

中国地震学会第三次学术年会论文
震源物理实验研究

国家地震局地震科学基金会
D850501课题组

地震学联合科学基金会
85032课题组

国家地震局地球物理研究所
1986年10月

目 次

课题组简介.....	(2)
改革中的震源物理实验室	(4)
论文	
1、由岩石力学实验研究地震前兆(耿乃光).....	(7)
2、岩石高压状态参数的实验研究(郝晋升).....	(22)
3、b值影响因素的实验研究(李纪汉).....	(39)
4、中国六条断裂带断层泥的摩擦系数(刘晓红等).....	(52)
5、岩石破裂前声发射的相对平静(方亚如、张智等).....	(62)
6、岩石破裂全过程的声发射b值(蔡戴恩、隋旺华等).....	(71)
7、海原断裂带断层泥在五千大气压下的密度和弹性波速度的实验 研究(耿乃光、郝晋升等).....	(94)
8、应力途径与岩石的摩擦滑动(耿乃光、李纪汉等).....	(123)
9、云南省九个地震台台基岩石的力学性质(耿乃光、 刘晓红等).....	(139)
10、断层泥力学性质与含水量关系初探(耿乃光、蔡戴恩、 方亚如等).....	(158)

课题组简介

本课题组向出席中国地震学会第三次学术年会的代表们致意，並借此机会介绍一下本课题组的情况。

一、研究内容

本课题组由两个课题构成。一个是国家地震局地震科学基金资助的项目(D850501)：滇西地震试验场介质力学性质的实验研究。另一个是地震学联合科学基金资助的项目(85震联基金准字第032号)：滇西地震试验场及我国主要地震区介质的力学性质和岩石破裂与摩擦滑动的研究。两课题研究内容一致。滇西地震试验场的工作由国家地震局地震科学基金资助。其它地区的工作由地震学联合科学基金资助。研究成果分别向两基金会报告。

课题组的研究内容有以下几个方面：

1、介质力学性质的实验研究。包括岩石高压状态参数和断层泥力学性质的研究。

2、地震成因的研究。开展高压下岩石的破裂实验，双剪摩擦实验，岩石热开裂等实验。研究岩石破裂与加载途径的关系及岩石破裂全过程本构关系。

3、地震前兆的模拟实验。探索前兆的机理及影响因素，着重研究岩石破裂过程中的变形与体积膨胀，声发射 Kaiser 效应与 b 值，波速异常等。

二、课题组成员

课题组由六人组成。耿乃光(助研)，李纪汉(工程师)、郝晋升(工程师)、刘晓红(技师)、方亚如(助工)、蔡戴恩(研实)。

三、课题组工作特点

1、依靠集体力量，充分发挥每个组员的作用。各种专业的成员之间互相配合、互相学习，取长补短。

2、开展与其它课题组的交流与合作。本课题组与二十多个课题组保持不同程度的连系和协作关系。这些课题组分属不同学科。在共同讨论实验方案，共同进行实验的过程中，本课题组向其它课题组学到了许多东西。开扩了思路。

3、改革科研组织工作。将课题思想与实验技术有机地融为一体，提高了工作效率。

四、工作进展

到目前为止，为期两年的D 850501课题已执行一年。为期四年的85震联基金准字032课题已执行一年半。研究计划如期完成。两课题共完成17项研究。写成论文二十余篇。已在各学术讨论会宣读论文14篇。在学术刊物上已刊出研究报告10篇。（学会宣读与刊物发表有重复）。

本课题组谨向提供科研经费的国家地震局地震学基金会和地震学联合科学基金会，协助野外采样工作的国家地震局滇西地震试验场、云南、山东、宁夏、新疆、四川、西藏等地震局或地震办公室，协助进行研究和共同讨论过本课题研究工作的课题组和同志们致谢。

课题组长 耿乃光

1986年10月

改革中的震源物理实验室

一、前言

在当前科研体制改革的形势下，实验室应该怎么管才能充分发挥设备潜力，促进科研发展，这是一个需要在实践中探索的问题。1984年底，当本实验室着手改革管理办法时曾作过一些设想。经过一年多的实践，这些设想基本实现。为了把今后的工作做得更好，对实验室一年半来的改革进行总结是十分必要的。

二、改革前实验室概况

本实验室名为“震源物理实验室”，是一个以研究地震成因和前兆机理为目的的岩石力学实验室。实验室拥有价值5万元以上的大型仪器设备5台套，通用测量仪器15台。改革前实验室属一个课题组，设备主要供本组使用。每年可取得科研成果3—4项。有时也有外单位的研究人员来实验室工作，平均每年约一起。

三、科研体制改革出现的新问题

在科研体制改革进程中研究所决定从1985年起实行基金制。原属实验室的研究人员各自独立提出课题。实验室以外从事理论研究的同志也提出了理论与实验相结合的课题。此外，震源物理学科以外的课题组也提出了使用本实验室的要求。改革促进了理论研究和实验研究的结合，促进了各学科之间的结合，这是一件好事，有利于科学事业的发展。但也对实验室提出了新的要求。其中最主要的一点是要求实验室打破过去主要为一个课题组服务的局面，要求

实验室为多课题组服务。这是实验室面临的新问题。

四、实验室新管理办法的提出

科研体制的改革全国都在进行。我们了解了一些单位实验室的管理情况。有些单位实验室仍处于一个课题组控制下，管理无制度，使用无章法，本单位其它课题组很难使用。有的单位实验室成了公共场所，大家使用、无人管理，很快造成设备损坏停运。中国科学院系统一些单位成立中心实验室的做法给我们很大的启发，即实验室统一管理，为多课题组服务。我们认为这个方向是正确的。我们按照这种原则、结合本实验室的具体情况，提出了实验室管理的改革方案，其内容要点是：

- (一) 震源物理实验室以发展地震学基础研究为目的，促进理论研究、现场观测研究和实验研究的结合，促进本学科与其它学科的结合。
- (二) 实验室为多课题组共同使用、面向全所、全地震局系统及全国。
- (三) 成立实验室管理组，负责实验设备的管理，保养、维护及重要设备的专人操作。
- (四) 各课题组要使用设备，事先提出计划，由管理组安排。
- (五) 各课题组根据使用设备的种类及时间交一定的使用费。此收入用于设备维修。
- (六) 实验室根据学科发展需要适时组织专题研究，组织多课题组从多学科角度对同一关键问题进行联合研究。

五、一年半实践的初步效果

在实行改革的一年半的时间里，已有18个单位所属24个课

题组的63名科研人员在实验室进行了研究工作，共取得科研成果72项。在这一年半的时间里，来实验室工作的科研人员接连不断，许多人是具有较高理论水平，具有丰富的现场经验而过去未曾作过实验的高研，这些同志在实验室配合下扬长避短、很快取得较高水平的科研成果。在此期间，有11位研究生在实验室进行了学位论文的实验工作，有23位研究生在实验室上了岩石力学实验课，培训了两名在职人员。

作为组织专题研究的试点，1985年下半年组织了一次“b值模拟实验研究”。针对在地震前兆研究中，国际地震学界关于b值实质的争鸣，以及我国在此前研究领域落后状况，组织了地震局直属三单位、三个学科的六个课题组进行联合研究。二十多个科研人员（其中高研5人，中研7人）经半年努力，取得10项实验研究成果，为我国b值模拟实验开创了良好开端、也为实验室组织专题研究提供了经验。

六、结语

实验室改革的初步结果表明，实验设备的潜力是很大的。只要有合理制度、把实验设备管好，打破部门所有制，为科研人员服务，就能使实验设备在科研中发挥应有的作用。

本实验室的改革尚处初始阶段、经验不足，出现一些新问题尚待解决。但改革给实验室带来的活力已经越来越清楚了。

本实验室属中型实验室，实验设备能力有很大的局限性。实验室的同志们决心把设备管好，为我国从事地震学研究的各课题组服务。值此中国地震学会第三次学术年会召开之际，谨向会议代表致以亲切的问候。

震源物理实验室负责人：郝晋升、李纪汉

1980年10月

由岩石力学实验研究地震前兆

耿乃光

(国家地震局地球物理研究所)

摘 要

本文概括地分析了地震前兆研究的现状。认为用前兆预报地震方向正确,但研究地震前兆必须有科学基础,包括可靠的观测基础,实验基础和理论基础。指出七十年代Brace根据常规三轴实验资料提出的岩石破裂前兆综合图用于解释地震前兆的规律过于简单。最近完成的一系列实验表明,从一定的应力状态开始,三个主应力的变化都可以引起岩石破裂而破裂前兆有很大的不同。此外还存在有应力场变化已引起了与破裂前兆性质相同的力学量的异常表现而岩石并不破裂的场合。提出用六种应力场变化场合下的三个不同方向的18张力学量异常表现规律图代替Brace的一张图,从而在考虑应力场变化的不同类型这一个方面扩充了地震前兆研究的实验基础。

一、引言

近二十年来地震学中的主要问题是地震预报问题。人们在用地震前兆预报地震发生的空间、时间和震级三要素的研究上投入了很大的力量并取得了进展。研制了各种仪器并建立了一系列观测台网。前兆现象一个接一个地被人们发现使研究者受到鼓舞。一些人以为只要多建台站并提高观测精度来发现前兆现象就可以预报地震。还有人认为发震时间和震级与前兆出现的时间和幅值之间有简单的数学关系。二十年来的实践使人们逐渐认识到前兆与地震之间的关系非常复杂。除了应继续加强和改进观测外还须对前兆的本质进行深入的研究才能掌握它的复杂的规律。

利用前兆预报地震，这个方向是对的。然而研究地震前兆必须有科学基础。前兆研究的科学基础包括三个方面：一、可靠的观测基础。必须确保观测到的物理力学量是与构造运动有关的量并达到必要的精度。至于这些地球物理场的变化是不是地震前兆，不是观测本身所能确定的。同一种可靠的由构造运动引起的地球物理场的变化而且量级相等，有时可以是地震前兆，有时则不是地震前兆。二、实验基础。实验的意义在于人们可以在实验室中人工控制的条件下在一定程度上使发生在现场的某些前兆现象重演以证实其科学性，并通过改变这些控制条件以探索前兆的规律性。三、理论基础。将现场观测到的前兆现象与实验室中得到的模拟现象联系起来，运用物理学的基本规律进行分析，建立起适当的模式。模式是人们对前兆本质及规律认识的集中表现，它能否用于指导前兆分析以实现地震预报，有赖于人类在一定时期的认识水平。

本文想讨论一下地震前兆研究的实验基础。1971年Brace在岩石破裂实验的基础上给出了一张反映前兆规律性的综合图（图1b）〔1〕。这个图曾作为七十年代许多有关前兆模式的依据〔2〕。这个图和这些模式曾成功地解释了地震前的波速异常和微震增加等前兆现象，但也存在着与这张图和这些模式不相符的场合。这表明七十年代人们的认识水平还未能解决利用前兆预报地震的问题。

Brace的这张图是建立在可靠的实验基础上的。就图本身来说是正确的，但用它来反映地震前兆的规律性就过于简单化了。

Brace的图建立在Kármán开创的岩石力学常规三轴实验的基础上〔3〕。其实验加载方式如图1a所示。实验时，先对岩石加一定的围压（最大主应力 σ_1 ，中等主应力 σ_2 和最小主应力 σ_3 都等于

一个一定的值： $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = P$ ），再保持中等主应力和最小主应力不变单独增加最大主应力使岩石破裂。在此过程中观测岩石的破裂前兆並研究其规律性。然而，地壳中岩石所处的应力状态和应力变化的方式决非如此简单，所以 Brace 的图及有关模式不能适应复杂的前兆表现很快就遇到麻烦。要想再前进一步必须考虑地壳内部各种可能的情况。

二、实验工作的进展

为了模拟地壳中岩石所处环境的复杂性，人们在实验中考虑了多种情况。研究了温度的影响、孔隙水的影响，介质性质的影响和构造的影响等等。这些实验从各个方面丰富了人们对影响岩石破裂前兆因素的了解，都是很有意义的。有了这些因素的影响，岩石破裂前兆的表现比图 1 b 复杂得多。联系现场的地震前兆活动，人们考虑到在不同地区的介质性质，构造特点和环境条件不同，因而地震前兆规律应该有地区性、即各个地区有各自的前兆规律。这种想法显然是一个进步，前兆规律的确因地区而异。然而在同一地区各次地震的前兆表现仍然有很大的不同。

影响前兆规律性的另一个重要因素是应力场的变化方式。为了阐明应力场的变化类型对地震前兆规律的影响，近十多年来进行了一系列的岩石力学实验。针对常规三轴实验中等主应力 σ_2 与最小主应力 σ_3 始终保持相等的局限性，茂木清夫设计了真三轴试验机。其中三个主应力均可独立地变化。茂木实验的加载方式如图 2 a 所示。茂木用此方法进行了大量的实验以阐明中等主应力效应〔3-8〕。实验表明，中等主应力不但影响到岩石的强度和延性与脆性，还影

响到破裂前兆。特别是中等主应力效应造成了破裂前兆的各向异性。

茂木的实验与常规实验有一个共同点，即岩石的最终破裂仍由最大主应力的增加引起。为了探索其它主应力变化的影响，曾作过应力途径和破裂前兆的研究〔9〕。由于实验是用常规三轴试验机进行的，实验又受到了最小主应力和中等主应力不能独立变化的限制。许东俊等用茂木清夫的真三轴试验机进行了单独改变最大主应力 σ_1 、中等主应力 σ_2 或最小主应力 σ_3 的实验。〔10~12〕。实验得到的主要结果是：一，岩石在一定的应力条件下，三个主应力中的任何一个的独立变化都能导致岩石的破裂。二、不同主应力变化引起岩石破裂的前兆规律不同。三、在某些主应力变化过程不引起岩石破裂的情况下，出现与破裂前兆本质相同的力学量的变化。

下一节以这些实验结果为基础，探讨不同应力变化方式下的力学量变化的一般规律。

三、应力变化类型与前兆规律

图2给出了六种最简单的应力变化类型。在实验的最后阶段三个主应力中只有一个在变化而另外两个保持不变。应力变化类型的代号和相应的实验最后阶段应力变化方式以及岩石是否破裂的情况如表1所示。代号的选择考虑了过去发表的文章中的代号。

表 1、应力变化方式与岩石是否破裂的情况

类型	实验最后阶段 应力变化方式	岩石是否破裂
A	σ_1 增加	破裂
A ⁻	σ_1 减小	不破裂
M ⁺	σ_2 增加	脆性岩石破裂, 延性岩石不破裂
M ⁻	σ_2 减小	破裂
C	σ_3 增加	不破裂
B	σ_3 减小	破裂

图 3 给出了上述六种应力变化方式下三个主应力方向的应变 ϵ_1 、 ϵ_2 和 ϵ_3 ，三个主应力方向的波速 V_{p1} 、 V_{p2} 和 V_{p3} 以及声发射率 A_E 的变化规律。图中横座标 $\Delta\sigma/\sigma_U$ 为差应力与破裂强度的百分比，纵座标未给出定量标度仅表示相对大小。在岩石发生破裂的场合，这些力学量的变化就是破裂前兆，在岩石不发生破裂的场合，这些与上述破裂前兆本质相同的力学量的变化，有时尽管非常显著，但不能称其为破裂前兆。

表 2. 六项肌肉型化方式不同肌型、收缩和声时射率时变化程度

类型	力学量	σ_1 方向	σ_2 方向	σ_3 方向
A	ε	$\sigma_1 = 0$; 弱, 缩短 $\sigma_2 = 0$; 中, 缩短 $\sigma_3 = 0$; 中, 伸长	$\sigma_1 = 0$; 弱, 缩短 $\sigma_2 = 0$; 中, 伸长 $\sigma_3 = 0$; 弱	$\sigma_1 = 0$; 强, 伸长 $\sigma_2 = 0$; 中, 伸长 $\sigma_3 = 0$; 弱
	V_F	弱	$\sigma_1 = 0$; 弱 $\sigma_2 = 0$; 中	$\sigma_1 = 0$; 强 $\sigma_2 = 0$; 中
	A_F	早	常出现早, 弱	常出现早, 强
	ε	弱, 缩短伸长	$\sigma_1 = 0$; 弱, 缩短伸长 $\sigma_2 = 0$; 弱, 伸长缩短	$\sigma_1 = 0$; 强, 伸长伸长 $\sigma_2 = 0$; 弱, 伸长缩短
A'	V_F	弱	弱	$\sigma_1 = 0$; 中 $\sigma_2 = 0$; 弱
	A_F	早	常出现早, 活动程度中等	常出现早, 活动程度中等
	ε	弱, 缩短伸长	弱, 伸长缩短	强, 伸长
	V_F	弱	弱	强
B	ε	$\sigma_1 = 0$; 弱, 缩短 $\sigma_2 = 0$; 中, 缩短 $\sigma_3 = 0$; 中, 伸长	$\sigma_1 = 0$; 弱, 缩短 $\sigma_2 = 0$; 中, 伸长 $\sigma_3 = 0$; 弱	$\sigma_1 = 0$; 强, 伸长 $\sigma_2 = 0$; 中, 伸长 $\sigma_3 = 0$; 强
	V_F	弱	$\sigma_1 = 0$; 中 $\sigma_2 = 0$; 中	$\sigma_1 = 0$; 强 $\sigma_2 = 0$; 中
	A_F	早	常出现早, 活动程度弱	常出现早, 活动程度弱
	ε	$\sigma_1 = 0$; 弱, 缩短 $\sigma_2 = 0$; 中, 伸长 $\sigma_3 = 0$; 中, 伸长	$\sigma_1 = 0$; 弱, 缩短 $\sigma_2 = 0$; 中, 伸长 $\sigma_3 = 0$; 弱	$\sigma_1 = 0$; 强, 伸长 $\sigma_2 = 0$; 中, 伸长 $\sigma_3 = 0$; 强
B'	V_F	弱	弱	$\sigma_1 = 0$; 中 $\sigma_2 = 0$; 弱
	A_F	早	常出现早, 活动程度弱	常出现早, 活动程度弱
	ε	$\sigma_1 = 0$; 弱, 缩短 $\sigma_2 = 0$; 中, 伸长 $\sigma_3 = 0$; 中, 伸长	$\sigma_1 = 0$; 弱, 缩短 $\sigma_2 = 0$; 中, 伸长 $\sigma_3 = 0$; 弱	$\sigma_1 = 0$; 强, 伸长 $\sigma_2 = 0$; 中, 伸长 $\sigma_3 = 0$; 强
	V_F	弱	弱	$\sigma_1 = 0$; 中 $\sigma_2 = 0$; 弱

1-2-1

表2给出了六种应力变化方式下的应变、波速和声发射变化程度的对比。变化程度也未定量地给出，仅定性地分作强、中和弱三等。因为实验资料来自十多种岩石其数据各不相同，而且这些实验数据也不能直接用于现场。这里仅想给出一个规律和相对的大小，供分析前兆观测资料时参考。各种前兆的量级只能由现场观测得到。

由以上图表可以直接看到由于应力场变化方式不同引起的多种多样的力学量异常表现。

1. 存在着出现变形增加、波速下降和声发射率增加的前兆之后发生破裂的理想情况。
2. 变形、波速和声发射率的异常量级与应力变化方式有关，变形和波速的异常量还与观测方向有关，不完全由破裂时能量释放的大小决定。
3. 在一些场合下波速和声发射异常现象出现极晚，难以用来预告岩石的破裂，变形在破裂前相当长时间内总会在某个方向有所反映。
4. 在某些场合下出现了变形、波速和声发射异常而岩石不发生破裂。

由此可见，现场前兆观测研究中所遇到的有兆有震，有兆无震、小兆大震、大兆小震和几种前兆此强彼弱，此现彼隐的错综复杂的现象可以在实验室人工控制的条件下在一定程度上重演。图3和表2反映了这种复杂性，而图1b仅反映了一种十分理想的情况。

四、讨论

考虑了六种应力变化方式的三个方向上力学量的变化规律，用18张图代替Brace的一张图，对于解释前兆现象的多样性更适应些。然而这六种情况仍是应力变化的最简单的情况，即三个主应

力同时变化的情况或交替变化的情况(曾作为少量这方面的实验〔13〕)。还可能出现各个主应力相互转化的应力变化情况。这都是本文所未涉及的。如果再考虑温度、孔隙水、介质性质与构造等的影响,且不谈地震前兆,即岩石在实验室中的破裂前兆就十分复杂多样。

然而在某一个地区的某一时期、地壳中岩石的环境状态与应力场变化方式不一定包括了上述一切可能性而只限于某些种。这样有可能使问题得到一定程度的简化。也就是说,在前兆研究中不但介质、构造和环境条件具有地区性,应力变化方式也具有地区性。阐明这些条件的影响对掌握特定地区的前兆规律十分重要。

因此,应力场的变化本身不但可以作为一种前兆、而且是决定其它一些前兆类型的重要因素。李四光教授在1967年说过“如果抓不住地应力的变化过程,就很难预言地震是否发生”〔14〕。掌握地壳中三个主应力的尺寸及其连续变化过程将有助于解决地震预报问题。

本文给出的图表,仅仅是实验结果的概括。正如前言所指出的那样,只有把现场观测到的可靠的资料与实验结果联系起来,建立起适当的理论模式,才有可能将前兆研究由经验引向科学的轨道,更好地用于地震预报。

参考文献

- [1] Brace, W. F. Micromechanics in rock systems, Proc. Civil Engineering Materials Conference, Southampton, in Structure, Solid Mechanics and Engineering Design, Part 1, M. T. M. T. (Ed.), New York, Wiley-Interscience, 187-204, 1971.
- [2] Mjachkin, V. I., Brace, W. F., Sobolev, G. A., and Dieterich, J. H. Tow Models for Earthquake Foreruners, Pageoph. 133, 169-181, 1975.
- [3] Kármán, T. von, Festigkeitsversuche unter allseitigem Druck, Z. Verhandl. Deut. Ingr., 55, 1749-1757, 1911.
- [4] 茂木清夫 岩石の破壊 および降伏条件, 材料, 20, 209, 143-150, 1971.
- [5] Mogi, K. Fracture and flow of rocks under high triaxial Compression, Journal, Geoph. Res. 76, 5, 1255-1269, 1971.
- [6] Mogi, K. Effect of the triaxial stress system on fracture and flow of rocks, phys, Earth planet, Interiors 5, 318-324, 1972.
- [7] Mogi, K. Fracture and flow of rocks Tectonophysics, 13(1-4), 541-568, 1972.

- [8] Mogi, K. Dilatancy of rocks under general triaxial stress states with special reference to earthquake precursors, Journal phys. Earth, 25, suppl, s 203-s217, 1977.
- [9] 耿乃光、陈黑贞、姚孝新, 应力途径和破裂前兆, 地震学报 2、3、236-244, 1980.
- [10] 许东俊 耿乃光 中等主应力变化引起的岩石破坏与地震 地震学报 6、2、159-166.
- [11] 耿乃光 许东俊 最小主应力减小引起的岩石破坏, 地球物理学报. 28, 2, 191-197, 1985.
- [12] 耿乃光、姚孝新、陈黑贞、许东俊, 应力途径的研究, 中国地震, 1、2、61-66, 1985.
- [13] 耿乃光 不同应力途径下岩石的体积变化, 西北地震学报 4、1、115-125, 1982.
- [14] 李四光 解决地震预报的方法与途径 地震地质 33-34. 科学出版社 1977.