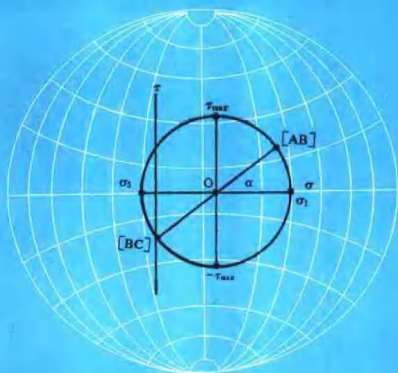


油气田构造地质力学分析

Youqitian Gouzao Dizhi Lixue Fenxi

黄继钧 伊海生 余 团 编著



成都科技大学出版社

油气田构造地质力学分析

黄继钧 伊海生 余 团 编著

成都科技大学出版社

(川)新登字 015 号

责任编辑 赵成永 周兴泰

封面设计 卢奇勋

内 容 简 介

本书系统地论述了构造应力场的基本知识,构造形迹的力学性质、特征及其对油气的控制作用,构造形迹的序次特征及其对油气的控制作用,构造体系及其对油气的控制作用,构造复合和联合的理论及其对油气的控制作用,含油气盆地地力学分析,古构造的研究方法等内容,涉及到油气田构造研究的诸方面。

本书内容丰富,资料新颖,是研究油气田构造和油气生成、运移、聚集的理论和工作方法方面比较系统的著作,具有一定的理论和实践价值。本书可供从事石油与天然气勘探的生产、科研和教学的人员及大专院校相关专业的本专科生和研究生阅读参考。

油气田构造地质力学分析

黄继钧 伊海生 余 团 编著

成都科技大学出版社出版发行

西南冶金地质印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 14.75

1996年10月第1版 1996年10月第1次印刷

印数 1—500册 字数 368千字

ISBN 7-5616-3343-2/P·85

定价:20.00元

前 言

油气田构造地质力学分析是油气资源勘探中一个极其重要的领域。它可以获取地表和地下一定深度内的地质信息,从而有利于阐明油气地质构造的特征、发生、演化过程及对油气的生成、运移、聚集的控制作用和机理。

本书是编著者在长期从事这方面的教学和科研工作的基础上,运用著名地质学家李四光教授创立的地质力学理论和方法所编著的一本比较系统地介绍不同力学性质的构造形迹、不同型式的构造体系及构造发生、演化对石油天然气的生成、运移、聚集的控制作用的著作。

全书共分九章,包含了六个方面的内容:

第一部分,比较系统地介绍油气田构造研究中的力学基础知识,重点介绍有关应力、应变、应力场的知识及古应力场的研究方法。

第二部分,介绍不同力学性质的构造形迹的特征、研究方法及其对油气的控制作用。

第三部分,介绍不同类型构造组合的特征、成因及其对油气的控制作用。

第四部分,系统论述不同方向、方式的外力同时或先后作用于同一地区所产生的构造复合和联合的力学机理、应力场特征及其对油气的控制作用。

第五部分,介绍不同力学机理的含油气盆地的特征、发生、演化过程及其对油气的控制作用。

第六部分,介绍油气田古构造的研究方法。

本书由黄继钧担任主笔,伊海生担任副主笔,余团参加了部分工作。

书中引用和参考了《地质力学参考》(乐光禹,1974)、《地质力学导论》(李东旭等,1986)、《地质力学引论》(周济元等,1991)等教科书中的有关内容。书中关于油气田及油气盆地分类方面的论述参照了《石油地质学》(潘钟祥、高纪清、陈荣书,1986)有关部分,并引用了朱夏、刘和甫、赵重远、陈发景、张恺、张之一、孟祥化、乐光禹、周济元和 Lerorsen 等专家、教授近年来所发表的部分资料,特此说明,并表示诚挚的感谢。

书中有关节理复平处理方法和四川盆地东北部构造分析系本书主笔黄继钧参与并承担自然科学基金项目《构造复合-联合叠加原理》(乐光禹、杜思清、黄继钧、杨武年等承担)中《纵弯褶皱叠加地区早期裂隙产状变化规律及恢复方法》和《四川盆地东北部构造复合联合格局》研究的成果。

赵成永老师为本书的编辑出版付出了辛勤劳动,在此表示衷心感谢。

囿于水平和经验,疏漏、错误之处在所难免,恳请地质界老前辈及同仁批评斧正。

编著者

1996. 1

目 录

第一章 绪 论	(1)
§ 1.1 油气田构造地质力学分析的涵义	(1)
§ 1.2 油气田构造地质力学分析的意义	(1)
§ 1.3 油气田构造地质力学分析的研究对象和内容	(3)
第二章 力学知识	(4)
§ 2.1 应力	(4)
§ 2.2 应力状态	(6)
§ 2.3 应力圆	(8)
§ 2.4 应变	(10)
§ 2.5 构造应力场的基本知识	(14)
一、构造应力场的基本概念	(14)
二、几种简单型式的应力场	(14)
三、构造应力场的研究方法	(18)
四、构造应力场研究实例分析	(29)
第三章 构造形迹的力学性质及其控油控气作用	(48)
§ 3.1 构造形迹的基本概念	(48)
§ 3.2 构造形迹的力学性质分类	(48)
§ 3.3 构造形迹的力学性质鉴定	(49)
一、褶皱的力学性质鉴定	(49)
二、断层的力学性质鉴定	(50)
§ 3.4 构造形迹的控油控气机制	(53)
一、褶皱构造的控油控气作用	(53)
二、断裂构造的控油控气作用	(59)
第四章 构造形迹的序次及其控油控气作用	(69)
§ 4.1 构造形迹序次的基本概念	(69)
§ 4.2 构造形迹序次的划分	(69)
§ 4.3 构造形迹力学性质的序次转化	(73)
§ 4.4 构造形迹多级序控油控气作用	(75)
第五章 构造体系及其控油控气作用	(78)
§ 5.1 构造体系的基本概念	(78)
§ 5.2 构造体系的类型和形式	(78)
§ 5.3 构造体系的控油控气作用	(96)
第六章 构造联合及其控油控气作用	(108)
§ 6.1 构造联合的基本概念	(108)
§ 6.2 构造体系联合的基本形式	(108)
§ 6.3 弧形联合的控油控气作用	(116)
第七章 构造复合及其控油控气作用	(127)
§ 7.1 构造复合的基本概念	(127)

§ 7.2	断裂力学性质的复合叠加	(127)
§ 7.3	叠加褶皱的类型及变形图象	(129)
§ 7.4	褶皱的限制复合	(135)
§ 7.5	纵弯叠加褶皱地区先存裂隙产状的变化规律及恢复	(138)
§ 7.6	构造复合对油气的控制作用	(156)
第八章	含油气盆地力学分析	(172)
§ 8.1	盆地的基本概念	(172)
§ 8.2	含油气盆地的分类	(174)
§ 8.3	拉张型盆地	(179)
§ 8.4	挤压型盆地	(195)
§ 8.5	扭动型盆地	(202)
§ 8.6	异类盆地的叠合与盆地性质的转变	(209)
第九章	古构造的研究方法	(211)
§ 9.1	古构造的基本概念	(211)
§ 9.2	古构造的研究方法	(211)
§ 9.3	构造体系发展史实例分析	(218)
§ 9.4	背斜圈闭发育史的研究	(224)
§ 9.5	生长断层发育史研究	(227)

第一章 绪 论

§ 1.1 油气田构造地质力学分析的涵义

油气田构造地质力学分析是用力学的理论和方法研究油气田地质构造和构造运动对石油和天然气的形成、运移和储集的影响和控制。它是石油地质学和力学之间的一门边缘学科。

石油和天然气的形成控制因素多种多样,非常复杂,归结起来,不外乎两方面:其一是物质来源(要有有机物质),这是内因;其二是构造条件,这是外因。但从力学观点看,构造条件最为重要。这是因为,虽有物质来源,但若没有构造作用所形成的沉积盆地,则无法堆积众多的有机物质。石油和天然气本身是流动的,形成之后呈分散形式。若没有构造运动,岩层不可能发生变形并给石油和天然气提供聚集的空间和运移的良好通道,而且处于分散状态的石油和天然气也不会在应力驱动下发生运移并在低压区聚集而形成工业油气藏。

§ 1.2 油气田构造地质力学分析的意义

一个地区是否有石油和天然气,关键不在于是海相还是陆相沉积,而在于是否具备生油和储油的条件。长期以来,一些中外地质学者,根据石油多数产于海相沉积地层之中,就认为“唯海相地层生油”,并把这一经验套用于中国,认为中国大部分地区是陆相沉积地层,“几乎无石油蕴藏的可能”,甚至当我国大庆、大港、胜利等油田相继开发之后的1975年,还坚持说:“按一般地质概念,陆相岩层不大可能开掘出含油的矿层来”。

众所周知,石油是一种由简单到复杂的各类碳氢化合物的混合物,它是由组成生物的有机体,特别是低等生物的有机物质的分解转变而成的。在漫长的地质年代中,在浅海、湖泊中的大量生物遗体 and 河流运来的大量陆地生物与泥砂一起不断地堆积下来,经过天长日久,越积越多。这些和泥砂堆积在一起的有机物质在还原环境下,由于厌氧细菌、地热、地压和其他物质的催化作用,逐渐分解成碳氢化合物,并形成石油和天然气。这是目前大家公认的石油生成观点。当然还有无机成因观点。

根据石油有机成因观点,就必须寻找有利于生油条件的地区。从地质构造和古地理条件来看,主要是:

(1)需要有一个比较广阔的低洼地区,并且长期为浅海或面积较大的湖水所淹没,同时是长期处于稳定下沉的环境,才可能有大量有机质的带入、沉积,有机质和沉积物一起埋藏起来;当沉积物下沉到相当深度,才能保证温度、压力升高到使有机物热解转化成石油。我国东部含油盆地的沉积地层厚度达六七千米以上,其中含有典型的厚层生油岩系。沉积厚度的大小,往往被认为是评价含油远景的因素;含油盆地的主体部分的沉积厚度要不小于1500m。

(2)在这些低洼地区的周围需要有大量的生物繁殖,同时在水中还要有极大量的微生物繁殖,因为大量的有机质是生油的物质基础。浅海、湖盆以及三角洲地带是生油的有利环境。从

古生物环境看,滨海区海浪作用强,不利于有机物质堆积、保存;深海区距岸远,水体深,有机物质相对较少;只有在浅海,特别是深湖、海湾和三角洲地带的水盆地是有利的生油区。因此,有利的生油岩系是受一定的岩体的岩性、岩相控制的。

(3)需要有适当的气候,为上述大量生物的生长创造条件。

(4)需要由陆地上经常输入大量的泥砂到浅海或大湖中去,迅速把输送来的有机物质和水中的繁殖速度高而死亡极快的微体生物埋藏起来,不让它们腐烂而成为气体向空气中扩散消失。考虑到石油运移和聚集的方便,理想情况下是在长期下沉过程中伴随有一定缓慢运动,造成有利于生油和储油沉积间的互成层,以形成有利的生油层、储油层和盖层的组合。

在这样的条件下生成的石油,最初呈点滴状分散而混杂在泥砂之中,也是没有工业价值的。要使点滴油珠聚集起来,成为有工业价值的油藏,就要经过一个天然的程序。这个天然程序就是要使含点滴石油的地层发生倾斜、褶皱和封闭性断裂,并在地应力驱动下,使呈点滴状分散的石油移聚并储藏到一定的储油构造圈闭中去。这样才能形成具有工业价值的油气藏。

这就不难看出,无论是海相还是陆相沉积地层,只要有生油和储油的条件,都有找到石油的可能,所以那种“唯海相生油”而“陆相贫油”的论断是站不住脚的。同时,无论是在低洼地区和还原环境的生油条件,还是促使石油移聚和集散的条件,尽管影响因素很多,但起主导作用的还是受地壳构造组合和地壳运动规律所控制。因此,对这个问题一定要认真对待,取得共识,才能科学地指导和部署石油普查勘探工作。

在过去,相当一段时间内,对生油层和储油构造的重要性问题,不同学者的看法迥然不同。比如,前苏联部分石油地质学家就比较强调生油层,提出找油要找“目的层”的主张。

大家知道,油是液体,天然气是气体,都是会流动的,而且它的运动又很复杂,既要适应种种地质构造条件,又要适应不同的岩石条件。在多数情况下,生油地区不一定是储油地区。例如,贵州龙里县有三叠系油苗,原以为三叠系有油源,因而在三叠系中到处打钻,但打了许多钻却打不出油来;又如,在福建,凝灰岩中有油;华北有些地方甚至在玄武岩中也有油。这就是说,生油层可能是储油层,但不一定大量储油,因为其中有一部分油可能跑掉了;也有些储油构造中的含油层又不一定是生油层,而是从生油层向构造的有利部位运移聚集的。

李四光教授在《关于当前石油地质工作的几点意见》中指出:“过份强调找‘目的层’,这可能对圈定油田的工作带来损失;如果一开始就假定某某层为‘目的层’而不认真考虑构造条件,轻易地进行钻探,带来的损失可能更大。由于重点放在‘目的层’上,就不免要看重岩层的对比工作”。“浅海和陆相沉积,一般岩相变化较大,单靠沉积物的特点,往往不能解决岩层对比的问题,单靠古生物也不能解决这个问题”。所以,我们认为,不能把“目的层”作为找油的重点看待,而要追索石油天然气运移聚集的规律。欧美一些国家储油在0.14亿吨以上的546个大型油田(1972年资料)统计,构造(包括背斜、断层和不整合)控制占85.33%,而礁相、地层和混合类型只占14.67%。我国济阳凹陷中各油气田的富集区的地质储量98.9%分布在构造圈闭(包括褶皱、断层和不整合)地区,仅有1.1%在非构造圈闭地区。当然,也不是说有构造就有油,但可以说,石油大多数是受构造控制的。构造既然是提供石油聚集的重要条件之一,那末,用构造观点找油要更现实些。因此,找油的方向不是找“目的层”,而是要找那些聚集油气的地段。首先要着重找“构造”。没有适宜的构造,油气是聚集不起来的。找有利于储油的构造才是方向。当然,如果一味强调构造、构造体系,而完全不管岩相特征,不考虑岩层的孔隙、渗透条件,不管岩层对比,不顾及盖层好坏,等等,也是片面的,不对的。

§ 1.3 油气田构造地质力学分析的研究对象和内容

油气田构造地质力学分析是力学和石油地质学之间的一门边缘科学。其内容主要是用力学的原理、观点和方法研究油气田地质构造、构造运动规律对石油、天然气生成、运移、储集的控制。其研究对象是油气田地质构造形迹及其组合和构造变形的发展历史。

油气田构造地质力学分析的研究内容,涉及的面很广泛,概括起来,包括以下几个方面:

(1) 构造形迹的力学性质及其控油控气作用

构造形迹按其形态分为褶皱、断层和裂隙。按其力学性质可分为压性、张性、扭性、压扭性和张扭性。不同形态、不同力学性质的构造形迹对沉积作用和油气的控制是不同的。要搞清构造对石油、天然气的形成、运移和储集的影响,必须首先查明油气田构造形迹的形态、力学性质。这是油气田构造力学分析工作的基础工作。

(2) 构造形迹的规模和序次及其控油控气特征

由于地质构造变形的特殊性,力的作用是长期的、持续的,所以,存在着变形后再变形的問題,这就提出了构造的序次問題。构造形迹序次和级别不同,则控油控气机制不同,为此,在研究油气田时必须查清区内构造的序次关系。只有这样,才不至于把局部应力场产生的低序次的构造当作区域应力场的产物看待。

(3) 构造组合型式及其控油控气特征

在一场构造运动中,在地壳中的某一区域所产生的构造形迹,决不是孤立的,而是彼此之间具有内在关系和成生联系并构成一个整体。李四光教授称之为构造体系。不同的构造体系具有不同的组合型式。

不同类型构造组合成生时具有特定的应力场特征和变形特征,对油气的形成、运移和储集起不同的控制作用。

同一构造组合型式的不同生成发展阶段、各阶段的型相变化和空间展布规律与油气的生成、运移、储集都有很大关系。

要研究构造组合型式对油气的控制,当然首先得搞清各种构造组合的特征。

(4) 构造联合及其控油控气作用

在地质历史的某一时期,地壳中所受的力可能不止一个,在某一区域可能同时受到几个不同方向或不同方式的力作用,从而产生联合现象。

联合应力场对石油、天然气的运移、储集具有特殊的控制作用。

(5) 构造复合及其控油控气作用

在漫长悠久的地质历史时期,地壳某一部分常常经历了不止一次构造运动。每一次运动都引起岩石、岩体变形、破裂,留下永久变形和相对位移的痕迹,从而改变地壳的均一性。前期构造对后期构造有一定影响或起控制作用,后期构造对前期构造进行利用改造。由于同一地区经历多次构造变形,造成石油、天然气再运移和油气藏底部位置的迁移和特征的改变。查明构造复合在石油、天然气的地质研究工作中是至关重要的。

(6) 构造应力场及其对石油天然气的驱动

石油和天然气是液体和气体,具流动性,在构造影响下由高压区向低压区运移,并在高压区包围之中的低压区聚集而成油气藏。查明构造应力场特征,对研究油气运移、储集就显得特别重要。

第二章 力学知识

为了搞好油气田构造的力学分析,必须具备力学的基本知识。因篇幅关系,只作一简单介绍。

§ 2.1 应 力

岩石在未受力作用时,其内部晶粒间就有互相作用的内力存在;当受到载荷作用时,由于质点间位置的改变,必将引起质点间相互作用力的改变。岩石力学和构造应力场中研究的内力,就是这种力的改变量。由于载荷作用所引起岩石内部内力的改变量称为附加内力或简称内力。

应力就是受力物体单位面积上的附加内力。我们应注意内力和应力是有一定区别的。在外力作用下,物体内部发生变形,从而产生了抵抗外力的附加内力,此附加内力在某一截面上的密度,就是应力。而内力之存在与有无外力无关系。例如一个能自由膨胀的均匀物体受热后,内力会有变化,主要是增加了排斥力,因而分子距离将增大直到吸引力和排斥力达到一个新的平衡。由于物体可以自由膨胀,外力为零,附加内力也为零,应力也为零。

作用在物体表面上的力可分解为法向力或正应力(用希腊字母 σ 代表)和剪应力(用字母 τ 来代表)。正应力或是张性的或是压性的。地质研究工作中常把压应力当作正,把张应力当作负。把顺时针剪切的剪应力规定为负,把反时针剪切的剪应力规定为正。

应力是张量,它不仅与所考察的位置有关,而且与该点所取截面的方位有关,是点和面的函数。即使在同一点上,通过该点的截面方位不同,其应力分量也各不相同。

因为应力是张量,所以不能用矢量叠加的办法来合成应力,即不能用通常的平行四边形法则对应力进行合成。应力的合成和分解应符合应力叠加原理,只能用莫尔圆进行。

为了研究应力,通常将物体内存一点沿 x, y, z 坐标轴方向取一边长分别为 dx, dy, dz 的微小正六面体(称单元微分体)来研究。

如图 2-1 所示,每一截面上都存在正应力及剪应力。一般将剪应力分解成沿坐标轴的两个分量。例如,某一截面的外法线与 x 轴平行,则把作用于该截面上的正应力记为 σ_x ;把截面上的两个剪应力分量分别记为 τ_{xy}, τ_{xz} 。其中,第一个脚标表示剪应力所在截面,第二个脚标表示剪应力的指向。这样,单元微分体六个截面上有九个应力分量,其中,三个为正应力分量 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$,六个为剪应力分量 $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}, \tau_{yx}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$ 。九个应力分量中,有三个是相等的,即

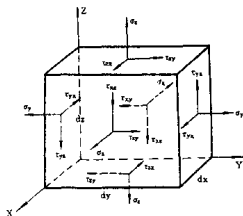


图 2-1 单元微分体各截面应力分量示意图

$$\left. \begin{aligned} \tau_{yx} &= \tau_{xy} \\ \tau_{zx} &= \tau_{xz} \\ \tau_{zy} &= \tau_{yz} \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

因此,单元微分体上的九个应力分量中,只有六个是独立的,即 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 和 $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ 。若这六个应力分量已知时,则过该点任一方位截面上的应力分量都可以求得。即

$$s = \sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

式中, s 称为应力张量,它是二阶对称张量。

对地质体进行力学分析,总的来说就是寻求在外力作用下,物体内部各处的应力分布和伴随着的变化情况。物体内部的应力分布除了受外力的作用方式控制外,还受物体本身的力学性质和限制物体运动的各个边界约束条件的影响。例如图 2-2,考虑在某介质表面下深 h 米处的一个微元体,它受覆盖介质的压力,如果这里是液体,则微元体各个面上的压应力都是 $\rho g h$,即处于静水压力状态;但如果这里是固体,则在 AB 面上的压应力是 $\rho g h$,而在 BC 面上的应力就可以不是 $\rho g h$ 。若是位于基岩临空面上的一点,在这面上的应力则为零。如果限制微元体在水平方向不许移动,则应力又不一样。这说明,决定物体应力分布的因素有外力、物体的力学性质和边界上的约束条件。

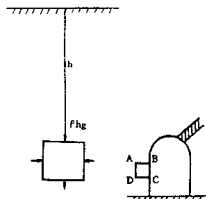


图 2-2 地下 h 米处一点的应力状态

一、静水应力

在各主应力相等的场合下,从下列式:

$$\left. \begin{aligned} s_x &= \sigma_1 l \\ s_y &= \sigma_2 m \\ s_z &= \sigma_3 n \end{aligned} \right\}$$

可以看出,作用在任何平面上的正应力也相等。在这种情况下,根据公式

$$\tau^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 l^2 m^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 m^2 n^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 n^2 l^2$$

得知,在材料中不存在剪应力。这种应力状态称为静水应力。其效应是只会引起体积的变化,这种变化可以是弹性的,或者是永久的体变。

二、偏应力

在任一具有主应力 σ_1, σ_2 和 σ_3 的应力系统中,我们把平均应力 $\bar{\sigma}$ 定义为:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{I_1}{3}$$

可将此视为应力系统中的静水应力部分,它只引起材料的体积变化。作用在横过任一平面的正应力 σ ,都可分为静水应力部分和另一个偏离于第一部分的组分 σ' 。

$$\sigma' = \sigma - \bar{\sigma} = \sigma - \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

这第二个分量称为应力偏量或偏应力。沿三个主轴,得到三个主偏应力 σ_1', σ_2' 和 σ_3' 。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1' &= \sigma_1 - \bar{\sigma} = \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{3} \\ \sigma_2' &= \sigma_2 - \bar{\sigma} = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{3} \\ \sigma_3' &= \sigma_3 - \bar{\sigma} = \frac{2\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2}{3} \end{aligned} \right\}$$

这些偏应力的效应是产生形变(与由应力系统静水应力部分引起的体变不同)。这种应变可以是弹性的和可恢复的。

因此,任一应力系统可用图 2-1 表示为两部分;同样,应变也可表示成两部分。静水应力对屈曲不产生影响。

§ 2.2 应力状态

在地壳运动时,地块内各点的应力分量各不相同;即使在同一点,各方位截面上的正应力与剪应力也不相同。过地块内某一点所有截面上应力的总体称为该点的应力状态。

沿一个受力物体内部某一点切取的单元体上,如果一个方向受力,其它两个方向受力为零,称单向应力状态;如果两个方向受力,另一个方向应力为零,称双向(平面)应力状态;若三个方向都受力,称三向应力状态。

下面研究沿坐标面的应力分量与任一截面上应力分量之间的关系。

一、单向挤压或拉伸状态下任意斜截面上的应力

设有一地块,受单向挤压(或拉伸)作用,如图 2-3,即 $\sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$,其内部有一斜截面 ef ,其外法线 N 与 x 轴夹角为 α ,则该斜截面上的应力分量 σ_α 和 τ_α 用平衡方程可求得,即:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\alpha &= \frac{\sigma_x}{2}(1 + \cos 2\alpha) \\ \tau_\alpha &= \frac{\sigma_x}{2}\sin 2\alpha \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

由上式可见,当 α 为 0° 或 180° 时, σ_α 达最大值,即等于 σ_x ;当 α 为 45° 时, τ_α 达最大值。所以,在单向挤压的情况下,在垂直挤压方向出现压性构造形迹,在与挤压方向成 45° 方向上出现共轭 X 裂隙。

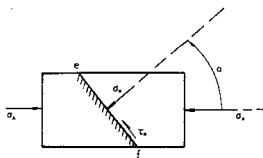


图 2-3 单向挤压状态下斜截面上的应力

二、平面一般应力状态下任一斜截面上的应力分量

若应力分量 $\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$,且 σ_x , σ_y 和 τ_{xy} 与 z 轴无关的应力状态称为平面应力状态。

设斜截面 ef 的外法线与 x 轴夹角为 α ,如图 2-4 所示。根据平衡方程可获得斜截面上正应

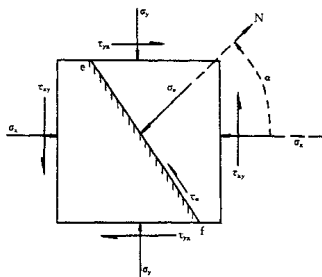


图 2-4 平面一般应力状态下斜截面上的应力

力和剪应力表达式:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha - \tau_{xy} \sin 2\alpha \\ \tau_n &= \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

三、平面一般应力状态下,最大主应力(σ_1)、最小主应力(σ_3)和最大剪应力($\tau_{\max}$)的大小和方向

在实际工作中,最关心的是岩层在什么情况下被破坏,在什么方向上被破坏。因此,最关心最大正应力和最大剪应力的大小、方向和它们的作用面。

对上述平面应力状态下斜截面上应力分量的表达式,采取微分求极值的办法,即得出 σ_1 , σ_3 和 $\tau_{\max}$ 的大小和方向的数学表达式:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \\ \sigma_3 &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \end{aligned} \right\} \quad (2-5)$$

设最大主应力与 x 轴夹角为 γ , 则:

$$\operatorname{tg} 2\gamma = \frac{-2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (2-6)$$

若求出 γ 为正号,则以 X 轴为基线反时针转 γ 角,即得 σ_1 方位;若 γ 为负号,则以 X 轴为基线顺时针转 γ 角,即得 σ_1 方位。

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2-7)$$

设最大剪应力作用面外法线与 x 轴夹角为 ϕ , 则,

$$\operatorname{tg} 2\phi = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2\tau_{xy}} \quad (2-8)$$

若 ϕ 为正号, 表示最大剪应力作用面外法线位于 x 轴反时针转动方向; 若为负号, 表示为 x 轴顺时针转动方向。

§ 2.3 应力圆

一个受力物体内部任意斜截面上的应力分量 $\sigma_\alpha, \tau_\alpha$ 和最大主应力、最小主应力及最大剪应力的方向和大小, 可用上述公式计算求得; 也可用应力圆作图求得, 下面来讨论这个问题。

若将公式

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\alpha &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha - \tau_{xy} \sin 2\alpha \\ \tau_\alpha &= \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha \end{aligned} \right\} \quad (2-9)$$

移项, 则得:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\alpha - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} &= \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha - \tau_{xy} \sin 2\alpha \\ \tau_\alpha &= \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha \end{aligned} \right\} \quad (2-10)$$

将二方程两边分别平方之后相加并进行整理, 即可得:

$$\left(\sigma_\alpha - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_\alpha^2 = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \quad (2-11)$$

此方程式与圆方程

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (2-12)$$

相似; 若用 σ_α 为横坐标, τ_α 为纵坐标, 则方程式 (2-11) 代表一个圆心坐标为

$\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}, 0 \right)$, 半径为 $\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2}$ 的圆。

此圆即为该应力状态的应力圆, 如图 2-5 所示。

在这个圆上的任何一点 $D(\sigma_\alpha, \tau_\alpha)$ 代表作用在某个截面上的应力分量。在正截面上 $\alpha=0$, 正应力为 σ_1 , 剪应力为零, 由圆上 A 点代表。在与正截面成 α 角 (即法线与 σ_1 成 α 角) 的斜截面上, 正应力与剪应力由公式 (2-9) 给出, 相当于圆上 D 点, 圆心角

ACD 为 2α 。随着 α 的增大, 截面上的应力分量沿着圆周按同一方向从 A 点转向 B 点。当 $\alpha=90^\circ$ 时, $\tau_\alpha=0$, 就是圆上 B 点。在物体内部经过一点可以作无穷多个截面, 而每个截面上的应力分量都对应于圆上的一点。我们说这个圆代表了物体内部一点的应力状态, 这个圆叫应力莫尔圆或

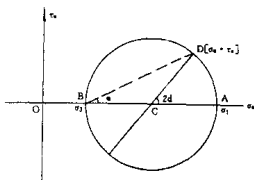


图 2-5 应力圆

简称应力圆。

应力圆在弹性力学和地质构造分析中用途极广,可用于描述一点的应力状态,求任意斜截面上的应力分量和受力物体内最大主应力、最小主应力和最大剪应力的大小和方向,从而分析地质构造变形的特征。

应力圆具有如下特征:

(1) 应力圆代表物体内一点的应力状态,经过这一点的任一斜截面上的应力分量 σ_α , τ_α 由应力圆上一个对应点代表。在物体内,截面逆时针旋转 α 角,则在应力圆上也按同一方向旋转,不过圆心角是 2α 。

(2) 两个相互垂直的截面上的应力分量对应于应力圆直径的两个端点。例如,考虑与 cd 截面垂直的截面,它的外法线方向 N' 与 σ_x 的夹角为 $\beta = 90^\circ + \alpha$ (图 2-6),根据单向挤压下任一斜

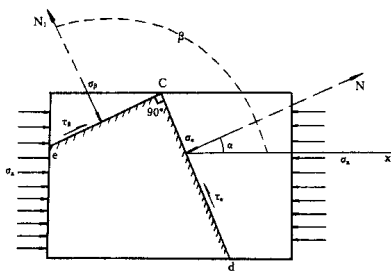


图 2-6 两个互相垂直的斜截面上的应力分量

截面上正应力、剪应力公式,即得 cd 面上正应力和剪应力:

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_x}{2} + \frac{\sigma_x}{2} \cos 2\alpha$$

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_x}{2} \sin 2\alpha$$

ce 面上正应力和剪应力为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\beta &= \frac{\sigma_x}{2} + \frac{\sigma_x}{2} \cos 2\beta = \frac{\sigma_x}{2} + \frac{\sigma_x}{2} \cos^2(90^\circ + \alpha) = \frac{\sigma_x}{2} - \frac{\sigma_x}{2} \cos 2\alpha \\ \tau_\beta &= \frac{\sigma_x}{2} \sin 2\beta = \frac{\sigma_x}{2} \sin^2(90^\circ + \alpha) = -\frac{\sigma_x}{2} \sin^2 \alpha \end{aligned} \right\} \quad (2-13)$$

由此可见,经过同一点的两个垂直面上的剪应力,总是大小相等、符号相反。因此,又被称为剪应力互等定理或剪应力成对定理。后者表示互相垂直的两个截面上的剪应力总是成对地出现。

从应力圆上看, cd 截面上的应力分量由 D 点代表,从 cd 截面逆时针旋转 90° 的截面上的

应力分量由应力圆上逆时针旋转圆心角 180° 的 D' 点代表。 D 与 D' 是直径的两端,由此也证明了剪应力互等原理。此外,若将下二式相加,

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\alpha &= \frac{\sigma_x}{2} + \frac{\sigma_x}{2} \cos 2\alpha \\ \sigma_\beta &= \frac{\sigma_x}{2} - \frac{\sigma_x}{2} \cos 2\alpha \end{aligned} \right\} \quad (2-14)$$

即得: $\sigma_\alpha + \sigma_\beta = \sigma_x$ (2-15)

表明两个互相垂直截面上的正应力之和等于常数(不随 α 而改变)。这个性质也可以从应力圆上看出。

(3)相差 180° 的两个截面上的应力,对应于应力圆上同一点,应力分量完全相同。从图 2-6 看出,这两个截面上的应力分量的作用方向相反,似乎应有所区别;然而,由于这两个截面的外法线方向相反,按应力符号规则,应力应相等。

(4)最大剪应力。从应力圆也可看出 τ_α 的最大值就是圆的半径,等于 $\sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$,它作用在法线与压应力 σ_x 成 45° 的截面上。对围压较大情况下的岩石,破裂常沿最大剪应力作用面发生。

(5)最大和最小正应力——主应力。从应力圆可以看出最大和最小正应力是在 A 点和 B 点,在对应的截面上剪应力等于零。这是一些特殊的正应力,叫主应力,它们的方向又叫主应力方向或主方向。对岩石来说,抗拉能力很差。需要知道最大拉应力的大小和方向,以分析拉破裂。

容易发生这样的疑问,即在求 cd 截面上的应力时,能否将 σ_x 直接分解为 $\sigma_\alpha = \sigma_x \cos \alpha$ 及 $\tau_\alpha = \sigma_x \sin \alpha$? 这个结果与前述结果不同。从前面分析得知,关键在 σ_x 与 σ_α , τ_α 是作用在两个不同截面上的应力,其差别是由这两个截面积不同引起的。在 ab 截面上的应力 σ_x 分解为 $\sigma_\alpha \cos \alpha$ 及 $\sigma_x \sin \alpha$ 仍然是作用在 ab 截面上的,不能是 cd 截面上的应力分量。因此,在分析一点的应力状态时,要注意分量是作用在哪个截面上的。在不同截面上的应力分量之间是服从应力圆的关系的。

§ 2.4 应 变

地壳内的应力状态随着时间的推移而不断变化,从而使地壳岩石发生永久变形。岩石变形程度的度量称为应变。构造地质学家的一项主要任务就是研究这些变形的性质和程度。一般说来,地壳的任一部分所曾经历的变形序列和大小都有可能加以测定;并且从理论上说,这些变形与其赖以产生的应力状态变化之间的关系也是可以阐明的,因而也就有可能查明在地壳表层下进行的、导致地壳失稳的运动学过程。但是,地壳岩石是一种各向异性的非均匀物质,其应力—应变关系极其复杂。所以,要根据应力作用的最终产物,即根据应力引起的所有变形的总和来确定应力的变化历史。这在实际上往往是很困难的。

变形的结果是引起线段长度的改变和相交线段之间的角度变化。测量这些变化就可计算出应变状态。

线应变是指物体受力作用后,其长度发生改变。其单位长度的变化量,用下式表达:

$$e = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{dl}{l_0} \quad (2-16)$$

式中, e ——线应变, 其正负取决于此线的伸长还是缩短;

l_1 ——物体变形后的长度;

l_0 ——物体原来的长度。

在地质问题计算中, 关于长度的量度, 最方便的是用平方长度比(λ), 它等于变形后长度 l_1 与原长度 l_0 之比的平方:

$$\lambda = \left(\frac{l_1}{l_0}\right)^2 = (1 + e)^2 \quad (2-17)$$

另一种量度称为对数应变或自然应变, 又叫真应变(ε), 适用于大应变。大应变可看成是一系列小应变增量的累积, 其计算式为:

$$\varepsilon = \sum_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} \quad (2-18)$$

如果 dl 为无限小增量, 则应变为:

$$\varepsilon = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_1}{l_0} = \ln(1 + e) \quad (2-19)$$

剪应变是指变形时, 相交线段之间的夹角的变化。设两交线的原始夹角为 90° , 则此直角变形后的偏斜量 ϕ 就为角剪切应变(图 2-7 所示)。而剪应变 γ 则为:

$$\gamma = \tan \phi \quad (2-20)$$

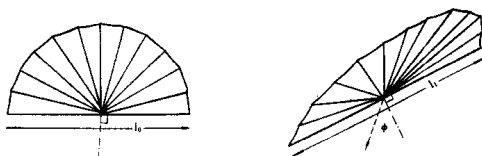


图 2-7 应变测量的参数。原始未变形的腕足类化石左右对称, 其铰合线长度为 l_0 , 变形后铰合线长度为 l_1 , 原来的中线与铰合线之间的夹角呈 90° , 偏斜的角度为 ϕ
(据兰姆赛)

如果角剪切应变很小, 则 $\tan \phi = \phi$ (弧度), $\gamma = \phi$ 。

在一般性空间问题中, 物体内某点的应变状态由九个分量表示(图 2-8)。这九个分量也是与坐标轴方向有关的量, 它们随坐标轴方向而改变的情况与应力分量相似。九个分量总称为应变张量, 用符号 $[E]$ 来表示。