

非金屬礦物原料特性与应用

武汉工业大学出版社



高等学校试用教材

非金属材料特性与应用

古阶祥 汤素仁 黄钟稷

武汉工业大学出版社

内 容 提 要

本书为非金属矿类教材编审委员会审定的统编教材，系统地介绍了数十种重要的非金属矿物原料的矿物特征、晶体结构、工艺技术特性、工业应用和要求：采、选、加工方以及资源概况和发展前景等。既有基础理论，又有丰富的实际应用资料。可作为高等院校非金属矿专业及有关地质专业的教材，也可作为从事非金属矿物原料应用研究和生产人员的参考书。

非金属矿物原料特性与应用

主 编 古阶祥

责任编辑 高鸣涵

*

武汉工业大学出版社出版

武汉工业大学出版社印刷厂印刷 湖北省新华书店发行

*

开本787×1092 1/16 印张：18.75 字数438千

1990年10月第1版 1990年10月第1次印刷

ISBN 7-5629-0376-X/TQ·18

印数0：001—1000册 定价：3.75元

序 言

本教材原名为《非金属矿特性及其地质特征》，1980年，作为非金属矿选矿、采矿专业的地质学基础，矿山地质学课程的补充教材在武汉建筑材料工业学院内部使用。1984年9月，经国家建材局科教司在洛阳召开的高等学校非金属矿专业教材编审会审议决定，列入教材出版计划，正式出版。

80年代以来，非金属矿工业以前所未有的速度在迅速发展。新矿种在不断地发现，新性能在不断地被认识，新用途在不断地开发。在这种情况下，我们收集了大量新的资料，重新修订了原教材，并根据新的教学大纲的要求和本教材突出非金属矿物原料特性与应用的特点，将原教材名称改为《非金属矿物原料特性与应用》。

本教材以非金属矿物原料的结构、物化性质为基础，以工艺特性为主导，以突出非金属矿物原料的应用为特色。既介绍了传统的非金属矿物原料，又介绍了如沸石、凹凸棒石粘土、海泡石粘土、累托石粘土等新矿种。对于促进我国有效开发和利用非金属矿物原料具有重要的意义。它可以作为高等院校非金属矿专业及有关地质专业的教材，也可以作为从事非金属矿物原料应用研究和生产技术人员参考书。

本教材由武汉工业大学古阶祥副教授主编，汤素仁副教授、黄钟稷副教授参编。编写分工如下：古阶祥：绪论、一、五、九、十四、十七、十八、廿三、廿四、廿六章。汤素仁：二、六、八、十、十一、十三、十五、二十、二十二、二十七、二十八。黄钟稷：三、四、七、十二、十六、十九、二十一、二十五章。全书插图由古莉同志清绘。

担任本教材主审的是中南工业大学的岳松教授，参审是四川建筑材料工业学院万朴教授和山东建筑材料工业学院邵国有副教授。本书编者对于三位学者在审稿过程中，严谨治学的学风，一丝不苟的精神以及提出的许多宝贵意见，表示敬佩和衷心感谢。

由于时间紧迫和编者水平之限，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

1989年8月于武汉

绪 论

人类社会在征服自然和改造自然的过程中，首先是从使用非金属材料开始的。后来，随着冶炼技术的发展，使用金属材料越来越多以至大大地超过非金属材料。这种情况一直延续到近代。然而，随着近代科学技术的飞速发展，许多金属的性能已不能适应高速、高温、绝缘、耐腐蚀等方面的要求，特别是现代大规模建设的发展，要求大量轻质、高强、美观的新型建筑材料，这样，人们又重新把注意力转向非金属矿物原料。近30年来，世界各国非金属矿工业的发展异常迅速，这一点从世界非金属矿产产值的增长情况很容易证实。例如，世界非金属矿总产值在50年代、60年代、70年代和80年代（初期）分别为407、600、899、1580亿美元，每10年间分别增长48%、66%和59%；但是，在这一期间，如1970~1980年，世界金属矿物原料产值的增长率仅为12%，大大低于同期的非金属矿物原料产值的增长率。需要指出的是，各国的发展是很不平衡的，例如，英国，在19世纪就已出现非金属矿物原料产值超过金属矿物原料产值的局面，现在它的比值已达到32:1。美国从1934年起，非金属矿物原料的产值超过金属矿物原料产值。到1971年，非金属矿物原料总产值为60.68亿美元，而金属矿物原料产值为30.04亿美元。1980~1982年，非金属矿与金属矿物原料产值分别达到467.15亿美元和230.07亿美元。1986年则分别为178亿美元和56亿美元，非金属矿物原料的产值是金属矿物原料产值的3倍。现在，有不少一般发达国家，其非金属矿物原料的产值也达到超过金属矿物原料产值两倍的境地。因此，有人提出，非金属矿物原料产值超过金属矿物原料产值是一个国家成熟的标志。

近几十年来，被工业利用的非金属矿物原料的矿种也有很大的变化。例如，本世纪初，工业开发利用的非金属矿种不足60种，而现在已发展到近200种。一些岩石和造岩矿物，如粘土岩、凝灰岩、珍珠岩、沸石、硅灰石、霞石等等，现在已成了具有特殊功能、特殊用途的宝贵原材料。

非金属矿物原料的应用领域也在不断地扩大。从用于肥料、农药、改良土壤到新型建筑材料、新型玻璃、陶瓷、耐火材料、石油、化工、环境保护、节能和能源开发、电子技术、航天技术、现代国防等几乎涉及所有领域。

我国非金属矿工业起步很晚，是一个新兴的工业部门。在过去较长的年代里，我们只开采利用有限的十几个矿种，而且多为土法开采、人工选矿，技术十分落后，1958年以后，我国非金属矿工业有较大的发展，许多矿山由土窑小井开采、人工选矿变成了正规矿井、机械化开采和选矿的现代矿山。到1981年，我国非金属矿年总产值已增长了30余倍，若以1984年几种非金属矿物原料产品的产量与建国初期相比，则石棉增长了232倍，石墨增长了254倍，滑石增长了426倍，石膏增长了457倍，饰面石材则由年产几千平方米增加到近200万平方米。

但是，与发达国家比较，我国的非金属矿工业还有很大的差距。在产值方面，我国仍以金属矿物原料占主导地位。1983年非金属矿物原料的总产值仅为12亿美元，不及美国1982年水平的1/50。目前，世界非金属矿物原料的年总产值已超过800亿美元。在开发利

用的矿种方面,我国已探明的非金属矿物原料矿产有80余种,被利用的仅有50种左右,而真正形成生产能力的还只有20几种。有许多矿种的特殊性能还没有研究和揭示出来;有许多矿床,特别是新矿种的矿床还停留在土法开采阶段;有许多矿产的选矿技术还没有过关,有用矿物选不出来或无法提纯;还有许多资源仍不会利用。因此,加速非金属矿物原料的地质勘探工作,加强对非金属矿物原料的开发应用研究是我国非金属矿工业的迫切任务。非金属矿物原料有效开发和利用的新途径是:

一、发现新矿种

随着现代科学技术的发展和对非金属矿物原料性能的深入研究,越来越多的非金属矿物原料的新矿种和新类型在被发现,新用途在发展。除前面介绍过的若干新矿种以外,以下是一些目前具有潜在工业应用价值的新矿种。

1. 透闪石

是一种普通的硅酸盐矿物,常产于白云岩与火成岩的接触处或一些结晶片岩中。可用于生产高频瓷、日用瓷和建筑陶瓷、墙地砖等,它具有烧成温度低、烧成周期短、烧成范围宽等特点。产品具电性能高、热稳定性好、机械强度高、烧成收缩小等优点,是一种很有前途的新型陶瓷原料。

2. 绢英岩

一种主要由绢云母和石英组成的岩石。可以用来生产釉面砖,其产品质量高、性能好、原料成本低,具明显的经济效益。

3. 钠云母

一种普通造岩矿物,主要产于千枚岩、云母片岩等变质岩中。据认为,钠云母是一种很有前途的密封材料的原料。通常,作为高质量的密封材料,需具备良好的可塑变形性、抗压缩性和压力传递性、化学惰性、低导热、导电性、无毒、可与细粉陶瓷作压缩性处理等等。研究表明,钠云母完全能适合上述要求,它既可以用于反应容器的衬垫,也可制成压力传递媒介的密封衬垫。

4. 伊利石

一种含钾较高的造岩矿物。通过物理和化学方法处理以及与其它物料配比后,可制成钾钙肥、钾氮肥等。也可代替滑石粉作填料用于造纸和高级化妆品及塑料中。用作造纸填料,它对油墨的吸附性良好,不脱粉、分层、无气泡使纸平滑光洁。加入塑料中能增强塑料的韧性和挠曲强度。在陶瓷工业中,还可生产釉面砖,其烧成温度可降低20~30℃。此外,它有较好的吸附性,尤其对 Cs^{137} 的吸附效果最佳,因此也可用于环境保护工程中,用于处理“三废”。

5. 麦饭石

是古老的一种药用矿物(实为岩石)。多形成于风化、半风化的浅成花岗斑岩中。近年来的研究试验表明,麦饭石具良好的吸附性能,含有多种对人体有益的元素。因此,它除具有医药保健功能外,在食品工业、精细化工、农牧业、环境保护等领域均有良好的开发应用前景。

6. 水镁石岩

水镁石经熔烧可形成方镁石。因此，可用作高级耐火材料。水镁石烧成的方镁石砖质量比菱镁矿烧制的砖更好。另外，用水镁石代替石灰，处理造纸厂废水，可使水循环使用，大大减少了环境污染，水镁石还可用来提取氧化镁（苦土），用作橡胶和塑料的填料。

7、低铁的蛇纹岩及某些云母镁橄榄石——白云石大理岩型镁橄榄石岩

这类岩石的耐火度高，用于生产方镁石耐火材料，其性能完全可以与菱镁矿生产的耐火材料相媲美。

8. 半石墨

煤与页岩之间过渡型岩石。它具有良好的膨胀性能，经高温焙烧成陶粒，质轻而坚硬，是高层建筑的一种理想材料。

9. 水黑云母 水金云母

是云母族矿物风化过程中，最终形成粘土矿物之前的过渡产物，一般产于岩石的风化壳中。这类矿物加热时其膨胀性能超过蛭石，因而是一种良好的隔热隔音材料。

10. 云母片岩

目前，碎片云母的应用越来越广，云母片岩可以作为生产细片云母的重要来源。有人预料，由于石棉使用逐步受到限制，在石棉水泥工业上，石棉将由碎云母代替，而且将成为云母的主要用途。

此外，尚有报道利用白粒岩和某种含碱质较高的凝灰岩作为玻璃纤维原料或玻璃原料等。

二、从天然矿物中生产新材料

利用非工业矿石或废石中的云母和石棉加工制成独特性能的新材料。例如，用酸浸析法，在不太高的压力和温度下，将铁镁质云母（金云母、黑云母、水金云母等）加工成一种纯二氧化硅板状晶体（成分为 $2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ）的新材料——硅质板。这种材料质轻、绝缘、耐热、耐酸，可以做云母代用品，也可制造各种高温绝热绝缘材料，飞行器上的超轻抗震耐高温的结构件；增强塑料的添加剂及地下管道的抗腐蚀涂料等。利用开采伟晶岩类矿床时顺便采出的含碳黑云母，在酸浸析以后，可获得自然添加碳的二氧化硅物质——碳质板。这种新材料具有良好的导电性，耐酸性，可作特种耐火材料、导电耐酸抗压材料等。从石棉矿床开采过程中获得的非工业温石棉中，可以经过处理获得一种新材料——硅质纤维。这种材料，不仅可以代替温石棉，而且可以生产各种天然石棉矿物中无法得到的新型制品。例如各种轻型耐酸绝热织品，增强塑料、抗腐蚀材料及用于喷气飞机上热气管绝缘涂料。试验表明，钛、铌、锆、硼硅酸盐，滑石、叶腊石、星叶石、炭质泥质云母页岩、含石墨的云母片岩，沸石等矿物和岩石，经热化学处理后也可获得类似性能的新材料。另外，利用云母、石棉和其它矿物酸浸析生产新材料时，还可以从浸析溶液中提取许多有价值的元素。

三、从尾矿和废石中回收有用矿物

由于选矿工艺的进步，过去某些不能回收被作为废石或尾矿而抛弃的工业矿物，现在

可以重新回收利用。例如加拿大从石棉矿山的尾矿中可以回收三种产品：①含细小石棉纤维的轻质“尾矿”，由于具有良好的吸附性能，可用于消除海洋表面石油污染和处理污水。②金属“尾砂”，含铁63%，镍0.25%以及少量的钴等，可提取铁和镍，或直接用来冶炼特种钢。③致密“尾矿”。用来生产耐火材料。加拿大的石棉尾矿估计有10亿吨，尾矿中石棉纤维含量有时超过15%，可见，从尾矿中回收产品，其经济价值相当可观的。又如，南非四个金伯利岩金刚石矿山，通过废石再处理回收金刚石，认为可使矿山开采年限延长10~15年。在蓝晶石尾矿中，可回收石英粉和金红石，在硅灰石尾矿中，可回收方解石粉等等。

此外，尚有许多国家对云母矿山进行二次开采获取细片云母和从有色金属矿山废石堆中回收萤石、重晶石等。

四、矿物的定向变形、改性处理

所谓定向变型，是指不进行矿物分解和熔融，而是通过物理—机械或热化学方法（如利用离子交换和酸浸析等），使矿物获得某种新性质，使低价值甚至无价值的矿物变为工业矿物。如通过热化学处理和光照射，消除金刚石中的颜色，提高其透明度和强度；通过输入离子法将金刚石硼化而具半导体性能；通过阳离子交换法使普通矿物（如透辉石）增加色彩而变为宝石。近年来，对某些矿物原料改型处理，已发展成一门新兴技术。例如：斜发沸石是比较广泛产出的一种天然沸石，但由于其孔径和表面积较小，因而大大影响其作为高档制品的用途。实验表明，可以通过使用NaOH和NaCl水溶液对其进行处理，使其矿物结构发生根本变化，由单斜晶系变为等轴晶系的八面沸石，这就大大提高了它的应用范围和经济价值。又如，铸造工业要求大量的钠基膨润土作为专门造型砂的粘合剂，但自然界产出的膨润土却多以钙基土为主，这种钙基土，在铸造中往往不能满足铸件特别是大型铸件的技术要求。若把钙基土改型处理变为钠基土，就可弥补钙基土之不足并扩大了钠基土的用途。

众所周知，非金属矿物原料具有许多优良的物理化学性质和独特的工艺性能。但是，原始的非金属矿物原料，并不是都能满足各种工艺要求，尤其是特殊的工艺要求，例如，许多非金属矿物原料，都可以作为填料用于许多工业部门。它可以改善产品的收缩性、密度、外观强度和降低成本等。但它也给产品带来脆性、均匀性和稳定性等问题。这些问题不解决，产品质量就受到影响，为了解决这些问题，往往就需要对非金属矿物原料进行改性处理。如广泛被用作填料的硅灰石，在作高分子材料添加剂或橡胶、塑料充填剂时，如不预先对其进行改性处理，则由于密度不同而不能均匀分散。改性处理后的硅灰石，除可避免这一问题外，且能大大增强产品的耐磨性和耐酸性，提高了产品质量，降低了成本。又如，属于酸性亲水疏油的高岭土，进行改性处理变为亲油疏水的碱性产品。此外，还可以把一般用途的膨润土经酸活化处理变为活性白土，或经铵反应变成具有广泛用途度和高经济价值的有机膨润土等。

目前，矿物的改型、改性技术正在以很高的速度发展，尤其是矿物表面改性的技术，正在发展成一种新工艺和新学科。这是有效开发利用非金属矿物的重要发展方向。已知的矿物改性的方法有：混料机处理法、流态床处理法、流态化磨机处理法、表面预处理技术、

整体处理工艺、高压釜加压涂敷处理、高温煅烧处理、机械挤压处理、高能量放射性处理、等离子气体处理、催化剂处理、酸处理等。

五、发展人工合成矿物研究和生产

天然非金属矿物原料受到储量、地理分布、开采技术条件及自然缺陷等种种限制。因此，加强人工合成研究和生产以解决某些资源不足和质量不高的缺点势在必行。近年来，在人工合成金刚石、红宝石、水晶、立方氧化锆、云母、沸石等方面已经取得了很大的进展，它们在使用中已经占了相当的比重，特别是红宝石和水晶已经可以完全代替天然产品。人造晶体虽然成本高，但它纯度好，质量高，而且还可以根据需要赋予其某些天然矿物所不具备的性能。因此，发展非金属矿物的人工合成生产，也是扩大非金属矿物原料来源的一个重要途径。

纵观人类历史，放眼未来，非金属矿工业是一个潜力无穷，前景广阔的工业。人类文明从石器时代开始，继而进入铜器，铁器时代，近代又进入多金属时代，现在人类又将进入新的更高级的石器时代了，可以预言，21世纪将是非金属时代。

目 录

绪 论

第一章	金 刚 石	(1)
第二章	石 墨	(15)
第三章	长 石	(30)
第四章	霞石正长岩	(36)
第五章	沸 石	(45)
第六章	蓝晶石类矿物	(56)
第七章	硅灰石	(62)
第八章	高岭土	(71)
第九章	石 棉	(82)
第十章	滑 石	(103)
第十一章	叶蜡石	(112)
第十二章	凹凸棒石粘土	(118)
第十三章	海泡石粘土	(125)
第十四章	云 母	(137)
第十五章	膨润土	(146)
第十六章	累托石粘土	(157)
第十七章	蛭 石	(161)
第十八章	石膏、硬石膏	(173)
第十九章	重晶石	(182)
第二十章	菱镁矿	(187)
第二十一章	萤 石	(194)
第二十二章	宝石和玉石	(203)
第二十三章	硅藻土	(225)
第二十四章	石灰岩	(235)
第二十五章	浮石和火山灰	(240)
第二十六章	珍珠岩	(248)
第二十七章	大理石	(263)
第二十八章	花岗岩	(277)

第一章 金刚石 (diamond)

第一节 金刚石的特征

一、金刚石的种类

过去,按用途把金刚石分为两大类:装饰金刚石和工业金刚石。

装饰金刚石是一种外形完美,色泽鲜艳,透明度极高,质地优良的金刚石,晶体愈大价值愈高,世界上最大的金刚石名曰“库里南”,是1905年在南非发现的,重达 3106 克拉。到目前为止我国最大的金刚石是1977年在华东某地发现的“常林钻石”,晶体外形尺寸为: $35 \times 30 \times 17 \text{ mm}$, 质量为158.76克拉,它是世界上100~200克拉金刚石的第596颗,经鉴定,这颗宝石属装饰品 I - 1 级。

工业金刚石即为工业上使用的金刚石,这类金刚石占金刚石总年产量的75~85%。根据其质量、结构和硬度的不同可分为三种。

(1) 圆粒金刚石 无色、黄色、黑色、圆粒呈不规则结晶状或放射状集合体。

(2) 红钻石 浅红色,形状近似球形,表面常有一层细粒金刚石包裹,结构坚硬致密,韧性大。

(3) 黑金刚石 不透明,是细粒金刚石的多孔状集合体,一般是椭圆形。通常表面光滑,具松脂或半金属光泽,硬度较红钻石低。

近年来,人们强调以金刚石的物质成分和某些物理性质(如发光性、光导性、导热性、红外光谱等)来进行分类,将金刚石分为 I 型(I_A、I_B)、II 型(II_A、II_B)和过渡型。I 型和 II 型的特征如表 1-1

过渡型金刚石其含氮量约达0.010%,浓度低于 I 型而高于 II 型,紫外线连续吸收范围为: $2250 \sim 3000 \text{ \AA}$,它常为无色并带有暗淡的玻璃光泽,其晶体形态与 II 型金刚石相似,特别与 II_A型更为相近。

二、金刚石的化学组成

金刚石由碳元素组成,是石墨的同质二象变体。据研究,金刚石中碳的同位素 C_{12}/C_{13} 比值变动范围在89.49~89.78之间,但是,即使是美丽透明的金刚石,往往也不是仅由纯碳组成,近年来,经用高灵敏度的分析方法研究金刚石后,发现其中存在许多杂质元素。在金刚石中出现的杂质元素有: Si、Al、Ca、Mg 和 Mn。经常发现的元素有: Na、Ba、Ca、Fe、B、Cr 和 Ti。有时才能发现的元素是: Sr、Co、Zr、P、Sc、La、Lu、Pt、Ag、Au 和 Pb。

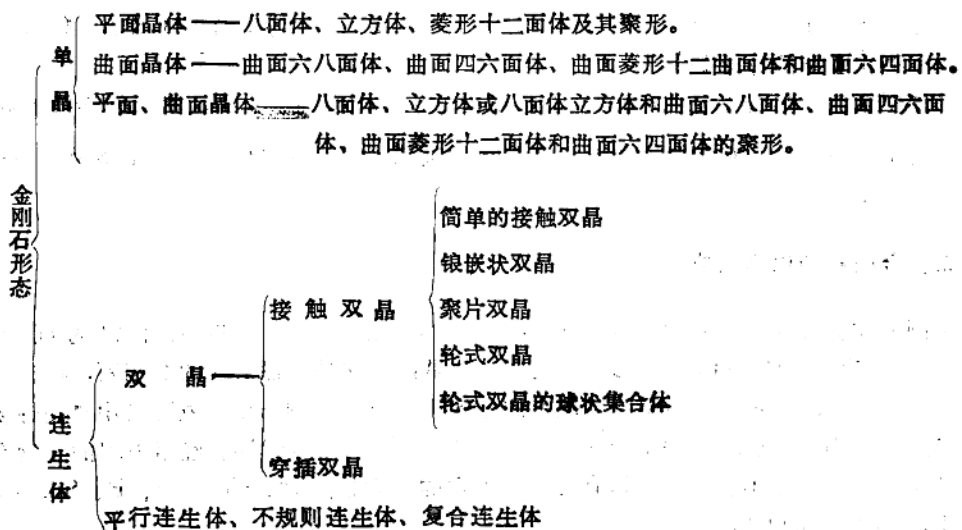
I、II型金刚石特征表

表1-1

	I 型		II 型	
	I _a	I _b	II _a	II _b
含 氮 量	0.1~0.23%，呈小片状存在于金刚石中，天然金刚石98%属于I _a 型。		含氮量低，且以分散的顺磁性氮存在于金刚石中。这类金刚石天然少见，而多见于人造金刚石。	
热 导 率	导热性仅及I _a 型的1/3		热导率高，室温下为铜的5倍。	
半 导 体 性 能	绝 缘		绝缘 比电阻低，一般为50~1200Ω·cm，属P型半导体	
光 导 性	差		好	
双 折 射	能 观 察 到		观 察 不 到	
伦琴射线衍射	显示出附加的斑点和条纹		正 常	
在红外线区域的吸收	在8~13μm范围内吸收		在8~6μm范围内吸收	
在紫外线区域的吸收	在波长小于3000Å时全吸收		在波长小于2250Å时吸收	

金刚石形态分类表

表1-2



三、金刚石的形态

由于生成环境不同，金刚石的晶体形态有多种多样的变化，自然界所见的金刚石晶形，以八面体和菱形十二面体以及聚形为主，此外也见到少量的立方体或四面体及其聚形晶。在这些晶体形态中，可分为单晶体和连生体，单晶体又可分为平面晶体、曲面晶体、平面一曲面晶体；连生体又可分为平行连生，不规则连生和复合连生等。如表1-2。

常见的几种金刚石晶体形态如图1-1。

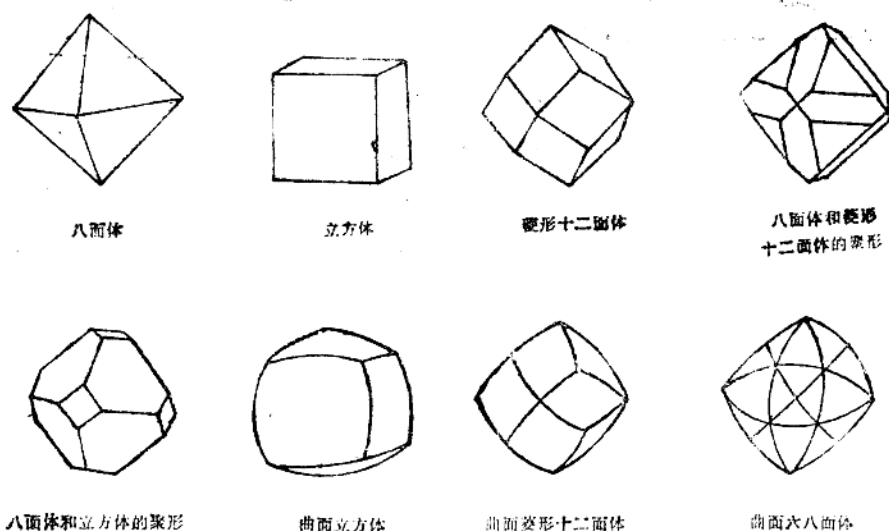


图1-1 金刚石常见的几种晶体形态

第二节 金刚石的结构

金刚石属等轴晶系，对称型 $3L^4 4L^3 6L^2 9PC$ 。 $a_0 = 3.56 \text{ \AA}$ 。金刚石的晶体构造属闪锌矿型，即立方面心格子构造，碳原子除分布于单位晶胞的角顶、面心外，还占居着由立方体晶胞分成的八个小立方体的中心（见图1-2a）。金刚石的晶体构造也可视为由角顶相连的（每个碳原子和相邻的四个碳原子相连形成）许多四面体所组成（见图1-2b）。碳原子间一般人认为以共价键维系，C-C间距离 $1.54 \text{ \AA}$ ，属于较典型的原子晶体。但是，有些学者，如列洛夫等人认为金刚石是由正负碳离子所组成的，因而它的结构与闪锌矿型离子晶格相似，而碳的阴离子形成最紧密堆积。

如果将金刚石的平行(111)面网处于水平位置时（图1-3），可发现它与石墨有着相似的六方环所组成的面网，即形成“似层状”构造，它和石墨的层状构造不同之处，是构成面网“层”的碳原子不处于同一水平位置上，其中三个碳原子较其它三个碳原子的位置稍高。

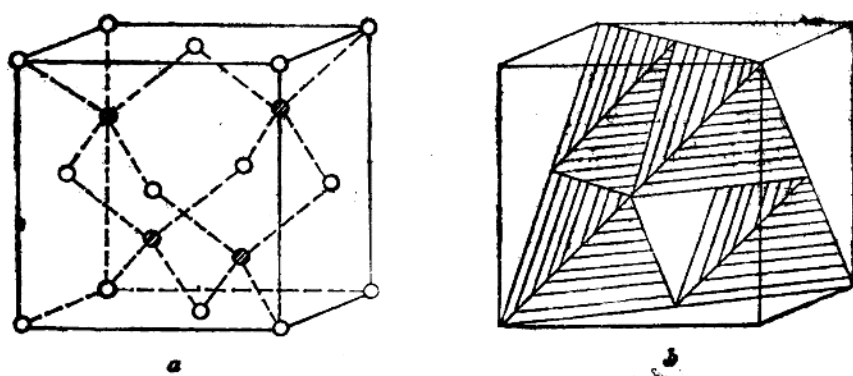


图1-2 金刚石的晶体结构

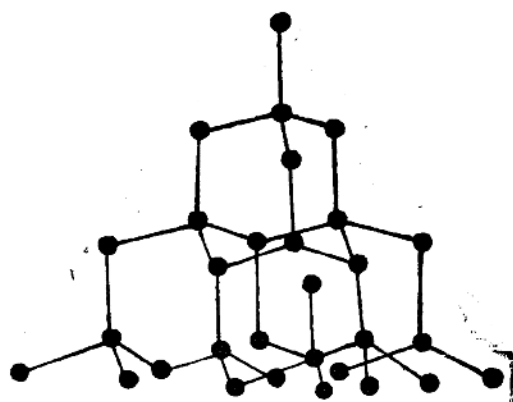


图1-3 金刚石(111)面网处于水平位置时的似层状结构

按照布拉维法则：“晶体生长到最后总是被面网密度较大的晶面所包围”。金刚石从理论上讲应结晶成八面体或者菱形十二面体，但是，由于金刚石在结晶过程中，受到各种不同的物理化学条件的影响，因此，自然界的金刚石晶体（包括八面体或菱形十二面体本身）形态是多种多样的。

第三节 金刚石的工艺技术特性

一、金刚石的光学性质

1. 金刚石的顏色

纯净的金刚石是无色透明的，但自然界的金刚石往往具有色彩，有的甚至被强烈地染成各种色彩。常见的颜色有黄色、绿色、褐色、玫瑰色、蓝色、灰色及黑色等。

金刚石的顏色与所含杂质及结构缺陷有关。例如黄色金刚石可由含 Ti^{4+} 和 Fe^{3+} 引起，或者由结构中各种缺陷中心所造成，呈绿色的金刚石认为是由处于顺磁状态的，即以孤立原子取代碳原子的氮所引起的，当这种形式的氮杂质浓度比在黄色金刚石中高时，金刚石就

显绿色。根据实验，在金刚石晶体人工掺入硼时，金刚石就能被染成蓝色，故认为天然的蓝色或浅蓝色的金刚石是由于含硼杂质的结果，玫瑰紫色和烟色的金刚石，研究认为它不是杂质所致，而是与滑移面有关。至于灰色及黑色的金刚石，则是由于晶体结构中某种极微细的内部缺陷或含有许多极微细的深色包裹体（多为石墨）所造成的。

2. 金刚石的光泽、色散、折射率及异常双折射

金刚石常具金刚光泽，但少数为油脂光泽、玻璃光泽、金属光泽或无光泽，这是由于长期的化学腐蚀、射线影响、外来物质加入以及表面为其它物质覆盖等所致。一般地说，Ⅱ型及过渡型金刚石的光泽较Ⅰ型金刚石弱。这是因为Ⅱ型金刚石晶体上的{111}面具有微层结构，在这类晶体的曲晶面上往往被蚀刻了许多滴状小丘，表面不平而显得暗淡。而Ⅰ型金刚石晶体的曲晶面往往非常光滑，因此具强烈的光泽。

金刚石具高度的色散性(0.063)，其折射率强烈地随波长而改变，例： $n_{\text{红光}}=2.402$ ， $n_{\text{黄光}}=2.417$ ， $n_{\text{绿光}}=2.427$ ， $n_{\text{紫光}}=2.465$ 。

金刚石是等轴晶系矿物，按理在光学上应该是各向同性的，但奇怪的是在金刚石晶体中常常总是显出异常的双折射花纹。这种异常的双折射现象一般认为是由不同的内应力引起的。晶体内部构造的不同，晶体中的位错、包裹体以及与塑性形变和机械冲击有关的各种类型的缺陷分布不同，以致造成了各种各样的双折射花纹。

3. 金刚石的透明度

纯净的金刚石晶体是透明的。但是自然界的金刚石常常是半透明和不透明的。这是由于晶体内存在混合物、机械裂隙等。透明度直接影响到它的工艺性质，透明度越高价值越大。

4. 金刚石的光性

金刚石在外界物理能量的作用下，如x射线、阴极射线、紫外光、加热摩擦等刺激下本身发光的性质称为发光性，金刚石在短波射线(长波一般不起作用)的照射下，使晶格中静电平衡发生暂时性破坏，即使原子中的电子轨迹发生变位，从而放出能量——光子而发光。但如射线取消后，这种电子轨迹变位的现象瞬间即可恢复，大多数金刚石在x射线作用下均能发光(主要为橙光)，只有少数金刚石不发光，这可能和金刚石晶体构造破坏、其它化学元素加入、表面腐蚀、被膜覆盖等原因有关，金刚石在太阳光下曝晒后，在暗室中发浅蓝色磷光；在紫外光照射下，发淡青、蓝色磷光。特别需要指出的是，Ⅱ型金刚石与其它金刚石不一样，在波长为 $3650 \text{ \AA}$ 时不发光，但用短波紫外线($\lambda=2537 \text{ \AA}$)照射后显示出明亮的浅蓝色，有时是红色磷光，不同情况下金刚石的发光情况见表1-3。

金刚石的发光性质

表1-3

阳 极 射 线			X 射 线		紫 外 线	
颜 色	亮 度		颜 色	亮 度	颜 色	亮 度
绿 色	鲜 明		天 蓝 色	中 一 微	天 蓝 色	鲜 明
天 蓝 色	极 鲜 明				紫 色	中 等
蓝 色	鲜 明				绿 色	中 等

二、金刚石的机械性质

1. 金刚石的硬度和脆性

金刚石是最硬的天然物质，它的绝对硬度为石英的1000倍，刚玉的150倍。它的硬度与其晶体内部构造有关，金刚石晶体的质点是碳原子，碳原子具有较高的电价，较小的体积（半径 $0.77\text{\AA}$ ），原子间以共价键相连，因此，就造成晶体内质点间距小（ $1.54\text{\AA}$ ），结合牢固有力。除此，也与其生成条件，如温度、压力、介质以及外来物质加入和成矿后的次生破损有关。例如澳大利亚的金刚石硬度就比南非的大，含铬的金刚石硬度降低，韧性增大，含氮的金刚石硬度较高而脆性也增大等。

金刚石各方向硬度不同，是由于其质点的分布、排列和键的密度在空间有方向性差异。此外，金刚石不同晶面的面网密度和面网间距不同，因此各晶面的硬度也不同，硬度大小排列应是 $(111) > (110) > (100) > (211) > \dots$ 。就是同一晶面的不同方向，也存在着硬度差，如 (100) 晶面上对角线 (011) 或 $(0\bar{1}0)$ 硬度大于正四边方向的硬度（即 (001) 或 (010) ），见图1-4。 (110) 晶面上 (110) 方向硬度大于 (001) 方向硬度，而且 (110) 方向的硬度几乎近于无限大； (111) 晶面虽然各向硬度相差不大，但仍有差别，指向立方体面对角线的方向硬度大于与此相反的方向的硬度。

金刚石硬度的非等向性给工业加工利用和工匠工艺加工提供了有利条件。

众所周知，金刚石虽然是最坚硬的物质，但它同时具有脆性，在突然冲击力的作用下，被劈开的压力为 $29.4 \times 10^8 \sim 9.8 \times 10^7 \text{ pa}$ 。金刚石的脆性和晶体的内应力与裂缝及其它缺陷有关，在内应力很大的情况下，晶体甚至能沿滑移面自己劈开，具有裂缝和其它缺陷的晶体，在较低的负荷下就能被劈开。

2. 金刚石的弹性和塑性

金刚石具有特殊的弹性，用x射线衍射强度和超声波传播速度的方法测得的弹性模量值（单位， 10^{11} pa ）为： $C_{11} = 9.5 \sim 11.0$ ； $C_{12} = 1.25 \sim 3.9$ ； $C_{14} = 4.4 \sim 5.96$ ； $K = 1/3 (C_{11} + 2C_{12})$ 为 $4.42 \sim 5.9$ 。金刚石的体积压缩系数为 $0.16 \sim 0.18 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{kg}$ ，体积压缩模量等于 $5.63 \sim 6.3 \times 10^{11} \text{ pa}$ 。

少数金刚石能发生塑性变形，据认为它是在 $\{111\}$ 晶面上产生滑移的影响。

3. 金刚石的解理和断口

金刚石具有平行 (111) 面的中等解理和平行 (110) 、 (221) 面的不完全解理，这和金刚石晶体内质点的排列有关，特别是和面网内面网间键的密度有关。据测定，金刚石晶体中 (111) 面网内键的密度最大为 $4.619/a^2$ ，面网间键的密度最小为 $2.309/a^2$ ， (110) 面网内键的密度为 $2.828/a^2$ ，仅次于 (111) 面网，键折曲展布，为相间的平面；面网间键

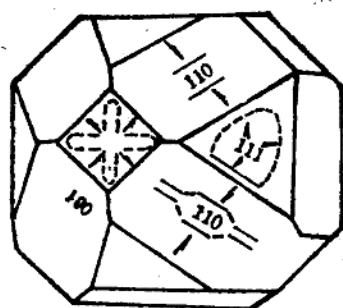


图1-4 金刚石晶面 (100) 、 (110) 和 (111) 上的硬度作等向性（箭头方向为硬度较小即易研磨方向）

的密度为 $2.828/a^2$ ，也是仅次于(111)面网组，其它面网内键的分布，不是呈断续的线状展布便是没有键，可见面网间键的密度大大地超过面网内键的密度，因此平行其面网方向不易产生解理。晶体被破碎不在网面间产生而在网面内产生。

I型和II型金刚石的解理面特征不同，II型金刚石的解理面比I型要平滑，后者的台阶较大、较高。金刚石的断口具有很复杂的结构，但常以贝壳状为特征。

3.4 金刚石的比密度

金刚石的比密度一般在3.52左右。由于自然界的金刚石质地一般都不纯，常含有微量元素及包体(机械混入物)，因此，它的比密度一般在3.47~3.53范围内变化。无色的金刚石其比密度一般在3.52左右，带色的无包体的金刚石，比密度偏高而黑色或灰色的金刚石(含石墨)比密度偏低，据测定比密度变化和颜色的关系如下表1-4。

各色金刚石的比密度

表1-4

颜色 密度	黑色	灰色	褐色	无色	乳白色	淡黄色	浅绿色	浅黄棕色	浅蓝色	玫瑰色	琥珀黄色	备注
3.74	1											据华东地区某金刚石测定
3.50		2										
3.505		1										
3.51		7										
3.52			1	14	2	4	2	6	3	1	2	
3.525								1	1	1		
3.53											1	

三、金刚石的电学性能

1. 金刚石的导电性

在室温下金刚石是电介质，但是可将它们看成是禁带很宽的半导体，其禁带宽度 $\Delta E = 9.12 \times 10^{-19} \text{J}$ 。根据理论计算，理想的金刚石晶体应该具有 $10^{20} \Omega \cdot \text{cm}$ 数量级的比电阻，但杂质的存在大大降低了它们的比电阻，积大多数金刚石晶体的比电阻等于 $10^{14} \sim 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ 。II型金刚石的比电阻较低，通常为 $25 \sim 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 。又查明，染成浅蓝色和蓝色的所有金刚石都是半导体，而半导体金刚石都具有P型导电性，过去人们认为金刚石的半导体性质主要是受杂质Al的影响。现在，有人认为这种性质是杂质硼造成的。

2. 金刚石的光电导性

当用波长为 $2100 \sim 3000 \text{\AA}$ 的紫外线照射金刚石时，发现在其中有光电流。当用红外和紫外线同时照射时，其光电导将增大近两倍。对I型金刚石用 $\lambda = 2550 \sim 2700 \text{\AA}$ 的射线照射时，其光电流最大，而II型金刚石用 $2250 \text{\AA}$ 时，产生第二峰值的光波波长大。在