

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.1930

环氧树脂基脆性透明岩石相似材料配比试验研究

胡南燕^{1,2}, 黄建彬¹, 罗斌玉^{1,2}, 李雪雪¹, 陈敦熙¹,
曾子懿¹, 付 晗¹, 娄家豪¹

(1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081;

2. 武汉科技大学 湖北省工业安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430081)

摘 要: 针对岩体内部裂隙的空间位置、发育程度、发展方向等无法直接观测的难题, 使用透明材料制作相似模型是一个行之有效的方法。为了研究原料配比对透明岩石相似材料力学性质的影响规律, 同时克服透明岩石相似材料常温下脆性度不够的缺陷, 采用环氧树脂作为骨料, 改性酸酐作为固化剂, 外加松香饱和溶液 (rosin saturated solution, RSS) 来调节脆性, 提出了脆性透明岩石相似材料试样的制备方法。应用全面试验设计法, 研究环氧树脂与酸酐质量比和 RSS 含量对透明岩石相似材料物理力学参数的影响规律。结果表明: 常温下制备的透明岩石相似材料具有良好的脆性。其中 RSS 含量对材料密度、抗压强度、弹性模量、峰值应变、抗拉强度、黏聚力和内摩擦角有显著影响, 而环氧树脂与酸酐质量比对材料密度有显著影响。材料的密度、抗压强度、弹性模量、峰值应变、黏聚力和内摩擦角随着 RSS 含量的增加不断降低, 抗拉强度随着 RSS 含量的增加呈现先降低后增加的趋势。材料密度随着环氧树脂与酸酐质量比的增加呈现先增加后降低的趋势。基于多元线性回归分析建立了脆性透明岩体相似材料力学性能与环氧树脂与酸酐质量比和 RSS 含量间的经验公式, 为脆性透明岩石相似材料配比提供借鉴参考。

关 键 词: 脆性透明岩石; 相似材料; 配比试验; 力学特性; 环氧树脂

中图分类号: TU451

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 12-3471-10

Experimental study on proportioning of epoxy resin-based transparent brittle rock-like materials

HU Nan-yan^{1,2}, HUANG Jian-bin¹, LUO Bin-yu^{1,2}, LI Xue-xue¹, CHEN Dun-xi¹,
ZENG Zi-yi¹, FU Han¹, LOU Jia-hao¹

(1. School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China;

2. Industrial Safety Engineering Technology Research Center of Hubei Province, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China)

Abstract: In view of the difficulty that the spatial location, growth degree and development direction of cracks inside rock masses cannot be directly observed, the transparent materials are considered as the effective method to build similar models. In order to study the effect of raw material ratio on the mechanical properties of transparent rock-like material, and overcome the defect of insufficient brittleness of transparent rock-like material at room temperature, a novel method to prepare the transparent rock-like material is developed with epoxy resin as aggregate, modified anhydride as curing agent and rosin saturated solution (RSS) as brittleness adjustment. The influence of the mass ratio of epoxy resin to anhydride and the content of RSS on the physical and mechanical parameters of transparent brittle rock-like material were investigated using the comprehensive experimental design method. The results showed that the prepared transparent rock-like material possesses good brittleness at room temperature. Furthermore, RSS content has a significant impact on density, compressive strength, modulus of elasticity, peak strain, tensile strength, cohesion and internal friction angle of the rock-like material, while the mass ratio of epoxy resin to anhydride has remarkable impact on its density. With the increase of RSS content, the density, compressive strength, elastic modulus, peak strain, cohesion and internal friction angle of the rock-like material reduce, while the tensile strength shows a trend of decreasing first and then increasing. In addition, with the increase of the mass ratio of epoxy resin to anhydride, the density of rock-like material first increases and then decreases. Finally, an

收稿日期: 2022-12-09

录用日期: 2023-03-31

基金项目: 国家自然科学基金 (No.52304191); 武汉市重点研发计划 (No.2023020402010624)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52304191) and the Key R&D Projects of Wuhan (2023020402010624).

第一作者简介: 胡南燕, 女, 1991 年生, 博士, 副教授, 主要从事透明岩石相似材料方向的研究。E-mail: hunanyan@wust.edu.cn

通讯作者: 罗斌玉, 男, 1990 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩石力学方向的研究。E-mail: binyul@126.com

empirical formula between the mechanical properties of transparent brittle rock-like material and the mass ratio of epoxy resin to anhydride and RSS content is established using multiple linear regression analysis, which provides reference for preparing transparent brittle rock-like material.

Keywords: transparent brittle rock; similar materials; proportioning test; mechanical properties; epoxy resin

1 引言

物理相似模型试验是常用的研究方法, 同样也是岩土体学家们解决相关复杂工程问题的重要手段。目前, 为了克服传统岩体相似材料的不透明性和不可视性, 相关学者发明出树脂制备的透明岩体相似材料来代替传统岩体相似材料。然而大部分树脂由于其常温状态下天然的延性和塑性, 与原岩力学性质仍有一定差距, 因此, 探索发明出一种常温下仍具备良好脆性的透明岩石相似材料是有必要的。

喻军^[1]、林志斌^[2-3]、李元海^[4]等采用硅胶粉和矿物溶液研制出了一种新的透明岩体, 并应用于深部岩体破裂机制和巷道围岩变形规律的研究中。然而该透明岩体的透明度在液态石蜡凝固后透明度并不高, 且具有较强塑性, 更适合模拟泥岩等软岩。除了以硅粉作为透明岩体的骨料外, 还有以环氧树脂为骨料来制作透明脆性岩石相似材料。郭彦双^[5]采用了新型的不饱和树脂及相应的固化剂及促进剂, 研制了一种脆性和透明性都良好的透明岩体来研究不同脆性材料中三维裂纹萌生、扩展及其贯通的演化过程。Fu^[6]、朱珍德^[7]、Tang^[8]等在前者的基础上, 通过改变固化剂和促进剂的比例, 同时控制了固化温度等养护条件, 得到了脆性更好的树脂材料, 在研究次生裂纹在透明岩体中的扩展中发现, 随着预置裂纹的扩展, 试件峰值强度和弹性模量逐渐减小。叶伟^[9]采用环氧树脂和固化剂及适量松香饱和溶液 (rosin saturated solution, RSS) 来制作透明脆性材料, 其透明岩体试样在低温下应力-应变曲线和天然岩体试样的相比具有高度的相似性。Ge 等^[10]使用环氧树脂 618 和无色透明改性固化剂制备透明岩体, 并用来模拟初始应力状态下爆破后其裂纹扩展状况。朱语聪^[11]在环氧树脂中加入不同含量的普通玻璃砂、天然水晶砂和熔融石英砂来模拟不同岩性的原岩, 但添加骨料后的试样显然透明度不高。此外, 由于透明、可塑的优势, 有学者以 3D 打印技术来研究岩体内部可视化的问题, Zhou 等^[12]以立体光刻 (SLA) 树脂作为 3D 打印材料来模拟硬岩; Ju 等^[13]采用不透明的光敏材料 Vero 和透明的疏松材料 Fullcure705 制备的硬岩与煤的物理力

学性质相似; 还有王海军等^[14]提出的 3D-ILC 技术, 该技术与 3D 打印技术区别在于使用了和岩石拉压比相近的玻璃作为试样, 且应用于含内裂纹的孔口^[15]、巴西圆盘^[16]以及三点弯^[17]内裂纹断裂扩展特性研究。目前以环氧树脂作为骨料制备的透明岩体仍存在两个问题: 一是脆性度不高, 经过学者改进配方后在低温下也只有 1/7, 与真实岩石仍有一定差距; 二是试样在加载中须保持低温 ($-40\sim-60\text{ }^{\circ}\text{C}$) 状态加载, 极大地提高了试验的难度。

鉴于树脂材料在常温状态下塑性较大的问题, 大部分树脂浇注法制备透明岩石的研究都需要在低温条件下才具有一定脆性, 且缺乏系统研究制备透明岩石材料的原料对其力学性质的影响以及各配比下透明岩石的具体力学参数。本文应用全面试验设计法, 以环氧树脂与酸酐质量比及 RSS 含量为控制因素, 制备常温下具有良好脆性的脆性透明岩石相似材料, 探索控制因素对脆性透明岩石相似材料的物理力学参数的影响, 并将试验数据拟合成经验公式, 同时将脆性透明岩石力学参数与真实原岩的相似模型进行对比, 为模型试验透明岩石相似材料配比提供了借鉴参考。

2 脆性透明岩石相似材料的制备

2.1 相似材料选择

制备透明土及透明岩体的骨料主要有熔融石英砂、硅粉、硅胶、有机玻璃 (polymethyl methacrylate, PMMA) 和树脂, 相比于前 4 种而言, PMMA 和树脂更适合具有一定强度的原岩。其中树脂材料因其具有一定塑性而在透明岩石相似材料中使用更为广泛。纯树脂用处不大, 需加入固化剂的物质才能具有优秀的力学性质, 不同固化剂与树脂固化后具有不同的力学性质, 经过前期多次试验后, 选择固化后仍能保持高透明, 且脆性较大的改性酸酐作为固化剂, 同时加入 RSS 来调节模型的脆性。

2.2 相似材料配比确定

研究采用全面试验设计法, 在设计中以环氧树脂与酸酐质量比和 RSS 占混合溶液的百分比作为试验设计的 2 个影响因素, 分别为因素 A、因素 B, 因素 A 设计 5 个水平, 因素 B 设计 4 个水平 (如表 1 所示), 共设计 20 组配比试验。在前期探索固化规

律时发现,树脂和酸酐在混合溶液中比例不宜差距过大,比如树脂比例过多时,在固定的养护时间内容易固化不完全,酸酐比例过多时会导致试件固化太快,从而气泡未排出,影响试件的透明度。同时 RSS 溶液由无水乙醇和松香调配而成,过多的 RSS 含量会导致试样难以固结,且试样颜色会变深,导致透明性降低。在前期探索过程中发现, RSS 含量在 9% 以内时试样固结程度良好且仍然具有良好的透明度。

表 1 脆性透明岩石相似材料试验设计水平

Table 1 Design level of transparent brittle rock-like material

水平	因素 A	因素 B/%
1	80:120	0
2	90:110	3
3	100:100	6
4	110:90	9
5	120:80	—

试验中,分别采用尺寸直径 $d \times$ 高 h 为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱形硅胶模具浇筑单轴压缩试样和采用 $d \times h$ 为 $\phi 50 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的圆柱形硅胶模具浇筑巴西劈裂试样。为了防止树脂固化后难脱模,在模具内侧粘上防粘膜再喷涂脱模剂。将环氧树脂放入 60°C 烘箱中预热后,根据设计方案称取混合料。搅拌结束后将树脂混合料用玻璃棒引流,匀速倒入模具中。将模具放入 40°C 的烘箱中固化 $7 \times 24 \text{ h}$,待树脂固化后拆去模具并将成型的试件进行单轴压缩试验和巴西劈裂试验。如图 1 所示为各配比下制备的脆性透明岩石相似材料单轴压缩试样。图 2 所示为各配比下制备的脆性透明岩石相似材料单轴压缩试件的透明性参考。透过试样可以清晰看出其底部对应的配合比参数,随着 RSS 含量的增加,试件的透明度降低,在 RSS 含量最高 (9%) 的配比中,

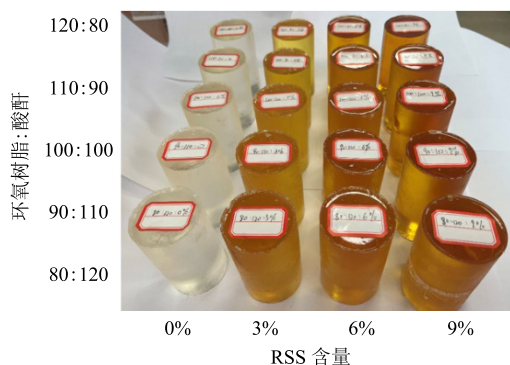


图 1 各配比下制备的脆性透明岩石相似材料单轴压缩试样
Fig.1 Uniaxial compression specimens of transparent brittle rock-like material prepared under different ratios

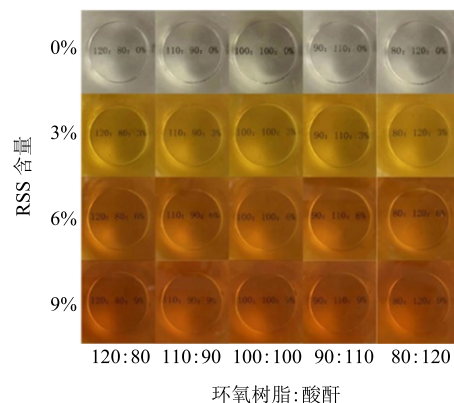


图 2 各配比下制备的脆性透明岩石相似材料单轴压缩试样透明性参考

Fig.2 Reference to transparency of transparent brittle rock-like material prepared under different ratios

试件呈现焦糖色,透明度最低,但仍然可以清晰地看到底部的字体,说明制备的试件都具备良好的透明性。

3 物理力学特性测试结果分析

在常温 (25°C) 下采用单轴压缩试验和巴西劈裂试验,在全数字电液伺服控制刚性压力机上进行加载,其中单轴压缩试验中控制位移加载速率为 0.5 mm/min ,巴西劈裂试验中控制位移加载速率为 0.2 mm/min 。试样压缩过程中的属性参数都以数字和图表的形式呈现。

单轴压缩试验主要是获得脆性透明岩石相似材料的单轴抗压强度和弹性模量。图 3 为 20 组不同配比的脆性透明岩石相似材料的应力-应变曲线,可以看出大部分配比达到峰值应变后应力迅速降低,说明制备的透明岩石相似材料具有良好的脆性,且大部分配比总应变小于 3%,满足工程中脆性岩石总应变不大于 5% 的要求。图 4 为单轴压缩下试件的破坏形态,不同配比下脆性透明岩石相似材料在经过峰值强度后都呈现为脆性的劈裂破坏。同时脆性岩石透明相似材料试样单轴抗压强度等物理力学参数在不同配比下会发生较大改变,可以通过改变不同配比来改变试样不同的物理力学参数,满足不同工程背景下不同的应力相似比。

根据脆性透明岩石相似材料的单轴压缩试验、劈裂试验和物理参数测试,得到了试样在不同配比下每组样品的密度、单轴抗压强度等物理力学参数。其中单轴试验和劈裂试验各做了 3 组,表 2 所示的物理力学参数数据为 3 组试验的平均值,并没有出现异常试件。

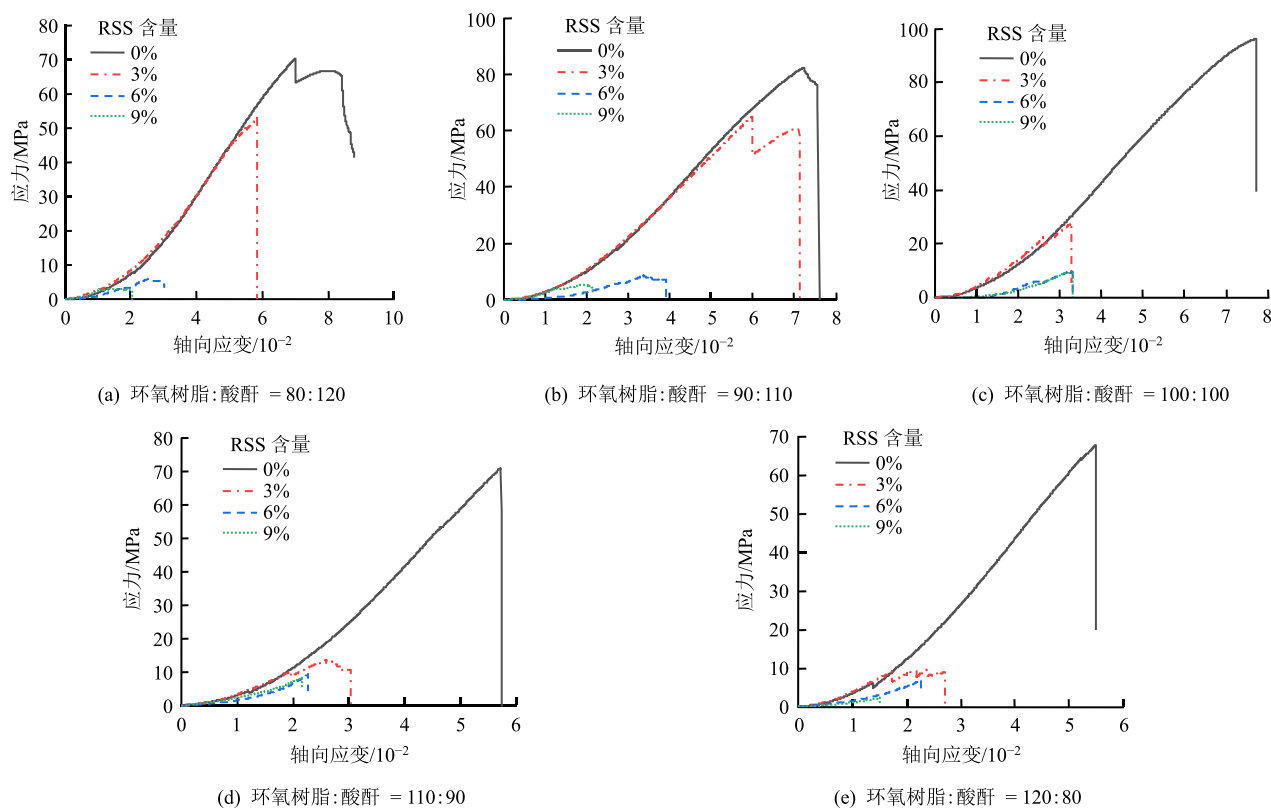


图3 不同原料配比下脆性透明岩石相似材料应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of transparent brittle rock-like material with different proportions of raw materials



图4 脆性透明岩石相似材料破坏形态

Fig.4 Failure pattern of the transparent brittle rock-like material

4 各因素敏感性分析

4.1 密度影响因素敏感性分析

由表1做出两因素对试样密度影响的分析图和方差分析表,如图5和表3所示。

由表1得出RSS含量对密度影响的极差为 19.38 kg/m^3 ,大于环氧树脂与酸酐质量比对密度影响的极差(11.77 kg/m^3),说明控制脆性透明岩石相似材料密度的主要因素是RSS含量,其次是环氧树脂与酸酐质量比。查表得到 F 的检验值为 $F_{0.01}(4, 12) = 5.41$, $F_{0.01}(3, 12) = 6.95$ 。由表2可得:A

因素的 F 值 $19.256 > F_{0.01}(4, 12)$,概率值 $P < 0.01$; B因素的 F 值 $65.652 > F_{0.01}(3, 12)$, $P < 0.01$,说明环氧树脂与酸酐质量比和RSS含量对脆性透明岩石相似材料的密度有着高度显著的影响。

从两因素对脆性透明岩石相似材料试样密度的影响规律可以看出,密度随着环氧树脂与酸酐质量比的增加呈先增加后降低,随着RSS含量的增加呈不断降低的趋势。

4.2 抗压强度影响因素敏感性分析

由表1做出两因素对试样抗压强度影响的分析图和方差分析表,如图6和表4所示。

由表1得出RSS含量对抗压强度影响的极差为 86.89 MPa ,大于环氧树脂与酸酐质量比对抗压强度影响的极差(55.48 MPa),说明控制脆性透明岩石相似材料抗压强度的主要因素是RSS含量,其次是环氧树脂与酸酐质量比。由表4可得:A因素的 F 值 $1.332 < F_{0.01}(4, 12)$, $P > 0.01$; B因素的 F 值 $32.382 > F_{0.01}(3, 12)$, $P < 0.01$,说明RSS含量对脆性透明岩石相似材料的抗压强度有着显著的影响,而环氧树脂与酸酐质量比对脆性透明岩石相似材料抗压强度的影响不显著。

从两因素对脆性透明岩石相似材料试样抗压强度的影响规律可以看出,抗压强度随着环氧树脂

表 2 不同配比下试样的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of samples with different ratios							
配比方案	密度/(kg·m ⁻³)	单轴抗压强度/MPa	峰值应变/10 ⁻²	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
80:120 (0)	1 163.05	70.36	7.00	1.378	3.58	7.94	64.58
80:120 (3)	1 161.07	52.96	5.83	1.227	2.49	5.74	65.53
80:120 (6)	1 154.02	6.04	2.53	0.312	1.07	1.27	44.35
80:120 (9)	1 150.61	3.26	1.62	0.370	1.05	0.92	30.85
90:110 (0)	1 173.94	82.26	7.24	1.514	3.52	8.51	66.63
90:110 (3)	1 165.67	65.04	5.98	1.355	0.61	3.15	78.94
90:110 (6)	1 155.50	8.67	3.38	0.364	0.76	1.28	57.01
90:110 (9)	1 154.56	5.26	1.98	0.332	1.29	1.30	37.31
100:100 (0)	1 173.36	96.21	7.72	1.640	2.79	8.19	70.67
100:100 (3)	1 168.26	27.78	3.27	1.142	0.47	1.81	75.18
100:100 (6)	1 162.93	9.49	3.17	0.483	0.90	1.46	55.77
100:100 (9)	1 158.49	9.32	3.29	0.490	1.78	2.04	42.79
110:90 (0)	1 174.82	71.14	5.71	1.617	3.22	7.57	65.98
110:90 (3)	1 171.74	13.66	2.60	0.400	0.46	1.25	69.20
110:90 (6)	1 162.37	9.35	2.26	0.567	1.50	1.87	46.34
110:90 (9)	1 162.12	8.48	2.15	0.428	2.52	2.31	32.81
120:80 (0)	1 166.95	67.84	5.49	1.620	2.24	6.16	69.40
120:80 (3)	1 166.65	9.56	2.38	0.660	0.63	1.23	61.21
120:80 (6)	1 157.67	6.96	2.27	0.380	1.55	1.64	39.47
120:80 (9)	1 154.84	2.23	1.50	0.180	1.82	1.01	5.81

注：括号中 0、3、6、9 分别对应 RSS 含量 0%、3%、6%、9%。

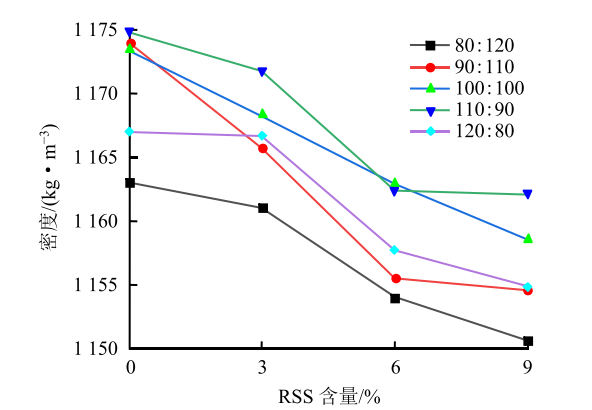


图 5 两因素对密度的影响规律
Fig.5 Influences of two factors on density

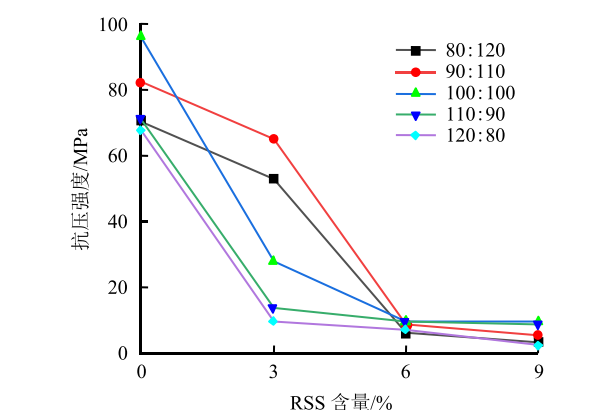


图 6 两因素对抗压强度的影响规律
Fig.6 Influences of two factors on compressive strength

表 3 脆性透明岩石相似材料密度方差分析表
Table 3 Variance analysis of density of transparent brittle rock-like material

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
A 因素	266.272	4	66.568	19.256	0.000
B 因素	680.859	3	226.953	65.652	0.000
误差	41.483	12	3.457		

表 4 脆性透明岩石相似材料抗压强度方差分析表
Table 4 Variance analysis of compressive strength of transparent brittle rock-like material

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
A 因素	915.778	4	228.944	1.332	0.314
B 因素	16 697.089	3	5 565.696	32.382	0.000
误差	2 062.533	12	171.878		

与酸酐质量比的增加呈先增加后降低，随着 RSS 含量的增加呈不断降低的趋势。

4.3 峰值应变影响因素敏感性分析

由表 1 做出两因素对试样峰值应变影响的分析图和方差分析表，如图 7 和表 5 所示。

由表 1 得出 RSS 含量对峰值应变影响的极差为 5.38×10^{-2} ，大于环氧树脂与酸酐质量比对峰值应变影响的极差 (3.6×10^{-2})，说明控制相似脆性透明岩石相似材料峰值应变的主要因素是 RSS 含量，其次是环氧树脂与酸酐质量比。由表 5 可得：A 因素的

F 值 $2.912 < F_{0.01}(4, 12)$, $P > 0.01$; B 因素的 F 值 $32.382 > F_{0.01}(3, 12)$, $P < 0.01$, 说明 RSS 含量对脆性透明岩石相似材料的峰值应变有着显著的影响, 而环氧树脂与酸酐质量比对脆性透明岩石相似材料峰值应变的影响不显著。

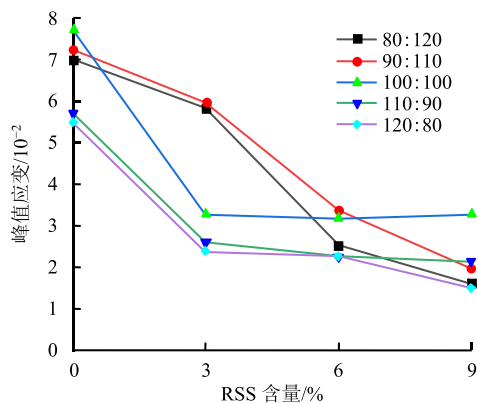


图 7 两因素对峰值应变的影响规律

Fig.7 Influences of two factors on peak strain

表 5 脆性透明岩石相似材料峰值应变方差分析表
Table 5 Variance analysis of Peak strain of transparent brittle rock-like material

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
A 因素	9.526	4	2.381	2.912	0.068
B 因素	60.357	3	20.119	24.599	0.000
误差	9.814	12	0.818		

从两因素对脆性透明岩石相似材料试样峰值应变的影响规律可以看出, 峰值应变随着环氧树脂与酸酐质量比的增加呈先增加后降低, 随着 RSS 含量的增加呈不断降低的趋势。

4.4 弹性模量影响因素敏感性分析

由表 1 作出两因素对试样弹性模量影响的分析图和方差分析表, 如图 8 和表 6 所示。

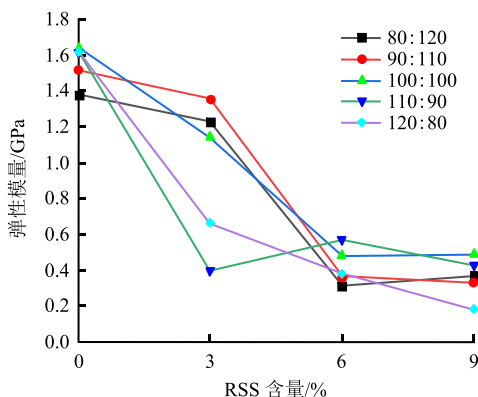


图 8 两因素对弹性模量的影响规律

Fig.8 Influences of two factors on elastic modulus

表 6 脆性透明岩石相似材料弹性模量方差分析表
Table 6 Variance analysis of elastic modulus of transparent brittle rock-like material

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
A 因素	0.143	4	0.036	0.644	0.642
B 因素	4.639	3	1.546	27.855	0.000
误差	0.666	12	0.056		

由表 1 得出 RSS 含量对弹性模量影响的极差为 1.22 GPa, 大于环氧树脂与酸酐质量比对弹性模量影响的极差 (0.96 GPa), 说明控制脆性透明岩石相似材料弹性模量的主要因素是 RSS 含量, 其次是环氧树脂与酸酐质量比。由表 6 可得: A 因素的 F 值 $0.644 < F_{0.01}(4, 12)$, $P > 0.01$; B 因素的 F 值 $27.855 > F_{0.01}(3, 12)$, $P < 0.01$, 说明 RSS 含量对脆性透明岩石相似材料的弹性模量有着显著的影响, 而环氧树脂与酸酐质量比对脆性透明岩石相似材料弹性模量的影响不显著。

从两因素对脆性透明岩石相似材料试样弹性模量的影响规律可以看出, 弹性模量随着环氧树脂与酸酐质量比的增加呈先增加后降低, 随着 RSS 含量的增加呈不断降低的趋势。

4.5 抗拉强度影响因素敏感性分析

由表 1 做出两因素对试样抗拉强度影响的分析图和方差分析表, 如图 9 和表 7 所示。

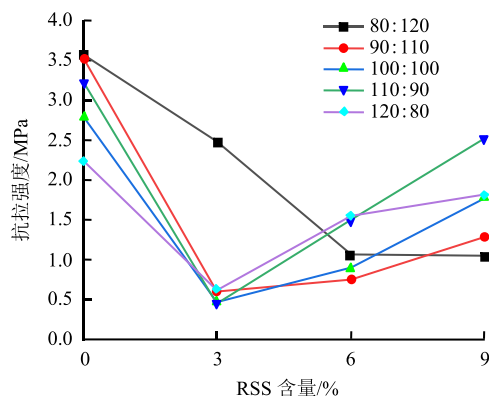


图 9 两因素对抗拉强度的影响规律

Fig.9 Influences of two factors on tensile strength

表 7 脆性透明岩石相似材料抗拉强度方差分析表
Table 7 Variance analysis of tensile strength of transparent brittle rock-like material

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
A 因素	1.042	4	0.260	0.618	0.658
B 因素	13.810	3	4.603	10.926	0.001
误差	5.056	12	0.421		

由表 1 得出 RSS 含量对抗拉强度影响的极差为 2.91 MPa, 大于环氧树脂与酸酐质量比对弹性模量

影响的极差 (2.03 MPa), 说明控制脆性透明岩石相似材料抗拉强度的主要因素是 RSS 含量, 其次是环氧树脂与酸酐质量比。由表 7 可得: A 因素的 F 值 $0.618 < F_{0.01}(4, 12)$, $P > 0.01$; B 因素的 F 值 $10.926 > F_{0.01}(3, 12)$, $P < 0.01$, 说明 RSS 含量对脆性透明岩石相似材料的抗拉强度有着显著的影响, 而环氧树脂与酸酐质量比对脆性透明岩石相似材料的抗拉强度的影响不显著。

从两因素对脆性透明岩石相似材料试样抗拉强度的影响规律可以看出, 抗拉强度随着环氧树脂与酸酐质量比的增加呈先降低后增加, 随着 RSS 含量的增加同样呈先降低后增加的趋势。

4.6 黏聚力影响因素敏感性分析

由表 1 做出两因素对试样黏聚力影响的分析图和方差分析表, 如图 10 和表 8 所示。

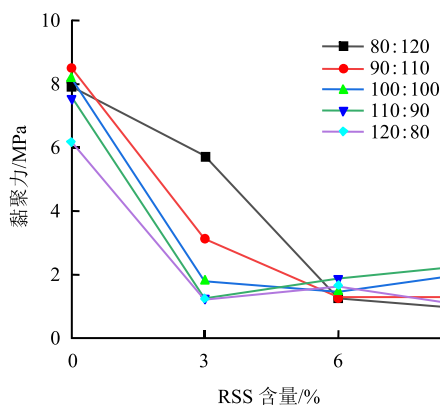


图 10 两因素对黏聚力的影响规律

Fig.10 Influences of two factors on cohesion

表 8 脆性透明岩石相似材料黏聚力方差分析表
Table 8 Variance analysis of cohesion of transparent brittle rock-like material

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
A 因素	4.560	4	1.140	0.907	0.49
B 因素	129.884	3	42.295	34.452	0.00
误差	15.080	12	1.257		

由表 1 得出 RSS 含量对黏聚力影响的极差为 7.23 MPa, 大于环氧树脂与酸酐质量比对黏聚力影响的极差 (5.08 MPa), 说明控制脆性透明岩石相似材料黏聚力的主要因素是 RSS 含量, 其次是环氧树脂与酸酐质量比。由表 8 可得: A 因素的 F 值 $0.907 < F_{0.01}(4, 12)$, $P > 0.01$; B 因素的 F 值 $34.452 > F_{0.01}(3, 12)$, $P < 0.01$, 说明 RSS 含量对脆性透明岩石相似材料的黏聚力有着高度显著的影响, 而环氧树脂与酸酐质量比对脆性透明岩石相似

材料黏聚力的影响不显著。

从两因素对脆性透明岩石相似材料试样黏聚力的影响规律可以看出, 黏聚力随着环氧树脂与酸酐质量比的增加呈先降低后增加, 随着 RSS 含量的增加呈不断降低的趋势。

4.7 内摩擦角影响因素敏感性分析

由表 1 做出两因素对试样内摩擦角影响的分析图和方差分析表, 如图 11 和表 9 所示。

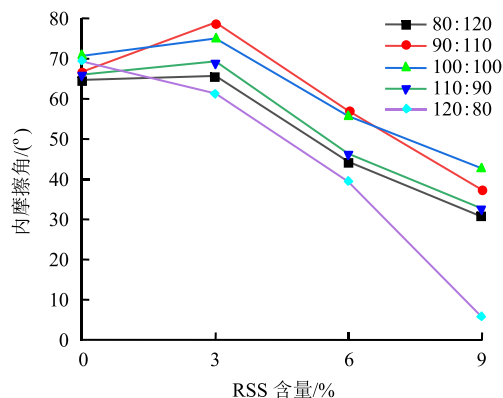


图 11 两因素对内摩擦角的影响规律

Fig.11 Influences of two factors on internal friction angle

表 9 脆性透明岩石相似材料内摩擦角方差分析表
Table 9 Variance analysis of internal friction angle of transparent brittle rock-like material

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
A 因素	775.933	4	193.983	4.718	0.016
B 因素	5 233.826	3	1 744.609	42.433	0.000
误差	493.370	12	41.114		

由表 1 得出 RSS 含量对内摩擦角影响的极差为 61° , 大于环氧树脂与酸酐质量比对内摩擦角影响的极差 (36.98°), 说明控制相似脆性透明岩石相似材料内摩擦角的主要因素是 RSS 含量, 其次是环氧树脂与酸酐质量比。由表 9 可得: A 因素的 F 值 $4.718 < F_{0.01}(4, 12)$, $P > 0.01$; B 因素的 F 值 $42.433 > F_{0.01}(3, 12)$, $P < 0.01$, 说明 RSS 含量对脆性透明岩石相似材料的内摩擦角有着显著的影响, 而环氧树脂与酸酐质量比对脆性透明岩石相似材料内摩擦角的影响不显著。

从两因素对脆性透明岩石相似材料试样内摩擦角的影响规律可以看出, 内摩擦角随着环氧树脂与酸酐质量比的增加呈先降低后增加, 随着 RSS 含量的增加呈不断降低的趋势。

5 多元线性回归与应用

根据脆性透明岩石相似材料各因素敏感性分

析和环氧树脂与酸酐质量比与 RSS 含量对其物理力学参数影响规律可以看出, 两因素与脆性透明岩石相似材料物理力学性质具有明显的线性关系。设环氧树脂与酸酐质量比为 X_1 , RSS 含量为 X_2 ; 密度指标为 Y_1 , 抗压强度指标为 Y_2 , 峰值应变指标为 Y_3 , 弹性模量指标为 Y_4 , 抗拉强度指标为 Y_5 , 黏聚力指标为 Y_6 , 内摩擦角指标为 Y_7 。利用 SPSS 进行多元线性回归分析, 得到回归方程如下式所示, 其中 R^2 为判定系数。

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= 5.471X_1 - 1.703X_2 + 1164.895, R^2 = 0.712 \\ Y_2 &= -19.062X_1 - 8.042X_2 + 87.437, R^2 = 0.772 \\ Y_3 &= -2.067X_1 - 0.495X_2 + 8.25, R^2 = 0.786 \\ Y_4 &= -0.193X_1 - 0.137X_2 + 1.642, R^2 = 0.79 \\ Y_5 &= 0.244X_1 - 0.139X_2 + 2.278, R^2 = 0.209 \\ Y_6 &= -1.354X_1 - 0.678X_2 + 7.979, R^2 = 0.705 \\ Y_7 &= -18.428X_1 - 4.369X_2 + 90.445, R^2 = 0.731 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

试验结果与回归结果对比曲线如图 12 所示,

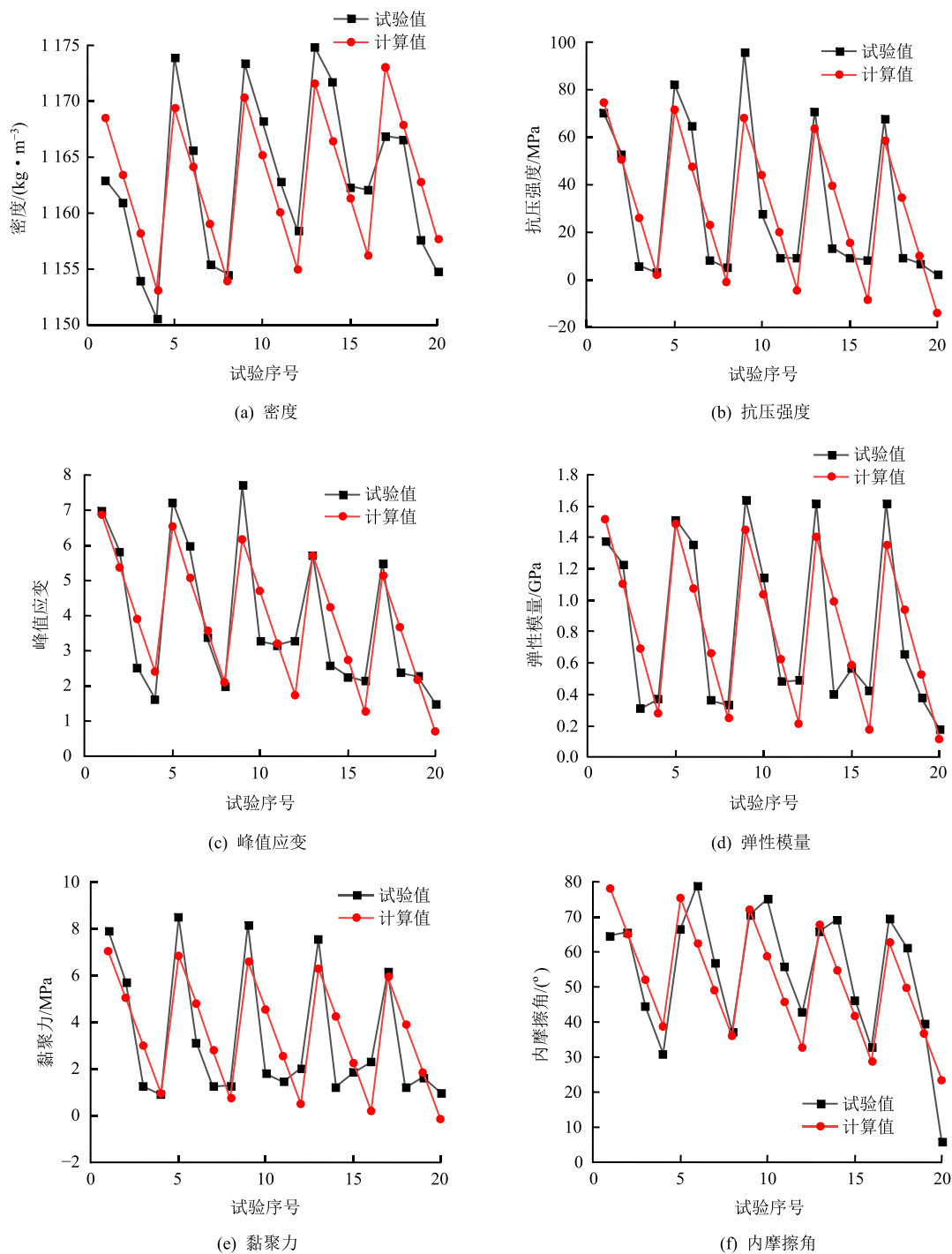


图 12 各参数试验结果与计算结果对比

Fig.12 Comparison of test results and calculated results of various parameters

由试验结果与回归结果对比曲线以及判定系数 R^2 可以看出回归方程的误差在合理范围之内。除了抗拉强度具有更为复杂的线性关系外，多元线性回归拟合得到的公式能较好地描述各物理力学参数的变化趋势的。

根据相似理论，实际工程原型和试验模型之间的几何尺寸和物理力学参数等需要满足一定相似关系，为了使用回归方程配置出与原岩力学性质相近的相似模型，需先计算出原岩的相似模型目标参数，经由量纲分析法可得

$$\left. \begin{aligned} C_{\sigma} &= C_y C_l = C_E C_{\varepsilon} \\ C_{\varepsilon} &= C_{\varphi} = C_{k_d} \\ C_{\sigma} &= C_E = C_c = C_{\sigma_c} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： C_{σ} 为应力相似常数； C_y 为重度相似常数； C_l 为几何相似常数； C_E 为弹性模量相似常数； C_{ε} 为应变相似常数； C_{φ} 为内摩擦角相似常数； C_{k_d} 为软化系数相似常数； C_c 为黏聚力相似常数； C_{σ_c} 为抗压强度相似常数。地质力学模型试验采用的相似材料很难满足所有的物理力学参数满足所有的相似比的要求。因此，本文根据近几年的模型试验研究成果选取以下的物理力学参数来满足相应的相似比： C_y 、 C_l 、 C_{σ_c} 、 C_E 、 C_c 、 C_{φ} ，并参考宁奕冰等^[18]在底摩擦物理模型试验应用中板岩的物理力学参数。选取本次试验目标几何尺寸相似比 $C_l = 17$ 、重度相似比 $C_y = 2.4$ ，由式(2)得 $C_{\sigma} = C_E = C_c = C_{\sigma_c} = 41$ ， $C_{\varphi} = 1$ 。将板岩相似模型的设计值代入回归方程中，取 X_1 为 0.66， X_2 为 9，最终确定脆性透明岩石相似材料的最优配合比为：环氧树脂与酸酐质量比为 80:120，RSS 含量为 9%。将原岩和相似模型目标参数与脆性透明岩石相似材料的力学性质进行对比分析，如表 10 所示。

表 10 原岩和相似模型目标参数与脆性透明岩石相似材料的力学性质对比

Table 10 Comparison of mechanical properties between original rock and similar model target parameters and transparent brittle rock-like material

类型	抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)
板岩	106.28	15.767	43.26	34.13
相似模型目标参数	2.59	0.380	1.06	34.13
透明岩石	3.26	0.370	0.92	30.85

表 10 显示，脆性透明岩石相似材料试样的单轴抗压强度、弹性模量、黏聚力和内摩擦角与板岩相似模型目标参数较为接近，说明本文研制的脆性

透明岩石相似材料与原岩具有相似的岩石特性，可以用来模拟实际工程中的部分岩体。

6 结 论

(1) 采用环氧树脂作为骨料，改性酸酐作为固化剂，外加 RSS 来调节脆性，提出了脆性岩石透明相似材料试样的制备方法，使其在常温状态下具有优良脆性。

(2) 采用极差分析法和方差分析法分析了两因素对脆性透明岩石相似材料物理力学参数的敏感性影响，RSS 含量对材料密度、抗压强度、弹性模量、峰值应变、抗拉强度、黏聚力和内摩擦角起显著影响，材料密度、抗压强度、弹性模量、峰值应变、黏聚力和内摩擦角随着 RSS 含量的增加不断降低，抗拉强度随着 RSS 含量的增加呈现先降低后增加的趋势。环氧树脂与酸酐质量比对材料密度起显著影响，材料密度随着环氧树脂与酸酐质量比的增加呈现先增加后降低的趋势。

(3) 对试验数据进行多元回归分析，得到透明岩石相似材料密度、峰值应变、弹性模量、抗拉强度和内摩擦角与环氧树脂与酸酐质量比和 RSS 含量间的经验公式，通过判定系数 R^2 以及试验值与计算值的对比图，判断经验公式的误差在合理范围内。同时将板岩相似模型目标参数代入回归方程中得出配比方案，配比方案试验值和相似模型目标参数接近，验证了回归方程的有效性，为模型试验透明岩石相似材料配比提供了借鉴参考。

参 考 文 献

- [1] 喻军, 林志斌, 李元海. 基于透明岩体的深部隧道围岩变形分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(4): 943-949.
YU Jun, LIN Zhi-bin, LI Yuan-hai. Analysis on deformation of surrounding rock of deep tunnel based on transparent rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(4): 943-949.
- [2] 林志斌, 朱昌星, 李元海. 埋深对软岩圆形巷道变形破裂规律的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(5): 1242-1249.
LIN Zhi-bin, ZHU Chang-xing, LI Yuan-hai. Influence analysis of buried depth on deformation and cracking laws of soft rock circular roadway[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(5): 1242-1249.
- [3] 林志斌, 张勃阳, 李元海, 等. 透明岩体三维数字照相量测技术开发与应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2018,

- 35(5): 1077-1084.
- LIN Zhi-bin, ZHANG Bo-yang, LI Yuan-hai, et al. Development of three-dimensional digital photogrammetry technology and its application in transparent rock[J]. **Journal of Mining and Safety Engineering**, 2018, 35(5): 1077-1084.
- [4] 李元海, 林志斌, 喻军, 等. 深埋圆型巷道围岩变形规律的透明岩体试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(6): 1104-1110.
- LI Yuan-hai, LIN Zhi-bin, YU Jun, et al. Experimental study of deformation laws of surrounding rock in deep circular roadway using transparent rock[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2016, 45(6): 1104-1110.
- [5] 郭彦双. 脆性材料中三维裂隙断裂试验、理论与数值模拟研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- GUO Yan-shuang. The study on experiment, theory and numerical simulation of fracture of three-dimensional flaws in brittle materials[D]. Jinan: Shandong University, 2007.
- [6] FU J W, CHEN K, ZHU W S, et al. Progressive failure of new modelling material with a single internal crack under biaxial compression and the 3-D numerical simulation[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2016, 165: 140-152.
- [7] 朱珍德, 林恒星, 孙亚霖. 透明类岩石内置三维裂纹扩展变形试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 913-921, 928.
- ZHU Zhen-de, LIN Heng-xing, SUN Ya-lin. An experimental study of internal 3D crack propagation and coalescence in transparent rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(4): 913-921, 928.
- [8] TANG H D, ZHU Z D, ZHU M L, et al. Mechanical behavior of 3D crack growth in transparent rock-like material containing preexisting flaws under compression[J]. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2015: 193721.
- [9] 叶伟. 透明脆性岩石相似材料内置三维裂纹扩展试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- YE Wei. Experimental study of internal 3D crack propagation in brittle and transparent rock-like material[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [10] GE J J, XU Y, PIRRI CANDIDO FABRIZIO. A method for making transparent hard rock-like material and its application[J]. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2019(2): 1-14.
- [11] 朱语聪. 透明硬岩相似材料物理力学特性试验及应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- ZHU Yu-cong. Research on the physical and mechanical properties of transparent hard rock-like materials and application[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.
- [12] ZHOU T, ZHU J B. Identification of a suitable 3D printing material for mimicking brittle and hard rocks and its brittleness enhancements[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2018, 51(3): 765-777.
- [13] JU Y, XIE H, ZHENG Z, et al. Visualization of the complex structure and stress field inside rock by means of 3D printing technology[J]. **Chinese Science Bulletin**, 2014, 59(36): 5354-5365.
- [14] 王海军, 张九丹, 任然, 等. 基于激光-介质损伤的三维内裂纹 3D-ILC 实现[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(12): 2345-2352.
- WANG Hai-jun, ZHANG Jiu-dan, REN Ran, et al. Embedded cracks in brittle solids induced by laser-medium interaction (3D-ILC)[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(12): 2345-2352.
- [15] 王海军, 郁舒阳, 任然, 等. 基于 3D-ILC 含内裂纹孔口脆性固体断裂特性试验[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2200-2212.
- WANG Hai-jun, YU Shu-yang, REN Ran, et al. Study on failure of brittle solids with circular hole and internal crack based on 3D-ILC[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(6): 2200-2212.
- [16] 王海军, 张九丹, 任然, 等. 基于 3D-ILC 含不同角度内裂纹圆盘断裂特性研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(9): 1636-1644.
- WANG Hai-jun, ZHANG Jiu-dan, REN Ran, et al. Fracture characteristics of Brazilian disc with fully internal cracks based on 3D-ILC[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(9): 1636-1644.
- [17] 王海军, 李汉章, 任然, 等. 基于 3D-ILC 三点弯脆性固体内裂纹扩展规律及破坏特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(12): 2463-2477.
- WANG Hai-jun, LI Han-zhang, REN Ran, et al. Three-point bending test study on the propagation law of internal cracks and failure characteristics of brittle solids based on 3D-ILC technology[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(12): 2463-2477.
- [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 Yi-bing, TANG Hui-ming, ZHANG Bo-cheng, 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.