

不同埋深灰岩相似材料配比试验及特性分析

臧万军^{1,2}, 常银会^{1,2}

(1. 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118;

2. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 为获得不同埋深下具有岩爆倾向性的灰岩相似模型, 引入岩爆能量原理建立岩爆相似准则, 参考原岩相关参数结合岩爆相似准则推算相似模型对应的原岩目标相关参数。引入岩爆倾向性指数、弹性能和耗散能, 以石英粉含量、重晶石粉含量、石膏水泥质量比、水含量为影响因素, 采用4因素5水平的正交试验方案, 进行单轴抗压试验得到各项参数。对试验结果进行敏感性分析及多元线性回归分析, 将不同埋深下灰岩相似模型参数带入线性回归方程, 并考虑敏感性分析结果对材料配比进行优化, 得出不同埋深下灰岩相似模型优化配比及物理参数, 为灰岩室内研究提供参考。

关键词: 岩爆倾向性; 相似材料; 岩爆能量原理; 相似理论

中图分类号: TU451

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2023)04-0320-07

Proportioning test and characteristic analysis of similar materials for limestone with different burial depths

ZANG Wanjun^{1,2}, CHANG Yinhui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Underground Engineering of Fujian Province, Fuzhou 350118, China;

2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In order to obtain the similarity model of limestone with rock burst tendency under different burial depths, the principle of rock burst energy was introduced to establish the similarity criterion of rock burst, and the relevant parameters of the original rock target corresponding to the similarity model were calculated by referring to the relevant parameters of the original rock and the similarity criterion of rock burst. The rock burst tendency index, elastic energy and dissipation energy were introduced. The quartz powder content, barite powder content, gypsum cement mass ratio and water content were taken as the influencing factors. The orthogonal test scheme of 4 factors and 5 levels was used to carry out the uniaxial compression test to obtain the parameters. Sensitivity analysis and multiple linear regression analysis were carried out on the test results. The parameters of limestone similarity model under different buried depths were brought into the linear regression equation, and the material ratio was optimized considering the sensitivity analysis results. The optimized ratio and physical parameters of limestone similarity model under different buried depths were obtained, which can provide reference for indoor research of limestone.

Keywords: rock burst tendency; similar materials; principle of rock burst energy; similarity theory

随着地下工程不断发展建设, 大量学者对隧道岩爆灾害问题开展相关研究, 但不同埋深岩石取芯困难限制了在室内开展大量相关试验^[1]。岩体相似试验是一种推断原岩中可能发生的力学现象及压力分布规律的重要研究手段^[2]。基于具有

不同特点的岩体进行相似模型试验, 其相似材料选择及配比设计是研究岩体物理力学特性的基础^[3]。史小萌等^[4]利用水泥、石膏、石英砂和重晶石粉等因素, 通过敏感性分析及多元线性回归分析, 得到单轴抗压强度和各影响因素间的定量关系。侯廷凯

等^[5]以标准石英砂、石膏水泥、硼砂为原料制备了白云岩的相似材料,通过敏感性分析研究影响因素对相似材料各力学参数影响程度。

目前岩爆相似材料相关研究仅模拟浅埋部和抗压强度较低的岩石,对不同埋深的岩石进行相似模拟鲜有研究,本文考虑岩爆能量原理建立岩爆相似准则,探索具有岩爆倾向性的不同埋深灰岩相似模型,为不同埋深灰岩室内试验研究提供参考。

1 相似理论推导及模型参数确定

1.1 岩爆倾向性评价指标

为定量评价岩石的岩爆倾向程度,国内外学者从不同的试验角度提出了十几种评价指标,其中绝大部分指标均根据岩石应力-应变曲线获得^[6]。利用应力-应变曲线通过单轴加、卸载试验,将岩石加载至峰值强度的 80%~90%,再进行卸载,根据单轴加、卸载曲线前后峰面积,计算弹性能、损耗能和岩爆倾向性指数^[7](见图 1)。

根据公式(1)得到岩爆倾向性指数

$$W_{et} = U^e / U^d \tag{1}$$

式中, U^d 为耗散能,MJ; U^e 为弹性应变能,MJ; W_{et} 为岩爆倾向性指数。当 $W_{et} \geq 5.0$ 时,相似材料为强岩爆性; $3.5 \leq W_{et} < 5.0$ 时,相似材料为中等岩爆性; $2 \leq W_{et} < 3.5$ 时,相似材料为弱岩爆性; $W_{et} < 2.0$ 时,相似材料无岩爆性。

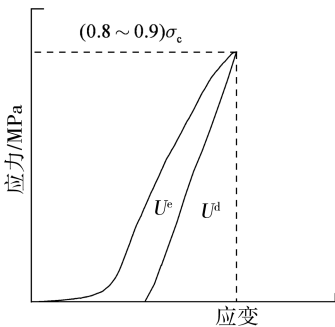


图 1 岩爆倾向性指数
Fig.1 Rock burst propensity index

1.2 建立岩爆相似准则

根据相似定理及弹塑性力学的相似条件^[8],研究影响岩爆相似材料力学性质的物理量主要有:几何相似系数 α ;密度相似系数 β ;密度 ρ , g/cm^3 ;泊松比 μ ;弹性模量 E ,GPa;抗压强度 σ ,MPa;耗散能 U^d ,MJ;弹性应变能 U^e ,MJ;岩爆倾向性 W_{et} ;试块尺寸 l ,mm^[9]。

$$\alpha = \frac{l_m}{l_p}, \beta = \frac{\rho_m}{\rho_p}, \sigma_m = \sigma_p \alpha \beta, E_m = E_p \alpha \beta, \mu_m = \mu_p$$
$$U_m^d = U_p^d \alpha \beta, U_m^e = U_p^e \alpha \beta, W_{et_m} = W_{et_p} \alpha \beta \tag{2}$$

式中:下标 p 表示原型,m 表示相似模型。

1.3 相似模型参数确定

根据文献[10],选取矿山埋深 400、500、600 m 处灰岩为模拟对象,结合相似准则,得出相似模型力学参数如表 1 所示。

表 1 相似模型力学参数
Tab.1 Mechanical parameters of similar models

材料参数	弹性模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa	耗散能/MJ	弹性能/MJ	岩爆倾向性
400 m	14.83	0.22	77.07	45.97	80.02	1.74
400 m 相似模型	10.42	0.22	54.27	32.37	56.35	1.74
500 m	15.21	0.21	76.74	55.03	90.81	1.82
500 m 相似模型	10.71	0.21	54.04	38.75	63.95	1.82
600 m	16.34	0.22	80.69	44.90	85.76	1.91
600 m 相似模型	11.50	0.22	56.82	31.61	60.39	1.91

2 相似材料制备

2.1 试验材料及制备

由于有岩爆倾向性的原岩具有高单轴抗压强度的特点,现有岩爆材料相似模型的单轴抗压强度普遍较低,仅适用于弱岩爆倾向性原岩的相似研究^[11]。因单轴抗压强度与材料本身的致密性有

关^[12],本试验为提高材料致密性,以 400 目石英粉及 800 目重晶石粉为骨料,高强石膏和 42.5 水泥为胶结材料,加水搅拌均匀,并加入 0.3% 减水剂及 0.25% 消泡剂,制作完成后进行 28 d 养护。

2.2 配比方案

利用正交设计方案,选择石英粉含量、重晶石粉含量、石膏水泥比、水含量 4 个影响因素,每个因素

设置 5 水平,共计 25 组配比方案。其中水含量为固体原料总质量百分比。表 2 为正交设计水平方案。

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

对相似材料试件进行单轴压缩试验和单轴加载、卸载试验,得到试件应力-应变曲线及模型力学参数,根据相似岩爆倾向性指数测得各项参数数据见表 3。以 25 号试件为例,对其进行单轴抗压试验测出峰值强度,再对其进行单轴加载、峰值强度 80%卸载试验。如图 2 所示,25 号试件具有较强的岩爆倾向性,试件破坏时,材料表面大面积脱落。如图 3 所示,根据单轴加载、峰值强度 80%

卸载曲线前峰面积及后峰面积比值,计算耗散能 U^d 和弹性应变能 U^e 。再利用公式(1)及判断准则计算岩爆倾向性大小。

表 2 相似材料正交设计水平方案
Tab.2 Orthogonal design horizontal scheme of similar materials

水平	$w_{\text{石英粉}}/\%$	$w_{\text{重晶石粉}}/\%$	石膏水泥比	$w_{\text{水}}/\%$
1	25	25	0:1	15
2	30	30	1.5:1	18
3	35	35	2.5:1	21
4	40	40	3.5:1	24
5	45	45	1:0	27

表 3 相似模型材料试验结果
Tab.3 Test results of similar model materials

组号	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	岩爆倾向性指数	弹性能/MJ	耗散能/MJ
1	30.16	9.50	0.252	2.453	35.23	14.36
2	27.81	4.30	0.183	2.531	28.47	11.24
3	27.00	8.30	0.224	1.830	22.78	12.45
4	57.00	4.92	0.202	3.564	65.32	18.32
5	34.43	5.23	0.217	1.350	43.18	31.98
6	26.00	6.50	0.124	2.841	26.45	9.31
7	17.31	3.23	0.154	0.980	23.45	23.92
8	33.47	10.56	0.243	3.135	41.56	13.25
9	23.65	3.56	0.121	0.563	25.45	45.20
10	23.99	2.30	0.187	0.823	24.23	29.44
11	18.78	4.20	0.156	1.210	18.23	15.07
12	45.38	7.56	0.212	1.740	58.32	33.52
13	55.50	7.30	0.154	1.437	60.34	41.99
14	33.00	4.90	0.114	2.961	39.23	13.25
15	48.89	8.45	0.182	3.281	62.45	19.03
16	58.82	12.18	0.263	3.843	71.23	18.55
17	30.47	10.18	0.238	2.471	38.76	15.69
18	22.52	4.26	0.143	1.132	20.45	18.09
19	35.43	5.10	0.132	1.580	42.56	26.93
20	16.89	2.87	0.112	0.383	20.45	53.81
21	20.15	4.40	0.154	1.754	16.35	9.34
22	25.99	3.20	0.115	2.310	27.34	11.83
23	14.48	2.01	0.127	0.521	14.32	27.53
24	22.95	4.82	0.230	0.732	23.41	32.07
25	39.89	5.87	0.143	2.414	48.32	20.04

3.2 敏感性分析

利用 25 组试验数据进行敏感性分析,找到影

响各试验指标的主要影响因素。将石英粉含量(A)、重晶石粉含量(B)、石膏水泥比(C)、水含量

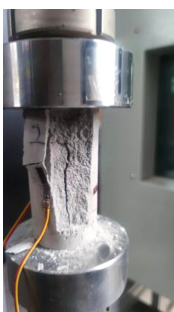


图 2 单轴抗压 (25#)

Fig.2 Uniaxial compression (25#)

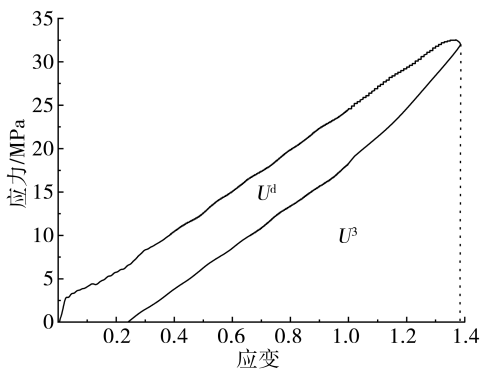


图 3 单轴加载、峰值强度 80%卸载试验 (25#)

Fig.3 Uniaxial loading and unloading test with 80% of the peak strength (25#)

(D)作为影响因素,相似模型抗压强度、弹性模量、泊松比、岩爆倾向性指数、弹性能和耗散能作为指标,研究影响因素对各指标变化的影响规律。

图 4 为敏感性分析规律,模型材料单轴抗压强度由石膏水泥比占比起主要控制作用,水含量影响较小。随着石英粉和重晶石粉含量增大,控制模型材料单轴抗压强度的胶结材料占比减少,各因素对抗压强度影响程度大小: C>B>A>D。模型材料弹性模量由重晶石粉含量起主要控制作用,石英粉和水含量影响较低,弹性模量随着重晶石粉含量增加呈下降趋势,各因素对弹性模量影响程度大小: B>C>D>A。泊松比主要由石膏水泥质量占比起主要控制作用,随着重晶石粉和高强石膏含量增加,泊松比呈下降趋势。各因素对泊松比影响程度大小: C>B>A>D。

重晶石粉含量对岩爆倾向性指数起主要控制作用。岩爆倾向性随着各因素含量增加,整体呈下降趋势,由于材料选用重晶石粉目数比石英粉小,随着其含量不断增加并不能同石英粉一样有效填充材料孔隙,其含量的增加使得胶结材料占比减少,反而会使骨料间的孔隙增加,材料积蓄能量能力降

低,耗散能力增加,导致材料岩爆倾向性大幅下降,各因素对岩爆倾向性影响程度大小: B>C>A>D。

石膏水泥比对弹性能起主要控制作用,随着石膏水泥质量占比增加,模型材料弹性能总体呈下降趋势,当水泥占比为 0 时,材料整体显脆性,储能降低材料弹性能降到最低。随着骨料及水含量的增加,模型材料弹性能呈下降趋势,当骨料含量增加时,胶结材料相应减少,其中水泥含量降低,材料储存能量能力下降,使弹性能降低,各因素对弹性能影响程度大小: C>A>B>D。

石英粉含量对耗散能起主要控制作用。随着石英粉含量增加,模型材料耗散能整体呈下降趋势,在石英粉含量为 30% 时最高,石英粉含量在 35% 时,模型材料密实度高,材料积蓄能量提高,耗散能降低。各因素对耗散能影响程度大小: A>B>D>C。

4 各参数与因素间的定量关系

以 25 组正交实验得到相似模型的抗压强度、弹性模量、泊松比、岩爆倾向性指数、弹性能、耗散能为基础,通过多元线性回归建立力学参数与材料 4 因素关系方程,并与实验结果进行拟合。

设因变量为 y , 影响因变量的 i 个自变量分别为 $x_1, x_2, \dots, x_i$, 则回归方程为:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_ix_i \quad (3)$$

式中, b_i 为回归参数。

令 y_1 为抗压强度, MPa; y_2 为弹性模量, GPa; y_3 为泊松比; y_4 为岩爆倾向性指数; y_5 为弹性能, MJ; y_6 为耗散能, MJ; x_1 为因素 A; x_2 为因素 B; x_3 为因素 C; x_4 为因素 D。经过计算得到如下回归方程:

$$y_1 = -6.2564 + 0.1752x_1 + 0.234x_2 + 1.0738x_3 - 0.3933x_4$$

$$y_2 = -22.03207 + 0.375x_1 + 0.109x_2 + 0.416x_3 - 0.07x_4$$

$$y_3 = -0.8053 + 0.01x_1 + 0.0075x_2 + 0.01117x_3 + 0.0015x_4$$

$$y_4 = 6.8059 - 0.0227x_1 - 0.1011x_2 + 0.0012x_3 - 0.0281x_4$$

$$y_5 = -2.7586 + 0.0781x_1 + 0.1928x_2 + 1.25x_3 - 0.372x_4$$

$$y_6 = -25.2016 - 0.0899x_1 + 1.162x_2 + 0.255x_3 + 0.13x_4$$

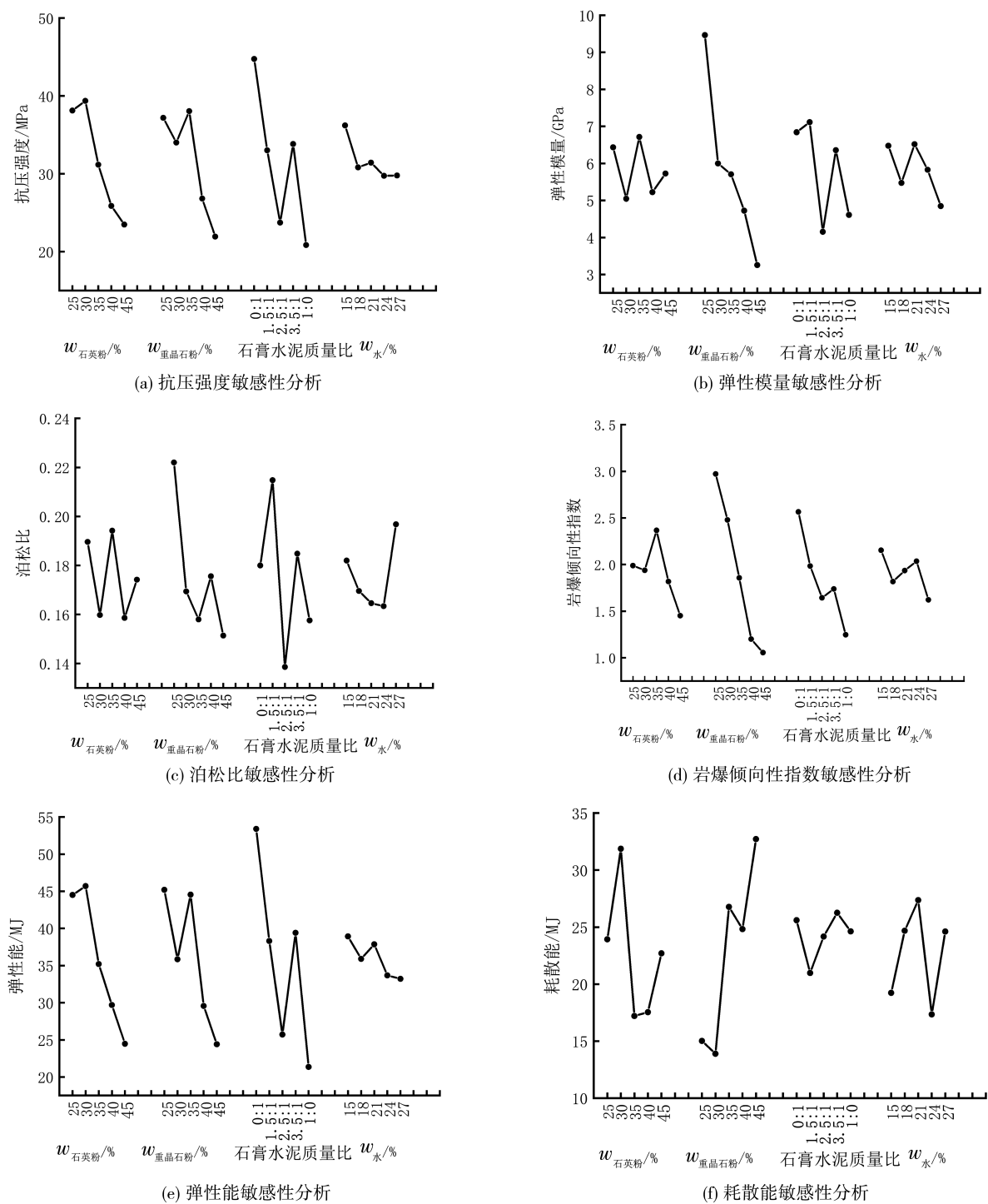


图 4 各因素对试验参数影响

Fig.4 Influence of various factors on test parameters

通过多元线性回归方程得到拟合值与实验值,由此作以下曲线拟合对比图,图中 y 轴为材料的各力学参数, x 轴为 25 组试验次序。

图 5 为各因素拟合图,方程曲线与试验结果

曲线大致拟合,其中弹性模量、弹性能、耗散能拟合对比曲线几乎完全重合,说明多元线性回归方程具有可靠性,可结合上述敏感性分析调整实验配比,制作出不同埋深下灰岩相似模型。

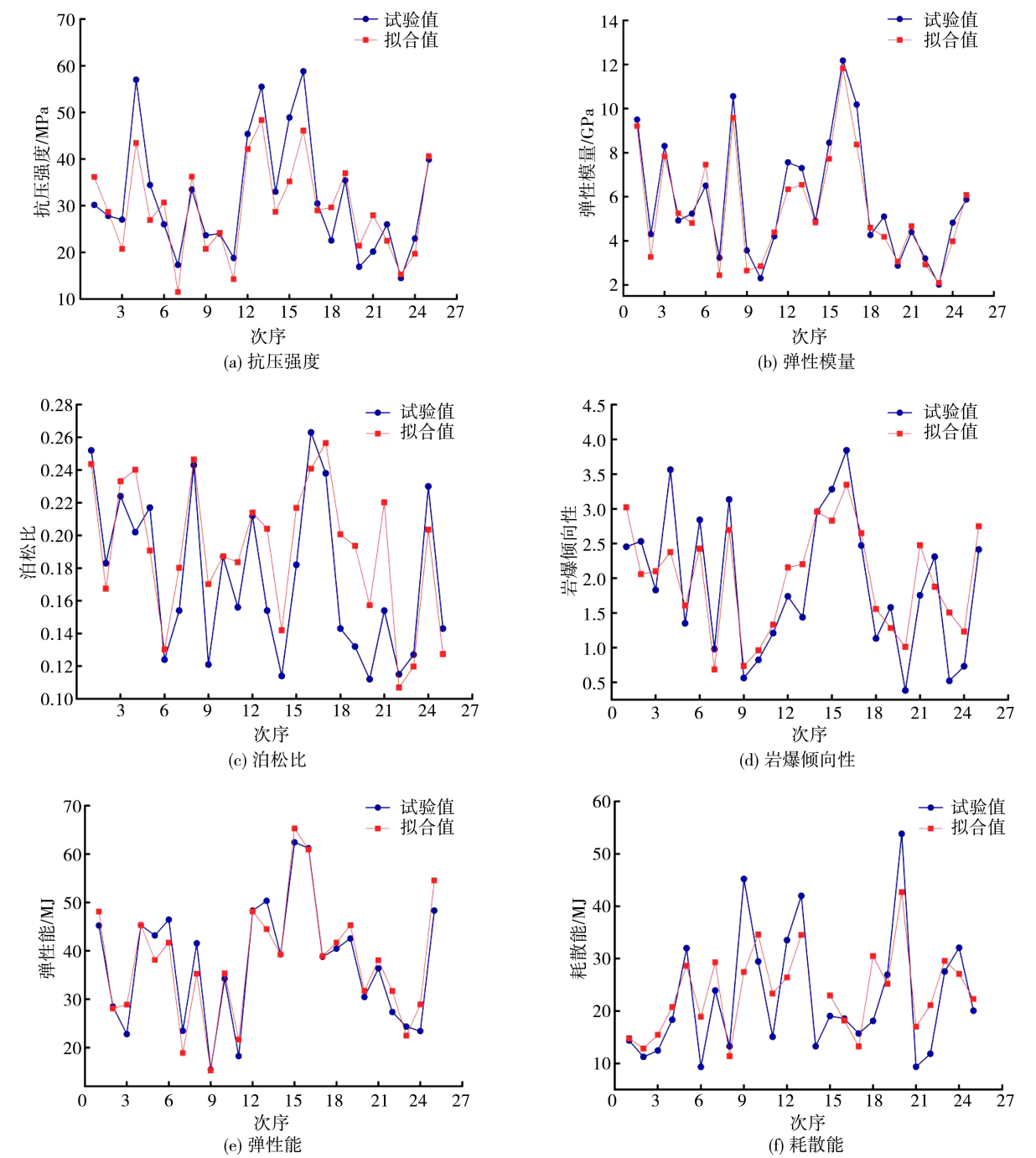


图 5 拟合值和试验值对比

Fig.5 Comparison of fitting values and test values

5 不同埋深下灰岩相似模型制作

通过前文的公式推导,已确定 400、500、600 m 埋深灰岩所对应的相似模型各力学参数,将各参数带入多元线性回归方程,得到不同埋深灰岩对应的相似模型材料配比,结合敏感性分析对模型材料配比进行调整,表 5 为经过调整的试件配

比及模型各项力学参数,表中 1、2、3 号试件分别为埋深 400、500、600 m 灰岩所对应的相似配比模型。石英粉含量 A、重晶石粉含量 B、石膏水泥比 C、水含量 D 调整配比及试验参数,试件 1 号优化后配比为 A:23.4%,B:18.2%,C:0.2:1,D:24%,试件 2 号优化后配比为 A:22.3%,B:24.2%,C:1.4:1,D:23%,试件 3 号优化后配比为 A:29.7%,

B:26.4%,C:1.3:1,D:22%,如表 5 所示,试件各参数达到目标值的 10% 以内。

表 5 二次优化后试件各项参数及配比
Tab.5 Parameters and ratio of specimen after secondary optimization

配比模型	弹性模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa	耗散能/MJ	弹性能/MJ	岩爆倾向性
1	9.62	0.21	48.23	30.14	53.52	1.76
2	9.87	0.20	49.42	35.66	59.44	1.66
3	12.58	0.22	53.08	28.69	58.16	2.02

6 结论

1)通过相似定理与平衡几何方程,考虑岩爆能量机理得出相似公式,参考灰岩原岩各项参数得到不同埋深灰岩相似模型各项参数。
2)根据各参数敏感性分析,石膏水泥质量比

与重晶石粉含量对模型材料各参数起主要控制作用。
3)通过多元线性回归分析将理论目标参数带入,计算出各埋深相似模型配合比并进行试验,结合敏感性分析,不断对配合比进行调整,使理论目标参数与实际试验参数误差不超过 10%。

参考文献:

[1] 梁鹏,张艳博,田宝柱,等. 巷道岩爆过程能量演化特征实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(4):736-746.

[2] 林礼华. 岩爆相似材料配比试验及敏感性分析[J]. 福建工程学院学报,2022,20(3):213-218.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 侯廷凯,周宗红,余洋先,等. 岩爆相似材料的最优配比试验研究[J]. 中国安全生产科学技术,2018,14(11):114-120.

[6] 张传庆,卢景景,陈珺,等. 岩爆倾向性指标及其相互关系探讨[J]. 岩土力学,2017,38(5):1397-1404.

[7] 董一丰,范俊奇,余永强,等. 硬脆性岩爆模拟材料力学性能及声发射特性研究[J]. 防护工程,2022,44(5):7-12.

[8] 贾宝新,苑文雅,马超义,等. 白砂岩相似材料配比试验及特性分析[J]. 地下空间与工程学报,2022,18(2):503-512.

[9] 李兵. 岩石相似材料的试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2015.

[10] 邹远刚. 不同深度灰岩岩爆倾向性及声发射特性研究[D]. 赣州:江西理工大学,2020.

[11] 李金臻. 白色超高性能混凝土的制备与性能研究[D]. 南昌:南昌大学,2019.

[12] 王志佳,揭基红,李胜民,等. 独龙江隧道岩爆相似材料配比试验研究[J]. 防灾减灾工程学报,2020,40(2):279-285.

(责任编辑:陈雯)