

多孔介质固液耦合相似材料的研制

韩 涛¹, 杨维好^{1,2}, 杨志江^{1,2}, 杜子博², 王 勇¹, 薛森森²

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘 要: 为研究地下结构与富水多孔岩体的相互作用问题, 根据模型试验相似理论, 研制出了一种多孔介质固-液耦合相似材料, 该材料由中粗砂、水泥、透水混凝土增强剂合水按一定配比均匀拌和压制而成。运用正交试验设计原理进行配比试验, 制作模型小试件, 进行了单轴抗压强度、渗透系数、重度、弹性模量、泊松比等参数测试, 找出了相似材料各成分对配比试件的影响特征, 可根据需要在物理模拟试验中选取不同配比。该配方力学指标稳定, 满足一次性浇筑大尺寸模型试件的要求, 适用于进行结构与围岩体耦合失效破坏模式的大型物理模拟试验, 为富水条件下地下结构风险评估提供了相似试验材料。

关 键 词: 相似材料; 物理模拟; 多孔介质; 固液耦合; 正交试验

中图分类号: TU 458.4; TD 265

文献标识码: A

Development of similar material for porous medium solid-liquid coupling

HAN Tao¹, YANG Wei-hao^{1,2}, YANG Zhi-jiang^{1,2}, DU Zi-bo², WANG Yong¹, XUE Sen-sen²

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: In order to investigate the interaction problems between the underground structure and the rich water porous rock, a kind of material similar to the porous medium solid-liquid coupling material was developed according to similarity theory of modeling simulation. The material was mixed and pressed from coarse sand, cement, pervious concrete intensifier and water by certain ratio. Proportioning experiments were carried out based on the orthogonal experiment design principle. Then small model samples were produced to obtain parameters such as the uniaxial compressive strength, the permeability coefficient, the bulk density and the elastic modulus and Poisson's ratio. The effects of different ingredients were studied; so the proportions of ingredient were varied for the different needs in physical simulations. The mechanical behaviours of these materials are stable, and not only meet the requirements of large models, but also suitable for large physical experiment on structure and wall rock destruction. Therefore, the simulation experiment material is feasible for risk assessment of underground structure in rich water conditions.

Key words: similar material; physical simulation; porous media; solid-liquid coupling; orthogonal experiment

1 引 言

隧道和煤矿涌水突水、地下水受核废料污染、潜水溃流、地表沙漠化、地表沉陷、水电站地下结构失稳等固-液耦合问题日益严重, 以往对这方面的研究都是以理论方法或者数值模拟方法进行, 模拟结果往往不能很好地反映成岩地质体在工程状态下的实际情况, 借助模型试验可定性或定量地反映复杂工程的施工工艺、荷载作用方式及时间效应等, 能研究工程受力的全过程, 从弹性到塑性, 直至极限荷载后的破坏形态^[1-2], 模型试验在岩体与结构的固-液耦合研究中具有重要作用。

根据相似理论, 在模型试验中应采用相似材料来制作模型^[3], 模型试验成功与否的关键在于相似材料与真实岩土体之间的相似性, 选择合适的模型材料对模型试验的成功与否起着决定性作用^[4]。一些国家的结构设计规范中, 明确规定了要以试验作为论证设计方案或提供设计参数的手段^[5]。本文从开挖、砌筑后井壁结构与含水丰富孔隙岩层相互作用问题出发, 模拟在原岩应力状态下结构与围岩体的耦合失效破坏模式, 从而为类似地下结构风险评估提供试验依据, 这就需要研制满足相似条件的固-液耦合多孔相似材料。

收稿日期: 2010-12-11

第一作者简介: 韩涛, 男, 1981 年生, 博士研究生, 主要从事岩土特殊施工技术研究工作。E-mail: hantaocumt@163.com

2 岩体相似材料的研究现状

在脆性硬岩岩爆相似材料研究方面,陈陆望^[6],李连贵等^[7],潘一山等^[8],徐文胜^[9],Burget 等^[10]研制出模拟岩爆的相似材料,并在物理模拟试验中得到应用。刘宇军等^[11]研究了水泥石膏相似材料。范鹤^[12]以砂为骨料,石膏、硅藻土混合物为胶结物对高填土涵洞相似材料进行了试验研究。黄庆享^[13]在固体相似材料研究的基础上,选用沙、黏土、凡士林等研制了固液两相应力-应变全程相似和水理性相似的模拟材料,单轴抗压强度小于 2 MPa,并对富水风积沙层下采煤过程进行了模型试验研究,取得工程验证^[14]。左保成^[15]结合反倾岩层边坡失稳破坏机制的相似模型研究,采用石英砂、石膏和水泥来模拟灰岩,石膏是水溶性材料,其性能易受温度和湿度影响,且干燥缓慢。韩伯鲤^[16]介绍了一种以铁粉、重晶石粉、红丹粉为骨料,以松香和酒精溶液为胶结剂,氯丁胶为附加剂的 MIB 相似材料,该材料弹性模量可根据胶膜厚度进行有效调整,其缺点是作为铁粉胶黏剂的氯丁胶含有甲苯,对人体的毒副作用较大。彭海明^[17]选用水泥石膏作为岩石模拟材料,但模型干燥慢、养护时间长。李仲奎、马芳平^[18]等研制出一种 NIOS 地质力学模型材料,它由磁铁矿精矿粉、河沙、黏结剂石膏或水泥、拌合用水及添加剂组成,配制也比较方便,物理化学性质比较稳定,成本低廉,没有毒性,对操作人员的身体健康和环境没有危害,是一种很有前途的相似材料,干燥太慢是其最主要的缺点。张强勇、李术才^[19-21]运用精铁粉、重晶石粉、石英砂、石膏粉、一级松香和医用酒精为原料,按一定的配比均匀拌合压实而成的铁晶砂胶结岩土相似材料,并进行了盐岩油气储库介质的地质力学模型试验。胡耀青等^[22]采用水泥、砂子、石子、石膏、滑石粉和克晒羧为主料来模拟岩层,采用红胶泥来模拟软弱隔水层。黎良杰等^[23]选用砂、碳酸钙和石膏为主料,以硼砂为缓凝剂制作采场底板突水模型的相似材料。龚召熊^[24]以石蜡油做胶凝剂,模拟强度较低、变形较大的塑性破坏型岩体和泥化夹层。周青春等^[25]对南水北调西线一期工程砂岩温度、围岩和水压耦合进行了试验研究。李树忱^[2]用砂和滑石粉作为骨料,石蜡作为胶结剂,研制的新型固-流耦合试验相似材料(PSTO),并在隧道涌水模型试验中取得成功应用。彭海明等^[27]选用水泥、石膏作为岩石模拟材料,并对其物理力学性能进行了研究。黄国军等^[28]在研究牛头山双曲拱坝整体稳定的三维地质力学模型试验

中采用以重晶石粉和铁粉为基本填充料,以机油为胶结剂,以皂化油加水为防锈剂,以膨润土为添加剂的混合材料。张宁^[29]采由水泥、砂、橡胶粉、水、减水剂、早强防冻剂、防水剂混合而成的新型相似材料,强度为 15~50 MPa,弹性模量为 2~4.5 GPa。

上述相似材料进行相似模拟试验时相似比大,大多材料强度和弹性模量较小,相似比为 1 的相似材料和模型试验研究较少。固-流耦合模拟试验的相似理论的研究尚未成熟;模拟材料必须同时满足固体变形和渗透性相似 2 个条件,很难找到合适的两相相似模拟材料来制作固-流耦合相似模型。研究固-液耦合相似材料,实现应力-应变全程相似和水理性相似,需要研制出满足尽可能多的相似系数为 1 的固-液耦合模型相似材料。

3 相似材料的相似指标

在物理模拟试验中,选择合适的模型材料是定量模拟的关键环节之一。需遵循相似理论,要求满足原型与模型的相似规律,即必须满足:模型材料的几何尺寸、边界条件、荷载及相似材料的重度、强度及变形特性方面的相似;模型和原型在弹塑性应力状态、破坏状态均应符合相似条件。

设原型岩石的物理力学参数分别为:抗压强度 σ^p 、弹性模量 E^p 、泊松比 μ^p 、孔隙率 n^p 、渗透系数 k^p 、重度 r^p 、多孔岩体平均颗粒直径 d^p ;相似材料的相应参数分别为 σ^m 、 E^m 、 μ^m 、 n^m 、 k^m 、 γ^m 、 d^m 。由量纲分析方法可以推导出相似判据, $C_\sigma = \sigma^p / \sigma^m$, $C_E = E^p / E^m$, $C_\mu = \mu^p / \mu^m$, $C_n = n^p / n^m$, $C_k = k^p / k^m$, $C_r = \gamma^p / \gamma^m$, $C_d = d^p / d^m$, 其中, C_σ 、 C_E 、 C_μ 、 C_n 、 C_k 、 C_r 、 C_d 分别为单轴抗压强度、弹性模量、泊松比、孔隙率、渗透系数、重度、多孔材料平均几何相似常数,对于固-液耦合相似材料模型试验,各相似常数均等于 1 是最理想的。

根据岩体的物理力学特征及模型试验的目的,选用的材料要求与原型材料具有相似的物理、力学性质,可由模型试验中测量的应力及应变通过相似关系反推原型的应力及应变变化关系,将相似材料的强度、弹性模量、泊松比、孔隙率、渗透系数作为参考指标,各相似常数尽可能多地等于 1,则越接近真实模型的性能。

4 相似材料的配制及结果分析

4.1 相似材料选择及试验方法

(1) 材料要求

岩体模拟是比较复杂的,能否较真实地模拟岩

体的力学条件关系到试验成果的可信度^[5]。固-液耦合相似材料的基本要求为：主要力学性质与模拟的岩层或结构相似；试验过程中材料的力学性能稳定，不易受外界条件的影响；相似材料应由散粒体组成，经胶结剂胶结并在模具内压成一定尺寸的砌块，才能保证有致密的结构和较大的内摩擦角；改变材料配比，可调整材料的某些性质以适应相似条件的需要；制作方便，凝固时间短；成本低、来源丰富；对人体无任何毒害作用。

(2) 材料选择

根据配制岩体固-液耦合相似材料的要求，试验中选择中粗砂、透水混凝土增强剂、水泥和水按一定比例拌合压制而成，中粗砂选用质地坚硬、级配良好的河砂，砂作为骨料，其细度模数在 2.7~3.0 之间。水泥采用 P.O.42.5 普通硅酸盐水泥，水泥和透水混凝土增强剂作为胶凝材料。

(3) 试件制作及测试方法

试件制作时先将砂和胶凝材料拌合均匀后，加入约一半用量的水拌合均匀，然后逐渐加水并搅拌均匀，将拌合料倒入模具内并用一定压力压制成型，脱模后做好标签并在标准养护室对试件进行养护，至一定龄期后进行各物理力学参数测试。

相似材料模型试验中主要测量渗透系数 k^m 、孔隙率 n^m 、抗压强度 σ^m 、弹性模量 E^m 和泊松比 μ^m （割线弹性模量 E_g^m 、割线泊松比 μ_g^m 可同时测得）这 5 个指标，试验中物理力学参数参照《工程岩体试验方法标准》、《土工试验方法标准》和《土工试验规程》进行测试。试验中每组制作 5 个尺寸为 $\Phi 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 试件测定渗透系数 k^m ，其他物理指标测试采用每组 3 个 $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 试件。

4.2 正交试验设计

运用相似材料模拟多孔隙岩体，原型材料的参数根据内蒙古自治区鄂尔多斯市多个矿区钻孔地质资料统计得到，见表 1。

表 1 原岩参数统计表

Table 1 Parameters of virgin rock

k^p	σ^p	ρ^p	E^p	μ^p	n^p	d^p
/(cm/s)	/MPa	/(kN/m ³)	/GPa		%	/(10 ⁻³ m)
$2.3 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-4}$	10~50	24.5~27	2~15	0.1~0.3	10~30	0.25~2

正交试验设计是用于多因素试验的一种科学分析方法，它是从全面试验中挑选出部分具有代表性的点进行试验，这些点具有均匀和整齐的特点。正交试验设计在水平值较少的情况下具有很高的效率，经常用来对试验进行统筹安排，以便尽快找出

试验中各因素对试验结果的影响程度。

本次相似材料配制采用正交试验设计方法，试验材料选用中粗砂、透水混凝土增强剂、水泥和水拌合压制成型。对于中粗砂，选用不同的粒径分布范围 d^m ，砂用量 M_g 保持不变，为 1 520 kg/m³；透水混凝土增强剂用量 M_z ，水胶比 W/C ，水泥用量 M_c 这 4 个因素，每个因素取 3 个水平，相似材料的正交表见表 2。测量不同配比条件下的 k^m 、 n^m 、 γ^m 、 σ^m 、 E^m 、 μ^m 、 E_g^m 和 μ_g^m 值。

表 2 相似材料 L₉(3⁴)正交试验表

Table 2 Orthogonal experiment of similar material L₉(3⁴)

试验组号	M_z /(kg/m ³)	W/C	M_c /(kg/m ³)	d^m /10 ⁻³ m
1	1(8)	1(0.38)	1(310)	1(≥0.30)
2	1	2(0.40)	2(350)	2(≥0.60)
3	1	3(0.42)	3(390)	3(≥1.18)
4	2(20)	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3(32)	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

4.3 正交试验结果分析

根据表 2 安排正交试验得到饱和重度 γ^m 、孔隙率 n^m 、抗压强度 σ^m 、弹性模量 E^m 、泊松比 μ^m 、割线弹性模量 E_g^m 、割线泊松比 μ_g^m 和渗透系数 k^m 测试结果，试验值进行统计平均后见表 3。

表 3 试验结果均值统计表

Table 3 Average test results

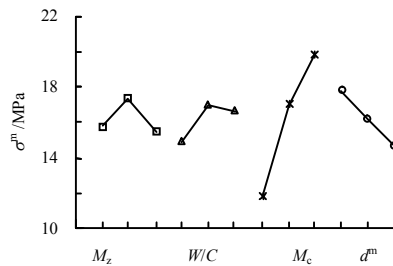
试验组号	γ^m /(kN/m ³)	n^m /%	σ^m /MPa	E^m /MPa	μ^m	E_g^m /MPa	μ_g^m	k^m /(10 ⁻⁵ cm/s)
1	21.69	28	11.6	6 200	0.18	6 200	0.18	5.28
2	22.05	24	17.5	10 370	0.16	11 067	0.16	1.19
3	22.31	22	18.3	9 300	0.18	10 380	0.17	1.47
4	22.20	22	15.4	11 618	0.21	11 820	0.22	0.41
5	22.37	24	23.4	11 630	0.18	12 540	0.18	1.29
6	21.92	24	13.4	9 500	0.24	9 830	0.23	1.70
7	22.55	23	17.8	6 185	0.17	6 300	0.17	1.60
8	22.33	25	10.2	9 185	0.27	9 785	0.27	0.24
9	22.42	25	18.2	9 890	0.22	6 400	0.30	0.30

4.3.1 抗压强度的正交试验结果分析

根据正交试验结果对各参数进行分析，得到的各因素对相似材料 σ^m 的影响关系见图 1，从图中可以看出， M_z 和 W/C 对强度影响不是十分明显； M_c 和 d^m 对强度影响显著，随着 M_c 的增大， σ^m 增大，在 10.2~23.4 MPa 范围内变化；随着 d^m 的增大，粗骨料的粒径级配变得不均匀，强度降低，进行模

批注 [h1]: 将此处对图 1 横坐标的解释移动至图 1 的备注中，并注明了图 4~图 7 横坐标意义与图 1 相同。

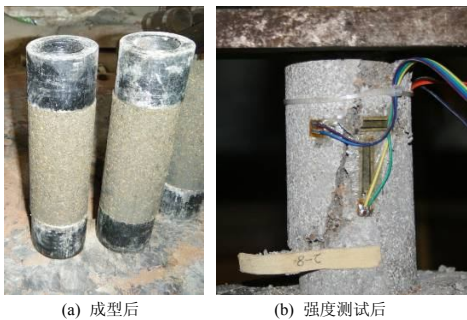
型试验时应选择粗骨料颗粒级配好的配方。运用模型材料制作的试件见图 2(a), 试件破坏形态见图 2(b), 相似材料试件的破坏形态和岩石非常相似, 为脆性剪切破坏。模型材料试件的典型应力-应变关系曲线如图 3 所示。从图可知, 相似材料的应力-应变关系曲线包含弹性变形阶段、塑性变形阶段和应变软化 3 个阶段。其中弹性变形所占比例较大, 而塑性变形持续时间较长。当应力超过峰值应力后, 应变不断增加, 而应力却缓慢降低, 表现出应变软



注: 图中横坐标 M_z 、 W/C 、 M_c 、 d^m 数值均为由小至大顺序排列, 其中 M_z 分别为 8、20、32 kg/m³; W/C 分别为 0.38、0.40、0.42; M_c 分别为 310、350、390 kg/m³; d^m 分别为 0.3~2、0.6~2、1.18~2 mm。

图 1 各因素与 σ^m 的关系

Fig.1 The relationships between various factors and σ^m



(a) 成型后 (b) 强度测试后

图 2 相似材料试件

Fig.2 Specimens of similar material

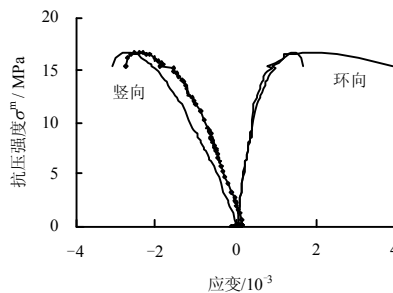


图 3 应力-应变关系曲线

Fig.3 Stress-strain relationship curves

化特性和较强的延性变形能力, 最后进入残余破坏强度阶段。

4.3.2 渗透系数的正交试验结果分析

岩石的渗透率由于应力状态的变化而表现出各向异性, 目前已有许多人采用不同试验手段证明岩石渗透系数随有效围压升高而降低的规律^[26, 30-34]。试验中采用稳定流量法测试渗透系数, 为方便数据处理, 试验中相似材料渗透系数的测试保持相同的围压 (2 MPa) 和渗透流量 (2 ml/min)。

按正交试验结果对数据进行分析, 得到各因素对 k^m 的影响曲线, 从图 4 中可以看出, M_z 和 d^m 对 k^m 影响显著, 随着 M_z 和 d^m 的增大, k^m 逐渐减小, 变化范围为 $3 \times 10^{-6} \sim 5.28 \times 10^{-5}$ cm/s, W/C 和 M_c 对 k^m 影响不是十分明显。模型试验中根据模拟岩体性质选择不同的 M_z 和 d^m 获得不同的 k^m 。

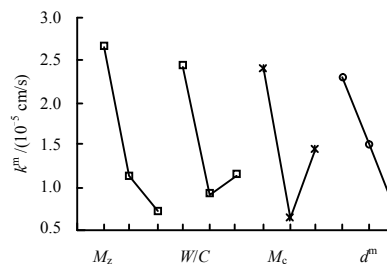


图 4 各因素与 k^m 的关系

Fig.4 The relationships between various factors and k^m

4.3.3 弹性模量、割线弹性模量的试验结果分析

按正交试验结果对数据进行分析, 得到的各因素对 E^m 的影响曲线见图 5(a)、对 μ_g^m 的影响曲线见图 5(b), 从图 5 中可以看出, 各因素对 E^m 和 μ_g^m 影响不是十分明显, 弹性模量在 7~12 GPa 范围内变化, 模型试验中根据模型结构与模拟岩体变形匹配的原则选择不同的配比。

4.3.4 孔隙率的正交试验结果分析

如图 6 所示, 按正交试验结果对数据进行分析, 得到的各因素与 n^m 的贡献关系曲线图。 M_c 和 d^m 对 n^m 影响较显著, n^m 在 22%~28% 范围内变化, 配制的模型材料与原型岩体孔隙率较大的相符合。

4.3.5 泊松比、割线泊松比的正交试验结果分析

按正交试验结果进行统计分析, 得到各因素与 μ^m 图 7(a)、与 μ_g^m 图 7(b) 的关系图, 从图中可以看出, 各因素都对泊松比产生一定的影响, 影响不显著, 泊松比在 0.16~0.25 范围内变化, 泊松比相对稳定, 在原型材料泊松比 μ^p 变化范围内, 基本满足 $C_\mu = 1$ 的条件。

4.4 模型试验配比的选择

根据正交试验结果,基本可以满足与原岩的5个指标相似系数近似等于1,结合模型试验的要求,基于原始应力场相似,模拟中、粗砂岩在富水条件下岩体与结构的相互作用,分析各因素的影响后,确定相似材料的配比(kg/m^3)为混凝土增强剂用量 M_z :水泥用量 M_c :砂用量 M_g 为8:310:1520,水胶比 W/C 取0.4,砂粒径取0.3~2 mm。

根据相似材料的变形特征曲线,配制更高抗压强度和弹性模量的岩体相似材料,可以采用不同级配的石英砂,采用更高标号的P.O.52.5普通硅酸盐水泥,提高配制的相似材料强度和弹性模量;采用中粗河沙配制的相似材料的重度 γ^m 在 $21.7\sim 22.4\text{ kN}/\text{m}^3$,

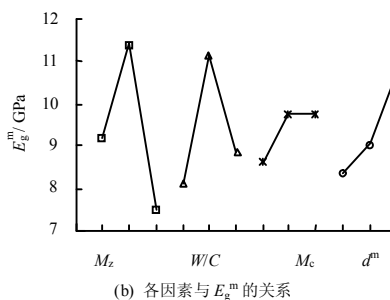
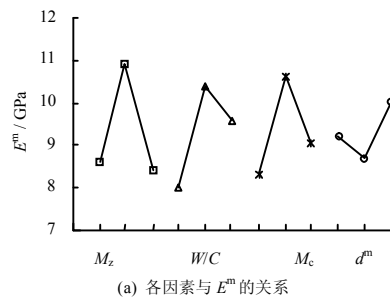


图5 各因素与 E^m 和 E_g^m 的关系
Fig.5 The relationships between various factors and E^m, E_g^m

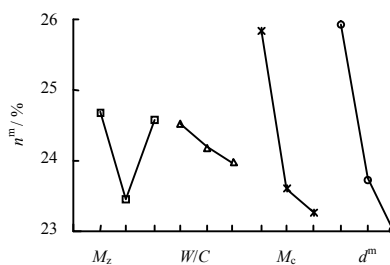


图6 各因素与孔隙率的关系
Fig.6 The relationships between various factors and porosity

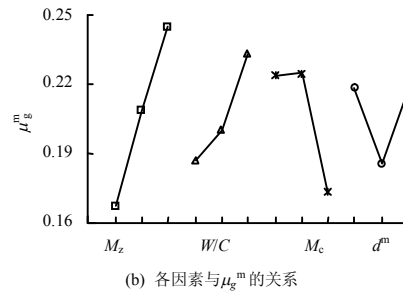
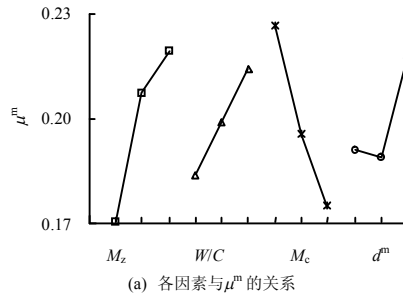


图7 各因素与 μ^m 和 μ_g^m 的关系
Fig.7 The relationships between various factors and μ^m, μ_g^m

原岩 γ^p 为 $24.5\sim 27\text{ kN}/\text{m}^3$,相似材料重度略小,重度相似系数 $C_\gamma \approx 1$,可通过加入重晶石粉或铁球(粉)等重度更大的材料代替部分中粗砂增大材料的重度,使得配制的相似系数 $C_\gamma = 1$ 。

5 结 论

(1) 借助正交试验,确定了由中粗砂、透水混凝土增强剂、水泥和水组成的满足5个相似系数近似等于1的一种多孔隙固-液耦合岩体相似材料。

(2) 利用该相似材料可进行富水条件下多孔隙材料与结构耦合的大型模型试验,材料制备简单,力学性能稳定。

(3) 可通过在相似材料上构造各种裂隙,模拟孔隙、裂隙岩体与地下结构的固-液耦合作用下结构受力和变形特性的研究。

(4) 研究固-液耦合相似材料,实现应力-应变全程相似和水理性相似,为通过模型试验揭示地下结构与富水岩体的固-液耦合失效破坏模式,从而为地下结构设计和灾变风险评估提供试验依据。

(5) 采用石英砂、加入重晶石粉、钢球(粉)材料配制出抗压强度、弹性模量、渗透系数变化范围更大的多孔固-液耦合相似材料,有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 沈泰. 地质力学模型试验技术的进展[J]. 长江科学院院报, 2001, 18(5): 32—36.
SHEN Tai. Development of geomechanic model experiment techniques[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2001, 18(5): 32—36.
- [2] 李树忱, 冯现大, 李术才, 等. 新型固流耦合相似材料的研制及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 281—288.
LI Shu-zhen, FENG Xian-da, LI Shu-cai, et al. Research and development of a new similar material for solid-fluid coupling and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(2): 281—288.
- [3] 陈安敏, 顾金才, 沈俊. 地质力学模型试验技术应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3785—3789.
CHEN An-min, GU Jin-cai, SHEN Jun. Application study on the geomechanical model experiment techniques[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(22): 3785—3789.
- [4] 李晓红, 卢义正, 康勇, 等. 岩石力学试验模拟技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [5] 林韵梅. 试验岩石力学模拟研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [6] 陈陆望, 白世伟. 脆性岩体岩爆倾向性的相似材料配比试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增): 1050—1054.
CHENG Lu-wang, BAI Shi-wei. Proportioning test study on similar material of rockburst tendency of brittle rockmass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(Supp.): 1050—1054.
- [7] 李连贵, 徐文胜, 许迎年, 等. 岩爆模拟材料研制及模拟试验分析[J]. 华中科技大学学报, 2001, 29(6): 80—82.
LI Lian-gui, XU Wen-sheng, XU Ying-nian, et al. Experimental study on simulation materials of rockburst[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2001, 29(6): 80—82.
- [8] 潘一山, 章梦涛, 王来贵, 等. 地下硐室岩爆的相似材料模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 49—56.
PAN Yi-shan, ZHANG Meng-tao, WANG Lai-gui, et al. Study on rockburst by equivalent material simulation tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1997, 19(4): 49—56.
- [9] 徐文胜, 许迎年, 王元汉, 等. 岩爆模拟材料的筛选试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 873—877.
XU Wen-sheng, XU Ying-nian, WANG Yuan-han, et al. Experimental study on simulation materials of rock burst[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(Supp.): 873—877.
- [10] BURGERT W, LIPPMAN M. Models of translator rock bursting in coal[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1981, 18: 285—294.
- [11] 刘宇军, 黄戡, 张可能, 等. 模拟岩石性能的试验研究[J]. 建筑技术开发, 2003, 30(8): 62—63.
LIU Yu-jun, HUANG Kan, ZHANG Ke-neng, et al. Experimentation and research on properties of simulated rock[J]. *Building Technique Development*, 2003, 30(8): 62—63.
- [12] 范鹤, 刘斌, 王成, 等. 高填土涵洞相似材料的试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, 28(8): 1914—1917.
FAN He, LIU Bin, WANG Cheng, et al. Experimental investigation on similarity simulation of imitative materials for high earth-filled culvert[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2007, 28(8): 1914—1917.
- [13] 黄庆享, 张文忠, 侯志成. 固-液耦合试验隔水层相似材料的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增 1): 2813—2818.
HUANG Qing-xiang, ZHANG Wen-zhong, HOU Zhi-cheng. Study of simulation materials of aquifuge for solid-liquid coupling[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(Supp1): 2813—2818.
- [14] 黄庆享. 浅埋煤层保水开采隔水层稳定性的模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 988—992.
HUANG Qing-xiang. Simulation of clay aquifuge stability of water conservation mining in shallow-buried coal seam[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(5): 988—992.
- [15] 左保成, 陈从新, 刘才华. 相似材料试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1805—1808.
ZUO Bao-cheng, CHEN Cong-xin, LIU Cai-hua. Research on similar material experiment[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(11): 1805—1808.
- [16] 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.
HAN Bo-li, CHEN Xia-ling, SONG Yi-le. Research on similar material of rockmass[J]. *Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering*, 1997, 30(2): 6—9.
- [17] 彭海明, 彭振斌, 韩金田. 岩土相似材料研究[J]. 广东土木与建筑, 2002, 12(12): 13—17.
PENG Hai-ming, PENG Zhen-bin, HAN Jin-tian. Research on similar material of geotechnical engineering[J]. *Journal of Guangdong Civil Construction*, 2002, 12(12): 13—17.
- [18] 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]. 水力发电学报, 2004, 23(1): 48—52.
MA Fang-ping, LI Zhong-kui, LUO Guang-fu. NIOS

- model material and its use in geo-mechanical similarity model test[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2004, 23(1): 48—52.
- [19] 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.
- ZHANG Qiang-yong, LI Shu-cai, GUO Xiao-hong, et al. Research and development of new typed cementitious geotechnical similar material for iron crystal sand and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(8): 2126—2130.
- [20] 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.
- WANG Han-peng, LI Shu-cai, ZHANG Qiang-yong, et al. Development of a new geomechanical similar material[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(9): 1842—1847.
- [21] 张强勇, 刘德军, 贾超, 等. 盐岩油气储库介质地质力学模型相似材料的研制[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3581—3586.
- ZHANG Qiang-yong, LIU De-jun, JIA Chao. Development of geomechanical model similitude material for salt rock oil-gas storage medium[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 3581—3586.
- [22] 胡耀青, 赵阳升, 杨栋. 采场变形破坏的三维固液耦合模拟试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2007, 26(4): 520—523.
- HU Yao-qing, ZHAO Yang-sheng, YANG Dong. 3D solid-liquid coupling experiment study of deformation destruction of coal stope[J]. **Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)**, 2007, 26(4): 520—523.
- [23] 黎良杰, 钱鸣高, 殷有泉. 采场底板突水相似材料模拟研究[J]. 煤田地质与勘探, 1996, 25(1): 33—36.
- LI Liang-jie, QIAN Ming-gao, YIN You-quan. Research on the tests of water inrush from floor simulated by similar materials[J]. **Coal Geology and Exploration**, 1996, 25(1): 33—36.
- [24] 龚召熊. 地质力学模型材料试验研究[J]. 长江水利水电科学研究院院报, 1984, 10(1): 32—46.
- GONG Zhao-xiong. Study of analogous material in geomechanical model test[J]. **Journal of Water Conservancy and Hydroelectric Power for Yangtze River Scientific Research Institute**, 1984, 10(1): 32—46.
- [25] 周青春, 李海波, 杨春和, 等. 南水北调西线一期工程砂岩温度、围岩和水压耦合试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3639—3645.
- ZHOU Qing-chun, LI Hai-bo, YANG Chun-he, et al. Experimental study of thermo-mechanical and hydro-mechanical coupling of sandstone for west route of south-to-north water transfer project[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(20): 3639—3645.
- [26] BRACE W F, WALSH J B, FRANGEOS W T. Permeability of granite under high pressure[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1987, 73(6): 2225—2236.
- [27] 彭海明, 彭振斌, 韩金田, 等. 岩性相似材料研究[J]. 广东土木与建筑, 2002, 12(12): 13—17.
- PENG Hai-ming, PENG Zhen-bin, HAN Jin-tian, et al. Lithology simulation material research[J]. **Guangdong Architecture**, 2002, 12(12): 13—17.
- [28] 黄国军, 周澄, 赵海涛. 牛头山双曲拱坝整体稳定三维地质力学模型试验研究[J]. 西北水电, 2004, 2: 49—53.
- HUANG Guo-jun, ZHOU Cheng, ZHAO Hai-tao. Monolithic stability 3D geomechanical model test for Niutoushan double curvature arch dam[J]. **Northwest Water Power**, 2004, 2: 49—53.
- [29] 张宁, 李术才, 李明田, 等. 新型岩石相似材料的研制[J]. 山东大学学报(工学版), 2009, 39(4): 149—154.
- ZHANG Ning, LI Shu-cai, LI Ming-tian. Development of a new rock similar material[J]. **Journal of Shandong University (Engineering Science)**, 2009, 39(4): 149—154.
- [30] 叶源新, 刘光廷. 岩石渗流应力耦合特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2518—2527.
- YE Yuan-xin, LIU Guang-ting. Research on coupling characteristics of fluid flow and stress within rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(14): 2518—2527.
- [31] SCHULZE O, POPP T, KERN H. Development of damage and permeability in deforming rock salt[J]. **Engineering Geology**, 2001, 61(3): 163—180.
- [32] ZHANG S Q, TULLIS T E, SCRUGGS V J. Implications of permeability and its anisotropy in a mica gouge for pore pressure in fault zones[J]. **Tectono Physics**, 2001, 335(1): 37—50.
- [33] 徐德敏, 黄润秋, 张强, 等. 高围压条件下孔隙介质渗透特性试验研究[J]. 工程地质学报, 2007, 15(6): 752—756.
- XU De-min, HUANG Run-qiu, ZHANG Qiang, et al. Experimental study on permeability of porous media under high confining pressure[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2007, 15(6): 752—756.
- [34] 贺玉龙, 杨立中. 围压升降过程中岩体渗透系数变化特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 415—419.
- HE Yu-long, YANG Li-zhong. Testing study on variational characteristics of rockmass permeability under loading-unloading of confining pressure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(3): 415—419.