



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

李 冰,刘见宝,任建刚,等.水力冲孔对煤微观孔隙和结构成分影响的试验研究[J].煤炭科学技术,2021,49(8):131-138. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.08.017

LI Bing, LIU Jianbao, REN Jiangang, *et al.* Experimental study of influence of hydraulic punching on microscopic pores and structural components of coal[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(8): 131-138. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.08.017

水力冲孔对煤微观孔隙和结构成分影响的试验研究

李 冰^{1,2,3}, 刘见宝^{1,2,3,4}, 任建刚^{1,2,3}, 陈 锋^{1,2,3}, 宋志敏^{1,2,3,4,5}

(1.河南工程学院,河南 郑州 451191;2.煤矿环境地质灾害综合治理技术河南省工程实验室,河南 郑州 451191;3.河南省煤产地土壤污染检测与治理工程研究中心,河南 郑州 451191;4.河南理工大学,河南 焦作 454000;5.开封大学,河南 开封 475004)

摘 要:煤矿瓦斯灾害严重制约着我国煤炭工业的发展,瓦斯灾害大多发生在透气性低和抽采效果差的低渗透性煤层中,目前水力冲孔技术是针对低渗透性煤层的一种较为有效的治理手段。为探讨水力冲孔技术对煤微观孔隙和结构成分的影响,利用压汞、液氮、甲烷等温吸附、傅里叶红外光谱和拉曼光谱等测试分析手段,对水力冲孔前后的煤样进行了微观孔隙、甲烷吸附性能和结构成分等方面的试验研究。结果表明,冲孔过程对于煤体内部微观孔隙具有一定的改造作用,主要集中在过渡孔(尤其是 50 nm 以下)和微孔段。不同温度下,冲孔过程均使煤的甲烷吸附性能显著提高,提高幅度可达 1~2 倍。冲孔后煤样的傅里叶红外光谱各峰位强度有所减小,拉曼光谱 D 峰和 G 峰面积有所增大,即冲孔过程对煤的结构成分也产生了影响,主要表现为官能团的相对含量变化、结构缺陷发育和芳香型碳富集。水力冲孔作用不仅可大幅改善煤体内部的孔隙通道,从而提升煤体内部瓦斯的解吸-扩散-渗流能力,还可使煤体新产生一些小分子结构的气体,且赋存于煤体内部丰富的孔隙结构中。水力冲孔后煤体这些微观孔隙和结构成分的变化,很好地解释了生产现场水力冲孔后煤体的瓦斯抽采效率提升,瓦斯流量衰减系数较小和持续抽采能力变强这一宏观现象。

关键词:水力冲孔;煤;微观孔隙;结构成分;瓦斯抽采

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)08-0131-08

Experimental study of influence of hydraulic punching on microscopic pores and structural components of coal

LI Bing^{1,2,3}, LIU Jianbao^{1,2,3,4}, REN Jiangang^{1,2,3}, CHEN Feng^{1,2,3}, SONG Zhimin^{1,2,3,4,5}

(1.Henan University of Engineering,Zhengzhou 451191,China;2.Henan Engineering Laboratory of Comprehensive Treatment Technology of Environmental Geological Disaster in Coal Mine,Zhengzhou 451191,China;3.Engineering Research Center of Soil Pollution Detection and Controlling in Coal Producing Area of Henan Province,Zhengzhou 451191,China;4.Henan Polytechnic University,Jiaozuo 454000,China;5.Kaifeng University,Kaifeng 475004,China)

Abstract: Coal mine gas disasters seriously restricted the development of China's coal industry, and most of which occurred in the low permeability coal seams with low permeability and poor extraction efficiency. At present, hydraulic punching technology is a relatively effective method to control low permeability coal seams. In order to study the influence of hydraulic punching technology on the microscopic pore and structural components of coal, the microscopic pore, methane adsorption properties and structural components of coal before and after hydraulic punching were studied by means of mercury intrusion, liquid nitrogen, methane isotherm adsorption, Fourier infrared spectroscopy and Raman spectroscopy. The results showed that the hydraulic punching process has a certain reforming effect on the microscopic pores in the coal body, which was mainly concentrated in the transition pore (especially below 50 nm) and microporous section. The

收稿日期:2021-02-25;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41872169,41972177,42002185);中国博士后科学基金资助项目(2018M642747);河南省博士后科研资助项目(001803030)

作者简介:李 冰(1980—),男,河南许昌人,副教授,博士。E-mail:hngclb@126.com

通讯作者:宋志敏(1961—),男,河南荥阳人,教授,博士生导师,博士。E-mail:songzhimin1961@126.com

methane adsorption properties of coal were improved significantly at the different temperatures after hydraulic punching, and the increase range could reach 1~2 times. After punching, the intensities of each peak of coal sample in Fourier infrared spectrum decreased, and the areas of D peak and G peak in Raman spectrum increased. That is to say, the hydraulic punching process also affected the structural components of coal, which mainly included the change of relative content of functional groups, the development of structural defects and the enrichment of aromatic carbon. Hydraulic punching effect can not only greatly improve the pore channels inside the coal body, so as to enhance the desorption, diffusion and seepage capacity of methane; but also could generate gas with small molecule structure, which can be stored in the rich pore structure inside the coal body. These changes in microscopic pore and structural components after hydraulic punching could well explain the increase in gas drainage efficiency of the coal body after hydraulic punching at the production site, the smaller gas flow attenuation coefficient and the stronger continuous extraction ability.

Key words:hydraulic punching; coal; microscopic pore; structural components; gas extraction

0 引言

煤炭始终占据着我国能源的主要地位。煤矿瓦斯灾害是制约我国煤炭工业安全高质量发展的最大障碍之一,而且随着开采深度越大,瓦斯灾害的威胁越大。据统计,我国目前存在的高瓦斯煤层中,约有 90% 以上属于低渗透性煤层^[1],尤其是软煤的渗透性更低,不利于瓦斯抽采,瓦斯抽采效果较差。实践证明,水力冲孔技术是目前针对碎软低渗性煤层的一种最为行之有效的治理手段。国内外很多学者都对水力冲孔技术进行了研究,主要包括理论、试验、数值模拟和现场研究^[2-4]。王凯等^[5]利用 RFPA2D-Flow 软件对冲孔钻孔周围的应力分布和透气性系数变化规律进行了模拟,结果与现场实测值较为吻合。蔺海晓等^[6]以煤岩体加载作用下的渗透率测试试验为前提,揭示了不同结构煤体卸压增透机理,提出了软煤(碎粒煤和糜棱煤)可通过冲孔出煤卸压增透,形成了基于煤体结构的水力强化增透瓦斯抽采技术。冯文军等^[7]通过应力应变-煤体结构-渗透率的耦合试验,揭示了“三软”煤层渗透率随煤体结构和应力变化的演化规律,发现软煤在卸压后渗透率得到大规模提升,且水力冲孔出煤后的卸压增透范围显著增大。郝富昌等^[8]建立了蠕变-渗流耦合作用下的水力冲孔周围煤体渗透率动态演化模型,揭示了水力冲孔周围煤体渗透率的时空演化规律,阐明了蠕变变形和基质收缩对渗透率的控制作用机理。

综上所述,目前国内外学者在试验、理论和数值模拟等方面对水力冲孔后煤体卸压增透机理有了一定的认识,提出了一些独特的见解。但是,关于水力冲孔对煤体的物理化学性质(孔隙结构、甲烷吸附性能、表面官能团和化学成分等)是否也存在着一定的影响,还需要进一步深入研究。而且,一些矿井资料显示,水力冲孔后煤体的瓦斯抽采效率提升,瓦斯流量衰减系数非常小,持续抽采能力变强,这一现象如果只从宏观裂隙层面难以解释。因此,笔者利

用几种常见的测试分析手段,探讨水力冲孔技术对煤的微观孔隙和结构成分的影响,以期解释水力冲孔后煤体存在的上述现象。研究结果不仅是对水力冲孔卸压增透机理的有益补充,而且可以有效指导生产现场。

1 试验样品

研究主要围绕水力冲孔前和冲孔后 2 种煤样开展试验。样品取自河南省永城矿区陈四楼矿二₂煤层的无烟煤,其煤质特征见表 1。

表 1 试验煤样煤质特征

Table 1 Coal quality characteristics of experimental coal samples

$A_d/\%$	$w(S)_{t,d}/\%$	$w(P)_d/\%$	$Q_{gr,ad}/$ (MJ · kg ⁻¹)	$Q_{net,ad}/$ (MJ · kg ⁻¹)
6.29~31.14	0.20~0.81	0.000 3~0.014 0	23.09~32.95	26.30~36.07
13.74	0.46	0.004 4	29.78	34.76

注: A_d 为灰分; $S_{t,d}$ 为全硫; P_d 为磷; $Q_{gr,ad}$ 为干燥基高位发热量; $Q_{net,ad}$ 为分析基低位发热量;最小值~最大值/平均值。

水力冲孔采用型号为 BRW (GRB) 315/31.5 的矿用乳化泵站供高压水。钻孔钻进过程中,冲孔水刀仅向钻头提供低压水。钻进过程结束后,在短时间内进入冲孔流程。冲孔过程中,水刀向钻孔径向喷射高压射流,实施冲孔作业。水力冲孔的水压为 10 MPa。冲出煤量为 30~50 kg/m。每米段冲孔时间设定为 15 min。冲孔的煤样粒径多为毫米级,含少量厘米级颗粒。冲孔后的煤样采用冲出来的煤粉制作。煤样采集、封装、运回实验室后,采用球磨机粉碎至试验所需粒径。冲孔前煤样反映原始煤体内部物理、化学结构。冲孔过程则因水的冲击作用加入了应力波振动扰动,可以反映冲孔过程中的应力波对煤体内部微观结构和成分的影响。冲孔前后煤样均取自 21012 工作面的邻近区域,地质环境一致,可排除煤样物理、化学结构先天差异的影响。该煤层可采厚度 0.80~3.85 m,平均厚度 2.45 m,煤层稳

定,煤层倾角 5°~20°,矿井瓦斯含量普遍较低,实测煤层瓦斯含量最高为 7.51 cm³/g。

2 微观孔隙对比研究

2.1 压汞测试

压汞测试所用仪器为美国 AutoPore IV 9500 压汞仪,最大压力可以达到 228 MPa,孔径测量范围为 5 nm~360 μm,进汞和退汞的体积精度小于 0.1 μL。所选样品粒径为 3~6 mm,在测试前都要在 105 ℃ 条件下二次烘干至恒重,压汞试验包括加压进汞、减压退汞过程,试验的最高压力选定为 200 MPa。

2.1.1 进汞-退汞曲线

冲孔前后煤样进汞-退汞曲线如图 1 所示,可以看出冲孔后煤样的进汞累积压入量明显多于冲孔前,且退汞曲线末端的累积压入量不为 0,表明退汞结束后,依然有部分汞液留在样品孔隙中,也从侧面反映了煤样孔隙结构的复杂性。

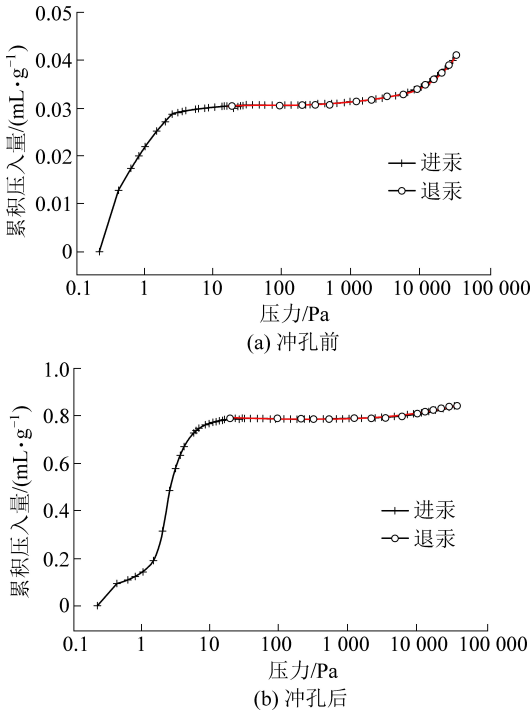


图 1 冲孔前后煤样进汞-退汞曲线

Fig.1 Curve of mercury intrusion and extrusion in coal samples before and after punching

冲孔前后煤样的孔隙率、总孔容和总孔面积压汞试验结果见表 2。

表 2 冲孔前后煤样压汞试验结果

Table 2 Mercury intrusion test results of coal samples before and after punching

样品	孔隙率/%	总孔容/(mL·g ⁻¹)	总孔面积/(m ² ·g ⁻¹)
冲孔前	5.70	0.041	3.727 4
冲孔后	51.70	0.839	18.200 4

可以看出,水力冲孔前后 2 种煤样的孔隙率相差较大,冲孔后的煤样孔隙率增大了近 10 倍,达到了 51.7%,总孔容增大 20 倍,总孔面积增大近 5 倍。

2.1.2 孔容分布

冲孔前后煤样的孔容(由压入汞体积微分代表)随着孔径的减小均呈现上升趋势(图 2)。在大于 1 μm 的孔径范围内,孔容非常小,几乎可以忽略不计。而对于小于 1 μm 的孔径而言,即在中孔范围内,孔容开始上升。对比冲孔前后煤样的退汞曲线可知,冲孔后的煤样在 10~100 nm 的退汞曲线与冲孔前存在着较大差别,说明冲孔过程对煤的过渡孔(尤其是 50 nm 以下的孔)影响较大,增大了过渡孔的孔容。

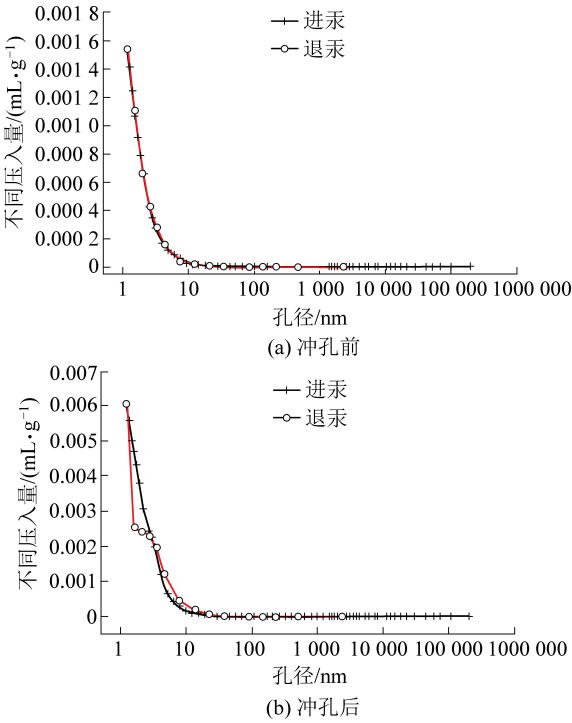


图 2 冲孔前后煤样压汞孔容分布

Fig.2 Pore volume distribution of mercury injection in coal samples before and after punching

2.1.3 比表面积分布

比表面积与孔容都是反映孔隙结构的参数,孔容从体积量的角度反映,比表面积则可从侧面反映该孔径下孔的数量情况,二者互为补充,可更为全面地反映样品的微观孔隙特征(图 3)。冲孔前后煤样的累积比表面积分布一致,从 100 nm 以下,累积比表面积均随孔径的减小而呈指数形式增加。不同的是,冲孔后样品累积比表面积比冲孔前增大了 5 倍。试验结果进一步证实了冲孔过程对过渡孔的影响较为明显。

2.2 液氮吸附测试

液氮吸附试验是研究颗粒微观孔隙特征的重要

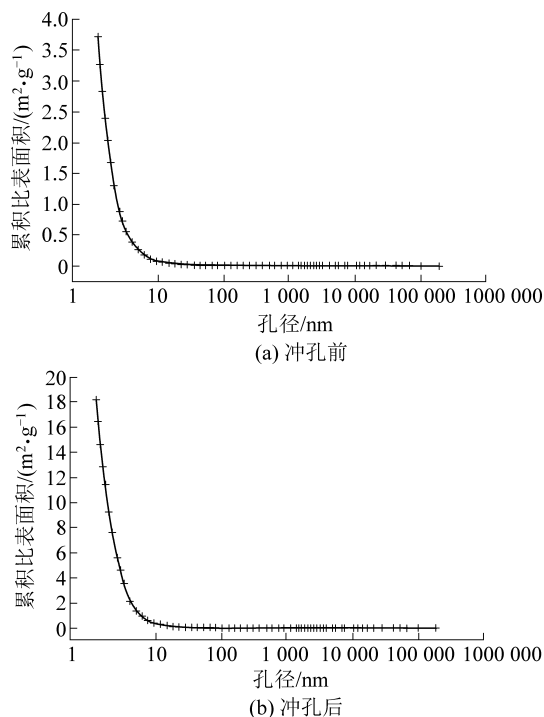


图3 冲孔前后煤样压汞比表面积分布

Fig.3 Distribution of specific surface area of mercury injection of coal samples before and after punching

测试手段,与压汞法共同组成了从细观孔隙到微观孔隙的研究体系^[9-11]。试验所用系统为 MicroActive for ASAP 2460 Version 2.01 型比表面与孔分布测试仪。该设备可以利用氮气、二氧化碳、氦气作为吸附气体,进行比表面积和孔径分布(大于 2 nm)的计算。试验样品的粒径为 0.17~0.25 mm(60~80 目),测试前需在 110 ℃ 下加热 8 h,以保证样品中的杂质在长时间加热后蒸发、排出。

2.2.1 孔容和比表面积分布

冲孔之后,煤样的孔容和比表面积都得到了较大的改善(图 4)。孔容与比表面积均具有错峰增加的规律,根据十进制孔隙结构分类法^[12],即孔容的增加主要来自过渡孔和中孔,而比表面积的增加则更多源于微孔和过渡孔,尤其是微孔。其中,微孔比表面积增加到近 15 倍,过渡孔比表面积增加到近 3 倍。由此得出,冲孔对增加微孔具有显著成效。

2.2.2 吸附-解吸等温线

水力冲孔前后煤样的等温线均属于第Ⅳ类等温线^[13],在相对压力为 0~0.1 时,氮气开始快速吸附于样品微孔中,曲线在这一区间上凸(图 5)。

在中压部分,冲孔前后样品的等温曲线几乎为水平状态。在相对压力大于 0.9 的区间,曲线开始快速上扬。对比冲孔前后 2 种样品的等温线可以发现,在低相对压力区间,冲孔后煤样的吸附量远高于冲孔前煤样,表明其微孔发育较好,微孔数量较多。

吸附量测试结果显示,冲孔前煤样的最大吸附量只有 $0.5 \text{ cm}^3/\text{g}$,而冲孔后煤样的最大吸附量达到了 $1.5 \text{ cm}^3/\text{g}$,增加到 3 倍。因此,从吸附-解吸等温线可以确定,冲孔过程使煤体微观孔隙结构更为发达,

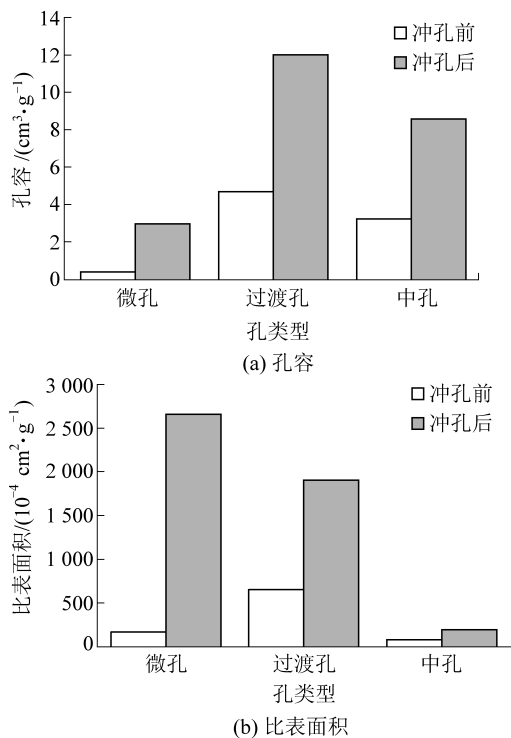


图4 冲孔前后煤样液氮孔孔容、比表面积分布

Fig.4 Distribution of pore volume, specific surface area of liquid nitrogen hole of coal samples before and after punching

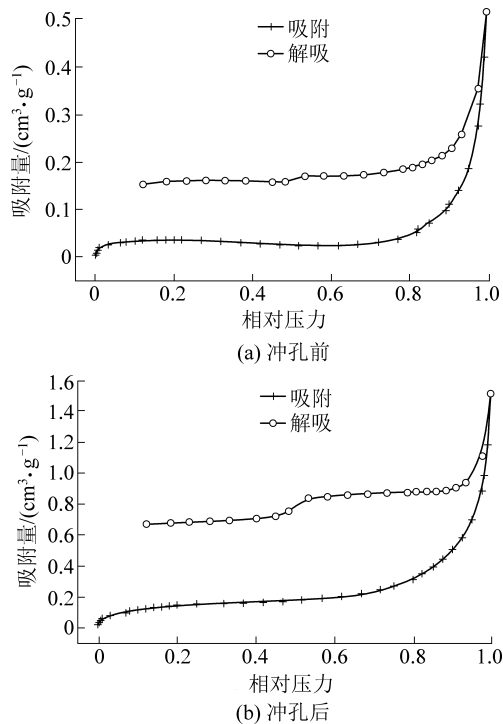


图5 冲孔前后氮气吸附/解吸等温线示意

Fig.5 Adsorption/desorption isotherm of nitrogen before and after punching

微孔数量大幅增加。

2.2.3 孔径分布

冲孔前后 2 种样品的孔径分布曲线具有一定的相似性,但存在差异。冲孔前煤样孔径存在 10 nm 的主峰和 20 nm 的次峰,而冲孔后的煤样孔径主峰为 2 nm,次峰为 10 nm,液氮吸附量也显著增大,说明冲孔过程造成了 10 nm 以下微孔的发育,与等温吸附测试结果一致(图 6)。

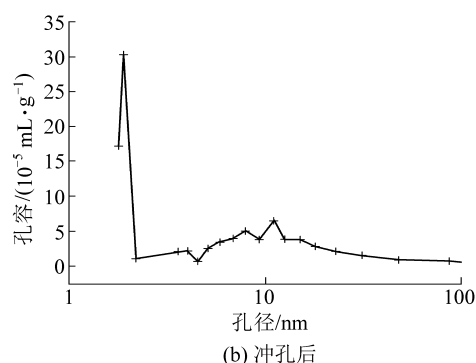
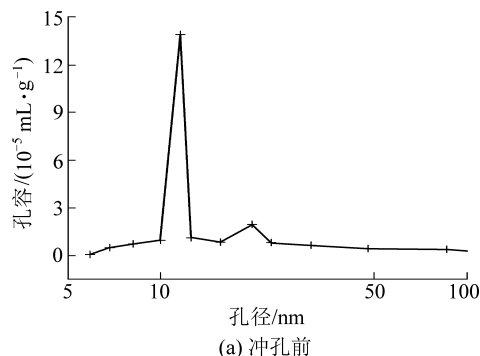


图 6 冲孔前后煤样液氮孔径分布

Fig.6 Pore size distribution of liquid nitrogen in coal samples before and after punching

总体而言,结合压汞和液氮吸附测试可知,冲孔过程对煤体微观孔隙结构具有较强的改造作用,可以大幅度增加煤体内部过渡孔(主要是 50 nm 以下的孔)和微孔的数量,但对大孔和中孔的影响不大。这样使煤体内部的孔隙通道得以大幅增多,使大孔、中孔、过渡孔以及微孔之间形成连通性更好的三维网络结构。

2.3 甲烷等温吸附测试

甲烷主要以吸附态赋存于煤基质孔隙中,少量以游离态与溶解态赋存在煤孔裂隙中^[14-16]。煤层甲烷吸附特性是评价水力冲孔效果和瓦斯持续抽采能力的重要参数,同时对煤与瓦斯突出预测具有十分重要的意义^[17-19]。本次试验所用系统为 TriStar II 3flex Version 5.00 比表面与孔隙度分析仪。对冲孔前、冲孔后煤样分别开展 30、40 和 50 ℃ 三个温度的甲烷等温吸附试验。冲孔前后煤样的等温吸附曲

线形态相似,但是吸附量不同。冲孔后煤样的甲烷吸附量显著增加,增加 1~2 倍。50 ℃ 条件下冲孔后的甲烷吸附量与 30 ℃ 条件下冲孔前的吸附量基本相同,说明冲孔可以造成一定的吸附温差效应(图 7)。冲孔后甲烷吸附量的增加可能是由于煤体内部的过渡孔以及微孔的数量增加,从而导致甲烷的赋存空间增加,等温吸附试验结果也进一步佐证了压汞和液氮测试的结果,即水力冲孔可以大幅度增加煤体内部微观孔隙的数量。

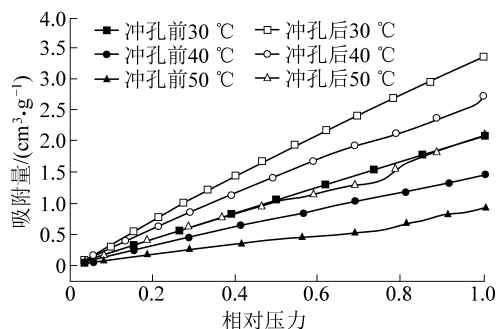


图 7 冲孔前后煤样甲烷等温吸附线对比

Fig.7 Comparison of methane isotherm adsorption lines of coal samples before and after punching

3 结构成分对比研究

3.1 傅里叶红外光谱分析

傅里叶红外光谱分析主要测定的是煤样中的官能团种类并大致反映其含量。通过官能团的测定,可以了解冲孔过程是否会对煤体的官能团结构、形式产生影响以及改变煤体的化学性质。试验所用红外光谱仪为 NICOLET iS10,取 1~2 mg 粉末试样(粒径 0.17~0.25 mm),200 mg 纯 KBr 研磨均匀,置于模具中,在油压机上压成透明薄片,将样片放入红外光谱仪中测试,波数范围 400~4 000 cm^{-1} ,扫描 32 次,分辨率 4 cm^{-1} 。

冲孔前后煤样红外光谱的峰位和曲线走势大致一致,说明官能团不存在大的差别(表 3、图 8)。根据图中的峰值点标定位置可以知道,煤是一种复杂的有机物,具有丰富的官能团结构。波数 3 697~3 684 cm^{-1} ,存在游离羟基;在 3 624~3 613 cm^{-1} ,存在分子内氢键;在 3 500~3 200 cm^{-1} ,存在醇、酚、氨类羟基;在 3 050~3 030 cm^{-1} 内,存在芳烃 CH 伸缩振动;在 2 922~2 918 cm^{-1} ,存在脂肪烃 CH_2 、 CH_3 不对称伸缩振动;在 2 858~2 847 cm^{-1} ,存在脂肪烃 CH_2 、 CH_3 对称伸缩振动;在波数 1 600 cm^{-1} 处,存在芳香结构 C=C 伸缩振动;在波数 1 460 cm^{-1} 处,存在脂肪类对称和不对称变形振动;在 900~700 cm^{-1} ,存在芳香结构 C—H 面外变形振动^[20-24]。但

是,由图 8 也可以看出,冲孔后煤样在各峰位上的强度都相应减小,尤其是游离羟基,芳烃 CH 伸缩振动,脂肪烃 CH_2 、 CH_3 不对称伸缩振动,芳香结构 $\text{C}=\text{C}$ 伸缩振动以及芳香结构 $\text{C}-\text{H}$ 面外变形振动的峰值大幅度减小。因此,可以认为,冲孔过程对煤体的表面官能团和化学结构产生了较大的影响。

表 3 煤的官能团光谱吸收强度

Table 3 Spectral absorption strength of functional groups of coal

官能团	波数/ cm^{-1}
游离羟基	3 697~3 684
分子内氢键	3 624~3 613
醇、酚、氨基羟基	3 500~3 200
芳烃 CH 伸缩振动	3 050~3 030
脂肪烃 CH_2 、 CH_3 不对称伸缩振动	2 922~2 918
脂肪烃 CH_2 、 CH_3 对称伸缩振动	2 858~2 847
芳香结构 $\text{C}=\text{C}$ 伸缩振动	1 600
脂肪类对称和不对称变形振动	1 460
烷基醚	1 050~1 030
芳香结构 $\text{C}-\text{H}$ 面外变形振动	900~700

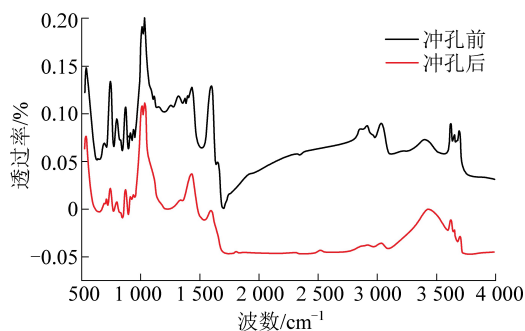


图 8 冲孔前后煤样傅里叶红外光谱对比

Fig.8 Comparison of FTIR spectra of coal samples before and after punching

3.2 拉曼光谱分析

试验所用设备为 renishaw inVia 显微激光拉曼光谱仪,选用波长为 532 nm 激光进行测试。拉曼测试对样品一般无粒径要求,试验所提供的样品均为微粒状。天然石墨和碳质物的拉曼光谱表现为 D 峰谱带归属于非晶质石墨不规则六边形晶格结构的振动模式,与分子结构单元间的缺陷有关。D 峰面积的大小取决于煤大分子结构中的缺陷,D 峰面积与结构缺陷正相关。G 峰谱带与分子结构中 $\text{C}=\text{C}$ 的伸展振动有关,代表着分子结构中的有序化程度。G 峰面积和煤大分子结构中芳香环总量,芳香型碳的富集程度相关,芳香环总量越大,芳香型碳富集越高,G 峰面积就越大^[25-27]。冲孔前后煤样的拉曼光谱的峰位和曲线走势几乎完全一致(图 9),不存在

大的差别。在激光拉曼光谱 $1\,000\sim1\,800\text{ cm}^{-1}$ 的波数范围内有 2 个明显的拉曼振动峰,即 D 峰和 G 峰。D 峰峰位在 $1\,350\text{ cm}^{-1}$, G 峰峰位在 $1\,600\text{ cm}^{-1}$ 。D 峰和 G 峰宽度分别为 300 cm^{-1} 和 150 cm^{-1} 。然而,冲孔后煤样 D 峰面积和 G 峰面积均有所增大,表明冲孔过程中煤体中的缺陷增多,芳香型碳的含量也增多,即冲孔导致煤样结构缺陷的发育和芳香型碳的富集。该结果与傅里叶红外光谱的分析结果基本一致,佐证了冲孔过程对煤体化学组成和官能团结构产生了影响。

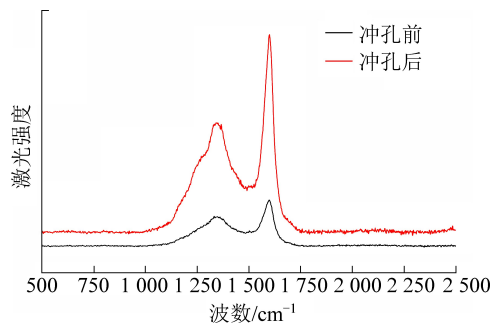


图 9 冲孔前后煤样拉曼光谱对比

Fig.9 Comparison of Raman spectra of coal samples before and after punching

4 讨论

冲孔前煤样经过了人工破碎和球磨机的研磨作用,属于机械破坏的范畴。冲孔后煤样经历了冲孔过程中的高压射流对煤体的高速冲击作用、排渣作用和制样过程中的球磨机研磨作用,以上各种作用也都属于机械破坏的范畴。所不同的是,冲孔后煤样在经历高速射流对煤壁造成冲击破坏的同时,也会持续产生应力波。因此,可以认为冲孔后样品微观孔隙和结构成分的改变并不是机械破坏作用引起的,而是冲孔过程中的水力产生的持续应力波导致的。即煤体在被冲出之前,就出现了微观孔隙和结构成分的改变。在冲孔过程中,射流撞击孔壁产生持续的、具有较大能量的应力波,孔隙结构和表面官能团在应力波的应力扰动下不断被拉伸、剪切和扭转,在长时间、多周期的疲劳载荷下发生变形和破坏。在应力的传递作用下,这种应力波扰动是持续的和立体的,在冲孔钻孔周围一定区域内都是存在的。因此可以认为,在冲孔过程中,煤体在被冲击和破碎之前,已经发生了微观孔隙、结构成分和甲烷吸附性能的较大变化。

根据文献[2]报道,大孔中的瓦斯主要以层流或湍流为主,中孔中瓦斯的流动状态为层流,而过渡孔和微孔中的瓦斯主要以扩散运动为主。由压汞和

液氮测试可知,冲孔后煤体孔隙发生变化,主要体现在大孔和中孔变化不大,而过渡孔和微孔的数量大幅度增加,大幅改善了煤体内部的孔隙通道。而甲烷的等温吸附试验表明,冲孔后甲烷的吸附量大幅提升。由于吸附解吸是一个可逆过程,故推测,冲孔后煤体内部的大孔、中孔、过渡孔以及微孔之间形成了连通性更好的三维网络体系,从而大幅提升了煤体内部瓦斯的解吸-扩散-渗流能力。

以往研究指出,冲孔作用可使煤体卸压,裂隙快速发育,透气性得到增强^[3-5,7-8]。此外,侯泉林等^[28]也指出,不到 10% 的应变就足以使煤结构中的含氧基团或醚键发生降解,并生成气态小分子,即可产生大量超量煤层气^[28]。笔者研究发现,冲孔后煤体的表面官能团含量和化学组成发生变化,以及结构缺陷的发育和芳香型碳的富集,且冲孔过程中会产生较大能量的应力波。因此推测,在冲孔过程中,煤体大分子在应力作用下,煤体表面的部分含氧基团不断发生裂解,产生小分子结构的气体,导致新生气体的总量变大。且由于煤体的大分子芳核结构发生裂解,导致芳环数量相对增加,即煤体中的缺陷增多,芳香型碳含量也增多。

综上所述可知,水力冲孔作用不仅可大幅改善煤体内部的孔隙通道,形成连通性更好的三维网络体系,从而提升煤体内部瓦斯的解吸-扩散-渗流能力,而且还可使煤体新产生一些小分子结构的气体,且这些气体可赋存于煤体内部丰富的孔隙中,在抽采过程中可不断缓慢释放。因此,这很好地解释了生产现场水力冲孔后,煤体的瓦斯抽采效率提升,瓦斯流量衰减系数较小和持续抽采能力变强这一宏观现象。同时也说明了冲孔作用后的瓦斯抽采效果受煤体的孔隙结构、透气性和地应力等因素的综合影响。

5 结 论

1) 冲孔过程对于煤体内部微观孔隙具有一定的改造作用,主要集中在过渡孔(尤其是孔径 50 nm 以下)和微孔段,可以大幅度增加微观孔隙的数量,从而使煤的甲烷吸附性能大幅度提升,提高幅度可达 1~2 倍。

2) 冲孔后煤样的傅里叶红外光谱各峰位强度有所减小,拉曼光谱 D 峰和 G 峰面积有所增大,即冲孔过程对煤的结构成分也产生了影响,主要表现为官能团的相对含量变化、结构缺陷发育和芳香型碳富集。

3) 水力冲孔作用不仅可大幅改善煤体内部的孔隙通道,从而提升煤体内部瓦斯的解吸-扩散-渗

流能力,还可使煤体新产生一些小分子结构的气体,且赋存于煤体内部丰富的孔隙结构中。

参考文献(References):

- [1] 李 慧,魏建平,王雪龙. 低渗透突出煤破坏过程中瓦斯运移规律研究[J]. 煤矿安全,2019,50(7):1-4.
LI Hui,WEI Jianping,WANG Xuelong. Study on gas migration law for low permeability outburst coal in the process of destruction[J]. Safety in Coal Mines,2019,50(7):1-4.
- [2] 薛 斐. 水力冲孔煤层增透机理及应用研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2018.
- [3] 刘金根,唐建平,桂小玲. 水力冲孔技术在煤层中的卸压增透作用试验研究[J]. 煤炭技术,2019,38(8):93-95.
LIU Jingen,TANG Jianping,GUI Xiaoling. Experimental investigation of pressure-relief and permeability improvement effect of hydraulic flushing[J]. Coal Technology,2019,38(8):93-95.
- [4] 雷克江. 水力冲孔防突技术研究进展与现场应用[J]. 煤炭技术,2019,38(5):75-78.
LEI Kejiang. Study progress of hydraulic flushing and its field application[J]. Coal Technology,2019,38(5):75-78.
- [5] 王 凯,李 波,魏建平,等. 水力冲孔钻孔周围煤层透气性变化规律[J]. 采矿与安全工程学报,2013,30(5):778-784.
WANG Kai,LI Bo,WEI Jianping,et al. Change regulation of coal seam permeability around hydraulic flushing borehole[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2013,30(5):778-784.
- [6] 蔺海晓,苏现波,刘 晓,等. 煤储层造缝及卸压增透实验研究[J]. 煤炭学报,2014,39(S2):432-435.
LIN Haixiao,SU Xianbo,LIU Xiao,et al. Experimental study of permeability enhancement in coal layers by fracture making or unloading[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(S2):432-435.
- [7] 冯文军,苏现波,王建伟,等. “三软”单一煤层水力冲孔卸压增透机理及现场试验[J]. 煤田地质与勘探,2015,43(1):100-103.
FENG Wenjun,SU Xianbo,WANG Jianwei,et al. The mechanism and field test of permeability improvement by hydraulic flushing in three-soft and single coal seam[J]. Coal Geology & Exploration,2015,43(1):100-103.
- [8] 郝富昌,孙丽娟,赵发军. 蠕变-渗流耦合作用下水力冲孔周围煤体渗透率时空演化规律[J]. 中国安全生产科学技术,2016,12(8):16-22.
HAO Fuchang,SUN Lijuan,ZHAO Fajun. Reseach on coal permeability spatio-temporal evolution around hydraulic flushing based on creep-seepage coupling[J]. Journal of Safety Science and Technology,2016,12(8):16-22.
- [9] 李 惠,王福国,李 振,等. 六盘水煤田杨梅树向斜主要煤层孔隙结构特征研究[J]. 煤炭科学技术,2019,47(7):234-243.
LI Hui,WANG Fuguo,LI Zhen,et al. Study on pore properties of main coal seams of Yangmeishu syncline in Liupanshui coalfield[J]. Coal Science and Technology,2019,47(7):234-243.
- [10] NIE Baisheng,LIU Xianfeng,YANG Longlong,et al. Pore structure characterization of different rank coals using gas adsorption and scanning electron microscopy[J]. Fuel,2015,158:908-917.

- [11] YAO Yanbin, LIU Dameng, CAI Yidong, *et al.* Advanced characterization of pores and fractures in coals by nuclear magnetic resonance and X-ray computed tomography[J]. *Science China-Earth Sciences*, 2010, 53(6): 854-862.
- [12] 王月红, 李靖, 张九零. 采用主成分分析法的孔隙结构与瓦斯放散[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(11): 1457-1460.
WANG Yuehong, LI Jing, ZHANG Jiuling. Research on the effect of pore structure and gas emission based on the main compositions analysis method[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2014, 33(11): 1457-1460.
- [13] SONG Yu, JIANG Bo, LI Fengli, *et al.* Structure and fractal characteristic of micro-and meso-pores in low, middle-rank tectonic deformed coals by CO₂ and N₂ adsorption[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2017, 253: 191-202.
- [14] 周西华, 常利强, 白刚, 等. 水分对不同煤种吸附甲烷特性影响及机理分析[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(5): 402-408.
ZHOU Xihua, CHANG Liqiang, BAI Gang, *et al.* The influence of water on methane adsorption characteristics of different coal types and the mechanism analysis[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2019, 38(5): 402-408.
- [15] 王凤林, 袁玉, 张遂安, 等. 不同含水及负压条件下煤层气等温吸附解吸规律[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(6): 158-163.
WANG Fenglin, YUAN Yu, ZHANG Suian, *et al.* Isothermal adsorption and desorption of coalbed methane under different water saturation and negative pressure[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(6): 158-163.
- [16] 张永强, 韩志雄, 薛海军, 等. 西南典型矿区煤等温吸附/解吸影响因素研究[J]. *煤炭工程*, 2019, 51(6): 18-23.
ZHANG Yongqiang, HAN Zhixiong, XUE Haijun, *et al.* Impact factors on gas adsorption and desorption of typical mining area in southwest China[J]. *Coal Engineering*, 2019, 51(6): 18-23.
- [17] 王延斌, 陶传奇, 倪小明, 等. 基于吸附势理论的深部煤储层吸附气量研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(6): 1547-1552.
WANG Yanbin, TAO Chuanqi, NI Xiaoming, *et al.* Amount of adsorbed gas in deep coal reservoir based on adsorption potential theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(6): 1547-1552.
- [18] 李树刚, 赵波, 赵鹏翔, 等. 煤岩瓦斯固气耦合相似材料瓦斯吸附特性研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(3): 634-642.
LI Shugang, ZHAO Bo, ZHAO Pengxiang, *et al.* Gas adsorption characteristics of similar materials with solid and gas couple of coal and gas[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2019, 36(3): 634-642.
- [19] 高丽军, 谢英刚, 潘新志, 等. 临兴深部煤层气含气性及开发地质模式分析[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(6): 1634-1640.
GAO Lijun, XIE Yinggang, PAN Xinshi, *et al.* Gas analysis of deep coalbed methane and its geological model for development in Linxing Block[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(6): 1634-1640.
- [20] HE Xueqiu, LIU Xianfeng, NIE Baisheng, *et al.* FTIR and Raman spectroscopy characterization of functional groups in various rank coals[J]. *Fuel*, 2017, 206: 555-563.
- [21] 郭德勇, 叶建伟, 王启宝, 等. 平顶山矿区构造煤傅里叶红外光谱和¹³C核磁共振研究[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(12): 3040-3046.
GUO Deyong, YE Jianwei, WANG Qibao, *et al.* FTIR and ¹³C NMR characterizations for deformed coal in Pingdingshan mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(12): 3040-3046.
- [22] 王海燕. 不同处置方式煤表面化学结构的傅里叶红外光谱分析[J]. *煤矿安全*, 2017, 48(8): 177-181.
WANG Haiyan. Fourier transform infrared spectroscopy analysis for surface chemical structure of coal under different pretreatment methods[J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(8): 177-181.
- [23] 王其江, 李肖肖, 韩博识, 等. 冲击破坏条件下煤的红外光谱特征研究[J]. *煤矿安全*, 2017, 48(9): 32-34, 38.
WANG Qijiang, LI Xiaoxiao, HAN Boshi, *et al.* Study on infrared spectrum characteristics of coal under impact damage[J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(9): 32-34, 38.
- [24] 简阔, 刘顺喜, 陈义林, 等. 低阶煤热解结构演化及与烷烃气碳同位素相关性的红外光谱[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(7): 84-89.
JIAN Kuo, LIU Shunxi, CHEN Yilin, *et al.* Infrared spectroscopic study on the structure evolution of low rank coal and its correlation with carbon isotope of alkane gas in pyrolysis process[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(7): 84-89.
- [25] 林红, 琚宜文, 侯泉林, 等. 脆、韧性变形构造煤的激光 Raman 光谱特征及结构成分响应[J]. *自然科学进展*, 2009, 19(10): 1117-1125.
LIN Hong, JU Yiwen, HOU Quanlin, *et al.* Laser Raman spectral characteristics and structural component response of brittle and ductile deformed structural coal[J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(10): 1117-1125.
- [26] 李霞, 曾凡桂, 王威, 等. 低中煤级煤结构演化的拉曼光谱表征[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(9): 2298-2304.
LI Xia, ZENG Fangui, WANG Wei, *et al.* Raman characterization of structural evolution in the low-middle rank coals[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(9): 2298-2304.
- [27] 苏现波, 司青, 宋金星. 煤的拉曼光谱特征[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(5): 1197-1202.
SU Xianbo, SI Qing, SONG Jinxing. Characteristics of coal Raman spectrum[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(5): 1197-1202.
- [28] 侯泉林, 李小诗. 构造作用与瓦斯突出和超量煤层气[J]. *物理*, 2014, 43(6): 373-380.
HOU Quanlin, LI Xiaoshi. The effect of tectonic deformation on gas outburst and excess coalbed methane[J]. *Physics*, 2014, 43(6): 373-380.