# 深井冲击煤层充填工作面区段煤柱宽度研究

张 明[1, 2, 3]，魏凯祥[1]，年 宾[3]，姜福兴[4]，王 昆[3]，朱海虎[1]，胡 浩[1]

(1. 安徽理工大学 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室，安徽 淮南 232001；2. 安徽理工大学 地质资源与地质工程博士后流动站，安徽 淮南 232001；3. 中勘资源勘探科技股份有限公司，安徽 淮北 235000；4. 北京科技大学 土木与资源工程学院，北京 100083)

**摘要：**为提高深井冲击煤层充填工作面防冲可靠性，保障采场围岩结构稳定和实现安全开采，以山东某深井超高水嗣后充填工作面为研究背景，采用理论分析、数值模拟、现场实测相结合方法，研究沿空充填开采“采空区－煤柱－关键层”T 型覆岩空间结构模型及其稳定性，探讨兼顾防冲与充填体保水的合理区段煤柱宽度。结果表明：(1) 满足煤柱顶板岩层断裂线因素和支承强度因素情况下，煤柱能够“隔离”充填采空区并对关键岩层及其覆岩空间结构形成支撑作用；(2)“采空区－煤柱－关键层”形成近似呈 T 型的覆岩空间结构，该 T 型模型的水平和竖直结构分别发生挠曲和压缩为主的变形，煤柱是控制 T 型模型稳定性的主要结构；(3) 充填工作面煤柱稳定性主要与静(动)态平均支承应力 $\sigma_z(\sigma'_z)$ 和自身承载强度 $R$ 有关，建立煤柱整体冲击失稳的 $I_C=\sigma_z/R$ 或 $I_C=\sigma'_z/R$ 力学判据，以此为基础确定合理区段煤柱宽度为 10 m。通过现场微震、应力、地面沉降等监测分析，验证理论模型合理性以及分析结果可靠性，成果对深井冲击煤层充填工作面煤柱留设与防冲研究具有一定的理论和应用价值。

**关键词：**采矿工程；深井开采；覆岩空间结构；冲击地压；区段煤柱；充填工作面

**中图分类号：**TD 32 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－6915(2025)02－0316－15

# Study on the width of section coal pillar in filling face of coal seam with rockburst hazards in deep mine

ZHANG Ming[1, 2, 3]，WEI Kaixiang[1]，NIAN Bin[3]，JIANG Fuxing[4]，WANG Kun[3]，ZHU Haihu[1]，HU Hao[1]

(1. *State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines*，*Anhui University of Science and Technology*，*Huainan*，*Anhui* 232001，*China*；2. *Geological Resources and Geological Engineering Post-Doctoral Flow Station*，*Anhui University of Science and Technology*，*Huainan*，*Anhui* 232001，*China*；3. *Chexplor Resource Exploration Technology Co.*，*Ltd.*，*Huaibei*，*Anhui* 235000，*China*；4. *School of Civil and Resources Engineering*，*University of Science and Technology Beijing*，*Beijing* 100083，*China*)

**Abstract：**To improve the reliability of rockburst prevention in the filling face of a deep coal seam and to ensure the stability of the surrounding rock structure in the stope and achieve safe mining，this study focuses on a filling face in a deep well with super-high water content in Shandong，China. Through a combination of theoretical analysis，numerical simulation，and field measurement，the spatial structure model and stability of the“goaf-coal pillar-key strata”T-type overlying rock structure during gob-side entry retaining mining were investigated. Furthermore，the reasonable coal pillar width considering both rockburst prevention and water-retaining performance of the filling body was explored. The results indicate that：(1) the coal pillar can effectively“isolate”the goaf and provide support to the key strata and their overlying spatial structure，under the conditions that meet

**收稿日期：**2024－07－02；**修回日期：**2024－08－20

**基金项目：**国家自然科学基金资助项目(52104114)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 52104114)

**作者简介：**张 明(1987－)，男，2017 年于北京科技大学采矿工程专业获博士学位，现任副教授，主要从事矿山压力和冲击地压等方面的教学与研究工作。E-mail：ok_ming_ming@126.com。通讯作者：魏凯祥(2001－)，男，现为硕士研究生。E-mail：3462316393@qq.com

**DOI：**10.3724/1000-6915.jrme.2024.0507

the fracture line of the roof strata and the supporting strength factors. (2) The“goaf-coal pillar-key strata”forms an approximately T-shaped overlying rock spatial structure. The horizontal and vertical structures of this T-shaped model primarily undergo flexural and compressive deformation，respectively，with the coal pillar being the main structure controlling the stability of the T-type model. (3) The stability of the coal pillar in the filling face is mainly related to the static(dynamic) average supporting stress $\sigma_z(\sigma_z')$ and its own bearing strength *R*. The overall impact-induced instability criterion $I_C=\sigma_z/R$ or $I_C=\sigma_z'/R$ was established，based on which the reasonable width of the coal pillar was determined to be 10 meters. The theoretical model′s validity and the reliability of the analysis results were verified through field monitoring of microseismic activity，stress，and surface subsidence. The findings provide theoretical and practical value for the design of coal pillar width and rockburst prevention in the filling face of deep coal seams.

**Key words**：mining engineering；deep mining；spatial structure of overburden rock；rock burst；section coal pillar；filling working face

## 1　引　言

我国已探明的煤炭资源中，千米以下埋深的储量占比约 53%，现有煤矿开采深度正以 10～25 m/a 的速度增加，目前我国采深超过 1 000 m 的矿井接近 50 座，随着浅部煤炭资源日趋枯竭，深井开采势在必行[1]；采深增加面临的深井开采冲击地压等矿山动力灾害问题日益突显，理论研究和开采实践表明，采空区充填技术能够降低采动覆岩运动剧烈程度和影响范围[2]，成为缓解上述问题的重要技术途径。

针对充填开采围岩结构与矿压控制等相关问题，国内外学者做了大量的研究。国内方面，张吉雄等[3]结合综采矸石充填开采技术因素，阐明了支护强度与开采高度之间的关系，提出了矸石直接充填采矿压力规律及其等价采高模型；F. Qi 和 Z. Ma[4]探讨了充填体对巷道周边应力分布及其稳定性的影响，验证了充填体支撑采空区岩层结构能够降低冲击地压发生的结论；李　猛等[5]综合矸石充填材料压缩变形本构方程和非线性 Winkler 地基模型，分析了矸石材料控制深井充填采场顶板的力学机制，推导了深井充填采场顶板下沉曲线函数；赵兵朝等[6]开展了侧限条件下的充填体－煤柱耦合承载压缩试验，对比不同充填体强度及充实率条件下煤柱的力学特性，获得了不同高度和强度的充填体内弹性模块上的径向应变规律；崔博强等[7]提出了单侧充填条件下“充填体－煤柱”协同承载结构及其不同单轴压缩条件下的损伤率，并进一步分析了该协同结构在压缩过程中的失稳判据；杨胜利等[8]运用理论分析、实验室测试以及现场监测等方法，建立了充填体支撑作用下坚硬顶板结构力学方程，研究了充填体对坚硬顶板的支撑作用及运动模式，阐明了充实率对沉降曲面形态的控制效果；冯国瑞等[9]采用数字图像相关法，监测加载过程中试件的声发射及电阻率变化，建立了不同截面边长矸石胶结充填柱的损伤模式及本构方程，得到了截面边长对矸石胶结充填柱的影响变化；王方田等[10]通过 FLAC$^{3D}$ 软件建立了“充填体－支架－煤体”之间的耦合关系，总结了不同推进速度、支护强度、水体积比 3 种因素对工作面覆岩应力、顶板下沉量与破坏程度的响应特征；P. Wu 等[11]阐释了充填采场“围岩－充填体－支护”整体结构特征，通过模拟实验并总结了不同充填率和充填步距对上覆岩层运动的敏感性。

相比于国内学者，国外学者主要侧重于充填材料配比和性能测试方面，K. F. Sadat 等[12]以建筑拆卸废料代替水泥再生骨料回填材料为背景，对添加硅酸盐水泥的混合建筑拆卸废料“再生骨料”样品进行力学试验，得到混合料中加入 8%的水泥含量回填材料的单轴抗压强度能够满足大多数地下采矿应用条件；G. Ehab 和 K. A. El-Nagdy[13]进行了大量回填材料混合物多元线性回归分析，建立了混合物单轴抗压强度与回填成分之间的关系，并得出了预测抗压强度的经验公式。

已有研究成果表明，充填体在控制工作面覆岩空间结构和采场应力变化等方面具有重要作用，然而涉及深井充填工作面合理区段煤柱留设理论方法的研究相对较少，刘金海等[14-15]提供了深井厚及特厚煤层综放工作面区段煤柱设计理论和试验方法，但是与本文研究背景的充填综采工作面等主要条件不完全一致，相关成果可以参考却不能完全适用，依据实际条件开展针对性研究是解决此类工程问题的主要途径。煤矿冲击地压的发生与开采覆岩空间

结构运动状态及其向采场煤岩体应力传递和集中效应关系密切[16]，区段煤柱宽度是影响上述因素的关键；因此，开展“深井、冲击煤层、充填工作面”复杂条件下的覆岩空间结构模型及其对区段煤柱冲击稳定性影响研究，对揭示深井开采充填工作面冲击地压机制与防治具有重要的理论和现实意义。

本文以山东某矿深井充填工作面区段煤柱稳定性为研究背景，首先探讨充填采空区的厚硬岩层－煤柱覆岩空间结构特征，其次建立厚硬岩层－煤柱协调变形的煤柱应力集中力学模型，最后在上述研究的基础上，提出满足煤柱防冲－充填体保水的区段煤柱宽度确定方法，以期为相似条件的充填工作面区段煤柱留设和冲击地压防治提供参考。

## 2　研究背景

### 2.1　开采条件概况

山东某煤矿设计年生产能力 60 万 t，CG1307 工作面采用综合机械化走向长壁采煤工艺，采空区采用全袋包充填技术控制顶板，主要用于地面村庄保护，采用的超高水充填材料主要由 A，B 物料组成，其中水体积可达 95%，充填工艺采用三八工作制度，平均充填步距为 1.8 m，在一个充填班中，时间安排是：2 h 充填准备工作，4 h 正常充填，2 h 充填后的辅助。

CG1307 工作面紧邻 CG1306 充填采空区，受井田边界和断层构造等复杂条件的影响，工作面呈不规则“刀把型”布置现状，煤柱边界局部钝角 172°，整体大致呈“平滑线性”特征，走向长约 970 m，倾向长 39～80 m，轨道顺槽两侧为实体煤，皮带顺槽紧邻 CG1306 充填采空区，采空区宽度为 100～130 m，如图 1 所示，开采区域地面标高 46～47 m，井下标高－700～－640 m，主采 3 煤层，总体为单斜构造，煤层产状变化较小，平均倾角小于 7°，煤厚 2.5～3.7 m，平均厚 3 m；根据相关冲击倾向性鉴定结果：3 煤层具有弱冲击倾向性，煤层单轴抗压强度为 12.5 MPa。工作面直接顶为 4.3 m 中砂岩，基本顶为 4.4 m 中砂岩，距 3 煤顶板最近的一组细砂岩亚关键层厚度为 11.2 m，高度为 25.3 m，厚度为 14.2 m 的中砂岩主关键层距离 3 煤顶板 93.4 m；顶、底板均具有弱冲击倾向性，3 煤顶底板综合柱状如表 1 所示。

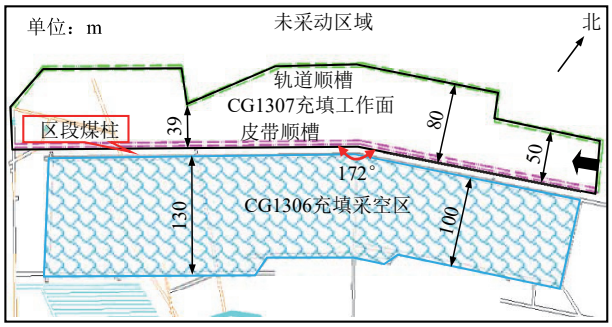



图 1　采场平面布置图

Fig.1　Plane layout of stope

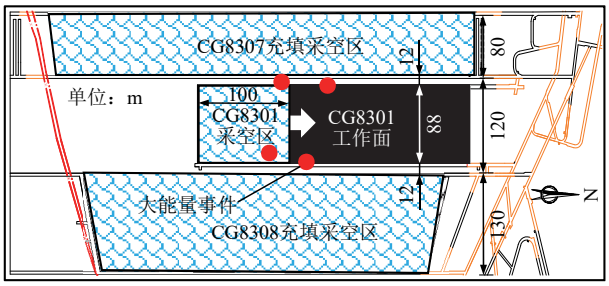
表 1　开采区域顶底板柱状图

Table 1　Mining area roof and floor histogram

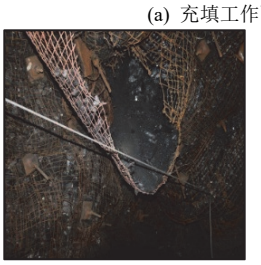
| 名称 | 岩性 | 柱状 | 厚度/m | 距煤层高度度/m |
|---|---|---|---|---|
| 主关键层 | 中砂岩 | | 14.2 | 93.5 |
| | 含泥质夹层砂岩组，单层厚度小于 8 m | | 45.1 | 48.4 |
| 基岩层 | 2 煤 | | 0.2 | 48.2 |
| | 泥岩 | | 3.5 | 44.7 |
| | 中砂岩 | | 3.1 | 41.6 |
| | 粉砂岩 | | 5.1 | 36.5 |
| | 细砂岩 | | 11.2 | 25.3 |
| 亚关键层 | 粉砂岩 | | 3.9 | 21.4 |
| | 砂质泥岩 | | 6.7 | 14.7 |
| | 泥岩 | | 3.5 | 11.2 |
| 基本顶 | 中砂岩 | | 4.4 | 6.8 |
| | 细砂岩 | | 2.5 | 4.3 |
| 直接顶 | 中砂岩 | | 4.3 | 0.0 |
| 3 煤 | 煤层 | | 3.0 | - |
| 直接底 | 泥岩 | | 0.6 | - |
| 基本底 | 粉砂岩 | | 3.8 | - |

### 2.2　相邻相似充填开采冲击案例及工程类比

相邻矿井开采地质条件与本矿相似，开采相同煤层，采用相同充填开采工艺。由于开采接续等原因，最后回采 C8301 孤岛工作面，采用倾斜长壁后退式综采工艺，超高水袋式充填采空区顶板管理，平均采深 677 m，开采 3 煤层厚度 2.8～3.5 m，煤层倾角为 4°～7°，煤层结构简单，煤层上方 20 m 范围内单层厚度最大的岩层为 8.4 m 的粗砂岩，煤层及其顶底板均有弱冲击倾向性，单轴抗压强度 10～13 MPa。工作面两侧为 CG8307，CG8308 充填采空区，对应的采空区宽度为 80，130 m。C8301 孤岛工作面宽度为 88 m，两侧区段煤柱宽度均为 12 m，如图 2(a)所示。




(a) 充填工作面及大能量事件分布



(b) 岩体冒落



(c) 单体弯折

图 2　充填开采巷道冲击实例

Fig.2　Example of roadway rockburst in filling mining

2021 年 10 月 20 日，C8301 工作面推采至切眼约 100 m 处，连续监测到 4 次 $10^4$～$10^5$ J 能级的大能量微震事件，其中最大能量达到了 $6.0\times10^5$ J，造成工作面煤柱“煤爆”不断，轨道顺槽超前 20 m 范围“底板”鼓起 300～400 mm，皮带巷滞后工作面煤壁约 60 m 区域巷道断面明显收敛，存在不同程度顶板“沉顶”和单体“弯折”破坏，个别区域有轻微“冒顶”现象，如图 2(b)，(c)所示。此次大能量微震事件和冲击显现的区域均集中在区段煤柱附近。

通过工程类比分析，深井充填开采一定程度上降低了覆岩移动和冲击显现，对冲击地压防治起到积极作用，但冲击煤层充填工作面仍潜在冲击危险性，其中留设煤柱宽度是影响冲击地压的主要因素之一，需要确定合理宽度煤柱以提高深井冲击煤层充填工作面防冲可靠性。

### 2.3　充填开采煤柱防冲设计关键问题

结合本矿背景和相似工程类比，工作面面临的主要开采影响因素是：采深大、煤层具有冲击倾向性和采用采空区后方充填开采等，煤柱留设及其防冲方面主要存在“新”问题如下：

(1)“浅埋、非充填工作面”采用 5 m 区段煤柱，“深井、充填开采”需要采用较宽(大)区段煤柱，考虑充填开采条件下矿压分析模型，即充填开采条件下采场覆岩空间结构分布问题。

(2) 5 m 区段小煤柱通常条件下处于完全塑性状态，能够满足防冲要求，考虑充填开采因素留设宽(大)煤柱应力状态及其对冲击地压影响，充填开采条件下满足防冲的合理区段煤柱宽度问题。

充填体的刚度越强、充填率越高，对顶板控制效果越好，充填体能够一定程度抑制顶板运动剧烈程度和影响范围，对降低冲击地压的发生是有利的，但超高水材料的物理力学特性和实际充填量尚无法保证完全控制顶板运动，为了避免区段煤柱设计不合理造成开采过程中煤柱冲击，需要采前开展合理区段煤柱宽度研究，并结合充填体材料保护等技术要求最终确定煤柱宽度。

## 3　沿空充填开采“采空区－煤柱－关键层”覆岩空间结构特征

采场“覆岩空间结构形成与运动－应力集中与转移－矿压形成与显现”之间关系密切，研究采场覆岩空间结构特征是进行采动灾害辨识与防控的前提。根据钱鸣高等[17]提出的岩层控制的关键层理论，结合预测冲击地压的关键层评估方法，覆岩空间结构形成与破坏主要是以关键层的运动状态为主要依据；本文根据充填采空区充填效果、区段煤柱隔离支撑作用和关键层运动状态等，进一步辨识沿空充填开采条件下覆岩空间结构特征。

### 3.1　充填开采条件下考虑基本顶板断裂线的煤柱宽度条件

采场留设区段煤柱主要起隔离采空区及控制次生灾害等作用，多数冲击灾害矿井采用窄煤柱或无(负)煤柱留设方法，能够降低采空区后方形成煤柱高应力及冲击失稳的可能性；超高水充填开采需留设相对较宽的区段煤柱并对其有一定要求：

(1) 具有足够的强度，并于采场围岩保持协调承载，保证采空区后方煤柱不会冲击失稳。

(2) 煤柱两侧塑性区不贯通，保证采空区后方超高水充填体不会渗流“失水”，不采用“贯穿式”钻孔卸压，煤柱具有一定的弹性区分布。

因此，超高水充填开采工艺条件下，要求采空区后方区段煤柱整体未达到塑性状态，并对覆岩空间结构具有一定的承载能力，深井、超高水充填采场通常采用留设大煤柱方案，大煤柱是否可以形成上覆岩层结构的支撑体，需要综合考虑 2 个方面因素：基本顶岩层断裂线因素和煤柱支承强度因素。结合研究背景，煤柱边界局部钝角 172°，整体大致呈“平滑线性”特征，工程上初步预估煤柱宽度影响，暂忽略煤层倾角和采场几何形状等，参考基本顶岩层断裂线影响因素及 Winkler 弹性地基模型[18]：

基本顶断裂线位置位于煤壁内部，断裂位置采用基本顶最大弯矩所在位置估算，断裂位置距煤壁为 $\rho$，通常 $\rho$ 也称之为塑性区宽度，计算式为

$$\rho=\left[\tan^{-1}\left(\frac{2\lambda\delta M_0+rQ_0}{r^2M_0+\lambda rQ_0}\varphi\right)\right]\varphi^{-1} \tag{1a}$$

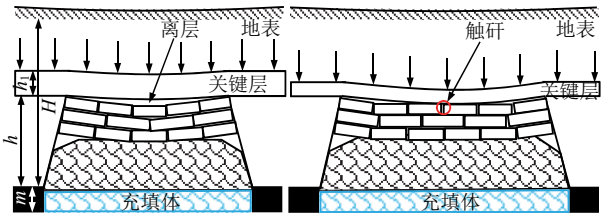
其中，

$$\left.\begin{aligned}\lambda&=\sqrt{\frac{\sqrt{k/E_0I_0}}{2}-\frac{N_0}{4E_0I_0}}\\ r&=\sqrt{\frac{N_0}{E_0I_0}}\\ \delta&=\frac{N_0}{E_0I_0}\\ \varphi&=\sqrt{\frac{\sqrt{k/E_0I_0}}{2}+\frac{N_0}{4E_0I_0}}\end{aligned}\right\} \tag{1b}$$

式中：$k$ 为 Winkler 地基系数，$E_0I_0$ 为基本顶岩梁结构抗弯刚度，$M_0$，$Q_0$，$N_0$ 分别为煤壁位置所对应基本顶岩梁结构弯曲的截面弯矩、剪力和轴力。一般工况条件下区段煤柱宽度 $\rho=2$～9 m[19]，因此，当煤柱宽度超过 4～18 m，煤柱具有一定的弹性区分布，并具有承载强度，对局部采场覆岩空间结构的形成和破坏产生影响；为了方便研究，下文探讨的超高水充填开采条件下区段煤柱留设问题，是在假设煤柱具有弹性区宽度 $D>2\rho$ 和未发生整体冲击失稳情况下进行的。

### 3.2　充填采区上覆关键层状态辨析

工作面开采和充填后，首先冒落的是直接顶，随着推采范围增加，煤层上方各级岩层受到开采扰动和自重应力共同作用下，能够自下而上逐层破裂运动，并在充填体上形成冒落和填充效果，由于单个工作面开采对顶板扰动以及覆岩破裂运动范围影响均有限，覆岩中存在一组受采动影响小且未发生破断的厚硬关键层，关键层相对厚度大、强度高，对应的抗弯刚度大，在具有充分“运动空间”条件的情况下，能够与下方软、弱、薄岩层发生离层[20]，“运动空间”大小除了与关键层自身的厚度、强度及距离煤层高度参数有关，还与充填开采效果、低位破裂和变形岩层碎胀特征等有关。考虑采空区形状和大小、采空区充填以及关键层等对“采空区－煤柱－关键层”覆岩空间结构模型影响，结合矿山压力理论及方法，以关键层最终弯曲变形稳定后是否与底部的低位破裂和变形岩层发生触矸作用为条件，大致划分 2 种类型的充填采区上覆关键层状态：弯曲离层和弯曲触矸，如图 3 所示。




(a) 关键层弯曲离层状态　　(b) 关键层弯曲触矸状态

图 3　考虑开采条件的上覆关键层及其覆岩状态

Fig.3　State of overlying key strata and overlying strata considering mining conditions

具体的理论判据分析，设开采煤层厚度 $m$，区段煤柱宽度为 $D$，关键层厚度 $h_1$，距煤层高度 $h$，采空区充填率 $\eta$，煤层底板至关键层底板破裂和变形岩层的碎胀系数为 $K$，由于关键层的弯曲挠度相对于岩层离层值是无穷小量，则关键层发生弯曲离层的条件：

$$\frac{m}{h}\geqslant\frac{K-1}{1-\eta} \tag{2}$$

反之，得到关键层发生弯曲触矸的条件：

$$\frac{m}{h}<\frac{K-1}{1-\eta} \tag{3}$$

由上述式(2)，(3)分析表明，当关键层距离煤层 $h$ 越远，采空区充填率 $\eta$ 越高，开采煤层厚度 $m$ 越小，通常能够形成弯曲触矸状态，相反则越容易形成弯曲离层状态；针对工程背景的 CG1306 及 CG1307 充填采空区基本条件，3 煤层厚度 $m=3.0$ m，细砂岩亚关键层距煤层高度 $h=25.3$ m，采空区充填率 $\eta=0.85$～0.95(平均 0.9)，煤层底板至关键层底板之间破裂和变形岩层的综合碎胀系数为 $K=1.3$，代入计算为 $m/h=0.12$，$(K-1)/(1-\eta)=3.0$，$m/h\ll(K-1)/(1-\eta)$，判断充填采空区上方的细砂岩亚关键层处于明显的弯曲触矸状态。

考虑深井充填开采工况下“采空区－煤柱－关键层”结构形成的空间、时序关系，基于覆岩空间结构观点，初步得到的连续充填开采几何特征和空间模型，如图 4 所示(图中，$L_0$，$l_0$ 为区段煤柱两侧采空区宽度)，本文进一步采用矿山压力理论，分析充填开采“采空区－煤柱－关键层”覆岩空间结构特征，研究模型边界、平衡条件及其力学求解。需要说明的是，下文针对实际工程背景，研究充填采空区关键层弯曲触矸状态特征条件的采场覆岩空间结构模型，其他开采条件下形成的弯曲离层状态及其采场覆岩空间结构模型，可参考本文思路，这里不过多赘述。

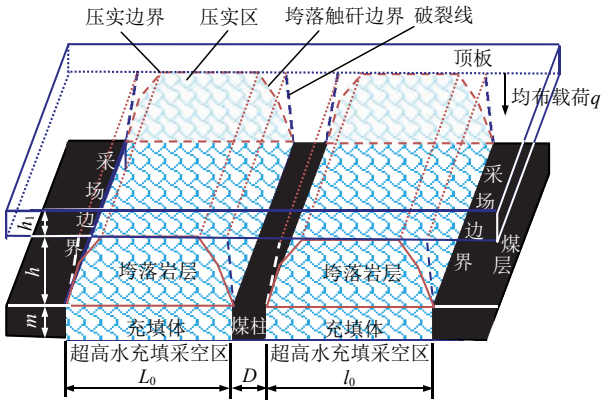



图 4　连续充填开采几何特征和空间模型

Fig.4　Geometric characteristics and spatial model of continuous filling mining

### 3.3　“采空区－煤柱－关键层”覆岩空间结构特征

基于工程背景进一步分析，紧邻的 2 个工作面先后开采后，以区段煤柱为中心由一侧采空向两侧采空过渡，在区段煤柱未达到失稳条件之前，煤柱两侧同时存在尺寸大小不完全对称的采空区及其上覆关键层弯曲触矸结构，如图 5 所示，煤层开采的上覆岩运动大致按一定角度自下而上发展，并且近似呈一定的破裂角度扩展[21]，设覆岩综合破裂移动角 $\alpha$，关键层底部悬露边缘尺寸为 $L$，$l$，满足 $L=L_0-2h\cos\alpha$，$l=l_0-2h\cos\alpha$。

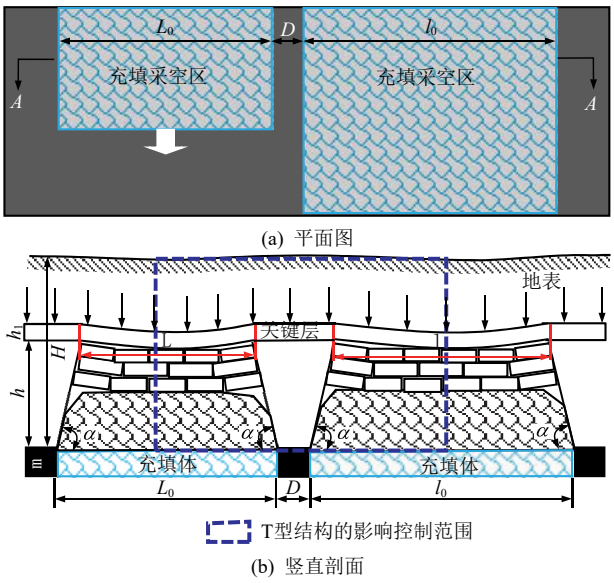



图 5　单侧采空到两侧采空形成的覆岩空间结构

Fig.5　Spatial structure of the overburden formed from one side to both sides

由“采空区－煤柱－关键层”形成的覆岩空间结构模型近似呈 T 型[22]，或称为 T 型模型，这是保持覆岩空间结构长期稳定和满足区段煤柱防冲的最终状态，为预测不同宽度区段煤柱应力集中程度和冲击危险性，T 型模型特点及尺寸：

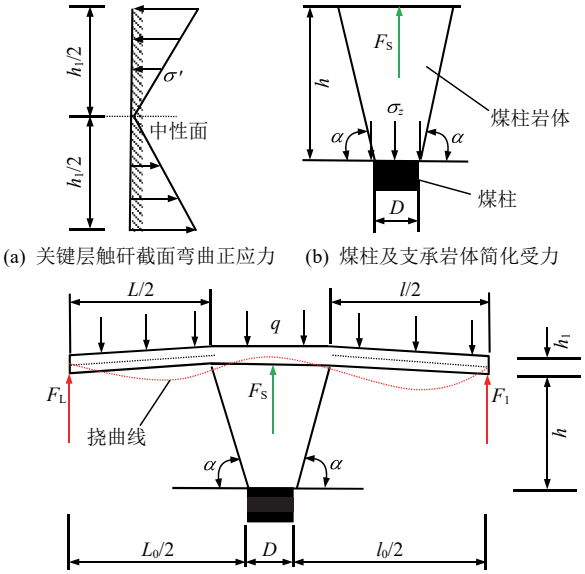
(1) T 型模型内各结构作用和受力变形特点：关键层作为地层系统“骨架”，对采场上覆岩层形成支撑，构成了 T 型模型的水平结构，该水平结构在竖直方向上发生弯曲变形；采空区充填体通过对冒落和填充的破裂、变形岩层形成支撑作用，从而保证了挠曲关键层在采空区岩层上的稳定触矸效果，构成了 T 型模型两侧辅助固支结构，该固支结构在水平和竖直方向同时发生挤压变形；区段煤柱如能够满足一定强度的条件下，煤柱及其支撑的正上方顶板岩层共同组成了 T 型模型的中间主体支撑结构体，主要对 T 型模型水平结构的关键层形成竖直方向支撑作用，同时“隔离”两侧采空区，该竖直结构近似处于压缩变形状态，并与水平结构在竖直方向上发生协调变形。

(2) T 型模型内各组成单元几何尺寸：竖直高度为煤层厚度 $m$、关键层距离煤层高度 $h$ 以及关键层厚本身度之和 $h_1$，模型的竖直高度等于 $m+h+h_1$；水平方向的宽(跨)度等于区段煤柱两侧采空区上方弯曲触矸状态的关键层触矸点(触矸点支承应力近似为集中载荷)之间水平距离，大小近似等于 $D+0.5(L_0+l_0)$ 或 $D+2h\cos a+0.5(L+l)$。

## 4　T 型模型力学分析及求解

### 4.1　力学模型构建

结合研究背景，考虑煤柱紧邻的采空区形状特征及其对覆岩空间结构的影响，基于沿空充填开采“采空区－煤柱－关键层”覆岩空间结构特征分析，初步探讨了 T 型模型内各结构受力变形和尺寸大小，为了便于 T 型模型力学分析和求解，如图 6 所示 T 型模型简化力学分析结果，对相关条件进行假设：采空区宽度一般远大于区段煤柱宽度，T 型模型水平结构以挠曲变形为主，竖直结构以压缩变形为主，水平岩梁视为弹性岩梁，煤柱视为弹性铰支座(煤柱上方岩体对关键层的支撑按集中力简化，集中力用 $F_S$ 表示)，关键层弯曲触矸并压实采空区后，考虑充填体对顶板结构“支撑”，采空区岩层对关键层触矸支承作用简化成集中力，两侧采空区分别用 $F_l$，$F_L$ 表示；关键层在触矸点处截面水平集中力用 $F_{平}$ 表示，$F_{平}$ 等于截面弯曲正应力 $\sigma'$ 在截面厚度方向上的定积分，即 $F_{平}=\int_{-\frac{h_1}{2}}^{\frac{h_1}{2}}\sigma' \mathrm{d}x$，$\sigma'$ 以截面中心




(a) 关键层触矸截面弯曲正应力　(b) 煤柱及支承岩体简化受力

(c) T 型模型水平和竖直结构简化受力

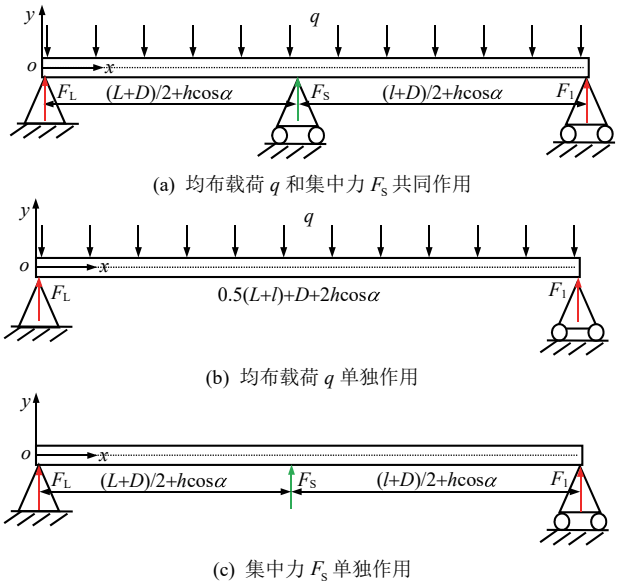
图 6　T 型模型力学简化分析图

Fig.6　Simplified mechanical diagram of T-type model

轴为界，上、下分别受到大小相等、方向相反的弯曲应力，则 $F_{平}=\int_0^{\frac{h_1}{2}}\sigma'\mathrm{d}x+\int_0^{-\frac{h_1}{2}}(-\sigma')\mathrm{d}x=0$；关键层在其梁长度方向受到的均布载荷为 $q$，煤柱上方岩体对关键层支承应力 $\sigma_s$，煤柱煤体受到的支承应力 $\sigma_z$。

### 4.2　考虑煤柱协调变形的超静定求解

T 型模型内含有 $F_I$，$F_L$，$F_S$ 共 3 个未知力，平衡力系 $\sum F=0$、力矩 $\sum M=0$，根据煤柱岩体协调变形进行超静定求解，简化模型受力及变形，如图 7 所示，计算均布载荷 $q$、集中力 $F_S$ 单独作用，引起




(a) 均布载荷 $q$ 和集中力 $F_S$ 共同作用

(b) 均布载荷 $q$ 单独作用

(c) 集中力 $F_S$ 单独作用

图 7　T 型模型的超静定简化分析示意图

Fig.7　The diagram of statically indeterminate simplified analysis of T-type model

岩梁在 $x=0.5(L_0+D)$ 处挠度，并根据岩梁挠曲变形的叠加法原理和 $x=0.5(L_0+D)$ 处协调变形等条件，令 $A=D+0.5(L_0+l_0)$，推导 $F_s$ 过程如下：

(1) 均布载荷 $q$ 单独作用下岩梁在 $x=0.5(L_0+D)$ 处挠度 $w_q$：

$$w_q\big|_{x=\frac{L_0+D}{2}}=-\frac{q(L_0+D)[8A^3-4A(L_0+D)^2+(L_0+D)^3]}{384EI}\tag{4}$$

式中：$E$，$I$ 分别为关键层弹性模量、单位宽度截面惯性矩。

(2) 集中力 $F_S$ 单独作用下岩梁在 $x=0.5(L_0+D)$ 处挠度 $w_{F_s}$：

$$w_{F_s}\big|_{x=\frac{L_0+D}{2}}=\frac{F_S(L_0+D)(l_0+D)[4A^2-(L_0+D)^2-(l_0+D)^2]}{96AEI}\tag{5}$$

(3) 如煤柱岩体未发生破坏，且忽略其竖直方向压缩变形量，岩梁在 $x=0.5(L_0+D)$ 处变形协调的条件 $w\big|_{x=0.5(L_0+D)}=0$，因此满足等式：

$$w\big|_{x=0.5(L_0+D)}=w_q\big|_{x=\frac{L_0+D}{2}}+w_{F_s}\big|_{x=\frac{L_0+D}{2}}=0\tag{6}$$

(4) 根据工程地质实际条件，可以得到 $A$，$D$，$L_0$，$l_0$，$q$ 等参数的具体数值，联立式(4)～(6)求解 $F_S$ 表达式为

$$F_S=\frac{Aq[8A^3-4A(L_0+D)^2+(L_0+D)^3]}{4(l_0+D)[4A^2-(L_0+D)^2-(l_0+D)^2]}\tag{7}$$

(5) 考虑动载条件下集中力 $F_S'$ 估算

结合节 3.3 的充填开采覆岩状态分析，充填开采一般不易形成较大范围关键层破断和覆岩空间结构失稳等强动载现象(可以忽略动载效应)，近似按静载分析。如果需要考虑动载效应，采用“动－静载”叠加原理[23]，估算动静叠加集中力 $F_S'$ 为

$$F_S'=(1+t)F_S\frac{Aq[8A^3-4A(L_0+D)^2+(L_0+D)^3]}{4(l_0+D)[4A^2-(L_0+D)^2-(l_0+D)^2]}\tag{8}$$

式中：$t$ 为煤柱应力动载增量，$t\geqslant 0$。

## 5　基于煤柱防冲－充填体保水的区段煤柱宽度确定

一般冲击地压工作面的防冲区段煤柱宽度原则不超过 5～9 m[24]，甚至采用无或负煤柱[25]，而大煤柱对防止超高水充填体渗水(即“保水”效果)相对有利，沿空充填开采区段煤柱留设，既要满足冲击地压防治要求，又要兼顾超高水充填材料保水效果，以及资源有效回收。

### 5.1　基于防冲的区段煤柱宽度

(1) 煤柱煤体静(动)态支承应力

T 型模型内高度为 $h$ 的“倒梯形”煤柱岩体重力，如图 6(b)所示，设“倒梯形”岩体面积为 $S$：

$$S=(h\cos\alpha+D)h \tag{9}$$

煤柱受到的静(动)态支承应力 $\sigma_z(\sigma_z')$ 为

$$\left.\begin{aligned}\sigma_z&=\frac{F_S+\gamma S}{D}=\frac{F_S}{D}+\left(\frac{h\cos\alpha}{D}+1\right)\gamma h\\ \sigma_z'&=\frac{F_S'+\gamma S}{D}=\frac{F_S'}{D}+\left(\frac{h\cos\alpha}{D}+1\right)\gamma h\end{aligned}\right\} \tag{10}$$

式中：$\gamma$ 为上覆岩层的平均容重。

(2) 煤柱承载强度

通常采空区充填率 $0<\eta<1$，考虑采空区充填效应，底部充填段(高度为 $\eta m$)所受侧向压力可近似采用“挡土墙理论”方法，顶部未充填段(高度为 $m-\eta m$)煤柱边缘无侧向应力，如图 8 所示，煤柱受到充填体侧向水平应力 $p_{ct}$ 近似呈线性分布，因此，采用“薄弱区”的顶部未充填段煤柱分析煤柱承载强度；参考张 明等[26]，煤柱具有“塑性－弹性”2 部分区域时，其综合支承强度 $R$ 近似为

$$R=\left(\frac{2\rho}{D}\varphi_{\min}+\frac{D-2\rho}{D}\varphi_{\max}\right)\sigma_C \tag{11}$$

式中：$\sigma_C$ 为煤体单轴抗压强度；$D>2\rho$ 时煤柱具有弹性区分布，煤柱中间处于弹性状态，$\varphi_{\max}$=3～5，煤柱边缘处于塑性应力状态，$\varphi_{\min}\approx1$，$D\leqslant2\rho$ 时煤柱处于完全塑性状态，$R\approx\sigma_C$。

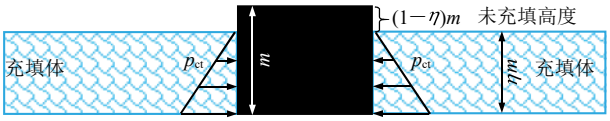



图 8　考虑充填体挡土墙作用的煤柱

Fig.8　Coal pillars considering the effect of backfill retaining wall

(3) 煤柱整体冲击危险性判据

按照冲击地压发生的应力条件，作用在煤柱的静(动)态支承应力，超过煤体极限支承强度时，煤柱即达到整体冲击失稳的力学启动条件，联立式(10)和(11)得到煤柱失稳判据：

$$I_C=\sigma_z/R\text{或}I_C=\sigma_z'/R \tag{12}$$

式中：$I_C$ 定义为煤柱整体稳定性指数，$I_C$ 的值越大，区段煤柱发生冲击失稳的危险性越高。$I_C<1.0$，煤柱整体稳定；$1.0\leqslant I_C<1.2$，煤柱整体弱冲击危险性，$1.2\leqslant I_C<1.5$；煤柱整体中等冲击危险性，$I_C\geqslant1.5$，煤柱整体强冲击危险性。

根据以上分析，可以预测不同稳定性条件下的煤柱宽度，如果煤柱极限稳定的宽度 $D_c$，则合理的防冲煤柱宽度需满足 $D>D_c$。

### 5.2　超高水充填材料保水对区段煤柱宽度要求

采空区充填体主要由 2 种超高水充填材料配比组成，水体积可达 95%以上，根据充填设计等技术要求，避免煤柱、充填体长期应力作用下充填体局部结构变形和发生渗水导致其功能失效，煤柱宽度应大于塑性区宽度，考虑煤柱两侧均有采空区分布，则满足超高水充填材料保水的区段煤柱宽度 $D>D_S\geqslant2\rho$，且 $D$ 越大越有利于超高水充填材料保水效果。

综合以上煤柱防冲、充填体保水 2 个方面，得到深井冲击煤层充填工作面区段煤柱宽度 $D>\max[D_C, D_S]$，并考虑资源有效回收等因素，最终确定合理的区段煤柱宽度。

## 6　应用与分析

### 6.1　合理区段煤柱宽度确定

根据开采范围基本情况，细砂岩亚关键层厚 $h_1=11.2$ m，距 3 煤高 $h=25.3$ m，亚关键层底板到主关键层底板之间距离 $\Delta h=57$ m，取覆岩平均容重 $\gamma=25$ kN/m$^3$，估算亚关键层岩梁结构所承受的上覆岩层载荷为 $q=\gamma\Delta h=1.43$ MPa，CG1307，CG1306 充填采空区宽度平均取 $L_0=50$ m，$l_0=110$ m，区段煤柱宽为 $D$，覆岩综合破裂角 $\alpha\approx80°$，得到 $L=L_0-2h\cos\alpha=41.2$ m，$l=l_0-2h\cos\alpha=101.2$ m，T 型模型水平尺寸 $A=D+2h\cos\alpha+0.5(L+l)=D+80$ m；3 煤平均厚 $m=3.0$ m，煤体单轴抗压强度 $\sigma_C\approx12.5$ MPa，考虑充填影响区段煤柱弹、塑性参数近似取 $\varphi_{\max}=3$，$\varphi_{\min}\approx1$，$\rho\approx3$ m。

研究背景条件下的充填开采覆岩运动相对平稳，忽略动载效应，将参数代入式(7)～(12)由此得到煤柱静态支承应力 $\sigma_z$、煤柱承载强度 $R$(左侧坐标)以及煤柱整体稳定性指数 $I_C=\sigma_z/R$(右侧坐标)与区段煤柱宽度 $D$ 变化曲线，如图 9 所示，随着区段煤柱宽度的增加，静态支承应力 $\sigma_z$ 逐渐下降，煤柱承载强度 $R$ 逐渐上升，并基于此，进一步推算合理的区段煤柱宽度：

(1) 防冲煤柱宽度 $D$ 确定：$D\leqslant2\rho\approx6$ m 时，煤柱处于塑性状态，$R<<\sigma_z$，$I_C>2.5$；6 m$<D\leqslant$9 m 时，$1.0<I_C\leqslant2.5$，且 $I_C$ 随着煤柱 $D$ 增加而减小；$D\approx9$ m 时，$I_C=1.0$，煤柱达到冲击失稳临界

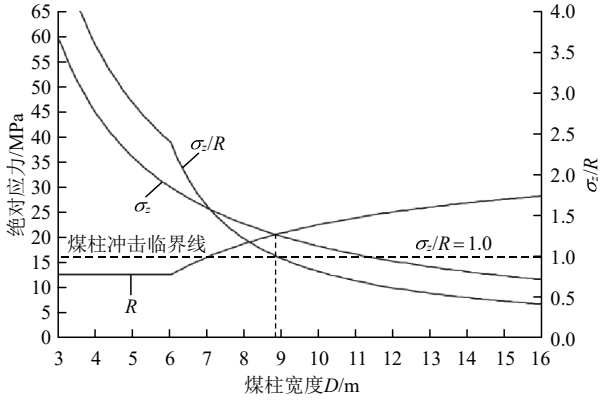



图 9　不同参数与煤柱宽度变化关系曲线

Fig.9　Relationship curves between different parameters and coal pillar width change

状态；9 m＜$D$≤13.5 m 时，0.5≤$I_C$＜1.0，且 $I_C$ 随着煤柱 $D$ 而增大而减小；$D$＞13.5 m 时，$I_C$＜0.5 并趋于稳定值；从冲击地压防治角度出发，合理防冲煤柱宽度 9 m＜$D_C$≤13.5 m，考虑采掘过程中可能出现的不确定因素以及采动等影响因素，取下限煤柱宽度 $D_C$ = 9～10 m。

(2) 超高水充填材料保水对区段煤柱宽度要求：满足超高水充填材料保水的区段煤柱宽度 $D$＞$D_S$ ≥ $2\rho$，因此工程背景条件下的充填材料保水区段煤柱宽度 $D_S$ ≥ $2\rho$ = 6.0 m，取 $D_S$ = 7 m。

综合以上煤柱防冲、充填体保水 2 个方面，得到了区段煤柱宽度 $D$＞ max[$D_C$，$D_S$]= 10 m，同时考虑资源有效回收等因素，最终确定合理区段煤柱宽度 $D$ = 10 m。

### 6.2　数值模拟及分析

结合 CG1306，CG1307 工作面条件，参考顶底板柱信息，运用 FLAC$^{3D}$ 数值软件，对比分析非充填开采和超高水充填开采 2 种工况下采场围岩及区段煤柱垂直应力，根据现场采空区充填效果，这里按照充填率 90%及近水平开采进行建模。如图 10 所示，建立的模型尺寸为 300 m×300 m×151.1m，初始模型划分为 729 600 个单元体，非充填计算模型划分为 714 400 个单元体，根据“等价采高模型”[3] 充填计算模型划分为 728 080 个单元体，设定的边界条件是模型的前方、后方、左侧、右侧以及底部边界实施了固定约束，顶部边界则保持无约束，顶部按照采深等价施加 13.75 MPa 的垂直压应力，重力加速度取 9.8 m/s$^2$；模拟选用 Mohr-Coulomb 强度破坏准则，相关煤岩体及所使用填充材料的力学参数，具体如表 2 所示。

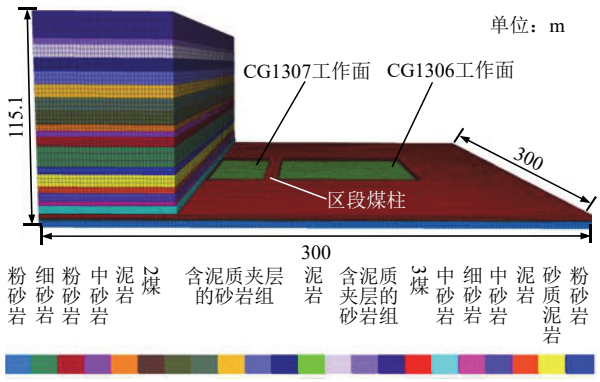



图 10　数值模拟模型图

Fig.10　Numerical simulation model diagram

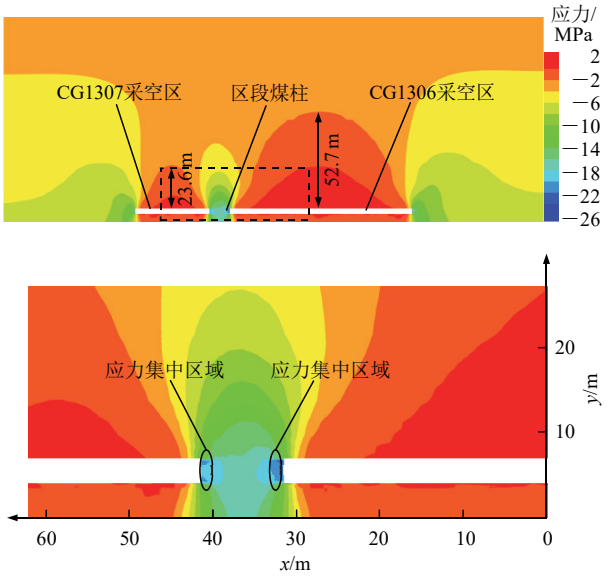
表 2　煤岩体力学特性参数

Table 2　Mechanical property parameters of coal and rock mass

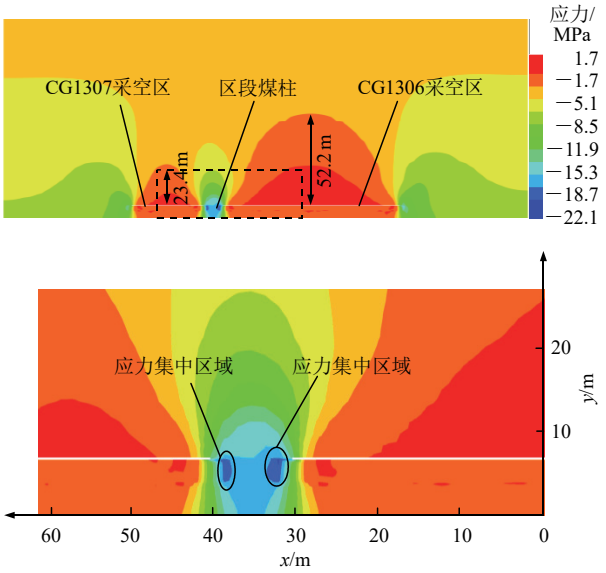
| 岩层名称 | 密度/(kg • m$^{-3}$) | 体积模量/GPa | 剪切模量/GPa | 黏聚力/MPa | 内摩擦角/(°) | 抗拉强度/MPa |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 粉砂岩 | 2 540 | 5.8 | 3.6 | 8.00 | 28 | 1.90 |
| 泥岩 | 2 400 | 6.0 | 3.0 | 7.00 | 26 | 1.38 |
| 3 煤 | 1 540 | 3.4 | 1.2 | 3.00 | 24 | 1.25 |
| 超高水材料 | 1 300 | 0.8 | 0.6 | 0.70 | 18 | 0.52 |
| 中砂岩 | 2 660 | 7.0 | 4.2 | 9.70 | 40 | 1.03 |
| 细砂岩 | 2 600 | 7.2 | 4.8 | 8.60 | 36 | 3.01 |
| 砂质泥岩 | 2 500 | 5.6 | 3.4 | 1.22 | 30 | 0.21 |
| 2 煤 | 1 540 | 3.4 | 1.2 | 3.00 | 24 | 1.25 |

根据数值模拟数据，如图 11 所示，对比分析可得到以下结果：

(1) 非充填开采后，CG1307 采空区上方卸压区高度为 23.6 m，CG1306 采空区上方卸压区高度为 52.7 m；采取充填开采后，CG1307 采空区上方卸压区高度为 23.4 m，CG1306 采空区上方卸压区高度




(a) 非充填开采垂直应力图




(b) 充填开采垂直应力图

图 11　非充填开采和充填开采垂直应力对比

Fig.11　Comparison of vertical stress between non-filling mining and filling mining

为 52.2 m，卸压区分布范围可以近似认为为顶板破裂范围，在高度方向上回填卸压区在高度上变化不明显，但卸压区应力大小下降。

(2) 非充填开采和充填开采 2 种不同工况下，采空区顶板岩层的垂直应力“释放”和相邻边界煤岩体的垂直应力“转移”趋势和分布特征整体相似，区段煤柱是应力集中的主要区域，与非充填开采相比，充填开采条件下的区段煤柱和采空区边界煤岩体所承受的垂直应力峰值均下降。

① 非充填开采后，区段煤柱所受到的最大垂直应力约为 24 MPa，超过了 10 m 煤柱发生冲击失稳的临界强度 21 MPa；采取充填开采后，区段煤柱所受到的最大垂直应力约为 20.4 MPa，未超过 10 m 煤柱发生冲击失稳的临界强度，相比于非充填开采的最大垂直应力降低了 15%。

② 不采取充填开采的情况下，CG1307 采空区左侧面所受到的最大垂直应力约为 16.8 MPa，CG1306 采空区右侧面所受到的最大垂直应力约为 18.6 MPa；采取充填开采后，CG1307 采空区左侧面所受到的最大垂直应力约为 13.8 MPa，降低了 17.8%；CG1306 采空区右侧面所受到的最大垂直应力约为 15.2 MPa，降低了 18.5%。

(3) 不采取充填开采的情况下，区段煤柱最大应力集中区域为煤柱两侧边界(处于临空状态)，易发生煤柱冲击失稳；采取充填开采的情况下，区段煤柱最大应力集中区域向煤柱中部区域转移，煤柱左侧应力集中区域距离煤柱边界 2～3 m，右侧应力集中区域距离煤柱边界 2～3 m，应力集中区域受到两侧煤岩体的阻碍和约束作用，降低了区段煤柱发生冲击失稳的可能性。

(4) 研究工程背景采用留设 10 m 区段煤柱时，充填开采对控制顶板活动和覆岩破裂高度起到了一定作用(相对较小)，但可以明显减小区段煤柱和采空区两侧围岩的垂直应力峰值和转移应力集中区域，从而降低了煤柱冲击失稳的可能性。充填开采 10 m 煤柱能够达到煤柱防冲和保持覆岩空间结构稳定等目标，同时模拟验证了本文研究理论模型和结果的合理性。

## 7　现场应用效果监测

### 7.1　现场监测系统布置

最终确定留设 10 m 区段煤柱进行实践，为保证合理性和安全性，开采过程中进行必要的监测。工作面“见方”区域覆岩运动和采场应力变化等相对活跃，该区域重点监测。采用应力在线系统和高精度微震系统，对充填开采过程中工作面周边区域的应力变化和微震信号进行监测。2022 年 2 月 3 日推采至距切眼约 58 m 处，CG1307 充填工作面推采至“见方”区域，微震、应力监测系统和地面沉降观测布置如图 12，13 所示。

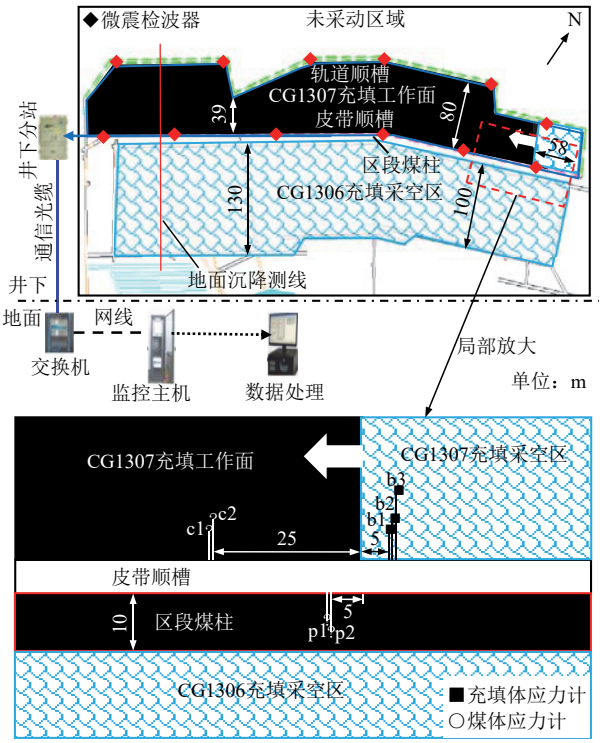



图 12　现场监测系统安装及应力测点布置示意图

Fig.12　Installation of on-site monitoring system and layout of stress measuring points



(a) 微震、应力监测分站　(b) 微震检波器

(c) 充填体应力计　(d) 煤体应力计

图 13　井下监测系统实物图

Fig.13　Downhole monitoring system diagram

(1) 微震系统布置：在轨道顺槽、皮带顺槽及周边巷道间隔 50～100 m 安装 1 组微震检波器(中高频检波器)，实时监测工作面及周边区域的震动场动态演化过程，并揭示充填开采过程中微震事件的影响范围。

(2) 应力系统布置：在 CG1307 充填采空区、区段煤柱和工作面前方不同位置分别布置 3 组应力监测点，用来监测应力变化及围岩结构稳定性。

充填采空区应力监测点，布置在工作面后方 5 m 处充填采空区内部，用于监测不同位置充填体在充填开采过程中应力变化等情况，该组测点安装 3 个专门设计的方形应力监测计(b1，b2，b3)，采用，如图 13(c)所示，孔深依次为 5，7 和 12 m，组内间距 1 m。

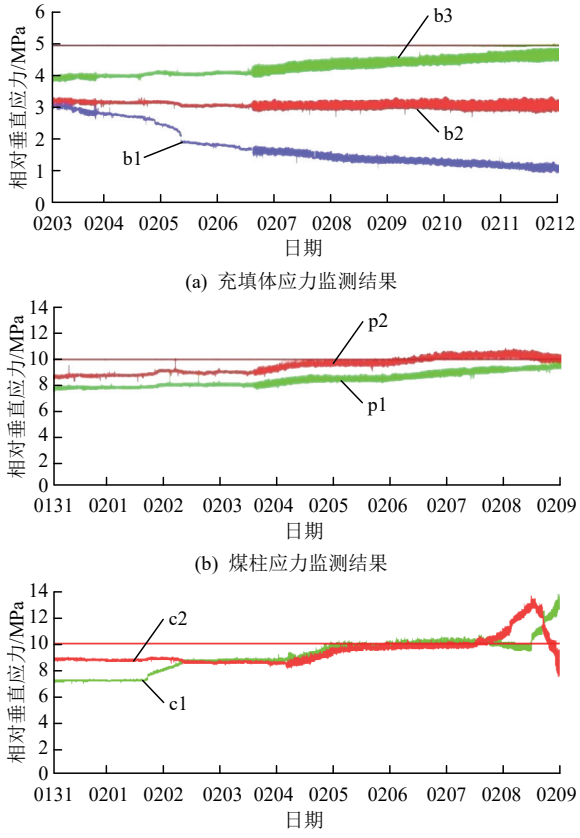
区段煤柱应力监测点，布置在工作面前方 5 m 处区段煤柱内部，用于监测区段煤柱在工作面推采过程中的应力变化等情况，该组测点安装 2 个液压枕式应力监测计(p1，p2)，如图 13(d)所示，孔深依次为 4 和 6 m，组内间距 1 m。

工作面前方应力监测点，布置在 CG1307 充填工作面前方 25 m 处，用于监测工作面前方在工作面推采过程中的应力变化等情况，该组测点安装 2 个液压枕式应力监测计(c1，c2)，如图 13(d)所示，孔深依次为 4 和 6 m，组内间距 1 m。

### 7.2　应力监测结果

(1) 充填体应力监测结果(采空区后方)：2022 年 2 月 3 日～2 月 12 日，在 CG1307 充填开采过程中，工作面后方采空区不同位置充填体主要受到测点至区段煤柱的距离、充填材料强度和工作面推采距离等因素的影响，如图 14，15 所示，b1，b2 和 b3 共 3 个测点布置在I，II，III 区，相应的应力监测曲线呈现出不同变化趋势，具体分析如下：

① b1 距离区段煤柱较近(5 m)，处于“充填体－顶板”不充分接触区，即图 15 中 I 区，该区域充填体与顶板岩块存在一定空隙，顶板未压实充填体，埋设的应力计处于长期的应力“松弛”状态，但考虑应力计本身具有一定的刚度，b1 应力监测曲线缓慢下降，但未降到 0。




(a) 充填体应力监测结果

(b) 煤柱应力监测结果

(c) 工作面前方应力监测结果

图 14　测点相对垂直应力实测曲线(2022 年)

Fig.14　Relative vertical stress at measuring points(in 2022)

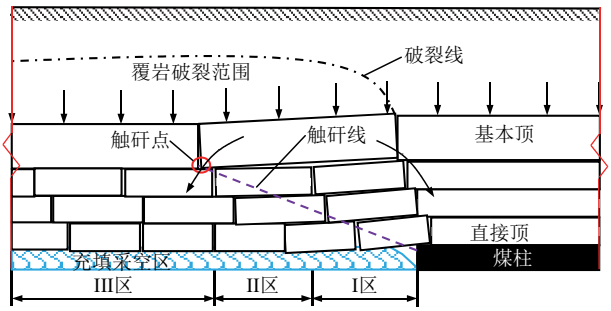



图 15　充填采空区充填体分区示意图

Fig.15　Filling body partition diagram of filling goaf

② b3 距离区段煤柱最远(12 m)，处于“充填体－顶板”稳定压实区，即图 15 中 III 区，该区域

充填体处于上覆岩层充分垮落压实区域，充填体受压且基本稳定，充填材料凝固时间为 4～5 d，即 2 月 7 日该区域充填体强度达到最终凝固强度，随着工作面推采，受 CG1307 充填采空区上覆岩层运动影响，该区域充填体被完全压实，b1 应力监测曲线缓慢上升。

③ b2 位于 b1 和 b3 之间(距离区段煤柱 7 m)，处于“充填体－顶板”缓慢压实区，即图 15 中 II 区，该区域充填体与顶板接触并逐渐压实，随着工作面推采，受 CG1307 充填采空区上覆岩层运动以及充填材料逐渐达到最终凝固强度的影响，充填体与顶板接触并逐渐压实，b2 应力监测曲线保持平稳。

④ 上述实测数据及分析结果表明：在工作面推采的过程中，充填体对采空区上覆岩层起到一定“支撑”作用，充填体各区域无明显应力突变现象，表明采空区充填体未破坏且“触矸点”未发生转移，充填采空区覆岩空间结构整体稳定。

(2) 区段煤柱应力监测结果(回采工作面附近)：2022 年 1 月 31 日～2 月 9 日，工作面“穿越”区段煤柱，煤柱由一侧采空转变为两侧采空，采空区覆岩空间结构完成转化，区段煤柱主要受到工作面“穿越”及充填开采等因素影响，其应力监测曲线呈现平稳→上升→平稳的变化趋势，具体分析如下：

① 在工作面“穿越”区段煤柱之前，随工作面推采，采空区上覆岩层载荷向周边转移造成应力集中，但充填开采缓解了区段煤柱的应力集中程度，应力监测曲线保持平稳。

② 2 月 4 日，工作面“穿越”区段煤柱，工作面推采对测点的影响达到最大程度，应力监测曲线呈现上升趋势。

③ 工作面“穿越”区段煤柱后，工作面不断向前推采，采空区及时得到充填，采空区后方覆岩空间结构保持稳定，区段煤柱应力集中程度得到缓解，应力监测曲线趋于平稳。

④ 上述分析结果表明：在工作面推采的不同阶段，区段煤柱保持稳定，无应力突变，充填开采可以减小区段煤柱应力集中程度，降低采动对煤柱冲击的影响，促使形成稳定的采场围岩协调承载结构。

(3) 工作面前方应力监测结果：2022 年 1 月 31 日～2 月 9 日，在充填开采过程中，工作面前方主要受工作面推进距离以及充填开采等因素影响，其应力监测曲线呈现平稳→上升→平稳→迅速上升的变化趋势，具体分析如下：

① 2022 年 1 月 31 日～2 月 4 日工作面至测点距离超出超前支承压力影响范围，应力曲线保持平稳。

② 2 月 4 日～2 月 5 日工作面推采至距离 c2 约 20 m 处(距离 c1 测点约 21 m)，测点开始受到超前支承压力影响，c1 和 c2 的应力监测曲线开始呈现上升趋势。

③ 2 月 5 日～2 月 8 日，随工作面推采，超前支承压力对测点影响程度逐渐提高，但采空区及时得到充填，覆岩荷载向工作面前方传递程度得到缓解，应力监测曲线保持平稳。

④ 2 月 8 日～2 月 9 日，工作面距离 c1 测点约 7 m，接近超前支承压力峰值区域，应力监测曲线迅速上升达到峰值，随后 c1 和 c2 测点应力计完成服役撤出。

⑤ 上述分析结果表明：受到开采速度限制(充填和冲击工作面等影响)，超前支承压力不断向前转移，但充填开采减缓了覆岩荷载向工作面前方传递的大小和影响程度，使工作面前方覆岩空间结构基本保持稳定。充填开采对保持工作面前方覆岩空间结构稳定起到积极作用。

(4) 钻屑法检(监)测：依据方法[27]，CG1307 工作面回采过程中，分别在“区段煤柱应力监测”、“工作面前方应力监测”位置附近实施了钻屑法检(监)测，排除煤壁 1 m 破碎煤体钻屑结果(误差大)，如图 16 所示，检(监)测结果均未超过预警指标，同时检(监)测过程中未发现动力煤炮、卡钻、顶钻、吸钻等现象，煤粉呈粉末状且颗粒不超过 1 cm。

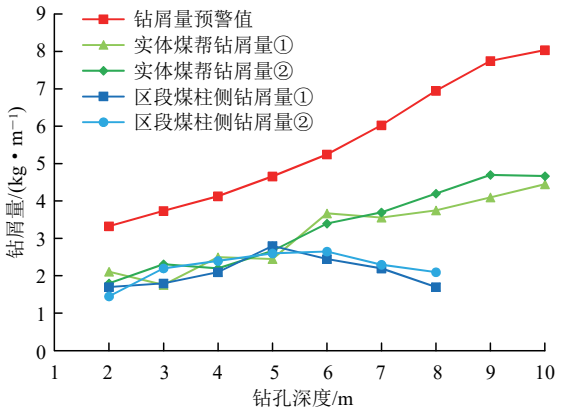
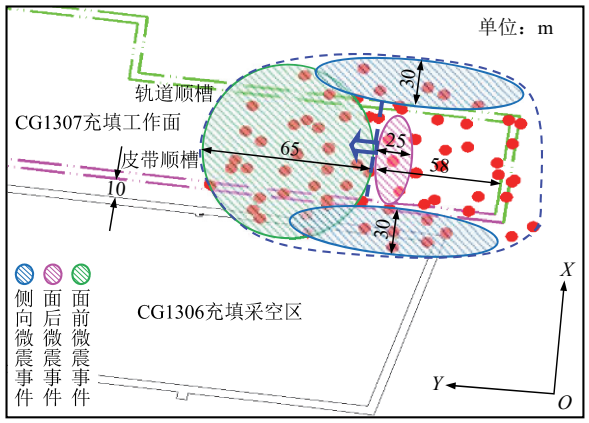



图 16　不同位置钻屑法检(监)测结果

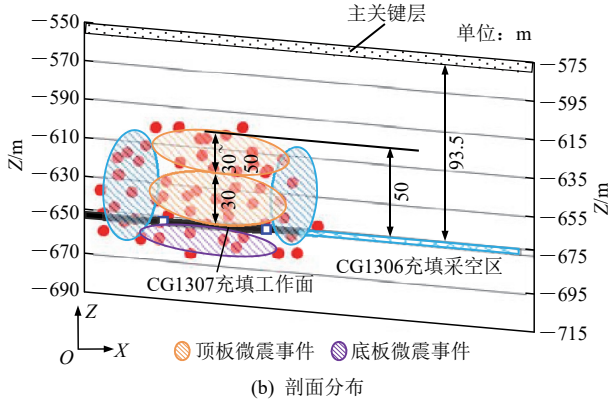
Fig.16　Drilling cuttings inspection in different positions

### 7.3 微震监测结果

CG1307 充填工作面控制推采速度 3～5 m/d，回采过程中液压支架工况良好，采场及巷道围岩未出现明显的动力性破坏，微震事件平面、剖面定位结果，如图 17 所示。统计分析工作面切眼至采空区初次见方期间微震事件：(1) 工作面超前微震事件最大影响范围 65 m；(2) 工作面沿空侧、实体侧微震事件最大影响范围 30 m，两侧近似对称分布；(3) 工作面后方微震事件最大影响范围 25 m；(4) 工作面顶板最大破裂范围距煤层 50 m，低位岩层运动范围 0～30 m，高位岩层运动范围 30～50 m；(5) 工作面皮带顺槽一侧未出现微震事件集中，微震破裂高度、集中程度和分布范围均与轨道顺槽相似，区段煤柱侧顶板岩层仍以侧向围岩运动为主，未出现煤柱失稳造成的大范围岩层运动微震集中事件；(6) 工作面监测微震能量未达到微震冲击预警指标：每天微震总能量未超过 $10^6$ J，单个微震能量未超过 $10^5$ J，未出现覆岩空间结构失稳诱发的强矿震。




(a) 平面分布

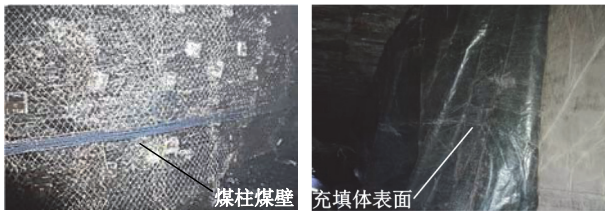



(b) 剖面分布

图 17　微震监测结果

Fig.17　Results of microseismic monitoring

微震事件分布范围、破裂高度、集中程度及无强矿震等特点，推断 CG1307 充填开采过程中，亚关键层及其控制的部分岩层经历“离层－弯曲－触矸－稳定”平稳运动过程，采空区覆岩运动范围未达到中砂岩主关键层赋存高度，即主关键层仍处于稳定状态。矿压观测 CG1307 工作面前方巷道围岩、后方充填体变形情况，如图 18 所示，工作面前方 65 m 范围内的煤柱侧巷道煤壁未出现片帮、臌帮，工作面后方 5 m 采空区充填体表面均完整、无充填体液体渗出，煤柱与充填体之间强度“耦合”良好，表明留设 10 m 区段煤柱未发生冲击，充填体完好，基本实现煤柱防冲、充填体保水预期目标。实践效果与理论分析基本吻合，进一步说明研究确定的区段煤柱宽度留设合理。




(a) 工作面前 65 m 煤柱侧巷道　(b) 工作面后 5 m 煤柱侧充填体

图 18　工程应用效果照片

Fig.18　Engineering application effect photos

### 7.4 地面沉降分析

该矿及周边开采 3 煤层(煤厚 3～5 m、采深 600～800 m)不充填开采、充分采动区域地面最终沉降范围 1.5～3.5 m，沉降系数为 50%～70%，据此推断：若 CG1307，CG1306 形成采空区达到充分采动，地面最终沉降大小预计为 3×(50%～70%)≈1.5～2.1 m。实际 CG1307，CG1306 采用了充填开工艺，采空后地面无明显沉降，如图 19 所示，CG1307，CG1306 沉降盆地最大值为−0.36，−0.28 m，远小于充分采动状态的经验值 1.5～2.1 m，同时区段煤柱支撑的地面区域未发生沉降。地面沉降分析得到 CG1307，CG1306 充填采空区与煤柱、顶板形成稳定结构，同时煤柱未发生失稳，进一步判断煤柱满

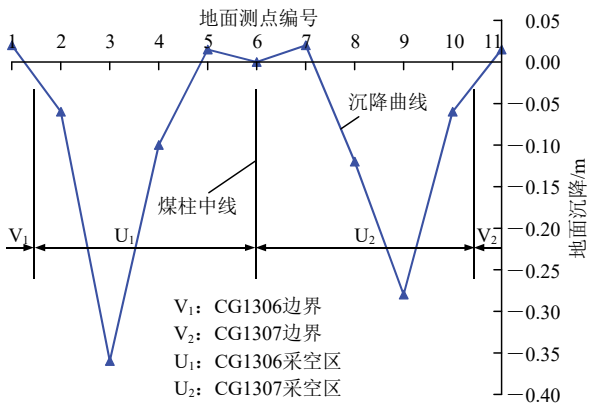



图 19　地面沉降监测曲线

Fig.19　Subsidence curves of the ground surface

足防冲以及能够对覆岩空间结构形成稳定控制效果，佐证了理论模型可靠性。

目前，CG1307 工作面已安全回采完毕，本文研究模型与结果指导了后期接续的 CG1309，CG1310，CG1311 等充填工作面区段煤柱留设及其冲击地压预防，技术和经济效益显著。

## 8　结　论

以典型“深井、冲击煤层、充填工作面”等复杂开采条件下工作面合理区段煤柱宽度确定为背景，围绕充填采场“覆岩空间结构形成与运动－应力集中与转移－矿压形成与显现”这一研究思路，采用理论分析结合实践的方法，开展相关性模型研究和工程应用，得到以下主要结论：

(1) 区段煤柱宽度是影响深井采场覆岩空间结构分布特征的关键参数，如果煤柱宽度同时满足顶板岩层断裂线因素和支承强度因素，深井、充填工作面、沿空开采条件下，煤柱能够初步形成具有一定稳定程度的支撑体结构，并决定着关键层运动状态及其覆岩空间结构分布特征。

(2) 充填开采“采空区－煤柱－关键层”覆岩空间结构分布特征，在竖直空间上近似呈不完全对称 T 型，将 T 型模型的上覆关键层视为弹性岩梁，煤柱等效为铰支座，以此建立了以关键层岩梁挠曲变形和煤柱竖直变形为主要形式的力学简化模型，推导了煤柱协调条件下集中力和支承应力表达，得到了煤柱整体冲击危险的力学判据。

(3) 深井冲击煤层充填工作面区段煤柱合理宽度确定，需要同时考虑煤柱防冲和充填体保水 2 个方面因素，结合实际背景条件并综合 2 个方面因素，确定合理区段煤柱宽度 $D > \max[D_c, D_s]$。

(4) 通过模型预测及数值模拟，确定留设区段煤柱宽度为 10 m，成果成功应用于工程实践，结合微震、应力、地面沉降、矿压显现等监测分析，表明留设的煤柱具有较好防冲可靠性，最终达到了区段煤柱兼顾防冲和充填体保水的双重目标。

## 参考文献(References)：


[1] 潘一山，宋义敏，刘　军. 我国煤矿冲击地压防治的格局、变局和新局[J]. 岩石力学与工程学报，2023，42(9)：2 081－2 095.(PAN Yishan，SONG Yimin，LIU Jun. The pattern，change and new situation of coal mine rock burst prevention and control in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2023，42(9)：2 081－2 095.(in Chinese))

[2] 王兆会，陈明振，李　强，等. 冲击地压矿井充填工作面超前采动应力对充填体充实率的反馈机制[J]. 煤炭学报，2024，49(4)：1 804－1 818.(WANG Zhaohui，CHEN Mingzhen，LI Qiang，et al. Feedback mechanism of advanced mining stress on filling body filling rate in filling face of rock burst mine[J]. Journal of China Coal Society，2024，49(4)：1 804－1 818.(in Chinese))

[3] 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 gangue (solid waste) direct filling coal mining technology[J]. Journal of Mining and Safety Engineering，2009，26(4)：395－401.(in Chinese))

[4] QI F，MA Z. Investigation of the roof presplitting and rock mass filling approach on controlling large deformations and coal bumps in deep high-stress roadways[J]. Latin American Journal of Solids and Structures，2019，16(4)：1－24.

[5] 李　猛，张吉雄，黄　鹏，等. 深井矸石充填采场顶板下沉控制因素及影响规律研究[J]. 采矿与安全工程学报，2022，39(2)：227－238.(LI Meng，ZHANG Jixiong，HUANG Peng，et al. Study on the control factors and influence law of roof subsidence in deep gangue filling stope[J]. Journal of Mining and Safety Engineering，2022，39(2)：227－238.(in Chinese))

[6] 赵兵朝，王京滨，张　晴，等. 侧限条件下充填体-煤柱耦合承载协同作用机制[J]. 煤炭学报，2023，48(12)：4 380－4 392.(ZHAO Bingchao，WANG Jingbin，ZHANG Qing，et al. Coupling mechanism of backfill-coal pillar under confined conditions[J]. Journal of China Coal Society，2023，48(12)：4 380－4 392.(in Chinese))

[7] 崔博强，白锦文，冯国瑞，等. 柱旁单侧充填煤充结构体的破坏响应特征与失稳机制[J]. 中南大学学报：自然科学版，2023，54(6)：2 431－2 446.(CUI Boqiang，BAI Jinwen，FENG Guorui，et al. Failure response characteristics and instability mechanism of coal-filled structure with unilateral filling beside the column[J]. Journal of Central South University：Natural Science，2023，54(6)：2 431－2 446.(in Chinese))

[8] 杨胜利，李　杨，王兆会，等. 充填体支撑作用下坚硬顶板运动模式与控制方法[J]. 采矿与安全工程学报，2023，40(5)：1 057－1 066.(YANG Shengli，LI Yang，WANG Zhaohui，et al. Motion mode and control method of hard roof under the support of filling body[J]. Journal of Mining and Safety Engineering，2023，40(5)：1 057－1 066.(in Chinese))

[9] 冯国瑞，赵永辉，郭育霞，等. 柱式充填体单轴压缩损伤演化及破坏特征研究[J]. 中南大学学报：自然科学版，2022，53(10)：4 012－4 023.(FENG Guorui，ZHAO Yonghui，GUO Yuxia，et al. Study on damage evolution and failure characteristics of cylindrical backfill under uniaxial compression[J]. Journal of Central South University：

Natural Science，2022，53(10)：4 012－4 023.(in Chinese))

[10] 王方田，高　翔，冯光明，等. 深井煤层超高水充填工作面充填体—支架—煤体协同承载机制[J]. 采矿与安全工程学报，2022，39(4)：663－673.(WANG Fangtian，GAO Xiang，FENG Guangming，et al. Synergistic bearing mechanism of filling body-support-coal body in ultra-high water filling working face of deep coal seam[J]. Journal of Mining and Safety Engineering，2022，39(4)：663－673. (in Chinese))

[11] WU P，ZHAO J，JIN J. Similar simulation of overburden movement characteristics under paste filling mining conditions[J]. Scientific Reports，2023，13(1)，https：//doi.org/10.1038/s41598－023－39782－3.

[12] SADAT K F，HADI A，YOUSEFI R M，et al. An experimental study on the mechanical properties of underground mining backfill materials obtained from recycling of construction and demolition waste[J]. Case Studies in Construction Materials，2023，18：e02046.

[13] EHAB G，EL-NAGDY K A. Optimal backfilling materials with high compressive strength based on multiple linear regression[J]. Mining，Metallurgy and Exploration，2023，40(6)：2 183－2 191.

[14] 刘金海，姜福兴，王乃国，等. 深井特厚煤层综放工作面区段煤柱合理宽度研究[J]. 岩石力学与工程学报，2012，31(5)：921－927.(LIU Jinhai，JIANG Fuxing，WANG Naiguo，et al. Research on reasonable width of segment pillar of fully mechanized caving face inextra-thick coal seam of deep shaft[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2012，31(5)：921－927.(in Chinese))

[15] 何文瑞，何富连，陈冬冬，等. 坚硬厚基本顶特厚煤层综放沿空掘巷煤柱宽度与围岩控制[J]. 采矿与安全工程学报，2020，37(2)：349－358.(HE Wenrui，HE Fulian，CHEN Dongdong，et al. Coal pillar width and surrounding rock control of gob-side entry driving in extra-thick coal seam with hard and thick main roof[J]. Journal of Mining and Safety Engineering，2020，37(2)：349－358.(in Chinese))

[16] ZHU S，FENG Y，JIANG F. Determination of abutment pressure in coal mines with extremely thick alluvium stratum：a typical kind of rockburst mines in China[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2016，49(5)：1 943－1 952.

[17] 钱鸣高，廖协兴，许家林. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州：中国矿业大学出版社，2003：59－88.(QIAN Minggao，LIAO Xiexing，XU Jialin. Key strata theory of strata control[M]. Xuzhou：China University of Mining and Technology Press，2003：59－88.(in Chinese))

[18] PENG K，YIN X，YIN G，et al. Galerkin solution of Winkler foundation-based irregular Kirchhoff plate model and its application in crown pillar optimization[J]. Journal of Central South University，2016，23(5)：1 253－1 263.

[19] 曹安业，白贤栖，蔡　武，等. 覆岩厚度变化应力异常机制及冲击矿压诱发机制[J]. 岩土工程学报，2023，45(3)：512－520.(CAO Anye，BAI Xianqi，CAI Wu，et al. Stress anomaly mechanism of overburden thickness change and induced mechanism of rock burst[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2023，45(3)：512－520.(in Chinese))

[20] WANG P，JIANG J，ZHANG P，et al. Breaking process and mining stress evolution characteristics of a high-position hard and thick stratum[J]. International Journal of Mining Science and Technology，2016，26(4)：563－569.

[21] 许　斌，蒋金泉，代　进，等. 采场上覆关键层破断角的力学推导和实验模拟[J]. 煤炭学报，2018，43(3)：599－606.(XU Bin，JIANG Jinquan，DAI Jin，et al. Mechanical derivation and experimental simulation of fracture angle of overlying key strata in stope[J]. Journal of China Coal Society，2018，43(3)：599－606.(in Chinese))

[22] 朱广安，窦林名，丁自伟，等. 孤岛工作面采前冲击危险性预评估研究[J]. 岩土工程学报，2018，40(5)：819－827.(ZHU Guang′an，DOU Linming，DING Ziwei，et al. Pre-evaluation of rock burst risk before mining in island working face[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2018，40(5)：819－827.(in Chinese))

[23] 窦林名，何　江，曹安业，等. 煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J]. 煤炭学报，2015，40(7)：1 469－1 476.(DOU Linming，HEJiang，CAO Anye，et al. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine[J]. Journal of China Coal Society，2015，40(7)：1 469－1 476.(in Chinese))

[24] ZHANG J，JIANG F，ZHU S，et al. Width design for gobs and isolated coal pillars based on overall burst-instability prevention in coal mines[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering，2016，8(4)：551－558.

[25] CHENG Y H，BAI J Z，MA Y K，et al. Control mechanism of rock burst in the floor of roadway driven along next goaf in thick coal seam with large obliquity angle in deep well[J]. Shock and Vibration，2015，DOI：10.1155/2015/750807.

[26] 张　明，成云海，王　磊，等. 浅埋复采工作面厚硬岩层－煤柱结构模型及其稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报，2019，38(1)：87－100.(ZHANG Ming，CHENG Yunhai，WANG Lei，et al. Research on thick and hard rock-coal pillar structure model and its stability in shallow mining face[J]. Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering，2019，38(1)：87－100.(in Chinese))

[27] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 25217.6—2019 冲击地压测定、监测与防治方法第 6 部分：钻屑监测方法[S]. 北京：中国标准出版社，2019.(The National Standards Compilation Group of People′s Republic of China. GB/T 25217.6—2019 Methods for test，monitoring and prevention of rockburst-Part 6：Monitoring method of drilling bits[S]. Beijing：Standards Press of China，2019.(in Chinese))