doi: 10.12097/gbc.2022.06.031

## 南方煤系地层小断层地震物理模型研究

戴世鑫<sup>1</sup>,董艳娇<sup>1\*</sup>,胡盼<sup>1</sup>,李祥<sup>1</sup>,邢振邯<sup>1</sup>,杨甫<sup>2</sup> DAI Shixin<sup>1</sup>, DONG Yanjiao<sup>1\*</sup>, HU Pan<sup>1</sup>, LI Xiang<sup>1</sup>, XING Zhenhan<sup>1</sup>, YANG Fu<sup>2</sup>

1. 湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室, 陕西 西安 710021

1. School of Earth Sciences and Geospatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China;

2. Key Laboratory of Coal Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Natural Resources, Xi 'an 710021, Shaanxi, China

摘要:【研究目的】针对南方煤田煤系地层岩性特征和地质构造分布,目前依靠传统方法,识别落差≪5m小断层存在极大的 局限性且难度较大,而地震物理模型是目前最有可能实现系统研究小断层的技术手段。【研究方法】以南方煤田──贵州省 六盘水煤田为例,根据对研究区的实地勘探与资料收集,设计地震物理模型。由于小断层的制作难度及特殊性,采用特有的空间 尺寸比例1:2000,速度比为1:1.74,首次在国内实现对不同埋深5m、3m和1m小断层的构建,从而制作完成了南方煤系地 层小断层地震物理模型,对地震数据进行采集,并对模型原始地震数据进行分析及处理,得到模型叠加剖面。【研究结果】可 以通过相似比原理选取特定比例因子,进行原料配比,完成包含落差≪5m小断层地震物理模型的制作,为后续采集地震数据对 煤田小断层进行识别及研究小断层波场特征提供试验平台。【结论】本次研究建立了一套适用于南方煤田小断层识别的地震 物理模型实验体系,验证了相似比原理与小断层模型构建的可行性,突破了传统方法难以识别小断层的技术局限。该模型为研 究小断层的波场特征、地震响应机制及后续小断层精细识别提供了实验平台与理论支撑,对提升南方煤系构造精细解释能力具 有重要意义。

关键词:地震物理模型;南方煤系;模型制作;数据采集;小断层
 创新点:国内首次系统完成煤系地层小断层地震物理模型的构建。
 中图分类号: P631.4 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)05-0858-14

# Dai S X, Dong Y J, Hu P, Li X, Xing Z H, Yang F. Seismic physical model of small fault in southern coal-bearing strata. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44(5): 858–871

**Abstract:** [Objective] Given the lithological characteristics and geological structure distribution of coal-bearing strata in southern coalfields, traditional methods face significant limitations and challenges in identifying small faults with a displacement of  $\leq 5$  m. Seismic physical modeling is currently the most promising technique for systematically studying small faults. [Methods] Taking the southern coalfield—Liupanshui Coalfield in Guizhou Province, as an example, a seismic physical model was designed based on field exploration and data collection. Due to the complexity and specificity of constructing small faults, a unique spatial scale ratio of 1 : 2000 and a velocity ratio of 1 : 1.74 were adopted. For the first time in China, small faults at different burial depths of 5 m, 3 m, and 1 m were successfully simulated, leading to the completion of a seismic physical model of small faults in coal-bearing strata. Seismic data were then acquired, and the raw seismic data from the model were analyzed and processed to obtain the stacked seismic

收稿日期: 2022-06-21;修订日期: 2023-04-17

资助项目: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》(编号:2018YFC0807801)、国家重点研发计划子课题《低渗透 油藏 CO<sub>2</sub> 注入及地质封存中的迁移转化规律和岩石力学响应》(编号:2018YFB0605503)、国家自然科学基金项目《南方复杂地质 条件煤田小断层物理模型地震波识别方法研究》(批准号:51804112)、自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室开放基金 (编号:KF2021-5)

作者简介: 戴世鑫(1983-), 男, 博士, 副教授, 从事地质、地球物理勘探研究。E-mail: hnkjdsx@126.com

<sup>\*</sup> 通信作者: 董艳娇(1997-), 女, 硕士, 从事煤田地质、地球物理勘探研究。E-mail: 1747001353@qq.com

profile. **[Results]** By applying similarity principles and selecting specific scaling factors, raw materials were proportioned to successfully construct a seismic physical model incorporating small faults with a displacement of  $\leq 5$  m. This model provides an experimental platform for acquiring seismic data, identifying small faults in coalfields, and studying their wavefield characteristics. **[Conclusions]** This study establishes a seismic physical modeling system suitable for identifying small faults in southern coalfields, demonstrating the feasibility of constructing fault models based on the similarity principle. The developed model overcomes the technical limitations of conventional methods in detecting small faults, and offers a reliable experimental foundation for investigating wavefield responses and seismic recognition mechanisms. It provides theoretical support for the refined interpretation of geological structures in southern coal-bearing stratas.

**Key words:** seismic physical modeling; coal measure of southern; model making; data acquisition; small fault **Highlights:** This study is the first in China to systematically construct a seismic physical model of small faults in coal-bearing strata.

在地震勘探中对于一个特定的勘探问题,一般 选取最准确、较经济的探测方式获取并解释地下地 震波信息。《煤田地震勘探规范 (DZ/T0300-2017)》 (中华人民共和国国土资源部, 2017)指出, 一般煤矿 将落差≤5 m 的小断层作为地震勘探的主要内容。 这对在矿井采区识别小断层的工作提出了更高的要 求(庄益明, 2018)。而传统的识别小断层的方法主 要通过野外地震资料与矿井实际揭露相比较,印证 断层的存在(周赏等, 2012)。在实际勘探过程中,由 于地质条件较复杂且受到人类活动的干扰,因此,仅 依靠传统方法识别小断层存在较大的局限性,对于 落差≤5 m 的小断层其解释与分辨难度较大。目前 尚缺乏对厚度 ≤5 m 小断层的有效探测技术,而通 过构建物理模型开展物理模拟,可深入理解≤5m小 断层的波场响应特征,为山脚树矿区地震数据的采 集、处理与解释提供理论依据和技术支撑。

采用物理模型研究地震波的传播有着悠久的历 史。著名的美国地球物理学家 William S. French 以 模型为依据,验证了该模型实际地震资料成像的可 行性(McDonald et al., 1988)。Blacquière et al.(1999) 简要介绍了物理模拟设备和荷兰 Delft 科技大学的 模拟研究。美国科罗拉多矿业学院的物理模型实验 多用于研究井间层析成像(Balch et al., 1991; Schneider et al., 1991)。加拿大的 Calgary 大学利用物理模型 研究薄层河道砂岩的岩性特征(Lawton et al., 1991)。House(1999)对 SEG/EAGE 盐丘构造物理模 型进行了成像。中国部分研究机构和高校自1980年 以来相继建成了大型地震物理模型试验系统(魏建 新等, 2002b; 牟永光, 2003)。随着中国实验室和实 验设备的不断发展,中国地震物理模型的研究也得 到了迅速发展(孙进忠等, 1997; 唐华风等, 2007)。 有学者指出,利用物理模型可以制作各种地质构造

模型,以满足地震勘探的需要(狄帮让等,2002;魏建 新等,2006)。韩堂惠等(2011)根据淮南的地质条 件,利用地震物理模型对裂隙带进行了研究,取得了 较好的效果。司文朋等(2015)在物理模型处理过程 中发现利用 Radon 滤波可以很好地去除在浅层界面 附近产生的多次转换干扰波。李勇等(2017)利用砂 泥岩组成的 3 层地层地震物理模型进行叠后研究, 不仅提高了勘探效果,还扩大了地震剖面的应用范 围。王玲玲等(2019)基于多裂缝参数地震物理模 型,开展叠后属性分析,取到了很好的效果。吴永宏 等(2025)在三维地震资料的基础上对垂向断距小于 30 m 进行了识别。

地震物理模拟技术是一种模型实验技术,已被 广泛地用于石油天然气的勘探与开发。目前,中国 的地震物理模型研究已经有了长足的进展,但是对 于煤炭勘探中的物理模型技术不多见。在此基础 上,本文利用地震物理模拟技术,对南方复杂煤系地 层进行地震勘探模拟研究,为该区煤炭资源的高产、 高效及安全开采提供技术支撑。

## 1 地质概况

本次研究区为南方煤田(华东、华中、华南)地质 勘探区及煤矿区。这些地区的煤系地层大多为粉砂 岩、泥质粉砂岩、细砂岩、钙质泥岩、疏松砂岩、粉 砂质泥岩、煤层(桂望成, 2011)。

本文主要以贵州省六盘水市盘县山脚树矿区为 例,出露地层以石炭系、二叠系和三叠系分布最广 泛,主要含煤地层为上二叠统龙潭组和长兴组,含煤 面积约 8200 km<sup>2</sup>,含煤层数多、厚度大(杨瑞琴等, 2014;易同生等,2018)。矿区内龙潭组含煤层(线) 28~48 层,一般 37 层左右,含煤层(线)总厚 17.12~ 38.73 m,平均总厚 29.66 m;含煤系数 6.79%~ 16.00%, 平均 12.10%。山脚树矿区有利区块出露的 地层由老至新为上二叠统峨眉山玄武岩(P<sub>3</sub>β)、上二 叠统龙潭组(P<sub>3</sub>*l*)、下三叠统飞仙关组一段(T<sub>1</sub>f<sup>1</sup>)和 二段(T<sub>1</sub>f<sup>2</sup>)、下三叠统永宁镇组(T<sub>1</sub>yn)及第四系 (Q)。矿区地层总体呈向 E—SE 倾斜的单斜构造, 地层倾向一般 80°~140°, 倾角较平缓, 一般 6°~ 12°。矿区发育近 EW 向和 NE 向 2 组断裂, 大都为 正断层。规模较大的断裂走向近 EW 向, 倾向 S, 西 部(浅部)表现为走向 NEE, 东部(深部)表现为 SEE。次 级断裂走向为 NE 向, 走向基本平行。中部发育有次 级褶皱。矿区南部断层少而小, 构造相对简单(图 1)。

2 煤系地层模型设计

## 2.1 模型原始地层构造设计

通过对南方煤系中山脚树矿区地层的详细调查,对该区煤系地层分布、岩性特征、各层的厚度、 倾向和倾角及其周围地层的发育情况进行整理,查 明了控制该区域的主要断裂构造和一些规模小但有 一定规律性的断层(戴世鑫等,2012)。通过对该区 域的详细调查,设计了煤系地层地震地质模型,并对 山脚树煤田进行实地勘探(表1)。根据选取的山脚 树矿区煤田的三维地震物理模型参数,绘制物理模 型设计图(图2)。

#### 2.2 模型比例因子

在实验室设计过程中,按照相似比的原理设计 物理模型,实验室模型大小为1:2000,然而矿区采 取的煤岩样处于浅层低速区,所以在设计每层速度 的过程中,为了更好地贴合矿区每层地层的实际速 度,将速度比例因子设为1:1.74。

以下公式为在地震波运动学特征模拟中的已知 比例关系。在物理模型介质与实际介质中,地震波



图 1 山脚树矿区构造纲要图(地层代号注释同表 1)

Fig. 1 Structural overview map of Shanjiaoshu mining area

的传播速度 V 不同,造成两者的物理参数(波长、时间、传播距离、频率等)也不同,上述参数的比值以γ 表示,也称作模型比例因子。两者的速度、时间、距 离、频率等参量有如下关系:

$$\frac{V_R}{V_M} = \gamma_V \, \Re \, \frac{L_R}{L_M} = \gamma_L \tag{1}$$

$$\frac{T_R}{T_M} = \gamma_T \, \operatorname{fl} \, \frac{f_R}{f_M} = \gamma_f \tag{2}$$

式中:下标*R*和*M*分别表示实际和模型参量,根据速度定义:

$$V = \frac{L}{T} \vec{x} V = \lambda f \tag{3}$$

Table 1         Three-dimensional seismic physical model parameters of the coalfield							
层数	地层	综合岩性	厚度/m	密度加权平均/(g·cm <sup>-3</sup> )	层速度/(m·s <sup>-1</sup> )		
第一层	永宁镇组(T <sub>1</sub> yn)	白云质灰岩	585	2.393	4530		
第二层	飞仙关组第二段 $(T_1 f^2)$	细砂岩	385	2.434	4290		
第三层	飞仙关组第一段 $(T_1 f^1)$	泥质粉砂岩	155	2.442	4580		
第四层		含煤粉砂岩	103.23	2.519	4350		
第五层	长兴组、龙潭组	煤	2.82	1.75	3000		
第六层		含煤粉砂岩	123.95	2.567	4420		
第七层	峨眉山玄武岩组(P1e)	火成岩	550	3.009	5540		

表1 煤田三维地震物理模型参数



1211





可推出速度、传播时间、波长、频率比例因子相 互之间的关系:

$$\gamma_{V} = \frac{\gamma_{L}}{\gamma_{T}}$$

$$\gamma_{V} = \gamma_{1} \gamma_{e}$$
(4)

当
$$\frac{V_R}{V_M} = 1$$
时,有:  
 $\gamma_L = \gamma_T, \ \gamma_\lambda = \frac{1}{\gamma_f}$ 或 $\frac{\lambda_R}{\lambda_M} = \frac{f_M}{f_R}$  (5)

式中: *L*、*T*分别表示地震波传播距离、地震波 传播时间; *λ*、*f*分别表示地震波的参量波长、频率; 下标 R 和 M 分别为实际和模型参量。表 2 为地震 物理模型中通常使用的几种模型比例因子。

与上述 5 种相似比组合不同的是,本模型按

1:2000 的比例同步缩小室内的二维测线布置比例。 由于地层较复杂,为尽可能的考虑本实验中小于 5 m 的小断层能够运用模型模拟出来,最终按 1:2000 的比例进行模型制作。本次实验用频率为 240 kHz 的超声波换能器做震源和接收器,调节地质模型的各 地层超声波速度与实际地层速度比为 1:1.74。在本 次实验中采用 0.2 μs 采样率,计算实际采样率过程如下。

假设野外实际地层的厚度为L,对应的物理模型 厚度为L<sub>m</sub>,v为野外实际速度,v<sub>m</sub>为物理模型的速度。 则有:

$$vt = L$$

$$v_m t_m = L_m$$
(6)

式中, tm 为物理模型的采样率; t 为实际的采样

Table 2Several combination of similarity ratio						
参数	γ	γ	γ	γ	γ	
比例	模型比例因子	模型比例因子	模型比例因子	模型比例因子	模型比例因子	
	1	2	3	4	5	
空间长度	1:10000	1:20000	1:10000	1 : 5000	1 : 1000	
时间	1 : 10000	1 : 10000	1:5000	1:5000	1 : 1000	
速度	1:1	1:2	1:1	1:1	1:1	
频率	10000 : 1	10000 : 1	5000 : 1	5000 : 1	1000 : 1	
采样率	1 : 10000	1:10000	1 : 10000	1 : 5000	1 : 1000	
适合情况	面积中	面积大、埋深大	面积中、频率高	面积小	面积小	

表 2 几种相似比组合 Table 2 Several combination of similarity rati

率,设此地层对应的采样个数为n,则得到:

$$vnt = L$$

$$v_m nt_m = L_m$$
(7)

将两式相除,则有:

$$\frac{vnt}{v_m n t_m} = \frac{L}{L_m} \Rightarrow \frac{vt}{v_m t_m} = \frac{L}{L_m}$$
(8)

此模型中,  $\frac{L}{L_m} = 2000$ ,  $\frac{v}{v_m} = 1.74$ , 所以本次实验 采用 0.2 us 采样率, 相当于实际采样率为 0.23 ms。

为得到所需的岩石物性参数,通过实际采集煤 岩样在实验室利用超声仪器进行探测,得到各样品 的纵横波速度,并根据相应的关系式计算出岩层的 岩石密度、纵横波速度(杨双安等,2004)。物理模拟 试验是在相似理论的基础上开展的,通过使用相似 材料制作出能够反映原型的模型,因此相似材料的 物理力学性质需与原型相似。所以,本次实验采用 的模型比例因子如表3所示。

## 2.3 模型最终地层设计

物理模型最终设计图(图 3)与初步设计图(图 2) 相比,模型最终设计缺少了白云质灰岩,设计过程中 该层被水层替代。其主要原因是:声在水中的传播 速度约为1500 m/s(杨揆一, 1997),水层所替代的部 分白云质灰岩占2/3,细砂岩占1/3,经过公式和 表1的计算,声波穿过水所消耗的时间和灰岩花费 的时间基本一致,水层的使用一方面替灰岩消耗了 时间且并未对研究小断层的识别产生影响,另一方 面灰岩在制作过程中成本较高,为了节约成本,特用 水层代替了灰岩。因此,在实验室制作模型的时候 去掉了该层。根据该区煤层的分布和岩石性质及 表3中的物理模型参数,对煤系地层地震地质模型 进行设计,其最终实验室物理模型如图3所示。

## 3 物理模型制作

## 3.1 材料

由于普通的工业物料无法达到三维模型所要求 的多种速率,因此可以将2种速度存在很大差异的 材料进行复合或混合,改变其混合比例从而解决这 一难题。山脚树三维地质物理模型各层相似模拟材 料见表4,其中主要目标层煤层由硅橡胶与环氧树脂 按50%的比例混合而成(魏建新等,2002a)。

#### 3.2 模型各层的制作

按比例制作模型中各层的试块,并在试块进行

表 3 物理模型比例参数 Table 3 Scale parameters of physical model

比例因子	模型	野外	物理模型大小/mm				
尺度L	1 m	2000 m	长	宽	高		
速度V	1 m/s	1.74 m/s	1200	500	500		
时间T	1.74 s	2000 s	水层深	60 (无地表)	41 (加地表)		
频率f	240 kHz	208 Hz	模拟区块/m				
采样率t	0.2 us	0.23 ms	纵向	横向	深		
采样点	4096	4096	2400	1000	1000		



图 3 模型最终设计图

Fig. 3 Final design drawing of the model

#### 表 4 相似模拟材料

#### 表 5 物理模型测量参数

Table 4         Similar simulation materials		Table 5         Physical model measurement parameters						
			巨位	巨々	试块密度/	试块纵波	转换实际纵波	转换实
地运		(天)以12 朴	屋匝	压石	$(g \cdot cm^{-3})$	速度/(m·s <sup>-1</sup> )	速度/(m·s <sup>-1</sup> )	密度/(g·c
砂岩		砂与环氧树脂	1	地表	1.082	1256	2185	1.883
煤层		环氧树脂与硅橡胶	2	细砂岩	1.1525	2433	4233	2.005
灰岩		石灰粉与环氧树脂	3	粉砂岩	1.183	2625	4568	2.058
泥岩		滑石粉与环氧树脂		含煤粉				
起伏地	表	普通硅酸盐水泥、砂、石膏粉、水	4	砂岩	1.1604	2492	4336	2.019
模型左侧、右	侧边	界 环氧树脂、橡胶、稀释剂与除泡剂等	5	煤层	1.122	1785	3106	1.952
基底		有机玻璃	6	含煤粉	1.1695	2561	4456	2.035

速度和密度测试。综合相似材料和地层构造特点, 确定的物理模型参数见表 5。

在山脚树矿物地震物理模型的制作过程中,3组

巨位	日々	试块密度/	试块纵波	转换实际纵波	转换实际
云世	压石	$(g \cdot cm^{-3})$	速度/(m·s <sup>-1</sup> )	速度/(m·s <sup>-1</sup> )	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
1	地表	1.082	1256	2185	1.883
2	细砂岩	1.1525	2433	4233	2.005
3	粉砂岩	1.183	2625	4568	2.058
4	含煤粉 砂岩	1.1604	2492	4336	2.019
5	煤层	1.122	1785	3106	1.952
6	含煤粉 砂岩	1.1695	2561	4456	2.035
7	玄武岩	1.602	2857	4971	2.787

小断层是制作难点。利用相似材料和煤系地质构造 的特征,根据表3中的比例参数及表5中的物理模

(1) 模型各层的制作方案是从底层向上制作,先制作第7层火山岩层。由于整个模型以斜平层为主,不需要定制构造模具,只需控制各层的倾角。先制作一个模型箱,把模具箱一端按层倾角抬高,进行逐步浇注即可。图4-a为制作好的第7层模型,这层模型还需在三维测量机上进行界面形态的测试。

(2) 第6层(含煤粉砂岩下)的制作与第7层相同。但由于第6层的顶界面同时作为目标层的底界面,包含9个小断层,因此在完成初步制作后需进一步加工出这9个断层。断层加工采用数控机床完成。

(3)煤层底和顶制作是整个物理模型制作的难 点,因为次层的制作包含煤层和3组小断层两部分 的制作,这就需要选择合适的材料来满足低速煤层、 含有小断层这两大特征。目的层煤层的厚度仅几 米,且底和顶都有小断层。这两层都采用机械加工 的方式把小断层加工出来。先制作好第6层,然后 在此层上加工9个小断层,断层的垂直断距分别为 5m、3m、1m,用黑线画出了断层在水平方向的位置 (图 4-c)。煤层的制作与第6层一样,先制作出煤层, 然后用数控机在相同的水平位置上加工断层(图 5)。

(4) 煤层上第 4 层至 2 层(含煤粉砂岩上、粉砂 岩和细砂岩)的制作方法与前面几层相同,只需按各 层的模型材料配比逐层制作加工(图 4-d~f)。

(5) 地表制作是将表层设计为平倾斜与弧形的混 合界面,制作时用一个简单的模具,弧形是通过加工 得到的。在根据相似比原理研制出相应的混合模拟 材料的基础上,以空间长度比例1:2000完成物理 模型制作,得到完整的起伏地表物理模型(图6)。模 型制作完成后,对各层的试块进行实际测试,得到的 结果为正确模型的各层速度。

在物理模型制作过程中,会受到温度和人为的 微弱影响,通过 LIKE 测量划线仪,测量出模型的几 何形态,最终的模型与当初设计的模型存在一些差 距。从图 7 和图 8 可见,虽然存在一些小的误差,但 是在误差控制范围内,因此该模型的制作是成功的。

## 4 物理模型数据采集与分析

#### 4.1 数据采集

本次数据采集的仪器设备依托于深部矿井工作 面地质条件精细探测使用的大型全自动三维坐标定 位系统。该仪器设备设置允许其在3个方向(X、Y、 Z)上移动,3个方向的最大移动范围分别为2.2m、 2.2m和0.6m,各方向的空间移动精度小于0.05mm。 实验仪器震源(换能器)参数为:主频最大可达240 kHz,纵波,发射和接收直径为10mm,子波波形为 Ricker子波(戴世鑫等,2022)。使用此仪器的最大优 点是,震源和接收器可以在三维空间中随意移动并 进行精确的定位,还可以根据实验目的对震源频率 进行随意调整,为实验带来方便。加60mm水层作 为覆盖层的目的是,为了使震源、检波器与传播介质 三者之间产生很好的耦合作用,整个地震数据采集 均在水中进行,可达到削弱面波干扰的目的(图9)。

以下观测系统是实验主要采用的,进行模型地 震数据采集:加层前与加层后(有无地表)观测系统 是一致的,即采集参数相同,采集起始炮位置相同。 都在水中采集,加层前水深(距参考点)约60 mm,即 有 60 mm 用水层代替,加层后水深(距参考点)约



Fig. 4 Construction of physical model









图 6 起伏地表的物理模型 Fig. 6 Physical model of the undulating surface

41 mm,即有 41 mm 用水层代替。①二维一次覆盖 观测系统:炮距和道距相同为 2 mm,固定炮检距 20 mm,道和炮数 591。②二维多次盖观测系统:道 间距 2 mm,炮间距 4 mm,最小炮间距 20 mm,每炮 道数 248; 每测线炮数 260。实验室采样间隔为 0.2 μs, 转换为 0.23 ms, 采样点 4096。

## 4.2 模型原始数据品质分析

从物理模型原始单炮记录中可以看出,尽管该 物理模型地震数据的品质与地震勘探实际采集的数 据相似,但两者之间存在一些细微的差别,在地震记 录上可以清楚地分辨出来自水池壁侧反射干扰、模 型边缘介质分界面的绕射波干扰和各层分界面间的 多次波干扰,主反射层同相轴依然可以清晰地辨别 和追踪(戴世鑫等,2022;图10)。

由图 10 可以看出,模型左 (a) 来自模型边界的 干扰波及各层间的多次波相对较多;采集数据模型 中 (b) 层位清晰可见,各层之间多次波依然存在,而 来自模型边界的干扰减少;模型右 (c) 中可以看到右 下角中干扰波越接近右侧干扰越强烈。可得出,在



图 8 模型制作后的平面形态测试

Fig. 8 Planar morphology testing after model construction



866

图 9 现场采集示意图 Fig. 9 Schematic diagram of on-site data

实验室物理模型数据采集过程中,模型边界干扰波 出现"两侧强,中部弱"的特点。这也是物理模型数 据与野外实际数据的主要差别,存在明显的边界效 应,而上述从原始地震数据对界面干扰波的分析,为 后续物理模型数据与野外实际数据的对比分析提供 了可靠的依据。

#### 4.3 模型数据处理

为了改善地震数据的质量,必须采取有效的措施抑制干扰波。干扰波主要有多次波、面波、声波,以及各种地形造成的次生干扰。如图 11 所示,经带通滤波和 F-K 滤波处理后,直达波和多次波消失,各



图 10 物理模型原始单炮记录



a-模型左边界采集数据(选取3炮);b-模型中部采集数据(选取3炮);c-模型右边界采集数据(选取3炮)



图 11 物理模型 FK 滤波 Fig. 11 Physical model FK filtering a--滤波前; b---滤波后

地层反射波愈加明显。

利用地震处理软件,经道炮编辑-定义观测系统-道均衡-FK 滤波-反褶积-速度分析-动校正-叠加,对 采集的模型数据进行处理后,得到模型叠加剖面 (图 12)。与实际构建的物理模型层面基本吻合。对 叠加剖面进行了叠后偏移得到图 13,可以看出,偏移 归位效果较好,并且与实际模型基本一致,说明整个 地震数据预处理流程及处理参数是合理的(戴世鑫 等,2011)。

## 4.4 煤系地层小断层地震响应特征分析

在地震勘探中震源频率与探测的精度、深度有 很大关系。在叠加剖面的基础上,对不同埋深的小 断层进行开时窗分析,得到小断层地震响应情况 (图 14)。从图 14 可以看出,位于埋深 800 m 的小断 层,落差为 5 m 的小断层反射波同相轴发生弯曲,而 落差为 3 m 和 1 m 的小断层反射波同相轴没有明显 变化;位于埋深 1000 m 和 1200 m 的小断层,小断层 反射波同相轴基本上无明显变化。

## 5 结 论

(1) 以南方煤田——贵州省六盘水煤田为地质背景,由于小断层的制作难度及其特殊性,采用相似比的原理,将相似材料滑石粉、环氧树脂、硅橡胶、砂等严格按照一定的配比进行模型制作,采用特有的空间尺寸比1:2000,速度比1:1.74,实现了对不同埋深5m、3m和1m小断层的构建,制作完成了南方煤系地层小断层地震物理模型。

(2)本次实验仅完成了地震物理模型的制作与数 据采集,对采集的原始数据进行初步分析,发现该物 理模型地震数据的品质类似于地震勘探实际采集的 数据,但数据中又存在许多来自模型边界的干扰。 并对模型数据进行深层次的处理,得到叠加剖面与



Fig. 13 Migrated section of the model

#### 戴世鑫等:南方煤系地层小断层地震物理模型研究



Fig. 14 Response of small faults at different burial depths at source frequency of 60 Hz

a—埋深 800 m; b—埋深 1000 m; c—埋深 1200 m

实际构建的模型各层面基本一致,以提高目的层信 噪比,为后续对不同埋深和落差为5m、3m和1 m小断层进行识别研究提供依据,以便更全面地了 解小断层的波场特征。

#### References

- Balch A H, Karazincir H, Wang Y R. 1991. Diffraction imaging of oil-producing layers using crosswell seismic: A physical elastic model study[J]. Proceedings of the 61st Annual Meeting of the Society of Exploration Geophysicists. Colorado School of Mines: 268–272 (in Chinese).
- Blacquière G, Volker A, Ongkiehong L. 1999. 3–D physical modeling for acquisition geometry studies [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts. Society of Exploration Geophysicists: 665–668.
- Dai S X, Hu P, Dong Y J, et al. 2022. Patterns of small fault with different placing depth in typical coal fields in southern China[J]. Journal of Mining Science and Technology, 7(1): 123–133 (in Chinese with English abstract).
- Dai S X, Zhu G W, Zhang P, et al. 2011. Study on seismic physical model and seismic numerical model for deep coal measure strata[J]. China Mining Magazine, 20(8): 115–118 (in Chinese with English abstract).
- Dai S X, Zhu G W, Zhang P, et al. 2012. Technology of disturbing wave filtering in seismic model and its application[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 17(1): 21–25, 29 (in Chinese with English

abstract).

- Di B R, Wei J X, Xia Y G. 2002. Study on effects and precision of 3–D seismic physical model technique[J]. Oil Geophysical Prospecting, 37(6): 562–568 (in Chinese with English abstract).
- Lawton D C, Nazar Brad, Chen Taiwen, et al. 1991. Thin–Bedded channel sandstone: A physical seismic modeling study[C]// Proceedings of the 61st Annual Meeting of the Society of Exploration Geophysicists. Univ. of Calgary: 264–268 (in Chinese).
- Gui W C. 2011. Wire–line coring drilling drill tool combination for "South" Coalfields[J]. Coal Geology of China, 23(2): 64–67 (in Chinese with English abstract).
- Han T H, Dai S X, Li X H, et al. 2011. Seismic physical modeling research on coal measure strata in Huainan[J]. Journal of China Coal Society, 36(4): 588–592 (in Chinese with English abstract).
- House L, Roberts P, Yang X, et al. 1999. Imaging and modeling seismic data from a physical model of the SEG/EAGE salt structure[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts. Society of Exploration Geophysicists: 1017–1020.
- Li Y, Zhou Y B, Fu Z Y, et al. 2017. Wave-field characteristic of geophysical model experiment[J]. Mineralogy and Petrology, 37(3): 107–112 (in Chinese with English abstract).
- McDonald J A, Gardner G H F, Hilterman F J (Xu D K (translator)). 1988. Seismic physical modeling [M]. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
- Mou Y G. 2003. Seismic physical modeling of 3D complex media [M]. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).

- Schneider W A, Jr, Balch A H, Yu F Y. 1991. Seismic crosswell imaging of 2D and 3D physical elastic models using prestack reverse time migration [C]// Proceedings of the 61st Annual Meeting of the Society of Exploration Geophysicists. Exxon Production Research. Colorado School of Mines: 256–260 (in Chinese).
- Si W M, Di B R, Wei J X. 2015. Analysis of multiple-converted interference wave in seismic physical modeling data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 54(1): 17–23 (in Chinese with English abstract).
- Sun J Z, Guo T Q, Tang W B, et al. 1997. Theoretical research and practice of ultrasonic seismic model experiments in China[J]. Chinese Journal of Geophysics, (S1): 266–274 (in Chinese).
- Tang H F, Wang P J, Jiang C J, et al. 2007. Physical model and seismic recognition of concealed volcanic edifices of Yingcheng Formation in Songliao Basin, Cretaceous, NE China[J]. Progress in Geophysics, (2): 530–536 (in Chinese with English abstract).
- Wang L L, Wei J X, Huang P, et al. 2019. Fracture-sensitive poststack seismic attribute optimization based on the physical model[J]. Oil Geophysical Prospecting, 54(1): 127–136, 9–10 (in Chinese with English abstract).
- Wei J X, Di B R. 2006. Properties of materials forming the 3–D geological model in seismic physical model[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 45(6): 586–590, 15–16 (in Chinese with English abstract).
- Wei J X, Di B R, Mou Y G. 2002. Research on materials and construction of 3D complex physical model [C]//Annual of the Chinese Geophysical Society 2002—Proceedings of the 18th Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society. China University of Petroleum: 252–253 (in Chinese).
- Wei J X, Mou Y G, Di B R. 2002. Study of 3–D seismic physical model[J]. Oil Geophysical Prospecting, (6): 556–561, 660 (in Chinese with English abstract).
- Wu Y H, Tao X Y, Zhao Z Y, et al. 2025. Discovery and significant implication of the strike–slip faults in Kaijiang–Liangping trough of the Sichuan Basin[J]. Geological Bulletin of China, 44(1): 117–128 (in Chinese with English abstract).
- Yang K Y. 1997. New Discoveries on acoustic wave propagation velocity[J]. Modern Physics, (2): 26 (in Chinese).
- Yang R Q, Tang X G. 2014. Coal-bearing strata characteristic analysis in Lupanshui coalfield, Guizhou Province[J]. Coal Geology of China, 26(7): 28–32 (in Chinese with English abstract).
- Yang S A, Zhang Y B, Xu H Y. 2004. The application and development trend of the three–dimensional seismic exploration technology in the coalfield[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, (6): 500–503 (in Chinese with English abstract).
- Yi T S, Gao W. 2018. Reservoir formation characteristics as well as co-exploration and co-mining orientation of Upper Permian coal-bearing gas in Liupanshui Coalfield[J]. Journal of China Coal Society, 43(6): 1553–1564 (in Chinese with English abstract).

- Zhou S, Wang Y L, Han T B, et al. 2012. Minor fault joint-interpretation[J]. Oil Geophysical Prospecting, 47(S1): 50-54, 165-166, 162 (in Chinese with English abstract).
- Zhuang Y M. 2018. Study on the fine interpretation method of seismic multiattribute of small fault in coal seam[D]. Doctoral Dissertation of China University of Mining and Technology (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- Balch A H, Karazincir H, 王友仁. 1991. 利用井间地震对产油层绕射成 象:物理弹性模型研究[C]//美国勘探地球物理学家学会第 61 届年 会论文集. Colorado School of Mines: 268–272.
- McDonald J A, Gardner G H F, Hilterman F J(许大坤译). 1988. 地震物 理模拟[M]. 北京: 石油工业出版社.
- Schneider W A, Jr Balch A H, 于锋玉. 1991. 用叠前逆时偏移做二维和 三维物理弹性模型的地震井间成象[C]//美国勘探地球物理学家学 会第 61 届年会论文集. Exxon Production Research. Colorado School of Mines: 256-260.
- Lawton D C, Nazar B, Chen T W, 等. 1991. 薄层河道砂岩: 一项物理地 震模拟研究 [C]//美国勘探地球物理学家学会第 61 届年会论文集. Univ. of Calgary: 264-268.
- 戴世鑫, 胡盼, 董艳娇, 等. 2022. 南方典型煤田不同埋深小断层识别规 律研究[J]. 矿业科学学报, 7(1): 123-133.
- 戴世鑫,朱国维,张鹏,等. 2011. 深部煤系地质条件地震物理与数值模型研究[J]. 中国矿业, 20(8): 115-118.
- 戴世鑫,朱国维,张鹏,等. 2012. 地震模型干扰波去除技术的研究与应用[J]. 煤矿开采, 17(1): 21-25, 29.
- 狄帮让,魏建新,夏永革.2002. 三维地震物理模型技术的效果与精度 研究[J]. 石油地球物理勘探, 37(6): 562-568.
- 桂望成. 2011. 南方煤田绳索取心钻进的配套问题[J]. 中国煤炭地质, 23(2): 64-67.
- 韩堂惠,戴世鑫,李小华,等.2011.淮南煤系地层地震物理模型研 究[J].煤炭学报,36(4):588-592.
- 李勇,周钰邦,付争妍,等.2017.基于地球物理模型实验的波场特征[J].矿物岩石,37(3):107-112.
- 牟永光. 2003. 三维复杂介质地震物理模拟[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 司文朋, 狄帮让, 魏建新. 2015. 地震物理模型实验数据中多次转换干扰波的分析[J]. 石油物探, 54(1): 17-23.
- 孙进忠, 郭铁栓, 唐文榜, 等. 1997. 我国超声地震模型试验的理论研究 与实践[J]. 地球物理学报, (S1): 266-274.
- 唐华风,王璞珺,姜传金,等.2007.松辽盆地白垩系营城组隐伏火山机 构物理模型和地震识别[J].地球物理学进展,(2):530-536.
- 王玲玲, 魏建新, 黄平, 等. 2019. 依托物理模型的叠后裂缝敏感地震属 性优选与应用[J]. 石油地球物理勘探, 54(1): 127-136, 9-10.
- 魏建新, 狄帮让. 2006. 地震物理模型中三维地质模型材料特性研 究[J]. 石油物探, 45(6): 586-590.
- 魏建新, 狄帮让, 牟永光. 2002a. 三维复杂物理模型材料和制作研 究[C]//中国地球物理学会年刊 2002——中国地球物理学会第十八 届年会论文集. 石油大学: 252-253.

- 魏建新, 牟永光, 狄帮让. 2002b. 三维地震物理模型的研究[J]. 石油地 球物理勘探, (6): 556-561, 660.
- 吴永宏, 陶夏妍, 赵忠宇, 等. 2025. 四川盆地开江-梁平海槽走滑断层 的发现与启示[J]. 地质通报, 44(1): 117-128.
- 杨揆一. 1997. 关于声波传递速度的新发现[J]. 现代物理知识, (2): 26.
- 杨瑞琴, 唐显贵. 2014. 贵州省六盘水煤田含煤地层特征分析[J]. 中国煤炭地质, 26(7): 28-32.
- 杨双安,张胤彬,许鸿雁. 2004. 煤田三维地震勘探技术的应用及发展

前景[J]. 物探与化探, (6): 500-503.

- 易同生,高为.2018. 六盘水煤田上二叠统煤系气成藏特征及共探共采 方向[J]. 煤炭学报,43(6):1553-1564.
- 中华人民共和国国土资源部.2017.中华人民共和国地质矿业行业标 准地震勘探规范 (DZ/T0300—2017)[S].北京:地质出版社.
- 周赏, 王永莉, 韩天宝, 等. 2012. 小断层综合解释技术及其应用[J]. 石油地球物理勘探, 47(S1): 50-54, 165-166, 162.
- 庄益明.2018.煤层小断层地震多属性精细解释方法研究[D].中国矿 业大学博士学位论文.