

国际地震动态

文集之四

RECENT DEVELOPMENTS IN WORLD SEISMOLOGY

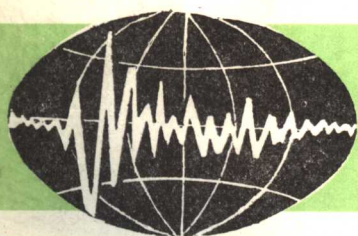
COLLECTION
OF PAPERS
04

国际地震学实验研究

EXPERIMENTAL SEISMOLOGICAL RESEARCH IN THE WORLD

《国际地震动态》编辑部编

Edited by the Editorial Board of RDWS



1987

科学技术文献出版社

国际地震动态 文集之四

国际地震学实验研究

主编：张洪由 宋守全

科学技术文献出版社

1 9 8 7

本文集英文译文：张洪由译，宋守全、秦馨菱校审

English Version for This Collection of Papers;

Translated by **Zhang Hongyou**

Revised and Approved by **Song Shouquan**

Qin Xingling

国际地震动态

文集之四

国际地震学实验研究

1987

RECENT DEVELOPMENTS IN WORLD SEISMOLOGY

COLLECTION OF PAPERS 04

EXPERIMENTAL SEISMOLOGICAL RESEARCH IN THE WORLD

1987

《国际地震动态》编辑部编

(北京海淀区清华东路)

科学技术文献出版社出版

(北京复兴路15号)

北京印刷三厂印刷

新华书店科技发行所发行 各地新华书店经售

•

787×1092毫米 16开本 6.5 印张 166 千字

1987年12月北京第一版第一次印刷

印数：1—1,000册

科技新书目：167—102

统一书号：13176·232 定价：1.55元

ISBN 7-5023-0538-6/P·12

内 容 提 要

本文集共收入论文18篇, 包括50余幅图表, 共约15万字。附有中英文对照的目录、论文摘要、内容提要 and 编者的话。本文集综述与评论了国际地震学实验研究和实验地球物理学在应用和基础研究等方面的研究现状及研究内容, 重点介绍了国际地震学实验研究取得的成果及其今后的展望和动向, 并阐述了地震学实验研究在地震预报中的作用及其发展方向。还特别介绍了日本在岩石实验方面的进展情况。

编辑出版本文集的目的就在于提供国际地震学实验研究的现状及其发展方向, 吸取其有益的思路和研究成果, 以促进我国这一领域研究工作的进一步开展, 特别对地震预报问题的研究起到积极推动作用。

本文集可供地震学、地球物理学、地磁学, 及其他有关领域的科研技术人员、大专院校有关专业师生, 以及其他有关单位和人员参考。

SYNOPSIS

This Collection contains 18 papers, including more than 50 diagrams, charts and tables, with about 150,000 Chinese Characters in all, and with a table of contents, abstracts of papers, a synopsis and the attached Editor's Note both in Chinese and English. It overviews and comments on the status quo and the research subjects of experimental seismological research and experimental geophysics in the world, their application and fundamental related research; mainly deals with the results obtained, and the tendency and prospects for the future in experimental seismological research and expounds its developing direction and the role it plays in earthquake prediction. It also especially describes the progress made in rock experiments in Japan.

The purpose of editing and publishing this Collection is to describe the status quo and the developing direction of experimental seismological research in the world, and to absorb their beneficial thinkings and findings in order to promote further development of research work in this field in China, and especially so as to play an actively motivating role in the research on earthquake prediction.

This Collection can serve as reference for scientific and technical workers in seismology, geophysics, geomagnetism and other related fields of the natural sciences; for teachers and students of relevant subjects in universities and colleges, as well as for other related agencies or individuals.

编 者 的 话

“《国际地震动态》文集之四：国际地震学实验研究”，综述与评论了国际地震学实验研究和实验地球物理学在应用和基础研究等方面的研究现状及研究内容，重点介绍了国际地震学实验研究取得的成果及其今后的展望和动向，并阐述了地震学实验研究在地震预报中的作用及其发展方向。还特别介绍了日本在岩石实验方面的进展情况。

为提供国际地震学实验研究的现状与发展方向，吸取其有益的思路和研究成果，以促进我国这一领域研究工作的进一步开展，特别对地震预报问题的研究起到积极推动作用，这是我们编辑出版本文集的主要目的。

大约从本世纪30年代就开始了对于岩石物理性质的研究，经过几十年的努力，取得了有关岩石膨胀和岩石摩擦特性的实验研究结果，并提出了地震的膨胀模式和岩石摩擦的经验公式。80年代以来，实验地球物理学的发展动力主要来自两个方面：第一是应用方面；第二是基础研究方面。它的研究内容大致可概括为：①高温高压下岩石的物理性质；②岩石压密过程和石油的生成；③实验室中的地震；④显微镜下的断层；⑤含流体岩石的性质；⑥地应力的测定。本文集中的大部分文章分别从不同角度论及到上述问题。

目前地震预报的主要困难问题，仍在于如何最好地取得资料、最佳地处理资料以及给出合理的资料解释。从这个意义上说，地震学实验研究无疑会对地震预报问题的研究起到积极的促进作用。

本文集由卢振恒、耿乃光等同志组织编写，谨此致谢。

限于编写和编辑水平，本文集难免有疏漏舛错之处，敬请读者批评指正。

本文集系作为《国际地震动态》的系列文集丛书。按其顺序，《各国地震研究和防震对策专辑》（1980年），作为“《国际地震动态》文集之一”；《国际地震社会学论文集》（1982年），作为“《国际地震动态》文集之二”；《国际震磁研究》（1986年）为“《国际地震动态》文集之三”，均为本刊编辑部编辑，科学技术文献出版社出版。特此补充说明如上。

EDITOR'S NOTE

"Experimental Seismological Research in the World—The Collection of Papers *04 of Recent Developments in World Seismology" overviews and comments on the present status and the research subjects of experimental seismological research and experimental geophysics in the world, their application and related fundamental research; mainly deals with the results obtained, and the tendency and prospects for the future of experimental seismological research, and expounds its developing direction and the role it plays in earthquake prediction. It also especially describes the progress made in rock experiments in Japan.

The Collection we edited and published aims to provide the present status and the developing direction of experimental seismological research in the world, and to absorb their beneficial thinkings and findings in order to promote further development of research work in this field in China, and especially to play an actively motivating role in the research on earthquake prediction.

Research on the physical properties of rocks was begun in the 1930s, after the efforts of several decades, a lot of experimental results on expansion and frictional properties of rocks have been collected, and the expansion model and empirical formula of rock friction have been put forward. Since the 1980s, the developing force of experimental geophysics has mainly come from two aspects, the first is that in application, and the second is that in fundamental research. The present research subjects can be roughly summarized as follows: 1. physical properties of rocks under high temperature and high pressure; 2. compaction process of rocks and oil formation; 3. seismism in laboratories; 4. faults under the microscope; 5. properties of rocks containing fluid; 6. measurement of earth stress. The above-mentioned problems have been dealt with in most articles of this Collection.

At present the main difficulties of earthquake prediction still depends on how to best collect the data, how to optimally process the data and how to give a reasonable interpretation of the data. In this sense, experimental seismological research will undoubtedly play an actively motivating role in the study on earthquake prediction.

We are grateful to comrades Lu Zhenheng, Geng Naiguang et al. for their efforts in organizing the compilation of this Collection.

There are bound to be oversights and omissions or mistakes due to our limited editing ability, comments or criticisms from readers are warmly welcome.

This Collection is published as one of the special series of "Recent Developments in world Seismology". In time sequence, "The Special Issue On Earthquake Research and Preparedness Countermeasures in Various Countries" (1980) as the Collection *01 of RDWS; and "A Collection of Papers On World Seismo-Sociology" (1982) as the Collection *02 of RDWS; and "Seismomagnetic Research in the World" (1986) which is the Collection *03 of RDWS were all edited by the Editorial Board of RDWS and published by the Scientific and Technological Documentary Publishing House. They are hereby additionally remarked as above.

国际地震动态

文集之四

国际地震学实验研究

1987年

目 录

编者的话.....	(V)
1. 实验地球物理学的进展.....	陈 颢 (1)
2. 地震波的衰减研究——实验室的Q值测量及与野外观测的差距.....	高龙生 (4)
3. 与地震学有关的断裂力学实验研究综述.....	尹祥础 (7)
4. 岩石压磁效应的实验研究.....	金 耀 (11)
5. 岩石破裂实验中的电磁辐射效应综述.....	徐为民 (14)
6. 高温高压岩石力学的进展.....	王绳祖 (18)
7. 高压下的岩石状态.....	郝晋升 (26)
8. 岩石破裂时的能量释放率和应力降.....	许昭永 (29)
9. 电液伺服试验机在岩石力学实验中的应用.....	李纪汉 (32)
10. 断层泥.....	姚孝新 (36)
11. 现代构造应力场研究方法的现状和在地震预报中的发展方向.....	安 欧 (39)
12. 原地应力测量研究现状及进展.....	李方全 (53)
13. 超声地震模型试验技术的发展和应.....	赵鸿儒, 郭铁栓 (60)
14. 日本岩石实验进展概况.....	冯义钧, 郑治真 (64)
15. 声发射效应在地震研究中的应用.....	于小红 (70)
16. 地震活动性的模拟实验研究.....	耿乃光 (73)
17. 古地磁学实验室方法.....	许同春 (76)
18. 震源实体构造研究的某些进展.....	张家声 (86)

RECENT DEVELOPMENTS IN WORLD SEISMOLOGY

COLLECTION OF PAPERS 04

EXPERIMENTAL SEISMOLOGICAL RESEARCH IN THE WORLD

1987

CONTENTS

Editor's Note	(V)
1. Progress in Research on Experimental Geophysics	Chen Yong (1)
2. Research on Seismic-Wave Attenuation—Q Value Measurements in Laboratories and the Difference from Field Observations	Gao Longsheng (4)
3. An Overview of Experimental Study on Fracture Mechanics Related to Seismo- logy	Yin Xiangchu (7)
4. Experimental Study of Rock Piezomagnetic Effects	Jin Yao (11)
5. An Overview on Electromagnetic Radiation Effects in Rock Rupturing Experi- ments	Xu Weimin (14)
6. Progress in High Temperature and High Pressure Rock Mechanics	Wang Shengzu (18)
7. Rock State under High Pressure	Hao Jinsheng (26)
8. Energy Release Rate and Stress Drop during Rock Ruptures	Xu Zhaoyong (29)
9. Application of Electrohydraulic Servo Test System to Rock Mechanics Experiments	Li Jihan (32)
10. Fault Gouge	Yao Xiaoxin (36)
11. Status Quo of Research Methods on the Recent Tectonic Stress Field and Its Developing Direction in Earthquake Prediction	An Ou (39)
12. Present Status and Progress in the Study on In-Situ Stress Measurement	Li Fangquan (53)
13. Development and Application of Techniques of Ultrasonic Seismic Model Experiments	Zhao Hongru, Guo Tieshuan (60)
14. An Outline of Progress in Rock Experiments in Japan	Feng Yijun, Zheng Zhizhen (64)
15. Application of Acoustic Emission Effects to Seismological Research	Yu Xiaohong (70)
16. Research on Seismicity by Model Experiments	Geng Naiguang (73)
17. Methodology of Palaeomagnetic Laboratory	Xu Tongchun (76)
18. Some Progress of Research on Physical Source Tectonics	Zhang Jiasheng (86)

Managing Editors for This Collection of Papers:

Zhang Hongyou, Song Shouquan

实验地球物理学的进展

陈 颢

(国家地震局地球物理研究所)

摘 要

80年代以来,实验地球物理学在应用和基础研究两个方面的推动下,取得了一些研究成果。本文扼要地回顾了这一学科的发展,概述了其研究内容,并在今后的展望中提出了几个值得注意的动向。

一、简单的回顾

80年代以来,实验地球物理学的发展动力主要来自于两个方面:第一是应用方面,对地球资源的开发、岩土工程和地震前兆的识别,都需要了解岩石的物理性质及其变化;第二是基础研究方面,例如,认识地壳的构造运动,了解地震的成因,都需要研究岩石的变形规律。

大约从本世纪30年代就开始了岩石物理性质的研究。最早布里奇曼等(Bridgeman et al.)发现岩石在差应力下的膨胀现象,这是由于岩石与金属材料的性质十分不同。布雷斯等(Brace et al.)对各种岩石的膨胀特点进行了细致的实验研究。在此基础上,肖尔茨和努尔(Scholz & Nur)提出了地震的膨胀模式。岩石膨胀的研究结果,现在已被不少地震学家所接受,并用于解释地震和工程建设上的许多问题。同样是在本世纪30年代,著名的土力学家特扎基(Terzaghi)研究了水对土力学性质的影响,形成了有效应力和孔隙压力等概念。以后,鲁比和哈伯特(Rubby & Hubbert)利用这种概念成功地解释了逆掩断层大规模滑动的问题。雷利等(Raleigh et al.)利用这种概念,解释了美国科罗拉多州兰吉利油田的注

水诱发地震问题。地壳中断层纵横,岩石沿间断面的摩擦滑动特性,对于了解构造运动和构造稳定性都是很重要的。1978年拜尔利(Byerlee)在总结过去关于岩石摩擦特性实验结果的基础上,提出了岩石摩擦的经验公式:若断层面上正应力为 σ ,剪应力为 τ ,则摩擦滑动条件为:

$$\tau = 0.85\sigma (\sigma \leq 200\text{MPa})$$

$$\tau = 0.5 + 0.6\sigma (\sigma > 200\text{MPa})$$

拜尔利给出的摩擦定律,形式十分简单,而且几乎对于所有的岩石和各种接触面条件,公式都是一样的。这是岩石在地球内部高压环境下的一种特殊行为。与经典物理学的摩擦规律十分不同,它可以用来讨论地壳中的应力状态,可以将断层错动方向与构造应力场加以联系。以上大致叙述了80年代以前实验研究的一些主要结果。

二、研究内容

80年代以来,实验地球物理学的研究内容可大致概括为以下几个方面:

1. 高温高压下岩石的物理性质

岩石的物理性质,从外部来说,受压力、温度和变形速率的影响;从内部来说,受岩石矿物组成、矿物颗粒大小、密度、孔隙度和生

成年代等影响。地壳内部的温度和压力随深度增加,一般每深100米,压力大约增加260个大气压,在地壳底部,压力约为1万大气压;而在沉积盆地则是每深100米,温度增加2—4摄氏度;在火山地区大约是这个数值的2—3倍。实验地球物理学的任务就是研究在这样高温高压的环境条件下岩石的各种物理性质受内部因素的影响。

2. 岩石压密过程和石油的生成

海底含水的泥在其上沉积物的重量压缩之下,经过100百万年逐渐脱水 and 固化,再经过数百万年生成含石油的深成岩。研究这个过程中岩石的物理性质变化对于找油和石油开采都是十分重要的。

3. 实验室中的地震

地下岩石破裂和已有断层的摩擦滑动,造成了地震。为了解释地震如何发生,在什么时候和在什么地点发生,需要在实验中人为地制造“地震”,增加研究的机会。因此,在实验中对岩石样品加载,研究其内部产生的小地震(即声发射),可以增加对于地震现象的认识。随着观测技术的现代化,已经对地震的空区,震中迁移和前震与余震的区别等课题进行深入的研究。

4. 显微镜下的断层

地震的发生多与断层有关,岩样中的破坏也多与微裂纹发展过程有关。因此,在实验室内对岩样中微裂纹的发生、发展和宏观断裂形成进行研究,同时研讨因此影响的岩石膨胀、弹性波速度变化和氦放射等现象,有助于讨论地震的前兆现象。

5. 含流体岩石的性质

岩石中含有孔隙,岩石是由固体骨架和孔隙流体组成的两相体。孔隙流体的存在不仅影响岩石的力学性质,而且还会和固体骨架之间发生化学的或物理的相互作用。在地热贮藏层中,热水对裂纹的应力腐蚀作用,对于该层的形成、发展和消亡都有重大的影响。

6. 地应力的测定

用钻孔应力解除法和水压致裂法测量地应

力,都受到深度的限制。岩石的声发射的不可逆特性——即所谓凯泽(Kaiser)效应,已引起人们的广泛兴趣,认为可能用于地应力的测量。

三、今后展望

从目前来看,实验地球物理学的研究有以下几个值得注意的动向:

1. 与能源开发密切联系

这里以努尔的工作为例。70年代末,努尔在斯坦福大学制订了研究岩石物理学的规划。为了推动这个学科发展,首先提出了解决石油贮量评定(reservoir evaluation)这样一个应用问题。这个问题非常现实,即如何通过各种地表测量、测井和实验室资料,去估计油贮的位置、尺寸、形状和油气贮量。并且在生产过程中,如何通过控制注水、注气的速率,控制气流或地下燃烧来提高采油率。这将包括三个方面的工作:①怎样得到最好的纪录;②怎样作最好的处理;③如何结合实验室工作得出最合理的解释。从岩石物理学角度来看,人们对于P波和S波在岩石中传播的性质已经基本清楚,即认识了波速 V_p 和 V_s 与岩石中矿物成份、孔隙度、渗透率、饱和度以及与环境条件的关系,也认识了波的衰减以及振幅和频率变化的规律。现在应做的事情是对各种不同的岩石作出测量,收集资料,并进行统计分析,然后贮存在计算机中,以便为今后的模型计算做准备。

目前地震预报的主要困难,仍在于如何最好地取得资料,如何最佳地处理资料以及给出合理的资料解释。从这个角度来看,解决能源问题的工作固然有任务的一面,但从学科方面来看,无疑会对地震预报问题的研究起到积极的促进作用。

2. 与材料科学的紧密结合

近年来,材料科学的进展是相当迅速的。但地球上数量最多的材料(和人类生活关系相当密切的材料)仍然是岩石材料。因此,将材料科学中的一些概念、方法、技术和理论,经

过改造与加工,移植到岩石力学中,则是岩石力学目前研究中另一个值得注意的动向。举例来说,目前大多数岩石力学的结果是通过小尺度样品实验得到的,实验持续时间也比自然界地质事件时间短得多。将实验室在快应变率下的结果外推到地质构造运动的低应变率情况,要作大幅度的外推。而这种外推,只有在知道这两种情况下变形机理相同时才有意义。因此,应该和材料科学中习惯的程序一样,应首先讨论岩石的变形机理,并将不同条件下的变形机理用变形图象表示出来。现在认为岩石变形主要有四种机理:①碎裂流动;②塑性流动;③非线性蠕变;④扩散蠕变。要具体分析,在什么样的条件下,哪一种变形机理是主要的。这样的分析方法是材料科学中借鉴过来的。另一个例子是:对地壳上部岩石来说,脆性破裂是主要的变形方式。研究岩石中的剪切型裂纹,对材料断裂力学的发展将会有所贡

献。

3. 和计算数学的结合

实验地球物理学的主要结果之一,是提供岩石的本构关系。在实际讨论地质现象(例如讨论地震的失稳运动)时,不仅要考虑某一区域岩石的本构关系,而且还要考虑它与周围地质体的相互作用。当岩体结构比较简单时,这种问题可以作为固体力学中的边值问题而求解。然而,在大多数情况下,得到简单的解析解是不可能的,而要求助于计算数学方法。对于各种机理的变形,可以采用一定的数学模型加以描述。除采用连续体模型外,对于碎裂变形还提出了非连续体模型,将岩石体处理为各独立块体的组合,运动方程是各质点的,而不是连续体的方程。本构关系也是采用质点间的关系代替。数字计算方法则和连续体问题中采用的差分方法相同。

PROGRESS IN RESEARCH ON EXPERIMENTAL GEOPHYSICS

Chen Yong

(State Seismological Bureau)

Abstract

Since the 1980s, some research results in experimental geophysics have been made under the push of application and fundamental research. The paper briefly reviews the development of this discipline, outlines its research subjects, and puts forward several trends being worthy of note in the prospect ahead.

地震波的衰减研究——实验室的Q值 测量及与野外观测的差距

高 龙 生

(国家地震局地球物理研究所)

摘 要

本文介绍了实验室中测量Q值的几种不同方法,以及它们的物理意义。Q值是表征介质在振荡或传输波动时的能量衰减特征。导致能量衰减的物理原因很多,有时也受周围的化学环境的影响;因此在研究Q值时要考虑研究对象的物理本质。有时实验室的测量可以和野外测量——比较,有时则可能大相径庭。

随着对地震波动力学特性的研究日渐深入,地震波的衰减问题日益显示其重要性。这是由于两方面的原因:①没有地震波衰减方面的知识,就不可能正确使用实际记到的地震记录,因为记录到的地震波都是经过真实地球介质衰减后的产物;②要探测地球介质本身的物理特性(不管是为找矿还是为地震预报服务),衰减特征本身就是一个重要的介质参数。

表征介质衰减特征的一个主要参数就是品质因素, Q因子。Q因子的定义可表述为:

$$Q^{-1} = 2\pi \frac{\Delta E}{E} \quad (1)$$

其中 ΔE 是振动或波动在一个循环过程中的能量损失, E 是振动或波动自身在一个周期中的能量。Q值表征着岩石作为传输地震波的介质的品质好坏。以下介绍四种测Q值的方法。

实验室研究常从一个振动系统的衰减振荡问题着手。在岩石物理实验室中,所谓一个系统往往是指标本自身、起振器及检测器、样品封装及接触介质等的一个联合体。因此 $\Delta E =$

$\Delta E_1 + \Delta E_2 + \Delta E_3$ 。其中 ΔE_1 为标本自身的内摩擦所引起的能量损耗; ΔE_2 为周围介质所造成标本在振荡过程中的损耗; ΔE_3 为与试件包裹及装配情况有关的能量损耗。因此从实验的一开始就可以感到Q值测量将不可避免地遇到一系列难题。因为我们无法想象可以形成一种不受周围影响的强迫振荡系统。而周围环境的影响严重限制Q值测量精度的提高。

一般就一个简单的、受到阻尼的机械振荡系统来说,在外加强迫力 $F e^{i\omega t}$ 的作用下,系统的运动方程可表示为:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + R \frac{dx}{dt} + Sx = F e^{i\omega t} \quad (2)$$

其中第一项代表系统的惯性力,第二项代表阻尼,第三项为系统自身的弹性恢复力。式中各符号的意义分别为: m —质量, R —阻尼, S —弹性常数, x —位移, t —时间, ω —圆频率。在解方程(2)时,往往先考虑下述情况,即右端 $F = 0$ 。此时有解答为:

$$x(t) = A e^{-1/2 \gamma t} \cos(\omega_1 t + \varphi) \quad (3)$$

式中 A 为初始振幅, ω_1 为圆频率, φ 为相位,

τ 可称为自由振荡的平均衰减寿命, 它相当于能量衰减到原始值的 $\frac{1}{e}$ 时所需的时间。不难证明它和品质因素有一简单关系, 即:

$$Q = \tau \omega. \quad (4)$$

其中 ω 为系统在无阻尼情况下的自振周期。因此测量出 τ , 也就可以求出 Q 因子。这是一种可行的实验方法。然而, 从实际的实验技巧看, 测量衰减寿命不易准确, 故常代之以测量强迫振荡下谐振曲线的频带宽度。

设若按 (2) 式所表达的强迫振荡方程, 对系统输入不同频率的强迫力, 则可以发现和无线电中简单电感电容回路中的谐振现象相似。在一维的机械系统中也存在一个谐振频率, 在此频率上, 强迫力对系统输入的功率为最大; 而在谐振频率两侧, 较高频和较低频方向, 输入功率逐渐衰减, 这样就形成一个带通滤波器。定义功率下降到一半数值时所相应的频率为半功率点。左右两个半功率点的差值即是共振曲线的频带宽度 ($\Delta\omega$)。不难证明:

$$\tau = \frac{1}{(\Delta\omega)} \quad (5)$$

将此式和 (4) 式联系起来, 便可得出

$$Q = \omega_0 / \Delta\omega$$

由此可见, 谐振曲线愈尖锐, 就意味着系统的 Q 值愈高。

兹举一简例, 说明一下怎样进行求取谐振曲线的岩石物理实验。首先加工出一个 $\phi 10 \times 100 \text{ mm} \times \text{mm}$ 的岩石标本, 用约 0.1 mm 的铜箔对其细致包裹。但在包裹前须注意对样品作小心的精细磨加工以获得具有高光洁度表面的试样。包裹好后, 装到固定在高压容器电极塞头的架子上, 然后将电磁驱动器 (起振器) 附着于标本上; 拾振器常为电容式换能器, 这样可减少标本上的附着物。换能器灵敏度大体上可测到 $0.5 \mu\text{m}$ 的振动即可。标本安装好后, 即可用恒振幅的信号发生器来驱动标本, 实行强迫振荡。变化信号的频率, 并分别在不同频率上测量标本的响应振幅, 即可根据振幅随频率的变化情况绘出谐振曲线。有了谐振曲

线即可根据其频带宽度求出 Q 值。

解释月球上野外实测的高 Q 值问题是项有趣的研究。月球上的地震波就地测量表明: 在那里, 即使是近月球表层的岩石 Q 值也可达到 3000—5000。这和地球上的情况差别很大, 地球岩石圈中的 Q 值一般低于 1000, 北京地区在频率为一周附近的地震波频段上, Q 值仅为 200。月球玄武岩标本带回地球上后在实验室内的实测 Q 值也仅为 60。为了解释实验室实测结果和月球上就地测量结果的差距, 先将月球标本进行高真空排气, 并在高真空环境下用电子枪进行焊接封装, 然后再对其进行高压高温实验。结果发现, 造成这种差别的主要原因是地球环境中的气体, 特别是岩石表面薄层吸附的 H_2O 气体影响最大; CO 、 H 、 H_2 、 O_2 和 CO_2 也分别不同程度地影响 Q 值, 而 He 、 N_2 、 Ar 等则对 Q 值影响极微。因此, Q 值测量是研究地球内部和其它星体气体环境的一个有效手段。

与使用谐振曲线不同的另一种实验室测量 Q 值的方法, 是根据 (1) 式, 直接测量岩石标本在每一个振荡循环中的能量损失。具体说, 是测量应力-应变弛豫回线中所包围的面积。其思路很象研究磁滞损耗时使用的磁滞回线测量法。由于振荡幅度很小 ($\sim 10^{-6}$ 应变), 因此必须对岩石标本受到的应力和应变分别作很精密的测量, 否则就看不到应力升起和应力降落时应变的弛豫变化。

除了根据岩石标本中的振荡衰减特征来研究 Q 值外, 更简易的方法是直接使用脉冲发射-接收等行波衰减方法。这样测量出的绝对 Q 值精度往往偏低, 而且不得不用过高的频率来进行实验。但此类方法可用来研究 Q 值的相对变化, 特别是在模仿地震孕育过程的偏应力实验中, 它可以算是较好的手段。某些实验结果表明, 在岩石破坏前纵波和横波的 Q 值按照不同的方式变化; 而且横波的不同偏振分量表现出不同的变化特征。这些给地震预报研究提供了很好的线索。

Q 值研究中最头痛的可能还是实验室研究

和野外研究的衔接问题。上述例子中提到已经解决了的月球标本的实验结果与野外实测的差异。在地球环境中,我们正面临着衰减的物理本质上的差异研究。经过在实验室进行详细研究,可列举出下列几种地震波衰减的物理原因;介质自身的非弹性;介质质点在运动过程中在晶粒边界和裂隙两侧之间的相对摩擦;岩石孔隙中的饱和液体在震波通过时的粘滞性流动(包括孔隙液的惯性力流动和液体的裂隙和

孔隙之间在震波通过时的挤压过程中的交叉流动);非饱和空隙中气泡在液体中的运动和挤压等。但野外观测资料却有证据说明,由地球成层结构或横向不均匀性所造成的散射过程有可能是衰减的主要因素,这是很难在实验室中用简单的方法再现的。野外Q值测定给出了一套自己的Q值-频率特征,这将促使实验室重新考虑其研究Q值的方法。

RESEARCH ON SEISMIC-WAVE ATTENUATION—Q VALUE MEASUREMENTS IN LABORATORIES AND THE DIFFERENCE FROM FIELD OBSERVATIONS

Gao Longsheng

(Institute of Geophysics, SSB)

Abstract

The paper depicts several different methods for measuring the Q value in laboratories and their physical implication. The Q value indicates the features of energy decay in the media under oscillation or transmission of waves. There are many physical reasons leading to energy decay. This energy decay is also affected by the surrounding chemical environments. Therefore, the intrinsic natures of the measured quantity must be considered in the study of Q values. Sometimes, measurements in laboratories are comparable with field observations, but sometimes they may differ widely.

与地震学有关的断裂力学实验研究综述

尹 祥 础

(国家地震局地球物理研究所)

摘 要

本文指出, 由于介质特性、工作环境及研究目的等方面的差别, 地震断裂力学有别于通常的工程断裂力学, 而具有一系列自身的特点。例如, 它着重研究受压状态下的闭合剪切裂纹; 介质的流变特性及裂纹间的相互作用成为影响裂纹扩展的重要因素; 除了研究裂纹的启裂条件外, 还要求研究裂纹扩展的全过程等。本文综述了有关这几个问题在实验研究方面的主要研究成果与研究现状。

众所周知, 构造地震, 至少浅源构造地震是由于地壳介质(岩石)的快速断裂所引起的。因此, 运用固体力学中的新分支——断裂力学来研究地震过程, 必然成为地震学中一股巨大的新潮流。

一、地震断裂力学区别于通常的工程断裂力学

断裂力学的产生与发展, 最初主要是出于工业技术发展的需要。从工程强度设计的角度着眼, 工程断裂力学中的中心课题是研究材料中裂纹扩展的条件, 即断裂条件。但是, 将断裂力学用来研究地震问题时, 由于地震的特点, 则面临一系列可主要概括为下述的新问题。

1. 对于工程结构来说, 最主要的危险是张开型, 即 I 型裂纹, 因为它常常是导致许多恶性事故的祸根。因此, 无论是理论上还是在实验方面, 工程断裂力学的着重点都是主要放在张开型裂纹的研究上, 而对剪切型裂纹则研究得比较少。但是, 地壳中占优势的却是压应力, 所以用受压剪切裂纹模拟地震断层是比较合理的, 这就要求深入研究受压闭合裂纹的性

态。

2. 地壳材料是天然岩石, 与工程材料有很大差别, 加以其特殊的工作环境, 诸如高温、高压、长期加载及流体作用等, 因此, 地壳材料的流变性质, 即非弹性性质, 成为一个突出因素, 它将对介质中裂纹的扩展条件、扩展速度等产生重要的影响。

3. 地壳材料中存在着大量各种尺度的裂纹。这些裂纹间的相互作用对于孕震、发震及震源参数的计算都可能起重要作用。这是在工程断裂力学中所不常遇到的问题。

4. 在工程断裂力学中最重要的问题是裂纹扩展条件, 而对裂纹的扩展方式, 诸如路径、速度变化等则一般不感兴趣。但是在地震学中则对裂纹扩展的全过程, 即从裂纹的启裂、扩展、加速直至止裂, 都要求作详细的研究。

二、实验研究现状及其主要成果

为了解决上述问题, 在进行理论研究的同时, 作了大量实验研究。

1. 摩擦剪应力的实验研究

受压闭合裂纹的裂纹面间存在着摩擦剪应

力,它是阻止裂纹扩展的重要因素,因而受到广泛的重视,不少人作了很多实验研究。其主要研究结果有以下几方面:

(1) 拜尔利定律 拜尔利(J.D. Byerlee)通过实验发现,摩擦强度 τ_f 与摩擦面上的正应力 σ_n 之间存在如下的线性关系:

$$\tau_f = 0.85\sigma_n \quad (\sigma < 200\text{MPa});$$

$$\tau_f = 50 + 0.6\sigma_n \quad (\sigma > 200\text{MPa}).$$

上式中应力的单位均为 MPa。式中的常数和系数与岩石种类及压力、温度等因素无关。这一结果十分奇特而引人注目,迄今尚未得到圆满的理论解释。

(2) 粘滑、稳滑及稳滑向粘滑的转化 由于粘滑可能是一种重要的地震机制,所以这一课题吸引了大批科学家进行实验研究。拜尔利、布雷斯及洛根等人(J. D. Byerlee, W. F. Brace, J. M. T. Logan et al.)发现,在各种条件下的粘滑之前,几乎总有一种稳态滑动,简称稳滑。由于这很可能是一种重要的地震前兆现象,所以又称之为前兆蠕动。由稳滑转化为粘滑的条件主要是:有效正应力增加,温度降低及滑动速率减少等。但在实验中还发现,由于岩石种类不同,稳滑的机制大不一样。因此这方面还有待更深入的研究。

(3) 滑动弱化模式及有关的实验研究 帕尔默与赖斯(A. C. Palmer & J. R. Rice)根据岩、土试样的剪切破坏实验得出,从静摩擦到动摩擦的过渡过程不是突变过程,摩擦力是位移的连续函数,当位移大于某一临界值 u^* 后,摩擦力则趋近于常值。 $\tau-u$ 曲线与直线 $u=u^*$ 所围的面积,在数值上等于岩石的剪切破裂能。并据此提出了著名的滑动弱化模式。黄庭芳利用这一原理,进行了岩石压缩实验,由岩石的破坏后性态(post-failure behaviour)测得多种岩石的剪切破裂能。近年来,迪特里希、鲁依纳等人(J. H. Dieterich, A. C. Ruina et al.)更进一步研究了摩擦剪应力与滑移速率及某些状态参量间的关系。包括与时间有关的各种因素对摩擦力的影响以及摩擦面上的不均匀性问题的实验研究,目前正处于方兴未艾

的阶段。

上述实验研究大多是利用“拼合试样”(试件中包含有贯穿全试件的断裂截面,实质上试件由几部分组合而成)或“完整试样”(试件中没有预制裂纹)进行实验的。从模拟地震断层的角度着眼,用包含预制中心裂纹的试件进行断裂实验更具有其实际意义。这方面早期的代表性工作是布雷斯等(W. F. Brace et al.)在60年代的实验。他们已发现,用含有斜中心裂纹的板状试件进行单轴压缩时,裂纹将不沿原裂纹面方向扩展,其初始扩裂方向与原裂纹平面之间成一角度,称之为断裂角。但布雷斯没有进一步研究断裂角的数值及变化规律。随后,从60年代到80年代,霍克(E. Hoek)、比尼阿夫斯基(Z. T. Bieniawski)、沙米拉(O. G. Shamila)、英格拉菲(A. R. Ingraffea)、李建国及蒂罗什(T. Tirosh)等继续在这领域内进行了实验。这些实验在试件材料与形状、加载方式、测试手段等方面都各具特色。但是,除了霍克的少量实验外,都是在试件中预制切口(notch),即在试件中用机械加工方法去掉一部分材料。切口的两面是互相分离的,没有摩擦剪切力的作用。从模拟地壳中断层的观点看有不够理想之处。尹祥础于1980年指出,对于受压闭合断层,断裂角应为常量,并等于纯Ⅱ型裂纹的断裂角(约 70°)。在尹祥础的指导与参加下,李世愚、李红、滕春凯等于1982—1983年用实验证实了这一结论。他们在实践中摸索出了在脆性材料,包括玻璃、岩石等的平板试件中,用三点加载、局部弯曲、单面启裂、双面贯穿预制中心裂纹(此处所指的不是切口)的新途径,为进行这一类实验创造了条件。笔者等人又进一步进行了三维裂纹断裂实验及高围压下(接近1000MPa)裂纹的扩展实验研究。在裂纹三维扩展实验中发现,它与裂纹的二维扩展有很大不同。它的破裂形成了一个非常复杂的断裂面系。这一实验发现,可能对一些重要的地震参数的计算方法,带来深远的影响。此外,它也为安艺敬一近来提出的地震断层的分数维性质提供了实验依据。总之,这些