

〔波〕B. 雅罗谢夫斯基 著

# 断裂与褶曲构造学



地质出版社

# 断裂与褶曲构造学

〔波〕B. 雅罗谢夫斯基 著

李树菁等 译

地震出版社

1987

## 内 容 提 要

本书由三部分组成。第一部分（构造地质学理论基础）论述了本学科的基本概念，并讨论了应力和应变场、应力的图示以及岩石破坏理论。第二部分（断裂构造）阐述了断层的特征和分类、断层的成因和结构；叙述了大型逆掩断层的特征；指出了正断层形成过程中水的作用。第三部分（褶曲构造）包括褶曲的几何特征和分类，叙述了各种类型褶曲的形成和恢复方法。

本书由李树菁（前言，第一部分；第三部分第五章和第六章的一部分）、曹可珍（第二部分第一章到第五章）、宋炳忠（第三部分第一到第四章和第七章）、蒋浩旋（第二部分第六、七章）、姚家榴（第三部分第六章的一部分）共同翻译，由李树菁进行校改。

本书可供构造地质、构造物理、地质力学等学科的科研人员、技术人员，以及大专院校有关专业师生参考。

В. Ярошевский

## ТЕКТОНИКА РАЗРЫВОВ И СКЛАДОВ

МОСКВА «НЕДРА» 1981

### 断裂与褶曲构造学

〔波〕В.雅罗谢夫斯基著

李树菁等 译

地质出版社出版

北京复兴路63号

北京昌平展望印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

787×1092 1/16 15印张 370千字

1987年5月第一版 1987年5月第一次印刷

印数0001—2600

统一书号：13180·316 定价：3.60 元

## 前 言

如所周知，波兰文的构造地质学文献不多。这主要是指方法性专著而言，不是指区域性著作，区域性地质工作在波兰进行得却相当广泛。我们在本书中不拟罗列许多杰出的地质学家在研究波兰地质构造方面的成就以及若干科学研究中心的建立。感到有些奇怪的是，虽然有这样多的成就以及若干科学研究中心的建立，高等学校的构造地质教学工作仍然采用的是难懂的外国教科书，而在讨论问题时以及在出版物中对基本概念本身的解释存在分歧。因此，有必要给波兰读者出版一本一方面在波兰具有方法性意义，另一方面可使构造地质学的概念和名词术语得到清理的著作。本书在断裂和褶曲方面应当部分地解决上述问题。

本书的选题不是偶然的。地质出版社出版的B.H.哈茵的《普通大地构造学》译本应当满足研究特大型构造以及地质构造发展一般规律方面的需要。准备出版的3.科坦斯基写的《深部地质学》一书介绍了以钻探和物探资料为根据的研究地质结构方法。地质研究所出版的《波兰地质结构》文集中包括了区域构造的基础研究工作。这些书都未涉及分布最广的中尺度构造单元（断裂和褶曲）的研究和描述原则。外国文献中对这些问题的论述要比波兰文献中的论述多得多。M.克谢恩开维奇的《动力地质学》教科书是包含有基本构造单元现代解释的唯一著作，然而由于这个问题的多方面性，这本书也不是包罗一切的。这本教科书在培养波兰地质干部中成功地得到使用，因而在许多名词术语方面占据了优先地位。

《断裂与褶曲构造学》集中讨论了成因问题，因为成因问题在波兰研究得较少，并且引起了很大的争论。有时还可听到一种意见，认为讨论地质构造单元的成因问题属于自由幻想范围，没有任何实际意义。本世纪初，波兰杰出的物理学家M.斯摩留赫夫斯基对此持有不同意见，他论证了地质构造问题利用物理定理可以解决。从这时起，在地质构造学方面积累了大量的资料，许多问题得到了解决，但又出现了许多问题。然而几乎任何人都不怀疑以下看法：对构造机理的描述越精确，构造机理研究的范围就越宽广。这完全不是说没有用数学表达的概念不予考虑。这意味着任何构造成因的结论都应当考虑其他学科所发现的普遍自然定理，主要是物理学和技术科学领域的这种定理。这还意味着，为了获得不可避免的地质学数学形式化，必需彻底把地质概念的结构条理化以及确切考虑我们对每个概念所赋予的物理含义。作者认为，对于广大地质工作者来说，对构造过程物理内容的理解、逻辑分类以及确切的表达比分析复杂的理论假设和迅速找出许多不同构造实例的能力更为重要。对构造成因过程的深刻理解开辟了构造研究结果应用的可能性。因此，本书的许多地方都提到了构造现象的力学内容，并且探讨了构造形成机理以代替对比描述。援引区域性实例仅仅是为了说明某些普遍规律。

由于本书的篇幅有限，不能充分叙述所有的内容，甚至于不能概略论述全部复杂问题。作者的意图是打算介绍一些基础内容，以便开创详细讨论的道路。同时作者有意识地重视对于波兰地质构造有意义的问题（例如断裂构造），扼要论述甚至完全不谈迄今对波兰地质构造意义不大的问题（例如构造互相干涉的一般问题）。

本书是不是一本教科书？如果认为教科书是某一知识领域内公认的和所争论的内容以及

原理的总和,那么,《断裂与褶曲构造学》就不是一本教科书。然而有许多前提条件使得类似这样的教科书的时代(自然科学领域)已接近结束。知识的急剧发展,不仅能丰富新的信息,甚至常常还要突破公认概念本身的基础。同时产生了“信息喘息”现象,这种现象使得在常常互相矛盾的资料雪崩式发展当中找出一些客观真理十分困难,有时则完全不可能。这就产生了选择的必要:采取主观评价方法,选择资料或者拒绝仓卒汇总资料的任何意图,以及通过信息丛选择出稀少的实例。

作者选择了第一条道路。因此,本书在某种程度上反映了作者本人的看法,同时又是作者对资料进行选择的结果。如果对这些资料都进行讨论,就会大大增大本书的篇幅。然而,作者认定这类书的作用还在于指出要注意第一手基础材料,并且作者常引用最重要的文献。同时遵守以下原则:1.重视其中引用有早期资料的最新工作;2.不引用在波兰见不到的文献,但个别经典著作或特别必需的著作例外;3.不引用大量区域性著作;4.引用了在正文中未引的某些重要著作(例如,某些教科书)。书中未引用文献的部分反映了公认的论点或者本人的观点。为了节省篇幅,仅表明了1/3左右所用文献的出处。

在波兰从事构造地质研究的地质学家均十分了解,由于波兰缺乏地质构造名词以及由于这些名词在应用中产生的许多分歧而感到何等困难。作者在构造地质学领域,甚至在岩石力学领域中引用了许多新名词或某些名词的新定义。这一点也不意味着希望把本书变成一个名词规范,而是为了使读者便于使用外国文献,书中相当广泛地采用了名词的外来语同意词。作者在解决名词问题时,遵循了以下规则:1.按照逻辑次序条件以及使名词与这些条件符合(而不是相反);2.尽可能采用现用的名词及定义;3.不采用非地质名词(例如技术名词)来定义的某些地质名词;4.不采用在波兰文中有对应名词的外来语名词;5.改正与国外一般理解明显不同的含义。

同时需要指出,不仅在波兰作者之间存在名词理解的分歧,甚至在极其一般的名词领域内亦有表现。因此,作者认为对名词作以下改进是合理的:“大地构造学”的概念是构造地质学的一部分,这一部分内容是在最大尺度(全球尺度或区域尺度)范围内来研究地壳运动过程的。作者认为,构造单元形态学是构造地质学的描述部分,这一部分主要属于中型和小型构造的范畴(然而,构造单元(形态)是与尺度无关的任意独特现象)。构造地质学本身是比较普遍的范畴,此范畴包括了所有尺度和各方面的构造过程的研究。构造成因,即研究构造单元的形成及改造过程的总和是构造地质研究的重要对象。

本书的课题常与技术科学和工程地质学互相交叉。因此,作者特别感谢土力学家З.格拉泽尔博士教授精心分析了本书的理论部分,以及在本书最终编辑阶段采纳了他提出的大量指导性意见。作者还要感谢Л.布尔哈尔特博士副教授和В.格罗赫里斯基博士副教授对本书初步编辑工作提出的评论,感谢Л.维索肯斯基博士对岩石力学问题的讨论。

В.雅罗谢夫斯基

# 目 录

## 第一部分 构造地质学理论基础

|                          |      |
|--------------------------|------|
| 第一章 基本概念 .....           | (1)  |
| 第二章 地质构造的符号表示 .....      | (3)  |
| 第三章 力系(场), 应力和应变 .....   | (4)  |
| 第四章 均质性和各向同性 .....       | (7)  |
| 第五章 应力的种类及其相互关系 .....    | (9)  |
| §1 基本概念 .....            | (9)  |
| §2 单向应力状态下的正应力和剪应力 ..... | (10) |
| §3 双向应力状态下的正应力和剪应力 ..... | (11) |
| §4 摩尔图解法 .....           | (12) |
| 第六章 应力和应变 .....          | (14) |
| §1 均匀变形和非均匀变形 .....      | (14) |
| §2 变形和变形体的种类 .....       | (15) |
| §3 岩石的强度 .....           | (18) |
| §4 岩石的弹性 .....           | (19) |
| §5 岩石的塑性 .....           | (23) |
| §6 流变模型 .....            | (40) |
| 第七章 应力和破坏 .....          | (45) |
| §1 破坏过程的实验观测及野外观测 .....  | (45) |
| §2 库伦-摩尔破坏理论 .....       | (51) |
| §3 格里菲斯破裂理论 .....        | (55) |
| §4 赖涅尔-魏森贝格破裂理论 .....    | (59) |

## 第二部分 断裂构造

|                           |      |
|---------------------------|------|
| 第一章 基本概念 .....            | (61) |
| 第二章 断层的几何(描述)特征 .....     | (63) |
| §1 分类 .....               | (63) |
| §2 断层面参数 .....            | (67) |
| §3 断层位移参数 .....           | (67) |
| §4 断层图参数 .....            | (69) |
| 第三章 断层的形成机理 .....         | (71) |
| §1 原生断层 .....             | (71) |
| §2 后成断层和回春断层 .....        | (75) |
| §3 断裂尖灭和同沉积断裂 .....       | (78) |
| 第四章 断层的形成及其在构造中的表现 .....  | (81) |
| §1 断层力学分析原理 .....         | (81) |
| §2 构造应力场及其在断裂构造中的反映 ..... | (87) |

|     |                         |       |
|-----|-------------------------|-------|
| 第五章 | 大逆掩断层, 水在断裂构造中的作用 ..... | (116) |
| 第六章 | 正断层、逆断层和平移断层 .....      | (125) |
| 第七章 | 挠曲构造和构造变动带 .....        | (144) |

### 第三部分 褶曲构造

|      |                    |       |
|------|--------------------|-------|
| 第一章  | 基本概念 .....         | (146) |
| 第二章  | 褶曲的几何(描述)特征 .....  | (148) |
| §1   | 几何要素和褶曲参数 .....    | (148) |
| §2   | 褶曲图示的要素和参数 .....   | (150) |
| §3   | 褶曲的构造符号 .....      | (152) |
| 第三章  | 褶曲的几何分类 .....      | (153) |
| §1   | 运动-几何学分类 .....     | (153) |
| §2   | 几何形态分类 .....       | (154) |
| §3   | 构造几何分类 .....       | (158) |
| 第四章  | 褶曲的数学描述和分析方法 ..... | (161) |
| 第五章  | 褶曲恢复的方法 .....      | (163) |
| §1   | 同心状褶曲的恢复 .....     | (163) |
| §2   | 相似褶曲的恢复 .....      | (165) |
| §3   | 调和褶曲的恢复 .....      | (166) |
| 第六章  | 褶曲形成的机理 .....      | (169) |
| §1   | 弯曲 .....           | (169) |
| §2   | 滑动 .....           | (188) |
| §3   | 流动 .....           | (192) |
| §4   | 褶曲形成的混合机理 .....    | (195) |
| 第七章  | 褶曲形成的原因 .....      | (198) |
| §1   | 简单挤压 .....         | (198) |
| §2   | 垂直面内的力偶 .....      | (207) |
| §3   | 水平面内的力偶 .....      | (209) |
| §4   | 垂直运动 .....         | (213) |
| §5   | 褶皱形成的特殊原因 .....    | (218) |
| 参考文献 | .....              | (220) |

## 第一部分 构造地质学理论基础

### 第一章 基本概念

构造地质学是研究地壳变动过程的成因、发展和结果的学科。从物理观点看来, 这些过程可归结为各种形式能量的互相转化, 例如, 热能转化为势能(壳下物质对流引起的岩系隆起), 势能转化为动能(重力滑动), 动能转化为弹性能(移动地块产生的岩层压力)。对地壳变动最终表现起决定性作用的是在这些转化过程中所产生的力。这些力产生了岩体内部应力, 这些应力可使岩体的初始产状发生破坏, 或者产生断裂破坏。正是这些效应成为构造地质学的主要研究对象。一方面, 岩层变形和破坏的形式作为岩体现代构造的反映引起了构造地质学家的兴趣; 另一方面, 作为推断地壳变动过程发展的原因和机理的前提条件, 也使他们发生兴趣。

某一物体或力场对另一物体某一点作用的量度叫做力。力是一种向量, 常用力所作用的质量与其加速度的乘积来度量。在物理学上, 垂直作用于物体单位表面面积上的力的大小叫做压力。在工程技术上叫做荷载。工程大气压 (1个工程大气压=0.968大气压=1公斤/厘米<sup>2</sup>) 和巴 (1巴=1.0197大气压) 是最常用的压力单位, 公斤/厘米<sup>2</sup>是常用的荷载单位。国际单位制采用的基本压力单位是牛顿/米<sup>2</sup> (1牛顿/米<sup>2</sup>=1公斤/米·秒<sup>2</sup>=0.02×0.10<sup>2</sup>×10<sup>-4</sup>大气压=10<sup>-5</sup>巴)。

某一物体(地质单位)作用于另一物体的直接作用力在地质学上常称之为挤压力。由上述可知, 在地质学上把力或挤压的概念理解为外力的作用, 例如从地台一侧向正在形成的褶皱带方向表现的作用力就是一种外力。在内力方面, 例如在褶曲形成过程中在褶曲拱部产生的内力, 应当采用应力这一概念。应力是作用于固体上的外力或使固体发生变形的其他因素在固体中所产生的内力的度量(见下文)。例如, 所采用的张量可理解为沿给定物体内的无穷小立方体微元面上作用力的总和。因此, 不能用向量运算原理(力的平行四边形原理)对应力进行合成与分解。更精确些说, 应力不能度量。然而, 在实际作图中, 常采用一定应力的方向和大小的概念, 并且从全套应力方向和大小中(称之为应力状态)划分出我们所需要的轴或轨迹<sup>1)</sup>, 有了这种划分就可以通过在外力作用范围内(例如, 受拉杆件截面上)以其局部形式近似确定给定应力的大小。因为应力通常在整个物体截面内分布不均匀, 所以为了确定应力大小, 应当尽量采用有力 $F$ 作用的截面内的最小力场 $A$ 。其表达式如下:

$$\sigma = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{F}{A}, \quad (1)$$

该情况下的应力单位与压力单位相同——首先是公斤力/厘米<sup>2</sup>(标准单位为牛顿/米<sup>2</sup>)。在英文文献中常可见到每平方英寸多少磅的单位, 每1磅/英寸<sup>2</sup>近似等于0.7公斤力/厘米<sup>2</sup>。

<sup>1)</sup> 在研究应力位置发生变化的大空间内, 常提到应力轨迹, 应力轨迹是一种线, 线上任一点的力均与给定应力轴相切。

在工程技术方面，允许用上述方式划分出任一应力方向，然而这时必须注意，沿其他方向作用的应力亦可能具有重要的构造意义。

由此可知，变形和破坏是总应力状态的结果，而不仅是由沿某一选定轴向的作用应力引起的。

变形是指物体形状变化，体积变化或两者兼而有之。形状的变化称为变形，体积的变化称为体变形。所有的变形都与单元颗粒分布的变化有关，在固体情况下，不可避免地要产生抵抗此变化的内力，即应力。因此，固体变形必然引起应力的表现。在讨论地质构造时，常把应力看成为变形的原因（这在实际工作上比较方便），然而，必须了解：实际上，应力的产生直接与应变过程有关，应力的变化过程与也同时进行的应变过程有关。

按照能量不灭定律，能量平衡变化前后应当相等，换句话说，消耗在变形过程中的能量应当等于在此全过程中所出现的新形式的能量。例如，形成背斜所需的机械能应当等于上升岩体的势能、岩层弯曲及相互运动引起的热能，以及可能出现的其他形式的能量（岩层挤压等引起的）之总和。然而，必须指出，通常地质构造不是能量封闭系统，同时在能量平衡表内必须考虑周围介质中的耗散能量，以及从周围介质中放出的能量。

在构造地质学中，在外力（压力）、重力、热的变化、结晶化学及相变影响下都能够发生变形。从构造地质学观点出发，构造岩体本身在空间中的运动（位移）亦属于变形，甚至于如果构造岩体的形状和体积在运动过程中未发生变化（例如，正断层围限的构造岩块的位移），亦算是变形。在讨论这种较大尺度位移时（例如推覆体的运动与整个造山带相比）常常认为在这种位移的影响下，高级别的构造运动单元发生变化，这种变化亦属于变形的概念。在实际工作中，分别对位移及变形进行研究比较方便。例如，在塔特拉赫有些构造形成于早期变形阶段，而在后来一个独立的变形时期内仅以统一的断块发生位移。从另外的方面看，研究点位移途径是分析各个构造形成的重要步骤（Howard, 1968; Elliott, 1972）。破坏作用，即岩石连续性突然冲断或者最大降低<sup>1)</sup>可能是应变过程的最后效应。

关于构造学中的破坏过程，只在构造实验方面可以有信心地加以讨论，因为在自然构造中常常仅能见到未引起岩石连续性中断的最终破坏结果。

1) 有时对破坏的研究比较广泛，例如在建筑学上把破坏看成是能使结构或其各个构件破坏的所有不可逆变形。在地质学上采用上述比较狭义的破坏概念比较方便。

## 第二章 地质构造的符号表示

为了简化构造过程上述力学特征单元的表示方法，建立了假定符号系统，这种系统与工程上采用的符号一致，并且在总体上与国际标准统一（表1）。

在构造岩石学上采用比较详细的符号系统（Turner, Weiss, 1963）。有些作者采用了结晶学原理，并且根据结晶学对称原理奠定了构造现象的分类和表示符号（Kirchmayer, 1965; Hoeppener, 1972）。

表1 地质构造表示符号

| 系 统 特 性   | 系 统 名 称 | 表 示 符 号                            | 采 用 条 件                                                                                                                |
|-----------|---------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 力（压力）     | 动力学系统   | $F_1, F_2, \dots, F_n$             | $F_1 > F_2 > \dots > F_n$                                                                                              |
| 应力（压力，荷载） | 力学系统    | 主应力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ | 轴 $\sigma_1 \perp$ 轴 $\sigma_2 \perp$ 轴 $\sigma_3$ , $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ .<br>压应力用正号表示，<br>张应力用负号表示 |
| 运动（位移）    | 运动学系统   | $a, b, c$ 轴                        | $a \perp b \perp c$                                                                                                    |
| 应变        | 构造系统    | $A, B, C$ 轴                        | $A \perp B \perp C$ $B$ =褶曲轴                                                                                           |

### 第三章 力系(场), 应力和应变

在构造地质学上, 下列力系有重要意义(在工程技术上, 力系称之为加载形式): 挤压(压入, 压缩)、拉伸、剪切、旋转(图1)。在自然界中, 这些力系很少以单纯的形式出现, 较常见到力系的各种组合。例如, 岩层在褶曲形成过程中同时受到挤压和弯曲、剪切及旋转作用的亦不少。

对确定变形性质有决定意义的是作用力系及与其同时产生的应力系统。应力系统与给定力系之间的关系是不稳定的和复杂的。这些关系取决于变形体性质, 变形体初始形状, 加载方式(面力, 线力, 点力)及加载速度。除多种力系方案之外, 这些条件的多样化形成了大量的应力场及由此引起的各种变形形式。下面将要讨论与简单力系有关的应力场的几种基本情况。为了进行讨论, 我们采用了均质各向同性体(见第四章), 这种物体受到逐渐施加荷载(非瞬时加载), 而且变形未进行到破坏。

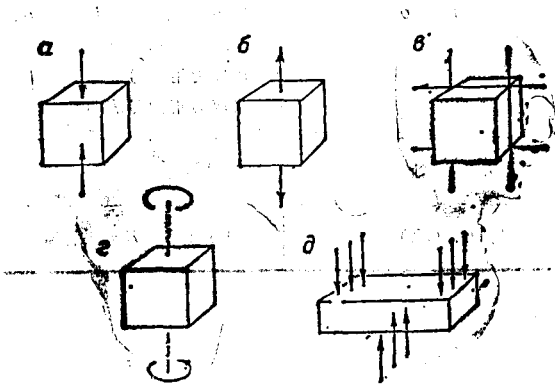


图1 变形时各种形式的作用力系  
a—挤压, b—拉张, c—剪切, d—旋转, e—弯曲

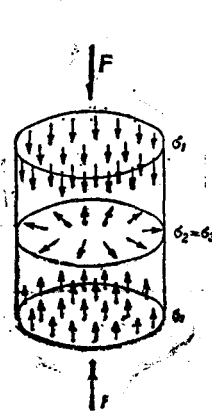


图2 单向压缩的应力系统

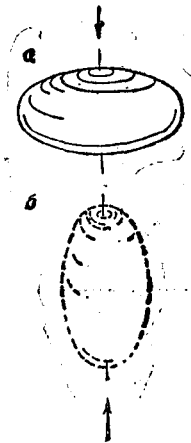


图3 球体单向压缩下的应变椭球体(a)以及与其相对应的应力椭球体(b)

应力系统可以通过与它密切相关的应变系统来表示。因为在均质各向同性体内, 这些系统的方向一致, 而这些轴的最大和最小应力与应变值方向相反(图6)。因此, 由单元力系形成的应力场可举最简单几何体变形实例来说明。我们选定了球体作为这种简单几何体进行分析, 因为与不同的应变椭球体(是球体应变的形式)相对应的应力椭球体合乎规律地反映了应力张量的分布。单向压缩能沿压力(应力 $\sigma_1$ )作用方向反映出挤压条件以及沿垂直于压力方向的面上反映出张力条件( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) (见图2)。这种应力系统可以用纺锤状旋转椭球体来表示, 因为变形前位于物体内的受压球体转变为反盘状椭球体(图3)。

单向拉伸可以在张力作用方向上引起张力的作用(应力 $\sigma_1$ ), 沿垂直于这一方向的面上引起压力( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) (图4)。这一应力系统可通过盘状旋转椭球体来表示, 因为事先处于未变形体的受张球体能转变为与上述相反的扇状椭球体(图5)。

三轴压缩(互相垂直的三个方向)引起的应力状态与三个方向荷载大小的比例有关。在荷载相同时, 应力状态就具有液体和气体静压性质。在该情况下, 唯一可能的变形形式是体

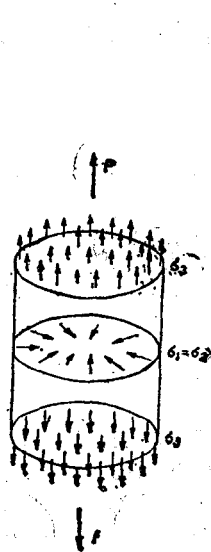


图4 单向拉伸下的应力系统

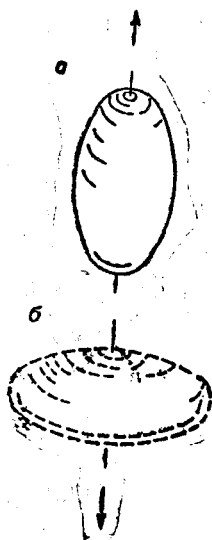


图5 球体单向拉张形成的应变椭球体 (a) 以及与其对应的应力椭球体 (b)

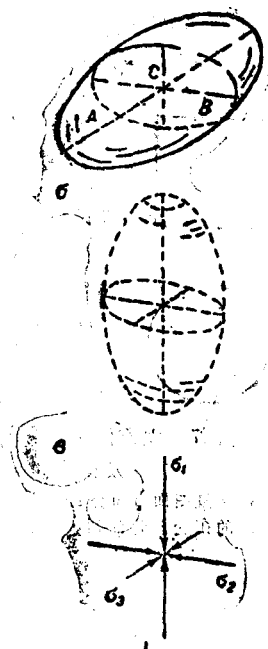


图6 球体三向压缩形成的应变椭球体 (a) 对应的应力椭球体 (b) 以及引起变形的加载力系 (c)

积的缩小。随着三向荷载中的一项荷载的增大，则应力状态逐渐趋近单轴压缩的条件 ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ )。当三向荷载大小各不相同，则可通过球体在此影响下力系形成的三向椭球体 ( $A > B > C$ ) 来表示应力状态。弹性体中应变椭球体的三个轴长将与以下荷载大小成反比：这种荷载沿应变椭球体的相应方向施加，其大小相当于相应的轴长 (图6)。

地质构造中的三向拉伸几乎见不到，因此，本书不加讨论。

某一单元的剪切变形 (力偶作用下) 能引起单元中的转动。沿相反方向出现的力偶能抵抗这种转动 (见图1, 6)。在这种情况下，当单元不可能自由转动时，变形可使该单元发生畸变，立方体变成菱形体，球体变成倾斜的三轴椭球体 (图7)，最大和最小应力轴与向量力成斜交，中间应力垂直于这些向量的作用平面。在图7所示的简单剪切变形实例中，最大和最小应力轴的位置随着变形的发展要发生改变 (中间应力轴不发生移动)。因此，这些变形在构造地质学中称为旋转变形。然而，曾经见到称之为纯剪切变形的特殊形式的剪应变 (见图31, 27)。在这类剪切变形过程中，没有一个应力轴在变形过程中不改变其位置的。构造地质学家把这些情况称之为非旋转变形，图3, 5及图6上的压力和张力都属于这种变形。如上所述，以上两种变形可以引起相同的几何效应，因此，这两种变形常常难以区别。兹举以下实例来说明：主要由非旋转变形形成的构造可以称之为直立的对称背斜，一般由旋转变形形成的构造称之为极不对称或倾斜背斜。这时必需记住，应力轴及构造对象的旋转不仅能够在垂直剖面内发生，亦可在水平及倾斜平面内发生。

弯曲常常表现在褶曲形成过程中，因此，弯曲应当用岩层弯曲的实例来研究 (图8)。在所形成的弧形外部 (凸起部分) 产生张力 ( $\sigma_3$ )，而在其内部 (凹下部分) 则产生压力

( $\sigma_1$ )。这些应力值在岩层内部方向上急剧减小,并且沿某个面达到零值,这在总的方面反映了外部表面的轮廓。在交互组成的岩层内这种中性面的位置决定于许多情况,然而中性面常位于弧形内面附近<sup>1)</sup>。

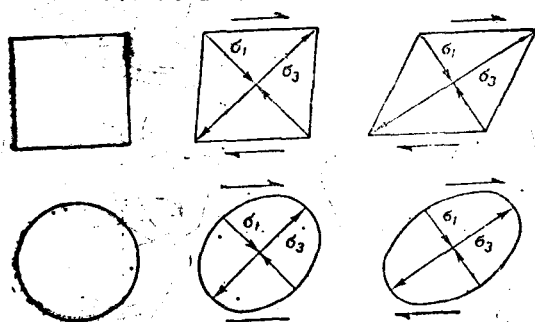


图7 立方体和球体的简单剪切变形(截面图)。

以及在此过程中伴生的力系

沿垂直于面方向分布有中间应力 $\sigma_2$ 以及与该物体相对应的在变形时的初始大小尺度不变

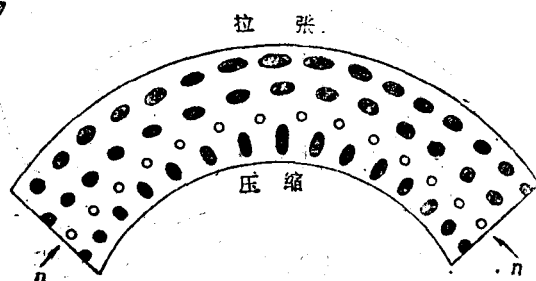


图8 用椭球体表示的弯曲层内的应力系统

图上的椭球体是在弯曲之前位于岩层内的球体变形形成的。图是根据实验资料编绘的,n—中性面

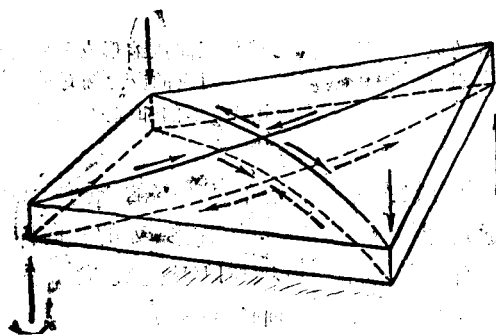


图9 两侧受扭岩板内的应力系统

据Б.Уиллис, Г.Уиллис, 1934; Г.П.Аджирея, 1966

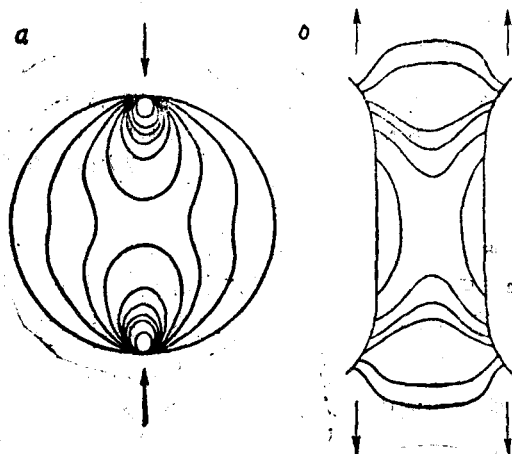


图10 偏振光试件中的等色线分布实例

a—单轴压缩(点荷载), б—单轴拉伸

构造地质学中的旋转最终要在幅度不同或方向不同的某一垂直运动面上表现出来。在这种条件下岩板内产生的应力见图9。图9所示岩板应力系统是由岩板沿两相互垂直的两个方向的平面弯曲应力组合成的,这种解释比较可信。

我们在上面仅讨论了简单应力系统的定性方面。地质构造体内的定量方面,即其中的绝对应力值可以通过专门的偏振光方法进行研究(Белоусов, Гзовский, 1964; Гзовский, 1975)。主要的标志是:应力轨迹各点上的应力值是不稳定的。与等应力差 $\sigma_1 - \sigma_2$ 截面(沿上述面积)相对应的所谓等色线表示了模型应力波动的空间分布。受简单力系作用的模型中的等色线空间分布实例见图10。此外,等倾线能表示应力轨迹分布,这在复杂构造和复杂力系情况下具有重要意义。电模拟方法(Czerwinska, 1974)及数学模拟方法,是一些很有前途的分析应力和应变场的新方法。

1) 在由各向同性材料板受所谓纯弯曲情况下的中和面通过板截面的中部。

## 第四章 均质性和各向同性

除了作用力系和加载方式外，影响应力和应变状态的主要因素还包括变形体性质。物体的均质性和各向同性程度是物体力学特征的重要要素。

各点力学性质完全相同的物体叫做均质(力学上的)体，不同点上力学性质不同的物质叫做非均质体。由发生褶曲难易不同的分层组成的岩系中的褶曲形成是这种标志表现的典型构造环境实例。在这种条件下，常发生复杂的不调和构造(图11)。曾遇到这种情况，当地质介绍不均质性非常明显时，其本身就形成类似地质构造的原因。这种构造的两个实例如图12所示。在小尺度时，均质性对于构造过程的影响可以在碎屑岩中，特别是砾岩中找到，图13

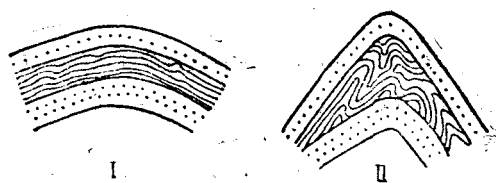


图11 由砂岩及页岩组成的不调和背斜形成过程的两个阶段(剖面图)

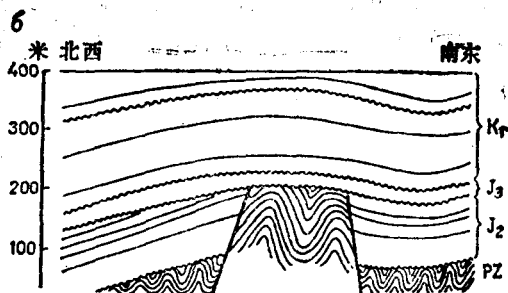
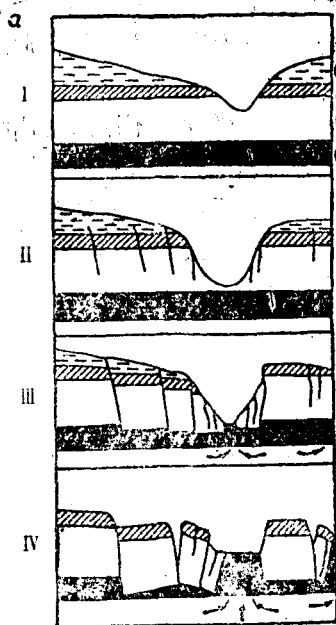


图12 由力学不均质性相当高的介质形成的假构造

а——波兰喀尔巴阡山脉小普耶尼纳区克鲁普恰克河附近的正断层和底辟构造(断层形成的1——IV阶段)，1——球状菱铁矿页岩；2——海百合灰岩；3——瘤状及含化石灰岩；4——灰岩及泥灰岩(据 К.Биркенмаера 的资料，1958)；б——由中侏罗纪泥质沉积固结形成的东贝加尔山前背斜，这些沉积覆盖在古生代刚性基底之上的地垒(Арбагов，Назаров，1972)。

表示了成因相同的构造裂隙。这种裂隙切割了具有不同成分胶结物的石英质砾岩。在图13中，砾岩受到粒间不规则裂隙的切割，而这些裂隙沿坚固程度较低的硅质胶结物穿过，并且绕过较硬的碎块。在图13,6所表示的砾岩中，由于成岩再结晶作用而使胶结物和砾石的性质接近。因此，后来产生的裂隙呈直线状，并且同样切割胶结物和碎屑组分。由上述可知，研究这类现象对于确定构造过程的相对时代可能有用。

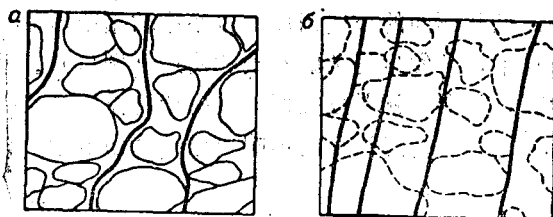


图13 岩石均质程度对构造裂隙性质的影响

a——硅质胶结的石英砾岩，b——具有再结晶胶结物的（石英质的）石英砾岩

密度大的岩石组分（砾石，结核等），不仅不妨碍反而能促进构造裂隙的发育；这还牵涉到象自然空洞、石化作用等影响岩石不均质性的其他原因。在这些遭到构造力作用的介质的力学不均质带的交汇区，会发生应力集中。正如在工程技术上十分清楚的，这种应力集中区常常是破坏过程开始的地方。有人认为，微观裂隙、颗粒界面，甚至于晶格缺陷之类的岩石极其轻微的不均质性均可能产生应力集中。当前认为上述要素在产生各种类型的构造断裂上有重大意义。

各方向的力学性质都相同的物体叫做力学各向同性体，各方向力学性质不同的物体叫做各向异性体。褶曲作用不可能发生在完全各向同性介质内，这是各向异性表现在地质构造意义上的实例。由密集的面和比较清晰的结构方向性等等造成的岩石各向异性程度越高，岩石越容易褶皱（图23, 6），各向异性在断裂构造过程中亦有重要的作用。

## 第五章 应力的种类及其相互关系

### §1 基本概念

一般,在外力作用下的物体任意截面内可划分出正应力和剪应力(图14)。在受力物体任一点上有三个且仅有三个相互垂直的平面,在这些平面上没有剪应力,这些面叫做主平面。换言之,在该物体的每个点上可以假想有一个无限小的立方体,在其面上只作用有正应力,这种应力称之为主应力。此立方体的边棱(主平面交线)是主应力轴(图15)。

沿这些轴中两个轴作用的应力在该体积内的全部应力都是极值应力:最大应力( $\sigma_1$ )和

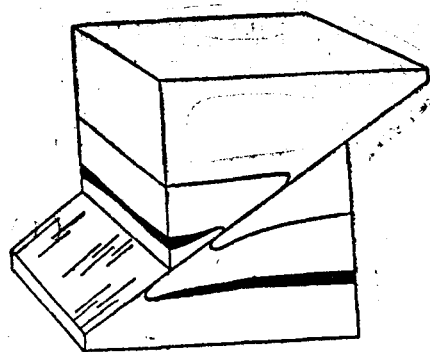


图14 逆断层表面附近剪应力及正应力作用的表现

作为沿逆断层滑动标志的构造擦痕和岩层弯曲是剪应力作用的结果。岩层厚度的变薄是由垂直于逆断层面的压力作用的结果

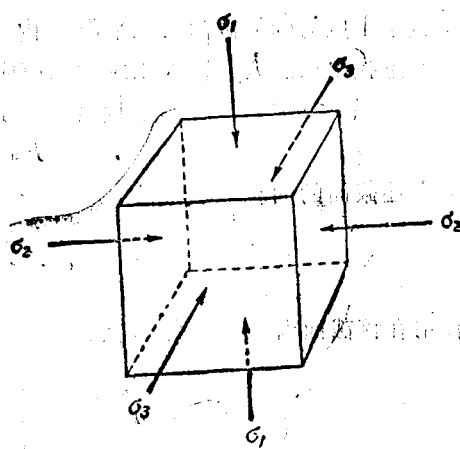


图15 无限小立方体图

立方体的面是主面,而边棱是主应力轴。 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 和 $\sigma_3$ 的符号可能为正(压力),亦可能为负(张力)

最大应力( $\sigma_1$ )。第三个轴的应力为中间值( $\sigma_2$ )。在一般情况下, $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 及 $\sigma_3$ 值均不同( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ),然而在特殊情况下,所有三向应力值可能相同(静水压力应力状态, $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ),或者两向应力值相同( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ 或 $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ )。

当两向主应力值相等或近于零时,我们称之为二维应力状态(单轴应力状态)。当其中一个主应力值等于或接近零值时,就叫做平面应力状态或双轴应力状态。构造运动过程中的应力状态几乎都是三维应力状态(三轴应力状态)。然而,多次证明(Akai, Mori, 1970)最大与最小应力( $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ )在变形及破坏过程中具有决定性作用,至于中间应力( $\sigma_2$ )大约不大于作用于垂直平面的应力的15%(Leon, 1934)。因此,在研究构造过程中,常常忽略这种应力的影响,而变形过程是在主应力 $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ 作用的平面内进行讨论的。这样一来,在实际研究上常分析双向应力状态,然而这并不排斥在完整的三维形式下研究地质构造

的合理性。不过，某些新资料表明， $\sigma_2$  的影响要比迄今所认为的大些 (Mogi, 1971, 1975)。

## § 2 单向应力状态下的正应力和剪应力

首先，我们讨论一下最简单的单向应力状态。可举上下施加单轴压力的岩石标本为例来说明（例如岩石标本为圆柱状）（图 16）。在此压力作用下产生的横向张应力（图 2, 3）与材料的种类有关，在我们能力所及的研究范围内，这种张应力可以略而不计。大体上，这种应力状态应当出现在仅受到本身体重作用的高地或丘陵条件下。如果用字母  $a$  表示标本的横截面，用  $F$  表示荷载，那么，按照简化的应力定义，我们可以把此截面内的整个压应力写成以下的形式：

$$\sigma = \frac{F}{a}.$$

在垂直于主应力的横截面（主平面）内没有剪应力。

要想找出任意截面上的正应力和剪应力〔此截面不是主平面，而是与样品压力轴成  $\alpha$  的交角 ( $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ )〕，需要找出垂直于该截面上  $F$  力的分量：

$$F_n = F \sin \alpha.$$

因为上述截面的面积

$$a' = \frac{a}{\sin \alpha}, \quad (1)$$

则作用在该截面内的正应力  $\sigma_n$  为：

$$\sigma_n = \frac{F_n}{a'} = \frac{F \sin \alpha}{\frac{a}{\sin \alpha}} = \frac{F}{a} \sin^2 \alpha = \sigma \sin^2 \alpha. \quad (2)$$

剪应力  $\tau$  的相应计算公式如下：

$$F_t = F \cos \alpha,$$

$$\tau = \frac{F_t}{a'} = \frac{F \cos \alpha}{\frac{a}{\sin \alpha}} = \frac{F}{a} \cos \alpha \sin \alpha = \sigma \cos \alpha \sin \alpha = \frac{\sigma}{2} \sin 2\alpha. \quad (3)$$

从这些简式可以导出与单轴压缩有关的结论。

1.  $\alpha = 90^\circ$  时，正应力最大值出现在垂直于压力轴的截面内 ( $\sin 90^\circ = 1$ )。  $\alpha = 0^\circ$  时，正应力最小值和零值出现在与压力轴平行的截面内 ( $\sin^\circ = 0$ )。

2. 按照上述原理（主平面）  $\alpha = 45^\circ$  [ $\sin (2 \times 45^\circ) = 1$ ] 时，剪应力最大；  $\alpha = 0^\circ$  和  $90^\circ$  [ $\sin (2 \times 0^\circ) = 0$ ,  $\sin (2 \times 90^\circ) = 0$ ] 时，剪应力为零。

从以上第2条总结中可推知：在单轴压缩下，岩石圆柱体内最大剪应力位于顶角为  $90^\circ$ 、与圆柱体轴成  $45^\circ$  交角的圆锥体表面上。在长方体岩石标本内，最大剪应力位于棱锥体表面上（图 17）。

上述总结与下一章的资料相同，既适合压缩实验，又适合拉张实验的岩石试件，