

中等专业学校教学用书

金 属 学

(有色冶金专业用)

长沙有色金属学校工艺教研组 编



中国工业出版社

中等专业学校教学用书



金 属 学

江苏工业学院图书馆 (专业用)

藏书章

沙市有色金属学校工艺教研组 编

中国工业出版社

本书阐述了金属及合金的结晶原理，金属及合金的结构、组织、性能及其相互关系；分析了二元及三元系合金状态图；介绍了工程金属材料的牌号、成分、组织、热处理方法、性能和应用；对金属与合金的粗型分析法及显微分析法也作了扼要的介紹。

本书适用于作中等冶金工业学校的有色重金属、輕金属和稀有金属冶炼专业的金属学教学用书，也可供有色金属压力加工专业参考。

本书是由长沙有色金属学校工艺教研組邹石坚、李勤、譚爱賢、俞宗彦、刘炎頂編写的，最后由沈阳有色金属学校金相教研組呂深、李溪审閱。

金 属 学

(有色冶金专业用)

长沙有色金属学校工艺教研組 編

*

冶金工业部工业教育司編輯 (北京猪市大街78号)

中国工业出版社出版 (北京佟麟閣路丙10号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 · 各地新华书店經售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $6^{5/8}$ · 字数168,000

1966年1月北京第一版 · 1966年1月北京第一次印刷

印数0001—2,600 · 定价(科四) 0.80元

*

統一书号: K15165 · 4223 (冶金-653)

目 录

緒 論	1
第一章 金属的晶体结构与结晶过程	4
§ 1-1 金属的特性	4
§ 1-2 金属的晶体结构及其特点	6
§ 1-3 结晶面指数及晶向指数	10
§ 1-4 金属实际晶体的结构(晶体的缺陷)	14
§ 1-5 液态金属的结构	16
§ 1-6 金属的结晶过程	17
§ 1-7 结晶后的晶粒大小	20
§ 1-8 晶体长大方式	21
§ 1-9 铸锭的结晶及结构	23
§ 1-10 金属在固态下的转变	27
第二章 研究金属及合金的方法	31
§ 2-1 粗型分析法	31
§ 2-2 显微分析法	33
第三章 二元合金的相结构及状态图	37
§ 3-1 合金相的结构	37
§ 3-2 相律及其应用	43
§ 3-3 合金状态图的建立	45
§ 3-4 杠杆定理及其应用	48
§ 3-5 共晶型状态图	49
§ 3-6 固态无限互溶型状态图	55
§ 3-7 固态有限溶解的共晶型状态图	59
§ 3-8 固态有限互溶的包晶型状态图	62
§ 3-9 形成化合物的状态图	64
§ 3-10 液态有限溶解的状态图	67
§ 3-11 具有固态转变的合金状态图	68
§ 3-12 合金的性质与状态图的关系	70
第四章 三元合金状态图	73
§ 4-1 三元合金成分的表示方法	73
§ 4-2 三元系中的杠杆定理和重心规则	77

IV

§ 4-3 液态与固态均无限互溶的三元合金状态图	79
§ 4-4 液态互溶、固态不溶, 具有共晶转变的三元合金 状态图	85
§ 4-5 形成稳定化合物的三元合金状态图	93
§ 4-6 液态完全互溶、固态有限互溶、具有共晶转变的 三元合金状态图	96
第五章 金属的塑性变形与再结晶	102
§ 5-1 单晶体的塑性变形	102
§ 5-2 多晶体金属的变形特点	104
§ 5-3 塑性变形对金属组织和性能的影响	105
§ 5-4 加热对塑性变形金属的组织 and 性能的影响	107
§ 5-5 金属的冷加工和热加工概念	109
第六章 铁及其合金	110
§ 6-1 铁-碳状态图	110
§ 6-2 钢的热处理	119
§ 6-3 碳素钢	127
§ 6-4 合金钢	133
§ 6-5 铸铁	145
第七章 铝、镁及其合金	153
§ 7-1 铝	153
§ 7-2 铝合金的分类	156
§ 7-3 铝合金的热处理	157
§ 7-4 变形铝合金	163
§ 7-5 铸造铝合金	168
§ 7-6 镁及其合金	172
第八章 铜、镍及其合金	178
§ 8-1 铜	178
§ 8-2 铜合金	182
§ 8-3 镍及镍合金	196
第九章 锡、铅、锌及其合金	200
§ 9-1 锡与铅	200
§ 9-2 铅及锡的合金	201
§ 9-3 锌及其合金	206
参考文献	208

緒 論

金属学的研究对象及內容 金属学是研究金属及合金的成分、組織和性能之間的关系及其变化規律,以及如何利用人工方法来改善合金組織和性能的科学。随着現代科学技术的飞速发展,有色金属及其合金便成为各工业部門不可缺少的材料。而各种新型有色金属及其合金的应用,已成为噴气技术、宇宙飞行和原子能工业飞速发展的前提。本課程是有色冶金类各专业的重要专业基础課。它包括:

(1) 金属与合金的晶体結構与結晶 研究金属与合金的晶体結構及其特征,以及金属与合金結晶过程的基本規律,結晶条件对金属与合金結晶后的組織和性能的影响。

(2) 合金系状态图 研究各种基本类型的二元及三元合金状态图,合金的組織与成分及溫度之間的关系,并認識其相互間的規律性。

(3) 金属与合金的組織的研究方法 介紹研究和分析金属与合金的内部結構与缺陷的方法。

(4) 工业用金属材料 研究各种常用的金属材料(黑色及有色金属)的成分、組織、热处理、性能及其在現代工业上的应用范围。

金属学的发展 金属学是一門理論和实践性很强的科学,是劳动人民生产經驗的积累和总结的結果,是由于生产的需要而发生与发展起来的。我国是世界上冶炼金属、配制合金、应用金属及合金最早的国家之一,据記載,早在三千多年以前,就掌握了銅、鉛、錫等金属的生产,并能为不同目的 配 制 不同性能的合金,如銅錫合金(青銅)、銅鋅合金(黃銅)等,而且掌握了某些合金元素含量与性质之間の規律,这与現代金属学原理是完全相符的。在一千六百多年前就能制出比重很小的鋁銅合金,且鋁含量达 85%。在掌握生鉄的冶炼技术方面,我国比西 欧 各国要

早一千多年，而在炼鋼技术方面我国也是应用最早国家之一。

在距今一千七百多年的汉朝，就知道用热处理方法来改变刀剑的性能，并且已经注意了冷却剂的影响。在明代的历史文献中記載了以粗型分析为主的檢驗金属与合金内部結構（組織）的方法，而用以判断金属及合金的质量，同时还应用了浸蚀剂，并且詳細总结了我国古代鋼鉄热处理方面的成就，深刻地分析了提高鋼鉄性能的方法。由此可见，我国古代在金属冶炼、提高金属的性能与应用金属及合金方面，达到了相当高的水平。我国古代劳动人民所写下的这段光輝历史，对人类的文明与进步做出了巨大的貢獻。但是由于历代封建王朝和帝国主义的残酷压榨以及国民党的反动統治，劳动人民創造的成果未能获得应有的发展，而且漸漸落后于西方各国。

解放后，我国人民在中国共产党和毛主席的英明领导下，为加速改变我国“一穷二白”的面貌开展了艰巨的斗争，迈开了巨大的历史步伐，在短短的十六年內，在社会主义革命与社会主义建設事业中取得了伟大的成就，我国人民的革命精神，从来没有象现在这样旺盛，我国社会主义的物质基础，从来没有象现在这样强大。在金属学方面，也与其它各个部門一样，建立了专门的研究机构和雄厚的技术队伍，在社会主义建設总路綫的光輝照耀下，結合我国实际資源情况，我們独立自主、自力更生地建立了我国的合金体系。近几年来我国頒布了金属材料的牌号、規格、加工、檢驗等一系列标准。

在金属材料方面，我国已从过去只能生产一般产品进入到能大量生产高級产品的阶段，例如各类高級优质合金鋼，新型有色金属合金，稀有金属及其合金，都能自己生产了，从而为我国工业的大发展創造了良好条件。

随着工农业生产的飞速发展，为加速国家农业現代化、工业現代化、国防現代化和科学技术現代化这一伟大任务，冶金工业負有更重大的使命，必須迅速增加金属材料的数量和品种，提高产品质量，降低成本。因此，金属学的理論与实际工作，必将推

向一个新的发展阶段。

学习目的与学习方法 学习金属学的目的在于：了解金属及合金的成分、組織和性能之間的关系，掌握合金組織变化規律，从而能正确地生产和处理金属材料，合理地使用 and 选择金属材料，为我国社会主义建設事业服务。

学习金属学对了解冶金过程中金属与杂质之間的关系、炉渣反应，合理选择冶炼制度，进行金属提純，正确确定合金軋制、鍛造与挤压时的加热溫度，了解加工前后組織与性能的变化等，也是极为重要的。它是直接帮助冶金工作者認識与了解冶金过程本质的基础。

二元合金状态图是冶炼专业学生学习的重点。它对正确理解合金的性能与成分和組織之間的关系、合金的組織和性能变化規律、金属冶炼的熔渣制度、提純技术的原理具有决定作用。

学习金属学必須遵循毛主席所教导我們的实践、認識、再实践、再認識的認識論去研究和認識問題。从实践入手，借助实验工具，通过試驗（如粗型分析、显微分析、机械試驗、热分析法及其它种种科学实验方法）以判断金属及合金的成分、組織结构、性能及其相互关系。通过实践归納总结而获得理性的認識，用以能动地去改造世界，促进生产的发展。在学习时，切忌死記和滿足一知半解，要善于思考，培养自己認識、分析、解决问题的能力。毛主席教导我們学习的目的全在于用。用，既是学习的目的，也是檢驗学习成績的标准。归根結底，学习的目的是为了参加祖国的社会主义革命和社会主义建設，将社会主义革命进行到底，把我国建設成为一个伟大的社会主义工业强国，实现共产主义。因此，在学习专业的同时，应努力学习政治，学习毛泽东思想，培养坚定的无产階級立场，全心全意为人民服务的观点。沒有正确的政治观点，就等于沒有灵魂。在学习中以毛泽东思想为指导，政治統帅业务，思想带动技术，理論联系实际，坚持又紅又专的方向，坚决走革命化、劳动化的道路，在三大革命运动中，把自己鍛炼成为无产階級革命事业的接班人。

第一章 金属的晶体结构与结晶过程

§ 1-1 金属的特性

各种元素的原子直径非常小，小到万万分之几厘米。为了量度这样小的质点，一般采用一种特殊的长度单位埃 ($\text{\AA}$, $1 \text{\AA} = 10^{-8}$ 厘米)。金属原子的直径大约在 $2.0 \sim 5.5 \text{\AA}$ 之间。

金属区别于非金属的特点是：原子最外层的价电子数较少（少于四个），受核的束缚力较弱，因此在各种化学反应中，容易失去这些价电子，而变成正离子。因此，金属是正电性的元素。其正电性随价电子数的增多而减弱。在金属学中，金属是指宏观的、巨大的原子集合体，如金属块或金属零件。金属原子集合体区别于非金属的特点是，具有高的导电性、导热性、金属光泽和可锻性（可塑性）。

那末金属的同种原子是如何结合起来的，为什么会具有上述

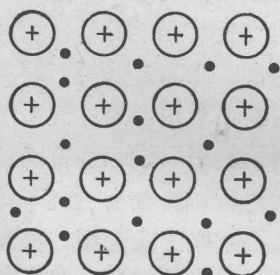


图 1-1 金属键的模型

区别于非金属的特性呢？在金属中原子的价电子不属于某一个原子，在原子（或离子）间自由地运动着，而形成所谓的电子气。正离子与带负电的电子气相互吸引而联结在一起，使金属具有完整性（图1-1）。这种靠正离子与电子气相互吸引的结合，是金属所特有的，称为金属键或金属结合。

金属中存在着金属键，就决定了金属具有区别于非金属的特性。

由于金属原子的价电子与核的作用力微弱，可在正离子间无序地、自由地移动，所以在微弱的电位差的作用下，自由电子就可作定向移动而形成电流。这就显示出金属的良好导电性。

热能是靠自由电子的运动和离子本身的热振动传递的，原子的热振动是所有物质所共有的，而自由电子的运动则是金属物质所特有的。因此，金属比非金属具有良好的导热性。但是由于导热不只取决于自由电子的运动，所以金属与非金属的导热性差别，远比金属与非金属导电性差别小。

在外力引起原子间的相对位移时，正离子与自由电子间仍保持着金属键，这就决定了金属具有可塑性。而非金属则不然，只要原子发生很小的位移，就会使同性离子相互接近而发生斥力使结合破坏（脆裂）。这说明非金属是不可塑的。因此，可以认为，金属是具有良好导电性、导热性、可塑性及金属光泽的物质。但是，有些金属（如铈、镧等），在一般条件下并不能锻压成型，

而有些金属（如铍、铈、镧等）的导电性及导热性与某些非金属差别并不大。因此，上述的特性还不足以区分金属与非金属。那末，还有没有其它特性可以更好地区分金属与非金属？金属与非金属的另一差别是：金属的电阻是随温度升高而增大，而非金属的电阻是随温度升高而减小（图1-2）。这是由于：温度的升高，使金属的正离子的热振动加大，阻碍自由电子的运动，因而使电阻增大，使导电性下降。因此，可以把具有高的导电性、导热性和可塑性，具有金属光泽，其电阻随温度升高而增大的物质，叫做金属。

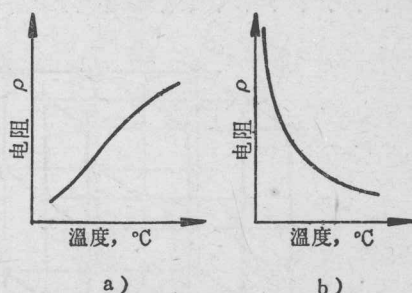


图 1-2 金属 (a) 与非金属 (b) 的电阻与温度关系的示意图

思考题

金属的原子结构特点、结合特点和金属特性之间的关系如何？

§ 1-2 金属的晶体结构及其特点

自然界的固态物质，可以分为晶体与非晶体两大类。晶体的特征是：原子呈規則的排列。因此，自然界中的晶体往往具有規則的几何外形（但金属中的晶体并不具有規則的几何外形）。而非晶物质的原子排列沒有規則性，因此也不具有規則的几何外形。

連結在空間規則排列的原子中心而形成的空間格子，叫做結晶格子（結晶点陣），简称晶格（如图 1-3 a 所示）。为了描繪方便，往往在晶格內取一能代表晶格特点的最小单位来表示晶格的特点。这样具有晶格特点的、在空間有秩序地重复可以形成晶格的最小部分，称为单位晶格，简称晶胞（图 1-3 b）。晶胞的棱边长度叫做晶格常数或点陣参数。

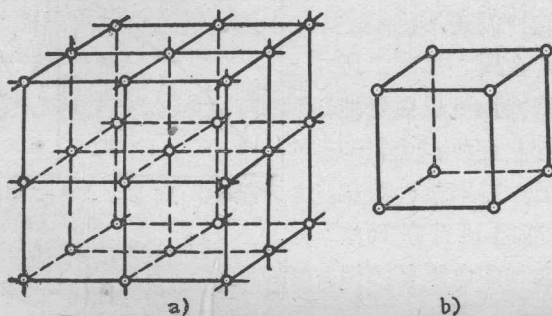


图 1-3 原子在金属內的排列示意图

a—結晶格子（或結晶点陣）； b—晶胞

虽然原子在金属內都呈規則的排列，但排列方式有所不同，这就决定了晶格具有不同的类型。布拉維以数学法推导出晶格共有 14 种类型。

尽管晶格类型共有 14 种之多，但对金属來說，由于金属鍵沒有方向性，金属原子呈紧密的排列时系統能量最低，最稳定，因此，金属多形成如图 1-4 所示的三种最紧密排列的晶格：a）

体心立方晶格；b) 面心立方晶格；c) 密排六方晶格。

表 1-1 列出了各元素的晶格类型。可见，晶格类型也与元素在周期表中的位置有关。

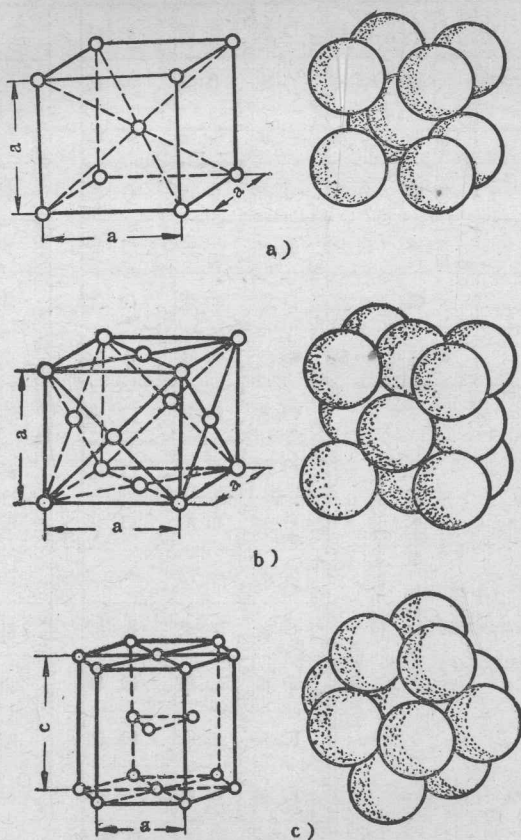


图 1-4 常用金属晶胞示意图

a — 体心立方晶格；b — 面心立方晶格；c — 密排立方晶格

具有体心立方晶格的金属有：钒、钼、钨、 α -铬、钽、 β -钛、铌及 α -铁等。

具有面心立方晶格的金属有：铝、铜、镍、金、银、铂及 γ -铁。

表 1-1 元素周期表

族 周期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H 0	元素晶格代表符号																
2	3 Li 鋰	□ 面心立方	□ 体心立方	□ 金刚石型	□ 复斜立方	□ 六方	□ 密排六方	□ 四方(四方晶体)	□ 三方(菱面晶体)	过渡族元素								
3	11 Na 鈉	19 K 鉀	21 Sc 鈷	22 Ti 鈦	23 V 鈷	24 Cr 鉻	25 Mn 錳	26 Fe 鐵	27 Co 鈷	28 Ni 鎳	29 Cu 銅	30 Zn 鋅	31 Ga 鎵	32 Ge 矽	33 As 砒	34 Se 硒	35 Br 溴	36 Kr 氬
4	37 Rb 鉀	38 Sr 鈷	39 Y 鈷	40 Zr 鈷	41 Nb 鈷	42 Mo 鉬	43 Tc 錳	44 Ru 鈷	45 Rh 鈷	46 Pd 鈷	47 Ag 銀	48 Cd 鈷	49 In 錫	50 Sn 錫	51 Sb 銻	52 Te 碲	53 I 碘	54 Xe 氙
5	55 Cs 銻	56 Ba 鋇	57-71 鐳系元素	72 Hf 鈷	73 Ta 鈷	74 W 鈷	75 Re 鈷	76 Os 鈷	77 Ir 鈷	78 Pt 鈷	79 Au 鈷	80 Hg 鈷	81 Tl 鈷	82 Pb 鈷	83 Bi 鈷	84 Po 鈷	85 At 鈷	86 Rn 氡
6	87 Fr 鈷	88 Ra 鈷	89 Ac 鐳系元素	90 Th 鈷	91 Pa 鈷	92 U 鈷	93 Np 鈷	94 Pu 鈷	95 Am 鈷	96 Cm 鈷	97 Bk 鈷	98 Cf 鈷	99 Es 鈷	100 Fm 鈷	101 Md 鈷	102 No 鈷	103 Lr 鈷	104 Rf 鈷
7	105 Db 鈷	106 Sg 鈷	107 Bh 鈷	108 Hs 鈷	109 Mt 鈷	110 Ds 鈷	111 Rg 鈷	112 Cn 鈷	113 Nh 鈷	114 Fl 鈷	115 Mc 鈷	116 Lv 鈷	117 Ts 鈷	118 Og 鈷	119 Lr 鈷	120 Uu 鈷	121 Uub 鈷	122 Uut 鈷

鐳系元素

57 La 鐳	58 Ce 鈷	59 Pr 鈷	60 Nd 鈷	61 Pm 鈷	62 Sm 鈷	63 Eu 鈷	64 Gd 鈷	65 Tb 鈷	66 Dy 鈷	67 Ho 鈷	68 Er 鈷	69 Tm 鈷	70 Yb 鈷	71 Lu 鈷
------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------

具有密排六方晶格的金属有：鎂、鋅、銅、鋁、 α -鈦、 α -鋁、 α -鈷及鈳等。表 1-2 列举了部分金属的晶格常数。

表 1-2 金属的晶格常数举例

体心立方晶格		面心立方晶格		密排六方晶格		
金属	晶格常数 (Å)	金属	晶格常数 (Å)	金属	晶格常数 (Å)	
					a	c
Cr	2.89	Al	4.05	Mg	3.20	5.20
W	3.15	Cu	3.60	Zn	2.65	4.93
Mo	3.14	Pb	4.94	Cd	2.97	5.60
Bi	3.04	Au	4.08	Be	2.26	3.59
Ta	3.30	Pt	3.93	Re	2.76	4.47
Nb	3.29	Rn	3.79	Hf	3.18	5.04
α -Fe	2.87	γ -Fe	3.63	α -Co	2.50	4.61
β -Ti	3.32	β -Ni	3.51	α -Ti	2.95	4.67
β -Zr	3.61	β -Co	3.53	α -Zr	3.22	5.12
V	3.03	Th	5.07	Y	3.66	5.81

晶胞中的原子数目是晶体结构重要的特点之一，每种晶格的晶胞中的原子数是不同的。如在体心立方晶格中晶胞中的原子数为 2（每个顶角的原子为八个晶胞所共有，而这样原子共有 8 个，所以属于每个晶胞的只有一个，再加上体心的一个，共有 2 个）。面心立方晶格晶胞中的原子数为 4（每个面中心的原子为两个晶胞所共有）。密排六方晶格晶胞中的原子数为 6。

原子所占体积与晶格总体积之比，叫做晶格的致密度。如果将原子看成球形，则可算出，在体心立方晶格中，晶格致密度为 0.68，面心立方晶格与密集六方晶格的晶格致密度均为 0.74。

距任一原子等距离的、最近的原子数目称为晶格的配位数。体心立方晶格的配位数为 8，面心立方及密排六方晶格的配位数均为 12。可见，配位数愈大，晶格的致密度就愈大。

在晶体不同的方向上原子排列的密度不同，原子间的结合力也不同，这使晶体在各个方向上的性能也不同。这种现象叫做各向异性或有向性，如铁单晶体不同方向的弹性模数在 13500~

29000 公斤/毫米² 范围内变化。晶体的力学性能、导热性、导电性、热膨胀性和耐蚀性等，在不同程度上都是各向异性的。

现已确定，所有固态金属及其合金均为晶体。

思 考 題

1. 晶胞、晶格常数、配位数的含义？
2. 常用金属有哪几种晶格类型，分析一下这几种晶格的特点。

§ 1-3 结晶面指数及晶向指数

在晶体中可以任意地通过原子结点中心連結成无数的原子平面。通过结点中心連成的原子平面称为结晶面，简称晶面。由晶格结点組成的任一直綫，代表晶格空間內的一个方向，称之为结晶方向，简称晶向。

由于晶体內存在无数的晶面和晶向，因此为了便于研究晶体的结晶过程和晶体在压力加工过程中的塑性变形，有必要分别采用晶面指数与晶向指数来表示晶体中不同的晶面与晶向。在立方晶体中，采用密氏指数来表示不同的晶面和晶向。

1. 晶 面 指 数

确定晶面指数的方法，可以归納为如下几个步骤：

(1) 选取参考坐标軸（坐标的原点应在所欲确定的晶面之外），以晶格常数为长度单位，找出所欲确定的晶面在各軸（ x 、 y 、 z ）上的截距；

(2) 取截距的倒数；

(3) 以公倍数乘各数得最小整数；

(4) 将各整数放入圓括弧內，如 (hkl) ，即为該晶面的晶面指数。

如图 1-5 中所示的晶面，它在 x ， y ， z 三个軸上的截距分别为 2，3，1，其倒数为 $1/2$ ， $1/3$ ，1。因而，所示的晶面的晶面指数为 (326) 。

显然，晶面在某晶轴上的截距愈大，则在晶面指数中与该晶轴相对应的数字将愈小。如果一晶面平行于某轴，则相对应的数字为零。例如，某晶面的截距为 $2, 3, \infty$ ，则该晶面密氏指数为 (320) 。

图 1-6 分别表示立方晶体中某些重要晶面的密氏指数。

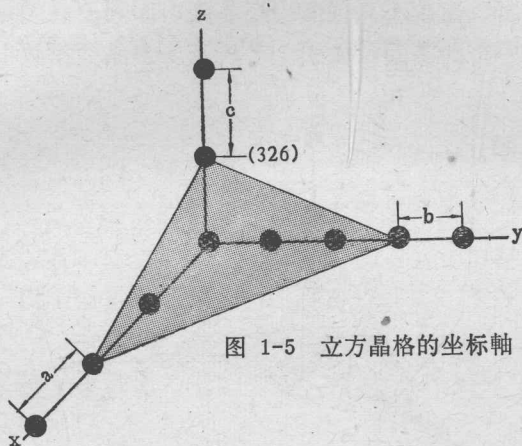


图 1-5 立方晶格的坐标轴（晶轴）

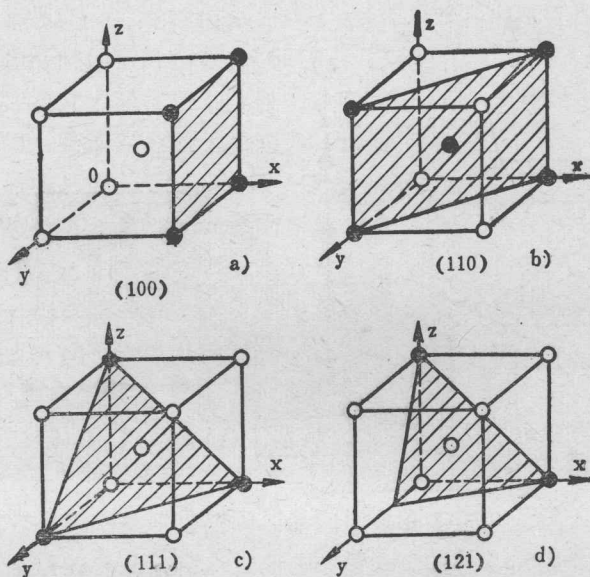


图 1-6 立方晶体中的晶面指数

如果一个晶面与坐标轴相交于负的一边，则在指数的对应数字上加一短横线来区别。如某晶面的截距为2，-3， ∞ ，则该晶面的晶面指数为 $(3\bar{2}0)$ 。

必须指出，由于密氏指数是指各轴截距倒数的最小整数比，因此固定的密氏指数不只代表一个晶面，而同一晶面指数，可代表一组相互平行的晶面，如图 1-7 所示。当晶面指数中的数字相

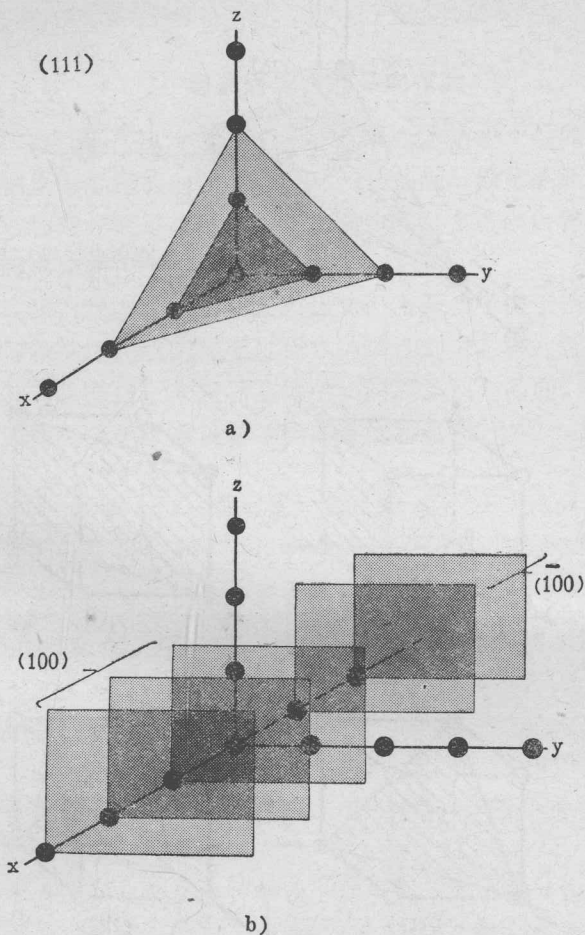


图 1-7 立方晶体中指数较简单的晶面的平行晶面