



采动覆岩离层注浆地表沉陷“四区”控制模型及应用

韩磊 杨科 王天君 于祥 裴春敏 许起 何祥

引用本文：

韩磊, 杨科, 王天君, 等. 采动覆岩离层注浆地表沉陷“四区”控制模型及应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 23–35.
HAN Lei, YANG Ke, WANG Tianjun. “Four Zones” control model and application for surface subsidence of bed separation grouting mining[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 23–35.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2023-0561>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

济宁城市规划区开采沉陷概率积分法参数综合研究

Comprehensive study of parameters of probability integral method of mining subsidence in urban planning areas of Jining City
煤炭科学技术. 2020, 48(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/1ed03392-10fe-468f-8a96-86d1c1729451>

基于变异函数的地表沉陷动态预计模型研究

Study on surface subsidence dynamic prediction model based on variogram
煤炭科学技术. 2021, 49(9): 159–166 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e7fec08e-321c-4543-8c72-843c55de0027>

弱胶结地层重复采动条件下地表最大沉降模型研究及应用

Research and application of maximum surface subsidence model under the condition of repeated mining in weakly cemented strata
煤炭科学技术. 2023, 51(9): 1–10 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-1814>

关键层对特厚煤层综放开采地表沉陷规律的影响研究

Study on influence of key strata on surface subsidence law of fully-mechanized caving mining in extra-thick coal seam
煤炭科学技术. 2019(9) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/1c026d18-de56-493c-8bff-1651a6b527b8>

基于Usher时间函数的采空区地表动态沉陷预测模型研究

Research on prediction model of surface dynamic subsidence of mined-out region based on Usher time function
煤炭科学技术. 2021, 49(9): 145–151 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/589a85d8-ch9b-461c-9d1d-7955dec26a5b>

基于无人机影像的西部矿区地表沉陷信息提取方法改进

Improvement of surface subsidence information extraction method based on UAV image modeling in Western Mining Area
煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 334–342 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-1381>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



韩 磊, 杨 科, 王天君, 等. 采动覆岩离层注浆地表沉陷“四区”控制模型及应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 23–35.

HAN Lei, YANG Ke, WANG Tianjun, et al. “Four Zones” control model and application for surface subsidence of bed separation grouting mining[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 23–35.

移动扫码阅读

采动覆岩离层注浆地表沉陷“四区”控制模型及应用

韩 磊¹, 杨 科^{2,3}, 王天君¹, 于 祥^{2,3}, 裴春敏¹, 许 起¹, 何 祥^{2,3}

(1. 山煤国际能源集团股份有限公司, 山西 太原 030000; 2. 安徽理工大学 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001;

3. 合肥综合性国家科学中心能源研究院, 安徽 合肥 230031)

摘要: 覆岩离层注浆技术已被证实是一种能够满足矿井无损开采与固废减排的新方法。为了有效控制采动引起的地面构筑物沉降, 以关键层理论为基础对离层注浆开采全过程进行稳态分析。首次提出了采动覆岩离层注浆地表沉陷“四区”控制模型, 分别为常规区、过渡区、注浆区和控制区, 并推导出“四区”范围的计算公式。以3501工作面控制地面焦化厂沉降为工程背景, 结合相似模拟与现场实测的沉陷观测数据对提出的“四区”模型进行验证, 结果表明: 相似模拟离层注浆地表沉陷曲线呈不规则的“V”字形, 工作面地表下沉量先快速增大, 到达最大下沉点后, 地表下沉量先快速减小, 随后减小速率逐渐变缓, 沉陷曲线表现出明显的“四区”分布, 最大下沉量为1 589 mm, 出现在常规区与过渡区的接触边界, 过渡区与注浆区接触边界下沉量为497.94 mm, 控制区内基本无下沉; 基于概率积分法预测的注浆条件下采动引起的地表下沉量、水平变形、倾斜和曲率与现场实测结果相符, 但明显小于未注浆条件下的预测值, 确定了注浆条件下地表变形满足构筑物I级损坏等级的要求; 结合矿井的实际工程地质及实际观测数据, 得到常规区范围为261.19 m, 过渡区范围为246.09 m, 注浆区范围为655.25 m, 控制区范围为199.53 m。提出的“四区”控制模型为研究离层注浆开采沉陷问题提供了基础理论依据。

关键词: 离层注浆; “四区”控制模型; 关键层; 地表沉陷; 损坏等级; 概率积分法

中图分类号: TD325 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2023)08-0023-13

“Four Zones” control model and application for surface subsidence of bed separation grouting mining

HAN Lei¹, YANG Ke^{2,3}, WANG Tianjun¹, YU Xiang^{2,3}, PEI Chunmin¹, XU Qi¹, HE Xiang^{2,3}

(1. Shanxi Coal International Energy Group Co., Ltd., Taiyuan 030000, China; 2. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 230031, China)

Abstract: The grouting technology of bed separations has been proved to be a new method which can meet the requirements of non-destructive mining and solid waste reduction. To effectively control the subsidence of ground structures caused by mining, the whole process of bed separation grouting mining is analyzed in a steady state based on the key stratum theory. For the first time, a “four zones” control model for surface subsidence under grouting bed separation was proposed, which includes natural zone, transition zone, warning zone, and protection zone, and the calculation formula for the “four zones” range was derived. Based on the engineering back-ground of controlling the subsidence of the ground coking plant at the 3501 panel, the proposed “four zones” model was validated by combining physical modelling and field measurement of subsidence. The results show that the surface subsidence curve of bed separation grouting in physical modelling shows an irregular “V” shape, and the surface subsidence of the panel first increases rapidly. After reaching the maximum subsidence,

收稿日期: 2023-03-04 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0561

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFC1904304); 国家自然科学基金重点资助项目(52130402); 安徽省高等学校科学研究项目(2022AH050839)

作者简介: 韩 磊(1978—), 男, 河北卢龙人, 正高级工程师, 博士。E-mail: han_kuangren@163.com

通讯作者: 杨 科(1979—), 男, 四川叙永人, 教授, 博士。E-mail: yksp2003@163.com

the surface subsidence first decreases rapidly, and then the reduction rate gradually slows down. The subsidence curve shows a clear “four zones” distribution, with a maximum subsidence of 1 589 mm, appearing at the contact boundary between the natural zone and the transition zone. The subsidence of the contact boundary between the transition zone and the warning zone is 497.94 mm, and there is basically no subsidence within the protection zone. The predicted surface subsidence, horizontal deformation, slope, and curvature caused by mining under grouting conditions based on probability integral method are consistent with the field measured results, but significantly smaller than the predicted values under non-grouting conditions. It is determined that the surface deformation under grouting conditions meets the requirements of Grade I damage level for structures. Based on the practical engineering geology and observed data of the mine, the natural area is 261.19 m, the transition area is 246.09 m, the warning area is 655.25 m, and the protection area is 199.53 m. The proposed “four zones” control model provides a fundamental theoretical basis for studying the subsidence of bed separation grouting mining.

Key words: bed separation grouting; “Four Zones” control model; key stratum; surface subsidence; damage grade; probability integral method

0 引言

煤炭作为我国的主体能源,是我国能源安全的战略保障,在未来相当长一段时间内,我国以煤炭为主体的能源结构不会发生变化^[1-4]。然而,煤炭在促进经济增长的同时,也因高强度、大面积的开采引起地表沉陷、地面构筑物破坏等,对生态环境造成严重破坏^[5-7]。传统的垮落式采煤方法,已经不能满足煤炭绿色精准开采的要求^[8]。离层注浆是一种基于覆岩移动规律而提出的减损开采煤矿注浆充填新技术^[9],自20世纪90年代传入我国,并在抚顺老虎台煤矿成功应用^[10],众多开采沉陷学者对其相关理论的研究产生共鸣。

乔伟等^[11]通过理论分析、数值模拟和三维地震监测深入分析了覆岩离层形成的机理,给出了离层发育层位、分布及体积计算的理论方法。许家林等^[12-15]基于关键层理论和离层的动态发育特征,提出了“覆岩离层分区隔离注浆充填”技术,使“离层充填体+关键层+分区煤柱”形成共同承载体,支撑上覆岩层,减少地表沉降。马荷雯等^[16-17]针对地质条件复杂,难以产生较大离层以及充填率低等问题,提出了覆岩离层多层次梯级注浆,并在淮北矿区进行应用。刘玉成和戴华阳^[18]利用理论和数值模拟的方法,建立了预计近水平煤层开采地表沉陷双曲线剖面函数模型,并通过FLAC^{3D}验证了模型的可靠性。杨治林^[19]利用弹性理论边值问题,将破断后岩层的结构形态及其运动过程中上覆表土层和岩体对地表沉陷的耦合行为视为一个完全接触性问题,提出了预测地表下沉的边值解法。崔希民等^[20]为了实现覆岩与地表下沉计算的统一性,从覆岩与地表等效下沉的角度出发,建立了采动覆岩与地表下沉关系模型,并利用上覆岩层的结构形态,确定了离层层位和离层量的大小。郭文兵等^[21]从二维和三维空间对覆

岩破坏充分采动进行分析,建立了二维和三维覆岩破坏充分采动理论模型,基于此提出了高强度开采覆岩破坏的充分采动判据。朱庆伟等^[22]对离层发展初期固支梁、中期悬臂梁、末期砌体梁结构模型的力学特征和结构变形演化进行了分析,建立了不同阶段的覆岩力学模型,基于此提出了下沉量填满和不填满离层2种情况下的地表下沉预计模型。袁长丰等^[23]建立了考虑节理倾角、迹长和迹宽的地质数学模型,推导了基于随机介质理论的上覆节理岩体沉陷概率分布函数,采用扩展后的Gamma分布代替Poisson分布,提出了考虑节理几何特征的上覆节理岩体沉陷预计方程。高超等^[24]通过对浅埋深特厚煤层综放开采下地表移动进行分析,基于层状弹性梁板岩层沉陷控制理论和随机介质理论,建立了适用于浅埋深特厚煤层综放开采的地表沉陷预计模型。王军保等^[25]通过假定Knothe时间函数中时间影响系数为时间有关的变量,提出了一种基于改性型Knothe时间函数的地表下沉盆地模型,并将得到的模型与改进的Knothe模型结合,建立了一种新的开采沉陷动态预测模型。通过分析固体密实充填的覆岩变形特征,分别在Winkler和Vlazov两种弹性梁理论、连续-离散介质耦合理论、单元层合板理论、等价采高理论基础上,建立了固体密实充填开采地表沉陷预计模型^[26-28]。XU和XUAN等^[29]通过观测覆岩离层注浆条件下地表下沉规律,基于理论分析,提出了离层区注浆厚度的梯形模型,并与未注浆下的地表最大下沉值进行对比,确定了离层注浆对地表沉陷的控制效果。

综上所述,众多学者对开采沉陷的研究取得了较丰富的进展,但是以上研究多集中于地表的竖向沉降,而走向方向上,由于采用离层注浆技术,地表沉陷曲线不是简单的先增加后减少。通过对比分析注浆和未注浆条件下的地表沉降,提出了离层注浆

开采全过程的地表沉陷“四区”控制模型,即常规区、过渡区、注浆区和控制区,并结合理论分析给出了“四区”的控制范围。结合山西霍尔辛赫矿3501工作面的地质条件,以保护地表焦化厂为目的,基于相似模拟及实际地表观测数据,给出了3501工作面回采过程中的“四区”控制范围。提出的“四区”控制模型为研究离层注浆开采沉陷问题提供了基础理论依据。

1 覆岩离层注浆减沉机理

煤层开采过程中,随着工作面的向前推进,覆岩体的原始应力状态遭到破坏,采空区上部岩层内部的应力在次生应力场作用下重新分布,使上覆岩层发生断裂、弯曲和下沉等现象,这种运动现象从采空区发展至地表形成地表沉陷。上覆岩层由于岩性、厚度和空间位置不同,导致岩层的运动并不完全一致,从而在覆岩垂直方向上形成位移差,这种位移差就是离层^[30]。

覆岩离层区注浆是一种控制地表沉降的充填方法(图1),它的基本原理是在工作面开采过程中,通过确定关键层的位置、计算关键层的破断步距及其极限跨距时对应的极限采宽、以及导水裂隙带高度,进而选取合适的目标关键层。由地面向目标关键层钻取注浆钻孔,待目标关键层下部开始出现离层时,通过注入粉煤灰浆液等浆体材料使其充满目标关键层下部的离层空间,以支撑目标关键层使其不发生破断,同时注入浆液能够胶结离层下位岩层的空间和裂隙,在遇到膨胀性岩层时,还能够起到膨胀挤压围岩的作用。

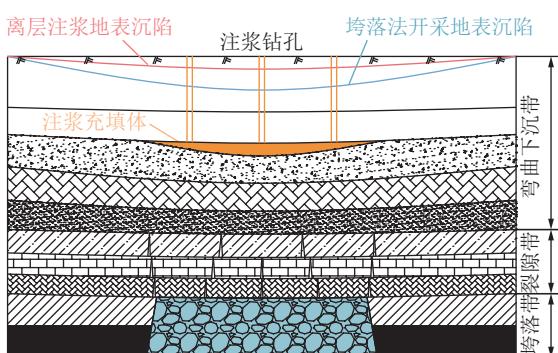


图1 覆岩离层注浆减沉原理

Fig.1 Schematic of overburden separation layer grouting for settlement reduction

图2在综合前人研究的基础上,给出了离层注浆开采和传统垮落法开采2种条件下的地表沉降对比情况。传统垮落法开采条件下,随着工作面回采

推进,采空区上方形成垮落带、裂隙带以及弯曲下沉带,裂隙带上方由于上覆岩层的非同步破断而形成离层,当离层上位关键层达到极限跨距时,关键层破断使离层闭合,这种岩层的破断形式由下向上传递到地表,在地表形成下沉盆地。由图1可知,这种传统垮落法开采下的地表沉降量往往较大,下沉盆地较深且陡,容易对地面建筑物、铁路、农田等造成较大的损害。而采用离层注浆开采,由地面向离层空间打注浆钻孔以支撑上位关键层,防止上位关键层的破断,有效减少了地表沉降量,传统垮落法开采引起的地表沉降量是离层注浆开采的数倍。

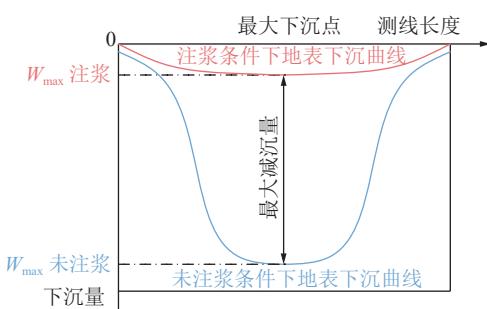


图2 注浆与未注浆条件下地表沉降对比

Fig.2 Comparison of ground settlement under grouting and non-grouting conditions

2 地表沉陷“四区”控制模型

离层随着工作面的向前推进而自下往上发展,因此离层区注浆并不是从开切眼开始,而是回采一定距离后,待目标关键层下方形成离层时开始进行注浆作业。因此,注浆条件下,由于煤层开采引起地表沉陷并不是一个简单的“V”字形曲线,而是一个不规则的浅“V”字形。为了进一步分析离层注浆条件下的地表沉降规律,笔者以关键层理论为依据,对煤层开采过程中引起的地表沉陷进行稳态分析。

2.1 关键层判别

根据离层注浆原理,首先应该对覆岩层中坚硬岩层的极限跨距进行分析,进而确定覆岩中主关键层与亚关键层的位置及其相关参数。

假设煤层上方第1层岩层为坚硬岩层,则第n层岩层对第1层岩层的载荷为

$$q_{(n)1} = \frac{E_1 h_1^3 \sum_{i=1}^n h_i V_i}{\sum_{i=1}^n E_i h_i^3} \quad (1)$$

式中: $q_{(n)1}$ 为第n层岩层对第1层坚硬岩层的载荷, MPa; E_i 为第i层岩层弹性模量, GPa; h_i 为第i层岩

层层厚, m; V_i 为第 i 层岩层体积力, MN/m³。

假设第 $n+1$ 层岩层为另一层硬岩层, 由于 $n+1$ 层岩层挠度小于第 n 层岩层, 故第 $n+1$ 层岩层不随下部岩层发生同步变形, 则:

$$q_{(n+1)1} < q_{(n)1} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1), 则得到硬岩层的判别公式为

$$E_{n+1}h_{n+1}^2 \sum_{i=1}^n h_i V_i > V_{n+1} \sum_{i=1}^n E_i h_i^3 \quad (3)$$

由煤层上方第 1 层硬岩层开始计算, 满足式(3)即为第 2 层硬岩层, 按照这种方法, 依次得到煤层上覆坚硬岩层的具体位置。

以两端固支梁模型计算, 判断各硬岩层的破断距:

$$L_{Tk} = h_k \sqrt{\frac{2R_{Tk}}{q_k}}, (k=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中: L_{Tk} 为第 k 层硬岩层的破断距, m; h_k 为第 k 层硬岩层层厚, m; R_{Tk} 为第 k 层硬岩层抗拉强度, MPa; q_k 为第 k 层硬岩层载荷, MPa。

当 $L_{Tk} < L_{Tk+1}$ 时, 确定第 k 层岩层为关键层, $k+1$ 层岩层为控制第 k 层关键层垮落的硬岩层。以此类推, 最终确定煤层上覆岩层中各关键层的位置。

2.2 离层注浆开采地表沉陷稳态分析

工作面沿走向推进过程中, 离层自下而上依次发育, 直至目标关键层出现离层时开始进行注浆充填。假设目标关键层为亚关键层 N , 则当亚关键层 $N-1$ 发生破断时, 亚关键层 N 下方开始出现离层。图 3 所示为工作面推进距离达到亚关键层 $N-1$ 的极

限回采距离时对应的地表沉陷稳态情况, 曲线 1 即为此阶段的地表下沉稳态曲线, 最大下沉值为 $W_{\max(N-1)}$ 。此时亚关键层 $N-1$ 达到极限跨距, 该亚关键层下方离层量达到最大, 即:

$$L_{T(N-1)} = h_{N-1} \sqrt{\frac{2R_{T(N-1)}}{q_{N-1}}} \quad (5)$$

根据关键层破断步距与覆岩破断角确定关键层达到极限跨距时对应的注浆充填工作面采宽, 在走向方向上, 表示为极限回采距离。则亚关键层 $N-1$ 达到极限跨距时注浆充填工作面极限回采距离为

$$L_{N-1} = h_{N-1} \sqrt{\frac{2R_{T(N-1)}}{q_{N-1}}} + \frac{2H_{N-1}}{\tan \theta} \quad (6)$$

式中: L_{N-1} 为亚关键层 $N-1$ 达到极限跨距时注浆充填工作面极限回采距离, m; H_{N-1} 为亚关键层 $N-1$ 与煤层间距, m; θ 为煤层上覆岩层破断角, (°)。

通过计算可以得出, 此阶段地表沉陷走向方向的影响范围为

$$L_{S(N-1)} = \frac{2H_c}{\tan \delta} + L_{N-1} = \frac{2H_c}{\tan \delta} + h_{N-1} \sqrt{\frac{2R_{T(N-1)}}{q_{N-1}}} + \frac{2H_{N-1}}{\tan \theta} \quad (7)$$

工作面继续向前推进, 亚关键层 $N-1$ 破断并在离层中部压实, 同时注浆关键层 N 下方离层开始发育并进行注浆充填。当工作面推进距离为 L_N 时(图 4), 达到了注浆关键层的极限跨距, 注浆关键层下方离层量达到最大为 S_{\max} 。

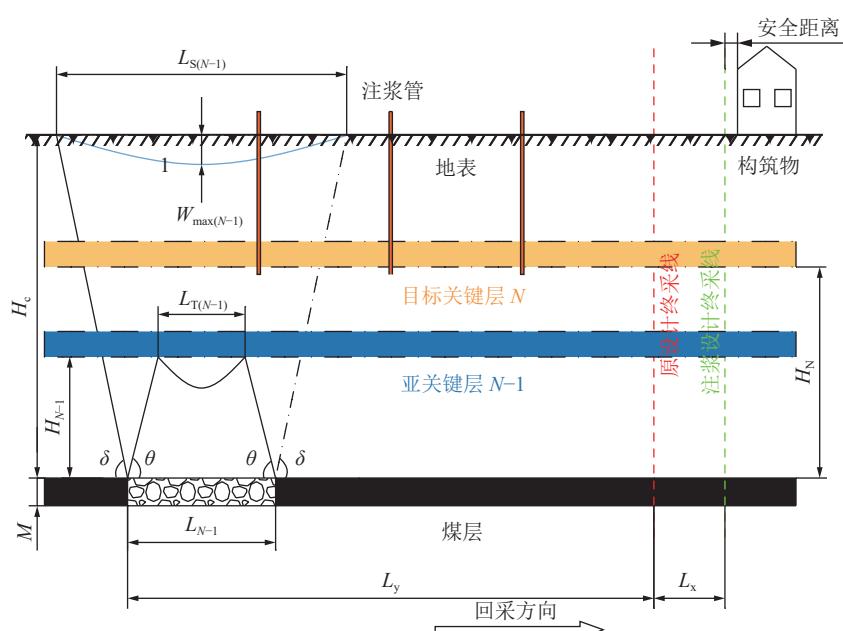


图 3 注浆关键层未形成离层时的地表沉陷稳态分析

Fig.3 Steady state analysis of surface subsidence when separation layer is not formed in key grouting layer

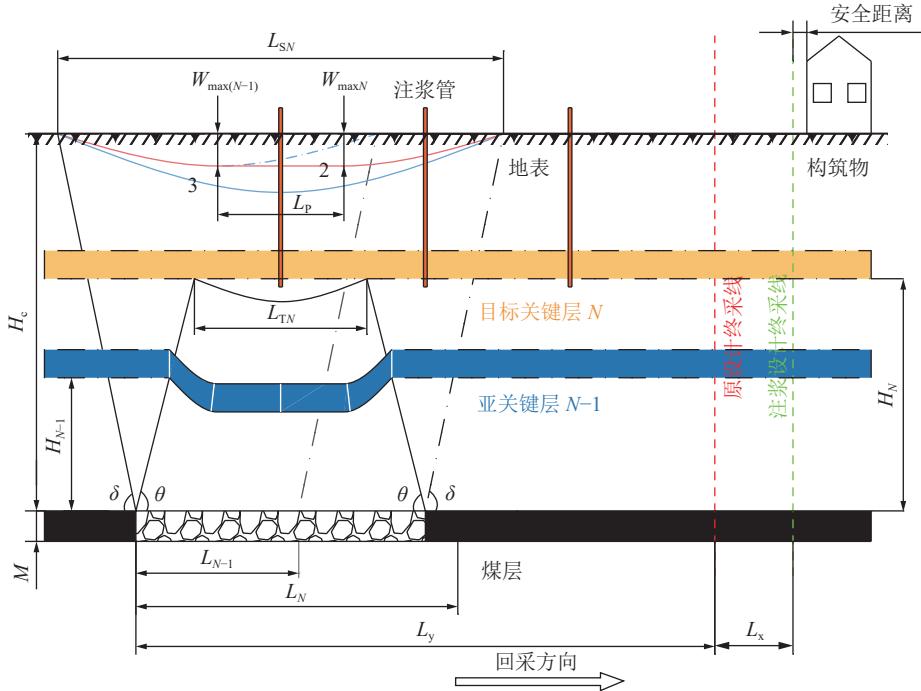


图 4 注浆关键层达到极限跨距时的地表沉陷稳态分析

Fig.4 Steady state analysis of surface subsidence when key grouting layer reaches the limit span

$$L_N = h_N \sqrt{\frac{2R_{TN}}{q_N}} + \frac{2H_N}{\tan \theta} \quad (8)$$

式中: L_N 为亚关键层 N 达到极限跨距时注浆充填工作面回采距离, m; H_N 为亚关键层 N 与煤层间距, m。

由于注浆体对注浆关键层起到支撑作用, 阻止其发生破断, 此时理想状态下(注浆体完全支撑起上位关键层, 使其不发生破断)的地表沉降可视为在图 3 状态时曲线 1 的延续, 即地表最大下沉值 $W_{\max N}$ 近似等于 $W_{\max(N-1)}$, 地表下沉曲线如图 4 中曲线 2 所示, 此时地表沉陷的影响距离为

$$L_{SN} = \frac{2H_c}{\tan \delta} + L_N = \frac{2H_c}{\tan \delta} + h_N \sqrt{\frac{2R_{TN}}{q_N}} + \frac{2H_N}{\tan \theta} \quad (9)$$

相较于曲线 1, 曲线 2 有一段平底长度, 平底长度为

$$L_N - L_{N-1} = h_N \sqrt{\frac{2R_{TN}}{q_N}} - h_{N-1} \sqrt{\frac{2R_{T(N-1)}}{q_{N-1}}} + \frac{2(H_N - H_{N-1})}{\tan \theta} \quad (10)$$

曲线 3 为工作面推进距离为 L_N 不进行注浆时的地表沉陷, 相较于曲线 2 下沉量明显较大。

图 5 所示, 工作面继续向前推进, 由于注浆体对注浆关键层的支撑作用, 注浆关键层不再破断, 离层不再向上发育, 并开始沿走向方向发展。图中 L_y 为原设计的走向回采长度, L_x 为采用离层注浆技术释放的压煤区长度, 当工作面推进距离为 $L_y + L_x$ 时, 整

个工作面走向的地表稳态沉降如图中曲线 5 所示。根据地表沉降量的大小, 将曲线 5 进行“四区”划分, 即: 常规区(a)、过渡区(b)、注浆区(c)和控制区(d)。

2.3 地表沉陷“四区”划分

2.3.1 常规区

由图 5 所示, 注浆条件下, 将开切眼侧地表下沉盆地边缘至注浆关键层达到极限跨距时地表下沉盆地平底末端的水平范围称为常规区的范围(l_a)。理想状态下将常规区范围内的地表下沉曲线视为亚关键层 $N-1$ 破断时地表下沉曲线的延续, 地表下沉曲线的形状为亚关键层 $N-1$ 破断时地表下沉曲线的一半与盆地平底的结合, 地表下沉量最大值近似等于亚关键层 $N-1$ 破断时地表下沉量的最大值 $W_{\max(N-1)}$ 。由图 4 可知, 亚关键层 $N-1$ 破断时地表下沉曲线的一半长度为 $\frac{H_c}{\tan \delta} + \frac{L_{N-1}}{2}$, 平底的长度为 $L_N - L_{N-1}$ 。由图 5 可知, 常规区的长度为

$$l_a = \frac{H_c}{\tan \delta} + L_N - \frac{L_{N-1}}{2} \quad (11)$$

将式(8)和式(10)代入式(11), 则有:

$$l_a = \frac{H_c}{\tan \delta} + \frac{2H_N + H_{N-1}}{\tan \theta} + h_N \sqrt{\frac{2R_{TN}}{q_N}} - \frac{h_{N-1}}{2} \sqrt{\frac{2R_{T(N-1)}}{q_{N-1}}} \quad (12)$$

2.3.2 注浆区

如图 5 所示, 注浆条件下, 将注浆关键层达到极

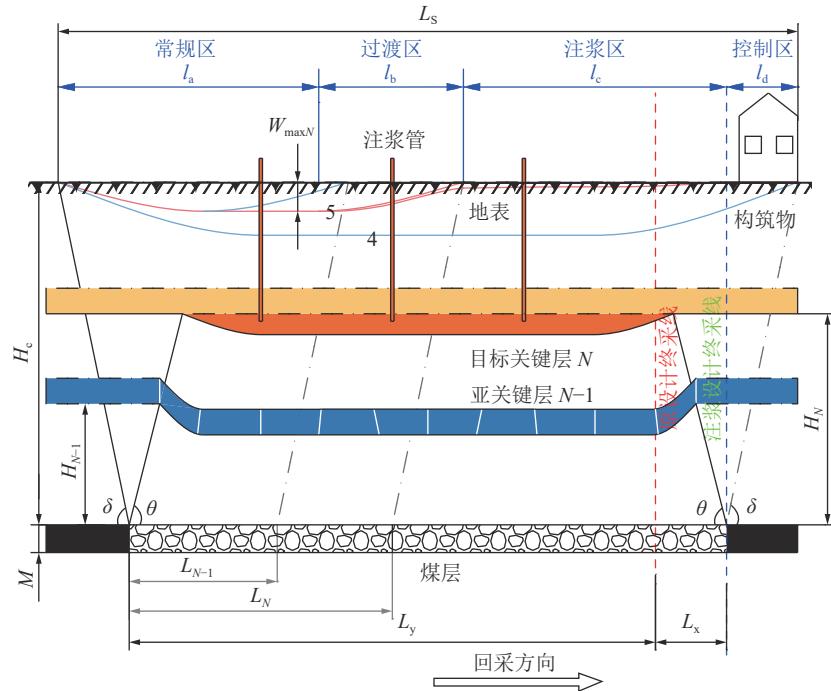


图5 工作面注浆开采全过程地表沉陷稳态分析及“四区”划分

Fig.5 Steady state analysis of surface subsidence and division of “four zones” in whole process of grouting mining of working face

限跨距时工作面侧地表下沉盆地边缘至构筑物安全距离间的水平范围称为注浆区的范围(l_c)。注浆区范围内的地表沉降最大值 $W_{\text{max}N}$ 远小于常规区地表沉降最大值, 地表变形满足《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》^[31]对构筑物的Ⅱ级损坏等级的要求。由图5可知, 注浆区的长度为

$$l_c = L_y + L_x - L_N - \frac{H_c}{\tan \delta} \quad (13)$$

将式(8)代入式(13), 则有:

$$l_c = L_y + L_x - \frac{2H_N}{\tan \theta} - \frac{H_c}{\tan \delta} - h_N \sqrt{\frac{2R_{TN}}{q_N}} \quad (14)$$

2.3.3 过渡区

如图5所示, 注浆条件下, 将工作面侧常规区边界至开切眼侧注浆区边界之间的水平范围称为过渡区的范围(l_b)。过渡区范围内的地表沉陷原则上均小于图中曲线2上升段, 即小于注浆关键层极限跨距时地表沉陷曲线上升段的沉降量。过渡区的最小沉降量为开切眼侧注浆区边界的沉降量, 最大沉降量为工作面侧常规区边界的沉降量。由图5可知, 过渡区的长度为

$$l_b = L_{SN} - a \quad (15)$$

将式(9)和式(12)代入式(15), 则有:

$$l_b = \frac{H_c}{\tan \delta} - \frac{H_{N-1}}{\tan \theta} + \frac{h_{N-1}}{2} \sqrt{\frac{2R_{TN-1}}{q_{N-1}}} \quad (16)$$

2.3.4 控制区

如图5所示, 注浆条件下, 将工作面回采至注浆设计终采线时在工作面侧地表沉陷边缘与安全线之间的范围称为控制区的范围(l_d)。该范围内地表有变形, 但是地表变形必须满足《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》^[31]对构筑物Ⅰ级损坏等级的要求。由图5可知, 控制区的长度为

$$l_d = L_a + \frac{H_c}{\tan \delta} = 20 + \frac{H_c}{\tan \delta} \quad (17)$$

综合以上分析可知, 为保证建立的“四区”范围控制模型满足实际工程的需求, “四区”范围需要满足的必要条件为

$$l_a + l_b + l_c + l_d = L_s = L_y + L_x + L_a + \frac{2H_c}{\tan \delta} \quad (18)$$

3 工程应用

3.1 工程背景

以山西霍尔辛赫煤矿3501工作面为研究背景, 3501工作面地面标高在+935~+939 m, 工作面标高在+359~+421 m, 工作面外切眼长度为120 m, 可采长度为332 m, 内开切眼长度246 m, 可采长度367.6 m。3号煤层平均厚度为5.6 m, 煤层倾角在1°~12°, 可采储量0.98 Mt。由于工作面回采区域地表有构筑物(主要为地面焦化厂)、道路、农

作物等,3501工作面井上下对照情况如图6所示,在开采过程中为了有效保护地面焦化厂,通过覆

岩离层注浆技术,尽可能多的释放焦化厂下煤炭资源量,控制地表沉陷。

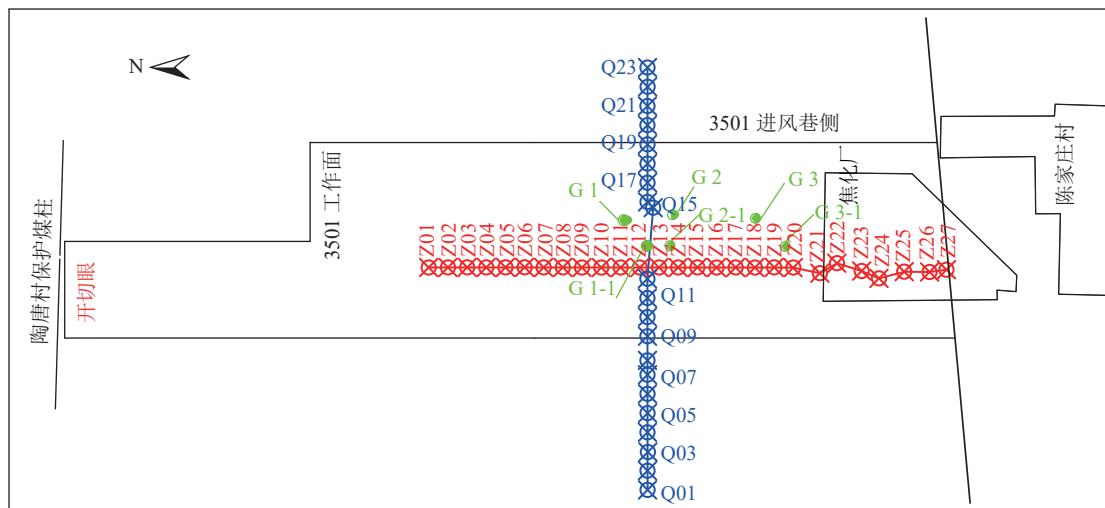


图 6 3501 工作面井上下对照情况

Fig.6 Comparison of up and down wells in No.3501 working face

3.2 注浆参数选择

根据3501工作面覆岩层的岩性特征(表1),利用关键层的判别准则,确定了其主关键层和亚关键层的位置,并计算得到主(亚)关键层的破断距及对应的极限采宽(表2)。通过实测法计算导水裂隙带高度为76.72 m,为了防止注浆时离层区与导水裂隙

带发生贯通,需要留设5倍煤层采高左右的围护带厚度($5 \times 5.6 \text{ m} = 28 \text{ m}$),则离层注浆的层位应在煤层104.72 m以上。综上所述,确定注浆层位应在埋深为382 m的中粒砂岩中(亚关键层4)。

为了控制上覆关键层的下沉,注浆压力必须大于覆岩自重力,由经验公式计算注浆压力应不小于

表 1 3501 工作面覆岩层及关键层信息

Table 1 Information of overlying layer and key layer in No.3501 working face

地层单位	序号	岩性	厚度/m	埋深/m	岩性描述	关键层判断	注浆层位
	1	表土层	174.65	174.65	黄土		
	2	粉砂岩	2.85	177.50	粉砂质结构,含少量云母,半坚硬		
	3	中粒砂岩	10.05	188.00	石英为主,长石次之,含少量云母,半坚硬	主关键层	
	4	砂质泥岩	8.00	196.00	砂质分布不均匀,与下覆岩层呈明显接触		
	5	细粒砂岩	4.50	200.50	细粒粉砂质结构,以石英为主,半坚硬		
	6	粉砂岩	6.50	207.00	粉砂质结构,含少量云母,半坚硬		
	7	中粒砂岩	4.00	211.00	中粒砂质结构,石英为主,长石次之		
	8	泥岩	2.00	213.00	松软,具滑面		
	9	中粒砂岩	9.00	222.00	中粒砂质结构,石英为主,长石次之,巨厚层状	亚关键层7	
上石盒子组	10	泥岩	4.00	226.00	松软,具滑面		
	11	中粒砂岩	3.00	229.00	中粒砂质结构,与下覆岩层明显接触,半坚硬		
	12	砂质泥岩	12.00	241.00	砂质分布不均匀,半坚硬		
	13	细粒砂岩	3.00	244.00	细粒砂质结构,石英为主,长石次之,半坚硬		
	14	中粒砂岩	4.00	248.00	中粒砂质结构,石英为主,与下覆岩层明显接触		
	15	砂质泥岩	8.50	256.50	砂质分布不均匀,半坚硬		
	16	粉砂岩	6.10	262.60	粉砂质结构,断口参差状,半坚硬		
	17	砂质泥岩	9.40	272.00	砂质分布不均匀,半坚硬		
	18	中粒砂岩	8.00	280.00	中粒砂质结构,石英为主,长石次之,半坚硬	亚关键层6	
	19	砂质泥岩	6.00	286.00	砂质分布不均匀		

续表

地层单位	序号	岩性	厚度/m	埋深/m	岩性描述	关键层判断	注浆层位
上石盒子组	20	粉砂岩	5.00	291.00	粉砂质结构, 断口参差状, 半坚硬	亚关键层5	
	21	中粒砂岩	15.00	306.00	中粒砂质结构, 分选差, 半坚硬		
	22	泥岩	2.00	308.00	松软, 具滑面, 含矿物		
	23	中粒砂岩	4.50	312.50	断口参差状, 分选中等, 与下覆岩层明显接触		
	24	粉砂岩	4.50	317.00	粉砂质结构, 小型交错层理, 分选好, 半坚硬		
	25	砂质泥岩	8.50	325.50	砂质分布不均匀, 断口参差状, 半坚硬		
	26	粉砂岩	4.50	330.00	粉砂质结构, 巨厚层状, 明显接触		
	27	中粒砂岩	3.00	333.00	裂隙发育, 分选差, 明显接触, 半坚硬		
	28	砂质泥岩	7.00	340.00	砂质分布不均匀, 半坚硬, 明显接触, 断口参差		
	29	粉砂岩	4.00	344.00	粉砂质结构, 泥质胶结, 半坚硬		
	30	泥岩	3.50	347.50	松软, 具滑面, 胶结, 致密		
	31	砂质泥岩	2.50	350.00	砂质分布不均匀, 明显接触		
	32	细粒砂岩	6.00	356.00	巨厚层状, 断口参差状, 半坚硬		
	33	砂质泥岩	2.00	358.00	砂质分布不均匀, 明显接触		
	34	细粒砂岩	5.50	363.50	细粒砂质结构, 分选好, 半坚硬		
	35	砂质泥岩	3.50	367.00	砂质分布不均匀, 泥质胶结, 分选中等, 半坚硬		
	36	泥岩	5.50	372.50	松软, 具滑面		
	37	中粒砂岩	9.50	382.00	中粒砂质结构, 明显接触, 半坚硬	亚关键层4	注浆
下石盒子组	38	砂质泥岩	3.00	385.00	砂质分布不均匀, 分选差, 断口参差, 半坚硬	亚关键层3	
	39	细粒砂岩	2.50	387.50	小型交错层理, 分选好, 断口参差, 半坚硬		
	40	粗粒砂岩	9.95	397.45	裂隙发育, 交错层理, 半坚硬		
	41	泥岩	1.05	398.50	松软, 具滑面, 半坚硬		
	42	砂质泥岩	5.00	403.50	小型交错层理, 分选好, 明显接触		
	43	粉砂岩	3.50	407.00	粉砂质结构, 半坚硬		
	44	泥岩	6.00	413.00	松软, 具滑面, 明显接触		
	45	砂质泥岩	11.00	424.00	砂质分布不均匀, 断口参差, 半坚硬		
	46	粗粒砂岩	2.00	426.00	粗粒砂质结构, 明显接触, 半坚硬		
	47	泥岩	6.00	432.00	松软, 具滑面		
	48	粉砂岩	2.50	434.50	粉砂质结构, 明显接触, 半坚硬		
	49	中粒砂岩	10.50	445.00	中粒砂质结构, 分选中等, 明显接触	亚关键层2	
	50	泥岩	2.00	447.00	松软, 具滑面		
	51	细粒砂岩	4.00	451.00	小型交错层理, 夹岩屑, 明显接触, 半坚硬		
山西组	52	砂质泥岩	4.60	455.60	砂质分布不均匀, 半坚硬	亚关键层1	
	53	泥岩	1.90	457.50	松软, 具滑面, 半坚硬		
	54	中粒砂岩	4.00	461.50	中粒砂质结构, 钙质胶结, 明显接触, 半坚硬		
	55	细粒砂岩	2.50	464.50	细粒砂质结构, 半坚硬		
	56	泥岩	3.60	467.60	松软, 具滑面, 夹岩屑, 明显接触		
	57	砂质泥岩	3.40	471.00	砂质分布不均匀, 明显接触		
	58	泥岩	1.50	472.50	松软, 含植物化石		
	59	砂质泥岩	2.50	475.00	砂质分布不均匀, 明显接触, 半坚硬, 块状		
	60	细粒砂岩	12.30	487.30	细粒砂质结构, 小型交错层理, 巨厚层状		
	61	煤	5.96	493.26	块状-粉末状, 暗淡光泽, 半亮型		
	62	泥岩	1.14	494.40	块状, 富含植物化石, 具滑面		
	63	中粒砂岩	1.60	496.00	中粒砂质结构, 小型交错层理, 明显接触		
	64	砂质泥岩	5.50	501.50	砂质分布不均匀, 巨厚层状, 致密, 平行层理		
	65	细粒砂岩	1.10	502.60	块状, 中厚层状, 钙质胶结, 坚硬		

表 2 关键层信息及破断距
Table 2 Key layer information and breaking distance

序号	类型	岩性	厚度/m	埋深/m	距煤层距离/m	破断距/m	极限采宽/m	注浆层位
1	主关键层	中粒砂岩	10.05	188.00	305.26	94.66	379.35	—
2	亚关键层7	中粒砂岩	9.00	222.00	271.26	82.32	335.30	—
3	亚关键层6	中粒砂岩	8.00	280.00	213.26	78.84	277.73	—
4	亚关键层5	中粒砂岩	15.00	306.00	187.26	51.13	225.77	—
5	亚关键层4	中粒砂岩	9.50	382.00	111.26	44.46	148.22	注浆
6	亚关键层3	粗粒砂岩	9.95	397.45	95.81	43.78	133.13	—
7	亚关键层2	中粒砂岩	10.50	445.00	48.26	34.32	79.61	—
8	亚关键层1	细粒砂岩	12.30	487.30	5.96	14.23	19.79	—

9.55 MPa, 浆液扩散半径应在 212.98~227.18 m。为了确保离层注浆效果, 保护焦化厂, 选择在 3501 工作面共布置 6 个注浆钻孔, 注浆钻孔的布置位置如图 6 所示, 注浆层位见表 3。注浆过程中, 对注浆量、注灰量和注浆压力进行定期监测。

表 3 3501 工作面注浆钻孔信息

Table 3 Grouting drilling information of No.3501 working face

序号	钻孔类别	数量/个	孔深/m
1	注1孔(斜)	1	382
2	注1-1孔(斜)	1	419
3	注2孔(直)	1	397
4	注2-1孔(直)	1	387
5	注3孔(直)	1	390
6	注3-1孔(直)	1	392

霍尔辛赫矿 3501 工作面以山西潞光发电厂、漳泽电厂和杨暴热电公司粉煤灰综合利用股份有限公司等企业排放的粉煤灰为离层注浆材料。通过对粉煤灰浆液进行强度测试和流动性测试, 选择水灰比(水:粉煤灰)0.7 作为离层注浆浆液的配比。截止工

作面回采结束, 在煤柱保护区范围内共推进 283 m, 释放压煤 47.5 万 t; 累计注浆量 62.44 万 m³, 注灰量 48.56 万 t。

3.3 地表沉陷观测及预测

3.3.1 3501 工作面相似模拟观测

以 3501 工作面地质力学参数及采掘工程设计为原型, 采用安徽理工大学二维模拟试验台, 试验台平台尺寸为 2.5 m×0.1 m×1.5 m(长×宽×高)。根据“三带”高度计算结果和现场注浆层位高度, 确定模型的几何相似比为 1:200(模型:原型), 确定容重相似比为 1:1.6(模型:原型), 强度相似比为 1:320, 时间相似比为 1:14, 其他相似常数依次进行计算。

相似材料模拟试验(图 7)铺设总高度为 110 cm, 其中煤层以上厚度约为 100 cm, 模拟的煤层实际埋深约为 493 m, 其余未模拟出的岩层实际厚度约为 293 m, 为保证相似模型与工程原型的相似性, 根据应力相似比, 在模型顶部铺设配重块至对应的应力边界, 等效模型上覆岩层的重力作用。

通过注浆材料初终凝试验得知, 注浆材料的初凝时间普遍在 4 d 左右, 按照现场工作面平均每天推进 2.4 m 计算, 则在一个初凝时间段内工作面共推

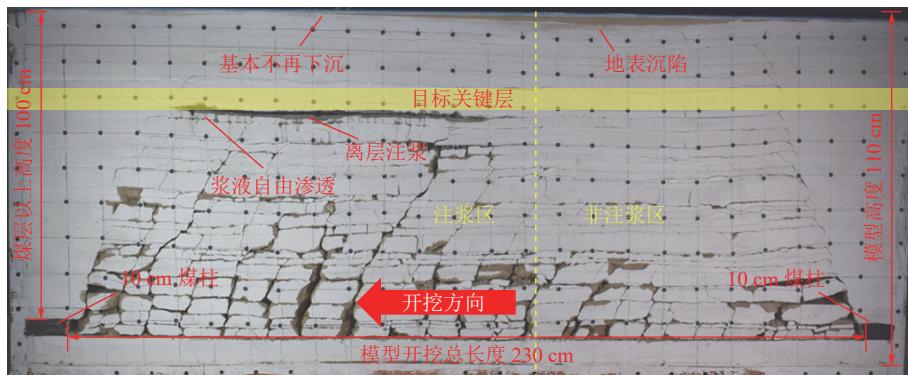


图 7 模型开挖 230 cm(开挖完毕)
Fig.7 Model excavation 230 cm (excavation completed)

进9.6 m,按照几何相似比计算,模型在一个初凝时间段内的开挖步距应为4.8 cm,为了计算和操作方便,确定开挖步距为5 cm。试验中采用的注浆材料的初凝时间为2~4 h,夏天温度较高时,其初凝时间为2 h左右。因此,试验按照注浆材料的初凝时间来确定工作面开挖的步距,即模型的开挖步距为5 cm,每开挖一个步距所用时间为2 h。相似材料模型的开挖顺序为从右到左依次进行,每开挖1个步距5 cm,即采用定点相机对模型表面进行拍照。

模型长度为2.5 m,左右两侧各留宽10 cm煤柱,中部2.3 m区域为开挖区域。工作面采用垮落法开挖,开挖距离到约0.665 m(亚关键层3破断)后,在目标关键层下方的裂隙和离层空间采用预制的注浆材料进行注浆充填。注浆过程中为了防止浆液从模型前后溢流出来,采用白色密封胶泥在模型前后表面对离层空间进行密封,起到阻止浆液从离层空间溢流而出的作用。需要说明的是,白色密封胶泥无定形形态,极软,基本无硬度和强度,因而基本不会对岩层的下沉和离层的发育过程造成任何阻碍。向离层空间注入浆液时,采用注射器+针头的组合器具,从模型后面缓慢推压注入,注浆过程中时刻注意浆液溢流和岩层变化情况。

通过对开挖过程中进行拍照,记录和分析覆岩裂隙发育和变形破坏过程;通过定点相机拍照并将照片导入软件中分析覆岩的位移下沉情况。

当工作面开挖距离达到230 cm(图7),模型开挖完毕并静置24 h后,模型右侧的岩层进一步压实稳定,而注浆离层空间发育逐渐变得稳定,离层空间内的浆液向下方岩层渗透一定程度后停止渗透,并逐渐凝固和硬化,留存在离层空间内的浆液固化,对关键层起到支撑作用,关键层的下沉基本不再明显。可见离层注浆对关键层及地表沉陷发挥了良好的控制作用。

通过提取图7中地表沉陷数据并转化相似比,制作了地表沉陷随工作面推进距离的下沉曲线,结果如图8所示。

由图8可知,地表下沉曲线呈不规则地“V”字形,自开切眼开始至开采结束为止,工作面地表下沉量先快速增大,到达最大下沉点后,地表下沉量先快速减小,而后减小速率逐渐变缓,地表下沉量的变化沉陷表现出明显的“四区”行为。常规区为开切眼与最大下沉点之间的范围,该范围内的地表下沉量快速增大,地表下沉速率先增大后减小,常规区的最大下沉量为1 589 mm;过渡区为最大下沉点与下沉量

减小速率开始变缓时之间的范围,该范围内的地表下沉量逐渐减小,地表下沉速率先增大后减小,过渡区下边界下沉量为最大下沉量1 589 mm,上边界下沉量为497.94 mm;注浆区为过渡区上边界与开采结束时之间的范围,该范围内的地表下沉量进一步减小,下沉速率波动范围稳定;控制区为被保护构筑物的范围,控制区内地表基本无下沉。由相似模拟结果可知,离层注浆有效地控制了地表沉陷。

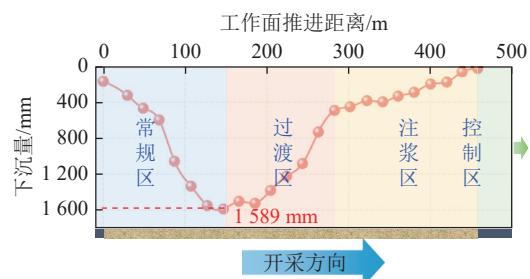


图8 工作面推进过程中地表沉陷观测曲线
Fig.8 Observation curve of surface subsidence during advance of working face

3.3.2 3501工作面实际观测结果

为了监测3501工作面注浆过程中减沉区域地表变形情况,3501工作面布设倾向观测线1条,设置观测点23个,编号首字母为Q,布设走向观测线1条,设置观测点27个,编号首字母为Z,测点间距为25 m。上述高程观测值均基于三等水准测量,水平观测值基于GNSS-千寻CORS技术进行观测。主要提取了走向观测线最后一次测量结果,由于Z1~Z5号测点浸水损坏,故提取Z6~Z27的测点数据进行分析,如图9所示为Z6~Z27的地表下沉量测量值。

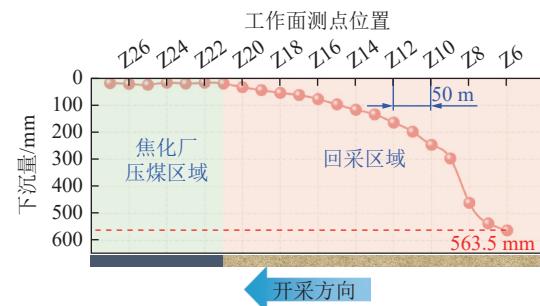


图9 3501工作面走向地表沉陷观测
Fig.9 Observation of No. 3501 working face trend to surface subsidence

由图9可知,工作面走向观测线上最大下沉点出现在Z6测点,地表最大下沉值为563.5 mm。自Z21测点开始属于焦化厂的受保护范围,由地表沉陷观测可知,Z21~Z27号测点内虽有沉陷,但沉陷量

很小。

除此之外, 对 Z6~Z27 测点的水平变形、倾斜、曲率进行分析, 并与《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》中规定的对构筑物 I 级损坏等级进行对比(表 4)。

表 4 3501 工作面地表变形与构筑物 I 级损坏等级指标对比

Table 4 Comparison between surface deformation of No. 3501 working face and Grade I damage grade of structures

因素	水平变形 / (mm·m ⁻¹)	倾斜 / (mm·m ⁻¹)	曲率 / 10 ⁻³ m ⁻¹
指标要求	≤2.0	≤3.0	≤0.2
实测值	-1.54~1.81	-1.81~1.48	-0.124~0.045

表 5 3501 工作面地表变形预测值与实测值对比

Table 5 Comparison between predicted and measured surface deformation of No.3501 working face

因素	下沉量/ mm	水平变形/(mm·m ⁻¹)	倾斜/(mm·m ⁻¹)	曲率/10 ⁻³ m ⁻¹
未注浆预测	3 707.0	-12.19~12.20	-26.68~24.73	-0.33~0.31
注浆预测	620.7	-1.99~1.76	-3.8~4.09	-0.04~0.04
实测	563.5	-1.54~1.81	-1.81~1.48	-0.124~0.045

根据 3501 工作面实际地质情况(L_y 为 700 m, L_x 为 283 m)及表 1 并结合式(12)、(14)、(16)、(17)可计算出 3501 工作面的“四区”分布范围, 取走向移动角 δ 为 70°, 即: 常规区 $l_a = 261.19$ m, 过渡区 $l_b = 246.09$ m, 注浆区 $l_c = 655.25$ m, 控制区 $l_d = 199.53$ m。由式(19)可知, $l_a + l_b + l_c + l_d = 1 362.06$ m, 而 $L_y + L_x + L_a + (2H_c / \tan \delta) = 1 362.06$ m, 满足式(18)所述必要条件。

4 结 论

1)首次提出了采动覆岩离层注浆地表沉陷“四区”控制模型, 分别为: 常规区、过渡区、注浆区和控制区, 结合关键层理论及岩层移动规律, 推导了地表沉陷的走向“四区”控制模型理论公式。

2)采用相似模拟试验观测了 3501 工作面开采过程中的地表沉陷规律, 相似模拟的地表沉陷曲线呈不规则地“V”字形, 根据曲线的变化规律, 沉陷曲线存在明显的“四区”分布, 常规区的最大下沉量为 1 589 mm, 过渡区上边界下沉量为 497.94 mm, 注浆区的地表沉陷进一步减小, 控制区内地表基本无下沉。

3)通过对 3501 工作面开采过程进行沉陷观测及概率积分法预测, 确定了焦化厂范围内地表变形满足《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》中规定的对于构筑物 I 级损坏等级的

由表 4 可知, 3501 工作面的水平变形、倾斜、曲率实测值均满足《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》中规定的对于构筑物 I 级损坏等级的要求。

为了更好地说明注浆减沉的效果, 采用概率积分法对 3501 工作面在注浆和未注浆条件下的地表变形参数进行预测, 并与实际测量值进行对比分析, 见表 5。由表 5 可知, 注浆条件下的地表变形预测值和实测值基本接近, 但是注浆条件下的地表下沉量、水平变形、倾斜和曲率均明显小于未注浆条件下的预测值。由此, 结合表 4 和表 5 可知, 确定 3501 工作面采取离层注浆能有效控制地表沉陷, 保护地表构筑物。

要求。

4)根据 3501 工作面实际地质情况, 计算出走向“四区”的范围分别为: 常规区 261.19 m, 过渡区 246.09 m, 注浆区 655.25 m, 控制区 199.53 m。

参考文献(References):

- [1] 刘 峰, 郭林峰, 赵路正. 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 1~15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHAO Luzheng. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 1~15.
- [2] 谢和平, 任世华, 谢亚辰, 等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2197~2211.
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197~2211.
- [3] 王双明, 孙 强, 乔军伟, 等. 论煤炭绿色开采的地质保障[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 8~15.
WANG Shuangming, SUN Qiang, QIAO Junwei, et al. Geological guarantee of coal green mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 8~15.
- [4] 钱鸣高, 许家林, 王家臣. 再论煤炭的科学开采[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 1~13.
QIAN Minggao, XU Jialin, WANG Jiachen. Further on the sustainable mining of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 1~13.

- [5] 崔希民,车宇航, MALINOWSKA A, 等.采动地表沉陷全过程预计方法与存在问题分析[J].煤炭学报,2022,47(6): 2170–2181.
CUI Ximin, CHE Yuhang, MALINOWSKA A, *et al.* Method and problems for subsidence prediction in entire process induced by underground mining[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2170–2181.
- [6] 杨科,赵新元,何祥,等.多源煤基固废绿色充填基础理论与技术体系[J].煤炭学报,2022,47(12): 4201–4216.
YANG Ke, ZHAO Xinyuan, HE Xiang, *et al.* Basic theory and key technology of multi-source coal-based solid waste for green backfilling[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4201–4216.
- [7] 张吉雄,张强,周楠,等.煤基固废充填开采技术研究进展与展望[J].煤炭学报,2022,47(12): 4167–4181.
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, ZHOU Nan, *et al.* Research progress and prospect of coal based solid waste backfilling mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4167–4181.
- [8] 袁亮.煤炭精准开采科学构想[J].煤炭学报,2017,42(1): 1–7.
YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 1–7.
- [9] 杨科,魏祯,赵新元,等.黄河流域煤电基地固废井下绿色充填开采理论与技术[J].煤炭学报,2021,46(S2): 925–935.
YANG Ke, WEI Zhen, ZHAO Xinyuan, *et al.* Theory and technology of green filling of solid waste in underground mine at coal power base of Yellow River basin[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 925–935.
- [10] 杨伦.对采动覆岩离层注浆减沉技术的再认识[J].煤炭学报,2002,27(4): 352–356.
YANG Lun. Re-understanding of grouting technology for subsidence reduction in mining-induced overlying strata[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 352–356.
- [11] 张鑫,乔伟,雷利剑,等.综放开采覆岩离层形成机理[J].煤炭学报,2016,41(S2): 342–349.
ZHANG Xin, QIAO Wei, LEI Lijian, *et al.* Formation mechanism of overburden bed separation in fully mechanized top-coal caving[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S2): 342–349.
- [12] 朱卫兵,许家林,赖文奇,等.覆岩离层分区隔离注浆充填减沉技术的理论研究[J].煤炭学报,2007,32(5): 458–462.
ZHU Weibing, XU Jialin, LAI Wenqi, *et al.* Research of isolated section-grouting technology for overburden bed separation space to reduce subsidence[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(5): 458–462.
- [13] 轩大洋,许家林,王秉龙.覆岩隔离注浆充填绿色开采技术[J].煤炭学报,2022,47(12): 4265–4277.
XUAN Dayang, XU Jialin, WANG Binglong. Green mining technology of overburden isolated grout injection[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4265–4277.
- [14] WANG B, XU J, XUAN D. Time function model of dynamic surface subsidence assessment of grout-injected overburden of a coal mine[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 104: 1–8.
- [15] XUAN D, XU J. Longwall surface subsidence control by technology of isolated overburden grout injection[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27(5): 813–818.
- [16] 马荷雯.采动覆岩离层多层位注浆地表沉陷控制技术[J].煤田地质与勘探,2021,49(3): 150–157.
MA Hewen. Surface subsidence control technology of multi-bed separation grouting[J]. Coal Geology and Exploration, 2021, 49(3): 150–157.
- [17] MA H, SUI W, NI J. Environmentally sustainable mining: a case study on surface subsidence control of grouting into overburden[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78: 320.
- [18] 刘玉成,戴华阳.近水平煤层开采沉陷预计的双曲线剖面函数法[J].中国矿业大学学报,2019,48(3): 676–681.
LIU Yucheng, DAI Huayang. Hyperbolic function model for predicting the main section surface deformation curve due to approximate horizontal coal seam underground longwall mining[J]. Journal of China University of Mining and technology, 2019, 48(3): 676–681.
- [19] 杨治林.煤层地下开采地表沉陷预测的边值方法[J].岩土力学,2010,31(S1): 232–236.
YANG Zhilin. Prediction of surface subsidence in underground mining seam based on the boundary value method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1): 232–236.
- [20] 崔希民,高宇,李培现,等.采动覆岩与地表下沉关系模型及离层量估算方法[J].煤炭学报,2023,48(1): 74–82.
CUI Ximin, GAO Yu, LI Peixian, *et al.* Relationships of mining subsidence between overburden rock and surface and application to estimate bed separation[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 74–82.
- [21] 郭文兵,赵高博,白二虎.煤矿高强度长壁开采覆岩破坏充分采动及其判据[J].煤炭学报,2020,45(11): 3657–3666.
GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, BAI Erhu. Critical failure of overlying rock strata and its criteria induced by high-intensity longwall mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(11): 3657–3666.
- [22] 朱庆伟,李航,杨小虎,等.采动覆岩结构演化特征及对地表沉陷的影响分析[J].煤炭学报,2019,44(S1): 9–17.
ZHU Qingwei, LI Hang, YANG Xiaohu, *et al.* Influence analysis of between subsidence and structure evolution in overburden rock under mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S1): 9–17.
- [23] 袁长丰,袁子晋,刘世波,等.考虑节理几何特征的地表沉陷预计方法[J].采矿与安全工程学报,2014,31(4): 620–623, 630.
YUAN Changfeng, YUAN Zijin, LIU Shibo, *et al.* The prediction method for surface subsidence considering the geometrical characteristics of joints[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(4): 620–623, 630.
- [24] 高超,徐乃忠,刘贵.特厚煤层综放开采地表沉陷预计模型算法改进[J].煤炭学报,2018,43(4): 939–944.
GAO Chao, XU Naizhong, LIU Gui. Improvement on prediction model algorithm for surface subsidence of extra thick seam using

- fully-mechanized top coal caving method[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(4): 939–944.
- [25] 王军保, 刘新荣, 刘小军. 开采沉陷动态预测模型[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(3): 516–521.
WANG Junbao, LIU Xinrong, LIU Xiaojun. Dynamic prediction model for mining subsidence[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(3): 516–521.
- [26] 郭庆彪, 郭广礼, 吕 鑫, 等. 基于连续-离散介质耦合的密实充填开采地表沉陷预测模型[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(9): 2491–2497.
GUO Qingbiao, GUO Guangli, LYU Xin, *et al*. Research on surface subsidence prediction of dense solid backfilling mining based on the coupling of continuous and discrete medium[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(9): 2491–2497.
- [27] 王 磊, 张鲜妮, 郭广礼, 等. 固体密实充填开采地表沉陷预计模型研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(7): 1973–1978.
WANG Lei, ZHANG Xianni, GUO Guangli, *et al*. Research on surface subsidence prediction model of coal mining with solid
- compacted backfilling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(7): 1973–1978.
- [28] 缪协兴, 黄艳利, 巨 峰, 等. 密实充填采煤的岩层移动理论研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2012, 41(6): 863–867.
MIAO Xiexing, HUANG Yanli, JU Feng, *et al*. Strata movement theory of dense backfill mining[J]. *Journal of China University and Mining Science*, 2012, 41(6): 863–867.
- [29] XUAN D, XU J. Grout injection into bed separation to control surface subsidence during longwall mining under villages: case study of Liudian coal mine, China[J]. *Nat Hazards*, 2014, 73: 883–906.
- [30] 于 涛, 王来贵. 覆岩离层产生机理[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2006(S2): 132–134.
YU Tao, WANG Laigui. Mechanism of generation of overburden separate layer[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2006(S2): 132–134.
- [31] 国家安全监管总局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017.