

基于正交试验的醋酸乙烯酯 - 乙烯共聚胶粉改性岩爆相似材料脆性调控机制与配比优化研究

蔡婧怡^{1,2,3}, 赵梦恬¹, 张俊颐¹, 王璐瑶¹, 颜 硕⁴, 苏 毅¹, 熊文涛¹, 邓一诺¹, 宋武奇¹,
王庆平^{1,2,3*}

¹安徽理工大学材料科学与工程学院, 安徽 淮南

²安徽理工大学安徽省煤基固废新材料产业共性技术研究中心, 安徽 淮南

³安徽理工大学深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南

⁴中国电子科技集团公司第八研究所, 安徽 合肥

收稿日期: 2025年4月15日; 录用日期: 2025年5月20日; 发布日期: 2025年5月30日

摘 要

本研究基于正交试验设计原理, 采用浇筑成型工艺系统探讨了胶砂比(1:2~1:5)、水胶比(0.3~0.6)、醋酸乙烯酯 - 乙烯共聚胶粉掺量(0~15%)及石膏比(1:1~1:4)等多参数协同作用对相似材料力学特性的影响规律。通过多指标响应分析, 成功研制出具有优化性能的低强度高脆性岩爆模型相似材料(抗压强度15.86 MPa、脆性指数Ba 0.22、冲击能量指数AcF 11.90)。研究表明, 醋酸乙烯酯 - 乙烯共聚胶粉通过构建三维聚合物网络结构并调控孔隙分布特征, 能够在降低材料强度的同时显著提升其脆性及冲击倾向性, 这为构建符合深部岩体力学响应的物理模型提供了新型材料解决方案。

关键词

低强度高脆, 冲击倾向性, 相似材料, 脆性指标

Study on Brittleness Control Mechanism and Ratio Optimization of Rock Burst Similar Materials Modified by Vinyl Acetate-Vinyl Copolymer Rubber Powder Based on Orthogonal Test

Jingyi Cai^{1,2,3}, Mengtian Zhao¹, Junyi Zhang¹, Luyao Wang¹, Shuo Yan⁴, Yi Su¹,
Wentao Xiong¹, Yinuo Deng¹, Wuqi Song¹, Qingping Wang^{1,2,3*}

¹School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

*通讯作者。

文章引用: 蔡婧怡, 赵梦恬, 张俊颐, 王璐瑶, 颜硕, 苏毅, 熊文涛, 邓一诺, 宋武奇, 王庆平. 基于正交试验的醋酸乙烯酯-乙烯共聚胶粉改性岩爆相似材料脆性调控机制与配比优化研究[J]. 矿山工程, 2025, 13(3): 607-618.

DOI: 10.12677/me.2025.133068

²Anhui Generic Technology Research Center for New Materials from Coal-Based Solid Wastes, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

³State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

⁴China Electronics Technology Group Eighth Research Institute, Hefei Anhui

Received: Apr. 15th, 2025; accepted: May 20th, 2025; published: May 30th, 2025

Abstract

Based on the principle of orthogonal experimental design, the effects of multiple parameters on the mechanical properties of similar materials, such as cement-sand ratio (1:2~1:5), water-binder ratio (0.3~0.6), the content of vinyl acetate-vinyl copolymer glue powder (0~15%) and water-paste ratio (1:1~1:4), were studied by using the casting process system. Through multi-index response analysis, a low-strength and high-brittleness rock-burst model similar material with optimized performance (compressive strength 15.86 MPa, brittleness index B_d 0.22, impact energy index A_{CF} 11.90) was successfully developed. The results show that by constructing a three-dimensional polymer network structure and adjusting the pore distribution characteristics, vinyl acetate-vinyl copolymer rubber powder can significantly improve the brittleness and impact tendency of the material while reducing its strength, which provides a new material solution for the construction of a physical model that conforms to the mechanical response of deep rock mass.

Keywords

Low Strength and High Brittleness, Impact Tendency, Similar Material, Brittleness Index

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

岩爆作为深部地下工程典型动力灾害,其本质是围岩弹性应变能的瞬态释放过程[1]。该现象通常伴随煤岩体弹射、冲击气浪及高频振动波等特征效应,具有突发性强、能量释放率高等特点。现代采矿工程实践表明,高地应力、复杂地质构造与高强度开采扰动的三重耦合作用,导致我国深部矿井岩爆事故频发,严重影响了煤矿安全高效的采矿活动,造成多人死亡和重大财产损失[2]-[4],应通过综合手段进行重点防控,确保矿井生产安全[5]-[7]。

研究岩爆灾害的机理、监测、预警和预防技术是有效避免岩爆灾害的良好基础和前提。物理模型试验通过相似理论重构岩爆孕育环境,是揭示其灾变机理的核心研究手段。对于物理模型试验,模型材料的性质特征对试验结果有很大影响,配制出适合物理模型试验使用的材料是成功的基础。张强勇团队[8]在研发铁晶砂胶结岩土模拟材料过程中,系统归纳了优质相似材料应具备的关键特性:首先,该类材料需具备宽泛的力学参数调节范围,以满足不同岩体类型的模拟需求;其次,材料需兼具耐腐蚀性与良好的绝缘特性;再者,其原材料应具有成本低廉且易于获取的特点,可显著降低实验经费;第四,材料需确保无毒无害,符合实验安全标准;第五,制备工艺简便且固化周期短,有利于提高成型效率;最后,材料需保持物理力学特性稳定,具有抗环境干扰能力。在岩爆机理研究领域,物理模拟实验因其对多因素

耦合作用(包括岩石属性、应力状态及开采条件等)的可控性展现独特价值。值得关注的是,岩爆模型试验对相似材料的脆性破坏特征具有特殊要求,这决定了研发兼具低强度与高脆性特性的模拟材料成为物理模拟试验取得可靠研究成果的重要前提条件。然而,岩爆模拟具有一定的难度,许多学者[9]-[14]开展了大量的物理模型试验,研究物理模型在不同条件下的变形、破坏规律。杨淑清[15]利用砂、水泥、石膏和重晶石、松香酒精溶液作为相似材料;陈智强等[11]利用细硅砂、碳酸钙、石膏和水;陈陆望和白世伟[16]利用石英砂、石膏、水泥、水;潘一山等[17]尝试了松香膨润土、松香重晶石、石膏-砂-松香材料、松脂材料、环氧树脂材料来模拟岩爆。这些模拟岩爆的相似材料基本有骨料(砂、矿渣、重晶石等)、胶凝材料(石膏、水泥、环氧树脂等)和改善性能的添加剂(减水剂、缓凝剂、松香酒精溶液等)组成。从前人的研究成果可见,试验结果与模拟的一般的静力破坏几乎没有区别,只是出现掉渣、葱皮剥落、掉块,没有出现围岩从能量积聚到突然爆裂弹射的动力失稳过程。周辉[18]团队通过引入岩爆倾向性指数和脆性评价指标,采用石英砂为配制出合适的岩爆模型材料,采用石英砂和重晶石粉为骨料,高强石膏和水泥为胶结材料配置低强高脆相似材料并分析讨论了各影响因素与岩爆倾向性、脆性之间的相互关系。然而由于相似材料强度太高以及高强石膏调整相似材料脆性以及冲击倾向性有限的原因,从而难以获得理想的低强高脆岩爆演示相似材料。因此在开发低强度、高脆性岩爆类似材料中探索使用其他材料作为改性剂有很大的意义。

醋酸乙酯-乙烯共聚胶粉(以下简称可分散乳胶粉)具有特有的“核-壳”结构(壳层为聚乙烯醇保护膜)[19]可在水化过程中形成三维聚合物网络(膜厚 50~200 nm),通过多尺度作用机制实现材料性能优化[20][21]。研究表明,可分散乳胶粉能够增大砂浆的总孔隙率和平均孔直径从而显著降低胶凝材料的抗压强度[22]-[25]。因此,引入可分散乳胶粉进入相似材料体系,有望减少刚性骨料、引入孔隙、延缓水化,在降低材料强度的同时,使低强度体系在破坏时表现出更高的脆性特征,有着作为改性剂制备低强高脆岩爆相似材料的潜力。

综上所述,本文在前人研究的基础上,暂不考虑原岩与模型材料之间的相似准则,采用正交设计法和敏感性分析进行方案设计和试验结果处理,定量分析与评价模型材料的岩爆倾向性和脆性大小,探索具有低强度、高脆性的岩爆模型材料配比方案。提出采用可分散乳胶粉作为改性剂。通过控制可分散乳胶粉含量来调整相似材料脆性以及冲击倾向性,以低强度高脆性类岩相似材料为目标,研制岩爆倾向性脆性岩石相似材料。

2. 实验

2.1. 实验材料

为配制出合适的岩爆倾向性脆性岩石相似材料,笔者在参考现有研究基础上,综合分析国内外有关相似材料配合比的试验研究。决定主要以机制砂, P. O32.5 硅酸盐水泥、低强度石膏,可分散乳胶粉 4 种材料配制,见图 1。并加入一定含量减水剂与缓凝剂以利于标准试件制作。为确保配制材料拥有脆性并保持较低强度,加入可分散乳胶粉代替一部分机制砂,选用抗压强度 7 MPa 的建筑石膏,并使用硅酸盐水泥调节材料强度。

2.2. 配比方案

通过前期开展的一些探索性试验研究,本文在周辉[18]的研究基础上进行改进,利用正交试验设计方法,选择胶砂比(A)、水胶比(B)、石膏比(C)、乳胶粉量(D)作为试验设计的四个影响因素,每个因素下设置 4 种正交水平,共 16 组配比方案。以脆性系数与冲击倾向性指数作为指标衡量。表 1 为模型材料 4 个因素的不同正交设计水平,表 2 为 16 组正交配比方案。



Figure 1. Materials for physical model test
图 1. 物理模型实验材料

Table 1. Orthogonal experiment factor levels table
表 1. 正交试验因素水平表

水平组数	胶砂比(A)	水胶比(B)	石膏比(C)	乳胶粉量(D)
1	1:2	0.3	1:1	0
2	1:3	0.4	1:2	5%
3	1:4	0.5	1:3	10%
4	1:5	0.6	1:4	15%

其中胶砂比为胶凝材料与砂子的质量比；水胶比为水和胶凝材料的质量比；石膏比为水泥与石膏的质量比；乳胶粉量为可分散乳胶粉代替砂子的质量百分数。

Table 2. Orthogonal experimental design table
表 2. 正交实验方案表

组号	胶砂比(A)	水胶比(B)	石膏比(C)	乳胶粉量(D)
1	1 (1:2)	1 (0.3)	1 (1:1)	1 (0)
2	1	2 (0.4)	2 (1:2)	2 (5%)
3	1	3 (0.5)	3 (1:3)	3 (10%)
4	1	4 (0.6)	4 (1:4)	4 (15%)
5	2 (1:3)	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3 (1:4)	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4 (1:5)	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

总固体质量为 3000 g，减水剂为总质量的 0.5%，缓凝剂为石膏质量的 0.1%。

2.3. 实验过程

浇筑试样时，按照实验配方称量骨料和胶凝材料，并精确到 0.1 g，将称量好的骨料和胶凝材料放入搅拌机中干搅 3 min，充分搅拌均匀。同时称量所需的减水剂和缓凝剂，精确到 0.01 g，称量所需的水，精确到 0.1 g。然后将称量好的减水剂和缓凝剂倒入称量好的水中，并搅拌均匀。再将制备的混合液倒入搅拌机中，分三次缓慢加入，湿搅 3 min。接着将搅拌好的混凝土倒入 50 mm * 100 mm 的模具中，分三次倒入，将浇筑好的模具放入振实台上，震动 3 min，拍出气泡，最后将振动完成的模具，放进温度为 20℃ ± 1℃，湿度 ≥ 65% 的养护箱中养护 1 d 后，继续养护到规定天数。试样浇筑流程如图 2 所示，浇筑好的部分试样见图 2(g)。

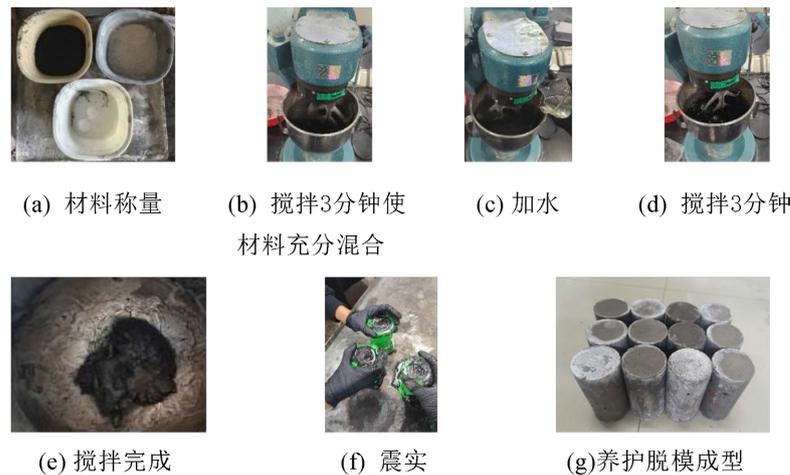


Figure 2. The process of specimen production
图 2. 试样浇筑流程

2.4. 相关参数评价指标

2.4.1. 脆性指数

目前，周辉[18]团队引入脆性评价指标(脆性程度大小 B_d) [26]，通过正交设计法研究各因素对脆性评价指标 B_d 。脆性程度大小 B_d 是以岩石峰后应力降的相对大小和速率进行衡量，当应力 - 应变曲线峰后相对应力降较大，且应力以极快的速率降至残余强度时，认为岩石的脆性程度很大。该指数通过试件全应力 - 应变曲线参数定义，表达式见公式(1)。

$$B_d = \frac{\tau_p - \tau_r}{\tau_p} \cdot \frac{|g| \cdot k_{ac(AC)}}{10} \quad (1)$$

式中： τ_p 和 τ_r 分别为峰值强度和残余强度； $k_{ac(AC)}$ 为从初始屈服点至残余强度起始点的连线斜率； $k_{ac(BC)}$ 为峰后应力减小速率(见图 3)。 B_d 的变化范围为 0~1， B_d 值越大，岩石脆性程度越大。脆性指数的值越高，岩石越容易以脆性方式破坏，即在承受一定应力后更容易出现裂纹和破碎。在工程和地质领域，了解岩石的脆性指数对于设计和施工非常重要。对于需要在岩石中钻孔、挖掘或爆破的工程。此外，在地质勘探和矿产勘探中，脆性指数也是评价岩石质量和稳定性的重要指标之一。脆性指标是评价页岩可压裂性以及预测崩滑、岩爆和地震的重要因素，同时，脆性不仅对岩石可削性、可钻性和可掘性造成显著影响，也与煤矿的持续开采及安全施工密切相关。了解岩石的脆性指数可以帮助工程师选择合适的工艺和设备，

减少事故的发生。

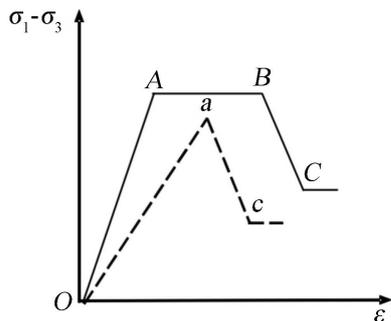


Figure 3. Brittleness evaluation index [18]
图 3. 脆性评价指标[18]

2.4.2. 冲击能量指数

岩层冲击倾向性是指其积聚变形能并产生冲击破坏的性质。用以判别岩石的岩爆倾向性。朱之芳[27]提出能量冲击指数 A_{CF} ，该指数由岩石全应力 - 应变曲线定义，计算式(2)如下：

$$A_{CF} = \frac{A_1}{A_2} \quad (2)$$

式中： A_{CF} 为冲击能量指数 A_1 为峰前面积， A_2 为峰后面积。当 $A_{CF} > 3.0$ 时相似材料为强岩爆性； $2.0 < A_{CF} \leq 3.0$ 时相似材料为中等岩爆性； $1.0 \leq A_{CF} \leq 2.0$ 时相似材料为弱岩爆性； $A_{CF} < 1.0$ 时相似材料无岩爆性。

3. 试验结果分析

Table 3. Basic property parameters of the test specimen
表 3. 试件基本性质参数

组号	密度(kg/m ³)	单轴抗压强度(MPa)	冲击能量指数 A_{CF}	脆性评价指标 B_d
B1	2214.14	28.739108	0.0905	0.002658
B2	2178.15	21.832102	1.26	0.12
B3	2094.9	15.86179	11.89946	0.220484
B4	2130.12	5.841274	3.799292	0.297841
B5	2139.38	12.872357	5.37	0.227
B6	2186.31	14.118471	4.87	0.039973
B7	2094.56	27.36	0.15475	0.031719
B8	2095.03	21.26459	2.62	0.19
B9	2188.68	7.50	3.41	0.029
B10	2205.24	14.78	6.45	0.131
B11	2155.06	7.9	1.27	0.021
B12	2052.2	13.366369	0.095724	0.112979
B13	2157.69	11.74	1.79	0.17
B14	2082.71	7.962803	0.06667	0.001529
B15	2183.13	8.69	1.91	0.05
B16	2190.57	6.71	7.48	0.13

根据正交配比方案, 利用配制好的模型试样, 先后开展单轴压缩试验和单轴加、卸载试验, 得到各试样的应力 - 应变曲线, 并根据式(1)~(2)分别测定模型材料的密度、抗压强度、冲击能量指数 A_{CF} 、脆性程度大小 B_d 等参数大小, 并对测量结果进行极差分析, 相关试验数据见表 3。

通过正交设计得到的试验数据常采用敏感性分析进行数据处理, 敏感性分析是通过每一因素求其平均极差来分析问题, 由平均试验值中最大值和最小值的差来找到影响指标的主要因素。根据试验结果, 本文将模型材料的四个影响因素(胶砂比(A)、水胶比(B)、石膏比(C)、乳胶粉量(D))对模型材料强度、冲击能量指数和脆性评价指标的变化影响规律总结如下。

3.1. 抗压强度敏感性分析

由图 4 可知, 抗压强度的大小基本随水胶比的增大而减小, 当水胶比为 0.6 时, 抗压强度均达到最小值。随着胶砂比的增大, 抗压强度先增大后减小, 当胶砂比为 1:3 时, 抗压强度最大, 当超过 1:3 时, 抗压强度随着机制砂的含量增加而逐渐增加。随着乳胶粉含量的增加, 抗压强度几乎呈线性减小趋势, 在乳胶粉掺入量为 15% 时抗压强度最小。根据敏感性分析(见表 4), 乳胶粉含量对抗压强度影响最大, 极差值为 10.32 MPa, 石膏比对其影响最小, 极差值为 1.8 MPa。各影响因素对抗压强度敏感性从大到小为: $D > A > B > C$, 对于抗压强度, 乳胶粉含量起主要控制作用, 当乳胶粉掺入量为 15% 时抗压强度最小。

各影响因素对抗压强度敏感性从大到小为: $D > A > B > C$ 。

抗压强度作为指标为最小值时因素水平组合为: $A_4B_4C_3D_4$ 。

Table 4. Compressive strength sensitivity analysis table

表 4. 抗压强度敏感性分析表

水平组数	胶砂比(A)	水胶比(B)	石膏比(C)	乳胶粉量(D)
均值 1	18.06	15.21	14.36	19.35
均值 2	18.9	14.67	14.18	15.68
均值 3	10.88	14.95	13.13	12.55
均值 4	8.77	11.79	14.93	9.03
R	10.13	3.42	1.8	10.32

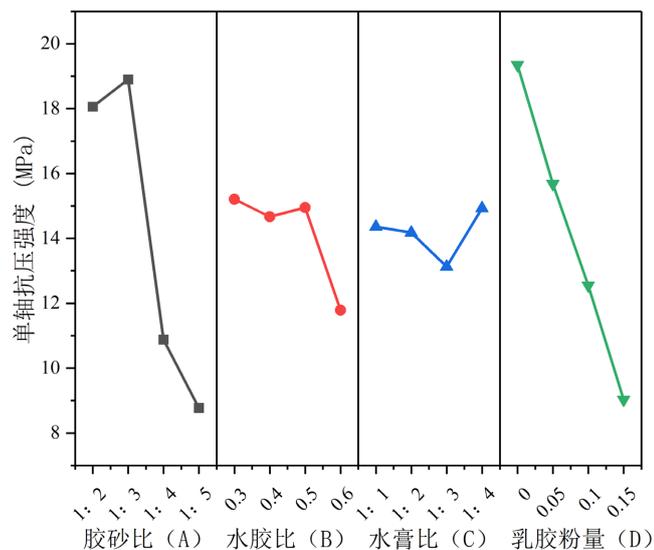


Figure 4. Compressive strength sensitivity analysis diagram

图 4. 抗压强度敏感性分析图

3.2. 冲击能量指数敏感性分析

由图 5 可知, 从整体变化趋势上看, 冲击能量指数随乳胶粉含量增大而呈现先增大后减小的趋势, 在乳胶粉含量为 10% 时达到最大, 当乳胶粉掺入量超过 10% 时, 冲击能量指数又随着乳胶粉含量的增加而减小。随着石膏含量的增加冲击能量指数先降低后增加又降低, 当石膏比增长至 1:2 时冲击能量指数减少到最低。当石膏含量超过 75% 时(石膏比为 1:3), 冲击能量指数又开始大幅度降低。

乳胶粉的含量和水膏比对相似模型的冲击能量指数影响波动较大。根据敏感性分析(见表 5), 乳胶粉量(D)对冲击能量指数影响最大, 极差值为 7.71。各影响因素对冲击倾向性指数敏感性从大到小为: $D > C > A > B$, 对于冲击能量指数, 乳胶粉含量相对而言起主要控制作用, 当乳胶粉掺入量为 10% 时, 冲击能量指数最大。

各影响因素对冲击倾向性指数敏感性从大到小为: $D > C > A > B$ 。

冲击倾向指数作为指标为最大值时因素水平组合为: $A_1B_3C_3D_3$ 。

Table 5. Shock energy index sensitivity analysis table
表 5. 冲击能量指数敏感性分析表

水平组数	胶砂比(A)	水胶比(B)	水膏比(C)	乳胶粉量(D)
均值 1	4.25	2.66	3.42	0.09
均值 2	3.25	3.16	2.15	1.73
均值 3	2.81	3.81	4.49	7.8
均值 4	2.80	3.49	3.04	3.27
R	1.45	1.15	2.34	7.71

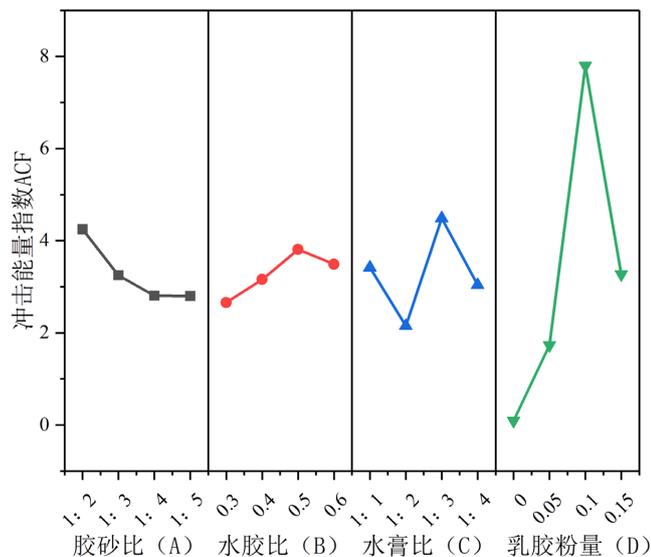


Figure 5. Shock energy index sensitivity analysis diagram
图 5. 冲击能量指数敏感性分析图

3.3. 脆性指标敏感性分析

根据图 6, 胶砂比对脆性程度大小的影响不是很明显。随乳胶粉量的增加, 脆性程度大小呈现先增大后减小的趋势, 当乳胶粉掺量为 10% 时, 试样的脆性最大。当水膏比为 1:4 时, 试样的脆性最高, 当石膏

含量大于 50% (水膏比 > 1:2) 随后石膏含量的增加对脆性程度大小起劣化作用, 当石膏含量大于 75% 时 (水膏比 > 1:3), 材料的脆性反而开始增加, 说明一定范围内石膏含量的增加对模型材料的脆性有较强的弱化作用。此外, 脆性程度大小随水胶比含量的增大呈现出先减小后增大的趋势, 在水胶比为 0.6 时脆性程度达到最大。根据敏感性分析(见表 6), 乳胶粉含量、水胶比和水膏比含量均对脆性程度大小影响较大, 极差值分别为 0.141、0.109 和 0.107。各影响因素对脆性程度大小敏感性从大到小为: $D > B > C > A$, 对于脆性程度大小, 乳胶粉含量起主要控制作用, 其次是水胶比、水膏比。

各影响因素对脆性程度大小敏感性从大到小为: $D > B > C > A$ 。

脆性指标最大时的因素水平组合为: $A_1B_4C_4D_3$ 。

Table 6. Brittleness index sensitivity analysis table

表 6. 脆性指标敏感性分析表

水平组数	胶砂比(A)	水胶比(B)	水膏比(C)	乳胶粉量(D)
均值 1	0.16	0.107	0.048	0.036
均值 2	0.12	0.072	0.126	0.125
均值 3	0.05	0.080	0.110	0.177
均值 4	0.087	0.181	0.155	0.099
R	0.037	0.109	0.107	0.141

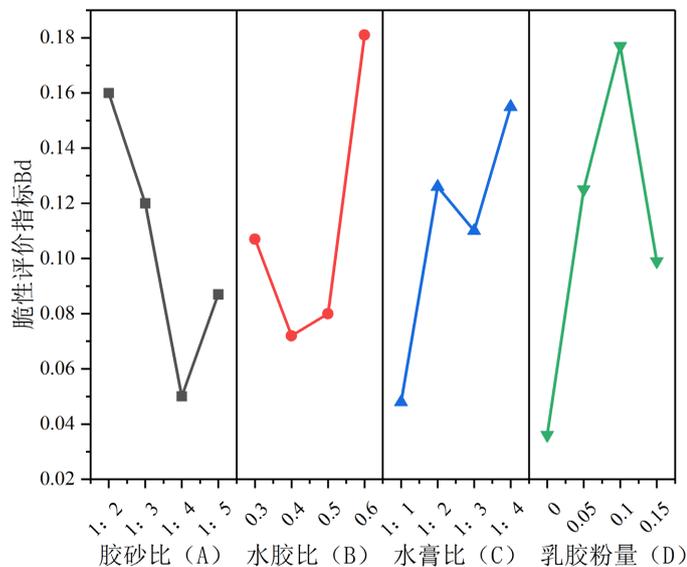


Figure 6. Brittleness index sensitivity analysis diagram

图 6. 脆性指标敏感性分析图

3.4. 试样微观结构分析

扫描电子显微镜被用来观察样品断裂处微观形貌和微观结构的仪器, 本次采用上海辰华公司的 FlexSEM1000 扫描电镜。取在万能试验机下断裂后的试件的截面, 喷金导电后, 观察断裂处微观形貌。以便分析试样出现脆性破坏与弹射的原因。根据前文对试样的抗压强度敏感性、冲击能量指数敏感性和脆性指标敏感性分析可知试样 B3 的综合性能最好, B14 最差, 因此对其进行 SEM 分析。图 7 为 B3、B14 试样在 28 d 经过破坏后断面的微观结构形貌。

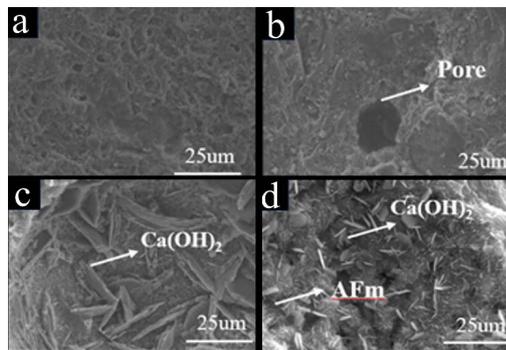


Figure 7. SEM images of the fracture surfaces of B3 and B14 specimens after 28 days of failure
图 7. B3、B14 试样在 28 d 经过破坏后断面的 SEM

a、b 为综合性能最差的一组 B14；c、d 为综合性能最好的一组 B3。如图 7(a)、图 7(b)所示，综合性能最差的一组生成的水化产物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量比较少，而且会产生少量的空洞，这也是此组脆性比较差的原因，因为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 层片状的解离特性，导致试件比较脆。由于此组有大量空洞的出现，导致试件在受压过程中不能够充分积聚能量，能量沿着孔洞和裂纹的方向进行扩展，导致此组试件冲击倾向性不好。

如图 7(c)、图 7(d)所示，综合性能最好的一组生成的水化产物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量比较多，而且生成了很多针棒状的钙矾石(AFm)，这就为试件提供了大量的脆性物质，而且加入的可分散乳胶粉(RDP)其引气作用所引入的微小气孔均匀分布于砂浆中，增大了砂浆的总孔隙率和平均孔直径，使砂浆硬化后结构疏松，从而强度降低。与此同时，胶粉三维聚合物网络分布在水化产物之间，将水化产物包裹在一起，大范围覆盖在水泥水化物表面控制钙矾石的生长点，使得针状钙矾石在局部生长的十分完整，这些分布在不同区域的聚合物膜结构则可以起到阻止内部微裂纹传播和应力集中的作用，而且由于聚合物膜相对较低的弹性模量和较高的形变能力，能有效的吸收微裂纹扩展时所需要的能量，使试件总体积聚能量的能力提高了，从而使试件的脆性与冲击性能良好。图 7(c)中可见试样内部生成了大量六方板状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，此为其脆性主要来源；图 7(d)中可见试样内生成大量针棒状钙矾石(AFt)。

3.5. 应力曲线与破坏模式分析

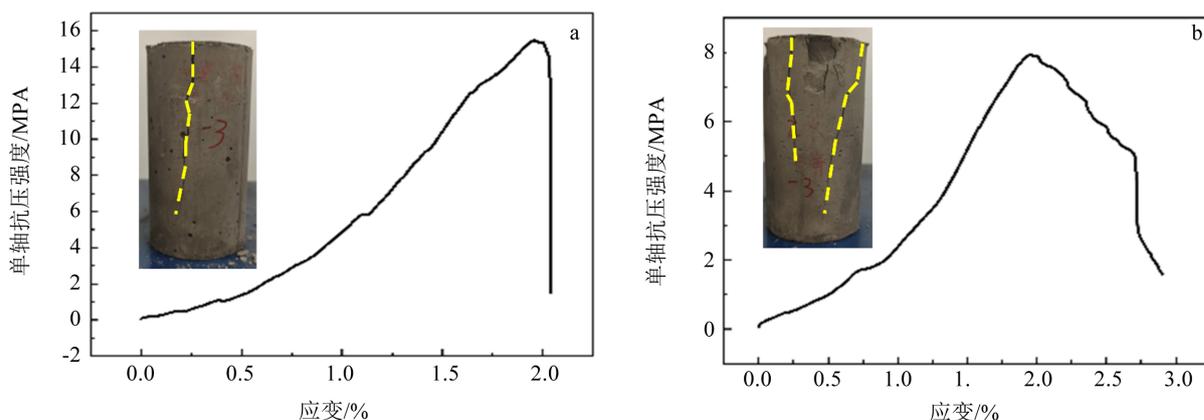


Figure 8. The stress-strain curves and failure pattern of model materials under uniaxial compression: (a) B3; (b) B14
图 8. 模型材料单轴压缩应力 - 应变曲线：(a) B3；(b) B14

由于矿物成分、地质作用等因素的影响，所配制的模型材料要想完全达到脆性岩石发生剧烈岩爆这种破坏程度难度较大的。而当 $A_{CF} > 3.0$ 时相似材料为强岩爆性表明岩石具有岩爆倾向， B_d 值越大代表岩

石脆性程度越大。因此,根据正交试验结果,以 A_{CF} 、 B_d 值共同作为筛选标准, B3 试件为岩爆倾向性、脆性程度综合性能最好的一组样品,而 B14 试件为综合性能最差的一组样品。而 B3、B14 试件的应力应变曲线如图 8 所示。

根据正交试验结果, B3 试样的综合性能最好, B14 试样最差。图 8 为该 2 组模型材料配比试样的单轴压缩应力-应变曲线与破坏形态, (a)为综合性能最好的一组 B3; (b)为综合性能最差的一组 B14。胶粉三维网络结构可以起到削弱应力集中并阻止内部微裂缝扩散作用, 有效地吸收微裂纹扩展时所需要的能量。如图 8(a)所示, B3 试样破坏时应力骤降, 曲线出现明显的应力跌落现象, 以剪切破坏为主, 脆性特征明显。如图 8(b)所示, B14 试样的曲线峰前靠近峰值附近存在一定的屈服变形过程, 峰后应力降较为平稳, 裂纹从试样受力端开裂, 一直延伸至底部, 属于张拉破坏。

4. 试验结论

本文在前人的研究基础上, 提出采用可分散乳胶粉作为新型脆性增强剂。通过控制石膏量来调整相似材料脆性以及冲击倾向性, 加入可分散乳胶粉代替一部分机制砂, 并引用岩爆倾向性指数和脆性评价指标, 采用正交设计法和敏感性分析, 以低强度高脆性类岩相似材料为目标, 研制岩爆倾向性脆性岩石相似材料。获得了不同配比模型材料的强度、冲击能量指数和脆性评价指标等试验数据, 并研究这些参数在不同设计水平下的变化规律, 得到以下结论:

(1) 根据敏感性分析, 模型材料各参数变化范围大, 规律明显。4 种影响因素中, 可分散乳胶粉掺入量对模型材料力学性质起主要控制作用。可分散乳胶粉含量的增加能够降低材料的抗压强度, 并且一定范围内乳胶粉含量的增加能够提高材料的岩爆倾向性以及脆性。

(2) 可分散乳胶粉的引气作用能够引入微小气孔并均匀分布于砂浆中, 增大了砂浆的总孔隙率和平均孔直径, 使砂浆强度降低。胶粉三维聚合物网络可以起到阻止内部微裂纹传播和应力集中的作用, 有效地吸收微裂纹扩展时所需要的能量, 提高了试件总体积聚能量的能力, 从而使试件的脆性与冲击性能良好。

(3) 当以冲击倾向指数 ≥ 2 、脆性指数 ≥ 0.2 为低强高脆相似材料的衡量指标时, 我们发现满足条件的组数为: B3、B4、B5。

(4) 为配制出低强度、高脆性的岩爆模型材料, 应严格控制可分散乳胶粉含量, 合理调节水胶比、石膏比和胶砂比。

(5) 本研究以可分散乳胶粉作为有机改性剂探索了一批具有低强度、高脆性的岩爆模型材料配比方案, 为深入研究原岩与模型材料之间的相似关系设计相似模型打下材料基础。

基金项目

安徽理工大学高层次引进人才科研启动基金资助(2023yjrc101); 安徽高校协同创新项目(GXXT-2022-083, GXXT-2023-019); 安徽理工大学省级大学生创新创业训练计划项目资助(S202410361037); 安徽理工大学国家级大学生创新创业训练计划项目资助(202410361009); 安徽理工大学 2024 年大学生创业基金扶持项目(项目名称: 淮南砭创智造科技有限公司); 国家重大科研仪器研制项目(部门推荐)(项目号: 52227901)。

参考文献

- [1] Li, T., Wang, X. and Meng, L. (2011) A Physical Simulation Test for the Rockburst in Tunnels. *Journal of Mountain Science*, **8**, 278-285. <https://doi.org/10.1007/s11629-011-2116-5>
- [2] Cai, W., Dou, L., Cao, A., Gong, S. and Li, Z. (2014) Application of Seismic Velocity Tomography in Underground

- Coal Mines: A Case Study of Yima Mining Area, Henan, China. *Journal of Applied Geophysics*, **109**, 140-149. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.07.021>
- [3] Lu, C., Liu, G., Liu, Y., Zhang, N., Xue, J. and Zhang, L. (2015) Microseismic Multi-Parameter Characteristics of Rockburst Hazard Induced by Hard Roof Fall and High Stress Concentration. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **76**, 18-32. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.02.005>
- [4] Jiang, Y., Zhao, Y., Wang, H. and Zhu, J. (2017) A Review of Mechanism and Prevention Technologies of Coal Bumps in China. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **9**, 180-194. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.05.008>
- [5] 潘一山, 宋义敏, 刘军. 我国煤矿冲击地压防治的格局、变局和新局[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(9): 2081-2095.
- [6] 鞠文君, 杨鸿智, 付玉凯, 等. 煤矿冲击地压巷道支护技术发展展望[J]. 煤炭工程, 2022, 54(11): 1-6.
- [7] 许鹏飞. 2000-2021年我国煤矿事故特征及发生规律研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(7): 129-133.
- [8] 张强勇, 李术才, 郭小红, 等. 铁晶砂胶结新型岩土模型材料的研制及其应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2126-2130.
- [9] 宋义敏, 潘一山, 章梦涛, 等. 深部高应力载荷作用下的洞室变形破坏试验[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2008, 27(4): 489-491.
- [10] 陈浩, 任伟中, 李丹, 等. 深隧道围岩稳定性的数值模拟与模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 615-620.
- [11] 陈智强, 张永兴, 周检英, 等. 基于数字散斑技术的深埋隧道围岩岩爆倾向模型材料试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 141-148.
- [12] 刘泉声, 王俊涛, 肖龙鸽, 等. OFDR 光纤传感技术在十字岩柱暗挖法物理模型试验中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1064-1075.
- [13] 杨金旺, 陈媛, 张林, 等. 基于地质力学模型试验综合法的顺层岩质高边坡稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 131-140.
- [14] 杨胜利, 王家臣, 杨敬虎. 顶板动载冲击效应的相似模拟及理论解析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 335-343.
- [15] 杨淑清. 隧洞岩爆机制物理模型试验研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1993, 26(2): 161-166.
- [16] 陈陆望, 白世伟. 脆性岩体岩爆倾向性的相似材料配比试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(S2): 1050-1054.
- [17] 潘一山, 章梦涛, 王来贵, 等. 地下洞室岩爆的相似材料模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 49-56.
- [18] 周辉, 陈珺, 张传庆, 等. 低强度高脆岩爆模型材料配比试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2039-2049.
- [19] 王培铭, 赵国荣, 张国防. 可再分散乳胶粉在水泥砂浆中的作用机理[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(2): 256-262.
- [20] 彭家惠, 毛靖波, 张建新, 等. 可再分散乳胶粉对水泥砂浆的改性作用[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(4): 915-919.
- [21] 侯云芬, 张莹, 黄天勇. 可再分散乳胶粉对干混砂浆性能的影响[J]. 北京建筑大学学报, 2021, 37(4): 1-8.
- [22] Ci, X. and Falconio, R. (1995) Acrylic Powder Modified Portland Cement. *Cement, Concrete, and Aggregates*, **17**, 218-226. <https://doi.org/10.1520/cca10147j>
- [23] Amick, H. and Monteiro, P.J.M. (2013) Temperature and Frequency Effects on Properties of Polymer-Modified Concrete. *Aci Materials Journal*, **110**, 187-196.
- [24] 任旭, 王鸿榕, 刘梓晗, 等. 可再分散乳胶粉对软岩相似材料性能的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(S2): 649-655.
- [25] 张国防, 王培铭. E/VC/VL 三元共聚物对水泥砂浆孔结构和性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1): 111-114, 120.
- [26] Meng, F., Zhou, H., Zhang, C., Xu, R. and Lu, J. (2014) Evaluation Methodology of Brittleness of Rock Based on Post-Peak Stress-Strain Curves. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **48**, 1787-1805. <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0694-6>
- [27] 朱之芳. 全应力应变曲线在冲击地压中应用的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 1986, 14(3): 35-40, 61.