

覆岩离层注浆层位判定及隔浆层稳定性研究

郭文兵^{1,2}, 李龙翔¹, 杨伟强¹, 白二虎^{1,2}, 吴东涛¹

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454003; 2. 煤炭安全生产与清洁利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454003)

摘要:覆岩离层注浆减沉技术是保护矿区地表建(构)筑物的重要手段之一,其中注浆层位选择与其下方隔浆层完整性是决定地表减沉效果的关键因素。采用理论分析、工程试验以及现场监测等手段,对覆岩离层注浆层位判别及其下方隔浆层稳定性进行了研究。通过理论分析方法对覆岩离层注浆过程中的隔浆层变形特征进行了研究,建立了基于弹性地基梁理论的隔浆层挠曲线方程,并根据岩层破坏程度,分区计算了隔浆层下方岩体的弹性地基系数,得到了注浆压力作用下隔浆层的最大弯曲下沉值;基于岩层破坏条件给出隔浆层稳定性分析方法,计算了注浆前后隔浆层下方自由空间的高度,并依据隔浆层最大弯曲下沉值与其下方自由空间的关系,对固支梁及弹性地基梁状态下的隔浆层完整性进行了判别;在此基础上,综合考虑注浆地层条件及隔浆层稳定性,提出了一种新的覆岩离层注浆层位判别方法。该方法通过计算导水裂隙带及各关键层高度确定潜在注浆层位,然后依据隔浆层完整性分析对各潜在注浆层位的可行性进行判别,最后引入安全系数对其稳定性进行评价。以某矿11090工作面为工程应用实例,依据该判别方法确定了合理注浆层位,在距煤层139.1 m处成功实施覆岩离层注浆充填,结合地表实测数据及地表下沉预计结果,该工作面实施注浆后,地表最大下沉值为230 mm,下沉系数为0.12,减沉率达到77.6%。附近民房的最大倾斜值约为0.8 mm/m,水平变形值为0.7 mm/m,有效保护了矿区地表村庄民房,同时保障了井下采掘工作的正常进行,验证了注浆层位判别方法的合理性,为覆岩离层注浆层位设计及矿区地表沉陷控制提供了参考。

关键词:覆岩离层注浆;隔浆层;注浆层位;地表沉陷控制;弹性地基梁

中图分类号:TD325 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2025)01-0264-17

Determination of grouting layer and stability analysis of slurry-resisting overburden in separation grouting

GUO Wenbing^{1,2}, LI Longxiang¹, YANG Weiqiang¹, BAI Erhu^{1,2}, WU Dongtao¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Collaborative Innovative Center of Coal Safety Production in Henan Province, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The technology of bed separation grouting subsidence reduction is one of the important means of protecting surface buildings and infrastructures in mining areas, the selection of the grouting layer and the integrity of the slurry-resisting overburden below are the key factors affecting the effectiveness of subsidence reduction. By means of theoretical analysis, on-site test and field monitoring, the determination of grouting layer in separation grouting and the stability of the Slurry-resisting overburden are studied. The theoretical analysis method was used to study the deformation characteristics

收稿日期:2024-10-30 策划编辑:郭晓炜 责任编辑:李雅楠 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.1333

基金项目:国家自然科学基金联合基金重点资助项目(U21A20108,U22A20620)

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

通讯作者:白二虎(1989—),男,河南周口人,教授,硕士生导师。Email: baieh@hpu.edu.cn

引用格式:郭文兵,李龙翔,杨伟强,等.覆岩离层注浆层位判定及隔浆层稳定性研究[J].煤炭学报,2025,50(1):264-280.

GUO Wenbing, LI Longxiang, YANG Weiqiang, et al. Determination of grouting layer and stability analysis of slurry-resisting overburden in separation grouting[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 264-280.



移动阅读

of the slurry-resisting overburden in the separation grouting technique. A deflection curve equation for the slurry-resisting overburden based on the elastic foundation beam theory was established, and the elastic foundation coefficient of the rock mass below the slurry-resisting overburden was calculated according to the degree of rock damage zoning. The maximum bending subsidence value of the grout slurry-resisting overburden under grouting pressure was obtained; based on the failure condition of strata, the stability analysis method of the slurry-resisting overburden is given, the height of the free space below the slurry-resisting overburden before and after grouting was calculated, and based on the relationship between the maximum bending subsidence value of slurry-resisting overburden and the free space below, the integrity of the slurry-resisting overburden in the state of fixed-support beams and elastic foundation beams was judged; on this basis, a new discrimination method of the grouting layer is proposed by considering the grouting stratigraphic conditions and the stability of the slurry-resisting overburden. This discrimination determines the potential grouting layers by calculating the height of the water conducting fracture zone and each key strata, and then distinguishes the feasibility of each potential grouting layer according to the integrity analysis of the slurry-resisting overburden, the safety factor is introduced to evaluate its stability. Taking the 11090 working face as an engineering application example, the reasonable grouting layer was determined through the discrimination method, and the overburden bed separation grouting is successfully implemented at 139.1 m from the coal seam. Combined with the measured data from the surface observation station and the estimated surface subsidence, the maximum surface subsidence value after grouting was 230 mm, the subsidence coefficient was 0.12, and the subsidence reduction rate reached 77.6%. The maximum inclination value of nearby residential houses is about 0.8 mm/m, and the horizontal deformation value is 0.7 mm/m, effectively protecting the surface buildings and infrastructures, while ensuring the normal progress of underground mining, verifying the rationality of the grouting layer discrimination method, and providing reference for the design of separation grouting layer and the control of surface subsidence in the mining area.

Key words: grouting bed separation; slurry-resisting overburden; grouting layer; surface subsidence control; elastic foundation beam

0 引 言

随着煤炭资源的持续开采,其引发的地表移动规模 and 范围的持续扩大,如何有效控制煤矿开采引发的地表沉陷,以保障矿区生态环境和建(构)筑物的安全,已成为煤矿开采领域亟待解决的关键问题,同时,煤炭生产过程中产生的大量煤基固废也是制约煤炭行业绿色发展的重要因素之一^[1-2]。因此,发展有效的开采沉陷控制技术,对于推动煤炭工业的可持续发展具有重要意义。

为满足矿区地表减沉需求,确保工作面采动影响范围内的建(构)筑物、河流及耕地保持稳定安全,覆岩离层注浆减沉技术作为一种有效的地表沉陷控制技术,已在我国中部和东部矿区得到了广泛应用^[3-4]。通过向覆岩离层空间中注入浆液材料,如粉煤灰、煤矸石等,有效减少了岩层下沉空间,进而限制了上覆岩层的移动及地表下沉(图1)^[5]。然而,覆岩离层注浆减沉技术的关键在于准确确定和控制工作面充填过程中离层注浆的各项参数,其中注浆层位的选择直接决定了地表减沉的效果^[6],若注浆层位选择不当,不

仅无法有效控制地表沉陷,还可能干扰采掘活动的正常进行,甚至造成地下水污染等严重影响^[7]。

为了保证浆液赋存的稳定性,注浆层位需设置在弯曲下沉带内,同时在导水裂隙带与注浆层位之间留设一定厚度的隔离岩层,以防止浆液沿岩层裂隙进入采掘空间^[8]。针对上述问题,已有相关学者针对覆岩离层注浆层层位选择及隔浆层留设进行了研究。基于关键层理论,随着煤炭采出所产生的自由空间向上传递,工作面上方未破断的关键层与其下部岩层之间将产生不协调性变形下沉,从而形成较大的离层空间,满足了离层注浆的空间需求^[9]。鞠金峰等^[10]通过地面钻孔原位监测方法,对工作面覆岩内部移动规律进行了研究,记录了各关键层在不同阶段的移动变形情况,并根据岩层破断情况,对岩层离层空间的传递情况进行了分析。蒋金泉等^[11]揭示了离层空间在关键层底部自下而上的动态发育与闭合规律,对覆岩离层空间的演化过程与特征进行了深入研究,明确了离层空间的形成机理,并提出了有效的确定方法和预测模型。崔希民等^[12]基于采动覆岩与地表下沉的关联性模型,对工作面覆岩变形及地表移动的演化规律进行了剖

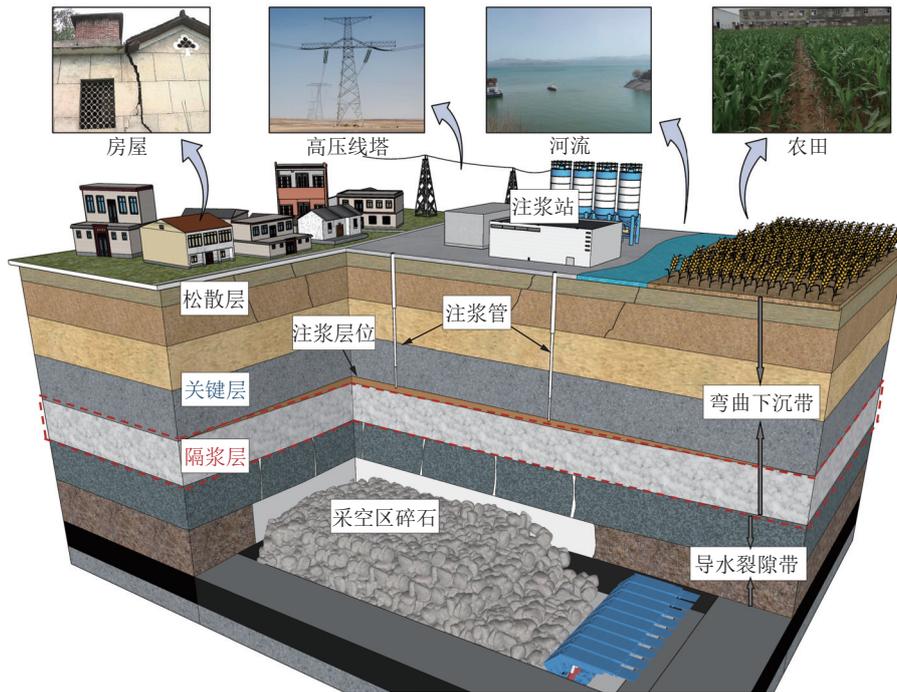


图 1 覆岩离层注浆技术示意

Fig. 1 Schematic diagram of overburden bed separation grouting technology

析,并据此分层界定了岩层间的离层量。通过剔除导水裂隙带内的无效离层,为覆岩离层注浆减沉设计提供了离层识别与量化评估手段。

目前,覆岩离层注浆减沉技术已在部分矿区得到应用,且众多学者针对多种地质条件下的覆岩离层注浆技术进行了深入研究。马荷雯^[13]提出选用覆岩离层多层位注浆技术,以解决覆岩无明显硬层,难以选择注浆层位的问题,并采用相似模拟、现场试验等手段验证技术可行性,为软弱覆岩离层注浆提供了解决思路。轩大洋等^[3]探讨了覆岩隔离注浆充填技术在煤矿开采中的应用及其多重效益,通过识别关键层层位并注浆充填其下方离层空间,将覆岩膨胀量转化为充填空间,形成联合承载结构支撑工作面覆岩,达到地表减沉目的。LI等^[14]利用弹性薄板理论对注浆岩层最大挠度值进行了分析,讨论了不同地质条件和设计参数对岩层移动及地表最大沉降量的影响,进而提出了一种注浆参数优化设计方法。郭文兵等^[15]针对“三软”厚煤层条件下的覆岩多层位离层注浆进行了研究,根据组合梁理论对软弱岩层离层判别方法进行了改进,建立了弹性薄板力学模型对多注浆层位的可行性进行验证,并通过现场工程性试验,成功实现了对矿区地表的减沉效果。

在进行覆岩离层注浆时,离层空间内的浆液需稳定赋存于离层空间内,类似于含水层的稳定存在。因此,注浆层位选择可以借鉴隔水层的留设原则。孙建

等^[16]为维护矿区地下含水层稳定,建立了隔水层弹性地基梁力学模型,分析了条带充填覆岩结构下隔水层的稳定性,并综合考虑了不同工作面参数及地质条件对含水层稳定性的影响,为隔水层的合理留设提供了计算方法。赵兵朝^[17]则基于关键层和开采沉陷理论,对近浅埋煤层采动覆岩隔水层稳定性进行了研究,构建了稳定性评价模型,并通过以下沉系数为基准的判断准则,验证了模型的有效性和准确性。张东升等^[18]结合地层结构、水循环等理论,提出覆岩等效阻水厚度概念,通过计算隔水层的整体阻水性,对保水开采可行性进行系统评价。

尽管上述研究为覆岩离层注浆层位设计及现场应用提供了丰富的理论指导,但在覆岩离层注浆工程的实际设计中,隔浆层留设厚度大多仍依赖于经验公式计算,鲜有考虑不同地质条件及岩层性质对注浆层位选择的影响。因此,注浆层位的合理性及隔浆层稳定性判别仍需进一步研究,同时,对于实际工程应用中隔浆层移动变形机制也缺乏分析,这已成为覆岩离层注浆设计中亟待解决的重要问题。笔者通过建立隔浆层弹性地基梁力学模型,对注浆压力作用下隔浆层弯曲变形值进行了计算,并分析了工作面推进过程中隔浆层移动变形规律,提出了隔浆层变形失稳判别条件,依据上述研究结论,对注浆层位可行性进行分析,并给出了考虑岩层弯曲下沉的离层注浆层位判别流程,为覆岩离层注浆层位选取及隔浆层稳定性判别

提供了理论依据。

1 覆岩离层注浆隔浆层弹性地基梁力学模型

1.1 隔浆层变形特征

在覆岩离层注浆减沉技术中, 隔浆层是指位于导

水裂隙带与浆液赋存层位之间的全部或部分煤岩层, 其位于导水裂隙带以上且具有较高的完整性及低透水性, 能够有效阻断或减缓浆液的溃散和渗透, 从而起到隔离浆液、维持浆液赋存稳定性并防止其大量溃入采掘空间的作用, 如图 2 所示。

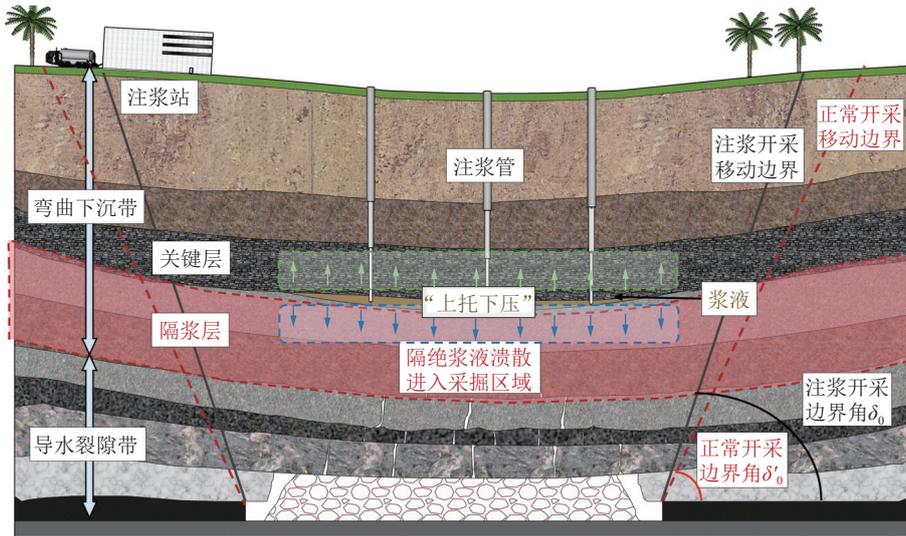


图 2 覆岩离层注浆隔浆层示意

Fig.2 Schematic diagram of overburden bed separation grouting slurry-resisting overburden

取工作面上覆岩层剖面对隔浆层变形情况进行分析, 弯曲下沉带内岩层移动过程具有连续和整体性, 通常以多层、整体性的发生, 并且在覆岩离层注浆过程中, 注浆层位下方的多层岩层共同起到维持离层区内浆液稳定的作用, 故将隔浆层视为整体对象 (即岩层组), 分析其内部岩层在协同变形条件下的移动变形情况, 从而判断隔浆层结构完整性。

随着工作面持续推进, 上覆岩层由下至上逐层移动, 将采空区空间传递至隔浆层下方, 为其提供必要

的变形空间条件, 此时, 隔浆层形成下部悬空, 两端约束的固支梁结构^[19], 并因自身重力而产生弯曲下沉 (图 3)。随着固支梁跨度逐渐增大, 隔浆层中部的弯曲下沉值也随之增加, 与上方关键层产生不同步下沉, 最终在关键层下方形成离层注浆空间, 此时, 对岩层间离层空间进行填充并保持一定注浆压力, 对关键层进行支撑的同时, 还减少了其下方空间的高度, 从而限制弯曲下沉量。在注浆压力的“上托下压”作用下, 隔浆层的弯曲变形量进一步增大, 使得底部与下方岩

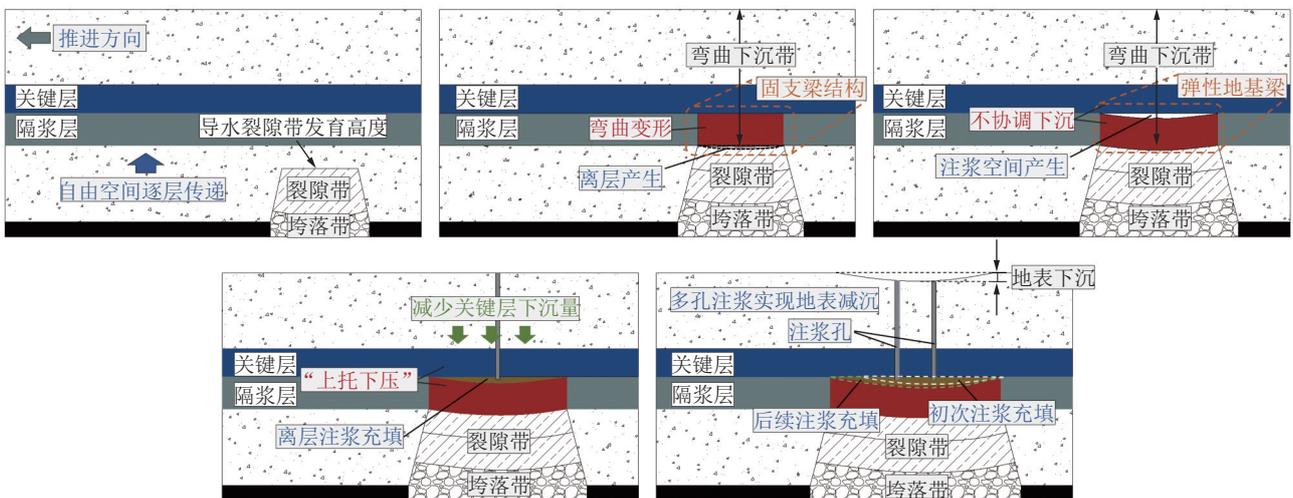


图 3 覆岩离层注浆隔浆层移动变形特征

Fig.3 Movement and deformation characteristics of slurry-resisting overburden in overburden bed separation grouting

层接触,形成弹性地基梁结构,将压力通过岩层向下方传递,进一步压实下方采空区。

为判断岩层状态,需对比岩层的最大下沉变形值与其下方离层的自由高度,随工作面的不断推进,煤层开挖所产生的自由空间也随工作面上覆岩层破断向上传递,由于岩层碎胀效应以及梁-拱组合结构的存在,岩层下方的离层自由高度逐渐减小,当岩层产生的最大挠度值超过其下沉自由高度时,岩层整体处于弯曲下沉状态,不会产生贯通裂隙,由此判断隔浆层完整性。杨伟强等^[20]以岩层抗拉强度为判别标准,计算出各岩层发生初次破断时的最大挠度值,并对弯曲下沉带的下边界进行了判定。

在此基础上,可通过比较注浆压力作用下隔浆层的最大挠度值及采空区压实后的离层高度之间的空间关系,进一步分析隔浆层稳定性。考虑到隔浆层受下部岩层支撑,且除采空区上方覆岩外,工作面边界及煤柱覆岩同样存在弯曲变形,因此,固支梁结构无法全面反映采场边界的变形情况,如今,弹性地基梁模型多被用于分析工作面覆岩变形规律,故当隔浆层与下方岩层接触后,可采用弹性地基梁理论对注浆前

后隔浆层弯曲变形进行分析,通过建立离层注浆开采隔浆层挠度力学模型,并根据岩层破坏条件来判断隔浆层稳定性^[21]。

1.2 隔浆层弹性地基梁力学模型建立

研究表明,采动覆岩完整性变化呈现出显著的分区特征(图4),基于采场围岩变形破坏特征,可将隔浆层下方岩体划分为3个区域:煤柱支撑区、煤柱影响区和覆岩移动区。覆岩移动区主要由隔浆层下方弯曲及垮落岩体组成,其弹性地基系数为 k_m ;煤柱影响区由采空区边界岩层及悬露岩层组成,其弹性地基系数为 k_c ;煤柱支撑区包括工作面保护煤柱及上方完整岩层,相较于其他2个区域,该区域受采动影响较小,因此岩层挠度可忽略不计。注浆压力是推动浆液在离层空间中流动、扩散和充填的主要动力,其大小受注浆量、注浆材料、裂缝扩散阻力等多重因素的影响。为了有效支撑注浆层位上方岩层,限制地表下沉从而达到减损的目的,实际工程设计中常从平衡地层自重的角度设定注浆压力,故假设隔浆层所受注浆压力大小 q ,大致等于其为上覆岩层自重。

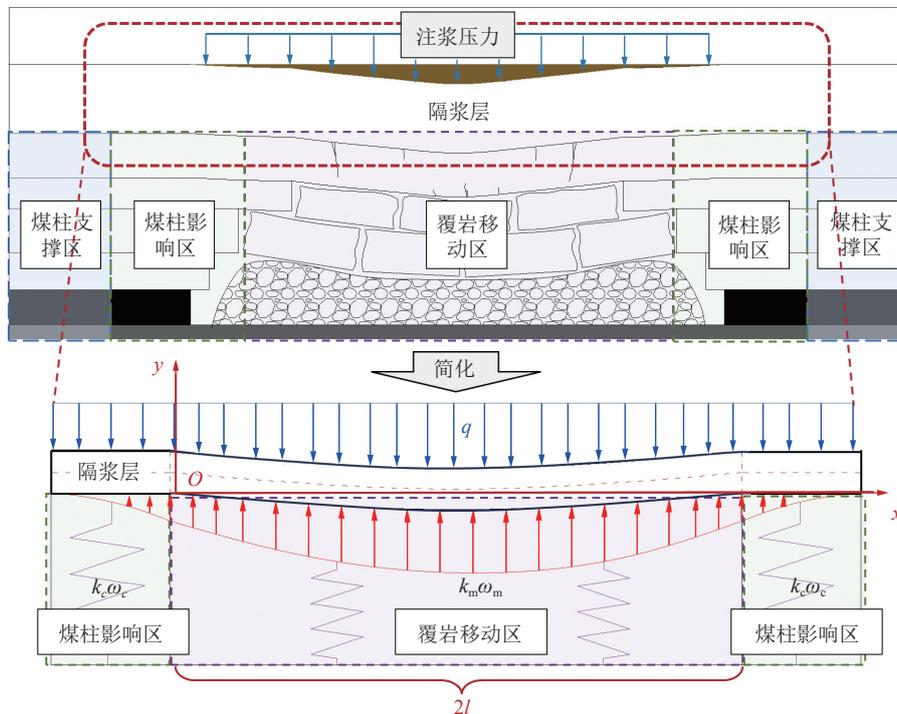


图4 隔浆层弹性地基梁力学模型

Fig.4 Mechanical model of slurry-resisting overburden elastic foundation beam

如图4所示,根据Winkler弹性地基梁理论,隔浆层会随采空区及煤柱上覆岩层同步产生弯曲变形。因此,隔浆层不仅在其上界面受注浆压力产生的均布载荷 q 的作用,同时也受来自煤柱和采空区上方岩层

的地基反力,分别为 $k_c\omega_c$ 、 $k_m\omega_m$ 。以工作面左侧边界在隔浆层上的投影点为原点建立坐标系 xoy ,采空区一侧为 x 轴正方向,地表方向为 y 轴正方向,设工作面长度为 $2L$,并据此对隔浆层的挠度进行分段计算。根

据平衡原理, 梁的挠度微分方程可表示如下。

$$\begin{cases} EI \frac{d^4 \omega}{dx^4} = q - k_m \omega & (0 \leq x \leq 2L) \\ EI \frac{d^4 \omega}{dx^4} = q - k_c \omega & (x \leq 0, x \geq 2L) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω 为梁的挠度, m; E 为隔浆层的弹性模量, Pa; I

$$\begin{cases} w_1(x) = e^{\beta x} (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x) + \frac{q}{k_m} & (0 \leq x \leq 2L) \\ w_2(x) = e^{\alpha x} (C_5 \cos \alpha x + C_6 \sin \alpha x) + e^{-\alpha x} (C_7 \cos \alpha x + C_8 \sin \alpha x) + \frac{q}{k_c} & (x \leq 0, x \geq 2L) \end{cases} \quad (2)$$

其中, C_1, C_2, \dots, C_8 为常数; α, β 为特征系数分别为 $\alpha = \sqrt{k_c/(4EI)}$, $\beta = \sqrt{k_m/(4EI)}$ 。根据对称性, 以采空区中部为中心线, 两边岩层弯曲变形情况相同, 故对 $x \leq L$ 区域的岩层进行力学分析, 根据梁的弯曲变形公式可得:

$$\begin{cases} \theta(x) = \frac{d\omega(x)}{dx} \\ M(x) = -EI \frac{d^2 w(x)}{dx^2} \\ Q(x) = -EI \frac{d^3 w(x)}{dx^3} \end{cases} \quad (3)$$

由此可计算得隔浆层各区域转角、弯矩和剪力方程, 再结合弹性地基梁模型的边界条件和连续性, 对上述方程进行求解。

连续性条件: 采空区和煤柱交界处挠度、转角、弯矩和剪力相等;

$$\begin{cases} w_1(0) = w_2(0) \\ \theta_1(0) = \theta_2(0) \\ M_1(0) = M_2(0) \\ Q_1(0) = Q_2(0) \end{cases} \quad (4)$$

边界条件: 采空区中部转角和剪力为 0, 在足够远处的下沉量为 q/k_c 。

$$\begin{cases} w_2(-\infty) = q/k_c \\ \theta_1(l) = 0 \\ Q_1(l) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

将梁的分段挠度微分方程以及变形关系输入 MATLAB 运算软件中, 结合所设边界条件及分段连续性质, 对隔浆层的挠度方程进行求解, 最终求得常数如下, 其中, $a = 1 + e^{2\beta L}$, $b = 1 - e^{2\beta L}$ 。

$$\begin{cases} C_1 = -\frac{q(k_c - k_m)(ba^4 - ba^2\beta^2 + 2a\beta\alpha^3)}{k_c k_m (2a^2\alpha^3\beta + ab\alpha^4 - 2aba^2\beta^2 + ab\beta^4 + 2b^2\alpha\beta^3)} \\ C_2 = \frac{qba^2(\alpha^2 + \beta^2)(k_c - k_m)}{k_c k_m (2a^2\alpha^3\beta + ab\alpha^4 - 2aba^2\beta^2 + ab\beta^4 + 2b^2\alpha\beta^3)} \\ C_3 = e^{2\beta L} C_1 \\ C_4 = -e^{2\beta L} C_2 \end{cases}$$

为截面惯性矩 $I = bh^3/12, m^4$; b 为梁的矩形截面宽度, 设 $b=1, m$; h 为岩层厚度, m; k_m, k_c 分别为采空区和煤柱侧的弹性地基系数, MPa/m;

上述隔浆层分区挠度方程表现为四阶常系数非齐次线性微分方程, 微分方程的解由对应齐次方程的通解和非齐次方程的特解之和, 结果如下:

$$\begin{cases} C_5 = \frac{b\beta^2 q(k_c - k_m)(-\alpha^2 + 2ba\beta + a\beta^2)}{k_c k_m (2a^2\alpha^3\beta + ab\alpha^4 - 2aba^2\beta^2 + ab\beta^4 + 2b^2\alpha\beta^3)} \\ C_6 = -\frac{ab\beta^2 q(k_c - k_m)(\alpha^2 + \beta^2)}{k_c k_m (2a^2\alpha^3\beta + ab\alpha^4 - 2aba^2\beta^2 + ab\beta^4 + 2b^2\alpha\beta^3)} \\ C_7 = 0 \\ C_8 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

1.3 各区域岩层弹性地基系数

弹性地基系数反映了岩层的刚度和承载能力。随着工作面不断推进, 隔浆层的暴露长度及自身下沉量逐渐增加, 最终与下部岩层接触并受其支撑, 将隔浆层下方支撑岩层视为等效弹性地基, 各岩层弹性地基系数 k 可以根据其受压后的变形量进行计算, 由于岩层完整性对其力学性质有明显影响, 可根据工作面覆岩的破坏程度, 分区计算下位岩层等效弹性地基系数, 如图 5 所示。

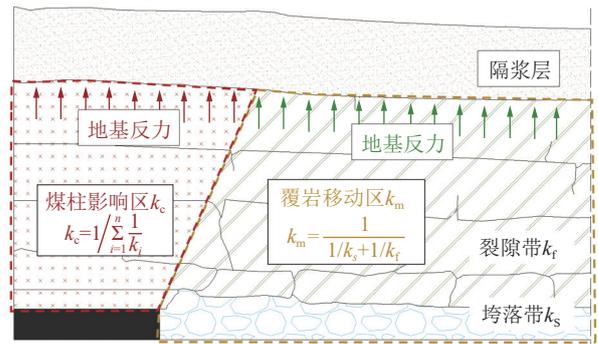


图 5 岩层各分区弹性地基系数

Fig.5 Elastic foundation coefficients of various strata zones

1) 煤柱影响区弹性地基系数。煤柱上方岩层虽承受了工作面采动产生的支承压力, 呈现出整体运移趋势, 但由于下方煤柱的支撑作用, 依旧保持相对完整的岩层结构, 未出现明显破裂或变形。故将煤柱上方完整岩层视为弹性体分析其应力-应变关系, 根据 Winkler 模型, 岩层弹性地基系数可由下式计算。

$$k = \frac{\sigma}{y} = \frac{E\varepsilon}{y} = \frac{E}{h} \quad (7)$$

其中, σ 为上覆载荷, MPa; y 为地基垂向压缩量,

m ; ϵ 为地基垂向应变。组合岩层在受覆岩压力作用下, 总变形量可由各个岩层压缩量相加得到

$$y = \sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_i h_i}{E_i} \quad (8)$$

代入近似条件 $\sigma_i \approx \sigma$, 则分区综合弹性地基系数为

$$k_c = 1 / \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{E_i} = 1 / \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} \quad (9)$$

对岩层组内岩层依次编号。式中: h_i 为组合岩层内各岩层厚度; E_i 为组合岩层内各岩层弹性模量; k_i 为组合岩层内各岩层弹性地基系数。

2) 覆岩移动区弹性地基系数。

覆岩移动区主要由采空区上方垮落带和裂隙带组成, 由于各分区弹性地基系数 k 及其内部岩层的弹性模量与层厚有关^[22], 根据岩层完整性, 分步对覆岩移动区弹性地基系数进行求解。

采空区内碎石为一个不同岩性和粒径的复杂体, 由多层岩层破碎后相互混合、堆积而成, 因此, 其地基系数不能仅通过垮落带内各层覆岩弹性模量计算, 此外, 随着采空区破碎岩体受力压实, 整体表现出应变硬化现象。余伊河等^[23]通过分析压实后采空区应力-应变曲线, 得出了压实后采空区的弹性地基系数计算公式。

$$\begin{cases} k_s = \frac{E_s}{h_s} = \frac{E_0 + \sigma_s / \epsilon_m}{h_s} \\ E_0 = \frac{1.039 \sigma_c^{1.042}}{k_b^{7.7}} \\ \epsilon_m = \frac{k_b - 1}{k_b} \end{cases} \quad (10)$$

式中, σ_s 为采空区所受应力, MPa; σ_c 为垮落岩体抗压强度, MPa; ϵ_m 为采空区内碎石最大应变值; E_0 为垮落带破碎岩体原始切变模量; k_b 为碎胀系数。

与垮落带内破碎岩体不同, 裂隙带岩体内部原生裂隙在采动影响下进一步扩展, 发育贯通形成部分新裂隙, 岩体力学性质受其内部裂隙开度和密度等因素影响, 但整体能够保持一定的结构稳定性和承载能力, 因此将其视为弹性体计算整体地基系数

$$k_f = 1 / \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{E_i} \quad (11)$$

同理, 根据式 (9) 计算覆岩移动区弹性地基系数, 将垮落带、裂隙带岩体的弹性模量代入可得。

$$k_m = \frac{1}{1/k_s + 1/k_f} \quad (12)$$

1.4 隔浆层底部下沉自由高度计算

除煤炭开采产生的空间外, 采动覆岩因卸荷膨胀

与再压实所产生的体积变化同样具有显著影响^[24-25]。采空区破碎岩体内部存在大量空隙, 在进行离层注浆时, 随着注浆压力的逐渐增大, 垮落碎石被进一步压实, 为上覆岩层提供了更大的下沉变形空间。因此, 计算岩层下沉自由高度时, 需要考虑工作面采高、上覆岩层碎胀性外, 还需分析注浆压力影响下采空区的压实变形情况, SALAMON 等^[26]对采空区内碎石的应力-应变关系进行了计算, 表明采空区内破碎岩体在受压后表现出明显的应变硬化现象^[27]。

$$\epsilon_s = \frac{\sigma_s \epsilon_m}{E_0 \epsilon_m + \sigma_s} \quad (13)$$

依据式 (13), 可计算出采空区压实后整体应变, 结合注浆工作面采高可得注浆压力影响下隔浆层底部离层空间高度。注浆压力随离层注浆进行及工作面推进呈现动态变化特征, 可分为无压、增压、稳压和过压 4 个阶段。为减少工作面上方主关键层及地表移动, 稳压及过压阶段为注浆压力长期维持阶段, 故将采空区所荷载荷等效为稳压阶段注浆压力大小, 基于此, 计算隔浆层下方最大下沉自由高度如下:

$$\begin{cases} H_{\max} = M - H_s + H_c \\ H_c = \epsilon_s h_s \\ H_s = h_s (K_p - 1) \end{cases} \quad (14)$$

式中, H_{\max} 为隔浆层下方最大下沉自由高度, m; M 为工作面采厚, m; H_s 为采空区垮落岩体最小残余厚度, m; H_c 为垮落带碎石压缩量, m; K_p 为垮落岩体残余碎胀系数 (图 6)。

结合覆岩离层注浆隔浆层变形特征及其受力情况, 建立弹性地基梁力学模型对注浆压力作用下隔浆层整体移动进行分析, 针对采动覆岩完整性变化的分区特征计算相应的弹性地基系数, 最终得到隔浆层的挠度微分方程, 通过对比隔浆层最大弯曲下沉值与下方自由高度的空间关系, 可对不同注浆层位合理性进行验证, 在此基础上, 提出一种综合地层条件及隔浆层稳定性的注浆层位判定方法。

2 覆岩离层注浆层位判定方法

目前, 覆岩离层注浆所留设的隔离岩层厚度通常采用《建筑物、水体铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采指南》^[28] (简称“指南”) 中提供的经验公式, 即“多倍采高法”进行选择, 依据工作面覆岩岩性, 导水裂隙带与注浆层位之间的隔浆岩层厚度应为 2~6 倍采厚, 因此注浆层位高度应根据下式计算:

$$H \geq H_f + H_b \quad (15)$$

其中, H 为注浆层位距离煤层的高度, m; H_f 为导

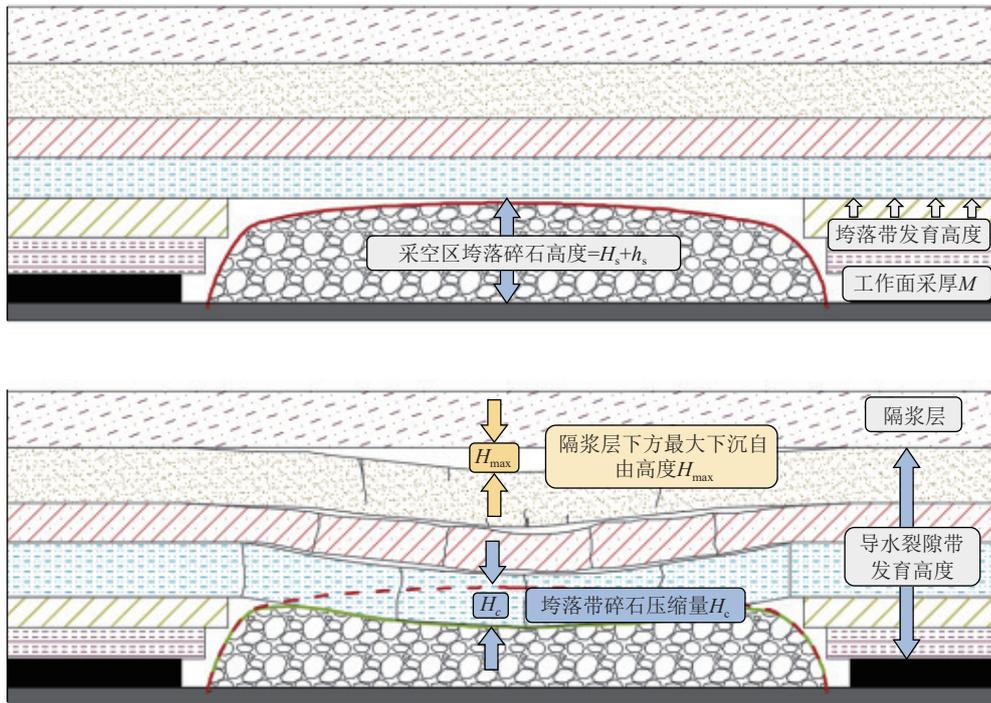


图 6 岩层下沉自由高度传递示意

Fig.6 Schematic diagram of subsidence free height transfer in strata

水裂隙带发育高度, m ; H_b 为留设岩层厚度。受开采扰动、注浆压力等因素影响, 工作面上覆岩层产生变形、移动、破断导致的隔浆岩层(组)完整性降低, 是影响浆液稳定性的重要原因。为防止隔浆岩层(组)因下沉移动引发剪切破坏, 进而导致内部裂隙发育与导水裂隙带贯通, 需综合矿区地层岩石力学特性(弹性模量、容重、地基系数等)、导水裂隙带发育高度以及浆液与煤层间距等因素对注浆层位进行选择。

如果层位设置过高, 则在适当的注浆压力下, 难以有效压实下方的冒落带和裂隙带, 从而导致注浆工

程完成后仍存在持续下沉的问题; 反之, 层位设置过低, 则注浆层位可能进入导水裂隙带中, 存在跑浆的风险, 不仅会增加浆液的注入量, 还可能对工作面的正常回采造成影响。因此, 需要在保证保护层完整性的前提下, 选择较低的注浆层位, 以确保覆岩离层注浆的效果。

基于上述对覆岩离层注浆地层条件及隔浆层完整性的分析, 提出一套考虑岩层弯曲下沉的离层注浆层位判别流程(图 7), 旨在评价潜在注浆层位下方隔浆层安全性, 以选择理想注浆层位。

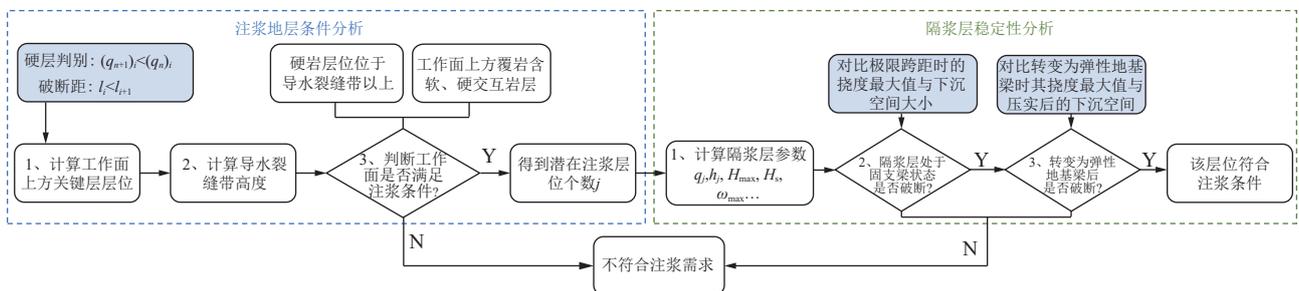


图 7 覆岩离层注浆层位稳定性判定流程

Fig.7 Flowchart for stability determination of slurry-resisting overburden in overburden bed separation grouting

注浆层位判别可分为 2 个部分, 首先, 对覆岩离层注浆工作面进行注浆地层条件分析, 判断工作面地质条件是否满足注浆需求, 从而确定潜在注浆层位。再通过隔浆层稳定性分析, 依次对各潜在注浆层位可行性进行评价, 根据梁的破坏条件, 判断隔浆层在固支梁及弹性地基梁状态下的完整性, 并验证该层位是

否满足注浆需求。

2.1 覆岩离层注浆地质条件判别

第一步, 根据地质钻孔探明覆岩离层注浆工作面上方岩层赋存情况, 计算关键层层位。关键层控制其上方部分或全部岩层移动, 在采场上方形成组合梁结构, 根据组合梁变形特征, 自下而上编号硬层 i , 求得

其所受载荷^[29]。

$$(q_n)_i = \frac{E_i h_i^3 (\gamma_i h_i + \gamma_{i+1} h_{i+1} + \dots + \gamma_n h_n)}{E_i h_i^3 + E_{i+1} h_{i+1}^3 + \dots + E_n h_n^3} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

其中, 计算第 i 层硬岩所受载荷时, 结果满足 $(q_{n+1})_i < (q_n)_i$ 时, 证明第 $n+1$ 层岩层因自身强度较高可作为第 $i+1$ 层硬层, 即:

$$(q_{n+1})_i < (q_n)_i \quad (17)$$

除载荷计算外, 还应通过关键层强度条件对各硬层进行判别, 由下往上对比硬岩层的破断距。

$$l_i = h_i \sqrt{\frac{2R_i}{(q_n)_i}} \quad (18)$$

当下式成立时, 第 i 层及第 $i+1$ 层都为关键层, 否则仅第 i 层为关键层。

$$h_i \sqrt{\frac{2R_i}{(q_n)_i}} < h_{i+1} \sqrt{\frac{2R_{i+1}}{(q_n)_{i+1}}} \quad (19)$$

第二步, 根据采矿地质条件及工作面参数计算导水裂隙带发育高度。结合工作面地质钻孔柱状图, 对覆岩岩性进行综合评价, 根据下式可得到岩层综合评价系数 P , 以此判断覆岩软硬程度。

$$P = \frac{\sum_1^n m_i Q_i}{\sum_1^n m_i} \quad (20)$$

其中, m_i 为覆岩 i 分层的法线厚度, m ; Q_i 为覆岩 i 分层岩性评价系数。《指南》给出了不同采煤方法、岩性以及煤层赋存情况的岩层破坏高度经验计算公式, 将导水裂隙带高度与岩层层位的空间关系相结合, 初步得到工作面上方导水裂隙带发育层位, 也可根据

同矿区工作面覆岩采裂比计算得到导水裂隙带发育高度。

第三步, 判断工作面是否满足注浆条件。参考水文地质资料以及导水裂隙带高度, 分析各关键层下方离层空间是否满足注浆需求, 并排除不符合注浆要求的层位, 通过注浆地质条件分析, 确定工作面上方离层注浆潜在层位。

2.2 覆岩离层隔浆层稳定性分析

根据潜在注浆层位高度计算对应参数, 并基于注浆条件地层分析结果, 自下往上依次对所得到的潜在注浆层位进行注浆可行性判别。依据地质资料计算各岩层参数及注浆设计压力等参数, 根据注浆层位空间位置以及隔浆层岩石力学参数分析覆岩移动情况, 分别判断隔浆层在固支梁及弹性地基梁状态下的破断条件, 如图 8 所示。

当离层空间传递至隔浆层下方时, 可简化为固支梁结构计算其极限跨距、极限挠度值以及下方离层高度, 根据岩层破坏情况, 以抗拉强度准则判别隔浆层在转变为弹性地基梁之前是否破断^[30], 破坏临界状态下岩层的挠度方程为

$$\omega(x) = \frac{q}{24EI} x^2(x - L_c)^2 \quad (21)$$

$$L_c = h \sqrt{\frac{2\sigma_t}{q}} \quad (22)$$

其中, $\omega(x)$ 为岩层挠度方程, m ; L_c 为初次破断块体长度, m ; σ_t 为岩层抗拉强度, MPa。固支梁的最大挠度发生在梁的中部, 故当 $x=L_c/2$ 处, 梁的弯曲下沉变形达到最大值:

$$\omega_{\max} = \frac{qL_c^4}{384EI} \quad (23)$$

根据固支梁破坏条件, 发生初次破断需要满足:

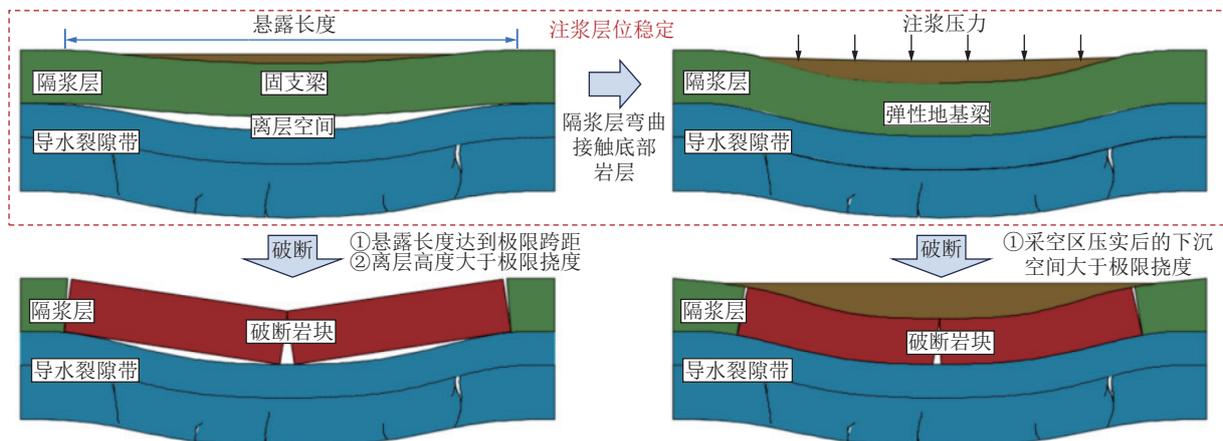


图 8 隔浆层破断形式示意

Fig.8 Schematic diagram of slurry-resisting overburden failure modes

① 悬空距大于其初次断裂时的极限破断距; ② 达到极限破断距时的最大弯曲下沉值小于其下方自由空间高度。将最大挠度值与下方离层高度 H_s 比较, 当满足下式时, 隔浆层为固支梁时不发生破断。

$$\omega'_{\max} \geq H_s \quad (24)$$

随着工作面不断推进, 隔浆层弯曲下沉值随梁的跨度不断增大, 直至与下方岩层接触后, 此时其状态由固支梁转变为弹性地基梁。由于注浆压力对采空区产生的压实作用, 隔浆层在承载注浆压力的同时, 其下方下沉自由高度也进一步增加, 根据隔浆层弹性地基梁力学模型可知, 其挠度最大值与注浆压力、隔浆层厚度、工作面尺寸、岩层地基系数等因素有关。首先, 将采矿地质条件及工作面参数代入式 (9), 分区计算各区域岩层弹性地基梁系数及隔浆层物理力学参数, 将上述所得数据代入隔浆层挠度方程, 得到注浆压力作用下隔浆层中部最大挠度值 ω_{\max} , 结合采空区应力-应变关系, 计算注浆压力作用下隔浆层下沉自由空间高度, 对比极限挠度与下沉自由高度的大小关系, 判断隔浆层完整性。隔浆层发生破断应当满足以下条件:

$$H \geq \omega_{\max} \quad (25)$$

若无法满足破断条件, 则该条件下隔浆层具有良好的完整性, 满足注浆稳定性需求。但由于覆岩离层注浆过程中, 注浆压力的时变性以及岩层的非均质性, 可能导致隔浆层局部发生破断, 为判定隔浆层在注浆压力作用下的整体稳定性, 笔者通过对比隔浆层的最大弯曲下沉值与下沉自由高度之间的关系, 引入安全系数 D 判断隔浆层的可靠性 (图 9), 计算公式为

$$D = \frac{\omega - H}{\omega} \quad (26)$$

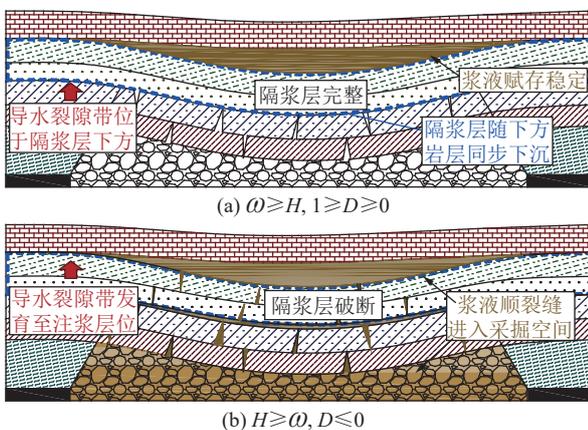


图 9 隔浆层破断条件及可行性判别

Fig.9 Failure conditions and feasibility determination of slurry-resisting overburden

其中, 安全系数 D 为隔浆层弯曲下沉值的安全增量, 当 $D \leq 0$ 时, 表明隔浆层下方为其下沉提供了足够空间, 在该层位实施离层注浆安全性较差; 当 $1 > D \geq 0$ 时, 表明下沉自由高度不满足隔浆层破断条件, 隔浆层随下方岩层同步下沉, 该层位进行离层注浆充填具有较高的可行性, 且在此范围内, D 的值越大表明注浆安全性越高。

3 工程应用实例

3.1 采矿地质条件

义煤集团某矿 11090 工作面位于河南省洛阳市, 地表对应位置为部分金溪村、古村内的民房及公路等建(构)筑物, 且工作面上方有大量农田覆盖, 综合考虑后选用覆岩离层注浆减沉技术对地表进行保护。

如图 10 所示, 11090 工作面倾向长为 977~1030 m, 走向长 185 m, 工作面采用倾斜长壁综合机械化放顶煤采煤法开采, 顶板管理方法采用全部垮落法管理顶板, 煤层平均厚度约 4.7 m, 工作面覆岩综合评价系数 P 为 0.357, 可得工作面覆岩岩性中硬, 上方基岩厚度为 596.5~606.5 m 且包含多层坚硬岩层, 满足覆岩离层注浆地层条件。

参考邻近采区导水裂隙带高度现场实测, 该矿 12 采区煤层平均厚度为 5.2 m, 其导水裂隙带最大高度为 75 m, 采裂比为 14.42, 可得 11090 工作面上方导水裂隙带发育预测高度为 67.77 m, 依据上述 11090 工作面参数及覆岩岩性, 可由《指南》中的经验公式 (表 1) 计算得出 11090 工作面上方导水裂隙带的高度范围为 55.03~104 m, 综上所述, 导水裂隙带发育高度范围为 67.77~104 m。

此外, 许家林等^[31]提出了一种基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法, 即主关键层位于临界高度 (采高为 7~10 m) 以外时, 导水裂隙带将发育至临界高度上方最近的亚关键层底部。综合经验公式、理论分析以及相邻工作面覆岩破坏高度研究成果^[32], 结合工作面地质钻孔柱状图, 可得导水裂隙带高度预计发育至距煤层 74.9 m 的中砂岩下方, 同理可得垮落带发育至距煤层 29.86 m 的砂质泥岩下方。基于 11090 工作面上方钻孔柱状图, 对覆岩离层注浆合理层位进行判别, 根据关键层判断步骤, 并同时排除导水裂隙带内关键层及含水层岩层, 计算得到导水裂隙带上方关键层空间分布位置, 11090 工作面上方潜在注浆层位分布 (表 2)。

以各关键层下方离层空间作为注浆设计层位, 根据矿区水文地质资料显示, 11090 工作面上方无明显含水层, 因此, 将导水裂隙带至注浆设计高度内全部

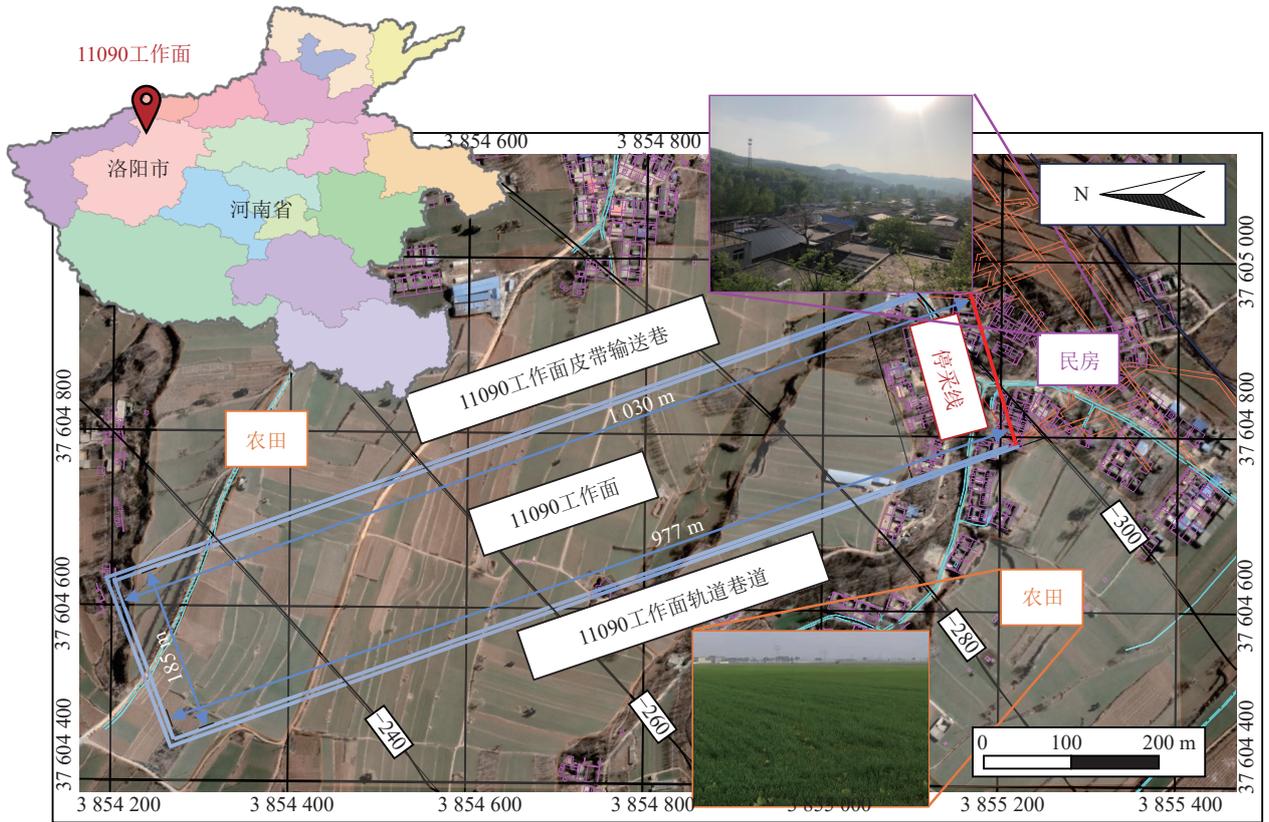


图 10 11090 工作面井上下对照

Fig.10 Wellbore vertical comparison diagram of 11090 working face

表 1 导水裂隙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	$H_{li} = \frac{100M}{0.15M + 3.12} \pm 11.18$	$H_{li} = 30M + 10$
中硬	$H_{li} = \frac{100M}{0.23M + 6.10} \pm 10.42$	$H_{li} = 20M + 10$
软弱	$H_{li} = \frac{100M}{0.31M + 8.81} \pm 8.21$	$H_{li} = 10M + 10$

岩层视为一个整体,作为该注浆设计层位下方隔浆层,隔浆层厚度可通过其上层高度及导水裂隙带发育高度计算得到(图 11)。

由于不同地质条件下工作面覆岩的力学性质存在明显的离散性,需针对工程实地情况确定工作面上

覆岩层物理力学参数,可参照以下 2 个方面:①依据工作面地质勘探报告及实验室试验数据,获取具体的岩层力学参数;②参考同矿区或相邻采区内相似采矿地质条件,依据已有数据确定合理的物理力学参数。

按空间高度依次将表 2 内关键层所对应的潜在注浆层位进行编号(1, 2, …, 5),结合工作面覆岩物理力学性质及注浆层位空间高度分别计算各隔浆层参数。

3.2 11090 工作面注浆层位判定

当离层空间传递至导水裂隙带发育层位时,隔浆层下部悬空形成固支梁结构,此时,采空区内碎石尚未被充分压实,离层空间高度主要受工作面采厚及导水裂隙带内岩层碎胀量影响,采空区上方距煤层距离 H_p 岩层的平均碎胀系数 K_p 可由下式计算^[33]:

表 2 11090 工作面潜在注浆层位分布

Table 2 Distribution of potential grouting layers in 11090 working face

岩层序号	岩层名称	岩性	厚度/m	距导水裂隙带高度/m	埋深/m	孔底注浆压力/MPa
32	主关键层	中砂岩	31.71	416.62	98.78	3.26
29	亚关键层4	砂质泥岩	64.25	337.64	145.22	5.23
23	亚关键层3	泥岩	50.91	240.44	255.76	7.66
19	亚关键层2	细砂岩	31.41	191.08	324.62	8.90
12	亚关键层1	泥岩	63.62	64.16	419.33	12.07

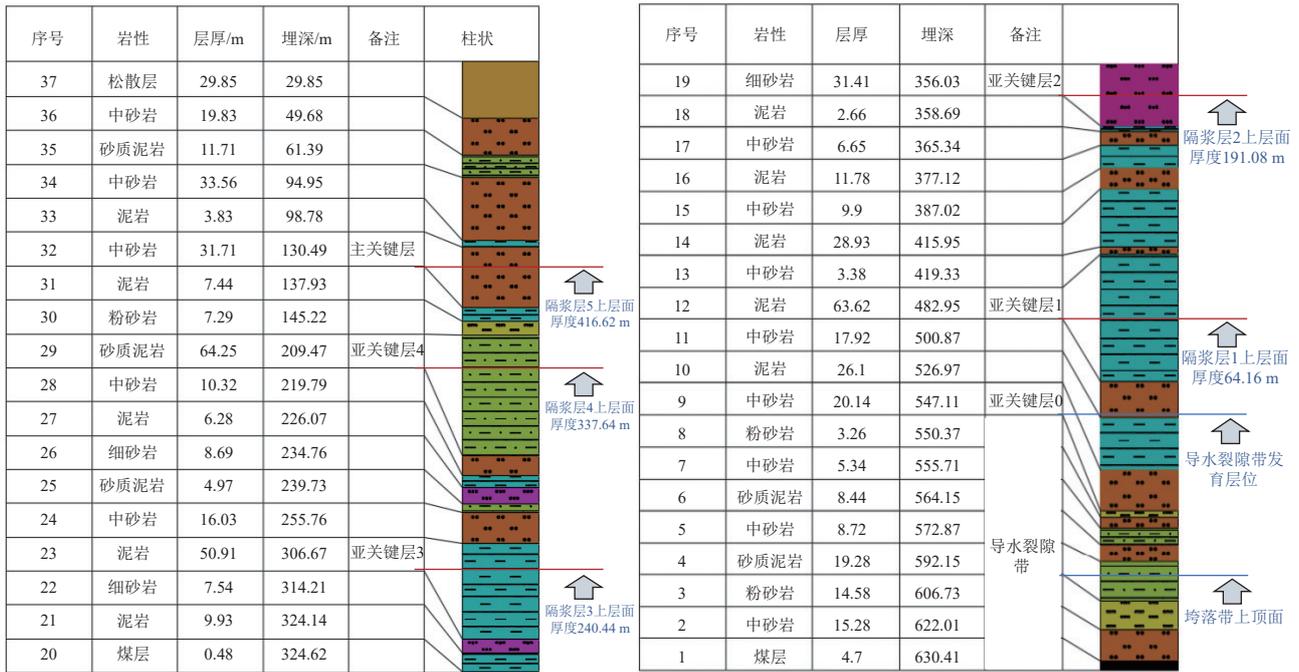


图 11 11090 工作面地质钻孔柱状

Fig.11 Geological borehole lithology diagram of 11090 working face

$$K_p = K_z - 0.017 \ln H_p (H_p < 100 \text{ m}) \quad (27)$$

其中, K_z 为直接顶原始碎胀系数; H_p 为最上层岩层与煤层之间的垂直距离, m。岩层断裂后岩块长度及失稳方式对其碎胀性具有显著影响^[34], 11090 工作面直接顶岩性为中砂岩, 其原始碎胀系数可基于其破断后的岩块尺寸进行选取, 见表 3。此外, 为确保参数的合理性, 还应结合相似采矿地质条件下的常规岩石碎胀系数进行取值。

表 3 岩石断裂后的碎胀系数

Table 3 Swelling coefficient of rocks after fracture

块体尺寸/m	> 1.5	1~1.5	0.2~0.7	< 0.2
碎胀系数K	1.03~1.1	1.2~1.3	1.4~1.65	1.6~1.85

岩体碎胀系数可分为原始碎胀系数和残余碎胀系数, 基于采动过程中岩层状态的演化特点, 式 (27) 中为原始碎胀系数, 参照常规岩石力学性质, 11090 工作面直接顶原始碎胀系数取为 1.15^[24]。根据式 (17) 和式 (22) 求出各隔浆层为固支梁时极限跨距及最大挠度值 (图 12)。

通过对比各隔浆层自身最大挠度值及下方离层高度 (表 4) 发现, 离层空间随工作面推进向上传递, 隔浆层弯曲变形值增大直至转变为弹性地基梁过程中, 1~5 号隔浆层均可在固支梁状态保持完整, 并将离层空间传递至注浆层位。

关键层下方注浆空间出现后, 在注浆压力作用下,

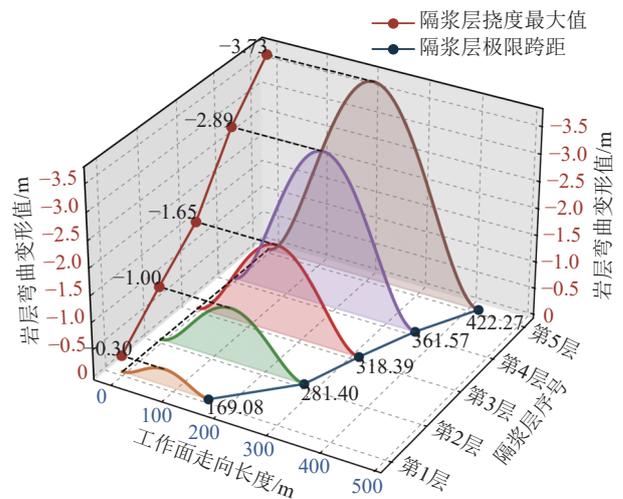


图 12 隔浆层固支梁状态下弯曲变形值

Fig.12 Bending deformation values of slurry-resisting overburden under fixed beam condition

隔浆层弯曲变形量进一步增大, 当隔浆层与下方岩层接触受支撑反力作用, 整体形成弹性地基梁结构, 下方各分区弹性地基系数见表 5。

依据潜在注浆层位高度, 设计相应注浆压力并计算下方隔浆层力学参数, 根据隔浆层弹性地基梁挠曲线方程, 求出方程各项系数。对离层空间实施注浆后, 隔浆层受注浆压力作用压实下部采空区, 其底部下沉自由高度进一步增大, 由式 (12) 和式 (13) 计算可得注浆后采空区压实变形量为 3.1 m, 故隔浆层下沉自由高度最大值为 3.31 m。由于弹性地基梁的挠度最大

表 4 固支梁状态下隔浆层参数计算

Table 4 Parameter calculation of slurry-resisting overburden under fixed beam condition

编号	隔浆层自重/MPa	抗弯刚度/(GPa·m ⁴)	隔浆层厚度/m	固支梁参数				
				抗拉强度/MPa	梁极限跨距/m	最大挠度值/m	离层高度/m	隔浆层完整性
5	10.4	2.31×10 ⁵	416.62	5.35	422.27	3.73		
4	8.4	1.31×10 ⁵	337.64	4.84	361.57	2.86		
3	6.0	9.73×10 ⁴	240.44	5.27	318.39	1.65	0.21	完整
2	4.8	7.80×10 ⁴	191.08	5.18	281.40	1.00		
1	1.6	1.12×10 ⁴	64.16	5.57	169.08	0.30		

表 5 弹性地基梁状态下隔浆层参数计算

Table 5 Parameter calculation of slurry-resisting overburden under elastic foundation beam condition

序号	注浆压力/MPa	抗弯刚度/(GPa·m ⁴)	煤柱影响区 弹性地基系数	覆岩移动区弹性地基系数			α	β	a	b
				裂缝带	垮落带	综合地基系数				
5	3.26	2.31×10 ⁵					0.017	0.006 3	6.61	107.29
4	5.23	1.31×10 ⁵					0.019	0.007 2	5.63	64.19
3	7.66	9.73×10 ⁴	7.67×10 ⁷	1.13×10 ⁸	1.45×10 ⁶	1.43×10 ⁶	0.021	0.007 8	5.03	44.33
2	8.90	7.80×10 ⁴					0.022	0.008 2	4.82	38.72
1	12.07	1.12×10 ⁴					0.036	0.013 4	4.47	29.90

值出现在梁的中点,根据梁对称性绘制采空区上方隔浆层挠度曲线如图 13 所示。为确保注浆层位可靠性,弹性地基梁跨距按照最小值选取,即为固支梁转变为弹性地基梁时的暴露长度。

将隔浆层参数代入式 (2) 计算最大挠度值见表 6,对比隔浆层最大挠度值与下沉自由空间得到 11090 工作面上方稳定注浆层位为主关键层下方及亚关键层 (1, 2, 3, 4) 下方,并计算上述注浆层位对应隔浆层安全系数 D,为 0.39~0.58,呈现出随着注浆层位高度逐渐增大的趋势,根据隔浆层稳定性分析结果,选择 11090 工作面覆岩离层减沉注浆层位。综合考虑采空区压实量、浆液赋存稳定性及工程安全性等因素,选择埋深为 419.33 m、厚度 63.62 m 的泥岩亚关键层 1 作为设计注浆层位,设计孔口注浆压力为 5.0~5.3 MPa。

3.3 覆岩离层减沉地表变形监测

为评价 11090 工作面覆岩离层注浆减沉效果,鉴

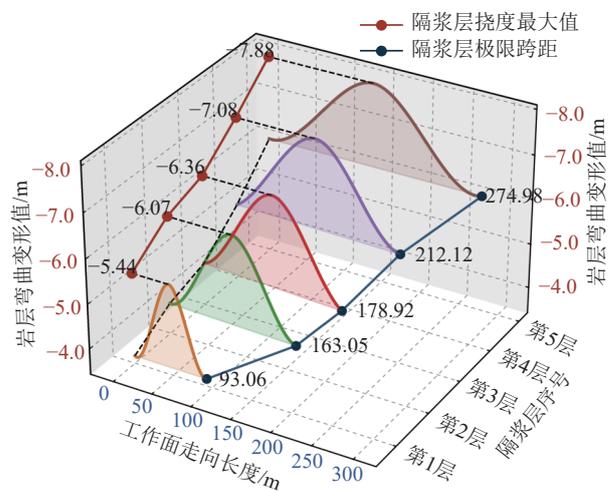


图 13 隔浆层弹性地基梁状态下弯曲变形值

Fig.13 Bending deformation values of slurry-resisting overburden under elastic foundation beam condition

表 6 隔浆层最大挠度值及稳定性判别

Table 6 Maximum deflection values and stability determination of slurry-resisting overburden

序号	注浆压力/MPa	抗弯刚度/(GPa·m ⁴)	弹性地基梁			
			弹性地基梁跨距/m	最大挠度值/m	注浆后下沉自由高度/m	隔浆层完整性
5	3.26	2.31×10 ⁵	274.98	7.88		
4	5.23	1.31×10 ⁵	212.12	7.08		
3	7.66	9.73×10 ⁴	178.92	6.36	3.31	完整
2	8.90	7.80×10 ⁴	163.05	6.07		
1	12.07	1.12×10 ⁴	93.06	5.44		

安全系数

定地表村庄房屋损坏情况, 根据地表移动变形沉陷预计范围结合注浆孔布置情况, 在工作面地表移动盆地的主断面上分别布置 1 条走向观测线及 1 条倾向观测线, 走向观测线布置 52 个测点, 间距 35 m (B1—B52), 倾向观测线布置 42 个测点, 间距 35 m (A1—A42)。参考工作面方位及地表房屋分布设计地表观测站, 测点分布与工作面位置关系如图 14 所示。

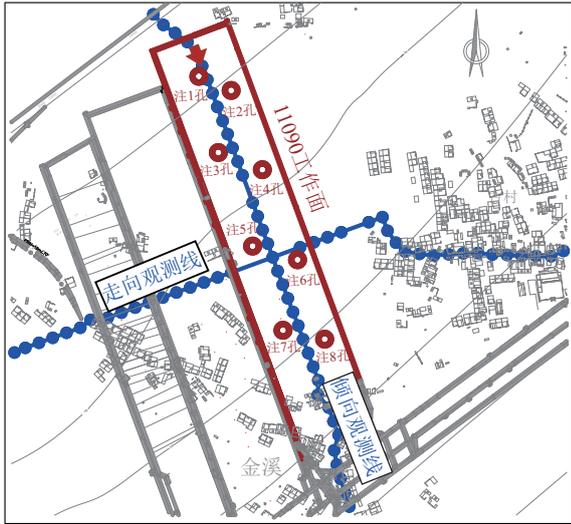


图 14 地表移动观测站及注浆孔布置

Fig. 14 Layout of surface movement observation stations and grouting holes

地表监测贯穿整个工作面回采过程, 定期全面测量测点的平面位置及高程, 以分析地表移动范围、地表最大下沉值等地表移动数据, 自地表观测站建立至工作面地表达达到稳沉状态, 共进行了 17 次测量, 均匀选取倾向观测线部分数据进行分析, 结果如图 15 所示。

根据地表观测站监测数据, 利用 MATLAB 软件对下沉数据进行拟合, 得到 11090 工作面不同时期地

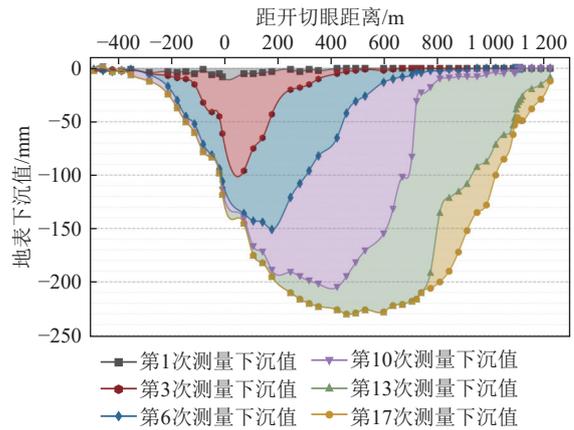


图 15 倾向观测线地表下沉值

Fig. 15 Surface subsidence values along the dip observation line

表下沉曲线, 图中填充颜色面积大小代表两次测量内地表下沉盆地发育情况, 分析图 15 可得, 地表最大下沉点为 B24, 下沉量为 230 mm。

依据 11090 工作面尺寸参数及工作面平均埋深可知, 该工作面为单方向充分采动, 使用充分采动下的概率积分法预计参数进行地表沉陷预计产生的误差较大, 应选取适用于非充分采动情况下的地表移动预计参数^[35-36], 参考《指南》中概率积分法预计参数经验值, 并结合采动程度系数 n , 对下沉系数进行相应的修正。

$$n = \sqrt{n_1 n_3} \tag{28}$$

$$n_1 = k_1 \frac{D_1}{H_0}, n_3 = k_3 \frac{D_3}{H_0} \tag{29}$$

其中, n_1 和 n_3 大于 1 时取 1; k_1 、 k_3 与覆岩岩性有关, 坚硬型覆岩取 0.7, 中硬型覆岩取 0.8, 软弱型覆岩取 0.9。同时, 依据同矿区不同工作面的地表移动变形规律^[37], 得到非注浆条件下 11090 工作面修正后的概率积分法计算参数见表 7。

表 7 地表移动预计计算参数

Table 7 Predicted calculation parameters for surface movement

开采方案	下沉系数 q_m	拐点偏移距 S	主要影响角正切 $\tan \beta$	影响传播角/(°)	水平移动系数 b_m
非注浆	0.38	0	2.2	87	0.25
离层注浆	0.12	0	1.5	87	0.25

采用概率积分法对 11090 工作面采用离层注浆及不注浆情况下, 工作面对应区域进行地表移动变形预计, 2 种开采方案地表预计最大下沉值结果对比如图 16 所示。依据现场监测数据对离层注浆情况下地表移动预计参数进行反演, 通过 MATLAB 的曲线拟合法求取下沉系数为 q_m 为 0.12, 地表最大下沉值为 231.5 mm, 证明现场实测地表下沉值与地表移动预计

结果的拟合程度较高, 可对除主断面外的地表移动范围进行分析。以地表下沉 10 mm 为地表下沉盆地最外边界, 通过对比 2 种方案下的地表预计下沉值可知, 覆岩离层注浆可明显减轻地表损害程度。

据正常开采预计结果, 11090 工作面开采引起的工作面地表最大下沉值为 1 009.8 mm, 地表最大倾斜值约 4.7 mm/m, 最大水平变形值 4.0 mm/m, 工作面附

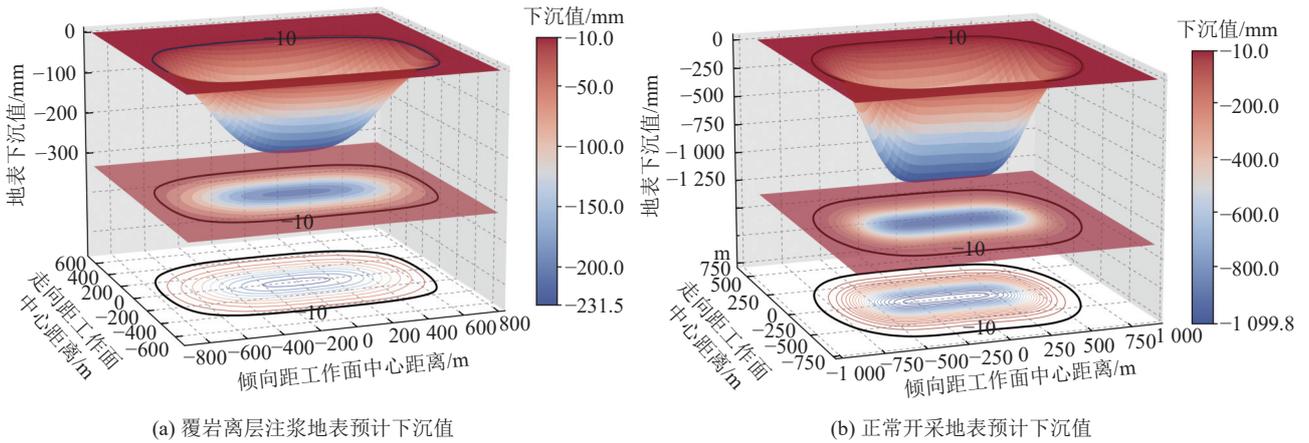


图 16 2 种方案地表预计下沉等值线

Fig.16 Contour map of predicted surface subsidence for two schemes

近地表民房已达到Ⅱ级损害程度,考虑到不同村庄民房结构、质量差异以及抗变形能力不同,正常开采会对地表民房造成明显采动影响。根据现场实测数据,采用覆岩离层注浆充填开采后,最大下沉值为 230 mm,工作面附近地表民房处最大倾斜值约 0.8 mm/m,最大水平变形值 0.7 mm/m,地表最大水平变形值均处于Ⅰ级损害程度内,地表建(构)筑物得到了有效保护。

为评价覆岩离层注浆减沉效果,基于预计所得 2 种方案地表下沉盆地主断面关系,如图 17 所示,曲线 1、2 分别为正常开采和注浆开采主断面地表下沉曲线,根据主断面地表下沉曲线所围面积,计算覆岩离层注浆减沉率^[38]。

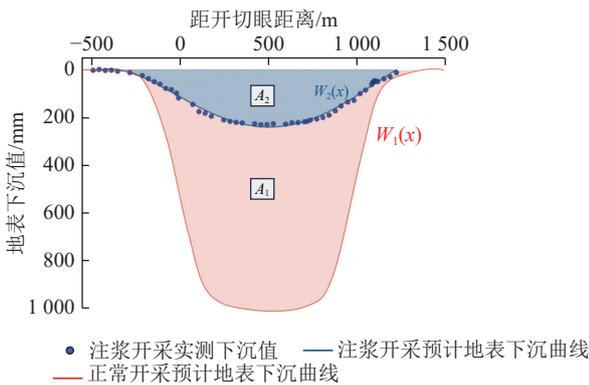


图 17 2 种开采方案主断面地表下沉曲线对比

Fig.17 Comparison of surface subsidence curves along the main section for two mining schemes

$$\rho = \frac{A_1}{A_1 + A_2} \times 100\% \quad (30)$$

其中, ρ 为覆岩离层注浆减沉率; A_1 为 2 种方案下沉曲线所围面积; A_2 为注浆后下沉盆地的断面面积。由式 (30) 计算出工作面覆岩离层注浆减沉率为 77.6%, 结果表明, 本次覆岩离层注浆充填对控制矿区地表下沉及地表构建(构)筑物保护效果明显。

4 结 论

1) 分析了覆岩离层注浆隔浆层移动变形特征, 针对隔浆层不同受力情况, 建立了基于弹性地基梁理论的隔浆层挠曲线方程, 并分区计算了隔浆层下方岩体的弹性地基系数, 得到注浆压力作用下隔浆层最大弯曲下沉值。

2) 依据岩层破坏条件提出了隔浆层稳定性判别方法, 计算隔浆层不同受力状态时的最大弯曲下沉, 并通过采空区碎石应力-应变关系计算注浆前后隔浆层下方自由空间高度, 分别对固支梁及弹性地基梁状态下隔浆层完整性进行了判别。

3) 提出一种综合考虑注浆地层条件及隔浆层稳定性的覆岩离层注浆层位判别方法, 首先根据拟注浆工作面覆岩结构计算导水裂隙带及各关键层高度, 得到潜在注浆层位。再对各注浆层位下方隔浆层完整性进行判别, 并引入安全系数对注浆层位可行性进行评价。

4) 结合工程实例, 根据覆岩离层注浆层位判别方法, 最终确定埋深 419.33 m, 厚度 63.62 m 的泥岩作为 11090 工作面设计注浆层位。结合地表观测站实测数据, 对采用覆岩离层注浆后 11090 工作面地表移动情况进行了分析, 地表最大下沉值为 230 mm, 下沉系数为 0.12, 减沉率约 77.6%。工作面附近地表民房处最大倾斜值约 0.8 mm/m, 最大水平变形值 0.7 mm/m, 对地表村庄民房进行了有效保护, 在该层位注浆可满足地表减沉效果。

参考文献(References):

[1] 杨科, 何淑欣, 何祥, 等. 煤电化基地大宗固废“三化”协同利用基础与技术[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 69-82.
YANG Ke, HE Shuxin, HE Xiang, et al. Foundation and technology of coordinated utilization of bulk solid waste ‘Three modernizations’

- in coal power base[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(4): 69–82.
- [2] 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.
- [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] 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.
- [5] WANG J, MA J, YANG K M, et al. Effects and laws analysis for the mining technique of grouting into the overburden bedding separation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 288: 125121.
- [6] 杜金龙, 潘树仁, 刘长友, 等. 面向绿色矿山的注浆关键技术与工程示范[J]. *矿业科学学报*, 2023, 8(3): 293–307.
DU Jinlong, PAN Shuren, LIU Changyou, et al. Key grouting technology and engineering demonstration for green mines[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 8(3): 293–307.
- [7] KOU T H, MU W P, GAO Z X, et al. Evaluation of the impacts of mining overburden bed separation grouting on the groundwater environment: A case study from Northern China[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2024, 83(10): 393.
- [8] 许家林, 轩大洋, 朱卫兵, 等. 基于关键层控制的部分充填采煤技术[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2019, 1(2): 69–76.
XU Jialin, XUAN Dayang, ZHU Weibing, et al. Partial backfilling coal mining technology based on key strata control[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2019, 1(2): 69–76.
- [9] 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.
- [10] 鞠金峰, 许家林, 刘阳军, 等. 关键层运动监测及岩移 5 阶段规律: 以红庆河煤矿为例[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(2): 611–622.
JU Jinfeng, XU Jialin, LIU Yangjun, et al. Key strata movement monitoring during underground coal mining and its 5-stage movement law inversion: A case study in Hongqinghe Mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 611–622.
- [11] 蒋金泉, 王普, 武泉林, 等. 上覆高位岩层岩下离层空间的演化规律及其预测[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(10): 1769–1779.
JIANG Jinquan, WANG Pu, WU Quanlin, et al. Evolution laws and prediction of separated stratum space under overlying high-position magmatic rocks[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(10): 1769–1779.
- [12] 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 between mining overburden rock and surface subsidence and its application to estimate bed separation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(1): 74–82.
- [13] 马荷雯. 采动覆岩离层多层次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 & Exploration*, 2021, 49(3): 150–157.
- [14] LI Y X, MA J, YANG K M, et al. Isolated overburden grout injection technology mining and grouting parameters discussion and optimization[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2024, 83(8): 264.
- [15] 郭文兵, 吴东涛, 郭明杰, 等. “三软”厚煤层开采覆岩多层次离层注浆减沉技术及应用[J]. *煤炭科学技术*: 1–12.
GUO Wenbing, WU Dongtao, GUO Mingjie, et al. Multi-bed separation grouting in “three soft” thick coal seams mining and their application[J]. *Coal Science and Technology*, 1–12.
- [16] 孙建, 王连国, 赵光明. 神东特殊保水开采煤层条带充填覆岩隔水层稳定性判据[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(5): 957–968.
SUN Jian, WANG Lianguo, ZHAO Guangming. Stability criterion of overburden water-resistant strata supported by filling strip in Shendong special water-preserved mining area[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(5): 957–968.
- [17] 赵兵朝, 郭亚欣, 孙浩, 等. 基于主关键层位置的近浅埋煤层采动覆岩隔水层稳定性研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(4): 653–662.
ZHAO Bingchao, GUO Yaxin, SUN Hao, et al. Stability research on the water-resistant strata under mining in nearly shallow coal seam based on location of main key stratum[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(4): 653–662.
- [18] 张东升, 李文平, 来兴平, 等. 我国西北煤炭开采中的水资源保护基础理论研究进展[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(1): 36–43.
ZHANG Dongsheng, LI Wenping, LAI Xingping, et al. Development on basic theory of water protection during coal mining in northwest of China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 36–43.
- [19] 王泓博, 张勇, 庞义辉, 等. 基于地表点下沉阶段特征的覆岩裂隙带高度演化[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(1): 24–34.
WANG Hongbo, ZHANG Yong, PANG Yihui, et al. Evolution of the height of overburden fractured zone based on stage characteristics of surface subsidence[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(1): 24–34.
- [20] 杨伟强, 郭文兵, 赵高博, 等. 基于岩层挠曲变形的“竖三带”理论判别方法及工程应用[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(10): 42–50.
YANG Weiqiang, GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, et al. Theoretical judgement method of overburden “three-zone” based on rock strata deflection deformation and its engineering application[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(10): 42–50.
- [21] JI S T, HE H, KARLOVŠEK J. Application of superposition method to study the mechanical behaviour of overlying strata in longwall

- mining[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 146: 104874.
- [22] 黄丹, 余斌, 王云昌, 等. 煤下铝上行开采工艺控制覆岩均匀沉降研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2024, 41(1): 95-106.
HUANG Dan, YU Bin, WANG Yunchang, et al. Study on aluminum mining under coal and uniform settlement control technology of overlying rock[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2024, 41(1): 95-106.
- [23] 余伊河, 马立强, 张东升, 等. 长壁工作面采动覆岩层理开裂机理及侧向裂隙发育规律[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(S2): 527-541.
YU Yihe, MA Liqiang, ZHANG Dongsheng, et al. Mechanism of bedding cracking and development laws of lateral fracture in overlying strata induced by longwall mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(S2): 527-541.
- [24] 许家林, 秦伟, 陈晓军, 等. 采动覆岩卸荷膨胀累积效应的影响因素[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 115-127.
XU Jialin, QIN Wei, CHEN Xiaojun, et al. Influencing factors of accumulative effect of overburden strata expansion induced by stress relief[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 115-127.
- [25] ZHU W B, YU S C, XU J M. Influence of the elastic dilatation of mining-induced unloading rock mass on the development of bed separation[J]. *Energies*, 2018, 11(4): 785.
- [26] SALAMON M D G. Partial extraction to control surface subsidence due to coal mining[C]. The 32nd U. S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), 1991.
- [27] 滕浩. 覆岩隔离注浆充填压实区形成机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
TENG Hao. Formation Mechanism of Compacting Area in the Gob with Grouting into Overburden of Isolated Panels during Longwall Mining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [28] 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.
- [29] 许家林, 钱鸣高. 覆岩关键层位置的判别方法[J]. *中国矿业大学学报*, 2000, 29(5): 463-467.
XU Jialin, QIAN Minggao. Method to distinguish key strata in overburden[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2000, 29(5): 463-467.
- [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.
- [31] 许家林, 朱卫兵, 王晓振. 基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(5): 762-769.
XU Jialin, ZHU Weibing, WANG Xiaozhen. New method to predict the height of fractured water-conducting zone by location of key strata[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(5): 762-769.
- [32] 沈传波. 新义煤矿覆岩离层注浆充填开采技术研究[J]. *煤炭与化工*, 2022, 45(10): 31-33, 70.
SHEN Chuanbo. Research of grouting and filling mining of overburden separation in Xinyi Mine[J]. *Coal and Chemical Industry*, 2022, 45(10): 31-33, 70.
- [33] 郭广礼, 缪协兴, 张振南. 老采空区破裂岩体变形性质研究[J]. *科学技术与工程*, 2002, 2(5): 44-47.
GUO Guangli, MIAO Xiexing, ZHANG Zhennan. Research on ruptured rock mass deformation characteristics of longwall goafs[J]. *Science Technology and Engineering*, 2002, 2(5): 44-47.
- [34] 黄士芳译. 苏. B. B. 勒. Г. Я. 诺. 何. 高等学校教学参考书 岩石物理基础[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1989: 372.
- [35] 郭增长, 谢和平, 王金庄. 极不充分开采地表移动和变形预计的概率密度函数法[J]. *煤炭学报*, 2004, 29(2): 155-158.
GUO Zengzhang, XIE Heping, WANG Jinzhuang. Applying probability distribution density function to predict the surface subsidence caused by subcritical extraction[J]. *Journal of China Coal Society*, 2004, 29(2): 155-158.
- [36] 戴华阳, 王金庄. 非充分开采地表移动预计模型[J]. *煤炭学报*, 2003, 28(6): 583-587.
DAI Huayang, WANG Jinzhuang. Prediction model for surface movement and deformation induced by sub-critical extraction[J]. *Journal of China Coal Society*, 2003, 28(6): 583-587.
- [37] 王金帅. 新义煤矿大采深煤层开采地表移动规律研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2016.
WANG Jinshuai. Research on Movement Laws of Deep Mining in Xinyi Coal Mine[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2016.
- [38] 郭增长, 王金庄. 离层注浆减沉效果的评价方法及误差分析[J]. *中国矿业大学学报*, 2002, 31(4): 384-387.
GUO Zeng zhang, WANG Jinzhuang. Methods of estimating surface subsidence-reducing effect by separated-bed grouting and their precision[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2002, 31(4): 384-387.