

许镇,李重情,岳廷乐,等. 不同保湿防裂类添加剂对岩石相似材料物理特性的影响[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2025, 40(1):1-7. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.01.001

XU Z, LI Z Q, YUE T L, et al. Effect of Different Moisturizing and Anti-cracking Additives on the Physical Properties of Similar Rock Materials[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 40(1):1-7. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.01.001

不同保湿防裂类添加剂对岩石相似材料物理特性的影响

许镇¹, 李重情^{1,2,3*}, 岳廷乐¹, 汤皓朋¹

(1.安徽理工大学 安全科学与工程学院, 安徽 淮南 232001; 2.深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001;
3.安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001)

摘要:岩石相似材料由骨料、胶结物和添加剂组成,为了探究保湿防裂类添加剂对岩石相似材料物理特性的影响,以河沙为骨料、石灰和石膏为胶结物,其中加入3%、5%和7%的甘油、石蜡和硅油,开展单轴压缩试验,观察物理参数变化.研究结果表明:3种不同添加剂条件下试样密度均呈上升趋势,但弹性模量和单轴抗压强度却呈下降趋势;其中,甘油对密度的影响大于石蜡和硅油,石蜡和硅油表现出良好的一致性,且不同添加剂在含量均为5%左右时存在转折点;随着添加剂含量的增加,试样由脆性破坏逐渐向塑性破坏转变,甘油对峰后的塑性破坏影响最为显著;弹性模量和单轴抗压强度均随着添加剂含量增加呈幂函数下降趋势,甘油的表现最为敏感,其保湿防裂性最佳,而石蜡和硅油对弹性模量和抗压强度表现出高度相似性但影响相对较小.该研究结果可为相似岩石试样的精准制作及在养护期间保持表面光滑和良好的完整性提供参考.

关键词:岩石相似材料;甘油;石蜡;硅油;单轴压缩试验

中图分类号:TD313 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2025)01-0001-07

Effect of Different Moisturizing and Anti-cracking Additives on the Physical Properties of Similar Rock Materials

XU Zhen¹, LI Zhongqing^{1,2,3}, YUE Tingle¹, TANG Haopeng¹

(1. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. State Key Laboratory for Mining Response and Disaster Prevention and Control of Deep Coal Mines, Huainan 232001, China;

3. Key Laboratory of Safe and Effective Coal Mining, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Rock-like materials are composed of aggregate, cement and additive. In order to explore the influence of moisturizing and anti-cracking additives on the physical properties of rock-like materials, river sand is used as aggregate, lime and gypsum as cement, and 3%, 5% and 7% glycerin, paraffin and silicone oil are added to the uniaxial compression test to observe the changes of physical parameters. The results show that the density of the samples under the conditions of the three different additives shows an upward trend, but the elastic modulus and uniaxial compressive strength show a decreasing trend, among which the effect of glycerol on the density is greater than that of paraffin wax and silicone oil, and the paraffin wax and silicone oil show good consistency,

收稿日期:2023-12-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52374179;52227901)

*通信作者, E-mail: zqli2003@126.com

and the content of different additives is 5%. With the increase of additive content, the sample gradually changes from brittle failure to plastic failure, and glycerol has the most significant effect on the plastic failure after the peak, both the elastic modulus and uniaxial compressive strength show a power function downward trend with the increase of additive content, glycerol is the most sensitive, and its moisturizing and anti-cracking properties are the best, while paraffin wax and silicone oil show high similarity to elastic modulus and compressive strength, but has relatively little effect. The results of this study can provide references for the accurate fabrication of similar rock samples and the maintenance of surface smoothness and good integrity during curing.

Keywords: rock similar materials; glycerol; paraffin; silicone oil; uniaxial compression test

随着我国经济的快速发展,浅部能源即将开采殆尽,深部能源开采成为必然趋势.而深部能源开采与浅部能源开采存在明显不同,受高地温、高渗透压、高地应力和强扰动影响,深部开采作业情况复杂,以至于采取大尺寸原岩进行室内试验变得较为困难.此时,进行岩石相似模拟试验成为可行的首选方法之一.

在岩石相似模拟试验中,选用的材料类别对试验结果起着主要影响.在相似材料的骨料和胶结剂方面,我国学者进行了大量研究,如郭义等^[1]以水泥、石膏、石英砂、重晶石粉为原材料,发现骨料比对相似材料的力学参数变化起主导作用;王汉鹏等^[2]研制出可用于瓦斯突出研究的超低渗气密性岩石相似材料,在试验过程中发现,胶结剂-特种水泥对材料物理特性影响显著;宋春鹏等^[3]、许韬等^[4]利用沙水石、砂粉石、砂水石这 3 种组合制作岩石相似材料,基于单轴抗压强度影响系数,发现砂粉石组合最优,并在此基础上加入铁精粉,增加材料的比重;耿晓阳等^[5]在配制砂岩相似材料过程中,发现骨料比和磁铁精矿比对密度起主要影响作用;赵明生等^[6]以石灰岩为研究对象,水泥、石膏、河砂为原材料,提出满足一般石灰岩相似模拟需要的 27 种配比.

在岩石相似材料中,除骨料和胶结剂外,添加剂对材料的物理特性也起着重要作用,如姚国强等^[7]、朴春德等^[8]在岩石相似材料研究中,发现甘油对材料的单轴抗压强度与弹性模量起主要影响作用;任占强等^[9]以重晶石、石英砂、石膏、甘油、羧甲基纤维素钠为原材料,研制出一种满足滑坡物理模型试验的低强高脆材料;张杰等^[10]以淀粉和石蜡为添加剂进行试验,研究发现石蜡对试样吸水率有很好的调节作用;ZHU 等^[11]在传统相似材料——河沙、碳酸钙、石膏的基础上,加入石蜡和凡士林,发现材料的脆性与石蜡和凡士林的含量有关;李剑光等^[12]、KONG 等^[13]在恒定温度下,测定了石蜡对岩石相似材料力学性质的影响;WU 等^[14]以河砂和碳酸钙为骨料,白水泥和石蜡为胶结剂,其中石蜡对抗压强度影响较小,仅起到黏结作用;张振杰等^[15]在铁精粉、重晶石粉、水泥、石膏中加入硅油,发现铁精粉和硅油可共同调节该材料的渗透系数;熊路长等^[16]以硅油为添加剂,细河沙、膨润土、石膏、石蜡为原材料,通过室内试验,研制出一种固液耦合相似材料;吴宝杨等^[17]在重晶石粉、石英砂、滑石粉、白水泥中加入硅油,探究了硅油在吸水率方面的影响.

综上所述,现有研究大多专注于骨料和胶结剂对岩石相似材料力学特性的影响,而添加剂对力学特性影响的研究较少.因此,以河沙为骨料,石灰和石膏为胶结剂,选择添加不同含量的保湿防裂类添加剂——甘油、石蜡、硅油,探究三者对相似材料力学特性的影响,为相似岩石试样的精准制作及在养护期间保持表面光滑和良好的完整性提供参考.

1 试样制备和试验方案

1.1 相似材料

相似岩石试样的原材料为河沙、石灰、石膏、甘油、石蜡、硅油.以河沙为骨料,石灰和石膏为胶结剂,甘油、石蜡、硅油为保湿防裂类添加剂.甘油、石蜡、硅油具有良好的保湿防裂的作用,并且常温下物理性质稳定,无毒无害价格低廉,多被用于岩石相似材料中^[9-10,15,24-25].液体石蜡的相对密度为 $0.830 \sim 0.860 \text{ g/cm}^3$,液体甘油的纯度大于等于 99%,硅油的黏度为 $1\ 000 \text{ cs}$,河沙的最大粒径不大于 2 mm .

参照张向阳等^[18]的研究,将原材料分为 4 组,以河沙:胶结剂(沙胶比)为 $10:1$,石灰:石膏(灰膏

比)为 0.4 : 0.6 为对照组;分别加入掺量为 3%,5% 和 7% 的甘油、石蜡和硅油,探究 3 种添加剂对类岩石相似材料力学特性的影响.根据以往的试验经验,以石灰、石膏作为胶结剂,掺水量一般为固体质量的 10%^[19-20].

1.2 试验方案

试验根据《煤和岩石物理力学测定方法》采用直径为 50 mm,高为 100 mm 的圆柱模具,本试验共分 10 组,为了减少误差,每组配制 3 个试样,取其平均值.

本次试验采用人工搅拌、振捣、压实,如图 1 所示.具体步骤:(1)准备好原材料,置于高精度电子秤上称量,在模具内贴壁放置一层 0.1 mm 厚的 PE 薄膜并刷油;(2)将称量好的干料置于盆中搅拌,将水倒入盆中搅拌均匀,湿料搅匀后加入添加剂继续搅拌 1 min;(3)将湿料装入模具中分 5 次振捣保证试样均匀密实,最后人工压实与模具齐平,静置 30 min,使试样成型脱模,自然养护;(4)试样放置在压力机中,加载速率为 0.2 mm/min,进行单轴压缩试验.



图 1 试验流程

2 试验结果及分析

按照《煤和岩石物理力学测定方法》对试样进行单轴压缩试验,测试试样的密度、弹性模量和单轴抗压强度,试验结果见表 1.由表 1 可知:试样的高径比最大为 2.05,最小为 2.02,满足《煤和岩石物理力学测定方法》中单轴压缩试验要求;密度分布范围在 1.56~1.75 g/cm³;单轴抗压强度分布在 0.059~0.222 MPa;弹性模量分布在 3.79~24.96 MPa.

表 1 单轴压缩试验结果

编号	直径/cm	高度/cm	密度/(g/cm ³)	弹性模量/MPa	抗压强度/MPa
1	49.95	101.94	1.56	24.96	0.222
2	49.97	101.34	1.66	14.22	0.173
3	49.95	101.00	1.72	6.46	0.099
4	49.96	101.12	1.75	3.79	0.059
5	49.96	101.61	1.60	20.12	0.196
6	49.95	102.56	1.62	14.11	0.144
7	49.97	101.69	1.67	12.78	0.129
8	49.96	101.82	1.60	19.18	0.147
9	49.97	102.14	1.62	14.33	0.111
10	49.95	101.05	1.67	13.38	0.091

2.1 辅助添加剂对试样物理参数的影响

2.1.1 密度

将 10 组试样,用砂纸进行打磨至标准,用 0.01 mm,0.01 g 精度的游标卡尺和电子秤对其检测各物理参数,通过计算得到各个试样的密度.用 ORIGIN 软件绘制成图,如图 2 所示.

在加入添加剂后,其密度变化趋势与朴春德等^[8]、张振杰等^[15]在流固耦合材料和软岩相似材料研究

中的趋势相符,都随着添加剂含量的上升而逐渐上升.

在 3 种添加剂中,甘油对试样密度的影响优于另外 2 种添加剂,从侧面说明了甘油的保湿防裂性更好.这是因为甘油相对于石蜡和硅油,结构上有 3 个羟基能够与水中的羟基互溶,所以能够混溶于水,降低水分子与石膏和石灰的水化反应效率;并且在自然养护期间,水和甘油混合液包裹在试样表面,能够吸收空气中的水分,从而降低试样在自然养护环境中的水分的蒸发效率,增加了试样的自重.添加石蜡和硅油之后,试样的密度增长相同,说明石蜡和硅油对试样密度影响具有很好的一致性.其中石蜡是正构烷烃,硅油是一种有机硅物料,二者都是疏水类物质,在常温下非常稳定且不易挥发,物理性质相似;因此对于试样密度的影响有较高的一致性.

此外,从图 2 中可以进一步看出:添加剂含量增加至 5% 左右出现转折点.添加剂为甘油时,含量从 5% 到 7% 对试样密度的增加效果比从 3% 到 5% 降低了 50%;添加剂为石蜡和硅油时,对应却增加了 60%.这是因为试样在自然养护中,接触空气的表面积不变,试样中甘油含量增加到 5% 左右时,其亲水性达到了一定的阈值,这时对试样密度的增加效果会逐渐降低;而石蜡和硅油由于其疏水性,随着含量的增加,会逐渐包裹在颗粒表面,从而阻碍了水分蒸发,即形成对试样密度逐渐增加的效果.

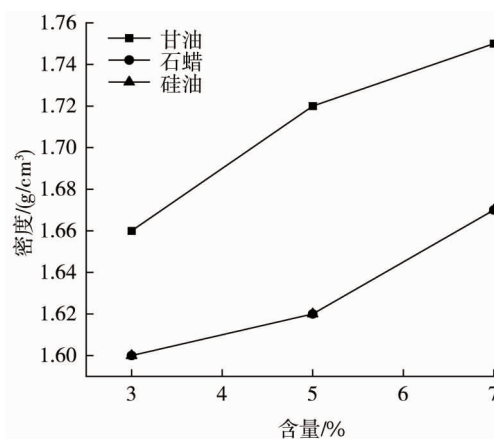


图 2 添加剂含量对密度的影响

2.1.2 应力-应变曲线

如图 3 所示,分别加入甘油、石蜡、硅油后的应力-应变曲线趋势与张杰等^[10]得出的应力-应变曲线类似.

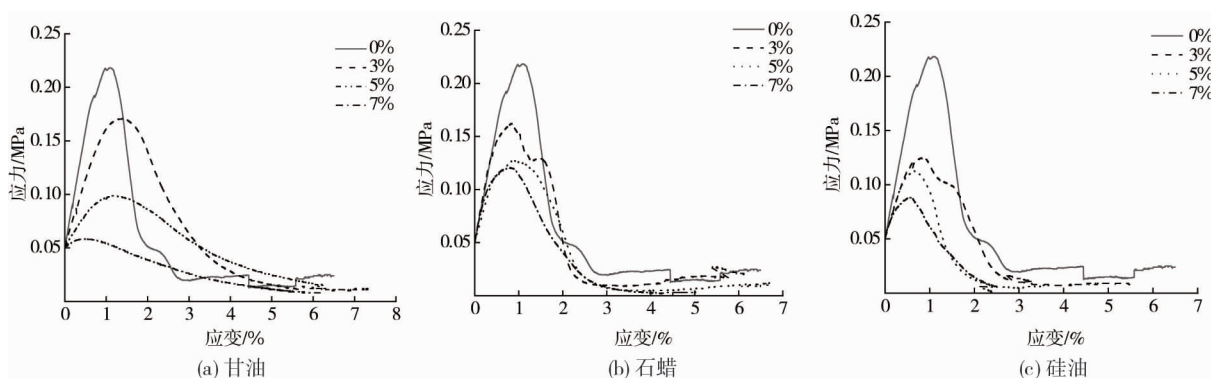


图 3 添加剂对应力-应变曲线的影响

一般,在应力-应变曲线中会出现 4 个阶段,即初始压密阶段、弹性变形阶段、塑性变形阶段和峰后破坏^[12],但是从图 3 可知:曲线起始阶段为近似直线的弹性变形阶段,缺少初始压密阶段.其原因可能是试样强度较低,在进行单轴压缩时,初始阶段内部孔隙瞬间闭合,轴向应力和位移传感器无法正常监测数据所致.

结合表1和图3(a)可知:随着甘油含量的增加,试样在弹性变形阶段的曲线由“陡”变“缓”,说明其抵抗变形的能力逐渐降低,且由于甘油良好的保湿防裂性,含量为7%时,几乎没有抵抗变形的能力.在塑性变形阶段,随着含量的增加,塑性应变逐渐增加,峰值应力下降幅度显著.在弹塑性变形阶段,相对于其他2种添加剂,甘油对其影响显著,曲线斜率的下降幅度最为明显;说明在这一阶段,相对于石蜡和硅油,甘油使试样内部裂纹发展更加迅速.在峰后破坏阶段,随着含量的增加,试样表现出非常明显的塑性破坏,其残余应变也逐渐增加.

从图3(b)可以看出:弹性变形阶段,随着石蜡含量的增加,其弹性变形逐渐减小;结合表1可知,从3%到7%,弹性阶段的斜率略有下降.塑性变形阶段,随着含量的增加,塑性变形逐渐增加,并且掺量为3%~5%的峰值应力下降明显,这是因为随着掺量的增加,骨料颗粒表面逐渐被石蜡包裹,导致内部微观裂纹迅速增加;5%~7%的峰值应力下降幅度减弱,说明了在含量为5%时,石蜡对岩石相似材料的影响可能到达了一个临界点.在峰后破坏阶段,试样表面开始出现裂纹,并逐渐连通形成宏观裂纹^[21];随着含量的增加,峰后破坏逐渐由脆性破坏转向塑性破坏;并且在含量为3%时,出现了“次峰值”,这一方面说明试样发生了塑性破坏,另一方面也说明,加入3%的石蜡降低了试样的残余强度,削弱了峰值应力^[22];从5%到7%,其残余应变逐渐增加,并且几乎在同一应变点应力为零,说明在这一交汇点,5%和7%的试样同时被彻底破坏.

从图3(c)可以看出:添加剂为硅油的曲线趋势与加入石蜡的类似.随着硅油含量的增加,其弹性变形逐渐减小,塑性变形逐渐增加.在峰后破坏阶段,其残余应变逐渐减小,并且硅油含量为5%与7%峰后破坏的残余应变基本相同.结合图2来看,也从侧面印证石蜡和硅油对相似材料物理特性的影响具有一致性.

因此,在加入添加剂后,试样在峰后破坏阶段表现的脆性特征,随着含量的增加,逐渐转变为塑性特征,且甘油相对于石蜡和硅油,对材料由脆性特征转变为塑性特征的效果更好,具有更好的延展性.

2.1.3 弹性模量

岩石的弹性模量是应力-应变曲线在弹性变形阶段中近似直线段的斜率,反映的是岩石抵抗变形的能力^[23].图4是甘油、石蜡、硅油在不同含量下,类岩石相似材料的拟合曲线,根据ORIGIN软件分析可得,其拟合函数分别为

$$y_1 = 78.34x^{-1.55}; \quad (1)$$

$$y_2 = 37.37x^{-0.57}; \quad (2)$$

$$y_3 = 31.27x^{-0.46}. \quad (3)$$

拟合度分别是0.99,0.97,0.96,呈幂函数下降趋势.

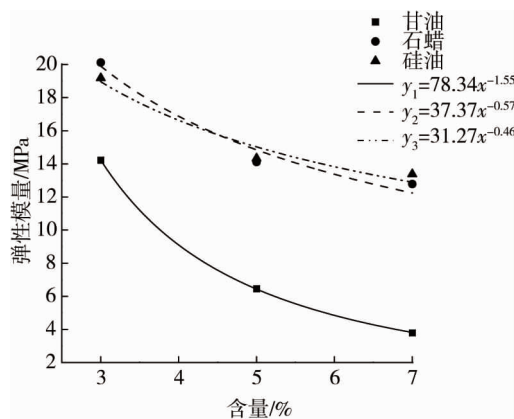


图4 添加剂含量对弹性模量的影响

由图4可以看出:在添加剂含量为5%之后,曲线开始逐渐趋于平缓.这是因为在5%之前,随着添加剂含量的增加,保湿防裂性能逐渐增加,使得胶结剂的胶结能力下降,微裂隙增加;但是在5%之后,是因为随着添加剂的增多,添加剂会逐渐包裹在一些骨料的表面,在微小裂隙发育时,起到一定黏结的作用.

结合表 1 和图 4,加入甘油后,弹性模量的整体下降趋势与朴春德等^[8]、任占强等^[9]在软岩相似材料和破碎岩石相似材料的研究中得出的结论相同——随着甘油含量的增加,弹性模量逐渐降低;具体为从含量 3%,5%增至 7%时弹性模量分别下降了 73.35%,41.33%。石蜡和硅油对弹性模量的影响近似,具体为石蜡含量从 3%,5%增至 7%时,试样的弹性模量分别下降了 36.48%,9.43%;添加剂为硅油时,对应分别下降了 30.23%,6.63%。

可见,同一含量下,甘油对试样弹性模量的削弱幅度最大,保湿防裂性更好,而石蜡和硅油对其影响相近,这与前文研究物理参数相类似。

2.1.4 单轴抗压强度

为比较单轴抗压强度与甘油、石蜡、硅油的关系,对其进行非线性拟合,如图 5 所示。单轴抗压强度与 3 种添加剂含量之间的拟合函数分别为

$$y_1 = 0.65x^{-1.20}; \quad (4)$$

$$y_2 = 0.34x^{-0.52}; \quad (5)$$

$$y_3 = 0.27x^{-0.56}. \quad (6)$$

三者的拟合度分别为 0.97,0.98,0.99,表明拟合的可靠度较高。发现在岩石相似材料中,随着添加剂含量的增加,抗压强度呈逐渐下降趋势,这与熊路长等^[16]研究结论相同。

具体地,可将拟合曲线分为 2 类:(1)加入甘油的快速下降。当含量从 3%,5%增至 7%时,强度分别降低了 65.90%,40.40%,这说明加入添加剂后,首先降低了石灰与石膏的水化反应速率,其次甘油具有较好的保湿性和吸湿性,使得试样残留水分较多,那么随着含量的增加,会极大地弱化抗压强度;(2)加入石蜡和硅油的平缓下降。石蜡含量从 3%,5%增加到 7%时,强度分别降低 34.18%,10.42%;添加剂为硅油时,对应分别降低了 38.10%,18.02%;综合数据和图 5,可以看出 2 条拟合曲线近似为强度差 $\Delta = 0.04$ 平行,与前文研究的物理参数相类似这一结论相符。

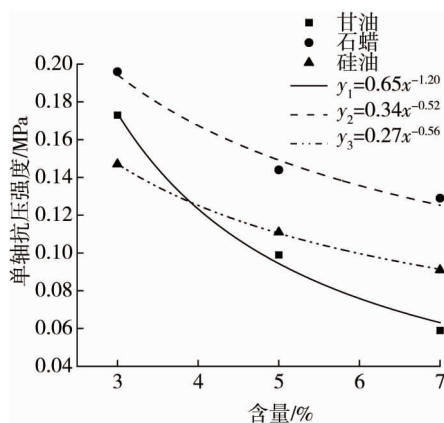


图 5 添加剂含量对抗压强度的影响

3 结论

1) 加入添加剂之后,类岩石相似材料的密度为 $1.60 \sim 1.75 \text{ g/cm}^3$;甘油对密度的影响大于石蜡和硅油,石蜡和硅油对密度的影响具有很好的一致性;随着添加剂含量的增加,对密度的影响效果发生了变化——甘油的增加效果逐渐减弱,石蜡和硅油的增加效果逐渐增加。

2) 峰后破坏阶段,试样所表现的脆性特征,随着不同添加剂含量的增加,逐渐表现为塑性特征,且甘油相对于石蜡和硅油,使试样的塑性特征愈发显著,在峰后破坏阶段表现出更好的延展性。

3) 通过对试样的弹性模量和单轴抗压强度进行非线性拟合,发现都符合幂函数下降趋势,其中,含甘油试样的拟合曲线曲率变化显著,表现最为敏感;石蜡和硅油对于弹性模量的拟合曲线几乎重叠,而对于单轴抗压强度的拟合曲线近似为强度差 $\Delta = 0.04$ 平行,硅油对强度的调节作用略大于石蜡。

因此,综合对试样密度、弹性模量和抗压强度相对比,可以明显发现:保湿防裂添加剂含量与类相似材料密度呈正相关,而与其弹性模量及单轴抗压强度呈负相关,其中甘油对试样的物理特性调节作用最为显著.上述结论可为相似岩石试样的精准制作及在养护期间,保持试样的表面光滑和良好的完整性提供参考.

参考文献:

- [1] 郭义,李昕昊,王创业,等.类岩石材料脆性特征与配合比方案试验研究[J].金属矿山,2022(2):48-53.
- [2] 王汉鹏,张冰,袁亮,等.超低渗气密性岩层相似材料特性分析[J].中国矿业大学学报,2021,50(1):99-105.
- [3] 宋春鹏,由爽,纪洪广,等.相似材料抗压强度正交试验与材料强度影响系数研究[J].材料导报,2023,37(23):64-69.
- [4] 许韬,高懿伟,张继勋,等.新型地质力学模型相似材料制备及试验[J].人民长江,2022,53(增刊2):113-118.
- [5] 耿晓阳,张子新.砂岩相似材料制作方法研究[J].地下空间与工程学报,2015,11(1):23-28.
- [6] 赵明生,康强,王园园.石灰岩相似材料力学性能试验研究[J].矿业研究与开发,2022,42(4):85-88.
- [7] 姚国强,言志信.岩体相似材料正交设计试验研究[J].铁道科学与工程学报,2018,15(4):902-910.
- [8] 朴春德,林雄.软岩相似材料配比实验研究[J].工程地质学报,2018,26(增刊1):684-690.
- [9] 任占强,宋章,林棋文,等.滑坡碎屑化运动物理模型相似材料特性研究[J].水文地质工程地质,2021,48(2):132-142.
- [10] 张杰,蔡维山,陈诚,等.基于正交试验的固液耦合相似材料研究[J].水利水电技术,2020,51(5):174-182.
- [11] ZHU G L, WANG S L, ZHANG W Q. Fluid-solid coupling materials to similar simulation test on water inrush in geotechnical and mining engineering[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022, 40(12): 5755-5768.
- [12] 李剑光,张余标,张金龙,等.软岩相似模拟材料单轴压缩力学特性的温度效应试验研究[J].应用力学学报,2019,36(1):225-229.
- [13] KONG C, GAO X Q, REN S B, et al. Physical model test of tunnel complex surrounding rock progressive failure based on strength-reduction similar materials[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 149: 107255.
- [14] WU W L, GUO J Q, LIU X L, et al. Experimental study on similar materials for fluid-solid coupling for model test of water inrush in Karst tunnel[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2023, 41(7): 4119-4135.
- [15] 张振杰,张强勇,向文,等.复杂环境下新型流固耦合相似材料的研制及应用[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(11):4168-4180.
- [16] 熊路长,范钢伟,张世忠,等.新型隔水层固液耦合相似材料研制[J].煤炭技术,2019,38(2):22-25.
- [17] 吴宝杨,李鹏,王雁冰,等.煤-水共采相似模拟试验材料力学特性分析[J].中国煤炭,2022,48(10):64-73.
- [18] 张向阳,罗磊,许林峰,等.相似材料配比量化确定方法的研究[J].煤矿安全,2019,50(10):45-48.
- [19] 王其洲,叶海旺,李宁,等.煤系软岩相似模拟材料配比实验及其强度变化规律[J].实验技术与管理,2021,38(9):77-82.
- [20] 任大瑞,刘保国,史小萌.相似材料力学性质影响因素试验研究[J].北京交通大学学报,2016,40(6):19-24.
- [21] 赵奎,李从明,曾鹏,等.热损伤花岗岩能量演化机制及损伤本构模型[J].金属矿山,2024(11):45-54.
- [22] 齐怀远,王建伟.峰后冷热循环下砂岩破坏过程力学特征及能量演化规律[J].煤矿安全,2023,54(7):163-170.
- [23] 陈传平.灰岩三轴循环力学特性及能量演化特征试验研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(2):67-73.