

文章编号: 1000-7598-(2004) 02-0266-04

细长窄煤柱破坏机理的数值分析

程国明¹, 黄侃², 王思敬¹, 宁柯³

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 中国矿业大学 北京校区资源系, 北京 100083;
3. 义马煤业公司北露天煤矿, 河南 义马 472302)

摘 要: 对特厚煤层条件下采用螺旋钻机开采细长窄煤柱的破坏过程进行了数值模拟。模拟结果再现了开采过程中煤柱破坏发生、发展直至塑性区贯通破坏的全过程, 并从应力场演化分析了煤柱破坏过程的应力分布特征及破坏机理。

关 键 词: 螺旋钻机开采; 煤柱破坏; 数值模拟

中图分类号: TB 115; TD 82 **文献标识码:** A

Numerical simulation of failure mechanism of slender coal pillars

CHENG Guo-ming¹, HUANG Kan², WANG Si-jing¹, NING Ke³

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2. Department of Resources Exploitation Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;
3. North Surface Mine of Yima Coal Corporation, Yima 472302, China)

Abstract: Numerical simulation software FLAC^{2D} is used to simulate the failure mechanism of slender coal pillars (which are of much lower width to height ratios) during high wall mining of thick seam. The results reproduce the whole process from the initiation of pillar failure, propagation, to plastic zone being joined together. The characteristics of stress distribution and failure mechanism of coal pillars are discussed by the numerically obtained stress yield during pillar deformation and failure process.

Key words: auger mining; coal pillar failure; numerical simulation

1 前 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的应用^[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。

在开采过程中及开采后, 细长窄煤柱 (煤柱的宽高比很小) 保留在巷道 (钻孔) 之间, 对覆岩进行支护。如果煤柱破坏、垮落, 上覆岩层随之也将冒落到开采巷道, 将导致设备被挤压甚至破坏。国

外因煤柱设计不当已导致开采设备和可采资源的巨大损失^[3]。因此, 了解煤柱的力学破坏机制对于优化煤柱布置设计、提高资源回收率, 具有重要的理论和实际意义。

近年来, 尽管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^[4~7], 但由于煤柱破坏问题的复杂性, 以及研究煤柱破坏过程在实验条件上的困难, 目前, 还没有一种力学解析方法能对螺旋钻机开采过程中煤柱破坏产生、扩展、破坏的全过程进行力学分析。

本文运用 FLAC^{3.30} 软件^[8], 将钻孔断面形状、煤柱宽高比、煤的强度、地应力以及顶底板相互作用等引入到计算模型中, 对螺旋钻机开采中煤柱从稳定、局部破坏、扩展及塑性区贯通的破坏过程进行了数值模拟; 从应力场演化过程分析了煤柱的破坏机理, 并与条带式开采进行了对比。

收稿日期: 2002-11-11

作者简介: 程国明, 男, 1967 年生, 博士, 副教授, 从事岩石力学与工程地质方面的研究。

2 数值模型

2.1 研究对象的力学参数

义马煤业公司北露天煤矿拟引进澳大利亚 ADU 公司螺旋钻机技术, 开采已到界的西部边坡和即将到界的南部边坡下的煤。第 2-3 煤为该矿主采煤层, 煤层厚度为 8~12 m。采场西端最终边坡高约为 105 m, 边坡角 32°, 其煤岩层的物理力学参数见表 1。ADU 公司技术人员经过现场调研, 建议北露天矿采用钻孔直径为 1.5 m, 钻进深度为 60 m 的螺旋钻机^[2]。

表 1 煤岩层力学参数表

Table 1 Mechanical parameters of coal and rock mass						
煤岩类型	重度 / 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	2 360	9.6	7.5	36	1.4	0.60
2-3 煤	1 500	2.6	1.8	30	0.8	0.25
煤矸互选层	1 900	4.4	3.2	32	1.0	0.30

2.2 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。模型共划分了 6 400 个单元, 6 561 个节点。该模型侧面限制水平移动, 底部限制垂直移动。模型中, 地应力按现场实测的地应力考虑^[9], 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 0.8 m, 采场间垂向隔层的厚度为 0.5 m。

本文以 8 m 厚煤层为研究对象 (其它厚度将另行讨论)。模拟过程的开采顺序采用下行式, 分 4 个分层进行开采, 在每一分层中开采顺序由左而右, 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。

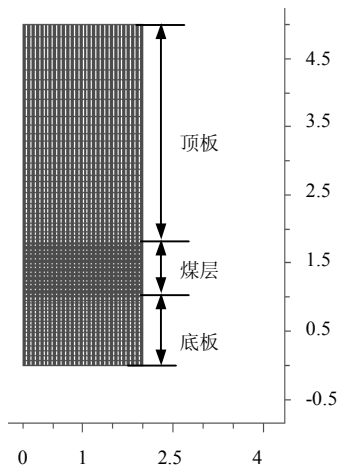


图 1 模型和网格剖分(单位: m)

Fig.1 Calculation model and mesh subdivision (unit: m)

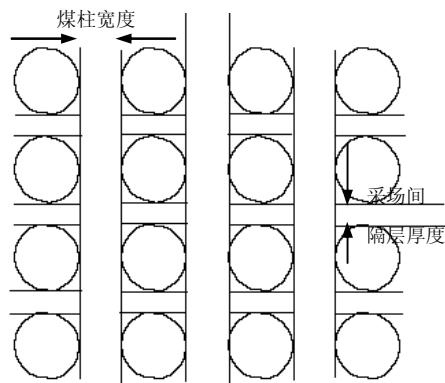


图 2 钻孔与煤柱布置示意图

Fig. 2 Layout of auger holes and coal pillars

3 模拟结果

图 3 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)。由图可见, 当开挖到 16 步时, 煤柱塑性区贯通破坏。(图中“×”, “*”的意义见图 (5))。整个开采过程中煤柱破坏发生、发展及塑性区贯通过程描述如下:

开挖第 1 分层 (第 1~4 步) 后, 煤柱中出现了屈服区, 采场周围和煤柱均处于完好状态, 见图 3(a); 开挖第 2 分层 (第 5~8 步), 与隔层处于同一标高位置的第 2, 3 分层之间的煤柱, 由于其周围有隔层保护, 尚未出现屈服区。开挖本分层后, 导致第一分层煤柱的屈服区范围有所扩大, 第 1, 2 分层及分层之间的煤柱是完好的, 见图 3(b); 开挖第 3 分层 (第 9~12 步) 后, 在采场和煤柱中出现一些塑性单元。开采本分层后, 导致第 1, 2 分层煤柱的屈服区范围有所扩大, 但未出现塑性单元, 分层之间的煤柱仍未出现屈服区, 3 个分层煤柱及分层之间的煤柱是完好的, 见图 3(c); 开挖第 4 分层 (第 12~16 步) 第 16 步时, 第 3, 4 分层之间的煤柱几乎全部屈服, 第 3 分层的所有煤柱出现塑性区贯通, 本分层的左边煤柱也出现塑性区贯通, 表明此时第 3 分层中所有煤柱与第 4 分层左边煤柱已破坏, 煤柱破坏方式皆为剪切破坏, 见图 3(d)。

由上分析可见, 下部分层间煤柱的全部屈服, 可认为是煤柱破坏的前兆。

4 煤柱破坏机理的力学分析

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, 从应力角度研究煤柱的破坏过程, 对于了解煤柱的破坏机理具有重要意义。

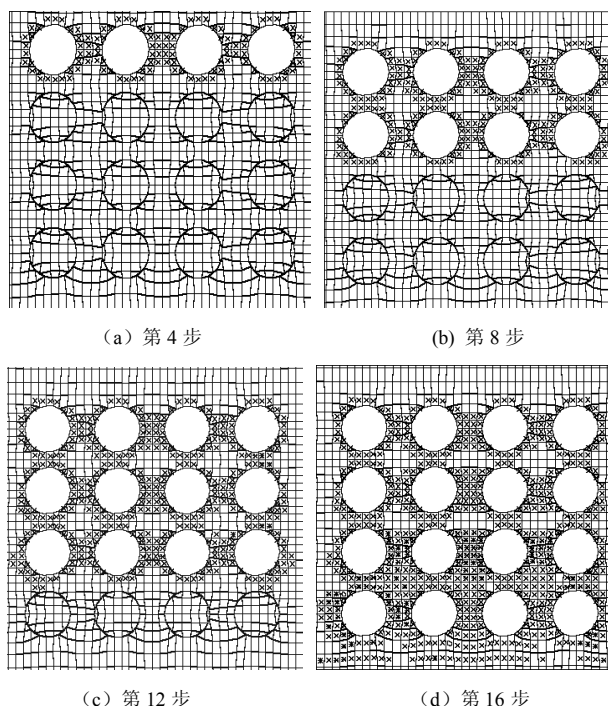


图 3 开采过程中煤柱的塑性区分布
Fig.3 Distribution of plastic zones of coal pillars during auger mining

表 2 是对应于图 3 煤柱破坏过程的应力场分布演化过程。开采第 1 分层后, 巷道 (钻孔) 周边围岩径向应力释放, 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; 开采第 2 分层后, 导致第 1 分层煤柱中的应力都有所下降, 第 2 分层煤柱峰值应力与第 1 分层煤柱相当; 开采第 3 分层后, 导致第 1, 2 分层煤柱中应力再次重新分布, 此时, 3 个分层煤柱中应力相差很小, 表明此时煤柱受力较均匀; 开采第 4 分层后, 上部 3 个分层应力再次重新分布, 其中, 第 1, 2 分层较开采第 3 分层后煤柱中相应的峰值应力略有增加, 但在 3, 4

表 2 开采不同阶段各分层煤柱的峰值应力的分布
Table 2 Distribution of peak stress of coal pillars at each slice during auger mining

开采位置	分层数	左边煤柱 / 10^6 N	中间煤柱 / 10^6 N	右边煤柱 / 10^6 N
开采第 1 分层 后的应力分布	1	-2.00	-2.20	-2.10
开采第 2 分层 后的应力分布	1	-1.90	-2.10	-2.00
	2	-1.90	-2.05	-2.00
开采第 3 分层 后的应力分布	1	-2.00	-2.0	-2.10
	2	-2.00	-2.05	-1.90
	3	-2.00	-2.10	-2.05
开采第 4 分层 后的应力分布	1	-2.10	-2.12	-2.10
	2	-2.10	-2.20	-2.10
	3	-2.50	-2.60	-2.50
	4	-2.80	-2.60	-2.80

注: 表 2 由应力充填图而得^[2]。

分层的煤柱中, 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。

图 4 是煤柱破坏后的应力分布图。由图可见, 开挖第 16 步后, 在第 1, 2, 3 分层中, 中间煤柱的核区大于两侧的核区, 表现为常态; 而在最下分层中, 中间煤柱的峰值应力小于两侧煤柱的峰值应力, 表现为非常态; 在 3, 4 分层之间的中间煤柱中, 应力分布发生突变, 其特点是中间小, 而向两侧逐渐增大, 也表现为非常态; 非常态表明, 中间煤柱承载已达到最大极限, 其应力向两侧煤柱转移, 煤柱中应力非常态是煤柱破坏的应力表征。

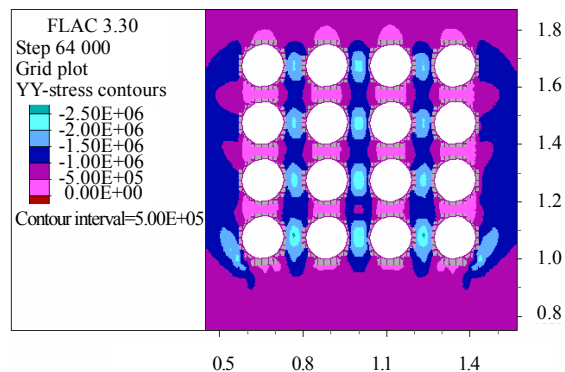


图 4 煤柱破坏后应力等值线分布填色图 (单位: m)
Fig.4 Distribution of stress contours after pillar failure (unit: m)

Queensland 中部的 Gregory 煤矿于 1999 年 5 月采用螺旋钻机进行开采, 由于保留的煤柱宽度较窄, 2000 年 2 月 8 日早上 6 点, 当推进 200 m 到第 2 采区时发现煤柱变形破坏^[3], 现场所观测到的煤柱变形破坏情况与模型煤柱变形破坏后的形态及应力分布状态一致。

5 与条带开采方式的对比

为了进一步探讨细长窄煤柱的破坏机制, 同时, 了解采场间垂向隔层对煤柱破坏的影响, 对于同一条件下的条带法开采进行了数值模拟, 模型中煤柱宽度为 0.8 m, 开挖断面为矩形 (长度 1.5 m, 高度 8 m, 这种开挖方式在实际中是不存在的, 只是便于分析对比)。由图 5 可见, 条带法开采时, 煤柱破坏方式主要为拉张破坏, 局部为剪切破坏; 由图 6 (图 6 为图 5 中中间煤柱局部放大图) 可见, 煤柱中峰值应力位于两侧, 由两侧峰值应力向煤柱

中央逐步降低。煤柱中有大量的拉应力存在,水平方向压应力值比垂向小3个数量级。

螺旋钻机开采时,由于采场间垂向隔层的存在^[2],从煤柱中垂向看,各分层中煤柱的垂向应力较大,而分层间煤柱垂向的应力较低,整个煤柱中垂向应力为高、低应力间隔分布;水平方向核心区峰值应力位于煤柱中央,而两侧较低。第3分层以上分层间煤柱中水平与垂直方向应力值相差不大,而第3,4分层间水平与垂直方向应力值相差近1个数量级。各分层煤柱中水平方向应力值为中间大,两侧小,而分层之间的煤柱中应力分布为中间小,两侧大。

对比表明:螺旋钻机开采时,由于采场间垂向隔层通过提供侧向应力,引起煤柱中的应力分布与条带式分布的较大差异,进而也导致破坏方式的不同。

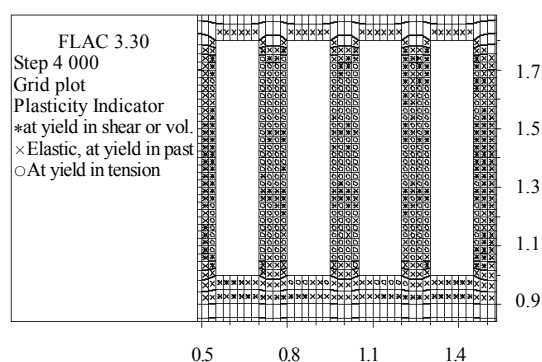


图5 条带开采煤柱破坏后塑性区分布(单位: m)

Fig.5 Plastic zone distribution after pillar failure in strip mining(unit: m)

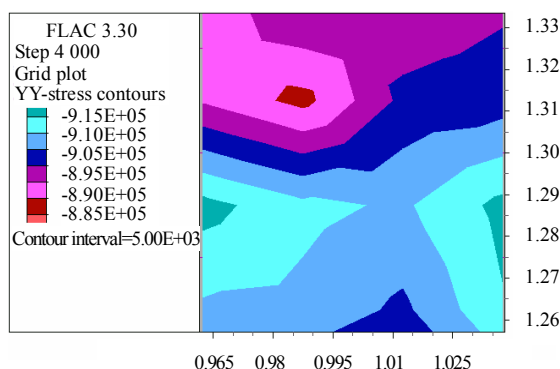


图6 条带开采煤柱破坏后应力等值线分布填色图(单位: m)

Fig.6 Distribution of stress contours after pillar failure in strip mining (local enlargement) (unit: m)

6 结 语

在螺旋钻机开采过程中,煤柱的破坏过程是一个十分复杂的时空过程,既与煤岩体的力学参数有关,又与开挖顺序密切相关,在目前解析方法还难于奏效的情形下进行数值模拟是一条可行之路。通过螺旋钻机开采过程的数值模拟,得出以下结论:

(1)螺旋钻机开采过程中,煤柱中的应力是不断地变化的,随着采高的加大,下部分层煤柱中出现较大的应力集中,是引起窄煤柱塑性破坏发生、发展和贯通的根源。

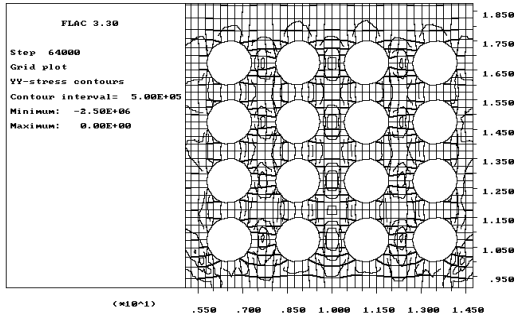
(2)下部分层间煤柱中,屈服区的大量存在,可认为是煤柱破坏前的预兆;最下分层中中间煤柱的峰值应力小于两侧煤柱的峰值应力,表现为非常态;下部分层之间的中间煤柱中应力分布发生突变,其特点是中间小,而向两侧逐渐增大,也表现为非常态;非常态表明,中间煤柱承载已达到最大极限,其应力向两侧煤柱转移,煤柱中应力非常态可被认为是煤柱破坏的应力表征。

(3)由于采场间垂向“隔层”为煤柱提供了侧向应力,导致煤柱中应力分布特征和破坏机制与条带式开采有较大的差异,因而,煤柱优化设计时,仅考虑煤柱宽度是不够的,采场间还应考虑留设一定厚度的垂向“隔层”。

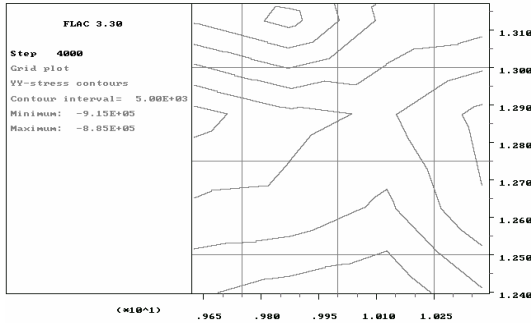
致谢:本专题由义马煤业公司和中科院地质与地球物理研究所工程地质力学重点实验室提供资助;数值计算在中国矿业大学(北京校区)计算中心完成,在此一并致谢。

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] 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.
- [3] M.Schmid, 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]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1998, 35(8): 1 087—1 105.
- [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]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstract*. 1995, 32(3): 215—225.
- [8] TASCA Consulting Group. FLAC^{2D}(3.3)User Manual[Z]. USA: Minnesesota, 1998.
- [9] 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.



煤柱破坏后应力等值线分布图



条带开采煤柱破坏后应力等值线分布图（局部放大）