

编 号: (79)012

内 部

出国参观考察报告

西德地球物理研究简况

56.2
144

科学技术文献出版社

出国参观考察报告
西德地球物理研究简况
(内部发行)

编辑者: 中国科学技术情报研究所
出版者: 科学技术文献出版社
印刷者: 中国科学技术情报研究所印刷厂
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

开本 $787 \times 1092 \cdot \frac{1}{16}$ 1.25印张 32千字

科技新书目: 133—18

统一书号: 13176·69 定价: 0.20元

1979年9月出版 印数: 6700册

目 录

一、概况	(1)
二、震源物理的实验、原地可控试验和理论研究的进展	(2)
1. 摩擦实验及其与野外情况的关系	(2)
2. 有关前兆现象的岩石物理性质的实验室观测	(3)
3. 震源物理的理论和研究尺度效应的理论方法	(4)
4. 联系实验室研究和地震的中等尺度的原地可控破裂 试验	(6)
三、西德地球物理研究简况	(7)
1. 爆炸地震学	(8)
2. 地球内部结构	(8)
3. 地球动力学	(8)
4. 震级、地震矩和其它震源参数	(8)
5. 西德的岩石实验研究	(9)
6. 西德的地震观测工作	(13)
四、附件 西德地球物理研究机构简况	(18)

西德地球物理研究简况

陈运泰 陈 颢

一、概 况

《地震震源物理的实验破裂力学国际讨论会》(International Symposium on Laboratory Fracture Mechanics Related to Earthquake Source Physics) 于1978年9月26日至29日在德意志联邦共和国的巴德·霍内夫(Bad Honnef)举行。这次讨论会由国际地震学和地球内部物理学协会(International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior)所属的地震预报委员会(Commission on Earthquake Prediction)的一个分会——地震震源物理分会(Subcommission on Earthquake Foci Physics)主办。参加讨论会的有西德、英国、挪威、意大利、瑞典、美国、波兰、东德、苏联、日本、澳大利亚、加拿大、中国等13个国家的40名科学工作者。我们两人参加了这次讨论会。

会议由西德波胡姆(Bochum)的鲁尔大学地球物理研究所(Institut für Geophysik, Ruhr-Universität)的Rummel教授负责组织。讨论会期间举行了四次全体会议,每次会议围绕一个问题进行讨论。四次会议所讨论的问题、会议主席及每次会议开始时担任综合评述的科学家见表1。

表 1

会 议	议 题	会 议 主 席	评 述 人
1	摩擦*	Dieterich (美) 和 Rutter (英)	Logan (美) 和 Stesky (加)
2	物理性质**	Mogi (日) 和 Nur (美)	Nur (美) 和 Spetzler (美)
3	理论+	Nikitin (苏)	Kostrov (苏) 和 Rice (美)
4	原地试验++	Mc Garr (美)	Gay (南非), Hurtig (东德) Baule (西德) 和 Will (西德)

* 摩擦实验及其与野外情况的关系。

** 有关前兆现象的岩石物理性质的实验室观测。

+ 地震震源物理学的理论和研究尺度效应的理论方法。

++ 联系实验室研究和地震的中等尺度的原地可控破裂实验。

会议结束后,承国际地震学和地球内部物理学协会主席、西德法兰克福大学地球物理教研室主任Berckhemer教授热情安排,我们对西德的地球物理研究机构、地震台网、震源物理实验室作了为期十一天(9月30日至10月10日)的参观访问。我们所参观访问的单位及其负责人的情况见表2。

表 2

所 参 观 的 单 位	主 要 负 责 人
1. 波胡姆的鲁尔大学地球物理教研室	H. Baule 教授
2. 鲁尔大学地球物理教研室岩石力学实验室	F. Rummel 教授
3. 法兰克福大学地球物理教研室	H. Berckhemer 教授
4. 卡尔斯鲁厄大学地球物理教研室	K. Fuchs 教授
5. 西尔塔克的黑森林观测所	H. Maelzer 副教授
6. 斯图加特大学地球物理教研室	K. Strobach 教授
7. 图宾根的稜那兹电子公司	Lennartz
8. 爱尔兰地震中心台	H. Aichele 博士
9. 汉堡大学地球物理教研室	S. J. Duda 教授
10. 基尔大学地球物理教研室	R. Meissner 教授
11. 基尔大学矿物学-岩石学教研室	H. Kern 教授

二、震源物理的实验、原地可控试验和理论研究的进展

震源物理主要根据野外观测、实验室的岩石破裂力学实验以及中等尺度的原地可控试验来研究地震的孕育和发生规律,从而实现地震预报。国际地震学界一般认为,虽然不知道发生地震的物理过程也能做些地震预报;但只有了解了震源物理过程才有可能真正实现地震预报。基于这种想法,无论是美国、苏联,还是日本等其它国家,都是通过野外观测、实验室实验和原地可控试验三个方面检验各种可能的地震发生的机制。

这次会议的目的是对震源物理这个新兴的领域进行回顾,对理论和实验工作进行评价,综合实验和理论研究成果。由于与会者都是这方面专业工作者,为了使会议开得生动活泼,会议规定,除一、二名综合评述者外,所有报告人的发言都以5分钟为限,只允许放二至三张幻灯片,以留有充分时间进行学术讨论。下面根据会议的议题,对会上交流的情况作简单的介绍。

1. 摩擦实验及其与野外情况的关系

地壳内多数地震是沿原有断层附近发生的,因此,摩擦可能是不稳定过程的主要控制因素。大家普遍认为,摩擦实验最好也不过是天然断层摩擦过程的高度简化的模拟。其好处在于能将被研究的过程和参数隔离出来。实验结果表明,在地壳内部的温度压力条件下,摩擦现象和下述因素有关:岩石种类、温度和压力条件、水和断层泥的存在、滑动率和滑动面的特性。摩擦实验方面的最大进展,就是发现在粘滑之前总是存在着稳态滑动。如果粘滑是地震的一种机制,那么这种粘滑前的滑动对于地震预报是很有意义的,因此对于这种震前滑动产生的条件、滑动规律以及它对各种前兆现象产生的影响开展了许多实验。特别值得提及的是,美国门罗公园的Dieterich为了研究稳态滑动的细节,制作了一台大型摩擦实验装置,样品大小为 $150 \times 150 \times 40$ 厘米³,重达几吨。他发现,粘滑产生的应力降很小,而且滑动事件不是沿整个断层面同时开始的,仅仅限于断层面的中部,稳态滑动以有限的速度在断层面的某些部份传播。实验还发现,实验室中粘滑产生的应力降一般是较大的,这是由于实验机系统与摩擦过程相互作用的结果,可控摩擦实验表明,在高刚性试验机上应力降可以明显地减小。会上共提出了6篇关于摩擦研究的报告,详细情况见表3。

表 3

报 告 人	报 告 题 目
J. Logan (美国)	岩石摩擦性质和模拟断层泥实验研究的最新进展 (综合评述)
R. Stesky (加拿大)	高温摩擦、变形机制和本构律
N. Barton (挪威)	考虑尺度效应的剪切实验方法
H. J. Alheid (西德)	5 千巴和500℃ 锯口岩石样品的粘滑和稳态滑动
E. Rutter (英国)	断层带硅酸盐矿物的特性
J. Dieterich (美国)	大型岩石样品的摩擦实验和水在粘滑中的作用

2. 有关前兆现象的岩石物理性质的实验室观测

这个议题的论文数量最多, 讨论的时间也最长。所涉及到岩石的物理性质有: 波速、电性、磁性、渗透率、孔隙度和密度、声发射特征和光学性质等。讨论了以下因素对物质性质和前兆变化的影响:

应力: 围压, 非对称三轴应力, 应力变化率, 常应力 (蠕变破裂);

应变率;

结构和成分: 非均匀性, 非各向同性, 间断面的存在;

延性和脆性;

温度;

水和其他孔隙流体的作用。

岩石破裂过程中的物理性质变化多半与膨胀有关。自从1965年以来, 特别是1971年膨胀-扩散模式提出后, 对于岩石的膨胀进行了大量细致的研究。地震很大, 而前兆效应却非常小, 这就提出了一个尖锐的问题, 是由于大地震之前应力变化很小呢? 还是别的什么因素? 尽管一些资料似乎表明, 在具有间断面的不稳定滑动之间也有膨胀存在, 但对于从完整岩石样品的实验中得到的结论是否适用天然断层带附近仍不清楚。Shamina 报告了在有机玻璃中观测穿过断层面的波速先下降, 接着又发生了回升。Atkinson指出了研究岩石的稳态慢断裂的重要性。Mogi报告了他的真三轴实验的结果, 说明岩石各向异性的膨胀可以造成强度等性质的明显差异。Nur在讨论中指出, 实验室研究样品的尺度与天然地震及原地实验相比, 是十分不同的 (表4), 因此, 要定量地研究地震的前兆现象, 必须开展尺度效应的研究。

表 4

实 验 室	原 地 实 验	天 然 地 震
样品大小 L	1mm~10km	10~10 ³ km
滑动距离 l	1cm~1m	0.1m~100m
尺度比例	$\frac{L_{\text{原}}}{L_{\text{实}}} \sim 10^4$	$\frac{L_{\text{天然}}}{L_{\text{原}}} \sim 10^4$
扩散时间比例 ($\tau \propto L^2$)	1~10 ⁸	1~10 ⁸

在实验方面还有一点要提及的, 就是有关岩石断裂力学参数测试工作的开展。岩石断裂

和裂纹传播、孔隙流体等对应力腐蚀的影响，这些都是有意义的课题，从实验得到的断裂韧性、表面能等断裂力学资料越来越多地应用于震源物理的研究。我们感到，在有关岩石性质的实验方面，尽管没有象“膨胀-扩散”模式刚刚提出时那样引人注目的成果，但在学术思想方面比那时要活跃得多。有关这个议题的文章介绍见表5。

表 5

报 告 人	报 告 题 目
A. Nur (美国)	断裂的不均匀性 (综合评述)
H. Spetzler (美国)	破裂过程中岩石的物理性质 (综合评述)
F. Rummel (西德)	花岗岩、蛇纹岩在脆性和延性破坏时的波速
H. Kern (西德)	高温高压下玄武岩的波速，水解反应
O. Shamina (苏联)	模拟材料中穿过剪切面波速的测量
H. Stiller (东德)	利用实验室实验解释震源物理过程的可能性
H. Berkhemer等 (西德)	微裂纹密度、破裂强度和Q值的实验
茂木清夫 (日本)	真三轴压缩下岩石膨胀的各向异性
G. Holzhausen (挪威)	破裂的形成
陈 颀 (中国)	辉长岩破裂研究
D. Lockner (美国)	花岗岩断层形成时的声发射
B. K. Atkinson (英国)	石英和石英岩在潮湿环境下的稳态慢断裂，与时间有关的断裂和应力腐蚀

3. 震源物理的理论和研究尺度效应的理论方法

地震总是伴随着突然的应力降。现在已经知道，在地壳的温度、压力条件下，有两种情况可以产生突然的应力降。一种是完整岩石的脆性破裂，另一种是预先存在的断层上的粘滑。这两种情况统称破裂 (rupture)。国际上对脆性破裂和粘滑，已经作了许多实验和理论研究。但是仍有许多问题尚待澄清。归纳起来，主要有以下四个方面的问题：

- (1) 脆性破裂和粘滑的本构律；
- (2) 影响断层的稳定滑动和不稳定滑动的因素；
- (3) 破裂的不均匀性；
- (4) 断层的“愈合”。

就这些问题，B. Kostrov等十人在会上作了报告。表6是报告人和报告的题目。

B. Kostrov的报告只是一个简单的评述。他的报告仅仅涉及到线性断裂力学中的一些基本概念和结果，如人们所熟知的三种基本类型的裂缝、破裂面端部附近的应力分布、应力强度因子等等，没有提出新的研究成果。

J. Rice和J. W. Rudnicki两人的报告则与B. Kostrov明显不同。在他们的报告中，提出了和岩石基本性质有关的失稳模式，并定量地研究了孔隙流体可以部份地导致地震破裂过程稳定的两种机制。他们指出，包体介质的膨胀硬化和包体外围介质的刚度随时间变化都可以使岩体不立即发生动力学破裂，而发生一种自行加速到动力学失稳的缓慢破裂。这种自行加速的形变可以表现为地面的加速蠕动或地倾斜异常，从理论上来说，是一种可以观测到的前兆。他们还研究了这种加速形变前兆异常的持续时间和岩石性质的关系。这类理论工作对

表 6

报 告 人	题 目
1 B.Kostrov (苏联)	论应用线性破裂力学于地震震源物理问题的原理
2 J.Rice (美国)	与岩石基本性质有关的失稳模式
3 L.Nikitin (苏联)	不稳定能量平衡准则用于研究类似岩石的材料中剪应变地点图象限制效应的结果
4 J. W. Rudnicki (美国)	窄的弱化断层带的孔隙流体的致稳作用
5 H.Stöckl (西德)	动态破裂传播的力学模式
6 A.Nur (美国)	破裂的非均匀性
7 M.Bonafede (意大利)	裂缝发生后应力场的变化——余震的一种物理模式
8 K.Broberg (瑞典)	动力学的滑动传播
9 N.Barton (挪威)	按破裂及摩擦两种假说得出的应力降的大小
10 J.H.Dieterich (美国)	包括了刚度效应的摩擦的基本规律

地震预报实践很有意义。

在地震的震源理论里，通常以弹性位错或等效力表示震源。若假定已知断层面上的位移时间函数，就可以按照弹性位错理论计算弹性介质中的位移。在位错理论里，位移时间函数是预先假定的，不是从计算得到的。要解决这个问题，靠位错理论不行，要借助应力松弛源理论。这就是把地震震源看作是在某一区域（通常设想为一个平面）内的应力状态发生了松弛。在这种情况下，断层面周围的物质就要发生运动并向外辐射地震波。如果已知预应力和介质的性质，便可计算出震源区的全部运动过程。根据这种想法，Stöckle作了应力松弛模式的有限差分计算，计算了两种类型（Ⅱ型和Ⅲ型裂缝）的震源辐射的近场地震波。他不但计算了同时破裂情形，还计算了有限破裂速度情形。通过计算，清楚地显示了终止震相对位移时间函数的影响，以及断层面上质点的运动是如何错过过头，然后阻尼振荡至新的平衡态的。Stöckle还指出，用有限差分法计算应力松弛模式可以得到许多有意义的结果，但这并不意味着它可以取代位错模式。位错模式仍然是很有用的。这是因为，尽管原则上可以用数值方法按应力松弛源理论计算地震波远场位移，但实际上要用到大量内存和耗费许多计算时间。在这种情况下，先由松弛模式得到震源时间函数，然后构制更合理的位错模式，再用位错理论进行计算则要方便得多。

A. Nur讨论的是地震断裂时的不均匀性问题。他利用Knopoff等人在1973年提出的一维断层模式，研究了当断层面上的应力降以及在断层端部吸收的能量都是不均匀时断层的“愈合”过程。通过数值计算，他得到三个结论。（1）愈合过程通常以大于波速的速率进行。（2）裂缝端部的摩擦的变化和愈合过程的不连续性有关。这种不连续性引起了断层和最后运动的不规则性。（3）当愈合过程连续时，按动力学方法计算应力降和按静力学方法计算的一致；在过程不连续的情形下，若用静力学方法计算则会低估应力降。

M. Bonafede等人的工作则是，利用膨胀-流体扩散理论研究滑动断层附近的应力场对膨胀和流体压强的影响，以解释余震的时-空演化，特别是解释晚期强余震这一别的理论未能很好解释的“异常”现象。

瑞典的K. B. Broberg教授在会上报告了他的最新研究成果。他研究了在理想的干摩擦情形下两种动力学滑动的传播问题。一种是固定夹头情形，即单方向的滑动传播；另一种是

向两个方向以恒定的速度对称地扩展的滑动传播。在传播过程中，头一种情形是一端开裂、一端愈合，而后一种情形是两端都开裂。用线性方法处理这个问题的结果表明，端部的过程可以用裂开模量和愈合模量表示。Broberg 还得出远处的应力、滑动区的范围、滑动量、滑动传播速度和能量耗散率之间的关系。

美国的 Dieterich 认为，震源物理的主要问题是人们对震前和震时沿着断层作用的力的性质不清楚，为此想通过实验来了解控制断层滑动的力的性质。实验室研究的情况当然要比自然界的断层简单，因此人们难免疑虑，在实验中那些在自然界的断层中很重要的、起主导作用的因素被简化掉了。尽管如此，许多人还是相信二者有许多相似之处，如：非稳态的摩擦滑动（粘滑）和非稳态的断层滑动相似；粘滑时的应力降低，而地震时的应力降也低；稳态的摩擦滑动和非地震的断层蠕动相似；用摩擦资料可以解释兰吉里（Rangely）的诱发地震；用预滑可以解释某些地震前兆。特别是实验室测得的摩擦系数和岩石类型、试验条件和滑动面的特征关系不大，这一事实进一步表明：实验室所研究的摩擦可能与更复杂条件下的自然断层的摩擦有关。现在已经有一些关于震源的失稳理论，这些理论都有一个共同特点，即都必须假定断层或震源区有某种形式的位移（或应变）弱化，以解释失稳和地震时的应力降。现在对位移弱化机制尚无一致看法，但从沿着一个断层重复地发生滑动的情况来看，人们不但应当考虑到位移弱化机制，而且应当考虑到相反的过程——愈合机制，研究断层在地震滑动后如何恢复其强度的。为此，Dieterich 作了摩擦实验，研究了位移弱化和愈合过程，然后提出了解释实验结果的岩石摩擦的本构律，并将这些本构律应用于模拟地震前的断层滑动。

从这次讨论会上报告的工作和讨论中，我们可以看到，在震源物理的理论研究中，有一些值得注意的情况。

（1）理论研究和岩石样品的实验、实地可控试验以及野外观测紧密地结合。在震源物理的研究中，不是简单地用实验或试验结果代替或说明野外观测结果，而是从实验或试验结果得到启示，力图推广到自然界的地震。

（2）震源物理的理论研究不是机械地搬用六十年代后迅速发展起来的金属材料的断裂力学的原理和方法，而是把理论断裂力学的概念结合到震源物理的一般方法中，即力图从模拟地震破裂的实验研究、实地可控试验和地震观测资料的分析中研究地震破裂的全部过程，即破裂的起始、扩展和终止机制，特别是研究与地震前兆的物理基础有密切联系的位移弱化机制，即破裂从稳态到失稳的细节。

（3）目前许多作者采用的理论模式的共同特点是，这些模式对于精确的实验和现场资料来说只是一种近似的答案。为了不致作出错误的结论，今后应当利用现场观测资料对模式加以限制，使之更加合理。

（4）十年前，震源物理学或震源物理过程这样的字眼在文献中刚刚出现时，研究这个问题的人寥寥无几。十年后的今天，在地震预报与控制 and 地震成因与机制这一目标的吸引下，许多领域如地球物理学、地质学、采矿、岩石力学、断裂力学的研究人员云集在这面大旗下，一齐攻这难关，声势蔚为壮观。

（5）在震源物理的理论研究方面，国外已做了许多工作，有些甚至是相当好的工作，但迄今距离基本上了解震源物理过程这个目标仍相当远。已经解决的问题仅占前面列举的四面问题的很小的比例。看来，现在这个领域虽有明显进展，但还没有重大的“突破”。

4. 联系实验室研究和地震的中等尺度的原地可控破裂试验

实验室做的岩石力学实验和地震的断层力学实验到底对天然地震能模拟到什么程度？为

了回答这个问题，有些人倾向于在原地做一些可控破裂试验，如研究矿爆、注水诱发地震等，试图以这种中等尺度的实地试验将实验室试验与天然地震联系起来。这方面的研究工作是近几年兴起的，从事这个领域的研究工作的人不多。在这次会议上只有四位学者报告了他们的工作。他们的名字及报告的题目如表7所示。

表 7

报 告 人	题 目
1 N. C. Gay (南非)	在矿山震动的震源区内的破裂、地震活动性和应变变化
2 E. Hurtig (东德)	矿山震动的震源和岩石力学问题
3 H. Baule (西德)	地下煤矿的地震、岩爆的定位问题及其震源机制的设想
4 M. Will (西德)	鲁尔区地下煤矿的地震-声活动性的记录和统计研究

这些作者通过对矿爆的地震活动性、P波初动的分布特性、破裂特征、应变观测等多方面的研究，说明，介于岩石样品和天然地震的矿爆具有许多和它们相似的特征。如N. C. Gay根据他对南非Witwatersrand深部的金矿岩爆观测指出：（1）岩爆应力降至少低于引起它周围的剪切应力一个数量级；（2）在岩爆震源区内，破坏情况是很不均匀的，岩爆大多发生在坚硬的岩石层，而不是在软弱的岩石层；（3）岩爆时释放出来的能量，几乎全部消耗在使断层带破碎上，一般只有小于1%的可用能量用于辐射地震波；（4）地震活动性的资料表明，天然地震可能类似于岩爆。

矿井、油田等都是很好的天然实验室，它具有尺度比岩石样品大，试验条件可以控制，震源区可以相当地接近等优点，有利于更快地检验各种震源理论。以往我国在这方面的不多，注意到了实验室的岩石力学实验，忽视了这种“好”和“省”的试验。从地震预报的角度来看，开展这方面的研究工作，是同实验室建设和实验同等重要的。

三、西德地球物理研究简况

我们参观了西德六所大学的地球物理教研室和两个地震观测台，对西德地球物理研究的现状有了一点印象。西德大学中的地球物理教研室都不大，人数一般在10—30人之间，其规模与我国大学中的教研室相当，但性质不同，它担负着科研和教学双重任务。教研队伍颇精干，通常由教授一至数人，有博士学衔的研究人员五、六人及几名技术员组成，其余是研究生和少量的高年级大学生。各教研室都有自己的观测系统和实验室。教研室之间的科研协作和研究人员的流动较为频繁；教研室与外国地球物理研究部门的联系也相当紧密，许多研究人员经常到美、日等国家进修或工作若干年后回到西德工作；教研室还经常接受别国的研究人员或研究生。正如基尔大学地球物理教研室主任 Meissner 教授所说的：“我们并不闭塞”。

西德并不是一个多地震的国家，地震活动的平均水平不高，平常一年仅发生100—200次一至四级微震。这种情况决定了它的地球物理工作侧重于基础研究，如地壳结构（爆炸地震学）、地球内部结构、震源参数（震级、地震矩等参数）、地球动力学（地球内部的粘滞性、地幔对流、板块的运动等）。西德有一些大矿，如著名的鲁尔煤矿。由于探矿工作的需要，有些教研室也致力于地球物理勘探资料的解释工作。不久以前，即1978年9月3日，在斯图加特附近发生了一次在西德是罕见的5.9级地震。这次地震在极震区造成了轻微破坏，

震中裂度Ⅶ $\frac{1}{2}$ —Ⅷ。它是一个恰好落在密集的现代地震台网包围之中的中等大小的地震。西德的地震工作者获得了这个地震的完整的、高质量的数字记录，如获至宝。许多人相信，这些高质量的记录对于了解地震破裂过程提供了一个很好的机会，解剖这只麻雀，一定会增进对地震过程的认识。现在他们中许多人正在加紧研究这个地震。

以下分五个方面叙述西德地球物理研究的情况。

1. 爆炸地震学

西德很注意地壳和上地幔结构的研究工作，认为这对于了解地球内部的动力过程很重要。在1974年7—8月间，由现在在卡尔斯鲁厄大学地球物理教研室工作的英国地震学家D. Bamford博士负责，西德和英国两国地震学家用了四周时间完成了一条贯穿英国南北的大剖面，叫“英国的岩石层地震剖面 (Lithospheric Seismic Profile in Britain, 简称为LISP B)。剖面长1000公里，放了29炮，并利用了一次正巧在野外工作期间发生于剖面附近的地震 (1974年8月6日Kintail地震， $M_b = 3$ ，震源深度14公里)。剖面上安置了60个可移动的三分向模拟磁带记录的地震台，台距2—4公里。得到了14个地壳剖面和3个长距离剖面。野外工作期间，由30名工作人员看台，每人看管二个台。除了五名参与这项国际协作的主要研究人员外，其余25人都是临时性的。这个剖面的准备工作做了一年半，而总结工作做了四年，至今仍在继续整理。这项研究取得了许多有意义的成果，不但得到了英伦三岛下面地壳厚度的变化，而且得到了地幔的细结构。特别是，不但研究了P波结构，还研究了S波结构。

西德的地震测深工作相当普遍，除LISP B剖面外，其它研究机构也在一些地方做了许多地震剖面。如法兰克福大学地球物理教研室的Berckhemer教授等人于1972年3月在埃塞俄比亚做了六条地震剖面，每条剖面长100至250公里不等。基尔大学地球物理教研室的H. Bartelsen, R. Meissner等人于1973年9月在德国西南部做了一条100公里长的剖面。这个剖面上布置了36个台，同时用反射波法和折射波法进行研究。

从这些例子可知，西德的爆炸地震学研究具有队伍精、效率高、成果多等特点。除此以外，还有一个值得提及的特点，这就是解释方法比较先进。多年来，卡尔斯鲁厄大学地球物理教研室的K. Fuchs, G. Müller和R. Kind致力于合成地震图的计算工作，致使不但可以用走时资料，还可以连同振幅、周期的资料反演地壳—上地幔结构。这种解释方法大大地改进了以往单用走时资料反演的方法。

2. 地球内部结构

G. Müller和R. Kind不但用合成地震图反演地壳—上地幔结构，而且利用世界标准地震台网(WWSSS)的记录，用合成地震图的方法计算远震地震图，以研究地球内部结构，如用P_cP震相的振幅研究核—幔边界的性质，用SKS和SKKS的振幅比及其走时差研究外核的结构。

3. 地球动力学

基尔大学地球物理教研室的Meissner教授和Vetter博士主要从事地壳和上地幔粘滞性的研究工作，他们曾经由熔点和温度的比值计算了一些地区的粘滞系数，得出地壳下部的粘滞性可能要比上地幔的低得多的结论，并认为在活动板块边界，海洋的高粘滞性物质压向大陆的低粘滞性区域便引起了重力高、地面对上升等现象。

4. 震级、地震矩和其它震源参数

基尔大学地球物理教研室主任Duda教授是国际著名的震级专家。他研究震级多年，力

图阐明震级的物理意义。他在最近完成的论文中论述：估计地震的大小这个问题由两部分构成，一是震源过程，二是地震波从震源至观测点的变化。解决这两个问题有双重困难，当进行间接观测时，介质的不均匀性影响了地震波的传播，这种影响不易准确地估计。所以他指出，震级概念的进一步发展有赖于对震源物理过程和对全球及区域构造的了解。

5. 西德的岩石实验研究

我们参观了鲁尔大学地球物理教研室 (Institut für Geophysik Ruhr-Universität, Bochum)、F. Rummel教授的岩石力学实验室、法兰克福大学地球物理教研室 (Institut für Geophysik Frankfurt-Universität, Frankfurt)、H. Berckhemer教授的高温高压实验室和基尔大学岩矿教研室 (Mineralogisch-Petrographisches Institut der Universität Kiel, Kiel) H. Kern教授的岩矿分析实验室。

西德的岩石力学试验大多是近十年内开展起来的，发展速度很快。实验室装备大多采用七十年代的技术，多数仪器系西德制造，还引进了许多荷兰的电子仪器，美国的计算机及数据处理设备。因此，设备相当先进，在伺服控制实验系统和高温技术方面有许多长处值得我们学习。今将有关情况介绍于下：

(1) 刚性试验机 (即闭环伺服控制实验系统) 的广泛应用

从六十年代末，在岩石力学实验设备方面最重要的事件就是刚性试验机的出现。它是研究脆性材料 (特别是岩石) 破坏过程的必不可少的设备。

为了说明什么是刚性试验机，我们先通过下面的例子来了解可控破裂的概念。在矿井中有一排矿柱，假若有一根矿柱发生破坏，则该处顶板将要下落，但顶板的下落势必要受到其他矿柱的制约，下落到一定程度后趋于稳定。而这根矿柱破坏的程度也将受到其他矿柱的影响。另外一方面，如果我们拿一根矿柱在实验室进行压力实验，可以肯定，该矿柱势必发生猛烈的破裂，分成许多碎块向四面抛出。实验室情况与矿井中的不同，是由于二者的条件不相似，实验室只考虑了一根矿柱的行为，没有考虑边界条件，即没有考虑其他矿柱的存在，当被试验的矿柱一旦发生破坏，承受荷载能力下降时，贮藏在材料机内的弹性能量全部放出，大大加速了该矿柱的破坏过程。因此，用通常的材料试验机，岩石的破裂是不可以控制的。相反，在天然环境下，由于一块岩石与其周围环境的相互作用，当它发生破坏，承受荷载能力降低时，其周围岩体承受的荷载可能会增加，结果，该岩石既可以发生猛烈的破裂，也可以发生缓慢的破裂，甚至破裂发生到一定程度后，反而趋于停止，破裂是否可控，要视其周围的环境而定。通常，我们用材料试验机的刚性来定量地描述这种相互作用。塞拉蒙 (Salamon, 1970) 证明，在实验室破裂可控的条件是：

$$k + f'(s) > 0$$

其中 k 是材料试验机的刚性 (试验机压板相对移动单位距离时产生力的大小)

s 是岩石样品两端面之间的相对位移，

$f(s)$ 是当变形为 s 时样品所受的力 $F = f(s)$ 。

所以，决定岩石破坏是否可控的因素是样品刚性 k_s 与试验机刚性的相对大小。

通常的材料试验机刚度为 200T/cm (我国的长江 500 型三轴岩石应力试验机刚性为 500T/cm)。早期，修斯和恰普曼 (Hughes and Chapman, 1966)，库克 (Cook, 1965) 和比尼奥斯基 (Bieniawski, 1966, 1967) 等使用了一些机械装置来增强材料试验的刚性，用这种方法泡尔丁 (Paulding, 1966) 成功地观测到裂纹的生长。但这种方法增加刚性有限，而且又必须损失试验机的荷载能力。在计算机技术大发展的背景下，出现了另外一种增加试验

机刚性的方法——闭环伺服控制试验机系统（图1）。当样品破裂一开始，两个端面间的距离势必缩短，位移传感器接收到位移加速后，立即传给比较单元，大多数情况下，反馈信号

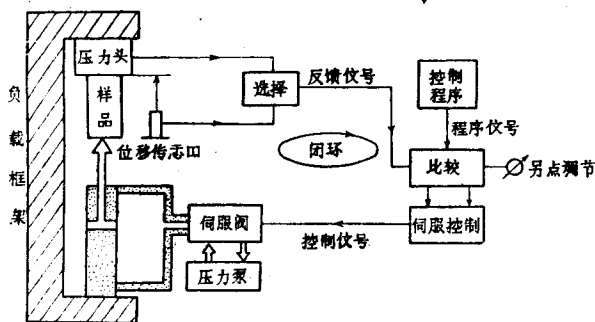


图 1

破裂就不会发展，目前伺服控制机构的反应时间约为2—50毫秒左右。以上介绍的是有关刚性试验机的背景材料，也许对于了解德国实验室设备的情况是有益的。

F. Rummel 教授的实验室是西德进行岩石破裂与粘滑研究的重要实验室之一，所有的试验设备全部实现了电子计算机伺服控制。该实验室有四套伺服控制系统。一套用于轴向荷载控制，伺服系统的总的反应时间是30毫秒，用这套系统和快速采样设备，可以清楚地测量出粘滑前、粘滑时和粘滑后应力与位移的细微变化（F. Rummel等，1978）。由于使用轴向伺服控制，使原来50吨的压机刚性提高到1600吨/厘米²。另一套伺服控制系统用于侧向（围压）控制，当保持围压为常值时，其控制精度达0.2%，因此可以用来直接监视样品横截面在实验过程中的变化，发现这种横截面积的增加是由于岩石样品横向膨胀或岩体解体所造成的。第三套伺服控制系统用于测量岩石样品的断裂强度因子 K_{Ic} 。第四套用于双轴压力实验。四套伺服控制系统共同使用一台计算机（SPC, 16/60，字长16，内存60K，循环速度0.96μs）。可以通过计算机互相联系，试验中可以进行控制的变量有：位移、轴向应变率、应力、围压、时间、外界输入能量等。

F. Rummel 实验室的另一个突出特点是伺服控制系统的成龙配套。一方面在仪器设备（硬件）上，终端显示处理设备相当齐全，例如测量岩石破裂过程中P波速度变化时，用示波器（CRO）监测P波到时及波形变化，通过打印机给出数据，同时通过转换器（CRT-Display Converter）定时在X-Y记录器上画出记录波形，获得了永久的记录。另一方面，在软件配备上也相当完善。

（2）高温（高压）技术

在西德，开展岩石高温高压实验的目的大致有二：一是与地震预报、矿山岩爆预报有关，主要研究高温高压环境下岩石的破裂与粘滑过程，研究发生破裂与粘滑的条件与寻找破坏的前兆，F. Rummel教授的实验室就属于这种情况。另一种是属于地球物理的基础研究，研究在地壳和上地幔的温度压力条件下，岩石的蠕变、流变特性，研究岩石矿物的相变以及地震波衰减因子Q值的变化等，H. Berckhemer 教授和 H. Kern 教授的实验室均属于这种情况。

目前的研究工作主要集中在10000巴和1000℃以下的温压条件，所用设备均为气体加压内热式高压容器。图2是典型的产生气体围压的装置（Rummel, 1978），氩气经过二级压缩达到10千巴的压力。高压氩气从侧面送入高温高压容器（图3）。加热系统用瑞典产的电炉

丝 (瑞典, Konthal 公司), 电炉丝要根据实验所需的温度和所需要的功率来选取。法兰克福大学地球物理教研室用于研究岩石高温蠕变的另一台高温装置的指标为: 围压10Kb, 最高温度1650°C, 持续工作时间为100小时, 最大差应力为500巴, 工作介质为氩气。这台设备与Rummel实验室的高温装置不同, 它是瑞士Nova厂的定型产品 (Autoklav 10Kb, Nova, Swiss)。为了达到更高的温度压力状态, 基尔大学Kern的实验室有固体加压的高温高压装置 (图4)。实际上, 它是由6×100吨的六面顶压机改制而成, 每个顶锤前部装有加热炉, 后部装有水冷却装置, 用这个高温设备可以测量岩石的弹性波速变化和岩组变化等 (Kern, 1978)。

(3) 几点印象

通过参观, 我们感到西德的岩石力学实验室有几个突出的特点, 给我们以深刻的印象。

首先, 各实验室效率很高, 人员精干。表8给出了我们所参观过的三个实验室工作人员的组织情况。每个实验室人数很少, 这种情况不仅对于岩石力学实验室, 而且对于其他课题的研究也都是这样。人员虽少, 但科研成果却很多, 为什么效率如此之高呢? 初步看来, 我们认为有两个原因。一是实验室自动化、电子计算机化程度很高, 许多原来用人进行的工作被机器代替了。当我们在Rummel实验室参观时, 好客的主人同时为我们表演了三个难度较大的实验: 高温粘滑试验, 双轴压力下灰岩波速测量和

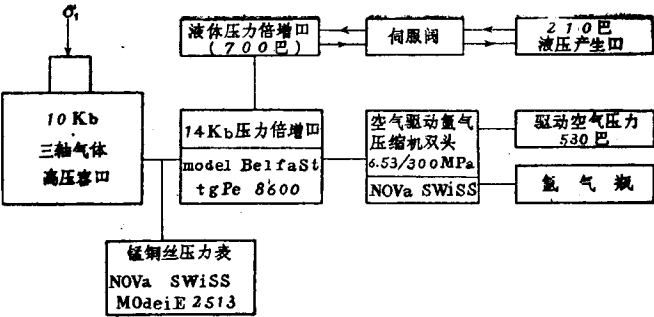


图2 10Kb 氩气围压产生装置

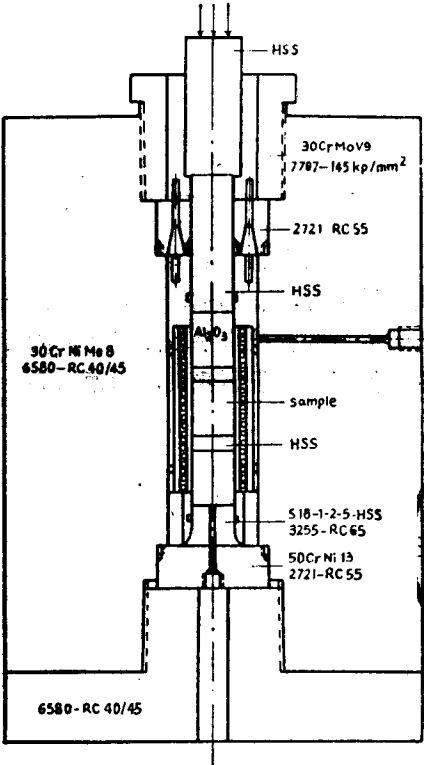


图3

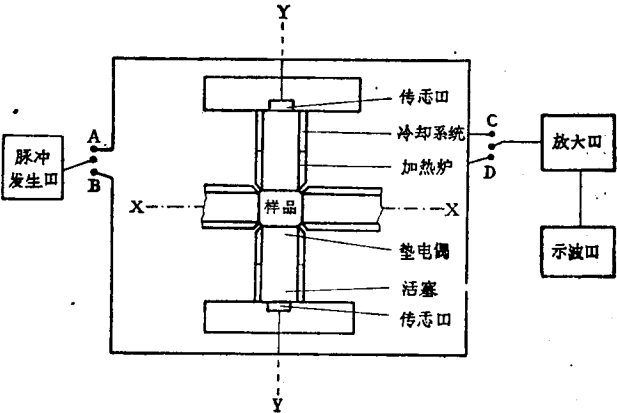


图4

表8 三个实验室组织情况

	鲁 尔 大 学	法 兰 克 福 大 学	基 尔 大 学
教 授	1 人 (Rummel)	1 人 (Berckhemer)	1 人 (Kern)
博 士		1 人 (Auer)	
研 究 生	3 人 (Alheid, Frohn, Eckes)	1 人 (Schaarschmit)	1 人
大学高年级学生	1 人 (Winter)		
技 术 员		1 人	1 人
总 计	5 人	4 人	3 人

Westerly 花岗岩的断裂韧度测量(用COD方法)。全部实验工作按预定程序由计算机控制进行,当实验结束时,全部数据、表格和曲线均已整理完毕,确实令人佩服。效率高的第二个原因是研究人员的科技水平较高。德国同行们非常重视科技人员的素质与训练,而不追求人员的数量。德国朋友告诉我们,西德大学一般为六年,学校中有严格的考核制度,大学毕业生进入研究机构必须经过严格的挑选。研究单位的工作人员象流水一样的在流动,许多学生或研究生在工作一段时间后,才能突出的留了下来,其余的到别的研究所去工作或从事其他工作。实验室就在这样的人员流动中发展成长。实验室负责人大多是40~50岁的中年人,经常到别的实验室工作,例如,Rummel教授,70年代曾在美国密尼苏达大学执教,作实验研究,后来又与意大利、印度一些实验室进行合作,对于国际上本学科动态有较全面的了解。

整个德国的工业和许多科学研究都是第二次世界大战后发展起来的,许多大学也只有十几年的历史,德国学者在建设现代化实验室方面的一些经验,也给我们留下了深刻的印象。德国的许多科学家十分关心工业技术,特别是以电子计算机为主的电子技术的进展。他们的目的是要引用这些最新进展,为本学科的发展服务。对那些虽属实验工作需要,但已有工业产品,而还不了解的仪器设备,他们决不轻易研制。他们的主要精力集中是在科学研究上,即使是研制仪器,也仅限于非通用仪器,例如某些高温容器。对于通用设备,如数据采集系统等,他们决不会以几个人的小实验室去和一些大公司竞争,而采用引入的态度。这就是德国实验室中技术人员比例非常之少的一个重要原因。技术人员主要集中在工业部门,科研人员则集中在研究机构。正因为这样,所有的科研人员经常同全世界的电子计算机公司、其他电子仪器工厂保持经常密切的联系,几乎每个人都有各公司、工厂最新的产品目录。德国科学家们还认识到,目前,电子技术特别是电子计算机发展得十分迅速,实验设备的更新是一个十分现实的问题,所以,他们在建设实验室时,总是逐步建设,急需的先建,可缓的就缓办,一方面受资金限制,另一方面,以便今后购买更先进的设备,保持实验室的先进水平免落后。在德国的实验室中,很少有几个实验室用同一种设备装备起来的情况,这一方面是由于对研究课题各有分工,另一方面是为了避免在设备频繁更新的情况下,大批仪器一起过时,同时被淘汰。对于一些重大的设备,例如基尔大学的自动X光岩组分析仪,电子扫描显微镜

(合计价值500万美元左右) 往往只一家研究所具备, 供全国地学研究使用。

6. 西德的地震观测工作

德国的莱茵地堑附近经常有小地震活动, 地震活动水平并不高, 大约每年发生100—200次 $1 < M < 4$ 的地震。1978年9月3日在斯图加特附近发生的一次5.9级地震可能是德国地震活动最重要的一次地震了。西德有相当数量的地震台站(见图5和表9), 主要用于测震观测, 有的台站也有应变仪, 倾斜仪和重力仪的观测。扎实的基础工作, 先进的观测仪器和出色的地震记录是西德地震观测工作的重要特点。下面仅介绍三个台站的情况来说明这些特点。

(1) 黑森林地震观测站

黑森林观测台即图5中的SCHILT (Schiltach的缩写)台, 它由卡尔斯鲁厄大学地球物理和大地测量教研室及斯图加特大学地球物理教研室共同管理使用, 台上共有4人, 两名科学家和两名技术员, 所有的观测数据, 同时采用脉冲编码调制(PCM)方式, 通过电话线传到台站地面实验室以及卡尔斯鲁厄大学。台站的两名科学家主要从事研究工作, 两名技术员负责全部仪器的维修和管理, 他们白天在台站工作, 晚上回家, 台站无人自动运转。

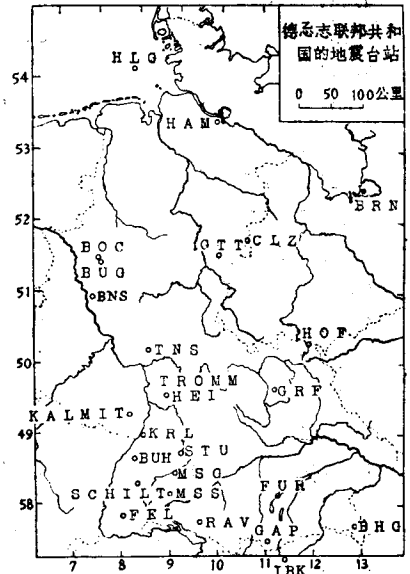


图 5

黑森林是西德著名的风景区, 早在1834年左右, 在花岗岩地区发现了银矿脉, 于是开挖了一些矿井生产银矿石。但是从1834年至1850年, 其中一条主要矿井只生产了740.5公斤白银, 于是开采者们就放弃了这条矿井。在花岗岩地区长达700余米的矿井却是地球物理观测的十分理想的地方, 因此, 从1952年开始, 地球物理学家们就利用这条矿井建立了地震台。以后十几年中, 逐步地维修了旧矿井, 开挖了近200米新矿井, 总共花费了近75万马克, 在矿井中设置了地震仪((英)威尔莫——Ⅲ型三分量一套; (瑞士)宽带——长周期三分量一套); 重力仪((美)LaCost精度为1微伽重力仪一套, (德)Askania精度3微伽重力仪1套); 金属丝应变仪(三分量, 互成120°角, 金属丝长10米)以及钻孔应变仪1套。台站矿井的平面图和剖面(地质)图分别见图6和图7所示。由于矿井较深, 覆盖层较厚, 矿井中观测室内的日温度变化不超过0.01℃, 年温度变化不超过0.1℃。矿井中采用二道压力屏蔽铁门(密封)。气压记录表明, 观测室内周期小于1小时的气压变化可以全部被滤掉, 因此, 气压、温度变化对于地震仪器, 特别是对于长周期仪器的影响是很小的。矿井内湿度较大, 相对湿度达100%, 因此, 多数仪器都放在特制的密封玻璃或铅罩内, 罩内放有干燥剂, 罩内的相对湿度一般不超过30—40%, 矿井内所有电源线, 信号线均采用防水型, 电缆连接处都特制了专门的防潮密封连接盒。

(2) 埃尔兰根(Erlangen)德国中心地震台

这个台即图5中的Gräfenberg台, 它实际上是由16个台组成的一个台阵, 南北长约200公里, 东西宽约100公里。台阵由三个子台阵组成, 该台阵从1975年开始建设, 目前已有二个台子投入运转, 最后的一个子台阵, 如果天气好的话, 将于今年年底建成。该台阵的资料供给所有的西德地球物理研究单位共同使用, 而经费仪器来自西德地质局(Geological

表9 西 德 的 地 震 台 站

代 号	北 纬	东 经	海 拔 高 程
BNS	50°57'50"	7°10'32"	200 m
BOC	51°29'22"	7°12'50"	64 m
BRN	52°25'07.5"	13°12'11.2"	45 m
BUG	51°26'44"	7°15'52"	135 m
BUH	48°40'32"	8°13'42"	750 m
- FEL	47°52'12.0"	8°01'00.0"	1485 m
- KALMIT	49°19'12.6"	8°05'01.2"	673 m
- TROMM	49°36'20.4"	8°48'13.8"	440 m
- SCHILTACH	48°19'47.4"	8°19'26.4"	582 m
CLZ	51°50'34.3"	10°22'26.8"	680 m
FUR	48°09'56"	11°16'35"	565 m
- BHG	47°43'17"	12°52'44"	475 m
- GAP	47°28'36"	11°03'52"	725 m
- IBK	47°15'28"	11°23'05"	580 m
GRF*	49°41'31"	11°13'18"	499.5 m
GTT	51°32'47"	9°57'51"	272 m
HAM	53°27'54"	9°55'29"	30.25m
HLG	54°11'05"	7°53'02"	41 m
HOF	50°18'49"	11°52'39"	566 m
KRL	49°00'39"	8°24'44"	114 m
STU	48°46'15"	9°11'36"	375 m
- HEI	49°23'55"	8°43'35"	560 m
- MSG	48°23'57"	9°02'00"	475 m
- MSS	48°10'45"	8°57'58"	915 m
- RAV	47°47'00"	9°36'50"	460 m
TNS	50°13'25"	8°26'56"	815 m

* 指的是台阵中心点地理坐标

Survey)。该台工作人员共有十人，其中八人是科学家（H. P. Harjes和D. Seidl等），负责台阵设计、建设和开展研究工作，另外二人是技术员。除埃尔兰根记录中心外的所有台站和子台阵等都是无人管理的。地震仪放置在特殊的钻孔中，一般钻孔深度约为40米左右，钻孔周围包有圆柱形泡沫塑料，用以保温和振动绝缘。所用的仪器为竖直分量的宽频带、长周期地震仪，不加电子反馈时，地震仪的固有周期为12秒，该地震仪是由瑞士制造的（G. Streckeisen Messgerätebau, Swiss）。地震仪测得的信号经放大，脉冲编码调制后通过商业用电话线送往子台阵，重新编码后由子台阵通过一对电话线送往记录中心。其中一个子台阵还装有SRO（Seismological Research Observatory）的三分量地震仪，其信号通过单独的电话线送往记录中心。这样，通往记录中心的只有四对电话线，一对是来自SRO，另三对是来自三个子台阵，带来了16个台的地震资料。这样作的目的是为了把德国自己制造的地震观测台网与SRO进行比较，德国科学家自豪地告诉我们，埃尔兰根台站运转二年多以来发现他们的台站比SRO毫不逊色。这个台阵收集资料的动态范围很大，为138db，所有的地震数据