

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201910035



# 隧道爆破力学模型相似材料 配比的正交试验

宫嘉辰<sup>1</sup>, 陈士海<sup>1,2</sup>

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 以砂岩作为模拟对象,研究满足隧道爆破力学模型试验要求的相似材料配比问题.基于正交试验法,选取石英砂、重晶石粉、石膏、水泥和水为相似材料,设置以石英砂/固体、水泥/石膏、重晶石粉/(重晶石粉+石英砂)的质量比为 3 个因素,每个因素 3 个水平,共 9 组配比的正交试验方案.通过室内试验,得到相似材料的密度、单轴抗压强度、弹性模量和声波波速的实测数据.试验结果表明:相似材料的物理力学参数分布范围较广,可满足不同隧道模型试验对相似材料的配比要求.利用极差敏感分析法分析各因素对相似材料参数的敏感性,并通过各因素对相似材料参数影响的直观分析图,分析各因素对相似材料物理力学参数的影响规律.对试验数据进行多元线性回归分析和室内试验,发现最优配合比下的相似材料与原型砂岩的单轴应力-应变曲线具有相似的脆性破坏特征;相似材料物理力学参数的设计值和实测值误差较小.

**关键词:** 砂岩;隧道爆破力学模型;相似材料;正交试验法;极差敏感分析法;直观分析图;多元线性回归分析;最优配合比

中图分类号: TU 458      文献标志码: A      文章编号: 1000-5013(2020)02-0164-07

## Orthogonal Test of Similar Materials Ratio in Tunnel Blasting Mechanical Model

GONG Jiachen<sup>1</sup>, CHEN Shihai<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Research Center for Tunneling and Urban Underground Space Engineering,  
Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Sandstone was used as the simulation object to study the ratio of similar materials that met the requirements of the tunnel blasting mechanical model test. Based on the orthogonal test method, quartz sand, barite powder, gypsum, cement, and water were selected as similar materials, and the mass ratio of quartz sand/solid, cement/gypsum, barite powder/(barite powder + quartz sand) were set as 3 factors, 3 levels of each factor, a total of 9 groups of orthogonal test schemes. Through laboratory tests, the data of density, uniaxial compressive strength, elastic modulus, and acoustic wave velocity of similar materials were measured. The test results show that the distribution range of physical and mechanical parameters of similar materials is wide, which can meet the requirements for the ratio of similar materials in different tunnel model tests. The sensitivity of each factor to similar material parameters is analyzed using range sensitivity analysis, and the in-

fluence of each factor on the physical and mechanical parameters of similar materials is analyzed through the visual analysis of the influence of each factor on the similar material parameters. Multivariate linear regression analysis and laboratory tests were performed on the test data. It is found that the uniaxial stress-strain curves of similar materials at optimal mix ratios and prototype sandstone has similar brittle failure characteristics. The difference between design and measure values of the physical and mechanical parameters of the material is small.

**Keywords:** sandstone; tunnel blasting mechanical model; similar materials; orthogonal test method; range sensitivity analysis method; visual analysis chart; multiple linear regression analysis; optimal mix ratio

近年来,由于工程地质条件和技术条件等限制,采用隧道爆破力学模型试验来研究实际隧道爆破工程问题得到广泛应用.相似材料的选取、配比,以及规范的试验操作步骤对相似材料的物理力学性质具有重要的影响,且对爆破力学模型试验的成功与否起着决定性作用.众多学者对地质力学模型相似材料的配比问题进行了相关研究. Lin 等<sup>[1]</sup>、吕祥锋等<sup>[2]</sup>依托工程实例和模型试验,进行相似材料配比试验.李丹<sup>[3]</sup>研制了可用于模拟坚硬岩体和脆性岩体的相似材料.张树川等<sup>[4]</sup>基于相似理论,研究相似材料的物理特性、静力学特性和动力学特性等.马永芹<sup>[5]</sup>通过相似准则建立模型爆破试验相似材料及相似炸药的联系.常胜涛<sup>[6]</sup>、刘俊轩<sup>[7]</sup>、郑志涛<sup>[8]</sup>从相似材料的静力学相似和动力学相似进行分析研究.张静等<sup>[9]</sup>利用正交试验设计法,研究模型试验中岩质相似材料的选择和配比问题.董金玉等<sup>[10]</sup>通过正交试验设计,采用极差分析法分析以铁粉、石英砂、重晶石粉、松香、酒精和石膏配比岩体相似材料.詹志发等<sup>[11]</sup>、耿晓阳等<sup>[12]</sup>基于正交试验法,通过极差和方差敏感性分析法,分别研究岩质相似材料和边坡模型试验相似材料的配比问题.申艳军等<sup>[13]</sup>、孙海涛等<sup>[14]</sup>、史小萌等<sup>[15]</sup>基于正交设计试验方法,分别研究配置模拟煤层岩体的相似材料、煤与瓦斯突出相似材料和类砂岩的相似材料,并通过多元线性回归方程,推算得到相似材料最优配合比.

本文以砂岩为模拟对象,基于正交试验法,从相似材料静力学特性和动力学特性进行研究,配置具有高密度、低强度、低弹模、低波速和脆性等性能的隧道爆破力学模型相似材料,并通过多元线性回归方程,为高地应力下隧道频繁爆破力学模型试验选取相似材料最优配合比.

# 1 模型试验相似比的确定

建立隧道爆破力学模型试验相似判据的理论基础是相似三定理,主要考虑静力学相似和动力学相似两部分.

## 1.1 静力学相似

隧道爆破力学模型静力学相似包括几何相似和材料的物理特性相似.几何相似考虑模型的几何尺寸( $l$ );材料的物理学特性相似考虑密度( $\rho$ )、应力( $\sigma$ )、泊松比( $\mu$ )、应变( $\epsilon$ )、弹性模量( $E_c$ )、位移( $u$ )、内摩擦角( $\varphi$ )、静摩擦系数( $\mu_0$ )等参数相似.根据量纲分析法,模型试验中无量纲的物理量包括应变、内摩擦角、泊松比、静摩擦系数等,无量纲的物理量的相似系数都为 1,即  $C_\epsilon=C_\varphi=C_\mu=C_{\mu_0}=1$ .

原型隧洞直径为 5 m,由于条件限制,隧道爆破力学模型尺寸(宽 $\times$ 高 $\times$ 长)取 1.5 m $\times$ 1.5 m $\times$ 2.0 m,隧道直径取 2 cm,确定几何相似系数( $C_l$ ),即  $C_l=l_p/l_m=25$ ,下标 p 表示原型,m 表示模型.根据量纲分析法,几何相似系数和位移相似系数量纲相同,确定位移相似系数( $C_u$ ),即  $C_u=u_p/u_m=C_l=25$ .

原型砂岩的单轴抗压强度( $f_c$ )为 39.43 MPa,弹性模量( $E_c$ )为 14.2 GPa,密度( $\rho$ )为 2.39 g $\cdot$ cm<sup>-3</sup>,声波波速( $v_p$ )为 2 560 m $\cdot$ s<sup>-1</sup>.模型试验加压系统的加载极限值为 3 MPa,考虑到应力相似比取值的合理性、隧道开挖方便和围岩是否产生爆破裂缝损伤效应等试验现实问题,选取相似材料单轴抗压强度设计值的取值范围为 1.0~1.5 MPa,确定应力相似系数  $C_\sigma=\sigma_p/\sigma_m=30$ ,弹性模量相似系数  $C_{E_c}=E_p/E_m=C_\sigma/C_\epsilon=C_\sigma=30$ .根据应力相似比,求解得到单轴抗压强度设计值为 1.31 MPa,满足单轴抗压强度设计值取值范围要求.密度相似系数  $C_\rho=\rho_p/\rho_m=C_\sigma/C_l=1.2$ .

## 1.2 动力学相似

此次模型试验采用电火花模拟爆破,故在不考虑炸药动力相似的前提下,隧道爆破力学模型动力学

相似应考虑时间( $t$ )、质量( $m$ )、刚度( $K$ )、频率( $f$ )、速度( $v$ )、加速度( $a$ )、阻尼( $C$ )等参数相似. 以力( $F$ )、长度( $L$ )、时间( $t$ )作为基本量纲,通过相似第二定理得到动力学物理参数的相似准则  $\pi_1 \sim \pi_6$  之间的函数关系  $f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6) = 0$ . 通过分析最终得到动力学物理参数的  $\pi$  矩阵为

$$\pi = \begin{bmatrix} & F & L & m & t & m & K & f & v & a \\ \pi_1 & 1 & -1 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \pi_2 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \pi_3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \pi_4 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \pi_5 & 0 & -1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \pi_6 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

通过  $\pi$  矩阵,选取  $\sigma, l, t$  作为基本量,确定动力学物理参数的相似准则为

$$\pi_1 = \frac{m}{\sigma l t^2}, \quad \pi_2 = \frac{K}{\sigma l}, \quad \pi_3 = \frac{f}{t^{-1}},$$
$$\pi_4 = \frac{v}{l t^{-1}}, \quad \pi_5 = \frac{a}{l t^{-2}}, \quad \pi_6 = \frac{C}{\sigma l t}.$$

根据相似准则,确定相似材料动力学参数相似比,如表 1 所示.

表 1 相似材料动力学参数相似比  
Tab. 1 Similar material parameters dynamic similarity ratio

参数名称	$a$	$t$	$v$	$f$	$m$	$C$	$K$
量纲	$LT^{-2}$	$T$	$LT^{-1}$	$T^{-1}$	$FL^{-2}T^2$	$FL^{-1}T$	$FL^{-1}$
相似比	1	5	5	0.2	18 750	3 750	750

隧道爆破力学模型的物理力学参数指标,要从静力学和动力学特性两部分进行研究. 考虑到需模拟原型隧道与模型的重力场相似、相似材料的强度相似和相似材料变形性能相似,实际参数过多,只需选取相似材料的重要参数进行分析研究即可. 因此,本次正交试验设计选取的相似材料的静力学相似指标为密度、单轴抗压强度和弹性模量.

考虑到接下来进行的高地应力下隧道频繁爆破力学模型试验,一方面需对不同高地应力下爆破地震波在隧道围岩中的传播波速进行测定,另一方面需依据爆破地震波波速的变化对隧道围岩的损伤进行分析. 因此,选取相似材料的动力学相似指标为声波波速. 据相似比计算得到正交试验设计中相似材料各物理力学参数指标的设计值,如表 2 所示.

表 2 相似材料物理力学参数指标的设计值  
Tab. 2 Design values of similar material physical mechanical parameter index

材料	$f_c/\text{MPa}$	$E_c/\text{GPa}$	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$v_p/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
砂岩原型	39.43	14.20	2.39	2 560
相似材料 (设计值)	1.31	0.47	1.99	512

2 材料选取的正交试验

2.1 相似材料的选取

相似材料的选取应考虑具有高密度、低强度、低弹模、低波速和脆性等性能. 根据大量的相似材料试验表明,以石膏为胶结剂,其脆性与岩石比较接近,弹性模量和抗压强度的调节范围较大,而以水泥石膏为胶结剂的相似材料和岩石的破坏特征相似<sup>[16]</sup>. 故选取二级建筑石膏粉和 32.5 号硅酸盐水泥作为胶结剂,选取石英砂和 400 目的重晶石粉作为骨料模拟重力场,并对声波波速进行调整. 水的质量分数为 10%,初凝时间控制在 20 min 左右,选取质量分数为 1%的硼砂溶液作为缓凝剂.

2.2 正交试验设计

正交试验设计了 A(石英砂/固体质量比)、B(水泥质量:石膏质量)、C(重晶石粉/(重晶石粉+石英砂)质量比)等 3 个控制因素,每个因素设置了 3 个水平,如表 3 所示. 表 4 为相似材料的正交试验配比表.

表 3 相似材料的正交设计因素水平  
Tab. 3 Similar material orthogonal design factor level

水平	因素		
	A/%	B	C/%
1	60	2 : 8	0
2	70	3 : 7	3
3	80	4 : 6	6

表 4 相似材料的正交试验配比表  
Tab. 4 Orthogonal test ratio of similar materials

因素	试验编号								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A/%	60	60	60	70	70	70	80	80	80
B	2 : 8	3 : 7	4 : 6	2 : 8	3 : 7	4 : 6	2 : 8	3 : 7	4 : 6
C/%	0	3	6	3	6	0	6	0	3

3 试样制作及试验结果

3.1 试样制作

制作尺寸为  $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  的标准圆柱试样(图 1),试样制作有如下 3 个主要步骤.

**步骤 1** 材料准备和搅拌. 将称量好的砂子、水泥、石膏和重晶石粉倒入搅拌机中搅拌 2 min,再加入提前配置好质量分数为 1% 的硼砂溶液,继续搅拌 2 min.

**步骤 2** 制模和编号. 取 1.2 倍模具具体积的相似材料一次性装入标准圆柱模具中进行制样,在 MQS-2 型材料强度试验机上对模具顶盖加压,使材料加压至标准圆柱尺寸,每组试验做 3 个试样,并进行编号 11,12,13,⋯,91,92,93.

**步骤 3** 拆模. 试样制作完成 1 h 后拆模,在 20 ℃ 的室内进行标准养护 7 d.



图 1 模具及试样  
Fig. 1 Mold and sample

3.2 试验结果

通过精密电子秤称量试样的质量,并计算每个试样的密度;通过 DS5 系列全信息声发射仪及声波波速测试系统,对试样进行声波波速测定试验;通过华侨大学 TFD-2000/D 型微机控制岩石伺服三轴压力试验机对试样进行单轴压缩试验,并根据单轴应力-应变曲线计算试样的弹性模量、泊松比等参数. 物理力学参数指标试验结果,如表 5 所示.

表 5 物理力学参数指标试验结果  
Tab. 5 Test results of physical mechanical parameter index

参数	试验编号								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.08	2.12	2.16	2.06	2.08	2.07	1.96	1.94	1.94
$f_c/\text{MPa}$	4.10	4.65	5.55	3.96	2.25	4.76	0.28	1.98	2.78
$E_c/\text{GPa}$	3.72	4.15	4.85	1.91	2.26	3.06	0.17	0.66	1.23
$v_p/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	961	1 095	1 271	695	827	1 022	428	576	762

从表 5 可知:相似材料密度为 1.94~2.16  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,单轴抗压强度为 0.28~5.55 MPa,弹性模量为 0.17~4.85 GPa,声波波速为 428~1 271  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . 相似材料密度分布较均匀,其他各物理力学参数指标的分布变化范围较广,在一定的配合比下,可满足隧道爆破力学模型试验对相似材料的密度、抗压强度、弹性模量和声波波速等参数设计值的要求.

4 影响因素敏感性分析

不同影响因素水平下,相似材料的敏感性分析,如表 6 所示.

表 6 不同影响因素下相似材料的敏感性分析  
Tab. 6 Sensitivity analysis of similar materials under different influence factors

水平组数	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$			$f_c/\text{MPa}$		
	石英砂/固体	水泥/石膏	重晶石粉/ (重晶石粉+石英砂)	石英砂/固体	水泥/石膏	重晶石粉 (重晶石粉+石英砂)
1	2.122	2.033	2.030	4.766	2.783	3.613
2	2.071	2.046	2.041	3.656	2.960	3.796
3	1.952	2.056	2.066	1.680	4.363	2.693
极差	0.170	0.023	0.033	3.086	1.580	1.103

水平组数	$E_c/\text{GPa}$			$v_p/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$		
	石英砂/固体	水泥/石膏	重晶石粉/ (重晶石粉+石英砂)	石英砂/固体	水泥/石膏	重晶石粉 (重晶石粉+石英砂)
1	4.242	1.933	2.485	1 109	694	853
2	2.413	2.356	2.430	848	832	850
3	2.062	3.046	2.395	588	1 018	842
极差	2.180	1.113	0.090	521	324	11

分析表 6 可知以下 4 点结论.

- 1) 各因素对相似材料密度的影响程度大小为石英砂/固体>重晶石粉/(重晶石粉+石英砂)>水泥/石膏,极差最大的是石英砂/固体质量比,说明石英砂/固体质量比对密度的控制起主要作用. 相似材料密度随着石英砂/固体质量比的增加而显著减小,随着水泥/石膏质量比和重晶石粉/(重晶石粉+石英砂)质量比的增大而缓慢增大.
- 2) 各因素对相似材料单轴抗压强度的影响大小为石英砂/固体>水泥/石膏>重晶石粉/(重晶石粉+石英砂),极差最大的是石英砂/固体质量比,说明石英砂/固体质量比对单轴抗压强度的控制起主要作用. 相似材料单轴抗压强度随着石英砂/固体质量比的增加而显著减小,随着水泥/石膏质量比的增加先缓慢增大后显著增大,随着重晶石粉/(重晶石粉+石英砂)质量比的增加先缓慢增大后显著减小.
- 3) 各因素对相似材料弹性模量的影响大小为石英砂/固体>水泥/石膏>重晶石粉/(重晶石粉+石英砂),极差最大的是石英砂/固体质量比,说明石英砂/固体质量比对弹性模量的控制起主要作用. 相似材料弹性模量随着石英砂/固体质量比增加先显著减小,后缓慢减小,随着水泥/石膏质量比增加而增大;重晶石粉/(重晶石粉+石英砂)质量比对弹性模量的影响很小,可忽略不计.
- 4) 各因素对相似材料声波波速的影响大小为石英砂/固体>水泥/石膏>重晶石粉/(重晶石粉+石英砂),石英砂/固体质量比和水泥/石膏质量比的极差均较大,说明石英砂/固体质量比和水泥/石膏质量比对声波波速的控制起主要作用. 相似材料声波波速随着石英砂/固体质量比的增大而显著减小,随着水泥/石膏质量比的增加显著增大,随着重晶石粉/(重晶石粉+石英砂)质量比的增加缓慢减小.

5 回归分析和最优配合比确定

5.1 回归分析

回归分析是正交试验设计分析的主要方法之一. 结合表 5 中的物理力学参数指标的试验结果,设自变量  $x_1$  为石英砂/固体质量比,  $x_2$  为水泥/石膏质量比,  $x_3$  为重晶石粉/(重晶石粉+石英砂)质量比. 另设  $\rho, f_c, E_c, v_p$  因变量分别为密度、单轴抗压强度、弹性模量和声波波速. 通过多元线性回归分析,得到多元线性回归方程为

$$\begin{cases} \rho = -0.864x_1 + 0.183x_2 + 2.235x_3 + 2.552, \\ f_c = -15.291x_1 + 5.253x_2 - 11.962x_3 + 11.951, \\ E_c = -17.673x_1 + 2.657x_2 - 2.791x_3 + 13.659, \\ v_p = -2\,625.452x_1 + 762.121x_2 - 195.892x_3 + 2\,349.741. \end{cases}$$

5.2 最优配合比确定

将表 2 中相似材料物理力学参数指标设计值代入多元线性回归方程中,并考虑实际操作中材料配合比的可实现性. 取  $x_1=80\%$ ,  $x_2=0.4$ ,  $x_3=3.0\%$ , 最终确定相似材料的最优配合比设计值(质量分数): 80% 砂子, 2% 水泥, 5% 石膏粉, 3% 重晶石粉, 1% 水.

通过室内试验测得相似材料的密度、单轴抗压强度、弹性模量和声波波速等参数指标,并与各参数指标设计值进行对比分析. 相似材料和原型砂岩的单轴应力( $\sigma$ )-应变( $\epsilon$ )曲线,如图 2 所示.

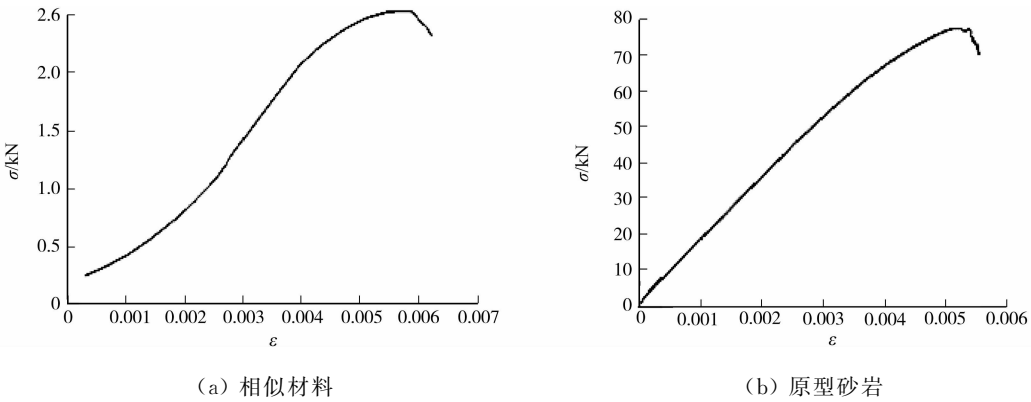


图 2 单轴应力-应变曲线

Fig. 2 Uniaxial stress-strain curve

由图 2 可知:对相似材料和原型砂岩的单轴应力-应变曲线进行分析,在弹性阶段和弹塑性阶段,二者表现略有不同. 由于接下来的隧道频繁爆破力学模型试验是对围岩体的裂缝损伤进行分析,只需考虑相似材料的塑性破坏阶段即可,故不会对试验结果的分析造成影响;而在塑性破坏阶段,相似材料表现出与原型砂岩相似的脆性特性破坏特征,可满足隧道爆破力学模型对围岩裂缝损伤分析的试验要求.

将相似材料各物理力学参数指标的实测值和设计值进行对比分析,结果如表 7 所示. 表 7 中:  $e$  为误差.

由表 7 可知:对于静力学指标,密度和单轴抗压强度的误差相对较小,分别为 2.50% 和 3.05%,可忽略不计,弹性模量的误差最大,误差为 8.51%;对于动力学指标,声波波速的误差为 7.22%. 究其原因,主要是试验操作误差和分析计算过程中的误差所导致的.

综上所述可知,选取的 4 个相似材料物理力学参数指标实测值和设计值对比误差较小,均在合理的范围内. 这说明相似材料最优配合比设计值,达到了隧道爆破力学模型试验对相似材料静力学和动力学相似比的要求.

6 结论

- 基于正交试验法,研究满足隧道爆破力学模型试验要求的相似材料配合比,得到如下 4 点结论.
- 1) 相似材料的密度分布较均匀,其他各物理力学参数的分布变化范围较广,在不同的配合比下,可以满足不同隧道爆破力学模型试验对相似材料的要求.
  - 2) 采用极差敏感分析法分析可知,对相似材料的密度、单轴抗压强度、弹性模量起主要控制作用的因素均为石英砂/固体质量比,声波波速主要受石英砂/固体质量比和水泥/石膏质量比两个因素控制.
  - 3) 相似材料密度随着石英砂/固体质量比的增加而显著减小,随着水泥/石膏质量比和重晶石粉/(重晶石粉+石英砂)质量比的增大而缓慢增大;单轴抗压强度随石英砂/固体质量比的增加而显著减小,随着水泥/石膏质量比的增加先缓慢增大后显著增大,随着重晶石粉/(重晶石粉+石英砂)质量比的增加先缓慢增大后显著减小;弹性模量随石英砂/固体质量比的增加先显著减小后缓慢减小,随着水泥/石膏质量比的增加而增大,重晶石粉/(重晶石粉+石英砂)质量比对弹性模量的影响很小;声波波速随

表 7 相似材料物理力学参数指标实测值与设计值对比  
Tab. 7 Comparison of measured and designed values of physics-mechanical parameters of similar materials

相似材料	$f_c/\text{MPa}$	$E_c/\text{GPa}$	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$v_p/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
设计值	1.31	0.47	1.99	512
实测值	1.35	0.51	2.05	549
$e/\%$	3.05	8.51	2.50	7.22

石英砂/固体质量比的增大而显著减小,随水泥/石膏质量比的增加显著增大,随重晶石粉/(重晶石粉+石英砂)质量比的增加缓慢减小.

4) 通过多元线性回归方程和室内试验对比验证,得到满足隧道爆破力学模型试验要求的相似材料最优配合比,即石英砂:水泥:石膏:重晶石粉:水=8:0.2:0.5:0.3:1. 最优配合比下的相似材料和原型砂岩的单轴应力-应变曲线在塑性破坏阶段表现出相似的脆性破坏特征,相似材料很好地模拟了原型砂岩的脆性特性;相似材料参数指标的实测值与设计值对比误差较小,满足隧道爆破力学模型对相似材料高密度、低强度、低弹模、低波速和相似比例的要求.

由于试验条件限制,控制因素的水平偏少导致试验组数偏少,后期研究拟考虑缩小因素水平的间隔,多设几组试验进行完善.

参考文献:

[1] LIN Peng,LIU Hongyuan,ZHOU Wei yuan. Experimental study on failure behaviour of deep tunnels under high *in-situ* stresses[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2015,46:28-45. DOI:10.1016/j.tust.2014.10.009.

[2] 吕祥锋,潘一山.刚柔耦合吸能支护煤岩巷道冲击破坏相似试验与数值计算对比分析[J].岩土工程学报,2012,34(3):477-482.

[3] 李丹.高地应力条件下交通隧道的模型试验研究及数值模拟[D].武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2008.

[4] 张树川,刘泽功,刘健,等.用于模拟煤体爆破的相似材料实验研究[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2018,38(2):1-6.

[5] 马芹永.模型爆破试验相似材料及相似炸药的确定[J].煤矿爆破,1998(2):810.

[6] 常胜涛.地铁隧道爆破开挖对邻近埋地管道影响的模型试验研究[D].大连:大连交通大学,2016.

[7] 刘俊轩.高台阶抛掷爆破模型相似材料的试验研究[D].昆明:昆明理工大学,2015.

[8] 郑志涛.高地应力岩体超深孔柱状装药爆破三维模型试验研究[D].淮南:安徽理工大学,2017.

[9] 张静,左双英,张彦召,等.岩质相似材料配比的正交试验研究[J].水利水电技术,2019,50(3):161-168. DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2019.03.022.

[10] 董金玉,杨继红,杨国香,等.基于正交设计的模型试验相似材料的配比试验研究[J].煤炭学报,2012,37(1):44-49.

[11] 詹志发,贺建先,郑博文,等.边坡模型相似材料配比试验研究[J].地球物理学进展,2019,34(3):1236-1243. DOI:10.6038/pg2019DD0176.

[12] 耿晓阳,张子新.砂岩相似材料制作方法研究[J].地下空间与工程学报,2015,11(1):23-28,142.

[13] 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. DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2016.04.014.

[14] 孙海涛,朱墨然,曹偲,等.突出煤层相似材料配比模型构建的正交试验研究[J].煤炭科学技术,2019,47(8):116-122. DOI:10.13199/j.cnki.cst.2019.08.014.

[15] 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. DOI:10.16285/j.rsm.2015.05.017.

[16] 彭海明,彭振斌,韩金田,等.岩性相似材料研究[J].广东土木与建筑,2002(12):13-14,17.

(责任编辑:黄仲一      英文审校:方德平)