

煤层底板变形破坏的相似材料模拟研究综述

张 俊^{1,2}, 姚多喜¹

(1. 皖江工学院 土木工程学院, 安徽 马鞍山 232001; 2. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 243031)

摘要: 底板变形破坏是煤层底板突水的重要影响因素, 借助室内试验系统进行相似材料模拟研究是获取深部采动条件下底板突水灾变演化及防治的有效手段。文章总结了相似材料模拟在煤层底板变形破坏中的应用原理、相似材料选择及模型制作, 综述了试验相关理论、试验材料、试验装置研制以及量测技术与成果分析等方面的研究进展, 重点分析了目前存在的主要问题。最后, 指出在未来的研究中, 需在模型材料、新技术、新方法方面加强攻关, 且应注意相似材料模拟、理论计算、数值模拟和现场实测等多种方法的综合应用, 进而综合确定煤层底板的变形破坏情况。

关键词: 矿井突水; 相似材料模拟; 煤层底板; 变形破坏

中图分类号: TD322⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-349X(2019)06-0047-06

DOI: 10.16160/j.cnki.tsxyxb.2019.06.012

Research Review about Similar Material Simulation for Deformation and Failure of Coal Seam Floor

ZHANG Jun^{1,2}, YAO Duo-xi¹

(1. School of Civil Engineering, Wanjiang University of Technology, Ma'anshan 243031, China;

2. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Deformation and failure of coal seam floor is the key factor affecting floor water inrush. Similar material simulation research in laboratory is an effective measure to learn the disaster evolution and prevention of floor water inrush under deep mining conditions. This paper summarizes the application principle, selection of similar materials and model making of similar material simulation in the deformation and failure of coal seam floor. Then the relevant research achievement is reviewed, including the theories, experiment materials, experiment apparatus design, measurement technique and result analysis, and etc, where the main present problems are analyzed as the focus. Finally, it is pointed out that the mode material, new technologies and methods should be given the first place in the future research. Moreover, attention should be paid to the comprehensive application of similar material simulation, theoretical calculation, numerical simulation and field measurement, and then the deformation and failure of coal seam floor is determined with a holistic approach.

Key Words: mine water inrush; similar material simulation; coal seam floor; deformation and failure

基金项目: 国家自然科学基金项目(51474008); 安徽高校自然科学研究项目(KJ2019A1281); 安徽省高校优秀青年人才支持计划项目(gxyq2019151); 皖江工学院科研项目(WG18026)

作者简介: 张俊(1988—), 男, 安徽铜陵人, 讲师, 博士研究生, 主要从事矿井工程地质研究。

矿井突水是一种威胁大且发生频繁的井下重大灾害,伴随着矿井开采深度的逐渐增大,突水事故日趋增多^[1-3]。底板变形破坏是发生突水的一个重要影响因素,国内外学者关于底板变形破坏的研究主要有理论计算、数值模拟、现场实测及相似模拟 4 种方法^[4-7]。煤层底板变形破坏受到地质构造、采动等因素的影响,其物理作用过程十分复杂。在理论计算与数值模拟时通常将复杂岩体结构进行简化处理,会使模型与实际岩体之间存在一定偏差,且在材料参数的选取、本构关系的确定等方面也存在一定困难^[8-11]。现场实测的方法结果最可靠,但测试周期较长,需耗费大量的人力物力,且会受到现场工作条件的限制^[12],使得该方法也存在一定的局限性。相似材料模拟作为一种科学研究方法,是依照原型根据相似原理来模拟,然后利用一定的仪器设备来观测模型在采动条件下的变化规律,再来推断原型中的岩体应力分布规律,从而解决地下工程等有关现实问题。利用该方法来研究煤层底板变形破坏的实质是根据相似原理将研究区内的矿山岩层按照一定比例缩小,用相似材料制作模型,然后在模型内模拟煤矿开采过程,观测模型中岩层的变形破坏情况,进而对原岩所发生的情况进行推断。本文系统总结了相似材料在模拟煤层底板变形破坏中的应用,指出了其主要的优势、不足及未来发展方向,对深部煤层底板在采动条件下突水灾变演化及防治具有重要的现实意义。

1 概述

1.1 原理

相似材料模拟试验是用人工材料按照一定的比例配制成“缩尺”模型,然后观察模型在开挖时的变形、移动和垮落情况。对于试验模型的制作主要依据相似理论进行,为了能使模型能更加真实地反映原型中的情况,需确定两者之间的相似关系和相似准则。一般需要具备以下几个相似条件:①几何相似,即按照一定比例缩小;②运动相似,即对应点运动情况相似;③动力相似,指模型与原型所有作用力相似;④应力相似、外力相似;⑤初始状态相似,指初始状

态的岩体结构和结构面上的力学性质等相似;⑥边界相似,指给定位移、所受外力相似。利用相似准则来计算模型上的相应参数,为相似模拟试验提供理论基础。

1.2 材料选择

试验过程中所用材料的质量、体积及配比均是经过与原型比较计算得出。通常情况下,材料主要由骨料、胶结物两部分组成。其中,骨料通常采用砂子、铝粉、云母粉等;而胶结物则采用水泥、石膏、水玻璃等。试验材料强度主要取决于胶结物的强度,而胶结物的强度主要取决于材料配比,即骨料与胶结物的比例以及胶结物成分的比例。对相似材料配比的确定通常需要在试验开始前开展大量工作。对于相似材料的选择,要满足以下几点要求:第一,相似材料的力学性质、单向抗压强度以及抗拉强度与原岩相似;第二,在试验中,材料不容易受到外界条件的干扰,其力学性能可以保持稳定;第三,可根据需要调整试验材料的配比,从而满足不同的相似条件;第四,试验材料来源丰富、制作方便、凝固时间短、成本低且污染少。

1.3 模型制作

试验过程均是在模型架上进行,对于模型架而言,则需要根据试验目的、工作面大小要求等进行设计或改进。模型铺设的步骤主要有:①检测、标定试验过程中需要用到的各种设备;②在试验台两端贴上标记纸;③在挡板内侧涂抹适量的油以方便脱模;④准确称取各种材料用量,且搅拌混合均匀;⑤按照“缩尺”比例计算各层厚度,逐层铺设并压实材料,将云母片等均匀地撒在各层之间以模拟岩层间的层理;⑥按照试验需要埋设应力传感器等测试仪器;⑦待模型干燥后拆除挡板,布置位移测点,模拟采动,进而完成试验。

2 研究进展

2.1 试验相关理论研究

相似材料模拟试验自 20 世纪 30 年代由前苏联库兹涅佐夫提出,已被广泛用于煤炭、水利

水电、冶金、岩土等行业中,在实践和理论方面也取得了一系列成果^[13-17]。王辉等^[18]在相似三定理分析的基础上,通过量纲分析法,确定了采场相似模拟试验进行中应满足的4个相似准则,利用量纲矩阵求出了4个相似准则分别为重力相似准则、内摩擦力相似准则、谐时准则、压力相似准则;胡耀青等^[19]从固流耦合理论出发,建立三维固流耦合数学模型,运用相似理论推导了三维固流耦合作用下的相似模拟准则,并通过相似材料配制试件的力学与渗透特性的实验,得出了几种典型的隔水层与含水层的相似材料配比,为工程实际中的固流耦合问题的研究提供了模拟的理论依据;崔希民等^[20]为了弄清模拟试验误差的主要来源、影响程度、可控性等,从相似材料、相似准则、边界条件等方面进行了分析,其研究结果为改进模拟试验方法、提高试验结果质量提供了依据;针对试验模型在铺设过程中存在的误差,王素华等^[21]以岩梁理论和弹性力学为基础提出了相似材料模拟试验的误差补偿理论,经过误差补偿后可减少模拟试验误差,从而可以使试验结果实现由定性向定量的转化。

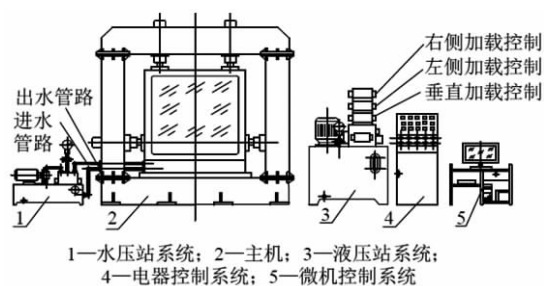
2.2 试验材料研究

在相似材料模型试验中,最重要的是选择相似材料建造“缩尺”模型。因此,选择正确的相似材料和合理确定材料配比,是进行试验的关键所在。在20世纪60年代,E. Fumagalli^[22]开创了工程地质力学模型试验技术,主要采用两类相似模拟材料:一类是用铅氧化物(PbO 或 Pb_3O_4)和石膏的混合物为主料,然后以砂子或小圆石作为辅助材料;另一类则主要以氧化铅、重晶石粉、石灰石粉作为骨料,利用在水中发生乳化作用的环氧树脂作为粘结剂,甘油和水作为稀释剂和保湿剂,膨润土或硅藻土为外加剂。葡萄牙里斯本国家土木工程研究所^[23]把铅氧化物(Pb_3O_4)和铁钛矿粉混合作为骨料,以石膏为胶结剂,开展了许多小尺寸模型试验。在国内,以武汉大学韩伯鲤等^[24]研制的MIB材料、清华大学马芳平等^[25]研制的NIOS

材料、山东大学张强勇等^[26]研制的IBSCM材料为代表,主要包括纯石膏材料,石膏硅藻土混合材料,以砂为骨料、石膏为主要胶结材料,以及以重晶石粉为骨料、石膏为主要胶结材料4种类型的相似材料,这些相似材料的优点是具有高容重、低抗压强度、低弹性模量,且性能稳定。张杰等^[27-28]以河砂为骨料、石蜡为凝胶剂,改进了相似模拟材料的亲水性能;李术才等^[29]利用地下工程突涌水物理模型试验系统,针对隧道工程的突涌水问题,发展创新了固流耦合相似模拟材料,探讨了巷道涌水的灾变演化过程。可以说,众多学者关于新型材料的研制为相似模拟试验提供了可能。但是,目前各类混合材料的性能和配比等方面的研究仍很难满足较大规模模拟试验的要求。同时,混合材料容易受到试验条件等因素的影响,其性能稳定性较差。

2.3 试验装置研制

试验装置是整个试验的基础,对于相似材料模拟试验装置系统一直处于不断设计、研发过程中。在矿井突水的模拟试验研究中,杨映涛等^[30]设计了物理模型自动稳压加载系统,并研制了底板突水模型试验装置,实现了对煤矿底板突水的模拟;刘爱华等^[31]研制了深部开采承压突水机制相似物理模型试验系统,能够进行矿井顶板承压突下开采突水模型试验模拟;王家臣等^[32]利用导水陷落柱突水模拟试验台,研究了含陷落柱构造的突水通道导水规律及突水机制;隋旺华等^[33]建立了水砂突涌试验平台和高压三维矿井突水模拟试验系统,开展了水砂突涌机制及采动影响下的突水试验模拟研究;弓培林、胡耀青等^[34-35]在二维试验台的基础上研制了三维固流耦合模拟试验台;姜耀东、熊祖强等^[36-38]设计了新的承压水模拟装置;谢淮北等^[39]研究了试验装置的结构优化;孙文斌等^[40]研制了深部采动高水压底板突水相似模拟试验系统(图1),该系统具有多样性、可靠性、全过程特点,可实现底板突水可视化观测及深部流固耦合相似模拟研究。



(a) 系统总装配图



(b) 实物图

图 1 深部采动高水压底板突水
相似模拟试验系统

2.4 量测技术与成果分析

相似模拟试验中观测的内容包括模型破坏现象的观测与描述、绝对位移、内应力等。胡耀青等^[19,35]采用大型三维固流耦合相似模拟试验台,对承压水上采煤突水监测预报理论的物理与数值模拟进行了研究;熊祖强等^[38]以煤矿承压水上开采工作面底板为研究对象,采用自行设计的水压模拟设备,利用开采固一流耦合相似模拟对承压水上煤层回采过程中顶、底板破断特征及裂隙演化规律进行了分析研究。目前,相似模拟试验研究重点大都是对于加载系统、测试系统的完善,通过观察裂隙发育情况来判断在试验中煤层底板破坏深度及破坏形态特征,但是对于煤层底板在采动前后的物理性质变化方面的研究则较少。许延春等^[12]以赵固二矿 11050 工作面为原型,利用超声波检测技术探测了底板岩层在试验前后的波形变化。近些年发展起来的光纤传感技术是根据检测光在光纤中传播时的光强、相位等特征参量的变化,实现对外界的检测或计量,因此可以利用光纤监测系统监测模型在开挖过程中内部应力、应

变的变化情况。

3 不足与展望

综上所述,相似材料模拟试验在试验模拟系统、相似材料的研制以及量测技术与结果分析等方面均取得了较大突破,已经成为煤层底板尤其是承压含水层上底板突水方面的一种重要研究方法。然而必须指出的是,相似材料模拟研究也有其局限性,要想准确地进行模拟很难,因为地下岩体特别是深部岩体的力学性质非常复杂。其局限性主要有以下几点:①目前的相似材料模拟大多为平面模拟,且在实验过程中,常对其边界条件进行简化,使得模拟结果与现实原型存在差异;②目前大部分立体试验模型通常只能进行单一类型的模拟实验,且大多无水平方向的加力机构;③在模型顶部加载时存在均匀受力问题;④模拟煤层开采位移、应力、应变测量问题尚需改进,采动前后底板岩层物性变化研究有待进一步深入;⑤深部采动岩体围岩环境表现出岩体动力响应的突变性、高应力场的复杂性、岩体的大变形和强流变性等特殊情况,且深部承压水水压大,因此,深部与浅部突水机理存在一定的差异性,必须在深部试验模拟系统特别是突水全过程研究等方面有所突破。

另外,即使对试验材料、试验过程等方面进行严格把关,相似材料模拟也很难代表现场的原位试验,当然,不可能也没有必要在各方面做到严格相似。在未来的研究中,需要在模型材料、新技术、加载方法甚至是新的实验理论方面加强攻关。在相似理论方面,需要向断裂力学、流变力学等新的力学领域发展;在试验材料方面,需要不断研发新的能够满足试验要求的材料,如 3D 打印技术制作相似模拟试验材料^[41-45];在试验系统方面,为适应当前深部开采的现实问题,需研发能模拟深部复杂环境的试验系统等;在试验量测技术方面,应注意研制更小的传感器,以便能安装在模型内部。最后需要强调的是,应注意相似材料模拟、理论计算、数值模拟和现场实测等多种方法的配合使用,取长补短,综合对比确定煤层底板在采动条

件下的变形破坏情况。

4 结论

煤层底板变形破坏对于底板突水破坏影响大,是一个非常重要的研究课题,本文在文献调研的基础上,明确了相似材料模拟试验在底板变形破坏方面的研究现状、存在的问题及未来研究方向,为后续有关研究奠定了基础,具有重要的意义。

参考文献:

- [1] ZHANG J C, SHEN B H. Coal mining under aquifers in China: a case study[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(4): 629 - 639.
- [2] 许延春, 李俊成, 刘世奇, 等. 综放开采覆岩“两带”高度的计算公式及适用性分析[J]. 煤矿开采, 2011, 16(2): 4 - 7.
- [3] 杨天鸿, 唐春安, 谭志宏, 等. 岩体破坏突水模型研究现状及突水预测预报研究发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 268 - 277.
- [4] 许延春, 陈新明, 李见波, 等. 大埋深高水压裂隙岩体巷道底板突水试验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(S1): 124 - 128.
- [5] 许延春, 陈新明, 姚依林. 高水压突水危险工作面防治水关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(9): 99 - 103.
- [6] 许延春, 杨扬. 回采工作面底板注浆加固防治水技术新进展[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(1): 98 - 101.
- [7] 连会青, 夏向学, 冉伟, 等. 新型流固耦合相似模拟材料的抗水性实验研究[J]. 煤矿开采, 2015, 20(1): 12 - 16.
- [8] GARBOCZI E J, CHEOK G S, STONE W C. Using LADAR to characterize the 3-D shape of aggregates: preliminary results[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(6): 1072 - 1075.
- [9] HÄFNER S, ECKARDT S, LUTHER T, et al. Mesoscale modeling of concrete: geometry and numeric[J]. Computers and Structures, 2006, 84(7): 450 - 461.
- [10] 刘业娇, 薛俊华, 袁亮, 等. 软岩底板突水机理分析及数值试验[J]. 煤炭学报, 2017, 42(12): 3255 - 3261.
- [11] 王妍, 姚多喜, 鲁海峰. 高水压作用下煤层底板隔水关键层弹性力学解[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(1): 131 - 136.
- [12] 许延春, 谢小锋, 董检平, 等. 在相似模拟试验中利用超声波检测技术探测底板破坏深度[J]. 煤矿开采, 2016, 21(1): 7 - 11.
- [13] 徐挺. 相似理论与模型试验[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1982.
- [14] 李鸿昌. 矿山压力的相似模拟试验[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988.
- [15] 袁文忠. 相似理论与静力学模型试验[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1998.
- [16] 顾大钊. 相似材料和相似模型[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995.
- [17] 罗先启, 毕金锋. 地质力学模型试验理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2016.
- [18] 王辉, 席健, 高玉坤, 等. 采空区相似材料模拟相似准则分析: 国际安全科学与技术学术研讨会论文集[C]. 沈阳: 东北大学出版社, 2012: 110 - 114.
- [19] 胡耀青, 赵阳升, 杨栋. 三维固流耦合相似模拟理论与方法[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(2): 204 - 206.
- [20] 崔希民, 缪协兴, 苏德国, 等. 岩层与地表移动相似材料模拟试验的误差分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1827 - 1830.
- [21] 王素华, 高延法, 廖俊展. 相似材料模拟试验中的误差补偿理论[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2005, 36(3): 411 - 414.
- [22] FUMAGALLI E. Statics and mechanics model[M]. Beijing: China Water Power-Press, 1979.
- [23] 王汉鹏, 李术才, 张强勇, 等. 新型地质力学模型试验相似材料的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1842 - 1847.
- [24] 韩伯鲤, 陈霞龄, 宋一乐. 岩体相似材料的

- 研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(2): 6-9.
- [25] 马芳平, 李仲奎, 罗光福. NIOS 模型材料及其在地质力学相似模型试验中的应用[J]. 水利发电学报, 2004, 23(1): 48-52.
- [26] 张强勇, 李术才, 郭小红, 等. 铁晶砂胶结新型岩土相似材料的研制及其应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2126-2130.
- [27] 张杰, 侯忠杰. 固-液耦合试验材料的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3157-3161.
- [28] 侯忠杰, 张杰. 陕北矿区开采潜水保护固液两相耦合实验及分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2004, 19(4): 1-5.
- [29] 李术才, 李利平, 李树忱, 等. 地下工程突涌水物理模拟试验系统的研制及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(3): 299-304.
- [30] 杨映涛, 李抗抗. 用物理相似模拟技术研究煤层底板突水机制[J]. 煤田地质与勘探, 1997, 25(S1): 33-36.
- [31] 刘爱华, 彭述权, 李夕兵, 等. 深部开采承压突水机制相似物理模型试验系统研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1335-1341.
- [32] 王家臣, 许延春, 李振华. 采场构造活化导水相似模拟试验平台研制: 中国力学学会学术大会'2009 论文摘要集[C]. 北京: 中国力学学会出版社, 2009: 347.
- [33] 隋旺华, 蔡光桃, 董青红. 近松散层采煤覆岩采动裂缝水砂突涌临界水力坡度试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2084-2091.
- [34] 弓培林, 胡耀青, 赵阳升, 等. 带压开采底板变形破坏规律的三维相似模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4396-4402.
- [35] 胡耀青, 赵阳升, 杨栋. 采场变形破坏的三维固流耦合模拟实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(4): 520-523.
- [36] 赵毅鑫, 姜耀东, 吕玉凯, 等. 承压工作面底板破断规律双向加载相似模拟试验[J]. 煤炭学报, 2013, 38(3): 384-390.
- [37] 姜耀东, 吕玉凯, 赵毅鑫, 等. 承压水上开采工作面底板破坏规律相似模拟试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1571-1578.
- [38] 熊祖强, 王晓蕾. 承压水上工作面破坏及裂隙演化相似模拟试验[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(5): 1114-1120.
- [39] 谢淮北, 孙镇镇, 韦朝坤, 等. 矿用相似模拟试验振实装置的结构优化[J]. 煤炭技术, 2015, 34(3): 222-223.
- [40] 孙文斌, 张士川. 深部采动底板突水模拟试验系统的研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 3274-3280.
- [41] 胡耀青, 严国超, 石秀伟. 承压水上采煤突水监测预报理论的物理与数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 9-15.
- [42] 江权, 宋磊博. 3D 打印技术在岩体物理模型力学试验研究中的应用研究与展望[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 23-37.
- [43] 肖维民, 黄巍, 丁蜜, 等. 基于 3D 打印技术的模拟柱状节理岩体试样制备方法[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(S2): 256-260.
- [44] 汪冲浪, 祁生文. 3D 打印技术在岩石试验中的应用现状与展望[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(2): 842-849.
- [45] 刘海林, 汪为平, 孙国权, 等. 一种地下矿山采空区相似材料 3D 模型的制作方法: 中国, CN106124263A[P]. 2016-11-16.

(责任编辑: 李秀荣)