

煤矿开采对地表层沉陷的影响规律研究

拜克尔·胡达拜尔迪

国网能源新疆准东煤电有限公司准东二矿 新疆 昌吉 831100

摘要：本文聚焦煤矿开采对地表层沉陷的影响规律研究，阐述了岩层移动理论与地表沉陷影响因素，为研究奠定理论基础。接着开展不同开采条件下地表沉陷数值模拟，分析不同开采方法与参数对沉陷的影响。随后进行现场监测，对比监测与模拟结果。因此，提出防治原则、目标及开采、工程防治措施，旨在实现煤矿开采经济效益与生态安全平衡，为地表沉陷防治提供理论与技术支持。

关键词：煤矿开采；地表层沉陷；影响规律；预测模型

引言：煤炭作为我国重要的能源支柱，煤矿开采活动日益频繁。然而，煤矿开采在带来经济效益的同时，也引发了地表层沉陷这一严峻问题，对周边环境、建筑物及基础设施等造成诸多不良影响。深入探究煤矿开采对地表层沉陷的影响规律，并探寻有效的防治措施，对于实现煤矿开采的经济效益与生态安全平衡、推动行业可持续发展而言，具有至关重要的现实意义。

1 煤矿开采与地表层沉陷相关理论基础

1.1 岩层移动理论

岩层移动理论是解析煤矿开采致地表沉陷的核心理论，旨在揭示地下岩体在采空区形成后的力学响应规律。煤矿开采打破采场周围岩体原有应力平衡，形成应力重新分布区，含应力降低、集中和原始应力区。采空区扩大，上方岩层失支撑，依次弯曲、离层、断裂、冒落，变形由下向上传递致地表沉降。该过程具时空特性，时间上分初始、活跃、稳定移动三阶段，空间上形成以采空区为中心的移动盆地。依岩体变形特征，理论分连续、离散、不连续介质理论等分支。连续介质理论用弹性、塑性力学方程描述变形；离散介质理论借颗粒流方法模拟岩体破碎运动，为沉陷预测与防治提供理论支持^[1]。

1.2 地表沉陷影响因素分析

地表沉陷是多种因素共同作用的结果，各因素经影响岩层移动改变地表沉陷的范围、幅度与形态。地质条件是基础，岩体物理力学性质决定沉陷程度，抗压、抗拉强度高，弹性模量大，抵抗变形能力强，沉陷量小；岩层层理结构、厚度及分布连续性也关键，厚层坚硬岩层成“关键层”延缓变形传递，薄层软弱岩层易剧烈变形。开采技术条件为主导，开采厚度与沉陷量正相关；开采深度越大，沉陷范围越广、坡度越平缓；开采边界形状影响移动盆地形态；煤层倾角使盆地倾向倾斜下方偏

移，倾角越大偏移越大；地下水活动软化岩体、降低强度，加速岩层移动与地表沉陷。

2 不同开采条件下地表层沉陷数值模拟研究

2.1 数值模拟软件介绍

煤矿开采地表沉陷数值模拟常用软件基于不同力学原理开发，适用于不同场景，能精准复现开采中岩体变形与地表沉陷规律。FLAC3D基于有限差分法，将计算区域离散化为网格单元，用显式时间积分求解岩体应力应变问题。它支持多种本构模型，如摩尔-库仑模型等，可有效模拟岩体从弹性变形到破坏的全过程，在大变形和岩体断裂模拟上优势明显，能直观呈现采空区形成后岩层移动的动态过程。UDEC/3DEC基于离散元法，把岩体看作离散块体和节理面组成的系统，重点模拟块体间的相对滑动与转动，适用于节理发育的岩体工程，能精准反映节理面对岩层移动和地表沉陷的控制作用。COMSOL Multiphysics基于有限元法，具备多物理场耦合分析能力，可实现应力场与渗流场、温度场等的耦合模拟，适合研究地下水活动等因素对地表沉陷的影响。这些软件都有数据输入、求解、结果可视化等功能，能输出位移云图等成果，为沉陷规律研究提供有力工具。

2.2 数值模型建立

数值模型建立要遵循科学、合理、实用原则，精准复刻地质和开采条件，保证模拟结果与实际相符。首先确定模型范围，依据开采影响半径公式计算，横向取开采宽度的3-5倍，纵向覆盖从地表到开采煤层下方足够厚度的稳定岩层，避免边界效应影响计算^[2]。网格划分采用非均匀网格，开采及周边关键区域用细密网格提高精度，远离区域用粗网格降低成本，网格质量要满足正交性，防止出现畸形网格。地质条件参数赋值是关键，通过现场钻孔取样和室内试验获取岩体物理力学参数，如密度、弹性模量等，对不同岩层按实际分布进行参数分

区赋值。开采过程模拟通过设置开挖步序实现,按实际进度依次删除对应网格单元模拟采空区形成,同时设置位移和应力边界,底部和侧面固定约束,顶部施加等效上覆岩层自重应力。模型建立后需校验参数,调整至初始应力状态与现场实测一致,确保模型可靠。

2.3 不同开采方法对地表沉陷的影响

不同开采方法因改变采空区形态、顶板管理方式及岩体受力状态,对地表沉陷产生显著差异。长壁垮落法应用广泛,开采后顶板自然垮落填充采空区,但无法完全抵消岩层变形,致使上方岩层持续移动,地表形成大面积、大幅度沉陷盆地,移动盆地边缘有明显裂缝带,对地表建(构)筑物破坏较大。充填开采法向采空区填充矸石、膏体等充填体,有效控制顶板下沉,充填体承担大部分上覆岩层荷载,减少岩层离层和断裂,地表沉陷量大幅降低,当充填体强度高且充填率高时,地表沉陷可控制在极小范围内,适用于“三下”开采场景。条带开采法将煤层划分成若干条带,开采条带煤体后保留条带作为支撑体,通过调整采留比控制岩层移动,无需充填材料,但资源回收率较低。房柱开采法通过开采房式巷道,保留柱式煤体支撑顶板,地表沉陷量较小,不过易出现顶板局部冒落情况,更适用于薄煤层开采。不同开采方法各有优劣,需根据具体地质和开采条件合理选择,以降低地表沉陷对周边环境的影响。

2.4 不同开采参数对地表沉陷的影响

开采参数是人为可控因素,对地表沉陷范围和程度起决定性作用,合理调整可降低沉陷风险。开采厚度是最直接的影响参数。相同地质条件下,地表沉陷量与开采厚度呈线性正相关,每增加1m,地表最大沉陷量增加0.4 - 0.8m。超过岩层临界厚度,顶板整体垮落,地表沉陷突变。对于50m - 70m特厚煤层,采用长壁垮落法开采(开采深度约600米),因开采厚度大,采空区上方岩层支撑范围广,易引发大规模岩层离层与断裂,地表沉陷量是普通中厚煤层的3 - 5倍,沉陷盆地边界裂缝发育剧烈,甚至出现阶梯式沉陷;600米开采深度使沉陷影响范围扩大至采空区宽度的4 - 5倍,沉陷坡度平缓,形成大范围平缓型移动盆地;开采深度越大,地表沉陷范围越广,坡度越平缓。常规煤层开采深度从100m增至300m,地表沉陷影响范围扩大2 - 3倍,最大沉陷量为浅部开采的50% - 70%。开采速度影响沉陷特征,快速开采使岩层变形不充分,地表沉陷量减少10% - 20%,但应力集中易引发冲击地压;缓慢开采沉陷量增大,应力释放更均匀。采空区宽度与地表沉陷有临界关系,小于岩层临界垮落宽度,顶板仅弯曲,地表无明显沉陷;超过临界值,顶

板垮落范围急剧扩大,沉陷量呈指数增长。

3 煤矿开采地表层沉陷现场监测与分析

3.1 现场监测方案制定

制定现场监测方案,需综合考量开采特性、地质条件与监测目标,搭建全方位监测体系,确保数据精准且及时。监测范围以采空区投影为圆心,向外辐射至预计移动盆地边界外50 - 100m,全面覆盖沉陷影响区域。监测内容聚焦地表沉降、水平位移等核心指标,分别运用水准测量、视准线、GPS定位以及RTK测量等方法开展监测。监测点布设遵循“均匀分布、重点突出”原则,在沉陷最大值区域加密布设,点间距设为10 - 20m,边缘区域可放宽至30 - 50m,依据现场实际及工程通用做法,采用稳固方式,固定监测点。监测频率依据开采进度与沉陷阶段灵活调整,开采初期、活跃期、稳定期及数据突变时按合理间隔开展监测。方案还需明确数据记录标准等内容,配备专业仪器并定期校准^[3]。

3.2 现场监测数据整理与分析

现场监测数据整理与分析是挖掘沉陷规律、评估风险的关键。先校验原始数据,用拉依达准则剔除异常值并补测修正。再对校验后数据规范化处理,建立数据库,绘制曲线。数据分析采用定性与定量结合,定性判断沉陷阶段,依位移速率划分初始、活跃、稳定移动阶段;定量计算沉陷特征参数,如最大沉陷量等,确定沉陷系数、移动角等。同时,结合地质和开采参数,分析因素与参数相关性,建立沉陷量与开采厚度、深度的回归预测模型,为沉陷预测提供数据支撑。

3.3 监测结果与数值模拟对比分析

监测结果与数值模拟对比分析可验证模型可靠性、优化参数。先对比沉陷特征参数,量化现场监测与数值模拟结果,计算相对误差,小于10%认为可靠,超15%则分析误差来源并调整参数。接着对比沉陷过程,分析监测与模拟位移曲线在时间上的一致性,判断模拟是否复现时间效应。再对比空间分布,绘制等值线图,对比移动盆地特征,看模拟是否反映空间分布。误差分析从模型参数、网格划分、边界条件三方面展开,针对问题重新获取参数、加密网格、调整边界条件。优化后的模型能更精准预测地表沉陷,为开采方案优化和防治措施制定提供依据。

4 煤矿开采地表层沉陷防治措施研究

4.1 防治原则与目标

煤矿开采地表层沉陷防治要遵循科学合理原则,平衡经济效益与生态安全,明确防治方向。核心防治原则有:“源头控制、过程调节、末端治理”结合,源头

优化开采方案减少风险,过程动态监测调整参数控制发展,末端用工程措施修复损害;“因地制宜、分类施策”,依地质、开采规模和地表保护要求制定方案,如厚煤层用充填法,薄煤层用条带开采法;“技术可行、经济合理”,保证效果前提下,选成本可控、施工便捷技术,避免过度防治增成本;“生态优先、绿色发展”,将防治与生态修复结合,减少对植被、水体和土壤破坏,实现协调发展。防治目标分阶段性和总体目标。阶段性目标包括开采期间地表沉陷速率控制在5mm/d内,沉陷量在建构筑物允许变形范围;总体目标为开采结束后地表沉陷稳定,沉陷区生态环境有效修复,土地复垦率达90%以上,恢复地表生态功能和土地利用价值。

4.2 开采技术措施

开采技术措施通过优化开采方式与参数,从源头控制岩层移动和地表沉陷,是防治核心手段。充填开采是广泛应用的源头控制技术,依充填材料分矸石、膏体和高水材料充填。矸石充填用煤矿固废,实现资源化利用,充填率85%-95%,有效控制顶板下沉;膏体充填材料混合制成,流动性好、强度高,充填率超95%,地表沉陷量控制在100mm内;高水材料充填凝固时间短,适合快速开采。条带开采合理划分采留条带,调整采留比控制沉陷,常用1:1或2:1,留条带宽度满足支撑要求,无需充填设备,适合中小型煤矿。限厚开采控制单次开采厚度,煤层超3m分层开采,每层2-3m,留隔离煤柱减少扰动。缓慢开采降低速度,让岩层变形协调,减少应力集中,但要结合冲击地压防治措施。此外,对称、顺序开采可使岩层变形均匀,减少局部集中沉陷。

4.3 工程防治措施

工程防治措施通过采取主动加固或被动防护工程,控制沉陷发展或修复沉陷损害,是开采技术措施的有效补充。顶板加固工程通过增强顶板岩体强度,提高其抗变形能力,常用技术包括锚杆支护、锚索支护和注浆加固,锚杆支护通过在顶板打设锚杆,将表层岩体与深部稳定岩体连接,阻止岩体离层;锚索支护适用于厚层顶板,通过长锚索将顶板与更深处的稳定岩层固定,承载

力更高;注浆加固通过向顶板岩层裂隙注入水泥浆或化学浆液,填充裂隙并胶结岩体,提高顶板整体性^[4]。地表加固工程针对已发生沉陷的区域,采用灌浆加固和强夯加固技术,灌浆加固通过向地表沉陷区土层注入浆液,填充孔隙并提高土层密实度,减少后续沉陷;强夯加固通过重锤夯实地表土层,提高土层承载力,适用于浅层沉陷治理。沉陷区修复工程包括土地复垦和生态修复,土地复垦根据沉陷程度采取不同方式,轻微沉陷区采用平整土地、修筑梯田等方式恢复农业用地;中度沉陷区采用挖深垫浅方式,开挖沉陷较深区域形成水体,垫平浅沉陷区域形成耕地;重度沉陷区可改造为鱼塘、湿地公园等。生态修复通过种植耐贫瘠、抗逆性强的植被,恢复地表植被覆盖,减少水土流失,同时采用生态袋、格宾网等技术加固边坡,防止滑坡、泥石流等次生灾害,实现沉陷区生态功能恢复。

结束语

煤矿开采引发的地表层沉陷问题关乎经济与生态安全。本文通过理论分析、数值模拟、现场监测等手段,深入探究了其影响规律,并提出针对性防治措施。研究虽取得一定成果,但煤矿地质条件复杂,未来仍需不断优化防治技术,结合实际完善预测模型,加强新技术应用,以实现煤矿开采与生态环境协调发展,推动行业可持续发展。

参考文献

- [1]王晓东,李志强,赵宏宇.煤矿开采沉陷对地表建筑物损害机理及防治技术研究[J].煤炭科学技术,2022,50(08):123-130.
- [2]刘慧敏,陈建国,孙晓峰.煤矿开采沉陷对地表建构筑物影响规律及控制措施分析[J].矿业安全与环保,2021,48(04):98-103.
- [3]郭文兵,杨伟强,吴东涛.我国煤矿开采沉陷控制技术研究现状与进展[J].采矿与岩层控制工程学报,2024,6(06):5-20.
- [4]伊永杰,王捞捞,朱卫兵.保德煤矿冲沟地形下综放开采地表沉陷规律研究[J].中国矿业,2023,32(03):60-66.