9月

2012 年

文章编号:0253-9993(2012)09-1535-06

采动裂隙网络实时演化及连通性特征

高明忠¹² ,金文城¹ ,郑长江³ ,周宏伟³

(1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 水利水电学院,四川 成都 610065;2. 中国平煤神马集团 能源化工研究院,河南 平顶山 467000;3. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083)

摘 要:以平顶山煤业集团八矿己 15 - 14120 采煤工作面为试验基地,借助改进后的本质安全型钻 孔裂隙窥视仪,实时采集采煤工作面前方煤岩体裂隙网络随工作面推进的演化过程。结合分形几 何理论与裂隙岩体连通率投影算法,揭示了采动影响下,工作面前方裂隙网络演化分形特征及连通 率变化规律。结果表明:采动对平煤八矿己 15 - 14120 采煤工作面上覆岩层裂隙网络沿开采方向 的影响范围约为 50 m;随着工作面不断接近试验测点,煤岩体采动裂隙网络分形维数总体呈上升 趋势,并与矿压分布有较好的对应关系;同时,煤岩体连通率随采煤工作面推进上升趋势明显,可依 次分为线性缓慢增长阶段、指数增长阶段及平稳阶段。

关键词: 裂隙网络; 演化特征; 连通率; 分形维数; 现场实验 中图分类号: TD712.6; TD821 文献标志码: A

Real-time evolution and connectivity of mined crack network

GAO Ming-zhong^{1 2} JIN Wen-cheng¹ ZHENG Chang-jiang³ ZHOU Hong-wei³

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering ,College of Hydraulic and Hydropower Engineering ,Sichuan University ,Chengdu 610065 ,China; 2. Energy & Chemical Industry Research Institute ,Shenma Group of Pingdingshan Coal Group Pingdingshan 467000 ,China; 3. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining ,China University of Mining and Technology (Beijing) Beijing 100083 ,China)

Abstract: Based on the field conditions of coal mining face No. 15 – 14120 at No. 8 Mine of Pingdingshan Coal Mining Group the information for real-time evolution of coal-rock crack network with advancement of working face was collected by using improved intrinsically safe borehole video instrument. Fractal theory and projective arithmetic for the two-dimensional connectivity of cracked rock mass were employed to characterize the evolution of crack network and variation of connectivity caused by mining. The results show that the influenced domain of crack network ahead of the working face is 50 m approximately in the condition of coal mining face No. 15 – 14120 at No. 8 Mine of Pingdingshan Coal Mining Group and the calculated fractal dimension of crack network increases as the distance between the monitoring hole and the mining face decreases which exhibites a good agreement with the variation of pressure at overburden strata. Moreover the calculated connectivity of mining-induced crack network increases obviously with the advancing of mining-face and the increasing process can be divided into linear phase exponential phase and constant phase. **Key words**: crack network; evolution characteristics; connectivity; fractal dimension; in-situ experiment

煤岩体中裂隙场是瓦斯渗流、运移、抽采的主要 通道,煤岩体裂隙的发育演化及空间分布情况直接影 响到煤岩体的渗透性和瓦斯在破断煤岩体中的运移 流动。早在19世纪人们就已经认识到煤中裂隙的存 在,前苏联学者 A.T. 艾鲁尼¹¹ 理论分析了瓦斯对煤 中微观结构的影响。直到 20 世纪 60 年代随着煤层 气勘探开发,对于煤岩裂隙场的研究日益引起人们的 关注,加之煤岩体中裂隙场也是煤与瓦斯共采的基

作者简介: 高明忠(1980—),男,山西吕梁人,讲师,博士。Tel: 028 – 85465866, E – mail: gmzh@scu.edu.cn。通讯作者: 金文城(1989—),男, 四川达州人,硕士研究生。Tel: 028 – 85465866, E – mail: kingofjwc@gmail.com

收稿日期: 2012-06-01 责任编辑: 许书阁

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2011CB201201 2010CB226802);国家自然科学基金资助项目(1204112)

础^[2] 采煤工作面上覆岩层采动裂隙形成机理、发展 演化规律、以及生成反演方法便成为亟待解决的关键 问题。前苏联 Ammosov 等^[3] 在《煤中裂隙》一书中, 较为系统地研究了煤体中裂隙分布。Smyth 等^[4] 研 究了微观尺度下煤体中裂隙结构的不同模式。Tien, Jha, Yasitli 等^[5-7]分别对厚煤层煤体的变形、位移、 应力及裂隙发育进行了数值模拟分析。近年来 国内 外学者主要采用理论建模、数值模拟、相似材料模拟、 地球物理探测技术、钻探等方法对采动裂隙的形成扩 展过程、形态特征及煤岩体裂隙场分布进行了大量的 试验及理论分析 取得了一些有价值的研究成果。钱 鸣高和缪协兴等^[8-10]在长壁工作面上覆岩层砌体梁 模型基础上,提出了关键层理论,揭示了采动裂隙 "O"形圈特征。许家林等^[11]探讨了上覆岩层性质对 裂隙带的影响规律 揭示了开采对裂隙带发育的诱致 机制,讨论了采动裂隙带的形态分布。Yang 等^[12]发 展了流场 – 应力 – 损伤耦合模型 揭示了开采诱致裂 隙发育而引起的含水层突水机理。隋旺华[13]、邓喀 中等[14]则从更大尺度探讨了开采引起的上覆岩层破 坏和移动规律。

由于采动裂隙的复杂性和空间分布的无序特征, 分形的引入为该问题的研究提供了另一途径。谢和 平等^[15]、Yu 等^[16]从采场物理模拟试验出发,揭示了 工作面上覆岩层中采动裂隙的分形特征,并获得了裂 隙分布分形维数与开采空间的统计关系。张永波 等^[17]从试验上验证了采动裂隙的分形分布特征,王 志国等^[18]基于现场实际开展了深部工作面上覆岩层 裂隙演化规律研究,揭示了裂隙网络演化的分形特 征。桂乐乐等^[19]从裂隙尺度律出发,研究了裂隙网 络的生成方法。

综上所述,尽管对于煤岩体力学特性、采动裂隙 场分布以及结构的研究取得了一定成果,但研究手段 均集中在试验室及数值仿真模拟层面,难以再现现场 边界条件及煤岩物理力学特性,一定程度上难免与现 场真实裂隙网络演化存在差异。本文针对深部倾斜 煤层走向长壁开采上覆岩层裂隙场的分布及演化规 律,依托平顶山煤业集团八矿己15-14120采煤工作 面,开展了长达3个月的现场试验。利用改进的 TYGD20型岩层钻孔探测仪系统记录了采动过程中, 工作面前方覆岩及煤层裂隙网络演化过程,基于分形 几何理论揭示裂隙时空特征受顶板压力的影响规律, 阐述了煤岩连通率演化特点,为瓦斯抽采及瓦斯导向 流理论奠定基础。

1 试验方案及成果

1.1 试验点采煤工作面概况

平顶山矿区是我国 13 个大型煤炭基地之一,而 平煤八矿则是突出较为严重的矿井之一,位于平顶山 市区东部,可采煤层自上而下共有三组四层,即丁 5 -6煤层、戊 9 - 10煤层、己 15煤层和己 16 - 17煤 层。试验点位于己四下延采区西翼己 15 - 14120采 煤工作面标高在 - 455 ~ - 580 m,埋藏深度 580 ~ 705 m。采煤工作面东西可采走向长 864 m,南北倾 斜宽 190 m,煤层厚度基本稳定,一般在 3.2 ~ 3.9 m 之间,平均 3.6 m;煤层倾角一般在 17°~25°之间,平 均 22°,呈西缓东陡之势。直接顶为砂质泥岩,厚约 3.0 m。距己 15煤层顶板 0.8 m 左右有一层 0.1 ~ 0.5 m 厚的煤线,该层易随采随落。直接底为一薄层 泥岩 厚 2.8~6.0 m 遇水易膨胀。

该工作面瓦斯压力 1.6 MPa,瓦斯含量 18 m³/t, 根据突出危险等级划分,属突出危险工作面。因此, 对瓦斯通道裂隙场的产生、发展及演化的深入探讨显 得尤其重要。

1.2 测孔布置及试验设备

试验以揭示采动条件下煤层及上覆岩层三维裂隙网络演化规律为目的,同时探讨裂隙演化导致连通率变化规律。在平煤八矿己 15 - 14120 机巷内设计布置 5 个观测断面,每个观测断面布置顺煤层方向和垂直顶板方向观测孔各一个。其中顺层孔设计孔深40 m,孔径75 mm,距离底板高度1.5 m,方位角与倾角分别为211°和22°;顶板孔设计孔深16 m,孔径38 mm,孔口位于顶板中间。现场实施过程由于综采机巷内空间有限,并布置了大量机械装置,条件十分复杂除孔径外各孔参数均有适当调整,实际测孔空间三维布置如图1 所示。

试验观测设备采用改进后的 TYGD20 岩层钻孔 探测仪(图 2),该设备具有防爆功能,配备全高清 520 线摄像头,能够实时清晰录制与拍摄孔壁离层、 破裂以及破碎岩体裂隙并能录制语音。经课题组改 进后设备增加了防雾和确定视频方位功能,适应孔内 高温大湿度环境,避免了起雾带来的视频信息不清晰 现象。

1.3 试验结果分析

从测孔成孔开始直到采动破坏该孔为止,利用 TYGD20 岩层钻孔探测仪连续采集各个钻孔全孔壁 裂隙的演化过程,同时配套防爆相机实时录制探杆进 尺深度及方位,并记录测点到工作面距离。从而获得

1536



图 1 现场钻孔三维分布示意





图 2 TYGD20 岩层钻孔探测仪

Fig. 2 Rock hole detecting instrument (Ver. TYGD20) 采动煤岩体三维裂隙网络真实演化过程。图 3 为顶 板孔在不同深度典型裂隙特征。

出于篇幅限制 本文以断面 2 顶板孔为代表讨论

裂隙演化过程。由于现场施工因素,各顶板孔轴向与 顶板岩层倾角大小各不相同,在孔深方向上裂隙分布 差异性较大。为便于分析,将裂隙分布投影到垂直于 顶板方向,同时结合记录的深度信息,在 CAD 平台下 将视频信息矢量化,转化为孔壁裂隙展开图,图 4 即 为处理后断面 2 顶板孔孔壁裂隙演化过程。试验结 果表明,采动对上覆岩层裂隙网络沿开采方向的影响 范围约为 50 m(即:图 5 中,L₁ + L₂ = 50 m),位于影 响区外上覆岩层随采煤工作面推进,其裂隙网络发育 不明显。在垂直于顶板方向上(图 3),按裂隙空间特 征可将上覆岩层分为:破碎区、近等间距离层裂隙区 和随机节理区。在采动影响范围内,随着采煤工作面 的接近,裂隙演化特征主要表现在:



(a) 破碎区







(c)随机节理区

图 3 单孔不同深度特征裂隙

Fig. 3 Representative cracks of single borehole in different depths

(1)上部随机节理区出现新的离层,裂隙网络演 化向深度和广度方向发展;

(2)近等间距离层裂隙区离层裂隙张开度增加,但数量增加不明显;

(3)破碎区更加破碎,主裂隙周边微裂隙条数增加;其上部离层间新生随机裂隙,逐渐过渡为破碎区;

(4) 孔口演化规律最明显: 同一时间不同孔口,

离采煤工作面越近其破碎区越大;同一孔口,随采煤 工作面推进其破碎区越大,同时离层裂隙与其周边发 育的微裂隙将演化为新的破碎区;

(5) 当采煤工作面推进到测孔断面时,离层主裂隙张开度有所减小;

(6)钻孔顶端附近的裂隙带是在采煤工作面推进过程中形成。因此钻孔端部效应影响较小。





2 采动单孔裂隙演化特征

2.1 单孔孔壁分形裂隙演化特征

分形维数可以很好地描述岩体裂隙网络的复杂 程度 现有文献中分形维数计算方法有多种,针对钻 孔孔壁裂隙分布,本文采用盒维数法也称覆盖法。其 计算式(1)中,F为二维平面上裂隙有界集合; $N_s(F)$ 为直径最大的 δ 可以覆盖裂隙集合的最少个数; D_B 为该裂隙集合的盒维数。为计算孔壁裂隙分形维数, 矢量化裂隙数据转为位图并二值化,用间隔为 δ 的格 子把该二值图片分割为边长为 δ 的正方形,计算出此 二值图片上至少包含一个像素点的正方形的个数,并 记此数为 $N(\delta)$;改变 δ 的大小,重复上面的过程,由 $N(\delta)$ 和1/ δ 的双对数关系可求出分维值。

$$D_B = \lim_{\delta \to 0} \frac{\lg N_{\delta}(F)}{-\lg \delta}$$
(1)

裂隙网络分形维数表征了裂隙在钻孔孔壁二维 展开图上的占位,可度量裂隙在空间的复杂程度。本 次试验共获得断面2顶板孔距采煤工作面不同距离 的11次视频信息(图4),图6为断面2顶板孔距采 煤工作面不同距离对应的分维值。总体上,随着工作 面的推进煤层顶板岩体裂隙网络分形维数呈增大趋 势。这是因为随着采煤工作面接近测点断面,其上覆 岩层离层主裂隙张开度增加,周边出现新裂隙,破碎 区扩展,加之近孔口有错动现象,使得裂隙的占位增 加,导致分维数增加。



图 6 断面 2 顶板孔距采煤工作面不同距离对应的分维值 Fig. 6 Relationship between the distance from mining face to section 2 and the fractal dimensions of fracture in borehole

距采煤工作面 39 m 及 18 m 区域,均出现明显的 降维现象。结合窥视数据,发现 39 m 处孔壁中部微 裂隙相互贯通形成宏观大尺度的离层主裂隙,使得二 维壁面展开图中此处裂隙占位减小。距工作面 18 m 处接近超前矿压峰值点,部分裂隙贯通形成宏观大裂 隙,且有被压密现象,致使裂隙空间占位减小。距工 作面 15 m 后,钻孔孔壁裂隙分布分维值增长缓慢,主 要是因为随着工作面推进,上覆岩层应力不断变化, 造成工作面前方煤体以及顶板所受压力超过其抗压 强度,使得超前工作面压力增大,而距采煤工作面 15 m 的地方正是压力峰值处,在此之后工作面的推进对 裂隙网络发展演化的贡献将逐渐降低,从而使得分维 增长较慢。

2.2 单孔深度方向连通率演化特征

大量文献表明裂隙连通率与流体渗流有着直接 的关系^[17],同理也可作为评价煤岩体中瓦斯的渗透 和流动难易程度的指标。为进行瓦斯治理,在己15 -14120的机巷和风巷布置有大量瓦斯抽采钻孔,钻 孔周边裂隙网络将成为瓦斯流动的关键通道,沿孔深 方向的连通率亦会成为决策钻孔深浅的主要因素。

根据实际工程问题的不同,连通率的计算方法也 不同。本文采用由陈建平等^[20-21]提出的投影法(式 (2)),其中 N_i为单条裂隙投影像素个数; n 为裂隙条 数; N 为孔深方向像素点个数。该法将空间三维裂隙 连通率计算问题归结为沿孔深方向的一维问题。首 先对图 4 二值化,后将图中所有的裂隙投影到孔深方 向并计算投影后裂隙像素点数目,从而得出裂隙像素 点个数在钻孔轴向所占比例,即为孔深方向的连通 率,值得注意的是计算过程中需要删除裂隙交叉重叠 部分的像素个数。

$$\xi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n} N_i \tag{2}$$

图 7 为断面 2 顶板孔连通率随采煤工作面推进 时的变化规律,总体上呈上升趋势,可分为3个阶段。 第1阶段(距采煤工作面 57~40 m 段)为线性缓慢 增长阶段:从煤岩体所受矿压上看,该阶段上覆岩体 应力状态由静水压力转变为环向围压降低 ,主应力增 加,对应图 5^[22] 中 L, 区域左侧, 主应力的增加促使岩 体局部应力集中 破断后产生相对均布离层裂隙。由 于离层裂隙倾角与孔深方向近垂直 对连通的贡献较 小 故连通率增长缓慢。第2阶段(距采煤工作面40 ~15 m 段) 指数增长阶段,对应于图 5 中的 L₂ 与 L₁ 交界段,主应力迅速增加,围压进一步降低导致在离 层裂隙周边产生随机裂隙,矿压进一步增加,部分随 机裂隙发育并相互贯通,伴随压实现象,因此连通率 偶尔会出现降低迹象。但总体在孔深方向的连通率 呈急剧增加趋势。第3阶段(距采煤工作面15~0m 段) 平稳阶段,所经历的矿压过程如图 5 所示 L₁右 侧,矿压从峰值点逐渐降低到煤岩抗压强度值,水平 方向卸压到0,煤岩裂隙已基本贯通,新生裂隙对连 通率贡献不大,以破碎区错动为主。此阶段特征与前 述分形维数有很好的对应关系。因此,认为超前矿压 最大值出现在工作面前方15 m处,即*L*₁ = 15 m。在 采煤推进过程中,支护及防突措施设计应特别加以考 虑。



图 7 断面 2 顶板孔连通率随采煤工作面推进变化规律 Fig. 7 Relationship between connectivity of along axial borehole and the distance from mining face to section 2

结论

3

(1) 平煤八矿条件下,采动对上覆岩层裂隙网络 沿开采方向的影响范围约为50 m。

(2)超前矿压最大值出现在工作面前方 15 m 处。

(3)随着工作面的推进,煤层顶板岩体裂隙网络 分形维数呈增大趋势;但由于矿压及煤岩力学特性影响,在39m与18m处有明显降维现象。

(4)钻孔轴向连通率随采煤工作面推进时总体 上呈上升趋势,其变化趋势可分为3个阶段:线性缓 慢增长阶段、指数增长阶段及平稳阶段。

参考文献:

- [1] 艾鲁尼 A T. 煤矿瓦斯动力学现象的预测和预防 [M]. 唐修义, 宋德淑,王荣龙,译. 北京:煤炭工业出版社,1992.
- [2] 袁 亮. 松软低透煤层群瓦斯抽采理论与技术 [M]. 北京: 煤炭 工业出版社 2004.
- [3] Ammosov I I ,Eremin I V. Fracturing in coal [M]. Moscow: IZDAT Publishers ,1963.
- [4] Smyth M ,Buekley M J. Statistical analysis of the microlithotype sequences in the bulli seam [J]. International Journal of Coal Geology , 1993 22:167 – 187.
- [5] Tien J. Longwall caving in thick seams [J]. Coal Age ,1998 ,103
 (4):52-61.
- [6] Jha S N ,Karmakar S. Thick seam mining-some experience and exaltation [A]. Singh TN ,Dhar BB editors. Proceedings of the International Symposium on Thick Seam Mining [C]. Dhanbad: Central Mining Research Station ,1992: 191 – 202.
- [7] Yasitli N E ,Unver B. 3D numerical modeling of longwall mining with

top-coal caving [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2005 42(2):219-235.

- [8] 钱鸣高 缪协兴,许家林,等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版 2003.
- [9] 钱鸣高 /缪协兴. 采场上覆岩层结构的形态与受力分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(2): 97 106.

Qian Minggao ,Miao Xiexing. Theoretical analysis on the structure form and stabbility of overlyine strata in longwall mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,1995 ,14(2):97 – 106.

[10] 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 Minggao ,Xu Jialin. Study on the "O-shape" circle distribution characteristics of mining induced fracture in the overlyine strata [J]. Journal of China Coal Society ,1998 23(5):466-469.

- [11] 许家林, 找鸣高, 金宏伟. 基于岩层移动的"煤与煤层气共采" 技术研究[J]. 煤炭学报 2004 29(2):129-132.
 Xu Jialin ,Qian Minggao ,Jin Hongwei. Study on "coal and coal based methane simulation extraction" technique on the basis of strata movement [J]. Journal of China Coal Society ,2004 ,29(2):
- 129 132.
 [12] Yang T H ,Liu J S ,Tang C A. A coupled flow-stress-damage model for groundwater outbursts from an underlying aquifer into mining excavations [J]. International Journal of Rock Mechanics and Min-
- ing Sciences 2007 44:87 97. [13] 隋旺华. 开采覆岩破坏工程地质预测的理论与实践[1]. 工程 地质学报,1994 2(2):29 – 37.

Sui Wanghua. Theory and practice of engineering geological predication of mining-induced overburden failure [J]. Chinese Journal Engineering and Geology J994 2(2): 29 - 37.

- [14] 邓喀中,周鸣,谭志祥,等. 采动岩体破裂规律的试验研究
 [J]. 中国矿业大学学报, 1998, 27(3): 261-264.
 Deng Kazhong, Zhou Ming, Tan Zhixiang, et al. Study on laws of rockmass breaking induced by mining [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1998, 27(3): 261-264.
- [15] 谢和平,于广明 杨 伦,等.采动岩体分形裂隙网络研究[J].
 岩石力学与工程学报,1999,18(2):147-151.
 Xie Heping, Yu Guangming, Yang Lun et al. Research on the fractal effects of crack network in overburden rock stratum [J]. Chinese

Journal of Rock Mechanics and Engineering ,1999 ,18(2):147 -

151.

- [16] Yu G M Xie H Zhao J F et al. Fractal evolution of a crack network in overburden rock stratum [J]. Discrete Dynamics in Nature and Society 2000 5(1):47-52.
- [17] 张永波,刘秀英. 采动岩体裂隙分形特征的实验研究[J]. 矿山 压力与顶板管理 2004(1):94-96.
 Zhang Yongbo Liu Xiuying. Experimental study on the fractal char-

acteristics of mining induced crack [J]. Ground Pressure and Strata Control 2004(1):94 –96.

- [18] 王志国,周宏伟,谢和平.深部开采上覆岩层采动裂隙网络演化的分形特征研究[J].岩土力学 2009 30(8):2403-2408.
 Wang Zhiguo Zhou Hongwei Xie Heping. Research on fractal characterization of mined crack network evolution in overburden rock stratum under deep mining[J]. Rock and Soil Mechanics 2009 30 (8):2403-2408.
- [19] 桂乐乐 周宏伟 夏昌敬, 等. 基于尺度律的裂隙网络生成及其 对地下厂房稳定性的影响分析[J]. 岩土力学 2010 31(12): 3934-3938.

Gui Lele Zhou Hongwei Xia Changjing et al. Generation of fracture net based on scale law and its effect on underground powerhouse stability [J]. Rock and Soil Mechanics 2010 31(12): 3934 - 3938.

 [20] 陈剑平 庐 波,谷宪民 等.用投影法求算岩体结构面三维连 通率[J].岩石力学与工程学报 2005 24(15):2617-2621.
 Chen Jianping, Lu Bo, Gu Xianmin, et al. Determining three de-

mensional connectivity of rockmass discontinuity by projection [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2005 ,24 (15):2617-2621.

- [21] 卢 波 陈剑平, 石丙飞, 筹. 用遗传算法求解节理岩体三维连 通率[J]. 岩石力学与工程学报 2004 23(20):3470-3474.
 Lu Bo, Chen Jianping, Shi Bingfei, et al. Application of genetic algorithm to evaluate 3D persistance of jointed rockmass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2004 23(20):3470-3474.
- [22] 谢和平,周宏伟,刘建锋,等.不同开采条件下采动力学行为研 究[J].煤炭学报 2011 36(7):1067-1074.

Xie Heping Zhou Hongwei ,Liu Jianfeng ,at al. Mining induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts [J]. Journal of China Coal Society 2011 36(7):1067-1074.