

综合物探方法在四工河煤田火区勘探中的应用研究

豆龙辉* 汪路南

新疆维吾尔自治区煤田地质局综合地质勘查队

DOI:10.32629/gmsm.v8i5.2341

[摘要] 综合应用多种地球物理勘探技术能够显著增强煤田火区探测结果的完整性与精密度。本研究采用了涵盖瞬变电磁法、高精度磁测法以及自然电位法在内的多技术综合地球物理勘探方案。通过综合分析各物探数据,本文精确划分了四工河煤田活火区与采空区的界限,并确定了其具体分布位置和面积。研究结果证实,所实施的多技术综合地球物理勘探方案展现出较高的精确度与可信度,为未来该区域煤田火区的精细化勘探与治理提供了宝贵的参考。

[关键词] 综合物探方法; 煤田火灾; 瞬变电磁; 高精度磁测; 自然电位法

中图分类号: P641.4+61 文献标识码: A

Application of comprehensive geophysical prospecting approach within the fire zone investigation of Sigonghe coalfield

Longhui Dou* Lu'nan Wang

Xinjiang Uygur Autonomous Region Coalfield Geology Bureau Comprehensive Geological Survey Team

[Abstract] The comprehensive application of multiple geophysical exploration techniques can significantly enhance the integrity and precision of coalfield fire detection results. This study adopted a multi technology comprehensive geophysical exploration plan that includes transient electromagnetic method, high-precision magnetic survey, and self-potential method. Through comprehensive analysis of various geophysical data, this article accurately delineated the boundaries between the active fire zone and goaf in the Sigonghe coalfield, and determined their specific distribution locations and areas. The research results confirm that the implemented multi technology comprehensive geophysical exploration plan exhibits high accuracy and credibility, providing valuable reference for the refined exploration and management of coalfield fire areas in Xinjiang in the future.

[Key words] comprehensive geophysical prospecting approach; coalfield fire; transient electromagnetic; high-precision magnetic survey; self-potential method

引言

新疆煤火问题在全球范围内具有显著性,其对煤炭资源的损耗、生态破坏及绿色发展阻碍备受关注。自1958年始,国家投入巨资治理,至2020年底,新疆已治理67处火区,总面积近1500万平方米,保护煤储量超300亿吨,减排温室气体逾4亿吨,效果显著^[1,2]。尽管如此,新疆的自然条件和煤层特性使得火灾治理任务依然艰巨。

现有的火区详勘主要借助红外成像、钻孔、遥感和各类物探技术来实施^[3,4]。在诸多物探方法中,瞬变电磁法对围岩中的低阻体的敏感性较高,具有理想的位置分辨率和测深分辨率。此外,在浅层地质结构中,该技术能够有效识别出具有双层积水特征的采空区域^[5]。煤火会形成铁磁性矿物的烧变岩,磁法勘探技术能够识别煤层自燃后烧变岩与围岩间的磁性质差异,精确定位火区,

并鉴别活火区与古火区。通过定期观测煤田火烧区的磁异常变化,可以定量分析煤田燃烧区的燃烧速率和方向,为火区防控提供科学依据。自然电位法通过监测煤层自燃引发的氧化还原电位变化来定位火区。煤层燃烧导致上部氧化区带正电,下部还原区带负电,形成闭合电回路并产生自然电场。温度升高促使氧化区吸收周围裂隙水,引起带电离子聚集,形成耦合电场。火区裂隙水矿化度增加,形成导电溶液,动态变化的氧化还原及吸附电场反映在自然电位异常上,为煤层自燃监测提供关键依据。

单一的物探方法难以对结果进行相互验证,难以充分掌握火区与采空区范围。为了准确圈定活火区和采空区范围,应用了包含瞬变电磁法、地面高精度磁测和自然电场法的综合物探方案对新疆四工河煤田火区进行了勘探。本研究提升了物探技术的应用价值和效果,有助于进一步制定与火区相匹配的治理方

案,提高治理效率和成效,对于新疆打造全国能源资源战略保障基地、保障国家能源安全具有重要意义。

1 综合物探方法应用的实施方案

1.1 火区简介

四工河煤田火区位于阜康市东南24公里处,行政区划隶属新疆阜康市管辖。火区中心地理坐标:东经 $88^{\circ}07'07''$,北纬 $44^{\circ}05'14''$ 。2001年,该区域首次记录到地表温度异常,2002年末,观察到地面有烟雾逸出,随后煤火的扩散范围逐步扩大。在第四次新疆煤田火区普查中,火区面积为44,660平方米,而在第五次普查时,面积增加至57,805平方米。火灾的发生与发展与小窑的非法开采密切相关,火区周围散布着未经处理的废弃煤场;并且火区迅速加剧燃烧。该火区的主要燃烧煤层分别为10-13、14-15、19-21煤层,煤层走向近东西向,倾向南,更多煤层信息参见表1。目标详查区范围呈南北向不规则条带状分布,物探勘查区面积约0.6平方千米。

表1 四工河火区煤层信息

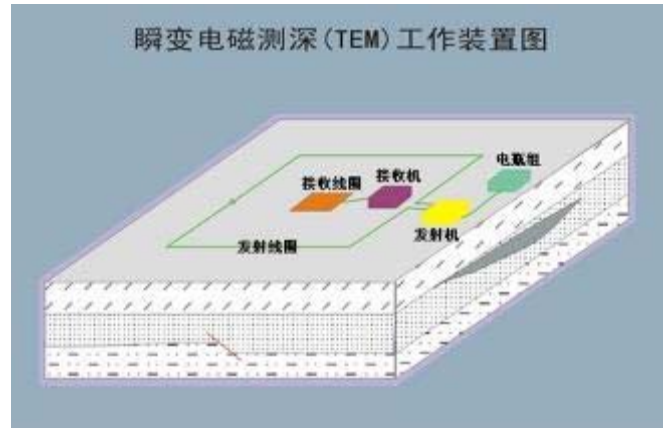
煤层	煤层厚度(m)	顶底板材质	平均火烧深度(m)
10-13	0.81~1.51	均为粉砂质泥岩	44
14-15	12~16.28	顶板为粉砂质泥岩,底板为砂岩	47
19-21	1.7~2.1	均为粉砂岩	55

1.2 瞬变电磁实施方案

本次瞬变电磁法采用的仪器为加拿大凤凰公司的V8多功能电法仪,见图1(a),和瞬变电磁测深装置,见图1(b)。共设有13条瞬变电磁法测线,间距50米,测点间隔10米,共433个物理点。由于本次探测目的在300米以浅,且工作区内有电线通过,为抑制工频干扰,工作频率选用25Hz,发射线圈尺寸选用 $300 \times 300\text{m}$ 。为保证发射信号强度及压制噪声,所选电流大小不低于10A。V8仪器中磁道选取4倍增益,确保能最大限度放大晚期道数据。为兼顾压制干扰效果和工作效率,选择90 s的采集时间作为常用叠加时间,遇到严重干扰时则适当延长采集时间来进行压制。



(a)



(b)

图1 瞬变电磁所用设备

1.3 高精度磁测实施方案

本次磁测工作使用了3台美国玻璃地球公司研发生产的Erev-1+质子磁力仪,分别编号E1、E2、E3。磁测钱对3台设备均进行了噪声水平、观测精度、系统误差和一致性测定,仪器的噪声水平均小于2.0nT,观测精度均小于0.9 nT,仪器间的一致性为1.12nT,均满足《地面高精度磁测技术规程(DZ/T 0071—93)》的要求。在工作区,布设了29条高精度磁测线,间距50米,测点间隔5米,共1974个物理点。

日变观测仪器使用E3,采样时间间隔为30秒,仪器自动循环测量和记录。E1和E2的工作采用总场测量方式,观测参数为地磁场总场强度,探头高度为1.5米,以校正点-观测点-校正点的闭合方式进行。高精度磁测数据采集采用仪器自动记录与磁测野外记录卡相结合的方式,记录内容涵盖各测线编号及其起始点编号,地形地貌、地物及干扰源的描述。

1.4 自然电位法实施方案

本次自电法作业选用了重庆奔腾地质仪器研究所制造的WDJD-4型多功能数字直流激电仪,自电法与高精度磁测共用测线与测点。依照《自然电场法技术规程(地矿部DZ/T 0081—2017)》及勘测区的地质条件,电位观测方式的电位总基点选择在1线南部自然电场平稳的一点,且接地良好,方便兼顾联测作业。为确保测量的准确性,对电极进行精细打磨,清除极柱上的铁锈,同时对电极进行配对编号,以符合极差不超过2mV的要求;在施工过程中,应避免阳光直射,以减少温度对硫酸铜溶液饱和度的影响;电极的接地电阻需低于 $2\text{K}\Omega$,电极坑的挖掘深度应控制在0.1至0.2米之间,并在坑内注水以增强接地效果。使用的导线应具有 $3\Omega/\text{km}$ 的电阻率,并在工作开始和结束前对导线进行漏电检测。

2 综合物探方法应用的数据处理

2.1 瞬变电磁法的数据处理

V8接收机将现场观测所得的测点数据存储于内置的CF卡中,每日工作结束后,将观测数据导入至计算机并进行整理,后续数据处理与解释的流程。使用V8电法工作站的配套软件TEM Pro

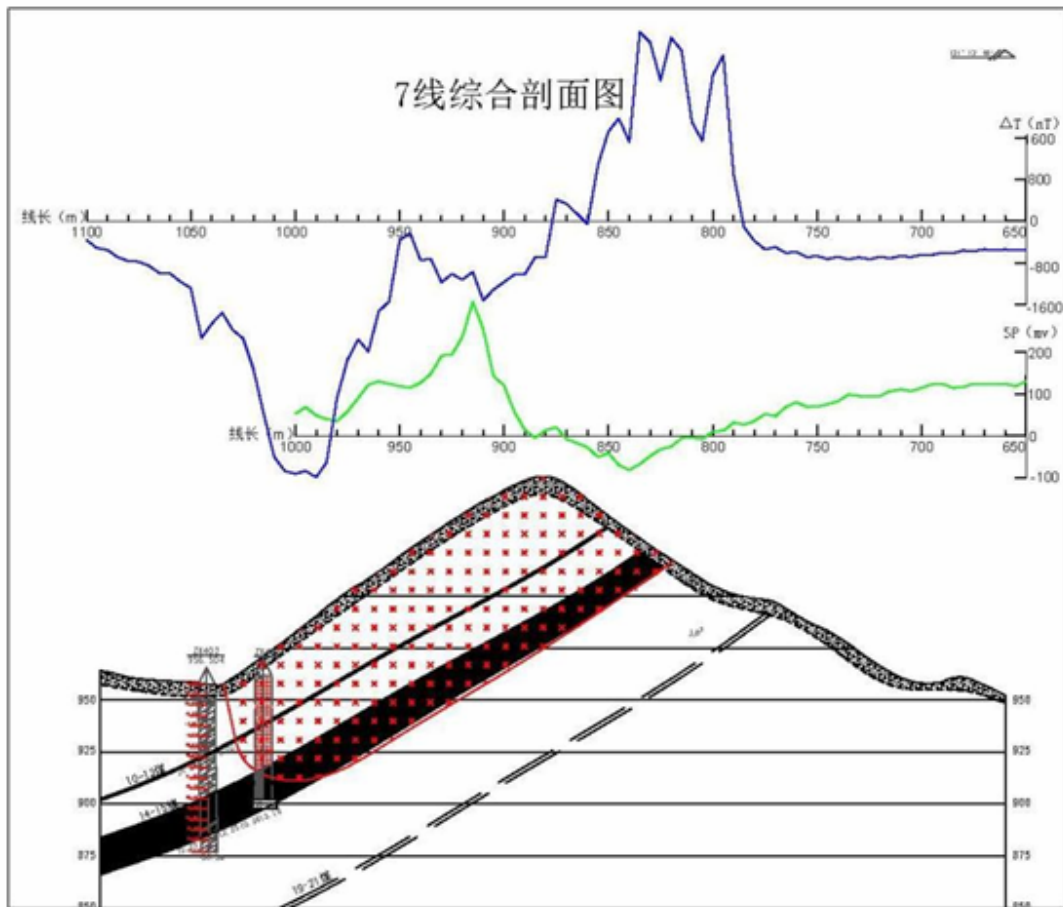


图2 7线综合剖面图

实施的预处理, 主要涉及对原始数据的点线号和误差进行检查, 并剔除其中的畸变点, 再将同一剖面内不同工作日收集的数据进行拼接, 以便于后续的反演处理。在预处理阶段, 无需对原始数据执行圆滑处理, 该操作可能导致重要信息的丢失, 进而降低分辨率。其次, 反演拟合过程本身即具备圆滑功能。随后, 采用Interpex公司的IX1D一维反演软件进行一维层状反演。该过程涉及从预设的初始模型出发, 计算理论衰减曲线, 并依据既定约束对地电模型的厚度与电阻率参数进行迭代调整, 以实现观测曲线的最佳拟合。反演结果文件呈现了点位与深度对应的电阻率值。

2.2 高精度磁测的数据处理

每个工作日结束后, 输入总磁场强度 T 值至计算机执行日变校正以获取 ΔT 值, 并绘制 ΔT 曲线。曲线需100%复核, 单项精度需至 0.1nT , 确认准确后, 方可继续次日工作, 确保第一手数据的准确性。需要注意的是, 采集数据时, 受多种干扰影响, 原始数据可能畸变。解释前, 应对畸变点进行校正。分析磁测曲线畸变原因, 结合地质资料和班报, 合理剔除或平滑, 同时避免引入假异

常。本次磁测数据处理采用MAGS4.0软件。鉴于项目区域面积及高差有限, 正常场梯度校正与高度校正均为 0nT 。由于实测 ΔT 异常反映斜磁化状态下的总场变化, 与磁性体实际位置存在偏差。为将斜磁化条件下的磁异常转换为垂直磁化条件下的异常, 需执行磁异常极化处理。参数设定为: 总场 57657.66nT , 磁倾角 $65^{\circ} 15' 47''$, 磁偏角 $2^{\circ} 53' 24''$ 。

2.3 自然电位法的数据处理

在本项研究中, 采用了自然电场法作为获取电位观测数据的方法。在数据处理的初始阶段, 对采集到的原始数据执行了一套综合性的预处理操作, 包括对每个测量点的平均电位值进行精确的数值计算, 还涵盖对数据进行基点校正和极差校正的步骤, 这些措施都是为了提高数据的精确度和可信度。随后, 研究团队对测量文件进行了详尽的编辑和导入流程, 特别关注于识别并排除那些异常的跳点数据, 这样做的目的是为了最小化这些误差对最终分析结果的潜在影响。经过这些严格的数据处理程序, 最终绘制出详尽的自电剖面图。

3 结果与讨论

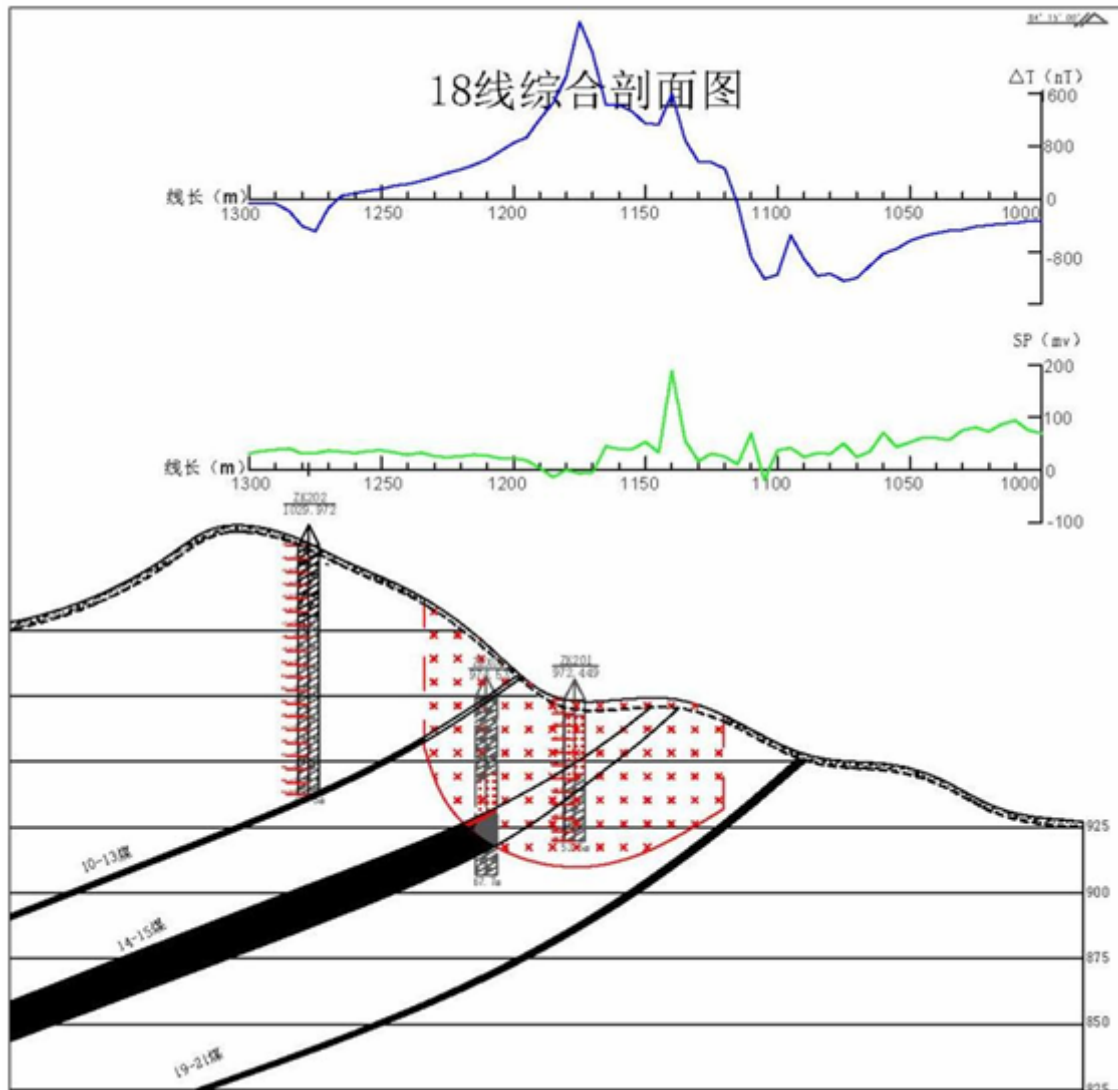


图3 18线综合剖面图

3.1瞬变电磁结果分析

瞬变电磁成果的解释包括视电阻率剖面的定性分析,以及反演电阻率的定量分析。视电阻率和横波速度等值线的显著扭曲与变形,表现为凹陷状。通过将相邻的异常测量点在平面图上组合,对低电阻、高电阻异常进行细致分析,通常在等值线变化带划分采空区的边界。选取代表性测线的瞬变电磁反演电阻率剖面来看,色标从蓝色过渡至黄色再到红色,分别代表视电阻率的低、中、高值。结合13-14煤层资料,采空异常区被圈定在低电阻率的蓝色对应范围内,该区域整体呈现低电阻率异常,推断采空区内部含水量较高,其顶界面的标高约为875米。

对布设的13条瞬变电磁法测线开展系统性分析,异常测线所呈现的异常均为低阻异常,与工作区地下水特征相符。综合多条瞬变成果剖面的异常特征进行圈定,最终确定的采空区面积约88,616平方米。

3.2高精度磁测结果分析

在磁测解释的过程中,必须从磁测曲线和地质特征中准确识别板状体的特性,并通过计算机辅助解释与人工解释的结合,以实现煤层自燃火区范围及深度的定性定量分析。定性解释基于本区火区与正常围岩的显著磁异常特征,通过分析 ΔT 曲线上煤层自燃的明显磁异常特征及其最小磁异常值,经过综合数据处理,得以界定火区的边界。

在本研究区域,磁异常表现为有限延伸且倾斜的薄板状二度体特征。在选取解释方法和公式时,主要考虑了二度体的特性,定量解释时需要计算煤层火区的上顶宽 $2b$ 。先根据水平垂直求导求得磁性体上顶中心原点 x ,再利用公式 $f(x)=1/2[Z_{max}(x)+Z_{min}(x)]$ 计算出 x 在测线上的位置。以原点为中心,连接 Z_{max} 横坐标为 b ,向 Z_{min} 方向延长 b ,即得 $2b$,在 Z_{max} 与 $2b$ 与四个不同高度上延伸曲线交点相吻合,即烧变岩体上界面边界。

在本项研究中, 测量得到的 ΔT 值主要分布在 $-5,000$ 至 $5,000\text{nT}$ 范围内, 烧变岩引起的磁异常较为显著。如图2展示的7线磁法-自电综合剖面图, 自上而下分别为磁测 ΔT 曲线(以蓝色表示)、自电曲线(以绿色表示)及地形曲线。该剖面线总长500米, 布置方向为 211° 。从图中可见, 磁测数据在桩号780至1050内显示出正负异常交替的现象, 其中异常峰值高达 $1,800\text{nT}$ 以上, 在地表, 地表可见烧变岩出露, 推断为煤层烧变岩的表现。在1040桩号附近, 钻探作业布置了钻孔, 钻孔揭示了10-13号煤层和14-15号煤层。结合地表露头的观察, 综合分析后, 火区异常被界定在820至1075桩号之间, 其底界面位于约915米水平标高, 估算埋藏深度约为60米。

磁测18线位于研究区北缘, 呈近东西向布置。在磁测数据中, 1050至1210桩号段显示出正负磁异常交替现象, 与地层倾向相吻合(如图3), 且地表有烧变岩的明显出露。据此推断, 磁异常可能由烧变岩引起。

缘。由于区内的煤层露头烧变历史久远, 烧变岩的延伸范围广泛, 难以界定其南北边界。

3.3 自然电位法结果分析

测得本区域的自然电位异常值普遍介于 -120mV 至 $+300\text{mV}$ 之间, 以负异常为主, 而在地表高温局部区域则呈现自电正异常。在自然电位曲线分析中, 根据图2, 桩号770至995区间内观察到显著的波动, 其中在915桩号处异常峰值超过 300mV 。地表高温点的存在表明, 这一自然电位异常是由煤层的活跃燃烧所引起的。18线上, 自然电位曲线整体平缓, 然而在1140桩号处突显出一个正异常峰值, 接近 200mV (见图4)。结合地表高温点的观测, 推测该区域下伏煤层可能存在活跃火源。在1175桩号附近布置的钻孔内观察到10-13号煤层的烧变岩, 并记录到孔内高温现象。综合分析确定火区异常区域位于1050至1210桩号之间, 底界面位于920米水平标高, 估算埋深约为45米。据此推断, 异常区域涉及10-13号煤层、14-15号煤层的烧变岩以及10-13号煤层的活跃火源。

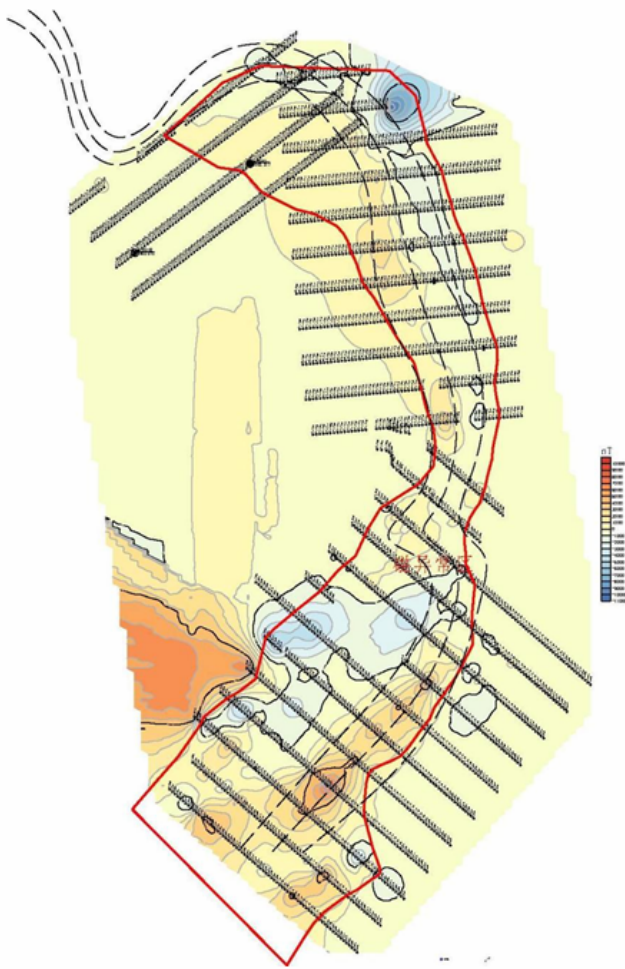


图4 磁测 ΔT 等值线平面图

根据实测数据及测点位置信息, 构建了如图4所示的工作区的磁测 ΔT 等值线平面图。在该平面图中, 圈定了一处磁异常区, 其范围以图中红色标记表示, 覆盖面积为 $262,411$ 平方米。磁异常区域沿煤层走向延伸, 南北纵贯整个区域, 且未触及区域边

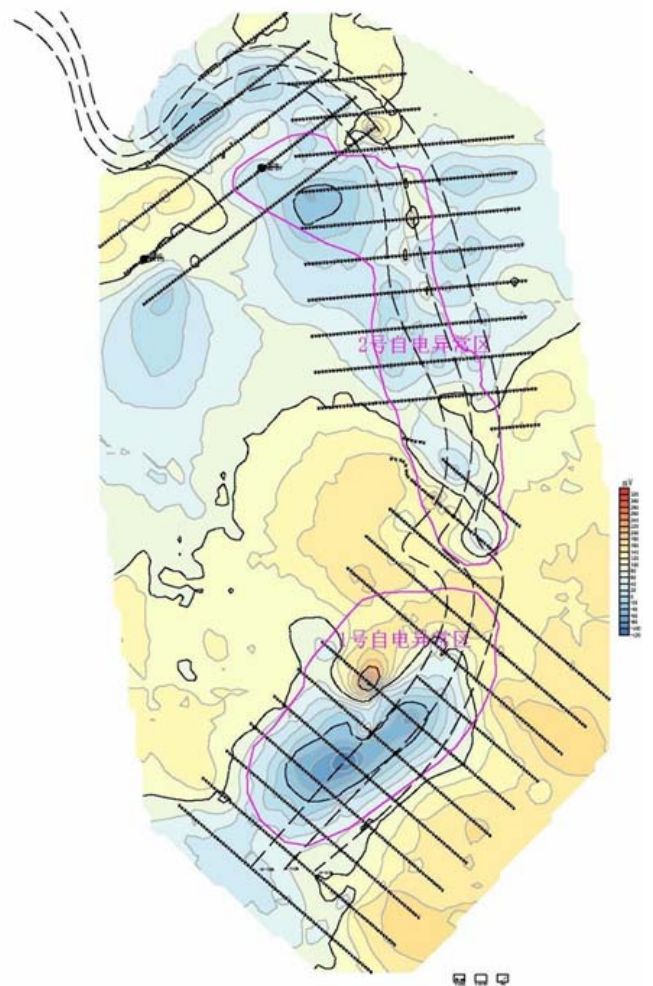


图5 自然电位等值线平面图

根据实测数据及测点位置信息, 构建了如图5所示的工作区的自然电位等值线平面图。在等值线图上, 通过洋红色标记圈定

出两处自电异常区域,它们主要沿煤层露头的走向分布,且地表存在高温点。这些区域的自电异常现象在三个主要煤层中均有不同程度的表现。其中,南部的1号自电异常区域的面积为77,161平方米,而北部的2号自电异常区域则稍大,面积为78,966平方米。

4 结论

(1)详述了包含瞬变电磁、高精度磁测以及自然电位法在内的综合物探实施过程,包括设备使用、数据处理、结果分析等内容。根据综合物探结果,结合温度异常及钻孔验证,精确确定2023年四工河煤田活火区面积为117,160m²,较2019年扩大至原来的两倍。

(2)通过对采空区进行瞬变电磁法勘探,结合煤层位置和走向关系,确定了采空区分布及深度。详查区内,四工河西煤矿二号井采空区深度+741m水平以上,采空区面积为88,616m²。推测870m以下采空区内存在较高水充填。

(3)钻探验证结果表明,物探与钻探误差范围为0-20米,平均误差为10米。综合物探方法的反演效果良好,质量符合煤田火

区探测工作的精度要求。

[基金项目]

本研究受到新疆重点研发项目(2022B03025-6)资助。

[参考文献]

[1]王伟.煤田火灾探测与治理技术现状及发展趋势[J].煤矿安全,2020,51(11):206-209+215.

[2]闫军.新疆煤田火灾多发频发原因分析研究[J].煤炭技术,2022,41(06):162-163.

[3]高玉荣,隋刚,张新军,等.遥感方法在宁武煤田煤火识别中的应用[J].煤炭科学技术,2023,51(05):133-139.

[4]包兴东.大面积煤田火区详细勘查方法[J].煤炭技术,2021,40(02):51-55.

[5]张帆,冯国瑞.瞬变电磁法勘探煤矿不同层间距双层积水采空区的可行性研究[J].物探与化探,2023,47(05):1215-1225.

作者简介:

豆龙辉(1986--),男,陕西扶风县人,大学本科,高级工程师,从事煤田地质勘查工作与研究。