

4

构造物理与地震

现代地壳运动研究

国家地震局地质研究所



地震出版社

现代地壳运动研究

RESEARCH ON RECENT CRUSTAL MOVEMENT

4

构造物理与地震

TECTONOPHYSICS AND EARTHQUAKES

国家地震局地质研究所

INSTITUTE OF GEOLOGY STATE SEISMOLOGICAL BUREAU

地震出版社

SEISMOLOGICAL PRESS

1989

内 容 提 要

构造物理学在研究地震成因、开发资源、保护环境和减轻地质灾害方面均有积极作用。因此,这门年青的科学近年来有了长足的发展。本书汇编了国家地震局地质研究所在构造物理与地震方面的部分研究成果。书中25篇论文通过数学模拟、模型实验、岩石力学实验、相变实验及显微构造等手段,比较系统地研究了潜在震源、震级上限及大震重复间隔等同岩石类型、力学性状、结构、介质、环境之间的可能关系。可供从事地质、地震地质、工程地质、环境地质、地球物理等研究的科技工作者及有关大专院校的师生参考。

现代地壳运动研究

4

构造物理与地震

国家地震局地质研究所

责任编辑:何寿欢 蒋浩旋

责任校对:孔景宽

地质出版社 出版

北京复兴路68号

朝阳展望印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

787×1092 1/16 12.5 印张 320 千字

1989年10月第一版 1989年10月第一次印刷

印数 0001—2200

ISBN 7-5028-0125-1/P·84

(526)定价:5.50元

前 言

构造物理学是研究不同尺度、不同层次和不同类型地壳构造变形现象物理本质的一门学科。自1940年成为独立学科以来在开发资源,保护环境和减轻灾害方面均起了积极作用。

在我国已召开过两次构造物理学术会议,与会者围绕野外构造变形、岩石力学、数值模拟、显微构造、地应力及地形变测量等方面提交了很多研究成果。本文集汇编了国家地震局地质研究所参加1986年中国地震学会构造物理会议的大部分论文。

国家地震局地质研究所构造物理研究室从事高温高压岩石力学、物理模拟实验、岩石相变实验、蠕变实验及岩石变形微观特征等方面的实验工作和数学模拟工作。实验室建于1962年,1974年有所扩展,1978年后有较大发展。目前,已形成一个有一定的研究能力和技术水平的研究实体。

高温高压岩石力学实验系统包括固体围压(0—750MPa, 0—800℃)、液体围压(0—500MPa)、气体围压(0—600MPa, 0—600℃)三个系统,其中部分设备设有孔隙压力系统。与此设备相配合的有应力、应变、声发射、波速和电导率等测试手段。这个系统的建成为研究地壳深处岩石的真实力学性质和变形特征提供了可能性。我们利用此系统进行的研究,包括十几种岩石的力学参数和变形破坏特征、断层物质的力学性质与断层活动方式、地震发生的刚度效应、压力效应、温度效应和介质因素等,已发表了50多篇论文。

模型实验系统包括声发射定位、声发射频谱分析、应力、应变、波速等测试手段。可研究不同构造组合条件下断层的扩展、地震时空演化、地震机制、断层位移以及频谱特征等方面的问题。这套系统的建立为研究不同构造区断层失稳条件、震级上限、地震活动性以及可能的前兆特征等提供了可能性。已发表论文30多篇。

岩石相变实验系统包括一套为研究0—1000℃, 1500MPa条件下岩石的电导率、波速以及相变的设备。我们曾利用此系统研究地壳内低阻低速层的成因,已发表论文5篇。另一套为金刚石压腔超高温高压系统(1000—3000℃, 70000MPa),我们利用此设备研究地幔物质的相变问题和矿物温度计,已发表5篇论文。

蠕变实验系统(0—1000℃, 700MPa)用于研究岩石长时间的变形特征及有关参数。已发表论文5篇。岩石变形微观特征研究把不同温压下岩石变形机制与力学性状结合起来。已有研究成果10篇。数学模拟方面的工作包括区域应力场、震源应力场、活动断层力学性质研究(断层活动强化、活动弱化及扩展)、地幔对流和盆地形成机制研究以及对地壳内的重力场、温度场、变形场之间的关系研究等方面。已发表论文30多篇。

目前,构造物理研究室在野外调查、实验和理论计算三方面紧密配合,使研究工作与自然界实际更趋接近。除继续把地震工作作为主要任务外,正寻求为更多方面的工程建设服务。

本书由国家地震局地质研究所学术委员会主编,吴裕文同志编辑。图件由董兆匀、张淑年、赵芹和赵东芝同志清绘,黄道宏和潘林声同志完成植字任务,在此一并致谢。

马 瑾

目 录

前言	马 瑾 (V)
地震成因与地震区划工作中构造物理研究的一些进展	马 瑾 (1)
强震危险区的多判据原理	王绳祖 (10)
地震的断层力学模型研究与潜在震源区的确定	宋惠珍等 (18)
岩石圈的脱层失稳与华北地台的活化	洪汉净 (26)
断层几何、地震辐射能与最大地震震级	杜异军 (35)
断层物性和构造地震震级	潘善德 (47)
局部重力变化的三维有限元分析	孔祥红等 (56)
华北地区构造应力状态沿垂直方向的变化及其成因	高祥林 (64)
受压斜裂纹稳定扩展过程的有限元法模拟及其讨论	袁岩光等 (69)
断层带岩石变形机制探讨	何永年 (78)
迁安石英岩的实验变形、失稳型式和石英晶体的位错结构	王子潮等 (86)
围压和应变速率对断层带摩擦滑动性状及变形特征的影响	马胜利等 (94)
温度和退火时间对碱性长石的影响	胥怀济等 (104)
含石英断层带摩擦滑动温度特性的研究	高 平等 (111)
含方解石断层带摩擦滑动温度效应的研究	张友南等 (117)
高温高压下岩石中纵波与横波速度的测量	郭才华等 (122)
从砂岩的破裂摩擦实验看岩石的脆性行为	王宝生等 (127)
岩性对地震重复周期影响的实验研究	许秀琴等 (135)
高围压下岩石粘滑时的应力降与剪切破裂能	池 江 (141)
雁列裂纹交接区破坏特征与失稳型式研究	李建国等 (149)
高温单轴压缩下混合岩长石变斑晶力学性状的实验研究	赵阿兴 (156)
地壳温压条件下居庸关花岗岩、济南辉长岩的强度特性	王威等 (163)
加温孔隙压岩石三轴实验装置	宋瑞卿等 (169)
具孔隙压的液体介质三轴实验设备	刘天昌 (174)
可用于矿物和岩石物性测试和相变研究的金刚石砧式超高压高温实验系统	郭金弟等 (178)

Contents

Preface.....	Ma Jin(V)
Some development of tectonophysics concerning earthquake research in China.....	Ma Jin(1)
Principles of multi-criterion method for judging risk region of strong shallow earthquake.....	Wang Shengzu(10)
Study of earthquakes by fault mechanical model and determination of potential earthquake focus region.....	Song Huizhen et al.(18)
Delaminating instability of the lithosphere and activation of North China Platform.....	Hong Hanjing(26)
Fault geometry, seismic radiation energy and maximum earthquake magnitude.....	Du Yijun(35)
Physical properties of faults and tectonic earthquake magnitude.....	Pan Shande(47)
Finite element analysis of 3-dimensional model of local gravity change.....	Kong Xianghong et al.(56)
Vertical variation of tectonic stress in North China and its causes.....	Gao Xianglin(64)
Modelling of process of stable extension of oblique cracks under compression by finite element method.....	Yuan Yanguang et al.(69)
On deformation mechanism of fault rocks.....	He Yonghua 78)
Experimental deformation, instability patterns of Qian'an quartzite and dislocation structure of quartz.....	Wang Zichao et al.(86)
Effects of confining pressure and strain rate on frictional behavior and deformation characteristics of fault zone.....	Ma Shengli et al.(94)
Effect of temperature and annealing time on alkali feldspars.....	Xu Huaiji et al.(104)
An experimental study on the temperature caused by stick-slip on fault by using thermo-luminescence method.....	Gao Ping et al.(111)
On temperature effect of friction slide along fault zone containing calcite.....	Zhang Yunan et al.(117)
Measurements of compressional and shear wave velocities under high temperatures and pressures.....	Guo Caihua et al.(122)
On the brittle behavior of rocks from the experimental studies on fracture and friction of sandstones under triaxial pressures.....	Wang Baosheng et al.(127)

An experimental study of the effect of rock types on earthquake recurrence interval.....	Xu Xiuqin et al.(135)
Shear stress drop and fracture energy during stick-slip of rock under high confining Pressure.....	Chi Jiang(141)
Study of fractures and instability parttern in the region of en-echalon cracks.....	Li Jianguo et al.(149)
Experimental study on mechanical properties of prophyritic feldspar from migmatite under uniaxial compression and high temperature.....	Zhao Axing(156)
On the strength of Juyongguan granite and Jinan gabbro under the temperature and pressure in the crust.....	Wang Wei et al.(163)
Triaxial experimental apparatus operating under pore pressure and temperature.....	Song Reiqing et al.(169)
A triaxial experimental apparatus with liquid medium and pore pressure system.....	Liu Tianchang(174)
An experimental diamond-anvil ultrahigh pressure and high temperature system for study of physical properties and phase transitions of minerals and rocks.....	Guo Jindi et al.(178)

地震成因与地震区划工作中 构造物理研究的一些进展

马 瑾

区域发震的地震地质背景、发震环境条件以及地震成因机制的研究与地震长期预报、地震区划关系密切,对短临预报的突破也是重要的基础工作。地震区划中有三个重要问题:1)潜在震源区的确定;2)地区震级上限;3)大震重复时间间隔。弄清这三个问题就弄清了一个区域的地震总格局。它将为进一步捕捉地震短临前兆、确定观测方案奠定基础。在这些工作中,构造物理研究都是不可缺少的手段。在地震危险性评价和预报中,国内外共同关心的有两个问题,即地震危险性随时间的变化和地震过程的物理本质^[1]。实际上它们与前述三个问题是密切相关的。以下仅就上述三方面谈谈近期研究的一些进展。为了说清一些思路,只好用挂一漏万的办法。

一、潜在震源区

地震在空间上、时间上分布很不均匀。其原因有多方面。为了寻找潜在震源区,有很多工作要做,如鉴别活动断层的活动时期、活动程度、力学性质、地震活动性地震地质工作及深部物探工作,这里不拟涉及。但是从本质上说,潜在震源区在平面上应位于近期活动断层面上发震地段的特殊构造部位,从剖面上应位于多震层的深度。以下仅从这方面来加以讨论。

1. 活断层的发展段

活动断层上有近期地震记录的即是发震段。但是,很多历史上无地震记录的活动断层是否也能发震,对此还需斟酌。我国的活动断层很多,大陆内地震重复时间间隔很长(10^3 — 10^4 a),相比之下历史记录又很短。因此,研究构成粘滑段(即发震段)的条件、粘滑段和稳滑段的差异以及粘滑在断层面上可能留下的其他影响等都是十分必要的。

(1) 粘滑的条件

关于这个问题已有很多研究成果,归纳起来有以下四方面(图1):

力学条件 区域应力场有足够的强度,力的方向、大小或其他触发条件均需有利于断层活动。这是发震最基本的条件。

断层面几何条件,又称结构条件 一系列的高温高压实验结果表明,粘滑发生在高围压下平直断层面上。在破裂扩展阶段不产生粘滑和突发失稳^[2],在破裂贯通时,才产生失稳应力降。断层面上障碍物多时,平均滑动量小,地震矩也小;断层平直时,滑动量大^[3]。因此,大地震与平直断层有关。这与过去单纯强调应力集中点失稳有区别。

环境条件 具备利于发震的几何条件后,断层能否发震还受其所在区的温度、压力、孔隙压力、应变速率等影响,这些因素统称为环境条件。这方面已有很多报道。在环境条件中,刚度条件也是一个重要方面^[4]。当震源区的刚度大于周围的刚度(不论是轴向或侧向)

时，易于失稳。震源内外的刚度比要大于某一定值是发震的一个条件。

介质条件 由于围岩不同，断层物质不同或水质条件不同，断层发震的条件也不同^[6]。其本质在于：在相同的环境条件下，由不同介质组成的断层带的变形方式（即变形机制）不同，因而其活动方式也不同^[6]。

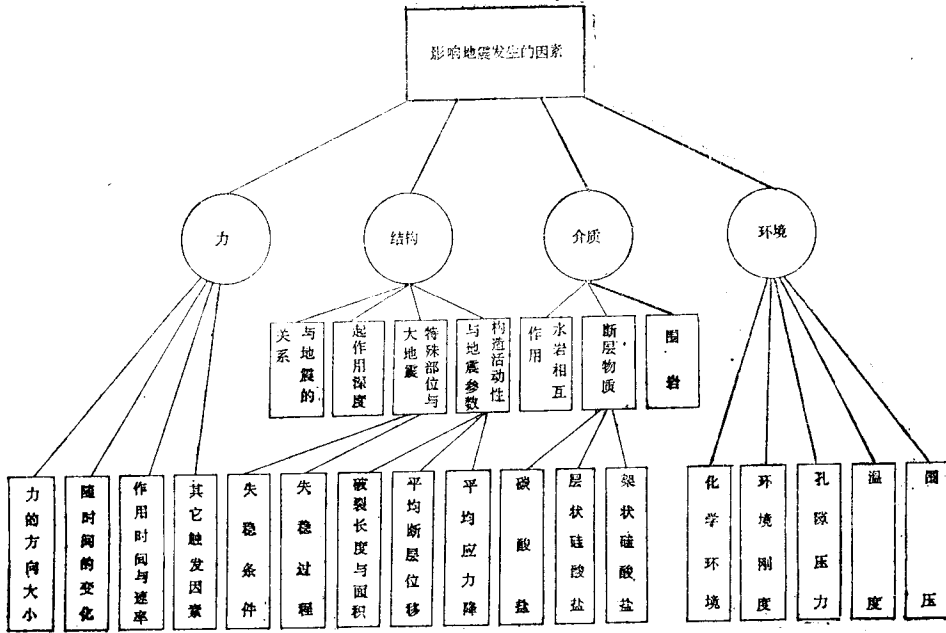


图1 影响地震发生的因素分析

对某一具体地区从上述条件进行分析后，便可作出潜在震源区的初步判断。

(2) 粘滑段与稳滑段剪切变形特征的差异

既然断层活动方式取决于断层带的变形机制，那么根据断层带的变形机制和相应的变形特征就可能反推断层带的活动方式。很多作者^[7-9]在研究断层带活动方式的同时，对断层带的变形机制与变形特征进行了研究。其结果可归纳为以下四点：

1) 随围压升高，断层的滑动方式由稳滑转为粘滑。低围压下断层的稳滑是通过松散的断层物质的粒间滑动来实现的，其变形特征是断层物质的均匀破碎，矿物粒度均匀减小，并可见由 R_1 吕氏剪裂控制的次级剪切带。高围压下断层的粘滑是通过伴有变形局部化的碎裂流动机制来实现的，其变形特征是断层带具典型的碎裂结构，平直的、伴有明显位移的 R_1 剪裂面极为发育。

2) 在相同的围压下，随着应变速率减慢，断层带的滑动方式由稳滑转为粘滑。研究表明，低应变速率有利于断层物质固结成岩，从而有利于变形局部化，因此，高应变速率下表现为粒间滑动（稳滑）的断层带在低应变速率下可能表现为碎裂流动（粘滑）。此外，由应变速率变化可引起 R_1 剪裂与断层面间夹角的变化^[7]，高应变速率伴随小夹角（9—14°）和稳定滑动，低应变速率伴随大夹角（10—22°）和粘滑。这个现象可用断层物质的亚固结和超固结来解释。

3) 在相同的围压下，随着温度升高，断层滑动方式由粘滑转向稳滑。研究表明，这种转

变与断层带物质的变形机制从碎裂流动转变为晶内塑性和动态重结晶相对应^[6]。

4) 在相同的温度压力(高温高压)条件下,蛇纹石、伊利石断层带由于带内孔隙压力不同,滑动方式也不同^[10,11]。高孔隙压下为稳滑,断层带的变形以均匀的粒间滑动为主。低孔隙下为粘滑,断层带的变形以固结成岩的断层物质的剪切破裂和摩擦滑动为主,其中平行断层面的一组剪切面极为发育^[6]。

需要说明的是,粘滑和稳滑段的鉴别不能仅从一个单一的标志出发,而要综合考虑各方面的因素。运用上述实验结果于自然界的断层带时,首先应鉴别出露的断层带形成剪切结构的环境(温压等)条件,其次需鉴别早期变形产物与后期变形叠加的产物,最后才可根据上述标志判断断层段可能的活动方式为粘滑还是稳滑。

(3) 粘滑的增温效应

断层发生粘滑后,除断层带结构上应有表现外,由于断层快速运动,可引起局部增温。有资料说明大地滑体摩擦面温度可达1500℃。但缓慢滑动时,断层面与外界有时间进行热交换,温度应增高不多。伴随粘滑的增温可能在断层带产生假玄武玻璃,但并不是在所有条件下都能出现。如何鉴别哪些断层经过了高温事件?影响增温大小的因素有哪些?显然,这些问题的研究对区别粘滑段和稳滑段,识别古震源,了解地震的成因机制,均有十分重要的意义。

这里首先有一个读出断层面温度的方法问题。有人曾用热染料试图读出实验室条件下粘滑的温度^[12],但热染料的存在改变了断层面的性质,而且在自然界的断层中并无热染料,故用其结果无法鉴定自然界断层的摩擦增温。

最近,地质所实验室在这方面有新的进展^[13]。他们的基本思路是:矿物的热释光强度随其接受的电离辐射剂量的增加而增加,随其所处环境温度的增高而减小。热事件可在几秒钟内使矿物晶格缺陷中的游离电子以光子形式释放,从而使剩余热释光强度减小,而在自然界各种电离辐射的影响下又逐渐增大。热释光鉴定年龄就是运用这个原理。据此原理,在静高压和高温下用经过 γ 射线照射的石英进行实验,发现石英的剩余热释光强度随压力变化不大,且随温度增高而下降,在160—400℃间有一个陡变带。以此作为标准曲线,可以鉴定含石英剪切带错动时的增温效应。实验表明,在粘滑和稳滑中都有一定的温度增量,这可能与实验室条件下应变速率较快有关。但粘滑时的增温值大于稳滑时的增温值,且大应力降事件的增温值大于小应力降事件的增温值。这项研究目前仅覆盖了400℃以下的温度段,还有待于继续深入。

在更高的温度段中也进行过一些研究^[14]。地壳中常见造岩矿物之一的碱性长石,在温度高于800℃,持续时间长于24 h,其光轴角变小3—6°。在高温下退火48 h以上,发现长石中钾长石和钠长石互相扩散,渐趋均匀,Or比值(钾长石在钾钠长石中的比例)下降。这些结果对于推断断层的形成环境、研究断层带摩擦增温效应都是有意义的。

2. 发震层和震源深度

(1) 发震层与脆韧转换带

在地壳上部,岩石以脆性方式变形。这种变形对压力依赖性很大,因此随深度增大,岩石变形的的方式由脆性变为韧性。韧性变形的流动应力与压力关系不大,但随温度增高和应变速率减慢而减小。因此,流动应力随深度增加而减小。由于岩石变形的阻力在脆性区是随深度加大而增加,在韧性区则随深度增加而减小,因此在两种变形方式转换地带,剪切阻力最

大,被称为脆韧转换带。在脆性域内,地震数量最多,应称为多震层;而在脆韧转换区,由于剪切阻力大,地震强度也大,应称强震层。但当岩石完全达到韧性变形状态,就很难发震了,故韧性区称为无震层(图2a)。

(2) 介质类型与震源深度

不同介质区的断层,发震的温度、压力范围也不同。由于不同地区温度梯度和压力梯度不同,一些介质分布区就有发震和不发震两种可能,而另一些介质分布区则只有发震层厚或薄的区别。例如,蛇纹岩区断层发震的条件是低压高温,如温度梯度高时就有可能发震,而温度梯度低时可能由于满足发震温度条件的深度上压力已太大,因而不能发震。但是另一些地区,如石英岩区的断层带只是发震层厚度因地温梯度不同而不同,低温度梯度下发震层的厚度要比高温度梯度下厚。

不同介质区脆韧转换的深度不同。碳酸盐区浅,长英质岩区较深,基性超基性岩区可能更深。从变形机制上说,粘滑稳滑的转换深度应与脆韧转换深度相当。但由于剪切过程会生热,从而使粘滑稳滑转换深度变浅(图2a)。海城、唐山、

邢台三个震区的优势深度分别为5—12km、6—14km和15—26km,三个地区的热流值分别为1.9HFU、1.54HFU和1.3HFU^[15]。据此推算出三个震源区发震的温度、压力范围是不同的(图2b)。这可能与三个震源区的介质不同有关。在美国东南部,相邻两区的热流值相同,但地震平均优势深度分别为12km和8km,也被推测为可能与两区介质不同有关^[16]。

地壳中介质是混杂分布的,不同介质各自达到脆韧转换的深度不同,发震层的深度也不同。因此,由不同介质引起的多震层、强震层可以互相重叠,造成几个强震层(图2c)。邢台大于4级的地震在深度上分布也较复杂,参差不齐(图2d)。邢台是震群型地震区,因此这种分布可能与当地介质在深度上分布的复杂性有关。

根据上述研究结果可以认为,大多数岩石在400℃时由脆性向韧性转换,因此多震层应浅于400℃等温线。在650℃以上,大多数岩石已完全达到韧性,因此最大震源

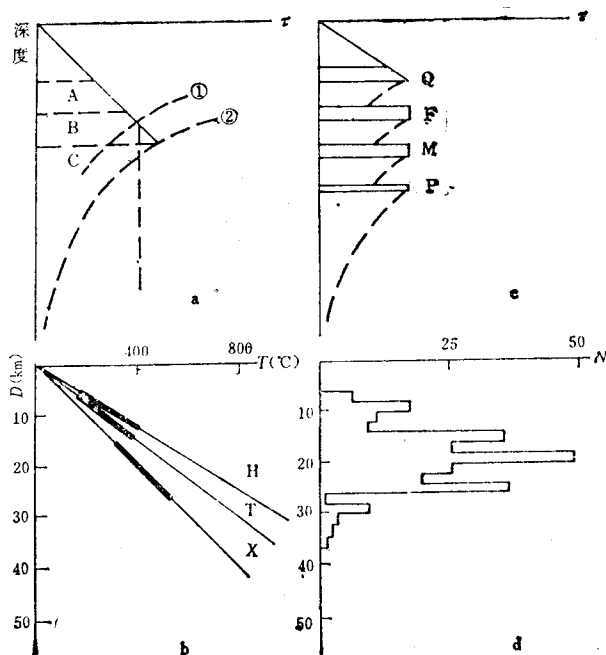


图2 发震层与震源深度

a. 剪切阻力随深度的变化: A. 多震层, B. 强震层, C. 无震层, ① 粘滑稳滑转换深度, ② 脆韧转换深度; b. 邢台(X)、唐山(T)、海城(H)地震发震的温度、压力(深度)范围; c. 不同岩性区发震的相对深度: Q. 富石英岩石, F. 富长石岩石, M. 铁镁质岩石, P. 橄辉岩; d. 1966—1974年邢台 ≥ 4 级地震的深度分布

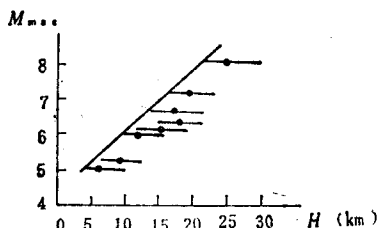


图3 最大震级与强震层厚度的经验关系

深度应浅于 650°C 等温线。强震层则在这两条等温线之间。强震层厚度愈大, 区域震级上限也愈高^[17]。强震层厚度为 15km 的区域, 地震往往小于 6.5 级; 层厚为 10km 的区域, 地震往往小于 6 级(图 3)。

由此可见, 认识和鉴别潜在震源区还有很多工作要做。

二、震级上限

1. 以往方法概述

地区震级上限是个难以确定的问题。目前采用的方法不外乎以下两种:

(1) 由已发生的地震事件进行外推, 如历史最大地震法、 b 值曲线法、平均应变释放率法以及各种地震数据的统计方法, 均属此类。此类方法的困难在于地震记录历史太短, 有仪器记录的历史更短, 因此需要其他方法补充。

(2) 按与发震有关的条件外推, 如在地震与其他地质现象间建立一些关系, 然后由这些地质现象来推测可能的地震活动情况。地质条件和构造条件的类比外推, 一些相似条件的图象识别均属于类比外推法。由活断层规模和位移量, 由空间规模和地质体尺度以及由构造应力积累和能量积累来估算震级也属类比外推。这些方法估算的时间比地震记录长得多。但是当建立其与地震的关系时, 需要更多的物理条件分析。因此, 围绕这些方法需要进行大量的构造物理研究工作。

2. 目前的思路与方法的探索

为了进一步讨论这方面的问题, 一些概念需要说明。一些构造部位, 如断层端点、拐点、交会点、错列点等可以积累应变能, 但由于外力方向、大小不同, 构造组合型式不同, 介质条件不同, 可能积累的能量大小也不同。地震时, 这些部位是主要供能部位, 也是破裂的起点或终点, 如炉霍、唐山等地震, 以及土耳其、美国的一些地震均如此^[18]。研究不同条件下几何因素、介质因素对应力分布和能量积累的影响, 是判断地区震级上限的一个重要方面^[19, 20]。地震大小还取决于有无释放应变能的条件, 发震断层段的长度、地震错距、介质性质均与震级大小有关。目前已从经验出发统计了不同地区这些参数与震级的关系, 系统分析这些因素对能量释放的影响是确定震级上限的另一个重要方面。

按照上述思路, 我们曾对雁列部位、交汇部位、人字型等区的应变能、破裂特点与几何参数的关系进行过一些分析与研究, 还对琼北地区的震级上限进行过估算。

3. b 值模型与特征震级模型

古登堡和里克特根据全球地震活动性资料提出了震级与频数关系的 b 值模型。鉴于 b 值在估算震级上限和地震重复间隔上有很大作用, 一直得到各方面的重视。最近国内针对 b 值的本质进行了专题讨论, 侧重方面是 b 值与应力状态和介质不均匀性的关系^[21]。从一个地区的地震活动资料出发, 早就发现地震的 b 值在低震级段和高震级段偏离线性。因此, b 值的线性段有一个起算震级和终止震级。

近年来, 工程建设要求对单个厂址、单个断层进行评价。大量古地震和活动断层的研究发现, 单个断层上震级频数关系偏离 b 值模型, 实际最大震级比 b 值模型预计值大(如阿留申, 地震距比预计大 $1-2.5$ 个数量级)^[22], 一定震级以上的地震数目比 b 值模型预计值多。同时还发现, 断层上的古地震事件有特征位移量, 因此便提出了特征震级和特征位移量的问题。

这个问题的研究把地质资料与地震活动资料联系起来，给地震预测带来了新的希望。

一条断层的震级频数关系与断层滑动量的分布有关(表1)^[23]。由表1可见，一个地区的震级上限取决于同一断层段上每次地震的位移量。如果一个点上每次地震的位移量是常数，大震规模就是常数。但是，如果同一段断层上每次地震的位移量不一致，则地震的规模就有大有小。当同一断层段上各点的滑动速率一致时，震级频数间关系为线性；而各部分滑动速率可变时，则震级频数间为非线性关系。特征地震模型的特点可归纳为：沿断层上滑动速率不一致，速率大处，位移量也大，属非线性震级频数关系；在中震级范围有低 b 值。

表1 震级频数关系与滑动类型

模 型	断层同一点上 各次地震位移量	同一断层各点的滑动速率	震级频数关系
变滑动量模型	可 变	常 数	大小地震均有，震级频数关系为线性， $b = 1$
均速滑动模型	常 数	大震中滑动较少地段，有较多中震，断层上累积位移为常数	大震规模一致，有较多中震，震级频数关系为线性
特征地震模型	常 数	变数，滑动速率大处位移量也大	大震规模一致，震级频数关系为非线性，中震级段低 b 值

三、地震重复时间间隔

1. 一些事实

国内外近来有很多讨论地震重复时间间隔的文章。在帕克菲尔德有 22 ± 10 a 的周期^[24]。在盐湖城霍什奇断层上，整体上有444 a 的周期，分段有1700—3000 a 的周期。新疆乌恰—阿克苏之间有11 a 的周期对跳。在一些地区地震确实有周期性发生的现象。

我国地震记录给出的图象是：地震在空间上很不均一，仅在特殊区、带上发震。地震在时间上也不均一，仅在一些特殊时期（地震活动期）发生。我国历史记录中有7级以上地震86次，其中只有6次原地重复。这也许由于历史资料记录的时间长度小于重复时间间隔。地震周期性发生可能有两种原因：其一，地震只发生在外力有特殊变化（突变）的情况下，这时，地震可能无周期性也可能有周期性，但这应属于外因影响下的引力周期（这种周期性在大区域上有一致性）；其二，外部因素是常数，周期性是由地区断层的一些固有因素造成的，不同地区由于固有因素不同周期也不同。以下只讨论第二种情况。

2. 地震重复发生及预测时间的条件

在上述第二种情况下，即外部因素是常数，周期性由地区断层的一些固有因素造成。这些因素包括介质性质、断层面积、断层几何结构等。当它们能周期性地恢复到某种常数时，地震才有周期性。当每次地震涉及的断层长度一致时，由这些地震发出的地震波的频率特性一致。当每次地震造成的错动量一致时，地震波的振幅一致^[8]。如果二者均相同，则地震大小相同，地震波形也相同。地震时造成的错动量取决于断层面上障碍体的多少。障碍体多时，平均错动量就小。断层面很不均匀时，即使发震断层长度一致，地震仍有大有小。当断层面较均匀，有固定数量的障碍体，该断层上的地震震级就较一致。

实际上，介质性质和其他参数是可变的。因此，在讨论特征地震模型、时间可测模型、

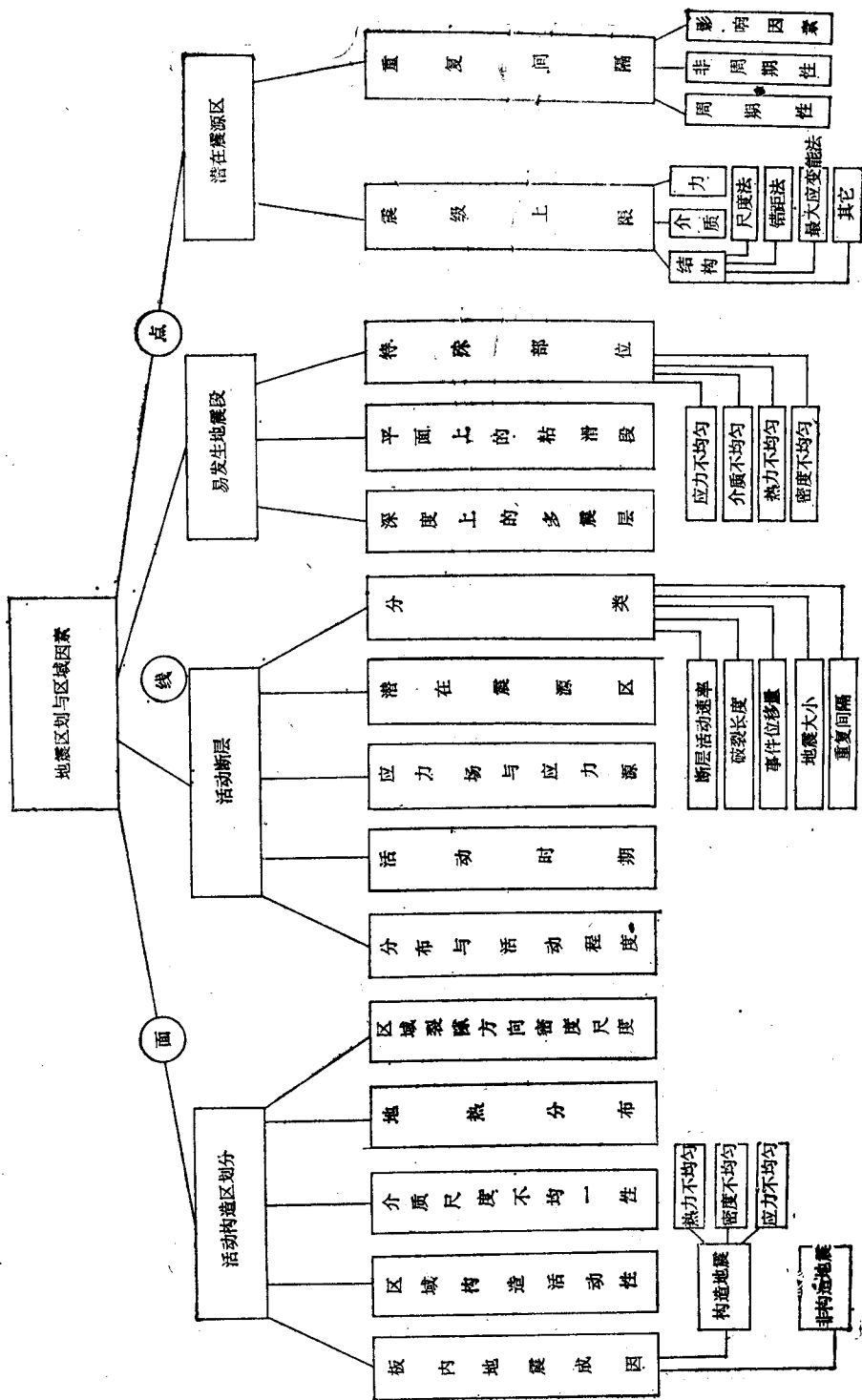


图4 不同尺度上地震研究工作的相互关系

位移可测模型时,往往做如下假定:构造应力积累速率是常数;发震的应力上限和地震终止的应力下限不随时间变化;地震应力降与震时位移成正比。在各方面条件短时间内不变的情况下,就符合严格的周期模型。假设发震应力上限保持不变,上一次地震的位移量大,应力降也大,恢复到该应力上限的时间就长。这就是时间可测模型。当地震终止时的应力(应力下限值)一致时,应力上升时间愈长,积累的应力(应力上限值)就愈大,发震位移也愈大,此即位移可测模型。

由上述分析可知,假定地震由破裂失稳扩展造成,地震发生与介质强度、断裂韧性、剩余强度有关。破裂由小向大扩展,能重复发震的条件是破裂反复愈合。破裂前后的强度和愈合强度不易一致。假定地震是由粘滑(摩擦失稳)造成,影响地震发生的因素是摩擦强度、震源内外刚度比、参加失稳断块的质量等。在先存断层上,当断层段固定,周围环境参数固定,介质参数和运动速率无大变化时,可能周期性地发生强度类似的地震。当然,由于短期内运动速率变化,断层面积变化(由于断裂扩展造成),加载速率或强度变化均可引起对周期性的偏离。显然,进一步深入研究影响地震重复间隔的因素是有意义的。

总之,在地震中长期预报和地震区划中,为了对一些经验性的规律进行解释,构造物理研究是不可缺少的手段。我们的思路是既要考虑力、结构、介质、环境四方面因素(图1),也应把面、线、点的研究结合起来(图4)。这样才能更好地进行地震区划。

参 考 文 献

- [1] M. J. Berry, F. F. Evison, 1985, Assessing and Predicting earthquake hazards, Vol. 8, No. 4.
- [2] 李建国等,雁列裂纹交接区破坏特征与失稳型式研究,本书。
- [3] K. Aki, 1984, Asperities, barriers, characteristic earthquake and strong motion prediction, J. G. R. Vol. 89, No. B7.
- [4] 王绳祖等, 1983, 环境刚度效应——影响震源应力降的重要因素, 地震地质, 3期。
- [5] 马瑾等, 1987, 介质在断层运动中的作用及其地震地质意义, 高温高压专业会议文集, 中国建筑工业出版社。
- [6] 马胜利等, 1987, 石英、方解石剪切带变形组构的实验研究, 地震地质, 4期。
- [7] D. E. Moore et al., 1986, Frictional strength, sliding behavior and deformation textures of heated illite gouge at low and high pore pressures, Open File Report, USGS.
- [8] J. M. Logan et al., 1979, Experimental studies of simulated gouge and their application to studies of natural fault zones, Proceedings of Conference VIII, analysis of actual fault zones in bed rock, 305—343, Open File Report, USGS.
- [9] 马胜利等, 1987, 围压和应变速率对断层带摩擦活动性状及变形特征的影响, 本书。
- [10] D. E. Moore et al., 1983, Strength of clay and non-clay fault gouges at elevated temperatures and pressures, Proceeding of 24th U.S. Symposium on Rock Mechanics, pp. 489—500.
- [11] 马瑾等, 1985, 温度、压力、孔隙压力对断层泥强度及滑动性质的影响, 地震地质, 1期。
- [12] L. W. Tueful et al., 1978, Effect of displacement rate on the real area of contact temperatures generated during frictional sliding of Tennessee sandstone, Pageoph, Vol. 116, pp. 848—865.
- [13] 高平等, 1987, 含石英断层带摩擦活动温度特性的研究, 本书。

- [14] 胥怀济等, 1987, 温度和退火时间对碱性长石的影响, 本书。
- [15] 吴乾藩等, 1984, 华北平原及其邻区地热初步研究, 地震科学研究, 3 期。
- [16] G. A. Bollingep et al. , 1985, An analysis of earthquake focal depth in the south-eastern U.S. , Geophys. Res. Lett. Vol. 12, No. 11.
- [17] N. V. Kondorskaya et al. , 1985, On the estimation of earthquake maximum magnitude based on a joint analysis of seismological and geothermal parameters, Tectonophysics, Vol. 121, pp. 79—85.
- [18] G. King et al. , 1985, Role of fault bends in the initiation and termination of earthquake rupture, Science, Vol. 228, pp. 984—987.
- [19] 潘善德等, 1987, 构造地震及可能震级—以“入”字型构造为例, 地震地质, 3 期。
- [20] 杜异军, 1988, 断层几何、地震辐射能与最大地震震级, 本书。
- [21] 耿乃光, 1986, *b*值模拟实验的进展和我国*b*值模拟实验的开端, 地震学报, 3 期。
- [22] J. R. Davison et al. , 1985, Frequency moment distribution of earthquakes in the Aleutian arc: A test of the characteristic earthquake model, BSSA, Vol. 75, No. 5.
- [23] W. H. Bakun et al. , 1984, Recurrence models and Parkfield, California, earthquakes, J. G. R., Vol. 89, No. B5.
- [24] D. P. Schwarzl et al. , 1984, Fault behavior and characteristic earthquakes: examples from the Wasatch and San Andreas fault zone, J. G. R. , Vol. 89, No. B7.

强震危险区的多判据原理

王 纛 祖

一、引 言

在地震预报工作中,一种单判据的观念至今仍然有着一定的影响。按照这种观念,主要根据应力集中程度和准静态强度判据判断强震危险性。然而,人们越来越认识到,准静态强度条件只是地震的必要条件之一,而不是强震的充分条件。人们已经注意到地震释放能量的大小同震源体积或发震断层长度之间的相关性,并借以估计震级的大小^[1-3],这实际上已涉及另一重要判据,即总能量判据。大量的研究还表明,由于温度、围压、岩性、水分、断层泥等多种因素的影响,岩石的摩擦滑动有稳滑与粘滑之区分^[4,5],粘滑失稳并非只需满足摩擦强度条件即可发生,在岩石破坏失稳时裂缝扩展速度也不同于质点错动速度^[6]。这些认识促使人们进一步去探索强震失稳的物理机制和发生条件。岩体错动要求“让位”的概念^[1],实际上已考虑到了发震所要求的“柔度”条件。关于“压机-试件”系统刚度及失稳型式的研究^[7-9],则更直接地涉及了发震的刚度判据问题。非均匀摩擦错动^[10]、错动带的凸起部和障壁^[11]、位移弱化和特征错距^[12]以及摩擦强度分布的非均匀性对失稳型式的影响^[13]等研究,也从不同角度涉及了发震对于错动阻力均匀性的要求。而关于岩石脆性-延性转变问题的广泛研究^[14-16],则从岩石力学性状本身超出了强度单判据的观念,表明了岩石的破坏并不一定导致突发失稳和强震。

近年来,作者等人在参考上述已有研究结果的同时,着重通过岩石的固体围压三轴试验和震源简化模型的理论分析,就岩石破坏失稳机制和浅源强震发生条件的问题进行了多方面的研究^[17-23]。研究表明:处于高围压、强约束状态下的震源岩体,其错动过程同时受到环境刚度和错动带接触刚度的控制,决定强震发生与否的不仅是岩石破坏型式(脆性或延性)的问题,而且还进一步涉及失稳型式(渐进式或突发式);必须区分裂缝扩展失稳和块体错动失稳、渐进失稳和突发失稳、以及非匀阻和匀阻突发失稳,浅源强震是震源岩体沿错动带匀阻突发失稳的动态过程;岩石的失稳型式受温度、围压等众多因素的影响,而这些因素都程度不同地通过改变岩石的塑性成分产生作用,塑性成分是决定发震与否的基本因素之一。

基于上述观点,强震危险区显然不是单一的强度判据所能判断的,而应该采用多个判据。本文将简要论述多判据方法的基本原理,并就有可能遇到的若干问题作简单讨论。

二、震源过程及简化模型

浅源强震的孕育和发生过程是震源体缓慢积聚和急速释放能量的过程。一般来说,可由下