

到界边坡下螺旋钻机开采顺序对煤柱稳定性的影响研究

曾钱帮¹, 程国明², 刘环宇³

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100083; 3. 河海大学, 江苏 南京 210098)

摘要: 对到界边坡下采用螺旋钻机开采煤柱不同开采顺序引起的破坏过程进行了数值模拟。模拟结果再现了不同开挖顺序对煤柱破坏的影响, 模拟结果表明: 层间不同开采顺序对煤柱稳定性影响较大, 而同一层内开挖顺序影响不明显; 研究结果为优化煤柱设计和现场施工工艺提供了理论依据。

关键词: 螺旋钻机开采; 开挖顺序; 煤柱; 稳定性; 数值模拟

中图分类号: TU 94 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2005)07-0768-04

作者简介: 曾钱帮(1973-), 男, 四川三台县人, 博士。主要从事岩体工程地质力学研究。

Study on influence of excavation sequence on the stability of coal pillar under final highwall with auger mining

ZENG Qian-bang¹, CHENG Guo-ming², LIU Huan-yu³

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Chinese Institute of Geological Environment Monitoring, Beijing 100083, China; 3. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The fracturing process induced by different excavation sequence under final highwall with auger mining was numerically simulated. The simulation results reproduced the effect of different excavation sequence on the fracture of coal pillar and indicated that different excavation sequence in different levels exerts great effect on the stability of coal pillars, but in the same level the effect of excavation sequence is not obvious. The study results provided theoretical basis for optimum design and excavation technology of coal pillar.

Key words: auger mining; excavation sequence; coal pillar; stability; numerical simulation

0 引言

螺旋钻机开采作为最终境界边坡下压煤的一种安全和经济的资源回收方法已经在德国、澳大利亚等国的露天煤矿成功应用^[1]。随着我国不少露天煤矿资源的逐渐枯竭, 该技术也将为解决我国露天煤矿到界边坡下压煤的资源回收提供一个新的选择^[2]。该技术是运用螺旋钻机, 通过一系列平行钻孔(直径一般为 1.5~1.8 m), 从暴露的边坡处, 对该煤层水平内较大范围的煤炭进行开采。一般适用于煤层埋藏较浅(30~60 m)、煤层及顶、底板强度较低的到界边坡下压煤开采。每个采场(钻孔)的断面小, 煤柱的宽高比很小, 开采范围较大且不支护^[3]。

国外螺旋钻机开采因煤柱设计不当已导致开采设备和可采资源的巨大损失^[4]。国外对螺旋钻机开采煤柱破坏机理的认识和研究有许多重要进展^[5~7], 近年来国内一些学者也对螺旋钻机开采煤柱的稳定性进行了不少研究, 如文献[8~11]。已有研究大都是考虑煤岩体力学参数、煤柱宽度等自然因素对煤柱变形和稳定性的影响, 尚未考虑不同开挖顺序等人为因素对煤

柱稳定性的影响, 而这些问题是现场十分关心的问题, 也是设计和研究部门必须给予解答的问题。

开挖过程是一个时空不断变化的过程, 不同的开挖顺序对工程围岩变形有很大的影响^[12, 13], 本文运用有限差分法 FLAC 3.30 数值模拟软件, 研究了不同开挖顺序对煤柱稳定性的影响, 为回收露天煤矿最终境界边坡下压煤的设计与生产工序提供了理论依据。

1 数值模型

1.1 研究对象的力学参数

义马煤业公司拟引进澳大利亚 ADU 公司螺旋钻机技术开采已到界的西部边坡及即将到界的南部边坡下的煤。2-3 煤为该矿主采煤层, 煤层厚度 8~12 m。采场西端最终边坡高约 105 m, 边坡角 32°。用直剪、三轴、无侧限抗压强度等试验, 进行了各项力学强度指标的测定, 其煤岩层的物理力学参数见表 1^[14], ADU

基金项目: 国家重点基础研究 973 项目资助(2002CB412702)

收稿日期: 2004-07-22

表 1 煤岩层力学参数表

Table 1 Mechanical parameters of coal and rock mass

岩石类型	密度/(kg·m ⁻³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/(°)	凝聚力/MPa	抗拉强度/MPa
砂岩	2360	9.6	7.5	36	1.4	0.60
2-3 煤	1500	2.6	1.8	30	0.7	0.25
煤矸互迭层	1900	4.4	3.2	32	1.0	0.30

公司技术人员经过现场调研, 建议北露天矿采用钻孔直径 1.5 m, 钻进深度为 60 m 的螺旋钻机。

1.2 模型及计算过程

计算模型和网格划分如图 1 所示, 模型计算范围为 20 m×50 m。划分单元时, 在开挖区域划分较为细密的单元, 外部单元较为稀疏。模型共划分 6400 个单元, 6561 个节点。该模型侧面限制水平移动, 底部限制垂直移动。材料破坏采用摩尔 - 库仑准则。钻孔与煤柱布置示意图见图 2, 钻孔直径为 1.5 m, 煤柱宽度为 1m, 采场间垂向隔层的厚度为 0.5 m。

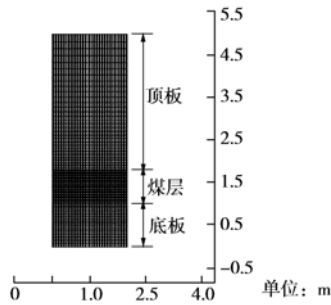


图 1 模型和网格剖分

Fig. 1 Calculation model and mesh

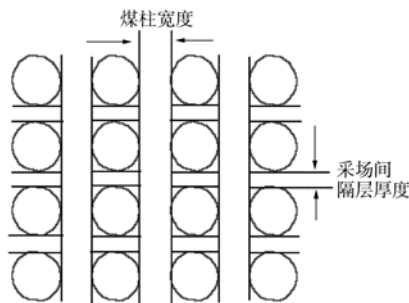


图 2 钻孔与煤柱布置示意图

Fig. 2 Layout of auger holes and coal pillars

本文以 8 m 厚煤层为研究对象。所有方案按煤柱宽度为 1 m, 4 排布置考虑, 煤岩层力学参数采用表 1 中所列参数。从现场工艺角度考虑, 设计 4 种不同开挖顺序方案 (见图 3)。在这种采矿方法中, 每一个钻孔即为一个采场, 在模型中设计了 16 步开挖以模拟开采全过程。

(1) 下行式顺序开挖 (方案 1)

计算开挖步骤如图 3 所示, 开挖顺序为 A₁₁→A₁₂→A₁₃→A₁₄→A₂₁→A₂₂→A₂₃→A₂₄→A₃₁→A₃₂→A₃₃→A₃₄→A₄₁→A₄₂→A₄₃→A₄₄。

图 4 是开采过程煤柱破坏的数值模拟结果 (限于篇幅, 只给出了部分结果)。图中“×”表示塑性屈服, “*”表示剪切屈服。

在开采到第 8 步时 (见图 4 (a)), 仅在钻孔周围和煤柱中出现一些塑性屈服单元; 开采到第 13 步时 (见图 4 (b)), 煤柱左侧中塑性屈服单元已贯通, 表明煤柱已破坏。

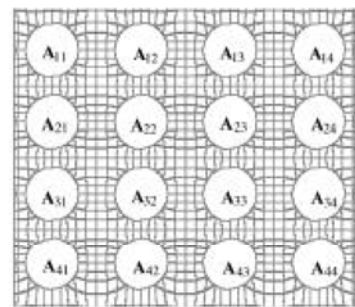
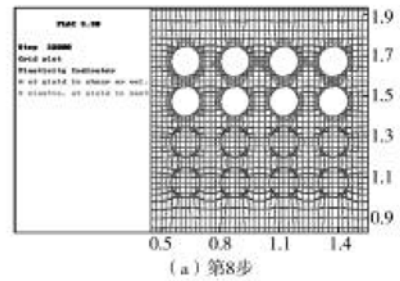
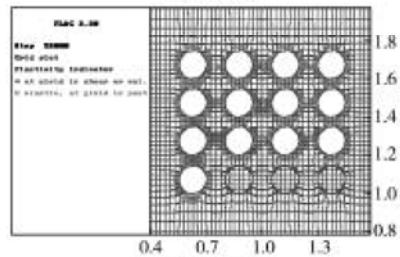


图 3 开挖顺序示意图

Fig. 3 Sketch map of excavation sequence



(a) 第 8 步



(b) 第 13 步

图 4 方案 1 开挖过程中塑性区分布

Fig. 4 Distribution of plastic zone in scheme 1

(2) 下行式间隔开挖 (方案 2)

计算开挖步骤如图 3 所示, 开挖顺序为 A₁₁→A₁₃→A₁₂→A₁₄→A₂₁→A₂₃→A₂₂→A₂₄→A₃₁→A₃₃→A₃₂→A₃₄→A₄₁→A₄₃→A₄₂→A₄₄。

在开采到第 8 步时 (见图 5 (a)), 仅在钻孔周围和煤柱中出现一些塑性屈服单元, 但塑性屈服单元的数目较第一种方案屈服单元数目少, 表明下行式间隔

开挖较下行式顺序开挖稳定性要好;开采到第 13 步时(见图 5 (b)),煤柱中塑性屈服单元已贯通,表明煤柱已破坏。

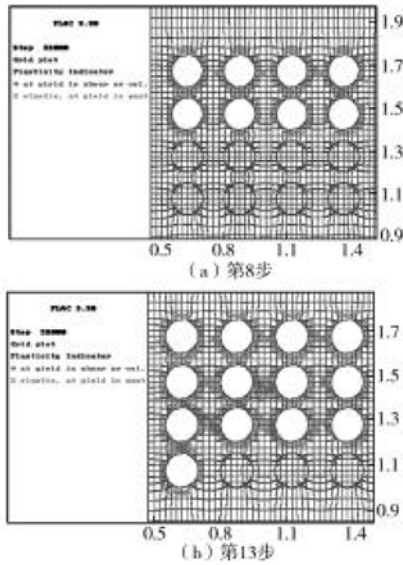


图 5 方案 2 开挖过程中塑性区分布

Fig. 5 Distribution of plastic zone in scheme 2

(3) 跳采式顺序开挖 (方案 3)

计算开挖步骤如图 3 所示, 开挖顺序为 $A_{11} \rightarrow A_{12} \rightarrow A_{13} \rightarrow A_{14} \rightarrow A_{31} \rightarrow A_{32} \rightarrow A_{33} \rightarrow A_{34} \rightarrow A_{21} \rightarrow A_{22} \rightarrow A_{23} \rightarrow A_{24} \rightarrow A_{41} \rightarrow A_{42} \rightarrow A_{43} \rightarrow A_{44}$ 。

当开采到第 8 步时, 仅出现塑性屈服单元; 当开采到第 13 步时, 尽管塑性屈服区范围显著增大, 煤柱和钻孔间竖向“隔层”中均出现了塑性屈服, 但塑性屈服单元并未贯通, 表明煤柱是稳定的; 开采第 16 步过程中及开采后, 塑性区仍未贯通, 表明煤柱仍然稳定 (见图 6)。

(4) 跳采式间隔开挖方案 (方案 4)

计算开挖步骤如图 3 所示, 开挖顺序为 $A_{11} \rightarrow A_{13} \rightarrow A_{12} \rightarrow A_{14} \rightarrow A_{31} \rightarrow A_{33} \rightarrow A_{32} \rightarrow A_{34} \rightarrow A_{21} \rightarrow A_{23} \rightarrow A_{22} \rightarrow A_{24} \rightarrow A_{41} \rightarrow A_{43} \rightarrow A_{42} \rightarrow A_{44}$ 。

当开采到第 8 步时, 仅出现塑性屈服单元; 当开采到第 13 步时, 尽管塑性屈服区范围显著增大, 煤柱和钻孔间竖向“隔层”中均出现了塑性屈服, 但塑性屈服单元并未贯通, 表明煤柱是稳定的; 开采第 16 步过程中及开采后, 塑性区仍未贯通, 表明煤柱仍然稳定 (见图 7)。

数值模拟计算结果对比分析表明: 采用跳采方法较下行式开采方法煤柱稳定性好, 同一层内间隔开采较顺序开采煤柱稳定性稍好, 但影响不明显。

(5) 不同开挖方案开采过程中煤柱中的应力分布

由于煤柱的破坏过程是一个复杂的依赖于煤岩体的力学性质和开挖顺序的力学过程, 因此, 从应力角度研究不同开采顺序中煤柱应力的分布情况, 对于了

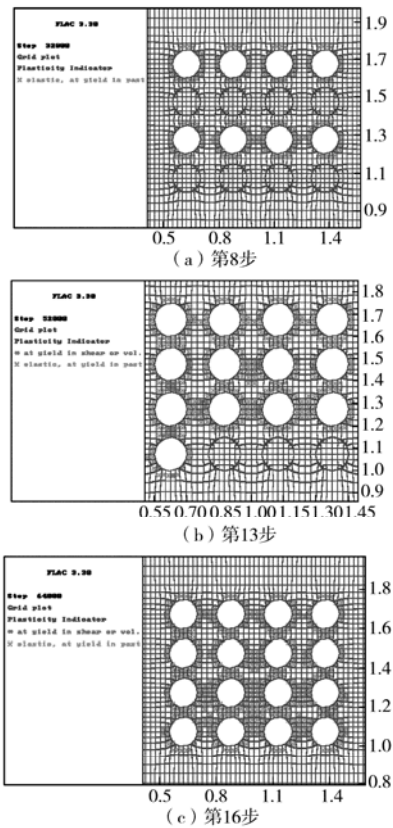


图 6 方案 3 开挖过程中塑性区分布

Fig. 6 Distribution of plastic zone in scheme 3

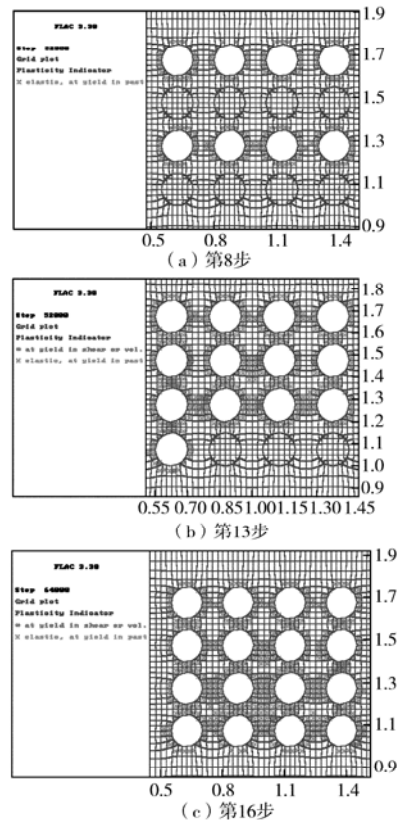


图 7 方案 4 开挖过程中塑性区分布

Fig. 7 Distribution of plastic zone in scheme 4

解煤柱的破坏机理具有重要意义。

表2是几种不同开采顺序方案开采过程中煤柱中峰值应力场分布演化过程。开采第4步后(即开采第一分层后),巷道(钻孔)周围围岩径向应力释放,应力平衡被破坏,采场顶板围岩中的应力转移到两侧的煤柱上,使煤柱上的应力升高,采场顶板围岩中的应力降低,各方案中煤柱中峰值应力相差很小,其中方案1、3中峰值应力相同(1.732 MPa),方案1、4中峰值应力(1.728 MPa)也相同,表明开采同一层时,间隔开采方案中煤柱的峰值应力略低于顺序开采方案中煤柱的峰值应力;开采第8步(即方案1、2开采第二分层,方案3、4开采第三分层)后,方案1、2中煤柱中峰值应力变化较小,而方案3、4中煤柱中峰值应力变化较大;开采第12步(即方案1、2开采第三分层,方案3、4开采第二分层)后,方案1、2煤柱中峰值应力变化较大,而方案3、4煤柱中峰值应力变化很小;开采第13步后,所有方案煤柱中的峰值应力都有较大提高,其中方案1、2煤柱中出现了较大的应力集中,由于上覆岩层主要靠强度较低的细长窄煤柱(宽高比1:10)支撑,同时采场之间的煤柱没有侧向支承,在较高的集中应力下,窄煤柱内部裂隙扩展、贯通,承受不了高应力而导致采场间煤柱的剪切破坏;而方案3、4煤柱中尽管峰值应力也较大,出现了大量塑性破坏区,但煤柱中塑性破坏区并未贯通,表明煤柱并未破坏;当开采16步后,方案3、4中的峰值应力较开采13步后减小,表明煤柱趋于稳定。

表2 不同开采方案中开采不同阶段煤柱中峰值应力分布表

Table 2 Distribution of peak stress of coal pillars in different schemes during auger mining 单位: MPa

开采步骤	方案1	方案2	方案3	方案4
4	1.732	1.728	1.732	1.728
8	1.785	1.755	2.077	2.073
12	1.945	1.927	2.073	2.108
13	2.409	2.409	2.416	2.413
16	煤柱已破坏	煤柱已破坏	2.389	2.377

从煤柱中峰值应力的分布,可以看出:跳采方案(即方案3、4)中煤柱的稳定性较下行式逐层开采方案(即方案1、2)煤柱稳定性好,在同一层中,间隔开采方案煤柱稳定性较顺序开采稍好,但不明显。

2 结 论

(1) 数值模拟计算结果对比分析表明:采用螺旋钻机开采,跳采较逐排开采煤柱稳定性好,层内间隔开采较层内顺序开采煤柱稳定性稍好,但影响不明显;不同开挖顺序将导致煤柱中出现不同的应力状态和不同程度的破坏,因此,煤柱的稳定性不仅取决于煤岩体的力学参数等自然因素,而且与开挖顺序密切相关。

(2) 在煤柱设计中,不仅应考虑煤柱宽度、隔层厚度、煤岩体力学参数等自然因素,还应考虑开挖顺序的影响;在工艺可行的情况下,建议采用跳采方法。

参考文献:

- [1] Schmid M, Knissel W. Highwall mining of coal. Part 1: Foundation and state of the art of mining systems[J]. Surface Mining, 2001, 53(4): 417 - 426.
- [2] 程国明, 黄 侃, 王思敬. 螺旋钻机开采及其发展综述[J]. 矿冶工程, 2003, 23(2): 4 - 6.
- [3] Schmid M, Follington I. Highwall mining of coal. Part 2: New developments in high capacity auger mining[J]. Surface Mining, 2002, 54(1): 1 - 24.
- [4] Baotang Shen, Mary Duncan Fama. Geomechanics and Highwall Mining[J]. World Coal, 2001, 1(2): 35 - 38.
- [5] Medhurst T P, Brown E T. A study of the mechanical behavior of coal for pillar design[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1998, 35(8): 1087 - 1105.
- [6] Follington, Bret Leisemann. Maximizing highwall potential[J]. World Coal, 1999, 8(12): 25 - 29.
- [7] Duncan Fama M E, Trueman R, Craig M S. Two and three dimensional elastic-plastic analysis for coal pillar design and its application to highwall mining[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr. 1995, 32(3): 215 - 225.
- [8] 程国明, 黄 侃, 王思敬, 宁 柯. 螺旋钻机开采的力学效应及煤柱稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1460 - 1464.
- [9] 程国明, 黄 侃, 王思敬. 细长窄煤柱破坏机理的数值分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 266 - 269.
- [10] Cheng Guoming, Wang Sijing, Cai Meifeng. Feasibility study of highwall mining in north surface mine of Yima Coal Corporation, China[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2003, 10(6): 1 - 4.
- [11] 中国矿业大学(北京), 中科院地质与地球物理研究所, 义马煤业公司. 北露天煤矿螺旋钻机开采钻孔布置方案研究[R]. 河南省义马市: 义马煤业公司. 2002.
- [12] Weishen Zhu, Shucui Li. Optimizing the construction sequence of a series of underground openings using dynamic construction mechanics and a rock mass fracture damage model[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2000, (37): 517 - 523.
- [13] 朱维申, 何满潮. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [14] 中国矿业大学, 义马煤业公司北露天矿. 铁路建筑物附近露天开采边界问题研究[R]. 河南省义马市: 义马煤业公司. 1999.