

鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿勘查技术应用研究

权军明 冯苗苗 谢贤胜

中陕核工业集团地质调查院有限公司 陕西 西安 710100

摘要: 鄂尔多斯盆地是我国重要铀矿基地, 本文聚焦其砂岩型铀矿勘查技术。阐述盆地成矿地质背景与勘查需求, 介绍基础地质、地球物理、地球化学及钻探工程等勘查技术及应用。探讨勘查技术组合优化原则与不同阶段方案, 结合典型案例综合分析应用效果。提出技术改进方向, 强调绿色勘查与可持续发展, 为盆地砂岩型铀矿勘查提供理论与技术支持。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 砂岩型铀矿; 综合勘查模型

引言: 鄂尔多斯盆地作为我国中西部大型含能源盆地, 砂岩型铀矿资源潜力巨大, 是我国重要的铀矿资源战略基地。随着勘查工作推进, 对勘查技术要求日益提高。精准圈定成矿靶区、深化成矿机理研究、提升资源储量控制程度是当前勘查核心需求。在此背景下, 研究鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿勘查技术应用, 对提高勘查效率与精度、实现资源可持续开发意义重大。

1 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿成矿地质背景与勘查需求

1.1 盆地基础地质特征

鄂尔多斯盆地是我国中西部大型叠合含能源盆地, 总面积约 $37 \times 10^4 \text{ km}^2$, 构造演化经历了基底形成、古生代克拉通拗陷、中生代内陆拗陷及新生代周边断陷四个阶段, 构造形态总体为东缓西陡的不对称向斜。盆地地层发育齐全, 从太古界至新生界均有出露, 其中中生界侏罗系—白垩系是砂岩型铀矿的主要赋矿层位, 尤以直罗组、延安组和志丹群最为重要。赋矿砂岩主要为河流相、三角洲相沉积, 具有分选性好、孔隙度和渗透率较高的特征, 为铀矿的迁移富集提供了有利的储集空间^[1]。盆地内断裂构造相对发育, 主要以近东西向、北东向和北西向为主, 不仅控制地层的沉积格局, 也为铀成矿流体的运移提供通道。另外, 盆地周边广泛分布的花岗岩体等酸性岩体, 为铀矿成矿提供充足的铀源, 叠加后期的氧化还原环境交替, 共同构成了盆地砂岩型铀矿成矿的基础地质条件。

1.2 盆地铀矿勘查核心需求

鄂尔多斯盆地作为我国重要的铀矿资源战略基地, 当前砂岩型铀矿勘查的核心需求主要体现在三个方面。一是精准圈定有利成矿靶区, 需在明确成矿地质条件的基础上, 进一步厘清铀矿赋存的空间分布规律, 解决靶区圈定精度不足的问题, 为后续勘查工作聚焦方向。二是深化成矿机理与赋矿规律研究, 目前盆地内部分区域铀

矿成矿过程的关键控制因素尚不明确, 亟需通过勘查工作揭示铀迁移、富集的动力学过程, 完善成矿模式, 为勘查预测提供理论支撑。三是提升资源储量控制程度, 现有勘查成果多集中在浅层和部分有利区域, 深层及边缘地带的资源潜力尚未充分挖掘, 需通过系统勘查提高资源储量的可靠性和经济性, 满足国家能源资源安全战略需求。

2 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿主要勘查技术及应用

2.1 基础地质勘查技术

基础地质勘查技术是鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿勘查的前提和基础, 主要包括区域地质填图、地层剖面测量、岩石学与矿物学分析等核心技术。区域地质填图采用1:5万—1:20万比例尺, 通过野外路线调查、露头观测和样品采集, 系统梳理盆地地层展布、构造格局和岩相古地理特征, 划分成矿远景区带。地层剖面测量聚焦中生代赋矿层位, 精准测量地层厚度、岩性组合及接触关系, 建立标准地层柱, 明确赋矿层位的空间对比标志^[2]。岩石学与矿物学分析通过薄片鉴定、扫描电镜等手段, 研究赋矿砂岩的矿物组成、颗粒形态、胶结类型及孔隙结构, 判断储层有效性; 同时结合铀矿物的赋存状态分析, 为成矿环境判断提供依据。该类技术广泛应用于勘查初期的区域筛选阶段, 为后续专项勘查技术的应用奠定了坚实的基础地质资料, 有效提升勘查工作的针对性和效率。

2.2 地球物理勘查技术

地球物理勘查技术在鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿勘查中发挥着关键作用, 凭借其非侵入性、覆盖范围广的优势, 成为圈定异常区、探测储层空间分布的核心手段。常用技术包括高精度重力勘查、磁法勘查、电法勘查及地震勘查等。高精度重力与磁法勘查主要用于盆地基底结构探测和区域性断裂识别, 通过重力异常梯度带和磁异常特征, 圈定基底起伏形态和岩浆岩分布区, 间接判断

成矿有利区域。电法勘查是砂岩型铀矿勘查的核心地球物理方法,其中可控源音频大地电磁法(CSAMT)和高密度电阻率法应用最为广泛,利用铀矿化与围岩的电性差异,精准探测赋矿砂岩的厚度、埋深及横向连续性,同时可识别氧化还原界面,而氧化还原界面是砂岩型铀矿富集的关键标志。地震勘查则主要用于精细刻画盆地内部构造形态和储层横向变化,为钻探工程部署提供精准的空间定位。

2.3 地球化学勘查技术

地球化学勘查技术通过分析地质体中元素的分布、分配规律,为鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿勘查提供直接的成矿信息,主要包括岩石地球化学勘查、土壤地球化学勘查和水文地球化学勘查等。岩石地球化学勘查通过系统采集赋矿层位砂岩样品,分析铀及伴生元素(如Mo、Se、Re等)的含量特征,圈定铀异常晕,判断铀矿化的强度和延伸方向;同时通过同位素分析,追溯铀源及成矿流体来源。土壤地球化学勘查在盆地浅覆盖区应用广泛,通过测量地表土壤中铀的次生晕异常,快速圈定成矿远景区,为区域普查阶段缩小勘查范围提供依据。水文地球化学勘查聚焦盆地地下水系统,分析地下水的化学成分、氧化还原电位(Eh)、pH值等指标,识别富铀地下水的运移路径和富集场所,因为砂岩型铀矿的形成与地下水的循环演化密切相关。

2.4 钻探工程勘查技术

钻探工程勘查技术是鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿勘查的最终验证手段,用于获取地下真实的地质资料和矿化样品,实现资源储量的精准计算。目前盆地内主要采用金刚石绳索取芯钻探、定向钻探和空气反循环钻探等技术。金刚石绳索取芯钻探具有取芯率高、钻进效率高、对岩芯扰动小的特点,可精准获取赋矿层位的岩芯样品,用于岩石学、地球化学分析及矿化程度评价;定向钻探技术则适用于复杂构造区域或需要精准控制钻孔轨迹的勘查区,能够有效穿越断裂破碎带,提高对深部赋矿层位的命中精度。空气反循环钻探在干旱缺水的盆地边缘区域应用广泛,利用压缩空气作为循环介质,不仅解决了缺水地区的钻探难题,还能快速获取岩粉样品,实现对地层的快速评价。钻探工程勘查需基于前期基础地质、地球物理和地球化学勘查的成果部署钻孔,通过钻孔数据的综合分析,验证异常区的矿化真实性,圈定矿体边界,为资源储量估算和矿山开发规划提供直接依据。

3 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿勘查技术组合优化与综合应用

3.1 勘查技术组合原则

鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿勘查技术组合需遵循针对性、递进性、经济性和互补性四大核心原则。针对性原则要求根据勘查区的地质特征选择适配技术,例如在厚覆盖区优先采用地球物理勘查技术,在露头发育区强化基础地质填图;对于低阻储层,重点选用电法勘查技术,提升异常识别精度。递进性原则强调技术组合需契合勘查阶段推进需求,从区域普查阶段的广覆盖、低成本技术组合,逐步过渡到详查阶段的高精度、针对性技术组合,实现勘查范围逐步缩小、精度逐步提升^[3]。经济性原则注重在保证勘查质量的前提下,优化技术组合方案,避免重复勘查,降低勘查成本。互补性原则要求发挥不同技术的优势,弥补单一技术的局限性,例如利用地球物理技术圈定储层空间分布,结合地球化学技术识别成矿异常,再通过钻探工程验证,形成“圈定—识别—验证”的完整技术链条。

3.2 不同勘查阶段技术组合方案

区域普查阶段的技术组合以广覆盖、低成本为核心,主要包括1:20万区域地质填图、1:5万高精度磁法与重力勘查、土壤地球化学测量及遥感地质解译。通过区域地质填图和遥感解译梳理盆地宏观构造与地层展布;利用重力、磁法勘查圈定基底构造和岩浆岩分布区,划分成矿远景区;结合土壤地球化学测量识别地表铀异常晕,快速筛选出具有成矿潜力的区域,为后续勘查工作聚焦方向。预查阶段聚焦成矿远景区,技术组合升级为1:5万基础地质填图、可控源音频大地电磁法(CSAMT)、岩石地球化学测量及少量验证性钻探。通过基础地质填图细化地层与构造特征;利用CSAMT精准探测赋矿砂岩的埋深、厚度及横向连续性;结合岩石地球化学测量分析铀及伴生元素分布,圈定成矿靶区;通过少量钻探工程验证靶区矿化可能性。详查阶段以精准评价矿化规模为目标,技术组合为高精度地震勘查、高密度电阻率法、系统钻探工程及室内综合测试分析。通过地震勘查精细刻画矿体空间形态;利用高密度电阻率法精准圈定矿体边界;通过系统钻探获取连续岩芯,结合室内测试分析,确定铀矿化强度、品位及资源储量,为矿山开发提供详实资料。

3.3 典型勘查区综合应用案例

以鄂尔多斯盆地东北部纳岭沟勘查区为例,该区域为典型的砂岩型铀矿勘查区,存在覆盖层厚、赋矿层位埋深较大的特点,其综合勘查技术组合取得良好效果。在区域普查阶段,通过1:20万区域地质填图和遥感解译,明确了区内侏罗系直罗组赋矿层位的展布范围;结合1:5万重力与磁法勘查,圈定了3处基底隆起带周边的成矿远

景区。预查阶段,针对远景区部署可控源音频大地电磁法(CSAMT)勘查,精准探测出直罗组砂岩储层的埋深在200—500m之间,横向连续性良好,并识别出2处低阻异常区;同步开展岩石地球化学测量,发现异常区内铀含量普遍高于背景值3—5倍,伴生元素Mo、Se异常叠加明显,据此圈定2个重点成矿靶区。详查阶段,在靶区内部署高精度地震勘查,进一步细化了矿体的空间形态和边界;通过系统钻探工程施工,完成钻孔32个,总进尺12800m,取芯率达92%以上,证实2个靶区均存在工业铀矿化,矿体呈层状、似层状展布,厚度2—8m,平均品位0.05%—0.12%;结合室内岩芯测试分析,最终估算(333+334)类铀资源储量超万吨,验证了该技术组合在复杂地质条件下的有效性。

4 勘查技术优化与创新

4.1 技术改进方向

鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿勘查技术的改进方向主要聚焦于提升精准性、拓展探测深度和提高效率三个核心维度。在精准性提升方面,针对地球物理勘查中异常识别干扰大的问题,需优化数据处理算法,结合机器学习技术实现矿化异常与非矿异常的精准区分;同时改进地球化学测试技术,开发微区原位测试方法,提高对微量铀元素的检测精度,明确铀的赋存状态。在拓展探测深度方面,随着浅层资源勘查程度不断提高,深层砂岩型铀矿成为勘查重点,需研发深部高分辨率地球物理勘查技术,如深部可控源音频大地电磁法、高精度深部地震勘查技术,提升对埋深大于1000m储层和矿体的探测能力;优化钻探技术,研发深部取芯钻探设备,提高深部复杂地层的取芯率和钻进效率。在效率提升方面,推动勘查技术的智能化升级,开发无人机搭载的遥感勘查系统和地球化学采样系统,实现广域范围内的快速勘查;构建勘查数据一体化管理平台,整合多源勘查数据,实现数据的实时共享、分析与可视化,提升勘查决策的科学性和高效性。

4.2 绿色勘查与可持续发展

绿色勘查是鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿勘查可持续发展的必然要求,核心是在勘查全过程践行生态保护理念,实

现勘查与生态环境的协调发展。在技术优化方面,推广低扰动勘查技术,如采用无人机遥感、航空地球物理勘查等替代传统地面大规模勘查工程,减少对地表植被的破坏;优化钻探工程工艺,采用空气反循环钻探、无固相钻井液等绿色钻探技术,降低钻探废水、废渣对土壤和地下水的污染^[4]。在生态保护措施方面,建立勘查全过程生态保护机制,勘查前开展详细的生态环境调查,制定针对性的生态保护方案;勘查过程中严格控制施工范围,对施工区域采取植被保护、水土保持措施,如设置截排水设施、覆盖防尘网等;勘查结束后及时对施工场地进行生态恢复,包括土地平整、植被补种等,确保区域生态功能不受破坏。推动勘查与绿色能源开发的协同发展,将铀矿勘查与太阳能、风能等清洁能源开发相结合,利用清洁能源为勘查设备供电,降低勘查过程中的碳排放;建立绿色勘查评价体系,将生态保护成效纳入勘查项目评价指标,引导勘查单位践行可持续发展理念,实现资源勘查与生态保护的双赢。

结束语

鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿勘查技术研究取得一定成果,多种勘查技术组合应用有效提升了勘查精度与效率。未来,需持续改进勘查技术,提升精准性、拓展探测深度、提高效率,同时积极践行绿色勘查理念,推动勘查与生态环境协调发展。通过不断优化技术与措施,为鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿勘查开发提供坚实保障,助力我国铀矿资源战略实施。

参考文献

- [1]张然,叶丽娟,党飞鹏,等.自动矿物分析技术在鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿矿物鉴定和赋存状态研究中的应用[J].岩矿测试,2021,40(1):61-73.
- [2]贺锋,刘鑫扬,刘卫红,等.鄂尔多斯盆地西南缘砂岩型铀矿"源—汇"系统研究[J].铀矿地质,2022,38(4):671-682.
- [3]魏永强.鄂尔多斯盆地铀矿地质资料的二次开发及应用[J].世界核地质科学,2022,39(3):485-492.
- [4]王伟,武正乾,贺锋,等.伽马-伽马测井在鄂尔多斯盆地西南缘白垩系识别岩性的研究[J].世界核地质科学,2024,41(2):343-350.