

# 构造地质学纲要

[澳] B. E. 霍布斯

[美] W. D. 明 斯 著

[荷] P. F. 威廉斯

石油工业出版社

8447

# 构造地质学纲要

[澳]B.E.霍布斯 [美]W.D.明斯 [荷]P.F.威廉斯 著

刘和甫 吴正文 等译



00261920

5924/19



200391236



石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书对构造地质学的现代进展作了概括,配合较详细讲授,可作为基础读物的教科书。首先介绍岩石变形力学的基本概念及应力分析和应变分析中的最新成就。其次介绍了新技术在构造地质学中的应用,包括用显微镜和扫描电子显微镜研究变形岩的显微构造方法;同时,强调了室内模拟实验及力学分析在构造地质研究中的应用,本书还以大量篇幅介绍了野外地质工作者最感兴趣的各种构造形态,如节理、断层、褶皱、面理、线理等领域中的新进展及其几何分析方法;同时,对世界范围内广泛分布的各种构造组合也进行了分析对比。最后,在大地构造领域中论述板块构造学的基本原理、板内应变及进一步研究方向;同时还论述了其他各种学说,如全球收缩和膨胀理论、大陆漂移理论、垂直运动和重力构造理论以及地幔对流理论等。本书附有计算习题和答案,赤平投影以及等面积投影等作图方法,可供构造地质学者从事定性向定量研究工作中的参考。

本书可供地质和石油地质专业大学生、研究生、科学研究工作者及野外地质工作者参考。

*B.E.Hobbs W.D.Means P.F.Williams*  
An outline of structural Geology  
Copyright © 1976, by John Wiley & Sons, Inc.  
published simultaneously in Canada.

## 构造地质学纲要

[澳]B.E.霍布斯 [美]W.D.明斯 [荷]P.F.威廉斯 著  
刘和甫 吴正文 等译

石油工业出版社出版  
(北京安定门外外馆东后街甲36号)  
妙峰山印刷厂印刷  
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 22印张 527千字 印1—6,000  
1982年7月北京第1版 1982年7月北京第1次印刷  
书号: 15037·2319 定价: 2.30元  
科技新书目: 29-185

## 前 言

迄今已经有一些时候了，我和许多同事们深感有这样一种情况：即在构造地质学方面还缺少这样一本简明教材，它既能概括构造地质学的现代进展，又能配合较详细地讲授，给学生作为基本读物的教科书。E.S.希尔思的构造地质学纲要一书就是卓越地为这个目的服务。但不幸的是那本书已经绝版，而且在许多方面已经过时了。我们在这本书里努力对这一课题的基本方面作一新的介绍。既然这本书的原意是想既简练又是引导性的，论述就不会全面，因此，大部分内容需要通过讲课或辅助性阅读加以引伸。有些课题由于它们的重要性而达到一个先进水平，但有许多其他先进方面仍未提到。为了引导去进一步研究和帮助独立工作的学生，我们列了大量参考文献。虽然这是一本基础性的读物，我们希望论述是准确的，并不会有任何一部分需要在将来再重学。

B.E. 霍布斯

W.D. 明 斯

P.F. 威廉斯

## 译者的话

由于本书精练而又系统地论述了构造地质学的新进展,同时从不同角度提供了构造分析的理论和方法,特别将几何分析和力学分析渗透在全书各个章节之中,故向读者推荐本书。

构造地质学的主要任务是构造描述和构造分析,并将所有构造形迹加以综合,最终论述构造在时间上的发育顺序和空间上的相互关系,并探讨动力起源问题。

在地球上任一岩体受力作用时,就使岩石发生位移和变形。因此本书在一开始就介绍力学的基本理论,系统论述应力分析、应变分析和岩石的力学特征(第一章)。这是以后各章进行构造分析的基础。本书关于力学理论在构造分析中的应用是超过已出版的构造地质学书籍中有关这方面的论述。因此也是从不同角度对地质力学基础与方法的补充。

原生构造是分析构造环境和构造几何形态的基础,因此本书对交错层、波浪、递变层理、各种印痕和印模等沉积构造进行了论述,作为分析构造变动、判别上下层序的依据(见第三章)。力学分析和建造分析是构造研究中的两个侧面,原生构造的研究有助于对构造环境和构造发育历史的解释。

一切构造现象,无论在时间上和空间上都可以划分许多等级。从不同的尺度来观察和研究构造,常常可以得到比较全面的构造综合。因此本书对不同尺度(微尺度、小尺度和大尺度)的构造研究分别在各章中予以论述。

微尺度主要是对显微构造进行研究,利用光学显微镜或电子显微镜对显微构造和结晶优选方位进行观察或度量,来研究变形岩石中各个部分的空间位置和几何形态(见第二章)。由于这些组构要素具有透人性的特点,因此可以提供有关岩石力学和热史的信息,并可用来推断较大尺度的构造特征,加深对变形机制的理解。

小尺度是研究肉眼能直接观察到的小构造,也是野外地质工作者最感兴趣的各种构造形迹,如褶皱、断层、节理、面理和线理等。褶皱是岩石中最普遍、最明显的韧性变形。该书除了在一般构造地质学书中所介绍的褶皱分类及褶皱形成的经典模式外,还评述了关于沉积岩和变质岩中褶皱发育机制的新进展(见第四章)。断层和节理是由于脆性破裂所产生的构造。书中除了对破裂机制与主应力方位等问题进行详细讨论外,并从微破裂、位移历史和应力历史等方面来说明断层发育历史,这对于应用历史分析方法来研究断层的读者来说是会有启发的(参阅第七章)。面理和线理是强烈变形或变质岩区广泛发育的透人性构造,也是进行构造分析的基础材料之一,本书首先对各种类型面理(如破劈理、折劈理、板劈理、片理和分异层理等)和各种类型线理(如擦痕、矿物线理、杆状构造、窗棂构造和香肠构造等)及其成因作了介绍,然后论述对各种类型不同期次面理和线理的测定来恢复总的变形历史(见第五章及第六章)。

大尺度的构造研究主要是将各露头区的构造形迹联系起来,研究各种构造组合来了解区域构造总的特征,可以作为个别构造形迹与大地构造研究之间的纽带。本书列举了各种典型的构造组合:如块断与裂谷、平移断层与伴生构造、表层褶皱与冲断层、穹窿与盆地、构造混杂岩带、板岩带与糜棱岩带等(见第九章)。这些世界性的典型实例对于研究具体地

区构造特征的读者来说，将有一定参考价值。显然，上述构造组合之间存在着过渡和重叠，这就涉及到构造的联合和复合问题。

对构造的几何形态、分布范围、排列方式和发育顺序的研究是几何分析的任务。同时，将不同尺度构造的研究联系起来，如对小型构造观察来推论大型构造，对个别构造的研究来认识总体构造，是研究区域构造应力或应变历史的必要步骤。本书首先介绍几何分析的一些基本概念(如尺度、样式、叠加和世代等)，然后阐述简单构造区和复杂构造区的分析方法、数据收集和进行解释等(见第八章)。

如果从更大的尺度上，或者更综合性地来分析区域构造直至全球构造，则是大地构造学研究的任务，因此本书在最后部分(第十章)对此进行了论述。其中大部分篇幅用于评述板块构造学，重点阐述了三种基本类型的板块边界(中脊、海沟和转换断层)，并对地槽学说和造山运动等老的概念提出了修正，赋予新的解释，也介绍了板块运动学和板内变形，指出板块构造学进一步研究的方向。为了扩大读者思路，本书也评述了其他各种大地构造学的理论，如全球收缩和膨胀理论，垂直运动和重力构造理论，以及大陆漂移和地幔对流理论等。

由于本书在有限的篇幅内概括了构造地质学领域的现代进展，因此很多问题的叙述是纲要性的。正如原著前言所指出的，许多内容需要通过讲解或辅助性阅读来加以引伸。幸而，本书附有详细的参考文献、习题和答案，读者通过细心阅读和思考不难从中得到更多的收益，并可以迅速地了解到近一二十年来国外构造地质学的新进展。

本书的翻译工作是在马杏垣教授指导下进行的，并为本书翻译了前言和绪论。各章翻译分工如下：第一、三、七章及附录B由刘和甫译出，第二章由游振东译出，第四章由朱志澄译出，第五章由李志锋译出，第六章由李东旭译出，第八、九章由宋鸿林译出，第十章由吴正文译出，附录甲由索书田译出，最后由刘和甫对全书进行校订。在审校过程中得到武汉地质学院王维襄等同志的帮助，特此表示感谢。

译者

1980年于北京

# 目 录

前 言	
译者的话	
绪 论	1
<b>第一章 力学概论</b>	<b>4</b>
1.1 引言	4
1.2 应力分析	4
1.2.1 应力的分量 一点上的应力	6
1.2.2 应力椭球体	11
1.2.3 岩石中应力状态的实例	15
1.3 变形的分析	16
1.3.1 应变 应变椭球体	19
1.3.2 非均匀变形	28
1.3.3 渐进应变 应变路线 变形路线	29
1.3.4 变形岩石中应变的测定	35
1.3.5 应变分布的实例	37
1.4 岩石受应力作用的反应	38
1.4.1 材料分类	39
1.4.2 力学反应分类	39
1.4.3 岩石的韧性	42
<b>第二章 显微结构</b>	<b>49</b>
2.1 引言	49
2.2 变形岩石的显微构造	50
2.2.1 晶体缺陷	50
2.2.2 显微构造发育的原理	66
2.2.3 遭受变形岩石中发育的显微构造	69
2.3 变形岩石中结晶学优选方位	72
2.3.1 由于滑移和旋转而发育的优选方位	74
2.3.2 再结晶所发育的优选方位	84
<b>第三章 原生构造</b>	<b>88</b>
3.1 引言	88
3.2 作为标志的原生构造	88
3.3 判别新老层序的原生构造	89
3.4 在变形岩石中层理的辨认和性质	93
3.5 不整合	95
3.6 沉积构造与变动构造之比较	96
<b>第四章 褶皱</b>	<b>100</b>
4.1 引言	100
4.2 单个褶皱的描述	100
4.3 褶皱系的描述	103
4.4 剖面上褶皱的描述	105
4.5 褶皱的方位	109
4.6 褶皱的分类	110
4.7 褶皱中的应变分布	112
4.7.1 褶皱形成的经典模式	113
4.7.2 褶皱形成的较真实模式	118
4.8 褶皱的发育	119
<b>第五章 面理</b>	<b>128</b>
5.1 引言	128
5.2 轴面面理: 概述	129
5.2.1 引言	129
5.2.2 破劈理	130
5.2.3 折劈理	130
5.2.4 板劈理	132
5.2.5 片理	134
5.2.6 分异层理	134
5.3 轴面面理的成因	136
5.3.1 引言	136
5.3.2 面理方位与应变的关系	137
5.3.3 层状硅酸盐的优选方位	143
5.3.4 优选的空间方位	146
5.3.5 分异作用	146
5.3.6 总结	148
5.4 置换面理	148
5.4.1 引言	148
5.4.2 置换面理的实例	149
5.4.3 置换岩石中个别褶皱的实例	149
5.4.4 置换面理的发育过程	150
5.4.5 置换的识别	155
5.5 其他变质面理	155
<b>第六章 线理</b>	<b>158</b>
6.1 引言	158

6.2 线理的描述.....159	8.2.1 尺度.....207
6.2.1 擦痕.....159	8.2.2 样式.....208
6.2.2 褶皱线理.....159	8.2.3 叠加.....209
6.2.3 由面理交切而成的线理 .....160	8.2.4 世代.....210
6.2.4 矿物线理.....160	8.3 变形地区的褶皱形态和露头型式 .....211
6.2.5 卵石、漂砾和鲕石.....162	8.4 简单构造区的分析.....214
6.2.6 杆状构造、窗棂构造和香肠 构造.....162	8.5 复杂构造区的分析.....217
6.3 线理的成因.....164	8.5.1 资料的收集.....217
6.3.1 引言.....164	8.5.2 解释.....220
6.3.2 矿物线理.....165	8.5.3 方法的局限性.....222
6.3.3 鲕石和卵石.....165	<b>第九章 构造组合</b> .....224
6.3.4 杆状构造、窗棂构造和香肠 构造.....166	9.1 引言.....224
6.4 线理指示平行于褶皱轴伸长 问题.....166	9.2 平缓沉积岩层.....224
<b>第七章 节理和断层</b> .....170	9.3 块断区和裂谷区.....226
7.1 引言.....170	9.4 平移断层及伴生构造.....228
7.2 节理.....170	9.5 表层褶皱和冲断层带.....231
7.2.1 节理组和节理系.....170	9.6 构造混杂岩.....233
7.2.2 节理面.....170	9.7 穹窿和盆地构造.....234
7.2.3 节理与其他构造的关系 .....171	9.8 盐丘.....238
7.2.4 节理的成因.....174	9.9 具有陡倾轴面的简单褶皱系 .....240
7.3 断层.....177	9.10 板岩带.....241
7.3.1 断层术语.....177	9.11 中浅变质的多期变形带.....242
7.3.2 角砾岩和糜棱岩.....178	9.12 推覆构造.....245
7.3.3 擦痕面和牵引构造.....179	9.13 具缓倾斜片理的地区.....250
7.3.4 断层位移的测定.....181	9.14 糜棱岩带.....251
7.3.5 断层的末端.....182	9.15 披盖片麻岩穹窿.....256
7.3.6 干燥岩石的抗剪阻力.....185	9.16 片麻岩区.....257
7.3.7 含孔隙流体岩石的抗剪 阻力.....190	<b>第十章 大地构造学</b> .....260
7.3.8 张节理的最大深度.....193	10.1 引言.....260
7.3.9 剪破裂方位与主应力方向的 关系.....194	10.2 板块构造学.....260
7.3.10 根据野外资料确定主应力 方位.....197	10.2.1 中脊.....262
7.3.11 断层历史.....198	10.2.2 海沟.....265
7.3.12 震源机制解.....203	10.2.3 转换断层.....267
<b>第八章 几何分析</b> .....207	10.2.4 板内应变.....269
8.1 引言.....207	10.2.5 板块运动的几何学.....270
8.2 基本概念.....207	10.2.6 板块构造和造山带.....283
	10.2.7 板块构造学中更进一步的 问题.....288
	10.3 有关地壳变形的其他解释.....289
	<b>附录A</b> .....294
	<b>附录B</b> .....303
	<b>参考文献</b> .....313



## 绪 论

构造地质学是论述岩石对外加变形力的反应方式，以及论述由于变形作用所产生的构造。由于岩石的化学成分和矿物成分变化极大，以及由于在变形时物理和化学环境变化很大而使这一课题变得复杂。每一岩石类型具有不同的力学性质，而这些性质取决于变形发生时的条件。其结果表现为地壳不同构造中各种各样的反应。当然这些构造——诸如各种类型的褶皱、断层、面理、线理和节理——是野外地质工作者直接感兴趣的，并且对于勾绘一个矿体形态、油田范围，或地区的构造历史都有重要意义。

构造地质学的最终目的是建立地壳和上地幔所经历的应变、应力、应变率、温度和压力的历史。达到这一目标努力工作的最主要方法仍然是野外工作，但其他技术也很重要，其中包括用显微镜和扫描电子显微镜去研究变形岩石的显微构造，用显微镜和 X-射线测角仪去测量组成晶体的结晶方位，并用透射电镜去看单个晶体内的构造细节。所有这些小特征都可以对一块特定岩石的构造历史给予相当启示。

那些相互作用使岩石中产生构造变化的各种因素以图解形式表示在 6 页中。

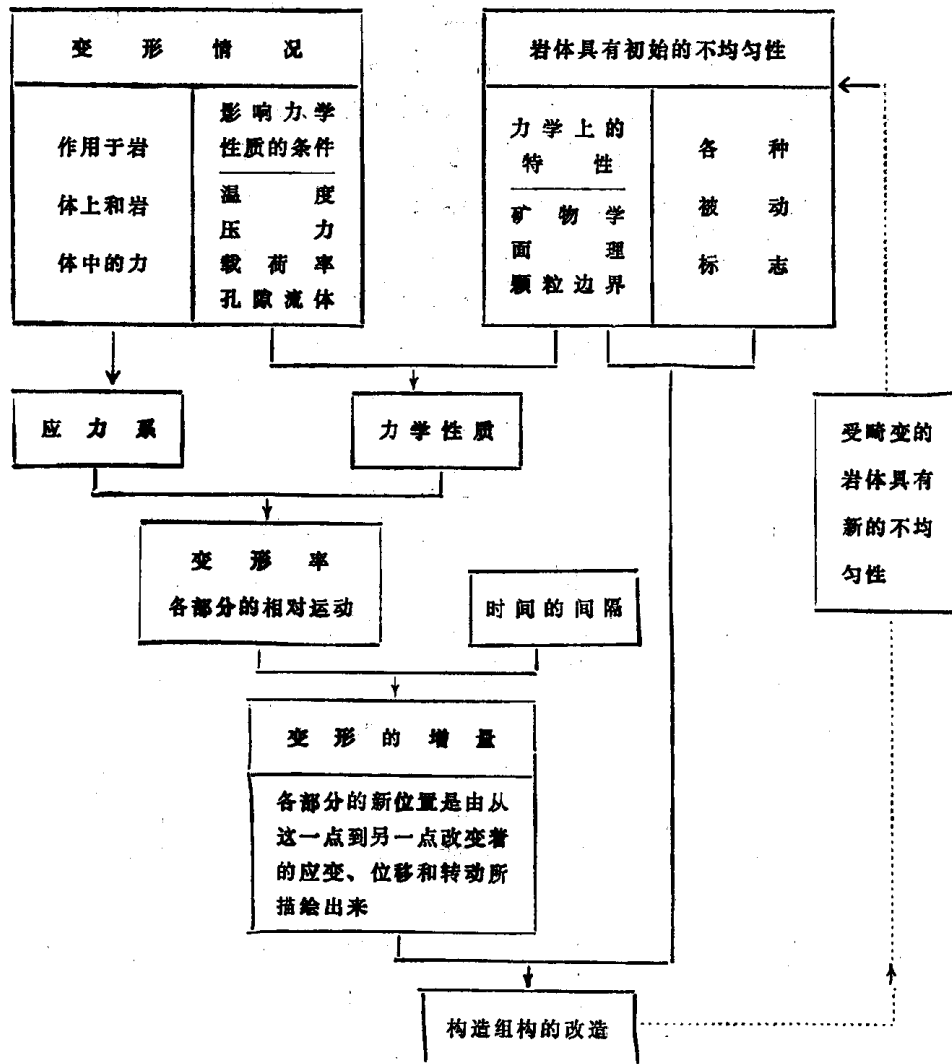
为了理解这些因素以及它们彼此相互作用的方式，我们假定有一岩体，边长为一英里的立方体，位于地壳某处。进一步设想这一立方体终于安置在变形力开始作用于岩体的边界位置上。在这一阶段，已经建立起温度和围压条件，一般讲，在岩体中从这一点到另一点之间，温度和围压在数量上存在着梯度。还有，情况不是静止的，在每一点的温度和围压将随时间而缓慢变化。岩体本身也不可能全部是均匀的，而是由不同岩石类型的层所组成。岩体的某些方面具有力学上的意义。因此，从这一点到另一点的矿物成分在很大程度上控制物质对作用于其上的力的反应方式。还有构造特征对于控制岩体的力学反应也很重要。在物体可能局部地或贯穿地存在着面理、片理、劈理和层理。如果围压比较低时，在变形过程中，这些面理上可能发生滑动。但是，如果围压比较高时，在这些面上的摩擦阻力可以相当高，则其他作用更容易使物体发生变形。此外，岩体中可能还有其他标志，如颜色条带之类。所有这些构造特征，不管它们在变形过程中是否具有力学意义的或相当被动的，都将在变形停止以后勾划出岩体中的构造轮廓。

因此，我们一方面要考虑变形情况，另一方面考虑岩体情况。施加于岩体边界上的力与重力结合在一起，就使岩体中的每一点产生另一种力系。这种从一点到另一点发生变化的力系可称为应力系 (stress system)。同时，岩体的力学特征（如矿物成分、面理的存在等）与施加在物质上的条件（如温度和压力）结合在一起时，物质在特定物理环境下，产生一组特殊力学性质的物质。当应力系作用于具有特殊力学性质的物质时，发生一定的变形率，这就使物质结构发生整体变化以及各部分之间发生彼此相对运动。随着时间的进展，岩体的各个部分取得了新的位置。这些新的位置是由变形过程中从一点到另一点变化的各种应变、位移和旋转所描绘出来的。各个部分的新位置可以从变形岩体的构造和组构的变化中反映出来。构造在很大程度上可以由岩体中最初的非均匀性和变形中的畸变来勾画其轮廓。如果变形作用继续进行，在岩体中已经发生的构造和组构变化，对岩体如何反

应进一步的变形中起一定的作用，如图解中右边的虚线所示。大多数岩体中的构造都是由许多小的变形增量施加到力学性质不断变化的物质上，经过长时期的逐渐演化而来。

如上所述，构造地质学与材料科学、固体物理、物理冶金学和制陶学的某些方面都有密切联系，事实上，构造地质学领域中最近的进展，是与这些物理科学的发展密切相联。然而，构造地质学家需要研究材料比冶金学家或固体物理学家所遇到的规模要大得多，另外构造地质学家往往需要根据有限的两度空间的露头去研究复杂的三度空间的构造。构造地质学家为了揭示这种构造曾发展了一些特殊的技术。在很大程度上也依赖于地层学、岩石学和矿物学的有关领域。然而，构造地质学中许多最基本的问题是与其它处理固体变形科学所遇到的问题相类似。

书中每一章将详细叙述上述方案中各个特定方面。第一章考虑岩石变形的力学方面，并详细讨论应力、应变的概念和岩石对应力的反应。第二章概述变形岩石的显微组构，重点是变形过程中发育的显微构造，包括促使产生大量变形的晶体缺陷。本章也考虑了变形过程中发育的结晶优选方位。第三章考虑了变形前的原生构造，包括层理以及在沉积过程



中可能出现的沉积构造。借助这些原生构造，构造地质学家能判别地层的上下层序，即使在地层遭受强烈变形之后也能认出。第四章所考虑的可能是最壮观的变形类型，就是原来未变动岩层中的褶皱作用。在变形岩石中看到的各种类型的褶皱与这类褶皱中可能存在的应变分布和褶皱发育机制是一起来考虑。第五章和第六章讲褶皱岩石中常见的构造，与这类岩石伴生的一些典型构造是各种类型的面理和线理。在第七章中考虑脆性岩石的变形方面，包括了节理和断层。第八章阐述了解决变形地区的构造几何学方法。在第九章中讲述了地球表面广泛分布的各种构造组合。在第十章中试图扼要地综述一些引起在岩石中形成构造的变形条件。本章大部分是讲新近流行的板块构造学概念。

# 第一章 力学概论

## 1.1 引言

在地球上任何一部分受到力的作用时，就使该地区内的岩石发生位移和变形。其中有些力完全是由于上覆岩石的重量所引起的，而另一些力则是由于组成地壳或地幔相邻部分物质的大规模运动所产生。此外，在岩石每一单元上都有重力作用。在有些情况下，这些力的作用时间是短期的而且较小，因此没有发生明显的变形。而在另外一些情况下，力的作用时间比较长，这就发生宏观的永久变形，譬如象大规模的褶皱作用。还有一些情况，作用力超过岩石的破裂强度，于是断层作用就成为最显著的变形模式。一个地区的岩石是否发生永久变形，以及变形作用主要是否由于褶皱作用、断层作用或者是其他方式，这将取决于一系列物理和化学因素的相互作用，其中包括温度、静水压力、孔隙流体压力、外加力的速率、变形作用的速率以及岩石的组分（包括流体的含量）。本章主要目的是探讨这些因素，以便更清楚地了解在自然界中岩石变形的方式。第二个目的是介绍一些概念，这些概念在以后几章中将要用到它。

岩石变形的研究为了方便分为三部分：应力分析（1.2节）、变形分析（1.3节）以及岩石受应力作用的反应（1.4节）。

## 1.2 应力分析

假定在巨大变形岩体中取一小的立方体岩石。图1.1a是表示在大的褶皱中取一小的立方体的例子。这一立方体的六个面都受到岩石相邻部分的挤压，而在立方体中的物质产生相应的反作用。此外，在立方体中每一质点都受到重力作用。因此，分布在整体立方体中的力系和作用于立方体面上的合力表示在图1.1c中。其中有些分力使立方体与岩体的相邻部分之间发生加速度，而另一些分力，表现为力矩，使立方体的角速度发生改变。然而，在天然条件下这些加速作用的数量级极小。同时，外加的力趋向于使立方体的形状发生变形，如当褶皱发育时，每一小区域相对于相邻部分发生旋转和平移时就使其形状发生变化（图1.1a和b）。

为了使小立方体发生一定的变形，作用于小立方体表面上力的大小决定于这些面的面积：如果立方体越大，要使其形状发生规定变化所需的力也越大。为了方便，采用与立方体大小无关的一种变形作用力进行测定。这种度量通常采用单位面积的力或**应力**。利用这种计量方法，就可以比较容易地去比较促使不同大小立方体变形的作用力，或者去比较

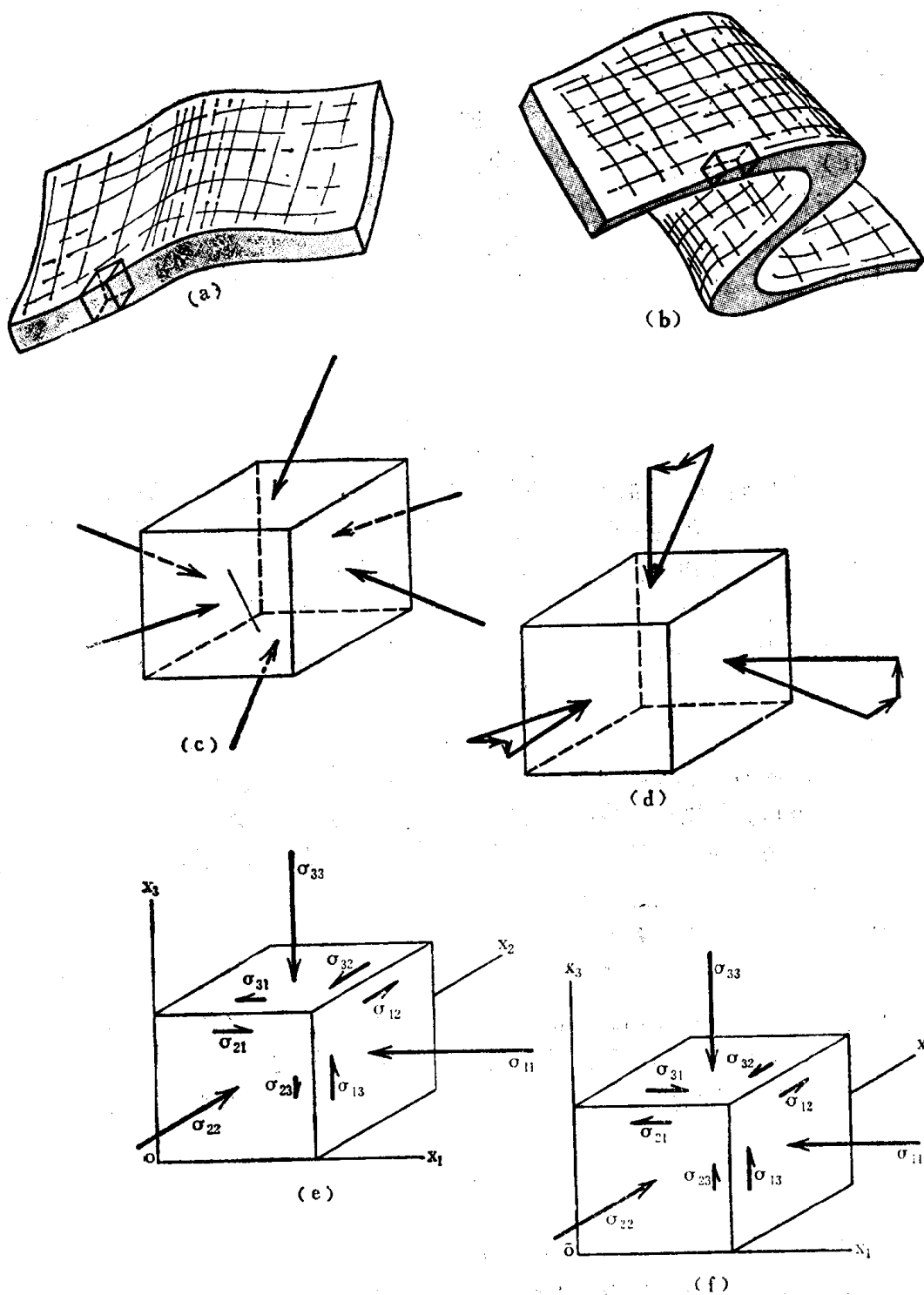


图 1.1 应力的分量。(a) 一遭受褶皱作用岩层中的小立方体。(b) 一岩层褶皱以后同一小立方体的变形。(c) 一作用于已变形立方体面上的力。(d) 一所有这些力都分解为垂直和平行于立方体表面。(e) 一作用于立方体面上的应力系是以  $Ox_1, Ox_2, Ox_3$  坐标系作为参考。(f) 一作用于无限小立方体面上的应力系

在渐进变形时促使同一地区岩石变形的作用力。应力具有的量纲  $[ML^{-1}T^{-2}]$ ，在地质上常用的一些单位给出在表 1.1 中。

### 1.2.1 应力的分量 一点上的应力

在图 1.1c 中立方体每一面上的力可以分解为三个正交分力，一个垂直于面，两个平行于面（图 1.1d）。如果这三个分力中每一个分力的值被立方体上表面积所除，就可以得到三个应力分量值（图 1.1e）。利用立方体的边作为笛卡尔坐标  $(x_1, x_2, x_3)$ ，并用符号  $\sigma_{ij}$  去标记垂直于  $x_i$  面上沿着  $x_j$  方向作用的应力分量。（这里，因为有三个坐标轴，所以  $i$  和  $j$  的范围是数值 1, 2, 3），这些不同的应力分量可以象在图 1.1e 中所标出的，并在下面阵列中以系统方式写出：

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

因此， $\sigma_{13}$  是作用于与  $x_1$  垂直的面上，并沿着  $x_3$  方向上的应力分量，而  $\sigma_{31}$  是作用于与  $x_3$  垂直的面上，并沿着  $x_1$  方向上的应力分量。用  $\sigma_{ij}$  所表示的应力分量，当两个角注相同 ( $i = j$ ) 时，则应力分量是垂直作用于立方体表面，被称为**正应力**。用  $\sigma_{ij}$  所表示的这些应力分量中，当两个角注是不同 ( $i \neq j$ ) 时，这些应力分量是平行作用于立方体表面，被称为**剪应力**。在有些教科书中正应力是用符号  $\sigma_{ij}$  ( $i = j$ ) 来表示，而用另一种符号  $\tau_{ij}$  ( $i \neq j$ ) 来表示剪应力。

在图 1.1a 中，由于立方体每一面上力的大小和方向不同，好象是很复杂，但如果假设是考虑一个点上的应力状态时，这种不均一的情况就变得简单了。假如将图 1.1e 的立方体缩小成一个点，就可以达到这一情况，这时在一点的应力可以规定为：当立方体表面积接近零时的力与面积的极限比例。当接近于这一极限情况时，即有下列三个重要特点：

1. 在每一面上力的分布接近均匀。
2. 在对立面上的力在大小和方向上彼此接近。

3. 除了立方体的角加速度变为无限大之外，作用于立方体上的力，所形成合力偶必然趋向于平衡。这意味着取极限时  $\sigma_{12} = \sigma_{21}$ ,  $\sigma_{23} = \sigma_{32}$  和  $\sigma_{31} = \sigma_{13}$  [Nye (1964), 83—87 页]，作用在一个无限小立方体面上的一些力就象在图 1.1f 中所表示的。

因此，取极限时，当假定为一点的应力状态时，应力分量的阵列可以写成对称的形式：

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

因此，在任何物质中的一点正好有六个独立的应力分量。这对于物体是否处在静止或加速度情况下，以及整个物体中力的分布是否均匀情况下都将成立。然而，如果物体存在一力矩时，这将不能成立。这种力矩在地质体中可能很少见，但在磁性体中由于外加磁场的作用可能会有这种例子 [Nye (1964, 86—87 页) 也见 Mc Clintock and Argon (1966, 54, 55 页) 对此进行讨论]。

在一物体中的**应力场** (stress field) 可以用所有各点上阵列 (1.2) 分量用图表示出来。如果在各点的分量是相同时，则应力场是均匀的。否则就是不均匀的。不均匀应力场的

地质上常用应力单位换算表

表 1.1

名称	巴	千巴	达因-厘米 <sup>-2</sup>	大气压	公斤-厘米 <sup>-2</sup>	牛顿-米 <sup>-2</sup>	帕斯卡(Pa)	千兆帕斯卡(GPa)	磅-英寸 <sup>-2</sup>
巴	1.0	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>6</sup>	0.9869	1.0197	10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>-4</sup>	14.503
千巴	10 <sup>3</sup>	1.0	10 <sup>9</sup>	0.9869 × 10 <sup>3</sup>	1.0197 × 10 <sup>3</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>-1</sup>	14.503 × 10 <sup>3</sup>
达因-厘米 <sup>-2</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-9</sup>	1.0	0.9869 × 10 <sup>-6</sup>	1.0197 × 10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-10</sup>	14.503 × 10 <sup>-6</sup>
大气压	1.0133	1.0133 × 10 <sup>-8</sup>	1.0133 × 10 <sup>6</sup>	1.0	1.0333	1.0133 × 10 <sup>5</sup>	1.0133 × 10 <sup>5</sup>	1.0133 × 10 <sup>-4</sup>	14.695
公斤-厘米 <sup>-2</sup>	0.9807	0.9807 × 10 <sup>-8</sup>	0.9807 × 10 <sup>6</sup>	0.9678	1.0	0.9807 × 10 <sup>5</sup>	0.9807 × 10 <sup>5</sup>	0.9807 × 10 <sup>-4</sup>	14.223
牛顿-米 <sup>-2</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-8</sup>	10	0.9869 × 10 <sup>-5</sup>	1.0197 × 10 <sup>-5</sup>	1.0	1.0	10 <sup>-9</sup>	14.503 × 10 <sup>-5</sup>
帕斯卡(Pa)	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-8</sup>	10	0.9869 × 10 <sup>-5</sup>	1.0197 × 10 <sup>-5</sup>	1.0	1.0	10 <sup>-9</sup>	14.503 × 10 <sup>-5</sup>
千兆帕斯卡(GPa)	10 <sup>4</sup>	10	10 <sup>10</sup>	0.9869 × 10 <sup>4</sup>	1.0197 × 10 <sup>4</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>9</sup>	1.0	14.503 × 10 <sup>4</sup>
磅-英寸 <sup>-2</sup> (psi)	6.895 × 10 <sup>-2</sup>	6.895 × 10 <sup>-5</sup>	6.895 × 10 <sup>4</sup>	6.805 × 10 <sup>-3</sup>	7.031 × 10 <sup>-3</sup>	6.895 × 10 <sup>3</sup>	6.895 × 10 <sup>3</sup>	6.895 × 10 <sup>-6</sup>	1.0

注：利用此表时从左边一行开始，然后沿着查出所要换算的一行的读数。如，1 大气压 = 1.013 × 10<sup>5</sup> 牛顿-米<sup>-2</sup>，而 1 牛顿-米<sup>-2</sup> = 1.02 × 10<sup>-5</sup> 公斤-厘米<sup>-2</sup>。  
 [资料据 Baumeister and Marks (1967)]。

例子在1.2.3节中进行讨论。

在均匀应力场中常常有可能去找到剪应力为零的三个相互正交的面。这三个面称为**主应力面** (principal planes of stress), 而它们的法线则称为**主应力轴** (principal axes of stress)。垂直于主平面的正应力是主应力, 常常用 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 和 $\sigma_3$ 来标记, 习惯上 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 。在地质文献中压应力常取正值。最大主应力、中间主应力和最小主应力分别用 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 和 $\sigma_3$ 来表示。因此, 在一点的应力状态可以用三个主应力及其方向来描述其特点。当参考立方体上的面与主应力面不平行时, 可以用阵列中的六个独立应力分量来表示。

应当注意, 应力虽然有许多是与力的物理特征有关, 但在应力的概念中常常包含与面积有关的物理特征。因此, 应力值不仅随外加力的方位和大小而变化, 而且当作用的面积大小和方向改变时, 应力也发生变化。在图1.2中可以较清楚地看出: 立方体的横剖面表示了立方体A面积上垂直作用力F的大小(图1.2a)。切过立方体的另一平面为P, 其法线与F的夹角为 $\theta$ 。我们要问: 通过P平面的法线分力与切向分力是多大? 它们与通过P面的正应力与剪应力在大小上有什么不同?

在图1.2a中力F可以分解为与P平面垂直和平行的分力。分力的大小分别为,

$$|F_N| = F \cos \theta \quad |F_s| = F \sin \theta \quad (1.3)$$

现在, 在图1.2b中, 在立方体截面上应力 $\sigma$ 大小为 $F/A$ , 而P平面的面积是

$$A_P = \frac{A}{\cos \theta} \quad (1.4)$$

因此,

$$|F_N| = F \cos \theta = A \sigma \cos \theta = A_P \sigma \cos^2 \theta \quad (1.5)$$

和

$$|F_s| = F \sin \theta = A \sigma \sin \theta = A_P \sin \theta \cos \theta$$

因此, 通过P面的正应力和剪应力的大小是

$$|\sigma_N| = \frac{|F_N|}{A_P} = \sigma \cos^2 \theta = \frac{F}{A} \cos^2 \theta \quad (1.6)$$

和

$$|\sigma_s| = \frac{|F_s|}{A_P} = \frac{\sigma}{2} \sin 2\theta = \frac{F}{A} \sin \theta \cos \theta$$

在这种情况下 $F_N$ 和 $\sigma_N$ 的大小, 以及 $F_s$ 和 $\sigma_s$ 的大小随着 $\theta$ 而变化, 分别表示在图1.2c和d中。方程1.3和1.6进行比较后表明: 应力不能象力那样进行分解, 也必须考虑作用面积大小的变化。

当主应力是 $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 时, 经过一平面其法线与 $\sigma_1$ 呈 $\theta$ 角时, 在平面上的正应力和剪应力的方程分别为:

$$\sigma_N = 1/2(\sigma_1 + \sigma_2) + 1/2(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta \quad (1.7)$$

$$\sigma_s = 1/2(\sigma_2 - \sigma_1) \sin 2\theta$$

可以参考雅格 (Jaeger, 1969, 5—20页) 的著作, 其中也考虑到三度空间的情况, 注意当 $\sigma_2$



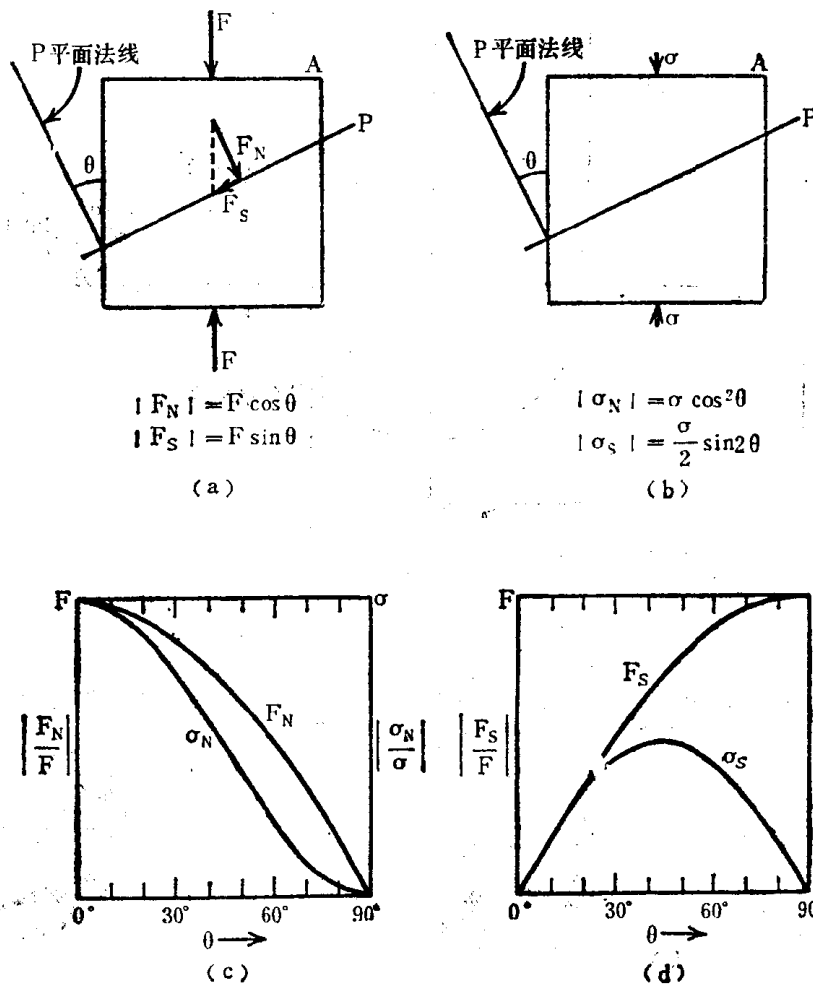


图 1.2 图解说明应力不能像矢量那样进行分解。(a) 一立方体每一面的面积为  $A$  的横剖面。  $F$  是与  $P$  平面法线成  $\theta$  角的力。垂直于平面的分力是  $F_N$ ，而平行于平面的分力是  $F_S$ 。  $F_S$  和  $F_N$  的大小可以根据  $F$  分别垂直和平行于  $P$  平面分解而得。(b) 一经过同一立方体的横剖面表示是由于力  $F$  所产生的应力  $\sigma$ 。在平面  $P$  上正应力  $\sigma_N$  和剪应力  $\sigma_S$  的大小是不可能根据垂直和平行于  $P$  的  $\sigma$  来分解求得。(c) —  $F_N$  和  $\sigma_N$  随  $\theta$  而变化的情况。(d) —  $F_S$  和  $\sigma_S$  随  $\theta$  而变化的情况

为零时，方程 (1.7) 将简化为 (1.6)。

方程 1.3 和 1.6 的比较表明了应力不能象力那样进行计算。应力是另一种类型数量的例子，称为**二级张量**(second-order tensor)[Nye, 1964]。

方程 1.7 导出的一种方便的应力表示图式，称为**莫尔图** (Mohr diagram)(图 1.3)。沿着两个正交坐标轴上将正应力和剪应力标上，表示在图 1.3a 上，在平面应力中主应力是  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$ ，以  $(\sigma_1 - \sigma_2)$  为直径和以  $Q = [(\sigma_1 + \sigma_2)/2, 0]$  为圆心作一圆。则在圆上任何一点  $P$  具有座标  $(\sigma_N, \sigma_S)$ ，这里  $\sigma_N$  和  $\sigma_S$  可以根据方程 (1.7) 给出， $2\theta$  则是轴  $\sigma_N$  与线  $PQ$  之间的夹角，可以根据所示方向来测定。在圆上任何一点  $P$  的座标可以给出平面上的正应力和剪应力，设该平面的法线与  $\sigma_1$  呈  $\theta$  夹角，该处主应力是  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$ 。当已知两个正交平面上的  $\sigma_N$  和  $\sigma_S$  时，也可以利用这一作图法来求出  $\sigma_1, \sigma_2$  和  $\theta$  [Jaeger(1969, 9—10 页)]。三度空间的应力状态也可以用稍为复杂的莫尔图来表示(图 1.3c 见 Jaeger 1969, 18—20 页)。莫尔图也广泛