

地质构造物理模拟实验模型的相似分析

赵仕俊¹, 赵锡奎², 杨少春¹

(1. 中国石油大学 (华东), 山东 东营 257061; 2. 成都理工大学, 四川 成都 610059)

摘 要:把地质构造物理模拟实验模型抽象为动力相似问题进行讨论,用相似理论分析导出了地质构造物理模型的相似准则并给出了相似比,认为几何相似、动力相似、材料相似和边界相似是反映地质构造现象的主要相似条件,时间相似、运动相似和其他相似条件是反映地质构造现象的次要相似条件。地质构造物理模拟实验能够直观定性的解释基本的地质构造现象,有针对性地模拟特定的地质构造现象并给以定性分析解释。由于地质构造尺度的宏大,经历的久远和形变的复杂性,地质构造物理模型设计时几乎不可能完全满足相似原理的适用条件,因此,各种地质构造物理模拟实验还不十分令人满意。

关键词:地质构造; 物理模型; 模拟实验; 相似准则

中图分类号: P54 **文献标识码:** A

1 引言

构造物理模拟实验研究已经跨越了 100 多年的历史。James Hall 在 19 世纪初最早从事地质构造物理模拟实验研究。20 世纪 80 年代前后,美、英、德、法等地质学家相继开展了针对不同地层、各种构造、多种形式的构造物理模拟实验研究,取得了许多有价值的成果。我国地质学家李四光、张文佑在 20 世纪 40 年代前后进行了构造物理模拟实验研究。1955 年初,以钟嘉猷为主在中国科学院地质研究所正式建立了构造物理模拟实验室,相继开展了多种材料、不同形式和方法的实验研究,代表了我国目前从事地质构造物理模拟实验研究的先进水平^[1]。构造物理模拟实验方法包括光弹模拟、离心机模拟和常规重力模拟。无论是那种类型的实验都必须讨论物理模型的相似性问题。笔者把地质构造物理模拟实验模型抽象为动力相似问题进行讨论,用相似理论分析导出了地质构造物理模型的相似准则和相似比,讨论了相似参数的有关问题,所得的结论可供同行参考,谬误之处恳请同行指正。

2 地质构造物理模型的相似分析

2.1 相似理论介绍

模型实验方法,是以相似理论为根据建立模型,通过模型实验得到某些量之间的关系和规律,然后再把它推广到实际对象上。由于采用了模型试验方法,因而,其实验结果可能推广应用到与之相似的所有对象,并且能够研究直接实验无法进行的对象以及在装备设计制造前要求研究的对象。

物理模拟的关键是模型与原型之间的相似性问题。实验模型在多大程度上与原型具有可比性是模拟实验成败的重要判据。因此,物理模拟实验必须遵从相似理论。

相似第一定理:凡彼此相似的现象,必定具有数值相同的相似准则。由相似的概念知,现象的相似,是具有同一特性的现象中,表征现象的所有量,在空间中相对应的各点和时间上相对应的各瞬间,各自互成一定的比例。

相似第二定理:凡具有同一特性的现象,当单值条件彼此相似,且由单值条件的物理量所组成的

收稿日期: 2005-08-18; 修回日期: 2005-09-23

基金项目: 中国石油大学 (华东) 211 工程建设项目重点课题 (石大 211-0217ZY)

作者简介: 赵仕俊 (1957-), 男, 四川南部县人, 硕士生导师, 高级工程师, 现从事地学计算机应用技术研究。

相似准则在数值上相等,则这些现象必定相似。这是做模型实验必须遵守的条件或法则,也称模型法。根据相似第二定理,我们用模型与原形相似准则相等的关系式,可求得模型实验遵守的条件。

相似第三定理:当一现象由 n 个物理量的函数关系来表示,且这些物理量中含有 m 种基本量纲时,则能得 $(n-m)$ 个相似准则;描述这一现象的函数关系式,可表示成 $(n-m)$ 个相似准则间的函数关系式。相似第三定理亦称定理。根据相似第三定理,可以把模型实验结果整理成相似准则间的函数式,以便把模型实验结果逆推到原形中去^[2]。

相似理论以相似三定理为主要内容。在一个力学系统中,有几何相似、时间相似、运动相似、动力相似和应力场相似等几种相似现象。根据相似的概念,表征现象的所有量间的关系,必服从同一自然规律,最直接的量间关系即是相似倍数。把相似倍数式代入描述相似现象的方程式中,于是得到相似指标式。这样,相似的现象它们的相似指标等于 1。所以,各相似倍数不能都是任意的,它们间的关系由相似指标式联系着。把相似倍数式代入相似指标式中,于是得到在各相似系统间数值都相同的一种综合量,这个综合量称为相似准则。对于靠数学分析无法求解的复杂现象的方程组,可通过模型实验求解。通过实验建立起的对一切彼此相似的现象都适用的相似准则关系式,只有在实验所确认的各物理量变化范围以内才可以应用,把这种关系式推广到此范围以外是不允许的。

2.2 物理模型相似准则导出

在地质构造物理模型的相似分析中,我们把它抽象为动力相似问题进行讨论,采用量纲分析方法讨论动力相似问题,描述动力相似现象的物理量的函数为

$$f(\sigma, \delta, P, t, Z, \rho, L, E) = 0 \quad (1)$$

式中 σ 为应力, δ 为挠度, P 为集中力, t 为时间, Z 为摩擦系数, ρ 为密度, L 为任一线性长度(包括长、宽和高), E 为弹性模量。

Π 项的指数式为

$$\Pi = \sigma^a 1 \delta^a 2 P^a 3 t^a 4 Z^a 5 \rho^a 6 L^a 7 E^a 8$$

列出量纲矩阵,写出指数的联立方程组求解,可得到动力相似问题的相似准则,即

$$\left. \begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{\sigma}{E} & \Pi_2 &= \frac{\delta}{L} & \Pi_3 &= \frac{P}{EL^2} \\ \Pi_4 &= \frac{t}{L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} & \Pi_5 &= Z \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)是动力相似问题的最基本的相似准则,由此可以导出一系列相似准则来。

2.3 物理模型的相似条件

模型的几何相似、时间相似、运动相似、动力相似和材料相似等相似准则导出如下。由式(2)中 Π_3 、 Π_4 , 代入相应的相似倍数得

$$C_P = C_E C_L^2 \quad (3)$$

$$C_t = C_L \frac{\sqrt{C_\rho}}{\sqrt{C_E}} \quad (4)$$

C_P 为力相似倍数, C_ρ 为密度相似倍数, C_E 弹性模量相似倍数, C_t 为时间相似倍数, C_L 为几何相似倍数。

式(4)指出,当模型材料选定,即 C_ρ 、 C_E 被确定,几何相似倍数 C_L 确定后,则时间相似倍数 C_t 便由式(4)的关系所确定,不能再任意选取。同样式(3)指出,这时力的相似倍数 C_P 也被确定。由上可见,在动力相似模型实验中,模型材料、几何相似倍数、力相似倍数以及时间相似倍数 4 个量,其中只有两个可以任意选取,另两个则随之而定。进一步分析表明,模型实验遵守这些条件时,模型与原形在惯性力和弹性力方面是相似的,模型与原形在惯性力和重力方面是不相似的。

有了最基本的相似倍数关系式(3)和(4)式后,描述动力相似的其他物理量的相似倍数便可导出,如:

$$\text{频率相似倍数 } C_f = \frac{1}{C_t} \quad (5)$$

$$\text{速度相似倍数 } C_v = \frac{C_L}{C_t} \quad (6)$$

$$\text{加速度相似倍数 } C_a = \frac{C_L}{C_t^2} \quad (7)$$

$$\text{边界摩擦系数的相似倍数 } C_z = \frac{C_E C_\rho}{C_L} \quad (8)$$

3 构造物理模拟实验模型的相似关系

3.1 几何相似

几何相似是地质构造物理模拟实验设计首先要

考虑的问题。所设计的模型尺寸不仅要满足通过实验得到的几何变形量能够清楚的反映相应的地质构造现象,同时还要便于仪器的加工装配,实验操作。因此,一般把模型最大尺寸限定在 100~1 000 mm 内,其几何相似比取 $C_L=1.5\times 10^7$,相当于自然条件下研究区的展布范围约为 1 500~15 000 km。

几何相似也包括组合相似,指在制作实验模型时,在模型中组合不同性质的材料,使之近似于野外的实际情况。岩石微观结构上存在着不均一性,而宏观上不均一性也很多,在不同层序组成的构造中,尤其是不同性质的岩性组成的叠层,其形变常是各具特色的。在大区域上则常由大地构造单元为背景,在垂向上和平面上都可进行详细的划分。如区域构造在垂向上组合的变化,也就是深层与浅层的组合、基底与盖层的组合及各圈层的组合。

3.2 材料相似

构造物理模拟的实验材料是多样化的。按材料的力学性质可分为脆性材料、弹塑性材料和塑性材料。物理模拟实验的结果与真实的地质构造现象的吻合程度跟模拟实验选用的材料有很大的关系。一般将尚未变质的沉积岩层中的褶皱(尤其原生构造)看作是塑性形变即成岩过程中的形变结果,沉积岩层中的肠状构造、背斜顶部的加厚现象都看作是塑性形变的结果。在变质岩石中的流动构造(包括流褶皱、流劈理、肠状构造等)一般常被看作是粘塑性或塑性状态下的产物,并受高温高压作用的影响。在自然界岩石形变现象中或实验室内的模拟过程,都可观察到具有弹性、塑性、脆性 3 种属性的形变现象。

在选择实验材料时,除了研究岩石本身的物理力学性能和形态变化特征外,还要研究岩石的成岩历史、岩相在横向和纵向上的变化。深入研究实验材料的相似特性,是追求构造物理模拟最大相似的一个重要研究内容。

3.3 时间相似

时间相似是指在进行模拟实验时所用时间与地质构造形变过程的时间的近似,一般所采用的时间相似比 $C_t=2.15\times 10^4\sim 6.80\times 10^9$,表示物理模拟实验中的 1 h 约相当于自然条件下的 2.5~776 000 a。时间相似比还可以提高,但对实验装置的动力驱动的极低速性能要求也相应的提高。

通常实验过程大多数是在几分钟内完成的,也

有的多达几小时至几十小时。速度相似比 $C_v=698\sim 0.0022$,若边界的推进速度约为 50 mm/a,按照速度相似比 C_v 推算,相当于模型中的推进速度约为 0.000 008 2~2.6 mm/h。在地质构造模拟实验中,如果不考虑时间的因素,从形变状态来决定它的快慢,那么同一性质的材料,由于实验时间的不同,却可得到完全不同的结果。对于大多数材料,在缓慢的作用力下可产生塑性形变,而快速挤压下则可成为脆性形变。

3.4 动力相似

不论在野外还是在实验室,一种构造形式或一个实验模型所反应的形态变化,都可以认为是受了力的作用的结果。对于实验中的一个实验模型来说,通常是如水平挤压、垂向压力、剪切作用或几种力量的联合作用,力的作用形式容易判断,其作用过程和力的大小是可以测量和记录的。绝大多数的构造形式都可以看作是一个低速缓慢的过程,可以通过实验测得的作用力的大小和相似系数推算所模拟的构造变形力的大小,但事实上还是不能完全认为这个力就是实际引起构造变形的力。

3.5 边界相似

边界相识是模拟实验中的一个重要相似条件,要做到真正相似尤其困难,因为原型的边界条件几乎就无法准确界定,实验中只能取简化的边界相似条件。如对于某一构造的模拟伸展/挤压实验,若长度相似比 $C_L=1.5\times 10^7$,模型长度 $D=160$ mm,宽度 $b=20\sim 24$ mm,若延性层厚度 $hd=7\sim 12$ mm,脆性上层厚度 $hb=0.3\sim 0.7$ mm,这相当于自然条件下研究区的展布范围约为 2 400 km,驱动边界长度为 300~360 km,岩石圈延性层和脆性上层的厚度分别约为 105~180 km 和 4.5~10.5 km;强度相似比 $C_\sigma=2.27\times 10^7$,若上部地壳强度按平均 100 MPa 取值,则模型中上层脆性材料的强度要求为 4.41 Pa。

4 构造物理模拟实验相似问题的讨论

从国内外学者所做的各种构造地质物理模拟实验研究来看,他们都是针对所研究的某一地质构造,设计相应的实验模型,通过理想化的实验方法得到可以与之对比的实验结果,然后用这个结果来解释说明所研究的地质构造^[1,3~8]。显然,不能将所得结

论上升到普遍原则。

构造地质学是以地质力学为理论基础。我们应在地质力学的理论指导下,分析各种不同的复杂的地质构造现象,抽象出基本的简约的地质构造模型,建立对应的力学模型,用这些基本的模型实验来推演各种不同的复杂的地质构造现象。就目前的情况来说,所做的各种地质构造物理模拟实验并不十分令人满意。其原因在于我们对地质构造物理模拟实验能够解决的问题期望值过高,并且,地质构造物理模型设计时几乎不可能完全满足相似原理的适用条件。这并不意味着贬低我们所做的各种地质构造物理模拟实验的科学价值,也不否定相似原理作为地质构造物理模拟实验设计的理论指导地位,是地质构造尺度的宏大、经历的久远和形变的复杂所使然。

我们在做地质构造物理模拟实验设计时要强化反映地质构造本质特性的主要相似条件,弱化那些反映地质构造一般现象的次要相似条件,并对地质构造物理实验在构造地质学研究中的作用和所能解决的问题有一个合理定位。我们认为,几何相似、动力相似、材料相似和边界相似是反映地质构造本质的主要相似条件,时间相似、运动相似和其他相似条件是反映地质构造现象的次要相似条件。地质构造物理模拟实验能够直观定性的解释基本的地质构造现象,有针对性模拟特定的地质构造现象并给以定性分析解释。地质构造物理模拟实验要做到精确的定量模拟还有很长的路要走。

致谢:在本课题的研究中,中国科学院地质与地球物理研究所钟嘉猷教授,石油大学刘泽容教授曾给予悉心指导,在此向他们表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 钟嘉猷. 实验构造地质学及其应用 [M]. 北京: 科学技术出版社, 1998.
- [2] 姜启源. 数学模型(第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [3] 李建国, 周永胜, 宋瑞卿, 王绳祖. 岩石圈塑性流动网络与多层构造变形的物理模拟[J]. 地震地质, 1997, 19(3): 248-257.
- [4] 周永胜, 李建国, 王绳祖, 等. 用物理模拟实验研究大陆伸展构造 [J]. 地震地质, 2002, 8(2): 141-147.
- [5] Wu H, Pollard D. An experimental study of the relationship between joint spacing and layer thickness [J]. Journal of Structural Geology, 1995, 17(6): 887-905.
- [6] Gutscher M, et al. Cyclical behavior of thrust wedges: insights from high basal friction sand box experiments [J]. Geology, 1996, 24(2): 135-138.
- [7] An L J, Sammis C G. Development of strike-slip faults: shear experiments in granular material and clay using a new technique [J]. Jour of Stru Geo, 1996, 18(8): 1061-1077.
- [8] Shemenda A I. Subduction: Insights from Physical Modeling [M]. London: Kluwer Academic Publishers, 1994.

Similar analysis of geological structure physical model

ZHAO Shi-jun¹, ZHAO Xi-kui², YANG Shao-chun¹

(1. China University of Petroleum, Dongying 257061, China;

2. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Using the means of similar analysis, this paper derives such similar standard and ratio as geometric similar, time similar, dynamic similar, movement similar, and material similar with geological structure physical model, discusses the experimental model, means, materials and the boundary condition of geological structure physical modeling experiment, points out that they might simulate various complex geological structure patterns with different materials under the definitive boundary condition. The author thinks that the geometric similar, dynamic similar, material similar and boundary similar are primary similar condition reflecting essential properties of the geological structure, but the time similar and

movement similar are secondary similar condition reflecting its appearance properties. It is difficult to demand the geological structure patterns physical model to whole satisfy the similar condition, because geometric dimension of geological structure is immense, its elapsed time is too long and its structure deformation is considerably complex; therefore, the people are not satisfied with the results of geological structure physical modeling experiment yet.

Key words: geological structure; physical model; modeling experiment; similar principle

《西北地质》投稿约定

1. 本刊已采用电脑排版, 欢迎以软盘形式投稿(方正、WPS、Word 纯文本文件均可)。来稿要求寄一份激光打印纸质样和一份与稿件对应的软盘, 图件一律采用 corel DRAW 8 或 10 绘制。否则, 本刊无法采用。图件请另外打印一份, 如果文中插图过小, 请另外打印一份大样, 以字迹清晰可辨为宜。论文打印稿不要太密, 应留出一定的行距, 以便审查和编辑稿件。

2. 作者投稿时应声明稿件专投本刊, 且未正式发表, 切忌一稿多投, 违反者责任自负。稿件投出两周后, 作者可打电话询问。因邮箱容量有限, 为保证其他的邮件畅通, 请不要网上投稿, 以免影响稿件的及时发表。

3. 编辑部在收到稿件 3 个月之内将予以答复。来稿一年之内(以收稿邮戳为准)未被刊用的稿件, 请作者自行处理。收到编辑部答复的作者, 按约定不得一稿多投, 稿件决定录用后收取一定发表费。编辑部不处理退稿, 请作者自留底稿。

4. 请另附纸张提供作者详细的通讯地址、电话或手机、E-mail 等, 并提供 3~5 位较高水平的审稿人的通讯地址、电话或手机、E-mail 等, 供编辑部参考。

5. 作者投稿不符合本刊要求者, 本刊将退请作者修改、补充, 并以稿件符合本刊要求的来稿时间作为投稿日期。

6. 来稿在语言文字、专业术语、国家标准、行业规范及国家机密等方面请作者务必仔细斟酌, 稿件一经发表, 文责自负, 编辑部不负连带责任。

7. 本刊现为纸质版—光盘版—网络版三位一体的出版模式, 凡本刊刊用的稿件, 其作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给。如作者不同意入编光盘版及网络版, 请在来稿时声明, 否则将视为同意。

8. 编辑部对来稿有权作技术性和文字性修改, 实质性内容修改将征得作者同意。来稿一经发表, 按篇酌付稿酬, 并赠送当期刊物。

9. 作者在收到稿件修改意见后, 务必抓紧时间尽快修改。同时, 请尽量参考《西北地质》的相关论文, 并将原稿、修改稿、修改后的软盘一并快速寄回编辑部。

10. 来稿务必写清楚详细通讯地址及工作单位, 并留下联系电话, 以便及时与作者联系修改稿件、寄发稿酬及赠送期刊等事项。作者在投稿的过程中若工作单位有变动, 敬请迅速通知编辑部, 以便随时与作者取得联系。作者若地址不详或电话不准确, 导致编辑部无法联系, 将会影响稿件的发表。

邮 编: 710054

地 址: 西安市友谊东路 166 号

单 位: 西安地质矿产研究所《西北地质》编辑部

电 话: (029) 87821951

E-mail: xbdz@cgs.gov.cn

网 址: www.xian.cgs.gov.cn, 打开网站主页后, 再点击右上方的《西北地质》栏目即可。