

文章编号: 1000-582X(2012)07-114-05

含瓦斯煤体渗透率与煤体结构关系的实验

吕闰生^{1,2}, 彭苏萍¹, 徐延勇¹

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 2. 河南理工大学资源环境学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 为了研究不同结构煤的渗透率差异, 以焦作煤田为例, 对 I~V 类结构煤进行了渗透率测试, 结果表明: 渗透率与不同煤体结构关系曲线近似呈正态分布, 先是呈级数增大, 随后呈级数减小, II 类渗透率最大, V 类煤体渗透率最小, I、IV、V 类煤体渗透率差别不大。引入渗透率变异系数、渗透率级差概念, 评价得出二₁ 煤层的非均质性、各向异性较强, 而单个类型煤体均质性较好。对饱含瓦斯煤体瓦斯分布的分区分带、矿井瓦斯涌出、煤与瓦斯突出作用机理进行了解释, 渗透率变化是孔裂隙的发展过程, 是控制瓦斯分布、涌出、煤与瓦斯突出的主控因素。

关键词: 煤体结构; 渗透率; 变异系数; 渗透率级差; 非均质

中图分类号: O357.3

文献标志码: A

Experiments on the relationship between permeability of gas-bearing coal and coal body structure

LÜ Runsheng^{1,2}, PENG Suping¹, XU Yanyong¹

(1. State Key Laboratory Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, P. R. China; 2. Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, P. R. China)

Abstract: Permeability tests of type I to V coal from Jiaozuo coalfield are carried out to study the gas permeability difference of coals with different structures. The experimental results show that the relation curve of permeability to different coal structures show normal distribution, and the value of permeability first increases quickly and then decreases sharply. Type II coal's permeability is the maximum and that of type V is the minimum. There is little difference of perm abilities of type I, type IV and type V. The concepts of variation coefficient of permeability and permeability ratio are brought in to evaluate the heterogeneity and anisotropy of No. 2₁ coal seam. It found both of them are high, however, the homogeneity of a single type structure coal is good. Mechanisms of gas sub region and banding, gas emission, gas outburst of gas-bearing coal are explained by the permeability differences. Permeability changes are the direct result of pore-fracture development and the major controlling factor of gas distribution, gas emission and coal and gas outburst.

Key words: coal structure; permeability; variation coefficient of permeability; permeability ratio; heterogeneity

收稿日期: 2012-02-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41172141); 国家自然科学基金资助项目(41072153); 河南省生物遗迹与成矿过程重点实验室开放基金资助项目(OTMP1006)

作者简介: 吕闰生(1974-), 男, 中国矿业大学(北京)博士研究生, 主要从事瓦斯地质和瓦斯防治教学与科研工作, (E-mail)lvrunsheng@126.com。

含瓦斯煤体渗透率是反映瓦斯在煤层中渗流难易程度的重要指标,是研究煤层瓦斯流固动态耦合的重要物性参数。其值与煤层所处的地球物理场环境息息相关,而作为地球物理场的 3 要素(地应力、温度和瓦斯压力)均随埋深增加和地质构造的变化而变化,致使含瓦斯煤渗透率亦随之动态变化。在常规情况下,有效应力、基质收缩等在煤层绝对渗透率诸影响因素中占据主导地位^[1-3]。煤体在外应力作用下,骨架体积将受压收缩,内部裂隙或孔隙体积将明显减小,孔隙率不仅是衡量煤体孔隙结构发育程度的关键指标,也是决定煤的吸附-解吸、渗透率和强度性能的重要因素,尤其是有效孔隙率对煤的渗透性影响更大^[4-6]。煤岩体的渗透率对煤岩体和瓦斯所构成耦合系统的稳定性起着不可忽视的作用,而在外力作用下其内部裂隙的发生、发展过程又对瓦斯的渗流过程起着控制作用^[7]。煤层渗透率的非均质性、各向异性是煤层在沉积、成岩等地质作用下的综合结果^[8]。煤体结构是煤储层在构造应力作用下变形的产物,是煤储层渗透率的间接反应,煤体结构差异是决定煤体在采动应力场作用下瓦斯涌出快慢程度的主要因素,煤体渗透性的各向异性、非均质性、瓦斯压力、温度、孔隙度差异使煤层真实渗透率测试结果不能真实反映^[9-11]。邵先杰^[12]、李俊玲^[13]提出采用储层渗透率差异系数来表征非均质煤体的渗透性。郭红玉等^[14]采用 GSI(岩体强度指标)来对煤体结构进行划分,利用其 GSI 指标与实验室测试的煤体渗透率进行分析来预测煤层的渗透率进行了有益尝试。前人对煤层渗透率研究是以地面煤层气开发过程中煤层没有受到采动应力影响进行评价,从煤层压裂及瓦斯排采角度对瓦斯流动难易程度定量分析,而矿井开采中应力集中、开采卸压以及煤与瓦斯突出指标参数与渗透率的影响很少进行研究。

在借鉴已有研究成果基础上,笔者以焦作煤田为研究区,结合煤层产出状态,分别采集二₁煤层 I~V 类结构煤体进行渗透率测试,引入渗透率参差系数、渗透率级差、煤的坚固性系数 f 等指标,分析渗透率变化与煤体结构变化关系,评价煤层的非均质性,揭示瓦斯赋存差异、煤与瓦斯突出机理,对矿井瓦斯防治提供理论借鉴。

1 研究区概况

焦作煤田位于太行山东南麓,整体形态为走向 NE、倾向 SE 单斜构造。主要含煤建造为石炭-二叠系含煤地层,共计含煤 13 层,其中,只有二₁煤是区

内主要可采煤层,区内广泛发育自燕山运动以来所生成的各种构造形迹,主要以断裂构造为主,褶皱构造表现微弱,岩浆活动较弱。区内二₁煤层煤体结构分布呈规律性的变化。九里山断层以南,可分为 3 层:层上部一层大约 0.3~1.0 m 的松软煤带(糜棱煤),中部为 3.0~4.5 m 的破坏程度微弱的块状煤带(原生结构煤和碎裂煤),接近煤层底板发育一层 0.25~1.5 m 的松软煤层带(糜棱煤);九里山断层以北、北碑断层以东的方庄井田多为块状(原生结构煤、碎裂煤)、次为粉粒状(碎粒煤、糜棱煤)的煤层;九里山断层以北、北碑断层以西以及煤田西部的各井田煤层顶部普遍发育一层 0.5~2 m 的松软煤层(糜棱煤),下部为块状煤层带(原生结构煤)。

2 采样与实验

2.1 采样

煤样按《防治煤与瓦斯突出规定》中煤体结构 5 类划分法采样,在煤层掘进和回采新鲜工作面采集可对比的 I~V 类煤样 26 个,其中 I 类煤样 5 个,II 类煤样 6 个,III 类煤样 4 个,IV 类煤样 5 个,V 类糜棱煤样 6 个,水分含量 2.60%~4.39%,灰分 9.41%~20.40%。

2.2 实验

渗透率测试实验基于达西稳定流法测定煤样渗透率,在外界条件一定的情况下,通过试样气体压力和气体流量来计算试样的渗透率,煤样加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 标准圆柱型煤芯试件,I 类和 II 类煤体直接钻成要求尺寸,III~V 类煤由于强度低、颗粒碎无法直接钻取,取 I、II 类煤芯同质量的煤样,在成型模具上加压成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 试样。渗透率测试系统如图 1 所示,主要包括密封圈、实验机压头、高压气源、气体流量计等几部分。

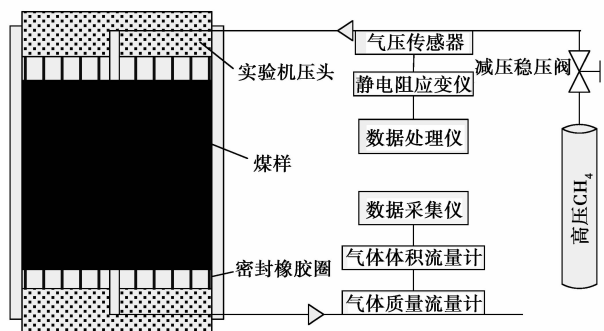


图 1 煤层瓦斯渗透率测试装置

3 实验结果分析

测试结果如表 1 所示。原生结构煤体渗透率级差 6.44, II、IV、V 类煤体渗透率极差为 3.11~3.58, III 类煤为 2.54, 渗透率级差越大, 煤体的非均质性越强。结果表明焦作矿区二₁ 煤层原生结构煤

分层非均质、各向异性最强; III 类煤体(强烈破坏煤)渗透率级差最小, 均质性最好; 煤层整体渗透率变异系数(变异系数越大, 渗透率变化越大)为 1.63, 说明其非均质性很强, 主要原因是在二₁ 煤层的不同部位受构造挤压、揉搓控制, 发育不同类型煤体结构。

表 1 不同煤体结构渗透率

煤体结构	煤样编号	渗透率 $k/\mu\text{m}^2$	f	渗透率级差 K_V	渗透率变异系数 V_c	煤层渗透率变异系数 V
I	I-1	1.280×10^{-5}	1.00	6.44	0.73	1.63
	I-2	3.560×10^{-5}	0.93			
	I-3	6.250×10^{-5}	1.19			
	I-4	8.240×10^{-5}	1.02			
	I-5	1.490×10^{-5}	0.81			
II	II-1	0.490	0.85	3.11	0.51	1.63
	II-2	0.936×10^{-3}	0.59			
	II-3	0.823×10^{-3}	0.74			
	II-4	3.120×10^{-3}	0.68			
	II-5	3.010×10^{-3}	0.78			
	II-6	4.350×10^{-3}	0.80			
III	III-1	0.836×10^{-3}	0.32	2.54	0.43	1.63
	III-2	1.360×10^{-3}	0.45			
	III-4	2.120×10^{-3}	0.59			
	III-5	0.980×10^{-3}	0.46			
	IV-1	2.500×10^{-5}	0.32			
IV	IV-2	3.100×10^{-5}	0.35	3.28	0.52	1.63
	IV-3	3.600×10^{-5}	0.41			
	IV-4	8.200×10^{-5}	0.46			
	IV-5	4.500×10^{-5}	0.44			
	V-1	2.400×10^{-6}	0.09			
V	V-2	3.200×10^{-6}	0.15	3.58	0.47	1.63
	V-3	4.600×10^{-6}	0.22			
	V-4	5.200×10^{-6}	0.24			
	V-5	3.700×10^{-6}	0.18			
	V-6	8.600×10^{-6}	0.16			

说明: f 为煤的坚固性系数。

从图 2 看出随着煤体结构由简单到复杂, 二₁ 煤的渗透率由极低值先迅速增大再迅速减小, 呈近似正态分布。渗透率在 II 类煤体及 II 类向 III 类煤体过渡阶段, 渗透率出现了级数增大, 到 IV、V 类煤体渗透率急速下降接近于 $0.1 \times 10^{-5} \mu\text{m}^2$ 。在原岩应

力状态下, 原生结构煤体的渗透率大小主要取决于孔隙度大小及裂隙发育程度。受实验条件限制, 本次对于原生结构煤体的试样没有选取包含裂隙煤样, 因此测试结果仅能反映原始无裂隙煤体渗透率。

不同煤体结构类型煤的 f 值具有一定的值域,

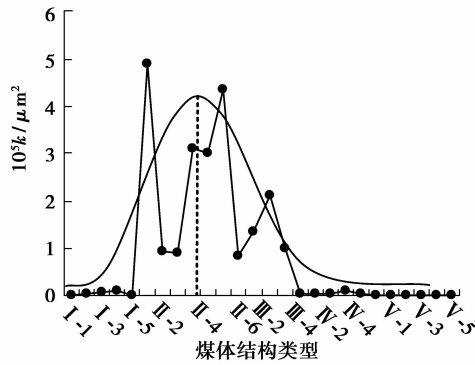


图 2 煤体结构与渗透率的关系曲线

并有相对密集的值域区间,即常见值域。煤的坚固性系数 f 值可以作为煤体结构分类的一个指标^[15]。对照表 1,渗透率与煤体结构的定量变化可以用渗透率与 f 值的函数关系来表示:

$$k = 3.3926 \times e^{(-25.7702 \times (f-0.75)^2)} + 0.0102. \quad (1)$$

式中: k 为渗透率, μm^2 ; f 为煤体坚固性系数;模型统计量 F 值为 11.03, $p=0.0001$,达极显著水平,模型相关系数 $R=0.78$,说明渗透率 k 和 f 值的相关性较好, f 值可以用来表征渗透率。煤体结构由简单变复杂,渗透率先增大后减小呈指数非线性对称变化。

根据张国华等^[7]的研究,饱和瓦斯煤体在原岩应力状态下,煤体渗透率与应力的关系符合图 3 特征。原始应力条件下,煤体渗透率随着应力增加, CH_4 气体受压缩,孔隙体积变小,渗透率出现下降,对外表现为随应力增加渗透率减小;继续增大应力,孔隙中 CH_4 气体压力增大,瓦斯劈裂作用下,裂隙贯通,煤体渗透性增大。

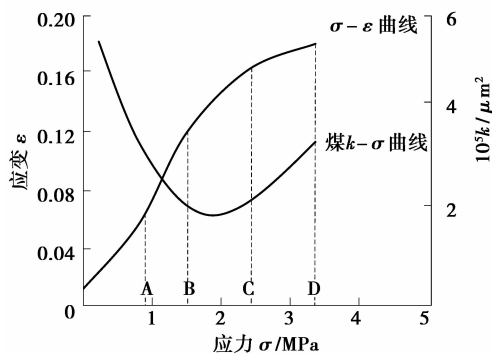


图 3 煤体应力与渗透率关系曲线

I~V 类单个类型煤体结构渗透率变异系数 V_c (图 4)变化不大,均低于煤层平均渗透率变异系数 V ,说明研究区大部分煤体的渗透性是比较差的,煤体中瓦斯运移相对困难,造成整个煤层瓦斯富集严重非均质性;仅在个别 II-III 类煤体,受原生裂隙和后生裂隙的切割,尽管煤体孔隙度较小,但孔裂隙

连通性较好,瓦斯运移相对容易。

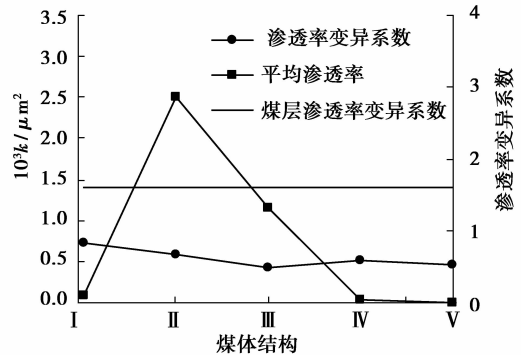


图 4 煤体结构渗透率与变异系数关系

煤体渗透率变异系数与煤体坚固性系数关系满足

$$V_c = -0.1623 \ln(f) + 0.7014, \quad (2)$$

式中: V_c 为渗透率变异系数; f 为煤体坚固性系数。说明随着煤体结构由简单到复杂, f 值由大变小,煤体渗透率变异系数减小,但减小趋势不明显,二者呈对数负相关,相关系数 $R=0.88$ 。

结合前人研究结果,构造煤(III、IV、V)微孔隙发育,在应力作用下孔裂隙出现闭合,连通性极差,在相同的外在条件下(有效应力、温度),尽管构造煤孔隙度大,但瓦斯不易发生渗流和运移,这一点本次实验也得到了证实,也为瓦斯的分区分带机制研究提供了一种思路借鉴。

4 渗透率差异对瓦斯影响

4.1 渗透率对瓦斯涌出影响

依据前面分析,煤体结构差异导致渗透率出现明显差异,煤层在原始应力场作用下,不同结构煤体之间由于渗透率差异存在,瓦斯运移微弱。因此,煤层瓦斯的分区分带现象非常明显。在采动应力作用下,煤体内部瓦斯流动速度、吸附瓦斯的解吸速度主要取决于饱和瓦斯煤体卸压快慢,即压力差,压差越大,高压瓦斯劈裂形成的裂隙相互连通,局部连通的裂隙又加速瓦斯流动速度,渗透率急剧升高。III-V 类煤体瓦斯渗透率非常低,开采中瓦斯的卸压明显,大量吸附瓦斯迅速解吸,沿着煤体中这些随机分布的劈裂流动,导致开采中瓦斯涌出很高。正是由于不同结构煤体存在,即使在同一条巷道中,瓦斯的涌出速度、强度也相差甚远。

4.2 渗透率对煤与瓦斯突出影响

目前公认的煤与瓦斯突出是煤体中瓦斯、地应力、煤体结构^[15]三者共同作用使含瓦斯煤体失稳破坏。渗透率差异一方面改造煤体中裂隙的形成扩展;另一方面,局部高压瓦斯流动劈裂作用进一步加

速瓦斯流动速度,从根本上削弱了煤颗粒骨架和瓦斯形成的固气耦合系统。在采动应力集中作用下,局部瓦斯在裂隙贯通瞬间,渗透率成倍增长,瓦斯流动促使局部瓦斯压力急骤下降,相应该局部区域中耦合体所受的有效应力迅速增大,固体骨架的部分弹性形变因气体排除而突然恢复,其积聚的弹性变形能突然释放,使该区域原有耦合体的暂时性稳定平衡发生急剧性失稳。如果这种发生在相对封闭的高应力集中区的饱和瓦斯煤岩体局部突发性失稳产生联动效应,迅速向外围发展,且外围煤岩体的阻抗能力不足以使失稳系统稳定下来时,会造成大面积区域的突发性失稳破坏,将发生煤体与瓦斯突出的动力现象。构造煤的渗透率和抗压强度均较低,当分布区满足这种相对封闭、高应力集中、饱和瓦斯煤体条件,煤与瓦斯突出必然发生,这也从机理上对构造煤发育是发生煤与瓦斯突出的必要条件进行了解释。另外原生结构煤体如果裂隙不发育,其渗透率也很低,饱和瓦斯煤体的封闭条件、应力条件、以及特殊的开采条件(高强度使应力集中过快)也满足发生突出的动力条件,但煤体抗压强度大(f 值高)、孔隙度低和局部煤体瓦斯突然卸压使煤体释放的弹性潜能相对也小,这种固气耦合体由于卸压而使煤颗粒骨架发生弹性潜能的突然释放不足以破坏相对抗压强度较高的煤体,一般情况下不会发生突出。总之,煤体渗透率的变化也就是煤体孔隙-裂隙的改造过程,对煤与瓦斯突出直到控制作用。

5 结 论

1)从实验得知,煤体结构差异对瓦斯渗透率影响近视呈正态分布,相关系数为 0.78,先呈级数增大,随后迅速减小,I类煤、III-V类煤渗透率相对较低,II类及II-III类过渡煤体渗透率最高。II类煤体渗透率是V类煤的621倍,III类煤的2倍,IV类煤的65倍,I类煤的68倍。

2)I~V类结构煤体渗透率变异系数与煤体结构(煤体 f 值)呈对数负相关,相关系数为0.88;同一类型煤体结构,其煤体均质性相对较好,整个煤层的渗透率变异系数为1.64,焦作矿区整个二₁煤层各向异性、非均质性较强。

3)从渗透率差异角度对煤层瓦斯的分区分带进行解释:渗透率变化的外在表现是应力变化,实质上是孔裂隙的形变和形成发生变化,孔裂隙的发育、发展过程直接控制煤体渗透率变化。

4)饱和瓦斯煤体的渗透率对煤与瓦斯突出、瓦斯异常涌出起到关键控制作用,正是由于采动应力造成煤体渗透率突发急变,最终导致瓦斯动力现象的发生。

参考文献:

- [1] 陶云奇,许江,程明俊,等.含瓦斯煤渗透率理论分析与试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增2):3363-3370.
TAO Yunqi, XU Jiang, CHENG Mingjun, et al. Theoretical analysis and experimental study on permeability of gas-bearing coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup2): 3363-3370.
- [2] 李培超,孔祥言,曾清红,等.煤层渗透率影响因素综述与分析[J].天然气工业,2002,22(5):45-49.
LI Peichao, KONG Xiangyan, ZENG Qinghong, et al. Summarizing and analyzing the factors affecting the coefficient of permeability of coal beds[J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(5): 45-49.
- [3] 汪伟英,汪亚蓉,邹来方,等.煤层气储层渗透率特征研究[J].石油天然气学报,2009,31(6):127-128.
WANG Weiyang, WANG Yarong, ZOU Laifang, et al. Study on characteristics of permeability of coalbed gas[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(6): 127-128.
- [4] 张广洋,胡耀华,姜德义.煤的瓦斯渗透性影响因素的探讨[J].重庆大学学报:自然科学版,1995,18(3):27-30.
ZHANG Guangyang, HU Yaohua, JIANG Deyi. Study on the factors affecting gas permeability of coal[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 1995, 18(3): 27-30.
- [5] 唐巨鹏,潘一山,李成全.有效应力对煤层气解吸渗流影响试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(8):1563-1568.
TANG Jupeng, PAN Yishan, LI Chengquan, et al. Experimental study on effect of effective stress on desorption and seepage of coalbed methane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1563-1568.
- [6] 孙培德.变形过程中煤样渗透率变化规律的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2001,20(增1):1801-1804.
SUN Peide. Testing study on coal specimen permeability during solid deformation process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Sup1): 1801-1804.
- [7] 张国华,梁冰.煤岩渗透率与煤与瓦斯突出关系理论探讨[J].辽宁工程技术大学学报,2002,21(4):414-417.
ZHANG Guohua, LIANG Bing. Aretical discussion of relationship between penetrate-rate of coal-rock and breaking out of coal and gas[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2002, 21(4): 414-417.

- [15] Rudder J, van de Wiele T, Dhoogeb W. Advanced water treatment with manganese oxide for the removal of 17 α -ethynylestradiol (EE2) [J]. *Water Research*, 2004, 38(1): 184-192.
- [16] 王与娟. 纳米 TiO₂ 改性羊毛纤维净化室内空气的研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2008.
- [17] Rasheed K A, Tahir H, Uddin F. Adsorption of methylene blue from aqueous solution on the surface of wool fiber and cotton fiber [J]. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 2005, 9(2): 29-35.
- [18] Hu B B. Sewage treatment by bioreactor using a novel wool fleece media [D]. Loughborough: UK Loughborough University, 2008.
- [19] Horan N J, Lowe M. Full-scale trials of recycled glass as tertiary filter medium for wastewater treatment [J]. *Water Research*, 2007, 41(1): 253-259.
- [20] 高乃云, 严敏, 赵建夫, 等. 水中内分泌干扰物处理技术与原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [21] Hanselman T A, Graetz D A, Wilkie A C, et al. Determination of steroidal estrogens in flushed dairy manure wastewater by gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(3): 695-700.
- [22] Clouzot L, Marrot B, Doumenq P, et al. 17 α -Ethinylestradiol: an endocrine disrupter of great concern. Analytical methods and removal processes applied to water purification, a review [J]. *Environmental Process*, 2008, 27(3): 383-396.
- [23] 阳春, 胡碧波, Andrew Wheatley. 聚联苯乙烯和石墨化碳黑固相萃取用于污水中雌激素定量分析[J]. *重庆大学学报*, 2009, 32(12): 1446-1450.
YANG Chun, HU Bibo, Wheatley A. Comparison of styrene divinyl benzen and graphitized carbon black solid phase extraction in oestrogen quantification in sewage [J]. *Journal of Chongqing University*, 2009, 32(12): 1446-1450.
- [24] 阳春, 胡碧波, Andrew Wheatley. 污水中雌酮的定量分析[J]. *重庆大学学报*, 2009, 32(6): 716-720.
YANG Chun, HU Bibo, Wheatley A. Quantification of oestrone in wastewater matrix by ELISA kits [J]. *Journal of Chongqing University*. 2009, 32 (6): 716-720.

(编辑 郑洁)

(上接第 118 页)

- [8] 倪小明, 苏现波, 张小东. 煤层气开发地质学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [9] 袁亮. 卸压开采抽采瓦斯理论及煤与瓦斯共采技术体系[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(1): 1-8.
YUAN Liang. Theory of pressure-relieved gas extraction and technique system of integrated coal production and gas extraction [J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(1): 1-8.
- [10] Jiang B, Qu Z H, Wang G G X, et al. Effects of structural deformation on formation of coalbed methane reservoirs in Huaibei coalfield, China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2010, 82(3/4): 175-183.
- [11] 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]. *煤炭学报*, 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]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(5): 848-854.
- [12] 邵先杰. 储层渗透率非均质性表征新参数[J]. *石油实验地质*, 2010, 32(4): 397-400.
SHAO Xianjie. A new characterized parameter for the permeability heterogeneity of the reservoir; calculation method of permeability diversity coefficient and its significance [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(4): 397-400.
- [13] 李俊玲. 渗透变异系数不同计算方法分析[J]. *油气田地面工程*, 2006, 25(12): 10-11.
- [14] 郭红玉, 苏现波, 夏大平, 等. 煤储层渗透率与地质强度指标的关系研究及意义[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(8): 1319-1322.
GUO Hongyu, SU Xianbo, XIA Daping, et al. Relationship of the permeability and geological strength index (GSI) of coal reservoir and its significance [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35 (8): 1319-1322.
- [15] 汤友谊, 张国成, 孙四清. 不同煤体结构煤的 f 值分布特征[J]. *焦作工学院学报: 自然科学版*, 2004, 23(2): 81-84.
TANG Youyi, ZHANG Guocheng, SUN Siqing. Distributive feature of f value of different coal body structure coal [J]. *Journal of Jiaozuo Institute of Technology: Natural Science*, 2004, 23(2): 81-84.

(编辑 郑洁)