

显微构造地质学概论

胡 玲 编 著



地 质 出 版 社

中国地质大学(北京)“跨世纪中青年学科带头人及骨干教师”建设项目
国土资源部地质力学开放实验室项目(项目编号dlkf-9802)

联合资助

显微构造地质学概论

胡 玲 编 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

书中介绍了岩石的变形及其影响因素、矿物的晶体缺陷及位错、显微构造变形机制、常见的微观构造变形现象、主要造岩矿物的变形、构造岩及有关问题研究（如构造岩的基本类型及其特征、构造岩与构造层次、构造岩与变质相、构造岩的脆-韧性转换、构造岩的成分变异及体积变化、构造岩的岩组和磁组构等），以及显微构造在地质学中的应用（包括运动学、动力学及应变分析，推断变形温压条件，变形过程及变形历史分析等）。

本书可作为高校地质类有关专业的教材或参考书，也可供从事构造地质、显微构造、变质岩、区域地质调查等方面工作的研究人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

显微构造地质学概论/胡玲编著. —北京：地质出版社，1998. 11

ISBN 7-116-02510-3

I. 显… II. 胡… III. 显微构造-构造地质学 IV. P54

中国版本图书馆 CIP 数据核字（98）第 02405 号

地质出版社出版发行

（100083 北京海淀区学院路 29 号）

责任编辑：叶 丹

责任校对：范 义

*

北京地质印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：10.5 图版：1页 字数：240 千字

1998 年 11 月北京第 1 版 • 1998 年 11 月北京第一次印刷

印数：1~1000 册 定价：16.00 元

ISBN 7-116-02510-3

P • 1858

（凡购买地质出版社的图书，如有缺页、倒页、脱页者，本社发行处负责调换）

前 言

显微构造是近代构造地质学中蓬勃发展的一门分支学科，80~90 年代取得了许多重要进展，目前，已成为研究生（地质、矿产等）的重要课程。国内现有的几本教学参考书均出版于 80 年代，反映了 80 年代中期的水平。本书在吸取了上述已有的 80 年代教材精华的基础上，又参考了大量 90 年代的新进展和新成果，更融入了笔者十多年来的研究和教学心得；因此，本书既是一本教学参考书，同时也兼具专著性质。

本书的编写和顺利出版要特别感谢李东旭教授和宋鸿林教授。多年来他们谆谆教导、鼓励关心笔者显微构造的科研和教学工作，并在百忙之中分别审阅了本书初稿，提出了许多宝贵的修改意见，宋鸿林教授提供了许多参考资料，李东旭教授还为本书作序，使本书增色不少。顾德林教授也审阅了本书初稿。在本书的编著和出版过程中，还得到了吴淦国教授、温长顺教授、国土资源部地质力学所白嘉启副研究员、刘文灿副教授、苏尚国副教授、胡道功博士、赵国春博士、李万伦博士、韩淑琴硕士等的大力支持和热情帮助，在此笔者谨向他们致以最诚挚的感谢！

由于笔者水平有限，疏漏、错误肯定不少，敬请广大读者批评指正。

胡 玲

1998 年 8 月

代 序

宏观与微观相结合的研究方法是一种很普通的科学研究方法，然而构造地质学领域里大多数学者仅进行宏观大地构造研究而很少深入探讨微观构造机理，只有少数学者从事显微构造研究。实际上显微构造不仅对岩石变形变质的机理的深入理解可提供重要证据，同时还可了解岩石变形的物理化学条件、组成地球岩石的各圈层的动力学状态提供大量信息，甚至还可以合理解释元素的活化、迁移和聚集等成矿机制。此外，对于岩石圈中流体的运移、地质灾害也可提供一定的信息。基于上述考虑，我们认为普及显微构造知识，推进显微构造研究是极为必要的。为此，从 1978 年我校恢复招收研究生起，就开始给地质力学和构造专业学生设置了这门必修课。遗憾的是当时的北京研究生部没有能讲授此课的教员，于是先后聘请了北京大学刘瑞珣教授、武汉郭保罗教授兼课达十余年之久。在此期间，我也曾先后动员校内年轻教员攻研这一方向，设法自己开课，但皆半途而废。其中只有胡玲从 1985 年考取硕士研究生开始，就坚持不懈地攻研这一方向，终于从 1991 年开始独立讲授这门课程，并通过多次讲课实践编出这本教材。这不能不令人感到欣慰。

科学的进步离不开继承与发展。显微构造地质学在国内也曾有过一段发展历史，可概分为二个阶段：

70 年代以前，有文献可查阅的主要有三位学者做出过贡献。首先是李四光（1889~1971），他早在 40 年代就已经从组成岩石的晶体或非晶体的粒间滑移、晶格位错解释岩石的塑性变形和流变现象（1947），并用这种蠕变现象进一步解释大陆岩石圈的滑移以及全球大陆运动规律（1951）。他在《地质力学概论》（1962）一书中强调，在鉴定构造形迹时，不仅要注意岩石的形变，还要注意矿物的相变，指出应力矿物也是鉴定结构面力学性质的标志。他特别提出：“地质力学的工作今后必须和分子乃至原子间力场的研究密切结合起来”。他还用离子间吸引力、排斥力和位能与距离的关系解释了岩石弹-塑性能的统一性与松弛现象。由此不难看出，李四光教授对显微构造的论述篇幅虽然不多，但内容的广度与深度到现在仍未失去其重要的科学价值。此外，何作霖教授（1900~1967）是最早将 Sander 岩石组构学介绍到国内的学者（1934）。王嘉荫教授（1911~1976）是国内最早重视岩石薄片构造现象研究的岩石学家，也是最早在大学课堂上讲授《应力矿物学》的学者。

70 年代以后，随着国内几个地质院系先后设立地质力学专业，北京大学地质系、武汉地质学院、长春地质学院、成都地质学院、山东海洋学院地质系都曾开设过“岩组学”、“应力矿物学”、“构造矿物学”、“显微构造学”等课程，并编印了教材。当时把显微构造研究看作是鉴定构造形迹的一种重要方法，是地质力学的组成部分，有些地质力学教材也包括有关内容。无论怎么讲，70 年代中期至 80 年代中期，是我国显微构造研究的一个高峰期。此后，随着地质力学专业的取消，这门课程在有些院校也被取消了。

由此可见，胡玲今天编写的这部教材是与前人的工作基础分不开的。这本书的最大特

色是吸取了 70~80 年代已出版教材的优点, 纳入了 90 年代以来国内外有关最新研究成果, 力求促成一门内容较丰富、较系统、较全面、较实用的学科体系。

显微构造地质学是一门新的知识体系。从现代科学的角度看, 它既具有横断性, 也具有多缘性。它是从岩石学、矿物学、结晶学, 乃至矿床学中提取出的特殊现象——显微构造作为研究对象, 研究中涉及多种学科, 诸如构造地质、地质力学、弹-塑性力学、流变学、金属物理、固体物理、原子物理、物理化学、地球化学, 乃至耗散结构、分形理论、非线性理论等; 还涉及各种测试技术, 如实验岩石学、岩石力学实验、透射电镜, 以及各种物质成分测试技术等。其研究成果将有助于解决地质科学中若干基础理论问题, 具有重要的科学意义。

总之, 显微构造学是一门正在发展中的学科, 有待进一步向纵深发展。从这个意义上讲, 这本教材具有承前启后的作用, 希望今后能进一步的发展、健全和完善。

中国地质大学(北京)地矿系教授

李东旭

1998 年春节

目 录

前 言

代 序

绪 论..... (1)

第一章 岩石的变形及影响因素..... (4)

一、有关岩石和矿物变形的基本概念..... (4)

(一) 弹性变形与塑性变形 (4)

(二) 脆性行为与韧性行为 (4)

(三) 应变硬化与应变软化 (4)

(四) 蠕变 (6)

(五) 均匀性与非均匀性 (7)

(六) 纯剪切变形与简单剪切变形 (7)

二、影响岩石和矿物变形的因素..... (8)

(一) 外部因素 (8)

(二) 内部因素 (16)

第二章 矿物晶体缺陷和位错 (19)

一、晶体缺陷及其分类 (19)

(一) 点缺陷 (19)

(二) 线缺陷 (20)

(三) 面缺陷 (20)

(四) 体缺陷 (22)

二、位错及其运动 (22)

(一) 位错的含义及类型 (22)

(二) 柏格斯矢量 (23)

(三) 位错的一些基本性质 (24)

(四) 位错的运动与增殖 (24)

三、部分(不全)位错及位错的分解 (29)

四、位错亚构造 (31)

(一) 自由位错 (31)

(二) 位错列或位错壁 (32)

(三) 镶嵌构造 (32)

(四) 堆垛层错 (34)

五、位错研究方法 (34)

(一) 表面法(也叫化学侵蚀法) (34)

(二) 缀饰法 (35)

(三) 透射电镜法	(36)
(四) X 射线衍射形貌法	(36)
(五) 场离子显微镜法	(36)
第三章 显微构造变形机制	(38)
(一) 显微裂隙的产生	(38)
(二) 碎裂作用和碎裂流动	(39)
一、显微破裂、碎裂作用和摩擦滑动	(38)
二、位错滑动	(39)
(一) 平移滑移	(39)
(二) 双晶滑移	(40)
(三) 扭折	(41)
三、位错蠕变	(43)
四、动态重结晶作用	(44)
(一) 亚晶粒旋转重结晶	(44)
(二) 颗粒边界迁移重结晶	(44)
(三) 颗粒迁移重结晶	(44)
五、扩散蠕变	(45)
(一) 体积扩散蠕变	(45)
(二) 晶粒边界扩散蠕变	(45)
(三) 超塑性蠕变	(46)
六、溶解蠕变	(47)
七、相变	(48)
第四章 常见的微观构造现象	(50)
一、常见的显微构造现象	(50)
(一) 显微破裂	(50)
(二) 矿物的光性异常	(51)
(三) 消光带	(51)
(四) 扭折带	(51)
(五) 变形纹	(52)
(六) 机械双晶	(53)
(七) 亚晶粒	(55)
(八) 动态重结晶新晶粒	(55)
(九) 静态重结晶新晶粒	(55)
(十) 核幔结构	(57)
(十一) 碎(残)斑系	(57)
(十二) 变斑晶包迹构造	(61)
(十三) 书斜式构造	(62)
(十四) 云母鱼	(62)
(十五) 砂钟构造	(63)
(十六) 带状构造	(63)

(十七) S-C 面理	(65)
(十八) 显微分层现象	(66)
(十九) 压溶构造	(66)
(二十) 出溶构造	(68)
(二十一) 显微褶皱	(69)
二、超微构造	(70)
三、微观构造样品的制备和研究方法	(70)
(一) 野外采样	(70)
(二) 室内整理及切制薄片	(70)
(三) 超微样品的制备	(71)
第五章 主要造岩矿物的变形行为	(72)
一、橄榄石	(72)
(一) 结晶学	(72)
(二) 滑移系	(73)
(三) 橄榄石的变形行为及变形机制	(73)
(四) 橄榄石的相变	(76)
(五) 由变形橄榄石引起的地震波速各向异性	(77)
二、辉石	(77)
(一) 结晶学	(77)
(二) 滑移系	(79)
(三) 辉石的变形行为及变形机制	(79)
三、角闪石	(80)
(一) 结晶学	(80)
(二) 滑移系	(80)
(三) 普通角闪石的变形行为及变形机制	(81)
(四) 蓝闪石	(82)
四、云母	(83)
(一) 结晶学	(83)
(二) 滑移系	(84)
(三) 云母的变形行为及变形机制	(84)
五、长石	(85)
(一) 结晶学	(86)
(二) 滑移系	(87)
(三) 长石的变形行为及变形机制	(89)
六、石英	(93)
(一) 结晶学	(93)
(二) 滑移系	(93)
(三) 石英的变形行为和变形机制	(95)
七、方解石和白云石	(96)
(一) 结晶学	(96)

(二) 滑移系	(98)
(三) 方解石的变形行为及变形机制	(99)
(四) 白云石的变形	(101)
第六章 构造岩	(102)
一、概述	(102)
二、构造岩的基本特征	(104)
(一) 断层角砾及断层泥	(104)
(二) 碎裂岩系列	(105)
(三) 玻化岩	(105)
(四) 糜棱岩系列	(108)
(五) 变余糜棱岩	(109)
(六) 构造片(麻)岩	(110)
(七) 叠加构造岩	(110)
三、构造岩与构造层次	(111)
(一) 碳酸盐糜棱岩(包括结晶灰岩和隐晶质灰岩)	(111)
(二) 富石英质糜棱岩	(112)
(三) 富长石质糜棱岩	(112)
(四) 橄榄岩糜棱岩	(112)
四、构造岩与变质相	(114)
(一) 构造变质作用	(114)
(二) 不同变质条件下的变形作用	(115)
五、构造岩的脆-韧性转换	(116)
(一) 脆-韧性转换的显微构造特征	(116)
(二) 脆-韧性转换研究的意义	(118)
六、构造岩的成分变异及体积变化	(119)
(一) 构造岩的成分变异	(119)
(二) 构造岩体积变化及估算	(119)
七、构造岩组构	(121)
(一) 构造岩岩组学	(121)
(二) 构造岩磁组构	(126)
第七章 显微构造在地质学中的应用	(130)
一、运动学分析	(130)
(一) 判别准则	(130)
(二) 判别标志	(130)
二、动力学分析	(132)
(一) 推导主应力方位	(133)
(二) 估算古应力值的大小	(137)
三、应变分析	(141)
(一) 估算应变变大小	(141)
(二) 定量分析应变方式	(144)

(三) 估算应变速率的大小	(147)
四、变形温压条件分析	(148)
(一) 变形纹	(149)
(二) 扭折	(149)
(三) 机械双晶	(149)
(四) 矿物的活动滑移系	(149)
(五) 矿物的动态重结晶	(149)
(六) 矿物的变形现象组合	(149)
(七) 糜棱岩中新生的基质矿物组合	(150)
五、变形过程及变形历史分析	(150)
主要参考文献	(153)
图版说明及图版	(158)

绪 论

常规的构造地质学按构造尺度的概念可分为巨型、大型、中小型、微型及超微型，其具体尺度大约在 $10^3 \sim 10^8 \text{cm}$ 之间。其中，巨型和大型构造常常是大地构造及区域构造所涉及的研究范畴，中小型构造是构造地质的研究领域，而微型及超微型构造则是显微构造所研究的范围。但是，显微构造与其它构造的区别不仅仅是在尺度上。因其尺度小，所涉及的物质基础不再仅仅是岩石，主要是各类造岩矿物。因而显微构造其实是构造地质学与岩石学、矿物学相结合的一个研究领域。它同时还涉及到金属物理学及材料学、岩石力学、地球化学等不同学科的知识，是一门多学科交叉的边缘学科，因此也有人称之为构造岩石学、构造矿物学、应力矿物学，等等；它们虽各有侧重，但其研究内容及研究目的却大致是一致的，主要都是涉及构造作用下岩石和矿物的变形行为、变形机制、变形环境、构造的运动学和动力学以及变形史等方面的问题，进而探讨区域及大地构造，乃至探讨岩石圈的组成和演化，等等。

显微构造的研究主要开始于本世纪初。在 19 世纪末及 20 世纪初，美国等国的一些科学家已经注意到了微观构造现象。本世纪 30 年代，奥地利学者 Sander 出版了《岩石的组构学》一书。他从微观角度出发，研究了岩石中矿物结晶优选方位及其与应力间的关系，阐述了几何对称分析方法和运动学关系的解释原则，揭示了岩石的变形特征和变形规律，成为显微构造的研究先驱。此后，带动了一批岩石学家从事天然变形岩石组构的分析和研究，如美国学者 Knopf (1933、1938) 和 Fairbain (1949)，分别介绍了“岩石构造学” (petrotectonics) 和“构造岩石学” (structural petrology) 的显微组构分析方法，使岩组学及显微构造得到了很快的发展，也为显微构造地质学作为一门独立学科奠定了基础。

由于注意到对天然变形岩石组构研究的推测性，到 50~60 年代，各国科学家开展了一系列实验岩石学研究。Turner (1953) 首先开创了利用人工合成和天然材料的矿物变形实验研究，指出了将矿物变形与应力状态变化联系起来的研究方向。之后，由 Carter 等许多学者进一步发展，积累了大量在不同应力应变条件下矿物变形实验研究的资料文献，并解决了外推自然界的方法技术问题。1963 年，Turner 和 Weiss 的《变质构造岩的构造分析》一书，对变形矿物和岩石的塑性变形机制及组构优先方位型式进行了广泛的讨论，并对变形岩石的性质、意义及其分析程序和方法进行了全面总结和重新评价，较系统地提出了矿物变形的运动学和动力学分析的思路与方法，指出其可适用于各种尺度的构造分析，并首先利用方解石双晶纹进行了岩石变形的动力学分析 (Turner, 1948、1963)，奠定了现代岩石变形实验研究的重要基础。这也是显微构造发展史上第二次重要的总结。

70 年代以来，随着新理论 (金属物理学及材料学位错理论和流变学理论等) 及新技术 (X 光岩组、透射电子显微镜、电子计算机等) 的引入，岩石、矿物变形实验的不断完善，以及国际间广泛的合作和交流，使显微构造研究无论在深度、广度上，还是在应用范围上都得到了快速发展。Vernon (1974) 的《变质反应与显微构造》一书广泛利用了电子探针

资料及透射电子显微镜的研究成果,着重论述了常见硅酸岩矿物的变形、恢复、重结晶和颗粒生长的过程及实验结果;Nicoles 和 Poirier (1976) 的《变质岩的晶质塑性和固态流变》一书则积极倡导位错理论和流变在阐述岩石变形流动过程中的地位和意义,并着重对上地幔橄榄岩塑性流变作了较全面的论述。这些可以说是显微构造发展史上的第三次重要的总结。

由于显微构造的飞速发展,70 年代召开了一系列的国际会议,如 1976 年在荷兰莱登堡召开的“组构、显微构造和微型构造”国际会议,1978 年澳大利亚地质学会召开的“变形和变质作用的显微构造过程”会议等,都强调了微观研究在构造变形分析中的重要作用。70 年代,显微构造的飞速发展已充分引起了各国地质科学家对显微构造和组构研究的重视,国际地科联构造委员会因而把显微构造研究列为 80 年代构造委员会的两项中心任务之一,这就更促进了它在 80 年代的发展。1981 年在美国召开的“彭罗斯(Penrose)糜棱岩”国际会议,1986 年在伦敦召开的“国际剪切准则会议”,以及 Wenk 等(1985)的《变形岩石和金属的优选方位》以及 Poirier (1985)的《晶质的塑性蠕变》等书,分别展示和总结了近年来的成果。

国内许多学者从不同角度也对这一时期显微构造的研究成果和进展进行了广泛的介绍和归纳(肖庆辉等,1982、1985;宋鸿林,1986、1993;钟增球,1985、1988、1994;嵇少丞,1986、1988;任建业,1988;王国灿,1993、1994;金振民,1993、1994 等),内容主要集中在高温高压岩石力学变形实验和对变形岩石的观察研究两大方向,及不同变形岩石,特别是糜棱岩及矿物的变形行为、变形机制、运动学和动力学参数、变形环境、变形变质史等几大方面,反映出我国学者对这一研究领域的重视。因而,70~80 年代可以称得上是显微构造领域向前发展的黄金时代,也使得显微构造日趋成为一门具有独立特色的学科。

进入 90 年代,显微构造研究则更加注重对中下地壳,乃至上地幔深层次变形岩石的变形、普通的非共轴变形应力状态、岩石的脆-韧性转换、变形变质流体及有关的成分变化、体积变化,乃至与成矿的关系等,研究内容更加广泛、深入。

由于显微构造地质学研究在近 20~30 年的飞速进展,带动了在地质领域,尤其是在构造地质领域中取得了飞跃性的发展,出现了不少新的动向,主要表现在以下几个方面。

1. 构造分析已由简单的几何学描述发展到研究构造运动学和构造动力学阶段。通过显微构造的研究,不仅可以揭示岩石和矿物的变形机制、变形动力学过程及其有关热力学信息,而且通过变形实验和理论模拟,能够量化估算变形过程的差异应力、应变速率、粘度等,建立优选方位模式,阐明影响岩石变形的内在和外因因素,由此可建立起不仅是构造几何学,而且包括了运动学、动力学的构造模式及机制。

2. 构造地质学研究的领域已由区域-露头尺度扩展到洋壳、陆壳,乃至全球规模的超宏观研究,以及光学显微镜和电子显微镜下的微观、超微观研究,各种不同尺度的研究已逐步统一起来,共同探讨构造地质学,乃至地质学中的各种根本问题。

3. 构造研究已由地壳浅部的脆性变形研究进入到对中下地壳,乃至上地幔的韧性变形研究,并按照岩石圈不同层次中主导的变形机制、岩石变形行为及构造表现形式等的不同,划分出不同的构造层次,为岩石圈组成及其演化的研究提供了新的思路。

4. 构造地质分析已由定性逐步走向定时、量化。通过显微构造研究可获得大量的几

何数据和应力状况的参数，计算机以及平衡技术等的应用使得定量化研究进一步向纵深发展；同位素年代学，如通过详细的构造事件年代测定等方面的研究进展又使得定时的研究变质地体或造山带的构造演化史、热衰减史、山脉隆升史等成为现实，从而使构造地质分析实现了从定性到定时、定量的飞跃。

5. 构造地质学与其它学科之间的交叉、渗透已越来越广泛。目前，对任何一个重大地质构造问题的探讨都已远远超出构造地质本身方法的范畴。当代构造地质学正朝着阐明地球构造作用的物理学和化学过程方向发展，出现了构造流变学、构造热力学、构造相变学、系统构造学等新的学科和分支。这些新的交叉及横断学科的形成与发展必将使构造地质学的研究内容和学科结构发生重大变化。

总之，显微构造地质学的研究与其它尺度构造地质研究的紧密结合及多种学科之间不断地相互交叉渗透，已使得地壳变形的研究步入了从浅部到深部、从脆性到韧性、从定性到定量、从微观到超微观、从构造几何学到运动学及至动力学发展的新阶段。显微构造不仅已成为解决大地构造基本问题必不可少的工具，而且已成为构造地质基础研究工作的主要组成部分。显微构造的研究在构造地质学领域也日益显示出其独特的和不可替代的作用。

第一章 岩石的变形及影响因素

地质作用引起地质体的变形称为构造变形。岩石和矿物受力后，其内部的组分和质点会发生运动和位移，其表现形式为变形和变位。变形的的主要方式可以是脆性，也可以是韧性，或者介于二者之间。相应地，变形的岩石和矿物也表现出不同的力学性状，它们既受岩石、矿物本身性质（内因）的制约，也受环境条件（外因）的影响。在讨论内因和外因之前，我们有必要先介绍几个有关的基本概念。

一、有关岩石和矿物变形的基本概念

（一）弹性变形与塑性变形

图 1-1 是一个简单的应力-应变曲线。在 P 点之前，曲线为直线，卸载后，介质能立即恢复到应变前的形状和大小，这种特性称为弹性。如果超过弹性极限 P 卸载，介质不能立即恢复到原来的形状和大小，甚至保持有永久变形（ OE ），这种性质称为塑性，过 P 点后产生的变形叫塑性变形。塑性变形的实质是矿物晶体内部晶格位错的滑移（详见下一章）。

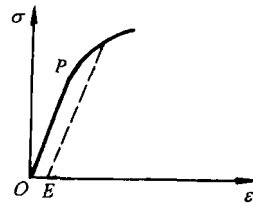


图 1-1 脆性材料拉伸的应力-应变曲线

（二）脆性行为与韧性行为

脆性状态是指岩石和矿物出现明显破裂，并且在破裂之前未出现明显的永久变形，其应力-应变曲线见图 1-2 中的脆性类型，表现为由直线部分直接破裂或直线后经短暂的曲线而破裂。

韧性（金属学上称为延性，有人也译为柔性）状态是指岩石或矿物在没有明显破裂的情况下，其形状和大小可发生显著变化的性质。地质学上指没有明显不连续面的变形，其应力-应变曲线如图 1-2 中的 4、5 列（韧性在材料力学中是指材料在塑性变形过程中吸收能量的能力，与地质学中的含义有所不同）。

地质构造中脆性与韧性的差异，主要在于岩石或矿物能否经受显著的永久变形而不破裂。一般来讲，靠近地表的岩石多处于脆性状态，随着深度的增加及温度和压力的增高，岩石逐渐由脆性向韧性过渡，直至完全为韧性变形。

图 1-2 中根据试件应变量的大小给出了一个确定脆性与韧性相互转换的数量界线，即大致以破裂前应变量的 5% 左右为界线，其中 2%~8% 之间为脆-韧性。对剪切带的脆、韧性划分，人们一般引用 Ramsay (1980) 提出的划分法（图 1-3）。

（三）应变硬化与应变软化

图 1-4 是几种不同的应力-应变曲线， P 点为屈服极限（或弹性极限）。前已述及，过 P 点以后的变形为塑性变形，塑性变形可以出现三种不同的应力-应变曲线：a. 曲线上斜，

为应变硬化；b. 曲线水平为稳态蠕变，也称纯塑性变形；c. 曲线下斜，为应变软化现象。应变硬化或应变软化与塑性变形的微观机制有关，这在以后的有关章节中还会继续深入讨论。这里介绍金属学中反复加卸载出现的应变硬化及软化现象、地质变形中的有关特征，并简要探讨其机制。

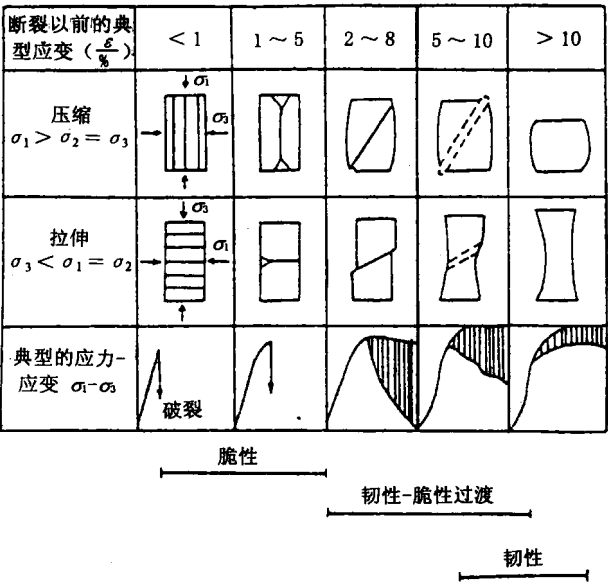


图 1-2 从脆性到韧性行为的变形特征及其应力-应变曲线形式
(据 Griggs 等, 1960)

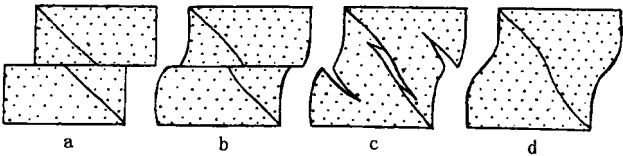


图 1-3 不同剪切行为的剪切带
(据 Ramsay, 1980)

a—脆性；b—初-脆性；c—脆-韧性；d—韧性

人们早就在对金属变形的实验中发现，当金属加载至产生塑性变形时卸载，再以同样的应变速率加载，则第二次达到塑性变形时所需的应力比第一次高，也即弹性极限和强度极限都提高了。继续反复这种过程，试件已经积累了一定的永久变形。这种经过多次加载和卸载实验的试件的弹性极限和强度极限，比未经实验的同类试件要高，即应变后的材料变硬了，这种现象在低温条件下特别明显。在金属工艺中，常利用这一力学性质来改善零件强度，比如钉子就是在制造过程中冷拉，超过屈服极限而使其硬化。如果不希望有这种应变硬化效应，则采用热处理（退火处理），再恢复其原有的延性和弹性。比如制造枪炮时，先使炮筒壁上的金属伸长超过屈服点，然后再进行热处理，使材料恢复或改善其弹性

性质，其实质也就是让材料晶体内的位错在高温下更容易攀移从而产生恢复作用，直到达到所需要的性质为止。

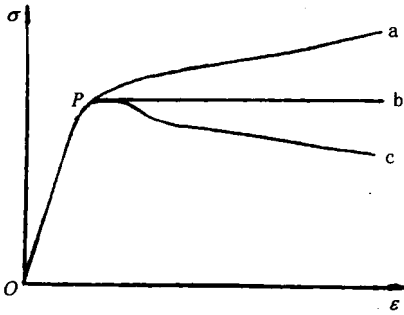


图 1-4 岩石应力-应变曲线示意图

a—应变硬化曲线；b—稳态蠕变曲线；c—应变软化曲线

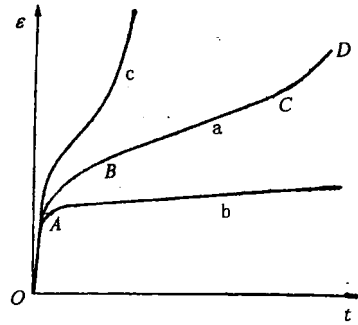


图 1-5 蠕变曲线

a—典型的蠕变曲线；b—低温和低应力下的蠕变曲线；c—高温和高应力下的蠕变曲线

地质构造变形中也同样存在应变硬化现象，如晚期的强变形区域并不总是叠加在早期变形区域上，尽管两者相邻，表现了空间上的分带性及非继承性的一面。这正说明了已变形的岩石比未变形的岩石硬。但也有许多活动带的岩石经过强烈变形后仍然能继续活动，一直持续很长时间，表现了时间上的继承性。再如，在韧性剪切带的变形中，应变从边缘到中心逐渐增强，而应力值在中心并不比边缘高，持续变形却总在中心处发生，直到出现断裂为止。这说明中心带比边缘带更软，也即存在应变软化现象。可见应变硬化和应变软化都是岩石变形的属性，因而探讨岩石中这两种似乎互为矛盾的现象的显微机制是十分重要的。据刘瑞珣（1988）研究，应变软化的显微机制大致有如下几种：

- ①流体或水的作用（详见后）；
- ②压溶作用，使得一部分固相转为液相，增加了孔隙和缝隙的润滑性；
- ③变形过程中矿物粒度的细粒化，使变形滑面上的阻力减小；
- ④变形过程中矿物的定向排列；
- ⑤变形过程中显微分层构造的形成；
- ⑥变形过程中矿物边界的动态迁移；
- ⑦变形过程中的动态重结晶作用；
- ⑧构造变质作用（如绢云母化、绿泥石化等使架状硅酸盐矿物变为层状硅酸盐矿物）；
- ⑨应变能和摩擦热能的积累；等等。

（四）蠕变

是指在小的恒定应力的长期作用下，固态岩石可以发生连续增加的一般是很慢的变形。天然岩石可供利用的时间近于无限长，所以蠕变在地质学上，特别是在韧性变形岩石研究中具有十分重要的意义。

图 1-5 为蠕变曲线。根据蠕变的速率变化情况，蠕变过程可分为三个阶段，第一阶段 AB，应变速率不断减小，为过渡蠕变阶段；第二阶段 BC，应变速率恒定，为稳态蠕变，这一阶段是地质压力计最重要的变形条件（详见第七章）；第三阶段 CD，应变速率递增，