# 大震孕震物理过程的初步探讨

## 林长佑

### (兰州地震研究所)

野外观测和岩石物理实验的结果是地震孕震物理过程研究的基础。本文在前人工作的基础上,由观测到的震区内的大地电磁测深结果出发,也考虑到近年来国内外所进行的一些岩石物理实验的结果,对我国大陆内大地震孕震物理过程进行初步的深讨。

## (-)

用大地电磁测深法对震区进行研究得到了如下几个方面的重要结果[1,2]:

在我国南北地震带北段的地壳中部普遍存在一异常低阻层,其埋藏深度大致为地下
20公里左右,电阻率为数个欧姆米或低于数个欧姆米。

由已报导过的高温高压下各种岩石导电性的实验结果和地球上部岩石导电机制的讨论可 以看出<sup>(8)</sup>,地壳中部异常低阻层最为合理的解释是,在地壳中部比较合理的温度和压力条 件下发生了某些矿物的热脱水反应<sup>(4、5、6、)</sup>,导致了该层内导电机制由半导体离子导电向电 解质导电的转变。热脱水反应的得以进行要求该处有适当的高温,即较高的"地幔热流"<sup>(7)</sup>。 很多实验都证明了岩石脱水后极限强度的极大降低<sup>(8)</sup>,因此,地震带的地壳中部 异常低阻 层是以含水和力学上的被削弱为特征的。

2) 在所研究的地震带内,上地幔的第一个低阻层出现在70—80公里深处,其电阻率也 为数个欧姆米。

上地幔第一个低阻层可以解释为该处岩石处于接近熔化或部分熔化的状态<sup>(9、10)</sup>,对于 地热异常区特别是如此<sup>(7、11)</sup>。该层是以低的粘滞度、低的极限强度即高的"流变性"为特 征的。

3) 在大熊孕震区,震前较长时间发现地壳中部异常低阻层的顶层的电导率升高5-10 倍。

 4) 在大混孕震区内,观测到了地下介质电性非均匀各向异性主轴随时间的系统性的 变化。

5) 在大震的临震前几天在距震中相当距离(约150公里)的测点上观测到了自然电场 两分量的大幅度的、同步的、成比例的变化。

其中的后三点是对76年8月松潘——平武两次7.2级大震观测获得的结果。

所有这些观测结果促使我们去提出一个大震孕震物理过程的设想,以将上述观测结果及

#### 第一卷 第三期

其它地震前兆现象与已获得的一些岩石物理实验的结果有机地联系起来。

(二)

这里认为发生在大陆内的大震概括起来可能具有如下的孕震物理过程, 地震带内的地球 上部岩层受到一水平挤压应力作用,由于地震带岩层垂向的非均匀结构造成了地壳中部异常 低阻层表面附近应力的某种集中,在水平非均匀性造成的应力集中的地段,地壳中部异常低 阻层表面附近的局部应力水平可能很高,这就在其上表面附近形成了少量向上发展的裂隙, 异常低阻层内的水随即进入这些裂隙,如此扩展到一定的体积就形成了所谓的孕震体,孔隙 水的作用极大地降低了孕震体内岩石的极限强度,从而极大地提高了其中作用的相对应力水 平(应力与该岩层极限强度的比),这就导致了在整个孕震体内大规模的扩容,经过一定时 间后,异常低阻层内的水将以扩散的方式进入扩容后的孕震体,包含于孕震体内的未来的地 震断裂带邻近的狭窄带区域是以弱介质为特征的,因而在扩容过程中形成了一个高裂隙密度 的微裂群区,这种情形导致了整个孕震体内应力分布的变化,其特点是有利于在地震断裂带 内沿带的方向大量生长新的微裂隙,而孕震体其余部分已张开的裂隙趋于闭合,则孕震体内 的水将向地震断裂带附近集中,由于地震断裂带两端各方面条件的差异,其中的某一端首先 比较大规模的破坏,水则大量地、迅速地进入该端,由于水的作用,使得沿地震断裂带的裂 隙迅速串通,造成地震断层的解体或部分解体,随即地 震也就发生了。

下面比较详细地阐述这一物理过程的发展。

地球上部岩层水平非均匀性对应力分布的影响是讨 论得很广泛的问题。在地震带内应力集中能量得以大量 积累的地段则是未来可能发生大震的地方<sup>[12,13]</sup>。本文 仅讨论在这种应力集中的地段上部岩层结构的垂向非均 匀性对地震发展的影响。为此我们考虑地球上部岩层在 一水平挤压力作用下的应力分布特点。

图一给出了在我国南北地震带北段用大地电磁测深 法获得的典型的地下电性分层剖面。上地幔第一个低阻 层顶面以上的部分我们称为地球上部岩层。由于上地幔 第一个低阻层的高"流变性"和解藕作用,可以认为构造

OKM. 沉积氣熱~10.2m —5KM 上部结晶地亮 102 -\_104 Am -20Km MILLER AMULEI 下部地亮 M面不清 ---10<sup>-</sup>-10<sup>3</sup> S.m 上地慢 70---80 上地强第一个低阻虽 цт 图一 我国南北地震带北段典型 的地下电性分层剖面

(出现于约20公里附近的低阻层 为地壳中部异常低阻层)

运动水平挤压应力仅作用于地球上部岩层之内。地球上部岩层可以简化为一脆性的上部地壳 和一脆性向延性过渡的"下部地壳",大体以地壳中部异常低阻层为分界。在这种垂向结构条 件下,水平挤压应力沿垂向的分布应满足下述两个条件:下部地壳向下至地球上部岩层底部 应力应逐渐减少为零;上部地壳向上至地表"自由表面"应力亦应有所减少。这造成了地壳中 部较高的应力水平。我们将这种情形示意性地表示于图二中。

另一方面,地壳中部异常低阻层做为岩层中的被削弱了的带,必然会造成其表面附近应 力的某种集中。由于地壳中部异常低阻层在地震带内形成一条带分布,则在沿着挤压应力的 横切面内相应于一平面内被削弱了的一个孔的效应。其结果将导致在孔的边界附近出现较大 的差应力<sup>[14]</sup>。 因此, 震区内地壳中部异常低阻层表面附近较高的应力水平是应力沿垂向分布的一个重 要特点。

地壳中部异常低阻层的顶板岩层通常具有10<sup>2</sup>—10<sup>4</sup>欧姆米的电阻率, 解释为其中含有不 甚连通的少量的孔隙和很少量的水。事实上, 在该处几千巴的围压和数百度的高温下, 岩石



应力的分布示意图

的孔隙度应该是很低的,孔隙多为气泡形成的细孔 孔隙,孔隙间连通性极差。孔隙中的水是在岩层形 成过程中自然残存的,数量是很少的。考虑到有效 压强定律( $P_e = P_e - \gamma P_p$ ),可以推测,在该部分岩 层中,孔隙压对有效围压的影响可能是不显著的。

当地震带内的孕震段受到足够高的 应力作用时,则地壳中部异常低阻层顶部附近达到了相当高的应力水平,在其顶板岩层内造成了一些逐渐向上发展的微裂隙。异常低阻层内的水很快地进入这些

裂隙。这种过程向上发展到一定程度就形成了具有一定厚度的地震孕震体。尽管这些由局部 应力集中造成的裂隙数量很少,整个孕震体内孔隙度的增加是不大的,但这些缝状裂隙的出

现造成了岩层中孔隙间良好的连通,异常低阻层内 水的源源不断供给大大提高了孔隙中水的相对含 量。有效孔隙压γP,的提高降低了有效围压,从而 降低了岩石的极限强度(图3)。深部活化水与岩 石骨架的化学作用也降低了岩石的极限强度。

脆性岩石破裂实验的研究表明<sup>(15、162</sup>,在岩石 受力破裂过程中会发生非弹性的体积膨胀(图四), 这种扩容的物理实质是岩石内出现随时间增长的微 裂隙(图五)。对于各种不同的岩石及各种不同的 围压条件,微裂隙的大规模出现仅决定于相对应力 水平,即都大致出现于应力达到破坏应力<sup>1</sup>/2—/3时。 由于在应力为破坏应力的50%—90%的宽广应力范 围内,微裂隙在孕震体内出现的位置完全是随机 的,而裂隙的取向优势地沿主压应力方向排列<sup>(17)</sup>,



则扩容将在整个孕震体内进行,外部的水来不及补给孕震体,显示出了扩容效应,同时也表现出了各种前兆现象的各向异性<sup>(18)</sup>。由于受到扩容硬化的阻碍,孕震体内的大部分区域扩容仅能达到一定的程度。而孕震体的扩容则导致了周围介质对孕震体作用应力的加强。松平大震大范围内水氡长趋势异常出现的时间与波速异常明显出现的时间的大体一致就说明了这一问题<sup>(19)</sup>。

异常低阻层内的水以扩散的方式进入孕震体导致了如波速异常这样的前兆现象的恢复, 同时导致了明显的电阻率异常的出现,其特点是在孕震体相应的部位出现了一个电阻率大幅 度降低的各向异性低阻层。这就解释了用大地电磁测深法获得的震前的异常低阻层顶层的电 性变化,同时也构成了地震区内地下电性非均匀各向异性主轴方向变化的第一阶段。水饱和花 岗岩受力破坏过程中电阻率的大幅度减少(图六)证明了上述推断的合理性<sup>(20)</sup>。这种情形将造



图 四 脆性岩石破裂以前的应力--轴应变,应力--体应变图

đ





成大地电磁测深视电阻率完全可以觉察的百分之几十的变化(图七)。[21]

未来的地震断裂带是指包含于孕震体内的一个比较狭窄的削弱带,也可以理解为一段 "锁住"的断层及其邻近的地带。与周围孕震体介质相比具有较低的极限强度,因而,在其 中在扩容期内将产生更为大量的微裂隙。高裂隙密度区在力学上可以用一低模量区加以等 效,地震断裂带做为一低模量区出现于孕震体内造成了整个孕履体内应力分布的改变<sup>(22)</sup>。



这种应力分布改变对地震断裂带及孕震体的其余部分造成了截然不同的两种影响:在断裂带 内将有利于大量生长沿断裂带方向的微裂隙;而孕震体的其余部分微裂隙则趋于闭合。孕促 体的这种发展过程将造成地震断裂带和周围孕震体之间极大的孔隙压力差,再加上孕震体内 沿主压应力方向的较高的渗透性,孕震体内的一些水可以较快地向地震断裂带附近集中(与 前一步的水由异常低阻层向孕震体内的扩散相比而言)。这就造成了观测到的孕震体电性各 向异性变化的第二个阶段,同时孕震体内的电阻也要逐渐升高。

由于地震断裂带两端的应力条件和介质条件的差别,其中的某一端可能将首先产生大规 模的破坏,大量的水随即迅速进入该端。这样沿着断裂带方向裂隙间的串通 传播 也 就开始 了。应该强调指出的是,在这一裂隙串通传播过程中水可能起着极其重要的促进作用:一方 面表面活化物质和带电离子组成的薄膜穿入微裂隙在其中产生了巨大的劈开压强<sup>(23)</sup>;另一方 面孔隙压降低了岩石的有效围压,从而也降低了该处岩石的破裂强度。水的上述作用不仅为 实验室中的实验所证明,也为野外的注水诱发地震的实验所证明<sup>(24、25)</sup>。

水在地震断裂带内的快速渗流导致了观测到的自然电场的临震前兆变化。当水比较快速 地穿过岩石骨架时,可能被吸附或带走某种符号的带电离子,从而在地震断层面内形成了一 个随时间加强的电隅极子,这就造成了在其周围比较广大的区域内随时间加强的地电场。

当水致裂隙串通由地震断裂带的一端传播到另一端时,这就意味着地震断层面的解体或 部分解体,与此同时地震断层面内增加的流体孔隙压降低了断层面上的正压力。于是,沿着 地震断层面最终的剪切破裂,即地震也就发生了。这时,整个孕震体内发生了相当的应力 降,在断裂带以外的孕震区内,由应力造成的裂隙将进一步闭合<sup>[26,27]</sup>。孕震体内的电阻率 又有进一步的升高。这就解释了观测到的震后的电阻率变化。

# (三)

这个模式不仅解释了震前电性异常方面的前兆现象。而且也予示了已经观测到的其它一 些前兆现象及其变化规律。

这个模式从大的方面讲属于国外流行的扩容—流体扩散模式的 范 畴<sup>[28, 29, 30]</sup>。但是它 也具有自己的一些特点,并在一定程度上克服了该模式存在的一些困难。

1.这个模式强调了地震带内上部岩层垂向非均匀构造对地震孕育的作用,在一定程度上 指出了扩容可能发生在那里的问题。

2.这个模式中,地震带内普遍存在的地壳中部异常低阻层不仅为流体扩散提供了足够数量的水,解决了扩容--流体扩散中水的来源问题,而且为解释我国大陆内发生得最多、震源 深度在10-30公里范围的大震提供了一种可能的机制。

3.在我们这个模式里特别强调了水在地震孕育发展过程中的作用,同时也特别强调了孕 震体内介质物性的变化对地震孕育发展过程的影响,因而放松了外部对孕震体应力作用的要求,特别是不要求在比较短的时间内外部应力作用的某种急剧的增长。

4.本模式阐明了地震孕育发展的各个阶段和孕震体内介质各向异性的发展过程。这就予示了各种前兆现象的起落现象及其发展变化特征。特别是本模式所强调的临震前地震断裂带内的急剧变化可能引起一系列的临震前兆异常,捕捉这些地震临震前兆现象对于地震予报和予防无疑是十分重要的。

这里对大震孕震物理过程所做的仅是很初步的探讨,提到的一些概念 基本 上 还是定性 的,利用的一些资料也并不十分充分。就模式的本身而言也可能还存在着 这 样 或 那样的困 难。这些都有待于做进一步的研究。

#### 参 考 资 料

1.兰州地震大队大地电磁测深组,中国南北地震带北段地壳和上地幔的电性特征,地球物理学报, Vol.19, №1, P<sub>2</sub>, 1976。

2.兰州地震大队大地电磁测深组,地震孕育发生过程中震源区附近地下介质电性变化特征,地震研究,№3, P<sub>15</sub>, 1977。(油印本)

3.兰州地震大队大地电磁测深组,大地电磁测深法, 1974, P143-173。

4.М.Н.Бердичевский, В.П.Борисова等, Аномалия Электропроводности Земной коры в якутии, Цзв. АН.,СССР. Физика Земли, № 10,Р43, 1969

5.B.J.Mitchell and M.Landisman, Electrical and Seismic properties of the Earth's Crust in the Southwestern Great Plains of the U.S.A.Geophysics, Vol.36, No2,  $P_{363}$ , 1971,

6.Peter J.Wyllie, A Discussion of Water in the Crust, The Struction and Physical Properties of the Earth's Crust, geophysical monograph 14, American Geophysical Union, Washington, D.C.P<sub>257</sub>, 1971.

7.David D.Blackwell, The Thermal Structure of the Continental Crust (同上), Pieg.

8.C.B.Raleigh and M.S.Paterson, Experimental Diformation of Serpentinite and its Tectonic Implications, Journal of Geophysical Research, Vol. 70, №16, P<sub>3865</sub>, 1965.

9.Don L.Anderson and Charles Sammis, Partial melting in the Upper Mantle, Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol.3, P<sub>41</sub>, 1970

10.I.B.Lambert' and P.J.Wyllie, Melting in the Deep Crust and Upper Mantle and the Nature of the low Velocity layer, (同上),  $P_{316}$ .

11.A.Adam, Some Results of the Magnetotelluric Survey in Carpathian Basin and its Complex Interpretation, Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, Vol.22, No1-2, P223, 1970

12.郭增建等, 震源孕震模式的初步讨论, 地球物理学报, Vol. 16, №3, 1973.

13. 牛志仁、苏刚, 震源孕育的追赶模式, 地球物理学报, Vol.19, №3, P<sub>179</sub>, 1976. 14. Γ. Η. Савип, 孔附近的应力集中, 卢鼎霍译, 科学出版社, 1958.

15.W.F.Brace, B.W.Paulding Jr., C.Scholz, Dilatancy in the Fracture of Crystalline Rocks Journal of Geophysical Research, Vol.71, №16, P<sub>3030</sub>, 1966.

16.CH.Scholz, Microfracturing and Inelastic Deformation of Rock in Compression, Journal of Geophysical Research, Vol.73, №4, P<sub>1617</sub>, 1968.

17.C.H.Scholz, Experimental Study of the Fracturing Process in Brittle Rock, Journal of Geophysical Research, Vol.73, No4,  $P_{1447}$ , 1968.

18. Chi-yuen Wang, Earthquake Prediction and Oriented Microcracks in Rock, Nature, Vol.251, No5474, P405, 1974. 19.兰州地震大队予报室水化组,松潘平武地震前水氡变化特征,地震研究,№2, P<sub>14</sub>, 1978.(油印本)

20.W.F.Brace, A.S.Orange, Electrical Resistivity Changes in Saturated Rocks during Fracture and Frictional Sliding, Journal of Geophysical Research, Vol.73, No4, P<sub>1433</sub>, 1968.

21.I.K.Raddy, R.J.Phillips, J.H.Whitcomb, D.M.Cole and R.A.Tyalor Monitoring of time Dependent Electrical Resistivity By Magnetotelluric, Journal of Geomagnetism and Geoelecricity, Vol.28, No2, P105, 1976.

22.B.T.Brady, Theory of Earthquakes, I.A.Scale Indepedent Theory of Rock Failure, Pure and Appled Geophysics, Vol.112, No4, P701, 1974.

23. N.Г.Киссин, Вода Под Землей, изд. «Моска», Р<sub>186</sub>.1976,

24.C. B. Raleigh, J.H. Healy, J.D. Bredehoeft, An Experiment in Earthquake Contral at Rangely, Calorado, Science, Vol. 191, No4233, P<sub>1230</sub>, 1976.

25. Masakazu Ohtake, Seismic Activity Induced by Injection at matsushiro, Japan, Journal of Physics of the Earth, Vol.22, No1, P163, 1974.

26.C.H.Scholz and Kranz, Notes on Dilatancy, Journal of Geophysical Research, Vol.79, №14, P<sub>2182</sub>, 1974.

27. Mark D. Zoback and James D. Byerlee, The Effect of Cyclic Differential Stress on Dilatancy in Westerly Granite Under uniaxial and Triaxial Condition, Journal of Geophysical Research, Vol. 80, No11, P1526, 1975.

28. Amos nur, Dilatancy, Pore Fluids, and Premonitory Variations of ts/tp travel times, Bull.Scism.Soc.Am., Vol.62, №5, P<sub>1217</sub>, 1972.

29.C. H. Scholz, L. R. Sykes, Y.P. Aggarwal, Earthquake Prediction: A Physical Basis, Science, Vol. 181, No4102, P<sub>803</sub>, 1973.

30.蜀水,震源应力场岩石膨胀性和水的扩散作用,地球物理学报, Vol.19, №2, P, 4, 1976.