

高温高压下岩石和 矿物物理性质的研究

[苏]M.П. 伏拉罗维奇 等著

地 震 出 版 社

序 言

在当前，岩石和矿物在高压高温条件下的物理性质的研究成果，对于了解地球内部具有越来越大的意义。首先，这些成果对解决地壳和上地幔许多现代物理问题，其中包括对地球深部结构的研究是必需的。上述研究，对于解决区域地球物理和地质、地球化学、岩石学、超深钻探以及寻找深部富集矿产的预测等方面的各种问题都是很重要的。因此，完善用高温高压下的实验资料综合解释野外地球物理和地质资料的方法是要解决的一个实际问题。

近几年，苏联和东欧一些国家的科学家取得了许多关于岩石和矿物在高压高温条件下物理性质的新的研究成果。已出版的一些专著、论文集、述评文章、会议文集和其它出版物 [1] (25, 27, 35, 66, 77, 79, 128, 159, 165, 168, 171, 173, 184) 和其它已部分发表了这些工作的结果。其中某些文章叙述了在高温高压下研究地球矿物质（即岩石和矿物——译者）物理性质的发展历史，甚至列举了广泛的图书目录 [35, 71, 72, 77, 170-173, 284, 285]。

本书叙述了1972至1975年间按 КАПІ І. 11 工作组计划完成的某些研究成果，提供了有关地球矿物质物理性质的实验的和理论的研究结果，同时阐明了它们在地球物理应用中的某些问题。

在研究矿物质在高温高压条件下物理性质的实验中，实验装置和方法的发展起了很大作用。这些工作发表在本专著的第一章，那里叙述了作者们近年来发展的新的设备、仪器和方法。

接着叙述了许多实验室在岩石和矿物在高温高压条件下的物理特性的综合研究方面所取得的研究成果。作者们完成的各种工作彼此间有很好的补充。在第二章里列举了矿物质弹性性质的资料。尽管在不同温度压力下对样品中弹性波（特别是纵波）速度进行过大量测量，但这类研究对地球物理是很有前景的，而且，开展高温高压同时作用下的实验是特别有意义的。本章发表了关于岩石和矿物弹性的各向异性的资料。在第三章中提出了同质多形的研究结果。各向异性和同质多形的研究特别是在新的观点方面，需要广泛和深入地进行。第四章讨论了高压对试样塑性变形和破裂过程的影响。但是关于岩石物理的这个方面的实验资料还很少。第五章是在高热力学参数下，对矿物质的电性和热性的研究成果。应该指出，在电性参数方面已有大量资料，但热物理性质几乎完全没有研究。关于岩石和矿物在高温高压条件下的磁性变化资料是比较少的（第六章）。这些研究同样必须积极开展。最后，在第七章，讨论了实验结果的某些地球物理应用的例子。

总之，上面提到的以及地球矿物质在高温高压条件下的物理性质某些其它方面的研究，无论在实验上还是在理论上都需要继续发展。为此应扩大压力和温度的范围，系统研究采集的岩石样品，要考虑它们的形成条件、化学成分、结构、年龄和其他因素，以至一系列造岩矿物的结晶学和结晶化学的特性。

应当指出，在科学实验室和生产组织中，在一个大气压下研究过几百万个岩石和矿物样品的物理性质，而在高温高压下在世界上也只研究了几千个样品。

可以有信心地说，各国学者共同努力，在极限热力学条件下对地球矿物质综合物理性质继续扩大研究，将可能在近几年取得实质性的新进展，这些新进展将能够有根据地解决地球内部的成分和结构以及其中进行的过程的许多问题。

目 录

序言	(1)
第一章 实验装置方法研究	(3)
15千巴等静压和高温通用实验装置	Т.С.Лебедев, В.И.Шаповал, В.А.Корчин〔苏〕 (3)
在高温高压条件下测量弹性波速度的仪器和方法	Е.И.Баюк〔苏〕 (6)
在非均匀挤压条件下弹性波速度的测量装置	М.П.Воларович, В.А.Будников〔苏〕 (7)
在各种PT-试验条件下同时研究岩石、矿物的纵波和横波的速度	Т.С.Лебедев, В.А.Корчин, В.А.Шаповал〔苏〕 (9)
极高压下矿物X射线和显微镜研究的方法、仪器和结果	Х.Фольштадт, Р.Веш, А.Крафт〔德〕 (20)
有关研究硫化铁体系和岩石中弹性波速度和衰减的仪器和方法问题	Г.И.Мюллер, З.Рааб, У.Зайпольд〔德〕 (24)
第二章 弹性	(27)
岩石的弹性性质	М.П.Воларович, Е.И.Баюк〔苏〕 (27)
矿物的弹性	Е.И.Баюк〔苏〕 (32)
在球形样品上研究岩石在各向压力作用下弹性的各向异性	З.Прос〔捷〕 (36)
超基性岩的弹性和速度的各向异性	В.Бабушка〔捷〕 (44)
岩石弹性的各向异性	Г.И.Мюллер, З.Рааб, У.Зайпольд〔德〕 (49)
变质岩中弹性波速度的各向异性	Е.И.Баюк〔苏〕 (51)
岩石和矿物的弹性波速度各向异性测量结果的处理	К.Клима, И.Пшенчик〔捷〕 (53)
大理岩弹性常数的确定	К.Клима, В.Бабушка〔捷〕 (61)
第三章 同质多形转变	(66)
某些矿物相变时的弹性性质变化	Е.И.Баюк〔苏〕 (66)
在不同热力学条件下碳酸岩和CaCO ₃ 成分的矿物同质多形转变动力学 和超声波速度变化	Т.С.Лебедев, Ю.П.Оровецкий, В.А.Корчин〔苏〕 (67)

高压下同质多形转变及有关地球物理问题	Я.Л.Копыстински〔波〕 (84)
第四章 变形性质	(89)
岩石的变形和强度性质	М.П.Воларович〔苏〕 (89)
岩石中裂缝对应力分布的影响	Я.Невядомски〔波〕 (92)
第五章 电性和热性	(96)
矿物和岩石的电性	З.И.Пархоменко〔苏〕 (96)
过渡金属 3d 型硫族化物的电性	Ч.Зайпольд〔德〕(105)
高压下岩石的温度传导性	Ч.Зайпольд, В.Гутцайт〔德〕(109)
第六章 磁性	(114)
铁磁性矿物及含有这些矿物的岩石在高温高压下的磁性变化	Т.С.Лебедев, Б.Я.Савенко, Н.Ф.Познанская〔苏〕(114)
磁铁矿在高温高压下的磁化强度	М.Еленска〔波〕(126)
第七章 地球物理应用	(130)
浅震和深震模式	Х.Штиллер, Ф.К.Вагнер, Х.Фольштадт〔德〕(130)
地震前 V_p 变化的岩石物理原因和定量估算	Х.Штиллер, Ф.Х.Вагнер, Х.Фольштадт〔德〕(133)
高温高压下的实验室资料在地球物理中的应用	М.П.Воларович, Е.И.Баяк, З.И.Пархоменко〔苏〕(137)
根据 $V_p = f(p)$ 的实验研究结果、深地震测深和地质资料得到的地壳岩石 物理模式	Т.С.Лебедев, Ю.П.Оровецкий, П.А.Буртний〔苏〕(139)
参考文献	(145)

序 言

在当前，岩石和矿物在高压高温条件下的物理性质的研究成果，对于了解地球内部具有越来越大的意义。首先，这些成果对解决地壳和上地幔许多现代物理问题，其中包括对地球深部结构的研究是必需的。上述研究，对于解决区域地球物理和地质、地球化学、岩石学、超深钻探以及寻找深部富集矿产的预测等方面的各种问题都是很重要的。因此，完善用高温高压下的实验资料综合解释野外地球物理和地质资料的方法是要解决的一个实际问题。

近几年，苏联和东欧一些国家的科学家取得了许多关于岩石和矿物在高压高温条件下物理性质的新的研究成果。已出版的一些专著、论文集、述评文章、会议文集和其它出版物 [1] (25, 27, 35, 66, 77, 79, 128, 159, 165, 168, 171, 173, 184) 和其它已部分发表了这些工作的结果。其中某些文章叙述了在高温高压下研究地球矿物质（即岩石和矿物——译者）物理性质的发展历史，甚至列举了广泛的图书目录 [35, 71, 72, 77, 170-173, 284, 285]。

本书叙述了1972至1975年间按 КАПИТ I.11 工作组计划完成的某些研究成果，提供了有关地球矿物质物理性质的实验的和理论的研究结果，同时阐明了它们在地球物理应用中的某些问题。

在研究矿物质在高温高压条件下物理性质的实验中，实验装置和方法的发展起了很大作用。这些工作发表在本专著的第一章，那里叙述了作者们近年来发展的新的设备、仪器和方法。

接着叙述了许多实验室在岩石和矿物在高温高压条件下的物理特性的综合研究方面所取得的研究成果。作者们完成的各种工作彼此间有很好的补充。在第二章里列举了矿物质弹性性质的资料。尽管在不同温度压力下对样品中弹性波（特别是纵波）速度进行过大量测量，但这类研究对地球物理是很有前景的，而且，开展高温高压同时作用下的实验是特别有意义的。本章发表了关于岩石和矿物弹性的各向异性的资料。在第三章中提出了同质多形的研究结果。各向异性和同质多形的研究特别是在新的观点方面，需要广泛和深入地进行。第四章讨论了高压对试样塑性变形和破裂过程的影响。但是关于岩石物理的这个方面的实验资料还很少。第五章是在高热力学参数下，对矿物质的电性和热性的研究成果。应该指出，在电性参数方面已有大量资料，但热物理性质几乎完全没有研究。关于岩石和矿物在高温高压条件下的磁性变化资料是比较少的（第六章）。这些研究同样必须积极开展。最后，在第七章，讨论了实验结果的某些地球物理应用的例子。

总之，上面提到的以及地球矿物质在高温高压条件下的物理性质某些其它方面的研究，无论在实验上还是在理论上都需要继续发展。为此应扩大压力和温度的范围，系统研究采集的岩石样品，要考虑它们的形成条件、化学成分、结构、年龄和其他因素，以至一系列造岩矿物的结晶学和结晶化学的特性。

应当指出，在科学实验室和生产组织中，在一个大气压下研究过几百万个岩石和矿物样品的物理性质，而在高温高压下在世界上也只研究了几千个样品。

可以有信心地说，各国学者共同努力，在极限热力学条件下对地球矿物质综合物理性质继续扩大研究，将可能在近几年取得实质性的新进展，这些新进展将能够有根据地解决地球内部的成分和结构以及其中进行的过程的许多问题。

第一章 实验装置方法研究

15千巴等静压和高温通用实验装置

为在达15千巴的等静压和高温条件下对岩石和矿物的各种物理性质进行综合研究，乌克兰共和国科学院地球物理研究所（基辅）地球物质物理性质研究室创造了УВГД-15〔100〕通用实验装置，利用ВНИИФТРИ研制的基辅《标准》工厂制造的校准的液压高压装置为压力源。它的通用性在于，在同一个液压压力源上联接几个可替换的工作室（容器），这些工作室装备有一些测量特定物理参数的测量单元。

设备由带有附加装置的高压发生器和带有测量单元的相应的容器组成。发生器与容器和锰铜压力表连接，后者借助于专门的延长器和三通来记录容器的压力。这种结构的设备能够在我们在完成各种测量时简便地进行工作容器的更换。

设备的基本的和最复杂的部分（图1）是高压液压发生器，它由以下几部分组成：两个HCBB-2500型泵站，其中一个是预压泵（6），另一个是低压泵（4）；可增压达15千巴的增压器（9）；手动压机（8）控制的顶压阀门（10）；带有手动压机（3）的高压阀门（2）；预压压力表（7）和高压压力表（11）以及锰铜合金压力表（1）。当被研究的样品放进可替换的高压容器（12）时，开动预压泵站（6），经低压阀门，工作容器、增压器和高压阀门充满特种液体。这时产生的压力用预压压力表（7）和高压压力表（11）来监测，同样也可用锰铜合金的压力表（1）来监测。当压力达到约2.5至3.0千巴时，关掉低压阀门（10），启动低压泵站（4），它带动增压器（9）继续升压。在设备中采用高压活塞直径15毫米（行程100毫米）的增压器。增压器低压活塞所提供的压力由压力表（5）来监测。增压器的高压活塞和高压阀门将部分液体压得更紧，以此更提高了密封质量。在增压器工作时，容器和管道中液体的压力，用两个锰铜合金压力表来监测（达25千巴）。容器和增压器需装两个压力表是由如下情况决定的：因为压力源要为体积和规模不同的容器提供压力，增压器、水泵和控制台安装于距容器的防护柜相当远的距离上。高压管道（达15千巴）长达100厘米，毛细钢管孔径为2毫米。在压力达10—12千巴时，传压介质采用No. 5聚乙烯硅酸盐液体，它在增压器和容器内达到必须的压力时存在着明显的惰性。这明显地表现于装在容器上的压力表显示出的压力升高较之装在增压器上的压力表具有明显的迟缓现象。由于存在两个压力表，每当下一次增压前就能确定压力动态。

此外，由于在高压阀门前后装有两个压力表，就能够使用不同容积的系列容器，由几个工作循环使各容器得到必须的压力。在增压器活塞达最大行程而容器中压力又不足时，可用手控压机（3）操纵的高压阀门把容器连同锰铜压力表与整个设备相隔开。增压器的工作活塞放到起始位置，用增压器提供压力的整个过程又从头循环。当干线中压力达到等于容器压力时，再打开连接干线与工作容器的高压阀门。

增压器活塞继续向前行进，能达到更高的压力。为了在9厘米³工作容器中获得达15千巴的压力，增压器的活塞要完成两个行程，而容器为14厘米³时，则要完成三个行程。如利用大容量的工作容器，则要相应地增加增压器的行程数量。用小尺寸的容器时，为提供必须

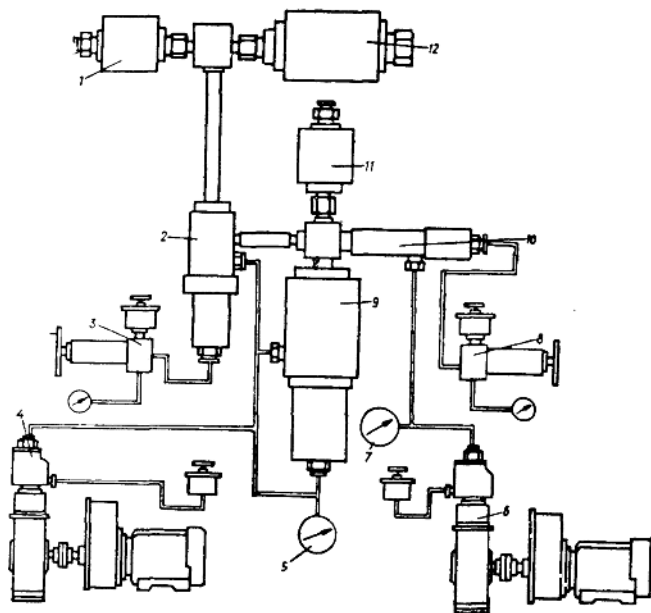


图1 高压等压(达15千巴)和高温通用设备的方框图(1—12请看文章中的解说)

的压力,而且又减少时间和能量的耗损,则可以向容器内安放补充物质。用锰铜合金压力表测量压力的误差不大于 ± 50 公斤/厘米²。

可利用No. 5 聚乙烯液体做压力传递介质,它在室温和15千巴压力下不固化^[63],尽管它的粘度增加很快(从1巴和20°C时的2.51泊,增到8.8—9.4千巴和同样温度时的3270—3340泊)。使用由乙二醇和甘油组成的混合液是不允许的,因为压电传感器与压力传递介质间是不绝缘的,其原因是上述液体在压力增加时成为导电的了。

在研究15千巴等静压及高温对岩石和矿物的各种物理参数的影响时,拟定和准备了两层容器的方案。大家知道,在给定容器尺寸的情况下,可采用带预应力壁的多层加固容器来获得最大的允许内压力。通常人们做成两层的。由于外壁有应力,而使内壁得到加固。如果作用到每个圆环单元内表面的压力 P_0 达到等于所用材料蠕变强度 σ ,极限时^[49],则带加固的(两层圆筒)高压容器设计得最好。

$$P_0 = \frac{\sigma_{s_1}}{2} \cdot \frac{r_1^2 - r_0^2}{r_1^2} + \frac{\sigma_{s_2}}{2} \cdot \frac{r_2^2 - r_1^2}{r_2^2}, \quad (1)$$

此处, P_0 ——容器内的压力; σ_{s_1} 和 σ_{s_2} ——圆筒的内外筒拉伸时的相应的材料的蠕变极限; r_0 和 r_1 ——容器的内外半径; r_2 ——加固件的外半径。

这个两层容器的关系式很容易从每层的强度条件中得到^[49];

I层

$$P_0 - P_1 = \frac{\sigma_{s_1}}{2} \cdot \frac{r_1^2 - r_0^2}{r_1^2},$$

II层

$$P_1 - P_2 = \frac{\sigma_{s_2}}{2} \cdot \frac{r_2^2 - r_1^2}{r_2^2},$$

此处， P_1 ——两层间的合成压力，而 P_2 ——自第二层外部的作用压力，在此条件下等于大气压 ($P_2 = P_{\text{气}} = 0$)。

函数 P_0 (1) 有最大值，因为在 $r > 0$ 时^[49]， $\frac{\partial^2 P_0}{\partial r^2} < 0$ ，从内部压力的最大值条件应得出

$$\sigma_{s_1} \frac{r_0^2}{r_1^2} = \sigma_{s_2} \frac{r_1^2}{r_2^2}.$$

在给定的环^[49]的尺寸和材料 (σ_i) 时，从这个关系式中很易找出容器两个环单元的共轭半径 (r_1) 的最佳值。

根据公式 (1) 和 (2) 计算的高压双层容器示意图示于图 2。它的内圆筒是用 45 Cr MoNiW 钢制造的，外筒是用优质 30 Cr 钢制造的。在容器的上部安装有锁合装置 (XBT 钢)，而在下边的尾端带有与高压三通相连接用的螺纹。在所描写的结构中采用了三个密封环：两个铜的 (三角形截面) 和一个聚四氟乙烯的 (正方形)。系统的最初密封是靠壳体装到容器的环形凸起时对环的压力而达到的。根据所进行的研究需要，在锁合装置的壳体上连接相应的测量单元。

图 3 例举了一种单元的截面图，它用于研究 15 千巴等静压和高温对改变岩石和矿物纵波

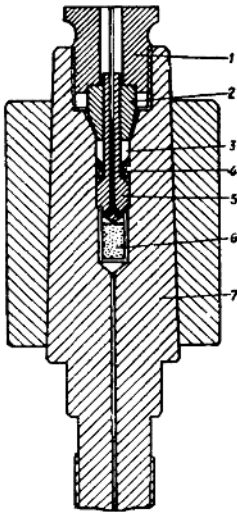


图 2 高压工作容器的一般外形

- 1—塞子；2—衬环；3—小衬环；4—密封装置；
5—带有导线的锁闭体；6—装有研究样品的测量单元；7—高压容器外壳

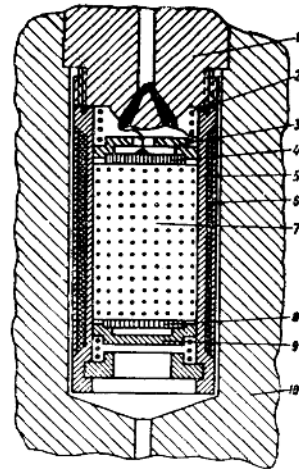


图 3 在高温和 15 千巴压力下研究矿物样品超声波速度的高压容器单元

- 1—锁闭装置的外壳；2—导线；3—上聚四氟乙烯碗；4、8—压电传感器；5—壁；6—加热器；7—被研究的样品；9—下聚四氟乙烯碗；10—高压容器外壳

和横波传播速度的作用。单元的所有部件装在铜制的圆筒 (5) 内。它的外面安装有一加热器 (6)，加热器由缠成两层的带状镍铬合金制造并用云母与筒壁绝缘。在加热器两层之间也放有这种绝缘体。外部绝缘是由两层薄膜状的聚四氟乙烯和一层云母组成。加热器和绝缘

层的总厚度在1.5毫米左右。单元尺寸小时，这点非常重要。

容器内的温度用镍铬-镍铝热电偶显示，它与单独导线相通，其精度为 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。锁合装置壳体有六根导线。使用带有不同类型加热器的上述装置的经验表明，根据加热器的功率情况，所确定的容器内的温度，精度达 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 。已查明，通过加热器的电流是完全与一定的温度相对应的。在加热器中电流固定时，经过一段时间（一般5—10分）可建立恒定的温度，它在相当长的一段时间内是不改变的（假设壳体是热绝缘的）。进行的一系列试验表明，用这两种方法来显示容器内的温度，其结果是很符合的。

在高温高压条件下测量弹性波速度的仪器和方法

苏联科学院地球物理研究所高压实验室创制了温度达 400°C 围压达4千巴时研究岩石弹性的仪器。工作容器本身是用经过热处理的高合金钢制造的厚壁圆筒。

电加热器安放在高压容器内。加热器的电源由交流电经过调压变压器PHO-250的次级线圈供给。电流值和电压降由0.5级的Д553型安培表和Φ506型伏毫安表来监测。加热样品消耗电流的功率达1.8千瓦。电加热器、岩石样品和压电效应传感器，在容器中的布置示于图4 [14, 35]。

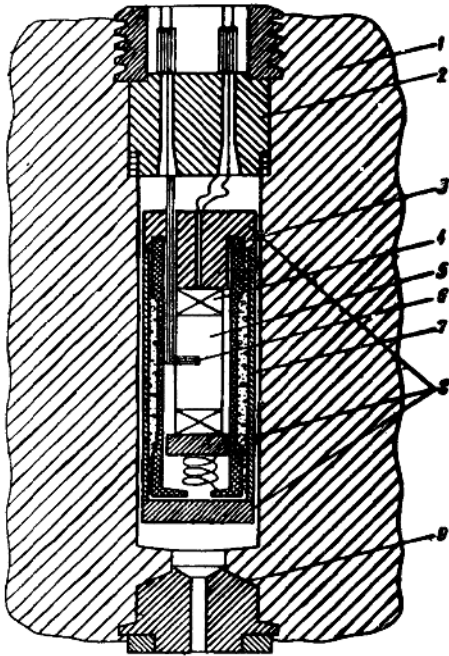


图4 高压容器的装配图

- 1—容器；2—导线；3—加热器；4—压电效应传感器；5—岩石样品；6—热电偶焊接处；7—石英管；8—石棉密封垫；9—接头

在容器中围压是用空气压缩机系统提供的，用10千巴的弹簧压力表测量压力。热电偶和从电子仪器通向电加热器以及压力传感器的导线都是经过外壳绝缘锥体插头导通的。插头放在容器的上部用螺塞压紧，用两个钢环和一个铜环组成密封锥密封。密封作用以布里奇曼《无补偿面》原理为依据。

为防止气体进入岩石孔隙，直径为20毫米，长为20—30毫米的岩石样覆盖以多层БФ-2胶。样品的温度用镍铬-镍铝热电偶测量，热电偶的接头导入与样品成垂直的专门小孔里（长10毫米和直径2.5毫米）。试验表明，这样放热电偶能够准确测量样品温度，而不影响弹性波速度值。温度的准确度是 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。头几次试验见到了通过容器壳体强烈的热扩散。特别是大的压力下，这就使样品加热发生困难。在容器壁与加热器间安放的石英管和石棉垫显著减少了热耗损。

正如现有资料分析和我们经验表明的那样，研究方法决定着所得结果的可靠性。例如，在小压力下（0.3—0.5千巴），温度达 100°C 时，花岗岩样品的加热引起了弹性波速度剧烈和不可逆的减少。其原因可能是造

岩矿物各向异性膨胀和化合水的蒸发时样品的破裂。对经过上述条件下试验的花岗岩薄片进行的显微镜下的研究表明，试验样品裂缝的数量比未试验样品增加了两到三倍。

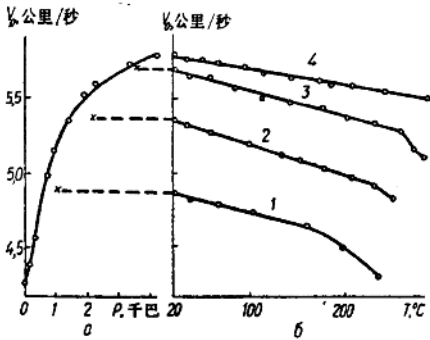


图5 花岗岩里纵波速度与压力(a)和温度(b)的关系。曲线上的数字是样品加热时的压力值

为了防止破裂,样品在达到最大压力后(4千巴)再加热。在这种情况下,直至温度达250—300°C时,观察不到速度的剧烈减少。在这种条件下高围压持续形成微裂隙,由于这个原因,速度随温度改变是单调的、可逆的、而在这样的试验后,研究岩石薄片时,见不到任何结构改变。但是低于3千巴的压力不能完全抵消该温度下产生的应力(图5,曲线2)。样品在2和1千巴的压力下重复加热达200—250°C后,再冷却到室温,速度与起始值不重合(图5上划×的)。

研究过程中已确认,若要不担样品产生微裂隙的风险,依照压力值样品只能加热到

一定温度。在4千巴压力时,温度不应该超过300—350°C,当压力为3千巴时,温度是250°C等等。对于含有各种不同弹性的矿物的岩石(结晶页岩,片麻岩等),这个界限是特别重要的。

在非均匀挤压条件下弹性波速度的测量装置

在地球物理学发展的现阶段,对于地球动力过程的研究得到越来越大的重视,其中也包括地震的孕育机制。因此形变过程对岩石物理特性的影响,包括对弹性波传播速度影响的实验研究具有特殊的意义。

型槽法是岩石样品形变研究首批方法中的一种。用这个方法定性地查明了硬质岩石中出现塑性形变的可能性^[187],后来型槽法广泛地被用于构造模拟^[111]及动力试验^[181]。将型槽法用于研究形变对岩石矿物中弹性波速度的影响表明,型槽中样品的负载具有某些特殊性^[22, 35]。为了取得定量的结果,制造了型槽法从结构上和方法上已很完善的ГПМ-7型装置^[21]。结构上的完善在于制定了型槽法的装配结构,试验样品的包装,型槽通道中活塞的密封,以及建立液压机工作用的专门装置。制定方法包括加载时应变状态的解释,它可以较精确地测量和解释加载样品的应变状态。

ГПМ-7型装置示于图6。装配的型槽是一个退火钢做的套筒,在其端部做有护箍环。在套筒的工作部分(中间)其壁不加固,这是为样品提供侧压力用的。型槽通道里样品的包装是一个重要问题,为取得定量的结果必须解决这一问题。初期试验中采用的样品是没有壳膜的。此时即使仔细地样品向型槽通道推挤时,在初加载时样品还产生了局部破裂。为用ГПМ-7装置试验研制了自行密封的样品包装,它克服了先前壳膜结构固有的缺点。对通道的直径20毫米高65毫米的型槽,制备的样品直径为16毫米,高32毫米。岩石样品和型槽通道壁之间的缝隙中铅壳的自行密封是通过在样品尾部使用一由壳膜材料制成的垫圈来实现的。在向岩样加载时壳膜的端部材料流向环形间隙而可靠地在型槽通道中密封岩样,于是样品不产生预先破裂。在型槽通道壁的弹性-塑性形变的情况下,活塞的密封也能保持。应强调的是,在型槽法中活塞密封以前未采用过。活塞密封结构的基础是汽缸-活塞型装置中采用的三角形切面的环。

准备试验的型槽放在专门的装置里,后者放在液压机的两平台之间。装置由上下两块平板组成,其距离可用弹簧柱调节。用钢活塞向样品传播轴心负载。在样品沿轴向形变时,将

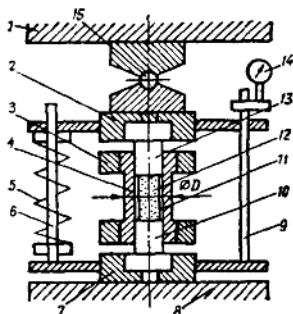


图6 按型槽法研究岩石的 ПИМ-7装置图

1、8—压机支承平台；2—上支承；3—型槽的护箍环；4—型槽套筒；5—弹簧；6—弹簧柱；7—下支承；9—测力计柱；10、13—活塞；1—铅壳；12—岩样；14—钟表指示计；15—球形万向节

发生侧向扩张，但型槽壁可阻止它。工作部分的型槽壁的反作用为样品提供了侧压力。在样品的形变过程中装置平板间的距离由三个钟表式指示计改变和显示。此外，在试验中测量压机的强度和型槽工作部分外径的变化。借助于专门设计的装置能在两个彼此垂直的方向上显示直径的大小。这是很重要的，因为型槽工作部分表面的形变在各方向上可以是不同的。

在型槽中形变时，样品对称轴的应力状态用轴应力 σ_1 和侧压力的值 σ_0 来描述，按下列公式计算：

$$\sigma_1 = \frac{F - f_1 - f_2}{S_0}, \quad \sigma_0 = -\frac{\sigma_1}{3} (1 + 2\gamma),$$

式中 F ——压机作用力， f_1 ——密封质中的摩擦， f_2 ——壳膜负载的修正值， S_0 ——样品起始的截面积， γ ——标准材料的侧推力系数。

型槽工作部分壁的反作用提供的侧压力值用预制的刻度表来测定。刻度表是由已知侧压力系数的材料做成的样品加负载并获得 σ_0 和 D 的关系得出的。为获得比较可靠的结果，刻度的标定是用变压器油 ($\gamma = 1.0$)、钢 ($\gamma = 1.0$) 和铅 ($\gamma = 0.9$) 进行的。用专门的试验来确定壳膜中的负荷修正值^[21]。应变状态参数的确定精度不低于 5%。用轴向形变 ϵ_1 表示样品的形变状态，其精度为 1%。

用 0.8—1.0 兆赫频率的压电陶瓷传感器发声的方法进行超声波测量。传感器安装在 ПИМ-7 装置的上下平板中的专门孔穴中 (图 6.2 和 7)。利用宽频带放大器和模拟式超声波探伤器测量弹性脉冲通过的时间。用预先试验在传感器-活塞-传感器系统中确定延迟时间，以及当量 $\sigma_1 = 1500$ 公斤/厘米² 的负荷对这段推迟时间的影响。当计算形变过程中岩样的弹性波速度时，被测出的弹性脉冲通过时间与样品长度相当。这个长度总是可以测到的，精度达 0.01 毫米。在这种条件下速度测量精度是 1.0—1.5%。

用 σ_0 - σ_1 的负载曲线和 σ_1 - ϵ_1 形变曲线两个关系式确定用 ПИМ-7 装置试验时岩石的形变性质。图 7 是干燥空气和完全水饱和的黑云母花岗岩样品的试验结果。干燥的和完全水饱和的黑云母花岗岩样品的结果是重合的。以负载曲线确定负载参数，用导数 $C = \frac{d\sigma_0}{d\sigma_1}$ 表示。

由图可见，黑云母花岗岩形变随在加载时负载参数较大变化而发生。具交变负荷参数和强度的试验样品是型槽法试验的基本特征，它不仅可在弹性而且可在脆性的岩石中得到非弹性形变。从图 7 可清楚地看到，黑云母花岗岩形变曲线上非弹性形变范围内的蠕变极限达 10%。从一系列类花岗岩岩石、辉长岩、闪长岩和片麻岩，即前面说过的脆性岩石中均可得到相似的结果。黑云母花岗岩中的超声波测量结果列举在图 8 上。由此可看出，在干燥的和水饱和

的岩样中，弹性波速度在非蠕变极限之前是增加的，而在非弹性形变范围内是减少的，而且纵波速度变化比横波大 1—2 倍。据此 V_p/V_s 比值同样在蠕变极限之前增加，而在其后减少。

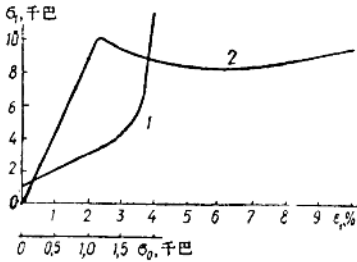


图 7 黑云母花岗岩的负载曲线 (1) 和形变曲线 (2)

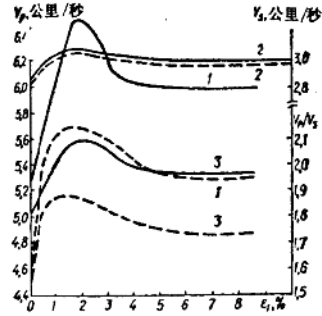


图 8 弹性波速度形态和黑云母花岗岩形变过程中的速度比

1—纵波速度；2—横波速度；3—速度比；实线是水饱和样品，虚线是干燥样品

在各种 PT -试验条件下同时研究岩石、矿物的纵波和横波的速度

在实验室条件下研究 V_p 和 V_s 的方法

为了确定岩石和矿物中超声波范围的弹性振动传播速度，采用了三种方法：共振法、脉冲法和超声波的干涉测量法。

伯奇及其同事首先在地球物理实验室采用了共振法。但在高温高压条件下只研究了横波，而且 V_s 的测定误差竟达 2%—5% [150]。

近年来，测量弹性波传播速度的脉冲法得到了推广 [26, 48, 70, 79, 121, 150, 151, 183, 214]。理论表明，在各向同性无限介质中由任意脉冲扰动引起的弹性振动的第一位移，是以平面纵波速度 (V_p) 传播的 [114, 186]。这点后来被实验证实了，且广泛应用于研究固体弹性的声学方法中。脉冲通声方法已经通用，可以用来测量横波的速度。

根据反射波测量 V_s 的方法是大家熟知的 [237]。 V_s 是根据 PSP 信号的第二次抵达来确定的，这个信号伴随着沿圆柱体传播的纵波。这个方法对高孔隙度和粗晶岩石是不大实用的，它的误差大于 2%。有时在实验室实验中测量圆柱体样品采用很简单的方法。如果圆柱体长与直径的比 (α) 大于 6，那么平面纵波就分散，这时初次触发的轴向传播速度等于 $\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ 。这使我们立刻确定出胡克模数 [35, 147, 149, 150, 169]，同时，在 V_p 数值已知情况下就不难计算 V_s 。确定 V_s 的这种间接方法在实质上是有点缺点的，即在块状体和柱体 ($\alpha = 3-6$) 中没有明确的速度区分标准。所以，确定不规则扰动的过渡区是困难的 [118, 149, 169]，还与样品质量和实验条件有关。

其他已知的测量超声波振动通过样品时间的方法，尽管有很高的准确度，但在高温高压条件下研究岩石的弹性常数方面尚未得到广泛的应用。相频法、回声脉冲法、完全内反射法

和干涉测量法（相的比较和脉冲输入）看来通用性很小，因为它们要求选择具有一定尺寸、颗粒度和孔隙度的样品。

现在只有少数著作^[16, 27, 35, 81, 105, 156, 299, 303]总结过超声波范围内的纵波和横波（剪切波）传播速度的实验室研究资料。而且， V_p 和 V_s 的测量结果只有在极少数情况下才能使用，以达到实验最终目的——高精度地计算岩石的弹性常数。这是因为 V_p 和 V_s 的测量不是在不同时间进行的，就是在不同的样品中进行的。就是同一种岩石也有很大的不均一性。所以，即使是从同一块岩石上取下来的一些样品，其速度数值的离散度也达3—5%，对于粗晶和层状岩石则更大，对于中-细结晶岩石约2—4%。在不同压力和温度的试验条件下，用不同的传感器在同一个样品上先连续测量纵波速度，然后测量横波速度。这给弹性常数的计算带来很大的误差（达10%）。这样的误差同第一测程以后的不可逆变化有关。传感器的重新放置会带来额外的不确定性。所以，在高温高压条件下，岩石和矿物中纵、横超声波速度的测量，应该利用同一个样品，而且要在同一个时间内完成。这样，我们计算岩石在各种热力学条件下的弹性常数绝对值及其变化的误差就最小了。

超声波传感器的结构特性

正确地选择测量P波和S波通过岩样时间的方法和超声传感器的结构，有助于提高确定物质弹性参数的精度。传感器应该有足够的发射强度和接收灵敏度，乃至必要的频率特性（同时应该能在纵波的背景上监察横波）。已知的传感器有各种结构，能不同程度地满足上述要求，但在高温高压条件下使用时仍有严重缺欠。这类传感器中最简单的一种是沿Y和AC切面的石英切片。因为它们具有低的压电系数，宽的频谱、高的激发电压，这就首先要求通到高压仪器中的电引线要有专门的结构，所以它们并未得到广泛使用。沿X切面的酒石酸钾钠传感器，具有很高的发射强度，而且也能在各种频率范围内工作，但是不能保证清楚地区分纵波和横波。此外，因为它们易溶于某些液体，所以不耐用，这就对容器内传递压力的介质的选择提出了特殊要求。用具有双形态压电元件的传感器，能清楚地观察到横波，但不能保证有足够的发射强度，且不适于在超过0.3—0.5兆赫的频段上工作。此外，它们的体积也大，难于用在高压容器中。有时使用“楔状”传感器，它的基本构件是一个棱上装有压电元件的棱镜体。这些传感器将横波或面波转换成纵波，接着就接收纵波信号。但是，当弹性振动通过棱镜体时，根据转换器的特性和它的固定方法，在其内产生了纵波、横波和瑞利波的振动，这就使必要信号的纯净分离更加困难。这些传感器的缺欠也是尺寸大，而且棱镜体材料的性质在高温高压条件下的试验过程中会发生无规律的变化。

为了测量纵向和横向弹性振动的传播速度，广泛使用具有相应极化性质的压电陶瓷传感器。压电陶瓷传感器有很高的压电系数，良好的机械强度，很易极化，加工比较简单。对于位移振动的压电元件一般做成长方条形的，纵向极化沿着长边。在以化学镀镍方法极化后，才装上压电元件激发电极^[53, 135]。有人认为，长为L厚为h的压电元件，当 $L/h \geq 40$ 时，频率是单一的。在技术上，这样的压电元件加工复杂，所以工业生产受到限制。一些标准工业传感器的尺寸如下： $l \times b \times h = 48 \times 1 \times 1.2$ 毫米，其频率为1兆赫，即 $24 \times 1 \times 0.6$ 毫米时为2兆赫。由于长度大，所以这种传感器的陶瓷结构是非均匀的，这使压电特性变坏了。尽管这种结构的传感器在生产，但它们的物理-机械和声学性质仍没有进行足够的研究。这就很难使它们在测量声学的装置中得到广泛应用。缺少传感器的统一标准，迫使研究人员在每种具体情况下用实验去选择传感器的必要尺寸，研究它们的某种频率。从文献中查得有如下相

应频率和尺寸的传感器：18×7×1毫米（1.8兆赫）；20×10×2毫米（0.5兆赫）；22×3.5×1.5毫米（0.8兆赫）〔80—82, 135, 264, 308〕。此外，业已查明，传感器的尺寸确定着纵波和横波信号的振幅。这些信号的区分同样与压电元件的极化质量有关。

压电元件的制造和纵波与横波传感器的研究

用工业生产标准的纵波极化压电转换器制造了位移振动传感器。从直径为50—70毫米

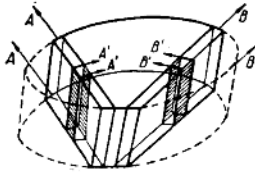


图9 加工位移振动传感器时的纵波极化圆柱压电陶瓷块的锯切图
AA-BB, A'A'-B'B' 为切口方向

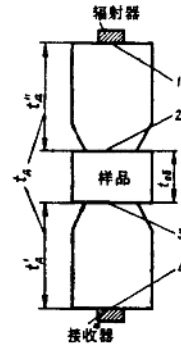


图10 传感器和岩样在高压室中的安装图
1—4 为超声波信号的反射面

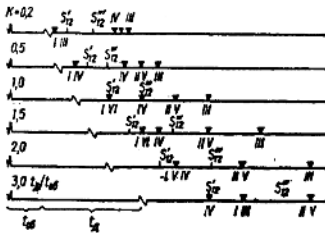


图11 超声波穿过传感器和岩样的时间（分别为 t_N 和 t_{0G} ）比值 (K) 不同时，纵波（I—VI）和横波信号入射和反射到压电接收器的时间图

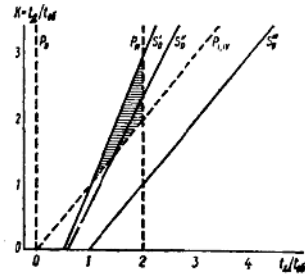


图12 t_N/t_{0G} 与 t_X/t_{0G} 的关系
 S' 系 $V_P/V_S = 1.5$ 时 S_0'' 系 $V_P/V_S = 1.6$ 时，
 S_0''' 系 $V_P/V_S = 2$ 时斜线区表示没有干扰的
可以测量 t_S 的范围

和厚度为20—40毫米的压电陶瓷圆筒体上，垂直于镀银表面锯出各种厚度的定向薄片（图9）。这使我们能够挑选出沿长度方向均匀极化的压电转换器对。磨光薄片之后，在其上切下所要求尺寸的元件。传感器平面沿纵波极化方向覆盖上一层薄银或其他的导电材料（我们使用基本由参合着胶状银的环氧树脂组成的导电覆盖膜）。这样制成的压电转换器粘在传感器的壳体上。根据高压仪器的情况采用如下尺寸的压电陶瓷元件：22×3×1；30×3×1.5；18×2×1和12×1×0.8毫米。安装传感器之前，对它们要仔细研究。对于接收—传递传感器（22×2×1和22×4×1.5毫米），所使用的元件也要显示出良好的结果。

纵波和横波同时产生和接收的质量，以及使交混回响干扰减到最小，首先取决于传感器

壳体的结构、所研究对象的导声性和尺寸。通常，所制造的传感器都具有缓冲器，以使压电元件的最佳声学条件与所研究的介质相适应。此外，缓冲器还保证纵波和横波信号能清楚地分开。选择不同程度的导声体，可以清除横向弹性波第一触发时在观察带中产生的这样或那样的反射信号。缓冲器的最大尺寸应该是这样的，使它的长度和岩样一起不超过弗列涅尔衍射带。这个条件可以明显地减少体积交混回响干扰的密度^[116]。分析了进入接收器的超声波信号后，就可以评价缓冲器的最佳尺寸，并选择传感器的最合适结构。除了穿过岩样和变换器系统的直接波外，进入接收压电元件的还有从中间介质变换器反射回来的交混回响波，以及双反射的一次波。于是，纵波和横波通过岩样的时间可以用相应信号的第一个触发来确定。传感器和岩样尺寸必须这样计算：以使在纵波第一个触发以后，在第一反射波到达之前，能观察到横波的第一个触发。在图10中示意描绘了传感器和岩样的安装情况，指出了反射平面。测量 t_p 和 t_s 时，最重要的干扰可归结为如下的反射信号：

$$\begin{array}{ll} \text{I. } P_{1434} = t_{s0} + 2t_x; & \text{IV. } P_{1324} = 3t_{s0} + t_x; \\ \text{II. } P_{1424} = 3t_{s0} + 2t_x; & \text{V. } P_{1314} = 3t_{s0} + 2t_x; \\ \text{III. } P_{1414} = 3t_{s0} + 3t_x; & \text{VI. } P_{1214} = t_{s0} + 2t_x. \end{array}$$

穿过传感器和岩样的纵波的直接信号 $P_{1234} = t_{s0} + t_x$ 。必须选择这样的传感器元件和岩样尺寸，使横波信号能置于 P_{1234} 和第一次反射信号之间（I、IV、VI）。图11中列举了时间图形，它表明 S_{12} 波的开始位置与超声波信号在传感器和岩样中持续的时间有关。图11中相应用罗马数字表示出所有六个反射信号的第一次触发， S'_{12} 和 S''_{12} 表示导声体中 V_p 和 V_s 的比值不同时横波信号的开始。研究了比值 $t_x/t_{s0} = 0.2; 0.5; 1.0; 1.5; 2.0$ 和 3 ($t_x/t_{s0} = K$)。看来，横波 S'_{12} 的第一个触发，在满足 $1 < K < 3$ 的条件下处于反射信号带外。在系数 K 与 $\frac{t_x}{t_{s0}}$ 的关系图上看得更清楚， $\frac{t_x}{t_{s0}}$ 表示第一个反射信号的持续时间 t_x 与时间 t_{s0} 的比值。

从图12看出，在上述条件下，如果超声波的横波与纵波速度的比值不大于1.7时，反射信号将不影响 V_p 和 V_s 的测量精度。

高质量接收横向振动信号的附加条件是，在弹性脉冲穿过发射器和接收器缓冲枢轴的时间上相等。这时横波第一个触发信号晚于 V_p 信号的开始，延迟时间不短于纵波穿过样品的持续时间，但不超过这段时间的两倍。在导声体尺寸最佳的条件下，信号 S_{12} 将超过最近反射信号的第一个触发，超过值不小于 $1/2t_{s0}$ 。所以，在正确选择传感器尺寸和确切选择缓冲器材料的情况下，横向超声波第一个触发信号可以处于完全没有反射信号的带内。在高压条件下研究岩石时，用时间区分信号是完全可行的。

实验确定，如果用作导声体的材料的 V_p/V_s 比不大于1.7，那么在高压的实验中只能使用 $1 < t_x/t_{s0} < 3$ 的传感器。各种人造玻璃、熔炼石英以及某些专门加工的金属都具有这些性质。计算确定并经实验证实，当研究长度为20—25毫米的样品时，用钢做的导声体的长度一般应为30毫米（ 2×15 ）。在这样的条件下，纵波的第一个触发处于6—10微秒的区间内，横波的第一个触发处于11—14微秒的区间内，而第一个反射信号则要经过20—25微秒后才到达^[80—82]。

超声波变换器的电声特性及其在测量线路中的最佳工作状态

在静水压力下研究岩石的状态时，超声波传感器易受到高压的作用。随着压力的增加，压电陶瓷的速度和弹性常数平稳地增大（图13），结果引起压电陶瓷传感器的电声性质发生