

多因素影响下石膏-石英砂类相似材料强度特性 变化规律研究^①

朱明德^{1,2}, 王剑波^{1,2}, 安龙^{1,2,3}, 程力^{1,2}, 侯奎奎^{1,2}

(1.山东黄金矿业股份有限公司, 山东 济南 250100; 2.山东黄金集团有限公司深井开采实验室, 山东 莱州 261442; 3.东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 以石膏-石英砂类相似材料为研究对象, 采用室内实验分析了7种因素对该类相似材料强度指标的影响规律。结果表明, 养护温度和材料密度与材料强度指标呈正相关, 养护湿度、砂胶比、灰膏比、细粒级石英砂含量、含水量等与材料强度指标呈负相关。计算了不同影响因素的敏感度指标, 其中材料强度对养护温度的敏感性仅4.5%, 而对砂胶比的敏感性达到了104.9%。对于单轴抗压强度, 温度、含水量、密度、湿度、灰膏比、细粒级石英砂含量和砂胶比的敏感度依次增大; 对于抗拉强度, 砂胶比、灰膏比、密度、湿度、含水量、细粒级石英砂含量和温度的敏感度依次降低。

关键词: 相似材料; 相似物理模型; 材料配比; 单轴抗压强度; 抗拉强度; 敏感度

中图分类号: TU431

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.01.009

文章编号: 0253-6099(2023)01-0040-05

Influence of Multi-factor on Variation Rule of Strength Characteristics of Similar Rock Material Prepared with Gypsum and Quartz Sand

ZHU Mingde^{1,2}, WANG Jianbo^{1,2}, AN Long^{1,2,3}, CHENG Li^{1,2}, HOU Kuikui^{1,2}

(1. Shandong Gold Mining Co Ltd, Jinan 250100, Shandong, China; 2. Deep Mining Laboratory of Shandong Gold Group Co Ltd, Laizhou 261442, Shandong, China; 3. Key Laboratory of Safe Mining of Deep Metal Mines, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: A kind of similar rock material was prepared with gypsum and quartz sand, and influence of seven factors on the strength index of the material was analyzed by performing laboratory tests. The results show that curing temperature and material density are in positive correlation with material strength index, while curing humidity, sand-to-binder ratio, ash-to-paste ratio, fine-grained quartz sand content, as well as water content are in negative correlation with material strength index. Based on the calculation of the sensitivity indices of different influencing factors, it is found that material strength has a sensitivity of only 4.5% to curing temperature, a sensitivity of 104.9% to sand-binder ratio. Factors of curing temperature, water content, material density, curing humidity, ash-to-paste ratio, fine-grained quartz sand content and sand-to-binder ratio are in an ascending order in terms of their sensitivity to uniaxial compressive strength; while factors of sand-to-binder ratio, ash-to-paste ratio, material density, curing humidity, water content, fine-grained quartz sand content and curing temperature are in a descending order in terms of their sensitivity to tensile strength.

Key words: similar material; similar physical model; material proportion; uniaxial compressive strength; tensile strength; sensitivity

相似物理模型实验是研究复杂工程问题的重要手段, 在矿山、水利和地下工程等领域应用广泛^[1-3]。相似物理模型实验的关键是在相似理论的指导下保证原

型与物理模型的相似性, 而相似材料原料及其配比参数的选取是实现相似性的关键^[4]。岩体属于典型的脆性材料, 而石膏具有高强度、高脆性的特点, 常采用

① 收稿日期: 2022-08-21

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0604601)

作者简介: 朱明德(1988—), 男, 河南开封人, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为深井采矿工艺、矿山岩石力学与岩爆防控。

石膏与石英砂作为相似材料中的胶凝材料和骨料来模拟研究岩体材料在复杂工程条件下的变形、失稳规律。

针对石膏-石英砂类相似材料组分及配比参数对其物理力学性质的影响,国内外学者开展了研究^[5-14],但研究结果缺乏普适性,难以指导石膏-石英砂类相似材料的配比参数设计。本文以石膏和石英砂为基础材料,配以相应的减强剂和缓凝剂制作类岩石相似材料,对影响相似材料物理力学性质的温度、湿度、密度、砂胶比、灰膏比、粒径级配和含水量等7个因素开展实验研究,分析不同因素对相似材料抗压强度及抗拉强度等力学性质的影响,并以此为基础开展多因素敏感性分析,确定单一因素的影响权重,为石膏-石英砂类相似材料的配比参数设计提供基础数据支撑。

1 石膏-石英砂类相似材料物理力学特性实验

1.1 相似材料原料选择

相似材料通常由胶凝材料、骨料和添加剂构成。胶凝材料是决定相似材料性质的主要原料,对相似材料模型物理力学性质起重要作用。骨料又称为充填材料,是影响相似材料物理力学性质的另一个重要因素,尤其是对相似材料的密度、晶体颗粒组成等起决定性作用。添加剂作为功能材料,对相似材料物理力学性质起到调控作用,根据其使用目的不同而不同,在实验中主要用于调整强度和凝固时间,通过调整强度来提高相似材料的适用范围,通过调整凝固时间,为相似材料的堆砌成型预留充足的操作时间。

依据以上相似材料原料的组成原则,本文制备的石膏-石英砂类相似材料,以石膏为胶凝材料,石英砂为骨料,重钙粉、柠檬酸和硼砂为添加剂,其中重钙粉为减强剂,降低相似材料强度,柠檬酸和硼砂作为复合缓凝剂,延长石膏的初凝时间。

1.2 实验方案

考虑相似材料的成型及初始强度等因素,根据石膏-石英砂类相似材料的效果实验,初步确定相似材料的基础配比参数(质量比)为石膏:(0.90~2.00 mm)石英砂:柠檬酸:硼砂:水=1:7:0.005:0.01:0.81。并以此配比参数为基础,分析温度、湿度、密度、砂胶比、灰膏比、粒径级配和含水量等7个因素对相似材料物理力学特性的影响。其中温度、湿度为环境影响因素,密度为材料制备影响因素,砂胶比、灰膏比、骨料粒径级配和含水量为相似材料的组分配比影响因素。砂胶比为石英砂与石膏的质量比;灰膏比为重钙粉与石膏的质量比;骨料粒径配比为0.45~0.90 mm石英砂占石

英砂总质量的比值;含水量为用水量与干料总质量的比值。以前述相似材料的基础配比参数设定对照方案:温度25℃,湿度55%,密度1.75 g/cm³,砂胶比7:1,灰膏比0:10,骨料粒径配比0,含水量1/10。按照该方案制作得到的相似材料单轴抗压强度为0.88 MPa,巴西劈裂抗拉强度为39 kPa。以对照方案为基础,采用单因素控制变量方法,分别对以上7个因素对相似材料强度指标的影响进行分析,单因素变量方案设置如下:

1) 温度:设置15℃、20℃、25℃、30℃、35℃和40℃共6个温度梯度,其他影响因素设置为:湿度55%,密度1.75 g/cm³,砂胶比7:1,灰膏比0:10,骨料粒径配比0,含水量1/10。

2) 湿度:设置45%、55%、60%、65%、70%和80%共6个湿度梯度,其他影响因素设置为:温度25℃,密度1.75 g/cm³,砂胶比7:1,灰膏比0:10,骨料粒径配比0,含水量1/10。

3) 密度:根据材料压实程度,设置1.55 g/cm³、1.65 g/cm³、1.75 g/cm³、1.85 g/cm³和1.95 g/cm³共5个密度梯度,其他影响因素设置为:温度25℃,湿度55%,砂胶比7:1,灰膏比0:10,骨料粒径配比0,含水量1/10。

4) 砂胶比:设置5:1、6:1、7:1和8:1共4个砂胶比梯度,其他影响因素设置为:温度25℃,湿度55%,密度1.75 g/cm³,灰膏比0:10,骨料粒径配比0,含水量1/10。

5) 灰膏比:对照方案中未添加起到减强作用的重钙粉,但为了分析重钙粉的减强作用,设置3:7、4:6、5:5、6:4和7:3共5个灰膏比梯度,其他影响因素设置为:温度25℃,湿度55%,密度1.75 g/cm³,砂胶比7:1,骨料粒径配比0,含水量1/10。

6) 骨料粒径级配:在石英砂总质量不变的情况下掺入小粒径(0.45~0.90 mm)石英砂来改变粒径级配,分别设置0%、10%、20%、30%、40%和50%共6种方案,其他影响因素设置为:温度25℃,湿度55%,密度1.75 g/cm³,砂胶比7:1,灰膏比0:10,含水量1/10。

7) 含水量:设置1:9、1:10和1:11共3个含水量梯度,其他影响因素设置为:温度25℃,湿度55%,密度1.75 g/cm³,砂胶比7:1,灰膏比0:10,骨料粒径配比0。

1.3 实验

采用Φ50 mm×100 mm圆柱模具制作单轴压缩实验所需试样,采用Φ50 mm×25 mm圆柱模具制作巴西劈裂实验所需试样。采用Master Loader 5030试验机

测定制作试样的单轴抗压强度和巴西劈裂抗拉强度指标。

2 影响相似材料物理力学特性因素分析

2.1 温度对相似材料力学性质的影响

温度对相似材料力学性质的影响如图1所示。由实验结果可知,随着养护温度升高,石膏-石英砂类相似材料的单轴抗压强度和抗拉强度均随之增大,但增长速率不同。温度小于25℃时,随着养护温度升高,其强度增长率较大,25~35℃时,强度增长速率变缓,温度高于35℃时,其强度增长速率再次增大。养护温度由15℃上升至40℃时,试样单轴抗压强度由0.84 MPa上升至0.90 MPa,强度值增长了7.14%;抗拉强度由35.12 kPa上升至42.64 kPa,强度值增长了20%。结果表明,抗拉强度对养护温度更为敏感。

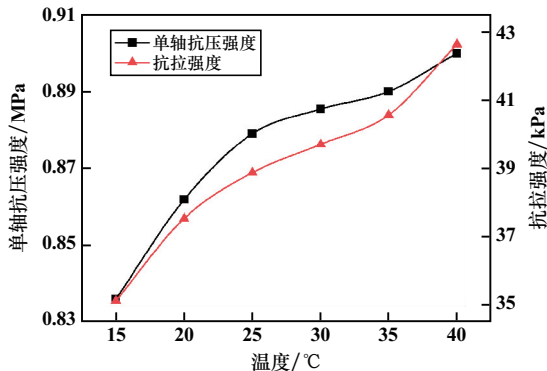


图1 温度对相似材料力学性质的影响

2.2 湿度对相似材料力学性质的影响

湿度对相似材料力学性质的影响如图2所示。养护湿度增大,石膏-石英砂类相似材料强度随之降低,且单轴抗压强度和抗拉强度的变化曲线呈相似的规律。根据湿度-强度曲线的特征,将相似材料强度随湿度的衰减划分为3个阶段:湿度低于50%及湿度高于75%时为强度变化的稳定阶段,在该阶段内,随着湿度增加,试样单轴抗压强度及抗拉强度变化较小。湿度

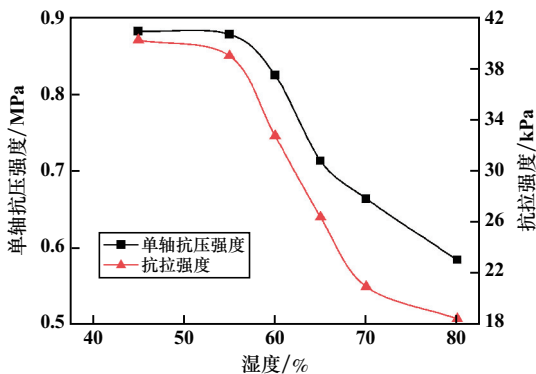


图2 湿度对相似材料力学性质的影响

50%~75%时为快速衰减阶段,在该阶段内,随着湿度增加,试样单轴抗压强度及抗拉强度快速衰减。养护环境湿度由45%上升至80%时,石膏-石英砂类相似材料单轴抗压强度由0.88 MPa降至0.59 MPa,抗拉强度由40.22 kPa降至18.50 kPa,相似材料单轴抗压强度与抗拉强度下降率分别为32.95%和56.08%,抗拉强度对养护湿度更为敏感。

2.3 密度对相似材料力学性质的影响

密度对相似材料力学性质的影响如图3所示。随着试样密度增大,其单轴抗压强度与抗拉强度均呈近似线性增长的规律。试样密度由1.55 g/cm³增长至1.95 g/cm³,单轴抗压强度由0.43 MPa上升至1.24 MPa,增长了188.37%,抗拉强度由29.12 kPa上升至43.52 kPa,增长了49.45%。随着密度增大,试样单轴抗压强度增长率显著大于抗拉强度增长率。

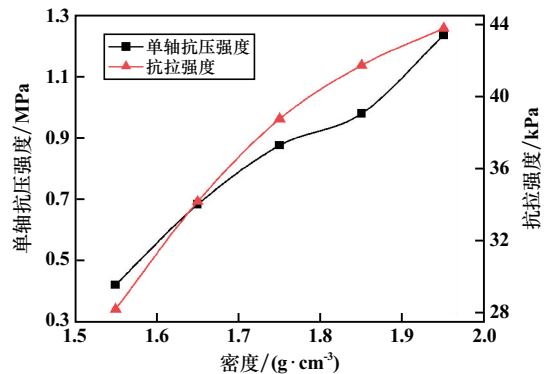


图3 密度对相似材料力学性质的影响

2.4 砂胶比对相似材料力学性质的影响

砂胶比对相似材料力学性质的影响如图4所示。随着砂胶比增大,石膏-石英砂类相似材料单轴抗压强度与抗拉强度相应降低,且曲线变化规律相似。砂胶比低于7:1时,单轴抗压强度和抗拉强度随砂胶比近似呈线性衰减的规律;砂胶比大于7:1时,随着砂胶比增大,强度衰减速率变缓。砂胶比由5:1上升至8:1时,单轴抗压强度由1.57 MPa降至0.66 MPa,降低了

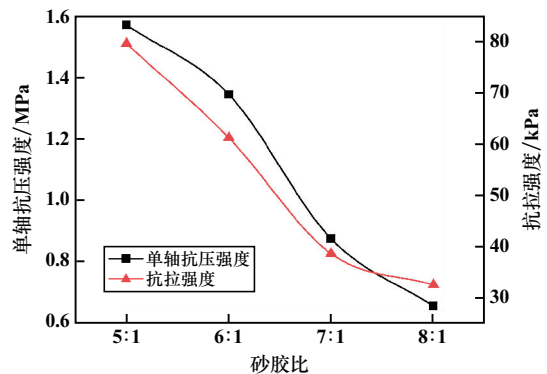


图4 砂胶比对相似材料力学性质的影响

57.96%，抗拉强度由 79.91 kPa 降至 32.75 kPa，降低了 59.02%。砂胶比分别为 5:1、6:1、7:1 和 8:1 时，石膏-石英砂类相似材料的拉压比分别为 19.65、21.91、22.59 和 20.10，压拉比较大，且随着砂胶比改变，该类相似材料压拉比相对稳定，是模拟脆性岩石的一种理想材料。

2.5 灰膏比对相似材料力学性质的影响

灰膏比对相似材料力学性质的影响如图 5 所示。重钙粉的加入显著降低了石膏-石英砂类相似材料的强度。随着灰膏比增加，相似材料试样单轴抗压强度和抗拉强度均显著降低，且随着灰膏比增加，强度的衰减速率也随之增大。灰膏比由 3:7 增加至 7:3 时，单轴抗压强度由 0.53 MPa 降至 0.32 MPa，降低了 39.6%，抗拉强度由 24 kPa 降至 7.5 kPa，降低了 68.8%。重钙粉的加入对材料抗拉强度影响更为显著。重钙粉的加入，可使相似材料达到更高的相似度。

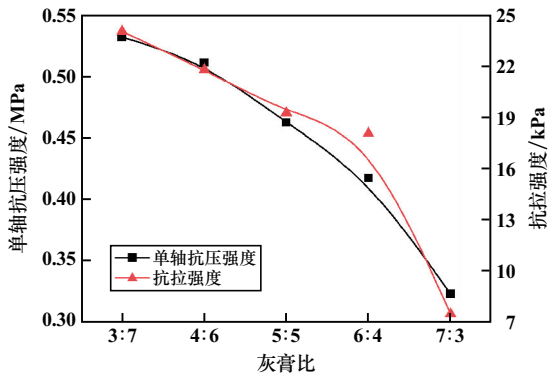


图 5 灰膏比对相似材料力学性质的影响

2.6 骨料粒径级配对相似材料力学性质的影响

骨料粒径级配对相似材料力学性质的影响如图 6 所示。随着细粒级 (0.45~0.90 mm) 石英砂混入，相似材料试样强度随之降低，且随着细粒级石英砂混入量增大，强度指标随之降低。随着细粒级石英砂含量增加，试样单轴抗压强度近似呈线性降低的规律，抗拉强度呈指数衰减的变化规律，当细粒级石英砂含量小于 35% 时，抗拉强度衰减速率较快，当细粒级石英砂含量

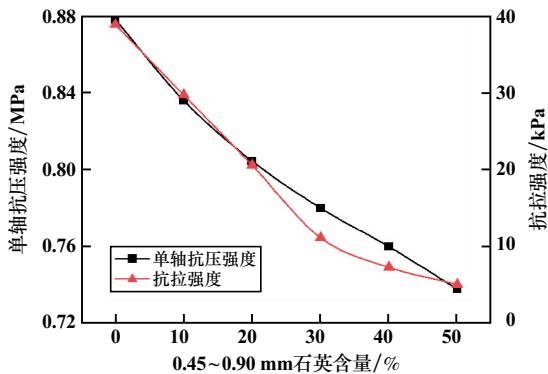


图 6 骨料粒径级配对相似材料力学性质的影响

大于 35% 时，抗拉强度衰减速率变缓。当细粒级石英砂含量由 0 上升至 50% 时，单轴抗压强度由 0.88 MPa 降至 0.74 MPa，降低了 15.91%，抗拉强度由 38.9 kPa 降至 5.23 kPa，降低了 86.56%，抗拉强度的降幅远超单轴抗压强度，表明抗拉强度对石英砂的粒径及所占比例更为敏感。

2.7 含水量对相似材料力学性质的影响

含水量对相似材料力学性质的影响如图 7 所示。由图 7 可知，随着试样含水量增加，材料单轴抗压强度和抗拉强度呈降低趋势，且变化规律相似。含水量由 1:11 上升至 1:9 时，单轴抗压强度由 1.16 MPa 降至 0.79 MPa，降低了 31.90%，抗拉强度由 46.01 kPa 降至 36.13 kPa，降低了 21.47%，单轴抗压强度对石膏-石英砂类相似材料的含水量变化更为敏感。

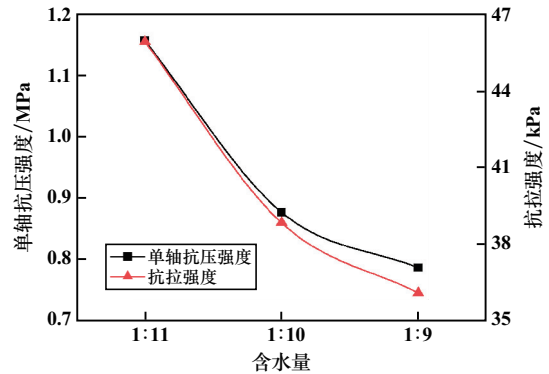


图 7 含水量对相似材料力学性质的影响

3 影响因素的敏感性分析

不同因素对石膏-石英砂类相似材料的影响程度以及主次顺序不同，不同影响因素所对应参数的量纲不同，且各个参数之间没有共性，很难直接判断影响程度高低，因此，对不同影响因素进行敏感性对比分析，首先定义评价影响因素敏感度的敏感度因子为：

$$S(a_k) = \max \left\{ \left| \frac{U_{a_k \max} - U^*}{U^*} \right|, \left| \frac{U_{a_k \min} - U^*}{U^*} \right| \right\} \quad (1)$$

式中 $S(a_k)$ 为影响因素 a_k 的敏感度； U^* 为基准方案所对应的试样材料的单轴抗压强度或抗拉强度； $U_{a_k \max}$ 和 $U_{a_k \min}$ 分别为在实验中单轴抗压强度和抗拉强度在影响因素 a_k 的变化范围内的最大值和最小值。

根据室内实验数据可知，7 个影响因素中，温度和密度与相似材料强度指标呈正相关关系，其余影响因素均与相似材料强度指标呈负相关关系。进一步由式(1)得到各个影响因素的敏感度指标如图 8 所示。由计算结果可知，对于单轴抗压强度，砂胶比的敏感度达到了

104.9%,其余影响因素的敏感度从大到小依次为细粒级石英砂含量、灰膏比、湿度、密度、含水量和温度,温度的敏感度仅为10.3%。对于抗拉强度,砂胶比的敏感度达到了78%,其余影响因素的敏感度从大到小依次为灰膏比、密度、湿度、含水量、细粒级石英砂含量和温度,其中温度的敏感度仅为4.5%,对相似材料单轴抗压强度几乎无影响。对比各个影响因素对相似材料的单轴抗压强度及抗拉强度的敏感度指标可知,不同因素在改变单轴抗压强度和抗拉强度时其作用并不相同,其中细粒级石英砂含量的改变对单轴抗压强度的影响较小,但却显著影响材料的抗拉强度;密度的改变显著影响材料的单轴抗压强度,但对抗拉强度影响不大。即单轴抗压强度与抗拉强度对影响因素的敏感性存在差异。

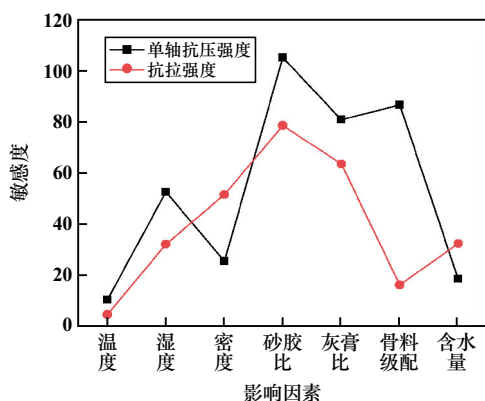


图8 各影响因素对强度的敏感度

4 结 论

1) 同一影响因素对材料单轴抗压强度和抗拉强度的影响具有一致性,即同一因素的改变引起的材料单轴抗压强度和抗拉强度的变化趋势一致,但变化幅度不同。

2) 得到了温度、湿度、密度、砂胶比、灰膏比、粒径级配和含水量等因素对石膏-石英砂类相似材料单轴抗压强度和抗拉强度的影响规律,结果表明,养护温度、材料密度与材料强度指标呈正相关,养护湿度、砂胶比、灰膏比、细粒级石英砂含量、含水量等因素与材料强度指标呈负相关。

3) 比较不同影响因素的敏感度可知,温度改变对相似材料强度指标影响程度较小,砂胶比改变对材料强度指标影响较大。

4) 对于单轴抗压强度,影响程度从大到小的因素依次为:砂胶比、细粒级石英砂含量、灰膏比、湿度、密度、含水量和温度;对于抗拉强度,影响程度从大到小的因素依次为:砂胶比、灰膏比、密度、湿度、含水量、细粒级石英砂含量和温度。

参考文献:

- [1] 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(22):3785-3789.
- [2] 王汉鹏,李术才,郑学芬,等.地质力学模型试验新技术研究进展及工程应用[J].岩石力学与工程学报,2009,28(S1):2765-2771.
- [3] 蒋复量,张帅,李向阳,等.基于正交设计的类轴矿岩相似材料配合比试验研究[J].矿冶工程,2018,38(2):20-24.
- [4] 杨洪增,赵章,李玉宝.高强度相似材料配比试验研究[J].煤矿安全,2018,49(9):59-62.
- [5] 史小萌,刘保国,元轶.水泥石膏胶结相似材料在固-流耦合试验中的适用性[J].岩土力学,2015,36(9):2624-2630.
- [6] 王鹏,舒才,施峰,等.不同砂胶比、密度和含水性相似材料力学性质正交试验研究[J].岩土力学,2017,38(S2):229-235.
- [7] LI H, GUO G, ZHA J. Study on time-varying characteristics of similar material model strength and the regulation measures[J]. Environmental Earth Sciences, 2017,76(15):1-11.
- [8] 刘亮亮,王海龙,刘江波,等.低强度相似材料正交配比试验[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2014,33(2):188-192.
- [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(11):1805-1808.
- [10] 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.
- [11] 徐卫东,张永亮,陈晓利,等.庙岭金矿采空区混合强度充填方法研究[J].矿冶工程,2022,42(2):14-18.
- [12] 杜轩宏.加载速率及配比对相似材料破坏特征影响实验研究[D].西安:西安科技大学安全科学与工程学院,2019.
- [13] 张友锋,付玉华,余姚.多次冲击下渗膨润土胶结充填体力学特性试验研究[J].矿冶工程,2022,42(1):30-34.
- [14] 林海飞,翟雨龙,李树刚,等.新型岩石相似材料物理力学参数影响因素的试验研究[J].西安科技大学学报,2015,35(4):409-414.

引用本文:朱明德,王剑波,安龙,等.多因素影响下石膏-石英砂类相似材料强度特性变化规律研究[J].矿冶工程,2023,43(1):40-44.