



移动扫码阅读

李 永,林柏泉,杨 凯,等.注热蒸汽后的煤体微观孔裂隙演化规律[J].煤炭科学技术,2019,47(12):102-108.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.12.014

LI Yong,LIN Baiquan,YANG Kai,*et al.*Evolution law of microscopic pore fractures of coal after hot steam injection [J]. Coal Science and Technology,2019,47(12):102-108.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.12.014

注热蒸汽后的煤体微观孔裂隙演化规律

李 永^{1,2},林柏泉^{1,2},杨 凯^{1,2},朱传杰^{1,2},孔 佳^{1,2}

(1.中国矿业大学 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室,江苏 徐州 221116;2.中国矿业大学 安全工程学院,江苏 徐州 221116)

摘 要:我国煤层瓦斯赋存具有强吸附、低渗透、微孔隙的特点,注热蒸汽开采作为一种新的增加瓦斯抽采率的方法,存在的热蒸汽作用于煤体后的瓦斯解吸、孔隙结构改变等一些基础问题仍未探讨。为了揭示热蒸汽对煤体孔裂隙结构的影响作用,使用高温热蒸汽对煤样进行处理,并借助扫描电镜、压汞法和核磁共振测试手段探讨了热处理前后煤样的孔裂隙演化规律。试验结果表明:热蒸汽作用后的煤体孔隙结构演化归结为 4 种基本模式,分别为孔隙扩张模式、孔隙连通模式、孔隙破裂模式和裂隙贯通模式。热蒸汽处理后,2 种煤样进退汞差值均变大,总孔容、渗透率、孔隙率和平均孔径得到了显著提升;表明蒸汽作用后煤开放孔变多,闭合孔和半闭合孔减少, T_2 谱中的波峰 P_1 、 P_2 和弛豫时间、整体峰谱面积均有显著提高,表明蒸汽作用后煤孔隙结构受热效应、水蒸气疏孔的影响,孔隙由中小孔向中大孔转变,孔裂隙连通性增加。原有的孔隙得到了进一步发育,孔隙结构的改变能促进煤体的扩孔增渗,最终有利于瓦斯在煤体内的解吸与渗流。对于注热增渗等技术的进一步发展具有较好的基础作用,研究内容为下一步蒸汽作用后瓦斯解吸研究有很好的指导作用,为注热蒸汽提高煤层渗透率,进而提高煤层气抽采率提供了依据。

关键词:煤体;热蒸汽;孔裂隙;扫描电镜;压汞;核磁共振

中图分类号:TD712.6

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)12-0102-07

Evolution law of microscopic pore fractures of coal after hot steam injection

LI Yong^{1,2},LIN Baiquan^{1,2},YANG Kai^{1,2},ZHU Chuanjie^{1,2},KONG Jia^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coal Methane and Fire Control, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Coal seam gas occurrence in China has the characteristics of strong adsorption, low permeability and micro-pore. The hot steam injection is a new way to increase the gas extraction rate. However, some basic problems such as gas desorption and pore structure change have not been explored. In order to reveal the effect of hot steam on the pore structure of coal pores, the pore fissure evolution rules of coal samples before and after heat treatment were discussed by means of scanning electron microscopy (SEM), mercury injection and nuclear magnetic resonance (NMR). The experimental results show that the pore structure evolution of coal after thermal steaming action can be summarized into four basic models, namely pore expansion mode, pore connectivity mode, pore fracture mode and fracture penetration mode. After the hot steam treatment, the difference between the inlet and outlet of the two coal samples was larger, and the total pore volume, permeability, porosity and average pore size were significantly improved. It shows that after steaming, the open pores of coal became more and the closed and semi-closed pores decreased. The peak P_1 、 P_2 , relaxation time and overall peak area of T_2 spectrum were significantly improved, indicating that the pore structure of coal splitting was affected by heat after steam action, and the pores changed from medium to small holes to medium and large holes, and pore fracture connectivity also increased. The original pores have been further developed, and the change of pore structure can promote the expansion and permeability of the coal body, which is beneficial to the gas desorption and seepage of gas in coal. It has a good foundation for the further development of technologies such as heat injection and infiltration. The research provides a guidance for improving the permeability of coal seam and the extraction rate of coal seam gas by injecting hot steam.

Key words: coal; hot steam; pore fracture; SEM; mercury injection; NMR

收稿日期:2019-08-18;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51474211);国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801402)

作者简介:李 永(1993—),男,山西忻州人,硕士研究生。E-mail:790279782@qq.com

0 引 言

瓦斯不仅给我国煤矿安全带来了严重威胁^[1],也是一种典型的温室效应气体^[2]。另外瓦斯还是一种优秀的清洁能源。无论从煤矿灾害防治的角度,还是从治理温室效应、充分利用能源的角度来看,做好瓦斯防治工作意义都非常重大^[3-4]。瓦斯抽采是解决瓦斯灾害的核心。我国煤层瓦斯赋存具有强吸附、低渗透、微孔隙的特点。在传统高压注水^[5]、水力压裂^[6]、水力割缝^[7-8]技术作用效果不理想的前提,国内外学者提出电脉冲致裂^[9-10]、注气驱替^[11]、声波激励^[12-13]等新型技术,然而工艺复杂,成本高昂,难以推广。

研究表明,煤层注热^[14-15]能够有效增产煤层气,煤层注热^[16]有多种形式,包括热水、热蒸汽、微波注热^[17-18]等。张登峰^[19]发现加热煤体能够促进甲烷解吸,张丽萍^[20]建立热-流-固多场耦合模型,研究了注热对孔隙压力,渗透率分布以及煤层气开采效率的影响。得出煤层注热温度越高,煤层气残余瓦斯压力越小,渗透率随温度增加呈上升趋势,煤层气开采效率显著提高。冯子军^[21]研究了煤热解破裂特征和物理力学特性,发现温度使煤体内部发生热解反应,增大了孔隙数量和连通性。另外一些学者^[22-25]利用分子模拟手段研究了热蒸汽注入后水蒸气与甲烷的竞争吸附情况,上述研究主要集中于的煤体渗流、瓦斯解吸,关于热蒸汽作用后煤体的微观孔径分布和孔隙形态的演化等方面几乎没有开展研究。因此,笔者以山东济宁和贵州林华 2 种煤样为研究对象,进行热蒸汽处理,利用扫描电镜法、压汞法和核磁共振技术各自的优点,分析了热蒸汽加热后煤体微观孔、裂隙结构的演化规律,揭示了热蒸汽加热对孔裂隙结构的作用机理,丰富和完善了注热蒸汽开采煤层气理论。

1 试 验

1.1 煤样选取和方法

此次试验选用取自济宁二号井煤矿的烟煤和取自贵州林华的无烟煤煤样,将 2 种原煤分别编号为 JN 和 LH。煤样基本参数见表 1。

1.2 样品制备

对于 2 种变质程度的煤样,每种煤在取样时,选取大块原煤的无破损、浸水和明显裂隙的部分进行钻心取样,然后将其一分为二,一份作为原煤煤样准备制样,另一份作为热蒸汽待处理煤样。为方便描述,将热蒸汽作用后的 JN 烟煤煤样编号为 JN-RH,

简称为热后烟煤;将热蒸汽作用后的 LH 无烟煤煤样编号为 LH-RH,简称为热后无烟煤。

表 1 煤样的工业分析
Table 1 Proximate analysis of coal

煤样	水分/%	灰分/%	挥发分/%	固定碳/%
JN	2.51	16.49	33.02	47.98
LH	2.14	11.04	5.81	81.01

为了使煤表面充分与热蒸汽接触,笔者将煤样破碎成 1~2 cm 的不规则小块,并将其置于烧杯中,将蒸汽发生器产生的高温蒸汽直接通入烧杯中 5 h,对煤体进行充分热处理,处理完毕后,分别进行扫描电镜、压汞、核磁共振分析;试验装置如图 1 所示。



图 1 试验装置
Fig.1 Experimental equipment diagram

热蒸汽加热过程采用百省全自动蒸汽发生器(额定功率 3 kW,热蒸汽额定压力 0.4 MPa,饱和蒸汽温度 151 ℃,额定蒸发量 4 kg/h)。

选取原煤煤样和热蒸汽处理后表面无水残留且较为平整煤样,经 80 ℃ 恒温干燥后作喷金处理,进行 SEM 测试,测试采用 QuantaTM250 扫描电子显微镜(放大倍数 6 倍~100 万倍;加速电压 0.2~30 kV)。

选取原煤煤样和热蒸汽作用后的煤样,样品均在 105 ℃ 下烘干至恒重,5 h 后送检,采用 Auto-Pore IV 9505 压汞仪(测定压力范围为 0~200 MPa,可测孔径范围为 0.005~360.00 μm)进行压汞分析。

考虑到在热蒸汽过程(约 5 h)中煤样浸泡于温度约 80 ℃ 的冷凝水中,可以认为是饱水状态,同样的,将原煤煤样在真空饱水机中饱水 5 h。2 种样品经上述处理后送检,采用低场核磁共振分析仪(设备主磁场 0.15 T,H 质子共振频率 21.7 MHz,射频脉冲频率 1.0~49.9 MHz,磁体控温 25~35 ℃,磁体均匀度 12.0×10⁻⁶,射频功率 300 W)进行分析。

2 试验结果与讨论

2.1 扫描电镜分析

Quanta™250 型高分辨率多功能环境扫描电子显微镜,其可以准确表征被测材料的表面形态和孔隙结构。由于无烟煤变质程度高,一般其表面致密,煤基质较为光滑,裂隙不发育,微孔结构、坑状构造等不如烟煤明显,因此选取济宁二号井煤矿的烟煤进行电镜扫描测试。借助扫描电镜对热蒸汽作用前后的烟煤表面结构、形态特征进行了分析。原始煤样的扫描电镜结果如图 2 所示。

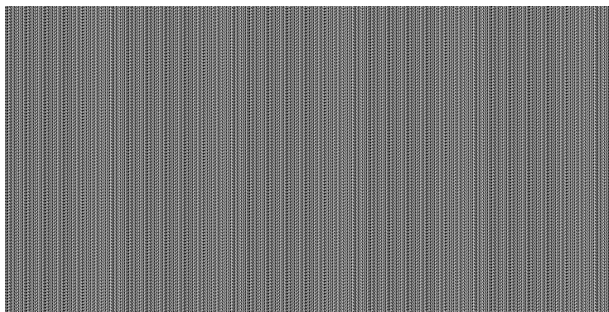


图 2 热蒸汽作用前的烟煤 SEM 图像

Fig. 2 SEM images of soft coal before hot steam heating

从原煤的 SEM 图可以看出,原煤表面较为致密,孔隙呈条带状错列,以胞腔孔和溶蚀孔为主,主要为单孔;孔间连通性较差,裂隙发育较弱,在孔隙和裂隙之间有少量矿物质充填。

热蒸汽作用后的煤体不同倍数扫描电镜结果如图 3 所示。

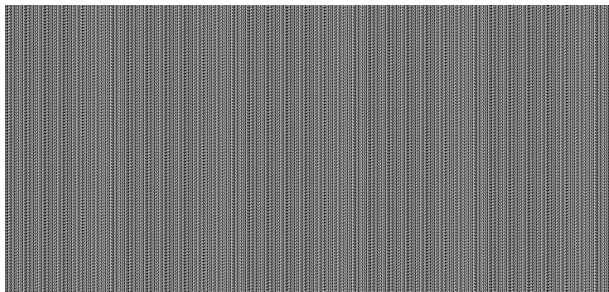


图 3 热蒸汽作用后的烟煤 SEM 图像

Fig. 3 SEM images of soft coal after hot steam heating

从图 3 可以发现,烟煤原煤经过热蒸汽作用后,表面变得凹凸不平、疏松、碎裂;孔隙得到发育,原生裂隙更为明显,并催生了新生裂隙。

为了进一步说明热蒸汽作用后的煤体孔隙结构演化特点,选取热蒸汽作用前后的煤样在不同尺度下采集了多张图像,选取最具特征的图片进行对比,将热蒸汽作用后的煤体孔隙结构演化归结为下述 4 种基本模式,如图 4—图 7 所示。

1) 孔隙扩张模式。热蒸汽作用后,原有的独立



图 4 热蒸汽作用后的孔隙扩张模式

Fig. 4 Pore expanded pattern after hot steam heating



图 5 热蒸汽作用后的孔隙连通模式

Fig. 5 Pore connected pattern after hot steam heating



图 6 热蒸汽作用后的孔隙破裂模式

Fig. 6 Pore broken pattern after hot steam heating



图 7 热蒸汽作用后的裂隙贯通模式

Fig. 7 Crack break-through pattern after hot steam heating

孔隙得到扩张,微小孔向中大孔转化,孔隙的直径增大、深度增加。

2) 孔隙连通模式。热蒸汽作用后,相邻的孔隙在自身孔隙增大的过程中与邻近的孔隙连通,形成新的更大的孔隙。

3) 孔隙破裂模式。在热蒸汽作用后,孔隙边缘在局部热应力作用下发生破碎、断裂,部分与周围裂隙连通。

4) 裂隙贯通模式。原煤经过热蒸汽作用后,在热应力的影响下,新生裂隙扩展并贯通了原有裂隙,并在此过程中贯通路径上的部分孔隙。

2.2 压汞分析

压汞法测试是以毛管束模型为基础,将被测煤样视作多孔介质,假设这种多空介质是由直径大小不相等的毛管束组成。在外界压力的作用下,将汞压入煤样,通过测定不同汞压下的进汞量,再用 Washburn 方程计算煤样的孔径:

$$r_w = \frac{-2\sigma_w \cos \alpha_0}{P_w}$$

式中: σ_w 为汞的表面张力, N/m, 通常取 0.484 N/m; P_w 为进汞压力, MPa; α_0 为汞在煤体表面的浸润角, 通常取 140°。

按照汞压力和孔径转化关系, 将曲线分为大孔段 (0.003 7 ~ 1.183 7 MPa)、中孔段 (1.183 7 ~ 13.074 4 MPa)、小孔段 (13.074 4 ~ 112.868 6 MPa) 及微孔段 (112.868 6 ~ 413.350 3 MPa)。

将热蒸汽作用前后的无烟煤压汞测试曲线绘制如图 8 所示。

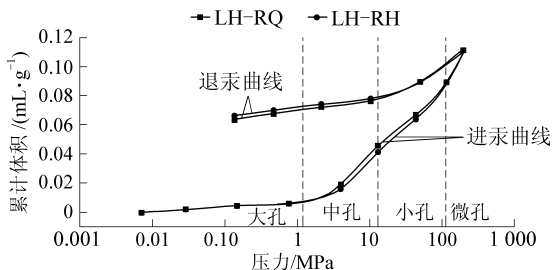


图 8 林华无烟煤的压汞法测试结果

Fig. 8 MIP test results of Linhua anthracite coal

从图 8 可以看出, 在大孔阶段, 热后无烟煤的进汞曲线与热前无烟煤的进汞曲线几乎一致, 说明热蒸汽对微裂隙和大孔的影响不够明显。在中孔和小孔阶段, 热后无烟煤的进汞曲线开始显著大于热前无烟煤的进汞曲线, 说明热蒸汽作用后, 煤样内部的中孔、小孔的数量得到了增加。在微孔阶段, 两者的进汞曲线几乎重合, 在微孔阶段的末端, 热后无烟煤的进汞曲线略低于热前无烟煤, 说明热蒸汽作用后, 煤体内的微孔略微减小。

观察退汞曲线, 在微孔和小孔阶段两者的退汞曲线几乎重合, 又因为在该阶段, 热后无烟煤的进汞曲线要大于热前无烟煤的进汞曲线, 因此, 热后无烟煤的滞后环面积要更小, 这表明热蒸汽作用后, 无烟煤内部的微孔、小孔发生了崩解和破裂, 向中孔、大孔转化。从中孔阶段开始一直到大孔阶段, 热后无烟煤的退汞曲线一直大于热前无烟煤的退汞曲线,

表明热蒸汽作用后, 中孔和部分大孔的体积以及孔间连通性得到了增加。

从累计进汞量上来看, 热蒸汽作用前后的累计进汞量并无太大差别, 说明煤体的总孔体积并未在热蒸汽的作用下有明显变化, 但是结合滞后环来看, 热后无烟煤的滞后环面积要大于热前无烟煤的, 热前无烟煤的最终进、退汞量差值为 0.059 22 mL/g, 热后无烟煤的最终进、退汞量差值为 0.066 21 mL/g。

同样地, 将热蒸汽作用前后的烟煤煤样的压汞测试曲线绘制如图 9 所示。

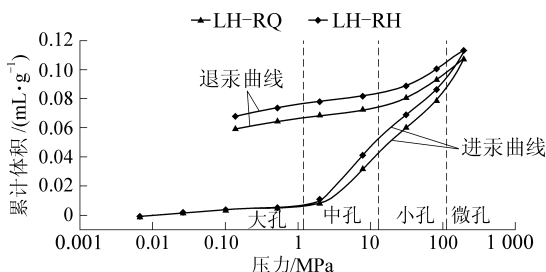


图 9 济宁烟煤的压汞法测试结果

Fig. 9 MIP test results of Jining soft coal

从图 9 可以看出, 热后烟煤的进汞曲线在大孔阶段就开始大于热前烟煤, 进入中孔和小孔阶段, 热后烟煤的进汞曲线开始明显大于热前烟煤的进汞曲线, 说明热蒸汽对烟煤有很好的扩孔效果。与无烟煤不同的是, 在微孔阶段, 热后烟煤的进汞曲线要大于热前烟煤的进汞曲线, 且热后烟煤的累计进汞量达到 0.114 08 mL/g, 比热前烟煤的累计进汞量增加了 0.005 08 mL/g。从整个进汞曲线可以分析出, 热蒸汽对烟煤内部各种不同孔隙均有不同程度的改善, 且煤体的总孔体积得到了显著增大。

观察退汞曲线, 在整个退汞曲线所构成的滞后环中, 滞后环的面积在几个不同孔隙阶段中均逐渐增大, 这表明热蒸汽的作用能够显著增加烟煤煤体内部所有孔隙的体积和孔间连通性。热前烟煤的最终进、退汞量差值为 0.054 92 mL/g, 热后烟煤的最终进、退汞量差值为 0.063 67 mL/g。

经过热蒸汽作用后, 煤体内部的开放孔数量增多, 部分原来闭合、半闭合的孔转变为开放孔, 并且孔间连通性得到改善。综上所述, 经过热蒸汽作用后, 微孔、小孔被破坏后向中孔、大孔转化, 并且孔间连通性得到了改善, 这些孔隙结构的改善有利于瓦斯的解吸和渗流。

济宁烟煤经过热处理后, 渗透率增加了 65.6%, 孔隙度增加了 11.82%, 平均孔径增加了 48.15%, 总

孔容增加了7.65%,林华无烟煤经热处理后,渗透率、孔隙度、平均孔径、总孔容分别增加了29.8%、8.65%、27.3%、9.52%,见表2。各结构参数出现增加的原因是煤体热应力的增大和水蒸气的冲蚀,扩大了原有孔隙的直径,总孔容增大表明原有的闭合孔和半闭合孔在热蒸汽作用转变为开放孔,对比无烟煤和烟煤,烟煤各项结构参数较无烟煤增加幅度较大,这归因于烟煤密度较小,孔隙更加发育,热蒸汽更容易进入其孔隙之中,产生扩孔效应。

表2 热蒸汽处理前后煤的孔结构参数

Table 2 Pore structural parameters of coal before and after steam treatment

样品	渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	孔隙度/ %	平均孔径/ μm	总孔容/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)
JN-RQ	0.090	13.11	0.027	0.116 4
JN-RH	0.149	14.66	0.040	0.125 3
LH-RQ	0.084	13.18	0.022	0.117 7
LH-RH	0.109	14.32	0.028	0.128 9

2.3 核磁共振分析

扫描电镜法只能观测到样品表面的孔、裂隙状态,无法探测内部的空间分布规律;采用压汞法时需要对煤样进行粉碎和过筛,在此过程中存在煤体孔隙结构被破坏的可能。核磁共振测试作为一种无损检测技术,能够测试宏观尺寸更大的煤样,而且可以对全系列大小的孔径进行测试,可以弥补上述不足。

为方便描述,将热蒸汽作用前的2种煤样编号为LH-RQ, JN-RQ(3块煤样分别再加上尾注1、2、3),热蒸汽作用后的煤样编号为LH-RH, JN-RH(3块煤样分别再加上尾注1、2、3)。

热蒸汽作用前后的烟煤和无烟煤煤样的核磁共振 T_2 图谱绘制于图10。核磁共振 T_2 谱中,横坐标表示弛豫时间,纵坐标表示相应的 T_2 振幅。弛豫时间与孔裂隙半径成正比,弛豫时间越长所对应的孔裂隙半径越大,振幅谱峰越大则该峰所代表的孔裂隙越发育。

T_2 弛豫图谱一般有双峰型、单峰型和三峰型,其中单峰型较为少见。结合前人的研究^[2-4],典型的 T_2 谱中,根据弛豫时间从小到大可以识别出微小孔、中大孔以及裂隙的3个区域。微小孔的谱峰主要分布在 $T_2 = 0.1 \sim 10 \text{ ms}$ 。中大孔的谱峰主要分布在 $T_2 = 10 \sim 100 \text{ ms}$,且峰的大小一般要略低于微小孔所对应的峰。裂隙对应的谱峰主要分布在 $T_2 > 100 \text{ ms}$,一般出现在裂隙较为发育的煤样中。

从图10可以明显看出,对于烟煤和无烟煤而言,热蒸汽作用后的2种煤样其 T_2 图谱的波峰大小

和峰谱面积均得到了增大,弛豫时间得到延长,这说明热蒸汽作用能够有效促进煤体孔隙的扩张和连通。为了进一步分析其特点,从每种煤样中选取最具代表性的一组数据进行详细分析。

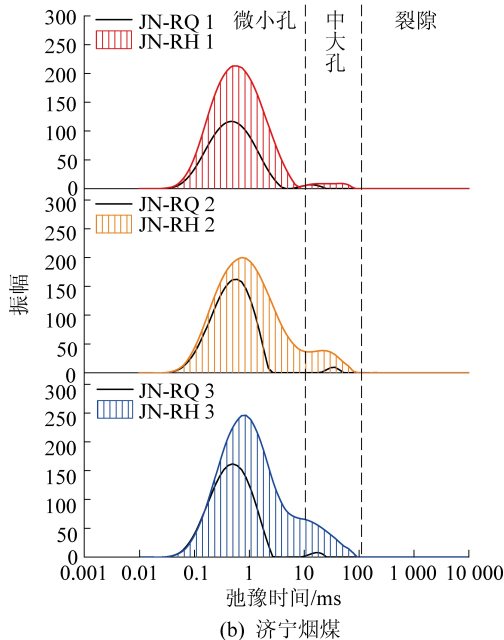
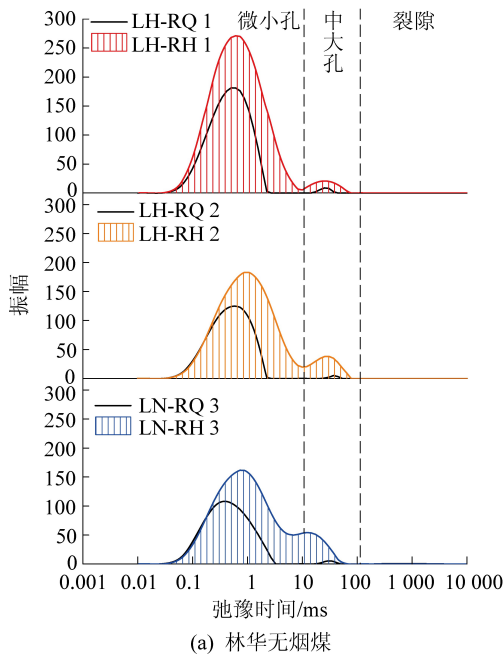


图10 烟煤和无烟煤的核磁共振测试结果

Fig. 10 NMR test results of two kinds of soft coal and anthracite coal

绘制烟煤煤样在经热蒸汽作用前后的 T_2 图谱,如图11所示。热前烟煤的 T_2 谱包含2个互相独立的波峰(P_1 最高, P_2 次之),微小孔阶段出现的非零谱段说明热前烟煤的微小孔较为发育,中大孔阶段也出现了非零谱段,但峰的大小远小于微小孔所对应的峰,说明热前烟煤中存在少部分的中大孔,但并

不发育。在裂隙阶段未出现非零谱段,说明热前烟煤中裂隙很不发育。当热前烟煤经过热蒸汽作用后,处于微小孔、中大孔阶段的波峰增高,弛豫时间延长,整体峰谱面积得到了增大。 T_2 谱中的波峰 P_1 大幅增高,与波峰 P_2 连通,2 个波峰之间不再相互独立,这说明热蒸汽作用后,煤体内部的孔隙扩张、打开并连通,原有的孔隙得到了进一步发育,部分孔隙由微小孔向中大孔转化。

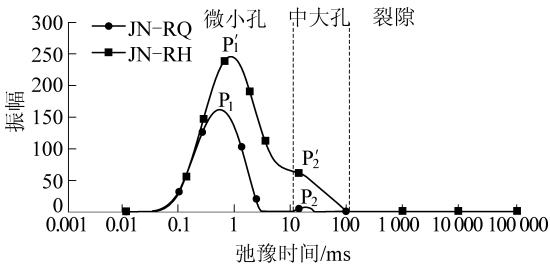


图 11 烟煤的核磁共振测试结果

Fig. 11 NMR test results of soft coal

同样绘制无烟煤煤样在经过热蒸汽作用前后的 T_2 图谱,如图 12 所示。与烟煤的 T_2 谱所表现出的特征相似,热前无烟煤的 T_2 谱也包含 2 个互相独立的波峰,经过热蒸汽作用后,处于微小孔、中大孔阶段的波峰增高,特别是中大孔阶段的波峰得到了非常明显的增高,形成了一个明显的波峰,这说明无烟煤在热蒸汽作用后,其孔隙得到了扩展,煤体内部的微小孔向中大孔转化。

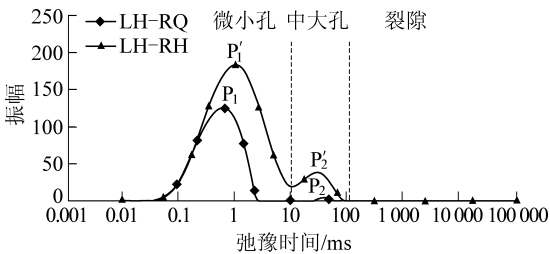


图 12 无烟煤的核磁共振测试结果

Fig. 12 NMR test results of anthracite coal

为了对比热蒸汽对烟煤和无烟煤的作用效果,将两者的 T_2 图谱绘制在一个图中,如图 13 所示。整体来看,热前无烟煤的波峰和整体峰谱面积比较明显地小于热前烟煤,在弛豫时间上两者相差不大;经过热蒸汽作用后,两者的波峰、弛豫时间和整体峰谱面积都得到了显著增大,对比热后无烟煤与热后烟煤的数据,发现热蒸汽作用后 2 种煤样之间的差距进一步被拉大,这说明在受到热蒸汽作用后,烟煤的孔隙扩张和连通效果更为明显。

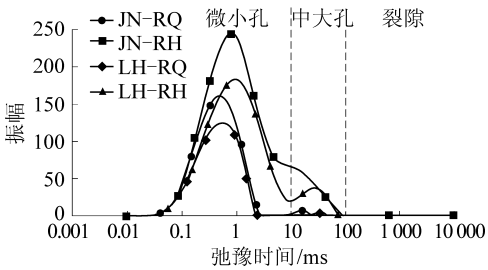


图 13 烟煤和无烟煤的核磁共振测试结果对比

Fig. 13 NMR test results comparison of soft coal and anthracite coal

3 结 论

1) 利用扫描电镜对煤体表面结构、形态特征进行了分析,将热蒸汽作用后的煤体孔隙结构演化归结为 4 种基本模式,分别为孔隙扩张模式、孔隙连通模式、孔隙破裂模式和裂隙贯通模式。研究发现,热蒸汽的作用能够有效促进煤体内部孔隙的破裂、贯通,也能够促进煤体内微小裂隙的发育和扩展。

2) 通过压汞法测试发现,对于不同煤种,经热蒸汽作用后,进退汞差值增大,另外煤体渗透率、孔隙度、孔容、平均孔径均出现大幅度增加,表明热蒸汽能扩大中大孔比例,减小微孔比例,打开闭合孔和半闭合孔,增加总孔容,进而提高煤体渗透率。

3) 通过核磁共振测定结果发现,热蒸汽作用后,烟煤与无烟煤的煤体内部孔隙扩张、打开并连通,原有的孔隙得到了进一步发育,部分孔隙由微小孔向中大孔转化;相较而言,热蒸汽作用后烟煤的扩孔效果更为明显,孔隙结构的改变能促进煤体的扩孔增渗,最终有利于瓦斯在煤体内的解吸与渗流。

参考文献 (References) :

[1] 林柏泉. 矿井瓦斯防治理论与技术[M]. 2 版. 徐州:中国矿业大学出版社, 2010:15-20.

[2] WARNUZIMSKI Krzyszto. Harnessing methane emissions from coal mining[J]. Process Safety & Environmental Protection, 2008, 86 (5): 315-320.

[3] 李文华. 新时期国家能源发展战略问题研究[D]. 南京:南京大学, 2013.

[4] 牛苗苗. 中国煤炭产业的生态效率研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉), 2012.

[5] 赵 东, 冯增朝, 赵阳升. 高压注水对煤体瓦斯解吸特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30 (3): 547-555.

ZHAO Dong, FENG Zengchao, ZHAO Yangsheng. Experimental study on the influence of high-pressure water injection on coal gas desorption characteristics [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (3): 547-555.

[6] 林柏泉, 孟 杰, 宁 俊, 等. 含瓦斯煤体水力压裂动态变化特

- 征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(1): 106-110.
- LIN Baiquan, MENG Jie, NING Jun, *et al.* Research on dynamic variation characteristics of hydraulic fracturing of coal body containing gas [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2012, 29(1): 106-110.
- [7] 林柏泉, 张其智, 沈春明, 等. 钻孔割缝网络化增透机制及其在底板穿层钻孔瓦斯抽采中的应用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1425-1430.
- LIN Baiquan, ZHANG Qizhi, SHEN Chunming, *et al.* Permeability-increasing mechanism of network slotting boreholes and application in crossing borehole gas drainage [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1425-1430.
- [8] 林柏泉, 刘厅, 邹全乐, 等. 割缝扰动区裂纹扩展模式及能量演化规律[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 719-727.
- LIN Baiquan, LIU Ting, ZOU Quanle, *et al.* Crack propagation modes and energy evolution within slotting disturbed zone [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 719-727.
- [9] ZHANG Xiangliang, LIN Baiquan, LI Yanjun, *et al.* Enhancement effect of NaCl solution on pore structure of Coal with high-voltage electrical pulse treatment[J]. Fuel, 2019, 235: 744-752.
- [10] LIN Baiquan, ZHANG Xiangliang, YAN Fazhi, *et al.* Improving the conductivity and porosity of coal with nacl solution for high-voltage electrical fragmentation[J]. Energy & Fuels, 2018, 32(4): 5010-5019.
- [11] 杨宏民, 魏晨慧, 王兆丰, 等. 基于多物理场耦合的井下注气驱替煤层甲烷的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2010, 35(S1): 109-114.
- YANG Hongmin, WEI Chenhui, WANG Zhao Feng, *et al.* Numerical simulation of coal-bed methane displacement by under ground gas injection based on multi-physical field coupling [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(S1): 109-114.
- [12] 姜永东, 宋晓, 崔悦震, 等. 声场作用下煤中甲烷解吸扩散的特性[J]. 煤炭学报, 2015, 40(3): 623-628.
- JIANG Yongdong, SONG Xiao, CUI Yue Zhen, *et al.* Characteristics of methane desorption and diffusion in coal under acoustic wave [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 623-628.
- [13] 于国卿, 翟成, 秦雷, 等. 超声波功率对煤体孔隙影响规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 47(2): 264-270.
- YU Guoqing, ZHAI Cheng, QIN Lei, *et al.* Study on the effect of ultrasonic power on coal porosity [J]. Journal of China University of Mining and technology, 2008, 47(2): 264-270.
- [14] 杨新乐. 低渗透煤层煤层气注热增产机理的研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2009.
- [15] 李惟慷, 杨新乐, 张永利, 等. 饱和蒸汽作用下煤体吸附甲烷运移产量规律试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1343-1349.
- LI Weikang, YANG Xinle, ZHANG Yongli, *et al.* Experimental study on yield regularity of methane adsorption and migration of coal under saturated steam [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1343-1349.
- [16] 贾泉敏, 孙海涛, 江万刚, 等. 煤层注热相关理论和工艺研究的现状及前瞻[J]. 矿业安全与环保, 2014, 41(2): 90-92.
- JIA Quanmin, SUN Haitao, JIANG Wangang, *et al.* Current situation and prospect of research on theories and processes related to coal seam heat injection [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2014, 41(2): 90-92.
- [17] 李贺. 微波辐射下煤体热力响应及其流-固耦合机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [18] 洪溢都. 微波辐射下煤体的温升特性及孔隙结构改性增渗研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [19] 张登峰, 崔永君, 李松庚, 等. 甲烷及二氧化碳在不同煤阶煤内部的吸附扩散行为[J]. 煤炭学报, 2011, 36(10): 1693-1698.
- ZHANG Dengfeng, CUI Yongjun, LI Songgeng, *et al.* Adsorption and diffusion of methane and carbon dioxide in different coal ranks [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1693-1698.
- [20] 张丽萍. 低渗透煤层气开采的热-流-固耦合作用机理及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
- [21] 冯子军. 褐煤原位注蒸汽开采油气的理论及试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- [22] 林柏泉, 李永, 杨凯, 等. H_2O 和 CH_4 在煤表面竞争吸附机理[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(6): 878-885.
- LIN Baiquan, LI Yong, YANG Kai, *et al.* Competitive adsorption mechanism of H_2O and CH_4 on coal surface [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(6): 878-885.
- [23] 柴琳, 吴世跃, 魏杰, 等. 基于 DFT 方法的注热蒸汽开采 CH_4 吸附机理[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(3): 72-78.
- CHAI Lin, WU Shiyue, WEI Jie, *et al.* Adsorption mechanism of CH_4 steam injection mining based on DFT method [J]. Coal Geology and Exploration, 2018, 46(3): 72-78.
- [24] 刘彦飞, 汤达祯, 许浩, 等. 基于核磁共振的煤岩孔裂隙应力变形特征[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1415-1421.
- LIU Yanfei, TANG Dazhen, XU Hao, *et al.* Stress and deformation characteristics of coal pore fractures based on nuclear magnetic resonance [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1415-1421.
- [25] 鲍先凯, 武晋文, 杨东伟, 等. 高压电脉冲水压致裂煤体效果试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(9): 133-138.
- BAO Xiankai, WU Jinwen, YANG Dongwei, *et al.* Experimental study on coal fracturing effect by high-voltage pulsed water pressure [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(9): 133-138.