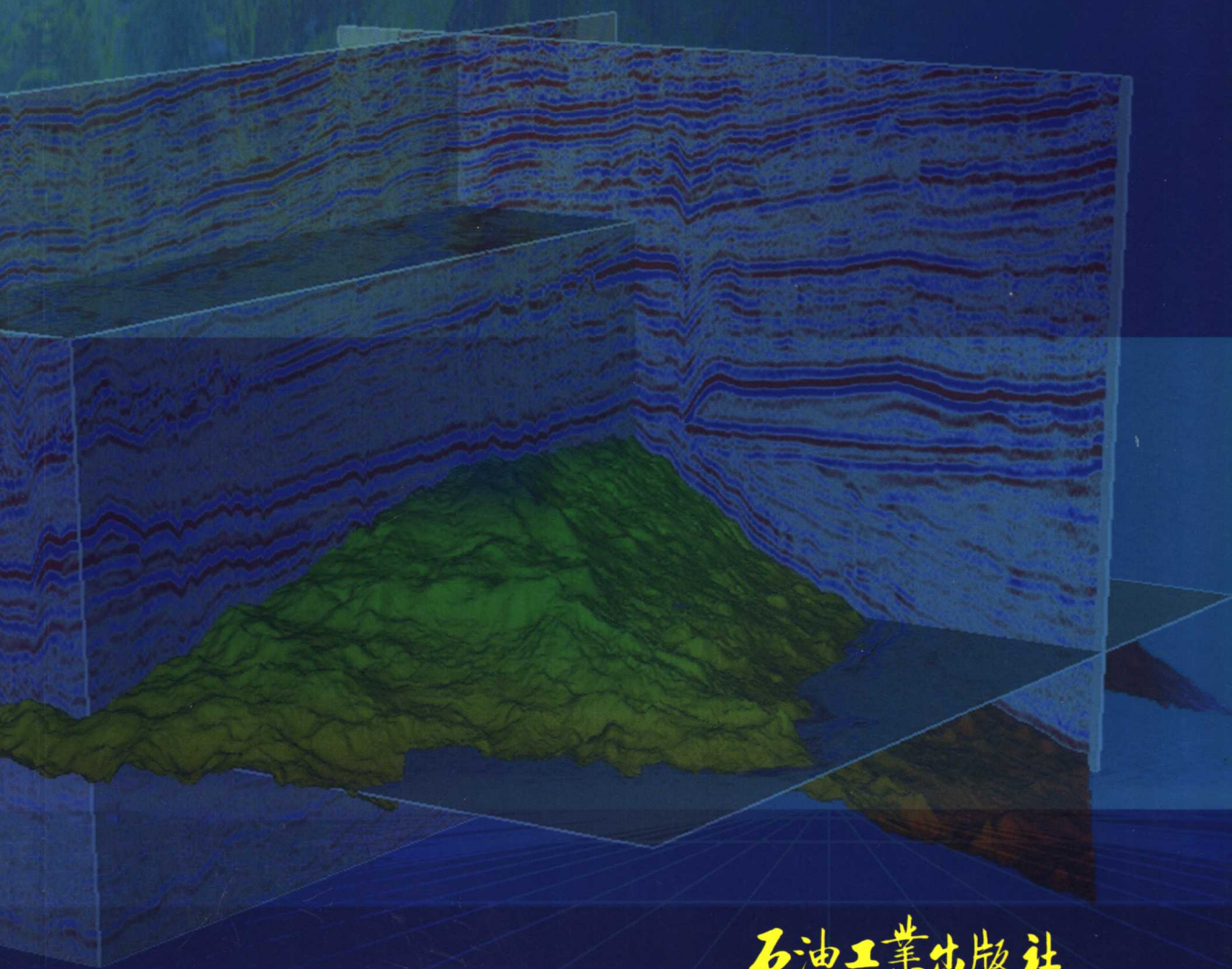


高等学校研究生教材

# 油区构造解析

漆家福 夏义平 杨 桥 编著



石油工业出版社

高等学校研究生教材

# 油区构造解析

漆家福 夏义平 杨 桥 编著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书首先介绍了油区构造解析的基础知识,包括应力和应变分析基础知识和油区构造变形分析的基本原理,然后按构造变形族系分别讨论了伸展构造、收缩构造、走滑构造、底辟构造和反转构造等几类构造的基本特征。

本书可作为地质学、矿产普查与勘探等专业研究生的学习教材,也可以作为石油勘探及开发工程师继续教育的教材和现场工作人员的参考书,还可以作为在校地质学、矿产普查与勘探等专业本科高年级学生选修构造地质学、石油构造分析等课程的补充教材或教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

油区构造解析/漆家福,夏义平,杨桥编著.

北京:石油工业出版社,2006.4

ISBN 7-5021-5426-4

I. 油…

II. ①漆… ②夏… ③杨…

III. 含油气区-地质构造-研究

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 006790 号

油区构造解析

漆家福 夏义平 杨 桥 编著

---

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址: [www.petropub.cn](http://www.petropub.cn)

总 机: (010) 64262233 发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

---

2006年4月第1版 2006年4月第1次印刷

787×1092毫米 开本: 1/16 印张: 10.75

字数: 272千字 印数: 1—3000册

---

定价: 20.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

## 序

油气勘探首先要知道盆地内部的构造,而且还要分析构造的形成和演化过程及其对油气要素的影响。因此,构造研究对于油气勘探而言是至关重要的。埋藏于地下一定深度的油区构造不同于地面地质构造那样可以直接观测,而是靠各种地球物理勘探方法来识别。地震勘探是最广泛、最有效的揭示含油气区地下构造的勘探方法,地震资料的地质解释是每一个石油勘探工作者、尤其是现场解释人员所必须具备的基本功。然而,地震资料的地质解释往往存在多解性,对于品质不好的资料、构造复杂地区的资料尤其如此。中国石油学会物探专业委员会、原中国石油天然气集团公司石油地球物理勘探局经常举办“物探资料地质解释”方面的研讨班,通过研修来提高物探解释人员的地质理论和地质研究方法。2001年,我受中国石油学会物探专业委员会委托,邀请石油大学(北京)漆家福教授在“地震资料构造解释研讨班”上讲授油区构造地质研究的理论和方法,为此他编写了名为《油区构造解析——地震资料构造解释的比较模型》的讲义。这本讲义比较系统地讲解了各种油区构造的基本概念、构造样式,并列举了一些国内外实例加以解析。阅读了漆家福的讲义并断续听了他在研讨班的讲课,很受启发。感觉将这一讲义充实、完善后作为石油物探部门的地质解释人员的工作参考书是很有必要的。现在,这一讲义经漆家福、夏义平等修编完善后终于由石油工业出版社正式出版了,作为一个大半辈子都在从事油区构造研究的老石油地质工作者感到由衷的高兴,应该表示祝贺,并感谢作者的辛勤劳动。

无疑,这本教材作为高等院校石油地质、石油物探类研究生或高年级本科生学习油区构造分析的教学用书也是十分适宜的。事实上,漆家福教授10多年来也一直是按照教材的体系为石油大学(北京)的研究生讲授油区构造解析课程。随着油气勘探技术的提高,人们对油区构造变形的复杂性有了更深刻的认识,在油区构造分析领域发展起来一些新概念(如伸展构造、变换构造带、断层连锁系统等)、新观念(如统一变形场和断层相关褶皱等)和新方法(构造解析方法、构造平衡分析方法等),而且应用这些油区构造新概念在油气勘探方面取得了一系列重大突破。漆家福、夏义平等编著的这本教材,及时吸收了油区构造研究领域中最新的理论、概念和分析方法。注重各类典型构造样式的比较分析,强调在统一构造变形场中各种构造要素相关性研究,用构造解析思想分析各种构造变形的基本样式以及各种构造要素之间的关系,并引入了国内外各种典型构造实例,理论分析与实例解剖相结合,深入浅出,对广大读者应该是十分有益的。

油气勘探中的构造地质研究是构造地质学的重要组成部分。美国学者 J. D. Lowell 于 1985 年编著了一本《石油勘探中的构造样式》(Structural Styles in Petroleum Exploration)。之后, D. J. Tearpock 和 R. E. Bischke 于 1991 年编著了一本《应用地下地质制图》(Applied Subsurface Geological Mapping), R. H. Groshong Jr 于 1999 年编著了一本《三维构造地质学》(3D Structural Geology)。AAPG (American Association of Petroleum Geologists)、SEG (Society of Exploration Geophysicists)、GSL (The Geological Society of London) 等协会还出版了大量的油区构造研究专刊、短训班教材等。这些读本的出现无疑丰富了油区构造研究的参考资料,对物探解释人员进行资料解释和制图有很大的帮助,也推动了

构造地质学的发展。遗憾的是国内在这方面的教科书和专著相对较少。1994 年，我和漆家福、陆克政等将 A. W. Bally1992 年在原石油地球物理勘探局讲学的讲稿《地震褶皱带及有关盆地》翻译出版，现在又促成本教材的出版，其目的都是想为推动我国的油区构造研究做一点工作。

袁秉衡

2005 年 10 月

## 前 言

马杏垣先生(1983)生前极力倡导“解析构造学”(analytical tectonics),并明确指出“解析”是一种思维方法,是把整体分解为部分,把复杂的事物分解为简单的要素加以研究的方法。解析构造学是广大构造地质学家在实践基础上逐渐形成的,是比较构造学(comparative tectonics)的发展。构造解析的主要内容是几何学、运动学和动力学解析三方面。几何学解析是构造解析的基础,通过系统分析地质构造中各种几何要素之间的关系来揭示其构造的运动学过程,进而揭示地质构造的形成机制和演化过程。

油区构造解析,顾名思义是解析含油气区域的地质构造。油区构造是埋藏于地下一定深度的地质构造,因而其识别和研究方法不同于地面构造。构造解析学在地面地质构造研究中得到广泛应用,其基本原理和思维方法同样适用于油区构造研究。2001年,中国石油学会物探专业委员会邀请本人在其举办的“地震资料构造解释研讨班”上讲授油区构造地质研究的理论和方法,为了讲课方便就编写了名为《油区构造解析——地震资料构造解释的比较模型》的内部讲义。由于编写时间比较仓促,这本讲义总体上看是比较粗糙的。讲义的题名就充满着矛盾的内涵,反映了本人在执教这门课程时矛盾的心境。因为构造解析强调的是思维方法和分析构造的技术,应该着重讲述构造分析的思路,而比较模型则是应该提供一些典型实例作为比较研究的对象。将两者统一起来本是作者编写这本讲义的初衷,但是讲义的内容显然还不够系统和充实。由于本人尚未见到国内有合适的用于油区构造分析的教材。因此,本人在中国石油学会物探专业委员会举办的地震资料解释方面的研讨班、石油大学(北京)硕士研究生班的《油区构造解析》课程的授课中基本都是以此讲义为蓝本。2004年,本人又受邀请在中国石油天然气集团东方地球物理公司讲授油区构造解析。地球物理公司总地质师夏义平博士等与本人讨论了讲课提纲,并提供了大量实例资料。这次讲课也为我们合作编写本教材打下了基础。夏义平博士长期在塔里木盆地进行构造解释工作,对塔里木盆地发育的逆冲褶皱变形、走滑构造变形、盐构造变形、反转构造变形等都有比较系统的研究。本书是在本人2001年编写的讲义基础上,由本人与夏义平、杨桥共同修改完成的,对原先讲义中一些明显的纰漏作了修订,并有较多的资料补充。

自然界的构造变形非常复杂,即便是全部暴露地表的构造变形,不同地质学家也可能会有完全不同的构造解释模式。地震资料揭示的构造变形受更多方面因素的影响,构造解释的多样性是不可避免的。本书起名为《油区构造解析》,试图以此为纲要讨论油区构造分析的理论基础和技术方法。所谓地质构造(structure)是一定区域范围内的岩石、岩层的空间形态及构成这种形态的各种要素之间的相互关系,解析的目的不只是识别和描述这种形态,更重要的是揭示构成构造形态的各种要素之间的关系。油区构造主要是覆盖于地下的构造,油区构造解析则是通过地震数据、钻井、测井资料等的地质解释来建立一种关于地下构造的解释模型,并分析地下构造要素之间的关系,分析构造变形过程和形成机制,从而论证解释方案的可靠性。

本书是作为在校地质学、矿产普查与勘探等专业硕士研究生学习油区构造解析(或构造地质学、石油构造分析等)课程的教材来编写的。同时也可以作为石油勘探及开发工程师继

续教育的教材和现场工作人员的参考书，还可以作为在校地质学、矿产普查与勘探等专业本科生高年级学生选修构造地质学、石油构造分析等课程的补充教材或教学参考书。早在1992年，石油大学（北京）地质类专业硕士研究生就将油区构造解析作为一门专门课程。该课程的目的是培养学生用现代构造地质学的新观念，用构造解析的思路和方法分析油区构造变形特征和形成演化过程的基本能力。

本书共分六章，第一章介绍了油区构造解析的基础知识，包括应力和应变分析基础知识和油区构造变形分析的基本原理；第二章至第六章按构造变形族系分别讨论了伸展构造、收缩构造、走滑构造、底辟构造和反转构造等几类构造的基本特征。本教材并未对构造地质学的一些基本概念和工作方法进行讨论，使用本教材要求学生要系统地学习了大学本科地质类专业的构造地质学、固体力学等课程。

本书编写过程中参考了大量国内外文献资料，除了列出的公开发表的参考文献外还有未能列出的一些内部资料。其中，部分图件资料涉及到目前已废止的“第三系（纪）”名称，为了尊重原作者成果，且因为“第三系（纪）”包含有“古近系（纪）”和“新近系（纪）”，故未作改动，仍沿用原作者的称谓。从最初的讲义编写到修编成本书，我们一直得到原中国石油天然气集团公司石油地球物理勘探局总地质师袁秉衡教授的指导。中国石油天然气集团东方地球物理勘探公司的徐礼贵、郑良合等为本书的出版做了大量工作。在此对上述单位和个人表示衷心感谢。

漆家福

2005年10月

# 目 录

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| <b>第一章 油区构造解析的基础知识</b> .....   | (1)  |
| <b>第一节 应力和应变的基本概念</b> .....    | (1)  |
| 一、应力与应力莫尔圆.....                | (1)  |
| 二、有关应变与应变的基本概念.....            | (4)  |
| <b>第二节 岩层变形的概念</b> .....       | (5)  |
| 一、岩石流变学特征与破裂准则.....            | (5)  |
| 二、岩层变形方式.....                  | (7)  |
| 三、影响岩层变形的因素.....               | (10) |
| <b>第三节 构造变形场</b> .....         | (12) |
| 一、构造族系.....                    | (12) |
| 二、构造样式.....                    | (13) |
| 三、构造变形场.....                   | (14) |
| <b>第四节 “构造确证”的基本准则</b> .....   | (15) |
| 一、精确性确证.....                   | (15) |
| 二、可接受性确证.....                  | (17) |
| 三、构造复原确证.....                  | (17) |
| 四、构造平衡确证.....                  | (18) |
| <b>第五节 地震剖面构造解释的基本知识</b> ..... | (19) |
| 一、地震剖面构造解释的基本原则.....           | (20) |
| 二、地震剖面构造解释的陷阱.....             | (21) |
| <b>第二章 伸展构造</b> .....          | (25) |
| <b>第一节 伸展构造的基本构造样式</b> .....   | (25) |
| 一、正断层.....                     | (25) |
| 二、伸展断陷盆地——地堑与半地堑.....          | (26) |
| 三、拆离断层和滑脱断层.....               | (30) |
| 四、以半地堑为基本单元的伸展断陷族系.....        | (30) |
| 五、正断层的运动及其诱导的构造变形.....         | (32) |
| 六、半地堑断陷内部的次级断层.....            | (37) |
| <b>第二节 伸展断层系统中的变换构造</b> .....  | (40) |
| 一、伸展断层系统中变换带的涵义.....           | (40) |
| 二、伸展断层系统中变换带类型.....            | (43) |
| 三、变换构造的尺度.....                 | (49) |
| <b>第三节 薄皮伸展构造</b> .....        | (49) |
| 一、构造样式.....                    | (49) |
| 二、相关（或共生）构造.....               | (52) |

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| 第四节 基底卷入的伸展构造及其演化 .....     | (56)  |
| 一、地壳尺度的伸展构造 .....           | (56)  |
| 二、伸展构造样式的演化 .....           | (58)  |
| 三、裂陷盆地类型的演化 .....           | (59)  |
| 第三章 收缩构造 .....              | (65)  |
| 第一节 收缩构造的基本构造样式 .....       | (65)  |
| 一、逆冲断层的基本特征 .....           | (65)  |
| 二、逆冲构造组合 .....              | (70)  |
| 第二节 薄皮收缩构造 .....            | (75)  |
| 一、薄皮逆冲构造 .....              | (75)  |
| 二、薄皮褶皱构造 .....              | (80)  |
| 三、薄皮收缩构造的平面特征 .....         | (80)  |
| 四、薄皮收缩构造的形成机制 .....         | (83)  |
| 第三节 基底卷入的收缩构造 .....         | (85)  |
| 一、结晶基底卷入的收缩构造 .....         | (85)  |
| 二、准沉积基底卷入或变质基底卷入的收缩构造 ..... | (88)  |
| 三、讨论 .....                  | (90)  |
| 第四节 前陆盆地的水平收缩构造系统 .....     | (90)  |
| 一、从造山带到前陆盆地的收缩构造系统 .....    | (90)  |
| 二、前陆盆地系统 .....              | (91)  |
| 三、前陆盆地中的同生收缩构造 .....        | (94)  |
| 第四章 走滑构造 .....              | (95)  |
| 第一节 走滑构造变形的一般特征 .....       | (95)  |
| 一、走滑断层与走滑构造的概念 .....        | (95)  |
| 二、走滑应变椭圆 .....              | (96)  |
| 三、走滑断层的垂直位移分量 .....         | (98)  |
| 四、走滑构造组合 .....              | (100) |
| 第二节 走滑构造的识别标志 .....         | (101) |
| 一、剖面标志 .....                | (101) |
| 二、平面标志 .....                | (107) |
| 第三节 薄皮走滑构造与基底卷入的走滑构造 .....  | (111) |
| 一、薄皮走滑构造 .....              | (111) |
| 二、基底卷入的走滑构造 .....           | (112) |
| 第五章 底辟构造 .....              | (117) |
| 第一节 底辟构造的一般特征 .....         | (117) |
| 一、底辟构造的基本结构与类型 .....        | (117) |
| 二、盐底辟构造样式 .....             | (118) |
| 三、盐上岩层的塌陷构造 .....           | (135) |
| 第二节 盐底辟构造的形成条件和演化过程 .....   | (137) |
| 一、盐底辟构造的形成条件 .....          | (137) |

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| 二、盐底辟构造的形成与演化模式·····  | (139) |
| <b>第六章 反转构造</b> ····· | (142) |
| 第一节 反转构造的基本特征·····    | (142) |
| 一、构造反转与反转构造·····      | (142) |
| 二、正反转构造·····          | (143) |
| 三、负反转构造·····          | (151) |
| 第二节 反转构造的鉴别与描述·····   | (152) |
| 一、反转构造的鉴别·····        | (152) |
| 二、反转构造的描述·····        | (153) |
| <b>参考文献</b> ·····     | (156) |

# 第一章 油区构造解析的基础知识

地质构造是岩层、岩石受地应力作用发生的变形。在地表下，可以直接观测到露头尺度或手标本尺度范围内的地质构造，更小尺度的构造则需要借助显微镜来观测，更大区域的地质构造则可以用地质制图方法来加以研究。油区构造属于地下的地质构造，主要依靠地震等地球物理勘探和钻井、测井等得到的地下地质信息来识别。因此，油区构造解析的基础应该包括三方面：其一是力学基础和应变分析的基本理论；其二是构造地质学基本理论；其三是地球物理勘探资料解释的基础知识。

## 第一节 应力和应变的基本概念

地壳中的岩层自它们形成之时起就一直受到包括地球重力场、地壳构造应力场等的作用。当岩层受力处于平衡状态时，岩层处于静止状态；否则就会发生位移，导致变形和变位。地质构造现象就是岩层受力发生变形和变位的结果。

### 一、应力与应力莫尔圆

#### 1. 力与应力

力是使具有质量的物体发生加速运动的能力，在物理学上力（ $F$ ）表示为质量（ $M$ ）和加速度（ $a$ ）的乘积。即：

$$F = Ma \quad (1-1)$$

力可以分为外力和内力。一个物体受到外力作用时，边界上的外力通过物体内部质点之间的相互作用传递到物体内部。应力是指物体内部截面上的单位面积受力，是力分布在物体内部的效应。即：

$$\sigma_T = F/S \quad (1-2)$$

式中  $F$ ——物体截面上受的力，英制单位为磅力（lbf），国际单位为牛（N）；

$S$ ——物体的截面面积，英制单位为平方英寸（in<sup>2</sup>），国际单位为平方米（m<sup>2</sup>）；

$\sigma_T$ ——截面上的总应力，英制单位为磅力每平方英寸（psi），1psi = 1lbf/in<sup>2</sup>，国际单位为帕（Pa），1Pa = 1N/m<sup>2</sup>。应力单位还常用“巴（bar）”、“千巴（kbar）”。

这些不同的单位有不同的含义，而且在构造地质学中常常将压应力取为正值，与一般工程中常取张应力为正值有所不同，在实际应用中既要注意符号的意义，也要注意换算尺度（B. E. 霍布斯等，1982）。

$$1\text{kbar} = 10^8\text{Pa} = 100\text{MPa}$$

$$1\text{MPa} = 145\text{psi}$$

$$1\text{psi} = 6.9 \times 10^3\text{Pa}$$

力和应力都是矢量。应力与力一样可以分解，物体内部任意截面上的应力都可以分解为分别与该截面法线方向和切线方向一致的两个应力分量。前者称为正应力，用 $\sigma$ 表示；后者称为剪切应力，用 $\tau$ 表示。物体内部一点的应力状态是过该点的所有方向的截面上的应力总

体特征。物体内部一点的应力状态可以用包含该点的单元体积表面三对相互垂直的截面上的应力分量表示。在三维直角坐标系中，一点的应力状态用九个应力分量表示，即：

$$\begin{array}{ccc} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{array} \quad (1-3)$$

当物体内部单元体积处于力的平衡状态时， $\tau_{xy}$  和  $\tau_{yx}$ 、 $\tau_{xz}$  和  $\tau_{zx}$ 、 $\tau_{yz}$  和  $\tau_{zy}$  的大小相等，方向相反。正应力有使物体沿截面法线方向发生直移和伸缩变形的趋势，剪切应力有使单元体积发生旋转和剪切变形的趋势。构造地质学中规定：张应力符号为“-”，压应力符号为“+”；左旋剪切应力符号为“+”，右旋剪切应力符号为“-”。在边界力学条件一定的情况

下，物体单元体积的方向发生变化则相应截面上的应力也发生变化。当单元体积在一个特定方向时，所有截面上都只有正应力，剪切应力为零。这一位置的单元体积的三个相互垂直的方向称为该单元体积的主应力方向，相应截面上的正应力称为“主应力”，分别用  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  表示。其中， $\sigma_1$  表示最大主应力（多数情况下最大主应力为压应力）， $\sigma_2$  表示中间主应力， $\sigma_3$  表示最小主应力（有些情况下最小主应力是张应力）。显然，如果已知一点的三个主应力方向和主应力值的大小，也就知道了该点的应力状态。由两个主应力方向组成的平面称为“主应力平面”，例如由  $\sigma_1$  方向和  $\sigma_3$  方向组成的平面（图 1-1）。

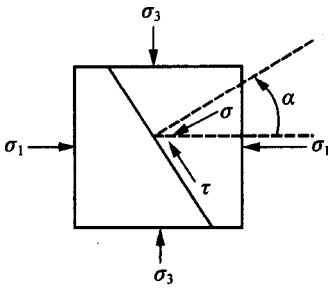


图 1-1  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  组成的主应力平面应力状态示意图

设  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  作用的截面面积分别为  $S_1$  和  $S_3$ ，截面上的作用力分别为  $F_1$  和  $F_3$ ，则  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  可以表达为  $(F_1/S_1)$  和  $(F_3/S_3)$ 。如果任意截面“ $S_a$ ”的法线位于  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  组成的主应力平面内，且“ $S_a$ ”的法线与  $\sigma_1$  轴夹角为  $\alpha$ ，根据面积的投影法则有：

$$S_a = \frac{S_1}{\cos\alpha}, \text{ 或 } S_a = \frac{S_3}{\sin\alpha} \quad (1-4)$$

根据力的分解则有：

$$F_a(\nu) = F_1 \cos\alpha + F_3 \sin\alpha \quad (1-5)$$

$$F_a(t) = F_1 \sin\alpha - F_3 \cos\alpha \quad (1-6)$$

式中  $F_a(\nu)$  ——垂直于截面“ $S_a$ ”的作用力；

$F_a(t)$  ——平行于截面“ $S_a$ ”的作用力。

根据应力的定义和式 (1-4)、式 (1-5)、式 (1-6) 的运算，截面“ $S_a$ ”上的正应力  $\sigma_a$  和剪切应力  $\tau_a$  可以分别表达为：

$$\sigma_a = \sigma_1 \cos^2\alpha + \sigma_3 \sin^2\alpha = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \quad (1-7)$$

$$\tau_a = \sigma_1 \cos\alpha \sin\alpha - \sigma_3 \sin\alpha \cos\alpha = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \quad (1-8)$$

方程 (1-7) 和 (1-8) 分别表示了任意方向的截面“ $S_a$ ”上的正应力和剪切应力分量，称为应力方程。

## 2. 应力莫尔圆

分别将式 (1-7) 和 (1-8) 两边平方后，两式相加整理后可以得到：

$$\left(\sigma_a - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right)^2 + \tau_a^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)^2 (\sin^2 2\alpha + \cos^2 2\alpha) = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)^2 \quad (1-9)$$

不难看出，式（1-9）是一个圆的方程。即在以正应力  $\sigma$  为横轴、剪切应力  $\tau$  为纵轴的坐标系中，物体内部一点在主应力平面上的应力状态表示为如图 1-2（a）所示的圆的轨迹，这种圆称为“应力莫尔圆”（Mohr's circle）。如果一个物体处于三轴应力状态，三个主应力轴分别为  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  和  $\sigma_3$ ，则任意截面上的应力值一定是对应于图 1-2（b）中阴影部分的某一点的坐标值。

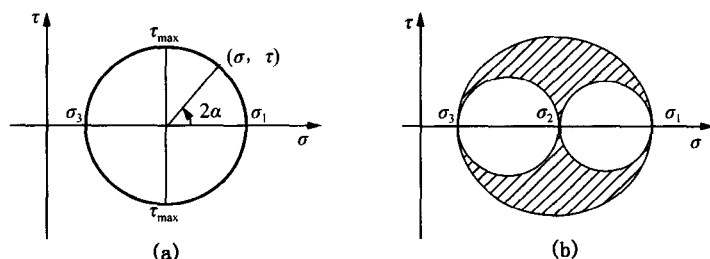


图 1-2 应力莫尔圆图解

（a）主应力平面莫尔圆图解；（b）三维应力状态莫尔圆图解

在应力莫尔圆中，如果一个任意截面的法线与主应力轴方向的夹角为  $\alpha$ ，该截面的应力分量是莫尔圆上以  $\sigma$  轴正方向为起点、圆心角为  $2\alpha$  的半径与圆周交点的坐标值。

从应力莫尔圆上很容易理解有关应力的一些基本性质和各种特殊的应力状态：

- （1）截面法线方向与主应力方向夹角为  $45^\circ$  的截面上的剪切应力最大；
- （2）两个互相垂直的截面上的剪切应力大小相等、方向相反；
- （3）水下一点的静水压力或地壳中一点的静岩压力（即上覆岩石的压力）在  $\sigma$ - $\tau$  坐标系中位于  $\sigma$  轴上的一点；同理，孔隙流体压力也是位于  $\sigma$  轴上的一点；
- （4）应力莫尔圆的圆心与坐标系原点一致时，最大主应力与最小主应力大小相等、方向相反，且主应力值与其  $45^\circ$  方向的截面上的剪切应力值相等，这种应力状态为纯剪切应力状态。

就像静水压力  $\sigma_w$  随着水深增大而增大一样，地壳深部的静岩压力  $\sigma_L$  也是随着深度的增大而增大，可以表示为：

$$\sigma_L = \rho_L \cdot g \cdot h \quad (1-10)$$

式中  $\rho_L$ ——上覆岩石的密度；

$g$ ——重力加速度；

$h$ ——深度。

由于水的密度比岩石的密度小，因而静水压力比静岩压力小。将式中的岩石密度改为水的密度就是静水压力  $\sigma_w$ 。静水压力  $\sigma_w$  梯度大约为  $1\text{kPa/m}$ ，静岩压力  $\sigma_L$  梯度大约为  $2.1\text{kPa/m}$ 。如果岩层孔隙流体是开放系统，与上覆水体相连，则岩层孔隙中的流体压力  $\sigma_f$  的大小与所在深度的静水压力  $\sigma_w$  一致。设  $\lambda = \sigma_L / \sigma_f$ ，如果岩层中的孔隙流体承受的是正常的压力，则  $\lambda \approx 0.465$ ，而当  $\lambda > 0.465$  时表明孔隙流体处于异常高压状态。

作用在岩层内部的应力可以使每个单元体积发生位移，从而导致岩层整体变形。单元体积位移的大小和方向取决于该点的应力状态。静水压力（孔隙流体压力）、静岩压力并不能使岩层发生变形，使岩层变形主要是岩层内部的差应力值。所谓差应力（ $\Delta\sigma$ ）是指最大主

应力与最小主应力之间的差值，即  $\Delta\sigma = (\sigma_1 - \sigma_3)$ 。

### 3. 应力场

由于岩层结构、岩性等诸多因素的影响，岩层内部不同位置的应力状态可以是不同的。可以用“应力场”（stress field）来表示岩层内部应力状态的总体特征。一个区域的应力场特征与该区域的边界条件（包括边界力、应力或位移等）、内部结构条件（包括岩层力学性质、几何形态等）等有关。当边界条件改变后，应力场特征也随之改变。即使边界条件基本不变，在应力场作用下岩层会发生变形，形成地质构造。而随着地质构造的演化，岩层内部的结构条件也发生了变化，相应的应力场特征也会发生变化。因此，一个地区不同地质时期的应力场特征是会发生变化的。

## 二、有关应变与变形的基本概念

### 1. 位移

物体从原始位置经过一段时间后达到新的位置，这种起止位置的差异称为位移（displacement），而位移的过程称为运动（motion）。构造地质学中的“位移”主要是指岩层发生的刚体位移，包括两种方式：直移（translation）和旋转（rotation）。直移是指岩层沿某个方向发生整体位移使其改变其原始位置而没有改变其原始产状，旋转是指岩层绕某个轴线发生整体转动使其位置和产状都发生改变。直移和旋转经常是同时发生的，使岩层的原始位置和产状同时改变，即“位态”发生变化。

### 2. 应变

应变（strain）可以分为体积应变、长度应变和角度应变，分别指单位体积的体积变化、单位长度的长度变化和单位角度的角度变化，分别称为体应变、线应变和角应变。岩层在静水压力和静岩压力作用下的体积缩小（例如疏松的沉积物经过压实使体积减小）可以视为体应变，而构造应力作用使岩层发生构造变形则主要是线应变和角应变（图 1-3）。

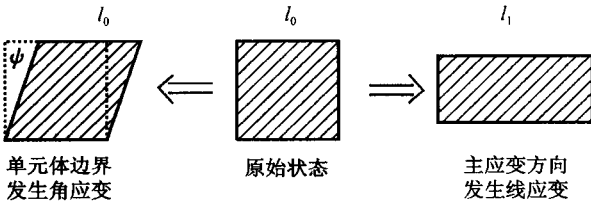


图 1-3 线应变和角应变示意图

线应变也称为正应变（normal strain），一般用“ $e$ ”表示：

$$e = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (1-11)$$

式中  $l_0$ ——岩层的原始长度；

$l_1$ ——岩层发生变形后的长度。

$e$  为正值时表示伸展应变， $e$  为负值时表示收缩应变。

地质构造变形属于大变形，通常用地壳或岩层的变形后的剖面水平长度与变形前的剖面水平长度之比来表示应变程度，用  $\beta$  表示，称为伸展系数：

$$\beta = \frac{l_1}{l_0} = 1 + e \quad (1-12)$$

显然， $\beta > 1$  时表示伸展变形， $\beta < 1$  时表示收缩变形。

角应变也称为剪切应变（shear strain），一般用“ $\Gamma$ ”或“ $\gamma$ ”表示：

$$\Gamma = \frac{1}{2} \gamma = \frac{1}{2} \tan \psi \quad (1-13)$$

式中  $\psi$ ——原始状态相互垂直的两条直线变形后所增大或减小的角度。

一个物体经过均匀变形，物体内的一个原始球形标志将成为一个椭球（图 1-4）。椭球的三个相互垂直的轴也是原始球形标志中的三个相互垂直的轴，它们只发生了正应变，剪切应变为零。这三个相互垂直的只发生正应变的轴称为主应变轴，其应变值分别表示为：

- $e_1$  = 最大主收缩应变变量
- $e_2$  = 中间主应变变量

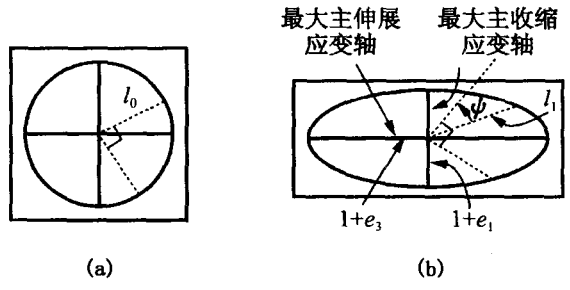


图 1-4 应变椭圆  
(a) 原始圆标志；(b) 应变椭圆

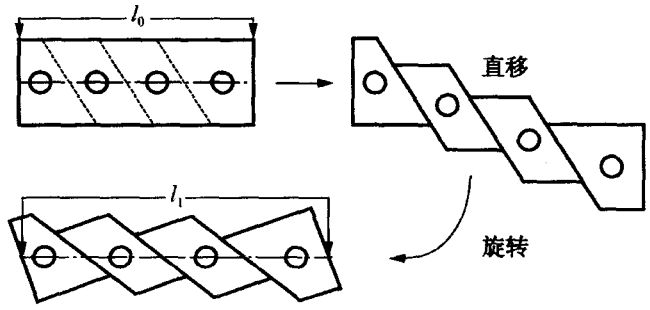


图 1-5 位移与应变关系示意图

$e_3$  = 最小主收缩应变变量（最大主伸展应变变量）

应变是与应力相对应的，主应变轴与主应力轴相对应，分布在主应力平面内。

### 3. 位移与应变的关系

位移和应变与观测尺度有关，小尺度上的位移可以体现出大尺度上的应变。如图 1-5 所示，一个岩层被一系列平行的破裂面切割并发生右旋错动，破裂面之间的岩层内部并没有发生应变，可以视为“刚体”，破裂面两侧的岩层发生刚体位移。但是从更大尺度考虑，岩层内部的小破裂面的“集合”体现了岩层的宏观应变结果。

## 第二节 岩层变形的基本概念

### 一、岩石流变学特征与破裂准则

#### 1. 岩石流变学特征

岩石流变学特征是指岩石的应力与应变或应变速率的关系。力学实验表明：不同物性的岩石其流变学特征有较大的差异，同一种岩石在不同的环境（包括温度、压力、流体、时间等）下其流变学特征也可以表现出明显的差异。一般地，随着差应力值的增大，岩石依次发生弹性应变、假粘性永久应变、破坏、断层滑动等几个阶段（图 1-6）。

所谓“弹性应变”（elastic strain）是指当有效差异应力解除后可恢复的应变，有效差异应力与应变成线性关系，即：

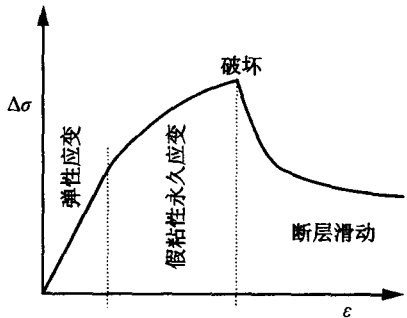


图 1-6 岩层流变特征曲线

$$\Delta\sigma = E\epsilon$$

(1-14)

式中  $E$ ——岩石的杨氏模量 (Young's modulus, 也称弹性模量);

$\epsilon$ ——应变值;

$\Delta\sigma$ ——差应力值。

当  $\Delta\sigma = 0$  时,  $\epsilon = 0$ 。弹性应变是可以恢复的。

所谓“假粘性永久应变” (psuedoviscous permanent strain) 是指当有效差异应力值超过岩层的弹性应力强度 (yield stress 屈服应力) 后, 随着差应力的增大岩层发生的应变, 当有效差异应力值解除后这一部分应变是不可恢复的。当应力值超过岩层的弹性应力强度后, 岩层内部通过颗粒间的调整, 提高其承受应力的能力。这种颗粒调整过程包含复杂的机制, 但总体上类似于粘滞性流动, 因而称为“假粘性永久应变”。岩层在应力作用下发生的假粘性永久应变除与差应力值 (剪切应力值) 大小、岩层力学性质有关外, 还与应力作用的时间有关。岩层发生褶皱变形就是假粘性永久应变的结果。

“破坏” (failure) 是指岩层所承受的应力值已达到或超过岩层所能承受的应力极限值 (strength 抗应力强度) 而使岩层发生破裂。岩层破坏后, 岩层的抗应力强度会降低, 在应力释放过程中岩层沿着破裂面发生滑移的过程称为“断层滑动” (fault sliding)。破坏和断层滑动是连续发生的, 使岩层形成节理和断层。

## 2. 破裂准则

岩层的抗应力强度包括抗张应力强度、抗剪切应力强度和抗压应力强度。其中抗压应力强度远远大于抗张应力强度和抗剪切应力强度。因此岩层破坏时产生的破裂一般是张破裂或剪切破裂。而在地下的岩层, 很少处于张应力状态 (即  $\sigma_3 < 0$ , 有时局部可以处于张应力状态), 因此, 多数破裂, 特别是断层主要是剪切破裂, 即岩层某截面上承受的剪切应力超过其抗剪切强度时发生破裂。

岩层在多大应力作用下、沿着什么方向发生破裂, 可以通过岩石力学实验和理论计算得到。实验表明, 岩石破裂时破裂面与最小主应力轴的夹角为:

$$\theta = 45^\circ - (\phi/2)$$

不同应力状态下岩石破裂时破裂面在应力莫尔圆上的点构成应力莫尔圆的包络线, 称为破裂包络线 (图 1-7)。

图 1-7 中的破裂包络线的方程可以表示为:

$$\tau_n = C + \mu_i \sigma_n \quad (1-15)$$

式中  $\mu_i = \tan\phi$ ;

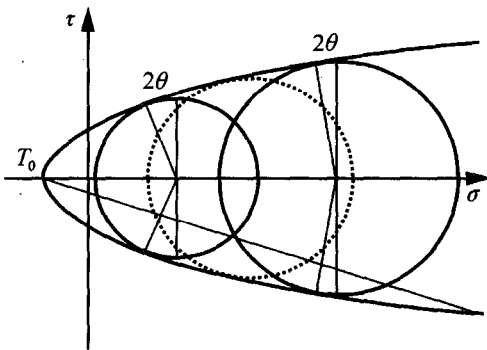
$C$ ——岩石的内聚力, 或抗剪切强度;

$\phi$ ——内摩擦角。

目前应用比较广泛的有两个破裂准则, 一是库仑准则 (Coulomb criterion), 一是格里菲斯准则 (Griffith criterion)。前者的破裂包络线是两条直线, 同一岩石的内摩擦角  $\phi$  的值不变; 后者的破裂包络线是一条抛物线, 同一岩石在不同应力状态下的内摩擦角  $\phi$  的值是不同的 (图 1-7)。

修正的格里菲斯破裂抛物线与负  $\sigma$  轴相交于  $T_0$  点,  $T_0$  为岩石的抗张强度。一般沉积岩层的内聚力强度在 10~20MPa 范围内, 抗张强度大约相当于内聚力强度的 0.5 倍。

图 1-7 莫尔圆的破裂包络线



### 3. 脆性变形与韧性变形

不同的岩层在同样的应力环境中可以表现出不同的流变学特征，同一种岩层在不同的应力环境中也可以表现出不同的流变学特征。在构造地质学中，如果岩层在破坏前所承受的应变变量小于5%，称为脆性变形；如果岩层所承受的应变变量大于5%还没有发生破坏，则称为韧性变形（朱志澄等，1990）。

## 二、岩层变形方式

### 1. 纯剪切变形与简单剪切变形

纯剪切（pure shear）最早是由 Anderson（1905）提出的一种应力场模型，用来解释在均匀介质中断层的初始角与应力场中三个主应力轴的关系。在纯剪切应力场模型中，如果发生剪切破裂，则一定是一对共轭的剪切破裂，共轭破裂面的交线与应力场中的  $\sigma_2$  一致。由于岩石存在内聚力，共轭剪切破裂面与应力场中双生的一对最大剪切应力面之间存在一个内摩擦角  $\phi$ ，因而共轭破裂面的锐角平分线与应力场中的  $\sigma_1$  一致，共轭破裂面的钝角平分线与应力场中的  $\sigma_3$  一致。在纯剪切变形中，岩石在差应力作用下沿  $\sigma_1$  方向缩短而沿  $\sigma_3$  方向伸长，总体变形中的最大主收缩应变轴  $e_1$  始终与最大压应力轴  $\sigma_1$  一致，最大主伸展应变轴  $e_3$  始终与最大张应力轴  $\sigma_3$  一致。所谓简单剪切变形是指岩石沿着单个剪切应力方向发生剪切变形，总体变形中的最大主收缩应变轴  $e_1$  与最大压应力轴  $\sigma_1$ 、最大主伸展应变轴  $e_3$  与最大张应力轴  $\sigma_3$  不一致，在变形过程中向同一方向偏转（图 1-8（a））。

简单剪切（simple shear）最早是由 Riedel（1929）提出的一种应力场模型，认为剪切带中主剪切位移带方向与控制构造变形的剪切应力方向一致（图 1-8（a））。在剪切应力作用下，可以诱导出次级应力场，形成次级的剪切破裂和其他构造变形要素，剪切变形过程使剪切带内部的构造要素发生与剪切应力方向一致的旋转，但是剪切带的宽度保持不变。如图 1-8（a）所示，同样是  $N36^\circ W$  的右旋走滑断层，如果用纯剪切应力模型来解释，区域挤压应力方向（ $\sigma_1$ ）应该是南北向，还可能发育一组与之共轭的  $N36^\circ E$  的左旋走滑断层；如果用简单剪切应力模型来解释， $N36^\circ W$  的右旋走滑断层是在沿  $N36^\circ W$  方向的右旋剪切应力作用下形成的，诱导出的局部挤压应力方向（ $\sigma_1$ ）应该是  $NNE$  方向，与纯剪切模型比较，相当于应力轴向  $NE$  方向偏转（ $\phi/2$ ）。而且简单剪切应力场模型中发育的构造要素更丰富，反映在剪切应力作用下剪切带的旋转剪切变形。

纯剪切和简单剪切都可以使主应变平面中的“圆”变形成为“椭圆”（图 1-8（b））。纯剪切变形过程中的主伸展应变轴方向的伸长和主收缩应变轴方向的缩短使之产生一对以主应变轴为对称轴的共轭剪切变形带，并且主应变轴方向在变形过程中保持不变。简单剪切变形过程可以理解为一叠卡片发生剪切滑动而使卡片上的“圆”标志变形成为“椭圆”。物体发生简单剪切变形时，应变“椭圆”的主应变轴方向在变形过程中发生旋转，而剪切变形带的宽度（或厚度）则保持不变。如果将简单剪切变形的椭圆再旋转一定的角度似乎可以等效于纯剪切变形的椭圆，但是它们的变形过程和变形机制及变形体的内部结构则完全两样。

纯剪切和简单剪切变形在不同的观测尺度上可以相互转换，小尺度上局部的简单剪切变形叠加上旋转位移可以成为更大尺度上宏观的纯剪切变形的一部分。在挤压作用下形成的一对共轭剪切破裂属于纯剪切变形。如果单独考察一条剪切带，这条剪切带如果在变形过程中其宽度保持不变则可以视为简单剪切变形。但是在挤压作用下形成的共轭剪切带在变形过程中往往是具有一定程度的收缩分量，这种情况下不能用简单剪切变形概念来描述。