

地质力学基础知识讲座



第七讲 岩石力学性质和模拟实验

武汉地质学院地质力学系 郭文蓉

一 岩石力学性质

自然界广泛存在的构造形迹，是地应力作用的结果。然而，室内岩石力学实验和野外地质现象表明，在同样形式的应力场中不同性质的（力学的、化学的、矿物的）岩层、岩体和地块，在构造方面的反映是不一样的，同样大小、同一方式的应力和加之于不同性质的地块上所产生的构造现象和构造特点可以完全不同。例如，一个地区受水平压力时，有些软弱的地层发生褶皱，而另一些坚硬的地层则发生破裂和矿物相变。这样即可得出，力的作用方式和被作用岩体的性质，是两个主要的因素。两者结合起来才产生某种构造现象。所以，在考虑地壳形变时，需要把这两个因素同时并重的加以考虑和分析才能从本质上掌握各种构造形迹的形成、转化、发生与发展。因此，我们把岩石力学性质的研究作为地质力学工作的一个重要方面。

研究岩石力学性质，就要了解各种岩石对地应力作用的反映，并根据它们对地应力作用反映的普遍规律，进而推断形成各种构造形迹及其组合的地应力活动方式、方向及其强烈程度。地质力学认为，研究岩石力学

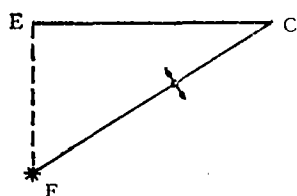
性质应该结合构造体系的展布规律来探索。

1. 自然界岩石力学性质的表象

众所周知，在漫长的地质年代里，地壳经过多次构造运动，使得构成地壳的岩石力学性质也发生了千变万化。地质学和地球物理学所积累的资料表明，岩石在自然条件下，既表现有弹性，又表现有塑性。

（1）弹性表象 固体的弹性是指物体在外力作用下变形，而除去外力后能完全恢复原状的性能。它是一种非永久变形。从构造形迹中很难直接观察到岩石的弹性表象，但绝不能认为岩石就没有弹性。下述种种地质现象，证实岩石是具有弹性的：①冲击地压的存在。国内外许多矿山坑道、地下铁路或其他隧道工程施工时，由于冲击地压的存在而引起的强烈岩爆现象是屡见不鲜的。这种现象部分可能是起因于上部岩层产生的流体静压力的作用，而最主要的是由于岩石在水平地应力作用下，产生了弹性变形，把应力积累起来，以位能的形式维持暂时平衡，因此会出现相对稳定状态。但随着地下作业的不断进行，破坏了相对平衡状态，就使长期积累的应力突然激发释放出来。这种冲击地压的存在，证明只有岩层具有高度弹性时，才会出现这种诱发现象。②地震弹性波

的传播。地震发出的强大冲击波（包括体波和面波），可通过地壳岩层向四周传播。其中横波（传播质点的震动方向垂直于射线，图Ⅶ—1），特别是高频率横波的传播并不



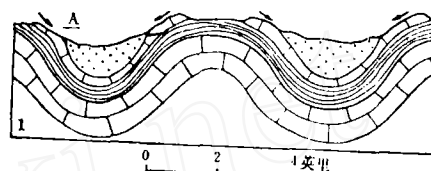
图Ⅶ—1 S波（横波）到达时质点震动方向
E—震源 F在地面上的投影 —— 震中；
C—观测台站位置；F—震源

限于地壳表层，有时竟深达三千公里以上。我们知道只有弹性的物质才能传播地震横波。③重力均衡代偿不完全现象的存在。地壳表面大陆上有高山，大洋里有深海沟，这种地形的高低不等，没有发生应该发生的重力变更的现象，称之为地壳重力均衡代偿现象。但是，大陆上许多地区显示相当大的布格重力负异常，重力均衡代偿作用很不完全。这证明那些地区对其周围地区保持着一定的弹性作用，地应力还在积累，以致还没有达到完全补偿所要求的程度，同样也能证明岩石具有一定弹性。④应力解除实验的成功结果。地应力解除实验可以直接测得弹性变形的恢复。即当把测件孔周围的岩石掏空后，孔径改变，说明岩石的弹性使这部分变形恢复。

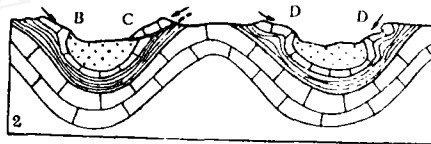
（2）塑性表象 自然界岩石的变形往往表现出既具有弹性又具有塑性，甚至还可以出现粘性流动。所以我们所看到的许多地质现象，常常具有综合的或过渡的性质。下面是几种以塑性表象为主的现象。①岩层的褶皱。岩层在地应力的作用下可以形成永久性变形的各种褶皱。挤压带中的砾石或粒状矿物变扁或扭曲等现象都可说明岩石具有塑性表象。②冰川砾石的变形。第四纪冰碛砾石中发现有多种形式的变形，如压坑，马鞍状、灯盏状扭曲。这些迹象证明在冰川运移过程中，由于岩块之间互相冲撞、碾磨而形成的砾石，又经过塑性形变，而发生了弯曲。③地震塑性波的传播。岩石不仅能传播

弹性波，而且还能传播一种频率低、传播速度较慢，振幅大，破坏性强的塑性波。这说明岩石在地震瞬时负荷下不仅有弹性也具有塑性。

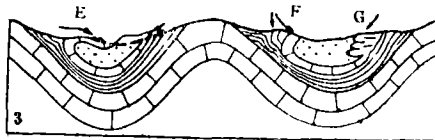
此外，岩石还具有粘性表象。例如中—深变质岩、混合岩地区的肠状褶曲；透镜状构造中柔性岩层常呈现顺层流动迹象。还有在某些背斜山坡上的翻转褶曲，都显示了可能是经过粘性流动而形成的（图Ⅶ—2）。



1—表示变形初期沿倾斜方向滑动的趋势，形成A—膝状褶曲；



2—变形进一步发展，B—陡壁构造，C—成片的滑动岩层，
D—由于滑动而形成的褶面



3—粘性流动，E—翻转褶曲或逆冲构造，F—同上，
G—由粘性流动而形成的脊槽

图Ⅶ—2 在重力作用下背斜顶部的石灰岩层的变形过程
（据哈里逊和弗孔，摘自希尔斯：《构造地质学概要》，说明略有改动）

2. 影响岩石力学性质的因素

除了岩石组成、结构的不同等内在原因决定着岩石力学性质而外，围压、温度、应力作用方式、作用时间等外部因素的差异，也会影响岩石力学性质的表象。

（1）围压 岩石随埋深的增加而围压增高，两者大体呈线性关系。非均匀的各向压缩能增强岩石的弹塑性，提高岩石的强度。一般在地壳表面岩石脆性较强，在地下深处围压较大的条件下，岩石可以呈现高度柔性。①围压增强时，岩石塑性增加。当轴向压应力不超过700公斤/厘米²时，岩石表现为脆性。而当围压增大到1000公斤/厘米²

时, 轴向压应力超过其弹性极限后, 却表现了明显的塑性变形特点。②围压增强时, 抗压强度增大。围压影响岩石力学性质的原因是高围压可使晶体内聚力增大, 质点间不易发生断裂, 只能从滑移来解释。故由脆性转变为柔性。

(2) 地温 实测资料证明, 地壳表层随着深度的增加, 地温也增高。地温增高则岩石塑性增大。这是由于晶体质点热运动增强, 质点间的内聚力减弱, 容易位移。从而使岩石表现出塑性, 并降低了强度。

(3) 时间 实验证明, 应力作用时间的长短和速度的快慢对岩石弹性和非弹性表象都有明显的影响。在高频振动下所测得的岩石弹性模量比缓慢连续加压所测得的数值为大。在短时间的应力作用下, 岩石表现为弹性; 在长期应力作用下, 即使应力低于弹性极限, 岩石也会发生显著的塑性变形。

由此可见, 在漫长的地质年代里, 岩石各种各样的变形图象, 时间因素是相当重要的。长期的地应力作用可以引起地壳岩石发生蠕变与松弛现象。

蠕变现象与松弛现象是物质流变性的两种宏观表象。前者是指在大小和方向都保持不变的外力作用下, 物体变形随时间增长而不断增加的现象。后者是当物体的变形保持一定时, 物体内的应力随着时间增长而不断减小的现象。可见, 这两现象的产生, 时间因素是重要关键。所以长期的地应力作用会引起岩石力学性质改变, 会出现长期积累的大规模构造变形图象。

岩石的力学性质究竟是怎样的呢? 地质力学认为岩石在长期力的作用下是一种同时具有弹性和塑性的物质, 这种弹性和塑性并不是像一般固体那样, 把屈服点以前的弹性变形和屈服点以后的塑性变形结合起来, 而是在所谓弹性范围以内显现的弹性和塑性。岩层当具有高度塑性时, 还能够发生半粘性流动。

时间对岩石变形和应力的影响是不容忽视的。岩石的蠕变现象反映了时间对岩石变形的影响; 岩石的松弛现象反映了时间对岩石应力的影响。在岩石流变过程中, 时间也是使弹性变形转化为永久变形的一个因素。

地质力学认为, 岩石的永久变形不一定要外力达到一定数值以后才发生, 也不一定要在高温下才发生, 在常温条件下, 尽管作用在岩石上的外力很微弱, 只要这种微弱外力持续作用很长很长, 岩石也会流动而发生很显著的永久变形, 包括破裂。因此, 就地质时期以几百万年、几千万年甚至几亿年这样长期的外力作用而言, 所谓“岩石基本强度”这一概念似乎也难确立了。

地质力学认为, 岩石作为组成广大地壳的物质, 在它存在的过程中其力学性质不是一成不变的。一般说来, 新的岩层塑性比较显著, 当它受到构造应力作用时, 容易发生褶皱; 相反, 越古老的岩层, 越有硬化的趋向, 就是说塑性越为减退。这种现象, 往往被用来说明为什么古老岩层在重新遭受构造应力作用时, 一般不像新岩层那样产生褶皱, 而是产生断裂。

通过上述讨论可以看出, 在研究地质构造现象时, 除了要考虑地质时期的地应力活动变化外, 还必须把变形介质即地壳岩石的力学性质、外部条件(围压、地温、时间等)有机地结合起来加以综合分析, 才能正确地理解地质构造现象的实际力学涵义。

二 模拟实验

模拟实验的方法也可称为模型实验方法。李四光同志一直十分重视它的发展, 并且生前亲自做过许多实验。他曾以实验所得的结果, 形象、有力地阐明地壳中各类构造体系的力学形成条件及其所反映的地壳运动方式。因此, 模拟实验被总结为地质力学工作方法中的七个步骤之一。

1. 什么叫模拟实验

模拟即模仿的意思。它是指在特定的条件下, 选择适当的材料, 依据相似理论, 用人工的方法, 使试件受到与自然界相类似的作用, 得到与存在于自然界实际现象或工程领域中相仿的模型体, 用来分析研究天然的实际现象或工程产生的原因和形成过程的一种科学实验。

模拟实验的方法很多, 应用范围也很

广，工程上也常用。不管模拟的方法如何，必须遵循一条基本原则：即所设计的模型和客观实体一定要有高度的相似性。模拟和客体实质可以不一样，规模可以不同，如自然界客观实体是岩石而模拟材料可以是泥巴，大断裂可作成小裂缝。

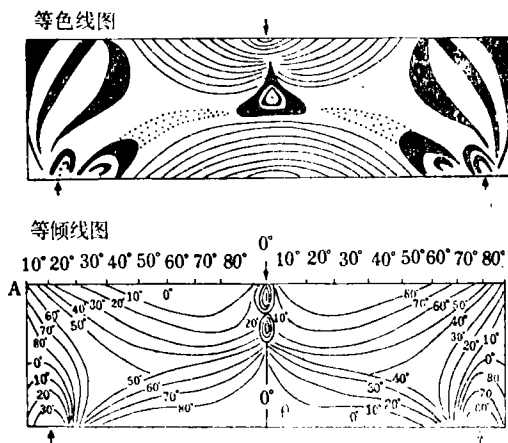
2. 模拟实验的目的

研究某一特定模型（即用来模仿“原型”的实验体系）在实验过程中的发展变化，与原型（被模仿的体系）进行对比和分析，以求得原型在运动中的有关知识和规律性，这就是模拟实验的目的。

如前所述，地质力学的核心思想就是构造体系。通过模拟实验确立不同类型构造体系的应力活动方式及形变特点就是它的重要目的。

目前地质力学采用的模拟实验方法，主要有两种：

（1）从应力角度模拟的光测弹性实验（图Ⅶ—3）。



图Ⅶ—3 山字型应力场模拟

〔利用明胶做模型材料，在山字型应力场模拟的光弹试验中做出的等色线图（上）和等倾线图（下）〕

（2）从形变角度模拟的（如泥巴实验法）形变和位移。

3. 泥巴模拟实验方法

（1）实验前提 主要有两点：①准备模拟的现象，在自然界要叠次出现，不能是

偶然的现象；它反映了自然界的规律，只有这样才有实验的价值。②对野外现象的模拟，在实验中也要叠次出现，不能在实验中只成功一两次。这种成功不应该是偶然的。只有多次、反复出现，才有可能分析引起这种现象（野外、室内）的控制因素。

（2）控制构造型式产生的因素 在实验室条件下调节各种可变因素模拟构造型式，从中找出三个因素：①材料的力学性质（弹性的、塑性的等）要加以选择，它可以改变实验的效果；②应力作用的方式（或称之为动力作用方式）；③边界条件。

上述三者之间是互相关联的。就材料的力学性质而言，迄今为止尚未找到有关岩石的完整特性（如弹性、塑性、流变性等）的材料。地质力学特别强调长期力作用下力学性质的变化，但构造型式却反映应力的作用方式。自然，这种方式 and 材料力学性质、边界条件是不能分割的。仅能据此推论岩体的性质。

根据控制构造型式产生的上述三个重要因素来分别考虑：

①材料选择：实验材料种类很多，可根据实验目的不同，选择不同的材料。如果需要脆性、高度弹性的材料，可选用玻璃，如需要相当脆而且具有一定塑性的材料，可用沥青、石蜡等；如需要柔性又具弹性的材料，可选用毡子、毛毯等；如需塑性的材料可选用泥巴、面团或各种塑料等等。

根据我们的经验，优点最多的实验材料是泥巴，这是因为：泥巴的实验结果与自然现象相似，可为进一步试验提供基础。泥巴的塑性强。岩石具有弹性、塑性，但在长期地应力作用下塑性表象更为显著，如果不具有塑性，就看不出褶皱运动痕迹。短时期模拟长时期形成的形变，就必须采用塑性较强的材料。泥巴的成分变化大，力学性质可变范围也大，既具有高度塑性，但也具有弹性。如加纸浆就更具有弹性，还有一定的粘性、胶性、触发性等。泥巴可掺不同比例的水，从而调剂其性质并可任意加其他物质（如纸浆、甘油等）。最后，泥巴的最大的优点是便宜，取材方便。

②动力来源：根据实验作法的不同，重

力的分力和离心力的获得,可把泥巴铺于板上,板斜放即可产生分力,离心力可用离心转盘产生。压力、张力、扭力可通过机械装置传递到试件中去。

(3) 边界条件 包括位移和力的边界或几何的边界等,可根据具体情况来设置。

以上所谈到的三个主要因素,经过反复调节应达到与野外现象高度的相似性为止。然后再进一步考虑共同的形态特征是否起源于同样或类似的应力活动方式,进一步追索引起那种应力活动方式的构造活动,特别是运动的趋向。根据以往的实验结果,我们认为模拟实验的方法很有启发作用。

最后谈谈几个要注意的问题:

1. 相似性。这是指的是类型的相似,不关细节问题(如压性构造形迹,可以是褶皱、冲断层,也可以是劈理、片理,虽然形态不同,但实质是一样的)。

2. 实验程序。必须要求从野外观察到的现象,然后到室内进行模拟,而决不能在实验室作出一种现象,到野外去生搬硬套。

3. 实验比例尺。模拟实验是以相似理论为根据的,因此,要考虑相似率。但从定性过渡到定量,涉及问题较多,目前尚不能做到。不过定性的实验还是有一定意义的。

用喷反接手为处理井内事故“开路”

广东地质局 邱祖干

前几年,我参与了广东水文二队处理一起重大井内事故的工作。当时运用微型孔底喷反钻具打捞障碍物,并作为扫、劈、掏等措施的配套工具,使用效果很好。现将此项经验简介于后,供同志们参考。

那起事故的大体情况是:钻具被卡后,经强力打、顶、反无效;孔内套管、花管多处破裂、错动、脱扣及下跑;孔壁坍塌掉块厉害;孔深近500米,孔径为89毫米;运用喷反钻具前,曾发生过几次跑管、误扫和误劈等重复事故。情势严重到放弃处理的边缘。

经运用喷反钻具,竟将数以百斤计的套管残边、合金片和坍塌物等打捞干净,保证了事故处理措施的顺利进行。

我体会,这项经验的突出优点有二:

一、由于喷反钻具抽吸力强,能使孔底障碍物随冲洗液进入钻具之内,以排除杂物在孔壁(或套管)与钻具之间造成挤夹的威胁,在捞渣和扫、劈、掏过程中,消除孔内阻力干扰,从而为采取处故措施,提供安全的工作环境。

二、用微型喷反钻具打捞障碍物时,不但少受孔径限制($\phi 75$ 以下的岩心管均可以用)、可连接长岩心管(4~5米)进行捞渣,而且

效能稳定效率高。当时该队在多达几十次的打捞中,无落空现象,使一次捞取量数倍于一般取粉管的捞取量。

在使用中必须注意:

一、当孔内残渣和坍塌物多时,为防止烧钻,扫孔过程中的轴心压力应逐渐加大。回次将结束时,可适当加大压力,以促进残渣相互挤卡的程度,有时甚至可根据情况停泵干钻几分钟。

二、喷反接手下井前,要经过严格的质量检查,并通过地彩试验,性能可靠者才能应用。接手加工精度要高,喷嘴与扩散管间的距离与同心度,要严格按图纸要求加工。为增强可靠性和提高使用寿命,对接手之喷嘴及扩散管可进行表面淬火处理。

三、最好在岩心管接头内腔装一防砂罩,以防扩散管与喷嘴间被泥砂、杂物堵住。

四、喷反钻具送未到孔底前(离孔底尚有一段距离)应先送水,以防喷反作用失效。

(注:这次用的喷反接手,是根据广东地质局1973年编《岩心钻探技术手册》中的图纸加工的)