

煤岩损伤扩展规律的即时压缩 SEM 研究*

②
9-15

吴立新 王金庄

(中国矿业大学北京研究生部 北京 100083)

孟顺利

(河北省煤炭厅 石家庄 050051)

TU452
TU455

摘要 使用 TOSHIBA-EDAX-9100 即时拉伸 SEM, 进行了中硬肥煤与坚硬无烟煤的即时压缩 SEM 损伤扩展规律研究。发现煤岩损伤产生的诱导因素和起裂应力特征, 揭示煤岩损伤扩展具有沿晶扩展、回避强带扩展和弱带优势导向扩展规律。

关键词 煤岩, 即时压缩, SEM, 损伤, 起裂与扩展

1 前言

岩石力学

煤岩是一种复杂的岩石材料, 煤岩组分复杂多样, 煤岩微结构复杂多变。受煤岩组分和微结构的影响, 煤岩的物理力学性质也复杂化。随着高倍扫描电镜技术(SEM)的发展, 进入 80 年代以来, 它开始在固体力学、材料力学及断裂力学中获得了越来越多的应用。近年, 国内外有学者借助 SEM 分析测试技术对岩石材料的断裂机制进行探索^[1~5]。本文选择中硬肥煤(河北峰峰二矿大煤)与坚硬无烟煤(河北峰峰三矿大煤, 接近于天然焦)制样, 在中国科学院力学研究所 TOSHIBA-EDAX-9100 即时拉伸 SEM 仪上进行即时压缩 SEM 实验, 研究了煤岩损伤扩展规律。

2 实验设计与制样

煤层是远古地表腐植物沉积演化的一种岩类矿物, 在地质环境中是成层状分布的。由于沉积物和沉积条件的非连续非均衡性, 煤层一般自然分割为多个宏观层面和许多个细观层面, 加上煤化过程中化学应力及成煤后地壳活动应力与地热作用, 煤层中一般发育有至少两组近似正交的原生裂隙, 其中一组沿煤层层面发育, 称为层面裂隙; 另一组近似垂直于煤层层面发育, 称为纵向割理。煤层在原岩应力状态下主要受环境应力场中地应力及内部残余应力作用。被开采时, 环境应力场受到扰动, 采场应力动态变化, 煤层及煤柱的受力情况复杂化。但概括起来, 煤层或煤柱受力主要来自 3 个正交方向: (1) 与煤层垂直的方向, 主要为上覆岩层的载荷应力; (2) 与煤层面平行的方向 1, 主要为地应力; (3) 与煤层面平行的方向 2, 主要为地应力和支持应力。

EDAX-9100 型 SEM 加载台的最大作用载荷为 2 kN。实验前估算煤试块的单轴压缩强度为 10~100 MPa, 因此, 试块承载端面积应小于 20~200 mm²。SEM 的最小视

1997年5月12日收到初稿, 1997年7月6日收到修改稿。

* 煤炭优秀青年基金和国家自然科学基金课题(59674004)联合支持。

场面积为 10 mm^2 。为全域搜索方便和节约机时,试块制成薄板状,长 $11.0 \sim 18.5 \text{ mm}$,宽 $8.3 \sim 12.5 \text{ mm}$,厚 $1.6 \sim 3.2 \text{ mm}$ 。为真实、全面地模拟研究煤岩在各种受力状态下的损伤扩展规律;实验样品按 3 种类型制作,如图 1 所示。



图 1 即时压缩 SEM 试块地质力学模型

Fig. 1 Geomechanical model of samples of real-time load SEM

模型 A 为:两加载端面分别沿煤层层面,观测面上可见平行于端面的细观分层和随机方向分布的割理;模型 B 为:两加载端面分别垂直于煤层层面,观测面上有垂直于端面的细观分层和原生损伤;模型 C 为:两加载端面分别垂直于煤层层面,观测面即为煤层层面,其上无原生损伤。经金相纸精磨和酒精刷洗处理后,试块具有较好的平整性和平行度,观测面也具有很理想的光洁度,SEM 下 1 000 倍率时表面微结构和原生损伤均清晰可辨。

3 起裂应力规律

由于各试块的微组分、微结构、原生损伤状况及力学模型不同,煤岩试块所测得的强度均有较大差异,且煤岩强度与力学模型之间不存在规律联系。但此次实验中,共有 8 个试块准确地捕捉到了起裂瞬间,如表 1 所列。经对起裂应力进行分析对比发现,不同试块的起裂应力之间存在较强的规律性,分别描述如下。

3.1 中硬肥煤

起裂应力与力学模型无明显关系,主要决定于微组成分及其结构(结合界面情况): (1) 镜质体、半镜质体及丝质体成非等厚层状分布的一般情况下(试块 E3, E8),垂直于端面沿微层界面起裂,起裂应力较低,平均为试块强度的 43.3%; (2) 当基质以均质镜质体为主体,只偶有半镜质体存在时(试块 E4),或垂直于加载方向原生损伤十分发育时(试块 E9),起裂应力大幅度上升,可达试块极限强度的 83%,甚至接近于试块的极限强度。

3.2 坚硬无烟煤

起裂应力与力学模型有一定关系,且起裂应力主要取决于原生损伤的组数与方向(对应于力学模型): (1) 只有一组原生损伤裂纹或有夹杂层的情况下(试块 W2, W3, W4),起裂应力较高,平均为试块强度的 70%; (2) 有两组斜交原生损伤裂纹时(试块 W6),起裂应力大幅度降低,仅为试块极限强度的 31.8%。

表 1 试块起裂应力、位置及方式

Table 1 The stress, position and manner when fractures initializing

试块号	力学模型	强度 σ_c /MPa	起裂应力 /% $\cdot \sigma_c$	起裂位置与起裂方式	试块描述
E3	B	8.4	48.4	垂直于端面沿微层界面张开	镜质体、半镜质体及丝质体成非等厚层状分布
E8	B	5.43	38.3	垂直于端面沿微层界面张开	镜质体、半镜质体及丝质体成非等厚层状分布
E4	B	9.1	83.1	垂直于端面沿镜质体与半镜质体界面张开	镜质体为主体基质, 偶有半镜质体成微薄层状或透镜状分布
E9	A	5.5	99.0	从垂直于端面的楔体尖端顺向起裂	垂直于加载方向的原生损伤十分发育, 新裂纹产生后试块随即破坏
W2	B	139.3	72.8	垂直于端面沿半镜质体张开	镜质体为主体基质, 半镜质体成微薄层状或透镜状分布, 垂直层面透镜状裂纹被碳酸盐非密实充填
W3	A	64.2	65.9	从垂直于端面的原生裂纹尖端顺向起裂	基质为均质镜质体, 偶有黏粒微核
W4	B	57.5	71.7	垂直于端面沿半镜质体张开	镜质体为主体基质, 半镜质体成微薄层状分布
W6	C	59.6	31.8	均质镜质体中靠近原生损伤附近垂直于端面压性张裂	基质为均质镜质体, 两组原生斜交裂纹被碳酸盐密实充填

4 损伤扩展规律

4.1 沿晶扩展

损伤力学指出^[6], 岩石材料基质中包含的各种不同成份、不同大小的颗粒可以看成岩石中的晶粒; 岩石在发生损伤断裂时, 裂纹扩展路径有两类: 一类为沿着晶粒界面扩展, 一类为穿破晶粒扩展。

此次研究中发现, 煤岩材料中“晶粒”包括: 均质镜质体的微粒体团块中密集分布的微粒体、均质镜质体中岛状或群岛状粘粒微核、均质镜质体微孔洞中充填的碳酸盐矿物等。将“晶粒”的强度与基质镜质体的强度进行比较, 如果“晶粒”的强度大于镜质体, 则可称之为“强晶”; 若小于, 则可称之为“弱晶”。实验观测表明, 微粒体、粘粒微核及碳酸盐密实微充填体均视为“强晶”。

研究表明, 煤岩损伤扩展遇到“晶粒”时扩展的基本形式是沿晶扩展, 具体表现为 3 种方式: (1) 沿晶粒界面曲折穿过“晶粒”团向前扩展(图 2(a)); (2) 绕开晶粒团向前扩展(图 2(b)); (3) 在“晶粒”团块附近生成一条平行于原裂纹的新裂纹继续向前扩展(图 2(c))。

4.2 回避强带扩展

从显微煤岩学的角度, 煤岩总是由一定细观结构构成, 这些细观结构包括一些比基质镜质体强度高的带状或透镜状物质, 如内生裂隙中密实充填的带状或透镜状碳酸盐矿物、基质中的微薄层状或透镜状黏土条带等。相对基质镜质体而言, 可以称之为强带。煤岩损伤扩展遇到这种强带, 总是以回避的方式继续其向前扩展的态势。这种回避包括 2 种方

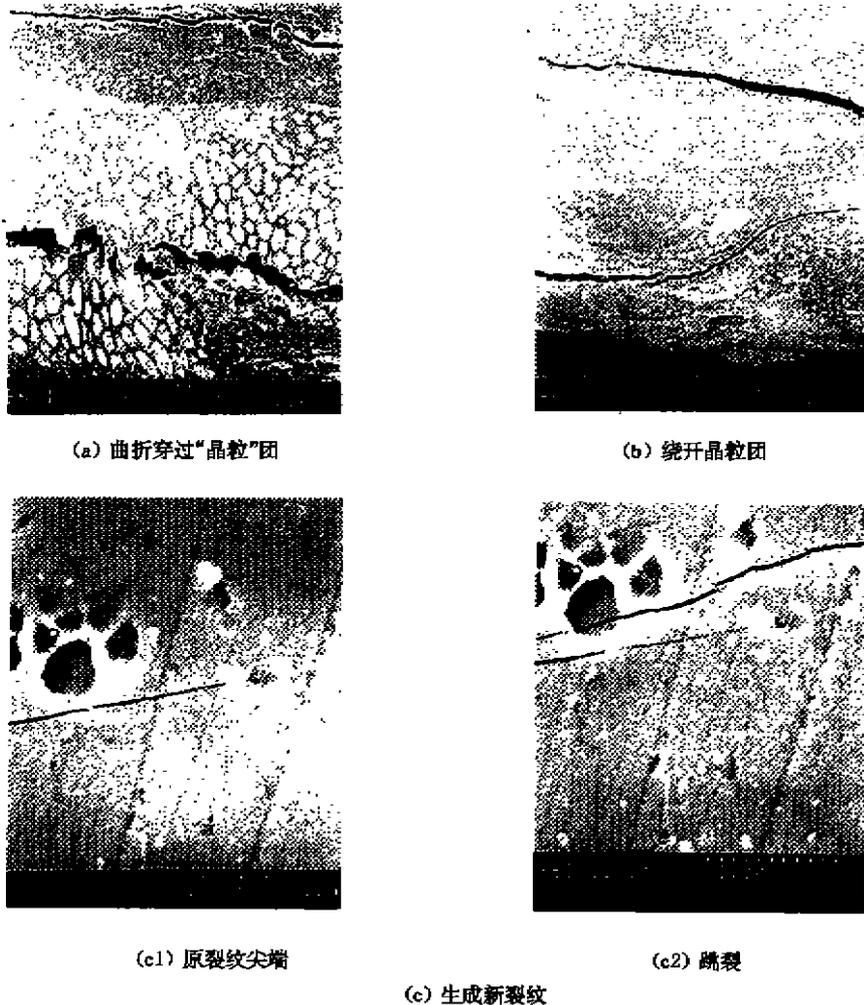


图 2 煤岩损伤扩展遇到“晶粒”时的 3 种基本形式

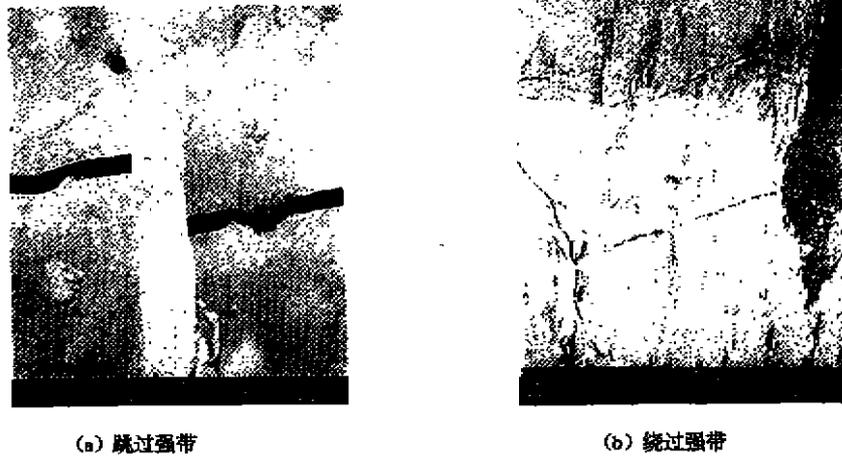
Fig. 2 Three basic types of coal fracture developing when encountering particles

式，即：(1) 跳过强带继续向前扩展，如图 3(a)；(2) 绕过强带继续向前扩展，如图 3(b)。

煤岩受力损伤的这种回避强带扩展规律，在煤岩地质历史中可得到很好的印证。因为煤岩在其地质历史中受力产生的原生损伤在煤岩材料中留下“记忆”，在 SEM 下可相当清晰地看到这种“记忆”的痕迹。如图 4 所示，试块 E3 的垂直于煤层层面的原生损伤裂纹受半镜质体条带阻隔而断开，试块 E6 垂直于煤层层面的原生损伤裂纹被黏土条带阻止。

4.3 弱带优势导向扩展

这是煤岩受力损伤扩展的另一种主要方式。因为煤岩材料微结构中大多包含各类成份的微薄层状或条带状物质，如内生裂隙中非密实充填的带状或透镜状碳酸盐矿物、均质镜质体中的微薄层状或透镜状半镜质体、丝质体或半丝质体、煤岩中未紧密闭合的原生损伤裂纹等。这些物质体本身、相互间的界面、与基质间的界面等便是煤岩材料中的薄弱带。

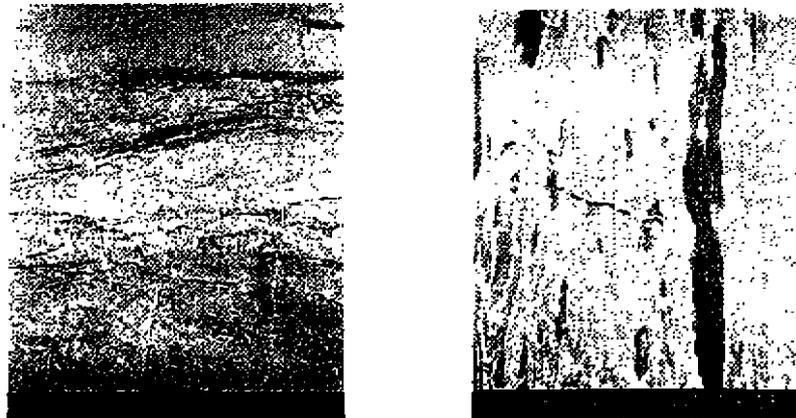


(a) 跳过强带

(b) 绕过强带

图 3 损伤扩展遇到强带时的扩展方式

Fig. 3 Developing features of fractures when encountering bands of high strength



(a) 试块 E3

(b) 试块 E6

图 4 原生损伤回避强带扩展在煤岩材料中留下的“记忆”

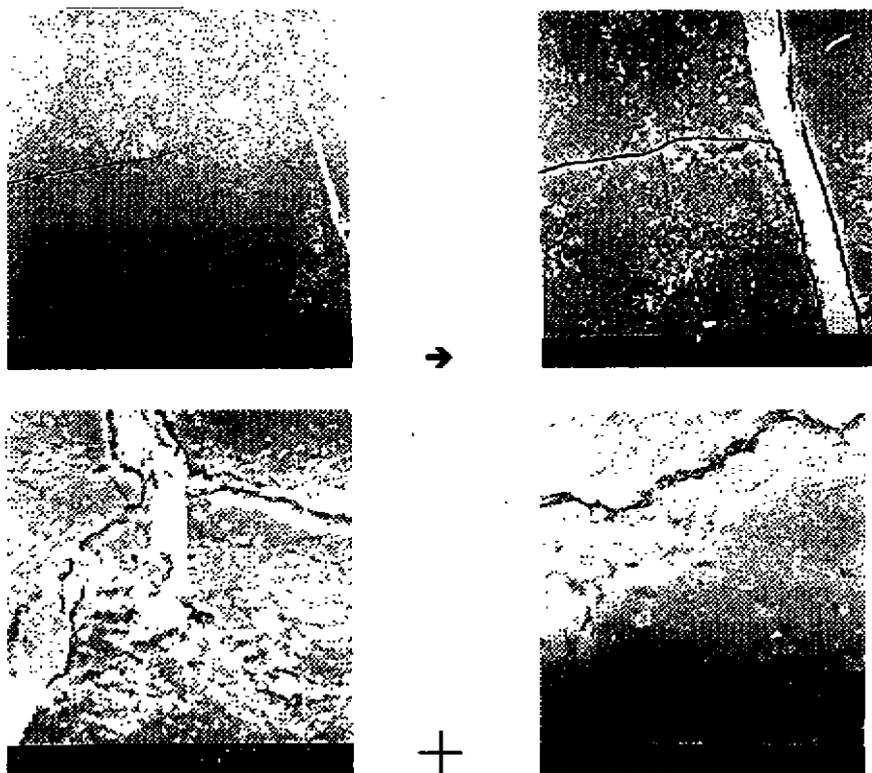
Fig. 4 The remained marks of original fractures avoiding bands of high strength

煤岩损伤产生与扩展时受弱带方向的优势导向,总是寻找和顺着这种弱带进行的。此类现象不胜枚举,如图 5(a)所示,试块 W6, W2 的裂纹寻找顺着被碳酸盐矿物非密实充填的原生裂纹向前扩展;如图 5(b)所示,试块 E3 的裂纹顺微组界面扩展;如图 5(c)所示,试块 E3 的裂纹顺半镜质体扩展;如图 5(d)所示,试块 W3 的裂缝顺着未紧密闭合的原生损伤裂纹扩展。

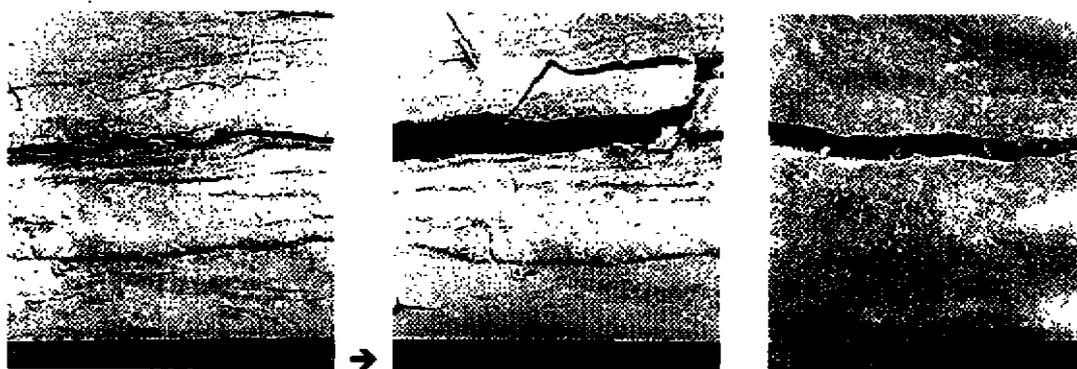
5 结论

通过实验研究,发现煤岩损伤产生的诱导因素主要有微组分之间的结合界面、基质中的低强微薄层体或透镜体以及平行于压应力方向的原生损伤;中硬肥煤起裂应力主要取决

于微组成份及其结构，坚硬无烟煤起裂应力则取决于原生损伤的组数及其发育方向；揭示煤岩损伤扩展具有沿晶、回避强带和弱带优势导向规律。上述结论对于研究煤爆、煤与瓦斯突出和煤柱稳定性具有理论指导意义。



(a) 顺被碳酸盐非密实充填的裂纹

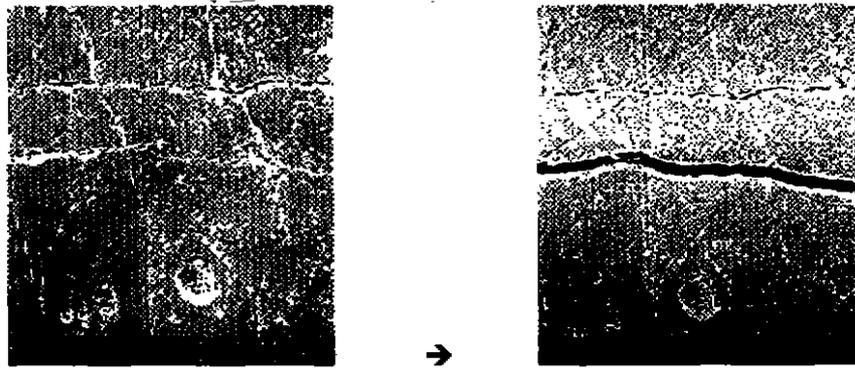


(b) 顺微组界面

(c) 顺半镜质体

图 5 煤岩损伤扩展受弱带方向的优势导向

Fig. 5 Fractures developing led by the directions of weak bands



(d) 顺非紧闭闭合的原生裂纹

图 5 煤岩损伤扩展受弱带方向的优势导向(续)

Fig. 5 Fractures developing led by the directions of weak bands(continued)

参 考 文 献

- 1 Tapponnier F, Brace W F. Development of stress-induced microcracks in westerly granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1976, 13: 103~112
- 2 许江, 李贺等. 对单轴应力状态下砂岩微观断裂发展全过程的实验研究. *力学与实践*, 1986, (4): 16~20
- 3 凌建明, 孙钧. 脆性岩石的细观裂纹损伤及其时效特征. *岩石力学与工程学报*, 1993, 12(4): 304~312
- 4 杨更社, 谢定义等. 煤岩体损伤特性的 CT 检测. *力学与实践*, 1996, (2): 19~20
- 5 赵永红, 王仁. 岩石微裂纹发育的扫描电镜即时观测研究. *岩石力学与工程学报*, 1992, 11(3): 284~294
- 6 谢和平著. *岩石·混凝土损伤力学*. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990
- 7 吴立新, 王金庄. 煤岩流变特性及其微观影响特征初探. *岩石力学与工程学报*, 1996, 15(4): 328~332

REAL-TIME LOAD SEM STUDY ON COAL FRACTURE DEVELOPING

Wu Lixin¹ Wang Jinzhuang¹ Meng Shunli²

(¹ Beijing Graduate School of China Univ. of Mining & Tech., Beijing 100083)

(² Coal Bureau of Hebei Province, Shijiazhuang 050051)

Abstract By means of experimental study on the dynamical development of samples of mid-strength rich coal and hard blind coal with TOSHIBA-EDAX-9100 real-time load SEM, the inducing factors and the behaviour features of coal fracture initializing are studied. It reveals that coal fracture develops along the interfaces between hard particles, avoids the bands of high strength, and develops along the direction of the bands of low strength.

Key words coal, real-time load, SEM, fracture, initialize and develop