

The background of the book cover is composed of three vertical panels showing microstructural geological images. The top-left panel is a red and black image showing a granular texture. The bottom-left panel is a blue and black image showing a more crystalline or fibrous texture. The right panel is a purple and black image showing wavy, layered structures. The title is printed vertically in the center white band.

显微构造地质学

刘瑞珣编著

显微构造地质学

刘瑞珣 编著

北京大学出版社

内 容 提 要

本书是作者在北京大学地质系讲授《应力矿物学》、《显微构造地质学》和《构造地质学专题》等课的基础上写成的。内容以构造变形机制为主，也介绍了构造变质机制的梗概。全书着重介绍基本原理，也配合一定的应用实例。叙述简明扼要，凡学过岩石学和构造地质学的科技人员和在校大学生、研究生都可阅读。

全书分十章，前两章介绍了必要的力学概念和变形几何学，三、四、五章介绍岩石变形的显微机制，六、七、八章阐述了应变软化、主应变方位和剪切指向的判断及组构优选的原理，第九章就构造活动能量问题作了探讨，第十章概括了显微构造与其他学科的横向联系和本学科的纵向发展。

目前，介绍显微构造方面的文献很少，本书可作为大专院校有关专业的教材，也可作为科研和生产单位有关人员研究显微构造的参考书。

显微构造地质学

刘瑞珣 编著

责任编辑：姚梅生 崔广振

北京大学出版社出版

（北京大学校内）

北京大学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

850×1168毫米 32开本 7.625印张 200千字

1988年10月第一版 1988年10月第一次印刷

印数：0001—2,000册

ISBN7-301-00254-8/N·001

定价：1.90元

前 言

本书主要讨论变形岩石在显微镜下的特征，这些特征是野外构造地质作用在显微视域的表现，重点在于光学显微镜下的表现。近二十年来，学者们深入研究显微视域的构造现象，揭开了许多以往令人迷惑的疑云，从而开辟了以“显微构造” (micro-structures) 为核心的构造地质学的新领域。它涉及早年发展起来的岩组学、应力矿物学、断层岩和晶体构造等，并促进这些领域的研究迅速发展起来。

我国学者不仅较早地将这些方面的知识传播进来，而且为这个新领域在我国的发展奠定了基础。何作霖 (1900—1967) 教授最早 (1934) 将岩组学的成果介绍到我国，王嘉荫 (1911—1976) 教授首先测定了我国标本的岩组图，并且发展了应力矿物学，他们是我国向这个新领域进军的带头人。

本书的基本内容取自笔者在北京大学地质系讲授的《应力矿物学》、《构造地质学专题》和《显微构造地质学》三门课的讲稿。《应力矿物学》是王嘉荫教授在1974年为北京大学地质力学专业学生开设的新课。这门课的基本思想已在他的遗著《应力矿物概论》 (1978, 地质出版社) 一书中反映出来。1977年，笔者接受《应力矿物学》的教学任务，听课对象扩大为构造地质及地质力学和地球化学两个专业的学生，讲授的内容也作了较大的调整，增加了许多构造变形作用的内容，也相应地删减了一些构造变质作用的内容。《构造地质学专题》和《显微构造地质学》是分别向高年级大学生和研究生开设的新课，这些课程的内容有些没有纳入本书中。

许多著作者都会感到，在科技资料迅速膨胀的今天，写书比

写论文不知要困难多少倍。由于书的出版周期长，待书籍出版时，有些资料已经陈旧。本书也难免这个命运。国外有人统计过，大约每过五年科技资料的信息量增加一倍。于是推论大学毕业五年之后，毕业前夕所学的课程，平均要有一半变得陈旧，甚至过时。这的确是一个令人振奋又令人担忧的现实。振奋之情来自客观实际的发展速度，催人上进，顽强奋斗；担忧之情来自主观能力，惟恐赶不上时代潮流，落入后进行列。作为一名大学教师，这种感受更显得深刻。带着这种心情写书，面对资料的选择问题，不能不迟疑和推敲。本书以介绍基本原理为主，适当以实例说明。因为基本原理是相对稳定的，学生只有掌握基本原理，学会独立钻研问题，才能跟得上迅速前进的科技潮流。大学教育，尤其是理科大学教育仍要以“打基础”为主，有了坚实广泛的基础，才能具备攀登高峰的能力。本书强调基本原理的意图也在这里。

众所周知，著名奥地利学者桑德尔（B.Sander）是显微构造学这个新领域的开拓者。他在茵斯布鲁克（Innsbruck）大学任教时所著《岩石组构学》（Gefügekunde der Gesteine, 1930）是这个新领域的第一本专著。我国学者何作霖教授不仅是桑德尔最早的学生之一，而且作为同事，与他一起工作过。世界上在德语区以外的国家中，我国是最早了解桑德尔新思想的国家之一。可惜在很长一段时间里，我国的显微构造研究只局限在少数单位的少数人身上。这一状况在十年动乱之后才有所改变。

1981年11月，由钱祥麟、袁奎荣、张保民和孙岩等人发起，吸收了一些积极支持者，在北京大学召开了全国第一届显微构造与组构学术讨论会^①，成立了全国显微构造与组构学学术组织。1984年11月，在桂林冶金地质学院又召开了第二届显微构造与组构学学术讨论会，到会代表由第一届的三十人增至一百三十多

^① 该会议部分优秀论文已刊于《构造地质论丛》第5号，1985，地质出版社。

人，这说明在这个新领域中作出贡献的专家学者迅速增加。在这期间，中国地质科学研究所先后举行过有关的讲座和学术讨论班，为迅速普及显微构造研究方法起了推动作用。更可喜的是一批中青年学者在显微构造领域成长起来，这是我国未来显微构造研究的中坚力量。

构造变质作用的研究比构造变形作用的研究还薄弱。瑞士苏黎世高等理工学院的鲁比 (D. Rubie) 博士一直准备讲授这样的课程，直到笔者1983年10月结束进修，离开那里回国时，这门课还没有开出来。他准备讲的内容有许多与王嘉荫当初在《应力矿物学》课中讲过的内容相似。可见，王嘉荫教授在生前已经看到了世界80年代学术的动向。他的逝世无疑是我国学术界的重大损失。构造变质作用这一研究方向，恐怕需要构造地质专业和地球化学专业的学者，彼此进修对方的学科知识共同来承担。这是一个很有前途的方向，笔者特别希望年轻的大学生和研究生，把这一份学术遗产接过来发展下去。许多在边缘学科领域作出贡献的人，往往是大学毕业之后跨专业再学习的人，愿年轻的读者们都不固守自己原来熟悉的领域而大胆向新阵地挺进。

本书部分照片摄于瑞士，奥地利和意大利，反映出欧洲阿尔卑斯构造变形的典型特征。值得回忆的是笔者得到著名沉积大地构造学家许靖华 (K. J. Hsü, 苏黎世高等理工学院) 教授，著名变形岩石构造学家兰姆赛 (G. J. Ramsay, 苏黎世高等理工学院) 教授，著名阿尔卑斯地质专家杜伦佩 (R. Trümpy, 苏黎世高等理工学院) 教授和著名构造地质学家劳布切尔 (H. P. Laubscher, 巴塞尔大学) 教授等在野外工作和室内工作的指导，还得到米内斯^① (A. G. Milnes, 苏黎世高工) 博士，施密特 (S. M. Schmid, 苏黎世高工) 博士，钦科 (A. Zingg, 巴塞尔大学) 博士，狄特丽 (D. Dietrich, 苏黎世高工) 博士，曼克台劳 (N. Mancktelow,

① A. G. Milnes 博士现任挪威国家理工大学地质所教授。

苏黎世高工) 博士, 胡伯 (M. Huber, 苏黎世高工) 博士和凯西 (M. Casey, 苏黎世高工) 博士等专家们的帮助。我拍摄这些照片, 向我国读者介绍阿尔卑斯变形特征也是他们的愿望, 在此我向读者转达他们的意愿。

“显微构造”的领域较本书的内容广泛得多, 仅就变形岩石的显微构造, 本书也介绍不全。限于笔者水平, 无力作更全面深刻的介绍, 书中所列内容也难免有错漏之处, 敬请读者批评指正。

本书在写作过程中得到国家自然科学基金的资助, 书中一部分内容属于《岩石韧性变形的显微构造特征及其应变测量》项目中的近期工作成果。

目 录

第一章 构造变形	(1)
1-1 有体力作用的构造变形.....	(1)
1-2 局部变形与总体变形.....	(3)
1-3 构造变形与显微构造分析.....	(5)
第二章 岩石的均匀变形	(10)
2-1 纯剪切变形.....	(10)
2-2 简单剪切变形.....	(21)
2-3 应变椭圆与应变椭球的几个问题.....	(28)
第三章 岩石变形的显微机制之一	
—— 细粒化和粒间滑动.....	(31)
3-1 应变硬化和应变软化现象.....	(31)
3-2 变形岩石中矿物的细粒化.....	(33)
3-3 粒间滑动, 显微滑动层的形成.....	(38)
3-4 显微机制分析的构造意义.....	(41)
第四章 岩石变形的显微机制之二	
—— 粒内滑动.....	(47)
4-1 晶内滑移.....	(47)
4-2 变形双晶.....	(58)
4-3 扭折.....	(67)
4-4 变形纹.....	(71)
第五章 岩石变形的显微机制之三	
—— 位错及其运动.....	(81)
5-1 晶体的缺陷.....	(81)
5-2 位错的移动及其数目变化.....	(85)

5-3	位错密度与应变·····	(88)
5-4	亚晶粒·····	(92)
5-5	应变的局部恢复·····	(95)
5-6	古应力计问题·····	(100)
第六章 岩石的应变软化作用 ·····		(109)
6-1	应变软化的显微机制·····	(109)
6-2	软化程度的定性估计·····	(117)
6-3	显微裂隙及其固结·····	(121)
第七章 主应变方位和剪切指向的确定 ·····		(131)
7-1	纯剪切变形的主应变方位·····	(131)
7-2	简单剪切变形的剪切指向·····	(142)
7-3	递进变形的应变方位变化·····	(161)
第八章 组构优选的形成 ·····		(171)
8-1	组构的优选定向·····	(171)
8-2	光轴与形态有固定关系的矿物所产生的组构优选·····	(173)
8-3	光轴与形态无固定关系的矿物所产生的组构优选·····	(179)
8-4	组构与主应变方位·····	(187)
第九章 构造活动能量的显微分析 ·····		(192)
9-1	破裂、破碎和表面能·····	(192)
9-2	摩擦和摩擦热·····	(202)
9-3	应变和应变能·····	(208)
第十章 构造地质新领域的显微构造 ·····		(213)
10-1	显微构造与区域构造·····	(213)
10-2	光学显微分析与电子显微分析·····	(217)
10-3	构造变形与晶格变形·····	(219)
10-4	构造变质问题·····	(221)

第一章 构造变形

地质作用引起地质体的变形称为构造变形。它一直是构造地质学研究的一个重要内容。但是把地质体作为变形介质来深入认识，还是近二十多年的事，它与近二十多年以来把岩石圈作为刚性(不变形)介质来认识具有同样重要的意义。用可变形和不变形这两个截然相反的概念同时描述岩石，不仅未引起混乱，相反却澄清了许多问题。认识岩石圈作为刚性块体的运动，才发现它们之间的强烈位移；认识岩石作为变形介质的变形，才从“构造运动”这一笼统概念中划分出变形和位移的不同。

1-1 有体力作用的构造变形

从外部施加在物体表面上的力称为面力。挤压、拉伸都是面力；从外部施加在物体内部各质点上的力称为体力。重力、惯性力都是体力。面力和体力都来自物体外部，故都称为外力。物体在外力作用下要发生变形，内部各质点间的相对位置要发生变化并产生恢复这种变化的力。单位内截面上的这种力，称为应力，应力是内力。体力虽然也作用到物体内部，但它不是内力而是外力，应力与体力是容易混淆的两个概念。

有体力作用的构造变形非常普遍，垂直的重力和水平的惯性力在一定程度上控制着地质体的变形，所以首先要搞清分析这种变形所遇到的几个概念。

现有一个截面为矩形的变形体，将其放在不变形的基座上(图1-1A)，它的各质点受到量值相等的重力作用，即体力各点上都一样。为保持物体不动，基座必须提供量值等于总重量的

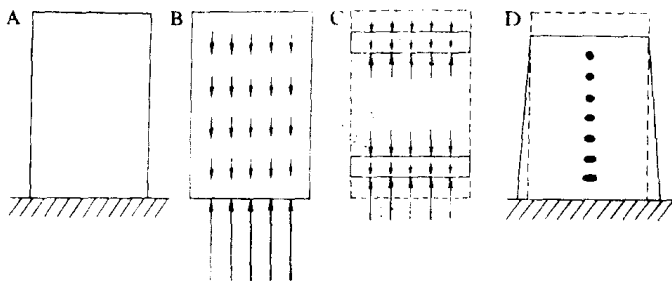


图1-1 有体力作用时，一个变形体的变形

A. 放在不变形底座上的一个足够大的变形体。B. 该物体所受的外力，框内小箭头是重力，底面大箭头是底座提供的支反力。C. 体内假想裁出的两个薄层各受到不同程度的挤压。D. 物体的变形和体内纵向上各圆形点的变形。

支反力使其平衡（图1-1B）。在这种条件下，物体内部各薄层的内力大小却不一样，较高处的薄层受到较小的纵向压力，较低处的薄层受到较大的纵向压力（图1-1C）。各层受不同的压应力，于是，产生不同的压应变，较高处的薄层受到较轻的纵向压扁，较低处的薄层受到较强的纵向压扁。这样，原来的单位圆变为扁率不同的椭圆，整个物体也随之变形（图1-1D）。

从图1-1可以看出，纵向最大的压应变产生在最低处的薄层，而那里的纵向却没有位移；最小的压应变产生在最上层，而那里有最大的纵向位移，即从图1-1D中虚线处移到实线处。所以应变和位移是不同的概念，在同一位置上应变和位移的大小通常没有直接联系。变形后物体的底部有明显的横向伸长，但物体并未受到横向外力，内部也没有横向拉应力，却有横向拉应变。所以，在三维分析中应力和应变也并不总是一致的。从这个例子可以看出位移与变形，内力与外力，应力与应变等各概念之间的区别。

如果图1-1中的物体是不变形体，那么当把物体由基座支撑改为顶部悬挂时，它的总体运动效果（平衡）不变。如果作为变形体，其内部的应变状况和总体变形（图1-2）就完全不同了。这时纵向为拉伸变形，显示总体伸长，横向有缩短。拉应变从上到

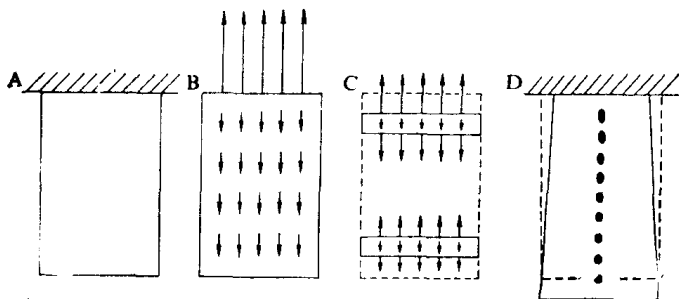


图1-2 一个矩形悬吊物体的变形

A. 变形前的悬吊情况；B. 矩形体的受力图，重力向下，顶面受拉力，与总重量平衡；C. 不同高度两个薄层的受力状况，较高薄层比较低薄层受拉伸强烈；D. 在这种受力条件下体内纵向变形各点不同，且总体伸长。

下由大变小，纵向位移则从上到下由小变大。图1-1与图1-2这两种不同情况，完全是由于边界条件改变而引起的。所谓边界条件，是指物体边界的几何形状和界面上的面力情况。在体力不变的情况下，物体内的各点应力、应变和位移取决于边界条件。边界条件改变了，物体内各点的应力、应变和位移也改变了。

1-2 局部变形与总体变形

从上一节的分析中可以看出，一个变形体的某一局部变形不代表它的总体变形，也不代表另外一个局部的变形。所以，从某一局部的变形状况，通常不能推测出整体的变形状况，也不能推测出外力的作用方式。在野外测量断层的断距，推覆体的推覆距离，岩层的升降幅度等，都属于测量位移，它们固然与变形有密切联系，却不是对变形本身的度量。所以，构造分析必须测量变形，近二十多年发展起来的应变测量方法对分析构造运动的全貌起了很大的作用。这种方法目前仍在不断地丰富和完善中。

显微构造的视域很小，它能从矿物的变形中得到某些局部变形的信息，补充野外宏观标志不足的损失。但是，这只能代表局

部的应变情况，不能以一两个这样的分析推测出区域构造应力场。古应力场只能从其应变的结果作推测，需要野外构造和显微构造相配合，需要细致分析局部变形与总体变形的相互关系，从而得出符合实际的结论。

在以往的构造分析中，常测量构造透镜体的产状，即它的三个主轴的产状，并且认为短轴一定平行压应力方向，长轴一定平行拉应力方向。这种做法并不总是正确的，这个问题也涉及局部与整体，应变与应力的关系。

图1-3表示一个原始单元体和单位圆在外应力场不变的情况下，受到简单剪切而逐渐变形的过程。从图中A变到A₄要经过几个中间阶段，每次都增加如图A₁所示大小的角剪应变。椭圆从A₁到A₄，扁率加大，长轴方位也逐渐旋转。外应力场是不变的，可是椭圆的主应变方位却在变化。如果认为椭圆的主轴方向就是区域

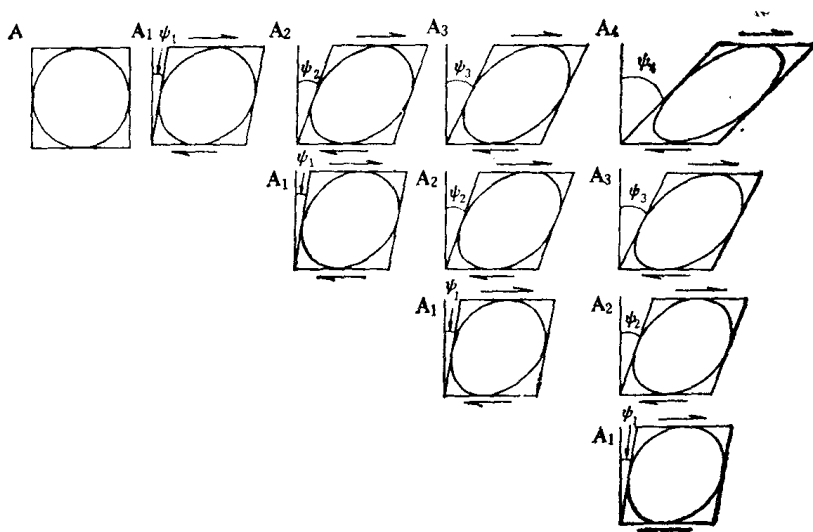


图1-3 一个单元体和单位圆在简单剪切条件下的递进变形[1]

A为变形前；A₁为第一阶段变形， ψ_1 为第一阶段角剪应变；A₂, A₃, A₄分别为第二，第三，第四阶段的变形， ψ_2 , ψ_3 和 ψ_4 是在 ψ_1 之上依次叠加 ψ_1 , ψ_2 和 ψ_3 角剪应变。

应力场的主应力方向，就会得出区域应力场在不断改变的结论，但这是错误的。事实上，不变的区域应力场可以使局部单元体的主应变方位不断改变。所以，简单剪切应变椭圆的长短轴一般不代表区域应力场的主方向，它只是局部应变场的主方向。在2-2节中还要讨论这个问题。

1-3 构造变形与显微构造分析

要测定地质体的构造变形，需要寻找一些标志物。最早利用鲕粒作标志物^[2]，因为它的原始形状是圆球状。后来许多种非球状化石也用作标志物，因为它们的某些器官有固定的长度比或者稳定的角度，可用以恢复局部应变场。兰姆赛曾作过有关应变测量工作的阶段性总结^[3]，这些方法已经陆续介绍到我国^[4-7]，并且在三维有限应变测量方面有所发展^[8]。不断丰富应变测量方法对认识区域的构造变形起着很大作用。近年来，有人利用显微标志确定局部变形情况，补充了野外标志物的不足。这种显微分析，主要是利用岩脉的纤维状矿物和压力影^[9-11]。大概亚当斯(Adams)^[12]和帕伯斯特(Pabst)^[13]最早开展了这方面的研究，兰姆赛和胡伯将其完善化并作了归纳^[14]，国内也有人将压力影的分析编了计算程序^[15]。这些成果为解决区域构造提供了很有趣的信息。

以往，认为推覆体的整体位移很大，而本身的变形可能很小。实际上推覆体的内部变形不仅明显，而且是判断推覆方式的依据之一。一个推覆体如果要向前并向上运动，则它后面的推力必须克服推覆体前面的阻力和本身重量的后滑分量(图1-4上)，这种受力方式很像图1-1的情况，不过是倾斜的块体作爬坡的匀速运动，于是产生挤压的变形。在这些长轴垂直滑动面的变形椭圆中靠近底部的那些椭圆，由于受到底面摩擦而向前倾倒(图1-4下)，椭圆的扁率由前(图中的左部)向后逐渐变大。如果一个

地质体靠自己的重力下滑，其前面的地质体下滑快，后面的下滑慢，会在地质体两端造成拉伸受力条件（图1-5），上图为该地质体的受力图，下图为其内部变形情况，由上往下有压扁逐渐明显

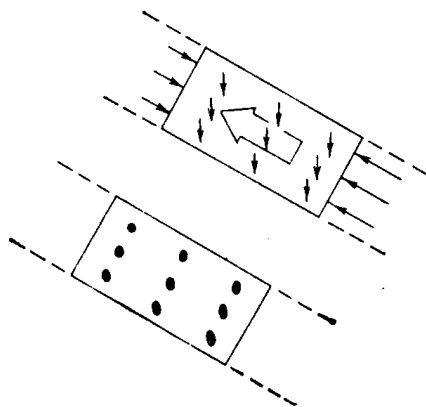


图1-4 受推力而运动的推覆体

上图为受后部地质体推动而向前运动的推覆体，它的受力情况与图1-1相似。下图为其内部各部位的变形。

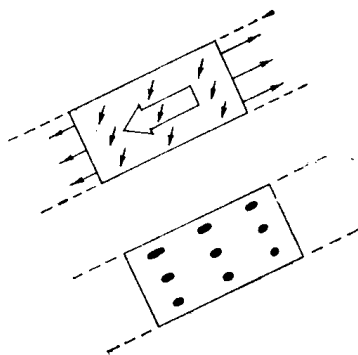


图1-5 受重力下滑的“滑覆体”

上图为下滑时的受力图。其前面的地质体拉它向前，后面的地质体拖其向后，于是造成拉伸，下图为其内部各点的变形。

化的趋势。由前往后，横向拉伸有逐渐增加的趋势。如果在一个推覆体剖面上测了足够多的点的变形，将其与图1-4和与图1-5进行比较，与哪个相近些，就能推测是哪种运动方式。

欧洲阿尔卑斯地区是研究推覆体的发源地。几个大型推覆体都移动了相当远的距离。可是，这些推覆体是被推来的，还是靠重力自己滑下来的却一直没有解决。兰姆赛领导的一些瑞士地质学家对莫柯勒斯（Morcles）推覆体作了相当数量的应变测量，其结果示于图1-6。该推覆体内的后部（南东部位）比前部拉长更甚，底部比上部拉长更甚，长轴为NW—SE向。这个测量结果与图1-5的例子更相近，似乎有理由说，该推覆体的运动方式是重力下滑的而不是被推移的，尽管它现在的位态好像在向上爬。我们从分析他们的应变测量结果中得出重力下滑的推论，尚不知道

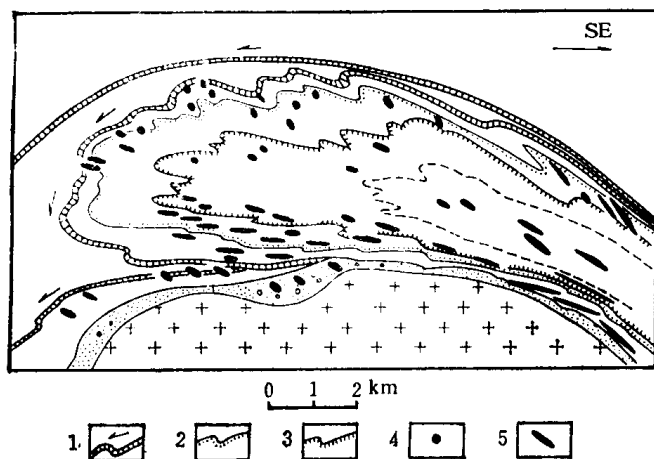


图1-6 莫柯勒斯（Morcles）推覆体的应变测量结果^[14]

剖面图。1.推覆体界面，韧性断层带，2.白垩系顶界，3.侏罗系顶界，4.单位图，5.应变椭圆。

没有测量过的其他推覆体是否有相同的情况。除了推覆构造外，显微构造在其他区域构造分析中，也提出不少证据。法国学者利用显微构造解释山链的形成和板块运动^[16]，已有专门介绍^[17]，

在利用显微构造方面他们有独特的见解。

可见“显微构造”并不是显微镜下的构造，而是借助显微镜研究包括大地构造在内的整个地质构造。

参 考 文 献

- [1] Rangan, D.M., 1973, "Structural Geology", 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc.
邓海泉, 徐开礼译, 1984, "构造地质学", 地质出版社。
- [2] Cloos, E., 1947, Oolite beformation in South Mountain fold, Maryland, *Bull. Geol. Soc. Am.*, **58**, 893—918.
- [3] Ramsay, J.G., 1967, "Folding and Fracturing of Rocks", McGraw-Hill, London.
单文琅, 宋鸿林, 蒋荫昌译, 1985, "岩石的褶皱作用和断裂作用", 地质出版社。
- [4] 宋鸿林, 1981, 应变测量及其地质意义, 地质与勘探, 2。
- [5] 何绍勋, 1982, 变形岩石的应变分析, 地质与勘探, 2。
- [6] 韩玉英, 1984, "有限应变几何学及其在地质学中的应用", 地质出版社。
- [7] 郑亚东, 常志忠, 1985, "岩石有限应变测量及韧性剪切带", 地质出版社。
- [8] Shao, J. and Wang, C., 1984, Determination of strain ellipsoid according to two-dimensional data on three or more intersection planes, *J. Math. Geol.*, **16**, 823—833.
- [9] Ramsay, J.G., 1980, The crack-seal mechanism of deformation, *Nature*, **284**, 135—139.
- [10] Durney, D.W. and Ramsay, J.G., 1973, Incremental strain measured syntectonic crystal growths, In "Gravity and Tectonics" (K.A. De Jong and R. Scholten eds), 67—96, Wiley, New York.