深部金属矿开采水害特征与致灾机理及防控对策*

杨柱[1,2],谢海军[1],滕龙[1,3],谢世平[1,2],徐磊[1,2],李阳明[1,2],刘帅洲[1,4],程易[1,3],雷煜[1,2]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012;
3.战略性稀有金属矿产高效开发国家技术创新中心, 湖南 长沙 410012;
4.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012)

摘要:随着金属矿山开采不断向千米以深延伸,水害赋存环境与致灾过程呈现高承压、弱富水、高应力-高水压耦合、水源多样、导水通道隐蔽以及灾变时效性显著等特征,传统以静态水文地质条件分析和被动排水为主的防治模式已难以满足深部安全开采需求。基于长沙矿山研究院有限责任公司长期开展金属矿山水害防治研究与工程实践的成果,从水害特征、致灾机理、防控技术及地下水安全协同治理4个方面进行了系统总结。首先,从水源、导水通道和致灾模式等维度梳理深部金属矿水害类型及其基本特征;其次,从地质构造控水、高应力-高水压作用下的岩体损伤-渗流耦合以及热-水-力-化学多场耦合3个层面,阐释深部水害的孕育、触发与演化机制;最后,总结了水文地质精细探查、突水危险性评价、帷幕注浆、强动水通道封堵、控制疏干、淹井治理及多源信息监测预警等关键技术,构建"精细探查-风险评价-工程治理-监测预警"闭环防控体系。研究可为深部金属矿山水害防控由单一灾害治理向安全开采、地下水资源利用与生态环境保护协同发展提供理论依据和工程参考。

关键词:深部金属矿;水害特征;致灾机理;矿山水害防控;地面帷幕;近矿体帷幕

中图分类号:TD745 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)09-0036-17

Characteristics and Disaster-Causing Mechanism of Water Hazard in Deep Metal Mining and Its Prevention and Control Countermeasures

Yang Zhu[1,2], *Xie Haijun*[1], *Teng Long*[1,3], *Xie Shiping*[1,2], *Xu Lei*[1,2], *Li Yangming*[1,2], *Liu Shuaizhou*[1,4], *Cheng Yi*[1,3], *Lei yu*[1,2]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.State Key Laboratory of Safety Technology of Metal Mines, Changsha, Hunan 410012, China;
3.National Technological Innovation Center for Efficient Development of Strategic Rare Metal Mineral Resources, Changsha, Hunan 410012, China;
4.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: As metal mining extends to depths greater than 1 000 m, the water hazard occurrence environment and disaster-causing process exhibit characteristics such as high confined pressure coexisting with weak water yield, high stress-high water pressure coupling, diverse water sources, concealed water-conducting channels, and significant time-dependent disaster evolution. The traditional prevention and control mode, which is dominated by static hydrogeological condition analysis and passive drainage, can no longer meet the requirements of safe deep mining. Based on the long-term research and engineering practice achievements of Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd in mine water hazard prevention and control, this paper systematically summarized four aspects: water hazard characteristics, disaster-causing mechanisms, prevention and control technologies, and coordinated groundwater safety management. Firstly, the types and basic characteristics of water hazards in deep metal mines were sorted out from the dimensions of water sources, water-conducting channels, and disaster-causing modes. Secondly, the mechanisms of initiation, triggering, and evolution of deep water hazards were elucidated from

* **收稿日期**:2026-07-22
基金项目:中国五矿集团有限公司全国重点实验室专项资金项目(2024GZKJ01);京津冀环境综合治理国家科技重大专项(2026ZD1210200)
作者简介:杨柱(1982—),男,湖南长沙人,硕士,正高级工程师,研究方向为矿山水害防治与水环境保护。E-mail:yangzhucug@163.com
通信作者:滕龙(1994—),男,湖北恩施人,硕士,工程师,研究方向为矿山水害防治与水环境保护。E-mail:tenglongcky@163.com

three levels: geological structure-controlled water, rock mass damage-seepage coupling under high stress-high water pressure, and thermal-hydraulic-mechanical-chemical multi-field coupling. Finally, key technologies such as fine hydrogeological exploration, water inrush risk assessment, curtain grouting, sealing of strong dynamic water channels, controlled dewatering, flooded shaft treatment, and multi-source information monitoring and early warning were summarized. A closed-loop prevention and control system of "fine exploration-risk assessment-engineering treatment-monitoring and early warning" was constructed. The research can provide a theoretical basis and engineering reference for the collaborative development of deep metal mine water hazard prevention and control from single disaster treatment to safe mining, groundwater resource utilization, and ecological environment protection.

Key words: Deep metal mine, Water-hazard characteristic, Disaster-causing mechanism, Prevention and control of mine water hazard, Ground curtain, Near-orebody curtain

0 引言

金属矿产资源是国民经济发展的重要物质基础,经过数十年的高强度开采,我国浅部金属矿产资源已日趋枯竭,大部分矿山进入深部开采阶段。统计显示,全球超 1 000 m 深井矿山近 300 座,最大采深超 4 000 m;我国已有 100 余座金属矿采深超过 1 000 m,正在建设的最深矿井三山岛金矿已突破 2 000 m[1]。深部金属资源的规模化开发,对于保障国家战略性矿产资源供给安全、维持矿业经济的可持续发展,具有重要的战略意义。

深部开采面临高地应力、高地温、高渗透压等复杂地质环境,其中水害是威胁深部金属矿安全生产的主要灾害之一。埋深增大伴随着地应力急剧攀升与含水层水压的线性增长,使瑞海金矿、纱岭金矿、马城铁矿、凡口铅锌矿等一批典型深部矿山,均不同程度受制于水害威胁,安全达产进程严重受阻[2]。导水断层的非均质导水性、岩溶裂隙空间展布的不确定性,使深部突水事件呈现出强非线性与高动态性的本质特征;在高地应力主导的力学环境下,岩体渗透特性处于持续动态调整之中,依赖静水压力假设的传统水文地质模型已难以胜任深部条件下的涌水行为描述,深部开采呈现明显的"高水压高水温构造出水""小裂隙滞后出大水""突水突泥链式耦合反应"等特征。近年来,国内外研究者在深部水害防控方面取得了大量创新性成果:三维地震勘探与广域电磁法等物探手段的突破,显著提升了对深部含水构造的空间辨识能力[3];高应力-渗流耦合理论的发展,为描述深部动态渗流场提供了力学基础[4];新型注浆材料及其配套工艺的开发,使深部堵水效率获得实质性提升[5]。但现有研究多针对特定矿区的水害展开,尚未形成针对深部特殊赋存环境的系统化水害防控理论与技术体系,本文基于长沙矿山研究院有限责任公司防治水技术团队数十年金属矿水害防控的工程实践积累,系统梳理深部金属矿水害的类型与特征,阐明不同控制要素下的深部水害致灾机理,总结深部开采条件的水害防控关键技术,并结合工程案例验证技术成效,以期为我国深部金属矿安全开采的水害防控与水环境保护提供支撑。

1 深部金属矿水害特征

深部金属矿水害区别于浅部或煤矿水害的根本原因,在于金属矿床具有独特的矿体赋存形态、围岩岩性组合与水文地质结构(见图 1)。金属矿体多呈脉状、透镜状或不规则状产出,围岩主要由岩浆岩、变质岩及碳酸盐岩构成,地下水含水介质受断裂、裂隙及岩溶构造控制,通常呈现明显的非层状和非均质展布特征[2,6]。上述地质背景共同决定了深部金属矿水害在突水水源、突水通道、灾变过程、动力耦合及环境效应等方面具有显著的特殊性与复杂性。

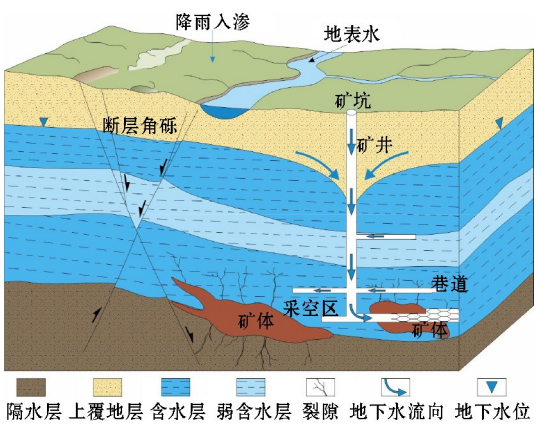


图 1 典型深部金属矿水文地质结构

Fig.1 Hydrogeological structure of a typical deep metal mine

1.1 水源类型复杂

深部金属矿水害的水源类型主要包括基岩裂隙水、岩溶水、老空区积水和断层水四类,主要以裂隙、

构造出水为主,特别是矽卡岩型金属矿床因赋存于岩溶发育的碳酸盐岩接触带,水害威胁尤为突出[6]。表 1 汇总了我国典型深部金属矿山主要充水水源及防治水对策。

随着开采深度增加,深部含水介质在高地应力和高水压作用下通常处于低渗透、相对封闭状态,整体表现为“高水压、弱富水”,但弱富水并不意味着水害威胁降低。采掘活动引起的应力卸荷与差应力增长可促使闭合裂隙重新张开、扩展并相互贯通,高孔隙水压又通过降低裂隙面有效法向应力促进损伤演化,使岩体渗透性在裂纹加速扩展和宏观破裂阶段出现数量级跃增。北山花岗岩三轴渗流试验表明,岩样渗透率在裂隙压密阶段降低、弹性阶段基本稳定,而在裂纹扩展至破坏阶段显著增大,最高增加两个以上数量级[7];稻田花岗岩加载至破坏后的渗透率较同一围压下的完整岩样高约 2～3 个数量级[8]。深部花岗岩地下工程现场测试表明,开挖扰动带水力传导系数可由原岩的 1×10^{-11}～1×10^{-10} m/s 增至约 10^{-8} m/s,进一步验证了采动卸荷和裂隙贯通引起的显著增渗效应[9]。

表 1 我国典型深部金属矿充水水源及防治水对策

Table 1 Water filling sources and water prevention and control countermeasures of typical deep metal mines in China

矿山名称	最大采深/m	主要充水水源	预测最大涌水量/(m^3/d)	主要防治水方法
云南会泽铅锌矿	≥1 500	岩溶裂隙水多含水层、断层水,高承压突水	≥20 000	控制疏干+隔水层保护矿柱留设+监测预警
山东三山岛金矿	≥1 200	海水入侵、基岩裂隙水、断层水	≥20 000	超前探水预注浆+防水矿岩柱+疏干排水+多元监测预警
山东瑞海金矿	≥1 780	断层破碎带细裂隙水	≥11 000	地表防治水+留设护顶防水矿柱+超前探水预注浆+疏干降水+多元监测预警
山东纱岭金矿	≥1 400	基岩构造裂隙水	≥45 000	超前探水预注浆+控制疏干+断裂构造探查及局部注浆+多元监测预警
福建马坑铁矿	≥850	岩溶水、断层破碎带水、地表水入渗	≥55 000	超前探水预注浆+地表截流+控制疏干+多元监测预警
河北马城铁矿	≥1 100	第四系含水层越流补给、断层水,高承压裂隙突水	≥70 000	近矿体帷幕注浆+强化排水+突水预警+断层保护矿柱
广东凡口铅锌矿	≥900	强岩溶水(主要),断层水、大气降水入渗	≥69 000	浅部截流疏干+帷幕注浆截水+排洪疏浚+治塌防渗
安徽安庆铜矿	≥1 000	基岩裂隙水、岩溶水、矽卡岩接触带水	≥49 500	超前探水注浆+局部近矿体帷幕+实时监测
湖南黄沙坪多金属矿	≥956	裂隙水、断层破碎带水、岩溶水	≥18 500	塌陷回填+河道防渗+地面局部帷幕

1.2 突水通道隐蔽性强,探测难度大

突水通道的隐蔽性强与探测难度大构成深部金属矿水害的另一显著特征[10]。突水通道主要包括采动裂隙、断层活化带、岩溶管道及封闭不良钻孔等类型[11],其空间展布隐蔽、连通性动态变化,导致突水预测和治理难度显著增加。深部高地应力对突水通道的控制作用尤为显著:高地应力使天然裂隙维持于“临界闭合”状态,采掘扰动引发的应力重分布可迅速打破临界平衡,驱动裂隙瞬间张开贯通。周子龙[12]从深部异构环境视角揭示了“应力扰动-裂隙激活-水害触发”的过程机制,表明即使前期探水工作较为充分,仍难以完全排除遭遇未查明导水构造的风险。

1.3 时效依赖性显著

深井突水过程通常呈现“孕育期—触发期—爆发期—衰减稳定期”四阶段演化特征。虽因不同矿山的水文地质工程地质条件、采掘扰动强度、事故规模及监测时间尺度存在差异,难以设置统一的绝对判别阈值,但可根据涌水量变化率及曲线拐点,对深井突水演化过程进行概化。由图 2 至图 4 可知,马城铁矿、毛坪铅锌矿与纱岭金矿 3 次突水事故均印证了这一特征。

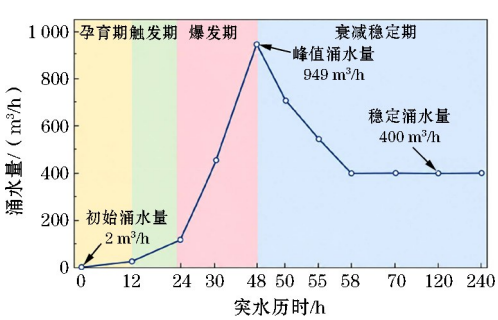


图 2 马城铁矿 2019 年风井石门巷突水事故涌水量变化曲线

Fig.2 Variation curve of water inflow during the 2019 water-inrush accident in the ventilation-shaft crosscut of Macheng Iron Mine

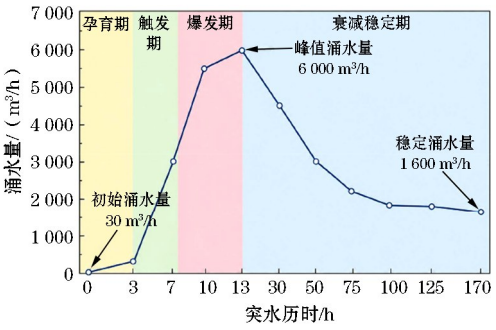


图 3 毛坪铅锌矿 2019 年 430 m 中段突水事故涌水量变化曲线

Fig.3 Variation curve of water inflow during the 2019 water-inrush accident at the 430 m level of Maoping Lead-Zinc Mine

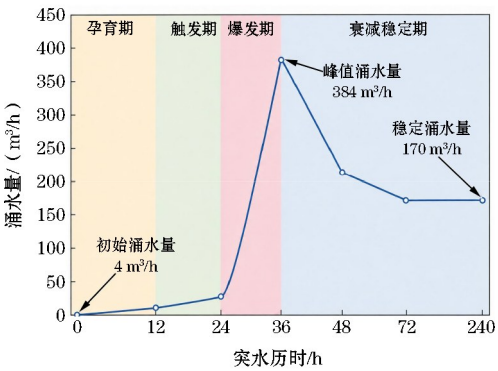


图 4 纱岭金矿 2023 年主井－1 465 m 中段突水事故涌水量变化曲线

Fig.4 Variation curve of water inflow during the 2023 water-inrush accident at the －1 465 m level of the main shaft in Shaling Gold Mine

(1) 孕育期。采掘活动使隔水层逐渐逼近失稳临界状态,微裂隙扩展但尚未形成贯穿性导水通道。

(2) 触发期。隔水层在爆破振动或应力集中触发下突然破坏,初始水量通常较小,但随裂隙冲刷扩展水量迅速增大。

(3) 爆发期。导水通道在高水压驱动下快速扩宽,水量呈指数增长至峰值,此阶段破坏力最大。

(4) 衰减稳定期。随含水层水头降低、导水通道逐渐稳定,涌水量逐渐衰减并趋于稳定。

这一现象的根本原因是深部岩体的渗透行为并非由瞬时应力状态单一决定,时间因素在其中扮演着不可忽略的角色。在长期高水压浸泡下,岩石经水化软化、矿物溶蚀扩容与应力腐蚀等多重时效劣化过程,岩体强度持续衰减、渗透性渐趋增大,采动扰动引起的应力调整进一步驱使围岩裂隙网络渐进式演化。初始小水量阶段是灾害防控的关键窗口期,但当前金属矿山普遍缺乏针对该阶段的实时监测和智能判识能力。

1.4 水害与动力灾害耦合

水害与岩爆等动力灾害的强耦合性构成深部金属矿最具威胁的复合型灾害模式[13]。耦合机制体现在 3 个层面:渗透弱化效应,高承压水通过降低结构面有效应力使岩体强度劣化,增大动力灾害概率;应力扰动效应,采掘瞬态应力波可导致孔隙水压力瞬间升高,进一步弱化岩体结构;时效叠加效应,深部岩体在长期高应力与高水压共同作用下损伤累积,结构面逐渐扩展贯通。三类效应相互放大,形成“应力－渗流”正反馈回路,使单一灾害可能级联演化为复合灾变。

1.5 注浆封堵难度大

深部高水压环境使注浆堵水面临多方面的工程障碍:高围压条件下岩体裂隙开度极小(多数小于 0.1 mm),常规水泥基浆液因颗粒粒径远超裂隙开度而难以有效注入扩散;高地应力－灌浆压力－水压力三重叠加效应使浆液有效扩散半径远小于浅部条件;高强度岩体中浆液与裂隙面的黏结强度能否长期抵抗高压水头持续作用,构成帷幕体长期稳定性的关键不确定因素[14]。多重因素叠加,致使马城铁矿、纱岭金矿等国内水文地质条件复杂的深井矿山建设周期延长。

1.6 环境效应的不可逆性风险

深部金属矿水害的环境负效应显著且修复困难[15]。传统长期大流量疏干排水引发的生态环境问题日益突出,统计数据显示,每开采 1 万 t 金属矿石产生的排水量可达 2.5 万～4 万 m^3,导致矿区周边地下水位下降速率达 1～3 m/a。由此引发的泉水干涸、地表河流基流量锐减乃至断流、岩溶地面塌陷频发等环境地质问题,其恢复周期往往以数十年计,部分生态环境影响甚至难以完全逆转。凡口铅锌矿最大涌水量达 69 000 m^3/d,逾 50 a 开采疏干形成了半径 2 900 m、深 110 m、面积 7.75 km^2 的疏干漏斗[11]。

基于上述特征,本文总结了我国深部金属矿主要水害类型及其因深部开采带来的特殊性,详见表 2。

表 2 深部金属矿水害类型及深部开采特殊性

Table 2 Water-hazard types and the particularties of deep mining in deep metal mines

分类依据	水害类型	主要特征	深部开采特殊性
按水源类型	含水层充水	孔隙、裂隙及岩溶含水层在开采扰动下向井巷系统充水	岩溶含水层富水性强,深部开采条件下突水风险尤为显著
	断层/构造带导水	断裂带兼具储水空间与导水通道功能,沟通不同含水层或地表水体	深部断层活动性增强,导水性随时间发生显著变化
	老空水突水	历史采空区积水突然涌入作业空间,突发性强、前兆不明显	上部水平老空水沿导水裂隙带向深部运移,致灾机理复杂
按致灾通道类型	采矿扰动裂隙通道	卸荷、拉伸及剪切裂隙相互连通,形成空间导水网络	深部高应力环境促使裂隙扩展范围与深度显著增大
	断层/构造裂隙通道	张性断层导水性强,压性断层导水性弱,力学性质决定导水能力	高应力条件下断层可重新活化,导水性能发生根本性改变
	岩溶管道/溶蚀通道	碳酸盐岩区古岩溶、深部岩溶及构造-岩溶复合通道系统	深部岩溶受构造控制,沿断裂带及层间剪切带定向发育
按致灾模式	瞬时突发型	短时间内突水量急剧增大,与大型导水通道瞬间贯通直接相关	破坏性强,易造成淹井等重大事故,预警时间极短
	渐变加剧型	涌水量随开采进程逐步增加,与裂隙网络渐进扩展或注浆帷幕老化有关	发展相对缓慢,为应急响应与治理提供一定时间窗口
	复合叠加型	多种水源与多条通道同时或交替作用,形成复杂突水模式	深部多含水层系统与复杂构造条件叠加,防治难度最大

2 深部金属矿水害致灾机理

深部金属矿水害的孕育与触发,是采矿扰动作用下地质结构、应力、渗流、温度及水-岩化学过程耦合演化的结果。高地应力、高水压和高地温环境使其致灾过程表现出显著的非线性与动态性,传统单一力学或渗流分析方法难以全面表征其演化规律。基于深部金属矿水害的主要控制因素,本文从地质构造控水、高应力-高水压作用下的岩体损伤-渗流耦合及多物理场耦合 3 个层面分析其致灾机理。

2.1 地质构造控水机理

断裂构造是深部金属矿水害的首要控水因素,断裂带的导水性能受到其力学成因类型、空间延伸规模、充填物岩性与胶结程度以及采矿扰动等因素的共同制约[16]。褶皱构造通过控制地层几何形态和伴生裂隙的空间发育规律,间接影响矿山水害的分布格局。其中张性断裂和断裂交汇带构成的导水通道最具危险性;褶皱构造通过背斜轴部的张裂隙带和向斜核部的汇聚效应间接控制地下水运移。断层活化突水往往由于采动应力触发引起断层两盘相对位移、带内物质剪切滑移,导水性增强后与含水层沟通即发生突水[17]。2019 年 4 月 3 日,马城铁矿 3# 回风井-900 m 水平石门巷道 364 m 出现突水,实测涌水量为 393 m^3/h,出水点为裂隙破碎带,初步判断受 F2 断层影响,为 F2 断裂带次生构造(见图 5)。强排后,因坍塌冲积物较少,在距离出水点 6 m 处施工止浆墙封堵,并进行了采空区注浆填充。

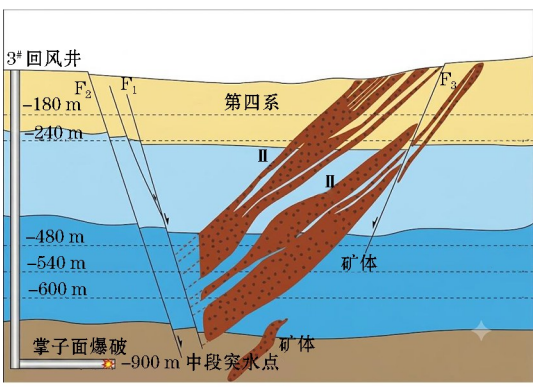


图 5 马城铁矿 3# 回风井-900 m 水平突水点位置

Fig.5 Location of the water-inrush point at the -900 m level of No. 3 return-air shaft in Macheng Iron Mine

深部断层构造导通岩溶水的问题更为复杂,岩溶管道内水流速度快、水头损失小,揭露后高动能水流迅速扩大突水口;岩溶塌陷柱内充填物在高压水流冲刷下被携出,形成水量大、持续时间长的“管涌式”突水(见图 6)。深部岩溶呈现三重特征:构造控制性,岩溶优先沿断裂带、层间剪切滑脱面等构造界面发育,裂隙连通性随采动卸荷动态演化,增加突水预测的时空不确定性;垂向分层性,岩溶在岩性界面处密集发育,构成主要赋存与运移空间;深部滞留性,一旦突水涌量难以迅速衰减,防治代价极高。

以毛坪铅锌矿为例,2019 年 3 月 2 日,430 m 中段 112 线配电硐室掘进放炮时,掌子面开始涌水,初始水量 30 m^3/h,随后迅速激增至 6 000 m^3/h,远超该中段排水能力。突水原因是 F16、F20 等断层破坏了二叠系梁山组砂页岩隔水层,直接沟通了二叠

系栖霞茅口组灰岩岩溶含水层，高压水沿断层带涌入采掘空间，该案例充分揭示了岩溶含水系统在深部矿山水害中的水源作用。

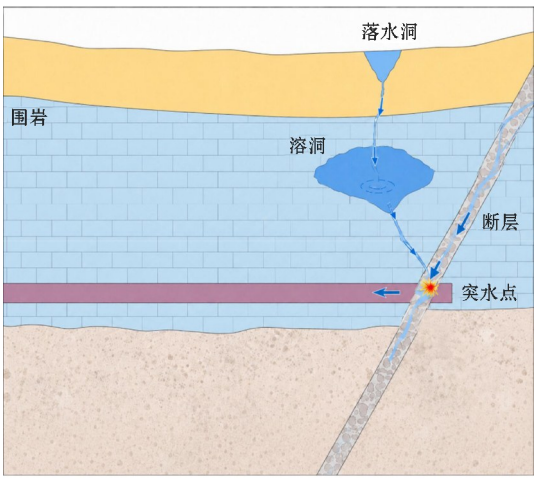


图 6　深部岩溶-断层复合导水突水模式

Fig.6　Model of water-inrush through a deep karst-fault composite water-conducting

2.2　岩体损伤-渗流耦合致灾机理

深部开采过程中，采掘工作面的推进引发围岩应力场的重分布，围岩经历复杂的应力路径变化发生渐进式的损伤累积。损伤演化与渗流行为之间存在强烈的双向耦合效应，损伤累积改变岩体的孔隙结构和渗透系数，而渗流场的变化又通过有效应力的调整反馈影响损伤演化进程[18]。这种耦合机制是深部突水灾害孕育与触发的重要动力学基础。

在未受明显扰动时，深部裂隙介质多处于低渗透和相对封闭状态。采动扰动打破原有应力-渗流平衡后，闭合裂隙可能迅速张开并逐步贯通，促使岩体弹性能与地下水压力能集中释放，形成“低渗透、高储能、快释放”的灾变演化模式。与此同时，高压裂隙水通过降低裂隙面的有效法向应力，进一步促进裂隙扩展与导水网络形成，从而构成损伤加剧与渗流增强相互促进的正反馈过程。

岩体损伤演化可辨识为 4 个阶段：阶段Ⅰ(微裂隙压密期)原生裂隙闭合；阶段Ⅱ(微裂隙萌生期)渗透性由降转升，但尚未形成宏观导水网络；阶段Ⅲ(加速扩展与贯通期)应力达峰值强度 60%～80%后，渗透系数数量级跃升，为突水孕育的关键窗口期；阶段Ⅳ(宏观破裂期)裂隙网络贯通后渗透系数阶跃增长[17]。

采动应力重分布从 3 个层次改变渗流场：一是采空区周边环形应力集中带驱动裂隙扩展，形成高渗透扰动区；二是围岩径向应力卸除后，松动圈内裂隙逐渐张开并扩展，深部条件下厚度可达 3～5 m；三是顶板导水裂隙带一旦穿透隔水层沟通上部含水层，大规模突水将难以通过常规排水控制。

2011 年 7 月 10 日，山东省潍坊市东盘马埠铁矿违规开采露天矿坑底部的保安矿柱，导致保安矿柱遭到严重破坏，加之矿山非法向露天矿坑内排放尾砂，连续降雨和井下爆破振动的叠加影响，最终引发保安矿柱垮塌(见图 7)，约 6 万 m^3 的水砂涌入井下，造成严重后果。

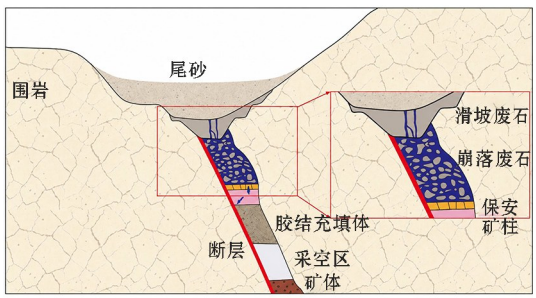


图 7　东盘马埠铁矿采掘扰动突水示意

Fig.7　Schematic of mining-disturbance-induced water-inrush at Dongpan Mabu Iron Mine

2.3　多物理场耦合致灾机理

深部开采过程中，温度场、渗流场、应力场与化学场的交叉耦合成为水害的控制性变量，其致灾机理如图 8 所示。多场耦合通过 3 条路径推动水害发展：

(1) 渗透性动态增大，增渗效应(损伤、溶蚀)在高温-高水压-高应力环境下占主导，渗透性随扰动累积渐进增大；

(2) 隔水层阻水能力持续衰减，水-岩化学作用可降低岩体的黏聚力和内摩擦角，热应力增加裂隙扩展驱动力，高水压削弱裂隙摩擦阻力；

(3) 前兆信息多尺度混杂，水化学变化以月至年尺度渐进，微震活动呈小时至天级间歇性群聚，涌水量可在数分钟至数小时内骤增，前兆信号的非线性与非稳态特征使单一指标预报失效，需要建立多源信息融合水害预警方法。

2023 年 6 月，纱岭金矿主井－1 465 m 皮带运输平巷掘进工作面发生突水事故，初始涌水合计约 7～9 m^3/h，爆破扰动 12 h 后突水量达到 384 m^3/h，巷道内积水水温测得约 45 ℃，事故未造成人员伤亡，但矿山历经 16 个月通过多级排水及注浆才将主井及－1 465 m 巷道恢复。

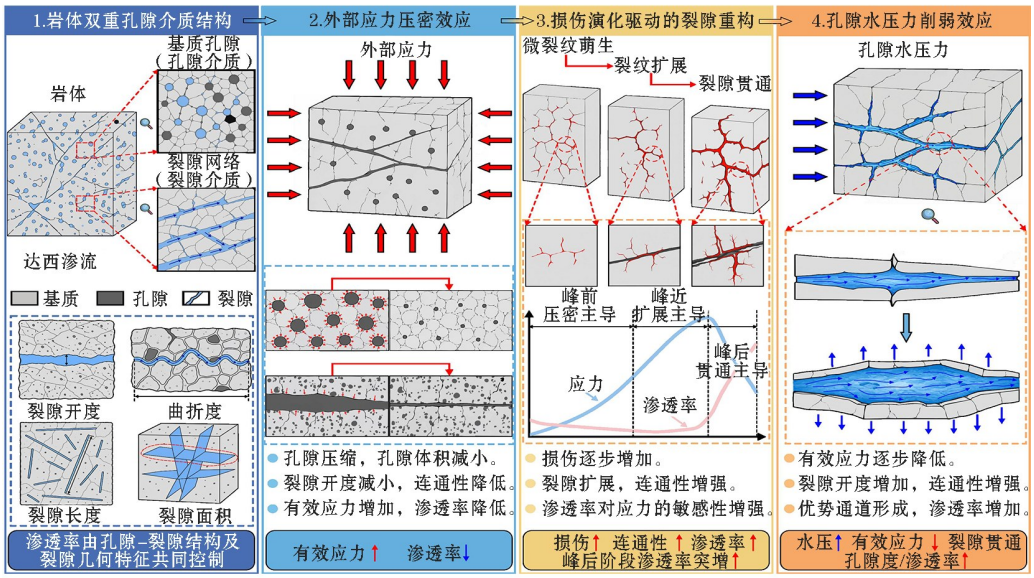


图 8　水-热-损伤耦合作用下致灾机理

Fig.8　Disaster-causing mechanism under coupled water-heat-damage effects

3　深部金属矿水害防控关键技术

深部金属矿水害受复杂水文地质条件、采动扰动与多场耦合作用共同影响，单一技术手段难以实现系统性防控。因此，有必要将水文地质精细探查、突水危险性评价、水害治理及监测预警等关键技术有机衔接，构建以“查-评-治-监”为主线的多技术协同闭环防控体系，如图 9 所示。长沙矿山研究院有限责任公司自 1961 年成立注浆研究课题组以来，持续开展非煤矿山水害防治技术攻关与工程实践，形成了覆盖探查、评价、治理与监测预警的全链条技术体系，累计完成 100 余座大水矿山防治水工程。

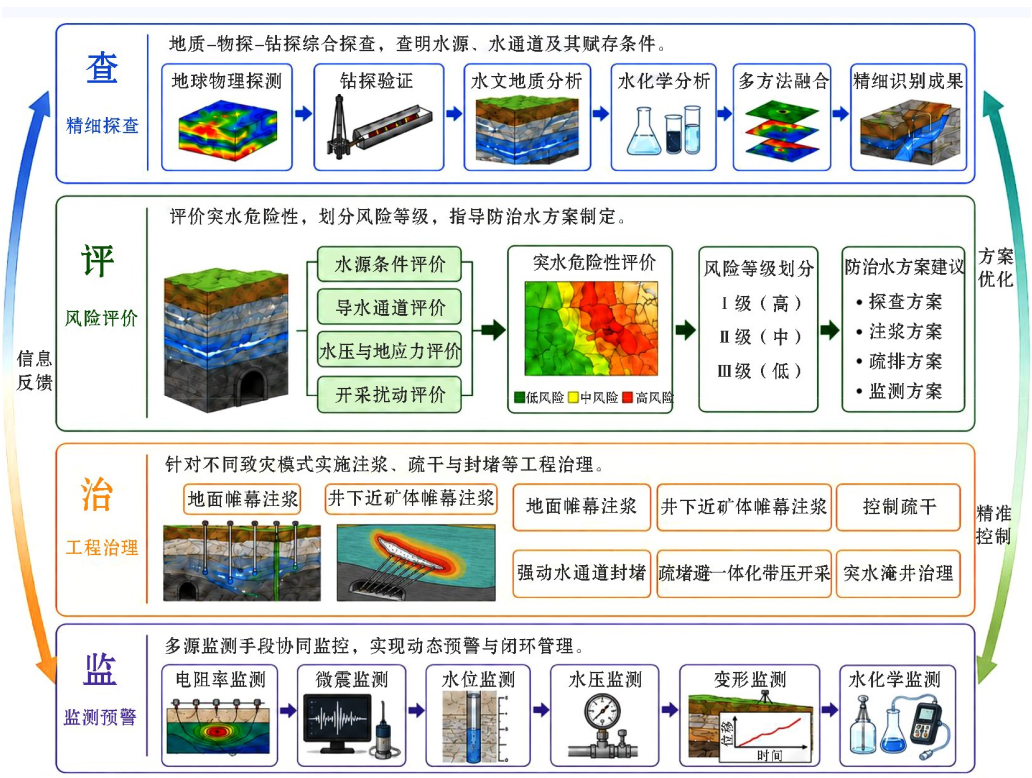


图 9　深部金属矿水害“查-评-治-监”闭环防控技术体系

Fig.9　Closed-loop prevention and control technology system of “exploration-assessment-treatment-monitoring” for water-hazard in deep metal mines

3.1 水文地质精细探查技术

深部金属矿水文地质精细探查的核心任务是识别突水水源、查明隐伏导水通道并刻画地下水系统的三维结构。针对深部探测对象埋藏深、构造复杂和单一方法多解性强等问题,相关技术正由单一物探向地面-井下联合探测、水化学示踪及三维建模综合约束方向发展。

3.1.1 地面地球物理探查技术

在地面物探方面,瞬变电磁法(Transient Electromagnetic Methods, TEM)对低阻异常体具有较强的识别能力,大功率发射与阵列式观测技术显著提高了探测深度与横向分辨率;音频大地电磁法(Audio Magnetotelluric Sounding, AMT)可用于深部岩溶发育区与构造破碎带探测。天然电场选频法轻便快捷、无需供电,适合浅部(<500 m)复杂场地的快速扫描;EH4 音频大地电磁测深法探测深度大(800~1 000 m)、分辨率高,能穿透高阻层并灵敏识别断裂带,抗干扰能力强,二者在深度和作业效率上优势互补,实现从浅层普查到深层精细探测的有机衔接,二者联合应用,可为导水通道识别和注浆钻孔布设提供依据[19-20]。容玲聪[21]较早开展了五极纵轴测深技术在非煤矿山水害防治中的应用研究,在凡口铅锌矿帷幕、新桥四房污水库、大志山矿帷幕等工程中,导水构造探测准确率和探测精度可满足防治水工程设计需求。

3.1.2 井下工作面超前探测技术

在井下超前物探方面,长沙矿山研究院有限责任公司针对磁铁矿山巷道水害超前探测,集成瞬变电磁法、隧道地震波预报法与钻孔地质雷达等方法,形成了综合超前探测技术体系,可用于识别掘进工作面前方断层破碎带及次级裂隙富水区[22]。钻孔激发极化法、钻孔电磁波层析成像与钻孔雷达等孔中物探技术,可利用有限钻孔条件对孔壁周围及孔底前方地层进行探测,缓解掘进施工与超前探放水之间的时空矛盾。

3.1.3 地下水化学示踪技术

水化学与同位素示踪可为突水水源判别提供地球化学约束。稳定同位素($\delta^{18}O$、δD)与放射性同位素(^{3}H、^{14}C)示踪相结合,可用于识别地下水补给来源、循环条件及停留时间;在多水源混合条件下,结合端元混合模型进一步估算不同水源贡献率。这类方法与物探、钻探结果相互印证,可从空间异常、水力联系与水源属性 3 个层面共同约束突水水源和导水通道。

3.1.4 矿区地下水三维数值模型

三维水文地质建模是多源探查成果综合表达的重要方式。长沙矿山研究院有限责任公司早在 20 世纪 90 年代初即开展三维地质建模技术在矿山的应用研究。李阳明等[23]基于 3DMine 矿业工程软件构建了莱新铁矿防治水分析应用模型,模型包括三维地质模型、矿体模型、巷道模型和钻孔涌水模型,实现了井下近矿体帷幕工程的三维可视化表达,为矿床水文地质条件分析和防治水工程设计提供了直观平台。

总而言之,地面物探用于圈定矿区尺度的含水构造异常,井下及孔中物探用于精细定位导水通道,水化学与同位素示踪可辅助判别突水水源,三维建模则实现多源探查成果的空间集成。鉴于单一方法易受信号衰减和地质多解性影响,应加强地面-井下-钻孔多尺度信息融合,并结合钻探和长期监测进行验证。

3.2 深井突水危险性评价技术

深部矿山高地应力、高水压、高地温及强采动扰动并存,突水风险随采掘工程推进动态演化,传统静态评价方法难以准确反映其时空变化。因此,深井突水危险性评价正向多因素综合分析、多源信息融合和动态评估方向发展。

在多因素综合评价方面,层次分析法-熵权法(Analytic Hierarchy Process-Entropy Weight Method, AHP-EWM)综合赋权模型考虑了采掘结构、含水层与隔水层水力特性及矿山防灾能力等指标,并可依托 ArcGIS 实现突水危险性分区[24]。杨柱等[25]引入博弈论组合赋权思路,采用 DEMATEL-AHP 对熵权结果进行校正,建立了综合考虑自然地质条件、采动扰动及帷幕注浆效果,并适用于不同采掘阶段的动态评价模型,在一定程度上平衡了单一主观赋权或客观赋权可能产生的偏差。

在涌水量预测与数值模拟评价方面,长沙矿山研究院有限责任公司形成了解析法、数值模拟法与比拟法相结合的多方法预测体系。王亮等[26]针对山东莱新铁矿水文地质条件复杂的特征,采用 Q-P 曲线外推法和解析法进行了矿坑涌水量预测,经对比分析验证了预测结果的可靠性。张大永等[27]以某大水铁矿二期工程为对象,基于一期帷幕注浆堵水率和矿床水文地质条件,预测帷幕工程实施后的矿坑涌水量,为二期工程防治水设计提供了依据。徐磊[28]则针对井下近矿体注浆帷幕改造后的水文

地质条件变化,基于改良 k 值计算方法重新预测矿坑涌水量,体现了帷幕治理后水文参数再识别和涌水量再评价的重要性。在地下水数值模拟方面,容玲聪等[29]利用 MODFLOW 三维地下水数值模拟软件设计城门山铜矿疏干系统,通过模拟不同疏干孔位置、深度、数量及单孔疏干水量,优化了疏干系统布置。徐磊等[30]基于 Visual MODFLOW 开展某铜矿露天边坡复合衬垫隔障式防渗墙方案研究,对防渗墙长期堵水效果进行百年尺度模拟评价,为露天边坡渗漏治理方案比选提供了依据。赵恰等[31]针对断层防水矿柱合理留设问题,基于流-固耦合原理,利用 Phase2 建立数值模型,分析防水矿柱厚度对局部地下水渗流场及断层围岩变形破坏特征的影响,并结合经验公式确定合理矿柱厚度。上述研究表明,数值模拟已由单纯涌水量预测工具,逐步发展为疏干系统优化、帷幕效果评价、防渗墙方案比选和防水矿柱设计的重要技术手段[32-34]。

多因素评价能够识别突水危险区,涌水量预测可为排水系统和治理工程设计提供水量依据,数值模拟则有助于分析不同开采与防治方案下地下水系统的响应。但评价结果仍受指标选取、水文参数不确定性及构造概化误差影响,后续应加强监测数据动态反演与模型持续校正,提高评价和预测结果的可靠性。

3.3 水害治理技术

水害治理是深部金属矿水害防控体系的核心环节。长沙矿山研究院有限责任公司围绕不同矿床类型和水害模式,形成了地面帷幕注浆、井下近矿体帷幕注浆、控制疏干、疏堵避一体化带压开采和突水淹井治理等技术体系[35]。

3.3.1 注浆材料与浆液扩散理论

在注浆材料与浆液扩散理论方面,容玲聪等[36]围绕矿山帷幕注浆材料开展了一系列研究,其研发的新型粉煤灰注浆材料具有较好的结石率、抗渗性和经济性,为工业固废资源化利用和低成本注浆材料开发提供了技术路径;对新桥矿帷幕工程结石体芯样的试验表明,改性黏土浆结石体在相应条件下可达到与普通水泥浆相近的强度水平[37]。杨柱等[5]研发的改性聚氨酯快速注浆堵水材料具有凝结快、膨胀性强等特点,适用于突发涌水和局部裂隙快速封堵。刘帅洲[38]开展超高水注浆堵水材料应用试验,进一步丰富了适用于富水裂隙和空隙封堵的新型材料类型。

在浆液扩散理论方面,郑长成等[39]将时变性浆液视为流变参数随时间变化的宾汉流体,建立了裂隙径向扩散锋面运移模型,揭示了裂隙开度、倾角及注浆压力对扩散距离、耗浆量和注浆时间的影响。黄炳仁[40]针对大水矿床注浆防水帷幕厚度确定问题,建立了基于水力梯度和浆液结石体强度的帷幕厚度计算方法。陈勤树[41]则基于含水层与帷幕渗透系数差异,建立了帷幕渗漏量简化计算方法。上述研究推动注浆工程由经验施工逐步向材料性能、浆液扩散和帷幕参数协同设计转变。

不同注浆材料在流动性、凝结时间、早期强度、耐久性和成本等方面各具特点,应根据裂隙尺度、水流条件及治理目标合理选择。现有扩散模型多基于规则裂隙和理想流变条件,难以充分反映深部高应力、强动水及复杂裂隙网络中的浆液运移过程,后续应加强材料性能演化、裂隙变形与浆液扩散耦合研究,并结合现场监测对模型参数进行校正。

3.3.2 地面帷幕注浆与强动水通道封堵

我国金属矿山帷幕注浆截流技术起步于 20 世纪 60 年代末。水口山铅锌矿鸭公塘矿区较早开展注浆帷幕截流工程,采用地面与井下联合注浆工艺,有效降低了矿井涌水量并控制了塌陷区扩展。此后,相关技术逐步由常规裂隙注浆向复杂构造、岩溶强动水通道及微细裂隙综合治理方向发展。

针对岩溶强动水通道流速快、浆液易流失和封堵难度大等问题,学者们也开展了大量研究。杨柱等[42]围绕凡口铅锌矿岩溶强动水通道封堵难题,采用示踪试验和加密钻探查明待注岩溶通道特征及地下水流速,结合地下水动力学和渗流理论推导骨料在地下水运动条件下的投放参数,提出“投注骨料-注入快凝膨胀材料-双液浆-普通水泥浆加固”的四步动水注浆方案,如图 10 所示。该方案一次性封堵涌水量为 6 000 m^3/d 的强动水通道,使帷幕堵水率由 67%提高至 75%,年节省排水电费 698.16 万元。

在复杂大水矿床帷幕设计方面,杨柱等[43]针对黄屯硫铁矿火山岩裂隙发育、断裂导水性强等特点,提出地面帷幕注浆防治水方案,显著减少了矿坑涌水;在构造裂隙型大水矿床中,相关生产性试验表明,高压灌注水泥-黏土浆能够改善构造裂隙及部分微细裂隙的充填效果。朱承敏等[44-45]进一步总结了水泥-水玻璃双液浆的应用条件,指出其凝结时间可调、早期强度较高,适用于强动水通道的快速控流与初步封堵。

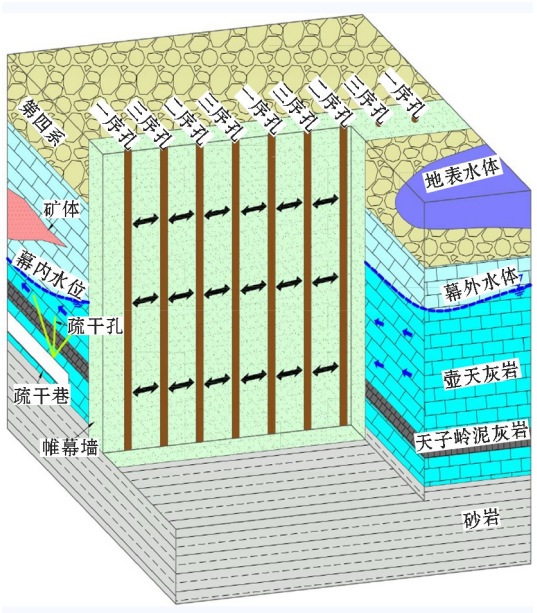


图 10　凡口铅锌矿帷幕注浆示意

Fig.10　Schematic of curtain grouting at Fankou Lead-Zinc Mine

总体来看，地面帷幕注浆已形成由异常探查、通道控流、分序注浆到质量检查的成套技术，可用于岩溶管道、构造破碎带及裂隙网络等不同类型导水通道治理。但其效果仍受通道探查精度、浆液抗水分散性能、扩散范围及帷幕长期耐久性影响，深部高水压条件下仍需加强注浆过程监测与帷幕服役状态评价。

3.3.3　井下近矿体帷幕注浆技术

井下近矿体帷幕注浆技术通过井下钻孔对矿体周边含水构造进行注浆改造，在矿体周围形成保护性隔水帷幕，实现采矿活动与含水层的有效隔离，如图 11 所示。相较于地面帷幕，该技术具有治理目标明确、钻孔距离短、工程量相对较小等优势，尤其适用于矿体与含水层空间关系紧密、地面帷幕布设困难或治理对象局部化的深部矿床。

在工程应用方面，徐磊等[46]研究了近矿体帷幕注浆在某大水矿山中的应用，围绕钻孔布置、注浆压力、浆液选择和堵水效果评价开展分析，工程实施后堵水率达到较高水平，取得了较好的经济、社会和环境效益。谢世平等[47]在龙塘沿铁矿首采段采用整体 25 m×20 m、局部 10 m×10 m 的钻孔网度和 30 m 帷幕厚度开展近矿体帷幕注浆，有效降低了首采段突水风险。相关研究还将该技术应用于高原矿山和深部高压含水层治理，表明其对复杂地形及局部强富水条件具有较好的适应性[48-49]。

在技术优化方面，杨柱等[50]针对安庆铜矿东马鞍山矿体岩溶发育不均、富水性和透水性强等问题，提出“分区治理＋局部近矿体帷幕注浆”方案，形成“探-注-检”的近矿体帷幕注浆技术路线。该技术在－580～－820 m 中段实施后，年涌水量明显降低，为复杂岩溶大水矿床深部开采提供了主动立体防控路径。此后，定向钻进、帷幕缺口修复、分段减压注浆及壁后引水注浆等技术进一步拓展了近矿体帷幕在薄弱区补强、深孔高压注浆和井筒涌水治理中的应用范围[51]。

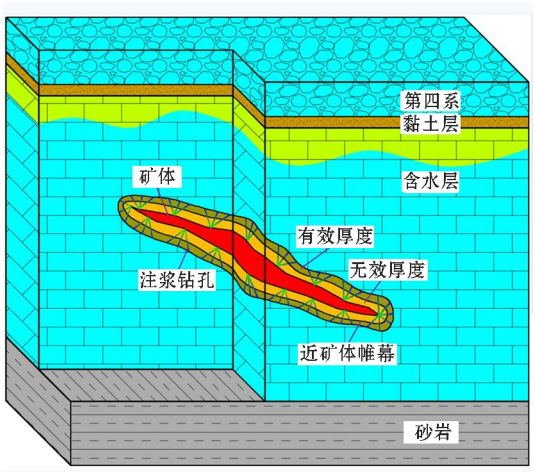


图 11　近矿体帷幕注浆及隔水层加固示意

Fig.11　Schematic of near-orebody curtain grouting and aquiclude reinforcement

总体来看，井下近矿体帷幕注浆实现了由大范围截流向局部精准治理的转变，能够兼顾堵水效果与工程经济性。但其治理效果仍取决于含水构造探查精度、钻孔轨迹控制、浆液扩散范围及帷幕连续性。后续应加强定向钻进、注浆参数动态调控和帷幕完整性监测，提高深部高水压条件下的治理可靠性。

3.3.4　控制疏干与带压开采技术

对于具备疏排条件的大水矿山，控制疏干是降低承压水头、缓解突水风险的重要措施，其核心是在查明含水层结构、补给条件及水力联系的基础上，通过疏水巷道或钻孔对目标含水层实施计划性降压，并根据水位、水量及采掘进度动态调整疏干强度，避免无序排水造成地下水资源损耗和生态环境影响。

孙茂贵等[52]针对姑山矿露天转地下基建开拓过程中探水孔单孔涌水量大的问题，在拟开拓区域布置超前截流疏干孔，降低了工作面水压和注浆施

工难度,并为后续疏干设计提供了水文参数。王亮等[53]则基于地下水数值模拟,对不同疏干孔布置和疏干强度下的矿坑涌水响应进行分析,为控制疏干方案优化提供了定量依据。

对于水文地质结构复杂、单一疏干或注浆难以满足安全开采要求的矿山,可采用疏干、堵水与避让相结合的综合治理模式。朱承敏等[54]针对白象山铁矿西部厚大矿体开采扰动导致水文地质结构时空演变的问题,提出疏干、堵水和避让相结合的综合防治水方案,体现了大水矿山防治水由单一治理向系统协同治理转变的趋势。王亮等[55]根据刚果(金)某铜钴矿“两层水”结构特征,采取疏干下部含水层、保留上部地下水的带压开采方案,在降低突水风险的同时兼顾地下水资源保护。

控制疏干适用于目标含水层边界较清楚、补给条件可控的矿山;疏堵避一体化更适用于多水源、多通道及水文地质结构复杂的矿床;带压开采则要求对隔水层稳定性、水压条件和采动影响进行充分评价。相关技术推动深部金属矿防治水由单纯“排水保安全”向“控水压、减涌水、保资源、稳开采”的协同治理模式转变。

3.3.5 突水淹井与巷道恢复治理技术

突水淹井是金属矿山最严重的水害事故形式之一,治理过程通常面临水量大、水压高、通道隐蔽、作业空间受限和应急时效性强等问题[56]。长沙矿山研究院有限责任公司在竖井、斜井、平巷和采区巷道淹井治理中积累了丰富经验,形成了水下抛碴注浆封底、埋管引水注浆、挡水墙构筑、地面钻孔注浆封堵、强排水和巷道恢复加固等技术方法。

黄炳仁[57]总结了望儿山金矿南风井突水淹井治理技术,形成了适用于井筒淹井恢复的封堵与排水工艺。高超[58]针对不同导水通道类型提出工作面注浆、通道封堵及巷道恢复措施。朱承敏等[59]针对软弱围岩冒落突水,强调导水通道封堵、围岩注浆加固与结构稳定恢复的协同作用。张贺庭等[60]则在复杂富水破碎带巷道治理中,提出了地面注浆、巷道分段处理和超前管棚帷幕注浆预支护相结合的技术路线。

当前突水淹井治理已由单一排水或局部封堵,逐步发展为水源与通道判识、应急控水、注浆封堵、围岩加固和巷道恢复相衔接的全过程治理模式[61]。治理效果受突水水源补给强度、导水通道空间位置、封堵施工条件及围岩稳定性等因素影响,因此,应加强事故初期水文信息快速获取、三维通道反演及封堵过程动态监测,提高复杂条件下的应急处置与恢复效率。

3.4 水害智能监测预警技术

监测预警是深部金属矿水害防控闭环中的重要反馈环节。受采动扰动和复杂水文地质条件影响,突水前兆通常表现为水位、水压、涌水量、水温、水化学、微震及应力等多源信息的协同变化,单一指标和固定阈值难以准确反映水害风险的动态演化。因此,水害监测预警正由单参数监测向多源信息融合、风险动态判识和智能辅助决策方向发展。

谢世平等[62]从突水水源、导水通道和突水强度3个方面总结了金属矿山水害监测预警研究进展,指出监测指标应与水害形成机制相对应。现有监测系统仍存在指标体系不完善、指标间物理联系不清、预警模型机理基础不足及部分系统重监测轻预警等问题,有必要构建“机理约束—数据驱动”相结合的预警方法。

在工程应用方面,毛坪铅锌矿建立了钻孔水文信息自动化监测系统,对关键水文地质钻孔实施多参数实时监测,为突水水源和补给通道判别提供动态数据支撑[11]。凡口铅锌矿构建了水害监测数据分析与处理系统,通过不同中段水文地质信息的集成分析,为开采条件变化下的水害风险研判和防治方案优化提供支撑[42,63]。近年来,微震监测、光纤传感和三维可视化技术也逐步应用于矿山水害监测,可分别用于识别岩体破裂活动、感知帷幕体及围岩状态变化,以及实现水文、地质、采矿和监测数据的空间集成[64]。

总体来看,深部金属矿水害监测已由水量、水位等常规参数监测,逐步向水文-应力-微震等多源信息协同感知发展,但现有预警模型仍较依赖经验阈值,跨矿山适用性和提前预警能力有限。未来应加强监测指标与致灾机理之间的关联分析,构建兼顾水源识别、通道演化和突水强度判别的多参数预警模型,推动水害预警由异常告警向风险预测转变。

4 地下水安全与环境协同防控

深部金属矿水害防控不仅关系到采掘工程安全,也直接影响矿区地下水资源保护和生态环境安全。长期大流量疏干排水可能引发地下水位下降、地表水漏失及岩溶塌陷,以及含重金属、硫酸盐或酸性矿井水外排造成的水环境污染等问题。因此,深

部金属矿水害防控不能局限于工程减灾,还应统筹地下水资源保护、矿井水高质利用、水热协同调控及堵水-控污一体化,推动防治水由单一安全保障向安全、生态与环境协同治理拓展,如图 12 所示。

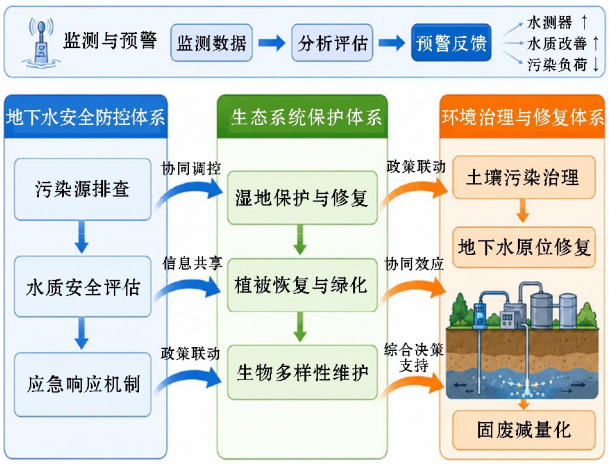


图 12 地下水安全-生态-环境协同防控体系

Fig.12 Coordinated prevention and control system for groundwater safety, ecology and environment

4.1 矿井水高质利用

矿井水的处理与资源化利用是水害防控由“被动排放”向“分质利用”转变的重要环节。深部金属矿矿井水赋存环境复杂,普遍含有悬浮物、重金属离子及硫酸盐,硫化矿床还可能形成酸性矿井水,直接外排易对周边地表水和地下水环境造成持续影响。

毛维东等[65]指出,含盐矿井水可根据水质特征采用预处理、膜浓缩、分盐结晶等组合工艺,推动矿井水由达标排放向生产回用、生态补水和资源化利用转变。对于深部金属矿,矿井水利用应与涌水量预测、控制疏干、帷幕截流及排水系统优化统筹衔接。在控制疏干、带压开采及矿坑涌水量预测等方面形成的研究基础,可为矿井水处理规模确定、水量调控和分质利用提供前端支撑[55]。通过“源头减水-过程调控-末端利用”的协同设计,在降低排水压力的同时,提高矿区水资源循环利用水平[53]。

4.2 水热协同调控

深部矿山高地温与高温涌水往往相伴发生。高温矿井水在增加井下热害治理和排水负担的同时,也蕴含可利用的低品位热能。黄麟淇等[66]围绕深部金属矿山热害防控与地热能协同开展了综述研究,指出深部矿山热害治理正由单纯通风制冷向围岩热能、矿井水热能协同利用方向发展,并强调热害控制与地热资源开发之间存在协同空间。对于深部金属矿而言,水热协同调控应服从水害防控和安全开采主线,其工程实施需结合矿井涌水量、水温、水质、排水系统布置及地表用能需求综合论证。对于水量稳定、温度较高的矿井排水,可探索矿区供暖、井口防冻、生活热水和辅助降温等梯级利用;对于水质腐蚀性强或水量波动大的矿山,则应优先保障排水安全和水处理系统稳定。已有的地下水数值模拟、控制疏干和涌水量预测成果,可为后续水热协同利用中的水量边界、水流路径和排水系统稳定性评价提供基础[29,53]。

4.3 堵水-控污一体化原位修复技术

堵水与控污的协同防控是深部金属矿水环境管理的重要方向。帷幕注浆在截断地下水流的同时,其构筑的低渗透性阻水体亦构成污染物迁移的物理屏障,可有效阻滞重金属等污染物随地下水向外围含水层迁移。通过控制帷幕内外水位差调控水力梯度,可进一步抑制污染物向矿区外围含水层的迁移。在此基础上,注浆材料的选择可兼顾堵水与污染物固定功能:掺入沸石、膨润土等吸附材料的复合浆液在封堵裂隙的同时,对重金属离子产生吸附与离子交换作用,实现堵水与控污的一体化效果。

长沙矿山研究院有限责任公司在凡口铅锌矿强动水通道封堵[42]、矿区渗漏河床综合注浆治理、岩溶地区尾矿库渗漏探查与治理[67]等研究,已从工程上实现了导水通道封堵和地表水入渗控制。后续可在此基础上进一步引入反应性材料、吸附性材料和原位修复理念,推动传统注浆堵水材料由单一阻水功能向“阻水-吸附-稳定化”复合功能发展。

深部矿山水害防治体系将逐步吸纳并融合“控制、处理、利用、回灌与生态环境保护”五位一体的综合治理理念,在保障矿山开采安全的刚性底线前提下,最大限度地实现矿井水的资源化回用和矿区水环境系统的结构性保护。

以安庆铜矿为例[32,50]。该矿为接触交代矽卡岩型透镜状铜铁矿床,主采矿体为东马鞍山矿体,开采中段最低达-969 m,属千米深井矿山。矿区张性裂隙系统广泛发育,三叠系灰岩中管道型岩溶与弥散型溶蚀裂隙交替分布,多重含水介质在垂向上构成复杂的立体含水系统,顶板大理岩为直接接触含水层,缺乏稳定隔水层,地表塌陷与井下突水构成链式耦合灾害。长沙矿山研究院有限责任公司历时 14 a(2009—2023 年),自主研发了井下微裂隙钠基悬胶注浆材料和无盲定向超前探水装备,攻克了深

部微裂隙注浆与金属矿山强电磁干扰环境下的探测技术瓶颈,集成了“浅部精准截流+深部精细帷幕”双层立体防控体系,形成了以“探-防-堵-监”为核心的四位一体技术体系(见图 13)。

工程实施后,矿山稳定日产量维持 3 500 t,累计创造产值 49.15 亿元;矿区地下水位平均回升 12 m,岩溶塌陷发生率降低约 90%;年排水电费节约 1 721 万元,污水处理费用年节约 1 877.5 万元。该技术体系已成功推广至新桥硫铁矿、徐楼铁矿等多座矿山,验证了其可复制性与行业推广价值,为同类复杂岩溶金属矿床的水害防控提供了可借鉴的工程模式。

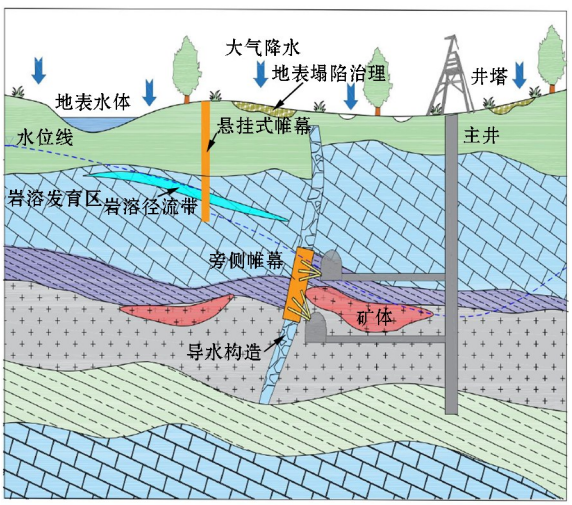


图 13 安庆铜矿水害主动立体防控技术

Fig.13 Active three-dimensional water-hazard prevention and control technology at Anqing Copper Mine

5 结论

本文围绕深部金属矿水害特征、致灾机理、防控关键技术及地下水安全协同防控开展系统综述,并结合长沙矿山研究院有限责任公司长期非煤矿山防治水工程实践,总结了深部金属矿水害防控技术的发展脉络与应用成效,得出的主要结论如下。

(1) 深部金属矿水害具有高承压、弱富水并存,高应力-高水压耦合,水源类型多样及导水通道隐蔽等特征,致灾过程的非线性与高动态性使水害识别、预测与治理难度显著增加。

(2) 深部金属矿水害主要受地质构造、损伤-渗流耦合及热-水-力-化学多场耦合作用控制。断裂构造与深部岩溶决定地下水赋存和导水通道分布,采动扰动与高压水共同促进裂隙扩展贯通,多场耦合作用进一步加剧了隔水岩体损伤与突水演化。

(3) 以“查-评-治-监”为主线的多技术协同防控体系,是实现深部金属矿水害主动防控的重要路径。七十年以来,针对复杂岩溶、构造裂隙及高承压水等不同类型水害生成模式,长沙矿山研究院有限责任公司围绕水文地质精细探查、矿区水文地质条件评价、多模式水害治理技术与工艺、多源数据监测预警等方向形成了系列研究成果。

(4) 在凡口铅锌矿、谷家台铁矿、三山岛金矿、马城铁矿等代表性工程中的应用结果表明,通过地面帷幕、近矿体帷幕、强动水通道封堵、控制疏干及智能监测预警等技术的组合应用,提高了水害治理方案与矿山水文地质条件的匹配程度,验证了该技术体系在复杂水文地质条件下的工程适用性。

(5) 深部金属矿水害防控正由单纯保障采掘安全向地下水资源保护和环境协同防控拓展。矿井水高质利用、水热协同调控及堵水-控污一体化等新需求,可与控制疏干、帷幕截流、导水通道封堵和多源监测预警等技术相衔接,推动防治水工程由单一“减灾控水”向“安全开采-水资源利用-环境保护”协同发展。

参考文献(References):

[1] 赵兴东.黄金矿山深井开采研究进展与发展趋势[J].黄金,2024,45(8):1-18.
Zhao Xingdong. Research progress and development trends of deep mining in gold mines[J]. Gold,2024,45(8):1-18.

[2] 杨柱,李阳明,谢世平.新安全形势下非煤矿山水害防控技术及发展趋势[J].中国矿业,2025,34(9):298-307.
Yang Zhu, Li Yangming, Xie Shiping. Technologies and development trends for water-hazard prevention and control in non-coal mines under the new safety situation[J]. China Mining Magazine,2025,34(9):298-307.

[3] 张光荣,张孟,李明翼,等.四川盆地深层—超深层地震勘探技术与应用:以 CX-JG 三维地震项目为例[J].深地能源科技,2026,2(2):38-46.
Zhang Guangrong, Zhang Meng, Li Mingyi, et al. Technology and application of deep and ultra-deep seismic exploration in the Sichuan Basin: taking the CX-JG 3D seismic project as an example[J].Deep Earth Energy Science & Technology,2026,2(2):38-46.

[4] 宋治祥.高应力-渗流耦合下深部层理砂岩力学特性及破裂机理[D].北京:中国矿业大学(北京),2024.
Song Zhixiang. Mechanical property and failure mechanism of deep eddeds and stones under high stress-seepage coupling [D]. Beijing: China University of Mining&-Technology-Beijing,2024.

[5] 杨柱，薛忍，王军，等.改性聚氨酯快速注浆堵水材料的研制及性能[J].煤田地质与勘探，2020，48(2)：134-140.
Yang Zhu, Xue Ren, Wang Jun, et al. Development and properties of a modified polyurethane rapid grouting material for water plugging[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(2):134-140.

[6] 杨小聪，蒋合国.新质生产力引领深部金属矿山安全高效开采：以毛坪铅锌矿深部开采实践为例[J].中国矿业，2024，33(5)：9-21.
Yang Xiaocong, Jiang Heguo. New-quality productive forces leading safe and efficient deep mining in metal mines: A case study of deep mining practice at Maoping Lead-Zinc Mine [J]. China Mining Magazine, 2024, 33(5):9-21.

[7] Chen Yifeng, Hu Shaohua, Wei Kai, et al. Experimental characterization and micromechanical modeling of damage-induced permeability variation in Beishan granite [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 71:64-76.

[8] Oda M, Takemura T, Aoki T. Damage growth and permeability change in triaxial compression tests of Inada granite[J]. Mechanics of Materials, 2002, 34(6):313-331.

[9] Pusch R, Stanfors R. The zone of disturbance around blasted tunnels at depth[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1992, 29(5):447-456.

[10] 袁世冲，李强，孙帮涛，等.金属矿山深部开采突水致灾危险源辨识与危险性评价：以滇东北毛坪铅锌矿为例[J].工程地质学报，2023，31(5)：1668-1679.
Yuan Shichong, Li Qiang, Sun Bangtao, et al. Identification and risk assessment of water-inrush hazard sources in deep metal mining: a case study of Maoping Lead-Zinc Mine in northeastern Yunnan[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(5):1668-1679.

[11] 练日锋.云南毛坪铅锌矿充水条件分析及涌水防治与预测[D].桂林：桂林理工大学，2024.
Lian Rifeng. Analysis of water-filling conditions and prevention and prediction of mine inflow at Maoping Lead-Zinc Mine, Yunnan [D]. Guilin: GuilinUniversity of Technology, 2024.

[12] 周子龙.岩石动静组合加载实验与力学特性研究[D].长沙：中南大学，2007.
Zhou Zilong. Experimental study and mechanical characteristics of rock under combined dynamic and static loading[D]. Changsha: Central South University, 2007.

[13] 李夕兵，姚金蕊，宫凤强.硬岩金属矿山深部开采中的动力学问题[J].中国有色金属学报，2011，21(10)：2551-2563.
Li Xibing, Yao Jinrui, Gong Fengqiang. Dynamic problems in deep mining of hard-rock metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10):2551-2563.

[14] 袁世冲.深部矿山裂隙岩体帷幕注浆浆液扩散机理及“浆-岩”组合体采动效应研究[D].徐州：中国矿业大学，2023.
Yuan Shichong. Slurry diffusion mechanism of curtain grouting in fractured rock masses of deep mines and mining-induced effects of grout-rock composites[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.

[15] 杨柱，李义连，陈华清，等.零价铁修复水土中含氯有机污染物的研究进展[J].安全与环境工程，2007(1)：43-46.
Yang Zhu, Li Yilian, Chen Huaqing, et al. Research progress on remediation of chlorinated organic contaminants in soil and water using zero-valent iron [J]. Safety and Environmental Engineering, 2007(1):43-46.

[16] 雷煜，张文泉，曹思文.采动作用下断层带非均质性对活化程度影响的模拟研究[J].煤炭技术，2025，44(4)：173-179.
Lei Yu, Zhang Wenquan, Cao Siwen. Numerical study of the influence of fault-zone heterogeneity on activation degree under mining disturbance [J]. Coal Technology, 2025, 44(4):173-179.

[17] 赵乾百，赵永，杨天鸿，等.不同微观裂隙密度下断层黏滑失稳规律离散元模拟[J].地震地质，2024，46(6)：1357-1373.
Zhao Qianbai, Zhao Yong, Yang Tianhong, et al. Discrete-element simulation of stick-slip instability of faults with different microcrack densities[J]. Seismology and Geology, 2024, 46(6):1357-1373.

[18] 张同钊.金属矿深竖井工程围岩渗透特征分析与突水风险预测研究[D].北京：北京科技大学，2023.
Zhang Tongzhao. Analysis of surrounding-rock permeability characteristics and water-inrush risk prediction for deep vertical shafts in metal mines[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.

[19] 李开，杨柱，高超，等.天然电场选频法与 EH4 大地电磁测深法综合探测导水通道[J].采矿技术，2023，23(3)：171-176.
Li Kai, Yang Zhu, Gao Chao, et al. Integrated detection of water-conducting channels using the natural electric-field frequency-selection method and EH4 magnetotelluric sounding[J]. Mining Technology, 2023, 23(3):171-176.

[20] 李林贵，黄胜昔，杨柱，等.综合物探技术在金属矿山水害防治中的应用[J].采矿技术，2015，15(2)：71-73.
Li Lingui, Huang Shengxi, Yang Zhu, et al. Application of integrated geophysical prospecting technology in water-hazard prevention and control in metal mines[J]. Mining Technology, 2015, 15(2):71-73.

[21] 容玲聪.五极纵轴测深在非煤矿区水害防治中的应用[J].矿业研究与开发，2009，29(4)：82-84.
Rong Lingcong. Application of five-electrode longitudinal sounding in water-hazard prevention and control in non-coal mining areas[J]. Mining Research and Development, 2009, 29(4):82-84.

[22] 杨柱，高超，徐磊，等.综合物探方法在磁铁矿山巷道水害超前探测的应用[J].现代矿业，2023，39(4)：183-186+190.
Yang Zhu, Gao Chao, Xu Lei, et al. Application of integrated geophysical methods to advance detection of roadway water hazards in magnetite mines [J]. Modern Mining, 2023, 39(4):183-186+190.

[23] 李阳明,刘宝川,王伟,等.基于 3DMine 的矿山防治水分析应用模型建立与研究[J].湖南有色金属,2024,40(5):80-83.
Li Yangming, Liu Baochuan, Wang Wei, et al. Development and application of a 3DMine-based analytical model for mine water-hazard prevention and control[J]. Hunan Nonferrous Metals,2024,40(5):80-83.

[24] 罗志伟,李阳明,于智斌,等.某铁矿隐蔽致灾因素综合评价与防控技术研究[J].湖南有色金属,2025,41(3):82-85.
Luo Zhiwei, Li Yangming, Yu Zhibin, et al. Comprehensive assessment and prevention and control technologies for concealed disaster-causing factors in an iron mine[J]. Hunan Nonferrous Metals,2025,41(3):82-85.

[25] 杨柱,梁晋熙,滕龙,等.基于 DEMATEL-AHP 和熵权法的深部矿井突水危险性评价[J].安全与环境工程,2026,33(3):15-26+47.
Yang Zhu, Liang Jinxi, Teng Long, et al. Water-inrush risk assessment in deep mines based on DEMATEL-AHP and the entropy-weight method[J]. Safety and Environmental Engineering,2026,33(3):15-26+47.

[26] 王亮,辛小毛,曾先贵.山东某铁矿矿床充水因素分析及矿坑涌水量预测[J].采矿技术,2010,10(5):46-48+72.
Wang Liang, Xin Xiaomao, Zeng Xiangui. Analysis of water-filling factors and prediction of mine inflow for an iron mine in Shandong[J]. Mining Technology,2010,10(5):46-48+72.

[27] 张大永,岳志朋,徐磊.某铁矿二期工程帷幕注浆后的涌水量预测[J].矿业研究与开发,2012,32(6):101-104+109.
Zhang Dayong, Yue Zhipeng, Xu Lei. Prediction of mine inflow after curtain grouting in the phase-Ⅱ project of an iron mine[J]. Mining Research and Development,2012,32(6):101-104+109.

[28] 徐磊.基于井下近矿体注浆帷幕改造后的矿坑涌水量的预测研究[J].采矿技术,2021,21(4):85-87.
Xu Lei. Prediction of mine inflow after reconstruction of an underground near-orebody grouting curtain[J]. Mining Technology,2021,21(4):85-87.

[29] 容玲聪,李栋.MODFLOW 三维地下水数值模拟设计城门山铜矿疏干系统[J].中国矿业,2009,18(12):96-99.
Rong Lingcong, Li Dong. Design of the dewatering system at Chengmenshan Copper Mine using MODFLOW three-dimensional groundwater numerical simulation[J]. China Mining Magazine,2009,18(12):96-99.

[30] 徐磊,黄炳仁,周耀东.基于 Visual Modflow 的复合衬垫隔障式防渗墙在某铜矿露天边坡堵水方案的研究[J].中国矿山工程,2022,51(5):24-31.
Xu Lei, Huang Bingren, Zhou Yaodong. Study of a composite-liner barrier cutoff wall for water sealing on an open-pit slope of a copper mine based on Visual Modflow[J]. China Mine Engineering,2022,51(5):24-31.

[31] 赵恰,王军,杨柱.断层防水矿柱合理留设数值模拟分析与评价[J].矿冶工程,2017,37(3):31-33+37.
Zhao Qia, Wang Jun, Yang Zhu. Numerical simulation analysis and evaluation of the rational width of a fault waterproof pillar[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2017,37(3):31-33+37.

[32] 王军,容玲聪.安庆铜矿地下水渗流场的模拟[J].矿业研究与开发,2004(6):25-27+87.
Wang Jun, Rong Lingcong. Simulation of the groundwater seepage field at Anqing Copper Mine[J]. Mining Research and Development,2004(6):25-27+87.

[33] 容玲聪.运用数值模拟法评价帷幕注浆效果[J].矿业研究与开发,1993(增刊 2):61-65.
Rong Lingcong. Evaluation of curtain-grouting effectiveness using numerical simulation[J]. Mining Research and Development,1993(Suppl.2):61-65.

[34] 容玲聪.运用样条插值函数分析计算帷幕注浆的堵水率[J].矿业研究与开发,1993(增刊 2):47-52.
Rong Lingcong. Analysis and calculation of the water-plugging rate of curtain grouting using spline interpolation functions[J]. Mining Research and Development, 1993(Suppl.2):47-52.

[35] 辛小毛,王亮.大水金属矿山防治水综合技术方法的研究[J].矿业研究与开发,2009,29(2):78-81.
Xin Xiaomao, Wang Liang. Comprehensive water-hazard prevention and control methods for water-rich metal mines[J]. Mining Research and Development,2009,29(2):78-81.

[36] 容玲聪,王军.新型粉煤灰注浆材料[J].中国矿业,2003(1):44-45.
Rong Lingcong, Wang Jun. A novel fly-ash grouting material[J]. China Mining Magazine,2003(1):44-45.

[37] 容玲聪,唐海燕,高超,等.改性黏土浆结石体抗压强度性能测试与分析[J].采矿技术,2017,17(1):22-23.
Rong Lingcong, Tang Haiyan, Gao Chao, et al. Testing and analysis of compressive strength of hardened modified clay grout[J]. Mining Technology,2017,17(1):22-23.

[38] 刘帅洲.某超高水注浆堵水材料的应用试验研究[J].采矿技术,2022,22(3):106-108.
Liu Shuaizhou. Experimental study on the application of an ultra-high-water grouting material for water plugging[J]. Mining Technology,2022,22(3):106-108.

[39] 郑长成,曾祥熹,黄树勋.时变性浆液径向扩散流的模拟研究[J].矿业研究与开发,1999(1):20-23.
Zheng Zhangcheng, Zeng Xiangxi, Huang Shuxun. Simulation of radial diffusion flow of time-dependent grout[J]. Mining Research and Development,1999(1):20-23.

[40] 黄炳仁.大水矿床注浆防水帷幕厚度的确定[J].中国矿业,2004(3):61-63.
Huang Bingren. Determination of the thickness of a grouting waterproof curtain in water-rich ore deposits[J]. China Mining Magazine,2004(3):61-63.

[41] 陈勤树.岩体注浆加固的理论与实例[J].有色金属(矿山部分),1994(2):25-28.

Chen Qinshu. Theory and engineering examples of rock-mass reinforcement by grouting[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),1994(2):25-28.

[42] 杨柱,赵恰,黄炳仁.矿山帷幕强动水通道注浆控制技术及工程应用[J].矿业研究与开发,2020,40(12):117-121.
Yang Zhu, Zhao Qia, Huang Bingren. Grouting control technology and engineering application for strong dynamic-water channels in mine curtains[J]. Mining Research and Development,2020,40(12):117-121.

[43] 杨柱,王军,李林贵,等.黄屯硫铁矿水文地质特征及防治水对策[J].有色金属(矿山部分),2014,66(5):47-50+61.
Yang Zhu, Wang Jun, Li Lingui, et al. Hydrogeological characteristics and water-hazard prevention and control measures at Huangtun Pyrite Mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2014,66(5):47-50+61.

[44] 朱承敏,高超,容玲聪.双液浆在矿山帷幕注浆中的应用与探讨[J].世界有色金属,2019(12):241-244.
Zhu Chengmin, Gao Chao, Rong Lingcong. Application and discussion of double-liquid grout in mine curtain grouting [J]. World Nonferrous Metals,2019(12):241-244.

[45] 朱承敏.水泥黏土浆在大型矿山帷幕堵水中的应用[J].四川水泥,2015(9):118.
Zhu Chengmin. Application of cement-clay grout to water plugging in large mine curtains[J]. Sichuan Cement,2015 (9):118.

[46] 徐磊,李飞,辛小毛.近矿体帷幕注浆在某大水矿山的应用[J].矿业研究与开发,2015,35(3):68-71.
Xu Lei, Li Fei, Xin Xiaomao. Application of near-orebody curtain grouting in a water-rich mine[J]. Mining Research and Development,2015,35(3):68-71.

[47] 谢世平,侯垣麒,刘天奇.龙塘沿铁矿首采段近矿体帷幕注浆应用[J].矿业研究与开发,2020,40(5):80-83.
Xie Shiping, Hou Yuanqi, Liu Tianqi. Application of near-orebody curtain grouting in the first mining section of Longtangyan Iron Mine [J]. Mining Research and Development,2020,40(5):80-83.

[48] 易伟功,辛小毛.井下近矿体帷幕注浆技术在高原地区金属矿山的应用[J].山东冶金,2019,41(4):21-23.
Yi Weigong, Xin Xiaomao. Application of underground near-orebody curtain grouting technology in a metal mine on a plateau[J]. Shandong Metallurgy,2019,41(4):21-23.

[49] 易伟功,杨海峰,蔡永生.庐江龙桥铁矿矿床水文地质条件及防治水方案研究[J].采矿技术,2021,21(4):57-60.
Yi Weigong, Yang Haifeng, Cai Yongsheng. Hydrogeological conditions and water-hazard prevention and control scheme for the ore deposit at Longqiao Iron Mine, Lujiang[J]. Mining Technology,2021,21(4):57-60.

[50] 杨柱,叶强,李阳明,等.复杂大水矿山近矿体帷幕注浆技术优化及应用[J].矿业研究与开发,2023,43(11):157-162.
Yang Zhu, Ye Qiang, Li Yangming, et al. Optimization and application of near-orebody curtain grouting technology in complex water-rich mines [J]. Mining Research and Development,2023,43(11):157-162.

[51] 王勇,谢世平.自制分水阀在井下大水工勘孔注浆中的应用[J].采矿技术,2016,16(2):76-77.
Wang Yong, Xie Shiping. Application of a self-made water-diversion valve in grouting of high-yield hydrogeological exploration boreholes underground[J]. Mining Technology, 2016,16(2):76-77.

[52] 孙茂贵,朱承敏.基建矿山超前截流疏干技术应用[J].现代矿业,2023,39(11):67-69.
Sun Maogui, Zhu Chengmin. Application of advance interception and controlled drainage technology in a mine under construction[J]. Modern Mining,2023,39(11):67-69.

[53] 王亮,滕龙,刘超,等.基于地下水数值模拟的控制疏干方案优化及矿坑涌水量预测[J].矿业研究与开发,2025,45(7):191-198.
Wang Liang, Teng Long, Liu Chao, et al. Optimization of controlled drainage schemes and prediction of mine inflow based on groundwater numerical simulation [J]. Mining Research and Development,2025,45(7):191-198.

[54] 朱承敏,孙茂贵,张骥,等.白象山铁矿疏堵避一体化防治水技术研究[J].中国矿业,2024,33(5):211-216.
Zhu Chengmin, Sun Maogui, Zhang Ji, et al. Integrated prevention and control technology combining drainage, plugging and avoidance at Baixiangshan Iron Mine[J]. China Mining Magazine,2024,33(5):211-216.

[55] 王亮,刘超,张帅,等.基于刚果(金)某铜钴矿含水层结构的带压开采方案研究[J].采矿技术,2024,24(4):17-22.
Wang Liang, Liu Chao, Zhang Shuai, et al. Study of a pressure-bearing mining scheme based on the aquifer structure of a copper-cobalt mine in the Democratic Republic of the Congo[J]. Mining Technology,2024,24(4):17-22.

[56] 黄炳仁,李夕兵,王军,等.非煤矿山突水淹井应急救援适用性技术综述[J].中国安全生产科学技术,2010,6(3):84-89.
Huang Bingren, Li Xibing, Wang Jun, et al. Review of emergency-rescue technologies applicable to water-inrush and mine-flooding accidents in non-coal mines[J]. Journal of Safety Science and Technology,2010,6(3):84-89.

[57] 黄炳仁.望儿山金矿南风井突水淹井治理新技术[J].矿业研究与开发,2006(增刊1):154-157.
Huang Bingren. New technology for treating water inrush and flooding in the south ventilation shaft of Wangershan Gold Mine[J]. Mining Research and Development, 2006 (Suppl.1):154-157.

[58] 高超.金属矿山巷道突水原因分析及治理[J].建井技术,2016,37(5):25-28.

Gao Chao. Cause analysis and treatment of roadway water inrush in metal mines[J]. Mine Construction Technology, 2016,37(5):25-28.

[59] 朱承敏,孙茂贵.金属矿山软弱围岩冒落突水治理技术研究[J].采矿技术,2024,24(3):89-93.
Zhu Chengmin, Sun Maogui. Treatment technology for water inrush caused by caving of weak surrounding rock in metal mines[J]. Mining Technology,2024,24(3):89-93.

[60] 张贺庭,刘帅洲,雷煜,等.复杂富水破碎带突水巷道恢复治理技术研究[J].采矿技术,2024,24(4):236-240.
Zhang Heting, Liu Shuaizhou, Lei Yu, et al. Restoration and treatment technology for a water-inrush roadway in a complex water-rich fractured zone[J]. Mining Technology, 2024,24(4):236-240.

[61] 谢世平.壁后引水注浆在井筒大涌水治理中的应用[J].采矿技术,2018,18(6):92-94.
Xie Shiping. Application of water-diversion grouting behind shaft lining to control large water inflow [J]. Mining Technology,2018,18(6):92-94.

[62] 谢世平,杨柱,罗舸旋子.金属矿山水害监测预警研究现状与展望[J].现代矿业,2023,39(1):10-13.
Xie Shiping, Yang Zhu, Luo Gexuanzi. Research status and prospects of monitoring and early warning for water hazards in metal mines[J]. Modern Mining,2023,39(1):10-13.

[63] 朱承敏,高超,容玲聪.矿山水害的模拟与智能防治决策[J].中国矿业,2020,29(12):103-108.
Zhu Chengmin, Gao Chao, Rong Lingcong. Simulation and intelligent decision-making for mine water-hazard prevention and control[J]. China Mining Magazine,2020,29(12):103-108.

[64] 宋子琦,王来斌,葛志刚.微震监测在矿井突水预警中的研究进展及展望[J].榆林学院学报,2024,34(5):25-31.
Song Ziqi, Wang Laibin, Ge Zhigang. Research progress and prospects of microseismic monitoring for mine water-inrush early warning[J]. Journal of Yulin University,2024,34(5):25-31.

[65] 毛维东,郭中权,付元,等.煤矿含盐矿井水处理利用技术综述[J].煤炭科学技术,2025,53(1):365-376.
Mao Weidong, Guo Zhongquan, Fu Yuan, et al. Review of treatment and utilization technologies for saline mine water in coal mines[J]. Coal Science and Technology,2025,53(1): 365-376.

[66] 黄麟淇,宋士龙,李夕兵.深部金属矿山热害防控与地热能协同开采技术研究进展[J].采矿与岩层控制工程学报,2026,8(3):231-260.
Huang Linqi, Song Shilong, Li Xibing. Research progress on synergistic control of heat hazards and geothermal-energy exploitation in deep metal mines[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2026,8(3):231-260.

[67] 谢世平,徐磊,易伟功.岩溶地区某尾矿库尾砂渗漏探查与治理[J].中国矿业,2024,33(5):101-108.
Xie Shiping, Xu Lei, Yi Weigong. Investigation and treatment of tailings seepage from a tailings pond in a karst area[J]. China Mining Magazine,2024,33(5):101-108.