

文章编号: 1000-6524(2002)03-0278-07

煤中显微裂隙的成因类型及其研究意义

张慧¹, 王晓刚², 员争荣¹, 郝琦¹

(1. 煤炭科学研究总院 西安分院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 分析、归纳了大量的扫描电子显微镜观测结果,以煤岩学、构造地质学研究为基础,依据煤中显微裂隙的形态、大小、排列组合等发育特征,将内生裂隙进一步划分为失水裂隙、缩聚裂隙、静压裂隙,将外生裂隙进一步划分为张性裂隙、压性裂隙、剪性裂隙、松弛裂隙。描述了各类裂隙的发育特征,探讨了裂隙的演化、识别和影响裂隙发育的因素。裂隙成因类型的研究,有助于判断不同裂隙对煤储层渗透率的贡献。

关键词: 煤; 显微裂隙; 成因类型; 扫描电子显微镜

中图分类号: P618.11

文献标识码: A

Genetic types of microfractures in coal and their significance

ZHANG Hui¹, WANG Xiao_gang², YUAN Zheng_rong¹ and HAO Qi¹

(1. Xi'an Branch, China Coal Research Institute, Xi'an 710054, China; 2. Xi'an Science and Technology College, Xi'an 710054, China)

Abstract: In accordance with coal sample observation by scanning electron microscope (SEM) and researches based on such subjects as anthracology, tectonic geology and material mechanics, the endokinetic fractures in coal are further classified into dewatering fractures, condense fractures and static pressure fractures, while the exogenetic fractures are further divided into tensile fractures, pressure fractures, shrink fractures and slack fractures, consistent with the development regularity of the geometric shapes, sizes and arrangement of fractures. The evolution, identification and controlling factors of the microfractures in coal are discussed, and the role of various fractures in coal reservoir is also analyzed. The researches on coal microfractures are of great significance in the study of coal reservoir, the exploration and development of coalbed methane, and the drainage of coal gas from coal mines.

Key words: coal; microfracture; genetic type; scanning electron microscope (SEM)

固体有机岩——煤层,是优质洁净能源煤层气的生气层和储气层。近十几年来,煤层气地质工作者对煤中裂隙的研究十分关注,因为裂隙是煤层气运移和产出的主要通道。煤中裂隙主要通过矿井巷道揭露的煤层、煤岩手标本以及煤岩光片的观测来研究,由于煤体结构

收稿日期: 2001-11-05; 修订日期: 2002-02-28

作者简介: 张慧(1955-),女,高级工程师,长期从事煤田地质、煤岩学及煤层气的研究工作。

不均匀、地质环境复杂以及研究手段局限等,煤中裂隙的揭示和认识仍有很多不足之处。笔者借助于扫描电子显微镜,展现和分析了几种用其他研究方法和手段无法揭示的显微裂隙。

1 样品及其制备方法

研究样品为我国不同地区、不同时代、不同类型的煤岩块样。用扫描电子显微镜(scanning electron microscope,以下简称SEM或扫描电镜)观察煤岩块样的自然断面,其样品制备方法和过程简要如下:

从较大的煤岩块样上用手掰(或用小锤敲)成 $1\sim 2\text{ cm}^3$ 的小块,选相对平整的自然断面($1\sim 2\text{ cm}^2$)作观察面,用吸球吹去表面附物,然后对观察面做导电处理,通常是镀金膜(或称金导电层)。对于煤体破坏严重的松散煤样(如碎粒煤、糜棱煤等),可用锡纸或其他可用作包裹的材料将取好的小块固定住,然后镀金导电层。该制样方法对样品基本没有人为损伤,能够保持样品的原始状态。

制备扫描电镜小块样前,须先做宏观描述,并仔细记录观察面特征。从大块样上制取小块样的过程是破裂和断开的过程,样品会优先沿内部原有某种界面(层面、组分界面、裂面、滑移面、磨擦面等)裂开。新鲜断面参差不齐,通常尽可能选取垂直层理的新鲜断面作扫描电镜的观察面。

扫描电镜主要观察微米级裂隙,除了研究尺度小以外,其观察内容和研究方法与宏观研究基本相同。因样品制备方法与光学显微镜所用样品的制备方法不同,所获信息与煤岩光片(经过抛光的)的观测结果有很多不同。

2 煤中显微裂隙的名称与分类

裂隙在煤中常见,但不同国家、不同学科、不同学者对此有不同的称谓。裂隙的近义词或同义词有:节理、割理(Law, 1993; 张胜利, 1995)、裂缝、断裂等,这些名称术语的含义和所指实际上就是煤中不同类型、不同规模的裂隙。裂隙一词最早由煤岩学引用苏联的概念,有内生和外生之分,此名称已在我国煤田地质领域应用多年。为了避免名词上的混淆,本文的“裂隙(fracture)”一词指扫描电镜下观察到的所有显微裂隙。裂隙是煤中的线状空隙,孔隙(pore)是点状或环状空隙(张慧, 2001)。

煤中裂隙的分类首先始于宏观观察,主要基于裂隙发育的规模,有的按等级划分为一级、二级、三级等,类似于构造地质学对断裂的划分;有的划分为主裂隙和次裂隙(李小彦, 1998);用“割理”一词来描述煤中裂隙的学者划分为面割理和端割理;有的划分为巨割理、大割理、中割理、小割理、微割理等(张胜利, 1995);苏现波(1998)划分为割理(内生)、外生裂隙和继承性裂隙;霍永忠(1998)在光学显微镜下把裂隙分为内生裂隙、层面裂隙、继承性裂隙和构造裂隙。各种分类方案主要因观察尺度和出发点不同而异。目前在扫描电镜下研究和划分煤中显微裂隙类型的有关报道很少见到。

所有裂隙都是应力作用的结果,裂隙的形态、大小、排列组合等特征是其力学性质的反映,可根据裂隙发育特征划分其成因类型。笔者沿用煤田地质学对煤中裂隙的划分,仍将煤中显微裂隙划分为内生和外生两大类,在此基础上进一步划分出7小类(表1)。

表 1 煤中显微裂隙类型及其成因描述

Table 1 Types of coal microfractures and their genetic description

分 类	成 因 简 述
内生裂隙	失水裂隙 煤化作用初期,煤层在压实、失水、固结等物理变化过程中形成的裂隙
	缩聚裂隙 煤在变质过程中因脱水、脱挥发分而缩聚所形成的裂隙
	静压裂隙 煤层在上覆岩层的静压作用下形成的与层理大体垂直的定向裂隙
外生裂隙	张性裂隙 由张应力作用而产生的启开状裂隙
	压性裂隙 经受严重挤压的煤中,由压应力作用而产生的闭合状裂隙
	剪性裂隙 由剪应力作用而产生的两组或多组共轭裂隙
	松弛裂隙 煤中构造面上由应力释放而产生的裂隙

3 显微裂隙的成因类型及其发育特征

裂隙发育特征包括裂隙的形态、大小(或者说规模,包括长度、宽度、高度)、排列组合、密度(条数/cm²)、与层理和组分的关系等,这些发育特征是成因分析的主要依据,也是成因类型鉴别的标志。

3.1 内生裂隙

内生裂隙是在煤化作用过程(包括成岩作用和变质作用)中,煤中凝胶化物质受温度、压力影响,内部结构发生一系列物理、化学变化,体积收缩产生内张力而形成的。内生裂隙主要发生在镜煤中,有定向的,也有不定向的。

煤化作用具有明显的阶段性,不同阶段煤层内部发生不同的变化,形成成因不同的裂隙。按煤化阶段和力的来源,将内生裂隙进一步划分为失水裂隙、缩聚裂隙和静压裂隙,前两者为不定向裂隙,后者为定向裂隙。

3.1.1 失水裂隙

单根裂隙多呈弯曲状,一般较短,不穿过镜煤分层,不同方向性的失水裂隙常组合成不规则网状,形似干裂纹。其宽度大多为几至几十微米,为大孔级(> 1 μ m)以上(张慧,2001)。

失水裂隙对组分选择性不强,镜质组和惰质组中均有发育,但镜质组中明显多于惰质组(图 1b)。失水裂隙在层面上发育较多,有的发育于组分之间。煤中不同组分多呈层状排列,因此,组分间的失水裂隙易与层理平行(图 1a)或等同,若组分为碎屑颗粒状,即形成层间孔(张慧,2001)。失水裂隙与风化裂隙在成因上有相似之处,常见于褐煤和低阶烟煤中,如山东黄县和云南宜良的褐煤、鄂尔多斯盆地的弱粘煤、不粘煤和长焰煤等。

3.1.2 缩聚裂隙

缩聚裂隙是煤化过程中化学变化的结果。其主要形貌特征是短小、弯曲、密集、无序,其长度为 2~ 5 μ m 或更小,宽度为 0.1~ 2 μ m 或更小,属中孔级(0.1~ 1 μ m)范围。缩聚裂隙严格受组分制约,仅发育于镜质组中,尤其是胶质体、沥青质体等塑流性强的组分(图 1c、d),并多见于组分界面上。

不同变质程度的煤中,缩聚裂隙的发育特征有差异(Suárez_Ruiz, 1994),低变质程度的煤中,缩聚裂隙主要见于塑流性强的组分,在中-高变质煤的镜质组中相对较多见,如山西长子县贫煤、霍东肥-焦煤、晋城无烟煤和贵州织金无烟煤等。无烟煤中有时可见密度大的

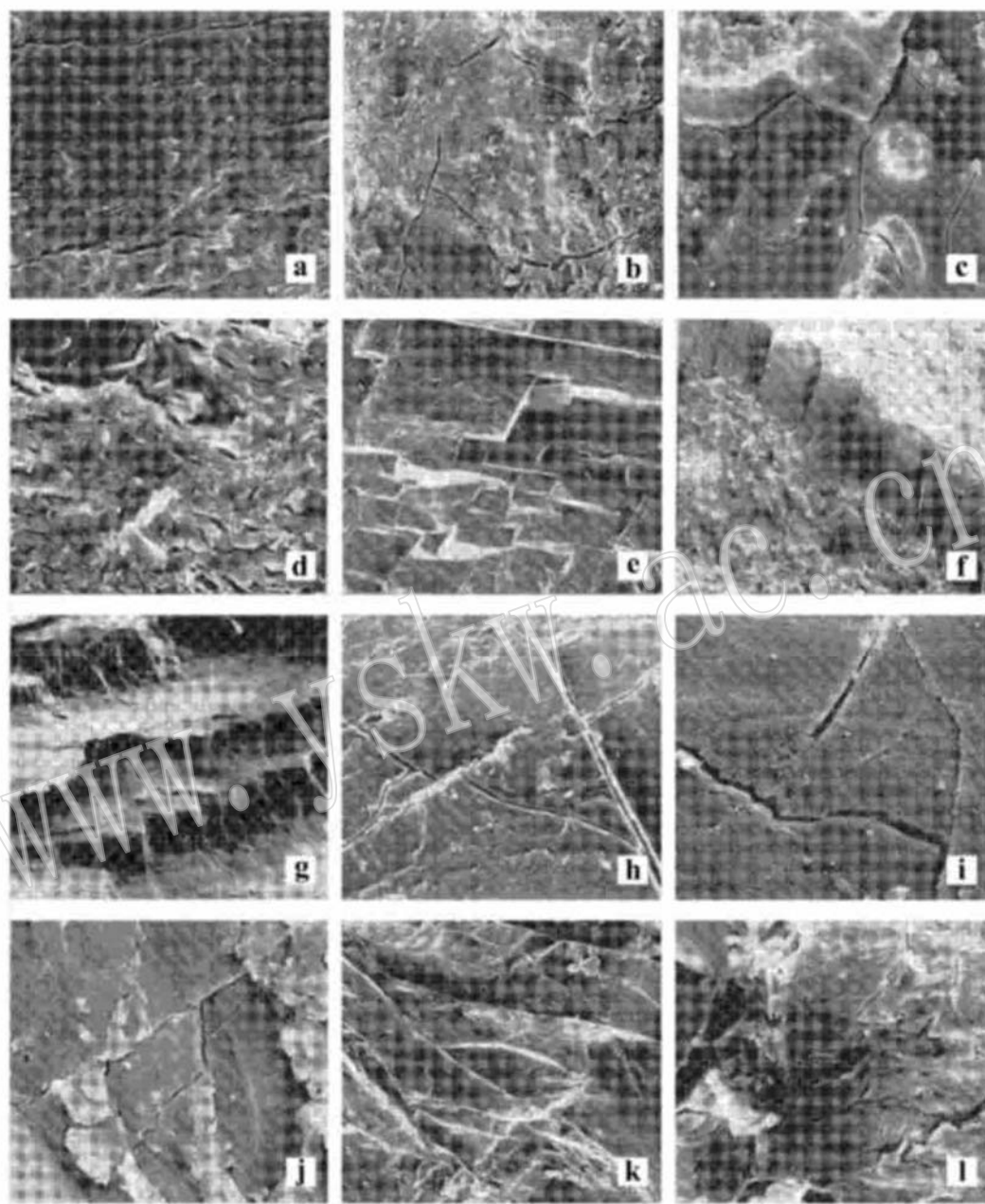


图1 煤中显微裂隙的扫描电镜观察结果

Fig. 1 Observations of coal microfractures by scanning electron microscope

a—失水裂隙, 山东黄县, E, 褐煤, $\times 480$; b—失水裂隙, 宁夏银洞沟, J_{1-2} , 长焰煤, $\times 300$; c—缩聚裂隙, 山西霍东, C-P, 肥-焦煤, $\times 1000$; d—缩聚裂隙, 山西晋城, C-P, 无烟煤, $\times 4400$; e—静压裂隙, 山西汾西, C-P, 焦煤, $\times 40$; f—静压裂隙, 黑龙江鹤岗, J_3 , 气煤, $\times 48$; g—静压裂隙, 山西阳泉, C-P, 无烟煤, $\times 220$; h—张性裂隙穿越微层理, 辽宁铁法, J_3 , 气煤, $\times 400$; i—张性裂隙, 河北唐山, C-P, 肥煤, $\times 1100$; j—剪性裂隙组成菱形网络, 陕西韩城, C-P, 焦-瘦煤, $\times 2600$; k—压性裂隙, 四川天府, P_2 , 焦-瘦煤, $\times 130$; l—松弛裂隙, 产于磨擦面糜棱质上, 安徽淮南, P_2 , 气煤, $\times 780$

很细小的缩聚裂隙(图1d)。

温度高、压力低的变质条件更容易使煤中产生缩聚裂隙,邹艳荣(1998)的研究结果表明,叠加岩浆热变质作用有利于内生裂隙进一步发展,更有利于缩聚裂隙的形成。

3.1.3 静压裂隙

静压裂隙基本上就是煤岩学中的“内生裂隙”和有些煤层气专家所指的“割理”。静压裂隙通常仅限于镜质组中,不穿越组分,其主要形貌特征是短、直、定向,宽度为大孔级及以上。静压裂隙两侧没有位移,与层理大体垂直,并常等间距排列(图1e-f-g),因受煤岩组分制约,静压裂隙本身不易构成网络。受现今地应力的影响,各地静压裂隙的启开程度不尽相同。

静压裂隙在低变质-高变质煤中均有发育,但煤级不同,其发育特征有明显差异。许多研究已表明,中变质煤的静压裂隙最发育(Law, 1993; 霍永忠, 1998)。本次研究还发现,高变质煤中的静压裂隙规模小、密度大,启开程度低,从图1e~g可以看出,山西阳泉无烟煤中静压裂隙的密度(数百倍镜下裂隙密集)大于黑龙江鹤岗气煤和山西汾西焦煤(几十倍镜下裂隙密集,数百倍镜下裂隙稀疏)。

从静压裂隙受限于镜质组的特征来看,静压裂隙的形成还与凝胶化组分的演变有关,因其明显的方向性充分体现了垂向静压的主导作用,故称之为静压裂隙。

3.2 外生裂隙

煤层形成后,受地质构造应力作用产生的裂隙为外生裂隙,或称之为构造裂隙。其主要特征是不受组分的限制,规模大小不等,相差悬殊,与层理呈高角度相交。煤层褶皱构造挠曲部位或断层附近的煤中,外生裂隙密度有时可达每平方米几万至几十万条(张慧等, 1998)。定性地来讲,所有煤层都有外生裂隙,但构造煤(主要是碎裂煤和碎粒煤)中最发育。按其力学性质,将外生裂隙进一步划分为张性裂隙、压性裂隙、剪性裂隙、松弛裂隙等(表1),其中前三类裂隙在宏观上已有较多研究(李小彦, 1998; 张胜利, 1995; 苏现波, 1998)。

3.2.1 张性裂隙

张性裂隙是煤层脆性变形的形式之一,宽度几至几十微米,裂面粗糙不平或呈波状、锯齿状,无擦痕。张性裂隙在均质镜质组中相对较直,当穿越不同组分时,常转向、错位或宽度减小(图1h-i)。在结构多变的煤层中,呈弯曲状,背斜轴部和正断层附近的煤中,张性裂隙比较发育,裂隙交汇处常可见到角砾。

张性裂隙有统计上的方向性,与区域构造应力场相关,是煤中主要裂隙类型之一,当其密度大到一定程度时即形成不同级别的角砾,或在一定范围内构成不同级别的裂隙网络。

3.2.2 压性裂隙

压性裂隙通常比较长和直,裂隙两侧位移量大,成组排列,各组以不同角度斜交,常将煤切割成楔状块(图1k)、菱形块或透镜体等(张慧等, 1998)。

3.2.3 剪性裂隙

剪性裂隙区别于其他裂隙类型的主要特征是派生裂隙发育,常有两组或多组共轭裂隙,裂面上有时可见擦痕或碎粒,可穿越不同组分,但优先在镜质组中发育。均质镜质组中的共轭剪性裂隙容易构成菱形(图1j)、X形、三角形、多边形网络(张慧等, 1998),共轭剪性裂隙中常有一组宽度大、延伸长的裂隙,通常称之为主裂隙(李小彦, 1998)。剪性裂隙还有张剪性和压剪性之分,前者启开度大于后者。

3.2.4 松弛裂隙

煤中构造面上,由应力释放而产生的裂隙为松弛裂隙(图 11)。遭受构造破坏较严重的煤层中滑移面、磨擦面非常之多,这些面是地质构造活动中应力集中的部位,碎粒、糜棱质(类似泥质)首先从这些面上产生,当应力释放时便形成松弛裂隙。松弛裂隙裂面不平,呈锯齿状,方向性不强,在磨擦面上常见,与擦痕伴生。

4 影响裂隙发育的因素

煤中显微裂隙成因类型多,特征各异,这是因为影响裂隙发育的因素众多。立足于煤层,可将影响因素分为外界因素和内在因素。外界因素主要是作用于煤层的外力的性质、大小、作用方式等,其次还有煤层顶底板岩石的机械性能;内在因素有煤岩组分、变质程度、煤层(或组分)厚度、孔隙性、含水性等。内在因素通过外界条件起作用,内、外因素都很重要。外生裂隙的发育与外界因素更为密切,内在因素对内生裂隙的发育更为重要。

扫描电镜下比较直观和明显的内在因素主要有组分和变质程度。同一应力场中的同一块煤中,组分不同裂隙发育程度不同(Close, 1991; 邹艳荣, 1998),镜质组是煤中脆性较大的组分,外生裂隙优先在其中发育。镜质组富含水分和挥发分,是煤化过程中变化最大的显微组分,内生裂隙也主要发育于其中。

内生裂隙与煤级关系密切(Law, 1993; Close and Mavor, 1991),总体来看,低阶煤中以失水裂隙为主,中阶煤中缩聚裂隙和静压裂隙兼而有之,高阶煤中缩聚裂隙多见,静压裂隙规模小、密度大。

5 裂隙的演化与类型识别

在漫长的地质历史中,随着煤层所经受的地质条件的变化,裂隙也发生相应的变化。成岩作用和变质作用初期形成的失水裂隙、静压裂隙等,在高变质阶段闭合(Law, 1993)。早期构造作用形成的裂隙,在后期构造作用下进一步发展(即继承性裂隙)、转向或加密等(苏现波, 1998)。在较严重的挤压作用下,启开状裂隙转变为闭合状。强烈的构造破坏作用使煤碎粒化或糜棱化,煤层原生结构破坏,原有各类裂隙被强烈改造。

煤中裂隙具极不均匀性和多样性,一个煤层或者一块煤岩手标本中,裂隙的成因类型复杂多变,扫描电镜下常见的是两种或两种以上类型的裂隙并存,即使同一条裂隙,也会兼有两种或多种成因,所以裂隙成因类型的识别有时是比较困难的。一般来讲,原生结构煤中的裂隙类型容易识别;构造破坏轻微的煤中,裂隙较易识别;经受多次构造变动的煤层,裂隙成因类型比较难判断。

6 结论与研究意义

煤中显微裂隙成因类型多,特征各异。所有裂隙都是煤层内力、外力或二者共同作用的结果,在地史中随煤层经受的地质条件变化而变化。内生裂隙受组分制约,仅在煤分层中局部连通,对煤层局部渗透率有贡献。压性裂隙呈闭合状,对煤储层渗透率贡献小;松弛裂隙发育于严重遭受破坏的煤层,此煤层的整体渗透率通常很低,故松弛裂隙对渗透率的贡献很

微弱;张性裂隙和启开状剪性裂隙的发育规模大,穿越不同组分和分层并常构成不同级别上的连通网络,对煤储层渗透率贡献最大,是控制煤层整体渗透率的主要裂隙。在煤层原生整体结构不破坏的情况下,张性裂隙和启开状剪性裂隙越发育,越有利于提高煤层渗透率。

裂隙是煤中流体运移和产出的主要通道,是煤储层渗透率(有效孔隙率)的决定性因素(Enever, 1997)。裂隙的成因类型不同,在煤储层中的作用亦不同,裂隙成因类型的识别,有助于判断裂隙在煤储层中的作用,预测煤储层的渗透率。

Reference

- Close J C. 1991. Natural fractures in bituminous coal gas reservoir[A]. Gas Research Institute Topical Report[C]. No. GRI 91/0337.
- Close J C and Mavor M J. 1991. Influence of coal composition and rank on fracture development in Fruitland coalbed natural gas reservoirs of the San Juan Basin[A]. Schwachow. Coalbed methane of Western North America: Rock mountain association of geologists field conference guidebook[C], 109~ 121.
- Enever R E, Hening A. 1997. The relationship between permeability and effective stress for Australian coals and its implications with respect to coalbed methane exploration and reservoir modeling[A]. Proceedings of the 1997 International Coalbed Methane Symposium[C]. Alabama: The University of Alabama Tuscaloosa, 13~ 22.
- Huo Yongzhong, Zhang Aiyun. 1998. The genetic classification and its application of microfracture in coal reservoir[J]. Coal Geology & Exploration, 26 (6): 28~ 32 (in Chinese with English abstract).
- Law B E. 1993. The relationship between coal rank and cleat spacing: Implication for the prediction of permeability in coal[A]. Proceedings of the International Coalbed Methane Symposium[C], 435~ 442.
- Li Xiaoyan. 1998. Analysis on study methods for coal reservoir fissures[J]. Coal Geology of China, 10 (1): 30~ 32 (in Chinese with English abstract).
- Suárez Ruiz I, Martínez L, Bertrand Ph. 1994. Influence of rock particle size on the artificial thermal evolution of kerogen[A]. A petrographic and geochemical study[C]. Int. J. Coal Geol., 25 (1): 47~ 64.
- Su Xianbo. 1998. Pore characteristic of coalbed methane reservoir[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technogy, 17 (1): 6~ 11 (in Chinese).
- Zhang Hui, Wang Xiaogang. 1998. Microstructures of coal and their reservoir property[J]. Coal Geology & Exploration, 26 (6): 33~ 36 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hui. 2001. Genetical type of pores in coal and its research significance[J]. Journal of China Coal Society, 26 (1): 40~ 44 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shengli. 1995. Coalbed cleat and its significances in coalbed methane exploration and development[J]. Coal Geology & Exploration, 23 (1): 27~ 30 (in Chinese with English abstract).
- Zou Yanrong, Yang Qi. 1998. The pore and fracture in coal[J]. Coal Geology of China, 11 (4): 39~ 41 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 霍永忠, 张爱云. 1998. 煤层气储层的显微孔裂隙成因分类及其应用[J]. 煤田地质与勘探, 26(6): 28~ 32.
- 李小彦. 1998. 煤储层裂隙研究方法辨析[J]. 中国煤田地质, 10(1): 30~ 31.
- 苏现波. 1998. 煤层气储集层的孔隙特征[J]. 焦作工学院学报, 17(1): 6~ 11.
- 张 慧, 王晓刚. 1998. 煤的显微构造及其储集性能[J]. 煤田地质与勘探, 26(6): 33~ 36.
- 张 慧. 2001. 煤孔隙的成因类型及其研究[J]. 煤炭学报, 26(1): 40~ 44.
- 张胜利. 1995. 煤层割理的形成机理及在煤层气勘探开发评价中的意义[J]. 煤田地质与勘探, (1): 27~ 30.
- 邹艳荣, 杨 起. 1998. 煤中的孔隙和裂隙[J]. 中国煤田地质, 11(4): 39~ 41.