

文章编号: 1001-4888(2016)02-0263-06

软弱破碎油页岩蠕变特性相似材料实验研究^{*}

王俊光, 刘文峰, 梁冰, 金峤

(辽宁工程技术大学 力学与工程工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘要: 为研究软弱破碎油页岩巷道蠕变变形特性及变化规律, 根据地质力学模型试验相似原理及油页岩岩石物理力学参数, 确定以硅胶粉和河砂为骨料, 以正十四烷、石膏为胶结剂, 通过相似材料配比及相似材料试件基本力学参数、蠕变参数测试, 得到骨胶比为 1 : 0.4、骨料比为 5 : 5 的相似材料, 与岩石蠕变力学特性具有一致性, 基本满足软弱破碎油页岩蠕变相似模型要求的材料配比。上述结果为开展油页岩地下开采巷道运营期的变形、破坏相似材料模型试验打下了坚实的基础。

关键词: 油页岩巷道; 蠕变; 相似材料; 配比试验

中图分类号: TU45

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-15-218

0 引言

油页岩作为石油的可替代能源, 其开发利用日益被人们所重视。油页岩开采方式主要有地下干馏法、露天开采法和地下开采法, 其中我国以地下开采法为主^[1]。油页岩属极软岩石, 孔隙、裂隙发育, 地下开采过程中巷道围岩出现明显蠕变特性, 对地下开采巷道围岩安全稳定造成极大影响, 为此研究软弱破碎油页岩巷道围岩蠕变规律对巷道围岩稳定性控制至关重要。蠕变实验研究, 无论是室内的还是现场的, 最主要的特点是试验条件处在一定的可控状态。但由于蠕变试验设备所限, 一般只开展标准岩石试件的蠕变试验, 正是由于这个特点, 岩石蠕变所得出的结果, 实质上只是岩石蠕变特性在该条件下的一种表现形式, 而不能完全反映出岩体巷道的蠕变特性, 况且油页岩软弱破碎, 层理发育, 加工试件难度大, 试验结果误差大, 而现场蠕变试验难度大, 具有一定局限性。

相似模型试验是研究工程岩体稳定性常用的试验, 其费用低、周期短、制作简单, 可以严格控制研究对象的主要参量, 发现研究对象的变形破坏特征和力学本质, 在模拟材料选择和配比上有可以参考的经验数据^[2]。相似材料的选择对模型试验至关重要, 国内外学者在这一方面做了大量工作。林韵梅、顾大钊等均对此进行过深入、系统的研究^[3-6]。随着相似材料试验技术的发展, 国内外专家学者从不同角度、配制不同的相似材料来模拟不同的岩石。任松等以工业盐、精铁粉为骨料, 环氧树脂、乙二胺为黏合剂构成相似材料, 模拟盐岩蠕变^[7]。史小萌等以水泥和石膏为胶结材料, 石英砂和重晶石粉为骨料的相似材料, 通过正交试验设计, 得到相似材料配比经验公式^[8]。王永岩等以沥青海砂等作为相似材料模拟了深部软岩蠕变特性^[9]。张强勇等以精铁粉、重晶石粉、石英砂、松香、医用酒精等做原料, 配制了模拟盐岩、泥岩和盐岩夹层的相似材料^[10]。以上研究成果没有针对特殊软岩油页岩的蠕变特性的相似材料研究, 但是油页岩蠕变规律研究对油页岩地下开采的稳定性控制具有重要影响。因此, 本文将在相似三

^{*} 收稿日期: 2015-11-10; 修回日期: 2016-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(51404130), 教育部博士点基金(20122121120004)

通讯作者: 王俊光(1980—), 男, 汉族, 讲师, 博士。研究方向: 岩石渗流力学、岩石流变力学、矿山压力与岩层控制。Email: shen-liu_303@163.com

定律基础上,以硅胶粉、河砂为骨料,以正十四烷、石膏为胶结剂,配比油页岩相似材料,开展油页岩巷道相似材料蠕变试验,通过数值散斑及位移监测,分析软弱破碎油页岩巷道蠕变变形、破坏规律。

1 模型试验相似理论及参数确定

按照模型试验的相似原理,要求模型的几何尺寸、边界条件、荷载及相似材料的容重、强度、变形特性均遵循一定的相似规律。根据弹性力学方程或量纲分析方法^[7,9,10],需满足式(1)相似性要求:

$$\left. \begin{aligned} C_{\sigma} &= C_{\gamma} C_L; C_{\sigma} = C_E C_{\epsilon} \\ C_{\delta} &= C_L C_{\epsilon}; C_{\sigma} = C_{\sigma_c} = C_{\sigma_t} = C_E = C_c \\ C_{\epsilon} &= C_{\varphi} = C_{\mu} = C_{\delta} = C_{\gamma} = C_g = 1 \\ C_{\dot{\epsilon}} &= \sqrt{C_g / C_L} \\ C_{\eta} &= \frac{1}{C_{\dot{\epsilon}}} = C_t C_E \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, ϵ 为应变; φ 为内摩擦角; μ 为泊松比; σ 为应力; σ_c 为抗压强度; σ_t 为抗拉强度; E 为弹性模量; c 为粘聚力; γ 为容重; L 为长度; δ 为位移; g 为重力加速度; η 为粘性系数; $\dot{\epsilon}$ 为蠕变速率。

本次试验以吉林桦甸油页岩矿为工程背景,选取几何相似比 $C_L=60$,应力比 $C_{\sigma}=C_L C_{\gamma}=60$,弹性模量和内聚力比 $C_E=C_c=C_{\sigma}/C_{\epsilon}=60$,蠕变速率比 $C_{\dot{\epsilon}}=\sqrt{C_g/C_L}\approx 1/8$,蠕变时间比 $C_t=1/C_{\dot{\epsilon}}=8$,粘性参数比 $C_{\eta}=C_t C_E=480$ 。油页岩基本力学参数和相似材料参数如表 1 所示^[11]。

表 1 油页岩与相似材料物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of oil shale and similar materials

油页岩 材料	密度 (g/cm ³)	抗压强度 (MPa)	弹性模量 (MPa)	泊松比	粘聚力 (MPa)	内摩擦角 (°)
原岩	1.41~1.93	2.82~3.59	276.34~299.27	0.27~0.31	0.65~0.94	27~32
相似材料	1.6	0.055	4.78	0.30	0.01	30

2 相似材料选择及配比试验

2.1 相似材料的选择

油页岩是一种非常复杂的材料,其力学性能和物理参数受外界条件影响较大,特别是受水作用影响显著。目前对于相似材料的研制,国内外相关学者已经做了大量工作,取得了较好的成果,大部分的相似材料胶结剂选择水泥和石膏,水泥和石膏作为相似材料胶结剂干燥成型慢且成型后强度过大,但不同的岩石物理力学特性,特别是含水状态下的蠕变特性各不相同,大多相似材料及配比只适用于相近岩石的力学特性,对于软弱破碎油页岩而言存在较大差异。硅胶粉相对密度较小,并且可调节范围较大,极易吸水,吸水后物理力学性质变化较大,同时硅胶粉呈白色,形成的相似材料色彩明显,对水渗流观测明显,因此本文参考国内外大量研究成果,选择以硅胶粉、河砂为骨料,充分利用两者密度差异,改变相似材料密度;选择石膏和正十四烷作为胶结剂,用正十四烷调节石膏硬度,同时调节相似材料透明度。

2.2 相似材料配比

配制相似材料试件时,首先根据材料的配比称取所需的硅胶粉、河砂和石膏,将其放入仪器内,然后再加入正十四烷和适量水并不断搅拌,使之混合均匀。选用直径为 50mm,高为 100mm 的重塑筒,分 4 层加入材料,用击实仪夯击,每层夯约 7~8 次即可达到设计密度。相邻两层土料间需打毛以使其更好地接触,最后一层则需刮平,装好土料之后 6h 即可脱模,晾晒 3d 后使用,相似材料及制备好的试件如图 1 所示。试验设备采用 XYB605C 微机控制电液伺服万能试验机,试验机最高载荷为 600kN,如图 2 所示。依据正交试验法,本文设计三组配比,骨料比分别为 1:0.2、1:0.4、1:0.6,骨料比分别为 3:7、5:5、7:3,正十四烷和水混合加入,所占比重为 31%,其中水烷比为 1:0.8,相似材料试件按配比不同,制作 3 组,每组制作 6 个试件,开展单轴压缩力学特性试验,单轴压缩曲线如图 3 所示,试验结果见

表 2。



图 1 相似材料及试样

Fig.1 The similar materials and the sample



图 2 微机控制万能试验机

Fig.2 Microcomputer control universal testing machine

表 2 相似材料配比表

Tab.2 Ratio of similar materials

骨胶比	骨料比 (砂：硅)	重度 (g/cm ³)	弹性模量 (MPa)	抗压强度 (MPa)	泊松比	粘聚力 (MPa)	内摩擦角 (°)
1：0.2	3：7	1.13	3.34	0.037	0.35	0.0075	26
	5：5	1.25	3.63	0.041	0.33	0.0082	27
	7：3	1.47	3.92	0.044	0.32	0.0089	27
1：0.4	3：7	1.54	4.49	0.043	0.32	0.0093	28
	5：5	1.62	4.81	0.048	0.31	0.0097	30
	7：3	1.79	4.99	0.054	0.31	0.0122	32
1：0.6	3：7	1.68	4.95	0.058	0.29	0.0134	29
	5：5	1.97	5.13	0.062	0.28	0.0159	34
	7：3	2.52	5.42	0.073	0.26	0.0162	35

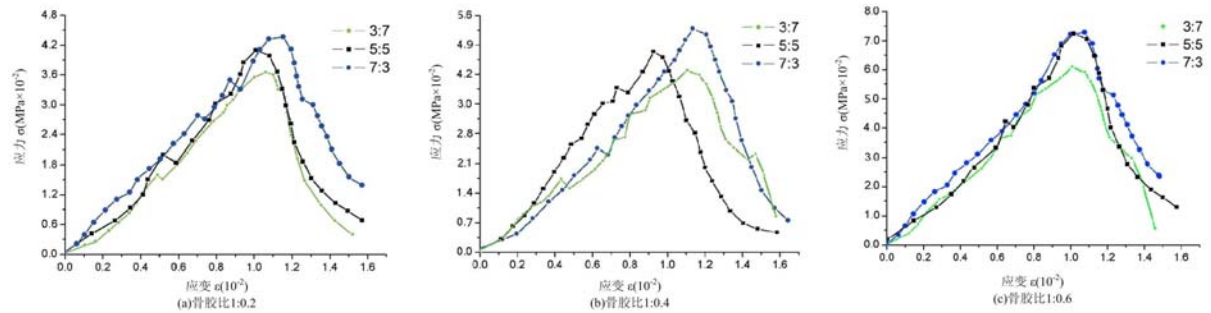


图 3 相似材料的应力—应变曲线图

Fig.3 Similar material stress-strain curve

从图 3 全应力—应变曲线可知,该相似材料制成的模型与岩石材料具有较好的一致性^[12]。从峰后应力—应变特征可见,相似材料具有明显的应变软化特征,相似材料呈现明显的延性破坏特点。从相似材料配比表可见,随着骨胶比增大,相似材料强度越来越高,在同一骨胶比骨条件下,随着骨料比(砂：

硅)比的增大,相似材料的强度也逐渐增大。以骨胶比为 1:0.4、骨料比为 5:5 配制的相似材料,岩石力学特性和相似材料基本力学特性参数符合配比比例要求,基本能够满足相似材料试验要求。

3 相似材料蠕变试验

由于相似材料试件较软,本次蠕变试验在自制研制的三轴压缩蠕变试验装置上进行,验设备示意图见图 4。轴压根据杠杆原理可实现任何大小载荷的加载,满足相似材料压力小的特点;围压通过水压加载,并由独立的稳压装置来控制恒定,可自行调整。根据文献[11]油页岩岩石蠕变实验结果,确定相似材料蠕变试验中围压为 0.008MPa,轴压分别为 0.015MPa、0.025MPa、0.035MPa、0.045MPa、0.055MPa,试验中采用分级循环加载的方法,试验过程及步骤如下:

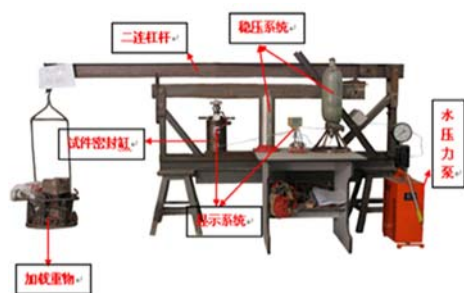


图 4 自制三轴蠕变试验仪

Fig. 4 Self-made triaxial creep test instrument

(1) 将骨胶比为 1:0.4、骨料比为 5:5 的相似材料制成标准试件;

(2) 干燥、打磨、养护晾晒 2d;

(3) 将制备好的试件用塑胶套密封,然后将密封好的试件放入三轴压力室的中间位置;

(4) 合上缸盖并拧紧保证密封,置于自制三轴仪上的指定位置;

(5) 打开排气孔,通过手动压力泵向压力室内注水,排净缸内空气后关闭排气孔;

(6) 安装千分表,缓慢施加围压到给定值;

(7) 轴压加载到所需值;

(8) 观察记录试验数据。

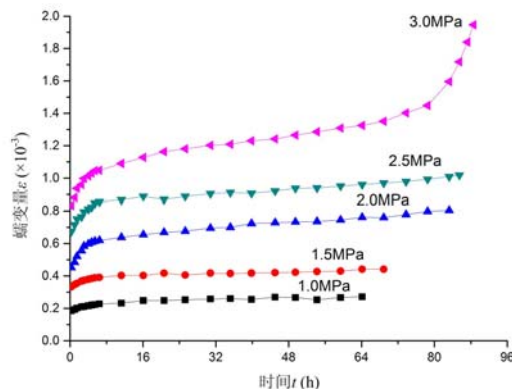


图 5 原岩蠕变试验曲线

Fig. 5 The curve of the original rock creep experiment

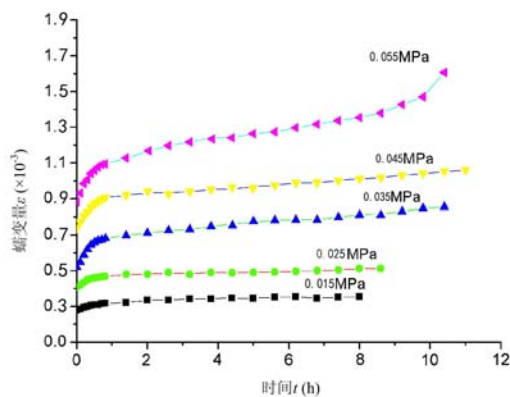


图 6 相似材料蠕变试验曲线

Fig. 6 Creep test curve of similar materials

图 5 给出了围压为 0.5MPa,轴压分别为 1.0MPa、1.5MPa、2.0MPa、2.5MPa、3.0MPa 的岩石蠕变曲线;图 6 给出了围压为 0.008MPa,轴压分别为 0.015MPa、0.025MPa、0.035MPa、0.045MPa、0.055MPa 的相似材料蠕变试验曲线。从图 5 和图 6 对比分析可知,相似材料与原岩材料的蠕变破坏曲线基本一致,均经历蠕变三个阶段,分别为初始蠕变、稳态蠕变和加速蠕变阶段。在减速蠕变阶段,二者的蠕变速率均急剧下降,在稳态蠕变阶段,蠕变速率基本保持定值,而进入加速蠕变阶段,蠕变速率急剧上升,最终发生破坏。同时在对分析中可以发现,原岩蠕变应变量、蠕变时间、加载应力与相似材料比例基本符合相似比要求,受原岩结构及外界环境因素影响,岩石蠕变量较相似材料蠕变量略有增加。利用粘弹塑性蠕变模型对相似材料蠕变参数进行反演,反演结果如表 3 所示。将原岩蠕变参数^[11]与相似材料蠕变参数对比可知,相关蠕变参数基本满足蠕变相似比要求。说明该相似材料配比可以真实、有效地反映油页岩蠕变特性,满足相似材料蠕变模型的要求。

表 3 油页岩相似材料蠕变特性参数
Tab. 3 Creep characteristic parameters of similar material of oil shale

油页岩材料	加载应力		G_1 (GPa)	G_2 (GPa)	η (GPa · h)	η (GPa · h)
	σ_3 (MPa)	σ_1 (MPa)				
相似材料比换算	1 : 60	1 : 60	1 : 60	1 : 60	1 : 480	1 : 480
原岩	0.5	1.0	1.32	1.97	54.56	172.25
	0.5	1.5	1.15	3.30	72.87	151.75
	0.5	2.0	0.81	3.64	62.22	117.96
	0.5	2.5	0.59	2.90	52.32	100.84
	0.5	3.0	0.26	2.51	34.47	82.44
相似材料	0.008	0.015	0.025	0.032	0.115	0.362
	0.008	0.025	0.022	0.056	0.153	0.317
	0.008	0.035	0.014	0.064	0.127	0.247
	0.008	0.045	0.012	0.048	0.113	0.227
	0.008	0.055	0.038	0.043	0.068	0.173

4 结论

(1) 以硅胶粉、河砂为骨料,以正十四烷、石膏为胶结剂,基于相似三定律,进行相似材料配比,得到一种基本能满足油页岩蠕变相似材料模型要求的配比材料;

(2) 随着骨胶比增大,相似材料强度越来越高,在同一骨胶比骨条件下,骨料比越大,相似材料的强度也逐渐增大,当骨胶比为 1 : 0.4、骨料比为 5 : 5 时,常规力学特性与油页岩原岩力学特性具有一致性,满足相似比要求;

(3) 当骨胶比为 1 : 0.4、骨料比为 5 : 5 时,相似材料与油页岩原岩蠕变破坏规律基本一致,均经历初始蠕变、稳态蠕变和加速蠕变三个阶段。通过参数反演,得到相似材料蠕变参数与原岩蠕变参数对比,蠕变参数基本满足相似比,可用其比例配制相似材料,模拟油页岩巷道模型材料。

参考文献:

- [1] 王俊光, 梁冰. 油页岩地下开采巷道围岩流变特性及工程应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(6):685—690 (WANG Junguang, LIANG Bing. Rheological properties of surrounding rock of tunnel for underground ming of oil shale and their engineering application[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(6):685—690(in Chinese))
- [2] 李媛, 王永岩. 沥青砂混合料新型软岩相似材料的试验研究[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2014, 35(5):510—513(LI Yuan, WANG Yongyan. Experimental research on a new soft rock-similar material with asphalt and sand[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2014, 35(5): 510—513(in Chinese))
- [3] 林韵梅. 试验岩石力学——模拟研究[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1984 (LIN Yunmei. Rock mechanics experiment-simulation studies [M]. Beijing: Coal Industry Publishing House,1984(in Chinese))
- [4] 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(GU Dazhao. Similar material and similar model[M]. Xuzhou: China University of Mining Press, 1995(in Chinese))
- [5] Li Q L, Zang W J, Wng Y, et al. Thermal conductivity and thermal mechanism of octadecane from molecular dynamics simulations[J]. Key Engineering Materials, 2012, 501(1):139—144.
- [6] Beck A, Heinemann U, Reidinger M, et al. Thermal transport in straw insulation[J]. J. Therm Envelop Build Sci., 2004, 27(3):227—234.

- [7] 任松, 郭松涛, 姜德义 等. 盐岩蠕变相似模型及相似材料研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增 1):106—110(REN Song, GUO Songtao, JIANG Deyi, et al. Study of creep similar model and creep equivalent material of soft rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Supp. 1):106—110(in Chinese))
- [8] 史小萌, 刘保国, 肖杰. 水泥和石膏胶结相似材料配比的确定方法[J]. 岩土力学, 2015, 36(5):1357—1362 (SHI Xiaomeng, LIU Baoguo, XIAO Jie. A method for determining the ratio of similar materials with cement and plaster as bonding agents[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5):1357—1362(in Chinese))
- [9] 王永岩, 李剑光. 李清海砂作为软岩相似材料的实验研究[J]. 实验力学, 2013, 28(2):242—246(WANG Yongyan, LI Jianguang. Experimental study of soft rock similar material by using mixture of asphalt and sea sand [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(2):242—246(in Chinese))
- [10] 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 Qiangyong, LIU Dejun, JIA Chao, et al. Development of geomechanical model similitude material for salt rock oil-gas storage medium[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12):3581—3586 (in Chinese))
- [11] 王俊光. 水作用下油页岩力学特性及巷道支护技术研究[D]. 辽宁工程技术大学, 2012(WANG Junguang. Mechanical properties and researches of roadway supporting technology of oil shale under the action of water[D]. Liaoning Technical University, 2012(in Chinese))
- [12] 牛双建, 党元恒, 杨大方. 深部软岩新型相似模拟材料的研制[J]. 实验力学, 2015, 30(3):388—393 (NIU Shuangjian, DANG Yuanheng, YANG Dafang. Development of a new simulation material for deep soft rock[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(3):388—393(in Chinese))

On the Similar Material for Creep Characteristic Study of Weak and Broken Oil Shale

WANG Jun-guang, LIU Wen-feng, LIANG Bing, JIN Qiao

(Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

Abstract: In order to study the creep deformation characteristics and variation of roadway made of weak and broken oil shale, according to geomechanics model experiment similarity principle and oil shale rock physical and mechanical parameters, taking silicon powder and river sand as aggregate, taking n-tetradecane and gypsum as cementing agent, through the similar material proportioning and its basic mechanical parameter and creep parameter testing, a similar material was obtained with aggregate-cementing agent ratio 1 : 0.4 and aggregate ratio 5 : 5 respectively. This similar material is consistent with rock creep mechanical characteristics, and basically meets the demands of similar model material proportioning for weak and broken oil shale creep study. Above results lay a solid foundation for the development of similar material model experiment of deformation and failure of oil shale underground mining tunnel, which is in operation.

Keywords: oil shale roadway; creep; similar material; proportioning experiment