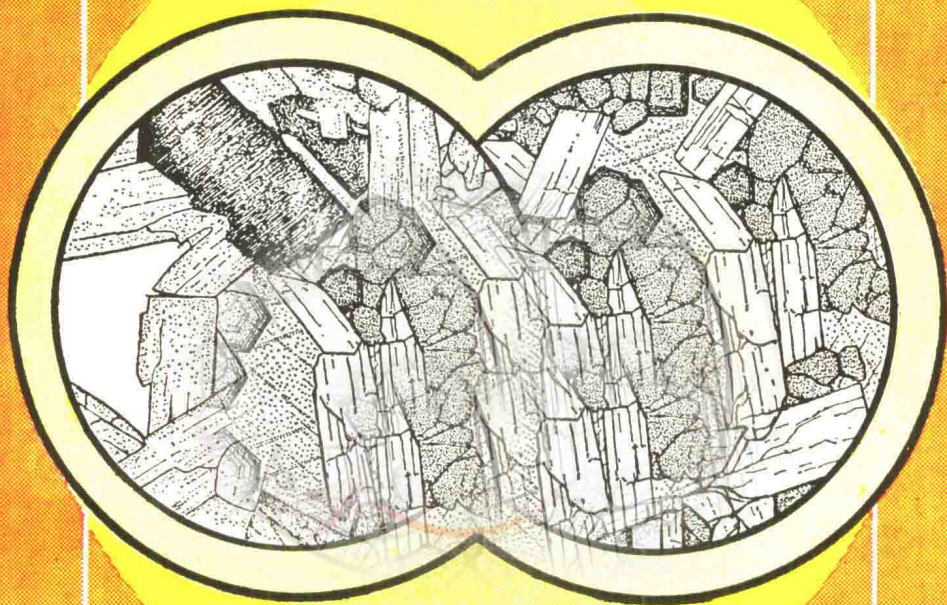


A. 哈 克

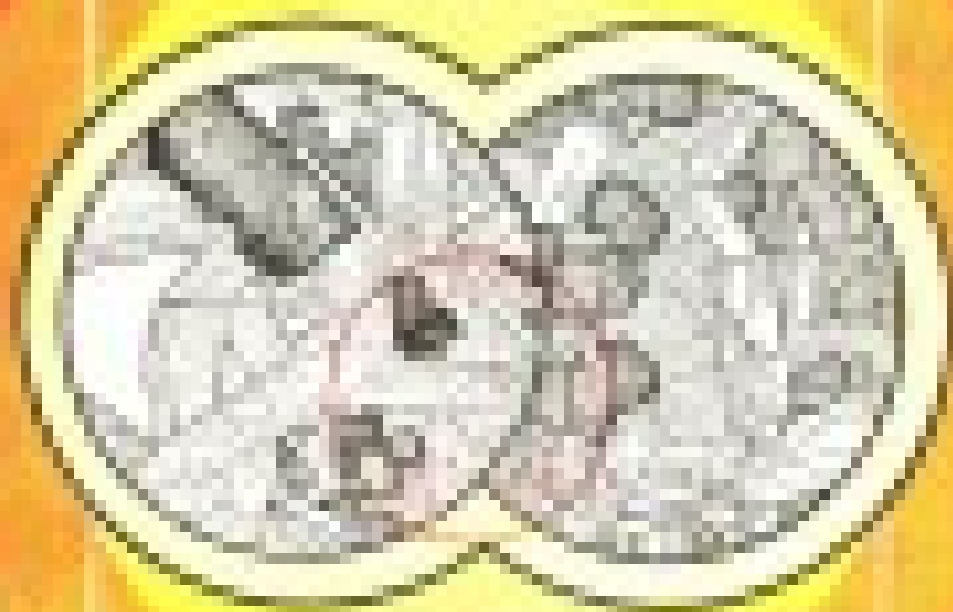


变质作用

岩石转变的研究

地质出版社

地质学



变质作用

岩石形成与演化

地质出版社

变质作用

岩石转变的研究

A. 哈克 著

蒋荫昌 译

刘智星 校

地质出版社

Metamorphism

A Study of the Transformations of Rock-masses

ALFRED HARKER

M. A. , LL. D. , F. R. S.

Sometime Fellow of St John's College and Emeritus Reader in
Petrology in the University of Cambridge

变质作用

岩石转变的研究

A. 哈克 著

蒋荫昌 译

刘智星 校

*

地质部书刊编辑室编辑

地质出版社出版

(北京西四)

地质印刷厂印刷

(北京安德路47号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本: 850×1168¹/₃₂·印张: 12·字数: 314,000

1981年11月北京第一版·1981年11月北京第一次印刷

印数1—3,380册·定价2.40元

统一书号: 15038·新734

初版前言

本书基本上是根据在剑桥讲课的教材重写的。鉴于目前还没有任何一本按类似方案编写出版的著作，所以激励着我把它献给更加广泛的大学生们。

变质作用在本书中不是作为一种状态，而是作为一种过程来加以考虑的；就是说把变质作用看成是由于温度和应力条件的变化而引起的渐进变化。在本书的第一部份里，高温是独自的统治条件。这就是“接触变质作用”的情况，通常把它看成是一种孤立的现象。反之，本书把纯热力变质作用的研究看成是探讨热力因素和动力因素一起发生作用的较复杂问题的原始线索。这种一般情况（区域变质作用）是第二部份的主要课题。在讨论区域变质作用时，我特别突出了剪切应力的控制影响，以区别于也有其作用的均匀压力。我认为具有一定重要性的另一种因素，是由于岩石的压碎作用所产生的机械热。在最后一章里，只简略地提到可以部份消除变质作用效果的各种退向变化。

我们的主要课题是变质作用，不是变质岩石，所以已经把详细的岩类学描述减缩到最低限度，但是由大量显微镜下的素描图可以得到一些弥补。为缩小篇幅而未列举化学分析：在地质调查所近期的出版物中收集了这些有用的资料。

例子主要选自不列颠，但我绝非低估那些对我们认识变质作用有所贡献的许多著名的大陆岩石学家的著作。毋宁说我的意图是要表明，英国是一个特别有利的研究地区，以及不列颠学者并未全然忽视非常充份地提供给他们们的机会。

A. 哈克

剑桥，圣约翰学院

1932年10月

再版说明

已故哈克博士仅在他逝世前几周才完成了他这部书的修订工作。他未能实现写出再版前言的愿望。根据他的遗愿，我承担了印刷校样的校订工作。在这一新版本里维持了原来的编写方案，而且尽可能地保留了原来的文字，不过也相机作了一些小的更动和订正，并把某些近期研究成果编入了参考文献。

C. E. 蒂蕾

剑桥

1939年8月

目 录

第 一 部 分

热 力 变 质 作 用

第一章 热力变质作用概述..... 1

课题的范围——编写方案——变质作用

的动因——控制热力变质作用的条件——化

学平衡的达成

第二章 热力变质作用概述（续）.....14

溶液在变质作用中的作用——扩散作用

的限制——热力变质作用的变质晕——某些作为

实例的地区——页岩和砂岩的玻璃化作用

第三章 热力变质岩石的结构.....29

变质作用与岩浆结晶作用的对比——残

余结构——固体中的晶体生长——结晶作用

的力——热力变质作用的特征结构——晶体

中包体的意义

第四章 非钙质沉积物的热力变质作用.....46

泥质沉积物的组分——泥质沉积物中的

低级变质作用——泥质沉积物中的中级变质

作用——泥质沉积物中的高级变质作用

第五章 非钙质沉积物的热力变质作用（续）.....64

连续的热力变质作用带——铝质和铁质

沉积物的热力变质作用——砂质沉积物的组

成——较纯砂质沉积物的热力变质作用——

较不纯砂质沉积物的热力变质作用

第六章 钙质沉积物的热力变质作用.....79

纯碳酸盐岩石——半钙质岩石的特点	
——不纯非镁质灰岩的热力变质作用——不	
纯镁质灰岩的热力变质作用	
第七章 钙质沉积物的热力变质作用 (续)	93
钙硅酸盐岩石——稳定的和准稳定的组	
合——戈尔德施密特关于角岩类型的分类	
第八章 火成岩的热力变质作用	106
火成岩的特点——基性岩石的热力变质	
作用——深度风化岩石的热力变质作用——	
酸性岩石的热力变质作用	
第九章 热力变质作用中的气成作用和交代作用	121
叠加于变质作用的气成作用——硼酸盐	
的引进——氟化物和氯化物的引进——硫化	
物和铁化合物的引进——钠的引进——其它	
的交代变化	

第 二 部 分

动力变质作用和区域变质作用	
第十章 作为变质作用的因素的应力	143
应变和应力的分析——应力对溶解度的	
影响——应力对化学反应的影响——应力矿	
物和反应力矿物	
第十一章 纯动力变质作用	158
软弱岩石中的劈理构造——劈理构造的	
变形——假劈理构造——劈理化岩石中矿物	
的转变——结晶质岩石中的应变效果——结	
晶质岩石中的压碎效果——在应力作用下结	
晶质岩石中的溶解效果——和压碎构造相伴	
随的矿物变化	
第十二章 区域变质作用概述	184
区域变质作用的分布——区域变质作用	

的等级——作为典型地区的苏格兰高地	
第十三章 结晶片岩的结构	197
区域变质作用中的控制物理条件——早期结构的消失——在应力作用下岩石* 中的晶体生长——矿物特性的影响——特征的结构类型——叶理的性质和起源	
第十四章 非钙质沉积物的区域变质作用	215
连续的变质带——绿泥石带——黑云母带——铁铝榴石带——十字石和蓝晶石带——矽线石带	
第十五章 非钙质沉积物的区域变质作用（续）	238
剪切应力不足的变质作用——铝质和铁质沉积物的区域变质作用——较纯砂质沉积物的变质作用——长石较多类型的变质作用——不纯砂质沉积物的变质作用——区域变质作用中的气成作用和交代作用	
第十六章 钙质沉积物的区域变质作用	261
不纯非镁质灰岩的变质作用——不纯镁质灰岩的变质作用——钙质页岩和板岩的变质作用——高度绿泥石质类型的变质作用——钙质粗砂岩的变质作用	
第十七章 火成岩的区域变质作用	283
火成岩对区域变质作用的双重关系——超基性岩石的区域变质作用——基性岩石的区域变质作用——中性和酸性岩石的区域变质作用——碱性岩石的区域变质作用	
第十八章 与区域变质作用相关的深成侵入体	311
在造山应力下的侵入体——混合片麻岩	

* 原文为固体(Solid)，本文标题中为岩石(rock)——译者。

和混染片麻岩以及贯入片麻岩——区域变质作用中的超基性岩石——区域变质作用中的基性岩石——区域变质作用中的中性和酸性岩石——类似区域变质作用的局部作用

第十九章 重复变质作用..... 337

多次变质作用的例子——为简单热力变质作用所尾随的区域变质作用——作为变质作用的因素的热的机械产生——为区域变质作用所尾随的简单热力变质作用

第二十章 退向变质作用..... 359

热力变质岩石中矿物的逆变——区域变质岩石中矿物的逆变——退向变质作用中显微构造的再排列

第一部分^①

热力变质作用

第一章 热力变质 作用概述

课题的范围——编写方案——变质作用的动因——控制热力变质作用的条件——化学平衡的达成。

课题的范围

“变质作用”这一术语在地质学上的理解,是指形态的变化,它涉及分子和原子的排列方式以及可见的形状和关系;因而它包含岩石中矿物和构造的重新排列。事实上,地质学的每一分科大都和物质世界中的变化现象有关,显然岩石变质作用的研究就其最完全含意来说,将包括岩石学全部研究对象的大部。但本书及大多数岩石学家所考虑的课题则是很不全面的,因而从一开始就限定一下研究的范围将是恰当的。

认定为理所当然的基本原理是:岩石发生的内部变化是对外界条件变化的一种反应,并被解释为在已改变的条件下重建平衡的一种成果。所指的这种条件有两个:即温度和应力。照我们的理解,变质作用的含义可规定如下。我们的出发点是可以接触并

① 本书所有岩石薄片素描图,均按原图缩小1/10。

直接加以观察研究的各类已知岩石，即在正常气温下并显然未受应力的岩石。我们将努力探索这种岩石在自然界中由于温度不同程度升高以及应力不同程度增强而发生的变化。由于这两个条件至少从理论上说是独立的，所以我们可以区分出热力变质作用——由温度升高所引起而应力因素没有重大影响，以及动力变质作用——与机械应力的作用相关但温度没有显著升高。我们进而研究涉及热力，动力这两个因素联合作用和相互作用的一般情况。由于以后将要出现的原因，这种最常见的变质作用类型典型地发育在地壳上某些广大的地区内，并可以方便地称之为区域变质作用。在试图解决区域变质作用所提出的较复杂问题之前，依次探讨这两种比较简单的特殊情况是符合科学的方法。

曾经默认温度和应力可以充分决定平衡条件。对于在限定的孤立系统中的内部反应说来，这是正确的。只有遭受变质作用的岩石在变质过程中其总体成份保持不变时，才会符合这种假定。如果有物质的增减就引进了一个新因素，从我们的直观观点看来乃是引入了一个干扰因素，应当适当加以考虑。于是变质作用（或形态的变化）就被交代作用（或物质的变换）所复杂化。

我们所指的变质作用不包括所有那些主要是地表的作用（统称为“风化作用”，包括水解作用、氧化作用、磷酸盐化作用以及其它一些属于退化性质的变化）。它们取决于以岩石为一方以大气水和气体为另一方之间的反应而包括许多交代作用的因素。对于其研究范围局限在地球岩石圈和大气圈交接的狭窄地带的观察者说来，它们的结果是十分显见的。这类变化对于我们的课题也确有其重要性，不过主要是因为它构成大循环过程的一部份，而变质作用则不过是它的一个补充部份。岩石风化作用这一课题既巨大又重要，因而足以把它作为地质学的一个独立的分科来处理。关于矿脉和矿床的部份也不在我们的计划之内，其中大部也有交代作用这一因素。通常更有理由把它作为单独的研究课题来处理。它大都要和重金属的硫化物和氧化物有关，而在普通岩石学中它们只不过是些很次要的部份；而且，其处理方式也部份地

取决于经济的和其它额外的条件。

这样限定的范围仍然是宽广的，这也是英国地质学家们通常的作法。美国著者们所指的变质作用，特别是范海斯(Van Hise, C. R.) 及其学派，则占有广阔得多的领域。采用这一较严格的定义后，我们将发现交代作用起的作用就不太重要了。在即将讨论的大多数变质作用中，我们就可大体不差地认定：岩石甚至岩石中任一很小部份的总成份在此过程中都未发生变化。当这种一般的假定发生例外时，也将予以研究。

编写方案

对于岩石中的变质作用及其效果这一课题，有两种可供选择的研究途径。它们符合于两种不同的观点，而在它们之间的选择就是在两种极不相同的处理方案之间的选择。为了方便起见，可以分为描述的和成因的这样两个方面。

一方面，我们可以单纯地从受到我们注意的标本来研究已变质的岩石，联系其实际性质——化学的、矿物的、结构的、和构造的——去进行描述和分类。当然，这种做法不能解决关于获得那些性质的方式的问题；但是，在这种描述性研究中，不得掺杂关于这些问题的考虑以致影响研究工作的开展。当应用于结晶片岩以及和区域变质作用密切有关的产物时，可以看出这种研究方式乃是韦尔纳地质学 (Wernerian geology) 的最后残迹。它特别为日尔曼学派所继承，我们从他们那里获得了许多有关这些岩石的知识。权威著作就是格鲁宾曼 (Grubenmann, U.) 的《结晶片岩》^①，每个大学生都应该人手一册。这本书的第一部份虽然论述了变质作用的原理，但并不试图在细节上应用这些原理，

① Die Kristallinen Schiefer (1906)；第二版 (1910)。作者曾计划出版内容有很大扩充的第三版，完成这一工作的任务已移交给他的继承者尼格里教授；但如今只出了此著作的第一部份：Die Gesteinsmetamorphose, by U. Grubenmann and P. Niggli, I. Allgemeiner Teil (1924)。

而分类部分则遵循纯描述性的方针。根据化学成分划分了十二个类，并区分出与地壳中不同深度带相关的三个变质作用等级。然而变质作用作为一种渐进过程的概念是非常模糊不清的，甚至在每一类里都是把最高度变质的岩石安排在先。纯动力变质作用产物只是在某些类型中附带加以承认，但“接触”（即纯热力的）变质作用则全然排除在外。结晶片岩被视为构成一个单独的岩石大类，而与火成岩和沉积岩这两个大类相并列，从而忽略了它们和这些岩类的关系。

描述的方法是植根于将变质岩作为由一定性质所限定的单独的岩类这种概念，而我所称的成因方法则是从把变质作用看成是可影响任何一类岩石并改变其性质的一种变化这一认识出发的。其来源可以归结到赖伊尔（Lyell,）所发展的休顿学说，变质作用一词出自赖伊尔，渐进变化的概念和该学派的主张是完全协调的。从这一合乎逻辑的出发点之所以没有取得重大进展，部份是由于令人遗憾地忽略了化学和岩类学方面的工作，这也是不列颠地质学家长期指责的对象；不过说实话，依据当时所掌握的知识也很难在这些方面有所成就。近年来物理化学的迅速发展，以及成功地运用实验方法解决岩石学问题，使这种情况大为改观。根据现在所奠定的基础，将来在理论的和成因的基础上建立起一种完善的变质作用理论●不是没有可能的。

范海斯●曾首次认真尝试根据一些初步的原理来讨论变质作用过程；但他的著作的范围比本书所采纳的宽广得多，而且在他的巨著中，有相当大一部份是专门论述诸如风化作用、胶结作用、和矿床这些课题的。莱兹（Leith C. K.）和米德（Mead）●的近期著作仍然是按不厌其详的方案构思的。

① Harker, 对地质学会的年度报告, Quart. Journ. Geol. Soc. vol. xxiv (1919), lxiii—lxv页。

② 关于变质作用的一篇论文, Monog. xlvii U. S. Geol. Sur (1904).

③ 变质地质学：一本教科书（1915）。

戈尔德施密特 (Goldschmidt V. M.)^①对奥斯陆区的初步研究报告,对热力变质作用的理论做出了重大贡献。他直接运用相律以确定总成份已知的变质岩石中所可能出现的矿物组合。可以把在渗透溶剂参与下完全变质的岩石简单地视为具有 n 个组分的“冻结”系统。于是可推导出,在平衡中能够共存的不同矿物的数目是 n ,或在一不变点处为 $n+1$ 。有关真正的化学平衡的假设不能得到普遍的承认,作为作者推理基础的其它假设也曾受到批判。然而,不同意戈尔德施密特的论点并不一定要反对他的常常为观察到的事实所支持的具体结论;并且他提出的关于不同“角岩”类型的分类仍可作为一种理想的方案。不过,因为它仅适用于已全部再造过的岩石,所以对于被视为一种渐进过程的变质作用说来则是无效的。

尽管我们目前还没有一种直接根据可接受的原理而建立起来的完整的变质作用理论,但经常怀着这一理想,通过整理观察资料和推论,至少有可能为有条不紊的处理准备条件。这就是本书的意图,其目的在于对课题做出合理的或成因的处理。曾大大增长我们对火成岩的成因的理解的实验成果,已被应用于有关变质作用的一些重大问题;以实验为根据的物理学和化学的已知定律常常为我们所使用^②。来自这些方面的帮助逐渐扩充和加强了地质学和岩类学的探索成果;由于综合使用所有这些手段,我们很有希望洞悉岩石变质作用的过程。对整个课题还不可能进行哲学上的探讨。

变质作用的动因

我们在较老的地质学教科书中可以看到,岩石通常在水的参

① Die Kontaktmetamorphose im Kristianiagebiet, Vidensk. Skr. (1911). 也可参看 Zeits. Anorg. Chem., vol. xxi (1911) 313—22 页。

② 其有益的概况参看 Johnston and Niggli, Journ. Geol., vol. xxi (1913), 481—516, 588—624 页。

与下由于热力和压力的作用而变质。关于水所起的作用，将在后面讨论：严格地说，不应把它当成变质作用的控制条件，它只不过是变质作用影响所及物质的一部份。再则，因为我们现在注意的并非能的问题，而是平衡的条件，所以我们可以把“热力”解释为平均的温度升高。剩余的因素需要较为详细的研究。

早期作者轻率使用的“压力”一词忽视了在用词方面的极其重要的区分。一方面，物体内每一点上的压力在各个方向上可以是相等的。因为这是在流体里所能保持的唯一的压力分配型式，可方便地称为静压力，在讨论液体和气体的习性时通常可以使用压力一词而不致产生混淆。在实验室的日常工作中这种用法也是正确的，而且化学家通常可以认为温度和（静）压力完全决定着控制给定系统的条件。然而，在变质作用中我们必须研究那些在固体岩石内部所进行的变化，而固体是能承受那种在给定点的不同方向上大小不同的压力的。这就是说固体不同于流体，它可承受剪切应力。简单的分析表明：作用在固体内一点上的任一非均匀压力，等于一个连带有一定剪切应力的简单（静）压力[●]。在力学中讨论应力和应变的相互关系时就采用了这种表述方式，因为代表均匀压力和容积压缩的关系的“压缩率”和代表剪切应力和变形的关系的“刚性率”乃是两个独立的常数。在探讨实际上是固体的物体中的分子和原子的重新排列时，这种表述方式也不是没有必要的，因为在这里也必须仔细地地区分简单压力和剪切应力的影响。可以通过简单的定律来表示静压力对于各种转化和化学反应的影响，但是剪切应力对这些作用的影响还有许多尚待探索。这是深为遗憾的，因为在变质作用中，剪切应力对于控制矿物的变化无疑是一个重要的因素，就象它对于构造的重新排列也显然具有巨大影响一样。

下文中未加引号的压力意指简单的平均静压力。应力一词严格地说应包括压力和剪切应力，但常常用作剪切应力的简称也不

● Thomson and Tait, Treatise on Natural Philosophy, art 682, 以及参看下面第十章。

致造成太大的误解。

数学家的应力和应变分析只能严格地运用于均匀和均质物体，同时很容易看出，从理论上说，在结晶质岩石中不可能有均匀的压缩和压力。如果花岗岩立方体的六个面受到外部的均匀压力，它的力学状况和在相同外力下的玻璃立方体的力学状况就有所不同。石英和长石不是同等地可压缩的，而且每一晶体的压缩性在不同方向上也不相同。因此花岗岩就不能不产生某些内部变形和剪切应力。温度变化引起的膨胀和收缩也会产生同一结果。除了数值不大之外，这些内部应力的特点是没有共同的方向，因为晶体位于各方的情况并无不同。因而应力在很大程度上相互抵消了。通过晶体之间轻微的相对滑动、劈理裂缝的开张、某些矿物晶体中的“滑动”和另一些晶体的弯曲而表现出小规模的平衡，但整个岩石的构造却没有发生明显的变化。实验确实证明：结晶岩石的力学习性大体上与均质物体的十分相似，而且非常符合虎克定律^①。

造山运动产生的强大外力在岩石内引起的剪切应力属于十分不同的等级。这些应力的大小只受岩石压碎强度的限制，而且事实上经常都已达到这个限度。此外，由于外力分配赋与这种应力以共同方向，因此就不会相互抵销。只有岩石发生了十分根本的几乎总是包括矿物和构造的重新排列的变化时才能消释。在应力作用下所引起的矿物变化也取决于温度，不过我们将会看到，它们通常都和没有应力因素而在相似温度下发生的变化有所不同。

由于有无重大剪切应力，对决定岩石因温度升高而发生的矿物变化，具有头等意义，并且它对新构造的形成也显然具有首要影响，因而这种区分将在一定程度上确定对整个课题的处理方案。所以本书第一部分将探讨未经应力因素复杂化的热力变质作用；第二部分将专门讨论以剪切应力作为控制条件、温度或有或

① Adams and Coker, An Investigation into the Elastic Constants of Rocks, More Especially with Reference to Cubic Compressibility, Carnegie Inst., Washington (1906).