#### 第37卷第4期 2013年8月

DOI:10.11720/j.issn.1000-8918.2013.4.23

# 页面物理模型模拟实验方法

# 薛建

(吉林大学地球探测科学与技术学院,吉林长春 130026)

**摘要:**在地震勘探物理模型实验中,采用页面物理模型模拟实验技术,可以降低物理模型的制作成本,缩短实验周 期。采取加工与观测同步进行的方法,可以分解复杂构造模型的地震波场,有利于研究各类震波在模型中的传播 问题。笔者介绍了页面模型的制作和观测技术,讨论了页面模型上波的分布特点,描述了典型构造模型的地震波 场。可以发现,页面物理模型的制作和观测简单,制作周期短,成本低;在得到的地震波场图上,各类震波的运动特 征明显而清晰;它不仅可以模拟各种简单的地质构造,在开展复杂构造的三维地震勘探物理模型实验时,有利于各 类震波的识别与分析。

关键词:模型制作;地震波场;实验技术;典型构造模型 中图分类号: P631.4 
文献标识码: A 
文章编号: 1000 - 8918(2013)04 - 0701 - 05

地震勘探物理模型实验是地震勘探领域的一项 基础研究工作,它通过研究超声波在物理模型上的 传播进而研究地震波在实际地质原型中的传播问 题<sup>[1-2]</sup>。物理模型实验包括模型制作、数据采集及 地震波场分析等过程。

开展物理模型实验,首先要按照模型实验相似 性准则<sup>[3]</sup>制作物理模型,固体物理模型的制作要经 过模型材料的选择性实验、加工模具、反复地浇筑和 脱模等过程。因此,模型的制作过程存在着加工周 期长、制作成本高、成品率低的缺点,这在很大程度 上制约了物理模拟实验的开展。事实上,当不需要 开展三维观测时,可以将浇筑的固体模型简化为页 面模型,通过简单的模型制作和观测,花费较低的成 本,得到与浇筑模型一致的地震波场。对于复杂构 造模型,可以在页面模型的制作过程中通过加工与 观测同步进行的方式分解复杂的地震波场,这对研 究各类震波在模型中的传播是非常有用的。笔者介 绍了页面物理模型的制作和观测方法,讨论了页面 模型上波的分布特点,描述了典型构造模型的地震 波场。

1 页面物理模型的制作

页面物理模型属于二维物理模型中的平板模型,但比普通的平板模型要薄的多,形象地称为页面模型。它由薄板和模型体两部分组成(图1)。薄板选用厚度1.5~2.5 mm的有机玻璃板或塑料板,一

收稿日期:2012-05-10;修回日期:2013-03-11

方面用于承载模型体,另一方面用于模拟某种围岩; 模型体可以采用贴片法、钻孔法或镶嵌法制作。贴 片法是将金属泊或其他薄层材料加工成所需要的形 状粘贴到薄板表面;钻孔法是在薄板上直接打孔;镶 嵌法是在薄板上去掉模型体部分,采用另一种材料 进行镶嵌。



图1 页面物理模型示意

贴片法是制作页面物理模型最常用的方法,贴 片的材料有金属箔、火漆、橡皮泥、湿纸片等,其中, 金属箔、火漆等具有较高速度的材料用于模拟高速 地质体,橡皮泥、硅橡胶等具有良好吸收特性的材料 用于模拟低速地质体。贴片的黏合剂可采用环氧树 脂和 502 胶等。

根据郭铁栓、赵鸿儒等人<sup>[4]</sup>的研究,当波沿着 平板传播时,如果平板的厚度很薄,入射波波长 $\lambda > h_1 + h_2$ (其中 $h_1$ 为平板厚度, $h_2$ 为贴片厚度),两层 介质黏合部位的合成纵波速度和横波速度可由

$$\bar{v}_{p}^{2} = \frac{\rho_{1}v_{p1}^{2}h_{1} + \rho_{2}v_{p2}^{2}h_{2}}{\rho_{1}h_{1} + \rho_{2}h_{2}} ,$$
$$\bar{v}_{s}^{2} = \frac{\rho_{1}v_{s1}^{2}h_{1} + \rho_{2}v_{s2}^{2}h_{2}}{\rho_{1}h_{1} + \rho_{2}h_{2}}$$

描述。式中: $h_1$ 、 $h_2$ 为两种介质的厚度; $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 为两种 介质的密度; $v_{p1}$ 、 $v_{p2}$ 为两种介质的纵波速度; $v_{s1}$ 、 $v_{s2}$ 为两种介质的横波速度。

实验表明,在有机玻璃薄板上粘贴锡箔或钢片 等高速材料可使贴片部位的纵波速度由 2 300 m/s 提高到 2 500 ~ 3 000 m/s;在有机玻璃薄板上粘贴 橡皮泥、硅橡胶或湿纸等吸收材料可以使贴片部位 的纵波速度由 2 300 m/s降低到 2 100 ~ 1 800 m/s。 通过不同材料的贴片改变模型体部位的速度和密 度,形成波阻抗界面,使我们可以参照模型实验相似 性准则制作物理模型。

## 2 页面物理模型观测的换能器

页面物理模型观测使用的换能器是一种将纵波 和横波组合在一起的换能器,它由两块压电陶瓷和 一块等腰三角形有机玻璃片按照图 2a 方式组成,在 探头上设置有 P 波和 S 波观测转换开关,分别进行 P 波发射 P 波接收或 S 波发射 S 波接收方式的切 换。换能器的指向性如图 2b,其指向性为 $f_p = f_1 + f_2 \int_s = f_1 - f_2$ ,在 P 波发射 P 波接收时,震动点处的 能量以 P 波为主,指向下方,S 波分布在两侧;在 S 波发射 S 波接收时,震动点处的能量以 S 波为主,指 向下方,P 波分布在两侧。



#### 图 2 换能器的结构及其指向性示意

#### 3 页面物理模型的观测

页面物理模型的观测方式有透射波观测、反射 纵波观测、反射横波观测、自激自收观测和 VSP 观 测等,其中反射纵波和反射横波观测最为常用,观测 方式见示意图 3 和图 4,图中 T 和 R 为发射和接收 换能器。

观测时首先将页面模型平放在工作台上,模型 与工作台间铺垫软纸作为吸收材料,防止工作台与



图 3 反射纵波观测示意



图4 反射横波观测示意

模型因直接接触产生干扰波。换能器接触的观测表 面上涂凡士林进行耦合,发射与接收换能器沿着测 量表面滑动进行数据采集。

## 4 页面模型的地震波场特征

为了解弹性波在页面模型中的传播特征,我们 对楔形贴片模型进行了纵波和横波观测。薄板采用 有机玻璃板,声学参数为 $v_p \approx 2$  300 m/s, $v_s \approx 1$  250 m/s, $\rho \approx 1.2$ g/cm<sup>3</sup>;楔形体为锡箔,实测声速 $v_p = 2$  890 m/s, $v_s = 1$  670 m/s。模型见图 3,发射换能器 位于 A 点,偏移距为 20 mm,道间距为 5 mm。

图 5 为 P 波发射 P 波接收方式得到的单炮记 录。剖面上最先到达的是沿测量表面传播的直达波 及面波;剖面左侧在 90~140 µs 处为楔状体上、下 界面的 P 波反射,168 µs 处的同相轴为薄板底界面 的 P 波反射,190 µs 以下出现的是转换波。图 6 为 S 波发射 S 波接收方式得到的单炮记录。剖面中最 先到达的是沿测量表面传播的直达波和面波;剖面 左侧 90~140 µs 处为楔状体上、下界面的 P 波反 射;剖面右侧 200 µs 处的同相轴为薄板底界面的 P 波反射,320 µs 处的同相轴为薄板底界面的 S 波反 射,介于 200~320 µs 间的波为楔状体上、下界面的 S 波反射和转换波。



图6 S 波观测时间剖面

# 5 复杂波场的分解

在对三维固体模型观测时,来自各个界面、模型 和边界的反射波、绕射波、转换波等相互交叉、重叠 和干扰,形成复杂的地震波场记录,使得对各震相的 识别和对比更加困难。采用页面物理模型可以实现 对地震总场信号的分解,使得原本非常复杂的地震 波场分析变得相对简单。其方法是,首先对薄板进 行观测,确定出来自模型边界的信号,然后再粘贴部 分模型体观测得到时间剖面,与上次观测的时间剖 面进行对比,标出模型体产生的震相,依此方法就可 以实现对复杂的地震总场的分解,使时间剖面上出 现的各种震相都能得到合理的解释<sup>[5-6]</sup>。

图 7 为模拟两个岩脉 K<sub>1</sub> 和 K<sub>2</sub> 的页面物理模型,采用自激自收观测,收、发探头间距 2.0 cm,测 点距离 5.0 mm,观测起点为 *A* 点。图 8 为只有 K<sub>1</sub> 的时间剖面图,可以确定出 K<sub>1</sub> 形成的 P 波反射波 K<sub>1</sub>P 和绕射波 K<sub>1</sub>PR、S 波的绕射波 K<sub>1</sub>SR。图 9 为 K<sub>1</sub>、K<sub>2</sub> 的时间剖面图,与图 8 对比,可以清楚地确定 出 K2 形成的 P 波反射波 K<sub>2</sub>P 和绕射波 K<sub>2</sub>PR、S 波 的绕射波 K<sub>2</sub>SR。



图 9 模型 K<sub>1</sub>、K<sub>2</sub> 的时间剖面

6 典型构造的地震波场再现

采用 P 波发射 P 波接收固定偏移距观测方式, 对背斜、向斜、阶梯、断裂、孔洞和楔形等页面物理模 型进行观测。观测位置 A~B,道间距 5 mm,物理模 型见图 10~15 中图 a,时间剖面见图 10~15 中图 b。从图中可以看到,这些构造模型的地震波场与实 际地质构造的地震波场具有相同的运动特征<sup>[7-8]</sup>。 背斜模型时间剖面上,背斜的隆起部分要比实际模 型略宽,表明背斜凸起面上反射波存在着发散现象; 向斜模型时间剖面较复杂,向斜的凹界面要比实际 模型窄很多,在最凹点处射线发生交叉,最凹点下方 波的能量增强,并形成假背斜现象;阶梯模型时间剖 面上可以看到上下台阶界面处的反射波和各端点处 的绕射波;断裂模型时间剖面上可以看到上下盘界 面处的反射波和断点处的绕射波,绕射波极小点对 应模型上的断点位置;孔洞模型时间剖面上可以看 到4个绕射弧线,空洞直径大者绕射波振幅强,凸点 位于33道的绕射波振幅最弱,这是由数个0.6 mm 孔洞群形成的绕射;楔形模型时间剖面上可以看到 楔形体上下界面的反射波以及楔形体两侧的端点绕



图 11 向斜模型及时间剖面



图 14 孔洞模型及时间剖面



# 7 结论

笔者介绍了页面物理模型的制作和观测方法, 讨论了楔形页面物理模型上地震波的分布特征和几 种典型构造模型的地震波场。由此可见,页面物理 模型的制作和观测都十分简单,模型制作周期短,成 本低;在得到的地震波场图上,各类震波的运动特征 明显而清晰;它不仅可以模拟各种简单的地质构造, 在开展复杂构造的三维地震勘探物理模型实验时, 还可以借助页面物理模型帮助分析和认识地震波总 场上的各类震波。

## 参考文献:

- [1] 孙进中,郭铁栓,唐文榜,等.我国地震超声模型实验的理论研究与实践[J].地球物理学报,1997,40(S1):266-272.
- [2] 郝守玲,赵群. 地震物理模型技术的应用与发展[J]. 勘探地球 物理进展,2002,25(2):34-42.
- [3] 赵鸿儒,唐文榜,郭铁栓.超声地震模型试验技术及应用[M]. 北京:石油出版社,1986:1-372
- [4] 郭铁栓,赵鸿儒,孙进中.控制地震模型实验材料波速的方法[J].物探与化探,1985,9(6):442-451.
- [5] 韩立国,薛建,王者江.基于页面物理模拟的复杂介质地震波 场特征分析[J].吉林大学学报:地球科学版,2003,33(2):222 -226.
- [6] 薛建,曾昭发,王者江,等.金属矿地震勘探物理模拟实验技术[J].吉林大学学报:地球科学版,2004,34(3):464-470.
- [7] 魏建新,孟平,赵群.固体物理模拟实验:波场观测[J].石油物 探,1997,36(2):75-85.
- [8] 雷宛,肖宏跃,邓一谦.工程与环境物探教程[M].北京:地质 出版社,2006.

# THE EXPERIMENTAL METHOD IN A THIN-PLATE PHYSICAL MODEL

#### XUE Jian

(Collage of Geoexploration Sci. & Tech., Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: The thin-plate modeling technique can reduce production cost and shorten production circle in physical experiments of seismic exploration. By simultaneous performance of the manufacture and observation, this processing and observation method can decompose seismic wave fields and help us know the propagations of various types of seismic waves in complicated media. This paper reports the manufacture and observation technique of the thin-plate model, discusses the characteristics of wave distribution in the thin-plate model, and describes the seismic wave fields of typical structure models. It is found that the thin-plate physical model has the advantages of simple manufacture and observation, short manufacture cycle and low cost; in addition, the movement characteristics of various seismic waves are obvious and distinct in the obtained seismic wave field map. It can not only simulate various simple geological structures but also help recognize and analyze different kinds of seismic waves during the 3D seismic exploration physical modeling of complex structures.

Key words: modeling; seismic wave field; experimental technique; typical structure model

作者简介: 薛建(1958 - ), 男, 吉林省榆树县人, 主要从事地震勘探物理模拟方法技术研究。