

文章编号:1000-582x(2001)04-0074-04

煤岩损伤分析及偏应力检测法

曹树刚, 鲜学福

(重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室学院, 重庆 400044)

摘要:大量的煤岩显微试验分析表明,损伤是沉积相煤岩固有的力学特性,结构的非均质性及其引起的应力局部化,是煤岩损伤发展最终导致结构破坏的根本原因;受力以后,煤的脆性断裂及以后的搓揉、粒化等破坏形式应是煤与瓦斯突出时煤的主要破坏机制。由全应力-应变试验结果得知,煤岩受力以后,相对其峰值强度而言,强度高的岩石扩容应力和残余强度高,而煤的扩容应力和残余强度低。最后,提出了研究煤岩损伤变化过程的偏应力检测法。

关键词:岩层; 实验分析; 损伤; 检测法

中图分类号:TD 713⁺.1

文献标识码:A

损伤,是指在单调加载或重复加载下材料的微缺陷导致其内粘聚力的减弱及体积单元破坏的现象。属于沉积岩的煤岩,由于古气候及沉积环境的差异,构成了煤系地层煤岩在微观上的差异。其受力变形是一个很复杂的物理力学过程,最终的宏观变形破坏与其内部微结构和微缺陷紧密相关。对煤岩的损伤分析,有利于讨论矿山顶板坍塌、冲击地压及煤与瓦斯突出等动力现象。

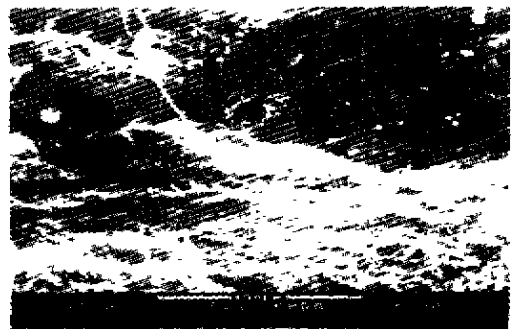
1 煤岩损伤的微观分析

采用美国 AMRAY 电子扫描显微镜对南桐井田的部分煤岩作了微观实验研究。由于沉积物、成岩环境及成岩后地质构造的影响,作为沉积相的煤岩存在微孔隙、微裂隙以及颗粒胶结面,加上节理、层理等软弱结构面的影响,无疑是一类含有原始损伤的连续介质体,其中煤的微观非均质性更为突出。图1揭示了成煤后的不均质性。煤存在一些微空洞、微裂隙,由不同形状、不同大小的块状颗粒叠压而成。图1(b)显示了煤在成岩时期受压力作用有一定的拖动塑性流动。炭质页岩和钙质泥岩的微观均匀性(见图2和图3)好于煤层,但仍有微空洞、微裂隙。钙质泥岩存在明显的解理面。

在外荷载作用下,由于煤岩颗粒和胶结物具有不同的力学强度,及原始微缺陷的影响,在煤岩内部不可避免的存在局部应力集中,或使局部颗粒、胶结物被挤



(a) (×300倍)



(b) (×500倍)

图1 煤显微图片

碎、拉裂、剪切滑移,产生新的微缺陷,或原有缺陷扩展,产生微裂纹、细观裂缝。最后,新、旧缺陷汇合及进一步扩展,形成大量的宏观裂隙,导致结构完全破坏。图4揭示煤受载以后产生一系列损伤破坏。其中,图

• 收稿日期:2000-02-20

基金项目:教育部博士点科研基金资助项目(9561108)

作者简介:曹树刚(1955-),男,重庆璧山人,博士。主要从事采矿工程及岩土工程等方面的教学和科研。

4(a)反映了煤不均质的交界面为强度薄弱处,外载作用时,沿此面产生的不规则张拉裂隙;图 4(b)反映了煤中亮煤产生垂直层理的台阶断裂,符合构造变形的最小耗能原理。



图 2 炭质页岩显微图片(×1500 倍)

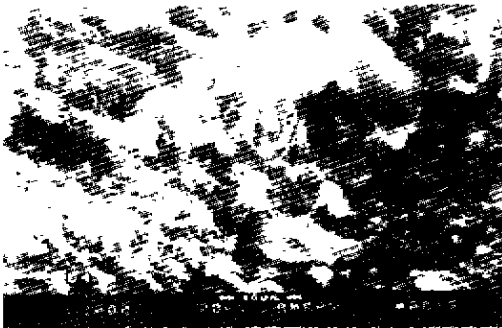
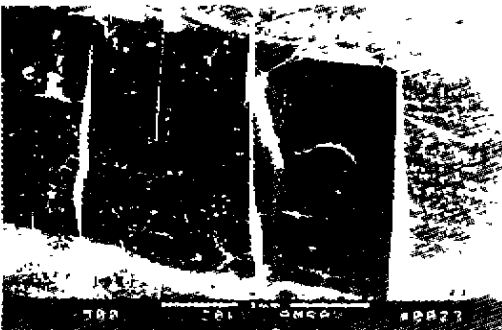


图 3 钙质泥岩显微图片(×2000 倍)



(a) (×400 倍)



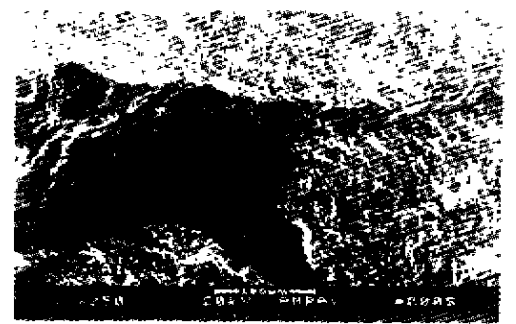
(b) (×1000 倍)

图 4 煤损伤显微图片

图 5 反映了炭质页岩受载以后损伤裂纹产生、发展及交汇情况,图 5(a)表明页岩成岩时的不均质性,造成局部的应力集中,原生微缺陷最后发展为微观破裂;图 5(b)表明损伤裂隙的发展、汇合。相对而言,炭质页岩沉积颗粒小、沉积方向性不明显,均匀性好一些,受载后产生的损伤裂隙带一定的方向性,近似于最大压应力方向,呈张拉断裂。



(a) (×400 倍)



(b) (×250 倍)

图 5 炭质页岩损伤显微图片



图 6 钙质泥岩损伤显微图片((500 倍)

图 6 为钙质泥岩损伤显微图片。钙质泥岩沉积颗粒取向性差,由于不同矿物、不同块度及不同的沉积环境造成结构的明显的不均质性。受载以后,原有的微缺陷扩展、汇合,造成细观的微裂隙,且裂隙延伸方向性差,主要沿不均匀结构交界面附近发展。

为考察煤岩的宏观力学特性,采用 Instron-1346 型伺服压力试验机进行了煤岩的全应力-应变关系试

验。试样规格为 50 mm × 50 mm × 100 mm。煤岩试样符号 A 为煤层底板炭质页岩, B 为煤层顶板钙质泥岩, C 为 K₆ 煤层。试验结果表明,煤岩受载之初,应力存在一个缓慢的增加过程,说明是煤岩内部微缺陷(孔洞、裂隙)受压闭合,存在较大的变形速率;随荷载增加,存在一个近似线性的变化过程;以后,应力增加变缓,应变变化加快,即煤岩原有微缺陷张裂及新微缺陷产生与发展。超过峰值应力 σ_c 以后,随着位移的增加,应力下降到某一值后变化很缓慢,该值可认为是煤岩单轴试验的残余应力,用 σ'_c 表示。实验结果表明,试样 A、B 及 C 分别的 (σ'_c/σ_c) 值分别为 52.3%、45.9% 及 8.8%,即受载时,强度较高的岩石残余应力就高,而强度最低的煤,其残余应力很低。试验应力 10% 的残余应力说明,试验煤的破坏以脆性破坏为主。

见图 7 至图 9,受压后煤岩试件体积变化到一定程度, ϵ_v 曲线变化趋势反向,即扩容。此后煤岩内部结构随荷载继续增加,原有裂纹张裂,并由慢到快地产生新的裂纹,也即煤岩材料损伤程度逐渐加大。煤岩试件扩容时应力 (σ 相对于其峰值应力 σ_c 而言,也因岩性的不同而发生变化。(σ_c/σ_c) 值变化,试件 A19 为 79.1%, 试件 B16 为 100%, 而煤的该值最低,试件 C12 和 C13 平均为 32.6%。扩容应力随岩性的相对变化规律,也说明了煤受力变形破坏规律与别的岩性之不同。强度低,变形破坏快。

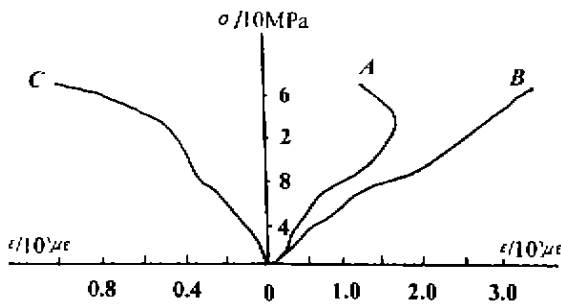


图 7 炭质页岩应变变化过程(A19)
A. ϵ_v 曲线; B. $\sigma - \epsilon_L$ 曲线; C. $\sigma - \epsilon_d$ 曲线

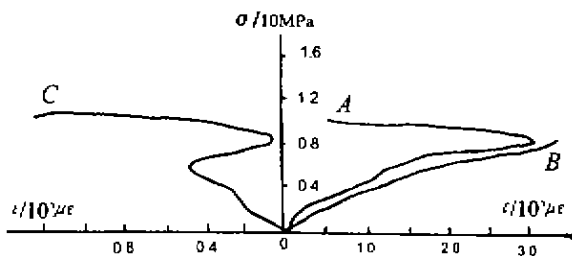


图 8 钙质泥岩应变变化过程(B16)
A. ϵ_v 曲线; B. $\sigma - \epsilon_L$ 曲线; C. $\sigma - \epsilon_d$ 曲线

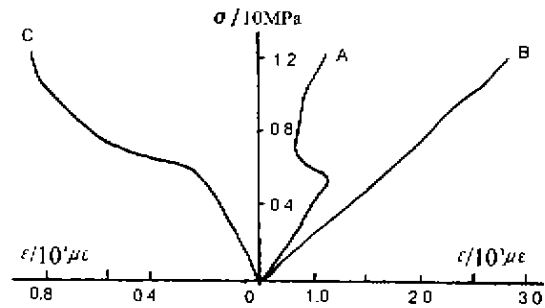


图 9 煤应变变化过程(C12)

A. ϵ_v 曲线; B. $\sigma - \epsilon_L$ 曲线; C. $\sigma - \epsilon_d$ 曲线

总之,不论从宏观上分析,还是从微观上观察,煤岩都具有明显的损伤特征。其内含有层面、节理、夹层、空洞、破碎带及裂隙等非连续结构面,也含有大量的微孔隙、微裂隙。

2 材料损伤的一般检测方法

在外部因素(力、温度、幅射等)作用下,煤岩内部微缺陷的成核、扩展(或胀大)、汇合将造成煤岩的逐渐损伤直至破坏。在连续损伤力学中,材料内部的微缺陷被近似地连续化,其影响用一个或几个连续的内部场变量来表示,即损伤变量。损伤变量是一种抽象的量,用来概括性地描述材料的损伤,它可以是标量、矢量、二阶张量等变量。

最简单的损伤变量是 Kachanov^[1] 和 Rabotnov^[2] 首先提出的。设有一简单的拉伸试件,其原始横截面积为 A_0 ,由于受拉产生损伤后的瞬时表观面积为 A ,此时横截面上出现孔隙的总面积为 ωA ,试件实际承载面积为 \bar{A} ,则 Kachanov 定义连续性因子

$$\psi = \frac{\bar{A}}{A} \tag{1}$$

Rabotnov 定义损伤因子

$$\omega = \frac{A\omega}{A} \tag{2}$$

存在关系

$$\omega + \Psi = 1 \tag{3}$$

由此可推到三维情况下的损伤变量定义,一个代表性体积元素的斜截面内损伤的等效面积与该截面总面积的比值。若该比值同截面的方位无关,则材料出现各向同性损伤。

为使加载过程中的损伤可以叠加, Broberg^[3] 将损伤变量定义为

$$\omega_B = \ln \frac{A}{A_0} \tag{4}$$

几十年来, Качанов 等人的损伤变量的定义得到了大量应用。由此也涉及到损伤变量的物理量测问题。现

有的煤岩损伤检测方法,如 X 光摄像、声发射、超声技术、红外显示技术,CT 技术等都属于直接测量方法。间接测量方法有弹性模量法(也称等效应变法)、弹性应变法、塑性特征量法及粘塑性特征量法等,主要量测其它物理力学量,通过计算求得材料的损伤量。作者主要通过煤岩力学试验,利用弹性模量指标反映煤岩损伤变化规律。

3 煤岩损伤的偏应力检测法

大量的矿山和其它工程实践表明,煤岩结构破坏主要是拉断破坏和剪切破坏;常温下,煤岩的拉断、剪切破坏过程中起主导作用的是偏应力张量 S_{ij} ,而

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij} \quad (5)$$

其中 $\sigma_m = \sigma_{ii}$, δ_{ij} 为 Kronecker 记号。

对于煤岩材料,假定在三轴应力条件下对材料损伤影响最大的是最大偏应力 S_{11} ,因而可通过蠕变试验检测煤岩材料损伤因子的变化规律。

采用 Lemaître^[5]“应变等效性假说”,损伤只通过有效应力而影响(修正)应变的行为,或认为将结构应力 σ 换成有效应力 $\bar{\sigma}$,所获得的无损材料的应变与有损材料的应变等效。在一维线弹性条件下,有损材料的应变。

$$\bar{\epsilon} = \frac{\bar{\sigma}}{E} = \frac{\sigma}{E(1-\omega)} = \frac{\sigma}{\tilde{E}} \quad (6)$$

式中 E 为无损时材料的弹性模量, $\tilde{E} = E(1-\omega)$ 为有损材料的弹性模量。故得损伤因子 ω 的演化方程

$$\omega = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \quad (7)$$

三维应力状态下,定义损伤张量 ω 为

$$\omega = I - A_\omega : A^{-1} \quad (8)$$

式中 I 为单位张量, A 为无损状态下材料的弹性常数张量, A_ω 为损伤状态下材料的弹性常数张量。与 ω 相应的有效应力张量为

$$\bar{\sigma} = (I - \omega)^{-1} : \sigma \quad (9)$$

对煤岩的三轴蠕变试验时,有 $\sigma_{11}, \sigma_{22} = \sigma_{33}, \sigma_{ij} = 0 (i \neq j)$ 。根据试验曲线不同荷载条件下的 $\epsilon - t$ 关系,可得到 $S_{11} - \epsilon_{11}$ 关系,见图 10。图中 ϵ_c, S_c 分别为材料完全破坏时的临界主应变及临界主应力。类似于式(6),存在如下的关系

$$S_{11} = \tilde{E}_0(\epsilon_{11}) \epsilon_{11} \quad (10)$$

式中 $\tilde{E}_0(\epsilon_{11})$ 称为有效模量,为 ϵ_{11} 的函数。设 E_0 为 $S_{11} - \epsilon_{11}$ 曲线中线性段模量,即得到类似于式(7)的损伤因子 D 的定义:

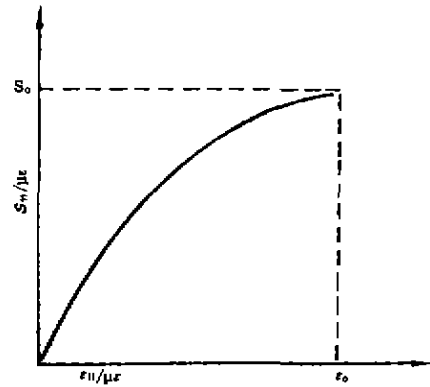


图 10 偏应力应变关系

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}_0(\epsilon_{11})}{E_0} \quad (11)$$

该式即为三轴蠕变损伤演化方程。 $\tilde{E}_0(\epsilon_{11})$ 形式经试验数据的曲线拟合确定以后,损伤因子 D 的变化规律也随之确定。因确定 D 值主要依据材料的最大偏应力,所以,这种确定煤岩蠕变损伤规律的方法可以称之为偏应力检测法。可以认为,在对材料的损伤分析中, D 与 ω 起相同的作用。

4 结束语

矿山煤岩是一类具有原始损伤的天然材料。受载以后,其内的损伤将继续发展,直至结构完全破坏。因此,采用简便易行的损伤变量检测方法,如作者提出的偏应力检测法,有利于揭示煤岩蠕变损伤规律,以便进一步研究矿山巷道支护、煤与瓦斯突出等与时间有关的力学问题。

参考文献:

- [1] Качанов, Л. М. О. Времени, разрушения, в условиях, ползучести [J]. Изв. АН СССР, ОТН, 1958, 8: 23 - 31.
- [2] RABOTINOV YU N. On the equations of state for Creep [M]. Progress in Applied Mechanics, 1963.
- [3] JANSON J, HULT J. Fracture mechanics and damage mechanics, a combined approach [J]. J. de Mech. Appl. 1977, 1(1), 59 - 64.
- [4] RACHANOV L M. Introduction to continuum Damage Mechanics [M]. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1986.
- [5] LEMAITRE J. A Course on Damage Mechanics [M]. Springer-Verlag, 1992.

The Quantitative Analysis of the Fatalness of the Methane Explosion in Coal Mines

LIU Li-ping, LIN Deng-fa, HE Chao-yuan

(Department of civil engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: If the quantitative index of the methane explosion in coal mines before exploding can be calculated, the measure will be take to prevent the methane explosion. The methods using in the analysis of the fatalness of the methane explosion are almost qualitative analysis. In this paper the quantitative analysis of the fatalness of the methane explosion in coal mines is achieved on the basis of the research of the essence event probability with the method of fault tree analysis using the micro-computer. The practical example of the quantitative analysis of the fatalness of the methane explosion in coal mines is given.

Key words: methane explosion; fault tree analysis; quantitative analysis

(责任编辑 钟学恒)

~~~~~  
{上接第 77 页}

## Damage Analysis on Coal and Rocks and the Method of the Checking Damage by the Deviator Stress

*CAO Shu-gang, XIAN Xue-fu*

(College of Resource & Environment Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The characteristic of the original damage and the breaking of the coal and rocks under the loading has been discussed by a lot of microscopic structure analysis and by whole stress-strain testing on the coal and rocks. The non-homogeneity causes the stress locating in a small spot. It is the essential cause of the damage developing and causing the structure breaking of the coal rocks. The failure of brittle fracturing, rubbing later on and granulating should be a major pattern in the outburst of coal and gas. The method of the examining damage by the deviator stress, is proposed. It can be used to analyse the characteristic of the coal and rocks.

**Key words:** rock; experiment; damage; method of the detecting

(责任编辑 钟学恒)