

煤矿多煤层重复采动对地表沉降叠加效应的探讨

李国杨

兖矿新疆矿业有限公司硫磺沟煤矿 新疆维吾尔自治区 昌吉 831100

摘要:我国浅部煤炭资源渐趋枯竭,煤炭开采向深部及复杂地质区域延伸,许多矿区尤其是老矿区多煤层赋存普遍。为充分回收资源,常采用分层开采,对多煤层重复采动。此模式使覆岩多次受扰破坏,内部结构与力学性质改变,地表沉降呈现复杂非线性叠加效应,传统单次采动预测模型失效,难评估环境风险。本文系统探讨煤矿多煤层重复采动下地表沉降叠加效应,阐述重复采动概念、背景及岩层移动规律,剖析叠加效应内涵、影响因素及与单次采动区别,回顾评述相关研究预测理论方法。结合现状指出关键科学问题与技术挑战,展望未来研究方向,为深部多煤层安全高效开采及生态保护提供理论支撑。

关键词:多煤层开采;重复采动;地表沉降;叠加效应;覆岩破坏

引言

煤炭是我国主体能源,在能源安全战略中地位关键。为提高资源回收率,许多矿区回采边角煤柱、薄煤层及多煤层群,催生了多煤层重复采动这一普遍且复杂的工程地质问题。重复采动是对不同深度两个及以上煤层依次开采。下行开采时,首次采动使覆岩“三带”(垮落带、裂隙带、弯曲下沉带)结构受损,完整性、承载力降低。再次采动,覆岩响应机制改变,地表沉降盆地呈现显著“叠加效应”。准确理解和预测该效应,对于保障矿区地面建筑物、铁路、水体(“三下”压煤)的安全、规划村庄搬迁与土地复垦、评估生态损害意义重大。但重复采动岩体力学行为复杂,现有基于单次采动的经典理论在应用时偏差大。因此,深入研究多煤层重复采动地表沉降叠加效应,揭示规律、发展预测评价方法,是采矿等领域亟待解决的关键问题。

1 重复采动的基本概念与岩层移动特征

1.1 重复采动的定义与分类

重复采动的核心在于“重复”二字,即同一区域的覆岩系统经历了不止一次的开采扰动。根据开采顺序的不同,可分为上行开采和下行开采。上行开采指先采下部煤层,后采上部煤层;下行开采则反之。在我国,受开采习惯、巷道布置及瓦斯治理等因素影响,下行开采更为普遍。本文的讨论主要基于下行开采模式。根据两次采动在时间和空间上的关系,重复采动又可细分为:(1)同采区重复采动:上下煤层在同一采区范围内开采,影响最为直接和剧烈。(2)相邻采区重复采动:上下煤层的开采区域部分重叠或相邻,存在一定的相互影响。(3)全采动与局部采区重复采动:例如,上煤层曾进行过房柱式开采(局部开采),留下大量煤柱,而下煤层则

进行长壁全采动,此时下煤层开采会对上覆的残余煤柱及采空区产生复杂的二次扰动。

1.2 重复采动下的覆岩破坏与移动规律

单次采动时,覆岩的破坏遵循经典的“三带”发育规律。垮落带内的岩块杂乱无章,裂隙带内岩层产生大量垂直与水平裂隙但仍保持层状,弯曲下沉带则整体下沉而未产生贯通裂隙。在重复采动条件下,这一过程被彻底改变:(1)初始状态的变化:当下煤层开始开采时,其顶板上方的岩层并非原始完整岩体,而是已经被上煤层开采严重损伤的“再生”岩体。这个“再生”岩体具有低强度、高孔隙率、强各向异性的特点。(2)垮落与裂隙的加速扩展:由于上覆岩层结构松散、承载力弱,下煤层开采所形成的矿山压力更容易向上传递。这导致下煤层开采时,其垮落带和裂隙带的发育高度往往远大于同等条件下单次采动的理论值。裂隙不仅向上发展,还可能沿着上煤层开采形成的旧裂隙网络迅速扩展、贯通。(3)关键层作用的弱化或转移:在单次采动中,坚硬厚实的“关键层”对控制上覆岩层的整体移动起着决定性作用。但在重复采动中,如果关键层在首次采动中已被破坏,则其控制作用消失,覆岩移动可能由更高位的、原本不具关键作用的岩层来承担,或者表现为无明显主控层的整体失稳^[1]。(4)地表移动的滞后性与突发性:重复采动地表下沉过程常表现出明显的滞后现象。在下煤层开采初期,地表下沉缓慢,因为能量主要用于进一步压实和重组上覆的破碎岩体。一旦破碎岩体达到新的极限平衡状态或发生突然的连锁垮塌,地表下沉速度会急剧增加,甚至出现台阶式或突陷式下沉,给地面设施带来灾难性后果。

2 地表沉降叠加效应的内涵与影响因素

2.1 叠加效应的内涵

地表沉降的叠加效应，是指在多煤层重复采动条件下，最终形成的地表沉降量（或沉降盆地）不等于各煤层单独开采所引起沉降量的简单算术和。这种效应可以是正叠加（增强效应），也可以是负叠加（削弱效应），但绝大多数情况下表现为非线性增强。（1）正叠加（增强效应）：这是最常见的情形。由于上覆岩层在首次采动后已处于临界失稳或高度损伤状态，其抵抗二次变形的能力极低。当下煤层开采时，很小的扰动就能引发大范围的、不可逆的二次沉降。最终总沉降量 $W_{\text{总}}$ 远大于两次单独开采沉降量之和（ W_1+W_2 ），即 $W_{\text{总}} > W_1+W_2$ 。（2）负叠加（削弱效应）：在某些特殊条件下可能出现。例如，上煤层开采后形成了一个非常稳定的、类似“拱”或“梁”的承载结构，当下煤层在其下方开采时，这个稳定结构能够有效“屏蔽”部分矿山压力，从而使得传递到地表的附加沉降量小于预期。但这种情况较为罕见，且稳定性难以保证。叠加效应的本质是岩体损伤的累积与演化。每一次采动都在前一次的基础上，对覆岩造成新的、更深层次的损伤，导致其宏观力学性能持续劣化，从而放大了后续采动的影响。

2.2 主要影响因素

2.2.1 层间距（H）

这是最关键的因素之一。层间距是指上下两煤层之间的法向距离。一般认为，存在一个“临界层间距”（ H_c ）。当实际层间距 $H < H_c$ 时，上下煤层的采动影响区相互贯通，叠加效应极为显著，地表沉降剧烈^[2]。当 $H > H_c$ 时，上下采动影响区相对独立，叠加效应减弱。临界层间距的大小与煤层采厚、覆岩力学性质密切相关，通常可表示为采厚的若干倍（如6-10倍采厚）。

2.2.2 采厚比（M）

采厚比是指下煤层采厚（ m_2 ）与上煤层采厚（ m_1 ）之比，即 $M = m_2/m_1$ 。采厚比越大，意味着下煤层开采释放的能量越大，对上覆已损伤岩体的扰动越强，叠加效应也越明显。

2.2.3 采动顺序与时间间隔

下行开采（上先下后）是叠加效应研究的重点。两次采动之间的时间间隔也很重要。如果间隔时间很短，上覆岩体尚未完成初次采动后的固结和应力调整，就承受二次扰动，可能导致更剧烈的失稳。反之，较长的间隔时间可能使岩体发生一定程度的“时效”愈合（尽管微弱），但总体而言，时间间隔对叠加效应的影响不如层间距和采厚比显著。

2.2.4 上覆岩层结构

覆岩的岩性组合、层厚、节理裂隙发育程度等决定了其在首次采动后的“再生”状态。若上覆岩层以软弱岩层为主，则首次采动后易形成松散的碎胀带，二次采动时极易发生大规模垮落，叠加效应强。若存在坚硬的砂岩或灰岩关键层，其在首次采动中的破坏模式（是整体破断还是形成铰接结构）将极大影响二次采动的响应。

2.2.5 开采参数

工作面长度、推进速度、采煤方法等也会影响叠加效应。例如，长工作面开采形成的地表沉降盆地更开阔，其与上覆沉降盆地的叠加区域更大。

3 重复采动地表沉降的研究方法与模型

为定量描述和预测重复采动的地表沉降，国内外学者提出了多种研究方法。

3.1 经验公式法

早期研究主要基于大量实测数据，通过回归分析建立经验公式。例如，苏联学者曾提出用“重复采动系数”（K）来修正单次采动的最大下沉值：

$$W_{\text{总}} = K \cdot (W_1 + W_2)$$

其中，K值通常大于1，其大小取决于层间距等因素。这种方法简单直观，但普适性差，仅适用于特定地质条件的矿区。

3.2 概率积分法修正模型

概率积分法是我国应用最广泛的地表移动预计方法。针对重复采动，学者们对其进行了修正，主要思路有：（1）分区修正法：将地表划分为仅受上煤层影响区、仅受下煤层影响区和重复影响区。在重复影响区内，引入一个大于1的“叠加系数”或“扰动系数”来放大下沉值。（2）参数修正法：认为重复采动改变了覆岩的主要力学参数，如主要影响半径（r）和下沉系数（q）。通过反演或经验，给出这些参数在重复采动条件下的修正值，再代入概率积分公式计算。（3）时间函数法：在概率积分法基础上，引入时间因素，建立能反映地表下沉动态过程的模型，以捕捉重复采动中可能出现的下沉加速现象^[3]。这些修正模型在一定程度上提高了预测精度，但其物理机制不够清晰，修正系数的确定仍带有较强的经验性。

3.3 数值模拟技术

随着计算机技术的发展，数值模拟（如FLAC3D, UDEC, PFC等）成为研究重复采动机理的有力工具。其优势在于：（1）全过程再现：可以精细模拟从上煤层开采、覆岩初次垮落，到下煤层开采、覆岩二次扰动直至地表沉降的全过程。（2）参数敏感性分析：方便地改变层间距、岩体力学参数、开采顺序等变量，定量分析各因素对叠加效应的影响规律。（3）内部场可视化：不仅能获得地

表沉降结果,还能直观展示覆岩内部的应力、应变、位移、裂隙演化等信息,为揭示机理提供直接证据。然而,数值模拟的准确性高度依赖于本构模型的选择和岩体力学参数的精确获取,而后者往往是困难的。

3.4 物理相似模拟实验

物理模拟实验通过选用合适的相似材料(如砂、石膏、云母等),按几何比例构建包含多煤层和覆岩的物理模型,然后分步开挖,观测岩层移动和地表沉降全过程。这种方法的优点是:(1)直观性强:可以直接观察到覆岩的垮落、断裂、离层等宏观现象。(2)验证性强:可以为数值模拟和理论分析提供可靠的验证数据。其局限性在于模型尺寸有限,难以完全模拟深部高地应力环境,且相似材料的力学性质与真实岩体存在差异。

4 研究现状、挑战与展望

4.1 现状与挑战

(1)机理认知的深度不足:对覆岩在多次采动循环下的损伤-愈合-再损伤的微观-宏观跨尺度演化机制理解尚浅。特别是,如何量化“再生”岩体的力学参数,仍是难题。(2)预测模型的普适性与精度:现有修正模型多为“黑箱”或“灰箱”模型,缺乏坚实的物理基础。在面对复杂地质条件(如断层、含水层、火成岩侵入等)时,预测精度难以保证。(3)动态过程的精准刻画:地表沉降是一个随时间演化的动态过程。现有方法对重复采动特有的下沉滞后、加速甚至突变等非稳态行为的预测能力较弱^[4]。(4)多场耦合效应的忽视:在深部开采中,高地应力、高渗透水压、高地温等多物理场耦合作用对重复采动岩体的力学行为有显著影响,但现有研究多将其简化为单一力学场问题。

4.2 未来展望

为应对上述挑战,未来的研究应重点关注以下几个方向:(1)深化多尺度损伤力学研究:结合室内岩石力学试验、CT扫描、声发射监测等手段,从细观和微观层面揭示重复采动下岩体裂纹萌生、扩展、贯通的全过程,并建立能反映历史损伤的本构模型。(2)发展智能融合预测模型:将物理机制明确的数值模型与数据驱动的机器学习方法(如深度学习、支持向量机等)相结合。利用

数值模拟生成大量“虚拟”样本,训练机器学习模型,再用少量实测数据进行校准,构建兼具物理可解释性和高预测精度的智能模型。(3)加强多物理场耦合数值模拟:开发或应用能够同时考虑渗流-应力-损伤(THM)甚至温度场(THMC)耦合作用的数值平台,更真实地模拟深部多煤层重复采动的复杂环境。(4)构建全生命周期监测与预警体系:利用InSAR(合成孔径雷达干涉测量)、GNSS(全球导航卫星系统)、分布式光纤传感等现代监测技术,对重复采动区域进行高时空分辨率的长期监测,实时捕捉地表及覆岩的微小变形,为动态修正预测模型和及时发布灾害预警提供数据支撑。

5 结语

多煤层重复采动引发的地表沉降叠加效应是一个复杂的岩体力学与采矿工程交叉问题。其核心在于,首次采动对覆岩造成的不可逆损伤,极大地削弱了其抵抗后续采动扰动的能力,导致最终的地表沉降呈现出强烈的非线性增强特征。层间距、采厚比、覆岩结构是控制叠加效应强弱的关键因素。尽管已有多种研究方法被应用于该问题,从经验公式到先进的数值模拟,但受限于对覆岩多次扰动损伤演化机理认知的不足,现有预测模型在普适性和精度上仍有待提高。未来的研究需要向多尺度、多场耦合、智能化的方向发展,深度融合现代监测、实验、模拟与人工智能技术,以期构建一套科学、精准、可靠的重复采动地表沉降预测与风险评估体系,为实现煤炭资源的安全、高效、绿色开采保驾护航。

参考文献

- [1] 龚浩,邱守元.多煤层重复采动地表渣堆沉降实测分析[J].内蒙古煤炭经济,2025,(22):4-6.
- [2] 刘国伟,吴周康,刘斌,等.厚松散浅埋煤层重复采动覆岩运移及地表沉陷规律研究[J].陕西煤炭,2026,45(02):18-22.
- [3] 程详,姜亚楠,周江,等.双煤层重复采动下覆岩运移-裂隙演化的光频域反射响应机制研究[J].工矿自动化,2025,51(10):16-25.
- [4] 韦四江,黄英俊,谭毅,等.多煤层重复采动回采巷道失稳机理与控制技术[J].河南理工大学学报(自然科学版),2024,43(05):1-9.