

安全技术及工程

不同煤体结构煤的瓦斯放散特征及其影响机理

张小东^{1,2} 李朋朋¹ 张硕¹

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院,河南 焦作 454000; 2. 中原经济区煤层(页岩)气河南省协同创新中心,河南 焦作 454000)

摘要:为了探讨不同破坏程度煤的瓦斯初始放散的差异性及其控制机制,以潞安矿区王庄矿为例,对不同粒度的原生结构煤和构造煤的瓦斯放散初速度 ΔP 进行了测试。借助于孔隙性、接触角测试结果,探讨了粒度、表面张力对 ΔP 的影响机理。研究发现:构造的破坏作用对煤的吸附/解吸、扩散性具有较大的影响:吸附孔隙增多,煤基质的表面张力增大,吸附能力增强,不利于气体的解吸;大孔径段的开放孔数量增多,有利于气体的扩散;煤体破坏程度与 ΔP 的对应关系在某一粒度段(0.75~0.90 mm)呈现相反的对应关系;不同破坏程度的煤、粒度对瓦斯放散初速度的影响主要是通过孔、裂隙性的影响权重变化而作用的,即当煤屑粒径大于0.90 mm,裂隙系统成为影响瓦斯放散的主要因素;粒径小于0.75 mm,孔隙含量成为主因。研究结果对于煤与瓦斯突出机理及防治具有一定的理论意义。

关键词:构造煤;瓦斯放散初速度;孔裂隙性;煤与瓦斯突出

中图分类号: TD713

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2016)09-0093-06

Gas emission features of coals with different coalbody structure and their influencing mechanism

Zhang Xiaodong^{1,2} Li Pengpeng¹ Zhang Shuo¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Collaborative Innovation Center of Coalbed Methane and Shale Gas for Central Plains Economic Region, Henan Province, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to discuss the gas initial emission difference and the control mechanism of coal with different damage degrees, taking Wangzhuang Mine in Lu'an Mining Area as an example, a test and measurement was conducted on the gas initial emission velocity ΔP of different particle size insitu structure coal and tectonic coal. With the test results of the porosity and contact angle, the paper discussed the influence mechanism of the particle size and surface tension to ΔP . The study found that the tectonic failure role would have high influences to the adsorption/desorption and diffusivity of the coal. The adsorption pores increased, the coal matrix surface tension increased and adsorption capacity increased, which would not be favorable to the gas desorption. The open pore numbers at the large pore size section were increased and would be favorable to the gas diffusion. The corresponding relationship between the coal structure and ΔP would be a reverse corresponding relationship in a certain particle size range(0.75~0.90 mm). The coal with different failure degree and the particle size affected to the gas initial emission velocity mainly realized with the pore and cracking's influence weight variation changed. When the coal cutting particle size was over 0.90 mm, the cracking system would be the major factor affected to the gas emission. When the particle size was less than 0.75 mm, the porosity content would be the major factor. The study results would have certain theoretical significances to coal and gas outburst mechanism and prevention.

Key words: coal structure; gas initial emission velocity; porosity; coal and gas outburst

收稿日期: 2016-04-16; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.09.017

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41372162); 河南省高校科技创新团队支持计划资助项目(14IRTSTHN002)

作者简介: 张小东(1971—), 男, 河南温县人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: z_wenfeng@163.com

引用格式: 张小东, 李朋朋, 张硕. 不同煤体结构煤的瓦斯放散特征及其影响机理[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(9): 93~98.

Zhang Xiaodong, Li Pengpeng, Zhang Shuo. Gas emission features of coals with different coalbody structure and their influencing mechanism [J].

Coal Science and Technology, 2016, 44(9): 93~98.

0 引言

煤矿井下开采过程中,瓦斯涌出特别是瞬时的煤与瓦斯突出与煤层的孔裂隙性、气体的解吸-扩散-渗流行为具有密切关系^[1-2]。在煤与瓦斯突出危险性预测的参数中,瓦斯放散初速度 ΔP 是一个重要指标,其大小与煤与瓦斯突出的瞬时性相关联,直接反映了煤体释放瓦斯的快慢程度。国内外学者针对不同破坏程度煤的瓦斯放散特征开展了诸多的试验和理论研究,在放散规律、影响因素以及放散过程的数值模拟等方面取得了诸多成果^[3-8]。但因煤样的差异及影响因素的复杂性,瓦斯放散初速度的变化规律及控制机理有待深入研究。

笔者以潞安矿区王庄矿的贫煤为研究对象,基于的煤样的瓦斯放散初速度测试结果,分析了不同粒度、不同破坏程度煤的瓦斯初始放散的差异性。结合煤样的孔隙性、接触角测试结果,以及前人研究成果^[9-12]探讨了影响煤样瓦斯放散初速度差异的主要因素及其实质。

1 煤样及试验

1.1 煤样

煤样采自山西潞安矿区王庄矿,煤类为贫煤。在井下分别采集了原生结构煤、碎粒煤和糜棱煤3种煤样,编号分别为WZ-I、WZ-III、WZ-IV。煤样工业分析结果见表1。

表1 煤样的工业分析结果

Table 1 Proximate analysis results of coal samples

编号	$M_{ad}/\%$	$A_{d}/\%$	$V_{daf}/\%$	$FC_{ad}/\%$
WZ-I	1.00	8.01	13.15	77.84
WZ-III	1.08	17.80	12.76	68.36
WZ-IV	1.11	19.69	11.57	67.63

1.2 试验

试验前,通过机械破碎和筛分,分别将3种煤样制备成粒径为0.16~0.25、0.25~0.5、0.5~1.0、1.0~2.0、2.0~3.0 mm的试验用样。 ΔP 测试按照AQ 1028—2009《煤的瓦斯放散初速度指标(ΔP)测试标准》进行。

接触角测定仪的成像放大率为176~1 008倍,接触角测量值范围为0°~180°,误差±1°。测试前,将煤样破碎至0.15~0.18 mm,用压片机破碎压制成为薄片。采用量角法测定了矿泉水、纯净水等2种液体在煤样薄片上的接触角。接触角测定后,分别

采用Antonow规则法、Berthelot规则法和ZHU法^[12]计算煤样的表面张力。

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

煤样的瓦斯放散初速度测试结果见表2。

表2 煤样瓦斯放散初速度 ΔP 测定结果

Table 2 Results of initial gas emission velocity

ΔP for coal samples

煤样编号	粒径/mm	平均粒径/mm	ΔP
WZ-I	0.16~0.25	0.205	15.0
	0.25~0.50	0.375	12.5
	0.5~1.0	0.750	10.0
	1.0~2.0	1.500	6.0
	2.0~3.0	2.500	5.0
WZ-III	0.16~0.25	0.205	18.0
	0.25~0.50	0.375	13.5
	0.5~1.0	0.750	8.5
	1.0~2.0	1.500	6.0
	2.0~3.0	2.500	5.0
WZ-IV	0.16~0.25	0.205	21.0
	0.25~0.50	0.375	14.5
	0.5~1.0	0.750	8.5
	1.0~2.0	1.500	5.5
	2.0~3.0	2.500	4.5

2.2 试验结果分析

2.2.1 不同粒度煤样 ΔP 的差异性分析

煤样粒度与瓦斯放散初速度拟合曲线如图1所示。由图1可以看出,随着粒度的增加,各煤样的 ΔP 均呈现先快速减小、后缓慢下降的趋势。即同一煤样在压力降低时,煤屑粒度越小,内部的气体分子的解吸、扩散速度越快。当粒度增大到某一临界值时, ΔP 趋于稳定,该值对应的粒径称为极限粒度^[3]。

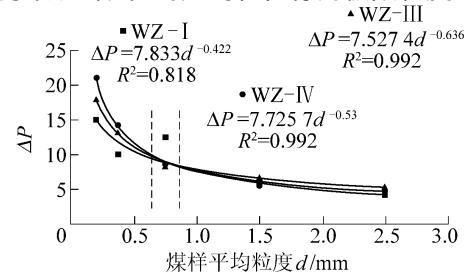


图1 煤样粒度与瓦斯放散初速度拟合曲线

Fig. 1 Fitting curves about the granularity and initial gas emission velocity for coal samples

2.2.2 不同破坏程度煤样 ΔP 的差异性分析

以往的测试结果表明,随着媒体破坏程度的增加,瓦斯放散初速度衰减的极限粒度呈减小的趋势^[3,7]。本次研究发现,3类破坏程度不同的煤样, ΔP 与 d 拟合曲线总体表现为:

1) 随着媒体破坏程度的增加,粒径对瓦斯放散初速度的负效应越显著。进一步研究发现,在小粒径区段,不同媒体结构煤样的 ΔP 与 d 拟合曲线离散型较大,大粒径段曲线离散型不明显,说明随着粒径的增加,初始瓦斯放散速度趋于一致。

2) 在粒径小于 0.75 mm 时,等粒径情况下的 ΔP 关系为: 糜棱煤>碎粒煤>原生结构煤; 当粒径大于 0.90 mm 以后,三类煤的 ΔP 对应关系发生了改变,即: 原生结构煤>碎粒煤>糜棱煤; 笔者将 ΔP 与媒体破坏程度的相关关系发生改变的对应粒径(0.75~0.90 mm)称之为转换粒径。

3) 由图 1 可以得到三类煤的粒径 d 与瓦斯放散初速度 ΔP 之间的拟合方程:

$$\Delta P = kd^n \quad (1)$$

式中: k 为与极限粒径和媒体破坏程度相关的系数, $k = \frac{\Delta P_0}{d_0^n}$ 。其中: d_0 、 ΔP_0 分别为不同破坏程度煤的极限粒径及其对应的瓦斯放散初速度; n 为与媒体破坏程度相关的特征指数,其值一般小于 0^[3]。

研究发现,3类煤的 k 相近,而 n 有明显的差异,原生结构煤、碎粒煤、糜棱煤的 n 绝对值分别为 0.422、0.530、0.636,表现为媒体破坏越严重, n 绝对值越大,放散初期的瓦斯运移速度更快。

3 煤中气体运移的动力学过程

3.1 解吸

煤是由复杂孔裂隙系统组成的多孔介质,在瓦斯抽采过程中,气体分子需要从煤基质块的孔隙中解吸,而后扩散至煤的裂隙系统中发生渗流,最终脱离媒体。以往研究表明,煤对甲烷分子的吸附属于物理吸附,具有可逆性。一般用 Langmuir 方程来表征其吸附参数,即:

$$V = \frac{abP}{1 + bP} \quad (2)$$

式中: V 为平衡压力 P 时的气体吸附量, cm^3/g ; a 为饱和吸附量, cm^3/g ; b 为吸附常数, MPa^{-1} 。

瓦斯抽采过程中,环境温度变化很小,可近似于等温条件。根据煤的吸附、解吸是可逆的过程,由式

(2) 推得解吸量的微分表达式为

$$dV = \frac{ab}{(1 + bP)^2} dP \quad (3)$$

3.2 扩散

3.2.1 扩散模式的界定

甲烷分子的扩散过程是以浓度梯度作为驱动力的定向作用,可根据扩散因子 k_n 将气体的扩散过程划分为 Knudsen 型扩散($k_n > 0.1$)、过渡型扩散($0.1 < k_n < 10$) 和 Fick 型扩散($k_n > 10$) 3 种方式, k_n 表达式为^[13~15]:

$$k_n = d_1 / \lambda \quad (4)$$

式中: d_1 为孔隙直径, nm ; λ 为分子平均自由程, nm 。

当气体分子、温度一定的情况下, λ 为定值。由此可以认为,瓦斯抽采过程中,媒体内部孔隙的孔径大小是引起气体分子扩散模式变化的主因。

3.2.2 扩散系数的计算模型

根据分子动力学理论,Knudsen 型扩散主要发生在小孔径段的孔隙中; Fick 型扩散主要发生在较大孔径的孔隙中,是由于气体分子之间的碰撞而产生的; 过渡型扩散发生的孔隙孔径介于 Knudsen 型扩散、Fick 型扩散对应的孔径之间。Knudsen 型扩散系数 D_K 、过渡型扩散系数 D_g 和 Fick 型扩散系数 D_f 计算公式见文献[16]。

地层条件下,甲烷分子的有效直径为 0.33 nm^[14] 取温度为 25 ℃, 压力为 0.1 MPa, 由分子动力学理论可算出甲烷分子的平均自由程为 85 nm, 在多孔介质中发生 Knudsen 型扩散的孔径小于 8.5 nm。

取 $d = 8.5 \text{ nm}$ 根据扩散系数的计算公式可得 D_K 、 D_f 、 D_g 分别为 1.78×10^{-6} 、 1.78×10^{-5} 、 $1.62 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 说明气体分子在多孔介质中的 Fick 型扩散最快, 过渡型扩散速度最慢。由此可以推测: 气体分子在媒体内部扩散过程中,由小孔径的孔隙到大中孔径的孔隙或裂隙中, 气体分子受到的阻力先是增加, 扩散速度下降, 而后阻力显著减小, 气体扩散速度明显增大。

3.3 渗流

瓦斯的渗流过程是以压力梯度为驱动力的定向运动,其中煤中的裂隙是渗流的主要通道,其流动规律符合达西定律,即:

$$v = -\frac{K}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (5)$$

式中: v 为渗流速度, m/s ; K 为储层绝对渗透率, μm^2 ; μ 为气体分子的动力黏度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; dp/dx 为沿气体渗流方向的压力梯度, MPa/m “-”号表

示气体分子沿着压力降低的方向发生迁移。

根据瓦斯放散初速度的测试条件(298 K, 0.1 MPa) 扩散时间 60 s, 甲烷在煤体裂隙系统的运移过程中短时间内难以形成压力差, 不足以发生显著的渗流行为。因此, 在试验过程中, 甲烷的运移速度主要受制于扩散行为, 而解吸、渗流行为的影响微弱。

4 瓦斯放散初速度的控制因素

作为反映煤体中低压气体运移快慢的特征指标^[17], 瓦斯放散初速度主要与温度、压力、水分以及固气之间的分子作用力、孔裂隙结构、气体分子运移距离等因素有关。由于测试的煤样均经过干燥处理, 且试验温度、压力条件一致。因此, 探讨各因素对瓦斯放散初速度的影响机理时, 无需考虑温度、压力和水分的影响。

4.1 孔、裂隙性

地质历史时期, 构造对煤层的控制作用表现为, 改变了煤层原始的赋存状态, 破坏了煤层结构的完

整性, 也对煤层的天然裂隙、孔隙具有较大的影响。压汞法和低温液氮吸附法对煤样的孔隙性测试结果见表 3、表 4, 进退汞曲线如图 2 所示。

由表 3、表 4 及以往研究成果^[18-20]可以看出, 原生结构煤的孔径分布非均质性强, 随着煤体破坏程度的增加, 不同孔径尺度的孔隙数量均呈现增多的趋势, 煤体容纳气体分子的能力增大。特别是破坏最为严重的糜棱煤中, 孔径小于 100 nm 以下的过渡孔、微孔的含量显著增多, 对煤的吸附/解吸、扩散性具有正负双重效应: 一方面吸附孔隙(孔径 2 nm 以下的孔隙)增多, 煤的孔隙内比表面积增大, 煤的吸附能力增强, 加大了解吸的难度; 另一方面, 扩散孔隙(孔径 2~123 nm)增加, 气体运移通道增多, 有利于气体的扩散。

由进退汞曲线(图 2)发现, 煤体破坏后, 大孔径段的孔隙形成的进退汞体积差变大, “滞后环”显著, 反映了相应孔径段的开放孔数量增多, 加之中值孔径变大, 因此气体运移的阻力减小。

表 3 压汞法对煤样孔隙性测试结果

Table 3 Test results of coal porosity under mercury intrusion porosimetry

编号	孔容/(10 ⁻⁴ cm ³ · g)						孔容比/%						
	V_1	V_2	V_{31}	V_{32}	V_3	V_4	V_t	V_1/V_t	V_2/V_t	V_{31}/V_t	V_{32}/V_t		
WZ-I	8	44	11	87	98	221	371	2.2	11.9	3.0	23.5	26.5	59.4
WZ-III	88	233	66	71	137	154	612	14.4	38.1	10.8	11.6	22.4	25.1
WZ-IV	7	501	69	106	175	221	994	1.0	50.3	6.9	10.6	17.5	22.2

注: V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 分别表示孔径为 10 000~1 000、1 000~100、100~10、10~3.1 nm 的大孔、中孔、过渡孔与微孔孔容; V_{31} 、 V_{32} 表示孔径 100~50、50~10 nm 的过渡孔 1 和过渡孔 2 的孔容; V_t 表示总孔容。

表 4 低温液氮吸附法对煤样孔隙性的测试结果

Table 4 Test results of coal porosity under liquid nitrogen adsorption method at low temperature

编号	比表面积/(m ² · g ⁻¹)		中值孔径/nm	平均孔径/nm
	BET 法	BJH 法		
WZ-I	0.0979	0.0861	4.12	8.24
WZ-III	0.3370	0.2434	9.04	18.09
WZ-IV	0.5040	0.3680	7.12	14.25

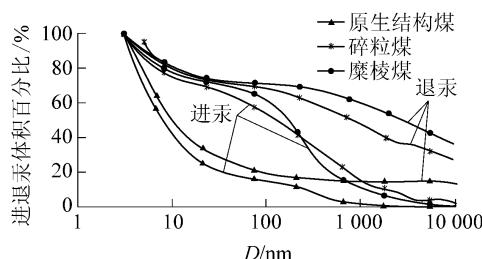


图 2 不同破坏程度煤的进退汞曲线

Fig. 2 Mercury injection and withdrawal curves of coal samples with different damage degree

4.2 粒度

煤是具有双重孔裂隙结构的固体介质, 一定粒径的煤样是由孔隙和裂隙构成的几何体。粒径越大, 孔喉、裂隙种类越多, 气体在煤中运移的路径越长, 气体扩散和运移受到孔隙喉道、裂隙形态的影响程度越大。

对于同一种破坏类型的煤, 煤屑粒径小于极限粒径的范围内, 随着粒径的增大, 气体分子运移距离变长, 扩散难度增加, 瓦斯放散初速度小; 当粒径不小于极限粒径, 粒径变化对孔隙的影响可以忽略, 由扩散动力学理论可知, 气体分子扩散速率变化不大, 表现为瓦斯放散初速度和粒径大小无关。

不同破坏程度的煤, 粒径对瓦斯放散初速度的影响主要是通过孔、裂隙性的影响权重的变化而综合作用的结果。煤屑粒径大于转换粒径时, 影响气体分子扩散速度的主要因素是裂隙系统。当颗粒粒

径较大时,原生结构煤的裂隙通道较为完整,有利于气体的运移。随着破坏程度的增加,特别是到了糜棱煤阶段,强烈的地质构造作用破坏了煤体的裂隙系统,裂隙的定向性完全遭到破坏,甲烷运移阻力变大,不利于气体的扩散;当煤样粒径小于转换粒径时,煤体的孔隙性对气体分子扩散的影响成为主因,而裂隙对甲烷放散的影响减弱。原生结构煤大孔含量明显比构造煤少,不利于气体的扩散。由于构造的破坏作用,不同孔径段的孔隙数量增多,气体运移通道增多有利于扩散,因此 ΔP 增大。

4.3 表面张力

煤对气体的吸附是发生在煤基质-气体分子之间的界面现象,煤基质的表面张力直接影响其对气体的吸附、解吸能力。表面张力可以借助于固-液接触角测定结果来计算^[13]。本次研究采用了 Antonow 规则法、Berthelot 规则法和 ZHU 法^[12],基于矿泉水、蒸馏水与煤样的接触角测试结果,计算得到了煤样的表面张力(表 5)。

表 5 不同媒体结构表面张力测定结果

Table 5 Test results about the surface tension on coal samples with different coal body structure

编号	接触角 $\theta/(^\circ)$	γ_A	γ_B	γ_Z
WZ-I-1	88.00	36.20	18.73	50.67
WZ-III-1	78.75	41.80	24.98	55.81
WZ-IV-1	76.25	43.29	26.79	57.07
WZ-I-2	91.49	35.25	17.16	50.22
WZ-III-2	84.25	39.81	21.90	54.67
WZ-IV-2	77.50	44.02	26.77	58.40

注:编号中的 1、2 分别表示采用矿泉水、蒸馏水进行的接触角测试; θ 表示煤样与液体的接触角; γ 表示固-液的表面张力, mN/m ; γ_A 、 γ_B 、 γ_Z 分别表示用 Antonow 规则法、Berthelot 规则法和 ZHU 法计算得到的表面张力, mN/m ; $\gamma_A = \frac{\gamma(\cos \theta + 1)}{2}$; $\gamma_B = \frac{\gamma(\cos \theta + 1)^2}{4}$; $\gamma_Z = \frac{\gamma(\sqrt{1 + \sin^2 \theta} + \cos \theta)}{2}$ 。

由表 5 可以看出,随着破坏程度的增加,煤样与矿泉水、蒸馏水的接触角均呈明显的减小趋势,计算得到的表面张力呈现增大的趋势,暗示煤基质与气体的分子间作用力增强,吸附势能变大,这与吸附量测试结果相一致。原因为:①构造的强烈破坏作用,使得煤的芳香层结构、分子间距减小,固-液(气)界面的分子间距变大,煤基质的表面势能大,从而引起吸附势增大;②构造的破坏作用,煤的微孔数量增多,内比表面积增大,吸附能力增强^[9,20]。

研究认为,表面张力增大对 ΔP 测试结果的影响受到煤屑粒径的影响。表现为,表面张力增加, ΔP 测试过程的充气阶段、能够吸附更多的气体,当煤屑粒径小于“转换粒径”时,脱气阶段因压降传播路径短,可形成较大的压降,解吸气量相对较大,有利于提高浓度梯度,促进甲烷的扩散;当煤屑粒径大于“转换粒径”时,由于煤体裂隙的复杂性,在试验低压条件下,压降相对较小,解吸气体较少,在复杂的裂隙通道中不足以有效提高浓度梯度,对气体的扩散作用不显著。

5 结 论

1) 研究认为瓦斯放散初速度 ΔP 可以作为表征气体分子扩散快慢的指标,对于同一煤样,随着煤屑粒径的增大,瓦斯放散初速度呈现减小的趋势,当粒径增大到某一临界值时, ΔP 趋于稳定,该临界粒径称为极限粒径。

2) 煤体破坏程度与 ΔP 的对应关系在某一粒径左右呈现相反的对应关系,该粒径称之为“转换粒径”。表现为煤屑粒径大于“转换粒径”时,随着煤体破坏程度的增加, ΔP 减小。当煤屑粒径小于“转换粒径”时,两者的对应关系发生转变。

3) 构造的破坏作用,对煤的吸附/解吸、扩散性具有正、负双重效应:一方面吸附孔隙增多,比表面积增大,煤基质的表面张力增强,吸附能力增强,不利于气体的解吸;另一方面,大孔径段的开放孔数量增多,扩散孔隙增加,有利于气体的扩散。

4) 不同破坏程度的煤,粒径对瓦斯放散初速度的影响主要是通过孔、裂隙性的影响权重的变化而综合作用的结果。煤屑粒径大于“转换粒径”时,裂隙系统对气体分子的扩散行为具有控制作用;煤屑粒径小于“转换粒径”时,孔隙成为主要影响因素。

参考文献(References):

- [1] 陈富勇,琚宜文,李小诗,等.构造煤中煤层气扩散-渗流特征及其机理[J].地学前缘,2010,17(1):195-201.
Chen Fuyong, Ju Yiwen, Li Xiaoshi, et al. Diffusion-osmosis characteristics of coalbed methane in tectonically deformed coals and their mechanism [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(1): 195-201.
- [2] 降文萍,宋孝忠,钟玲文.基于低温液氮吸附试验的不同媒体结构煤的孔隙特征及其对瓦斯突出影响[J].煤炭学报,2011,36(4):609-614.
Jiang Wenping, Song Xiaozhong, Zhong Lingwen. Research on the pore properties of different coal body structure coals and the effects

- on gasoutburst based on the low-temperature nitrogen adsorption method [J]. *Journal of China Coal Society* 2011, 36(4): 609-614.
- [3] 刘彦伟, 刘明举. 粒径对软硬煤粒瓦斯解吸扩散差异性的影响 [J]. *煤炭学报* 2015, 40(3): 579-587.
Liu Yanwei, Liu Mingju. Effect of particle size on difference of gas desorption and diffusion between soft coal and hard coal [J]. *Journal of China Coal Society* 2015, 40(3): 579-587.
- [4] 富向, 王魁军, 杨天鸿. 构造煤的瓦斯放散特征 [J]. *煤炭学报* 2008, 33(7): 775-779.
Fu Xiang, Wang Kuijun, Yang Tianhong. Gas irradiation feature of tectonic coal [J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(7): 775-779.
- [5] 张飞燕, 韩颖. 煤屑瓦斯扩散规律研究 [J]. *煤炭学报* 2013, 38(9): 1589-1596.
Zhang Feiyan, Han Ying. Research on the law of gas diffusion from drill cuttings [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(9): 1589-1596.
- [6] 魏建平, 陈永超, 温志辉. 构造煤瓦斯解吸规律研究 [J]. *煤矿安全* 2008, 39(8): 1-3.
Wei Jianping, Chen Yongchao, Wen Zhihui. Study of gas desorption laws on tectonically coal [J]. *Safety in Coal Mines* 2008, 39(8): 1-3.
- [7] 刘彦伟. 煤粒瓦斯放散规律、机理与动力学模型研究 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2011.
- [8] 贾东旭, 孙景来. 不同变质程度煤体破碎度对瓦斯放散初速度的影响 [J]. *煤炭科学技术* 2013, 41(8): 68-70.
Jia Dongxu, Sun Jinglai. Fragmentation of different metamorphic degree coal affected to initial velocity of gas emission [J]. *Coal Science and Technology* 2013, 41(8): 68-70.
- [9] 张小东, 刘浩, 刘炎昊, 等. 煤体结构差异的吸附响应及其控制机理 [J]. *地球科学: 中国地质大学学报* 2009, 34(5): 848-854.
Zhang Xiaodong, Liu Hao, Liu Yanhao, et al. Adsorption response of different coal body structures and its influence mechanism [J]. *Earth Science - Journal of China University of Geosciences*, 2009, 34(5): 848-854.
- [10] 张晓东, 桑树勋, 秦勇, 等. 不同粒径的煤样等温吸附研究 [J]. *中国矿业大学学报* 2005, 34(4): 427-432.
Zhang Xiaodong, Sang Shuxun, Qin Yong, et al. Isotherm adsorption of coal samples with different grain size [J]. *Journal of China University of Mining & Technology* 2005, 34(4): 427-432.
- [11] Yuri B Melnichenko, He Lilin, Richard Sakurovs, et al. Accessibility of pores in coal to methane and carbon dioxide [J]. *Fuel*, 2012, 91(1): 200-208.
- [12] 罗晓斌, 朱定一, 石丽敏. 基于接触角法计算固体表面张力的研究进展 [J]. *科学技术与工程* 2007, 7(19): 4997-5004.
Luo Xiaobin, Zhu Dingyi, Shi Limin. Progress in the calculation of solid surface tension based on contact angle method [J]. *Science Technology and Engineering* 2007, 7(19): 4997-5004.
- [13] 聂百胜, 何学秋, 王恩元. 瓦斯气体在煤层中的扩散机理及模式 [J]. *中国安全科学学报* 2000, 10(6): 24-28.
Nie Baisheng, He Xueqiu, Wang Enyuan. Mechanism and modes of gas diffusion in coal seams [J]. *China Safety Science Journal*, 2000, 10(6): 24-28.
- [14] 张小东, 刘炎昊, 桑树勋, 等. 高煤级煤储层条件下的气体扩散机制 [J]. *中国矿业大学学报* 2011, 40(1): 43-48.
Zhang Xiaodong, Liu Yanhao, Sang Shuxun, et al. Study of the gas diffusion mechanism in high-rank coal reservoirs [J]. *Journal of China University of Mining & Technology* 2011, 40(1): 43-48.
- [15] Yang R T. *Gas separation by adsorption processes* [M]. London: Imperial College Press, 1997: 101-140.
- [16] Yu Liu, Wang Changbin, Song Fuquan, et al. Mechanism of diffusion influences to the shale gas flow [J]. *Advances in Porous Flow* 2014, 4(1): 10-18.
- [17] 李国庆, 孟召平, 王保玉. 高煤阶煤层气扩散-渗流机理及初期排采强度数值模拟 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39(9): 1919-1926.
Li Guoqing, Meng Zhaoping, Wang Baoyu. Diffusion and seepage mechanisms of high rank coal-bed methane reservoir and its numerical simulation at early drainage rate [J]. *Journal of China Coal Society* 2014, 39(9): 1919-1926.
- [18] 张文静, 喻宜文, 卫明明, 等. 不同变质变形煤储层吸附/解吸特征及机理研究进展 [J]. *地学前缘* 2015, 22(2): 232-242.
Zhang Wenjing, Ju Yiwen, Wei Mingming, et al. Study on characteristics and mechanism of adsorption on different metamorphic-deformed coal reservoirs [J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(2): 232-242.
- [19] 张丽萍, 苏现波, 曾树荣. 煤体性质对煤吸附容量的控制作用探讨 [J]. *地质学报* 2006, 80(6): 910-915.
Zhang Liping, Su Xianbo, Zeng Shurong. Discussion on the controlling effects of coal properties on coal adsorption capacity [J]. *Acta Geologica Sinica* 2006, 80(6): 910-915.
- [20] 方爱民, 侯泉林, 喻宜文, 等. 不同层次构造活动对煤层气成藏的控制作用 [J]. *中国煤田地质* 2005, 17(4): 17-20.
Fang Aimin, Hou Quanlin, Ju Yiwen, et al. Study on control action of tectonic activity on CBM pool from various hierarchies [J]. *Coal Geology of China* 2005, 17(4): 15-20.