

综放工作面开采速率对围岩应力环境影响的研究

王金安¹, 焦中华¹, 谢广祥²

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 安徽理工大学, 安徽 合肥 232001)

摘要: 综放工作面开采速率影响着工作面围岩应力重新分布和变形破坏的结果。主要归结于: (1) 开采速率的不同影响围岩应力转移过程的完整程度; (2) 开采速率的不同造成单位时间开采截深的变化, 从而影响了围岩的加卸载过程以及加载速率的变化; (3) 开采速率的不同对岩石蠕变时间有一定的影响, 从而影响岩石的变形及应力分布。以谢桥煤矿为工程背景, 通过数值模拟分析, 揭示开采速率对工作面围岩应力影响的规律。随着综放工作面推进速度的增加, 工作面周围应力降低区的面积减小; 与之对应, 工作面周围岩体破坏区的范围减小; 工作面前方峰值应力向工作面靠近, 峰值应力变大; 围岩岩体的变形时间缩短, 工作面周围岩体的位移减小。提出适当提高综放开采推进速度有利于工作面管理和安全生产。

关键词: 采矿工程; 综放开采; 开采速率; 应力环境

中图分类号: TD 32

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)06 - 1118 - 07

STUDY ON INFLUENCE OF MINING RATE ON STRESS ENVIRONMENT IN SURROUNDING ROCK OF MECHANIZED TOP CAVING MINING FACE

WANG Jin'an¹, JIAO Shenhua¹, XIE Guangxiang²

(1. *School of Civil and Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;*

2. Anhui University of Science and Technology, Hefei, Anhui 232001, China)

Abstract: The mining rate affects the results of stress distribution, deformation and failure process in surrounding rocks in mechanized top-caving mining face. The rate effect can be summarized as follows: (1) the completion of stress transition in surrounding rock under different mining rates; (2) the variation of loading and unloading rate in process of different cutting depths in unit period of time; (3) the development of deformation and stress distribution in rock due to creep behavior. Based on the mining state in Xieqiao Colliery, numerical investigation is carried out to reveal the fact that the reduced stress zone around the mining face decreases with the increase of mining rate. Consequently, the failure zone decreases, and the peak stress locates nearer the mining face while the stress value increases. Since the deformation period becomes shorter, as a result, the displacement reduces. The study points out that appropriately increasing the mining rate of mechanized top caving mining face will benefit the mining face management and safe production.

Key words: mining engineering; mechanized top caving mining; mining rate; stress environment

收稿日期: 2004 - 12 - 31; **修回日期:** 2005 - 05 - 08

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(2004008025)

作者简介: 王金安(1958 -), 男, 1994 年于波兰西里西亚工业大学获博士学位, 现任教授、博士生导师, 主要从事采矿工程、岩土工程、工程力学方面的教学与研究工作。E-mail: wjarock@ces.ustb.edu.cn

1 引言

综放机械化放顶煤开采是提高产量、降低采煤成本、提高生产效率,实现矿井集约化生产的重要手段。但由于综采放顶煤技术一次开采全高,开采强度大,工艺过程复杂,工作面的推进速度缓慢,致使采空区的冒落运动充分参与到工作面附近的围岩应力分布的过程,使工作面管理难度增加、安全状况恶化,工作面冒顶、煤壁片帮、支架失稳的事故时有发生。这不仅严重威胁着工人的生命安全,影响了企业的效益,而且制约了综放技术朝着更加进步的方向发展^[1~3]。

理论和实践表明,综放工作面的推进速度是影响工作面围岩应力重新分布的主要因素之一。近年来,国内外学者对此问题采取多种方法进行研究^[4~6]。陈通^[4]认为提高工作面推进速度可以有效地延长工作面周期来压步距,减小来压次数,可以最大限度降低来压对安全生产的危害;韩卫清^[5]认为可以通过距离反推出推进速度来避免来压与工作面前方断层等地质构造相遇;李德海和高木福^[6]采取连续介质力学的方法探讨了开采速度与地表移动变形的关系。然而在实践中,工作面的推进速度影响工作面围岩应力重新分布的量化关系很难确定。如果能够掌握二者之间比较确定的关系,则将有效地预防工作面冒顶、支架失稳等安全事故,并为现场选择合理的推进速度提供有利依据。

2 开采速率对围岩力学场的影响

开采速率对围岩的力学场的影响主要体现为:开采速率的不同影响了围岩应力转移过程的完整程度;开采速率的不同造成了单位时间开采截深的变化,从而影响了围岩的加卸载过程以及加载速率的变化;开采速率的不同对岩石蠕变时间也有一定的影响,从而影响了岩石的变形及应力分布。

2.1 应力转移过程的完整程度

地下开采势必造成围岩应力的转移和重新分布。力的转移和变形发展需要在一定的时间过程内完成。地下开采围岩力学场本质上是复杂应力空间的转移和发展过程达到何种程度,不同开采速率对围岩力学场的影响事实上仅反映采空区顶板岩层冒落、运动与应力转移过程中的某一时刻的状态。认

识应力的转移过程对研究开采速率对围岩力学场的影响有直接的意义。

2.2 加载速率对岩体的力学特性的影响

影响岩体力学特性的原因主要来自两个方面:其一为岩体的自然状态,即岩性、岩体结构、岩体的赋存条件,以及因施工所引起岩体自然状态的改变;其二为工程作用力的特点。地下开采对开采体是卸载过程,反过来也是对周围岩体的加载过程。单位时间内开采截深增加必然导致周围岩体的单位时间内加卸载活动更加剧烈,可以认为对周围岩体的加载速率增大。国内外学者分别利用不同的材料做过加载速率效应研究,研究结果表明,加载速率对强度、变形有影响。普遍认为,随着加载速率的增大,岩石的峰值强度随之增大^[7~9](见图 1)。

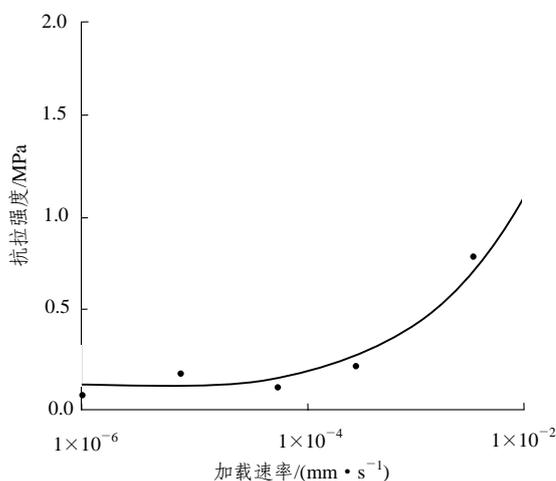


图 1 泥岩强度与加载速率之间的关系^[7]

Fig.1 Relationship between loading rate and strength of mudstone^[7]

在静态加载速率范围内,加载速率对岩体变形特性有影响,但不如对强度影响那样敏感。此外,加载速率对岩体的弹性变形几乎没有什么影响,只有当变形超过弹性范围后才显示出塑性变形的差异^[7]。加载速率对岩体力学特性产生影响的原因,实质上是岩体变形特性的时间相关关系的表征。将岩体视为黏弹性体,在相同载荷的作用下,加载速率越慢,岩体的黏性变形时间就越长,岩体的黏性变形越容易得到充分地发展,总的变形量也就越大。将岩体视为黏弹性体,这只是总原则,对于每一种岩体其弹性成分和黏性成分的数量比随岩性及物质成分而异。岩体的黏性成分越少,岩体变形的时间效应越不明显。对于那些较坚硬的岩石来说,在静

态加载范围内，其黏性变形不易显现，弹性变形起绝对控制作用，这个结论与现场围岩变形监测结果基本上是一致的。

2.3 加载速率对岩体破坏方式的影响

岩体的破坏方式不仅与岩体结构特征有关，而且与加载速率有关。从不同应变速率下的岩体载荷-位移全过程曲线来看，其变形及破坏有如下特征：在高加载速率下，岩体变形量小，屈服阶段很短，变形速度比弹性阶段快，从屈服点到峰值几乎是在瞬间完成^[7]。峰值后岩体瞬间爆裂弹射破坏，峰值后的变形破坏过程很难追踪，而且没有残余应力。在中等加载速率下，弹性变形与前者相同，屈服阶段比前者长，变形量也比较大，可观察到局部破坏过程。峰值点比前者低，峰值后虽然也是突发性爆裂弹射，但弹射程度比前者低。峰值后的变形过程可部分追踪。在低应变速率下，岩体的弹性变形与前者基本相同，有明显的屈服阶段，而且屈服点低，峰值点也比前者低很多。峰值后的变形过程可全部追踪，有明显的残余应力。上述结果只是外观现象，实质上是由于岩石是一种黏弹性体，这种特殊的材料对时间的敏感性起决定作用。应变速率越慢，岩体的黏性变形越有机会发展，消耗的能量也就越多，所积累的弹性变形能就越少。由此可以清楚地看出这种变化规律，即岩体弹性变形能积累多少显然与加载速率有直接关系。而弹性变形能积累程度又决定了岩体破坏时的弹射规模和程度。岩体内弹性变形能积累得越多，岩体破坏时释放的弹性变形能就越多，弹射程度量级自然就越大。

综上所述，岩体的弹射变形能随加载速率增加而增大的原因为：(1) 岩体的黏性变形发展程度取决于加载速率的大小，黏性变形能否得到充分地发挥又直接影响了岩体的脆性程度。(2) 峰值前的变形随加载速率增加而减小，即能量消耗减小。(3) 岩体的变形模量和强度随加载速率的增加而增大，因而岩体中的弹性能储备也随之增大。(4) 峰值后的应力降随加载速率增大，残余应力变小，以至为 0，所以，释放弹性能的能力随加载速率的增加而增强。岩体释放弹性能的能力又决定岩体的破坏方式。

2.4 岩体流变影响

岩石蠕变性研究可追溯到 20 世纪 30 年代。岩石蠕变性是岩石的重要力学特性之一^[10~17]，很多岩石工程问题都与岩石蠕变性有密切关系。陈宗基

曾指出，一个工程的破坏往往是有时间过程的。换句话说，是由岩石的流变性控制的。加载应力不同造成流变过程和性质的根本性改变(见图 2)。

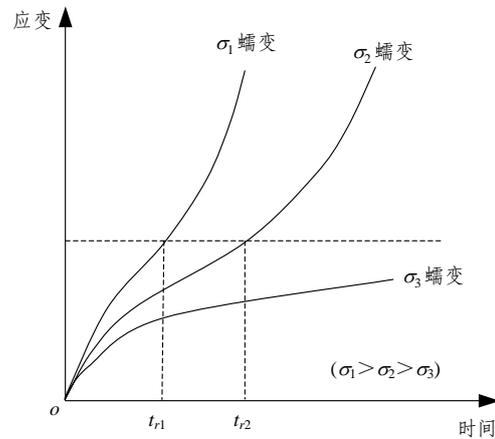


图 2 岩石的蠕变行为与载荷关系

Fig.2 Relationship between creep behavior and stress level

通过上述分析，可以看出加载速率对岩体力学特性有明显的影 响，而且还有一定规律性可循。可以利用这些规律来指导试验研究和生产实践。因此，在研究开采速率对围岩力学场的影响时考虑岩体的加卸载时效作用是十分必要的。

3 计算模型与计算方案

3.1 计算模型

以淮南矿业集团谢桥煤矿 1151(3)工作面的具体地质条件为工程背景，建立数值计算模型研究工作面开采速率对围岩力学场的影响。1151(3)工作面标高-588~-662 m。地面标高为+20.4~+25.8 m，该面煤层结构稳定，普遍发育二层炭质泥岩或泥岩夹矸。平均煤层厚度为 5.4 m，煤层顶、底板情况：老顶为粉、细砂岩，直接顶为泥岩或砂质泥岩，直接底为泥岩，老底为粉砂岩^[18](见图 3)。

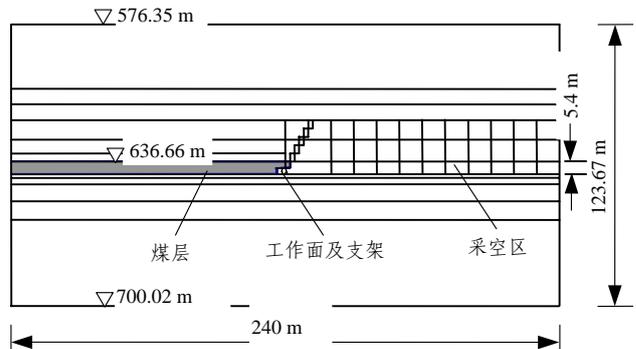


图 3 计算模型简图

Fig.3 Schematic plot of numerical model

计算中采用 Mohr-Coulomb 屈服准则判断岩体的破坏, 模型中煤的体积模量为 833.3 MPa, 剪切模量为 384.4 MPa, 黏聚力为 1.0 MPa, 内摩擦角 34°, 抗拉强度 0.25 MPa。根据岩石力学试验结果, 煤岩体破坏后随变形发展残余强度逐步降低的性质(见图 4), 本计算采用应变软化模型, 即当煤岩达到峰值强度后, 煤岩的残余强度——黏聚力、内摩擦角和剪胀角随着峰后应变值的增加而降低(见表 1)。

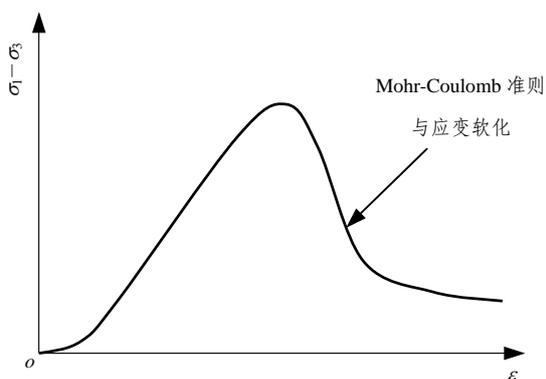


图 4 岩石莫尔 - 库仑模型与应变软化模型

Fig.4 Mohr-coulomb model and strain softening model

表 1 煤岩峰后残余强度变化值

Table 1 Variation of residual strength of coal

峰后应变	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	剪胀角/(°)
0.000 0	1.0	34	7
0.001 5	0.7	31	6
0.005 0	0.5	29	5
0.014 0	0.3	27	4

3.2 计算方法

本研究应用二维 FLAC^{2D}(fast Lagrangian analysis of continua)连续介质有限差分程序进行计算分析。FLAC 程序建立在显示拉格朗日算法基础上, 是为岩土工程应用而开发的, 主要适用模拟计算岩土类工程地质材料的力学行为。FLAC 程序可在每个时步通过更新结点坐标的方式, 将位移增量加到结点坐标上, 以材料网格的移动和变形模拟大变形和扭曲。程序设有多种材料本构模型, 允许输入多种材料类型, 亦可在计算过程中改变某个局部的材料参数, 增强了程序使用的灵活性, 极大地方便了开采过程在计算上的处理。

FLAC 采用显式算法来获得模型全部运动方程(包括内变量)的时间步长解, 从而可以追踪材料的渐进破坏过程, 这对研究开采速率响应是非常重要的。

的。图 5 所示为有限差分计算流程图。计算过程首先调用运动方程, 由初始应力和边界力计算出新的速度和位移。然后, 由速度计算出应变率, 进而获得新的应力或力。每个循环为一个时步, 图 5 中的每个图框是通过那些固定的已知值, 从已计算出一组速度, 计算出每个单元的新的应力。如果应力发生某些变化, 将对相邻单元产生影响并使它们的速度发生改变, 如果选取的时步非常小, 乃至在此时步间隔内实际信息不能从一个单元传递到另一个单元(事实上, 所有材料都有传播信息的某种最大速度)。因为每个循环只占一个时步, 对“冻结”速度的假设得到验证——相邻单元在计算过程中的确互不影响。当然, 经过几个循环后, 扰动可能传播到若干单元, 正如现实中产生的传播一样。

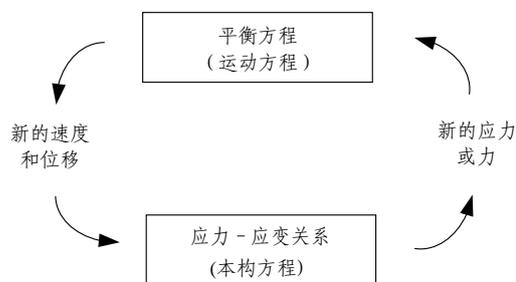


图 5 有限差分计算流程图

Fig.5 Flowchart of finite difference method

对于非线性材料, 物理不稳定的可能性总是存在的, 例如: 煤柱或岩体的突然失效和垮塌。在现实中系统的某些应变能转变为动能, 并从力源向周围扩散。有限差分方法可以直接模拟这个过程, 因为在有限差分公式中包含有动力方程, 在其中包括惯性项——动能产生与耗散。这样, 可以保证在被模拟的物理系统本身是非稳定的情况下有限差分数值计算仍有稳定解。

在准静力学有限差分迭代过程中, 受扰动区域的应力(不平衡力)不断调整, 与现实中的应力转移十分类似(尽管它们经历的数学和力学过程与机械时间无关)。鉴于工作面推进速度引起的时间效应造成围岩应力转移过程与数值计算过程中迭代步数的长短有关, 因此本研究采用不同的迭代步数来间接模拟围岩的应力转移过程。

3.3 方案设计

考虑到提高开采速率, 主要体现为应力转移不充分的情况下继续开采, 以及单位时间开采截深的

增加。一方面，可依据计算时步的长短模拟开采后应力转移过程，从而反应开采速率的影响(见表 2)；另一方面，可通过相同时步内不同开采步距的大小模拟单位时间内开采截深的影响(见表 3)。

表 2 研究围岩应力转移过程的方案

Table 2 Numerical scheme of stress transition process in rock mass

方案号	开采长度/m	开挖步数	单位时间开采截深/m	一次开采计算步数	计算总步数
1	20	10	2	50	500
2	20	10	2	100	1 000
3	20	10	2	200	2 000
4	20	10	2	500	5 000
5	20	10	2	1 000	10 000
6	20	10	2	2 000	20 000

表 3 研究单位开采截深对围岩应力分布影响的方案

Table 3 Numerical scheme of mining depth effect in a unit period on stress distribution

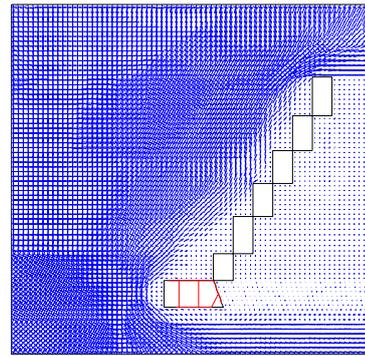
方案号	开采长度/m	开挖步数	单位时间开采截深/m	一次开采计算步数	计算总步数
A	20	20	1	2 000	40 000
B	20	10	2	2 000	20 000
C	20	5	4	2 000	8 000
D	20	2	10	2 000	4 000

4 数值模拟结果分析

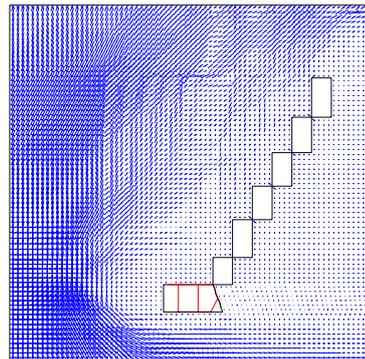
根据前面设计的计算方案，通过对计算结果进行了详细的比较、分析，结论归纳如下：

(1) 开采扰动引起围岩应力重新分布，在工作面前方出现高应力集中区，随着应力的转移，峰值应力增大，峰值应力出现的位置前移；在工作面上方出现低应力区，随着应力的转移，低应力区范围增大，最后趋于一个拱状(见图 6)；在工作面前方和上方形成一个高应力带，随着应力的转移这个高应力带前移，并由带状变为拱状，最后趋于盾状。

(2) 在工作面前方和上方引起围岩破坏，随着应力的转移，在工作面前方破坏范围明显增大，在工作面上方，也同样增大，塑性区的形状也由带状变为拱状，最后趋于盾状(见图 7)；工作面周边围岩移动，随着应力的转移，工作面前方、顶板位移增加，位移峰值由冒落带转移到工作面前方，工作面底板反拱有少量增加，工作面后方底板则表现先增加后降低。



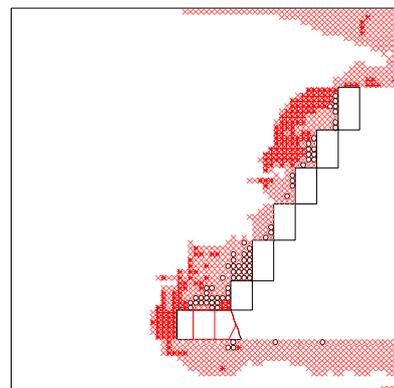
(a) 应力转移不充分(方案 1)



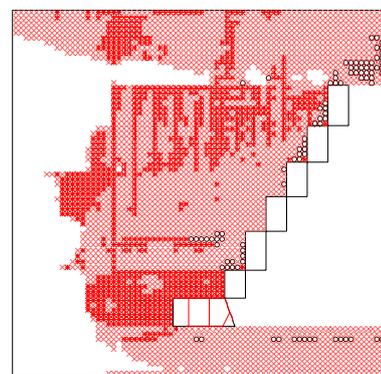
(b) 应力转移充分(方案 5)

图 6 应力转移过程的围岩主应力矢量场比较

Fig.6 Comparison of transition of principal stress vector field in rock mass



(a) 应力转移不充分(方案 1)



(b) 应力转移充分(方案 5)

图 7 应力转移过程的破坏场比较

Fig.7 Comparison of yield field in stress transition process

(3) 研究表明, 开采扰动引起应力的重新分布, 在工作面前方形成峰值应力区, 在工作面附近形成低应力区(见图 8)。随着综放开采工作面推进速度的增加, 低应力区的面积减小; 与低应力区对应, 工作面周围岩体破坏区的范围减小; 工作面前方峰值应力向工作面靠近, 峰值应力变大; 围岩岩体的变形时间缩短, 工作面周围岩体的位移减小。

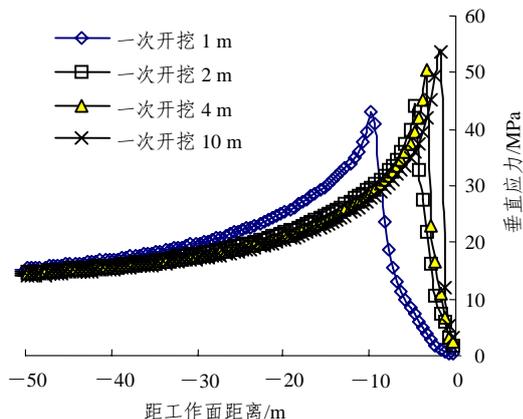


图 8 工作面前方煤内垂直应力曲线

Fig.8 Vertical stress in coal seam in front of mining face

(4) 在工作面前方和上方引起围岩破坏, 并在工作面前方形成一条线状破坏带, 随着固定时步内开采截深的增加, 这条线状破坏带向工作面靠近, 导致工作面周围岩体破坏范围减小; 引起工作面周围围岩移动, 随着固定时步内开采截深的增加, 周围岩体的位移量减小(见图 9)。

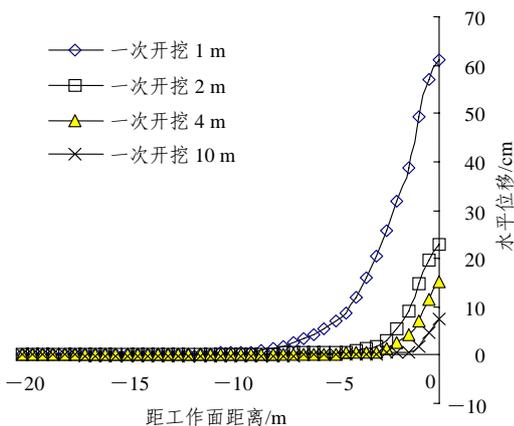


图 9 工作面前方煤内水平位移

Fig.9 Horizontal displacements in coal seam in front of mining face

现场观测到: 综放面前方 20 m 以内, 在工作面推进速度不大的情况下, 尽管围岩应力不高, 回采

巷道变形速率急剧增大, 反映出巷道围岩峰后加速蠕变的又一个显著特点, 值得深入研究^[18]。由此可见, 现场生产实践中应当尽量提高推进速度, 这对节约生产成本、保证生产安全都有一定意义。然而, 必须认识到在工作面前方高应力区的存在, 这个高应力区随着推进速度的增加向工作面靠近, 岩体中高应力区体现为岩体积累了大量的弹性能。过高的弹性能聚集可能在井下诱发岩爆产生。因此, 现实生产中在尽量提高推进速度的同时, 还应当对地下岩石的力学特性进行必要的试验研究。

5 结 语

综放工作面的推进速度是影响工作面围岩应力重新分布的主要因素之一, 它从根本上决定了围岩的破坏程度以及开采成本。为确保安全生产和生产效益最大化, 在开采前提出合适的推进速度, 是现代煤矿生产对理论研究者们提出的一个新的要求。

本文通过数值模拟研究了综放开采工作面推进速度对围岩应力环境的影响, 定性提出了适当提高综放开采推进速度有利于工作面管理和安全生产的诸多理由, 研究成果在淮南矿业集团谢桥煤矿的生产过程中得到了实际验证。然而, 影响现场安全生产的因素还有施工组织、回采工艺、设备运转可靠性、通风系统以及生产工人的熟练程度等等。切实结合这些因素来综合考虑和确定推进速度与安全生产和生产效益最大化之间的关系, 将能够合理地提出一个适当的推进速度。这无疑将是综放开采技术的一个重大进步。

参考文献(References):

[1] 吴 键. 我国综放开采技术 15 年回顾[J]. 中国煤炭, 1999, 25(1): 9 - 16.(Wu Jian. Fifteen years retrospection of mechanized top caving technology in our country[J]. China Coal, 1999, 25(1): 9 - 16.(in Chinese))

[2] 傅冰骏. 国际岩石力学发展动向[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(2): 195 - 196.(Fu Bingjun. Recent developments in rock mechanics and rock engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(2): 195 - 196.(in Chinese))

[3] 周维垣, 杨若琼, 杨 强. 岩石力学发展的最新趋势——第九届国际岩石力学大会会议内容介绍[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 117 - 119.(Zhou Weiyuan, Yang Ruoqiong, Yang Qiang. The current development trend of rock mechanics[J]. Chinese Journal of

- Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 117 - 119.(in Chinese))
- [4] 陈 通. 综采工作面推进速度与周期来压步距关系分析[J]. 煤矿开采, 1999, 34(1): 33 - 35.(Chen Tong. Analysis of the relationship between advancing speed and periodical weighting span in fully mechanized mining face[J]. Coal Mining Technology, 1999, 34(1): 33 - 35.(in Chinese))
- [5] 韩卫清. 综采工作面矿压监测的实践应用分析[J]. 山西建筑, 2004, 30(9): 130 - 131.(Han Weiqing. Practice and application analysis of ground pressure monitoring in fully mechanized mining face[J]. Shanxi Architecture, 2004, 30(9): 130 - 131.(in Chinese))
- [6] 李德海, 高木福. 开采速度与地表移动变形的关系探讨[J]. 煤炭科学技术, 1996, 24(6): 52 - 59.(Li Dehai, Gao Mufu. Discussion about relationship between advancing speed and surface subsidence[J]. Coal Science and Technology, 1996, 24(6): 52 - 59.(in Chinese))
- [7] 郭 志. 试验条件与岩体力学特性的相关性[J]. 水文地质工程地质, 1995, (1): 15 - 19.(Guo Zhi. The relativity between testing condition and mechanical characteristics of rocks[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1995, (1): 15 - 19.(in Chinese))
- [8] 王 社, 张 宏. 加载速率对两类不同材料力学性能影响程度的分析[J]. 西安公路交通大学学报, 1997, 17(1): 121 - 123.(Wang She, Zhang Hong. The influence degree of loading rate on mechanical properties of two different materials[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1997, 17(1): 121 - 123.(in Chinese))
- [9] 李永胜. 加载速率对红砂岩力学效应的试验研究[J]. 同济大学学报, 1995, 23(3): 265 - 269.(Li Yongsheng. Experiment analysis of the mechanical effects of loading rates on red sandstone[J]. Journal of Tongji University, 1995, 23(3): 265 - 269.(in Chinese))
- [10] 张忠亭, 王 宏, 陶振宇. 岩石蠕变特性研究进展概况[J]. 长江科学院院报, 1996, 13(增 1): 1 - 5.(Zhang Zhongting, Wang Hong, Tao Zhenyu. The progress of study on creep characteristics of rocks[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1996, 13(Supp.1): 1 - 5.(in Chinese))
- [11] 张向东, 李永靖, 张树光, 等. 软岩蠕变理论及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1 365 - 1 369.(Zhang Xiangdong, Li Yongjing, Zhang Shuguang, et al. Creep theory of soft rock and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1 365 - 1 369.(in Chinese))
- [12] 刘俊来. 岩石变形机制与流变学研究的近期发展[J]. 地质科技情报, 1999, 18(3): 11 - 15.(Liu Junlai. Recent progress of deformation mechanisms and rheology of rocks[J]. Geological Science and Technology Information, 1999, 18(3): 11 - 15.(in Chinese))
- [13] 焦俊虎, 张永波. 岩石力学本构模型的研究现状及其进展[J]. 太原理工大学学报, 2002, 33(6): 653 - 656.(Jiao Junhu, Zhang Yongbo. The current research and development of the constitutive model of rock mechanics[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2002, 33(6): 653 - 656.(in Chinese))
- [14] 孙 钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.(Sun Jun. Geotechnical Material Rheology and Its Engineering Application[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.(in Chinese))
- [15] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.(He Manchao, Jing Haihe, Sun Xiaoming. Soft Rock Engineering Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2002.(in Chinese))
- [16] Okubo S, He C, Nishimatsu Y. Time dependent behaviour in uniaxial compression[J]. J. Min. Metal. Inst. Japan, 1987, 103: 117 - 181.
- [17] Okubo S, Nishimatsu Y. Uniaxial compression testing using a linear combination of stress and strain as the control variable[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1985, 22: 323 - 330.
- [18] 谢广祥. 综放面及其巷道围岩三维力学场特征研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国矿业大学, 2004.(Xie Guangxiang. Study on characteristics of three dimensional stress fields of fully mechanized top-coal caving face and roadway surrounding rock[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2004.(in Chinese))