

# 地质力学中的力学问题

北京大学 王 仁

地质力学是一门把地质学与力学结合起来的边缘学科。地球表面有一层由岩石组成的薄壳，一般称为地壳。地壳和自然界的其他事物一样，处在不停的运动变化之中。地壳运动的结果在地层和岩体中遗留下各种永久变形，叫做地质构造。同时，地壳运动还在不断进行中，岩体内部除了有残留下来的应力外，还有强烈的应力活动，还在继续产生变形、地震等现象。地质力学的研究对象就是反映地壳运动的这一切现象，它运用力学分析的方法研究地壳构造和地壳运动的规律。

由于地壳在漫长的地质年代中经历了长期复杂的运动过程，因而它产生的地质现象是极其复杂的。我们在野外能够观察到的仅是这些运动的遗迹，要想从它们去追溯运动过程的本来面目，找出造成这个运动的外力和条件，进一步总结出地壳运动的规律来，就需要运用力学的方法进行理论上的探讨。从力学上看，这是一个很困难的反问题，力学工作者必须和地质工作者密切配合，深入实际，才有可能通过共同的努力来解决这些问题。

## 地 质 力 学 的 应 用

地质力学的应用主要有以下几个方面：

1. 找矿勘探。地下矿藏的分布，同地质构造的形成和分布状况有密切的关系，例如有些地质构造有利于形成某种金属矿床，而另一些地质构造的某个部位中则有利于储存煤或石油。在某处发现一个矿体后，根据地质力学的分析，可以在相隔某个距离的有关另一构造部位再找到一个矿体。近年来我国地质战线上应用地质力学的分析方法，在查明地质构造规律，指导找矿勘探方面取得了很大成绩。

2. 地震预报。地震，特别是危害性很大的浅震，是由于地壳中一些应力集中部位，当应力超过岩体强度时，发生破裂而引起的一种地质现象。它的形成和发震是地质体中的一个力学过程，同地质构造及地壳运动有密切的关系。在一个地震发震前，有关地区地壳中的应力都是有变化的，把这些变化和地质条件结合起来考虑，就可以用来预报地震。不难理解，要真正解决地震的中长期预报以及逐步做到控制地震，就必须弄清楚地震的酝酿、形成和触发的力学过程，而且需要和地质构造紧密结合起来考虑。

3. 工程地质，水文地质。在工程建设的大量岩体力学问题中，不但需要知道有关的地质条件，岩石的力学性质，还需要从地质构造的角度分析岩体中残余应力的分布，以及工程建成后，在新的条件下应力作用的变化情况。这些方面对于设计隧洞、水坝、地下建筑物、边坡等是很重要的。在工农业和生活用水以及在利用地下热水等方面，利用地质力学的方法查明地质构造、裂隙水及热水的保存和分布规律等，也逐渐为人们所重视，特别在开发地下

热库这个新能源时，地质力学工作也是很重要的。

此外在分析滑坡、雪崩、河流、海岸地貌等等方而，也都涉及地质力学的分析。

## 发 展 简 况

运用力学的分析方法研究地壳运动的问题由来已久，诸如由于日、月引力所引起的变形（潮汐力），地球旋转时体内的应力分布，地震波在地球内的传播，把震源当作弹性位错进行的计算等等，就是经典弹性理论（如Love, Лурье等人的著作）中的问题；另外，用材料力学和弹性力学的方法分析一些典型地质构造中的应力，也已在构造地质学方面应用过。从事力学研究的 Nadai, Biot 等人也曾把地壳作为塑性体、粘弹性体，进行过板和梁的弯曲和稳定性分析，以及用模拟实验研究山脉的形成等。近年来由于岩体力学、地震学、大地构造学的迅速发展，力学和地质学的结合有日益加强的趋势，力学在地质学中的应用也在不断深入。不过，关于推动地壳运动的动力来源究竟是什么，迄今为止还没有定论，对岩石在地壳中温度和压力条件下的流变力学性质的研究也才开始，应用流变体的模型来分析地壳运动的工作还很少见，特别是还很少用力学的方法对全球性的构造进行分析。

李四光同志曾在地质力学方面做出了重大贡献。早在20年代，他就根据全球各地的地质资料，观察到这样一个现象：某一时期，在高纬度区海水高涨，淹了大片陆地，同时低纬度区海水低落，陆地出露；另一时期，在低纬度区海水高涨，高纬度区海水低落。这样的涨落反复进行过好几次。也就是说，海水有从两极向赤道，赤道向两极这样反复进退的运动规律。而且，常常是在低纬度区海水高涨到某个程度后，发生一次广泛的地壳运动，而后海水转向高纬度。因为地球自转加速时，赤道半径相应要增大，但岩层变形较困难，因而首先反映的是海水由两极向赤道流去，导致低纬度区的陆地被淹。反之，地球自转减速时，赤道半径相应要缩小，海水就涌向高纬度区。由此，李四光同志早就提出把地球自转速度变化和地壳构造运动联系起来看法，后来又经过对地质构造的其他现象进行分析，最后他认为地球自转速度的变化是地壳构造运动的动力。这个假设虽因根据现今地球自转速度的变化率所计算出来的应力太小，不足以引起地壳构造运动而被怀疑，但似乎也不能排除这样的可能性，即：在某个地质时期地球自转速度的变化率比现在大，而且有长时期的单调变化使地壳发生流变性的变形。目前虽然已有一些证据说明过去地球自转速度曾比现在快，而且还在变，但对其变化规律及变化原因还不清楚。

在地壳运动的推动力方面还有许多其他学说，如地球冷却、地球膨胀、潮汐力、地球自转轴的移动、地球内部物质对流等等。一般认为可能性较大的是在地壳以下的地幔中存在着物质的对流，它在地壳底部产生水平（即平行于地表面）方向的剪应力，其推力可以比较大。这个学说能够解释大洋底部向两旁扩张的构造现象，但还没有直接的证据说明这种对流的存在，而且在地幔中的热传递过程也是极为复杂的，很难计算。

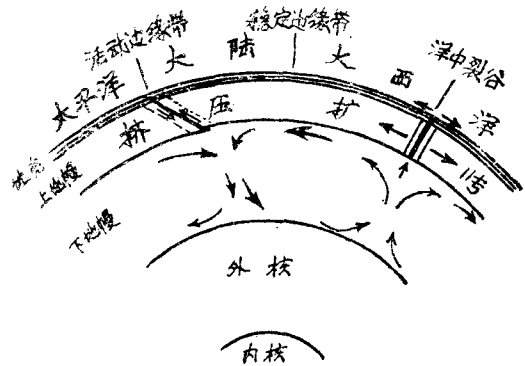


图 1

李四光同志还致力于运用弹性力学中的应力分析方法把地壳上的错综复杂现象，根据地壳构造是受压缩、受拉伸、受剪切、或它们的联合作用而形成的，把它们分成五种基本的构造形迹。然后把在生成上相互有联系，时间上大体上同时期出现的各种构造形迹及其分割的岩块当作一个整体看待，称为一个构造体系。

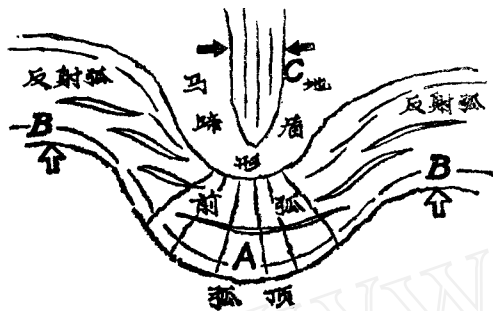


图 2

我国地质力学工作者在李四光同志指导下经过大量的野外调查、研究、分析，总结出带有普遍性的几种基本的构造体系，从而将错综复杂的地质构造现象归纳为这些基本的构造体系和它们的复合和联合作用，形成了以构造体系为中心的一套地质力学理论。这样就有可能使地质学脱离单纯的描述现象的阶段，进入到揭穿这些现象本质的阶段。现在举两个典型的构造体系为例进行说明。

1. “山”字型构造：这种构造体系的特点一般是在它的中间有一个向赤道<sup>1)</sup>（在北半球即向南）凸出的受挤压形成的弧形构造带（例如山脉），叫做前弧，见图A处；而前弧的左右两侧有两个反方向弯曲的弧形构造B，B，叫做反射弧；此外在前弧的内侧有一组垂直于BB方向的直线形受挤压带C，叫做脊柱，在C和A之间有一块变形较小的区域，叫做马蹄形盾地。这些构造形迹组成的整体叫做“山”字型构造。从其形成的力学性质看，它好象一个两端悬臂的简支梁受到自北向南的载荷作用而弯曲的情况。地质力学工作者在我国已发现大大小小二十多个具有这种典型性的构造体系，并总结出在它的弧顶部位常是金属矿床出现的地方，而在它的马蹄形盾地部位上常是煤矿储存的地方等等结果。

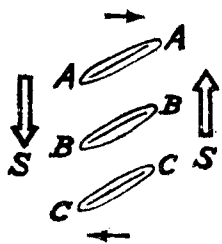


图 3

2. “多”字型构造。这种构造的主要特点是有一串大致平行的受挤压的构造带如AA，BB，CC，它们可能是隆起的山脉，也可能是凹陷的盆地。从它们形成的力学性质来看，好象是一块长条薄板受到剪切作用而发生的剪切失稳现象。如图，在两旁的剪力S作用下，沿AA等方向是拉应力，而垂直于AA等方向则是压应力，使薄板沿这些方向失稳。如果在AA处发现某种矿产，从地壳构造运动的角度看，BB，CC和AA是在同一个时期、受同一个外力作用、同一次运动中形成的，因而很可能也会有这种矿产。这样就为勘探在地表面看不见的盲矿体提供了理论依据。

以上只是两个构造体系的例子。深刻了解这些地质构造体系的力学性质，对分析地下建筑物所受到的地应力，对研究地震的形成、发生和如何进行预报等方面就提供了更可靠的根据。不过在找矿勘探方面，有时只需对构造的力学性质有定性的了解就行了，而对于分析地应力以研究地震，则常需要定量的结果。

目前，对构造体系的这种总结分类工作还不能说已经结束。虽然在分析这些体系时已经用了一些力学概念，但这些分析基本上还处在定性的阶段。李四光等同志只对“山”字型构造和“多”字型构造进行了初步的弹性力学分析。然而地质构造是一个长时期内形成的永久

1) 也有少量前弧是向西凸出的山字型构造。

变形的问题，因而要把构造体系从力学上分析清楚，就必须考虑到地质体的流变性质。这方面的分析工作还没有什么开展。

关于地壳运动的另一个争论较大的问题是：地壳运动是以平行于地面的水平方向为主呢，还是以垂直于地表面的方向为主？李四光同志根据对地质现象观察和力学分析的结果，认为是水平运动为主，而垂直运动是派生的。现在大地构造学中新兴的板块学说把对流看作是地壳运动的动力，也认为是水平运动为主。特别是由于观测仪器的新发展，直接在地表层内测量地壳应力的结果说明了水平方向的应力大于垂直应力，和弹性理论中所认为的水平应力只是垂直应力的 $1/4$ 至 $1/3$ 正好相反。现在已较普遍地认为水平运动为主了。

## 存在的问题

如上所述，由于地质现象十分错综复杂，要对它们进行力学上的分析是很困难的。除了迄今还没法肯定使地质构造发生运动的动力是什么，以及地质体的非均匀性、各向异性等问题外，在力学上的困难主要还有：

1. 地壳构造中包含大量的裂隙、软夹层等，用经典的“点连续介质”理论来处理就显得不够。目前在探索这样的理论：将岩体看成是由大量的块体组成的，每个块体本身仍可用经典“点连续介质”理论；这些块体通过接触面或软夹层相互作用，整个岩体仍是一个连续介质，不过应力张量将不再是对称的，剪应力分量不服从互等定理。这个理论也可称为准连续介质理论，现在已开始应用到岩体力学方面。

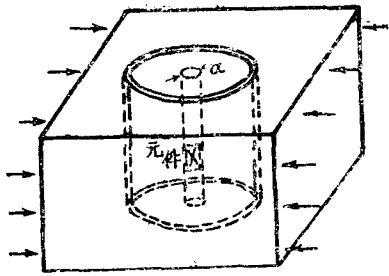
2. 岩体在地壳条件下的流变力学性质（状态方程）。目前一般主张在分析地壳运动时，可以近似地把岩体看成是一般线性流变体。也有人认为必须考虑它是一个非线性流变体。有人将运动过程分为快速的，如地震的发震，中速的，如地震的酝酿形成过程，以及缓慢的长时期的构造运动等情况，分别用不同方式代表岩体的力学性质。另外目前还存在岩体有无基本强度的争论，有人认为只要时间足够长，即使温度不高，应力很微小，岩石也将发生蠕变变形；但是，高山能长期保持几公里高度而不变成平缓的形状，从这一事实来看，岩体还应有一定数量的屈服应力，它随温度、压力条件而改变的量，可能比一般想象的为低。目前在外国曾进行过一些岩石在地壳条件下的力学性质实验，但有关长时间流变性质的实验很少。关于岩石在压应力作用下的破裂传播理论，也有一些研究，这是研究地震发震时所需要的。

3. 大变形问题。地质构造现象虽然一般认为是个缓慢的过程，变形的速度很慢，每一小段时间的变形很小，但时间一长，变形量也是很大的，一般的小变形理论不足以解释许多地质现象，在力学分析中常常需要考虑几何变形上的非线性，这方面做的工作也不多。

此外，在对一个构造体系进行力学分析时，边界条件究竟应怎么取，地壳深部热传递情况怎样考虑等，也都是些复杂的问题。

由此看来，要运用力学的分析方法还有很大的困难，这就需要和地质工作者紧密结合起来，深入到实际中去进行观测和收集、分析资料，抓住主要矛盾，进行符合实际的简化和抽象，把实际和理论工作密切结合起来，才能从理论上真正解决一些地质构造运动的问题。

目前在现象观测手段方面，由于人造卫星对地球的考察，地球物理各种手段的应用，对研究地质构造运动提供了很好的条件。近二十年来应用了地应力解除的方法，对地壳表层中现有的应力状态取得了一些定量的数据，这方法主要是：先在岩体中打一个直径为 $a$ （例如30毫米）的小孔，把一个测量变形的元件放在孔内，两端支在孔壁上，这时小孔周围的岩石



仍受岩体中应力的作用；然后再在小孔周围开一个直径约  $10a$  的同心圆槽，使周围岩体中的应力和小孔周围的岩石隔开。因为这岩石圈不再受周围岩体中的应力作用，它就变形并恢复到无应力状态。根据小圆孔内元件测得的变化，通过标定曲线，就可以得出原先作用在这岩石圈上的应力，也即岩体中存在的应力。这个方法用于分析地质构造，能够准确地决定它现在所受作用力的方式和方向，确切地决定应力的分布情况。另外，如将这样的元件长期放在地层中进行观测，就可以看到地壳中应力的变化。从而预报地震是否将要发生。目前它遇到的

困难是怎样排除干扰因素对测值的影响。此外也还有用光弹性贴片法进行这种工作的，等等。这些方法的缺点是只能在地表面下很薄的一层中取得数据。现在还正在发展用地震波的方法、电磁波衰减率的方法等研究深一些地方的地质构造情况，从波形记录来分析当地应力状态，等等。当然这些方法只能测得现今的地应力分布情况，对于其历史情况还难于了解。

“应力矿物”的工作乃是根据应力作用下矿物的物理和化学性质的变化来推断该矿物在形成时作用力的方式和方向等。这些方面的工作对深刻了解地壳运动的规律是十分重要的。今后需要进一步发展各种现场探测手段，并要把这些手段和应力分析结合起来，由探测结果中分析出有关应力场的资料。

此外关于实验室的工作，前面已经说过，要进行力学上的分析，就要进行岩体在地壳条件下流变力学性质和破裂条件的实验研究。另外还需要发展实验应力分析方法。关于照顾到长时间过程的光粘弹性实验，国外已开始作，不过有待进一步发展。其他模型实验如泥巴实验等，能给出一些典型构造的形象，但仍停留在定性的阶段。从定性过渡到定量的主要困难是缺乏模型律，这和不掌握岩体本身的力学性质，难于确定边界条件等也是有关系的。

在缺乏这些主要基本资料的情况下，进行理论演算工作是有困难的。看来一个可能的办法是结合某些具体的构造，进行力学、地质学、地球物理学等多方面配合的研究，在理论上采取半反逆的方法，即先根据部分实测结果做一些假设并进行一些演算，然后再和其他实测结果对比，来对这些假设进行修正和取舍。

以上对地质力学中的力学问题做了肤浅的介绍，希望弄清楚这样两点：地质力学虽然是一个很基本性的理论学科，但它对社会主义建设却可以发挥而且已经发挥着重要的作用；地质力学的问题很复杂，需要力学工作者和地质工作者多方面共同努力才能逐步加以解决。李四光同志生前曾多次呼吁力学工作者参加这个工作。我们相信，在这方面，力学工作者应该是可以做出贡献的。