

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.02.018

独龙江隧道岩爆相似材料配比试验研究*

王志佳¹, 揭基红², 李胜民¹, 尹天天¹, 郭洞斌²

(1. 海南大学土木建筑工程学院, 海南 海口 570000; 2. 云南第一公路桥梁工程有限公司, 云南 昆明 650000)

摘要:独龙江隧道处于岩爆高发地段,隧道结构设计前需开展隧道岩爆模型试验,以便精准对岩爆程度进行评估。基于上述现状,开展隧道岩爆模型试验相似材料的研制工作,对隧道围岩岩爆成灾机理进行分析,析出了岩爆现象的控制参数:单轴抗压强度、抗压抗拉强度比值、冲击能量指数,选取石英砂、水泥、水、甘油作为隧道岩爆模型试验相似材料的原材料;采用以4种原材料含量为4个因素,以同一原材料的4个递变质量比为4个水平的正交试验法,展开对16组不同质量比的相似材料试件进行试验,测得每组试件的控制参数值,最终通过极差及方差析出重要影响因子:单轴抗压强度主要影响因子为石英砂含量,且呈负相关关系;抗压抗拉强度比值的主要影响因子为水泥含量,且呈正相关关系;冲击能量指数主要影响因子为水泥与水的含量,且均呈负相关关系。由以上试验结论分析得到独龙江隧道岩爆相似材料的最终配比,即石英砂、水泥、水、甘油质量比为75:35:20:1。

关键词:岩爆;模型试验;相似材料;正交试验;质量比;影响因子

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)02-0279-07

Study on Similar Material Ratio for Rock Burst Test in Dulongjiang Tunnel

WANG Zhijia¹, JIE Jihong², LI Shengmin¹, YIN Tiantian¹, GUO Jiongbin²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570000, China;

2. Yunnan First Highway Bridge Engineering Co., Ltd, Kunming 650000, China)

Abstract: The primary problem of Dulongjiang tunnel is the high incidence of rock burst. This paper proposes a scheme of rock burst model test before the design of tunnel structure, so as to accurately evaluate the degree of rock burst. Based on the above situation, the research on similar materials for rock burst model test of the tunnel was carried out, the mechanism of rock burst disaster of the tunnel surrounding rock was analyzed, and the control parameters of rock burst phenomenon were obtained as follows: the uniaxial compressive strength, the ratio of compressive strength to tensile strength and the impact energy index. Quartz sand, cement, water and glycerin were selected as the raw materials for similar materials model in rock burst test of the tunnel. Considering the content of the four kinds of raw materials as four factors, the orthogonal test method with the four progressive mass ratios as four levels for the same raw materials was used in carrying out on 16 groups similar materials tests. The

* 收稿日期:2018-07-01;修回日期:2019-03-06

基金项目:海南省自然科学基金项目(518QN214)、国家自然科学基金项目(51708163)、海南大学科研启动基金项目(KYQD(ZR)1722)资助

作者简介:王志佳(1987-),男,博士,讲师。主要从事模型试验相似材料研发方面的研究。Email:993041@hainanu.edu.cn

通讯作者:揭基红(1974-),男,高级工程师。主要从事隧道施工技术方面的研究。Email:517057806@qq.com

corresponding control parameters were measured. Finally, the important influencing factors were determined through the range and variance analyses. Results show that the main influencing factor on uniaxial compressive strength is the content of quartz sand, giving a negative correlation. The main influencing factor on the ratio of compressive strength to tensile strength is the cement content, showing a positive correlation. The main influencing factor on the impact energy index is the cement and water content, illustrating a negative correlation. Based on the analysis of the above test results, the final recommended mass ratio of similar materials for Dulongjiang tunnel rock burst test is 75:35:20:1.

Keywords: rock burst; model test; similar material; orthogonal test; mass ratio; influence factor

引言

岩爆通常发生在硬脆岩体密集分布的高地应力地区,岩体开挖时,需要改变原始岩体的空间结构,这就使得该岩体周围的围岩强度无法适应该应力分布下的集中应力,而导致岩体突然发生失稳破坏^[1]。岩爆灾害会直接对工程设备、勘察施工人员造成安全威胁,引发重大工程灾害,是地下工程和隧道工程亟待解决的难题之一。

模型试验是研究岩爆灾害的重要手段,其核心技术环节在于岩爆相似材料的研究,前人对岩爆相似材料研究已取得一定成果。李连贵等^[2]开展不同加载比、几何特性、开孔方式的模型试验,研究岩爆发生机制;陈陆望等^[3]利用正交试验,采用石英砂、石膏、水泥、水、甘油和明胶等材料制作岩爆相似材料,提出合适的岩爆材料配比方案;李天斌等^[4-5]根据正交试验,研究不同配比相似材料的力学性质,完成了岩爆相似材料的配制工作,配合自研隧道开挖装置,开展隧道岩爆物理模型试验;周辉等^[6]通过引入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,评价了模型材料的岩爆倾向性和脆性大小,提出具有低强度、高脆性的岩爆模型材料配比方案。

众多学者对岩爆相似材料配制方法开展了深入研究,得到了大量宝贵经验,有助于进一步了解岩爆发生的机制,而在独龙江隧道现场,则缺少针对该区域的岩爆特点研究成果。综上所述,本文将以前人研究方法为基础,以高黎贡山独龙江隧道的燕山晚期花岗闪长岩为研究对象,选取石英砂、水泥、水、甘油作为隧道岩爆模型试验相似材料的原材料,通过正交试验设计原理选取不同的质量比组合,进行相似材料配比试验,以期得到能准确模拟独龙江隧道岩爆相似特性的最佳相似材料配比。

1 相似常数

1.1 控制参数

岩爆模型的相似材料需遵循原型物理量与模型物理量的相似原则。由此将下标p(prototype)和m(model)分别表示原型和模型的相应物理量。通过对岩爆的机理进行分析可知岩爆现象的控制参数为:单轴抗压强度 σ_p 、抗压抗拉强度比 σ_p/σ_{tp} 和冲击能量指数 W_{bp} ;则相似材料的相应参数分别为 σ_m 、 σ_m/σ_{tm} 和 W_{bm} ^[7]。

1.2 相似比尺

本次模型试验选定尺寸相似比 $C_L=10$ 、密度相似比 $C_\rho=1$ 和冲击加速度相似比 $C_a=1$ 。根据已知参量的相似比推导计算单轴抗压强度 σ_p 、抗压抗拉强度比 σ_p/σ_{tp} 和冲击能量指数 W_{bp} 的相似比。

岩爆释放的应力为:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

式中, σ 为应力; F 为受力; A 为面积。

因此:

$$\sigma_p = \frac{F_p}{A_p}, \sigma_m = \frac{F_m}{A_m} \quad (2)$$

单轴抗压强度应力比例为:

$$C_\sigma = \frac{\sigma_p}{\sigma_m} \quad (3)$$

式中, C_σ 为应力相似常数。

把式(3)两边同时乘以 σ_m ,代入式(2),得:

$$\sigma_m \cdot C_\sigma = \frac{F_m}{A_m} \cdot \left(\frac{F_p}{A_p} \cdot \frac{A_m}{F_m} \right) = \frac{F_p \cdot C_F}{A_m \cdot C_A} \quad (4)$$

式中, C_F 为作用力相似比; C_A 为面积相似比。

式(4)两边同时除以 C_σ ,得:

$$\sigma_m = \frac{C_F}{C_A \cdot C_\sigma} \cdot \frac{F_m}{A_m} \quad (5)$$

根据式(2)和(5)可得:

$$\frac{C_F}{C_A \cdot C_\sigma} = 1 \quad (6)$$

即:

$$C_\sigma = \frac{C_F}{C_A} \quad (7)$$

同理可得:

$$C_F = C_\rho \cdot C_L^3 \cdot C_a = 1000 \quad (8)$$

$$C_A = C_L^2 = 100 \quad (9)$$

由式(8)和(9)得:

$$C_\sigma = 10 \quad (10)$$

由上述的推论方法可同理推得:

$$C_{\frac{\sigma_c}{\sigma_t}} = \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_{tp}} \Big/ \frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{tm}} = 1 \quad (11)$$

$$C_{W_B} = W_{BP} / W_{Bm} = 1 \quad (12)$$

式中, C_{σ_c/σ_t} 为抗拉抗压强度比的相似比; C_{W_B} 为冲击能量指数相似比。

1.3 原型概况

独龙江公路改建工程高黎贡山隧道位于云南省怒江傈僳族自治州西北边陲。隧道所在区上覆土层为第四系冰渍堆积碎石土, 下部基岩以燕山晚期花岗岩闪长岩为主, 由表1可见隧道及围岩参数^[8]。

表1 独龙江隧道花岗岩力学试验指标

Table 1 Test indexes of granite mechanics for Dulongjiang Tunnel

样品编号	密度 ρ / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	单轴抗压强度 σ_c / MPa	抗拉强度 σ_t / MPa	弹性模量 E / GPa	泊松比
E057	2.69	125.37	7.74	44.8	0.27
E063	2.63	96.16	3.77	25.5	0.26
E064	2.65	70.68	4.19	27.6	0.25
平均参数	2.66	97.40	5.23	32.6	0.26

独龙江隧道的样品岩性在一定程度上决定了岩爆发生与否及其爆发强度^[9]。而岩性的主要指标包括单轴抗压强度 σ_c 、抗压抗拉强度比 σ_c/σ_t 、冲击能量指数 W_B , 而其中最重要的因素是抗压抗拉强度比。若 σ_c/σ_t 较小时, 则就更易发生岩爆且岩爆强度更大。反之, 若 σ_c/σ_t 较大时, 发生岩爆机率更小且烈度也较小^[7]。冲击能量指数定义为:

$$W_B = \frac{W_P}{W_T} \quad (13)$$

式中, W_P 为岩石受到单轴压缩形变过程中上升段的

段下面积; W_T 为岩石受到单轴压缩形变过程中下降段的段下面积。通常采用如下关系预测岩体是否有岩爆的风险^[10]: 当冲击能量指数小于1.5时, 该岩体无岩爆倾向, 当冲击能量指数超过3.0时, 该岩体有强烈岩爆倾向, 当冲击能量指数为1.5~3.0时, 该岩体有中等岩爆倾向。

最后根据独龙江采集的样品做成小模型试件进行测试试验, 根据表2中抗压抗拉强度比 σ_c/σ_t 的均值大小进行分析及判断, 可总结出该试验样品具有中等岩爆的倾向, 则相应室内试验材料配比则要求达到中等岩爆程度^[11]。由冲击能量指数 W_B 的均值可以判断出该试验样品也处于中等岩爆倾向。同上, 室内材料配比也应满足独龙江该处对冲击能量指数要求。

表2 独龙江样品试验结果

Table 2 Results of sample tests of Dulongjiang Tunnel

样品编号	密度 ρ / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	抗压抗拉强度比 σ_c/σ_t	冲击能量指数 W_B
A ₁	2.69	16.20	1.86
B ₁	2.63	25.51	1.53
C ₁	2.65	16.89	1.87
平均参数	2.66	19.53	1.75

1.4 模型参数

根据表1和表2的数据通过相似比尺理论计算得到表3。

表3 模型材料和原型材料的各项参数

Table 3 Parameters of model material and prototype material

材料类型	泊松比	单轴抗压强度 σ_c / MPa	冲击能量指数 W_B	抗压抗拉强度比 (σ_c/σ_t)
模型材料	0.21	9.74	1.75	19.53
原型材料	0.21	97.4	1.75	19.53

2 正交试验设计

2.1 岩爆相似材料的选取原则

(1) 应满足模型材料与独龙江隧道围岩物理力学性能的相似。

(2) 应具有脆性特征, 较好的线性应力应变关

系,较小的抗压抗拉强度比及较大的弹性能量指数。

(3)相似材料的声发射强度、频率、累计数及能量特征应与独龙江隧道岩石相似,具有突发性破坏的特征。

(4)应满足施工工艺的要求,凝固时间适宜,易于成型,成本较低,力学指标稳定。

2.2 本次试验选择的相似材料

试验选取的相似材料基本上有两类,一类是骨料,如砂、碎石等;另一类是胶凝材料,如石膏、水泥等。此外,为改进相似材料的性能及满足相似材料制作工艺要求,还需要掺入其他材料,如减水剂、缓凝剂。本试验选取石英砂为骨料,水泥为胶凝材料,石英砂相比普通砂而言,其颗粒级配良好,淤泥等杂质含量较低,且与胶凝材料结合良好。

2.3 设计正交试验

本次相似材料配比试验采用正交试验^[12]设计方法。在进行相似材料配比时,以石英砂含量 X_1 、水泥含量 X_2 、水含量 X_3 、甘油含量 X_4 这4项指标作为影响因子。以单轴抗压强度 σ_c 、抗压抗拉强度比 σ_c/σ_t 与冲击能量指数 W_B 为该试验考核指标。最终通过试验所得的结果进行数据统计与分析,得到相应材料配比对以上3个参数的影响关系。从而经过分析与筛选得到独龙江模拟试验的所需材料较精确配比,以达到满足模型中物理材料与原型相似的目的。

由于在不同配比中得到的样品最终质量一样,本试验提出了质量比配比的概念,一个质量比即试验样品总质量与总质量比份额的比值。本试验样品质量定为1 000 g,且质量比份额分别为50:29.5:30:0.5,则总质量比份额为110,所以一个质量比即为1 000/110。为确保试验试件与花岗岩的相似性,根据以往花岗岩相似试件配比的经验^[11]确定该试件的初步配比,石英砂含量采用10个质量比为一个水平区间,含水量采用5个质量比为一个水平区间,甘油含量采用0.5个质量比为一个水平区间。最后水泥含量试验的质量比取值水平区间随前3个因素变化而变化。

由此确定其4个因素的4个试验水平,4种影响因素水平值见表4。对于4个因素4个水平的试验,则需要安排16次试验,即正交表可以表示为 L_{16}

(4^4),并将所测得 σ_c 、 σ_c/σ_t 和 W_B 的值一同计入正交表内,见表5。

表4 4种影响因素水平值

Table 4 Horizontal value of four factors				
水平值	X_1	X_2	X_3	X_4
1	40	29.5	30	0.5
2	50	24	25	1
3	60	18.5	20	1.5
4	70	13	15	2



图1 模型试件

Fig.1 Model specimen



图2 岩石三轴试验仪

Fig.2 Rock triaxial testing apparatus

3 试验结果分析

3.1 单轴抗压强度

本试验采用直接压坏小型试件的方法,测得相应模型试件的数据。通过对表5的数据整理得到各因素对单轴抗压强度的影响。从中分析得到模型试件的单轴抗压强度随石英砂含量 X_1 的增大而大幅减小,并由表6中 K_1 计算所得平均值,通过分析平均值的极差及对单轴抗压强度的影响因子的主次进行排序: $X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3 \rightarrow X_4$,可看出石英砂含量为最主要影响因子,而水泥次之。

表5 岩爆模型相似材料配比 $L_{16}(4^4)$ 正交试验及结果

Table 5 $L_{16}(4^4)$ orthogonal test and results of similar material ratio in rock burst model

序号	1	2	3	4	σ_c /MPa	σ_c/σ_t	W_B
	X_1	X_2	X_3	X_4			
1	1(40)	1(29.5)	1(30)	1(0.5)	15.83	17.17	1.12
2	1	2(24)	2(25)	2(1)	18.45	15.05	1.59
3	1	3(18.5)	3(20)	3(1.5)	19.84	13.55	1.97
4	1	4(13)	4(15)	4(2)	16.34	10.95	2.22
5	2(50)	1	2	3	15.98	13.93	1.38
6	2	2	3	4	17.95	11.62	1.37
7	2	3	4	1	16.52	11.57	2.99
8	2	4	1	2	13.59	10.05	2.7
9	3(60)	1	3	4	12.23	12.64	2.21
10	3	2	4	1	17.17	12.44	1.47
11	3	3	1	2	15.72	10.84	1.16
12	3	4	2	3	10.36	12.98	1.71
13	4(70)	1	4	2	16.79	13.42	1.31
14	4	2	1	3	14.20	11.02	2.59
15	4	3	2	4	6.24	11.09	1.42
16	4	4	3	1	9	12.22	1.29

由此可得在配制高抗压强度、低内摩擦角材料试件时,不宜使用过多的骨料材料。归纳数据得出独龙江模型试验的石英砂组分范围应在70~75个质量比。

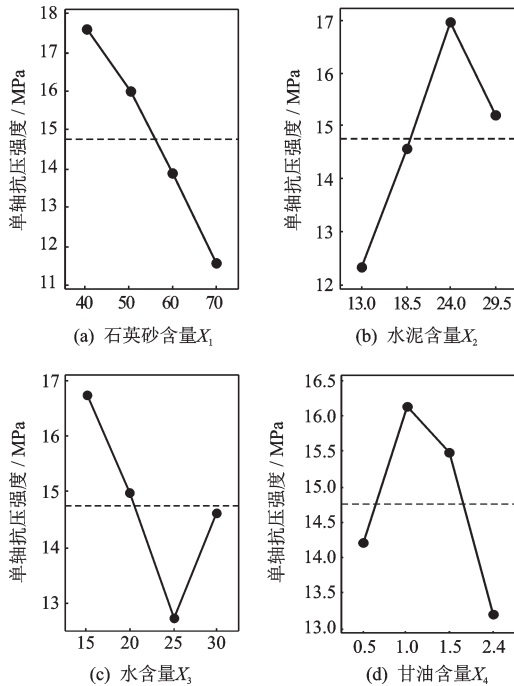


图3 各因素对单轴抗压强度的影响

Fig.3 Influence of various factors on uniaxial compressive strength

表6 单轴抗压强度正交试验设计分析

Table 6 Orthogonal experimental design analysis on uniaxial compressive strength

平均值	影响因素			
	X_1	X_2	X_3	X_4
\bar{K}_1	17.615	15.208	14.835	14.630
\bar{K}_2	16.010	16.853	12.758	16.138
\bar{K}_3	13.870	14.580	14.755	15.095
\bar{K}_4	11.558	12.323	16.705	13.190
极差R	6.057	4.530	3.95	2.948
排序	1	2	3	4

3.2 抗压抗拉强度比

通过对模型小试件的抗压抗拉强度比值的正交分析,得到图4各因素对抗压抗拉强度比的影响。

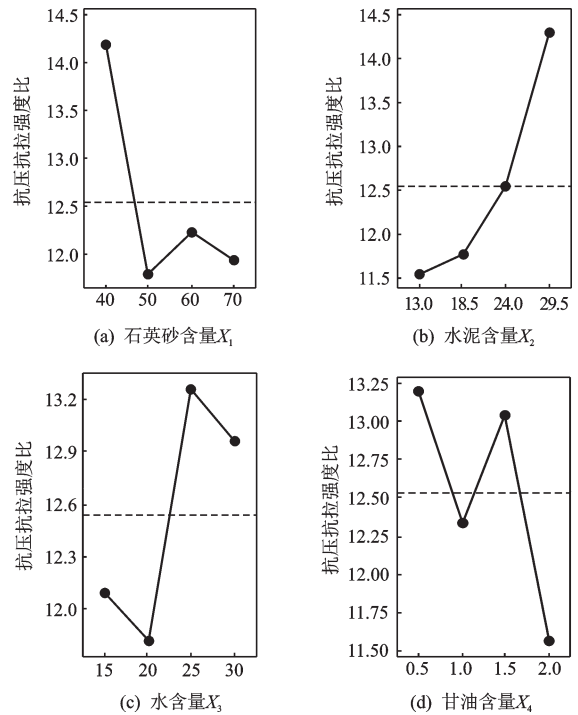


图4 各因素对抗压抗拉强度比的影响

Fig.4 The influence of various factors on the ratio of compressive strength to tensile strength

从图中可以看出模型试件的抗压抗拉强度比值随水泥含量 X_2 的增大而增大,由表7中计算所得平均值 K_1 ,可以将各因素对抗压抗拉强度的影响因子进行排序: $X_2 \rightarrow X_1 \rightarrow X_4 \rightarrow X_3$ 。这个关系说明,对于抗压抗拉强度比而言水泥含量为主要影响因子。由此可得在配制高抗压强度、低抗拉强度的材料试件时,应使用较多的凝胶材料。最后由以上数据进行

归纳总结可得出独龙江隧道岩爆模型试验的水泥组分范围应在30~35个质量比。

表7 抗压抗拉强度比的正交试验设计分析结果

Table 7 Analysis results of orthogonal test design for compression tensile strength ratio

平均值	影响因素			
	X_1	X_2	X_3	X_4
\bar{K}_1	14.180	14.290	12.270	13.350
\bar{K}_2	11.793	12.533	13.263	12.340
\bar{K}_3	12.225	11.763	12.508	12.820
\bar{K}_4	11.938	11.550	12.095	11.575
极差 R	2.387	2.740	1.168	1.775
排序	2	1	4	3

3.3 冲击能量指数

通过对模型小试件的冲击能量指数正交分析,得到图5各因素对冲击能量指数的影响。从图中可

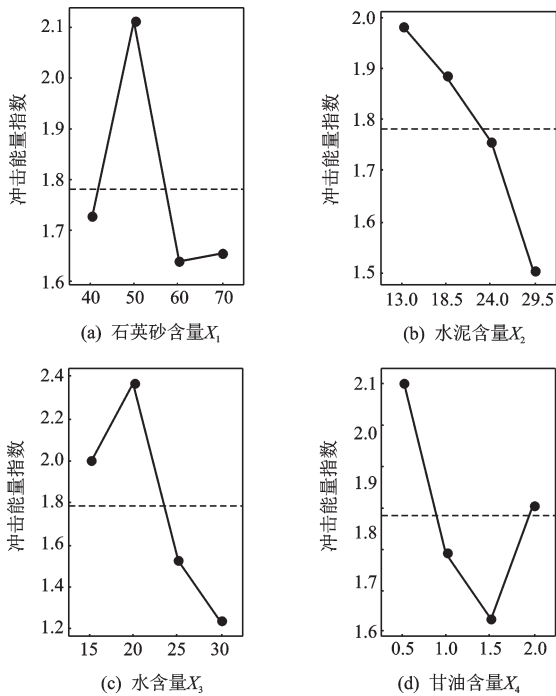


图5 各因素对冲击能量指数的影响

Fig.5 Influence of various factors on impact energy index

以看出模型试件的冲击能量指数随水泥含量 X_2 、含水量 X_3 的增大而减小,而其他影响因素和冲击能量指数的关系并不明显。由表8中计算所得平均值 K_1 ,同理通过各平均值算出相应极差并对图像进行分析和排序,可以将各因素对冲击能量指数的影响

效应进行排序为: $X_2 \rightarrow X_3 \rightarrow X_1 \rightarrow X_4$ 。因此就冲击能量指数而言水泥的含量与水的含量对其起主要作用。

表8 冲击能量指数正交试验设计极差分析结果

Table 8 Results of range analysis for orthogonal design of impact energy index

平均值	影响因素			
	X_1	X_2	X_3	X_4
\bar{K}_1	1.752	1.505	1.893	1.718
\bar{K}_2	2.110	1.755	1.525	1.690
\bar{K}_3	1.638	1.885	1.710	1.913
\bar{K}_4	1.653	1.980	1.998	1.805
极差 R	0.472	0.475	0.473	0.223
排序	3	1	2	4

就抗压抗拉强度比试验结论——水泥30~35个质量比与以上试验规律基本吻合,因此对于水泥的含量仍然选择抗压抗拉强度试验所得质量比区间作为独龙江隧道岩爆胶凝相似材料的配比,就水的含量而言,根据以上的规律得出岩爆模型试验材料的水的配比为20~25个质量比。甘油则在0.5~2个质量比都可作为岩爆模型的相似材料的配比。

4 结论

以独龙江隧道岩爆特性的研究为背景,选取了石英砂、水泥、水、甘油作为相似材料的成分,利用正交试验法,开展了岩爆相似材料的配制工作,通过对正交试验结果进行研究,将各因素所对应水平值变化对相应参数的影响规律进行分析,得到以下结论:

(1) 单轴抗压强度主要受石英砂掺入质量比的影响,抗压抗拉强度比值主要受水泥掺入质量比的影响,冲击能量指数主要受水泥及水的掺入比影响。由以上试验结论分析得到高黎贡山岩爆相似材料的最终推荐质量比配比为75:35:20:1。

(2) 本次试验考虑的单轴抗压强度 σ_c 、抗压抗拉强度比 σ_c/σ_t 、冲击能量指数 W_B 只是岩爆相似材料的主要设计参数,但为了使岩爆特性严格满足相似要求,还需对岩石其他物理力学指标及其岩体工程力学的特征进行分析,一同考虑到模型试验中。

参考文献:

- [1] 徐则民,黄润秋,范柱国,等.长大隧道岩爆灾害研究进展[J].自然灾害学报,2004,13(2):16-24.
Xu Z M, Huang R Q, Fan Zh G, et al. Progress in research on rock burst hazard of long tunnel with large section[J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(2):16-24.(in Chinese)
- [2] 李连贵,徐文胜,许迎年,等.岩爆模拟材料研制及模拟试验分析[J].华中科技大学学报,2001,(6):80-82.
Li L G, Xu W Sh, Xu Y N, et al. Development of rockburst simulation materials and simulation test analysis [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2001, (6): 80-82.(in Chinese)
- [3] 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(增2):1 050-1 054.
Chen LW, Bai Sh W. Proportioning test study on similar material of rockburst tendency of brittle rockmass [J]. Rock & Soil Mechanics, 2006, 27(Sup 2):1 050-1 054.(in Chinese)
- [4] 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(增1):2 610-2 616.
Li T B, Wang X F, Meng L B. Study on physical simulation of similar materials in rockburst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Sup 1): 2 610-2 616.(in Chinese)
- [5] 李天斌,钟雨奕,潘皇宋,等.高地应力隧道岩爆破坏特征物理模型试验研究[J].地下空间与工程学报,2019,15(6):1 639-1 645.(in Chinese)
Li T B, Zhong Y Y, Pan H S, et al. Physical model test of rockburst failure characteristics of high in-situ tunnels [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(6): 1 639-1 645.
- [6] 周 辉,陈 珺,张传庆,等.低强高脆岩爆模型材料配比试验[J].岩土力学,2019,40(6):2 039-2 049.
Zhou H, Chen J, Zhang Ch Q, et al. Experimental study on material proportion of low-strength and high-brittle rockburst model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(6): 2 039-2 049.(in Chinese)
- [7] 王元汉,李卧东.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.
Wang Y H, Li W D. Method of fuzzy comprehensive evaluations for rockburst prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 1998, 17(5): 493-501.(in Chinese)
- [8] 陆日超.高黎贡山隧道岩爆声发射监测与数值分析[D].重庆大学,2014.
Lu R Ch. Rockburst acoustic emission monitoring and numerical analysis of Gaoligongshan tunnel [D]. Chongqing University, 2014.(in Chinese)
- [9] Tan X J, Chen W Zh, Yang J P, et al. Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze-thaw cycle [J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 68(3): 130-138.
- [10] 费鸿禄,徐小荷,唐春安.岩爆模拟材料特性分析[J].阜新矿业学院学报(自然科学版),1994,13(2):19-24.
Fei H L, Xu X H, Tang Ch A. Study of complete load deformation curve of simulating materials for rockbursts [J]. Journal of Liaoning University (Natural Science Edition), 1994, 13(2):19-24. (in Chinese)
- [11] 徐林生,王兰生.二郎山公路隧道岩爆发生规律与岩爆预测研究[J].岩土工程学报.1999,21(5):569-572.
Xu L Sh, Wang L Sh. Study on the laws of rockburst and its forecasting in the tunnel of Erlang Mountain road [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(5):569-572. (in Chinese)
- [12] 袁宗盼,陈新民,袁 媛等.地质力学模型相似材料配比的正交试验研究[J].防灾减灾工程学报.2014,34(2):197-202.
Yuan Z P, Chen X M, Yuan Y, et al. Study on ratio of similar material of geomechanical model based on orthogonal test [J]. Journal of Disaster Prevention & Mitigation Engineering, 2014, 34(2):197-202.(in Chinese)

(本文责编:周小潭)