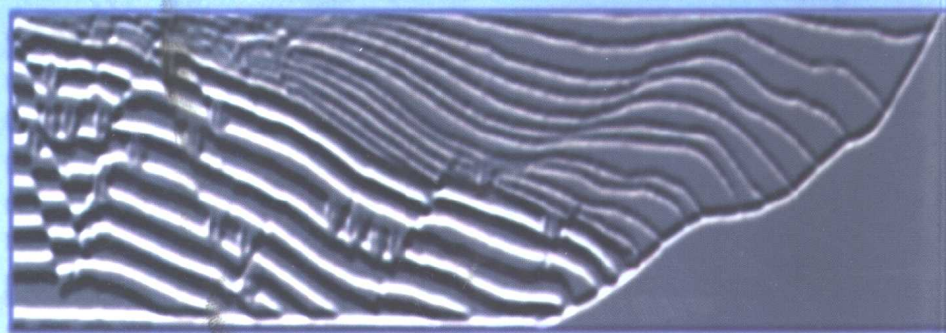
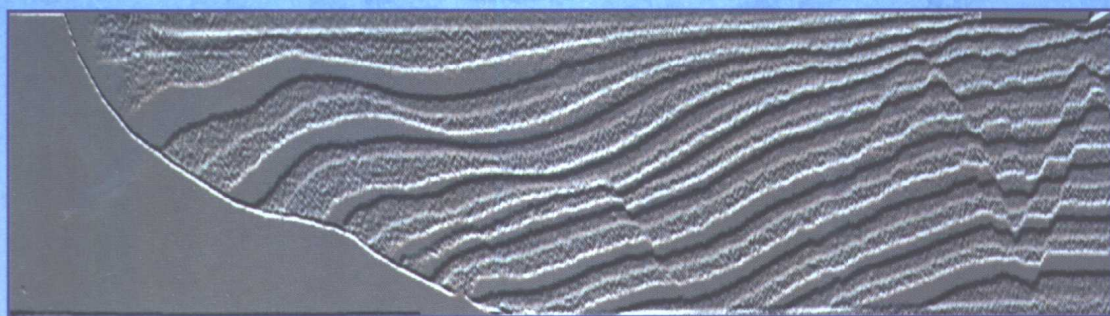


盆地构造研究中的 砂箱模拟实验方法

周建勋 漆家福 童亨茂 著



地震出版社



盆地构造研究中的砂箱 模拟实验方法

周建勋 漆家福 童亨茂 著
陆克政 指导

地震出版社

1999

内 容 提 要

本文除介绍了盆地构造研究中砂箱模拟实验的基本原理、研究现状和技术方法外,还具体介绍了伸展、挤压、走滑和反转构造的一些基础实验模型,以及结合我国含油气盆地中的一些实际所进行的实验研究成果。

本书对盆地构造的形成过程和动力学机理研究提供实验依据和新的启发,推动我国盆地构造研究中构造物理模拟研究工作的进一步深入。

本文供从事盆地构造分析和研究的地质工作者、高等学校从事盆地构造研究和教学的教师、大学生,研究生阅读,参考。

盆地构造研究中的砂箱模拟实验方法

周建勋 漆家福 童亨茂 著

责任编辑:周为莺

责任校对:庞娅萍

*

地 震 出 版 社 出版

北京民族学院南路9号 邮编:100081

北京地大彩印厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 8.25印张 212千字

1999年9月第一版 1999年9月第一次印刷

印数 001—550

ISBN 7-5028-1692-5/P·1018

(2185) 定价:15.00元

前 言

构造物理模拟实验是帮助地质学家认识构造变形过程、研究构造形成机制的重要方法。80年代中期以来,构造物理模拟方法在含油气盆地构造研究中取得了显著成效,一些国际著名大学逐渐加入了这一研究领域,许多国际石油公司也积极资助这方面的研究工作,有些还在自己的地质研究中心建立实验室,取得了许多研究成果。这些研究成果为石油勘探工程师解释地下构造的几何形态、分析构造形成特征和机理提供了重要的启发。为了促进我国油气勘探研究的水平,加强基础地质研究工作,中国石油天然气集团公司重点资助石油大学(北京)建立构造物理模拟实验室,旨在通过对含油气盆地构造变形过程的重现,深入了解各种类型构造及其组合形成和演化的运动学和动力学机理,揭示盆地构造特征与油气运移和聚集规律的内在联系,为地质、地球物理资料的综合解释提供地质构造模型,提高我国含油气盆地构造的研究水平。

1990年中期,原中国石油天然气总公司阎敦实总地质师倡导在石油院校建立几个基础地质研究实验室,并与石油大学张一伟校长商定在石油大学(北京)筹建造构造物理模拟实验室。在原中国石油天然气总公司人教局、勘探局和科技局有关部门和领导的关怀和支持下,经过各方面专家的仔细论证,在张一伟教授和陆克政教授的具体领导下,历时5年,基本完成了实验室硬件的设计制造,同时跟踪国际前沿开展了系列基础实验研究和针对渤海湾黄骅盆地实际地质构造的研究工作,积累了一些工作经验,并对黄骅盆地及整个渤海湾的构造成因机制研究提供了新的启示和依据。

从构造变形环境角度考虑,盆地构造主要涉及地壳浅层次的岩石脆性变形。从相似原理可知,松散砂子是模拟地壳浅层岩石脆性变形最为理想的相似材料。因此,石油大学(北京)筹建造构造物理模拟实验室的建设和研究过程中,一直十分重视盆地构造的砂箱实验研究工作,进行了一系列有关盆地伸展、挤压、反转、走滑构造的基础实验研究。同时,考虑到伸展裂陷盆地在我国含油气盆地中的重要地位,专门针对我国东部渤海湾盆地中部比较典型的黄骅盆地进行了构造成因机制方面的实验研究工作,对盆地构造的形成过程和成因机制有了更深入的认识。其中对黄骅盆地所开展的工作在国内还是首次,实验结果对于黄骅盆地构造、以及整个渤海湾盆地的构造研究具有重要的启示,对油气勘探研究的思路具有积极的指导作用。

本专著是对石油大学(北京)构造物理模拟实验室研究工作的一个阶段总结,反映了集体的研究成果。其中包含了原中国石油天然气总公司人教局、勘探局和

科技局有关部门和领导的关怀支持和有关专家的宝贵建议。在此特别要感谢阎敦实、丁贵明、付诚德、徐梦虹、张云福、关德范、汤静、赵艾江、乔丽、吕明岗等领导同志的的关怀和大力支持，他们曾多次亲临现场指导解决实验室建设的实际问题和困难。特别感谢中国地震局地质研究所马宗晋、马瑾院士，中科院地质研究所的钟嘉献、谢鸣谦、李继亮、单家增教授，地质部地质力学研究所沈淑敏研究员，石油勘探开发研究院的宋建国、裘亦楠总地质师，中国地质大学的陈发景、王德发、刘和甫教授，以及石油大学的张家环、冯石、管宇锐、李德同教授，他们对实验室的建设和实验选题论证工作提出了大量极其宝贵的意见和建议。特别感谢大港油田集团公司薛士荣、吴永平、高有楠、石彦明、赵学平、王光奇、杨池银、周建生、廖前进、周立宏、陶庆学、曹来勇、杨勇、田克勤等原任和现任领导历年来对我们研究工作的支持，其中周立宏、李淑恩、韩品龙、张祥兴、蔺岱伟、史炳健等专家还曾共同参与了部分实验研究工作。同时石油大学(北京)有关部门的领导和同志，如吴元燕、朱筱敏、王尚旭、蔡镜伦、王修斋、关洪涛、邵美玲、宁正福、王永等都曾给予大量的支持和关怀，在此一并表示衷心感谢。

实验室建设自始至终是在张一伟、陆克政教授的领导下进行，参加实验室具体工作的有：漆家福、周建勋、童亨茂、杨桥、王子煜，还有研究生陈福巨、邬光辉、郑兴平，以及实验员朱玉军参加了部分具体工作。

本书共分八章。前言由陆克政撰写。第一章，第二章，第四章第四节，第五章，第六章第二、三节，第八章由周建勋撰写。第三章、第七章由漆家福撰写。第四章一、二、三节，第六章第一节由童亨茂、周建勋撰写。全书由周建勋统编定稿，最后由陆克政和漆家福统一审定。

目 录

第一章 构造物理模拟的理论基础	(1)
第一节 基本原理	(1)
一、几何条件是构造变形的制约因数	(1)
二、构造物理模拟的实质是变形几何学方法	(2)
三、构造物理模拟的基本原则	(2)
四、构造物理模拟实验的一般步骤	(3)
第二节 构造物理模拟实验的相似条件	(3)
一、一般相似条件	(3)
二、单个实验的相似条件	(6)
三、实验材料的基本确定方法	(6)
第二章 构造物理模拟实验的研究历史与发展现状	(7)
第一节 研究历史	(7)
一、初始阶段	(7)
二、重要阶段	(8)
三、新的发展阶段	(8)
第二节 发展现状	(10)
第三章 构造物理模拟实验室装置	(12)
第一节 构造变形物理模拟综合实验仪及其功能	(12)
一、位移驱动系统	(12)
二、模型装配系统	(14)
三、变形过程记录系统	(15)
四、底部模型的设计与安装	(17)
第二节 其它辅助设备	(17)
一、手控简易伸缩位移驱动仪	(17)
二、手控简易剪切仪	(18)
三、计算机及配套软件	(18)
第四章 伸展构造的剖面砂箱实验研究	(20)
第一节 平面拆离伸展构造的模拟研究	(20)
一、实验模型装置	(20)
二、实验结果	(21)
三、讨论	(25)
第二节 铲式拆离伸展构造的模拟研究	(25)
一、实验模型装置	(25)
二、实验结果	(25)

三、讨论	(26)
第三节 坡-坪式拆离伸展构造模拟研究	(27)
一、实验模型装置	(27)
二、实验结果	(27)
三、讨论	(28)
第四节 影响铲式断层上盘伸展构造形成特征的因素分析	(28)
一、实验方法	(29)
二、实验结果分析	(29)
三、讨论	(32)
第五章 伸展构造的平面砂箱实验研究	(33)
第一节 斜向铲式正断层模型	(33)
一、实验模型装置	(33)
二、实验结果	(33)
第二节 斜向裂陷均匀伸展模型	(37)
一、实验模型装置	(37)
二、实验结果	(37)
第三节 斜向自由边界局部伸展模型	(40)
一、实验模型装置	(40)
二、实验结果	(42)
第四节 斜向自由边界均匀伸展模型	(42)
一、实验模型装置	(42)
二、实验结果	(43)
第五节 曲折边界斜向裂陷伸展模型	(45)
一、曲折自由边界单侧伸展模型	(46)
二、曲折自由边界基底均匀双侧伸展模型	(47)
三、曲折刚性边界单侧伸展模型	(47)
四、曲折刚性边界双侧伸展模型	(49)
第六节 讨论	(53)
第六章 挤压、走滑及反转构造的砂箱实验研究	(54)
第一节 挤压变形实验	(54)
一、实验模型设计	(54)
二、实验结果	(55)
三、讨论	(56)
第二节 走滑变形实验	(58)
一、实验模型设计	(58)
二、实验结果	(58)
三、讨论	(59)
第三节 半地堑的反转构造实验	(60)
一、实验方法	(60)

二、实验结果·····	(61)
三、讨论·····	(64)
第七章 半地堑盆地层序结构的砂箱实验模拟·····	(67)
第一节 从剖面平衡分析半地堑盆地的层序结构模型·····	(67)
第二节 用砂箱模拟实验论证平衡剖面分析结果·····	(69)
第三节 两则实例·····	(70)
第四节 讨论·····	(73)
第八章 黄骅盆地新生代构造形成的砂箱实验研究·····	(74)
第一节 概述·····	(74)
第二节 黄骅盆地构造成因的平面砂箱实验·····	(75)
一、实验模型设计·····	(75)
二、实验结果·····	(77)
三、实验结果的对比分析与讨论·····	(100)
第三节 岐东-白东构造带典型剖面构造模拟 ·····	(108)
一、地质特征分析·····	(108)
二、实验模型设计·····	(110)
三、实验结果分析·····	(112)
第四节 成因机制讨论·····	(116)
结 语·····	(118)
参考文献·····	(118)

第一章 构造物理模拟的理论基础

第一节 基本原理

一、几何条件是构造变形的制约因数

一般的工程问题通常变形量较小，现有的力学工具可以较好的解决。但是，构造变形过程(除地震过程外)的特点是时间长、变形量大。常用的力学工具对于描述这种变形过程有很大的难度，通常用“有限应变几何学”方法加以研究(韩玉英,1984)。大变形过程主要受几何因素的制约，例如在 Hubbert(1951)的著名砂箱实验中(图 1-1)，随着手摇活动板的匀速推进，其前侧发生挤压、后侧发生伸展，在此过程中应力状态保持不变，但构造变形面貌随着活动板推进距离的增加而变化，在此推进距离是一个几何量。此外，Braun 等(1994)用几何方法计算铲形正断层上盘变形面貌，得出与实际十分符合的结果(图 1-2)，进一步说明构造变形主要受几何因数的控制。

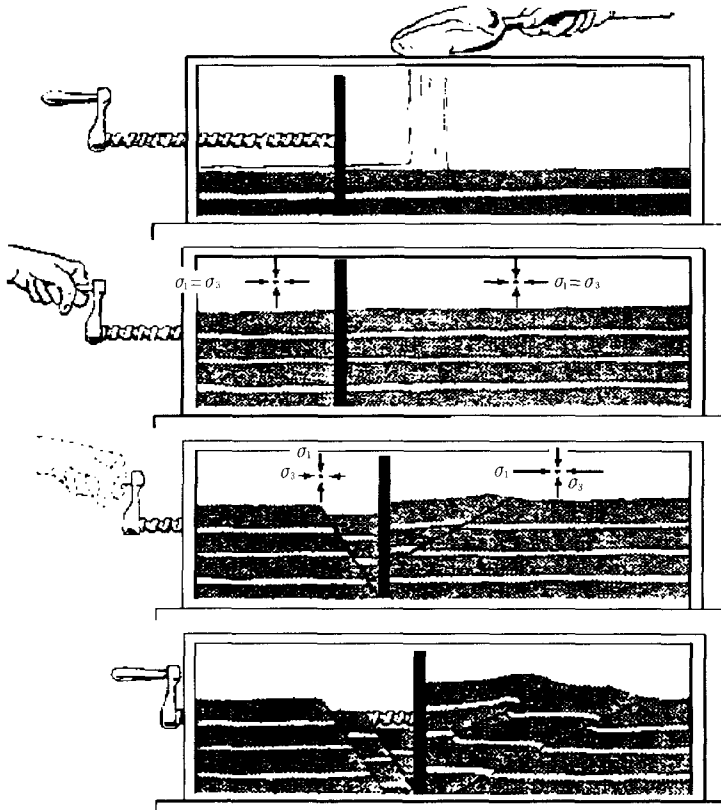


图 1-1 Hubbert(1951)砂箱实验示意图

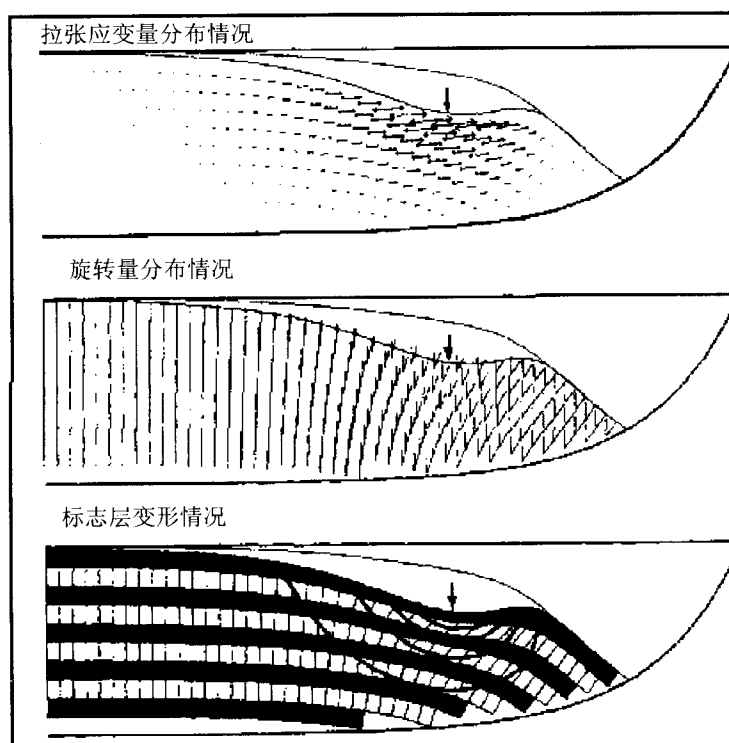


图 1-2 从纯几何计算得到的铲形正断层上盘的变形面貌(据 Braun 等,1994)

二、构造物理模拟的实质是变形几何学方法

构造物理模拟实验基本上不考虑模型的应力大小，通常是根据实际研究对象确定模型的边界条件和应变方式，选择合适的实验材料，研究随应变增加模型的变形特征和演化过程，除了在实验材料的选择过程中需考虑力学性质的相似性问题，实验所考虑的模型边界条件、应变方式和应变等均是几何参数，所以构造物理模拟的实质是变形几何学方法。事实上，大量研究结果也表明构造变形的过程与结果主要受几何条件控制，与岩石力学性质和应力大小的关系相对较小(Braun 等,1994;McClay 等,1995)。因此，构造物理模拟方法是研究物理构造变形问题切实可行的方法。

三、构造物理模拟的基本原则

尽管构造物理模拟实验已经得到普遍承认，但仍有人怀疑：虽然构造过程的模拟实验在原则上是可行的，但是复杂的地质过程能否在相对简单的实验室条件下加以模拟？已有的研究表明答案是肯定的，只要遵循以下五个方面的原则，实验结果对于构造地质现象的解析是十分有效的(格佐夫斯基, 1975)。这五个原则是：

(1) 相似原则：即实验模型与研究对象必须符合相似原理，这是实验模拟研究最重要的基本原则，只有符合这一原则，实验结果才能对研究对象作出正确的解释。

(2) 选择原则：影响构造变形的可能因素很多，往往无法同时满足相似原则，因此只能选择考虑其中主要因素的相似原则，而不必苛求所有的因素都相似。

(3) 分解(分离)原则:影响构造变形的因素很多,如果同时考虑所有的因素,模型的设计就会变得十分复杂,需要采取分解(分离)的原则,即设计多组实验,每一组实验只考虑一个因素而固定其它因素,在分解研究各个因素的基础上进行综合分析,以达到简化模型设计的目的。

(4) 逐步近似(逼近)原则:自然界的条件很复杂,实验室条件有时只能做到大致相似,并随着认识的发展和实验条件的改善逐步逼近相似。在模型相似条件研究尚差的情况下,也可以进行模拟实验,只是把实验结果运用于自然现象时必须谨慎。

(5) 统计的原则:模型实验所获得的结论是纯经验的,特别是每个实验不可能保证条件精确相同,因此需要从统计的角度来评价它的可信度与准确度。

四、构造物理模拟实验的一般步骤

这里涉及的一般步骤,并不牵涉到具体的实验方法,大体可分为以下8个步骤:

- (1) 地质调查,确定构造原型。
 - (2) 分析控制构造原型的主要因素。
 - (3) 根据原型几何尺寸及所采用的模拟方法等因素确定模型比例尺。
 - (4) 根据构造过程的物理环境与原型的岩石力学性状,选定合适的模型材料。
 - (5) 根据野外观察和地球物理资料所推断的原型受力方式与约束条件,确定模型的加载方式与约束条件。
 - (6) 记录模拟过程和结果,及时进行整理。
 - (7) 分析模拟结果的精确性以及天然实体的相似程度。若达不到要求,可重复第(2)、(4)、(5)、(6)、(7)步,甚至对第(1)步作进一步的工作。
 - (8) 合理地将模拟结论用于实际问题。
- 上述8个步骤,构成了从实际中来到实际中去的循环。

第二节 构造物理模拟实验的相似条件

物理模拟实验所研究的构造现象,主要限于地壳岩石的褶曲、断裂等宏观变形现象及变形过程,并不针对那些构造岩石学方法所研究的微观过程。因此,仅需从实验的选择原则考虑相似条件,只要求模型在变形和断裂的宏观表现上与研究对象的相似。当模型与研究对象中同类量的比是常数时,称之为相似,这个常数称之为相似因子(相似常数)。地壳变形和断裂产生的过程、引起变形和断裂的力、以及岩石的物理-力学性质等等,都可以用物理量来描述。在模拟实验时,对其中的每一个物理量都应该选择相似因子。有些相似因子是可以任意选择的,但多数物理量之间具有相互联系的数量纲,当选择了一定的相似因子后,一些与之相关联的相似因子就被确定而不能任意改变,否则相似性就会遭破坏。这种表示相似因子满足某种关系时物理现象就会相似的方程式,称之为相似条件。

一、一般相似条件

相似条件的确定一般有两种方法(格佐夫斯基,1975)。第一种是实验人员根据自己的经验选择那些自己认为对实验有重要影响的物理量,并通过分析物理量的量纲来确定相似条件。这种方法的优点是比较简单。但由于这种方法物理量的选择是人为的,所以难免有时某些重要的物理量被忽略;相反一些多余的物理量被人为的选用,所以这种方法的可靠性较差,但曾

被许多人采用(Koenigsberger 等, 1913; Hubbert, 1937)。

确定相似条件的第二种方法是由苏联物理学家 B. П. 基尔比切夫, 然后由 M. B. 基尔比切夫、П. С. 爱尔松和 A. A. 古赫曼研究出来的。此方法的实质在于: 相似条件是从描述所研究过程的微分和积分方程(如描述应力、位移、变形、断裂之间关系的柯西平衡方程, 描述岩石变形和物理性质随时间变化的蠕变方程、破裂过程的方程等等)推导出来的。数学已经证明: 当过程的物理场相似时, 如果选取相似几何量和物理量作为标准量纲尺度单位, 那么方程式就可以推导出等值的无量纲形式。在这一规律基础上, 在模拟理论中证明通过相反的途径就可以找到相似因子之间的关系, 这种表示相似因子之间关系的方程式就是相似条件。因此, 在决定相似条件时最基本的任务就是选择初始方程式。下面以柯西平衡方程为例说明相似条件的推导过程, 柯西平衡方程的表达式如下:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \delta_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= \rho j_x \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \delta_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= \rho j_y \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \delta_z}{\partial z} + \rho g &= \rho j_z\end{aligned}$$

式中: x, y, z ——笛卡儿坐标(z 轴是垂直的); $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ ——位于垂直于脚标相应的坐标轴平面上的正应力; $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ ——位于垂直于第二个脚标相应的坐标轴平面上, 作用在平行第一个脚标相应的坐标轴的剪应力; ρ ——物质密度; g ——重力加速度; j_x, j_y, j_z ——加速度的投影; $\rho_{jx}, \rho_{jy}, \rho_{jz}$ ——表示惯性力(静力均衡时等于零)。

为了把上述方程式化为无量纲形式, 从而求出相似条件, 首先应进行比例尺变换, 即用无量纲值和某个用符号“ $\exists$ ”标出的量纲标准的乘积来代替每一个量纲值:

长度: $x = XL_{\exists}, y = YL_{\exists}, z = ZL_{\exists}$

应力: $\delta_x = \sum x G_{\exists}, \delta_y = \sum y G_{\exists}, \delta_z = \sum z G_{\exists}$

$\tau_{xy} = T_{xy} G_{\exists}, \tau_{xz} = T_{xz} G_{\exists}, \tau_{yx} = T_{yx} G_{\exists}, \tau_{yz} = T_{yz} G_{\exists}, \tau_{zx} = T_{zx} G_{\exists}, \tau^{zy} = T_{zy} G_{\exists}$

密度: $\rho = \rho_{\exists}$

重力加速度: $g = g_{\exists}, j_x = H_x g_{\exists}, j_y = H_y g_{\exists}, j_z = H_z g_{\exists}$

其中 $X, \sum x, T_{xy}, H_x$ 等为无量纲常数, 这样柯西平衡方程就变为:

$$\frac{G_{\exists}}{L_{\exists}} \left[\frac{\partial \sum x}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial z} \right] = \rho_{\exists} g_{\exists} H_x$$

$$\frac{G_{\exists}}{L_{\exists}} \left[\frac{\partial T_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sum y}{\partial y} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial z} \right] = \rho_{\exists} g_{\exists} H_y$$

$$\frac{G_{\exists}}{L_{\exists}} \left[\frac{\partial T_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sum z}{\partial z} \right] + \rho_{\exists} g = \rho_{\exists} g_{\exists} H_z$$

要使上式变为无量纲形式, 必须满足条件:

$$\frac{G_{\exists}}{L_{\exists}} = \rho_{\exists} g_{\exists} \quad \text{即} \quad G_{\exists} = L_{\exists} \rho_{\exists} g_{\exists}$$

要使模型与客体相似，必须满足：

$$\frac{G_{\text{模}}}{G_{\text{客}}} = \frac{\rho g_{\text{模}} L_{\text{模}}}{\rho g_{\text{客}} L_{\text{客}}}$$

设长度相似因子 $C_L = \frac{L_{\text{模}}}{L_{\text{客}}}$ ；弹性模量相似因子 $C_\delta = \frac{\delta_{\text{模}}}{\delta_{\text{客}}}$ ；同理有密度相似因子 C_ρ ；重力加速度相似因子 C_g 。所以上式可以表达为：

$$C_\delta = C_\rho C_g C_L$$

这就是说明应力、密度、重力加速度、长度之间关系的相似条件。由于 $C_g = 1$ ，所以上式可以简化为：

$$C_\delta = C_\rho C_L$$

同理可以推导出其它一些基本的相似条件：

$$C_\eta = C_\rho C_L$$

$$C_\mu = C_\delta C_L$$

$$C_\delta = C_\rho = C_G = C_\tau = C_E$$

具体还可得出以下的一些相似条件：

(1) 有关弹性模量、密度、重力加速度、长度关系的相似条件：

$$C_G = C_\rho C_g C_L$$

(2) 有关粘度、应力和时间关系的相似条件：

$$C_\eta = C_G C_t$$

(3) 有关能量、应力和长度关系的相似条件：

$$C_u = C_G C_L^3$$

(4) 有关应力、强度、弹性模量关系的相似条件：

$$C_\sigma = C_\rho = C_G = C_E$$

$C_G = \frac{G_{\text{模}}}{G_{\text{客}}}$ 为剪切弹性模量相似因子；为杨氏弹性模量相似因子 $C_E = \frac{E_{\text{模}}}{E_{\text{客}}}$ ($E_{\text{模}}$ 为模型剪切弹性模量, $E_{\text{客}}$ 为研究对象客观剪切弹性模量, 以下类似)；

$C_\rho = \frac{\rho_{\text{模}}}{\rho_{\text{客}}}$ 为密度相似因子 C_ρ ；

$C_g = \frac{g_{\text{模}}}{g_{\text{客}}}$ 为重力加速度相似因子；

$C_L = \frac{L_{\text{模}}}{L_{\text{客}}}$ 为长度相似因子；

$C_\eta = \frac{\eta_{\text{模}}}{\eta_{\text{客}}}$ 为粘度相似因子；

$C_u = \frac{u_{\text{模}}}{u_{\text{客}}}$ 为能量相似因子；

$C_\sigma = \frac{\sigma_{\text{模}}}{\sigma_{\text{客}}}$ 为应力相似因子；

$C_p = \frac{P_{\text{模}}}{P_{\text{客}}}$ 为强度相似因子。

所有无量纲的值，如泊松系数、摩擦系数等，在确定相似条件时，不需经过比例变换，它们的大小在模型中和在自然界中是一样的。

以上所推导出的相似条件是适用于所有实验的最详尽最普通的条件,而对于某一个具体的实验,应用全部这些条件是没有必要也是不可能的,通常对于具体的实验根据实际情况进行简化。

二、单个实验的相似条件

在研究某一个具体实验的相似条件时,采用把重要因素分别模拟的原则(分离原则),就可以从研究中去掉某一方程或个别方程的某些项;另外,由于岩石的某些特征值研究不够,根据模拟的逼近原理,暂时不得不在模型上放弃一定数量的这些特征值的规定。由于以上这些原因,实际实验过程中相似条件可以大大简化。在多数情况下,我们所研究的是漫长地质历史过程中缓慢发展的构造变形,相似条件一般采取如下形式:

$$C_{\eta} = C_{\rho} C_L C_{\tau}$$

$$C_P = C_{\rho} C_L$$

由于在模拟实验过程中所采用的时间和尺度的相似因子很小,这样就决定了不可能用组成被模拟实体的岩石来制作模型,而必须采用其它粘性系数和强度特征都比岩石小得多的等效材料。

三、实验材料的基本确定方法

虽然以上第二种确定相似条件的方法是根据岩石变形力学方程(如描述应力、位移、变形、断裂之间关系的柯西平衡方程,描述岩石变形和物理性质随时间变化的蠕变方程、破裂过程的方程等等)推导得出,在数学上来看比较严格。但是,由于目前对在高温、长时间、低应变速率的构造变形条件下的岩石力学性质了解得还很不够,相关的力学方程中仍有很多不确定的参数,因此目前对相似条件还无法做到很精确,大部分情况下只能处于半定量状态,需要经过实验经验的归纳总结。故一般相似条件在实验相似材料的选择上作为一般性的参考(马瑾,1987)。最终以模型的构造形态变化达到与实际构造现象近似为主要判据。

通常模拟实验的1分钟相当于自然界中(10~100) Ma,故 $C_t = 10^{-11} \sim 10^{-13}$;通常, $C_g = 1$;实验材料与实际岩石的密度差异通常不大,故 $C_{\rho} \approx 0.5$;实验模型的比例尺通常在1:10000~1:1000000之间,故 $C_L = 10^{-4} \sim 10^{-6}$ 。

根据公式 $C_G = C_{\rho} C_{\kappa} C_L$,得 $C_G = 10^{-4} \sim 10^{-5}$ 间,同理根据 $C_{\sigma} = C_P = C_G = C_E$, $C_P = 10^{-4} \sim 10^{-5}$ 间。再根据 $C_{\eta} = C_G = C_L$,得 $C_{\eta} = 10^{-15} \sim 10^{-19}$ 间。已知岩石的弹性模量 $G = 10^4 \sim 10^5$ MPa (1 MPa ≈ 10 kg/cm²),抗剪强度 $P = 1 \sim 50$ MPa,粘度 $\eta = 10^{17} \sim 10^{22}$ 泊(马瑾,1987),故实验材料的 G 应为 $(10^{-2} \sim 1)$ MPa, P 应为 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ MPa, η 应为 $10^4 \sim 10^6$ 泊。加水粘土的 G 约在 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ 之间, P 在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ MPa 间, η 在 $10^4 \sim 10^5$ Pa 间,比较符合相似条件,是较好的相似材料,故是构造物理模拟的常用材料。此外,特定配方的硅胶、凡士林等也是合适的材料。

对于伸展构造的模拟,由于岩石的抗张强度通常较抗压及抗剪强度低近一个数量级,因此实验材料的强度需更低一些。按上述公式,应选择抗张强度为 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ MPa (10^{-6} MPa 只相当于 0.01 g/cm²) 的实验材料。松散石英砂的抗张强度接近于零,同时它的变形特性符合库仑准则,与地壳浅层次岩石的变形特性相同,因此是模拟地壳浅层次构造变形十分理想的相似材料,尤其适合作为伸展构造变形的模拟(McClay 等,1987,1990;Ellis 等,1988)。此外,各类沉积岩的抗张强度的差别小于 4 MPa(马瑾,1987),相应模型材料的强度差别应在 $4 \times 10^{-4} \sim 10^{-5}$ MPa (约 0.4 g/cm²) 左右,这点差别对于模型变形的影响可以忽略不计。因此,伸展构造的实验模型基本上可以不考虑不同岩性之间的强度差异问题。

第二章 构造物理模拟实验的研究历史与发展现状

第一节 研究历史

在很早以前,人们通过地质填图方法对构造的几何形态与地壳岩石变形的运动学特征等方面积累了许多感性知识。通过观察不同形式构造的变形特征,人们对于构造变形的过程和变形条件有了一定的了解,但这种了解仅仅基于某种推测。由于构造变形过程的长时性,人们所能见到的仅仅是地壳岩石构造变形的最终结果,却无法观察构造变形的整个过程,因而对构造变形过程的力学机理及许多重要的基本问题无法真正地理解。于是人们发明了构造物理模拟实验方法,用模型来再现构造变形,从而研究自然界中所观察不到的构造变形过程。

构造物理模拟实验的研究历史,最早可以追溯到上一世纪初,大致可以分为三个主要的发展阶段(格佐夫斯基,1975;马瑾,1987;曾佐勋等,1992)。

一、初始阶段

从19世纪初期至19世纪末,为物理模拟发展的初级阶段。当时,由于对岩石性质了解甚少,加上缺乏成熟的相似理论,实验中基本上不考虑相似条件。所采用的模型材料包括锌、铁、铝等金属材料,粘土、石膏、玻璃、肥皂、布料、纸等非金属材料,以及石膏、蜡、柏油、松节油的混合物等。这一时期的代表人物有Hall(1815)、Favre(1878)、Daubree(1879)、Cadell(1888)与Willis(1893)等。

最早,Hall(1815)采用多层布料与紧密粘土对相邻地块间的地槽沉积受水平挤压后的变形机制进行了模拟实验的研究。法国学者Daubree(1879)研究了玻璃薄板受扭转的破裂实验,证明节理组系的存在以及变形固体中剪裂面与张裂面的同时性,并对岩石劈理、裂隙、节理与褶曲等方面的实验进行了总结,他著的《实验地质综合研究》一书为该时期的代表作。但他采用金属板材作为褶皱模型材料,显然缺乏相似条件方面的考虑。Harker(1885)对劈理进行了研究。Cadell(1890)对叠瓦构造进行了模拟实验。德国的Reyer(1892)首次提出了由深部作用造成地壳隆起而形成斜坡,层状岩层沿斜坡发生重力滑动的理论,用以解释褶皱成因。Reyer除了按自己的重力滑动理论进行了褶皱模拟,还对香肠构造、雁行裂隙、地垒与地堑构造、放射状—同心圆状构造等进行了实验模拟,并对岩浆侵入与火山喷发的构造现象进行了模拟实验,特别是他第一次提出了构造模型相似条件的问题,认为用尺度和时间都比实际地质体小得多的模型来再现构造变形时,所使用的材料的粘度必须大大低于岩石的粘度。因此,他采用的模型材料多为湿粘土、粘土、石膏、糖浆、石膏与明胶的混合物、粘土夹胶冻层与各种粉末。美国地质调查所的Willis(1893)采用熟石膏作为硬层,蜂蜡作为软层组成实验地质模型,模拟了阿帕拉契亚山的褶皱作用,并通过模拟实验提出能干岩层不易褶皱和不能干岩层易褶皱。但在实验中,他需要给模型施加很大的上覆载荷,与阿帕拉契亚山区上覆情况不一致,说明他采用的实验材料还是太强硬。

总体来说,这一阶段属于构造模拟实验发展的初级阶段。在构造观点上,主要与地球的收缩假说相联系,在模型材料选择上,尚缺乏相似性方面的考虑。

二、重要阶段

20 世纪前半期,是模拟实验发展的重要阶段。Sheldon(1912)为验证剪节理与张节理面性质做了很多实验。Morath(1913)在他的博士论文中,将定量理论应用于构造模型,采用量纲分析来推算地质材料的强度因子,指出如果给定长度缩小因子,则强度也应按同样的因子缩小。Hobbs(1914)综合前人的资料并结合模拟实验对阿尔卑斯山的形成机制做了大量工作。Mead(1920)通过实验认为褶皱带的形成在很多情况下可能是受剪切作用形成的。Chamferlin 和 Shepard(1923)也做了褶皱的模拟实验研究。日本学者德田贞一(Tokuda,1926)用模拟实验对日本岛弧、马里亚纳弧等进行了研究。Sherrill(1929)通过实验证明,在同沉积褶皱中,背斜顶面的倾斜度是受下面埋丘的坡度所限制。德国的 Cloos(1930)用软泥做了许多实验,模拟了尺度较小的构造变形,由于符合相似原理效果很好,其中最成功的是对断裂机制的模拟,他也曾模拟过莱茵地堑、红海裂谷等,并认为造成这些地堑或裂谷是地球表面张力造成的等等。狄塞特尔(de Sitter,1956)用橡皮条、粘土、石蜡等做了实验,认为平行岩层的变短是产生同心褶皱的原因。随着构造物理模拟实验研究的不断深入,有关模拟实验中物理相似性的理论也不断得到完善。早在 1913 年,Koenigsberger 和 Morath 就致力于这方面的研究,Hubbert(1937)在前人研究的基础上加以发展,并在《应用于地质构造研究的尺度模型理论》一书中利用他的理论解释了一些现象,如地球虽然由强度很大的岩石组成,但从其变形来看,这些岩石却好象是很软弱的现象。他还提出,在模型中如果变形尺度被减少了百万倍,那么在介质密度不变的情况下,介质强度也应减少百万倍。认为用实验材料去模拟高温高压下的岩石,最重要的是粘度上的相似。美国的 Nettleton(1934,1941)和 Dobrin(1941)用柏油和糖浆做了有关盐底辟穹隆形成过程的实验,并对实验的物理相似性做了很好的解释,提出盐丘是由岩盐重力上浮流动形成的观点,这使模拟实验工作大大前进了一步。在前苏联,系统的模拟实验是由别洛乌索夫开始的,1944 年他在理论大地构造实验室进行了模拟实验。1949 年,苏联科学院地球物理研究所成立了构造物理实验室,对横弯、纵弯、香肠构造劈理等进行了实验研究。这些工作是在垂直力起主导作用的总观点下进行的。

在中国,构造物理模拟实验受到地质力学创始人李四光的高度重视。他将模拟实验作为地质力学工作方法的一个重要步骤,并亲自做了不少模拟实验方面的工作。在本世纪 20 年代末地质力学发展的初期,李四光从总结东亚地区的基本构造格架出发,提出了构造体系及构造型式的概念。当时他采用软化的描图纸(具有弹塑性)在刨光板上进行模拟实验,以论证一些典型构造型式的形成机制(Lee,1929)。1945 年,他采用泥巴实验方法,对地质力学的经典构造型式—山字型构造进行了专题研究(Lee,1945)。1948 年,他与陈庆宣、李铭德合作,进行了共轭剪切角的泥巴实验研究(Lee et al.,1948)。这一时期,在张文佑的研究工作中,也成功地利用了模拟实验方法(Zhang,1948)。

总的来说,在第二阶段,构造模型相似理论得到了很好的发展,并有意识地使用粘土、柏油、糖浆一类相似材料,做出了不少成功的实验。这一时期是模拟实验理论和实践发展的一个重要阶段,对构造地质学、构造物理学与地质力学的发展作出了重要贡献。但是,这一时期的实验工作仍然停留在形态相似的程度上的。

三、新的发展阶段

自本世纪 50 年代开始,模拟实验进入了一个新的发展阶段。一方面,模拟实验在不少国家得到广泛开展,另一方面模拟实验已不再满足于形态上的再现,而是不断朝定量化方向努

力。

1944年,前苏联在别洛乌索夫领导下组建了苏联第一个理论大地构造实验室,开始进行构造物理学研究。格佐夫斯基于1950进入苏联科学院地球物理研究所(后来的苏联科学院大地物理研究所)的构造物理实验室工作,格佐夫斯基和别洛乌索夫等在很大程度上决定了前苏联构造物理学的发展方向。他们在实验室内做出了不同类型的褶皱、断裂与香肠构造,并进行了各种影响因素的定量估计研究。对构造模拟实验的理论基础和实验方法进行了进一步的系统研究,将确定相似条件的“无量纲化方法”引入构造模拟研究。格佐夫斯基从1953年开始引进了光弹方法,分析了简单剪切和纵弯曲褶皱的应力分布,使构造模型的应力研究进入了定量分析的新阶段。在别洛乌索夫与格佐夫斯基(1965)合著的《实验构造地质学》一书中对这些发展进行了初步总结,并在1975年出版的《构造物理学基础》中对构造模拟实验的基本原则、相似条件、等效材料、用模型研究应力的光学方法等进行了详细论述。

进入50年代,美国学者继续开展盐丘构造模拟实验,Parker和McDowell(1955)在稍加改进的条件下重复了Nettleton和Dobrin所做的盐穹隆的实验。Currie(1956)研究了在隆起背景下地堑的形成过程。Bucher(1956)尝试模拟全球规模的地壳变形。Ramberg于1962年从美国芝加哥大学来到瑞典后,在Uppsala大学建立起了离心机构造实验室,实现了对模型的定量离心惯性力加载,对重力构造进行了独到的研究,取得了丰硕的成果,吸引了其它国家的实验地质学家到该实验室参观、访问、学习、进修与研究。Ramberg于1967年总结出版了《重力、变形和地壳的离心机模拟研究》一书,经过后来的修改与扩充,改书名为《重力、变形和地壳的理论、实验与地质应用》,于1981年出版了第二版。自该书问世以来,一直得到广泛引用,在国际上具有很大的影响。

60年代以来,国外在断裂构造(如Cloos,1968;Horsfield,1977;Davis等,1983;Naylor等,1986)、褶皱构造(如Currie等,1962;Johnson,1970;Ghosh等,1968)、区域构造(如Elmohandes,1981;Tapponnier等,1982)、底辟构造(Ramberg,1990;Vendeville等,1990)的物理模拟等方面,开展了大量工作。随着板块理论的兴起与发展,不少实验者利用流体力学实验建立地幔对流模型,如美国的Whitehead(1976),德国的Jacoby(1976),日本的Ito等(1983)。Dixon(1974,1975)在Ramberg实验室完成了构造模型有限应变测量的实验方法,这一方法使构造模型的变形分析进入了定量阶段。至今,Ramberg离心机构造模拟实验室还不断有新的实验成果问世(如Davison等,1993;Koyi等,1993;Koyi,1995,1997)。

进入50年代,我国的构造物理模拟研究工作也有较大的发展,中科院地质研究所、地矿部地质力学研究所、国家地震局地质研究所、中国地质大学以及其它一些地质院校等单位也开展了这一领域的积极探索。我国的地质力学获得了新生命并得到很大发展,《构造物理模拟大地构造体系复合问题》的重要论文中,在第八部分专门论述“从弹塑性物质实验结果论中国西北部构造体系所显示的运动方式”;黄汉纯(1959)以“几个模型实验”为题,进行了地质力学模拟实验的专门介绍;还有不少构造物理学家与构造地质学家进行了大量的模拟实验工作(马宗晋等,1965;马瑾等,1965;邓启东等,1966;黄庆华,1974;孙殿卿等,1980;张国铎,1981;王仁等,1982;潘秋叶等,1984;钟嘉猷,1988;沈淑敏等,1989;曾佐勋,1989,1991)。张文佑等(1985)还整理出版了《构造物理模拟实验图册》。除了从不同角度对不同的构造形迹或构造形式进行实验模拟外,我国对构造模型应力、应变与位移测定方法的研究方面也取得了可喜的成果。早在60年代,黄忠贤将应变花网格法用于构造应力场模型分析。1981年常志忠等