

宫玉菲,朱国维,姜雨璞,等. 煤层不同地质结构相似材料配比实验研究[J]. 矿业科学学报,2022,7(3):267-274. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2022.03.001

Gong Yufei,Zhu Guowei,Jiang Yupu,et al. Experimental study on the proportion of similar materials for different geological structures of coal seams [J]. Journal of Mining Science and Technology,2022,7(3):267-274. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2022.03.001

煤层不同地质结构相似材料配比实验研究

宫玉菲,朱国维,姜雨璞,史东京

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083;
2. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083

摘要:为研究煤岩层与隐蔽地质异常体地球物理响应特征,本文基于矿井工作面煤岩层结构设计,构建煤岩隐蔽致灾异常体实体1:1大型物理模型进行模拟实验。采用煤粉、砂石、水泥等材料通过正交试验方法对新元矿的煤层、顶底板、陷落柱和断层等进行相似材料配比与制作工艺实验以及物性参数实验测试,并将获得的波速、电阻率、介电常数等物性参数实验数据与原煤样及现场综合探测结果对比分析,最终确定物理模型各地质构造单元的最优施工配比;煤层模拟选用煤粉、砂和水泥含量分别为55%、10%和25%;顶板选择砂胶比为3,石膏水泥比为2:8的配比;底板选择砂胶比为2.5,石膏水泥比为3:7的配比;陷落柱选用砂57.5%、煤10%、石膏4.5%、水泥18%的实验配比。研究结果为实验室矿井探测装备技术实验平台建设提供数据支撑。

关键词:相似材料;正交试验;物理模型;煤层;异常构造

中图分类号:TU 502

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2022)03-0267-08

Experimental study on the proportion of similar materials for different geological structures of coal seams

Gong Yufei,Zhu Guowei,Jiang Yupu,Shi Dongjing

1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China
2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Beijing 100083, China

Abstract: This paper based on coal strata structure of mine working face, a one-to-one physical model of coal and rock concealed disaster-causing abnormal body is designed and constructed which is used to study the geophysical response characteristics of coal strata and hidden geological anomalies. Selected pulverized coal, gravel and sand, cement as raw materials to study similar material ratio and manufacturing process experiment of coal seams, roofs and floors, collapse columns and faults in Xinyuan Mining by applying the orthogonal design method. In addition, a variety of parameters on physical property were tested. Based on the experimental data of physical parameters such as wave velocity, resistivity and dielectric constant, the optimal construction ratio of each geological structure in the underground physical model was determined by comparing the original coal samples and the comprehensive detection results. Coal powder, sand and cement contents of 55%, 10% and 25% were selected for coal seam simulation; The sand cement ratio is 3 and gypsum cement ratio is 2:8 for the roof of coal seam; The ratio of

收稿日期:2021-10-30 修回日期:2021-11-16

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0807801)

作者简介:宫玉菲(1995—),女,山东潍坊人,博士研究生,主要从事物探地质方面的研究工作。Tel:18810813772, E-mail:1399663811@qq.com.

sand cement ratio is 2.5 and gypsum cement ratio is 3 : 7 for coal seam floor; The test proportions of sand 57.5% , coal 10% , gypsum 4.5% and cement 18% were selected for the collapse column. The above provides quantitative support for laboratory construction of mining detection equipment technology test platform of the project.

Key words: similar material; orthogonal test; physical model; coal seam; abnormal structure

物理模型的构建可以很好地反映某个区域的局部地质构造,模拟井下煤岩隐蔽致灾异常体实体物理模型。国家重点研发计划“煤矿隐蔽致灾地质因素动态智能探测技术研究”提出在新元矿区构建煤矿井下隐蔽地质体动态智能识别实验室。本文根据阳泉新元矿区地质异常体分布特征,通过相似材料实验,对实验室煤层、顶底板及异常体充填配比进行实验研究,分析对比原煤及原位测试数据,选定了实验室施工最优配比,为井下实验室建设提供数据支撑。

国内外研究人员对能够模拟实际地质情况的地球物理模型的相似材料展开了深入的研究^[1-3]。1960年前苏联地质学家就地震波探测问题,提出通过改变物理模型相似材料的温度达到控制相似材料弹性的方法。国内学者对相似材料的研究始于20世纪70年代,王汉鹏等^[4-8]在新型相似材料开发领域取得较多创新成果,选择粉质黏土作为相似模型的骨料,控制模型的含水百分比和模型的压实强度后制作了视电阻率相似材料模型;康向涛等^[9]模拟原煤相似材料,运用单因素分析法研究煤粉对试样强度的关系;董金玉等^[10-12]分别采用正交试验和数据统计方法,探讨了原料组分占比对相似材料物理、力学性质的影响;孔令强等^[13-15]将砂子作为相似材料的骨料,模拟原煤的物理力学性能和地震特征的影响规律;程久龙等^[16]将砂子作为相似材料骨料,选择石膏、水泥和水作为胶结剂,保证制作模型的材料与研究对象强度和变形参数上的相似准则,研究相似材料的电性参数等性质,满足物理相似;高华礼等^[17-18]对相似材料中水分的影响和相似材料配比量化方法进行研究。

综上所述,前人对相似材料的强度、地震、电阻率等物性参数采用单因素到多水平多因素的正交试验方法进行研究,做出了很多前沿性贡献。本文依据前人研究基础,对新元矿区煤岩层及地质异常区域^[19]进行相似材料模拟实验,探究了影响相似材料物性参数的因素,对比前期测试物性参数,确定了相似材料模拟配比,为井下实验室的施工提供数据支撑。

1 模拟材料选择及配比依据

1.1 模拟材料选择

本次对模拟煤层、顶底板、陷落柱及断层进行相似材料的配比实验,选用的材料主要有煤粉、砂石、水泥、水、石膏、土、氯化钠溶液等。其中,煤粉打磨并筛分为细煤粉(粒径 $<2\text{ mm}$)及粗煤粉(粒径 $<5\text{ mm}$)两类,砂石选用粒径小于 1 mm 、 $1\sim 3\text{ mm}$ 、 $3\sim 5\text{ mm}$ 的砂及粒径小于 2 cm 石子,水泥为普通硅酸盐水泥 P. O 42.5,氯化钠溶液质量分数为 0.3% 。

1.2 配比设计依据

矿区煤层、顶底板和地质异常区(陷落柱、断层和采空区)在每种地球物理探测方法下会产生不同的响应特征。煤层的地球物理响应特征为高电阻率、高声波时差、低密度、低自然伽马的“两高两低”特征,密度主要分布范围为 $1.3\sim 1.8\text{ g/cm}^3$,纵波速度在 $1\ 500\sim 2\ 500\text{ m/s}$ 之间;顶底板的地球物理响应特征为低电阻率、低声波时差、高密度,密度一般在 $2.4\sim 2.8\text{ g/cm}^3$,纵波速度 $2\ 500\sim 4\ 000\text{ m/s}$;陷落柱及断层具有高耐水性、低强度、高渗透率的特性。

在设计煤层、顶底板、陷落柱及断层相似材料时,根据不同岩性构造,调整材料配比含量及粒径等,满足煤岩层及地质异常体不同的物理力学性质。

2 配比方案设计

实验采用正交试验设计方法,它是一种针对多因素多水平且因素间可能存在交互作用的分式析因研究方法。可方便分析实验中骨料(煤粉及砂)和胶结材料(水泥)对各测试数据的影响。

2.1 煤层配比

在相似材料的煤层配比实验中选用不同含量煤粉、砂子和水泥进行正交试验,设计30组不同材料配比方案进行实验试块的制备。煤层模拟所用相似材料中,煤粉的粒径分为粗细两种,其中20组采用细煤粉(粒径小于 2 mm),10组采用粗煤粉(粒径小于 5 mm),砂都选用粒径小于 1 mm ,用水

量视煤粉(研磨机研磨筛选)干湿程度不同,控制在12%~14%。表1、表2分别为选用细、粗煤粉制作煤层相似材料试块的配比方案。

表1 细煤粉煤层相似材料配比方案

Table 1 Ratio scheme of similar materials in fine pulverized coal seams %

配比编号	细煤粉	砂	水泥
A-7	40	20	30
A-8	40	25	25
B-6	45	15	30
B-7	45	20	25
B-8	45	25	20
C-4	50	10	30
C-6	50	15	25
C-7	50	20	20
C-8	50	25	15
E-4	55	10	25
F-5	58	12	20
G-4	60	10	20
G-6	60	15	15
I-2	65	5	20
I-4	65	10	15
I-6	65	15	10
K-1	70	0	20
K-2	70	5	15
L-1	75	0	15
L-2	75	5	10

表2 粗煤粉煤层相似材料配比方案

Table 2 Ratio scheme of similar materials in coarse pulverized coal seams %

配比编号	煤粉	砂	水泥
E-6	55	15	20
G-4	60	10	20
G-7	60	20	10
H-5	63	12	15
I-3	65	8	17
I-4	65	10	15
J-4	68	10	13
K-4	70	10	15
L-3	75	8	12
M-1	80	0	15

2.2 顶底板配比

煤层顶底板的相似材料模拟实验选择砂、水

泥、石膏和氯化钠溶液等材料进行。选用粒径小于1 mm的砂作为骨料,石膏水泥作为胶结剂。实验配比中,石膏主要用来降低模型的密度,而制作试块时用质量分数为0.3%的氯化钠溶液替代水,可以满足实际岩层电性条件。顶底板实验配比方案见表3。

表3 顶底板配比方案

Table 3 Roof and floor ratio scheme

编号	砂胶比	石膏水泥比
DA-1		2:8
DA-2		3:7
DA-3	2.0	4:6
DA-4		5:5
DB-1		2:8
DB-2		3:7
DB-3	2.5	4:6
DB-4		5:5
DC-1		2:8
DC-2		3:7
DC-3	3.0	4:6
DC-4		5:5
DD-1		2:8
DD-2		3:7
DD-3	3.5	4:6
DD-4		5:5

2.3 陷落柱及断层配比

陷落柱及断层的实验配比是在顶底板实验配比的基础上增大砂的粒径等级(陷落柱试块用砂采用1~3 mm和3~5 mm粒径)及添加石膏、煤粉等材料,对煤层陷落柱及断层进行一个相似材料的模拟。按照模拟陷落柱对渗透性、密度、结构及力学性质的不同要求进行不同的配比实验,其中陷落柱要求保证一定的渗透性,而断层需在结构上满足介于煤层与顶底板的特性。

3 多物理参数实验测试

3.1 波速测试

3.1.1 常温常压测试

波速测试所用的仪器为超声波脉冲发射接收器及DSOX2014A数字存储示波器。

本文波速数据选取试块胶结养护后测得的平均值进行分析。

图1为煤层试块密度随配比变化图。由图1

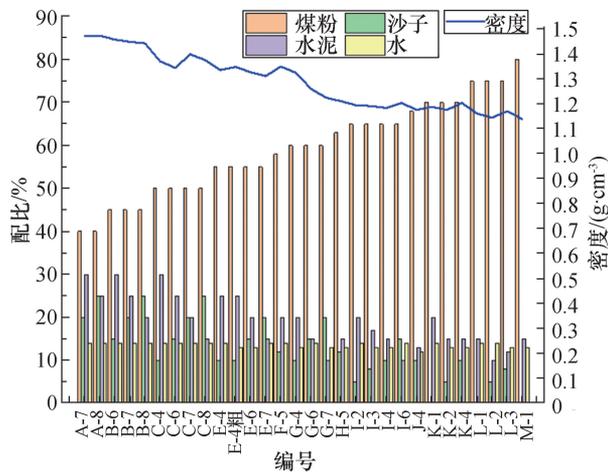


图1 煤层试块密度变化

Fig. 1 Density variation of coal seam test block

看出,试块密度处于 1.1 ~ 1.5 g/cm³,煤粉含量与密度大小呈反比关系,煤粉含量越高,密度越小。

图2为细煤粉和粗煤粉试块波速由小到大升序排列的配比分布图。可以看出,相同配比条件

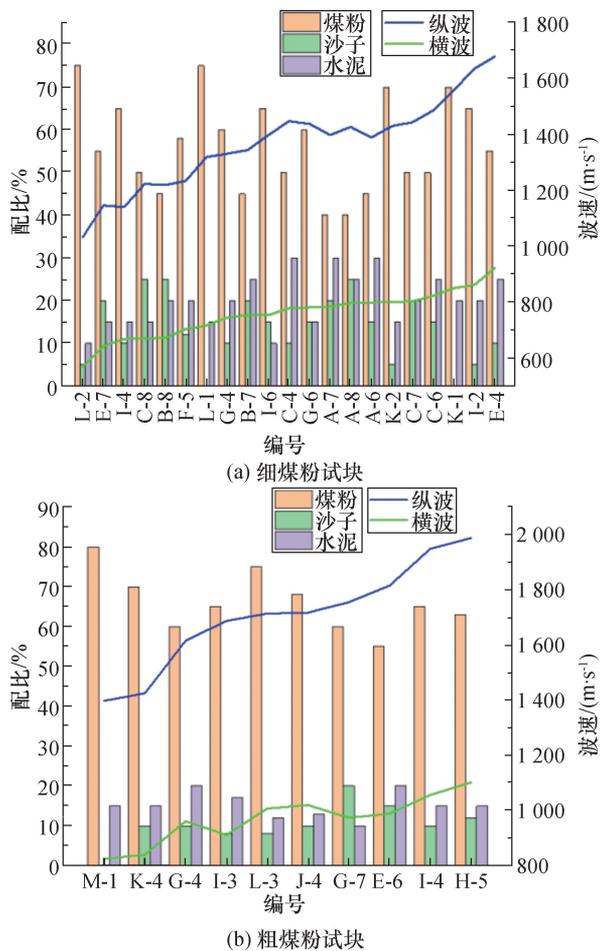


图2 煤层试块纵波降序排列

Fig. 2 Longitudinal wave descending sequence arrangement diagram of coal seam test block

下,粗煤粉试块的波速明显高于细煤粉试块。在配料制样过程中,粗煤粉试块比细煤粉试块更易于胶结成形,可能是因为粗煤粉结构破坏小些,更易与水泥混合胶结;而细煤粉颗粒较细,需加大水的含量增加固结,细煤样试块更松散且易碎。

在图2(a)中,将速度相近的 L-2、I-4、E-7、B-8 和 L-1、G-4、B-7、I-6 及 K-2、G-6、C-7 各看成一组,对比发现:试块中水泥含量高,其波速也高,且煤和沙子对其影响较小,说明在影响波速的因素中水泥的含量起主要作用。在图2(b)中,将 L-3、J-4 和 I-4、H-5 对比发现:在水泥含量相同情况下,砂子含量高,其波速也高。

同样完成顶底板、陷落柱和断层试块的常温常压波速测试,并随时间监测试块波速密度变化。顶底板、陷落柱和断层纵波波速分别处于 1 800 ~ 3 000 m/s、1 900 ~ 2 600 m/s 和 1 200 ~ 3 000 m/s 范围。

图3为陷落柱试块 15 d 纵波波速与时间关系。可以看到,拆模初期波速随时间呈明显上升趋势,表明试块在制作后随着水分的蒸发胶结硬化较快,波速上升比较明显;后期随着试块逐渐胶结,波速趋于平稳。

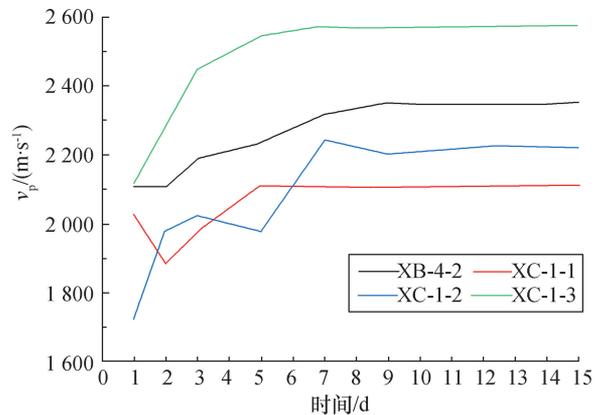


图3 陷落柱试块 15 d 纵波波速与时间关系

Fig. 3 15 d longitudinal wave velocity and time diagram of collapse column test block

3.1.2 围压波速测试

矿区井下实验室建设不仅需要掌握常压环境下的物性参数,还需要模拟井下围压条件对试块进行实验。利用煤炭资源与安全开采国家重点实验室 OLYMPUS 5077PR 声波发射器、RS-ST01C 非金属声波检测仪,对试验样品进行 0 ~ 30 MPa 围压加压条件下纵、横波速度测试,得到相关围压波速数据。

围压波速测试主要目的是模拟井下压力环境下相似材料波速变化。实验发现,煤层、顶底板及异常区试块在围压下波速都呈现随压力增大而增大的变化趋势。

图4所示是顶底板试块纵波波速随围压变化关系,随着围压的升高,波速呈增大趋势。对比各类型试块的围压-波速变化,随围压压力的增加,波速增加,波速增加范围介于200~900 m/s。

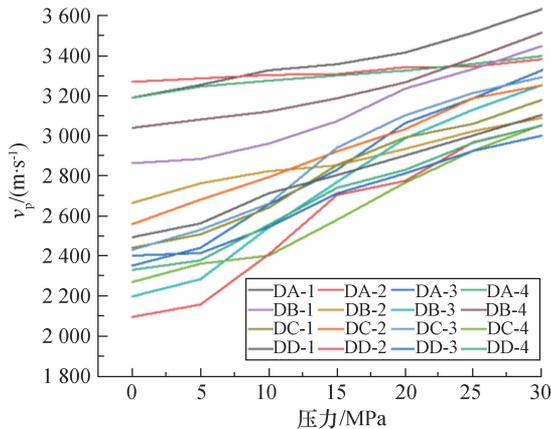


图4 顶底板试块纵波波速随围压变化

Fig. 4 Longitudinal wave velocity variation with confining pressure of the top and bottom test blocks

3.2 电阻率测试

选择对称4极装置测量试块电阻率。其中,A、B为供电电极,读电流表示数;M、N为测量电极,读电压。按照上述观测方式和实验仪器,对试块的电阻率进行测量计算。

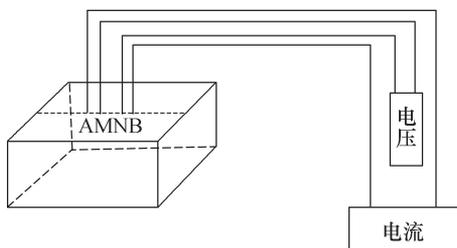


图5 电阻率测量示意图

Fig. 5 Schematic diagram of resistivity measurement

对称4极装置的特点是AM=NB,记录点取在MN中点。电阻率 ρ_s 表示为

$$\rho_s = K_{AB} \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$

$$K_{AB} = \pi \frac{AM \cdot AN}{MN}$$

式中, ΔU_{MN} 为测量电极M、N的电势差,V; I 为测量电流,A; K_{AB} 为装置系数。

对试块初凝和养护稳定后分别进行电阻率测试,发现试块含水率是影响电阻率数值的主要因素。含水率低,电阻率降低。因为顶底板及异常区域的相似材料试块制作采用0.3%氯化钠溶液,因此电阻率值较煤层试块偏低,可以满足煤层层的电性规律。

图6是含煤量不同的煤层相似材料电阻率变化图。含煤量60%以下,电阻率较低;含煤量超过60%,电阻率增高。

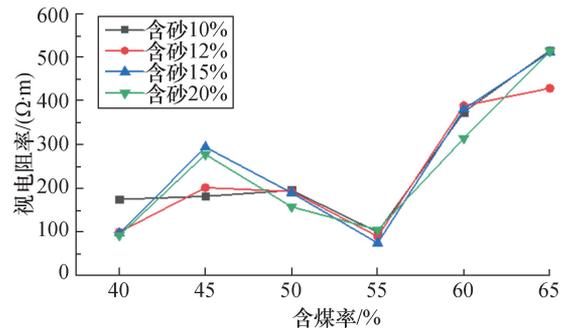


图6 煤层试块不同含煤率电阻率变化

Fig. 6 Resistivity variation diagram of test block with different coal content

图7为试块不同含砂率电阻率变化图。可以看出,不同含砂率的煤相似材料的视电阻率变化趋势大体相同,而随着含煤率的升高,视电阻率有上升的趋势。因此,样品含砂率的大小对于样品视电阻率的影响不明显,含煤率对于视电阻率有较明显的影响。

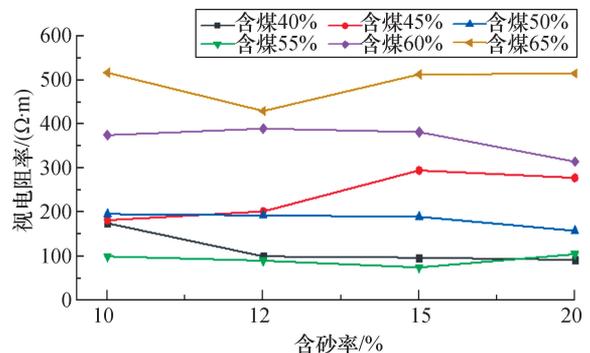


图7 试块不同含砂率电阻率变化

Fig. 7 Resistivity variation diagram of test block with different sand content

3.3 介电常数测试

采用LJD-B介电常数介质损耗测试仪测试介电常数。测量每个样本的介电常数需要用9个不同频率的电容。测量样品需要处理成厚度小于5 mm的圆形薄片。本次实验所测介电常数值为试块养护处理后的稳定值。

煤层相似材料试块的介电常数值为2~8。煤层试块介电常数随频率变化关系如图8所示,可见介电常数值随电容频率的增高而降低。

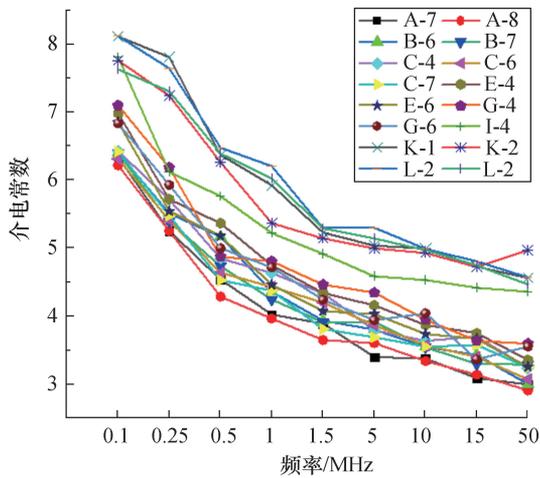


图8 煤层试块介电常数随频率变化
Fig.8 Permittivity varies with frequency

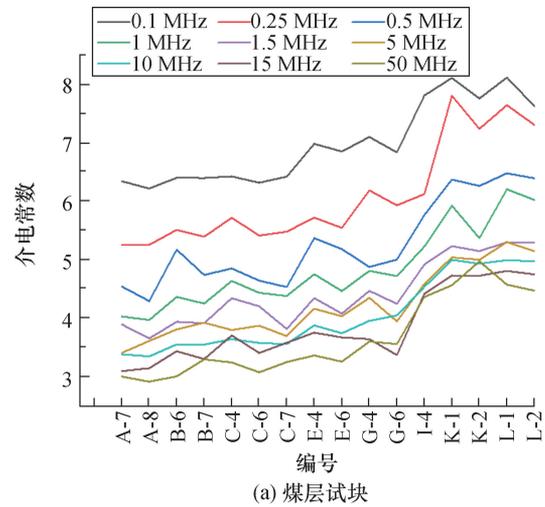
图9为煤层和顶底板试块介电常数在不同配比下的变化图。由图9(a)看出,煤层相似材料试块介电常数值随煤粉含量的增大呈增高趋势。因此,可以通过增加煤粉含量提高相似材料的介电常数。由图9(b)可以看出,顶底板试块介电常数低一些,数值在2~5之间,且随着砂胶比的增大呈减小趋势,而随测量频率的增高而减小。

4 数据分析及选型

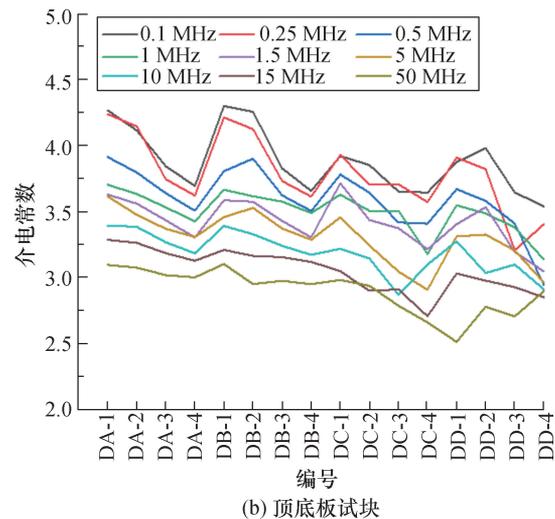
4.1 原煤岩数据对比分析

根据新元矿区早期原煤岩样的检测资料,该研究区所采煤样的平均密度为 1.485 g/cm^3 ,纵波波速介于 $1700 \sim 2300 \text{ m/s}$,平均约 2000 m/s ;顶底板灰岩及砂质泥岩的平均密度为 2.538 g/cm^3 ,纵波波速介于 $3500 \sim 4500 \text{ m/s}$ 。由于原煤样采集及制备受所采煤样破碎性影响严重,该数据所测原煤样品为结构致密样品。实际原煤平均数据应略低于该数据值。

分析本次试验试块测试数据,结合试块制备胶结性及松散程度,认为煤层施工最优配比为:煤粉含量 $50\% \sim 60\%$,砂含量 $10\% \sim 15\%$,水泥含量 $20\% \sim 25\%$ 。该配比范围内密度介于 $1.3 \sim 1.5 \text{ g/cm}^3$,常温常压下纵波波速平均为 1600 m/s ,施加围压后,纵波波速为 1900 m/s 。其中,E-4的配比(煤粉、砂和水泥含量分别为 55% 、 10% 和 25%)试样/试块物性参数与原煤煤层最相似。



(a) 煤层试块



(b) 顶底板试块

图9 不同配比介电常数变化

Fig.9 Permittivity changes at different ratios

模拟顶板相似材料选择砂胶比3,石膏水泥比2:8的配比,其测试数据密度为 2.38 g/cm^3 ,围压纵波波速为 3800 m/s 。模拟底板相似材料选择砂胶比2.5,石膏水泥比3:7的配比,其测试数据密度为 2.23 g/cm^3 ,围压纵波波速为 3300 m/s 。与原煤顶底板样品的密度与波速范围比较符合。

4.2 现场测试数据对比分析

在新元矿研究区现场采用MMS-1型矿井多波地震仪器,选用1m小道间距,以锤击方式进行地震纵、横波速度测试工作,得到已知构造、煤层、顶底板的纵、横波速度值。表4为陷落柱X78地震纵横波速度原位测试结果,位于模型巷道3484号测点位置,测点平行巷道掘进工作面布置。表5为断层F5纵、横波速度原位测试结果,测点范围在断层F5南北向。

表4 陷落柱 X78 地震纵横波速度原位测试结果

Table 4 In-situ test results of compressional and shearing wave velocity of collapse column X78

参数		序号							平均
		1	2	3	4	5	6	7	
纵波速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	底板	4 800	2 120	3 145	2 653	4 215	3 216	3 562	3 387
	顶板	5 760	2 565	3 837	3 263	5 142	3 891	4 381	4 120
横波速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	底板	2 824	1 247	1 850	1 561	2 479	1 892	2 095	1 993
	顶板	3 388	1 509	2 257	1 919	3 025	2 289	2 577	2 423

表5 断层 F5 纵横波速度原位测试结果

Table 5 In situ test results of compressional and shearing wave velocity of fault F5

参数		序号							平均
		1	2	3	4	5	6	7	
纵波速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	底板	3 333	5 000	5 000	2 000	1 000	1 000	769	2 586
	侧帮	4 286	3 333	2 500	2 000	2 500	2 500	3 333	2 921
	顶板	4 100	6 050	6 000	2 380	1 220	1 200	907	3 122
横波速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	底板	1 961	2 941	2 941	1 176	588	588	452	1 521
	侧帮	2 521	1 961	1 471	1 176	1 471	1 471	1 961	1 719
	顶板	2 412	3 559	3 529	1 400	718	706	534	1 837

根据表4和表5测试结果,确定陷落柱相似材料模拟选用砂57.5%、煤10%、石膏4.5%、水泥18% (骨料:胶结剂为3:1)作为井下实验室施工配比,其试块测试密度($2.15 g/cm^3$)及纵波波速($3 500 m/s$)介于煤层与顶底板之间。

断层的施工根据实际情况分上、中、下段不同配比,顶部施工选用煤层与顶板材料混合,中部采用煤层与顶、底板材料混合,下部采用煤层与底板材料混合,以保证断层的上、中、下结构分别与顶板、煤层、底板相似。

5 结论

(1) 实验确定了影响相似材料试块波速的主要因素是密度。具体可以改变水泥含量、压力等来调节试块密度。电阻率的主要影响因素为试块的含水量,模拟煤层的电阻率略高于其他结构。煤层的介电常数高于顶底板,其数值范围分别是2~8和2~5。

(2) 现场施工建设与实验室相似材料实验的规模及环境存在差异,结合现场原位波速测试数据,选定煤层、顶板和底板的试块常压纵波波速分别为 $1 600 m/s$ 、 $3 800 m/s$ 和 $3 300 m/s$ 。

(3) 确定最优配比分别是:煤层模拟选用E-4(煤粉、砂和水泥含量为55%、10%和25%);顶板选择砂胶比3,石膏水泥比2:8的配比;底板选择砂胶比2.5,石膏水泥比3:7的配比;陷落柱选用砂

57.5%、煤10%、石膏4.5%、水泥18% (骨料:胶结剂3:1)作为施工配比。

参考文献

- [1] Bezrodnov A N. A method of producing complicated transient boundaries in seismic models[J]. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 1966, 10(3):300-305.
- [2] Magnitsk V A, Neprochn Y P, Rykunov L. Velocity gradients of elastic waves and temperature gradients beneath mochorovichich boundary (black-sea, indian-ocean) [J]. *Doklady Akademii Nauk Sssr*, 1970, 195(1):85-89.
- [3] Urosevic M, McDonald J A. Physical modeling of anisotropic media[J]. *Geophysics*, 1985, 66(2):398-412.
- [4] 王汉鹏,李术才,张强勇,等. 新型地质力学模型试验相似材料的研制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(9):1842-1847.
Wang Hanpeng, Li Shucui, Zhang Qiangyong, et al. Development of a new geomechanical similar material[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(9):1842-1847.
- [5] 张强勇,李术才,郭小红,等. 铁晶砂胶结新型岩土相似材料的研制及其应用[J]. *岩土力学*, 2008, 29(8):2126-2130.
Zhang Qiangyong, Li Shucui, Guo Xiaohong, et al. Research and development of new typed cementitious geotechnical similar material for iron crystal sand and its

- application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(8):2126-2130.
- [6] 高会会,裴向军,马志刚,等. 饱水软弱夹层相似材料配比试验研究[J]. *水利水电技术*, 2021, 52(9):156-164.
- Gao Huihui, Pei Xiangjun, Ma Zhigang, et al. Experimental study on mixing ratio of similar materials for water-saturated weak interlayer[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52(9):156-164.
- [7] 李光,马凤山,郭捷,等. 大尺寸工程模型试验中的相似材料配比试验研究[J]. *东北大学学报:自然科学版*, 2020, 41(11):1653-1660.
- Li Guang, Ma Fengshan, Guo Jie, et al. Experimental study on similar materials ratio used in LargeScale engineering model test[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2020, 41(11):1653-1660.
- [8] 柴敬,姚凯亮,刘奇,等. 基于不同残余含水率的相似材料力学特性研究[J]. *矿业研究与开发*, 2020, 40(7):37-42.
- Chai Jing, Yao Kailiang, Liu Qi, et al. Study on mechanical properties of similar materials based on different residual moisture contents[J]. *Mining Research and Development*, 2020, 40(7):37-42.
- [9] 康向涛,黄滚,邓博知,等. 模拟原煤的相似材料试验研究[J]. *东北大学学报:自然科学版*, 2015, 36(1):138-142.
- Kang Xiangtao, Huang Gun, Deng Bozhi, et al. Experimental study on similar material for simulating raw coal[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2015, 36(1):138-142.
- [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(01):44-49.
- Dong Jinyu, Yang Jihong, Yang Guoxiang, et al. Research on similar material proportioning test of model test based on orthogonal design[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(1):44-49.
- [11] 宁奕冰,唐辉明,张勃成,等. 基于正交设计的岩石相似材料配比研究及底摩擦物理模型试验应用[J]. *岩土力学*, 2020, 41(6):2009-2020.
- Ning Yibing, Tang Huiming, Zhang Bocheng, et al. Investigation of the rock similar material proportion based on orthogonal design and its application in base friction physical model tests[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(6):2009-2020.
- [12] 李童悦,赵佳美,周洪正. 基于正交设计的岩石相似材料配比试验研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(4):143-147.
- Li Tongyue, Zhao Jiamei, Zhou Hongzheng. Mixture proportioning tests of rock similar materials based on the orthogonal methods[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2018, 16(4):143-147.
- [13] 孔令强,孙景民. 模拟煤体的相似材料配比试验研究[J]. *露天采矿技术*, 2007, 22(4):33-34, 36.
- Kong Lingqiang, Sun Jingmin. Study of the ratio of similar materials for simulating coal[J]. *Opencast Mining Technology*, 2007, 22(4):33-34, 36.
- [14] 李智宏,朱海龙,赵群,等. 地震物理模型材料研制与应用研究[J]. *地球物理学进展*, 2009, 24(2):408-417.
- Li Zhihong, Zhu Hailong, Zhao Qun, et al. Study and materialization of new seismic physical model building materials[J]. *Progress in Geophysics*, 2009, 24(2):408-417.
- [15] 齐琦,管伟明,温颖远. 砂粒径对相似材料力学特性的影响机理[J]. *中国矿业*, 2020, 29(6):133-138.
- Qi Qi, Guan Weiming, Wen Yingyuan. Influence mechanism of sand particle size on mechanical properties of similar materials[J]. *China Mining Magazine*, 2020, 29(6):133-138.
- [16] 程久龙,于师建. 覆岩变形破坏电阻率响应特征的模拟实验研究[J]. *地球物理学报*, 2000, 43(5):699-706.
- Cheng Jiulong, Yu Shijian. Simulation experiment on the response of resistivity to deformation and failure of overburden[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2000, 43(5):699-706.
- [17] 高华礼,孙海涛,戴林超,等. 水分对突出煤相似材料力学特性及瓦斯解吸性能的影响[J]. *矿业安全与环保*, 2020, 47(2):7-10.
- Gao Huali, Sun Haitao, Dai Linchao, et al. The influence of moisture on mechanical properties and gas desorption performance of similar materials in outburst coal[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2020, 47(2):7-10.
- [18] 张向阳,罗磊,许林峰,等. 相似材料配比量化确定方法的研究[J]. *煤矿安全*, 2019, 50(10):45-48, 53.
- Zhang Xiangyang, Luo Lei, Xu Linfeng, et al. Research on quantitative determination method of similar materials ratio[J]. *Safety in Coal Mines*, 2019, 50(10):45-48, 53.
- [19] 姚海,王宁. 复合煤层采空区下分层综放开采相似模拟研究[J]. *煤炭工程*, 2021, 53(3):11-15.
- Yao Hai, Wang Ning. Similar simulation on fully mechanized top-coal caving mining in lower slicing of compound coal seam[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(3):11-15.

(责任编辑:陈贵仁)