

文章编号:0253-9993(2013)01-0015-06

构造煤瓦斯解吸初期特征实验研究

李云波^{1,2}, 张玉贵¹, 张子敏¹, 姜 波²

(1. 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室(河南理工大学), 河南 焦作 454000; 2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008)

摘 要:利用自制的煤样瓦斯解吸试验装置,在恒温30℃、不同压力、不同粒度条件下,研究平顶山和鹤壁的原生结构煤和构造煤的瓦斯解吸初期速度和解吸量,分析构造煤瓦斯解吸初期的影响因素,建立构造煤瓦斯初期解吸数学模型。实验结果表明:与原生结构煤相比,构造煤瓦斯解吸初期速度更大,其初始解吸速度为1.23~4.20 mL/(g·min),是相同实验条件下原生结构煤的1.36~2.84倍,尤其在前1 min内差别较大;构造煤瓦斯解吸量是一条单调递增的幂函数曲线,0~10 min的瓦斯解吸规律具有分段性,可分为快速解吸段、缓慢解吸段和平稳解吸段,构造煤前10 min瓦斯解吸量可达1 h内解吸总量的60%。分析认为构造煤中大孔和过渡孔的发育程度决定了构造煤瓦斯初期特征;构造煤瓦斯解吸初速度随粒度的减小而增加,但是在极限粒度以下煤粒度对瓦斯初期解吸速度影响较小;瓦斯解吸初速度与吸附平衡压力呈幂指数关系;构造煤瓦斯解吸初期曲线符合文特式。

关键词:构造煤;瓦斯解吸;煤与瓦斯突出;瓦斯含量

中图分类号:TD713 **文献标志码:**A

Experimental study on gas desorption of tectonic coal at initial stage

LI Yun-bo^{1,2}, ZHANG Yu-gui¹, ZHANG Zi-min¹, JIANG Bo²

(1. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control (Henan Polytechnic University), Jiaozuo 454000, China; 2. School of Resource and Earth Science, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: A coal sample test device had been designed for testing the gas desorption velocity and capacities of Pingdingshan and Hebi tectonic coal at initial stage under 30℃, different pressures and granularity conditions. In addition, the study had analyzed the influence factors of tectonic coal gas desorption and established a mathematical model. The results show that the initial desorption velocity of tectonic coal is from 1.23 to 4.20 mL/(g·min), which is 1.36-2.84 times faster than undeformed coal under the same experimental test conditions. In particular, the differences are greater in the first one minute. Tectonic coal gas desorption law is assumed as a monotone increasing power function curve, which can be divided into three stages in the first ten minutes: fast desorption section, slow desorption section and smooth desorption section. The desorption amount of tectonic coal gas in the first 10 minutes occupies 60% of the first one hour. The experimental study results indicate that the initial characteristics of the tectonic coal are determined by the distribution proportion of macroporous and transitional pores. The desorption velocity increases with particle size, which is not obvious when it is below the limit grain size. The desorption velocity and adsorption equilibrium pressure can be described as power-exponential function relationship. The desorption curve of tectonic coal gas at initial stage satisfies the K. Winter expressions.

Key words: tectonic coal; gas desorption; coal and gas outburst; gas content

构造煤是煤层在构造作用下发生脆性破碎或韧性变形及流变迁移的产物^[1],是预测煤与瓦斯突出

收稿日期:2011-12-12 责任编辑:张晓宁

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40772099);国家科技重大专项课题资助项目(2011ZX05040-005)

作者简介:李云波(1981—),男,河南南阳人,博士研究生。E-mail:yunboli@163.com。通讯作者:张玉贵(1965—),男,安徽潜山人,教授,博士生导师。E-mail:zyg@hpu.edu.cn

的标志^[2]。构造煤的低强度、高吸附、快放散和低渗透特性是造成煤与瓦斯突出的根本原因^[3],尤其是构造煤瓦斯解吸初期的瓦斯放散能力对于煤与瓦斯突出的发生、发展有直接影响^[4-5],决定着煤与瓦斯突出的临界状态;构造煤瓦斯快速解吸能力也是煤层瓦斯含量测定不准的重要原因,严重影响了突出危险区预测和防突措施的实施效果。

前人对煤中瓦斯解吸后的解吸规律进行了深入研究:杨其銮、王佑安^[6-7]利用球状模型从理论上推导出美国矿业局直接法(USBM法),以此作为损失量计算的依据,但认为扩散定律并不适用于破坏严重的构造煤;何学秋、聂百胜等^[8-10]认为瓦斯在煤粒中的解吸模式符合菲克定律,推算出了第3类边界条件下球形煤基质瓦斯解吸的数学模型,该结论也一直被用于构造煤瓦斯解吸规律;富向等^[11]试验验证了利用扩散定律描述构造煤解吸初期规律的合理性,认为在0.74 MPa下前60 s内构造煤瓦斯解吸规律符合文特式。但由于构造煤结构的强烈非均质性,关于构造煤瓦斯解吸初期阶段的系统性研究较少,系统研究构造煤瓦斯解吸初期(煤体暴露0~3 min)规律对准确测定瓦斯含量和预测煤与瓦斯突出具有重要意义。

1 试 验

1.1 瓦斯解吸实验装置

自制解吸实验装置如图1所示。其原理与煤炭部颁布的关于煤的瓦斯吸附量测定方法(MT/T 752—1997)的实验系统基本相同,装置包括5个单元:吸附—解吸单元、温度控制单元、真空抽气单元、

高压充气单元、瓦斯解吸特征测定单元。装置实现4个功能:真空脱气功能、恒温功能、瓦斯解吸速度和解吸量测定功能。实验设计的样品罐体积约为150 cm³,装样质量大于200 g。为了提高实验精度,在瓦斯解吸特征测定单元中使用了气体质量流量计,参数如下:准确度为±1% F.S,重复精度为±0.2% F.S,响应时间为≤1 s,数据采集频率为1 s。依靠计算机辅助软件对实时数据采集保存。与现有传统的试验装置相比,新装置具有反应时间短、数据采集量大和数据精度高等特点。

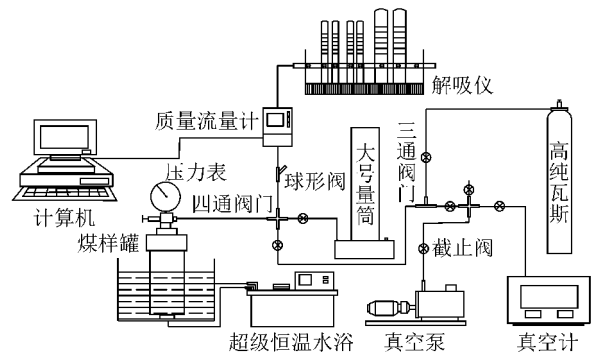


图1 瓦斯解吸实验装置

Fig. 1 Test device of gas desorption

1.2 样品与实验方法

按照煤样采取方法(GB 482—1995)采取鹤壁六矿二₁煤层和平煤八矿戊₉₋₁₀煤层的原生结构煤和构造煤两对煤样,按标准破碎、筛分成不同粒径样品,在105℃烘干2 h备用。样品煤级、破坏类型、坚固性系数、真密度、工业分析等煤质特征和瓦斯吸附解吸参数见表1。

表1 实验样品的特征参数与等温吸附试验

Table 1 Parameters and isothermal adsorption test of coal samples

煤 样	煤 层	煤 级	破坏 类型	坚固性 系数	放散初 速度	真密度/ (g·cm ⁻³)	工业分析/%			等温吸附试验	
							<i>M</i> _{ad}	<i>A</i> _{ad}	<i>V</i> _{ad}	<i>a</i> /(cm ³ ·g ⁻¹)	<i>b</i> /MPa ⁻¹
鹤壁原生煤	二 ₁	贫瘦煤	Ⅱ类	0.40	8	1.37	0.66	7.82	14.17	26.84	1.15
鹤壁构造煤	二 ₁	贫瘦煤	Ⅳ~Ⅴ类	0.13	12	1.38	0.92	8.42	13.98	31.57	1.34
平顶山原生煤	戊 ₉₋₁₀	肥煤	Ⅰ~Ⅱ类	0.80	10	1.30	1.07	15.93	25.81	11.17	0.70
平顶山构造煤	戊 ₉₋₁₀	肥煤	Ⅳ~Ⅴ类	0.20	13	1.31	1.75	14.38	26.72	13.13	0.98

注:*a*为瓦斯解吸极限吸附量;*b*为吸附常数。

利用自制煤样瓦斯解吸试验装置,研究粒度为0.25~0.50,0.50~1.00 mm的样品在设定温度为30℃、吸附平衡压力为0.5,1.0和1.5 MPa的条件下构造煤和原生结构煤的瓦斯解吸规律。称量约250 g备用样品,装入罐中压实密封,检查系统气密性,真空抽气至10 Pa,稳定24 h后,充入纯度为

99.99%的CH₄,在恒温条件下吸附到设定吸附平衡,在4 h内瓦斯压力表变化小于0.05 MPa时,认定为煤样瓦斯吸附平衡。待传感器读数稳定后,放出游离瓦斯,利用气体质量流量计和解吸仪获得瓦斯解吸速度和解吸量试验数据,测定瓦斯解吸速度的时间为3 min,测定瓦斯解吸量的时间为60 min,试验期间的

温度变化小于 1 °C,且大气压变化小于 0.133 kPa 时实验数据有效。

2 试验结果与讨论

2.1 构造煤瓦斯解吸初期速度的测定

利用设计的构造煤瓦斯解吸装置对采集的构造煤煤样进行了瓦斯解吸初速度试验。实验结果(表 2)显示:在相同试验条件下,鹤壁构造煤瓦斯初始解吸速度为 1.953 ~ 4.197 mL/(g · min),平顶山构造煤瓦斯初始解吸速度为 1.225 ~ 2.701 mL/(g · min),构造煤是原生结构煤的 1.36 ~ 2.84 倍。构造煤瓦斯解吸初速度随煤粒粒度的增大而减小,随吸附平衡压力的增加而增大,即瓦斯初始解吸速度与吸附平衡压力呈正相关,与煤粒粒度呈负相关。

表 2 瓦斯解吸初速度对比

Table 2 Contrast of initial velocities of the gas desorption

样 品	压力/ MPa	粒度/ mm	$V_1/(mL \cdot (g \cdot min)^{-1})$	$V_2/(mL \cdot (g \cdot min)^{-1})$	V_1/V_2
鹤 壁	0.5	0.25 ~ 0.50	2.305	1.699	1.36
		0.50 ~ 1.00	1.953	0.948	2.06
	1.5	0.25 ~ 0.50	4.197	2.913	1.44
		0.50 ~ 1.00	3.683	1.635	2.25
平 顶 山	0.5	0.25 ~ 0.50	1.667	0.586	2.84
		0.50 ~ 1.00	1.225	0.485	2.53
	1.5	0.25 ~ 0.50	2.701	1.564	1.73
		0.50 ~ 1.00	2.519	1.291	1.95

注: V_1 和 V_2 分别为构造煤和原生结构煤体暴露后第 1 秒瓦斯的解吸速度。

从 30 min 内的瓦斯解吸速度曲线上看,构造煤和原生结构煤主要在前 0 ~ 1 min 的差别较大(图 2)。前 10 s 平顶山构造煤的瓦斯解吸速度是原生结构煤的 1.7 ~ 2.8 倍,鹤壁构造煤是原生结构煤的 1.3 ~ 2.2 倍;在 10 ~ 60 s 内这种差距逐渐变小,1.5 min 后破坏程度不同的煤的解吸曲线趋于相近。

2.2 构造煤瓦斯解吸初期解吸量的测定

在对构造煤瓦斯解吸初速度测定的同时利用瓦斯解吸仪对瓦斯解吸量进行了同步测定。从 0 ~ 10 min 解吸曲线(图 3)上看:构造煤的瓦斯解吸曲线是一条单调递增的幂函数,在相同条件下构造煤的瓦斯解吸量要大于原生结构煤,并随着解吸时间的增加,两者间的差距逐渐增大;构造煤瓦斯解吸量随着吸附平衡压力的增加而增加,随粒度的减小而增大。构造煤瓦斯解吸初期规律具有分段性:在瓦斯初始解吸的前 2 min 解吸量变化最大,增加最快,为快速解吸段;在 2 ~ 10 min 解吸量缓慢递增,增长量逐渐平

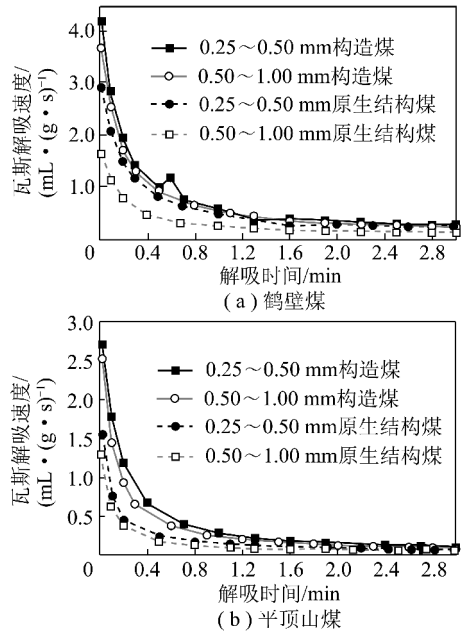


图 2 构造煤和原生结构煤瓦斯解吸初期速度的变化曲线(平衡压力:1.5 MPa)

Fig. 2 Change curves of gas desorption velocity in initial stage of tectonic and undeformed coal (pressure:1.5 MPa)

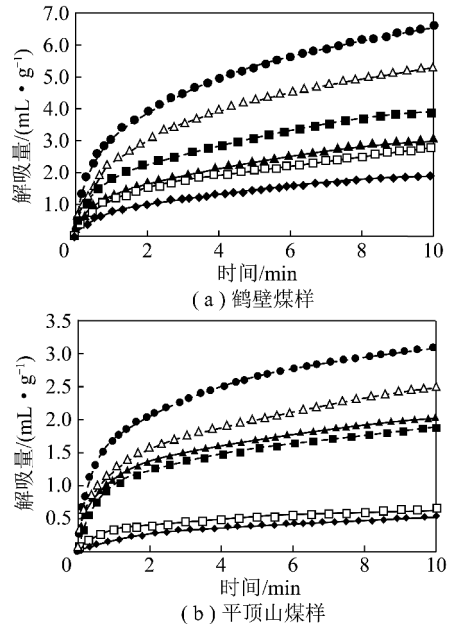


图 3 构造煤和原生结构煤瓦斯解吸初期解吸量特征曲线(粒度:0.50~1.00 mm)

Fig. 3 Initial gas desorption characteristic curves of tectonic and undeformed coal (particle size:0.50~1.00 mm)

缓,为缓慢解吸段;当解吸时间到达 10 min 后,瓦斯解吸基本趋于平稳,为平稳解吸段。从瓦斯解吸释放内能的角度来讲,前 2 min 内煤层的瓦斯解吸变化将是决定煤与瓦斯突出的关键因素。实验对比显示构

造煤 0 ~ 10 s, 0 ~ 30 s, 0 ~ 1 min, 0 ~ 3 min 和 0 ~ 10 min 所占 0 ~ 60 min 的解吸量的比例分别为

13% ~ 24%, 21% ~ 39%, 27% ~ 50%, 42% ~ 70%, 63% ~ 93% (表 3)。

表 3 构造煤不同时间段瓦斯解吸量比例

Table 3 Gas desorption proportion in different time of tectonic coal

煤 样	粒度/ mm	压力/ MPa	0 ~ 60 min		0 ~ 10 s		0 ~ 30 s		0 ~ 1 min		0 ~ 3 min		0 ~ 10 min	
			解吸量	解吸量	解吸量	比例	解吸量	比例	解吸量	比例	解吸量	比例	解吸量	比例
鹤 壁 构造煤	0.25 ~ 0.50	0.5	5.42	0.69	13	1.14	21	1.48	27	2.25	42	3.41	63	
	0.25 ~ 0.50	1.5	10.41	1.37	13	2.27	22	3.04	29	4.57	44	6.75	65	
	0.50 ~ 1.00	0.5	5.71	0.78	14	1.31	23	1.72	30	2.61	46	3.88	68	
	0.50 ~ 1.00	1.5	10.00	1.40	14	2.27	23	3.00	30	4.48	45	6.52	65	
平 顶 山 构造煤	0.25 ~ 0.50	0.5	3.08	0.68	22	1.02	33	1.27	41	1.72	56	2.26	73	
	0.25 ~ 0.50	1.5	4.78	1.01	21	1.56	33	1.98	41	2.67	56	3.52	74	
	0.50 ~ 1.00	0.5	2.53	0.50	20	0.78	31	0.98	39	1.36	54	1.82	72	
	0.50 ~ 1.00	1.5	3.28	0.79	24	1.28	39	1.63	50	2.28	70	3.06	93	

注:各时间段解吸量比例为各时间段解吸量与 60 min 解吸量之比,%;解吸量的单位为 mL。

2.3 构造煤瓦斯解吸初期特征因素分析

(1) 构造煤发达的孔隙-裂隙系统决定了瓦斯解吸初期特征要远大于原生结构煤。如图 4 所示,液氮实验表明:对平顶山构造煤而言,孔径 10 ~ 100 nm 的过渡孔孔隙体积为孔隙总体积的 50% 以上,孔径超过 100 nm 的大孔,为 75%;过渡孔孔容面积为 12%,大孔孔容面积不到 1%,而孔径小于 10 nm 微孔和过渡孔占了 80% 以上。煤中微孔 (<10 nm) 是煤层瓦斯储存的主要空间,决定了构造煤瓦斯解吸衰减速度,而大孔 (>100 nm) 和过渡孔 (10 ~ 100 nm) 提供了良好的瓦斯解吸通道,使得构造煤中的瓦斯在解吸初期能够以较大的速度迅速释放,决定了构造煤瓦斯初期的解吸特性。

(2) 煤屑瓦斯解吸存在极限粒度,在小于极限粒度时瓦斯解吸强度、衰减系数随着煤样粒度的增大而衰减减小,当构造煤粒度大于极限粒度 (6 mm) 时,瓦斯解吸强度、衰减系数随着煤样粒度的增大,衰减的程度不再明显^[12-14]。与前人研究结论不同的是:不同构造煤的极限粒度不局限于一定值,而是随煤体破坏程度的不同而不同。在极限粒度以下,粒度与解吸初速度和衰减速度成反比,在瓦斯解吸初期阶段,煤粒粒度对原生结构煤解吸特性的影响要大于构造煤。表 2 表明粒度为 0.25 ~ 0.50 mm 的鹤壁原生结构煤瓦斯解吸初速度是粒度为 0.50 ~ 1.00 mm 的瓦斯解吸初速度的 1.5 ~ 1.8 倍,而构造煤粒度的影响比较小,为 1.1 ~ 1.2 倍;粒度为 0.25 ~ 0.50 mm 的平顶山原生结构煤瓦斯解吸初速度是粒度为 0.50 ~ 1.00 mm 的瓦斯解吸初速度的 1.2 ~ 1.5 倍,而构造煤粒度的影响比较小,为 1.0 ~ 1.4 倍。因此,极限粒度以下的构造煤样粒度不是影响瓦斯初期解吸规律的主要因素,

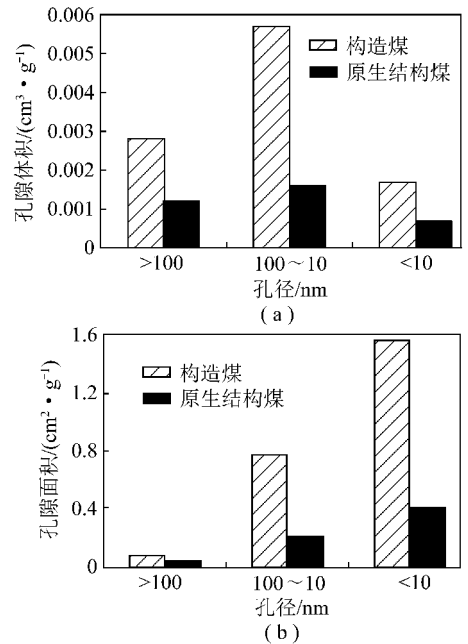


图 4 平顶山煤样液氮法孔隙体积、孔容面积分布

Fig. 4 Pore volume and pore area proportion of Pingdingshan coalmine tectonic and undeformed coal

粒度越小,对瓦斯解吸初速度的影响越小。

(3) 瓦斯吸附平衡压力越大,初期的瓦斯速度和瓦斯量越大。随着吸附平衡压力的增加,煤单位面积的吸附量增大,煤内吸附瓦斯改变了煤粒的受力状态^[15],增加了煤体快速解吸瓦斯的能力。以粒度为 0.50 ~ 1.00 mm 的平顶山构造煤为例,在 1.5 MPa 时的瓦斯解吸初速度为 2.519 mL/(g·min),为 0.5 MPa 时的 2.1 倍,是相同条件下原生结构煤的 2 倍。吸附平衡压力 P 与瓦斯解吸速度 V 符合幂指数关系,即 $V = BP^k$ (表 4) 其中, B 为回归系数; k 为拟合系数。

表 4 吸附平衡压力经验公式对比

Table 4 Contrast of the empirical formulas of adsorption balance pressure

实验	煤样	粒度/mm	瓦斯解吸初期速度/(mL·(g·min) ⁻¹)			V=BP ^k				V'=nP+C			
			0.5 MPa	1.0 MPa	1.5 MPa	B	K	推算值	误差	n	C	推算值	误差
平顶山	构造煤	0.25~0.50	1.667	2.057	2.701	2.19	0.42	2.60	-0.10	0.780	1.28	2.45	-0.25
		0.50~1.00	1.225	1.989	2.519	1.95	0.66	2.55	0.03	1.528	0.46	2.75	0.23

注:C,K和n为回归系数,无量纲;V'为构造煤瓦斯解吸速度,mL/(g·min)。

2.4 构造煤瓦斯解吸初期解吸模型

在瓦斯解吸初期,煤的瓦斯解吸是扩散控制的过程,其规律可以用菲克律来表示^[8,16-17]。美国的USBM认为在煤体解吸初期符合巴雷尔式,而在新颁布的《煤层瓦斯含量井下直接测定方法》(GB/T 23250—2009)则认为瓦斯初期解吸规律符合√t法(即巴雷尔式)和幂函数法(即乌斯基诺夫式,简称乌

式),但对于构造煤瓦斯解吸初期特征却没有明确的解吸模型。以测定的鹤壁、平顶山构造煤(粒度为0.25~0.50 mm,P=0.5 MPa)实验数据,对不同数学模型的适应性进行验证。拟合的时间段为0~1,0~2,0~3和0~10 min,拟合方法采用最小二乘法(图5),其中,Q_t为t时刻的瓦斯解吸量;Q_∞为极限解吸量,mL。

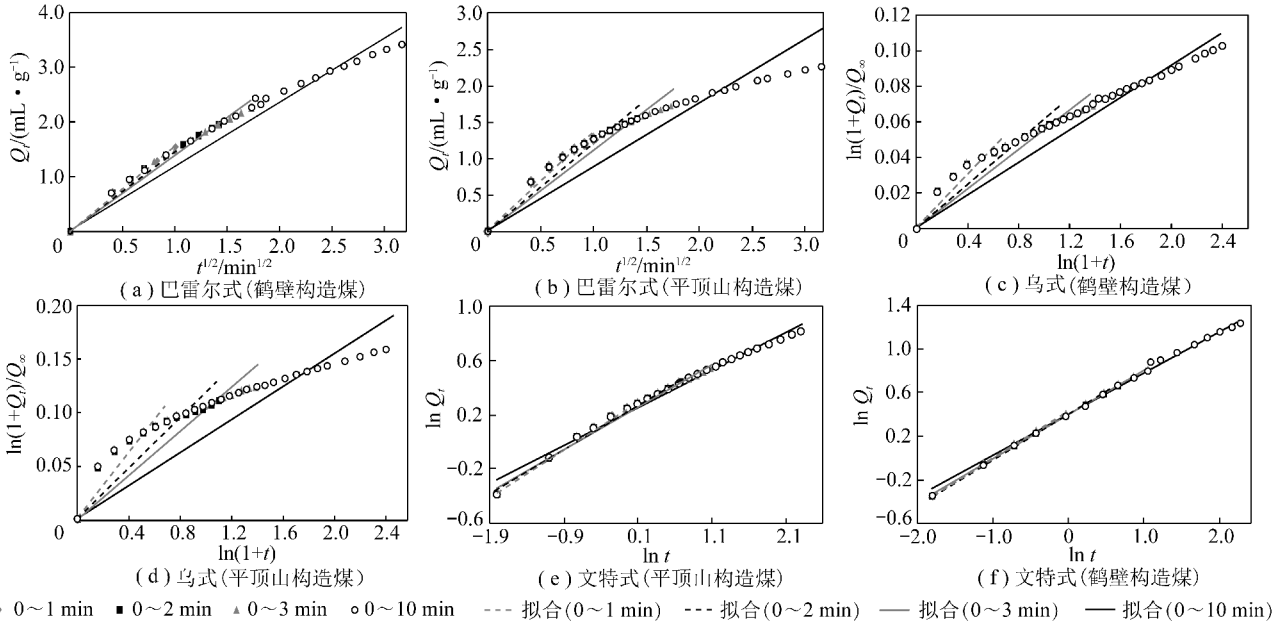


图 5 构造煤瓦斯解吸初期解吸模式拟合

Fig. 5 Fitting curves of gas desorption mode in initial stage of tectonic coal

数据拟合效果显示巴雷尔式和乌式都存在随解吸时间的延长,误差增大的特点。图5(a),(b)显示巴雷尔式随瓦斯吸附平衡压力的增加和煤样粒度的增大,其相关性随之减少;但对原生结构煤的拟合效果要好于构造煤,说明对于破坏严重的构造煤用巴雷尔式表述并不合适。图5(c),(d)显示乌式并不适宜描述构造煤瓦斯解吸初期规律,尤其是对于平顶山构造煤解吸初期规律的表达,其相关性甚至不足0.5,已经严重失实。因此,上述两式并不适合描述构造煤解吸初期特征。

图5(e),(f)显示文特式与构造煤的瓦斯解吸初期规律拟合关系较好。构造煤瓦斯解吸初期的解吸量Q'与时间t呈现幂指数关系,符合Q'=Dt^α的形式

(α,D为拟合系数;t为解吸时间,min)。在双对数坐标下,解吸量与解吸时间呈标准的线性关系:ln Q'=α ln t+D,这与瓦斯解吸速度曲线的表述是一致的。数据拟合的结果对于在其他实验条件下的构造煤也同样适用,因此对于破坏强烈的构造煤解吸初期规律应用文特式表述更为确切。

3 结 论

(1)在相同试验条件下,构造煤比原生结构煤的瓦斯解吸初速度大。构造煤为1.225~4.197 mL/(g·min),原生结构煤为0.485~3.683 mL/(g·min),前者是后者的1.36~2.84倍,尤其是前1 min内,两者差别大。构造煤瓦斯解吸初速度随煤

粒粒度、吸附平衡压力的变化而变化,瓦斯解吸初始速度与吸附平衡压力呈正相关,与煤粒粒度呈负相关。

(2)构造煤瓦斯解吸初期解吸曲线是一条单调递增的幂函数,在相同条件下构造煤的瓦斯解吸量要大于原生结构煤,并随着解吸时间的增加,两者间的差距明显增大。在瓦斯解吸初期,构造煤的瓦斯解吸曲线具有分段性,依次分为快速解吸段、缓慢解吸段和平稳解吸段。实验对比显示:构造煤0~10 s,0~30 s,0~1 min,0~3 min和0~10 min所占0~60 min解吸量的比例分别为13%~24%,21%~39%,27%~50%,42%~70%和63%~93%。

(3)构造煤结构控制着其快速解吸的特性。发达的孔隙-裂隙系统决定了瓦斯解吸初期特征要远大于原生结构煤,极限粒度以下的煤样粒度不是影响瓦斯初期解吸规律的主要因素,吸附平衡压力与瓦斯解吸速度之间符合良好的幂指数关系。

(4)巴雷尔式和乌斯基诺夫式并不适合描述构造煤解吸初期特性,通过数据拟合分析发现,文特式能较好地表达构造煤的瓦斯解吸初期规律,因而对于破坏强烈的构造煤解吸初期规律应用文特式表述更为准确。

参考文献:

- [1] 张子敏,张玉贵. 瓦斯地质规律与瓦斯预测[M]. 北京:煤炭工业出版社,2005.
Zhang Zimin, Zhang Yugu. Gas geology regularity and gas prediction [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2005.
- [2] 彭立世. 用地质观点进行瓦斯突出预测[J]. 煤矿安全, 1985, 16(12): 6-11.
Peng Lishi. Coal-gas outburst forecast based on geological theory [J]. Safety in Coal Mines, 1985, 16(12): 6-11.
- [3] 张玉贵. 构造煤演化与力化学作用[D]. 太原: 太原理工大学, 2006.
Zhang Yugu. Evolution of deformed coal and process of coal mechanochemistry[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2006.
- [4] 郝吉生,袁崇孚,张子戌. 构造煤及其对煤与瓦斯突出的控制作用[J]. 焦作工学院学报(自然科学版), 2000, 19(6): 403-406.
Hao Jisheng, Yuan Chongfu, Zhang Zixu. The tectonic coal and its effects on coal and gas outburst [J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology (Natural Science), 2000, 19(6): 403-406.
- [5] 蒋承林,俞启香. 煤与瓦斯突出过程中能量耗散规律的研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(2): 173-178.
Jiang Chenglin, Yu Qixiang. Rules of energy dissipation in coal and gas outburst [J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(2): 173-178.
- [6] 杨其鑫,王佑安. 煤屑瓦斯扩散理论及其应用[J]. 煤炭学报, 1986(3): 87-94.
Yang Qiluan, Wang Youan. Theory of methane diffusion from coal cuttings and its application [J]. Journal of China Coal Society, 1986(3): 87-94.
- [7] 杨其鑫,王佑安. 瓦斯球向流动的数学模拟[J]. 中国矿业学院学报, 1988(3): 55-61.
Yang Qiluan, Wang Youan. Mathematical simulation of the radial methane flow in spherical coal grains [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1988(3): 55-61.
- [8] 何学秋,聂百胜. 孔隙气体在煤层中扩散的机理[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(1): 1-4.
He Xueqiu, Nie Baisheng. Diffusion mechanism of porous gases in coal seams [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, 30(1): 1-4.
- [9] 聂百胜,郭勇义,吴世跃,等. 煤粒瓦斯扩散的理论模型及其解析解[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(1): 19-22.
Nie Baisheng, Guo Yongyi, Wu Shiyue, et al. Theoretical model of gas diffusion through coal particles and its analytical solution [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, 30(1): 19-22.
- [10] 吴世跃,郭勇义. 煤粒瓦斯扩散规律与突出预测指标的研究[J]. 太原理工大学学报, 1998, 29(2): 138-141.
Wu Shiyue, Guo Yongyi. Study on the coal particle in methane diffusion and coal and methane outburst prediction index [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1998, 29(2): 138-141.
- [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 irradiation feature of tectonic coal [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(7): 775-779.
- [12] Barrer R M. Diffusion in and through solid [M]. England: Cambridge University Press, 1973: 19-51.
- [13] Winter K, Janas H. Gas emission characteristics of coal and methods of determining the desorbable gas content by means of desorbometers [A]. XIV International Conference of Coal Mine Safety Research [C]. 1996.
- [14] Bolt B A. Diffusion of carbon dioxide from coal [J]. Fuel, 1959, 38: 28-31.
- [15] 姜波,秦勇. 变形煤的结构演化机理及其地质意义 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998: 5-15.
Jiang Bo, Qin Yong. Structure evolution of deformed coal and its significance of structure geology [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1998: 5-15.
- [16] Mastalerza M, Gluskoter H, Uupp J. Carbon dioxide and methane sorption in high volatile bituminous coals from Indiana [J]. International Journal of Coal Geology, 2004, 60: 43-55.
- [17] 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(8): 1-3.
Wei Jianping, Chen Yongchao, Wen Zhihui. Study of gas desorption laws of tectonically coal [J]. Safety in Coal Mines, 2008(8): 1-3.