



《材料科学导论》讲义

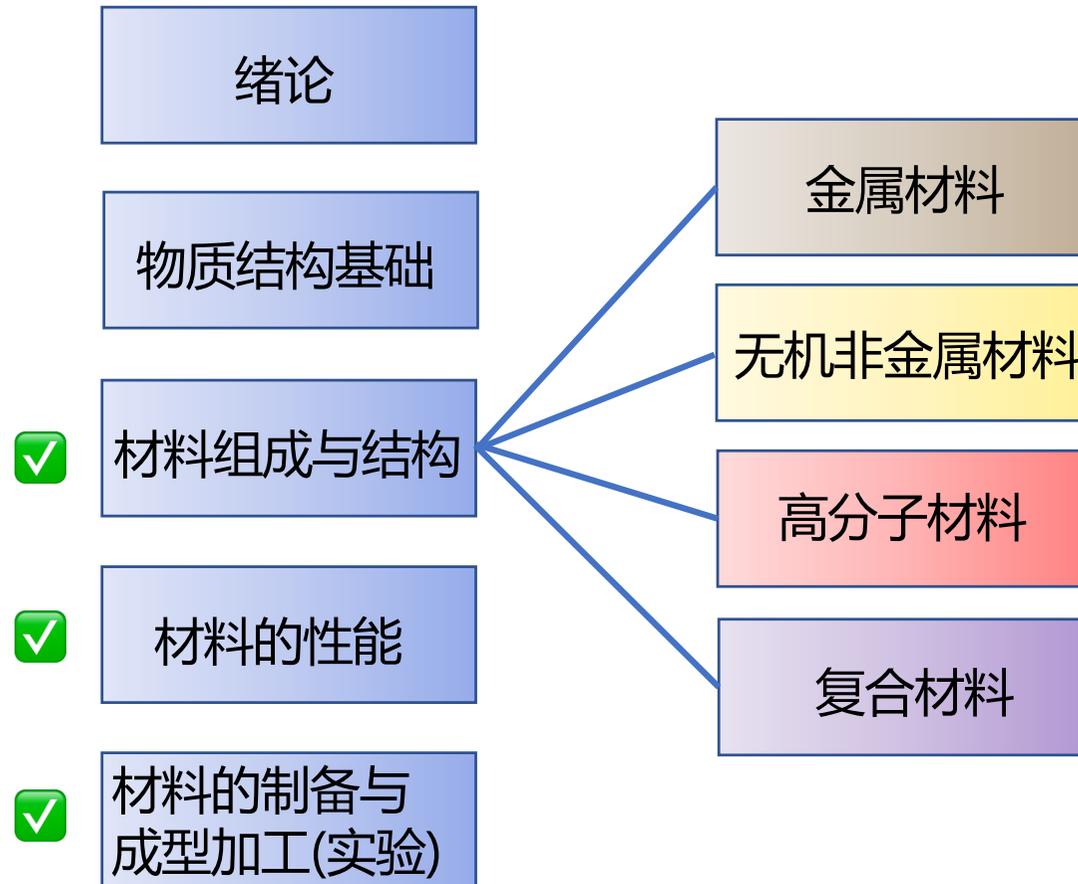
3.3 材料的组成与结构

徐一飞、高悦

復旦大學高分子科學系

xyf@fudan.edu.cn; yuegao@fudan.edu.cn

内容总览



课程安排

Week 9: 无机非金属材料组成与结构

Week 10: 高分子材料组成与结构

Week 11: 复合材料组成与结构

Week 12: 材料的力学性能与热性能

Week 13: 材料的电磁性能

Week 14: 材料的其他性能

Week 15: 新型材料的性能

Week 16: 实验课

什么是材料？

材料是人类用来制造机器、构件、器件和其他产品的物质。但并不是所有物质都可称为材料，如燃料和化工原料、工业化学品、食物和药品等，一般都不算作材料。



材料分类

- 1.按化学组成分类**：金属材料、无机物非金属材料、有机高分子材料、复合材料
- 2.按物理性质分类**：高强度材料、耐高温材料、超硬材料、导电材料、绝缘材料、磁性材料、透光材料、半导体材料
- 3.按凝聚态分类**：单晶材料、多晶材料、非晶态材料、准晶态材料
- 4.按物理效应分类**：压电材料、热电材料、铁电材料、光电材料、电光材料、磁光材料、激光材料
- 5.按用途分类**：建筑材料、研磨材料、耐火材料、耐酸材料、电工材料、光学材料

本讲内容

3.3.1 无机非金属材料组成的结合键

3.3.2 无机非金属材料中的简单晶体结构

3.3.3 硅酸盐结构

3.3.4 无机非金属材料非金属结构

3.3.5 陶瓷

3.3.6 碳化化合物

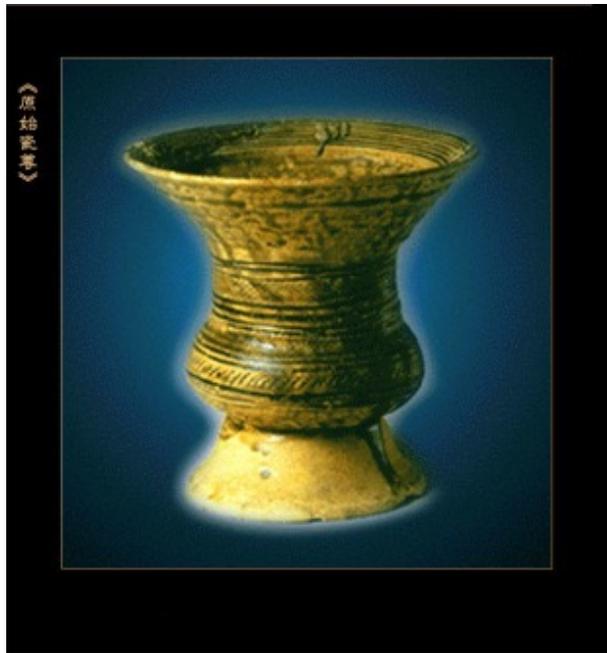
教学目标

- 了解无机非金属材料的基本分类
- 了解各类无机非金属材料的结构特点

3.3.1 无极非金属的组成与结合键

无机非金属材料

无机非金属材料，是以某些元素的氧化物、碳化物、氮化物、卤素化合物、硼化物以及硅酸盐、铝酸盐、磷酸盐、硼酸盐等物质组成的材料。是除有机高分子材料和金属材料以外的所有材料的统称。



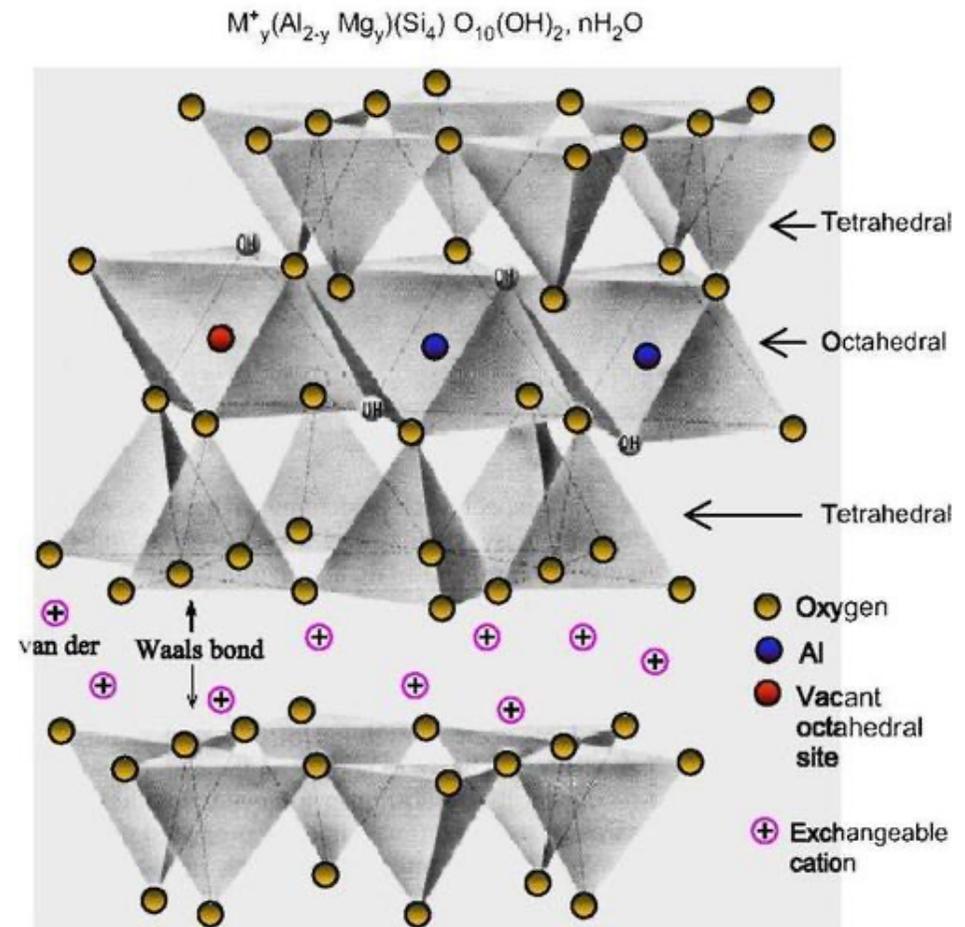
中国古代的陶瓷艺术



罗马斗兽场

无机非金属材料键合方式

混合键的存在与键合多样性是无机非金属材料键合方式的显著特征。包括离子键、共价键、氢键、范德华力、离子-共价混合键、离子-共价-范德华力混合键。



离子键与离子晶体

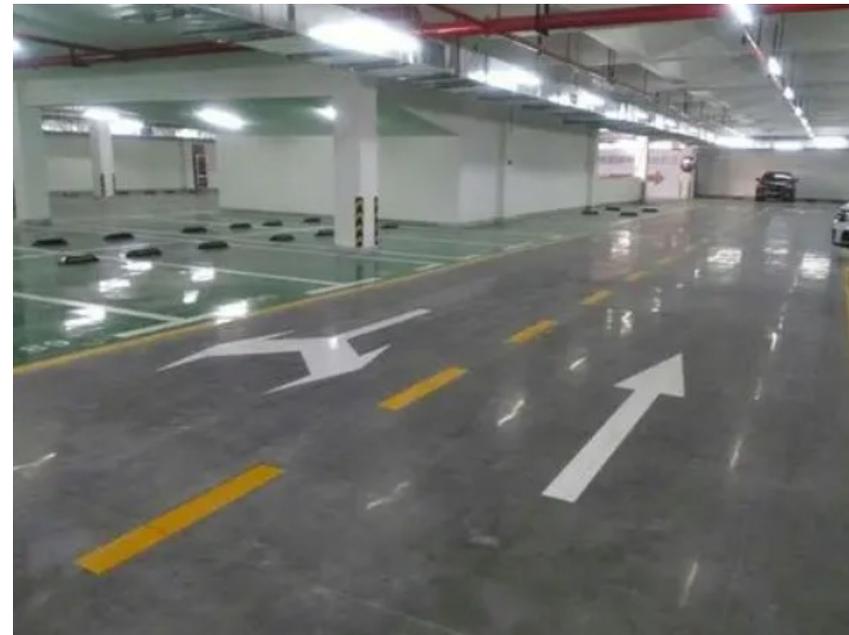
自然界中完全由离子键合的晶体较少，但氧化物、氮化物、碳化物、硫化物和卤化物通常离子键合程度较大。离子键不具有方向性和饱和性，有利于离子在空间中作密堆积，因此离子晶体通常具有较大密度。例子：NaCl、CsCl....



镉黄 (CdS) ,一种无机颜料 , 离子性结合键仅含69%

共价键与原子晶体

共价键的特征是具有严格的方向性和饱和性，原子空间排布密度较低，因此通常具有较高硬度、较低密度和低导电性。例子：单晶硅（金刚石立方结构）；As、Sb、Bi等（层状结构）...



金刚砂（SiC），常用于耐磨地坪，离子性结合键仍然含18%

混合键

混合键的存在与键合多样性是无机非金属材料键合方式的显著特征。包括离子键、共价键、氢键、范德华力、离子-共价混合键、离子-共价-范德华力混合键。

表1 二元晶体中离子性结合键的比例

晶体	离子性比例(%)	晶体	离子性比例(%)	晶体	离子性比例(%)
Si	0	CdS	69	AgCl	86
Gb	0	InAs	36	MgO	84
SiC	18	InSb	32	MgS	79
ZnO	62	GaAs	31	LiF	92
ZnS	62	GaSb	75	NaCl	94
ZnSe	63	CuCl	74	BbF	96
CdO	79	CuBr	86		

3.3.2 无机非金属材料简单晶体结构

无机非金属材料晶体结构

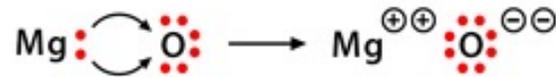
无机非金属材料键合方式涉及离子键、共价键、氢键、范德华力，空间结构涉及所有七个晶系。

1. Ionic Bond

Metal atom loses electron(s) to nonmetal atom



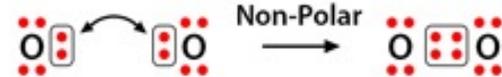
Sodium Chlorine Sodium chloride



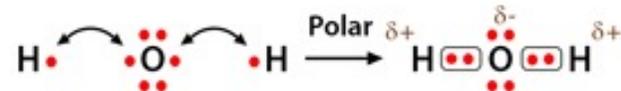
Magnesium Oxygen Magnesium oxide

2. Covalent Bond

Two nonmetal atoms share electrons



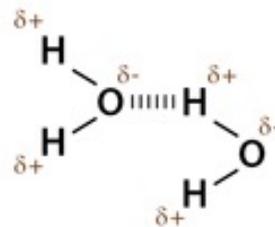
Oxygen atoms Oxygen molecule



Hydrogen Oxygen Hydrogen Water

3. Hydrogen Bond

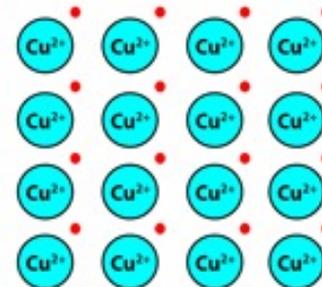
Hydrogen attracts an electronegative atom electrostatically



Two water molecules

4. Metallic Bond

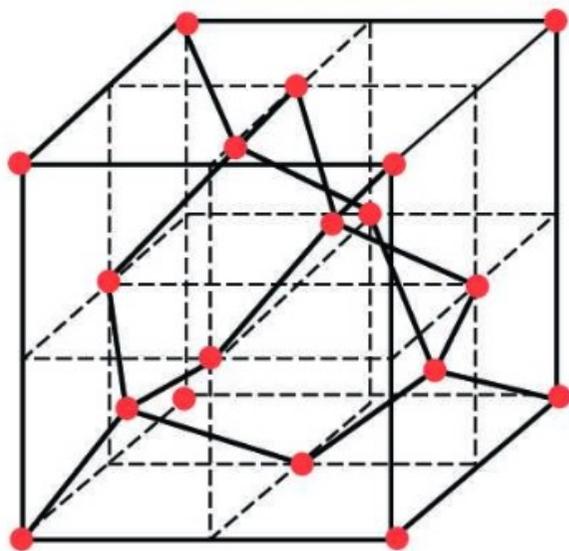
Positive metal ions attract conducting electrons



Copper ions immersed in an electron cloud

单晶硅

单晶硅属于立方晶系，是典型的共价晶体。
硅原子外层电子分布为 $3s^23p^2$ ， sp^3 杂化，配位数为4，
键角 $109^\circ28'$ 。



单晶硅晶胞结构



单晶硅片

单晶硅

太阳能电池

主要产品简介

530-580 WP

210单晶硅高效半片组件
210 monocrystalline silicon high-efficiency half-chip module

25年85%效率保有率生产商质量保证

25年后功率保值率高1-8%

高效线性质保

阴影条件下发电性能好

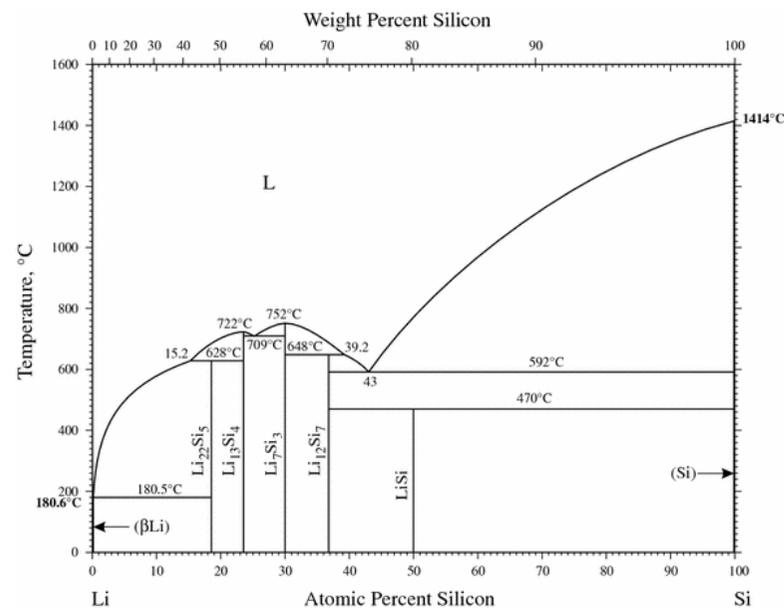
特殊的电池微组件设计显著降低阴影遮挡造成的功率损失

产品优势

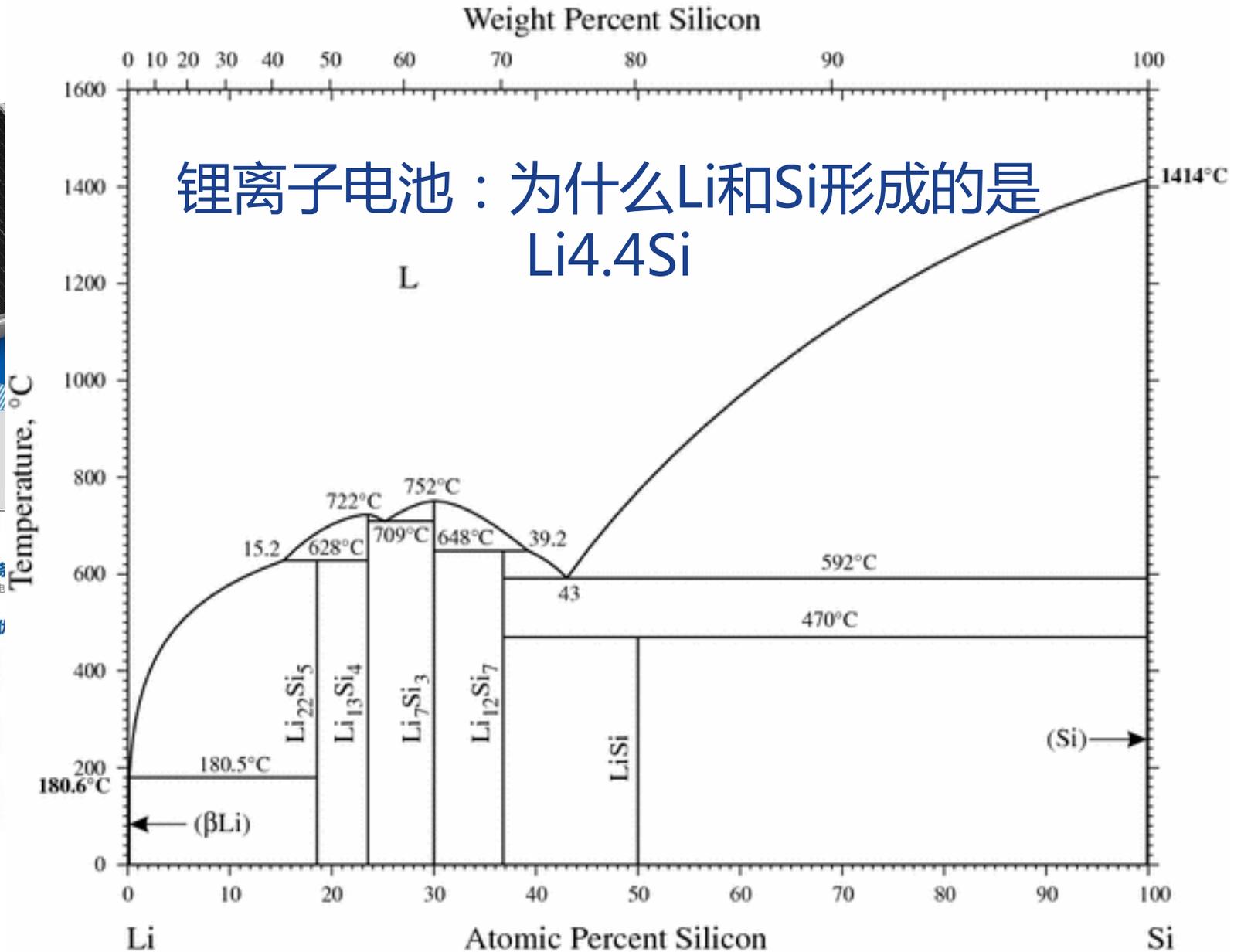
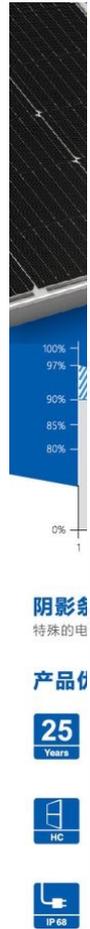
- 25 Years 25年功率线性质保**
功率不低于组件标准条件下功率的85%
- 突出的结构设计承载能力更强**
最大可承受冰雪压力2400帕大气压
- 阴影条件下发电性能更好**
半片工艺排版设计显著降低阴影遮挡造成的功率损失
- 透视检测率确保组件一致性更高**
E1专业光伏透视检测率100%
- 质量优选光伏接线盒**
IP68防水等级, 发电不回流
- 组件出厂功率正公差保证**
平均功率超出组件标称功率的0-5W



锂离子电池

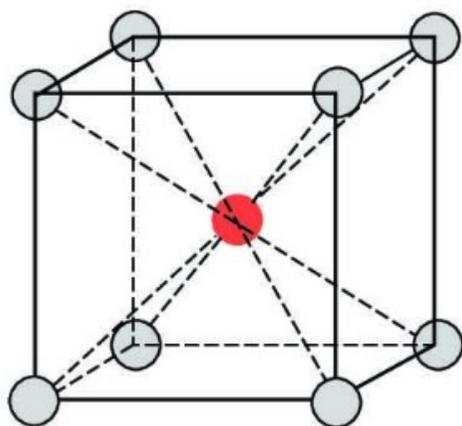


单晶硅

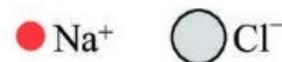
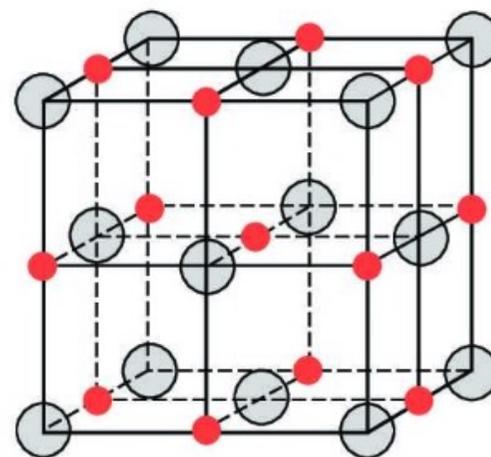


氯化铯与氯化钠晶体

CsCl与NaCl均属于立方晶系，是典型的AX型离子晶体，晶胞内正负离子数相同。CsCl呈立方体配位， $Z=8$ ，简单立方 Cs^+ 与简单立方 Cl^- 在空间中错位配套而成。NaCl呈八面体配位， $Z=6$ ，面心立方 Na^+ 与面心立方 Cl^- 错位配套。



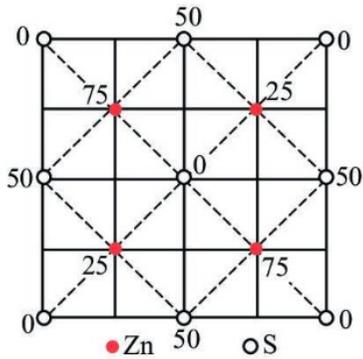
CsCl晶胞结构



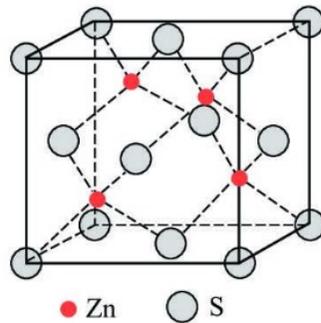
NaCl晶胞结构

立方ZnS与六方ZnS

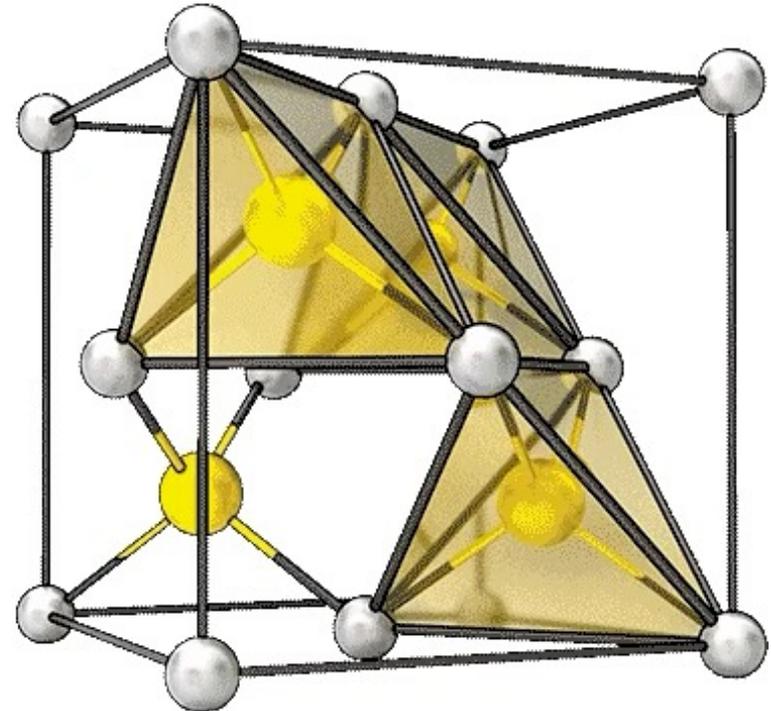
面心立方ZnS（闪锌矿）与六方ZnS（纤锌矿）均属于立方晶系，属于共价晶体。面心ZnS中， $Z_{(Zn)}=Z_{(S)}=4$ ，面心立方Zn与面心立方S错位配套。



(a) 立方ZnS晶胞的(001)晶面



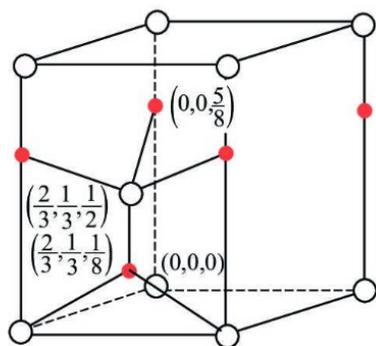
(b) 立方ZnS晶胞结构



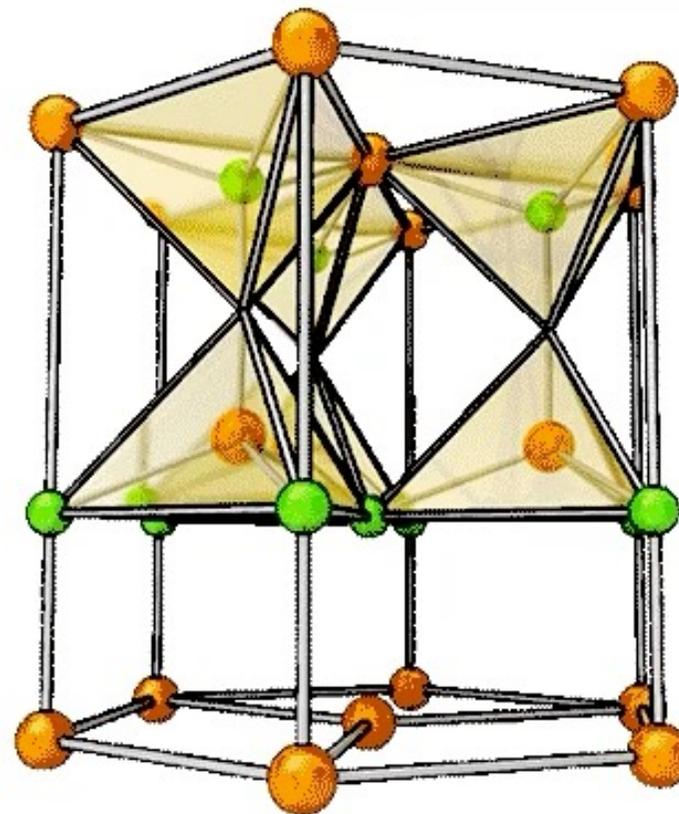
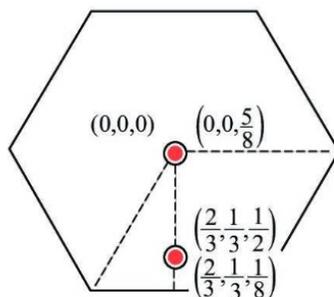
立方ZnS晶胞结构

立方ZnS与六方ZnS

六方ZnS由简单六方Zn与简单六方S错位形成。



● Zn
○ S



六方ZnS晶胞结构

面心立方ZnS与六方ZnS



闪锌矿（经加工）



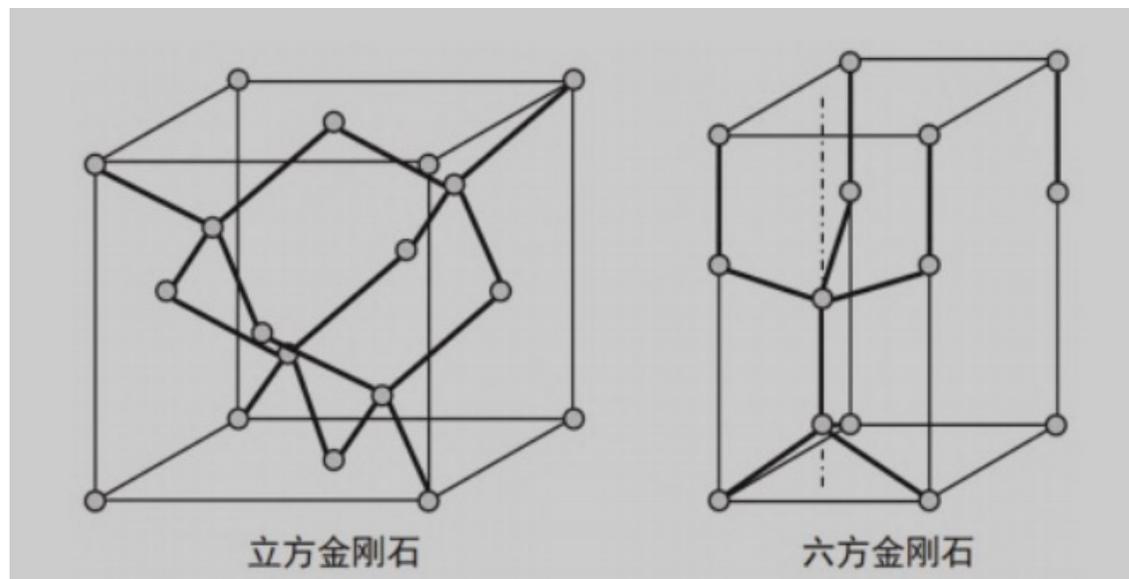
纤锌矿

延伸：金刚石

金刚石，即钻石，为C的同素异形体，具有类似于单晶硅的四面体结构（C原子发生 sp^3 杂化）。是自然界中**硬度和导热性**均为最高的物质，同时拥有**极高的电阻**和优良的**透光性**。



天然金刚石



我系的学习奋斗精神



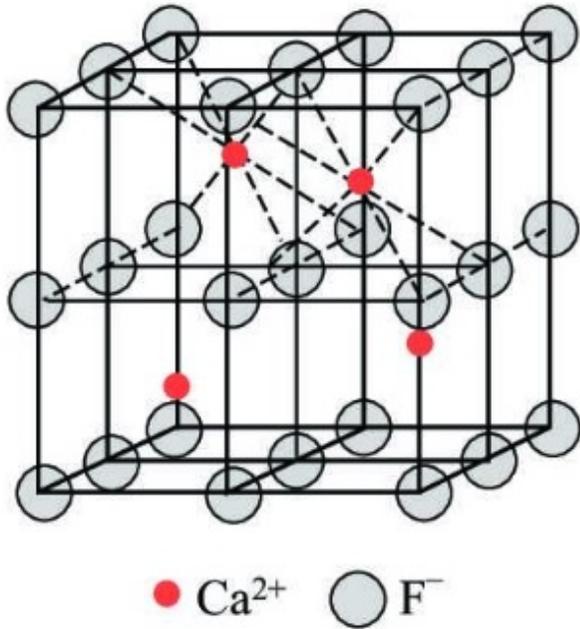
1958年
高分子化学研究所成立

及高分子教研室
along with the Polymer Educational Research Center



氟化钙晶体

CaF₂属立方晶系，AX₂型离子晶体。晶胞中负离子数量为正离子两倍。 $Z_{(\text{Ca}^{2+})}=8$, $Z_{(\text{F}^{-})}=4$ 。二氧化铀 UO₂、二氧化钍 ThO₂与CaF₂结构类似。



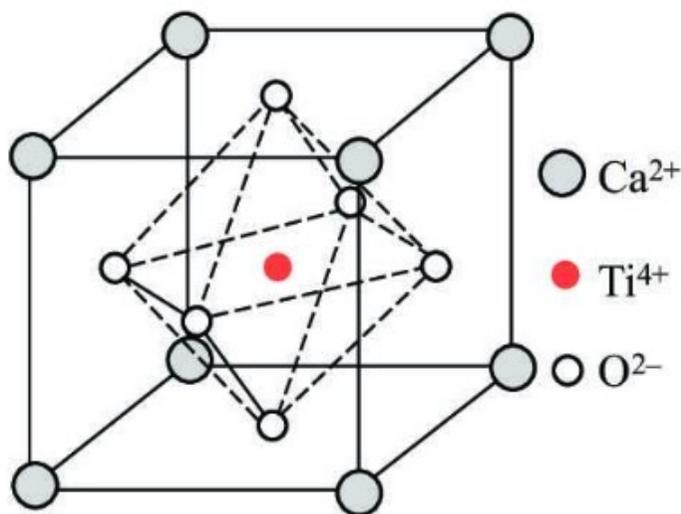
CaF₂晶胞结构



萤石，主要含CaF₂

钙钛矿

天然钙钛矿化学组成为 CaTiO_3 ，为典型的 ABX_3 型离子晶体，属于立方晶系。 $Z_{(\text{Ca}^{2+})}=12$ ， $Z_{(\text{Ti}^{4+})}=6$ ， $Z_{(\text{O}^{2-})}=6$ 。 O^{2-} 分别与4个 Ca^{2+} 与2个 Ti^{4+} 键合。



CaTiO_3 晶胞结构

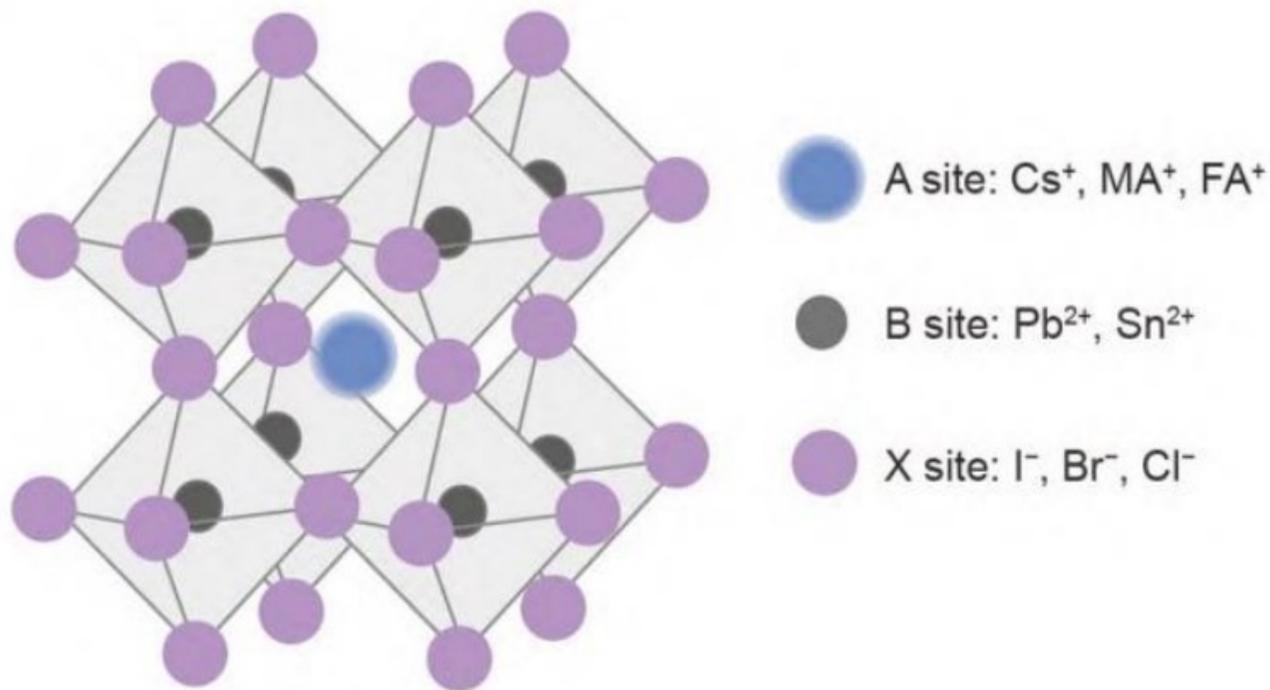


基质上的钙钛矿晶体

钙钛矿：优势明显的第三代光伏技术

钙钛矿结构的化学通式中A位一般为原子半径较小的阳离子（如Cs⁺、MA⁺、FA⁺等），B位为原子半径较大的过渡金属离子（如Sn²⁺、Pb²⁺等），X为卤素阴离子（I⁻、Br⁻、Cl⁻等）。

拥有优越的电荷传输性质、长载流子扩散距离、全光谱吸收和高吸光系数，因而可以有效吸收太阳光并高效地产生光生载流子，同时减少在光电转换过程中的能量损失，是较为理想的光电材料。

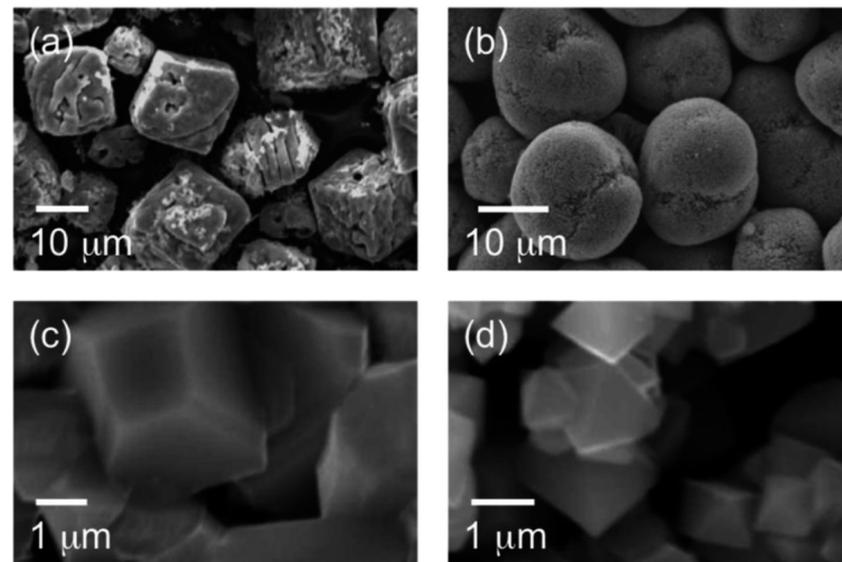


尖晶石型晶体结构

天然尖晶石化学组成为 MgAl_2O_4 ，属于立方晶系，为典型的 AB_2X_4 型离子晶体。尖晶石型晶体中，A可为二价正离子（ Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Fe^{2+} ...），B可为三价正离子（ Al^{3+} 、 Fe^{3+} ...），结构与 MgAl_2O_4 类似。陶瓷中的尖晶石相对其力学性能、电性能、磁性能等有较大影响。



尖晶石（经加工）

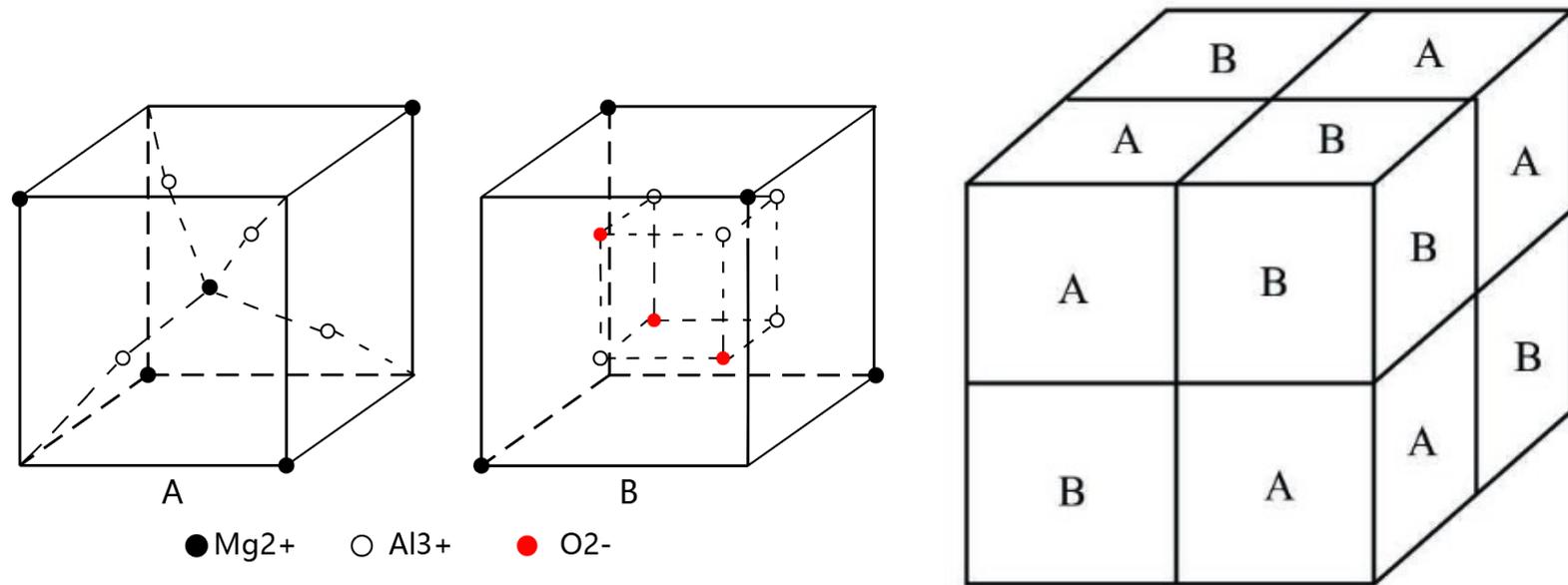


具有尖晶石结构的 $\text{LiMn}_{1.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_4$

锂电池5V正极材料

尖晶石型晶体结构

正尖晶石型晶体结构较为复杂，晶胞含八个“化学式”，即 $A_8B_{16}O_{32}$ 。正尖晶石型晶胞可分为八个“小块”（ $4A+4B$ ），A、B块交错堆叠（共棱同，共面异）。此外还有反尖晶石型晶体，区别在于二价离子和三价离子的填充位置。



正尖晶石晶胞结构

无机非金属材料晶体的理论密度

当无机非金属材料可用简单化学式表示时，理论密度公式为：

$$\rho = \frac{n'(\sum A_C + \sum A_A)}{V_c N_A}$$

- n' = 一个晶胞中的化学式单位数；
- $\sum A_C$ = 化学式中正离子原子量之和；
- $\sum A_A$ = 化学式中负离子原子量之和；
- V_c = 一个晶胞的体积；
- N_A = 阿伏伽德罗常数；

无机非金属材料晶体的理论密度

例题：计算NaCl晶体理论密度，并与实验值 2.16 g/cm^3 进行比较。

王者级别：顶尖玩家，具备强大的技巧和策略

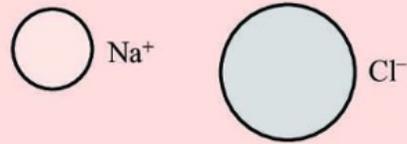
无机非金属材料晶体的理论密度

例题：计算NaCl晶体理论密度，并与实验值2.16 g/cm³进行比较。

$$\rho = \frac{n'(\sum A_C + \sum A_A)}{V_c N_A}$$

$$\sum A_C = A_{\text{Na}} = 22.99 \text{ g/mol}$$

$$\sum A_A = A_{\text{Cl}} = 35.45 \text{ g/mol}$$



$$0.102 \times 10^{-7}$$

$$0.181 \times 10^{-7}$$

钻石级别：已经熟练掌握技巧，懂得合理运用公式

无机非金属材料晶体的理论密度

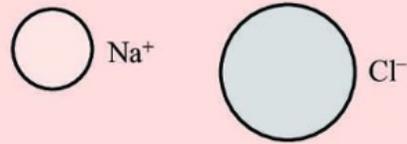
例题：计算NaCl晶体理论密度，并与实验值2.16 g/cm³进行比较。

$$\rho = \frac{n'(\sum A_C + \sum A_A)}{V_c N_A}$$

FCC 晶胞：n=4

$\sum A_C = A_{Na} = 22.99 \text{ g/mol}$

$\sum A_A = A_{Cl} = 35.45 \text{ g/mol}$



0.102×10^{-7}

0.181×10^{-7}

白金级别：已经具备一定的技巧，但还需提高策略水平

无机非金属材料晶体的理论密度

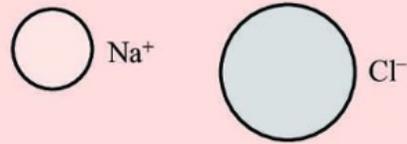
例题：计算NaCl晶体理论密度，并与实验值2.16 g/cm³进行比较。

$$\rho = \frac{n'(\sum A_C + \sum A_A)}{V_c N_A}$$

FCC 晶胞：n=4

$\sum A_C = A_{Na} = 22.99 \text{ g/mol}$

$\sum A_A = A_{Cl} = 35.45 \text{ g/mol}$



0.102×10^{-7}

0.181×10^{-7}

黄金级别：已经掌握了基本操作，但还需实战经验

无机非金属材料晶体的理论密度

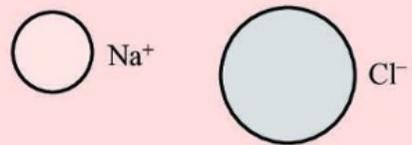
例题：计算NaCl晶体理论密度，并与实验值2.16 g/cm³进行比较。

$$\rho = \frac{n'(\sum A_C + \sum A_A)}{V_c N_A}$$

FCC晶胞：n=4

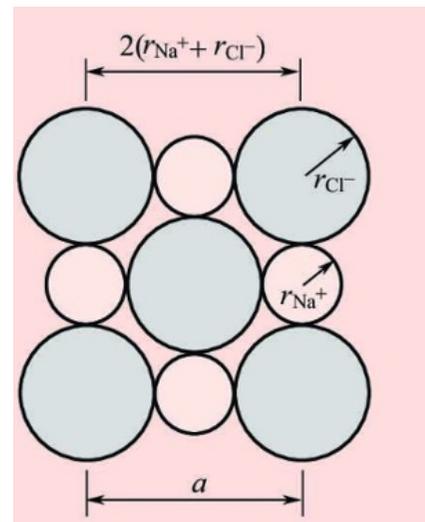
$$\sum A_C = A_{\text{Na}} = 22.99 \text{ g/mol}$$

$$\sum A_A = A_{\text{Cl}} = 35.45 \text{ g/mol}$$



$$0.102 \times 10^{-7}$$

$$0.181 \times 10^{-7}$$



$$a = 2r_{\text{Na}^+} + 2r_{\text{Cl}^-}$$

$$V_c = a^3 = (2r_{\text{Na}^+} + 2r_{\text{Cl}^-})^3$$

白银级别：技术水平仍需提高

无机非金属材料晶体的理论密度

例题：计算NaCl晶体理论密度，并与实验值2.16 g/cm³进行比较。

$$\rho = \frac{n'(\sum A_C + \sum A_A)}{V_c N_A}$$

按照NaCl的晶体结构，计算其理论密度，并与实验测得的密度值2.16g/cm³进行比较。

解：FCC晶胞：n=4

$$\sum A_C = A_{Na} = 22.99 \text{ g/mol}$$

$$\sum A_A = A_{Cl} = 35.45 \text{ g/mol}$$

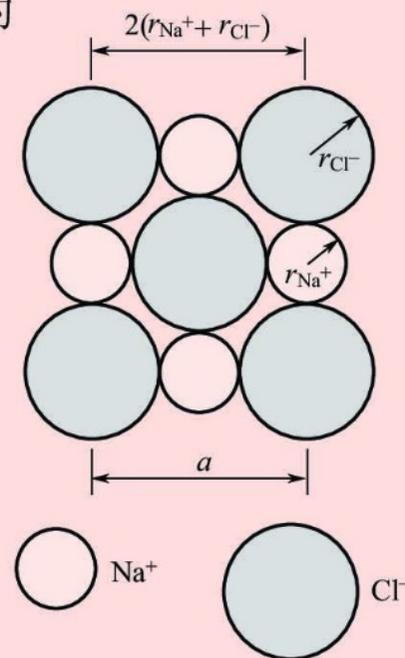
$$a = 2r_{Na^+} + 2r_{Cl^-}$$

$$V_c = a^3 = (2r_{Na^+} + 2r_{Cl^-})^3$$

$$\rho = \frac{n'(A_{Na} + A_{Cl})}{(2r_{Na^+} + 2r_{Cl^-})^3 N_A}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{4 \times (22.99 + 35.45)}{(2 \times 0.102 \times 10^{-7} + 2 \times 0.181 \times 10^{-7})^3 \times 6.02 \times 10^{23}} \\ &= 2.14 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

NaCl晶体的理论密度为2.14g/cm³，低于实验值2.16g/cm³。其原因可能是实验材料NaCl中含有重金属元素。



青铜级别：技术水平仍需提高

3.3.3 硅酸盐结构

中国科学院上海硅酸盐研究所

[播报](#)[编辑](#)[讨论](#)[上传视频](#)[+](#)

科研机构

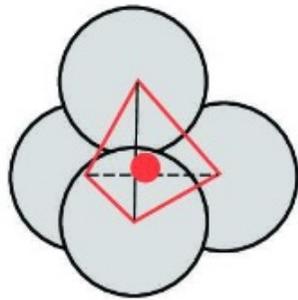
中国科学院上海硅酸盐研究所（Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences）的前身是1928年成立的国立中央研究院工程研究所；1954年，更名为中国科学院冶金陶瓷研究所；1959年，独立建所，定名为中国科学院硅酸盐化学与工学研究所；1984年，改名为中国科学院上海硅酸盐研究所。

中国科学院上海硅酸盐研究所主要研究领域涵盖了人工晶体、高性能结构与功能陶瓷、特种玻璃、无机涂层、生物环境材料、能源材料、复合材料及先进无机材料性能检测与表征等。

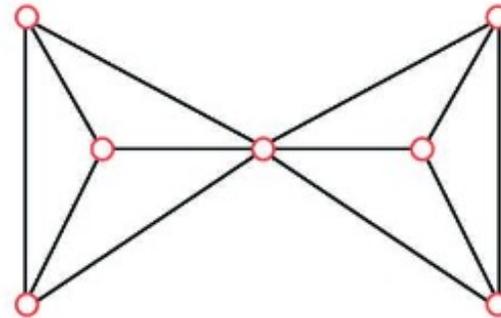
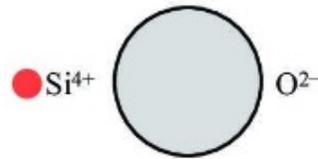
据2015年12月研究所官网信息显示，中国科学院上海硅酸盐研究所共有国家重点实验室1个、中国科学院重点实验室4个；共有在职职工700余人，其中高级专业技术人员290余人，在学研究生417名，其中博士研究生178名。 ^[1]

硅酸盐结构

Si原子发生 sp^3 杂化，与O原子紧密结合，形成 $[\text{SiO}_4]$ 四面体亚单元， $[\text{SiO}_4]$ 通常共顶连接，偶尔共棱，但从不共面。共顶情况的差异使硅酸盐产生岛状、环状、链状、层状、架状五种亚类。



硅氧四面体



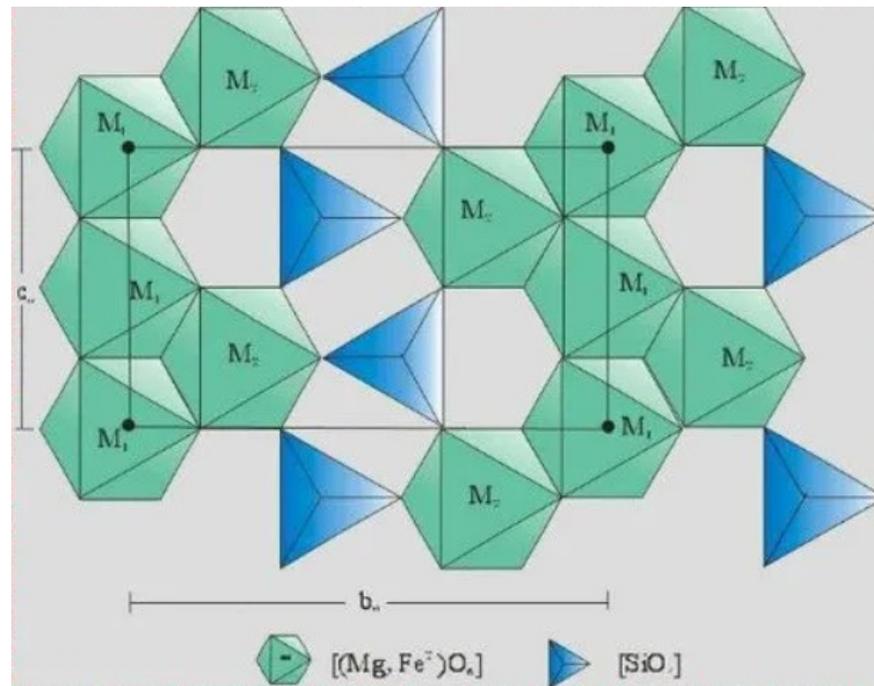
硅氧四面体共顶连接

岛状结构硅酸盐

相邻硅氧四面体不共用原子，呈孤岛状，形成 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 络阴离子。金属正离子在这类结构中一要引入正电荷保证电中性，二是要通过离子键将络阴离子团联系起来。镁橄榄石（ $\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$ ）是这类结构的典例。



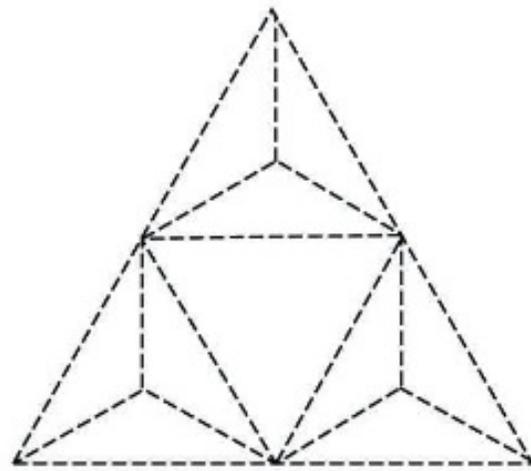
镁橄榄石



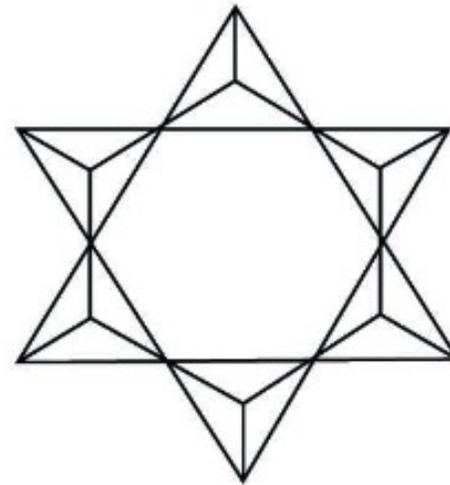
镁橄榄石晶体结构

环状结构硅酸盐

相邻硅氧四面体共顶连接，形成闭合环，络阴离子结构通式为 $[\text{SiO}_3]_n^{2n-}$ 。环状络阴离子依然依靠金属阳离子通过离子键连接。



(a) 三节环



(b) 六节环

硅氧四面体共顶连接构成多节闭合环

环状结构硅酸盐



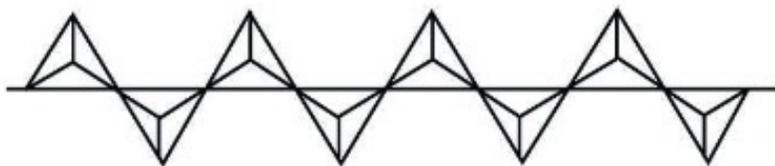
蓝锥石 $\text{BaTi}[\text{Si}_3\text{O}_9]$
(典型三节环结构)



绿柱石 $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$
(典型六节环结构)

链状结构硅酸盐

相邻硅氧四面体共顶连接，一维方向上无限延伸形成链状结构。晶胞中 $n=2$ ，络阴离子结构通式为 $[\text{Si}_2\text{O}_6]^{4-}$ ，也写作 $1_{\infty}[\text{Si}_2\text{O}_6]^{4-}$ 。金属阳离子将链间的空隙填充。典例是顽火辉石 $\text{Mg}_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$ 。



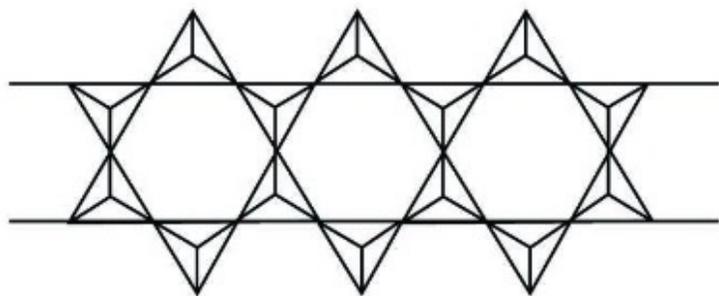
单链状结构



顽火辉石 $\text{Mg}_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$

链状结构硅酸盐

特殊地，通过共顶连接可形成双链状结构。络阴离子为 $1_{\infty}[\text{Si}_4\text{O}_{11}]^{6-}$ 。晶胞中含4个Si，6个非共用氧和5个共用氧。同样，阳离子通过离子键联络各链。



双链状结构

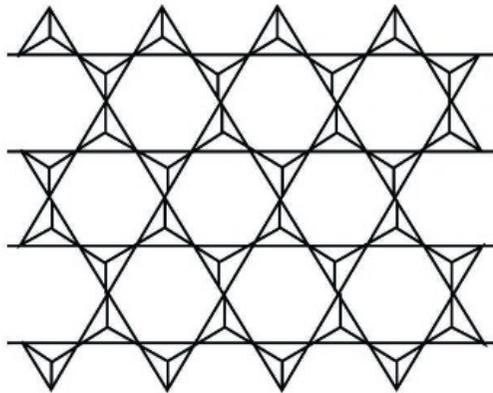


透闪石



层状结构硅酸盐

相邻硅氧四面体共顶连接，二维方向上无限延伸形成层状结构。络阴离子结构通式为 $2_{\infty}[\text{Si}_2\text{O}_5]^{2-}$ 。层间可靠金属阳离子引入的离子键联系，例如白云母（ $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ ），也可靠范德华力联系，例如滑石（ $\text{Mg}_3[\text{Si}_2\text{O}_5]_2(\text{OH})_2$ ）。



层状结构



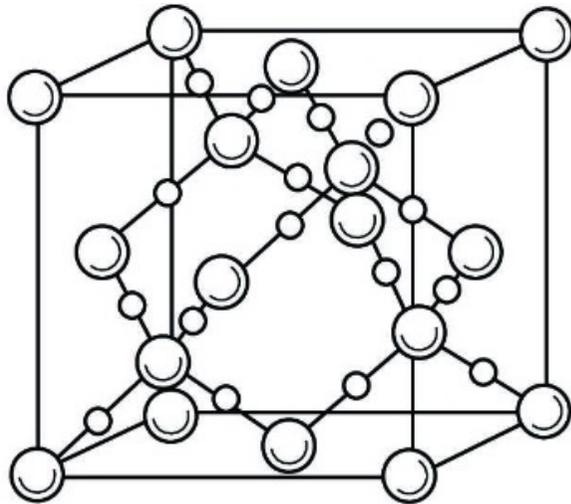
白云母



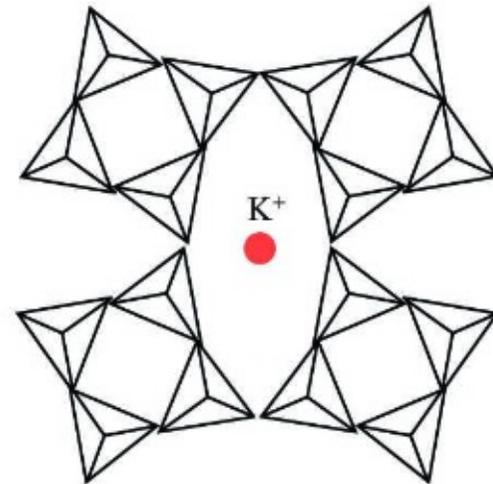
滑石

架状结构

相邻硅氧的每个顶角均与其他四面体共顶连接，三维方向上无限延伸形成架状结构。络阴离子结构通式为 $3_{\infty}[\text{SiO}_2]$ 。即纯晶态二氧化硅。当两种原子半径相差不大时，可发生同晶置换，而整体结构不发生改变。硅酸盐中，Si常被Al置换。置换需要其他阳离子的引入以保证电中性，例如高温钾长石（ $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ ）。



层状结构

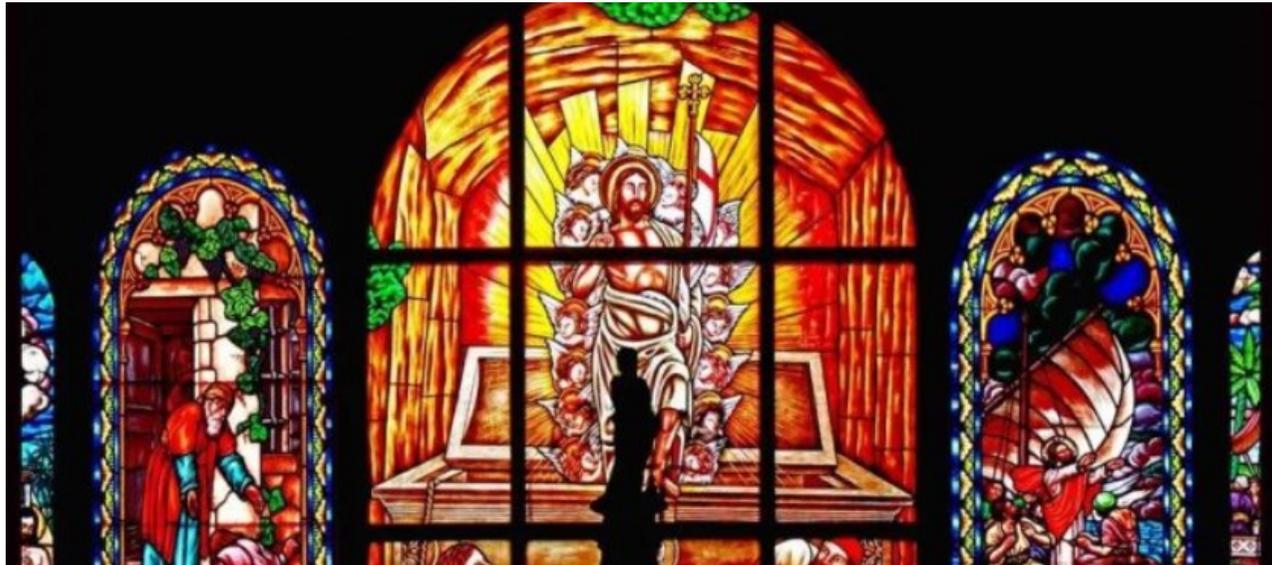


高温钾长石晶体结构

3.3.4 无机非金属材料非晶体的结构

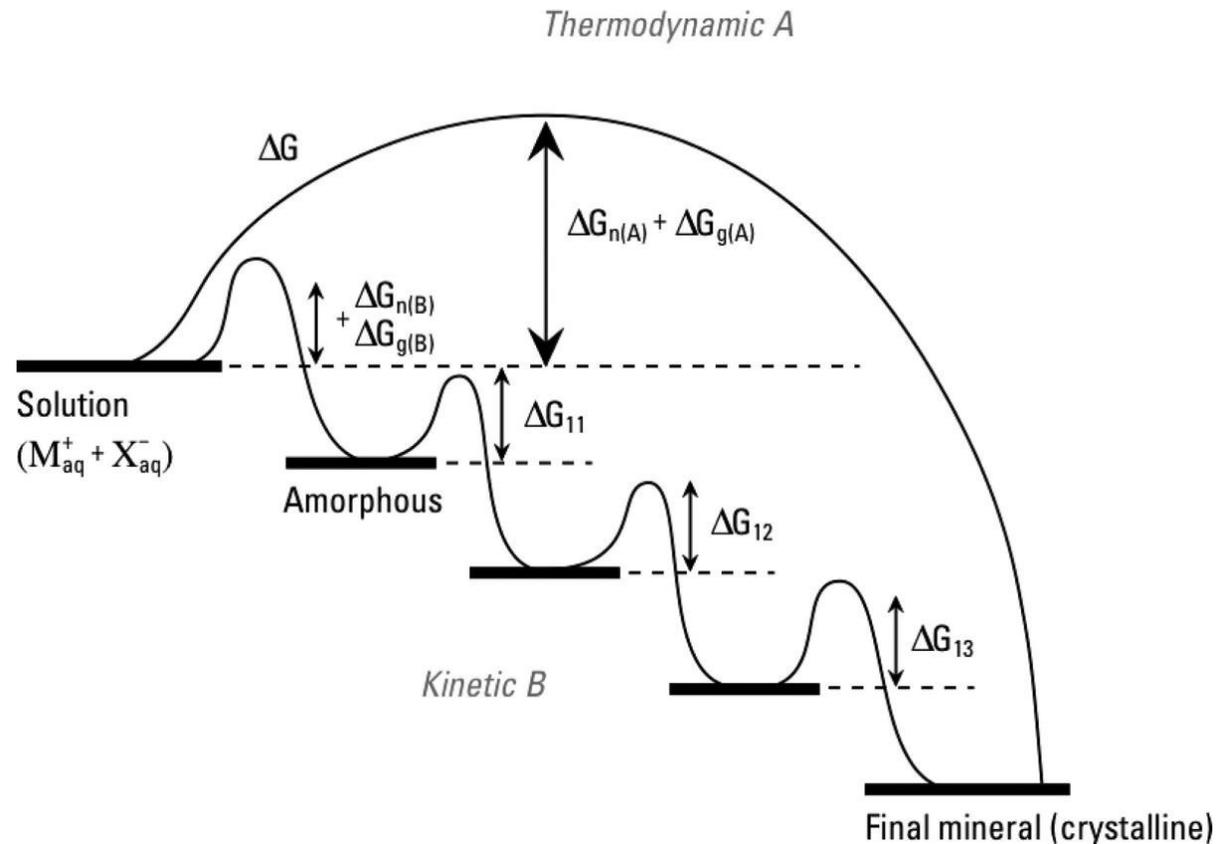
无机非金属材料非晶体结构

非晶态材料是原子排列不规则的固体材料的统称。宏观上无特定形状，微观上内部质点无序排列，主要特征为远程无序性和亚稳态性。



圣德尼修道院教堂的彩绘玻璃（1137年）

Ostwald阶梯规律

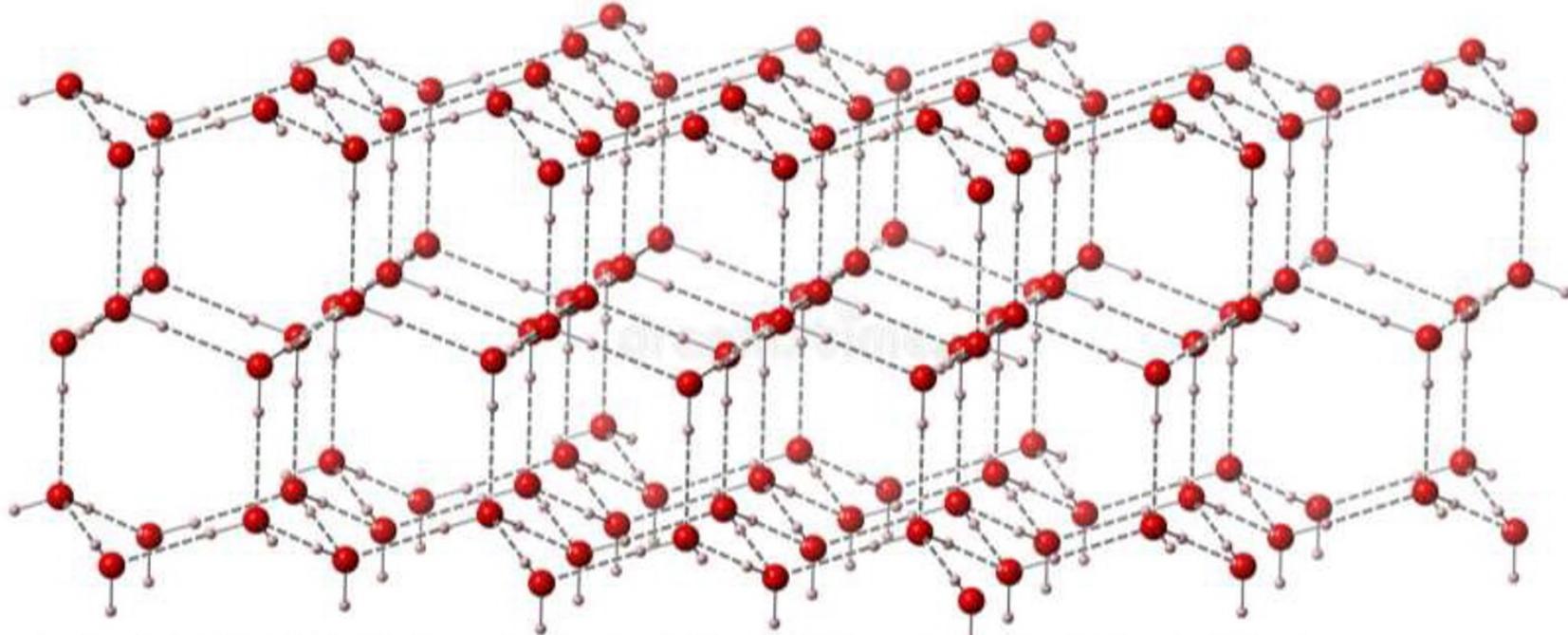


阶梯规律示意图, Meldrum et al., Chem. Rev., 2008

--Wolfgang Ostwald提出了晶相的阶梯规律：在结晶过程中，自由能高的亚稳态晶相会先形成

--较低的表面能以及和环境的相似性是重要因素

晶体性质的来源



六方冰晶的晶格结构，红色小球是O原子，白色小球是H原子 (dreamstime.com)

- 在晶体中，原子（分子、离子）呈周期性排列，这种排列具有各向异性
- 几乎所有金属和大部分的无机非金属材料都会发生结晶。高分子材料也可以结晶（较难）
- 结合力强、规整性强、结构简单的物质容易结晶

非晶固体材料



玻璃(matshop.ca)



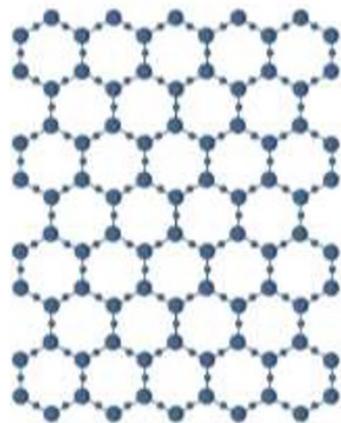
塑料(lagence.tv/)



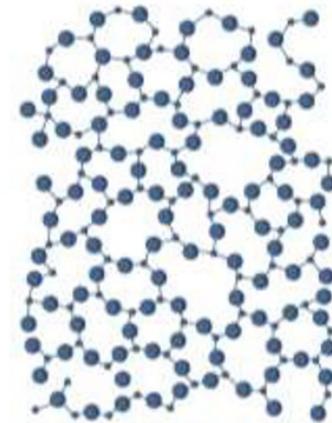
松香(all.biz)

—非晶态物质内部不存在长程周期结构，类似于液体，但又不具有流动性

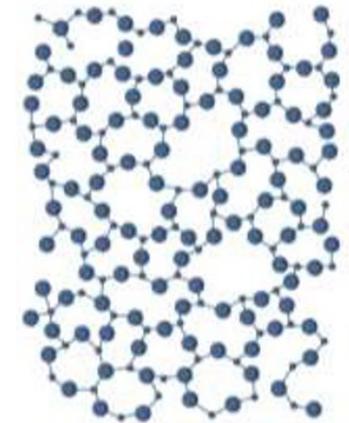
—这类物质也具有均匀性



晶体



液体



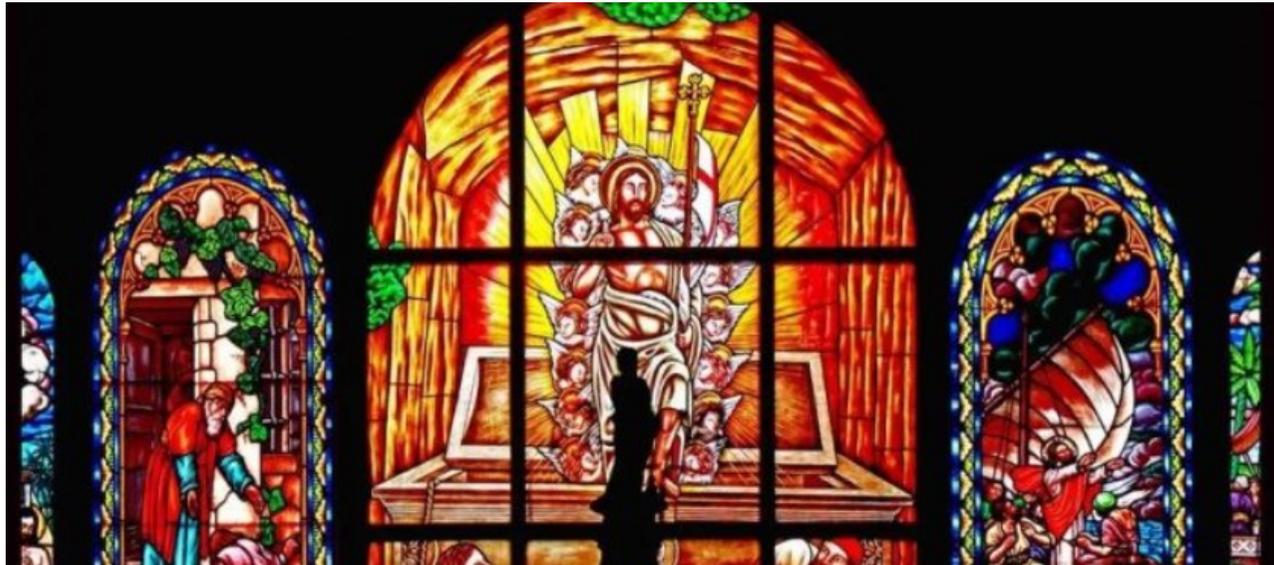
玻璃

(Image from quantamagazine.org)

无机非金属材料非晶体结构

材料是晶态还是非晶态与化学组成无关。Why?

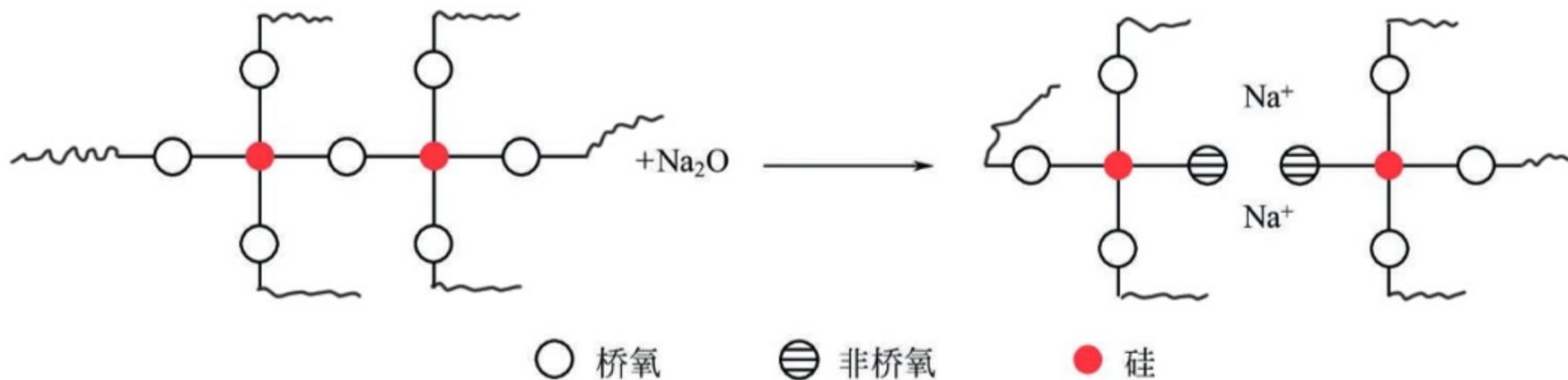
分类：无机玻璃、凝胶、半晶态半导体和无定形碳。



圣德尼修道院教堂的彩绘玻璃（1137年）

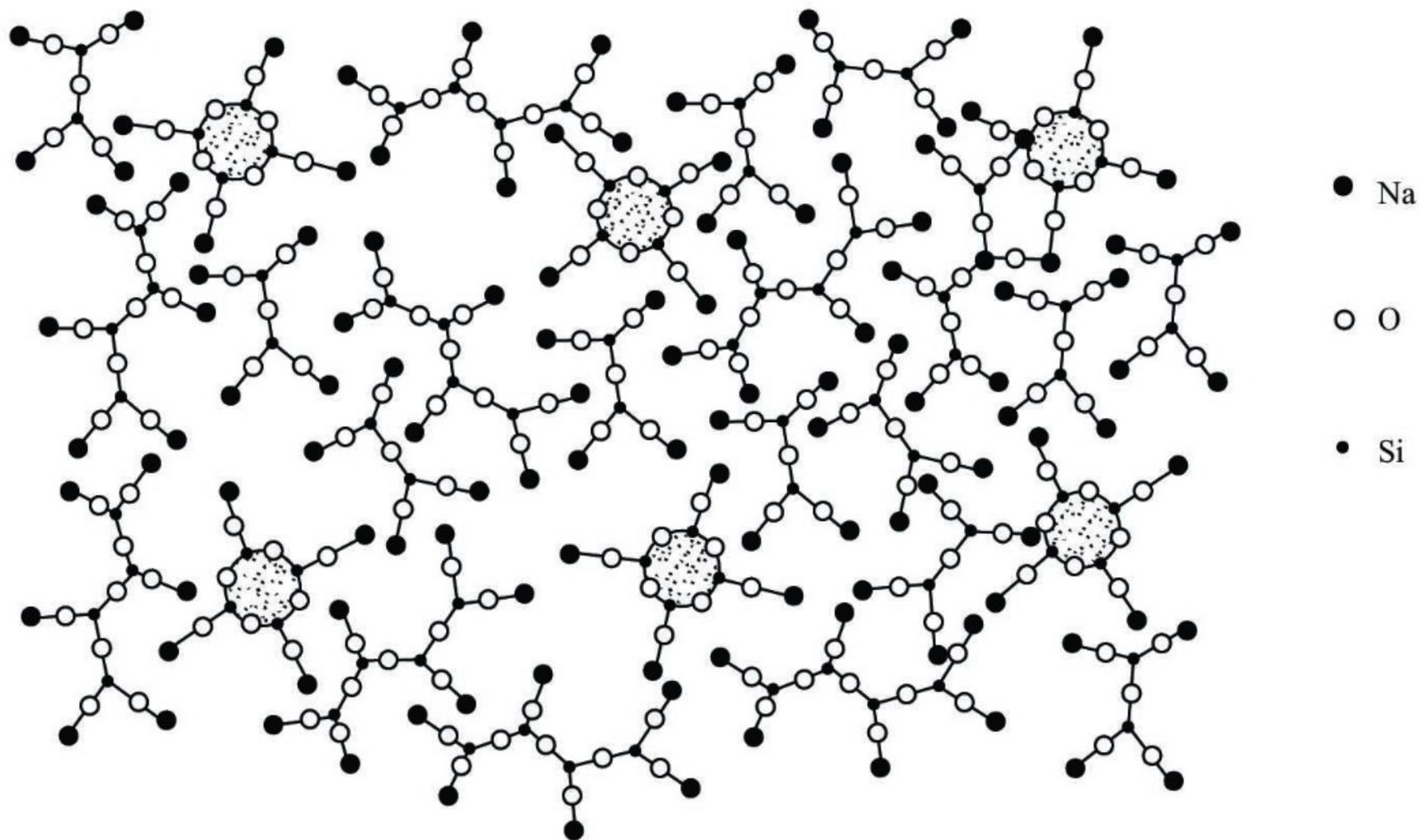
硅酸盐熔体

硅酸盐熔体的聚合物结构理论认为，向硅酸盐熔体中引入金属（Me）氧化物或碱土金属（R）氧化物， Si^{4+} 倾向夺走其中的 O^{2-} ，形成 $[\text{SiO}_4]$ ， Si-O-Si 结构变为 Si-O-Me （R）。整体结构有“架状→层状→链状→环状→岛状”的转变趋势。体系最终形成大量 $[\text{Si}_n\text{O}_{3n+1}]^{2(n+1)-}$ 聚阴离子。Me（R）通过离子键结合在 Si-O-Si 断键位点。



金属（碱土金属）氧化物的引入破坏 Si-O-Si 网络结构

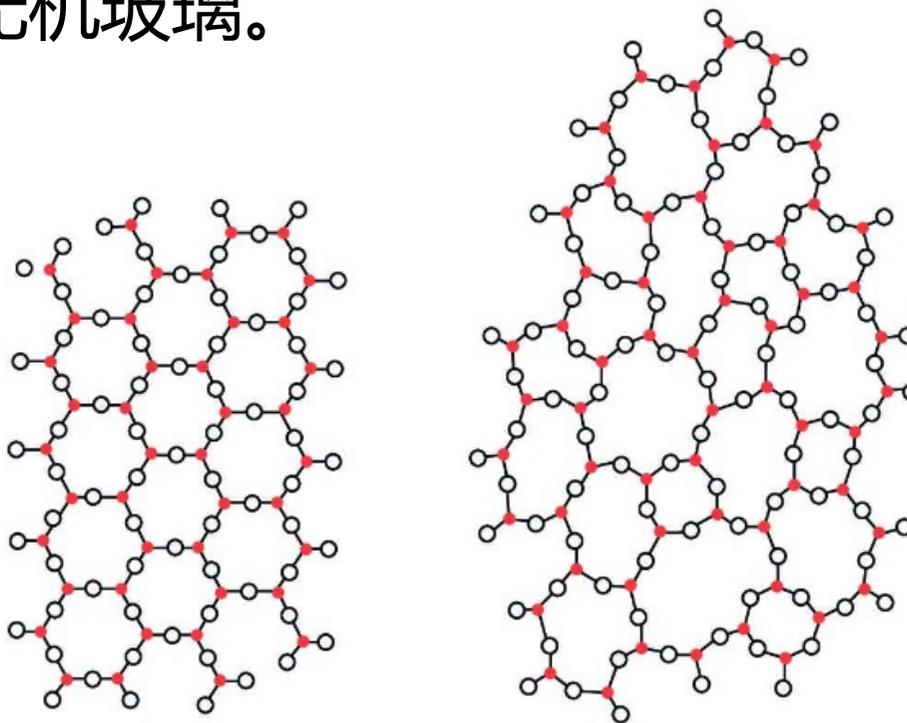
硅酸盐熔体



无机玻璃

广义地，固体非晶态物质统称为玻璃，非晶态即为玻璃态（从熔体冷却，室温下还保有熔体结构的固体物质状态）。狭义地，玻璃仅指无机玻璃。

玻璃态的通性：各向同性、热力学介稳性、状态转化的渐变性、性质变化的连续性与可逆性。关于玻璃的结构，目前普遍被接受的有晶子学说和无规则网络学说两种。

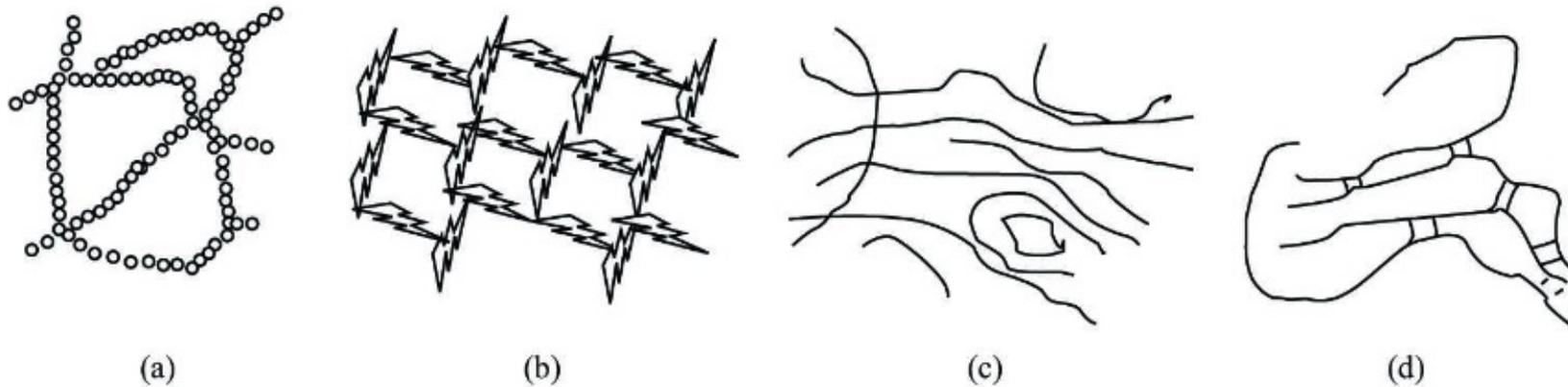


(a) 规则排列的晶体(石英晶体) (b) 不规则排列网络结构的玻璃(石英玻璃)

二氧化硅网络结构示意图

凝胶与胶凝材料

凝胶 (gel) 是指胶体质点在一定条件下相互连接所形成的空间网状结构，其网状结构的间隙充满分散介质（液体或气体）。凡能因理化作用，从浆料变成坚硬固体，并能胶结其他物料，具有一定机械强度的物质统称为胶凝材料。



凝胶结构示意图

凝胶与胶凝材料



水硬性胶凝材料（即水泥）



石膏（一种气硬性胶凝材料）

凝胶与胶凝材料



无定形碳

无定形碳也称玻璃碳，具有玻璃化无序结构。包括玻璃状碳、含氢非晶碳、离子碳。

玻璃碳无硅酸盐结构，结构和物理特性呈现高度各向同性，耐气液渗透，同时兼具石墨和玻璃的特征。通常由多种热固性树脂经特殊热处理得到。



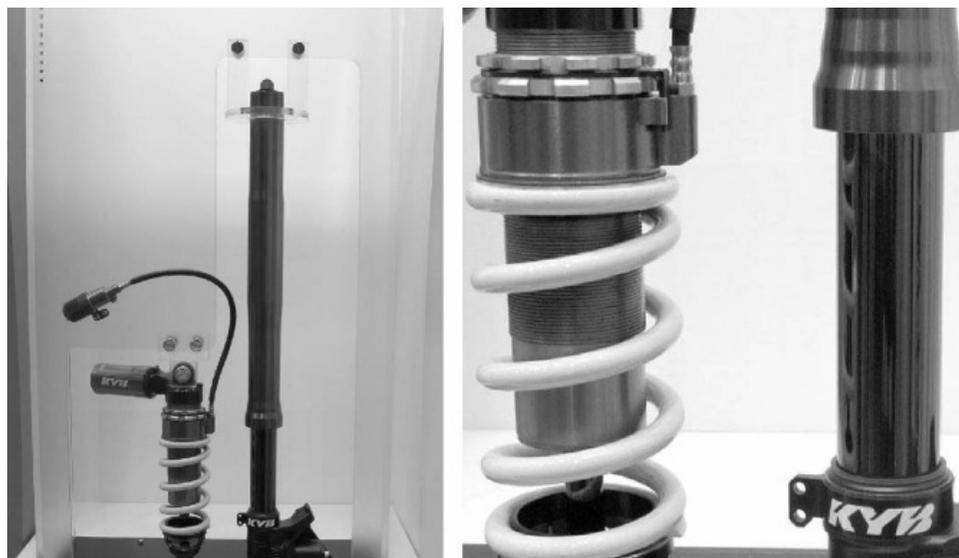
玻璃碳样品



玻璃碳制品

无定形碳

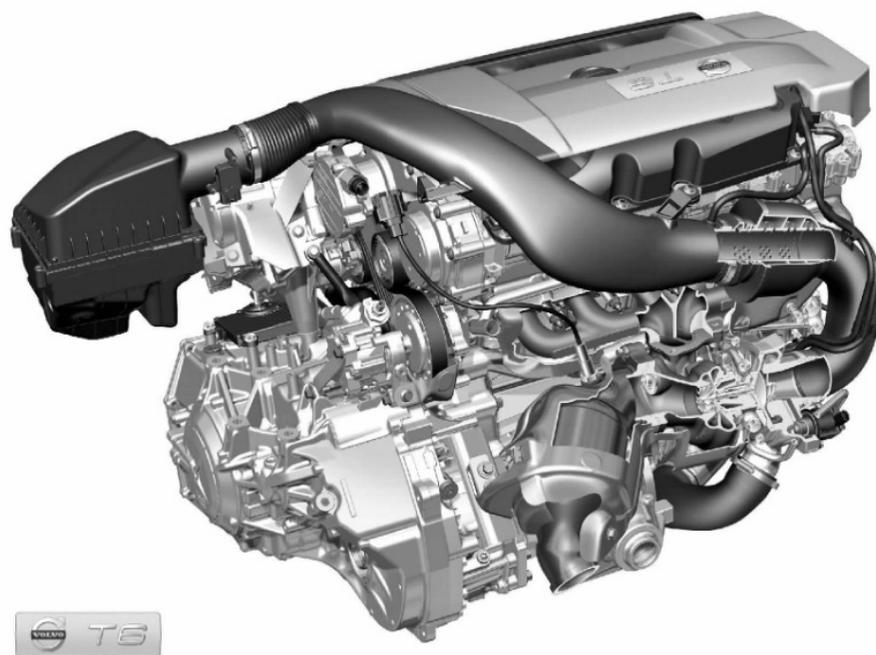
含氢非晶碳通常指由挥发性碳氢化合物（常为烃类，例如甲烷、乙烷）在一定条件下裂解制备得到的单块碳素材料。含氢是由于C-H键裂解不完全。通常具有**高硬度、高强度、高耐磨性、化学稳定性、绝缘性**。



使用 “KYB NEWDLC” 涂层的摩托车减震器

无定形碳

采用离子束技术制备的碳素材料称为离子碳。原料（石墨或碳氢化合物气体）在一定条件下产生碳离子，离子键相互结合沉积形成离子碳。物理特性与金刚石相似，也是一种类金刚石碳（DLC）。



DLC薄膜气门挺柱装备的沃尔沃高性能T6发动机

3.3.5 陶瓷

陶瓷

一定组成配比的矿物原料粉末或化工原料粉末成型后，经特定的工艺使其致密化，赋予其一定的强度和密度及其他特殊性能的固体材料。通常是多晶多相聚集体。可分为传统陶瓷（原料为天然硅酸盐矿物）和特种陶瓷（较纯的人工化合物为原料）。



青花瓷



氧化锆陶瓷结构件

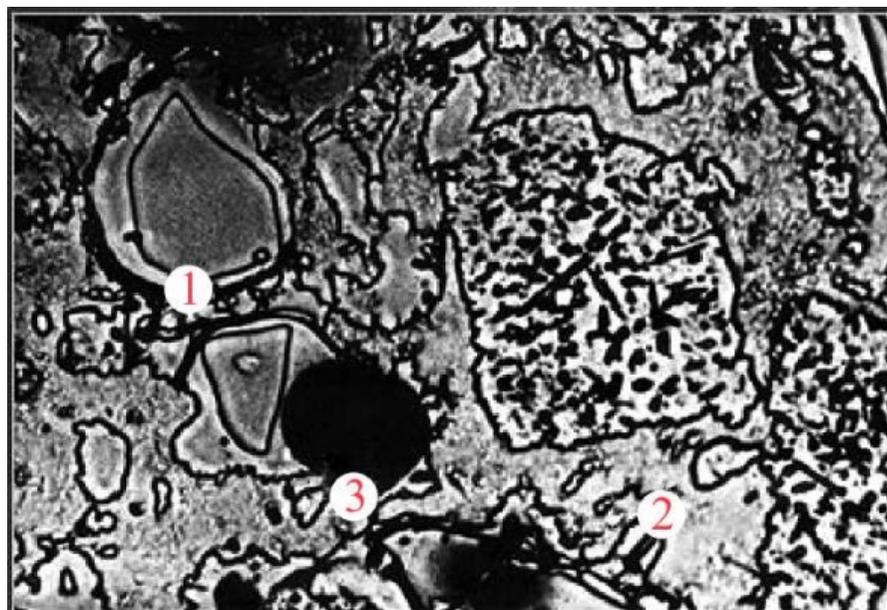
陶瓷的显微组织

主要分为结晶相、玻璃相、气相、晶界：

结晶相是陶瓷最主要的组成相，其结构、含量、分布决定陶瓷性能。主要为含氧硅酸盐、氧化物、非氧化物。

陶瓷材料中，不同晶粒的取向各异，交界处形成大量晶界。

晶界处容易形成晶格畸变或界面位错，产生本征应力。在陶瓷冷却时，晶界应力的存在造成微裂纹，大大降低材料的断裂强度。



陶瓷显微组织

①结晶相 ②玻璃相 ③气相

陶瓷的显微组织

玻璃相是烧结过程中产生的非晶态物质，通常富含氧化硅、碱金属氧化物和原料本身的杂质。通常含量为15%~35%。玻璃相一方面有利于气孔的填充和致密化。另一方面能抑制晶粒生长，使材料保持细晶结构。此外还可分散晶粒、降低烧结温度。

气相来源于陶瓷孔隙中的气体。烧结过程不可避免会产生气孔。气孔过多或分布不均匀将造成裂纹，大大影响陶瓷密度、强度等性能。



陶瓷表面的气孔

3.3.6 碳化化合物

炭黑

炭黑也称黑灰，主要元素为碳（83%~99.5%），含少量氧、氢、硫等。碳原子以共价键键合形成碳粒子，碳粒子熔结成链枝状结构形成炭黑。炭黑聚集体间空隙较大，具有较强吸附能力。可用作橡胶补强剂、着色剂（涂料、油墨、塑料等）、导电掺杂、紫外稳定剂、抗氧剂等。



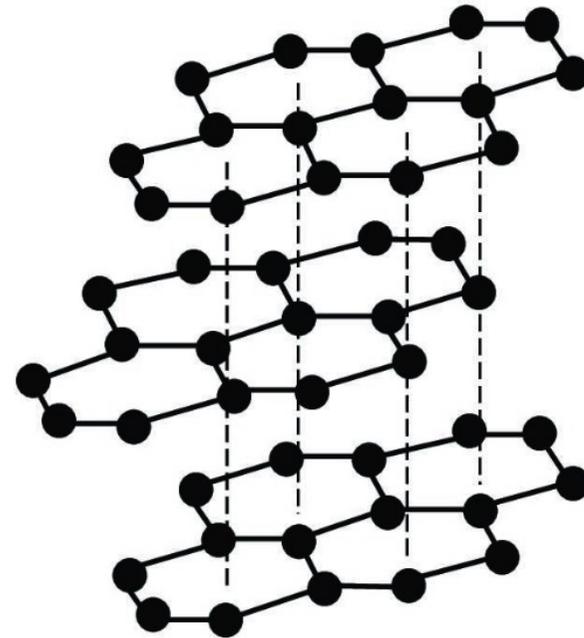
造纸用色素炭黑

石墨

石墨，也称黑铅，属于六方晶系，是典型的层状结构。层内为六方网状结构（C原子 sp^2 杂化），层间以范德华力连接，呈ABAB...堆积。层状结构赋予其断裂性和可压缩性，可用作固体润滑剂或固体密封环。同时石墨具有热稳定性、化学稳定性、导电性。



石墨



石墨晶体结构

石墨：锂离子电池负极



III. Niklas Elmehed. © Nobel Media.
John B. Goodenough
Prize share: 1/3



III. Niklas Elmehed. © Nobel Media.
M. Stanley Whittingham
Prize share: 1/3



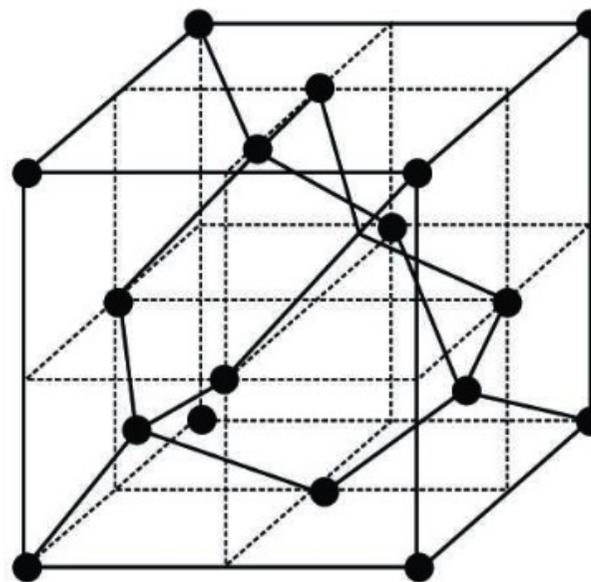
III. Niklas Elmehed. © Nobel Media.
Akira Yoshino
Prize share: 1/3

金刚石

金刚石，即钻石，为C的同素异形体，具有类似于单晶硅的四面体结构（C原子发生 sp^3 杂化）。是自然界中**硬度和导热性**均为最高的物质，同时拥有**极高的电阻**和优良的**透光性**。



天然金刚石



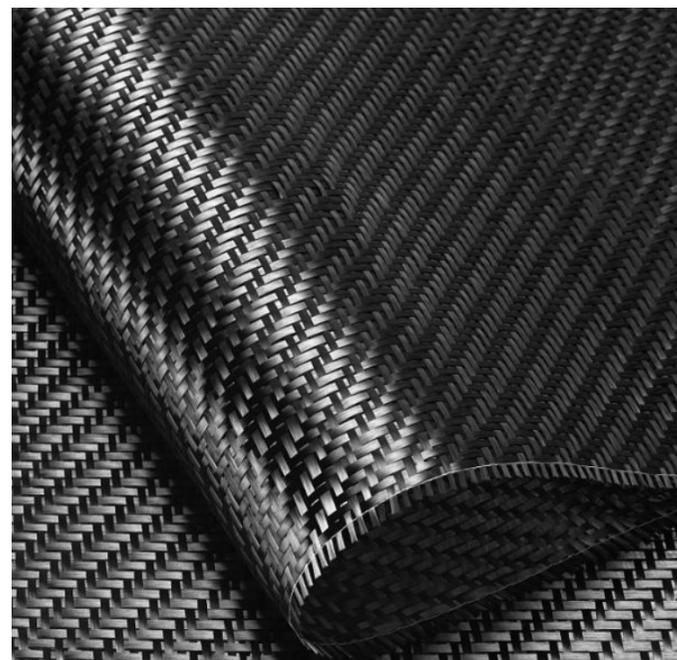
金刚石结构

碳纤维

碳纤维是由碳单质形成的一种特殊纤维，具有**高强度**、**抗腐蚀**、**耐高温**等特性。碳纤维通常由**聚丙烯腈**经**预氧化**、**碳化**、**石墨化**处理形成。优良的力学性能使其常用作**复合材料的基底**。



碳纤维汽车结构件

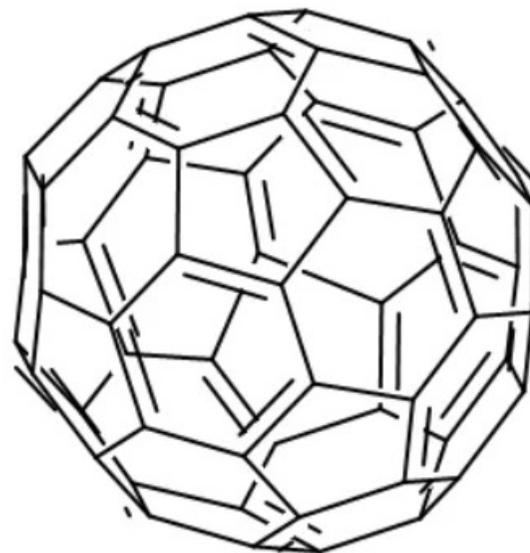


碳纤维布

富勒烯

富勒烯是60个碳原子形成的空心球状分子，也称足球烯、巴基球。由Rohlfing于1984年在碳蒸汽骤冷淬火产物中发现。

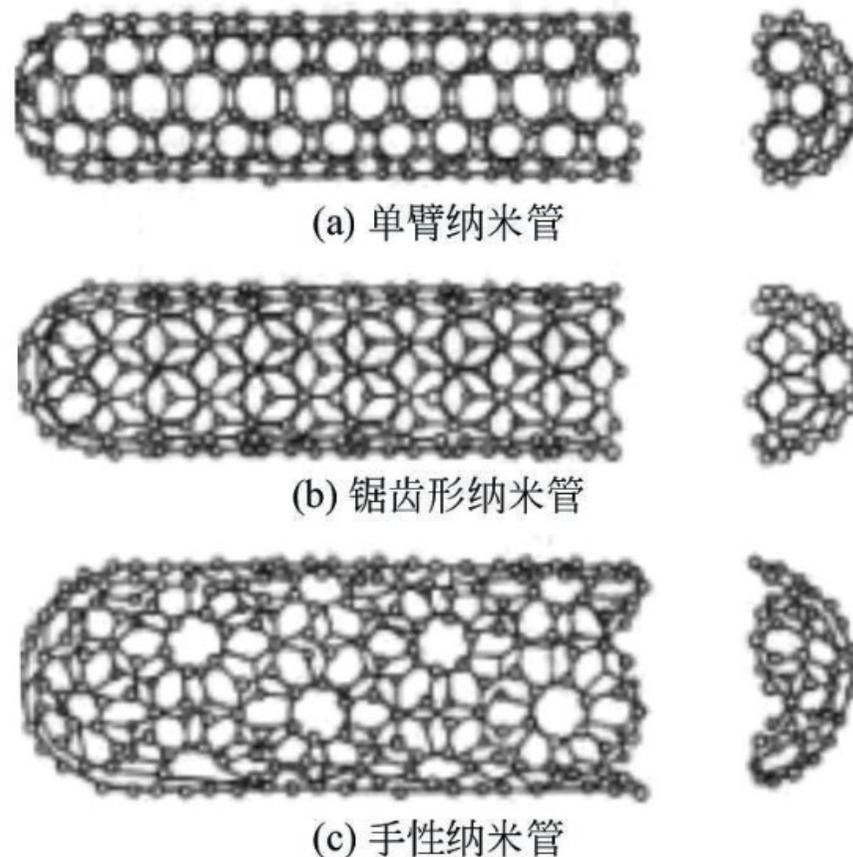
富勒烯具有一定的芳香性，但与平面状的芳香族稠环化合物不同，其C=C键具有一定的 sp^3 性质，具有特殊反应活性。此外富勒烯还具有超导电性和强磁性。



富勒烯结构

碳纳米管

碳纳米管结构与富勒烯类似，六边形的碳单质网络形成中空、无缝的管身（几十纳米~一微米），而管道两端（直径几纳米~几十纳米）由两个富勒烯半球笼罩。碳纳米管结构可分为单臂纳米管、锯齿形纳米管、手性纳米管，在新型功能材料、电子器件、超强增强纤维等方面具有巨大的应用前景。

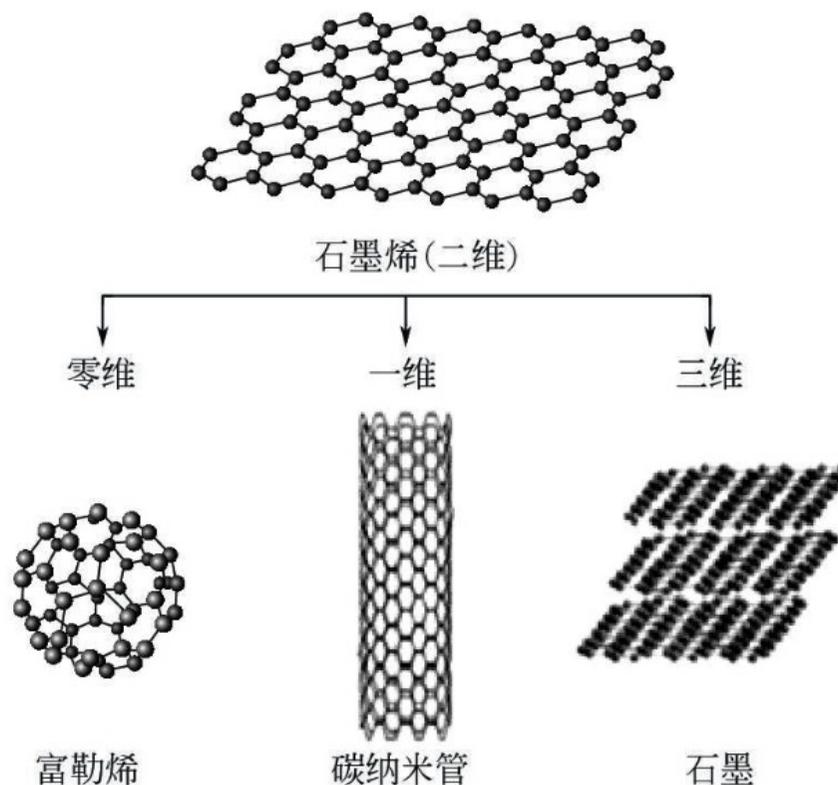


三种碳纳米管结构

石墨烯

石墨烯于2004年由Andre Geim和Konstantin Novoselov用机械剥离法首次制得。结构为单层或薄层的新型二维原子晶体。

石墨烯的发现充实了多维碳材料体系的完整性。常被认为是构成其他石墨材料的基本单元。具有特殊的理化性质。



总结

