



基于顶板结构断裂特征的煤矿结构充填关键位置确定方法

冯国瑞 郭伟 李竹 戚庭野 崔家庆 崔业凯 张志城 蔡文浩

引用本文:

冯国瑞, 郭伟, 李竹, 等. 基于顶板结构断裂特征的煤矿结构充填关键位置确定方法[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 38–49.
FENG Guorui, GUO Wei, LI Zhu. Method determination on key position of coal mine constructional backfill based on fracture characteristics of roof structure[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 38–49.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1747>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

无巷旁充填支护沿空留巷顶板断裂位置研究

Study on roof breaking location of gateway retained along goaf with no gateway sidewall backfilling and support
煤炭科学技术. 2019(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/fbbe4d28-4bd4-4e00-b850-429ec554aaa3>

采空区煤矸石浆体充填技术研究进展与展望

Research progress and prospect of coal gangue slurry backfilling technology in goaf
煤炭科学技术. 2023, 51(2): 143–154 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1725>

高水材料充填沿空留巷应力控制与围岩强化机理及应用

Stress control and surrounding rock strengthening mechanism of gob-side entry retaining with high-water content material filling and its application
煤炭科学技术. 2022, 50(6): 16–28 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b9409a9e-32ce-4948-b6df-661111d622d2>

红土膏体充填材料及其物理特性试验研究

Experimental study on red clay paste backfilling material and its physical characteristics
煤炭科学技术. 2021, 49(2): 61–68 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.008>

水泥粉煤灰基矸石胶结充填体破坏特征及强度形成机制

Failure characteristics and strength formation mechanism of cement-fly ash based cemented gangue backfill
煤炭科学技术. 2024, 52(5): 36–45 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0794>

煤矿充填固碳理论基础与技术构想

Theoretical basis and technical conception of backfill carbon fixation in coal mine
煤炭科学技术. 2024, 52(2): 292–308 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1485>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

冯国瑞, 郭伟, 李竹, 等. 基于顶板结构断裂特征的煤矿结构充填关键位置确定方法[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 38-49.

FENG Guorui, GUO Wei, LI Zhu, *et al.* Method determination on key position of coal mine constructional backfill based on fracture characteristics of roof structure[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 38-49.

基于顶板结构断裂特征的煤矿结构充填关键位置确定方法

冯国瑞^{1,2,3,4}, 郭伟^{1,2,3}, 李竹^{1,2,3}, 戚庭野^{1,2,3,4}, 崔家庆^{1,2,3}, 崔业凯^{1,2,3}, 张志城^{1,2,3}, 蔡文浩^{1,2,3}

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 矿山岩层控制及灾害防控山西省重点实验室, 山西 太原 030024; 3. 山西省煤基资源绿色高效开发工程中心, 山西 太原 030024; 4. 山西浙大新材料与化工研究院, 山西 太原 030024)

摘要: 充填开采是控制岩层移动并降低地表沉降与环境损害的重要途径, 而充填材料来源不足和充填成本高昂现成为制约井工煤矿充填开采推广应用的主要瓶颈。探寻重点区域的低充填率靶向充填新方法及配套技术是充填开采的研究热点之一。为解决上述问题, 结合煤矿井下结构充填的学术思想, 深入研究了顶板岩层断裂特征, 明确了顶板岩层破断块体尺寸及铰接形态, 识别了破断铰接块体主沉降区域, 判定出结构充填的关键位置。结合关键位置确定方法, 提出重点控制基本顶最大挠度位置, 即板结构潜在张拉断裂位置(塑性铰发育位置)的“工字型”结构充填新方法。结合新阳矿岩层地质参数, 借助 FLAC^{3D} 数值模拟软件, 深入分析了工作面采宽和推进方向上顶板岩层内应力、竖直沉降、塑性区分布规律, 揭示了不同方案下充填体稳定性演变特征。结果表明: “工字型”充填在节省充填用量的基础上, 较垮落式开采减少初采期直接顶沉降量 33.47%, 与全部充填仅相差 2.3%。同时, 关键位置充填体能有效应对顶板回转下沉引起的应力集中, 保持自身稳定性, 实现对顶板的长效支撑。综合分析得到了新阳矿首采工作面初采期“工字型”结构充填最佳充填方案为中部条带长度 72 m, 宽度 7 m, 两侧条带长度 18 m, 宽度 6 m, 较全部充填可减少充填材料成本 33.86 万元。该方案形成的密闭空间为 1 980 m³, 占总采出空间的 44%, 可用来储能或碳封存, 助力实现零碳绿色开采, 推动双碳目标的实现。

关键词: 关键充填位置; 塑性铰; “工字型”结构充填; 充填体应力调配; 分区沉降特征

中图分类号: TD823.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2024)04-0038-12

Method determination on key position of coal mine constructional backfill based on fracture characteristics of roof structure

FENG Guorui^{1,2,3,4}, GUO Wei^{1,2,3}, LI Zhu^{1,2,3}, QI Tingye^{1,2,3,4}, CUI Jiaqing^{1,2,3}, CUI Yekai^{1,2,3}, ZHANG Zhicheng^{1,2,3}, CAI Wenhao^{1,2,3}

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Key Laboratory of Shanxi Province for Mine Rock Strata Control and Disaster Prevention, Taiyuan 030024, China; 3. Shanxi Coal-based Resources Green-efficient Mining Engineering Research Center, Taiyuan 030024, China; 4. Shanxi-Zheda Institute of Advanced Materials and Chemical Engineering, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Backfilling mining is important for controlling strata movement and reducing surface subsidence and environmental damage. Insufficient sources of raw materials and high backfilling costs have become major bottlenecks, limiting the application of backfill mining in underground coal mines. Exploring new methods and supporting technologies of targeted backfill with low backfilling rate in key areas is one of the research hotspots in backfilling mining. To solve these problems, combined with the academic thought of constructional backfill in underground coal mines, an in-depth study of the fracture characteristics of roof strata is conducted, the hinged shape and size of broken blocks in the roof strata are clarified, the main subsidence area and position of broken hinged blocks are identified, and the key pos-

收稿日期: 2023-11-12 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.12438/cst.2023-1747

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(52334005); 国家杰出青年科学基金资助项目(51925402); 新基石科学基金会所设立的科学探索奖

作者简介: 冯国瑞(1976—), 男, 山西阳城人, 教授, 博士生导师, 博士。Tel: 0351-6010177, E-mail: fguorui@163.com

通讯作者: 李竹(1989—), 男, 山西长治人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: lizhu01@tyut.edu.cn

ition of the constructional backfill is determined accordingly. Through the key position determination method, an “I-shaped” constructional backfill new scheme that focuses on controlling the maximum deflection position of the main roof, *i.e.*, the potential tensile fracture position (plastic hinge development position) of the plate structure, is proposed. Combined with the geological parameters of the rock strata of Xinyang Mine, FLAC^{3D} numerical simulation software was used to analyze the stress, vertical subsidence, plastic zone distribution of the roof in the direction of mining width and advancing direction of the working face, and the stability evolution characteristics of backfilling body under different schemes are revealed. The results show that the “I-shaped” backfill can reduce the immediate roof subsidence in the initial mining period by 33.47% compared with the caving mining on the basis of saving the backfilling amount, and there is only a difference of 2.3% with the full backfill. At the same time, the backfilling body at the key position can effectively response the stress concentration caused by the rotation and subsidence of the roof, maintain its stability, and realize the long-term support for the roof. After comprehensive analysis, the best backfilling scheme for the “I-shaped” constructional backfill in the first coal face of Xinyang Mine is 72 m in length and 7 m in width in the middle strip, and 18 m in length and 6 m in width in the two side strips. Compared with full backfill, the cost of backfilling materials can be reduced by 0.338 6 million yuan. The scheme creates a confined space of 1 980 m³, or 44% of the total mining space, which can be used for CO₂ or carbonized material sequestration, helping to achieve zero-carbon green mining and promote dual-carbon goals.

Key words: key backfilling positions; plastic hinge; “i-shaped” constructional backfill; backfilling body stress distribution; partition subsidence characteristics

0 引 言

充填开采是有效遏制采动覆岩失稳破坏、减少矿区地表环境损害、涵养土壤及水体资源、保持人居环境与采矿经济协同并进的重要手段^[1-3]。国内外众多学者围绕充填开采进行了大量研究,并取得了丰硕的研究成果。ADACH-PAWELUS K等^[4]通过研究水力回填进而改善采矿区域的地质力学状况,并降低采空区围岩的岩爆风险。PARISEAU WG等^[5]通过现场调查证明了水力回填能有效控制地表沉降,并对其适用范围及优劣进行探讨。张吉雄等^[6-7]针对固体充填技术,提出了基于等价采高理论的地表沉陷预测概率积分模型,阐述了地表沉陷控制的基本原理。MOHAMMED HEFNI等^[8]将铜矿废料制成不同成分的水泥浆回填样品,用于重新注入地下采矿洞穴,以最大限度地减少堆积废料对环境的污染。围绕地下煤炭资源采出空间的全部充填开采取得了长足发展,极大促进了开采沉陷控制与固废材料的双效发展^[9-10]。在充填材料短缺且已严重制约充填开采推广的局面下,减小充填量、降低充填成本且实现顶板岩层有效控制的部分充填开采技术应运而生并得到快速发展与广泛应用^[11]。许家林等^[12-13]在传统离层注浆技术的基础上创造性地提出覆岩隔离注浆充填,利用采动覆岩注浆形成的压实区与隔离煤柱联合控制关键层结构的稳定性,揭示了注浆充填体“上托下压”式岩层沉陷控制的力学本质。戴华阳等^[14]针对条带开采采出率较低、全采全充成本较高的问题,提出了一种“采-充-留”相结合的部分开采、部分充填、部分煤柱的协调开采方法。张新国

等^[15]提出了短壁部分充填工作面设计方法及跳采、间隔充填的程序及工艺。朱梦博等^[16]为回采隔离煤柱增大采出率,将隔离煤柱视为短壁工作面并提出了两短壁工作面夹一长壁工作面的条带充填开采方法。朱卫兵等^[17]提出控制地表沉降的墩柱式回填采矿技术并给出了墩柱尺寸设计方案。杜献杰等^[18]利用数值模拟得到新阳矿最佳墩柱充填方案。白锦文等^[19],李竹等^[20-21]采用采空区灌浆充填技术对房柱式采空区进行了靶向充填,充填体与遗留煤柱形成协同承载体,实现了采场岩层移动的有效控制。邱华富等^[21]提出采矿-充填-建库(MBS)协同系统的理念,通过结构设计,充填材料控制,以局部充填理念为指导,实现充填、建库的协同。

然而目前井下部分充填开采技术中,充填体布设位置多依靠经验方法,普遍采用了等间距布置的方式,该方式未能深入考虑顶板岩层破裂及破断特征,也未考虑顶板岩层破裂及破断结构对充填体布置位置选择的关联特征,一定程度上造成了充填用量大及充填成本高的局面^[22]。事实上,部分充填开采中充填体的布设位置应遵照顶板岩层的破断特征,针对顶板岩层破断块体或塑性铰接块体沉降量大的位置及区域进行靶向强力充填支撑,如此方能更为精准地控制部分充填工作面的顶板下沉,同时在充填体所形成的密闭空间进行储能,这正是冯国瑞等^[23]提出的“结构充填”学术思想的进一步深化与具象。

基于此,对顶板岩层断裂特征进行深入研究,明确顶板岩层板结构潜在破断铰接形态,识别破断铰接块体主沉降区域及位置,据此判定结构充填的关

键位置,并提出了一种重点控制基本顶最大挠度位置即板结构潜在拉伸断裂位置的“工字型”结构充填方案。通过数值模拟,结合新阳矿岩层地质参数,探究了不同充填方案下,顶板与充填体受力、变形以及塑性区的演化特征,从而得到新阳矿“工字型”结构充填的最佳方案,以期在现场工程充填方案设计提供理论依据及参考。

1 工作面基本顶破断块体尺寸分析

将基本顶简化为矩形薄板。基本顶薄板的力学假设:在基本顶下沉与离层过程中层与层间的摩擦力很小,可把基本顶视为弹性薄板或矩形板,同时基本顶的厚度与短边之比(一般情况下工作面长度小于工作面推进长度视为短边) $(1/100 \sim 1/80) < h/b < (1/8 \sim 1/5)$,符合薄板的高宽比,因此将基本顶视为矩形薄板符合工程实际^[24-25]。

1.1 首采工作面模型

随着工作面的推进,基本顶在固定的上覆岩层载荷下暴露尺寸不断扩大,达到塑性极限状态,由虚功原理与塑性铰相关理论确定铰线分布位置与基本顶暴露尺寸,产生的塑性铰线具体表现为“X”形破断裂隙。模型如图1所示:BA方向为工作面推进方向,BD方向为工作面采宽方向。基本顶的塑性极限状态如图2所示。

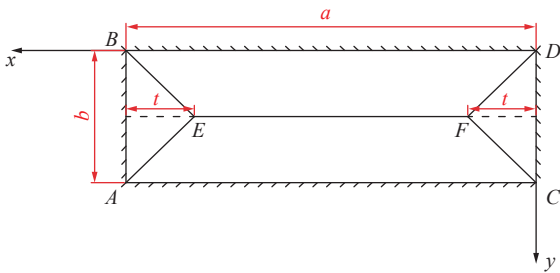


图1 四边固支基本顶力学模型

Fig.1 Mechanical model of four edges clamped main roof

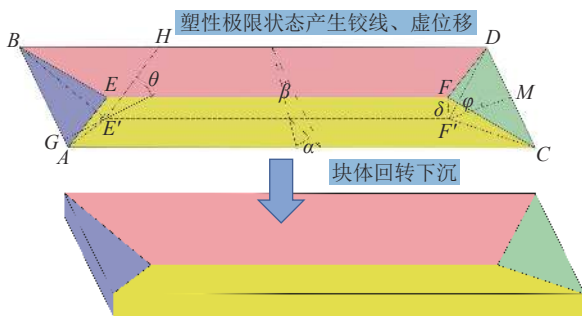


图2 四边固支基本顶塑性极限状态及破断铰接示意

Fig.2 Schematic diagram of plastic limit state and fracture hinge of four edges clamped main roof

基本顶达到塑性极限状态时外力做的虚功 W 为

$$W = qV \tag{1}$$

其中, V 为破坏机构发生虚位移式的体积; q 为上覆载荷。

虚位移式体积为

$$V = w(x,y)dxdy = \frac{ab\delta}{2} - \frac{bt\delta}{3} \tag{2}$$

式中: δ 为基本顶的挠度; a 为工作面采宽; b 为基本顶初次垮落步距; t 为三角形破断块体高长; $w(x,y)$ 为虚位移。

外力虚功为

$$W = \left(\frac{ab\delta}{2} - \frac{bt\delta}{3} \right) q \tag{3}$$

内力总虚耗散能为塑性铰线处的极限弯矩对相对转角所做的功为

$$T = \sum_{i=1}^k \int_l M_p \varphi ds \tag{4}$$

式中: k 为塑性铰线条数; l 为塑性铰线长度; φ 为相对转角; M_p 为塑性铰线单位长度极限弯矩。

塑性铰线 EF 的相对转角

$$\alpha = \frac{4\delta}{b} \tag{5}$$

塑性铰线 AE 、 BE 、 CF 、 DF 的相对转角

$$\theta = \frac{\delta}{bt} \sqrt{4\delta^2 + b^2 + 4t^2} \tag{6}$$

塑性铰线 AB 、 CD 的相对转角

$$\Phi = \frac{\delta}{t} \tag{7}$$

塑性铰线 AC 、 BD 的相对转角

$$\beta = \frac{2\delta}{b} \tag{8}$$

塑性铰线长度为

$$l_{AB} = l_{CD} = b$$

$$l_{AC} = l_{BD} = a$$

$$l_{AE} = l_{CF} = l_{BE} = l_{DF} = \sqrt{\frac{b^2}{4} + t^2}$$

$$l_{EF} = a - 2t \tag{9}$$

将式(5)~式(9)代入式(4)得

$$T = 4\delta M_p \left[\sqrt{\frac{4\delta^2 + b^2}{4t^2} + \frac{4(t^2 + \delta^2)}{b^2}} + 2 + \frac{2(a-t)}{b} + \frac{b}{2t} \right] \tag{10}$$

联立式(1)、式(2)和式(6)并结合虚位移的无穷小性,板挠度无限接近0得到

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} q = \frac{24(b^2 + 2at)M_p}{bt(3ab - 2bt)} \quad (11)$$

基本顶均厚为 h , $M_p = \sigma_s h^2 / 6$, σ_s 为基本顶的抗拉强度, 代入得到

$$b = \frac{2\sqrt{2}h\sqrt{(3aqt - 4\sigma_s h^2 - 2qt^2)at\sigma_s}}{3aqt - 4\sigma_s h^2 - 2qt^2} \quad (12)$$

t 由 b 取最小求得, 即

$$\frac{db}{dt} = 0 \Rightarrow t = \frac{\sqrt{2}\sqrt{q\sigma_s}h}{q} \quad (13)$$

将式 (13) 代入 (12) 整理得到首采工作面初次垮落步距计算公式

$$b = \frac{4h\sigma_s\sqrt{3a^2q - 4ah\sqrt{2q\sigma_s}}}{3aq\sqrt{2\sigma_s} - 8h\sigma_s\sqrt{q}} \quad (14)$$

1.2 邻空工作面模型

建立一侧采空工作面 (三边实体煤约束, 一边煤柱约束, 三边固支, 一边简支) 基本顶的力学模型 (图 3)。

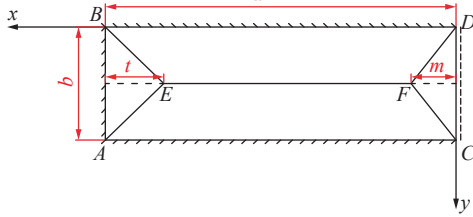


图3 三边固支一边简支基本顶力学模型

Fig.3 Mechanical model of main roof with three edges clamped and one edge simple supported

三固一支基本顶塑性极限状态 (图 4) 下虚位移式体积为

$$V = w(x, y)dxdy = \frac{(3a - t - m)b\delta}{6} \quad (15)$$

代入式 (1) 得到外力功

$$W = (3a - t - m)\frac{b\delta q}{6} \quad (16)$$

塑性铰线 CF 、 DF 的相对转角

$$\theta_1 = \tan \theta_1 = \frac{\delta}{bm} \sqrt{4\delta^2 + b^2 + 4m^2} \quad (17)$$

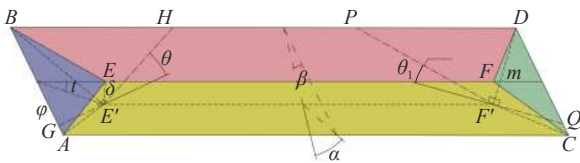


图4 三固一支基本顶塑性极限状态示意图

Fig.4 Schematic diagram of plastic limit state of main roof with three edges clamped and one edge simple supported

塑性铰线长度为

$$l_{CF} = l_{DF} = \sqrt{\frac{b^2}{4} + m^2} \quad (18)$$

$$l_{EF} = a - t - m \quad (19)$$

进而得到内力虚功:

$$T = 4\delta M_p \left[\frac{\sqrt{\frac{4\delta^2 + b^2}{4t^2} + \frac{4(t^2 + \delta^2)}{b^2}} + 2}{2} + \frac{\sqrt{\frac{4\delta^2 + b^2}{4m^2} + \frac{4(m^2 + \delta^2)}{b^2}} + 2}{2} + \frac{2a - m - t}{b} + \frac{b}{4t} \right] \quad (20)$$

联立式 (16)、式 (20) 取极限化简得到

$$b = \frac{2\sqrt{2}\sqrt{(3amqt - m^2qt - mqt^2 - 2m\sigma_s h^2 - \sigma_s h^2 t)am\sigma_s h^2 t}}{3amqt - m^2qt - mqt^2 - 2m\sigma_s h^2 - \sigma_s h^2 t} \quad (21)$$

t 、 m 由 b 取最小求得, 即

$$\begin{cases} \frac{\partial b}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial b}{\partial m} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} t = \sqrt{2}h\sqrt{\frac{\sigma_s}{q}} \\ m = h\sqrt{\frac{\sigma_s}{q}} \end{cases} \quad (22)$$

将式 (22) 代入式 (21) 得到邻空工作面基本顶初次垮落步距计算公式

$$b = \frac{4h\sqrt{3a^2q\sigma_s - 2ah\sqrt{q\sigma_s}^3(\sqrt{2} + 1)}}{3\sqrt{2}aq - (2\sqrt{2} + 4)h\sqrt{q\sigma_s}} \quad (23)$$

其余边界条件下基本顶破断块体尺寸计算过程可依据上述原理进行, 不再赘述。

1.3 基于基本顶破断块体尺寸的“工字型”充填方式

由于技术条件约束, 充填开采难以实现完全顶[26-27], 无论是梁模型还是板模型计算得到的基本顶最大挠度都远小于欠接顶量[24,28], 因此即使对采空区进行充填处理, 基本顶依然会起裂, 引起塑性铰线发育。基本顶块体绕铰线回转形成采空区“倒四坡顶”式沉降分布, 其最大下沉处位于块体的铰线处, 即塑性铰线处。基本顶作为亚关键层, 其稳定性对煤矿安全生产有重要意义, 基于此, 提出围绕基本顶塑性铰线分布位置的“工字型”结构充填方式, 如图 5 所示。首采工作面“工字型”充填中部条带长度为 $a - 2t$, 与两侧条带连接处即是基本顶三角形破断块体的顶角位置, 与巷帮距离为 t ; 而邻空工作面中部充填条带长度为 $a - t - m$, 与邻空侧条带的连接处距巷帮 m , 非临空侧为 t , 其上下端条带长度皆为初次垮

落步距 b 。条带宽度 l_1 、 l_2 、 l_3 需根据具体地质参数设计。

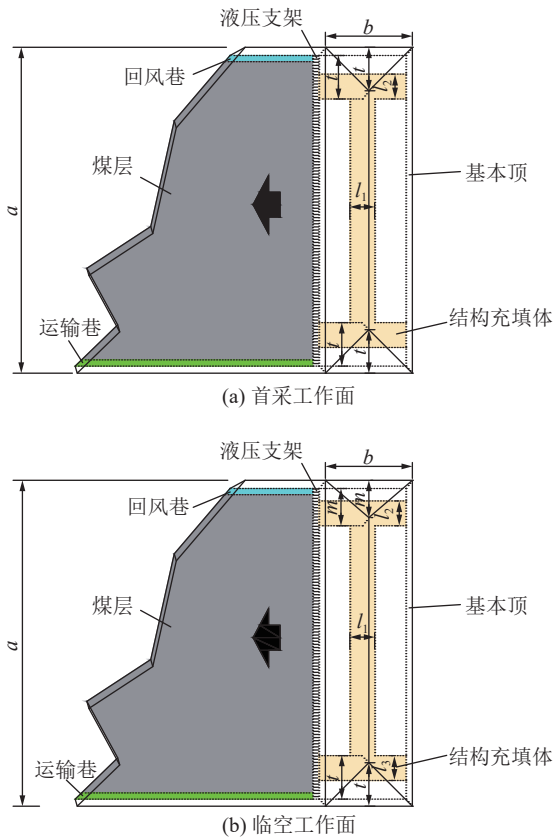


图5 “工字型”结构充填示意

Fig.5 “I-shaped” constructional backfill schematic

2 “工字型”结构充填方案设计

汾西矿业集团新阳煤矿位于吕梁市孝义市城西14 km的高阳镇,地处山西省吕梁山东麓,地标相对高差约120 m。矿区南北长约为7.5 km,东西宽约9 km,总面积为53.3 km²。本研究对象为新阳矿2号煤,煤层结构简单,稳定可采,平均厚度2.5 m,倾角2°~11°(平均9°)。

根据表1中山西新阳矿2号煤10203工作面地质条件与岩层参数(图6),工作面采宽100 m,结合式(13),式(14)计算得到首采工作面基本顶初次垮落步距为18 m,三角形破断块体高长为14 m。使用FLAC^{3D}数值模拟软件,建立50 m×140 m×80.5 m的模型,开挖2号煤层初采期18 m的范围并充填。

由于FLAC^{3D}为连续介质分析软件,难以真实反映顶板的回转下沉,因此对采掘范围的顶板进行块体划分,划分依据为破断块体尺寸计算公式,计算得到三角形破断块体与梯形破断块体尺寸,并在块体间设置接触面,同时进行充填体参数标定,如图7所示。本模型求解的本构关系采用Mohr-Coulomb强

表1 煤岩层及充填体物理力学参数

Table 1 Mechanical parameters of coal seam, rock stratum and backfill body

岩性	容重/ (kN·m ⁻³)	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)	抗拉强度/ MPa
中粒砂岩	26	2.93	1.76	41.0	31.0	3.11
泥岩	24	2.50	1.40	18.0	30.0	3.00
细粒砂岩	26	3.04	2.21	43.4	32.0	2.20
砂质泥岩	24	1.10	1.00	10.0	29.0	1.61
煤层	13	1.00	0.60	3.50	27.0	1.10
粉砂岩	25	2.74	1.65	27.5	35.0	2.77
充填体	25	0.80	0.50	1.15	30.1	1.05

岩性	柱状图	层厚/m	深度/m
中粒砂岩		15.0	208
1号煤层		1.5	209.5
泥岩		3.0	212.5
细粒砂岩		3.0	215.5
砂质泥岩		1.5	217
2号煤层		2.5	219.5
泥岩		1.0	220.5
中粒砂岩		3.0	223.5
粉砂岩		50.0	273.5

图6 新阳煤矿煤岩层综合柱状

Fig.6 Comprehensive histogram of coal and rock strata in Xinyang Coal Mine

度准则。模型计算过程中,分别约束模型侧向及下部边界,并在上部边界补偿厚度为193 m煤岩体的自重,即施加4.825 MPa均布载荷。

“工字型”结构充填条带尺寸设计方案见表2,首先固定两侧条带尺寸,长度为18 m,宽度为14 m(三角形破断块体的高长),中部条带长度为72 m,宽度从18 m全充减少至0 m,在工作面采宽方向中部(50 m)处布置推进方向基本顶下部、直接顶下部应力测线以及基本顶下部、直接顶下部位移测线,分析不同充填方案下应力及沉降变化规律并结合塑性区分布选择既有效支撑顶板又节省充填用量的条带宽度,同时为了探究“工字型”充填的优势,选择全充、不充间隔2 m充填2 m方式进行对照。其次,固定步骤一得到的中部条带宽度 l_1 ,两侧条带宽度自14 m减少至0 m,在工作面推进方向中部(9 m)处布置采

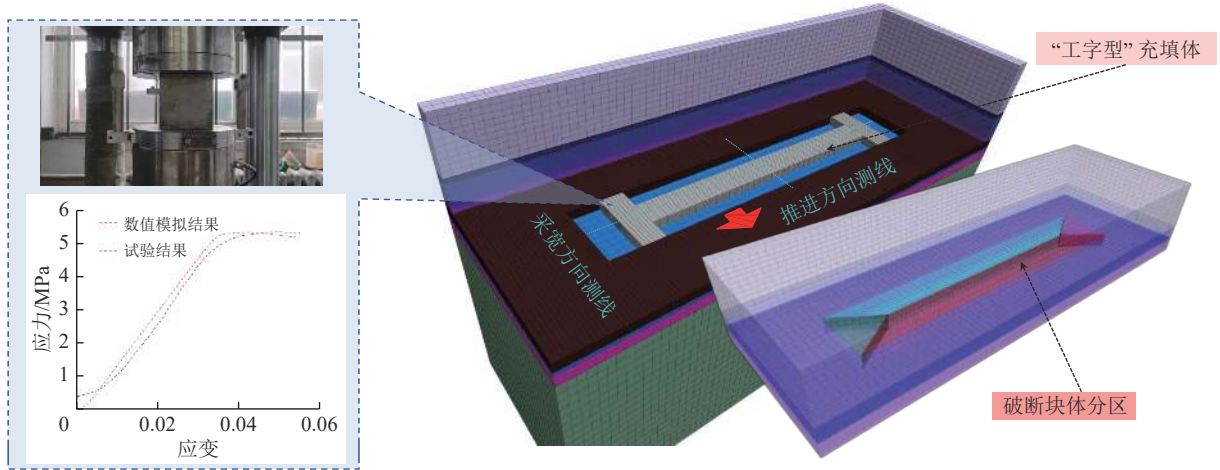


图 7 数值模拟三维模型

Fig.7 3D model of numerical simulation

表 2 充填方案设计

Table 2 Backfilling scheme design

步骤		一	二
试验组	图例		
	中部条带宽度/m	18减少至0	l_1
	两侧条带宽度/m	14	14减少至0
方案	全充	隔2充2	不充
统一对照组	图例		

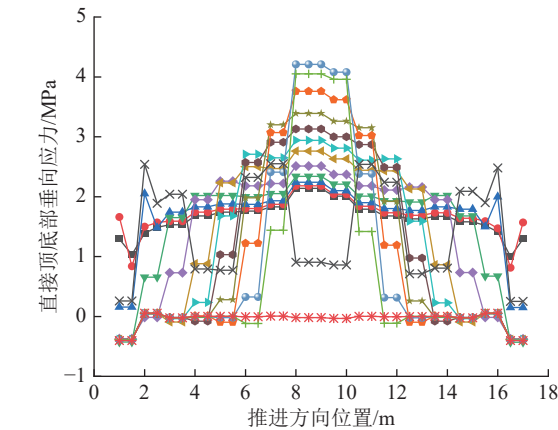
宽方向上述测线,结合塑性区变化分析最佳侧边条带宽度 l_2 。

3 推进方向顶板及充填体受力变形特征及塑性区演化

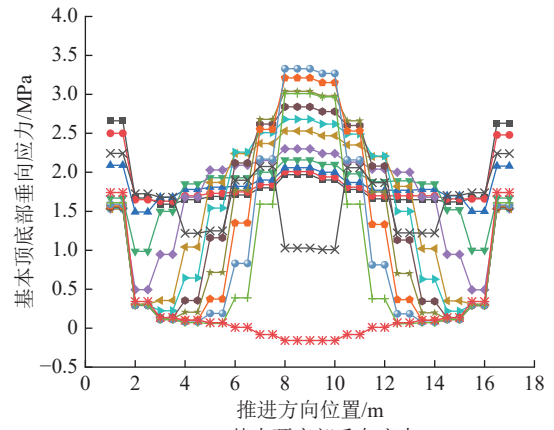
3.1 直接顶底部应力与沉降

不同中部条带宽度下推进方向直接顶底部垂向应力如图 8a 所示,中部条带上覆载荷形式整体呈拱形,随着条带宽度的减少,条带中部应力逐渐增大,应力曲线曲率逐渐增加。在宽度从 18 m 减少到 3 m 的过程中,应力最大值从 2.14 MPa 上升至 4.21 MPa, 2 m 时降为 4.05 MPa。间隔 2 m 充填 2 m 时应力最大值位于靠近采空区中部的条带边界处,为 2.55 MPa,略高于“工字型”充填中部条带 8 m 时相同位置处的应力。

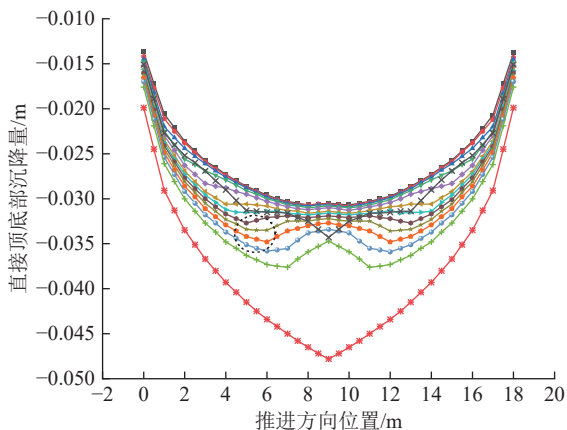
充填开采在初采期对顶板下沉控制已发挥显著作用,如图 8b 所示。工作面中部沿推进方向沉降量整体呈现中间大两侧小的趋势,不充填时最大沉降量为 0.047 8 m,全部充填时最大沉降量为 0.030 7 m,减少了 35.77%。中部条带减少至 6 m 前,沉降量增加幅度不明显,如 7 m 时,最大沉降量 0.031 8 m 较全充仅增加 3.58%。中部充填条带宽度 ≤ 6 m 时,最大沉降量增加明显,对应增加率分别为 6.51%, 9.45%, 13.36%, 16.94%, 22.48%,且开始出现空顶区沉降量大于充填区沉降量的现象,如图 8b 中黑色虚线框选位置所示,表明该宽度充填条带对两侧空顶区的支撑能力减弱。间隔 2 m 充填 2 m 时,由于采空区中部 2 m 处为间隔位置,沉降量较大。由此可见,对采空区中部顶板沉降最大处进行关键位置充填是必要的。



(a) 直接顶底部垂向应力

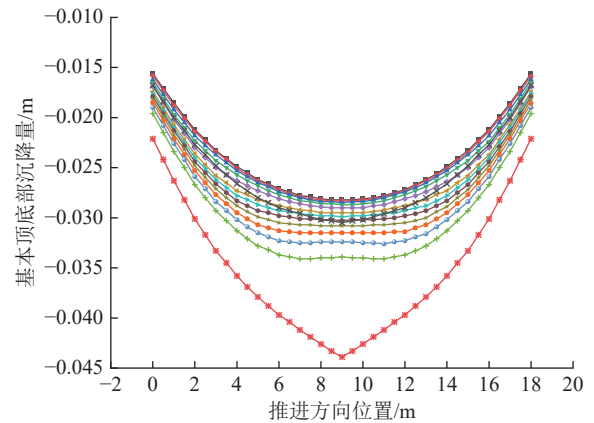


(a) 基本顶底部垂向应力



(b) 直接顶沉降量

—全充 —16 m —14 m —12 m —10 m
—8 m —7 m —6 m —5 m —4 m
—3 m —2 m —隔2充2 —不充



(b) 基本顶沉降量

—全充 —16 m —14 m —12 m —10 m
—8 m —7 m —6 m —5 m —4 m
—3 m —2 m —隔2充2 —不充

图8 不同充填方案推进方向直接顶底部应力与沉降

Fig.8 Stress and subsidence at bottom of immediate roof in advancing direction with different backfilling schemes

3.2 基本顶底部应力与沉降

不同中部条带宽度下推进方向基本顶底部垂向应力如图9a所示,基本顶底部应力曲线同样呈拱形,且随充填体中部条带宽度的减少,曲率逐渐增大。在宽度从18 m减少到3 m的过程中,应力最大值从1.97 MPa上升至3.33 MPa,2 m时降为3.01 MPa,与直接顶相同,都存在底部应力值下降的现象,分析原因在于,当中部条带宽度小于3 m时,采空区中部基本顶塑性破坏,导致其自承载能力减弱,应力传递受阻,同时充填体破坏严重无法有效支撑顶板,因此不仅出现了基本顶底部应力降低的现象,充填体上覆(直接顶底部)应力同样存在降低现象。

基本顶沉降曲线如图9b所示,沉降量随中部充填条带宽度减少变化不明显,曲线整体呈开口向上抛物线形,最大沉降位置位于采空区中部。全充时最大沉降量为0.028 3 m,条带宽度 ≤ 6 m时,沉降增量相较上升,较全充分别上升7.45%,9.22%,11.7%,15.19%,

图9 不同充填方案推进方向基本顶底部垂向应力与沉降

Fig.9 Stress and subsidence at bottom of main roof in advancing direction with different backfilling schemes

20.49%。间隔2 m充填2 m时最大沉降为0.030 5 m,略高于“工字型”充填中部条带6 m时沉降。

3.3 塑性区分布特征

不同充填方案采宽方向50 m处切片塑性区分布如图10所示,“工字型”充填在中部条带减少至7 m前,顶板未出现塑性区;6 m时空顶区直接顶开始产生塑性区;5 m时,充填条带上边界开始塑性破坏;4 m时,直接顶塑性区增加同时充填体下边界开始破坏;2 m时,充填体塑性区贯通,破坏加剧,直接顶塑性区增加,同时基本顶开始破坏。不充填时,顶底板破坏显著。因此“工字型”中部条带宽度应 ≥ 7 m,同全充,间隔2 m充填2 m方式保持了采空区中部顶板和充填体的稳定性。

4 采宽方向顶板及充填体受力变形特征及塑性区演化

4.1 直接顶底部应力与沉降

两侧条带宽度减少对中部条带上覆应力影响较

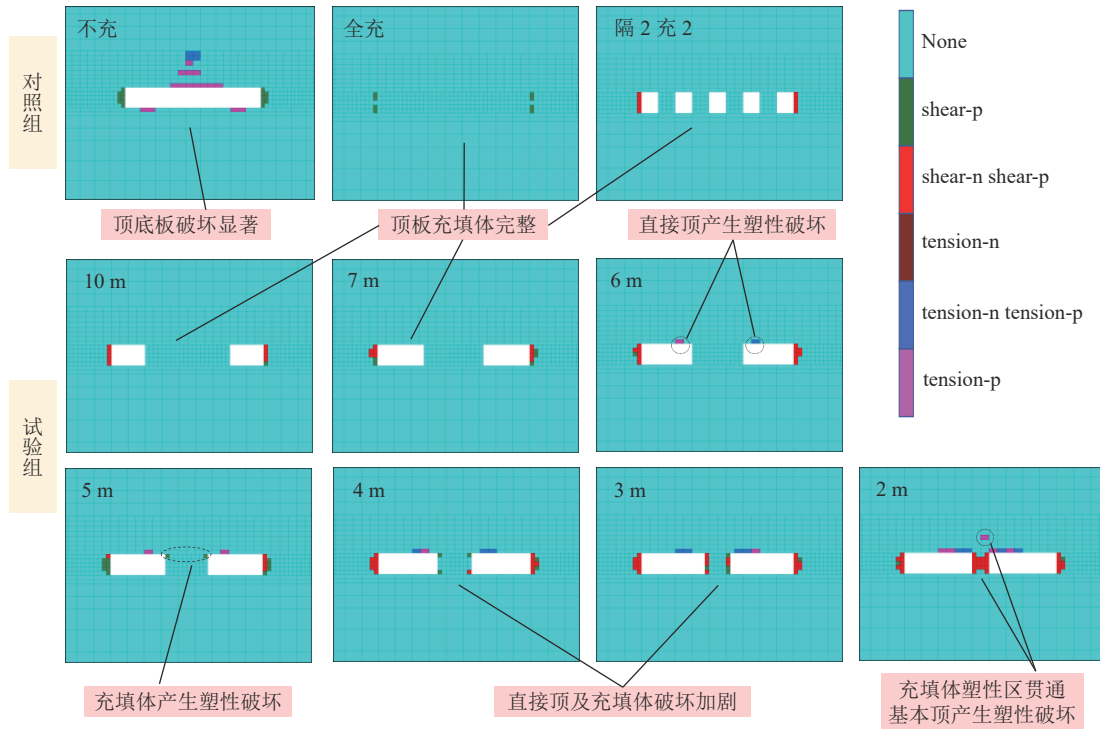


图10 不同充填方案中部条带塑性区分布

Fig.10 Distribution of middle strip plastic zone with different backfilling schemes

小, 应力曲线几乎重合。30~70 m 位置区间条带应力上下波动, 幅度较小, 整体呈水平分布, 0~30 m 应力曲线如图 11a 所示, 两侧条带上覆应力随宽度减少均呈现先升高后降低再平缓的趋势, 条带宽度 ≥ 4 m 时, 应力最高点位于距巷壁 12 m 左右位置, 推断此处应力集中, 需重点充填支撑; < 4 m 时, 应力最高点向中部移动, 顶板暴露面积扩大。

0~30 m 沉降曲线如图 11b 所示, 两侧条带宽度减少对中部沉降影响同样较小, 位移曲线几乎重合。两侧条带宽度 ≥ 6 m 时, 位移曲线呈开口向上抛物线形; < 6 m 时, 如图中黑色虚线框选位置所示, 位移曲线在降到最大值前不再单调, 在空顶区靠近充填体边界位置处存在转折, 说明宽度小于 6 m, 充填条带无法对空顶区域实现有效支撑, 导致空顶区沉降量大于部分充填区域。

4.2 基本顶底部应力与沉降

如图 12a 所示, 基本顶底部垂向应力曲线变化趋势与直接顶相似, 在采宽方向 30 m 处, 不同“工字型”充填方案的应力曲线趋于一致。两侧条带 < 4 m 时, 应力最高点向中部移动, 说明由于两侧条带宽度的减少, 无法有效应对顶板回转下沉引起的应力集中, 导致基本顶三角形块体下方大面积处于暴露即空顶状态, 侧面表明对基本顶三角形块体的控制效果减弱。如图 12b 所示, 基本顶沉降曲线和直接顶类似, 都存

在拐点, 区别在于拐点始现于两侧条带 4 m 时距巷壁 10 m 处, 如图中黑色虚线框选位置所示, 说明宽度 ≤ 4 m, 充填条带对基本顶沉降控制能力减弱。

4.3 塑性区分布

不同充填方案侧边条带塑性区分布如图 13 所示, 基本顶三角形破断块体顶角位置为应力集中区, 易造成充填体塑性破坏, 因此要对该位置重点充填。采用全充或“工字型”充填时, 仅充填体上表面产生部分塑性区; 两侧条带宽度减少至 6 m 前, 塑性区面积未发生增加, 减少至 5~3 m 时, 塑性区大量发育, 并向充填体下部延伸; 2~0 m 时, 侧边条带宽度减少产生的影响波及中部条带; 而采用间隔 2 m 充填 2 m 方式时, 该位置存在塑性区贯通风险。因此“工字型”充填两侧条带宽度应 ≥ 6 m。

综上, 结合采宽、推进方向顶板沉降和应力分布曲线以及塑性区变化规律, 新阳矿“工字型”结构充填的具体方案为: 中部条带长度 72 m, 宽度 7 m, 两侧条带长度 18 m, 宽度 6 m, 充填率为 40%, 少于间隔 2 m 充填 2 m 方案的 44%。在该充填方案下, 满足了对顶板的高效控制要求, 使沉降量及应力值在合理可控的范围内; 同时有效应对了基本顶破断块体回转下沉引起的应力集中区支护问题, 保持了充填体自身的稳定, 使其能够长期高效地对顶板进行支撑。

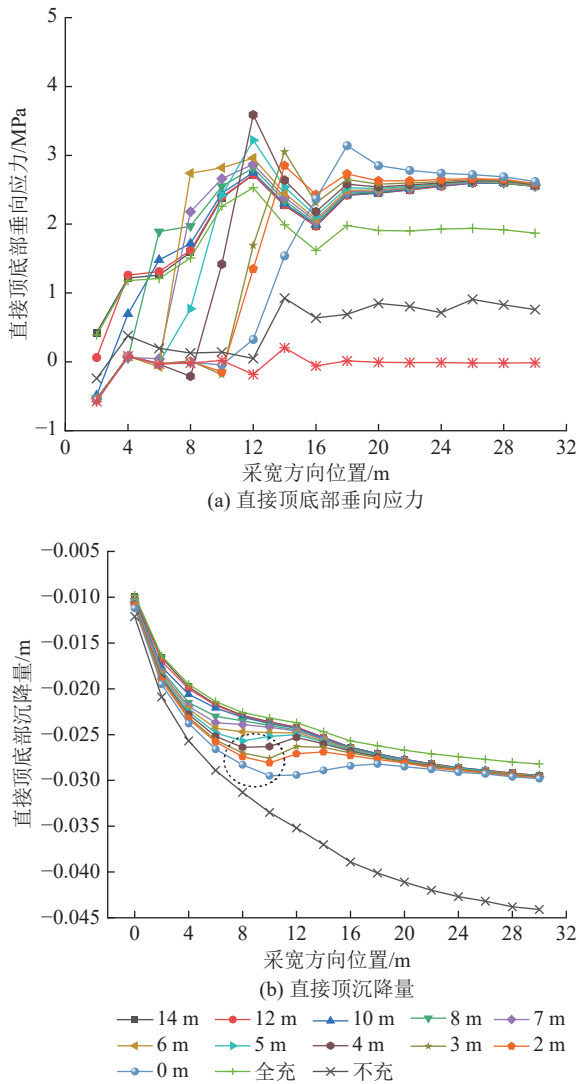


图 11 不同充填方案采宽方向直接顶底部应力与沉降
Fig.11 Stress and subsidence at bottom of immediate roof in mining width direction with different backfilling schemes

5 “工字型”结构充填经济效益分析及空间利用构想

5.1 经济效益分析

对“工字型”结构充填经济效益进行分析,采空区充填材料花费计算公式如下:

$$Q = (m_c Q_c + m_a Q_a + m_g Q_g + m_w Q_w) S_{ba} h \quad (24)$$

式中: m_c 、 m_a 、 m_g 、 m_w 分别为水泥、粉煤灰、煤矸石、水的单位用量; Q_c 、 Q_a 、 Q_g 、 Q_w 分别为水泥、粉煤灰、矸石、水的单价; S_{ba} 为充填区域面积; h 为采高。

文中所用水泥、粉煤灰、煤矸石、水质量配比为 1 : 4 : 5 : 2,其中煤矸石按照粗、中、细级配,用量分别为 332.5、332.5、285 kg/m³,则水泥为 190 kg/m³,粉煤灰为 760 kg/m³,水为 380 kg/m³[29]。

充填材料价目:煤矸石 0.04 元/kg,粉煤灰 0.035

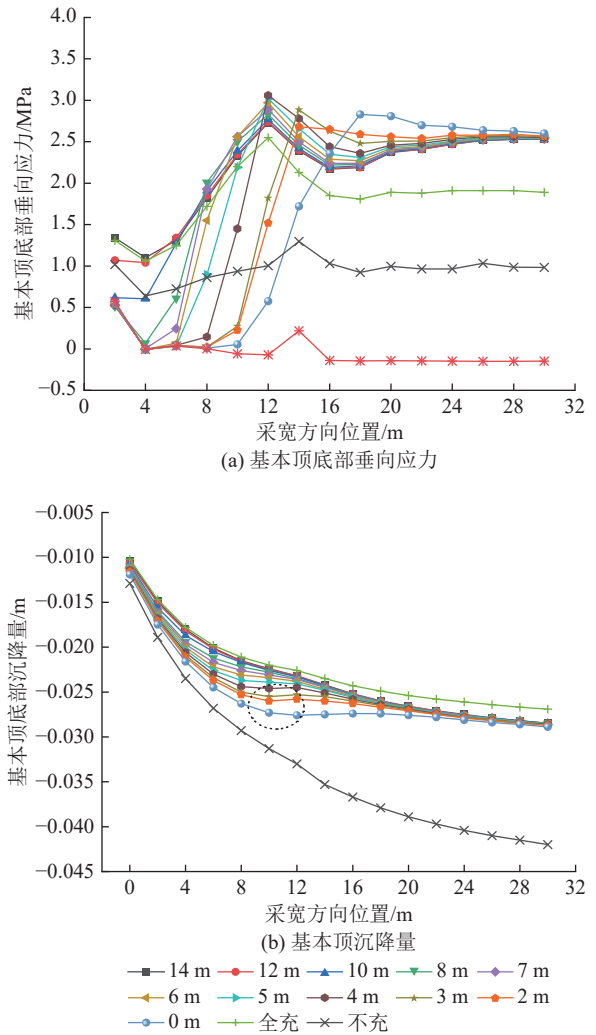


图 12 不同充填方案采宽方向基本顶底部应力与沉降
Fig.12 Stress and subsidence at bottom of main roof in mining width direction with different backfilling schemes

元/kg,水泥 0.32 元/kg。水可用矿井水代替,因此无需计算花销。将表 3 中各材料单价代入式 (24) 对新阳矿 2 号煤层 10203 工作面全充、间隔 2 m 充填 2 m 以及“工字型”充填 3 种方案的材料花销进行计算,结果见表 3。

计算结果表明:“工字型”结构充填方案在对上覆岩层高效承载及保持自身长期稳定的基础上相较于全充在开采 18 m 时能够节省 33.86 万元;相较于间隔 2 m 充填 2 m 节省 2.51 万元。

虽然“工字型”充填在充填材料花费上与间隔 2 m 充填 2 m 相差较小,但其在充填工艺的连续性以及充填效率方面更具优势。

5.2 “工字型”结构充填储能应用构想

如图 14 所示,在“工字型”充填形成的封闭空间中进行储能或固碳满足结构充填理论中对地下空间的利用构想。以 CO₂ 封存为例,新阳矿 2 号煤层 10203 工作面初采期总采出空间为 4 500 m³,其中充

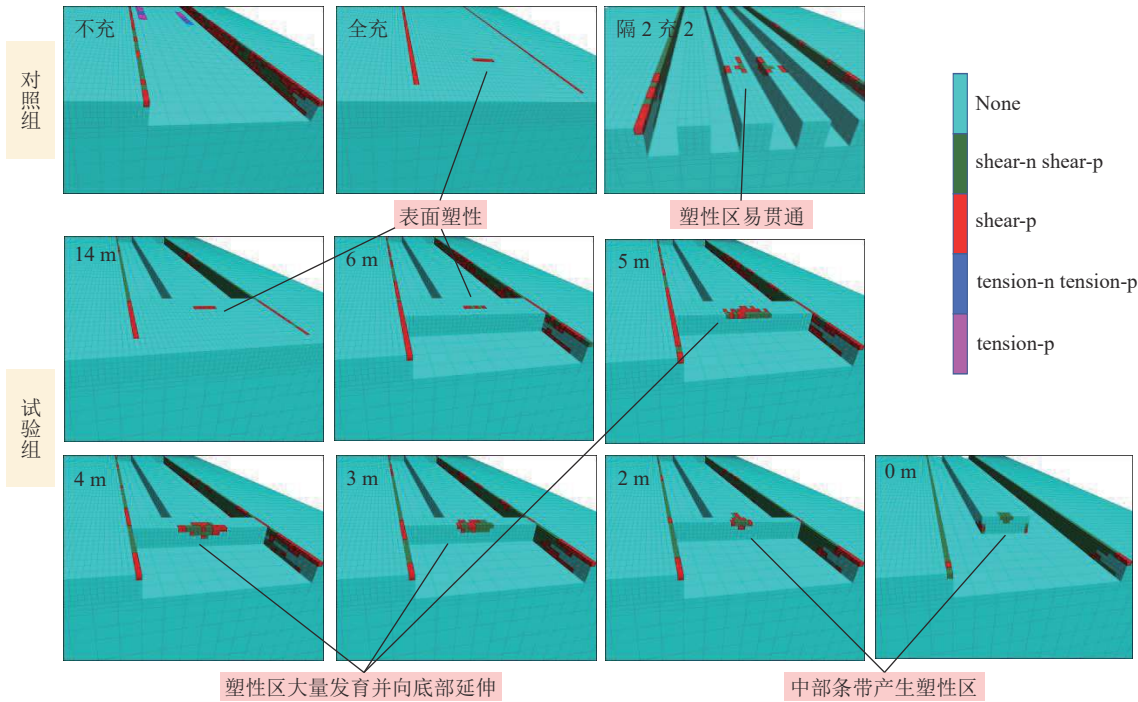


图 13 不同充填方案侧边条带塑性区分布

Fig.13 Distribution of side strip plastic zone with different backfilling schemes

表 3 不同充填方案材料花销

Table 3 Material cost of different backfilling schemes

充填方案	S_{ba}/m^2	h/m	$Q/万元$
全充	1 800		56.43
隔2充2	800	2.5	25.08
“工字型”结构充填	720		22.57

用以及资源可持续问题,从而推进双碳目标的实现^[31-32]。

6 结 论

1) 结构充填开采通过对关键位置进行靶向高强度充填以控制顶板岩层破裂回转及下沉运动。基于弹塑性力学原理深入研究顶板岩层潜在断裂特征,获得了首采及邻空工作面基本顶破裂块体尺寸解析公式,识别了破裂块体铰接形态及主沉降区域,据此判定了结构充填关键位置。结合关键位置确定方法,提出了重点控制基本顶最大挠度位置即板结构潜在张拉断裂位置(塑性铰发育位置)的“工字型”结构充填方案。

2) 利用 FLAC^{3D} 数值模拟软件对新阳矿“工字型”结构充填方案进行设计。结果表明该条件下在工作面推进方向上“工字型”结构充填中部条带宽度 $\geq 7\text{ m}$ 且工作面面宽方向端部条带宽度 $\geq 6\text{ m}$ 时,能够满足对顶板沉降的控制需求,且能有效应对顶板回转下沉引起的应力集中,减少充填体塑性破坏范围,实现对顶板的长效支撑。

3) 结合采宽、推进方向顶板沉降和应力分布曲线以及塑性区变化规律,新阳矿初采期“工字型”结构充填的具体方案为:中部条带长度 72 m,宽度 7 m,两侧条带长度 18 m,宽度 6 m,充填率为 40%,少于间隔 2 m 充填 2 m 方案的 44%,表明准确把握关键

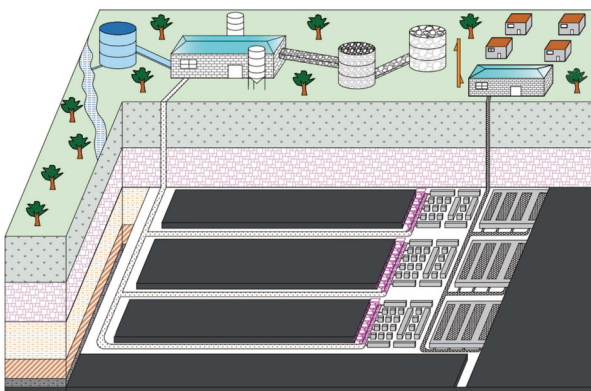


图 14 “工字型”结构充填储能固碳示意

Fig.14 "I-shaped" constructional backfill energy storage carbon fixation schematic

充填体形成的密闭空间体积为 $1\ 980\text{ m}^3$ 。另一方面,充填区域体积达到 $1\ 800\text{ m}^3$,采用碳化改性的充填材料可增加充填体的吸附率,从而实现将 CO_2 固存在充填体内,增大储量。以上 2 种方法在冯国瑞等^[30]的研究中均有提及。上述举措可应对废弃矿井再利

位置的结构充填新方法,将有效降低充填开采成本,对全面推进充填绿色开采大有裨益。

4)“工字型”充填形成的封闭空间可用于CO₂或能源的长期存储,充分发挥结构充填技术在地下空间利用的巨大优势,推动废弃矿井残留空间再利用及资源可持续长效开发技术革新,助力我国双碳目标的早日实现。

参考文献(References):

- [1] 许家林. 煤矿绿色开采 20 年研究及进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 1-15.
XU Jialin. Research and progress of coal mine green mining in 20 years[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 1-15.
- [2] 朱磊, 古文哲, 宋天奇, 等. 采空区煤矸石浆体充填技术研究与展望[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 143-154.
ZHU Lei, GU Wenzhe, SONG Tianqi, et al. Research progress and prospect of coal gangue slurry backfilling technology in goaf[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 143-154.
- [3] 刘建功, 李新旺, 何团. 我国煤矿充填开采应用现状与发展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 141-150.
LIU Jianguo, LI Xinwang, HE Tuan. Application status and prospect of backfill mining in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 141-150.
- [4] ADACH-PAWELUS K, PAWELUS D. Application of hydraulic backfill for rockburst prevention in the mining field with remnant in the polish underground copper mines[J]. Energies, 2021, 14(13): 3869.
- [5] PARISEAU W G, KEALY C D. Support potential of hydraulic backfill[A]//ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. ARMA, 1972: ARMA-72-0501.
- [6] 张吉雄, 缪协兴, 郭广礼. 矸石(固体废物)直接充填采煤技术发展现状[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(4): 395-401.
ZHANG Jixiong, MIAO Xiexing, GUO Guangli. Development status of backfilling technology using raw waste in coal mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(4): 395-401.
- [7] ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, SUN Qiang, et al. Surface subsidence control theory and application to backfill coal mining technology[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74: 1439-1448.
- [8] HEFNI M, AHMED H A M, OMAR E S, et al. The potential reuse of saudi mine tailings in mine backfill; a path towards sustainable mining in saudi arabia[J]. Sustainability, 2021, 13: 6204.
- [9] 路彬, 耿华锋, 王东生, 等. 基于全负压短壁联采密实充填的“三下”采煤法[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(S2): 251-256.
LU Bin, GENG Huafeng, WANG Dongsheng, et al. Coal mining method under buildings, railways and water-bodies based on full negative pressure short wall combined mining and dense filling[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(S2): 251-256.
- [10] 李永亮, 路彬, 杨仁树, 等. 煤矿连采连充式胶结充填采煤技术与典型工程案例[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1055-1071.
LI Yongliang, LU Bin, YANG Renshu, et al. Cemented backfilling mining technology with continuous mining and continuous backfilling method for underground coal mine and typical engineering cases[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1055-1071.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 戴华阳, 郭俊廷, 阎跃观, 等. “采-充-留”协调开采技术原理与应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1602-1610.
DAI Huayang, GUO Juntao, YAN Yueguan, et al. Principle and application of subsidence control technology of mining coordinately mixed with backfilling and keeping[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1602-1610.
- [15] 张新国, 刘伟韬, 孙希奎, 等. 粉煤灰高水短壁部分充填技术研究与实践[J]. 煤炭学报, 2016, 41(12): 3016-3023.
ZHANG Xinguo, LIU Weitao, SUN Xikui, et al. Research and practice on shortwall part filling technology using fly ash high-water material[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12): 3016-3023.
- [16] 朱梦博, 刘浪, 王双明, 等. 短-长壁工作面充填无煤柱开采方法研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(6): 1116-1124.
ZHU Mengbo, LIU Lang, WANG Shuangming, et al. Short-and long-walls backfilling pillarless coal mining method[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(6): 1116-1124.
- [17] ZHU Weibing, XU Jingmin, XU Jialin, et al. Pier-column backfill mining technology for controlling surface subsidence[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 96: 58-65.
- [18] DU Xianjie, FENG Guorui, ZHANG Min, et al. Influence of backfilling rate on the stability of the “backfilling body-immediate roof” cooperative bearing structure[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(6): 1197-1206.
- [19] 白锦文, 崔博强, 戚庭野, 等. 关键柱旁充填岩层控制基础理论[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 424-438.
BAI Jinwen, CUI Boqiang, QI Tingye, et al. Fundamental theory for rock strata control of key pillar-side backfilling[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 424-438.
- [20] LI Zhu, FENG Guorui, CUI Jiaqing. Research on the influence of slurry filling on the stability of floor coal pillars during mining above the room-and-pillar goaf: A case study[J]. Geofluids, 2020, 2020(1): 1-21.

- [21] 李 竹, 冯国瑞, 朱卫兵, 等. 柱式采空区蹬空复采充填体高-强协调机制及其临界高度研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(3): 469-478.
LI Zhu, FENG Guorui, ZHU Weibing, *et al.* Height-strength coordination mechanism of filling body in pillar goaf and its critical height in kick-off mining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(3): 469-478.
- [22] 邱华富, 刘 浪, 王 美, 等. 金属矿采矿-充填-建库协同系统及充填储库结构[J]. 石油学报, 2018, 39(11): 1308-1316.
QIU Huafu, LIU Lang, WANG Mei, *et al.* Mining-backfill-storage building synergetic system in metal mine and its backfill storage structure[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(11): 1308-1316.
- [23] 冯国瑞, 杜献杰, 郭育霞, 等. 结构充填开采基础理论与地下空间利用构想[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 74-84.
FENG Guorui, DU Xianjie, GUO Yuxia, *et al.* Basic theory of constructional backfill mining and the underground space utilization concept[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(1): 74-84.
- [24] 王新丰, 高明中, 陈雨雪, 等. 基于弹性薄板理论的采场顶板破断特征分析[J]. 金属矿山, 2015, 468(6): 24-28.
WANG Xinfeng, GAO Mingzhong, CHEN Yuxue, *et al.* Analysis of fracturing characteristics of stope roof based on elastic thin plate theory[J]. *Metal Mine*, 2015, 468(6): 24-28.
- [25] 徐秉业, 刘信声. 结构塑性极限分析 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.
- [26] 朱鹏瑞, 王东旭, 宋卫东, 等. 充填接顶率对采场顶板稳定性影响的数值模拟研究[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(5): 39-42.
ZHU Pengrui, WANG Dongxu, SONG Weidong, *et al.* Numerical simulation research for the influence of roofcontacted filling rate on the stability of stope roof[J]. *Mining Research and Development*, 2015, 35(5): 39-42.
- [27] 徐 斌, 杨仁树, 李永亮, 等. 煤矿胶结充填开采覆岩移动三量关系及其控制原则[J]. 煤炭学报, 2022, 47(S1): 49-60.
XU Bin, YANG Renshu, LI Yongliang, *et al.* Three measurement relationship and control principle of overburden movement in cemented filling[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(S1): 49-60.
- [28] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- [29] WANG Haochen, FENG Guorui, QI Tingye, *et al.* Influence of the use of corn straw fibers to connect the interfacial transition zone with the mechanical properties of cemented coal gangue backfill[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 367: 130334.
- [30] 冯国瑞, 白锦文, 曹光明, 等. 残采区关键域充填储碳空间重构的科学内涵[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(3): 432-445.
FENG Guorui, BAI Jinwen, CAO Guangming, *et al.* Scientific connotation on the key location backfilling for carbon storage space reconstruction in the residual mining area[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(3): 432-445.
- [31] 谢和平, 张吉雄, 高峰, 等. 煤矿负碳高效充填开采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 36-46.
XIE Heping, ZHANG Jixiong, GAO Feng, *et al.* Theory and technical conception of carbon negative and efficient backfill mining in coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 36-46.
- [32] 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.