

基于岩体时间效应的深部变间距 骑跨采巷道稳定性模拟

张培森^{1,2}, 林东才^{1,2}, 杨 健^{1,2}, 王明辉^{1,2}

(1. 山东科技大学 资源与环境工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 矿山灾害预防控制教育部重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘 要:针对深部变间距骑跨采中工作面与底板巷道的不同空间位置关系,采用 FLAC^{3D} 软件对考虑岩体时间效应时巷道垂向压力的影响范围、位移变化形态及塑性破坏程度进行了分析。研究结果表明,层间距对巷道顶底板及两帮相对移近量影响明显,且层间距对巷道两帮相对移近量的影响更大,同时层间距越大受动压的影响越弱,围岩收敛变形越小、底鼓量越小;围岩位移变化受岩体时间效应的影响程度随着煤层间距的增加而弱化;不同煤间距条件下,不同时间区间,其岩体的时间效应影响程度也存在差异。

关键词:变间距;骑跨采巷道;时间效应;数值模拟

中图分类号:U455

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2012)06-0010-05

Numerical Simulation of Deep Varied Interval Riding Mining Roadway Stability Based on Time-effect of Rock

ZHANG Peisen^{1,2}, LIN Dongcai^{1,2}, YANG Jian^{1,2}, WANG Minghui^{1,2}

(1. College of Resource and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control, Ministry of Education, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Aiming at deep varied interval riding mining, as well as different position relationships between working face and floor roadway, the FLAC^{3D} software was applied to analyze the influence area of roadway vertical pressure, displacement variation and plastic damage degree considering time-effect of rock body. The results indicate that there is a significant effect from coal seam interval on the relative deformation amount of roof and floor and both sides of roadway, and even more on the latter. With the increase of coal seam interval, the effect of dynamic pressure on roadway is weaker, convergence deformation of surrounding rock and floor heave are both smaller, and the effect of time-effect on displacement variation of surrounding rock is weaker; the performance of rock time-effect is different under different coal seam intervals and different time ones.

Key words: varied interval; riding mining roadway; time-effect; numerical simulation

煤矿 70%~80% 的巷道围岩稳定性都受到采动的强烈影响^[1]。煤层开采引起回采空间周围岩层应力重新分布,在回采空间周围的煤柱上造成应力集中,且该应力将向底板深部岩层传递^[2-5]。同时随着采深增加,围岩压力不断增高,巷道变形越来越严重,使两帮大量移近,顶板下沉,表现出强烈的底鼓显现。跨采工作面底板巷道断面大,服务年限长,且受到一次甚至多次采动压力影响,变形破坏更为严重^[6-8]。众所周知,

收稿日期:2012-08-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51109124);教育部博士点新教师基金项目(20113718120009);中国博士后基金项目(20090461257);山东科技大学科研创新团队支持计划项目(2010KYTD106)

作者简介:张培森(1977—),男,山东曹县人,副教授,博士,主要从事矿山压力与岩层控制、地下工程灾害预测及防治、矿井特殊开采等方面的教学与科研工作。E-mail:peisen_sky@163.com

岩石是典型的具有时间效应的材料。本研究结合兖州煤业集团有限公司济宁二号煤矿的实际情况,113_上01工作面及113_上02工作面存在一定的回采期及其与113_下08工作面的接续问题,113_上01工作面端头实体煤侧的支撑压力将长期影响下层动压巷道113_下08顺槽围岩的稳定性。因此,借助有限差分软件FLAC^{3D}探讨深部跨采巷道围岩稳定性的流变特征,对深部变间距煤层条件下跨采巷道合理布设方案的确定以及保证矿井安全生产具有重要的现实意义。

1 工程概况

济宁二号煤矿3_上与3_下煤层间距0.7~39.25 m,平均25.66 m,层间距小、起伏变化大,两煤层在十一采区北部合并,向南间距增大。根据矿井生产接续、十一采区构造和煤层赋存特点,为缓解接续紧张,探测煤层赋存情况,辅助探放邻近区段老空水,需提前施工113_下08工作面运输顺槽和切眼,在113_下08面切眼东端施工混凝土密闭墙、与113_下07面采空区隔离,密闭墙留设3趟6吋泄水管,探放113_下05、113_下06、113_下07面采空区积水,造成3_上煤层工作面跨采3_下煤层回采巷道的局面,该巷道的布置如图1所示。

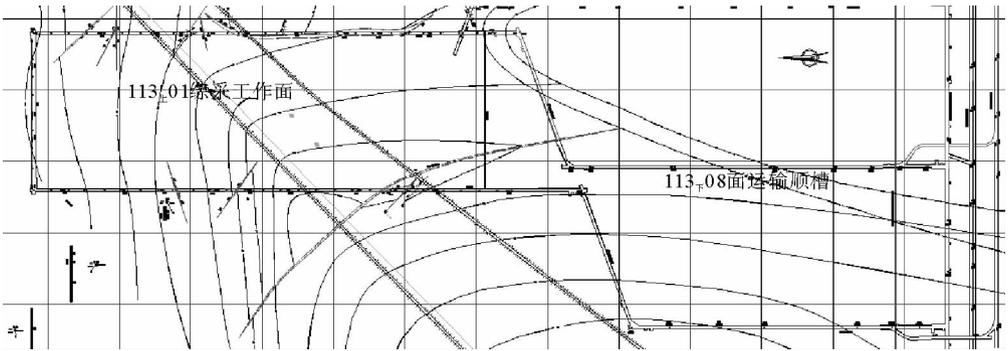


图1 巷道布置示意图

Fig. 1 Diagram of roadway layout

与一般巷道相比,跨采动压巷道在采动过程中受到直接上部工作面、临近工作面及自身工作面前方与侧向煤壁支撑压力的多元叠加作用,导致在不同位置的底板巷道受到动压影响的程度有所不同,113_下08运输巷道的具体空间关系如图2所示。

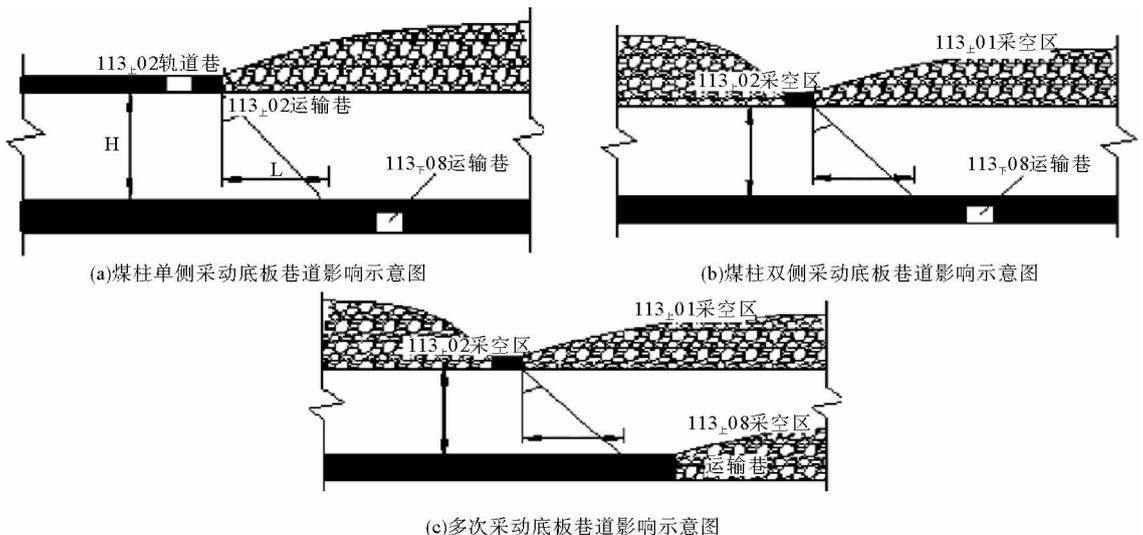


图2 113_下08运输巷道受采动多元叠加影响示意图

Fig. 2 Diagram of 113_下08 transportation roadway by the mining multiple stacking effect

2 数值模型

2.1 计算模型的确立

鉴于 FLAC^{3D} 的诸多优点,根据济宁二号煤矿 113_下08 工作面的地质条件和地层综合柱状图,建立相应的数值计算模型,模型倾斜方向长度为 600 m(X 方向),走向方向长度为 700 m(Y 方向)及垂直方向长度为 55 m(Z 方向),即三维计算模型大小为 600 m×700 m×55 m。具体网格划分如图 3 所示。为了提高计算精度,巷道周围网格进行加密处理,其他部分网格呈发散状。模型的两侧面采用水平位移约束,模型底部设置为固定边界,上部边界施加相当于上覆岩自重的均布载荷 q ,显然, q 的选取与模型上部覆岩的厚度 H 有关。不考虑岩体时间效应时,数值模型采用 Mohr-Coulomb 模型;考虑岩体时间效应时,数值模型采用 CPOW 模型;采空区及巷道用 Null 单元模拟。

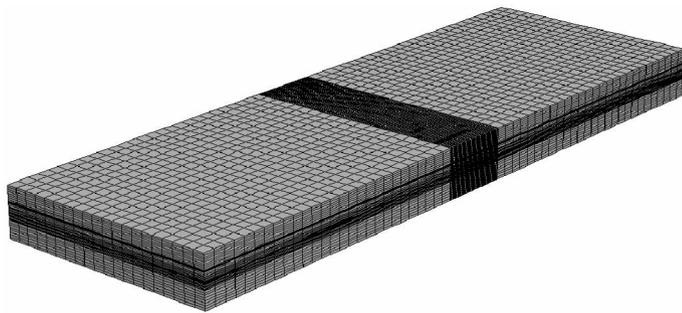


图 3 模型网格划分图

Fig. 3 Map of model grid division

2.2 本构模型

指数准则粘塑性模型 CPOW 结合了双指数模型和 Mohr-Coulomb 弹塑性模型的行为。在模型构成中,总应变率 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 分解为弹性应变率 $\dot{\epsilon}_{ij}^e$,粘性应变率 $\dot{\epsilon}_{ij}^c$ 和塑性应变率 $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ 三个部分:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^c + \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (1)$$

$\dot{\epsilon}_{ij}^e$ 仅描述了应力比率部分(是唯一描述应力比率的分量),而粘弹塑性的偏应变率可以表示为:

$$\dot{S}_{ij} = 2G(\dot{e}_{ij}^c \dot{e}_{ij}^e - \dot{e}_{ij}^p) \quad (2)$$

其中: \dot{S}_{ij} , \dot{e}_{ij} 分别为应力应变变化率的偏张量部分, G 为切线剪切模量。

$$\dot{S}_{ij} = \dot{\sigma}_{ij} - \dot{\sigma}_0 \delta_{ij}, \dot{e}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij} - \frac{e_{vol}^c}{3} \delta_{ij} \quad (3)$$

其中: $\sigma_0 = \sigma_{kk}/3$, $e_{vol}^c = \epsilon_{kk}^c$ 。

体积应变为弹塑性,其表达式为:

$$\dot{\sigma}_0 = K(\dot{e}_{vol}^c - \dot{e}_{vol}^p) \quad (4)$$

其中: $\dot{\sigma}_0 = (\dot{\sigma}_{11} + \dot{\sigma}_{22} + \dot{\sigma}_{33})/3$, $\dot{e}_{vol}^c = \dot{e}_{11} + \dot{e}_{22} + \dot{e}_{33}$, K 为切线体积模量。

按照 Norton 指数准则, Von Mises 等效应力 $q = \sqrt{3J_2}$ ($J_2 = S_{ij}/2$, S_{ij} 是偏应力张量的第二个不变量) 触发蠕变,蠕变率为:

$$\dot{e}_{ij}^c = \dot{e}_{cr} \frac{\partial q}{\partial S_{ij}} \quad (5)$$

蠕变流的方向由 q 的定义式推导出来,即:

$$\frac{\partial q}{\partial S_{ij}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{S_{ij}}{q} \quad (6)$$

根据上述定义式,蠕变强度包含两个分量:

$$\dot{e}_{cr} = \dot{e}_{cr}^1 + \dot{e}_{cr}^2 \quad (7)$$

其中: $\dot{e}_{cr}^1 = \begin{cases} A_1 q^{n_1} & q \geq \sigma_1^{ref} \\ 0 & q < \sigma_1^{ref} \end{cases}$, $\dot{e}_{cr}^2 = \begin{cases} A_2 q^{n_2} & q \leq \sigma_2^{ref} \\ 0 & q > \sigma_2^{ref} \end{cases}$, σ_1^{ref} 和 σ_2^{ref} 是两个模型参数。

塑性应变率是通过 Mohr-Coulomb 流动法则定义,即:

$$\dot{e}_{ij}^p = \dot{e}^p \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} - \frac{1}{3} \dot{e}_{vol}^p \delta_{ij} \quad (8)$$

其中: $\dot{e}_{vol}^p = \dot{e}^p \left[\frac{\partial g}{\partial \sigma_{11}} + \frac{\partial g}{\partial \sigma_{22}} + \frac{\partial g}{\partial \sigma_{33}} \right]$

塑性流的方向 $\partial g / \partial \sigma_{ij}$ 是通过 Mohr-Coulomb 势函数 g 的定义式表述的, 塑性流动率的强度 $\dot{\epsilon}^p$ 是由 Mohr-Coulomb 屈服准则 $f=0$ 推导出来的。在主轴法计算公式中, 剪切屈服的屈服量和势函数分别为:

$$f = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2C \sqrt{N_\phi}; g = \sigma_1 - \sigma_3 N_\psi \quad (9)$$

张力屈服的函数则为:

$$f = \sigma^t - \sigma_3; g = -\sigma_3 \quad (10)$$

其中: σ_1 和 σ_3 分别表示最小和最大主应力; C 为材料内聚力; ϕ 为内摩擦角; ψ 为材料伸缩系数; σ^t 为抗拉强度; $N_\phi = (1 + \sin\phi) / (1 - \sin\phi)$; $N_\psi = (1 + \sin\psi) / (1 - \sin\psi)$ 。

模型的执行过程严格遵照手册中关于指数规则和 Mohr-Coulomb 准则模型描述。首先, 粘弹性响应计算 Δt 时步, 然后计算主应力和主方向, 并检验屈服准则。如果不满足屈服准则, 为该步增加塑性应变增量, 增量强度为 $\lambda = \dot{\epsilon}^p \Delta t$, 以满足屈服准则 $f=0$ 。过程遵循 Mohr-Coulomb 模型实施中提出的方法, 并将粘弹性响应代替了“弹性推测”。

3 计算结果分析

煤间距不同及是否考虑岩体时间效应时, 随着工作面的向前推进, 在距离工作面不同距离的检测面, 其垂向压力的影响范围、位移变化形态及塑性破坏程度都在发生相应的变化。本次计算模拟主要对指定检测面, 在煤间距不同及考虑岩体时间效应与否时, 所对应的 113_下08 运输巷道围岩的垂直向应力、位移及塑性破坏情况进行分析。

计算条件: 煤间距分别为 10, 22, 37 m; 113_下08 运输巷道相对 113_上01 工作面内侧距离为 28 m; 考虑岩体时间效应的时间起点为 113_上01, 113_上02 工作面回采结束后。因篇幅所限, 本文仅给出煤间距为 10 m 时, 考虑及不考虑岩体时间效应条件下检测面所对应的垂直向位移、水平向位移、垂直向应力及 113_下08 运输巷道围岩的塑性破坏的情况, 具体如图 4 和图 5 所示。

从图 4 和图 5 可以看出: 不考虑岩体时间效应时, 113_下08 运输巷道围岩的垂直位移近似呈对称分布, 但由于受 113_上01 工作面侧向支承压力的影响, 巷道围岩顶板下沉影响范围左侧略大; 考虑岩体时间效应时, 随着时间的推移, 巷道围岩垂直及水平位移都不断增加, 但 113_下08 运输巷道左侧的水平位移随时间增加而增加的量值及幅度都远大于右侧随时间增加而增加的值。

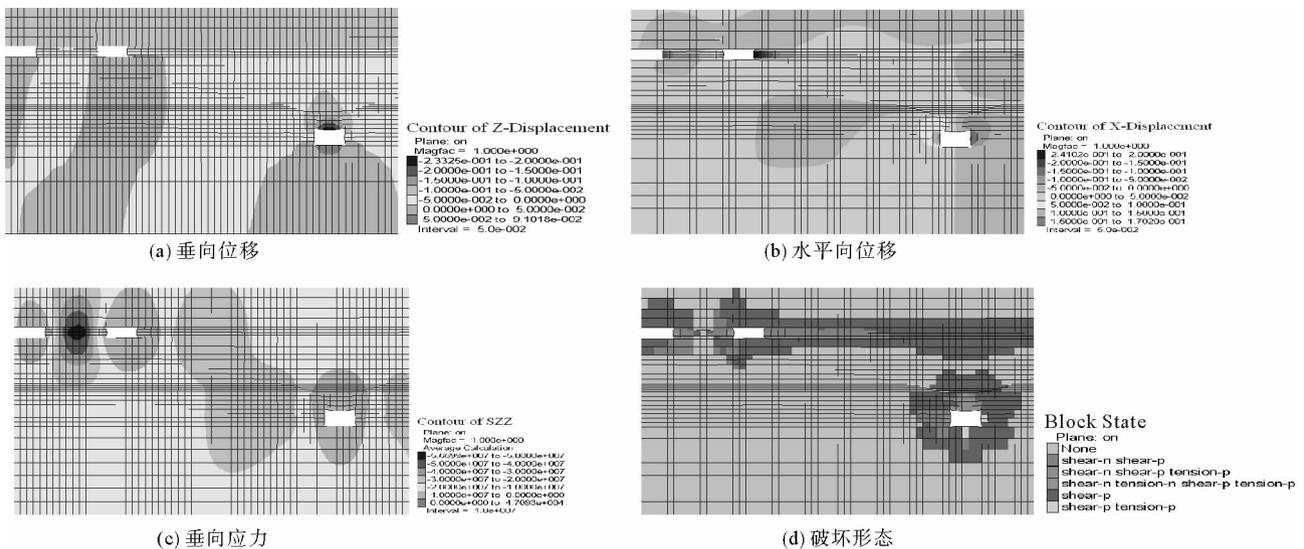


图 4 不考虑岩体时间效应时 113_下08 运输巷道的应力位移及破坏情况图

Fig. 4 Map of stress displacement and damage situation about 113_下08 transportation roadway without considering the time effect of rock mass

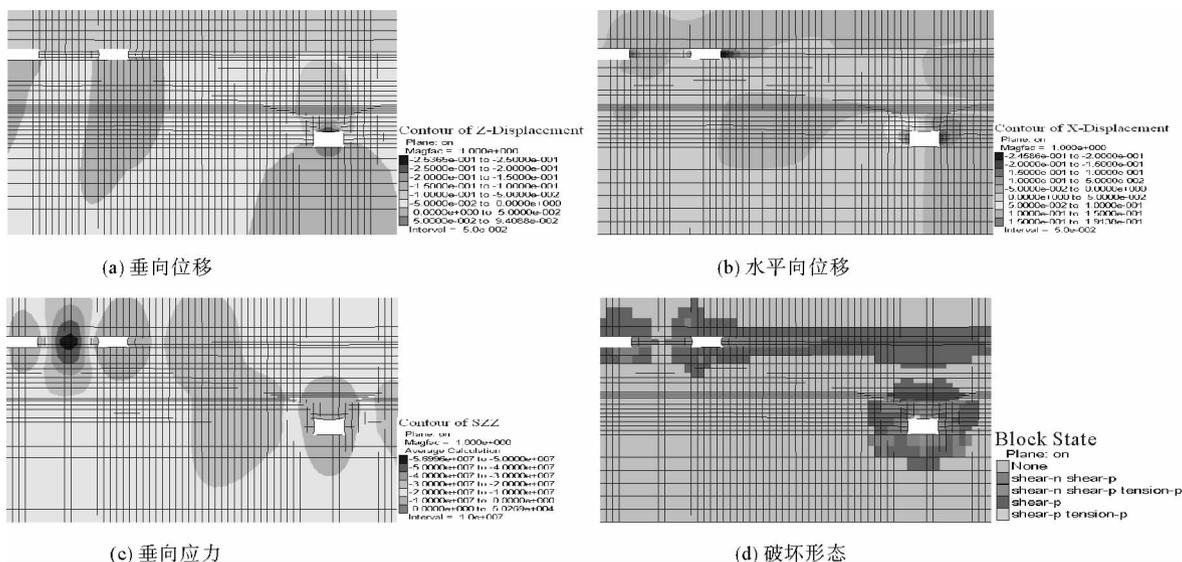


图 5 考虑岩体时间效应时 113_F08 运输巷道的应力位移及破坏情况图

Fig. 5 Map of stress displacement and damage situation about 113_F08 transportation roadway considering the time effect of rock mass

岩体时间效应结束后,运输巷道左侧的水平位移随时间增加而增加的量值为 21.2 mm、幅度为 12.4%,而运输右侧的水平位移随时间增加而增加的量值为 4.8 mm、幅度为 2%;巷道围岩较大变形区域在时间推移的过程中不断向围岩深部扩张,其中巷道底板围岩变形速率较大,扩张深度较大。在考虑岩体时间效应后垂直向应力最大压应力及最大拉应力分别增加了 297 和 3.18 kPa,其相应的增加幅度分别为 0.5%和 6.7%;同时 113_F08 运输巷道围岩的破坏范围也在考虑岩体时间效应前后存在增加趋势,不断向围岩深部扩展。

计算对比可以得出:在考虑岩体时间效应后,煤层间距为 10 m 时,113_F08 运输巷道顶底板及两帮相对移近量分别增加了 23.47 和 26.02 mm、变化幅度分别增加 7.2%和 6.3%;煤层间距为 22 m 时,113_F08 运输巷道顶底板和两帮相对移近量分别增加了 14.7 和 9.4 mm、变化幅度分别增加 4.7%和 2.5%;煤层间距为 37m 时,113_F08 运输巷道顶底板及两帮相对移近量分别增加了 12.3 和 7.1 mm、变化幅度分别增加 3.6%和 1.8%,由此可得 113_F08 运输巷道围岩位移变化受岩体时间效应的影响程度随着煤层间距的增加而弱化。不同煤间距条件下,在时间效应初期,巷道围岩只发生了较小的蠕变变形及较小范围的塑性区,围岩塑性区扩展缓慢且巷道围岩塑性区面积差别不大。随着时间的推移,在上部工作面支承压力长期作用下,下部巷道围岩进入恒速蠕变阶段,巷道围岩塑性区范围快速扩展;进入减速蠕变阶段后,前期围岩塑性区扩展缓慢,后期则几乎保持不变,此时围岩逐渐趋于稳定。巷道围岩塑性区面积同时随着时间的推移不断增大,并逐渐趋于稳定,但煤间距越小巷道围岩塑性区面积达到稳定所需的时间较长。

4 结束语

采用 FLAC^{3D} 软件,在煤间距不同及是否考虑岩体时间效应时,对 113_F08 运输巷道围岩的垂直向应力、位移及塑性破坏情况进行了分析,得出如下结论:

- 1) 层间距对巷道顶底板及两帮相对移近量影响明显,且对巷道两帮相对移近量的影响更显著,同时层间距越大受动压的影响越弱,围岩收敛变形越小,底鼓量越小。
- 2) 围岩位移变化受岩体时间效应的影响程度随着煤层间距的增加而弱化,不同煤间距条件下,不同时间区间,其岩体的时间效应表现程度也存在差异。
- 3) 相对而言,考虑岩体时间效应时分析所得的结论更符合现场实际,研究结果可以为深部变间距煤层骑跨采巷道的长期稳定性分析提供理论参考。