

erties of Solids”, ed. by J. J. Burke, 1970, 是美国陆军材料研究的学术会议录, 包括金属, 聚合物, 复合材料, 多孔材料, 岩石和陶瓷以及动态断裂的问题。

6. “Mechanical Behaviour of Material under Dynamic Loading”, ed. by U. S. Lindholm, 1968.

#### 专著

1. Bell, J. F., “Experimental Foundations of Solid Mechanics”, 见 “Handbuch der Physik”, ed. by S. Flugge, V. VI a/1, 1974, 是固体力学实验技术综述。
2. Chou, P. C., Hopkins, A. K., “Dynamic Response of Materials to Intense Impulsive Loading”, 1972, 是 Duvell, G. E. 数人合写的关于一维应变实验的专著。
3. Johnson, W., “Impact Strength of Materials”, 1971, 适于工程应用。
4. Compbell, J. D., “Dynamic Plasticity”

(1973) .

5. Wasley, A. J., “Stress Wave Propagation in Solid” (1973), 是本初等理论书。

#### 综合文献

1. Harding, J., “Shock Proragation in Solid”, *Sci. Prog. (GB)* 63, 252 (1976), 575.
2. Compbell, J. D., “Dynamic Plasticity: Macroscopic & Microscopic Aspects”, *Mat. Sci. Eng.*, 13 (1973), 1.
3. Curren, D. R., “Dynamic Failure in Solids”, *Physics Today*, 30, 1 (1977), 17.
4. 泽冈昭, “最近の超高速飞翔体の研究, 工业火药, 38 (昭和52年), 21.
5. Koloky, H., The Role of Experiment in the Development of Solid Mechanics — Some Examples, *Advances in Appl. Mech.*, 16 (1976), 309.

## 地震孕育发展的力学过程和地震预报

中国科学院力学研究所 王震鸣

地震的孕育发展, 主要是和地壳的受力、变形、能量的逐步积累和集中、岩层突然断裂和错动、应变能释放、发生地震及震后的调整等有关的力学过程, 同时伴随着地球物理、地球化学的变化, 并且是与大气物理、天体物理等有联系的复杂过程。

地震力的产生, 与地球自转速率的变化、地球内部物质的流动与能量的转化等因素有关, 是一个复杂的尚未完全弄清的问题。

地震和地壳岩层的断裂有关, 这取决于使岩层破裂的地应力和岩层抵抗破裂的强度这一对矛盾。地震孕育发展的力学过程, 就是这对矛盾既对立又统一的变化过程。影响地应力大小、方向和分布情况等变化的因素很多, 如地壳构造运动的强度和规模, 应变和应变能积累的速度, 岩层的屈伏与变形, 断层的粘滑和蠕动, 地幔中水平力(可引起地壳拉、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、气压的变化及其他

能使地壳水平线垂直方向应力增加或变得不均匀的因素, 它是矛盾的主导方面。影响岩层强度变化的因素也很多, 如所受应力的的大小, 作用时间的长短, 加载速度, 应变率, 温度的变化, 岩石结晶的改变, 蛇纹岩的脱水变脆, 地下水渗入使岩石变弱, 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, 它是矛盾的非主导方面, 但在一定情况下, 也可起重要的决定性的作用。如岩层中的应力增加, 或岩层的强度减弱, 或两者同时发生, 则容易产生破裂, 反之则不易产生破裂。如地应力仅在局部超过岩层强度, 而在总体上, 在未来的总破裂面上还未超过岩层强度, 则仅引起小范围的断裂, 产生局部的小震或滑动, 一旦地应力不单在局部而且在某一大断面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, 会引起地壳岩层大规模的破裂, 发生大地震。

由于地壳构造和岩层性质(力学、物理和化学性质

等)的种种不均匀性,受力状况与触发因素的不同,因而出现地震及其前兆的多样性。

《关于地震孕育过程中的力学问题》一文已刊登在《力学与实践》1979年第二期上。有关内容不在此重复了。

## 地震和断层的关系

地壳在构造力的作用下,产生应力的增强、调整和集中,从而使地壳构造产生皱褶、断层、蠕滑和粘滑等;如突然发生大规模的粘滑和破裂,释放大量的应变能,就发生地震。

到目前为止,在以往的千百万年间,地壳上已先后形成了深浅、长短、疏密、宽窄不同的断裂带,把地球分割成相当多的形状不规则的板块。在断层间有的有大量的断层泥,有的凹凸不平、有曲折或呈S形,有的在漫长的年代中又胶合起来,或因岩浆侵入造成岩石变质。岩层的温度状态和分布不同(会导致热应力的产生,岩层结构和性能的改变等),断层间的正压力、摩擦力和粘聚力也不相同。因在断层处裂隙较多,接触面不平整,应力分布不均匀,断层处的岩层强度肯定要比完整的岩层小些,容易产生局部破裂。另外,当断层泥中水分饱和时断层容易滑动。水和岩石中的硅酸盐矿物能起化学变化,使岩石变弱。水压能使有效围压(围压减去水的压力)降低,使摩擦力减小。摩擦所产生的热,可使岩石溶解或软化,又可使断层容易蠕动。因此,地震时往往在原有断层处开始错动或断裂,然后向裂缝两端或应力最大、强度较弱的部位扩展。

在上地壳,由岩层的脆性断裂所引起的浅源地震,所占的比例最大。另外,下地壳和部分上地幔断裂时,也会伴随着上地壳的脆性断裂,在非常强烈的构造力的作用下,由上地壳的脆性断裂也可能带动下地壳和部分上地幔的脆性断裂。沥青在缓慢加载时,有很好的延性和流动性,但在猛烈的敲击下,可碎成许多块,显示出脆性破裂,这可和下地壳和上地幔的岩层在突加载荷下的脆性破裂相类比。关于岩层这种脆性材料,其裂缝扩展的规律,用断裂力学的方法进行研究,是有意义的。

在断层两侧大范围地区受力后有错动倾向时,由于断层的两端,断层的转折处或断层的交叉处阻止断层的错动,起了闭锁作用,刚度较大,造成应力、应变分布的不均匀,形成应力集中,积累起巨大的应变能,一旦岩层的应力超过断层处的摩擦力甚至闭锁段完整岩层的极限强度,就突然产生粘滑和大断裂,引起地震,成为震源。如果是缓慢的蠕动,因为不能积

累起巨大的能量,或积累的能量不是以地震波的形式急剧地释放,而是通过缓慢的小幅度大面积的形变和高程的变化来释放能量,则不产生大震,可能只有一些小震。如果有强大的闭锁段并已积累起巨大应变能,则断层的蠕动,释放不了多少应变能,而往往引起应力场的重大变化,是大地震的前奏。岩层的突然粘滑、断裂和错动,就引起强烈的地震了。

地震的强度与断层的性质有关。由于岩层的拉伸强度最低,加上已有断裂、裂隙、节理等的存在,它能承受的总拉力很低,产生正断层。因此能积累的拉伸应变能较小,引起的震级较低,最大不超过7级。在承受剪力时,由于断层两侧间的摩擦力,或由于其他岩层的闭锁,只有剪力大于摩擦力和闭锁段的阻力时,才能引起错动或产生新的平推断层,只要闭锁段的长度和强度足够大,就可积累起很大的应变能,最大可产生8级多的地震。在既有压力又有剪力时,断层间的摩擦力可更大,由于围压的增加,闭锁段岩层的强度也增大,因而可产生比单有剪力时更大的地震。至于既有拉力又有剪力的情况,比单有剪力时的震级要小些,这是明显的。当两水平主应力都是压应力,其中两个或一个应力很大时,会产生逆断层,这时围压最大,岩层强度也最大,且往往产生新的巨大断裂,因而与最大震级8.9级相对应。

地震的强度还与断层的长度、断层的面积、错动的幅度和速度、岩层的强度尤其是震源体积的大小和释放应变能的多少等有关。

能引起地震的断裂带就是活动断裂带。研究近代还在活动的断裂带对预报地震有重要意义。

在地震过程中,在已有断层重新活动的基础上,产生新的断裂和错动,这是最普遍的。但不是说已有断层都会重新活动或在当前都有同等的活动性。李四光同志倡导的地震地质工作,对地震发生的地质构造,找出活动构造带,发现震源的位置等重大问题,有重要的指导意义。

## 地震过程的阶段性

在地震活动的各个阶段中,有一个地震孕育发展的力学过程,与此相联系的还有地球物理和地球化学的变化过程,出现各种前兆现象。

(1) **应变积累阶段:** 由于地壳的构造运动,地壳块体间力的相互作用,引起孕震区应力和应变的逐渐增大。应变积累的速度,对于某些地区,每年约为 $10^{-6}$ 左右,其他地区可大于或小于 $10^{-6}$ ,因构造运动的速率、规模和强度而不同。缓慢而稳定地积累应变能,是量的渐变阶段,时间较长(数十、数百年或更

长), 范围较大(可达数万至数十万平方公里的面积), 而应力、应变的数值不大, 变化也不大。因此前兆现象不大明显。这时岩层中的应力, 虽然由于岩层的不均匀, 分布是不均匀的, 但应力水平一般还较低, 其最大应力和弹性极限相比还较小。用各种比较精密的观测手段能觉察到, 尤其是在未来的震源附近。当然异常的幅度一般比较小。由于应力水平较低, 因此地震小而少。

由于岩层性质和受力的不均匀性, 造成应力和应变分布的不均匀性。剪应力的不均匀性, 对于发生地震具有重要的意义。剪应力大的部位可发生较大的地震或较早地出现蠕滑。

上地幔在应变和应变率较小时, 应力也较小, 高温因素所产生的应力松弛使应力更小, 应变能积累得也少。这是相对平静的阶段, 以积累应变和应变能为主的阶段。

(2) **前兆活动阶段:** 在地震孕育过程中, 随着时间的推移, 当局部地区地壳岩层中的应力和应变增大到一定程度, 地壳中的应变能就积累得比较大了。下地壳尤其是上地幔的岩层, 围压较大, 温度很高, 由于应力的长期作用和增大, 粘弹性或流变引起的变形增大, 可是所承担的应力仍然很小。因此构造运动的力基本上由离地表10~30公里处刚度较大的岩层所承受, 应力较大。在断裂带上, 由于摩擦力的不同, 岩层对错动倾向所起的闭锁作用的不同, 应力的分布就更不均匀了, 断层间会出现一次或多次的蠕滑和粘滑, 使闭锁区的应力进一步增大, 引起应力场的明显变化。在这变化过程中, 由构造运动所作的总功中, 一部分变为浅层岩石的破碎能, 有的以微震和小震的形式释放了, 地壳中较深岩层中应力大的部位可能会进入塑性状态, 塑性变形和粘弹性体的蠕变以及摩擦、滑动等引起的不可逆变形过程中, 有一部分能量转变为热能释放出来了, 但大部分的功以应变能的形式储藏于地壳岩层中。

在这过程中, 由于岩石的导热性很差, 温度的分布是不均匀的, 一方面加速局部的蠕变和塑性变形过程, 还使有关地区或地带的温度升高, 这就引起局部地区尤其是震源区附近的地温、水温、气温等的热异常。

巨大的构造力所引起的构造运动, 会引起地面的各种变形(水平的、垂直的、局部隆起与凹陷等)、海平面的升降和地倾斜的变化。在地应力还比较小时, 岩层中的压应力和剪应力, 可使土层、岩层尤其是上地壳岩层的孔隙、裂缝等缩小, 使土层和岩层中的含水量减少, 对于渗透性大的土层和岩层, 水分容易排出, 也容易压实。对于渗透性不好的岩层, 由于

水分的存在, 能承受一部分压力, 当水分逐渐渗出后, 变形随时间而增大, 出现延时的压实。岩层的变形可引起孔隙压的变化, 孔隙压的变化也可引起岩石的变形, 两者是彼此耦合在一起的。孔隙压的变化会迫使地下水流动, 引起地面的升降。由于泊桑比所引起的地面高程的变化是很小的。当应力进一步增大到一定程度后, 受压缩和剪切的岩层产生扩容, 出现显著的非弹性体积膨胀, 引起地面高程的变化。强烈地震前地应力的加强, 会导致地球内部物质的流动和密度的变化, 从而引起地球重力场的变化。

在地震过程中, 水平应力和水平运动处于主导地位, 由此可推算出在许多场合下有关地震的一系列有用的结果。但垂直力和上下差异运动也是重要的, 不可低估和忽视。有的地震是以上下差异运动为主而引起的。如1556年关中平原的8级地震, 1950年西藏察隅的8.5级地震等。至于由差异运动、垂直力与水平运动、水平力共同作用引起的地震就更普遍了。此外, 差异运动和垂直力作为加速或减缓地震过程的因素, 加大或减小震级的因素, 和作为临震时的触发因素等, 都必须加以考虑。因此在研究地震问题时, 不能象研究地质问题时那样强调水平应力和水平运动的主导性, 以致低估了垂直力和上下差异运动的影响。

如果还有由于地壳的褶皱和地幔对地壳的垂直力所引起的差异运动和弯曲运动, 那末高程变化就更显著了。新的裂隙(包括扩容裂隙和由于拉伸所引起的张裂隙)及由此而产生的附加的各向异性, 会引起介质的弹性模量、剪切模量、泊桑比的变化, 导致地震波波速的变化(横波的波速几乎不变), 纵波与横波的波速比将减小, 这是与地应力大小有关的。以后有水流入这个地区, 使这个比值回升, 裂缝注水可促进断层错动而产生地震, 所以比值回升就和地震有了联系。另外, 对于扩容的干裂隙来说, 其波速比的恢复, 也可以由于地应力水平的下降, 造成扩容裂隙的闭合。这两种说明都有其正确方面, 都是波速比恢复的重要原因, 不但有实验根据而且可作出理论上的解释。看来地应力下降造成的波速比的恢复, 是上下地壳中都起作用的因素, 范围也可以比较广, 而地下水的渗入, 可能是在上地壳中或其他部位地下水容易渗入的岩层中起主要作用的因素。

岩层承受较大应力时, 在受压方向的缩短和侧向膨胀(形成微裂隙), 孔隙率、含水量和温度的变化, 会引起岩石的电阻率、地电流和地磁的变化, 较大的加载率和应变率, 将使岩层发生更多的脆性破裂, 出现的大小裂隙, 进一步引起孔隙压力的变化, 引起深层浅层地下水的流动。由于物理和化学的因

素,在地下水中常带有热能、离子和放射性物质,这也会影响岩层的电阻率、地电流和地磁的变化,可导致某些电气仪表的突跳异常。在高围压下,当水进入裂隙时,会使波速比的异常恢复。而流体静压将使断层间的有效压力降低,水能使岩石的强度变小。断层泥中有水渗入后容易滑动,使断层间的摩擦力显著减小,发生稳定的或不稳定的滑移。断层的较大蠕动,可引起应力场的重大变化,在应力增加区,前兆现象加剧,而在应力减小区,则出现前兆现象的恢复或反向变化。有大量裂隙产生,有地下水向深层流动和高温因素,就会引起水分的急速汽化和其他复杂的物理化学过程,使深层地层中的放射性活动所产生的氦气上升,在地表的某些井水中氦的含量显著增加(在有些情况,地下水压力变化,通道改变,也可出现氦含量显著减少的情形)造成异常。在裂隙大量产生或在剪切变形过程中产生较大的雁行裂缝或者还有拉伸裂缝的情况下,深岩层中原有的水分或渗入的水分,在数百度高温和接近大气压的条件下,将有大量水分和其他液体汽化。随着岩层和土壤的孔隙、水井、河渠和洞穴等部位散逸至大气中,可出现井水发浑、变色、冒泡、发响声、水位大幅度上升等现象。带有电能、化学能和热能的各种地下气态物质,逸出地面,出现各种地气,形成低雾、低压、闷热、怪味、异常的云层、大风、大雨、雷电及日月气象异常等各种气象异常。在这阶段,由于构造应力场的继续作用,在深层地壳中,有一定的范围可进入塑性阶段,这时的应变能要比第一阶段大得多。由于应力和应变分布的不均匀和断层蠕变段的滑动,把它承受的部分应力,转加给断层的闭锁区,使其变形增加和加速,而远离闭锁段的地区,应力水平下降,震源附近的应力和应变却明显地增加了。由于构造运动和地质条件的不同,如地壳介质的不均匀性较大,上地壳3~5公里至十多公里深度处的岩层,由于围压较小、温度较低,岩层是脆性的,如果强度也较低,可能还存在地壳的向下弯曲,使上地壳的岩层受一种压应力,与水平应力场叠加后,应力增大,在某些部位就发生断裂,引起强度不同的小震,使应力进一步调整。由于应力水平的继续增高,上地壳中地震的数量增多,强度逐渐加大,出现填满性地震和有前震的主震型地震。另一种情况是,如震源附近和表层岩石都比较均匀而且完整,强度较大,可能还存在地壳的向上弯曲运动,使上地壳的岩层受一种拉伸应力,与水平应力场叠加后,使应力水平有所降低,因而在震源附近上地壳浅岩层中,不产生明显的地震,就是小震和微震也相当少,出现地震空白区。由于除了岩石的扩容以外,较大的裂隙不多,因而地下物质和能量不易上升至地

表,气象异常也比填满性地震和一般地震出现得晚,而在周围地区,岩层的强度和完整性如差一些,在蠕滑、粘滑或裂缝扩展处,可出现许多小震和前兆现象。这种地震空白区也就出现没有前震或前震很小很少很晚而震级却很大的主震型地震。其前兆现象与填满性地震不同。只要在未来的总断裂面上,错动力的总和还没有超过闭锁段和其他地段摩擦力的总抵抗力,那末地震还不会发生。这个阶段是量的急速变化阶段,前兆现象逐渐增加直至最为明显的阶段。

在这阶段,在震源区地壳中已有大量雁行裂缝和其他裂缝的情况下,临震前的大破裂,在切割这些裂缝时,会产生岩石的摩擦、破裂、碰撞和崩塌等,引起岩石的振动,发出震前的地声现象。有时有地声而没有大震,这是由于破裂,是局部的,规模还不大。如果是巨大断裂形成过程中的地声,那么地震就非常紧迫了。大地震临近前还会发生地光现象,地气可能是产生前兆地光的原因,造成化学发光、可燃气体发光、电离气体发光等。从地光发生的时间与地点来分析,都与地壳在地应力作用下,岩层大破裂、猛烈错动,地下携带各种能量的气态物质急速上升的过程有关,因而与地震有关。

在这阶段,当地壳受力后应变率较大时,对于上地幔这种开尔文固体,不但含有开尔文刚性常数的这一项受力,而且含有开尔文粘性常数这一项也参与受力,于是上地幔也参与承受了相当大的应力,所以在破裂以前,会出现短暂的平静阶段,在这短暂时间内,由于上地幔承受了相当大的一部分力量,而且有相当大的刚度和强度,所以上地壳的应力和变形可暂停增长,破裂也略有停顿,在短暂的时间以后,当应变率减小时,上地幔又把承担的应力和应变能释放出来,这时地壳承受不了,大破裂就来临了。

(8) 应变能大释放阶段:即弹性回跳阶段。当使断层错动的总力接近闭锁段强度总和的抵抗力时,就处于临界状态,这是最危险的时刻。地震的内因已经具备,一些力量不大的触发因素,如日月引力、气压变化、地壳的差异运动、地球自转速率的变化、电磁因素等外因,就能引起岩层突然的大断裂,发生强烈震动,造成大地震。在大地震时,地壳中积累的应变能就大量释放。

在大地震时巨大惯性力的作用下,地壳产生大量形变,山崩地裂,喷沙冒水,水库和河堤决口,桥梁破坏,铁路和公路交通中断,房屋倒塌,引起许多次生灾害,有时还会引起海啸,造成巨大灾难。

对于断层地震,横波占优势,因而极震区主要是横波造成破坏。在断裂传播的方向上,横波比其他方向强,而这方向正与断层的走向一致。地震波的传播

会受到地质构造的影响,因此地震可能沿某些断裂带发生特别强烈的破坏,而在某些地方的破坏则可能较小。

震源周围介质除深部密实岩层外,还有浅层或近于地表的未固结的沉积物。受地震的巨大惯性力后,当这些沉积物受拉时,地表容易开裂和下陷,受挤压时,地表可隆起或折叠。由于松散沉积物的孔隙中大都含有水,因此当受压时,孔隙变小,迫使水外流涌出地面,造成喷沙冒水,它是饱和砂土在地震力作用下突然丧失抗剪强度而出现的一种现象。主要从复盖层薄的地方,如井底、沟渠、河滩、地裂缝和农田等处喷出地面;当受拉时,空隙变大,地下水水位降低,地表则出现泉竭、井水下降、河流干涸等现象。山崩滑坡亦与惯性力的大小和方向有关。地震的破坏又与土壤条件及地下水的状况有关。

(4) **剩余应变能释放阶段:**它是应变能大释放以后产生的应力和应变的调整阶段。余震的能量,一部分是由断层错动弹性回跳后,在原孕震区广大地区剩余能量的再分配所提供的,另一重要的部分是地幔在临震前和地震时作为粘弹性体共同变形而吸收储藏起来的大量应变能,由于时间的推移和粘弹性过程,又逐步释放出来,造成的应变回跳来供给的。因此又使震源区附近的应力场和应变场在余震阶段作调整变化。余震的错动方向,可能和主震方向相同,这是一般的趋势和占多数的情况;也可以和主震方向相反,这应是局部的占少数的情况。这是不同的应力场和不同的弹性回跳程度所引起的不同的情况。余震和主震方向相反,属于回跳过头的情况。

在岩层经过巨大震动产生许多断裂和破碎以后,在震源区受力四象限分布中的受拉地区,由于围压的减小,岩层的摩擦力下降,地下水的渗入,孔隙压力的变化使有效压应力降低,岩层变弱等重要因素,使断裂和错动更易发生,产生较多的余震。不同的地震,其余震的分布规律是有差别的。余震的分布常出现在主震的两个节面上,和主震方向一致的那个节面容易发生余震,是容易理解的。而且一般强余震都发生在断裂带的端部,这是因为在这里又造成了闭锁,阻碍进一步的错动,大震后整个孕震区的剩余应变能经过调整以后,又有相当大的一部分集中在这里所引起的。另一个节面与上述的那个节面垂直,这可能是以拉伸为主引起的断裂所造成的。因为大断裂错动的牵引,也可能引起邻近地区应力的变化,出现震情。

总之,这是应变能大释放以后行将转入下一活动期的过渡阶段。余震活动的时期或数月或数年,由于粘弹性因素的作用,只有经过越来越长的时间,才能调整和积累起较大的能量,因此,一般的趋势是震级

和频度都随时间按指数或对数的形式而衰减,它是整个地震过程的尾声。

包括四个阶段的一个完整时期,大约是数百年至一、二千年,新构造运动较强的地区,如新疆和西藏,则为几十年。每一地区活动时期的长短,随各地构造运动的强度和速度而异。

## 地应力前兆

在地震的孕育发展过程中,地应力的加强和变化是发生地震的主导因素,也是产生其他地震前兆的重要因素,因此必须抓住地应力观测这个重要环节。地应力与构造运动直接有关,因此根据地质构造来设置地应力观测站,效果较好。

在地应力测量方法中,有的用应力解除法测量地应力的绝对值,这种测量费时费事,不宜作为地震前兆的观测手段。有的是测量岩层应变或岩层应力的相对值变化。通常测量岩层的应力要比测量应变或位移困难些。在远离震源的地区,岩层处于或接近于弹性状态,岩石的应力和应变,一般虽不呈现线性关系,但当应力较小时,可将应力和应变近似地看成具有线性关系,测得了应变的相对变化,也就测得了应力的相对变化。但是,即使是同一型号的仪器、装置和元件,因为所选的地理位置、地形地貌、岩石性质、地下水位和埋设条件、密封好坏、使用历史等不同,对于相同的应力或应变,其测得值往往不同,这就使各台站之间测得的应力或应变值,相互间不能在数量上作精确的比较,大体上只能表达本台站所在地区在地震过程中的相对变化。由于岩层在应力较大、时间相隔较长时,会产生流变,所以先后测得的数值,其单位值所对应的应力和应变也不是恒定的。这使测得的相对值又加上了一种相对的意义。埋设在土层中的土应力仪,这方面的影响就更大些。而埋设在岩层中的地应力仪,在一、二年内影响不大。因而可用地应力趋势异常的时间来估算震级。

在震源附近的深岩层可能已处于塑性状态,应力和应变已不成线性关系,不大的应力增量可引起很大的应变增量。在地表测得的地应力相对变化通常只有数公斤/厘米<sup>2</sup>,可是在深层地壳中的应力变化远比这个数值要大一至二个数量级。另外,在震源附近,岩层除原有断裂和裂隙外,还有因受压受剪扩容后产生的微裂缝,和因受拉、受剪(有一个方向会产生拉应力)所产生的拉伸裂缝,它要比扩容裂缝大得多。岩层尤其是浅岩层的不连续性更加突出,这时用连续介质力学来描述、计算岩层的力学过程,就不合适了。这时岩层已为不连续介质,其应变已不满足协调方程,其应力的分布与传递更不均匀了,已不能在界面

上承受拉应力,界面上的剪力靠岩石的啮合和摩擦来传递,压应力分布也不均匀,压碎和剪碎的情况也经常出现。岩层破碎后的不连续性,使应力和应变的分布和传递,在空间上时间上发生明显的不均匀性和不连续性。所以在地震前数十天至地震前一瞬间这个时期内,应力和应变值的起伏变化很大,出现临震前的突跳现象。这里谈的是力学上的原因,当然也有因震源区地应力变化所产生的地球磁场和电场(由震磁效应、地下水的流动及其他原因所引起)的变化引起的。它能使无线电中断、大气放电等,当然也能使观测台站的电气仪表和用电感法测量地应力的装置发生异常和突跳。另外,与地震前兆有关的热异常因素,也可能影响测量地应力的装置和仪表的观测数值。

不论用电感法、电容法、电阻法或其他方法(如激光测量),只要能近似地测出岩层或土层的应变或应力,间接或直接地都能作为测量地应力的手段,但要考虑长期使用的问题。

地壳的构造运动,水平运动和水平应力通常具有主导性。如仅有水平运动,不论是处于受拉、压、扭或其组合情况,在地壳的垂直剖面上,地表与深岩层的应变,都应基本相同。地表的应变,基本上反映了地壳深部的应变。如有差异运动,有弯曲、扭曲的变形存在,则地壳中的应变分布,上下不同,但也有一定的规律。地表测得的应变,可能大于或小于深部岩层的应变。无论如何,只要测得的应变是地震过程中地壳变形的真实反映,则经过深入研究,总有可能探索出与地震过程的本质联系,因而有参考价值。至于应力情况,由于上下地壳岩层的刚度不同,地表的沉积土和破碎岩层的平均刚度很低,因此在地表、上下地壳中的应力分布很不均匀,应力值相差非常悬殊。同样,由于孔隙和裂隙、裂缝的存在,应力和应变的分布也是不连续的。

通常测量土应力是在离地面数公尺到十几公尺的土层中进行。测量地应力是在数十至一、二百公尺深的岩层中进行。测得的是沉积土和风化岩层中的应力和应变。水平相隔一定距离的两点,由地应力产生的相对位移,因有大量裂隙、孔隙的存在,使这相对位移中的相当大的一部分,能化为裂隙和孔隙间的位移。适当增加测量仪器的埋设深度,例如增加到200米以上,使裂隙的数量和影响减小,能增加较完整岩层中测得的应变值,使地应力测量仪器所反映的空间范围扩大,地壳深部的力学过程能得到较好的监视和反映,这是突出的优点。当然大幅度增加埋设深度也是有困难的。

地应力台站的设置,不要选在岩层坡度大的地

方,或小范围的鼓包上,这种地方的水平应力要比大面积坡度平缓处岩层的水平应力低。前者的水平形变比较自由,因而应力和应变就不大了。如果在陡立的沟壑、山崖和断层的边缘,则测得水平应力和应变也会大大降低。

土应力仪的构造和埋设条件都较简单,可大量普及。其精度虽不及地应力仪,但数量多,如位置选择得好,尽量减少干扰,对震情仍有重要参考价值。唐山地震经验表明,土应力仪在当地进行短临预报中效果较好。

既然一种方法测得的应变小于整个地壳断面的平均应变,则一定可以有另外的方法,使测得的应变大于平均应变。大家知道,断层或裂隙间的位移(与之对应的应变)是比较大的。在横跨断层的两点间,由距离变化折算所得的应变量和由高程度化折算所得的倾斜量,都比任一侧较完整岩层的应变量和倾斜量要大,这给测量带来了方便。此外,在断层间的破碎带中,安置适当的测量应力和应变的装置,亦可获得良好的效果。断层和破碎带中测得的应力、应变和位移,往往与断层间的粘滑、蠕变、预位移等有关。用蠕变仪可测定断层两侧间的水平和垂直位移,已得较好的效果。但要按断层的分布安排测量装置,以取得地区应力场的资料,想要有较好的效果,仍需做很多工作。

用趋势异常和速率异常预报震时间,用趋势异常的时间来预报震级,将趋势异常和速率异常算得的主应力方向,用交汇法确定和预报震中,在我国都已通过实践取得了成功的经验。

地应力趋势异常表示台站所在位置表层岩石中的应力变化,一般说来,它可反映出地应力的变化过程。先在大面积上逐步增强,然后由于部分断层一次或多次的蠕变和粘滑,发生应力的调整 and 变化,震源区的应力逐步地或突然地增强了,而离震源较远或处于应力调整段附近的台站,其应力水平下降或恢复了,这是地震过程中的重大变化,它预示着离大震只有几个月或更短的时间,进入短期预报阶段了。而短临异常的出现,表示震源区小裂缝增多,而且大的雁行裂缝也正在或即将出现,岩层的破碎加剧。不连续的岩块在传递应力时,将发生时间和空间上强烈的不均匀性和不连续性,出现突跳现象。由于在短期受力时,在应变率很大的情况,下地壳和上地幔都可呈现出相当大的强度和刚度,承受相当数量的应力,因而整个断面上不至于立即破裂,经过数天到一、二十天的应力调整后,全断面上尤其是上地壳中岩层的应力和强度都已达临界状态,那末一有触发因素就引起大震。

趋势异常的时间,与应力场的孕育变化过程有关。只有相当大的应力场,调整和集中所需的时间才较长。此外,只有闭锁段较长和较强,才能有较大的震源体积,在较长的时间内积累起更多的应变能。因此趋势异常的时间的对数值与震级有关,可用来预报震级。较长的趋势异常时间将对应较大的地震。不能因为别处发生了一个略为大一一点的地震,就认为对应了、交待了,以致漏报大震或把震级预报得过低了。短临异常所反映的是震源处应力和应变的局部激烈变化,对预报发震的时间有较好的参考价值。

据受力情况分析,只有远离震源和断层蠕变段附近的台站,才有趋势异常的恢复问题,在震源附近的台站,其应力总是处于相当大的数值,在震前没有趋势异常恢复的问题,而突跳异常则最为明显。

由于趋势异常中可能包括若干孕震区应力场(由若干震源所引起)的影响,以及岩层中的初始应力,蠕变与松弛的影响,所取的正常和异常的基准线(这对判别震前应力的状态至关重要,它直接关系着三要素的预报)都有关系。而速率异常是趋势异常中前后一天的日差值,就能更多地排除上述影响。因为几个孕震区变化最剧烈的时间,是不大可能重合的,而且积累的误差可以消除,因而通常能取得比用趋势异常算得的主应力交汇的结果要好。根据相同的理由亦可采用趋势异常中变化幅度最大的几十小时或几天的差值,计算其主应力方向来交汇震中,它的变化幅度比日差值大,因而可算得精确些。它可作为日差值速率异常的一种补充,用它算得的主应力方向交汇所得的震中,可更准确些。

同时有几个震源,它们对地应力台站在空间上的影响,对于均匀介质,大致与距离的平方成反比,与震源的大小、孕育的震级成正比,此外与所受的力的方位、应变率和应力对时间的变化率有关,与有无巨大断裂带阻隔等地质构造也有关。

在临震前的一段时间里,震源处岩层应力的急速变化,使下地壳和上地幔岩层在应力传递过程中显现的弹性因素起主导作用,因为应力可通过上地幔来传递,因此上地壳中的断层和裂缝等因素对应力传递的影响不大,于是可得震源处应力的变化传得很远,离震源数千公里处都可有反映。即速率异常的信息可在很远的台站测得,而较近台站有时速率异常反而不大明显(可用断裂和断层的影响和力的传递途径来说明)。而趋势异常的数值,由于其应力的变化率和应变率都没有速率异常(指突跳变化)时那么大,下地壳和上地幔的粘性流动因素在起作用,因此不能通过上地幔而传得很远,而在近震源处,如果没有断层阻隔,受力方位也合适的话,那么反应一定是明显的。

在临震前的一段时间内,既然应力在急剧变化,定时观测往往会漏测许多重要的信息,因此需要有自动连续的观测和记录装置。据说日平均值可减小温度的影响,但平均后数值变小也是缺点。

用主应力方向交汇震中,已有许多成功的实例,但也不是非常可靠的。这是因为现有方法的理论基础是闭锁段受力而蠕变段不受力,这是用均匀各向同性介质平面问题的力学模型所确定的方法。实际上问题要复杂得多,它是带有一定程度各向异性的不均匀不完全连续的介质的接近于半无限空间的力学问题。不完全是弹性力学问题,而是弹塑性和粘弹性的力学问题。即使近似地采用平面问题的力学模型,由于闭锁段以外的调整段仍有摩擦力存在,其方向是阻碍断层的错动的,这种摩擦力按单位长度来说,虽比闭锁段小得多,但在断层全长的总和亦是可观的数值,且分布是不均匀的,随着蠕滑和粘滑的进行,摩擦力时大时小,所以作主应力交汇时,应注意这一趋向。用主应力交汇,越接近发震,闭锁段所受的力越大,与整个断层面的摩擦力相比所占的比重越大,因此就比较准。在交汇震中时是以平面问题为依据的,没有考虑孕震区往往存在着的差异运动和弯曲、扭曲、剪切等因素的影响,所以交汇所得的结果有时也不够准确。

在用主应力方向交汇震中的问题中,并不是所有台站测得的主应力都有同等的效果。在两向压应力区最大主应力方向指向震中,在两向拉应力区则最大拉应力方向指向震中。中间有一个过渡区,应力数值最小,两主应力方向都不指向震中。对于用速率异常所得的主应力方向交汇震中,亦有同样的问题。这就要求适当增加地应力的观测台站,地理位置分布得合理,有一定的密度,有较高的精度和可靠性,这样对地震预报的效果可更好。

现有的电感法测地应力装置,在肯定其应用价值的同时,还应指出它受温度、天气、电场、磁场、仪器等的影响较大,有时悬空元件和受力元件同步变化,原因还不甚清楚,可能是电磁和地热等因素在起作用。

临震前电感式地应力观测台站仪表瞬时值的大幅度跳动,电感值不稳等,除由岩石破裂、地应力和应变急剧变化所引起的直接原因外,还和地下水的流动,或岩层破裂、摩擦、运动过程中伴生的地电场和地磁场强烈变化、地热的变化有关。它反映了临震前地下岩层中接近大断裂大错动前的某些物理、力学的变化过程。这也是一个重要的征兆。出现大规模测值突跳异常,意味着地震临近了。

现在常用的电感式应力仪,其灵敏度较低,测得

的应变量为 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ 。为了满足精度的需要,有必要将测得的应变量提高到 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ ,以适应地震预报的需要。体积式应变仪,精度可达 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ ,对于记录地震信息,亦很重要。将激光技术用于测量位移和应变,可得很好的结果。

## 关于地震的触发问题

外因触发大地震,有水触发、磁触发、电触发和力触发等。在力触发中,有日月引力、大气压力、水库库容压力和地球自转速率的变化等所引起的力。这些外力在地壳内所引起的平均应力计算起来不大(约为 $10^4$ 达因/厘米<sup>2</sup>),可是它的分布很不均匀,因而影响增大了。由于地壳已裂成大小不同的板块,在地表和深部有巨大的断裂,在垂直方向受力引起的弯曲、扭曲和剪切变形后,在断层端部或闭锁段端部,由于应力集中所引起的应力变化,或由于塑性变形、应变集中所引起的应变变化,摩擦力的变化,岩层强度的变化等,则显著地增大了。对于已处于临界状态的岩层,在内因已充分具备的情况下,不大的触发因素(外因),可引起连锁反应,导致岩层的破裂而产生大地震。

总的说来,触发因素是使岩层所受的应力与岩层强度之间的矛盾激化,有的是通过增加应力而触发的,有的是使岩层的强度变弱而触发的,也有兼影响两者而触发的。

只有在震源处的矛盾转化的条件已具备的情况下,触发因素才起作用。对于不同的情况,同一种类的触发因素,也可出现不同的结果。有的是向下的分布力触发地震,有的则是向上的分布力触发地震,这与地壳的构造运动、应力状况等有关,而上述两种情况如所受的力反向,则不但不能作为触发因素,可能还起着使地震推迟发生,使震级增大的作用。对于水平应力的变化,亦有类似情况。

由于月球在近地点比在远地点要近 $1/9$ ,引潮力相应增大39%。最突出的触发因素是朔望兼近地点区,其次为上、下弦兼近、远地点的中间区。华北平原的较大地震,70%左右与朔望和上、下弦有关。而在其他地区,与朔望的相关性又很小。这可能是引潮力只对某些不稳定地区才有触发作用。

统计表明,在北京附近百余公里的范围内,六级以上的地震,常发生在太阳活动11年周期的谷段,即谷年及其前后一年的期间。76年唐山地震恰为1668年郟城8.5级大震和1679年三河8级大震的第26和27周期年。这种相关性,在注意到它与地震的触发有关外,更应研究它与地震成因之间的关系。

关于旱涝、尤其是震前1~3年的大旱和大涝,作为负荷的变化,可使地壳产生不均匀的垂直运动,影响局部地区的稳定性,因而可能与地震有关。它与下地壳和上地幔的粘弹性因素有关,因而需要滞后一、二年左右的时间。

地极的移动和地球自转速率的变化,可影响地球内部物质的流动和应力分布,因而和地震的触发有联系。例如炉霍两次七级以上地震都是在地球自转速率减慢时发生的。1920年海原8.5级大地震是在地球自转速率减慢到极值后向正常值返回的过程中发生的。

由此看来,触发的因素很多,作用机理也较复杂。因此不能只注意个别因素的触发作用。只有发生大震的内因具备以后,这些外因才有可能起触发和诱发的作用,而在绝大多数情况下,当内因还未具备时,这些“触发因素”是起不到触发作用的。当内因还不到最成熟时,则需要较大的触发力,或触发因素较长时间的延续作用,才能触发地震。

## 关于地震预报问题

周总理早就指出:“地震是有前兆的,是可以预测的,可以预防的”。

一个震级较大的构造地震,由于构造运动所引起的地球应力场、地球形变场、地球物理场和地球化学场的变化,会在几十年、几年、几个月的时间内,在不同程度和范围存在多种地震前兆,发生由量变到质变的过程。研究地震的全过程,研究它与其他事物的相互联系,研究各种地震前兆,是可以逐步弄清地震的规律的,因而地震是可以预报的。但是,影响地震的因素很多,既有内因又有外因,处于不断地变化之中,表现形态很不相同。既有力学问题,又有地球物理、地球化学和天文、气象等方面的问题,相当复杂。而地壳深部和上地幔岩层的真实情况,目前还无法详细地探明,还不能弄清地震的规律性,因而地震的发生还表现出某种程度的偶然性。因此目前要精确预报地震的三要素,即时间、地点和震级,还有困难。严密观测和认真识别地震前兆是预报地震的核心问题。

必须强调,在地震的孕育发展过程中,地应力的加强和变化是发生地震的主导因素,也是产生其他地震前兆的重要因素。因此必须抓住地应力观测这个重要环节,并与其他前兆联系起来,进行综合预报,则效果较好。

一般说来,震源体积越大,则震级越大,异常范围越大;震源较深,对地表的影响较小,异常范围也较小。对于深层震源,由于软流层的阻隔作用,可能

不易观测到前兆异常。

有地震必定有前兆，而有“前兆”则不一定有地震。有地震必定有前兆，是指大范围、全过程和多种观测手段而言的，并不是指某一局部地点或台站、地震过程的某一阶段和某一种观测手段而言的。由于断层断裂的分布及整个孕震区地质构造的不均匀性和因素的复杂性，所以在震前，地震前兆并不是到处出现，也不是同时达到高潮的。在分布上可以是孤立分散的，也可以是集中的，在时间上可以有先后的，可以是平向变化也可以出现反向变化变化。如地震异常属于真异常，是地震预报的基础，有的是假异常，这种所谓“前兆”实在并不是由地震因素引起的，而是由其他干扰因素引起的，当然不能用来预报地震。也有地震异常与干扰因素合并出现的情况，使观测所得的结果变得复杂了。分析和排除干扰的问题，是一件艰苦、困难的工作，需要摸索和研究。强震以前，有的台站可观测到大量的明显的前兆现象，而有的台站都可能没有观测到异常现象，这可能是由于地质构造（如断层阻隔）受力方位、距离远近、土壤条件、地下水位、地温及其他因素干扰所造成的。在这里，若干台站观测到的异常现象如果精确可靠，就不能因有的台站异常小而少去否定或忽视前者所反映的本质意义。

一般说来，地震前兆的幅度大、频度高、持续时间长、分布范围广，则震级就可能大。离震中区越近或在未来地震的断层上，震源又较浅，则前兆明显，幅度大，持续时间也长，离震源越远或震源较深则反之。但地应力速率异常有时能反映数千公里以外的信息，而在近处有些观测手段没有明显异常的情况也是有的。此外，各种前兆异常的数值与测定的方向、位置、深度和仪器的精度等都有关系，如选择得好，就能取得好的观测效果，有利于预报。因此要着眼于全局，用大量的精确可靠的观测手段来监视震情，掌握全盘情况，综合分析、判断，而不是用单一手段分别发布预报。

填空性和填满性地震，其前兆的形态、分布、出现先后、强度与频度等差别很大。表现在前震的有无、大小和多少，地下水、动物异常等出现的早晚。唐山地震属于前震不明显的类型，动物异常的70~90%以上出现在临震前一天，震前短时间内的突发性异常也较多。而海城地震属于有前震的类型，动物异常的时间就提前。

填满性地震，在未来的震中附近，各种前兆现象明显，小震逐渐增多，震级逐渐加大，“小震闹大震

到”，容易引起人们的重视，受到广大群众和各种群测群防手段的监视，对这种地震的预报，相对来说容易些。而填空性地震，由于震源区地下岩层强度高、较均匀完整等原因，在震中区各种前兆现象与四周相比，不够明显，前震震级小而少，不易引起人们的注意，“小震闹大震到”也不灵了，要想从震中附近获得比较明显、直观的临震信息也比较难，一旦进入临震期，各种前兆明显出现后，时间紧迫，大地震也很快来到了。现在广泛地认为，在已知的地震带内，地震空白区是未来强震最可能发生的值得注意的地区。

填空性地震，往往震级很大，前兆现象又不如填满性地震那样明显，群测群防单位较难掌握和预报。因此，对于可能发生填空性强震的地区，应严加监视，作出预报。

地震是由许多因素决定的，是很复杂的。在目前要正确预报地震三要素，没有虚报、错报和漏报是不大可能的。但对一个大地震来说，它的孕震时间相当长，从地应力、波速比、地形变异异常的时间、范围和幅度，以及地震的填空填满特征，测震学方面的数据，地震地质、历史资料和各种地震前兆的大小多少等，都对预报震级有重要的参考价值。一般说来，较小的地震能量，可能通过蠕变和变形而释放，因而不发生或仅发生相当小的地震。而一个对应于相当大的震级（例如七级以上）的能量，是不可能通过蠕变和高程变化释放的，即使释放掉75%的能量，震级也不会减小半级。当然其发震序列还不知道（需要严密监视地应力的变化），但震级应当是比较确定，要求预报震级的误差小于半级左右是合理的。至于发震的时间和地点，变化的因素要多些。在断裂带或闭锁段的两端，哪一处先发震，作出正确的预报要困难些，因为地应力和岩层强度的变化，触发因素等，都难于把握得很清楚，有随机性，因此出现声东击西的情况是可能的。

地震预报涉及许多学科，如地震地质、地震学、地震史、地球物理学、地球化学、岩石力学、固体物理学、大气物理学，地下水文学、天体物理学、动物生理学以及现代测试技术等，要从多方面进行研究协作。

研究地震发生的力学原因，震源区的应力分布和变化过程，各种地震波的传播机制，各种因素对地应力和岩层强度的影响，地应力加强过程所产生的形变和断裂，与其他前兆变化的关系等，也是地震预报和地震控制所必须研究的重要环节。