

doi: 10. 11720/wtyht. 2023. 1225

任喜荣,李欣,周志杰.等值反磁通瞬变电磁法在金矿采空区探测中的应用[J].物探与化探,2023,47(2):540-546. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1225>

Ren X R, Li X, Zhou Z J. Application of the opposing coils transient electromagnetic method in investigation of mined-out areas of a gold deposit[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(2): 540-546. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1225>

等值反磁通瞬变电磁法在金矿采空区探测中的应用

任喜荣,李欣,周志杰

(甘肃省地质矿产勘查开发局 第二地质矿产勘查院,甘肃 兰州 730020)

摘 要:甘肃省玛曲县大水金矿是西秦岭地区的典型矿山之一,由于矿山的连年持续开采,导致在 5 号、9 号高陡边坡下方形成一系列不同埋深的采空区,引起局部地面塌陷,存在较大安全隐患,根据环保及安全方面的要求,急需查明隐伏塌陷的空间展布特征,有效预防地质灾害的发生。本次研究采用等值反磁通瞬变电磁勘探技术,通过对勘察区典型断面图异常特征的精细解释,结合勘察区水文地质、基础地质等资料的综合分析,进而实现矿山隐伏塌陷的透明化、立体化。研究表明:利用等值反磁通瞬变电磁法(OCTEM)进行地下采空区探测,能够较好地反映采空区隐伏地层的岩性电性特征,并且采空区与围岩的物性差异明显,可有效查明地下采空区的空间位置及基本形态特征。同时基于多勘探线物探剖面采空区边界特征点数据,结合计算机三维建模技术,可实现采空区空间形态三维可视化,透视采空区的立体特征。等值反磁通瞬变电磁法的实施效果及三维建模技术为矿山恢复治理及安全评价提供了技术依据,可以有效服务于数字矿山的建设。

关键词:等值反磁通瞬变电磁法;采空区;金属矿山;三维建模

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2023)02-0540-07

0 引言

目前在采空区勘察中主要采用的物探方法有 CSAMT、高密度电法、AMT 法等,CSAMT、AMT 作为一种勘探深度较大的物探方法,对浅地表的分层较差,存在盲区。高密度电法点距太大分辨率低,点距太小电极之间存在耦合效应,数据质量不能保证。瞬变电磁测深法^[1-4]利用接地电极或不接地回线建立起地下的一次脉冲磁场,在一次磁场间歇期间接收感应的二次电场和磁场,由于发射电流关断时,接收线圈本身产生感应电动势,并叠加在地下涡流场产生的感应电动势之上^[5],因而造成瞬变电磁实测数据早期信号失真,形成探测盲区^[6]。

中南大学席振铎等^[7]于 2014 年提出基于等值反磁通原理的瞬变电磁法,数据模拟和实验论证表明该方法能有效消除接收线圈本身的感应电动势,

从而获得地下纯二次场响应,解决了传统瞬变电磁法存在勘探盲区这一大难题,具有工作效率高、成本低、探测精度高等特点,适合采空区勘察。

本文主要阐述了等值反磁通瞬变电磁勘探原理,结合甘肃省玛曲县大水金矿采空区勘察应用效果,通过大量的野外实测数据,证实该方法受地形影响较小,具有 0~100 m 深度分辨率高的特点,能够实现对地下采空区的精准划分。

1 工作方法原理

等值反磁通瞬变电磁法,即 OCTEM (opposing coils transient electromagnetic method),是将发射天线线圈、接收天线线圈和调零天线线圈三者平行布置,相互串联发射天线线圈和调零天线线圈,使发射天线线圈和调零天线线圈组合产生的一次场穿过接收天线线圈的磁通量始终等于 0 或接近于 0。这样

收稿日期: 2022-05-19; 修回日期: 2023-02-13

基金项目: 甘肃省基金项目“甘肃省武山县洛门南地热资源普查”(201904-D10);内蒙古自治区基金项目“内蒙古自治区乌拉特后旗那仁铅银多金属矿预查”(13-4-kc08)、“内蒙古自治区乌拉特后旗帮帮熬瑞—呼赛日铜钨金多金属矿预查”(13-4-kc42)

第一作者: 任喜荣(1982-),男,本科,高级工程师,研究方向为地球物理、城市综合物探研究。Email:350135513@qq.com

相同的两组线圈通以反向电流时产生等值反向磁通的电磁场时空分布规律,如图 1 所示,利用上下平行共轴的两组相同线圈为发射源(Tx^+ , Tx^-),且在该双线合成的一次场零磁通平面上,测量对地中心耦合的纯二次场^[8-9]。

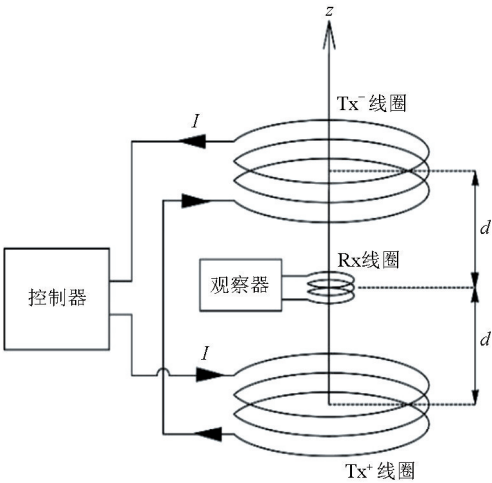


图 1 OCTEM 装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the OCTEM device

以电流环代替圆形线圈,计算磁场,电流环磁场的计算柱坐标见图 2。如图 2 所示,水平电流环(半径 a , 电流 I) 中心为原点(O)建立柱坐标(单位向量为: u_ρ, u_θ, u_z),令 r, r' 分别为观测点 $P(\rho, \theta, z)$ 和场源点 $P'(\rho', \theta', z')$ 的位置矢量。

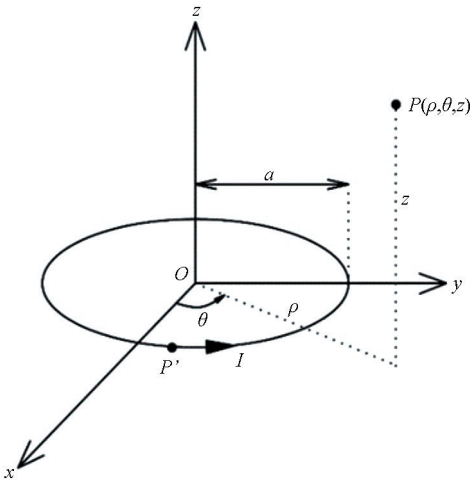


图 2 电流环磁场计算柱坐标

Fig. 2 Cylindrical coordinates of current loop magnetic field calculation

在自由全空间中,有限区域直流源产生的矢量势 A 为:

$$A(r) = \int_v J(r') G(r, r') dV' \quad (1)$$

其中: $J(r')$ 为电流密度矢量; $G(r, r')$ 为自由空间格林函数。

$$G(r, r') = \frac{1}{4\pi |r - r'|} \quad (2)$$

水平电流环的电流密度矢量 J 与 θ' 无关,仅有切向分量 J_θ , 即

$$J = J_\theta u_\theta = I \delta(\rho' - a) \delta(z') u_\theta \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)可求得:

$$A = A_\theta u_\theta = \frac{I \sqrt{4\alpha\rho}}{4\pi\rho} \left[\frac{(2 - q^2)K(q) - 2E(q)}{q} \right] u_\theta \quad (4)$$

其中:

$$q = \sqrt{\frac{4\alpha\rho}{(\alpha + \rho)^2 + z^2}} \quad (5)$$

$K(q)$ 、 $E(q)$ 分别为第一类、第二类完全椭圆积分。再根据:

$$B = \mu_0 H = \mu_0 \nabla \times A \quad (6)$$

其中: μ_0 为自由空间的磁导率; $\nabla \times A$ 表示矢量 A 的旋度。在柱坐标系中可以得出电流环产生的磁场各分量:

$$B_\rho = \frac{\mu_0 I z q}{8\pi\rho\sqrt{\rho\alpha}} \left[-2K(q) + \frac{2 - q^2}{1 - q^2} E(q) \right] \quad (7)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I q}{8\pi\sqrt{\rho\alpha}} \left[2K(q) + \frac{a q^2 - (2 - q^2)\rho}{(1 - q^2)\rho} E(q) \right] \quad (8)$$

$$B_\theta = 0 \quad (9)$$

根据以上公式和矢量叠加原理计算 OCTEM 双线圈源的一次磁场,其磁力线分布见图 3。由图可见,双线圈源的中间平面磁力线是水平的,为一次场零磁通面,此平面接收不受一次场关断影响,仅接收到地下纯二次场响应。

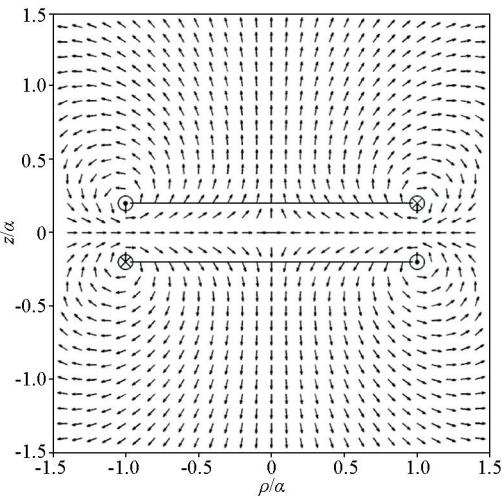


图 3 OCTEM 双线圈源合成的一次场磁力线示意

Fig. 3 Schematic diagram of primary field magnetic field lines synthesized by OCTEM dual-coil source

2 方法应用实例

2.1 勘察区地质概况

勘察区位于甘肃省玛曲县大水金矿,西秦岭东段南缘,在地貌上属中高山构造剥蚀地形。上覆第四系冲洪积物砂砾石、粉土,第四系下伏主要为三叠系马热松多组,该层为大水金矿床的主要含金层位。三叠系马热松多组岩性可以划分为土黄色、浅灰色泥质灰岩、浅灰色中厚层灰岩、浅灰色中厚层状灰岩和灰白色白云质灰岩 4 个岩性段。地层中花岗闪长岩脉发育,属极软质岩体,遇水极易软化,工程条件差。分布有 F₄、F₉ 断裂构造,均为融水断裂,是区内地下水的补给及运移通道。在标高 3 455~3 495 m 之间存在较多的采空区,为安全起见,急需查明采空区的空间位置及分布情况^[10-13]。

2.2 物性特征

根据勘察区出露主要地层岩性及钻孔钻遇岩性,得出勘察区主要岩性的视电阻率结果见表 1。
由表 1 可知,覆盖层沙土层与溶蚀灰岩、完整灰岩之间存在明显的电性差异,具备开展 OCTEM 的地球物理前提。

表 1 勘察区野外露头岩石电性参数统计

Table 1 Statistical of electrical parameters of rock outcrops in the survey area

岩性	样品数	电阻率最小~最大		电性特征
		值/(Ω·m)	均值/(Ω·m)	
细沙(充水)	6	1.3~6.6	2.1	低阻
红黏土	11	20.8~43.7	29	低阻
泥岩	10	43.1~80.3	60.7	低阻
细沙(含泥)	8	16.8~115.6	61.7	低阻
砂岩(破碎)	7	55.2~77.4	63.6	低阻
粉土	12	90.8~239.7	162.3	低阻
溶蚀灰岩(含水)	15	103.9~405.5	205.9	低阻
细沙	2	270.9~271.2	271.1	低阻
砂岩(板状)	5	329.4~455.1	376.5	低阻
含泥砾石	13	423.0~654.6	506.7	中等
腐殖土	8	396.7~865.7	560	中等
砂岩(块状)	3	772.8~779.3	776.1	中等
溶蚀灰岩	6	947.7~1486.5	1159.7	中等
砾岩	18	334.4~3860.7	1164.2	中等
砂砾石	9	1154.4~1410.9	1239.3	中等
灰岩	14	9019.8~17612.3	11938.9	高阻
结晶灰岩	9	11358.7~27581.3	16680.4	高阻

2.3 野外数据采集

本次工作针对 3455-CQ87、3455-CQ88、3455-CQ89、3495-CQ90、3495-CQ91 五个采空区部署等值反磁通瞬变电磁剖面 12 条(图 4)。

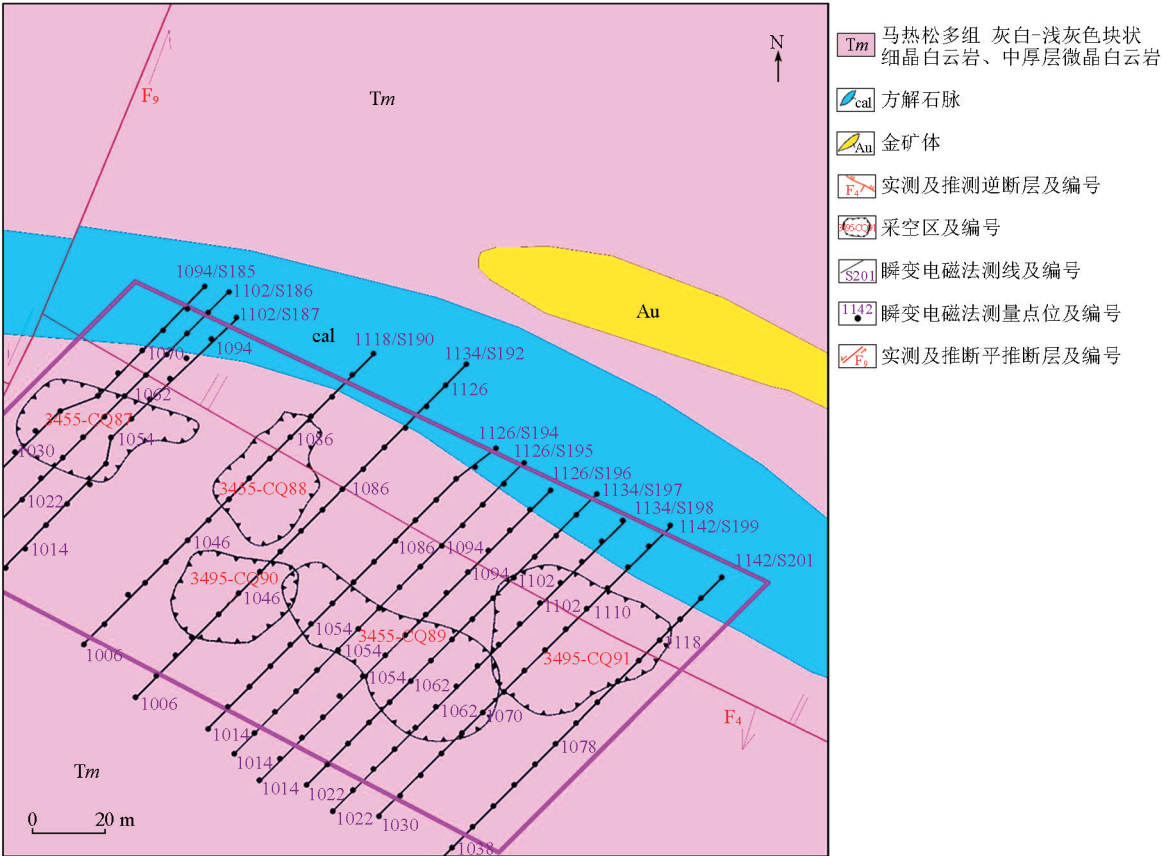


图 4 大水金矿矿区地质
Fig. 4 Geological map of Dashui gold deposit

野外数据采集使用 HPTeM-18 瞬变电磁仪。根据地质条件和采空区埋藏深度,选择频率范围在 0.625~6.25 Hz 之间,一般在采空区埋深大于 200 m 时工作频率选用 0.625 Hz,采空区埋深小于 200 m 时工作频率选用 2.5 Hz,采空区埋深小于 100 m 时工作频率选用 6.25 Hz。一般叠加次数设置为 200 次,在干扰地段适当调整为 300~400 次,重复观测次数一般设置为 2,在强干扰地段调整为 3~4 次^[14-17]。

2.4 资料处理及解释推断

数据处理使用 HPTeM Data Process 数据处理

软件,在进行飞值剔除、地形校正、平滑滤波等数据预处理流程之后,对单个剖面进行 2D 反演计算,设置参数有反演方法、约束系数、反演系数、基准阻值、网格间距等。根据测区已知采矿资料、水文资料和地质资料对参数进行调整,以期与已知资料最大程度拟合。通过调试,反演方法采用二维瞬态弛豫反演,反演系数为 0.1,约束系数为 1,基准阻值为 500,网格间距为 5 m。

以 3455-CQ89 采空区为例,针对该采空区布置瞬变电磁长剖面 6 条,自西向东编号为 S194~S199 测线(图 5)。

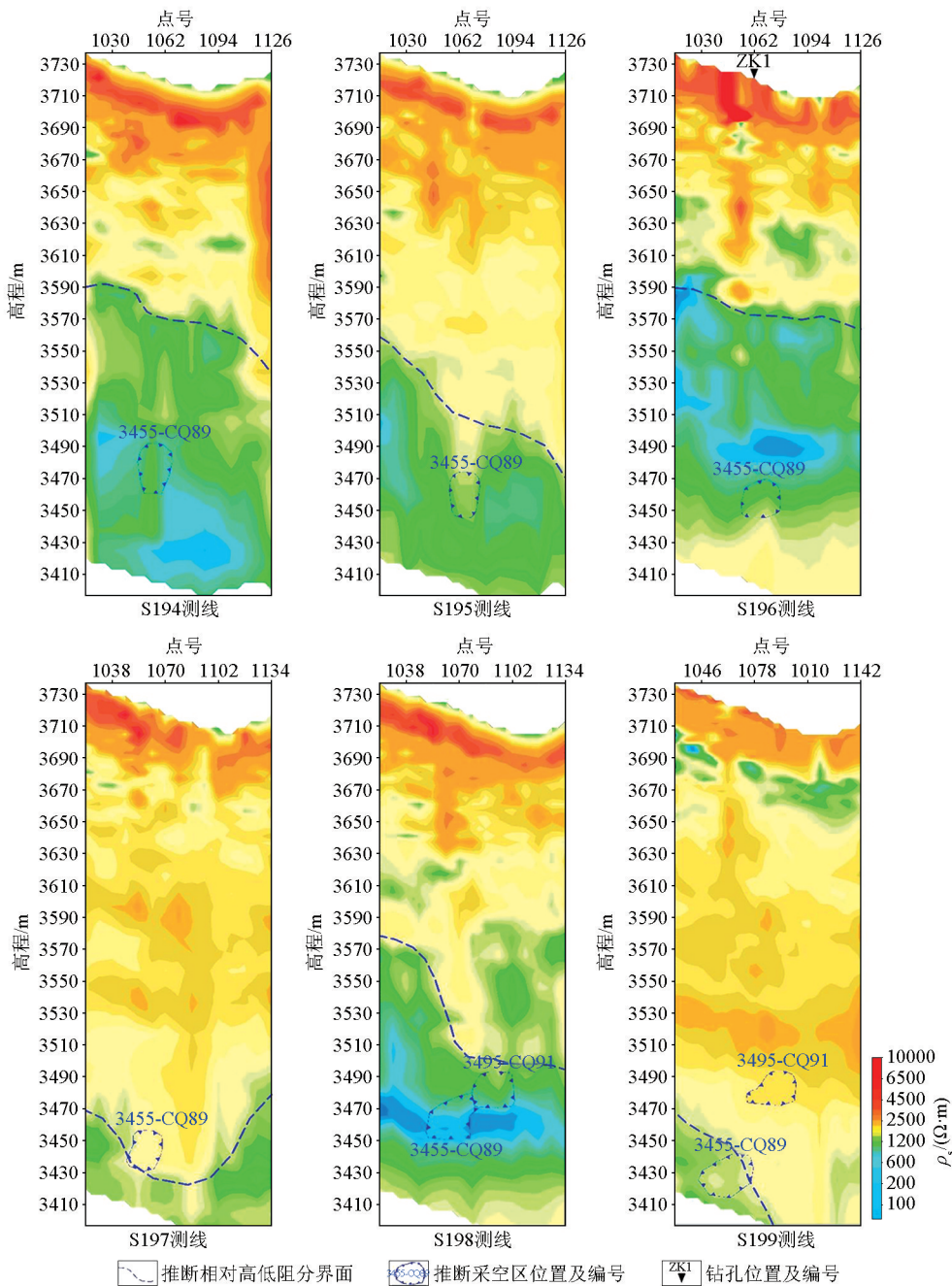


图 5 3455-CQ89 采空区瞬变电磁剖面联合反演电阻率断面

Fig. 5 Combined inversion resistivity profile of transient electromagnetic profile in goaf 3455-CQ89

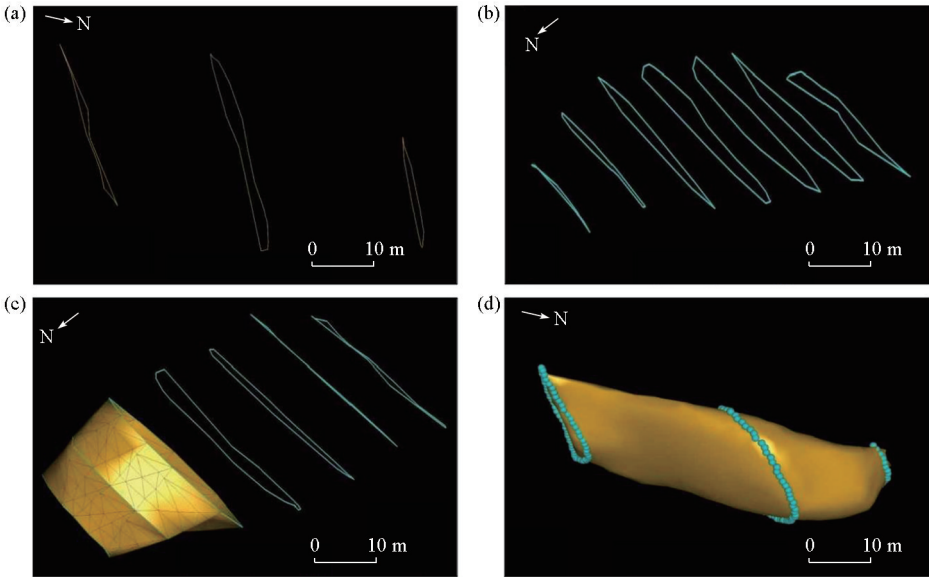
从 6 条瞬变电磁剖面可以看出,各剖面地层稳定,均为马热松多组灰岩,不同深度因含水量不同而呈现出不同的电性特征。各剖面电阻率在纵向上由浅至深整体分为高阻→低阻→中低阻。高阻为浅层不含水的马热松多组灰岩地层,至 3 590 m 标高段时开始出现稳定水位,局部形成的低阻异常为花岗闪长岩脉遇水软化、富水引起。S194、S196、S198 测线在 3 590 m 标高处开始形成相对低阻,S197、S199 测线在 3 470 标高处开始形成相对低阻,S195 测线在 3 560 m 标高处开始形成相对低阻,推测为地下水赋存,且水位与地形起伏明显相关。综上,推断采空区在各瞬变电磁剖面上呈现出局部相对高、低阻异常,位置见图 5。资料表明,在 S196 测线 1 062 点布置钻孔,钻至 246~270 m 深度钻遇采空区。对多条剖面综合分析,该采空区长约 67 m,平均宽 27 m,高约 33 m,围岩为灰岩。

2.5 采空区三维可视化建模

采空区三维可视化建模是基于等值反磁通瞬变

电磁断面图中提取的采空区边界坐标点建立建模数据库,通过对数据唯一性及逻辑性检查,构建出空间剖面中“节点—弧段—剖面多边形”之间的拓扑关系,最终建立基于边界表达的三维地质模型。

采空区建模采用“点—线—面—体”的建模原则,实现对建模数据的流程化处理,同时联系实际地质模型,最大程度地建立起符合实际数据采集后得到的采空区模型。该三维可视化建模流程具有以下优点:①真三维地质建模。考虑实际地质目标的空间坐标,可建立起不同地质目标间的耦合关系,实现模型的三维可视化;②准确建模。与以往单用柱状网格建模不同,建模中采用基于柱状网格和非结构三角形网格的方式,在数据插值中以自由组合的形式创建网格,打破结构化模拟的常规建模思维,更精确地模拟出地质目标的边界起伏形态,建立起更加符合真实地质目标的三维模型体。建模各步骤效果示意如图 6 所示。



a—边界坐标建立线;b—断面间插值采空区边界线;c—创建采空区起伏表面;d—单个采空区三维模型

a—boundary coordinate establishment line;b—inter-section interpolation goaf boundary line;c—creation of goaf undulating surfaces;d—3D model of a single goaf

图 6 采空区三维可视化建模示意

Fig. 6 Schematic diagram of 3D visualization modeling of goaf

1) 边界坐标点输入。建立 xyz 空间坐标系,将断面图中获得的采空区边界点按实际空间坐标输入。基于边界坐标,利用面具体函数,自动建立采空区边界及起伏形态,同时根据采空区边界起伏形态,在不同断面间插值边界线,避免边界线间突变起伏引起的虚假模型,更加符合实际地质情况。

2) 创建采空区表面。采用柱状和非结构三角

形结合的网格,对采空区边界线插值连接成面,数值模拟出精细的采空区起伏表面。

3) 建立采空区体模型。利用以上生成的边界起伏表面,采用数据插值,识别各个面文件间的接触关系并合并各个面文件,最终封闭成光滑的三维体模型(图 7)。

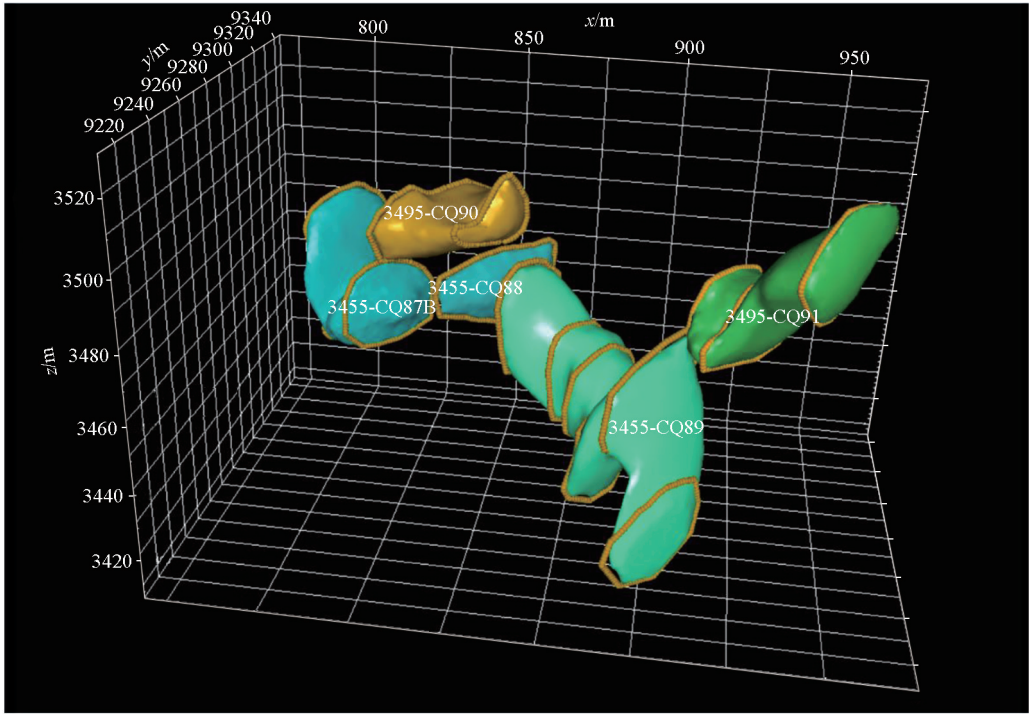


图 7 采空区三维可视化模型

Fig. 7 3D visualization model of goaf

3 结论

- 1)等值反磁通瞬变电磁法在矿山采空区探测工作中应用效果较好,相比于传统 TEM 方法,有效地消除了早期信号失真造成的盲区,能够获得丰富的地质信息,提高探测精准度。
- 2)等值反磁通瞬变电磁适应于多种地形条件,在采空区勘察中受地形影响较小,同时结合已知采空区的具体位置及电性参数综合反演,会取得事半功倍的效果。
- 3)通过建立采空区三维模型,可直观展示多个采空区的空间分布及埋深变化情况,能较为容易地对采空区容积进行估算。

参考文献 (References) :

[1] 张卫雄,王有权,庄飞舟,等.甘肃玛曲格萨尔黄金实业股份有限公司大水金矿矿产资源开发与恢复治理方案[R].甘肃玛曲格萨尔黄金实业股份有限公司,2018.
Zhang W X, Wang Y Q, Zhuang F Z, et al. Mineral resources development and restoration treatment scheme of Dashui Gold Mine of Gansu Maqu Gesar Gold Industry Co. Ltd. [R]. Gansu Maqu Gesar Gold Industry Co. Ltd. ,2018.

[2] 辛静.等值反磁通瞬变电磁法在浅部采空区探测中的应用[J].工程地球物理学报,2019,16(5):718-722.
Xin J. The application of opposing coils transient electromagnetic method to detect shallow goaf [J]. Chinese Journal of Engineering

Geophysics,2019,16(5):718-722.

[3] 李貅.瞬变电磁测深的理论与应用[M].西安:陕西科学技术出版社,2002.
Li X. Theory and application of transient electromagnetic sounding [M]. Xi'an:Shaanxi Science and Technology Press,2002.

[4] 薛国强,李貅,底青云.瞬变电磁法理论与应用研究进展[J].地球物理学进展,2007,22(4):195-200.
Xue G Q, Li X, Di Q Y. The progress of TEM in theory and application [J]. Progress in Geophysics,2007,22(4):195-200.

[5] 孔详儒.电磁感应研究的进展与展望[J].地球物理学进展,1992,7(2):11-14.
Kong X R. The advance and prospect of the earth's electromagnetic induction study[J]. Progress in Geophysics,1992,7(2):11-14.

[6] 嵇艳鞠,林君,于生宝,等. ATTEM 系统中电流关断期间瞬变电磁场响应求解的研究[J].地球物理学报,2006,49(6):1884-1890.
Ji Y J, Lin J, Yu S B, et al. A study on solution of transient electromagnetic response during transmitting current turn-off in the AT-TEM system[J]. Chinese Journal Geophysics,2006,49(6):1884-1890.

[7] 席振铎,龙霞,周胜,等.基于等值反磁通原理的浅层瞬变电磁法[J].地球物理学报,2016,59(9):3428-3435.
Xi Z Z, Long X, Zhou S, et al. Opposing coils transient electromagnetic method for shallow subsurface detection [J]. Chinese Journal Geophysics,2016,59(9):3428-3435.

[8] 席振铎,宋刚,周胜,等.一种瞬变电磁测量装置及方法[P].中国专利,201410092714X,2014-03-14.
Xi Z Z, Song G, Zhou S, et al. A transient electromagnetic measuring device and method [P]. China Patent,201410092714X,2014-03-14.

- [9] Jackson J D. Chassical electrodynamics [M]. New York: Wiley, 1962.
- [10] 周超,赵思为.等值反磁通瞬变电磁法在煤窑采空区中的应用[C]//北京:2018 国际地球物理会议暨展览,2018:1406-1409.
- Zhou C,Zhao S W. Application of opposing coils transient electromagnetic method in coal mine goaf [C]//Beijing:2018 International Geophysical Conference and Exhibition,2018:1406-1409.
- [11] 杨建明,王洪昌,沙椿.基于等值反磁通瞬变电磁法的岩溶探测分析[J].物探与化探,2018,42(4):846-850.
- Yang J M,Wang H C,Sha C. An analysis of karst exploration based on opposing coils transient electromagnetic method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2018,42(4):846-850.
- [12] 彭星亮,席振铎,王鹤,等.等值反磁通瞬变电磁法在地质灾害探测中的应用对比[J].西部探矿工程,2018,30(8):147-150,153.
- Peng X L,Xi Z Z,Wang H,et al. Comparison of application of opposing coils transient electromagnetic method in geological disaster detection [J]. Western Exploration Project,2018,30(8):147-150,153.
- [13] 高远.等值反磁通瞬变电磁法对石膏矿采空区的探测分析[J].物探与化探,2019,43(6):1404-1408.
- Gao Y. The application effect on detecting goaf of gypsum mine by opposing coils transient electromagnetics method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2019,43(6):1404-1408.
- [14] 雷宛,肖宏跃,邓一谦.工程与环境物探教程[M].北京:地质出版社,2006.
- Lei W,Xiao H Y,Deng Y Q. Engineering and environmental geophysical exploration Tutorial [M]. Beijing:Geological Publishing House,2006.
- [15] 赖耀发,席振铎,张峰,等.等值反磁通瞬变电磁电阻率谱系法探测铝土矿[J].中南大学学报:自然科学版,2021,52(9):3264-3272.
- Lai Y F,Xi Z Z,Zhang F,et al. Application of opposing coils transient electromagnetic resistivity spectrum method to detect bauxite deposits [J]. Journal of Central South University: Science and Technology,2021,52(9):3264-3272.
- [16] 孙怀凤,吴启龙,陈儒军,等.浅层岩溶瞬变电磁响应规律试验研究[J].岩土力学与工程学报,2018,37(3):652-661.
- Sun H F,Wu Q L,Chen R J,et al. Experimental study on transient electromagnetic responses to shallow karst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(3):652-661.
- [17] 赵东东,陈基伟,宗全兵,等.等值反磁通瞬变电磁法在地铁盾构孤石探测中的应用[J].工程地球物理学报,2021,18(4):495-502.
- Zhao D D,Chen J W,Zong Q B,et al. Application of opposing coils transient electromagnetic method in metro shielding boulder detection [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2021,18(4):495-502.

Application of the opposing coils transient electromagnetic method in investigation of mined-out areas of a gold deposit

REN Xi-Rong, LI Xin, ZHOU Zhi-Jie

(No. 2 Exploration Institute of Geological and Mineral Resources, Gansu Bureau of Geological and Minerals Exploration, Lanzhou 730020, China)

Abstract: The Dashui gold deposit in Maqu County, Gansu Province is a typical mine of the western Qinling region. Owing to continuous mining, many mined-out areas have been formed at different depths below high and steep slopes No. 5 and 9, causing local surface collapse and major safety hazards. According to the requirements for environmental protection and safety, there is an urgent need to determine the spatial distribution of concealed collapse to effectively prevent geological disasters. Using the opposing coils transient electromagnetic method (OCTEM), this study conducted the fine-scale interpretation of the anomalies on the typical sections of the exploration area. Based on this, as well as the comprehensive analysis of the hydrogeological data and basic geological data of the exploration area, this study determined the transparent and three-dimensional distribution of the concealed collapse of the Dashui gold deposit. The results of this study show that the subsurface investigation of mined-out areas using the OCTEM can effectively reveal the lithologic and electrical characteristics of concealed strata in mined-out areas. Moreover, the significantly different physical properties between mined-out areas and surrounding rocks can be used to effectively identify the locations and basic morphologies of subsurface mined-out areas. The data on the boundary characteristic points of the mined-out areas on geophysical profiles with multiple exploration lines and three-dimensional modeling allow for the three-dimensional visualization of the spatial morphology of the mined-out areas. The application performance of the OCTEM, along with three-dimensional modeling, provides a technical basis for mine restoration and safety evaluation, thus effectively serving the construction of digital mines.

Key words: opposing coils transient electromagnetic method (OCTEM); mined-out area; metal mine; 3D modeling