

# 复杂地质条件下矿山建设工程 风险防控机制研究

柯洪异<sup>1</sup>, 徐付强<sup>2</sup>, 李军伟<sup>3</sup>, 王辉<sup>3</sup>, 雷晓强<sup>4</sup>

1. 开平市立途矿业有限公司, 广东 开平 529300;
2. 青岛国道通设计咨询有限公司, 山东 青岛 266000;
3. 青岛尚裕盛工程科技有限公司, 山东 青岛 266000;
4. 安徽中掘建设工程有限公司, 安徽 淮北 235000)

**摘要** 矿山建设工程面临着极深部地层高地应力、复杂水文地质条件及瓦斯赋存等多重技术挑战, 工程风险控制是保障矿井建设顺利推进的核心。针对深部矿井建设中面临的围岩变形失稳、瓦斯涌出异常及地下水渗透等工程技术难题, 探究与之相适应的工程技术对策尤为关键。通过对井下巷道掘进支护工艺、通风瓦斯抽采系统布局以及水害防治工程技术的深入剖析, 揭示了不同地质环境下工程技术参数的选择依据与执行标准, 旨在通过优化工程技术手段, 构建科学的风险防御技术体系, 提升矿井建设过程中的工程稳定性与作业环境可靠性, 为复杂地质条件下的矿山建设提供工程实践参考。

**关键词** 风险控制; 工程技术; 围岩稳定性; 瓦斯治理  
**中图分类号**: TD7 **文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.038

## 0 引言

随着浅部矿产资源的日益枯竭, 矿山建设工程逐渐向深部地层延伸, 地质环境的复杂性呈现指数级增长, 深部地层的高地应力、高地温及高岩溶水压等特征, 显著增加了井下工程作业的技术难度与风险系数。在矿井开拓延伸及巷道掘进过程中, 单一的传统工程技术已难以满足复杂多变的施工需求, 工程结构的失稳与作业环境的恶化成为制约矿井建设进度的主要瓶颈。面对严峻的工程技术挑战, 必须深入剖析矿山建设中的关键风险源, 依托先进的工程力学理论与施工工艺, 制定针对性的技术应对方案, 通过对支护、通风、排水等关键工程环节的技术革新与参数优化, 实现对工程风险的源头控制与过程消除, 确保矿山建设工程在复杂地质环境下的有序推进与结构稳定。

## 1 矿山建设地质环境与工程风险因素解析

矿山建设工程深处于地壳内部, 其作业环境受地质构造运动影响显著, 岩体结构的完整性直接决定了井下工程的稳定性。在深部开采区域, 原岩应力场分布极不均匀, 构造应力与自重应力的叠加效应, 使得围岩处于高强度的挤压状态, 当井下巷道开挖破坏了原有的应力平衡后, 围岩内部积聚的弹性势能瞬间释放,

极易诱发岩爆、底鼓及片帮等动力现象, 断层破碎带、陷落柱等不良地质构造的存在, 进一步削弱了岩体的自承载能力, 使得支护结构承受非对称载荷, 增加了工程支护失效的风险。伴随深度的增加, 煤层瓦斯赋存压力增大, 吸附态瓦斯向游离态转化的速率加快, 作业空间的瓦斯浓度控制难度加大, 地下含水层的静水压力随深度增加而升高, 岩溶裂隙水的突发性涌出对井下排水系统构成了严峻考验, 这些地质与环境因素相互交织, 构成了矿山建设中错综复杂的工程风险体系, 要求施工技术必须具备极高的适应性与抗灾变能力<sup>[1]</sup>。

## 2 巷道掘进与支护工程技术对策

### 2.1 光面爆破技术参数优化与应用

在岩石巷道掘进作业中光面爆破技术通过精确控制周边眼的装药结构与起爆时序, 旨在减少爆破冲击波对围岩的扰动破坏, 施工中需根据岩石的普氏硬度系数及节理发育程度, 动态调整周边眼的间距与抵抗线比值, 通常将不偶合系数控制在合理区间以确保保护壁效果, 采用空气间隔装药或导爆索传爆工艺, 降低爆炸峰值压力, 使裂缝沿炮眼连线平整贯通, 避免由于超挖或欠挖造成的围岩应力集中。起爆网路设计中严格执行毫秒延期干扰降震爆破方案, 利用微差挤压原理,

**作者简介**: 柯洪异 (1986-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 矿山建设。

为岩石破碎创造自由面,同时削弱地震波的叠加效应,爆破后巷道轮廓线的平整度直接影响后续支护结构的贴合程度,通过激光断面仪对成型断面进行实时扫描监测,反向修正钻孔角度与深度参数,实现对掘进断面的精细化控制,维持围岩自身的承载拱结构稳定。

## 2.2 高预应力锚网喷联合支护机制

面对深部高应力软岩巷道的大变形特征,传统被动支护方式难以有效遏制围岩的流变特性,高预应力锚网喷联合支护技术成为控制围岩变形的关键手段。该技术体系的核心在于通过高强螺纹钢锚杆施加高预紧力,通过托盘与钢带将预应力扩散至围岩深部,形成具有一定厚度的预应力压缩带,金属菱形网与钢筋梯子梁的配合使用,增强了护表构件的抗剪切能力,防止破碎岩块的剥落。喷射混凝土层作为柔性封闭结构,不仅填补了岩体裂隙阻隔了风化作用,还与锚杆体系形成了协同承载结构。在施工过程中,需严格校核锚杆的锚固力与预紧扭矩,确保锚索的主动张拉力达到设计吨位,利用深孔锚索将浅部不稳定岩层悬吊于深部稳定岩体之上,构建深浅部协调变形的复合支护体系,有效限制巷道顶板的离层与两帮的移近<sup>[2]</sup>。

## 2.3 松软破碎围岩注浆加固工艺

针对断层破碎带及节理裂隙发育区域,围岩自稳能力极差,单纯依靠外部支护难以维持巷道稳定,需采用化学注浆或水泥注浆工艺改善岩体力学性质,注浆工程需依据岩体裂隙张开度及渗透系数,选择匹配的浆液材料与注浆压力。对于微细裂隙,选用高渗透性的超细水泥或聚氨酯类化学浆液,利用液压泵将浆液压入岩体深部,浆液凝固后将破碎岩块胶结成整体,显著提高岩体的粘聚力与内摩擦角,注浆孔的布置需呈放射状发散,确保浆液扩散半径覆盖整个松动圈,采用分序注浆与后退式注浆工艺,防止浆液沿裂隙跑漏,保证注浆饱满度,加固后的岩体形成了具有一定承载能力的人工假顶或加固拱,为后续的锚杆施工提供了可靠的着力基础,实现了由围岩改性到结构强化的工程技术路径。

# 3 矿井通风与瓦斯控制工程体系

## 3.1 矿井通风网络解算与风量分配

矿井通风系统是维持井下大气环境各项指标处于受控状态的动力基础。复杂的通风网络要求精确的节点风压解算与风量按需分配,利用计算机网络模拟技术对全矿井通风阻力分布进行动态分析,识别高阻力区段与风流不稳定分支,通过优化通风构筑物位置与调节风窗的开口面积,降低矿井总风阻,主通风机的工况点需匹配矿井通风阻力特性曲线,确保风机运

行在高效区。在多水平、多翼开采布局下,实施分区通风策略,各采区建立独立的进回风系统,减少角联风路的产生,消除风流反向与循环风的工程隐患,针对掘进工作面长距离供风需求,选用大功率对旋式轴流局部通风机,配合大直径阻燃抗静电风筒,降低沿程风阻,确保迎头风量满足稀释瓦斯与粉尘的工程标准,维持风流场的稳定流动。

## 3.2 本煤层瓦斯顺层钻孔预抽技术

对于高瓦斯及突出煤层,在回采作业前必须实施本煤层瓦斯预抽工程,通过降低煤体瓦斯含量与瓦斯压力,消除突出的动力势能,顺层钻孔施工需沿煤层倾向布置,严格控制钻孔轨迹,防止钻孔穿层进入顶底板岩层导致抽采失效,采用大功率履带式液压钻机,配备高强度螺旋钻杆与 PDC 复合片钻头,提高成孔效率与深度。钻孔施工完成后,立即进行封孔作业,应用聚氨酯—膨胀水泥“两堵一注”带压封孔工艺,消除钻孔周边的漏气通道,提高抽采负压在煤体深部的传递效率,抽采管网系统需加装流量计与浓度传感器,实时监测单孔及支管的抽采参数,对于抽采浓度衰减过快的区域,及时补打钻孔或实施水力割缝增透措施,通过增大煤体暴露面积,强化瓦斯解吸流动,确保评价单元内的残余瓦斯含量降至临界值以下<sup>[3]</sup>。

## 3.3 采空区高位裂隙钻孔与埋管抽放

回采工作面推进过程中,上覆岩层垮落形成采空区,其中的卸压瓦斯往往向回风隅角积聚,高位裂隙钻孔技术利用岩层移动形成的“0”形圈裂隙带作为瓦斯流动通道进行拦截抽采,钻场布置在回风巷顶板岩层中,钻孔终孔位置需精确落在冒落带上部的裂隙发育区,避开垮落带的漏风区与弯曲下沉带的闭合区。通过调节抽采负压,控制裂隙带内的气体流向,将高浓度的卸压瓦斯直接抽排至地面利用系统,对于回风巷上隅角,铺设大直径骨架风筒或专用埋管,随工作面推进埋入采空区,利用负压源持续抽吸积聚瓦斯,该系统需配合束管监测系统,实时分析采空区气体成分变化,防止因过度抽采导致采空区遗煤自燃氧化,实现瓦斯治理与防灭火工程的动态平衡。

## 3.4 综合防尘喷雾与空气净化系统

矿井建设过程中的破岩、运输及转载环节产生大量矿尘,综合防尘工程通过湿式作业与喷雾降尘手段全方位捕获悬浮颗粒,掘进机与采煤机必须配备内外喷雾装置,内喷雾压力需足以克服截割阻力并冷却截齿,外喷雾形成水幕覆盖尘源扩散路径,在各转载点、溜煤眼及破碎机处安装自动感应喷雾装置,利用红外传感器探测物料流动,实现尘源同步喷雾。进回风巷道每隔一定距离设置全断面水幕,利用高压微雾喷嘴产生微米

级水雾,增加水滴与粉尘颗粒的碰撞概率与捕捉效率,对于呼吸性粉尘浓度较高的区域,增设风水联动除尘风机或干式除尘器,通过滤筒过滤或离心分离原理净化风流,管路系统中添加润湿剂降低水的表面张力,提高煤尘的润湿性能,从源头抑制粉尘的产生与飞扬<sup>[4]</sup>。

## 4 地下水害防治与防灭火工程策略

### 4.1 承压含水层地面区域注浆改造

针对底板承压含水层威胁严重的矿区,采用地面区域治理工程对含水层进行预先改造是消除水害隐患的根本措施,利用定向钻进技术,在地面施工主孔并分支多个水平羽状孔,精确控制钻孔轨迹沿含水层层位延伸。选用高标号水泥浆或粘土水泥浆作为骨料,通过高压注浆泵将浆液压入岩溶裂隙与孔隙中,浆液扩散凝固后充填导水通道,置换出原本赋存的承压水,将强含水层改造为弱含水层或隔水层,注浆过程中需实时监测泵压与流量变化,依据P-Q曲线判断浆液扩散状态,直至达到设计终压,该工程措施在矿井建设前期实施,能够大面积封堵地下水补给通道,显著降低井下开采时的底板突水系数,为巷道掘进创造干燥的施工环境,从源头上阻断了高压水体对井下工程的侵入路径。

### 4.2 井下超前探放水钻探工艺实施

井下巷道掘进必须严格执行“有掘必探”的工程准则,利用专用探水钻机实施超前钻探作业,探水钻孔布置呈扇形结构,控制巷道前方及侧帮的一定范围,确保探查无盲区,钻进过程中需密切观察孔内返水颜色、水量变化及钻机运转声音,一旦发现顶钻、卡钻或涌水异常,必须立即停止钻进,固定钻杆并关闭孔口防喷装置。对于探明的积水区域,必须下套管安装高压闸阀,连接排水管路进行有控放水,放水过程中定时观测水压与流量衰减曲线,直至水量疏干,钻探施工需保留足够的超前距与帮距,严禁在未探明水文地质情况的区域盲目掘进,通过物探手段如瞬变电磁法或直流电法先行圈定异常区,钻探手段验证并消除隐患,构建起物探先行、钻探验证的综合探放水工程体系<sup>[5]</sup>。

### 4.3 矿井排水系统能力核定与优化

矿井排水系统是抵御突发涌水的最后一道防线,其工程能力必须留有充足的富余系数,主排水泵房需配备工作泵、备用泵与检修泵,其总排水能力应能在20小时内排出矿井24小时的最大涌水量,排水管路铺设双回路,当一条管路检修或故障时,另一条管路仍能承担全部排水负荷。随着矿井延深,需及时进行水泵扬程与管路阻力的校验,必要时增设中转水仓或更换高扬程多级离心泵,泵房吸水井与水仓连接处需设置滤网装置,防止杂物进入泵体损坏叶轮,建立自动化的水位监测与水泵联动控制系统,根据水仓水位自动调节开

启水泵台数,实现错峰填谷运行,定期进行联合排水试验,实测水泵工况点效率及管路排水能力,确保在突水工况下系统能迅速响应,维持井下水位的可控性。

### 4.4 采空区自然发火束管监测与注氮

针对易自燃煤层的采空区防灭火工程,建立束管监测系统是早期发现氧化升温征兆的关键,束管采样头预埋采空区散热带与氧化带交界处,通过真空泵将气体样本抽取至地面色谱分析仪,分析一氧化碳、乙烯、乙炔等标志性气体的浓度变化趋势,一旦发现气体浓度异常或呈现持续上升趋势,立即启动注氮防灭火系统。利用地面制氮机组生产高纯度氮气,通过专用管路输送至井下,经由预埋的注氮管路向采空区氧化带连续注入。氮气作为惰性气体,能有效降低采空区氧气浓度,抑制煤炭氧化反应速率并切断燃烧所需的氧气供给,对于高温点,可配合实施灌注黄泥浆或三相泡沫技术,利用浆液的包裹性与吸热性覆盖高温煤体,阻隔漏风通道,实现降温与窒息的双重灭火效能。

## 5 结束语

矿山建设工程是一项集地质勘探、岩土工程、流体力学及环境控制于一体的复杂系统工程。面对深部地层的高应力、高瓦斯及高水压等极端工况,单纯依赖经验式的施工模式已无法适应现代矿井的建设需求,必须确立以地质探测为先导、以支护力学与流体控制技术为核心的工程技术体系。通过光面爆破、联合支护、分区通风、瓦斯抽采及综合防治水等工程措施的有机结合与精准执行,能够有效化解地质环境带来的工程风险。各类工程技术的实施需依据现场监测数据进行动态调整,确保技术参数与岩体响应特征相匹配。只有不断革新工程工艺,强化技术参数的执行刚性,构建全方位、多层次的工程技术防御网络,才能确保矿山建设工程在复杂多变的地质环境中保持结构的稳固性与系统的可靠性,实现工程建设目标的顺利达成。

## 参考文献:

- [1] 苗永春,杨波,周航宇,等.基于AHP的煤矿企业“安全管理文化”建设与评估[J].中国安全生产科学技术,2025,21(S1):51-57.
- [2] 金传芳.金属非金属矿山安全生产管理标准化建设探究[J].冶金管理,2025(07):93-96.
- [3] 刘同原,刘建宇.煤矿安全管理智能化建设及发展研究[J].内蒙古煤炭经济,2025(11):112-114.
- [4] 刘玉喜.矿山电气安全管理与技术探讨[J].中国金属通报,2025(02):181-183.
- [5] 胡言钊.露天矿山安全标准化建设与评价研究[J].中国金属通报,2023(06):192-194.