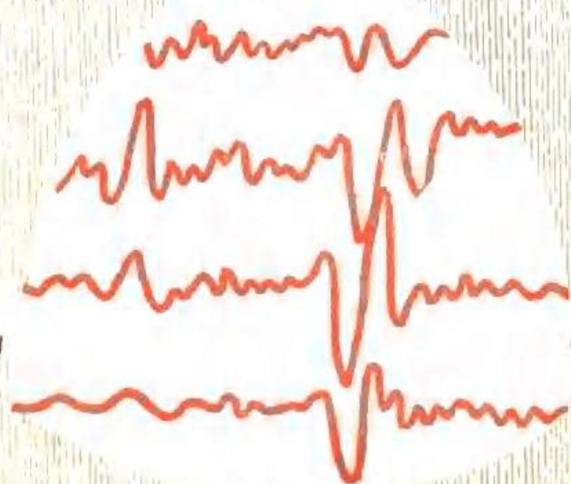


超声地震模型 试验技术及应用

赵鸿儒 唐文梅 郭铁栓 编著



石油工业出版社

27873

超声地震模型试验技术及应用

赵鸿儒 唐文榜 郭铁栓 编著

石油工业出版社

前 言

将地球或某种地质构造，按照一定比例缩小，择其主要方面制成理想化的模型，在实验室里研究其中地震波场的分布，以模拟真实介质中的地震波场，是地震学和地震勘探等学科进行理论和方法技术研究的重要方面。超声地震模型试验是其中主要方法。对它进行系统地研究始于本世纪五十年代。近年来，由于数字技术的广泛应用，地震学、特别是地震勘探得到迅速发展，因而对超声地震模型试验提出了更高的要求，超声地震模型试验得到了人们的普遍重视。

超声地震模型试验涉及声学 and 地球物理学等多方面知识。迄今为止，国内尚无有关超声地震模型试验的专著，各种有关文献则散见于各种刊物或某些专著的个别章节，一些重要内容（如模型震相分析等）尚无文字介绍。这使从事此项工作的研究者往往感到不便。

本书是以在北京大学和云南大学地球物理专业讲授“模型地震学概论”专题课的讲稿和超声地震模型实验室近年来教学科研小结为基础写成的，书中力图运用数学、物理学、地球物理学、地质学等方面的知识深入浅出地、较系统地阐述现代超声地震模型试验的理论、方法技术、实验技能等方面的基本知识，着重介绍了实验仪器设备（主要是压电式换能器）、模型震相分析、模型材料与模型建造等，并以相当的篇幅给出了实例，作为补充。

本书可作为地球物理专业专题课的参考教材，也可供地球物理专业方面的教师、研究生、大学生以及从事超声地震模型试验的专业工作者参考。

本书在编写过程中，作者得到了有关同志的大力支持。除书中提到的以外，还有马天朗、周铁英、唱鹤鸣、王博文、黄洁、傅竹武等同志以及煤炭部第一物探队超声地震模型实验室的同志为本书提供了宝贵资料，书中还引用了北京大学无线电系水声专业讲义有关内容，在此，谨向他们表示谢意。

限于作者的专业理论水平和实际工作能力，书中错误在所难免，衷心希望读者批评指正。

作 者

1984年3月

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第二章 弹性波传播的理论基础	12
第一节 均匀完全弹性介质中传播的波	12
第二节 弹性波传播的数学描述	13
第三节 平面波的传播	20
第四节 平面波在半空间和层内的传播	23
第五节 自由面半空间的平面波	34
第六节 层内的面波	40
第七节 走时曲线(时距曲线)	45
第八节 某些震源的波动场	53
第三章 超声地震模型试验用的仪器和设备	61
第一节 压电式换能器	61
第二节 其它形式的换能器和激发方式	104
第三节 仪器	106
第四章 地震模型震相分析	126
第一节 各类地震震相记录特征	126
第二节 仪器对地震模型震相记录图的影响	140
第三节 地震模型震相的识别方法	144
第四节 震波波速的测定	157
第五节 地震模型震相识别的实例	162
第五章 模型材料和模型的建造	186
第一节 模型与原型的相似性问题	186
第二节 模型材料	190
第三节 模型建造	218
第六章 三维超声地震模型试验简介	222
第一节 三维超声地震模型试验仪器与装备	223
第二节 模型的制作	224
第三节 三维超声地震模型实验实例	226
第七章 超声地震模型试验应用实例	235
第一节 空气介质中三维多层模型试验方法的研究	235
第二节 多层液体介质地震模型的试验方法	245
第三节 三层介质模型震相分析与地壳结构	254
第四节 京、津、唐地区地壳结构的初步实验模拟	263

第五节	非线性层状构造理论的模型试验研究.....	270
	——高速夹层的透射波和反射波.....	270
第六节	二维三层同心圆盘介质模型中波的传播.....	280
第七节	厚度不同的高速夹层地震模型的研究.....	288
第八节	三维二层液体介质中首波能流的模型试验.....	296
第九节	二维高速夹层(薄)地震模型中震相之研究.....	307
第十节	二维层状模型中弹性波垂直时间场的研究.....	320
第十一节	反射法地震勘探三维液体模型实验的初步研究.....	332
第十二节	透射波法地震勘探三维液体模型实验的初步研究.....	343
第十三节	单轴加载下岩石破裂过程的研究.....	349
第十四节	低速夹层内体波干涉迭加场初探.....	359
参考文献		368

第一章 绪 论

超声地震模型试验的研究是与地震学和地震勘探学密切相关的一个重要研究领域,是实验地震学的一个重要分支。国外文献称之为“model seismology”^[1]可直译为“模型地震学”,故早期的地震模型试验工作多称之为模型地震学。但这个名称一方面易与国内外现今普遍研究的数学模拟模型相混淆,另一方面利用模型进行试验研究的新方法和新技术还在迅速发展,“模型地震学”应该包括更深更广的内容,所以作者采用了“超声地震模型试验技术及应用”这样的书名。在绪论中由于延用历史资料较多,为了叙述方便有些地方仍采用了“模型地震学”这个名称。

在模型地震学中,主要研究模拟地震波在各种模型构造中传播的运动学和动力学特征。这些模型构造相当于地球的真实构造或设想的理想构造,换句话说,即通过某种相似变换能将一种模型构造类比另一种模型构造或真实的地球构造。

模型地震学的另一个研究方面是震源机制的模拟。在实验室中模拟各种震源机制以及不同震源引起的地震波在介质中的传播特征,对于探测地下爆破和地震预报以及工程地震等无疑有着重要意义。

模型地震学还包括测定在常温常压或高温高压下岩石和矿物标本的波速、波谱、阻抗、衰减系数等物理参数的基础研究。通过对比野外测定的有关参数,可以提供确定地球内部介质性质的资料。

模型地震学研究中最普遍使用的方法是超声波方法,因此可以说模型地震学是声学在地球物理实验室中的应用。

声学的研究已有数千年历史。声是传播知识和满足人类语言及音乐美感的基本要素,正式研究音乐为希腊人所创始,毕德哥拉斯(Pythagoras)是主要发起观测音程及比值的人。亚里士多德(Aristotle)也曾研究过声的传播并提出了声的波动基本性质。直到伽利略(Galileo)的时代,才有了基本的传播定律。约在同一个时期,进行了空气中声波测定的第一个实验。到牛顿(Newton)对声进行数学分析时,对声的现象的研究达到了高潮。十九世纪末期昆特(Kundt)用声波使微小颗粒聚集在波节点上,使人们用肉眼观察到了声波的影响。后来出现了人类听觉以上的高频笛子和音叉,使人类获得超声波成为可能。

1880年,压电现象的发现,推动了超声波领域的研究。由于晶体元件的出现,为这方面的研究创造了条件。随后磁致伸缩材料的研究也取得了成功。这些成果为超声波的应用奠定了基础。战争的需要再次推动超声波的研究和应用,在1914—1918年的战争中,对用声波反射法来探测水下舰艇的研究,以及制成移动线圈换能器在液体内产生强大声源的应用均取得了大的进展。1947年左右钛酸钡压电陶瓷器件成为商品之后,超声工作迅速发展起来并获得了广泛的应用。1955年锆钛酸铅压电陶瓷体系出现后,大大推动了超声波在各方面的应用,超声波在地震学和地球物理勘探学中的应用也是在这个时期迅速发展起来的。

众所周知,声频范围一般在16—20000赫兹之间,低于16赫兹称为次声波,高于20000

赫兹称为超声波。实用的超声波频率一般约在 10^4 — 10^8 赫兹量级，而近震的震波主频约在1—10赫兹量级，地震勘探用的地震波主频约在 10 — 10^2 赫兹量级。如果考虑超声波和地震波在固体介质中的传播速度是同一量级，则超声波波长远小于地震波波长，因而可用相当于真实地质构造尺度 10^{-2} — 10^{-7} 倍的模型来模拟这些构造。让超声波在所建造的模型内传播，研究超声波在这些已知构造中传播的运动学和动力学特征，从而推断地震波在真实地质构造中的传播特征，这就是模型地震学观测研究的基本思想和主要方法。图 1-1 给出了这种研究方法的测试原理图。

尽管各国地震学家使用的仪器不同，但原理基本相同。图中的时标发生器，分频器和电脉冲发生器主要用来产生需要的电讯号，发射换能器把电讯号转换成超声波，加载于模型上，超声波通过模型被接收换能器检拾起来，再转换成电讯号，送至带有放大器的显示设备中，然后把波的讯号记录到记录设备中。早期的换能器多采用石英、酒石酸钾钠、钛酸钡等晶体，现在大多采用发射功率大，接收灵敏度高的锆钛酸铅系列压电陶瓷晶体。至于发射、接收和记录显示，则由电子设备来完成，近年来，还采用了磁带数字记录，或与微处理机联机，数据直接存入机器中进行处理。

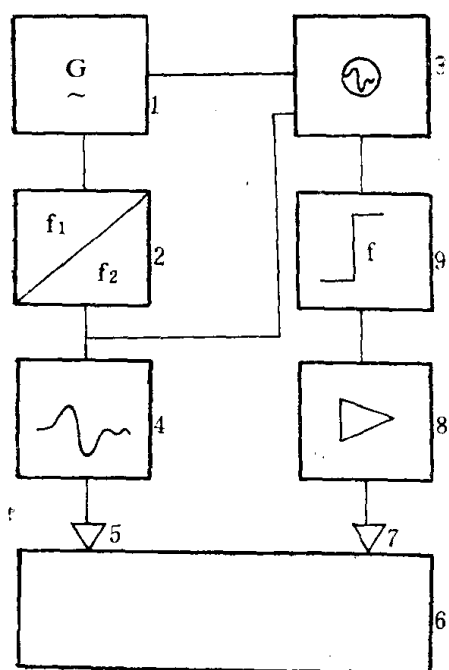


图 1-1 超声地震模型试验测量原理示意图（根据J.贝伦斯）

1—时标发出器；2—分频器；3—示波器；
4—脉冲发出器；5—发射源；6—地震模型；
7—接收器；8—放大器；9—滤波器；

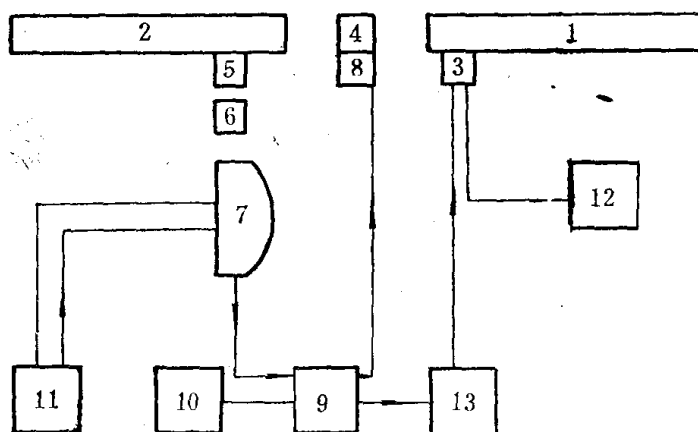


图 1-2 条纹方法测试原理示意图（根据J.科扎克）

1—准直系统；2—聚焦系统；3—光源；4—地震模型；5—刀口；
6—增补透镜；7—高速摄影机；8—波源；9—高压供电器；10—高
压电容器；11—高速照相机控制板；12—光源电源；13—延迟电源

五十年代末期，还曾出现了一种可见波场的观测方法，称为条纹方法，其测试原理见图 1-2，但这种方法的仪器设备较复杂，操作使用不如超声方法简便，所以选用者不多。

地震模型试验系统研究始于五十年代。但最早的模型试验可以追溯到本世纪二十年代。当时的英国地球物理学家布拉德(E. C. Bullard)曾提出用超声波模拟地震波，在小尺度的模型上研究地震学问题的设想。日本人寺田寅彦曾做了一个瑞利波的实验，这是最早的地震模型试验之一。但早期的试验均因技术上的原因，而未能得到较理想的结果。

1936年，里伯(Rieber)利用电火花震源拍摄了在空气中波前通过在曲面和尖形边界时

P波反射和绕射后的图像。

1939年,施米特(Schmidt)发表了一篇文章,对半透明的层状模型,用暗线摄影技术记录了界面上波的反射、折射和绕射波波前。他第一个验证了波由低速介质入射到高速介质时所产生的折射波曲面波前。这种波(德国人称首波、法国人和苏联人称圆锥波)在施米特发表文章之前,一直没有为人们直观认识到。

五十年代前后,由于无线电和压电陶瓷器件的迅速发展,超声波技术也得到了很快的发展。美国、苏联等国家的地球物理学家先后用超声波成功地做了一些地震模型实验。与此同时,仪器、模型材料和实验方法的研究也都取得较大进展,模型地震学在地震学和地震勘探学等领域得到了重要发展和应用。

早期的模型实验多是简单的三维模型,较常见的是在水中放置某种简单几何形态的固体来研究震波的传播特征。1954年美国地球物理学家奥利弗(J. Oliver)等人,利用了乐甫(Love)的平面应力理论对二维地震模型理论作了较完善的论述。指出许多地球内部轴对称问题可以简化在一个薄板模型上进行研究。由于二维模型理论上的成功和选用材料的方便,使以后的模型实验多采用二维模型,取代了早期的三维模型。

所谓三维模型,即模型的整体尺度(x, y, z 三个方向)远大于所使用的超声波波长。严格地讲,模型尺度最少要比超声波波长大五倍以上。所谓二维模型是在 x, y 方向上的尺度远大于所使用的超声波波长,即为一板状模型。一维模型则是在某一方向的尺度远大于所使用的超声波波长,而其余方向的尺度均小于超声波波长,即为一杆状模型。根据研究问题的不同,人们建立了一维、二维和三维模型,所以也就有人简单地把地震模型的研究分为一维、二维和三维三种类型了。一维模型可以进行一些简单的直达波,反射波,透射波,面波(弯曲波)等基础问题的研究。二维模型常用来研究地震学和地震勘探学中各类震波在各种过渡层,中间层和复杂的地质构造中波传播的动力学和运动学特征的理论问题或实际生产中的问题(如地震勘探、工程地质、矿山地质等的方法问题,正、反演问题等)。三维模型多用来研究较复杂的各向异性介质中波的传播问题,震源问题,物质的蠕变效应,相变问题和三维地震勘探问题等。一维和二维模型材料较丰富,模型建造也比三维模

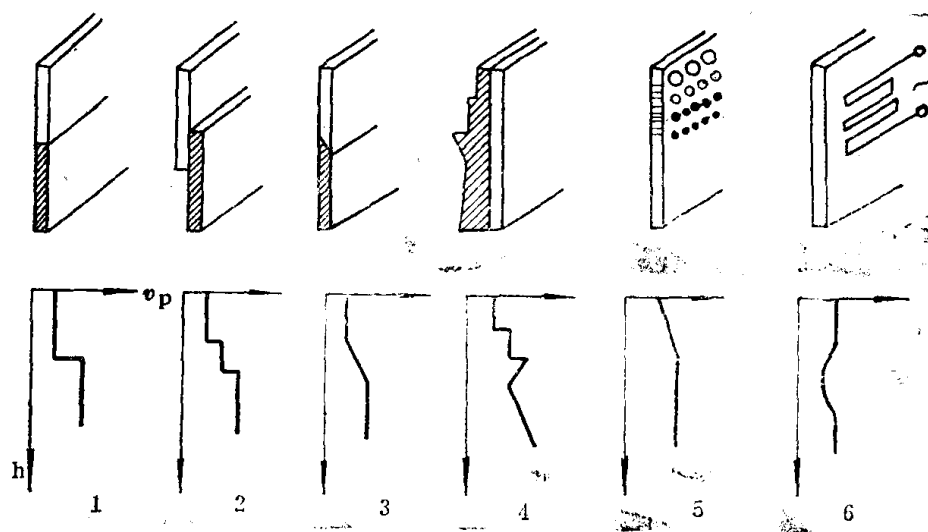


图 1-3 二维地震模型分类图(根据J.贝伦斯)

上图一模型示意图,下图一速度分布图;1—简单的成层模型;2—均匀中间层模型;3—过渡层粘合模型;4—具有复杂速度—深度分布的粘合模型;5—速度梯度的钻孔模型;6—速度梯度的热模型

型容易得多。由于在许多情况下二维模型可以解决三维的问题，所以人们尽量采用二维模型，二维模型技术也飞快地发展起来。图 1-3 是德国地球物理学家给出的二维模型的基本类型及其速度—深度分布图。图 1-3 的分类是基于控制模型材料波速的方式来划分的。从这里可以看出改变和控制模型材料波速的研究是一个很重要的课题。图中的粘合、钻孔、加热都可以改变原有材料的波速，此外，还可以用混合方法来改变材料的波速。

从六十年代到七十年代初，模型地震学研究取得了相当丰富的成果。这一时期也是模型地震学发展的重要阶段。1966年和1972年各国地球物理学家两次在捷克斯洛伐克首都布拉格附近的利比利斯城堡召开模型地震学的专题学术讨论会。在会上发表了许多重要文章，这一时期的工作主要集中在地震波在各种地质构造中传播的运动学和动力学特征的研究上。以德国人贝伦斯(I. Behrens)为代表的一批地震学家成功地进行了地震波在一阶不连续界面传播的运动学和动力学特征的模拟研究（所谓一阶不连续界面，即两种速度不同的介质组成的界面，包括平界面和有起伏的褶皱界面）。对各种过渡层、高速层、低速层和导波的研究也取得了重要的进展。作为这一时期研究的例子，图 1-4 给出了贝伦斯所做的反射波在几类典型的一阶不连续界面上的振幅—距离曲线。

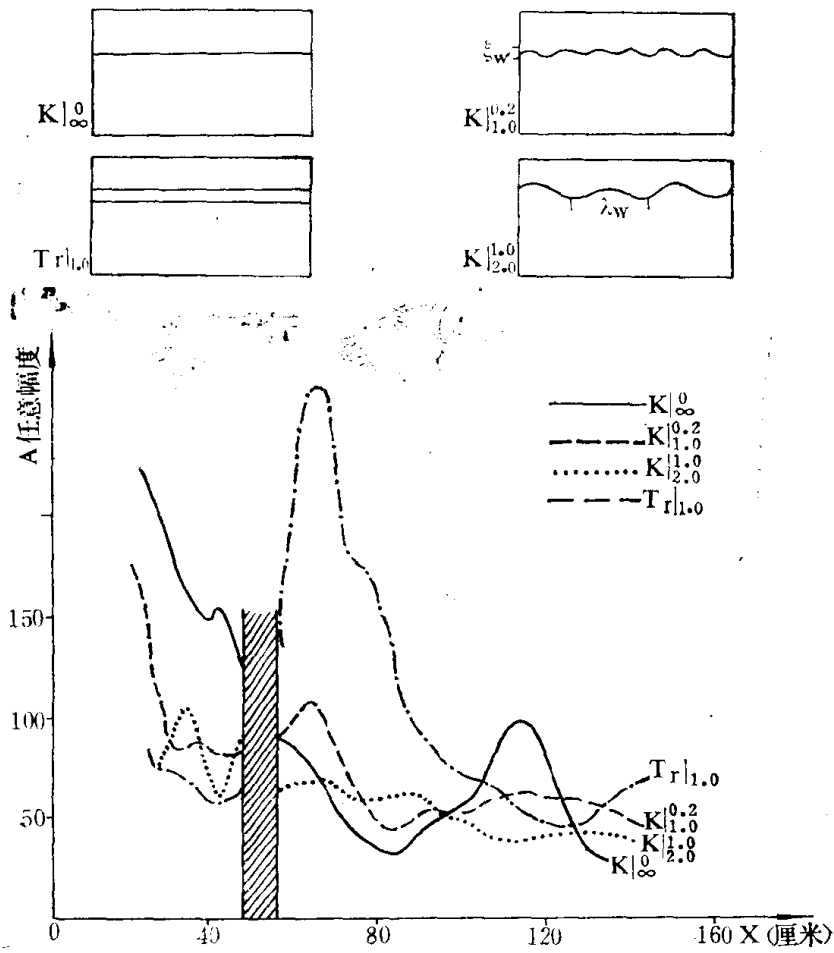


图 1-4 各类平界面上反射P波的振幅—距离曲线图

(根据J.贝伦斯)

K $\left\{ \begin{array}{l} \xi_w - \text{褶皱幅度,} \\ \lambda_w - \text{褶皱波长,} \end{array} \right.$

Tr —过渡层

从图中可以看出，反射P波的振幅与褶皱面的起伏幅度有关。褶皱起伏越大，反射波衰减越不明显，且振幅随距离出现波动。图 1-5 是相应的一阶不连续界面上的首波振幅—距离

曲线。图中的结果表明首波的振幅随界面褶皱的幅度增加而增加。图1-6和图1-7是两个低速层模型的实验结果。图1-6中的P波振幅—距离曲线有一个极小值，即众所周知的“影区”。这一极小值随震源深度的增加而稍向震中迁移，而且当震源很深时，极小值消失。图1-7的结果表明，当入射波的周期增加或低速层层厚减小时，P波的振幅—距离曲线上的极小值也将消失。如图1-4—1-7。这样的研究结果是很多的。以上仅是这方面工作的几个例子。

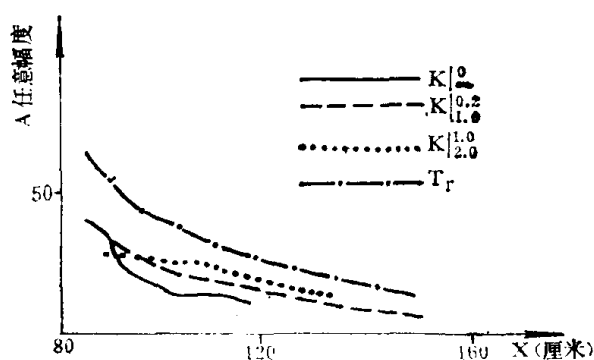


图 1-5 各类平界面上的首波振幅—距离曲线
(根据J. 贝伦斯)

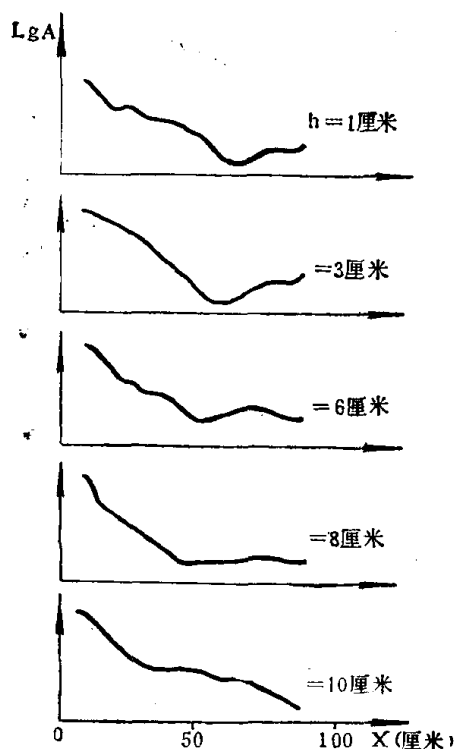


图 1-6 低速层模型上的P波振幅—距离曲线与震源深度的关系(根据Ю.Б. 里兹尼钦科)

h —震源深度; A —P波振幅

目前使用模型研究地震波的传播主要在两方面进行:

- 1) 数学模型与物理模型相联系, 并结合野外资料较好地解决复杂的构造问题。
- 2) 作为自然界观测的补充。当在地图上发现与一般常见震相有所不同时, 就可以尝试建立一种模型, 把发现的地震波震相在实验室里再现出来。

应该指出的是, 由于数字技术的发展, 在一定条件下, 如果已知介质的物理参数和几何形态, 地震波场的分布特征就可以用计算方法求出。但是, 由于地下情况的复杂性和数学方法的近似性, 计算的结果往往不能完全反映真实情况, 需要采用物理模型试验方法与之配合, 共同解决问题。另一方面, 物理模型试验不仅可以对数学模拟计算方法进行验证, 而且还可为数学模拟的方法研究提供理想而廉价的数据。经过物理模型试验验证的数学模拟计算方法, 就可以更有信心地进行推广。

模型材料的研究与各种地震学和地球物理勘探学问题的模拟是相辅相成的, 因而这一时期模型材料的研究也取得一些令人满意的成果。1960年一些苏联地震学家提出了改变模

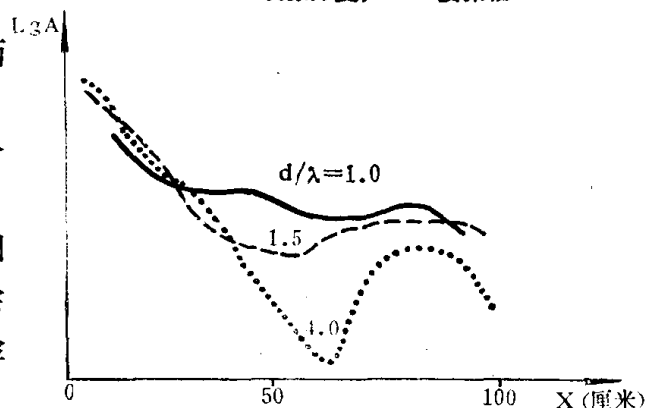


图 1-7 低速层模型上的P波振幅—距离曲线与入射波长和低速层厚之比的关系(根据Ю. Б. 里兹尼钦科)

d —低速层厚; A —P波振幅; λ —入射波波长

型温度控制材料弹性性质的想法。莱克诺夫(Rykunov)等用石腊和聚乙烯的混合物制成了复合模板,通过改变板各处的温度,使模板产生速度梯度。他们发现,对于这种模板,温度可以在 10°C — 20°C 范围内变化,此时, P, S波的速度都随温度的增加而降低,但吸收系数基本是常数,泊松比也不改变。后来,希克(Schiok)和施奈德(Schneider)也曾做过类似的工作。他们首先研究了具有不明显边界的二维模型。1960年至1963年,苏联人伊瓦金(Ivakm)等首先提出了二维钻孔模型(图 1-8)。之后吉尔伯沙金(Gilbtshcjm)等人提出二维钻孔模型模拟具有速度梯度介质的方法(即钻孔的大小和多少可以改变传播介质的波速,改变量可达50%)。同一时期捷克斯洛伐克地震学家文克(Vaněk)等人用大量薄板介质胶合成具有速度梯度的模型材料。他们还研究出一种水—甘油—明胶三维凝胶体模型材料,这种材料可以使 P波速度变化 20—50%, 图 1-9 是实测结果。近年来美国人用硅酮树脂按照不同配料方法得到了速度可调的三维模型材料。此外,将两层介质粘合在一起,改变波速的公式也可在这一时期的文献中看到。

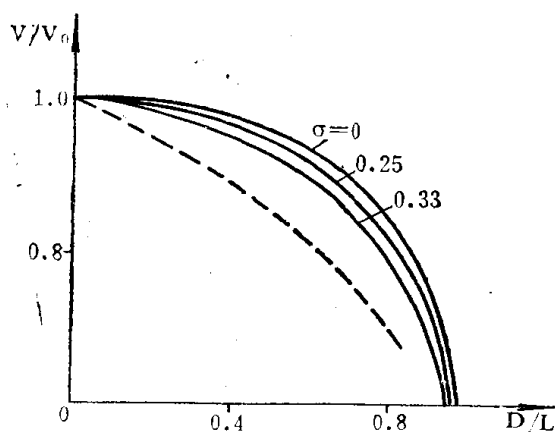


图 1-8 均匀分布圆孔钻孔介质的纵波速/无孔纵波速与 D/L 关系曲线图(根据伊瓦金)

虚线—实测值; 实线—理论值;
D—孔径; L—孔距; σ —泊松比

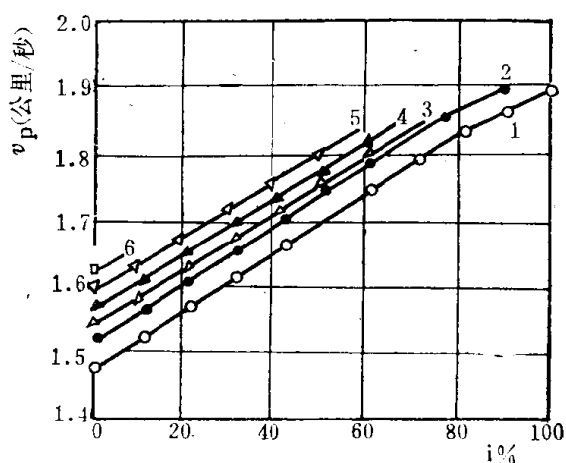


图 1-9 水—甘油—明胶方式凝胶体中的P波速度范围(根据L.沃尼克)

i—甘油在水中的浓度; v_p —纵波速度 1、2、3、4、5、6、为水—甘油混合体中明胶的不同浓度 1—0%; 2—10%; 3—20%; 4—30%; 5—40%; 6—50%

在模拟实际地球构造方面,国外的地球物理学家们也作了许多有益的工作。1964年,中村功(Nakanura)对一个高速层地震模型的首波进行频谱分析,由此推断出 M 界面约有一公里厚。关于首波机制的一些模型试验正在进行中。

震源机制的研究是模型地震学的另一个方面,人们在实验室中试图模拟各种震源机制并研究模型中震波的传播。美国地震学家普雷斯(F. Press)作了这方面的工作,他巧妙地利用晶体的组合在二维模型上模拟单力偶和双力偶源。他使用了圆形有机玻璃板的二维模型,模拟震源安放在板中心,接收器放在圆盘周围,记录到的P波和S波的波形见图1-10。普雷斯所用的震源发射器为钛酸钡晶体,包括单源和偶极源两种。偶极源由两块晶体制成,它们相互靠紧,但使其取向能产生相反的相。振幅图和运动方向与P波和S波理论显示了良好的一致性。利用这些模拟震源可以获得和天然地震记录相似的地震波幅射图形。这是一个振奋人心的成功实例。

另一个有趣的模拟是利用电极在空间或水中放电产生的电火花做为震源,称为电火花

源。这种源很接近于实际的爆炸源，早期用这种源多在三维模型试验中研究波的绕射，衍射，反射等。例如，1975年伍兹(J. P. Woods)提出了一个火花源模型，这一个模型利用电极在空间放电为发射源，以空气为介质，初步证明地震波的反射能量不是由某一点或某一断层线反射回来的，因而几何射线是不太好的近似。1978年古普塔(S. K. Gupta)用此法研究了弯曲界面上反射和衍射问题。

目前，我国也已把火花源用于工程地震和地震勘探的生产或科研以及个别模型实验中。

在过去的二十几年里，模型地震学的研究方面除了地震波的传播特征和震源的模拟之外，还有对岩石的破裂、地震波的产生、地壳和地幔构造的模拟，对地震预报等实际问题也作了许多有意义的工作。

图1-11给出一个震源区破裂过程的模拟草图和相应的实验结果。实验分为均匀材料，不均匀材料和很不均匀材料三类破裂过程。这三类材料破裂产生的频度可以较好地与主震—余震型，前震—主震—余震型和群震型地震序列相对应。

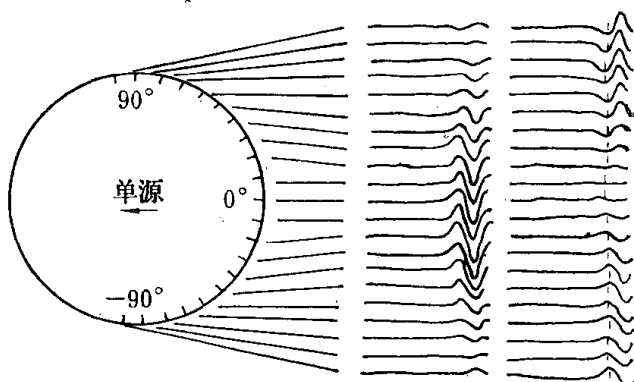


图1-10 圆板单源发出的P波与S波(根据F.普雷斯)

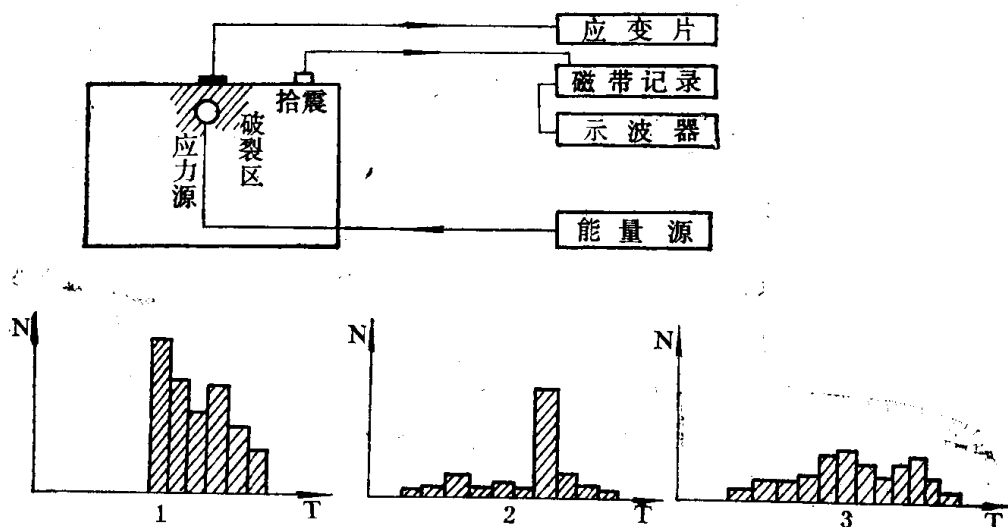


图 1-11 震源破裂实验的示意图及其破裂频度结果(根据:茂木清夫)

1—材料结构均匀; 2—材料结构不均匀; 3—材料结构很不均匀; N—频度; T—时间

图 1-12 也是一个与地震预报有关的实验结果。将孕震区 视为一个包含体，设想只要包含体的性质明显地不同于周围的介质，且选择合适的波长，就可能由振幅—距离曲线将其找出。模型是一个三维模型，在模型中间有一个圆柱形的洞，可以加入不同的圆柱形介质，实验以钢、石蜡和石蜡加环氧树脂碎片三种情况模拟地震孕育的简化设想过程。即开始受压时，密度增加，之后出现一些局部裂纹使介质拉伸变松。前面的情况用钢，后面的情况用石蜡和石蜡加环氧树脂碎片。图1-12是以震源区为尺度的不同入射波波长所得的实验结果。从图中可见包含体和入射波波长之比 d/λ 越大， A_{12} 和 A_{max} 的变化越明显。其它的实验结果还有：包含体介质的差异对振幅影响不大；振幅曲线的振荡变化，开始于包含体所在的位置上，并且延伸约 30 个波长。这个实验设想的 条件与真实地震的 孕育情况相

比, 当然显得较简单, 但它的结果和思路还是有益的。

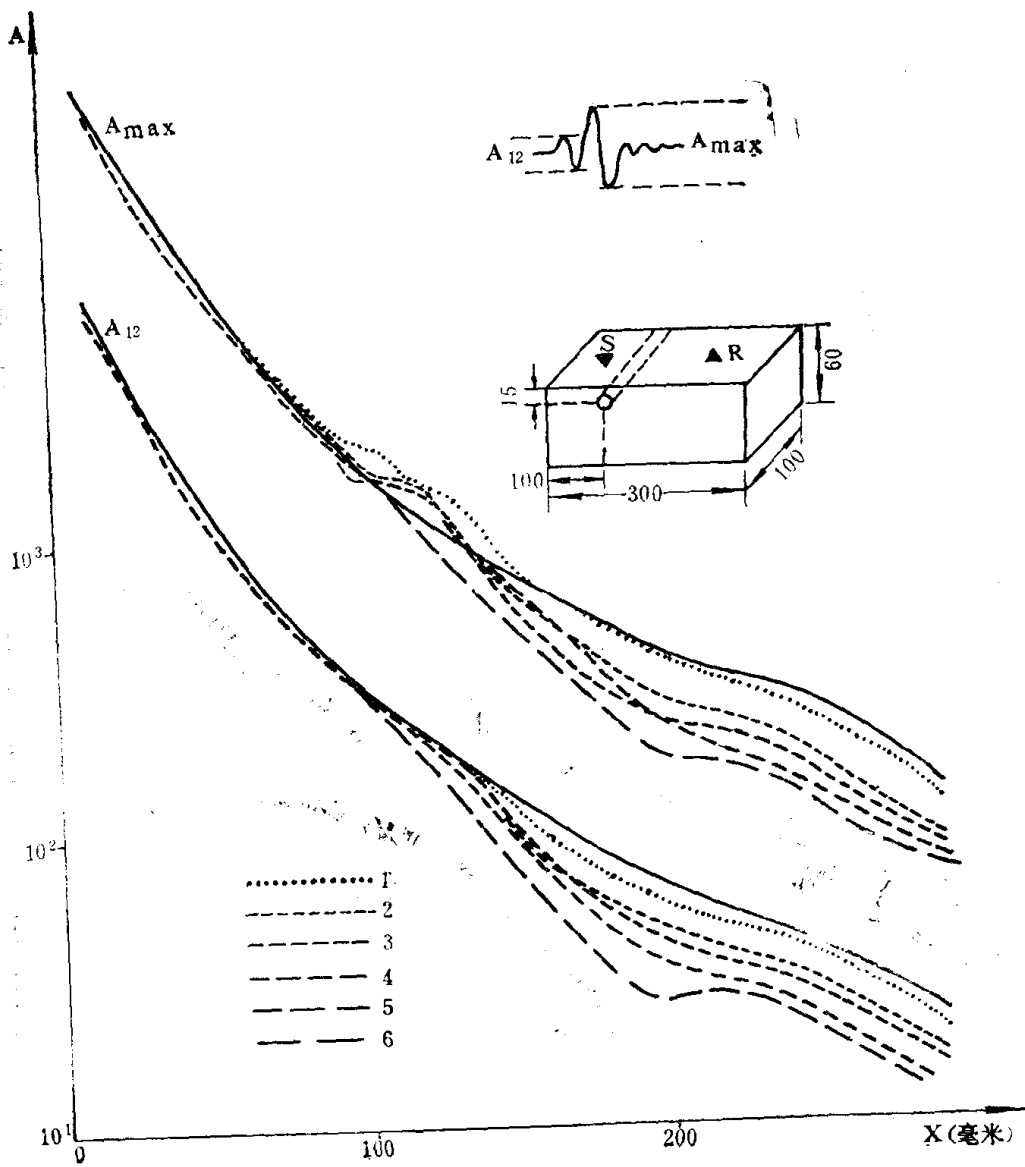


图 1-12 不同入射波长下的 A_{12} 和 A_{max} 与距离的关系 (根据 O. G. 莎米那)

1— $d/\lambda=0.5$; 2— $d/\lambda=0.7$; 3— $d/\lambda=0.8$; 4— $d/\lambda=1.0$; 5— $d/\lambda=1.5$; 6— $d/\lambda=2.0$;
图上部分—模型示意图, 它是一个具有速度梯度的三维模型, 图中的尺度单位均为毫米

根据实际地球物理勘探资料所作的实验也很多, 图1-13是为研究实际声波测井而建立的模型示意图, 整个模型长18英尺, 由钢棒制成, 并采用了磁致伸缩换能器作为发射源。实验主要是为了研究反射波而设计, 其反射面是由钢棒不同截面积构成的。其原理既简单又有趣。众所周知平面波垂直入射到平界面上的反射系数 r_{12} 可以表示为

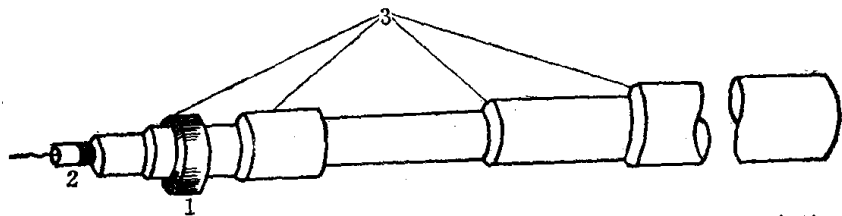


图 1-13 根据测井资料建立的反射波模型示意图 (根据 A. 贝内特)

1—压磁换能器源; 2—接收换能器; 3—反射面最大直径 $\phi=1.5$ 英寸; 长=1.8英尺

$$r_{12} = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1}$$

考虑模型为一维模型，如果A为钢棒的截面积，则 r_{12} 可表示为

$$r_{12} = \frac{\rho_2 A_2 V_2 - \rho_1 A_1 V_1}{\rho_2 A_2 V_2 + \rho_1 A_1 V_1}$$

再考虑钢的波速V和密度 ρ 为常数，则

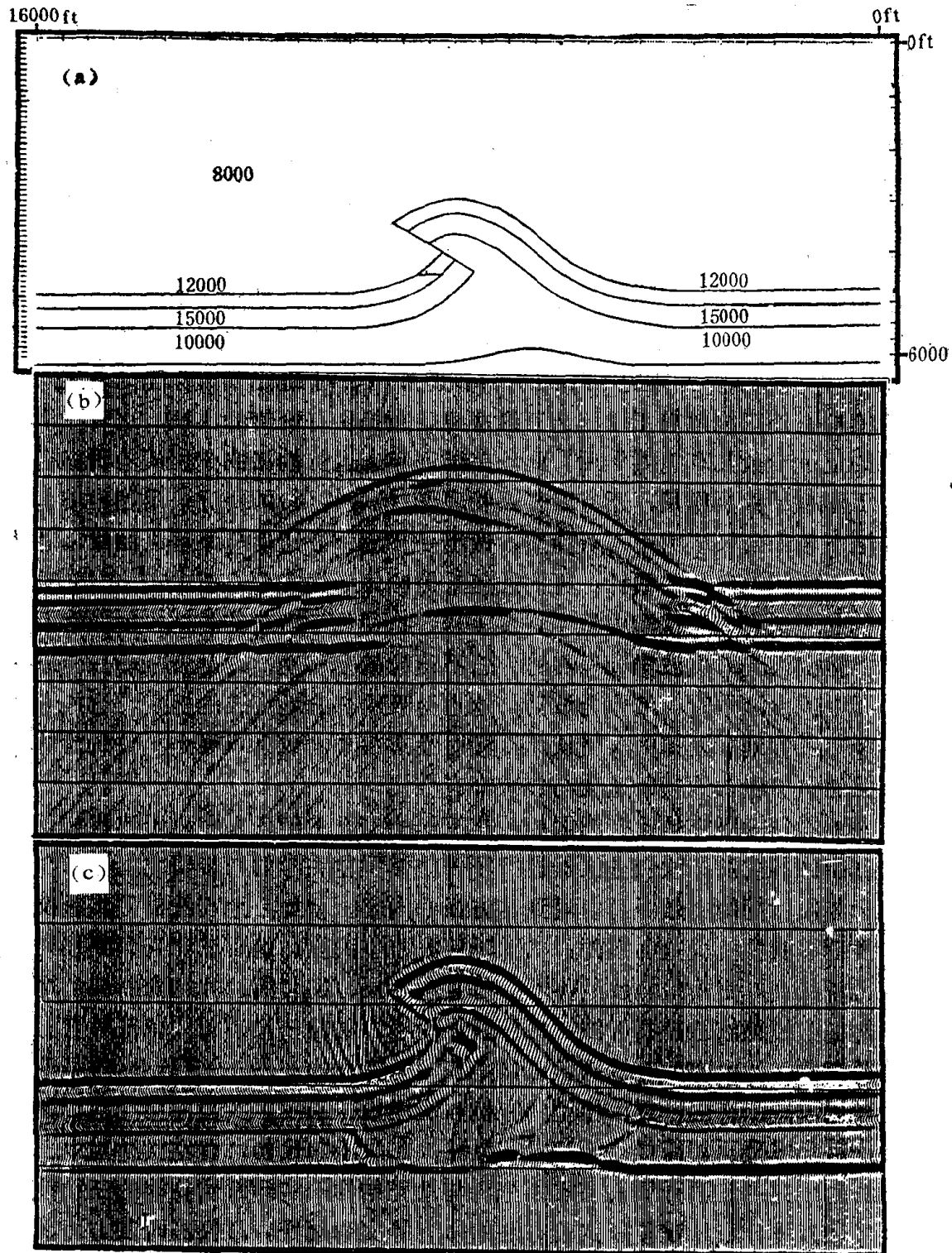


图 1-14 计算机绘制的反射波推覆体模型图

a. 推覆体模型 (图中数字为波速, 英尺/秒) b. 共反射点剖面 c. 经过深度偏移校正得到的精确图象 (根据伽登纳)

$$r_{12} = \frac{A_2 - A_1}{A_2 + A_1}$$

可见只要改变棒的截面积就可以达到改变反射界面的目的。这一公式为一维模型研究多次反射提供了简单易行的方法和理论根据。不过这里还应指出一点，公式假设不同截面积钢中的波速相同，实际上是有差异的（见第二章），只不过其变化比起截面积 A 的变化可以忽略不计。

七十年代以后，随着科学技术的迅速发展，尤其是近年来模型试验采用了许多新技术，如声光观测方法（声全息）在高温高压下声发射的利用，以及计算机的使用，使地震模型实验技术别开生面。特别是计算机的使用，不仅为数学模拟计算与物理模型实验相结合提供了实用的可能，而且能够把物理模型中各种波的信号直接绘制成构造图（二维剖面图和三维地震图），使结果一目了然。图 1-14 就是计算机绘制的来自一个推覆体模型上反射 P 波的处理结果，图中的结果给我们的印象是深刻的。

近年来，国外用模型实验方法对塑性形变介质和裂隙介质中弹性波的传播，以及随机分布裂隙介质中的波场进行了研究。在 1980 年举行的美国勘探地球物理学家协会 (SEG) 第五十届国际年会上有许多论文也涉及到超声地震模型试验工作，诸如：用超声波传播技术测定衰减 (Q^{-1})；模型实验与理论研究和野外试验相结合对地震互换原理的研究；利用三维模型实验模拟野外三维地震工作，为三维成像问题提供有价值的认识，这对三维地震工作选择合适的记录参数具有重要作用。此外美国近年来进行的横波模型试验研究也对野外的地震勘探工作起了重要作用；还有对岩石物理学(机械性质)的研究；用超声模型试验方法模拟野外地下数千公尺压力下岩石性质，做出一整套 P 波速度与波速比曲线，利用这种曲线可以对岩石性质做出某些估计。再如近年来美国休斯顿大学、斯坦福大学等高等院校，在他们的超声地震模型试验中做了许多工作，也得到一些新的看法。如在岩石中波的衰减问题上，他们认为地震波穿过岩石时，岩石颗粒就会移动，这是衰减的一个原因。地震波穿过岩石中所含液体时，液体会波动，这也会吸收部分地震波的能量，这是衰减的另一个原因。多年来搞地震勘探的人员认为低频时没有衰减，或衰减很小，并认为低频时速度也不变，但他们发现在低频时速度与衰减都有变化。

我国模型地震学的研究是比较薄弱的，其工作始于五十年代末和六十年代初。那时仅有个别单位自制仪器或从苏联引进仪器进行了一些模型地震学的初步研究工作。在六十年代初期和七十年代后期的文献中可以看到这方面的内容。诸如：地震波模型实验仪器的电子线路；二维地震波模型试验的震源；二维弹性波模型试验；地震波在直角断层模型介质中传播的动力学特征；根据地震波的特性分辨直角断层、锐角断层和钝角断层；弯曲界面上折射波形特征的模拟实验；折射波法探测断层的模拟实验—记录图的特征等等。其中大多数是地震勘探方面的内容，有些实验工作是在国外完成的，图 1-15 是国内早期研究过的一个直角断层模型示意图，图中模型为有机玻璃浸泡在水中，实验中观测到了图中所示的四组震相，这种模型比较简单，而且只有纵波。在八十年代初，有空气介质中三维多层模型试验方法的研究；三层介质模型震相分析与地壳结构；实际断层初动的三维地震模型研究；三维多层液体介质地震模型试验方法的研究等文章出现。在仪器研制方面，从 1975 年湖南省湘潭市无线电厂生产了我国首批声波岩石参数测定仪起，至今国内生产这方面仪器的工厂已近十家，产品基本成龙配套，这不仅使我国的超声地震模型试验工作得以迅速

开展,同时为工程地质、地质、石油、矿山、煤炭、水电、冶金、交通和国防等诸方面的野外生产和科研提供了新的手段。目前我国的许多高等院校、科研单位和一些勘探部门也正在建立自己的超声地震模型实验室。相信再过一段时期,我国地震模型实验工作将会更广泛地开展起来,为我国模型地震学的发展做出新的贡献。

我们的超声地震模型实验室从1978年重建以来,除教学外还进行了以下诸方面的工作:超声地震模型实验仪器的研究;模型震相识别的研究;模型材料和模型试验方法技术的研究;某些实验理论的研究。例如,二维双层粘合模型的研究及其应用——北京、天津和唐山地区地壳结构的初步模拟;二维钻孔介质中波的特性研究;二维钻孔填充介质中波的传播特征的探讨;不同混合液体中波速变化试验;不同混合固体中波速变化试验;三维多层液体介质地震模型试验方法的研究;空气介质中三维多层模型试验方法的研究;三层介质模型震相分析与地壳结构(辽宁南部地区地壳结构);二维层状介质中垂直和孔间地震波的走时规律;模型超声测试与地震勘探相似分析;二维多圈圆盘介质模型中波传播特征的研究;厚度不同的高速夹层地震模型的研究;二维界面地震模型的首波研究;三维二层液体介质中首波能流的模型实验研究;非线性层状构造理论的模型试验研究;岩石超声波谱分析的探讨与试验;岩石声发射的研究;岩样在压力下声速与应力应变等关系的研究;三维地震勘探模型实验的方法研究;S波勘探方法的研究;地震模型试验中的震相识别方法等方面进行了一些研究工作。本书就是在我们实验室工作实践的基础上并搜集有关资料编写的。上述详细内容将在以后的章节中介绍,这里不再赘述。

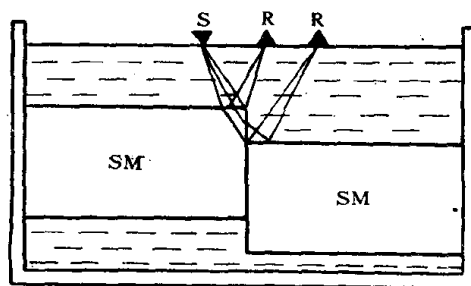


图 1-15 国内早期水中浸泡直角断层模型示意图(根据:滕吉文)

SM—模型; ————水

总起来看,目前在超声地震模型试验研究中所关心的问题可归纳为:

1) 在不均匀介质中地震波的传播。特别是对各种衍射效应进行深入研究,迄今对此尚未做过足够的理论分析。在模型地震学中,波导占有重要地位(低速层、高速层、槽波),此外,层状介质的倾斜层、尖灭层的地震波传播研究也是一个重要课题。

2) 地震波在性质与真实的弹性介质相差极大的介质中的传播。在高温高压下测定P波与S波的衰减、波谱等是极有意义的。

3) 不同类型震源的应力释放,如爆炸源、位错源、机械源等。研究物质的蠕变效应是有益的。相变的实验室试验对研究新全球构造具有特殊价值。这些研究与地震预报问题也有着密切联系。

4) 在生产实践中许多具体问题的模拟和理论的验证。如地震、地震勘探、工程地质、工程地震、地质、石油、煤炭、冶金、矿山、水坝、交通和国防等部门的实际问题的正反演的研究,新方法的研究以及岩性测定与划分等问题。

展望未来,超声地震模型试验的发展方向是什么?从目前情况看,一方面要研制新仪器,探索新的观测方法以提高测量精度;另一方面,是震源机制的模拟、真实地球的地壳地幔的模拟及对地震波在倾斜层、不均匀介质等地质构造中传播的研究。此外,全波分析、超声全息以及三维地震等地震模型试验的研究,对于野外的地震、地震勘探、测井的全波分析、地震全息、三维地震和人工合成地震图等工作都具有重要意义。