

巷旁充填体性质对覆岩稳定性影响研究

Study on the Influence of Roadway-Side Backfill Properties on Overlying Strata Stability

吕健华(山东能源新矿集团内蒙能源长城三矿, 内蒙古 鄂尔多斯 016299)

摘要:为揭示沿空留巷巷旁充填体性质对覆岩稳定性的影响机制,本文采用理论分析与数值模拟相结合的方法,确定了影响覆岩稳定的关键参数,深入分析了关键参数对覆岩稳定性的作用规律。结果表明:巷旁充填体的压缩模量与支撑强度是控制沿空留巷过程中覆岩下沉的关键参数;巷旁充填体压缩模量与覆岩下沉量呈负相关,当压缩模量处于0.5~1.2 GPa时,压缩模量提升可有效抑制覆岩下沉,超过1.2 GPa后,模量增加对抑制覆岩下沉的效果减弱;巷旁充填体支撑强度与覆岩下沉量也呈负相关,当支撑强度处于0.5~2 GPa时,随支撑强度提高覆岩下沉量显著减小,超过2 GPa后,强度增加对覆岩下沉量的减小效果减弱。本文揭示了巷旁充填体压缩模量与支撑强度对覆岩下沉变化规律的影响,为维护沿空留巷覆岩稳定性提供理论依据。

关键词:巷旁充填体;沿空留巷;覆岩稳定性;压缩模量;支撑强度

中图分类号: TD322 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)06-0041-05

Abstract:To investigate the influence mechanism of gob-side filling body properties on overburden stability in gob-side entry retaining, this study combines physical modeling and numerical simulation to identify key parameters affecting overburden stability and analyzes their governing patterns. The results indicate that the compression modulus and supporting strength of the gob-side filling body are the dominant factors controlling overburden subsidence during gob-side entry retaining. Specifically, both parameters exhibit negative correlations with overburden subsidence; as the compression modulus increases within the 0.5 ~ 1.2 GPa range, subsidence decreases significantly, with optimal suppression achieved between 0.5 ~ 1.2 GPa before diminishing beyond 1.2 GPa; similarly, when supporting strength ranges from 0.5 ~ 2.0 GPa, higher strength markedly reduces subsidence, though this effect weakens beyond 2.0 GPa. This study clarifies the effects of the compression modulus and supporting strength of the gob-side filling body on the variation law of overburden subsidence, laying a theoretical foundation for maintaining overburden stability in gob-side entry retaining.

Key words: gob-side filling body; gob-side entry retaining; overburden stability; compression modulus; supporting strength

1 前言

随着我国浅部煤炭资源逐渐枯竭,深部及复杂条件矿井的开采比例持续攀升^[1],传统留巷技术面临覆岩变形失控、支护成本激增、资源损失严重等瓶颈。其核心问题在于巷旁支护体难以匹配深部高应力环境下的覆岩运动需求,易导致其发生结构性失稳,从而造成留巷围岩控制失效。因此,本文针对巷旁充填体的压缩模量与支撑强度这两个影响覆岩下沉的核心决定因素展开研究,探究了二者对覆岩稳定性的影响规律,其对维护覆岩稳定性具有参考价值。

针对沿空留巷控制顶板下沉及维护覆岩稳定性,学者们通过理论分析、数值模拟、现场试验等多

元方法,已开展一系列研究工作。例如,余小广^[2]就充填法对沿空留巷围岩稳定性进行研究,通过与垮落法对比,发现充填法能够有效控制覆岩运动、抑制巷道变形。金蒙^[3]研究了深井高应力环境下软底沿空巷道的变形现象,提出联合支护措施,减小了巷道顶底板变形量。司金帅^[4]等针对浅埋大断面复合顶板巷道围岩变形问题,应用顶板注浆、锚网索为主的优化支护技术方案,使围岩控制效果较好。冯晓民^[5]对沿空留巷巷道围岩变形问题进行研究,制定围岩注浆加固技术方案,实现了对围岩变形的有效控制,取得了良好的加固效果。李德阳^[6]等针对巷道围岩的流变突出问题,研究了深部巷道流变变形的控制机制,为深部巷道的稳定性控制提供了参考依据。郑文翔^[7]等对复合顶板巷道围岩失稳

[作者简介] 吕健华(1992—),男,山东泰安人,本科,工程师,研究方向为采矿工程及矿井设计。

[基金项目] 山东能源重大项目(SNZB-XKIT-D2024010322)

[引用格式] 吕健华. 巷旁充填体性质对覆岩稳定性影响研究[J]. 中国矿山工程,2025,54(6):41-45.

力问题进行研究,提出并使用“长锚杆+长锚索”优化支护方案,提高了软弱复合顶板巷道围岩稳定性。王军^[8]等对重复采动影响下沿空留巷巷道围岩的稳定性进行研究,采用补强支护+增加单元支架+合理控制回采速度的耦合控制技术,使围岩变形处于可控范围。史先影^[9]等对二次高强度开采沿空留巷围岩变形机理进行研究,提出巷道肩角斜拉锚索+“锚杆+锚索”补强支护方案,保证了沿空留巷巷道围岩稳定。张金龙^[10]对沿空留巷巷道顶板注浆加固技术进行研究,提出具有针对性的注浆加固技术,该技术能够有效抑制顶板下沉及维护沿空留巷围岩稳定。王炳方^[11]针对留设巷道采动影响环境下围岩稳定性较差的问题,采用巷旁充填技术,提高了沿空留巷围岩整体稳定性。贾乔楠^[12]针对切顶卸压沿空留巷围岩变形问题,采用切顶卸压沿空留巷围岩补强支护技术,提高了巷道围岩稳定性。杜兆文^[13]等对大倾角煤层覆岩分区特征及破断回转行为进行研究,得出大倾角煤层覆岩破断回转运动规律,为大倾角下沿空留巷围岩控制提供理论支撑。王飞^[14]等研究了厚直接顶作用下切顶深度对沿空留巷稳定性的影响,采用“补强支护+切顶卸压+巷旁支护+巷内临时支护”的支护方案,实现顶板下沉量减小。

以上研究成果围绕不同地质条件与开采环境下沿空留巷的顶板下沉控制、覆岩稳定性维护等方面开展了系统研究,并取得了丰富成果,但就沿空留巷巷旁充填体性质对覆岩稳定性研究较少。为补充相关研究,本文采用理论分析和数值模拟的方法研究了沿空留巷巷旁充填体性质对覆岩稳定性的影响机制。

2 沿空留巷覆岩力学模型

为明确沿空留巷覆岩变形的影响因素,基于材料力学和结构力学的基本原理,建立了沿空留巷覆岩力学模型,将部分沿空留巷覆岩简化为弹性基础梁模型。该模型能够充分考虑巷旁充填区的变形问题,当覆岩对充填区施加载荷时,充填区会产生下沉;巷旁充填体对覆岩施加支撑作用力,约束覆岩变形。为确保力学模型变形连续条件,在充填区域变形过程中,要求覆岩变形与巷旁充填体下沉同步,沿空留巷覆岩力学模型如图1所示。

在该模型中,巷旁充填体对采空区上覆岩层起有效支撑,使基本顶保持完整不破断。随着工作面推进,巷旁充填体逐渐凝固并与围岩共同形成稳定

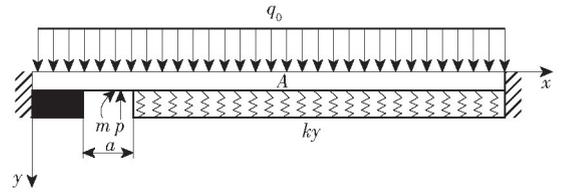


图1 沿空留巷覆岩力学模型

结构。将处于稳定状态后的岩层作为分析对象,其左侧边界为固定支撑,右侧充填区域依据文克勒弹性地基理论简化为梁模型^[15]。充填区右端设为固定约束,巷道宽度记为 a ,上覆岩层对关键层施加均布载荷 q_0 。充填体区域被理想化为弹性地基,由一系列互不影响的弹簧组成,任一点处地基反力 σ 与该点挠度 y 满足 $\sigma = ky$ 的关系,其中 k 为地基系数。覆岩右侧除实体煤提供支撑外,充填区支撑力为 ky ,将巷道右侧充填区域视为 Winkler 弹性地基上的梁结构,并定义该侧边界剪力为 p 、弯矩为 m 。根据 Winkler 弹性地基梁理论,对沿空留巷顶板力学模型进行分析。充填体上方关键梁 A 承受上覆岩层均布载荷 q_0 的作用,其挠度控制微分方程为:

$$\frac{d^4 y(x)}{dx^4} + 4\beta^4 y(x) = q_0 \quad (1)$$

式中: $y(x)$ 为位移函数; β 为特征系数。

基本微分方程的解为:

$$y(x) = e^{\beta x} (A \cos \beta x + B \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C \cos \beta x + D \sin \beta x) + \frac{q_0}{k} \quad (2)$$

边界条件:右侧为半无限长自由边界;左侧为弯矩 m 和集中力 p 共同影响。

$$\begin{cases} M|_{x=a} = -EI \frac{d^2 y}{dx^2} \Big|_{x=a} = m \\ Q|_{x=a} = -EI \frac{d^3 y}{dx^3} \Big|_{x=a} = p \end{cases} \quad (3)$$

当 $x \rightarrow \infty$ 时, $y \rightarrow \frac{q_0}{k}$, 由于 $e^{\beta x} \rightarrow \infty$, $e^{-\beta x} \rightarrow 0$, 所以可得: $A = B = 0$

则式(2)可简化为:

$$y(x) = e^{-\beta x} (C \cos \beta x + D \sin \beta x) + \frac{q_0}{k} \quad (4)$$

将左侧边界条件代入式(3),解得:

$$\begin{cases} C = -\frac{(\beta m + p)}{2EIB^3} \\ D = \frac{m}{2EIB^3} \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)得到挠度方程:

$$y(x) = e^{-\beta x} \left(-\frac{(\beta m + p)}{2EIB^3} \cos \beta x + \frac{m}{2EIB^3} \sin \beta x \right) + \frac{q_0}{k} \quad (6)$$

将巷道宽度值 $x = a$ 代入式(6),即可计算出巷道右侧覆岩梁的挠度与转角:

$$y(A) = e^{-\alpha\beta} \left(-\frac{(\beta m + p)}{2EIB^3} \cos \alpha\beta + \frac{m}{2EIB^3} \sin \alpha\beta \right) + \frac{q_0}{k} \quad (7)$$

$$\theta(A) = -\beta e^{-\alpha\beta} \left(-\frac{(\beta m + p)}{2EIB^3} \cos \alpha\beta + \frac{m}{2EIB^3} \sin \alpha\beta \right) + e^{-\alpha\beta} \left(\frac{(\beta m + p)}{2EIB^3} \cos \beta x + \frac{m}{2EIB^3} \sin \beta x \right) \quad (8)$$

式中: $y(A)$ 为梁的挠度; $\theta(A)$ 为梁的转角; E 为梁的弹性模量; I 为梁的截面惯性矩; B 为梁的特征尺寸; α 为梁的阻尼系数; k 为与外载荷相关的等效刚度系数。

基于弹性地基梁理论,结合梁的挠度与转角公式,推导出巷旁充填体压缩模量、充填体高度、巷旁充填体支撑强度、巷道断面尺寸、覆岩性质、弹性模量及上覆岩层载荷等参数与覆岩变形的关系。巷旁充填体压缩模量通过自身变形阻力对覆岩变形起约束效果,模量越大约束作用越强;充填体高度决定其与顶板岩层的接触支撑范围及力的传递路径,高度变化会改变竖向支撑效应;巷旁充填体支撑强度直接关联抵抗覆岩压力、维持结构稳定以限制覆岩位移的能力,强度不足易引发覆岩的过量下沉;巷道断面尺寸影响围岩应力分布状态,不同断面形式与大小会重塑覆岩受力格局,进而改变覆岩的下沉特征;覆岩性质(如岩性、分层结构等)决定上覆岩层自身变形本构与承载特性,软硬岩层组合差异会使下沉响应截然不同;覆岩弹性模量反映岩层抗变形能力,弹性模量越高岩层越不易变形,对下沉的抑制作用更显著;上覆岩层载荷作为覆岩下沉的驱动力来源,其大小与分布直接决定覆岩系统总应力水平,从根本上影响下沉量。这些参数从材料力学性能、几何形态、荷载条件等影响着沿空留巷充填工作面覆岩的下沉规律与变形特征。

从参数调控的角度来看,充填体高度需根据巷

旁支护需求、覆岩压力及留巷工艺要求综合确定,以满足稳定性要求;巷道断面尺寸则须满足通风、运输及设备布置等生产功能,二者均由工程实际需求主导,可调整范围相对有限;覆岩岩性、岩层弹性模量以及上覆岩层载荷等关键参数,则主要受到地质条件的天然制约,工程实施难以通过人为手段进行大幅改变,也属不可控因素。因此,巷旁充填体的压缩模量和支撑强度成为抑制沿空留巷覆岩下沉的主要可控参数。为研究巷旁充填体的压缩模量和支撑强度对覆岩下沉的影响规律,本文采用数值模拟的方法,对其作用机制进行分析。

3 沿空留巷覆岩下沉关键参数分析

3.1 数值模拟方案

本研究旨在揭示巷旁充填体压缩模量及支撑强度对覆岩下沉影响的内在规律,依据实际工程概况,运用FLAC3D软件进行模拟。模型尺寸设计长×宽×高为200 m×100 m×63 m,工作面顶板埋深为204 m,巷道断面为矩形断面,断面尺寸宽×高为4 m×3.8 m,具体如图2所示。本次计算采用Mohr-Coulomb塑性本构模型,将岩体、煤体与充填区域统一简化为均匀连续、各向同性的介质进行模拟分析。通过控制变量法,研究巷旁充填体的压缩模量和支撑强度的变化对覆岩最大下沉量的影响规律,得到了巷旁充填体的压缩模量和支撑强度与覆岩下沉量的关系。煤岩层物理力学参数见表1。

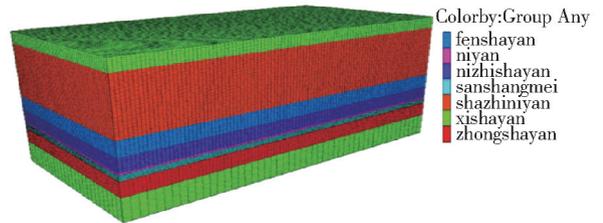


图2 沿空留巷充填工作面模型

3.2 巷旁充填体压缩模量和支撑强度对沿空留巷覆岩的影响

基于数值模拟得到沿空留巷巷旁充填体的压缩模量与覆岩下沉量数据,做出了巷旁充填体压缩模量与覆岩下沉量的拟合曲线,具体如图3所示,其拟合公式见式(9)。

$$S = 193.46 - 252.74E_s + 91.41E_s^2 \quad (9)$$

式中: S 为覆岩下沉量; E_s 为巷旁充填体压缩模量。

由图3所示,巷旁充填体的压缩模量与覆岩最大下沉量之间呈现负相关关系。巷旁充填体压缩模

表1 煤岩层物理力学参数

岩层名称	岩层厚度/m	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	抗拉强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	密度/kg·m ⁻³
细砂岩	8.2	8.5	6.8	4	7	32	2700
砂质泥岩	10.5	0.46	0.24	1.6	2.8	25	2450
粉砂岩	0.8	4.8	3.7	2	4	30	2800
泥质砂岩	9.3	2.6	1.5	2	3	28	2680
泥岩	5.7	0.24	0.16	1.2	1.1	30	2650
煤	4	0.16	0.09	0.9	0.8	29	1550
中砂岩	10.5	7.7	6.5	4	7	31	2750
细砂岩	14	8.3	6.5	4	7	32	2700

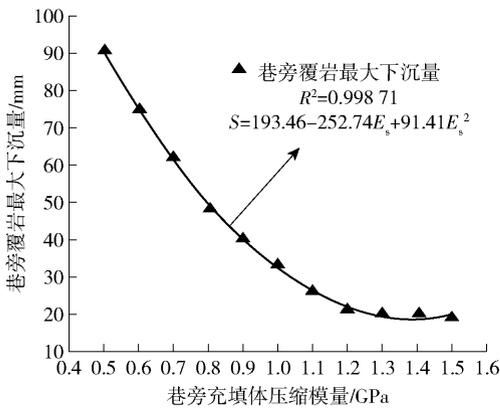


图3 压缩模量对覆岩下沉量影响的拟合曲线

量的提高能够有效限制沿空留巷覆岩变形:随着巷旁充填体压缩模量的增大,巷旁充填体抵抗竖向变形的能力显著增强,能够有效地抑制覆岩的挠曲变形,使覆岩整体下沉量呈现出逐渐减小的变化趋势。通过对巷旁充填体的压缩模量与覆岩最大下沉量的数据值进行拟合,发现其收敛于 Polynomial 函数,且相关系数 R^2 为 0.998。基于该模型,在已知巷旁充填体压缩模量时,可求出对应覆岩下沉量,为留巷工程的变形控制提供一定参考价值。

具体而言,当压缩模量处于 0.5 ~ 1.2 GPa 时,压缩模量提升可有效降低覆岩下沉量。此阶段,巷旁充填体与覆岩通过应力传递与变形协调形成高效的协同承载结构:一方面,巷旁充填体凭借适中的刚度有效承担上覆岩层传递的集中应力,通过自身弹性压缩变形分散应力峰值,减缓顶板结构的弯曲变形;另一方面,巷旁充填体与围岩界面产生良好的摩擦-咬合作用,界面变形协调充分,二者共同构成整体承载体系,使得顶板下沉量呈现非线性的大幅度减少。当压缩模量超过 1.2 GPa 后,由于充填体刚度显著高于围岩,其与围岩的变形协调性急剧降低,

界面易出现脱空或局部应力集中现象。此时,充填体对覆岩变形的约束作用逐渐趋于饱和,尽管模量继续增加,但对顶板下沉量的抑制效率明显放缓,抑制效果趋于平缓。

通过拟合巷旁充填体支撑强度与覆岩下沉量的数据,得到了巷旁充填体支撑强度与覆岩下沉量的拟合曲线,具体如图 4 所示,其拟合公式见式(10)。

$$S = 49.57 - 9.67\sigma_s + 1.52\sigma_s^2 \quad (10)$$

式中: S 为覆岩下沉量; σ_s 为巷旁充填体支撑强度。

根据图 4 所示,巷旁充填体的支撑强度与覆岩最大下沉量之间呈现显著的负相关关系:当支撑强度处于 0.5 ~ 2.0 GPa 时,支撑强度增加对抑制覆岩下沉的效果明显,下沉量减少幅度可达 30% ~ 40%。这本质上是因为充填体支撑强度的提高能够改善其承接巷道周边上覆岩层传递的垂直荷载与侧向应力的能力,从而降低覆岩的弯曲变形与破坏风险。当强度超过 2.0 GPa 时,巷旁充填体的作用呈现差异性,一方面能抑制围岩塑性区的进一步扩展,增强围岩的整体稳定性,减缓因采动影响导致的岩层断裂、离层与下沉现象。另一方面却面临脆性破坏风险,易导致张拉裂纹发育,进而大幅削弱其对覆

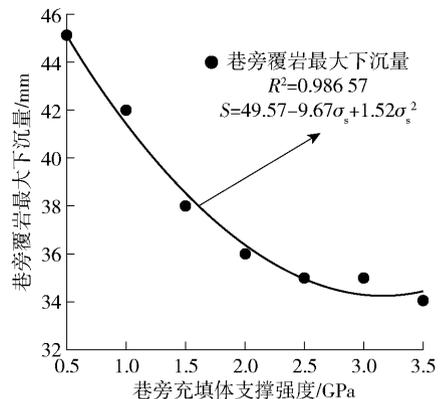


图4 支撑强度对覆岩下沉量影响的拟合曲线

岩变形的抑制能力,说明该强度阶段充填体控制覆岩变形的效果存在局限性。通过对巷旁充填体支撑强度与覆岩最大下沉量的数据进行拟合分析,发现其符合 Polynomial 函数关系,拟合系数 R^2 为 0.986。基于该模型,可通过巷旁充填体支撑强度,定量计算覆岩最大下沉量,为沿空留巷工程的变形控制提供一定参考依据。

因此,通过优化充填材料的压缩模量可有效控制巷旁覆岩下沉,其“前陡后缓”的压缩模量下沉量曲线表明低模量区间存在高效控制区间,而支护强度需根据巷道条件精准匹配工程需求,二者协同优化既能通过压缩模量高效抑制变形,又能通过强度分级设计平衡安全与经济性,避免过度投入或强度不足引发的覆岩失稳风险,为保障沿空留巷过程中上覆岩层的结构稳定提供理论支撑。

4 结论

为探究沿空留巷覆岩稳定性的影响机制,本文通过理论分析和数值模拟的方法研究了沿空留巷巷旁充填体性质对覆岩稳定性的影响,结论如下。

(1) 巷旁充填体的压缩模量与支撑强度是控制沿空留巷覆岩稳定的关键参数。

(2) 巷旁充填体压缩模量与覆岩下沉量呈负相关关系:当压缩模量处于 0.5 ~ 1.2 GPa 时,压缩模量提升对抑制覆岩下沉具有显著效果,覆岩下沉量随压缩模量增加呈明显减小趋势;当压缩模量超过 1.2 GPa 后,压缩模量进一步增加对抑制覆岩下沉的效果减弱。

(3) 巷旁充填体支撑强度与覆岩下沉量也呈负相关关系。当支撑强度处于 0.5 ~ 2.0 GPa 时,其提升可显著抑制覆岩下沉,且下沉量随支撑强度增加呈快速减小趋势;当支撑强度超过 2.0 GPa 后,继续增加支撑强度对覆岩下沉量的抑制效果逐渐减弱。

[参考文献]

- [1] 王克. 恒源煤矿系统巷道水力压裂切顶卸压效果研究[J]. 科学技术创新, 2025(10): 225-228.
- [2] 余小广, 徐常涛, 王襄禹, 等. 充填工作面沿空留巷围岩稳定性及应用研究[J]. 煤炭技术, 2025, 44(10): 91-97.
- [3] 金蒙. 深井软底沿空留巷围岩变形及控制研究[J]. 晋控科学技术, 2025(4): 21-24.
- [4] 司金帅, 惠张宾, 王琪. 复合顶板浅埋大断面巷道围岩支护优化[J]. 中国矿山工程, 2025, 54(4): 63-68.
- [5] 冯晓民. 沿空留巷巷道围岩注浆加固技术研究[J]. 能源与节能, 2025(9): 185-187+215.
- [6] 李德阳, 李鹏飞, 李亮. 深部劣化围岩巷道蠕变大变形控制机理研究[J]. 中国矿山工程, 2025, 54(2): 20-25+30.
- [7] 郑文翔, 褚占福, 郭帅, 等. 复合顶板巷道围岩控制技术研究[J]. 煤炭技术, 2025, 44(9): 1-7.
- [8] 王军, 严超超. 区段煤柱回收对沿空留巷围岩失稳影响与控制技术研究[J]. 煤炭工程, 2024, 56(11): 38-45.
- [9] 史先影, 田志诚. 二次高强度开采沿空留巷围岩变形机理研究[J]. 中国矿业, 2025, 34(5): 187-197.
- [10] 张金龙. 沿空留巷巷道顶板注浆加固技术研究[J]. 能源与节能, 2025(7): 155-157.
- [11] 王炳方. 综采工作面沿空留巷巷旁充填技术工艺实践研究[J]. 建井技术, 2025, 46(2): 27-32.
- [12] 贾乔楠. 沿空留巷围岩受力变形特征及其支护优化设计[J]. 石化技术, 2025, 32(1): 395-396.
- [13] 杜兆文, 温卓越, 潘昌文, 等. 大倾角煤层覆岩分区特征及破断回转行为研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(5): 1271-1285.
- [14] 王飞, 王绪强, 石新禹, 等. 厚直接顶作用下切顶深度对沿空留巷稳定性影响分析[J]. 工矿自动化, 2024, 50(12): 59-66.
- [15] 孙炳书, 刘明文. 关于弹性地基梁模型与计算方法[J]. 工业建筑, 2014, 44(S1): 818-820.