

铀的数智化原地浸出动态开采体系的探索与构建

刘龙成,张喆安

(核工业北京化工冶金研究院 数字化铀矿采冶中心,北京 101149)

摘要:针对原地浸出动态开采体系在实际应用中存在的实时数据分析不足、智能决策支持欠缺及动态优化能力有限等问题,分析了数字孪生技术与原地浸出采铀工艺相结合的优势,通过与缪子成像、光纤水位监测、先进传感技术、人工智能和大数据分析等先进关键技术相结合,构建了一套高效的数智化铀矿采冶平台。该平台包括地质结构模型、地下水渗流模型、反应运移模型和智能代理模型,核心算法涵盖深度学习、数据同化、多目标优化和不确定性分析。原地浸出动态开采体系的建立有助于提高铀资源的开发利用效率,能为其他矿产资源的开采提供有益参考,具有一定的理论意义和实践价值。

关键词:原地浸出;铀;动态开采体系;数字孪生技术;数智开采平台;多源异构数据

中图分类号:TL212 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2617(2025)01-0001-09

DOI:10.13355/j.cnki.sfj.2025.01.001

随着全球能源需求的持续增长,铀作为核能的重要原料,其开采技术受到了重点关注。原地浸出(简称地浸)技术因具有环境友好性和经济高效性,已成为全球范围内广泛应用的铀矿开采方法。我国现有原地浸出采铀技术主要依赖静态设计和操作,因此资源利用率较低,灵活性较差。虽然近些年在自动化控制系统、视频监控系統、数据管理系统等方面取得了一定研究进展,但距离实现全面智能化开采仍存在较大差距。

为了进一步提升我国地浸采铀技术水平,提出了“原地浸出动态开采体系”概念,主要针对原地浸出动态开采体系在技术上存在的实时数据分析不足、智能决策支持欠缺及动态优化能力有限等技术问题,分析了将数字孪生技术^[1]与原地浸出采铀工艺相结合的优势,通过引入与地浸开采工艺密切相关的核心模型与算法,结合传感技术、人工智能和大数据分析等先进关键技术,构建了一个高效的数智采铀平台,以期通过该平台推动地浸采铀工艺的数智化进程,实现从静态设计和调整向动态调整的转变,提升资源利用效率和经济效益,并为数智化原地浸出采铀提供理论和实践参考,进一步推动矿山开采技术的发展。

1 原地浸出采铀技术的发展现状

原地浸出是一种在天然埋藏条件下,通过浸出液与矿物的化学反应,选择性地溶解并提取矿石中的有用组分,而不使矿石或围岩产生位移的集采、选、冶于一体的方法^[2-3]。迄今为止,我国已完成了三代地浸采铀技术体系的研发及工业应用,并取得了一定成果。作为我国天然铀生产的主要工艺,地浸矿山在 2021 年的铀产量占比超过全国天然铀总产量的 80%。

地浸采铀工艺属于流水化作业,因此具备较好的自动化改造条件。美国在 20 世纪 90 年代就开始了地浸矿山的自动化建设,较早实现了井场和水冶厂的自动化控制,建成了无人值守的水冶熄灯工厂,井场的固定场所也实现了无人值守。哈萨克斯坦的地浸矿山自动化程度也很高,作为地浸采铀第一大国,不仅建成了井场和水冶厂的自动化控制系统,而且在企业管理上构建了以 SAP 公司的 ERP 为主的管理平台,初步建成了以生产执行系统和试验分析系统为核心的数字铀矿山信息系统。2020 年,哈萨克斯坦进一步建立了自动化控制泵送系统及采矿与水冶的生产模

收稿日期:2024-08-06

第一作者简介:刘龙成(1965—),男,博士,教授,主要研究方向为铀矿冶、核素迁移。

型,为分析和改进业务流程奠定了基础。同时,该国还建立了技术钻井综合生产数据库,开发了统一的数据存储(CDS)数据模型,并通过总线集成数据,实现了快速获取哈萨克斯坦原子能工业公司及其子公司、联营公司和合营公司的完整而透明的数据。此外,利用地质和采矿信息系统(GMIS),实现了关键业务流程的自动化和数字化^[4]。总之,国外地浸矿山的自动化水平普遍较高,单体千吨级矿山的工作人员最少可控制在60人左右,大型矿山的人均年产能普遍超过10 t。

相比之下,我国地浸铀矿山的自动化建设起步较晚,但近年来取得了显著进展。截至目前,已经完成自动化工控系统、视频监控系统、数据管理(报表)系统、数据池和地浸井场渗流模拟等五大系统的建设^[5]。其中,自动化工控系统能实现生产全流程数字化,井场和水冶等关键工序自动化控制率可达100%;视频监控系统能实现生产作业场所监控覆盖率100%,使隐患排查及“三违”查处效率大幅提高,并降低事故发生率;数据管理系统可显著提高生产报表数据质量,降低数据管理人力成本,提高生产管控效率;数据池则能汇总矿山生产运行及其相关的静态和动态数据,实现集中管理;地浸井场渗流模拟系统能实现抽注液孔水位变化的直观展示。水冶厂房也已建成“熄灯工厂”,实现固定场所无人值守,少人巡检,一人管控全厂。总体而言,国内地浸铀矿山的自动化控制技术已经达到了国际先进水平。

国内外的地浸铀矿山在自动化和信息化方面虽已取得了一定进展,但尚未真正实现数智开采,当前技术主要聚焦于自动化操作和数据采集,而在实时数据分析、智能决策支持和动态优化方面仍存在明显不足。面临的挑战主要包括数据获取与集成、模型构建与预测的技术难题,以及投资成本高、标准化不足和管理体系亟待提升等问题。为实现真正的数智开采,需在以下几个方面取得突破:1)先进传感技术。开发高精度、低成本的传感器,实时监测地下系统的动态变化;2)大数据与人工智能。利用大数据和人工智能技术,进行复杂系统的建模、仿真和优化;3)数字孪生技术。建立地下系统的数字孪生体,实时映射和预测地下系统的演化;4)综合管理平台。构建统一的数智开采管理平台,集成各类数据和系统,实现全局优化和智能决策。

2 原地浸出动态开采体系的构建

地下系统具有复杂性、动态性、不确定性和多尺度性,给地浸采铀工艺的准确监测和优化带来了极大挑战^[6-7]。为了应对该挑战,作为地浸采铀数智化的初次探索,提出了“原地浸出动态开采体系”这一概念。原地浸出动态开采体系是一套以三维地质结构模型^[8]和多场耦合高仿真模型^[9]为基础,以数据流通、深度学习、数据同化、大数据分析、工业物联网等前沿技术为手段,以动态优化、智能决策为目的,集动态性、准确性和实时性为一体的数智化铀矿采冶新模式。在目前阶段,其主要任务是通过地下系统多参数协同监测系统的研发,建立地浸采铀新一代监测体系,实现对地下系统孔渗参数、流体渗流速度、浸出液化学组分等状态参数的三维动态监测,为动态开采平台提供数据支撑。通过开展原地浸出动态开采算法研究,建立以反应运移模型^[10]为基础,以深度学习、数据同化及多目标优化为核心的动态开采算法体系,实现对地下系统的高仿真模拟和智能优化技术的突破。原地浸出动态开采体系有效结合了数字孪生技术与地浸采铀技术的优势,有望成为地浸开采技术的前沿发展方向,为后续的研究和应用提供重要的理论和实践基础,为铀矿采冶带来新的应用前景。

原地浸出动态开采体系通过综合应用先进的监测和控制手段,能实时优化浸出过程各阶段的工艺参数,实现矿床资源的高效利用与环境保护的协调统一:1)在设计阶段,可实现动态精准布井,减少白孔概率,并实现局部采收区域单孔流量的最优设计;2)在生产阶段,可动态预测地下系统的演化,动态映射矿层铀品位和浸出液中铀浓度的分布状态,优化单孔流量,精准预测局部或全局优化浸出工艺,从而实现采区绿色高效的浸出;3)在退役治理阶段,可实现地下环境的精准治理及效果推演。该体系具备三个核心特征:一是动态性。即动态预测矿层铀资源及地下系统中关键要素的全空间映射和演化规律;二是准确性。依靠实时监测数据的反馈与同化,持续模拟并迭代更新地下系统的描述,从而提高模型预测的准确性;三是实时性。依托动态开采体系的核心算法,实时映射地下系统的运行状态,并根据阶段目标实施智能优化策略。

2.1 数字孪生技术与应用

数字孪生的概念,最早是在 2003 年由 Grieves 提出,目前已得到广泛认可^[11]。数字孪生系统由客观实体及与其对应的虚拟空间组成,虚拟空间包含从客观实体收集到的所有信息,以及从不同层次对物理设备或过程的高保真描述,其目的是实时精准地表征实体的物理过程,优化实体系统的管理和操作。

当客观实体拥有一个数字孪生体后,则能实现该客观实体真正的全生命周期智能管理,包括开发(如资源规划、产品设计、工艺设计)、生产(如生产管理规划与控制、设备维护、安全环保)及废弃处置(如矿山的退役治理)等。根据实际应用情况,数字孪生技术可进一步划分为 6 个等级^[12]:以虚仿实(L0)、以虚映实(L1)、以虚控实(L2)、以虚预实(L3)、以虚优实(L4)、虚实共生(L5),定义见表 1。

表 1 数字孪生技术的等级划分

Table 1 Classification of Digital Twin technology levels

层级	名称	定义
L5	虚实共生	虚实长期同步运行,可自主孪生,精准预测未来状态
L4	以虚优实	可运用数字孪生进行物理实体优化
L3	以虚预实	可预测物理实体未来一段时间的运行过程和状态
L2	以虚控实	可通过孪生模型间接控制物理实体的运行过程
L1	以虚映实	可实时复现物理实体的实时状态和变化过程
L0	以虚仿实	可代替物理实体进行仿真分析或实验验证

由表 1 可知:建成原地浸出动态开采体系须达到数字孪生技术的 L5 等级,即实现客观实体(或物理空间)与虚拟空间(或数字空间)之间的双向数据流通^[13]。但目前国内地浸采铀的数字孪生技术尚处于 L0~L1 等级,并未真正建立动态优化与智能决策系统。要解决此问题并推动国内地浸采铀的数字孪生技术达到更高等级,必须依赖一些核心技术的突破与应用,尤其是地下系统的实时、三维、多参数、动态监测系统的研发。

2.2 动态监测系统

在构建物理实体的数字孪生体时,数据是不可或缺的基础。观测数据和监测数据的种类和数量不足将直接影响数字孪生体的构建水平,进而影响虚拟空间对实体空间的实时表征准确性和模拟效果。在地浸采铀工艺中,观测数据通常包括地质勘查、地球物理、水文地球化学等数据,这些数据主要用于矿山开采前的设计和规划,与生产过程中的动态变化无关,也称为静态观测数据。而监测数据是实时获取的数据,可反映生产过程中地下系统的持续变化,主要包括地下水水质、浸出液、流速和流量等动态监测数据。这些数据对于优化工艺、确保安全及减少环境影响尤为重要,尤其在数字孪生技术中,实时数据的获取和分析是

精准预测和优化决策的关键。然而,当前地浸采铀技术体系中对实时反映地层结构、流体水位和水温等地下系统动态变化的数据获取还不足,这些动态数据的缺失将影响数字孪生体的准确性和映射效果。

2.2.1 缪子成像监测系统

在地浸采铀过程中持续向矿层注入浸出剂,可使其长期处于高度活跃的化学反应状态。浸出剂的化学作用不仅会引起岩石化学组分发生改变,还会导致岩石微观形貌发生变化。这些变化将会持续改变地层的孔隙结构和渗透性能,进一步复杂化地浸过程中的动态监测和数据分析。因此,为提高地层结构在数字孪生模型中映射的准确性,需要实时掌握地下结构的变化情况。

当前,在地浸采铀领域,探测矿山的地质结构主要采用测井技术。测井是通过向井下放入不同种类的探头,如电测井、声波测井和核测井等,来获取近井筒地层的物性参数,包括孔隙度、渗透率和岩性等。单点测井一般无法全面反映整个采区的地质情况,通常需要进行多点测井,通过综合分析多个井点的数据,才能更准确地描述整个采区的地质结构和变化。尽管地浸井场的钻孔数量众多,但其主要

用于抽液和注液的地浸作业。在开采过程中进行大规模测井则需要暂停地浸作业,会严重影响生产。因此,该方法在连续开采井场中不能有效应用,不得不考虑采用其他方法来实现对地层结构的实时监测与分析。

为了获取浸出液的渗流范围,曾有研究人员在地浸井场进行小规模的电法和磁法探测^[14];但实际操作中发现,正在运行的地浸矿山中大量潜水泵和电缆会产生强干扰电磁场,这对探测产生了很大影响。因此,在采用电法和磁法探测时,需关停整个测试区的生产活动,这无疑会给正常生产带来不便和损失。此外,电法和磁法的探测深度也有限,远远达不到国内地浸铀矿山的开采深度(600 m以上)。相比之下,地震法的探测深度远高于电法和磁法,其反演精度的高低取决于解释算法的优劣^[15];但目前在地浸采铀领域,关于地震波对砂岩的解释算法尚缺乏深入的研究,且该法的勘探成本也较高,包括设备投入、数据采集和处理等各项费用。因此,该法在地浸矿山中的实际应用可行性较低。总之,在地浸采铀领域,现有的常规勘探方法均存在明显的局限性,还无法有效获取地下结构的动态变化数据。因此,进一步探索新的勘探技术和方法,以更好地适应地浸采铀的实际需求十分必要。

缪子成像技术^[16]作为一种强大且独特的成像方法,在地球物理勘探、核安全、考古学、火山监测等领域具有广泛的应用潜力^[17]。该技术能够揭示地下结构和复杂环境的细节,为安全监控、环境保护及文化遗产保护等领域提供关键信息和支持。基于这一重要技术背景,中国原子能科学研究院在“十三五”期间研发了国内面积最大的基于漂移管探测器缪子成像装置。该装置在探测器技术、数据读取与处理、电子学电路及成像算法等关键技术均实现了自主研发。这一研究成果为后续进一步推进缪子探测器在矿产勘探领域的研究与应用奠定了基础。目前,美国、加拿大和日本等国家在地质勘探和资源开发领域已经广泛应用缪子探测技术来探测地下的矿藏和岩层结构,这对于定位矿藏、评估资源量,以及进行地质调查具有重要意义。因此,可以考虑通过在深达数百米的地浸钻孔中部署钻孔型缪子探测器,并分析所测得的密度分布异常区域,从而精确评估地浸采区的地层密度变化。

2.2.2 光纤水位监测系统

缪子探测器的优势主要在于其高穿透力和对密度变化的敏感性,可以用来捕获地层结构变化情况,但并不能直接反映地层渗透性能的改变情况。渗透性能(或渗透率)可以用来描述流体通过地层的能力,是与孔隙度、孔隙连通性和流体性质相关的参数之一。缪子探测器提供的密度分布信息虽能间接提供某些线索,但不足以全面评估渗透性能的变化。因此,为了弥补上述不足,研发一种能持续记录水位变化的水位监测系统十分必要。

当前,在地浸采铀领域,主要采用压力式水位计^[18]来监测水位变化。压力式水位计具有结构简单、成本相对低廉和适用于静态水体监测等优点,但其无法提供实时和精确的水位变化数据。国内矿山运行规范中未要求对采区地下水位进行持续记录,但原地浸出动态开采体系需要高精度和频繁的水位监测数据,以支持精确的地质结构和渗透率三维分布建模。压力式水位计的测量精度和响应速度有限,无法满足地浸数字孪生技术对动态水位数据监测的要求,因此需要探索更先进的水位监测技术来应对这一挑战。

目前,已有研究人员提出了一种基于分布式光纤传感器的水位监测系统,并将其用于地下水位监测中,实际应用结果表明监测效果较好^[19]。该系统依赖于光纤传感器的独特设计和工作原理(见图1),将光纤作为传感元件,并通过测量光信号的变化来实现对地下水位的高精度实时监测。首先,光源将光信号发送到光纤传感器中,即一段被特殊设计的光纤,其内部结构与表面处理使其对压力较为敏感。当外部压力发生变化时,光纤传感器中光信号的振幅、相位或频率也随之改变。如水位上升或下降会导致光纤传感器被拉伸或压缩,从而改变光信号在光纤中的传播特性。最后,监测系统接收经过环境影响后的光信号,并进行信号处理和数据分析,系统便可以准确地确定水位的变化情况,并将实时数据传输到控制中心,继而推断地层的渗透性能。基于光纤传感器的水位监测系统具有高灵敏度、强抗干扰能力和长期稳定等优势,能够实现多点布线和大范围监测,可为地浸采铀数字孪生技术提供实时、精准的水位数据,并在持续监测、数据整合、地层变化监测与资源优化管理等方面发挥作用。

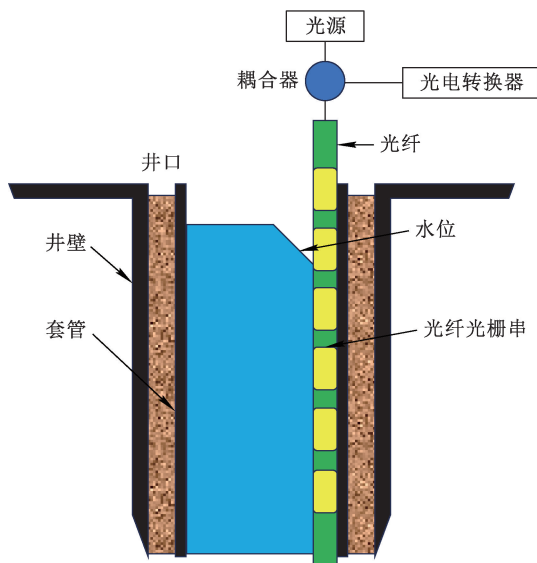


图 1 基于光纤传感器的水位监测系统示意
Fig. 1 Schematic diagram of a fiber-optic sensor-based water level monitoring system

2.3 动态开采模型的构建与算法的选择

在原地浸出动态开采体系中,地质勘查数据、地球物理数据、地球化学数据和工艺参数数据等构成了静态观测数据;而生产数据及缪子成像监测系统和光纤水位监测系统提供了实时变化的动态监测数据。这两类数据共同组成了原地浸出动态开采体系的数据底板。

2.3.1 动态开采体系的结构

原地浸出动态开采体系的结构如图 2 所示。作为原地浸出动态开采体系的核心,虚拟仿真系统的主要任务是模型构建与预测。通过构建集成的地质结构模型、地下水渗流模型和反应运移模型,采用深度学习方法建立必要的智能代理模型,并根据地下矿体状态和实时监测数据进行动态和持续的数据同化,以实现地对地浸采铀过程的更精准地模拟和预测其发展趋势。在此基础上将监测数据、运维数据和模型预测结果实时地展现在可视化平台上。通过动态图表、GIS 集成、热力图和交互式仪表盘等数据展示形式,使管理者能够实时获取全面的数据信息(包括开采状态和预测趋势),以提高决策效率,优化资源利用,增强风险管理,实现动态开采体系的高效、精准和智能化管理。

作为原地浸出动态开采体系的决策手段,智能优化系统在地浸采铀行业中发挥着关键作用。

它是根据阶段目标 and 需求,采用单目标或多目标优化算法,提供包括运维方案、工艺调整和生产决策在内的智能优化策略。单目标优化侧重于特定阶段的主要目标,如最大化浸出效率;而多目标优化则综合考虑多个目标之间的权衡,如提高回收率、控制成本和减小环境影响。通过实时数据分析和模型预测,智能优化系统能够最大程度地优化设备运行、调整工艺参数并支持生产决策,从而提升生产效率、降低环境影响和运营成本,推动地浸采铀行业向绿色、智能化方向发展。

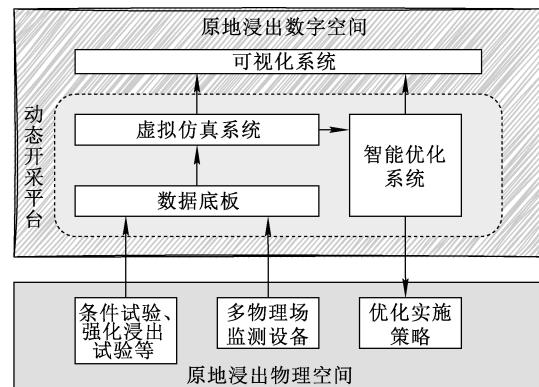


图 2 原地浸出动态开采体系的结构
Fig. 2 Structure of in-situ leaching dynamic mining system

2.3.2 动态开采体系的核心技术

原地浸出动态开采体系的核心技术包括四大模型和四大算法。四大模型包括:1)地质结构模型,通过 T-PROGS^[20] 或 SGeMS^[21] 实现;2)地下水渗流模型,通过 MODFLOW^[22] 或 HYDRUS^[23] 实现;3)反应运移模型,通过 RT3D^[24]、TOUGHREACT^[25] 或 PFLOTRAN^[26] 实现;4)智能代理模型,通过 PINN^[27] 或 DOCRN^[28] 实现。它们共同构成了原地浸出动态开采体系的基础,分别用于描述矿床地质结构、模拟地下水流动、预测化学反应过程及物质运移情况,并实现系统的智能化操作。而四大算法指的是深度学习算法、数据同化算法、多目标优化算法和不确定性分析算法,它们负责处理和分析大数据,进行复杂计算,实现快速响应,优化各项决策,并量化不确定因素的影响。这些模型和算法的开发可分为两个阶段,分别是离线阶段及在线阶段(见图 3)。

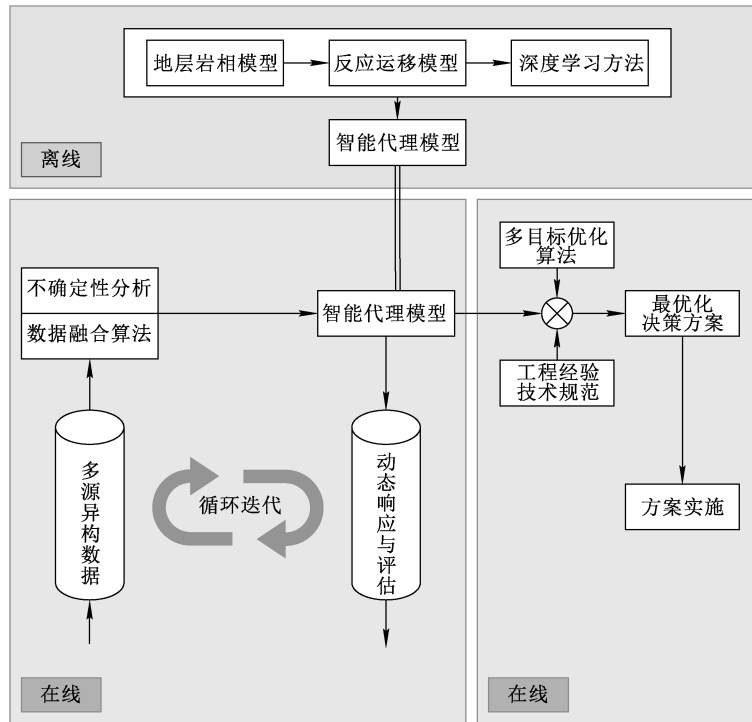


图 3 原地浸出动态开采体系的基本要素及集成

Fig. 3 Basic elements and integration of in-situ leaching dynamic mining system

在离线阶段,首先根据前期搜集的静态观测数据及其统计学性质,使用大量样本(集合)来代表系统状态的概率分布,同时采用传统的静态模拟方法来搭建地质结构模型、地下水渗流模型和反应运移模型等。这些模型通过模拟矿床地质结构、地下水流动和化学反应过程,生成大量的虚拟数据。这些数据不仅涵盖了不同的操作条件和环境变量,还反映了系统的复杂非线性行为。其目的是为深度学习算法构建的智能代理模型提供大量的训练数据。通过训练,代理模型能够捕捉到系统的关键特征和复杂模式,从而在后续的在线阶段快速、准确地预测系统行为,优化操作决策。

在在线阶段,通过融合多源异构数据,代理模型得以不断更新。同时,根据需求,可以融合技术规范、实践经验等信息,并运用必要的优化算法来调整工艺参数或调控生产策略等。在线阶段的数据实时更新使得代理模型能够迅速响应变化,实现智能化调整,提高系统的灵活性和适应性。

这种综合性的动态开采体系的应用,充分体现了现代智能采矿技术的优势,可使地浸采铀工艺达到更高的精度,进而获得更高的经济效益。该体系不仅提高了开采过程的效率和安全性,还

支持风险管理和环境保护措施的制定,能确保地浸采铀技术在实际应用中的可靠性和可持续性。特别是深度学习、数据同化、多目标优化和不确定性分析等先进算法的应用,不但能够提升采矿效率和资源利用率,还能显著降低对环境的影响,在原地浸出动态开采体系的发展中起着至关重要的作用,有助于促进地浸采铀行业的可持续发展。

2.4 关键支撑技术

原地浸出动态开采体系通过实时数据采集和分析,依托物联网、云计算、边缘计算、大数据、人工智能、传感器、区块链及三维可视化等先进技术,可实现对地浸采铀过程的精确模拟和预测。这些技术的协同作用能大幅提升地浸采铀的智能化水平和整体效率。其中各技术在体系中的具体应用包括:物联网实现设备与远程监控的高效交互;云计算和边缘计算处理海量数据,保证数据分析的连续性和准确性;大数据和人工智能算法通过深度分析和模拟,优化采矿过程;传感器实时监控矿区物理与化学参数,区块链技术则确保数据透明与安全;三维可视化技术将复杂数据转化为直观模型,支持决策和优化工艺。通过这些技术的综合应用,原地浸出动态开采体系不仅能提高

生产效率,还能在地浸采铀的可持续发展奠定坚实的基础。

3 结论

当前我国现有的地浸采铀技术主要依赖静态设计和操作,导致资源利用率和开采灵活性受到一定限制,虽然目前在自动化和信息化方面已取得了一些进展,但技术上仍存在若干问题亟待解决。为应对上述挑战,提出了“原地浸出动态开采体系”概念,旨在重点解决以下关键问题:1)提升实时数据分析能力。通过开发高精度传感器和先进的数据采集系统,特别是引入缪子成像监测系统和光纤水位监测系统,实现对矿山环境的全面实时监测。2)优化智能决策支持系统。通过引入人工智能和机器学习技术,构建智能化的决策支持平台,增强动态优化和自适应控制能力。3)加强数字孪生技术应用。通过建立虚拟矿山模型,进行模拟试验和预测分析,提高对实际矿山操作的指导能力。4)推进信息化集成。实现从数据采集、传输、存储到分析的全流程信息化管理,增强各系统间的协调与联动,提高整体运行效率。5)加强多学科合作。整合地质学、采矿工程、信息技术等多学科知识,推动技术创新和应用的跨领域合作。

通过一系列的研究与应用,原地浸出动态开采体系将全面走向数字化和智能化,通过先进技术的融合与创新,实现矿山开采效率和资源利用率的双提升。这不仅有助于提高我国铀资源开发利用的水平,推动地浸采铀技术的进一步发展,实现矿山开采的可持续发展目标,同时也将为其他矿产资源的开采提供有益的示范和借鉴。

参考文献:

- [1] FULLER A, ZHONG F, DAY C. Digital Twin: enabling technologies, challenges and open research [J]. IEEE Access, 2020, 8: 108952-108971.
- [2] 阙为民, 谭亚辉, 曾毅群, 等. 原地浸出采铀反应动力学和物质运移[M]. 北京: 原子能出版社, 2002.
- [3] 原渊, 苏学斌, 李建华, 等. 世界地浸采铀矿山生产现状与进展[J]. 中国矿业, 2018, 27(增刊 1): 59-61.
YUAN Yuan, SU Xuebin, LI Jianhua, et al. Production status and development of the world in-situ leaching of uranium mines [J]. China Mining Magazine, 2018, 27(Sup. 1): 59-61.
- [4] 肖朝凡, 邓晨阳. 哈萨克斯坦核燃料产业发展概况[J]. 国外核新闻, 2023(4): 28-31.
- XIAO Chaofan, DENG Chenyang. Overview of the development of Kazakhstan's nuclear fuel industry [J]. Foreign Nuclear News, 2023(4): 28-31.
- [5] 伍宪玉, 侯江, 侯录, 等. 地浸铀矿山自动化和信息化系统融合设计及应用[J]. 湿法冶金, 2021, 40(6): 523-526.
WU Xianyu, HOU Jiang, HOU Lu, et al. Integration design and application of automation and information system of in-situ leaching uranium mine [J]. Hydrometallurgy of China, 2021, 40(6): 523-526.
- [6] 陈彦, 吴吉春. 含水层渗透系数空间变异性对地下水数值模拟的影响[J]. 水科学进展, 2005(4): 482-487.
CHEN Yan, WU Jichun. Effect of the spatial variability of hydraulic conductivity in aquifer on the numerical simulation of groundwater [J]. Advances in Water Science, 2005(4): 482-487.
- [7] 施小清, 吴吉春, 吴剑锋, 等. 多个相关随机参数的空间变异性对溶质运移的影响[J]. 水科学进展, 2012, 23(4): 509-515.
SHI Xiaoqing, WU Jichun, WU Jianfeng, et al. Effects of the heterogeneity of multiple correlated random parameters on solute transport [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(4): 509-515.
- [8] 郑贵洲, 申永利. 地质特征三维分析及三维地质模拟现状研究[J]. 地球科学进展, 2004(2): 218-223.
ZHENG Guizhou, SHEN Yongli. 3D analysis of geological characteristics and status research of 3D geology modelling [J]. Advances in Earth Sciences, 2004(2): 218-223.
- [9] 李淑君, 王惠泉, 赵文玉, 等. 基于 COMSOL 多物理场耦合仿真建模方法研究[J]. 机械工程与自动化, 2014(4): 19-20.
LI Shujun, WANG Huiquan, ZHAO Wenyu, et al. Multiphysics coupling simulation modeling methods based on COMSOL [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2014(4): 19-20.
- [10] 毛晓敏, 刘翔, BARRY D A. PHREEQC 在地下水溶质反应运移模拟中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2004(2): 20-24.
MAO Xiaomin, LIU Xiang, BARRY D A. Application of PHREEQC on solute reactive transport modeling in groundwater [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004(2): 20-24.
- [11] GRIEVES M. Digital Twin: manufacturing excellence through virtual factory replication[R/OL]. White Paper, (2015-02-01) [2024-10-12]. <https://www.researchgate.net/publication/275211047>.
- [12] 陶飞, 张辰源, 戚庆林, 等. 数字孪生成熟度模型[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(5): 1267-1281.
TAO Fei, ZHANG Chenyuan, QI Qinglin, et al. Digital Twin maturity model [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(5): 1267-1281.
- [13] KRITZINGER W, KARNER M, TRAAR G, et al. Digital

- Twin in manufacturing: a categorical literature review and classification[J]. IFAC-Papers OnLine, 2018, 51(11): 1016-1022.
- [14] 何柯. 电法探测铀矿地浸开采的地下“溶浸范围”实验研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2019.
- [15] 撒利明,杨午阳,姚逢昌,等. 地震反演技术回顾与展望[J]. 石油地球物理勘探,2015,50(1):184-202.
SA Liming, YANG Wuyang, YAO Fengchang, et al. Past, present, and future of geophysical inversion[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50(1): 184-202.
- [16] 智宇,周静,陈雷,等. 宇宙线缪子散射成像模拟与算法研究[J]. 原子能科学技术,2020,54(6):990-997.
ZHI Yu, ZHOU Jing, CHEN Lei, et al. Research on cosmic ray muon scattering tomography simulation and imaging algorithm [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, 54(6): 990-997.
- [17] 罗小为,杨燕兴,李祥,等. 缪子科学技术前沿及未来发展[J]. 原子能科学技术,2020,54(12):2296-2305.
LUO Xiaowei, YANG Yanxing, LI Yang, et al. Research status and prospect of muon physics and technique[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, 54(12): 2296-2305.
- [18] 丰建勤. 压力式水位计应用及精度分析[J]. 海洋测绘, 2002(2):52-54.
FENG Jianqin. The application of the pressure-type water gauge and its precision analysis [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2002(2): 52-54.
- [19] 吴永红,屈文俊,邵长江,等. 光纤光栅水位传感器的理论模拟与实验研究[J]. 光子学报,2009,38(7):1651-1653.
WU Yonghong, QU Wenjun, SHAO Changjiang, et al. Theoretical modeling and experimental study on FBG water level sensor [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(7): 1651-1653.
- [20] CARLE S F. T-PROGS: transition probability geostatistical software, Version 2.1[R]. Hydrologic Sciences Graduate Group: University of California, 1999.
- [21] WU J, REMY N, BOUCHER A. Applied geostatistics with SGeMS: a user's guide[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [22] HARIHARAN V, SHANKAR M U. A review of visual MODFLOW applications in groundwater modelling[C]// Microelectronics Systems Education: International Conference on Science, Engineering the Technology; 14th ICSET 2017. Peking: IOP Publishing, 2017: 263.
- [23] SIMUNEK J, GENUCHTEN M T V, SEJNA M. Hydrus: model use, calibration, and validation[J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(4): 1263-1274.
- [24] WHELAN G, CASTLETON K J, PELTON M A. FRAMES-2.0 software system: linking to the groundwater modeling system(GMS) RT3D and MT3DMS models[J]. Technical Report, 2007. DOI: 10. 2172/912744.
- [25] XU T F, SPYCHER N, SONNENTHAL E, et al. Toughreact Version 2.0: a simulator for subsurface reactive transport under non-isothermal multiphase flow conditions [J]. Computers & Geosciences, 2011, 37(6): 763-774.
- [26] HAMMOND G, LICHTNER P, LU C, et al. PFLOT-RAN: reactive flow & transport code for use on laptops to leadership-class supercomputers[J]. Groundwater Reactive Transport Models, 2012. DOI: 10. 2174/978160805306311201010141.
- [27] CUOMO S, DI COLA V S, GIAMPAOLO F, et al. Scientific machine learning through physics-informed neural networks; where we are and what's next[J]. Journal of Scientific Computing, 2022, 92(3). DOI: 10. 1007/s10915-022-01939-z.
- [28] ZHAN C J, DAI Z X, SOLTANIAN M R, et al. Data-worth analysis for heterogeneous subsurface structure identification with a stochastic deep learning framework [J]. Water Resources Research, 2022, 58(11). DOI: 10. 1029/2022WR033241.

Exploration and Construction of a Digital-Intelligent In-Situ Leaching Dynamic Mining System for Uranium

LIU Longcheng, ZHANG Zhean

(Digital Uranium Mining and Metallurgy Center, Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149)

Abstract: To address the problems such as insufficient real-time data analysis, lack of intelligent decision-making support, and limited dynamic optimization capabilities of in-situ leaching dynamic mining system in practical application, the advantages of integrating Digital Twin technology with the in-situ leaching process for uranium extraction were analyzed. By incorporating advanced technologies such as muon imaging, fiber-optic water level monitoring, advanced sensing technologies, artificial intelligence, and big data analysis, an efficient digital-intelligent uranium mining platform was constructed.

ted. The platform includes geological structure model, groundwater seepage model, reactive transport model, and intelligent agent model. The core algorithms cover deep learning, data assimilation, multi-objective optimization, and uncertainty analysis. The establishment of the dynamic in-situ leaching mining system can improve the efficiency of uranium resource development and can provide valuable reference for the extraction of other mineral resources, thus having certain theoretical significance and practical value.

Key words: in-situ leaching; uranium; dynamic mining system; Digital Twin technology; intelligent mining platform; multi-source heterogeneous data

欢迎订阅 2025 年《湿法冶金》

《湿法冶金》(双月刊)创刊于 1982 年,全国中文核心期刊,由中国核工业集团有限公司主管、核工业北京化工冶金研究院主办,主要内容涉及有色金属、稀有金属、稀散金属、稀土金属、贵金属的选矿及湿法冶金工艺,相关材料(萃取剂、离子交换树脂、吸附剂、絮凝剂等)的合成工艺,冶金过程自动控制系统,设备及仪器仪表的研发技术,分析测试方法,三废治理、二次资源综合回收流程,是一本湿法冶金技术综合性刊物,可供相关科研、设计、生产人员及高校师生参阅。

《湿法冶金》国内统一连续出版物号 CN 11-3012/TF,国际标准连续出版物号 ISSN 1009-2617,广告发布登记为京通市监广登字 20190002 号,由《湿法冶金》编辑部编辑出版。2025 年定价 15.00 元/期,全年 90.00 元,全国各地邮局均可订阅,邮发代号 80-181。编辑部常年办理订刊业务。

通信地址:北京市通州区九棵树 145 号《湿法冶金》编辑部

邮政编码:101149

开户银行:工行北京九棵树支行

开户名:核工业北京化工冶金研究院

账号:0200 0498 0900 8800 221(汇款备注:《湿法冶金》订刊费)

联系电话:010-51674124,51675321

电子邮箱:shifayejin@163.com

投稿网址:<https://sfyj.cbpt.cnki.net>

广告联系:13911227093(陈先生)

