

基于 Burgers 模型的软岩流变相似材料的研究

储昭飞, 刘保国, 孙景来, 沈君, 宋宇, 李铁

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 以精铁粉、重晶石粉和石英砂为骨料, 酒精松香溶液为胶结剂, 液压油为黏滞剂, 研制出一种新型软岩流变相似材料(IBSRO)。通过正交试验, 研究该相似材料各组成成分对其弹塑性参数和 Burgers 流变模型参数的影响。试验结果表明, 该相似材料的单轴抗压强度 σ_c , 弹性模量 E , 泊松比 μ , 黏聚力 c , 黏弹性模量 E_1, E_2 以及黏滞系数 η_1, η_2 均主要受酒精松香浓度和液压油含量影响; 酒精松香浓度越大及液压油含量越小, $\sigma_c, E, c, E_1, E_2, \eta_1$ 及 η_2 越大, μ 越小; 内摩擦角 ϕ 主要受(铁粉+重晶石粉)/骨料及液压油含量影响, 且两者越大, ϕ 越小; 初始蠕变率、稳定蠕变率、衰减蠕变时间以及流变比例均随酒精松香浓度增大而减小, 而随液压油含量增大而增大。该相似材料的常规弹塑性参数和流变参数的范围均与实际软岩相对应, 可模拟软岩的瞬时力学特性与流变力学特性。最后, 采用多元线性回归分析提出该材料配比的确定方法, 并在软岩盾构斜井的流变模型试验中得到较好应用与验证。

关键词: 岩石力学; 软岩; 流变; 相似材料; 正交试验; 模型试验

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)05 - 1185 - 14

Research on rheological similar material of soft rock based on Burgers model

CHU Zhaofei, LIU Baoguo, SUN Jinglai, SHEN Jun, SONG Yu, LI Tie

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A new rheological similar material of soft rock(IBSRO) was developed with the iron ore powder, barites powder and sand as aggregate, the solution of rosin and alcohol as glue, and the hydraulic oil as viscous agent. The effects of components of the similar material on the elastic-plastic parameters and Burger's model parameters were investigated through orthogonal tests. The test results indicate that the uniaxial compressive strength(σ_c), elasticity modulus(E), Poisson's ratio(μ), cohesion(c), viscoelasticity modulus(E_1, E_2) and coefficient of viscosity(η_1, η_2) are all affected mainly by the rosin concentration and the content of hydraulic oil. The greater the rosin concentration and the smaller hydraulic oil content, the larger the values of $\sigma_c, E, c, E_1, E_2, \eta_1$ and η_2 and the smaller the values of μ . The internal friction angle(ϕ) is mainly affected by the(iron ore powder + barite powder)/ aggregates and the content of hydraulic oil, and the larger the two factors, the smaller the value of ϕ . The initial creep rate, stable creep rate, primary creep time and rheological strain ratio all decrease with the rosin concentration, and increase with the hydraulic oil content. The range of elastic-plastic and Burger's model parameters of the similar material corresponds to that of soft rock, which can be used to simulate the instantaneous and rheological properties of soft rock. Finally, the method of determining the ratio of the material components based the multivariate linear regression analysis is presented and is verified in the rheological model test on the

收稿日期: 2017 - 09 - 04; **修回日期:** 2018 - 01 - 14

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(C17JB00180); 国家自然科学基金资助项目(71771020, 71631007)

Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(Grant No. C17JB00180) and National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 71771020 and 71631007)

作者简介: 储昭飞(1989 -), 男, 2014年毕业于北京交通大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩石流变力学与隧道围岩支护时效作用方面的研究工作。E-mail: zhaofeichu@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1082

shield shaft of soft rock.

Key words: rock mechanics; soft rock; rheology; similar material; orthogonal test; model test

1 引言

软岩是隧道、坝基等大型工程构筑物常见的承载体,其具有变形大、强度低及显著流变的特性^[1-2]。软岩的强流变性往往给工程施工和结构的长期稳定安全带来巨大威胁^[3]。目前对软岩中工程流变效应的研究,主要采用原岩流变试验和地层应力、位移反分析的方法,得到流变本构方程及参数,继而在理论和数值上进行分析^[4-5]。

采用相似理论配制相似材料进行模拟地下工程开挖支护等问题是一种常见且可靠的方法^[6]。合适的相似材料配制与选取,决定了模型试验结果的可靠性。软岩属于典型的低强度岩石,而在保持与软岩其他特性相似的同时,配制此类低强度相似材料难度较大。以往对中、低强度岩石相似材料的研究中,张强勇等^[7]用铁精粉、重晶石粉、石英砂作为骨料,松香酒精溶液作为胶结剂,配制出铁晶砂胶结相似材料(IBSCM)。李树忱等^[8-9]以砂、滑石粉、重晶石粉等为骨料,石蜡、水泥等为胶结剂,外加调节剂,混合制成可模拟不同渗透性的中、低等强度岩体的固-流耦合相似材料(PSTO 和 SCVO)。杨旭等^[10]采用铁粉、钡粉以及生石灰配成红层软岩相似材料,对材料软化系数及弹塑性参数进行了研究。董金玉等^[11]在张强勇等^[7]提出的铁晶砂胶结相似材料基础上,利用正交试验方法对该材料不同配比下的弹塑性力学性质进行深入研究。

强流变性是软岩另一重要特性,而对于相似材料的流变性质研究,目前成果较少。刘德军等^[12-13]在铁晶砂胶结相似材料基础上,调整配比研究一种可能模拟金坛盐岩流变效应的相似材料,并在该区域盐岩地下油气储库的模型试验中应用。任松等^[14]以不同粒径的工业盐、精铁粉为骨料,环氧树脂、乙二胺为胶结剂,配成金坛盐岩蠕变的相似材料。显然,以往文献中研制的中低强度岩石相似材料多基于材料弹塑性力学性质与水理特性相似配制,而能恰当描述软岩瞬时力学特性与长期流变效应的相似材料研究少之甚少。

林海飞等^[15]在研制“固-气”耦合相似材料时,加入液压油作为调节剂,指出液压油量增多会显著降低材料强度但增大泊松比,而液压油本身就具有良好的黏滞性。为此,本研究将在张强勇等^[7]研制

的铁晶砂胶结相似材料基础上,加配液压油,形成以精铁粉(I)、重晶石粉(B)、石英砂(S)为骨料,酒精松香溶液(R)为胶结剂,液压油(O)为黏滞剂的新型软岩流变相似材料(IBSRO)。再通过4因素4水平的正交试验,研究酒精松香浓度、(铁粉+重晶石粉)/骨料(IB/IBS)、铁粉/(铁粉+重晶石粉)(I/IB)以及液压油含量对材料的瞬时力学参数与流变力学参数的影响。最终采用多元线性回归提出该种新型软岩流变相似材料配比的确定方法。

2 软岩流变的相似准则

相似准则是模型试验的理论基础,也是相似材料配制的前提。在对软岩进行流变效应考虑时,软岩的材料参数包括常规物理力学参数和与时间有关的流变力学参数。常规物理力学参数包括:几何尺寸 l ,重度 γ ,应力 σ ,应变 ε ,弹性模量 E ,泊松比 μ ,黏聚力 c ,摩擦角 φ 和单轴抗压强度 σ_c 等。根据相似理论中的相似三定理^[16]可得到上述参数的原型与模型的相似比 C_x (其中下标 x 代表各参数)。则

$$C_\mu = C_\varphi = C_c = 1 \quad (1)$$

$$C_\sigma = C_E = C_c = C_{\sigma_c} = C_\gamma C_l \quad (2)$$

软岩的流变力学参数由其流变本构决定。目前描述岩石的流变本构较多,其中,Burgers模型能合理描述岩石衰减蠕变与稳定蠕变阶段,为工程广泛应用^[4]。因此本文将推导出岩石为Burgers模型时相似准则。其一维蠕变方程为

$$\varepsilon(t) = \left\{ \frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right) \right\} \sigma_0 \quad (3)$$

蠕变率为

$$\dot{\varepsilon}(t) = \left(\frac{1}{\eta_1} + \frac{1}{\eta_2} e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right) \sigma_0 \quad (4)$$

式中: σ_0 为蠕变应力; ε , $\dot{\varepsilon}$ 分别为应变与应变率; E_1 , E_2 为黏弹性模量, η_1 , η_2 为黏滞系数。Burgers模型如图1所示。

范鹏贤等^[17]指出,由于流变产生的变形破坏与时间 t 有关,而不能采用运动学时间相似关系 $C_t = \sqrt{C_l}$ 。假定黏滞系数 η_1 , η_2 相似比为 C_η ,应变率 $\dot{\varepsilon}$ 相似比为 $C_{\dot{\varepsilon}}$,并由式(1)和(2)可知,蠕变应力 σ_0

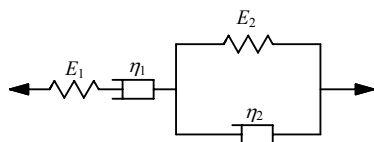


图 1 Burgers 模型示意

Fig.1 Sketch of the Burgers model

及黏弹性模量 E_1, E_2 的相似比应均为 C_σ , 应变 ε 的相似比 $C_\varepsilon = 1$ 。则原岩与相似材料间各参数应满足:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{0, p} &= C_\sigma \sigma_{0, m}, \quad t_p = C_t t_m \\ E_{1, p} &= C_\sigma E_{1, m}, \quad E_{2, p} = C_\sigma E_{2, m} \\ \eta_{1, p} &= C_\eta \eta_{1, m}, \quad \eta_{2, p} = C_\eta \eta_{2, m} \\ \varepsilon_p &= \varepsilon_m, \quad \dot{\varepsilon}_p = C_\varepsilon \dot{\varepsilon}_m \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: 下标“p”, “m”分别代表原岩和相似材料。对于原岩和相似材料, 一维蠕变方程分别为

$$\varepsilon_p(t_p) = \left[\frac{1}{E_{1, p}} + \frac{t_p}{\eta_{1, p}} + \frac{1}{E_{2, p}} \left(1 - e^{-\frac{E_{2, p} t_p}{\eta_{2, p}}} \right) \right] \sigma_{0, p} \quad (6)$$

$$\varepsilon_m(t_m) = \left[\frac{1}{E_{1, m}} + \frac{t_m}{\eta_{1, m}} + \frac{1}{E_{2, m}} \left(1 - e^{-\frac{E_{2, m} t_m}{\eta_{2, m}}} \right) \right] \sigma_{0, m} \quad (7)$$

将式(5)中代入式(6), 并化简整理得

$$\varepsilon_p(t_p) = \left[\frac{1}{E_{1, m}} + \frac{C_\sigma C_t t_m}{C_\eta \eta_{1, m}} + \frac{1}{E_{2, m}} \left(1 - e^{-\frac{C_\sigma C_t E_{2, m} t_m}{C_\eta \eta_{2, m}}} \right) \right] \sigma_{0, m} \quad (8)$$

由式(1)可知原型与模型的应变相似比 C_ε 为 1, 即 $\varepsilon_p(t_p) = \varepsilon_m(t_m)$, 因此式(7)和(8)两式对任意 t_m 应都相等。因此, C_η, C_σ 和 C_t 应满足:

$$C_\eta = C_\sigma C_t \quad (9)$$

同理, 将式(5)代入式(4)中, 并考虑式(6)可得

$$C_\varepsilon = 1/C_t \quad (10)$$

进一步分析易知, 式(9)和(10)同样适用于 Burgers 三维蠕变方程与其他元件流变本构, 只是三维应力与应变均为偏量分量。图 2 为一维 Burgers 模型原岩与相似材料的蠕变曲线关系, 图中 ε_0 为瞬时应变, $t_{s, p}, t_{s, m}$ 为衰减蠕变持续时间。显然有

$$t_{s, p} / t_{s, m} = C_t \quad (11)$$

且初始蠕变率和稳定蠕变率满足:

$$\frac{\sigma_{0, p} / H_p}{\sigma_{0, m} / H_m} = \frac{\sigma_{0, p} / \eta_{1, p}}{\sigma_{0, m} / \eta_{1, m}} = \frac{1}{C_t} \quad (12)$$

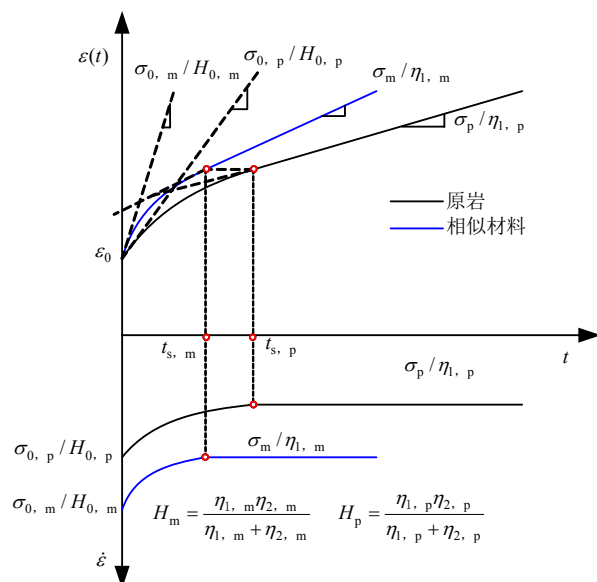


图 2 原岩与相似材料 Burgers 模型蠕变曲线关系

Fig.2 Curves of Burgers model of rock and similar material

由式(10)~(12)和图 2 可知, 原岩与相似材料的瞬时应变与流变比例应相同, 但达到同一蠕变应变的时间不同。无论是衰减蠕变阶段还是稳定蠕变阶段, 相似材料的蠕变率都应是原岩 C_t 倍, 而到达稳定蠕变的时间则是原岩为相似材料的 C_t 倍。因此, 若需在短时间内模拟软岩长期的流变效应, 需选择比原岩更大蠕变率的相似材料。

3 正交试验方案和试验方法

3.1 材料选择与试验方案

相似材料骨料选用的精铁粉(I)、重晶石粉(B)和石英砂(S), 其中, 精铁粉和重晶石粉均为 300 目, 相对密度分别为 4.4 和 3.7, 石英砂为 80 目, 其相对密度为 2.65。胶结剂选用酒精松香溶液(R), 松香为天然松香, 酒精为纯度 99% 的工业酒精, 酒精全部挥发后, 由松香将骨料胶结。液压油(O)选用常见的长城牌液压油, ISO 黏度等级为 68, 黏度指数 100。

为探究相似材料中各组分对材料性质的影响, 需进行正交配比试验分析。试验中松香酒精溶液质量占骨料质量 6%, 胶结剂用量由酒精松香溶液中松香浓度来调整。因此, 正交试验以酒精松香溶液浓度、(铁粉+重晶石粉)/骨料的质量比(IB/BS)、铁粉/(铁粉+重晶石粉)的质量比(I/IB)以及液压油含量作为 4 个控制因素, 每个因素设置 4 级水平。其中, 骨料和胶结剂水平范围参考张强勇等^[7, 11], 液压油的水平则是由试验前试配确定, 最终设计水平如表 1 所示。根据正交设计试验原则, 选用 4 因素 4 水平的正交设计方案 L16(4×4), 材料配比方案如表 2 所示。

表1 相似材料正交试验设计水平

Table 1 Design levels of orthogonal test on similar material

水平	酒精松香浓度/%	IB/IBS	I/IB	液压油含量/%
1	7.5	0.6	0.05	1.75
2	12.5	0.7	0.20	3.50
3	17.5	0.8	0.35	5.25
4	22.5	0.9	0.50	7.00

表2 相似材料配比方案

Table 2 Test schemes of similar material

配比	酒精松香浓度/%	IB/IBS	I/IB	液压油含量/%
1 [#]	7.5	0.6	0.05	1.75
2 [#]	7.5	0.7	0.20	3.50
3 [#]	7.5	0.8	0.35	5.25
4 [#]	7.5	0.9	0.50	7.00
5 [#]	12.5	0.6	0.20	5.25
6 [#]	12.5	0.7	0.05	7.00
7 [#]	12.5	0.8	0.50	1.75
8 [#]	12.5	0.9	0.35	3.50
9 [#]	17.5	0.6	0.35	7.00
10 [#]	17.5	0.7	0.50	5.25
11 [#]	17.5	0.8	0.05	3.50
12 [#]	17.5	0.9	0.20	1.75
13 [#]	22.5	0.6	0.50	3.50
14 [#]	22.5	0.7	0.35	1.75
15 [#]	22.5	0.8	0.20	7.00
16 [#]	22.5	0.9	0.05	5.25

3.2 试样制备与试验过程

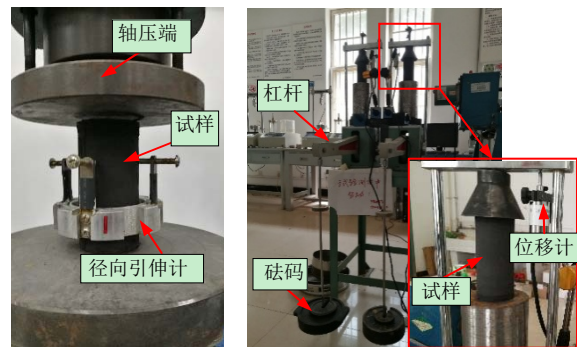
试样制备时对照表2中的配比,先将骨料与松香酒精溶液混合搅拌,最后加入液压油进行二次充分搅拌。混合料搅拌完成后,采用特制模具^[18]和土样模具将试样分别制成直径50 mm、高度100 mm和直径39.1 mm、高80 mm两种规格,对应表2中每一配比,每种规格各制作4个试样,共128(16×8)个。第一种规格试样与标准岩石试样规格相同,其中3个用作单轴压缩试验,1个用于单轴压缩蠕变试验;第二种规格试样与土标准体三轴试样规格相同,4个均用于三轴压缩试验。试样制备过程中,需分层、定量、定数夯实,且各层面应刮毛后再填制下一层,以保证同一配比试样的均匀性。试样脱模后需在干燥环境中养护10 d以上,直至酒精完全挥发,如图3所示。



图3 部分养护中的试样

Fig.3 Some samples in curing

试验前,对所有试样的重度进行测试,求得各配比的重度 γ 均值。试验时,单轴压缩试验采用自制的五联单轴压缩仪(见图4(a)),可同时测得试样的抗压强度 σ_c ,弹性模量 E 和泊松比 μ 。三轴压缩试验采用土体三轴压缩仪,可测得材料黏聚力 c 和摩擦角 φ 。蠕变试验采用由土体固结仪改装的单轴流变仪,如图4(b)所示。Z. Zhang等^[2, 5]研究表明,不同蠕变应力等级下所拟合的流变模型参数有一定差别,为了降低这种差距,本文选择适中的蠕变应力进行测试。因此,每个试样蠕变应力 σ_0 为单轴抗压强度的0.6倍,即 $\sigma_0 = 0.6\sigma_c$,蠕变测量时间为150 h,这样以保证试样能产生明显的初期流变与稳定流变,同时不至于快速发生加速流变破坏。



(a) 单轴压缩试验

(b) 单轴压缩蠕变试验

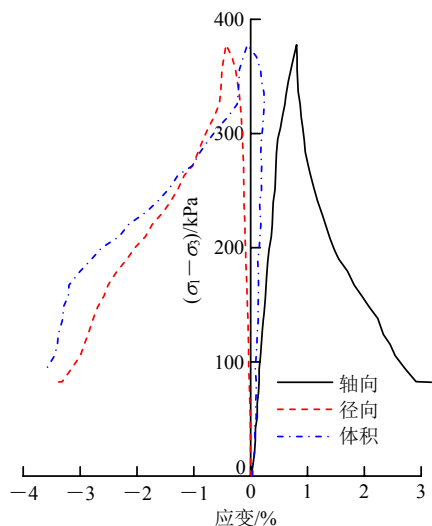
图4 试样单轴压缩与蠕变试验

Fig.4 Uniaxial and triaxial compression tests on samples

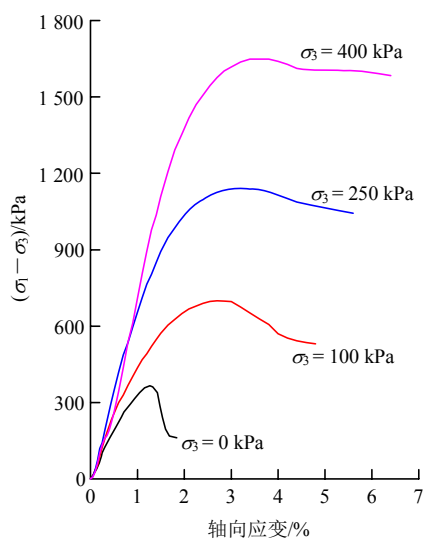
4 试验结果及分析

4.1 常规物理力学参数测试结果

图5为10[#]配比试样单轴压缩和三轴压缩的应力-应变曲线,显然该种相似材料在单轴压缩下表现为一定脆性和应变软化特征,有围压时则呈现较强的塑性流动且延性破坏特性明显,这与典型软岩的应力-应变曲线相似。



(a) 单轴试验



(b) 三轴试验

图 5 10# 单轴、三轴压缩应力 - 应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of uniaxial and triaxial compression tests for the #10 sample

表 3 为不同配比相似材料常规物理力学参数的测试结果。可知相似材料的重度 $\gamma = 24.0 \sim 28.3 \text{ kN/m}^3$ ，单轴抗压强度 $\sigma_c = 0.11 \sim 1.27 \text{ MPa}$ ，弹性模量 $E = 29 \sim 448 \text{ MPa}$ ，泊松比 $\mu = 0.14 \sim 0.42$ ，黏聚力 $c = 27 \sim 528 \text{ kPa}$ ，内摩擦角 $\varphi = 32.2^\circ \sim 42.5^\circ$ 。单轴抗压强度是岩石坚硬程度划分的关键指标，也是相似材料配制时的重要表征指标。规范^[19]指出，软岩的单轴抗压强度 σ_c 一般小于 15 MPa 。由式(2)，并结合室内模型试验几何相似比与重度相似比范围^[16]，可知应力相似比 C_σ 一般应大于 15，从而可得软岩相似材料的单轴抗压强度一般应小于 1 MPa 。因此，本文配制的相似材料基本可满足软岩相似材料所需强度范围。

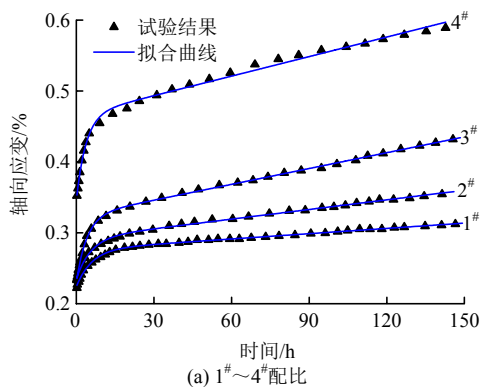
表 3 相似材料常规物理力学参数的配比结果

Table 3 The results of basic parameters of similar materials

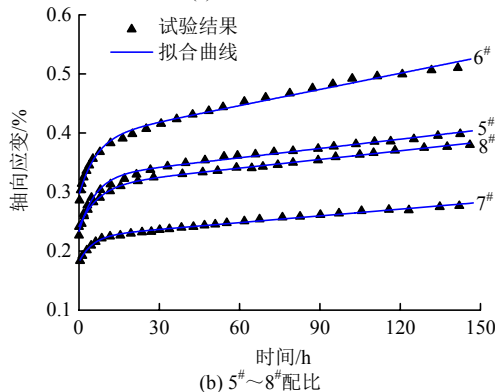
配比	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	σ_c/MPa	E/MPa	μ	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
1#	24.0	0.48	137	0.26	106	42.5
2#	25.7	0.26	75	0.31	63	38.2
3#	25.9	0.19	37	0.37	49	36.1
4#	28.3	0.17	29	0.42	44	34.8
5#	24.7	0.24	68	0.34	57	39.0
6#	25.0	0.11	32	0.39	27	37.0
7#	27.5	0.92	313	0.22	221	38.6
8#	26.5	0.85	202	0.29	232	32.8
9#	24.9	0.34	58	0.37	78	40.1
10#	26.6	0.38	84	0.26	95	36.5
11#	25.1	0.91	252	0.25	224	37.4
12#	26.0	1.06	354	0.17	270	36.4
13#	25.7	1.02	323	0.19	241	39.5
14#	25.6	1.27	448	0.14	295	40.5
15#	25.7	0.25	64	0.29	67	33.7
16#	25.5	0.52	181	0.23	143	32.2

4.2 流变力学参数测试结果

图 6 为不同配比相似材料单轴压缩蠕变试验结果和 Burgers 模型拟合曲线。显然在蠕变荷载 $\sigma_0 = 0.6\sigma_c$ 时，相似材料均表现出明显的衰减蠕变和稳定蠕变两阶段特征，因此采用 Burgers 模型能很好辨识。表 4 为 Burgers 模型各参数的拟合结果，可知 E_1 取值在 $21.9 \sim 394.9 \text{ MPa}$ 范围，略小于瞬时弹性模量 E ， E_2 取值在 $67.1 \sim 1992.5 \text{ MPa}$ 范围，而 η_1 和 η_2 则分别在 $7.09 \sim 320$ 和 $0.319 \sim 18.3 \text{ GPa} \cdot \text{h}$ 范围。



(a) 1#~4# 配比



(b) 5#~8# 配比

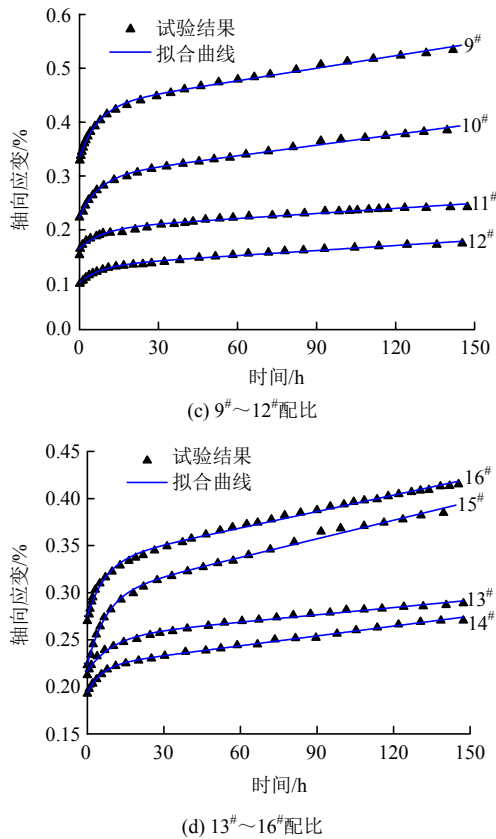


图6 1#~16#配比试样蠕变试验点和 Burgers 拟合曲线
Fig.6 Creep data and fitting curves of Burgers for samples #1 - #16 of similar materials

由于 Burgers 为元件模型，其基本参数 E_1 , E_2 , η_1 及 η_2 物理意义并不十分明确，不能直观反映材料

流变效应。因此结合图 2 和 6，可由材料的初始蠕变率 σ_0/H_m 、稳定蠕变率 σ_0/η_1 、衰减蠕变时间 t_s 以及流变比例 $\varepsilon_c/\varepsilon_t$ 来直观衡量材料流变程度。其中， $\varepsilon_c/\varepsilon_t$ 为蠕变试验结束时蠕变应变 ε_c 占总应变 ε_t 的比例。由表 4 可知，相似材料的初始蠕变率取值范围为 $3.53 \times 10^{-3} \sim 3.26 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$ ，稳定蠕变率在 $1.92 \times 10^{-4} \sim 9.19 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$ 范围，衰减蠕变时间 t_s 在 $9.8 \sim 26.0 \text{ h}$ 范围，流变比例 $\varepsilon_c/\varepsilon_t$ 则在 $25.17\% \sim 44.66\%$ 范围。

以往软岩的流变研究^[2, 5, 20]表明，尽管软岩初始和稳定蠕变率随蠕变应力增大而非线性增大，但初始蠕变率和稳定蠕变率的变化范围一般分别在 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-2}$ 及 $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$ 范围。因此，对应于本研究相似材料，通过调整时间相似比与材料配比即可得到满足实际软岩流变性的材料。

5 各因素敏感性分析

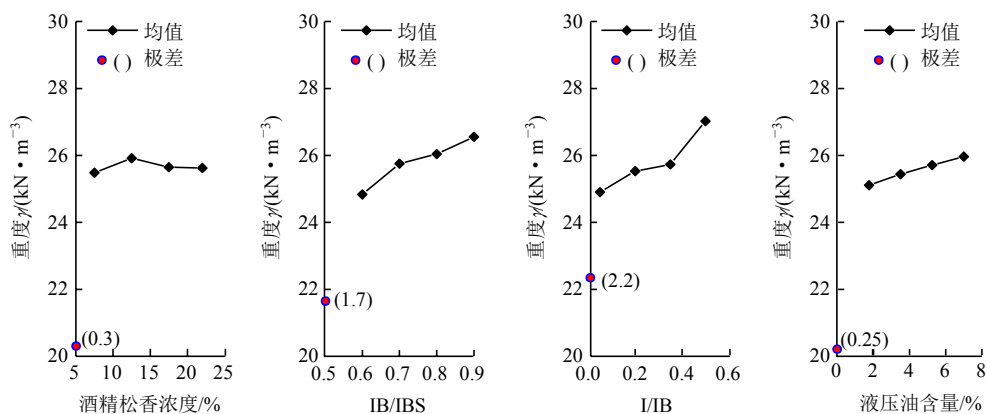
表 3, 4 给出了相似材料 16 组正交配比的常规瞬时力学参数以及流变力学参数试验结果。根据正交试验理论，各参数与表 1 中 4 个因素的敏感性关系可通过极差分析法(直观分析法)^[11]来分析，该方法以参数的均值与极差作为分析指标。

5.1 常规物理力学参数因素敏感性分析

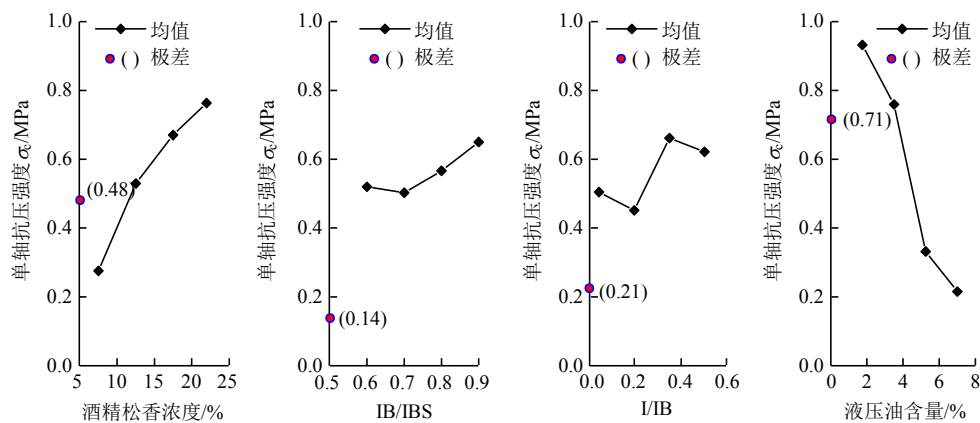
图 7 为表 3 中相似材料 6 个常规力学参数的均

表 4 相似材料 Burgers 模型参数及流变效应参数结果
Table 4 Results of rheological parameters of Burgers of similar materials

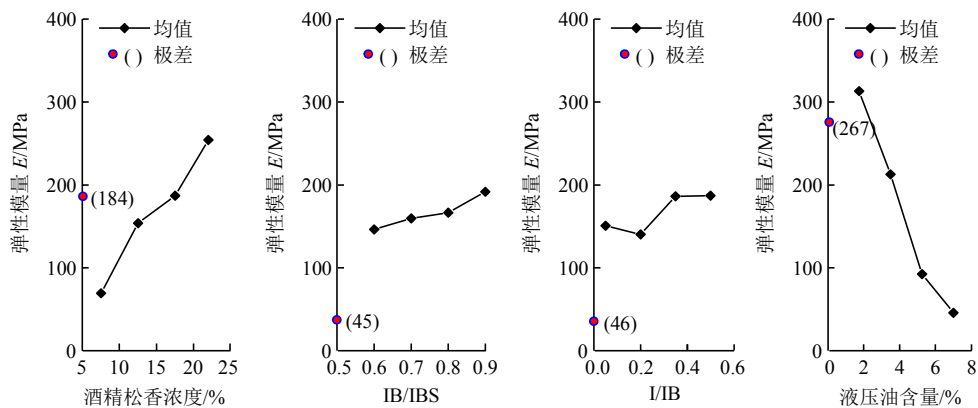
配比	E_1/MPa	$\eta_1/(\text{GPa} \cdot \text{h})$	E_2/MPa	$\eta_2/(\text{GPa} \cdot \text{h})$	初始蠕变率 σ_0/H_m	稳定蠕变率 σ_0/η_1	衰减蠕变时间 t_s/h	流变比例 $\varepsilon_c/\varepsilon_t/\%$
1#	129.5	116.7	556.6	3.3	8.99×10^{-3}	2.49×10^{-4}	18.4	30.71
2#	66.2	34.4	272.3	1.5	1.07×10^{-2}	4.52×10^{-4}	22.8	35.43
3#	49.6	15.4	124	0.5	2.34×10^{-2}	7.44×10^{-4}	23.0	41.00
4#	29.1	11.0	84.9	0.3	3.26×10^{-2}	9.19×10^{-4}	26.0	44.66
5#	61.1	27.2	153.2	0.9	1.59×10^{-2}	5.24×10^{-4}	21.7	39.41
6#	21.9	7.1	67.1	0.4	1.59×10^{-2}	9.12×10^{-4}	23.3	43.31
7#	303.4	145.2	1269.8	6.5	8.89×10^{-3}	3.80×10^{-4}	11.5	30.53
8#	211.5	104.6	736	5.3	1.01×10^{-2}	4.89×10^{-4}	18.8	36.41
9#	60.7	26.0	209	1.5	1.43×10^{-2}	7.78×10^{-4}	22.0	39.39
10#	101.6	34.5	302.9	2.2	1.08×10^{-2}	6.57×10^{-4}	19.0	34.67
11#	330.9	174.0	1443.9	12.3	4.72×10^{-3}	3.13×10^{-4}	11.2	32.58
12#	357.4	204.6	1692.5	16.3	4.21×10^{-3}	3.11×10^{-4}	13.0	32.18
13#	327.8	318.7	1606.3	18.3	3.53×10^{-3}	1.92×10^{-4}	11.8	31.03
14#	394.9	320.0	1934.1	16.1	4.96×10^{-3}	2.37×10^{-4}	9.8	25.17
15#	86.6	22.6	198.5	1.5	8.81×10^{-3}	6.57×10^{-4}	21.0	36.20
16#	133.5	53.7	527.5	3.8	1.08×10^{-2}	5.80×10^{-4}	14.2	33.87



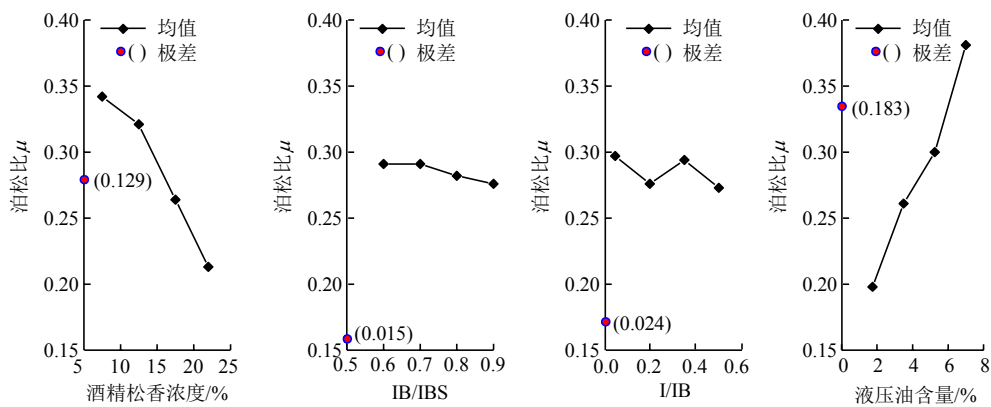
(a) 重度 γ



(b) 单轴抗压强度 σ_c



(c) 弹性模量 E



(d) 泊松比 μ

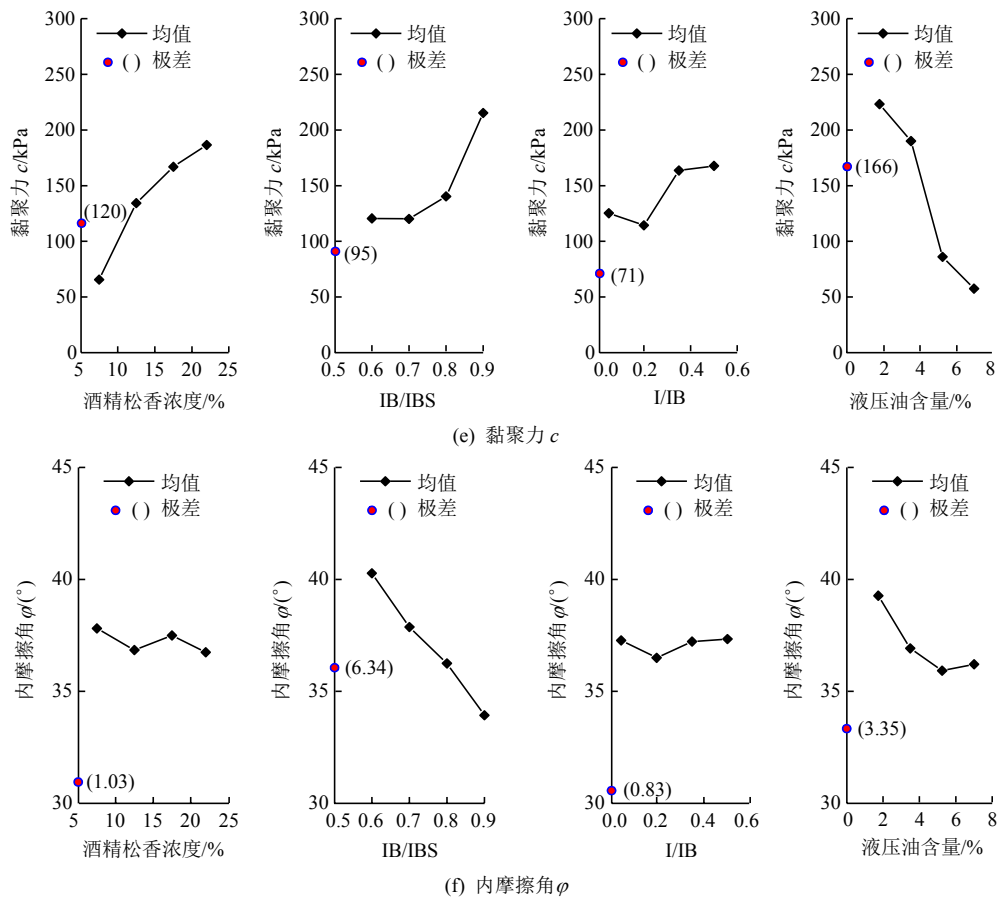


图 7 相似材料常规物理力学参数因素敏感性分析

Fig.7 Sensitivity analysis of the factors affecting basic parameters of similar material

值和极差在 4 个因素影响下的分布。图中各影响因素下的极差值大小均以横坐标轴为零点基线，在纵坐标轴上量化，并在括弧内标实际数值。对于重度 γ (见图 7(a))，由均值分布可知，其随 IB/IBS, I/IB 以及液压油含量增大而增大；由极差大小可知，因素 IB/IBS 和 I/IB 对其影响较大，而酒精松香浓度与液压油含量对其影响较小。

由图 7(b), (c)和(e)可知，相似材料的单轴抗压强度 σ_c 、弹性模量 E 以及黏聚力 c 三者在这 4 个因素影响下，均值与极差变化基本一致。就均值而言，以上 3 参数随酒精松香浓度和 IB/IBS 增大而增大，而随液压油含量增大明显减小。由极差分析可知， σ_c 和 E 受液压油含量影响最大，酒精松香浓度次之，IB/IBS 及 I/IB 影响则相对较小；而对于黏聚力 c ，4 个因素对其影响均较明显，且受液压油含量影响最大，酒精松香浓度次之，IB/IBS 再次之，I/IB 影响最小。

图 7(d)表明，酒精松香浓度及 IB/IBS 越大，材料泊松比 μ 越小；液压油含量越大，则 μ 越大。在 4 个因素中， μ 主要受液压油含量和酒精松香浓度影响，其他因素影响较小。由图 7(f)可知， φ 主要受

IB/IBS 及液压油含量影响，且 IB/IBS 与液压油含量越大， φ 越小。

5.2 流变力学参数因素敏感性分析

类比上述常规物理力学参数因素敏感性分析，由表 4 试验结果可得到 Burgers 模型的 4 个流变参数在各因素影响下的均值与极差分布(见图 8)。显然，参数 E_1 , E_2 , η_1 及 η_2 的均值与极差分布在 4 个因素影响下具有较强的一致性。对于均值， E_1 , E_2 , η_1 及 η_2 均随酒精松香浓度增大而增大，随液压油含量增加而减小； E_1 和 E_2 随各因素变化与 E 变化规律一致。 η_1 和 η_2 随 I/IB 增大而增大，而随 IB/IBS 增大呈现先减后增的趋势。对于极差，对 E_1 , E_2 , η_1 及 η_2 影响最大的因素均为液压油含量，其次为酒精松香浓度，而 IB/IBS 及 I/IB 的影响程度相对较小，且二者相差不大。

如前所述，尽管 Burgers 模型能够很好地拟合相似材料流变前两阶段，但其参数 E_1 , E_2 , η_1 及 η_2 对材料流变效应直观反映较差。图 9 为表 4 中 4 个直观描述流变效应参数的敏感性因素直观分析。显然，初始蠕变率 σ_0/H_m 、稳定蠕变率 σ_0/η_1 、衰减蠕变时间 t_s 以及流变比例 $\varepsilon_c/\varepsilon_1$ 均随酒精松香浓度增

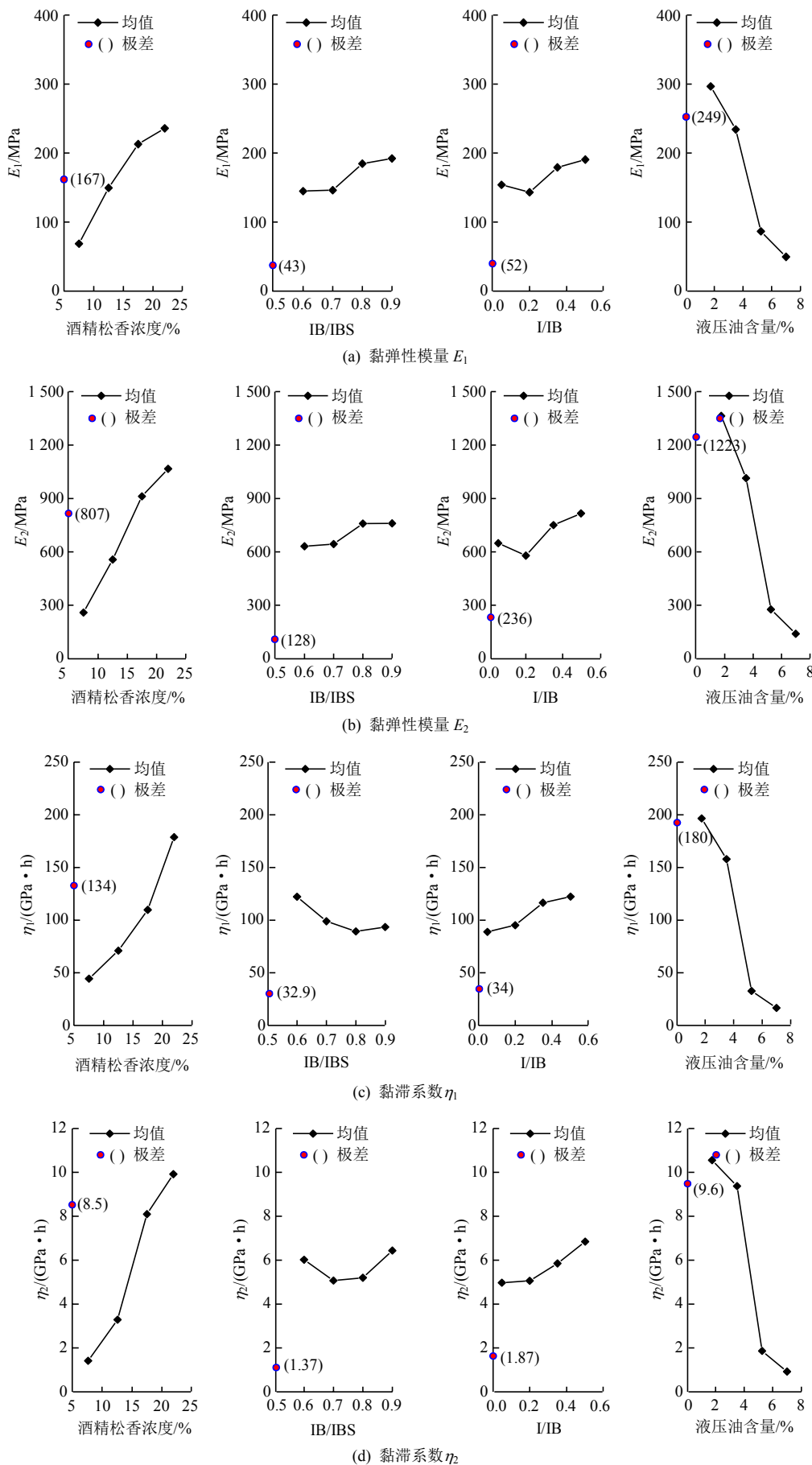


图 8 Burgers 模型参数因素敏感性分析

Fig.8 Sensitivity analysis of the parameters in Burger's model

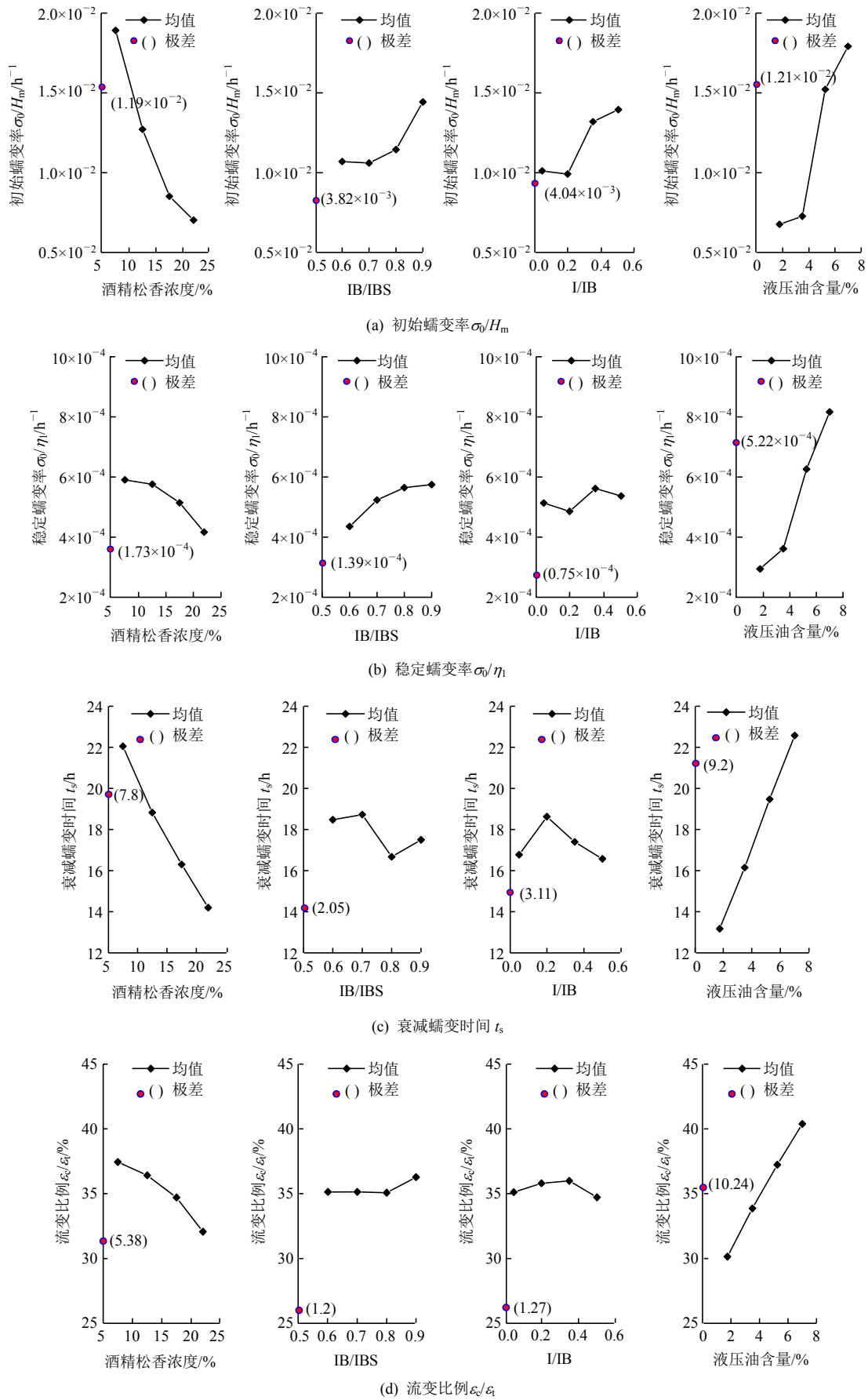


图9 流变效应参数因素敏感性分析

Fig.9 Sensitivity analysis of the factors affecting rheological effect

大而减小，随液压油含量增大而增大。初始蠕变率、稳定蠕变率以及流变比例随 IB/IBS 增大而非线性增大；而随 I/IB 增大，4 个参数均值皆在一定范围内波动，变化趋势不明显。

从图 9 中各因素影响下的极差来看，4 个参数均受液压油含量影响最大，酒精松香浓度次之，而 IB/IBS 以及 I/IB 影响较小，且两者相差不大。因此可看出，液压油含量与酒精松香浓度对相似材料的流变性起主控作用，且液压油含量越大、酒精松香浓度越小，材料的流变效应越明显。

6 相似材料配比的确定方法

目前，对于相似材料配比的确定，一般先基于正交配比试验得到各因素对目标关键指标的影响规律，再采用试配法得到合适目标配比^[16]。然而，试配法过程繁琐且盲目，史小萌等^[18]基于多元线性回归分析，确定了相似材料 γ 、 σ_c 和 E 与配比 3 个因素的关系，该方法比试配法更为高效、准确。为此，本文尝试基于多元线性回归方法来确定软岩流变相似材料(IBSRO)的配比。由以上各参数的因素敏感性分析可知，弹性模量 E 、单轴抗压强度 σ_c 、黏聚力 c 以及黏弹性模量 E_1, E_2 受各因素的影响趋势与程度基本一致，因此各参数间应存在一定关系。由表 3, 4 的配比结果，可得到 E 与 σ_c, c, E_1 及 E_2 的关系(见图 10, 11)，且相应拟合关系式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_c &= 0.0028E + 0.1 \quad (R^2 = 0.96) \\ c &= 0.0007E + 0.0278 \quad (R^2 = 0.94) \\ E_1 &= 0.96E + 7.49 \quad (R^2 = 0.97) \\ E_2 &= 1.798E^{1.16} \quad (R^2 = 0.96) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

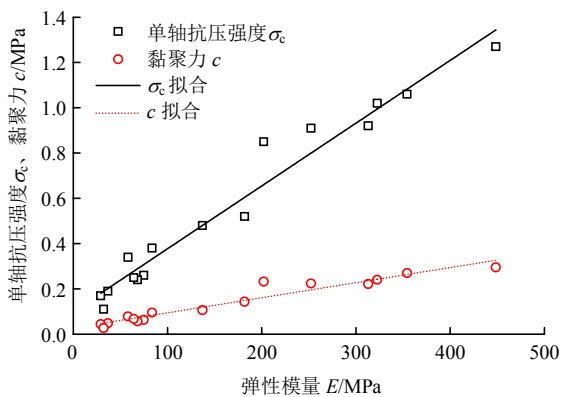


图 10 弹性模量 E 与 σ_c, c 的相关关系

Fig.10 Correlation of elasticity modulus E with σ_c and c

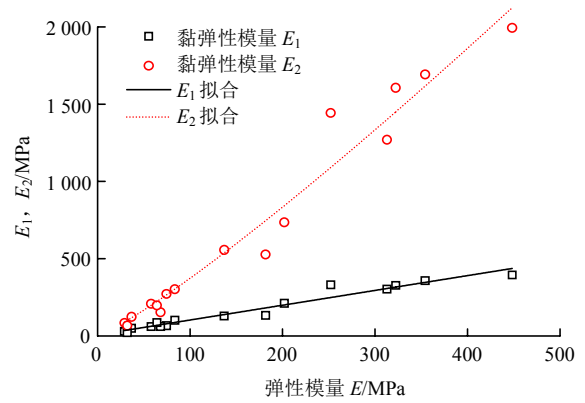


图 11 弹性模量 E 与 E_1, E_2 的相关关系

Fig.11 Correlation of elasticity modulus E with E_1 and E_2

式(13)中各参数单位均为 MPa。显然 E 与 σ_c, c 和 E_1 呈正比例关系，与 E_2 呈幂函数关系。因此，相似材料配比确定时可弹性模量 E 为主控参数，总体代表 σ_c, c, E_1 及 E_2 。

同理，黏滞系数 η_1 与 η_2 受各因素的影响趋势与程度基本一致，且泊松比 μ 对各因素的敏感性与 η_1, η_2 相同，但受主要因素影响趋势却相反。考虑材料的流变性，由表 3, 4 可得到 η_1 与 η_2, μ 的相关关系(见图 12)。可见 η_1 与 η_2 成正比关系， η_1 与 μ 呈幂函数关系，相应拟合表达式为

$$\left. \begin{aligned} \eta_2 &= 0.0696\eta_1 - 0.789 \quad (R^2 = 0.94) \\ \mu &= 0.704\eta_1^{-0.236} \quad (R^2 = 0.84) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

由此可知，可用 η_1 作为控制参数来反应 η_2 及 μ 。

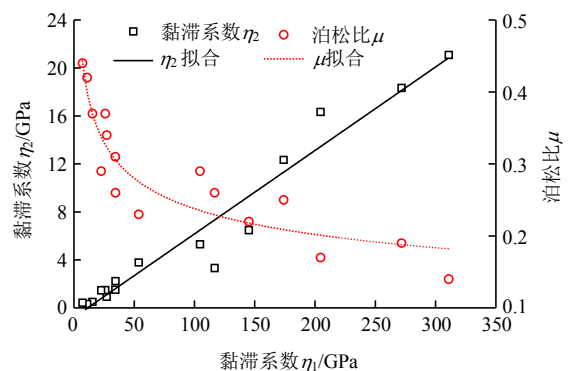


图 12 黏滞系数 η_1 与 η_2, μ 相关关系

Fig.12 Correlation of viscosity coefficients η_1 with η_2 and μ

此外，由于重度 γ 和内摩擦角 ϕ 分别是相似材料的基本物理参数和塑性参数，且二者对各影响因素敏感性规律性与其他参数均不同，因此 γ 与 ϕ 亦作为主要控制参数。至此可知，可用重度 γ 、弹性模量 E 、内摩擦角 ϕ 及黏滞系数 η_1 这 4 个主控参数进行确

定软岩流变相似材料(IBSRO)的配比。设 4 个影响因素中酒精松香浓度为 X_1 , IB/IBS 为 X_2 , I/IB 为 X_3 , 液压油含量为 X_4 , 则由多元线性回归分析, 可得到 4 个主控参数与 4 个因素间的回归方程如下:

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= -2.64X_1 + 5.6X_2 + 4.4X_3 + 3X_4 + 20.7 \\ E &= 1175.5X_1 + 142.9X_2 + 103.2X_3 - 5269.3X_4 + 84.8 \\ \varphi &= -8.6X_1 - 20.6X_2 + 0.63X_3 - 58X_4 + 56.2 \\ \eta_1 &= 874.7X_1 - 80.8X_2 + 98.5X_3 - 3851.3X_4 + 171.4 \end{aligned} \right\} (15)$$

式(15)中, 各参数的复相关系数依次为 0.93, 0.94, 0.86, 0.83, 具有较好回归性。因此, 在已知材料配比时, 结合式(13)~(15), 即可求得相似材料各参数。然而, 实际中一般先由原岩参数与相似比确定目标相似材料参数, 再选择合适配比配制。因此由式(15)反解出材料配比表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= -0.026\gamma - 0.0026E - 0.0411\varphi + 0.0041\eta_1 + 2.357 \\ X_2 &= 0.021\gamma + 0.0031E - 0.0049\varphi - 0.0042\eta_1 + 0.293 \\ X_3 &= 0.1868\gamma - 0.005E - 0.012\varphi + 0.0071\eta_1 - 3.99 \\ X_4 &= -0.0016\gamma - 0.0008E - 0.0095\varphi + 0.0009\eta_1 + 0.472 \end{aligned} \right\} (16)$$

结合式(13), (14)和(16), 即可初步确定本文提出的软岩流变相似材料(IBSRO)的配比。然而, 根据式(13)~(16)得到的配比会因拟合误差而与目标配比间存在一定偏差, 而此时参照节 4 各因素对参数的影响规律进行微调即可。

7 软岩盾构斜井的流变模型试验

以神华新街矿区盾构斜井的长期流变平面模型试验为背景。模型试验对应实际地层为泥质粉砂岩, 具有较强流变性, 盾构斜井埋深为 150 m。模型试验几何相似比 $C_l = 1 : 35$, 重度相似比 $C_\gamma = 1 : 0.85$, 时间相似比 $C_t = 1 : 4$, 应力相似比 $C_\sigma = 1 : 30$, 黏滞系数相似比 $C_\eta = 1 : 120$ 。模型试验前, 测得泥质粉砂岩的常规力学参数和 Burgers 模型参数如表 5 所示, 结合以上相似比, 则可换算出所需目标相似材料的常规参数力学与 Burgers 参数如表 6 所示。再将目标材料的 4 个主控参数 γ , E , φ 以及 η_1 代入式(16), 可求得的相似材料的配比如表 7 所示。

根据表 7 的配比配制出泥质粉砂岩的实际相似材料, 并测得其常规力学参数与 Burgers 模型参数亦如表 6 所示。表 6 亦列出目标相似材料与实际相

表 5 泥质粉砂岩参数

Table 5 The parameters of muddy siltstone

类型	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	σ_c/MPa	E/GPa	μ	c/MPa	$\varphi/(\text{°})$
常规	22.7	16.8	4.95	0.29	4.2	36.5
类型	E_1/GPa	$\eta_1/(\text{GPa} \cdot \text{h})$	E_2/GPa	$\eta_2/(\text{GPa} \cdot \text{h})$		
流变	5.21	11400	20.45	699		

表 6 泥质粉砂岩相似材料的参数及其误差

Table 6 Parameters and errors of similar material of muddy siltstone

类型	$\gamma' / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	σ_c' / MPa	E' / MPa	μ'	c' / kPa	$\varphi' / (\text{°})$	E_1' / MPa	$\eta_1' / (\text{GPa} \cdot \text{h})$	E_2' / MPa	$\eta_2' / (\text{GPa} \cdot \text{h})$
目标材料	26.5	0.52	165	0.29	143	36.5	173	95	681	5.8
实际材料	26.1	0.57	189	0.25	161	38.0	202	112	793	7.1
误差/%	1.5	9.6	14.5	13.7	12.6	4.1	16.7	17.9	16.4	22.7

表 7 泥质粉砂岩相似材料的配比

Table 7 Proportions of similar material of muddy siltstone

酒精松香浓度/%	IB/IBS	I/IB	液压油含量/%
12.8	0.78	0.37	3.6

似材料间的误差百分比, 可以看出, 实际相似材料与目标材料间的各参数值存在一定误差, 但所有参数误差百分比基本小于 20%, 这表明根据上述的配比确定方法来配制实际软岩相似材料具有较好的准确性与可靠性。

图 13 为该平面模型试验的整体图, 试验台架尺寸为 1.6 m×1.4 m×0.3 m, 地层竖向原岩应力由顶



图 13 盾构斜井流变模型试验

Fig.13 Rheological model test of the shield inclined shaft

部高 1 m 的重铁块竖向静力加载。盾构隧道模型直径 0.2 m, 管片厚 12 mm, 采用石膏浇筑。试验时, 开挖支护后再施加竖向原岩载荷。试验中对斜井拱顶、拱腰和拱底处的地层应力与衬砌内侧位移等进行了监测。

图 14 为管片结构拱顶、拱腰和拱底三处的内壁径向位移 u_r 和壁后径向应力 P_s 随时间变化情况。显然, 在地层荷载施加瞬间, 管片壁后受到瞬时的地层荷载, 并产生相应的瞬时变形, 之后随时间增长其所受荷载与产生的变形均逐渐增大。由此表明本文研制的相似材料能很好地适用于模拟实际泥质粉砂岩地层中隧道围岩与支护间的长期时效作用。

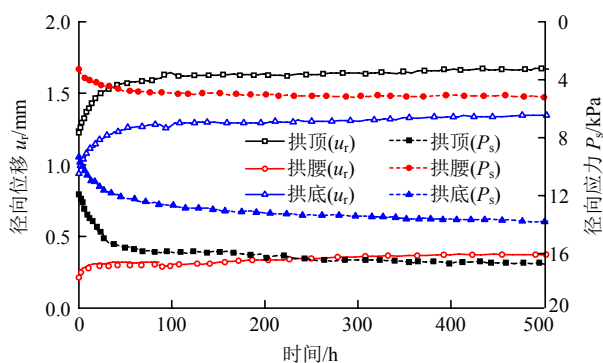


图 14 管片内壁径向位移与壁后径向应力

Fig.14 Radial displacements and stresses of segment

8 结 论

本文以精铁粉、重晶石粉和石英砂为骨料, 酒精松香溶液为胶结剂, 液压油为黏滞剂, 研制出一种模拟软岩的瞬时力学特性与流变力学特性的新型软岩流变相似材料(IBSRO)。再通过正交试验, 研究各组分对材料的瞬时弹塑性参数与 Burgers 模型流变参数的影响。主要研究成果如下:

(1) 该相似材料的常规弹塑性参数和 Burgers 模型流变参数的范围均与实际软岩相对应, 可模拟软岩的瞬时力学特性与流变力学特性。

(2) 该材料单轴抗压强度 σ_c 、弹性模量 E 、泊松比 μ 、黏聚力 c 、黏弹性模量 E_1 , E_2 以及黏滞系数 η_1 , η_2 均主要受酒精松香浓度和液压油含量影响, 且酒精松香浓度越大、液压油含量越小, σ_c , E , c , E_1 , E_2 , η_1 及 η_2 越大, μ 越小。内摩擦角 φ 主要受铁粉和重晶石粉共占骨料比及液压油含量影响, 且两者越大, φ 越小。初始蠕变率、稳定蠕变率、衰减蠕变时间以及流变比例均随酒精松香浓度增大而减

小, 随液压油含量增大而增大。

(3) 采用多元线性回归分析提出该相似材料配比的确定方法, 并在软岩盾构斜井的流变模型试验中得到较好的应用与验证。

参考文献(References):

- [1] 邓华锋, 原先凡, 李建林, 等. 软岩三轴加-卸载试验的破坏特征及抗压强度取值方法研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 959 - 971.(DENG Huafeng, YUAN Xianfan, LI Jianlin, et al. Research on failure characteristics and determination method for compressive strength of soft rock in triaxial loading and unloading tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 959 - 971.(in Chinese))
- [2] ZHANG Z, XU W, WANG W, et al. Triaxial creep tests of rock from the compressive zone of dam foundation in Xiangjiaba Hydropower Station[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 50: 133 - 139.
- [3] 孙 钧, 潘晓明. 隧道软弱围岩挤压大变形非线性流变力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1 957 - 1 968.(SUN Jun, PAN Xiaoming. Research on large squeezing deformation and its nonlinear rheological mechanical characteristics of tunnel with weak surrounding rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1 957 - 1 968.(in Chinese))
- [4] ASADOLLAHPOUR E, RAHMANNEJAD R, ASGHARI A, et al. Back analysis of closure parameters of Panet equation and Burger's model of Babolak water tunnel conveyance[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 68: 159 - 166.
- [5] 田洪铭, 陈卫忠, 田 田, 等. 软岩蠕变损伤特性的试验与理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 610 - 617.(TIAN Hongming, CHEN Weizhong, TIAN Tian, et al. Experimental and theoretical studies of creep damage behavior of soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 610 - 617.(in Chinese))
- [6] HUANG F, ZHU H, XU Q, et al. The effect of weak interlayer on the failure pattern of rock mass around tunnel-scaled model tests and numerical analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2013, 35(35): 207 - 218.
- [7] 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): 2 126 - 2 130.(ZHANG Qiangyong, LI Shucai, GUO Xiaohong, 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): 2 126 - 2 130.(in Chinese))
- [8] 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 Shuchen, FENG Xianda, LI Shucui, 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.(in Chinese))
- [9] 李术才, 周毅, 李利平, 等. 地下工程流-固耦合模型试验新型相似材料的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1 128 - 1 137.(LI Shucui, ZHOU Yi, LI Liping, et al. Development and application of a new similar material for underground engineering fluid-solid coupling model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1 128 - 1 137.(in Chinese))
- [10] 杨旭, 苏定立, 周斌, 等. 红层软岩模型试验相似材料的配比试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2 231 - 2 237.(YANG Xu, SU Dingli, ZHOU Bin, et al. Experiment study on similarity ratio of similar material for model test on red-bed soft rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(8): 2 231 - 2 237.(in Chinese))
- [11] 董金玉, 杨继红, 杨国香, 等. 基于正交设计的模型试验相似材料的配比试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(1): 44 - 49.(DONG Jinyu, YANG Jihong, YANG Guoxiang, et al. Research on similar material proportioning test of model test based on orthogonal design[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 44 - 49.(in Chinese))
- [12] 刘德军, 吕晶, 张强勇, 等. 具有流变特性的盐岩相似材料的研制及应用[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1 590 - 1 595.(LIU Dejun, LÜ Jing, ZHANG Qiangyong, et al. Development and application of salt rock-similar materials with rheological property[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(10): 1 590 - 1 595.(in Chinese))
- [13] 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): 3 581 - 3 586.(ZHANG Qiangyong, LIU Dejun, JIA Chao, et al. Development of geotechnical model similitude material for salt rock oil-gas storage medium[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3 581 - 3 586.(in Chinese))
- [14] 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 salt rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Supp.1): 106 - 110.(in Chinese))
- [15] 林海飞, 翟雨龙, 李树刚, 等. 基于正交设计的“固-气”耦合相似材料力学与渗透特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(3): 672 - 679.(LIN Haifei, ZHAI Yulong, LI Shugang, et al. Research on mechanics and permeability characteristics of similar material of solid-gas coupling based on orthogonal design[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 672 - 679.(in Chinese))
- [16] 杜彬, 刘保国. 相似模拟及其在盾构施工煤矿斜井中应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 1 - 18.(DU Bin, LIU Baoguo. Similarity simulation and its application in shield inclined shaft[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016: 1 - 18.(in Chinese))
- [17] 范鹏贤, 王明洋, 邢灏喆, 等. 模型试验中材料变形破坏的时间相似问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1 843 - 1 851.(FAN Pengxian, WANG Mingyang, XING Haozhe, et al. Time-dependent problems of deformation and failure in geo-mechanical model tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1 843 - 1 851.(in Chinese))
- [18] 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): 1 357 - 1 362.(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): 1 357 - 1 362.(in Chinese))
- [19] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50021—2001 岩土工程勘察规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.(The National Standards Compilation Group of the People's Republic of China. GB 50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009.(in Chinese))
- [20] MARANINI E, BRIGNOLI M. Creep behaviour of a weak rock: experimental characterization[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(1): 127 - 138.