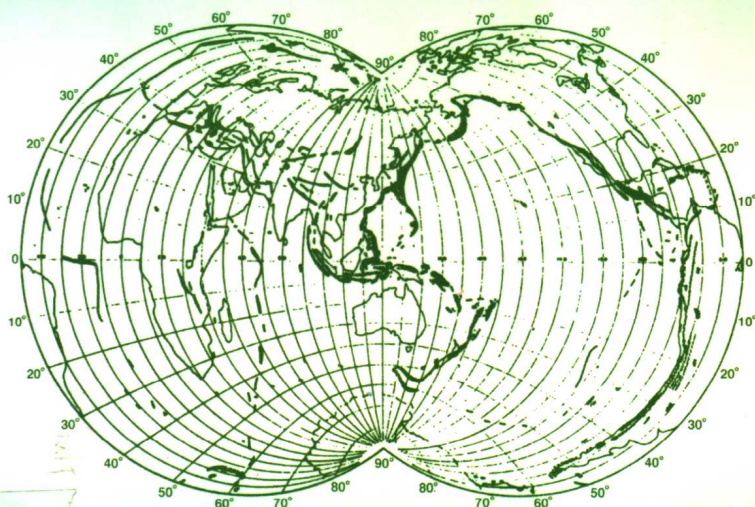


地震学史

[美] 小本杰明·富兰克林·豪厄尔 著

柳百琪 译

赵仲和 孙其政 校



地震出版社

地震科学联合基金资助

地震学史

[美] 小本杰明·富兰克林·豪厄尔 著

柳百琪 译
赵仲和 孙其政 校

地震出版社

1998

著作权合同登记 图字：01-98-1069

AN INTRODUCTION TO SEISMOLOGICAL RE-
SEARCH: HISTORY AND DEVELOPMENT

BENJAMIN F. HOWELL, JR.

本书版权归 Cambridge University Press 所有。

Copyright © Cambridge University Press, 1990.

本书中文版由著作权人授权地震出版社独家出版发行, 1998。

版权所有, 翻印必究。

地 震 学 史

[美] 小本杰明·富兰克林·豪厄尔 著

柳百琪 译

赵仲和 孙其政 校

责任编辑: 陈晏群

责任校对: 耿 艳

*

地 震 学 史 出版发行

北京民族学院南路9号

中国地质大学轻印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 6.25 印张 168 千字

1998年8月第一版 1998年8月第一次印刷

印数 001—500

ISBN 7-5028-1569-4/P. 957

(2012) 定价: 10.00 元

译者说明

一、《地震学史》重点介绍了西方地震学发展史，是一本不多的地震学基本理论专著。该书作者几乎全部是根据已发表的地震学文献，系统地阐述了西方地震学基本概念的演变过程，即当代的地震学如何从最原始、最简单的思想形成我们今天对地震认识的过程。该书内容涉及地震成因、地震活动性与地震预测、地震仪器、地震脉冲、地球内部构造、地震大小的度量、地震波的衰减和海啸等。

《地震学史》作者小本杰明·富兰克林·豪厄尔(Howell, B. F. Jr.)现年 81 岁，现为美国宾夕法尼亚大学的名誉教授，他年青时从师于美国地震学泰斗古登堡(Gutenberg B.)。他长期从事教育工作，曾担任过该校地球物理学和地球化学系的系主任和研究生院院长助理和副院长，长达 14 年，发表过的著作和论文有《地球物理学导论》、《地球和宇宙》、《论地震震级的饱和》、《论圣安德烈斯断层的地震危险性的变化》、《地震波的吸收》等。

二、书名的变动。该书原名为《地震学研究导论：历史与发展》(An Introduction to Seismological Research: History and Development)，今改为《地震学史》，这是由于英国剑桥大学出版社版权销售经理吉布森(Karen Gibson)1995 年 10 月 2 日给我来函转告：“原书作者希望把该书中文版的书名改为《A History of Earthquake Seismology》”的结果。另外我们还需强调指出的是，正如该书作者在前言中所述，“由于我不具备多种语言的阅读能力”，这本地震学史所反映的一些发现是有局限性的，大部分属于美国人和西欧人。尽管如此，凡是愿意扩大自己对西方地震学发展史有比较系统认识的人，该书仍不失为一本难得的，开卷有

益的好书。

三、本译著如果没有地震科学联合基金会的资助和赵仲和研究员、孙其政司长的友好支持也是难以出版的，译者对此深表感谢！由于译、校者的理解、表达能力有限，书中难免有错误、不当之处，望读者来信予以指正。

柳百琪

1998年5月于北京，民族
学院南路5号(100081)

序

我撰写本书有如下几个目的。首先，是为了自我再教育。我曾任研究生院院长助理和副院长长达 14 年，离任之后深感自己已落后于地震学新思想的发展。为此，我拟在退休之际，作些补救。撰写一部地震学的发展史，似乎对指导我如何组织阅读，是一个既合乎逻辑，又非常有用的方法。当今地震学的发展瞬息万变，我恐怕是永远可望而不可即了。

我撰写这本地震学研究史的基本目标是：为地震学家们在准备研究一项新的课题时提供一些立项的依据。这对地震研究工作者在报告工作时，首先介绍一些有关该研究课题的经典的和基本的著作，通常是很有帮助的。我在撰写本书过程中参考了大量的文献。凡在该书中没有提及参考来源的，一般可以在戴维森 (Charles Davison, 1927) 所著的《地震学奠基者》一书，或古登堡 (Beno Gutenberg, 1941) 撰写的并已在美国地质学会发表的题为《地震学，1880~1938》^①一文中找到。我作为古登堡的学生，深感他那种严谨细致地参考阅读他人文献的作风，对我的影响颇深 (参见 Gutenberg, 1951, 1959)。

撰写本书的另一个目的是，试图阐述地震学中的一些新思想是如何产生的，即我们今天对地震的认识是如何从最原始、最简单的思想形成现代概念的。由于广泛进行观测和实验研究的结果，这种如何由早期简单的灵感发展到当前成熟的认识已经一目了然。通常人们将一个能把一种概念阐述得非常清楚的人视为这

① 该著作于 1978 年，即 20 年前已由本书译者译成中文，连续发表在《国外地震》1978 年 1, 2 期上——译者注。

种认识的首创者。正是让别人承认概念正确性的这种能力，才使人们记住了他。举一个很能说明问题的例子，里德(Harry Fielding Reid, 1910)常被称为弹性回跳理论的创始人，而从未有人提到过海福德(J. F. Hayford)和鲍德温(A. L. Baldwin, 1908)，但实际上，里德的理论却是根据海福德和鲍德温两人的测量结果建立起来的；如今也没有人提及吉尔伯特(G. K. Gilbert, 1884)，但他却是在里德提出弹性回跳理论之前 20 多年，就已提出了与里德基本相同的思想。同样地，赫斯(H. H. Hess, 1962)和迪茨(R. S. Dietz, 1961)被公认为是板块构造学说的创造人，但却很少听到有人提及费希尔(Osmand Fisher, 1882, 1891)早期在这方面所从事的工作。

我在地震科学发展史这本书中，重点强调的是科学思想的发展，而不是强调发展这些思想的人。我不准备对此表示任何歉意，尽管这种做法有可能会使一些历史学家感到失望。撰写本书的目的在于追踪科学思想的演变，以帮助人们理解今天地震学的来龙去脉，而不是考察那些从中发展出这些思想的文化背景。地震学相对来说，是一门新的科学，其绝大部分的概念可上溯到不超过 19 世纪后半叶。另外，我在撰写本书时几乎全部都依据于发表的文献。显然，一百多年前发表的文献是依据当时一年或多年的口头讨论后整理出来的，即使在今天还是这样。基于已发表文献的研究，并不能显示这些思想是如何从当时在地震学领域工作的人员之间的非正式交换意见过程中演变而来的。历史学家有可能会强调地震学史的那一个方面；而我只能对这些思想是如何演变的谈谈自己的管见所及。

本书不拟探讨勘探地球物理学和核爆破识别的历史。因为有关这两个主题，如今已有了两本写得极好的书，一本是斯威特(Sweet, 1978)著的《地球物理勘探史》；另一本是贝茨(Bates)、加斯克尔(Gaskell)和赖斯(Rice, 1982)共同撰写的《人类活动中的地球物理学》。看来，还是把重点放在我最感兴趣和我还具有某

种资格讲述的那些地震学问题是最为适宜的。

读者也许会注意到，本书讲到的一些发现大部分属于美国人和西欧人。造成这种结果的部分原因是由于我不具备阅读多种语言的能力；另外还由于当代的地震学主要是在早期对地震学感兴趣的两个中心的推动下发展起来的。一个中心在德国，是以格丁根(Göttingen)大学的维歇特(Emil Wiechert)和他的同事们为代表；另一个中心在大不列颠，为首的是马利特(Robert Mallet)和米尔恩(John Milne)以及那些热心于地震学的人们。米尔恩还是日本国地震学研究的奠基人。美国的地震学研究基础比较雄厚，但是直到发生了1906年旧金山地震之后，地震学才进入了发展的鼎盛时期。

最后，我愿意向凡读过本书部分或全部原稿的，及凡有助于使本书达到现在这么完整的所有同事们和朋友们表示谢意。我还要特别对安艺敬一(Keiiti Aki)，安德森(Don L. Anderson)，格伦(William Glen)，格林菲尔德(Roy J. Greenfield)，兰斯顿(Charles A. Langston)，拉文(Peter M. Lavin)和奥利弗(Jack Oliver)表示感谢。我还要向宾夕法尼亚州立大学的地球科学系，特别是该校校长亚历山大(Shelton S. Alexander)所给予的支持和鼓励表示衷心的感谢。

小本杰明·富兰克林·豪厄尔(Benjamin F. Howell, Jr.)

于宾夕法尼亚大学校园

目 录

序	(I)
第一章 绪 言	(1)
第二章 地震成因	(4)
1. 神话时代	(4)
2. 岩石断裂作用的认识	(5)
3. 深部地震的问题	(11)
4. 早期的震源机制研究	(13)
5. 断裂的可能机制	(16)
6. 由记录脉冲得到的震源特征	(18)
第三章 地震活动性和地震预测	(25)
1. 直接观察	(25)
2. 开始合作收集数据	(30)
3. 用板块构造理论解释地震活动性	(38)
4. 地震复发率的估计	(47)
5. 诱发地震活动性	(52)
6. 地震危险性图	(53)
7. 地震预测	(56)
第四章 地震仪器	(59)
1. 验震器	(59)
2. 惯性地震仪	(61)
3. 现代地震仪系统	(67)
4. 应变地震仪	(70)
5. 强震仪	(73)
第五章 地震脉冲和地球内部构造	(74)
1. 识别不同的地震脉冲	(74)
2. 地壳构造	(78)

3. 地幔构造	(81)
4. 地核	(87)
5. 地球内部的密度	(91)
6. 地球的自由振荡	(96)
第六章 地震大小的度量	(100)
1. 绪言	(100)
2. 烈度表	(100)
3. 震级	(106)
4. 地震矩	(113)
5. 地震能量	(116)
第七章 衰减	(123)
1. 绪言	(123)
2. 几何扩散	(124)
3. 频散	(125)
4. 散射	(127)
5. 吸收	(128)
第八章 脉动	(135)
第九章 海啸	(141)
1. 绪言	(141)
2. 成因	(142)
3. 传播	(146)
4. 海啸警报系统	(149)
附录: 地震学史中的大事记	(153)
参考文献	(157)

第一章 绪 言

很多年以前，当我还是个大大学生时，普林斯顿大学已故的巴丁顿(A. F. Buddington)在他讲授石油学的课堂上，曾对我们这群学生指出：在一个人的有生之年至少会赶上一次由于新的思想引入的科学领域，以致不得不放弃已建立得很好的思想，并且还需更新该领域的整个观点。这种革新已对地震学发生过三次影响，每一次的影响都可以简便地以一次特大地震为标志。

在 1755 年葡萄牙里斯本地震之前，人们曾普遍地把地震看作是“上帝”对人类行为不端而加以惩罚的一种“举动”；后来，由于仔细观察的结果，人们更多地把地震看作是一种自然现象，并对地震的认识也在逐渐稳步地加深。人们在认识上把地震看作是一种自然现象的变化，而这种变化并不是地震学所独有的，因为至少从法国的笛卡尔(René Descartes, 1596~1650)和德国的莱布尼兹(G. W. Leibnitz, 1646~1716)时代以来，这种变化已在科学的各个方面发展起来了。在 1755 年之后的一个半世纪里，人们对地震的认识还只是局限于从直接观察所得到的知识。这是由于当时缺乏测量地面运动的合适手段。一直到 19 世纪末研制出了灵敏的地震仪之后，人们才能从地震图上识别出传播的各种脉冲。

奥尔德姆(Richard Oldham, 1899, 1900)通过研究 1897 年印度地震的地震图，成为最早正确辨别出压缩波(P)、剪切波(S)和面波的人。这一发现预示着地震学进入了一个黄金时代，并且这个时代一直持续了半个多世纪。在此期间，地震学是探测地球内部的主要手段。虽然这种对地震图的解释预示了地震学新纪元的到来，但这也是由于研制出了改进的地震仪(参见第四章)才成为

可能。劳森(Andrew Lawson, 1908)在对 1906 年旧金山地震的地震效应所作的报告中,对地震效应的定性描述可以说达到了顶峰。然而,即使在这篇报告中正显示出新的重点放在了定量方法上,即表现在该报告中包括了 68 个观测台的地震图,并且采用了里德(H. F. Reid)对地震机制的解释。把劳森报告中的相对重点与克劳斯科普夫(K. B. Krauskopf)等(1968~1973)著的《1964 年阿拉斯加大地震》进行比较,可以看到后者是采用了 8 卷的篇幅来详细描述这一地震的每一个方面。

1960 年前后,由于下述三项进展的结合,又一次对地震学进行了革新。第一项进展是研制出了高速数字计算机,从而有可能处理各种各样的问题,例如对频散曲线的计算,这个问题在此以前是很难处理的(参见 Dorman, Ewing 和 Oliver, 1960)。第二项进展是由于需要有一种手段对提出的禁止地下核试验进行监测引起的,而监测地下核爆破的手段与天然地震是不同的。为了证明这种需要,有关方面给地震学研究提供了大量经费,并且有众多年青科学家被吸引投身于地震学研究,他们把此作为自己的事业。美国空军的高级研究计划局(简称 ARPA)在一段时间内,曾成为促进美国地震学发展的一个主要机构。ARPA 英明地支持了多项地震研究,其中包括许多基础性的研究以及限于识别核爆破的计划。该局作出最重要的贡献之一,就是与分布在世界上大部分地区的观测台合作,共计安装了 100 多套现代标准化地震仪。各个台把记录到的地震图寄到世界数据中心(现今在美国科罗拉多州的博尔德)。凡对这种地震图感兴趣的科学家都可从该中心获得该地震图的拷贝件。这样做带来两种效果:第一,通过与单个机构联系,即可迅速地得到对任何感兴趣的地震的地震图。而以前,为了渴望获得数据,人们不得不单独地给每个观测台写信联系,并且还需等待,有时甚至要等待数月之久。第二,也是一种更为重要的效果,即由于记录仪器的特性彼此相似,使得人们可以较为容易地比较不同地点的地面运动。由于可以容易地获得

良好的记录资料和研究经费，又有一大批年青有为的研究人员投身于这一领域，从而导致人们对地震的认识水平又有了飞速的提高。

第三项进展是，在迪茨(R. S. Dietz, 1961)和赫斯(H. H. Hess, 1962)发表了有关板块构造的论文之后，人们迅速地接受了板块构造学说。其实这种思想并不算新，但是支持这一学说的证据突然变得令人信服了(详见第三章的讨论)。其结果是，提出了把地球看作是热发动机的综合模型，以解释地震为什么会在何时何地发生。板块构造革命是一种表述完好的思想，是一个能够迅速地让人们放弃陈旧观念的极佳例证。这一学说不仅促进了地震学的迅速发展，而且还推动了整个地质科学的进步。

我们可把1960年的智利地震看作是现代地震学开始的标志。这时人们首次采用新式计算机对地球自由振荡谱进行彻底的分析，从而得到了有关地球内部的新信息(参见 Benioff, Press 和 Smith, 1961; Ness, Harrison 和 Schlichter, 1961; Alsop, Sutton 和 Ewing, 1961A)。

在获得这三项进展之后的几十年中，地震学研究的性质发生了变化。这表现在现今可以比以往提供数量大得多的数据，并且这些数据都经过了计算机处理。有时，数据可即时直接从地震仪反馈给计算机。借助计算机，用地震学方法推断出了地球构造或性状的多重模型，把这种模型与实际观测资料进行比较，可选出最为可能的模型。基于从板块构造学说得到的对地球变化过程的新认识，导致了可对地震危险性作出合理的评估，甚至已作过几次成功的地震预报(详见第三章)。当今获得的进展足以使地震预报成为数个国家(包括美国、日本)的国家级的研究目标。

第二章 地震成因

1. 神话时代

对古代和中世纪的大多数人们(甚至还包括当代的一些人)来说,地震是上帝或某种其它超自然的力量对人类行为不端而施加的一种惩罚。米尔恩(John Milne, 1886)曾总结过各种神话般的地震成因,例如日本国下面的大鲑鱼、青蛙(蒙古)、公猪(印尼的西里伯斯)或乌龟(美洲的印第安人)的扭动。

希腊作家爱作比较机械性的解释,如美里塔司(Miletas)的台利斯(Thales, 约公元前 580 年)认为,地球漂浮在一个浩瀚的大洋上,是大洋的风浪袭击着大陆(Sachs, 1979)。地下大孔穴中的风也常被人们假设为地震的成因。亚里斯多德(Aristotle, 公元前 340 年)把这种看法归因为是阿那克萨戈拉(Anaxagoras)哲学家提出的。亚里斯多德认识到某些地震与火山喷发有关。因为火山喷发常常涉及到猛烈喷出大量气体,因而合乎逻辑的假设是,大火山喷发前的地震是这种气体由地下一个洞穴扩展到另一个洞穴的结果。另一种看法认为,火山喷发后,由于洞穴顶部的塌陷形成了地震振动。笛卡尔(René Descartes)的假设是地下气体的爆炸引起了地震(Geike, 1905)。

到 17 世纪,已经发表了许多有关地震效应的描述,但是其中有些可能是被夸大或被歪曲了(Deresiewicz, 1982)。当时已能认识到地表位移是地震的一种效应,但还没有能将它与这种振动源联系起来。胡克(Robert Hooke)在 1668 年发表的《论地震》和随后的一些论文中指出,陆地的隆起与下沉是一种值得注意的地震效应(Adams, 1938)。富兰克林(Benjamin Franklin)在 1737 年对地面的长裂纹和峡谷的形成曾作过评述。

直到 1755 年,人们还一直把地下风和地下爆炸认为是地震的首要成因。温思罗普(John Winthrop)在讨论当年新英格兰地震时曾描述过,因水射到热岩上或由地下火焰产生的蒸汽所造成的膨胀蒸气在形成地震中的可能作用(Brasch, 1916)。在其后的一个半世纪里常被人们提到的米切尔(John Michell, 1760)也持相同观点。他的设想是,由于蒸气而产生的地震波沿地层界面传播,当地震波穿过时使得上覆岩石隆起。

2. 岩石断裂作用的认识

在 19 世纪期间,人们已逐渐认识到了岩石断裂的重要意义。最初,人们把断裂看作是地震的一种效应,而不是地震的成因。莱尔(Charles Lyell, 1835, 380 页)说“坚实地面的突然断裂可能会产生剧烈的震动”;但是他又说(389 页)“陆地的突然下沉有时也可能是由于地下洞穴坍塌的结果。”尽管莱尔(398 页)把地震的上升力看作是陆地块体隆起的原因,但是他仍重复米切尔的看法,即把在地层中传播的气体脉冲视为人们一般可以接受的地震波成因。

亨利(Henry D.)和罗杰斯(William B. Rogers, 1843, 345 页)提出观测到的脉冲振动“是由地壳的线性破裂……,以及高度压缩蒸气或其它气态物质突然通过所造成的裂缝而迅猛逃逸引起的”,这一看法已有一点接近于现代的认识了。虽然他们正确地设想断层作用在地震过程中是必不可少的,并用断层的长度来解释有感地区的椭圆形状,但是他们仍未能放弃那种一般把膨胀气体作用作为地震基本成因的陈旧观点。

当地球科学家观察到地震有时还发生在远离当代火山活动区时,就不得不考虑另外的成因。费希尔(O. Fisher, 1855, 160 页)在讨论瑞士地震时指出:“菲斯普山谷位于两个山脉的轴上,而这两个山脉都表现为一个巨大的上升山谷。该震也许是这一古老的扰动基底再次发生移动造成的,并且很可能是在菲斯普处的这些山谷之间的某个矩形拐角承受着主要位移。非火山区的地震可

能是由于支撑受到破坏的结果。在阿尔卑斯隆起时期，那些地壳中比较热的下部可能比其正常位置更加接近地表，而当冷却时，很可能发生支撑的收缩和破坏，阿尔卑斯的较近期的隆起使人们有理由认为这一过程仍继续在进行中。”那么“支撑的破坏”和“基底的移动”与断层作用是不是同一回事呢？

曾被戴维森(Charles Davison, 1927)认为是科学地震学主要奠基者的马利特(Robert Mallet)在当时似乎已接近于认识到断层的作用，但是他还未完全接受其全部意义。马利特(1859 B, 411 页)说：“脉冲的中心或地震的震源一般被设想为下述原因的结果，即由于突然的火山爆发或一个有限地区的突然隆起或下沉；或被弯曲和处于应变状态的地层的突然破裂；或可能是由于先前从高度炽热表面消散的水突然形成蒸气……；或可能是通过裂缝的蒸气的演变及其不规则的跃变(突变)式压缩”。马利特(1872, 261 页)还指出，“由波动粒子的运动或由于波经过而直接产生地震裂缝或裂隙在物理上是不可能的”。他从理论上提出了地震或者是火山形成的，或者是冷却产生的切向压力造成的。当时是收缩论统治着人们对山脉形成的看法。马利特(1872, 270 页)认为“地震是由地壳缓慢冷却产生的切向压力使得位于地球深部的岩石基底发生破裂或磨合而形成的。”从这一想法到把断层作用看成是震动的来源，还只是向前迈出了很小一步。

惠特尼(Josiah D. Whitney, 1872, 275 页)在讨论 1872 年加利福尼亚欧文斯谷地震时，也曾说过与此几乎相同的看法，即“随着拉伸或压缩的积累，直到物质的内聚力再也承受不了这种压力时，岩石就会破碎，并且形成裂缝，于是一个强而有力的脉冲传到压在上面的岩石”。惠特尼像马利特一样，也把应力归因于收缩，但出于某种理由，他强调是拉伸而不是压缩或剪切作为位移的成因，他当时还没有认识到单个大断层构造的重要意义。直到多年以后，吉尔伯特(Grove K. Gilbert, 1884)和霍布斯(William H. Hobbs, 1910)再次研究这一地区时，才清楚地认识

到断层与地震的真正关系。

齐特尔(Von Zittel, 1901, 284 页)认为,证明断层在地震中的重要作用,应归功于休斯(Edward Suess, 1873, 1875),他说:“休斯教授在他的两篇论及下奥地利地震和意大利南部地震的富有启发的文章中断定:地震沿山系的构造运动线发生,并且与任何火山现象完全无关。”在短短的几年内,人们接受了把断层作用看作地震的成因。赫尔内斯(Rudolph Hoernes, 1878)把构造地震作为三类地震中的最重要一类地震。其它两类地震是洞穴坍塌和火山活动期间造成的振动。

在整个 19 世纪人们已积累了许多有关地表断层的观测资料。1819 年印度库奇丛林沼泽地的一次地震形成了一个高 3~6 m 的山崖,即安拉朋德构造(安拉大坝),从而引起了人们对这一现象的高度关注(Macelwane, 1933, 4 页; Richter, 1958, 607 页)。1857 年加利福尼亚蒂洪堡地震产生了一条长达 110 km 的水平错动;加州欧文斯谷的地震产生了一个 7 m 的垂直山崖(Whitney, 1872; Hobbs, 1910; Richter, 1958)。通过在当地出版的非技术性报告和报道,这些现象才为人们所了解。这些事实又经过了相当长的时间才广为人知。我们今天对这些地震的许多认识都是在这些事件发生后经过多年科学研究才得到的。

吉尔伯特(Grove K. Gilbert)率先于 1883 年 9 月 20 日在《盐湖市讲坛报》(Salt Lake City Tribune)发表的一篇短文中,明确地提出了地震成因的断层理论;这篇短文是对那个城市面临地震危险而提出的一种警告。后来吉尔伯特在《地震理论》一书中(1884, 50 页),谈到大盆地中的断块山建造,他说:“上冲使地壳内发生局部应变(内含一定量的压缩和畸变),该应变一直在增加,直至足以克服沿断裂表面的初始摩擦力。突然,几乎是在一瞬间,出现一个足以释放这一应变的运动量,此后是长时间的平静,在此期间,应变又逐步地重新得到加强”。吉尔伯特(1884, 52 页)确认了在任何一个地点地震复发的间歇性,“在发生过地震的震源