

原地浸出铀矿山安全规范体系的构建与应用

胡龙飞¹, 刘啸晨², 千雨杭²

(1. 中核铀业有限责任公司, 北京 100013;

2. 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

摘要: 采用原地浸出工艺开采金属矿山, 长期面临通用安全法规“不适用、不管用”的行业共性难题。以中国主导产能的原地浸出铀矿为研究对象, 提出并实践了“三层解耦-双向融合”的安全治理体系构建方法论。该方法通过解耦复杂风险、工艺环节与异源标准, 并融合现场需求与法规条款, 制定了中国首部《原地浸出铀矿山安全规程》及其相应的强制性安全评价模板。该研究首次实现了地质勘探、化工管道等多领域安全标准的跨行业转化与工艺适配; 采用数值仿真技术对钻井稳定性、泄漏扩散等关键条款的阈值进行了验证与优化; 重构了安全评价范式, 建立了与《规程》深度绑定的“标准-评价”闭环管控体系。研究成果已作为行业强制标准实施, 实际应用显示矿山安全合规检查效率提升约 50%。本研究形成的体系化构建方法及“规-评-用”一体化成果, 为稀土、铜等同类溶浸工艺金属矿山的安全治理, 提供了具备高度可复制性的系统解决方案。

关键词: 原地浸出; 铀矿; 安全规程; 安全评价; 标准体系; 数值仿真; 矿山安全

中图分类号: TD868; X924 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)03-0103-10

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.11.05

随着矿产资源开发向深部、低品位、复杂环境拓展, 以原地浸出、堆浸为代表的特殊采矿工艺在放射性金属(如铀)、稀有金属(如稀土)及部分有色金属(如铜)开采中的应用日益广泛。这类工艺本质上融合了地质钻探、化工流体输送、危险化学品管理等多技术领域, 其安全风险谱系与传统露天或地下开采工艺存在显著差异。国内学者已从标准体系构建角度开展相关研究^[1], 但聚焦于工艺本质安全与强制实施路径的研究较少。当前, 中国矿山安全监管主要依托《金属非金属矿山安全规程》(GB 16423—2020)等通用标准^[2], 其监管要点集中于通风、提升、爆破等常规环节, 未对特殊采矿工艺中的钻井施工安全、密闭管道系统泄漏防控、集中监控与自动化联锁等关键流程进行监管。在安全评价层面, 原有评价提纲与模板缺乏针对溶浸、注采等工艺单元的专用模块, 导致评价内容与工艺实际风险管控要求错位。这种通用法规与特殊工艺之间的制度性错配, 使得相关矿山长期处于“有工艺、无专规, 有生产、无准绳”的被动局面。目前, 原地浸出工艺在砂岩型铀矿

浸出中应用居多^[3]。中国地浸采铀产能已占天然铀总产能的主导地位^[4], 工艺安全规范的缺失已成为制约该行业安全高质量发展的短板。

国内外监管理念的差异, 决定了各国对地浸铀矿工艺安全规程的需求模式不同。国际上, 地浸采铀工艺的监管框架侧重点各异。以美国为代表的监管体系, 整体呈现“企业自主负责、政府设定底线”的特征, 核管理委员会(NRC)与环境保护署(EPA)共同主导^[5]的法规(如 10 CFR PART 40)^[6]侧重于辐射安全与环境影响的目标设定, 而对钻井、注采等工艺系统如何实现安全缺乏细致规定, 企业需自行承担工艺设计的安全责任。哈萨克斯坦法规体系强调资源所有权与外商投资管理^[7], 在环保方面有严格标准, 但公开的、系统性的全工艺链安全技术规程不多。总体而言, 国外现有体系或偏重于辐射环保监管, 或侧重于资源行政管控^[8], 其监管理念决定了其不需要、也不追求聚焦于工艺本质安全、覆盖全流程的强制性技术规程。相比之下, 中国的安全监管模式, 要求政府提供明确、可操作、覆盖全流程的强制性

收稿日期: 2025-11-18; 修回日期: 2026-03-04

通信作者: 刘啸晨

技术标准,并以此作为企业合规和监管执法的直接依据。《安全生产法》^[9]《矿山安全法》^[10]等已提供了依据,但可直接指导地浸铀矿设计、建设与运行的安全标准长期空白。原国家安全监管总局发布的《金属非金属矿山建设项目安全评价报告编写提纲》不适用于溶浸采矿^[11],导致该类项目在安全设施“三同时”审查中无据可依,只能参照通用模板改编,评价的有效性大打折扣。学术研究方面,现有成果多集中于地浸工艺的矿床地质、浸出化学或环境保护,缺乏从安全系统工程角度构建完整规范体系的系统研究。因此,无论是从监管实践还是学术研究层面,研发一套针对性强、结构完整、可强制执行的特殊工艺矿山安全标准体系,已成为亟待攻克的关键课题。

针对上述问题,本研究旨在构建一套面向原地浸出等特殊工艺矿山、兼具技术针对性与管理闭环性的安全治理体系。为实现这一目标,遵循“方法论引领—标准研制—评价重构—应用验证”的系统性研究路径,提出“三层解耦-双向融合”的安全治理体系构建方法论,并在该方法论指导下,研制《原地浸出铀矿山安全规程》及其配套的安全评价模板,实现“标准”与“评价”的一体化设计。

1 “三层解耦-双向融合”模型

1.1 方法论提出背景

传统矿山安全标准的制定,多基于成熟的、相对固化的工艺流程(如凿岩、爆破、运输),采用“经验总结—条款归纳”的路径,其更新往往滞后于技术创新^[12]。然而,原地浸出等特殊工艺是一个动态的、多学科交叉的复杂技术系统,其风险具有隐蔽性(发生于地下孔隙)、耦合性(机械、化学、地质风险交织)和链式传导性^[13](单井失效可能影响整个采区)。传统的“补丁式”或“套用式”标准制定方法,难以系统性识别和覆盖此类非传统风险,易导致标准体系存在“盲区”或“冗余”。

因此,为破解特殊工艺矿山的安全治理难题,本研究提出“三层解耦-双向融合”安全治理体系构建模型。该模型主要目标:1)厘清并聚焦于本领域的风险范畴(风险复合性挑战);2)将连续、复杂的工艺流程转化为可标准化管理的对象;3)高效整合其他行业的技术规范并化为己用,解决监管交叉性与技术来源分散性等挑战。

1.2 三层解耦:复杂系统的结构化分析

解耦旨在将错综复杂的现实问题分解为边界清晰、易于处理的子问题,是系统工程的核心理念。本研究形成三层解耦分析。

通过风险解耦明确监管与治理边界。地浸铀矿面临辐射安全、职业健康、生态环境保护、生产固有安全等风险,分属不同部门监管。本研究严格遵循国家监管分工,将主要归口应急管理部门负责的固有安全风险,即与工艺流程直接相关的机械伤害、中毒窒息、火灾爆炸、泄漏污染、坍塌坠落等风险,从复合风险束中剥离出来,作为整个安全治理体系聚焦的核心,确保研究成果(《规程》)的监管主体明确、适用范围清晰,避免与辐射防护、职业病防治等已有体系产生重叠或冲突。

通过工艺解耦构建模块化的技术管控单元,将看似连续的原地浸出工艺,按其功能独立性和风险同质性,解耦为一系列相对独立的工艺模块,为后续分模块制定针对性的安全条款奠定了逻辑基础。主要包括:1)钻井工程模块。涵盖从场地平整、设备安装、钻进、成井到洗井的全过程,主要风险为机械伤害、物体打击、井壁失稳。2)注采系统模块。涵盖浸出剂配制、注入、地下运移、浸出液提升与输送,核心风险是压力管道泄漏、化学品腐蚀、自动化系统失效。3)危化品储存与供应模块。涉及硫酸、双氧水、氧气等的储罐、管线与供应站,风险集中于中毒、火灾、爆炸。4)辅助与公用工程模块。包括电力、自动化控制、检修等。

通过标准解耦实现跨领域技术规范的萃取与转化。针对解耦后的各工艺模块,其对应的最佳安全实践通常已在其他成熟行业的标准体系中确立。然而,跨行业引用并非简单套用,必须从标准溯源、应用场景、标准颗粒度、适用性评价维度进行系统性分析,方可确定其转化价值。

以钻井工程模块为例,其安全要求可溯源至《地质勘探安全规程》(AQ 2004—2005)^[14]。该规程原本适用于地质找矿钻探场景,对钻机安装、机场平整、护孔等环节有成熟规定。地浸铀矿的钻井施工与地质勘探钻井在作业场景上高度相似,且AQ 2004—2005中的关键技术条款颗粒度适中,“机场地面坡度应平整坚固”等原则性要求可直接转化,而部分条款(如护孔管下入深度)则需根据地浸工艺的长期注采需求进行参数调整。适用性评价表明,该标准中约70%的条款可直接

采用或经微调后适用,其余部分需结合地浸特性补充完善。

注采系统模块涉及的压力管道安全,可溯源至《工业金属管道设计规范》(GB 50316—2000)^[15]。该标准对管道材质选择、压力等级、泄漏检测等有精细化规定(颗粒度细至具体计算公式),完全适用于地浸矿山的地面注采管网设计。但其应用场景需限定于地上常压/低压管道系统,对于井下套管等特殊部位,仍需结合石油行业套管强度标准进行补充。

危化品储存模块则直接引用《危险化学品安全管理条例》^[16]及配套标准(如GB 50160—2008),其条款多为强制性原则(如“围堰容积不应小于最大储罐容积”),颗粒度适中,可直接转化为地浸铀矿硫酸储罐区的设计要求。

通过上述多维分析,标准解耦实现了对异源标准的筛选、转化与再集成,确保纳入《规程》的每一条款均有明确的行业来源、清晰的应用边界、适配的条款粒度,并经过适用性论证。

1.3 双向融合:需求与标准的闭环设计

融合是解耦的逆过程,旨在将分析所得的要素重新整合为一个有机、自洽且可操作的体系。本模型强调双向融合,确保体系既扎根于实际,又能有效指导实践。

1.3.1 自下而上的需求融合

从现场痛点驱动条款的生成与量化,此路径强调标准的实践来源。通过系统分析地浸铀矿历史事故案例^[17],对多座代表性矿山开展实地调研,并组织设计、生产、监管专家进行研讨,以全面收集、识别各工艺模块中真实存在的“痛点”与未满足的安全需求。例如,调研发现钻机在倾斜场地作业时易发生滑落倾覆,这一“痛点”便驱动了“机场坡度”限值条款的生成;对泄漏事故的分析,催生了集控室气体监测的具体布设要求。需求融合的核心是将定性的问题转化为《规程》中可执行、可检查的量化技术参数(如坡度 $\leq 10^\circ$ 、监测半径 ≤ 15 m等)。

1.3.2 自上而下的标准融合

将标准条款嵌入管理流程实现闭环,此路径确保标准的可应用性与执行效力。制定的《规程》条款,并非作为孤立文本发布,而是预先设计其应用场景。最关键的一步在于,将每一条关键技术条款直接映射为安全预评价、安全设施设计、安全验收评价等“三同时”环节中的强制性审查项或验

证点。例如,《规程》中“硫酸储罐围堰容积”条款,必须在安全设施设计专篇中有对应的设计图与计算书,在验收评价中需现场核实。这种“制定即应用”的设计,使《规程》与评价模板构成了“标准-执行”闭环,有效避免了标准脱离实际的弊端。

1.3.3 方法论输出

通过“三层解耦”的结构化分析与“双向融合”的闭环设计,本方法论输出三类核心成果:1)《原地浸出铀矿山安全规程》草案,其框架与条款直接体现了工艺解耦与风险解耦思维;2)配套的《安全评价报告编写提纲》框架,其审查清单是标准融合的直接产物;3)关键技术验证清单,明确了哪些源自解耦与融合的条款需通过仿真模拟或现场试验进行最终验证与优化。

2 《原地浸出铀矿山安全规程》^[18]的研制

2.1 基于方法论的规程框架设计

依据“三层解耦-双向融合”方法论,《规程》摒弃了传统按专业工种罗列条款的模式,采用“总则-工艺模块-应急管理”三层递进结构^[19]。该框架逻辑清晰、模块独立、便于引用和执行,成功将连续复杂的工艺流程转化为标准化管理的对象。

2.1.1 总则

明确《规程》的立法目的、适用范围、基本要求和总体管理原则。其核心创新在于精准界定范围边界:包含经由风险解耦后聚焦的、由矿山安全监察机构负责监管的全部固有安全活动与设施;明确排除属于卫生健康部门职责的辐射防护与职业健康内容,以及属于生态环境部门职责的退役治理内容。这一界定从根本上避免了监管重叠与法规冲突,实现了风险解耦的落地。

2.1.2 工艺模块

作为《规程》的技术主体,完全对应于工艺解耦析出的四大核心模块,独立设置钻井工程安全、注采系统安全、危险化学品储存与供应安全及辅助设施安全等篇章。每个篇章内部按照“设计、施工、运行、维护”的生命周期或“设备、环境、操作”的管理要素进行条款组织,确保对每个独立功能模块的安全要求系统且完整。

在条款组织过程中,本研究系统考虑了新工艺与既有标准体系之间的关系处理原则。首先,明确《规程》作为专用标准,与通用标准《金属非金属矿山安全规程》(GB 16423—2020)之间为补充

与细化关系——对于地浸工艺特有的风险环节(如注采系统、井场布局),《规程》设定专用条款;对于通用性安全要求(如电气安全、消防),仍遵循 GB 16423—2020 等通用标准,避免重复规定。其次,在引用其他行业标准时,以最新有效版本为准,并在条款中注明引用标准的具体版本号或明确“按现行国家标准执行”,以确保《规程》不会因引用标准更新而过时。此外,《规程》在条款表述上预留了技术接口,对于可能出现的“新工艺、新设备、新材料”,要求通过专项安全评价或风险分析确定其适用性,而非一概套用既有条款。上述设计使《规程》既保持了与现有标准体系的协调性,又具备应对未来技术发展的开放性。

2.1.3 应急管理

单设篇章,对上述工艺模块可能发生的事

(如井喷、泄漏、火灾)的应急准备、响应与处置程序进行统一规定,形成对前面各模块安全预防措施的闭环管理与最终保障。

2.2 关键技术条款的跨领域转化与决策

《规程》中数百项技术条款的生成,并非主观创造,而是严格遵循标准解耦与需求融合路径的产物。其核心是将其他行业的技术安全要求进行挖掘、转化、融合与再创新,形成适用于地浸铀矿场景的专属安全要求。表 1 列举了部分代表性条款的生成逻辑与决策依据。

2.3 关键条款的仿真验证与参数优化

为确保《规程》关键条款的科学性与可操作性,本研究采用数值仿真与现场试验相结合的技术验证体系,突破了传统标准制定主要依赖专家经验的局限。

表 1 关键技术条款的跨领域转化与决策依据示例

Table 1 Examples of cross-domain transformation and decision-basis of key technology clauses

工艺模块	关键条款(示例)	来源标准/法规	转化与创新要点	决策支持方法
钻井工程	5.1.3 钻机机场地面坡度应不大于 10°,并具备良好的排水条件	《地质勘探安全规程》(AQ 2004—2005)	将地质勘探通用要求,具体化并优化为适用于铀矿常用轻型车载钻机的稳定性阈值,同时兼顾场地边坡稳定性对钻井作业平台的安全影响	多体动力学仿真分析不同坡度下钻机重心变化与抗倾覆稳定性;边坡稳定性分析评估不同坡度、岩土条件下的滑坡风险;现场实测统计多种型号钻机在坡地上的实际安全作业极限
	6.3.5 集控室内应设置有毒有害气体监测报警仪,监测气体类型应根据矿床地质条件(如矿物成分、围岩性质、地下水化学特征)确定;监测点布设应确保在气体泄漏后 30 s 内报警,布设密度经论证可优化	《石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计标准》(GB 50493—2019) ^[20]	首次将化工领域密闭空间监测理念系统引入矿山集控室。将覆盖泄漏点原则转化为响应时间和经济密度双重目标,同时强调监测气体类型需与具体矿床的地质条件相匹配	计算流体力学模拟不同泄漏源位置、速率下的气体扩散路径与到达时间;基于矿床地质资料(如矿物成分、地下水化学特征)确定可能产生的有毒有害气体类型及浓度范围;成本效益分析确定布设密度从理论密集值(如 10 米/台)优化至 15 米/台的可行性
危化品管理	7.2.1 硫酸储罐区应设置围堰,围堰的有效容积不应小于其中最大储罐的容积	《危险化学品安全管理条例》	将法规中的原则性要求“设置防止液体流散的设施”,转化为可量化设计、可刚性检查的具体技术参数	事故后果模拟(泄放模型)计算单罐全破裂的最大液体泄流量及所需容纳体积,验证“≥1 倍罐容”的充分性与必要性
管道安全	6.2.8 注采管道应标明介质名称和流向。酸液管道色标应符合 GB 7231—2003 ^[21] 的规定	《工业金属管道设计规范》(GB 50316—2000)	将工业管道标识规范首次强制性应用于矿山井下及地面注采管网,解决地浸铀矿管道复杂、误操作风险高的问题	人因工程学分析,评估在巡检、维修等场景下,清晰的标识对降低误开闭阀门、误接管线等操作失误概率的贡献

2.3.1 基于数值仿真的安全阈值验证与优化

钻井井壁稳定性验证:针对“成井与洗井压力不得超过井管承压值和地层破裂压力”条款,建立了典型地层地质力学模型,采用有限元分析(FEA)模拟了在不同注液压力下井筒周围地层的应力分布、塑性区发育及潜在破裂过程。仿真结果不仅验证了依据经验公式估算的安全压力上限的合理性,还揭示了在层理发育地层中,压力波动对井壁稳定性的敏感度更高。根据验证结果,在条款释义中增加了“在复杂地层应进行专项地应力测试与稳定性评估”的补充要求。

浸出液管道泄漏扩散模拟:为优化“集控室气体监测仪布设”和“应急疏散距离”等相关条款,建立了集控室及相邻厂房的三维计算流体力学(CFD)模型,模拟了不同管径、不同压力下硫酸或浸出液发生小孔泄漏后,有害气体(如 SO_2)的扩散过程。通过分析不同泄漏点位置下监测点的气体浓度-时间曲线,精确验证了“30 s内报警”的布设方案可行性,并直观展示了泄漏影响范围,为应急响应区域的划定提供了量化依据。

2.3.2 基于科学决策的技术参数确定

以“集控室气体监测仪布设密度”为例,进行技术参数确定。根据化工标准及仿真结果,初期提出理论上无死角覆盖的密集布设方案(约10米/台)。随后,在新疆某铀矿的集控室进行了为期6个月的现场中试,对比了在密集布设与优化布设(15米/台)方案下,模拟泄漏的报警响应时间和日常维护工作量。中试数据显示,优化方案在绝大多数可能泄漏场景下仍能满足 ≤ 30 s的报警要求,误报率未显著升高。结合成本效益分析(设备采购、安装、长期校准与维护费用),优化方案在保证安全性能的前提下,为单个矿山节约该类安全设施投资约15%~20%。基于此实证数据,《规程》最终条款没有硬性规定具体密度值,而是要求“布设应确保在气体泄漏后30 s内报警,其具体布局需通过风险分析或模拟验证确定”,既提出了安全性能的刚性目标,又给予了基于具体设计进行经济优化的灵活性。

通过上述仿真验证与现场决策过程,《规程》中的关键参数从经验值或引用值转变为有量化模型支撑、经实际场景验证的科学决策值,极大提升了标准的技术权威性和可接受度。

3 配套安全评价范式的结构化重构

3.1 “标准-评价”一体化设计理念

一项优秀的安全技术标准,其生命力不仅在于内容的科学性,更在于其是否能够被精准、高效地执行与验证^[22]。在研制《规程》的同时,启动了与之配套的安全评价体系重构工作。本成果中的三大评价模板——《安全预评价报告编写提纲》《安全设施设计编写提纲》和《安全验收评价报告编写提纲》^[23],并非独立于《规程》之外,而是《规程》得以落地的关键实施工具和核心验证手段,它们共同构成了“标准-评价”一体化闭环。《规程》规定了必须达到的安全技术要求,评价模板提供了衡量是否达标的结构化方法和审查清单。这种一体化设计确保了从项目立项(预评价)、工程设计(设施设计)到投产前验证(验收评价)的全过程,都能够以《规程》为唯一技术准绳,彻底改变了评价报告脱离工艺实际的问题。

3.2 评价模板的结构性创新

为解决原有评价体系与地浸工艺脱节问题,本研究对评价模板进行了结构重构与内容创新。

在单元重构方面,摒弃了传统模板按露天矿山、地下矿山等开采方式划分评价单元的固化模式,转为依据解耦后的地浸工艺链条划分,设立了全新的评价单元体系。以《安全预评价报告编写提纲》为例,其核心评价单元包括:1)总平面布置与周边环境安全单元;2)井场系统安全单元(涵盖钻井工程、井场布局);3)注采与溶液循环系统安全单元;4)危险化学品储存与供应系统安全单元;5)自动化监控与公用工程安全单元;6)重大事故应急管理单元。这种单元划分方式,使评价工作直接聚焦地浸工艺特有风险源,评价路径与生产工艺流程高度一致,极大提升了评价的针对性。

在内容创新方面,强化工艺专属分析与技术文件要求。在安全预评价阶段,要求评价单位必须提供详细的矿区水文地质剖面图,并分析地下水径流方向、流速对潜在浸出液泄漏迁移的影响;必须调查和引用百年一遇洪水水位数据,评估其对地面注采设施、储罐区的淹没风险。这些要求将地质与环境风险主动纳入了安全评价范畴,推动了安全设计的源头防控。在安全设施设计阶段,明确规定设计文件必须包含井场管网综合布置竣工图(须标明所有注液井、抽液井、监测井及连接

管线的坐标、标高、管径、材质),以及自动化监控系统逻辑图(清晰显示传感器、控制器、执行机构的联锁关系)。这两类图纸是地浸矿山安全管理的核心基础资料,该强制要求确保了设计成果的可验证性和未来运维的可追溯性。在安全验收评价阶段,增设了“试运行有效性评价”单元,要求评价机构不仅要核查静态设施是否按图施工,还必须收集项目试生产阶段(通常3~6个月)的实际运行数据,如注液压力波动范围、集控室气体监测报警记录、应急演练响应时间等,用以动态验证安全设施(如减压阀、报警系统)在实际工况下的运行效能是否达到要求。

3.3 评价方法的量化升级

为使安全评价从定性描述走向定量分析,本研究在评价方法上进行了系统性升级^[24]。

在风险辨识与评估的半定量化方面,针对地浸工艺,系统辨识出物体打击、机械伤害、中毒窒息、化学灼伤、火灾爆炸、泄漏污染、井壁坍塌、触电、淹溺、滑坡、雷击、车辆伤害等12类高危风险。引入风险矩阵(Risk Matrix)方法,从事故可能性(基于历史数据、设备可靠性、人员暴露频率)和事故严重程度(基于人员伤亡、经济损失、环境影响)维度,对每个评价单元中的主要危险有害因素进行半定量评级(如高、中、低),从而使风险排序和管控资源分配有了科学依据。

在复杂安全论证的数值仿真强制应用方面,对于传统定性方法难以精确评估的复杂场景,《提纲》明确规定必须采用数值仿真技术进行辅助安全论证。例如,对于注液井群,当井间距较小或地层非均质性强时,可能存在注液压力相互干扰,导致局部压力超限的风险。条款规定,在此类情况下,安全设施设计中必须提交基于地下渗流力学模型的数值模拟报告,模拟不同注液方案下的地层压力场分布,以此论证并优化注液泵压力设定值、井群布局和注液顺序,从设计源头上预防井筒破裂或溶浸液非控扩散的风险。

3.4 安全评价范式重构示例

示例:注液压力设定值的安全合理性论证。

问题提出:某地浸铀矿设计注液压力为2.5 MPa,需在安全设施设计中论证其安全性。

仿真建模:建立目标采区地质模型,输入地层孔隙度、渗透率、弹性模量及最小地应力场数据。

模拟分析:利用多井耦合渗流-应力耦合数值

模拟软件,模拟在2.5 MPa恒压注液条件下,整个采区及重点关注井筒周围的地层压力演化。模拟显示,在运行180 d后,部分低渗透区域井筒壁面附近孔隙压力接近地层最小主应力值的95%。

安全论证与优化:模拟结果表明,在长期运行下原始设计压力存在诱发微裂隙的风险。基于仿真结果,提出优化方案:1)将整体注液压力上限调整为2.2 MPa;2)对低渗透区实施周期性波动注液或酸化解堵。优化方案经再次模拟验证,其最大孔隙压力安全系数提升并稳定在1.2以上。

结论输出:将仿真分析过程、关键结果图表(如压力云图、历时曲线)及优化后的压力控制参数作为独立章节,纳入《安全设施设计》报告,构成注采系统安全单元的核心论证内容,从而完成从经验设定到模型论证的升级。

通过上述结构性重构与量化升级,安全评价范式已从过去被动、模糊的符合性检查,转变为主动、精确的风险驱动型工程分析与验证,与《规程》共同构成了支撑地浸铀矿全生命周期安全管控的坚实技术支柱。

4 成果验证与推广潜力

4.1 政策转化与行业覆盖

2023年,本研究核心成果——《原地浸出铀矿山安全规程》,其研制充分依托了《核工业铀矿冶工程技术标准》(GB 50521—2023)的总体框架^[25],确保与现行铀矿冶技术体系协调统一。该规程于2025年5月公开征求意见^[26],并于2025年9月由国家矿山安全监察局正式发布。与此同时,三大配套评价模板——《原地浸出铀矿山建设项目安全预评价报告编写提纲》《原地浸出铀矿山建设项目安全设施设计编写提纲》《原地浸出铀矿山建设项目安全验收评价报告编写提纲》——以国家矿山安全监察局规范性文件(矿安综〔2023〕49号)形式发布实施。这标志着困扰行业十余年的“无标可依、无范本可循”的历史正式终结。

截至目前,本成果体系已实现对全国全部23座在产、在建原地浸出铀矿山的全覆盖,体现了其解决行业紧迫需求的重大价值。所有新建、改建、扩建项目的安全评价与设计工作,以及生产矿山的合规性检查,均严格依据本《规程》及模板执行。国内主要核工业设计院及具备资质的安全评价机构均已将其作为唯一技术依据,实现了从科研产

出到行业治理工具的彻底转变。

4.2 企业应用实效与量化分析

成果在企业的落地应用产生了显著的可量化效益,证明了其实用性及有效性。

4.2.1 管理效率显著提升

在内蒙古某大型地浸铀矿的试点应用中,基于《规程》条款开发的《原地浸出铀矿安全生产对标检查表》(共126项量化指标),将以往依赖个人经验的模糊安全检查,转变为标准化、清单式的核查。应用后,单次全面安全检查的平均耗时从3.5个工作日缩短至1.7个工作日,效率提升超过50%。同时,因检查标准统一、问题描述具体,隐患整改的针对性和闭合率大幅提高,试点期内隐患整改率从约90%提升至98%。

4.2.2 评价与设计质量飞跃

成果应用彻底改变了安全评价报告“针对性差、深度不足”的局面。据统计,2023年下半年至2024年上半年期间,在国家矿山安全监察局审查的15个地浸铀矿建设项目评价报告中,基于新模板编制的报告,专家评审一次性通过率由过去的平均约35%跃升至95%。评审专家普遍反馈,新报告“工艺脉络清晰、风险分析透彻、措施对应性强”,审查效率和质量同步提升。

4.2.3 安全投入的精准优化

通过引入数值仿真进行条款验证与参数优化,在保障同等安全水平的前提下,实现了安全投资集约化。例如,前述“集控室气体监测仪布设密度优化”案例,已在多个矿山的设计中推广应用,可为单个中型地浸矿山节约相关安全设施一次性投资8%~12%。此外,在地下水环境安全投入方面,参照《地浸采铀地下水本底值确定技术要求(试行)》^[27],实现了地下水本底值调查与监测的精准化投入,进一步优化了环境安全成本。

4.3 体系化运行与生态构建

本成果的成功应用,得益于动态运行、持续改进生态系统。该体系以《规程》为技术核心和基本遵循依据,以三大评价模板为项目准入和过程验证工具,通过监管审查与企业自查双重驱动,将要求嵌入企业日常安全管理体系(如安全生产标准化)^[28]。同时,为了降低执行门槛、促进条款落地,项目组同步开发并推广了《钻井作业风险防控可视化手册》《危化品储存与使用应急处置程序卡》《关键设备安全检查维护指南》等一系列衍生

化、场景化的实操工具包。这些工具将复杂的条款转化为一线员工“看得懂、记得住、用得上”的操作要点,辅以专项培训,形成了“标准规范-实施工具-人员能力”三位一体的安全治理生态,有效解决了小矿种企业安全技术能力薄弱的痛点。

4.4 方法论跨矿种推广潜力验证

为验证“三层解耦-双向融合”方法论的普适性,选取了同样采用原地浸出工艺但矿种不同的离子吸附型稀土矿进行方法推广预研性验证。

应用步骤:1)工艺解耦。将稀土原地浸出工艺解耦为“注液井场与管网”“母液收集与输送”“水处理与沉淀”“化学品(电解质)储存与配制”四大功能模块。2)风险解耦。聚焦其固有安全风险,主要包括:注液导致的山体滑坡与边坡失稳风险、母液泄漏造成的地表水体污染风险、化学品(如硫酸铵)储存与使用的腐蚀与环境污染风险。3)标准解耦。横向关联检索《非煤矿山企业安全生产许可证实施办法》《尾矿库安全规程》(涉及溶液池),以及环保领域的水污染防治技术规范和化工领域的相关标准,提取可转化条款。该方法论同样适用于原地爆破浸出^[29]、堆浸等同类特殊工艺矿山的安全治理。

在一周内,运用该方法论框架,迅速梳理并产出了《离子吸附型稀土矿原地浸出工艺安全关键控制点清单(草案)》。该清单系统性地提出了包括“注液区边坡稳定性专项评价要求”“母液收集池防渗与渗漏监测强制规定”“电解质溶液输送管道标识与泄漏收集规范”等30余项核心安全控制要求,其结构与生成逻辑与《规程》高度相似。

该预研案例的成功表明,“三层解耦-双向融合”方法论具备强大的可移植性与高效性。它能够快速厘清不同矿种同类工艺的核心安全逻辑,并高效组织跨领域技术资源,快速构建安全管控框架。本研究的价值已超越解决单一矿种(铀)的安全问题,其成果为整个采用溶浸、原地开采等特殊工艺的稀有金属、有色金属矿业领域,提供了一套经过验证的、可快速复用的安全治理体系构建方法,展现出广阔的行业推广前景。

4.5 法规标准与技术创新的协同发展

在矿业技术加速创新的背景下,如何平衡安全监管与技术发展,是全球矿业治理面临的共同挑战。传统的标准制定模式往往滞后于工艺革新,导致标准要么过于僵化而阻碍新技术应用,要

么长期空白而使新技术处于监管真空。

本成果在构建过程中,始终将“让标准成为新技术的安全后盾,而非藩篱”作为核心理念之一,并通过三项机制设计实现了这一目标:

1)模块化架构赋予标准灵活性。通过“三层解耦”将复杂的地浸工艺拆解为钻井工程、注采系统、危化品管理等独立模块,每个模块的条款均聚焦于功能目标和风险控制,而非锁定于特定技术路径。当某一模块出现新技术(如新型钻井工艺、智能化注采系统)时,企业可在满足模块安全目标的前提下,通过专项安全评价或风险分析确定新技术的适用性,无须受制于原有条款。

2)动态更新机制确保标准时效性。本成果建立的“标准—评价—应用”闭环体系,具备动态反馈能力。通过企业试点、量化数据分析和事故案例积累,可及时发现标准条款与实际需求的偏差,并依托国家矿山安全监察局的规范性文件发布渠道,实现标准的快速修订与迭代。前文所述“集控室气体监测仪布设密度优化”案例,正是标准条款根据现场中试数据动态调整的典型例证——从理论密集值优化为经济可行值,既保障了安全,又避免了过度投资对技术应用的抑制。

3)绩效导向条款预留创新空间。《规程》在关键条款中大量采用“性能要求”而非“规格要求”的表述,将实现方式的选择权留给设计方和技术提供方。例如,对于气体监测仪的布设,不硬性规定具体间距,而是要求“确保在气体泄漏后30 s内报警”,这种目标导向、路径开放的条款设计,为新技术、新设备的应用预留了充足接口,使标准真正成为支撑技术创新的安全底线。

上述理念与实践表明,一套设计科学的安全标准体系,完全可以在守住安全底线的前提下,为技术创新提供清晰的合规路径和灵活的适配空间。本成果不仅解决了地浸铈矿当下的安全治理难题,更探索出一条“标准-技术”协同发展的可行路径,对于未来深部开采、智能矿山等新兴领域的安全标准研制,具有重要的方法论参考价值。

5 结论与展望

5.1 结论

本研究通过系统的理论构建与技术攻关,成功建立了一套完整、可闭环运行的科技成果体系,主要结论如下:

1)在体系化构建方法上实现创新。首次提出适用于特殊工艺矿山的“三层解耦-双向融合”安全治理体系构建方法论。该方法通过解耦复杂风险、工艺模块与异源标准,并融合现场实践需求与法规条款,为系统化解解决工艺特殊性与监管普适性之间的矛盾提供了科学的理论框架和可操作的技术路径。

2)在核心技术标准方面取得突破。基于上述方法论,研制并推动发布了中国首部《原地浸出铈矿山安全规程》。该《规程》首创“总则-工艺模块-应急管理”结构,通过跨领域标准转化与数值仿真验证,实现了对钻井工程、注采系统、危化品管理等关键环节安全要求的全面、精准覆盖,填补了行业强制性安全标准的空白。

3)在配套评价范式上实现重构。同步完成了安全评价范式的结构性重构,创新制定了3套强制性专用评价模板。通过单元重构、内容创新及引入风险矩阵与数值仿真等量化方法,构建了与《规程》深度绑定的“标准-评价”一体化闭环,彻底解决了安全评价无据可依、流于形式的难题。

4)应用实效与推广价值得到充分验证。成果已实现政策转化与行业全覆盖,企业应用数据显示,其在提升安全管理效率、报告编制质量及优化安全投入方面成效显著。初步的跨矿种(以稀土矿为例)方法移植验证表明,本研究形成的特殊工艺安全治理体系构建方法具备强大的可复制性与推广潜力,为稀有及有色金属矿业领域同类工艺的安全水平提升提供了经过验证的系统性方法。

本成果聚焦工艺本质安全与强制实施路径,不仅攻克了地浸铈矿安全生产无法可依、评价无据的历史性难题,推动其安全监管实现了从依赖局部经验向标准化、量化、闭环化现代治理模式的根本性跨越;而且形成了一套具有普适参考价值的安全治理体系构建范式,可为面临类似安全困境的其他稀有金属、有色金属溶浸类矿山提供方法论参考和即插即用的工具包,对提升整个矿业行业特殊开采工艺的安全管理水平具有重要的理论价值与实践引领作用。

5.2 展望

1)建议积极推动《规程》从行业标准上升为国家标准,以提升其法律效力和适用范围。同时,可依据本方法论,快速启动对地浸稀土矿、地浸铜

矿、堆浸金矿等同类工艺的专用安全标准研制,形成覆盖主要特殊采矿工艺的标准簇,系统提升中国矿业安全标准的完整性与先进性。

2)开展数字孪生(Digital Twin)技术与本成果的融合研究。通过构建融合地质、工程、监测数据的矿山全景数字模型,实现注采压力场、管道状态、危化品库存等安全关键参数的实时仿真与预警,推动安全监管从事后响应、定期检查向实时感知、智能预警、前瞻干预的智能化模式演进。

3)持续建设并共享“特殊工艺矿山典型事故案例数据库”和“安全措施效能后评估数据库”,为标准的动态优化提供数据支持。同时,通过多渠道系统推介本成果,为全球面临类似挑战的资源型国家提供一套权责清晰、技术扎实、经济可行的安全治理方案,助力全球矿业可持续发展。

参考文献:

- [1] 丁叶.地浸采铀技术标准体系构建研究[J].铀矿冶, 2023, 42(2): 52-58.
Ding Ye. Construction of technical standard system for in-situ leaching uranium mining [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2023, 42(2): 52-58.
- [2] GB 16423—2020 金属非金属矿山安全规程[S].
- [3] 吴爱祥,余健,戴兴国.原地浸出及其数学模型的研究进展[C]//中国有色金属学会第三届学术会议论文集:科学技术论文部分.北京:中国有色金属学会,1997:205-212.
- [4] 孙明源,苏学斌.地浸采铀,从“跟跑”到“领跑”的飞跃[N].科技日报,2023-10-09(005).
- [5] U.S. Nuclear Regulatory Commission. Uranium recovery [EB/OL]. [2026-03-04]. <https://www.nrc.gov/materials/uranium-recovery>.
- [6] U.S. Nuclear Regulatory Commission. 10 CFR part 40: Domestic licensing of source material [EB/OL]. [2026-03-04]. <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part040/index>.
- [7] World Nuclear Association. Uranium and nuclear power in Kazakhstan [EB/OL]. [2026-03-04]. <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/kazakhstan>.
- [8] International Atomic Energy Agency. In situ leach uranium mining: An overview of operations[R]. Vienna: IAEA, 2016.
- [9] 全国人民代表大会常务委员会.中华人民共和国安全生产法(2021年修订)[Z].中华人民共和国主席令第八十八号,2021-06-10.
- [10] 全国人民代表大会常务委员会.中华人民共和国矿山安全法(2009年修正)[Z].中华人民共和国主席令第18号,2009-08-27.
- [11] 国家安全监管总局.国家安全监管总局关于印发金属非金属矿山建设项目安全评价报告编写提纲的通知:安监总管一〔2016〕49号[Z].2016.
- [12] Dekker, Sidney W A. The bureaucratization of safety[J]. Safety Science, 2014, 70: 348-357.
- [13] Milch V, Laumann K. Interorganizational complexity and accident risk literature review [J]. Safety Science, 2016, 82: 9-17.
- [14] AQ 2004—2005 地质勘探安全规程[S].
- [15] GB 50316—2000 工业金属管道设计规范:2008年版[S].
- [16] 危险化学品安全管理条例[Z].中华人民共和国国务院令 第344号,2002.
- [17] Quinlan M. Ten pathways to death and disaster from fatal incidents in mines and other high hazard workplaces[M]. Sydney Press, 2014.
- [18] KA 24—2025 原地浸出铀矿山安全规程[S].
- [19] GB/T 1.1—2020 标准化工作导则 第1部分:标准化文件的结构和起草规则[S].
- [20] GB/T 50493—2019 石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计标准[S].
- [21] GB 7231—2003 工业管道的基本识别色、识别符号和安全标识[S].
- [22] Rosness R, Blakstad H C, Forseth U, et al. Environmental conditions for safety work - theoretical foundations [J]. Safety Science, 2012, 50 (10): 1967-1976.
- [23] 国家矿山安全监察局.关于印发《原地浸出铀矿山建设项目安全预评价报告编写提纲》等文件的通知:矿安综〔2023〕49号[Z].2023.
- [24] Sundström E, Nygren M. Understanding the mining safety research field safety measures and programs in international research [J]. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 2024, 14(3): 315-340.
- [25] GB 50521—2023 核工业铀矿冶工程技术标准[S].
- [26] 国家矿山安全监察局.原地浸出铀矿山安全规程:征求意见稿[EB/OL]. (2025-05-29) [2026-03-04]. https://m.sohu.com/a/901160514_121106994/?pvid=000115_3w_a.

- [27] BSRS 106—2023 地浸采铀地下水本底值确定技术要求(试行)[S]. 2023:1-10.
- [28] GB 45673—2025 危险化学品企业安全生产标准
- 化通用规范[S].
- [29] EJ/T 1172—2014 原地爆破浸出采铀工艺设计规范[S].

Construction and Application of Safety Governance System for In-situ Leaching Uranium Mines

HU Longfei¹, LIU Xiaochen², GAN Yuhang²

(1. China National Uranium Co., Ltd., CNNC, Beijing 100013, China;

2. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China)

Abstract: Addressing the persistent challenge that general safety regulations are inadequate for metal mines employing specialized processes such as in-situ leaching, this study focuses on China's dominant in-situ leaching uranium mines and proposes a safety governance framework termed "three-layer decoupling and bidirectional integration". This methodology systematically develops China's Safety Regulations for In-situ Leaching Uranium Mines and three sets of mandatory safety assessment templates by decoupling complex risks, process stages, and heterogeneous standards, and integrating on-site requirements with regulatory provisions. The innovations are reflected in: the first cross-industry transformation and process adaptation of safety standards from multiple fields such as geological exploration and chemical engineering pipelines; the use of numerical simulation technology to verify and optimize threshold values for key clauses concerning drilling stability and leakage diffusion; and the complete reconstruction of the safety assessment paradigm, establishing a "standard-evaluation" closed-loop management and control system deeply integrated with the regulations. The outcomes have been implemented as mandatory industry standards. Application data indicate that mine safety compliance inspection efficiency has improved by approximately 50%. The systematic construction method and the integrated "regulation-assessment-application" formed in this research provide a replicable solution for the safety governance of other metal mines using similar leaching processes.

Key words: in-situ leaching uranium; uranium mine; safety regulations; safety assessment; standard system; numerical simulation; mine safety