

岩爆相似材料配比试验及敏感性分析

林礼华

(福建省交通规划设计院有限公司,福建 福州 350004)

摘要:深部隧道岩爆已成为影响工程安全施工的重要危险源,室内模拟实验是研究深部岩爆问题的重要手段之一。为研究岩爆倾向性较高的模型,使用石英砂、水泥、石膏等材料进行配置,设计正交试验方案,进行力学试验,依据岩爆倾向性指数及脆性指标,利用试验试件参数进行有限元模拟,对室内试验进行验证。结果表明,配比为石英砂 55%、石膏水泥比 2.5 : 1、松香 4%、含水量 23.3% 的 2 号试件具有比其他两组试件更强的脆性,配比为石英砂 70%、石膏水泥比 1.5 : 1、松香 3.5%、含水量 20.6% 的 16 号试件具有更强的岩爆倾向性。以 2 号试件为例进行数值模拟,两者数据拟合较好,模拟现象与试验现象相吻合,可为岩爆室内试验及模拟提供参考。

关键词:岩爆倾向性;相似材料;配比试验;正交试验

中图分类号: TU451

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2022)03-0213-06

Proportion test and sensitivity analysis of materials similar to rockburst

LIN Lihua

(Fujian Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350004, China)

Abstract: Rockburst in deep tunnels has become an important source of danger that affects the safety of engineering construction. Indoor simulation experiments are one of the important means to study deep rockburst problems. In order to study the model with high rockburst tendency, quartz sand, cement, gypsum and other materials were used for configuration, and an orthogonal test plan was designed, and a mechanical test was carried out. According to the rock burst tendency index and brittleness index, a finite element simulation was carried out by using the test piece parameters to verify the laboratory test. Results show that test piece No.2 with a ratio of 55% quartz sand, a gypsum-cement ratio of 2.5 : 1, 4% rosin and a water content of 23.3% has stronger brittleness than the other two groups of specimens, and test piece No.16 with the ratio of quartz sand is 70%, 1.5 : 1 gypsum-cement ratio, 3.5% rosin, 20.6% water content has a stronger rockburst tendency. Taking the test piece No.2 as an example, the numerical simulation is carried out. The data of the two are well fitted, and the simulated phenomenon is consistent with the experimental phenomenon, which can provide a reference for the rockburst laboratory test and simulation.

Keywords: rockburst tendency; similar materials; proportion test; orthogonal test

地下隧道岩爆研究因工作条件局限,获取原岩难度大,制备深部岩石模拟材料是室内开展原岩岩爆相关研究的必要手段之一。侯廷凯等^[1]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;申艳军等^[2]利用相关材料制作类砂岩的相似模型并对其进行力学研究;王雅雯

等^[3]使用石英砂、重晶石粉等骨料制作铁精砂的相似模型材料;周辉等^[4]利用砂、水泥等作为材料制作了高脆性材料;陈陆望等^[5]利用石英砂、石膏、水泥、水制作了具有岩爆倾向性的模型材料;潘一山等^[6]采用膨润土、石膏-砂材料、环氧树脂等用于岩爆试验,以达到岩爆效果。

目前大多数的研究只是在材料中加入填充材料,使模拟材料抗压强度增大,单纯提高材料的岩爆倾向性,当岩爆发生时原岩也具有高脆性伴随岩石脱落。但有关材料高脆性的研究较少。本研究引入岩爆倾向性指数和脆性评价指标,探索高脆性岩爆模型材料配比方案,为建立原岩与模型材料之间基本力学参数相似以及岩爆倾向性和脆性相似提供参考。

1 岩爆模型材料评价指标

通常发生岩爆的岩石是致密的,影响岩石脆性的主要因素之一是岩性单轴抗压强度与抗拉强度,所以选择抗压抗拉比为脆性系数判断指标,能够较好的判断相似材料脆性程度^[7]。

由于强岩爆材料具有强度峰后曲线突然下降趋势且峰后面积较小的特点,为定量评价岩石的岩爆倾向性,引入基于应力应变曲线的岩爆倾向性指数,通过计算峰值前后面积比,判断材料岩爆倾向性较为准确。

1.1 脆性系数判断

以抗压、抗拉强度比为脆性系数, σ_c 为抗压强度, σ_t 为抗拉强度,当 $\sigma_c/\sigma_t < 14.5$ 时相似材料为强脆性,当 $14.5 \leq \sigma_c/\sigma_t < 26.7$ 时相似材料为中等脆性, $26.7 \leq \sigma_c/\sigma_t \leq 40$ 时相似材料为弱脆性, $\sigma_c/\sigma_t > 40$ 时相似材料无脆性^[8]。

1.2 岩爆倾向性指数

W_{cf} 为基于抗压强度峰值前后面积比的岩爆倾向性判据指数。

$$W_{cf} = F_1 / F_2 \tag{1}$$

式中: F_1 为抗压强度峰值前半区的面积; F_2 为抗压强度峰值后半区的面积,如图 1 所示。当 $W_{cf} > 3.0$ 时相似材料为强岩爆性, $2.0 < W_{cf} \leq 3.0$ 时相似材料为中等岩爆性, $1.0 \leq W_{cf} \leq 2.0$ 时相似材料为弱岩爆性, $W_{cf} < 1.0$ 时相似材料无岩爆性^[9]。

2 相似材料的选择和制备

2.1 相似材料的选择

选用石英砂、水泥、石膏、松香酒精溶液和减水剂为原料,其中用石英砂作为骨料,由 3 种目数分别为 80、200、400 的石英砂各 1/3 混合而成,以减少试件孔隙率。使用水泥和高强石膏粉混合作为胶凝材料,以提高试件强度及脆性。利用松香的高脆特性,加入松香酒精溶液提升材料脆性,按

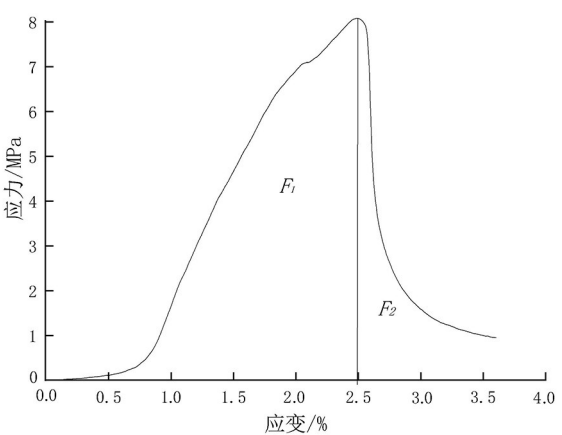


图 1 应力应变曲线图(试件 15#)

Fig.1 Stress-strain curve diagram (test piece 15#)

不同配比制成相似模型材料,在模型材料内加入减水剂,减少原料中自由水的数量,同时加入缓凝剂,延长水与原料作用的时间。

2.2 相似材料的制备

采用尺寸分别为 $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 、 $\Phi 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的模具制备试件^[10], $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 用于单轴抗压试验, $\Phi 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 用于巴西劈裂试验,分别测出试件抗压及抗拉强度。

2.3 相似材料正交设计及方案

设计 4 种影响因素 A 、 B 、 C 、 D , 分别为砂石率(%)、石膏水泥比、松香率(%)、掺水率(%),对每个影响因素设定 4 种水平,如表 1 所示,安排 16 次试验,每次试验制备 6 个试件。正交设计表选用 $L_{16}(4^5)$,如表 1 所示。

表 1 正交试验设计方案				
Tab.1 Orthogonal experiment design scheme				
试验编号	A/%	B	C/%	D/%
1	1(55)	1(3.0;1)	1(3.53)	1(25.0)
2	1	2(2.5;1)	2(3.85)	2(23.3)
3	1	3(2.0;1)	3(4.17)	3(20.6)
4	1	4(1.5;1)	4(4.50)	4(17.9)
5	2(60)	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3(65)	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2

续表

试验编号	A/%	B	C/%	D/%
12	3	4	2	1
13	4(70)	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

3 试验过程与结果分析

通过文献分析及预实验,根据正交配比方案制作相似材料试件,进行力学试验,得到各试件相关参数。根据配比方案称取各类材料,混合均匀后加水快速搅拌,并加入质量占比 0.3%的缓凝剂和减水剂,然后将混合料倒入涂有脱模剂的模具,24 h 后取出试件并养护 28 d。对 16 组试件进行试验得到岩爆倾向性指数 W_{ef} 抗压抗拉比 σ_c/σ_t 及其他力学参数^[11],如表 2 所示。

表 2 不同配比模型材料试验结果

Tab.2 Test results of model materials with different ratios

试验编号	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	抗压抗拉比	弹性模量/GPa	W_{ef}
1	6.8	0.47	14.47	1.98	2.12
2	7.5	0.89	8.20	1.80	2.56
3	4.6	1.05	4.38	1.96	1.60
4	7.1	1.27	5.59	3.04	1.22
5	3.8	0.82	4.63	1.80	0.80
6	7.2	1.56	4.62	3.90	2.23
7	1.2	0.29	4.14	0.57	0.88
8	1.9	0.45	4.22	0.67	0.75
9	4.6	1.20	3.83	1.48	3.57
10	3.1	0.62	5.00	1.78	0.59
11	2.2	0.59	3.73	0.97	1.24
12	2.2	0.56	3.93	1.35	1.10
13	3.2	1.32	2.42	5.40	1.20
14	5.7	0.54	10.56	1.14	1.78
15	8.1	1.82	4.45	3.27	3.43
16	6.9	1.42	4.84	3.55	1.57

3.1 敏感性分析

采用敏感性分析对正交设计试验数据进行处理,根据试验结果,对试件各项力学参数及指标的

影响规律进行总结分析。

3.1.1 抗压强度敏感性分析

由图 2 可知,抗压强度基本随石英砂和松香酒精的含量增大而减小,当石英砂含量为 65%及石膏水泥比为 2.0 : 1.0 时,抗压强度均达到最小。随着含水量降低,适量的水对石膏开始充分发生作用,抗压强度开始呈增大趋势。根据敏感性分析,如表 3 所示,石英砂含量对抗压强度影响最大,松香酒精含量对其影响最小。

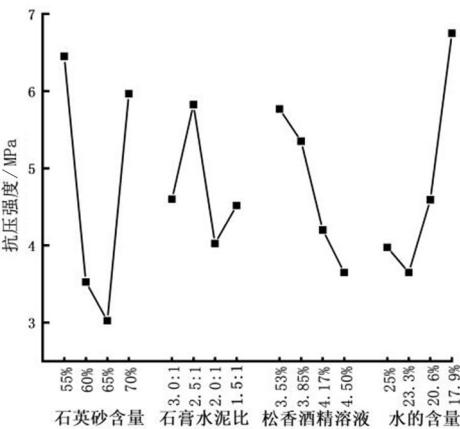


图 2 抗压强度敏感性分析

Fig.2 Sensitivity analysis of compressive strength

表 3 抗压强度极差分析

Tab.3 Range analysis of compressive strength

水平组数	A/%	B	C/%	D/%
1	6.50	4.60	5.76	3.97
2	3.52	5.82	5.35	3.65
3	3.02	4.02	4.20	4.59
4	5.96	4.51	3.65	6.75
极差	3.42	1.80	0.41	2.77

3.1.2 抗拉强度敏感性分析

由图 3 可知,抗拉强度基本随石英砂含量的增大而减小,随含水率减小呈增大趋势。在含量为 65%时,抗拉强度达到最小,当含量为 70%强度反而突然增大,主要原因是石英砂为 3 种不同目数的砂粒配置而成,砂粒间的缝隙被填充。随着松香酒精含量增加,抗拉强度有降低的趋势。如表 4 所示,试件中水占比对抗拉强度有较大影响,石膏水泥含量对抗拉强度影响最小。各影响因素对抗拉强度敏感性从大到小为: $D > A > C > B$, 对于抗拉强度,石英砂含量和水含量起主要控制作用。

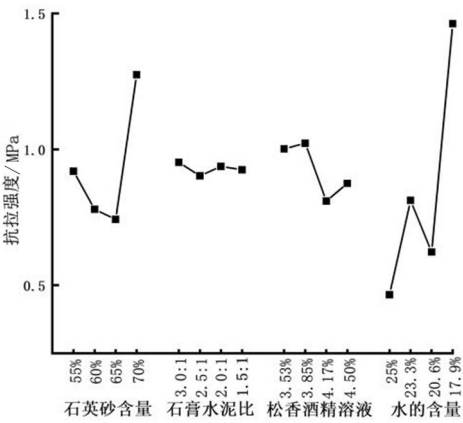


图 3 抗拉强度敏感性分析

Fig.3 Sensitivity analysis of tensile strength

表 4 抗拉强度极差分析

Tab.4 Range analysis of tensile strength

水平组数	A/%	B	C/%	D/%
1	0.92	0.95	1.00	0.46
2	0.78	0.90	1.02	0.81
3	0.74	0.93	0.81	0.62
4	1.27	0.92	0.87	0.53
极差	0.53	0.05	0.21	0.84

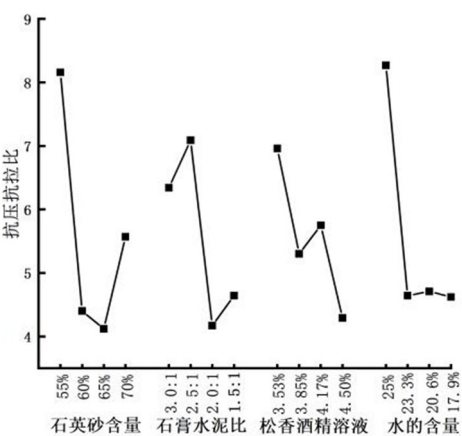


图 4 抗压抗拉比敏感性分析

Fig.4 Sensitivity analysis of the ratio between compressive strength and tensile strength

量均达到最大。当高强石膏含量减少,弹性模量呈线性减少,松香酒精溶液与石膏水泥比趋势大致相同。而含水量对弹性模量影响明显,含水量为 17.9%时达到最大。如表 6 所示,石英砂和含水量对弹性模量影响最大,石膏水泥比含量对其影响最小。

3.1.3 抗压抗拉比敏感性分析

由图 4 可知,随着松香酒精溶液含量增加,材料脆性降低,抗压抗拉比呈逐渐减小趋势。随着高强石膏在配比中不断减少,抗压抗拉比也呈减小趋势,主要原因是石膏减少使材料脆性降低。含水量对材料脆性有重要作用,含水率为 25%时抗压抗拉比最大。如表 5 所示,石英砂和含水量均对材料脆性程度影响较大。

表 5 抗压抗拉比极差分析

Tab.5 Range analysis of the ratios between compressive strength and tensile strength

水平组数	A/%	B	C/%	D/%
1	8.16	6.34	6.96	8.27
2	4.40	7.09	5.30	4.64
3	4.12	4.17	5.75	4.71
4	5.57	4.64	4.29	4.62
极差	4.04	2.92	2.67	3.65

3.1.4 弹性模量敏感性分析

由图 5 可知,随着石英砂含量和含水量增大,弹性模量呈增大趋势,在两者含量最大时,弹性模

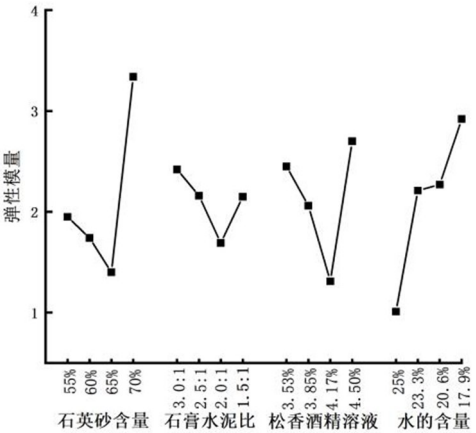


图 5 弹性模量敏感性分析

Fig.5 Sensitivity analysis of elastic modulus

表 6 弹性模量极差分析

Tab.6 Range analysis of elastic modulus

水平组数	A/%	B	C/%	D/%
1	1.95	1.74	1.40	3.34
2	2.42	2.16	1.69	2.15
3	2.45	2.06	1.31	2.70
4	1.01	2.21	2.27	2.92
极差	1.95	0.72	1.39	1.91

3.1.5 岩爆倾向性指数敏感性分析

由图 6 可知,岩爆倾向性指数随石英砂含量增大而增大,石英砂含量为 60%时达到最小。岩爆倾向性随含水量减少而增大,含水量为 17.9%时达到最大。随着松香酒精溶液含量增加,岩爆倾向性几乎呈线性减少。如表 7 所示,石英砂含量对岩爆倾向性指数影响最大,石膏水泥比对其影响最小。各影响因素对岩爆倾向性指数敏感性从大到小为: $A > D > C > B$, 对于岩爆倾向性指数,石英砂和水含量起主要控制作用。

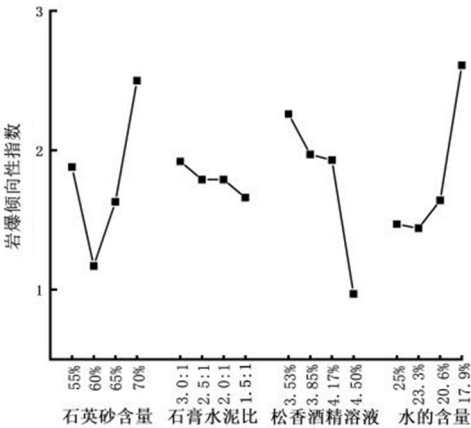


图 6 岩爆倾向性指数敏感性分析

Fig.6 Sensitivity analysis of rock burst tendency index

表 7 岩爆倾向性指数极差分析

Tab.7 Range analysis of rock burst tendency index				
水平组数	A/%	B	C/%	D/%
1	1.88	1.17	1.63	2.50
2	1.92	1.79	1.79	1.66
3	2.26	1.97	1.93	0.97
4	1.47	1.44	1.64	2.61
极差	1.33	0.26	1.28	1.18

3.1.6 相似材料影响因素敏感性方差分析

方差分析法是在试验原始数据分类对比时分析试验数据间差异的方法。在置信水平 $\alpha = 0.1$ 条件下分别对单轴抗压强度、抗拉强度、抗压抗拉比、弹性模量、岩爆倾向性进行方差分析,以确定主要影响因素^[12]。

由表 8 可知,石英砂含量对试件单轴抗压强度影响较显著,含水量对抗拉强度影响较显著,同极差分析结果一致,自由度都为 3。与其他因素相比,石英砂含量对弹性模量的影响最大,松香

酒精溶液含量对岩爆倾向性及材料脆性具有较大影响。

表 8 各因素的方差分析

Tab.8 Variance analysis of each factor					
研究指标	因素	A/%	B	C/%	D/%
单轴抗压强度	方差	35.393	7.030	11.603	23.340
	显著性	3.272 显著	0.392 不显著	0.690 不显著	1.680 不显著
抗拉强度	方差	0.707	0.005	0.129	2.06
	显著性	1.158 不显著	0.006 不显著	0.171 不显著	7.595 显著
抗压抗拉比	方差	37.194	37.402	39.137	25.810
	显著性	1.087 不显著	1.094 不显著	1.160 不显著	0.696 不显著
弹性模量	方差	8.637	1.890	4.845	5.625
	显著性	1.960 不显著	0.310 不显著	0.905 不显著	1.090 不显著
岩爆倾向性	方差	3.688	0.137	3.879	3.702
	显著性	1.220 不显著	0.035 不显著	1.308 不显著	1.230 不显著

4 岩爆模型材料及数值模拟

4.1 模型材料优选

根据岩爆模拟材料所应满足的要求及材料特性,参考岩爆模型材料关系式^[5]:

$$\begin{cases} 6 \leq \sigma_c \leq 12 \\ \sigma_c/\sigma_t \leq 14.5 \\ W_d > 1.5 \\ 18.9\% \leq X_3 \leq 24.3\% \end{cases} \quad (2)$$

2 号试件和 16 号试件满足公式(2),2 号试件的配比为石英砂 55%、石膏水泥比 2.5 : 1、松香 4%、含水量 23.3%;16 号试件配比为石英砂 70%、石膏水泥比 1.5 : 1、松香 3.5%、含水量 20.6%。根据脆性指标抗压抗拉比,2 号试件具有比 16 号试件更强的脆性,根据岩爆倾向性指数,16 号试件具有更强的岩爆倾向性。

4.2 模型材料数值模拟

采用数值模拟方法对优选出的试件验证,以 2 号试件为例,使用试件参数为依据,采用与室内实验相同加载速率,还原室内实验条件,增加数值模拟可靠性。有限元数值模拟参数为密度 1.8

g/cm^3 、弹性模量 1.88 GPa、泊松比 1.17、加载速率 0.1 m/s。如图 7 所示,试验结果与数值模拟结果拟合度较好,原试件峰值抗压强度 7.5 MPa,模拟试件峰值抗压强度 6.8 MPa,通过模拟试件曲线,计算模拟试件岩爆倾向性指数 W_{cf} 为 $2.2 > 1.5$,具有强岩爆性且具有高脆性,模拟试件表面材料大面积脱落,与试验现象吻合,如图 8 所示。

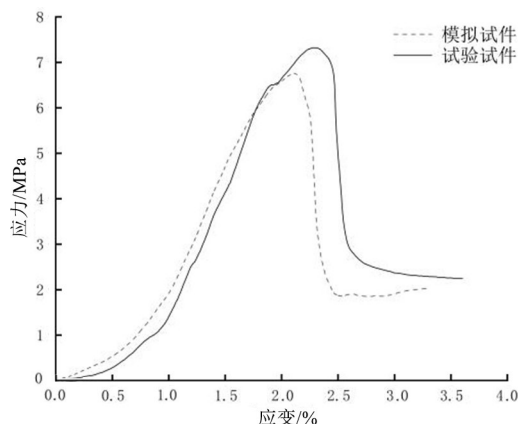


图 7 试验数据与数值模拟拟合

Fig.7 Fitting of test data and numerical simulation

5 结论

本研究引入岩爆倾向性指数和脆性评价指标,采用正交设计法、敏感性分析、方差分析,获得不同配比相似材料的各项力学参数及指标等试验数据,并研究不同设计水平下参数及指标影响及规律。在研究基础上进行多元线性回归分析,引入相似方程即可模拟某种岩石材料,进行相应的室内试验,得出以下结论:

1) 根据敏感性分析和方差分析,模型材料各

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 申艳军,荣腾龙,杨更社,等.类砂岩相似材料配合比方案试验研究[J].水利水电科技进展,2016,36(4):75-79.
- [3] 王雅雯,裴向军,丁梓涵.铁精砂相似材料力学性质试验研究[J].科学技术与工程,2014,14(34):283-288.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 王元汉,李卧东,李启光,等.岩爆预测的模糊数学综合评判方法[J].岩石力学与工程学报,1998,17(5):493-501.
- [8] 李天斌,王湘锋,孟陆波.岩爆的相似材料物理模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S1):2610-2616.
- [9] 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.
- [10] 林贤文,杨杰,臧万军.隧道围岩相似材料配比试验及其敏感性分析[J].福建工程学院学报,2020,18(3):228-234.
- [11] 马超义.温度影响下白砂岩力学特性及岩爆倾向性分析[D].阜新:辽宁工程技术大学,2020.
- [12] 申建军,董瑞,任柏惠,等.基于正交试验的岩层相似材料配比研究[J].煤炭技术,2020,39(7):148-151.

(责任编辑:方素华)

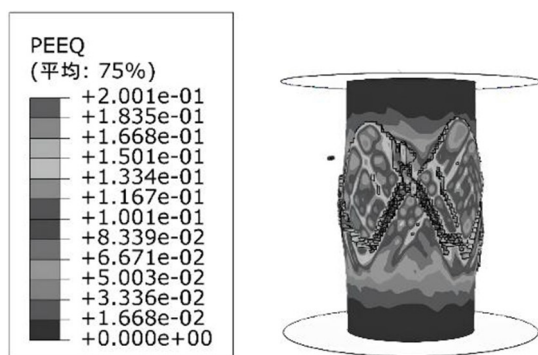


图 8 试件数值模拟(2#)

Fig.8 Numerical simulation(specimen 2#)

参数变化范围大,规律明显。4 种影响因素中,石英砂含量和含水量对模型材料力学性质起主要控制作用。

2) 以岩爆模型材料关系式为选择标准,得到 2 组具有一定岩爆倾向性和脆性特征的配比材料,2 号试件配比为石英砂 55%、石膏水泥比 2.5:1、松香 4%、含水量 23.3%,16 号试件配比为石英砂 70%、石膏水泥比 1.5:1、松香 3.5%、含水量 20.6%。可满足岩爆物理模型试验要求。

3) 为配制高脆性的岩爆模型材料,石英砂含量应控制在 55% 左右,含水量控制在 20% 左右,并合理调节石膏水泥比例和松香酒精溶液含量。

4) 以 2 号试件为例进行有限元数值模拟,使用 2 号试件基本材料参数及尺寸对模型进行设置,数值模拟数据与试验数据拟合较好,模拟试件表面材料大面积脱落具有高脆性及强岩爆倾向性,与 2 号试件试验现象吻合,试验结果具有可靠性。