

瞬变电磁法在识别煤矿区隐伏岩体空间展布特征中的应用

余 苇^{1,2} 丁海^{1,2*} 韩 锋¹ 张燕海³ 朱建刚^{1,2} 尹金柱⁴

1. 安徽省煤田地质局勘查研究院 安徽合肥 230088

2. 安徽省非常规天然气工程技术研究中心 安徽合肥 230088

3. 淮北矿业(集团)有限责任公司 安徽淮北 235000

4. 安徽省煤田地质局物探测量队 安徽宿州 234000

摘 要: 本文以淮北煤田海孜煤矿为例, 首先结合钻孔地质资料对瞬变电磁数据实施反演, 然后采用 Voxler 软件建立了三维视电阻率模型, 讨论了研究区地下电性结构特征, 查明了研究区深部隐伏岩体的空间展布形态。研究结果表明, 基于瞬变电磁探测数据的三维可视化技术是探测煤矿区隐伏岩体空间展布形态的有效途径。

关键词: 淮北煤田; 侵入岩; 瞬变电磁法; 三维可视化

引言

煤矿区中岩浆侵入虽然破坏了煤层的连续性、增加了煤矿生产的安全隐患^[1-3], 但其热接触变质作用也会影响煤层气的赋存规律^[4-6]。因此, 查明煤矿区侵入岩的展布特征对矿井动力灾害防治及煤炭、煤层气资源评价具有重要意义。

燕山期, 两淮煤田经历了多期岩浆活动(图1), 致使临涣煤矿^[3,7]、卧龙湖煤矿^[1,8]、海孜煤矿^[6,9-10]等煤矿经历不同程度的岩浆侵入。虽然前人已通过钻探、测井等手段调查了淮北煤田各煤层岩浆岩侵入情况, 但并未对矿区内侵入岩的空间展布进一步开展详细工作。

本文采用瞬变电磁法对淮北煤田海孜煤矿侵入岩进行精细化探测研究。首先根据以往测井资料确定了井田内煤系地层、岩浆岩的物性特征; 然后结合钻探资料对瞬变电磁数据实施约束反演, 并通过 Voxler 软件建立了三维视电阻率模型, 最后讨论了研究区深部电性结构, 查明了研究区深部隐伏岩体的空间展布特征。

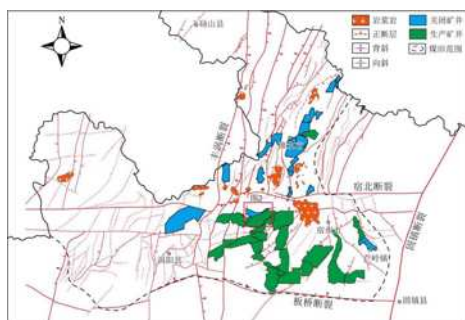


图1 淮北煤田矿井分布及构造纲要略图

1 研究区概况

1.1 地质概况

海孜煤矿位于淮北煤田中部, 在构造上位于童亭背斜北部倾伏端, 西以大刘家断层为界, 东南以大马家断层为界(图2)。区内90个钻孔见侵入岩以岩床形式沿5煤层顺层侵入, 平均厚度约120 m, 岩性以闪长玢岩为主, 辉长岩、闪长玢岩次之^[1]。

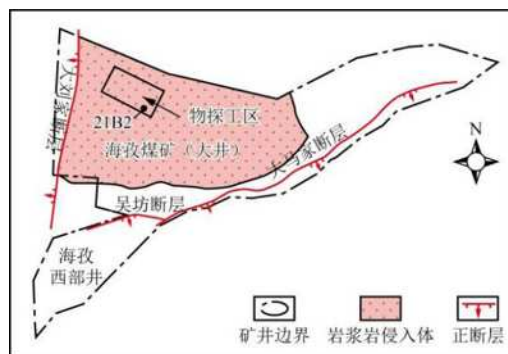


图2 海孜煤矿(大井)范围及研究区位置

区内新生界厚约200 m, 不整合覆盖于古生界之上。古生界自下而上发育寒武系(C)、下奥陶统(O)、中石炭统本溪组(C2b)、上石炭统太原组(C3t)、下二叠统山西组(P1s)、中二叠统下石盒子组(P2xs)和中-上二叠统上石盒子组(P2-3ss)。区内地层倾角10~25°, 走向近东西, 呈北倾的单斜构造。上、下石盒子组是主要含煤地层, 厚度可达600 m, 自上而下间隔发育3、4、7、8、9、10煤6层可采煤层^[2,12-13]。

1.2 岩石物性特征

据以往资料, 新生界平均视电阻率为 $6\sim 80\ \Omega\cdot\text{m}$, 局部层段因发育稳定隔水层而呈高阻特征; 二叠系砂岩裂隙含水层视电阻率值介于 $30\sim 60\ \Omega\cdot\text{m}$, 泥岩视电阻率介于 $10\sim 30\ \Omega\cdot\text{m}$, 煤层视电阻率值为 $20\sim 150\ \Omega\cdot\text{m}$; 石炭系以灰岩为主, 视电阻率值为 $\sim 200\ \Omega\cdot\text{m}$ 。侵入岩的视电阻率一般为 $675\sim 728\ \Omega\cdot\text{m}$, 局部大于 $1000\ \Omega\cdot\text{m}$ 。由此可见, 区内地层、煤层与侵入岩间存在明显的电性差异, 这为采用瞬变电磁法识别侵入岩的空间展布提供了良好的地球物理基础。

2 瞬变电磁法测深基本原理

瞬变电磁法是采用接地电极或线圈观测发射电流间歇期内纯二次感应涡流场时空变化来探测地下结构的时域电磁勘探方法 [13-14]。根据烟圈理论, 不同深度介质产生的同心环状感应涡流将与地面呈近 47° 的锥形不断向下、向外扩散传播, 其涡流密度最大值与地面呈近 30° [15]。因此, 不同时窗内的信号反映了不同深度的电性结构: 早期信号反映浅部结构的电性信息, 而晚期信号则揭示了深部结构的电性信息。

为了揭示地下介质的电性结构, 还需在去噪、滤波等预处理的基础上将瞬变电磁的衰减电压曲线换算为视电阻率曲线, 计算方法如式 (2) 所示 [16]:

$$\tilde{\rho}_t = \frac{i_0}{4\delta} \left(\frac{2i_0 \mu \pi}{5tV(t)} \right)^{2/3} \quad (2)$$

式中: ρ_t —视电阻率 ($\Omega\cdot\text{m}$), t —时窗时间 (ms), m —发射磁矩, q —接受线圈的有效面积 (m^2), $V(t)$ —是时窗 t 内的瞬变感应电压, μ_0 —地层介质磁导率。

3 数据采集、反演与三维可视化

3.1 采集参数

本次采用 PhoenixV8 多功能电法仪进行数据采集, 平行于地层走向共部署 37 条测线, 测线、测点间距均为 20 m (图 3)。在对比分析背景噪音、仪器一致性和发射回线等实验结果的基础上, 确定发射线框尺寸为 $720\text{ m}\times 720\text{ m}$, 发射频率为 2.5 Hz, 发射电流为 10 A, 增益 4。

3.2 数据反演

如图 4a 所示, 测点 L1040-D2200 视电阻率曲线整体平滑、连续, 仅曲线末端信号存在个别“跳点”, 表明数据质量较好。本文首先采用 IX1Dv3 软件对预处理后的瞬变电磁数据实施一维 Occam 反演, 然后结合钻孔 21B2 地质资料进

行了约束反演, 进一步优化反演模型。

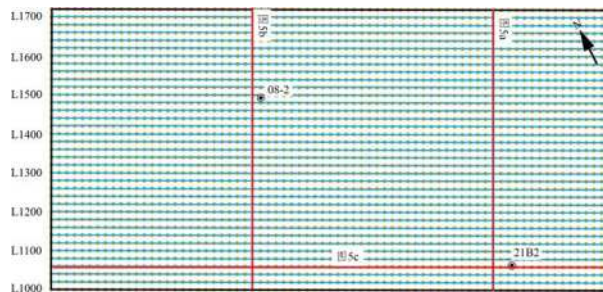


图 3 瞬变电磁法测线部署示意图

瞬变电磁反演结果是对地下介质电性特征的综合反映。测点 L1040-D2200 一维反演结果显示, 地层电性特征呈现为中阻—低阻—中阻—高阻的特征, 属于 HA 型 (图 4b)。其中, 受深部高阻侵入岩影响, 自 -560 m 以深地下介质的电性特征 (图 4c)。

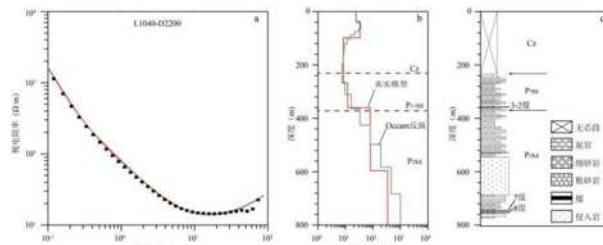


图 4 (a) 视电阻率曲线; (b) 一维 Occam 反演结果; (c) 钻孔 21B2 地层柱状图

3.3 三维可视化

为进一步精细刻画侵入岩空间展布特征, 本文采用 Voxler 软件对测点反演数据生成三维数据体, 然后利用软件中 Gridder 功能进行网格化处理, 并插值加密, 最终通过形体渲染建立深部三维视电阻率模型 (图 6)。

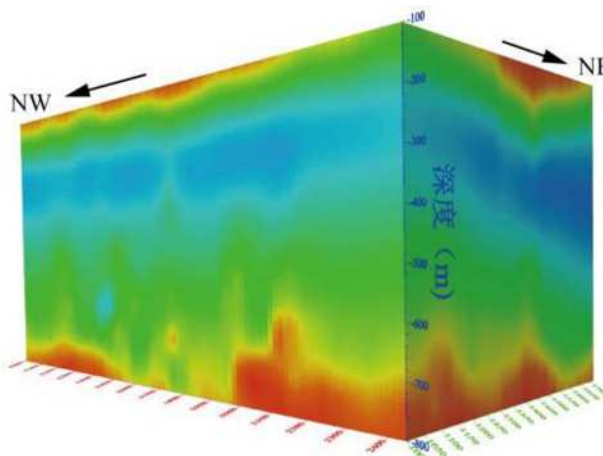


图 5 三维视电阻率模型

4 讨论

4.1 深部电性结构特征

图 6 所示, -220 m 以浅地层呈明显的近水平分布, 视电阻率值介于 $80\sim 200\ \Omega\cdot\text{m}$, 整体上由中高阻向低阻过渡。综合分析研究区岩石视电阻率、地质和水文资料, 推断浅部中 - 高阻异常反映了新生界第二隔水层电性特征, 该隔水层主要发育砂质粘土、粘土, 夹少量 1-2 层粘土质砂。

自 -220 m 以深, 可进一步划分为 I、II、III 三个电性层:

电性层 I 的视电阻率值介于 $30\sim 70\ \Omega\cdot\text{m}$, 可能与上石盒子组上部多套含水层的发育相关。顶界为上覆新生界不整合接触界面, 向下可延伸至 3-2 煤附近 (图 6a, b)。沿倾向方向, 电性层 I 呈向北增厚; 沿着走向方向, 电性层 I 底界自东向西逐渐加深 (图 6c)。

电性层 II 位于 3-2 煤之下, 视电阻率值介于 $70\sim 150\ \Omega\cdot\text{m}$, 底界标高为 $-600\sim -780\text{ m}$ 。沿倾向方向上, 电性层 II 向北加深 (图 6a, b); 沿走向方向上 (图 6c), 顶界面整体向西加深。根据钻孔资料, 推断该电性层是对下石盒子组上部砂岩、粉砂岩和泥岩电性特征的综合反映。

电性层 III 视电阻率值大于 $200\ \Omega\cdot\text{m}$, 顶界面自东南向西北逐渐加深。在钻孔 21B2 下部埋深约 -580 m (图 6a), 向西北部可加深至 -780 m (图 6c)。综合分析钻孔资料、一维 Occam 反演和二维视电阻率断面图, 认为该高阻异常指示了侵入岩的电性特征。

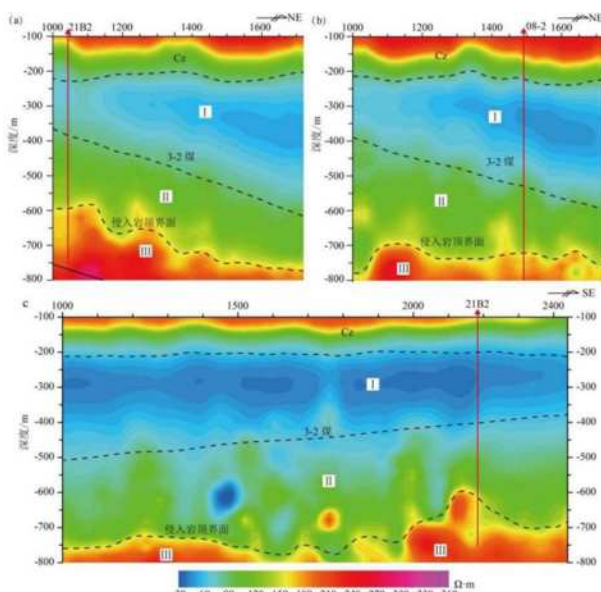


图 6 二维视电阻反演断面图

4.2 隐伏岩体的空间展布特征

据钻孔、一维反演和二维视电阻率断面分析结果, 本文提取三维数据体中视电阻率值 $200\ \Omega\cdot\text{m}$ 等值面作为侵入岩与二叠纪含煤地层接触界面。

如图 7 所示, 研究区地下介质分别存在标高 -200 m 以浅和 -600 m 以深两个 $200\ \Omega\cdot\text{m}$ 视电阻率等值面。结合钻孔 21B2 和 08-2 地质资料, 浅部 $200\ \Omega\cdot\text{m}$ 视电阻率等值面位于新生代地层中, 整体上表现为自研究区东南部向西北方向逐渐加深, 指示了新生界第二隔水层的展布特征。

-600 m 以深视电阻率等值面代表了侵入岩的顶界面, 自东南约 -600 m 向西部加深至 -800 m 以深。然而, 受数据探测深度限制, 本次瞬变电磁法探测工作未能充分揭示区内侵入岩的底界面特征。对比以往调查结果, 本文基于瞬变电磁探测数据的三维可视化研究有效的提高了煤矿区隐伏岩体的空间展布探测的精细化程度。

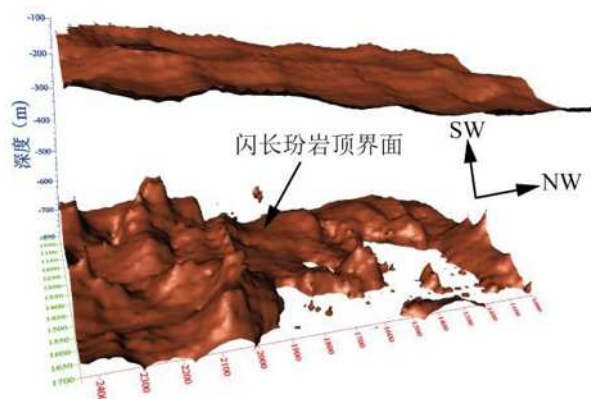


图 7 三维视电阻率等值面

5 结论

本文采用 Voxler 软件建立了以瞬变电磁法数据为基础的三维视电阻率模型, 揭示了深部侵入岩的展布特征, 得到以下结论:

(1) 瞬变电磁数据反演结果显示研究区侵入岩呈高阻特征, 与钻孔揭露的地质信息基本一致, 表明利用瞬变电磁法探测侵入岩空间展布范围的可靠性与有效性。

(2) 瞬变电磁数据的三维可视化直观揭示了侵入岩的空间展布, 提高了地质解释的准确性。

(3) 充分利用以往资料进行约束反演, 有助于提高瞬变电磁反演结果的可靠性。

参考文献:

[1]JIANG J Y, CHENG Y P, WANG L, et al. Effect of magma

- intrusion on the occurrence of coal gas in the Wolonghu coalfield [J]. Mining Science and Technology (china), 2011, 21: 737-741.
- [2] WANG L, LIU S M, CHENG Y P, et al. The effects of magma intrusion on localized stress distribution and its implications for coal mine outburst hazards [J]. Engineering Geology, 2017, 218: 12-21.
- [3] 秦培建, 张清勇, 李贺, 等. 临涣井田岩浆侵入活动对煤体的影响规律 [J]. 安全, 2023, 44(01): 60-64.
- [4] 吴斌, 孟凡彬. 岩浆岩侵入煤层的地震属性识别技术 [J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(06): 64-71.
- [5] 赵民, 黄春慧, 汤振清. 鲁西南主要煤田岩浆岩特征及对煤的影响 [J]. 煤田地质与勘探, 2000, (02): 10-13.
- [6] 张晓磊. 巨厚岩浆岩下煤层瓦斯赋存特征及其动力灾害防治技术研究 [D]. 中国矿业大学, 2015.
- [7] 武昱东, 据宜文, 侯泉林, 等. 淮北煤田宿临矿区构造-热演化对煤层气生成的控制 [J]. 自然科学进展, 2009, 19(10): 1134-1141.
- [8] 胥翔, 郑硕, 汪宏志, 等. 皖北卧龙湖煤矿火成岩侵入对煤层的地球化学影响 [J]. 宿州学院学报, 2020, 35(05): 65-70.
- [9] 蔡春城, 祝琳, 姜奎, 等. 不同产状侵入岩浆岩对煤体的热变质作用研究 [J]. 煤矿安全, 2014, 45(09): 4-8.
- [10] 任红, 杨永刚, 杨欣. 巨厚火成岩下开采矿井三维数字建模 [J]. 煤矿开采, 2014, 19(01): 31-33.
- [11] 据宜文. 海孜煤矿煤层断层层滑构造发育规律分析 [J]. 煤矿现代化, 1999, (01): 44-47.
- [12] 吕凡家, 徐胜平. 海孜煤矿二叠系含煤地层沉积环境分析 [J]. 淮南职业技术学院学报, 2002, (02): 52-54.
- [13] LI H, XUE G Q, ZHAO P, et al. Inversion of arbitrary segmented loop source TEM data over a layered earth [J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 128: 87-95.
- [14] ANTON Z, RONNIE P, DAVID W, et al. Multi-transient electromagnetic repeatability experiment over the North Sea Harding field [J]. Geophysical Prospecting, 2010, 58: 1159-1176.
- [15] NABIGHIAN M N. Quasi-static transient response of a conducting half-space An approximate representation [J]. Geophysics, 1979, 44(10): 1700-1705.
- [16] 潘纪顺, 张鑫, 陈世仲, 等. 大定源回线装置瞬变电磁法在煤矿采空区探测中的应用 [J]. 科技创新与应用, 2024, 14(14): 137-140.
- [17] 李建新, 涂勇刚. 瞬变电磁消除勘探盲区的技术方法及应用效果 [J]. 工程地球物理学报, 2014, 11(03): 361-365.
- [18] 曹华科, 戚志鹏, 李貅, 等. 考虑关断时间的瞬变电磁视电阻率计算及不同波形浅层分辨特征分析 [J]. 地球物理学进展, 2022, 37(04): 1704-1716.
- 作者简介:** 余苇 (1990—), 男, 四川乐山人, 博士, 主要从事构造地质学、地球物理学及废弃矿井资源开发利用方向的研究工作。
- 通讯作者:** 丁海 (1983—), 男, 江苏扬中人, 博士, 正高级工程师, 长期从事非常规天然气勘查方面的科研工作。
- 项目资助:** 安徽省公益性地质工作项目 (2021-g-2-14, 2023-g-1-21), 安徽省自然资源科技项目 (2023-k-19), 安徽省自然科学基金 (2408085QD129)。