

doi: 10.11720/wtyht.2021.0055

裴肖明,冯国瑞,戚庭野.瞬变电磁法探测复杂状态下煤矿充水采空区物理模拟实验[J].物探与化探,2021,45(4):1055-1063.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.0055>

Pei X M, Feng G R, Qi T Y. Physical simulation experiment for detecting water-filled goaf of coal mine under complex conditions bases on transient electromagnetic method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(4): 1055-1063. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.0055>

瞬变电磁法探测复杂状态下煤矿充水采空区物理模拟实验

裴肖明^{1,2}, 冯国瑞^{1,2}, 戚庭野^{1,2}

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 山西省绿色采矿工程技术研究中心, 山西 太原 030024)

摘要: 煤矿充水采空区形成后, 分布形态各异且位置不明, 因此极易造成严重水害事故。为了精准定位充水采空区并研究其电磁响应特征, 本文选择神东煤矿 1 号煤层为工程背景, 采用亚克力玻璃架子充当实验台, 并使用相似模拟材料充当各岩层设计了不同积水量以及不同垮落岩体存在状态下充水采空区的瞬变电磁探测物理实验。结果表明: 当采空区内充水时, 感应电动势曲线在衰减过程中会受到低阻效应而产生异常的“上凸”现象, 且充水量越大异常幅度越明显。垮落岩体的存在会有限地减弱低阻异常效应。当采空区内未充水时, 感应电动势曲线正常衰减, 此时垮落岩体产生的影响可忽略不计。本次研究对于煤矿采空区水害防治具有重要意义。

关键词: 瞬变电磁法; 充水采空区; 物理模拟实验; 感应电动势衰减曲线

中图分类号: P631.325 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2021)04-1055-09

0 引言

近年来, 随着煤炭资源大量开采, 遗留的积水采空区数目也显著增加, 进而可能在煤层采掘工作中引起重大的煤矿水害事故^[1-3]。瞬变电磁法作为地球物理探测法的代表, 其对低阻体(积水)反应灵敏、地形要求低、体积小以及工作效率高等优点^[4-5]使得该方法广泛应用于积水采空区的勘探任务中。物理模拟实验能真实客观地模拟现场实际工况, 得到地下积水采空区的响应特征, 从而增加结果的可靠性, 目前关于瞬变电磁法探测采空区的物理实验也有大量的研究。姜志海和焦险峰^[6]采用矿井瞬变电磁超前探测扇面扫描采样法, 构建全空间物理模型并对柱状良导体与低阻薄板进行了超前探测; 焦险峰和刘志新^[7]设计 3 种线圈装置对不同状态的浅埋异常体(金属棒)进行了瞬变电磁探测实验, 并

证明可用于浅层积水采空区的勘探工作; 许时昂等^[8]以圆形铜球模拟巷道中的积水采空区域, 设计了连续重叠覆盖的瞬变电磁超前探测物理实验进行分析研究; 张广博^[9]使用铜棒与铜板模拟积水异常体设计物理模拟实验, 研究在掘进过程中线圈与异常体在不同距离条件下 X 、 Y 、 Z 三分量的瞬变电磁响应特征; 邢修举等^[10]选择淡盐水池作为实验场地、圆柱体铜棒作为积水采空区设计物理实验, 并采用三维瞬变电磁超前探测技术研究隧道积水采空区的响应特征; 王国库^[11]开展了相似比为 1:100 的大型水槽物理模拟实验, 研究采空区在不同含水率条件下的瞬变电磁响应特征; 王巍等^[12]选用花泥模拟围岩, 低阻球体模拟积水异常体建立物理实验模型, 研究其在凸地形、凹地形、斜坡以及不同坡度等条件下深埋积水采空区的电磁响应特征; 高彬^[13]以正方体纸箱为承载体设计了立方体六通道对偶发射模型, 开展了矿井多通道瞬变电磁法探测地下巷道积

收稿日期: 2021-01-28; 修回日期: 2021-03-03

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目(U1710258, U1810120); 国家自然科学基金项目(51925402, 51804208); 山西省重点研发计划(社会发展领域)项目(201803D31044)

第一作者: 裴肖明(1994-), 男, 山西朔州人, 硕士研究生, 主要从事电磁法探测技术研究。Email: pxm2998944218@163.com

通讯作者: 冯国瑞(1976-), 男, 山西阳城人, 教授, 博士生导师。Email: fguorui@163.com

水采空区的物理模拟实验,验证了该方法具有判断低阻异常体方位的能力。

上述各项研究虽然进行了大量的物理实验,但仅能达到精准探测积水采空区的大致方位,同时也很少对复杂分布状态下的积水采空区具体的响应特征值进行探究。基于此,本文通过设计瞬变电磁探测的相似模拟实验,对不同积水量以及不同垮落岩体存在状态下积水采空区的感应电动势响应进行定量分析,得到各自模型条件下的瞬变电磁响应规律,这对于煤矿埋藏复杂的采空区积水水害防治也具有技术指导意义。

1 瞬变电磁物理模拟实验系统

1.1 相似性准则

物理模拟实验的目的是最大限度地还原现场地质状况,从而更直观、准确地描述煤矿积水采空区的瞬变电磁响应特征^[14-15],由于实验条件有限,需满足相似性准则,通过计算合适的相似比复制现场地电模型来达到目的。由于所有电磁现象理论都基于麦克斯韦方程组进行推导,因而其相似性原理也是以该方程组为出发点,时间域瞬变电磁法的基本准则由两大方程式表示^[16-17]:

$$\frac{\sigma_m \mu_m L_m^2}{t_m} = \frac{\sigma_f \mu_f L_f^2}{t_f}, \quad (1)$$

$$\frac{\varepsilon_m \mu_m L_m^2}{t_m^2} = \frac{\varepsilon_f \mu_f L_f^2}{t_f^2}. \quad (2)$$

式中: $\sigma_m, \mu_m, L_m, \varepsilon_m, t_m$ 分别代表物理模拟实验的电导率、磁导率、几何长度、介电常数以及采样时间, $\sigma_f, \mu_f, L_f, \varepsilon_f, t_f$ 分别表示野外探测试验的电导率、磁导率、几何长度、介电常数以及采样时间。

介电常数会影响位移电流的变化,本次研究并不考虑位移电流的影响,因而基本准则的表达式选择式(1),这是对整个瞬变电磁几何形态的模拟。但是,瞬变电磁响应参数为有量纲的参量,所以既需要模拟电磁系统的几何分布形态,也需模拟系统的绝对值,确定模拟的几何比例,称之为绝对(比例)模拟。以 Lee 和 Leawis 给出的均匀空间理论公式为例,其响应表达式为

$$\frac{\varepsilon(t)}{I} = \frac{-2I\mu\sqrt{\pi}}{t} \cdot F\left(\frac{\sigma\mu L^2}{t}\right), \quad (3)$$

式中: $\varepsilon(t)/I$ 的部分为归一化的感应电动势; L 为线圈半径; F 为辅助函数; $\sigma\mu L^2/t$ 为无量纲部分, $-2I\mu\sqrt{\pi}/t$ 为有量纲部分。在电磁场物理模拟中,一般假

设模型所处介质不具备导磁性,磁导率 μ 均为常量,参考式(3)可知,感应电动势响应与 L/t 呈正比关系,因而还需研究附加条件来满足绝对模拟条件,也叫作振幅校正系数,表达式如下:

$$\frac{V_f}{V_m} = \frac{L_f}{L_m} \cdot \frac{t_m}{t_f}. \quad (4)$$

由于野外现场试验与物理模拟实验所用设备完全一致,因而有 $t_m = t_f$,所以式(1)可作简化运算

$$\sigma_m L_m^2 = \sigma_f L_f^2, \quad (5)$$

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_f} = \left(\frac{L_f}{L_m}\right)^2 = k^2. \quad (6)$$

式中 k 为线型比例尺,又称作缩比系数。本次实验选择缩比系数为 100 来对现场地层特征与电磁参数进行模拟。

1.2 工程背景

神东煤矿位于陕西省北部、晋陕蒙三省交界地带,其中心位置在鄂尔多斯大型聚煤盆地的东北部,主要可采煤层为侏罗系中下统延安组的 1、2⁻²、3⁻¹、4 和 5⁻² 号煤层。乌兰木伦河贯穿整个研究区域,植被稀少,地表水系没有发育,年降雨量较少且大部分流失,从而形成的地下水量较少,但容易在局部煤矿采空区内积聚,进而造成严重煤矿积水水害。

选择 1 号煤层为工程背景,地层分布见表 1。该煤层厚度在 3.0~11.9 m,平均厚度 9.3 m;埋深浅,距地表 60~70 m;煤层结构简单,部分含有砂质泥岩夹矸;顶板岩层主要为细砂岩、粉砂岩,部分地段为中粗砂岩,底板主要为砂质泥岩与泥岩。煤矿各地层电阻率分别为:砂岩,10~10⁵Ω·m;煤层,10~10⁴Ω·m;石灰岩,60~4×10⁵Ω·m;(砂质)泥岩,10~300Ω·m;矿井水,1~10Ω·m。

表 1 神东煤矿 1 号煤层地层分布

Table 1 Formation distribution table of No.1 coal seam in Shendong coal mine

地层名称	平均厚度 /m	埋深/m	岩层	岩层地质特征
	2.90	38.64	细砂岩	细砂岩
	20.28	41.54	粉砂岩	多为粉砂岩,极少量细砂岩,含有植物化石碎片
侏罗系中、下统延安组(J ₁₋₂ ^y)	5.49	61.82	中粗砂岩	主要为中粗砂岩
	9.37	67.31	1号煤层	结构简单,全区可采,为本区主采煤层
	8.09	75.40	砂质泥岩	灰黑色砂质泥岩,含大量植物化石碎片
	4.22	79.62	泥岩	泥岩
	4.70	84.32	粉砂岩	主要为粉砂岩,含有植物化石碎片

1.3 物理模型

为了实现模型的装填、压实以及方便观察积水采空区的形态,本次实验使用长 100 cm、宽 60 cm、高 50 cm 的亚克力有机玻璃架子作为实验台,参照神东煤矿侏罗系 1 号煤层的顶底板岩性以及实验台参数,采用砂子、石灰、石膏以及水 4 种相似模拟材料^[18-19]进行配比。经过计算,确定几何相似比为 100:1,容重相似比为 1.6:1,应力相似比为 160:1。

根据上述比例来构建各地层模型并铺设在亚克力玻璃架子中,其岩层的相似模拟材料配比如表 2 所示。模型从上至下依次为细砂岩层、粉砂岩层和中砂岩层、煤层以及砂质泥岩层,在煤层部分留有长

50 cm、宽 60 cm、高 10 cm 的空腔作为采区,两侧模拟煤柱部分同时在煤层与上覆岩中间加一玻璃板固定。在玻璃架子左右两侧开有直径为 2 cm 圆孔插入导水软管以控制积水量,同时在空腔周围涂上水泥浆结构防止积水对相似模拟材料构成破坏,在玻璃架子的后侧面开槽控制垮落岩体的投放,垮落岩体根据顶板层材料配比完成制备,通过导水软管排放水来控制水量,分别对全充水、充 1/2 水、未充水、全充水含垮落岩体、充 1/2 水含垮落岩体以及未充水含垮落岩体 6 种条件下的积水采空区进行探测,整体的物理模拟系统如图 1 所示。

表 2 岩层相似模拟材料配比

Table 2 Proportion of similar materials in rock layers

岩层	层序	铺设高度/m	配比号	砂子/kg	石灰/kg	石膏/kg	水/kg
细砂岩	5	0.03	546	26.19	2.09	3.15	3.15
粉砂岩	4	0.20	637	125.50	6.50	14.50	14.50
中砂岩	3	0.05	537	47.22	2.82	6.61	5.69
煤	2	0.1	873	62.00	5.50	2.25	7.00
砂质泥岩	1	0.08	673	50.64	5.12	2.24	5.76
总量		0.46		311.55	22.03	28.75	36.10



图 1 物理模拟系统示意

Fig.1 Schematic diagram of physical simulation model

为研究所铺设各岩层的电性,根据表 2 中的相似材料配比依次制作细砂岩层、粉砂岩层、中砂岩层、煤层、砂质泥岩层的立方体试件,其大小均为 10 cm×10 cm×10 cm,如图 2 所示。之后在各试件顶端和底部各放置铜片,利用多通道电阻仪的两个金属钳夹住 2 个铜片,并放一重物压紧模拟试件来准确测量每个模拟试件的电阻值。根据电阻的计算公式: $R = \rho \frac{L}{A}$,便可求出对应材料的电阻率值。式中: R 为所测电阻值, L 为两铜片间的距离, A 为试件的底面积, ρ 为电阻率。由于本次制作均为边长为

10 cm 的立方体标准试件,所以其底面积 A 均为 0.01 m²,距离 L 均为 0.1 m。求出电阻率后,即可同现场岩层的电性特征相对应,整个测量过程如图 3 所示。整理到各相似模拟试件的电阻率情况如表 3 所示。经对比,本次相似模拟岩层的电阻率值与现场岩层的电阻率范围区间的变化规律基本一致。

1.4 实验装置

仪器选用 SMARTem24 瞬变电磁系统进行探测工作,该系统主要由发射装置与接收装置组成。发射装置主要包括 12 V 汽车蓄电池、滑动变阻器以及瞬变电磁发射机,其中蓄电池用以供电,所串联的滑



图 3 电阻测试系统示意

Fig.3 Schematic diagram of resistance test system

表 3 各相似模拟试件的电性特征

Table 3 Electrical characteristics of similar simulated specimens

模拟岩层	细砂岩	粉砂岩	煤层	中砂岩	砂质泥岩	含水层
电阻率/($\Omega \cdot m$)	$(3.4 \sim 3.5) \times 10^3$	$(7.6 \sim 7.7) \times 10^3$	$(2.5 \sim 2.6) \times 10^3$	$(6.8 \sim 6.9) \times 10^3$	$(2.6 \sim 2.7) \times 10^2$	1~5

动变阻器来控制发射电流处于安全值,发射机在发射线圈上提供电流信号。接收装置包括瞬变电磁接收主机以及探测线圈,接收主机用于接收所探测的电磁响应信号并成图,探测线圈由多根白色多芯漆包线均匀缠绕而成电线构成,这种线具有较大的电阻值且线径较小,能大大提高信噪比从而最大程度地抑制自藕效应^[14],此外在线圈绕制时,各匝线圈用等边方形塑料框架作回线支架,并且采用重叠回线式线圈组合装置进行实验,也能进一步降低自感、互感等的干扰,保证探测数据准确。由于积水采空层埋深较浅,根据相似性准则中缩比系数 k 以及具体设计情况确定发射线圈边长为 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 、绕制 9 匝,接收线圈边长为 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 、绕制 27 匝^[6, 17]。具体的参数设置如下:发射电流 9 A,发射频率为 6.25 Hz,探测的采样时间为 34 ms;时间窗口

数为 28;测线与测点采用 $15\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 的网格进行布置,即线距 15 cm,点距 10 cm,共探测 0、10、20 三条测线,测点以 10 号为起点,90 号为终点从左向右依次布设 9 个测点,如图 4 所示。

2 探测结果的分析与讨论

通过所模拟计算的感应电动势衰减曲线来具体研究各积水采空区的瞬变电磁响应特征,如图 5 所示,经过数据处理与分析,选择各自测线上测点 10、20、30、40、50 上的衰减曲线进行研究。当采空区全充水时,在采样时间 0.5~3.2 ms 的区间(异常反映时间段)内,感应电动势在衰减期间会受到低阻效应影响,衰减速率减慢,导致各衰减曲线出现明显的异常“凸起”现象,形态变为“S”形,且该时间内响

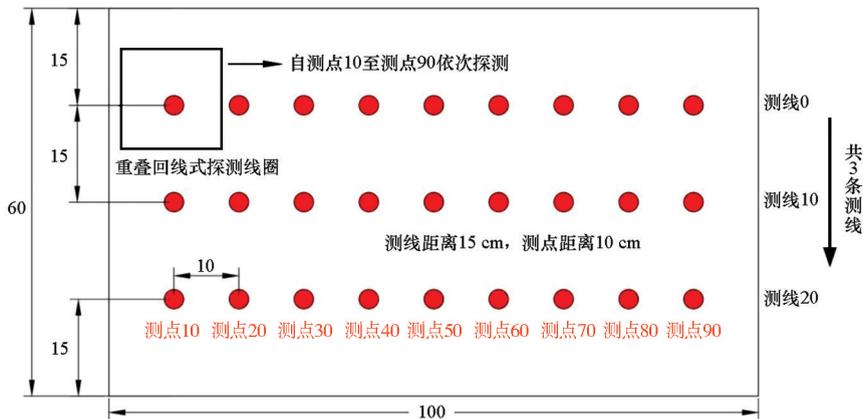


图 4 测线测点布置

Fig.4 Layout of surveying lines and points

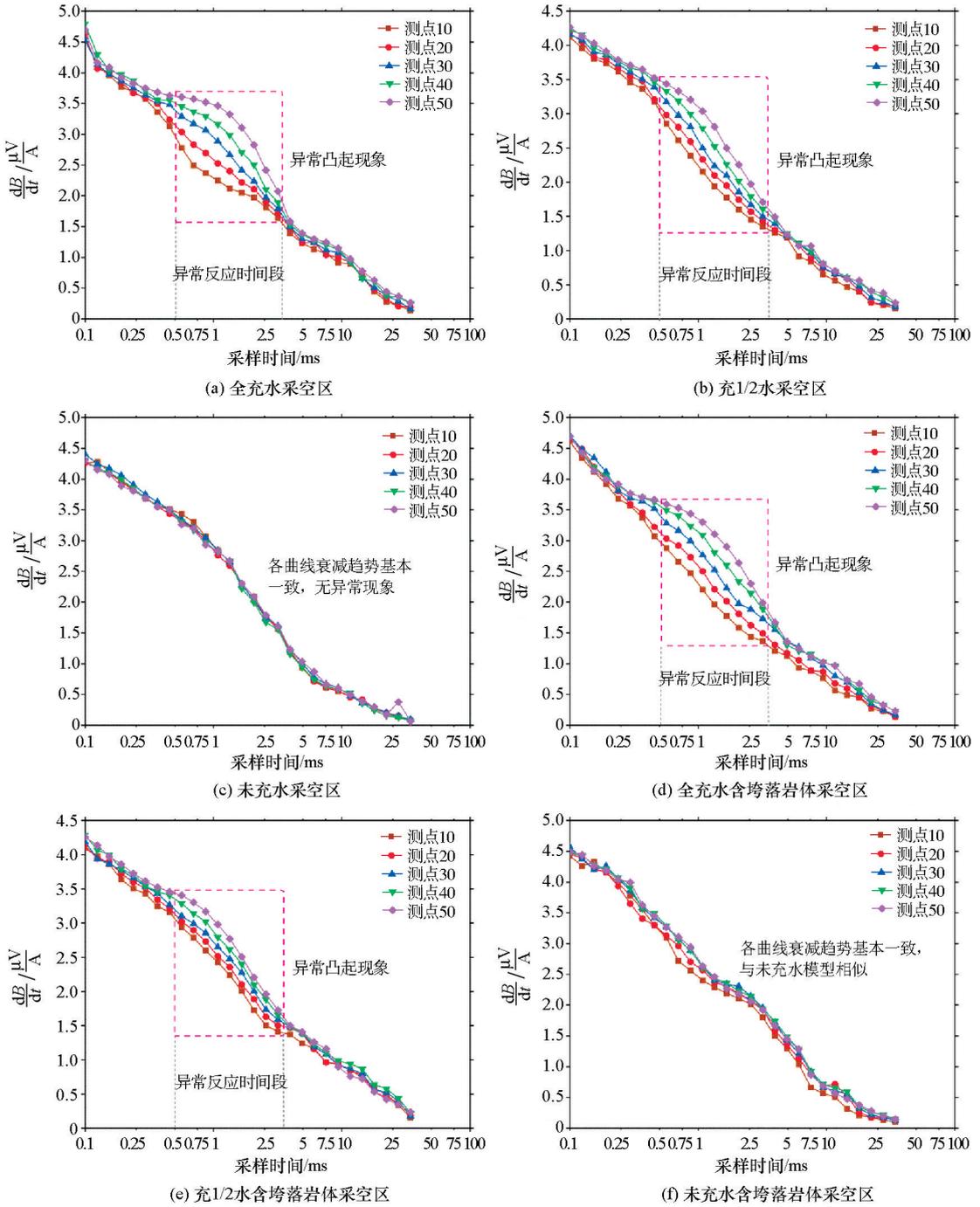


图5 不同状态充水采空区的衰减电动势曲线

Fig.5 Curves of decay electromotive force of water-filled goaf in different states

应值急剧上升,同时测点距离积水区越近,整体的电动势数值越大。当采空区内含 1/2 量的积水时,由于采空区内空气的影响,积水造成的低阻效应有所减弱,各曲线仍会出现小幅度的异常“凸起”现象,对应该时间内响应值也有小幅度的增加。当采空区内未积水时,在整个采样时间区间内,各衰减曲线趋势近乎重合,并无明显的异常现象发生,且形态变为规律衰减形态。当采空区内充水(包括全充水条件与充 1/2 水条件)且含有垮落岩体时,由于垮落岩

体的高阻特性使得电动势曲线在异常反映时间段内仍然出现明显的“凸起”异常,但异常幅度相较于不含垮落体模型有所降低,曲线的整体衰减趋势与不含垮落体的模型类似,表明垮落岩体产生的影响十分有限。当采空区内没有充水且含有垮落体时,感应电动势的衰减曲线基本重合,分布规律与未充水采空区模型十分相近。

上述 6 种积水采空区模型主要根据积水量以及有无垮落岩体两大因素进行分类分析,下面对这两

个因素对衰减电动势的响应特征进行研究。选择位于积水采空区中心位置上方的 50 号测点对其不同充水量条件下感应电动势的衰减曲线图如图 6a 所示。衰减电动势的响应值大小取决于不同埋深深度下地层的电阻值,由于各采空区模型所铺设的上覆岩层设定相同,3 种积水量条件的采空区模型的初始响应值基本相同。之后,由于采空内积水的存在,感应电动势在衰减过程中会受到低阻效应的影响,曲线在 0.5~3.2 ms 的采样时间内会产生异常的“上凸起”现象,在异常过程中的响应值关系为全充水 > 充 1/2 水 > 未充水模型。整个衰减过程表明积水量越大,其产生的低阻效应与异常反映程度越强,同时其感应电动势响应的衰减速率越慢,响应值越高。

对异常反映发生时间段内不同积水量采空区的感应电动势响应进行定量分析,以未充积水模型为基准,研究其衰减电动势的增幅特征,列出异常阶段

响应值大小如表 4 所示,并根据表中数据,得到响应值的增幅情况,如图 6b 所示。选择未充水模型作为参照量,对于充 1/2 水的采空区,其增幅由 6.61% 开始单调递增,到采样时间 1.08 ms 时达到最大值 12.86%,之后由于瞬变电磁波继续开始远离积水采空层,其电磁信号逐渐减弱,进而导致衰减电动势响应值逐步减小,增加倍数也不断下降,在 3.1840 ms (异常时间末)处达到 6.32%;全充水模型的初始增加比率为 10.56%,之后按二次函数式单调递增,在 2.066 ms 达到最大值 35.35%,之后呈下降趋势,最后降至 22.81%。从整个异常衰减过程可以看出,采空区积水量越多,其电动势响应值增加的百分比与幅度就越高,同时响应值到达极大值的时间也越长,即异常持续的时间越长,且增幅曲线呈现先递增后减小的趋势。

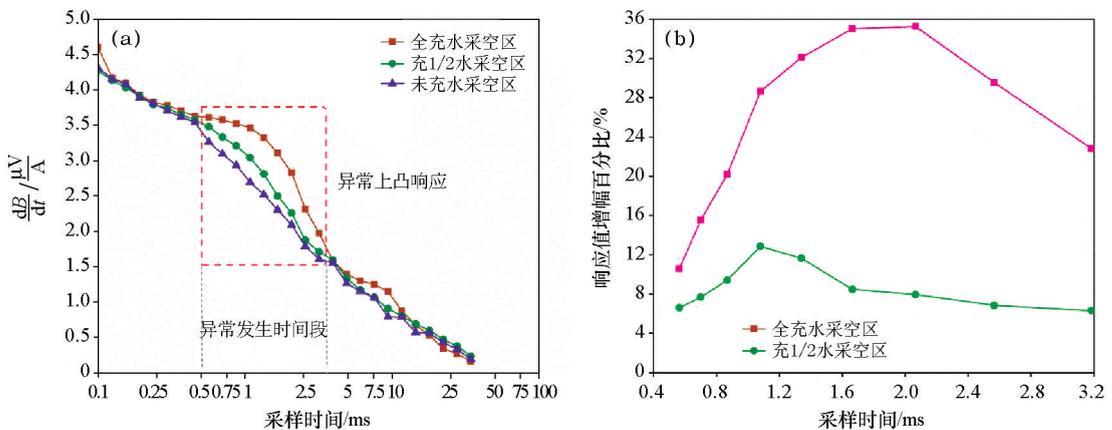


图 6 不同积水量采空区衰减电动势曲线 (a) 及衰减电动势响应增幅特征 (b)

Fig.6 Attenuation electromotive force curves in goaf with different amounts of accumulated water (a) and the increase characteristics of induced electromotive force (b)

表 4 不同充水量采空区的衰减电动势响应值

Table 4 Response value of attenuation electromotive force in goaf with different water filling

充水状态	采样时间/ms								
	0.5645	0.7005	0.8695	1.0800	1.3405	1.6640	2.0660	2.5645	3.1840
全充水	3.6301	3.5741	3.5219	3.4630	3.3243	3.1076	2.8268	2.4148	2.0729
充 1/2 水	3.4773	3.3705	3.2642	3.0884	2.8599	2.5970	2.2564	1.9737	1.7080
未充水	3.2616	3.0930	2.9304	2.6923	2.5167	2.3015	2.0897	1.7868	1.6064

不同垮落岩体存在状态对充水采空区电磁响应的影响如图 7 所示,从全充水、充 1/2 水以及未充水三种条件下进行对比分析。垮落岩体由上顶板岩层垮塌形成,内部物理性质发生改变,致使其电阻值相对围岩很高,存在高阻特性。但积水的影响对于瞬变电磁信号占主体位置,因此当采空区充水时,包括全充水模型和充 1/2 水模型在异常“凸起”时间内 (0.5~3.2 ms),含跨落岩体采空区模型的感应电动

势相较于无垮落体模型在衰减过程中产生的异常现象会减弱,并且响应值也会有小幅度的减少。整体而言,呈高阻特性的垮落岩体将有限地减弱低阻异常效应。当采空区未充水时,在空气与垮落体的高电阻作用下,瞬变电磁信号的穿透力很差,难以识别地下目标,此时两条衰减曲线基本重合分布,垮落岩体的影响可以忽略。

对异常反映时间段内不同垮落岩体存在状态采

空区的感应电动势响应进行定量分析,设定无垮落体的充水采空区模型为参照量,研究其衰减电动势的减幅特征,当采空区未充水时,垮落体产生的影响可忽略不计,因而不对其进行分析。列出全充水条件与充 1/2 水条件下的异常阶段响应值大小如表 5 所示,并根据表中数据得到响应值的减幅情况,如图 8a、b 所示。对于全充水模型,其降幅在异常初始时间 0.564 5 ms 时为 1.07%,之后响应值减小的百分比大跨度递增,在 2.066 ms 处达到极大值 7.17%,此时

比率增长的斜率开始急剧下降,到 3.184 0 ms 时降为 4.26%。充 1/2 水模型的初始降低比率为 1.06%,整个变化形式为先上升后下降,其电动势响应值的降幅先不断增加,到 1.08 ms 处达到极大值 4.70%,随后开始下降,在异常时间末降幅变为 0.56%。从整个异常衰减过程可以看出,垮落岩体可以有限抵消积水带来的低阻异常效应影响,使感应电动势响应值显示出极微小的下降,但目标体仍会产生明显的低阻异常反映。

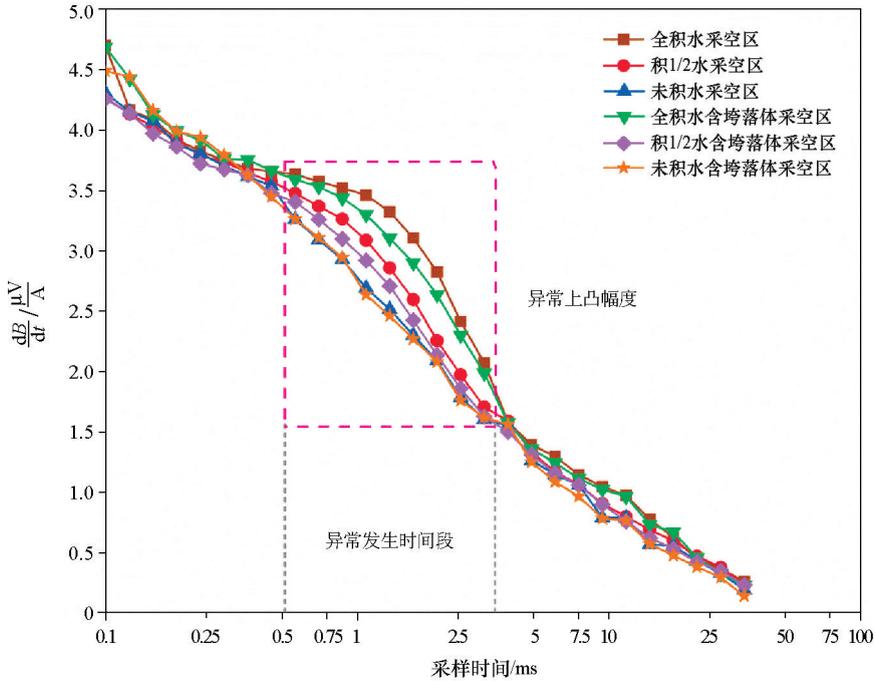


图 7 不同垮落体存在状态充水采空区衰减电动势曲线

Fig.7 Curves of attenuation electromotive force in the water-filled goaf with different existence status of collapsed bodies

表 5 不同垮落体存在状态充水采空区的衰减电动势响应值

Table 5 Response values of attenuation electromotive force of water-filled goaf in different the existence status of collapsed bodies

充水状态	采样时间/ms								
	0.5645	0.7005	0.8695	1.0800	1.3405	1.6640	2.0660	2.5645	3.1840
全充水	3.6301	3.5741	3.5219	3.4630	3.3243	3.1076	2.8268	2.4148	2.0729
全充水含垮落体	3.5917	3.5320	3.4377	3.3002	3.1049	2.9011	2.6377	2.3024	1.9881
充 1/2 水	3.4773	3.3705	3.2642	3.0884	2.8599	2.5970	2.2564	1.9737	1.7080
充 1/2 水含垮落体	3.4071	3.2613	3.0995	2.9220	2.7115	2.4262	2.1357	1.8610	1.6282

3 结论

通过设计充水采空区的瞬变电磁相似模拟探测实验,可得到 6 种不同状态充水采空区模型的瞬变电磁响应特征,结论如下。

1) 采空区内的充水量越大,低阻效应的影响就越明显,感应电动势衰减曲线在采样时间约 0.5 ~

3.2 ms 内出现的异常“上凸”幅度就越大。全充水模型的衰减曲线呈“S”形,充 1/2 水的曲线呈“拱桥”形态;对于未充水采空区,各曲线衰减趋势基本一致,衰减速率处于正常水平。

2) 垮落岩体的存在会微小地减弱充水采空区在衰减过程中受到的低阻效应,同时全充水含垮落体模型对应的衰减电动势响应的减幅大于充 1/2 水含垮落体的采空区模型。此外,当充水采空区内含

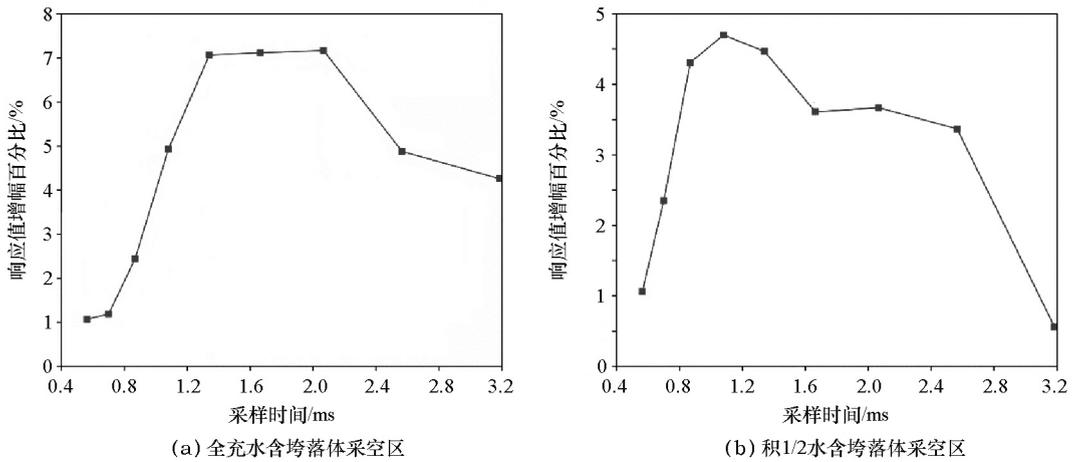


图8 不同充水条件下衰减电动势响应减幅特征

Fig.8 Amplitude reduction characteristics of attenuation electromotive force response under different water-filled conditions

有垮落体时,感应电动势响应仍然存在明显的异常增大,表明呈低阻特性的积水与高阻垮落体相比,其对于瞬变电磁信号的影响更大。

3)以未充水模型的电动势响应值为基准,全充水模型的最大增幅比为35.35%,且到达最大值时间为2.066 ms;充1/2水模型的最大增幅比为12.86%,且到达最大值时间为1.08 ms。以不含垮落体模型为基准,全充水含垮落体模型的感应电动势减幅比最大为7.17%,充1/2水含垮落体模型的减幅比最大为4.70%,其到达最大值时间分别为2.066 ms和1.08 ms。由此表明采空区内充水量越大,其感应电动势的增幅就越大;当含有垮落岩体时,感应电动势的减幅越大,同时响应值到达极大值的时间就越久。

4)通过感应电动势响应变化规律再次证明积水量对于感应电动势响应的变化影响极大。瞬变电磁法在充水的低阻介质中探测效果更显著,灵敏度更高,电磁信号响应更强烈,而对于未充水的高阻体来说,电磁波穿透介质的能力很差,响应强度也更弱。这也为现场积水区探测工作提供了技术指导。

参考文献 (References):

[1] 李琰庆,赵华杰,夏抗生. 废弃煤矿诱发的透水机理及防治技术[J]. 煤矿安全,2020,51(6):87-92.
Li Y Q, Zhao H J, Xia K S. Mechanism and control technology of water inrush caused by abandoned coal mines[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(6): 87-92.

[2] 李文平,乔伟,李小琴,等. 深部矿井水害特征、评价方法与治水勘探方向[J]. 煤炭学报,2019,44(8):2437-2448.
Li W P, Qiao W, Li X Q, et al. Characteristics of water disaster, evaluation methods and exploration direction for controlling groundwater in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2437-2448.

[3] 武强,崔芳鹏,赵苏启,等. 矿井水害类型划分及主要特征分析

[J]. 煤炭学报,2013,38(4):561-565.

Wu Q, Cui F P, Zhao S Q, et al. Type classification and main characteristics of mine water disasters[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4): 561-565.

[4] 张银松,李斌,张家刘. 瞬变电磁法在水域地质勘察中的应用[J]. 物探与化探,2016,40(1):160-162.
Zhang Y S, Li B, Zhang J L. The application of the transient electromagnetic method to the waters geological investigation[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(1): 160-162.

[5] 卢云飞,薛国强,邱卫忠,等. SOTEM研究及其在煤田采空区中的应用[J]. 物探与化探,2017,41(2):354-359.
Lu Y F, Xue G Q, Qiu W Z, et al. The research on SOTEM and its application in mined-out area of coal mine[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(2): 354-359.

[6] 姜志海,焦险峰. 矿井瞬变电磁超前探测物理实验[J]. 煤炭学报,2011,36(11):1852-1857.
Jiang Z H, Jiao X F. Physical experiment of mine transient electromagnetic advanced detection[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(11): 1852-1857.

[7] 焦险峰,刘志新. 瞬变电磁法浅层分辨率物理模型实验研究[J]. 中国矿业大学学报,2014,43(4):738-741.
Jiao X F, Liu Z X. Physical model and experimental research on shallow resolution of transient electromagnetic method[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(4): 738-741.

[8] 许时昂,孙松,韩鹏飞,等. 瞬变电磁重叠覆盖超前探水模拟测试研究[J]. 工程地球物理学报,2014,11(1):40-43.
Xu S A, Sun S, Han P F, et al. Simulation and test study of the overlapping coverage of detecting water in advance by Transient Electromagnetic Method[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2014, 11(1): 40-43.

[9] 张广博. 掘进工作面富水区瞬变电磁法多分量探测物理模拟及应用[D]. 徐州:中国矿业大学,2016.
Zhang G B. Physical simulation and application of multi-component Transient Electromagnetic Method in heading faces of water-rich area[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2016.

- [10] 邢修举,吴正飞,张依瑞,等. 三维瞬变电磁超前探测技术在隧道探水中的应用[J]. 现代隧道技术,2020,57(1):162-167.
Xing X J, Wu Z F, Zhang Y R, et al. Application of 3D transient electromagnetic advance detection technology in tunnel water exploration[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(1): 162-167.
- [11] 王国库. 不同含水率采空区瞬变电磁响应特征研究[D]. 北京:煤炭科学研究总院,2019.
Wang G K. Study on transient electromagnetic response characteristics of goaf with different water content[D]. Beijing: China Coal Research Institute Co., Ltd., 2019.
- [12] 王巍,韩吉民,陈剑杰,等. 起伏地形下隐伏异常体瞬变电磁法探测的模拟实验研究[C]//中国地质学会工程地质专业委员会. 第八届全国工程地质大会,2008.
Wang W, Han J M, Chen J J, et al. Research on model experiment of Transient Electromagnetic Method to detect deep underground cavities in complex terrain[C]// Geological Society of China Engineering Geology Professional Committee. Proceedings of the 8th National Engineering Geology Conference, Beijing: Editorial Department of Journal of Engineering Geology, 2008.
- [13] 高彬. 矿井多通道瞬变电磁响应特征研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2019.
Gao B. Study on the characteristics of mine multi-channel transient electromagnetic response[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2019.
- [14] 陈载林. 瞬变电磁法几种规则形体的物理模拟实验[J]. 物探与化探,2013,37(6):1092-1095.
Chen Z L. Physical simulation experiments on several regular shapes of Transient Electromagnetic Method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(6): 1092-1095.
- [15] 王欣. 曙光煤矿瞬变电磁超前探测物理模拟试验研究[J]. 机械管理开发,2018,33(7):143-144,147.
Wang X. Experimental study on physical simulation of Transient Electromagnetic advanced detection in Shuguang Coal Mine[J]. Mechanical Management and Development, 2018, 33(7): 143-144, 147.
- [16] 蒋邦远. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探[M]. 北京:地质出版社,1998.
Jiang B Y. Applied near zone magnetic source transient electromagnetic exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998.
- [17] 刘志新,刘树才,刘仰光. 矿井富水体的瞬变电磁场物理模型实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(2):259-266.
Liu Z X, Liu S C, Liu Y G. Research on transient electromagnetic field of mine water-bearing structure by physical model experiment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 259-266.
- [18] 姚琦,冯涛,王卫军,等. 矿山开采相似材料配比及力学试验研究[J]. 安全与环境学报,2017,17(6):2129-2134.
Yao Q, Feng T, Wang W J, et al. On preparing the materials as close as possible in the experimental ratio and mechanical properties with those gained from mining[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(6): 2129-2134.
- [19] 黄庆享,胡火明. 黏土隔水层的应力应变全程相似模拟材料和配比实验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2017,34(6):1174-1178.
Huang Q X, Hu H M. Experimental study of simulation material and matching for whole stress and strain process of clay aquiclude[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(6): 1174-1178.

Physical simulation experiment for detecting water-filled goaf of coal mine under complex conditions bases on transient electromagnetic method

PEI Xiao-Ming^{1,2}, FENG Guo-Rui^{1,2}, QI Ting-Ye^{1,2}

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Research Center of Green Mining Engineering Technology in Shanxi Province, Taiyuan 030024, China)

Abstract: After the formation of water-filled goaf in coal mines, the distribution patterns and locations are different and unclear. Therefore, it can easily cause serious water hazards. In order to accurately locate the water-filled goaf and study its electromagnetic response characteristics, the authors chose the Datong Majiliang coal mine as the engineering background, used acrylic glass shelves as the experimental platform, and took similar simulation materials as each rock layer to design the physical experiment of transient electromagnetic detection in the water-filled goaf under different water accumulation and existence situations of collapsed rock masses. The results demonstrate that, when the goaf is filled with water, the induced electromotive force curve will be affected by the low resistance effect during the attenuation process and produce an abnormal "upward" phenomenon, and the greater the water filling, the more obvious the abnormal amplitude is. The existence of collapsed rock mass will limitedly weaken the abnormal interference of low resistance. When the goaf is not filled with water, the induced electromotive force curve decays normally, and the impact of the collapsed rock mass is negligible.

Key words: transient electromagnetic method; water-filled goaf; physical simulation experiment; decay electromotive force curve