

# 結晶學

長春地質勘探學院礦物教研室

蔣永年編

長春地質勘探學院

457  
650

# 目 录

## 緒 論

§ 1 引言.....	1
§ 2 結晶物質的結構.....	3
§ 3 結晶物質的性質.....	7
§ 4 結晶學及其与其它科学之关系.....	8
§ 5 結晶學发展簡史.....	9
§ 6 結晶學在国民經济中的实际意义及其在地質勘探工作者培养 上所起的作用.....	12

### 第一篇 晶体的發生和成長 (物理化学教育系)

§ 1 相变与晶体的形成.....	15
§ 2 晶体的发生.....	16
§ 3 晶体的成長理論.....	18
§ 4 影响晶体生長的因素.....	22
§ 5 晶体的培养.....	25

### 第二篇 几何結晶學

#### 第一章 晶面角恆等定律及晶体測量

§ 1 / <u>晶面角恆等定律</u> .....	31
§ 2 晶面角的測量.....	32
§ 3 晶体的投影.....	35

#### 第二章 晶体的对称

§ 1 对称的概念.....	41
§ 2 对称要素.....	42
§ 3 <u>对称要素的組合</u> .....	48
§ 4 32类对称型的推导.....	54
§ 5 晶系与晶族的划分.....	60

#### 第三章 晶体的形狀

§ 1 引言.....	64
-------------	----

荆延仁

§ 2	單形的概念	64
§ 3	47種單形及其在各晶系中的分布	69
§ 4	聚形的概念	83
§ 5	最常見礦物的特征的晶形	84
/第四章 整數定律及結晶符號		
§ 1	引言	94
§ 2	<u>整數定律</u>	94
§ 3	結晶符號	97
§ 4	晶體定向	101
§ 5	單形符號在各晶系各對稱型中所代表的單形	111
/第五章 晶帶定律、晶稜符號及晶體計算		
§ 1	關於晶帶的一般概念	112
§ 2	晶稜符號及其與晶面符號之間的關係	113
§ 3	<u>晶帶定律</u>	118
§ 4	晶體計算	119
X第六章 晶體的連生		
§ 1	概述	122
§ 2	雙晶	122
§ 3	浮生規律連生體	127
X 第三篇 晶體構造與晶體化學		
第一章 費道洛夫結晶化學分析概念及晶體構造		
§ 1	引言	128
§ 2	費道洛夫平行面體學說、晶體有限定律及晶體化學分析	128
§ 3	無限圖形的對稱操作和對稱型	132
第二章 晶體構造的 X—射線研究法		
§ 1	引言	138
§ 2	布拉格——莫里夫公式	138
§ 3	晶體構造的 X—射線分析法	140
第三章 晶體化學		
§ 1	引言	144
§ 2	原子和離子半徑	145

§ 3	球体的紧密排列	145
§ 4	配位数	148
§ 5	极化现象	149
§ 6	键的类型和格子类型	150
§ 7	典型构造	151
§ 8	晶格能的概念	155
§ 9	类质同象及同质多象	156

## 第四篇 物理結晶學

### 第一章 晶体的光学性质

§ 1	自然光的性质	158
§ 2	高級晶族晶体的光性——等向性	158
§ 3	中、低級晶族晶体的光性——異向性	159
§ 4	晶体中光的吸收作用	161

### 第二章 晶体的力学性质

§ 1	解理	163
§ 2	硬度	164
§ 3	晶体的机械变形	165

### 第三章 晶体的热学性质

§ 1	导热性	167
§ 2	膨胀	168

### 第四章 晶体的电学性质

§ 1	导电性	168
§ 2	焦电性及压电性	168

# 結 晶 学

## 緒 論

### §1. 引 言

結晶学是研究結晶体（結晶物质）的科学。但是什么东西是結晶体呢？

你参观过矿物陈列馆嗎？看見过清彻冰瑩的水晶、螢石和光輝夺目的黃铁矿、方鉛矿嗎？这些矿物是自然界最美丽的东西之一：它們有平滑的晶面、笔直的晶稜，以及由面或稜所交成的顶点，它們的外形是规律的、整齐的、有如人工琢磨的一样。当你看到这些矿物晶体之后，便会由感观上得到結論：具有多面体外形的一切固体，称为結晶体。

上面所提到的例子的确是結晶体。但是結晶学所討論的对象不單純限于那些珍奇的矿物晶体，它所討論的范围非常广泛，也就是說还有許多东西是属于結晶体的范畴。只要我們將眼界放大一些，留心观察我們周圍的环境，就会发现自然界有許多結晶体的堆积，其中有許多是与我們日常生活息息相关的。

譬如，山是我們所熟知的，它是地壳中岩石高聳的部分。所謂岩石就是矿物的集合体，例如建筑石材花崗岩就是由石英、長石和云母構成的。这些構成花崗岩的石英、長石和云母同样是矿物晶体；它們与陈列馆中所陈列的标本的区别只在于缺乏規則的外形，除此而外，再没有什么区别了。它們所以沒有获得規則的外形，乃是从岩漿生成的时候，各种矿物晶体互相挤压，不容許它們获得結晶多面体的

外形，因而形成圓的或不規則的形体。

自然界的一切均在變化着。岩石在大气營力下會逐漸發生變化——機械破壞和化學分解形成土壤；不易溶解的礦物晶体如石英，就遭到破碎變為細粒，並為流水攜帶至較低的地方。我們在海濱和河岸所看到的砂子，其中大部分即由石英細粒構成，它們除了更細小以外，與前面所談的石英晶体沒有區別。至于土壤，更是細小的結晶物質了，如果不借助特殊的儀器是不能窺見它們的。

現在看看我們日常生活上所用的東西吧，其中許多是與結晶物質密切相關的：例如食鹽、砂糖是結晶体；醫藥上用的硫酸銅、硫酸鎂、硫黃等也是結晶体；生活上需用的各種金屬也同樣是由細小的結晶顆粒構成的。

總之，上面所提到的都是結晶物質，它們在自然界分布非常廣泛。其中有的結晶良好，具有多面體外形；但大多數是沒有規則外形的顆粒，或塊體，假如借光學儀器幫助，則可發現更多的顯微晶体了。

它們的外部特征既然如此懸殊，那麼到底有沒有共同之處？假如我們將不規則形狀的結晶顆粒置于適宜的環境里，晶体可以自由發育，則它必然會成為多面體的形狀。由此可見，內部因素對結晶體來說是最有意義的；外形僅是內部因素的外在表現而已，它不是結晶體的必備條件。前面提到的關於結晶體的定義，顯然是片面的，不嚴謹的。

結晶學是一門嚴謹的科學，不容許有這樣不嚴謹的定義。因此，我們要明確結晶體的概念，應該從本質問題入手，亦即必須討論其內在因素。這種內在因素表現在晶体內部結構的規律性上。

## §2. 結晶物質的結構

自从十七、八世紀以后，才出現关于結晶体性質及內部結構的見解，阿羽衣觀察方解石解理，認為結晶体是由很小的彼此緊密累迭的“磚塊”構成：這些“磚塊”小到這樣的程度，以致于由它們構成的結晶面，在我們看來都是无可比拟的平滑。可是再問：最后的“磚塊”又是由什麼構成的呢？当时阿羽衣不能回答這些問題。

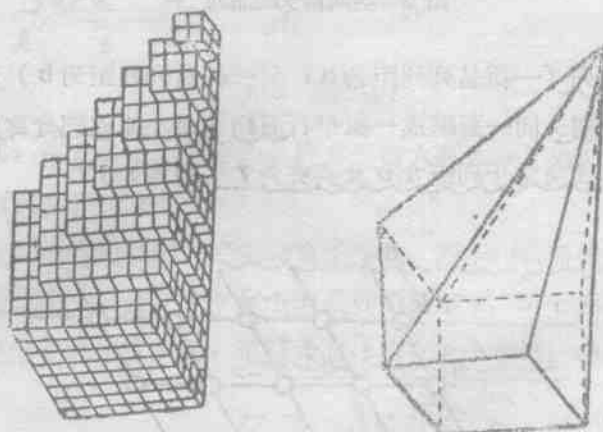


图 1 阿羽衣理論中方解石晶体結構

到了十九世紀，用X射綫揭露了結晶体內部構造的秘密。

經X—射綫研究證明，一切晶体均由有規律分布于空間的質点構成。它的特点表現在經過完全相等距离后，晶体內部結構的重复再現性上。例如图二，为NaCl的構造图形，从一个 $\text{Na}^{+}$ 向某方向延伸、移动，就可发现在相等距离后出現同样的質点( $\text{Na}^{+}$ )。

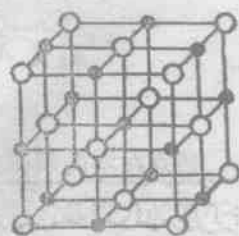


图 2 NaCl的構造

由于晶体内部结构的这种特点，我们就可能按一定方式来分析质点在空间排列的情况。在晶体中同样的质点（原子、离子、或分子）按直线排列，称为晶列；在同一晶列上或一组平行的晶列上的质点间距（列距）相等。

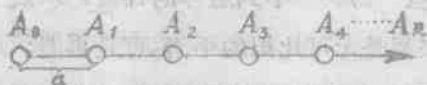


图 3 空间格子的晶列

二组晶列（一组晶列列距为  $a$ ，另一组晶列列距为  $b$ ）可组成平面，称为面网。同一面网或一组平行面网的最小组成部分称为基本单位面，其形式决定于列距  $a, b$  及其夹角  $\gamma$ （图四）。

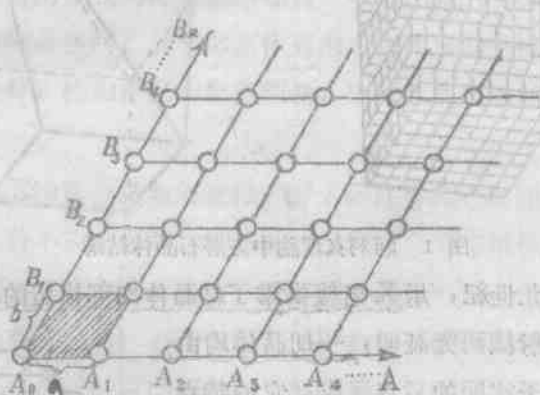


图 4 面网

质点在空间规律分布所构成的立体几何图形称为空间格子，空间格子即为代表晶体构造的立体几何图形。

在任何结晶构造中可以看到许多平行分布的顶点，如果设法将它们连结起来，则得到某些平行六面体系统，平行六面体的顶点称为结



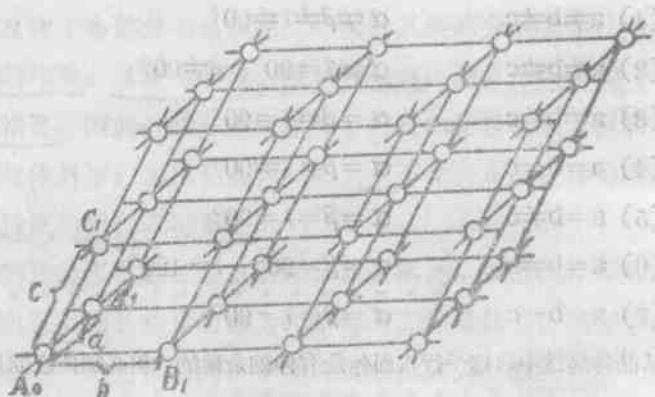


图 5 空間格子

点。因此，空間格子亦可認為是許多平行六面体象“磚块”一样地紧密累迭而成。

平行六面体的型式決定空間格子型式。而平行六面体的形狀和大小決定于三个不同在一个平面上的晶列的列距  $a$ ,  $b$ ,  $c$  和其間的夾角  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 。业經研究証明，平行六面体共有七个类型：①②

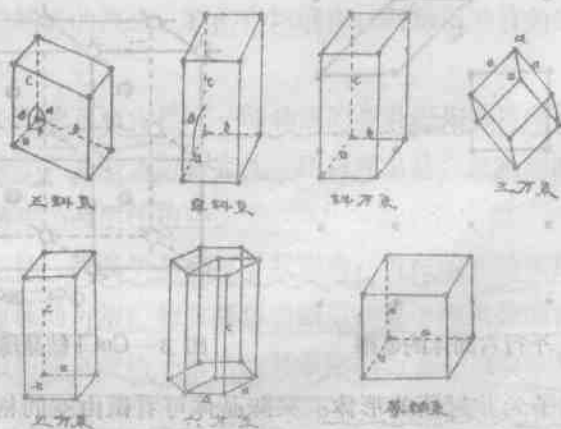


图 6 平行六面体类型 (斜晶) ①② (面晶)

- (1)  $a \neq b \neq c$        $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
- (2)  $a \neq b \neq c$        $\alpha = \gamma = 90^\circ$      $\beta \neq 90^\circ$
- (3)  $a \neq b \neq c$        $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
- (4)  $a = b = c$          $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
- (5)  $a = b \neq c$         $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
- (6)  $a = b \neq c$         $\alpha = \beta = 90^\circ$      $\gamma = 120^\circ$
- (7)  $a = b = c$          $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

①从晶体構造中选择平行六面体是有伸縮余地的，但必須使之能够表示出高度对称关系。例如，图7，質点排列情况显示有二个对称面。在图中表示了二种連結方式：一个是長方形，一个是平行四边形，前者能均表示高級对称。

②一般在晶体中不是簡單的格子，往往是几个格子彼此穿插形成复杂格子。例如CsCl的晶体構造系由二个彼此穿插的簡單立方格子構成。每一立方格子的頂点位于另一立方格子的中心。如果在Cs<sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>离子对称重心取相当点，則得到簡單的立方格子（图8）。

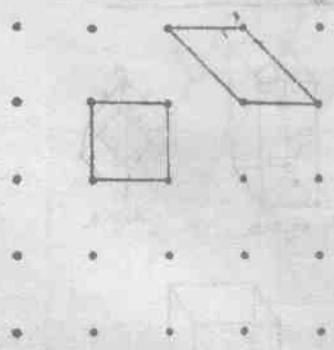


图7 平行六面体的选择

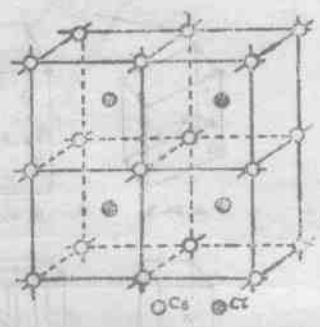


图8 CsCl 結晶構造

空間格子为非封閉的形体。实际晶体可看做由空間格子稠密面網（晶面）与晶列（晶稜）的限制所形成的封閉形体。根据以上所述，

可以想象晶体上各部分与晶体内部結構的某些部分的关系：晶面与密度大的面網相当，晶稜与密度大的晶列相当，而晶体的隅角（頂点）則与結点相当。因此，当在适宜环境下成長的結晶物质可以获得整齐美观的多面体外形，形成結晶体。而外形不是决定結晶体的因素，它仅是内部特征的外在表现而已。

結晶物质的專有特征是空間格子狀的構造。根据这种專有特征我們即可得出有关結晶物质的概念，并可与非結晶物质区别开来。

結晶物质：质点作空間格子狀有規律排列的一切固体。

非結晶质：质点作不規律排列的固体。⑤

⑤結晶物质系质点作空間格子狀有規律排列的一切固体，保持最小內能，穩定性最大。而非晶质在構造方面与过冷却液体相似，不是真正的固体，它不稳定，随时有結晶和形成細小晶質集合体的傾向，虽然它有向晶質轉变的傾向，但是不能获得結晶多面体的外形。

### §3. 結晶物質的性質

由結晶质結構的概念，我們得以解釋結晶质所具有的許多性質，茲簡述如下：

1. 最小內能及穩定性 一种物质的各种凝聚态所保持的內能以固态晶质为最小，具最大的穩定性。所以非晶质、过冷却液体及过飽和溶液等有轉变为晶质的趨勢。

2. 自限性 結晶质具有格子狀構造，当在适宜的环境下，可以获得結晶多面体的外形。如將晶体磨圓后，置于同成分的飽和溶液中，則溶液中的质点按格子構造的要求粘結上去，重新恢复其多面体外形。因此，晶体的发生和成長是內因与外因相互作用下的結果。

3. 均一性 由于晶体具有格子狀構造，整个晶体具有同样的結

構因而导出均一性的結論。但是絕對均一的东西在自然界是不存在的。

4. 異向性 晶体的許多物理性質均因方向而異其值，例如藍晶石在不同的方向上硬度差別很大，沿直立方向易為刀鋒刻划，但橫截方向刀鋒不留任何痕跡（圖9）。

5. 對稱性 晶体上的各部分具有互相重複再現的情形，構成美麗的對稱形体。結晶體的對稱是晶体內部構造的外部反映。因此，晶体的對稱程度取決於平行六面體的對稱程度。

6. 晶体上各部分的規律分布是必然的結果，並且它們之間具有一般幾何形体上的數學關係：晶面數 + 隅角數 = 晶稜數 + 2

7. 在限制要素中對應晶面夾角恒等 同一物質在相同的條件下具有相同的結晶構造，因而导出相對應晶面夾角恒等的性質。

7. 在晶体上取三個不平行的晶稜（晶列）為座標軸，則任何晶面（面網）在空間的位置關係均可用三個簡單整數表示之。

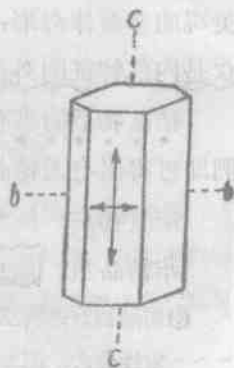


圖9 藍晶石結晶體b向硬度大於C向

#### §4. 結晶學及其與其它科學之關係

結晶學是研究晶体的發生和成長，外形，內部構造以及物理性質的科學。從上述定義可以看出結晶學應包括以下幾個主要部分：

緒論

晶体的發生和成長

幾何結晶學

晶体構造與晶体化學

物理結晶學

結晶学是建立在物理，化学及数学基础上的一門自然科学，随着其他科学的进步，在近几十年来获得迅速的发展；而在結晶学方面研究的成果对于其他科学也提供了丰富的材料。图10表示了結晶学和其他科学的相互关系：

1. 对称理論，几何外形及内部構造均遵循数学規律。
2. 晶体的发生和成長多引用物理化学方面的理論。
3. X—射綫发现后，用以研究晶体的内部構造，給結晶学研究开辟了新的道路。

4. 晶体的物理性质关系着内部構造，而内部構造又关系着化学成分，因而結晶学的研究为物理学家，化学家及金相学家所注意。

5. 矿物学与結晶学的关系最为密切。由于二者系平行发展，在很長的时间內，自然

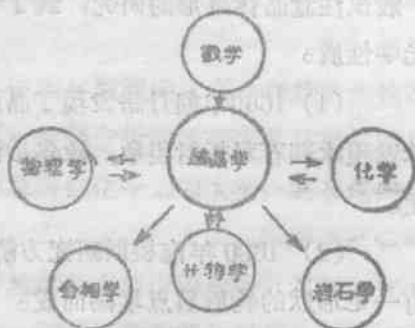


图10 結晶学及其与其他科学之关系

界的結晶体成为結晶学研究的唯一对象，因而結晶学曾被認為是矿物学的一部分，而矿物学中所以要研究結晶学是为了矿物学的需要。

6. 岩石学的研究有賴于結晶学的理論。
7. 許多工业技术部門依賴結晶学研究的材料。

### §5. 結晶学發展簡史

結晶学是在人类社会物质文化发展过程中逐渐建立起来的，随着人类物质生活的需要，其他科学的进步，尤其是物理学及化学的进步，結晶学研究方法得以逐渐改进，研究內容也是逐渐扩展，走向为

国民經济服务的道路。

远在十七世紀人們就开始研究結晶体，并发现有关結晶的基本性质。十八世紀为几何結晶学的主要发展时期。至十九世紀几何結晶学达到成熟阶段，引向晶体構造方面的研究，完成了关于結晶物质的概念。到了廿世紀 X-射綫发现后，应用至晶体内部構造方面的研究，使結晶学的发展向前推进一步。茲將結晶学发展过程按几个主要发展阶段分述如下：

1. 萌芽时期 (十七世紀) 这个时期是結晶学开始发展阶段，一般仅注意晶体外形的研究，到了十七世紀末叶才开始注意到晶体的光学性质。

(1) 1669年丹諾发现了晶面角恒等定律，大約在同时巴尔托林发现冰洲石双折射现象，数年后海根斯也开始了晶体的光学性质研究。

(2) 1690年海根斯研究方解石光学性质时，提出晶体是由具有一定形状的物质质点堆砌而成。

2. 发展阶段 (18—19世紀) 这个时期是几何結晶学的主要发展阶段，有关几何結晶学的基本定律已經建立。至十九世紀已达到成熟阶段，并且提出晶体構造的理論。

(1) 罗蒙諾索夫創立微分子說，將微分子看做球形，由这些微分子堆砌而成晶体。

(2) 1774年阿羽衣发现整数定律，他假定構成晶体的分子形状为平行六面体。

(3) 十九世紀初叶，一般学者注意晶面角测量工作。从事該項工作的有韋曼、列曼、劳曼、密勒、柯克沙洛夫、叶連免也夫、叶洛費也夫等。

(4) 十九世紀創立對稱理論，發現了晶帶定律，俄國學者 A. B. 加多林用幾何方法推導晶體 32 類對稱型。

(5) 十九世紀後半葉隨着物理、化學的發展，開始人工晶體的研究；同時，晶體化學的規律性、同質異象及類質同象已經確定，晶體的光學性質也有深入的研究。

(6) 十九世紀後半葉，俄羅斯出現了偉大的結晶學家——E. C. 費道洛夫，他在幾何結晶學及晶體構造的理論方面都有很卓越的成就。他創立了平行面體學說，晶體有限定律，結晶化學分析法，並且推導了 230 空間群，另外發明雙圓測角儀及費氏旋轉台，對於結晶研究方面具有重大意義。

3. 近代（二十世紀以後）勞埃實驗闡明了 X—射綫的性質，並且証實了晶體構造理論。此後 X—射綫分析成為研究晶體構造的最有力的武器，結晶學便向晶體構造及晶體化學方向發展，並且走向為國民經濟服務的道路。

自從蘇聯十月革命以後，由於蘇聯社會制度的優越，科學研究者掌握了馬列主義，發揮了集體力量，結晶學也和其他科學一樣得到飛躍的發展。

(1) 自從勞埃實驗証實了晶體具備空間格子狀結構後，Г. B. 吳里夫開始利用 X—射綫研究晶體構造，創造了許多新穎的研究方法。吳里夫——布拉格公式的建立，在 X—射綫研究晶體方法上起了很大的作用，此外他設計了吳氏網，便於計算晶體常數和結晶符號。他對於晶體成長理論也有深刻地研究。

(2) A. B. 舒布尼科夫將結晶學應用到技術方面，並且建立了全世界獨一無二的蘇聯科學院結晶學研究所。

(3) 蘇聯偉大的結晶化學家 H. B. 貝洛夫研究了關於晶體中

球体紧密排列的原理。

自然界的一切现象都是可知的。结晶学发展历史就证明了人类在物质文化发展，有关科学进步的条件下认识自然的过程。这个过程是从几何形态的感性认识到内部因素的理性认识，遵循着由低级到高级的发展规律。

结晶学是一门年青的科学，虽然在近几十年来有了显著的进展，但在某些部分还缺乏详细的研究，有待今后的努力。

### §6. 结晶学在国民经济中的实际意义及其在地质勘探工作者培养上所起的作用

大家都知道，结晶物质在我们生活的世界里广泛地分布着。组成地壳的各种岩石和土壤都是矿物晶体构成的；所有的金属、冰块、冰、雪等，也都是结晶体构成的；我们所服用的医药如利尿盐、磺胺，以及在生活上不可缺少的食盐和砂糖也同样是结晶体。总之，除了玻璃、松香、塑膠以及其他类似的物质之外，在我们周围的固体物质都属于结晶质的范畴。因此，我们可以说，我们所在的环境是结晶物质的世界。

我们处在结晶物质的世界里，不仅我们的生活与结晶物质息息相关，并且许多工业技术部门和科学研究方面的最高的成就也与结晶物质性能の利用分不开。

很早以前，人们就已经在冶金方面利用结晶物质集合体的性能了。

金属是结晶颗粒构成的，这些结晶颗粒之间没有规律可言，但



是經過加工之后，則結晶顆粒便按某種規則排列，改變了金屬的機械性能；另外，金屬的淬煉也與金屬的結晶顆粒內部重新組合有關。我們知道，物質在一定溫度範圍內形成一定的穩定的結構，表現了一定的機械性能。例如鐵原子在 $1000^{\circ}\text{C}$ 左右為面心格子結構，溫度緩緩下降至常溫就會轉變為體心格子結構；假如溫度急劇下降，例如將一塊赤熱的鐵投入冷水中，鐵原子來不及重新組合，就在常溫下保留了鐵在高溫下的結構，這就說明了為什麼煉過的鋼具有更優良的機械性能。

現在，對結晶物質的利用遠遠超越了上述的範圍，巨大的單一晶體的應用更為重要了。

金剛石具有最高的硬度，它用於刻劃玻璃，切鋸建築石材，鑲着金剛砂的鐵管做探礦鑽孔之用。人工製造的剛玉及其變種紅寶石用來製造精密儀器的承軸，留聲機錄音片的彫切器等。

在光學儀器方面：冰洲石用做偏光鏡，為岩石顯微鏡上不可缺少的主要零件之一；天然的和人工的石英、螢石、岩鹽、鉀鹽等應用在光學的紫外光綫和紅外光綫上。由這些物質做成的稜鏡是分光儀器的重要部分，由它們製成的物鏡可用在暗處照象。

無論是天然的和人工的壓電石英，用途就更多了，壓電石英能記錄變化得很快壓力，這是其他測量儀器不能勝任的。壓電石英為超聲波之源泉，超聲波也和其他的波一樣，遇到障礙物即行反射，因此可用來測定海深和障礙物的大致距離；超聲波不僅能反射，也能部分地透入固體，因此利用來檢查固體內部不能令人察見的毛病。另外，壓電石英在無線電工程上可幫助發射器的頻率更為穩定。屬於這類壓電性質的晶體還有电气石、酒石酸鹽等，

結晶體在工業技術部門和科學研究上應用的例子還可例舉許多。總之，結晶學的研究成果已與科學技術方面的最新成就密切結合着，