

# 不同采动深度下煤岩体应变能特征及诱发强矿压机机制研究

慕彬业

国家能源集团神东煤炭集团有限责任公司布尔台煤矿, 内蒙古 鄂尔多斯 017209

**摘要 :** 随着煤矿开采深度增加, 矿压显现问题成为深部矿井开采动力灾害研究热点。为深入研究不同开采深度下煤岩体能量耗散特征及其诱发矿压机机制, 本文以神东某矿为研究背景, 综合采用理论分析、数值模拟及现场监测研究手段, 分析了不同开采深度下围岩能量演化规律, 模拟研究了不同深度煤层采动下围岩变形破坏特征, 揭示了不同深度煤体采动诱发强矿压机机制。结果表明: 埋深不同区域矿压显现情况存在较明显的区别, 煤层埋深超过380m增加了巷道底鼓变形等矿压显现。随煤层埋深的增加, 侧向支撑压力、巷道顶板应力、巷道底板应力、巷道顶底板移进量及巷道两帮收敛量均表现为增大的特征。帮收敛量对比可知, 巷道顶底移进量明显大于巷道两帮收敛量。随着深度增加, 煤岩体内积聚的弹性应变能呈现非线性增加, 此外, 发现煤岩体应变能呈现区域性变化。研究结果对煤矿安全高效开采具有重要意义。

**关键词 :** 动力灾害; 强矿压机机制; 失稳变形; 数值模拟

## Study on the Strain Energy Characteristics of Coal And Rock Mass and the Mechanism of Inducing Strong Mine Pressure under Different Mining Depths

Mu Binye

Buertai Coal Mine of State Energy Group Shendong Coal Group Co., Ltd. Ordos, Inner Mongolia 017209

**Abstract :** With the increase of coal mining depth, mine pressure behavior has become a hot topic in the research of dynamic disasters in deep mine mining. In order to deeply study the energy dissipation characteristics of coal and rock mass and its induced mine pressure mechanism at different mining depths, this paper takes a mine in Shendong as a research background and comprehensively uses theoretical analysis, numerical simulation and on-site monitoring research methods to analyze the energy evolution of surrounding rocks at different mining depths., simulates and studies the deformation and failure characteristics of surrounding rocks under mining of coal seams at different depths, and reveals the mechanism of strong mine pressure induced by mining of coal bodies at different depths. The results show that there are obvious differences in mine pressure behaviors in different areas with burial depths. The coal seam burial depth exceeding 380m increases mine pressure behaviors such as tunnel floor heave deformation. With the increase of the coal seam depth, the lateral bearing pressure, the tunnel roof stress, the tunnel floor stress, the tunnel roof and floor movement, and the convergence of the two sides of the tunnel all increase. Compared with the convergence of the sides, it can be seen that the movement of the top and bottom of the roadway is significantly greater than the convergence of the two sides of the roadway. With the increase of depth, the elastic strain energy accumulated in coal and rock bodies increases non-linearly. In addition, it is found that the strain energy of coal and rock bodies changes regionally. The research results are of great significance to safe and efficient mining of coal mines.

**Keywords :** dynamic disaster; strong mine pressure mechanism; unstable deformation; numerical simulation

## 引言

煤炭资源是我国的重要能源来源, 煤矿开采对国家经济发展起着至关重要的作用。然而, 在煤矿开采过程中, 煤岩体会受到巨大的应力影响, 容易引发矿压灾害, 危及矿工的生命安全和矿山的正常生产<sup>[1-3]</sup>。因此, 深入研究不同采动深度下煤岩体的应变能特征及诱

发强矿压的机制，对于预防和控制矿压灾害、保障矿山安全具有重要意义。

本文以神东某矿为研究背景，综合采用理论分析、数值模拟及现场监测研究手段，分析了不同开采深度下围岩弹性应变能变化特征，模拟研究了不同深度煤层采动下围岩变形破坏特征，揭示了不同深度煤体采动诱发强矿压机制。通过本研究，将有望为煤矿安全生产提供新的理论视角和实践经验，促进我国煤炭工业的技术创新和发展。

### 一、不同采动深度煤岩体能量演化特征

随着煤层埋深增加，煤层中的自重应力随之增加，煤岩体中聚积的弹性能也随之增加，煤层在埋深为  $H$  且无采动影响的三向应力状态下，煤体中的主应力为：

$$\sigma_1 = \gamma H \tag{1}$$

式中  $\gamma$  为岩层容重，单位为  $N/m^3$ ， $\sigma_1$  为垂直应力，单位为 MPa。

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \frac{\mu}{1-\mu} \gamma H \tag{2}$$

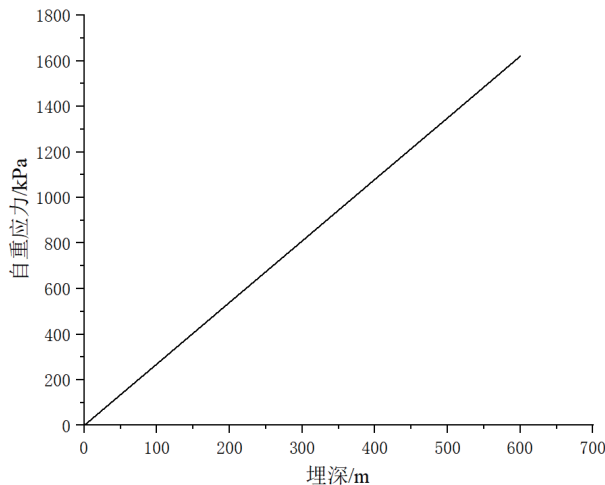
式中  $\mu$  为泊松比； $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  为水平应力，单位为 MPa。因采动应力造成煤岩体体积变形而积聚的弹性能  $U_v$  可表示为：

$$U_v = \frac{(1-2\mu)(1+\mu)^2}{6E(1-\mu)^2} \gamma^2 H^2 \tag{3}$$

式中  $E$  为煤岩体弹性模量，单位为 GPa；形采动应力造成的煤岩体状变形而积聚的弹性能  $U_f$  为：

$$U_f = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)^2}{3E(1+\mu)^2} \gamma^2 H^2 \tag{4}$$

图1为自重应力与容重的关系，图中可以观察到，工作面垂直应力随着埋深增加而增加，对工作面矿压显现的影响就越大，再加之地应力的影响，不同的埋深呈现不同的矿压显现情况。



> 图1自重应力与容重的关系

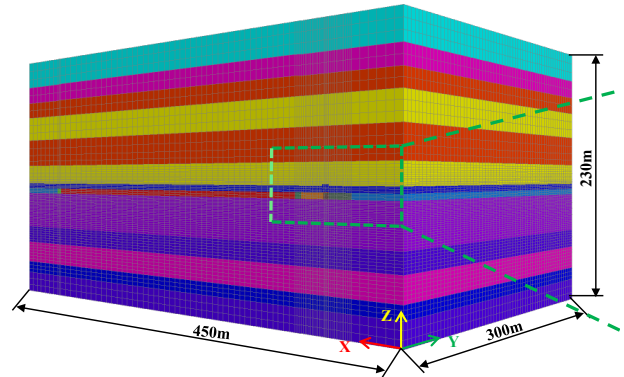
取神东某矿12上典型工作面为研究背景，该工作面埋深332.9 ~ 428.75m，平均381.3m，自切眼向回撤通道1600m区域工作面埋深超过380m，根据工作面实际揭露，煤倾角1~5°，煤层中局部发育3~5层夹矸，厚0.2 ~ 0.8m，煤层平均煤厚4.78m，岩层容重选取2.7t/m<sup>3</sup>。

通过现场观测及计算，矿压显现呈现分区性，此外，辅运顺槽现场矿压显现与埋深关系呈现正相关性，当埋深超过380m时，底鼓变形、顶板下沉等矿压显现剧烈，随着埋深的减小，底鼓等矿压显现减弱。因此，埋深不同区域矿压显现情况存在较明显的区别，煤层埋深超过380m增加了巷道底鼓变形等矿压显现。

### 二、不同采动神东围岩变形破坏分析

#### (一) 不同采动深度数值模型建立

以神东某矿为研究背景，建立与现场条件相一致的数值计算模型，模拟不同深度煤层开采围岩变形破坏特征。模型尺寸为450m×300m×230m（长×宽×高），数值模型如图2所示。模型z方向为自由面，顶部施加垂直压力10MPa，模型底端固定，侧面限制水平移动。测压系数为0.8，模型采用Mohr-Coulomb本构模型，岩石力学参数如表1所示。



> 图2数值模型

表1岩石力学参数

顶底板	煤岩层	体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa	密度 d/kg·m <sup>-3</sup>	摩擦角 f/°	粘聚力 C/MPa	抗拉强度 t/MPa
顶板	粉砂岩	4.5	2.3	2436	33	1.2	2
	砂质泥岩	2.5	2.0	2440	28	3.2	0.9
煤层	12上煤层	2.2	1.5	1350	26	2.5	0.65
底板	砂质泥岩	2.5	2.0	2440	28	3.2	0.9

开挖方案：该方案主要对比不同煤层埋深条件下的围岩变形和应力变化规律，以煤层埋深为变量，编号分别为  $C_j$  ( $j=1 \sim 5$ )。其中， $C_1 \sim C_5$  分别对应煤层埋深为300m、350m、400m、450m、500m条件下的对比研究方案， $C_3$  代表现场施工方案，具体方案见

表2。

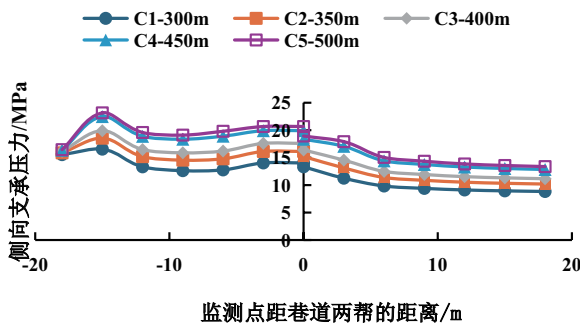
表2煤层埋深对比方案

方案编号	埋深 /m	不变量
C <sub>1</sub>	300	开采速度 煤柱宽度 直接顶厚度 底板岩性 采高
C <sub>2</sub>	350	
C <sub>3</sub>	400	
C <sub>4</sub>	450	
C <sub>5</sub>	500	

## (二) 模拟结果分析

### 1. 围岩应力变化特征

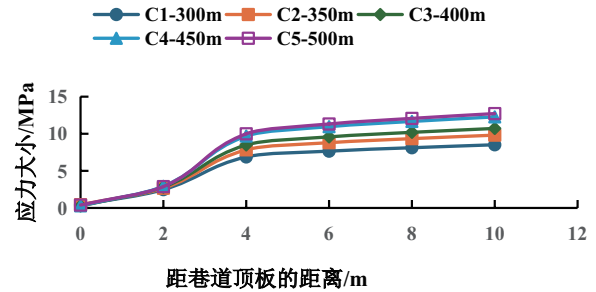
图3为煤柱和实体煤帮侧向支承压力变化曲线，巷道左侧为煤柱，右侧为实体煤。图中可以观察到，在持续靠近巷道中心的方向上，左侧实体煤柱的侧向支承压力整体呈现先增大后减小的“非对称”特征；右侧实体煤帮侧的侧向支承压力整体呈现非线性增大的特征；推采过程中，侧向支承压力峰值始终位于左侧实体煤柱侧。煤层埋深为300m、350m、400m、450m、500m时，峰值应力均出现在左侧实体煤柱侧距离巷道中心15m的位置处，峰值应力分别为16.55MPa、18.54MPa、19.90MPa、22.48MPa、23.16MPa，随着煤层埋深的增加，侧向支承压力呈现增加的特征。



> 图3不同煤层埋深的侧向支承压力曲线

图4为巷道顶板应力变化曲线，在逐渐向深部发展方向上，巷道顶板应力呈现持续增加的趋势，在距离巷道顶板表面4m时，顶

板应力开始趋于稳定，在距离巷道表面10m时，顶板应力达到稳定。煤层埋深为300m、350m、400m、450m、500m时，距离巷道表面4m时的顶板应力分别为6.88MPa、7.83MPa、8.49MPa、9.69MPa、9.99MPa；在距离巷道表面10m时的顶板应力分别为8.51MPa、9.81MPa、10.72MPa、12.27MPa、12.72MPa；随着煤层埋深的增加，巷道顶板应力呈现增加的特征。



> 图4不同煤层埋深的巷道顶板应力变化曲线

综上，随煤层埋深的增加，侧向支承压力、巷道顶板应力、巷道底板应力、巷道顶底板移进量及巷道两帮收敛量均表现为增大的特征。帮收敛量对比可知，巷道顶底移进量明显大于巷道两帮收敛量。

## 三、结论

通过对不同深度煤岩体应变能特征及诱发强矿压机制研究，主要形成如下结论：

- 1) 埋深不同区域矿压显现情况存在较明显的区别，煤层埋深超过380m增加了巷道底鼓变形等矿压显现。
- 2) 随煤层埋深的增加，侧向支承压力、巷道顶板应力、巷道底板应力、巷道顶底板移进量及巷道两帮收敛量均表现为增大的特征。帮收敛量对比可知，巷道顶底移进量明显大于巷道两帮收敛量。
- 3) 随着深度增加，煤岩体内积聚的弹性应变能呈现非线性增加，此外，发现煤岩体应变能呈现区域性变化。

## 参考文献

- [1] 倪先杰, 李迎富. 大采高工作面采场围岩结构力学分析及工程应用 [J]. 采矿与安全工程学报. 2022, 39(5): 911-920.
- [2] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深部开采的定量界定与分析 [J]. 煤炭学报. 2015, 40(1): 1-10.
- [3] 李铁, 王维, 谢俊文, 等. 基于采动顶、底板岩层损伤的冲击地压预测 [J]. 岩石力学与工程学报. 2012, 31(12): 2438-2444.