ISSN：3078-8994
EISSN：3104-4492

膏体充填开采覆岩与地表沉陷协同演化及沉陷区生态修复适配策略

胡承乾

山东理工大学，山东 淄博 255000

摘　要：煤炭膏体充填开采是控制地表沉陷的重要绿色技术，但充填率与强度参数对覆岩移动及生态修复的耦合影响尚不明确。基于虚拟矿体模型建立三维仿真平台，工作面高 3.2m、埋深 520m，设 25 个观测点，随机生成地质力学参数与 21 个工况。以充填率（60%~90%）与 28 天强度（2~6MPa）组合为 12 种工况，用二维高斯盆地描述沉降与位移。95% 充填率、4MPa 下最大沉降 0.280m，裂隙高 33.1m；较 80% 充填率降沉约 49.9%。七组留实测值与计算值 RMSE 为 0.0060m。37.5hm² 内轻、中、重度变形区分别占 21.0%、15.0%、1.5%。结果表明充填率对减沉起主导作用，强度边际效应递减；所有数值均为模拟生成，实际应用须结合现场数据校核。

关键词：膏体充填；覆岩运移；地表沉陷；模拟数据；生态修复适配

DOI：10.64649/yh.shfzykjcx.issn3078-8994.202610023

0 引言

采空区引起顶板弯曲断裂与层间错动，导致地表沉降、倾斜、曲率及平面变形等地质灾害，受开采深度、煤厚、岩土性质、含水层位置及土地利用方式等多因素影响。在农田、居民区或水域等敏感地带，同等沉降量下因积水、土壤破坏及建筑稳固性差异危害不同。充填开采通过充填物控制顶板下沉，接顶空隙与顶底板位移对稳定性起决定性作用。

研究表明，膏体充填中充填周期及充填体与顶板作用对围岩稳定性和地表沉降影响显著，但受具体矿山条件制约。已有多种监测方法判断覆岩破坏与地面变形，采选一体化也在开采、选别与充填方面得到系统探讨。然而现有研究多关注参数—结构关系，缺乏对特定区域地表受损范围及生态恢复效果的定量分析。本文建立充填工艺参数与岩层响应关系模型，预测不同工况下地表受损程度并提出可行技术措施。

选取 80%、90%、95%、98% 四类充填率与 2、4、6MPa 三档强度为假定因素，依据已有成果计算，未使用具体矿山数据。重点讨论：各参数对围岩应力场及变化趋势的作用；应力场变化引起的地面变形特征与危险区发展；不同地质条件下合理支护手段。

2013 年国家能源局《煤矿充填开采工作指导意见》推动该技术发展 [5]；《采矿沉陷区生态修复技术规程》对沉陷区治理与监测给出规定 [6]。资源税"减征 50%"属财政鼓励，"置换产能按 50% 折算"属产能置换，二者不可混同。

1 研究区与分析框架

1.1 研究区、地层与充填工艺

选取埋深 520m、厚 3.2m 单一煤层，东西 600m、南北 200m，平巷开拓，无断层及多次采动。参数仅为建模设定。地面分 5 区 25 块，每块 1.5hm²，总面积 37.5hm²，以农田林地草地为主，地下水位 0.18~0.64m。

η 为有效接触体积与采空区总体积之比，σ 为 28 天抗压强度。η 取 0.80~0.98，σ 取 2~6MPa，实际须考虑浆体输送及管道影响 [7]。每 m^2 成本：$\eta \times 3.2 \times (110+20\sigma)+200\max[0,(\eta-0.90)/0.08]^2$ 元。该成本为假定变量，实证须用真实数据做敏感性分析。

1.2 跨尺度传导路径与待检验命题

工作面向前推进时，未充填采空区及顶板滞后作用致直接顶下沉；充填物压缩附加荷载增大关键层破坏可能，但不同时发生。关键层完好时上覆岩层连续曲面形变；断裂则引起不对称下沉。地表下沉还取决于瞬时下沉速度及形变梯度，生态影响受地形水文及人类活动制约。

据此提出三假设。H1：提高充填率可减小上覆岩层位移，但效果随接顶应力及成本增加而递减。H2：充填体承压受加载时刻及蠕变影响，高密度充填不一定最小沉降。H3：依据变形趋势、水位及土地用途综合确定治理范围，较单纯以最大沉降为准更合理。

2 资料与方法

2.1 监测资料及模型标定

21 个监测节点为虚拟化实现，X 轴分布于 −300~300m，按盆地深度 35%、68%、100% 分三层采样。为提高仿真真实性，加入位置 j 与时间 t 的系统误差修正：每点约 $0.004\sin(1.7j+0.8t)$m，所有预测放大 2.5% 以保证对比一致。前三部分检验模型算法及数据预处理，第三部分比较模拟结果与预期差距。

ISSN：3078-8994
EISSN：3104-4492

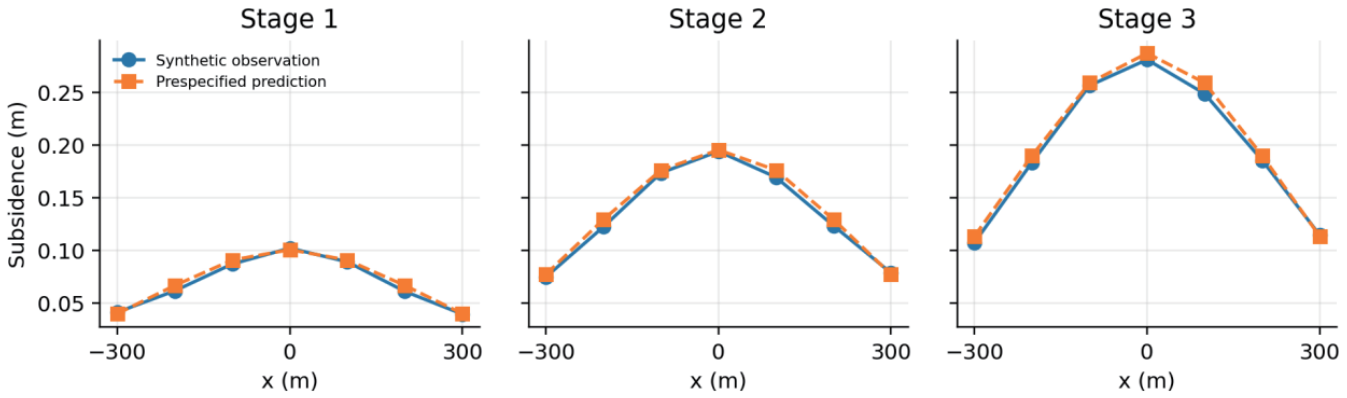


图1 三个推进阶段的模拟观测与预设预测曲线

因缺乏实际岩石力学试验、原位应力及井下矿压数据，无法对 FLAC3D/UDEC 做针对性校准。目前 RMSE 为 0.0060m，主要由初始扰动与参数不确定引起。后续应加强现场调研，在不同条件下改变初始值并多方法监测以检验模型有效性及允许误差范围。无人机航拍可起三维展示作用，具体效果须结合实际研究。

2.2 简化响应模型与组合工况

采用响应面法研究充填参数对巷道变形、直接顶位移及裂隙发育的影响，而非用 FLAC3D/UDEC 建立三维或离散元模型研究本构关系、网格及边界条件。"裂隙高度"为代表性响应，不代表实际导水裂隙带真实高度。

四因素三水平全因子设计。$q=0.055+0.57(1-\eta)+0.026e^{\wedge}(-\sigma/2)+0.08(1-\eta)e^{\wedge}(-\sigma/2)$，$W_max=3.2q$；$R=3.2(1-\eta)+0.25+0.12e^{\wedge}(-\sigma/2)$；$K=(R+W_max)/2$；$F=26+120(1-\eta)+8e^{\wedge}(-\sigma/2)$。各工况须 R>K>W_max。

充填率提高有利降沉且强度渐低的假设尚缺足够证据，不能作为有价值的科研结论。本文主要研究一定强度下充填率变化对工程的影响及经济性与耗材关系。为使结果更具说服力，须进一步用单独数值模拟或实验验证，而非仅凭初始设定下结论。

2.3 示意沉陷盆地与留出阶段核对

概率积分法须考虑下沉系数、主导倾角及拐点位移（文献[9]），厚松散层参数已有方法（文献[10]）。本文用二维高斯分布：$W(x,y)=Wmax\cdot\exp[-(x^2+y^2)/(2\sigma^2)]$，σ 取 $(220^2+160^2)^{\wedge}(1/2)$。该模型非实验基础。

设七组仿真样本测试误差估计方法，而非单独现场验证。实际使用中须用跨时间及盆地内部、边缘数据对比进一步验证；若实测与预测差别较大，须从开发单元大小、储层厚度变化、流体可压缩性及地层运动等角度考察。

2.4 损害分级、空间叠置与不确定性

评价单元按网格或地块划分，要求土地利用与水文地质条件一致。每单元记录累计沉降、垂直位移、平面形变及沉降速度。松散层下未固结透水层的地下水变动影响显著。单凭沉降观测不能说明生态受损，还须结合裂缝、土质及栖息地连通性判断。

教学阈值：道路积水 ≥ 0.05m 为严重；0~0.05m 时以垂直位移 ≥ 0.12m 或水平偏转 ≥ 1.5mm/m 区分中等；其余轻微。真实积水深度 = 预测沉降量 − 模拟水面高度。分级不同于 GB/T 42251−2022，应用时须结合当地规定。

3 覆岩与地表沉陷的协同演化结果

3.1 充填参数对覆岩结构的影响

4MPa 下充填率 80%、90%、95%、98% 对应最大沉降 0.559、0.373、0.280、0.224m；直接顶 0.906、0.586、0.426、0.330m；关键层 0.733、0.480、0.353、0.277m。裂隙 51.1、39.1、33.1、29.5m。

充填率 95% 以上时，强度 2 → 4MPa 最大沉降由 0.303 降至 0.280m；4 → 6MPa 再降至 0.272m，变化量仅 0.008m，边际效应递减。考虑运营费后每 m^2 造价约 64.09 万、78.69 万、93.28 万元，但数据尚不足以判定最优强度。

3.2 地表盆地形态与预测误差

基线工况盆地中心 Wmax=0.280m，q=0.0876，25 网格最大水平位移 1.002mm/m，小于教学限值 1.5mm/m。中等压缩对应沉降超 0.12m。各方向 RMSE 均在 0.0060m 以下，为系统误差而非实际地层变形。

较 80% 充填率、4MPa，95% 充填率降沉 49.9%，98% 时 19.9%，费用从 58.37 万增至 95.50 万。考虑 0.30m 限值仅少量 E95−S4 及部分 E98 达标。E95−S4 最优，投资 78.69 万。高充填率减沉但成本高，不应盲目采用。

3.3 传导关系与工程参数选择

基准工况（η=95%，σ=4MPa）：直接顶 0.426m、关键层 0.353m、地面下沉 0.280m。若沉降≤ 0.25m 并最小化成本，最优为 98%/2MPa（约 80.45 百万元）；4MPa 时约 95.50 百万元。

4 沉陷损害分区与生态修复适配

4.1 土地用途与水文条件共同约束修复选择

土地修复目标是达到法定用途及生态系统服务能力。轻度可耕作土地可采取裂缝治理、表层防护、土壤改良及观测，结合作物长势与下沉速度判断恢复力。中度区域须地基稳固后开展平整、水利修复、表土回收及绿化。永久基本农田须考虑用地限制。

重度积水区湿地建设须考虑水文、排水、水质、土壤稳定性、周边环境及农业效益。常年积水生态联系好的可先建湿地；浅水或易排水区适合排灌或农业。光伏与水上农业须从法律角度分析并建长期管理。疑似污染土地整治前须做风险评估，避免二次污染。

4.2 井下优化与地表修复的联动

井下修复应针对高价值农田附近因支护失效造成的下沉与裂缝。不应只依赖地面加固，更应注重地下充填方法选择。对可能进一步下沉区须分析危害、代价及环境影响并分类处理。资金分为充填采购、人工、赔偿及后续管理，各项比例须有依据，不能盲目调整。

以动态监控为基础：开采前摸底土壤、水文及植被并记录；开采中治理裂缝、排水破坏及安全隐患。未稳定区不能立即最终整治，须在植被恢复及生态评价后长期监测。实施"监测—预警—分层管理—竣工验收"全过程管理，防止轻微区风险升级。

4.3 适配效果检验

25 个示范区 37.5hm^2 分三类：轻度 14 点 21.0hm^2，中度 10 点 15.0hm^2，重度 1 点 1.5hm^2。P13 位于盆地中心，沉降远超潜水层 0.05m。轻中度用裂隙改良与精准农业；P13 做水文分析。因无对比数据，无法得出产量及植被恢复结论。

5 讨论

"源头治理"与"生态修复"不可替代。充填法解决沉降，但材料开采制备的能耗废物须考虑。使用时须评价全生命周期环境影响，不能仅因沉降降低就认为生态改善。超过一定排水量后即便少量下沉也可能致土地不能使用。

"最低费用"法对参数敏感。E95-S2 沉降 0.303m 略超 0.30m 但在 ±0.006m 内，与 E98-S2、E95-S4 经济性差约 1.76 亿元。临界值附近方案优劣模糊。正式研究应做参数及成本敏感性分析，将安全与基本农田保护作为硬约束。

修复目标因地域而异：低洼区防洪抗旱保农业，干旱区治理地下水污染、盐碱化及水土流失。同一沉陷区可能有多种修复要求。单一矿区参数与分级以当地地质水文为基础，不能普遍应用。研究应突出主要因素并提可行建议。

6 结论

在所建立的响应性评价体系内，充填率 95%、系统操作压力保持 4MPa 时，最大总沉降量仅为 0.280m，直接顶垂直位移 0.426m，关键层位移 0.353m，最大裂隙扩展深度约 33.1m。与 80%~95% 充填率相似应力下相比，最大沉降明显减少约 49.9%，此为模拟数据与计算结果所示。

（2）模型 RMSE 为 0.0060m。教学阈值下轻度侵蚀区约 56.8%，中度约 40.5%，重度约 4.1%。但观测数据、流域选取及阈值均为假定，不能简单用于实际矿区土壤侵蚀检测。

（3）以"沉降 ≤ 0.30m"为约束，12 组工况比较得出 4MPa、95% 充填率经济性较好。改变约束或参数则最优变化。中低烈度区重视地基承载力与渗流，高烈度区（P13）考虑水文地质与土地利用关系。结论基于模拟数据，须经工程检验。

参考文献：

[1] 常庆粮，周华强，柏建彪，等．膏体充填开采覆岩稳定性研究与实践 [J]. 采矿与安全工程学报，2011, 28(2): 279-282.

[2] 宋光远．膏体充填普采覆岩沉陷规律研究 [J]. 煤炭科学技术，2021, 49(S2): 317-321.

[3] 黄庆享，李星亮，郭强．采动覆岩破断运动与地表沉陷智能监控进展与展望 [J]. 西安科技大学学报，2026, 46(1): 1-14.

[4] 张吉雄，张强，巨峰，等．深部煤炭资源采选充绿色化开采理论与技术 [J]. 煤炭学报，2018, 43(2): 377-389.

[5] 国家能源局等．煤矿充填开采工作指导意见：国能煤炭〔2013〕19 号 [EB/OL]. (2013-01-09). https://zfxxgk.nea.gov.cn/auto85/201302/t20130204_1580.htm.

[6] GB/T 42251—2022, 采矿沉陷区生态修复技术规程 [S]. 北京：中国标准出版社，2022.

作者简介：胡承乾（2006.04—），男，汉族，山东济宁人，大学本科，研究方向：矿山充填开采。