

三维复杂介质 地震物理模拟

牟永光 著

**SEISMIC PHYSICAL
MODELING
FOR 3-D COMPLEX
MEDIA**

石油工业出版社
Petroleum Industry Press

三维复杂介质地震物理模拟

牟永光 著

石油工业出版社

内 容 提 要

该书是中国石油天然气集团公司重点科研项目“石油地震物理模型及应用研究”的成果总结,内容包括地震物理模拟的理论、方法、设备;三维复杂介质地震物理模型的制作方法、数据采集与处理方法;三维复杂介质地震物理模拟在地震勘探方法研究、三维地震观测系统优化设计、地震数据处理和解释中的应用。该书具有较高的理论价值和实用价值。可供从事地震勘探研究的技术人员和大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

三维复杂介质地震物理模拟/牟永光著.

北京:石油工业出版社,2003.4

ISBN 7-5021-3665-7

I. 三…

II. 牟…

III. 复杂地层-三维地震法勘探-地震模拟试验

IV. P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 097214 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京乘设伟业科技排版中心排版

石油工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 7.75 印张 198 千字 印 1—1000

2003 年 4 月北京第 1 版 2003 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3665-7/TE·2693

定价:18.00 元

前 言

随着我国石油天然气勘探、开发工作的不断发展,我们面临的勘探对象和开发环境越来越复杂,面临着复杂构造油气藏、岩性油气藏和裂缝油气藏的勘探和寻找“剩余油”的艰巨而复杂的任务。为了解决这些复杂油气藏的勘探、开发问题,必须将复杂介质地震波传播规律的地震理论与地震物理模拟实验研究紧密结合起来。通过三维复杂介质地震物理模拟对三维复杂介质地震勘探方法、三维地震观测系统的优化设计、三维地震数据处理方法及三维地震资料解释方法进行研究,并与地震理论研究紧密结合,使地震物理模拟实验研究在地震理论的正确指导下进行,同时,地震物理模拟实验研究发现的新的现象反过来又促进了地震研究的深入开展。只有这样才能解决我们所面临的艰巨任务。

因此,我们从 20 世纪 80 年代初就提出了数字地震物理模拟的研究项目,受到原中国石油工业部的重视,于 1984 年正式列为重点科研项目,此后经过近 20 年的艰苦努力,研制成功了固体地震物理模拟方法,并自行设计研制了大型精密定位系统和自动控制采集系统,建立了地震物理模型实验室,并紧密结合我国复杂地区的石油天然气勘探、开发生产实际开展了原中国石油天然气总公司“八五”重点科研项目“油气储层地球物理模型及反演技术”和中国石油天然气集团公司“九五”重点科研项目“石油地震物理模型及应用研究”等研究工作。

鉴于地震物理模拟与地震数值模拟相比具有无可比拟的真实性及其在三维复杂介质地震模拟中的快速和经济的特点,而且,当前国内外尚无一本三维复杂介质地震物理模拟的专著,因此在上述研究工作的基础上写成了本书。本书是石油大学地震物理模型实验室(中国石油天然气集团公司物探重点实验室)全体人员共同劳动的成果。参与本书各章节编写的人员有翁绳斌教授(第四章、第五章和第七章)、魏建新副教授(第五章、第七章和第八章)、狄帮让副教授(第四章)、曹思远副教授(第七章)、李国发博士(第七章)、顾培成高工(第八章)和裴正林博士后(第九章)。参加地震物理模型实验室工作的人员先后还有刘仲一教授、张云福教授级高工、楼敏博士、杨燕硕士、朱建林硕士、姜华方硕士、赵西宁硕士、马延路硕士、崔文玮硕士、郭志强硕士、赵建辉硕士、薛国锋硕士、孙吉定硕士、韩其玉博士、伊京翠和何铁伟硕士等。他们的工作对本书都有贡献。参与科研合作的有上海精密机床修理厂、上海电气自动化研究所、大港油田、新疆油田和江苏油田等单位,在此一并表示感谢。另外,对关心和支持我们的研究工作的领导和同行们致以深切的谢意。

作者

2003 年 1 月 22 日于北京

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 地震物理模拟及其特点	(1)
第二节 地震物理模拟的发展	(2)
第三节 地震物理模拟的应用	(2)
第二章 地震物理模拟理论	(4)
第一节 地震物理模拟运动学理论——几何相似原理	(4)
第二节 地震物理模拟动力学理论——动力学相似原理	(5)
第三章 地震物理模拟方法	(8)
第一节 超声地震物理模拟	(8)
第二节 激光超声地震物理模拟	(18)
第四章 地震物理模拟设备	(25)
第一节 大型精密定位系统	(25)
第二节 自动控制采集系统	(31)
第五章 三维复杂介质地震物理模型制作方法	(36)
第一节 三维复杂介质地震物理模型制作方法	(36)
第二节 三维复杂介质地震物理模型制作材料	(38)
第六章 三维复杂介质地震物理模型数据采集与处理方法	(42)
第一节 三维地震物理模型数据采集方法及其特点	(42)
第二节 三维地震物理模型数据处理方法及其特点	(44)
第七章 三维复杂介质地震物理模拟在地震勘探方法研究中的应用	(45)
第一节 三维弗仑奇(French)地震物理模型	(45)
第二节 转换波地震物理模型	(51)
第三节 横波分裂及再分裂裂缝介质地震物理模型	(53)
第四节 砂岩油气储层地震物理模型	(65)
第八章 三维复杂介质地震物理模拟在三维地震观测系统优化设计中的应用及优化 设计方法	(73)
第一节 三维复杂介质地震物理模拟在三维地震观测系统优化设计中的应用	(73)
第二节 三维复杂介质地震物理模拟三维地震观测系统优化设计方法	(89)
第九章 三维复杂介质地震物理模拟在地震数据处理中的应用	(96)
第一节 三维复杂介质地震物理模拟标准数据体的建立	(96)
第二节 三维复杂介质地震物理模拟对地震数据处理方法的检验	(97)
第十章 三维复杂介质地震物理模拟在地震资料解释中的应用	(107)
第一节 复杂介质地震物理模拟在地震资料定性解释中的应用	(107)
第二节 复杂介质地震物理模拟在地震资料定量解释中的应用	(116)

第一章 绪 论

本章首先说明地震物理模拟及其特点,然后叙述地震物理模拟的发展过程和发展方向,最后,讨论地震物理模拟的应用。

第一节 地震物理模拟及其特点

所谓的地震物理模拟(Seismic Physical Simulation),通常也叫做地震物理模型(Seismic Physical Modeling)。现代的地震物理模拟是在实验室内将野外的地质构造和地质体按照一定的模拟相似比制作成物理模型,并用超声波或激光超声波等方法对野外地震勘探方法进行模拟的一种地震模拟方法(如图 1-1 所示)。

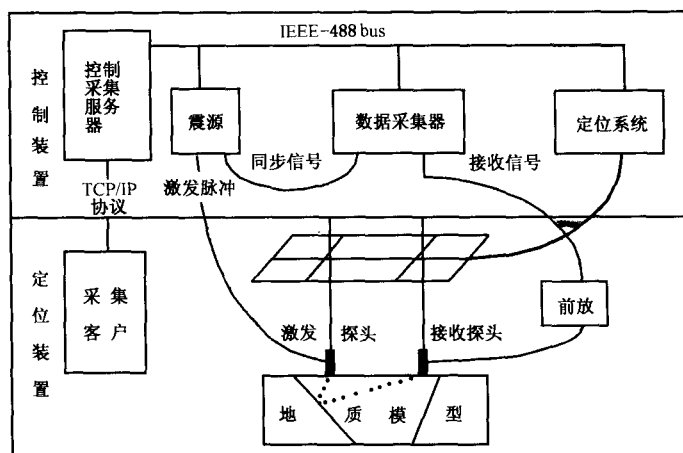


图 1-1 地震物理模拟方法示意图

在各科学技术领域中,模拟方法可分为两大类。一类是物理模拟,它是通过物理实验过程对某一科学技术领域中某个过程或现象进行模拟的;另一类是数学模拟或数值模拟,它是通过数值计算方法对某一科学技术领域中的某一过程或现象进行模拟的。由上述地震物理模拟方法可知,它是属于物理实验模拟的一种模拟方法。地震物理模拟与地震数学模拟方法相比,其最大的优点就是地震物理模拟结果的真实性,它不受计算方法、假设条件的限制,特别是在三维复杂介质地震模拟中,它比地震数值模拟具有快速和经济的特点,因而地震物理模型受到国外工业发达国家各石油公司和大学的普遍重视。

地震物理模型实验在石油天然气勘探、开发中的应用越来越广泛。它除了用于地震波理论研究,例如声波介质、弹性介质、各向异性介质和双相介质中弹性波传播理论研究外,还在盐丘、盐下构造成像、河道砂预测、裂缝带检测、井间地震研究及油藏动态监测等石油天然气勘探、开发工作中发挥重要的作用。

第二节 地震物理模拟的发展

地震物理模拟发展的初期是将按照一定的模拟相似比制作的地质构造和地质体的物理模型放在巨大的水槽中,同时将激发超声探头和接收超声探头放在水槽中,进行超声波的激发和接收,以观测和记录超声波在物理模型中的传播过程,用来模拟地震波在地下地质构造和地质体中实际传播过程,这种地震物理模拟方法叫做水槽地震物理模型。水槽地震物理模型的最大优点在于激发和接收超声探头与水介质耦合的均匀性,同时,水槽地震物理模型可以较好地模拟海洋地震勘探过程,因而这种地震物理模拟方法在 20 世纪 70 年代得到了飞速的发展。

1977 年美国休斯敦大学地震声学实验室创建水槽地震物理模型。该实验室曾受到美国 30 多家石油公司和地球物理公司的支持和资助,至今仍是美国最大的地球物理工业联合体之一。

国内南京石油物探研究所以及同济大学在 1985 年前后设计建立了大型水槽自动地震物理模型观测系统。

但是,水槽地震物理模型也存在着明显的缺陷。这就是这种方法无法正确地模拟陆上地震勘探过程。同时,这种模拟方法只能记录到纵波,而不能记录到横波和转换横波。为了克服水槽地震物理模型的缺点,在 20 世纪 80 年代,美国哥伦比亚大学、埃克森石油公司、休斯敦大学和中国石油大学先后研制成功了固体地震物理模型。

1985 年美国埃克森石油公司建立了固体地震物理模型观测系统。

石油大学于 1986 年研究成功了固体地震物理模型方法,并且一开始就从固体地震物理模型方法出发研制了一套大规模、高精度固体地震物理模型设备。

这种固体地震物理模拟方法是将激发、接收超声探头直接与固体物理模型表面相接触,进行激发和接收。这样可以模拟陆上地震勘探过程,并且可以观测和记录纵波、横波和各类转换波,实现多波多分量地震物理模拟。

此后,在 20 世纪 90 年代初期,欧洲共同体等又将超声固体地震物理模拟发展到激光超声波地震物理模拟。

1990 至 1993 年,欧洲共同体在勘探研究及发展计划中,特别加强地震物理模型的研究,强调了“以地震物理模型弥补数值计算的不足”。并研制成了激光超声波地震物理模拟方法。

这种激光超声波地震物理模拟方法是用激光发生器作为激发源,在固体物理模型中产生超声波,并在固体物理模型中传播,然后用激光干涉仪接收到接收点的超声波,观测和记录固体物理模型中超声波的传播过程,模拟地下地震波的传播过程的固体地震物理模拟方法。这种方法可以模拟点状震源激发和接收的情况。

由于地震物理模拟方法和技术的长足进步,目前,世界上很多国家和地区的石油公司和大学都建立了自己的地震物理模型实验室。其中加拿大卡尔加里大学、荷兰德尔福理工大学、英国石油公司、法国石油研究所、挪威大陆架和石油技术研究所及俄罗斯、日本等国都建立了地震物理模型实验室。

第三节 地震物理模拟的应用

随着我国石油天然气勘探开发工作的不断发展,我们面临的勘探对象和开发环境越来越复杂,面临着复杂构造油气藏、岩性油气藏和裂缝油气藏的勘探及寻找“剩余油”的艰巨而复杂

的任务。为了解决这些复杂油气藏勘探、开发问题,必须将复杂介质地震波传播规律的地震理论研究与地震物理模拟实验研究紧密结合起来。通过三维复杂介质地震物理模拟对三维复杂介质地震勘探方法、三维地震观测系统的优化设计、三维地震数据处理方法和三维地震资料解释方法进行研究。目前,三维复杂介质地震物理模拟的应用主要有四个方面。

一、在三维复杂介质地震勘探方法中的应用

- (1)三维地震勘探方法研究;
- (2)多波地震勘探特别是转换波法勘探方法研究;
- (3)横波勘探特别是横波分裂、再分裂应用研究;
- (4)砂岩油气储层研究;
- (5)碳酸盐岩裂缝储层研究;
- (6)Fresnel 带与空间分辨率研究;
- (7)非弹性介质中波传播速度研究。

二、在三维地震观测系统优化设计中的应用

- (1)复杂断块构造三维地震观测系统优化设计;
- (2)复杂逆掩断裂带三维地震观测系统优化设计;
- (3)复杂潜山构造三维地震观测系统优化设计;
- (4)复杂盐丘构造三维地震观测系统优化设计。

三、在三维地震数据处理中的应用

- (1)三维复杂介质标准数据体的建立;
- (2)对复杂介质地震数据处理方法的检验:①井间地震层析方法;②各向异性偏移成像方法;③复杂盐丘及盐下偏移成像方法。

四、在三维地震资料解释中的应用

- (1)定性解释:①复杂地震波场波型分析及波传播规律研究;②砂泥岩薄互层油藏 AVO 油、气、水流体性质分析;③裂缝带检测;④薄层河道砂分布。
- (2)定量解释:①裂缝方向检测;②裂缝密度估计。

第二章 地震物理模拟理论

本章将讨论与地震物理模拟有关的一些共同的理论问题。这些问题包括地震物理模拟运动学理论——几何相似原理和地震物理模拟动力学理论——动力学相似原理。

第一节 地震物理模拟运动学理论——几何相似原理

在进行地震物理模拟时,为了使所得到的模拟结果的运动学特性——模型超声波的传播时间与实际地质构造和地质体中的地震波运动特性——实际地震波的传播时间成比例,必须使模型的尺寸与实际地质构造和地质体的尺寸呈一定的比例关系——几何相似比,这是地震物理模拟的一个基本原理,叫做几何相似原理。

当波在模型介质中的传播速度 v_m 与地震波在实际介质中的传播速度 v 相同时,即

$$v_m = v$$

则
$$\frac{f}{f_m} = \frac{\lambda_m}{\lambda} = \frac{l_m}{l} \quad (2-1)$$

式中 f ——实际介质中波的频率;
 f_m ——模型介质中波的频率;
 λ ——实际介质中的波长;
 λ_m ——模型介质中的波长;
 l ——实际介质的尺度;
 l_m ——模型介质的尺度。

如果令
$$\frac{l_m}{l} = k_l, \frac{t_m}{t} = k_t$$

则(2-1)式变成
$$k_l = k_t \quad (2-2)$$

式中 k_l ——模型介质与实际介质的尺度比;
 t ——实际介质中波的传播时间;
 t_m ——模型介质中波的传播时间;
 k_t ——模型介质与实际介质中波传播的时间比。

此时,模型介质与实际介质的尺度比等于模型介质与实际介质中的波长比,或实际介质与模型介质中波的频率比。或者说模型介质与实际介质的尺度比等于模型介质与实际介质中波传播的时间比。

当模型介质速度 v_m 与实际介质速度 v 不相同,

令
$$\frac{v_m}{v} = k_v$$

则
$$k_v \frac{f}{f_m} = \frac{\lambda_m}{\lambda} = \frac{l_m}{l} \quad (2-3)$$

或
$$k_l = k_v \cdot k_t \quad (2-4)$$

此时,模型介质与实际介质的尺度比等于模型介质与实际介质中的波长比或实际介质与模型介质中波的频率比乘以模型介质与实际介质中波传播的时间比。或者说模型介质与实际介质的尺度比等于时间比乘速度比。

第二节 地震物理模拟动力学理论——动力学相似原理

在进行地震物理模拟时,为了使所得到的模拟结果不仅满足波的运动学特性与实际介质中波的运动学特性相似,而且在波的动力学特性——振幅吸收衰减等方面也与实际介质中波的动力学特性相似,则除了必须遵守几何相似原理之外,还必须满足波的动力学相似性,即要求模型介质的各弹性常数,密度和吸收衰减系数与实际介质相应的弹性常数、密度和吸收衰减系数成比例,这就是地震物理模拟动力学相似原理。

在声学介质中,声波方程为

$$K \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2-5)$$

式中 p ——声波压力;

K ——声学介质弹性常数;

ρ ——声学介质密度;

x, y, z ——空间坐标;

t ——时间。

这时,为了保持波的动力学的相似性,则必须满足

$$\left. \begin{aligned} K &= cK_m \\ \rho &= c\rho_m \end{aligned} \right\} \quad (2-6)$$

式中 K ——实际介质的声学弹性常数;

ρ ——实际介质的密度;

K_m ——模型介质的声学弹性常数;

ρ_m ——模型介质的密度;

c ——常数。

此时,模型介质中与实际介质中的声波方程(2-5)完全相同。

在弹性介质中,弹性波方程为

$$\mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda + \mu) \text{grad}(\text{div} \vec{u}) = \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \quad (2-7)$$

式中 $\vec{u}$ ——位移矢量;

∇^2 ——拉普拉斯算子;

div ——散度算子;

grad ——梯度算子;

t ——时间;

λ, μ ——拉梅弹性常数;

ρ ——密度。

这时,为了保持波的动力学的相似性,则必须满足

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= c\lambda_m \\ \mu &= c\mu_m \\ \rho &= c\rho_m \end{aligned} \right\} \quad (2-8)$$

式中 λ, μ ——实际介质的拉梅弹性常数;
 ρ ——实际介质的密度;
 λ_m, μ_m ——模型介质的拉梅弹性常数;
 ρ_m ——模型介质的密度;
 c ——常数。

此时,模型介质中与实际介质中的弹性波方程(2-7)完全相同。

在介质孔隙饱含流体的双相介质中,双相介质弹性波方程为

$$\begin{aligned} N\nabla^2 \vec{u} + \text{grad}[(A + N)\text{div} \vec{u} + Q\text{div} \vec{U}] &= \frac{\partial^2}{\partial t^2}(\rho_{11}\vec{u} + \rho_{12}\vec{U}) + b \frac{\partial}{\partial t}(\vec{u} - \vec{U}) \\ \text{grad}[Q\text{div} \vec{u} + R\text{div} \vec{U}] &= \frac{\partial^2}{\partial t^2}(\rho_{12}\vec{u} + \rho_{22}\vec{U}) - b \frac{\partial}{\partial t}(\vec{u} - \vec{U}) \end{aligned} \quad (2-9)$$

式中 $\vec{u}$ ——固体的位移矢量;
 $\vec{U}$ ——流体的位移矢量;
 A, N, Q, R ——双相介质的弹性常数;
 $\rho_{11}, \rho_{12}, \rho_{22}$ ——双相介质的密度;
 b ——双相介质的衰减系数。

这时,在双相介质中,为了保持波的动力学的相似性,则必须满足

$$\left. \begin{aligned} A &= cA_m \\ N &= cN_m \\ Q &= cQ_m \\ R &= cR_m \\ b &= cb_m \\ \rho &= c\rho_m \end{aligned} \right\} \quad (2-10)$$

式中 A, N, Q, R ——实际双相介质的弹性常数;
 $\rho(\rho_{11}, \rho_{12}, \rho_{22})$ ——实际双相介质的密度;
 b ——实际双相介质的衰减系数;
 A_m, N_m, Q_m, R_m ——模型双相介质的弹性常数;
 $\rho_m(\rho_{11,m}, \rho_{12,m}, \rho_{22,m})$ ——模型双相介质的密度;
 b_m ——模型双相介质的衰减系数。

此时,模型双相介质中与实际双相介质中的弹性波方程(2-9)完全相同。

在单相或双相、非完全弹性介质情况下,除要求各弹性系数和密度相同或相似外,还要求介质的吸收系数 α 相同或相似。

设在实际介质中,地震波振幅

$$A = A_0 e^{-\alpha r}$$

如
则

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha_0 f \\ A &= A_0 e^{-\alpha_0 f r} \end{aligned} \quad (2-11)$$

式中 A ——地震波的振幅;
 A_0 ——地震波的初始振幅;
 α_0 ——实际介质的吸收系数;
 f ——地震波的频率;
 r ——地震波的传播距离。

在模型介质中,波的振幅

$$A_m = A_{m0} e^{-\alpha_m r_m}$$

其中

$$\alpha_m = \alpha_{m0} f_m$$

则

$$A_m = A_{m0} e^{-\alpha_{m0} f_m r_m} \quad (2-12)$$

式中 A_m ——模型中波的振幅;
 A_{m0} ——模型中波的初始振幅;
 α_{m0} ——模型介质的吸收系数;
 f_m ——模型中波的频率;
 r_m ——模型中波的传播距离。

为了使波在模型中传播与地震波在实际介质中传播具有相同的振幅衰减,

则

$$\frac{A}{A_0} = \frac{A_m}{A_{m0}}$$

得到

$$\alpha_0 f r = \alpha_{m0} f_m r_m \quad (2-13)$$

当波在模型介质中的传播速度 v_m 与地震波在实际介质中的传播速度 v 相同时,

$$v_m = v$$

则

$$f r = f_m r_m$$

得出

$$\alpha_{m0} = \alpha_0 \quad (2-14)$$

此时,模型介质的吸收系数应等于实际介质的吸收系数。

而当波在模型介质中的传播速度 v_m 与地震波在实际介质中的传播速度 v 相似时,

即

$$\frac{v_m}{v} = K_v$$

得

$$\alpha_0 v = \alpha_{m0} v_m$$

或

$$\alpha_{m0} = \frac{1}{K_v} \alpha_0 \quad (2-15)$$

此时,模型介质的吸收系数应等于实际介质的吸收系数乘以速度比。

第三章 地震物理模拟方法

本章探讨地震物理模拟的模拟方法。主要讨论超声地震物理模拟方法和激光超声地震物理模拟方法。

第一节 超声地震物理模拟

现代地震物理模拟是建立在超声学的基础上的。它是在实验室内,用超声发射探头产生超声波在地震物理模型中传播,然后用超声接收探头接收到达模型表面的超声波并进行记录,以模拟实际野外地震勘探中,用炸药爆炸等地震震源产生的地震波(弹性波)在地层中传播,到达地面,最后由地震检波器接收和记录的过程。

超声波在模型介质中的传播过程和传播规律与弹性波在弹性介质中的传播过程与传播规律除频率差异外,其它相同,因此,这里对超声波的传播问题不再赘述。下面,着重对超声波的产生与接收问题进行讨论。

一、压电效应

产生超声波的方法有很多种,例如压电效应、磁致伸缩等。但是,目前实际产生超声波的方法主要是建立在压电效应的基础上。压电效应是包括石英和硫酸锂等绝缘体单晶、硫化镉和氧化锌等半导体及钛酸钡和锆钛酸铅(PZT)等陶瓷材料所特有一种性质。压电效应要求材料存在极性轴。这种极性轴在石英等单晶材料中是自然存在的,但是在钛酸钡和锆钛酸铅(PZT)等陶瓷材料中,必须通过特殊处理才能人为产生。

为了说明超声波的形成,我们讨论从压电晶体中以适当方式切出的一个具有一定厚度的板状体,其横向尺度比厚度大得多。如果我们加一个电场强度为 E 的均匀电场于这个板状体。由于板状体的压电效应(这里是其反压电效应),这个电场将引起压电板状体内的弹性正应力 σ ,如图 3-1 所示。

$$\sigma = -eE \quad (3-1)$$

式中 σ ——弹性应力, $\frac{N}{m^2}$;

E ——电场强度, $\frac{V}{m}$;

e ——压电材料的压电常数, $\frac{N}{Vm}$ 。

(3-1)式在压电板状体厚度不变的条件下成立。如果板状体的厚度发生变化,则由于板状体的弹性,(3-1)式将增加应力 σ 与应变 S 关系项(见本节压电方程)。

上面,我们讨论了一个压电板状体在电场强度 E 的作用下,由于材料的反压电效应而引起压电板状体内的正应力 σ 和板状体厚度的相对变化正应变 S 。如果电场强度 E 是变化的,则所引起的压电板状体的应力 σ 和应变 S 也是变化的,因而压电体将产生超声振动,这样,压电体将电能转换成机械能,形成超声波。这就是超声震源发射探头的工作原理。

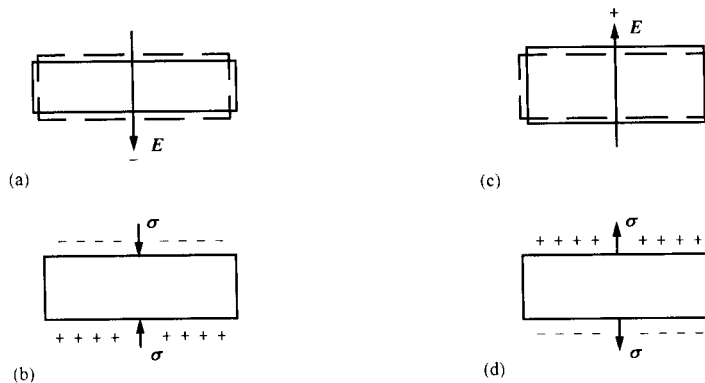


图 3-1 压电板状体在电场 E 作用下引起的
正应力 σ 与板状体的压缩和膨胀

(a)、(c)中的虚线表示板状体受电场 E 作用前的厚度，
实线表示板状体受电场 E 作用后的厚度；

(b)、(d)中的 +、- 符号表示板状体受电场 E 作用形成的表面电荷

现在,我们来讨论一个压电板状体在外力作用下发生变形,使板状体的厚度相对变化产生应变 S ,由于材料的压电效应(这里是其正压电效应),这个应变 S 将引起压电板状体的介电质极化,因而在板状体两侧电极上产生电荷,其电荷密度为介电位移 D ,则

$$D = eS \quad (3-2)$$

式中 D ——压电材料的介电位移, $\frac{C}{m^2}$;

S ——弹性应变;

e ——压电材料的压电常数, $\frac{N}{Vm}$ 。

这里符号选取是当电能和机械能流入板状体时取正号,否则取负号。(3-2)式在压电板状体处于电路短路条件下成立。如果板状体两侧电极间不处于短路状态,则(3-2)式将增加介电位移 D 与电场强度关系项(见本节压电方程)。

上面,我们讨论了一个压电板状体在外力作用下,发生板状体厚度相对变化的应变 S ,由于材料的正压电效应而引起压电板状体的介电质极化,在板状体两侧电极上产生电荷密度 D 。如果外力和应变 S 是变化的,则所引起的压电板状体两侧电极上的电荷密度 D 也是变化的,因而压电体将产生相应的电荷密度变化,这样,压电体将超声的机械能转换成电能。这就是超声接收探头的工作原理。由于压电效应的可逆性,(3-1)式和(3-2)式中的压电常数 e 是相同的。

除了用(3-1)式和(3-2)式表示压电体的压电效应外,我们还经常用另外的式子来表示压电体各物理量之间的关系,这时,压电效应也可以表示为

$$S = -dE \quad (3-3)$$

$$D = d\sigma \quad (3-4)$$

式中 S ——弹性应变;

E ——电场强度, $\frac{V}{m}$;

D ——压电材料的介电位移, $\frac{C}{m^2}$;

σ ——弹性应力, $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$;

d ——材料的压电模量, $\frac{\text{C}}{\text{N}}$ 。

(3-3)式和(3-4)式与(3-1)式和(3-2)式是完全等价的,在应用中,可以用任何一对方程表示压电效应。

在三维压电体情况下,压电材料存在各向异性,(3-1)式和(3-2)式中的各物理量都与方向有关,这时,与(3-1)式和(3-2)式对应的各向异性公式为

$$\sigma_j = -e_{ji}E_i \quad (3-5)$$

$$D_i = e_{ij}S_j \quad (3-6)$$

$$i = 1, 2, 3$$

$$j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

式中 $i = 1, 2, 3$ 分别表示向量 E 和 D 的 x, y, z 分量;

$j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 分别表示张量 σ 和 S 的 xx, yy, zz, yz, zx, xy 分量;

e_{ij} ——各向异性压电材料的压电常数矩阵;

e_{ji} ——各向异性压电常数矩阵的转置矩阵。

同样,(3-3)式和(3-4)式相应的三维各向异性公式为

$$S_j = -d_{ji}E_i \quad (3-7)$$

$$D_i = d_{ij}\sigma_j \quad (3-8)$$

式中 d_{ij} ——各向异性压电材料的压电模量矩阵;

d_{ji} ——各向异性压电模量矩阵的转置矩阵。

从(3-6)式和(3-8)式,我们可以得到

$$\sigma_j = C_{jk}S_k \quad (3-9)$$

其中

$$C_{jk} = d_{ji}^{-1}e_{ij} \quad (3-10)$$

$$j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

$$k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

式中 σ_j ——弹性应力张量分量;

S_k ——弹性应变张量分量;

C_{jk} ——各向异性弹性常数矩阵。

(3-9)式表明三维各向异性弹性体弹性应力 σ_j 与弹性应变 S_k 之间的关系,即各向异性弹性虎克(Hooke's)定律。各向异性弹性常数 C_{jk} 为 6×6 阶矩阵,由于弹性常数矩阵的对称性,它最多有 21 个弹性常数是不同的。由(3-10)式可以得出

$$e_{ik} = d_{ij}C_{jk} \quad (3-11)$$

或

$$d_{ik} = e_{ij}C_{jk}^{-1} \quad (3-12)$$

式中 e_{ik} (或 e_{ij})——各向异性压电常数矩阵;

d_{ik} (或 d_{ij})——各向异性压电模量矩阵;

C_{jk} ——各向异性弹性常数矩阵;

C_{jk}^{-1} ——各向异性弹性常数逆矩阵。

(3-11)式或(3-12)式表明三维各向异性压电常数矩阵 e_{ij} 与压电模量矩阵 d_{ij} 及各向异性弹性常数矩阵 C_{jk} 之间的关系。当已知各向异性弹性常数矩阵 C_{jk} 时,各向异性压电常数矩阵 e_{ij} 与压电模量矩阵 d_{ij} 可以利用(3-11)式或(3-12)式相互求出。

二、压电方程

上节中讨论过的方程(3-1)表明一个适当切割出的板状压电体在电场强度为 E 的电场作用下,由于板状压电体的反压电效应引起板状压电体内的弹性应力 $\sigma_1 = -eE$ 。除此之外,因为压电体本身也是一个弹性体,由于板状压电体的变形,同时还产生一个附加的与板状体厚度相对变化弹性应变 S 成正比的弹性应力 $\sigma_2 = C_e S$ 。因此,这时板状体的弹性应力应为

$$\sigma = C_e S - eE \quad (3-13)$$

式中 σ ——弹性应力;

S ——弹性应变;

E ——电场强度;

e ——压电常数;

C_e ——当电场强度 E 为常数时的弹性常数。

同样,方程(3-2)表明一个板状压电体在外力下,发生变形使板状体的厚度发生相对变化,产生弹性应变 S ,由于材料的正压电效应而引起板状体的介电位移 $D_1 = eS$ 。此外,因为压电体本身也是一个介电体,板状体表面的电荷在板状体内将产生一个电场强度 E 的电场,由于板状体的介电性质,在板状体表面还将产生一个附加的与电场强度 E 成正比的介电位移 $D_2 = \epsilon_s E$ 。因此,这时板状体的介电位移应为

$$D = eS + \epsilon_s E \quad (3-14)$$

式中 D ——介电位移;

S ——弹性应变;

E ——电场强度;

e ——压电常数;

ϵ_s ——当弹性应变 S 为常数时的介电常数。

这样,我们得到了与压电效应(3-1)式和(3-2)式相对应的完全的压电方程(3-13)和(3-14)。

同样,我们可以得到与压电效应(3-3)式和(3-4)式相应的完全的压电方程

$$S = C_e^{-1} \sigma - dE \quad (3-15)$$

$$D = d\sigma + \epsilon_e E \quad (3-16)$$

式中 S ——弹性应变;

σ ——弹性应力;

E ——电场强度;

D ——介电位移;

d ——压电模量;

C_e^{-1} ——当电场强度 E 为常数时弹性常数的倒数;

ϵ_{σ} ——当弹性应力 σ 为常数时的介电常数。

压电方程(3-15)和(3-16)与压电方程(3-13)和(3-14)是完全等价的。在应用中,可以用任何一对方程研究压电体的状态。

在三维各向异性压电体情况下,压电方程(3-13)和(3-14)变成如下的矩阵方程

$$\sigma_j = C_{ejk} S_k - e_{ji} E_i \quad (3-17)$$

$$D_i = e_{ij} S_j + \epsilon_{s_{ih}} E_h \quad (3-18)$$

$$h = 1, 2, 3$$

$$i = 1, 2, 3$$

$$j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

$$k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

式中 C_{ejk} ——当电场强度不变时各向异性弹性常数矩阵;

$\epsilon_{s_{ih}}$ ——当弹性应变不变时各向异性介电常数矩阵。

在三维各向异性压电体情况下,压电方程(3-15)和(3-16)相应的矩阵方程为

$$S_j = C_{ejk}^{-1} \sigma_k - d_{ji} E_i \quad (3-19)$$

$$D_i = d_{ij} \sigma_j + \epsilon_{\sigma_{ih}} E_h \quad (3-20)$$

式中 C_{ejk}^{-1} ——当电场强度不变时各向异性弹性常数矩阵 C_{ejk} 的逆矩阵;

$\epsilon_{\sigma_{ih}}$ ——当弹性应力不变时各向异性介电常数矩阵。

值得注意的是压电方程(3-13)或相应的矩阵方程(3-17)虽然反映了压体(震源探头)产生超声波时各物理量之间的关系,而压电方程(3-14)或相应的矩阵方程(3-18)则反映了压电体(接收探头)接收超声波时各物理量之间的关系,但是,一个压电体的压电效应的正效应与反效应是相互作用的,因而,当研究压电体的状态时,我们必须同时考虑压电方程(3-13)和(3-14)或者同时考虑压电方程(3-17)和(3-18)。同样,对于另一组压电方程(3-15)和(3-16)或相应的矩阵方程(3-19)和(3-20)也必须同时考虑,才能得到压电体状态的完全的结果。

三、固体地震物理模拟方法

在第一章绪论第二节中,我们已经叙述过,在 20 世纪 80 年代中期以前的超声地震物理模拟方法都是水槽超声地震物理模拟方法。这种地震物理模拟方法是将制作好的地震物理模型放置在水槽中,同时将超声震源发射探头和接收探头也放入水槽中(如图 3-2 所示)。超声震源探头 S 发射出超声波 W_1 在水中传播,当超声波入射到地震物理模型表面时,将发生反射 W_2 和透射 W_3 ,透射超声波 W_3 在地震物理模型中继续传播,在模型内部的波阻抗界面上将发生反射 W_4 和断面反射 W_5 ,在速度界面上将产生折射波 W_6 ,在模型介质的间断点上将发生绕射 W_7 ,在模型介质的不均匀点上还将产生散射 W_8 等现象。当这些反射波、折射波、绕射波和散射波等传播到水面附近的超声接收探头 R 时,就被接收探头接收并被超声波记录仪器记录下来。

上述的水槽超声地震物理模拟中,超声震源发射探头和超声接收探头都放入水槽中,由于发射探头和接收探头都直接与水质相接触,超声震源激发条件与接收条件良好而且均匀,因而易于得到质量较高的记录。而且可直接模拟海洋地震勘探条件,因而得到广泛的应用。但