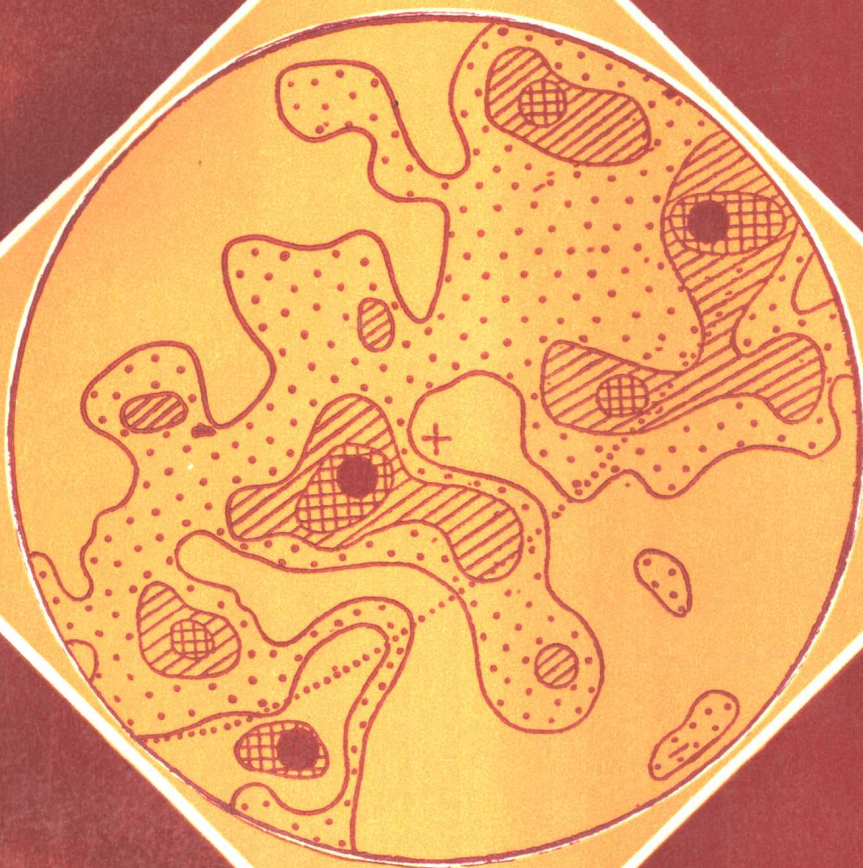




# 构造岩石学基础

何永年 林传勇 史兰斌 编著

地质出版社

# 构造岩石学基础

何永年 林传勇 史兰斌 编著

地质出版社

## 内 容 简 介

本书共有十一章,前四章阐述岩石的力学性质、变形行为及其影响因素,讨论了岩石-矿物-晶内三个层次的变形概念、特征与变形机制,详细地介绍了晶体缺陷和位错理论。第五章到第七章较详尽地叙述岩组学的基本理论、方法和变形岩石组构的运动学和动力学分析。

第八章到第十一章介绍国内外应用构造岩石学的原理、方法研究断层岩、快速变形岩石及其显微构造以及慢源岩的流变特征等内容。

本书可供从事构造、岩石等有关的地质科研人员及院校师生参考。

## 构造岩石学基础

何永年 林传勇 史兰斌 编著

责任编辑:郑长胜

地质出版社出版发行

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张:11.25 字数:254,000

1988年7月北京第一版·1988年7月北京第一次印刷

印数:1—2,650册 国内定价:3.10元

ISBN 7-116-00191-3/P·175

# 前 言

岩石变形是一种重要的构造现象，是构造地质学研究的主要内容。构造地质学论述岩石对于外加变形力的反应形式，以及由于变形作用所造成的各种构造，其目的是恢复地壳和上地幔所经受的应力、应变、应变速率、温度、压力等环境条件和历史。为了达到这一目的，宏观的野外地质工作无疑是一个重要的途径。但是，对变形作用的介质——岩石中因变形引起的显微构造和组构特征的分析研究，也是一个重要的方面。早在半个多世纪以前，Sander (1930) 创建了岩组学 (Gefüekunde der Gesteine, Petrofabric Analysis)。岩组学就是从微观的角度通过研究变形岩石的基本单位——矿物结晶学方位的空间排列型式与外加作用力之间的关系，来揭示岩石变形特征的一门学科。此后，岩组学得到了很快的发展，其研究内容也不断地扩展。代表性的著作有H.W. Fairbairn (1941)，H. A. 叶里塞耶夫 (Ёлисеев, 1953)，F. J. Turner和L. E. Weiss (1963) 等人的专著。近十年来，变形岩石的显微构造和组构研究又有了新的进展，主要是采用了冶金物理学和材料科学的最新成就，将位错理论和高电压透射电子显微镜 (TEM) 技术引进到变形岩石显微构造研究领域中来，使得结晶物质的变形研究大大地深入了一步。A. Nicolas和J. Poirier (1976) 的《变质岩中晶质塑性和固态流动》一书，很好地总结了这方面的成就。

变形岩石的显微构造研究，也是近代构造物理学 (Tectonophysics) 研究的一个重要组成部分。构造物理研究各种尺度的变形过程、变形机制和变形条件。已有大量的实验和野外证据表明，岩石变形的环境因素 (如温度、压力、应力等) 在一定的条件下，可以通过变形岩石的显微构造和组构记录 and 保存下来。因此，研究和分析这些显微构造和组构特征，便可以推导岩石变形时的环境条件，恢复变形的历史。近年来，许多文献中报导的变形显微构造地质应力计方法 (Paleopiezometry 或 Geopiezometry)，就是根据这一基本原理发展起来的。

不过，对变形岩石显微构造和组构研究的意义认识，是有一个过程的。在过去相当长的一段时间里，有些学者把微观研究看成是“锦上添花”的装饰品。近年来，人们逐渐认识到大型、小型和微型构造形成机制上的相似性和密切联系。例如，我国著名大地构造学家张文佑教授曾指出：“它们之间的关系是辩证的关系，既各有本身的特殊性，也有彼此之间的共同性。在发生和发展过程中，大型、小型和微型有相互联系的共生性；在结构和形态上也有可以互相对比的相似性；从运动学和动力学的观点看，三者是不可截然分开的” (1978)。

此外，近年来国际间广泛的合作和交流，有力地促进了这一领域的研究。例如，1976年在荷兰莱登召开的“组构、显微构造和微型构造”国际会议，1977年由英国皇家学会召开的“工程材料和地球蠕变”会议，1978年由法国国家科学研究中心主持举行的“矿物岩石变形机制国际讨论会”以及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”会议等等，都强调了微观研究在构造变形分析中的重要作用，也充分说明了地质学家对显微构造和组构研究的重视。

鉴于显微构造研究涉及到构造地质学的许多根本问题,国际地科联构造委员会十分重视这一领域的研究,把显微构造研究列为八十年代构造委员会的两项中心任务之一。1978年,上届国际地科联构造委员会主席A.伯塞尔森和秘书长H.兹瓦特联名发表了一篇题为“构造地质学的根基”的论文,文中认为,如今对构造地质学者最大的一个挑战,是构造地质学被过于通俗化,牺牲“徒步”地质学家的辛勤劳动而热衷于制作模型的风气太流行了。这种风气不利于构造地质学基础理论研究的探讨和发展。面对这一情况,构造委员会决定,把原来侧重于编制世界各大洲构造地质图的工作转移到两个领域中:(一)前寒武纪地盾区的构造;(二)显微构造,并决定在构造委员会下面设立前寒武纪构造分委会和显微构造分委会。由此可以大致地看到国际间有关变形岩石显微构造研究发展的趋势,以及对这一领域研究工作的重视程度。

在我国,组构与显微构造研究也已有数十年的历史。何作霖先生早年在奥地利留学时是B.Sander的学生,他回国后首先把岩组学引入国内(1943),不久后又亲自创制了我国第一台X-射线组构测量仪(1947)。此后,张文佑,王嘉荫,池际尚等老一辈地质学家,都对我国的这一领域起过推动作用。近年来,我国的显微构造和组构研究获得了迅速的展。1980年在北京召开了第一届全国显微构造与组构学术讨论会,并在中国地质学会构造专业委员会内,成立了显微构造与组构专业组。在专业组的组织下开展了一系列学术交流活动,使我国的显微构造和组构研究向前迈进了一步。例如,对断层带岩石和深流岩石的显微构造研究,变形显微构造地质应力计以及高压透射电子显微镜技术的采用等等,都获得了较好的结果。

但是,必须指出,显微构造和组构研究本身也存在着不少问题和局限。例如,变形显微构造和组构研究是从微观的尺度来研究岩石变形的,而地质学所关心的往往是宏观的岩石类形问题,加上岩石变形的地质条件和发育历史极为复杂。因此,根据微观分析获得发结论(认识)应用到宏观的实际地质问题上时必须谨慎。又如,显微构造特征研究的一个重要的依据,是实验室里岩石实验变形的结果,然而实验室条件与自然界的环境存在着差别,因此这里面就可能有很大的误差。同时,显微构造与组构分析本身在理论上和方法上也还存在不少问题有待于改进和解决。

最后,还要说明两点:1.本书虽然采用了《构造岩石学基础》这一名称,但所包含的内容超出了狭义的岩组分析的范围,同时又有别于广义的构造岩石学,因为它不包含露头尺度的小构造以及火成岩的原生构造研究等内容。2.近年来,在构造地球化学(这里主要指研究岩石变形过程中物质的迁移规律的内容),应力腐蚀以及组构型式的计算机模拟和物理模拟等方面有了迅速的进展,限于笔者的经验和知识,本书没有涉及这些方面的内容,希望今后有机会时再加以补充。

本书是笔者在中国科技大学研究生院数年来讲授构造岩石学的基础上补充完善的。钟大赉教授审阅本书全稿,笔者根据他的意见作了必要的修改。马志先老师审查了本书初稿,从柏林副研究员对本书提出了中肯的建议并给予了很大帮助,在此一并志谢。书中肯定还会有不少疏漏不当之处,欢迎批评指正。

# 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| <b>第一章 岩石变形</b> .....           | 1  |
| 一、应力作用下岩石的力学行为 .....            | 1  |
| (一) 弹性 .....                    | 1  |
| (二) 非弹性 .....                   | 1  |
| (三) 蠕变 .....                    | 2  |
| 二、影响岩石力学性质及变形行为的各种因素 .....      | 2  |
| (一) 外界物理环境的影响 .....             | 2  |
| (二) 岩石本身因素的影响 .....             | 5  |
| <b>第二章 岩石的变形机制</b> .....        | 8  |
| 一、岩石脆性变形的机制 .....               | 8  |
| 二、岩石塑性变形的机制 .....               | 9  |
| (一) 晶内滑移 .....                  | 9  |
| (二) 超塑性流动 .....                 | 9  |
| (三) 动态重结晶 .....                 | 10 |
| (四) 压溶作用 .....                  | 10 |
| (五) 高温蠕变 .....                  | 11 |
| (六) 扭折 .....                    | 11 |
| (七) 相变与碎裂流动 .....               | 12 |
| 三、脆-韧性过渡 .....                  | 12 |
| <b>第三章 矿物中常见的变形显微构造特征</b> ..... | 15 |
| 一、矿物中常见的变形显微构造 .....            | 15 |
| (一) 显微破裂 .....                  | 15 |
| (二) 变形矿物的光性异常 .....             | 16 |
| (三) 双晶纹 .....                   | 17 |
| (四) 滑移带、变形带和变形纹 .....           | 17 |
| (五) 扭折带 .....                   | 21 |
| (六) 压溶现象与压力影 .....              | 22 |
| (七) 雪球构造 .....                  | 24 |
| (八) 核幔构造 .....                  | 25 |
| (九) 砂钟构造 .....                  | 25 |
| 二、变形作用与变形显微构造之间的关系 .....        | 26 |
| <b>第四章 晶体缺陷和位错</b> .....        | 28 |
| 一、晶体缺陷研究现状 .....                | 28 |
| 二、晶体缺陷及其分类 .....                | 29 |
| (一) 晶体缺陷 .....                  | 29 |

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| (二) 晶体缺陷分类 .....              | 29 |
| 三、位错及位错亚构造 .....              | 30 |
| (一) 位错的具体含义 .....             | 30 |
| (二) 柏格斯矢量和位错分类 .....          | 32 |
| (三) 位错的一些基本性质 .....           | 33 |
| (四) 位错的运动和增殖 .....            | 34 |
| 四、位错亚构造 .....                 | 37 |
| (一) 自由位错 .....                | 37 |
| (二) 位错列和位错壁构造 .....           | 37 |
| (三) 亚晶粒构造 .....               | 38 |
| (四) 位错弓弯和位错环构造 .....          | 38 |
| 五、位错的研究 .....                 | 39 |
| (一) 相差显微镜法 .....              | 39 |
| (二) 缀饰法 .....                 | 39 |
| (三) 化学浸蚀法 .....               | 39 |
| (四) 透射电子显微镜法 (TEM) .....      | 39 |
| (五) X射线形貌法 .....              | 40 |
| (六) 场离子显微镜法 .....             | 40 |
| <b>第五章 变形岩石组构分析基础</b> .....   | 41 |
| 一、岩组学的基本概念 .....              | 41 |
| 二、组构分析的工作程序 .....             | 42 |
| 三、定向标本的采集和定向薄片的制作 .....       | 42 |
| (一) 标本的要求 .....               | 42 |
| (二) 采样位置的选择 .....             | 43 |
| (三) 定向标本的标记方法 .....           | 43 |
| (四) 组构轴的确定 .....              | 43 |
| (五) 定向薄片的制作 .....             | 44 |
| 四、实验室内组构测定技术 .....            | 45 |
| (一) 旋转台组构测定技术 .....           | 45 |
| (二) 光度计法组构测定技术 .....          | 51 |
| (三) 干涉图法测定一轴晶光轴 .....         | 51 |
| (四) X射线组构测定方法 .....           | 52 |
| 五、赤平投影及岩组图制作法 .....           | 53 |
| (一) 赤平投影原理及投影方法 .....         | 53 |
| (二) 岩组图的编制方法 .....            | 57 |
| <b>第六章 变形岩石组构的运动学分析</b> ..... | 62 |
| 一、变形岩石的组构类型 .....             | 62 |
| (一) 变形岩石组构分析的内容 .....         | 62 |
| (二) 岩组图的基本型式 .....            | 62 |
| (三) 组构的对称型式 .....             | 62 |
| (四) Sander的构造岩类型 .....        | 63 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| (五) 组构图解的统计意义及均一性 .....       | 64  |
| 二、变形岩石组构的运动学分析原理 .....        | 64  |
| (一) 从优选方位的型式来分析 .....         | 64  |
| (二) 根据方位型式的对称型分析—对称原理 .....   | 65  |
| (三) 组构与应力场关系的分析 .....         | 66  |
| (四) 在应变方面的解释与分析 .....         | 66  |
| 三、变形岩石中常见造岩矿物的优选方位型式 .....    | 66  |
| (一) 石英的优选方位型式 .....           | 66  |
| (二) 云母的优选方位型式 .....           | 70  |
| (三) 方解石的优选方位型式 .....          | 72  |
| (四) 白云石的优选方位型式 .....          | 75  |
| (五) 橄榄石的优选方位型式 .....          | 76  |
| (六) 其他矿物的优选方位型式 .....         | 79  |
| 四、优选方位形成机制 .....              | 79  |
| (一) Sander关于组分运动的概念 .....     | 79  |
| (二) 由晶内滑移和晶粒旋转形成的优选方位 .....   | 80  |
| (三) 由重结晶作用形成的优选方位 .....       | 81  |
| 五、变形岩石组构的运动学分析实例 .....        | 82  |
| (一) 在褶皱研究中的应用 .....           | 82  |
| (二) 在断裂研究中的应用 .....           | 85  |
| (三) 幔源橄榄岩包体的组构分析 .....        | 86  |
| (四) 其它方面的应用 .....             | 87  |
| <b>第七章 变形岩石组构的动力学分析</b> ..... | 89  |
| 一、组构动力学分析原理 .....             | 89  |
| 二、双晶纹的动力学分析 .....             | 91  |
| (一) 方解石 .....                 | 91  |
| (二) 白云石 .....                 | 94  |
| (三) 斜长石 .....                 | 95  |
| (四) 透辉石 .....                 | 99  |
| (五) 双晶纹动力学分析的局限性 .....        | 101 |
| 三、变形纹的动力学分析 .....             | 101 |
| (一) 石英变形纹的动力学分析 .....         | 101 |
| (二) 具体做法 .....                | 103 |
| (三) 该方法的局限性 .....             | 104 |
| 四、云母扭折带的动力学分析 .....           | 104 |
| (一) 原理 .....                  | 104 |
| (二) 具体方法 .....                | 104 |
| 五、变形岩石组构的动力学分析实例 .....        | 105 |
| (一) 在褶皱研究中的应用 .....           | 105 |
| (二) 在断裂研究中的应用 .....           | 106 |
| (三) 在区域构造研究中的应用 .....         | 107 |
| (四) 用以确定岩层的层序 .....           | 108 |

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| (五) 区分海底滑动揉皱和构造褶皱 .....                | 108 |
| 六、组构动力学分析方法的讨论 .....                   | 109 |
| <b>第八章 变形显微构造地质应力计及其应用</b> .....       | 110 |
| 一、研究地球应力场的主要途径 .....                   | 110 |
| 二、岩石的稳态流动及稳态显微构造 .....                 | 111 |
| (一) 岩石的稳态流动及其条件 .....                  | 111 |
| (二) 稳态显微构造 .....                       | 111 |
| 三、变形显微构造地质应力计 .....                    | 112 |
| (一) 概念和历史回顾 .....                      | 112 |
| (二) 自由位错密度地质应力计 .....                  | 113 |
| (三) 动态重结晶颗粒粒度地质应力计 .....               | 114 |
| (四) 亚晶颗粒度地质应力计 .....                   | 116 |
| (五) 几种矿物的显微构造地质应力计 .....               | 117 |
| 四、变形显微构造地质应力计应用实例 .....                | 119 |
| (一) 上地幔流动应力的估算 .....                   | 119 |
| (二) 中下地壳韧性剪切带的差应力 .....                | 123 |
| 五、存在的问题和困难 .....                       | 124 |
| <b>第九章 断层岩及其显微构造特征</b> .....           | 127 |
| 一、关于剪切带问题 .....                        | 127 |
| 二、断层岩的分类 .....                         | 128 |
| 三、断层岩类及其显微构造和组构特征 .....                | 129 |
| (一) 断层泥 .....                          | 130 |
| (二) 断层玻化岩 .....                        | 131 |
| (三) 碎裂岩类 .....                         | 131 |
| (四) 糜棱岩类 .....                         | 134 |
| (五) 碎裂岩与糜棱岩的区别 .....                   | 138 |
| (六) 糜棱岩形成的模拟实验研究 .....                 | 138 |
| 四、断层岩研究中的一些问题 .....                    | 140 |
| <b>第十章 快速变形岩石及其显微构造</b> .....          | 141 |
| 一、冲击岩及其显微构造 .....                      | 142 |
| (一) 陨石冲击坑 .....                        | 142 |
| (二) 冲击岩 .....                          | 142 |
| (三) 冲击变形引起的显微构造特征 .....                | 143 |
| 二、地震断裂带中快速变形岩石及其显微构造特征 .....           | 146 |
| (一) 断层玻化岩 .....                        | 146 |
| (二) 断层泥中某些快速变形的微观特征 .....              | 147 |
| 三、其他快速变形的一些显微构造特征 .....                | 147 |
| (一) 黑云母击象 .....                        | 147 |
| (二) 橄榄石{110}[001]滑动条带 .....            | 147 |
| <b>第十一章 幔源岩石的流动特征及上地幔流变状态的研究</b> ..... | 150 |
| 一、橄榄岩包体和岩体的幔源证据 .....                  | 150 |

|                                                       |     |
|-------------------------------------------------------|-----|
| (一) 矿物组合的全球一致性 .....                                  | 150 |
| (二) 地震波速及岩石密度 .....                                   | 150 |
| (三) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比及其余同位素比值 ..... | 150 |
| (四) 辉石地温计和地压计资料 .....                                 | 150 |
| (五) 包体橄榄石位错亚构造特征 .....                                | 150 |
| (六) 橄榄岩包体及其母岩玄武岩的绝对年龄值 .....                          | 151 |
| 二、幔源橄榄岩的结构和组构 .....                                   | 151 |
| (一) 幔源橄榄岩的结构类型 .....                                  | 151 |
| (二) 幔源橄榄岩的组构特征 .....                                  | 151 |
| 三、幔源橄榄岩中橄榄石的位错亚构造 .....                               | 153 |
| (一) 位错研究的方法 .....                                     | 153 |
| (二) 幔源橄榄石中的位错亚构造 .....                                | 155 |
| 四、上地幔流变状态的推导 .....                                    | 161 |
| (一) 上地幔的温度、压力状态 .....                                 | 161 |
| (二) 上地幔流变状态参数的推导 .....                                | 162 |
| 五、地质学意义的探讨 .....                                      | 163 |
| (一) 幔源包体形成的环境条件及上地幔流变状态的探讨 .....                      | 163 |
| (二) 根据流动速率和等效粘滞度推导大地构造性质 .....                        | 164 |
| 主要参考文献 .....                                          | 167 |

# 第一章 岩石变形

岩石受到力的作用时，会发生位移和变形。当作用力较小且作用时间短暂时，岩石不发生明显的变形；而当作用力较大且作用时间较长时，就要发生宏观的永久变形，象大规模的褶皱作用；当作用力超过岩石的破裂强度时，则发生以断层作用为主的变形。

讨论岩石变形，必然要直接引用物理学和工程上所使用的应力和应变的知识和概念。但鉴于有关应力和应变分析的专著已有不少，而且在许多地质学的论著与教科书中也都有论述 (Turner和Weiss, 1978; Hobbs 等, 1982)，所以这里不再作详细讨论。

## 一、应力作用下岩石的力学行为

岩石在应力作用下，由于其本身及环境条件的差异会表现出不同的力学行为，归纳起来主要有以下几种。

### (一) 弹性

在使岩石变形的力撤除之后，岩石立即恢复到应变前的形状和大小，岩石的这种特性称为弹性。弹性变形时的应力和应变关系是线性的，即应力-应变曲线上的直线部分 (图1-1)。岩石的弹性变形在地质学研究中不占重要地位。

### (二) 非弹性

在变形力撤除之后，岩石保持有永久变形，这种变形为非弹性行为。非弹性可以分为脆性、韧性和塑性。

I. 脆性 岩石在破裂之前未出现任何明显的永久变形，这种变形作用类型是脆性状态。在应力-应变曲线上表现为由直线部分直接破裂 (图1-1第二栏) 或直线后经短暂的曲线而破裂 (图1-1第三栏)。

II. 韧性 金属学上称为延性，地质学上也有人称为延性，还有的人称为柔性。这是指岩石在没有明显破裂的情况下，其形状和大小发生显著变化的能力。韧性变形时的应力-应变曲线如图1-1的右边两栏所示。

III. 塑性 外力超过屈服极限时材料发生的永久变形即为塑性变形。材料在破坏之前

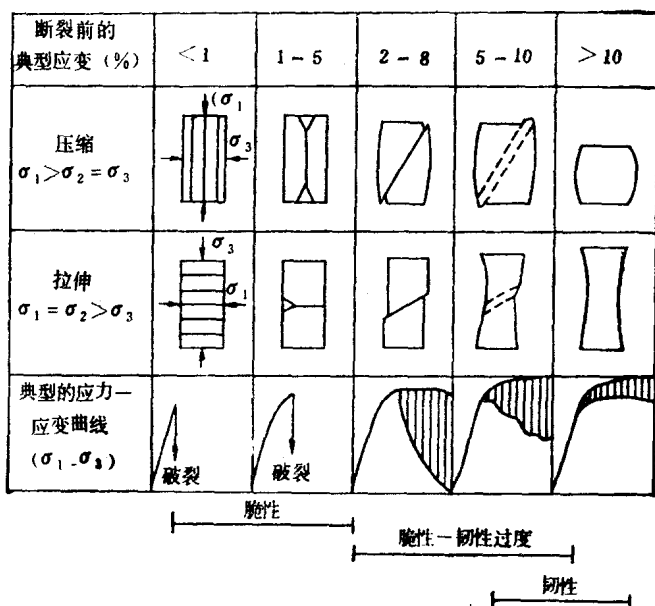


图 1-1 从完全脆性到完全韧性的性能转换图解。图中说明了典型压缩与典型拉伸试验中样品形状和变形方式以及相应的应力-应变曲线的变化

(据Griggs和Handin, 1960)

发生永久变形(塑性变形)的能力为材料的塑性。从上述含义上看,塑性与韧性似乎没有多大区别。在地质学上,一般作者往往用韧性变形来讨论岩石的宏观变形,而用塑性变形来讨论晶内滑移等变形机制。

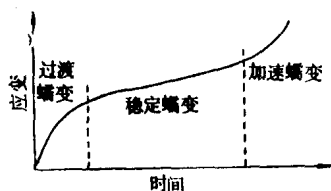


图 1-2 恒定应力下的岩石蠕变曲线

上述脆性行为与韧性行为的差别主要是宏观上的,即岩石是否能经受显著的永久变形而不发生宏观破裂。在研究断层(特别是地壳浅部的断层)和节理时主要涉及岩石的脆性变形,而在研究褶皱和韧性剪切带时,则主要涉及岩石的韧性变形。当然岩石在经受强烈的韧性变形之后亦可发生破裂。区分岩石的脆性行为与韧性行为是有意义的,因为这两种行为产生的环境条件是不同的。分析天然变形岩石的变形特征可以推断岩石变形时的物理环境。

### (三) 蠕变

表示应变随时间的变化关系。它指的是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(应变)。因为天然变形可供利用的时间是近于无限长的,所以蠕变显然是一种可能具有巨大地质意义的过程。特别是在研究上地幔岩石的变形时,必定涉及到岩石的蠕变特性。典型的蠕变曲线可以分成三个阶段(图 1-2)。第一阶段应变速率递减,为过渡阶段;第二阶段应变速率恒定,为稳态蠕变;第三阶段应变速率递增,为加速蠕变。

## 二、影响岩石力学性质及变形行为的各种因素

在同样的变形环境条件(温度、压力、加载的快慢、方式和大小等)下,不同的岩石会有不同的力学反应;同时,同一种岩石由于变形环境条件的变化,变形行为也会改变。岩石的力学性质和变形行为取决两个方面:一是内在因素,即岩石本身的成分、结构和构造特征;二是外界因素,即岩石所处的变形环境。此外,样品的尺寸、形状等也有一定影响。

### (一) 外界物理环境的影响

I. 围压 围压对岩石的强度和变形行为都有明显影响。一般来说,增大围压会提高岩石的强度。这方面已有许多实验证据,最常被人们引用的经典实例是 Von Karman(1911)对卡拉拉大理岩进行的实验变形所得结果。他获得了不同围压下的各种应力-应变曲线(图 1-3),清楚地显示了围压对岩石强度的影响。近年来,许多研究者对其他岩石所做的实验变形,也都得出了同样的结论。

另一方面,围压对岩石变形行为也有重要影响。在图 1-3 中可以看到,围压到  $5 \times 10^7$  帕时,脆性破裂仍然出现地比较早,应变为 2% 时岩石就失去了强度;但当围压高到  $6.5 \times 10^7$  帕时,应变达 7% 时,岩石仍不失去强度,显示了较好的韧性。图 1-4 所示的结果可以进一步说明这一问题。很显然,随着围压增高,石灰岩变形由脆性过渡到韧性,压缩实验与拉伸实验均如此,只是拉伸实验要求的围压更高一些。

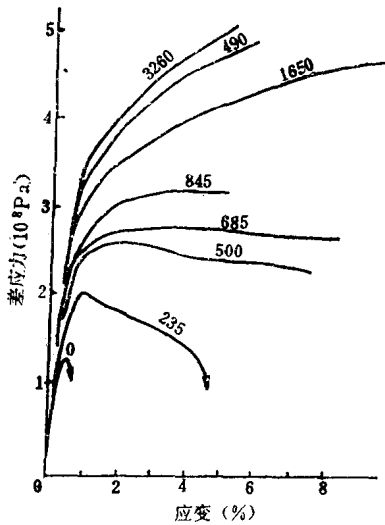


图 1—3 卡拉大理岩在不同围压下变形的应力-应变曲线，曲线上数字为围压值单位为 $10^8$ 帕  
(据Von Karman, 1911)

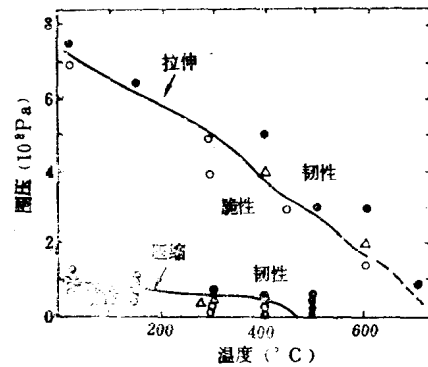


图 1—4 在压缩和拉伸实验中，当围压和温度变化时索伦霍芬石灰岩的脆-韧性转变  
(据Head, 1960)  
○脆性 △过渡 •韧性

II. 温度 温度是影响岩石强度和变形行为的另一重要因素。一般说，温度升高会降低岩石的强度。图1—5是Griggs等（1960）在 $5 \times 10^8$ 帕围压下对花岗岩所做的实验变形的结果，不同的温度下有不同的应力-应变曲线，这清楚地显示出花岗岩的强度随温度升高而降低的趋势。从图中还可以看到温度对变形行为的影响，在室温（25℃）下，花岗岩表现为明显的脆性，而在800℃时，则显示出明显的韧性（应变达15%以上尚未破坏）。从上面的图1—4中也可以看出，温度升高时，岩石由脆性过渡到韧性。

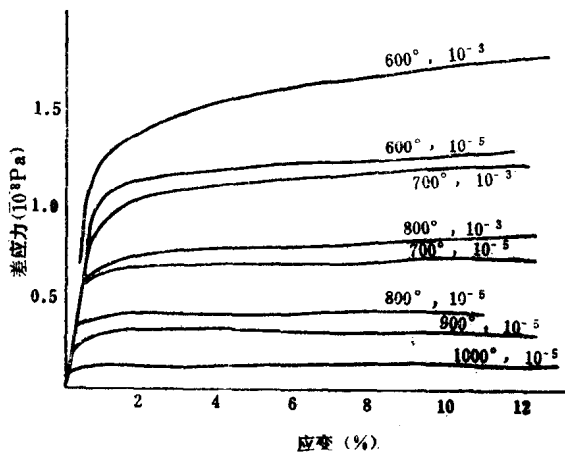


图 1—5 花岗岩在 $5 \times 10^8$ 帕围压和不同温度下的应力-应变曲线  
(据Griggs等, 1960)

注：曲线上的数字逗号前的为实验温度，逗号后的为应变速率，单位是 $s^{-1}$

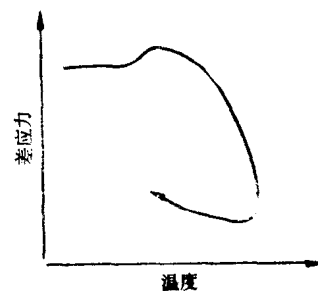


图 1—6 蛇纹岩的应力-温度关系曲线

也有少数例外情况，主要是某些含水矿物或岩石，当温度升高时，可能会出现强度暂时的增大，当达到一定温度后，强度又突然下降。不过当温度再下降时，岩石的强度是不会恢复到原来的水平。日本学者对蛇纹岩所做的实验结果就是这种情况（图1—6）<sup>①</sup>。

上述实验结果表明，在围压增大和温度增高时，岩石的变形行为都会从脆性向韧性转化。在自然界，在温度和围压都较低的地表和浅地壳，岩石呈脆性变形时，随着深度加大，温度和围压都升高，岩石则可能表现为韧性变形。所以一个大的断层带，浅部表现脆性断裂形式，深部则可能为韧性剪切形式。这方面的研究已引起越来越多的国内外学者的注意。

Ⅲ. 外施应力加力条件（即加载条件）对岩石力学性质的影响主要有以下三个方面。

1. 加载的快慢 加载的快慢，实际上就是应变速率的大小。一般说来，加载越快，即应变速率越大，岩石的强度也越大；反之亦然。

图1—7是Paterson（1982）对卡拉拉大理岩所做实验变形得出的应力-应变曲线。从图中可以清楚地看出应变速率对岩石强度的影响：在600℃，700℃和800℃温度条件下，应变速率为 $10^{-3}$ /秒时岩石的强度比相应温度下应变速率为 $10^{-5}$ /秒时的强度为大。

表1—1所示的实验结果可以进一步说明应变速率对岩石（砂岩和辉长岩）抗压强度的影响。

表 1—1 加载速率对岩石抗压强度的影响

| 岩石名称  | 单 轴 抗 压 强 度 $\text{kg/cm}^2$ |              |          |
|-------|------------------------------|--------------|----------|
|       | 到破坏时间 30 s                   | 到破坏时间 0.03 s | 增加强度 (%) |
| 砂 岩   | 563                          | 844          | 50       |
| 辉 长 岩 | 2180                         | 2820         | 30       |

至于应变速率对岩石变形行为的影响，有一个几乎是众所周知的事实可以作为很好的例子：当用铁锤猛击沥青块时，沥青块立即破碎成小块，显示出脆性变形；但当用一重物压在一块沥青上，经过较长的时间之后（相当于缓慢加载），沥青就会慢慢发生塑性变形，显示出很好的韧性。

在天然变形岩石中也有类似的例子。在冲击作用下（如陨击坑），各类岩石都发生脆性破裂，有些岩石中云母还会出现很特征的击象（用钉子打击云母也会出现击象）。而在区域变质作用下，岩石可以发生弯曲和褶皱，其中的云母解理常常出现弯曲和扭折（详见第三章）。

2. 加载力的方位与中间主应力 加载力的方位也常常影响到岩石的强度和变形行为，特别是当岩石内具有先存的面状构造（破裂面、叶理、片理面等）时。当外施应力与这些面状构造成 $45^\circ$ 左右角度时，岩石强度明显降低（由于此时这些面上的分剪应力很高，因此很容易沿此面发生滑动）。图1—8<sup>①</sup>的横坐标是外施应力与岩石中先存面状构造之间的夹角。曲线表示了当这一角度从 $0^\circ$ — $90^\circ$ 时岩石强度的变化情况。曲线清楚表明，当先存面状构造与加载力成 $45^\circ$ 左右角时，岩石的强度要低得多。

① 据罗焕炎：中国科技大学研究生院“岩石圈动力学讲义。”1982。

关于中间主应力 $\sigma_2$ 的作用，过去认为破裂发生在平行 $\sigma_2$ 的面内，所以往往不予考虑。近年来，人们越来越注意到 $\sigma_2$ 的大小对岩石力学性质的影响。研究表明， $\sigma_2$ 的作用主要有以下一些方面。

对岩石强度的影响。图1—9表示了粗面岩强度与 $\sigma_2$ 的关系。一般说， $\sigma_2$ 增大，强度增高。

剪切破裂面与最大主应力之间的夹角 $\theta$ 随着 $\sigma_2$ 值的相对增加而增大。岩石的韧性还随着 $\sigma_2$ 值的相对增加而减小。这方面， $\sigma_2$ 的作用与 $\sigma_3$ 的作用是相反的，如前所述，围压增大，

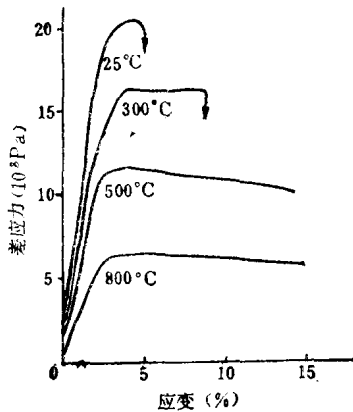


图 1—7 不同温度与应变速率条件下，卡拉拉大理岩实验变形应力-应变曲线

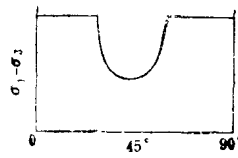


图 1—8 岩石强度与加载力方位的关系示意图

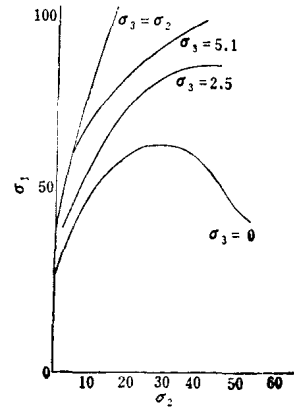


图 1—9 中间主应力 $\sigma_2$ 对粗面岩强度的影响  
(据Hoskins, 1967)

注：图中应力单位为 $\text{klb/in}^2 = 6.895 \times 10^6 \text{Pa}$

岩石的韧性增大。此外，有人认为 $\sigma_2$ 对破裂的产生影响不大，但对破裂的扩展有较大影响。

3. 加载方式 加载方式也会影响岩石的强度，一般说，岩石对挤压作用有较大的抵抗，即抗压强度较大，可能比抗拉强度或抗剪强度大20—30倍。岩石的抗剪强度和抗拉强度也会因不同方向的加载受到影响，但影响不很严重，强度变化不大。

此外，反复的加载会引起岩石的疲劳而导致强度的下降。

## (二) 岩石本身因素的影响

I. 岩石的成分、结构、构造因素 组成岩石的矿物种类、颗粒大小、颗粒间的联结以及胶结情况，对岩石的强度有很大的影响。一般说，组成矿物强度大、矿物之间的联结好，则岩石的强度大。例如石英是强度比较大的造岩矿物，在石英岩中，石英颗粒结晶度好，互相镶嵌（联结力强），因此石英岩的强度就很大。而花岗岩中，石英颗粒中间有其他矿物充填，所以石英颗粒对花岗岩的强度影响小些。而象砂岩一类岩石，当石英含量高时，强度大些；当石英含量低而粘土质（胶结物）含量高时，强度显著下降，所以砂岩的强度变化范围比较大。

此外岩石的结晶度和岩石中矿物的优选方位对岩石的强度影响也很大。

在同样的外界物理条件下，不同岩石的变形行为有很大差异。Miller (1981) 根据实验结果把岩石的应力-应变曲线分为五种类型（图1—10）。当然这是在一定条件下的变形

特征, 当温度、压力等条件变化时, 变形行为也会改变。

II. 岩石的孔隙度与含水量 若岩石中存在孔隙, 那么在岩石变形时, 特别是在有围压作用下变形时, 岩石孔隙会被压紧, 引起体积变化, 因而强度会受到影响。而当孔隙中有水时, 则对强度影响更大, 这可能是因为: ①孔隙水破坏了岩石的粘结力; ②孔隙水起到润滑作用; ③孔隙水压抵消了一部分围压。实验结果表明 (Handin, 1963), 孔隙水压越大, 则岩石的强度越低。

孔隙压力还会影响岩石的变形行为—脆-韧性的过渡。图1—11表示的是在  $6.895 \times 10^7$  帕围压下和各种孔隙压力作用下石灰岩的应力-应变曲线 (Heard, 1960)。这些曲线显示出随着孔隙压力的增加, 岩石从脆性行为到韧性行为的全面变化。由这一结果可以得出, 在围压相同的条件下, 孔隙压力的增加使岩石趋向于韧性变形。

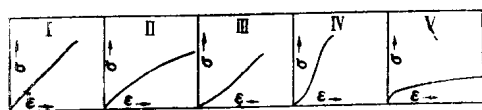


图 1—10 岩石的典型应力-应变曲线类型  
I—弹性, 玄武岩、石英岩、辉绿岩、白云岩; II—弹-塑性, 软弱灰岩, 泥岩、凝灰岩等; III—塑-弹性, 砂岩, 花岗岩等; IV—塑-弹-塑性, 大理岩、片麻岩等; V—弹-塑-蠕变, 岩盐等

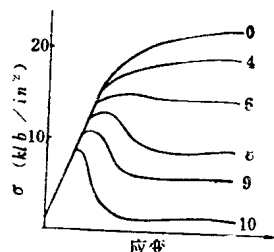


图 1—11 孔隙压力对石英岩脆性-韧性过渡的影响, 围压为  $6.895 \times 10^7$  帕, 曲线上的数值是孔隙压力, 单位同  $\sigma$   
注:  $klb/in^2 = 6.895 \times 10^6 Pa$

III. 岩石中先存的面状构造 前已述及, 当岩石中先存有面状构造时, 岩石因加载的方位不同而表现出不同的强度。实验也表明, 这种面状构造还控制着岩石破裂的发育和扩展, 这对研究岩石的断裂及其系统具有重要意义。图 1—12 所表示的实验结果 (国家地震局地质研究所, 1982) 可以说明这一问题。当试件中先有缺口 (裂缝) 时, 加压过程中首先在裂缝的两端发生破裂, 开始是张裂 (图1—12 a, b), 进一步变形, 才在张裂基础上, 于原先存在的裂缝之间形成剪裂 (图1—12 c), 并把裂缝贯通。如果变形前的裂缝的位

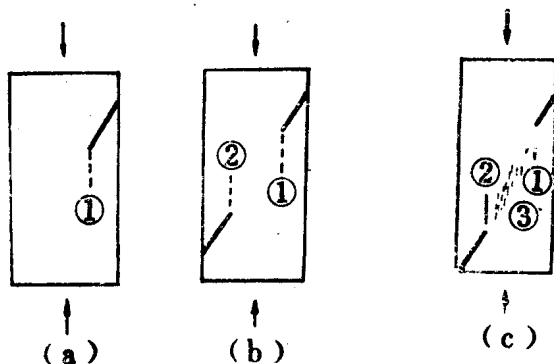


图 1—12 试件内有先存裂缝时, 破裂发育的阶段和特点示意图  
(据国家地震局地质研究所, 1982)

置不同，数量不同，那么变形破裂的发育与扩展的特点也就不同。

此外，试件的形状、大小等也影响岩石的强度等力学性质。

上面分别讨论了影响岩石力学性质及变形行为的外部 and 内部各种因素。在岩石的变形实验中也往往是固定其他因素，改变一、二种因素，观察它们所起的作用。但实际情况却不是那样简单，一是实际中往往是多重因素联合作用，二是各种因素之间相互影响，相互制约，因此这种联合效应是复杂的。例如，围压的提高可以增大岩石的强度；而温度的升高则要降低岩石的强度；应变速率越大，岩石的强度越大；孔隙水压越大，则岩石的强度越低。当这些因素都变化时，则岩石的力学性质和变形行为就不是一种简单的变化关系了。在自然界这种情况就更为复杂。因此在把实验结果外推到天然变形岩石中时需要谨慎。特别是自然界的有些变形条件（例如极缓慢的应变速率）在实验室还无法达到，这就给外推又增加了困难。在多种因素的综合作用下，造成了构造变形非常复杂而又丰富的特征，也为构造岩石学研究提供了广阔的场所。上述的各种因素与岩石变形的关系则为推断天然岩石变形条件提供了必不可少的依据。