



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

矿物岩石学

唐洪明 主编

石油工业出版社
Petroleum Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

矿物岩石学

唐洪明 主编

石油工业出版社

210千字

29.90元

(类同责任设计受封号，同同册惠券的照出成)

石油工业出版社

内 容 提 要

本书共分9章,内容包括结晶学基础、矿物通论、矿物各论、岩浆岩总论、岩浆岩各论、岩浆岩的成因、变质岩总论、变质岩各论等。

本书适用于资源勘查工程、石油地质勘查、煤田地质勘查、金属及非金属矿产地质勘查等专业方向的本科教学,也可供相关专业工作人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿物岩石学/唐洪明主编.

北京:石油工业出版社,2007.12

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5021-6034-0

I. 矿…

II. 唐…

III. ①矿物学—高等学校—教材

②岩石学—高等学校—教材

IV. P57 P58

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第172931号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petro. pub. com. cn

编辑部:(010) 64523580 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:中国石油报社印刷厂

2007年12月第1版 2007年12月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:21.5

字数:546千字

定价:29.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

《矿物岩石学》是资源勘查工程专业的一门重要的专业基础课程，是《沉积岩石学》、《沉积相》、《矿床学》等后续课程的基础，更是石油地质勘查、煤田地质勘查、金属及非金属矿产地质勘查等专业方向的重要基础课程。

矿物岩石学课程由矿物学和岩石学两大部分组成。全书共分九章，第一章绪论简单介绍了矿物及矿物学、岩石和岩石学、矿物岩石学与石油等沉积矿产的关系；第二章结晶学基础介绍了晶体与空间格子的概念、晶体的形成、晶体的对称、晶体的理想形态、晶体的定向与晶面符号及晶体的连生等问题；第三、四章矿物学部分讨论了矿物的化学成分、矿物的晶体化学特性、矿物的物理性质与化学性质、矿物的成因与研究方法以及矿物各论等内容，重点介绍了资源勘查工作中常见矿物；第五、六、七章岩浆岩部分较系统地介绍了岩浆岩石学的概念、岩浆岩的物质成分、岩浆岩的结构和构造、岩浆岩的产状和相、岩浆岩的分类和命名，并对超基性岩、基性岩、中性岩、酸性岩、碱性岩和脉岩类分别进行了系统的描述，还对岩浆岩的形成、演化、主要岩浆岩的成因、板块构造与岩浆活动、中国不同地质时期的岩浆活动作了简要介绍；第八、九章变质岩石学部分比较系统地介绍了变质作用和变质岩的概念、变质作用的方式、变质岩的物质成分、变质岩的结构和构造、变质岩的分类和命名，并对接触变质岩、气成热液变质岩、动力变质岩、区域变质岩和混合岩等主要岩石类型分别作了较系统的描述，同时对变质带、变质相及变质相系等有关内容也作了简要的介绍。

本来沉积岩是岩石学的重要内容，但由于以后要单独开设《沉积岩石学》课程，故本教材中未涉及沉积岩石学的内容。

本教材是根据西南石油大学现行《矿物岩石学》教学大纲的要求，在原有历年教材的基础之上修改补充编写完成的。内容力求系统丰富、翔实具体，文字力求严谨精炼、深入浅出，力求较好满足教学要求、达到夯实基础的目的，在一定程度上满足同学自学及拓宽知识的需求，同时尽力突出石油勘查特色。

本教材由唐洪明、雷卞军、赵敬松共同编写完成，具体章节分工为：第一、二、三、四章由唐洪明编写，第五、六、七章由赵敬松编写，第八、九章由雷卞军编写，唐洪明对全书进行统稿。在编写过程中，西南石油大学郗爱华教授提出了很多中肯的意见，使本书内容更加充实。书稿完成后，由成都理工大学肖渊甫教授和西南石油大学王兴志教授进行了仔细审阅，并提出了许多宝贵的修改意见。在此一并致谢！

限于编者水平有限，本书疏漏、不足之处在所难免，敬请广大读者不吝指教，以便再版时更加完善。

编 者

2007年6月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 矿物及矿物学	1
第二节 岩石和岩石学	2
第三节 矿物岩石学与石油等沉积矿产的关系	4
第二章 结晶学基础	6
第一节 晶体及其基本性质	6
第二节 晶体的对称及晶体的分类	20
第三节 晶体的理想形态	36
第四节 晶体定向和晶面符号	46
第五节 晶体的规则连生	55
第三章 矿物通论	60
第一节 矿物的化学成分	60
第二节 矿物的晶体化学	72
第三节 矿物的形态	85
第四节 矿物的物理性质及化学性质	91
第五节 矿物的成因和成因标志	109
第六节 矿物的鉴定研究方法	115
第四章 矿物各论	122
第一节 矿物的分类与命名	122
第二节 含氧盐大类硅酸盐类	125
第三节 含氧盐大类其他含氧盐类	161
第四节 氧化物和氢氧化物大类	171
第五节 卤化物大类硫化物大类自然元素大类	182
第五章 岩浆岩总论	195
第一节 岩浆与岩浆岩	195
第二节 岩浆岩的物质成分	198
第三节 岩浆岩的结构和构造	203
第四节 岩浆岩的产状和相	213
第五节 岩浆岩的分类和命名	222
第六章 岩浆岩各论	227
第一节 超基性岩类(橄榄岩—科马提岩类)	227
第二节 基性岩类(辉长岩—玄武岩类)	233
第三节 中性岩类(闪长岩—安山岩及正长岩—粗面岩类)	241
第四节 酸性岩类(花岗岩—流纹岩)	252
第五节 碱性岩类(霞石正长岩—响岩类)	260

第六节 脉岩类	265
第七章 岩浆岩的成因与分布	270
第一节 岩浆与岩浆岩的形成	270
第二节 板块运动与岩浆岩的分布	276
第八章 变质岩总论	281
第一节 变质作用及变质岩	281
第二节 变质岩的物质成分	289
第三节 变质岩的结构和构造	294
第四节 变质岩的分类和命名	302
第九章 变质岩各论	305
第一节 接触变质岩类	305
第二节 区域变质岩类	309
第三节 动力变质岩类	318
第四节 气成热液变质岩石类	321
第五节 混合岩岩类	325
第六节 变质岩研究概述	329
参考文献	335
337	337
338	338
340	340
341	341
342	342
343	343
344	344
345	345
346	346
347	347
348	348
349	349
350	350
351	351
352	352
353	353
354	354
355	355
356	356
357	357
358	358
359	359
360	360
361	361
362	362
363	363
364	364
365	365
366	366
367	367
368	368
369	369
370	370
371	371
372	372
373	373
374	374
375	375
376	376
377	377
378	378
379	379
380	380
381	381
382	382
383	383
384	384
385	385
386	386
387	387
388	388
389	389
390	390
391	391
392	392
393	393
394	394
395	395
396	396
397	397
398	398
399	399
400	400

第一章 绪 论

第一节 矿物及矿物学

人们对“矿物”的认识来源于生产实践，并可追溯到远古时期。在我国古代，“矿”字写作“𠩺”，字形象征采矿工具，其读音为“况”（kuàng）或“巩”（gǒng），象征采矿的声音。在西方，矿物一词来自拉丁文“minera”，原意为矿、矿石或矿山的意思。可见在古代，矿物及矿物的知识与采矿实践密不可分，而我国是从事采矿活动最早的国家之一。

矿物是地壳中的化学元素经由各种地质作用形成并赋存于地壳中的自然物质，绝大多数是由两种或多种元素构成的化合物，少数是由一种元素构成的单质。在实验室条件下，虽可获得某些成分和性质与矿物相同的物质，因其不是地质作用的产物而称其为“人造矿物”或“合成矿物”。陨石和月球岩石来自其他天体，其中的矿物称为“陨石矿物”、“月岩矿物”，或统称它们为“宇宙矿物”，以此与地壳中形成的矿物相区别。

在地壳形成及演化过程中，由各种地质作用形成的矿物是多种多样的，它们可以是气态的（如火山喷气中的二氧化碳和水蒸气等），也可以是液态的（如水、自然汞等），更多的是固态的（如石英、方解石、磁铁矿、石盐等晶体及蛋白石等非晶体）。岩石和地壳均由矿物组成，地壳的岩石圈、水圈和气圈正是依据矿物存在的主要物理状态来划分的。

矿物均具有一定的化学成分、各不相同的物理性质和化学性质，固体矿物还具有一定的内部结构、确定的几何形态。由于地质条件的复杂性及地质作用的多样性，矿物的成分、结构和形态、物理性质和化学性质等并非是绝对恒定的，而是在一定范围内变化的。如我国山东产出的金刚石与南非产出的金刚石，基本属性相同，但其色泽、透明度、微量元素及杂质等常有明显差异，这些差异的存在也为深入研究其形成条件提供了资料。

任何矿物都是经由一定地质作用形成于一定的环境条件（物理的及化学的条件）之中，并稳定于其形成时的环境条件下的。当环境条件发生改变时，或在新的地质作用过程中，原有的矿物必将发生程度不同的变化，甚至形成新的矿物。也就是说，矿物是地壳中化学元素（物质）运动某一阶段的产物及存在的基本形式。矿物的稳定是相对的，运动变化是绝对的。如黄铁矿（ FeS_2 ）在地表与空气和水长期接触，将逐渐发生氧化与水化而形成可溶性硫酸盐与褐铁矿（ $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ）。当然，其变化的难易与变化的速率，因矿物的不同及环境条件改变程度的不同而有极大差异。

矿物是地壳中岩石和矿石的组成单位，是成分、结构和性质都稳定的、均匀的、可以独立区分出来加以研究的自然物质。如花岗岩主要由长石、石英、白云母及少量黑云母、普通角闪石组成；石灰岩主要由方解石等矿物组成；铅锌矿石主要由方铅矿和闪锌矿等矿物组成。

从上述可见，矿物是地壳中自然元素经由各种地质作用形成和发展着的、在一定环境条件下相对稳定的单质和化合物，是相对具有一定的化学成分、稳定的内部结构、确定的外部

形态、固定的物理性质和化学性质、能相互区别的自然物质，是组成岩石、矿石及地壳的基本物质单元。

矿物学，是以固体矿物为研究对象，以矿物的化学成分、内部结构、外表形态、物理性质、化学性质、形成条件、分布规律、应用价值、演化历史为研究内容的学科。气态和液态矿物各有其特殊的属性而纳入其他学科的研究领域。

按研究内容侧重点的差异，矿物学可细分为：形态矿物学（研究矿物晶体形态、矿物个体的发芽、生长、发展变化及它们的连生规律）；成因矿物学（研究矿物综合体的形成与起源，从化学、物理学、物理化学和地质学观点探讨它们的成因）；实验矿物学（从事合成矿物以及在各种物理化学条件下模拟和探索矿物的形成过程）；矿物晶体结构学和晶体化学（探索新矿物晶体结构，研究晶体结构与成分间的关系，并进一步阐明矿物晶体成分、结构与性能以及生成条件的关系）；矿物物理学（是近年来固体物理学理论和新实验技术引入矿物学后新兴的一门边缘学科，它不仅体现着矿物研究的新领域，并对矿物材料的研究有极大的帮助）。上述矿物学的各分支相互联系、互为补充，组成统一的矿物学整体。

矿物学是地质科学极重要的一门分支学科，是属于研究地壳物质成分特性及其历史的学科之一，与多种地质学科关系极为密切。地球化学以元素的分布、迁移、分散和富集为研究内容，而地壳中自然化学元素均是以矿物的形式暂时、稳定地存在，又通过矿物的分解破坏而分离迁移，即矿物是元素赋存的主要形式，也是元素运动迁移的中间站，所以地球化学研究与矿物学密不可分。岩石和矿石均由矿物组成，欲了解其特征、成因及分布都必须应用矿物学的知识，即矿物学与岩石学、矿石学及矿床学同样密不可分。地壳中局部地段的构造演化和应力变动往往以矿物破坏、改造和位移的方式记录下来，这些记录有助于恢复构造变动的历史；地层岩石中重矿物组合特征与其形成环境及时间有关，这些特征在岩石地层及储集层的划分对比中获得经常应用，即矿物学与构造地质学、地层学等同样有相当密切的联系。显然，矿物学是地学类多种专业的重要基础课程之一。

矿物学与物理学、化学等自然学科的关系十分密切并获得其有力支撑与促进。19世纪中叶，偏光显微镜应用于矿物晶体的鉴定与研究；20世纪初叶，X射线衍射技术应用于矿物结构分析；而后的物理化学条件和相平衡理论应用于矿物形成的研究等，均是矿物学发展史上里程碑性的变革。近30多年来，固体物理学及量子化学理论及现代测试技术的应用，已经和正在促使矿物学理论及研究方法不断取得新的进展。

第二节 岩石和岩石学

“岩石”一词应用十分广泛，早在远古时期即开始有了“石头”知识的萌芽，伴随生产活动的实践及采矿事业的兴起，关于岩石和矿物的知识逐渐积累，大约在18世纪开始从地质学中分出了矿物学，以后又从矿物学中分出了岩石学，但对岩石却一直没有严格的定义。

岩石（rock）是构成地球表层（地壳和软流圈之上的上地幔，即岩石圈）的主要物质成分，是在特定地质条件下，由各种地质作用所形成的具有稳定外形的固体矿物（包括部分玻璃质和生物残骸）的集合体。

岩石常由多种矿物组成，有时也可由单一矿物组成（称为“单矿物岩”）。石油和天然气由于不是固体，不能称作岩石；由水泥胶结的砂砾、烧锅炉的炉渣及各种陶瓷、铸石材料等，虽然都是固体矿物的集合体，但不是地质作用形成的也不能称作岩石，只能称为“人造

岩石”或“工艺岩石”。

地壳中岩石种类有数千种之多，根据成因及特征一般可归纳为以下三大类：

(1) 岩浆岩 (magmatic rock)，主要是由地壳深处或上地幔形成的高温熔融的岩浆，在地质构造运动的驱使下，侵入地下或喷出地表冷凝而形成的岩石，如花岗岩、玄武岩等。

(2) 变质岩 (metamorphic rock)，是在温度压力升高及活动性流体参与条件下，由地壳中已存在的、先期形成的各种岩石发生矿物成分、结构、构造转化而重新形成的岩石，如片岩、片麻岩和大理岩等。

(3) 沉积岩 (sedimentary rock)，是在地表条件下，由风化作用、生物作用及某些火山作用等形成的沉积岩原始物质经搬运、沉积和沉积后作用所形成的岩石，如砂岩、泥岩、石灰岩、白云岩和火山碎屑岩等。

一般来说，三大类岩石成因不同、特征各异，但它们之间又彼此密切相关，可以相互转化。例如，岩浆岩、变质岩和先期的沉积岩经风化、搬运、沉积和沉积后作用可形成沉积岩；沉积岩、变质岩及先期的岩浆岩经熔融作用可形成岩浆，而后再经冷凝又可形成岩浆岩；岩浆岩和沉积岩等岩石经变质作用可转变为变质岩。这种不同岩石类型的相互转化不是简单地循环重复，而是不断形成特征各异的新岩石。由于地质作用的复杂性，自然界还可见到特征相似、成因逐渐过渡的岩石，也可见到仅仅依据成分、结构、构造特征难以确定其成因及类型的岩石。例如，岩浆作用形成的花岗岩与交代变质作用形成的混合花岗岩极为相似，岩浆成因的辉石岩和角闪岩与变质成因的辉石岩和角闪岩同样不易区分。对于这些岩石，只有经过全面深入研究，方可得出正确结论。

三大类岩石在地壳中的分布情况各不相同。沉积岩主要分布于地表，约占大陆表面积的75%，海底几乎全部被沉积岩及沉积物所覆盖。随深度的增加，岩浆岩和变质岩增多、沉积岩相应减少，在地壳下部至上地幔主要是岩浆岩和变质岩。根据地球物理资料和高温高压实验判断，从地表向下16km的范围内，岩浆岩和变质岩的体积可达95%，沉积岩只占5%。

岩浆岩和变质岩均是内动力地质作用的产物，主要由肉眼可辨的矿物晶体组成，故二者也可统称为“结晶岩”(crystalline rock)。

岩石学 (petrology) 是以岩石为研究对象，以岩石的物质成分、结构、构造、野外产状、共生组合、分布规律以及岩石成因、与成矿的关系等为研究内容的一门独立学科。

岩石学是地质学的一门重要的分支学科。根据研究侧重点的不同，岩石学可分为：岩类学 (petrography)，或称描述岩石学，主要研究岩石的物质成分、结构、构造、分类、命名以及产状与分布等方面的内容；岩理学 (petrogenesis)，或称成因岩石学或理论岩石学 (theoretical petrology)，主要探讨岩石的形成条件和形成过程等岩石成因方面的问题。岩类学虽然是岩石学的重要方面，但不是岩石学的全部内容，它的科学体系是建立在一定成因概念基础上的；而岩理学的发展又是建筑在更深入细致的岩类学的基础之上。因此，现代的岩石学一般将岩类学和岩理学统一起来，综合分析岩石产出条件与实验成果，全面研究岩石的基本特征、组合、成因及在时间上和空间上的分布规律。

从岩石的成因角度考虑，岩石学通常分为岩浆岩石学、变质岩石学和沉积岩石学，目前岩石学正沿着这三个主要的分支方向各自独立地发展着。

岩浆岩石学 (magmatic petrology) 着重研究岩浆岩的物质组成、结构构造、产状分布、共生组合、成矿关系、成因机制以及岩浆的形成、活动、演化规律、与全球构造的关系等内容。近年来，岩浆岩石学的研究范围已扩大到上地幔和宇宙星体岩石。

变质岩石学 (metamorphic petrology) 着重研究变质岩的物质组成、结构构造、共生组合、成因成矿、原岩恢复、变质相和相系、变质作用与构造活动及地壳演化发展的关系等内容。

沉积岩石学 (sedimentary petrology) 着重研究沉积岩原始物质的形成、搬运、沉积、成岩作用以及沉积岩的岩石学特征、沉积矿产、沉积环境和沉积相的关系等内容。

从资源勘查专业的角度考虑, 由于石油及天然气等沉积矿产主要形成在沉积盆地内, 绝大部分也储集于沉积岩中。因此, 要了解 and 掌握石油天然气等沉积矿产的生成、储集以及在空间上和时期上的分布规律, 就必须牢固地掌握沉积岩石学的基本知识、基本理论和基本技能, 所以沉积岩石学是资源勘查专业的主干课程之一。矿物学、岩浆岩石学和变质岩石学则是沉积岩石学的先行基础课, 也是资源勘查和相关学科、相关专业的重要基础课程之一, 因而, 本教材将矿物学、岩浆岩石学和变质岩石学合并, 统称为矿物岩石学。

第三节 矿物岩石学与石油等沉积矿产的关系

矿物岩石学是学习沉积岩石学和沉积相的基础, 即必须具备矿物岩石学的基本知识、基本理论和基本技能, 方能学好石油天然气等沉积矿产的主干课程——沉积岩石学。这是因为: 形成沉积岩的原始物质成分主要来自于岩浆岩和变质岩, 尤其是陆源碎屑岩和火山碎屑岩的物质成分与结晶岩石十分相近, 即结晶岩是沉积岩最重要的、最原始的母岩; 沉积盆地的周缘和基底常由古老的结晶岩石组成, 通过对结晶岩的研究, 可以较深入地了解基底岩系并圈定沉积盆地的边界轮廓, 也可为地球物理勘探成果的解释提供地质基础资料和数据; 在研究含油气盆地的沉积相时, 常根据沉积岩的物质成分、重矿物组合来分析推断母岩的性质和物源方向, 而其成分和重矿物组合除受风化、搬运、沉积作用影响外, 更取决于结晶岩等母岩的类型与性质, 对结晶岩知识的充分掌握更有利于准确地推断母岩性质和物源方向, 更有效地解决盆地的沉积相问题。因此, 不论是沉积矿产的综合研究, 还是沉积矿产的现场勘探生产实践, 均常常会遇到与结晶岩有关的问题。

世界上的油气勘探历史经历了 100 多年, 已发现了数以万计的各种类型的油气藏, 其中非沉积岩系油气藏因不断被发现而成为不可忽视的油气藏类型之一。一般认为, 非沉积岩系油气藏又可分为基岩型油气藏和火山岩型油气藏两种类型。

基岩型油气藏, 即石油与天然气储集于沉积盆地基底结晶岩系中的油气藏, 主要以花岗岩基岩油气藏和变质岩基岩油气藏较为常见。

委内瑞拉的拉帕斯油田即是花岗岩基岩油藏, 它的油井最高日产量可达 2000t 以上。位于北非利比亚锡尔特盆地东部的奥季拉油田, 也是花岗石基岩油藏, 前震旦系的花岗岩长期暴露于地表, 加之各种构造运动和火山活动, 使岩体普遍遭受绢云母化和高岭石化并发生破裂产生大量裂隙, 从而形成多种储集空间, 其孔隙度达 11%~25%, 渗透率达 $(700\sim 900)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$, 该油田目前是世界上探明的产油量最高的基岩型油藏。

美国加利福尼亚州豪金谷东侧边缘的爱迪生油田是典型变质岩基岩型油气藏, 是该州石油最丰富的地区之一, 基岩由绿色—灰色云母片岩、绿泥石及阳起石片岩组成。

鸭儿峡油田是我国最早发现的变质岩油藏。位于酒泉西部盆地的老君庙背斜带西段, 石油产自志留系泉脑沟群, 储集层岩性为灰绿色—紫红色千枚岩及变质砂岩, 岩石本身储油性很差, 孔隙度低 (小于 2.5%), 渗透率大都接近于零, 但在多期构造运动及长期风化作

用下形成大量裂隙，据岩心裂隙统计，其平均密度 3.9 条/m，裂隙平均宽度 0.38mm，在斜交和垂直裂隙中均有原油充填，这些裂隙是主要的储集空间。

东胜堡油田是以花岗岩为储集层的基岩型古潜山油气藏。东胜堡油田位于大民屯凹陷中部，古潜山由太古宇的混合花岗岩及数量不等的侵入伟晶岩脉及基性岩脉组成，古潜山顶部经历强烈的风化作用和地下水淋滤溶蚀作用，溶缝、溶洞十分发育，成为良好的储集层。

兴隆台油田位于辽河西部凹陷的中央隆起带，基底岩石为前震旦系花岗片麻岩，曾经长期暴露于地表，裂隙发育，与上覆盖的古近系沙河街组第四段玄武岩共同组成储集层。

东渤海湾地区，胜利油田太古宇花岗片麻岩基底岩系中打出日产千吨的油井。

火山岩型油气藏中以玄武岩型油气藏所占比例最多。自 19 世纪末在墨西哥发现富贝罗油田古近系玄武岩油藏以来，相继在日本、印度尼西亚、古巴、阿根廷、美国、加纳及俄罗斯发现了众多的玄武岩油藏，特别是在美国得克萨斯州、墨西哥湾沿岸已发现 29 个成串分布的玄武岩油藏。其他火山岩型油气藏也有发现，如日本新潟盆地见附油田，大部分油气产自早中新世的安山岩和流纹岩。

我国的新疆、内蒙古、渤海湾、华北等地也发现有玄武岩油藏。著名的准噶尔盆地克拉玛依油田石炭系的玄武岩油藏，拥有原油储量亿吨以上。二连盆地阿尔善油田的阿北玄武岩层状油藏，含油面积 15km²，探明储量 2100×10⁴t。近年来，在四川雅安至天全县间周公山背斜的二叠系玄武岩中也获工业性油藏，这意味着在西南地区同样不可忽视岩浆岩型油气藏的勘探。另外，在辽河油田见有古近系安山岩储油岩系，在渤海湾地区中生界火山岩和火山碎屑岩也有良好的油气显示。

玄武岩具有间歇性、多期性喷发的特点，气孔构造和柱状节理发育，原生及次生的孔隙也发育较好，有利于油气储集，当含油气盆地之中油源充足且区域盖层发育时往往可形成油气藏，尤其是在不整合侵蚀面附近的、在断裂发育地段的玄武岩层中，常可形成块状、层状的高产油气藏。

总之，岩浆岩及变质岩等结晶岩石不仅是沉积盆地内沉积岩的母岩，往往也是盆地基底岩系，结晶岩虽然通常不是生油岩系，但可以改造发展成为油气等矿产不可忽视的储集层。因此，结晶岩与沉积岩等岩石一样，都与石油天然气等沉积矿产有着不同程度的密切关系。作为以石油天然气勘探、评价为主要方向的资源勘查专业的大学生，不仅要掌握沉积岩有关知识，同样必须具备和掌握结晶岩方面的基本知识，为科研、生产及未来从事专业工作打下坚实基础。

第二章 结晶学基础

自然界的矿物绝大多数都是晶体，晶体都具有自身固有的特性及规律。了解并掌握晶体的特性和规律是学习矿物学必需的基础。本章将对晶体、晶体的形态特征、晶体的内部结构与物质质点的关系等问题作简要讨论。

第一节 晶体及其基本性质

一、晶体的概念

人们认识晶体，首先是从观察它的外部形态开始的。在古代，人们通常把具有规则的几何多面体形态的石英——水晶称为晶体 (crystal)，后来发现石盐、方解石、磁铁矿等也具有规则的多面体形态 (图 2-1)，于是这一术语得到推广，把凡是天然产出的具有规则几何多面体形态的固体称为晶体。显然，这种认识也是不全面的，如岩石洞穴中生长的石英常呈多面体形态，而花岗岩中的石英则是不规则的粒状。科学研究证明，这两种形态的石英，除了形态差异外，其他性质都完全相同；实验还证明，将不规则粒状的石英颗粒放入过饱和 SiO_2 溶液中，让其自由生长最终也能够长成与水晶一样的规则几何多面体形态。由此可见，是否具有规则的几何多面体形态并不是晶体的本质，晶体的多面体形态只是晶体内部结构在一定条件下的外在反映。

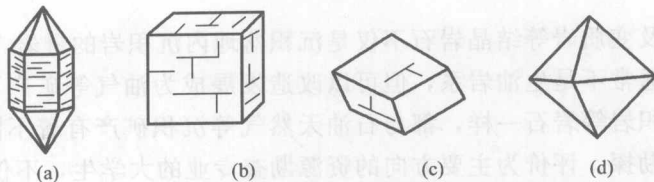


图 2-1 几种不同形态的自形晶体

(a) 水晶；(b) 石盐；(c) 方解石；(d) 磁铁矿

对晶体本质的研究进行了几个世纪，直到 1912 年应用 X 射线分析晶体的内部结构之后才真正获得实质性进展。

研究表明，自然界所有晶体，不论其外形如何，组成晶体的质点 (原子、离子或分子等) 在晶体内部都是规律性重复排列的。这种规律性主要表现为，同属性的质点在三维空间的任何方向上均呈周期性重复，即构成空间格子。例如，石盐 (NaCl) 晶体内的 Cl^- 在任意方向上均是等间距重复出现的， Na^+ 同样是在任何方向上等间距重复出现的 (图 2-2)。内部质点是否规律性重复排列是晶体与非晶质体的根本区别。

因此认为，晶体是内部质点 (类型与环境均相同的原子、离子或分子等) 在三维空间呈周期性重复排列的固态物体，或者称内部具有格子状结构的固体为晶体，晶体也可称为结晶质 (crystalline)；相反，凡内部质点不能在三维空间作周期性重复排列的物质为非晶质。水和空气都是非晶质，玻璃、胶体物质 (蛋白石、琥珀、松香等) 也是非晶质。

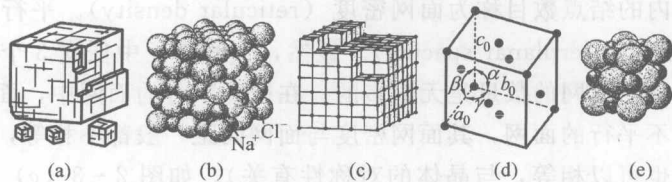


图 2-2 石盐晶体及其内部结构

(a) 晶体及解理；(b) 晶体结构；(c) 立方面心空间格子；(d) 单位立方面心空间格子；(e) 石盐的晶胞

在矿物学、岩石学等许多学科中，习惯上往往将晶体这一名称专门用于指具有几何多面体外形的晶体，将不具有几何多面体外形的晶体称为晶粒 (crystalline grain) 或称为结晶质，还常常依据晶粒的大小将结晶质分为显晶质和隐晶质：凡是在裸眼及放大镜下可以分辨晶粒大小与形态者为显晶质 (phanerocrystalline)；凡是在放大镜下无法分辨者为隐晶质 (cryptocrystalline)，隐晶质还可进一步细分为显微晶质和显微隐晶质。

晶体分布极为广泛，天然矿物绝大多数是晶体，许多工业产品，如钢铁、合金、陶瓷以及绝大多数药品 (包括牛胰岛素) 等都是晶体。

二、晶体的空间格子

1. 空间格子

晶体内部质点在三维空间上分布的规律性，常用空间格子来描述。

石盐晶体 (NaCl) 是由 Cl^- 离子和 Na^+ 离子在空间相间排列而组成的 [图 2-2 (b)]，从石盐晶体中任意选取一个“几何点”作为原始点，晶体内必有无数的与该原始点在性质、环境和方位上完全相同的几何点，晶体中这些彼此完全相同的几何点称“相当点”。如果以任意一个 Cl^- 的中心为原始点，该点周围有 6 个 Na^+ 与之相邻，晶体中其余每一个 Cl^- 中心点的周围同样也有 6 个 Na^+ ，这些 Cl^- 中心点在性质、环境和方位上与原始点完全相同，属同一类相当点。这些相当点 (Cl^- 中心点) 所构成的无限的立体几何图形，能表现石盐晶体内各种质点 (Cl^- 或 Na^+) 在三维空间的分布重复规律，称其为空间格子 [图 2-2 (c)]。

也就是说，从晶体内部结构中抽象出来的，同一类“相当点”所组成的无限的立体几何图形称为空间格子 (space lattice)。或者说，从晶体内部结构中抽象出来的、用以表示晶体内部质点分布重复规律的无限的立体几何图形称为空间格子，又称为空间点阵。

相当点是纯粹的几何点，没有任何物理上的和化学上的意义，不表示具体质点的种类、大小及相互关系。同一种晶体中，相当点有多种选取方式，但其空间格子均是相同的；不同种类的晶体，其空间格子通常是各不相同的，即空间格子的形态特征与相当点的选择无关，仅取决于晶体的内部结构。

2. 空间格子的组成要素

组成空间格子的相当点又称为结点 (node) [图 2-3 (a)]。

空间格子中由排列在一条直线上的结点构成的几何图形称为行列 (row) [图 2-3 (b)]。每一行列上相邻结点之间的距离称为结点间距 (row spacing)。显然，任意两结点即构成一个行列，在同一空间格子内有无数多个行列，同一行列或相互平行行列中的结点间距恒定相等；相互不平行的行列之结点间距一般不相等 (也可以相等，与晶体对称性有关)。

空间格子中由分布在一个平面上的结点构成的几何图形称为面网 (net) [图 2-3 (b)]。

面网中单位面积内的结点数目称为面网密度 (reticular density)。平行且相邻的两面网间的距离称为面网间距 (interplanar spacing)。显然, 空间格子中任意 3 个不在同一行列上的结点就构成一个面网, 面网的数量是无限多的; 在彼此平行的面网中, 面网密度恒定相等且面网间距也相等; 不平行的面网, 其面网密度与面网间距一般都不相等, 并且面网密度较大者面网间距较大 (也可以相等, 与晶体的对称性有关)。如图 2-3 (c) 所示, 垂直纸面的面网与纸面相交的行列分别为 AA' 、 BB' 、 CC' 等, 显然面网 AA' 的面网密度最大, 面网 DD' 的面网密度最小; 假设各行列与 AD (结点间距为 d) 的交角依次为 β_1 、 β_2 、 β_3 等, 各面网的面网间距依次为 d_1 、 d_2 、 d_3 等, 则面网间距 d_i 与 $\sin\beta_i$ ($i=1, 2, 3\cdots$) 成正比, 即:

$$d_i = b \sin\beta_i \quad (2-1)$$

由此表明, 同一空间格子内, 面网密度较大的面网, 相应的面网间距较大; 面网密度较小的面网, 相应的面网间距较小。

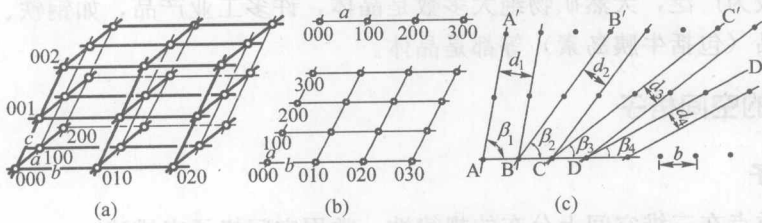


图 2-3 空间格子的组成要素示意图

(a) 空间格子与结点; (b) 行列与面网; (c) 面网间距与面网密度的关系

需要指出的是, 行列、面网以及空间格子都是几何上的无限图形, 但对实际晶体而言, 不论晶体如何巨大, 在空间上终究是有限的。不过, 以晶体内部质点的重复周期与晶体颗粒的通常大小相比较时, 后者远远大于前者。例如, 在 1mm^3 的石盐 (NaCl) 晶体内, 包含有大约 2.23×10^{23} 个 Cl^- 离子和同样数目的 Na^+ 离子。因此, 从微观的范畴来讲, 可以近似地将实际晶体的格子结构看成是在三维空间无限延伸的几何图形。

3. 单位空间格子及晶胞

从几何学的知识容易得出, 三条不共面的行列就可以决定一个空间格子的形状, 即在空间格子中, 平行六面体是其基本单位。平行六面体由 6 个两两平行且相等的面构成 [图 2-2 (d)]。整个空间格子可以看成是由平行六面体在三维空间毫无间隙地平行叠置而成, 且平行六面体的 8 个角顶都必定被结点占据 (其面心或体心也可能有结点分布)。

在一个空间格子中, 可选取多种类型的平行六面体。其中, 能反映空间格子对称特性的、行列间相互正交或近于正交的且体积最小的 (唯一的) 平行六面体, 称为单位空间格子 (或单位平行六面体)。空间格子可理解为由单位空间格子无间断的平移叠置而成。

单位空间格子的选取原则:

- (1) 所选取平行六面体的对称性应符合整个空间格子的对称性;
- (2) 在满足对称性的前提下, 选取行列 (或称为棱) 之间直角关系最多的平行六面体;
- (3) 在满足前述条件的前提下, 选取体积最小的平行六面体;
- (4) 当由于对称性无正交棱时, 在满足前 3 个条件的前提下, 选取结点间距最小的行列为棱。

表征单位空间格子形状及大小的3个棱长（即3个行列方向上的结点间距） a_0 、 b_0 、 c_0 和三者间的交角 α 、 β 、 γ 称为“单位空间格子参数”，或简称格子参数 [图 2-2 (d)]。在实际应用中，格子参数的3个棱长 a_0 、 b_0 、 c_0 也常常可以用简化的 a 、 b 、 c 表示。

实际晶体中，由具体质点（离子、原子、络离子及分子等）所构成的、其形状和大小与对应的单位空间格子一致的最小晶体，称为晶胞（cell）[图 2-2 (e)]。可以认为，晶体是由晶胞在三维空间无间断的平移叠置而成 [图 2-2 (b)]。

由于晶胞的形状大小与对应的单位空间格子完全一致，因此，表征单位空间格子形状及大小的3个棱长 a 、 b 、 c 和三者之间的交角 α 、 β 、 γ 又称为晶胞参数，或者说，单位空间格子参数即相应晶体的晶胞参数。晶胞参数仅与晶体的内部结构有关，即同种晶体晶胞参数均相同，不同种晶体的晶胞参数各不相同，因此晶胞参数是矿物晶体相互区别的极重要的、极可靠的标志。

4. 空间格子的分类

各类空间格子之间的相互区别主要表现在两个方面：一是由格子参数决定的空间格子的形态；二是单位空间格子中结点的分布位置。

依据单位空间格子的三个棱长 a 、 b 、 c 及其夹角 α 、 β 、 γ 的相互关系，即依据格子参数的特征，常将空间格子划分为如下七类（图 2-4）。

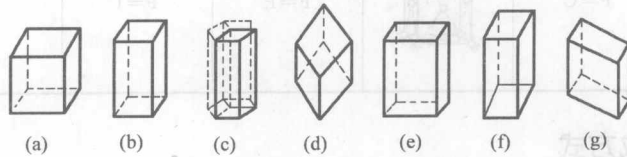


图 2-4 空间格子的形状与参数分类

(a) 立方格子；(b) 四方格子；(c) 六方格子；(d) 三方格子；(e) 斜方格子；(f) 单斜格子；(g) 三斜格子

(1) 立方格子： $a=b=c$ ， $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。

(2) 四方格子： $a=b\neq c$ ， $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。

(3) 六方格子： $a=b\neq c$ ， $\alpha=\beta=90^\circ$ ， $\gamma=120^\circ$ 。

(4) 三方格子： $a=b=c$ ， $\alpha=\beta=\gamma\neq 90^\circ$ （或 60° ）。可划分为三方格子的空间格子还可按六方格子划分，其格子常数与六方格子相同，即 $a=b\neq c$ ， $\alpha=\beta=90^\circ$ ， $\gamma=120^\circ$ ，但体积相应为原来的三倍。如方解石（ $\text{Ca}[\text{CO}_3]$ ）的三方格子参数为 $a=0.637\text{nm}$ ， $\alpha=46^\circ 5'$ ，晶胞内含两个分子；其六方格子参数为 $a=0.499\text{nm}$ ， $c=1.076\text{nm}$ ，晶胞内含六个分子。

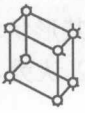
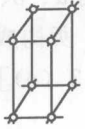
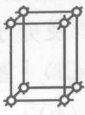




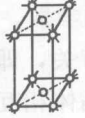




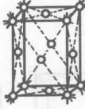

(5) 斜方格子： $a\neq b\neq c$ ， $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。

(6) 单斜格子： $a\neq b\neq c$ ， $\alpha=\gamma=90^\circ$ ， $\beta\neq 90^\circ$ 。

(7) 三斜格子： $a\neq b\neq c$ ， $\alpha\neq\beta\neq\gamma\neq 90^\circ$ 。

按结点分布位置，又可将空间格子划分为四种基本类型：原始格子（代号 P），结点只分布在平行六面体的角顶（其中，三方菱面体原始格子的代号 R）；底心格子（代号 C），结点分布于平行六面体的角顶及一对面的中心；体心格子（代号 I），结点分布于平行六面体的角顶及六面体的中心；面心格子（代号 F），结点分布于平行六面体的角顶及每个面的中心。结合单位格子参数与形态的不同，共十四种空间格子，又称为十四种布拉维格子（表 2-1）。

表 2-1 十四种布拉维格子

	三斜格子	单斜格子	斜方格子	三方格子	四方格子	六方格子	立方格子
原始格子 (P)							
底心格子 (C)	C=P			—	C=P	—	—
体心格子 (I)	I=P	I=C		I=P		—	
面心格子 (F)	F=P	F=C		F=P	F=I	—	

三、晶体的形成方式

1. 由液相结晶析出晶体

由液相（液体或熔体）中结晶析出晶体，是晶体形成的主要方式，又可分为以下两种情况。

(1) 从熔体中结晶，当温度低于熔点时，晶体开始析出，也就是说，只有当熔体过冷却时晶体才能形成。如金属熔体冷却到熔点以下结晶形成金属晶体。岩浆中的晶体矿物都是由这种方式形成的。因此，由熔体形成的矿物晶体都具有较高的熔点。

(2) 从溶液中结晶，是实验室获得晶体常用的方法，也是自然界中常见的现象。物质从溶液中结晶，必须在该物质达到过饱和时才能发生。过饱和的实现有多种途径：温度降低，如岩浆期后热水溶液随着与岩浆源距离的增加，温度逐渐降低，某些物质的溶解度随之减小至过饱和，相应的晶体陆续析出；水分蒸发，如天然盐湖卤水经过蒸发浓缩，石膏、石盐等盐类矿物按溶解度依次结晶沉积；通过化学反应，生成溶解度小的难溶物质结晶析出。

2. 由气相结晶为晶体

从气相直接转变为晶体的条件是要有足够的蒸气压力。在火山口附近，常常可见到由火山喷气直接结晶生成的硫、碘、氯化钠等矿物晶体。这样的作用在地下深处亦有发生，如萤石、绿柱石、电气石等矿物就可以在岩浆期后作用阶段由气相直接结晶形成。雪花也是由于水蒸气压力超过一定数值而直接由气相结晶形成的晶体。这些都是由气相直接结晶成为晶体的实例，此种现象又称为凝华作用。

3. 由固态再结晶为新晶体

环境条件的变化可以引起原有物质成分在固体状态下进行改组，使原矿物由非晶质变为结晶体、由小晶粒变为大晶粒或者生成新矿物晶体。这是变质作用、成岩作用、某些岩浆作用及火山作用过程中新矿物形成的主要途径，可分以下几种情况。

(1) 由固态非晶质（玻璃质或胶态物质）转变为结晶质。例如，火山玻璃经过漫长的地质年代后可以发生结晶作用形成石英等矿物晶体，这种形成晶体的途径常常称为脱玻化作用（devitrification）或重结晶作用。脱玻化初期往往形成一些针状、毛发状、球粒状、羽毛状的极细小晶体，称为雏晶（crystallite）[图 2-5 (a)]，而后逐渐长大成为真正的不同粒径不同形态的晶体。

(2) 同质多象转变形成新晶体的过程也是在固体状态下进行的。同质多象转变，是指在热力学条件改变时，晶体化学组成不变化，晶体结构却发生改变而形成另一种在新条件下稳定晶体的过程。例如，当温度升高至 573°C 以上时， α -石英将转变为 β -石英的晶体结构；当温度降低到 573°C 以下时， β -石英又会重新转变为 α -石英的晶体结构 [图 2-5 (b)]。

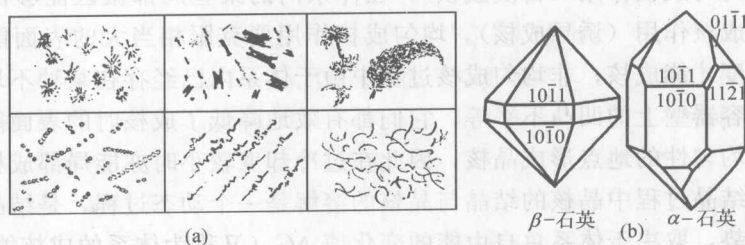


图 2-5 雏晶与石英

(a) 脱玻化作用形成的雏晶；(b) α -石英与 β -石英

(3) 原本晶粒微细的矿物或岩石经过重结晶作用常常可形成较为粗大的新的矿物晶体。例如，由隐晶质方解石组成的石灰岩，在区域变质过程中或与岩浆岩接触时，在固体状态下常常可重结晶形成由粗粒方解石晶体组成的大理岩。

(4) 在温度等条件变化时，固溶体常常发生分离而形成新的矿物晶体。例如，由一定比例的闪锌矿（ ZnS ）和黄铜矿（ CuFeS_2 ）在高温时组成均一相的固溶体，在低温时就发生分离形成两种独立矿物；又如，高温时钾长石和钠长石组成均一相的固溶体（透长石），随温度降低二者发生分离而变为具条纹结构的正长石或具条纹结构的微斜长石（条纹长石）。

(5) 在固态下通过变质结晶作用常可形成新的矿物晶体。例如，在区域变质条件影响下，矿物在定向压应力高的方向上溶解，而在垂直于高压应力的方向上再结晶，从而形成一向伸长或二向延展的角闪石、云母等变质矿物晶体；又如，在较高的温度和压力作用下，粘土矿物通过变质结晶作用可形成分子体积较小、相对密度较大且晶体较粗大的红柱石、蓝晶石等变质矿物，这样的矿物称为变晶，当其晶体远大于周围晶体时又称为变斑晶。

上述各种形成晶体的结晶过程，最初都需要先形成微小的晶核，然后再发育长大成为一定粒径和一定形态的晶体。