第二章　晶体生长模型与面角守恒定律

MODELS AND LAWS OF CRYSTAL GROWTH

第一节 晶体生长的途径
FACIES TRANSFER INTO CRYSTAL

晶体的形成途径有 3 种。

1 由气相转变为晶体

当某些气体处于其过饱和蒸气压或过冷却温度条件时，可直接转变为晶体。

2 由液相转变为晶体

液相有熔体和溶液两种基本类型。当温度下降到低于熔体的熔点（即过冷却）或当溶液达到过饱和时，可结晶形成晶体。

3 由固相转变为晶体

对于非晶态的固体，相对于晶体来说其内能较大而处于不稳定状态。因此，非晶态的固体可以自发地向内能更小更稳定的晶体转化。

除了非晶态的固体可以转变为晶体以外，一些早期形成的晶体，当其所处的物理化学条件改变到一定程度时，使原来的晶体转变成了另外一种晶体。主要有以下几种情况。

（1）同质多相转变　某种晶体在热力学条件改变时转变为另外一种在新条件下稳定的晶体，新晶体与原晶体成分相同，但结构不同。

（2）固溶体分解　固溶体是两种或两种以上的物质在一定的温度条件下形成的类似于溶液的一种均一相的结晶相固体。当温度下降时，固溶体内部物质之间的相容性下降，从而使它们各自结晶形成独立的晶体，这就是固溶体的分离现象。

（3）再结晶作用　再结晶作用是指在温度和压力的影响下，通过质点在固态条件下的扩散，由细粒晶体转变成粗粒晶体的作用。在这一作用过程中，没有新晶体的形成，只是原来晶体的颗粒由小变大。

第二节 晶体的层生长与螺旋生长
CRYSTAL GROWTH MODELS

晶体的生长一般是先生成晶核，尔后再逐渐长大的。

晶核形成以后，围绕晶核的生长，实际上就是溶液或熔体中的其它质点，按照格子构造规律不断地堆积在晶核上，使晶核逐渐长成晶体的过程。那么质点是如何堆积到晶核上长成晶体的呢？下面重点介绍两个有关的理论模型。

1 层生长理论

层生长(layer growth)理论又称科塞尔-斯特兰斯基**二维成核（two-dimensional nucleation）理论**，是由科塞尔（W.Kossel）提出后经斯特兰斯基（I.N.Stranski,）发展而成的晶体生长模型。该理论认为，质点在光滑的晶核表面堆积时，存在着 3 种不同的占位

中国地质大学（北京）岩石矿物教研室

位置 1，2 和 3（如图 2-1），分别称为三面凹角、二面凹角和一般位置。质点优先进入三面凹角，其次是二面凹角，最后是一般位置。由此可以推出，在理想情况下，晶体在晶核基础上生长时，应先生长一条行列，然后生长相邻的行列，在长满一层面网后，再开始生长第二层面网，这样晶体面网一层一层地逐渐向外平行推移，最外层的面网便发育成晶体的晶面。这就是层生长理论。

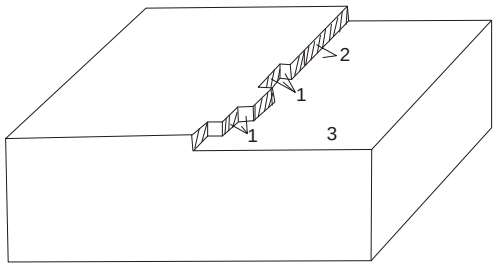
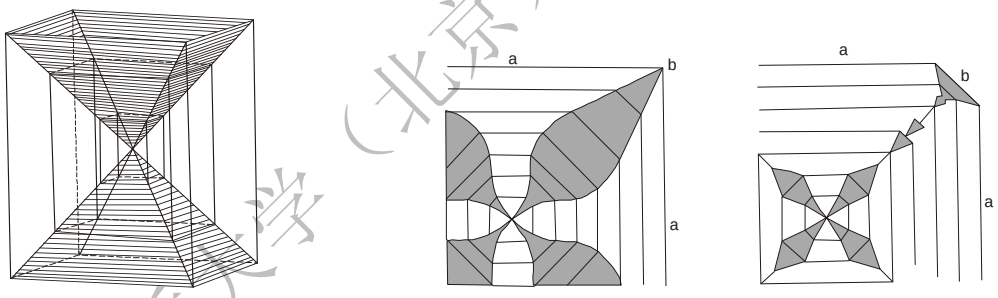


图 2－1 层生长模型（潘兆橹等，1993）

晶体表面不一定是平坦的晶面，而可能出现晶面阶梯，表明质点向晶核上堆积时也不一定是在一层堆满以后才开始堆积第二层，晶核表面可有多个层同时在堆积。

尽管如此，晶体的生长在许多情况下还是按层进行的。晶体常生长成为面平、棱直的多面体形态（晶体的自限性）；同种物质的晶体上对应晶面间的夹角不变（面角守恒定律）；生长锥（图 2－3）等。所有这些现象都证明了晶体在较理想条件下生长时，晶面是平行向外推移的。



A　　B　　C

图 2－3 晶体的生长锥。A-各晶面生长速度保持恒定时形成的棱锥状生长锥；B、C－各晶面相对生长速度有变化时形成的复杂生长锥（南京大学岩矿教研室，1982？）

2 螺旋生长理论

层生长理论还不能很好地解释低过饱和度和低过冷却度条件下晶体面网的连续生长问题。为此，基于实际晶体结构中常见的位错现象，弗兰克（F. C. Frank），布顿（W.K.Burton）和卡勃雷拉（N.Cabrera）等人又提出了晶体的螺旋生长模型，亦称 BCF 模型。

按照**螺旋生长(spiral growth)理论**，杂质在晶格中的不均匀分布可使晶格内部产生应力，当应力积累超过一定限度时，晶格便沿某一面网发生相对剪切位移，形成**螺旋位错(screw dislocation)**。螺旋位错的出现使平滑的界面上出现沿位错线分布的凹角（如图 2-4），从而使介质中的质点优先向凹角处堆积。显然，随着质点在凹角处的堆积，凹角并不会消失，只是凹角所在的位置随质点的堆积而不断地螺旋式上升，导致生长界面以螺旋层向外推移，并在晶面上留下成长过程中形成的螺旋纹。这便是晶体的螺旋生长。

中国地质大学（北京）岩矿教研室

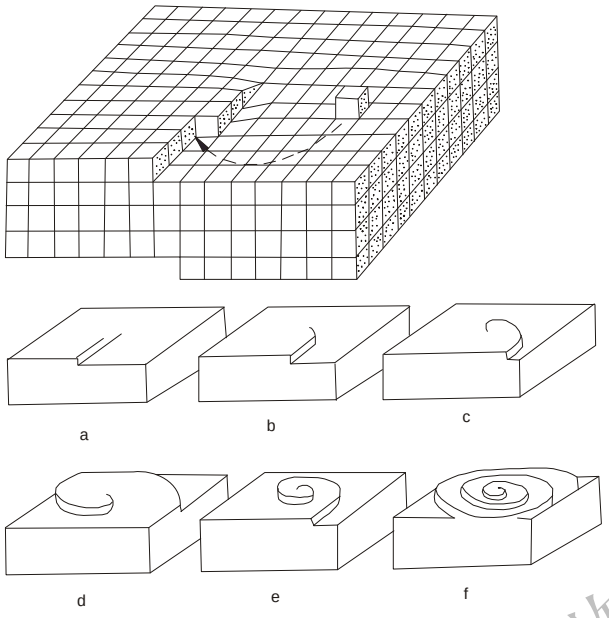


图 2-4 晶格中的螺旋位错和螺旋生长模型（潘兆橹等，1993）。a-f 示不同生长阶段。

第三节 晶面发育的布拉维法则和周期键链理论
THEORIES ON CRYSTAL FACE GROWTH

在晶体的生长过程中，同时有多个不同方向的面网在生长，那么，那些面网会最终发育成晶面呢？下面我们介绍有关这方面的几个主要理论。

1 布拉维法则

我们把晶面在单位时间内沿其法线方向向外推移的距离称为晶面的生长速度。

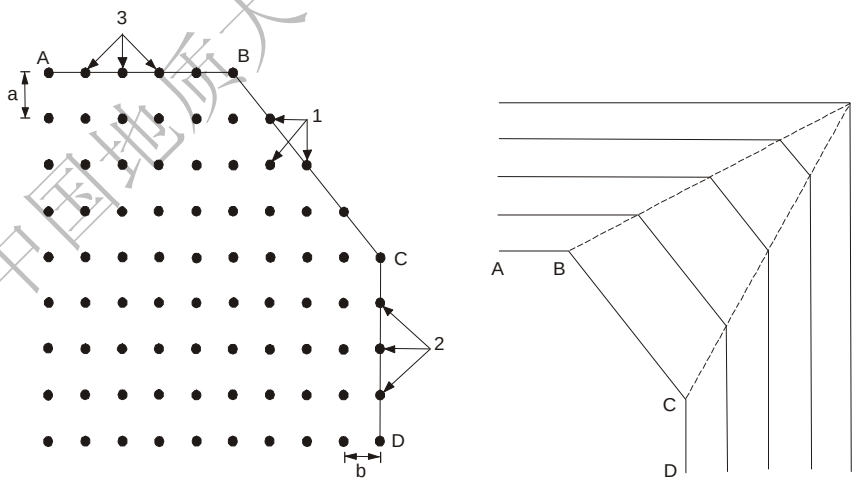


图 2－6 布拉维法则图解（秦善等，2004）。左－面网密度小的晶面优先向外推移；右－生长速度快的晶面在生长时消失。

晶面的生长速度与面网密度有关，面网密度越小，晶面生长速度越快；面网密度越大，

中国地质大学（北京）岩石矿物教研室

晶面生长速度越小。面网密度越小的晶面，在晶体生长过程中，面积逐渐缩小而最终可被面网密度较大的相邻晶面所淹没，因此，得以继续扩大的晶面一般都是面网密度较大的晶面。

据此，法国结晶学家布拉维（A.Bravis）提出，实际晶体的晶面常常是由晶体格子构造中面网密度大的面网发育而成的。这一结论被称为**布拉维法则（law of Bravais）**。

2 周期键链理论

该理论认为，在晶体结构中存在着一系列周期性重复的强键链，其重复规律（周期及方向等）与相应质点的重复规律一致，这样的强键链称为周期键链（Periodic bond chain，简写为 PBC）。晶体平行键链生长，键力最强的方向生长最快，平行强键链最多的面最常见于晶体的表面而成为晶面。这就是**周期键链理论（PBC theory）**。

晶面类型可划分为以下 3 种类型：

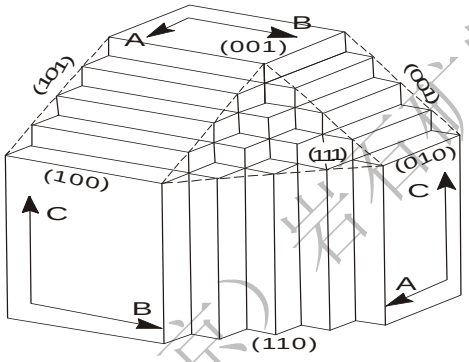


图 2—8 周期键链理论图解（潘兆橹等，1993）

F 面：又称平坦面，有两个以上的Ｐ Ｂ Ｃ与之平行，面网密度最大，质点结合到Ｆ面上去时，只形成一个强键，晶面生长速度慢，易形成晶体的主要晶面。

S 面：或称阶梯面，只有一个 PBC 与之平行，网面密度中等，质点结合到 S 面上去时，形成的强键至少比Ｆ面多一个，晶面生长速度中等。

K 面：或称扭折面，不平行任何 PBC，网面密度小，扭折处的法线方向与 PBC 一致，质点极易从扭折处进入晶格，晶面生长速度快，是易消失的晶面。

从上述分析可以看出，晶体中最常见且发育较大的晶面应当为Ｆ面，而经常缺失或罕见的应当为 K 面。

第四节 影响晶体生长的外部因素
FACTORS AFFECTING CRYSTAL GROWTH

影响晶体生长的几种主要外部因素分析:

1. 涡流和生长介质的流动方向

在晶体的生长过程中，随着晶体周围溶液中的溶质向晶体上的粘附以及晶体生长释放出来的热量增加，晶体周围的溶液密度减小温度升高而在重力作用下上升，从而使远离晶体的冷的重溶液向晶体方向流动，从而形成涡流。

中国地质大学（北京）岩矿物教研室

2. 温度

在不同的温度条件下，同一种晶体的不同晶面，其相对生长速度会有所改变，从而影响其生长形态。

3. 杂质与酸碱度

溶液中杂质的存在可以改变晶体上不同面网的表面能，从而其相对生长速度也随之变化而影响晶体的形态。

故溶液的酸碱度也能影响晶体的形态。

4. 粘度

在粘度较大的情况下，溶液中质点的供给主要以扩散的方式进行。在这种情况下，晶体上容易接受溶质的棱、角部分生长较快，而晶面的中心部分生长较慢，甚至不生长。

5. 结晶速度

结晶速度越大，则形成的结晶中心越多，在围绕多个结晶中心生长的情况下，晶体不易长大。因此，形成的晶体多为细粒状。反之，结晶速度越小，体系中结晶中心的数量越少，越有利于晶体的长大，晶体多呈粗粒状。

6. 生长顺序与生长空间

晶体生长的空间对晶体的生长形态影响较大，早期析出的晶体，具有较多的自由生长空间，晶形完整，自形程度较高；后期析出的晶体，只能在已形成的晶体残留的空间中生长，因此，其晶形一般不完整，常呈半自形晶或他形晶。

7. 应力作用

此外，对于在固相中形成的晶体形态而言，外部应力的作用十分重要：一般垂直于压应力轴的晶面较大；在剪切应力作用下形成的晶体可呈不对称椭球状或丝状。这对应力作用方向的判别有重要意义。

第五节 晶簇与几何淘汰律

DRUSE AND GEOMETRIC ELIMINATION LAW

晶簇（druse）是指丛生于岩石空洞或裂隙中某一基底之上，另一端朝向自由空间并具有完好晶形的单晶体群。热液成因的石英、石膏、辉锑矿等矿物常见其晶簇

若有许多呈不同取向的晶核在一个基底上生长，当晶体生长到一定阶段后，就只有那些生长速度最大方向与基底平面垂直的晶体才能继续生长。这就是所谓的**“几何淘汰律”**（geometric eliminaton law）

中国地质大学（北京）岩石矿物教研室

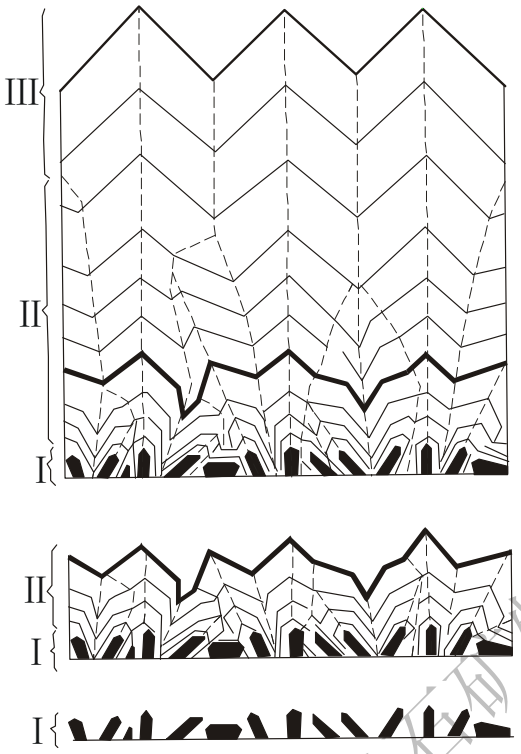


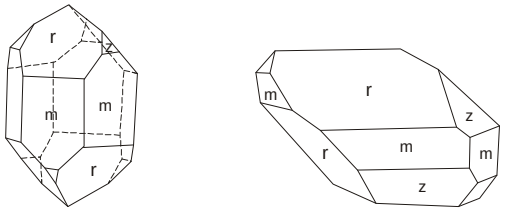
图 2－15 几何淘汰率图解（陈光远，1988）

第六节 歪晶与面角守恒定律

DISTORTED CRYSTAL AND STENO'S LAW

1．歪晶

由于晶体在生长过程中不可避免地要受到外界环境因素的影响，形成的偏离理想形态的晶体称为**歪晶（distorted crystal）**（图 2-16）。



(A) (B)

图 2-16 石英的理想晶（A）与歪晶（B）(潘兆橹等，1993)

2．面角守恒定律

1669 年，丹麦学者斯丹诺（N.Steno）在对石英（α-SiO_2）和赤铁矿（Fe_2O_3）晶体的研究过程中发现，同种物质的晶体，其对应晶面之间的夹角恒等。这就是**斯丹诺定律（Steno' s law）**或**面角守恒定律（law of constancy of angle）**。如图 2-16 中不同形态的石英，其对应晶面间的夹角是相等的。即 r∧m=141° 47″，r∧z=133° 44″，m∧m=120° 。

中国地质大学（北京）岩石矿物教研室

所谓面角（interfacial angle）是指晶面法线之间的夹角，其数值等于相应晶面之间实际夹角的补角。

面角守恒定律是结晶学发展史上的一个重要发现，它为研究复杂多样的晶体形态，提供了一条可行的途径。

中国地质大学（北京）岩石矿物教研室