文章编号：1671−251X（2023）08−0142−06 DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2022110069

不同粒径混合煤样瓦斯解吸动力特性研究

马兴莹[1]， 龚选平[1]， 成小雨[1]， 程成[1]， 李德波[2]

（1. 中煤能源研究院有限责任公司，陕西 西安 710054；
2. 中煤新集能源股份有限公司，安徽 淮南 232000）

摘要：目前关于瓦斯解吸动力特性的研究主要集中在单一粒径煤样，而对于不同粒径混合煤样瓦斯解吸动力特性的研究较少。针对该问题，利用含瓦斯煤多场耦合渗流解吸实验系统，将(0，0.25)mm、[0.25，0.5)mm、[0.5，1] mm 3 种粒径煤样按照不同比例混合，开展了不同粒径混合煤样瓦斯解吸实验，分析了不同粒径煤样占比条件下的瓦斯解吸量、扩散系数及解吸衰减系数等瓦斯解吸动力学参数变化特征。结果表明：① 不同粒径混合煤样瓦斯解吸过程中，前期影响瓦斯解吸量的主要因素是粒径大小，后期影响瓦斯解吸量的主要因素是煤样中不同粒径煤样占比大小；小粒径煤颗粒占比越大，煤样瓦斯解吸量越大。② 不同粒径混合煤样瓦斯扩散系数具有时变性，随着瓦斯解吸时间增加，瓦斯扩散系数呈衰减态，最终趋近 0；初始瓦斯扩散系数随小粒径颗粒煤占比的增加而减小；③ 小粒径颗粒煤占比越大，瓦斯解吸衰减系数越大。因此，在井下瓦斯含量测定过程中，获取的煤样中应尽可能提高大粒径颗粒煤的占比，以降低取样过程中瓦斯损失量，提高瓦斯含量测定的准确度。

关键词：瓦斯解吸；粒径；解吸量；扩散系数；解吸衰减系数

中图分类号：TD712 文献标志码：A

Study on gas desorption dynamic features of mixed coal samples with different particle sizes

MA Xingying[1], GONG Xuanping[1], CHENG Xiaoyu[1], CHENG Cheng[1], LI Debo[2]

(1. China Coal Energy Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;
2. China Coal Xinji Energy Co., Ltd., Huainan 232000, China)

Abstract: Currently, research on the dynamic features of gas desorption mainly focuses on single particle size coal samples. There is less research on the dynamic features of gas desorption of mixed coal samples with different particle sizes. To solve this problem, a multi field coupled seepage desorption experimental system is used to mix coal samples with three different particle sizes (0,0.25) mm, [0.25, 0.5) mm, and [0.5, 1] mm in different proportions. Gas desorption experiments are conducted on mixed coal samples with different particle sizes. The changes in gas desorption kinetic parameters such as gas desorption amount, diffusion coefficient, and desorption attenuation coefficient are analyzed under different particle size coal sample proportions. The results indicate the following points. ① During the gas desorption process of mixed coal samples with different particle sizes, the main factor affecting the gas desorption amount in the early stage is particle size. In the later stage, the main factor affecting the gas desorption amount is the proportion of coal samples with different particle sizes. The larger the proportion of small coal particles, the greater the amount of gas desorption in the coal sample. ② The gas diffusion coefficient of mixed coal samples with different particle sizes exhibits temporal variability. As the gas desorption time increases, the gas diffusion coefficient decreases and eventually approaches 0. The initial gas diffusion coefficient decreases with the increase of the proportion of small particle coal. ③ The larger the proportion of small particle coal, the greater the attenuation coefficient of gas desorption. Therefore, in the process

收稿日期：2022-11-17；**修回日期：**2023-08-11；**责任编辑：**盛男。
基金项目：安徽省高校自然科学研究重点资助项目（KJ2021A0459）。
作者简介：马兴莹（1995—），男，甘肃兰州人，硕士研究生，研究方向为矿井瓦斯防治，E-mail:1139741752@qq.com。
引用格式：马兴莹，龚选平，成小雨，等. 不同粒径混合煤样瓦斯解吸动力特性研究[J]. 工矿自动化，2023，49(8)：142-147.
MA Xingying, GONG Xuanping, CHENG Xiaoyu, et al. Study on gas desorption dynamic features of mixed coal samples with different particle sizes[J]. Journal of Mine Automation，2023，49(8)：142-147.

扫码移动阅读

of underground gas content measurement, the proportion of large particle coal in the coal samples obtained should be increased as much as possible to reduce gas loss during the sampling process and improve the accuracy of gas content measurement.

Key words: gas desorption; particle size; desorption amount; diffusion coefficient; desorption attenuation coefficient

0 引言

随着我国煤层开采深度的增加，煤与瓦斯突出灾害治理难度增大[1]。煤层瓦斯含量测定结果准确与否直接影响矿井防突措施的有效性，制约矿井安全生产[2-3]。我国煤层瓦斯含量测定方法主要分为间接法和直接法。利用间接法测定煤层瓦斯含量时，测定步骤较为繁琐，测定时间长，且瓦斯压力的原位测定易受井下环境影响[4]。直接法具有测定方法简单、作业工程量小、测定周期短等优点[5]，目前被广泛应用。直接法测定的瓦斯含量由损失量、现场解吸量和残余量 3 个部分组成，其中损失量受取样过程中煤样瓦斯解吸规律的影响，直接影响瓦斯含量测定结果的准确性，而瓦斯解吸规律与瓦斯解吸动力特性密切相关。

影响瓦斯解吸动力特性的因素众多[6-9]，其中煤样粒径是主要因素之一。文献[10]采用核磁共振实验和高压瓦斯等温吸附实验，测定不同型煤粒度对瓦斯吸附特性的影响，结果表明型煤平均粒度越小，吸附瓦斯总量越大，瓦斯吸附常数及瓦斯吸附饱和度均与粒度大小呈负相关关系。文献[11]在等温等压条件下开展了煤的瓦斯解吸实验，得出瓦斯解吸量与粒径呈反比，随着粒径的增大，瓦斯在煤粒内部扩散阻力增大，瓦斯扩散能力减弱。文献[12-14]研究认为无论颗粒煤粒径大小，其瓦斯解吸量均随时间延长而增加，但当颗粒煤粒径大于极限粒径后，粒径的增加对瓦斯解吸量基本无影响。文献[15]基于经典扩散模型研究发现，瓦斯扩散率随粒径减小而增加。文献[16]通过现场测试分析采落煤与放落煤的粒度分布，发现煤体粒度越小，瓦斯涌出速度越快。文献[17-18]采用动扩散系数模型研究发现，粒度毫米级煤样的单位瓦斯解吸量和瓦斯解吸率随粒度增大呈减小趋势。文献[19]通过瓦斯等温吸附解吸实验发现，增加煤样的吸附压力或降低煤样粒度，均会引起瓦斯解吸量和解吸速度的增大。

上述研究主要针对单一粒径煤样瓦斯解吸动力特性，而煤层瓦斯含量测定直接法需定点取样，受煤层赋存条件影响，所获取煤样是由不同粒径的颗粒煤组成。因此，本文采用含瓦斯煤多场耦合渗流解吸实验系统，开展不同粒径混合煤样条件下瓦斯解吸实验，分析实验过程中瓦斯解吸量、扩散系数及解吸衰减系数等瓦斯解吸动力学参数变化特征，为瓦斯含量测定过程中煤样的选择与测定结果的修正提供理论依据。

1 实验方案

1.1 实验系统

实验采用自主研发的含瓦斯煤多场耦合渗流解吸实验系统，该系统主要由真空脱气系统、恒温控制系统、吸附解吸系统和数据采集系统组成，如图 1 所示，可实现不同粒径煤样在不同气体压力条件下的吸附解吸实验。

图 1 图 1 含瓦斯煤多场耦合渗流解吸实验系统

Fig. 1 Coal containing gas multi-field coupling seepage desorption experiment system

1.2 煤样制备

煤样取自中煤华晋集团有限公司王家岭矿。煤样采集后放入密封袋并充入氦气保存，在实验室将煤样筛分成粒径为(0, 0.25) mm、[0.25, 0.5) mm、[0.5, 1] mm 的颗粒煤，并使用磨口瓶保存。为减少煤样中水分和灰分对实验结果的影响，将筛分好的煤样干燥 12 h。煤样基本物性参数见表 1。

表 1 煤样基本物性参数

Table 1 Basic physical property parameters of coal samples

破坏类型	瓦斯放散初速度/mmHg	水分/%	灰分/%	挥发分/%	吸附常数a/(mL·g^{-1})	吸附常数b/MPa^{-1}	孔隙率/%
Ⅱ, Ⅲ类	8.74	0.55	8.48	17.08	29.24	0.95	4.20

将筛分好的(0, 0.25)mm、[0.25, 0.5)mm、[0.5, 1] mm 粒径煤样按照不同比例混合，分为 6 组，见表 2。

表 2　不同粒径混合煤样

Table 2　Mixed coal samples with different particle sizes

煤样编号	粒径占比/%		
	(0, 0.25) mm	[0.25, 0.5) mm	[0.5, 1] mm
D1	0	0	100
D2	0	100	0
D3	100	0	0
H1	95	3	2
H2	80	15	5
H3	80	5	15

1.3　实验过程

将煤样罐置于 30 ℃ 恒温水浴中进行吸附解吸实验，选择瓦斯吸附平衡压力为 1.5 MPa，研究不同粒径混合煤样的瓦斯解吸规律及解吸动力学参数。实验操作过程：① 将装有煤样的煤样罐连接阀门和管路，使用氦气检查装置气密性。② 对煤样罐和管路进行真空脱气，当真空计显示为 20 Pa 以下时，认为真空脱气完成。③ 打开吸附阀门，调节减压阀压力为 1.5 MPa，使煤样罐中的煤样在该条件下吸附 24 h，当煤样罐中压力在 8 h 内保持不变时，即认为煤样已完成瓦斯吸附。④ 打开解吸阀门，进行解吸实验，记录瓦斯解吸量等数据(设定数据采集时间间隔为 5 s)。⑤ 更换煤样罐中的煤样，重复步骤①—步骤④，完成其他煤样吸附解吸实验。

1.4　实验数据处理

将实验实测的瓦斯解吸体积换算成标准状态(压力为 101.325 kPa，温度为 273.15 K)下的解吸体积[20]。

$$Q_t = \frac{273.2}{1.013\,25\times10^5\times(273.2+T_s)}(P_0-9.81H_s-P_b)Q_s \tag{1}$$

式中：Q_t 为标准状态下单位质量煤样瓦斯解吸量，cm^3/g；T_s 为解吸时水柱温度，K；P_0 为大气压力，Pa；H_s 为量筒内的水柱高度，mm；P_b 为 T_s 条件下饱和水蒸气压力，Pa；Q_s 为实验条件下测得的单位质量煤样瓦斯解吸量，cm^3/g。

单位质量煤样的极限瓦斯解吸量为

$$Q_\infty=\left\{\frac{abP}{1+bP}\exp[n(T_1-T)]-\frac{abP_0}{1+bP_0}\exp[n(T_1-T_0)]\right\}\times\frac{1}{1+0.31M_{ad}}\frac{100-A_{ad}-M_{ad}}{100} \tag{2}$$

式中：P 为瓦斯吸附平衡压力，MPa；n 为系数；T_1 为测定瓦斯吸附常数 a, b 值时的温度，K；T 为煤样实验吸附瓦斯时的温度，K；T_0 为煤样实验解吸瓦斯时的温度，K；M_{ad} 为煤样中水分含量，%；A_{ad} 为煤样中灰分含量，%。

2　实验结果及分析

2.1　不同粒径混合煤样瓦斯解吸量

不同粒径混合煤样瓦斯解吸量随时间变化曲线如图 2 所示。

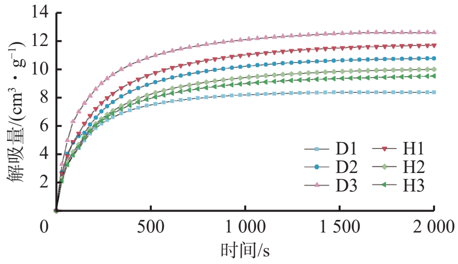

图 2　不同粒径混合煤样瓦斯解吸量随时间变化曲线

Fig. 2　Variation curves of gas desorption of mixed coal samples with different particle sizes under different time

从图 2 可得以下结论：

1) 解吸初始阶段(500 s 以内)的瓦斯解吸量占整体解吸量的 50%～70%。之后，瓦斯解吸速度逐渐放缓且解吸量曲线逐渐趋于平稳。不同粒径混合煤样瓦斯解吸量曲线在解吸前期形成交叉，说明在解吸前期影响解吸量的主要因素是煤样粒径大小。这是由于小粒径颗粒煤的瓦斯扩散路径较短且简单，同时小粒径颗粒煤的孔隙结构也更简单，解吸初始阶段更容易使吸附在煤基质中的瓦斯解吸扩散到外部环境中。

2) 解吸 2 000 s 时，煤样 H1 瓦斯解吸量为 11.68 cm^3/g，煤样 H2 瓦斯解吸量为 9.99 cm^3/g，煤样 H3 瓦斯解吸量为 9.52 cm^3/g，即在解吸后期，小粒径颗粒煤占比高的煤样瓦斯解吸量明显高于小粒径颗粒煤占比低的煤样，说明在解吸后期粒径占比对解吸量的影响起主要作用。这是由于粒径的变化改变了煤样初始状态结构，孔容也随之发生变化[21]。粒径越小，煤样的孔容越大，相同吸附压力条件下瓦斯吸附量越多，解吸时同等吸附压力条件下，解吸时间越长，瓦斯解吸量也越多。

2.2　不同粒径混合煤样瓦斯扩散系数

不同粒径混合煤样瓦斯扩散系数随时间变化曲线如图 3 所示。

从图 3 可得以下结论：

1) 不同粒径混合煤样瓦斯扩散系数均随时间增加而逐渐减小，最终趋近 0。究其原因，当煤样中瓦斯在解吸初始阶段时，气体首先通过表面孔隙扩散，

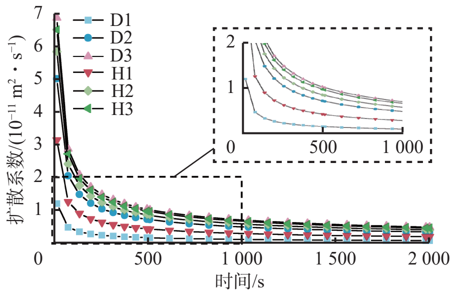

图 3　不同粒径混合煤样瓦斯扩散系数随时间变化曲线

Fig. 3　Variation curves of diffusion coefficient of mixed coal samples with different particle sizes under different time

然后通过煤基质的内部孔隙和一个较长的扩散通道，在此期间需要克服一定的阻力；当煤样中瓦斯解吸一段时间后，表面孔隙和基质内孔隙的压力不断降低，导致煤基质压缩和孔隙变形减小，因此在瓦斯扩散的后期，气体扩散阻力大大增加，瓦斯扩散系数降低并逐渐趋向于 0。

2）不同粒径混合煤样初始瓦斯扩散系数从大到小的排序为 D3＞H3＞H2＞D2＞H1＞D1，说明初始瓦斯扩散系数随小粒径颗粒煤占比的增加而减小。这是由于瓦斯扩散系数大小主要受有效扩散面积的影响，小粒径颗粒煤比大粒径颗粒煤有更大的比表面积，有效扩散面积增加导致扩散系数减小。

不同粒径混合煤样瓦斯扩散系数见表 3。可看出煤样 D3 瓦斯扩散系数衰减最明显，从实验开始至结束，煤样 D3 瓦斯扩散系数衰减了 2 个数量级，其他煤样瓦斯扩散系数衰减了 1 个数量级。

表 3　不同粒径混合煤样瓦斯扩散系数

Table 3　Diffusion coefficients of mixed coal samples with different particle sizes

时间/s	瓦斯扩散系数/($m^2 \cdot s^{-1}$)					
	D1	D2	D3	H1	H2	H3
15	6.87×10^{-11}	5.01×10^{-11}	1.20×10^{-11}	3.14×10^{-11}	5.84×10^{-11}	6.50×10^{-11}
60	3.24×10^{-11}	2.32×10^{-11}	5.41×10^{-12}	1.44×10^{-11}	2.73×10^{-11}	3.07×10^{-11}
120	2.22×10^{-11}	1.58×10^{-11}	3.63×10^{-12}	9.65×10^{-12}	1.86×10^{-11}	2.10×10^{-11}
180	1.78×10^{-11}	1.27×10^{-11}	2.88×10^{-12}	7.66×10^{-12}	1.49×10^{-11}	1.69×10^{-11}
240	1.53×10^{-11}	1.08×10^{-11}	2.44×10^{-12}	6.51×10^{-12}	1.27×10^{-11}	1.44×10^{-11}
300	1.35×10^{-11}	9.54×10^{-12}	2.14×10^{-12}	5.74×10^{-12}	1.13×10^{-11}	1.28×10^{-11}
420	1.13×10^{-11}	7.92×10^{-12}	1.77×10^{-12}	4.74×10^{-12}	9.36×10^{-12}	1.07×10^{-11}
540	9.82×10^{-12}	6.89×10^{-12}	1.53×10^{-12}	4.11×10^{-12}	8.15×10^{-12}	9.29×10^{-12}
660	8.81×10^{-12}	6.17×10^{-12}	1.36×10^{-12}	3.67×10^{-12}	7.30×10^{-12}	8.33×10^{-12}
780	8.05×10^{-12}	5.63×10^{-12}	1.24×10^{-12}	3.33×10^{-12}	6.66×10^{-12}	7.61×10^{-12}
900	7.45×10^{-12}	5.19×10^{-12}	1.14×10^{-12}	3.07×10^{-12}	6.16×10^{-12}	7.04×10^{-12}
1 200	6.37×10^{-12}	4.43×10^{-12}	9.66×10^{-13}	2.61×10^{-12}	5.26×10^{-12}	6.02×10^{-12}
1 500	5.64×10^{-12}	3.91×10^{-12}	8.50×10^{-13}	2.30×10^{-12}	4.66×10^{-12}	5.34×10^{-12}
2 000	4.83×10^{-12}	3.34×10^{-12}	7.20×10^{-13}	1.95×10^{-12}	3.97×10^{-12}	4.56×10^{-12}

2.3　不同粒径混合煤样瓦斯解吸衰减系数

不同粒径混合煤样瓦斯解吸衰减系数变化曲线如图 4 所示。

从图 4 可看出，不同粒径混合煤样衰减系数从大到小的排序为 D3＞H1＞D2＞H2＞H3＞D1，说明小粒径颗粒煤占比越大，瓦斯解吸衰减系数越大，对瓦斯损失量的影响越显著，越不利于对瓦斯含量的准确测定。这是由于随着瓦斯解吸的进行，煤样内孔隙压力不断降低，导致煤基质压缩和孔隙结构发生变形，小粒径颗粒煤内部小孔和微孔变得更小，由原来的开放孔变为封闭孔；同时煤样粒径越小，瓦斯在孔隙中的扩散长度也越小。

因此，在井下瓦斯含量测定过程中，获取的煤样

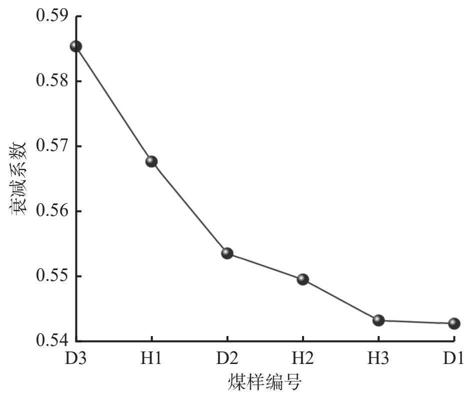

图 4　不同粒径混合煤样瓦斯解吸衰减系数变化曲线

Fig. 4　Variation curves of desorption attenuation coefficient of mixed coal samples with different particle sizes under different time

中应尽可能提高大粒径颗粒煤的占比,以降低取样过程中瓦斯损失量,提高瓦斯含量测定的准确度。

3 结论

1）不同粒径混合煤样瓦斯解吸过程中,前期影响瓦斯解吸量的主要因素是粒径大小,后期影响瓦斯解吸量的主要因素是煤样中不同粒径占比大小;小粒径煤颗粒占比越大,煤样瓦斯解吸量越大。

2）不同粒径混合煤样瓦斯扩散系数均随时间增加而逐渐减小,最终趋近 0,瓦斯扩散系数具有时变性;初始瓦斯扩散系数随小粒径颗粒煤占比的增加而减小。

3）小粒径颗粒煤占比越大,瓦斯解吸衰减系数越大。因此,在井下瓦斯含量测定过程中,获取的煤样中应尽可能提高大粒径颗粒煤的占比,以降低取样过程中瓦斯损失量,提高瓦斯含量测定的准确度。

参考文献(References):

[1] 王恩元,张国锐,张超林,等. 我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报,2022,47(1):297-322.
WANG Enyuan,ZHANG Guorui,ZHANG Chaolin,et al. Research progress and prospect on theory for coal and gas outburst control and protection in China[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(1):297-322.

[2] 袁亮,姜耀东,何学秋,等. 煤矿典型动力灾害风险精准判识及监控预警关键技术研究进展[J]. 煤炭学报,2018,43(2):306-318.
YUAN Liang,JIANG Yaodong,HE Xueqiu,et al. Research progress of precise risk accurate identification and monitoring early warning on typical dynamic disasters in coal mine[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(2):306-318.

[3] 袁亮. 煤矿典型动力灾害风险判识及监控预警技术研究进展[J]. 煤炭学报,2020,45(5):1557-1566.
YUAN Liang. Research progress on risk identification,assessment,monitoring and early warning technologies of typical dynamic hazards in coal mines[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(5):1557-1566.

[4] 龙威成. 煤层瓦斯含量测定过程气成分差异研究[J]. 安全与环境学报,2020,20(3):925-929.
LONG Weicheng. Trace and determination of the gas compositional difference in the coal seam gas content testing[J]. Journal of Safety and Environment,2020,20(3):925-929.

[5] 李成武,王义林,王其江,等. 直接法瓦斯含量测定结果准确性实验研究[J]. 煤炭学报,2020,45(1):189-196.
LI Chengwu,WANG Yilin,WANG Qijiang,et al. Experimental study on accuracy of direct gas content determination[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(1):189-196.

[6] 刘帅强,王兆丰,马树俊,等. 基于压力与温度对损失瓦斯量影响试验研究[J]. 中国安全生产科学技术,2021,17(12):92-97.
LIU Shuaiqiang,WANG Zhaofeng,MA Shujun,et al. Experimental study on influence of pressure and temperature on gas loss amount[J]. Journal of Safety Science and Technology,2021,17(12):92-97.

[7] 袁梅,王玉丽,李闯,等. 粒径−温度耦合作用下煤中瓦斯解吸规律试验研究[J]. 煤矿安全,2019,50(12):32-35,40.
YUAN Mei,WANG Yuli,LI Chuang,et al. Experimental study on coupling effect of particle size and temperature on gas desorption in coal[J]. Safety in Coal Mines,2019,50(12):32-35,40.

[8] 林海飞,韩双泽,杨二豪,等. 脉冲超声对煤的孔隙结构及瓦斯解吸特性影响的实验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2022,39(6):1235-1245.
LIN Haifei,HAN Shuangze,YANG Erhao,et al. Experimental study on the influence of pulsed ultrasound on coal pore structure and gas desorption characteristics[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2022,39(6):1235-1245.

[9] 王振洋,程远平. 构造煤与原生结构煤孔隙特征及瓦斯解吸规律试验[J]. 煤炭科学技术,2017,45(3):84-88.
WANG Zhenyang,CHENG Yuanping. Experiment on pore characteristics and gas desorption law of structural coal and primary structure coal[J]. Coal Science and Technology,2017,45(3):84-88.

[10] 李树刚,张晓宇,严敏,等. 型煤粒度对孔隙结构特征及瓦斯吸附特性的影响[J]. 矿业安全与环保,2019,46(4):8-12,16.
LI Shugang,ZHANG Xiaoyu,YAN Min,et al. Effect of coal particle size on pore structure characteristic and gas adsorption characteristic[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2019,46(4):8-12,16.

[11] 陈学习,高泽帅,金霏阳,等. 不同粒径煤的瓦斯解吸扩散特性实验研究[J]. 华北科技学院学报,2022,19(4):1-6.
CHEN Xuexi,GAO Zeshuai,JIN Feiyang,et al. Experimental studies on gas desorption and diffusion characteristics of coal with different particle sizes[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology,2022,19(4):1-6.

[12] 李修磊. 不同解吸公式对混合粒度颗粒煤瓦斯解吸的适用性研究[J]. 煤矿安全,2020,51(9):35-40.
LI Xiulei. Study on applicability of different desorption formulas to gas desorption of mixed particle coal[J]. Safety in Coal Mines,2020,51(9):35-40.

[13] 郭朋帅，高建宁，张春璞，等. 瓦斯放散初速度影响因素研究进展[J]. 煤矿安全，2020，51(7)：176-182.
GUO Pengshuai，GAO Jianning，ZHANG Chunpu，et al. Research progress and analysis on influence factors of initial velocity of gas emission[J]. Safety in Coal Mines，2020，51(7)：176-182.

[14] 袁军伟. 颗粒煤瓦斯扩散时效特性研究[D]. 北京：中国矿业大学(北京)，2014.
YUAN Junwei. Study on diffusion aging characteristics of granular coal gas[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing，2014.

[15] 李青松，李国红，王恩元，等. 基于经典扩散模型不同粒径粒煤瓦斯扩散特征实验研究[J]. 中国安全生产科学技术，2018，14(9)：44-49.
LI Qingsong，LI Guohong，WANG Enyuan，et al. Experimental study on gas diffusion characteristics of granular coal with different particle sizes based on classical diffusion model[J]. Journal of Safety Science and Technology，2018，14(9)：44-49.

[16] 成小雨，龚选平，尉瑞，等. 考虑煤体粒度的落煤瓦斯涌出预测模型研究[J]. 中国安全生产科学技术，2022，18(7)：61-67.
CHENG Xiaoyu，GONG Xuanping，YU Rui，et al. Study on prediction model of gas emission in dropping coal considering coal particle size[J]. Journal of Safety Science and Technology，2022，18(7)：61-67.

[17] 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 study on gas desorption and diffusion laws of coal with different particle sizes[J]. Journal of Safety Science and Technology，2019，15(12)：83-87.

[18] 翟盛锐. 不同粒度型煤煤样瓦斯吸附-解吸变形特征实验研究[J]. 中国安全生产科学技术，2018，14(6)：84-89.
ZHAI Shengrui. Experimental study on gas adsorption-desorption deformation characteristics of briquette coal samples with different granularity[J]. Journal of Safety Science and Technology，2018，14(6)：84-89.

[19] 周伟，袁亮，薛俊华，等. 多粒度煤样瓦斯等温吸附解吸特征试验分析：以寺河煤矿3号煤为例[J]. 工矿自动化，2018，44(1)：26-30.
ZHOU Wei，YUAN Liang，XUE Junhua，et al. Experimental analysis of isothermal adsorption and desorption characteristics of gas in coal samples with multi grain sizes: A case study on No. 3 coal in Sihe Coal Mine[J]. Industry and Mine Automation，2018，44(1)：26-30.

[20] 贾宏福. 基于浓度差测定方法的扩散系数影响因素空模型研究[D]. 焦作：河南理工大学，2021.
JIA Hongfu. Study on empty model of influencing factors of diffusion coefficient based on concentration difference measurement method[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University，2021.

[21] 杨萌萌，袁梅，徐林，等. 粒径对煤中瓦斯放散初速度影响实验研究[J]. 工矿自动化，2016，42(9)：56-59.
YANG Mengmeng，YUAN Mei，XU Lin，et al. Experimental research of influence of coal particle size on initial speed of methane diffusion[J]. Industry and Mine Automation，2016，42(9)：56-59.

(上接第 93 页)

[14] 梁天宇. 浅谈电火花加工的要素[J]. 中国高新技术企业，2015(4)：91-92.
LIANG Tianyu. Discussion on the elements of electrical discharge machining[J]. China High-Tech Enterprises，2015(4)：91-92.

[15] GB 17509—2008 汽车及挂车转向信号灯配光性能[S].
GB 17509-2008 Photometric characteristics of direction indicators for motor vehicles and their trailers[S].

[16] GB 14886—2016 道路交通信号灯设置与安装规范[S].
GB 14886-2016 Specifications for road traffic signal setting and installation[S].

[17] GA/T 743—2016 闪光警告信号灯[S].
GA/T 743-2016 Flash alarm signals[S].

[18] JB/T 12707—2016 道路监控电子闪光装置[S].
JB/T 12707-2016 Electronic flash apparatus for road monitoring[S].

[19] 曹玉超，范伟强. 基于不同深度识别算法的矿井水位标尺刻度识别性能分析与研究[J]. 煤炭学报，2019，44(11)：3529-3538.
CAO Yuchao，FAN Weiqiang. Performance analysis and research of mine water level scale recognition based on different depth recognition algorithms[J]. Journal of China Coal Society，2019，44(11)：3529-3538.

[20] 余星辰，王云泉. 基于小波包能量的煤矿瓦斯和煤尘爆炸声音识别方法[J]. 工矿自动化，2023，49(1)：131-139.
YU Xingchen，WANG Yunquan. Coal mine gas and coal dust explosion sound recognition method based on wavelet packet energy[J]. Journal of Mine Automation，2023，49(1)：131-139.

[21] 王建业. 矿井电火花图像感知方法研究[D]. 北京：中国矿业大学(北京)，2023：11-15.
WANG Jianye. Research on mine electric spark image perception method[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing，2023：11-15.