



[美] W. L. 邦德 著 国防工业出版社出版

晶体工艺学

晶体工艺学

〔美〕W.L. 邦德 著

冯永全 等译

钱振型 审校

丁11/16/87



国防工业出版社

内 容 简 介

本书深入浅出地介绍了几何晶体学、X射线晶体学和晶体光学的基础知识，并把它们和晶体的加工研制相结合，既介绍了原理，又介绍了晶体（包括半导体）加工所用的各种研磨料、加工方法及设备。书中对一些技术性较强的工艺如磨平面、圆柱面、球面、双曲面等讲解得比较详细，并提供了80多种晶体的X射线衍射数据，是一本比较实用的参考书。

本书可供从事晶体学、晶体物理学的研究工作者，晶体加工研制的技术人员、地质矿物的科技工作者，以及大专院校有关专业的师生参考。

Crystal Technology

W. L. Bond

John Wiley & Sons, Inc. 1976

晶 体 工 艺 学

〔美〕W. L. 邦德 著

冯永全 等译

钱振型 审校

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 9¹⁸/₁₆ 232 千字

1982年2月第一版 1982年2月第一次印刷 印数：0,001 - 3,000册

统一书号：15034·2268 定价：1.15元

译 者 序

晶体工艺学是伴随着现代科学技术而成长起来的一个新的工艺学分支。它涉及到结晶学、光学、固体物理等多种学科的有关知识，具有与传统的机械加工和光学加工迥然不同的特点和内容。这方面的成果已经广泛应用于电子和激光等许多先进的科学技术领域。毫无疑问，晶体工艺学已经变得越来越为人们所重视。

本书对晶体加工工艺方面的知识作了比较全面的介绍。前半部分着重叙述与加工有密切联系的晶体物理学，包括晶体结构、X射线定向及晶体光学等方面的基础知识；后半部分则着重介绍晶体加工的各个环节，包括磨料、磨具及各种材料的选用，晶体的切割，平面、球面及某些非球面的加工，同时还对测量和有关的其它内容作了扼要的介绍。对一些技巧性较强的工艺讲解得比较详细。可供从事这方面工作的工人和工程技术人员参考。

参加本书翻译的同志有吕赤焱（第一章），严根福（二、三、四章），冯永全（五、六、七章），陈尔绍（八章），娄子勤（九、十、十一章），顾林根（十二、十三章、附录）。下列同志对有关章节作了技术审阅：赵光荣（一、二、三、四、十三章、附录），刘宗文（七、八、九、十、十一章），甘国炜（八、九、十、十一章）。全书由钱振型同志审校。还有徐宏文等同志参加了文稿整理。由于我们水平低，难免有错误，欢迎读者批评指正。

一九八〇年

目 录

第一章 晶系和晶片取向	1
晶体标志：分类	1
32个点群	2
晶片标志	11
不旋转或简单定向	11
一次旋转定向	12
二次旋转定向	13
三次旋转定向	13
第二章 原子面及其面指数	16
原子面	16
密勒指数	17
密勒-布喇菲指数	18
菱形晶轴	18
平移点阵只具有 1, 2, 3, 4 和 6 重旋转对称轴的证明	21
第三章 空间群和 X 射线衍射	23
X 射线定向	23
空间群	23
X 射线	25
衍射光锥	25
面间距 d	35
立方和单轴晶体的图解法	36
粉末法	37
粉末衍射仪	37
标定非立方晶体	39
第四章 X 射线测向仪	44
面夹角	51
寻找接近于任意取向的原子面	56
确定特殊的原子面	60
心射极平投影	62

劳厄照片	63
制作取向更精确的晶片——圆筒形夹具	66
极射赤平投影	69
球的大圆和小圆	72
格氏网	75
完全定向	76
定向的精度	79
准直仪的楔形角	80
折射	81
倾斜误差	82
晶体的完整性	83
腐蚀	83
劳厄照片	84
测角仪扫描	84
双晶测角仪	84
朗氏法	90
盖革计数管电路	90
第五章 晶体定向的光学法	92
光学定向	92
反射法	92
光在晶体中的传播	94
单轴晶体	95
波法线、光线和偏振器	96
斯涅尔定律	96
双轴晶体	96
光通过单轴基片的传播	98
偏振光通过双轴晶片的传播	103
锥光偏振仪	103
十字镜	106
根据消光观察寻找矩形单轴晶块的光轴	107
双轴晶体的“完全”光学定向	112
第六章 材料	116
磨盘材料	116
冷却剂	116
磨料	116
氧化铝	117
碳化硅	117

VI

碳化硼	117
金刚石	117
其它磨料	117
磨料的制备	117
选分的质量	118
材料的磨削过程	119
磨削速度和耐磨性	120
粘结	122
粘结剂	122
腐蚀	125
一些晶体的 X 射线数据	125
$\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$	146
第七章 晶体的切割	147
切割	147
泥浆切割机	147
切断机	148
切割用的法兰盘	149
金刚石锯片	150
横向切割机	150
线切割机	151
金属丝切割机	154
线排切割机	154
环形线的制作	156
定向切割夹具	157
对热敏感的大晶体的切割	158
第八章 平面研磨	164
研磨	164
加工晶片平面平行的块规法	168
亨特-霍夫曼 (Hunt-Hoffman) 研磨机	172
平面磨盘	173
自动保持平面度的磨盘	174
用刀口尺检验平面度	174
用光干涉法检验平面度	175
薄片研磨中偏心压力引起的倾斜	177
情况 I: 圆片	178
情况 II: 矩形晶片	179
情况 III: 分隔的晶片	180

声纳晶片的生产	181
金刚石高速切削刀	183
细长棒	185
制作晶体棱镜	190
第九章 加工圆柱表面	192
圆柱体的加工	192
假圆柱体	197
局部圆柱体	199
平板的柱形端	204
第十章 球体的加工	209
大球体	209
双管法	210
橡皮圆盘法	211
小球	213
局部球体	215
样板	215
制作磨具	216
球面加工机	218
制作磨具	219
磨厚透镜用的万向支架	220
第十一章 加工双曲率面	223
双曲率面	223
环面	224
加工超环面磨具	225
环面磨具	225
一般超环面	226
双凸面磨具	227
双曲率面的研磨	227
第十二章 曲率和棱镜角度的测量	231
曲率的测量	231
测球仪	231
反射法	232
球面镜内的图像	235
像的测量	237
测量大曲率半径的目镜位移法	239

VIII

角度测量	240
像散型显微镜	245
轮廓显微镜	245
测定圆形端部平行度误差的激光装置	246
发散光束干涉仪	247
第十三章 其他	248
精密X射线测角仪	248
波长分布	248
准直仪分布	249
强度测量	250
精密定向用的双晶体测角仪	251
精密定向表面的研磨	251
用劳厄相片作精确定向	255
折射	255
有多少次反射?	256
X射线密度	256
X射线吸收的计算	256
用金属箔校准计数计	257
吸收限	257
一些物理性质的计算	258
矢量	258
压电效应和极性测试仪	261
正交晶体的光学计算实例	267
晶体弹性	268
晶体内弹性波速度的计算	271
X射线衍射的强度	277
附录	280
极射赤平投影	285

第一章 晶系和晶片取向

晶体标志：分类

在退火良好的玻璃中，一个方向上总的物理性能与任何其它方向的都相同，这就是说，所有的方向都是等效的。所谓总的物理性能是指声速和光速等而不考虑原子级的微观现象。玻璃内的原子是局部有序排列，但从统计学的角度看，这种有序度在整块上都是相同的。

晶体不仅局部而且整体都是高度有序的，即晶体是原子的有序排列，但这种次序并不一定是简单的。在任何单晶中均可划出一个平行六面体单元，整个晶体可以看作是由这种单元在三维空间内紧密堆积而成。这些称作晶胞的单元都是相同取向的；当这些单元在晶体中排列组合起来时，每个单元看来都一样。由于这种有序排列，在一块晶体中也许会有几个等效方向，在这些方向上声速、光速以及所有其它物理性能都相同。

X射线结晶学家分析了几千种晶体，并测定了每种晶体的晶胞尺寸和形状（即晶格常数）以及每个晶胞中的原子排列。

绝大多数天然晶体从几个方向上看似乎都一样，即它们有对称性。在应用X射线之前，矿物学家们就注意到这种情况，并按照这种总的对称性把晶体分为七个晶系。这些晶系称为三斜、单斜、正交、四方、三方、六方和立方。采用的对称要素是二重、三重、四重和六重对称轴。他们还观察了镜象面和反演中心。现在常把三重对称看作六重对称的特例。应当指出，若晶体仍被看作是由同样取向的晶胞紧密堆积而成，那么就不能采用其它类型的轴。在晶体中不存在五重或八重等对称轴。

一种晶体可以同时有几种这样的轴，可以有三个相互垂直的

四重对称轴，同时有四个全在一点上相交的三重轴；还可以有几个镜面通过这一点，对这些对称要素进行逻辑上可能的组合，可以得到 32 个可能的“点群”。

32 个点群

对称性最小的晶体就是没有对称性的三斜系，其晶胞中的原子排列是不对称的，这种晶胞通常是非矩形的平行六面体。为了描述这种晶胞，可以从一个晶胞角的原点出发选择矢量 a 、 b 、 c ，它们的长度分别为 a_0 、 b_0 、 c_0 ，这些长度是不相等的。矢量 b 和 c 之间的夹角称为 α ， c 和 a 之间的夹角称为 β ， a 和 b 之间的夹角称为 γ 。

通常， a 、 b 、 c 要选择得使 c_0 最短、 b_0 最长， α 和 β 一定是钝角。

在三斜晶胞内原子的排列也有可能构成一个对称中心，这就是“三斜轴面体”类，在三斜晶系中再也没有别的晶类了。

在探讨其他晶系之前，要先提到两种并存的点群命名法，即熊夫利 (Schoenflies) 表示法和赫曼-毛根 (Hermann-Mauguin) 表示法。采用熊夫利表示法时把三斜不对称类写成 C_1-1 。 C 的下标 1 意味着只有一重对称轴，即只有绕轴一周才可使晶体复原。短线后 1 的意义和赫曼-毛根表示法中的相同。三斜轴面点群类写成 C_i-1 ，下标 i 表示唯一的反演对称素， $\bar{1}$ 表示绕轴一周并加上一次反演。

至于反演：如果在一个晶体中沿着任一直线的正负方向上的各种特性都一样，这晶体就具有一个反演中心。图 1-2 中的斧石晶体的每一个面都与这晶体另一侧的类似面相匹配，这样的晶体不会有压电效应。晶体的畸变只会引起等量的电荷沿着晶体中任一条线向相反的方向移动，因此就不会产生电场。

在单斜晶系中， b 轴垂直于 a 和 c 轴，即 $\alpha = \gamma = 90^\circ$ ，但 $\beta > 90^\circ$ 。长度 a_0 、 b_0 、 c_0 都不相等。 b 轴或是二重轴 (即二重对称轴之一) 或垂直于一个反映对称面 (常称为镜面并用 m 表示)，或

者它既是二重轴又垂直于一个镜面(即共有三类)。很明显, 只有一个二重轴的单斜类的符号是 C_2-2 , 只有一个镜面的单斜类用 C_s-m 表示。既有一个二重轴又有垂直于该轴的镜面的这一类用 $C_{2h}-2/m$ 表示。赫曼-毛根表示法中的斜线表示镜面垂直于二重轴。

在正交晶系中, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, 但 $a_0 \neq b_0 \neq c_0$ 。这里可以有三个相互垂直的二重轴, 即 D_2-222 类; 或者有两个垂直相交的镜面, 交线也是一个二重轴—— $C_{2v}-2mm$ 类; 最后, 正交晶系也可以有三个相互垂直的镜面, 而且三条相交线都是二重轴, 即 $D_{2h}-mmm$ 类。

四方晶系引入了一个新的要素。最简单的四方对称性是这样——一个轴, 把它旋转四分之一周再加一次反演就可得到等效方向, 这是 $S_4-\bar{4}$ 类, 只有一个简单四重轴的四方晶体是 C_4-4 类。

对其它 22 类这里不再作文字说明, 而列出所有各类晶体的对称要素图形(图 1-1 至图 1-32)。小的叉号和圆圈表示等效方向。叉号可看作投影面上部的等效点, 而圆圈可看作投影面下部的等效点。每一类都列举了一种天然晶体。这些图中, 船形符号表示二重轴, 实心三角表示三重轴, 实心方块表示四重轴, 包含船形符号的空心方块表示一个四重反演轴 $\bar{4}$, 含有实心三角的空心六方块表示六重反演轴 $\bar{6}$, 而实心六方块表示六重轴, 实线圆表示形成镜面的赤道面, 而其它实线表示别的镜面。

对晶体对称性的了解有助于选用各种不同的方法从晶体原材料中切取等效的样品。这种知识对于切割人造晶体是很重要的, 两个等效方向中有一个与长的梨晶横交而另一个却沿着梨晶的长度方向。为了要长的晶片, 可以使晶片长度顺着梨晶的长度方向。

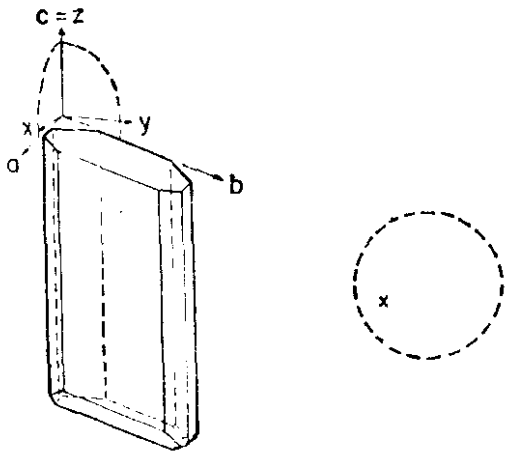


图1-1 氨基乙基乙醇胺酒石酸盐——晶体及其对称图形, 三斜晶系 C_1-1 类

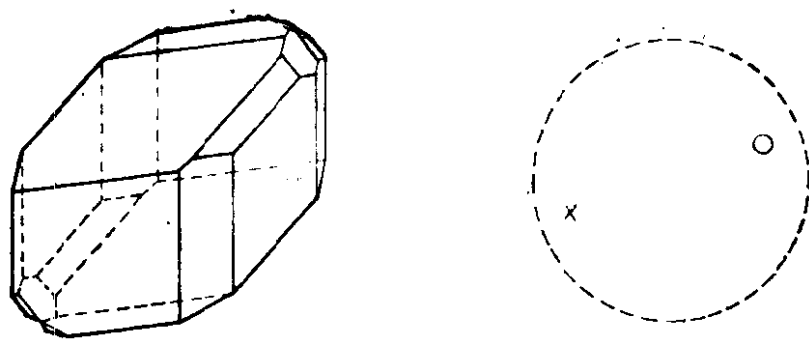


图1-2 斧石晶体及其对称图形, 三斜晶系 C_i-1 类

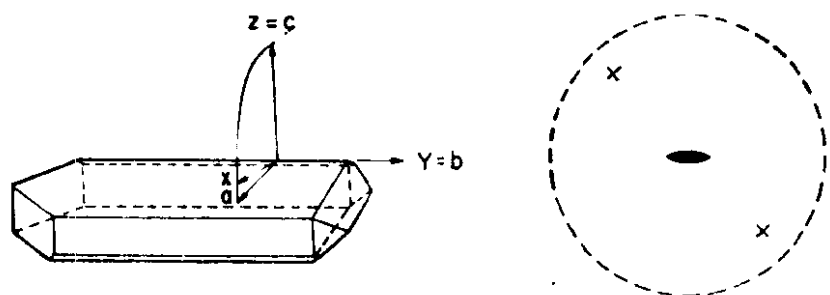


图1-3 乙二胺酒石酸盐晶体及其对称图形, 单斜晶系 C_2-2 类

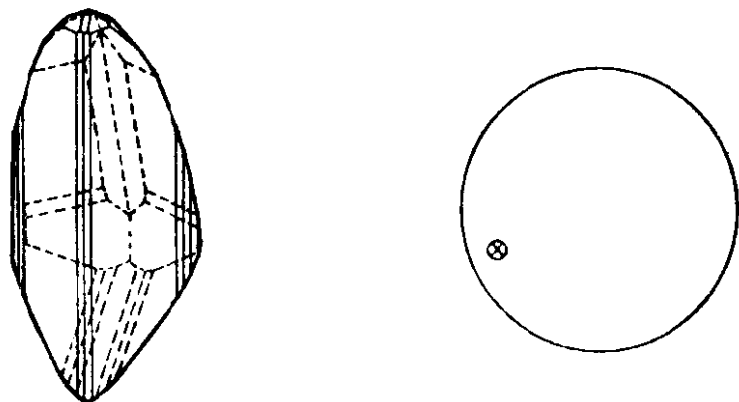


图1-4 斜晶石晶体及其对称图形, 单斜晶系 C_s-m 类

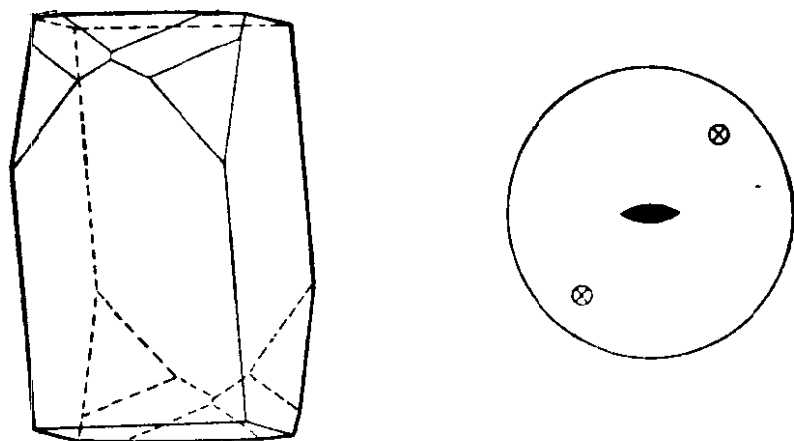


图1-5 辉石晶体及其对称图形, 单斜晶系 $C_{2h}-2/m$ 类

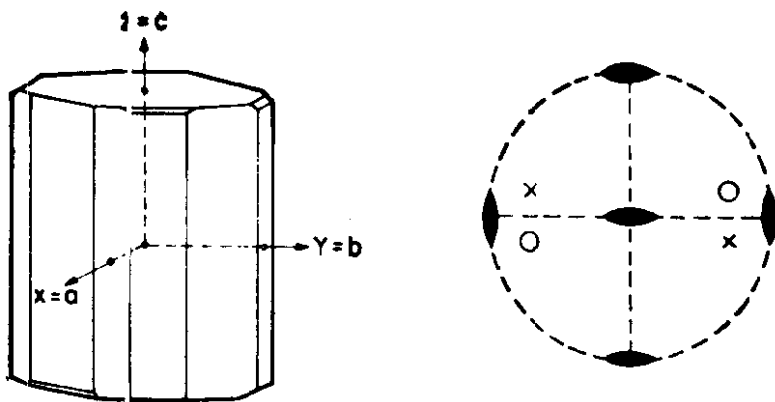


图1-6 罗谢尔盐晶体及其对称图形，正交晶系 D_2-222 类

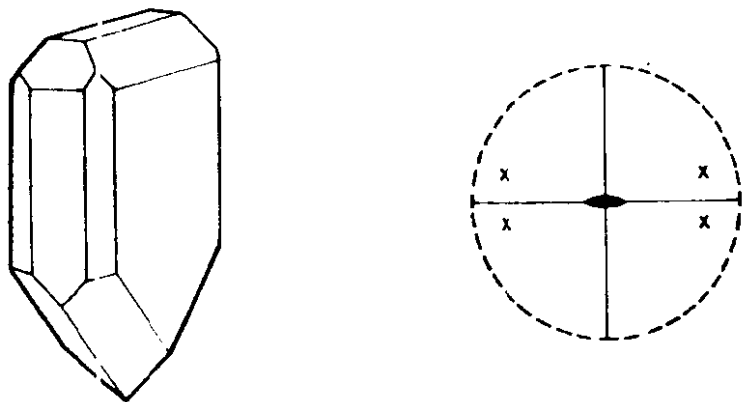


图1-7 菱锌矿晶体及其对称图形，正交晶系 $C_{2v}-2mm$ 类

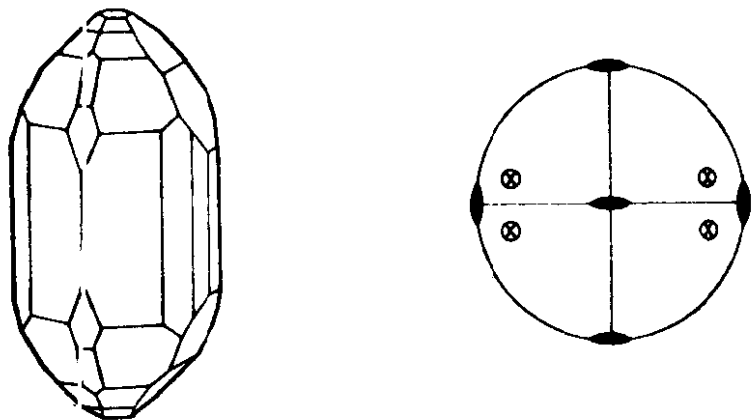


图1-8 黄玉晶体及其对称图形，正交晶系 $D_{2h}-mmm$ 类

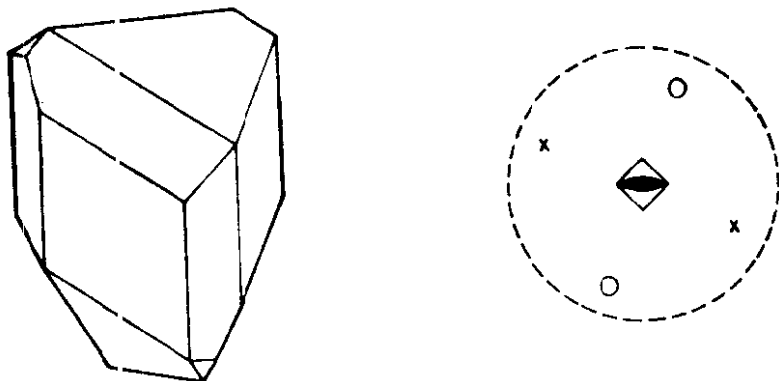


图1-9 理想化的砷硼钙石晶体及其对称图形，四方晶系 S_4-4 类

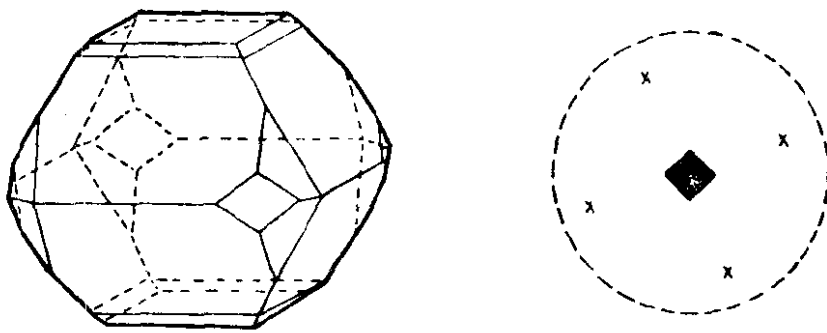


图1-10 钼铅矿晶体及其对称图形，四方晶系 C_4-4 类

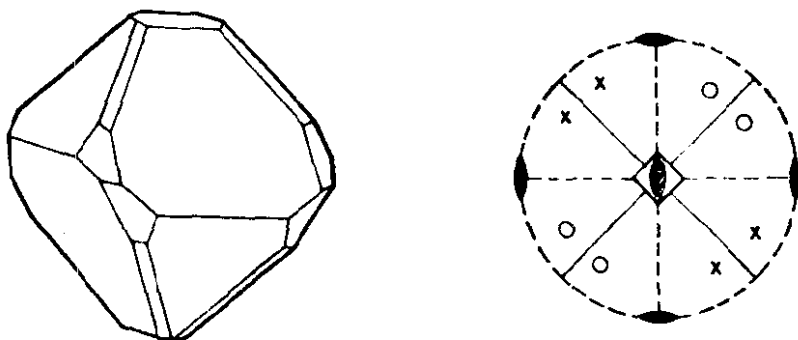


图1-11 黄铜矿晶体及其对称图形，四方晶系 $D_{2d}-42m$ 类

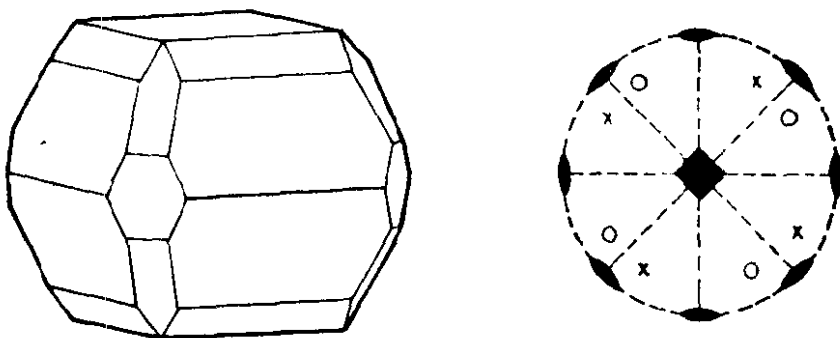


图1-12 硫酸镍晶体及其对称图形，四方晶系 D_4-422 类

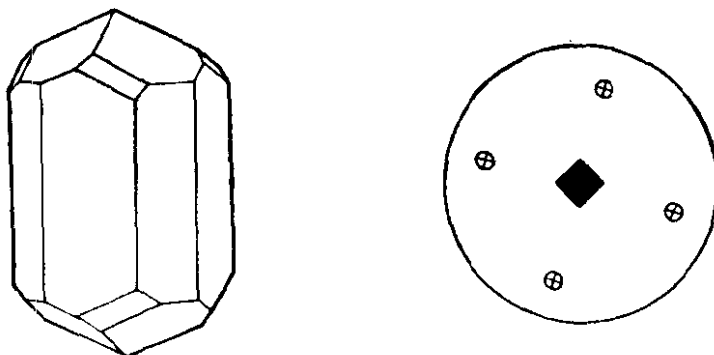


图1-13 方柱石晶体及其对称图形，四方晶系 $C_{4h}-4/m$ 类

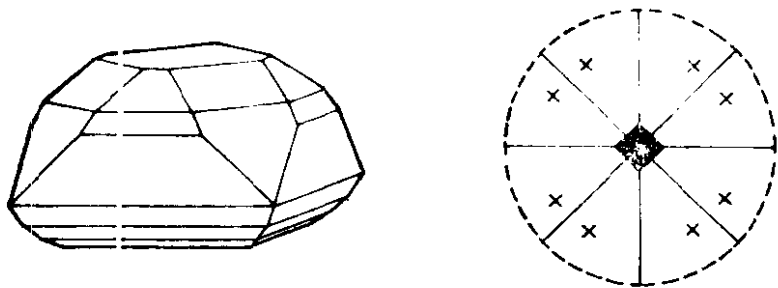


图1-14 铅矾晶体及其对称图形，四方晶系 $C_{4v}-4/m$ 类

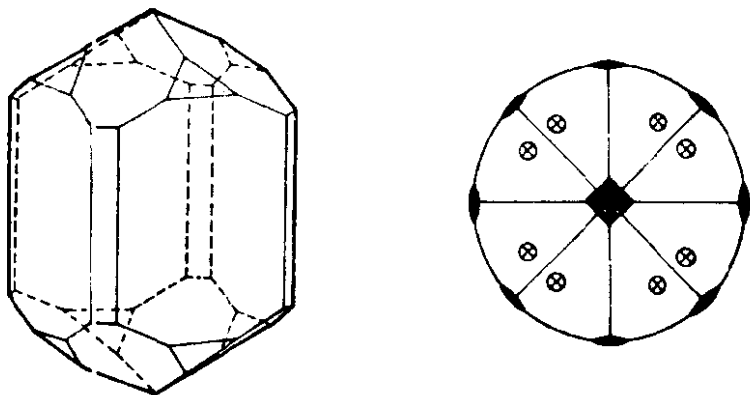


图1-15 金红石晶体及其对称图形，四方晶系 $D_{4h}-4/mmm$ 类

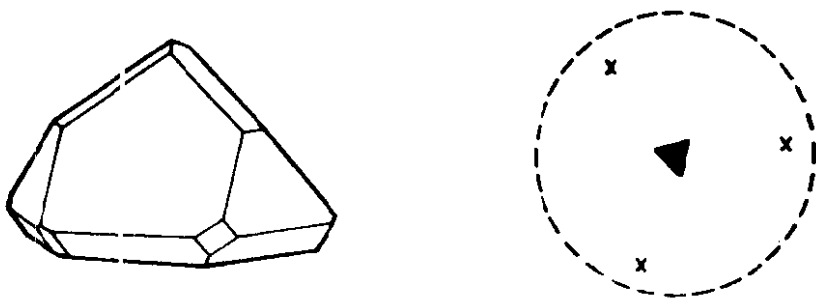


图1-16 高碘酸钠晶体及其对称图形，六方（三方）晶系 C_3-3 类

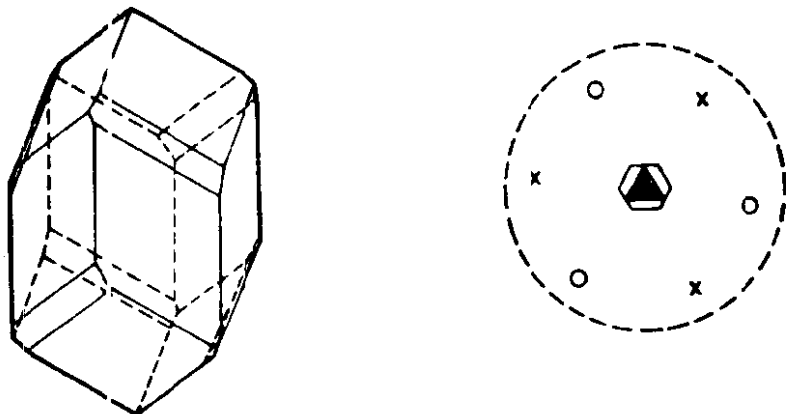


图1-17 透视石晶体及其对称图形，六方（菱形）晶系 $C_{3i}-3$ 类

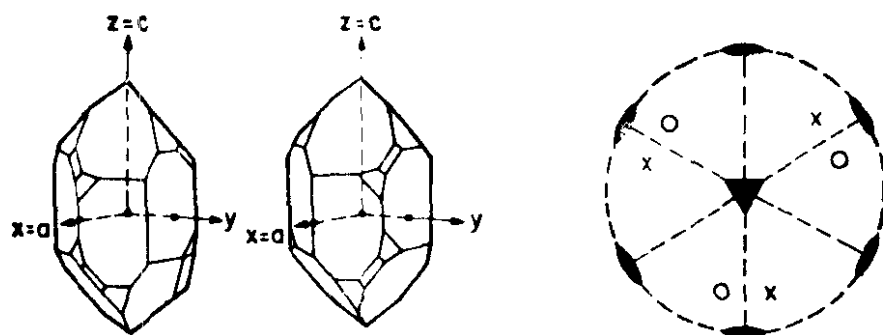


图1-18 两种石英晶体：左旋晶体和右旋晶体及其对称图形，六方（三方）晶系， D_3-32 类

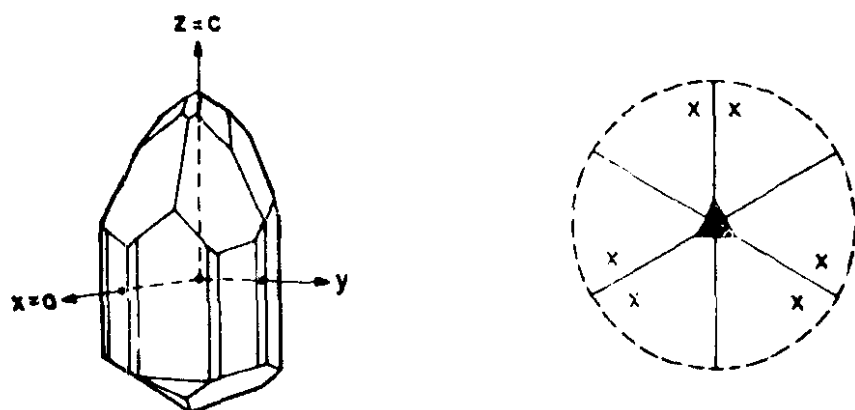


图1-19 电气石晶体及其对称图形，六方（三方）晶系 $C_{3v}-3m$ 类

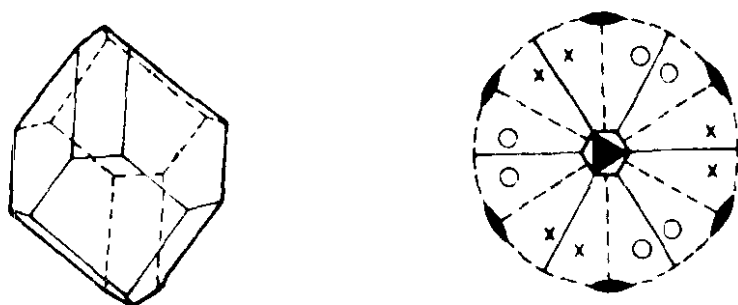


图1-20 方解石晶体及其对称图形，六方（菱形）晶系 $D_{3d}-\bar{3}m$ 类

无实例

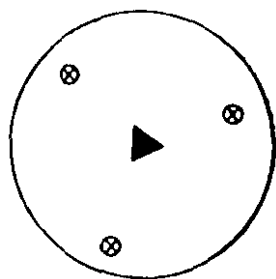


图1-21 $C_{3h}-6$ 类对称图形，六方晶系（无已知的实例）