

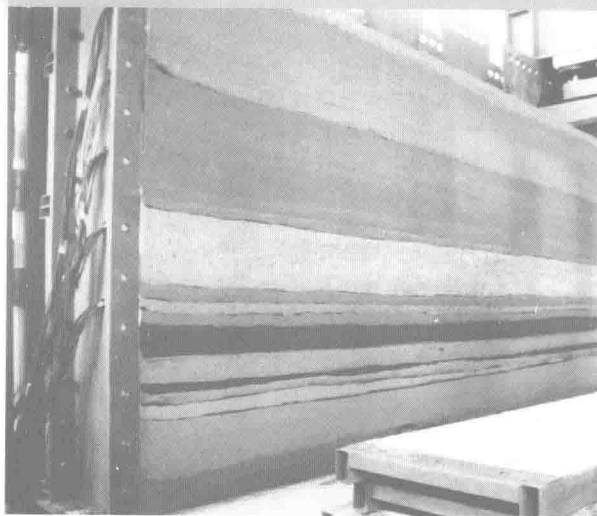
国家科技支撑计划课题资助 (2013BAB10B06)



相似模拟及其 在盾构施工煤矿 斜井中的应用

杜彬 刘保国 编著

清华大学出版社



相似模拟及其 在盾构施工煤矿 斜井中的应用

杜彬 刘保国 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统介绍了模型试验的相似理论、相似材料性质及配比、试验装备、加载及测试系统、大体积模型铺设工艺等方面新的成果,以及这些新成果在盾构施工煤矿长距离斜井、煤层开采对盾构斜井稳定性影响模拟试验中的应用。内容主要包括基本相似理论及地下工程模型试验相似条件;基于不同配比相似材料试件的正交试验提出的相似材料配比经验计算方法;相似材料物理力学特性及影响因素;模拟含水地层特性的新型相似材料配比确定;伺服电机多头加载三维模型试验台及其测量控制系统研制;盾构机掘进煤矿斜井、预制管片支护、煤层开采对斜井稳定性影响的相似模拟试验方法及结果分析,煤层开采引起含水层疏排放对地层沉降变形和斜井稳定性影响的相似模拟方法及结果分析。本书在伺服电机驱动加载、基于原型物理力学参数和相似比定量确定、相似材料配比、盾构掘进与管片支护模拟、含水地层疏排水相似模拟方面进行了新的探索,对于地下工程、采矿工程中的相似模拟研究有一定参考价值。

本书可供从事隧道与地下工程、采矿工程领域科研和工程技术人员参考,也可作为高等学校相关专业研究生教学参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

相似模拟及其在盾构施工煤矿斜井中的应用/杜彬,刘保国编著. —北京:清华大学出版社,2016

ISBN 978-7-302-43761-1

I. ①相… II. ①杜… ②刘… III. ①模型试验—应用—地下采煤—斜井开拓—盾构法—研究 IV. ①TD823.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 089758 号

责任编辑:秦 娜
封面设计:陈国熙
责任校对:赵丽敏
责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170mm×240mm 印 张:16.75

字 数:328 千字

版 次:2016 年 11 月第 1 版

印 次:2016 年 11 月第 1 次印刷

定 价:80.00 元

产品编号:069749-01

自 20 世纪 30 年代提出相似模拟方法以来,相似材料与相似模拟一直是研究复杂问题的最重要手段,尤其在矿山、水利、地下工程等领域得到了广泛应用。随着计算机技术的快速发展,数值模拟方法因其快速、便捷、省时省力,一定程度上代替了相似模拟成为研究复杂问题的主要手段。然而,数值模拟是在已知研究对象本构方程、边界条件和输入参数的情况下才能输出正确的结果,而对于复杂的岩土体及其人类工程活动,想要准确知道本构方程、边界条件和输入参数,目前来看是非常困难的。因此,在各种数值模拟方法快速发展的今天,相似模拟依然有不可替代的优势。目前,相似理论已经比较完善,相似模拟的关键问题是在相似理论指导下如何保证原型与模型的相似,对于工程扰动下地质体的受力、变形和破坏规律的相似模拟,相似材料原料及其配比的选取是达到相似的关键,在这一方面,已出版的相关书籍均有所论述,但多采用试凑的办法,或列举出不同配比相似材料力学特性供选择。随着人类工程活动中新技术的应用,如何采用相似模拟方法开展相关研究也提出了新的课题,如利用盾构法掘进煤矿斜井的模拟,煤层开采引起的含水层水疏排放的模拟等。本书是在完成国家科技支撑计划课题“煤层开采对斜井管片结构稳定性影响规律研究”(课题编号:2013BAB10B06),总结相似材料与相似模拟方面新成果的基础上编撰完成的。

统观全书,与同类已出版的著作比较,本书具有以下特色和创新:

系统介绍了模型试验的相似理论;在不同配比相似材料试件正交试验的基础上,提出了基于原型材料密度、单轴抗压、抗拉强度和弹性模量的相似材料配比定量计算方法;研制了可模拟含水地层特性的新型相似材料,并提出了相似材料配比的定量确定方法;系统介绍了模型试验台的类型、加载方法,试制了伺服电机多点加载三维模型试验台及其测量控制系统;提出了盾构机掘进煤矿斜井、预制管片支护、煤层开采的模拟试验方法,以及煤层开采引起含水层水疏排放对地层沉降变形和斜井稳定性影响的模拟试验方法。

该书的出版丰富了相似材料与相似模拟的方法和手段,尤其是在相似材料配

比的定量确定、煤矿斜井掘进与支护模拟、煤层开采模拟、含水层水疏排放模拟方面。相信本书对相似材料与相似模拟的方法及其在矿山中的应用有很好的借鉴作用。为此作序,不足之处请广大读者指正。

2016 年冬于北京交通大学



神华集团新街台格庙矿区煤炭资源储量 138 亿 t, 是我国西部神东煤炭基地周边唯一待开发的特大型整装煤田, 是“十二五”规划国家大型煤炭基地建设的重点项目。新街矿区煤矿采用斜井开拓方式, 新建斜井从地表穿越第四纪松散层和白垩纪、侏罗纪不同性质砂岩层, 以 6° 倾角到达首采煤层 3-1 煤, 落底埋深近 700m, 斜长 6558m, 井筒净直径 6.6m, 采用盾构机掘进、预制钢筋混凝土管片拼装支护。这一全新的煤矿长距离斜井建设方式在我国煤矿建井史上属于首次, 建成的斜井井壁结构不同于传统的井壁结构, 相对于传统整体浇筑钢筋混凝土井壁具有厚度小、管片与管片之间和环与环之间螺栓连接、胶条防水等特点。这种新型的斜井井壁结构在投入运营后的适应性和长期稳定性如何, 煤层开采带来的上覆地层垮塌、开裂导致的含水层水疏排放对斜井安全稳定运行有何影响, 如何留设斜井合理保护煤柱等一系列问题需要进一步研究。本书即在此背景下, 依托国家科技支撑计划课题“煤层开采对斜井管片结构稳定性影响规律研究(2013BAB10B06)”的主要研究成果, 详细介绍了模型试验的相似原理、相似材料物理力学特性及其配比确定方法、相似模型试验装备研制和测试仪器、模型试验设计与制作等基本内容, 以及煤层开采对盾构斜井稳定性影响模型试验和开采引起地层疏排水对盾构斜井稳定性影响模型试验等专题研究成果。其中试制的大尺寸、多功能、伺服电机多点加载模型试验台获得国家发明专利, 在相似材料配比方法、煤层开采引起地层疏排水模拟方法等方面具有一定的创新性。本书为相似模型试验及其在矿山中应用的专业书籍, 可作为矿山、土木、水利等行业模型试验研究方法的专业参考书, 也可作为高校研究生教学的参考书。

本书共分 6 章。第 1 章介绍了模型试验的相似理论; 第 2 章介绍了模拟岩石的相似材料原料及其配比确定方法, 在正交试验基础上提出了确定相似材料配比的经验公式; 第 3 章介绍了相似材料本身的物理力学特性及其影响因素; 第 4 章介绍了模型试验设备和模型设计制作方法; 第 5 章介绍了煤层开采对盾构斜井稳定性影响的平面和三维模型试验成果; 第 6 章介绍了地层疏排水对盾构斜井稳定性影响的试验成果。

本书第 1、4 章由刘保国撰写, 第 2、5 章由史小萌、元轶撰写, 第 3 章由任大瑞

撰写,第6章由张磊、储昭飞撰写,全书由杜彬、刘保国统稿。

本书的研究成果和出版得到国家科技支撑计划课题(2013BAB10B06)、神华集团有限责任公司项目(GJJT-13-01-06)的大力资助,作者在此深表谢意!另外对参加本书模型试验的研究生崔增辉、谢丹、高丽君、薛建设、杨新伟、张杰等也表示感谢!

本书的研究成果得到神华集团有限责任公司顾大钊院士、南清安教授级高级工程师、卓卉高级工程师,神华神东煤炭集团有限责任公司杨俊哲教授级高级工程师、武子生教授级高级工程师,北京交通大学项彦勇教授的大力支持和帮助,在此一并表示衷心感谢!

由于作者水平所限,书中难免疏漏和欠妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2016年6月

第 1 章 相似理论	1
1.1 基本概念	1
1.1.1 几何相似	1
1.1.2 相似现象	1
1.1.3 相似常数	2
1.1.4 相似指标	2
1.1.5 相似准则	3
1.1.6 原型与模型	4
1.2 相似三定理	4
1.2.1 相似第一定理	4
1.2.2 相似第二定理	4
1.2.3 相似第三定理	5
1.3 相似准则的推导	5
1.3.1 相似转换法	5
1.3.2 因次分析法	7
1.3.3 矩阵法	9
1.4 模拟试验的相似条件	11
1.4.1 现象分析	11
1.4.2 几何相似条件	12
1.4.3 应力-应变关系相似条件	12
1.4.4 应力相似条件	13
1.4.5 变形相似条件	14
1.4.6 边界相似条件	15
1.4.7 破坏相似条件	16
1.4.8 时间相似条件	17

第 2 章 岩石相似材料及配比确定方法	19
2.1 相似材料配比的表示方法	19
2.1.1 胶结材料加水	19
2.1.2 单一胶结材料	19
2.1.3 两种胶结材料	20
2.1.4 多种胶结材料	22
2.2 相似材料原料的性质及选择	22
2.2.1 相似材料原料选择的原则	22
2.2.2 胶结材料	23
2.2.3 充填材料	25
2.2.4 添加剂	25
2.3 相似材料配比正交试验方法	27
2.3.1 正交试验设计方法概述	27
2.3.2 正交试验设计常用概念	27
2.3.3 正交试验设计方法	28
2.3.4 试验结果的数据处理	29
2.4 水泥、石膏、碳酸钙胶结相似材料配比确定方法	36
2.4.1 相似材料原料	36
2.4.2 正交试验设计	38
2.4.3 试件制备方法	39
2.4.4 试件物理力学试验	39
2.4.5 试验结果分析	42
2.4.6 相似材料配比确定方法	48
2.5 含水地层相似材料配比确定方法	49
2.5.1 相似材料原料	49
2.5.2 正交试验设计	50
2.5.3 试件制作	51
2.5.4 物理力学试验	51
2.5.5 试验结果分析	54
第 3 章 相似材料的物理力学性质	62
3.1 相似材料制备	62
3.1.1 相似材料制作工艺	62
3.1.2 相似材料试件制备	66

3.1.3	相似材料模型物理力学参数的测定	68
3.2	相似材料的物理力学特性	69
3.2.1	石膏胶结相似材料	70
3.2.2	水泥胶结相似材料	76
3.2.3	石蜡、凡士林胶结相似材料	79
3.2.4	塑料胶结相似材料	81
3.2.5	其他胶结剂制作相似材料	83
3.3	影响相似材料物理力学特性因素分析	83
3.3.1	胶结材料的影响规律	84
3.3.2	充填材料的影响规律	89
3.3.3	添加剂的影响规律	90
3.3.4	用水量的影响规律	93
3.3.5	含水率的影响规律	93
3.3.6	相似材料的尺寸效应	97
3.3.7	相似材料的温度效应	106
3.3.8	相似材料的动力学效应	109
第4章	相似模型试验装备与模型设计制作	113
4.1	相似模型试验台	113
4.1.1	试验台主体结构	114
4.1.2	试验台加载方式	115
4.1.3	测试传感器与仪表	117
4.1.4	试验台边界效应与处理	118
4.2	相似模拟试验设计与制作工艺	119
4.2.1	相似准则的选择和调整	119
4.2.2	相似常数的选取	120
4.2.3	原型分析与模型参数	123
4.2.4	相似材料原料的选择及配比的确定原则	126
4.2.5	相似材料模型的制作方法	128
4.2.6	相似材料模型的养护	131
4.2.7	试验规划	132
4.2.8	数据采集与结果分析	133

第5章 煤层开采影响的模型试验研究	138
5.1 概述	138
5.2 工程概况及模拟区域	138
5.2.1 工程概况	138
5.2.2 模拟区域	142
5.3 平面相似材料模型试验	143
5.3.1 试验目的及内容	143
5.3.2 模型试验设计	144
5.3.3 模型试验监测	146
5.3.4 模型试验过程	150
5.3.5 模型试验结果	153
5.3.6 模型试验结论	179
5.4 三维相似材料模型试验	180
5.4.1 试验目的及内容	180
5.4.2 模型试验设计	180
5.4.3 模型试验监测	184
5.4.4 模型试验过程	188
5.4.5 模型试验结果	196
5.4.6 模型试验结论	207
第6章 采区排水影响的模型试验研究	209
6.1 引言	209
6.2 工程模拟区域概况及管片结构	210
6.2.1 工程概况	210
6.2.2 模拟区域	211
6.2.3 模拟区域斜井管片结构	212
6.3 原岩室内固结压缩试验	213
6.3.1 试验目的及内容	213
6.3.2 试验方案	213
6.3.3 试验过程	214
6.3.4 试验结果及分析	215
6.4 流固耦合相似材料配比试验	222
6.4.1 试验目的及内容	222
6.4.2 相似材料原料	222

6.4.3	相似材料性质	223
6.4.4	试验结论	227
6.5	含水层疏干排水相似材料模型试验	227
6.5.1	试验目的及内容	227
6.5.2	模型箱设计	228
6.5.3	模型试验设计	230
6.5.4	模型试验监测	234
6.5.5	模型的铺设	235
6.5.6	模型试验过程	237
6.5.7	模型试验结果	239
6.5.8	模型试验结论	252
	参考文献	254

相似理论

1.1 基本概念

1.1.1 几何相似

两个具有相同几何特征(如平面三角形都是由三条直线围成一个封闭图形,其内角和为 180°)的物体或图形,若其对应部分的长度比值等于同一常数,则称为几何相似。

例如,图 1-1 为 A、B 两个平面三角形,若平面三角形 A 与 B 的对应边长度满足下式:

$$\frac{l_1}{l'_1} = \frac{l_2}{l'_2} = \frac{l_3}{l'_3} \quad (1-1)$$

则称平面三角形 A 和 B 几何相似。

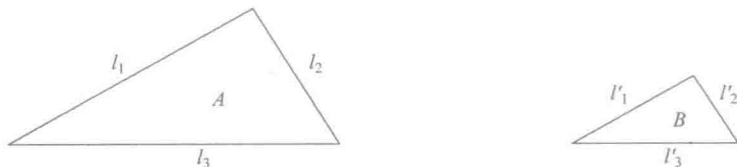


图 1-1 相似平面三角形

1.1.2 相似现象

在几何相似的两个物体或系统中进行同一性质的物理过程(如运动、受力等),若所有有关物理量在几何对应点和对应的瞬时都各自保持一定的比例关系,则称

这样的物理过程为相似现象。

例如,图 1-2 为 A 和 B 两个运动系统,它们的运动轨迹构成的几何图形满足几何相似。

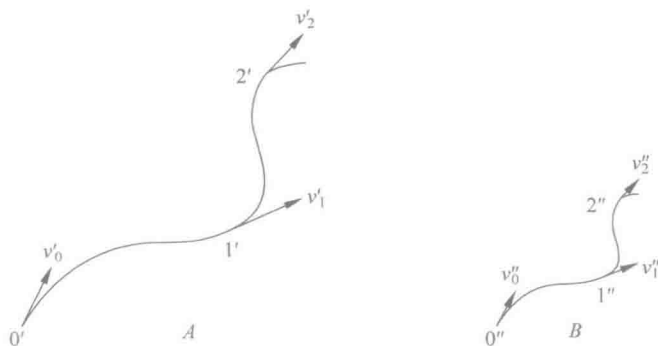


图 1-2 运动相似

描述该运动系统的物理量是路程 l 、速度 v 和时间 t ,如果在几何对应点上的物理量满足以下各式:

对应点上的速度:

$$\frac{v'_0}{v''_0} = \frac{v'_1}{v''_1} = \frac{v'_2}{v''_2} = \dots = C_v \quad (1-2)$$

对应两点之间的路程:

$$\frac{l'_0}{l''_0} = \frac{l'_1}{l''_1} = \dots = C_l \quad (1-3)$$

对应路程所用时间:

$$\frac{t'_1}{t''_1} = \frac{t'_2}{t''_2} = \dots = C_t \quad (1-4)$$

则 A 和 B 两个运动系统相似,该物理过程为相似现象。

1.1.3 相似常数

在两个相似系统中,对应物理量的比值保持常数,该常数称为相似常数。相似常数通常用 C 加下标表示,如图 1-2 两个运动相似系统中,速度比值用 C_v 表示,路程比值用 C_l 表示,时间比值用 C_t 表示,分别为速度相似常数、路程相似常数、时间相似常数。

1.1.4 相似指标

两个相似系统中通常会有多个相似常数,相似常数之间不是完全独立的,因此不能任意取值,相似常数之间等于 1 的组合关系称为相似指标。相似指标可以通

过相似系统所遵循的相同规律推导得出。

例如,图 1-2 所示 A、B 两个运动相似系统,其遵循的相同规律为

$$v = \frac{dl}{dt} \quad (1-5)$$

系统 A

$$v' = \frac{dl'}{dt'} \quad (1-6)$$

系统 B

$$v'' = \frac{dl''}{dt''} \quad (1-7)$$

将式(1-2)~式(1-4)代入式(1-6)可得

$$C_v v'' = \frac{C_l dl''}{C_t dt''} \quad (1-8)$$

将式(1-7)代入式(1-8)可得

$$\frac{C_v C_t}{C_l} = 1 \quad (1-9)$$

$\frac{C_v C_t}{C_l}$ 即为运动系统的相似指标。

由此可见,对于运动系统相似常数, C_v 、 C_t 和 C_l 之关系必须满足式(1-9),它们之间只有任意两个相似常数可随意选定,第三个相似常数必须根据式(1-9)来确定。

1.1.5 相似准则

两个相似系统中,存在着数值不变的物理量组合,该组合称为相似准则,或相似判据。相似准则可以通过相似指标推导出。

仍以图 1-2 运动相似为例,将式(1-2)~式(1-4)代入式(1-9)相似指标得

$$\frac{\frac{v'}{v''} \frac{t'}{t''}}{\frac{l'}{l''}} = 1 \quad (1-10)$$

即

$$\frac{v' t'}{l'} = \frac{v'' t''}{l''}$$

也就是说

$$\frac{vt}{l} = \text{idem}(\text{不变量})$$

即运动系统的相似准则为

$$\frac{vt}{l}$$

相似准则等于不变量而不是等于一个常数,这是因为,它的数值只是在两个相似系统中某两个对应的点和对应的瞬间的数值是相同的,而在同一系统中不同点或不同瞬间,其相似准则的值不一定相同。例如,系统 A 运动至 $1'2'$ 时,相似准则 $\frac{v_1' l_1'}{l_1'}$ 和 $\frac{v_2' l_2'}{l_2'}$ 的值不一定相等。

相似现象中相似准则的数目随现象不同而异。一般来说,现象越复杂,相似准则的数目就越多。

1.1.6 原型与模型

原型是指由多种要素构成的实际研究对象;模型是几何尺寸小于或等于原型,满足相似性条件,由相似性材料塑造的研究对象。对于土木、水利、采矿等领域,原型是人类从事工程活动一定范围的客观存在;模型是为研究原型的力学特性,在实验室人为塑造的实体,是原型的近似。

1.2 相似三定理

前面介绍了相似现象的基本概念,那么,物理现象满足什么条件才是相似的?相似现象具有哪些性质?相似模拟试验的结果如何才能推广到原型中去呢?下面要介绍的相似三定理正是对这些问题的回答。

1.2.1 相似第一定理

相似第一定理阐述的是相似现象具有的性质,即相似现象的相似准则相等,相似指标等于 1,且单值条件相似。

单值条件是个别现象区别于同类现象的特征,它包括:几何条件、物理条件、边界条件及初始条件。几何条件是指参与过程的物体的形状和大小;物理条件是指参与过程的物体的物理性质;边界条件表示物体表面所受的外界约束;初始条件则是指所研究的对象在起始时刻的某些特征。例如,在研究物体的导热过程时,物体的形状、几何尺寸就是几何条件;物体的比热容、导热系数等是物理条件;与所研究物体表面接触的介质的导热系数是边界条件;而物体在初始时刻的温度则是初始条件。

1.2.2 相似第二定理

相似第二定理也称“ π 定理”,它可表述如下:如果现象相似,描述此现象的各种参量之间的关系可转换成相似准则之间的函数关系,且相似现象的相似准则函数关系式相同。

因为相似准则是无因次的,故描述相似现象的物理方程为

$$f(a_1, a_2, \dots, a_k, a_{k+1}, a_{k+2}, \dots, a_n) = 0 \quad (1-11)$$

可转换成无因次的相似准则方程:

$$F(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-k}) = 0 \quad (1-12)$$

式(1-11)中的 $a_1, a_2, \dots, a_k$ 是基本量; $a_k, a_{k+1}, a_{k+2}, \dots, a_n$ 是导出量。由此可见,相似准则有 $(n-k)$ 个,相似第二定理给相似模拟试验结果的推广提供了理论依据。因为,若两种现象相似,根据相似第二定理,可将模型试验结果中整理出的相似准则关系,推广到原型中去,从而使原型得到圆满的解释。

1.2.3 相似第三定理

相似第一定理和第二定理阐述了相似现象具有的性质,并为相似模拟试验结果的推广提供了依据。那么什么情况下两种现象才是相似的呢?也就是说,现象相似的条件是什么呢?这就是相似第三定理要回答的问题。

相似第三定理可表达为,若两个现象能被相同文字的关系式所描述,且单值条件相似,同时由此单值条件所组成的相似准则相等,则此两种现象相似。在工程实践中,要使模型和原型完全满足相似第三定理的要求是相当困难的,甚至不可能。这时可根据研究对象的特征,合理选取那些对现象影响重大的因素,抓住现象的主要矛盾,略去次要因素,使得模拟研究得以实现,这就是所谓的“近似模化”。近似模化能否成功,主要取决于影响因素选择的合理性。近似模化虽然不能保证全部相似条件得到满足,但由于它保证了现象主要因素间的相似,故其研究结果的精度一般可满足工程实际的要求,因此,近似模化已在工程实践中得到了广泛的应用。

上述三个定理在许多关于相似理论和模型试验技术的著作和文献中都有详细的证明,本书不再重复这部分内容。

1.3 相似准则的推导

在进行相似模拟研究的试验设计、试验结果整理及推广时,均需求得所研究现象的相似准则。推导相似准则的方法较多,本节只介绍常用的三种方法,即:相似转换法、因次分析法及矩阵法。

1.3.1 相似转换法

相似转换法是用方程分析求相似准则的方法之一,它是根据描述研究对象的基本方程及单值条件来推导出现象的相似准则。

这种方法的基本步骤为:

(1) 列出描述现象的基本方程及全部单值条件;