



第一章 总论

第一节 变质作用和变质岩的概念



本章重点

1. 变质作用的概念和主要类型；
2. 变质岩的概念；
3. 变质作用的制约因素和变质作用方式；
4. 变质岩的基本特征和成因分类。



本章难点

1. 变质作用的主要类型与变质作用方式；
2. 变晶矿物、变质岩结构和构造的类型及其认识与区别。



参考书目

在学习和应用“变质岩”部分的知识时，可进一步参考下列文献和书籍：

贺同兴等，1988，变质岩岩石学，地质出版社

王仁民等，1989，变质岩石学，地质出版社

温克勒，H.G.F.，1876，变质岩成因，张旗等译，
科学出版社

弗农，R.H.，1976，变质反应与显微构造，游振东
等译，地质出版社



参考书目

王嘉荫, 1978, 应力矿物概论, 地质出版社

王仁民等, 1987, 变质岩原岩图解判别法, 地质出版社

Miyashiro, A., 1973. Metamorphism and metamorphic belts, George Allen and Unwin Ltd. London

Spry, A. 1949, Metamorphic textures, Pergamon Press Ltd. London



1.1 变质作用和变质岩的概念

1.1.1 变质作用和变质岩

变质作用 (metamorphism)

由地球内力作用引起物理、化学条件的改变，使地壳中已形成的岩石在基本保持固态状态下，原岩组分、矿物组合、结构、构造等方面发生转化的过程。

变质作用是三大造岩作用之一，也是地壳演化的重要机理之一。



1.1.1 变质作用和变质岩

变质岩 (metamorphic rock)

由变质作用所形成的岩石。

按原岩石类型将变质岩分为三类：

由岩浆岩形成的变质岩称为正变质岩；

由沉积岩形成的变质岩称为副变质岩；

变质岩再变质称为复变质岩，或叠加变质岩。



1.1.1 变质作用和变质岩

变质岩在地球的发展演化过程中占有重要的地位。前寒武纪（地壳形成历史四分之三以上的时间）的岩石几乎全部是变质岩。变质岩的分布约占大陆面积的五分之一以上。

变质岩在我国分布很广，从太古宇至新生代都有变质岩的形成，但多数分布在古老的结晶地块和古生代以来的造山带、构造活动带中。

因此，对变质作用和变质岩的研究有其重要的理论和实际意义。



1.1.2 变质作用的制约因素

变质作用的制约因素，即引起岩石发生变质作用的主要是内部因素（地质因素），外部因素（物理、化学方面的）也很重要。

外部因素主要有三：

- 1) 温度 (T)
- 2) 压力 (P)
- 3) 具有化学活动性的流体 (C)



一、温度 (T)

在变质过程中，温度是一个重要的因素。大部分变质作用是在温度升高的情况下发生的。如：



在上述反应中，温度升高反应向右进行，温度降低则向左进行。

结论： 温度的变化可决定变质作用的方向。



一、温度 (T)

温度引起的变质作用主要表现为：

(1) 促使矿物重结晶，从而使原岩的结构、构造发生改变，而岩石组分基本不变。如石灰岩重结晶成大理岩。

(2) 促进变质反应的进行，使组分重新组合，致使矿物成分和结构、构造都发生改变。如白云母分解形成矽线石 + 钾长石组合。



一、温度 (T)

引起变质作用的热源，目前一般认为有五方面：

- (1) 岩浆热
- (2) 地热增温率
- (3) 构造热
- (4) 蜕变热
- (5) 地幔热流

关于变质作用的温度下限，根据浊沸石等开始出现的温度大约在 $180^{\circ}\text{C}\sim 230^{\circ}\text{C}$ 左右（与沉积岩的后生成岩作用过渡）；温度上限是根据深熔实验确定的，约为 $700^{\circ}\text{C}\sim 900^{\circ}\text{C}$ （与岩浆作用过渡）。



二、压力 (P)

压力是变质过程中另一个重要的因素。通常与温度一起制约着大多数变质作用的进行。

按照压力的来源可分为三种：

负荷压力

流体压力

应力



1. 负荷压力 (P_l)

指地壳一定深处岩石所承受的上覆岩层的重力。

一般认为在地表下0~40km范围内，随着深度的增加，均向压力约以平均为0.0275GPa/km的增压率增加。

在一定的温度下，由于均向压力的增加，往往形成相对密度较大，分子体积较小的矿物。

一般认为：变质作用中压力的范围为<0.1GPa至1~1.2GPa，即换算成正常地下深度为3km~40km。



2. 流体压力 (P_f)

流体主要由岩石中存在的挥发分。

在不同的条件下，流体压力对变质作用的影响是不同的，通常有三种情况：

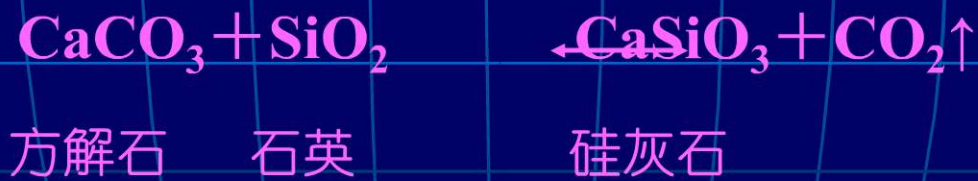
- ①在深度超过10km，裂隙、节理不发育，处于封闭体系，为粒间流体，故 $P_f = P_l$ ， P_f 为非独立的变量。
- ②在地壳的较浅部位，节理裂隙发育，流体相自由流通，成为开放体系，则 $P_f < P_l$ 。
- ③在岩浆侵入体大量逸出挥发分的接触带，局部变成 $P_f > P_l$ 。



2. 流体压力 (P_f)

当处于②、③两种条件时, $P_f \neq P_l$, 这时 P_f 成为影响变质反应平衡的独立变量 (因素)。

这在脱水和脱碳酸盐化的变质反应中是很重要的。如反应:



由于流体中 CO_2 的含量不同, 引起 P_{CO_2} 的变化, 平衡的温度也不同。见下图3-1。

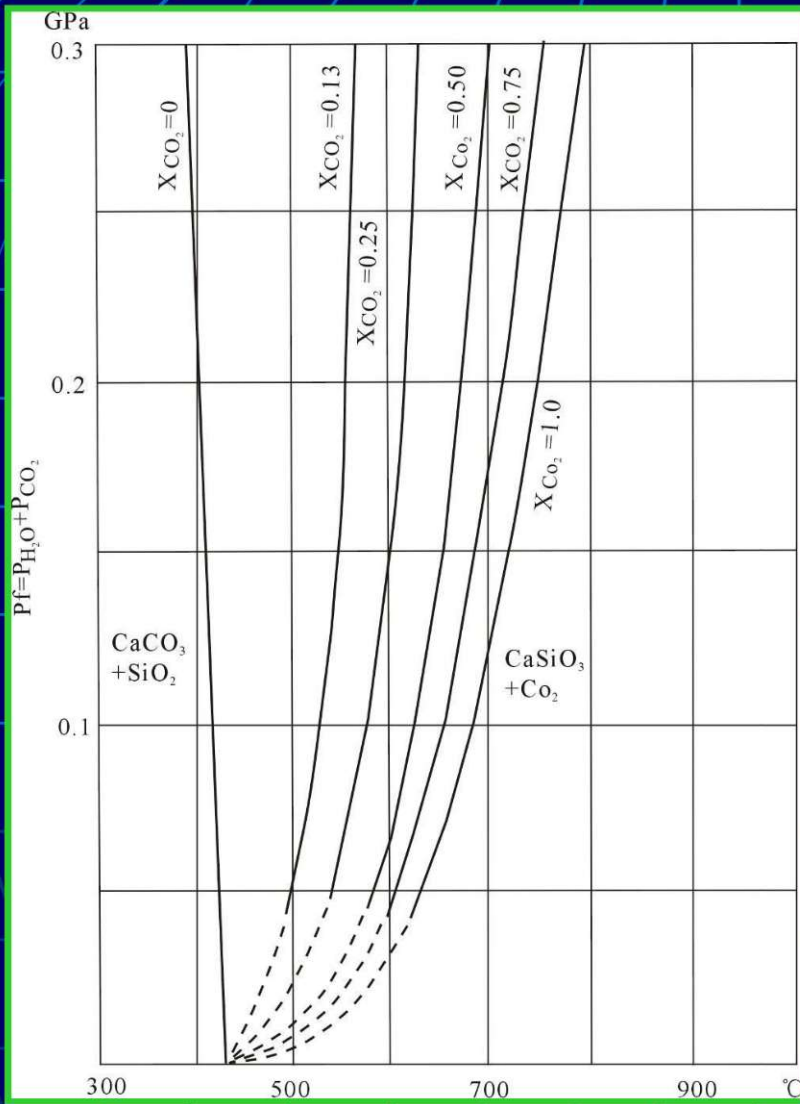


图3—1 温度、流体压力、流体中CO₂的含量（以摩尔分数表示）与CaCO₃+SiO₂=CaSiO₃+CO₂的平衡关系图（按格林伍德，1962；X_{CO₂}即CO₂的摩尔分数）

结论：流体压力能影响变质作用的温度。



3. 应力 (P_s)

主要指由构造运动或岩浆活动所引起的侧向挤压力。

岩石在应力作用下，当超过其弹性极限时可发生变形；而在超过其强度极限时则发生破碎。

应力可使矿物发生变形、破裂及光学性质上的改变。例如：云母、长石的扭折、石英的压碎和波状消光、方解石的变形双晶等。



3. 应力 (P_s)

在应力的参与下还可以引起：

变质岩中某些定向构造的形成（线理、片理、流劈理等）；

促进粒间流体的活动；

应力作用的结果是：

加速变质作用的进行，提高变质反应的强度。



三、具有化学活动性的流体（C）

化学活动性的流体，通常指的是气态或液态的水溶液，因为在水溶液中经常含有不同数量二氧化碳、硼酸、盐酸、氢氟酸和其它挥发分，这些物质大大增强了水溶液的化学活动性。

这些流体在变质过程中所起作用有四：

①在岩石孔隙和裂隙中的粒间溶液，由于压力差或浓度差而产生流动，与周围岩石发生交代作用，即造成组分的迁移（带出或带入），形成与原岩组分迥然不同的变质岩石。



三、具有化学活动性的流体 (C)

② 粒间溶液对矿物彼此间的反应还能起到接触剂的作用，通过这种溶液作媒介，促进组分的溶解和沉淀，从而促进矿物的重结晶和变质结晶。

③ 水和碳酸等还直接参与组成含水和含碳酸的矿物，影响水化（降温）和脱水作用（升温）、碳酸盐化和去碳酸盐化作用的进行。如：





三、具有化学活动性的流体 (C)

④水溶液对岩石的重熔温度影响也很大。花岗质岩石在干体系时温度要高达 950°C 才开始重熔；而在湿体系时，在 $640 \pm 20^{\circ}\text{C}$ 就开始重熔。

具有化学活动性的流体，在变质作用中是普遍而重要的，但在一般情况下，不作为变质作用中的一个独立的强度因素。

结论： 只有在温度和压力的共同参与下，才能作为影响变质作用的因素之一。



变质作用因素小结

在变质过程中，一般情况下，温度作为主导因素，配合着压力和具有化学活动性流体的活动。

另一方面，变质作用还与原岩的内部因素（物质组分、结构、构造等）密切相关，例如：石灰岩经变质后发生重结晶形成大理岩，而处于同样变质条件下的石英砂岩几乎可以没有明显的变化。

因此，在研究变质作用因素及其变质过程时，应结合地质情况和变化特征进行综合分析研究。

1.1.3 变质作用的方式

变质作用方式——变质作用过程中，导致岩石的矿物成分，结构构造转变的机制。

主要的变质作用方式有五种：

重结晶作用

变质结晶作用

交代作用

变质分异作用

变形和碎裂作用



提示：

不要将
变质作用方式
与变质作用类
型两者相混！



1. 重结晶作用 (recrystallization)

原岩中的矿物发生溶解、组分迁移、再沉淀结晶，致使矿物形状、大小变化，而无新矿物相形成的作用。

例如：石灰岩因方解石在变质作用过程中发生重结晶变成大理岩。

因此，重结晶作用是在封闭体系中发生的， T 为主导因素， P 为非独立因素， C 只起到溶剂和载体的作用。



2. 变质结晶作用 (metacryatellization)

变质作用过程中，原岩中的化学成分重新组合而形成新矿物的作用。

矿物相的转变是通过变质反应来实现的。

变质反应的种类很多，如：

固体 \longleftrightarrow 固体反应（如红柱石—蓝晶石—矽线石之间的多象转变）；

水化或脱水反应（如白云母+石英 \longleftrightarrow 钾长石+红柱石或矽线石+水）；等等。



2. 变质结晶作用 (metacryatellization)

因此，变质结晶作用基本是在封闭体系中发生的，T为主导因素，P、C为非独立因素；有新矿物的形成，可有原矿物的消失，但体系的化学组分不变，矿物相数可变。



提示：

变质结晶与重结晶的区别在于
是否有新矿物的形成！



3. 交代作用 (metasomatiam)

在变质作用过程中，由于流体相运移，发生物质组分的带入、带出，引起组分间复杂置换的作用。

交代作用的结果是使原岩的化学成分发生改变。在交代作用过程中，新矿物的形成与旧矿物的消失是同时进行的。例如：



反应过程中，两种长石共存，反应结束只有一种长石存在。



3. 交代作用 (metasomatism)

因此，交代作用是在开放体系中发生的，T和C为主导因素，P则配合着起作用；

有新组分的加入和新矿物的形成，原有组分有迁出，原矿物的消失，体系的化学组分和矿物相数均有变化。



提示：

交代作用与变质结晶的区别在于有组分的带入和迁出！

4. 变质分异作用 (metamorphic differentiation)



成分、结构构造均匀的原岩，经变质作用形成矿物成分、结构、构造不均匀的各种作用。

这是由于温度、压力（包括应力）和溶液影响下，使岩石中某些组分发生局部迁移、聚集和结晶形成的。



矿物分带现象



4. 变质分异作用 (metamorphic differentiation)

因此，变质分异作用是在相对封闭的体系中发生的，T、C、P均可为主导因素。

一般情况下，没有新组分的加入和新矿物的形成，原有组分也无有迁出；但出现组分和矿物的分带现象。



提示：

变质分异作用的关键
在于出现分带现象！



5. 变形作用 (deformation)

在应力作用下，岩石和矿物发生变形和破碎的作用。

由于应力超过了岩石和矿物的弹性极限，就会出现塑性变形；当超过强度极限时，则发生破裂和破碎。此外还可伴随应力作用下的重结晶和变质结晶，从而改变了原岩的岩性。

变形的强度与应力大小、作用方式、持续时间和岩石所处深度及其本身的力学性质有关。



5. 变形作用 (deformation)

因此，变形作用是在封闭 - 开放的体系中发生的， P_s 为主导因素， T 、 C 也可是主导因素。

一般情况下，可出现重结晶和变质结晶；开放条件下则有现组分变化；也可见矿物的分带现象。



提示：

变形和碎裂作用的关键
在于岩石和矿物的形变！



1.1.4 变质作用的类型

根据地质成因、变质作用因素和变质作用方式，将变质作用分为五种类型：

热接触变质作用

动力变质作用

气液变质作用

区域变质作用

混合岩化作用



1. 热接触变质作用 (contact thermal metamorphism)

由岩浆体散发的热量，使接触带围岩发生变化的一种变质作用。

原岩主要发生重结晶和变质反应（变质结晶），可以有新矿物相的形成，而化学成分没有显著改变。

该过程一般为封闭一半封闭体系；控制作用的主导因素是温度（低—高）；压力低（非独立因素），流体仅起促进重结晶和变质结晶的作用。



2. 动力变质作用 (dynamometamorphism)

在构造运动产生的定向压力作用下，岩石所发生的变质作用。

作用过程中，重结晶或变质结晶作用不强烈。其展布往往与断裂带有关，故常呈带状分布。

该过程一般为封闭一半封闭体系；控制作用的主导因素是压力（低—高）；温度较低（低—中，可为独立因素），流体通常起促进重结晶和变质结晶的作用，有时可加入矿物相。

3. 气液变质作用 (pneumatolytic hydrothermal metamorphism)



具有化学活动性的气态或液态流体，对岩石进行交代而使岩石发生变质的一种作用。

当这种流体来自于岩浆体时，使接触带围岩和岩体发生交代作用，称为**接触交代变质作用 (contact metasomatic metamorphism)**。

交代过程为开放体系；温度（低—高）和具有化学活动性流体是主导因素；压力低（非独立因素）；组分有带入迁出，矿物相有更替。



4. 区域变质作用 (regional metamorphism)

由于区域性热流异常，伴有压力作用、有时有流体相加入等作用因素复杂所形成大面积分布变质岩的一种变质作用。可进一步分为四种：

区域埋藏变质作用

区域动力热流变质作用 (简称区域动热变质)

区域热流动力变质作用 (简称区域热动变质)

区域中高温变质作用



(1) 区域埋藏变质作用 (regional burial metamorphism)

随着埋藏深度的变化，在负荷压力和地热增温率的影响下，岩石发生重结晶和变质结晶的变质作用。

作用过程的特点是：

主导因素为T、P/;

基本上无化学组分的变化;

不形成新的定向构造;

可形成新的矿物相，通常为低温中 - 低压矿物组合。



(2) 区域热流动力变质作用 (regional thermal dynamometamorphism)

在区域性应力和温度影响下，岩石发生变形、重结晶和变质结晶的变质作用，亦称为**造山变质作用**。

作用过程的特点是：

主导因素为 P_s 、 T ；

变形强（由浅至深从脆性过渡为韧性），发育广泛的定向构造（区域性劈理→板理→片理）和复式紧闭褶皱；

有同构造花岗岩，但无混合岩化；

一般形成低-高压的中-低温矿物组合；

主要见于中生代以来的造山带。

(3) 区域动力热流变质作用 (regional dynamic thermal metamorphism)



在区域性温度和压力影响下，岩石发生重结晶、变质结晶和变形的变质作用。

作用过程的特点是：

主导因素为 T 、 P_s ，可有 C 加入；

地幔上隆产生的热流呈点状、轴状分布，形成中-低温、中-低压矿物组合，构成递增变质带；

发育广泛、复杂的岩浆和混合岩化、变形；

常形成古造山带、褶皱基底岩系。



(4) 区域中高温变质作用 (regional thermal metamorphism)

在区域性温度和压力伴有流体相的影响下，岩石发生重结晶、变质结晶和变形的变质作用。

作用过程的特点是：

主导因素为T、P，常有C；

与大面积热流异常有关，岩浆（原地—半原地的）、混合岩化广泛；

变形发育，常见高温流变现象和叠加褶皱；

变质程度（变质带和变质相分布）与地层层序一致，形成中—低压的中—高温矿物组合；

常形成太古宇结晶基底。



5. 混合岩化作用 (migmatitization)

在区域变质作用基础上地壳内部热流继续升高，便产生深部热液和局部重熔熔浆的渗透、交代并贯入变质岩中，形成混合岩的一种变质作用。

作用过程为开放体系；温度（低—高）和具有化学活动性流体是主导因素；压力低—中（可为独立因素）；交代现象普遍，组分可有带入迁出，矿物相有更替。

下图表明了上述变质作用的温压及相互关系。

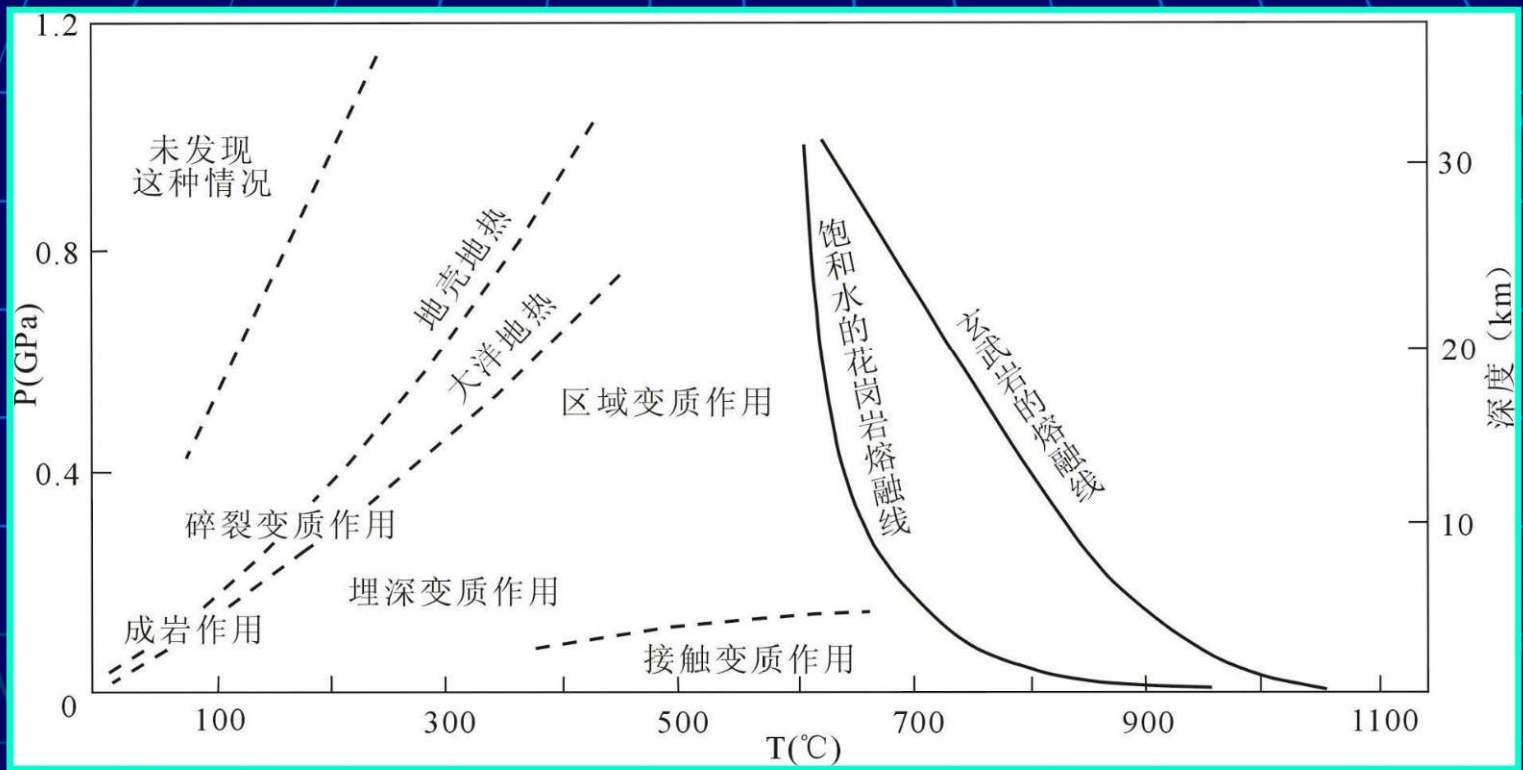


图3-2 变质作用的主要类型及其温度、压力范围示意图
(引自Ehler, E.G. 等, 1962)



6. 其他类型的变质作用

在地壳演化过程中，变质作用常常具有多期次特点，称之为复变质作用。

复变质作用 (polymetamorphism)：亦称**叠加变质作用**，指岩石经受不同期次变质作用的叠加。

进一步分可为两种：

退变质作用 (retrogressive metamorphism)：原来比较高温的变质矿物共生组合被较低温的矿物组合所取代的复变质作用。

(前)进变质作用 (progressive metamorphism)：与退变质作用相反。



6. 其他类型的变质作用

此外，还有一些特殊的或局限的变质作用，如：

洋底变质作用：在大洋中脊形成的富钠质和水的中—低级变质矿物组合的变质作用。

冲击变质作用：陨石坠落于地表形成的瞬时高温高压矿物组合的变质作用。

高热变质作用：亦称为烘焙变质作用，为岩流底部使地表岩石产生高温接触变质的变质作用。

极低级变质作用：介于后生成岩作用与低级变质作用之间（由伊利石的结晶度参数 $K.I(^\circ 2\theta)$ 表达： $0.25 < K.I(^\circ 2\theta) < 0.42$ ）。