变质反应与显微构造

R·H 弗农 著

.3
48

地质出版社

变质反应与显微构造

R. H. 弗农 著

游振东
王仁民 等译

地质出版社

Metamorphic Processes

Reactions and Microstructure Development

R. H. Vernon

Macquarie University, Sudney, Australia

London

A Thomas Murby publication of

George Allen & Unwin Ltd

变质反应与显微构造

R. H. 弗农 著

游振东
王仁民 等译

地质矿产部书刊编辑室编辑

责任编辑：马志先

地质出版社出版

（北京西四）

地质出版社印刷厂印刷

（北京海淀区学院路29号）

新华书店北京发行所发行·全国新华书店经售

开本：850×1168 1/32 印张：7 1/4 字数：185,000

1983年3月北京第一版·1983年3月北京第一次印刷

印数：1—3,010册、定价：1.50元

统一书号：15038·新912

译 者 的 话

随着地质研究工作的进展，发现许多矿产资源分布与变质岩及其形成过程关系十分密切。但变质岩是怎样形成的？这是一个复杂的问题，专门讨论这类问题的著作很少。R. H. 弗农（Vernon）的这本书《变质反应与显微构造》主要研究较为微小尺度上的变质过程，而这正是一般岩石工作者所特别感兴趣的。

书的原名叫《变质作用过程》副题是《反应与显微构造的发育》，为了突出所论述的问题，把书名改为《变质反应与显微构造》。

在这本书中作者比较全面地考虑了变质过程中化学和物理两个方面。矿物学（化学）和显微构造（物理的）观察方法相结合是R. H. 弗农在这一领域中突出成就之一。

作者在变质反应方面，强调了详细研究实际变质反应的必要性及其有关的基本概念和方法，其中包括物化原理的运用；显微构造研究方面不仅介绍了一般显微构造的发育过程，而且较详尽地论述了某些常见硅酸盐矿物的变形恢复和重结晶，以应用于岩石学方面。许多精细的岩石学研究均涉及矿物微区的变异，如石榴石的环带构造等。在这方面，作者广泛利用了电子探针的资料。在显微构造研究中，作者广泛引用了透射电子显微镜的研究成果，并阐明了这些成果的岩石学意义，这种处理方法是一般变质岩著作所不多见的。

原版书未附有内容索引，译本中取消了。但在有关名词术语首次出现时加注了英文原名。本书的特色之一是在每章后面均附有较详尽的较新的参考文献，译本中均予以保留，以便深入研究者查阅参考。

序　　言

这本书是供那些想要洞悉变质岩石学的现代研究方法的大学高年级学生和研究生用的。本书的目的，用比较简单而又非正式的术语来说就是解释变质岩中（i）变质反应和（ii）显微构造产生的过程。从地质上来讲，这些是当前使我最感兴趣的。第一个目的要求讨论平衡因素、反应动力学和反应机制，并强调实际反应的复杂性以及把与之有关的化学方法和显微构造方法结合起来的必要性。第二个目的要求讨论变形、恢复、重结晶和颗粒生长的过程，侧重于对硅酸盐矿物的实验。本书结束时，概括论述变质作用中的化学过程和物理过程，虽然通过阅读前面的一些章节（特别是第四章）就可以清楚了，然而在详细研究变质作用时，这两方面很少能完全分开。

最近以来，从岩石学方面对变质反应和显微构造的发展所进行的实验研究是这样迅速，使得学生们面对着的是不断增长的情报和相当快就过时的资料。所以，在本书里，我不打算面面俱到，或者是提供所谓“实际”资料。相反，我将更多地论述基本原则，希望学生在详细研究有关变质作用的具体问题时，能够得到这些原则的指导。我选择了对某些矿物的某些反应和变形、重结晶的分析研究，以供较详细的讨论，但这仅作为所采用方法的例子，相图使用极少，主要是合理使用计算和实验资料，我认为这些资料目前来讲是比较好的；再说一遍，这些仅仅是使用某一方法的实例而已。

参考文献能够使对此感兴趣的学生得以利用当前的最新资料，从这些资料中，他们可以看到表明现代变质岩石学的特征的人类努力和斗争的例证，正如人们在所有科学领域里所做的那样，在这样一种简单的书本里，是不能将这种情况充分表达出来

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

的。为方便起见，主要的参考文献列在每一章的末尾，并且在正文和插图说明里提到时在右上角用数目字标出，更为具体的，而不是一般性的补充参考文献，见于某些插图的说明中。全书通用的略语的解释列于正文之前。

我要感谢雷·宾斯（Ray Binns），伊恩·邓肯(Ian Duncan)，迪克·弗拉德（Dick Flood），维克·沃尔（Vic Wall），保罗·威廉士（Paul Williams），和克里斯·威尔逊（Chris Wilson），他们审阅了原稿的各个部分。我特别要感谢埃里克·埃森（Eric Esscne)和维克·沃尔允许我使用他们的一些未发表的关于相图的资料（图2.7，2.14，4.4，4.5，4.12），感谢迈克·埃斯里奇（Mike Etheridge）允许我使用图7.4，感谢伊恩·邓肯，他的批评意见不仅改进了本书，而且还使我得知他何以没有对第一稿引为基础的讲稿发表意见。我也真诚的感谢阿莉森·科提森(Alison Coates)，蒂娜·特普斯特拉(Tima Terpstra)南尼特·麦哲西一林伦（Nanette Madjlessi-Leenen)，谢丽·奈特（Sherry Knight)，迪安·奥莉夫（Dean Oliver)，雷德·巴什福德和迪克·弗拉德在准备和组织打字原稿、图表的过程中，他们提供了宝贵的帮助。阿莉森·科提斯进行了大量的打字工作，保证了我的拼写和语法比较严整，对此我特别感激。本书开始写于马阔里大学，结束于莱顿（Leiden）大学（蒙H. J兹沃特教授的好意）。我非常感谢这些机构所提供的技术帮助。

1974年7月于澳大利亚，悉尼

马阔里大学　地球科学学校

主 要 代 号

G 吉布斯自由能

Δ 某一反应所含数量的变化

T 温度（一般文字中为常用温度；热力学公式中为绝对温度）

P 围限压力

V 体积（常用的）

V 蒸汽（用于化学反应时）

S 熵

x_i 溶液中组份 i 的克分子分数

a_i 组份 i 的活度

f_i 组份 i 的逸度

n_i 组份 i 的分子数

″ 化学位

μm 微米（$=10^{-6}$米）

kb 千巴（$=10^{8}$帕斯卡）

ke 千卡

R 通用气体常数

D 扩散系数

Q 活化能

ln 自然对数

K 平衡常数

P 相数

C 组份数 } 在相律中

F 自由度数 }

b 位错的布吉斯向量

γ 界面自由能

$\bar{\sigma}$ 平均应力

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 主应力轴

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 有限应变的主轴

$\dot{\epsilon}$ 应变速率

目　　录

译者的话
序　言
主要代号
第一章　绪论……（1）
一　引言……（1）
二　变质作用的范围……（1）
三　变质作用的温度和压力……（5）
四　变质作用下物质的运移……（6）
五　矿物组合（“共生组合”）……（7）
六　变质岩的显微构造……（7）
七　变质岩的优选方位……（8）
八　变质级……（9）
九　变质相……（10）
十　变质作用的构造位置……（13）
参考文献……（14）
第二章　变质反应的平衡方面……（15）
一　引言……（15）
二　变质反应的驱动力……（16）
三　变质反应的类型……（17）
四　变质反应的变量数……（20）
五　变质反应及所产生的组合……（23）
六　等变线上的滑动反应……（24）
七　一相对另一相稳定性的影响……（24）
八　变质矿物稳定共生的标准……（27）
九　局部（镶嵌）平衡的范围……（28）

十　变质相图的拓扑学计算（施赖尼马克斯分析）…（29）
十一　反应曲线斜率的计算……（31）
十二　反应曲线的实验测定……（35）
十三　实验反应的往返……（36）
十四　计算的和实验测定的反应曲线之间的矛盾……（37）
十五　变质作用中的开放体系……（38）
十六　变质作用中的流体相……（39）
十七　流体相的压力……（43）
十八　流体压力对反应曲线的影响……（43）
十九　流体相成份（混合挥发组份的逸度）对反应曲线的影响……（46）
二十　氧逸度的作用……（53）
二十一　共生的磁铁矿和钛铁矿……（57）
二十二　fO_2对无变价阳离子的含水硅酸盐的影响……（57）
二十三　共生矿物之间元素的分配……（57）
参考文献……（59）
第三章　变质反应的动力学……（63）
一　引言……（63）
二　变质作用中的扩散……（67）
三　成核作用与生长……（74）
四　反应动力学在变质作用中的应用……（77）
五　变质矿物中的环带……（80）
六　变质岩中文石的问题……（80）
七　方解石＋石英⇌硅灰石＋CO_2的反应动力学……（83）
参考文献……（84）
第四章　变质岩中的反应……（86）
一　引言……（86）
二　变质反应的机理……（86）
三　在变质泥质岩体系中的反应……（90）
四　在镁铁质和超镁铁质体系中的反应……（105）

五　P-T-X 平衡现有的实验与理论判定在多大程度上是恰当的？……(111)
六　退级反应……(113)
七　包括环带状矿物的反应……(115)
八　包括环带状石榴石的反应……(117)
九　变质作用过程中的成分变化（变质分异作用）…(120)
参考文献……(122)
第五章　稳定的变质显微构造……(125)
一　引言……(125)
二　不稳定的颗粒排列……(126)
三　无向性单相集合体中稳定的颗粒排列……(126)
四　有向单相集合体……(128)
五　多于一相的集合体……(129)
六　变质岩中颗粒的空间分布和粒度分布……(133)
七　固态下颗粒调整的环境……(136)
参考文献……(137)
第六章　变形、恢复和重结晶过程……(138)
一　引言……(138)
二　脆性与韧性变形的比较……(138)
三　晶体的塑性……(138)
四　粒内塑性变形的主要形式……(139)
五　变形的次生形式……(140)
六　位错……(143)
七　位错是怎样助长变形的？……(143)
八　位错的实验检定法……(146)
九　位错的活动性……(147)
十　位错的产生……(148)
十一　位错与工作硬化、软化的关系……(149)
十二　部分位错……(150)
十三　非金属中的位错……(150)

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

十四　表面的不完整性……(151)
十五　颗粒界面对变形（粒间变形）的影响……(156)
十六　恢复与重结晶……(157)
十七　重结晶所产生的结晶优选方位的发育……(159)
十八　变形所产生的优选方位的发育……(159)
十九　一些概括……(160)
附录：滑移系统的检定法……(161)
参考文献……(163)
第七章　几种常见硅酸盐矿物的变形、恢复和重结晶……(164)
一　引言……(164)
二　石英……(164)
三　橄榄石……(179)
四　层状硅酸盐……(185)
五　斜长石……(195)
引言……(195)
斜长石的实验变形……(196)
斜长石的天然变形……(197)
斜长石的实验重结晶……(197)
斜长石的天然重结晶……(198)
六　小结……(199)
参考文献……(201)
第八章　变质作用中化学过程与物理过程之间的关系……(205)
一　引言……(205)
二　化学反应对岩石机械性质的影响……(205)
三　差异变形对矿物组合的影响……(206)
四　由于一些矿物的优先移出而形成的变质层理的实例……(208)
五　大规模交代作用和变形……(211)
六　伟晶岩和变形……(211)
七　混合岩……(212)

八　变形与矿物生长的时间关系……(214)
九　溶解转移……(217)
十　旋节分解……(218)
参考文献……(219)

第一章 绪 论

一、引 言

我想你们在基础地质学课程及后来的岩石学课程中已经接触过变质矿物和变质岩，而且了解到了主要从化学、矿物学或野外的观点来探讨变质作用的最重要的教科书。[9、12、16]本书中，我将集中详述变质反应与显微构造，特别是为更充分地了解他们而需要把化学过程和物理过程联系起来的哪些方面。这一章将讨论变质作用的某些方面，它们是本书其余部分所必须的背景材料。

二、变质作用的范围

在固体状态下的岩石蚀变能够发生于范围广泛的地质环境中。某些类型的岩石蚀变照例是和变质作用分开的，例如风化作用就不能包括在内，因为它发生于大气条件下。然而按某些人的定义另一些蚀变过程则可过渡到变质作用。例如一般所谓沉积岩的“成岩作用”（沉积矿物因埋藏而发生胶结与变化）就过渡到变质作用的开始，所谓“埋藏变质作用”。然而，除了发生于大气条件下的最早期的成岩变化之外，我有理由对大部分成岩反应使用“变质的”这一词，由于岩石主要保持固体状态，且处在地壳的而不是大气的P-T条件。所以我把“成岩作用”的大部分看作是埋藏变质作用，因为我发现不可能在二者之间划出一条有效的界线。

通常用于表达特定的变质环境的术语包括“埋藏变质作用”、“围岩蚀变”（热液矿体周围）、“地热蚀变”（在次火山岩地

热区）和“岩浆后期蚀变”（主要或全部在结晶的岩浆岩侵入体之中）。这些术语的意义在于它们指示了发生变质作用的地质环境。但是当我们考虑变质矿物组合的形成条件时它们就没有意义了。这些矿物与温度、压力以及活动组份活度改变的影响等有关，而不论这些约束力是如何加于它们的。因而它们只取决于以同样的方式所施加的同样的一组条件，而与所处的地质环境无关。例如，同一种矿物组合可以形成于（a）岩浆岩的后期蚀变，（b）热液矿体附近的围岩蚀变，（c）围绕岩浆岩侵入体的最低级的接触蚀变，（d）沉积岩—火山岩系的埋藏变质和（e）地热区局部或区域性的蚀变。

变质作用通常划分为两大类：形成于岩浆岩侵入体周围的接触（热）变质作用；以及变质岩形成于区域规模的区域变质作用。但是在这两类变质作用中也可以形成同样的矿物组合。因此，当代的趋势是把变质作用划分为三个彼此过渡的负荷压力类

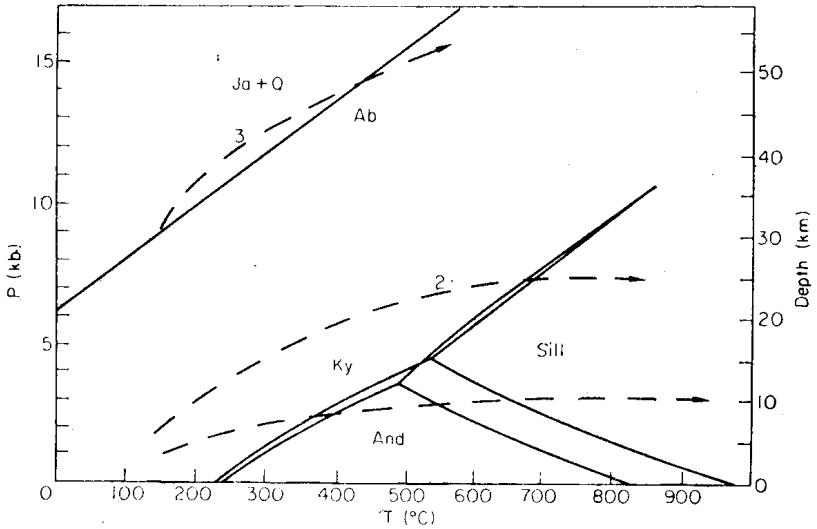

图 1.1 低压(1)、中压(2)和高压(3)变质作用可能的P-T梯度（“抛物线”）叠加于 Al_2SiO_5 相图解（参看图4.4）和钠长石⇌硬玉＋石英的反应曲线图（参看图4.18）上，变质作用的主要压力类型即基于此。此图解是根据都城秋穗关于变质相系列的概念拟定的

型（图1.1），它们不再拘泥于接触/区域变质类型，当然这些术语仍有其地质意义。

这些压力类型基于两组固体-固体的平衡。就是：（1）Al_2SiO_5相关系，显然含有稳定的红柱石的变质泥质岩称为“低压”类型，含稳定的蓝晶石的变质泥质岩称为“中压”类型，以及（2）钠长石⇌硬玉＋石英的转化，含硬玉＋石英的岩石称为“高压”类型（图1.1）。

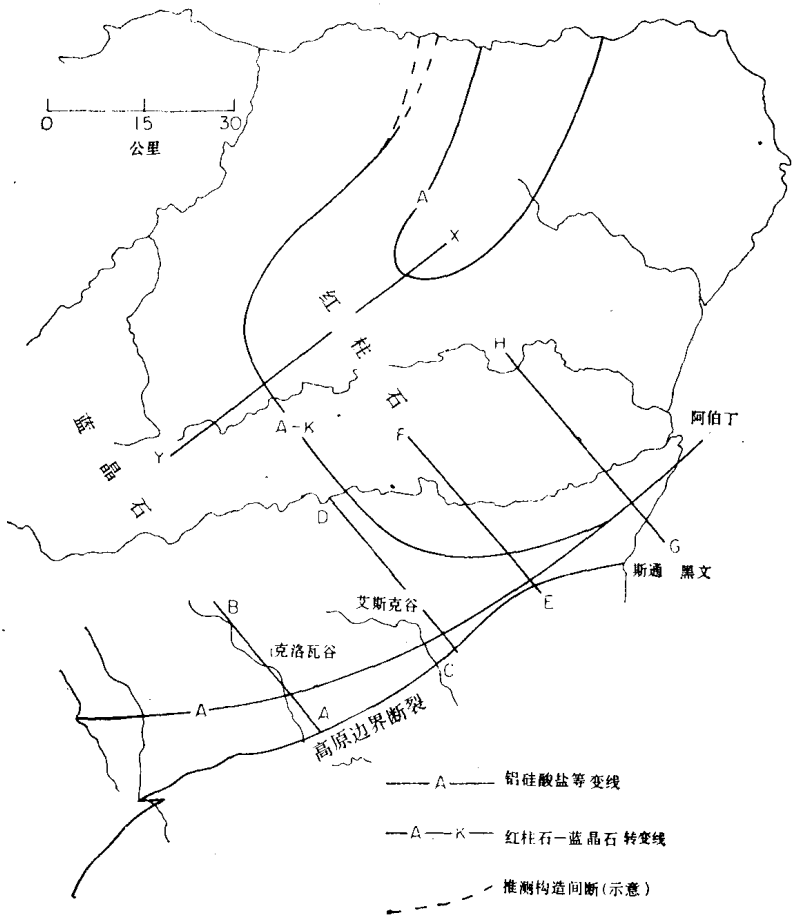

图 1.2 苏格兰达累丁东部主要铝硅酸盐等变线。横截线AB, CD等与图1.3一致。“铝硅酸盐等变线”(A)北部为红柱石等变线，南部为部分蓝晶石，部分红柱石等变线。据Porteous P. 30[11]

低压和中压变质作用显然同时发生的一个著名的例子出现于苏格兰高地东部达累丁变质地区（图1.2，1.3），一个地区以红柱石为主（布羌型或低压变质作用），而毗邻于一个蓝晶石区（“巴罗型”或中压变质作用）。两个区域是靠“红柱石-蓝晶石转化”线推断地分割开[11]。这也可看作低压区域变质作用在一个区域规模发育的例子。虽然这个情况因有许多岩浆岩侵入体的存在而复杂化。

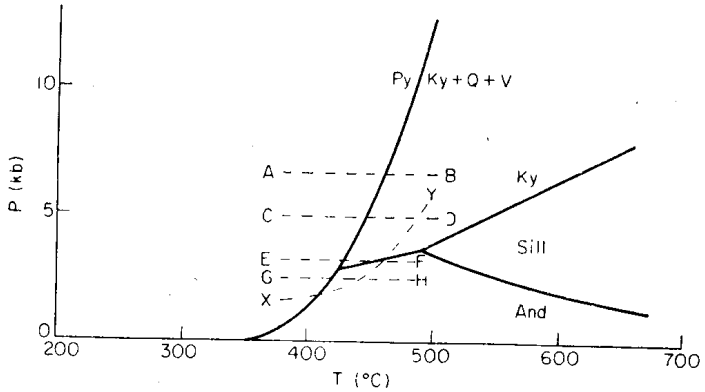

图 1.3 某些铝硅酸盐的相平衡(据图4.4和4.5)横截线与图1.2一致。叶蜡石⇌蓝晶石+石英+水蒸汽的曲线作为图1.2中的“铝硅酸盐等变线”乃是蓝晶石+石英($P_{H_2O}=P_t$)的稳定下限，但在达累丁岩系中“铝硅酸盐等变线”可能位于较高的(及变化的)温度，取决于其所包含的实际反应。据Porteus[11]P. 35并修改

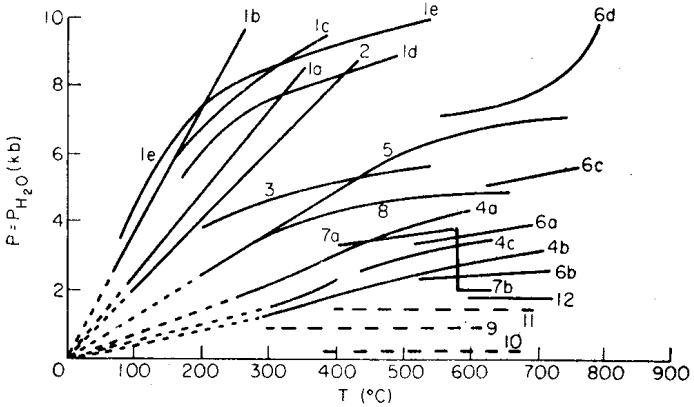

图 1.4 不同地区推断的P-T梯度。显示每个地区可能有其独特的P-T梯度。据特纳[12]359页数字反映特定的地区（如果需要详细参见特纳）

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com