

综合物探技术在煤矿陷落柱中的探测应用分析

孙伟涛

中国煤炭地质总局一二九勘探队, 河北 邯郸 056004

摘 要 : 煤矿作为能源开采的重要领域, 其安全生产始终是国家关注的重点。在复杂的地下开采过程中, 陷落柱作为一种常见的地质灾害现象, 其存在不仅极大程度上破坏了煤层的连续性和完整性, 还极易成为矿井突水、顶板冒落等安全事故的诱因, 直接威胁到矿工的生命安全及企业的正常运营。传统的物探方法, 如地震勘探、电法勘探等, 虽在一定程度上能够揭示地下构造信息, 但在探测陷落柱时, 往往受限于探测深度、分辨率及环境干扰等因素, 难以全面、精确地刻画陷落柱的空间分布、形态特征及富水性等关键信息。鉴于此, 本文深入探讨了综合物探技术在煤矿陷落柱探测中的创新应用。综合物探技术通过整合多种物探手段 (如瞬变电磁法、高密度电阻率成像、三维地震勘探、地面穿透雷达等), 充分发挥各自技术优势, 实现数据互补与融合, 有效克服了单一物探方法的局限性。该技术不仅能够更精确地定位陷落柱的位置, 还能深入解析其内部结构、规模大小及富水状况, 为煤矿安全生产提供更为全面、可靠的地质依据。文中详细分析了综合物探技术在陷落柱探测中的优势, 包括提高探测精度、扩大探测范围、增强抗干扰能力等, 并通过具体实例展示了该技术在不同地质条件下的应用效果, 验证了其在实际操作中的可靠性和准确性。这些研究成果对于提升煤矿地质灾害防治水平、保障矿井安全高效生产具有重要意义。

关 键 词 : 综合物探技术; 煤矿陷落柱; 探测

Analysis on the application of comprehensive geophysical exploration technology in the detection of coal mine collapse column

Sun Weitao

129th Prospecting Team of China Coal Geology Administration, Handan, Hebei 056004

Abstract : Coal mine as an important field of energy mining, its safety production has always been the focus of national attention. In the complex underground mining process, as a common geological disaster phenomenon, collapse column not only destroys the continuity and integrity of coal seam to a great extent, but also easily becomes the incentive of mine water inrush, roof caving and other safety accidents, which directly threatens the life safety of miners and the normal operation of enterprises. Although the traditional geophysical exploration methods, such as seismic exploration and electrical exploration, can reveal the information of underground structure to a certain extent, it is difficult to describe the spatial distribution, morphological characteristics and water richness of the collapsed column comprehensively and accurately due to the factors such as detection depth, resolution and environmental interference. In view of this, this paper deeply discusses the innovative application of comprehensive geophysical exploration technology in coal mine collapse column detection. By integrating various geophysical methods (such as transient electromagnetic method, high-density resistivity imaging, three-dimensional seismic exploration, ground penetrating radar, etc.), integrated geophysical exploration technology gives full play to their respective technical advantages, realizes data complementarity and fusion, and effectively overcomes the limitations of a single geophysical exploration method. This technology can not only locate the position of the collapse column more accurately, but also analyze its internal structure, scale and water rich status in depth, providing a more comprehensive and reliable geological basis for coal mine safety production. In this paper, the advantages of comprehensive geophysical exploration technology in collapse column detection are analyzed in detail, including improving detection accuracy, expanding detection range, enhancing anti-interference ability, etc., and the application effect of this technology in different geological conditions is demonstrated by concrete examples, and its reliability and accuracy in practical operation are verified. These research results are of great significance for improving the level of coal mine geological disaster prevention and control and ensuring mine safety and efficient production.

Keywords : integrated geophysical exploration technology; coal mine collapse column; probe

煤矿开采是一项高度依赖地质条件的系统工程，而地质构造的复杂性往往给开采活动带来诸多不确定性。其中，陷落柱作为一种典型的隐蔽性地质灾害，其形成过程漫长且机理复杂，涉及地下水循环、岩石力学性质变化等多个方面。由于陷落柱内部往往填充有破碎岩石和泥沙，甚至可能富含地下水，这使得其在煤矿开采过程中极易成为水患的源头，威胁矿井安全。因此，准确、及时地探测陷落柱的位置、规模及其富水性，成为煤矿地质勘查和灾害防治的重要任务^[1]。传统的物探技术由于各自存在的局限性，难以满足这一需求。随着科技的不断进步，综合物探技术应运而生，它集合了多种物探方法的优点，通过综合运用、数据处理与解释技术的提升，实现了对陷落柱更为全面、深入的探测。这不仅提高了地质勘查的精度和效率，也为煤矿企业的安全生产决策提供了强有力的技术支撑。

一、综合物探技术概述

综合物探技术，作为现代地质勘探领域的一项尖端成就，其深度整合与广泛应用的特性，彻底革新了我们对地球内部结构的探索方式。该技术体系的核心竞争力在于其无与伦比的综合性与兼容性，它巧妙地将诸如电阻率法、磁法勘探、地震勘探、重力勘探、放射性勘探等多种地球物理勘探手段融为一体，形成一套高效协同的勘探系统^[2]。这一系统不仅能够针对地下介质复杂多变的物理特性（如电阻率差异、磁化率变化、岩石弹性响应、天然放射性强度等）进行全方位、多角度的数据采集，还能通过先进的数据处理与分析技术，深入挖掘这些数据背后的地质信息，从而构建出地下三维地质结构的精细模型。在煤矿这一特殊领域，综合物探技术更是成为了保障安全生产不可或缺的技术支撑。面对煤矿开采过程中频发的地质灾害，尤其是由陷落柱引起的安全隐患，该技术展现出了独特的优势。陷落柱作为煤矿中隐蔽性高、危害性大的地质异常体，其精确探测与评估是预防煤矿事故的关键。综合物探技术通过综合应用多种勘探手段，能够有效区分陷落柱与周围正常岩层的物理属性差异，如电阻率突变、磁性异常、地震波速减慢等特征，进而实现对陷落柱边界的清晰界定和空间位置的精确定位。在实际操作中，综合物探技术的实施通常包括以下几个关键步骤：首先，根据煤矿区域的地质背景资料，制定针对性的勘探方案，选择合适的勘探方法和仪器；其次，在煤矿现场进行实地测量，采集大量、高质量的地球物理数据；然后，利用先进的计算机技术和专业软件，对数据进行处理、分析和解释，提取有关陷落柱的关键信息；最后，根据解释结果绘制出陷落柱的分布图，为煤矿的开采规划和安全措施制定提供科学依据^[3]。

二、综合物探技术在煤矿陷落柱中的探测应用

（一）地震勘探

地震勘探作为地质勘探领域的一项先进技术，其核心在于通过人工方式在地表或浅部地层中激发地震波。这些地震波随后在地下岩层中传播，遇到不同岩性界面或地质构造时会发生反射、折射和透射等现象。通过在地面布置的密集地震检波器阵列接收这些反射回来的地震波信号，并利用高精度的数据处理技术进行

分析，地震勘探能够揭示地下复杂的地质结构^[4]。

在陷落柱的探测中，地震勘探技术发挥着关键作用。它能够清晰地描绘出地下岩层的分层情况，包括不同岩层的厚度、岩性变化以及潜在的断裂构造等。这些信息对于评估陷落柱的几何形态、分布范围及其与周围地层的空间关系至关重要。然而，值得注意的是，由于陷落柱内部填充物的复杂性（如松散岩石、泥土及可能的水体）以及含水量的变化，单一的地震勘探方法有时难以全面、精确地反映其内部特性和动态变化。因此，在实际应用中，往往需要结合其他物探手段进行综合分析和解释。

（二）瞬变电磁探测

瞬变电磁探测（TEM）技术则是一种基于电磁感应原理的地球物理勘探方法。该方法通过在地表或井下布设不接地回线或接地电极作为发射源，向地下发送一次强大的脉冲电磁场。当这个脉冲电磁场遇到地下介质时，会激发产生二次电磁场，这些二次场会随时间发生变化并传播到地表^[5]。通过观测和分析这些二次场的变化特征，可以推断出地下介质的电性分布、结构特征以及含水性等信息。

对于陷落柱的探测而言，瞬变电磁探测技术具有独特的优势。由于陷落柱内部往往富含水体或具有较低的电阻率，这使得它们对电磁场的变化尤为敏感。因此，通过瞬变电磁探测技术可以准确地识别出陷落柱的富水性特征，包括其空间分布、规模大小以及水体的动态变化等。这些信息对于评估陷落柱的稳定性、潜在的灾害风险以及指导工程实践具有重要意义。

（三）可控源音频大地电磁探测（CSAMT）

可控源音频大地电磁探测（CSAMT）是一种结合了主动源电磁法和音频大地电磁法优点的先进勘探技术。该技术通过在地表布设可控的人工场源（如电偶极子或磁偶极子）来激发一定频率范围内的电磁场，并观测由该电磁场在地下介质中传播时产生的不同频率响应。通过对这些响应数据的分析和处理，可以反演出地下介质的电阻率分布、地质构造特征以及可能的矿产资源信息等^[6]。

在陷落柱的探测中，CSAMT 技术凭借其探测深度大、分辨率高的特点展现出了强大的应用潜力。通过选择合适的场源参数和观测频率范围，CSAMT 技术能够有效地穿透覆盖层和浅部地层，直接探测到地下深部的地质构造和陷落柱等异常体。同时，

该技术还能够提供丰富的电阻率信息，有助于进一步揭示陷落柱的内部结构和含水状况。因此，CSAMT 技术在陷落柱探测领域具有广阔的应用前景和研究价值。

三、综合物探技术在煤矿陷落柱中的探测注意事项

（一）环境噪声控制

在煤矿井下进行物探作业时，环境噪声是影响探测精度的关键因素之一。环境噪声主要包括机械振动（如矿车运行、采煤机作业等产生的震动）、电磁干扰（井下电器设备、无线通信等发出的电磁波）以及自然噪声（如地下水流动声、岩石裂隙声等）。为减少这些噪声对探测信号的干扰，避开生产高峰期进行物探作业，减少机械振动等人为噪声的影响。对于电磁干扰，可采用电磁屏蔽装置或选择电磁环境相对较好的时段进行作业^[7]。在数据采集后，运用滤波、去噪等信号处理技术，进一步提高信噪比，削弱噪声对探测结果的影响。

（二）数据采集质量

高质量的数据是确保探测结果准确性的基础。在数据采集过程中，所有参与人员需经过专业培训，熟悉设备操作规程，确保数据采集过程的标准化和规范化。确保每个测点的数据采集完整无遗漏，避免因数据缺失导致的信息不全面。详细记录作业现场的天气状况、温度、湿度等环境参数，以及设备工作状态、测点位置等信息，为后续数据处理提供全面、准确的背景资料。实施数据质量监控机制，对采集的数据进行初步检查，及时发现并处理异常数据，确保数据的准确性和代表性。

（三）多方法综合验证

鉴于煤矿地质条件的复杂性和多变性，单一物探方法往往难以全面揭示陷落柱的特征。因此，采用多种物探方法进行综合验证，是提高探测结果可靠性和准确性的有效途径。根据煤矿的具体地质条件和探测需求，合理选择地震勘探、电法勘探、磁法勘探、重力勘探等多种物探方法^[8]。利用先进的数据处理软件和技术，将不同方法获取的数据进行有效融合，提取出共同的、有价值的信息。结合地质、采矿等专业知识，对融合后的数据进行深入分析，揭示陷落柱的空间分布、形态、规模等特征，为煤矿开采提供科学依据。

（四）安全作业

安全是煤矿生产的永恒主题，也是物探作业中不可忽视的重要环节。在井下进行物探作业时，必须严格遵守安全生产规定，确保探测人员的人身安全。所有参与物探作业的人员必须接受严格的安全培训，掌握井下作业的基本安全知识和技能。作业前应对所有设备进行全面检查，确保设备性能良好、安全可靠。特别是通风、照明和通讯设备，必须保持畅通无阻，以应对紧急情况。

应急准备：制定详细的应急预案，明确应急逃生路线和救援措施。同时，加强应急演练，提高全体人员的应急反应能力^[9]。设立专门的安全监督员，对作业现场进行全程监管，及时发现并纠正违章行为，确保作业过程的安全有序。

四、综合物探技术在陷落柱探测中的应用

（一）探测原理

综合物探技术在陷落柱探测中的应用，是一种高度集成与互补的地球物理勘探策略，其核心在于精准把握不同地球物理场在地下介质中的传播与响应特性。这些物理场包括地震波、电磁场等，它们对地下岩层的岩性、密度、导电性、磁性等物理特性的变化具有不同的敏感性。

地震勘探：作为综合物探的重要组成部分，地震勘探通过在地表激发人工地震波，并观测其在地下岩层中的传播、反射与折射现象，从而反演地下地质结构。对于陷落柱的探测，地震波在遇到陷落柱形成的空洞或破碎带时，会产生明显的反射或绕射现象，进而在地震记录上形成特征波形，帮助研究人员识别陷落柱的存在位置及其边界。

瞬变电磁探测：该方法利用电磁感应原理，通过向地下发送一次脉冲磁场，观测由地下介质导电性差异引起的二次电磁场变化。对于陷落柱而言，其内部可能充满水体或泥质物，这些物质的导电性通常高于周围岩石，因此在瞬变电磁探测中会显示为低电阻率异常区，从而有效指示陷落柱的富水性^[10]。

CSAMT（可控源音频大地电磁测深）：此方法结合了可控源电磁法与音频大地电磁法的优点，能够提供更深层、更精细的地质电阻率结构信息。在陷落柱探测中，CSAMT 不仅能验证地震勘探和瞬变电磁探测的结果，还能进一步细化陷落柱的垂向分布、规模及形态特征，为后续的采矿规划与安全评估提供重要依据。

（二）实例分析

以某煤矿为例，面对矿区内复杂的地质条件及多个潜在的陷落柱威胁，研究团队精心设计了综合物探技术方案。

首先，通过地震勘探的高分辨率成像能力，团队详细描绘了矿区的地下岩层分布，特别是断裂构造的走向与规模。这些断裂构造往往是陷落柱形成的重要因素，它们的精确识别为后续的陷落柱探测奠定了坚实基础。

随后，利用瞬变电磁探测的高效性与敏感性，研究团队对疑似陷落柱区域进行了重点扫描。通过对比不同区域的电磁响应特征，团队成功圈定了富水性较强的异常区域，初步确认了陷落柱的位置与范围。

最后，为了获得更全面的陷落柱信息，研究团队采用了 CSAMT 方法进行深入探测。CSAMT 不仅验证了地震与瞬变电磁的探测结果，还揭示了陷落柱在垂向上的详细结构，包括其顶底界深度、形状变化及可能的充水情况等。这一系列的探测成果，为煤矿后续的开采方案调整、安全隐患排查及防治水工作提供了有力的技术支持。

通过对比综合物探技术的探测结果与后续钻探验证，两者高度一致，充分证明了综合物探技术在陷落柱探测中的可靠性、高效性和准确性。这一成功案例不仅展示了现代地球物理勘探技术的强大潜力，也为类似地质条件下的陷落柱探测提供了宝贵的经验与参考。

五、总结

综合物探技术在煤矿陷落柱探测中具有显著优势，能够全面揭示地下地质结构，准确确定陷落柱的位置、规模及其富水性。

通过实例分析可以看出，综合物探技术在实际应用中取得了良好的效果，为煤矿安全生产提供了有力保障。未来，随着技术的不断进步和完善，综合物探技术在煤矿陷落柱探测中的应用将更加广泛和深入。

参考文献

- [1] 李旭. 综合物探技术在煤矿防治水中的应用 [J]. 能源与节能, 2023(2):216-218.
- [2] 郭璋怡. 综合物探技术在煤矿水治理中的运用 [J]. 矿业装备, 2023(12):121-123.
- [3] 王名贺, 郝少辉. 综合物探技术在煤矿防治水中的应用 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2023(15):169-171.
- [4] 刘玮. 综合物探技术在煤矿采空区探测中的应用研究 [J]. 能源与节能, 2023(5):193-195,211.
- [5] 刘斌. 综合物探技术在煤矿防治水中的应用研究 [J]. 煤炭工程, 2019, 51(z1):84-86.
- [6] 潘远. 综合物探技术在煤矿水害防治中的应用 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2019(15):185-186.
- [7] 郭艳春. 综合物探技术在煤矿防治水中的运用探析 [J]. 当代化工研究, 2020(6):96-97.
- [8] 刘超, 刘昊. 综合物探技术在煤矿防治水中的运用分析 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2020(15):179-180.
- [9] 乔秋雁. 综合物探技术在煤矿采区地质勘探中的应用 [J]. 中外交流, 2020(12):148.
- [10] 胡光斌. 综合物探技术在煤矿地质水文勘探中的运用分析 [J]. 矿业装备, 2021(6):80-81.