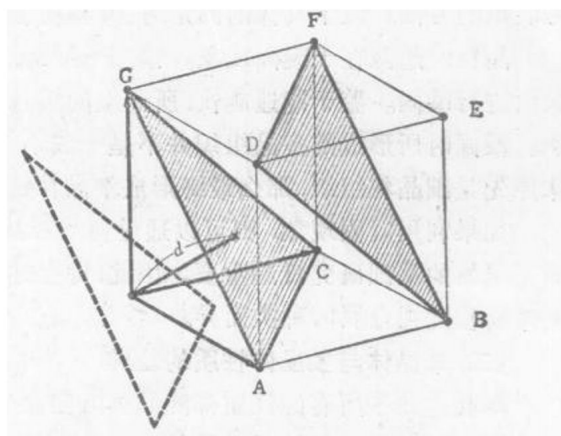


图 1-10 六方晶体的晶胞

图 1-11 (111) 的面间距

距是最重要的因素。也就是说,在面间距与入射线波长 λ 之间存在著名的布拉格衍射条件关系

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (1-1)$$

式中: θ 为衍射角。因此,作为晶面定义的面必定含有入射线散射源的原子。在图 1-8 的面上,虽不包含有原子,但只要密勒指数为整数,那么在其延长面上便含有阵点。

考虑面间距时,如果平行的两晶面中,至少有一个是由通过原点的面所构成,就很方便。图 1-11 上, (111) 是由含有三个阵点的 ACG 面构成的,可以直接看出,与该面相邻的 (111) 面是 BFD 面。但是,如果考虑通过同样阵点之一的原点 O,而且平行于 ACG 面的 (111) 面,那么面间距 d 便可由自原点 O 到 ACG 面所引垂线的长度来求得。

对于立方晶体,任意晶面 (hkl) 的面间距的值 d ,可由其密勒指数按下式计算。

$$1/d = \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} / a \quad (1-2)$$

而 a 则是立方体的点阵常数。

同样,对于立方晶体, (hkl) 晶面还具有这样一种重要的性质,即它与相同指数的 $[hkl]$ 晶向正交。但是,在一般晶系中这一关系并不成立。

二、单晶体与多晶体

(一)单晶体与多晶体

作为整体由一个晶体构成的晶体叫做单晶体,金属只有在特殊情况下才以单晶体存在,一般都由细小的单晶体的集合体构成,这样的晶体叫做多晶体。构成多晶体的一个个单晶体叫做晶粒,晶粒与晶粒之间的边界叫做晶粒边界,或简称晶界。

晶粒的大小,与金属的种类和处理过程有关,不能一概而论,但大多为 100~300 微米(1 微米等于 10^{-3} 毫米)左右。图 1-12 是多晶体的晶界组织的一个示例。表示晶粒大小的方法,除直接表示尺寸的方法而外,还有与用一系列序号定出的标准组织相比较,即用晶粒度序

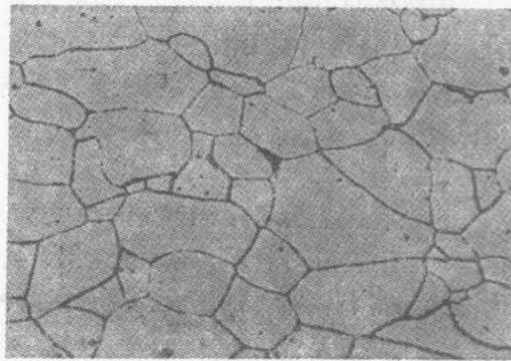


图 1-12 体心立方金属的晶界