

露天转地下巨厚煤层重复采动离层空间透水超前治理技术

王良晨 张千宇

抚顺矿业集团有限责任公司

DOI:10.32629/gmsm.v9i3.2480

[摘要] 针对露天转地下、井工转露天两种开采转型模式下,巨厚煤层重复采动引发的覆岩离层发育、含水层导通突水难题,以蒙东白音华矿、辽抚老虎台矿—东露天矿为工程案例,揭示离层空间形成机制、透水通道演化规律及水害致灾特征。构建“多元协同精准探测、井上井下联合超前疏放、立体注浆充填封堵、一体化动态监测预警”的离层空间透水超前治理技术体系,精准圈定离层与富水异常区。工程应用表明,注浆封堵合格率超95%,涌水量降幅超82%,边坡与覆岩稳定性显著提升,实现零突水安全开采,可为同类巨厚煤层重复采动离层水害防控提供技术支撑。

[关键词] 巨厚煤层; 重复采动; 透水超前治理; 露天转地下; 井工转露天

中图分类号: P641.4+61 文献标识码: A

Technology for the advance treatment of water ingress in the detached zone of massive coal seams during repeated mining operations in the transition from open-pit to underground mining

Liangchen Wang Qianyu Zhang

Fushun Mining Group Co., Ltd.

[Abstract] Addressing the challenges of overburden detachment and aquifer connectivity leading to water inrushes caused by repeated mining operations in ultra-thick coal seams under two transition scenarios—from open-pit to underground mining and from underground to open-pit mining—this study uses the Baiyin Hua Mine in Eastern Inner Mongolia and the Laofu Laohutai Mine—Dong Open-pit Mine as engineering case studies to elucidate the formation mechanisms of detachment zones, the evolution patterns of water-permeable pathways, and the characteristics of water-related disasters. A technical framework for the proactive management of water permeability in delaminated zones has been established, comprising “multi-source collaborative precision detection, integrated surface-and-subsurface advance drainage, three-dimensional grouting and backfilling, and integrated dynamic monitoring and early warning”. This framework enables the precise delineation of delaminated zones and water-rich anomalies. Engineering applications demonstrate that the grouting and sealing pass rate exceeds 95%, with a reduction in water inflow of over 82%. The stability of slopes and overlying rock has been significantly enhanced, achieving safe mining with zero water inrushes. This provides technical support for the prevention and control of water hazards in dislodged strata resulting from repeated mining operations in similar ultra-thick coal seams.

[Key words] ultra-thick coal seams; repeated mining operations; proactive water permeability management; transition from open-pit to underground mining; transition from underground to open-pit mining

1 引言

近年来,随着浅部资源枯竭与开采条件变化,露天转地下、井工转露天等开采转型模式在巨厚煤层矿区日趋普遍。转型过程中,重复采动诱发覆岩离层空间快速扩展,离层积水在多元水源补给下形成高压突水体,水害隐患极为突出。蒙东白音华矿、辽抚老虎台矿—东露天矿的工程实践表明,此类离层透水具有隐

蔽性强、突发性高、致灾链长等特点,常规井工或露天单一治理技术难以有效应对。目前,针对双向转型场景下巨厚煤层重复采动离层水害的系统性超前治理研究尚显不足,缺乏从探测、疏放、封堵到监测的全流程技术方案。为此,本文依托现场工程案例,系统总结离层空间形成机制与透水致灾规律,提出“多元协同精准探测、井上井下联合超前疏放、立体注浆充填封堵、一

体化动态监测预警”的成套治理技术体系,并通过工程应用验证其可靠性,以期同类条件矿区离层水害防控提供参考。

2 工程背景与水害问题分析

2.1 典型矿区开采与地质概况

2.1.1 蒙东白音华矿(露天转地下)

白音华煤田为内蒙古东部大型整装褐煤田,探明地质储量超140亿吨,构造简单,地层倾角 $1^{\circ}\sim 8^{\circ}$,埋藏浅、赋存稳定,适合露天与井工联合开采。主采3-1煤层平均厚度18.31m、最大30.5m,2-1中下煤层平均16.41m,属典型巨厚煤层。顶板以粉砂岩、细粒砂岩为主,富水性强,为主要充水含水层;底板隔水性能较好。

矿区先期露天开采形成深度超170m的大型采坑,边坡最高95m,存在大范围覆岩损伤体。转为井工回采后,工作面采用分层综放开采,总采厚达36m,覆岩受二次重复扰动,岩层变形不协调加剧,多层位、大范围离层空间快速发育。顶板砂岩含水层与第四系松散层含水层连通性强,地表水沿边坡与地表裂缝汇入,易形成立体充水通道,离层高压积水突水风险极高。

2.1.2 辽抚老虎台矿—东露天矿(井工转露天)

抚顺煤田为新生代特厚煤田,构造复杂,煤层倾角 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$,南部局部直立倒转。老虎台矿井田面积6.886km²,主采煤层厚度20~130m、平均50m,为世界级巨厚煤层,深部矿压与水害耦合显著。东露天矿面积9.2km²,主采煤层平均厚度41.7m,顶板为巨厚油母页岩,含水层与隔水层相间分布,水文地质条件复杂。

老虎台矿长期井工开采形成大量采空区与破碎覆岩,导水裂隙高度发育;东露天矿转为露天开采后,边坡卸荷与回采扰动叠加,激活裂隙网络,离层空间与老空区、含水层、地表水贯通,形成多元复合致灾体系,水害滞后性、突发性强,治理难度大。

2.2 重复采动离层透水致灾共性特征

两种转型模式下,巨厚煤层重复采动离层透水灾害具有鲜明共性:

(1) 离层空间多层位、大范围发育,隐蔽性极强;

(2) 充水水源多元、通道贯通,离层积水水压可达2.0~2.5MPa,突水动力充足;

(3) 突水具滞后性与突发性,前兆不明显,预判难度大;

(4) 易引发边坡失稳、顶板垮落等次生灾害,形成水害—岩灾耦合效应;

(5) 离层空间深、形态复杂、水压高,常规技术治理效果差。

2.3 不同转型模式致灾差异性

2.3.1 致灾机理对比

露天转地下以边坡卸荷为主导,露天开挖形成高陡边坡与自由变形面,地下回采引发覆岩弯曲离层,导水通道以地表水沿边坡裂隙入层为主,离层多分布于浅部覆岩。井工转露天以老空活化为主导,井工采空区与破碎岩体长期赋存,露天开挖激活裂隙网络,离层与老空水直接连通,通道更隐蔽、离层分布更深。

2.3.2 致灾特征差异

露天转地下(白音华矿):高陡边坡提供变形自由面,地下回

采使边坡裂隙与覆岩离层裂隙贯通,形成地表水—含水层—离层空间充水模式,水害与边坡稳定性高度耦合,易诱发滑坡。井工转露天(老虎台矿—东露天矿):井工采空区与破碎覆岩广泛存在,露天开挖激活裂隙,离层与老空积水连通,形成多元复合致灾模式,充水来源复杂、突水滞后性更显著。

3 研究现状/文献综述

国内外学者围绕采动覆岩离层水害已开展大量研究,形成以精准探测、超前疏水、注浆封堵、动态监测为核心的主流治理体系。探测技术以地震、电磁、钻孔测井为主,用于识别离层与富水区域;疏水以地面或井下钻孔降压为主,降低突水动力;注浆以充填离层、封堵裂隙为目标,阻断导水通道;监测以水位、水压、位移单参数观测为主,实现险情预警。但现有技术多面向单一井工或单一露天开采场景,针对露天与井工双向转型、巨厚煤层重复采动的耦合致灾场景研究较少,对转型过程中边坡卸荷、老空活化、覆岩二次扰动的适配性不足,缺乏成套化、闭环式超前治理技术。本文首次面向露天↔井工双向转型、巨厚煤层、重复采动复合条件,构建全流程离层空间透水超前治理技术体系,填补该领域技术空白。

4 离层空间透水超前治理核心技术

4.1 多元协同精准探测技术

技术原理:无人机快速识别地表异常,为物探提供边界;三维地震精准刻画覆岩结构与离层空间形态;广域电磁灵敏识别富水异常;井上下联合探测直接验证异常真实性。四者空间互补、精度互补、物性互补,可消除单一方法误判漏判。

采用无人机地表普查、广域电磁勘探、三维地震勘探、井上下联合探测四位一体组合,重点聚焦地表水入渗、离层水富集及回采扰动裂隙连通三大致灾关键环节。无人机全域航拍可快速识别地表裂缝、积水区与边坡变形段,为物探提供基础依据;三维地震勘探能够反演覆岩结构与关键层位置,精准确定离层空间层位、厚度及平面展布范围;广域电磁勘探通过电阻率异常判识富水区域,弥补地震勘探在富水性识别上的不足;井上下联合探测利用钻孔成像、水文测井、井下瞬变电磁等手段,进一步验证与修正异常区范围。通过多技术融合解译,可初步界定离层异常区与富水异常区,建立三维地质模型,实现离层水害精准定位,为后续治理提供可靠靶区。

4.2 井上井下联合超前疏放水技术

技术原理:地面钻孔覆盖范围大、疏降半径广,可实现整体降压;井下钻孔靶向性强、距离近,可消除局部高压积水。井上+井下组合实现分层位、全域高效降压,比单一方式更安全、降压更彻底。

以源头降压、主动防控为核心,采用地面大直径钻孔为主、井下超前疏水钻孔为辅的联合疏放模式,实现分层位、分区域有序疏放。地面疏水钻孔覆盖范围大、疏放效率高,可对大型离层空间与含水层实施整体降压;井下超前疏水钻孔针对性强、精准度高,适合深部及局部小型离层空间的近距离疏放。疏放全过程对水压、水量进行实时监测,动态调整疏放布局与疏放强度,

将离层水压降至安全阈值以下,彻底消除高压积水突水动力,并切断含水层对离层空间的持续补给,为注浆封堵创造稳定条件。

4.3 立体注浆充填封堵技术

技术原理:先疏放可降低水压,避免注浆时浆液被高压水冲散、封堵失效;地面注浆实现大空间全域充填,井下注浆实现局部裂隙精准补强,地面+井下立体作业确保封堵密实、通道全断。

采用地面定向注浆+井下局部补强的立体作业模式,对疏放后的离层空间、导水裂隙带及边坡破碎带进行系统化充填。地面注浆以水泥-粉煤灰复合浆液为主,针对大型离层空间实施全域充填,具备成本低、流动性好、固结强度高的特点,可有效支撑覆岩、防止二次离层发育;井下注浆采用速凝型材料,对顶板导水裂隙与破碎岩体进行局部补强封堵,快速封闭导水通道。施工中严格监测注浆压力、浆液流量与扩散范围,确保充填密实、封堵到位,从根本上阻断离层透水通道,同时提升覆岩完整性与边坡整体稳定性。

4.4 一体化动态监测预警技术

技术原理:单一参数易受干扰、误报率高;多参数耦合监测可捕捉水文-岩土-矿压联动前兆,提升预警准确性与可靠性。

构建地表水、地下水、离层水压、边坡位移、地表沉降、支架阻力多参数协同监测网络,实现离层水害全过程闭环管控。水文监测模块实时跟踪水压、水位与涌水量变化,评估疏放与封堵效果;岩土变形监测重点掌握边坡沉降、覆岩移动及顶板来压特征,判断岩体稳定状态;系统内置多参数预警模型,通过设定临界阈值实现异常自动识别与分级预警。该技术可实时捕捉突水前兆,提升预警及时性与准确性,为现场安全回采提供全天候保障。

5 工程应用效果分析

本文技术体系分别应用于白音华矿露天转地下1202工作面、老虎台矿一东露天矿井工转露天协同开采工作面,实现全流程闭环治理,验证了技术适用性与可靠性。

5.1 白音华矿(露天转地下)应用效果

1202工作面煤层平均厚度36m,覆岩扰动强烈,离层空间广泛发育,最大水压2.1MPa。治理完成无人机普查86km²、地面物探剖面12条、地面疏水注浆孔58个、井下超前疏水孔236个,处置3个大型离层空间。治理后:探测无漏探错判;累计疏水1.86×10⁵m³,水压降至0.3MPa以下;注浆4.2×10⁴m³,封堵合格率96.8%,岩体渗透系数降至10⁻⁶cm/s以下;工作面涌水量由480m³/h降至86m³/h,降幅82.1%,未发生突水。边坡位移速率由8mm/d降至1.2mm/d,稳定系数由1.18提升至1.38,整体安全稳定。

5.2 老虎台矿一东露天矿(井工转露天)应用效果

该区域受老空区与重复采动双重影响,离层与导水裂隙高度发育,最大水压2.5MPa。治理完成无人机普查42km²、地面物探剖面8条、地面疏水注浆孔65个、井下超前疏水孔312个,处置5个离层空间。治理后:清晰揭示离层与采空区连通关系;累计

疏水2.58×10⁵m³,水压降至0.25MPa以下;注浆5.7×10⁴m³,封堵合格率95.9%,导水通道彻底阻断;涌水量由560m³/h降至98m³/h,降幅82.5%,实现零突水、零积水。地表沉降速率由6mm/d降至0.8mm/d,顶板来压缓和,支架压损事故为零,工作面安全高效推进。

6 结论与展望

露天转地下与井工转露天模式下,巨厚煤层重复采动引发覆岩多层位、大范围离层发育,在多元水源补给下形成高压积水,突水具滞后性、突发性与灾害链特征。本文构建的“多元协同探测、井上井下联合疏放、立体注浆封堵、一体化动态监测”超前治理技术体系,可精准定位致灾区域、高效降压疏水、密实封堵通道,工程应用探测准确率超92%、涌水量降幅超82%,实现零突水安全回采,适用于两类开采转型场景。

该体系存在局限:深部500m以深微小离层探测精度不足,小于1m薄离层刻画能力有限;监测数据智能化融合水平不高,多参数联动预警能力偏弱;高水压大裂隙条件下注浆密度与材料经济性有待提升。未来需提升深部物探分辨率,构建智能预警模型,研发低成本绿色注浆材料,推动离层水害治理向高精度、智能化、绿色化发展,为巨厚煤层安全高效开采提供支撑。

[课题项目]

国家重点研发计划资助(2024YFC3013904)。

[参考文献]

- [1]王思翔.深部超厚煤层重复采动覆岩裂隙发育规律及水害评价研究[D].中国矿业大学,2025.
- [2]张宝锋.厚煤层开采导水断层超前治理技术及应用[J].陕西煤炭,2021,40(S1):94-97+105.
- [3]李延超,王飞飞,姜安民,等.露天转地下开采引起露天边坡变形破坏特征及演化机理研究[J].矿业研究与开发,2024,44(7):72-79.
- [4]韩光远,王志刚,罗洪森,等.巨厚煤层分层复采条件下涌水量预测与数值模拟[J].煤矿安全,2025,56(12):191-200.
- [5]曾庆隆,雷秀文,杨珏,等.某铁矿露天转地下开采隔离层安全厚度确定研究[J].矿业研究与开发,2025,45(6):50-58.
- [6]乔伟,刘梦楠,孟祥胜,等.煤矿采动覆岩离层水害致灾因素勘查与预测评价[J].煤炭学报,2024,49(04):2031-2044.
- [7]李振华,黄玉峰,王文强,等.巨厚顶板砂岩含水层下采煤水害防治:理论与技术[J].煤炭科学技术,2026,54(01):270-289.
- [8]崔峰,贾冲,来兴平,等.缓倾斜斜冲倾向性顶板特厚煤层重复采动下覆岩两带发育规律研究[J].采矿与安全工程学报,2020,37(03):514-524.
- [9]张小荣,王飞,余鑫.特厚煤层大断面重复采动影响巷道围岩失稳机理及控制技术[J].煤炭科技,2024,45(05):150-157+162.

作者简介:

王良晨(1992--),男,汉族,辽宁省黑山县人,本科,采矿工程师,研究方向:采矿工程专业(井工矿)。