

石油地质勘探技术培训教材

石油 构造地质学

张 恺
陆克政
沈修志
编著

石油工业出版社

石油地质勘探技术培训教材

石油构造地质学

张 恺 陆克政 沈修志 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书全面系统介绍了与石油勘探密切相关的构造地质学,运用小构造、盆地构造和全球构造有机联系的方法,详尽阐述石油构造的成因、分类及其与油气生成和聚集的关系。本书可供从事石油勘探的工程技术人员学习,也可供有关大专院校师生参考。

石油地质勘探技术培训教材

石油构造地质学

张 恺 陆克政 沈修志 编著

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京顺义燕华营印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 25¹/₄印张 644千字 印1—2,500

1989年3月北京第1版 1989年3月北京第1次印刷

书号: 15037·3009 定价: 6.10元

ISBN 7-5021-0159-4/TE·157



前 言

《石油地质勘探技术培训教材》自1982年内部发行后，受到广大读者欢迎。当时共印一万套，很快就被读者全部订购。石油工业部石油勘探司和教材编委会陆续收到数百封来函、来电，给予较高评价，并迫切希望得到教材。根据读者要求和工作需要，经领导批准，石油勘探司决定，适当调整和加强编委会力量；在现有基础上，吸取各方面的有益意见，改进不足之处，补充新内容，删简修订，由石油工业出版社正式出版。

补充修订的原则是：

- 一、反映在石油地质理论上不断开拓新领域的进展情况；
- 二、反映当代石油地质勘探技术的新理论、新工艺、新方法；
- 三、列举国内外石油地质勘探技术的新成果；
- 四、满足现场工作者解决理论和方法问题的实际需要。

教材正式出版的宗旨是：

- 一、补充、更新现有石油地质技术干部的专业技术知识；
- 二、作为石油地质勘探技术干部进修培训的课本，同时也可作为教学、科研人员的参考丛书；
- 三、推动石油地质勘探事业的发展。

教材内容的选取，既照顾该学科的系统性和完整性，又保证它的先进性和实用性。这些书是编委会成员数十年工作、教学、科研经验的积累，也是石油地质勘探技术理论的结晶。希望能在发展我国石油地质勘探事业中起到应有的作用。

教材编委会的成员有：

郝石生(主编) 翁文波 陆邦干 胡朝元 李德生 陈发景 吴崇筠 王曰才 王鸿勋
张 恺 钱绍新 黄第藩 裘亦楠 应凤祥 刘和甫 陆克政 谭廷栋 尚作源 张一伟
贾振远 樵汉生 彭振南 沈修志 戴金星 戚厚发 陆基孟 赵澂林 钟国森 曾文冲
欧阳健 何登春 朱恩灵 徐树宝 尚慧芸 李晋超 郭舜玲 陈丽华 缪 昕 成云芯
袁幼庸 王雪吾

教材编委会的学术顾问是阎敦实、翟光明、李国玉、查全衡同志。

北京石油勘探开发科学研究院、华东石油学院北京研究生部对教材编委会的工作给予了大力支持和帮助，谨致深切谢意。

编委会成员以业余撰写为主，加以时间仓促，水平有限，不足之处恳请读者批评指正。

石油工业部石油勘探司

1985年10月

序 言

本书是为了培训在职的石油地质和物探人员而编写的继续教育教材。按教学计划要求，其中包括了小构造、区域构造和大地构造三部分。它与一般大学教材有所不同，书中只对与石油勘探有密切关系的重点课题作了专门讨论，有些内容虽然也是构造地质学中的重要课题和基本概念，因篇幅所限提及较少或未能介绍，读者可参阅大学用一般构造地质学教材。为了有助于学员自学，各章之后都列出了主要参考文献。

书中第一、二、三、五章由沈修志编写，第四、十章由张恺编写，绪论、第六、七、八、九章由陆克政编写。地体构造部分由张恺、沈修志合写。最后由陆克政整理。全书经刘和甫教授审查，提出许多宝贵意见，在此表示感谢。

由于时间紧、水平所限，错漏之处肯定不少，欢迎读者提出批评指正。

编著者

1987. 5

目 录

绪论	(1)
第一章 构造变形分析的力学基础	(2)
第一节 应力及应力状态	(2)
一、外力、内力和应力	(2)
二、应力的特性	(3)
三、应力状态	(4)
第二节 应力状态分析	(6)
一、单轴应力状态分析	(6)
二、双轴应力状态分析	(9)
三、三轴应力状态分析	(12)
第三节 岩石变形	(14)
一、变形与应变	(14)
二、岩石变形方式	(16)
三、岩石变形的一般过程	(19)
四、岩石变形机制	(22)
第四节 应变分析	(28)
一、应变椭球体	(28)
二、递进变形	(31)
三、变形岩石的应变测量	(32)
第五节 影响岩石力学性质与岩石变形的因素	(34)
一、围压	(35)
二、温度	(36)
三、溶液	(37)
四、孔隙液压	(39)
五、应变率	(40)
六、时间	(40)
第二章 断层和褶皱的成因分析	(45)
第一节 断层成因分析	(45)
一、正断层成因分析	(45)
二、逆断层成因分析	(49)
三、推覆构造成因分析	(55)
四、平移断层成因分析	(64)
第二节 褶皱的形成机制	(67)
一、纵弯褶皱作用	(68)
二、横弯褶皱作用	(70)

三、剪切褶皱作用	(72)
四、柔流褶皱作用	(72)
五、膝折褶皱作用	(73)
第三章 地球内部构造和物理化学性质	(76)
第一节 地球内部的层圈构造	(76)
一、地球内部的分层	(76)
二、地壳的类型和特征	(78)
三、地幔的分层与物理化学性质	(82)
四、地核的分层与特性	(84)
第二节 地球内部的各种物理化学性质	(85)
一、地球内部的密度和压力	(85)
二、地球内部的温度	(86)
三、地球内部的磁性	(88)
四、地球内部的重力	(89)
五、地壳均衡作用	(91)
第四章 板块构造的基本概念及其新进展	(93)
第一节 大陆漂移与海底扩张假说	(93)
一、魏格纳的挑战	(93)
二、大陆漂移学说的复兴	(94)
三、海底扩张说	(104)
第二节 转换断层与板块旋转极	(113)
第三节 岩石圈俯冲消减、大陆碰撞与威尔逊旋回	(116)
一、岩石圈俯冲消减	(116)
二、俯冲消减带上产生的地质作用	(117)
三、弧-陆碰撞、大陆碰撞与造山带	(133)
四、大洋盆地发展的威尔逊旋回和大陆增生的板块构造旋回	(140)
第四节 板块边界类型、驱动机制与地壳的基本构造单元	(143)
一、板块边界类型和划分依据	(143)
二、大陆上古板块边界的确定问题	(143)
三、板块的分级和分类	(144)
四、引起板块运动的可能机制	(145)
五、地壳的基本构造单元	(148)
第五节 板块构造研究发展趋势及其新进展	(155)
一、关于全球性古陆联合和古陆裂解、大陆漂移方面研究的新进展	(156)
二、关于太平洋演化历史和环太平洋陆缘大陆增生研究方面的新进展	(169)
三、关于板块构造在大陆构造地质研究方面的新进展	(197)
四、关于地球的演化与板块构造方面研究的新进展	(203)
五、关于地球内部的性质及其作用过程十年研究的新进展	(208)
结束语	(211)
第五章 深断裂和断块构造	(212)

第一节	深断裂的识别	(212)
一、	深断裂的概念	(212)
二、	深断裂的鉴别标志	(212)
三、	深断裂的类型	(213)
四、	中国的深断裂概况	(214)
第二节	断块构造	(222)
一、	断块构造的概念和对断裂的分类	(222)
二、	基底断裂对盖层构造的控制作用	(224)
三、	中国断块构造划分及断块发育演化概况	(226)
第六章	地槽	(228)
第一节	地槽的早期概念	(228)
第二节	地槽概念的发展和地槽分类的提出	(229)
一、	舒可特的地槽概念和分类	(229)
二、	斯蒂勒等的地槽分类	(230)
三、	凯伊的地槽分类	(231)
四、	裴伟和西尼村的地槽分类	(233)
五、	奥布安的地槽分类	(233)
第三节	地槽内部构造和演化模式	(234)
一、	一些苏联学者的地槽演化模式	(234)
二、	奥布安的地槽演化模式	(235)
三、	松本的地槽演化模式	(239)
第四节	板块构造和地槽	(239)
一、	板块构造对现代地槽的分类	(240)
二、	用板块构造理论重新对凯伊地槽分类的解释	(242)
三、	根据在板块构造中的位置对大陆边缘地槽的分类	(245)
四、	板块构造和多旋回发展理论	(246)
第五节	中国的地槽区	(246)
第六节	地槽和地台的转化	(249)
第七章	盆地的类型	(250)
第一节	盆地的分类原则及主要分类方案	(250)
一、	盆地的分类原则	(250)
二、	早期的国外盆地分类方案	(251)
三、	70年代以来主要的国外盆地分类方案	(253)
四、	国内的一些盆地分类方案	(257)
第二节	裂谷型盆地	(259)
一、	大陆内部裂谷	(260)
二、	大陆内部断陷-拗陷盆地	(264)
三、	陆间裂谷	(271)
四、	被动大陆边缘	(272)
五、	被动大陆边缘的衰退裂谷	(277)

六、拗拉谷	(280)
七、边缘海盆地	(284)
八、大洋裂谷	(288)
九、扭张性盆地	(288)
第三节 挤压型盆地	(289)
一、海沟	(289)
二、弧前盆地	(290)
三、前陆盆地	(292)
四、残留洋盆地	(294)
五、陆壳碰撞挤压构造带间挤压型盆地	(295)
六、克拉通内挤压型盆地	(297)
第四节 与扭性有关的盆地	(297)
一、扭动断层与雁列构造	(297)
二、扭动断层与地块升降	(303)
三、走向滑移旋回与性质转化	(305)
四、世界平移断层网络	(305)
五、走向滑移断层与滑移线场理论	(306)
第五节 与升降作用有关的盆地	(308)
第六节 多期异类盆地的叠合与转变	(308)
第八章 盆地的下沉和充填	(311)
第一节 盆地的下沉机制	(311)
一、重力作用	(311)
二、热力作用	(312)
三、应力作用	(313)
四、地球内部各圈层的相互作用	(313)
第二节 盆地的聚集速率	(314)
一、聚集速率的概念和单位	(314)
二、聚集速率的比较	(316)
三、使用聚集速率中的一些问题	(319)
第三节 盆地的充填	(321)
一、控制盆地充填的因素	(321)
二、建造或构造——岩石组合的概念	(325)
三、建造或构造——岩石组合的类型	(325)
四、岩石组合序列	(326)
第九章 盆地的层序和构造	(328)
第一节 盆地的层序、旋回和幕	(328)
一、层序及其接触关系	(328)
二、旋回和幕	(330)
三、海平面相对变化的旋回及其原因	(334)
第二节 盆地内部的构造	(335)

一、盆地的基底和盖层	(335)
二、盆地内部构造单位	(337)
三、背斜型构造带	(338)
四、断层构造带	(348)
五、单斜型构造带	(351)
六、潜山构造带	(352)
第十章 板块构造与油气生成和聚集	(354)
第一节 板块构造理论与油气的热演化及油气在地壳中垂直分带分布规律	(354)
一、板块构造与油气的热演化	(354)
二、油气在地壳中垂直分带分布规律	(358)
第二节 板块构造与油气生成、聚集的新假说	(366)
一、深海沟油气生成和运移的逆掩断层假说	(366)
二、W.R.迪肯森关于碰撞造山带前周缘盆地下伏古老陆缘沉积柱体被 带入俯冲带，促使油气生成与运移假设	(369)
三、关于深部油气勘探与非常规生油理论	(369)
四、关于浅层勘探与早期生油理论研究	(370)
五、关于推覆体构造带油气生成与聚集理论	(371)
六、关于非生物成因天然气成因假说	(373)
第三节 板块构造与油气分布规律	(375)
一、板块构造与世界含油气区类型	(375)
二、板块构造与油气在含油气盆地中的分布规律	(378)
三、世界油气的分布与全球大地构造和气候的关系	(382)
四、全球地史和油气储量的分布	(383)
五、地球演化的板块构造阶段与全球油气分布规律	(389)
六、根据板块构造理论制定新的油气勘探准则	(390)
结束语	(391)
参考文献	(392)

绪 论

构造地质学是地质学的一个重要分支，主要是研究变形作用所形成的各种地质构造。研究范围包括构造形态、力学性质、变形条件、分布组合和发展演化，进而探讨岩石圈组成、结构、块体的几何学、运动学和动力学。

地质构造研究包括小型构造、区域构造和大地构造。研究对象小到需要借助于显微镜和扫描电子显微镜研究变形岩石的显微构造，如微裂隙和显微裂隙等，大至研究全球规模和星际的块体及构造带。

石油地质勘探需要将局部构造、油区或盆地构造、全球构造的研究密切结合起来。石油构造地质学研究内容相当广泛，既包括改造方面，也包括建造方面。石油地质构造研究是石油地质研究的一个重要支柱，是评价油气远景不可缺少的依据。构造发育是油气藏形成的一个控制因素。

构造地质学的研究方法是综合的历史分析、地球物理、地球化学和计算等方法相结合。综合的历史分析法根据建造和改造的各方面特征进行时空对比分析，以认识构造发育的时空规律性。岩石不同物理性质的实验、力学实验模拟比较以及应力场分析是最常用的一种物理分析法，常能辅助说明形成地质构造的形成机理，弥补不能重现地质过程的不足。石油和天然气的陆上和海上勘探使用着各种手段，包括各种地球物理方法（如地震勘探，重、磁、电法勘探，放射性勘探），化探，浅钻、深钻和超深钻井，野外露头观测，航空测量、航天遥感影像解释等，这些不同层次获取资料的综合分析使之有可能探明深部的隐伏构造，对比不同构造层构造变化关系和认识构造与沉积作用、岩浆活动和其他各种地质现象间的相互联系。利用计算机研究地质、物探、测井三种资料，获得三度空间构造的技术以及进行构造和盆地模拟的技术正在日益发展。盆地形成机理和构造演化等理论涉及到大陆和海洋，涉及到地质、地球物理和地球化学各方面的成果。目前单依靠哪一方面的专家都不能作出全面理想的构造解释，因此，需要加强各方面的合作，同时应培养出能掌握更先进技术的、具更广泛知识的新型人才。

构造地质学与许多学科有密切关系，其中包括岩石学、矿物学、地层学、地史学、古生物学、古气候学、古地理学、地貌学、测量学、地震学、水文地质学、工程地质学、矿床学、遥感地质学、古地磁学、地热学、地球化学、构造物理学、材料学、固体物理学、流体物理学、天文学和数学地质等。

本书共十章。第一章首先讨论了构造变形分析的力学基础，应力和应变分析。第二章分析了各种断层和褶皱的成因。第三章介绍了地球内部各层圈的构造和地球内部各种物理化学性质。第四章讲述了板块构造的基本概念及板块构造研究的某些新进展。第五章叙述了深断裂和断块构造。第六章综述了地槽概念、分类、演化及其与板块构造的关系。第七章阐述了盆地分类及各类盆地的特征和成因。第八章概述了盆地的下沉机制、下沉速率和盆地充填。第九章讲述了盆地的层序和构造。最后一章讨论了构造与油气生成和聚集关系的理论。

第一章 构造变形分析的力学基础

地壳中的各种地质构造都是岩石受力发生变形的产物，它们的发生和发展必然受力学规律支配。因此从力学观点研究岩石变形及其产物——地质构造，是阐明各种构造的分布、发生和演化规律的一个必要途径，也是本课程的主要研究内容。为此本章将介绍一些有关固体变形的基本概念和理论。应当指出，现代固体变形理论主要是在研究和总结金属、混凝土及石料等在寻常环境条件下的力学实验资料的基础上发展的，而岩石的变形及其研究却不同于前者。首先，地壳上各种地质构造都是岩石在地壳运动产生的地应力作用下的一种变形结果，它们当时受力的情况，我们现在无法见到，因此只能采用反序的研究方法，即从现今所见到的各种变形现象出发，依据现代固体变形的有关理论和试验，推究产生这种或那种变形时力的状况和各种构造形成机理（即发生和发展的各种物理和力学过程），然后由个别到组合、由局部到整体探究其运动学和动力学机制，进而深入探讨地壳运动的发生和发展规律。其次，影响岩石变形的因素很多，情况比较复杂，特别岩石变形通常是在高温、高压等环境下发生的，其受力作用的时间之长也是一般材料力学实验条件无法比拟的。这些环境因素对于岩石的力学性质有很大的影响，从而也必然影响到岩石的变形过程。正因为如此，对于在高温、高压以及力的长时间作用下岩石力学性质变化的实验室研究以及模拟实验等内容也就成为本课程深入发展中需要解决的重要课题之一。尽管岩石变形和一般固体变形条件如此不同，但它们之间某些变形的基本力学规律还是相同的，因此现代固体变形理论仍然是分析和解决地质构造形成和发展有关问题的主要手段和途径。

第一节 应力及应力状态

一、外力、内力和应力

力是物体间的相互作用，这种作用主要表现为改变物体的运动状态，包括改变物体的位置、速度、形状和大小等等。力对于物体的效应决定于力的大小、方向和作用点三个因素，通称为力的三要素。工程力学上量度力的大小是以4°C的1kg净水在北纬48°52'海平面上的重量作为力的单位，称1kg。力的方向包含方位和指向两重含义，而作用点是指力在物体上的作用位置。一般说，力的作用位置通常不是一个点而是具一定的面积。但当作用面积达无限小时，可看成是一个点，该点上的力称集中力。过力的作用点作一直线，使直线的方位代表力的方位，则该直线称为力的作用线。在说明一个力时，既要说明它的大小，还要说明它的方向，这种把力的大小和方向同时加以考虑的量称为矢量，故力可以合成和分解。

力总是成对出现的，单独的一个力实际上是不存在的。对于一个物体来说，另一个物体施加于该物体的力称为外力。相互作用的两个物体，当另一个物体作用于一个物体上时，一个物体的反作用力则作用于另一物体上。对另一个物体来说，这个力也是外力。作用力与反作用力都是外力，总是同时发生，大小相等，方向相反，并沿同一直线作用在两个互相作用的物体上。

根据力的分布情况，外力可分为面力和体力两种：面力是通过接触面传递的，它只作用在物体表面上；体力是物体内部每一个质点上都受到外力作用，它的大小与质量成正比，不是通过接触传递而是相隔一定距离相互作用的，如重力、惯性力等。

内力是指同一物体内部各部分之间的相互作用力。由于物体是由无数质点所组成，它们在没有受外力作用时，其内部各质点间就已存在着相互作用的力，它使各质点处于相对平衡状态，并使物体保持一定的形状，这种力称物体固有的内力或称自然状态的粒子力。

粒子力有二种：一种是物体内部各质点间的吸引力和排斥力；另一种是内部各颗粒间的粘着力。

当物体受到外力作用时，其内部各质点间平衡状态就发生变化，它们相互作用的力也随之发生改变，直到达到一个新的平衡为止。这种内力的改变量称附加内力或派生粒子力，即应力。简言之，应力是指物体受外力作用时，其受力物体内部各质点间产生相互作用的附加内力，用以平衡外力。显然应力不是外力、不是作用力和反作用力；应力是派生和附加的内力、亦非固有的内力。

地球内部单位面积上的附加应力称为地应力。

二 应力的特性

应力是可以测量和表示的，除计算外亦可用图解截面法求得。如图1-1所示，当某一物体两端遭受外力P拉伸并处于平衡状态时，其内部便产生与外力作用相抗衡的内力p。若将该

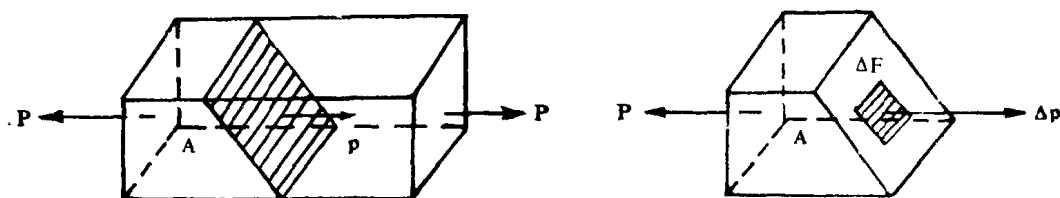


图1-1 外力与内力

物体沿任意截面F切开，将物体分为A、B两部分。取其一部分（如A块），其截面上的内力p应与外力P大小相等、方向相反。在内力均匀分布情况下，作用于F截面上的应力值为：

$$\sigma_F = \frac{P}{F} \quad (1-1)$$

σ_F 代表应力，指作用于物体A截面F上单位面积的附加内力，它表示附加内力的大小，其量纲为 kg/cm^2 。

若在物体内任意选取一个与外力作用方向不相垂直的微分面积 ΔF ，此微分面积上内力的合力为 Δp 。根据平行四边形法则，可将内力 Δp 分解为垂直于该截面 ΔF 上的内力称正应力（或直应力） σ （正应力可再分为张应力和压应力）和平行于该截面 ΔF 上的内力称剪应力（或切应力），以 τ 表示。（图1-2）。那么，作用于截面 ΔF 上的合应力为：

$$\sigma_{\text{合}} = \frac{\Delta p}{\Delta F} \quad (1-2)$$

在内力非均匀分布时，可取其极限值即：

$$\sigma_{点} = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta p}{\Delta F} = \frac{dp}{dF} \quad (1-3)$$

$\sigma_{点}$ 称截面上点应力，即为该点的全应力。而上述合应力的法向分量即正应力为：

$$\sigma = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta F} = \frac{dN}{dF} \quad (1-4)$$

其切向分量即剪应力为：

$$\tau = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta F} = \frac{dT}{dF} \quad (1-5)$$

物体内部应力大小随着作用外力的增加而增加，但它有一定的限度，当超过限度时，物体就遭破坏。应力的性质亦随外力性质的变化而变化：当外力是拉伸力时，其应力也是拉伸力；外力是压力时，应力也是压力；外力是剪力时应力也是剪力。但外力与应力又是相对的。在地质构造研究上，习惯上将压应力定为正值，张应力定为负值。剪应力会使物体发生旋转，于是又将逆时针转动角度变化定为正值，顺时针转动角度变化定为负值。它们恰与工程力学上所使用符号完全相反。

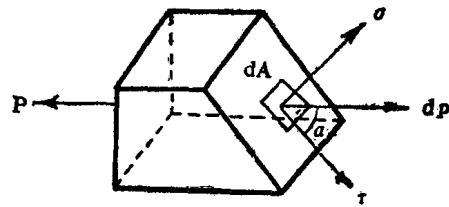


图1-2 截面微分面积上的内力

三、应力状态

物体受力后，内部各个截面上将产生有规律分布的应力，物体所处的这种力学状态称应力状态。为了分析物体受外力后各点各方向的应力情况，常从点应力状态入手。所谓点应力状态，就是物体受力后，通过该点的各个截面上的应力情况。通常在该点附近截取包含该点的最小单元体——微分正六面体（又称元素体）来考察，因为各面趋近于零的极小值，故可认为在各面上的应力是均匀分布的。这样，各面上的应力情况就代表了点应力情况，而且相互平行平面上的应力情况是相同的。

在一般情况下，微分正六面体的六个面上都有正应力和剪应力作用，如图1-3示；取直角坐标系的x、y、z轴与微分正六面体诸面上的法线平行，六面体上的正应力 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别平行于

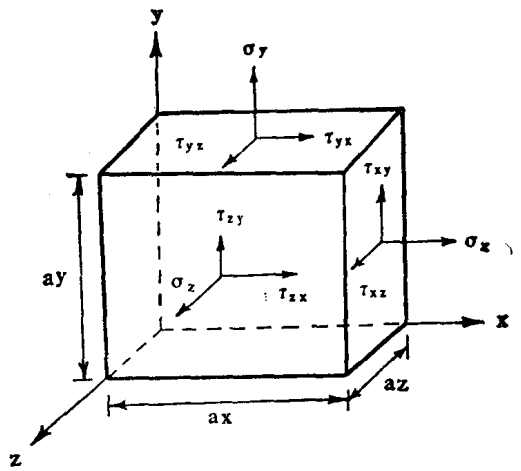


图1-3 单元体上的应力分量

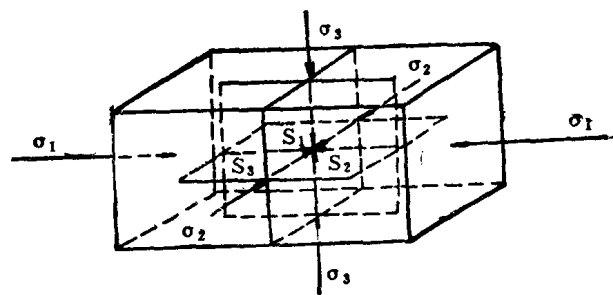


图1-4 单元体的三对主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 方位

X、Y、Z轴；剪应力在各面上可以分成两个相互垂直的剪应力分量，如包含Y轴垂直于X轴的面上有 τ_{xy} 和 τ_{xz} 两个剪应力。由图可知，通过一点的微分正六面体的面上作用着 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 τ_{xy} 、 τ_{xz} 、 τ_{yz} 、 τ_{yx} 、 τ_{zx} 、 τ_{zy} 等对称的九对应力及其分量。

当物体受力处于平衡状态时，通过该物体内部任意点总是可以截取这样一个微小单元体，使其六个面上都只有正应力的作用，而无剪应力的作用，有了这三对正应力，便可以完全充分地表示出该点的应力状态（图1-4）。

在单元体这六个面上作用的正应力称主应力，主应力的方向线称主应力轴，其作用面则称主应力面。主应力的性质在三个方向上可以全是拉伸的主张应力，也可以全是挤压的主压应力，更可以部分方向为主张应力、部分方向为主压应力的组合。当六个面上的三对主应力值都相等时，物体将只会发生简单的体积变形而无形状的变化。如果三对主应力大小不等时，物体就会发生复杂的形状变化。最通常情况三对主应力可分别为最大主应力 σ_1 、中间主应力 σ_2 和最小主应力 σ_3 ，最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 其值之差称应力差，应力差越大，其所引起物体形状改变就越明显。地质构造分析常将最大压应力表示最大主应力 σ_1 ；最大张应力表示最小主应力 σ_3 ，而中间主应力 σ_2 可以是压应力也可以是张应力，其数值在最大主应力和最小主应力之间。

当主应力 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ，并且符号相同时，就可以根据一点的主应力矢量 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为半径作出一个椭球体，这个三轴不等的椭球体称为应力椭球体（图1-5a）。应力椭球体形状的变化取决于三对主应力的相对大小。所以应力椭球体能代表一点的三维应力状态。沿三个主应力平面所切过椭球的三个椭圆称为应力椭圆（1-5b），它表示平行于每一个主平面而切过椭球的二维截面，每一个这种平面中的应力矢量就构成一个应力椭圆。

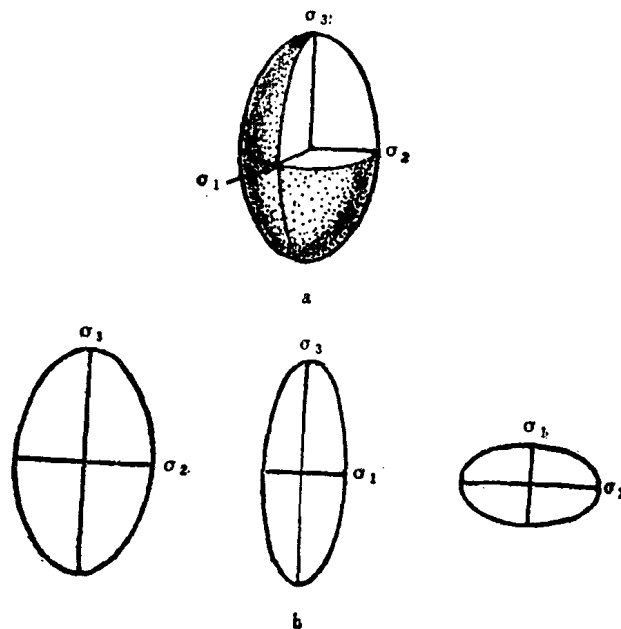


图1-5 一般三轴应力椭球的透视图（a）垂直于椭球体每一主平面的正视图（b）
（据W. D. 米恩斯）

物体中一点的空间应力状态可根据其应力椭球体的形态进行分类，称应力状态的类型。有三种基本类型，即单轴应力状态、双轴应力状态和三轴应力状态。

1. 单轴应力状态又称单向应力状态，就是三轴应力椭球体中，有二个主应力值均等于零，而只有一个主应力值不等于零时的应力状态，即 $\sigma_1 \neq 0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ，此时物体将发生单向的拉伸或压缩的线性变形。

2. 双轴应力状态又称平面应力状态，就是三轴应力椭球体中，有一个主应力值为零，而另二个主应力值均不等于零时的应力状态，即 $\sigma_2 = 0, \sigma_1 > \sigma_3 \neq 0$ ，此时物体将发生双向的平面变形，如在构造力作用下，地壳表面所处的就是这种应力状态。

3. 三轴应力状态又称空间应力状态，就是三轴应力椭球体中，三个主应力值都不等于零且大小亦均不相等的应力状态，即 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \neq 0$ ，此时物体将发生三向不等的复杂变形，如地壳内部岩块所处的变形，其形成三轴不等的应力椭球体，则反映了自然界最普遍的一种三向应力状态。

实际工作中，三轴应力状态在一定条件下，可以简化为二轴应力状态来解析，而单轴应力状态最简单，可视为二轴应力状态的特例。更有一种特殊情况是呈现纯剪应力状态，这种特例是物体的三个主应力中，有一个主应力值为零而另二个主应力值均不等于零，但它们绝对值相等、符号相反的条件下，即 $\sigma_2 = 0, \sigma_1 = (-\sigma_3)$ ，那么将在某一平面上产生只有剪应力作用，而无垂直正应力作用变形的应力状态。

第二节 应力状态分析

不论单轴、双轴和三轴应力状态，都可以进行二维应力状态分析，也可进行三维应力分析。二维应力状态分析一般只研究某二向（平面）的应力作用，而不考虑第三向应力的作用。在讨论某一平面与其上的正应力和剪应力大小关系时，利用莫尔图解法来进行应力分析。

一、单轴应力状态分析

杆状物体遭受拉伸或压缩时其横截面的应力状态为单轴应力状态。设作用于该物体上的外力为 P_1 ，内力为 p_1 （图1-6）。此时垂直于作用力的主平面 A_0 上的主应力为

$$\sigma_1 = \frac{P_1}{A_0} \quad (1-6)$$

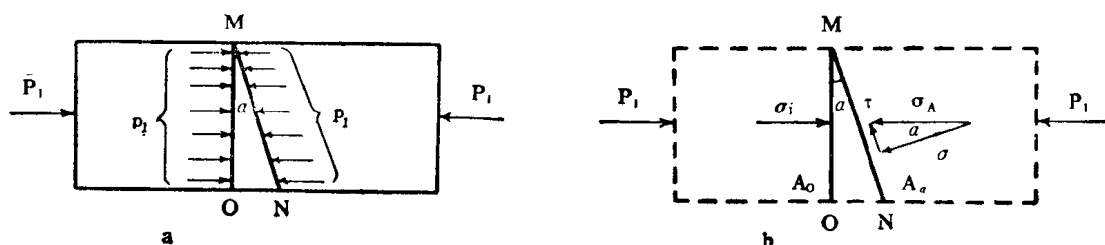


图1-6 单轴应力状态

a—内力图示；b—应力图示； σ_A —合应力； σ_1 —主应力； σ —正应力； τ —剪应力

与作用力斜交的截面 A_α 上，设正应力为 σ ，剪应力为 τ ，其合应力 σ_A 为

$$\sigma_A = \sigma_1 = \frac{P_1}{A_\alpha} \quad (1-7)$$

上二式中 A_0 为横截面MO的面积， A_α 为斜截面MN的面积， α 为 A_0 与 A_α 二截面间夹角，

它亦等于截面 A_n 法线与合应力 σ_n 间的交角，并规定从主应力轴顺时针方向量至截面法线的为负值，逆时针方向丈量的为正值。

在单轴应力状态下，包含 σ_2 的任意截面上，主应力 σ_1 与正应力 σ 和剪应力 τ 的关系，可以下列公式表示

$$\sigma = \frac{\sigma_1}{2} (1 + \cos 2\alpha) \quad (1-8)$$

$$\tau = \frac{\sigma_1}{2} \sin 2\alpha \quad (1-9)$$

(1-8)和(1-9)式是在单向压缩(或拉伸)、均匀微量弹性变形条件下，正应力 σ 和剪应力 τ 与主应力 σ_1 的关系式，它具有如下特点：

(1)从公式(1-8)和(1-9)中得知，当 $\alpha=0^\circ$ 时： $\cos 2\alpha=1$ ，则 $\sigma=\sigma_1$ ，达最大值(σ_{\max})； $\sin 2\alpha=0$ ，则 $\tau=0$ 。这表明，在与拉伸或挤压力方向垂直的截面上正应力值最大，而无剪应力存在。

(2)当 $\alpha=90^\circ$ 时： $\cos 2\alpha=0$ ，则 $\sigma=0$ ； $\sin 2\alpha=0$ ，则 $\tau=0$ 。这表明，在与拉伸或挤压力方向平行的截面上，既无正应力作用，亦无剪应力作用。

(3)当 $\alpha=45^\circ$ (或 135°)时： $\cos 2\alpha<1$ ，则 $\sigma<\sigma_1$ ； $\sin 2\alpha=1$ ，则 $\tau=\frac{\sigma_1}{2}$ 达最大值(τ_{\max})。这表明，在与拉伸或挤压力方向成 45° (或 135°)交角的截面上，除有正应力作用外，剪应力作用的值最大，这样的截面称为最大剪应力作用面，有对称二组，故又称共轭剪应力作用面。

(4)当 $\alpha=0^\circ$ 至 90° 的其它数值时(45° 除外)： $\cos 2\alpha<1$ ，则 $\sigma<\sigma_1$ ； $\sin 2\alpha<1$ ，则 $\tau<\frac{\sigma_1}{2}$ 。

这表明，截面上可同时存在有正应力 σ 和剪应力 τ 的作用，而且随着截面与作用力方向交角 α 的变化，其截面上的正应力 σ 与剪应力 τ 的值亦相应地变化。其中 σ 值的变化在 $0\sim\sigma_1$ 间， τ 值的变化在 $0\sim\frac{\sigma_1}{2}$ 间。

上述二式除应用于单向压缩情况外也适用于单向拉伸情况，只是压应力在公式中用正号表示，张应力用负号表示。

应力莫尔圆分析 为了综合表述物体任意方向截面上正应力 σ 和剪应力 τ 的大小及其与主应力 σ_1 间的关系，可将(1-8)和(1-9)二式两边平方并相加可获得下述关系式：

$$\left(\sigma - \frac{\sigma_1}{2}\right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma_1}{2}\right)^2 \quad (1-10)$$

该关系式实为一圆的方程式，表示一个以 σ 为横坐标， τ 为纵坐标的直角坐标系，以圆心在 $(\frac{\sigma_1}{2}, 0)$ ，半径为 $\frac{\sigma_1}{2}$ 的圆。该圆的圆周是无数个点的轨迹，这些点代表 α 取任何值的