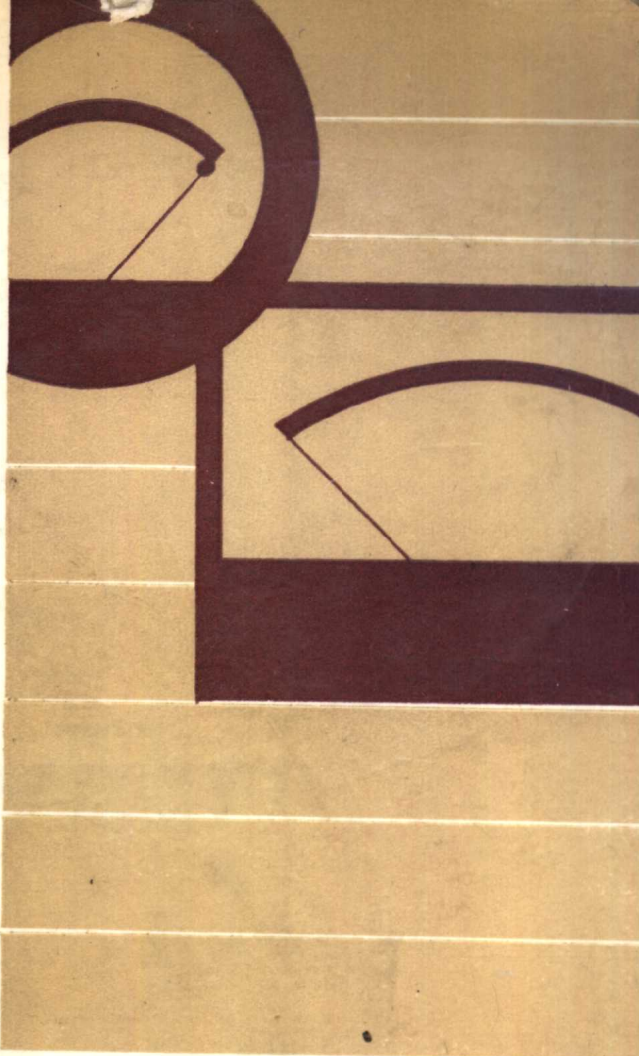


钱家栋 等 编译
陈有发



地震地电学译文集

地震出版社



地震地电学译文集

钱家栋 陈有发等 编译

地震出版社

1989

内 容 提 要

本文集较系统地介绍了国外地震地电学有关实验、野外观测以及方法理论研究等方面的工作。所选取的文献既包含了一些经典的资料,也包含了 70 年代末与 80 年代一些较新的研究成果。本文集所汇集的材料,涉及不同范围的压力、温度、湿度条件和不同的受力方式(围压和剪切)下岩石的电性实验,日、美、苏各国的现场观测情况,孕震过程电性变化的微观机理分析和新的资料分析处理方法等。本文集可供从事岩石力学、地球物理和地震预报方面的研究人员和大专院校有关专业师生参考。

地震地电学译文集

钱家栋、陈有发等 编译

责任编辑:姚家榴

地质出版社出版

北京复兴路 63 号

国防大学第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

850×1168 1/32 13.5 印张 363 千字

1989 年 12 月第一版 1989 年 12 月第一次印刷

印数 0001-1000

ISBN 7-5028-0234-7/P·151

(621) 定价: 9.00 元

目 录

前言	(1)
----------	-------

一. 岩石标本室内实验

✓ 水饱和岩石破裂和摩擦滑动过程中电阻率的变化 [美] W.F.Brace 等(3)	
岩石摩擦滑动和破裂时电阻率的变化 [美] Chi-Yuen Wang 等(21)	
与膨胀有关的岩石电阻率变化	[美] W.F.Brace(36)
压力对岩石电阻率的影响	[苏] Э.И.Пархоменко(48)
温度对岩石电阻率的影响	[苏] Э.И.Пархоменко(66)
不同温压条件下饱水岩石的电学性质 [苏] Т.С.Лебедев 等(83)	
✓ 变形岩石的电阻率(二)——沉积岩的进一步实验研究 [日] 山崎良雄(92)	
✓ 应力作用下凝灰岩电阻率的变化 [美] C.Morrow 等(111)	
低孔隙度岩石的电阻率和裂隙形成的关系 [苏] О.М.Барсуков(126)	
确定交流电场中岩石在 100—1000℃ 时的电学性质 [苏] Г.Г.Теладзе(135)	
长石形变和破坏时的带电现象 [苏] Г.И.Шевцов 等(139)	
论碱性卤素晶体和岩石中裂隙形成时的电磁效应 [苏] Н.Г.Хатиашвили(149)	

二. 野外观测实验

变形岩石的导电性(三)——电阻率测试仪

- [日] 山崎良雄(159)
- 震前和同震电阻率变化 [日] 山崎良雄(169)
- 大岛火山三原山火山口周围的电阻率变化和 1978 年伊豆
大岛近海地震 [日] 行武毅等(179)
- 在加尔姆试验场精密观测地电阻率变化的结果
..... [苏] А.Я.Сидорин(192)
- 磁流体动力(МГД)发电机在地壳研究中的应用
..... [苏] Ю.М.Волков(197)
- 加尔姆试验场地电断面研究的方法和结果
..... [苏] В.И.Журавлев 等(212)
- 地壳电阻率随时间变化的高精度测量
..... [美] H.F.Morrison(216)
- 论电离层的地震前兆 [苏] М.Б.Гохберг 等(237)
- 固体潮和岩石物理特征的变化 [苏] Б.П.Дьяконов(242)
- 加尔姆试验场地震活动性的空间分布特征与地电结构的
关系 [苏] В.И.Журавлев 等(247)
- 鲁宾铜矿岩石电阻率及其与应变场和岩爆的关系
..... [波] Wojcieh Stopinski 等(251)

三. 理论、方法研究

- 与地震有关的力电效应 [美] R.Dmowska 等(272)
- 由力电现象引起的岩石电阻率变化
..... [苏] М.Я.Балбачан(285)
- 岩石电导率和地震 [苏] О.М.Барсуков(297)
- 地震电磁现象的起源 [日] 水谷仁(305)
- 地震电性前兆的可能原因 [苏] О.М.Барсуков(312)

电阻率测深中五种最小二乘法技术的比较	
.....	[美] G.M.Hoversten 等(319)
层状直流导电剖面的反演问题	[美] S.Coen 等(350)
噪杂地区深部地电探测的分析程序及仪器	
.....	[意] L.Alfano 等(378)
三维结构下大地电磁测深曲线的畸变	
.....	[美] S.K.Park(392)
大地电磁测深的进展(动态综述)	[中] 林长佑(415)

前 言

本世纪 60 年代, 地震预报研究在世界范围内兴起。地球电磁学方法也同时被引入其中, 发展出一个新的分支——地震地电学方法。它以地球介质的电学性质随时间的变化及其它电现象与地震孕育过程的关系为主要研究对象, 寻求在地震发生前那些与地震发生的时间、地点和强度相关联的介质电性时空变化的异常指标, 以实现地震预报。显然, 这是一个难度很大的科学问题, 它首先需要有足够的观测实践, 其次需要研究电性变化与描述孕震过程的其他物理、化学参数变化之间的关系。前者是这一新学科的观测基础, 后者则是其实验基础及理论基础。

二十多年来, 包括中国在内的各国地学工作者为了这一门新学科的发展已经做出了巨大的努力, 在上述观测、实验和理论诸方面研究工作中取得了不少进展。这本译文集汇集了国外这些研究中的一些有代表性的材料以供国内的同行以及感兴趣的读者了解国外研究的动态时参考。

应当说明, 虽然国外有不少学者从事地球电磁学在地震预报中应用的研究工作, 但是它在整个地震预报研究中, 数量上占的比例还不算大, 并且比较零散地分布在为数众多的地学研究杂志和书刊之中, 不易为人们查阅。因此, 将这一类文献汇集册译为中文, 将可使读者感到方便。此外, 这本译文集的编纂有着特定的安排, 它以实验、观测及方法理论研究的系统汇集, 使读者对于地球电磁学方法在地震预报中的应用有一个全貌性、系统性的了解, 对于这个新学科的几个重要的基本问题和研究环节有新的认识, 以便促进我国的地电方法预报地震的研究工作, 开拓新思路、扩大新领域。

还应当说明, 地震地电学方法虽然是一门新的学科, 但从它发展的开始就是和传统的地球电磁学方法息息相关的。这本译文集中的某些论文, 如某些压力实验或某些反演方法, 其作者原来

研究的目的是并不是为地震预报的研究服务的。但是由于这些研究或其方法、思路，或其结果，对于地震预报中的地电方法研究有积极的意义，因此译文集中也予以选入。

这本译文集共收入 33 篇国外学者的研究论文，其作者分布在美、苏、日、意、波等五个国家，其中涉及室内各种条件下岩石标本的实验论文 12 篇；野外现场观测方面的论文 11 篇；理论和方法技术方面的论文 10 篇。考虑到目前大地电磁测深方法作为一种新的电性前兆研究方法的发展前景，我们在理论和方法技术的论文中加入了两篇介绍大地电磁测深的内容，其中一篇是综述性报道。

这本译文集编辑工作由钱家栋、陈有发组织，主要由兰州地震研究所电磁室同志翻译和校对。荣代璐、汤泉、高元勤、胡新源、王振声等同志也承担了部分校对工作。钱家栋和孙崇绍分别对英文及俄文论文进行了总审校对工作。部分图件由刘昱枝、赵玉珍描绘，蔺西科、董奇珍、候丽、丁卉、梁戈沐抄写了部分稿件。

由于我们译校水平有限，错误之处在所难免，恳望读者批评指正。

一、岩石标本室内实验

水饱和岩石破裂和 摩擦滑动过程中电阻率的变化

[美国] W.F.Brace 等

引 言

实验室观测到水饱和结晶岩被压到破裂时电阻率的显著变化 [Brace and Orange, 1966], 其减小量达一个数量级。大部分变化发生于超过破裂应力一半时。对各种各样的火成岩和沉积结晶岩都观测到电阻率的这一变化。虽然开初有点意外, 经过仔细考查, 似乎这些结果和早先关于围压对电阻率的影响 [Brace et al, 1965] 及岩石在围压下扩容的研究是一致的。虽然如此, 观测结果提出了大量有趣的问题。兹举一例: 我们发现, 这结果即在低压下电阻率的少量增高随后在高压时电阻率大幅度减小是不同于帕尔霍敏柯和帮达连柯的报告的 (1960)。其中包括, 他们发现结晶岩石在低压时, 随压力增高而电阻率减小。对几种岩石, 帕尔霍敏柯和帮达连柯提出过与我们相反的应力效果, 即在低压时 (电阻率) 减小而在高压时增高。显然这些矛盾的观测结果必须用某种方法使其一致起来。

在我们研究电阻率对围压的依赖性时, 我们注意到电阻率变化与孔隙率的强烈相关, 遵循一个通常称之为阿尔奇定律的关系 [Wyllie and Rose, 1950]。在围压下结晶岩产生新的孔隙, 这些新的孔隙是引起水饱和岩石电阻率猛烈减小的原因。在现在的实

验中，能否如同我们在围压时所做的实验那样，同样地建立新的孔隙率与电阻率之间的关系呢？换句话说，根据测量到体积变化并应用阿尔奇定律，我们能否预言在应力状态下观测到的（电阻率）定量变化呢？为了探索这个有意义的可能性，我们设计了在测量电阻率的同时测量体积变化的方法。这个新方法，它比以前用来研究体积变化的方法[Brace et al., 1966]更适宜于电法测量。

我们将观测结果应用于地震预报，结果表明，用测量地层的电阻率变化可能探知地震之前的应力增高。然而一个重要的未知数是预先存在的断层的影响。破裂岩石应力的增高，是否会导致和完整岩石同样剧烈的电阻率变化呢？我们用几个实验来阐明这个问题。

除这些问题的讨论以外，我们在这里提供这些实验的细节。我们给出一些体积变化资料，同时给出电阻率随应力的全部测量资料。

实 验 方 法

一般方法如下。类似布雷斯（1965）最近描述的处理方法，用水饱和的圆柱体标本，在受外部围压及较小的内部液压（以后称为孔隙压力）下，再加以轴向应力。围压和孔隙压力在实验过程中保持常数。当轴向压力缓慢增加时，通过标本的两端测量电阻率。在某些实验中，也观测轴向应变和体积应变，对个别标本还测量了横向电阻率变化。大部分实验在岩石破裂时终止，而某些实验则继续进行，经过几个应力循环，就是在围压和孔隙压力保持常数的情况下，对破裂岩石反复施加（轴向）应力。在某些应力水平下，碎片滑动，导致应力降落，于是滑动停止。这样反复经过几个应力循环。每一个循环，都观测了体积应变和电阻率变化。

所研究岩石的物理性质列于表 1。正如表中所表明的那样，

其中有许多是布雷斯等 1965 年的结果。这里所用的弗雷德里克辉绿岩称为 1 号辉绿岩，从同一地点采集的新标本，但性质略有不同，称之为 2 号辉绿岩。斯普鲁斯-派思斜方辉石是由塞科尔在离北卡罗来纳州巴尔萨姆-加普 40 英里的斯普鲁斯-派思附近采集的。波茨维尔灰岩也是塞科尔从田纳西州斯普林附近的牛顿岩层采集的。方解大理石是纯白的、很均匀的颗粒结构岩石，与我们以前用来研究可缩性和破裂强度的岩石相同，它的来源不同。

实验装置如图 1 所示，磨光的正圆柱体标本，直径 25mm、长 40—60mm、上端和一个带孔的淬硬钢活塞接触，底端是一个钢塞子。这塞子兼起活塞和盛水容器的作用，它通过 1/2mm 左右的云母片与底端活塞接触。电阻率在上端活塞和底塞之间测量（频率为 10Hz）。布雷斯等在 1965 年所用的 Zrc 被认为是不必要的。

实验装置中不可缺少的一个元件是防护套，它不仅隔离提供高压的围压介质（石油或煤油并起绝缘作用，而且使标本在破碎时保持完整。如果它破裂，高压的围压介质就会进入孔隙压力系统，此外，它破裂必然导致实验的终止。一般的橡胶或塑料套管都不适于做防护套。它们的一个缺点是，聚氯丁合成橡胶在 0.5kbar 以上的压力时有点导电。只有一种材料证明是适用的，就是 3mm 厚的聚氨基甲酸乙酯套管。这

种材料是透明的、绝缘的，不受溶剂的影响；它能经受猛烈的直

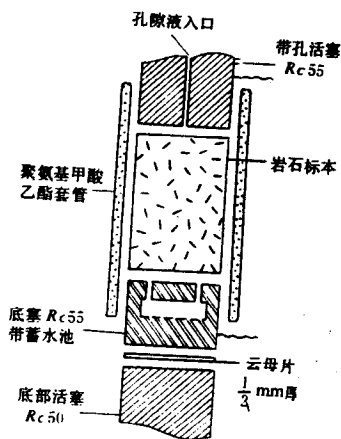


图 1 实验装置示意图

表 1

岩石物性表

岩 石	密度 (g / cm ³)	平均颗粒 直径(mm)	总孔隙率 η	成分分析	参考 文献
田纳西州 波 茨维尔砂岩	2.620	0.20	0.030	石英 46、古长石 21 白云母 11、氧化物 2	-
佛 蒙 特 拉 特兰石英石	2.643	0.30	0.005	石英 91、正长石 7、 微斜长石 2	Orace et al. [1965]
罗德岛 韦斯 特利花岗岩	2.646	0.75	0.009	石 英 27.5、微斜长石 35.4、黑云母 4.9。 斜长石 31.4(其中微斜长 石 17%)	Brace et al. [1965]
马萨诸塞 科德角花岗 闪长岩	2.715	6.5	0.004	正长石 42、石英 28、 斜长石 18(其中微长石 18%)。 黑云母,绿泥岩 12	Brace et al. [1965]
方解大理石	2.715	0.20	0.003	方解石 99	
纽约 钙长石	2.748	7.0	0.002	斜长石 90、 辉石—紫苏辉石 7、 绿泥岩 2	Brace et al. [1965]
马里兰 弗雷 德里克岩 1 [#]	3.020	0.175	0.001	斜长石 48、 辉石—紫苏辉石 49、 绿泥岩 1	Brace et al. [1965]
马里兰 弗 雷德里克辉 绿岩 2 [#]	3.033	0.20	0.001	斜长石 49、 辉石—紫苏辉石 46、 氧化物 3、绿泥岩 2	
北卡罗莱纳 阿达 斜方辉石	3.255	1.0	0.003	橄榄石 80(其中铁橄榄石 12%)、 蛇纹岩 19(?)	Brace et al. [1956]

续表 1

北卡罗莱纳 斯普鲁斯一 派恩 斜方辉石	3.262	0.50	0.002	橄榄石 96、 蛇纹岩 3、 氧化物 1	
------------------------------	-------	------	-------	----------------------------	--

至标本破裂甚至高达 11kbar 压力的撕扯作用。套管罩住整个标本，在上面活塞和下面塞子之间，用一股或两股 14 号钢丝扎紧。

图 1 所示装置配备一个标准型的压力容器，围压由一个手压泵维持，并用一个 7.5kbar 的汉斯压力计测量，容器压力介质和标本的温度变化通过一个外部冲淋方式控制在 1℃ 以内，穿过压力容器终端的导线具有超过 600kΩ 的漏电电阻。最后，力和施于标本上的轴向应力由容器外的压力计测量。

岩石标本和其孔隙水形成一个独立的压力系统。除岩石和上面的空心活塞外，这个系统由一个 2kbar 的海斯计和一个体积计（“压力发生器”）组成。这体积计就是个简单的活塞和圆筒，这种设计能使少量液体补充到系统中去或从系统中流出来，该液体体积的大小可以测知。

典型的实验方法如下：首先是围压，其次是孔隙压加到套好的标本上。这压力维持 2—4 小时，具体地说，等孔隙压力达到近于常值，即系统孔隙压力的变化小于每小时 1ber 时可以认为适当了。随后，（轴向）应力按预定加载次序加上。也就是说，先估计出破裂应力的值；在达到破裂应力一半之前，特别是接近破裂时，应力以小步长增加。总计，应力分 10—15 级，全部时间约 30 分钟至 2 小时。与这个加载速率相应的应变速率在较高应力下为 10^{-4} / s。

典型情况中，在不变的围压下，孔隙压力随应力增加而变

化。以韦斯特利花岗岩标本的一个实验为例（图 2），开始建立的孔隙压力为 500bar，当轴向应力增加时，起初孔隙压力略有增加，随后到破裂压力的 0.6 倍左右，（孔隙压力）开始下降，破裂时，迅速降至 300bar 左右。

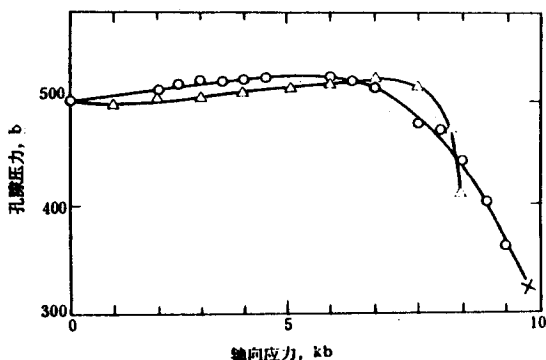


图 2 孔隙压力随轴向应力的变化
围压，对花岗岩（圆点）为 1.58kbar，对花岗岩闪长岩（三角）
为 1.90kbar，花岗岩在叉点破裂

孔隙压力的这个变化显然是由于岩石孔隙率的增加引起的（同时伴有很小的弹性形变）。用体积计能直接测得孔隙率的这个变化。调整体积计，可使孔隙压力保持常数，即在低压时，体积计活塞缩回，以抵消孔隙率的减小；在高压时，活塞推进，以抵消孔隙率的增加。因此，在每一个应力下，岩石标本的体积变化都可以和电阻率的变化同时测量。

有必要改变图 1 的装置，以得到横向电阻率随应力的变化。标本分三部分，上、下圆柱体垫片使标本与带孔活塞及底塞绝缘，垫片由致密的斑岩组成，其强度为岩石标本的两倍。垫片用环氧树脂粘在标本上。在这个多层结构的两侧涂上银胶形成导电

通路，于是电流从中空活塞流下，经上面垫片和标本的一侧，径向穿过标本到达另一侧，经标本和底下垫片的这一侧到底塞。在上面垫片和标本一侧割开 1mm 深的沟，通过此沟对标本供水。

虽然这个装置比其它许多试验过的装置为优，但它也不是完全成功的，对标本孔隙液的供给经常发生障碍，使得实验不得不在破裂前终止。

观测数据

图 3 和图 4 是电阻率相对于轴向应力的资料，这是对实际实验条件的小变化作过补偿，并校正到单一温度 (20℃) 和单一水电阻率 (50Ω.m) 条件下的资料。

几种岩石的体积应变 $\Delta V/V_0$ 随应力变化示于图 5。图中，按习惯规定，负应变表示体积增大。

图 6 所示为韦斯特利花岗岩标本破裂后的资料。它代表三块花岗岩标本和一块辉绿岩标本的典型特性。在 F 点岩石破裂，电阻率立即到 A 点，注意在这个围压下，荷载并未降到零，而是降到 3kbar 左右。几个小时以后，电阻率渐渐恢复到接近于 C 点的数值。以整个实验中所使用的加载速率重新对标本加载，在 F' 点，沿裂缝发生滑动，应力降到接近于 C 点的水平。等到电阻率第二次达到常数时，再次对标本加载，直至到 F'' 点，应力再次降落，实验到此结束。在这样的实验中，也观测了体积变化；在滑动和重新施加应力的过程中，体积的变化和图 6 所示的电阻率变化一样，并不显著。

象上面的实验，破裂的形态颇为复杂。典型的是一条主要裂缝，与应力轴的倾角通常为 $25^\circ - 35^\circ$ ，有时裂缝与活塞或底塞相交，有时全部在标本以内。虽然主要裂缝清楚而显著，但还有许多同样倾角的次等裂缝，通常这些裂缝的长度为主要裂缝长度的 $1/3 - 2/3$ ，并和主要裂缝相交。作为特点，主要裂缝包含碎片，而较小的裂缝则不包含碎片。因此，在实验中所观测到

的滑动很可能是发生在主要裂缝上。

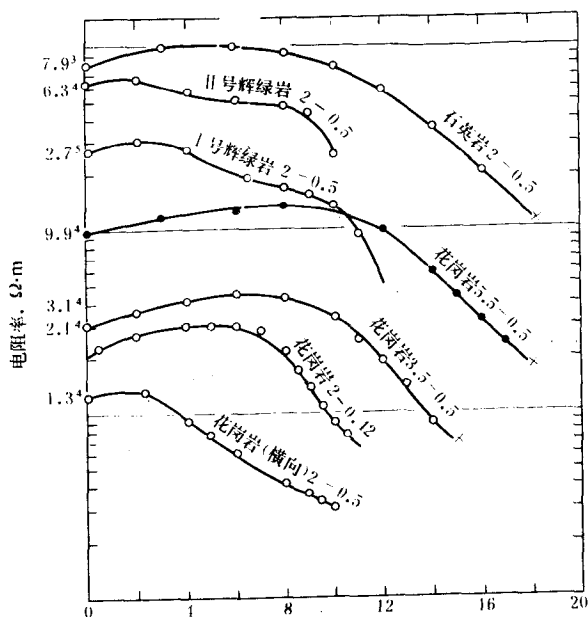


图3 电阻率与轴向应力的函数关系

岩石名称后面的数字分别为围压和孔隙压力，单位为 kbar。为方便起见，曲线作了垂直移动，在 O 应力线上的小数为 10Hz、20° 时的电阻率；7.9³ 意为 7.9×10^3 。除最下一条曲线外，都是轴向电阻率。破裂发生在 X 点

以上所给出的全部资料的误差如下：孔隙压和围压的可能误差为 0.25%，轴向应力为 100—200bar，任一实验过程轴向应力的相对精度为 1% 左右，电阻率的可能误差为 1% 左右。然而，如布雷等 1965 年所指出过的，对同类岩石的不同标本，电阻率的重复性只有 20% 左右。但在同一实验中，相对精度要高得多。

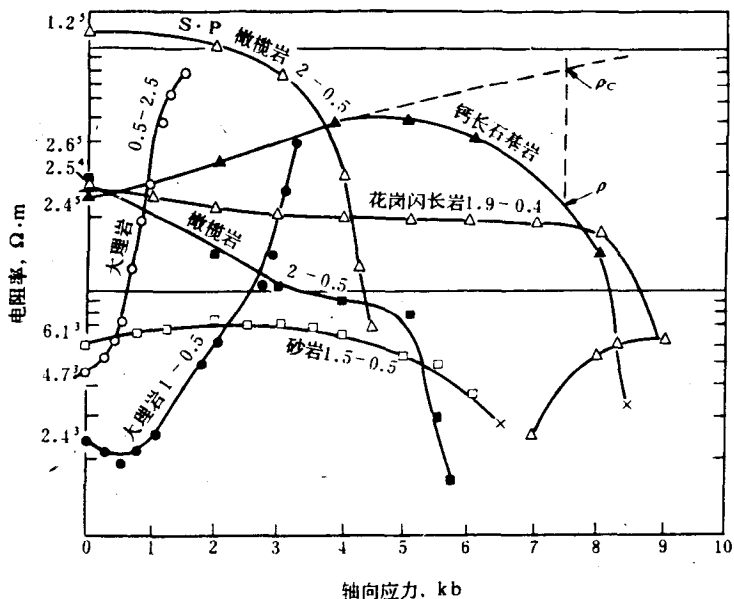


图 4 电阻率与轴向应力的函数关系

岩石名称后面的数字分别为围压和孔隙压力，单位为 kbar。为方便起见，曲线作了垂直移动，在 O 应力线上的小数为 10Hz、20° 时的电阻率；7.9³ 意为 7.9×10^3 。除最下一条曲线外，都是轴向电阻率。破裂发生在 X 点

体积的变化，可以从体积计测量，读数误差为 1×10^{-4} 左右。然而，我们报告中的数据，在低压时误差大约为 10%，而在高压时，大约为此两倍。这么大的误差是由于在每个应力下需长时间等待孔隙压力达到平衡而引起的。经常有这样的情况，体积的变化还没有及时测出，破裂已经发生。

讨 论

除大理石外，本文所研究的岩石的性能定性上都相同。在大约破裂应力一半之前，电阻率随应力增加而略有增加或减少，随后，以越来越快的速率减少，当超过破裂应力的 90% 时，电阻