

地震 孕育发展过程 中的力学问题

王震鸣

(中国科学院力学研究所)

我国是一个多地震的国家。构造地震，尤其是浅源构造地震的危害很大。

地震的孕育发展过程，主要是与地壳的受力、变形，能量的逐步积累和集中，突然断裂和错动，释放应变能，发生地震及震后的调整等有关；同时还伴随着地球物理、地球化学变化；且是一个与大气物理、天体物理等有联系的复杂过程。因此，研究地震孕育发展过程中的力学问题，有助于提高地震预报的水平。

一、引起地震的力从何而来

地质力学认为，地球自转速率的变化，会直接产生经向和纬向的水平惯性力，这是引起地壳构造运动水平力的来源。如地球自转速率增大，则引起离心力的增大，使地球物质向外流动，造成地球对自转轴惯性矩的增大。在地壳上，由于天体的、气象的因素，地球内部热的因素和均衡运动等，不但直接引起某些地区作用于地幔上的力的变化，而且会使地球的惯性矩有所变化。而地球角动量在某定值上下的波动，同样会引起自转速率和地球内部物质的变动。这种运动变化过程，在地壳已断裂成若干巨大板块和大量小块的情况下，由于力分布得不均匀而复杂化了。地球自转速率的变化，就是这样和构造运动相联系，既和力的作用过程有关，又和能量的变化过程有关。一般认为，其能量来源可能是地球内部的放射性元素在蜕变过程中释放的热能，天体特别是太阳和月亮对地球的

引力势能和地球自转的迴转能等。所有这些，加上地下物质及其温度能量分布的不均匀性，地壳和地幔构造的不均匀性及其交接处约束程度的不同，流变性能的不同等，使力的作用和物质流动的过程变得更复杂了。

到目前为止，关于地震力的问题还没有很好解决，还不能确切地提供产生构造运动的力（体力和面力）的大小和方向，不能精确地给出这些力在空间（地点和深度）上是如何分布的，在时间上是如何变化的。因此，还只能根据地震仪的记录给出力的方向和应力降，用以探讨一些问题。而对于研究地震问题来说，地震力问题既和地震的孕育发展过程有关，又和地震的触发有关，是一个必须深入研究的根本问题。

二、岩层中的应力和强度

地震既然和地壳岩层的断裂有关，这就涉及岩层受力的大小（应力）和岩层承受的能力（岩层强度）这两方面。影响地应力变化（大小、方向、分布情况等）的因素很多，如地壳构造运动的规模和强度，应变和应变能积累的速度，岩层的流变、屈服和变形，断层的粘滑和蠕动，地幔中水平力（可引起地壳受拉、压、剪、扭等）的变化，温度场的变化，岩层的围压和孔隙中流体压力的变化，天体引力、旱涝、气压的变化及其它能使地壳在水平或垂直方向应力增加或变得不均匀的因素。影响岩层强度变化的因素也很多，如所受应力的大小，作用时间的长短，加载速度的快慢，应变率的大小，温度的变化，岩石结晶的改变或局部熔化，蛇纹岩的脱水变脆，地下水的渗入使岩层变弱，围压和孔隙压的变化，裂隙的产生与扩展，受力状态的变化等。如果地应力仅在局部超过岩层强度，而在总体上，在未来总破裂面上还未超过岩层的强度，则仅引起小范围的断裂，产生局部的小震或滑动。一旦地应力不仅在局部，而且在某一大断面的总体上也超过岩层的强度，且积累的应变能已很大，则处于临界状态的岩层，局部的破裂就会引起地壳岩层的大规模破裂，发生大地震。

三、地壳构造和岩层性质的不均匀性

地震及其前兆现象的多样性，与地壳构造

和岩层性质的不均匀性有关。

地壳对于地球来说是很薄的一层外壳，可是它的构造却相当复杂。地壳的最厚处（西藏高原）约 80 公里，最薄处（深海沟）约 5 公里，厚度差别很大。地壳岩层是极不均匀而且是不连续的，在垂直方向上，具有大小、形状、厚度、构造、性能等不规则的层次，在水平方向上，以往千百万年内发生过难于计数的大小地震，形成各种断裂带、软夹层或褶皱，使上地壳岩层的破碎程度增加了。还有由于温度、沉积和岩浆侵入等物理、化学和力学的原因所引起的各种裂隙、节理、片理和空洞等。有的裂隙是干燥的，有的则含有水、石油、天然气等液体和气体。地壳的温度分布也不均匀。自地表往下，温度逐渐升高。在 20 公里以内，每深 1 公里增高 30℃。在 20 公里处约为 600℃，上地幔温度最高处可达 2000℃，地核处可达 4000—5000℃。由于岩石的热传导率很低，地球温度场的分布是不均匀的，可能也是非定常的。定常温度场产生的热应力，在很长的年代可产生应力松弛；而非定常的温度场则产生可变化的热应力场。由于岩层的自重和地壳平面内所受力，岩层所受围压（两水平主应力加垂直主应力，其总和的 1/3）自地表往下逐渐增加，在地壳深部可达 10000—15000 巴。但在相同深度，由于物质分布和水平应力的不同，围压并不相同。岩层的物理性能（磁性、导电性、压电效应、压磁效应和放射性等）和化学性质等，也有很大的差别。在地壳和上地幔中的低电阻层，据研究与地震带有联系。

四、岩石的力学性质

各种岩石由于生成年代、所处条件的不同，力学性能差别很大。有的岩石强度大，有的比较坚韧，有的较易变形，但大部分都比较脆。岩石的抗拉强度最低，抗剪强度次之，抗压强度最大。岩层的特性随深度变化很大。在上地壳，岩层的脆性是主要的；在下地壳，岩层处于由脆性到韧性的过渡状态。在地幔中，岩层的粘性蠕变则是变形的最主要方式。

岩石的力学性质和温度、围压密切相关。当温度增加到一定程度，岩石的强度和弹

性模量将降低；泊桑比将增大。而围压增加到一定程度后，岩石的强度将增大。地表数公里深的沉积土和破碎岩层，其平均刚度要比完整岩层小得多。随着深度的增加，由于风化和其他因素所造成的裂隙将显著减少，因此岩层的平均刚度将逐渐增加而达到极值。随后，由于温度增加使岩层刚度下降的现象越来越显著。因此岩层的平均强度和平均刚度分别在某一深度范围内为最大。如应变基本相同，由于应力分布与刚度有关，则在刚度大处，所受的应力亦大。据推断，岩层的平均强度和平均刚度约在 10—30 公里深的范围达到最大（对于不同的地区和岩层有所不同）。这里可形成很大的震源体积，积累很大的应变能，且上地壳的脆性断裂，容易导致地壳的大断裂，这是我国破坏性的大地震都发生于这个深度范围内的原因。

岩石在短暂受力时，标准的持续时间为 3 秒，上限为 4 小时，最典型的是地震波的传播过程，表现为弹性体，变形很小，有强度极限，脆性，如受力较大尤其是突然加载时，则出现脆性破坏。浅源地震一般都和岩石的脆性断裂有关。同一岩石，在一定的情况下，如受力较慢而应力又超过弹性极限时，也可产生数量较大、不可恢复的塑性变形。如围压、温度、含水量增高时，可增加岩石的塑性。在交变载荷作用下，岩石的疲劳强度很低。即使在弹性范围内，岩石的性质也和力的作用时间有关。同类试件用高频振动测得的模量就比用静态加载测得的模量要大。

岩层尤其是下地壳和上地幔的岩层，一般说来是粘弹性体。它在外力作用下所产生的变形中，有一部分是能很快地产生和恢复的弹性变形，另一部分是由于物体的粘性流动而出现的滞后变形。后一部分变形将随时间的增长不断地增大，在外力解除后，将随时间而逐步恢复，这种现象称为粘弹性。物体在应力的作用下，随着时间的增长，其塑性变形不断增加的性质，称为粘塑性。

下地壳和上地幔岩层的力学性质，有人简单地用线性粘弹性体即开尔文固体的模型来近

似它,也有人用麦克斯韦流体的模型来近似它。

开尔文固体,应力 $\tau_{ij} = 2\mu_K \varepsilon_{ij} + 2\eta_K \dot{\varepsilon}_{ij}$ ($i \neq j$), 其中 ε_{ij} 和 $\dot{\varepsilon}_{ij}$ 分别表示应变和应变率, μ_K 和 η_K 分别称为开尔文刚性和粘性常数。

麦克斯韦流体,应变率 $\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\tau}_{ij}/2\mu_M + \tau_{ij}/2\eta_M$ ($i \neq j$), 其中 τ_{ij} 和 $\dot{\tau}_{ij}$ 分别表示应力和应力对时间的变化率, μ_M 和 η_M 分别称为麦克斯韦刚性和粘性常数。

对于地震问题,用开尔文固体的模型描述下地壳和上地幔岩层的力学性质比较合适。对于长期受力情况,用麦克斯韦流体模型较为合适。

至于数万到数亿年的更长期受力情况,在麦克斯韦模型中含 μ_M 的项显得很小时,可以忽略,这种物体称为宾汉体,不大的应力即可引起流变,蠕变是变形的的主要方式。大规模的造山运动和大陆漂移属于这一类的受力问题。

岩层中还有一种与粘弹性行为有关的力学过程,称为静态疲劳。它是对破坏的抵抗能力随时间衰减的一种过程。岩层的强度在减弱以后,也可随时间而恢复,这就是强度恢复。

岩层的流动在热的影响下加速;而在压力的作用下减慢。裂隙水的存在,能明显地增加岩层的流变性。这些和地震的关系也很密切。

岩石在受压或受剪达到强度极限的 $1/2 - 2/3$ 后,就不断出现微裂缝,平行于主压应力方向,并有声发射,当应力接近强度极限时,微裂缝急速地增加,这种非弹性体积膨胀即扩容,又与一些地震前兆有关。

岩石受力时的摩擦问题也很重要,它比工程力学中的摩擦问题要复杂,摩擦定律 ($F = \mu N$) 的应用受到限制。岩石的断裂面往往很粗糙或有突出物,在较大的压强(如围压为数千巴以上)作用下,接触的部分面积,其压应力很高,可将凸出的岩粒压碎。此外,在互相啮合的部分,在巨大压应力下,当摩擦力大到一定程度后,由于剪应力很大,就可能将凸出的岩石剪搓成碎末。压碎剪碎的岩粉成为断层泥,在水的作用下,有利于滑动。就是在干燥的情况下,其摩擦系数也要显著变小。从大量实

验资料可知,岩石的摩擦系数 μ 约为 $0.4 - 1.4$ 。对于 $5 - 40$ 公里深度的岩层,其平均值约为 $0.6 - 0.8$,正压力再增加时, μ 值还要减小些。

断层间由于克服摩擦力而产生的突然间歇滑动,称为粘滑。粘滑与浅源地震关系密切,因为浅震往往是已有断层的重新滑动引起的。随着应力在突然滑动中的释放,断层面又可被锁住,直到某一时间以后突然再发生滑动为止。粘滑的产生又和岩层的热软化(可能是深源地震的一种机制)、蠕滑(其中断层泥起着复杂的作用)和脆性破裂有关。断层间的岩体因表面凹凸不平呈锁住状态时,摩擦力最大;锁住区破裂时,摩擦力相对减小。于是摩擦力便不是常数,随两表面间的相对位移而迅速涨落。因此,岩石摩擦涉及到非线性力学过程。

地下数十公里处的岩样无法取得,它所处的温度和压力条件固然可以在实验室模拟,而岩石的环境和所受外力的历史,是无法再现的。岩石本身由于组织结构的差异,其力学性质是各向异性的;而天然岩层则更复杂。这样,天然深部岩层的性质,目前还无法如实地了解,只能依靠推理和一部分实验来推断。岩石力学的进展和在实验室中测得的部分数据,虽已能说明不少问题,但要用到地壳上去,还有很大的距离。岩层在不同情况下,有条件地成为弹性体、塑性体或粘弹性体,出现脆性破坏或流变等,这些都和地震、地震前兆有关,需要研究清楚。

五、精确计算地区应力场所面临的问题

引进过分简单的假定,如假定地壳为均匀、连续、各向同性的弹性体,或把地壳的三维受力情况当作二维问题来处理,把还未弄清的境界条件给予一定的位移和应力的数值等,当然也能近似地探讨和定性地说一些说明一些问题,取得一些有用的结果。但由于受力情况不能确切地提供;地壳,特别是震源区的上地壳,在临震前是不连续体;又由于地震的力学过程是一个随时间而变化的动力学过程,力和位移的边界条件,和岩层的受力状况(体力和面力)、本构方程一样,都随时间而有所变化。由于上述原因,在目前想要用数学力学的方法,严格求解地壳或局

部地区在构造力作用下的应力场问题,非常困难。

对于下地壳和上地幔这种粘弹性体,在某种情况下,例如应变率和应力对时间的变化率不大的情况下,下地壳和上地幔可出现蠕变和松弛,使自己的变形增大或应力减小,这时上地壳可能增加应力,或者,也可能由于局部的显著形变而在大范围内降低应力。但在地壳中的应力和应变在短期内变化很大的情况下,上地幔则参与受力过程,在近似的开尔文固体模型中,由于 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 很大,因此, $2\eta_K\dot{\epsilon}_{ij}$ 这一项就不能忽略,有时可能成为主要的。这时,岩层的应变并不大,但 τ_{ij} 却可以相当大。于是上地幔亦出现积累和释放能量的过程。这些又与地震有关,在分析计算时是应该考虑的。

在研究大地构造或地震的缓慢变化过程时,由于力的作用很慢,应变率也小,地幔中的高温高压因素,使上地幔容易产生蠕变和应力松弛,使地幔中的应力很小,容易流变。于是,上地幔对地壳的受力影响不大,因此可将地壳近似地作为二维问题来处理。可是,在精确计算地震的急速变化阶段时,要把下地壳和上地幔这种粘弹性体之间的水平力和垂直力的相互作用及其变化完全忽略;或将地壳可能存在着的差异运动(可引起地壳的弯曲、扭转和剪切等)加以忽略;或将本来是三维问题(在地震过程的急速变化阶段,上地幔参与受力,呈现弹性

体或粘弹性体,因而接近于半无限的空间问题)的地壳板块,简单地看成是一个弹性力学平面问题,把上、下地壳所具有的各种不尽相同的力学特性,不加区别,这是不恰当的。当然作为近似计算,为了定性地说明一些问题,那是可以采用的。

总的说来,在目前,虽然有了高速电子计算机和有限元法这样的计算条件,可是对于地壳那样的不连续介质的力学问题,仍不好解决。即使按连续介质处理,由于力、本构方程、边界条件(包括下地壳和上地幔间的边界条件)、初始条件等都不清楚或不确切,所以,想要用弹性力学、塑性力学和粘弹性力学的方法来精确求解地壳或局部地区的应力场问题,还不现实。由于岩层的强度准则也同样不清楚或不确切,因此,尚不能把地震预报寄托在精确计算地区的应力场上,而要采用更为切实可行的方法,总结提高目前国内外已采用的地震预报方法。

同时,利用力学的基本原理来加强理论分析和计算,改进实验方法,包括岩石试验、模拟试验和野外实测,可以是定性的,也可以是定量的,只要能抓住探讨地震过程中有关的力学问题的本质,就可以加深对地震的力学过程的认识,提高地震预报的水平。

随着野外的调查研究、实测和实验工作的进展,加上理论分析和计算,对地震的力学过程和地震问题的认识,一定会越来越深刻。

墨西哥与秘鲁抗震工程考察散记

钱培风

1978年8至9月笔者参加国家建委建筑工程抗震技术考察组到墨西哥及秘鲁两国进行抗震考察,现将看到的一些情况和体会简述如下。

这两个国家地震都很多。1957年墨西哥盖来诺海岸地震,使首都墨西哥市遭到不小的损失,切尔巴钦柯市濒于毁灭。它促使墨西哥国立自治大学成立工程研究所,开始抗震研究工

作。秘鲁1966,1970及1974年连续发生了三次强烈地震,也造成了很大的损失,所以近几年来对于抗震研究,也受到了重视。

在秘鲁安蒂斯山靠太平洋一侧,有一段山势较为平缓,可以耕种,因而建立了很多城市。较大的如互来斯(Huaraz),居住着十多万居民。与它相距几十里的小城市涌盖(Yunqay)也有二