



互联网+珠宝系列教材

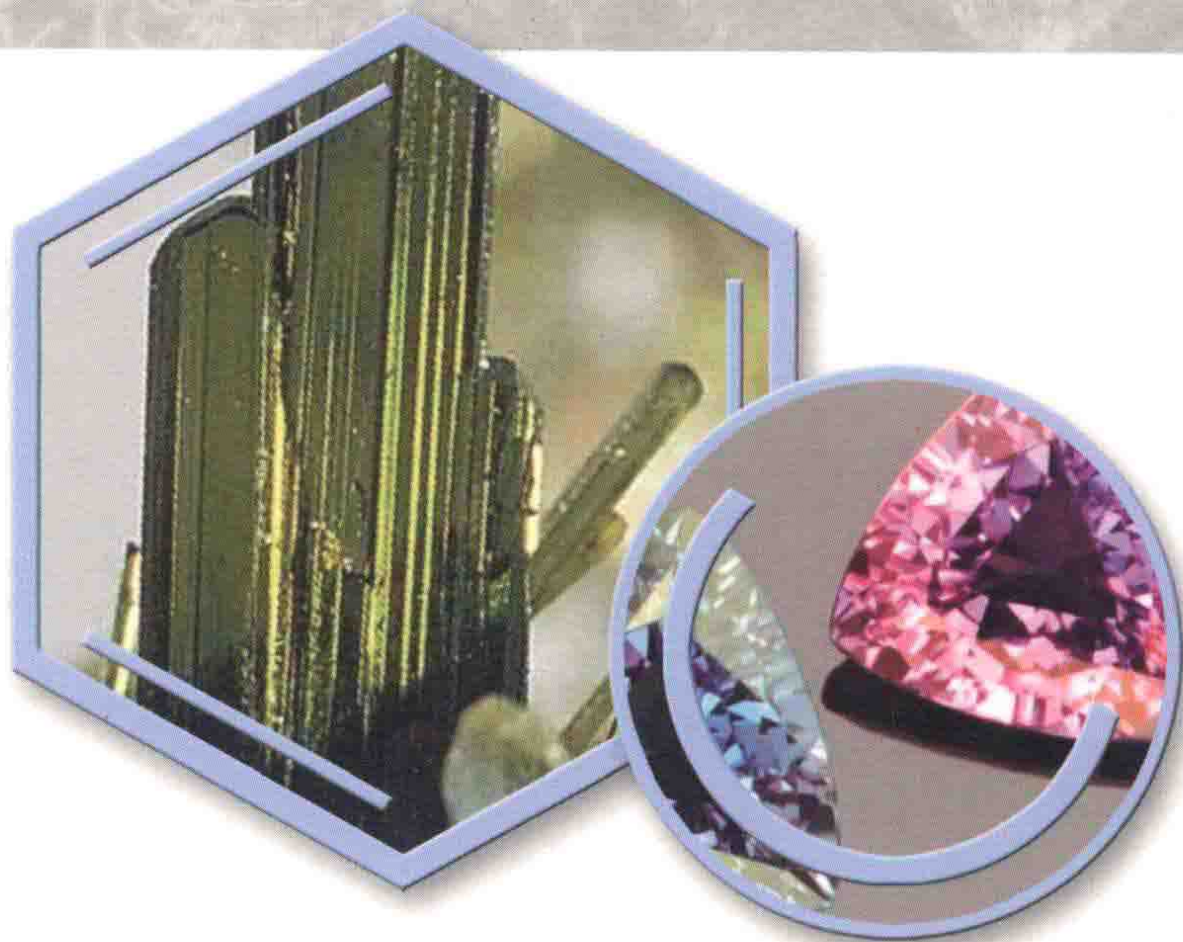
高等院校珠宝专业“十三五”规划教材

结晶学及 晶体光学

含附件

JIEJINGXUE JI JINGTI GUANGXUE

主 编 杨琇明



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

高等教育珠宝专业“十三五”规划教材

结晶学及晶体光学

含附件

JIEJINGXUE JI JINGTI GUANGXUE

杨琇明 主编



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

图书在版编目(CIP)数据

结晶学及晶体光学:含附件/杨琇明主编. —武汉:中国地质大学出版社,2018.7

ISBN 978-7-5625-4314-5

- I. ①结…
- II. ①杨…
- III. ①晶体学 ②晶体光学
- IV. ①07

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 155604 号

结晶学及晶体光学:含附件		杨琇明 主编
责任编辑:张旻玥	选题策划:张 琰	责任校对:周 旭
出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)		邮政编码:430074
电 话:(027)67883511	传 真:67883580	E-mail:cbb@cug.edu.cn
经 销:全国新华书店		http://cugp.cug.edu.cn
开本:787 毫米×1092 毫米 1/16	字数:253 千字	印张:9.75 插页:1
版次:2018 年 7 月第 1 版	印次:2018 年 7 月第 1 次印刷	
印刷:湖北睿智印务有限公司		
ISBN 978-7-5625-4314-5		定价:188.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

序

宝石学古老又年轻,自 20 世纪 90 年代初至今,得益于改革开放和经济的快速发展,在中国也得到了蓬勃发展。宝石学的概念不断被扩大和丰富。宝石学已成为集地质、材料、物理、经济、艺术等为一体的以宝石为载体的综合学科。科研内容也丰富多彩,从品种的分类定名,真假鉴定,天然、合成、优化处理鉴定,品质评价等宝石学经典检测课题,到矿物成因,颜色成因,合成方法和条件,优化处理的机理和过程等基础研究。然而,作为宝石学最重要的科学支柱,结晶学及晶体光学是学习宝石的人不可缺少且必须学好的基础理论之一。绝大多数宝玉石是晶体,即单晶体和多晶体集合体,其光学性质、形态包括微形貌等各种各样的物理性质都与矿物的成分、晶体结构、晶体的对称性等密切相关;电磁波与宝玉石之间的相互作用,如反射、透射、吸收、衍射、干涉、全内反射、双折射、发光性等,不仅是宝玉石检测鉴定中常用的各种方法,也是宝玉石美学设计、展示之根本所在。

本书的主编杨琇明先生是我国珠宝教育、培训和仪器设计制造方面优秀的资深专家,有丰富的第一手实践经验和扎实的理论功底。本书内容由浅入深,图文并茂,作者将现代互联网及 3D 技术有机地运用到教学过程,将难懂的理论如此简单直观精确地展示给读者。如此好书,只叹来得太晚。

《结晶学及晶体光学》是宝石学人的基础课程教材。这本书的问世归功于作者几十年的执著和努力。本书内容充实,结构严谨,值得宝石界、矿物界及广大珠宝爱好者、收藏者阅读,以获得茅塞顿开或精益求精之裨益。

祝贺这本书的出版!

陆太进

2018 年 7 月 2 日

前言

出国多年,回国后,欣喜地看到中国的珠宝教育如此欣欣向荣,遍地开花。忆想当年中国珠宝教育的奠基人——陈钟惠教授所做的一步一步扎扎实实的工作,如苍山,似大海,为教授过早离我们而去潸然泪下。

然而,考察过一些大学、高职院校后,特别是我孩子参加了一些职业培训班的学习之后,对国内的宝石学教育现状却有一些担忧。

首先,由于社会发展太快,我们只希望快出人才、早出人才,往往忽视了最基础的知识教育。结晶学和晶体光学是学习宝石学最基础的两门课,而恰恰是这两门课许多学校和培训机构没有给学生讲明白,讲透彻。基础不牢,何以建高楼大厦?与我孩子同时参加培训班的一些同学,每每遇到宝石的一些现象和概念不能理解的情况,其实,都是因为没有学好结晶学和晶体光学;其中,不乏多次参加培训的同学,在我孩子给他们讲授一些基本概念后,顿时茅塞顿开,豁然开朗。这再次说明,基础知识教育是最基本的教育,是重中之重。其次,结晶学和晶体光学需要一些空间想象的能力,而这些能力的培养是需要相应的实验配套才能达到的。一些学校严重地缺乏教具,更缺乏如何应用教具教授的教员。另外,由于大多数学校的宝石学教育是依托于原来的地质学教育,教授结晶学和晶体光学的教材也多沿用现有的供地质学专业学生使用的教材,教授的教员也是原来教授地质学的老师,许多教授的内容与宝石学是脱节的。

新编的《结晶学及晶体光学》供宝玉石学专业学生使用,希望能为解决这些问题提供一些帮助。

我孩子——杨恒宇,不是地质学的科班出身,年轻人没有我们这些老朽的条条框框,我想让他来编写初稿不仅对他自己是一次再学习的机会,而且也许会给本书带来一些新意。成稿之后,请亓利剑教授、赵珊茸教授、陈美华教授、叶松教授对全书进行了修改,感谢李勋贵高级研究员、廖任庆高级讲师、张良钜教授提供了一些视频、图片及PPT素材,最后定稿。

新编的《结晶学及晶体光学》有如下一些特点:

1. 本书短小精干,文字简明扼要,将大量的图件、解释性资料放在互联网上,便于教师和学生查阅。
2. 配有教学模型,使得书上的平面图示成为了立体的,可供同学反复操作。
3. 配有视频、动画、PPT教学课件;如有需要,通过互联网,可以提供实时的教学。本书有中文版,后续发行英文版,不仅为国内外的宝石学教育提供了基础教材,也可以作为国内大学生的专业英语教材。

4. 本书强调学习的过程,是同学自己探索的过程,一些内容只讲授最基本的知识,其推广和总结性的内容,则需要同学自己去发现、研究和总结。

本书献给中国珠宝教育的奠基人陈钟惠教授。希望能为珠宝学教育添砖加瓦。

杨琇明

2018 年劳动节于武汉

目 录

上篇 结晶学

第一章 晶体、非晶质体和胶体的概念	(3)
一、晶体	(3)
二、点阵、空间格子	(4)
三、非晶质体	(7)
四、胶体	(8)
第二章 极射赤平投影	(10)
一、面角守恒定律	(10)
二、球面投影	(10)
三、极射赤平投影	(13)
四、吴氏网	(14)
第三章 晶体的对称	(16)
一、对称的概念	(16)
二、晶体的微观对称性和宏观对称性	(16)
三、晶体的宏观对称要素	(17)
四、晶体的对称要素组合	(21)
五、晶体的对称型	(22)
六、晶体对称的分类	(25)
第四章 晶体定向	(26)
一、晶体微观定向——14 种空间格子	(26)
二、晶体宏观定向	(30)
第五章 理想晶体的形态	(40)
一、单形的概念	(40)
二、单形的推导	(40)
三、晶面符号和单形符号	(45)
四、单形类型	(50)

五、聚形	(53)
第六章 晶体的实际形态	(55)
一、晶体生长简介	(55)
二、天然晶体——矿物的形态	(62)
第七章 晶体化学简介	(71)
一、化学键和晶格类型	(71)
二、等大球最紧密堆积	(73)
三、配位数、配位多面体	(75)
四、同质多像	(75)
五、类质同像	(77)
第八章 宝石矿物的物理性质	(80)
一、宝石矿物的光学性质	(80)
二、宝石矿物的力学性质	(85)
三、宝石矿物的其他物理性质	(89)

下篇 晶体光学

第九章 可见光及光的传播	(95)
一、光的波动性	(95)
二、光的几大定律和现象	(96)
第十章 光率体与光性方位	(103)
一、均质体光率体	(103)
二、非均质体光率体	(104)
三、光性方位	(113)
第十一章 自然白光照射下晶体的光学性质及应用	(115)
一、颜色、光泽和透明度	(115)
二、宝石矿物的色散	(115)
三、宝石矿物的吸收光谱	(117)
四、变色效应	(120)
五、全内反射、色散与宝石的琢型	(121)
六、放大镜、显微镜	(127)
七、宝石的变彩效应	(130)
八、猫眼效应和星光效应	(131)
第十二章 单偏光下晶体的光学性质及应用	(132)
一、宝石的吸收性和多色性	(132)

二、折射仪 (133)

三、偏光仪 (136)

第十三章 正交偏光下晶体的光学性质及应用 (138)

一、正交偏光仪的结构 (138)

二、偏光仪的使用方法 (138)

三、消光类型 (138)

第十四章 锥光下晶体的光学性质及应用 (140)

一、波向图 (140)

二、一轴晶干涉图 (141)

三、二轴晶干涉图 (142)

主要参考文献 (146)

「上篇」

结晶学

第一章 晶体、非晶质体和胶体的概念

一、晶体

自然界已发现的天然矿物约 3 800 种,绝大多数都是晶体。要学习矿物,掌握常见的宝石矿物和造岩矿物,必然要涉及到晶体。

那么,什么是晶体呢?

在野外,我们经常可以在某些岩石中,特别是在岩石的空洞或裂缝中发现一些矿物,它们的表面被许多天然长成的平面——晶面所包围,呈现某种特定的几何多面体。例如长在岩石空隙中的 α -石英经常呈带有尖顶的六方柱体[图 1-1(a)];而内陆盐湖中的石盐则经常长成一个个立方体[图 1-1(b)]。最初,人们只是把这些具有天然几何多面体外形的矿物称为晶体。



(a) α -石英晶体



(b) 石盐晶体

图 1-1 呈几何多面体外形的晶体

20 世纪 20 年代人们将 X 射线应用于晶体结构的研究,证实了在一切晶体中,其组成物质的质点(原子、离子、离子团或分子等)在三维空间是有规律重复排列的。以石盐晶体为例:图 1-2(a)为石盐晶体的结构图,图 1-2(b)是从石盐晶体选取的能代表石盐晶体结构重复规律的最小单位(晶胞)。图中大球代表氯离子,小球代表钠离子。



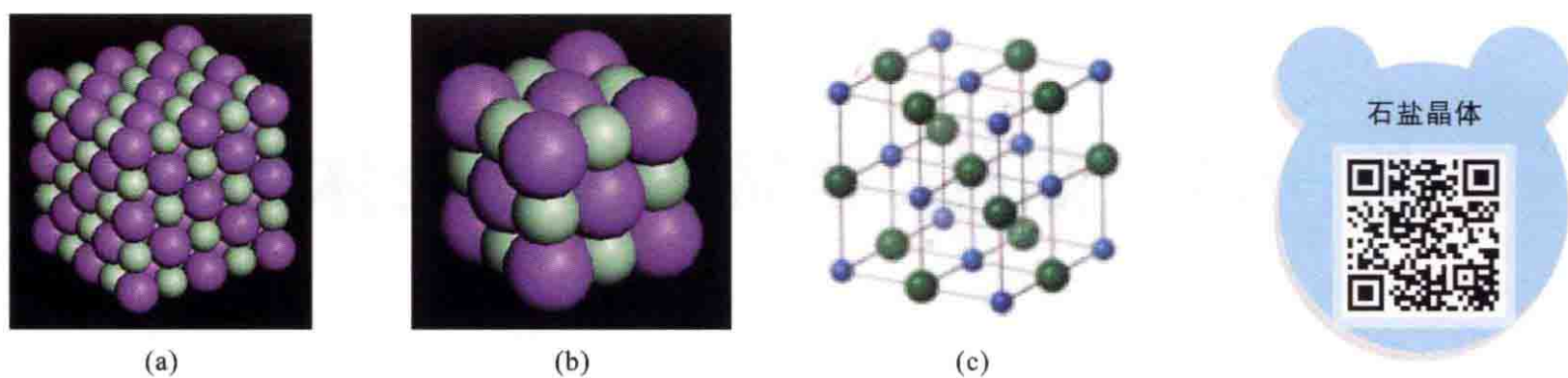


图 1-2 石盐的晶体结构

可以看出,氯离子和钠离子在三维空间各自按一定的间距重复排列。如:沿着立方体三条棱的方向,氯离子和钠离子都是每隔 0.5628nm 重复一次,而沿着对角线方向,都是每隔 0.3973nm 再现一次,其他方向情况相似,只是重复的间距不同。用直线将氯离子和钠离子的中心点连接起来,将代表氯离子、钠离子球的半径缩小,就得到如图 1-2(c) 所示的图形。研究发现,所有石盐,不论外部形态是否规则,其内部质点都是如图 1-2 所示的立方格子排列。石盐之所以能够长成立方体的规则外形,是内部质点遵循格子构造规律排列的结果。晶体与非晶质体的区别就在于晶体的内部质点是在三维空间作有规律的重复排列;晶体这种重复规律是整体性的,这种在图形中贯彻始终的规律称为“长程有序”。在非晶态(液态和气态)结构中,原子排列没有规律周期性,原子排列从总体上是无规则的,但是,近邻的原子排列是有一定规律的,这就是“短程有序”,它们不会有“长程有序”。

二、点阵、空间格子

1. 点阵

晶体是内部质点在三维空间作有规律的重复排列构成的结构。首先考虑一张二维周期性结构的图像,如图 1-3(a) 所示。可在图上任选一点 O 作为原点,在图上就可以找到一系列与 O 点质点种类和周围环境完全相同的点——相当点,如图 1-3(b) 所示,再将这一组无限多的点抽象成几何点就构成了点阵,如图 1-3(c) 所示。将图像作一平移,对应于从原点 O 移至任意点的位置,图像仍然不变。这种不变性表明点阵反映了原结构的平移对称性。上述的考虑显然可以推广到具有三维周期性结构的无限大晶体。应该指出,原点位置可以任意选,但同一种晶体得到的点阵却是等同的。

点阵、基元和晶体结构的关系可以表示为:晶体结构=点阵+基元(图 1-4)。结构基元可以是原子、分子、离子、原子团或离子团等。

总结一下上述基本概念。

(1)相当点:晶体结构中物质组成和几何环境皆相同的点。

(2)相当点系:由相当点组成的点系列,我们将抽象出来的点系列称为点阵。同一晶体中,

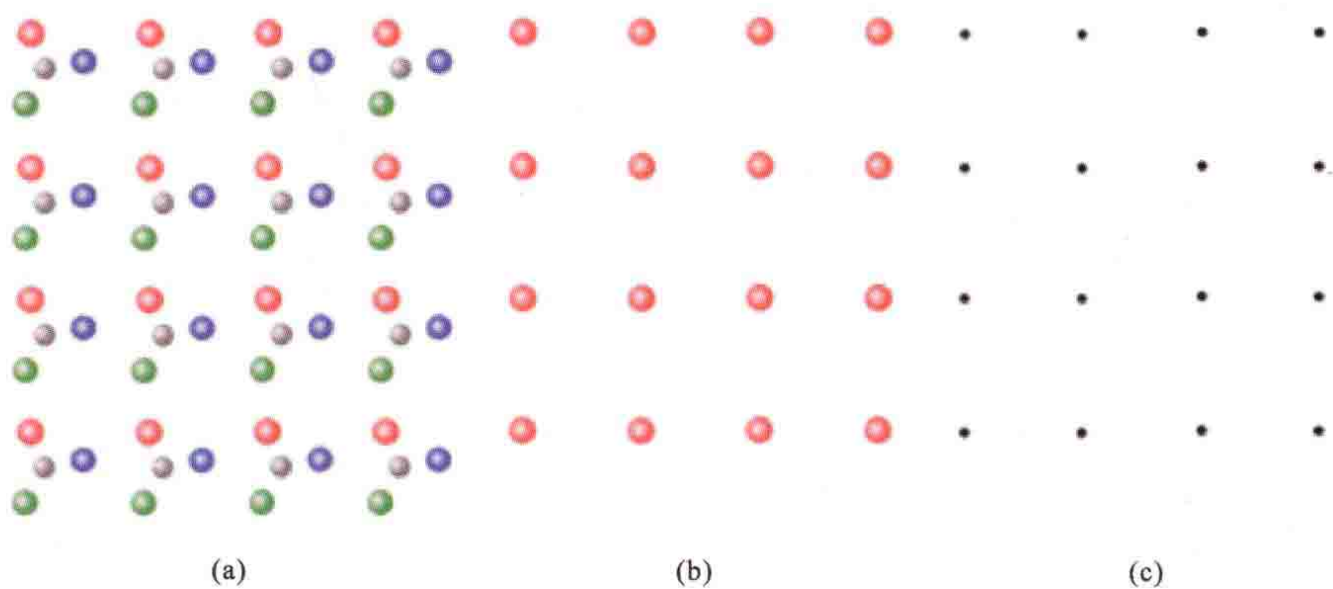


图 1-3 二维周期性结构图像(a),提取的一套相当点(b)和抽象出来的点阵(c)

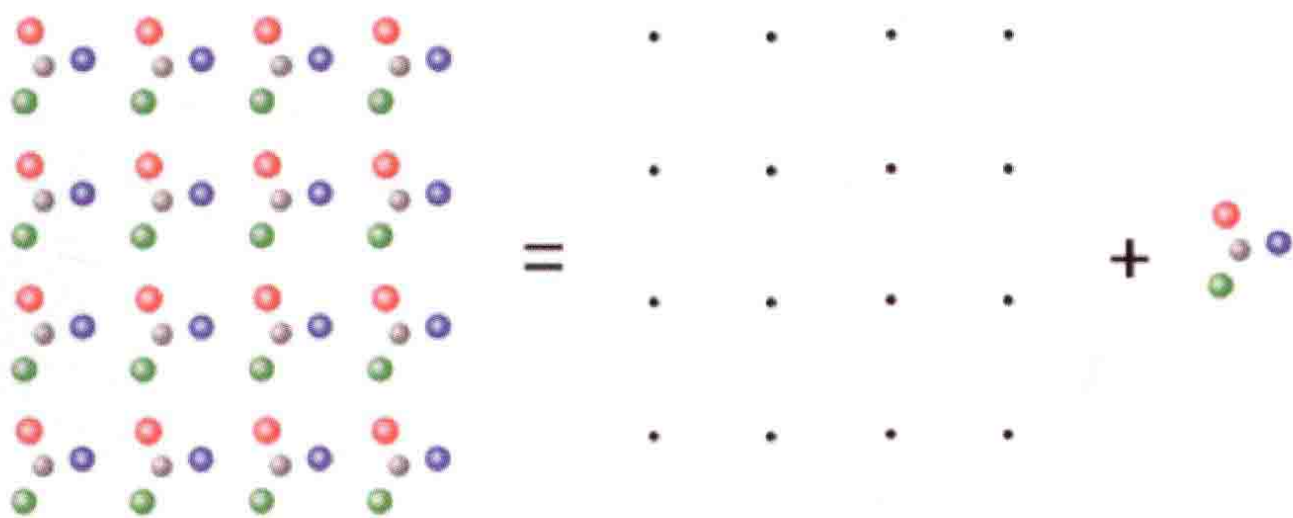


图 1-4 晶体结构和点阵、基元的关系

可以选择任何位置为起点,抽象出其点阵。不同的起始点得到的各套相当点系的重复规律是相同的,与哪一套质点的相当点系无关。抽出其中任一套相当点系,都可表示该晶体中各套相当点系中质点的重复规律。

(3)点阵点:是点阵中的点,代表晶体结构中的一套相当点。需要强调指出的是,点阵点和点阵虽然是从相当点和相当点系转化而来,但它们在概念上却有区别。相当点和相当点系没有脱离物质内容,而点阵点和点阵则是脱离了物质内容,只有数学上抽象出来的概念。

(4)结构基元:是重复周期中的具体内容,晶体结构中与其点阵中一个点阵点对应的物理实体(原子、分子、离子、离子团等)。如果在晶体点阵中各点阵点的位置上,按同一种方式安置结构基元,就得到整个晶体的结构。因此可以简单地将晶体结构示意地表示为:晶体结构=空间点阵+结构基元。晶体的空间点阵理论的提出基于一个假设,即晶体是无限大的。由于实际晶体的大小远超出晶体结构的重复周期,可以认为晶体构造是在三维空间无限伸展。

2. 空间格子

结点是指点阵中的点阵点,在空间格子中称为结点。连接点阵中任意两个点阵点,都可以得到一条直线点阵。在空间格子中将直线点阵称为行列。每一行列都有一个最小的结点重复

周期,等于行列上两个相邻结点间的距离,简称结点间距,如图 1-5 中的 a 。



图 1-5 直线点阵——行列

在空间格子中,有无数不同方向的行列。相互平行的行列,结点间距相等;不平行的行列,结点间距一般不等。

网面是由平面点阵所构成(图 1-6)。

连接空间点阵中分布在同一平面内的结点,即构成一个网面。任意两个相交行列(或者任何不在同一条直线上的 3 个点阵点)就可确定一个网面(图 1-6)。空间点阵,可有无数不同方向的网面。两个相邻网面的垂直距离称网面间距。单位面积内的结点数目称网面密度。互相平行的网面,网面间距相等,网面密度相等;不平行的网面,网面密度和网面间距一般不相等。网面密度大的网面之间,其网面间距也大,反之,网面密度小的,其网面间距也小。

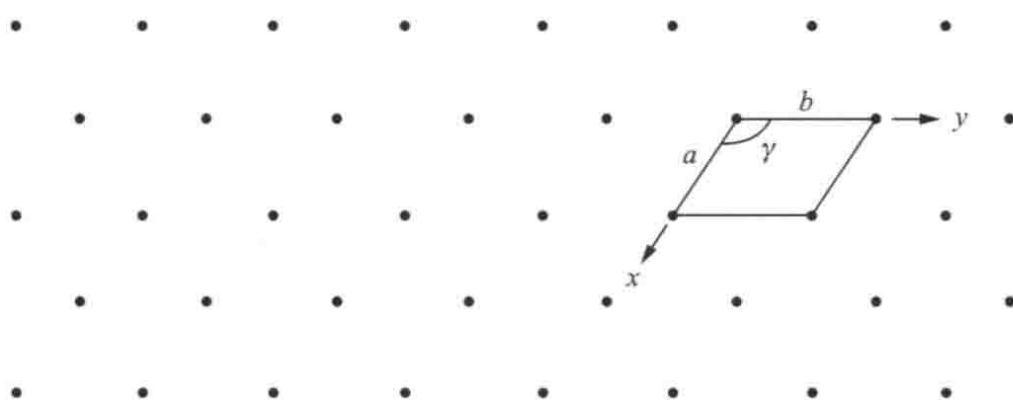


图 1-6 平面点阵——网面

[网面点阵参数(Lattice Parameter): a, b, γ]



任意选择 3 个不共面的行列,可以将空间点阵划分成如图 1-7 中的平行六面体,它反映了晶体在三维空间上的周期性重复,表示这种重复规律的几何图形即为空间格子。空间格子参数: $a, b, c, \alpha, \beta, \gamma$ 。

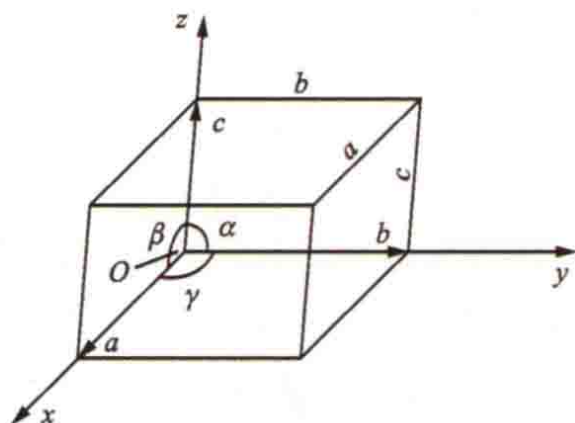
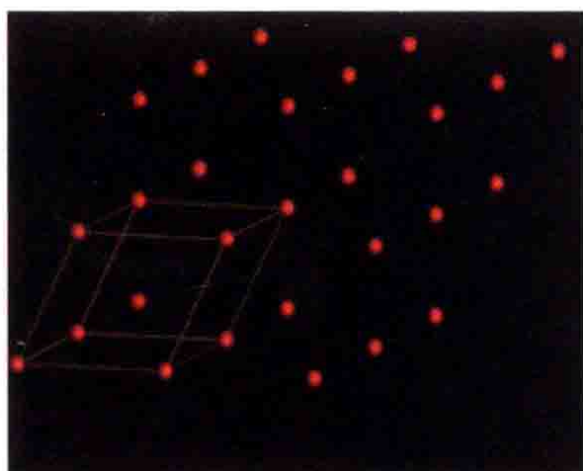


图 1-7 空间点阵——空间格子

平行六面体即空间格子的最小单位,由 6 个两两平行且相等的面组成,空间格子可视为平

行六面体在三维空间重复堆砌而成。

在实际晶体结构中所划分出来的相应单位,称为晶胞。单位平行六面体的3个棱长及其间的夹角,分别与晶胞的3个棱长及其夹角对应。整个晶体结构可视为晶胞在三维空间重复堆砌。晶胞的形状与大小,取决于彼此相交棱的长度和它们的夹角(图1-7)。

以上这些概念包括结点、行列、网面、平行六面体、空间格子参数,统称为空间格子要素。

对于一个晶体结构,只能抽象出一套空间点阵,然而,同一空间点阵可以划分出无数不同形状、大小的空间格子。具体如何划分将在第四章详细说明。

3. 晶体的基本性质

晶体内部质点在三维空间的周期性重复排列,决定了它与非晶质体的根本区别,赋予了晶体独特的基本性质:

(1)均一性。由于晶体是具有格子构造的固体,在同一晶体的各个不同部分,质点的分布是一样的,所以晶体的各个部分的物理性质和化学性质也是相同的,这就是晶体的均一性。

(2)自限性。晶体在适当条件下可以自发地形成几何多面体外形的性质,这种性质叫自限性,在第六章有进一步说明。

(3)异向性。在同一格子构造中,不同方向上质点排列一般是不一样的,因此,晶体的性质随方向的不同而有所差异,这就是晶体的异向性。

(4)对称性。晶体具异向性,但这并不排斥晶体在某些特定的方向上具有相同的性质。晶体的相同部分(如外形上的相同晶面、晶棱或角顶,内部结构中的相同网面、行列或质点等)能够在不同的方向或位置上有规律地重复出现,这就是晶体的对称性。晶体的格子构造本身就是质点重复规律的体现,对称性是晶体极其重要的性质,是晶体分类的基础,我们将在第三章中详加讨论。

(5)最小内能性。在相同的热力学条件下,晶体与其同种物质的气体、液体相比较,其内能最小,这就是晶体的最小内能性。

(6)稳定性。在相同的热力学条件下,晶体比具有相同化学成分的非晶质体稳定,非晶质体有自发转变为晶体的必然趋势,而晶体决不会自发地转变为非晶质体,这就是晶体的稳定性。晶体的稳定性是晶体具有最小内能性的必然结果。

三、非晶质体

广义非晶质体包括一切不是晶体的物质,如:气体、液体、准晶体、等离子体等。本书为了今后在学习宝石矿物学时更方便地区分非晶质体矿物,采用狭义非晶质体概念。

非晶质体是与晶质体相对立的概念,它也可以是一种固态物体,但其内部质点在三维空间不成周期性重复排列。因此,非晶质体不可能遵循为晶体所共同具有的空间格子规律,它也不可能具有为晶体所共有的那些基本性质。在外形表现上,它在任何条件下都不可能自发地成长为规则的几何多面体;在内部结构上,其各个部分之间,仅仅在统计意义上是均一的,而在不同方向上的性质则是相同的。所以,非晶质体在外部性质上是一种无定形的凝固态物体,在内部性质上则是统计意义上均一的各向同性体。其实,从这些方面的特性来看,非晶质体更类似

于液体。所以,非晶质体也可以被认为是过冷却的液体,或者说是硬化了的液体。当加热非晶质体时,它将逐渐软化,最后变成熔体,而没有固定的熔点。

不过,要在晶体与非晶质体之间划一绝对严格的界限是有困难的。在许多具有长链状分子的纤维类物质或高聚合物中,还存在着分子之间成一维的或二维的周期性重复排列的情况。显然,它们是介于晶体与非晶质体之间的过渡型的物体。

非晶质体的分布远不如晶体那么广泛。在岩石、矿物的领域中,只有像琥珀、火山玻璃以及由于受到放射性蜕变的影响而玻璃化的一些放射性矿物属于非晶质体。此外,在其他领域中,也只有诸如玻璃、塑料、树脂、沥青等少数物质属于非晶质体的范畴。与晶体相比,它们只占有极少部分。

四、胶体

从化学中我们知道,胶体是一种两相或多相的细分散系,它由分散相(分散质)和分散媒(分散剂)组成;分散相的大小约在 $1\sim 100\text{nm}$ 之间。固体、液体、气体都既可作为分散相,也可作为分散媒,从而组成不同的胶体体系。其中分散媒远多于分散相的胶体称为胶溶体(溶胶);若分散相为固体,且数量很多,整个胶体呈凝固态者,则称为胶凝体(凝胶)。

固态的胶体矿物基本上只有水凝胶体和结晶胶体两类。前者例如蛋白石,其分散媒是水,分散相是固体,即胶体粒子;而后者的分散媒为结晶质,分散相则气体、液体、固体均有可能,例如乳石英等。由于结晶胶溶体通常都只把它作为晶体来对待,而将分散于其中的分散相看成是包含于晶体中的机械混入物,因此,胶体矿物实际上就是指水胶凝体矿物。

胶体粒子由核和包围核的双离子层构成。有的核可能只包含有一个分子或结合在一起的几个分子。例如明胶等许多高分子化合物的胶体粒子;另有一些胶体粒子的核则可以由上万个分子组成,它们通常都是成结晶相的,例如 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 等许多在地质作用中形成的胶体粒子。显然由前一种胶体粒子凝聚而成的胶凝体应属于典型的非晶质体;而由后一种胶体粒子形成的胶凝体包括通常所称的胶体矿物在内,从本质上来讲,它们应该属于晶体的范畴,是一种超显微的隐晶质(即在光学显微镜下也不能区分其晶粒的隐晶质)。但是,正是由于它们的颗粒太细了,而颗粒与颗粒之间有时是呈无规则的杂乱排列的,因而从总体来看,它们在诸如 X 射线衍射效应、光学性质等一系列性质上,都表现出与非晶质体类似的特点,即外形上不能自发形成规则的几何多面体(通常称肉冻状),各项宏观性质都具有统计意义上的均一和各向同性的特点,等等。所以胶体矿物通常都被作为非晶质体来看待。

胶体粒子由于其粒径非常小,比表面积(总表面积与体积之比)极大,因而具有很大的表面自由能。胶体的这种状态是不稳定的,它有把表面自由能转变为质点间势能的趋向,亦即胶体粒子趋向于合并成较大的颗粒;与此同时,还将排出存在于其间的分散媒。这一过程就是所谓的胶体陈化(老化)。水胶凝矿物发生陈化时,其中所吸附的水分将逐渐脱失,颗粒逐渐增大而称为显微镜下可见的隐晶质,并最终称为显晶质矿物。由于通常把水胶凝体矿物视为非晶质体的,因此,对于胶体陈化而形成的晶质矿物,有时称之为变胶体矿物。

综上所述,晶体、非晶质体和胶体之间区别的根本原因就是它们内部质点排列的不同造成的。如图 1-8 所示,晶体中,组成它们的物质质点(原子、离子、离子团或分子等)在空间都是作有规律排列的,这种规律主要表现为质点的周期重复,这种质点在三维空间周期性地重复排