

牛耀, 苏占东, 孙进忠, 等. 岩体物理模拟实验中的相似材料配比. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(5): 1645–1656.
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230090.

Niu Yao, Su Zhandong, Sun Jinzhong, et al. Proportioning of Similar Materials in Rock Physical Simulation Experiments. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(5): 1645–1656. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230090.

岩体物理模拟实验中的相似材料配比

牛耀¹, 苏占东^{1,2}, 孙进忠³, 张昊¹, 吴雪丽¹, 林淇七¹, 王懿文¹, 李梓檬¹,
朱焕欣¹, 张建勇^{1,2}, 梁金平^{1,2}

1. 防灾科技学院地质工程学院, 河北 三河 065201

2. 河北省地震灾害防御与风险评估重点实验室, 河北 三河 065201

3. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083

摘要:为确定岩体物理模拟实验中常见相似材料的配比, 首先选取河砂、重晶石粉、石膏和水泥四种原料, 采用正交设计的方法, 设置骨料比(河砂和重晶石粉质量与石膏和水泥质量之比)、水膏比(水泥质量与石膏质量之比)和重晶石掺量(重晶石粉质量与骨料质量之比)3个因素, 每个因素5个水平, 开展单轴压缩情况下的密度试验和声发射试验, 然后确定不同配比对相似材料物理力学指标和表征损伤程度指标(D)的敏感性。试验结果表明: 在骨料比影响下, 相似材料密度、抗压强度和弹性模量的极差最大, 分别为 0.13 g/cm^3 、 2.60 MPa 和 247 MPa , F 检验值最大, 显著性最高; 在重晶石掺量影响下, 泊松比的极差最大, 为 0.09 , 同样显著性最高; 在骨料比影响下 D 的极差最大, 为 0.25 , 显著性最高。总的来说, 骨料比对相似材料密度、抗压强度、弹性模量和 D 起控制作用, 重晶石掺量对泊松比起控制作用; 重晶石掺量最优为 20% 。

关键词: 物理模拟实验; 相似材料; 正交设计; 敏感性; 损伤特征

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230090

中图分类号: TU45

文献标志码: A

Proportioning of Similar Materials in Rock Physical Simulation Experiments

Niu Yao¹, Su Zhandong^{1,2}, Sun Jinzhong³, Zhang Hao¹, Wu Xueli¹, Lin Qiqi¹, Wang Zhiwen¹,
Li Zimeng¹, Zhu Huanxin¹, Zhang Jianyong^{1,2}, Liang Jinping^{1,2}

1. Department of Geological Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China

2. Hebei Key Laboratory of Earthquake Disaster Prevention and Risk Assessment, Sanhe 065201, Hebei, China

3. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

收稿日期: 2023-04-13

作者简介: 牛耀(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土地震工程方面的研究, E-mail: 15231024083@163.com

通信作者: 苏占东(1987-), 男, 副教授, 博士, 主要从事岩体应力场与断裂活动性方面的研究, E-mail: szdchris@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807270); 中央高校基本科研业务费专题研究重点项目(ZY20215113); 防灾科技学院研究生创新基金项目(ZY20230311)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41807270), the Fundamental Research Fund for the Central Universities (ZY20215113) and the Science and Technology Innovation Program of Postgraduate Students in Institute of Disaster Prevention (ZY20230311)

Abstract: In order to determine the ratio of similar materials commonly used in physical simulation experiments, four raw materials including river sand, barite powder, gypsum and cement were selected, and orthogonal design was adopted. Bone glue ratio (ratio of river sand mass and barite powder mass to gypsum mass and cement mass), water-paste ratio (ratio of cement mass to gypsum mass) and barite content (ratio of barite powder mass to aggregate mass), with five levels for each factor, were set to carry out density test and acoustic emission test under uniaxial compression. The sensitivity of different proportions to the physical and mechanical indexes of similar materials and the indexes of damage degree were determined. The experimental results show that the density, compressive strength and elastic modulus of similar materials under the influence of bone glue ratio have the largest range, which are 0.13 g/cm^3 , 2.60 MPa and 247 MPa , respectively, F -test has the largest value, and the significance is the highest. Poisson's ratio has the largest range under the influence of barite content, which is 0.09 , and has the highest significance. The relative cumulative damage degree (D) had the largest range (0.25) under the influence of bone glue ratio, and the F test value was the most significant. In general, the bone glue ratio controls the density, compressive strength, elastic modulus and D of similar materials.

Key words: physical model test; similar material; orthogonal design; sensitivity; characteristics of injury

0 引言

随着我国经济建设的高速发展,基础设施建设不断增加,能源开发需求和资源开采逐渐向深部发展,不仅造成了一系列工程地质灾害,而且严重影响了岩体工程施工和运营的安全与效率^[1-2]。目前解决这类岩体工程问题主要依靠现场调查、理论分析、数值模拟和物理模拟实验等方法。其中物理模拟实验应用较为广泛^[3-5],其以相似理论为基础制作相似模型,还原复杂条件下的原型由弹性到塑性直至破坏的全过程^[6],以反映岩体的真实情况及其规律性。开展模型实验所需的相似材料根据不同工程背景和地质条件而有所不同,模型相似材料的选择及配比等因素对模型的物理力学性质和变形破坏特征具有很大的影响,也对模拟实验的成功与否起着决定性的作用^[7-9]。由于岩体力学特性十分复杂,岩体工程失稳破坏与岩体自身的强度和变形特性密切相关^[10],因此研究不同配比相似材料的物理力学性质变化规律和变形损伤特征,对了解岩体破裂机制和破坏特征十分重要。开展不同配比相似材料力学性能实验同时也是开展岩体物理模拟实验的关键,可为后续岩体物理模拟的研究提供可取的相似材料及可靠的配比,也可对岩体物理模拟实验提供指导和参考。

针对特定的岩土工程问题,确定相似材料的配

比是开展此类问题物理模拟的基础^[11]。对此,前人在相似材料选择及配比方面进行了大量的研究。如:杨旭等^[12]为开展红层软岩工程相似模型试验,采用正交试验方法设计了模型相似材料配比试验,通过研究相似材料软化度系数、重度、强度等参数随配比的变化规律,确定了适用于软岩的相似材料及其配比;张艳丽^[7]为了模拟煤体的相似材料,选用河砂、煤粉、石膏和碳酸钙等为原料,利用正交试验方法开展了影响煤体相似材料物理力学性质的关键因素和变化规律;吕艳等^[13]为配制用于振动台物理模型试验的花岗岩相似材料,选用铁矿粉、石英砂、重晶石粉、石膏和松香酒精的相似材料配比方案,获得了各对比对花岗岩相似材料物理力学性质的影响结果和相似材料的配比经验方程。虽然越来越多的新型材料(比如环氧树脂、铁矿粉和矿粉等)被用于配制相似材料^[11, 14-15],但水泥、石膏、重晶石粉等传统的相似材料在试验中仍然使用广泛,对其理论研究也一直未停止^[6-7, 12, 16-18]。学者们主要通过采用正交设计方法改变材料之间的配比测定试件的物理力学性质,探究材料配比与其对物理力学指标的影响^[7, 9, 17-18],目前的研究也逐渐由极差分析的定性分析法转向方差分析的定量分析法,再由方差分析的定量结果验证极差分析定性结果的准确性^[6, 13]。随着对岩体相似材料物理力学特性研究的不断深入,国内外学者逐渐开始关注相似材料的破裂行为

和内部损伤^[19-20]。但是对于开展相似材料正交试验来说,相关研究多注重材料物理学指标在相似比例上的满足^[21],对相似材料破坏模式以及损伤特征的研究还有待完善。声发射(AE)作为一种实时的被动无损检测技术,能够反映材料内部的变化。相似材料在外力作用下发生损伤破坏主要表现为裂纹的产生和扩展,当材料内部存储的能量被释放时,就会产生声发射现象^[22]。为了评估材料加载破坏过程中的损伤程度,学者们从定量的角度建立起了声发射参数与力学参数之间的关系。在Kachanov^[23]基于损伤断面面积定义损伤变量后,有学者^[24-27]先后提出基于声发射参数建立损伤变量的计算模型来评估材料的损伤程度,如:吴贤振等^[24]探讨了岩石不同破坏模式下声发射特征参数与应力、应变和损伤变量的关系,建立了累计振铃计数与损伤变量和应力之间的耦合模型;李树刚等^[25]建立了单轴压缩状态下基于声发射事件累积计数的相似材料损伤模型,对相似材料的损伤特性进行了描述;Dai等^[26]针对脆性材料损伤与声发射特征参数的关系,提出评估材料损伤与强度的理论模型及经验公式;林峰等^[27]基于声发射概率密度函数在以AE事件数为中间变量的基础上,推导出近似梯形积分的公式,建立起混凝土在单轴压缩情况下损伤变量与AE累积数的函数关系。然而针对多因素多水平的复杂影响因素,如何对相似材料的损伤特征进行定量分析还鲜有研究。

本研究选用河砂、重晶石粉、石膏和水泥作为相似材料,先采用正交试验设计方法(3因素5水平的正交试验方案)对相似材料进行密度试验和单轴压缩变形试验,利用极差分析法和方差分析法分析骨胶比、水膏比和重晶石掺量3个因素对相似材料物理学指标的影响规律和敏感性;然后利用声发射技术监测试件变形损伤过程,定量分析各因素对表征相似材料损伤程度指标的敏感性和影响规律,以期工程岩体物理模拟研究提供参考。

1 试验概况

1.1 试验材料

相似材料选取河砂、重晶石粉、石膏和水泥。其中:河砂和重晶石粉为骨料,因河砂和重晶石粉密度较大,能提高材料的重度,起骨架支撑作用;石膏和水泥的混合材料为胶结材料,其中石膏的脆性与岩石的近似;此外用水作溶剂。同时为了避免由试验

材料不同所造成的误差,所用相似材料均采用同一规格和批次,相似材料的具体参数见表1。

表 1 相似材料参数			
Table 1 Parameters of similar material			
材料	性状	规格	主要成分
河砂	黄白颗粒	40~120目	二氧化硅
重晶石粉	白色粉末	325目	90%硫酸钡
石膏	白色粉末	1500目	碳酸钙
水泥	灰色粉末	PO42.5	氧化钙

1.2 试验设备

本试验使用到的仪器设备主要为压力机、应变仪、声发射采集系统和标准砂浆养护箱。其中:压力机为ZYSS-2000型,最大试验荷载可达2000kN,位移测量值范围为1~100mm,测量分辨率为0.001mm,测量值精度优于±5%。应变仪为XL2118A16U型静态电阻应变仪,采用高精度24位A/D转换器,能够同时测量应变与拉压力两种物理量,应变模块范围为-19999~38000,测力模块范围为1~99999kN。声发射采集系统为DS5-16B全息声发射监测系统,可采集16通道的声发射信号,前置放大倍数为40dB,16位A/D转换器记录数据,A/D转换器非线性误差为0.5LSB(least significant bit,最低有效位),传感器型号RS-2A,中心频率150kHz;声发射采集系统可对声发射全过程的波形自动记录和存储,通过后期回放设置同步获得通道号、到达时间、幅度、持续时间、振铃计数、能量、ASL值、通道撞击数以及通道撞击速率等14个声发射特征参数。标准砂浆养护箱的可控温度为(20.0±2.0)℃,可控湿度为(40%~80%)±5%,测温精度优于±0.2℃,测湿精度在±3.0%以内。

1.3 试验流程

相似材料单轴压缩过程中的声发射监测试验流程见图1。用定制的直径为50mm、高为100mm的三瓣膜不锈钢圆柱模具预制试样,如图1a所示。先根据具体配比确定相关材料用量,将加高环固定在模具顶部;然后将拌合好后的材料依次装满模具并人工捣实,使装量控制在试件体积的110%左右;再用配套的击实锤将试件压至成预定的尺寸,每组配比5个试样。将试样放入砂浆标准养护箱内养护7d,养护条件温度为20℃,湿度为65%。养护期限

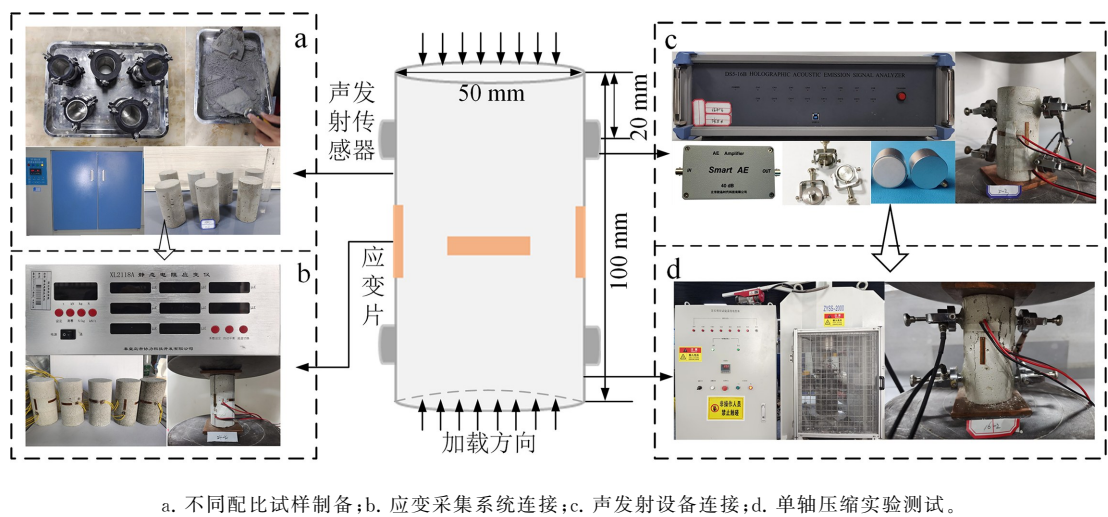


图 1 不同配比相似材料测试流程示意图

Fig.1 Schematic diagram of testing process for similar materials with different proportions

结束后,先在试样表面中部贴电阻应变片,横向和纵向应变片各 2 片,沿圆周向对称布置(图 1b);再连接应变仪并检查各通道能否正常传递信号。接下来,如图 1c 所示,先使用热熔胶在距离试件顶部和底部均为 2 cm 处粘贴与声发射传感器耦合基座的声发射转换器,上下各 2 个,共 4 个,使转换器位置在同一个平面上;然后用耦合剂将声发射传感器与转换器耦合,并通过连接线将声发射传感器与声发射前置放大器连接;再将声发射前置放大器连接至声发射数据采集仪;最后调整球形支座,使试样顶面(承压面)与上压头端面平行并对中(图 1d)。将压力机的加载压头位移速率设置为 0.01 mm/s,同时启动压力机控制软件、声发射采集系统和应变采集系统,对相似材料不同配比的试样展开单轴压缩测试。当试样发生破坏时,同步停止各试验设备工作。

2 相似材料正交试验设计方案

本试验采用正交试验设计法。该法采用正交表安排试验,既能使试验点分布均匀,又能减少试验次数^[28-29]。本试验以骨胶比(河砂和重晶石粉质量与石膏和水泥质量之比)、水膏比(水泥质量与石膏质量之比)和重晶石掺量(重晶石粉质量与骨料质量之比)作为正交试验设计的 3 个因素,每个因素设置 5 个水平。为了单纯探究各因素对相似材料各个指标影响,3 个因素之间相互独立,排除因素之间的干扰,不考虑因素之间的交互作用。具体的相似材料正交试验设置见表 2。

Table 2 Orthogonal design level of similar material			
水平	因素		
	骨胶比	水膏比	重晶石掺量/%
1	3 : 1	3 : 7	0
2	4 : 1	4 : 6	10
3	5 : 1	5 : 5	20
4	6 : 1	6 : 4	30
5	7 : 1	7 : 3	40

注:水的质量占试样质量的 15%。

相似材料配比方案采用正交设计 L25(5³)方案,见表 3。

3 试验结果分析

3.1 相似材料物理力学指标影响因素的敏感性

通过对表 3 中 25 组不同配比材料试件进行密度试验和单轴压缩变形试验,得到了各组相似材料的密度 ρ 、抗压强度 σ_c 、弹性模量 E 和泊松比 ν ,结果见表 4。相似材料的密度范围分布在 1.91 ~ 2.17 g/cm³ 之间,单轴抗压强度范围分布在 1.04 ~ 5.33 MPa 之间,弹性模量范围分布在 67.1 ~ 662.0 MPa 之间,泊松比范围分布在 0.17 ~ 0.38 之间。相似材料的物理力学指标范围分布较广,以上试验结果基本可以满足不同类型岩石的物理模型试验对相似材料物理力学参数的要求范围。

表 3 相似材料配比方案

Table 3 Test schemes of similar material			
试验号	因素		
	骨胶比	石膏比	重晶石掺量/%
SY1	3 : 1	3 : 7	0
SY2	3 : 1	4 : 6	20
SY3	3 : 1	5 : 5	40
SY4	3 : 1	6 : 4	10
SY5	3 : 1	7 : 3	30
SY6	4 : 1	3 : 7	30
SY7	4 : 1	4 : 6	0
SY8	4 : 1	5 : 5	20
SY9	4 : 1	6 : 4	40
SY10	4 : 1	7 : 3	10
SY11	5 : 1	3 : 7	10
SY12	5 : 1	4 : 6	30
SY13	5 : 1	5 : 5	0
SY14	5 : 1	6 : 4	20
SY15	5 : 1	7 : 3	40
SY16	6 : 1	3 : 7	40
SY17	6 : 1	4 : 6	10
SY18	6 : 1	5 : 5	30
SY19	6 : 1	6 : 4	0
SY20	6 : 1	7 : 3	20
SY21	7 : 1	3 : 7	20
SY22	7 : 1	4 : 6	40
SY23	7 : 1	5 : 5	10
SY24	7 : 1	6 : 4	30
SY25	7 : 1	7 : 3	0

3.1.1 极差分析

极差分析法是一种用于判断正交试验中各因素对试验结果的敏感性的统计方法^[9, 30]。极差是当前因素不同水平下的试验结果的最大值减去最小值,通过比较极差的大小可判断每个因素对试验结果的影响,极差越大,说明该因素对试验结果的影响程度越大。结合表 4 中相似材料配比正交试验的结果,利用式(1)和式(2)计算可得到每个因素影响下物理力学参数的极差值。

$$k_{xi} = K_{xi} / 5 ; \tag{1}$$

$$R_x = \max \{ k_{x1}, k_{x2}, k_{x3}, k_{x4}, k_{x5} \} . \tag{2}$$

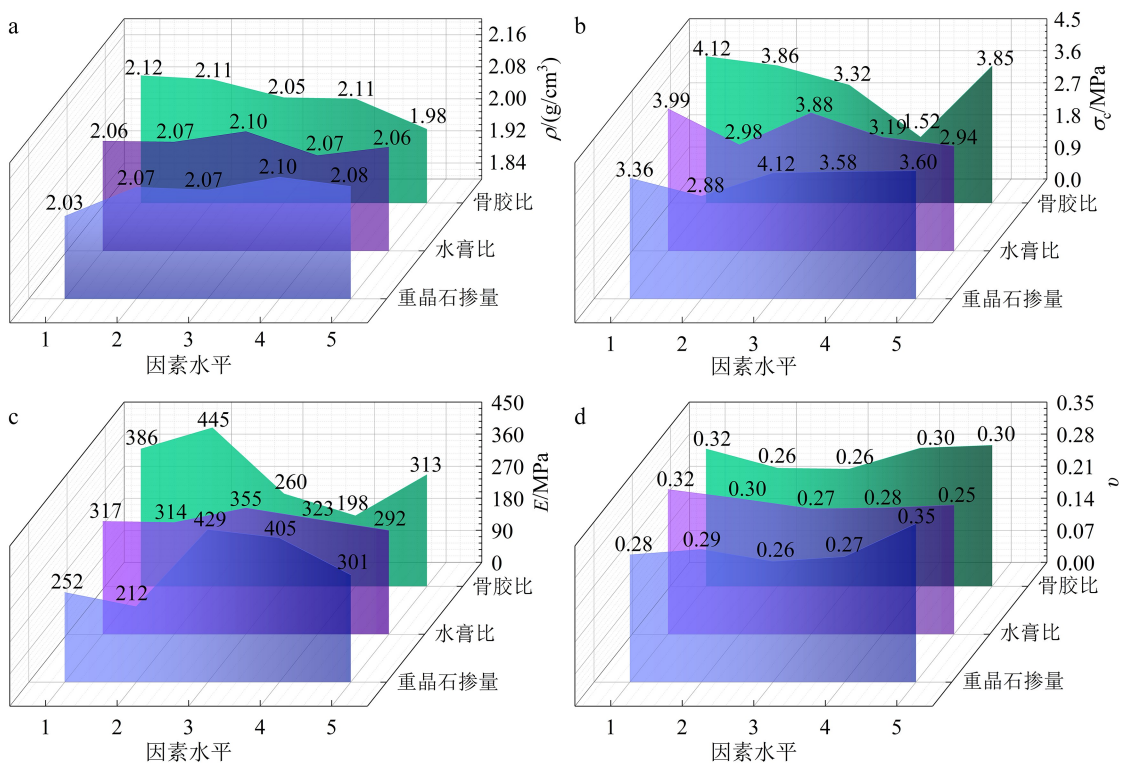
式中: k_{xi} 为 x 因素 i 水平下某个试验指标的平均值, $i=1,2,\cdots,5$; K_{xi} 为 x 因素 i 水平下的某个试验指标的总和; R_x 为 x 因素各个水平下某个试验指标的极差值。

表 4 相似材料配比正交试验结果

Table 4 Orthogonal test results of similar material ratio				
试验号	$\rho / (\text{g} / \text{cm}^3)$	σ_c / MPa	E / MPa	ν
SY1	2.07	4.31	376.0	0.32
SY2	2.12	4.20	503.0	0.37
SY3	2.14	5.19	333.0	0.33
SY4	2.09	2.57	287.0	0.26
SY5	2.16	4.32	429.0	0.32
SY6	2.16	4.53	523.0	0.25
SY7	2.08	1.98	364.0	0.21
SY8	2.13	5.33	662.0	0.27
SY9	2.15	3.67	438.0	0.36
SY10	2.03	3.77	239.0	0.20
SY11	2.13	4.03	167.0	0.38
SY12	2.04	3.37	349.0	0.17
SY13	2.02	4.47	318.0	0.22
SY14	2.06	1.96	239.0	0.21
SY15	2.07	2.75	225.0	0.30
SY16	2.06	2.10	227.0	0.38
SY17	2.12	1.04	67.1	0.37
SY18	2.17	1.41	161.0	0.31
SY19	1.91	3.50	85.7	0.23
SY20	2.09	1.20	449.0	0.22
SY21	1.95	5.00	291.0	0.25
SY22	2.00	4.29	285.0	0.36
SY23	2.03	2.98	299.0	0.24
SY24	1.99	4.27	565.0	0.32
SY25	1.95	2.70	116.0	0.37

图 2 为表 4 中各个物理力学指标在骨胶比、石膏比和重晶石掺量 3 个因素影响下不同水平极差变化情况,其可以直观反映各个因素对相似材料物理力学指标的敏感性。

根据图 2a 中各因素对密度的影响,可以看出:各因素对相似材料密度的敏感性从大到小依次为骨胶比、重晶石掺量、石膏比;相似材料密度随着骨胶比的增大而呈现减小的趋势,随着重晶石掺量的增大而呈现增大的趋势,石膏比对材料密度的影响关系不是十分明显。由图 2b 可知:各因素对相似材料单轴抗压强度的敏感性从大到小依次为骨胶比、石膏比、重晶石掺量;相似材料的单轴抗压强度随着骨胶比和石膏比的增大而呈现减小的趋势,在骨胶比为 6 : 1(水平 4)时达到最低值,随着重晶石掺量的增多,材料单轴抗压强度呈现增大的趋势。从图 2c 可以看出:各因素对相似材料弹性模量的敏感性从



a. 各因素对 ρ 的影响; b. 各因素对 σ_c 的影响; c. 各因素对 E 的影响; d. 各因素对 ν 的影响。

图 2 相似材料物理力学指标敏感性的极差分析堆积图

Fig.2 Stacked plots of polar analysis of factors to physical and mechanical indices of similar materials

大到小依次为骨胶比、重晶石掺量、石膏比;相似材料弹性模量随骨胶比的增大呈现“N”形变化趋势,分别在骨胶比为 4 : 1(水平 2)和 6 : 1(水平 4)时达到最大值和最小值;相似材料弹性模量随重晶石掺量和石膏比的增大呈现“倒 N”形的变化趋势,均在水平 3 达到峰值(骨胶比为 5 : 1,石膏比为 5 : 5,重晶石掺量为 20%)。如图 2d 所示:各因素对泊松比的敏感性从大到小依次为重晶石掺量、骨胶比、石膏比;相似材料的泊松比随着材料中重晶石掺量的增大呈现“N”形的变化趋势;相似材料泊松比随着骨胶比和石膏比的增大呈现先减小后增大的趋势。

为了使正交因素对相似材料各个物理力学指标的极差具有明显性和可比性,以得出各因素对相似材料物理力学参数的影响程度和敏感性,将相似材料各个物理力学指标在不同因素影响下的极差用如图 3 中的柱状图并列展示出来。

从图 3 中的各个因素影响下的各个物理力学指标的极差值来看,在影响相似材料密度、抗压强度和弹性模量的因素中,骨胶比的极差最大,说明骨胶比对相似材料的密度、单轴抗压强度和弹性模量起控

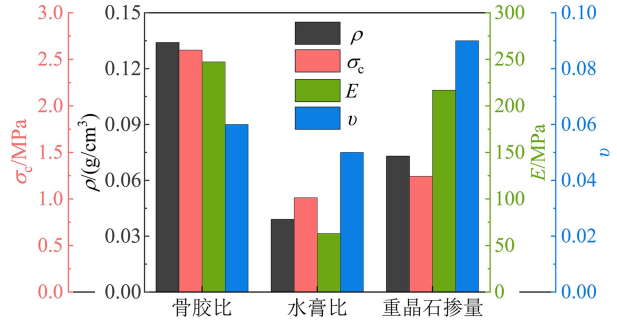


图 3 相似材料物理力学指标敏感性的极差分析结果

Fig.3 Range analysis results of sensitivity of physical and mechanical indexes of similar materials

制作用,影响以上物理力学指标的极差分别为 0.13 g/cm³、2.60 MPa 和 247 MPa;骨胶比对泊松比的影响较小,极差为 0.06。在影响泊松比的因素中,重晶石掺量的极差最大,极差为 0.09,说明重晶石掺量对相似材料泊松比控制起主要作用。石膏比对相似材料各个物理力学指标的影响均很小。

3.1.2 方差分析

利用方差分析法中的单因素方差分析研究各因

素对物理力学指标的影响效应。方差分析法是把每一个因素影响下的试验结果考虑进去,通过计算分析出的检验水平判断因素对指标的显著性,其能全面地反映各因素水平带来的影响,较极差分析法准确性更高^[31]。

本次试验安排了 3 因素 5 水平的正交试验,试验总次数为 $n=25$ 。所以试验总自由度 $f_T=25-1=24$;由于每个因素水平都设置为 5,所以各因素的自由度为 $f_e=5-1=4$;则试验差的自由度为 $f_E=f_T-f_e=24-4=20$ 。试验结果的差异性一方面来自于因素水平的变化,另一方面因为有试验误差。在方差分析的指标中,总离差平方和 S_T 反映试验结果的总差异, S_T 越大,说明各次试验结果之间的差异越大;各因素离差的平方和 S_e 反映由于各因素水平变化所引起的试验结果的差异;试验误差的离差平方和 S_E 反映试验误差对试验结果的差异。

总离差平方和 S_T 为

$$S_T = \sum_{k=1}^n x_k^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n x_k \right)^2; \tag{3}$$

各因素离差平方和 S_e 为

$$S_e = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^{n_a} K_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n x_k \right)^2。 \tag{4}$$

其中: x_k 为第 k 个试验号的指标测试结果; n 为试验总次数; n_a 为每个因素所具有的水平数,每个水平做 a 次试验, $n=an_a$; K_i 为因素在第 i 个水平 a 次试验结果的和。

试验误差的离差平方和 S_E 为

$$S_E = S_T - S_e。 \tag{5}$$

为了消除计算各因素离差平方和项数的影响,将引起试验结果差异性的各离差平方和进行平均,各因素平均离差平方和 S_{ae} 和试验误差平均离差平方和 S_{aE} 分别为

$$S_{ae} = S_e / f_e; \tag{6}$$

$$S_{aE} = S_E / f_E; \tag{7}$$

$$F = S_{ae} / S_{aE}。 \tag{8}$$

将各因素平均离差平方和(式(6))与误差平均离差平方和(式(7))相比,得出 F 检验值。 F 值表示显著性,是统计学中检验样本之间的方差是否具有显著差异的方法。

先将表 4 中每种配比相似材料密度试验和单轴压缩变形试验得出的物理力学指标按照式(3)—(8)进行分析计算。然后根据表 5 中计算出的 F 值,综合考虑选取置信水平为 0.1 的临界值 $F_{0.1}(f_e, f_E)=$

$F_{0.1}(4, 20)=2.25$ 。最后根据以上 F 值判据判断因素对物理力学指标的显著性。判别如下:若 $F \geq F_{0.1}(4, 20)$,则称该因素对结果的影响是显著的;若 $F < F_{0.1}(4, 20)$,则称该因素对结果的影响是不显著的。

表 5 相似材料物理力学指标敏感性的方差分析结果
Table 5 Results of variance analysis on sensitivity of physical and mechanical indexes of similar materials

	因素	骨胶比	水膏比	重晶石掺量
ρ	S_T		0.119 1	
	S_e	0.056 1	0.007 5	0.024 9
	S_E	0.063 1	0.111 6	0.094 3
	S_{ae}	0.014 0	0.001 9	0.006 2
	S_{aE}	0.003 2	0.005 6	0.004 7
	F	4.44	0.34	1.32
	显著性	显著	不显著	不显著
σ_c	S_T		38.320 5	
	S_e	16.655 8	5.025 6	1.804 3
	S_E	21.664 7	33.294 9	36.516 2
	S_{ae}	4.164 0	1.256 4	0.451 08
	S_{aE}	1.083 2	1.664 7	1.825 8
	F	3.84	0.75	0.25
	显著性	显著	不显著	不显著
E	S_T		543 661	
	S_e	193 041	10 252	178 792
	S_E	350 620	533 410	364 870
	S_{ae}	48 260	2 563	44 698
	S_{aE}	17 531	26 670	18 243
	F	2.75	0.10	2.45
	显著性	显著	不显著	不显著
ν	S_T		0.105 7	
	S_e	0.017 7	0.006 1	0.044 2
	S_E	0.088 0	0.099 6	0.061 4
	S_{ae}	0.004 4	0.001 5	0.011 1
	S_{aE}	0.004 4	0.005 0	0.003 1
	F	1.01	0.31	3.60
	显著性	不显著	不显著	显著

由表 5 中的 S_e 和显著性结果可知,骨胶比对相似材料密度、单轴抗压强度和弹性模量的变化影响是显著的,重晶石掺量对相似材料泊松比的变化影响是显著的,这与极差分析的结果一致;水膏比对不同配比相似材料的各物理力学指标的变化影响均不显著。

3.2 相似材料损伤特征影响因素的敏感性

3.2.1 基于典型配比的相似材料声发射特征

相似材料破裂过程中伴有大量的声发射信号,因此可利用典型的声发射特征参数表征材料的损伤特性^[32]。声发射源的活动程度由单位时间内所发生的撞击数(或振铃计数)来表示,因此撞击和振铃累计计数经常被用来描述损伤过程^[33-34]。为了探究不同配比相似材料在破坏之前的损伤特征,根据表 4 中相似材料物理力学指标的变化情况,从 25 组试验中选取了 5 组典型配比,典型配比的选取遵循均匀分布的原则,其他配比也同样呈现相同的声发射变化特征,故从表 4 中每 5 组试验中选取 1 组典型试验,本次选取的试验号分别为 SY3、SY22、SY10、SY15 和 SY18;另外由于岩体变形破裂的行为与岩体性质差异有关,故可知选取的这 5 组试验的物理力学指标范围分布较广。图 4 为上述 5 组典型配比相似材料的应力、声发射振铃计数、声发射撞击数与时间的关系。

从图 4 相似材料在单轴加载过程中撞击数曲线和振铃计数变化的特点,将相似材料变形损伤破坏的过程分为三个阶段:接触期,稳定期和突增期。接触期,振铃计数数值较小,撞击数小幅度增加;这是由于介质材料压密,相似材料内部微裂纹闭合,变形能积累,导致了小振幅声发射的产生。稳定期,结合撞击数数值和加载时间范围的变化情况,发现撞击数曲线的平均斜率(在该阶段中的撞击数数值变化范围与时间范围的比值)较上一阶段呈现变小的趋势;这是由于相似材料进入弹性受力和发生稳定破裂的时期,在该阶段不产生结构性的损伤和明显的破裂。突增期,强度大的相似材料的撞击数曲线斜率会在该阶段的后期明显变大(图 4a—d),而强度小的相似材料的撞击数曲线斜率变化较小(图 4e);这是由于该阶段主要对应相似材料应力—应变曲线的裂纹不稳定扩展阶段和破坏阶段,强度大的相似材料在裂纹扩展和贯通时的能量大,脆性破坏特征明显,而强度小的相似材料呈现相反的性质。

3.2.2 各因素对表征相似材料损伤程度指标的敏感性

为了更清楚地描述正交因素对相似材料的损伤程度的影响,参考 Liu 等^[35]根据声发射撞击数和声发射累计振铃计数表征材料内部的损伤程度,采用式(9)定义和计算相似材料在某个因素水平下的相对累积损伤程度(D)。 D 与试样内部损伤程度呈正

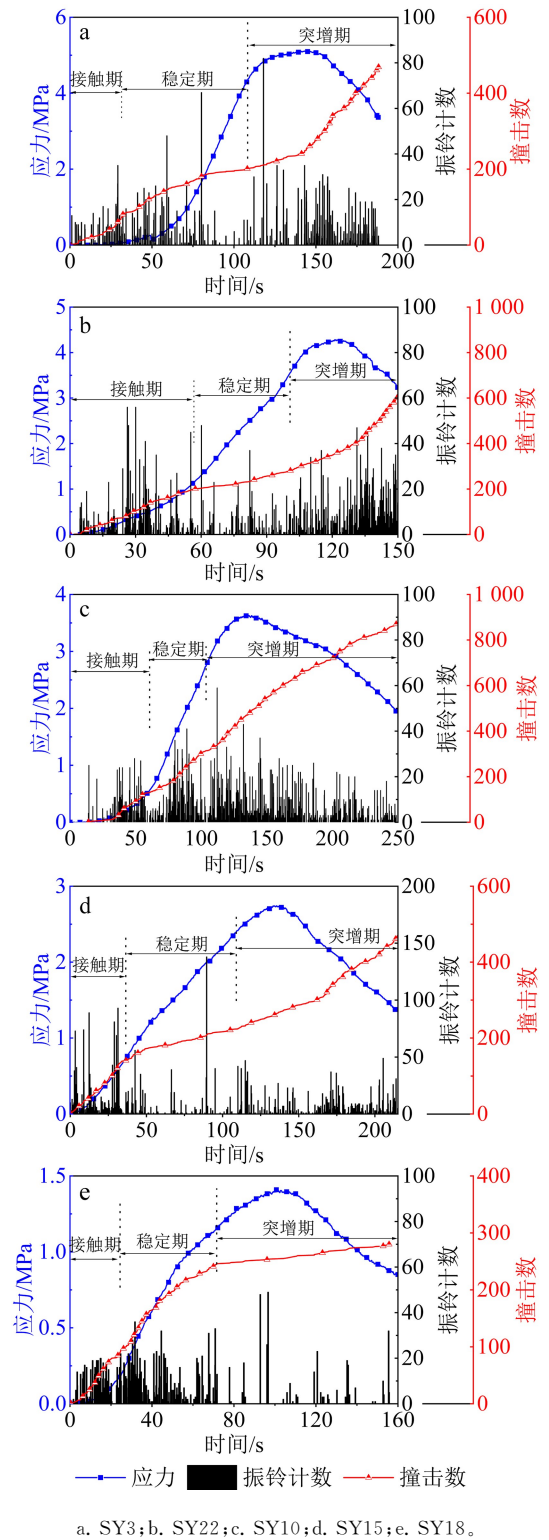


图 4 典型相似材料配比声发射特征参数的响应曲线

Fig. 4 Response curve of acoustic emission characteristic parameters of typical similar materials

相关。 D 越大,试样内部损伤程度越大,并且试件越接近破坏。

$$D_i = N_i / N_t \quad (9)$$

式中: N_i 为试样发生破坏时,某个因素 i 水平的累计撞击数($i=1,2,\cdots,5$); N_t 为所有组试样破坏时的累计撞击数。

为了评估相似材料在发生破坏之前的损伤特征,尤其是破坏前兆之前的损伤特征,依据图 4 中应力/振铃计数/撞击数-时间关系曲线,选择由稳定期进入突增期的时间节点处的撞击数为计算依据。该节点对应的时间为材料裂纹开始大量发育与贯通的时刻,节点处对应的应力为材料发生累计损伤的临界应力水平。

图 5 为不同因素对相似材料的 D 值影响趋势图。从图 5 可以看出: D 值随着骨胶比的增加而增

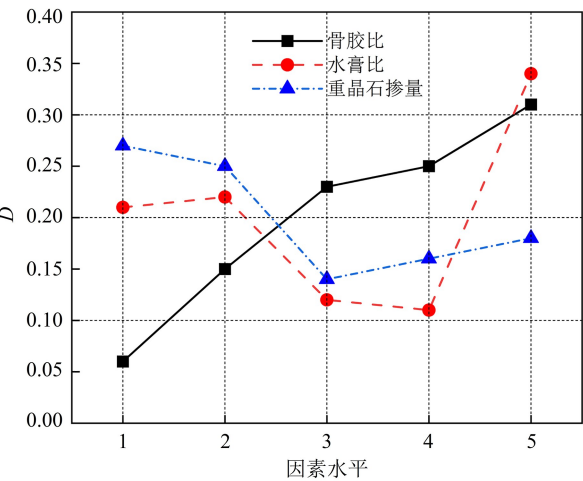


图 5 各正交因素对 D 的影响

Fig.5 Influence of each orthogonal factor on D

大,骨胶比越大,说明骨料表面的包裹层越薄,并影响试样的均匀性,试样内部孔隙相对越多^[36],试样的相对损伤程度会越大;与其他水平相比,骨胶比为 7 : 1(水平 5)时的相似材料的损伤程度最高。 D 值随着石膏比的增加呈现先略上升后下降再上升的趋势,石膏比对相似材料的损伤程度的影响是一个动态过程,石膏比过大或过小都会影响试件内部结构的均匀性,进而造成材料损伤变形程度过大;石膏比为 6 : 4(水平 4)时,相似材料损伤程度最小;石膏比过小,水化产物不能完全地填充浆体内部的孔隙,石膏比过大水化物反而会破坏局部结构,使薄弱处产生微裂缝^[37]。 D 值随着重晶石掺量的增加呈现先下降后上升的趋势,重晶石掺量占骨料的比例在 20%(水平 3)时,相似材料损伤程度最小,可见最优的重晶石掺量水平为 20%。

利用式(1)和式(2)求解相似材料的 D 值在各因素影响下的极差,结果见表 6。由表 6 可以看出骨胶比的极差最大,为 0.25,其次是石膏比,为 0.23,最后是重晶石掺量,为 0.13;可见骨胶比对相似材料的 D 值影响程度最大,说明骨胶比对材料的损伤程度起控制作用。利用方差分析方法对极差分析各因素对不同配比相似材料损伤程度的敏感性分析结果进行验证,结果见表 7。表 7 方差分析结果中的 F 值也可以说明以上极差分析的现象,骨胶比影响下相似材料的 D 值的 F 值最大,说明骨胶比对相似材料 D 值的变化影响最显著。

表 6 正交因素对相似材料 D 影响的极差分析结果

Table 6 Results of range analysis of the effect of orthogonal factors on D of similar materials

因素	N_i					N_t	D_i					极差
	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5		D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	
骨胶比	508	1 101	1 765	1 848	2 303	7 525	0.06	0.15	0.23	0.25	0.31	0.25
石膏比	1 545	1 668	895	822	2 565		0.21	0.22	0.12	0.11	0.34	0.23
重晶石掺量	2 025	1 888	1 081	1 175	1 326		0.27	0.25	0.14	0.16	0.18	0.13

表 7 正交因素对相似材料 D 影响的方差分析结果

Table 7 Results of variance analysis of the effect of orthogonal factors on D of similar materials

因素	S_T	S_e	S_E	S_{ae}	S_{aE}	F
骨胶比		395 856	1 918 860	98 964	95 943	1.03
石膏比	2 314 716	380 012	1 934 704	95 003	96 735	0.98
重晶石掺量		129 501	2 185 215	32 375	109 261	0.30

4 结论

1)采用河砂、重晶石粉、水泥和石膏等相似材料组合的密度、抗压强度、弹性模量和泊松比等物理力学参数结果范围分布较大,能够基本满足物理模拟试验对相似材料的要求。

2)骨胶比对相似材料密度、抗压强度和弹性模量起控制作用,重晶石掺量对相似材料泊松比起控制作用。石膏比对相似材料各个物理力学指标的影响均很小。

3)相似材料的声发射振铃计数和撞击数曲线在加载过程中的变化过程划分为接触期、稳定期和突增期。基于进入突增期节点处的声发射撞击数定义相似材料的相对累计损伤程度(D),发现骨胶比对相似材料的 D 值影响程度最大。骨胶比越大, D 值呈现越大的趋势;石膏比过大过小都会影响相似材料损伤变形的程度;重晶石最优掺量为 20%。

参考文献(References):

- [1] Gong F, Yan J, Li X, et al. A Peak-Strength Strain Energy Storage Index for Rock Burst Proneness of Rock Materials [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 117: 76 - 89.
- [2] Chen J, Li X, Cao H, et al. Experimental Investigation of the Influence of Pulsating Hydraulic Fracturing on Pre-Existing Fractures Propagation in Coal[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 189: 107040.
- [3] 康希并, 张建义. 相似材料模拟中的材料配比[J]. 淮南矿业学院学报, 1988(2): 50 - 64.
Kang Xibing, Zhang Jianyi. Material Proportioning in Similar Material Simulations[J]. Journal of Huainan Institute of Mining, 1988 (2): 50 - 64.
- [4] 何松高, 李传新, 张义平, 等. 基于构造物理模拟的塔中北坡 NE 向走滑断裂形成机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(1): 73 - 87.
He Songgao, Li Chuanxin, Zhang Yiping, et al. Mechanism of the NE Trending Strike-Slip Fault in the North Slope of Tazhong Based on Analogue Modelling [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(1): 73 - 87.
- [5] 袁进科, 裴钻, 杨森林, 等. 纳米硅基固沙材料加固机理及抗冲蚀试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 80 - 89.

- Yuan Jinke, Pei Zuan, Yang Senlin, et al. An Experimental Study of the Reinforcement Mechanism and Erosion Resistance of Nano Silicon-Based Sand-Fixation Material [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 80 - 89.
- [6] 李光, 马凤山, 郭捷, 等. 大尺寸工程模型试验中的相似材料配比试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(11): 1653 - 1660.
Li Guang, Ma Fengshan, Guo Jie, et al. Experimental Study on Similar Materials Ratio Used in Large Scale Engineering Model Test [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(11): 1653 - 1660.
- [7] 张艳丽. 煤体相似材料配比的正交试验研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(12): 72 - 74.
Zhang Yanli. Research on Orthogonal Experiment of Ratio of Similar Material for Coal [J]. Coal Technology, 2018, 37(12): 72 - 74.
- [8] 范鹤, 刘斌, 范泽, 等. 高填土涵洞相似材料模型试验与数值模拟[J]. 吉林大学学报(工学版), 2008, 38(2): 399 - 403.
Fan He, Liu Bin, Fan Ze, et al. Model Test with Similar Material and Numerical Simulation of Culvert with High Fills [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2008, 38(2): 399 - 403.
- [9] 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.
- [10] 周亚. 岩体剪切破坏与声发射特性模拟试验研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021.
Zhou Ya. Study on Simulation Test of Rock Mass Shear Failure and Acoustic Emission Characteristics [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2021.
- [11] 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 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): 2126 - 2130.
- [12] 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): 2231 - 2237.
- 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): 2231 - 2237.
- [13] 吕艳,刁钰恒,周泽华,等. 大型振动台试验花岗岩相似材料配比研究[J]. 地震工程学报, 2021, 43(5): 1150 - 1159.
- Lü Yan, Diao Yuheng, Zhou Zehua, et al. Proportion of Granite Similar Material Used in Large-Scale Shaking Table Test [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(5): 1150 - 1159.
- [14] 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 - 51.
- 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 - 51.
- [15] 胡南燕,黄建彬,罗斌玉,等. 透明岩体相似材料配制及其物理力学特性分析[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(1): 135 - 140.
- Hu Nanyan, Huang Jianbin, Luo Binyu, et al. Preparation of Similar Materials for Transparent Rock Mass and Analysis of Its Physical and Mechanical Properties[J]. Mining R&D, 2023, 43(1): 135 - 140.
- [16] 宋丽霞,张德全,李秦,等. 松软砂岩型铀矿床相似材料配比试验研究[J]. 铀矿冶, 2023, 42(2): 1 - 6.
- Song Lixia, Zhang Dequan, Li Qin, et al. Experimental Study on Similar Material Ratio for a Soft Sandstone-Type Uranium Deposit[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2023, 42(2): 1 - 6.
- [17] 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.
- [18] 宁奕冰,唐辉明,张勃成,等. 基于正交设计的岩石相似材料配比研究及底摩擦物理模型试验应用[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 2009 - 2020.
- Ning Yibing, Tang Huiming, Zhang Bocheng, et al. Investigation of the Rock Similar Material Proportion Based on Orthogonal Design and Its Application in Base Friction Physical Model Tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 2009 - 2020.
- [19] 李长冬,唐辉明,胡新丽,等. 岩石相似材料变形与强度特性及数值模拟研究[J]. 地质科技情报, 2008, 27(6): 98 - 101.
- Li Changdong, Tang Huiming, Hu Xinli, et al. Deformation and Strength Characteristics and Numerical Simulation of Rock Similar Material[J]. Geological Science and Technology Information, 2008, 27(6): 98 - 101.
- [20] Gu X B, Wu Q H, Zhu Y H. The Experimental Investigation on the Propagation Process of Crack for Brittle Rock Similar Material[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37: 4731 - 4740.
- [21] 张五洲,周瑜,鲁鲲鹏,等. 基于正交试验设计的岩石相似材料研究[C]//中冶建筑研究总院有限公司. 2022年工业建筑学术交流会议论文集. 北京:工业建筑杂志社, 2022: 1226 - 1232, 1292.
- Zhang Wuzhou, Zhou Yu, Lu Kunpeng, et al. Study on the Rock Materials Based on Orthogonal Test [C]//Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd. MCC Group. Proceedings of the 2022 Industrial Building Academic Exchange Conference. Beijing: Industrial Construction Magazine, 2022: 1226 - 1232, 1292.
- [22] 秦四清. 岩石声发射技术概论[M]. 成都:西南交通大学出版社, 1993.
- Qin Siqing. Introduction to Rock Acoustic Emission Technology [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1993.
- [23] Kachanov L M. On the Time to Failure Under Creep Condition[J]. Izv Akad Nauk USSR, Otd Techn Nauk, 1958, 8: 26 - 31.
- [24] 吴贤振,刘建伟,刘祥鑫,等. 岩石声发射振铃累计计数与损伤本构模型的耦合关系探究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(1): 28 - 34, 41.
- Wu Xianzhen, Liu Jianwei, Liu Xiangxin, et al. Study on the Coupled Relationship Between AE Accumulative Ring-Down Count and Damage Constitutive Model of Rock[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(1): 28 - 34, 41.
- [25] 李树刚,成小雨,刘超,等. 单轴压缩岩石相似材料损伤特性及时空演化规律[J]. 煤炭学报, 2017, 42(增刊 1): 104 - 111.

- Li Shugang, Cheng Xiaoyu, Liu Chao, et al. Damage Characteristics and Space-Time Evolution Law of Rock Similar Material Under Uniaxial Compression [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(Sup.1): 104 - 111.
- [26] Dai S T, Labuz J F. Damage and Failure Analysis of Brittle Materials by Acoustic Emission[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1997, 9(4): 200 - 205.
- [27] 林峰,李庶林,薛云亮. 混凝土材料声发射参数与力学参数及其损伤程度的关系[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2010, 49(4): 526 - 530.
- Lin Feng, Li Shulin, Xun Yunliang. Relationship Between Acoustic Emission Parameter and Mechanics Parameters Damage Degree of Concrete Material[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2010, 49(4): 526 - 530.
- [28] 张延军,袁学兵,马跃强,等. 花岗岩双裂隙热-流耦合参数敏感性[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(6): 1971 - 1981.
- Zhang Yanjun, Yuan Xuebing, Ma Yueqiang, et al. Sensitivity of Thermal-Fluid Coupling Parameters of Granite Double Fractures [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(6): 1971 - 1981.
- [29] 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.
- Wu Baoyang, Li Peng, Wang Yanbing, et al. Mechanical Properties of Materials for Similar Simulation Test of Coal-Water Co-Mining[J]. China Coal, 2022, 48(10): 64 - 73.
- [30] 刘厚平,韩博,张凌,等. 基于正交试验法的天然气水合物地层钻井液配方设计[J]. 地质科技情报, 2013, 32(6): 202 - 206.
- Liu Houping, Han Bo, Zhang Ling, et al. Optimum Design of Drilling Fluid in the Natural Gas Hydrate Formations by Orthogonal Test Method [J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(6): 202 - 206.
- [31] 陈魁. 应用概率统计:应用数学[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.
- Chen Kui. Applied Probability Statistics: Applied Mathematics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [32] 刘祥鑫,张艳博,梁正召,等. 岩石破裂失稳声发射监测频段信息识别研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(6): 1096 - 1105.
- Liu Xiangxin, Zhang Yanbo, Liang Zhengzhao, et al. Recognition of Frequency Information in Acoustic Emission Monitoring of Rock Fracture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(6): 1096 - 1105.
- [33] 赵云阁,黄麟淇,李夕兵. 岩石损伤强度及峰值强度前后阶段的声发射识别[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(10): 1908 - 1916.
- Zhao Yunge, Huang Linqi, Li Xibing. Identification of Stages Before and After Damage Strength and Peak Strength Using Acoustic Emission Tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(10): 1908 - 1916.
- [34] 苏占东,孙进忠,夏京,等. 冻融循环对花岗岩声发射特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(5): 865 - 874.
- Su Zhandong, Sun Jinzhong, Xia Jing, et al. Experimental Research of the Effect of Freezing-Thawing Cycles on Acoustic Emission Characteristics of Granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(5): 865 - 874.
- [35] Liu H, Li W, Luo G, et al. Mechanical Properties and Fracture Behavior of Crumb Rubber Basalt Fiber Concrete Based on Acoustic Emission Technology[J]. Sensors, 2020, 20(12): 3513.
- [36] 蒋勇,牛云辉,贾陆军,等. 高强度透水混凝土实验研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(3): 16 - 19.
- Jiang Yong, Niu Yunhui, Jia Lujun, et al. Experimental Study on High-Strength Pervious Concrete[J]. New Construction Materials, 2017, 44(3): 16 - 19.
- [37] 阎培渝,陈炜一,杨剑. 硅酸盐水泥的细度对其水化过程和力学性能的影响[J]. 水泥, 2023(1): 1 - 5.
- Yan Peiyu, Chen Weiyi, Yang Jian. Effect of Fineness of Silicate Cement on Its Hydration Process and Mechanical Properties[J]. Cement, 2023(1): 1 - 5.