



移动扫码阅读

杨昌永,常会珍,邵显华,等.扫描电镜下不同煤体结构煤微孔隙特征研究[J].煤炭科学技术,2019,47(12): 194-200. doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.12.028

YANG Changyong, CHANG Huizhen, SHAO Xianhua, et al. Study on micro-pore characteristics of structural coal in different coal bodies under scanning electron microscopy[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(12): 194-200. doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.12.028

扫描电镜下不同煤体结构煤微孔隙特征研究

杨昌永^{1,2}, 常会珍^{1,2}, 邵显华^{1,2}, 郝春生^{1,2}, 田庆玲^{1,2}, 武杰^{1,2}, 刘明杰^{1,2}, 季长江^{1,2}, 贾晋生^{1,2}

(1.煤与煤层气共采国家重点实验室,山西 晋城 048012; 2.易安蓝焰煤与煤层气共采技术有限责任公司,山西 太原 030006)

摘 要:煤体结构是影响煤孔隙发育特征、煤层气赋存和运移行为的关键因素之一。为探究不同破坏程度煤微孔隙发育特征,采用扫描电镜对赵庄矿 3 号原生结构煤、碎裂煤、碎粒煤及糜棱煤等 4 种不同煤体结构类型煤的微孔隙进行了大量观测;基于扫描电镜观测资料,对煤微孔隙成因类型进行了划分,并对孔隙形态、孔隙连通性、孔隙大小及充填情况进行了系统研究。研究表明:赵庄矿 3 号煤中发育有原生孔、变质孔、矿物质孔及外生孔等 4 大类,胞腔孔、气孔、铸模孔、溶蚀孔、摩擦孔、角砾孔、碎粒孔等 7 小类不同成因类型微孔隙。不同煤体结构煤中微孔隙成因类型及发育程度有所不同,原生孔、变质孔及矿物质孔主要发育于原生结构和构造保存相对完好的原生结构煤和碎裂煤中,煤孔隙稳定性较好且孔隙形态相对规整;外生孔多发育于煤体结构破坏严重的碎粒煤和糜棱煤中,煤孔隙稳定性差且孔隙形态不规整;煤孔隙连通性整体较差且被碎屑物充填现象较常见;孔径大小不一,几千纳米至几十微米均有分布。

关键词:不同煤体结构;结构分类;扫描电镜;微孔隙特征

中图分类号:P618.11

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)12-0194-07

Study on micro-pore characteristics of structural coal in different coal bodies under scanning electron microscopy

YANG Changyong^{1,2}, CHANG Huizhen^{1,2}, SHAO Xianhua^{1,2}, HAO Chunsheng^{1,2}, TIAN Qingling^{1,2}, WU Ji^{1,2}, LIU Mingji^{1,2}, JI Changjiang^{1,2}, JIA Jinsheng^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Coal and CBM Co-mining, Jincheng 048012, China;

2.Yi'an Lanyan Coal and Coalbed Methane Co-mining Technology Co., Ltd., Taiyuan 030006, China)

Abstract: Coal structure is one of the key factors affecting coal pore development characteristics and coalbed methane occurrence and migration behavior. In order to explore the micro-pore development characteristics of coal with different degrees of damage, a large number of observations on micro-pores of four different coal structure types, such as primary structural coal, broken coal, broken coal and glutinous coal, from Zhaozhuang Coal Mine were carried out by using scanning electron microscopy. Based on the observation data of scanning electron microscopy, the genetic types of coal micro-pores were divided, and the pore morphology, pore connectivity, pore size and filling conditions were systematically studied. This study found that there were four types of primary pores, metamorphic pores, mineral pores and exogenous pores in No.3 coal seam of Zhaozhuang Coal Mine, and seven types of micro-pores with different genetic types, such as cellular pores, stomata, mold holes, dissolution holes, friction holes, brecciate holes and broken grains. The genetic types and developmental degrees of micro-pore in different coal-structured coals are different. The primary pores, metamorphic pores and mineral pores are mainly developed in original structure coal and fractured coal with relatively intact structure and structural preservation. Coal pore stability Better and relatively regular pore morphology. Exogenous pores are mostly developed in fragmented coal and xylonite coal with serious coal structure damage, and the pore stability of coal is poor and the pore morphology is irregular. Coal pore connectivity is generally low and filled with debris. The pore size varies widely from a few thousand nanometers to several tens of micrometers.

Key words: different coal structures; classification of coal structure; scanning electron microscopy; micro-pore characteristics

收稿日期:2019-08-18;责任编辑:曾康生

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05067001-008);山西省应用基础研究计划资助项目(2016012012)

作者简介:杨昌永(1981—),男,贵州铜仁人,硕士,工程师。E-mail: 285356078@qq.com

0 引 言

煤是孔裂隙双重发育的多孔介质^[1],孔隙结构特征(发育程度、孔隙数量、孔径大小、展布形态及孔隙连通性等)对煤层气赋存、运移(吸附、扩散及渗流)特性及行为具有至关重要控制作用^[2],其是煤层气开发和矿井瓦斯抽采的重要研究内容之一^[3-4]。

早在 19 世纪时,学者们已认识到煤中存在孔裂隙^[5],历经百余年的研究和工程实践,煤孔隙在理论研究、试验方法及技术手段等方面已达到了相对深入、系统和成熟阶段。郝琦^[6]、张慧^[7]就基于大量扫描电镜下煤孔隙观测图片,对煤孔隙成因进行了探讨并分类,认为煤中孔隙主要为“气孔、植物组织孔、溶蚀孔、矿物质铸模孔、晶间孔、角砾孔和粒间孔”等类型;文献[8-11]采用不同实验仪器和测试方法对煤的孔隙直径(简称“孔径”)进行了测定,并基于孔径测定数据开展了孔隙大小划分;吴俊等^[12]在国内首次采用压汞实验对煤孔隙形态进行了探究,并将煤中孔隙形态划分为 5 种类型;郭品坤等^[13]、蒯亚兵等^[14]分别采用压汞法和液氮吸附法对煤孔隙结构进行了测定,基于压汞-退汞曲线及吸附-脱附曲线特征及“滞后环”形态对煤孔隙形态进

行了分析和划分;阎纪伟等^[15]、热依拉·阿布都瓦依提等^[16]分别把 CT 和核磁共振技术应用于煤孔隙结构研究,实现了煤孔隙结构立体和三维空间的观测。扫描电镜具有很高的放大倍数、分辨率、清晰度及极强的图像立体感,可轻松实现不同级别及成因类型的孔隙观测,定向、半定量煤孔隙的描述和表征^[17]。鉴于扫描电镜在煤孔隙观测方面的明显效果和优势,笔者采用扫描电镜对赵庄矿 3 号不同结构煤的微孔隙进行了观测,研究成果以期与研究区地面煤层气开发和矿井瓦斯抽采及防治提供可靠、有益技术参数。

1 样品采集及描述

1.1 样品采集

煤样均采集于赵庄矿 1101 大巷掘进工作面 122 m 处新鲜煤壁,为了避免外力对其进行再次破坏而形成一些次生孔裂隙系统,煤样采集尽量在原位状态下进行。煤体结构类型划分依据(GB/T 30050—2013)《煤体结构分类》,从宏观煤岩类型的可分辨程度、层理完整性、煤体破碎程度、裂隙及揉皱发育程度、手试强度等方面划分出了原生结构煤、碎裂煤、碎粒煤及糜棱煤等 4 种不同煤体结构煤类型(图 1)。

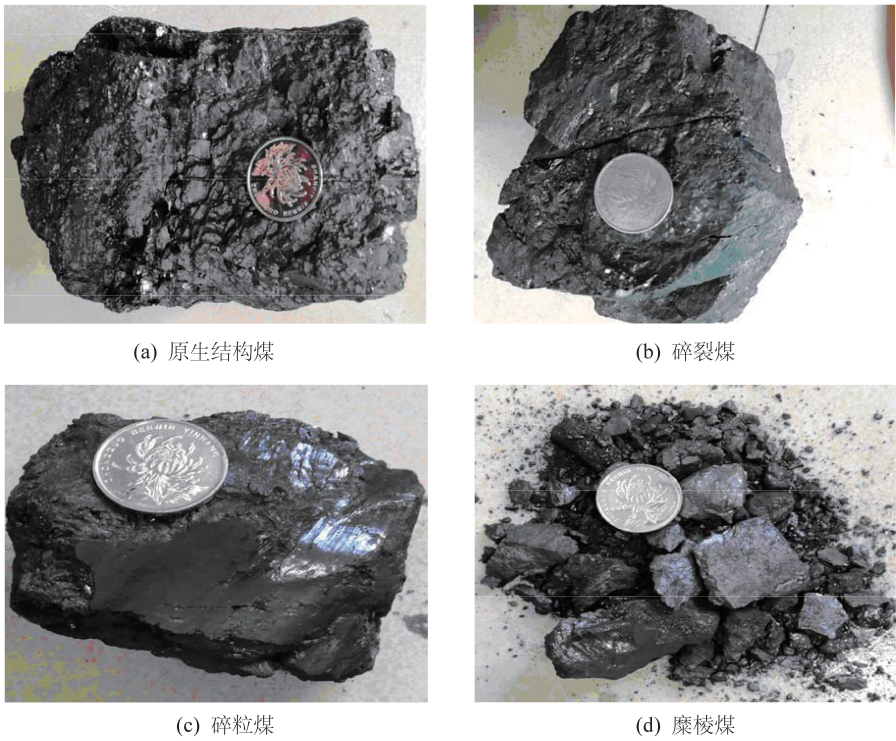


图 1 赵庄矿 3 号煤层不同煤体结构煤采集实物

Fig.1 Different coal structure of No.3 coal seam in Zhaozhuang Coal Mine

1.2 样品描述

1) 原生结构煤。原生结构煤(又称“原生煤”或“非构造煤”)系指未遭受构造变动,煤中仍保留有原生的沉积构造及构造特征的煤层,其结构、构造、内生裂隙等一般清晰可辨^[18](图1a)。煤的宏观煤岩类型为光亮型~半光亮型,宏观煤岩组分以亮煤为主,镜煤少量,偶见少量暗煤条带;块状构造,条带状结构明显;煤体坚硬,用手很难掰开;贝壳状、参差状、阶梯状断口;内生节理相对发育且保存完好,节理面光滑平直,以剪节理为主。

2) 碎裂煤。碎裂煤属于构造煤范畴,其煤体破坏不严重,煤层受构造应力作用使得割理裂隙系统发育,多呈块状^[19](图1b)。其宏观煤岩类型以光亮型~半光亮型煤为主,半暗型煤少量;宏观煤岩组分以亮煤为主,镜煤次之,暗煤少量,偶见少量线型暗煤条带;层状、块状构造,煤体中等坚硬,用手容易剥成小块;参差状、阶梯状断口;外生节理相对发育,多呈不规则状,与内生(原生)节理组成网状节理。节理面平滑,可见扭曲、错动和擦纹等构造现象。

3) 碎粒煤。碎粒煤属于一种构造煤类型,煤体受构造应力破坏呈大小不等的块状,煤体破坏程度较碎裂煤更为严重^[20](图1c)。其宏观煤岩类型为半光亮型~半暗型煤;宏观煤岩组分以暗煤为主,亮煤次之;弯曲透镜体状、片状构造,煤体较碎软,用手容易剥成碎粒状、粉末状;参差状、粒状断口;层理紊乱无次序,节理不清晰,次生节理密度较大;煤体常见大量擦痕和摩擦镜面。

4) 糜棱煤。碎粒煤是构造煤中破坏最为严重的一种煤体结构类型,受构造应力作用而成细粒状^[20](图1d)。其宏观煤岩类型为暗淡型煤;煤体极其碎软,用手极易捻成粉末状;粒状、片状及透镜状构造;煤中原生结构已被破坏,糜棱状构造;层理极其紊乱、不清晰,基本无节理发育,呈粘块状;煤体多见凸镜体和摩擦镜面。

2 扫描电镜下煤的微孔裂隙特征

2.1 试验仪器及工作原理

2.1.1 试验仪器

采用EVO MA15型高倍扫描电子显微镜(图2)对煤的微孔隙进行观测,该仪器由德国卡尔.蔡司公司制造。其具有极高的放大倍数,可实现5~1 000 000倍镜下物像观测;分辨率高,存储分辨率高达32 000×24 000像素;探针电流范围0.5 pA~5 μA,加速电压范围0.2~30 kV;自由工作距离从2~145 mm,可实现连续可变工作距离;工作压力范围

10~400 Pa,可实现快速抽采真空和可变压力条件下操作;具有五轴优中心自动样品平台,最大试样高度145 mm,最大试样直径250 mm。



图2 EVO MA15 扫描电子显微镜

Fig.2 EVO MA15 scanning electron microscope

2.1.2 工作原理

扫描电镜是扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope—SEM)的简称,是通过“电子枪”发射聚焦过的电子束轰击和扫描样品的表面,进而使样品激发出各种系列的物理信号(如背散射电子、二次电子、吸收电子及投射电子等信号),这些物理信号通过信号收集系统的检测、放大和处理,最终在图像显示系统中获得样品表面各种特征的扫描图像。

2.2 样品制作

对采集的煤样进行切割,切割样品的高度和直径分别不超过145、250 mm。对切割后的样品一面进行研磨和剖光处理,而后用导电胶粘贴于样品的剖光面并使其粘贴于样品托上,再用吹扫器把样品表面的附着物或杂物吹扫掉(即“干净处理”),最后对吹扫过的样品进行在真空下干燥和导电处理。

2.3 样品观测

2.3.1 原生结构煤微孔隙特征

赵庄矿3号原生结构煤均质性、完整性好,煤中可见气孔(图3a、图3b)、胞腔孔(图3c)和铸模孔(图3d)等3种类型微孔隙发育。气孔属于一种变质孔,为成煤阶段煤变质作用过程中的“生气”和“聚气”作用所形成^[7,21]。气孔形态多样,呈次圆形、椭球形及不规则形,孔隙分布较为集中(图3a),部分呈定向成群产出(图3b)。孔径基本在10 μm以下,大小不一。孔隙间基本不连通,孔隙中常见粒状、片状等碎屑矿物所充填;由成煤植物的细胞结构孔所形成的胞腔孔,其属于原生孔范畴^[7,22],孔隙以孤立形式存在,孔隙形态呈次圆形,部分因破坏变形而呈椭球形及少量不规则形。孔径大小不一,基本

在 $1\sim 10\ \mu\text{m}$ 。孔隙间不连通,孔隙中常见粒状碎屑物质(图3c);煤中的矿物与有机质具因硬度差异,成煤过程中受压应力作用而形成一些印坑,这些印

坑即为铸模孔,其属于一种矿物质孔^[7,23]。铸模孔形态极为复杂,孔隙不连通,均为“死孔”,孔径一般小于 $20\ \mu\text{m}$ (图3d)。

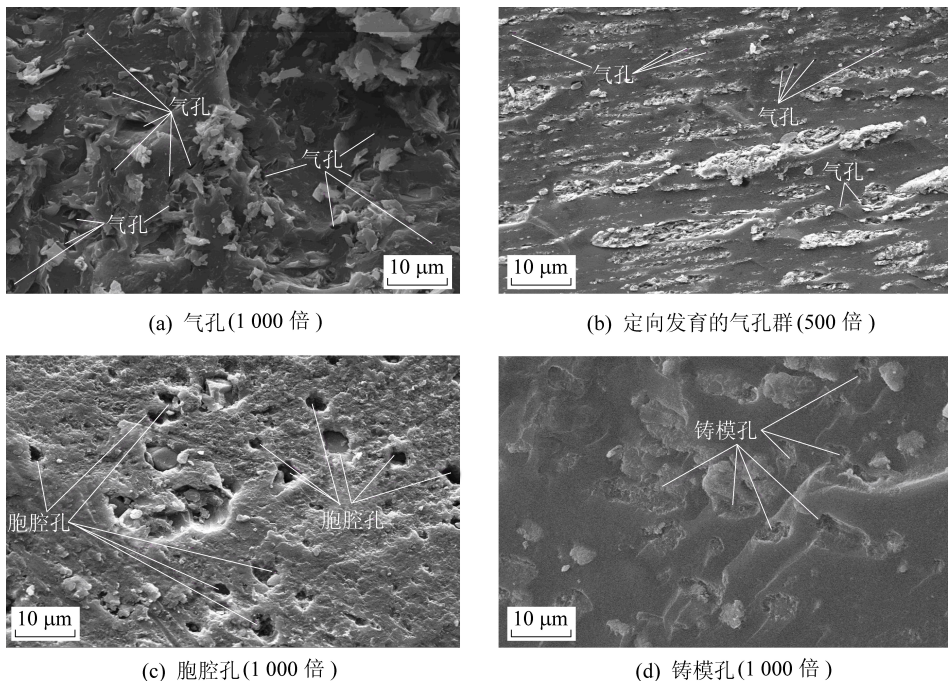


图3 赵庄矿3号原生结构煤扫描电镜下微孔隙特征

Fig.3 Micro-pore characteristics of No.3 original structure coal in Zhaozhuang Mine under SEM

2.3.2 碎裂煤微孔隙特征

赵庄矿3号碎裂煤的均质性、完整性较原生结构煤差,镜下可观测到粒状、片状等碎屑矿物质附着于样品表面,样品中发育有溶蚀孔(图4a)、摩擦孔(图4b)和角砾孔(图4c、图4d)等3种微孔隙类型。可溶性矿物质长期在气、水及其耦合作用下受溶蚀作用形成孔洞(即“溶蚀孔”),属于一种矿物质孔^[6]。其分布较为分散,形态主要呈次圆形和扁长形。孔径大小不一,多数小于 $20\ \mu\text{m}$ 。孔隙被碎屑矿物质充填现象严重,孔隙间基本不连通(图4a);成煤期后,在构造压应力作用下煤体面与面之间发生摩擦而形成一些孔洞(即“摩擦孔”),摩擦孔为一种外生孔^[7]。孔隙稀疏分布,形态极为复杂,多呈压扁的扁长状和线形状。孔径大小不一,一般小于 $5\ \mu\text{m}$ 。孔隙间具有一定连通性,孔隙中可见一些碎屑物质充填;受构造应力场及其演化作用影响,致使煤层遭受破坏而在角砾之间形成一系列外生孔洞(即“角砾孔”)^[7]。角砾呈尖角状,大小不一。角砾孔发育相对集中,形态多为不规则状,分布杂乱无序。孔径大小不一,多数在 $5\ \mu\text{m}$ 以下。孔隙间连通性相对较好,孔中常见少量碎屑矿物质充填(图4c、图4d)。

2.3.3 碎粒煤微孔隙特征

赵庄矿3号碎粒煤破坏相对严重,其完整性较差,可见大量碎粒附着于煤表面。煤中可见摩擦孔(图5a、图5c)、角砾孔(图5a)和碎粒孔(图5b、图5d)发育。碎粒煤中的摩擦孔和角砾孔与上述碎裂煤中的摩擦孔和角砾孔特征基本一致,限于篇幅,此处不再赘述。受构造应力场及其演化作用,煤体遭受破坏而形成大量碎粒,碎粒组合、堆叠从而在碎粒间形成了系列外生作用所形成的孔洞(即“碎粒孔”)^[7,22]。碎粒呈条状、片状或半圆状,碎粒大小不一, $1\sim 10\ \mu\text{m}$ 者居多。孔径差异显著, $0.5\sim 5.0\ \mu\text{m}$ 均有发育。孔隙发育且分布集中,孔隙间连通性好。但该类孔隙在流体运移过程中容易发生滚动和位移,进而发生碎粒堵塞孔裂隙系统,不利于流体(气、水)的高效渗流产出。

2.3.4 糜棱煤微孔隙特征

赵庄矿3号糜棱煤破坏极为严重,煤体的完整性非常差,碎粒状物质大量发育且附着于煤表面。孔裂隙系统发育紊乱,煤中可见少量角砾孔(图6a)和大量碎粒孔(图6b、图6d)发育。糜棱煤中的角砾孔和碎粒煤、碎粒煤中的角砾孔特征总体类似,但糜棱煤中的角砾($2\sim 3\ \mu\text{m}$ 者居多)和孔径($<4\ \mu\text{m}$)

更小,限于篇幅,此处不再赘述。碎粒形态多样,呈半圆状、片状或条状。

因煤体破坏较碎粒煤更为严重,因而煤中小粒径碎粒更为发育,粒径大小分布更为广泛,0.1~

10.0 μm 均有发育。孔隙发育极为紊乱,孔隙间连通性较碎粒煤差。流体运移情况下碎粒更容易发生滚动和位移而堵塞流体渗流产出通道,煤层渗透性变差。

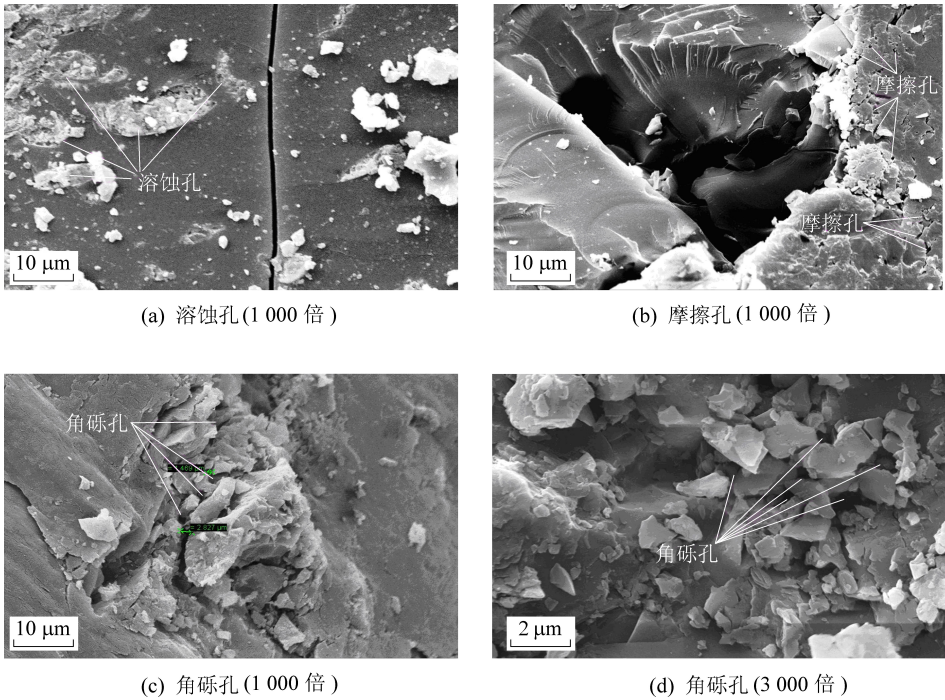


图 4 赵庄矿 3 号碎裂煤扫描电镜下微孔隙特征

Fig.4 Micro-pore characteristics of No.3 fractured coal in Zhaozhuang Mine under SEM

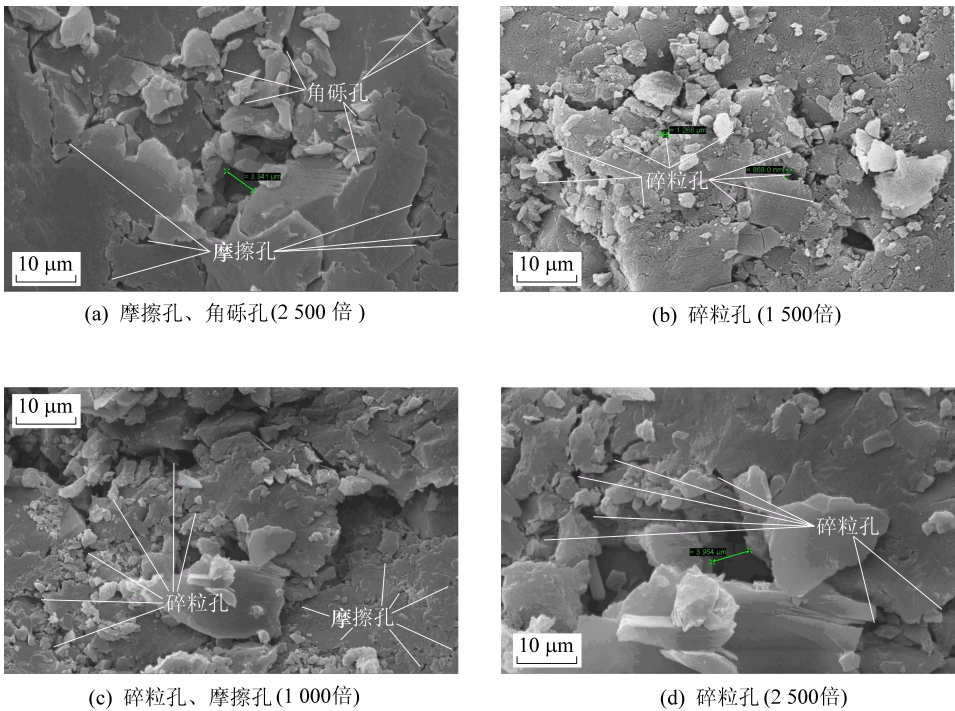


图 5 赵庄矿 3 号碎粒煤扫描电镜下微孔隙特征

Fig.5 Micro-pore characteristics of No.3 fragmented coal in Zhaozhuang Mine under SEM

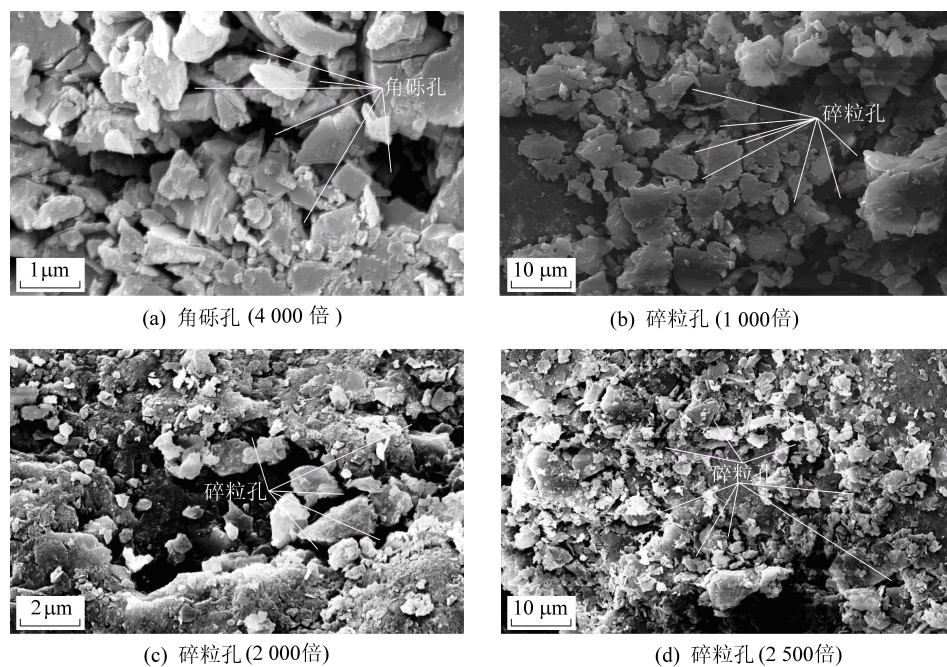


图6 赵庄矿3号糜棱煤扫描电镜下微孔隙特征

Fig.6 Micro-pore characteristics of No.3 mylonite coal in Zhaozhuang Mine under SEM

3 结 论

1) 赵庄矿3号煤中发育有原生孔、变质孔、矿物质孔及外生孔等四大类,胞腔孔、气孔、铸模孔、溶蚀孔、摩擦孔、角砾孔、碎粒孔等七小类不同成因类型微孔隙。不同煤体结构煤中微孔隙的成因类型及其发育程度、孔隙形态、孔径大小、孔隙连通性及被充填情况等亦不同。

2) 煤体的完整性和均一性随煤体破坏严重程度逐渐降低,原生孔(胞腔孔)、变质孔(气孔)及矿物质孔(铸模孔、溶蚀孔)主要发育于原生结构煤和碎裂煤中,外生孔(摩擦孔、角砾孔、碎粒孔)多发育于碎粒煤和糜棱煤中。

3) 赵庄矿3号煤中微孔隙间多不连通,孔隙中常见粒状、片状等碎屑物质所充填,渗透性能整体较差,不利于流体(水、煤层气)的高效渗流产出。

4) 煤体结构对煤孔隙的稳定性具有重要影响,煤体破坏程度越严重,煤孔隙稳定性越差且对煤层气排采越不利。

参考文献(References):

[1] 冯增朝,赵阳升,文再明.煤岩体孔隙裂隙双重介质逾渗机理研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(2):236-240.
FENG Zengchao, ZHAO Yangsheng, WEN Zaiming. Percolation Mechanism of Fractured coal rocks as dual-continua[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 236-240.

[2] 汤政,姜波,宋昱,等.宿县矿区构造煤压缩特性及孔隙结构分形特征研究[J].煤炭科学技术,2017,45(12):174-181.
TANG Zheng, JIANG Bo, SONG Yu, et al. Study on compression characteristics and pore structural fractal feature of structure coal in Suxian Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12):174-181.
[3] 李辛子,王赛英,吴群.论不同构造煤类型煤层气开发[J].地质论评,2013,59(5):919-923.
LI Xinzi, WANG Saiying, WU Qun. Discussion on development of coalbed methane with different tectonic coal types[J]. Geological Review, 2013, 59(5):919-923.
[4] 姜家钰,雷东记,谢向向,等.构造煤孔隙结构与瓦斯耦合特性研究[J].安全与环境学报,2015,15(1):123-127.
JIANG Jiayu, LEI Dongji, XIE Xiangxiang, et al. Study on pore structure and gas coupling characteristics of tectonic coal[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(1):123-127.
[5] KENDALL P E, BRIGGS H. The formation of rock joints and the cleat of coal[C]. Proc R Soc Edinburgh, 1933:164-187.
[6] 郝琦.煤的显微孔隙形态特征及其成因探讨[J].煤炭学报,1987,12(4):51-61.
HAO Qi. Microscopic porosity morphology of coal and its causes[J]. Journal of China Coal Society, 1987, 12(4):51-61.
[7] 张慧.煤孔隙的成因类型及其研究[J].煤炭学报,2001,26(1):40-44.
ZHANG Hui. Genetic types of coal pores and their research[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(1):40-44.
[8] 霍多特 B B.煤与瓦斯突出[M].宋世钊译.北京:中国工业出版社,1966.
[9] 刘常洪.煤孔隙结构特征的试验研究[J].煤矿安全,1993,21(8):1-5.

- LIU Changhong. Experimental study on coal hole structure characteristics[J]. Safety in Coal Mines, 1993, 21(8): 1-5.
- [10] 秦勇, 徐志伟, 张井. 高煤级煤孔隙结构的自然分类及其应用[J]. 煤炭学报, 1995, 20(3): 266-271.
- QIN Yong, XU Zhiwei, ZHANG Jing. Natural classification of high coal rank coal pore structure and its application[J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(3): 266-271.
- [11] 傅雪海, 秦勇, 张万红, 等. 基于煤层气运移的煤孔隙分形分类及自然分类研究[J]. 科学通报, 2005, 50(S1): 51-55.
- FU Xuehai, QIN Yong, ZHANG Wanhong, *et al.* Fractal classification and natural classification of coal pore based on coalbed methane migration[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(S1): 51-55.
- [12] 吴俊, 金奎励, 童有德, 等. 煤孔隙理论及在瓦斯突出和抽放评价中的应用[J]. 煤炭学报, 1991, 16(3): 86-95.
- WU Jun, JIN Kuili, TONG Youde, *et al.* Coal pore theory and its application in gas outburst and drainage evaluation[J]. Journal of China Coal Society, 1991, 16(3): 86-95.
- [13] 郭品坤, 程远平, 卢守青, 等. 基于分形维数的原生煤与构造煤孔隙结构特征分析[J]. 中国煤炭, 2013, 39(6): 73-77.
- GUO Pinkun, CHENG Yuanping, LU Shouqing, *et al.* Based on the fractal dimension of primary coal and tectonically deformed coal pore structure characteristics analysis[J]. China Coal, 2013, 39(6): 73-77.
- [14] 蒯亚兵, 申小龙, 刘军. 黄陇煤田低煤阶煤储层孔隙特征及吸附储集性能研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(5): 181-186.
- LIN Yabing, SHEN Xiaolong, LIU Jun. Study on pore features and adsorption storage performances of low rank coal reservoir in Huanglong Coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 181-186.
- [15] 阎纪伟, 要惠芳, 李伟, 等. μ CT技术研究煤的孔隙结构和分形特征[J]. 中国矿业, 2015, 24(6): 151-156.
- YAN Jiwei, YAO Huifang, LI Wei, *et al.* Pore structure and fractal characteristics of coals by μ CT Technology[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(6): 151-156.
- [16] 热依拉·阿布都瓦依提, 马凤云, 张翔, 等. 低场核磁共振技术在煤炭岩相孔隙结构中的应用[J]. 核技术, 2017, 40(12): 43-48.
- RAHILA Abduwahit, MA Fengyun, ZHANG Xiang, *et al.* Application of low-field nuclear resonance technology in coal petrographic pore structure[J]. Nuclear Techniques, 2017, 40(12): 43-48.
- [17] 李亚男, 李贵中, 陈振宏. 煤储层孔隙特征及比表面对煤吸附能力影响的研究[J]. 中国煤层气, 2016, 13(1): 3-6.
- LI Yanan, LI Guizhong, CHEN Zhenhong. Research on the characteristics of coal reservoir porosity and the influence of specific surface area on coal adsorption capacity[J]. China Coalbed Methane, 2016, 13(1): 3-6.
- [18] 彭苏萍. 不同结构类型煤体地球物理特征差异分析和纵横波联合识别与预测方法研究[J]. 地质学报, 2008, 82(10): 1311-1322.
- PENG Suping. Analysis of Geophysical Characteristics of different structure types and study on joint identification and prediction methods of vertical and transverse waves[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(10): 1311-1322.
- [19] 张晓辉, 康志勤, 要惠芳, 等. 基于CT技术的不同煤体结构煤的孔隙结构分析[J]. 煤矿安全, 2014, 45(8): 203-206.
- ZHANG Xiaohui, KANG Zhiqin, YAO Huifang, *et al.* Pore structure analysis of coal with different coal structure based on CT technology[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(8): 203-206.
- [20] 姜波, 李明, 屈争辉, 等. 构造煤研究现状及展望[J]. 地球科学进展, 2016, 31(4): 335-346.
- JIANG Bo, LI Ming, QU Zhenghui, *et al.* Current status and prospects of structural coal research[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(4): 335-346.
- [21] 徐玉胜, 张仁贵, 彭担任, 等. 裂隙发育煤层瓦斯抽放钻孔新封孔技术[J]. 煤矿安全, 2009, 40(2): 25-27.
- XU Yusheng, ZHANG Rengui, PENG Danren, *et al.* Sealing technology for gas drainage in fractured coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2009, 40(2): 25-27.
- [22] 程庆迎. 煤的孔隙和裂隙研究现状[J]. 煤炭工程, 2011(12): 91-93.
- CHENG Qingying. Research status of pore and crack in coal[J]. Coal Engineering, 2011(12): 91-93.
- [23] 王明寿, 汤达楨, 张尚虎. 煤储层孔隙研究现状及其意义[J]. 中国煤层气, 2004, 1(2): 9-11.
- WANG Mingshou, TANG Dazhen, ZHANG Shanghu. Research actuality and significance of pore in coal reservoir[J]. China Coalbed Methane, 2004, 1(2): 9-11.