

厚大冲积层下金属矿山充填开采地表沉降变形研究综述

舒友阳¹, 张云鹏¹, 陈 超^{1,2*}

¹华北理工大学矿业工程学院, 河北 唐山

²河北省矿山绿色智能开采技术创新中心, 河北 唐山

收稿日期: 2026年5月28日; 录用日期: 2026年6月29日; 发布日期: 2026年7月21日

摘 要

随着金属矿产资源开发向深部、复杂地质条件与生态敏感区延伸, 充填开采已成为控制采空区失稳、降低地表沉降和推进绿色矿山建设的重要技术路径。厚大冲积层具有厚度大、压缩性强、含水层与隔水层组合复杂、固结变形持续时间长等特点, 使金属矿山充填开采引起的地表沉降不再仅仅是采空区上覆基岩移动的直接结果, 而是采空区扰动、充填体压缩、基岩断裂与离层、冲积层压缩固结及地下水响应等多因素共同作用的结果。围绕厚大冲积层下金属矿山充填开采地表沉降变形问题, 文章系统梳理了国内外在矿山地表变形、金属矿山充填开采、厚松散层沉陷、多源遥感监测、数值模拟和智能预测等方面的研究进展。研究认为, 厚大冲积层条件下地表沉降具有沉降范围扩大、边界收敛缓慢、残余沉降明显和多场耦合特征; 充填体强度与弹性模量、接顶率、充填滞后时间、充填体长期蠕变以及含水层失水固结是影响沉降控制效果的关键因素。未来应加强厚冲积层-基岩-充填体耦合机理、多源协同监测、机理-数据融合预测和采充参数动态优化研究。

关键词

厚大冲积层, 金属矿山, 充填开采, 地表沉降, 沉降预测, 多源监测

Review of Research on Surface Settlement and Deformation in Metal Mine Reclamation Areas Beneath Thick Alluvial Strata

Youyang Shu¹, Yunpeng Zhang¹, Chao Chen^{1,2*}

¹College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

²Hebei Provincial Technology Innovation Center for Green and Intelligent Mining of Mines, Tangshan Hebei

Received: May 28, 2026; accepted: June 29, 2026; published: July 21, 2026

*通讯作者。

文章引用: 舒友阳, 张云鹏, 陈超. 厚大冲积层下金属矿山充填开采地表沉降变形研究综述[J]. 矿山工程, 2026, 14(4): 1008-1020. DOI: 10.12677/me.2026.144101

Abstract

As metal mineral resource development extends into deeper geological layers, complex geological conditions, and ecologically sensitive areas, backfill mining has become a critical technical approach for controlling goaf instability, reducing surface subsidence, and advancing green mining practices. The thick alluvial layer, characterized by its substantial thickness, high compressibility, complex combination of aquifers and impermeable zones, and prolonged consolidation deformation, means that surface subsidence caused by metal mine backfilling is no longer solely the direct result of overlying bedrock movement but rather the outcome of combined effects including goaf disturbance, backfill compression, bedrock fracturing and delamination, alluvial layer compression and consolidation, and groundwater response. This study systematically reviews domestic and international research progress on mine surface deformation, metal mine backfilling, settlement in thick loose layers, multi-source remote sensing monitoring, numerical modeling, and intelligent prediction regarding surface subsidence deformation under thick alluvial layers. Research indicates that surface subsidence in such conditions exhibits expanded coverage, slow boundary convergence, significant residual settlement, and multi-field coupling characteristics; key factors influencing subsidence control include backfill strength and elastic modulus, capping rate, backfill lag time, long-term creep behavior of the backfill, and aquifer dewatering and consolidation. Future efforts should focus on elucidating the coupled mechanisms among thick alluvial layers, bedrock, and backfill materials, developing multi-source integrated monitoring systems, enhancing mechanism-data fusion prediction models, and optimizing dynamic mining-backfill parameters.

Keywords

Thick Alluvial Deposit, Metal Mines, Backfill Mining, Surface Subsidence, Subsidence Prediction, Multi-Source Monitoring

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

金属矿山地下开采会改变原岩应力平衡, 诱发采空区围岩移动、覆岩破裂和地表沉降。近年来, 矿山地表变形研究从单一沉降预计逐渐转向“损伤源头控制 - 过程监测 - 预测预警 - 生态修复”的全生命周期框架, 研究热点集中在沉降预测、充填开采、裂隙破坏和地质力学建模等方面[1]。在绿色矿山建设背景下, 胶结膏体充填和尾砂综合利用被广泛用于金属矿山采空区治理、深部开采安全控制和尾矿减量处置[2] [3]。与空场法或自然崩落法相比, 充填开采通过充填体与围岩协同承载, 能够减小采空区自由空间、限制顶板闭合变形并降低地表沉降风险。充填体的材料组成、流变性能、凝结硬化和后期变形性能直接影响采场闭合量与顶板稳定性[4] [5]。若仅强调是否充填, 而忽略充填体强度增长、泌水收缩、压缩蠕变和接顶效果, 仍可能低估长期沉降风险[6] [7]。

厚大冲积层或厚松散层广泛分布于我国东部高潜水位矿区以及部分盆地型金属矿区。已有研究表明, 厚松散层薄基岩条件下地表沉陷常表现为下沉范围广、盆地边界收敛缓慢和稳沉时间长等特征[8] [9]。含水冲积层还可能因地下水位变化、含水层失水和隔水层压缩产生附加固结沉降[10] [11]。为明确概念, 将“厚大冲积层”界定为覆盖于基岩之上、厚度和力学 - 水文响应足以显著改变采动沉降传递路径的冲积

- 松散层体系。工程判别上,可综合采用绝对厚度、松基比和工程响应三类指标:当冲积层厚度 $H_a \geq 100$ m,或冲积层厚度与基岩厚度之比 $H_a/H_b \geq 1.0$ 时,可作为厚大冲积层重点评价对象;当 H_a 为 50~100 m,但存在高压缩性软弱黏土层、承压含水砂层、隔水层破坏或地下水位显著变化,并已可能引起附加固结沉降时,也应纳入厚大冲积层工程控制范畴。在该定义下,厚大冲积层覆盖条件下的金属矿山充填开采沉降应被理解为采空区、充填体、基岩、冲积层和地下水共同作用的多场耦合过程。

基于岩性组合和水文地质响应,后文将厚大冲积层进一步区分为三类:软弱黏土主导型、巨厚砂层或砂砾含水层主导型以及黏砂互层复合型。软弱黏土主导型的关键问题是压缩性强、孔压消散慢和采后残余沉降明显;巨厚砂层或砂砾含水层主导型的关键问题是水位变化、疏排水扰动和失水压密;黏砂互层复合型则兼具压缩固结与渗流响应,易形成差异沉降和边界区缓慢扩展。在已有文献基础上,重点讨论厚大冲积层下金属矿山充填开采地表沉降变形的传递链条、监测预测与分类型控制方法。由于专门针对“厚大冲积层-金属矿山-充填开采”三者耦合的研究仍有限,在直接引用金属矿山充填开采案例的同时,吸收厚松散层煤矿沉陷、多源遥感监测和膏体充填材料研究成果,为类似矿区沉降预测与工程管控提供参考[12] [13]。



Figure 1. Research framework for surface settlement in backfill mining beneath thick alluvial strata
图 1. 厚大冲积层下充填开采地表沉降研究框架

如图 1 所示,地表沉降研究可划分为工程地质背景识别、采充扰动分析、地层变形传递、监测预测与控制反馈四个层面。厚大冲积层不是被动覆盖层,而是能够通过压缩、固结和渗流变化参与沉降演化的重要地质单元。

2. 厚大冲积层下金属矿山充填开采的工程背景

2.1. 厚大冲积层与基岩组合特征

厚大冲积层通常由黏土、粉土、砂层、砂砾层及多层含水层、隔水层组成,具有非均质、各向异性和明显水文地质分层特征。其工程响应不仅受基岩移动控制,还受土体压缩模量、孔隙水压力消散和软弱夹层结构控制[14] [15]。相对于普通基岩矿山,厚大冲积层覆盖条件下的地表沉降盆地往往边界更平缓、影响半径更大,并可能在开采后继续发展。

基岩厚度及其与松散层厚度之比是判断沉降传递特征的重要指标。鲁南矿区厚松散层薄基岩研究指出,松基比变化会影响下沉系数、水平移动系数、主要影响角正切和移动边界参数。深埋厚冲积层薄基岩煤层研究进一步显示,覆岩运动可表现出关键层控制和厚冲积层主导两个阶段[16]。这些结论虽然主要

来自煤矿，但对厚大冲积层金属矿山沉降机理分析具有借鉴价值。

含水冲积层对沉降具有双重影响。一方面，厚层松散介质可能削弱基岩不连续破裂在地表的直接表现；另一方面，含水层失水固结、隔水层压缩和软弱土层剪切会导致附加沉降或边界区沉降缓慢发展[17]。因此，厚大冲积层矿区沉降评价不能只依据采深和采厚，还应综合分析冲积层分层、含水层水头和基岩完整性。

2.2. 金属矿山充填开采特点

金属矿山矿体常呈陡倾、厚大、透镜状或不规则脉状赋存，采矿方法包括分段空场嗣后充填、上向水平分层充填、下向胶结充填、阶段矿房充填和块体崩落等。与煤矿长壁工作面相比，金属矿山采空区更具空间离散、多中段叠加和分期扰动特征，沉降中心会随采场推进、矿柱回收和充填体变形而发生迁移[18]。充填开采的减沉能力来自充填体支撑与围岩协同变形。胶结膏体充填材料的浓密、搅拌、输送和硬化性能决定其可施工性与后期承载能力。同时，废石充填、采空区注浆和高阶段大跨度采空区治理也可用于降低地压灾害和地表沉降风险[19] [20]。

金属矿山沉降案例研究显示，多阶段充填开采能够降低空区失稳风险，但仍可能形成随开采推进而扩展的沉降漏斗。近地表厚大铅锌矿体研究表明，采场空间形态和开采深度是控制沉降强度和影响范围的重要因素。块体崩落法铜矿研究则说明，金属矿山沉降预测需要结合实际采场边界和三维监测数据进行校正[21] [22]。

3. 厚大冲积层下地表沉降变形传递链条及主控因素

厚大冲积层下金属矿山充填开采地表沉降并非单一因素作用的结果，而是由深部采动扰动向浅部地层逐级传递，并与冲积层固结、地下水响应共同耦合形成的动态过程。其基本传递链条可概括为“采空区扰动源形成 - 充填体承载与压缩 - 基岩断裂离层与变形传递 - 冲积层压缩固结及渗流响应 - 地表沉降盆地形成与长期演化”。在这一过程中，地质条件、采矿参数、充填质量、水文地质条件和时间效应分别作用于变形传递链条的不同环节，并共同决定沉降盆地形态、边界扩展速度和采后残余沉降特征。

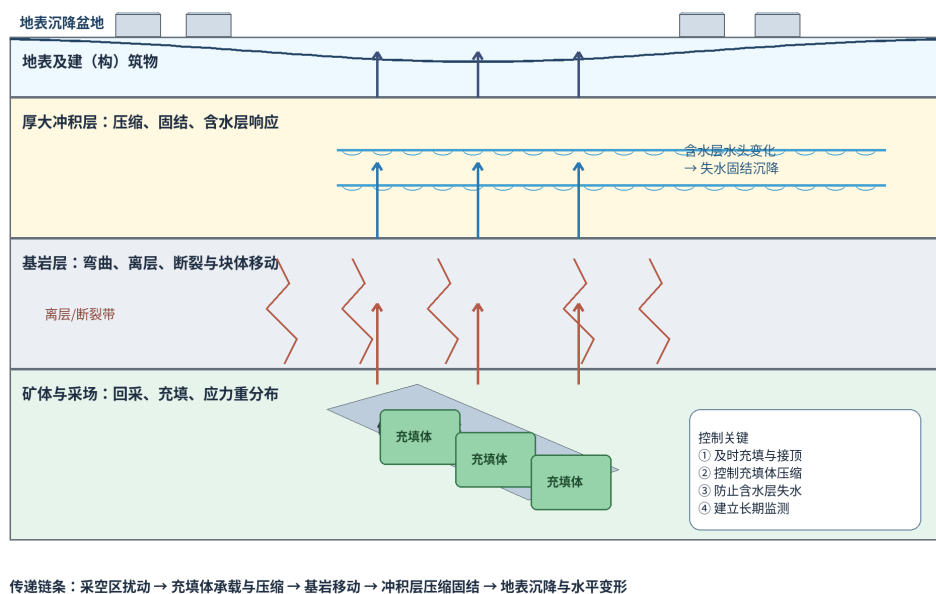


Figure 2. Illustration of the surface settlement and deformation transmission mechanism beneath the thick alluvial layer
图 2. 厚大冲积层下地表沉降变形传递机制示意

如图 2 所示，沉降传递链条可分为扰动源、充填体、传递层、响应层和地表表现五个环节。为进一步体现“影响因素 - 作用机理 - 控制指向”的对应关系，表 1 对各环节的主控因素及工程控制重点进行了归纳。

Table 1. Main factors affecting surface settlement in metal mine reclamation areas under thick alluvial strata
表 1. 厚大冲积层下金属矿山充填开采地表沉降主要影响因素

因素类别	主要指标	主要作用
地质因素	冲积层厚度、基岩厚度、松基比、断层、节理、软弱夹层	控制变形传递路径、沉降范围、裂缝发育和边界收敛速度
矿体因素	矿体倾角、厚度、埋深、走向长度、形态复杂程度	影响采空区几何形态、沉降中心位置和不对称沉降
采矿因素	采场跨度、分段高度、回采顺序、矿柱留设、采空区连通性	决定围岩应力重分布、顶板稳定性和沉降发展强度
充填因素	充填体强度、弹性模量、充填率、接顶率、泌水率、滞后时间	决定采空区残余空间、支撑刚度、长期压缩沉降和顶板闭合量
水文因素	地下水位、含水层厚度、隔水层完整性、导水裂隙	影响含水层失水固结、软化变形和渗流 - 应力耦合响应
时间因素	充填体龄期、蠕变、采后残余沉降、冲积层固结时间	决定沉降是否存在滞后发展、二次沉降和长期稳定问题

3.1. 采空区扰动源及采矿因素

采场跨度、采深、分段高度、回采顺序、矿柱留设和采空区连通性决定了深部扰动源的规模与时序。金属矿山矿体常呈陡倾、透镜状或不规则脉状赋存，多中段、分期回采和矿柱回收会使采动影响范围呈现阶段性叠加特征。当短时间内形成大范围连续采空区，或采场跨度过大、矿柱回收过快时，围岩应力重新分布强烈，顶板弯曲、离层、剪切破坏及局部冒落风险增加，从而增强地表沉降[18] [21] [22]。

3.2. 充填体承载、接顶效果与长期变形

充填体是削弱采空区扰动向上覆岩层传递的关键结构。其减沉效果主要取决于充填体强度、弹性模量、充填率、接顶率、泌水率、龄期强度增长和长期蠕变特性。若充填体早期强度不足、接顶不充分或后期产生明显沉缩与蠕变，采空区残余空间将增大，顶板闭合量和覆岩移动量随之增加，并进一步向基岩和冲积层传递。因此，充填因素不仅影响采场稳定性，也决定了采后残余沉降的发展程度[23]-[28]。

3.3. 基岩断裂离层与变形传递

基岩在采动影响下可能出现弯曲下沉、裂隙扩展、层间离层和局部断裂。基岩厚度及其与冲积层厚度之比是控制变形传递方式的重要指标。当基岩较厚且完整性较好时，基岩能够在一定程度上缓冲采动变形；当基岩较薄、节理裂隙发育或断层构造复杂时，深部采动扰动更容易向上部冲积层传递，导致地表沉降范围扩大或边界区变形加剧。对于多中段连续回采的金属矿山，应从三维采场结构出发分析沉降边界，而不能简单沿用二维剖面假定。

3.4. 冲积层压缩固结与地下水响应

厚大冲积层不是被动覆盖层，而是参与沉降演化的重要变形层。软弱黏土层、粉土层和含水砂层在采动扰动、孔隙水压力变化和地下水位下降作用下，可能发生压缩固结、剪切变形和附加沉降。对于软弱黏土主导型冲积层，沉降常表现为时间滞后和长期残余变形；对于巨厚砂层或砂砾含水层主导型冲积

层，地下水位变化和含水层失水压密是影响地表沉降的重要因素。因此，厚大冲积层矿区沉降评价不能只考虑采深、采厚和充填强度，还应综合分析冲积层分层结构、压缩模量、含水层水头变化和隔水层完整性[10] [11] [15]。

3.5. 地表沉降盆地形成与长期演化

在采空区扰动、充填体压缩、基岩移动和冲积层固结共同作用下，地表最终形成沉降盆地。与普通基岩矿山相比，厚大冲积层覆盖区沉降盆地通常具有影响范围广、边界收敛慢、稳定时间长和残余沉降明显等特点。沉降中心受矿体空间形态、开采顺序和充填体变形控制，沉降边界则受冲积层厚度、松基比、含水层结构和地下水变化影响。因此，厚大冲积层下地表沉降预测与控制应从“最大下沉量评价”转向“沉降全过程风险控制”。

3.6. 不同冲积层类型下的变形差异

软弱黏土主导型冲积层的变形链条可概括为“采动扰动 - 孔压消散 - 黏土压缩固结 - 长期残余沉降”。该类型的沉降速率可能在开采期后逐渐降低，但稳沉时间较长，对道路、建构筑物 and 尾矿设施的长期安全影响较为突出。

巨厚砂层或砂砾含水层主导型冲积层的变形链条可概括为“采动裂隙或疏排水扰动 - 含水层水头下降 - 砂层失水压密 - 地表附加沉降”。该类型对地下水边界条件高度敏感，若隔水层完整性受损，沉降可能表现出与采矿扰动不同步的突增或扩大。

黏砂互层复合型冲积层的变形链条兼具上述两类特征，既可能发生软弱夹层固结压缩，也可能因含水层水头变化产生渗流 - 应力耦合响应。该类型应重点关注差异沉降、沉降盆地边界缓慢外扩以及地表裂缝与地下水变化之间的对应关系。

4. 地表沉降监测技术研究进展

厚大冲积层下沉降变形具有空间范围大、时间跨度长、局部变形差异明显的特点，单一测量手段难以满足全过程评价需求。近年来，多源遥感与井上下协同监测逐渐成为矿区沉降研究的主要趋势[29]。表 2 比较了常用监测技术的优势、局限和适用环节。

Table 2. Comparison of the applicability of surface settlement monitoring technologies
表 2. 地表沉降监测技术适用性比较

监测方法	主要优势	主要局限	适用环节
水准测量	精度高、结果直观	点状监测、效率较低	沉降主断面、建构筑物保护
GNSS/GPS	可连续观测三维位移	点位有限、成本较高	沉降中心与关键边界点
InSAR/SBAS-InSAR	覆盖范围大、时间序列长	大梯度变形区易失相干	区域沉降识别、边界监测
UAV 摄影测量/LiDAR	空间分辨率高，可识别裂缝和大变形	受地形、植被和像控点影响	大变形区、裂缝区、地形重建
分布式光纤	可连续获取地层内部应变	钻孔施工成本较高	冲积层内部变形和全地层传递
微震/应力监测	可识别围岩破裂和应力调整	与地表沉降需综合解释	深部采场和采空区稳定性评价

4.1. 地表与遥感监测

传统水准测量和 GNSS 监测仍是地表沉降精密验证的基础，但难以完整描述大范围沉降盆地和边界区演化。InSAR、SBAS-InSAR、DS-InSAR、UAV 摄影测量和 UAV LiDAR 能够提供区域化、连续化和

高分辨率数据, 适合厚大冲积层下沉降范围识别和时间序列分析[30] [31]。

主动与被动遥感融合是当前矿区沉降监测的重要方向。基于概率积分模型与 InSAR/UAV 融合的研究表明, InSAR 适合识别小变形和边界区沉降, UAV 更适合获取大变形区高分辨率地形, 两者结合可弥补单一技术的不足。D-InSAR、SBAS 和 UAV 倾斜摄影的综合研究也证明, 多源技术融合有利于提高矿区沉降监测精度和可靠性[32]。

4.2. 井下、地层内部与多源协同监测

在厚大冲积层条件下, 仅观测地表最终沉降难以揭示变形源。分布式光纤、测斜仪、水文孔和并行的电法等技术可用于识别冲积层内部压缩、剪切和含水层变形[33] [34]。例如, 全断面监测揭示了基岩段、松散层段与地表之间不同的变形时序和贡献率[35]。

松散含水层失水沉降研究表明, 水头变化与含水层压缩之间具有可监测的对应关系。因此, 未来厚大冲积层金属矿山监测体系应从“地表点线观测”转向“空-天-地-井”一体化监测, 通过卫星遥感、无人机、地面测量、地球物理探测和井下监测组合, 实现从采动源到地表响应的全过程感知[36]。

5. 地表沉降预测模型研究进展

5.1. 经验模型与概率积分法

概率积分法是我国矿山开采沉陷预计中应用最广的经验-半经验方法, 其参数包括下沉系数、水平移动系数、主要影响角正切、拐点偏移距和开采影响传播角等。对于厚大冲积层下金属矿山, 传统概率积分法面临两类困难: 一是厚冲积层引起边界沉降收敛缓慢和附加固结沉降, 二是金属矿体几何不规则、多中段叠加, 难以直接按规则工作面处理。

近年金属矿山沉降预测开始尝试将概率积分法与三维激光扫描、遥感监测和数值模拟结合。Pulang 铜矿块体崩落法研究通过三维激光点云与概率积分模型预测沉降范围和最大下沉值, 提高了金属矿山沉降预计的工程适用性。盘龙铅锌矿充填开采研究则结合随机介质理论、FLAC3D 和 GPS 监测, 分析不同开采深度下的地表沉降趋势。

5.2. 数值模拟与物理模型

数值模拟能够处理复杂矿体形态、非均质地层、断层破碎带和不同充填参数对沉降的影响。常用软件包括 FLAC3D、UDEC/3DEC、ABAQUS、COMSOL 和连续-离散耦合方法。其关键在于模型边界、地层分层、充填体参数、接触面参数和地下水边界条件的合理设置。

若将厚大冲积层简化为均质弹性层, 或将充填体简化为刚性支撑体, 容易低估残余沉降和长期沉降风险。物理相似模拟可直观揭示覆岩移动、离层发育和冲积层变形传递过程, 尤其适合研究厚松散层内部变形与基岩移动之间的分段响应。

5.3. 数据驱动与机理-数据融合预测

随着 SBAS-InSAR、UAV 和 GNSS 时序数据积累, 矿区沉降预测正从静态参数预计向动态反演和智能预测转变。基于 SBAS-InSAR 和 Logistic 模型的动态预测可利用时间序列沉降数据逐像元反演模型参数, 对后续沉降进行预测[37]。结合时间函数和小基线集 InSAR 的方法也可用于动态沉降盆地建模[38]。

人工智能模型在沉降时序预测中显示出潜力。D-InSAR 参数反演、SBAS-InSAR 与深度学习模型结合, 可改善非线性沉降预测能力[39] [40]。CNN-BiGRU-Attention、概率积分反演和 BO-Prophet 模型的应用进一步体现了时序数据驱动方法的发展方向[41] [42]。不过, 数据驱动模型若脱离采矿进度、充填参数

和地层内部变形，可能存在解释性不足和外推风险。

对厚大冲积层金属矿山而言，更合理的方向是将机理模型、数值模拟和多源监测数据融合：以采场回采与充填过程确定扰动源，以 InSAR/UAV/GNSS 获取地表响应，以分布式光纤和地下水监测识别冲积层内部机制，再通过贝叶斯更新、机器学习或参数反演动态修正预测模型[43] [44]。

表 3 总结了各种地表沉降预测模型：

Table 3. Surface settlement prediction model and its applicability
表 3. 地表沉降预测模型及其适用性

模型类型	代表方法	优势	局限	应用建议
经验模型	实测统计、类比	工程应用方便	外推能力弱	适合资料丰富矿山
概率积分法	传统/修正模型	参数体系成熟	边界效应处理不足	需厚冲积层修正
数值模拟	FLAC3D、3DEC、ABAQUS	可表征复杂结构	参数敏感	适合机理与方案比选
物理模拟	相似材料试验	过程直观	缩尺效应明显	适合验证传递机制
数据驱动	SVR、LSTM、GRU、CNN-BiGRU	动态预测能力强	解释性不足	需融合采矿进度
多源融合	InSAR/UAV/GNSS/光纤/水文	覆盖广、时序连续	配准与误差复杂	适合预警平台

6. 地表沉降控制技术

厚大冲积层下金属矿山地表沉降控制应与前述沉降传递链条相对应，形成“问题 - 机理 - 对策”的闭环体系。针对采空区扰动源过强的问题，应通过优化采场跨度、分段高度、矿柱尺寸和回采顺序降低深部扰动强度；针对充填体接顶不足、强度增长滞后和长期蠕变问题，应加强充填材料配比、料浆浓度、泌水率、接顶率和二次补充充填控制；针对基岩断裂离层和变形传递问题，应结合采场结构优化、局部加固、注浆治理和微震监测进行协同控制；针对冲积层滞后固结和地下水响应问题，应建立地下水位长期监测制度，并采取隔水、注浆加固、控制疏排水和地下水动态调控等措施。由此可将沉降控制从单纯采后治理转变为源头减沉、过程监测、动态预测和风险处置相结合的主动控制体系。图 3 展示了监测 - 预测 - 控制闭环。

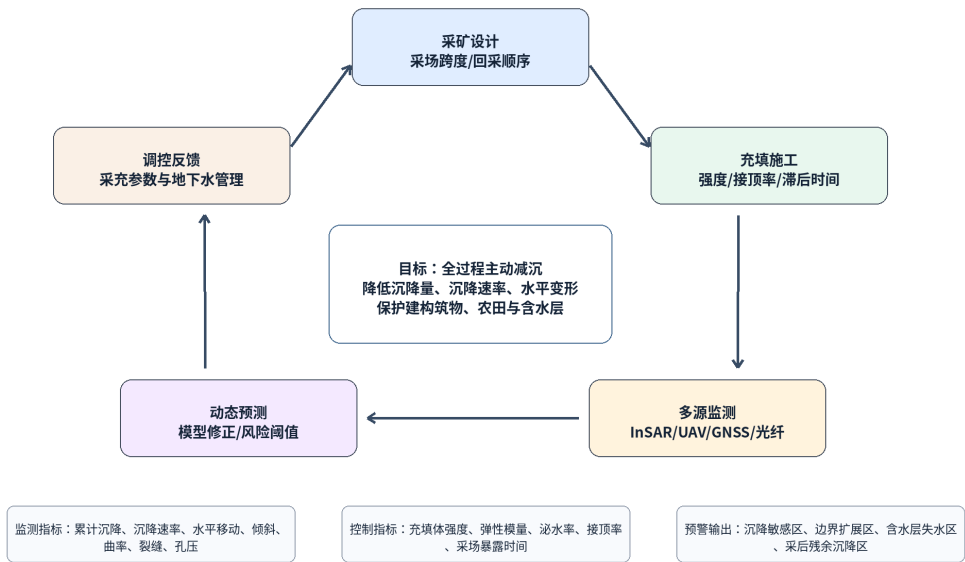


Figure 3. A closed-loop system for controlling subsidence caused by backfill mining beneath thick alluvial layers
图 3. 厚大冲积层下充填开采沉降控制闭环

如表 4 所示，沉降控制应由被动观测转向主动闭环控制。该闭环以采矿计划和充填参数为输入，以多源监测数据为反馈，以动态预测模型为核心，以风险阈值和控制策略为输出，实现回采顺序、采场跨度、充填强度、接顶工艺和地下水控制的动态调整。

Table 4. Technical approaches for controlling surface settlement
表 4. 地表沉降控制技术路径

控制阶段	主要措施	预期效果
开采设计阶段	划分保护区、优化采场跨度和回采顺序、矿柱和充填方案	降低扰动源规模，控制沉降发展基础条件
充填施工阶段	提高料浆浓度、控制泌水率、提高接顶率、二次补充充填	减小采空区残余空间和充填体压缩变形
生产监测阶段	InSAR/UAV/GNSS 与水准、光纤、水文孔联合监测	识别沉降边界、速率变化和冲积层内部变形
动态预测阶段	概率积分修正、数值模拟校正、机器学习时序预测	滚动更新沉降量、沉降范围和风险等级
风险处置阶段	调整回采节奏、局部加固、注浆、地下水调控、地表保护	降低地表建构物物和生态环境损害风险

6.1. 采场结构与回采顺序优化

为应对 3.1 节所述采空区扰动源规模过大和多中段扰动叠加问题，应合理控制采场跨度、分段高度、矿柱尺寸和回采顺序，是降低采空区扰动强度的基础。对于厚大冲积层覆盖区，应避免短时间内形成大范围连续空区，减少采空区群连通失稳和覆岩移动叠加。对于倾斜或厚大矿体，可通过分区开采、间隔回采、预留保护矿柱和及时充填降低沉降峰值与沉降速率。

6.2. 充填体质量与接顶控制

为应对 3.2 节所述充填体承载不足、接顶率低、泌水沉缩和长期蠕变问题，充填控制的核心是提高充填体早期承载能力、长期稳定性和接顶效果。应根据采场稳定性和地表保护目标设计充填体强度与刚度，优化尾砂级配、料浆浓度、胶凝材料和混合工艺，降低泌水率和体积应变[45] [46]。对于沉降敏感区域，应重点控制充填滞后时间和顶部接顶残余空间，必要时采用二次补充充填、压力注浆或高强度顶层胶结充填[47] [48]。

充填体强度设计应结合开采方法、采场尺寸和暴露时间确定，而不宜简单套用统一强度指标。矿山充填强度设计研究表明，金属矿山胶结充填体应兼顾安全储备、材料成本和施工稳定性。铅锌尾砂充填体质量研究也提示，尾砂性质与胶凝体系会显著影响强度和耐久性。

6.3. 地下水与厚冲积层响应控制

为应对 3.4 节所述的冲积层滞后固结、含水层失水压密和地下水位变化效应，应建立地下水位长期监测制度，分析采动裂隙导通含水层的可能性，控制矿山疏排水对浅部含水层的影响。对于含水层与采动裂隙可能连通的区域，可采用隔水、注浆加固、地表水体保护和地下水动态调控等措施；对于软弱黏土主导型冲积层，应重点关注孔隙水压力消散和长期固结沉降；对于巨厚砂层或砂砾含水层主导型冲积层，应重点控制含水层水头变化及其引起的附加沉降[49]。

6.4. 不同冲积层类型的差异化控制策略

对于软弱黏土主导型冲积层，应将控制重点放在“长期固结 - 残余沉降”链条上。工程上宜采取较保守的采场尺度和回采节奏，强化充填体长期变形控制，并通过水准、GNSS、InSAR 和孔压监测联合识别采后沉降速率变化。对地表建构物、道路和尾矿设施等敏感对象，应设置长期预警阈值，而不宜仅

以短期稳沉作为安全判据。

对于巨厚砂层或砂砾含水层主导型冲积层,应将控制重点放在“地下水扰动-含水层失水压密”链条上。工程上应严格控制矿山疏排水影响范围,保护关键隔水层完整性,必要时采用帷幕注浆、局部封堵、回灌调控和水文孔连续监测等措施,避免因水头快速下降引发附加沉降。

对于黏砂互层复合型冲积层,应采用“固结控制+水文控制+差异沉降预警”的组合策略。监测体系应同时覆盖地表沉降、地层内部应变、地下水位和裂缝发育;预测模型应将软弱夹层压缩参数、含水层水头变化和采充进度共同纳入,控制措施则应在采场结构、充填质量和地下水调控之间动态联动。

7. 现有研究不足与发展趋势

7.1. 现有研究不足

1) 厚大冲积层下沉研究多集中于煤矿,针对金属矿山充填开采的专门研究仍不足。煤矿长壁工作面与金属矿山分段、分层、充填或崩落开采在采空区形态、扰动时序和支撑结构上明显不同,直接套用煤矿参数可能导致沉降预测偏差。

2) 充填体-基岩-冲积层耦合机制尚未完全清晰。已有研究多分别讨论充填体变形、覆岩移动或松散层沉陷,而将充填体长期蠕变、采空区残余空间、基岩断裂、含水层失水固结和地表沉降盆地演化统一起来的模型仍较少。

3) 多源监测数据融合仍存在尺度差异和误差传播问题。InSAR 适合区域沉降,UAV 适合高分辨率地形,GNSS 和水准适合点位精密验证,分布式光纤适合地层内部变形,但这些数据在时间频率、空间分辨率和坐标基准上存在差异。

4) 长期沉降预测不足。厚大冲积层固结和充填体蠕变可能持续多年,而多数工程模型更关注开采期或短期采后稳定期。未来应加强充填体长期力学、地下水动态和冲积层固结共同作用下的多年尺度沉降预测。

7.2. 发展趋势

未来研究可从五个方向推进:一是开展“采空区-充填体-基岩-冲积层-地表”全过程多场耦合机理研究;二是建立井上下、空天地一体化监测体系;三是发展机理模型与数据驱动模型融合的动态预测方法;四是以地表保护目标反向优化采场结构和充填参数;五是沉降监测、充填控制、生态修复和地表建构筑物保护纳入矿山数字孪生与智能管控平台。

从工程应用角度看,厚大冲积层下金属矿山沉降控制应从“预测最大下沉量”转向“控制沉降全过程风险”。这意味着不仅要关注沉降中心,还要关注沉降盆地外边缘、水平移动、倾斜变形、裂缝发展、含水层压缩和采后残余沉降等多维指标。

8. 结论

1) 厚大冲积层下金属矿山充填开采地表沉降是采空区扰动、充填体压缩、基岩移动、冲积层压缩固结和地下水变化共同控制的复杂过程。与普通基岩矿山相比,其沉降往往具有影响范围广、边界收敛慢、稳定时间长和残余沉降明显等特点。

2) 充填开采能够有效降低采空区自由空间和覆岩移动,但其减沉效果受充填体强度、弹性模量、接顶率、充填滞后时间、泌水固结和长期蠕变共同影响。厚大冲积层条件下,还应重点考虑含水层失水固结和软弱夹层压缩对地表沉降的附加影响。

3) 沉降预测方法正从经验公式和概率积分法向数值模拟、遥感反演、机器学习和机理-数据融合模

型发展。对于厚大冲积层金属矿山，应采用动态更新的预测模型，而非依赖固定参数的一次性预计。

4) 未来应加强厚冲积层-基岩-充填体耦合机制、长期残余沉降、多源数据融合和采充参数智能优化研究，形成监测-预测-控制一体化的主动减沉技术体系。

参考文献

- [1] Xiong, Y., Kong, D., Song, G., Li, J. and Qin, Z. (2025) Damage and Control of Mining Surface Deformation: Research Status, Hot Spots and Trends. *Deep Resources Engineering*, **2**, Article ID: 100203. <https://doi.org/10.1016/j.deepr.2025.100203>
- [2] Wu, A., Wang, Y., Ruan, Z., Xiao, B., Wang, J. and Wang, L. (2024) Key Theory and Technology of Cemented Paste Backfill for Green Mining of Metal Mines. *Green and Smart Mining Engineering*, **1**, 27-39. <https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.04.003>
- [3] Xue, G., Yilmaz, E. and Wang, Y. (2023) Progress and Prospects of Mining with Backfill in Metal Mines in China. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, **30**, 1455-1473. <https://doi.org/10.1007/s12613-023-2663-0>
- [4] Yang, L., Li, J., Liu, H., Jiao, H., Yin, S., Chen, X., et al. (2023) Systematic Review of Mixing Technology for Recycling Waste Tailings as Cemented Paste Backfill in Mines in China. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, **30**, 1430-1443. <https://doi.org/10.1007/s12613-023-2609-6>
- [5] Li, C., Li, X. and Ruan, Z. (2023) Rheological Properties of a Multiscale Granular System during Mixing of Cemented Paste Backfill: A Review. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, **30**, 1444-1454. <https://doi.org/10.1007/s12613-023-2601-1>
- [6] Fang, K., Zhang, J., Cui, L., Haruna, S. and Li, M. (2023) Cost Optimization of Cemented Paste Backfill: State-of-the-Art Review and Future Perspectives. *Minerals Engineering*, **204**, Article ID: 108414. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108414>
- [7] Wang, C., Qi, Y., Jing, J., Ma, J., Zhou, Y., Ping, H., et al. (2023) Properties and Microstructure of Total Tailings Cemented Paste Backfill Material Containing Mining and Metallurgical Solid Waste. *Frontiers in Earth Science*, **11**, Article ID: 1181952. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1181952>
- [8] 刘辉, 李玉, 苏丽娟, 等. 厚松散层薄基岩下开采地表变形规律——以鲁南矿区为例[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 11-20.
- [9] 郭庆彪, 邓雨, 罗锦, 郭俊廷, 杨英明. 厚松散层地表下沉盆地外边缘区沉陷特征与预计模型修正[J]. 煤炭学报, 2025, 50(12): 5345-5356.
- [10] 刘辉, 左建宇, 苏丽娟, 等. 巨厚含水松散层下开采地表移动变形规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5): 49-56.
- [11] 徐良骥, 张平松, 许时昂, 等. 基于分布式光纤的松散含水层失水沉降规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 231-241.
- [12] Li, G., Wan, Y., Guo, J., Ma, F., Zhao, H. and Li, Z. (2022) A Case Study on Ground Subsidence and Backfill Deformation Induced by Multi-Stage Filling Mining in a Steeply Inclined Ore Body. *Remote Sensing*, **14**, Article No. 4555. <https://doi.org/10.3390/rs14184555>
- [13] 汤伏全, 杨倩. 西部黄土高原矿区采煤沉陷多源遥感监测技术进展与展望[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 9-26.
- [14] 张平松, 许时昂, 吴海波, 等. 厚松散层下煤层开采全地层移动变形时空演化特征[J]. 煤炭学报, 2026, 51(1): 239-254.
- [15] 陈芳, 王伟, 杨建, 等. 厚松散含水层失水沉降相似模拟实验研究[J]. 工矿自动化, 2022, 48(2): 70-76.
- [16] 杨胜利, 吴山西, 王兆会, 唐岳松, 李家龙, 孙文超. 深埋厚冲积层薄基岩煤层开采地表沉降特征与预测方法[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 523-537.
- [17] 彭世龙, 程桦, 姚直书, 荣传新, 蔡海兵, 张亮亮. 厚松散层底含直覆薄基岩开采地表沉陷预计及特征研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4503-4516.
- [18] Zhao, Y., Zhao, X., Dai, J. and Yu, W. (2021) Analysis of the Surface Subsidence Induced by Mining Near-Surface Thick Lead-Zinc Deposit Based on Numerical Simulation. *Processes*, **9**, Article No. 717. <https://doi.org/10.3390/pr9040717>
- [19] Wu, G., Nie, X., Zhao, L. and Li, Z. (2024) Study on the Stability of Waste Rock Filling in Goaf Based on Dynamic Comprehensive Analysis Method. *Heliyon*, **10**, e41023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41023>
- [20] Trigueros, E., Cánovas, M., Arzúa, J. and Baraibar, J.M. (2024) Evaluating the Influence of Backfilling on the Stability

- of an Abandoned Room-and-Pillar Mine: A Case Study in Northern Spain. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, **10**, Article No. 116. <https://doi.org/10.1007/s40948-024-00834-1>
- [21] Ling, W., Zhu, Z., Feng, X., Wang, L., Wang, W., Li, Z., *et al.* (2024) Procedure Design and Reliability Analysis for Prediction of Surface Subsidence of a Metal Mine Induced by Block Caving Method—A Case Study of Pulang Copper Mine in China. *Minerals*, **14**, Article No. 1011. <https://doi.org/10.3390/min14101011>
- [22] Ling, W., Feng, X., Wang, L., Zhu, Z., Wang, S., Fu, H., *et al.* (2024) Prediction Method of Surface Subsidence Induced by Block Caving Method Based on UAV Oblique Photogrammetry. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 19293. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-74864-w>
- [23] Qiu, X., He, X., Cao, R., Qiu, H., Shi, X., Gou, Y., *et al.* (2024) Study on the Surface Subsidence Trend of Fill Mining in Underground Mines with Different Mining Depths. *Advances in Civil Engineering*, **2024**, Article ID: 4407757. <https://doi.org/10.1155/2024/4407757>
- [24] Behera, S.K., Singh, P., Mishra, D.P., Mishra, K., Kumar, A., Mandal, S.K., *et al.* (2023) Required Strength Design of Cemented Backfill for Underground Metalliferous Mine. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, **37**, 927-952. <https://doi.org/10.1080/17480930.2023.2242159>
- [25] Akkaya, U.G., Cinku, K. and Yilmaz, E. (2021) Characterization of Strength and Quality of Cemented Mine Backfill Made up of Lead-Zinc Processing Tailings. *Frontiers in Materials*, **8**, Article ID: 740116. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.740116>
- [26] Li, Y., Sun, W., Li, X., *et al.* (2024) Research on Slurry Flowability and Mechanical Properties of Cemented Paste Backfill with Solid Waste Materials. *Materials*, **17**, Article No. 2341.
- [27] Chen, J., Shan, Y., Li, S., Huang, Q., Dan, Z. and Yu, H. (2025) Research and Engineering Practice of High Stage and Long Span Complex Goaf Filling Treatment Technology. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 43033. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-24224-z>
- [28] Qi, C. and Fourie, A. (2019) Cemented Paste Backfill for Mineral Tailings Management: Review and Future Perspectives. *Minerals Engineering*, **144**, Article ID: 106025. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106025>
- [29] 李全生, 李晓斌, 张凯, 曹志国, 郭俊廷, 严岳冠, 张存, 徐祝贺, 赵永强. 基于“空天地”一体化技术的岩层采动损伤监测与应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 402-413.
- [30] Wang, R., Wu, K., He, Q., He, Y., Gu, Y. and Wu, S. (2022) A Novel Method of Monitoring Surface Subsidence Law Based on Probability Integral Model Combined with Active and Passive Remote Sensing Data. *Remote Sensing*, **14**, Article No. 299. <https://doi.org/10.3390/rs14020299>
- [31] Zhao, J., Yang, X., Zhang, Z., Niu, Y. and Zhao, Z. (2023) Mine Subsidence Monitoring Integrating DS-InSAR with UAV Photogrammetry Products: Case Studies on Hebei and Inner Mongolia. *Remote Sensing*, **15**, Article No. 4998. <https://doi.org/10.3390/rs15204998>
- [32] Zhu, M., Yu, X., Tan, H. and Yuan, J. (2024) Integrated High-Precision Monitoring Method for Surface Subsidence in Mining Areas Using D-InSAR, SBAS, and UAV Technologies. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 12445. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63400-5>
- [33] 蔡毅, 沈华章, 黄厚旭, 等. 厚松散层矿区开采沉陷拉伸区域土体内部变形演化规律研究——以淮北孙疃煤矿为例[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(8): 36-49.
- [34] 任绪言, 王伟, 杨阳, 等. 地面塌陷分布式光纤监测技术研究综述[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(4): 243-263.
- [35] 张平松, 许时昂, 吴海波, 等. 煤层采动巨厚松散层全断面监测及内部变形特征[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 628-644.
- [36] Chen, X., Chen, J., Wang, G., Zhang, Q. and Zheng, Y. (2025) Mining Subsidence Based on Integrated SBAS-InSAR and Unmanned Aerial Vehicles Technology. *Journal of Ocean University of China*, **24**, 113-129. <https://doi.org/10.1007/s11802-025-6009-6>
- [37] Xu, Z., Ji, M., Zhang, G. and Chen, Z. (2022) Method for Dynamic Prediction of Mining Subsidence Based on the SBAS-InSAR Technology and the Logistic Model. *Remote Sensing for Natural Resources*, **34**, 20-29.
- [38] Hu, J., Yan, Y., Dai, H., He, X., Lv, B., Han, M., *et al.* (2024) Prediction Method for Dynamic Subsidence Basin in Mining Area Based on SBAS-InSAR and Time Function. *Remote Sensing*, **16**, Article No. 1938. <https://doi.org/10.3390/rs16111938>
- [39] Hou, Z., Yang, K., Li, Y., Gao, W., Wang, S., Ding, X., *et al.* (2022) Dynamic Prediction Model of Mining Subsidence Combined with D-InSAR Technical Parameter Inversion. *Environmental Earth Sciences*, **81**, Article No. 221. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10423-8>
- [40] Liu, Y. and Zhang, J. (2023) Integrating SBAS-InSAR and AT-LSTM for Time-Series Analysis and Prediction Method of Ground Subsidence in Mining Areas. *Remote Sensing*, **15**, Article No. 3409. <https://doi.org/10.3390/rs15133409>

-
- [41] Wang, Z., Zhao, Y., Wang, P., Wang, X., Jiang, A., Zhang, G., *et al.* (2024) Refined Subsidence Monitoring and Dynamic Prediction in Narrow and Long Mining Areas Based on InSAR and Probabilistic Integral Method. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 25007. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76037-1>
- [42] Yu, K. (2025) Mine Subsidence Monitoring and Prediction Integrating SBAS-InSAR Technology and Bo-Prophet Model. *PeerJ Computer Science*, **11**, e3327. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.3327>
- [43] Zhu, M., Yu, X., Tan, H., Yuan, J., Chen, K., Xie, S., *et al.* (2024) High-Precision Monitoring and Prediction of Mining Area Surface Subsidence Using SBAS-InSAR and CNN-BiGRU-Attention Model. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 28968. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80446-7>
- [44] Zhang, Z., Lin, Q., Yan, H., Zhu, X., Zhang, X., Yang, S., *et al.* (2025) Ground Subsidence Monitoring and Prediction Based on InSAR and CNN-BiGRU-Attention: A Case Study of Chengdu. *Engineering Geology*, **357**, Article ID: 108336. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.108336>
- [45] Zheng, Q., Wang, C. and Pang, L. (2023) Overburden and Surface Subsidence with Slicing Paste Filling Mining in Thick Coal Seams. *Frontiers in Earth Science*, **10**, Article ID: 1027816. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1027816>
- [46] Du, Z., Chen, D., Li, X., Jian, Y., Zhang, W., Zhang, D., *et al.* (2024) Study on the Partial Paste Backfill Mining Method in a Fully Mechanized Top-Coal Caving Face: Case Study from a Coal Mine, China. *Sustainability*, **16**, Article No. 4393. <https://doi.org/10.3390/su16114393>
- [47] Zhang, J., Zhang, Q., Sun, Q., Gao, R., Germain, D. and Abro, S. (2015) Surface Subsidence Control Theory and Application to Backfill Coal Mining Technology. *Environmental Earth Sciences*, **74**, 1439-1448. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4133-0>
- [48] Lu, H., Qi, C., Chen, Q., Gan, D., Xue, Z. and Hu, Y. (2018) A New Procedure for Recycling Waste Tailings as Cemented Paste Backfill to Underground Stopes and Open Pits. *Journal of Cleaner Production*, **188**, 601-612. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.041>
- [49] 张平松, 程锦全, 许时昂, 吴海波. 厚松散层下区域注浆改造地层扰动变形特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 246-258.