

张应力在地震过程中的作用

龚 鸿 庆

(天津市地震局)

摘 要

本文根据断裂力学的基本结论,地质学对断裂形成过程的认识以及一部分地震事实,讨论了张应力在地震断裂形成过程中的作用。本文认为:张应力在地震过程中起着十分积极的作用。这是对目前一般认为地震是由剪切破坏形成的观点的必要补充。

按地震成因的断层说,一般认为除了某些地区(如洋脊)的地震是由张应力作用形成的之外,浅源构造地震是由于地壳中岩体在应力作用下,岩体被剪切破坏的结果。无可非议,地震过程中剪切应力起着十分明显的作用。地壳形变测量结果,宏观破坏等资料均证明了剪切破坏的存在。因此,从美国雷德提出地震成因的弹性回跳理论到目前研究震源机制的各种力学模型,实验室的模拟试验,都是以地震是岩石被剪切破坏的结果的观点为基础的。这样剪切应力在地震过程中的作用已被肯定下来了。然而这里也还存在一些问题,例如:在地震过程中除了剪切应力作用外,是否还存在其它性质的应力。本文试图说明拉张应力在地震过程中的作用。希望能引起地震工作者的重视。

一、断裂力学中的张开型裂纹

断裂力学是近年来迅速发展起来的新学科,它主要研究带有宏观裂纹材料的脆性断破行为。当前国内外已经开始在地震学中引进断裂力学理论。应用断裂力学观点来认识地震过程原则上可以认为:浅源构造地震是岩体中裂纹(断裂,裂隙等)在应力作用下,由稳态扩展达到失稳扩展的结果。在这里强调了裂纹——这一宏观缺陷在材料脆性断破过程中的重要性。

在断裂力学中,根据作用力的方式将裂纹分为三类。如图1图2所示,有张开型(I型),滑开型(II型)和撕开型(III型)。这三种裂纹分别近似于地质学和地震学中的张裂断层,走向滑动断层和倾向滑动断层。显然在地震学中对浅源地震的解释一般是指II型或III型裂纹。至于I型裂纹在地震过程中的作用没有引起重视。

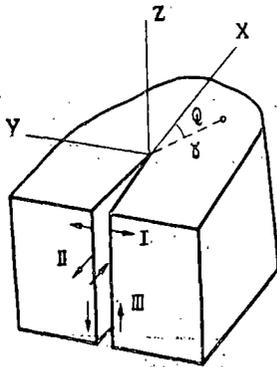


图 1

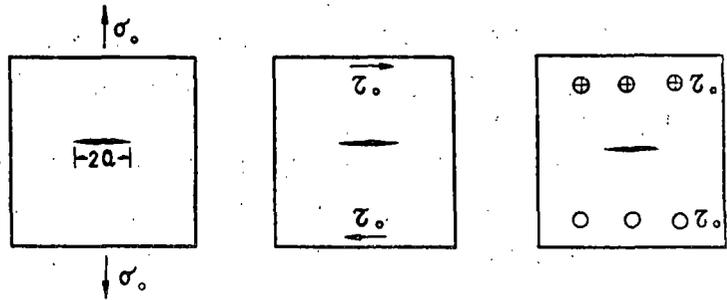


图 2

然而，在断裂力学的发展过程中，张开型裂纹占有极重要的地位。大量实际情况表明张开型裂纹是现实材料中最常见，最危险的裂纹，是材料低应力断裂的主要原因。因此张开型裂纹是近年来断裂力学理论和实验研究的主体。张开型裂纹之所以成为最危险的裂纹，其原因可能有以下两方面：

(1) 由材料力学可知，应力的作用方式有拉伸、压缩、剪切、扭转等。而在现实各种结构中，许多部位则大量地形成拉伸应力。

(2) 同一材料在拉伸、压缩、剪切、扭转等不同作用方式的应力作用下，材料的抗破坏强度是不同的。其中以材料在拉伸应力作用下的抗破坏强度为最小。在工程岩石力学中一般以单轴抗压强度的 5~10% 来估计抗拉强度。对于一些中等强度的岩石类材料的抗拉强度仅为几十巴，强度极高的岩石其抗拉强度才超过一百巴。同时材料的抗剪切强度也远比抗拉强度大。因此材料是最容易被拉伸应力破坏。

关于地壳内部产生拉张应力的问题，我们认为，在我国地壳内水平挤压应力的作用下，在一些地质构造部位也可以产生拉张应力。这方面我们可以从以下两方面来讨论。

1. 一般来说，大范围内的区域压应力是比较稳定的，但由于地质构造的复杂性，可以导致不同部位出现不同性质的应力。例如在地质力学中认为山字型构造的孤顶部位即可出现张应力，又如在水平压应力和垂直力的共同作用下，地壳可以出现隆起或褶皱，在隆起和褶皱的顶部也会产生张应力。当然这种张应力往往与剪切应力共同作用岩体，因此纯 I 裂纹在地壳中是极少的。

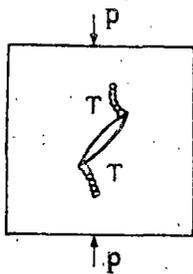


图 3 压应力作用下
裂纹前缘最大张应力
作用点位置

2. 即使是一条压扭性的断层，根据大量的实验结果和理论分析都证明在断层（裂纹）的端部存在着应力集中区，在该应力集中区内也存在张应力区。W. F. Brace 和 E. G. Bomobolakis 应用追踪最大张应力的方法，证实了在裂缝长轴端点附近存在一个张性应力区，其最大张应力点 T 位于裂缝长轴端点附近，并偏在压缩荷载一侧。（图 3）。

由以上可知，岩体在大范围的区域压应力作用下，一些局部地区将出现次一级的应力场，在这个局部应力场中可以经常出现张应力，即使是压扭性断层，在其端部也存在明显的张应力区。

二、地质学对断裂形成的认识

在地壳中存在着各种不同类型的断裂,断裂是如何形成的也是地质学关心的问题。一般地讲,构造断裂是地壳中岩体受力由形变达到破裂阶段的结果。根据对匀质岩石试样的压缩试验结果,断裂形成过程可描述如下〔4〕:

1.因岩石试样内部不可避免地存在微观缺陷(诸如夹杂,微孔,晶界,相间界等),当岩石受力超过岩石的屈服强度时,可以出现晶格位错,引起塑性形变,形成X形共轭交叉网状分布的潜势剪切断裂网络(吕德氏纹)。

见图4。

2.应力继续加强,形变进一步发展,当剪切应力超过材料的抗剪强度,在吕德氏纹的基础上形成X型交叉断裂系。从理论上讲,最大剪应力与主压应力成 45° 角,实际上由于内摩擦的存在,两组剪裂面的交角常是小于 90° 的锐角,其方向指向挤压方向。这在材料力学中被称为哈特曼定律。

3.断裂系进一步发展,当局部地区出现引张条件时,便在垂直主张应力方向上交替沿用先成的两组剪裂面而形成锯齿状的张性断裂。

根据上述过程,在地质学中一般认为,在挤压的条件下,断裂的形成是由剪切开始,最后由拉张完成的。这一观点也强调张应力在断裂形成过程中的作用。特别是在后期,剪切断层面上出现拉张应力是十分危险的,容易造成岩体的断破。

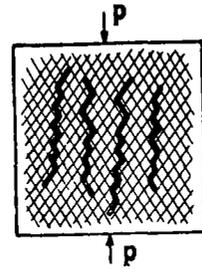


图4 泥巴模拟实验挤压后所表现的X型断裂网格

三、张应力在地震过程中作用的事实

断裂力学中认为,张开型裂纹是最常见,最危险的裂纹。地质学也承认断裂形成过程中拉张应力的作用。我们又简要分析了,在区域水平挤压应力作用下地壳中也可在一定部位形成张应力区。鉴于以往在地震学中认为地震过程是剪切运动,忽视了张应力的作用。本文试图应用一些地震事实来讨论地震过程中张应力的作用,也就是试图说明地震主断裂具有张开型裂纹性质。

1.震后宏观调查资料 地震造成地表破坏的宏观现象可以推测地震发生的某些力学性质。在强震后对震区宏观调查结果表明,与地震主断裂有关的地裂缝,除了普遍存在水平位错和垂直位错之外,几乎所有地裂缝都存在水平张裂。这些水平张裂在量级上不如剪切位移量大,但毕竟还是说明了地震断裂面形成过程中有张应力的作用。地震主断裂是剪切和张裂共同作用下形成的,是一种 I + II + III 的复杂混合裂纹。

2.余震分布特征 强震后的余震分布是有规律的,通过对强震后余震分布的统计,可以发现余震大部份分布在由P波初动符号所决定的张应力区域内。关于余震发生在引张区内的原因,比较合理的解释是余震断层面上原有的应力场和主震发生后在该区形成的张应力相互叠加共同作用的结果。

3.地壳形变资料 在区域水平压应力场的作用下,在地壳中的某些部位上可以大量出现

张应力。此外，地壳中的岩体在垂直力的作用下，也可以形成引张区。这些张应力的作用结果以一定方式反映到地壳形变资料中来，因此分析地壳形变资料可以获知张应力的存在与否。

郭增建等同志曾讨论了垂直力在地震过程中的作用问题。并列举了一系列地震事实。在地震过程中垂直力的影响是存在的〔5〕。我们认为：垂直力影响地震过程的方式，除了产生垂直剪切之外，主要通过形成拉张应力来影响地震过程。现在我们参照文献〔5〕简要地讨论张应力在地震过程中的作用。

1)1966年2月5日云南东川地震、1969年7月26日广东阳江地震、1970年5月22日河北丰南地震，震前由地形变资料证明震中区都出现了明显的隆起区。这种隆起区可以由垂直力引起，也可以是水平压应力作用的结果。但无论何种原因，均可使隆起区的拱曲顶部出现较高的拉张应力（图5）。因此，这些发生在隆起区内的地震，拉张应力的作用是明显的。

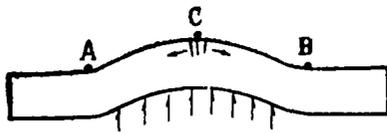


图 5 隆起区的张应力



图 6 垂直剪切时过渡区内的张应力

2)1966年3月8日河北省邢台地震、1975年2月4日辽宁省海城地震，震前由地壳形变资料可知，震中区外围也存在明显的隆起区。这类地震没有发生在隆起区内，而是发生在隆起区的边缘或稍远的地点，这可能是在隆起所引起的水平牵拉（拉张）应力积极参与下发生的。

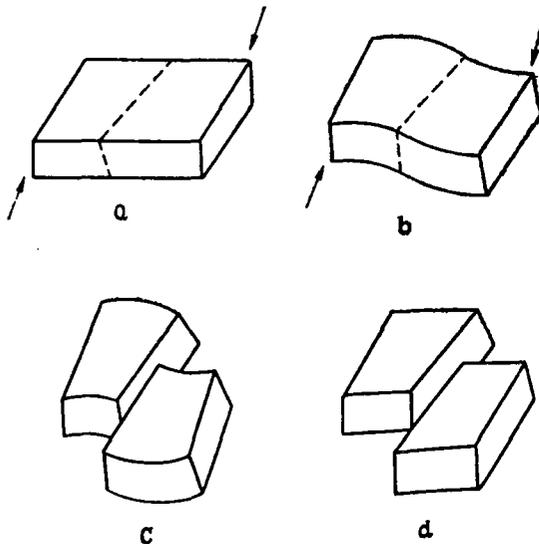


图 7 唐山地震地壳形变模式

3)1967年3月27日河北省河间地震、1970年1月5日云南省通海地震，震前震中区以及外围地区都没有观测到隆起区。但震中区的垂直差异运动十分剧烈。如图6所示，在垂直剪切的情况下，剪切力偶可能有一个过渡区。在过渡区内岩体裂纹并不发育，因此可以出现具有一定倾角的张应力，从而影响地震过程。

4)1976年7月28日河北省唐山地震震区的形变资料经国家地震局地震测量大队分析有如下结果〔6〕：在震中附近地震最大相对垂直位移约为

1.0米，最大水平位移约为2.5米，并伴有不大的张开位移。因此唐山地震断裂是张扭性正断层（I + II + III型混合裂纹）。虽然张性位移比水平和垂直位移小得多，但考虑到岩石的抗拉强度远小于抗剪、抗压强度，较小的张应力就可导致岩石断破。所以唐山地震也是在张应力积极作用下形成的（图7）。

以上形变资料均说明了张应力在地震过程中是一个不可忽视的积极因素。这里顺便说明一点,有些地震发生在隆起区的拱曲顶部引张区,有的地震发生在受隆起牵拉的引张区内。其原因可能与岩体内原有裂纹的分布有关。按断裂力学观点认为,裂纹的失稳扩展条件,除了应力大小的条件外,还有裂纹长度大小的条件。如果隆起区,原有裂纹规模较大,应力又易于集中,则地震发生在隆起区的可能性较大。否则,发震的可能地点将在水平牵拉引张区内。

4. 人为地震 注水地震和水库地震都可以认为是一种人为地震。人为地震的成因条件比一般构造地震明确,对人为地震的研究将有助于对一般构造地震的认识。现在我们根据人为地震的特征来讨论张应力在人为地震形成过程中的作用。

1) 注水地震 近年来国内外相继发现了向深井内高压注水可以引起群发性地震。显然注水引起地震的直接原因是岩体内部孔隙流体压力的快速增加。而孔隙流体压力的增加的作用力方式是张裂性质的。注高压水引起地震的事实说明了未注水前岩体内孔隙(裂纹)处于稳定状态。注入高压水后,在原应力场中加入了张应力,导致裂纹前缘的应力强度因子增加,最后出现失稳扩展,形成地震。由此可见,注水地震是在张应力出现后发生的。张应力在注水地震的形成过程中是关键因素。

2) 水库地震 这里我们应用1962年3月19日广东省新丰江水库地震的资料来讨论张应力在水库地震过程中的积极作用。

关于水库地震的成因目前有两种观点,即库水渗透诱发和水库荷载作用。文献〔7〕认为新丰江水库地震主要是由库水渗透诱发的。

笔者认为(见图8)库水荷载实际是一种向下的垂直力。由于库基存在断裂,在介质不连续的情况下,水压应力场是无法用弹性力学中的布希涅斯克问题解给出。库水荷载作为向下的垂直力作用于库基,则在水库边缘地区引起张应力区。新丰江水库地震大部份

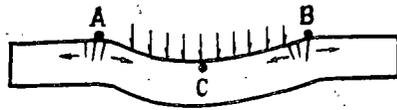


图8 水库荷载作用示意图

分布在水库边缘的引张区内。这是张应力作用的结果。其次由文献〔7〕的研究结果表明,新丰江6.1级主震发生在北西向构造带上。北西向断裂带规模比北东向构造带小得多,在地面上仅能见到长几米-几十米扭裂隙,呈不均匀地密集成带展布,但其力学性质确是张扭性的,与水库荷载引起的张应力合成,导致主震发生。水库荷载引起的张应力开始时地壳浅部较大,地震应先发生在浅部,随着浅部岩体的断裂形成,张应力向下发展,地震震源深度应有向深处发展的现象。新丰江水库地震确实有震源向深处发展的现象,这也是张应力作用的体现。新丰江水库地震开始时以走滑型地震为主,但后期变为以倾滑型为主。水准测量结果也说明了水库荷载的作用是明显的。由以上分析,我们认为新丰江水库地震的形成过程中水库荷载作用是明显的,而水库荷载的作用是通过垂直力引起水库边缘的张应力来实现的。

通过上述分析我们认为,张应力在地震过程中是一个不可忽视的因素。由于张应力的作用使原来的剪切型断裂(Ⅱ型裂纹)改变为张扭性断裂(Ⅰ+Ⅱ型裂纹)。此时一方面改变了断裂端部的应力分布状态,使裂纹前缘的应力强度因子 K 得到增加。另一方面张应力的作用改变了岩石的抗破坏强度,由原来的抗剪切破坏强度改变为抗拉伸破坏强度。抗拉强度要比抗剪切强度小得多,因此,张应力作用是岩石抗破坏强度下降的原因。顺便指出,过去对

关于注水诱发地震的原因，一般认为是注水可以增强孔隙流体压力，使有效围压（外部压力和内部孔隙流体压力之差）有所降低，而在剪切应力作用下，岩石的抗破坏强度依赖于有效围压，有效围压降低，岩石的抗破坏强度也下降，使岩石破坏（地震）。事实上有效围压的降低是孔隙流体压力（张应力）增加引起的，特别是当孔隙流体压力超过外部压力时，断裂具有张裂性质，此时岩石破坏强度降低的原因显然是张应力作用。

四、结 束 语

本文列举了一系列地震事实，讨论了张应力在地震过程中的作用，我们认为地震是由剪切应力和张应力共同作用的结果，强调张应力的作用是对地震力学过程认识的必要补充。由此推论，在地壳中具有张扭性质的断裂（裂纹）或者出现可以产生张应力的因素是比较容易发生地震的。这一推论对地震预报将有参考意义。本文仅对张应力在地震过程中的作用作了一般描述，许多问题还有待今后进一步工作。

（本文1979年6月8日收到）

参 考 文 献

- [1]北京钢铁研究院金属物理室，工程断裂力学，上册，1977。
- [2]K.G斯塔格，O.C.晋基维茨，工程实用岩石力学，1978。
- [3]陈培善等，从断裂力学观点研究地震的破裂过程和地震预报，地球物理学报，20，3，1977。
- [4]张文佑等，“断块”与“板块”，中国科学，2，1978。
- [5]郭增建等，从水平力和垂直力的相互作用讨论我国境内地震的孕育和发生，地球物理学报，20，3，1977。
- [6]国家地震局测量大队，唐山7.8级地震的地壳形变，资料汇编，1977。
- [7]王妙月等，新丰江水库地震的震源机制及其成因初步探讨，中国科学，1，1976。

THE ROLE OF THE STRETCHING STRESS IN THE EARTHQUAKE PROCESS

Gong Hong-qing

(The Seismological Bureau of Tianjin)

Abstract

This paper, based on the basic conclusions of the rupture mechanics, ~~on~~ a geological understanding of the rupture formation process as well as on some factual accounts of earthquakes, discusses the role of the stretching stress ^{tensile} during the process of seismic rupture formation. It holds that an active role is played by the stretching stress ^{tensile} in the earthquake process. This serves as a necessary supplement to the present point of view that earthquakes result from shearing break.