

doi: 10.11720/wtyht.2021.1443

陈健强,李雁川,田浩,等.含水采空区全空间瞬变电磁响应分析[J].物探与化探,2021,45(2):546-550.http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1443

Chen J Q, Li Y C, Tian H, et al. Whole-space transient electromagnetic detection of water-bearing goaf[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(2):546-550.http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1443

含水采空区全空间瞬变电磁响应分析

陈健强^{1,2,3}, 李雁川³, 田浩³, 李汉超³

(1.煤炭科学技术研究院有限公司安全分院,北京 100013; 2.煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室(煤炭科学研究总院),北京 100013; 3.山西晋煤集团技术研究院有限责任公司,山西晋城 048006)

摘要: 针对含水采空区全空间瞬变电磁响应信号识别问题,采用有限元数值模拟及现场实测方法,基于电动势—视电阻率及对应时深转换关系,获取了全扇面视电阻率随深度变化的空间分布规律,提取了低阻异常区测点感应电动势衰减曲线,得出了测点随探测角度变化的电动势量化变化规律。基于上述研究,开展了井下钻探验证及钻孔窥视,并对现场钻孔出水水样进行了水质分析。结果表明:含水采空区的瞬变电磁响应横向角度对应一致性高于纵向深度;其感应电动势升幅与感应电动势差值变化趋势相反,呈现出在二次场观测初期急剧增大而后趋缓的特征,最大升幅可达 10 倍以上。钻探工程及化探分析进一步验证了物探成果。

关键词: 含水采空区;全空间瞬变电磁法;有限元模拟;电动势升幅;钻探;化探

中图分类号: TD166 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2021)02-0546-05

0 引言

在井下含水采空区探测应用实践方面,瞬变电磁法因施工快捷、观测系统布设简单、对采集人员配置要求低、对低阻体响应敏感等优势得到推广应用。钟声等^[1]、丁亮斌等^[2]基于地面物探成果,采用井下瞬变电磁法进行对比验证,获得了视电阻率低值重叠区域,结合地质资料分析获取了含水采空区空间分布情况;刘百祥等^[3]在回采工作面平巷内布设测线观测系统,获得了视电阻率切片成果图,结合现场施工环境及地质资料将其划分为积水区、弱积水区和无水区,通过钻孔进行了验证。当前多数应用性研究成果集中体现了视电阻率断面图直观特征在物探成果解释中的作用,但对含水采空区电性变化规律量化研究方面仍有待补充^[4-8]。

晋城矿区各大生产矿井实际生产过程中面临的重点水患类型为采空区积水、砂岩水、太原组灰岩裂隙水和奥陶系岩溶水等。其中,因历史原因遗留的

大量小窑采空区,在资源整合过程中难以全面掌握其采掘资料,从而对正常采掘活动造成极大威胁。目前,以瞬变电磁法为代表的物探技术已在矿区得到了普及,但对于含水采空区的电性响应特征识别研究仍需进一步开展^[9-11]。

1 含水采空区正演模拟响应

建立全充水采空区有限元模型,如图 1 所示。综合考虑煤层采后形成的顶板导水裂缝带,设置低阻体为棱长 50 m 正方形,几何中心距离线圈 75 m,电阻率为 $0.25 \Omega \cdot \text{m}$ 。均质围岩背景场电阻率设置为 $1000 \Omega \cdot \text{m}$,线圈发射电流频率设置为 25 Hz。按照 15° 间隔,由右帮 0° ~ 左帮 180° 沿扇面均匀布置 13 个测点,其中 90° 测点方向指向含水采空区模型。

图 2 所示为电性响应差异最大的右帮 0° 及正前方 90° 测点方向的感应电动势衰减曲线,可以看出在观测初期二者处于同一量级水平,随观测时间的增加,含水采空区方向电动势值下降 2 个量级,为

收稿日期: 2020-09-08; 修回日期: 2020-10-19

基金项目: 煤科院科技发展基金项目技术创新基金(2019CX-II-14); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51704162)

作者简介: 陈健强(1993-),男,安徽合肥人,硕士,研究实习员,主要从事防治水物探相关实践及研究工作。Email: ccrcjq@126.com

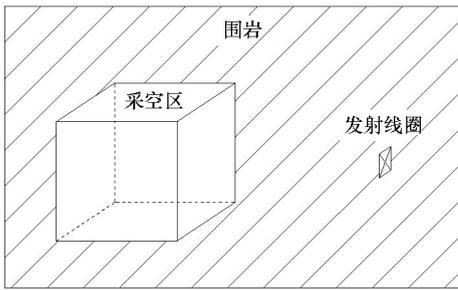


图1 有限元模型示意

Fig.1 Diagram of finite element model

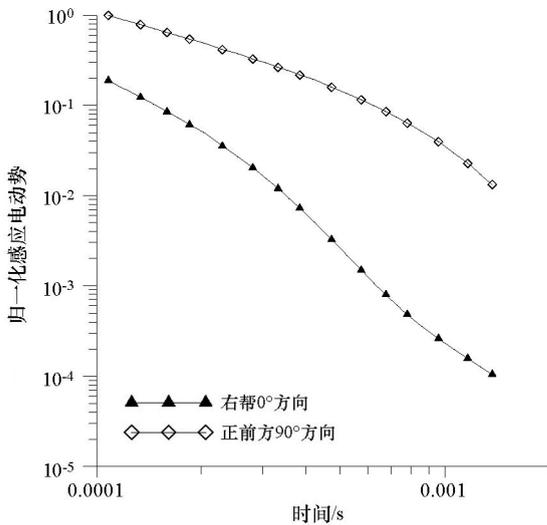


图2 含水采空区测点电动势模拟成果

Fig.2 EMF simulation results of measuring points in water bearing goaf

初期值的 1/50 左右,背景场方向电动势下降达 4 个量级,为初期值的 1/2 000 左右。在观测阶段内,含水采空区感应电动势值域水平整体显著高于背景场。

根据时间域电磁法特点,模拟所得数据体反映的是二次场电动势—时间关系,需通过

$$\rho_s = B \times C \times 6.32 \times 10^{-12} \times (S \times N \times s \times n)^{2/3} \times [\varepsilon_{\text{晚}}^*(t)/I]^{-2/3} \times t^{-5/3} \quad (1)$$

计算转化为视电阻率—时间关系^[12],再进行相应时间—深度转换关系得出电阻率—深度关系。式中: ρ_s 为视电阻率; B 、 C 分别为装置、空间响应系数; S 、 N 和 s 、 n 分别表示发射和接收线圈的面积、匝数; $\varepsilon_{\text{晚}}^*(t)$ 为晚期感应电动势; I 为发射电流; t 为二次场观测时间。

根据测点电动势数据转换计算所得的含水采空区视电阻率空间综合响应分布如图 3 所示。分析图 3 可知,对应含水采空区位置的正前方区域表现出显著闭合低阻特征,在纵向方向上,低阻异常中心更

偏向线圈一侧,相比模型几何中心位置存在一定差异;但在横向方向上,二者角度方向一致性较好,反映出全空间瞬变电磁法横向分辨率相对更高的特点。提取正前方 90°及左帮 180°方向测点电动势数据,进行线圈法向由旁侧转至正对含水采空区过程的电动势差值及升幅计算,得到图 4。

由图 4 中升幅曲线可以得出,观测初期正前方 90°含水采空区影响下的二次场感应电动势相比右帮 0°相对正常围岩背景场下的感应电动势数值增大 4 倍左右,但由于对低阻体敏感,二者间的电位升幅呈现急剧增大而后稳中有降特征,在 0.001 s 内总体升幅可达 100 倍以上。

进一步对两个方向的感应电动势差值进行归一化分析,可以发现与图 2 双对数坐标系中电动势差值逐步增大的表象不同的是,观测阶段异常体及背景场的二次场感应电动势差值随时间实际为单调递减关系,与升幅曲线变化趋势大体上相反。

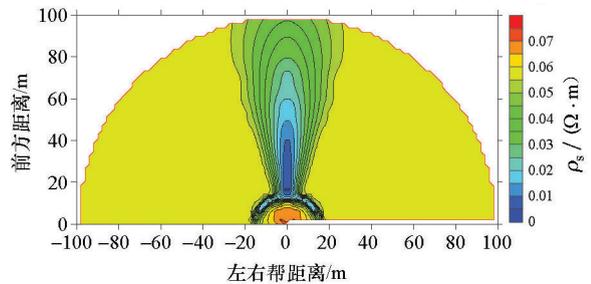


图3 含水采空区空间电性模拟结果

Fig.3 Spatial electrical simulation results of water bearing goaf

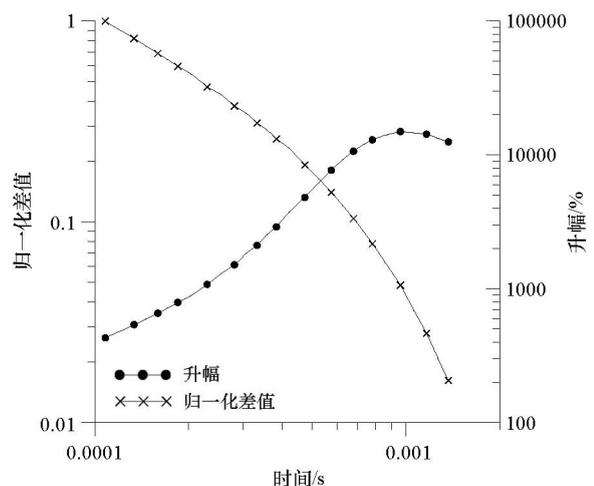


图4 模拟含水采空区二次场电动势变化

Fig.4 Simulation of EMF change of secondary field in water bearing goaf

2 应用实例

2.1 物探成果

探测地点位于晋煤集团 9 号煤层,现场物探施工条件较好,布置扇形观测系统。根据矿方地质资料,本次探测范围内存在资源整合矿井遗留空巷,具体赋存情况未知,水平横向探测成果如图 5 所示。

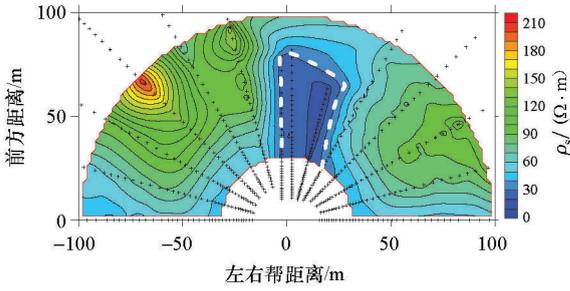


图 5 含水采空区空间电性实测成果

Fig.5 Measured results of spatial electrical properties of water bearing goaf

图 5 中,右帮 75°至正前方 90°范围内存在 1 处低阻区域,如虚线部分所示,深度范围为沿探测方向 80 m 以内。该区域内的数据散点距离密度高于其他方向,反映出相同观测时窗下的对应测点二次场传播距离小,衰减速度慢。

提取右帮 45°方向相对正常背景场及 75°方向低阻响应测点电动势曲线进行分析,探测过程中测点角度逆时针旋转对应的感应电动势变化情况如图 6 所示。

从图 6a 的电动势衰减曲线对比可以得出,观测初期二者值域水平位于同一量级,为 $n \times 10^{-6}$ V。随时间推移,二者数值均跨量级衰减,观测后期分别降至 $n \times 10^{-9}$ 、 $n \times 10^{-10}$ V,分别下降 3 个量级和 4 个量级。

由图 6b 中升幅曲线可以看出,实测低阻异常区二次场电动势值升幅曲线与图 3 数值模拟结果相比,总体数值相对较小,后期在 10 倍左右波动;但总体上看,具有一致性规律:实测电动势增幅在 0.001 s 之后逐步趋向相对稳定,即二者都表现出了电动势升幅随观测时窗后移急剧增大而后增速放缓的特征。图中的电位差值归一化曲线反映出井下实测低阻体及背景场的电动势数值差值与时间的变化关系呈近似线性单调衰减特征,与电动势升幅曲线总体变化趋势相反,与图 3 数值模拟成果规律相符。综合上述分析,判断该物探低阻异常区为含水采空区

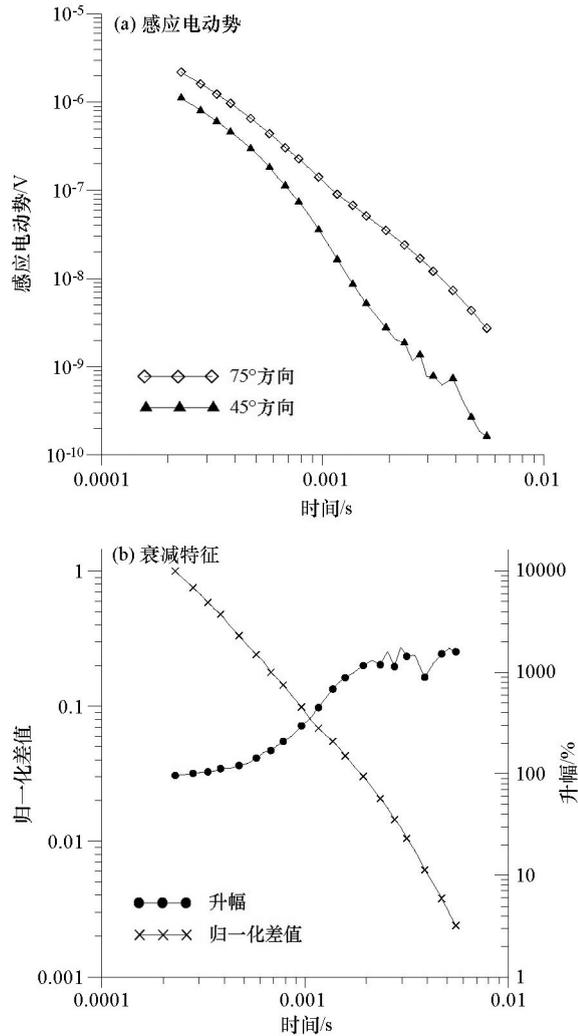


图 6 实测含水采空区二次场电动势及其衰减特征
Fig.6 Measured EMF of secondary field and its attenuation characteristics in water bearing goaf

响应。

2.2 钻孔窥视

为验证物探成果,以物探成果图中低阻异常为靶区,于掘进工作面共计布设 15 个钻孔开展钻探工作。其中,迎头前方右帮 77°角度钻孔出水量最大,达到 45 m³/h。对该钻孔进行窥视,轨迹如图 7 所示。图 8 为钻孔窥视成果,可以看出开孔位置前方 56 m 处揭露采空区,内部孔隙大,充水程度高。

将钻孔窥视轨迹与物探异常区范围叠加,如图 9 所示。图中,实线表示钻孔轨迹,末端为见空出水位置;闭合虚线为划定的低阻异常区范围,放射状散点为各探测方向相应距离深度的视电阻率数据。

分析图 9 可知,低阻异常与钻孔见空位置在横向角度上具有较好的一致性,该方向邻近的右帮 75°测点视电阻率数据散点空间密度最大,即低阻异常体二次场响应信号最强。但在纵向深度上,物探

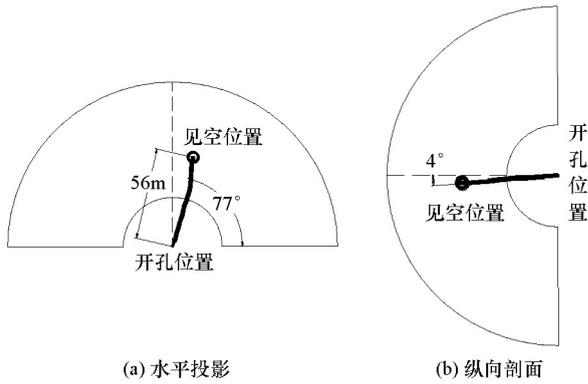


图7 钻孔设计

Fig.7 Drilling design diagram



图8 钻孔窥视成果

Fig.8 Drilling peep results

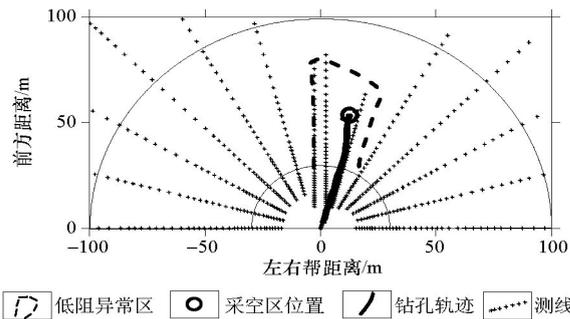


图9 钻物探成果叠加

Fig.9 Superposition of drilling geophysical exploration results

低阻异常中心与实际含水采空区位置存在一定偏差,探测结果更偏向线圈一侧,与图3所示模拟成果相类似。

2.3 化探分析

为进一步验证物探分析及钻孔窥视成果,对出水样进行水质分析,结果如表1所示。通过此次化探,对本次水样本的离子浓度及化学特征有了整体认识,丰富了水化学样本数据库。本次水样的总硬度及矿化度均比以往顶板裂隙水对应指标值大,pH呈弱酸性。阳离子以 Mg^{2+} 为主,占比达到53.96%;阴离子以 SO_4^{2-} 为主,占比达到54.24%,分析为密闭空间内的硫化物反应所致^[13],即为老窑

表1 水样离子浓度

Table 1 Ion concentration of water sample

	离子	浓度/($mg \cdot L^{-1}$)	占比/%
阳离子	K^+	8.71	0.67
	Na^+	216	28.29
	Ca^{2+}	112	16.87
	Mg^{2+}	217.6	53.96
	Fe^{3+}	1.27	0.21
阴离子	Cl^-	50.35	7.79
	HCO_3^-	420	37.83
	CO_3^{2-}	0	0
	SO_4^{2-}	473.9	54.24
	NO_2^-	1.19	0.14

水典型化学特征。

3 结论

1) 模拟及实测成果共同显示,含水采空区瞬变电磁响应的横向角度对应一致性比纵向深度对应性更好,现场探测前需做好深度参数试验工作。

2) 含水采空区感应电动势升幅呈现出在二次场观测初期急剧增大而后趋缓的特征,整体可达10倍以上。感应电动势差值在观测时间内整体单调递减,与升幅曲线变化趋势总体上相反。

3) 钻孔窥视及化探水质分析进一步验证了物探成果,为后续防治工作奠定基础。

参考文献 (References):

- [1] 钟声,王士党.地面与井下瞬变电磁法联合探测煤矿富水区域[J].物探与化探,2016,40(3):635-638.
Zhong S, Wang S D. The application of combined ground and underground coal mine transient electromagnetic methods to the exploration of water-rich area[J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(3): 635-638.
- [2] 丁亮斌,李铁亮.小煤窑采空积水区的探查方法[J].煤矿安全,2019,50(5):150-152.
Ding L B, Li T L. Method for finding out water accumulation area in small coal mine[J].Safety in Coal Mines, 2019, 50(5): 150-152.
- [3] 刘百祥,鲜鹏辉,仇念广.瞬变电磁法在探查工作面上覆煤层采空区富水性中的应用[J].煤矿安全,2020,51(4):137-141.
Liu B X, Xian P H, Qiu N G. Application of transient electromagnetic method in detecting water richness in goaf of overburden coal seam at working face[J].Safety in Coal Mines, 2020, 51(4): 137-141.
- [4] 易洪春.地—井瞬变电磁响应特征研究[J].物探与化探,2018,42(5):970-976.
Yi H C. Research on response of ground-borehole TEM[J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(5): 970-976.
- [5] 张永超,贾新果,陈凯,等.瞬变电磁法探测超高水材料注浆治理采空区效果[J].煤炭科学技术,2017,45(3):174-178,100.

- Zhang Y C, Jia X G, Chen K, et al. TEM inspecting of goaf treatment effect with grouting super high water material [J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(3): 174–178, 100.
- [6] 王鹏, 程建远, 姚伟华, 等. 积水采空区地面-钻孔瞬变电磁探测技术[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(8): 2502–2508.
- Wang P, Cheng J Y, Yao W H, et al. Technology of detecting water-filled goaf beside borehole using downhole transient electromagnetic method [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(8): 2502–2508.
- [7] 于景邨, 常江浩, 苏本玉, 等. 老空水全空间瞬变电磁法探测三维数值模拟研究[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(1): 95–99, 103.
- Yu J C, Chang J H, Su B Y, et al. Study on whole space transient electromagnetic method prospect three dimensional numerical modeling of gob water [J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(1): 95–99, 103.
- [8] 牟义, 典型地质异常体电磁法响应特征研究[J]. *煤矿开采*, 2017, 22(4): 4–9.
- Mu Y. Study of electromagnetic response characteristics of typical geological anomalous body [J]. *Coal Mining Technology*, 2017, 22(4): 4–9.
- [9] 牟义, 李江华, 徐慧, 等. 矿井瞬变电磁法参数优化试验及超前探测应用[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(6): 184–190.
- Mu Y, Li J H, Xu H, et al. Parameters optimization test of mine transient electromagnetic method and application of advanced detection [J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(6): 184–190.
- [10] 陈健强, 张永超, 邱浩, 等. 井下富水区瞬变电磁响应特征分析[J]. *煤矿安全*, 2019, 50(10): 185–189.
- Chen J Q, Zhang Y C, Qiu H, et al. Transient electromagnetic response characteristics of mine water-rich area [J]. *Safety in Coal Mines*, 2019, 50(10): 185–189.
- [11] 邱浩, 郝宇军, 陈健强. 煤矿采空区瞬变电磁超前探测波场成像研究[J]. *煤炭工程*, 2020, 52(2): 56–58.
- Qiu H, Hao Y J, Chen J Q. Wave field imaging system in advance detection of watery goaf using mine transient electromagnetic method [J]. *Coal Engineering*, 2020, 52(2): 56–58.
- [12] 于景邨, 胡兵, 刘振庆, 等. 矿井瞬变电磁探测技术的应用[J]. *物探与化探*, 2011, 35(4): 532–535.
- Yu J C, Hu B, Liu Z Q, et al. The application of mine transient electro-magnetic detection technology [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2011, 35(4): 532–535.
- [13] 黎灵. 强水力联系采空区水害补给综合判定技术[J]. *煤矿开采*, 2018, 23(4): 93–96, 32.
- Li L. Comprehensive judgement method of goaf water disaster alimementation under strengthen hydraulic connection [J]. *Coal Mining Technology*, 2018, 23(4): 93–96, 32.

Whole-space transient electromagnetic detection of water-bearing goaf

CHEN Jian-Qiang^{1,2,3}, LI Yan-Chuan³, TIAN Hao³, LI Han-Chao³

(1. *Mine Safety Technology Research Branch of China Coal Research Institute, Beijing 100013, China*; 2. *State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China*; 3. *Jincheng Anthracite Mining Group Technology Research Co., Ltd., Jincheng 048006, China*)

Abstract: Aiming at tackling the problem of whole-space transient electromagnetic response signal identification in water-bearing goaf and based on induced electromotive force (EMF)-apparent resistivity and time-depth conversion relationship, the authors obtained the spatial distribution law of apparent resistivity with depth variation of the whole sector by using the finite element numerical simulation and field measurement method, extracted the EMF attenuation curve of the measuring point in the low resistance abnormal area, and calculated the voltage rise amplitude of the measuring point varying with the detection angle. Based on the above research, the authors carried out the drilling verification and borehole peeping, and analyzed the content of the drilling water samples. The results show that the transverse angle consistency of transient electromagnetic response of water-bearing goaf is higher than that of vertical depth, and the rising amplitude of EMF in the abnormal region of low resistance is opposite to the difference of induced voltage, which shows a sharp increase in the initial stage of secondary field observation followed by slowing down, reaching more than 10 times on the whole. Drilling engineering and geochemical exploration analysis further verify the geophysical exploration results.

Key words: water-bearing goaf; whole-space transient electromagnetic method; finite element simulation; voltage rise amplitude; drilling; geochemical exploration

(本文编辑:沈效群)