

充填采矿技术的应用研究

刘海龙

北京首钢矿山建设工程有限公司, 北京 100000

[摘要]充填采矿技术属于现代矿山开采体系里的重要部分,借助主动对采空区力学环境加以调控来达成安全且高效的开采目标。文章全面阐述了干式、湿式、膏体以及胶结充填技术各自的工艺特点与适用范围,深入剖析了充填体的力学性能和围岩之间相互作用的机制。同时结合当下技术的发展态势,从灾害防治、材料创新、工艺融合等多个方面说明应用的实际情况,并提出了包含渗透调控、参数优化、系统集成、材料改良以及质量管控在内的五位一体的技术优化路径,以此为构建安全可控制、绿色环保、智能高效的充填采矿体系给予理论方面的有力支撑。

[关键词]充填采矿;膏体流变;协同支护;材料改性

DOI: 10.33142/ect.v3i6.16885

中图分类号: TD823

文献标识码: A

Application Research on Backfill Mining Technology

LIU Hailong

Beijing Shougang Mining Construction Engineering Co., Ltd., Beijing, 100000, China

Abstract: Backfilling mining technology is an important part of the modern mining system, which achieves safe and efficient mining goals by actively regulating the mechanical environment of the goaf. The article comprehensively elaborates on the process characteristics and application scope of dry, wet, paste, and cemented filling technologies, and deeply analyzes the mechanical properties of the filling body and the mechanism of interaction between surrounding rocks. At the same time, based on the current development trend of technology, the actual application situation is explained from multiple aspects such as disaster prevention and control, material innovation, and process integration. A five in one technological optimization path including infiltration control, parameter optimization, system integration, material improvement, and quality control is proposed, which provides strong theoretical support for building a safe, controllable, green, environmentally friendly, intelligent and efficient backfill mining system.

Keywords: fill mining; paste rheology; collaborative support; material modification

充填采矿技术依靠人工构建充填体来达成对采空区的主动支撑,从根源上对传统采矿所引发的岩层移动规律予以改变。伴随深部开采以及复杂矿体开发需求不断增长,这项技术在控制地表沉陷、改善地压显现状况、处置工业固废等诸多方面都彰显出独有的优势。当下技术的发展呈现出材料科学、岩土力学以及智能控制等多学科相互交叉的特点,其关键点在于处理充填体强度时效性、工艺经济性以及环境协调性三者间的动态平衡难题。

1 充填采矿技术分类

1.1 干式充填

将干燥的固体充填材料(如废石、尾砂等)直接充填至采空区,通过机械夯实或自然沉降,形成致密充填体。这种方法简单易行、成本低,但充填体强度较低,适用于地表岩层稳定、采深较浅的矿山。

1.2 湿式充填技术

湿式充填所采用的介质是尾砂浆体,借助水力梯度来达成管道的自流输送。在沉降进程里,尾砂颗粒会形成层状的堆积结构,而其固结的速度会受到浆体浓度、颗粒级配以及絮凝剂类型等多方面因素的共同作用。其中的关键技术参数有临界流速、沉积坡度以及泌水速率,这些参数

需要依靠流变试验来确定最为适宜的输送浓度区间。此技术对于细粒级尾砂有着不错的适应性,然而也存在着充填体强度增长较为缓慢、采场脱水周期偏长等一系列问题,所以得配合分段隔离的相关措施一同使用。

1.3 膏体充填技术

膏体充填借助对骨料级配以及添加剂配比加以调节的方式,让混合料呈现出非牛顿流体所具有的特性,并且将屈服应力的范围控制在 200~800Pa 这一区间内。它的核心优势就在于能够在高浓度的条件之下达成稳定的输送效果,其中充填体的塌落度能够维持在 15~25cm 这样一个较为理想的区间范围。经过微观结构方面的分析可以发现,膏体在受到剪切稀化的作用影响之时会形成三维网状的骨架结构,而且同时具备触变性以及自密实性这两种特性。这项技术能够在很大程度上降低井下脱水的负荷,不过对于搅拌设备的功率以及管道的耐磨性都有着比较高的要求。

1.4 胶结充填

在干式或湿式充填料中掺加水泥、粉煤灰等胶凝材料,利用胶凝材料水化形成的水化产物,将松散颗粒胶结成整体,获得高强度充填体。胶结充填适用于对采空区稳定性要求高的矿山。

2 充填采矿技术的应用现状分析

2.1 矿井灾害防治领域

充填体于矿井灾害防控领域呈现出多维度的力学调控效能。依靠充填体和围岩的协同变形机制,能够对采场三维应力场分布予以重新构建:在垂直方向上,凭借充填体弹性模量与围岩刚度相匹配的情况,进而产生“弹性支座”效应,使得顶板下沉量得以降低;而在水平方向方面,借助充填体侧向约束力来抑制围岩塑性区不断扩展,把岩爆风险区域的应力集中系数控制在 1.5 以下^[1]。就突水通道封堵这一情况而言,胶结充填体经过对骨料级配以及胶凝材料掺量加以优化之后,便形成了双重防渗结构——其中粗骨料骨架起到机械阻隔的作用,而胶结相填充微孔隙则可使渗透率降至 10^{-6}cm/s 这样的量级。对于多中段开采所出现的应力叠加效应,采用“高模量核心区+梯度过渡层”这种差异充填设计方式,利用充填体弹性模量从 20GPa 一直到 5GPa 呈现出的连续变化状况,达成采动应力波阻抗的渐进式衰减效果。除此之外,充填体与注浆加固技术联合起来进行应用,能够在断层带形成复合承载体,通过注浆结石体来提升充填界面的抗剪切能力。

2.2 充填材料与工艺创新

固废基胶凝材料体系打破了对传统水泥的依赖状况,借助多尺度活化技术来挖掘工业固废所蕴含的潜在活性。在机械活化环节,运用行星式球磨机来达成矿渣比表面积超出 $600\text{m}^2/\text{kg}$ 的目标,进而推动玻璃体结构出现解聚情况;就化学激发而言,挑选钠水玻璃和硫酸盐复合激发剂,由此使得赤泥当中的活性铝硅酸盐溶解率得以提升,达到了 75% 以上的程度。在材料改性的层面,聚羧酸减水剂和纳米二氧化硅发挥出协同效应,能够把充填料浆的流动度提升 30%,与此同时还将泌水率减少到 2% 以内。工艺创新主要集中在骨料预处理以及浆体稳定性控制这两个方面:旋流分级装置凭借对底流口直径以及进口压力加以调节的方式,实现了对尾砂-0.074mm 粒级含量的精准把控,使其控制在 35%~45% 这个区间范围;真空脱水系统采用多孔陶瓷滤板以及负压梯度加载技术,促使滤饼含水率降低至 18% 以下。新型搅拌工艺依靠双轴异速剪切的作用,消除了膏体充填料里面的团聚结构,从而确保流变参数变异系数小于 5%。

2.3 采矿方法技术融合

充填工艺同采矿方法相互融合,由此催生出多种具有适应性的技术体系。阶段嗣后充填依靠“回采-充填-养护”这三个阶段的时序来加以控制,以此保证充填体强度的发展速率能够和采场的暴露时间相匹配,其中最为关键的控制指标在于充填体在 3 天时的强度要达到 1MPa 以上。在房柱法的优化过程当中,胶结充填体和原本就存在的矿柱共同构成复合支撑结构,借助弹性模量匹配方面的设计,从而实现应力能够均衡地分布^[2]。对于倾斜矿体的开采情况而言,所研发出来的走向分段充填法通过调节充填步距

以及接顶角度这两方面,可有效地对上盘围岩的剪切滑移量予以控制。在关键技术层面取得的突破主要表现在充填接顶工艺的革新上面,也就是利用气动助推系统并配合膨胀剂的添加,如此一来,接顶率从传统工艺下的 70% 提升到了 95% 以上,并且充填体与顶板之间接触应力分布的均匀性也提高了 40%。

2.4 智能化施工技术进展

充填施工在向智能化转型的过程中,其核心是以数据感知、分析以及决策所形成的闭环。物联网监控系统把科氏力质量流量计、 γ 射线浓度计等一系列传感装置集成起来,其采样频率能够达到每秒 10 次,如此一来便能实现对料浆密度的精准控制,其控制精度可以达到 $\pm 0.01\text{t/m}^3$ 这样的程度。深度学习所构建的管道堵塞预警模型借助卷积神经网络来提取压力波形的时频特征,能够在管道堵塞刚开始出现苗头的时候,提前 30min 就发出预警信息。运用 BIM 技术所构建的充填数字孪生体,将地质模型、设备参数还有施工日志等方面的数据都集成到了一起,再通过碰撞检测算法对管道布置方案加以优化,使得弯头的数量减少了 40% 以上。智能调控系统采用的是模型预测控制算法,能够实时对搅拌能耗以及管道输送效率进行优化处理,进而让每吨充填材料的电耗降低了 25%。机器人巡检装置上搭载了三维激光扫描仪,它能够自动识别出充填挡墙上的裂缝,并且还能评估其结构的安全等级,其检测效率相比于人工而言提升了足足 8 倍之多。

3 充填采矿技术应用策略优化

3.1 矿井水害协同防治体系构建

矿井水害的防治工作应当从充填体渗透性能以及水文地质条件这两方面着手展开协同调控相关事宜。其中,充填体渗透系数和含水层导水能力所呈现出的匹配关系,在构建阻水屏障这一过程中占据着极为关键的地位,属于核心要点所在。借助多孔介质渗流理论来构建渗透率与水力梯度之间的耦合方程,以此对不同孔隙率分布状况下对地下水渗流路径所产生的改造成效加以量化分析。凭借基于 CT 扫描所开展的充填体三维重构技术,能够精准地识别出微观层面的渗流优势通道情况,并且将分形维数计算方法融入其中,以此来对骨料级配进行相应的优化处理。在细颗粒用于填充粗骨料间隙的基础之上,进一步引入纤维材料,以此增强孔隙的曲折程度。水文地质模型需要把非饱和渗流方程以及达西定律加以集成整合起来,通过运用有限元法对充填体和围岩接触面所存在的水力耦合行为展开模拟操作,从而动态地去评估充填体渗透时效性对于承压水头抑制效率所产生的影响情况。对于高水压地层而言,要采用多层异质充填结构来进行设计,具体来讲就是在表层设置低渗透胶结层,以此来阻断初始渗流现象的发生,而在内部则要保留适度的透水通道,借此实现压力的缓释作用,进而形成一个“堵疏结合”的立体防控体系。

3.2 爆破-充填一体化参数设计

爆破作业和充填体稳定性之间存在着较强的时空关联性,所以得建立起爆破能量场以及充填体动力响应的协同控制机制才行。运用离散元-有限差分耦合算法来模拟爆炸应力波在充填体里面的传播特点,着重去分析纵波速变化的规律还有剪切滑移面扩展的走向,进而确定充填体临界振动加速度的阈值^[3]。在中深孔爆破方面,采用空气间隔装药的结构形式,借助调节径向不耦合系数的方式来控制爆生气体的作用时长,凭借应力波叠加所产生的效应形成较为平滑的破裂面。鉴于充填挡墙对于振动比较敏感这一情况,依据小波包能量分析法提取出爆破振动信号的频带能量分布方面的特征,由此建立起挡墙固有频率和爆破主频之间的避让准则。另外还开发了充填体-围岩系统的振动传递函数模型,通过传递矩阵法来计算不同位置处振动速度的衰减系数,从而制定出分区域的爆破药量控制标准。引入预裂爆破技术,以此形成应力隔离带,并且利用充填体的塑性变形来吸收残余振动能量,最终达成采动扰动和充填稳定所呈现出的动态平衡状态。

3.3 高可靠性充填系统建设

充填系统的可靠性要想得到提升,得从结构材料、输送工艺以及应急保障这三个方面一同着手去优化才行。就结构材料而言,纳米改性混凝土挡墙在制作过程中掺入了二氧化硅气凝胶颗粒,如此一来便在材料内部成功构建起了纳米级的闭孔结构,进而让其抗渗性能得以突破以往达西定律所适用的边界范围。借助反应分子动力学来模拟水泥水化产物和纳米材料之间的界面结合机制,以此对改性剂的掺量以及分散工艺的各项参数加以优化处理。再看输送工艺方面,管道输送系统会依据浆体流变特性的曲线情况,运用哈夫曼方程来计算各个不同管路段的沿程阻力损失。其中,通过变径的设计方式使得自流段的管径能够增大15%~20%,以此达到降低流速梯度的目的;而泵压段则采用锥形渐缩管的方式来维持剪切速率处于恒定的状态。至于应急保障环节,设置了以PLC控制为基础的应急缓冲仓,当检测到管道压力出现突发性变化的时候,该应急缓冲仓能够自动切换输送路径。备用泵站这边则采用双电源冗余以及液压蓄能器这两种手段,以此来保障整个系统能够实现零延迟的启动状态。另外还开发出了管道磨损寿命的预测模型,结合EDEM软件对骨料颗粒针对管壁所产生的微切削作用展开模拟,从而建立起管壁厚度、输送压力以及使用寿命之间相互对应的映射关系。

3.4 绿色充填材料研发路径

固废基胶凝材料的研发工作需要突破活性激发以及界面强化方面的关键技术。赤泥所制备的地质聚合物借助碱激发剂来溶解铝硅酸盐玻璃体,进而形成由 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 与 $[\text{AlO}_4]^{5-}$ 构成的三维网络结构,其反应的程度能够凭借核磁共振谱 ^{29}Si 化学位移值来进行量化的表征。煤矸石热

活化运用的是两段式的煅烧工艺,先是于 650°C 的温度下脱除羟基水以此来增强无定形相的含量,接着在 850°C 的温度下促使莫来石晶相发生重构,进而提升其火山灰活性。当钢渣微粉和热活化煤矸石按照1:2的质量比例进行复配的时候, CaO/SiO_2 的摩尔比能够达到0.8~1.2这个胶凝反应的最佳区间范围。对于环境相容性的评价而言,需要通过动态淋溶试验来测定重金属离子的累积释放量,并且采用地球化学模拟软件来预测在百年这样的尺度范围内污染物的迁移规律,以此确保充填体可以成为重金属的永久固化载体。

3.5 全周期充填质量管控体系

充填体全周期性能演化监测工作需要将多源信息感知以及大数据分析技术相互融合起来。分布式光纤传感网络按照0.5m的空间分辨率来布置,借助布里渊频移量来反演充填体轴向应变的具体分布情况,同时结合温度补偿算法把热致应变误差给消除掉。声发射系统运用波形特征聚类分析技术,从背景噪声当中把微裂纹扩展所产生的突发信号提取出来,依据b值理论对充填体损伤演化的各个阶段做出预测。在开发多参数融合算法的时候,需要构建起卷积神经网络架构,其输入层要集成应变速率、声发射事件率还有湿度扩散系数等多达12维的特征向量,而输出层则要映射充填体剩余强度系数以及破坏概率。健康度分级标准是依照支持向量分类模型来确定的,会将充填体的状态划分成弹性稳定期、损伤累积期以及临界失稳期这三个阶段,再根据这样的划分动态地去调整相邻采场回采的间隔时间,以此来确保采充协同能够具备一定的安全裕度。

4 结语

充填采矿技术当下正处在从被动支护逐步朝着主动调控转变的关键时期,其技术所涵盖的内涵也在不断地向着更为精细化以及更智能化的方向去延伸拓展。在未来的研究当中,应当将关注点聚焦在多个场耦合所产生的作用之下的充填体长效稳定性的相关机理方面,还有固废资源化利用时的界面反应调控事宜,以及由数字孪生所驱动的全流程优化这类前沿领域之上。借助材料、工艺以及装备等方面的协同创新举措,促使充填采矿技术能够朝着更加安全、更加经济以及更加绿色的方向不断发展前行,进而为矿产资源实现可持续开发给予相应的技术方面的有力保障。

【参考文献】

- [1]郭玉杰.金属矿山充填采矿技术要点及应用分析[J].世界有色金属,2023(22):78-80.
- [2]飘凡.试析充填采矿技术在金属非金属矿山采矿工程中的应用[J].中国金属通报,2024(1):20-22.
- [3]张云.充填采矿技术在金属矿山采矿工程中的应用[J].世界有色金属,2025(3):100-102.

作者简介:刘海龙(1986.5—),单位名称:北京首钢矿山建设工程有限公司,毕业学校和专业:张家口职业技术学院。