



变质岩岩石学教程

● 游振东 王方正 主编

A TEXTBOOK OF METAMORPHIC
PETROLOGY

中国地质大学出版社

地质学

地质学是研究地球的物质组成、结构、形成和演化的科学。本书是地质学专业的必修课教材，也是地质工程、地质资源、地质环境等专业的重要参考书。本书共分八章，第一章至第六章为变质岩岩石学，第七章为变质岩构造学，第八章为变质岩地史学。本书可作为地质学、地质工程、地质资源、地质环境等专业本科生的教材，也可供从事地质工作的工程技术人员参考。

变质岩岩石学教程

游振东 王方正 主编



地质学 00000-1000 地质学

中国地质大学出版社

内 容 提 要

本书是根据中国地质大学岩石矿物学专业变质岩岩石学教学大纲的要求和总结多年来变质岩教学经验的基础上,并参考欧美80年代有关教科书和专著编写成的。

全书共分十二章,计27万字。其中第一章至第五章为总论,第六章至第十章为各论,第十一章变质岩工作方法,第十二章变质作用与地壳演化,可看作全书的结论。

教材内容涉及各类变质作用、变质岩的分类描述和成因研究工作方法等各个方面。

该教材适用于地质、地化、岩矿、矿产地质及地质力学等专业,亦可供野外地质工作者和研究人员参考。

变质岩岩石学教程

主 编 游振东 王方正

责任编辑 张华瑛

*

中国地质大学出版社出版

石首市第二印刷厂印刷 湖北省新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 15.125 字数 365千字

1988年11月第1版 1991年4月第2次印刷

印数 3001—6000册

ISBN 7-5625-0134-3/P·47

定价: 3.80元

前 言

当代变质岩石学显著进展之一在于把变质作用的特点和类型与区域地壳演化和大地构造环境密切联系起来,变质相和变质相系的研究在这方面起着重要的作用。近年来由地球物理学方面引入造山带热模拟的资料,提出了变质作用的压力-温度-时间轨迹的概念,更深入地研究地壳不同层次的变质岩在抬升、侵蚀过程中所经历的过程。然而其基础仍在于变质相和变质相系。

本教程是根据中国地质大学岩石矿物学专业变质岩岩石学教学大纲要求和总结多年来变质岩教学经验的基础上编写而成的。编写过程中吸收了欧美80年代有关教科书和专著中某些有益的内容。经过两年来的试用,作者等又对教材作了补充修改,部分章节进行了调整。

全书共十二章,27万字。第一章至第五章为总论部分,目的在于给学生一些有关变质作用和变质岩的基本理论、概念和术语,为学习各论打下基础;第六章至第十章为各论部分,讲述不同类型变质作用的特点及其岩石,次序的安排大体按变质因素从简而繁的原则,所以区域变质和混合岩化作用列在最后,在各论的叙述中力图突出不同变质相和相系的矿物组合和矿物本身的特点、不同变质相之间的区别和联系;第十一章为变质岩工作方法;第十二章变质作用与地壳演化,可以看作全书的结论部分。从最后两章中使初学者可以了解如何应用变质岩石学所提供的资料来解决地质学中的重大问题。

虽然如此,各章仍保持其各自的独立性,因此,在教学过程中可不受这一顺序的限制。

该教材适用于地质、地化、岩矿、矿产地质及地质力学等专业,学时数50至90,学时数不同可适当删减内容。

本教程由游振东、王方正、桑隆康和钟增球组成的编写组共同编写而成。王方正担任第一、二、五章和第十一章第二节;桑隆康担任第三、四、七章和第十一章第一节;钟增球担任第六、八两章和第十一章的第四、五两节;游振东担任第九、十、十二章和第十一章第三、六两节。韩郁菁副教授在使用本书过程中,对本书的补充修改提供了意见;责任编辑为张华瑛。

桂林冶金地质学院姜德厚副教授审读了全书的修订稿,并提供了修改意见和建议。对此编者深表谢忱。

由于笔者水平所限,疏漏,谬误之处不少,希广大读者批评、指正。

编者

1988.1.30

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 引言——变质岩和变质作用.....	(1)
第二节 变质岩岩石学的研究历史及发展现状.....	(1)
第三节 变质作用的控制因素.....	(3)
第四节 变质作用的方式.....	(6)
第五节 变质作用的类型.....	(8)
第二章 变质反应	(10)
第一节 变质反应的类型.....	(10)
第二节 变质因素对变质反应的制约.....	(12)
第三节 变质反应动力学的基本概念.....	(15)
第四节 形成常见变质矿物的变质反应实验资料评述.....	(18)
第三章 共生分析和变质相	(28)
第一节 共生原理(相律)和成分-共生图解的概念.....	(28)
第二节 ACF 图.....	(32)
第三节 $A'KF$ 图.....	(36)
第四节 AFM 图.....	(39)
第五节 共生图解综述.....	(41)
第六节 施赖纳玛克斯方法.....	(43)
第七节 变质相.....	(47)
第四章 变质岩的成分特征和化学类型	(52)
第一节 变质岩的化学成分和化学类型的划分.....	(52)
第二节 变质岩矿物成分.....	(57)
第五章 变质岩的结构构造	(62)
第一节 变质岩的结构特征.....	(62)
第二节 变质岩的构造.....	(71)
第三节 结构构造研究的意义.....	(73)
第六章 接触变质岩	(78)
第一节 概述.....	(78)
第二节 接触变质岩的分类和命名.....	(81)
第三节 接触变质相及主要接触变质岩.....	(81)
第七章 交代作用和气-液变质岩	(93)
第一节 交代作用.....	(93)
第二节 开放系统的矿物共生原理和共生分析概念.....	(96)
第三节 气-液变质作用和气-液变质岩.....	(99)

第四节	计算交代作用前后化学成分变化的巴尔特“氧”法	(110)
第八章	动力变质岩	(113)
第一节	概述	(113)
第二节	动力变质岩的分类	(118)
第三节	动力变质岩的基本特征	(119)
第四节	动力变质岩的成因问题	(123)
第九章	区域变质岩	(125)
第一节	概述	(125)
第二节	区域变质岩的分类命名	(126)
第三节	相系列的概念及其划分	(132)
第四节	中压区域变质相系	(134)
第五节	高压区域变质相系列	(154)
第六节	低压区域变质相系列	(158)
第十章	混合岩化作用与混合岩	(163)
第一节	概念	(163)
第二节	混合岩的基本组成部分	(163)
第三节	混合岩的基本特征	(164)
第四节	混合岩的主要类型	(168)
第五节	混合岩的成因	(172)
第六节	混合岩带的划分	(174)
第十一章	变质岩研究方法	(177)
第一节	变质岩的原岩恢复	(177)
第二节	地质温度计及地质压力计	(190)
第三节	指示矿物带与相系判定	(195)
第四节	变质岩的优选方位	(199)
第五节	韧性剪切带研究	(203)
第六节	变质作用历史的分析	(211)
第十二章	变质作用与地壳演化	(223)
第一节	板块运动与变质作用	(223)
第二节	前寒武纪变质岩与早期地壳演化	(227)
第三节	变质作用的时代分布	(231)
第四节	变质建造	(233)

第一章 绪 论

第一节 引言——变质岩和变质作用

岩石学是研究地壳、地幔及天体物质成分的学科之一。19世纪后期,人们已把组成地壳的岩石按成因不同划分出岩浆岩,沉积岩和变质岩三大类,相应的岩石学就开始分成岩浆岩(火成岩)岩石学、沉积岩岩石学、变质岩岩石学三个分支学科。变质岩岩石学是研究变质岩的成分、结构、构造、产状、分布、分类、命名、共生组合和变质岩的形成、演化的机制与条件以及其在地球(天体)形成、演化中的地位及作用、与矿产的关系等内容的独立的学科。

所谓变质岩是指在地壳发展过程中,原来已存在的各种岩石(可以是沉积岩、岩浆岩及早已形成的变质岩),由于地壳的构造运动、岩浆活动、地热流的变化等内力地质作用,使原来岩石所处的地质环境及物理化学条件发生了改变,为了适应这种变化,在基本保持固态的情况下,岩石的结构构造、物质成分发生变化而形成的一种新的岩石。这一使岩石发生变化的地质过程就总称为变质作用。

变质作用与岩浆活动、风化、沉积、成岩作用组成了整个地壳的形成和发展的一个完整的地质循环,它们之间是既有区别,又有联系的。风化作用和变质作用都可以引起原来已存在的岩石的变化,但变质作用的起因是在地表以下的内力地质作用,而风化作用是在地表条件下主要由外力地质作用所造成。现代变质作用的起因还有宇宙天体的影响,例如,外来天体与地球相撞也可引起变质作用。变质作用和岩浆活动都是由内力地质作用引起的,主要发生在地表以下较深的地方,但变质作用是在岩石基本处于固态条件下发生的,而岩浆作用则基本处于熔融流动的状态。不过,变质作用并不排除少量的不占优势的液态及熔融流体的存在。另外,一般所指的变质作用,并不包括在地下深处蒸发岩的物质成分、结构构造的变化及有机质的煤化作用。

变质作用过程中,常常伴随有元素的迁移和运动,当某些有用元素富集到人类能开采利用时,就称为变质成矿作用。

变质岩根据原岩的不同可以划分为正变质岩和副变质岩。正变质岩系指原岩是岩浆岩形成的变质岩;副变质岩是原岩为沉积岩的变质岩。

第二节 变质岩岩石学的研究历史及发展现状

人类对岩石的识别及利用,从史前阶段就已开始了。到我国的春秋战国时期(公元前700—221年)、希腊在公元前400—500年,以及古罗马(公元前500年—公元二世纪)的文字记载中已有不少岩石名称及其性质、用途的记载。到18世纪末期,岩石学才与矿物学相脱离而形成独立的学科。变质岩从岩石学中单独划分出来,始于1862年冯科塔(VonCotta, B.)。但较为详细的变质岩岩类学的研究和描述,是在尼科尔(Nicol)于19世纪末发明了

偏光显微镜之后。当时仅限于岩石的分类和描述，这是变质岩研究的描述阶段。由于大量的变质岩矿物成分及结构构造描述性资料的积累，于20世纪初出现了变质矿物平衡共生的理论。当时，最著名的变质岩工作者当推巴罗（Barrow, C. 1853—1932）、哈克（Harker, A., 1859—1939）及格鲁宾曼（Grubenman, U.），它们提出了正常递增变质作用及应力矿物的概念。并第一次把变质岩的空间强度分带与区域构造地质环境联系起来，奠定了变质岩岩理学基础。

在变质岩成因研究中，把理论化学、热力学平衡理论、数学中的拓扑学、线性代数、立体几何的投影的理论与变质岩的矿物学研究及其成因联系起来，早在19世纪末就开始了。到20世纪50年代成绩卓著者有：戈尔德施密特（Goldschmidt, V.M., 1888—1947）、艾斯科拉（Eskola, P., 1883—1964）、巴尔特（Barth, T.F.W., ）、兰伯格（Ramberg, H.）、柯尔任斯基（Кожинский, Л.С.）、尼格里（Niggli, P.）、特纳（Turner, F.J.）等。他们提出的一些变质岩成因的理论和方法至今还被地质工作者广泛地使用着。

在第二次世界大战前，人们就开始了变质矿物的人工合成的实验研究。大量的实验资料的取得是在1950年之后，但此时的研究，多是简单体系，温度、压力条件与自然条件相差较大。

60年代以后变质岩的研究，随着区域地质大规模的总结、大地构造中板块构造学说的创立、海洋地质学的进展、月球及其他近地行星的研究，实验岩石学高温高压技术的日趋完善、体系越来越逼近天然变质作用。高精度微区、微量分析测试技术、电子计算机技术的引进，不平衡体系热力学、统计热力学、化学动力学、固溶体热力学、固体物理学、金属物理学及微量元素、稀土元素、同位素地球化学等近代学科理论与变质岩研究的互相渗透，变质岩的研究已进入一个崭新的阶段。一方面在宏观上，变质岩的研究是整个地壳、甚至到上地幔的形成及演化的研究之重要组成部分，形成了变质地质学方向；微观上，变质岩的矿物成分、化学成分、结构构造的研究与近代测试技术相结合，研究的精度、深度越来越高，使近代数学、物理、化学之理论的应用和发展开辟了广阔的领域，形成了一系列与变质岩岩石学有关的新的研究方向。例如，变质实验岩石学、矿物共生的相拓扑学、岩组学、变质化学动力学及变质矿物物理学等等，不胜枚举。

总之，目前变质岩的研究，一方面，在野外地质调查工作中及室内整理中，传统的地质工作方法仍然是重要的基础；另一方面，新技术新理论的大量渗透和引用。但要注意一切先进的技术手段和新理论，都必须建立在可靠的野外地质调查和显微镜下细心地观察及描述之上。如果忘记了这一点，变质岩的研究必将误入歧途。

我国的变质岩研究，解放前，在极其困难的条件下，人数极少的老一辈地质工作者，顽强地工作，基本上是沿用30年代描述岩石学的方法，对个别地区的变质岩进行了描述和分类。我国变质岩的真正发展，是在解放之后，随着大规模区调工作的进行，积累了丰富的变质岩研究的实际资料，统一了变质岩的分类命名（程裕淇，1959）。正当变质岩的研究更深入的开展时，十年‘文化革命’的大动乱，使变质岩的研究进展大大减慢，使本来与世界先进国家不大的差距，加大了。党的十一届三中全会之后，变质岩研究又以新的面貌开始了。目前，国际上的先进技术和理论都在逐步地引进到我国的实际变质岩工作中来，且已取得了丰硕的成果。由于我国地域辽阔、地质构造位置特殊、多样、复杂及变质岩类型齐全，又有先进的社会主义制度，变质岩研究的领域是极其广阔的，我们的变质岩研究，必将为人类的变质岩岩石学的发展做出优异的贡献。

第三节 变质作用的控制因素

变质作用是地壳（可能包括上地幔）形成和发展过程中的重要环节。因此，变质作用的发生总是在特定的地质环境中。影响变质作用特点的首要因素是地质因素，这包括变质作用发生的地质时代、经历的时间，所处的大地构造环境、地质位置，岩浆活动的特点、构造活动的方式及强度、地热流的强度、大小及变化趋向等等，当然也包括遭受变质作用的原岩的成分及结构构造特征、岩石的组合特征等。习惯上，原岩的特点作为内部因素考虑，不在控制因素考虑之列。从物理化学观点看，引起变质作用的地质环境虽然千差万别，但可以抽象出温度、压力、时间、活动性流体等因素。用这些因素的变化，可以较为确切地描述出不同地质环境的特点。所以这些因素作为控制变质作用的基本外部因素来研究是一种科学的概括和抽象，亦为将近代物理化学等自然基础科学引入变质作用研究中创造了条件。

一、温 度

温度是体系的热状态的直接标志。温度的改变意味着体系热状态的改变。热状态的改变是导致变质作用发生的最重要的因素之一。

（一）变质作用的温度范围

沉积物经成岩作用形成沉积岩后，还会发生的后生变化，成岩后生作用和变质作用之间的界限一般为 $150-250^{\circ}\text{C}$ 。不同的原岩类型这个界线稍有差别。另外，实际上成岩作用和变质作用之间没有一条截然的分界线。目前认为，一个真正的变质矿物共生（即只在变质岩中才遇到的共生）的首次形成是变质作用开始的标志。按沉积岩的定义，互相联系的毛细空间的完全堵塞是成岩后生作用结束的标志。目前认为，象浊沸石、蓝闪石、硬柱石、钠云母或叶腊石的首次出现则表明变质作用的开始。这些矿物形成的温度对不同的原岩有差别，同一矿物可由不同矿物组合、经不同的变质反应形成，不同变质反应的平衡温度当然是不同的。就是同一变质反应，在不同压力条件下，平衡的温度也是变化的。大量的实验资料表明，前述那些变质矿物开始出现的温度在 $150-250^{\circ}\text{C}$ 之间。

变质作用的高级阶段会出现少量的熔融作用，随着熔体的增加，逐渐变成岩浆，进入岩浆过程。这期间也没有一条截然的界线。我们知道不同原岩熔融的起始温度不一样，且压力、挥发分含量也会影响熔融温度。另外，一个岩石融化的过程往往是在一个较大的温度区间，因此变质作用与岩浆作用的温度界线，根据花岗质岩石、泥质岩、基性岩的熔融实验表明是在 $650-1100^{\circ}\text{C}$ 之间。（参看图1-1）

（二）诱发热状态改变的原因

变质作用是复杂的，因此引起变质过程中热状态改变的因素也是复杂多样的。根据现在了解，有下列一些原因：

1. 地热增温 岩石位置随着在地壳中深度的增加，其体系的温度会逐渐增加，但对不同大的构造环境，地热增温率是有很大差别的，可以从每千米十几度到每千米一百多度之间变化。这样引起的热状态改变的范围可能很大，但温度一般并不太高，往往造成较低级的变质作用。

2. 上地幔热流的运动 现已查明地幔中、尤其是上地幔中热状态是不均一的，且存在着地幔热流的运动，这种地幔热流的运动也会对地壳发生重大的影响，使地壳的热状态发生变化。现在认为这是造成大规模高级变质作用的主要原因之一。

3. 放射性元素衰变释放热能的积累 地壳中放射性元素的总含量在百万分之一以上, 在自然衰变过程中积累的热量, 也是十分可观的。

4. 岩浆活动带来的热能

5. 在应力作用下, 摩擦作用产生的热能

总之第1、2、3个热源是大规模的区域性的, 后2个热源是局部的热源。

二、压 力

岩石的变质作用通常是在一定外界压力状态下进行的, 这种压力根据其物理性质可分为两大类:

(一) 静压力

静压力具有均向性, 它们是控制变质作用的重要因素之一。静压力又可分为负荷压力和流体压力。

1. 负荷压力 指岩石在地壳一定深度所承受的上覆岩层的重力, 通常以 p_l 表示之。其数值随深度而增加, 近似于上覆岩层的重量。但按地层厚度及岩性密度计算负荷压力, 并不是一件容易的事。因为地层的厚度可以因构造变形、褶皱加厚或减薄。压力的单位是Pa (帕斯卡), 一般情况下, p_l 随岩层深度约以 $25 \times 10^6 \text{ Pa} - 30 \times 10^6 \text{ Pa/km}$ 的速率增加。增加速率的值取决于岩石的密度。

2. 流体压力 在岩层发生变质作用过程中, 由于岩石中存在少量的流体相, 其流体压力以 p_f 表示。其中各组分的分压力分别表示为 $p_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 p_{CO_2} ……, 其数值与各自在流体相中相对物质的量有正比关系, 在理想混合时, 符合道尔顿定律:

$$p_f = p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{CO}_2} + \dots$$

在变质作用过程中, p_l 与 p_f 的关系具有不同的复杂情况。在地壳深部, 由于岩层中构造裂隙不太发育, 流体处于封闭状态, 固体岩石所承受的压力能全部传送给流体相, 所以一般是 $p_l = p_f$ 。在这种封闭体系中, 随着温度上升, 各种变质反应将释放出大量的流体, 鉴于毛细孔的体积很小, 于是会出现 $p_f > p_l$ 的状况。 p_f 的大小取决于岩石的强度, 以岩石不发生破裂为限。在地壳浅部, 岩层中裂隙发育, 体系为开放的, 此时 p_f 等于相应深度流体相的重力, 而不等于上覆岩层中的重力, 又因流体的密度较之岩层为小, 故呈 $p_f < p_l$ 的状态。在封闭条件下, 当时含流体相的矿物结晶时, $p_f < p_l$ 也是可能的。

(二) 应力

应力是一种侧向压力, 它通常和地壳活动带的构造运动有关, 在一个地区它们的出现常具有阶段性, 其强度在空间上变化也很大。其单位也是Pa。在地壳中应力可以分为两大类

(伯特 (Bott, M.H.P.), 库兹涅尔 (Kusznir, N.J.) 1984): 可更新应力 (Renewable Stress) 和不可更新应力 (Non-renewable Stress)。

1. 可更新应力 指能够不受应力松弛和逐渐释放应变能的影响而连续起作用或者在环境变化后还能重新起作用的一种应力。例如, 由地幔热对流引起的软流圈对岩石圈的牵引力、岩石圈板块边界作用力; 由地表地形起伏引起岩石圈厚度不均一或岩石内部密度不均一, 形成重力异常, 较大规模出现的均衡补偿作用引起的应力等。据研究其值在 10^6 Pa 到数百 10^6 Pa 之间变化。

2. 不可更新应力 指那些具初始应变能一经释放, 应力马上消失的一种应力。这种应力是瞬间存在的, 例如, 挠曲应力、薄膜应力、热应力均属此例。

1) 挠曲应力：是指由岩层褶曲时产生的一种差应力。据瓦尔克特 (Wallcoft 1970) 估计，由负荷异常产生弯曲造成的挠曲应力可比负荷压力大4.4倍。在大洋岩石圈的俯冲带处，下部的挤压形成岩层弯曲，其挠曲应力差可达 10^9Pa 。

2) 薄膜应力：是由板块曲率半径变化造成的一种应力。板块垂直纬度方向上的运动，可引起板块曲率半径的变化。据图考特 (Turcotte, 1976) 计算，因非洲大陆移向赤道时产生的边缘拉张——东非裂谷带内最大的差应力，可达 $60 \times 10^8\text{Pa}$ 。

3) 热应力：岩石圈内地热不均一性，因热胀冷缩而形成的一种差应力。

应力产生的原因是复杂的，象变质反应中，矿物相变引起矿物体积的变化，地球自转速率的改变、以及地球以外天体对地壳的影响等等，均可造成应力差。变质作用中应力的产生大多数是上述诸因素叠加、综合作用的结果。

应力的垂直分力，可以使负荷压力值增大，使局部地区总的压力值大于负荷压力，这部分压力称为构造超压。从有些地方估算，其数值可达 $2 \times 10^8 - 3 \times 10^8\text{Pa}$ 数量级。实验表明，这种压应力只在地壳较浅部位，岩石保持刚性形态，且应变迅速时，才有意义。在地壳深处，因温度高，负荷压力大，岩石具塑性，此时应力可因塑性变形而释放，并不起附加压力的作用。

三、具化学活动性的流体

在变质作用过程中，总体上岩石是处于固体状态，但其中常存在有少量的流体相。这些流体的量虽然不大，但其作用却不小。

(一) 流体相的组成

在以硅酸盐矿物为主的岩石变质作用中，流体相的主要成分是 H_2O 。但在碳酸盐岩地层变质作用中，还会释放出 CO_2 。因此，流体相的成分，除了原来存在于沉积物毛细孔中的 H_2O 以外，还含有 CO_2 。此外，在变质作用的温压条件下，存在于岩石中的一些组分溶解到这些流体当中去，象K、Na、Si、Mg、Al、Fe、Cl、F、S等。据变质矿物中液相包裹体成分的研究表明，流体的成分，首先与变质母岩的成分有关，谢泼德 (Shepherd, T.J.) 等研究英国爱尔兰的深变质岩中包裹体成分发现，凡是流体中含较多的 CH_4 ，均与含石墨的变质母岩有关。而含 H_2O 、 CO_2 量相当者，多取自该区混合岩。其次，流体相的成分可因变质程度的不同而有差异。例如，莫里斯 (Mullis, 1979) 和弗赖 (Frey, 1980) 研究了瑞士变质岩中裂隙脉中流体包体的成分与区域变质的变质程度有关。未变质的岩石流体以 H_2O 、 CO_2 、 CH_4 以及更复杂的碳氢化合物为主体。近变质带中复杂碳氢化合物消失， CH_4 是其主要组分。低级的叶腊石变质带中 CH_4 消失， H_2O 是主体成分。中级十字石变质带中， CO_2 含量急剧增加，可高达10—60 mol%。 O_2 在流体相中起的作用是十分重要的，虽然它们的含量不到 f_{O_2} ($10^{-5} - 10^{-35}\text{Pa}$) 数量级。

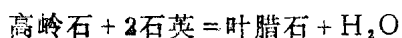
(二) 流体相的存在状态

在变质作用的温度压力范围内，在较低的温度下， H_2O 、 CO_2 等呈气或液态存在。在超临界条件下，流体是一种具许多液体性质的高密度的气体。例如， H_2O 在773K、 $2 \times 10^8\text{Pa}$ 时，密度为 0.68g/cm^3 ，在673K，同样的压力下，密度为 0.97g/cm^3 。这些流体占据着微小的裂隙和被吸附在颗粒边界上。在接近岩石初始熔融温度的变质条件下，岩石中可以存在少量成分类似岩浆的硅酸盐熔体相。

(三) 流体相的来源

变质作用过程中的流体，其来源是多种的。首先，未变质的原岩中会保存一些流体相。

例如，沉积岩中的毛细管和微裂隙中可能保存有较多的 H_2O 。另外，变质作用中会发生脱 H_2O 及脱 CO_2 的反应，这就提供相当多的流体。例如最低级变质作用中的脱水反应。



就释放出 $7w_B\%$ 的 H_2O 来。当然，变质反应释放出来的 H_2O 和 CO_2 不一定完全被保存在岩石中。第三种来源可能与岩浆活动有关，我们知道，岩浆中含有大量的挥发分，随着岩浆结晶作用的进行，这些挥发分的一部分会沿着周围的裂隙进入围岩中去。在地壳深处，上地幔中的流体相也可进入地壳中来，在变质作用中发挥作用。在大洋与大陆板块的边缘，一部分海水亦可能伴随俯冲作用进入地壳深处而参加到变质作用中来。

四、时 间

时间是影响变质作用的重要因素，在以往的变质岩的研究中，往往被人忽略。时间这一因素有两方面的涵义，一是指变质作用发生时的地质时代，二是变质作用发生开始到终止所经历的时间。从目前的研究来看，在同一地区，相同的大地构造环境中，不同地质时期发育的变质作用，具有不同的特征。随着地质历史的发展，变质作用特点的变化往往具有一定的规律性。另一方面，变质温压条件，如果没有足够的时间，变质作用就可能对原岩不起作用或作用很不明显。当有足够的时间，使变质作用得以进行时，变质岩的形成才得以实现。特别是变质结构的形成和塑性变形，都是很缓慢的进程，都需要相当长的时间才行。若考虑到变质作用的动力学特点，时间对它的控制作用就更明显。

第四节 变质作用的方式

岩石在变质作用过程中，矿物成分和结构构造都发生变化，这些变化的方式和过程极其复杂多样。变质作用的方式主要包括：重结晶作用、变质反应和变质结晶作用、变质分异作用、交代作用、变形和碎裂等。这些作用方式都受变质因素控制，同时又与原岩的特点有关。各种变质方式的机制目前仍有一些问题值得深入研究和探讨。

一、重结晶作用

重结晶作用 (recrystallization) 这一概念，首先由艾斯科拉(1939)给予明确定义，系指变质作用中除新矿物形成之外的一种单独的再结晶作用。更确切地说，重结晶作用是指在变质作用条件下，原先存在的矿物颗粒的重新组合，只有形状大小的变化，而不涉及新矿物的生成。重结晶又分初始重结晶和次生重结晶。初始重结晶是以应变晶体内部无应变颗粒的形成和生长而相互接触为特征的；无应变颗粒与应变晶体有很不相同的方位。在这个基础上如有进一步生长和界面的调整就是次生重结晶作用。重结晶包括两个步骤：

1. 成核过程 形成具高角度界面并适合于迅速生长的稳定的无应变区。
2. 生长 稳定成核颗粒的扩展和最终碰接，产生具有光滑至不规则随机界面的无应变颗粒集合体。

重结晶作用总的特点是同种矿物颗粒粒度不断加大，相对大小逐渐均匀化，颗粒外形也变得较规则。重结晶作用的强度和速度既受原岩成分和结构的控制，也与各种变质因素有关。概略地说，原岩成分是碳酸盐类和硅质岩较之砂质及粉砂质岩石易于重结晶；组分较简单的岩石比组分复杂的岩石易重结晶；原岩粒度较细者重结晶较易。流体相的存在和温度的

升高是重结晶的必要条件，温度越高越有利于重结晶作用，应力加大一般也有利于重结晶。

二、变质结晶作用和变质反应

变质结晶作用是指在变质作用的温度、压力范围内，在原岩基本保持固态条件下，新矿物相的形成过程，与此同时必有相应的原有矿物趋于消失。这种新的变质矿物的形成，很多情况下是通过特定的化学反应来实现的，这样一些化学反应就是变质反应。变质反应前后，岩石的总成分保持不变（除挥发分外）

变质反应的种类复杂，不同种类的变质反应，变质因素对它们的效应各不相同。变质反应的确定，是在对自然产出的变质岩进行详细地野外及室内观察的基础上，参考实验室的模拟实验资料及热力学理论分析进行综合的结果。关于变质结晶及变质反应的详细讨论将在第二章中进行。

三、交代作用

交代作用（metasomatism）是指变质条件下，由变质原岩以外的物质的带入和原岩物质的带出，而造成的一种矿物被另外一种化学成分上与其不同的矿物所置换的过程。由定义可知，交代作用的结果是岩石总的化学成分的改变（ H_2O 、 CO_2 变化一般不加考虑），其中新矿物的形成与旧矿物的消失是同时进行的，但不是一种注入及充填作用。交代作用进行时，岩石基本上处于固态，但其中流体相的存在是十分重要的因素。流体相起着物质搬运、迁移的媒介和催化剂的双重作用。交代作用的前后，岩石总的体积基本保持不变。

温度的升高一般有利于交代作用的进行，压力的影响较为复杂，流体相中各种物质的化学势梯度是引起交代作用的主要动力。关于交代作用的机理是一个复杂的问题，在热液蚀变岩石一章中将讨论这个问题。

四、变质分异作用

变质分异作用（metamorphic differentiation）这一概念是斯提威尔（Stillwell, F. L.）于1911—1914年首先提出，意指成分均匀的原岩，在岩石总成分不变的前提下，造成矿物组合不均匀的一种变质作用。艾斯科拉（1932）在广泛研究各种变质分异现象之后，提出了三种成因机理：结核原理（说明变斑晶的形成过程）、不稳定组分的局部溶解和最稳定组分的沉淀及局部富集。后来的变质岩岩石学家又提出了一些变质分异作用的假说。就目前看来，流体相存在是其必要条件，应力作用也是起特别重要作用的。其机理的具体细节，还有许多问题没有解决。

五、变形及碎裂

各种岩石在应力的作用下，当应力超过塑性屈服强度时，就会出现塑性变形现象，当应力超过其弹性极限时就会发生破碎裂开。变形和碎裂是变质过程中的一种重要作用，它既与岩石（包括组成它们的矿物）的力学性质有关，又与变形岩石所处的深度、应力的大小强度等因素有关。

（一）变形与碎裂

变形有脆性变形与塑性变形之分。从地质上讲，塑性变形是指没有总体破裂情况下所发生的一种形状改变；而脆性变形是有破裂发生的一种变形，这种破裂可有也可没有明显的位

移。这两者的区别取决于观察的尺度，比如，一个岩石体在某一尺度上看，可说遭受塑性变形（无总体破裂），但若以更小的尺度去看，这种变形可能是不均一的，可能会存在晶体晶格的滑移、双晶滑动、位错或小尺度的破裂。变形还包括在应力作用下有方向性的重结晶作用。这也会使矿物结晶的方位和形态发生变化而形成矿物外形及内部构造的优选方位。这即是在某一定方位上矿物颗粒稳定存在，并不断生长，而其他方向上的颗粒则不稳定，趋向分解。

（二）变形的机理

山德（Sander, B.）认为变形，特别是塑性变形，是在应力作用下组分运动的结果。这种组分的运动可分为两类：即直接运动和间接运动。所谓组分的直接运动包括矿物晶体内部的滑动和晶体颗粒之间的相对运动等等；组分的间接运动是指各种组分的原子和离子，在间隙溶液中的溶解和扩散及再次沉淀结晶的过程。实际上是在应力条件下以化学方式进行的重结晶和重新组合的作用。

第五节 变质作用的类型

变质作用类型的划分，考虑的角度不同有不同的情况。

（一）按变质作用的地质产状可以分为

1. **接触热变质** 是发生在侵入体周围接触带上，主要由岩浆侵入时带来的热能而导致的一种变质作用。这种变质作用的主要方式是重结晶和变质反应，主要的控制因素是温度。其温度范围参看图1-1。

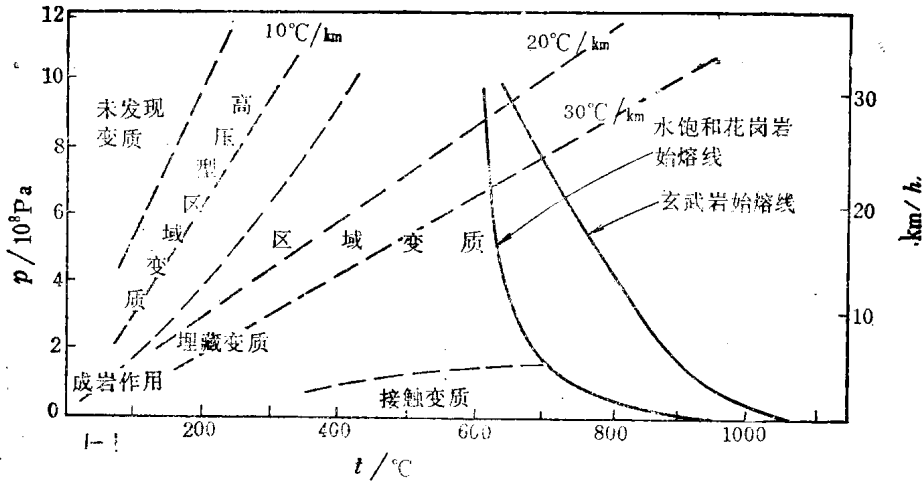


图1-1 变质作用的温压范围图解（据Ehlers/Blatt 1980 Fig.17—9改编）

2. **动力变质** 出现于断层带或构造运动强烈的地区，主要的起因是应力，主要的变质方式是变形及碎裂。

3. **气-液变质** 是一种有较多的活动性组分存在的流体相参与下，发生的一种交代作用。当这种交代作用是由岩浆侵入引起，且分布于岩体与围岩的接触带上时，则称接触交代变质。除流体相外，温度、组分的化学势是主要的控制因素，交代作用和变质反应是其主要变质方式。

4. **埋藏变质** 是岩层处于地下较深处，主要由负荷压力和地热增温引起的一种大规模

的重结晶作用，变质温度较低（见图1-1），其间没有明显的透入性运动的影响，没有片理等变形迹象。

5. **洋底变质** 是在洋中脊下面的一种大规模的重结晶作用，主要的控制因素是深部热流。

6. **区域变质** 是在岩石圈大规模的范围发生的一种多种因素综合起作用的复杂变质作用。这种变质常常伴随着构造运动的发生，在前寒武纪及造山带更为常见，有人称其为造山变质作用。这种变质还常常伴随有混合岩化、大规模的形变以及岩浆活动。

7. **冲击变质** 是由陨石与地球相撞而引起的一种局部的、短时间的、压力巨大的变质作用。以出现特殊的超高压稳定矿物为特征。

8. **混合岩化** 是介于变质作用与岩浆活动之间的一种过渡型的造岩作用。在这种造岩作用中有广泛的流体相及少量的融熔相存在，交代作用亦有较重要的意义。

（二）按照变质过程中温度的变化可分为

1. **前进变质** 系指由增温而引起的变质作用，其特征是以稳定的高温矿物组合代替较低温的矿物组合。

2. **退变质** 是指低级变质叠加于原有的高级变质作用而引起的变质。是低温矿物组合取代较高温的矿物组合的过程。退变质作用常见于大的断裂带。

3. **复变质** 是多次不同温压条件的变质事件的叠加。既可以是变质作用温度一次比另一次高，亦可反之。退变质可以看作复变质的一个特例。有人称为重变质、叠加变质或多期变质。

（三）按照区域变质作用的压力类型划分为

1. **高压型** 地温梯度 $10^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 左右

2. **高压过渡型** 地温梯度 $10-20^{\circ}\text{C}/\text{km}$

3. **中压型** 地温梯度 $20^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 左右

4. **低压过渡型** 地温梯度 $20-30^{\circ}\text{C}/\text{km}$

5. **低压型** 地温梯度 $>30^{\circ}\text{C}/\text{km}$

变质作用之压力型是与大地构造环境密切相关的。不同压力型会出现不同的压力指示矿物。其温压范围参见图1-1。

参 考 文 献

贺同兴、卢良兆、李树勋、兰玉琦，1980，变质岩岩石学，地质出版社，1—33页。

温克勒 H.G.F. 著，1976，变质岩成因，张旗、周云生译，1980，科学出版社，1—27页。

弗农 R.H.，1977，变质反应与显微构造，游振东、王仁民等译，1984，地质出版社。

Ariyushov, E. V.，1973, J. Geophys. Res. v. 78, p. 7675—7708.

Bott, M. H. P.，1984, Tectonophysics, v. 105, p. 1—13

Frey, M. et al., 1980, Eclogae. Geol. Hel., v. 73, p. 175—203.

Tomkeieff, S.I., 1981, Dictionary of Petrology.

第二章 变质反应

变质作用过程中新的变质矿物的形成，绝大多数都可以用一化学反应来描述，当然要确切地建立与实际变质过程相符的化学反应方程式，并不是一件容易的事。但是建立变质作用中的化学反应方程式是非常有意义的。第一，它提供了一种用物理化学方法确切地研究变质条件的基础；第二，从化学上理解变质过程的机制，离不开化学反应式；第三，把各种不同变质矿物组合之间的变化关系一目了然地展示在面前；第四，为变质岩的成岩过程的划分提供出了一条令人信服的界线；第五，为用实验模拟过程提供了投料和设备装置技术要求的基本数据。如此等等，还可以列出一些。总之，变质反应类型、各种变质因素对变质反应的制约、变质反应的机理等是近代变质岩成因研究中极其重要的内容。

变质过程中化学反应有其特点，这种反应基本上是在固态下进行的。因此控制该反应的温度应在对应的原岩熔融作用的固相线之下。流体相既可以是催化剂，也可以直接参加反应，多数情况下，把它当作变量来考察。变质反应的起因是外部因素的变化，其直接的驱动力是体系自由能的降低。另外，变质反应中平衡是存在的，不平衡的情况也大量存在。

相应于升温过程的变质反应称为正向反应。变质反应在升温过程中表现出明显的矿物转化，反应速率随温度升高呈指数倍增加。但与降温过程相应的退级反应，如果没有其他因素（特别是流体相），则反应速率极其缓慢。这是形成于地壳深处的变质岩在地面得以保存的原因。

第一节 变质反应的类型

变质反应按照反应物和生成物的性质可以划分出不同的反应类型：

（一）固体 $\rightleftharpoons$ 固体反应

这种反应反应物和生成物均不涉及流体相，其控制因素主要是温度和压力。进一步划分还包括：

1. 同质多像变体的转变

例如：
$$\text{Al}_2\text{SiO}_5 \rightleftharpoons \text{Al}_2\text{SiO}_6$$

红柱石矽线石

2. 固溶体的出溶

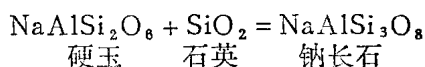
高温条件固溶体为均一的一相，随着温度的降低会在固相线温度之下，发生出溶现象，生成页片状或条纹状交生体，甚至最终离溶为两个矿物单晶。象单斜辉石中的斜方辉石页片，有些条纹长石即为此种固-固反应的结果。

3. 矿物有序状态的转变

长石类矿物中Al-Si占位有序度会随着T的变化而变化，某些铁镁矿物中Mg-Fe的占位也有有序一无序转变的问题，高镁方解石、白云石类矿物中存在着Ca-Mg占位有序度的问题。这种矿物有序度的状态，在变质作用中也会发生变化，其实质也可为固-固反应。

4. 纯固相之间的反应

这一类一般指化学成分不同的固相之间相互反应形成新的固相矿物。例如：

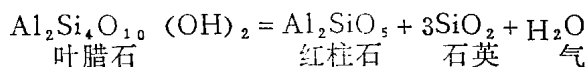


(二) 有流体相存在的反应

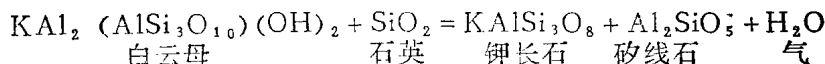
这类反应，与固相反应之间最大的差别，是有流体相的参加，变质反应中起重要作用的流体相主要是 H_2O 、 CO_2 、 O_2 。有时它们各自参加反应，有时它们中的两个或两个以上组分同时参加反应。其控制因素除 T 、 p 外，体系的流体相的 $x_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 x_{CO_2} 、 f_{O_2} 等起着重要的作用。为了研究的方便，还可进一步的分为：

1. 水化和脱水反应

含 H_2O 矿物在变质过程中常以这种方式发生矿物相的变化。如：



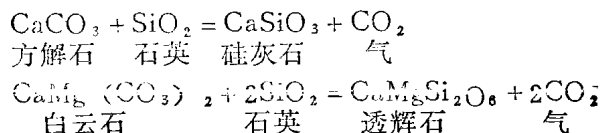
又如：



2. 碳酸盐化与脱碳酸反应

原岩为碳酸盐质的岩石，在变质过程中，经常发生这类反应。

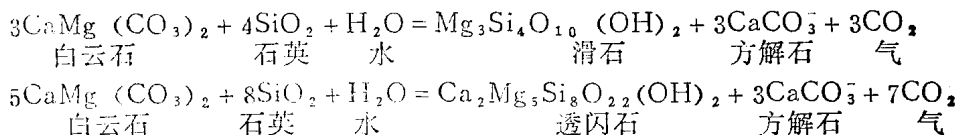
例如：



等等

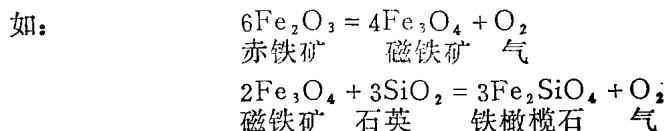
3. H_2O 及 CO_2 同时存在的反应

在很多含泥的碳酸盐岩中以及一些含碳酸盐矿物的其他成分的岩石中 H_2O 和 CO_2 往往同时参加反应。例如：



4. 氧化-还原反应

当含有变价元素的矿物存在时，在变质作用过程中，因 f_{O_2} 的变化，常常会发生这一类的化学反应。



(三) 连续反应和不连续反应

上面提到的变质反应的类型，反应物和生成物都是纯相，当反应物消失时，生成物就形成了，这种反应物与生成物之间的关系是一种突变的关系。当反应偏离了平衡的温度、压力条件之后，假定反应不因时间的限制而中止，且有足够的时间使反应进行下去，不是反应物稳定，就是反应物消失（即生成物稳定），这类反应的性质就是不连续的。但是当反应物和生