



“三软”厚煤层开采覆岩多层位离层注浆减沉技术及应用

郭文兵 吴东涛 郭明杰 胡玉杭 杨伟强 王比比

引用本文:

郭文兵, 吴东涛, 郭明杰, 等. “三软”厚煤层开采覆岩多层位离层注浆减沉技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 1-12.

GUO Wenbing, WU Dongtao, GUO Mingjie. Multi-bed separation grouting in “three soft” thick coal seams mining and its application[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 1-12.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0344>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

采动覆岩离层注浆地表沉陷“四区”控制模型及应用

“Four Zones” control model and application for surface subsidence of bed separation grouting mining
煤炭科学技术. 2023, 51(8): 23-35 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0561>

采动覆岩高位离层演化特征及涌(突)水前兆信息研究

Study on evolution features of high level overburden separation layer and precursor information of water inrush during coal mining
煤炭科学技术. 2021, 49(2): 194-205 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.023>

“三软”厚煤层回采巷道掘锚一体机工艺优化及应用

Process optimization and application of bolter miner for “three-soft” thick coal seam mining roadway
煤炭科学技术. 2024, 52(8): 1-10 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1530>

特厚煤层开采坚硬顶板覆岩结构及其演化特征分析

Analysis of overburden structure and evolution characteristics of hard roof mining in extremely thick coal seam
煤炭科学技术. 2023, 51(1): 95-104 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1709>

多关键层结构下不同采厚覆岩移动及围岩响应特征

Movement of overburden with different mining thickness and response characteristics of surrounding rock under multi-key layer structure
煤炭科学技术. 2022, 50(6): 211-218 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6fe3c93b-c7c4-4bad-a880-f4147963ecdb>

软硬互层覆岩结构影响卸压瓦斯运储区交叉融合的厚度比效应

Structure of soft and hard interbedded overburden rock under the influence of thickness ratio affects the cross fusion of pressure relief gas transportation and storage area
煤炭科学技术. 2025, 53(2): 163-177 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0282>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

采矿科学与工程



移动扫码阅读

郭文兵, 吴东涛, 郭明杰, 等. “三软”厚煤层开采覆岩多层位离层注浆减沉技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 1-12.

GUO Wenbing, WU Dongtao, GUO Mingjie, *et al.* Multi-bed separation grouting in “three soft” thick coal seams mining and its application[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 1-12.

“三软”厚煤层开采覆岩多层位离层注浆减沉技术及应用

郭文兵^{1,2}, 吴东涛^{1,3}, 郭明杰¹, 胡玉杭¹, 杨伟强¹, 王比比¹

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454000; 3. 河北工程大学 矿业与测绘工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 采动覆岩离层注浆中注浆层位精准识别及保护层厚度合理确定, 对防治地表沉陷、保护地表建(构)筑物具有重要意义。为了实现覆岩多层位离层精准注浆减沉, 基于组合梁理论改进了离层位置判别方法, 确定了覆岩多层位离层注浆充填位置; 通过弹性薄板理论, 建立了覆岩离层注浆保护层采动岩体结构力学模型; 构建了覆岩多层位离层注浆充填空间的等效模型, 并根据注浆空间上位岩层和下位岩层破断规律, 给出了充填空间的最小和最大总体积; 采用概率积分法并结合地表实际监测结果, 评价了“三软”厚煤层覆岩多层位离层注浆效果, 并对郑州矿区裴沟煤矿 22151 工作面开展了实例分析。结果表明: 钻孔窥视验证了多层位离层注浆位置的准确性, 在距煤层 152.6 m 中粒砂岩底部和距煤层 168.6 m 处细粒砂岩下方之间成功实施覆岩多层位离层注浆; 工作面在开采厚度为 7.1 m 时, 保护层厚度为 25.2 m 能够实现覆岩离层注浆工作的安全实施; 理论计算注浆量为 $9.5 \times 10^4 \sim 14.7 \times 10^4$ t, 实际工程注浆量约为 13.3×10^4 t, 注采比约为 0.41; 采用覆岩多层位离层注浆开采后, 地表最大下沉量为 649.8 mm, 大部分民房处地表最大水平变形值处于 I 级损害程度内; 覆岩多层位离层注浆开采地表沉陷控制效果显著, 减沉率约 77.91%。

关键词: “三软”厚煤层; 软硬交互覆岩; 覆岩离层; 多层位注浆; 保护层; 沉陷控制

中图分类号: TD325

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)05-0001-12

Multi-bed separation grouting in “three soft” thick coal seams mining and its application

GUO Wenbing^{1,2}, WU Dongtao^{1,3}, GUO Mingjie¹, HU Yuhang¹, YANG Weiqiang¹, WANG Bibi¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. State Collaborative Innovative Center of Coal Work Safety and Clean-efficiency Utilization, Jiaozuo 454000, China; 3. School of Mining and Geomatics Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: Accurate identification of the grouting position in overburden isolated grouting and the reasonable determination of the protective layer thickness are of significant importance for preventing surface subsidence and protecting surface buildings and infrastructures. In order to realize the accurate grouting and reduce subsidence in multi-bed separation grouting. By improving the method for determining separation positions based on the composite beam theory, the filling positions for multi-bed separation grouting were determined. Using the theory of elastic thin plates, a structural mechanical model of the protective layer for overburden isolated grouting was established. An equivalent model for the grouting filling space of overburden isolated separation was constructed, and the minimum and maximum total volumes of the grouting filling space were determined according to the breaking law of the upper and lower rock layers in the grouting space. The effect of multi-bed separation grouting in “three soft” thick coal seams was evaluated through the use of probability integrals, combined with actual surface monitoring results. Additionally, 22151 working face of Peigou Coal Mine in Zhengzhou mining area was analyzed as case study. The results show that field borehole observation validated the accuracy of the bed separation positions. Multi-bed

收稿日期: 2024-03-20

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 王晓珍

DOI: 10.12438/cst.2024-0344

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点资助项目 (U21A20108, U22A20620); 河南省国际科技合作重点资助项目 (251111521200)

作者简介: 郭文兵(1969—), 男, 河南商丘人, 教授, 博士生导师, 博士(后)。E-mail: guowb@hpu.edu.cn

通讯作者: 吴东涛(1994—), 男, 河北邯郸人, 讲师, 博士。E-mail: 823831800@qq.com

separation grouting was successfully implemented between the bottom of medium grained sandstone 152.6 m away from the coal seam and the bottom of fine-grained sandstone 168.6 m away from the coal seam. When the mining thickness of the working face is 7.1 m, a protective layer thickness of 25.2 m ensured the safe implementation of overburden isolated grouting. Theoretical grouting volume calculations range from approximately 9.5×10^4 to 14.7×10^4 tons while the actual engineering grouting volume for multi-bed separation grouting is approximately 13.3×10^4 tons, with a grouting-to-mining ratio of about 0.41. The maximum surface subsidence is 649.8 mm, and the maximum horizontal deformation value of the surface at most residential buildings is within the I degree of damage. The surface subsidence control effect of mining with multi-bed separation grouting was remarkable, and the subsidence reduction rate was about 77.91%.

Key words: “three soft” thick coal seams; alternate overburden of soft and hard; bed separation; multi-bed separation grouting; protective layer; subsidence control

0 引言

我国能源受“贫油、少气、相对富煤”独特的能源资源禀赋制约,煤炭作为我国能源生产和消费的主体地位短期难以改变^[1]。然而,采煤诱发的地表沉陷和生态环境问题一直是制约煤炭行业健康发展的重要问题之一。同时,煤炭开采与利用过程中不可避免地产生煤矸石、粉煤灰、炉渣等固体废物,增加了水土气等环境污染风险并威胁群众安全健康^[2-3],亟需开展固废减排与处置利用工作。

河南作为中原地区的主体,采煤沉陷区快速增加与耕地产能提升的矛盾日益突显。特别是人口密集、建(构)筑物众多以及广泛农田覆盖的郑州矿区,面临沉陷控制问题显得更加突出^[4]。覆岩离层注浆充填开采作为绿色开采技术的重要技术手段之一,能够有效控制地表沉陷,保护地表建(构)筑物^[5-7]。

精准捕捉离层位置及是否能够及时注浆是覆岩离层注浆成功实施的关键^[8]。针对此,国内外众多学者对采动覆岩运移规律和离层发育展开研究。高延法等^[9]最早提出覆岩多层位离层注浆减沉技术,并建立了基于注采比的注浆减沉地表沉陷预计理论;杨伦等^[10]基于组合梁理论提出了顶板离层位置的理论计算方法,该模型得到了广泛认可,成为研究覆岩离层发育的重要理论基础^[11-12];徐超等^[13]采用3DEC研究了覆岩裂隙演化规律,并定量表征了离层率;WANG等^[14]采用UDEEC模拟软件分析了覆岩移动规律与离层特征;崔希民等^[15]通过建立覆岩与地表等效下沉的关系模型,定量分析了覆岩与地表下沉规律,从而估算出覆岩离层量;钱鸣高院士^[16]提出了岩层控制关键层理论,进一步明确了覆岩运移与离层演化规律的相互关系^[17],并成功应用于覆岩离层注浆开采工程中^[6];许家林教授^[18-20]提出了覆岩隔离注浆减沉技术,并在多个煤矿进行了成功应用。除此之外,覆岩离层的监测或观测方法也开展了研究,包括地面钻孔观测、微震监测技术等^[21-23]。

“三软”煤层是指顶板不稳定易冒落、煤层松软坚固性系数小、底板软抗压强度小^[24]。在上覆岩层软硬岩交互率大、岩层厚度小的地质条件下,“三软”厚煤层综放开采过程中存在覆岩整体变形量大且移动速度快,采动覆岩离层发育-闭合-传递迅速等特点^[25]。然而,针对中等埋深^[26]、大采高、覆岩软硬岩交互率大、岩层厚度小的地质条件下,“三软”厚煤层综放开采覆岩离层注浆研究目前鲜有报道。鉴于此,笔者在以往研究基础上,从离层位置判别、注浆层位确定、保护层厚度是否合理等多方位研究,探索并实施了覆岩多层位离层注浆开采技术,可为“三软”厚煤层综放开采覆岩离层注浆减沉设计提供技术支持,对促进覆岩离层注浆减沉技术的应用与发展具有重要作用。

1 覆岩多层位离层注浆

1.1 研究共识

在采煤过程中,离层空间一般沿软、硬岩层的界面进行,并随着工作面的推进从较低位置向较高位置发展。当离层发育到钻孔范围内时可进行注浆。注浆位置不得与导水裂缝带相交,这样的交叉可能会导致注入的泥浆涌向地下工作面,威胁井下安全生产。因此,注浆位置应位于导水裂缝带上方一定距离处,该距离岩层组称为保护层厚度,注浆位置通常为: $H \geq H_d + H_f \geq H_d + 5M$,其中, H 为注浆位置到煤层的距离; H_d 为导水裂缝带高度; H_f 为保护层厚度; M 为煤层厚度。

当厚煤层上覆岩层为软弱、中硬、坚硬岩层或其互层,采用综合机械化放顶煤开采时,煤层上方导水裂缝带最大高度应根据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采指南》^[27]中给出的经验公式进行计算(表1)。

根据式(1)结果,结合地质钻孔资料,确定一层较厚的砂岩层(或称地表主控岩层)为注浆位置,覆岩离层注浆开采如图1所示。

表1 导水裂缝带高度计算经验公式
Table 1 Empirical formula to calculate the height of fractured zone

岩性	计算公式之一	计算公式之二
坚硬	$H_d = \frac{100M}{0.15M+3.12} \pm 11.18$	$H_d = 30M + 10$
中硬	$H_d = \frac{100M}{0.23M+6.10} \pm 10.42$	$H_d = 20M + 10$
软弱	$H_d = \frac{100M}{0.31M+8.81} \pm 8.21$	$H_d = 10M + 10$

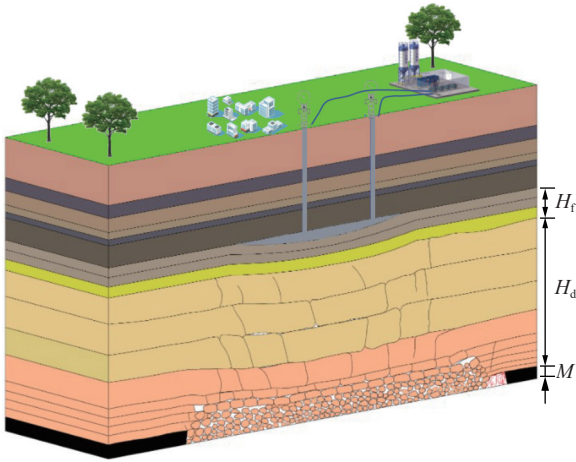


图1 覆岩离层注浆开采示意

Fig.1 Schematic of overburden bed separation grouting

1.2 覆岩多层位离层注浆层位识别

在顶板岩层间分离和压裂的发展过程中,可以将软、硬交互的上覆岩层看作若干个地层叠加成的组合岩梁进行分析,并假设各岩层上的荷载呈均匀分布,组合梁结构如图2所示。

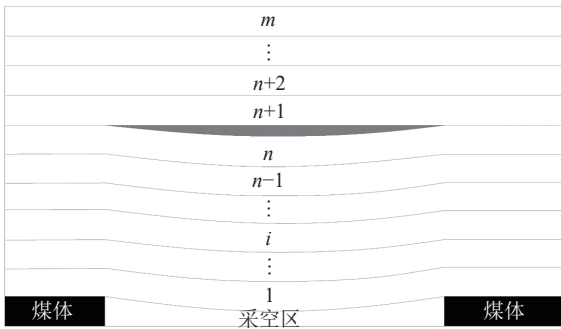


图2 组合梁结构

Fig.2 Composite beam structure

根据组合梁理论,在含有 m 层岩石的覆岩中,当第 1 层和第 n 层之间的相邻层能够紧密接触并实现同步变形时,考虑 n 层组合梁,第 i 层 ($i \leq n$) 的荷载可推导为

$$(q_n)_i = \frac{E_i h_i^3 (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \dots + \gamma_n h_n)}{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3 + \dots + E_n h_n^3} \quad (1)$$

式中: E_i 、 h_i 和 γ_i ($i=1, 2, \dots, n, \dots, m$) 分别为每层岩层的弹性模量、厚度、容重。

由矿山压力与岩层控制理论可知^[16],当计算出的 $(q_{n+1})_i$ 小于 $(q_n)_i$ 时,则认为第 $(n+1)$ 层将与第 n 层之间发生了层间分离(图2),即产生离层:

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

结合式(1)和式(2)可以得到一个常用的简化公式:

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

由于式(2)和式(3)只比较了相邻地层之间力学性能差异,忽略了 $(n+1)$ 层以上地层对 $(n+1)$ 层可能产生的力学效应。例如,假设第 $(n+2)$ 层的抗弯刚度小于第 $(n+1)$ 层的抗弯刚度,在这种情况下,沉降过程中第 $(n+2)$ 层可能与第 $(n+1)$ 层接触,导致第 $(n+1)$ 层受第 $(n+2)$ 层的挤压,产生额外的力。针对此不足,HE 等^[28] 对其进行了修正:如果 $(q_m)_i = \max((q_1)_i, (q_2)_i, \dots, (q_n)_i)$, 且 $1 \leq m < n$, 则第 $m+1$ 层和第 m 层之间产生离层;如果 $(q_n)_i = \max((q_1)_i, (q_2)_i, \dots, (q_n)_i)$, 则第 1 层和第 n 层之间不会产生离层。

修正后产生离层空间的力学原理可以解释为:如果 $(q_m)_i = \max((q_1)_i, (q_2)_i, \dots, (q_n)_i)$, $1 \leq m < n$, 则第 1 ~ m 岩层能以组合梁的形式同步弯曲。此外,如果 $(q_m)_i > \max((q_{m+1})_i, (q_{m+2})_i, \dots, (q_n)_i)$, 第 $m+1$ 层与第 n 层之间各层的变形均小于第 m 层。因此,第 m 层和第 $m+1$ 层之间的界面可以被第 m 层拉开。根据计算结果,剔除导水裂缝带内无法形成的封闭离层空间,从而确定注浆离层空间位置。

1.3 覆岩多层位离层注浆技术

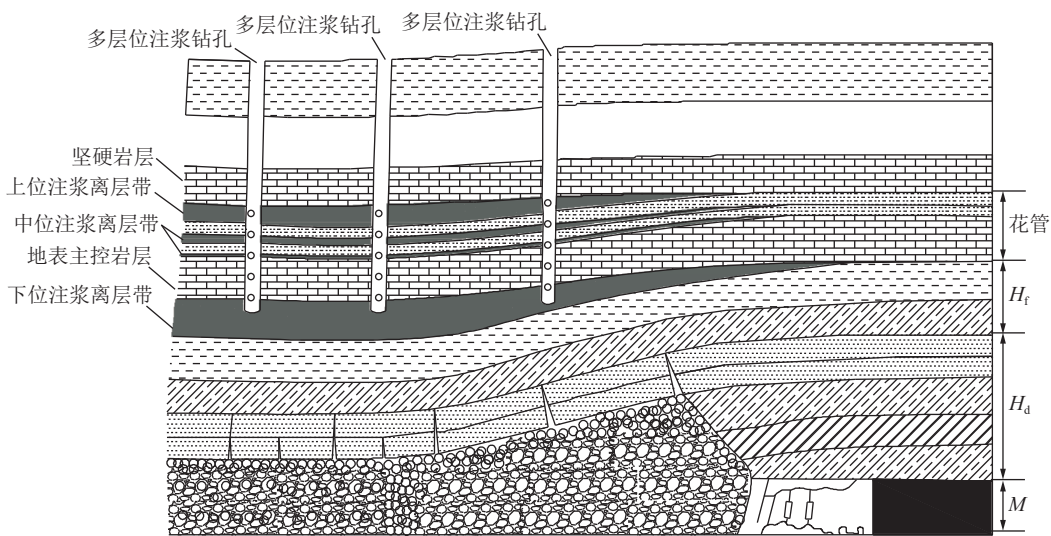
针对中等埋深、大采高、覆岩软硬岩交互率大、岩层厚度小的地质条件,其没有明显关键层。在开采过程中,覆岩整体变形量大且移动速度快,采动覆岩离层发育-闭合-传递迅速,为有效捕捉离层,实现离层注浆减沉,笔者探索了“三软”厚煤层采动覆岩多层位离层注浆技术。首先识别覆岩离层注浆层位,确定多层位注浆范围;然后,为防止覆岩协同破坏传至地表,将上部注浆层位和底部注浆层位之间的注浆管设置为花管段;最后,通过花管段注浆,对覆岩多层位离层进行充填,从而达到覆岩多层位离层精准注浆和地表减沉。注浆花管及其现场安设如图3所示。覆岩多层位离层注浆开采技术如图4所示。

对于“三软”地层特征且工作面处于非充分采动

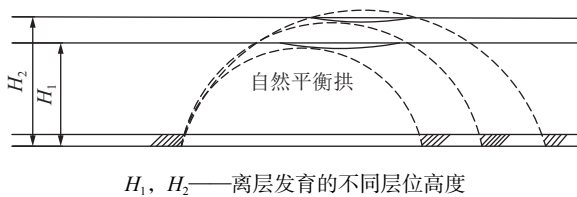


图 3 注浆花管现场安设
Fig.3 Installation of grouting floral tube on site

条件,随着煤层推进距离的增加,煤层顶板覆岩发生冒落、断裂破坏,岩层间的离层、岩层的弯曲变形、断裂和下沉,由下至上递进发展,由于推进距离小于地表达充分采动所需要的推进距离,岩层的变形破坏在覆岩内部的一定高度会形成自然“平衡拱”,如图 5 所示。采用覆岩多层位离层注浆,构筑“拱基”,在开采平面上,随着工作面推进,一定间隔内形成“拱基”,两相邻的“拱基”之间的覆岩,其变形破坏的向上发展将受到两边“拱基”的制约,从而形成“平衡拱”,抑制上覆岩层的变形破坏,从而有效地控制地表下沉。



注: H_k 为垮落带高度
图 4 覆岩多层位离层注浆开采技术
Fig.4 Multi-bed separation grouting mining technology



H_1, H_2 ——离层发育的不同层位高度
图 5 覆岩自然平衡拱
Fig.5 Natural dome of equilibrium of overlying strata

1.4 覆岩多层位离层注浆等效模型

建立覆岩多层位离层注浆充填开采等效模型,当上部层位和中部层位注浆充填体厚度($H_{u,max}$ 和 $H_{m,max}$)为 0 时,则等效为单层位覆岩离层注浆;当 $H_{u,max}+H_{m,max}>0$ 时,可将上部层位和中部层位注浆离层充填体投影至下位注浆离层带,使离层带空间等效为倒梯形,且填充物边界都位于工作面走向方向的正上方,如图 6 所示。

其与回采工艺参数在工程上满足以下几何关系:

当 $H_{u,max}+H_{m,max}>0$ 时,离层空间可等效为倒梯形,且填充物边界都位于工作面长度边缘的正上方,其与回采工艺参数满足以下几何关系:

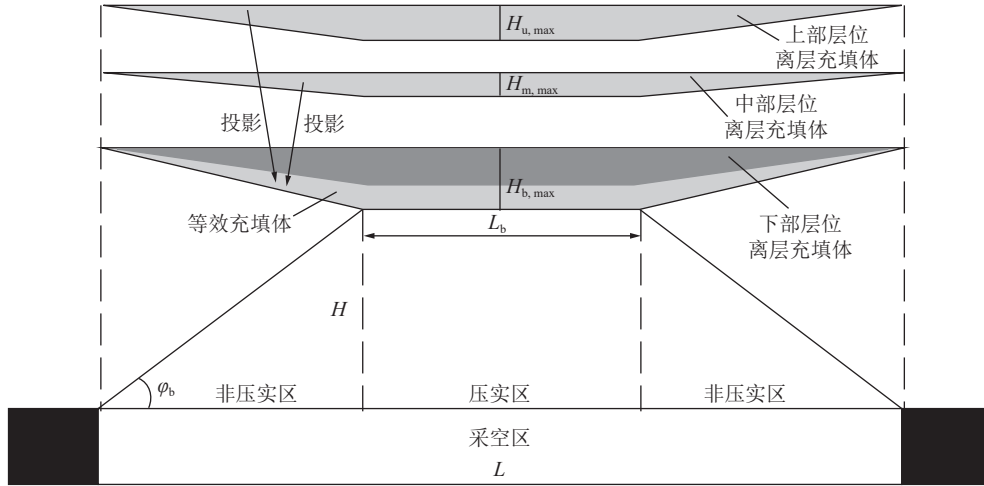
$$\frac{(L_b + L)H_{b,max}W}{2} = \alpha WML \quad (4)$$

式中: W 为工作面宽度; α 为注采比,一般取 0.35 ~ 0.45。

则充填浆体厚度为

$$H_{b,max} = \frac{ML\alpha}{L - H/\tan \varphi_b} \quad (5)$$

在注浆过程中,由于注浆压力增大,注浆层的水平和垂直分离范围进一步扩大,注浆量随之增大。同时,注浆压力随注浆量增加而增加,使注浆离层带以下采空区会逐渐被压实,闭合了注浆离层带以下预先发育的部分离层。同样,注浆也会对其上覆岩层产生抬升力,可认为高层位注浆离层带上覆岩层



注: L_b 为注入离层带平底塌陷区长度; $H_{b,max}$ 为充填浆体厚度; L 为工作面走向长度; ϕ_b 为充分采动角, 定义为充填体最下部平坦部分边缘与工作面边缘煤层上方的连线夹角, 一般取 $50^\circ \sim 60^\circ$ 。

图6 覆岩多层位离层注浆充填开采等效模型

Fig.6 Equivalent model of multi-bed separation grouting mining

沉降量与地表沉降量相等。因此, 覆岩多层位离层注浆地表沉降量的工程解有

$$\begin{cases} H_{h,max} = M - H_{b,max} - H_{c,max} \\ H_{c,max} = H_k (K_p - 1) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $H_{h,max}$ 为主控岩层下沉量; $H_{c,min}$ 为采空区垮落岩体最小残余厚度; H_k 为垮落带高度; K_p 为垮落岩体残余碎胀系数。

2 覆岩离层注浆开采保护层变形力学分析

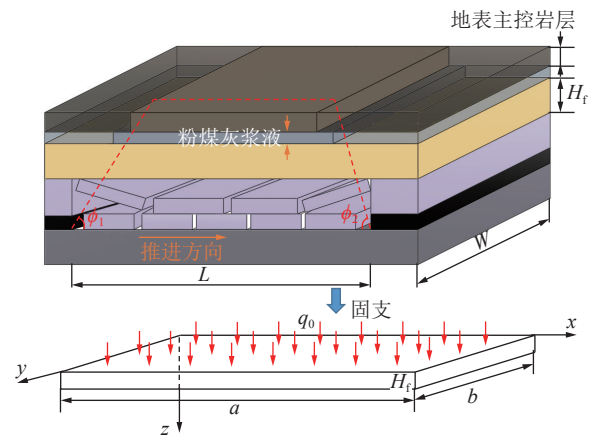
中等埋深、大采高的工作面进行覆岩离层注浆工作, 计算保护层的合理厚度、变形以及判定保护层稳定性, 是确保覆岩离层注浆层位安全、有效、合理的必要条件, 依据覆岩的地质特征, 根据弹性薄板理论提出一种作为这必要条件的计算方法。

2.1 保护层岩层挠度力学模型

将保护层简化为单层, 保护层下沉、变形并与下位岩层接触。结合弹性薄板理论, 进行保护层变形力学分析计算, 首先进行以下假设: ① 保护层与下位岩层整体接触, 保护层上部所受荷载为均布荷载, 荷载大小为注浆层位压力 (σ_f), 保护层下部支撑力均匀分布荷载; ② 组成保护层的岩层整体协调变形, 忽略层间剪切作用; ③ 忽略断层弱化带等复杂地质构造对保护层力学性质的影响。

离层初次发育时上、下岩层被周边岩层固支, 各边刚性固定。选取四边固支的弹性组合岩板作为岩层破断的力学计算模型^[29], 如图7所示。

对于四边固支的矩形板, 其各边刚性固定, 则沿各边的挠度 w 和转角 ($\partial w/\partial x, \partial w/\partial y$) 皆等于 0。故模



注: q_0 为保护层岩层的横向均布荷载; a 、 b 分别为保护层岩层的走向长度、倾向宽度。

图7 保护层的力学计算模型

Fig.7 Strata mechanical model of protective layer

型边界条件为

$$\begin{cases} (w)_{x=0} = 0, (w)_{x=a} = 0 \\ \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{x=0} = 0, \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{x=a} = 0 \\ (w)_{y=0} = 0, (w)_{y=b} = 0 \\ \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{y=0} = 0, \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{y=b} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

保护层岩层平面薄板弯曲微分方程为

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q_0}{G} \quad (8)$$

其中, $G = EH_f^3/12(-\mu^2)$ 为单一薄板的抗弯刚度, 其中, E 、 μ 分别为保护层岩层的弹性模量、泊松比, q_0 可表示为

$$\begin{cases} q_0 = (1-\lambda)(\sigma_f + \gamma_b H_f) \\ \sigma_f = P_k(\Delta t) + \gamma_f H_f \end{cases} \quad (9)$$

式中: λ 为保护层岩层下伏岩层的支撑系数, $0 \leq \lambda < 1$, $\lambda=0$ 时表示保护层岩层与下伏岩层无接触; σ_f 为注浆层位压力; P_k 为注浆孔口压力, 孔口压力随注浆时间逐渐增大, 因此 $P_k(\Delta t)$ 为孔口压力随时间变化的函数, $\Delta t=0$ 时, $P_k(0)=0$; γ_f 为粉煤灰浆体容重; γ_b 为保护层容重。

根据挠度函数^[29], 取第 1 项即可满足实际工程需求, 则对于单一薄板, 在受到注浆压力和自重时,

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{\sigma_x(x, y, z/2) + \sigma_y(x, y, z/2)}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x(x, y, z/2) - \sigma_y(x, y, z/2)}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2(x, y, z/2)} = \frac{D + \sqrt{T}}{H_f^2} \\ \sigma_3 = \frac{\sigma_x(x, y, z/2) + \sigma_y(x, y, z/2)}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x(x, y, z/2) - \sigma_y(x, y, z/2)}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2(x, y, z/2)} = \frac{D - \sqrt{T}}{H_f^2} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} D = 6A_{11}(1+\mu) \left[\frac{\pi^2}{a^2} \cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right) \sin^2\left(\frac{\pi y}{b}\right) + \frac{\pi^2}{b^2} \cos\left(\frac{2\pi y}{b}\right) \sin^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) \right] \\ T = [6A_{11}(1-\mu)]^2 \left\{ \left[\frac{\pi^2}{a^2} \cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right) \sin^2\left(\frac{\pi y}{b}\right) - \frac{\pi^2}{b^2} \cos\left(\frac{2\pi y}{b}\right) \sin^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) \right]^2 + \left[\frac{\pi^2}{ab} \sin\left(\frac{2\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{2\pi y}{b}\right) \right]^2 \right\} \end{cases} \quad (12)$$

假设岩层剪切破坏, 基于摩尔-库仑准则, 岩层的破坏判据为

$$\sigma_1 - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 = 2C \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (13)$$

式中: C 、 φ 分别为保护层岩层的黏聚力、内摩擦角。

将式(12)代入摩尔-库仑准则中, 得到保护层岩层损伤破坏的判据方程, 当 $F=1$ 时, 保护层破断:

$$F = \frac{\sqrt{T} - D \sin \varphi}{C H_f^2 \cos \varphi} \quad (14)$$

判断覆岩离层注浆在开采中保护层厚度是否安全合理, 则需建立保护层岩层允许的厚度范围, 即

$$H_f > \sqrt{\frac{\sqrt{T} - D \sin \varphi}{C \cos \varphi}} \quad (15)$$

因此, 针对中等埋深、大采高、覆岩软硬岩交互率大、岩层厚度小地质条件下的“三软”煤层工作面, 采用综放开采覆岩离层注浆时, 应根据覆岩离层注浆层位识别方法确定注浆层位后, 再根据下式判别注浆层位是否安全可行:

$$\begin{cases} H > H_d + H_f \\ H_f > \sqrt{\frac{\sqrt{T} - D \sin \varphi}{C \cos \varphi}} \end{cases} \quad (16)$$

保护层岩层的挠度表达式为

$$\begin{cases} w = \frac{A_{11}}{G} \sin^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin^2\left(\frac{\pi y}{b}\right) \\ A_{11} = \frac{q_0}{\pi^4 \left(\frac{3}{a^4} + \frac{3}{b^4} + \frac{2}{a^2 b^2}\right)} \end{cases} \quad (10)$$

2.2 保护层失稳判据

由保护层岩板在 x 和 y 方向正应力和切应力表达式^[30], 并根据主应力与应力分量之间的关系得到均布载荷下保护层岩层中性面($z=H_f/2$)的最大、最小主应力的表达式:

3 多层位离层充填空间体积计算

离层空间一般存在于沿软、硬岩层的界面, 随着煤层推进距离增加, 软岩与硬岩在竖直方向挠度不一致, 离层的产生由挠度的差异性引起, 认为离层的四边是密闭区间, 如图 8 所示。

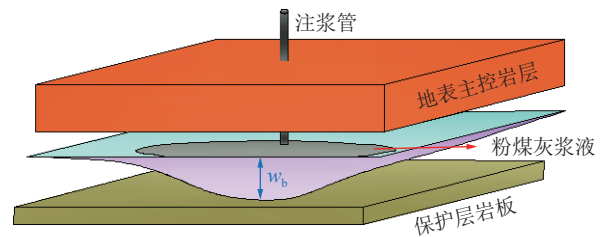


图 8 覆岩离层注浆空间

Fig.8 Grouting space of bed separation

根据式(10)可知两板之间的空间 w_b 高度为

$$w_b = \frac{\left(\frac{q_x}{G_x} - \frac{q_s}{G_s}\right)}{\pi^4 \left(\frac{3}{a^4} + \frac{3}{b^4} + \frac{2}{a^2 b^2}\right)} \sin^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin^2\left(\frac{\pi y}{b}\right) \quad (17)$$

式中, q_s 和 q_x 分别为充填空间上位岩层和下位岩层的横向均布载荷; G_s 和 G_x 分别为充填空间上位岩层和下位岩层的抗弯刚度。

根据薄板理论中岩层中心($a/2, b/2$)处挠度最大

的研究共识,可知注浆空间最大高度为

$$w_{b\max} = \frac{1}{\pi^4 \left(\frac{3}{a^4} + \frac{3}{b^4} + \frac{2}{a^2 b^2} \right)} \left(\frac{q_x}{G_x} - \frac{q_s}{G_s} \right) \quad (18)$$

则某一离层注浆层位的体积可表示为

$$V_i = \iint_{a_i \times b_i} (w_x(x, y)) - (w_s(x, y)) dx dy = \frac{w_{b,\max} ab}{4} \quad (19)$$

式中: w_s 、 w_x 分别为上、下岩板各个点的挠度。

当采用覆岩多层位离层注浆开采,则注浆空间总体积为各注浆空间体积之和,即

$$V = \sum V_i \quad (20)$$

工程解上,根据工程实际情况,注浆过程中,注浆压力会对其上覆岩层产生抬升力。为方便计算,假设充填过程中地表主控岩层下沉量接近零。结合图5建立覆岩离层注浆充填开采注浆空间的等效模型,如图9所示。

同理,由岩层中心($a/2, b/2$)处挠度最大,可知 $H_{b,\max} = w_{b,\max}$, 则充填离层空间体积 V 的工程解可计算为

$$V = \frac{(L_b + a)H_{b,\max}W}{2} = \frac{(L - 2H/\tan \varphi_b + a)A_{11}W}{2G} \quad (21)$$

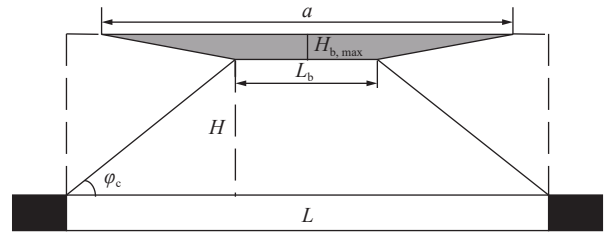


图9 覆岩离层注浆充填开采注浆空间的等效模型

Fig.9 Equivalent model of grouting space for bed separation grouting mining

4 工程案例

4.1 地质条件

郑州矿区裴沟煤矿是郑煤集团公司主力矿井之一,位于郑州市西南35 km,新密市境内,面积约19万 m^2 。设计生产能力为180万 t/a的生产能力。矿井主采煤层为二₁煤,煤层结构简单,煤层厚度为4~11 m,平均煤层厚度为7.5 m。其直接顶为泥岩和砂质泥岩,平均厚度6~7 m;基本顶为中细、中粗粒砂岩,平均厚度7 m;直接底为泥岩和砂质泥岩,平均厚度为10 m。根据缓倾斜煤层顶底板分类,裴沟煤矿开采二₁煤层是典型的“三软”不稳定煤层^[25]。

裴沟煤矿22151工作面作为覆岩离层注浆研究区域,如图10所示。工作面二₁煤原煤段整体属于

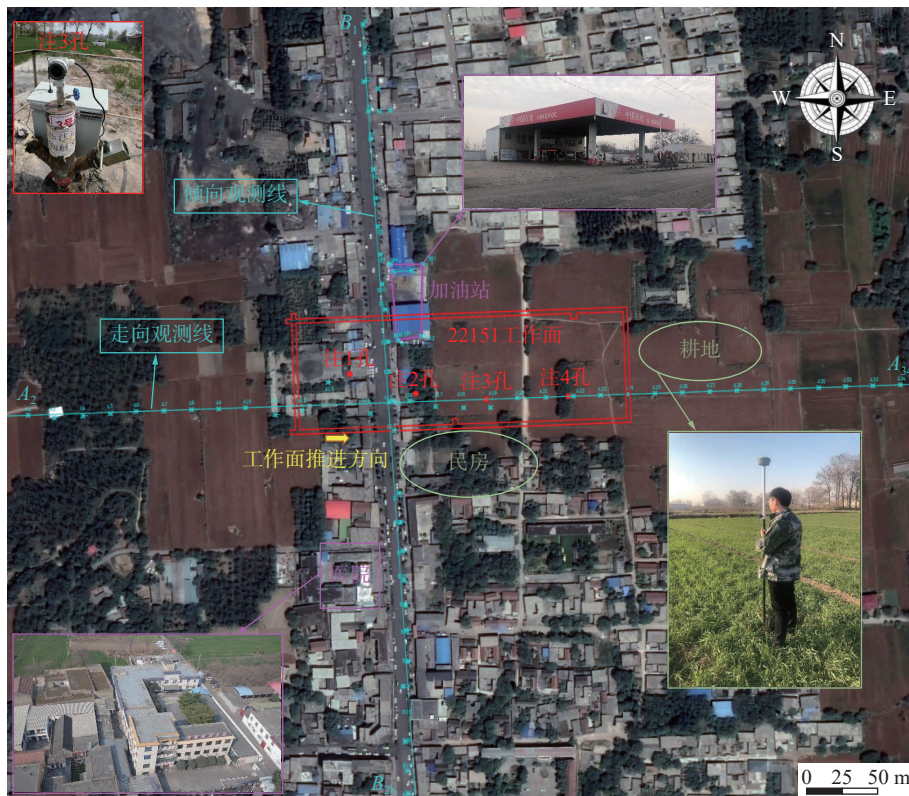


图10 裴沟煤矿22151工作面位置

Fig.10 Map showing the location of No.22151 working face in Peigou Coal Mine

厚煤层,赋存较稳定,西部靠近开切眼附近局部煤层底部含有0~2.0 m夹矸;工作面走向长约为300 m,倾向长约为106 m。工作面地表标高+220.1—+226.4 m,工作面标高-60.5—97 m,工作面平均埋深302 m;煤层平均厚度约7.1 m,煤层平均倾角约为12°。工作面采用综合机械化放顶煤采煤方法,自然垮落法管理顶板。地面主要为村庄民房及耕地,境内有王观公路南北向穿过,公路两侧建(构)筑物较为密集根据现场调查,公路两侧建筑物多为1~2层砖混结构建筑物,少量建筑物为3~5层,还有一些加油站、医院等重要建筑物,如图10所示。

4.2 工作面覆岩离层注浆采煤可行性预测

裴沟煤矿22151工作面上覆岩层主要为砂质泥岩、泥岩等软弱岩层和中粒砂岩、细粒砂岩等坚硬岩层组成上覆岩层中软弱岩层和坚硬岩层比例为

1.59:1。根据上覆各岩层岩性及其厚度,对照分层岩性评价系数表,计算得到覆岩综合评价系数 $P=0.55$,上覆岩层岩性影响系数 $D=1.73$,由此可知工作面覆岩岩性综合评定为中硬偏软^[27]。

根据表1中硬条件下厚煤层开采导水裂缝带高度计算公式得出导水裂缝带的大致发育高度为81.4~152 m。根据矿方提供的相邻工作面煤层平均厚度为8.1 m,工作面开采引起的导水裂缝带高度为117.7 m,即裂采比为14.5。结合22151工作面煤层开采厚度为0~13.17 m(平均厚度7.1 m)、经验公式及现场实测数据确定22151工作面导水裂缝带的高度为103~152 m。为确保井下安全生产,选取该范围中间值为导水裂缝带最终高度,为127.5 m。

采用修正后的方法确定顶板离层位置,剔除导水裂缝带范围内无法封闭的离层空间,表2给出了

表2 离层分离位置

Table 2 Position of roof bedding separation

岩性	序号	厚度/m	容重/(kN·m ⁻³)	弹性模量/GPa	(q _n) ₁ /kPa	这一层下方是否有离层	(q _n) ₂ /kPa	这一层下方是否有离层	(q _n) ₃ /kPa	这一层下方是否有离层
黄土层	24	15.6	18.6	0.05	0.01	—	306.70	—	595.35	否
中粒砂岩	23	2.2	24.3	8.60	80.20	—	280.52	—	537.79	否
泥岩	22	7.6	22.5	2.50	79.10	—	275.89	—	527.58	否
砂质泥岩	21	8.4	23.5	4.80	76.27	—	263.58	—	500.19	否
泥岩	20	10	22.5	2.50	74.28	—	253.97	—	478.06	否
砂质泥岩	19	3.8	23.5	4.80	71.18	—	239.75	—	445.59	否
泥岩	18	3.6	22.5	2.50	69.28	—	231.59	—	427.35	否
砂质泥岩	17	5.2	23.5	4.80	67.43	—	223.77	—	409.94	否
中粒砂岩	16	11.6	24.3	8.60	65.04	—	213.35	—	386.44	否
泥岩	15	13.8	22.5	2.50	69.89	—	225.09	—	404.09	否
砂质泥岩	14	6.4	23.5	4.80	67.49	—	208.94	—	360.62	否
泥岩	13	22.8	22.5	2.50	63.98	—	192.45	—	320.62	否
砂质泥岩	12	3.8	23.5	4.80	94.44	—	267.95	—	433.21	否
细粒砂岩	11	3.0	25.0	13.40	89.35	—	242.11	—	353.42	否
泥岩	10	1.2	22.5	2.50	85.41	—	221.29	—	286.92	否
细粒砂岩	9	10.4	25.0	13.40	83.61	—	212.48	是	260.00	—
砂质泥岩	8	3.6	23.5	4.80	138.35	—	363.15	否	—	—
细粒砂岩	7	2.8	25.0	13.40	128.50	—	291.99	否	—	—
中粒砂岩	6	9.6	24.3	8.60	121.08	是	233.28	—	—	—
泥岩	5	4.4	22.5	2.50	203.76	否	—	—	—	—
中粒砂岩	4	2.8	24.3	8.60	176.35	否	—	—	—	—
泥岩	3	3.4	22.5	2.50	157.49	否	—	—	—	—
中粒砂岩	2	7.2	24.3	8.60	131.63	否	—	—	—	—
砂质泥岩	1	7.4	23.5	4.80	173.90	否	—	—	—	—
泥岩	—	4.4	导水裂缝带	—	—	—	—	—	—	—

导水裂缝带上方位置岩层产生离层结果。

首选离导水裂缝带顶部较近的注浆层位进行分析：

将序号 1 岩层作为组合梁最下层，计算结果表明：

$$\max(q_1)_1, (q_2)_1 \cdots (q_{24})_1 = \max(q_5)_1 = 203.76 \text{ kPa}$$

则在第 5 号岩层和第 6 号岩层间出现离层。然后将第 6 号岩层作为组合梁的最下层继续计算离层，结果表明：

$$\max(q_6)_6, (q_7)_6 \cdots (q_{24})_6 = \max(q_8)_6 = 363.15 \text{ kPa}$$

则第 8 号岩层和第 9 号岩层之间出现离层。再将第 9 号岩层作为组合梁的最下层继续计算离层，

结果表明：

$$\max(q_9)_9, (q_{10})_9 \cdots (q_{24})_9 = \max(q_{24})_9 = 595.35 \text{ kPa}$$

根据计算结果，最终确定在第 9 层细粒砂岩下至第 5 层泥岩上进行覆岩多层位离层注浆。若在此位置进行注浆，则保护层厚度为 21.02 m。

根据实际现场注浆状况，孔口压力 P_k 为 1.0 ~ 1.2 MPa，选取 $P_k=1.1$ MPa；粉煤灰浆体容重 γ_f 按 70% 的体积分数计算， $\gamma_f=15$ kN/m³；注浆层位深度 $H_f=149.8$ m。式(15)中保护层其他计算参数根据岩石基本物理力学测试、现场监测和工程经验确定，表 3 给出了保护层的各参数的平均值。

表 3 保护层厚度计算参数

Table 3 Calculation parameters for the protective layer thickness

岩层	P_k/MPa	H_f/m	$\gamma_f/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	W/m	L/m	C/MPa	$\varphi/(\text{°})$	μ	λ
保护层	1.1	152.6	15	106	300	1.5	30	0.3	0.8

将以上参数代入式(15)中有：

$$\sqrt{\frac{\sqrt{T} - D \sin \varphi}{C \cos \varphi}} = 16.5 \text{ m} < 25.2 \text{ m}$$

根据中等埋深、大采高的工作面进行覆岩离层注浆可行性判定条件可以预测：裴沟煤矿 22151 工作面在开采厚度为 7.1 m 时，保护层留设厚度为 25.2 m 能够实现覆岩离层注浆工作的安全实施。

4.3 工作面覆岩离层注浆量预计

为验证覆岩多层位离层注浆中离层位置的准确性，通过增加高层位注浆钻孔并通过钻孔窥视识别注浆位置，如图 4 所示。根据钻孔窥视结果可知，在距煤层 168.6 m 处细粒砂岩下方存在粉煤灰浆液，验证了多层位离层注浆设计的可行性，钻孔窥视结果如图 11 所示。

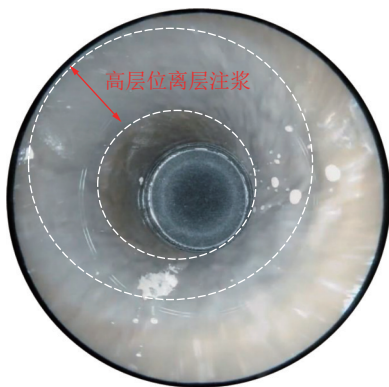


图 11 钻孔窥视

Fig.11 Drilling hole peeping

根据式(18)、式(19)、式(20)、表 2，结合该地质条件可近似计算得 22151 工作面采后注浆层位内可形成的最大充填总体积的理论值为 $6.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。根据式(21)，结合表 2 近似计算得 22151 工作面采后注浆层位内可形成的最大充填总体积为 $9.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。通过现场浆体体积分数度需大于 70%， γ_f 为 15 kN/m³，2 种计算方法消耗粉煤灰分别约为 $9.5 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $14.7 \times 10^4 \text{ t}$ ，而实际注浆量约为 $13.3 \times 10^4 \text{ t}$ ，注采比约为 0.41。因此由薄板理论推导的注浆空间体积预计结果和工程解的计算假设可知，二者可分别可作为中等埋深、大采高、覆岩软硬岩交互率大、岩层厚度小的地质条件下的“三软”厚煤层综放开采覆岩离层注浆充填空间的最小和最大总体积。

4.4 多层位离层注浆地表沉降控制效果

采用概率积分法对 22151 工作面开采区域进行地表移动变形计算，根据笔者对“三软”煤层开采沉陷规律的研究，得到了郑州矿区主要矿井概率积分法预计参数^[25]，经综合分析得到适合 22151 工作面的概率积分法计算参数，见表 4，图 12 为下沉等值线。根据计算结果，若 22151 工作面在不采取覆岩离层注浆情况下，地表最大下沉量为 2 941.5 mm，地

表 4 工作面地表移动概率积分法计算参数

Table 4 Parameters for probability integration method in surface movement calculation for No.22151 working face

下沉系数	拐点偏移距	主要影响角正切	影响传播角	水平移动系数
0.78	0	2.2	85°	0.34

表移动变形较为严重,地表移动变形最大值达 31.8 mm/m,不采取覆岩离层注浆情况下,工作面地

表附近民房最大损害等级达到Ⅳ级,需要采取拆除重建措施。

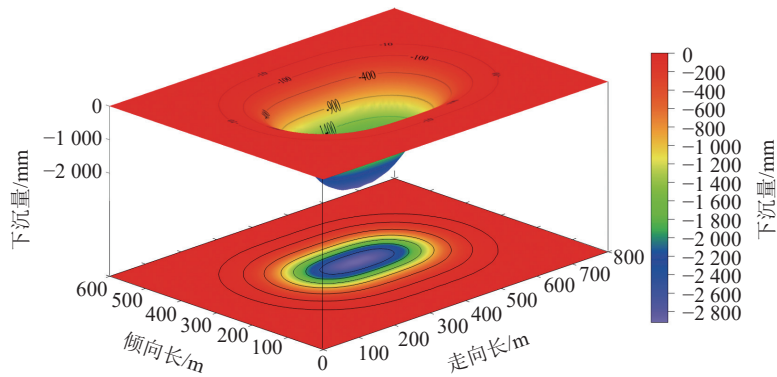


图 12 正常开采地表下沉等值线

Fig.12 Contour map of surface subsidence for normal mining

为评价覆岩多层位离层注浆减沉效果,每周进行 3~4 次地表位移观测,共进行 86 次观测。根据最后一次的观测结果,基于 Matlab 的曲线拟合法求取下沉系数为 q 为 0.147。由图 13 中可以看出,实测地表变形值与拟合结果的拟合程度较高,说明求取的参数较精确。图 14 给出了覆岩多层位离层注浆开采等值线。

控制采动引起的地表沉陷及地表建(构)筑物保护具有明显效果。

根据现场实测结果,采用覆岩多层位离层注浆开采后,地表最大下沉量为 649.8 mm,大部分民房处地表最大水平变形值处于 I 级损害程度内,少数民房地表移动变形值超出 I 级范围,控制在 II 级损害以内。

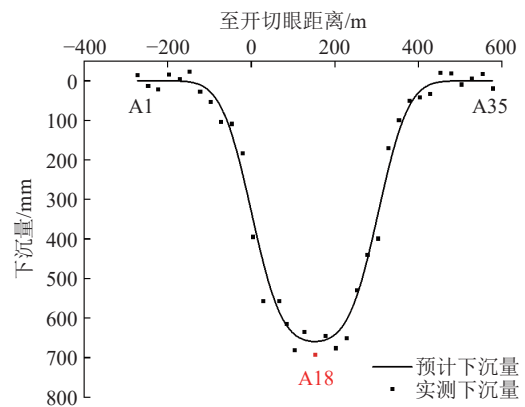


图 13 覆岩多层位离层注浆地表走向观测值拟合结果

Fig.13 Fitting results of surface strike observation values for multi-bed separation grouting

综上,正常开采情况下,地表最大下沉量约 2 941.5 mm,采用多层位覆岩离层注浆开采地表最大下沉量为 649.8 mm(图 15),减沉率约为 77.91%,对

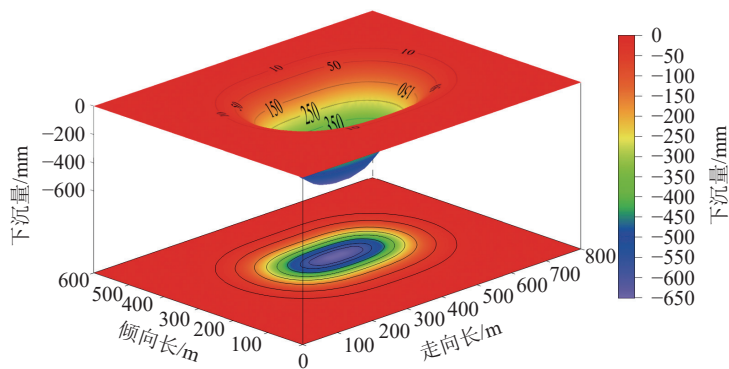


图 14 覆岩多层位离层开采地表下沉等值线

Fig.14 Contour map of surface subsidence for multi-bed separation grouting mining

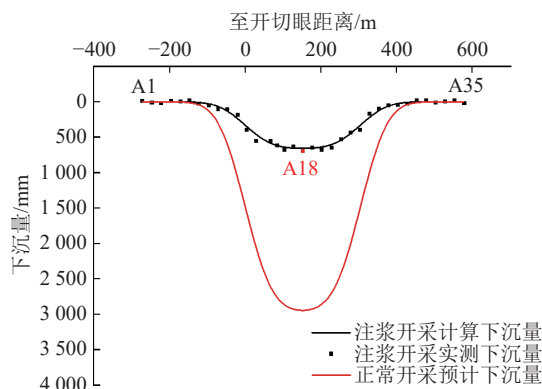


图 15 2 种开采方案地表预计下沉量结果对比

Fig.15 Comparison of predicted surface subsidence values between two mining methods

5 结 论

1) 根据改进的离层判别方法确定了多层位离层注浆位置, 通过钻孔窥视验证了多层位离层注浆位置的准确性, 在距煤层 152.6 m 中粒砂岩底部和距煤层 168.6 m 处细粒砂岩下方之间成功实施了覆岩多层位离层注浆。

2) 在裴沟煤矿 22151 工作面采用覆岩多层位离层注浆开采, 当工作面开采厚度为 7.1 m 时, 保护层厚度为 25.2 m 能够实现覆岩离层注浆工作的安全实施。

3) 薄板理论推导的注浆空间体积预计结果和工程解可分别作为中等埋深、大采高且“三软”煤层覆岩离层注浆充填空间的最小和最大总体积。理论计算注浆量为 $9.5 \times 10^4 \sim 14.7 \times 10^4$ t, 覆岩多层位离层注浆实际工程注浆量约为 13.3×10^4 t, 注采比约为 0.41。

4) 采用覆岩多层位离层注浆开采后, 地表最大下沉量为 649.8 mm, 下沉系数为 0.147, 大部分民房处地表最大水平变形值处于 I 级损害程度内。覆岩多层位离层注浆开采地表沉陷控制效果显著, 减沉率约 77.91%。

参考文献(References):

[1] 王双明, 申艳军, 宋世杰, 等. “双碳”目标下煤炭能源地位变化与绿色低碳开发[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2599–2612.
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SONG Shijie, et al. Change of coal energy status and green and low-carbon development under the “dual carbon” goal[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2599–2612.

[2] 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 back-filling[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12):

4201–4216.

- [3] 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.
- [4] 郭文兵, 赵高博, 白二虎, 等. 中部矿粮复合区采煤沉陷及耕地损毁研究现状与展望[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 388–401.
GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, BAI Erhu, et al. Research status and prospect on cultivated land damage at surface subsidence basin due to longwall mining in the central coal grain compound area[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 388–401.
- [5] 徐平, 郭文兵, 张敏霞. 控制采动区桥梁移动变形方法研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(3): 425–429.
XU Ping, GUO Wenbing, ZHANG Minxia. Methods of controlling movement and deformation of mining induced bridge[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(3): 425–429.
- [6] 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.
- [7] 钟亚平. 建筑物下综放开采特厚煤层覆岩离层注浆[J]. 煤炭科学技术, 2001, 29(1): 5–6.
ZHONG Yaping. Practices on fully mechanized caving mining in special thick seam under building structures with grouting in overburdens[J]. Coal Science and Technology, 2001, 29(1): 5–6.
- [8] 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-understand the technology of reducing the subsidence due to mining by injecting grouts into separated beds in overlying disrupted strata by extraction[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 352–356.
- [9] 高延法, 钟亚平, 李建民, 等. 覆岩离层带多层位注浆减沉的理论与实践[J]. 煤矿开采, 2002, 7(2): 42–45.
GAO Yanfa, ZHONG Yaping, LI Jianmin, et al. Theory and practice of subsidence control by multi-layer grouting in overburden bed-separation zone[J]. Coal Mining Technology, 2002, 7(2): 42–45.
- [10] 杨伦, 于广明, 王旭春, 等. 煤矿覆岩采动离层位置的计算[J]. 煤炭学报, 1997, 22(5): 477–480.
YANG Lun, YU Guangming, WANG Xuchun, et al. Calculation of position of separated strata due to mining in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(5): 477–480.
- [11] 朴春德, 施斌, 魏广庆, 等. 采动覆岩变形 BOTDA 分布式测量及离层分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(3): 376–381.
PIAO Chunde, SHI Bin, WEI Guangqing, et al. BOTDA distributed measurement and analysis of mining overburden separation[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(3): 376–381.
- [12] 孙学阳, 付恒心, 寇规规, 等. 综采工作面顶板次生离层水害形成机理分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(4): 678–683.

- SUN Xueyang, FU Hengxin, KOU Guigui, et al. Mechanism of water hazard caused by the secondary separation in the overburden stratum of the fully mechanized coal face[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(4): 678-683.
- [13] 徐超,王凯,郭琳,等.采动覆岩裂隙与渗流分形演化规律及工程应用[J].*岩石力学与工程学报*,2022,41(12):2389-2403.
XU Chao, WANG Kai, GUO Lin, et al. Fractal evolution law of overlying rock fracture and seepage caused by mining and its engineering application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(12): 2389-2403.
- [14] WANG S F, LI X B, WANG S Y. Separation and fracturing in overlying strata disturbed by longwall mining in a mineral deposit seam[J]. *Engineering Geology*, 2017, 226: 257-266.
- [15] 崔希民,高宇,李培现,等.采动覆岩与地表下沉关系模型及高层量估算方法[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.
- [16] 钱鸣高.岩层控制的关键层理论[M].徐州:中国矿业大学出版社,2000.
- [17] 许家林,钱鸣高,金宏伟.岩层移动离层演化规律及其应用研究[J].*岩土工程学报*,2004,26(5):632-636.
XU Jialin, QIAN Minggao, JIN Hongwei. Study and application of bed separation distribution and development in the process of strata movement[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(5): 632-636.
- [18] 许家林,轩大洋,朱卫兵,等.部分充填采煤技术的研究与实践[J].*煤炭学报*,2015,40(6):1303-1312.
XU Jialin, XUAN Dayang, ZHU Weibing, et al. Study and application of coal mining with partial backfilling[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(6): 1303-1312.
- [19] 许家林,倪建明,轩大洋,等.覆岩隔离注浆充填不迁村采煤技术[J].*煤炭科学技术*,2015,43(12):8-11.
XU Jialin, NI Jianming, XUAN Dayang, et al. Coal mining technology without village relocation by isolated grout injection into overburden[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(12): 8-11.
- [20] 轩大洋,许家林.铁路隧道下综放面覆岩隔离注浆充填开采试验研究[J].*采矿与安全工程学报*,2023,40(5):1102-1110.
XUAN Dayang, XU Jialin. Field study of longwall fully-mechanized caving mining by overburden isolated grouting under a surface railway tunnel[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(5): 1102-1110.
- [21] PALCHIK V. Localization of mining-induced horizontal fractures along rock layer interfaces in overburden: Field measurements and prediction[J]. *Environmental Geology*, 2005, 48(1): 68-80.
- [22] CHENG G W, MA T H, TANG C N, et al. A zoning model for coal mining - induced strata movement based on microseismic monitoring[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 94: 123-138.
- [23] 滕永海,阎振斌.采动过程中覆岩离层发育规律的研究[J].*煤炭学报*,1999,24(1):25-28.
TENG Yonghai, YAN Zhenbin. Study on the development law of overlying strata separation during mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 1999, 24(1): 25-28.
- [24] 来兴平,张旭东,单鹏飞,等.厚松散层下三软煤层开采覆岩导水裂隙发育规律[J].*岩石力学与工程学报*,2021,40(9):1739-1750.
LAI Xingping, ZHANG Xudong, SHAN Pengfei, et al. Study on development law of water-conducting fractures in overlying strata of three soft coal seam mining under thick loose layers[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(9): 1739-1750.
- [25] 郭文兵,杨治国,詹鸣.“三软”煤层开采沉陷规律及其应用[M].北京:科学出版社,2013.
- [26] 侯恩科,谢晓深,王双明,等.中深埋厚煤层开采地下水动态变化规律及形成机制[J].*煤炭学报*,2021,46(5):1404-1416.
HOU Enke, XIE Xiaoshen, WANG Shuangming, et al. Dynamic law and mechanism of groundwater induced by medium-deep buried and thick coal seam mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1404-1416.
- [27] 胡炳南,张华兴,申宝宏.建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采指南[M].北京:煤炭工业出版社,2017.
- [28] HE J H, LI W P, FAN K F, et al. A method for predicting the water-flowing fractured zone height based on an improved key stratum theory[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 33(1): 61-71.
- [29] 徐芝纶.弹性力学-上册[M].5版.北京:高等教育出版社,2016.
- [30] 左建平,孙运江,钱鸣高.厚松散层覆岩移动机理及“类双曲线”模型[J].*煤炭学报*,2017,42(6):1372-1379.
ZUO Jianping, SUN Yunjiang, QIAN Minggao. Movement mechanism and analogous hyperbola model of overlying strata with thick alluvium[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(6): 1372-1379.