



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)

安全科学与工程



移动扫码阅读

安丰华,贾宏福,刘 军.煤孔隙特征对瓦斯放散初速度影响研究[J].煤炭科学技术,2021,49(9):82-87. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.09.012

AN Fenghua, JIA Hongfu, LIU Jun. Study on influence of coal pore characteristics on initial velocity of gas emission [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 82-87. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.09.012

煤孔隙特征对瓦斯放散初速度影响研究

安丰华^{1,2}, 贾宏福¹, 刘 军^{1,2}

(1.河南理工大学 安全科学与工程学院,河南 焦作 454000;2.煤炭安全生产与
清洁高效利用省部共建协同创新中心,河南 焦作 454000)

摘 要:煤的瓦斯放散特性是表征煤与瓦斯突出危险性的关键指标之一,不同变质程度煤的瓦斯放散初速度 ΔP 差异很大。为分析其内在影响机制,采用 N_2 吸附法和 CO_2 吸附法对不同变质程度煤进行孔径分析,研究了大孔、介孔和微孔孔隙比表面积、体积和平均直径对 ΔP 的影响。结果表明: ΔP 随 Langmuir 体积增大呈线性增加的趋势,而与 Langmuir 压力无关;随微孔比表面积增大, ΔP 呈幂函数增长, ΔP 与煤的大孔、介孔和微孔体积及平均孔径呈正相关;挥发分与 Langmuir 体积近似呈幂函数关系,与 ΔP 呈负指数关系;微孔比表面积大小、微孔孔隙体积、微孔平均直径是煤微观结构影响 ΔP 的主要参量。因此,随变质程度增高, ΔP 呈增大趋势,主要是受煤内微孔发育的影响。

关键词:放散初速度;孔径分析;比表面积;孔隙体积;微孔

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)09-0082-06

Study on influence of coal pore characteristics on initial velocity of gas emission

AN Fenghua^{1,2}, JIA Hongfu¹, LIU Jun^{1,2}

(1. College of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean High Efficiency Utilization, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The gas emission characteristics of coal is one of the key indicators to characterize the coal and gas outburst risk. The initial gas emission velocity ΔP of coal varies greatly with different metamorphic degrees. In order to analyze its internal influence mechanism, the N_2 adsorption method and CO_2 adsorption method were used to analyze the pore size of coal with different metamorphic degrees, and the effects of the specific surface area, volume and average diameter of macropore, mesopore and micropore pores on ΔP were studied. The results show that ΔP increases linearly with the increase of Langmuir volume, and has nothing to do with Langmuir pressure; ΔP increases with the power function of the specific surface area of the micropores, and ΔP is positively related to the volume of macropore, mesopore and micropore and the average pore diameter. Volatile matter is approximately in a power function relationship with Langmuir volume, and is in a negative exponential relationship with ΔP . The micropore specific surface area, the volume of the micropores, and the average diameter of the micropores are the main parameters affecting ΔP . Therefore, ΔP tends to increase as the degree of metamorphism increases, which is mainly affected by the development of micropores in coal.

Key words: initial velocity of release; pore size analysis; specific surface area; pore volume; micropores

0 引 言

我国煤与瓦斯突出灾害严重,且随着采深增加,

防突形势日趋严峻^[1]。煤的瓦斯放散初速度(ΔP)是突出危险性评价的重要指标之一,也是表征煤体放散瓦斯能力的一个关键物理量。

收稿日期:2021-05-25;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51504084);国家自然科学基金资助项目(51704100);河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室开放基金资助项目(WS2017B12)

作者简介:安丰华(1984—),男,山东临沂人,讲师,博士。E-mail:fenghuazm009@126.com

国内外学者对瓦斯放散规律进行了大量研究。部分学者发现 ΔP 受变质程度^[2-3]、破坏类型^[4]、孔隙结构^[5]、水分^[6]、粒径^[7-8]、温度^[9-10]等多因素影响。富向等^[11]进行了构造煤微观和宏观的数学理论模型研究,得出构造煤的瓦斯放散特征;张路路等^[12]根据气体在不同尺寸孔隙中的扩散特性,导出随孔隙尺寸和孔隙压力变化的动态扩散系数,结合孔隙的分形特性,建立考虑孔隙结构的扩散模型;李成武等^[13]研究了承压条件下含瓦斯煤解吸扩散特性,得出瓦斯解吸量、宏观/微观有效扩散系数随轴压升高呈先下降后波动上升的趋势;张慧杰等^[14]对比分析构造煤与原煤放散过程,得到中孔及大孔分布是导致构造煤和原生煤瓦斯放散特征差异的主要因素;李祥春等^[15]研究发现瓦斯在煤体孔隙中的扩散以微孔内的表面扩散为主,孔比表面积越大,表面扩散越显著。

已有学者研究粒煤解吸特性表明煤孔隙特征是决定瓦斯扩散行为的主要因素^[15-16]。因此,煤中孔隙也是影响瓦斯放散初速度的内在关键因素。而从

煤的孔隙构成出发,对瓦斯放散初速度进行的研究尚不足。基于此,笔者利用 N₂、CO₂吸附试验对不同变质程度煤样进行孔径分析,分析煤内部孔隙特征对瓦斯放散初速度的影响,对煤与瓦斯突出灾害预测测试及防治具有重要意义。

1 煤样采集与测试

1.1 基础参数测定

试验采集低、中、高 3 种变质程度 8 个煤样,分别取自安徽淮北卧龙湖煤矿、海孜煤矿、祁南煤矿、河南禹州平禹四矿、焦作九里山矿和辽宁沈阳红菱煤矿。采集完煤样后,筛取粒径 0.074~0.200 mm 煤样,依照 MT/T 1087—2008《煤的工业分析方法》进行工业分析;筛取粒径 0.20~0.25 mm 煤样,依照 AQ 1080—2008《煤的瓦斯放散初速度指标(ΔP)测定方法》进行瓦斯放散初速度测定,依照 MT/T 752—1997《煤的甲烷吸附量测定方法(高压容量法)》进行甲烷吸附试验。工业分析、放散初速度和吸附试验结果见表 1。

表 1 煤样工业分析、瓦斯放散初速度和吸附试验结果

Table 1 Proximate analysis, gas initial release velocity and adsorption test results of coal samples

煤样	取样地点	煤种	水分 $M_{ad}/\%$	灰分 $A_{ad}/\%$	挥发分 $V_{daf}/\%$	瓦斯放散初速度 ΔP	Langmuir 体积 $V_L/(mL \cdot g^{-1})$	Langmuir 压力 P_L/MPa^{-1}
HZ7	海孜 867 煤	贫煤	2.52	42.81	13.65	24	36.94	0.96
HZ9	海孜 869 煤	贫煤	1.49	20.08	11.99	28	41.05	1.00
HZ10	海孜 10 煤	贫煤	0.99	9.95	13.12	22	26.81	0.87
WLH10	卧龙湖 10 煤	无烟煤	3.62	35.56	12.70	31	56.53	0.62
PY2	平禹四矿 2 煤	瘦煤	1.16	14.90	16.91	27	33.77	1.34
HL7	红菱西 3702 工作面	瘦煤	1.01	18.68	18.31	18	27.81	0.70
QN3	祁南 34 下回风下山	气煤	1.40	16.56	40.25	6	16.11	1.12
JLS5	九里山 15051 联络巷	焦煤	3.30	14.01	12.55	22	43.66	0.73

1.2 孔径分析

研究煤孔隙特征的方法有很多,目前气体物理吸附方法和压汞法是多孔介质最常用的分析方法。其中,77 K 温度下 N₂吸附法^[17]使用最为广泛,但由于试验在低温下进行,N₂分子动能低,难以进入到微孔中,适用于煤中大中孔隙的测定。近年来,CO₂吸附法^[18]更多地用于多孔介质中微孔的测定。笔者同时采用 N₂吸附法和 CO₂吸附法对上述 8 种煤样进行孔径分析。筛选采集煤样,制备了粒径 0.20~0.25 mm 煤样,利用 AUTOSORB-1 全自动比表面和孔径分布分析仪分别进行了液氮温度(77 K)下 N₂吸附法和低温(273 K)下 CO₂吸附法,对于 N₂吸附数据,利用 Brunauer-Emmett-Teller (BET)

多分子层吸附理论计算煤的比表面积,利用 Barrett-Joyner-Halenda (BJH) 方法做孔径分布分析;对低压 CO₂吸附试验数据,采用了 DR 和 DA 方法^[19]进行了孔径分析,N₂、CO₂吸附试验孔径分析结果见表 2。

N₂吸附法 BJH 孔径分布和 CO₂吸附法 DA 孔径分布,如图 1、图 2 所示。从图 1 可以看出煤样为单峰孔径分布,主峰值为 4 nm 左右,所测煤样基本以小孔、微孔为主;图 2 中 DA 法所测煤样孔径也为单峰分布,主峰位于 1.5~2.0 nm。对比图 1、图 2 可以发现,DA 法比 BJH 法更好地揭示了微孔分布, N₂ 吸附法适用于介孔和大孔分析, CO₂ 吸附法适用于对微孔分析。结合表 1 分析图 2 中不同变质程度煤样可以发现,变质程度越高,微孔越发育。

表2 煤孔隙结构测定结果

Table 2 Measurement results of coal pore structure

煤样	N ₂ 吸附试验			CO ₂ 吸附试验		
	BET 比表面积 面积/(m ² ·g ⁻¹)	BJH 孔体积/ (mL·g ⁻¹)	BJH 法平均 孔径/nm	DR 方法微孔比表 面积/(m ² ·g ⁻¹)	DR 方法微孔 体积/(mL·g ⁻¹)	DR 方法微孔 平均孔径/nm
HZ7	3.05	0.007 7	10.33	23.46	0.008 2	1.23
HZ9	1.85	0.009 5	21.61	31.71	0.011 1	1.25
H10	0.72	0.004 0	23.87	21.48	0.007 5	1.22
WLH10	1.02	0.013 8	12.49	60.44	0.021 1	1.25
PY2	1.61	0.005 6	13.92	19.33	0.006 7	1.21
HL7	1.57	0.004 9	12.25	15.44	0.005 4	12.42
QN3	1.74	0.003 6	8.20	3.94	0.001 4	11.19
JLS5	1.25	0.007 7	13.12	47.77	0.016 7	12.12

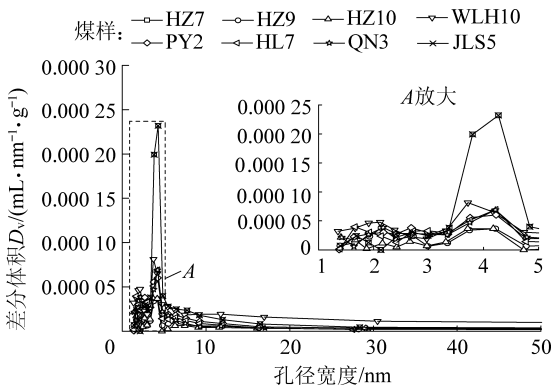


图1 BJH 孔径分布

Fig.1 BJH pore size distribution

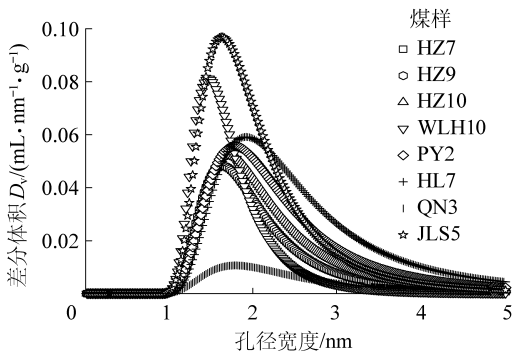
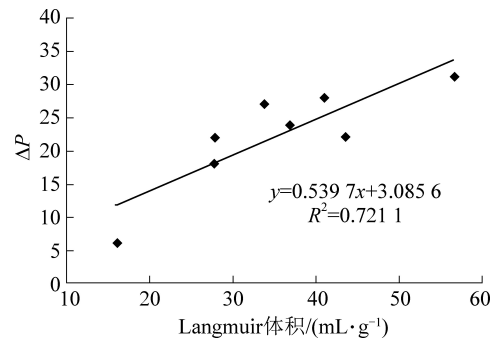
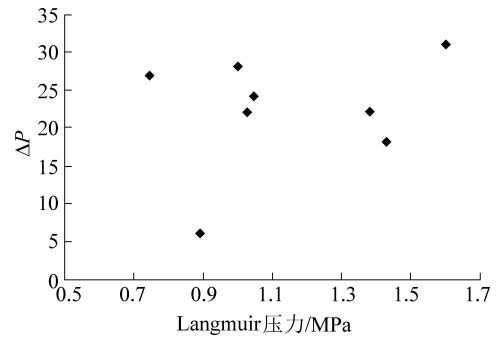


图2 DA 孔径分布

Fig.2 DA pore size distribution

图3 Langmuir 体积与 ΔP 的关系Fig.3 Relationship between Langmuir volume and ΔP 图4 Langmuir 压力与 ΔP 的关系Fig.4 Relationship between Langmuir pressure and ΔP

和 DR 法分析了煤介孔、大孔和微孔对 ΔP 的影响。 ΔP 随比表面积、孔体积、平均孔径变化如图 5、图 6、图 7 所示。

图 5a 中 ΔP 随 BET 比表面积变化离散性增强,但仍可以看出 ΔP 随 BET 比表面积增大略有略微变大趋势;从图 5b 可以看出 ΔP 随微孔比表面积呈幂函数增长,且拟合度近 0.8;由于 DR 法相比 BET 法可揭示更多微孔结构,结合 ΔP 与比表面积相关度,说明微孔比表面积对 ΔP 以正向促进作用为主,即微孔比表面积越大 ΔP 越大,但增长幅度逐渐变缓。

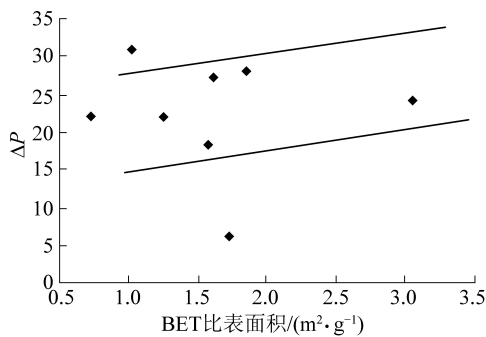
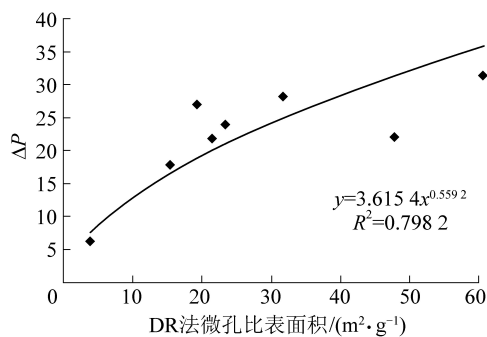
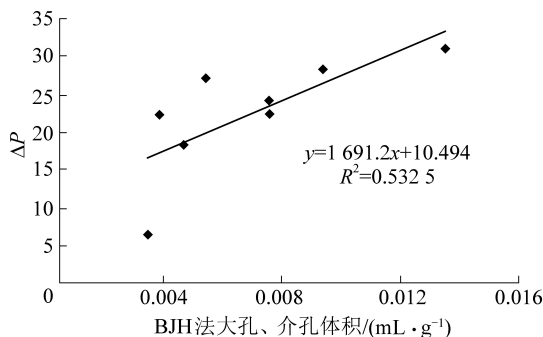
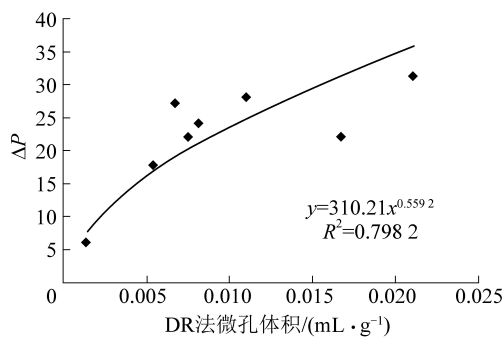
2 试验结果与分析

2.1 吸附性能与 ΔP 关系

煤的 Langmuir 体积反映了煤瓦斯吸附性强弱。笔者得到了不同变质程度煤吸附常数,发现 ΔP 随 Langmuir 体积增大呈线性递增的趋势,如图 3 所示;而 Langmuir 压力与 ΔP 无关,如图 4 所示。

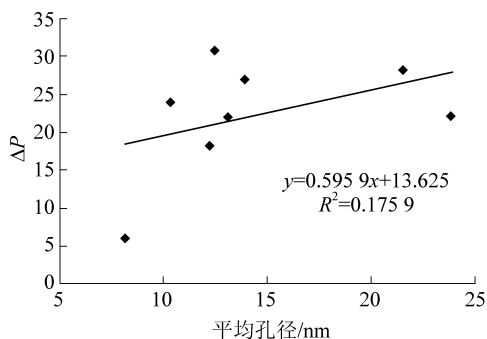
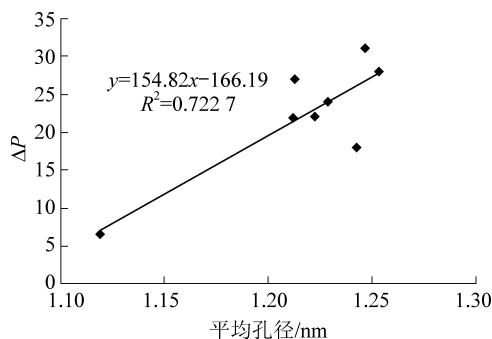
2.2 孔隙特征对 ΔP 的影响

为探求煤微观特征对 ΔP 的影响,利用 BJH 法

(a) BET比表面积与 ΔP 关系(b) DR法微孔比表面积与 ΔP 关系图 5 ΔP 随比表面积变化规律Fig.5 ΔP changes with specific surface area(a) BJH法大孔、介孔体积与 ΔP 关系(b) DR法微孔体积与 ΔP 关系图 6 ΔP 随孔隙体积变化规律Fig.6 ΔP changes with specific pore volume

由图 6 可以看出,大孔、介孔和微孔体积与 ΔP 呈正相关,大孔和介孔影响更接近于线性,而微孔影响接近于幂函数规律。相比微孔体积,大孔和介孔体积对 ΔP 的影响相对较小。由图 7 可以看出,大

孔和介孔的平均孔径与 ΔP 关系拟合度低,即对 ΔP 影响较小;而微孔平均孔径对 ΔP 的影响明显大于大孔和介孔, ΔP 随微孔平均孔径呈线性正相关,且拟合度为 0.7 左右。

(a) 大孔、介孔平均孔径与 ΔP 关系(b) 微孔平均孔径与 ΔP 关系图 7 ΔP 随平均孔径变化规律Fig.7 ΔP changes with average pore size

2.3 变质程度与 ΔP 关系

煤的变质程度是指在温度、压力等因素作用下,煤的物理、化学性质变化的程度,可由干燥无灰基挥发分来表征,挥发分越高,变质程度越低。挥发分与 Langmuir 体积、 ΔP 的关系分别如图 8、图 9 所示。图 8 表明挥发分与 Langmuir 体积近似呈幂函数关系,即煤变质程度越高,瓦斯吸附能力越强。由图 9

可以看出,挥发分与 ΔP 呈负指数关系,即 ΔP 随变质程度增高而增大。

2.4 分析讨论

由以上结果可以看出,不论从比表面积、孔隙体积还是孔隙平均直径,煤中微孔特征对 ΔP 的影响明显大于大孔和介孔。由图 3 可知 ΔP 随 Langmuir 体积增大而增大,即煤的吸附能力越强 ΔP 越大。

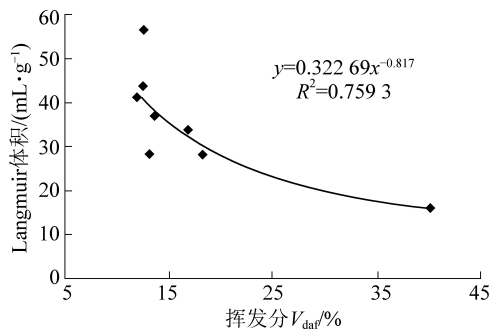
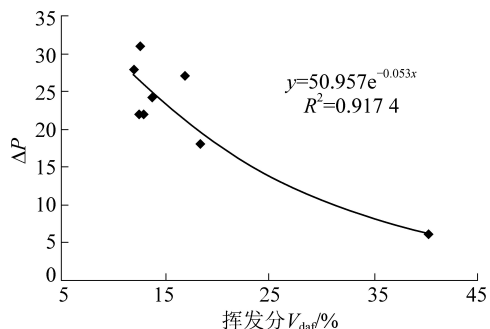


图8 挥发分与 Langmuir 体积的关系

Fig.8 Relationship between volatile matter and Langmuir volume

图9 挥发分与 ΔP 的关系Fig.9 Relationship between volatile matter and ΔP

由于甲烷在 303.15 K 温度下为超临界吸附,在低压下吸附曲线为 I 型吸附线,表现为单分子层吸附,比表面积是最大吸附量的决定因素^[20]。而煤中微孔是比表面积主要贡献者,微孔越发育,可释放瓦斯量越多, ΔP 越大(图 5)。

孔隙体积与比表面积具有相互依存的内在联系,由于煤比表面积主要受微孔控制,随孔隙体积增加微孔比表面积增量要大于大孔、介孔,结合图 5、图 6 结果,可知微孔体积对 ΔP 的影响大于大孔、介孔。

由菲克扩散定律可知,瓦斯扩散量与扩散系数直接相关,而孔径越大瓦斯扩散能力越强。因此,孔隙的平均直径影响瓦斯放散的难易程度,平均孔径越大放散越容易, ΔP 越大,反之亦然。而对于微孔富含的大量瓦斯,很显然微孔平均孔径影响着煤中大部分瓦斯的放散难易程度,因此微孔平均孔径对 ΔP 有明显的影响(图 7)。此外,介孔和大孔也对瓦斯扩散能力有一定影响,构造煤的大中孔隙发育,导致其 ΔP 通常大于原生煤。

煤的最大瓦斯吸附量主要由微孔决定,且煤变质程度越高微孔发育较好,造成其瓦斯吸附能力变强,因此,变质程度对 ΔP 影响其实质还是受微孔特征影响。

煤瓦斯放散过程中,瓦斯含量、孔隙大小共同决定瓦斯放散快慢。结合上述分析,微孔比表面积控

制可释放瓦斯量大小,平均孔径大小影响瓦斯放散难易程度。因此, ΔP 主要受煤微孔特征影响,即微孔比表面积大小、微孔孔隙体积、微孔平均直径等因素可表明 ΔP 大小。

3 结 论

1) 瓦斯放散初速度 ΔP 随 Langmuir 体积增大呈线性增大的趋势, $y = 0.539 7x + 3.085 6$, R^2 达到 0.721 1;而 ΔP 与 Langmuir 压力无关。

2) 煤微孔比表面积对 ΔP 影响占主导作用,随微孔比表面积增大 ΔP 呈幂函数增长, R^2 为 0.798 2; ΔP 与煤的大孔、介孔和微孔体积及平均孔径呈正相关。

3) 大孔和介孔体积对 ΔP 的影响相对较小, ΔP 主要受煤微孔孔隙特征影响,即微孔比表面积大小、微孔孔隙体积、微孔平均直径是煤微观结构影响 ΔP 的主要参量。

4) 不同变质程度煤对 ΔP 的影响,其实是微孔对 ΔP 的控制作用,随变质程度增高, ΔP 呈增大趋势。

参考文献 (References):

- [1] 郭怀广,朱立凯. 深部动力灾害诱发机理及影响因素研究[J]. 煤炭科学技术,2021,49(5):175-181.
GUO Huaiguang,ZHU Likai. Discussion on mechanism and influencing factors of deep dynamic disaster [J]. Coal Science and Technology,2021,49(5):175-181.
- [2] 刘 军,王兆丰. 煤变质程度对瓦斯放散初速度的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2013,32(6):745-748.
LIU Jun,WANG Zhaofeng. The effect of coal metamorphism on the initial gas emission velocity [J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2013,32(6):745-748.
- [3] 姜海纳,程远平,王 亮. 煤阶对瓦斯放散初速度及坚固性系数影响研究[J]. 煤矿安全,2014,45(12):11-13.
JIANG Haina,CHENG Yuanping,WANG Liang. Research on the influence of coal rank on the initial velocity and firmness coefficient of gas emission [J]. Safety in Coal Mines,2014,45(12):11-13.
- [4] 张慧杰,霍中刚,舒龙勇,等. 构造煤发育区 K_1 值低指标煤与瓦斯突出原因分析[J]. 煤炭科学技术,2019,47(7):82-87.
ZHANG Huijie,HUO Zhonggang,SHU Longyong,et al. Cause analysis on coal and gas outburst in low index with K_1 value of tectonic coal developed area [J]. Coal Science and Technology,2019,47(7):82-87.
- [5] 陈刘瑜,李希建,沈仲辉,等. 贵州北部突出煤的孔隙结构及分形特征研究[J]. 中国安全科学学报,2020,30(2):66-72.
CHEN Liuyu,LI Xijian,SHEN Zhonghui,et al. Pore structure and fractal characteristics of outburst coal in northern Guizhou [J]. China Safety Science Journal,2020,30(2):66-72.

- [6] 王月红,陈庆亚. 煤的微观结构对瓦斯放散特性的影响研究[J]. 华北科技学院学报,2014,11(7):1-5.
WANG Yuehong, CHEN Qingya. Effects of coal microstructure on gas emission characteristics [J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2014, 11(7): 1-5.
- [7] 潘红宇,李树刚,李志梁,等. 瓦斯放散初速度影响因素实验研究[J]. 煤矿安全,2013,44(6):15-17,21.
PAN Hongyu, LI Shugang, LI Zhiliang, *et al.* Experimental research on factors affecting the initial velocity of gas emission [J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(6): 15-17, 21.
- [8] 韩恩光,刘志伟,冉永进,等. 不同粒度煤的瓦斯解吸扩散规律实验研究[J]. 中国安全生产科学技术,2019,15(12):83-87.
HAN Enguang, LIU Zhiwei, RAN Yongjin, *et al.* Experimental research on gas desorption and diffusion law of coals with different particle sizes [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(12): 83-87.
- [9] 郭志刚. 温度和放散空间体积对等容变压法测定瓦斯放散初速度的影响分析[J]. 能源与环保,2018,40(12):42-44.
GUO Zhigang. Analysis of the influence of temperature and volume of space on the measurement of the initial velocity of gas emission by the isometric variable pressure method [J]. China Energy and Environmental Protection, 2018, 40(12): 42-44.
- [10] 李晓伟,蒋承林. 温度对瓦斯放散初速度测定的影响研究[J]. 煤矿安全,2009,40(1):1-3.
LI Xiaowei, JIANG Chenglin. Research on the influence of temperature on the measurement of the initial velocity of gas emission [J]. Safety in Coal Mines, 2009, 40(1): 1-3.
- [11] 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 emission characteristics of structural coal [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(7): 775-779.
- [12] 张路路,魏建平,温志辉,等. 基于动态扩散系数的煤粒瓦斯扩散模型[J]. 中国矿业大学学报,2020,49(1):62-68.
ZHANG Lulu, WEI Jianping, WEN Zhihui, *et al.* Coal particle gas diffusion model based on dynamic diffusion coefficient [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(1): 62-68.
- [13] 李成武,薛洪来,刘文彪. 承压煤体瓦斯解吸-扩散特性实验研究[J]. 煤炭学报,2018,43(3):717-723.
LI Chengwu, XUE Honglai, LIU Wenbiao. Experimental research on gas desorption-diffusion characteristics of pressurized coal [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(3): 717-723.
- [14] 张慧杰,张浪,汪东,等. 构造煤的瓦斯放散特征及孔隙结构微观解释[J]. 煤炭学报,2018,43(12):3404-3410.
ZHANG Huijie, ZHANG Lang, WANG Dong, *et al.* Gas emission characteristics of structural coal and microscopic interpretation of pore structure [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(12): 3404-3410.
- [15] 李祥春,李忠备,张良,等. 不同煤阶煤样孔隙结构表征及其对瓦斯解吸扩散的影响[J]. 煤炭学报,2019,44(S1):142-156.
LI Xiangchun, LI Zhongbei, ZHANG Liang, *et al.* Characterization of pore structure of coal samples with different coal ranks and their effect on gas desorption and diffusion [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S1): 142-156.
- [16] 赵伟,王亮,陈向军,等. 受限空间煤粒瓦斯吸附扩散特性及模型适配差异分析[J]. 煤炭科学技术,2020,48(9):146-151.
ZHAO Wei, WANG Liang, CHEN Xiangjun, *et al.* Analysis of gas adsorption and diffusion characteristics of coal particles in confined space and model adaptation differences [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 146-151.
- [17] NEIMARK A V, RAVIKOVITCH P I, GRUN M, *et al.* Pore size analysis of MCM-41 type adsorbents by means of nitrogen and argon adsorption [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1998, 207(1): 159-169.
- [18] LI H, CHANG Q, GAO R, *et al.* Thin-layer drying characteristics and modeling of lignite under supercritical carbon dioxide extraction and the evolution of pore structure and reactivity [J]. Fuel Processing Technology, 2018, 170: 1-12.
- [19] 杨全红,郑经堂,王茂章,等. 由密度函数理论和DR、DA方程研究PAN-ACF多段吸附机理[J]. 炭素,1998(2):22-25.
YANG Quanhong, ZHENG Jingtang, WANG Maozhang, *et al.* Study on PAN-ACF multi-stage adsorption mechanism from density function theory and DR and DA equations [J]. Carbon, 1998(2): 22-25.
- [20] 马向攀,王兆丰,任浩洋. 基于吸附势理论的低温环境煤甲烷吸附等温线预测[J]. 煤矿安全,2017,48(5):22-25.
MA Xiangpan, WANG Zhao Feng, REN Haoyang. Prediction of adsorption isotherm of coal methane in low temperature environment based on adsorption potential theory [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(5): 22-25.