

55.2533
03398

震源物理

[苏] M. A. 萨多夫斯基 主编

许同春 耿乃光 等译 陈运泰 金跃 等校



地震出版社

震 源 物 理

[苏] M. A. 萨多夫斯基 主编

许同春 耿乃光 等译

陈运泰 金 跃 等校

地 震 出 版 社

1 9 8 2

内 容 简 介

“震源物理”是苏联科学院院士M. A. 萨多夫斯基主编的一本论文集。文集以破裂物理学的统一观点研究和总结了地震孕育过程以及孕震期间地震震源区内介质物理状态的变化等问题。文集内容反映了苏联科学院地球物理研究所震源物理与地震前兆研究室开展的理论研究、室内和野外实验工作。

本书读者对象是地球物理、地质工作者以及从事材料破裂物理学研究的人员。

震 源 物 理

[苏] M. A. 萨多夫斯基 主编

许同春 耿乃光 等译

陈运泰 金 跃 等校

地震出版社出版

北京复兴路63号

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

850×1168 1/32 $7\frac{3}{4}$ 印张 208千字

1982年5月第一版 1982年5月第一次印刷

印数 1—2,000

统一书号：13180·137 定价：0.97元

目 录

序言	M. A. 萨多夫斯基 (1)
震源物理基础和地震预报	B. И. 米亚奇金等 (4)

第一部分 破裂的理论问题

压缩荷载下的脆性断裂力学.....	Б. В. 科斯特罗夫等 (28)
孕育地震震源的统计理论基础	B. И. 米亚奇金等 (44)
论地震震源区岩体的长期强度	С. И. 祖布科夫等 (57)

第二部分 破裂的实验室研究

适用于地震物理破裂过程的实验室研究现状	Г. А. 索波列夫等 (69)
单个宏观裂纹孕育区超声声发射.....	О. Г. 沙米娜等 (93)
双轴压缩下有机玻璃准塑性流动对纵波速度影响的研究	З. И. 斯塔霍夫斯卡娅等 (122)
单轴压缩下样品破坏过程的研究.....	С. Д. 维诺格拉多夫 (127)
岩石样品变形和破坏过程中各种物理参数的变化	И. С. 托马谢夫斯卡娅 (135)
脱水过程对高温高压下岩石样品物理参数的影响	З. И. 帕尔霍缅科等 (146)
变形和破坏过程中矿物的带电和发光现象	Э. И. 帕尔霍缅科等 (157)

第三部分 野外研究方法和某些结果

探测地震震源区的仪器和工作方法.....	B. И. 米亚奇金等 (166)
----------------------	---------------------

堪察加震源带测深精度的估计和某些结果		В. И. 米亚奇金等 (170)
地震射线穿过地震震源区传播的数值模拟		Г. С. 库什尼尔等 (184)
地震活动区机械电现象的研究		Г. А. 索波列夫等 (193)
构造破裂带里超声波速度的变化		О. И. 西拉耶娃等 (231)

序 言

本文集收集了探讨地震孕育问题以及孕震期间未来震源周围区域物质状态变化问题的论文。这些问题不但远未最后解决，甚至在不同作者的论文中对这些问题的提法有时也是根本不同的。

文集作者无意评论现今有关地震震源性质的各种观点，而仅限于介绍苏联科学院地球物理研究所近年来完成的研究成果。从事这些工作的是一批对地震机制的看法极为接近（如果不是完全一样的话）而结合在一起的研究人员。根据破裂物理学的一些著名原理，他们认为：震源形成过程就是杂乱无章地分布于形变岩体内的大量裂纹(缺陷)的增长过程。由于这些裂纹的相互作用，使得产生裂纹的区域形成一个狭窄地带，最后在这个地带发生了导致地震的主断裂。必须着重指出，他们从这一观点出发，研究了主断裂形成区内岩石的总形变，从而成功地编制出了与已获得的地震周期概念一致的综合形变速度图，并解释了一些已观测到的地震长期前兆和短期前兆的性质。

诚然，断言用所发现的与自然界相似的过程来证明地球物理研究所提出的地震物理概念的正确性，目前为时尚早。不过，把这些概念当作工作假设来运用或许会促进理论、室内和野外实验这些相互联系的研究工作的计划性。我们认为，本文集发表的研究成果在某种程度上可以证明这种工作方法是富有成效的。

文集分三部分，分别叙述理论、实验和野外研究工作。

理论部分有三篇论文。其中一篇是B. B. 科斯特罗夫和B. H. 弗里德曼写的，这是压缩条件下发生破坏的理论的开创性工作。这篇论文研究了均匀初始应力场中裂纹准静态扩展的平面问题、而初始裂纹是有摩擦作用的闭合裂纹。用他们得到的结果就有可

能在今后定量研究具有给定裂纹分布的物体的破坏过程，计算在解释地震前兆时一些国外论文中评价很高的膨胀量。B. И. 米亚奇金和 O. Д. 沃叶沃达的论文研究了不均匀介质中破坏过程的统计描述及其用于孕震研究的可能性问题。第一部分的最末一篇论文是 C. И. 祖布科夫和米亚奇金写的，文中分析和运用长期强度定律解释前兆现象出现时间的合理性，并确立了地震能量和所释放的应力值之间的经验关系式。

第二部分论述实验研究，从 Г. А. 索波列夫和 O. Г. 沙米娜的综述性文章开始。文章分析了压缩下岩石和材料破坏的重要实验研究结果。作者选择了这些对于认识地震孕育物理过程极需解决的关键问题，并且论述了地球物理研究所实验研究计划的根据。后几篇论文介绍了按上述计划作的一些研究工作的成果。首先应提及的是沙米娜等人的论文。在这篇论文中，谈到了他们在获得可控剪切破坏方面的成功实验。通过这些实验可以观测剪切型主裂纹扩展前材料物理性质的变化，解释以前已发现的一系列地震前兆现象。在 C. Д. 维诺格拉多夫的论文中描述的地震过程的发展与实验室样品破坏过程的发展之间的相似性也是很有意义的。在这篇论文中，还对这两种过程的相似性作了一些解释。确切地说，这些解释与其说是阐明了问题的本质，不如说是突出了问题的重要性。И. С. 托马谢夫斯卡娅和 Э. И. 帕尔霍缅科等人的几篇论文报道了与岩石形变和破坏相伴出现的许多现象。对于诸如地震时的天空发光现象、岩石电学性质等效应的性质都作了研究。证实了在岩石水化和脱水时，可能出现岩体中的应力重新分布等现象。

第三部分叙述了野外研究工作。这一部分详细介绍了在堪察加地震区开展的地震探测和机械电现象的研究工作。其中有 O. И. 西拉耶娃等人关于运用超声探测构造破碎表层的论文。看来，这篇论文开辟了研究震源的新途径。索波列夫对于千岛-堪察加地区强震关系的见解颇有意义，有一些独到之处。

如前所述，本文集并不奢望对震源物理学问题的现状作一完整的评述。它也没有把地球物理研究所开展的所有工作概括罄尽。文集的目的仅仅是反映已为事实所证明不仅在苏联，而且在外国已被公认的那些具有方向性的最重要问题。

完全有可能过不多久就得对本书提及的资料作重要补充。由于在濒临地震的地区研究地壳电导率取得成果，这种对震源过程的见解可能会有重大发展。在未来地震震中区开展大地测量的观测方法也是大有希望的。我们还觉得，对于未来地震震中区里剩余形变和位移现象的研究迄今仍注意不够，这是极不当的。倘若对剩余现象的数量和特性没有清楚的认识，未必能解决与地震震源的能源有关的问题。最后，考虑到裂纹中有从外部渗入或在脱水过程中析出的水，故不能排除对两相介质中形成裂纹的发展过程开展研究的必要性。但所有这些工作都是将来要做的。现在我们只希望本书所介绍的材料能对从事地震震源研究的学者有所裨益。

M. A. 萨多夫斯基
(陈运泰 译 靳君达 校)

震源物理基础和地震预报

В. И. 米亚奇金 Б. В. 科斯特罗夫

Г. А. 索波列夫 О. Г. 沙米娜

对震源的兴趣是和地震学的出现一起产生的。虽然里德早在1910年就提出了地震和地球物质破坏相联系的假说，但是，后来地震学发展却基本上是沿着地球的构造研究这个方向发展的。这不仅是因为研究地球内部对于一般科学和国民经济具有重大意义，而且还因为介质结构和地震波传播规律的知识是研究震源的必要前提。此外，如果没有固体破裂物理学的充分发展，就不可能研究作为介质破坏的震源。众所周知，断裂力学是在本世纪二十年代中期产生的，然而其蓬勃发展则是从二次世界大战后对构件利用的要求开始的，并一直持续至今。

由于地震学的发展，特别是三十年代发现了节线后，才进一步开展了震源研究。长期以来，震源的研究工作与破裂物理学发展无关，即与破裂物理学平行发展，可以说这种研究是通过建立震源“地震学模式”的方式开展的，主要是根据观测资料，而不是根据表达得很明确的破坏过程的物理概念。众所周知，拜尔利、克依利斯-博罗克、维京斯卡娅、本多弘吉等人的经典著作是以地震观测获得地震信息为基础。由维京斯卡娅及其同事们建立的确定震源主应力轴方向的方法尤其值得注意。同时，苏联地球物理研究所的许多地震学家继续发展了甘布尔采夫院士在地震物理学研究方面的思想。他们在地震活动区和矿井这种天然实验室里工作，这样就有可能获得非常重要的地震的各种物理性质的资料，如各个地震及其总体的动力学过程、时空联系、介质性质的变化等(Ю. В. 里兹尼钦科, И. Д. 涅尔谢索夫, С. Д. 维诺

格拉多夫, 米亚奇金, 沙米娜等)。关于地壳中断裂形成和发展的地质学与构造物理学的概念(В. В. 别洛乌索夫, М. В. 格佐夫斯基, К. И. 库兹涅佐娃)以及岩体中的地震过程的概念(Ю. В. 里兹尼钦科)也有进一步的发展。

六十年代中期, 在断裂力学和地震学某些成果的基础上, 开始了震源理论的探索(诺波夫、伯里奇、沃希、В. В. 斯特罗夫)。由于广泛探索地震预报, 需要更多更深刻的地震孕育过程的物理知识。因此, 在许多研究机构中, 认真扩充了有明显“地震学倾向”的物质破裂物理学的室内实验队伍, 并且, 注意力主要放在剪切破坏条件下微裂隙和宏观裂隙的形成过程, 以及伴随此过程的样品与模型物理-力学性质的变化过程上。

近年来, 野外预报研究的最重要成果是: 在地球上各个不同地区中发现的前兆(至少是一些前兆), 具有与地震能量有关的时间过程^[1-3]。

根据断裂力学的成就, 尤其是根据专门的地震学室内试验, 现在已经能够定性地说明所获得的野外结果, 并且发现了进行预测研究的新的可能性。作者认为, 总的来说, 按照破裂理论和震源概念的发展水平、现代室内实验和野外观测结果, 已经可以开始建立地震孕育过程的理论。对于解决现代地球物理学的一系列重要问题, 如强震的时间预报, 地震对地面和建筑物的实际影响的预测和发展地震区划新方法等与国民经济有关的问题, 这个理论是很有必要的。

震源物理的基本概念

在地震学文献中, “震源”的概念是非常不同的。有的是指具有相应坐标的某一点(点源), 有的是指源, 有的则是指由余震位置勾划出的区域(体积)。

按现代的资料, 构造地震震源是在剪切构造形变过程中积累起来的应力作用下发生的地球物质连续的动态(快速)断裂。这

种断裂是沿着某些表面发生的。研究断裂的发展和愈合的动态和准静态过程是震源物理的课题。实际上，震源物理学就是研究地球内部条件下岩体（地球物质）破裂的物理学。显而易见，假如不弄清单断裂起始和停止条件，就无法了解断裂快速传播过程的震源，并从物理上对它进行描述。因此，震源物理学便超出地震发生的范围，自然分成三个主要部分（见表）：

表 震 源 物 理 学

孕育（月）	动态断裂（秒）	剩余现象（月）
时空中的应力状态	宏观断裂失稳	在时空中应力重新分配
小缺陷的积累和发展	断裂的张开和地震波的辐射	次生断裂出现
宏观断裂的形成	断裂的停止	宏观断裂的愈合

1. 地震孕育的物理学；
2. 地震发生的物理学；
3. 剩余现象的物理学。

笠原庆一^[4]最先对地震过程提出过类似的划分法。他把地震过程划分为震前、主断裂和震后阶段。格佐夫斯基^[19]也把构造断裂的形成划分为类似的阶段。稍后，M. B. 拉茨和 C. H. 切尔内绍夫^[6]按照格佐夫斯基的划分采用了现代物理学的方法，直接提出了断裂形成的相应阶段，并且对整个变形体内的均匀破裂、裂隙的密度加大和合并以及断裂的形成和生长等作了研究（文献 5 第 76 页）。

格佐夫斯基把第一和第二阶段合并成一个，在其后面补充了正在形成的断裂的缓慢生长阶段。

在我们的划分法中，尽管整体均匀裂开的阶段对于了解地震的原因很重要，但在震源物理的形式上可以不予研究。

地震的孕育是从某个体积中的裂隙达到“临界”密度后，裂隙的大小和数量呈雪崩式增长而开始，以在未来主断裂面上形成若干个“启动”裂隙而告终。这个过程使介质的有效（整体）的物理-力学性质发生变化，使地震能量分布具有独特的时空进程，从而为预报地震的地点、时间和强度提供了可能性。

主干断裂的形成、启动、快速传播和停止都属于地震发生的物理学范围。把这个阶段和后面的断裂生长阶段（如格佐夫斯基所做的那样）区分开来，对地震学来说是重要的，因为在已知范围内，同一断裂的起始和停止条件乃是了解孕育过程和剩余现象的关键。

研究剩余现象（主断裂的继续生长、分叉和愈合）可以迅速地有效地积累地震知识。因此，可把它划为单独的、专门研究领域。

破裂过程的基本概念

目前，已经知道有三种和加载特征有关的破裂现象：恒定加载时的破裂（快速破坏）；重复加载作用下的破裂（疲劳）；长期加载影响下的破裂（缓慢破裂，长期强度）。

经典的强度理论建立在下述概念上：为了发生快速破裂，必须对物质施加一定大小的应力，这个应力值是物质的一个特征量，即强度极限或暂态阻抗。对于给定物质的疲劳破坏或缓慢破坏，加载的循环次数和作用时间是表示此过程的特征量。若假定发生形变的介质是连续和均匀的，便无法研究和物质结构有关的破坏的物理机制。固体物理的发展已考虑到理想晶体点阵物质模型的强度理论，但是这就产生了下述矛盾：理论强度比实际强度高好几个数量级。格里菲斯^[6]、依尔文^[7]、奥罗万^[8]等，都曾企图解决这一矛盾。

物体的破坏与其中存在和产生的大量微裂隙有关。如果储存在介质中的弹性能的减少量足以补偿表面能的增加量，裂隙便要

传播（生长）。根据有效单位表面能 $\gamma_{\text{有效}}$ （裂纹生长的阻力）的概念， $\gamma_{\text{有效}}$ 就是为形成单位面积新的表面在裂隙端部附近所有不可逆的机械能的耗损（特别是塑性形变）。

孤立(单个)裂纹

孤立裂纹的运动条件是：

$$G = 2 \gamma_{\text{有效}}, \quad (1)$$

式中， G 是推动裂纹扩展的力。

在均匀应力场的均匀弹性介质中，裂纹扩展的力与应力以及裂纹的大小有关：

$$G = c \sigma^2 l / 2 \mu, \quad (2)$$

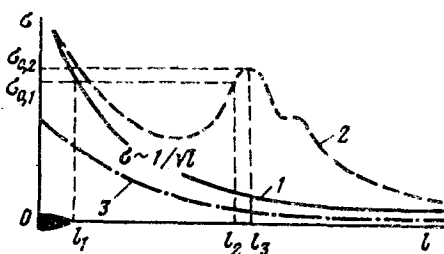


图 1 极限应力和断裂长度的关系

式中， c 是和裂纹形状与加载方式有关的无量纲系数， μ 是介质的剪切模量。由 (1) 和 (2) 式可以求得孤立裂纹临界荷载的表达式：

$$\sigma = \sqrt{\frac{4 \mu \gamma_{\text{有效}}}{c l}}$$

图 1 的曲线表示临界荷载和裂纹长度的关系。当荷载增加到 $\sigma_{0,1}$ 时 $\left(\sigma_{0,1} = 2 \sqrt{\frac{\mu \gamma_{\text{有效}}}{c l_1}} \right)$ ，长度为 l_1 的裂纹开始无限制地传播，直至物体完全破裂。只有应力场或介质不均匀，裂纹才能快速停止。图 1 的曲线 2 表示不均匀介质的临界荷载。在长度达到 l_2 时，裂纹处于平衡状态，当荷载进一步呈准静态增加时，裂纹将稳定生长。

在恒定荷载下，裂纹可能缓慢生长。 $\gamma_{\text{有效}}$ 应当与裂纹运动速度有关，这一点是解释这一过程的基础（图 2）。在裂纹端部附

近,造成物质破裂的能量一部分可以通过非力学方式提供,例如可以通过分子热运动的涨落、表面张力因活动的介质而减小(雷宾杰尔效应)^[9]和侵蚀媒质的化学作用(应力腐蚀)来提供。所有这些过程的机械力损耗愈小,裂纹端部附近的破坏过程就愈长,即裂纹的生长速度愈小。但是,当速度足够大时,破坏时的不可逆损耗要减小。当推动裂纹扩展的力等于最大值 $2\gamma_{\text{有效}}$, 即图 2 中表示的 G_c (临界) 时,便开始快速破裂。在 $G < G_c$ 时,裂纹缓慢地增长。如果速度为零, $\gamma_{\text{有效}}$ 具有(目前还没有搞清)最终数值,那么就有一个 G 的安全值区间以及与裂纹大小有关的相应的安全荷载区间(图 1 曲线 3)。

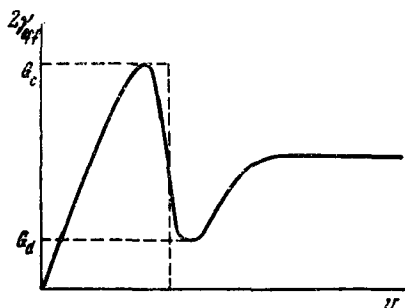


图 2 有效表面能和破裂速度的关系

以连续介质模式来描述物质时,忽略了特征线度比裂纹尺寸小得多的次级物质结构,而这仅在某些限度内才是成功的。可以肯定,缺陷的形成和增长以及次一级结构的破坏都是为任何大小裂纹的扩展作准备的。因此,要研究各级模型:由分子水平的晶格的结构与缺陷,直到完全忽略物质内部结构的连续介质模型。图 3 表示了金属构件的物质结构等级。

在地质学研究中,除了长达几百和几千公里的断裂外,还可区分出微裂隙、粉碎的单晶粒与小块岩石(0.01 毫米到 10 厘米)、外露可见的宏观裂隙(10—100 厘米)、断裂、破碎岩体(100 米—10 公里)和切穿整个岩石层的巨大构造断裂,直至深大断裂^[6]。这里仅着重指出,尽管物质的性质由最低(微观)等级来确定,但不同尺度等级的介质特性是有区别的。特别是等级愈高,裂纹生长的阻力 $2\gamma_{\text{有效}}$ 愈大,因为前一级中与微裂纹形成

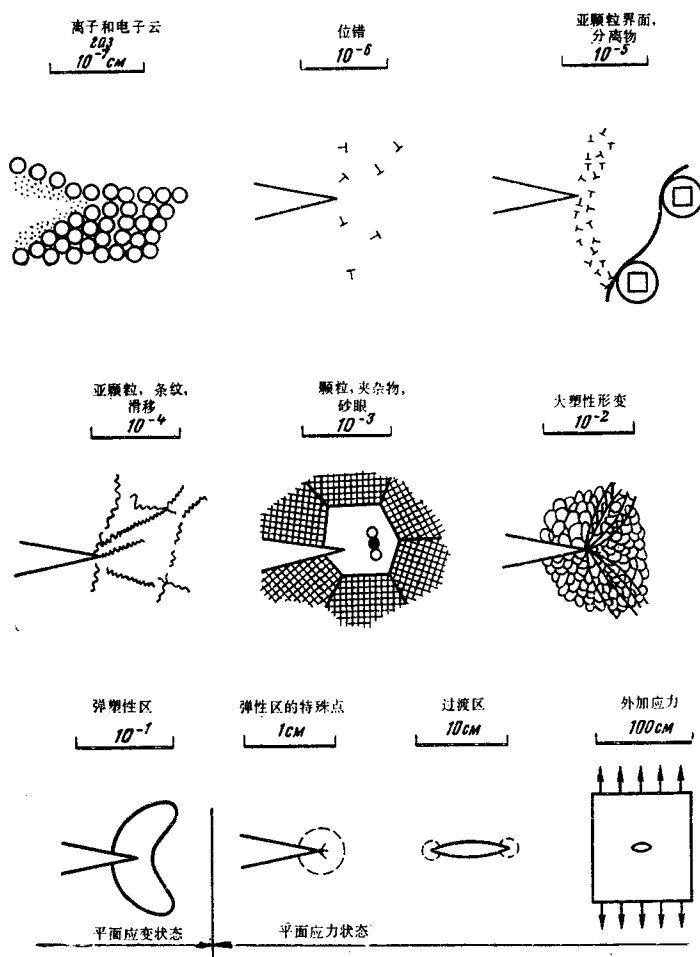


图 3 介质结构不均匀性的特征尺度^[10]

即与破坏相联系的损耗也包括在其中。用人们熟知的、裂纹在某些特征长度下缓慢生长和快速停止的间歇性实验结果, 不难说明上述事实^[11]。

裂纹系

通过大量实验已经确定，破坏通常是以形成裂纹系和裂纹系之间的隔堤遭到破坏，使之合并成主断裂的方式进行的。孤立裂纹的破坏不是最好的理论近似^[11]。实验事实和理论分析表明，当物质中与荷载条件和介质结构的不均匀性有关的微裂纹达到相当集中的程度时，缺陷（裂纹）的相互作用是破坏的雪崩阶段的基础^[11,12]。在长时间的荷载作用下，裂纹相当集中的原因是：在物质微观结构的强度壁垒上，先于其他裂隙生长的裂隙被阻止。快速加载时，由于在剪切裂纹边缘附近，裂纹稳定生长，便发生“扩散”破坏。

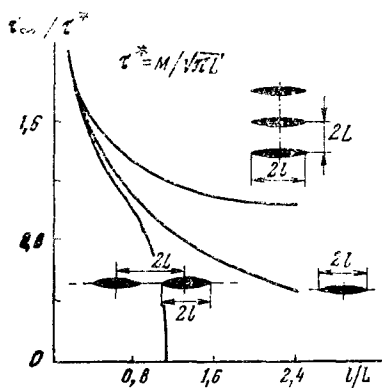


图4 均匀介质中裂纹系的稳定性^[13]

在裂纹形成的加速与失稳中，裂纹相互作用的概念，可以用均匀应力场中裂纹系的临界荷载理论关系很好地加以说明(图4)。对于两个不相等裂纹的相互作用，假如小裂纹是在大裂纹所在平面的上方或下方，则其生长减慢或根本就不生长；假如它位于大裂纹所在平面内，则小裂纹加速生长。显然，在物体内部微裂纹统计上均匀分布并且有一些裂纹具有优势取向的情况下（至少在相互作用的初始阶段），相互作用加速的机会应当多于减慢的机会。从宏观上看，裂纹的断裂位移在物体的形变量中占有一定比例。这个量与应力和裂纹平均尺度的立方成正比。裂纹形成的雪崩过程和相应的宏观形变似乎并不稳定，即在宏观应力水平降低的情况下，宏观形变仍可能加速进行。由于介质的微观不均匀性，裂纹形成的失稳加速过程随着弥散的增长而发展，并向狭窄的裂纹形成区集中^[11,12]，从而导致主断裂的形成。茂木清夫的实验就

是在荷载增加的情况下这种动态过程的很好说明^[14]。

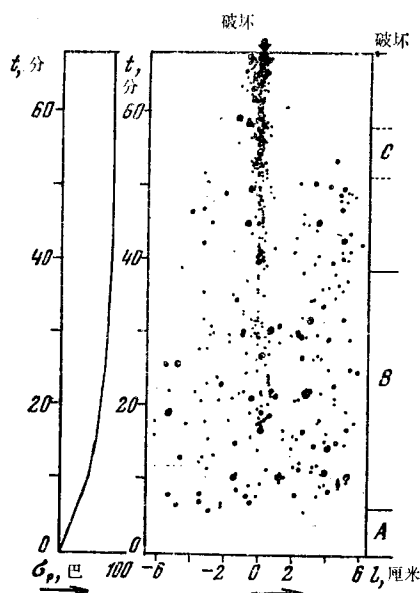


图 5 形变花岗岩样品中弹性脉冲源的时空分布(茂木清夫)^[14]

A: 没有微破裂; B: 微破裂分散在整个体积内; C: 微破裂聚集在未来主断裂分布区附近

图 5 表示与快速动态断裂相应的声脉冲的位置和能量的时间分布。

在地质学的研究中也确定了裂纹在主断裂附近加密的现象(图 6)。图 7 是狭窄带中宏观形变局部化过程的示意图。

在所圈出的体积中, 当应力达到 σ_0 、应变达到 ε_0 时, 在画细线的范围内开始了雪崩式的失稳过程, 形变增长到 ε_1 , 同时在整个体积中应力降到 σ_1 。在物体的其它点上仍保持弹性状态, 形变“恢复”到 ε'_1 。图 7 是以宏观观点描述的裂纹形成的失稳过程。

我们还要指出, 如果过程是在恒定形变速度下进行的, 则加速过程可能导致附加应力减小, 并相应地使过程减慢, 以至将不