

# 利用 ANSYS 程序分析软岩冲击矿压及 广义应力(应变)率准则\*

刘卫群 缪协兴 王爱文

(中国矿业大学理学院 徐州 221008)

**摘要** 利用 ANSYS 程序分析了权台煤矿软岩冲击矿压。通过对所得数据的处理,总结出一种用于判断冲击矿压的广义应力(应变)率准则,即冲击矿压发生时,冲击点附近的应力(应变)变化比其他时刻同地的变化和其他位置同时刻的变化都为剧烈,并将这一准则用于工作面回采时的冲击矿压预测,结果是合理的。

**关键词** ANSYS 程序, 软岩冲击矿压, 广义应力(应变)率准则

**分类号** TD 324

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2002)01-0029-05

## 1 引言

目前,在采煤强度加大的同时,采煤深度也在不断增加,许多软岩矿区的工作面深度都已经超过了一500 m,甚至超过了一600 m,围岩应力较浅煤层时大了许多,而且由于各种原因,这些软岩矿采区的布置不尽合理,造成了爆发冲击矿压的隐患。徐州东部的“三软”矿区就发生了几起冲击矿压事故<sup>[1,2]</sup>,权台煤矿 3127<sup>L</sup>工作面发生的冲击矿压就是其中之一。

3127<sup>L</sup>工作面位于权台煤矿一600 m 水平东一采区,开采下二迭纪石盒子组(夏桥系)3<sup>#</sup>煤层是本区最下部最深的工作面。该工作面位于矿井东翼与北翼分界线——权台大向斜之内,开采的深度为一558~一600 m。煤层赋存条件为<sup>[1~3]</sup>:煤层厚度为3.54~5.16 m,平均厚度为4.5 m;煤层倾角为0°~13°,平均为7°;老顶为灰白色细砂岩,厚度为1.7 m;直接顶为砂泥岩,厚度为2.3 m;直接底为泥岩,局部为细砂岩,厚度为2.9 m;老底为4层煤及砂泥岩,厚为14.2 m。地质构造情况为<sup>[1~3]</sup>:该面邻近向斜轴,其中材料道和切眼穿过轴心,轴心附近煤层倾角较为平坦,远离轴心煤层倾角变化

加大,掘进过程中将会遇到一些伴生小断层。另外,由于历史的原因,东一采区开采布局不当造成该面三面老塘的半岛式局面,致使煤岩整体性多次被切割破坏。1991年7月10日,当材料道掘至向斜轴附近时,在该面掘进迎头发生了一起严重冲击矿压。现利用 ANSYS 程序对这起冲击矿压发生过程中,周围煤(岩)力学参数的变化进行模拟分析,以期总结教训和为预测冲击矿压找寻一些规律。

## 2 冲击矿压分析的计算模型

ANSYS 是美国软件商开发的大型有限元软件。自20世纪70年代以来,该软件经历多次版本更新,现已发展到能完成结构静力分析、动力学分析、流体分析和包括热电磁在内的多场耦合分析的 5.5 No Boundaries 版,实例考证也日臻完善。本问题的模型就是建立在 ANSYS 5.5 No Boundaries 微机版操作平台上的,所用模块为结构线性静力分析模块。

向斜轴的特殊构造对 3127<sup>L</sup>材料道冲击矿压的发生起了重要的作用,因此在建造模型时应包含它。考虑到三维问题网格划分和计算工作量大,模型只取到煤层以上的第3层老顶处,而对老顶以上部分用相当载荷压力的方法进行处理,这样做既可节省

2000年3月6日收到初稿,2000年5月7日收到修改稿。

\* 国家自然科学基金重点资助项目(59734090)和煤炭高校青年基金资助项目。

作者 刘卫群 简介:男,31岁,1996年于中国科技大学近代力学系固体力学专业获硕士学位,现任讲师、中国矿业大学工程力学专业在职博士生,主要从事计算力学和采动岩体力学方面的研究。

内存，当需要多组工况数据结果时又缩短了计算时间，对结果的准确性没有多大影响。

模型的四周边界设定为沿  $y$  轴取向的边固定  $x$  位移，沿  $x$  轴取向的边固定  $y$  位移，底面也就是煤层的下表面固定  $z$  位移。这样的边界可能过于严格，实际情况要更放松一些，但数据结果体现的规律应该是相同的。

载荷的选取通过下面的计算来确定：假设老顶以上各岩层平均密度为  $2.4 \text{ t/m}^3$ ，老顶所在深度为  $-600 \text{ m}$ ，则上表面均布压力  $q = 600 \times 2.4 \times 10^3 \times 9.8 = 14.112(\text{MPa})$ ，这里忽略了地表载荷和动载荷，实际情况是允许的。表 1 给出了计算选取的岩层性质参数。图 1 为巷道掘进  $280 \text{ m}$  时模型的剖面图，空白处为采空区。计算采用 8 节点六面体元，整个模型共包括 5 469 个单元，11 972 个节点。

表 1 3127<sup>z</sup>工作面岩层性质参数

Table 1 Properties of rock strata at face 3127<sup>B</sup> of tunnel

岩性	厚度/m	$E/\text{GPa}$	$\mu$	$\gamma/\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$	备注
煤	4.5	0.8	0.28	13 230	
泥岩	4.2	7.0	0.24	19 600	直接顶
细砂岩	1.3	7.5	0.20	25 840	老顶

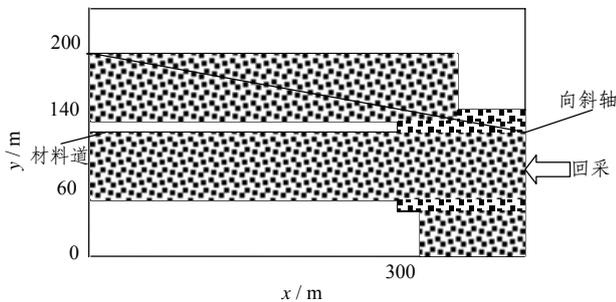


图 1 3127<sup>z</sup>材料道掘进 280 m 模型剖面投影

Fig.1 Model profile of tunnel material 3127<sup>B</sup> with 280 m advance of

### 3 分析方案及计算结果

为了尽可能地分析冲击矿压发生的整个过程，方案选取巷道掘进至 270，280，290，300，310 和 400 m 时来建模并进行计算<sup>[4]</sup>。由于其他模型与 280 m 模型大同小异，这里不再一一给出。

表 2 是所选样点的坐标。6 种工况下采集到的数据如表 3~8 所示。

表 2 3127<sup>z</sup>材料道掘进时所选样点的坐标

Table 2 Coordinates of chosen points for analyzing the advancing of material tunnel 3127<sup>B</sup>

样点号	$x/\text{m}$	$y/\text{m}$	$z/\text{m}$
1	225	140	4.5
2	240	140	4.5
3	255	140	4.5
4	270	140	4.5
5	300	140	4.5
6	315	140	4.5

表 3 材料道掘进至 270 m 时的数据结果

Table 3 Output of chosen points with advance of 270 m

样点	$\sigma_{\text{max}}/\text{MPa}$	$\varepsilon_{\text{max}}/10^{-2}$
1	4.87	6.88
2	4.65	8.23
3	4.76	6.69
4	5.17	7.02
5	7.86	9.20
6	5.39	7.41

表 4 材料道掘进至 280 m 时的数据结果

Table 4 Output of chosen points with advance of 280 m

样点	$\sigma_{\text{max}}/\text{MPa}$	$\varepsilon_{\text{max}}/10^{-2}$
1	4.87	6.88
2	4.65	8.23
3	4.77	6.71
4	5.25	7.30
5	7.96	9.31
6	5.41	7.50

表 5 材料道掘进至 290 m 时的数据结果

Table 5 Output of chosen points with advance of 290 m

样点	$\sigma_{\text{max}}/\text{MPa}$	$\varepsilon_{\text{max}}/10^{-2}$
1	4.88	6.91
2	4.68	8.27
3	4.78	6.73
4	5.35	7.51
5	8.13	9.86
6	5.57	7.77

表 6 材料道掘进至 300 m 时的数据结果

Table 6 Output of chosen points with advance of 300 m

样点	$\sigma_{\text{max}}/\text{MPa}$	$\varepsilon_{\text{max}}/10^{-2}$
1	4.97	7.27
2	4.78	8.39
3	5.17	7.45
4	5.85	8.22
5	9.09	10.82
6	6.11	8.60

表7 材料道掘进至310 m时的数据结果

Table 7 Output of chosen points with advance of 310 m

样点	$\sigma_{max} / \text{MPa}$	$\varepsilon_{max} / 10^{-2}$
1	4.92	7.01
2	4.69	8.32
3	4.76	6.79
4	5.44	7.76
5	8.20	9.45
6	5.62	7.87

表8 材料道掘进至400 m时的数据结果

Table 8 Output of chosen points with advance of 400 m

样点	$\sigma_{max} / \text{MPa}$	$\varepsilon_{max} / 10^{-2}$
1	4.89	6.79
2	4.65	8.24
3	4.76	6.69
4	5.21	7.08
5	7.88	9.25
6	5.41	7.44

### 4 广义应力(应变)变化率准则

引入两个广义变化率的概念, 即广义应力变化率  $\dot{\sigma}_l$  和广义应变变化率  $\dot{\varepsilon}_l$ , 下标  $l$  与工作面推进长度  $\Delta l$  相关, 以区别于绝对变化参量时间  $t$ 。

广义应力变化率平均值指工作面每推进单位长度时应力的变化量, 极限意义下为

$$\dot{\sigma}_l = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta \sigma}{\Delta l} = \frac{d\sigma}{dl} \quad (1)$$

广义应变变化率平均值指工作面每推进单位长度时应变的变化量, 极限意义下为

$$\dot{\varepsilon}_l = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta l} = \frac{d\varepsilon}{dl} \quad (2)$$

这里用到的是两者平均值的概念, 为了不致混淆, 将其平均值分别记为  $\bar{\sigma}'_l$  和  $\bar{\varepsilon}'_l$ 。6个样点在材料道工作面推进过程中应力、应变变化的情况如表9, 10所示。

表9 3127<sup>Z</sup> 材料道掘进中样点应力变化情况

Table 9 Stress change of chosen points with advance of material tunnel 3127<sup>B</sup> kPa / m

样点	270~280 m	280~290 m	290~300 m	300~310 m	310~400 m
1	0	1	9	-5	-0.33
2	0	3	10	-9	-0.44
3	1	1	39	-41	0.00
4	8	10	50	-41	-2.56
5	10	17	96	-89	-3.56
6	2	16	54	-49	-2.33

表10 3127<sup>Z</sup> 材料道掘进中样点应变变化情况

Table 10 Strain change of chosen points with advance of material tunnel 3127<sup>B</sup>  $\times 10^{-5}$

样点	270~280 m	280~290 m	290~300 m	300~310 m	310~400 m
1	0	3	36	-26	-0.44
2	0	4	12	-7	-0.89
3	2	2	72	-66	-1.11
4	28	21	71	-46	-7.56
5	11	55	96	-137	-2.22
6	9	27	83	-73	-4.78

从应力(应变)的变化情况可以看出, 各点应力(应变)在接近冲击矿压发生时(300 m处切割向斜轴时), 广义平均应力(应变)率最大, 即应力(应变)的变化最为剧烈, 而在冲击矿压发生之前的过程中, 随着工作面的推进, 广义平均应力(应变)率由小变大, 之后则由大变到小, 这一变化趋势也可从图2, 3中看出(样点5结果)。

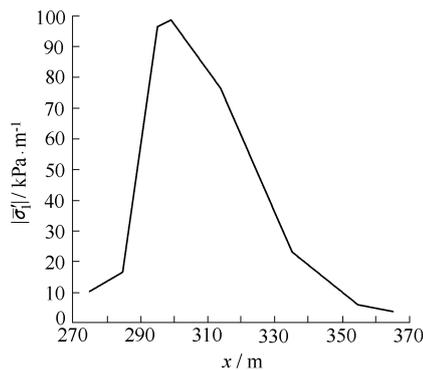


图2 3127<sup>Z</sup> 材料道掘进过程中广义平均应力率变化

Fig.2 Change of general averaged stress rate with advance of material tunnel 3127<sup>B</sup>

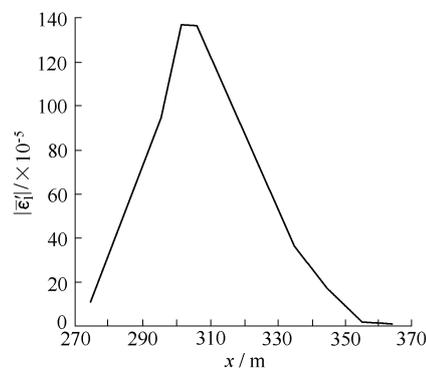


图3 3127<sup>Z</sup> 材料道掘进过程中广义平均应变率变化

Fig.3 Change of general averaged strain rate with advance of material tunnel 3127<sup>B</sup>

同一时刻不同点的变化情况也不一样，接近冲击矿压发生点附近变化比其他地方剧烈。以工作面从 290 m 推进到 300 m 为例，变化情况见图 4，5。

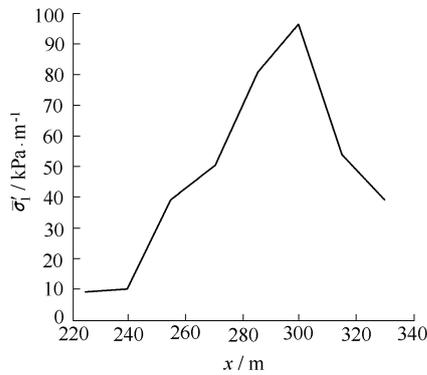


图 4 在 290~300 m 推进中不同位置处的广义平均应力率变化  
Fig.4 General averaged stress rates of different positions corresponding to advance from 290 to 300 m

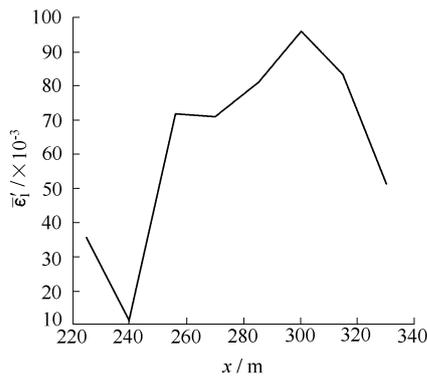


图 5 在 290~300 m 推进中不同位置处的广义平均应变率变化  
Fig.5 General averaged strain rates of different positions corresponding to advance from 290 to 300 m

简言之，冲击矿压发生时，冲击点附近的应力(应变)变化比其他时刻同地的变化和其他位置同时刻的变化都剧烈，这就是广义应力(应变)率准则。由此可以指导实践，通过对工作面附近的应力(应变)测量或计算，分析其变化规律，以期判别是否有冲击矿压危险及确定发生冲击矿压的大致位置。

### 5 冲击矿压预测实践<sup>[5]</sup>

这里将广义应力(应变)率准则用于 3127<sup>Z</sup> 工作面的回采分析。表 11 为样点坐标。表 12, 13 为回采中样点的应力(应变)变化情况。

表 11 3127<sup>Z</sup>工作面回采时样点的坐标  
Table 11 Coordinates of chosen points for analyzing the extracting of tunnel 3127<sup>B</sup>

样点号	x / m	y / m	z / m
1	260	140	4.5
2	280	140	4.5
3	300	140	4.5
4	320	140	4.5
5	340	140	4.5
6	360	140	4.5

表 12 3127<sup>Z</sup>工作面回采时样点应力变化情况  
Table 12 Change of stresses of chosen points with extracting of tunnel 3127<sup>B</sup> kPa / m

样点	回采 10 ~40 m	回采 40 ~70 m	回采 70 ~100 m	回采 100 ~130 m	回采 130 ~160 m
1	10.3	16.7	-8.7	-8.7	-1.3
2	16.7	25.3	-6.3	-6.3	-0.3
3	91.7	137.7	-45.7	-27.3	-11.7
4	74.7	90.7	-31.3	-16.7	-8.3
5	63.7	81.3	-25.3	-18.3	-7.7
6	66.3	79.3	-21.7	-12.7	-4.7

表 13 3127<sup>Z</sup>工作面回采时样点应变变化情况  
Table 13 Change of strains of chosen points with extracting of tunnel 3127<sup>B</sup> × 10<sup>-5</sup>

样点	回采 10 ~40 m	回采 40 ~70 m	回采 70 ~100 m	回采 100 ~130 m	回采 130 ~160 m
1	26.3	29.3	-15.7	-16.3	-7.3
2	27.7	31.3	-15.7	-15.3	-5.7
3	103.7	162.7	-63.3	-31.3	-19.7
4	84.7	108.7	-45.7	-27.7	-17.3
5	70.3	91.7	-39.3	-21.7	-10.3
6	64.7	90.3	-41.3	-20.3	-7.7

从变化趋势可以看出，当回采工作面进行到 40~70 m 时，各点变化都比较剧烈，这是一个危险的时刻，应加强观测，避免冲击矿压的发生。另外，从横向的比较看，第 3 样点，即 x 坐标为 300 m 的地方广义平均应力(应变)率一直领先于其他各点，这是一个危险的区域，应注意预防和采取积极的措施，使其应力(应变)与周围的变化协调起来。实际调查证实上述判断是正确的。

### 6 结 语

冲击矿压的发生有一定的滞后性，但在长期的蕴育过程中，也有一个由缓到急的变化，最终导致

爆发冲击矿压, 当然诱发因素(如开切眼, 爆破)会加快这一变化的进程。在冲击矿压发生的过程中, 煤岩内部参数不断变化, 仔细分析这些变化, 提出合理的判别方法, 可为进一步采取预防措施提供参考。

文中利用有限元 ANSYS 程序, 重点分析了权台软岩矿 3127<sup>2</sup>工作面冲击矿压发生时的变形及应力分布情况。通过对数值结果的分析, 提出了广义应力(应变)率的判别准则, 该准则认为, 冲击矿压发生时, 冲击点附近的应力(应变)变化较其他时刻同地的变化和其他位置同时刻的变化都为剧烈。这一准则中其实已经蕴含了与时间相关的概念。最后将这一准则用于工作面回采时的冲击矿压预测, 结

果是合理的。

## 参 考 文 献

- 1 缪协兴, 翟明华, 张晓春. 软岩矿区冲击矿压防治研究[R]. 徐州: 中国矿业大学, 徐州权台煤矿, 1998
- 2 刘卫群, 缪协兴, 王爱文等. 软岩矿区冲击矿压机理与数值模拟研究[R]. 徐州: 中国矿业大学, 1999
- 3 胡光伟. 冲击矿压机理的数值分析[硕士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 1999
- 4 张晓春, 缪协兴, 翟明华等. 三河尖煤矿冲击矿压发生机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 508~510
- 5 潘一山, 王来贵, 章梦涛等. 断层冲击地压发生的理论与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 642~649

## ANALYSIS ON BURST OF SOFT ROCK BY PROGRAM ANSYS AND CRITERION OF GENERALIZED STRESS (STRAIN) RATE

Liu Weiqun, Miao Xiexing, Wang Aiwen

(Dept. of Math. and Mech., China Univ. of Min. and Tech., Xuzhou 221008 China)

**Abstract** The burst of soft rock is studied by program ANSYS. By analyzing the generated data, the criterion of generalized stress (strain) rate is proposed as a means to predict rockburst occurrence. During rockburst, the stress and strain at the location close to the burst point change more rapidly than any other location at the same moment, and also the two variables at the moment close to the burst time vary more speedily than those at any other moment within the same location. As a practical example, the criterion is employed to forecast the rockburst with face extraction, and a rational conclusion is obtained.

**Key words** program ANSYS, burst of soft rock, criterion of generalized stress (strain) rate

## 近 3 年 SCI 收录论文数居前的知名院校土木工程系排名表

No.	院校名	收录论文数/篇			土木系教职员人数/人
		2000	1999	1998	
1	香港理工大学(中国)	104	90	78	34
2	加州大学伯克利分校(美国)	91	100	83	70
3	南洋理工大学(新加坡)	72	65	56	90
4	香港大学(中国)	71	52	59	24
5	帝国学院(英国)	64	66	66	46
6	麻省理工学院(美国)	63	69	68	48
7	西北大学(美国)	59	51	48	30
8	培都大学(美国)	58	58	52	55
9	香港科技大学(中国)	58	49	55	29
10	新加坡国立大学(新加坡)	56	47	43	51