

DIYINGLI LIEFENG CESHI JISHU
ZAI SHIYOU KANTAN KAIFAZHONG DE YINGYONG

地应力、裂缝测试技术 在石油勘探开发中的应用

(第二版)

张 杰 李 磊 张 伟 张景和 孙宗颀 © 著

石油工业出版社

地应力、裂缝测试技术 在石油勘探开发中的应用

(第二版)

张 杰 李 磊 张 伟 张景和 孙宗颀 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了油藏深部地层测试岩石力学参数、人工裂缝、天然裂缝形态及地层中三向应力大小和方向的技术。室内测试包括用不定向岩心,采用多种方法综合测定岩心在地层中三向应力的大小和方向(包括天然裂缝方向)。在现场,用无源声传导技术、地面法,测储层中的天然裂缝方向及人工裂缝方向、长度;用测井资料处理柱状应力分布、天然裂缝分布及砂体分布等 11 种测试方法,用上述方法在我国 13 大油区,86 个区块油田,近千口井进行实测,对我国的新近系—古近系、白垩系、侏罗系、三叠系、二叠系、石炭系等地质年代的油藏储层地应力场、人工裂缝方向、天然裂缝方向的分布规律有了一定的认识,并列举了应用实例。

本书可供从事油气勘探和开发的工程技术人员、研究人员以及大专院校相关专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

地应力、裂缝测试技术在石油勘探开发中的应用 /
张杰等著. — 2 版. — 北京:石油工业出版社,
2018. 1

ISBN 978-7-5183-2170-4

I. ①地… II. ①张… III. ①地应力-应用-油气勘
探②裂缝测井-应用-油气勘探 IV. ①P618. 130. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 247176 号

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.com

编辑部: (010) 64523712

图书营销中心: (010) 64523633

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2018 年 1 月第 2 版 2018 年 1 月第 2 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 12. 25

字数: 320 千字

定价: 65.00 元

(如发现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

地层中油气生储盖是地壳上部的组成部分。在漫长的地质年代里，它经历了无数次沉积轮回和升降运动的各个历史阶段，地壳物质内产生了一系列的内应力效应。这些内应力来源，可分两部分——古应力场和现今地应力场。古应力场是由于板块边界的挤压，地幔对流，岩浆活动和地质构造运动使地壳产生若干褶皱、隆起和断裂；现今地应力场是地壳构造运动之后，古应力场已全部释放，又产生现今的较为稳定的应力场，它如同一个自由体，它与附近构造断裂形态、方向、距离都有关。

因此地应力是客观存在的一种自然力，它必然影响石油勘探与开发的全过程。掌握生、储、盖，地应力、天然裂缝分布，包括其方向、数值大小是极为重要的。

盆地的油气生成、运移、聚集、保存及破坏再聚集的过程，与盆地所处环境和区域构造应力场历史上的发展变化有密切关系，尤其开展当今应力场分布研究，有助于揭示低渗透油田和裂缝性油气田的油气分布。

在油气田开发工程方面，更令人瞩目的现今应力场分布状态及在油田开发过程中油田应力场测量，包括人工裂缝方向、天然裂缝方向及地层中的三向应力和方向，要从几千米深的地层得到信息，并具有工业测试的水平，这难度比较大，笔者在 1980 年到 1997 年十几年时间里，根据我国石油勘探开发的具体状况，创立适应国情的十几种的测试技术，有些技术问题在世界上也是首先解决的，如地面声传导测人工裂缝、天然裂缝，用不定向岩心，采用各种方法综合性测试，得出岩心在地层中的三向应力大小和方向（包括天然裂缝方向）等深受油田用户的欢迎。勘探开发中的应用，是笔者近 20 年在油田现场实践工作总结的一部分。本书全面介绍测试方法及其原理。在实验室包括岩石力学参数测量，用不定向岩心，采用岩石波速、岩石差应变、岩石凯塞效应、古地磁等综合测试，确定岩心应力大小和方向。现场测试包括：水压裂缝地面法、井下法、井下电视、瞬时停泵；用测井资料处理地应力分布和天然裂缝，如井孔崩落掉块、柱状应力剖面、常规测井资料解释裂缝；用现代应力场数值模拟来判断油气富集区。本书应用上述方法，对胜利油区、大港油区、华北油区、中原油区、塔里木油区、吐哈油区、克拉玛依油区的部分断块油田进行人工裂缝、天然裂缝测试，用其成果，研究构造断裂走向的分布规律。

本书利用地层中的人工裂缝、天然裂缝及三向应力大小和方向测试结果，在新油田井网方案设计，老油田注采井网调整及注水方式，水平井方向及位置的确定，应用天然裂缝开发裂缝油田。深、浅地层断套主要原因及套管强度的设计；应用人工裂缝方向开发深层固体碱岩、地热等，内容十分丰富，对石油勘探与开发有指导作用。因此，本书对于从事油气勘探和开发的工程技术人员、研究人员以及大专院校的学生和研究生均有参考价值。

本书难免有不妥之处请读者批评指正。

目 录

第一章 岩石力学参数测定	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 试验	(6)
第三节 岩石弹性常数 E , ν 的确定	(10)
第四节 岩石强度	(13)
第五节 岩石断裂韧度测量	(20)
第二章 地应力、裂缝测试技术及原理	(42)
第一节 地应力及其测试技术概述	(42)
第二节 用不定向岩心对地应力及天然裂缝的测定	(54)
第三节 用测井资料处理现代应力场及天然裂缝分布	(66)
第四节 地应力与油气富集的关系	(76)
第三章 地质构造断裂与储层裂缝	(80)
第一节 油田地质断层走向与储层裂缝分布规律	(80)
第二节 水力压裂裂缝形态及其方向的分布规律	(91)
第三节 油田水平最小主应力测试结果	(97)
第四节 地应力与地质构造的关系与传统解释	(100)
第四章 地应力与裂缝在工业中的应用	(106)
第一节 井网布局	(106)
第二节 储层裂缝导流能力	(111)
第三节 剩余油分布研究与挖潜	(114)
第四节 水平井油藏、轨迹、位置的筛选	(122)
第五节 转向压裂	(132)
第六节 风城 FHW332U 双管注采井注氮气效果	(140)
第七节 防止套管变形的研究	(147)
第八节 利用地应力水力裂缝开发安棚天然碱矿研究	(150)
第九节 用有限元法计算油田地应力场的分布	(165)
第十节 对微地震单井九分向监测裂缝研究	(174)
第五章 创新与结论	(186)
第一节 创新	(186)
第二节 方法与结论	(187)
参考文献	(190)

第一章 岩石力学参数测定

第一节 概 述

如今国民经济建设中许许多多的工程（大坝、采矿、隧道、地铁、高层建筑、钻井、采油等）都涉及岩体性质及其稳定的问题。岩体，概括而言，由岩块和各种不连续面（结构面）组成。岩体性质则决定于这二者的性质。不连续面（结构面）的物理—力学性质在其他有关书中有介绍，这里仅对岩石块的物理—力学性质参数的测定作简要介绍。岩石一般是由数种矿物组成，也有少数由单一矿物组成。岩石的性质不仅与组成该岩石的矿物性质有关，还与矿物颗粒间的胶结物性质和岩石的结构及构造有关。在研究岩石性质时，岩石的各向异性（或各向同性）程度亦是大家关注的问题。

岩石材料和其他材料一样，其力学性质一般由强度及其弹性常数所组成。按受力情形不同，强度有抗压强度、抗拉强度、抗剪强度之分。强度定义为在各种受力情况下岩石材料达到破坏时的最大应力值。岩石材料在受力状况下的应力与应变之间的关系一般用弹性常数来表示，它们分弹性模量、泊松比、剪切（刚性）模量（Modulus of rigidity）、体积弹性模量（Bulk modulus）和拉姆常数（Lame's constant）。它们的定义如下。

弹性模量（或杨氏模量）：当岩石材料在受力（受压或受拉）状况下且在弹性应变范围内时，在受力方向上的应力与应变的比值称弹性模量（杨氏模量），常用 E 表示。当岩石材料处于受剪应力状况下，剪应力与剪切应变之比值称剪切模量，常用 G 表示。

岩石材料在受压或受拉状况下，除发生轴向（受力方向）的应变外，还发生侧向（即垂直于受力方向）的应变。在受压时，侧向应变（发生膨胀）为正，在受拉时侧向应变（发生收缩）为负。侧向应变与轴向应变的比值为泊松比，用 ν 表示。

岩石块在静水压力（即岩石块处于三维静水压力）状况下，静水压力与体积应变之比值称作体积弹性模量，用 K 表示。假设岩石块是均匀、各向同性且是完全的弹性体，则这些弹性常数之间有下列关系：

$$E = \frac{9KG}{3K + G} \quad (1-1)$$

$$\nu = \frac{(3K - 2G)}{2(3K + G)} \quad (1-2)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (1-3)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (1-4)$$

$$\lambda = \frac{Ev}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (1-5)$$

从上述关系式可以看出，这些弹性常数中只有两个是独立的。其他常数可从这两个常数按上述公式计算而得，常用的这两个弹性常数是 E 和 ν 。

岩石块的力学性能将在试验机上进行测试。在介绍岩石块性能测试前，先对试验机、岩石试样及测试仪器的要求作简单介绍。

一、刚性和伺服控制试验机

过去很长一段时间，为了测试材料的性能，试验常在柔性或“重锤式”试验机上进行。试验机的这种柔性性质能掩盖材料的某些性质。这一点只在近几十年才被认识。这种作用特别明显地表现在对脆性材料（如岩石和混凝土等）做加压试验时，试验在应力—应变曲线达到峰值或刚过峰值时就终止，并伴随着试样的爆破声和试样的激烈解体。这种现象很少在地下工程中发现。

1943 年 Whitney 通过测定试验机的刚性，首次明确地解释了试验机刚性对试样破坏的作用。

1962 年 Brock 通过钢梁加载（增加试验机刚度），并采用位移控制的方法，获得了混凝土的应力—应变全过程曲线。

1966 年 Cook 和 Hejem 在自制的刚性试验机上首次获得了大理岩的全应力—应变曲线。

1970 年 Wawersick 用液压千斤顶手控试验机的位移从而获得各种岩石的全应力—应变曲线，实际上这是伺服手控试验机，它使试样破碎过程进行得比想象的缓慢得多。

一个弹性件的刚度 k ，定义为弹性件发生单位位移所需的力，可表达为：

$$k = P/\delta \quad (1-6)$$

式中 δ ——试件在力 P 作用下发生的位移。

弹性件在力 P 作用下储藏的能量 Q 为：

$$Q = P^2/(2k) \quad (1-7)$$

岩石试样的断面为 A ，长为 L ，杨式模量为 E 时的刚度为：

$$k_R = \frac{AE}{L} = \frac{P}{\delta} \quad (1-8)$$

由于岩石试验经常呈非线性的，所以岩石的刚度又可表达为：

$$k_R = f'(\delta_r) \quad (1-9)$$

式中 $f'(\delta_r)$ ——力—位移曲线的导数，或为力—位移曲线上某点切线的斜率。

当试验系统作用力为 P ，则在试验机和试样中储藏的总能量为：

$$Q_s = P^2(1/k_R + 1/k_m)/2 \quad (1-10)$$

例举常用试验机的刚性为 $1.78 \times 10^7 \text{ kg/m}$ ，岩石刚度为 $7.15 \times 10^7 \text{ kg/m}$ ，则试验机中储藏的能量为岩石的 4 倍。当试样一旦发生破裂，则系统中储藏的总能量将全部释放，而试验机中储藏的大量能量的释放必然造成试块的突然破裂并伴随爆裂声，从而影响试件的破裂过程。

这也可用试件的加载—位移曲线与试验机刚度 (k_1, k_2) 的相对关系来说明, 如图 1-1 所示。柔性试验机的刚度为 k_1 , 刚性试验机的刚度为 k_2 , 试样力—位移曲线在 A 点的切线斜度为 $f'(\delta_A)$ 。当 $|f'(\delta_A)| > |k_1|$ 这意味着发生一个很小的压缩位移 δ_x 时, 试件上载荷下降比试验机的要大, 即试件抗载荷的能力要小于试验机输送的载荷, 从而造成系统的不稳定和试件突然破坏。通常用的试验机的刚度小于岩石的力—位移曲线峰值处的斜度, 故一般认为这种试验机是柔性的。在这种试验机上做岩石试验, 试验往往在峰值附近因试件突然破裂被迫终止, 也就无法获得力—位移的全过程曲线。当 $|f'(\delta_A)| < |k_2|$ 时, 这种不稳定的状态不会发生, 因在任何载荷水平下, 试验机中储藏的能量 (它由 k_2 线下面的面积所代表) 总是小于试件进一步压缩所需要的能量 (它由试件的力—位移曲线下面的面积所代表)。若要使试件进一步压缩, 则需向系统进一步输入能量, 这时可获得力—位移全过程曲线, 用刚性试验机进行试验揭示了脆性岩石在峰值载荷后仍有抗载荷的能力, 这是一个很重要的工程实际问题。

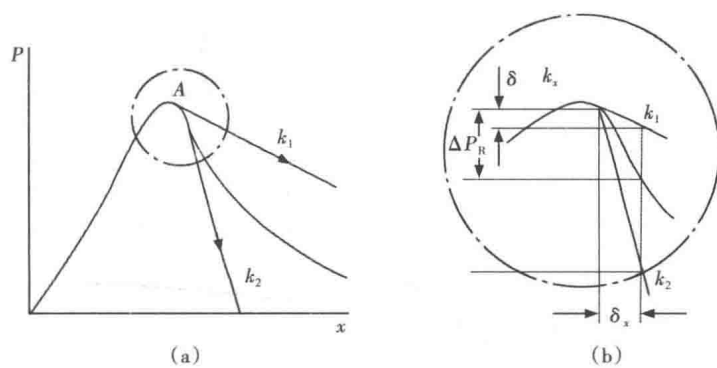


图 1-1 加载—位移曲线

液压伺服控制试验机采用了闭路反馈控制系统, 其原理如图 1-2 所示。该系统, 由函数信号发生器, 反馈和函数信号比较器及伺服阀、促动器等组成。

反馈信号是从试样在试验过程中的实验变量中选取。它可以是加载速率, 也可以是位移速率或应变速率。这些信号一般由传感器直接产生。如选用作用在试件上的功作反馈信号, 则不得不用管理放大器或计算机来产生反馈信号。

函数信号发生器是用来产生一个独立的随时间变化的函数信号。函数信号是由电机的或电子的函数发生器产生。电机的函数发生器是一个较老的装置, 如今则采用电子的函数发生器, 如数字线性发生器能随着时间线性地增加满程序电压。

反馈和函数信号比较器, 这里将反馈信号和程序信号进行比较, 根据二者信号之差和极性输出一控制信号来调控伺服阀。

伺服阀是控制高压液体送入促动器的方向和流量多少的。伺服阀的一个孔与高压油泵相连, 一个孔与促动器相连, 另一个孔则与低压区相连。

液压伺服控制试验机工作原理: 试验前根据岩石性质设立试验的函数信号。在试验中岩石试样发生的反馈信号与设定的函数信号进行比较后输出一控制信号, 调控伺服阀的开闭程度, 从而控制促动器动作的方向和快慢。

伺服控制试验机最大的特点是试验完全可按独立设置的变量进行, 这样在试验达到峰值后, 通过函数信号与反馈信号的比较, 使伺服阀控制促动器的进油量, 从而获得岩石全应

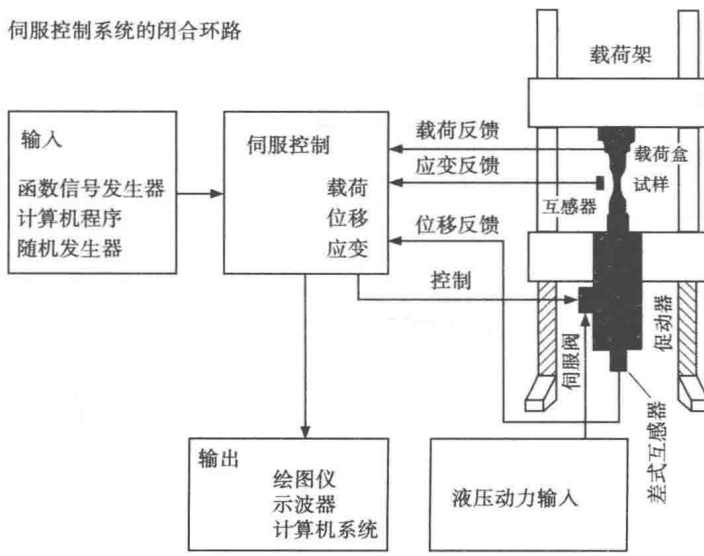


图 1-2 伺服控制系统的闭环回路

力—应变曲线。这是其他任何种类的试验系统难以达到的。正确地选择反馈信号是保证试验完成的重要一步。反馈信号必须是在试验过程中单调增加的变量。不能选择在实验过程中某些时候为增加，某些时候又变为减少的变量作为反馈信号。譬如在单轴压缩试验中常选用侧向应变作为反馈信号，在单轴拉伸试验中则选用轴向应变作为反馈信号，在三弯梁试验中选用梁底部扩张（张开位移）作为反馈信号。

二、试验的要求

在做任何岩石块试验时，为了使试验结果可靠，以下三方面的要求应得到重视：正确加工试件，相适应的载荷加载装置和相适应的变形测量仪器。

试件的形状和加工方法与试验的类型有关。单轴压缩、单轴拉伸试样一般都采用圆柱体试样。其直径 D 为 50mm 左右，试件高一般为 $2D$ ，试件两端面不平行度误差不超过 0.002mm（当试件直径为 50mm 时，两平面一端高度最大误差不大于 0.1mm）；端面应与试件轴线垂直，其偏差不得大于 0.12° ，高度误差不超过 2%。

劈裂试验也采用圆柱体试样。试件长度 L 为直径的 0.25 倍，试件两端面平行度及端面与轴线的垂直度与对单轴压缩试件的相同。

载荷加载装置应满足试验所需加载的能力，并能满足连续加载及加载速率的要求。

变形测量装置应满足试件在试验中发生的最大变形测量，且保证当量程在 $250\mu\text{m}$ 以上时，测量精度为 $\pm 2\%$ ，当量程小于 $250\mu\text{m}$ 时，测量精度在 $\pm 5\mu\text{m}$ 之间。一般变形测量装置都能满足上述测量精度，许多都超过上述精度要求上百倍，变形测量装置还要能直接装在试件相应的部位上。安装变形测量装置的部位应是应力梯度很小，且该部位的应力值是能较准确的测得。譬如在单轴压缩和单轴拉伸试验时，接近试件两端的部分都有较高的应力梯度，因此变形测量装置应安装在离加载盘尽可能远的地方，即在试件的中央部分。当试件的高/直径值为 2 或大于 2 时，在试件中央部分的应力较为均匀，在这里测得的应变值较为合理，误差一般小于 5%，从实际工程目的看则可忽略不计。劈裂试验试件长为直径的 $\frac{1}{8} \sim \frac{1}{4}$ 时，

试件中央部位应力也较均匀，是安装应变片的好地方。对任何其他类型的试件，重要的是研究试件表面不同位置的应力状况，要选择应力分布均匀的位置安装变形测量装置。

测量的可信赖度还与测量基线长（度）有关。而测量基线长（度）与岩石中颗粒平均尺寸大小有关。一般而言测量基线长（度）应是颗粒平均尺寸的十倍以上（测量基线长是指试验用的试件的基本尺寸——长×宽×高）。在试验上进行变形测量时，测试装置应在轴向对称的两个部位进行安装，从两个部位测得的数据取其平均值作为变形值相对合理可靠，这对轴向变形和侧向变形测量都一样，即都应从两个部位进行测量。

三、变形（应变）测量

岩石试件的变形量一般很小。对小的变形量人们的感官很难察觉，而要求通过放大后进行测量。

目前有许多变形测量的仪表，且都能满足测量的要求，它们大致可以分成三大类：机械仪表、光学仪表和电仪表。

在机械仪表中最重要和最通用的是千分表，它们有不同的量程和不同的精度。通常千分表的量程为 2.5~10mm，而最小读数达 0.01~0.001mm。它们通过一些装置既可用来测定轴向（平行于载荷方向）的变形，也可测定侧向（垂直于载荷方向）的变形。这种方法适用于中等强度以上的岩石试件，不适用于软岩石试件。光学仪表利用仪表中一小镜二次反射光束的差别来确定其变形量。这一套光学系统的安装调试是十分麻烦的，测量（读数）也很费时，为了避免仪表中的小镜被打碎，所以在试样发生破裂前需将该仪器拆下来，因此目前已很少被采用。

在电仪表中，测量岩石变形最常用的有两种：线型变化的差式互感器（LVDT）和电阻式应变（器）片。

线型变化的差式互感器是一个电—机械的传感器。它输出的电信号与传感器中芯棒位移量成正比。它的一个初级线圈和两个次级线圈装在传感器的外壳内，且初级线圈在中间，它的两边各有一个次级线圈（图 1-3）。在这些线圈中间有一个圆柱形可移动的磁性芯棒，它产生的磁通量将这些线圈连通。两个次生线圈实行一系列的反相连接，因此次生电流的两个电压是反相的，传感器的纯输出则是这两个电压之差。当芯棒处在中央位置时，纯输出为零，这点称为平衡点或零点。当芯棒向某一边移动，则该边次生线圈的电压将上升，而另一边次生线圈的电压则降低，二者给出的差式输出与芯棒的位移量呈线型关系。大部分线型差式传感器的输入电压在 6~24V 之间，频率范围为 50Hz~20000Hz。满量程时传感器输出的激励电压在 $\pm 3 \sim \pm 16V$ ，通常为 $\pm 10V$ ，而传感

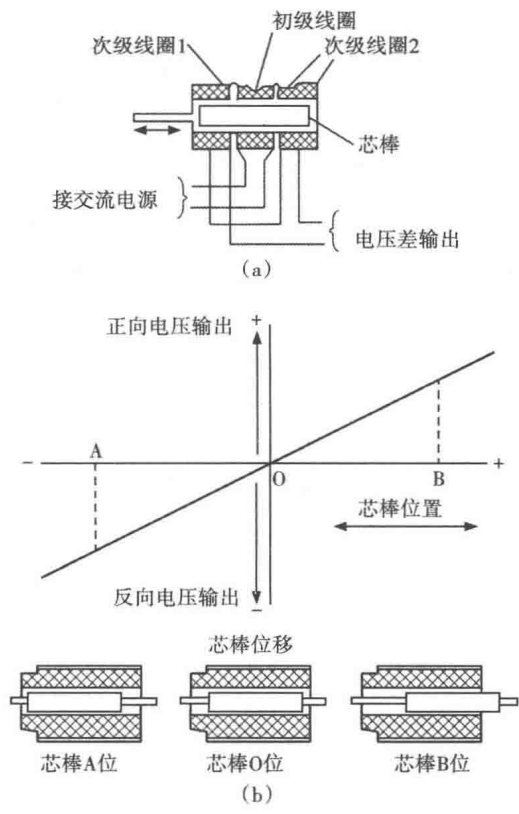


图 1-3 线型变化的差式互感器

器的量程变化较大，在 $\pm 0.5 \sim \pm 250\text{mm}$ 之间。

差式传感器是交流仪器，即它的初级线圈用交流电，而记录设备的输入则要求用直流电。因此，任何一个差式传感器都需要一个信号调节器，它将某频率的线型电压转换成相应频率的激励电压。它提供载体信号的介调和过滤以及将信号放大后输入记录仪，往往直流/交流转换器、解调器和过渡器组装在一个电子盒内。当芯棒移动时差式传感器需要的动力较小。

差式传感器因它的安装问题使其使用受到限制，该仪器也不宜用作动态试验测试。

增长电阻应变片。金属丝的长度将增加其电阻。当然对不同的材料，电阻增长的程度不同。由于技术的发展，目前电阻应变片已成为应变测量的主要手段。

电阻应变片分金属丝、金属箔和压阻式。压阻式应变片中的敏感元件是半导体材料，它的电阻随压力变化而变化，其敏感度较高，常用作动态应力测量。

电阻应变片由 0.025mm 直径或 0.0025mm 厚的箔，长十几厘米的金属丝（或箔）组成。应变片因数 F 计算公式为：

$$F = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \tag{1 - 11}$$

式中 R ——原电阻；
 ΔR ——电阻变化值；
 L ——原长度；
 ΔL ——长度变化值。

应变片因数 F ，是应变片应变敏感度的量度， F 愈高，应变片的灵敏度愈高。

理想的应变片材料应具有高阻抗、阻抗变化大、对温度不敏感且应变片因数为常数。

应变片的长度变化较大。对箔片式应变片长度从 $0.5 \sim 25\text{mm}$ ，电阻从 $60 \sim 1000\Omega$ ；对金属丝式应变片，长度在 $1 \sim 200\text{mm}$ 之间，电阻从 $60 \sim 2000\Omega$ 。选用电阻应变片时主要考虑试验时的温度、应变变化梯度值和稳定性要求等。

当电阻应变片用纸作背衬并用硝化纤维素作黏结剂时，只能用于温度到 55°C ；当应变片的背衬为环氧树脂基时，适用的温度为 $-170 \sim +100^\circ\text{C}$ ，而玻璃纤维载体可用于温度从 $-200 \sim +230^\circ\text{C}$ 。

铜—镍合金丝组成的应变片可测量 $10\% \sim 15\%$ 的应变。当应力场比较均匀时，尽可能选用较长的应变片，当应力梯度较高时则不得不选用较短的应变片，金属箔片的应变片适用于做疲劳试验。当蠕变试验需要时间较长时，则需考虑应变片的稳定性，这时需采用带温度补偿的应变片。尽可能采用较长的应变片以减少应力松弛效应。还需采用防水的环氧树脂载体以减少温度变化的影响。

第二节 试 验

一、单轴压缩试验

在进行单轴压缩试验时，岩石试件常加工成圆柱状或方柱状。过去这些试件的高等于其直径或边长（正方体）。这时，试验结果常受试件与压盘接触面的影响，主要是刚性压盘限制试件端部的侧向扩张，造成应力集中。因此当载荷小于试件的单轴抗压强度时，侧向抑制

效应往往造成试件和压盘接触处开始破裂，并引起圆锥形的试件破坏，这在单轴压缩试验中经常发生。这种侧向抑制效应是由于压盘的刚度一般大于试样而引起摩擦约束所造成。为此，在试件与压盘间垫上固体润滑物，如纸、铅片或其他可塑的材料以减少试件与压盘接触处的摩擦约束作用，但这些技术措施往往引起径向拉应力，从而引起试件纵向劈裂。

另外一种办法是在试件两端与压盘之间各放一个金属块，其断面尺寸大小与岩石试件的断面尺寸相等，并选取金属材料的侧向膨胀与岩石的一样，即要求它们的 ν/E 比值相等，图 1-4 这样由于两端金属块与岩石试件在压缩过程中同时发生侧向扩张，前面所述的试件的端部效应将消失。

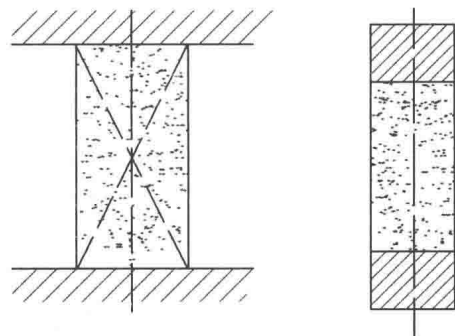


图 1-4 单轴压缩试验

二、单轴直接拉伸试验

岩石的抗拉强度测定最好采用直接拉伸试验。但由于直接拉伸试验时，岩石端部因夹具夹持，而引起高应力，且常造成端部破碎，而使直接拉伸试验成功率较低。

目前做直接拉伸试验时，用环氧树脂将试样两端粘接两个断面大小与试样一样的钢块，这钢块与柔性钢丝绳连接（从而将弯应力减至最小），从而传递拉应力给岩石试件。也有用球式万向连轴节与试样端部的钢块相连而传递拉应力的。

三、劈裂试验

单轴直接拉伸试验的困难导致常用间接法来测定岩石的抗拉强度。劈裂试验是间接法中最常用的一种（图 1-5）。这时常采用圆柱状试样，其长度一般小于其直径，这种试验既可

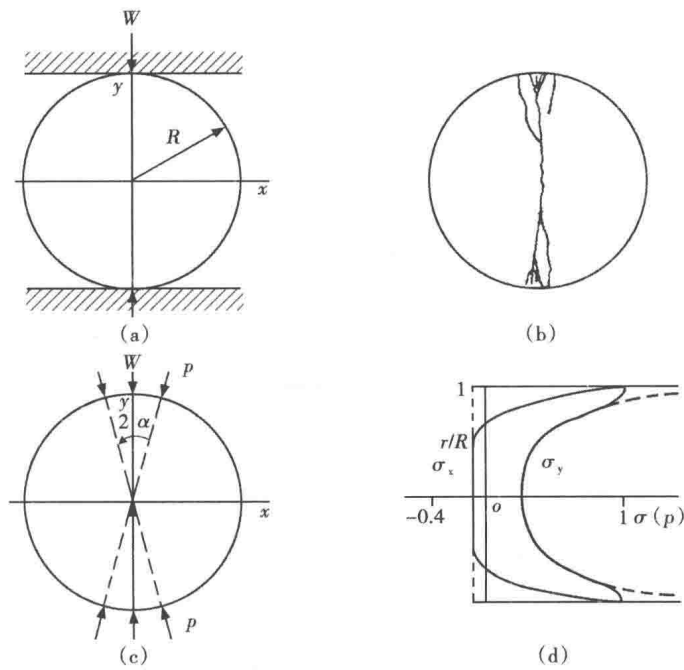


图 1-5 劈裂试验

确定岩石抗拉强度，也可测定其弹性常数，也可用来测定岩石的各向异性。

当圆柱形试件在两个刚性平面承压板之间沿直径方向加压时为线形压力，则沿这直径上的应力为：

$$\sigma_x = P/(\pi R t) \quad (1-12)$$

$$\sigma_y = P(3R^2 + y^2)/[\pi R(R^2 - y^2)] \quad (1-13)$$

而在横向直径，即垂直于加压直径方向上的应力为：

$$\sigma_x = -P[(R^2 - x^2)/(R^2 + x^2)]^2/(\pi R) \quad (1-14)$$

式中 P ——加载载荷；

R ——圆柱体的半径；

t ——圆柱试件长。

当圆柱体在两个弧形板上加压，使圆柱体在很小的 2α 弧线内受一均匀压力 P ，此时， 2α 通常为 15° ，这种加压方式可避免线形加压时应力集中而产生的副作用，即在试件与承压板接触附近产生数条裂纹，而不是一条裂纹。应当指出，沿试件垂向直径的垂向应力 σ_y ，对试件的破坏有一定影响，这垂向应力是不均匀的，在试件中心， $\sigma_y = 3\sigma_x$ 然后逐步增大，并在达到边缘时，其值最大。因此在试件中心，当主应力之比值为 3 时，试件的破坏应该是拉应力引起的。但劈力试验给出的试件抗拉强度一般略高于直接拉伸试验的结果。

四、圆筒压裂法

圆筒内半径为 R_1 ，外半径为 R_2 ，试验时圆筒内可施加液压 p_1 ，圆筒外液压为 p_2 ，需要时，轴向还可加一载荷 P 。当 p_1 ， p_2 和 P 的组合不同时，可引起圆筒的破坏形式不同。

当 $p_1 = 0$ 且 p_2 较小， R_1 也较小时，则圆筒的破坏与圆柱形岩石在三轴腔中所发生的破坏相似，即形成一个单一剪切面破坏，剪切面与轴线成一小夹角。当 p_2 相对较大， R_2 也较大时，破坏面形成一个圆锥面，且与轴线形成一个小的圆锥顶角。

当 $P = 0$ ， $p_2 = 0$ 且只有圆筒内的液压 p_1 时，圆筒中的径向应力 σ_r 和切向应力 σ_θ 的计算公式为：

$$\sigma_r = -\frac{p_1 R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 - \frac{R_2^2}{r^2} \right) \quad (1-15)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{p_1 R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 + \frac{R_2^2}{r^2} \right) \quad (1-16)$$

σ_r ， σ_θ 在圆筒壁中的变化如图 1-6 所示，圆筒内壁上的应力为：

$$\sigma_r = p_1, \quad \sigma_\theta = -p_1(R_1^2 + R_2^2)/(R_2^2 - R_1^2) \quad (1-17)$$

当 p_1 足够大时，则可造成圆筒状岩石试样径向破裂。

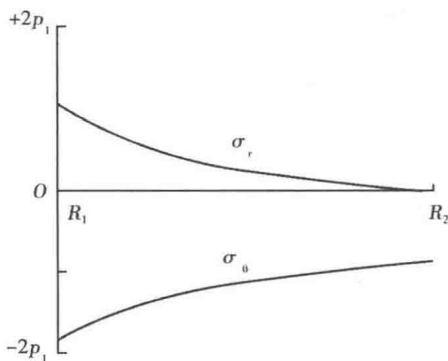


图 1-6 σ_r ， σ_θ 在圆筒壁中的变化

五、三轴压缩试验

在研究岩石的机械性质时，三轴压缩试验是一种最有用的试验方法，因为应力和温度可在一个较大范围内调节。譬如温度一般可从室温至 800℃，围压则从小于 500kPa 至 5000MPa。

常温三轴压缩试验腔如图 1-7 所示。

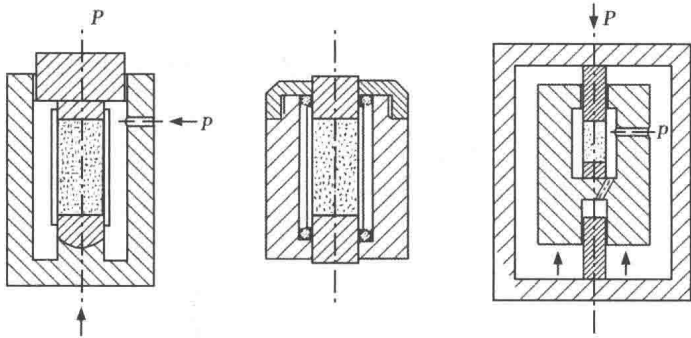


图 1-7 常温三轴压缩试验

主应力是由压力机沿圆柱试样轴向方向施加的，而试样侧面的压力则是由高压油或惰性气体通过不渗透的金属或橡皮套施加的。

试样直径与长之比为 1:2 到 1:3，直径从 25mm 到 100mm。一般小直径试样是用来作高温高压试验的，这时围压介质是氩或二氧化碳而不是液压油。做常温三轴试验时，围压介质一般采用液压油。图 1-7 中展示的三种三轴试验腔，第一种试验腔的缺点是由于试件上部的活塞面积大于试件的断面，高压油作用在活塞端部的力影响试验机对试件施加的轴向力；且在压缩过程中，由于活塞断面较大，使三轴腔容积变小，从而较难控制三轴腔中的压力。第二种试验腔由于采用了活塞断面面积与试样的相同，第一种试验腔的缺点在这里很大程度上被克服了。第三种试验腔是为了完全克服由于试验腔容积变化引起围压的变化而设计的。这里有两个活塞，它们通过轭状物相连接，两个活塞腔是沟通的，从而使试验过程中围压腔的容积和压力保持为常数。

三轴试验时，要使三轴腔和试验机的轴线对正。在加工试样时也要保证试件两端面的平行。因偏心加载和弯曲都能引起试样不均匀的变形。三轴试验时，存在端部效应和表面效应。譬如岩石试样两端钢块的刚度一般比岩石大，加压时，如果近试样端部较弱的部分开始破坏，则这部分的应力下降，而试样较强部分的应力会增加。这种效应在试样内也会有，而由于试样内部各部刚性差别不会像钢块、岩石间的差别那么大，因此该效应的程度要低些。试样侧面是由液体传递压力，当接近试样侧面较弱部分且开始破坏，这时作用在这些部分的围压并不减小。

为了测定试样的应变，常在试样对称的两侧面贴上应变片，并将应变片的导线通过专门的支撑盖引出三轴腔。

试验时，轴压 P 和围压 p 同时增加，以便 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = p$ ，当达到预期的 p 值后，保持围压 p 不变，继续增加轴压 P ，直到试样发生破坏，这时就可计算在某围压条件下岩石的强度。

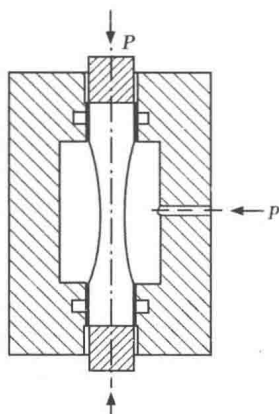


图 1-8 特殊形状的试样

三轴试验的延伸。通常的三轴试验是 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ，但也可以使三轴试验的围压大于轴压，从而使主应力关系成为 $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ 。这时 σ_3 可以是压应力 $\sigma_3 > 0$ ，也可以是拉应力 $\sigma_3 < 0$ 。如果采用特殊形状的试样（图 1-8），该试样最小断面积为 A_1 ，最大断面积为 A_2 ，围压压力为 p ，则轴向拉应力为 $-kp$ ，这里 k 的计算公式为：

$$k = (A_2 - A_1) / A_1 \quad (1-18)$$

如试验时轴向载荷为 P ，则在试样最小断面处的轴向应力为：

$$\sigma_3 = [P - (A_2 - A_1)p] / A_1 \quad (1-19)$$

因此改变 P 的大小， σ_3 则可从不同大小的压应力变成拉应力，在实际工作中， P 和 p 常常同步增加，以便 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = p$ ，这时 $P = pA_1(1+k)$ 。当达到一定的预期值后，逐步降低轴向压力 P ，直到试样发生破坏，这就可测定当 $\sigma_1 = \sigma_2$ 时，试样随 σ_3 变化而发生破坏的条件。

第三节 岩石弹性常数 E ， ν 的确定

一、单轴压缩、拉伸试验弹性模量的计算

当进行单轴压缩与拉伸试验时，试件的轴向及侧向都发生相应的变形，如图 1-9 所示。

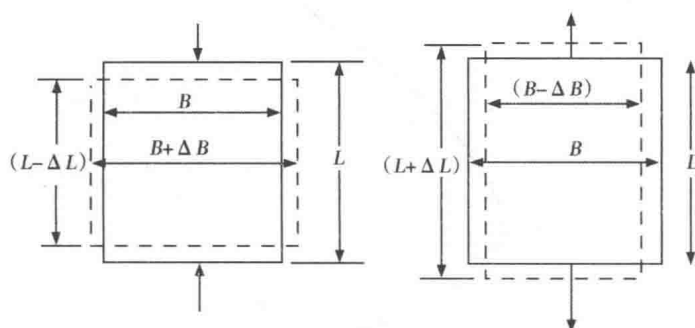


图 1-9 单轴压缩、拉伸试验

其轴向应变 ε 计算公式为：

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1-20)$$

式中 L ——试件在受力前的长度；

ΔL ——试件在受力后长度的变形量。

其侧向应变 ε' 是：

$$\varepsilon' = \frac{\Delta B}{B} \quad (1-21)$$

式中 B ——试件原侧向宽；

ΔB ——试件在受力后侧向宽的变形量。

如果试件的断面为 A ， F 为试件受的力，则试件的应力为：

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{1-22}$$

当岩石试件受力不大时，一般可作为线弹性材料对待，这时的弹性模量计算公式为：

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A}{\Delta L/L} = \frac{FL}{\Delta LA} \tag{1-23}$$

而泊松比为：

$$\nu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} = \frac{\Delta BL}{\Delta LB}$$

当试验时，测量试件的总长（ L ）和总宽（ B ）的变化时，用上述公式计算弹性常数；当测量的是试件部分长和部分宽的变化时，则在计算试件的应变时，应用测量的部分长和部分宽代入公式。

试件两端面不平行，或试件轴线不垂直，或试件轴线与试验机承载盘轴线不一致等原因，都会造成加压试验时试件发生弯曲，这将引起应变测量的误差，消除这种误差的办法是在试件两对面（ 0° 和 180° ）同时测量其应变（包括轴向应变和侧向应变），取其平均值作为试件的应变值。

在岩石压缩试验中，由于应力—应变曲线并非直线（图 1-10），在计算时，选其直线部分计算其弹性模量。当岩石试件的应力—应变曲线表现出较强的非线性时，则有切线弹性模量与割线弹性模量之分（图 1-11），常用 50% 抗压强度处的切线弹性模量作为平均值，其表达式为：

$$E_t = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \tag{1-24}$$

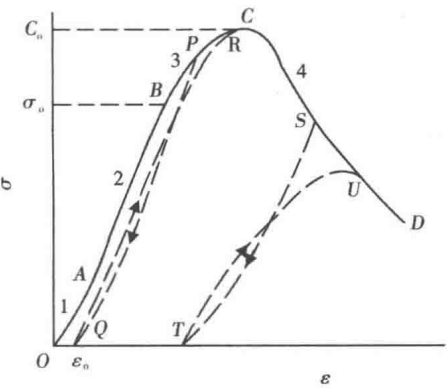


图 1-10 应力—应变曲线（一）

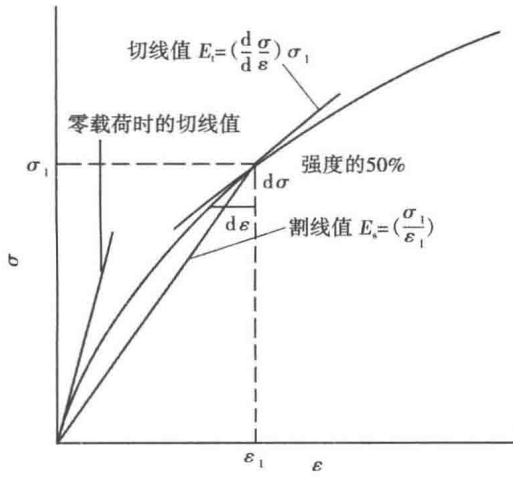


图 1-11 应力—应变曲线（二）

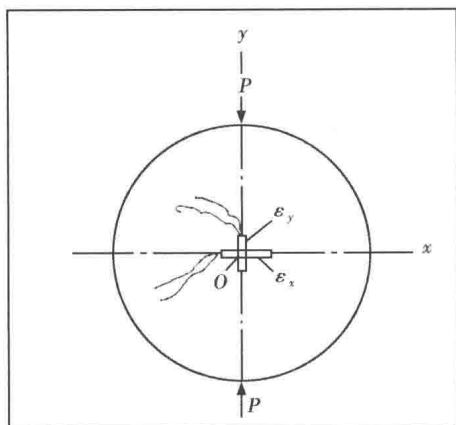


图 1-12 应变片的位置

割线弹性模量计算的表达式为:

$$E_s = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1-25)$$

它常在应力与应变都达到最大值,即试样破坏时计算其割线弹性模量,当然在任何应力水平都可计算 E_s ,这时常称作变形模量。

二、劈裂法试验弹性常数的计算

在劈裂法试验时,为了进行应变测量,常在试件中心贴上互成 90° 的两个应变片(在另一端面也贴上相同的两个应变片),其中一片平行于加载轴线,另一片则垂直于加载轴线(图 1-12)。平面应

力时,弹性常数计算公式为:

$$E = - \frac{6P(1 - \nu^2)}{\pi Dt(\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x)} \quad (1-26)$$

$$\nu = - \frac{3\varepsilon_x + \varepsilon_y}{3\varepsilon_y + \varepsilon_x} \quad (1-27)$$

式中 P ——加载载荷;

D ——圆柱状试件的直径;

t ——圆柱状试件的长;

ε_y ——在试件中心沿 y 轴方向的应变;

ε_x ——在试件中心沿 x 轴方向的应变。

平面应变条件下弹性常数计算公式为:

$$E = \frac{6P(1 - \nu)(1 - 2\nu)}{\pi Dt[\nu\varepsilon_x + (1 - \nu)\varepsilon_y]} \quad (1-28)$$

$$\nu = - \frac{\varepsilon_y + 3\varepsilon_x}{2(\varepsilon_y - \varepsilon_x)} \quad (1-29)$$

由于试件中不同部位的应力与应变是不同的,因此除要求十字应变片应贴在试件中心外,还希望应变片的长小于 $0.07D$,这时可保证其误差为 $\pm 5\%$ 。当没有十字形应变片时,将测量 ε_x 的应变片放在中心,测量 ε_y 的应变片在中心上面,在 y 轴上。

三、三轴试验弹性常数的计算

三轴试验时,通过测定轴压 P 、围压 p 和应变片输出的轴向应变,可计算试样的弹性模量 E :

$$E = \frac{P/A - 2vp}{\varepsilon_1} \quad (1-30)$$

式中 A ——试样的断面面积;