

碎屑物理模拟研究的理论与方法*

张春生¹, 刘忠保², 施 冬², 贾爱林³

(1. 成都理工学院石油系, 四川成都 610059; 2. 江汉石油学院地质系, 湖北荆州 434102; 3. 石油勘探开发科学研究院, 北京 100083)

摘要: 碎屑沉积体系的物理模拟是研究沉积过程的重要手段, 也是预测油气储集砂体分布的有效方法之一。沉积过程的相似性是物理模拟成败的关键, 为此模拟实验必须满足相似理论的基本要求。保持原型与模型沉积过程相似的基本理论是几何相似、运动相似及动力相似以及由此推导出的颗粒悬浮相似、颗粒运动相似和河床变形相似 3 个基本准则。某些相似条件在实验过程中不可能同时满足, 此时应考虑满足影响沉积过程的主要条件。符合实际的地质模型和物理模型的建立是正确开展物理模拟的基础。在模型指导下的实验方案的确定是模拟实验的主要环节。

关键词: 碎屑沉积体系; 物理模拟; 理论; 方法; 相似性

第一作者简介: 张春生, 男, 36 岁, 副教授(在读博士生), 沉积学、模拟实验

中图分类号: P588. 21 文献标识码: A

碎屑沉积模拟研究始于 19 世纪末, 至目前基本上可以划分为以下几个发展阶段。

(1) 19 世纪末至 20 世纪 50 年代是碎屑沉积模拟研究的初步阶段, 所用实验装置主要是玻璃水槽, 受理论水平及实验手段的限制, 该阶段的工作主要集中在表面现象的观察及描述方面^[1]。

(2) 20 世纪 60~ 80 年代是碎屑沉积模拟研究的大发展时期, 以水槽实验为主, 着眼于沉积构造及形成机理的定性研究, 有大量论文和著作问世^[2~ 4], 本阶段的研究成果为沉积学的发展奠定了坚实的基础。

(3) 20 世纪 80 年代后期以来, 碎屑沉积模拟侧重于湖盆砂体的定量模拟和沉积学的定量研究, 不仅用于解决理论问题, 同时注重解决实际问题, 与石油天然气的勘探开发结合起来, 形成了定量研究砂体沉积过程及演变规律、预测油气储集体分布的有效方法体系。

碎屑沉积模拟一般可分为物理模拟和数值模拟两个方面, 物理模拟是数值模拟的基础, 可以验证数值模拟的正确性, 数值模拟反过来可以有效地指导物理模拟, 使物理模拟具有一定的前瞻性。应

当说, 物理模拟与数值模拟是相辅相成的, 对实际问题的解决起到了相互促进的作用。本文仅讨论物理模拟的理论与方法。

1 理论基础

物理模拟的关键是要解决模型与原型之间相似性的问题, 也就是说, 实验模型在多大程度上与原型具有可比性是成败的标准。为此物理模拟实验必须遵从一定的理论, 这种理论可称之为相似理论。模型与原型之间必须遵守的相似理论包括几何相似、运动相似及动力相似。

1.1 几何相似

几何相似是指模型与原型的几何形状相同、原型和模型各对应部位的尺寸都成同一长度比例而言, 这是相似的必要条件。

规定原型值与模型对应值的比例称为模型比例。设 L_H 为原型某一部位的长度, L_m 为模型对应部位的长度, 则长度比尺为

$$\lambda_L = \frac{L_H}{L_m} \quad (1)$$

式中 H 代表原型, m 代表模型。长度比尺 λ_L 在原型和模型任何相应的部位都相同, 因此, 它既可以代表长度比尺, 也可代表宽度比尺和高度比尺。

有了长度比尺 λ_L , 就可以根据它引出面积比尺和体积比尺。因为面积是长度的平方, 所以面积比尺为

* 本文由国家重点基础研究发展规划项目(G1999022507)和中国石油天然气集团公司油气储层重点实验室项目(95- 109- 01- 12)联合资助。

收稿日期: 2000- 08- 14

$$\lambda_L = \frac{A_H}{A_m} = \lambda_L^2$$

同理, 因为体积是长度的三次方, 所以体积比尺为

$$\lambda_V = \frac{V_H}{V_m} = \lambda_L^3$$

长度比尺表征着几何相似, 也就是说几何相似是通过长度比尺 λ_L 来表达的。

1.2 运动相似

运动相似是指原型和模型水流各对应点的流速都成同一比例。设 V_H 为原型水流某一点的流速, V_m 为模型水流对应点的流速, 则流速比尺为

$$\lambda_v = \frac{V_H}{V_m} = \frac{\lambda_L}{\lambda_t} \quad (2)$$

式中 λ_t 为时间比尺。有了流速比尺 λ_v , 就可据此引出加速度比尺为

$$\lambda_a = \frac{a_H}{a_m} = \frac{\lambda_L}{\lambda_t} = \frac{\lambda_L}{\lambda_t^2} \quad (3)$$

另外还可引出其它与时间有关的物理量的比尺, 如角速度比尺, 运动粘滞性比尺, 流量比尺等。

对照几何相似, 可以看出, 运动相似多了一个时间比尺 λ_t 。也就是说, 运动相似是通过长度比尺 λ_L 和时间比尺 λ_t 二者来表达的。

1.3 动力相似

作用于水流的外力包括各种各样不同性质的力, 主要的外力有重力和粘滞力, 此外还有表面张力和弹性力等。

动力相似是指作用于原型和模型水流的各种不同性质的力都各自成同一比例。

例如作用于原型和模型水流各对应点的重力为 G_H 、 G_m , 粘滞力为 R_H 、 R_m , 则力的比例为

$$\lambda_F = \frac{G_H}{G_m} = \frac{R_H}{R_m} \quad (4)$$

因为 $G = \rho g V$, $R = L \rho \nu v$, 所以

$$\lambda_F = \frac{\lambda_m \lambda_L}{\lambda_t^2} \quad (5)$$

式中 λ_m 为质量比尺。有了质量比尺, 就可据此引出其它与质量有关的物理量比尺, 如密度比尺、重率比尺、动量比尺、能量比尺、功率比尺等等。

对照运动相似可以看出, 动力相似多了一个质量比尺 λ_m , 也就是说, 动力相似是通过长度比尺 λ_L 、时间比尺 λ_t 和质量比尺 λ_m 三者来表达的。

在原型和模型中, 同时符合几何相似、运动相似、动力相似的水流, 称为相似水流。

相似水流之间的各种比尺选择并不是任意的而应当受到力学规律的约束。作用于水流的各种不同性质的力, 都是企图改变水流运动状态的, 但水流具有惯性, 在外力作用下由惯性所引起的惯性力, 则是企图维持水流原有运动状态的反作用力。因此, 各种不同性质的力都应当受到牛顿第二定律的约束。

根据牛顿第二定律

$$F = m a = \rho v a \quad (6)$$

式中 ρ 为密度, v 为体积, a 为加速度。

于是得惯性力的比尺为

$$\lambda_F = \lambda_\rho \lambda_v \lambda_a = \lambda_\rho \lambda_L^2 \lambda_t^2 \quad (7)$$

各种不同性质的外力是一种力, 水流的惯性力也是一种力, 前者比尺为 λ_F , 后者的比尺为 λ_F 。为了达到水流相似, 这两类力的比尺必须相等, 否则就不能成为相似水流。然而由于各种外力的物理特性不同, 事实上是不可能达到完全相似这个要求的。因此, 只能根据对水流起主要作用的外力来确定其相似条件。例如, 以重力作用为主的水流原型与模型的重力比尺 λ_F 为

$$\lambda_F = G_H / G_m = \lambda_L \lambda_t^3$$

而水流的惯性力的比尺 λ_F 为(7)式。

从而由 $\lambda_F = \lambda_F$ 得

$$\lambda_L \lambda_t^3 = \lambda_\rho \lambda_L^2 \lambda_t^2$$

即 $\lambda_L^2 / \lambda_t \lambda_L = 1$ (8)

(8)式即为重力相似准则, 其意义为原型水流

的弗劳德数 $Fr_H = \frac{V_H^2}{g_H L_H}$ 与模型水流的弗劳德数

$Fr_m = \frac{V_m^2}{g_m L_m}$ 相等。由重力相似准则求出流速比

尺 λ_v 、时间比尺 λ_t 、流量比尺 λ_Q 等等。

以粘滞力作用为主的水流, 原型与模型的粘滞力比尺为 $\lambda_F = R_H / R_m = \lambda_L \lambda_\rho \lambda_v \lambda_t$, 而水流的惯性力比尺为 $\lambda_F = \lambda_\rho \lambda_L^2 \lambda_t^2$

由 $\lambda_F = \lambda_F$ 得 $\lambda_L \lambda_\rho \lambda_v \lambda_t = \lambda_\rho \lambda_L^2 \lambda_t^2$

即 $\lambda_L \lambda_t / \lambda_v = 1$ (9)

(9)式即为阻力相似准则, 其意义为原型水流

的雷诺数 $Re_H = L_H V_H / \nu_H$ 与模型水流的雷诺数

$Re_m = L_m V_m / \nu_m$ 相等。其中, ν 为运动粘滞系数,

λ_ν 为运动粘滞系数比尺, ν_H 及 ν_m 分别为原型水流及模型水流的运动粘滞系数, λ_ρ 为水流密度比

尺。由阻力相似准则可求出流速比尺 λ_v 、时间比

尺 λ 、流量比尺 λ_q 等等。

由下面的理论分析可知,河道水流必须同时满足重力相似和阻力相似才能保证原型水流与模型水流相似。

由水流运动的能量平衡方程得

$$\frac{dz}{dl} = \frac{d}{dl} \left| \frac{V^2}{2g} \right| + \frac{dh_f}{dl} \quad (10)$$

式中 $\frac{dz}{dl}$ 为单位重量的水体沿水流方向的重力分量, 简称重力项; $\frac{d}{dl} \left| \frac{V^2}{2g} \right|$ 为同一水体沿水流方向因位变加速度而产生的惯性分量, 简称惯性项; $\frac{dh_f}{dl}$ 为同一水体沿水流方向所受到的阻力, 简称阻力项。

方程(10)为水流运动的基本方程, 不仅原型中水流要满足该方程, 模型中的水流同样要满足该方程。由于重力相似应满足

$$V_H^2 / g_H L_H = V_m^2 / g_m L_m$$

即 $Fr_H = Fr_m$ (11)

由于阻力相似应满足

$$L_H V_H / \gamma_H = L_m V_m / \gamma_m \quad (12)$$

$$\text{即 } Fe_H = Fe_m$$

阻力相似具体体现在模型水流的水面线与原型水流的水面线相似。

上述分析表明: 要使原型水流和模型水流的动力相似, 必须同时满足重力相似和阻力相似, 二者缺一不可。

应用上述相似理论, 可以进一步推导出物理模拟的一系列相似准则, 最主要的相似准则包括:

(1) 悬浮相似准则

$$W_r = V_r \left(\frac{H_r}{L_r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

(2) 颗粒运动相似准则

$$\left\{ \begin{array}{l} (C_D - f_{CL})_r = 1 \\ \left(\frac{\rho}{\rho} - 1 \right)_r = 1 \\ (fgD / u_D^2)_r = 1 \\ \left(\frac{V_D D}{\gamma} \right)_r = 1 \end{array} \right. \quad (14)$$

(3) 河床变形相似准则

$$(t_1)_r = \frac{\beta_r H_r L_r}{q_{sr}} \quad (15)$$

式 13, 14, 15 中, 下标 r 为原型与模型中各物理量的比值; ρ 为水流密度; t 为时间; p 为应力; γ 为运

动粘滞系数; H 为水深; q 为单位长度内流进或流出的流量; W 为颗粒的沉速; C 为颗粒浓度; D 为颗粒直径; F 为摩擦系数; V_D 为深度为 D 处的流速; q_s 为单宽输砂率; β 为床沙干容重; $(t_1)_r$ 为河床变形的时间比尺。

模型与原型的几何相似、运动相似、动力相似等 3 个相似条件以及悬浮相似、颗粒运动相似和河床变形相似等 3 个准则就是开展物理模拟研究的基本原理。

2 实验方法

碎屑物理模拟一般都在实验装置内进行。国际上比较著名的实验装置隶属于不同的大学, 如日本筑波大学、英国 Leeds 大学、挪威 Delft 技术工程大学等; 国内比较先进的实验室是中国石油天然气集团公司沉积模拟重点研究室, 该研究室拥有先进的实验装置, 一流的检测手段, 近十多年来, 研究人员致力于碎屑沉积模拟的研究工作, 取得了良好的效果。碎屑沉积模拟的方法可概括为如下 7 个步骤。

2.1 确定地质模型

所涉及到的参数包括盆地的边界条件(大小、坡度、水深、构造运动强度、波浪、基准面的变化等)、流速场的条件(流量、流速、含沙量等)、入湖或海的河流规模及分布、沉积体系的类型、碎屑体的粒度组成等。

2.2 确定物理模型

由于自然界中形成沉积体系的控制因素较多, 确定物理模型的关键是抓住主要矛盾, 而忽略一些次要因素。好的物理模型应当反映碎屑沉积体系的主要方面。物理模型的主要内容是确定模型与原型的几何比尺与时间比尺、流场与粒级的匹配、活动底板运动特征以及模型实验的层次。

2.3 建立对比标准

实验开始前应确定每个层次的实验进行到何种程度为止, 是否进入下一个层次的模拟, 所以确定合适的相似比是重要的。

2.4 明确问题性质

应当明确沉积学基础问题的研究可以假设其它因素是恒定的, 而重点研究单一因素对沉积结果的影响, 但实际问题的解决往往是复杂的。各种因素之间是相互制约的, 因此必须考虑。一般应从沉积体系的范畴思考问题, 而不能仅从某个单砂体着

手就事论事。因为单砂体是沉积体系甚至是盆地的一部分。

2.5 确定实验方案

在物理模型的基础上,进一步细化实验过程,把影响碎屑沉积的主要条件落实到实验过程的每一步,特别应注意实验过程的连续性和可操作性。因为实验开始后一旦受到某些因素的影响而被迫中断,再重新开始时,该沉积过程是不连续的(除非在形成原型的过程中确实存在这种中断),流场的分布将受到较大影响,因此,实验开始前的充分准备是十分必要的。

2.6 适时进行监控

因为沉积模拟研究是对地质历史中沉积作用的重现,是对过程沉积学进行研究。所以沉积过程的详细记录和精细描述是必需的,只有这样才能深入研究过程与结果的对应性。江汉石油学院沉积模拟实验室采用的是对搬运沉积全过程录像的方法,监控碎屑沉积体系的生长形态及演变规律。

2.7 过程与结果的对应研究

实验完成后对沉积结果的研究一般可采用切剖面的方法,对碎屑沉积体任一方向切片建立三维数据库,并与沉积过程相对应,比较原型与模型的相似程度,从而对原型沉积时的未知砂体进行预测。目前已经做到的对比项目有相分布特征、厚度变化、粒度变化、夹层隔层的连通性及连续性、渗流单元的分布等。

3 局限性

3.1 尺度的限制

任何物理模拟实验装置由于受到场地及装置大小的限制,不可能无限制地扩大规模。如果原型的几何规模比较大,要想在室内实现模拟,只有缩小比例,而任何比尺的过度缩小,都将造成实验结果的失真和变形,导致原型与模型之间相似程度的降低。根据目前实验水平,一般 X 、 Y 方向的比例尺控制在1:1 000之内较合适。 Z 方向的比例尺控制在1:200之内比较理想。实验工作中,一般使 X 、 Y 方向比例尺保持一致,即选用正态模型,这种

模型的准确性较高。某些情况下,根据原型的形态特点, X 、 Y 方向的比例尺允许不一致,即选用变态模型,但二者比例尺相差不宜太大,否则容易造成实验结果的扭曲。

3.2 水动力及气候条件的限制

自然界碎屑沉积体系形成过程中,水动力条件非常复杂,有些条件在实验室内难以实现,如潮汐作用、沿岸流、水温分层、盐度分异,以及沉积过程中突然的雨雪气候变化等影响因素,这些都在一定程度上影响了实验过程的准确性。

3.3 模型理论的限制

在前述相似理论中,诸多相似条件有时并不能同时得到满足,而某个条件的不满足就可能导致实验结果在一定程度上的失真。例如,要使模型水流与原型水流完全相似,必须同时满足重力相似与阻力相似,但二者是一对矛盾;又如悬浮颗粒的运动,现有模型中关于沉降速度的相似条件有沉降相似和悬浮相似,很显然,二者也不可能同时满足。因此实验方案设计中,抽取起主要作用的因素就显得十分重要。

尽管碎屑沉积体系的物理模拟存在上述许多局限,但它在促进实验沉积学的发展、研究碎屑体系形成过程及演变规律、预测油气储集砂体的分布方面愈来愈显示出它独特的优势^[5,6]。

参 考 文 献

- 1 Allen J R L. Fining upwards cycles in alluvial successions[J]. *Geol J*, 1965, 4: 229~ 246
- 2 Bridge J S. Hydraulic interpretation of grain sized distributions using a physical model for bedload transport[J]. *J Sediment petro*, 1981, 51: 1 109~ 1 124
- 3 Best J L. Sediment transport and bed morphology at river channel confluences[J]. *Sedimentology*, 1988, 35: 481~ 498
- 4 Saunderson H C, Lockett F P J. Flume experiments on bedforms and structures at the dune-plane bed transition[J]. *Spec Publs Int Ass Sediment*, 1983, 6: 49~ 58
- 5 张春生, 刘忠保. 现代河湖沉积与模拟实验[M]. 北京: 地质出版社, 1997. 200~ 233
- 6 张春生. 歧北凹陷舌状砂体沉积模拟实验[J]. *石油与天然气地质*, 1995, 16(2): 178~ 184

(下转第307页)

参 考 文 献

- 1 邓晋福, 叶得隆, 赵海玲, 等. 下扬子地区火山作用深部过程与盆地形成[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1992. 155~ 156
- 2 丛良滋, 周海民. 南堡凹陷主动裂谷多幕拉张与油气的关系[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(4): 296~ 301
- 3 李思田. 沉积盆地的动力学分析——盆地研究领域的主要趋向[J]. 地学前缘, 1995, 2(3): 1~ 9

VOLCANIC ACTIVITIES AND RIFT-SUBSIDENCE CYCLES IN NANPU SAG

Dong Yuexia Zhou Haimin Xia Wenchen
(China University of Geosciences, Wuhan, Hubei)

Abstract: The Mg²⁺ contents of protomagma in Nanpu Sag are mainly 0.65~ 0.75. The incompatible elements of rare earth and trace elements are rich and compatible elements are deficient. This suggests that the protomagma was controlled by the fusion of upper mantle source rock. The structural sequences of stretch rift basin is usually composed of coarse grain sequence in the bottom, volcanic rock bearing sequence in the lower part, deep-water sequence in the mid part and filling sequence in the upper part. Nanpu Sag could be divided into 6 sequences accordingly. The third and fourth sequences controlled the distribution of the two main petroleum systems of the sag. The formation mechanism of the sag was related of the upwelling of the mantle, and was controlled by the evolution model of active rift.

Key words: volcanic activity; structural sequence; basin dynamics; mechanism; Nanpu Sag

(上接第 299 页)

controlled the distribution of Mesozoic volcanic rocks, the volcanic rocks on the west side of the fault developed well than that on the east side. Besides, the superiority of great depth of electromagnetic sounding was also used to probe the deep texture of the globe. The result suggests that the depth of high conductive layer of the mantle is about 60 km, and that the undulation of the asthenosphere show distinct mirror relation; the depth of intracrustal high conductive layer is about 20 km. This is the reflection of detachment zone formed in earth crustal extension.

Key Words: oceanic array magnetotelluric sounding; intracrustal high conductive layer; intramantle high conductive layer; principal fracture

(上接第 303 页)

THEORY AND METHOD OF PHYSICAL
SIMULATION IN CLASTIC SEDIMENTATION

Zhang Chunsheng¹ Liu Zhongbao² Shi Dong² Jia Ailin³

(1. Department of Petroleum, Chendu College of Technology, Chendu, Sichun; 2. Jiangnan Petroleum Institute, Jingzhou, Hubei;
3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing)

Abstract: Physical simulation of clastic sedimentary system is an important resort of studying sedimentary process, it is also one of efficient methods of forecasting oil-gas sandbody distribution. The similarity of sedimentary process is the key of physical simulation. So simulating experiment must suffice resemble theory. Basin theory keeping sedimentary process of model similar to that of prototype is geometry resemblance, kinetic resemblance, dynamic resemblance and three deduced basic rules such as grain suspend resemblance, grain kinetic resemblance, river bed transfiguration resemblance. Some resemblance conditions can not be content in experiment at the same time, the main conditions influencing sedimentary process should be content first. The establishment of geology and physical models according to actual condition is the foundation of correct physical simulation; the determination of experiment project based on the models is the main link of the simulation.

Key Words: clastic sedimentary system; physical simulation; theory; method; similarity