ISSN 1671－2900
CN 43－1347/TD

采矿技术　第 24 卷　第 1 期
Mining Technology，Vol. 24，No. 1

2024 年 1 月
Jan. 2024

高密度电法勘测技术在采空区探测中的应用*

史玉林

（烟台金曼投资有限公司，　山东 栖霞市　265300）

摘　要：随着早期地下金属矿山的粗放式开采，相当一部分矿山采用空场法进行采矿，遗留的采空区未及时进行处理，存在着采空区分布范围、规模和现存状态不清的问题，采空区围岩稳定性对地表生态环境和矿山下部资源开发利用均存在极大的威胁。探明生产矿山历史遗留采空区赋存状态已迫在眉睫，高密度电阻率法在采空区、溶洞等异常地质体探测中具有结果精准、易于施工、低本高效等优点。某金矿 6-1 号矿体因民采采空区技术资料缺失，下部资源开采受到采空区威胁，采用高密度电阻率法对民采采空区进行了探测，结合开采地质条件对探测数据进行分析，共圈定采空区异常区域 4 个，和工程揭露充分吻合，证明了高密度电阻率法在采空区探测中的实用性。

关键词：高密度电法；电阻率；采空区；数据分析

0　引言

长期以来，国民经济飞速发展带动了采矿业蓬勃发展，相当一部分贵金属薄矿体矿床采用空场采矿法开采，开采时将矿块划分为矿房和矿柱两步回采，先开采矿房后回采矿柱，形成的采空区一般不做处理。遗留的采空区因处理技术存在短板或不经济等原因未及时进行处理，且部分民采采空区年代久远未留存相关技术资料，导致部分矿山的采空区分布范围、采空区规模及现赋存状态不清[1]。遗留的采空区自身稳定性较差，受到外部自然扰动或采矿作业影响极易垮塌，不仅对地表建（构）筑物造成严重破坏，而且对采空区下部及周边矿产资源开发造成潜在的长期威胁[2]。随着近年来物探测量技术的发展，如先进的高密度电阻率法、矿山 CT 层析成像、声发射探测等技术涌现，可根据围岩物理性质不同对采空区、断层、矿岩软弱结构面进行测量诊断，同时高密度电阻率法具有探测范围广、数据真实可靠等优点，在采空区探测中应用较多[3-4]。

某黄金矿山因早期民采区较多，遗留了较多采空区未进行处理，对深部资源开发造成了严重的生产安全隐患。根据采空区埋藏深度和现场条件，决定采用勘查效果较好的高密度电阻率法进行勘查[5]。通过测量围岩、采空区电阻率，并对探测数据进行分析可得到不同电阻率区域分布规律，再结合生产实际分析采空区稳定性，对潜在危险采空区采取胶结充填等治理手段，基本可以杜绝采空区坍塌、地表沉陷等事故的发生，对生态环境的保护和井下的安全生产均具有良好的效益[6]。

1　工程概况

某金矿矿区及周边分布有一定量的民采采空区，多为 20 世纪八九十年代开采导致，规模不一，现基本已植被覆盖，个别位于矿体浅层的顶部，其采空回填率在 85％以上。为充分利用深部矿产资源，矿山于 2015 年进行基建，采用竖井开拓，设计中段高度为 50 m，下设 7 个中段（＋248～－50 m）；现已开拓＋48 m、＋200 m、＋150 m、＋100 m 中段巷道，现开采矿体以 6-1 号矿体为主。

6-1 号矿体部分已开采为采空区，标高位于＋326～＋150 m，新开拓的部分中段采空区已充填完毕，但原民采区均采用浅孔留矿采矿法开采，部分采空区未进行充填处理，且采空区赋存的技术资料不全，稳定性不明，对该矿下部资源开采及地表稳定极具威胁，故采取高密度电阻率法对历史遗留的采空区进行测量、摸查。

* **收稿日期**：2023-04-06

作者简介：史玉林（1987—），男，山东烟台人，测量工程师，主要从事矿山生产技术等方面的研究，E-mail：547854176@qq.com。

2 高密度电法测量原理及工程布置

2.1 高密度电法原理

高密度电阻率法是基于传统电法理论,工程现场一次布设电极就可以对大量信号进行采集,具有工作效率高等优点[7]。同时以矿、岩、土的电性差异为基础,通过对地下静电场分布规律的测量观测,来研究分析异常工程地质难题[8]。野外电阻率测量时通过 GPS-RTK 点位将电极放样,通过程控电极开关和测量仪器配合实现大地电阻率数据的自动快速采集,然后将测量数据导入数据反演处理软件[9],对数据进行处理后并绘制出高密度电阻率剖面图。高密度电法工作原理如图 1 所示。

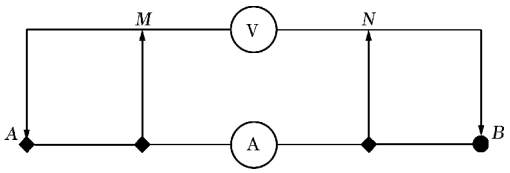

图 1 高密度电法原理

数据解译遵循由已知推断未知的原则,即:由已知的矿井下采空区的位置、范围推断整个矿区采空区、充填区内的采空及充填情况,保证探测数据解译的真实性[10]。勘测数据处理导入 Res2dinv 二维反演软件后可以显示为倒梯形图像,根据高密度电阻率剖面图可以直观地表述地层矿岩在纵深向、水平横向静电场中电阻率的变化,不同阻值范围对应着矿岩异常地质体变化[11]。勘测装置在工作时给供电电极 AB 端通电,测得电流 I,同时测量接收电极 MN 之间的电压 U,电阻率可通过下式计算。

$$\rho = U \cdot K / I$$

式中,ρ 为电阻率,Ω·m;U 为接收电极之间的电压,V;K 为探测装置系数,与 AM、AN、BM、BN 点电极之间的距离有关,m;I 为供电电极通过电流,A。

2.2 采空区物理特征

因采用空场采矿法或采用其他采矿方法开采形成的采空区未及时处理,若对工程实体周边围岩原有应力扰动,矿体顶板因采矿而发生垮落、断裂、弯曲下沉等破坏,导致上覆岩层的连续性和承载能力遭到严重破坏[12-13]。采空区内部充填废石、地下水、或处于敞空状态,不同岩层因各向异性导致其电物理特性各不相同,故通过对地质体电阻率测量可以反映不同的矿岩、采空区界限以及采空区状态[12]。

基于矿岩、采空区的地球物理特征,在采用高密度电阻率法对工作区内采空区进行测量时,能够依据相关准则对采空区状态进行判断。采空区部分充填,遗留敞空体积较大,因空气电阻率无穷大,所以表现为高电阻特征;如采空区充填较充分,充填体均一性较好,则其电阻较低。当采空区因地下水原因而充水时,矿山地下水金属离子较多,为良性导体,一般表现为低电阻特征。

根据采空区边界矿岩电物理特性突变特征,高密度电阻率法可以对采空区边界、分布范围、充填情况、充水情况及其顶板围岩的垮落破坏形态进行判断[14]。

2.3 探测工程布置

通过分析矿山井下及周边地质资料,确定采空区埋深一般在+248~+50 m 之间,矿体走向北东向,因此,采空区走向也为北东方向。依据前期收集资料,在对现场进行初步调查的基础上结合场地的条件,确定垂直于矿体走向沿着 SE165°方向布设勘探线。采用点距为 5 m 的高密度电法温纳装置对勘查区进行剖面测量工作,测线方向基本垂直于采空区走向。为了详细地查明采空区范围,在 6 号带布置 2 条剖面(PM1、PM2)加以控制,圈定地电异常分布区,对矿山采空区充填工作进行验证。

本次物探工作完成主要实物工作量:高密度电阻率法剖面 2 条,共计 240 个物理点。使用的高密度电阻率测量系统是重庆仪器厂所生产的 DUK-2A120 道高密度电法测量系统。高密度电阻率法现场测量布置如图 2 所示。

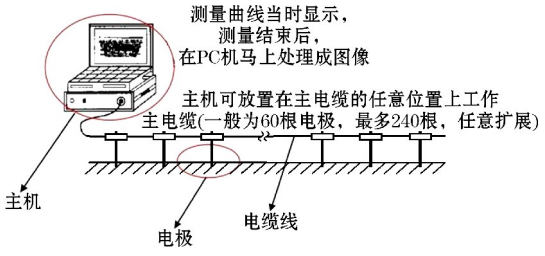

图 2 高密度电阻率法现场测量

在野外工作过程中,对个别单条测线进行了重复观测,其采集到的原始数据偏差在规范允许的误差范围内,剖面图反演结果吻合较好。视电阻率用来反映岩石和矿石导电性变化的参数,其与各种岩石的电阻率、岩石的分布状态、电极排列等情况有

关。本次工作视电阻率均方误差 $M_{\rho a}=\pm 1.42\%$，符合《电阻率剖面法技术规程》(DZ/T 0073—2016)要求。

3 数据分析及探测成果

3.1 6-1 号带的 PM1 剖面成果

PM1 高密度电阻率剖面(见图 3)垂直于矿体 6-1 呈南东向布置，点号 210～390 位于已知采空区、充填区处。从图 3 中可以看出，由于矿山开发形成的采空区、充填区，其电性层连续性较差，横向和纵向上高低阻变化均比较明显。特别是在 360 点附近纵向上存在明显高低阻异常变化梯度带，结合矿山开采资料，此高低阻异常变化梯度带位于充填区与采空区接触带上。断面范围在点号 210～360，AB/2 范围在＋259～＋149 m，断面呈现中低阻区域，存在“U”字形中阻及低阻封闭圈异常，推断为充填区域且是充填较好的中低阻反映。结合矿山开采资料，该中低阻异常与＋248 m 中段、＋200 m 中段、＋150 m 中段的充填区域相吻合。

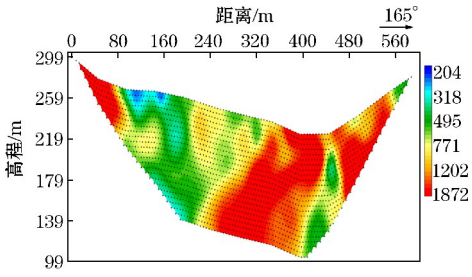

图 3 PM1 高密度电阻率剖面

断面范围在点号 360～400，视电阻率呈现出高阻异常，整体视电阻率等值线随深度增大逐渐增大，变化较平稳。等值线形态及数值的差异反映了两侧岩性电性差异较大，推断为采空区域。结合矿山开采资料，该高阻异常与＋100 m 中段的采空区域相吻合。

3.2 6-1 号带的 PM2 剖面成果

PM2 高密度电阻率剖面(见图 4)垂直于矿体 6-1 呈南东向布置，点号 220～380 位于已知采空区、充填区处。从图 4 中可以看出，由于矿山开发形成的采空区、充填区，其电性层连续性较差，横向和纵向上高低阻变化均比较明显。断面范围在点号 210～400，AB/2 范围在＋250～＋140 m，断面呈现中低阻区域，存在“U”字形中阻及低阻封闭圈异常，推断为充填区域且是充填较好的中低阻反映。结合矿山开采资料，该中低阻异常与＋248 m 中段、＋200 m 中段、＋150 m 中段的充填区域相吻合。

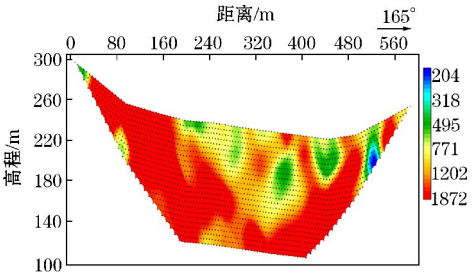

图 4 PM2 高密度电阻率剖面

断面在点号 400 附近，纵向上存在明显高低阻异常变化梯度带，结合矿山开采资料，此高低阻异常变化梯度带位于充填区与采空区接触带上。视电阻率等值线随深度增大逐渐增大，变化较平稳。等值线形态及数值的差异反映了两侧岩性电性差异较大，推断为采空区域。结合矿山开采资料，该异常与＋100 m 中段的采空区域相吻合。

4 结论

(1) 综合 PM1 和 PM2 这两条剖面的中低阻异常，结合 6-1 号矿体充填区域＋248 m 中段、＋200 m 中段、＋150 m 中段及预留顶柱，可圈出 3 个采空充填异常区。根据高阻异常，结合矿山采空区域＋100 m 中段及预留顶柱，可在平面上圈出 1 个采空异常区。

(2) 此次勘查结果表明，高密度电阻率法有较好的垂向探测效果，视电阻率异常形态规则，高低阻带状特征明显异常位置符合实际情况，较好地反映出了矿山采空区、充填区及正常岩石的完整程度。

(3) 通过对物探资料进行整理成图和地质解释，基本查明了勘查区在勘查深度范围内的异常情况，推断在勘查区范围内发现的中低阻异常为充填区，高阻异常为采空区。并推测出了充填区、采空区的平面投影位置。

参考文献：

[1] 蓝宇. 广东大宝山矿采空区安全形势与对策研究[J]. 中国安全生产科学技术，2022，18(增刊 1)：159-164.

[2] 周逸文，张涛，段隆臣，等. 我国矿山采空区综合治理研究综述[J]. 安全与环境工程，2022，29(4)：220-230.

[3] 林毅斌，董凯程，赖渊平，等. 露天矿地下采空区探测与综合整治技术研究[J]. 有色金属(矿山部分)，2022，74(2)：11-16.

[4] 卿晓锋,杜蛟.综合电法在煤矿采空区探测中的效果分析[J].四川地质学报,2022,42(2):325-330.

[5] 韩琳,李洪涛,安成龙,等.铁矿老采空区空间分布精细探测方法与应用[J/OL].金属矿山,1-14.[2023-03-28].http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20230104.1545.001.html

[6] 薛丹丹.试析矿山采空区安全评估方法[J].世界有色金属,2021(17):101-102.

[7] 张静,胡尊平,陶鹏飞,等.高密度电阻率法特点及在地质灾害中的应用实例[J].西部探矿工程,2022,34(9):138-143.

[8] 王成龙.综合物探技术在矿山采空区勘察中的应用[J].石材,2023(2):22-24.

[9] 王永增,张忠海,曹洋,等.基于高密度电阻率法的露天铁矿陡立型铁矿体内不明采空区探测技术研究[J].中国金属通报,2020(12):155-156.

[10] 刘慧芳,郭秀军,吴景鑫,等.垃圾场填埋气泄漏过程高密度电阻率法监测效能分析[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2023,53(2):107-115.

[11] 杨生文,徐林,张风荣,等.高密度电阻率法对山脊下伏采空区埋深探测的研究[J].内蒙古煤炭经济,2020(24):16-17.

[12] 刘书瑶.某金属矿山采空区上覆岩层变形机理及稳定性分析[D].赣州:江西理工大学,2022.

[13] 杜瑞成.矿山采空区资源富集规律及采动压力研究[J].世界有色金属,2021(23):31-33.

[14] 蒲文龙,丁洁琼.瞬变电磁法在新铁煤矿隐蔽采空区探测中的应用[J].价值工程,2023,42(4):152-156.