

采空区覆岩采动裂隙演化过程 及其分形特征研究

刘超^{1,2}, 李树刚^{1,2}, 许满贵^{1,2}, 张天军³

(1. 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054;
3. 西安科技大学 理学院, 陕西 西安 710054)

摘要:为了研究采空区覆岩采动裂隙形成过程中的演化规律, 基于煤岩细观破裂力学特性的数值模拟方法, 结合非线性的分形几何理论, 研究了覆岩采动裂隙演化过程并定量地描述了其时空分布特征, 结果表明: 采动下覆岩不断劣化, 其内部细观损伤积累最终引起覆岩破坏. 采动裂隙演化过程中的声发射具有自相似性的分形特征, 加载后其分维值首先小幅度的升高, 随后急剧下降, 尤其是在破坏前降到最低, 该特性可作为评价覆岩破坏的有效指标. 上述结果能很好地解释覆岩采动裂隙的演化机制, 并指导灾害发生前覆岩稳定性发展趋势的预测预报等防治实践.

关键词:覆岩; 采动裂隙; 数值模拟; 分形理论; 演化规律

中图分类号:TD32 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9102(2013)03-0001-05

在工作面回采过程中, 采空区顶板逐渐地悬空, 诱发了覆岩的运位移与断裂, 产生了大量的采动裂隙, 最终形成采动裂隙场. 通常, 各种工作面灾害问题与覆岩采动裂隙场的空间分布状态密切相关^[1]. 因此, 深入开展覆岩采动裂隙的分布特征及其演化规律并进行定量地描述的研究, 对揭示覆岩结构破坏规律, 实现对采空区灾害的防治具有重要的理论与工程意义.

对于采动裂隙场的演化特征研究, Yavuz H^[2]等研究了工作面回采之后覆岩内存在的破裂带的不同特点. 刘天泉等提出了覆岩裂隙场“横三区”与“竖三带”的观点^[3]; 钱鸣高等人提出了覆岩关键层及“O”圈理论^[4]; 袁亮认为在首采卸压层覆岩内存在一个环形裂隙圈^[5]; 李树刚等认为覆岩采动裂隙在空间上呈椭抛带的分布状态^[6]; 黄炳香^[7]研究了覆

岩采动裂隙场的贯通度、发育高度; 张永波^[8]等进行了采动岩体裂隙分布分形规律的实验研究, 认为采动岩体裂隙网络形成、扩展及分布规律具有分形特征.

上述研究成果通过理论模型、数值模拟、模拟实验及工程反演等手段对覆岩运移规律与采动裂隙分布状态及其在实际工程中的应用作了有益的探索, 但常规的方法多是对覆岩采动裂隙场的宏观表现行为进行了相应的研究, 对其细观演化规律研究尚有所不足, 特别是运用非线性的数学方法定量地描述采动裂隙演化特征的研究还需要进一步完善. 本文借助于煤岩破裂过程细观分析数值方法, 深入揭示覆岩采动裂隙的演化过程, 并运用非线性的分形几何理论, 对采动裂隙的分布状态进行定量描述.

收稿日期: 2013-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51174157, 51174158, 51104118); 中国博士后科学基金面上资助项目(2012M512017); 陕西省教育厅自然科学研究项目(12JK0801); 西安科技大学博士启动金项目(2012QDJ010); 西安科技大学科研培育基金(201141)

通信作者: 刘超(1981-), 男, 河南息县人, 博士后, 讲师, 主要从事煤岩动力灾害致灾机理、监测分析及防治方法方面的研究. E-mail: liuchao_2001@163.com

1 采动裂隙演化数值模拟

1.1 数值模型建立

运用 RFPA^{2D} 软件进行数值建模,沿工作面倾向方向取剖面,采用平面应变分析.模型尺寸设定为 250 m × 100 m,并划分为 250 × 100 个单元.建模过程中,将模型简化为 11 层,第 2,第 9 层为煤层,其它为岩层,第 2 层、第 9 层煤层厚度分别为 6.0 m, 9.0 m.

结合实际的工作面回采过程,并反映出工作面受开挖的影响,在第 9 层煤层中部一次共开挖了 100 m.另外,加载方式采用下边界及左右边界面都为固定约束;上边界位移加载,采用分步加载方式,每步加载 10 mm,根据上述条件建立的计算模型如图 1 所示.

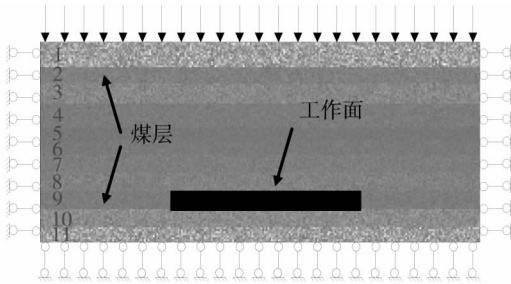


图 1 数值计算模型

Fig. 1 Numerical model

按照模拟计算的要求,该数值模拟没有考虑地下水、温度及瓦斯的影响,但考虑了自重效应.模型中,各层的灰度代表其弹性模量的大小,灰度越亮,表示其值越大,各煤岩层的力学参数,如表 1 所示.

表 1 数值计算力学参数

Tab. 1 Parameters of numerical model

序号	岩性	层厚 /m	弹性模 量/GPa	抗压强 度/MPa	泊松比	摩擦角 /(°)	自重/ (g · cm ⁻³)
1	砂质泥岩	13	240	100	0.31	29.0	2.5
2	煤层	6	18	22	0.40	30.0	1.4
3	粉砂岩	10	65	80	0.27	29.5	2.3
4	粉砂岩	12	60	60	0.16	26.0	2.3
5	中粒砂岩	5	20	50	0.16	31.0	2.6
6	砂质泥岩	6	25	55	0.38	27.0	2.5
7	泥岩	11	55	70	0.21	22.0	2.4
8	细砂岩	10	45	80	0.33	25.0	2.5
9	煤层	9	18	22	0.40	30.0	1.4
10	粉砂岩	10	70	80	0.28	29.8	2.4
11	砂质泥岩	8	120	105	0.26	27.0	2.5

1.2 模拟结果分析

由上述建立模型的计算结果可知:在工作面回采过程中,在采空区覆岩内部,煤岩大致经历了 3 个破坏过程,包括微裂纹的初始萌发、裂纹扩展宏观裂纹贯通.限于篇幅,本文仅介绍煤岩体损伤分布状态、应力场动态演化过程及相应声发射产生规律的部分模拟结果.

在荷载增加过程中,覆岩采动裂隙场也相应的经历了不同的变化过程.当模型加载到第 5 步时,考虑到加载及自重的双重效应,煤岩的应力得到重新分布,尤其是在工作面两端内侧的左右上方产生了明显的损伤演化,同时在上述区域出现了声发射现象,表明采动裂隙开始孕育,如图 2(a) (Step5) 所示,但在工作面支承压力的作用下,覆岩没有大面积垮落,而且破断面以内裂隙很少,此时裂隙场并没有形成;随着加载的进行,覆岩不断运移并破断,由于砌体梁结构的影响,以致对覆岩的垮落形态产生了很大的作用.一方面,覆岩底部各岩层之间的离层逐渐趋于压实,另一方面,采空区两侧采动裂隙仍然继续发育并扩展,最终在采空区两侧由下往上形成较为明显的裂隙发育区.同时,在工作面两端内侧的斜上方位置,煤岩损伤程度逐渐明显,声发射也不断增多,在煤岩体损伤不断加剧条件下,覆岩裂隙场逐渐形成,而且采动裂隙场的范围不断变大,并逐渐向覆岩上方及工作面方向慢慢延展,最终在覆岩内部形成明显的裂隙场,如图 2(a) (Step26) 所示.

另外,在加载条件下,覆岩应力场的迁移规律,从另一个侧面也说明了采动裂隙场的演化过程.由于采动效应,煤岩地应力的平衡状态被破坏,导致地应力重新分布,应力差高低区域逐渐形成,致使开挖附近的覆岩产生不同程度的卸压,最终在开挖附近一定范围的煤岩内形成了应力集中区.在煤岩弹性变形过程中,其弹性潜能对煤岩做功,使煤岩不断破断和运移,致使覆岩内部产生了大量的微破裂,在经过萌生、扩展直至贯通后,微破裂逐渐形成宏观裂隙场.图 2(b) 反映的是不同加载步条件下覆岩内部应力场的迁移规律,其中图中灰度代表应力大小程度,灰度越亮,说明应力越大;反之,灰度越暗,就说明应力越小.从图 2(b) (Step5) 中可看出,覆岩应力集中区出现在工作面两端;而中部区域应力较低,并且在拉应力下,破裂面在工作面上方中部形成;荷载不断增加,应力场逐渐向工作面上方发生迁移,尤其是在工作面四周产生应力差高低区域,形成应力集中区,并以剪应力为主,此

时采动裂隙大量产生,最终形成较为明显的裂隙场,而在覆岩中部逐渐形成贯通的破裂面,并趋于压实,如图2(b)(Step9,14,18,26)所示。

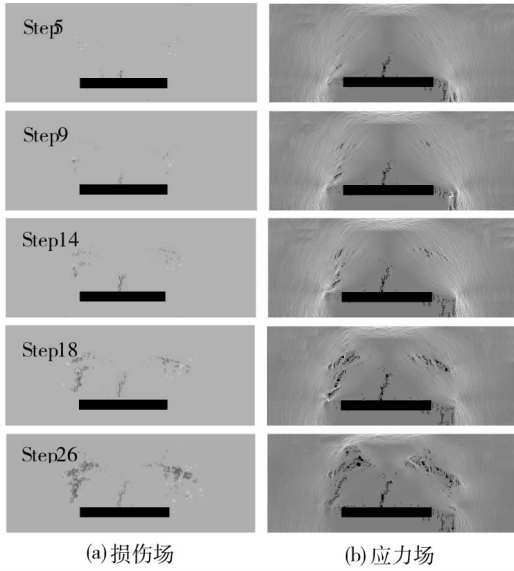


图2 不同加载步条件下覆岩采动裂隙演化规律

Fig. 2 Evolution rule of mining - induced fracture in overlying strata with different loading steps

2 采动裂隙分形特征

2.1 分维数计算模型

Mandelbrot 把分形概括为其组成部分与整体以某种形式相似的形,并用分数维 D 值来定量描述分形特征. 煤岩裂缝具有良好的分形特点,可借助于分形几何方法来定量描述复杂裂缝的发育程度^[9].

在 RFP^{2D} 模拟煤岩破裂的过程中,已经破坏的单元所在位置代表发生了 1 次声发射事件. 通常,作为表征煤岩受载变形破坏的参量(声发射),理论上每 1 个微破裂就对应着 1 个声发射事件. 朱传镇^[10],梁正召^[11]等论证了声发射事件在时空域上的分布也具有分性特征.

根据分析几何理论,本文采取盒维数法建立分维数的计算模型. 假设所考察的区域边长为 L ,分别以边长 r 为 $L/2, L/3, L/4$ 等的正方形去覆盖整个被考察区域,可以分别得到含声发射事件的盒子数 $N(r)$. 当 $r \rightarrow 0$ 时,就可以得到此分布的分维值 D ^[12-13].

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N(r)}{-\lg r} \quad (1)$$

式中: r 为正方形的边长, m ; $N(r)$ 为含声发射事件的盒子数; D 为分数维值.

分别取一系列的 r 与 $N(r)$,之后以双对数坐标

来获得直线的斜率,其斜率即为分形维数 D .

2.2 分维数计算及分析

由上述模拟结果及分形维值计算可得到不同加载步下声发射事件的双对数图,如图3所示。

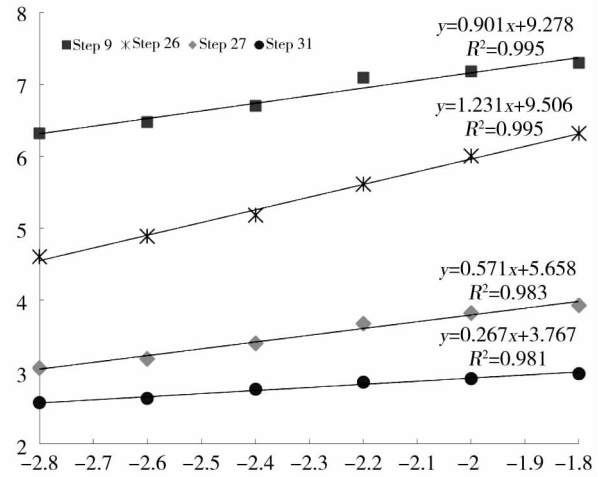


图3 $\ln N(r) - \ln r$ 双对数图

Fig. 3 $\ln N(r) - \ln r$ diagram

声发射分形维值作为覆岩采动裂隙无序性的度量,能反映出其微破裂的统计演化规律. 模拟结果表明:在加载初期,计算模型的声发射分形维值较大,并随着载荷的增加不断增大,这是因为在较小应力水平时,模型内部以小尺度的微破裂为主,覆岩处于相对稳定阶段. 当加载到一定阶段(Step26)后,分形维值开始下降,这说明声发射大事件增多,模型内部出现较大尺度的微破裂,微裂隙扩展从无序逐渐向有序发展. 之后,分形维值下降趋势非常明显,迅速降到最低值,这说明覆岩内部微破裂连接贯通并形成最终的裂隙区,即宏观主破裂的发生,这就是覆岩损伤的分形规律性,如图4所示。

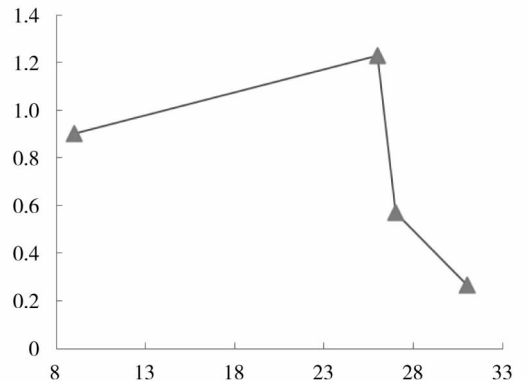


图4 不同加载步下分形维值 D 变化曲线

Fig. 4 Variation curves of fractal dimension D with different loading steps

从细观数值模拟方面出发,上述结果验证了覆岩损伤是一个耗散结构、降维有序的变化过程. 不难看出,分维值最低点可看成为覆岩破断诱发煤岩动力灾害的发生点,也就是说,分维值的变化可作为灾害发生的前兆,这就为建立覆岩变化与采动响应之间的物理关系创造了可能性.

3 结论

1) 加载初期,裂隙带内产生了损伤现象,采动裂隙形态开始孕育,冒落带内出现了拉破坏;随着加载的进行,裂隙区不断发育,离层区拉破坏较为明显;荷载曲线开始逐渐地表现出非线性行为并发生突跳,裂隙区应力集中十分明显,造成损伤加剧,声发射激增,最终形成裂隙发育区,而冒落区则形成宏观空洞的重新压实区.

2) 覆岩声发射事件分布特征可用分形几何理论进行定量的描述,且 $\ln N(r) - \ln r$ 曲线呈线性关系,说明了覆岩破坏过程具有明显的分形特征,这可作为覆岩稳定性分析的评价指标.

3) 在实践工程中,覆岩破坏前兆的分形临界值较难确定,如果能够结合其他的实时连续监测技术,就有可能实现充分利用采动裂隙的演化规律及其分形特征来评价覆岩稳定性的可能性.

参考文献:

[1] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(3): 225 - 230.
Qian M G, Miu X X, Xu J L. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(3): 225 - 230.

[2] Yavuz H. An estimation method for cover pressure re-establishment distance and pressure distribution in the goaf of long wall coal mines [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41: 193 - 205.

[3] 刘天泉. 矿山岩体采动影响与控制工程学及其应用[J]. 煤炭学报, 1995, 20(1): 1 - 5.
Liu T Q. Mining response on rock masses and control engineering and their application[J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(1): 1 - 5.

[4] 钱鸣高, 许家林. 覆岩采动裂隙分布的“O”形圈特征研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(5): 466 - 469.

Qian M G, Xu J L. Study on the “O” shape circle distribution characteristics of mining induced fractures in the overlying strata [J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(5): 466 - 469.

[5] 刘泽功, 袁亮, 戴广龙, 等. 开采煤层顶板环形裂隙圈内走向长钻孔法抽放瓦斯研究[J]. 中国工程科学, 2004, 6(5): 32 - 38.
Liu Z G, Yuan L, Dan G L, et al. Study on coal seam roof gas drainage from the strike of annular fracture area by the long drill method[J]. Engineering Science, 2004, 6(5): 32 - 38.

[6] 林海飞, 李树刚, 成连华, 等. 覆岩采动裂隙演化形态的相似材料模拟实验[J]. 西安科技大学学报, 2010, 30(5): 507 - 512.
Lin H F, Li S G, Cheng L H, et al. Model experiment of evolution pattern of mining-induced fissure in overlying strata[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2010, 30(5): 507 - 512.

[7] 黄炳香, 刘长友, 许家林. 采动覆岩破断裂隙的贯通度研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 45 - 49.
Huang B X, Liu C Y, Xu J L. Research on through degree of overlying strata fracture fissure induced by mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(1): 45 - 49.

[8] 张永波, 靳钟铭, 刘秀英. 采动岩体裂隙分形相关规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3426 - 3429.
Zhang Y B, Jin Z M, Liu X Y. Testing study on fractal correlation law of cracks in mined rock masses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3426 - 3429.

[9] 巩磊, 曾联波, 苗凤彬, 等. 分形几何方法在复杂裂缝系统描述中的应用[J]. 湖南科技大学学报, 2012, 27(4): 6 - 10.
Gong L, Zeng L B, Miao F B, et al. Application of fractal geometry on the description of complex fracture systems[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology, 2012, 27(4): 6 - 10.

[10] 朱传镇, 安镇文, 王林瑛, 等. 地震分形特征及其在地震预测中的意义[J]. 地震研究, 1991, 14(1): 73 - 88.
Zhu C Z, An Z W, Wang L Y, et al. Fractal features of earthquakes and its significance in earthquakes prediction [J]. Journal of Seismological Research, 1991, 14(1): 73 - 88.

[11] 梁正召. 三维条件下的岩石破裂过程分析及其数值试验方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2005.
Liang Z Z. Three - Dimensional failure process analysis of rock and associated numerical tests[D]. Shenyang: Northeastern University, 2005.

[12] Xie S Y, Yang Y G, Bao Z Y, et al. Mineral resource analysis by parabolic fractals[J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(1): 91 - 96.

[13] Liu J H, Liang R, Wang C L, et al. Application of fractal theory in detecting low current faults of power distribution system in coal mines[J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(3): 321 - 325.

Research on mining crack evolution process and its fractal characterization of overlying strata in goaf

LIU Chao^{1,2}, LI Shu – gang^{1,2}, XU Man – gui^{1,2}, ZHANG Tian – jun³

(1. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention Ministry of Education, Xi'an 710054, China;

2. School of Mining Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

3. College of Science, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to study the mining crack evolution process of the overlying strata in goaf, based on the numerical method for meso rupture mechanics characteristics of coal rock, combined with nonlinear fractal geometry theory, the evolution process of mining crack and quantitative description of the spatial and temporal characteristics were researched. The results show that the overlying strata deteriorated continuously under mining, simultaneously, the internal meso damage accumulation of rock eventually cause the overlying strata failure. The acoustic emission in the cracks evolution process is with self – similarity. The fractal dimension increases firstly with a small amplitude after loading, and then sharp declines, especially decreases to a minimum value before damage. It is considered to be a effective indicator in evaluation of overburden damage. By means of the overlying results, the overburden fractured evolutionary mechanisms are explained perfectly, and it is able to guide forecasting and control practice of rock stability before disasters.

Key words: overlying strata; mining crack; numerical simulation; fractal theory; evolution rule