

文章编号: 1001-4888(2015)03-0388-07

深部软岩新型相似模拟材料的研制^{*}

牛双建^{1,2,3,4}, 党元恒^{1,4}, 杨大方²

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南焦作 454003;

2. 河南理工大学 深部矿井建设重点学科开放实验室, 河南焦作 454003;

3. 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;

4. 煤炭安全生产河南省协同创新中心, 河南焦作 454003)

摘要: 在总结以往相似模拟材料特点的基础上, 结合深部软岩强度、变形特征, 本着相似材料组分简单、模型制作便捷等原则, 研制了仅以河砂为骨料, 松香酒精溶液为粘结剂的深部软岩新型相似模拟材料。通过对不同配比试样进行单、三轴压缩、巴西劈裂试验, 获得了不同配比条件下该相似模拟材料的强度、变形、破坏特征。研究表明, 通过简单的配比调配, 该相似模拟材料可以较好地模拟深部大多类型的软岩, 且具有组分简单、模型制作便捷、力学性能稳定、无毒无污染、价格低廉、一定程度上可重复利用等特点。

关键词: 深部软岩; 物理模拟; 相似模拟材料; 单轴压缩; 三轴压缩

中图分类号: TD315

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-14-215

0 引言

我国煤炭储量埋深在 1000m 以下的有 2.95×10^{16} t, 占煤炭资源总量的 53%^[1]。据相关部门统计, 截止到 2013 年 7 月, 我国煤矿开采深度达 1000m 以上的矿井有 47 余处, 预计未来将有更多矿井进入深部开采。深部复杂的地质、力学环境, 致使深部开采遇到的问题层出不穷, 严重制约深部煤炭资源的开采利用, 对深部开采相关科学问题展开深入研究具有重要的现实意义。物理模拟可以对深部开采中诸多工程开展的整个动态过程实现室内再现, 可控性强, 是对深部开采相关科学问题开展深入研究的一种重要手段和方法。在进行物理模拟前, 首要工作就是选择与模拟对象相似的模拟材料, 其选择的是否恰当, 将直接影响物理模拟试验结果。

一般情况下, 相似模拟材料是由填料和胶结料组合而成的, 而相似模拟材料的力学性质很大程度上是由胶结料的力学性质决定的。根据以往的分类经验, 胶结料可分为无机胶结料(如石膏、水泥、石灰、碳酸钙等), 碳氢类石油产品胶结料(如石蜡、凡士林、地蜡、油类等), 合成树脂胶结料(如尿素、环氧树脂等), 天然胶质产品胶结料(如松香、沥青等)四类。不同的胶结料所制备的相似模拟材料也是各有特点的, 如具有脆性破坏特点的相似材料是由无机胶结料制备的, 具有弹塑性和塑性变形特点的是由碳氢类石油产品胶结料制备的, 而具有脆性直至塑性变化特点的是由合成树脂胶结料制备的。

以上是传统的常用相似模拟材料的组分及制备, 随着物理模拟试验研究的深入, 又出现了许多新的

^{*} 收稿日期: 2014-10-21; 修回日期: 2015-01-07

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51304068); 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGDUK1207); 河南理工大学深部矿井建设重点学科开放实验室开放基金项目(2012KF-03); 河南理工大学博士基金项目(B2012-048)

通讯作者: 杨大方(1984—), 女, 工学硕士, 讲师, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。Email: yangdafang@hpu.edu.cn

相似模拟材料,如 MIB 材料^[2]、NIOS 材料^[3]、铁晶砂胶结岩土相似材料^[3]等。这些相似模拟材料虽具有较多的优点,但最突出的特点是大多组分过多,致使模型制作过程繁琐、成型困难;其次,其变形特征与深部软岩变形特征存在一定的差异,且模型废料不能重复利用。本文鉴于深部软岩大多具备变形模量小、强度低、峰后延性变形显著等特征,本着相似材料应当组分简单、模型制作便捷、成型容易、价格低廉、性能稳定、无毒无污染、一定程度上可以重复利用等原则,研制了一种新型的深部软岩相似模拟材料。

1 材料选择及试样制作

1.1 材料选择

查阅相关文献^[2-11]综合分析比较后,决定用细河砂作填料,松香酒精溶液(图 1)作胶结剂研制相似模拟材料,做完组分配比设计后,将搅拌均匀的配料做成适合试验的模型并充分干燥。

1.2 试样制作

将松香与砂的质量比作为这次的配比指标,做了 6 种配比的试验方案,松香与砂的质量比分别是 0.93%、1.75%、2.47%、3.68%、4.80%、5.41%,根据设计的配比分别做成不同类型的试样,用于各项力学参数和变形参数的测定,对不同配比的模型材料的力学参数和变形特征进行评价。

主要制作三类试样,用于单轴压缩测定抗压强度及变形特征的 $\Phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 标准圆柱形试样,测定抗拉强度的 $\Phi 50\text{mm} \times 25\text{mm}$ 标准圆柱形试样及测定抗剪强度的 $\Phi 39.1\text{mm} \times 80\text{mm}$ 标准圆柱形试样。制备好的试样见图 2,试样制作流程见图 3。

为了使试样充分干燥,需要不断地测定其质量,等到质量不再变化时,说明试样已经完全干燥。此时,测量各个试样的尺寸,算出体积,用完全干燥后的质量,算出其密度。计算得出该模型的密度为 $1.73 \times 10^3 \sim 1.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。



图 1 相似模拟材料组分

Fig. 1 Each component of similar simulation materials



图 2 试样

Fig. 2 Samples

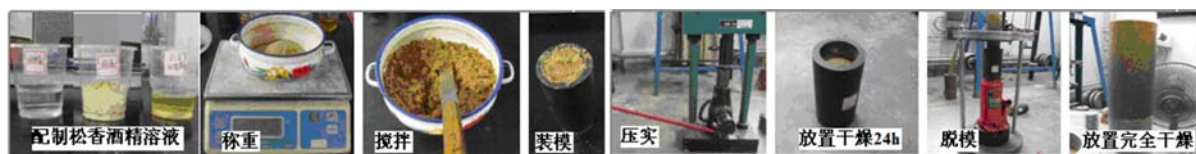


图 3 试样制作流程

Fig. 3 Process of making samples

2 力学性能特性试验

2.1 单轴压缩

共制备了 6 种配比的试样,每种 6 个,共 36 个。本试验采用的设备是由江都市天源试验机械有限公司生产的 TY8000 型万能材料试验机。试验时,先对试样施加预接触压力,其值设定为 0.05kN;待试验机加载板与试样完全接触后,开始记录应力、应变等参数,然后采用位移控制进行轴向加载,直至试样破坏。

每种配比的试样测试 4~6 块,根据材料强度的离散型,对试验的结果做去离散化处理,也就是选取三块强度值相差不大的试样对其试验数据求平均值作为该配比试样的力学指标,试验结果见表 1。

表 1 试件单轴抗压强度试验参数测试结果

Tab.1 Samples parameter test result of uniaxial compressive strength

试件编号	容重 γ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗压强度 σ_c (MPa)	弹性模量 E(MPa)
0.93%	1.745	0.433	48.69
1.75%	1.753	0.666	67.03
2.47%	1.746	0.869	83.13
3.68%	1.760	1.497	106.55
4.80%	1.807	1.885	119.86
5.41%	1.797	2.024	209.81

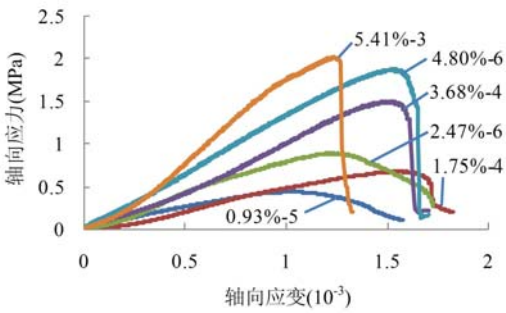


图 4 单轴压缩试验应力—应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of uniaxial compressive strength test

各配比下部分试件的单轴抗压强度应力—应变曲线见图 4,单轴压缩试验试件的破坏模式见图 5。松香含量与单轴抗压强度值的关系曲线见图 6,松香含量与弹性模量值的关系曲线见图 7。



图 5 模型材料单轴压缩、巴西劈裂、三轴压缩试验破坏模式

Fig. 5 Test failure model of model materials uniaxial compression, Brazilian split test, triaxial compression

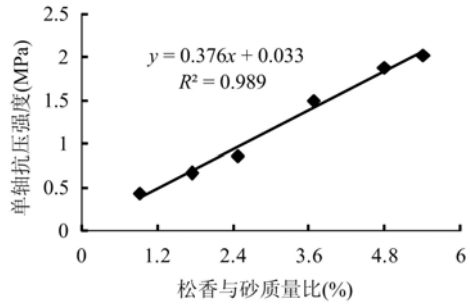


图 6 单轴抗压强度与松香含量关系曲线

Fig. 6 Uniaxial compressive strength and rosin content curve

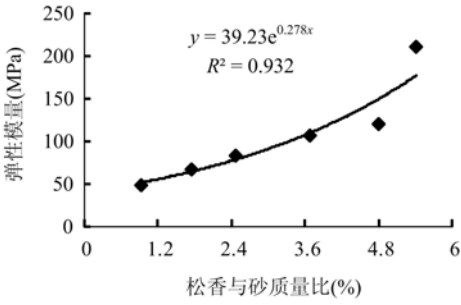


图 7 弹性模量与松香含量关系曲线

Fig. 7 Elastic modulus and rosin content curve

由图 4 中的全应力—应变曲线可知,砂与松香酒精溶液制成的模型与岩石材料具有很好的一致性。对于其峰值后应力—应变特征,当松香与砂的质量比不大于 2.47% 时,具有显著的应变软化阶段,与高应力环境下软岩的变形破坏特征具有一致性;当松香与砂的质量比大于 2.47% 时,其特征由延性破坏逐步转为脆性破坏,与硬岩的变形破坏特征具有一致性。这就说明通过改变配比,可以较好地得到模拟软岩到硬岩的相似模拟材料。另外,由图 5 分析可知,在单轴压缩条件下,该模型材料主要发生剪切和竖向劈裂破坏,这与岩石材料的单轴压缩破坏模式一致。以上研究表明,在单轴压缩试验条件下,以砂和松香酒精溶液为填料和胶结剂研制的相似模拟材料与岩石材料的力学与变形特征是相似的。

由图 6、图 7 可知,在所选的配比(0.93%~5.41%)范围内,该模型材料的单轴抗压强度和弹性模量值大致在 0.426~2.059MPa 和 41.07~255.92MPa。随着松香含量的增加,单轴抗压强度值大体上

呈线性函数增加,而弹性模量值则呈指数函数增加。

2.2 巴西劈裂(抗拉强度)

测定抗拉强度的方法很多,大致可分为两大类:直接拉伸法和间接拉伸法,而间接拉伸法中的劈裂法是应用最为广泛的,因此,测定相似模拟材料的抗拉强度采用劈裂法。试验采用直径 50mm,高径比 0.5,即高 25mm 的圆柱体试样。同样制备了 6 种试样,每种试样 3~4 个。

按照式(1)计算试样的抗拉强度:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dH} \tag{1}$$

式中, σ_t 为试样抗拉强度,MPa; P 为试样破坏时所加荷载,N; d 、 H 为试样直径、高度。

每种配比的试样测试 3~4 块,对抗拉强度值相近的三块试样求平均值作为该配比下的相似模型材料抗拉强度,结果见表 2。试件的破坏模式见图 5;松香含量与抗拉强度的关系曲线见图 8。

由表 1、表 2 可知,不同配比下该相似材料的抗压强度是抗拉强度的 6~7 倍,就岩石来说,抗压强度一般是抗拉强度的 4~25 倍,平均为 10 倍。另外,由图 5 可知,其巴西劈裂试验的破坏模式与岩石材料也具有很好的一致性。因此,可以说本课题所研制的相似材料与岩石材料在抗拉强度特性方面基本相似,可以很好地模拟这种岩石材料。另外,由图 8 可知,在所选的配比范围内,随着松香含量的增加,该模型材料的抗拉强度大体上呈指数函数增大。

表 2 试件抗拉强度试验参数测试结果

Tab. 2 Parameters test result of specimen compressive strength test

试件编号	抗拉强度 σ_t (MPa)
0.93%	0.072
1.75%	0.117
2.47%	0.137
3.68%	0.214
4.80%	0.319
5.41%	0.351

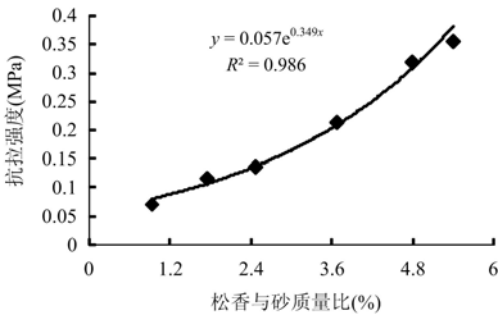


图 8 抗拉强度与松香含量关系曲线

Fig. 8 Compressive strength and rosin content curve

2.3 三轴压缩(抗剪强度)

试验设备采用南京土壤仪器厂产的 TSZ-2 全自动三轴仪,电脑可全程控制试验过程,可进行不同应力路径的三轴压缩试验,围压范围为 0~2.0MPa,最大轴向加载力为 30kN。

采用尺寸为 $\Phi 39.1\text{mm} \times 80\text{mm}$ 的圆柱体试样进行试验,同样配比了 0.93%、1.75%、2.47%、3.68%、4.80%、5.41% 的试验,每种制备 6 个试样,共 36 个试样,分别做围压为 0.1MPa、0.2MPa、0.4MPa 的三轴压缩试验。

不同围压下(0MPa、0.1 MPa、0.2 MPa、0.4 MPa),不同配比的相似模拟材料三轴压缩试验全应力—应变曲线及其对应的莫尔强度包络线见图 9;试件的破坏模式见图 5;各种配比下的内摩擦角与粘聚力见表 3;松香含量与粘聚力的关系曲线见图 10。

由图 9 可知,常规三轴压缩条件下,该相似模拟材料存在明显的峰值后应变软化阶段,且应变软化趋势随着围压的增大越来越明显,此变形特征与处在高应力环境下的深部软岩有一致的变形特征。由表 3 和图 10 可知,该相似模拟材料在不同配比下的内摩擦角基本稳定在 $42^\circ \sim 48^\circ$ 之间,而随着松香含量的增大,粘聚力却呈指数函数关系增大,其值在 0.1412~0.4455MPa 之间。表明研制的这种相似材料具有较好的复合胶结性能,可很好地满足深部高应力环境下软岩的相关物理模拟研究的需要。

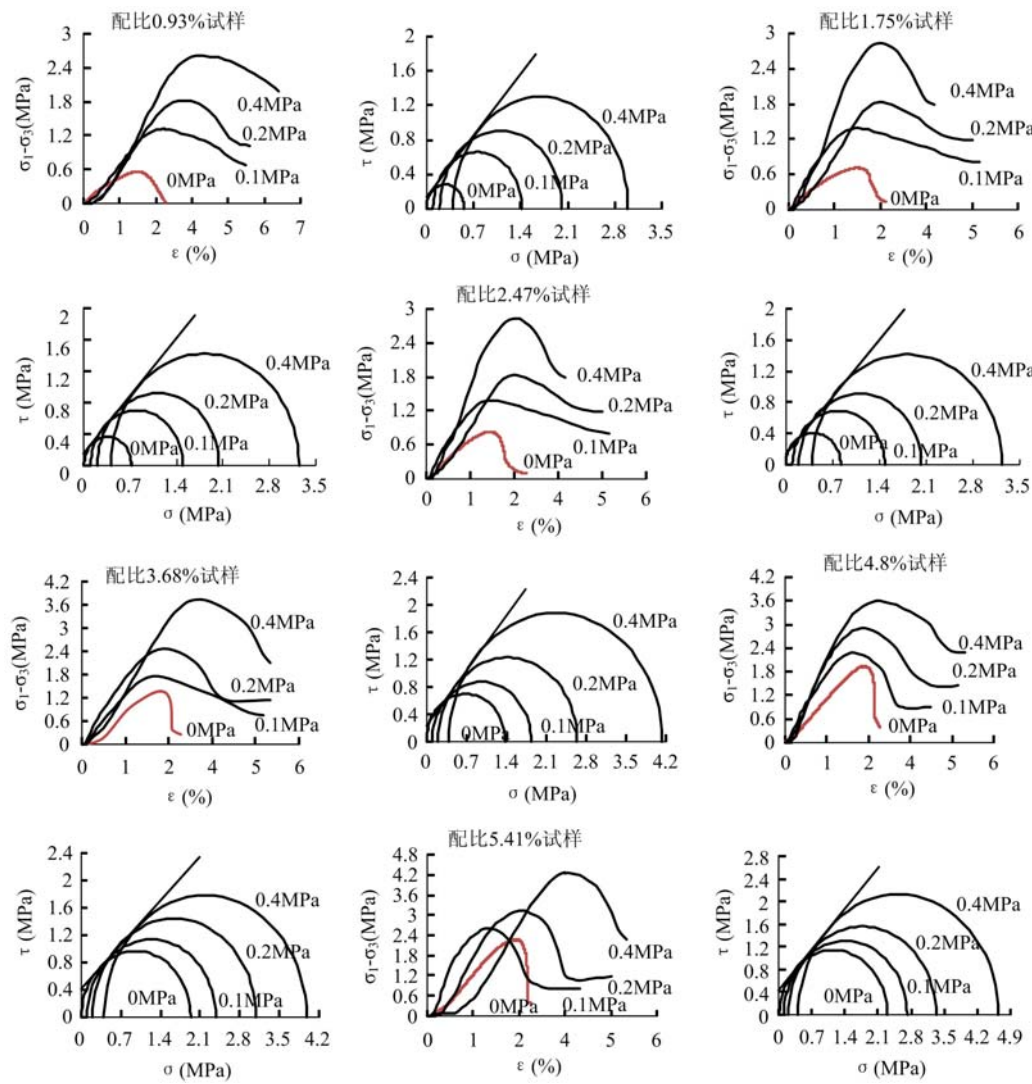


图 9 试样三轴压缩全应力—应变曲线及莫尔强度包络线
Fig. 9 Sample triaxial compression complete stress-strain cure and Moiré strength envelope

表 3 不同配比下的内摩擦角及粘聚力试验结果

Tab. 3 Test result of internal friction angle and cohesion in different ratio

配比	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	粘聚力 $c(\text{MPa})$
0.93%	45.74	0.1412
1.75%	46.36	0.1555
2.47%	45.55	0.1735
3.68%	48.90	0.2361
4.8%	42.84	0.4212
5.41%	45.75	0.4455

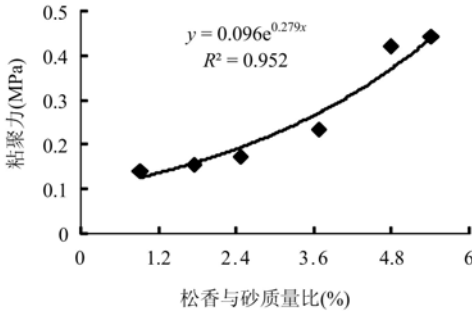


图 10 粘聚力与松香含量的关系
Fig. 10 Cohesion and rosin content curve

3 结论

深部软岩大多具备变形模量小、强度低、峰后延性变形显著等特征,鉴于这些特征,研制了以河砂为骨料、松香酒精溶液为粘结剂的深部软岩新型相似模拟材料,该相似模拟材料具有如下特点:

- (1) 组分简单,仅以细河砂为骨料,松香酒精溶液为胶结剂。
- (2) 通过简单的配比调配,模拟材料的单、三轴抗压强度、抗拉强度、弹性模量等强度与变形参数均具有较大的变化范围,峰后延性变形明显,可以较好地模拟深部大多类型的软岩。
- (3) 力学性能稳定、具有很好的复合胶结性能。
- (4) 模型制作便捷、成型容易。
- (5) 各组分材料价格低廉、对人及环境无毒无污染。
- (6) 由于模型材料组分少、性能稳定,对模型废料通过酒精溶解,在一定程度上可以重复利用。

参考文献:

- [1] 赵生才. 深部高应力下的资源开采与地下工程—香山会议第175次综述[J]. 地球科学进展, 2002, 17(2):295—298 (Zhao Shengcai. Resources Exploiting and Underground Engineering in Deep and High Stress Environments: Review of the 175 Fragrance Hill Conference[J]. Advances in Earth Science, 2002, 17(2):295—298(in Chinese))
- [2] 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 Boli, Chen Xialing, Song Yile. Research on Similar Material of Rock Mass [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 1997, 30(2):6—9(in Chinese))
- [3] 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 Fangping, Li Zhongkui, Luo Guangfu. NIOS Model Material and its Use in Geo-mechanical Similarity Model Test [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(1): 48—52(in Chinese))
- [4] 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 Hanpeng, Li Shucai, Zhang Qiangyong, et al. Development of A New Geo-mechanical Similar Material [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9):1842—1847(in Chinese))
- [5] 王永岩, 李剑光. 沥青海砂作为软岩相似材料的实验研究[J]. 实验力学, 2013, 28(4):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(4):242—246(in Chinese))
- [6] 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—35 (Shen Tai. Development of Geo-mechanic Model Experiment Techniques [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2001, 18(5):32—35(in Chinese))
- [7] 陈安敏, 顾金才, 沈俊等. 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 Anmin, Gu Jincai, Shen Jun, et al. Application Study on The Geo-mechanical Model Experiment Techniques [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22):3785—3789(in Chinese))
- [8] 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 Liangjie, Qian Minggao, Yin Youquan. Research on the Tests of Water-inrush from Floor Simulated by Similar Materials [J]. Coal Geology & Exploration, 1996, 25(1):33—36(in Chinese))
- [9] 左保成, 陈从新, 刘才华等. 相似材料试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11):1805—1808 (Zuo Baocheng, Chen Congxin, Liu Caihua, et al. Research on Similar Material of Slope Simulation Experiment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11):1805—1808(in Chinese))
- [10] 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 Shucai, Li Mingtian, et al. Development of a New Rock Similar Material [J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2009, 39(4):149—154(in Chinese))
- [11] 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 (Cui Ximin, Miao Xiexing, Su Deguo, et al. Error Analysis of Similar Material Simulation Test of The Movement of Rock Strata and Surface [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12):1827—1830(in Chinese))

Development of a New Simulation Material for Deep Soft Rock

NIU Shuang-jian^{1,2,3,4}, DANG Yuan-heng^{1,4}, YANG Da-fang²

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China; 2. Opening Project of Key Laboratory of Deep Mine Construction, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China; 3. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu, China; 4. The Collaborative Innovation Center of Coal Safety Production of Henan, Jiaozuo 454003, Henan, China)

Abstract: On the basis of summarizing characteristics of previous similar simulation materials, combining with the strength and deformation characteristics of deep soft rock, in line with the principle of simple component and modeling convenience of similar materials, a new similar simulation material for deep soft rock was developed, which takes only river sand as aggregate and rosin alcohol solution as a binder. Through uniaxial compression, triaxial compression and brazilian split experiment for specimens with different proportions, the strength, deformation and failure characteristics of the simulated material were obtained under different proportions condition. Results show that through simple proportion modifying, this simulated material can simulate most types of deep soft rock, and has many advantages such as simple component, modeling convenience, stable mechanical properties, non-toxic and pollution-free, low prices, reusable at a certain extent etc.

Keywords: deep soft rock; physical simulation; similar material simulation; uniaxial compression; triaxial compression