

5676
05094

变质岩的晶质塑性 和固态流变

〔法〕 A. 尼可拉斯 著
J. P. 泊利埃



科学出版社

56.76
05074

变质岩的晶质塑性和固态流变

〔法〕A. 尼可拉斯 J. P. 泊利埃 著

林传勇 史兰斌 译

劳秋元 钱祥麟 等校

科学出版社

1985

内 容 简 介

本书是关于变质岩流变机制及构造分析方面的专著。作者总结了七十年代以来的新成果,将物理冶金学中的位错理论运用于变质岩的晶质塑性和固态流变的研究中,提出了地质学中物理冶金学方法的研究方向。

书中较详细地介绍了位错理论的基本概念及其在变质岩固态流变研究中的应用实例,同时也介绍了野外和实验室中的工作方法(包括电子显微镜和X光形貌法等许多新方法)及工作实例。

本书可供广大地质工作者,尤其是从事变质岩、构造和显微构造研究方面的工作人员及大专院校师生参考。

A. Nicolas and J. P. Poirier

Crystalline Plasticity and Solid State Flow in Metamorphic Rocks

John Wiley & Sons, 1976

变质岩的晶质塑性和固态流变

〔法〕A. 尼可拉斯 J. P. 泊利埃 著

林传勇 史兰斌 译

劳秋元 钱祥麟 等校

责任编辑 苏宗伟 衣晓云

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1985年3月第一版	开本: 850×1168 1/32
1985年3月第一次印刷	印张: 15 5/8 插页: 14
印数: 0001—2,300	字数: 405,000

统一书号: 13031·2838

本社书号: 3933·13—14

定价: 5.20 元

中 译 版 序

现代组构分析方法是由 Bruno Sander 于二十年代末至三十年代初发展起来的,其经典著作《岩石的组构学》(Gefügekunde der Gesteine, 1930)对变形岩石的组构及其新的几何分析方法和运动学解释的基本原则,作了全面的论述,引起国际地质界的重视和传播。最早是美国地质学家以“岩石构造学”(Petrotectonics) (E. B. Knopf, 1933)或“构造岩石学”(Structural Petrology) (E. B. Knopf and Ingerson, 1938; H. W. Fairbain, 1949)的名义介绍了他的显微组构分析方法。特别是在 E. B. Knopf 夫人主持下进行的矿物和岩石的实验变形工作,为此开辟了新的前景。

从此, Sander 的方法逐渐被广泛应用,特别是在阐明变质岩构造时获得了不同程度的成功。六十年代初, F. J. Turner 和 L. E. Weiss 根据当时已经积累的经验,对变形岩石的构造或组构的性质、意义及其分析程序有关的概念和方法进行了总结和重新估价。这就是他们所著《变质构造岩的构造分析》(1963)一书的主要内容。其中阐述了构造岩组构及适用于各种尺度的分析方法,以及对有关构造资料的运动学和动力学解释。它的优点是恢复了 B. Sander 的原意,即构造或组构分析不是仅限于显微尺度的技术,而是完全可应用于大中型构造。因之应特别强调这一方法的野外研究坚实基础和野外室内相结合的特点。这已日益为广大地质工作者所认识。

近年来,由于物理冶金学原理和材料科学的位错理论等的引入,以及透射电镜(TEM)技术的发展,使得矿物岩石变形的研究进一步深化,在变形岩石的固态流变和位错机制等方面有许多新的成就。这样,就有可能将复杂的大型构造的演化环境与显微构造发育更紧密地联系在一起,从而使这一学科研究领域扩大到诸

如板块构造和上地幔流变的研究中去。A. Nicolas 和 J. P. Poirier (1976) 的《变质岩的晶质塑性和固态流变》一书,就是这些方面的工作总结。作者以物理冶金学理论为基础来研究岩石在塑性流变过程中所形成的组构,并进行运动学解释,提出了地质学中的物理冶金学方法的研究方向。因此,本书是近年来关于变形矿物岩石的显微构造及流变机制等方面的现代理论和最新技术方法的重要著作。有关本书的评价, G. S. Lister 教授已有专文*, 这里不再赘述。

组构分析方法在我国的应用和发展大致也经历了上述的过程。何作霖教授曾随学于 B. Sander, 早在三十年代就把旋转台技术以及组构分析方法介绍给我国地质界(1933, 1937), 并且首先将 X 光技术引进组构分析工作中(1947); 四、五十年代王嘉荫教授也应用和开展了这一工作(1946), 并在应力矿物方面有深入的研究; 六十年代马杏垣教授等基于嵩山地区变质岩构造研究实践提出的构造解析方法(1979, 1981), 在区域地质调查中起了一定的作用; 近年来何永年同志对幔源橄榄石位错构造和流变机制的研究等, 说明我国这一领域也在不断地发展和深入。

因此, 林传勇、史兰斌同志将本书翻译介绍给我国地质界是值得欢迎的。希望本书的出版能对我国这一学科的发展起到一定作用。

马杏垣 徐煜坚

1983. 3. 10

* Lister, G. S., 1977, *Tectonophysics*, V. 43, No. 3—4, p. 307—308.

译 者 的 话

A. Nicolas 和 J. P. Poirier 的《变质岩的晶质塑性和固态流变》一书,是 1979 年徐煜坚教授向我们推荐的。读后觉得本书很有参考价值。因此,尽管当时我们接触物理冶金学及位错理论还很少,但仍决心将本书译出以介绍给广大同行们。译文初稿完成后,曾由劳秋元副研究员进行了初校。后又由科学出版社委托钱祥麟教授等负责校订。具体由钱祥麟校序言和第一、七、八、十二章;丁中一校第二、六章;冯孙齐校三、四章;郑亚东校五、九、十、十一章。他们纠正和补充了原译文中误译和漏译的地方,使译文更为完善。最后,我们根据校者的意见重新修整了译稿。现还有以下几个问题需说明:

1) 有一些英语术语目前尚无统一的译法,例如书名中的“流变”一词,原文为“Flow”,目前国内也有不少文章译成“流动”。书中经常出现的 flow structure 和 flow direction 我们认为译作“流动构造”和“流动方向”为好。又如书中反复出现的 Slip 一词,以及在少数地方与 Slip 作为同义词使用的 glide,在中文中都译为“滑移”或“滑动”。我们原译为“滑动”,现根据校者的意见将术语性的已被大家普遍接受的如滑移系、滑移面和滑移方向等都进行了统一,一般地方则滑移、滑动都是同义的。

2) 本书所广泛运用的物理冶金学术语,我们主要以科学出版社 1980 年版的“金属材料及热处理词汇”为准。但有一些词在金属学和地质学中译文有不同之处,如 fabric, 金属学译成“织构”,地质学则为“组构”;又如 preferred orientation 金属学中译成“择优取向”,而地质学则为“优选方位”等等。在此我们都统一采用已为地质学工作者所普遍接受的译法和术语。

还有不妥之处,尚需读者批评指正。

本书翻译过程中我们得到了马杏垣教授和徐煜坚教授的关怀和鼓励。并在百忙中写了中文版序言。同时我们也得到许多方面的支持和帮助,在此深致谢意。

译者 1983年3月

序 言

在过去的十五年中，构造地质学的运动学和动力学分析沿着两个不同的方向迅速取得进展：一是连续介质力学方法，它主要是在关于褶皱作用及有限应变估算的理论、实验和几何学结果的基础上发展起来的；其二则主要建立在岩石和造岩矿物的形变的大量实验资料基础上。这些资料表明岩石与金属的塑性流变构造和流变过程并无明显的差别。显然地质学家应和物理冶金学家进行协作。前者可以从后者的长期深刻的经验中得到裨益，后者也可把他们的兴趣扩展到不同条件下变形的物质上去。这就是为什么我们把地质学的这一研究方法称为物理冶金学方法。

本书的目的有二：

(1) 充分阐明用来正确描述和解释岩石的变形构造所必需的物理冶金学基础。本书与斯普莱 (Spry, 1969) 的著作的不同之处在于对基础资料的介绍更有理论和更全面。当然斯普莱对变质岩的结构给予了全面的介绍，而我们所研究的则仅限于由流变所产生的变质岩结构。

(2) 研究变质岩结构的流变解释。为此，我们感到对目前尚未普遍采用的应变-应力分析及各种技术都仍有进一步研究的必要。在流变解释中，我们放弃动力学上的考虑，因为我们认为只有在搞清楚流变的运动学之后，才有可能提出动力学的解释。

本书中，我们一般通过对地幔橄榄岩的研究来阐述物理冶金学和地质学概念的运用。看来橄榄岩是最适用于此目的的，因为该岩石中的主要矿物橄榄石和顽火辉石都具有比较简单的晶体结构，还具有大家熟知的力学性质；此外，其变形构造表明流变通常是广泛的和均匀的。如此严格的条件反映了在当前认识阶段上该方法的局限性。

还应强调指出,在推动变形结构、构造的流变解释方面是冒着一定风险的。关于这方面问题的研究报告至今发表的还很少,而且所作的解释往往是个人的观点,将来可能还要修正。这些解释主要是根据对塑性流变橄榄石的研究提出的。严格的说,这些解释也只适用于这种岩石。但由于流变总是遵从普遍的规律,因此我们认为这些例子具有普遍意义。这些解释对已为连续介质力学方法所确认的某些解释提出了疑问,例如,关于褶皱的运动学解释。

在本书的撰写过程中,我们得到了多方面的帮助。例如,曾与格林(H. W. Green)进行过讨论;勒鲁布列(M. Lelubre)、弗罗德罗(C. froideraux)、柯尔比(S. H. Kirby)、马丁(G. Martin)、波蒂埃(F. Boudier)、布谢(J. L. Bouchez)、格冈(Y. Gueguen)、马托尔(M. Mattaur)、登德克斯(Den Tex)、阿德尔(A. J. Ardell)、克里斯蒂(J. M. Christie)等人对本书各个部分进行了评阅;韦茨曼(S. Wightman)核对了本书的英文;伯利奥(L. Bureau)为我们打印初稿;利沙特(A. Cossard)为本书绘制插图;以及诺列特(J. Naulet)为本书拍制照片;在此一并向他们表示衷心感谢。

A. 尼可拉斯 J. P. 泊利埃

一九七五年三月于南特和萨克莱

目 录

中译版序

译者的话

序言

第一章 引言：变质岩构造分析	1
1.1 本书所研究的变质岩.....	1
1.2 变质岩构造分析的目的.....	2
1.2.1 构造和变质历史分析的目的.....	2
1.2.2 运动学和动力学分析的目的.....	3
1.3 运动学分析方法.....	5
1.3.1 连续介质力学方法.....	5
1.3.2 物理冶金学方法.....	7
1.3.3 连续介质力学方法与物理冶金学方法之间的关系.....	9
第二章 固体力学原理	12
2.1 总述.....	12
2.2 定义：位移、畸变、应变、旋转.....	12
2.3 应力.....	26
2.4 应力与应变之间的关系：弹性形变，塑性形变.....	34
2.4.1 弹性常数.....	37
2.4.2 塑性应变.....	40
2.5 应力同应变速率及流变方式之间的关系.....	53
第三章 物理冶金学原理	57
3.1 晶体中晶格缺陷概论.....	57
3.2 空位.....	59
3.2.1 形成，迁移，发射源，吸收源.....	59

3.2.2	给定温度下空位的平衡浓度	60
3.3	自扩散的空位机制	63
3.3.1	概念和定律	63
3.3.2	扩散系数的测量	71
3.3.3	公式	73
3.3.4	离子晶体中的扩散	75
3.4	位错	80
3.4.1	概论	80
3.4.2	伯格斯矢量	85
3.4.3	位错的应力场	88
3.4.4	位错的自能,线张力	92
3.4.5	外应力施加在位错上的力	98
3.4.6	位错源	101
3.4.7	晶格弯曲与稳态位错构造之间的关系	104
3.4.8	晶格内位错的滑移	107
3.4.9	位错攀移	111
3.4.10	塑性应变与可动位错之间的关系	116
3.5	二维缺陷(或面缺陷)	120
3.5.1	堆垛层错	120
3.5.2	位错壁	124
3.5.3	晶粒边界	127
3.5.4	界面	130
第四章	晶体中的塑性流变与退火过程	132
4.1	概论: 加工硬化,恢复	132
4.1.1	加工硬化	133
4.1.2	恢复	140
4.1.3	加工硬化与恢复之间的竞争	145
4.2	特征位错构造	147
4.2.1	冷加工状态的位错构造	147
4.2.2	高温流变的位错构造	148

4.2.3	位错显微构造与外施应力之间的经验关系	149
4.3	高温塑性流变的机制	154
4.3.1	概述	154
4.3.2	应力感生的表面之间的物质扩散流动	155
4.3.3	应力感生的位错之间的物质扩散转移	160
4.3.4	受位错攀移控制的滑移引起的蠕变(魏特曼蠕变)	161
4.3.5	超塑性形变	163
4.3.6	相变超塑性	167
4.4	应力感生的重结晶(压结晶)	169
4.4.1	概述——化学势	169
4.4.2	应力感生的重结晶的坎姆模型	172
4.4.3	讨论	176
4.5	应变感生的重结晶	178
4.5.1	概述	178
4.5.2	成核	179
4.5.3	晶粒边界迁移	181
4.5.4	动态重结晶	184
第五章	造岩矿物的塑性变形	187
5.1	引言	187
5.2	橄榄石	187
5.2.1	结晶学	187
5.2.2	滑移系	189
5.2.3	恢复和重结晶	197
5.2.4	高温蠕变律	197
5.3	蓝晶石	200
5.4	顽火辉石和斜顽火辉石	202
5.4.1	结晶学	202
5.4.2	滑移系	203
5.4.3	正顽火辉石与斜顽火辉石之间的转化	204

5.4.4	恢复和重结晶	206
5.4.5	出溶页理	206
5.5	透辉石	207
5.5.1	结晶学	207
5.5.2	滑移系	207
5.5.3	机械双晶	208
5.6	角闪石	209
5.6.1	结晶学	209
5.6.2	滑移系	209
5.6.3	机械双晶	211
5.7	云母	212
5.7.1	结晶学	212
5.7.2	滑移系和扭折	212
5.7.3	重结晶	214
5.8	斜长石	215
5.8.1	结晶学	215
5.8.2	滑移系	215
5.8.3	机械双晶	216
5.9	石英	218
5.9.1	结晶学	218
5.9.2	滑移系	222
5.9.3	机械双晶	225
5.9.4	湿石英的变形机制,水解弱化	226
5.9.5	恢复和重结晶	235
5.9.6	变形实验过程中向柯石英的转化	236
5.10	碳酸盐	237
5.10.1	结晶学	237
5.10.2	机械双晶	239
5.10.3	滑移系	242
5.10.4	高温蠕变	245

5.11	石盐	247
5.11.1	结晶学	247
5.11.2	滑移系	248
5.11.3	压力对交滑移的影响	254
5.11.4	高温蠕变	255
5.12	硬石膏	258
5.12.1	结晶学	258
5.12.2	机械双晶和滑移系	258
5.12.3	应力-应变曲线	259
第六章	塑性流变和重结晶产生的结构和优选方位: 实验和计算机模拟结果	261
6.1	引言	261
6.2	橄榄石集合体的实验变形	261
6.2.1	塑性流变	263
6.2.2	同构造重结晶	266
6.3	云母集合体的实验变形	270
6.3.1	问题的概况	270
6.3.2	低温变形	271
6.3.3	高温变形	274
6.4	石英集合体的实验变形	277
6.4.1	塑性流变	278
6.4.2	同构造重结晶	282
6.4.3	退火重结晶	287
6.5	方解石集合体的实验变形	291
6.5.1	单轴实验变形产生的结构和优选方位	293
6.5.2	解释	298
6.5.3	三轴实验变形产生的优选方位	300
6.5.4	退火作用	303
6.6	白云石集合体的实验变形	303
6.6.1	塑性流变	303

6.6.2	同构造重结晶和退火重结晶	306
6.7	石盐集合体的实验变形	308
6.8	硬石膏集合体的实验变形	308
6.9	塑性流变的计算机模拟	311
6.9.1	目的	311
6.9.2	方法	312
6.9.3	晶胞组合的统计结果	312
6.9.4	孤立晶胞的观察结果	316
6.9.5	与天然和实验变形多晶体的对比	321
第七章	野外构造的运动学方法和应变分析	325
7.1	引言	325
7.2	运动学分析方法	325
7.3	野外构造	328
7.3.1	面状透入性构造	331
7.3.2	线状透入性构造——线理	333
7.3.3	非透入性构造	336
第八章	构造资料的表示方法及分析	342
8.1	引言	342
8.2	资料总体的代表性和个数	342
8.3	不具形貌配置的方向资料	347
8.3.1	方向资料的性质	347
8.3.2	参考系和表示法的基本模式	347
8.3.3	平面表示法的技术	351
8.3.4	方位密度图的编制	352
8.3.5	方位密度图的分析	356
8.4	具形貌配置的资料	359
8.4.1	定位的空间资料	359
8.4.2	定位的方向资料	361
第九章	实验室方法	364
9.1	光学显微镜研究法	364

9.1.1	薄片制备	364
9.1.2	薄片中的主要研究内容	366
9.2	优选方位的 X 光测定法	373
9.3	亚构造和位错的观测方法	373
9.3.1	位错缀饰法	374
9.3.2	侵蚀坑	374
9.3.3	X 光形貌法 (X-ray topography)	377
9.3.4	透射电子显微镜 (TEM)	382
第十章	橄榄岩的结构、构造以及优选方位的运动学解释	389
10.1	研究橄榄岩流变的重要意义	389
10.2	变形橄榄岩的不同类型及其产状	389
10.2.1	岩体中的橄榄岩	389
10.2.2	包体中的橄榄岩	392
10.3	结构和优选方位	393
10.3.1	巴尔第塞洛 (Baldissero) 岩体: 冷加工——突 出的非旋转剪切流变	394
10.3.2	兰佐核心区 (Lanzo Core): 热加工——显著的 旋转剪切流变	397
10.3.3	兰佐边缘区: 强烈的旋转剪切流变	401
10.3.4	玄武岩包体系列; 应变的增大, 重结晶作用, 变形旋回	403
10.3.5	金伯利岩包体: 超塑性流变	411
10.4	野外构造	412
10.4.1	叶理和线理	412
10.4.2	褶皱	415
第十一章	橄榄岩中的大规模流变、上地幔地球动力学	419
11.1	引言	419
11.2	橄榄岩中流变的几何模式	419
11.2.1	不同橄榄岩类的流变研究	419
11.2.2	与二辉橄榄岩侵入体有关的流变	420

11.2.3	蛇绿岩套中的方辉橄橄榄岩体流变的研究	428
11.2.4	最上部地幔的地震波速各向异性	430
11.3	上地幔的蠕变	434
11.3.1	板块构造和上地幔的蠕变	434
11.3.2	上地幔的粘滞性: 各种流变机制评价	435
11.3.3	讨论	441
11.3.4	软流圈和低粘滞度带	445
第十二章	变质岩流变解释的设想	448
12.1	概述	448
12.2	面状和线状透入性要素的运动学解释	449
12.2.1	叶理	449
12.2.2	线理	451
12.2.3	板劈理	451
12.3	褶皱的运动学解释	453
参考文献		455