

煤岩气相渗透率变化类型及判别模式

李俊乾, 卢双舫, 薛海涛, 王伟明, 张鹏飞

(中国石油大学(华东)非常规油气与新能源研究院, 山东 青岛 266580)

摘要:煤岩气相渗透率变化类型具有多样性。针对我国 32 个煤矿的不同变质程度煤岩样品(制备 54 个岩心柱),开展气相(CO₂)渗透率动态变化规律研究,基于气体反弹压力和渗透率伤害率 2 项指标,划分了煤岩气相渗透率变化类型;结合煤岩煤质数据,建立了渗透率变化类型判别模式。我国煤岩气相(CO₂)渗透率变化主要表现为下降型、反弹型和上升型 3 大类,包括 8 个小类;通过最大镜质组反射率—初始渗透率、惰镜比(惰质组含量与镜质组含量之比)—初始渗透率、固灰比(固定碳含量与灰分产率之比)—初始渗透率和惰镜比—固灰比交会图法,可有效识别煤岩气相渗透率变化类型,为优选有利的煤层气开发储层提供依据。

关键词:气相渗透率;反弹压力;渗透率伤害率;煤岩;煤层气

中图分类号:TE132.2

文献标志码:A

Change types of coal permeability to gas and its identification pattern

Li Junqian, Lu Shuangfang, Xue Haitao, Wang Weiming, Zhang Pengfei

(Unconventional Oil & Gas and Renewable Energy Research Institute, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China)

Abstract: Coal shows a variety of permeabilities to gas flow. Coal samples of different ranks were collected from 32 mines in China, and were prepared into 54 cylindrical cores to investigate coal permeability to gas (CO₂) flow. The results were classified based on rebound pressure and permeability damage rate. Furthermore, a pattern of change types was established. These included “declining type”, “rebounding type” and “increasing type”, which could be further sub-divided into 8 types. The permeability change types can be identified from cross-plots of “maximum vitrinite reflectance—initial permeability”, “ratio of inertinite content to vitrinite content—initial permeability”, “ratio of fixed carbon content to ash yield—initial permeability” and “ratio of inertinite content to vitrinite content—ratio of fixed carbon content to ash yield”.

Key words: permeability to gas; rebounding pressure; permeability damage rate; coal; coalbed methane

煤储层渗透率是影响煤层气产量的重要储层参数之一,关于煤储层渗透性地质控制因素及高渗区的预测已受到广泛关注^[1-8]。但在煤层气开发实践中,已逐渐认识到煤储层渗透率为动态渗透率,随煤层气井的排采而发生变化,特别是在产气阶段,煤岩气相渗透率变化趋势及控制因素更为复杂。针对这一问题,国内外学者已进行了大量实验研究,发现在压降过程中煤岩气相(吸附性气体)渗透率变化具有多样性^[9],且渗透率变化受有效应力、基质收缩和气体滑脱三大地质效应的综合影响^[9-14],基于有效应力和/或基质收缩效应建立了多种渗透率变化的预测模型^[1,15-23]。然而,对于我国不同变质程度煤岩,在什么样的煤里会出现怎样的渗透率变化,仍有待解决。本文基于大量煤岩气相(CO₂)渗

透率实验,将渗透率变化过程作为一个整体进行考虑,系统划分了我国煤岩气相渗透率变化类型,通过分析不同渗透率变化类型煤岩之间的物性和煤岩煤质差异,建立了渗透率变化类型的判别模式,为寻找有利的煤层气开发储层提供依据。

1 样品及实验

煤岩样品取自三江—穆棱河含煤区(鹤岗、鸡西和勃利盆地及绥滨拗陷)、霍州盆地、鄂尔多斯盆地渭北煤田以及沁水盆地东南部的 32 个煤矿(表 1)。实验之前,将煤岩样品制备成直径为 2.5 cm 的岩心柱,共计 54 个,在空气条件下进行干燥。本次渗透率实验采用 CO₂ 气体,围压恒定为 5.0 MPa,出口压力为大气压,调节进口气体压力由

收稿日期:2014-09-13;修订日期:2015-09-10。

作者简介:李俊乾(1987—),男,博士,讲师,从事非常规油气储层研究。E-mail:lijunqian1987@126.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05034-001, 2011ZX05062-006)和山东省自然科学基金(ZR2014DP007)联合资助。

表1 恒定围压(5 MPa)条件下煤岩气相(CO₂)渗透率变化类型

Table 1 Change types of coal permeability to CO₂ under a constant confining stress (5 MPa)

序号	采样点	$R_{o,max}/\%$	$K_0/\mu D$	类型	$\eta/\%$	P_i/MPa	序号	采样点	$R_{o,max}/\%$	$K_0/\mu D$	类型	$\eta/\%$	P_i/MPa
1	检顺 ^a	0.799	33.572	I	66		28	屯城 ^b	2.955	33.681	II ₁	44	0.5~1
2	王庄 ^b	1.701	19.732	I	69		29	东荣2 ^g	0.763	33.323	II ₁	35	0.5~1
3	牛山 ^b	2.473	14.801	I	84		30	屯城 ^b	3.056	28.016	II ₁	44	0.5~1
4	干河 ^c	0.894	8.932	I	72		31	曹村 ^f	1.173	23.783	II ₁	33	0.5~1
5	辛置 ^c	0.803	5.707	I	80		32	寺河 ^b	2.855	13.130	II ₁	34	0.5~1
6	望云 ^b	2.353	2.551	I	83		33	米山 ^b	3.008	10.228	II ₁	17	0.5~1
7	李雅庄 ^c	1.060	2.405	I	86		34	王台铺 ^b	3.318	9.187	II ₁	48	0.5~1
8	竹林山 ^b	2.615	1.974	I	72		35 [±]	马沟渠 ^g	1.957	3.778	II ₁	31	0.5~1
9	辛置 ^c	1.025	0.758	I	84		36	义城 ^b		1.692	II ₁	34	0.5~1
10	侯村 ^b	3.290	0.634	I	95		37	端氏 ^b	2.738	0.059	II ₁	35	0.5~1
11	侯村 ^b	2.900	0.616	I	97		38	牛山 ^b	1.899	0.017	II ₁	25	0.5~1
12	寺河 ^b	3.103	0.409	I	99		39	永红 ^b	2.852	0.011	II ₁	29	0.5~1
13	辛置 ^c	1.006	0.073	I	98		40	盛和 ^d	1.117	190.809	II ₂ -I	46	1~1.5
14	盛和 ^d	0.824	1253.191	II ₁ -I	51	0.5~1	41	辛置 ^c	1.481	152.495	II ₂	13	1~1.5
15	博庆 ^d	0.861	653.928	II ₁ -I	58	0.5~1	42	余吾 ^b	1.716	130.302	II ₂	11	1.5~2
16	团柏 ^c	0.707	643.652	II ₁ -I	54	0.5~1	43	曹村 ^f	1.826	54.879	II ₂	35	1~1.5
17	干河 ^c	0.883	126.974	II ₁ -I	48	0.5~1	44	李家河 ^f	2.125	53.117	II ₂	30	1~1.5
18	桃山 ^e	0.799	69.524	II ₁ -I	62	0.5~1	45	辛呈 ^b	1.647	45.724	II ₂	33	1~1.5
19	申家庄 ^b	2.550	22.955	II ₁ -I	71	0.5~1	46	平政 ^f	1.864	39.794	II ₂	25	1~1.5
20	桃山 ^e	0.759	1.982	II ₁ -I	56	0.5~1	47	余吾 ^b	2.218	18.274	II ₂	13	1~1.5
21	屯城 ^b	2.552	0.669	II ₁ -I	70	0.5~1	48	米山 ^b	2.526	7.512	II ₂	12	1~1.5
22	李雅庄 ^c	1.089	0.248	II ₁ -I	66	0.5~1	49	侯村 ^b	2.790	0.012	II ₂	1	1~1.5
23	端氏 ^b	2.915	0.003	II ₁ -I	50	0.5~1	50	寺河 ^b	3.054	0.008	II ₂	5	1.5~2
24	辛呈 ^b	2.041	283.528	II ₁	32	0.5~1	51	王村 ^f	2.132	1.221	II ₃	-18	1.5~2
25	曹村 ^f	1.091	277.447	II ₁	50	0.5~1	52	常村 ^b	1.873	0.007	II ₃	-1	1~1.5
26	游仙山 ^b	2.057	49.916	II ₁	37	0.5~1	53	米山 ^b	2.848	65.484	II ₃ -III	-26	2~2.5
27	团柏 ^c	0.747	42.576	II ₁	36	0.5~1	54	合阳1 ^f	1.961	13.205	III	-34	>4

注: $R_{o,max}$ 为最大镜质组反射率; K_0 为初始进口压力(4.0 MPa)下的气相渗透率; $\eta=(K_0-K_1)/K_0$,代表气相渗透率伤害率,其中 K_1 为进口气体压力0.5 MPa时的气相渗透率; P_i 为气体反弹压力。上标 \pm 为岩心柱垂直于层理方向;a为鹤岗盆地;b为沁水盆地;c为霍州盆地;d为鸡西盆地;e为勃利盆地;f为渭北煤田;g为绥滨拗陷。

4.0 MPa 逐渐降至 1.0 MPa,步长为 0.5 MPa,共计 8 个压力点,在每个气体压力下测定气体流量。本次实验参数设计用于模拟煤层气体排采过程,实验仪器及流量测试方法参见文献[24]。对测试完渗透率的岩心进行粉碎、制样,在中国地质大学(北京)煤储层物性实验室进行煤岩显微组分、镜质组反射率以及工业分析等测试。

2 实验结果与讨论

2.1 煤岩气相渗透率变化类型划分

实验结果显示,在气体压力降低过程中,CO₂ 气体渗透率变化趋势具有多样性。为了将压降过程中渗透率变化趋势进行有效分类,采用了气体反弹压力和渗透率伤害率 2 个定量指标。①气体反弹压力,即在气体压力降低过程中煤岩气相渗透率开始反弹时对应的气体压力。由于测试压力点有限(8 个),反弹压力采用区间范围。因此,本文将渗透率反弹时对应的进口气体压力总结为 0.5~1, 1~1.5,1.5~2,2~2.5,>4 MPa。②渗透率伤害率,

即枯竭压力时煤岩气相渗透率与初始气相渗透率之比。本文枯竭压力为 0.3 MPa(即进口气体压力 0.5 MPa),初始气体压力为 2.05 MPa(进口气体压力为 4.0 MPa)。在 5 MPa 围压条件下,54 个煤岩心气相(CO₂)渗透率伤害率范围为-20%~99%。

根据气体反弹压力和渗透率伤害率 2 个指标,将压降过程中煤岩气相渗透率变化分为下降型(类型 I)、反弹型(类型 II)和上升型(类型 III) 3 大类,其中类型 II 可细分为 3 个小类(类型 II₁、II₂ 和 II₃)以及 3 个过渡类型(类型 II₁-I、II₂-I 和 II₃-III),典型样品见图 1。I 型煤岩气相渗透率随气体压力降低而逐渐降低,渗透率伤害率最大,范围为 66%~99%(平均 83%),在测试范围内未出现反弹。II 型煤岩气相渗透率先降低后反弹升高:①II₁-I 和 II₁ 型煤岩的气体反弹压力为 0.5~1 MPa,该 2 种类型煤岩渗透率伤害率较高,前者为 48%~71%(平均 59%),后者为 17%~50%(平均 35%);②II₂-I 和 II₂ 型煤岩的反弹压力主要为 1~1.5 MPa,II₂-I 型仅出现于 1 个煤岩心,

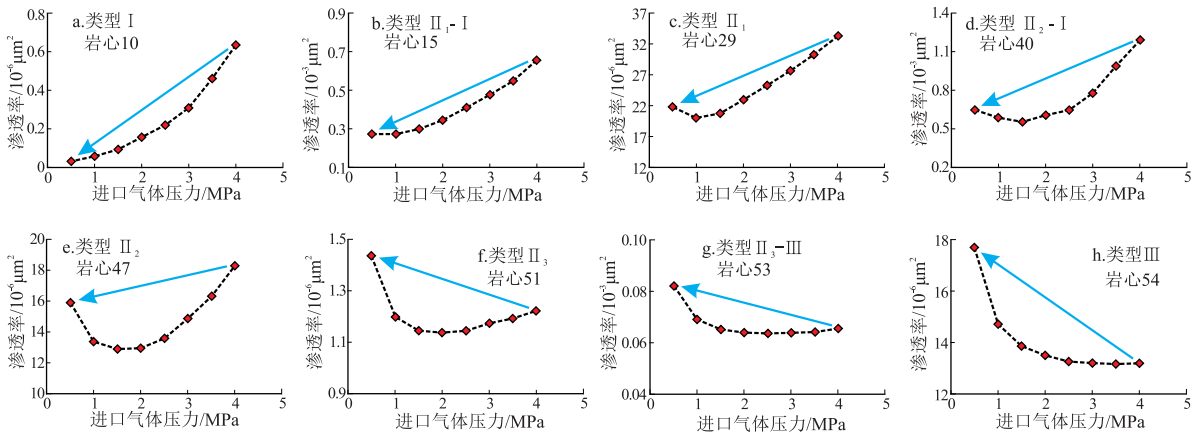


图 1 5 MPa 围压条件下煤岩气相 (CO₂) 渗透率变化类型

Fig.1 Change types of coal permeability to gas (CO₂) under 5 MPa confining stress

渗透率伤害率为 46%; II₂ 型煤岩渗透率伤害率较低,为 1%~35% (平均 18%); ③ II₃ 和 II₃-III 型煤岩的反弹压力较高,在 1~1.5, 1.5~2, 2~2.5 MPa 范围均有出现,两者渗透率伤害率均小于 0,分别为 -1%~-18% 和 -26%。III 型煤岩的气体反弹压力最高,大于 4 MPa,渗透率伤害率最小,为 -34%。由下降型→反弹型→上升型,煤岩的气体反弹压力逐渐升高,但渗透率伤害率逐渐降低 (图 2)。

从渗透率变化类型对煤层气排采的影响而言,上升型好于反弹型,后者又好于下降型,而且气体反弹压力越高、渗透率伤害率越低,对煤层气排采越有利。因此,煤岩渗透率变化类型由好至差依次为: III 型 (出现频率 1.85%)、II₃-III 型 (1.85%)、II₃ 型 (3.7%)、II₂ 型 (18.5%)、II₂-I 型 (1.9%)、II₁ 型 (29.6%)、II₁-I 型 (18.5%) 和 I 型 (24.1%)。其中, II₃、II₃-III 和 III 型煤岩的气体反弹压力较高,渗透率伤害率较低,为有利的渗透率变化类型,也是煤层气开发首选储层类型,但出现频率较低,仅为 7.4%; II₂ 和 II₂-I 型煤岩的气体反弹压力较高,渗透率伤害率中等,为较有利的渗透率变化类

型,出现频率为 20.4%,该类型煤岩可重点考虑; II₁、II₁-I 和 I 型煤岩的气体反弹压力较低,渗透率伤害率较高,属于不利的渗透率变化类型,该类型出现频率较高,达 72.2%。由实验结果可初步判断,我国煤储层多表现为不利的渗透率变化类型。

2.2 不同渗透率变化类型煤岩的差异性

2.2.1 煤变质程度

本文测试的煤岩最大镜质组反射率 ($R_{o,max}$) 范围为 0.707%~3.318% (图 3),煤类覆盖气煤至无烟煤。对于 3 种不利的渗透率变化类型, $R_{o,max}$ 大于和小于 1.5% 的煤岩均有存在,其中 I 型煤主要出现于 0.799%~1.060% (肥气煤—肥煤) 和 2.353%~3.290% (贫煤—无烟煤) 范围内; II₁-I 型煤主要出现于 0.707%~1.089% (气煤—肥煤) 之间,在 2.550%~2.915% (无烟煤) 之间也有出现; II₁ 型煤多出现于 0.747%~1.173% (气煤—肥煤), 1.899%~2.057% (贫煤) 和 2.738%~3.318% (无烟煤) 3 个范围内。对于 3 种有利的渗透率变化类型以及较有利的渗透率变化类型 II₂,主要出现于 $R_{o,max}$ 大于 1.5% 的煤中,其中 II₂ 型煤的镜质组反射率范围为

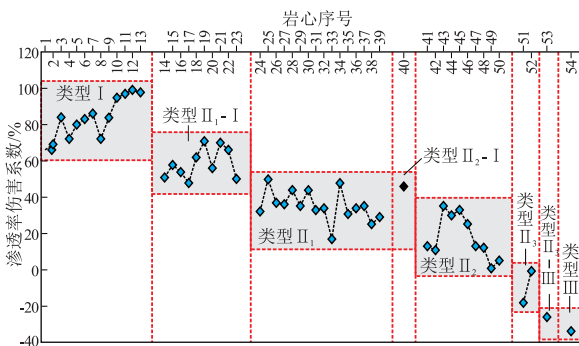


图 2 不同变化类型煤岩的渗透率伤害率

Fig.2 Damage rates of permeability for coals with different change types

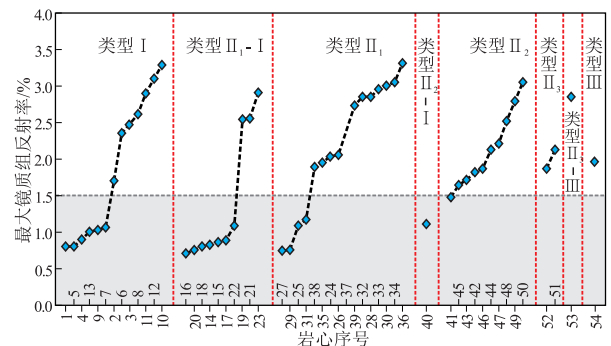


图 3 不同变化类型煤岩的变质程度

Fig.3 Metamorphic grades of coals with different change types

表 2 不同变化类型煤岩的物质组成特征

Table 2 Characteristics of material composition for the different change types

类型	镜质组含量/ %	惰质组含量/ %	壳质组含量/ %	矿物质含量/ %	水分含量(空气 干燥基)/%	灰分产率 (干燥基)/%	固定碳含量(干燥 无灰基)/%
I	68.2~95.0 81.1	0.6~16.5 7.4	0.0~13.3 3.1	2.1~15.5 8.6	0.58~1.81 1.09	3.78~31.48 13.37	66.24~89.52 79.32
II ₁ -I	61.5~91.7 73.1	0.2~28.3 15.3	0.0~10.6 2.3	2.6~33.7 9.3	0.65~1.45 1.08	4.38~34.02 14.12	65.78~91.52 75.94
II ₁	69.2~95.4 87.1	0.0~17.9 4.8	0.0~4.3 0.8	2.8~15.4 7.3	0.55~2.42 1.36	7.55~30.23 17.68	55.28~90.39 80.10
II ₂ -I*	85.1	5.6	0.0	9.3	0.93	17.68	71.29
II ₂	67.5~90.7 84.1	0.6~8.1 4.1	0.0	5.6~30.3 11.8	0.33~2.07 0.84	11.08~52.38 21.60	55.45~89.82 81.04
II ₃ *	78.4~93.0	4.1~4.3	0.0	2.7~17.5	0.6~1.44	4.18~25.91	68.01~89.85
II ₃ -III*	87.4	0.8	0.0	11.6	0.61	17.88	87.47
III*	83.3	6.2	0.0	10.6	0.38	19.74	80.23

注: * 表示数据点较少。分式表示最小值~最大值/平均值。

1.481%~3.054%(焦煤—无烟煤)。

2.2.2 煤岩物质组成

8种渗透率变化类型煤岩的有机显微组分均以镜质组为主(占60%以上),其次为惰质组分,壳质组含量最低(表2)。壳质组含量主要出现于3种不利的渗透率变化类型煤岩中,且I型煤>II₁-I型煤>II₁型煤。II₁型煤镜质组含量占绝对优势(平均87.1%),惰质组、壳质组和矿物含量则相对较低。II₁-I型煤的镜质组含量最低(平均73.1%),而惰质组含量最高(平均15.3%)。总体而言,不同渗透率变化类型煤岩之间的显微组分差异性不显著。

从煤质角度而言,由于同一渗透率变化类型煤岩往往覆盖多种煤类,因此各种变化类型煤岩的固定碳含量、水分含量和灰分产率分布范围均较宽。总体上,固定碳含量在50%以上,水分含量在1%左右。与3种有利变化类型和较有利变化类型(II₂)煤岩相比,3种不利变化类型的煤岩固定碳含量和灰分产率略低,而水分含量略高。其中,I型煤岩特低灰—高灰均有出现;II₁-I型煤岩以特低灰和中灰为主;II₁型煤岩以低灰—中灰为主;II₂型煤岩以中灰为主;3种有利变化类型的煤岩以中灰为主。

2.2.3 煤岩初始渗透率

实验条件下的煤岩初始渗透率代表了煤层气并产气阶段开始时对应的煤储层初始渗透率。但实验结果显示,煤岩气相渗透率变化类型与初始渗透率之间相关性不明显,即在相同初始渗透率条件下,可能出现多种渗透率变化类型(图4)。I型煤岩初始渗透率在 $7.3 \times 10^{-8} \sim 3.4 \times 10^{-5} \mu\text{m}^2$ 之间;II₁-I型煤岩初始渗透率主要分布于 $2.5 \times 10^{-7} \sim 1.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之

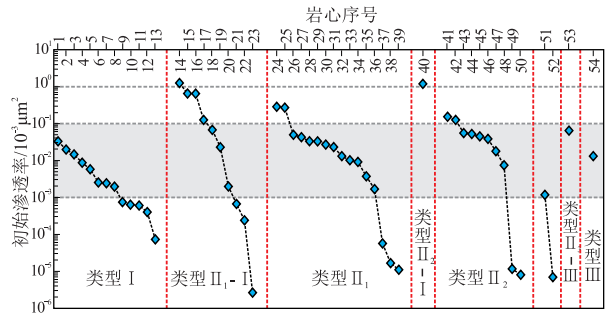


图 4 不同变化类型煤岩的初始渗透率

Fig.4 Initial permeability for coals with different change types

间;II₁型煤岩主要集中在 $1.7 \times 10^{-6} \sim 5.0 \times 10^{-5} \mu\text{m}^2$ 之间,少量达 $10^{-4} \sim 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $10^{-8} \sim 10^{-7} \mu\text{m}^2$ 级别;II₂型煤岩初始渗透率主要为 $7.5 \times 10^{-6} \sim 1.5 \times 10^{-4} \mu\text{m}^2$,少量达 $10^{-8} \mu\text{m}^2$ 级别。其他类型煤岩样品出现频率较低,初步估计II₃型煤岩初始渗透率接近或小于 $10^{-7} \mu\text{m}^2$ 级别;II₃-III和III型煤岩初始渗透率位于 $10^{-5} \sim 10^{-4} \mu\text{m}^2$ 级别。

2.3 煤岩气相渗透率变化类型判别模式

通过上述分析可以看出,煤变质程度、初始渗透率、显微组分和煤质等指标对于识别渗透率变化类型具有一定指示意义,但每个指标都不能明确划分出渗透率变化类型。因此,需要综合考虑多项指标以识别渗透率变化类型。研究已经显示^[9-11]:煤岩气相(CO₂)渗透率变化受气体滑脱、基质收缩和有效应力三大地质效应的综合影响,气体滑脱主要在低压下引起渗透率明显增加,通常称之为正效应;有效应力的增加引起渗透率降低,通常称之为负效应;基质收缩作用较为复杂,随煤变质程度升高,基质收缩引起的渗透率增加则逐渐显著,正效应逐渐明显。对于本次研究,在围压保持不变、

CO₂ 气体压力降低过程中,有效应力和基质收缩效应导致煤岩骨架变形,引起煤岩气相渗透率变化^[11]。煤岩骨架变形特征与煤岩显微组分、煤质密切相关^[25],因此本文提取了惰镜比(惰质组含量/镜质组含量)和固灰比(固定碳含量/灰分产率)2个反映煤岩变形的指标。另外,三大效应均与煤岩孔渗性相关,随煤岩渗透性增加,有效应力负效应影响减弱;基质收缩正效应引起的渗透率增量变大;气体滑脱正效应影响减小。因此,在绘制交会图时应充分考虑煤岩孔渗性参数。由上述可见煤岩气相渗透率变化的复杂性,单因素难以有效识别渗透率变化类型。在本次研究过程中绘制了最大镜质组反射率—初始渗透率、惰镜比—初始渗透率、固灰比—初始渗透率和惰镜比—固灰比交会图(图 5),根据不同煤岩之间的变形及渗透性差异,划分出渗透率变化类型,从而建立渗透率变化类型判别模式。

2.3.1 煤变质程度与初始渗透率判别模式

煤变质程度影响煤的物质组成和孔—裂隙系统^[26],通过交会煤岩初始渗透率,可以在一定程度上判别煤岩渗透率变化类型。随最大镜质组反射率增加,煤岩初始渗透率逐渐降低,但对不同渗透率变化类型煤的影响程度表现出差异性(图 5a)。当 $R_{o,max}$ 小于 1.5% 时,随 $R_{o,max}$ 增大,3 种不利的渗透率变化类型煤岩初始渗透率逐渐降低,降低程度由高至低依次为 II₁-I 型、I 型和 II₁ 型;当 $R_{o,max}$

大于 1.5% 时,3 种不利的渗透率变化类型煤岩初始渗透率缓慢降低,而对于较有利的渗透率变化类型(II₂)煤岩,其初始渗透率随 $R_{o,max}$ 增大而显著降低。另外,在交会图上 3 种有利渗透率变化类型(II₃、II₃-III 和 III)煤的出现频率较低,因此未显示出明显规律。

2.3.2 煤岩显微组分与初始渗透率判别模式

渗透率变化类型在惰镜比—初始渗透率交会图(图 5b)上亦表现出一定规律性。在类型上接近的煤岩,其具有的储层物性和煤岩学特征也相近,因此在交会图上显示出相邻分布的特征,如作为 II₁ 型和 I 型煤的过渡类型,II₁-I 型煤出现于 II₁ 型和 I 型煤分布区周围,主要位于右上部(具有较大惰镜比和初始渗透率),少量分布于左下角(具有较小惰镜比和初始渗透率)。II₁ 型煤分布范围相邻于 I 型煤,两者有一定重叠,整体上前者渗透率(大于 10⁻⁵ μm²)较后者(小于 10⁻⁵ μm²)高。较有利的渗透率变化类型 II₂ 型煤分布范围主要出现于 II₁ 型煤范围内部,且具有较小的惰镜比(<0.1)。根据这一规律,推测 3 种有利的渗透率变化类型 II₃、II₃-III 和 III 型煤可能出现于 II₂ 型煤范围附近,图 5c 和图 5d 亦表现出类似特征。

2.3.3 煤质与初始渗透率判别模式

在固灰比—初始渗透率交会图(图 5e)上, I 型煤分布成片出现,于其上下两侧附近出现 II₁-I 型和 II₁ 型煤。在 I 型煤上侧, II₁ 型煤分布范围

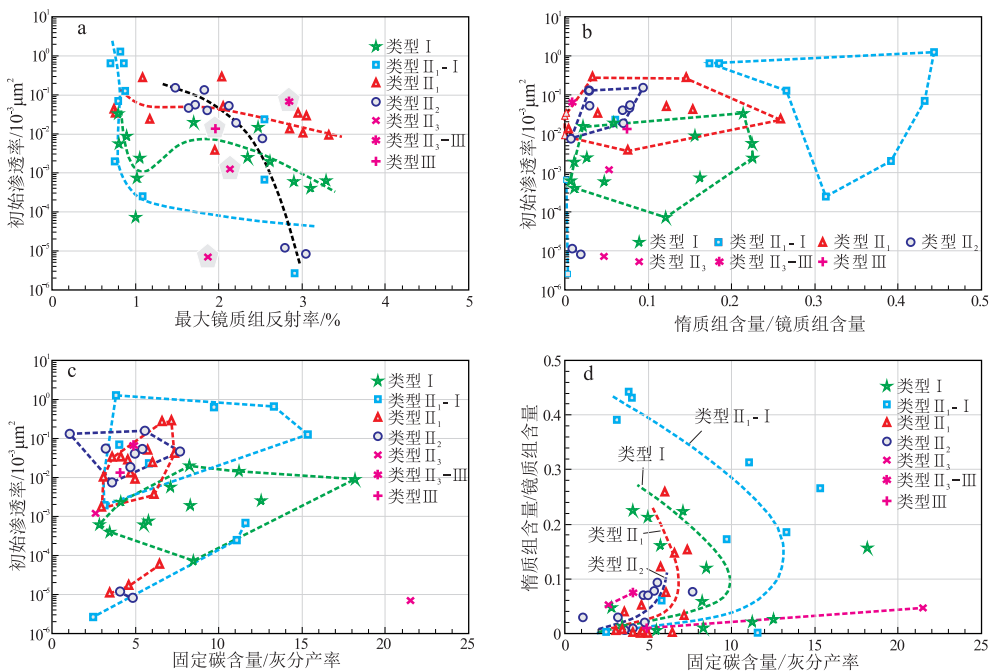


图 5 煤岩气相(CO₂)渗透率变化类型判别模式

Fig.5 Identification pattern for different change types of coal permeability to gas

相邻于Ⅱ₁-Ⅰ型煤,且集中出现于后者分布范围之内,具有较小的固灰比(<7.5);Ⅱ₂型煤相邻Ⅱ₁型煤,但两者重叠部分较多,难以进行区分。

2.3.4 煤岩显微组分与煤质判别模式

不同煤岩显微组分具有不同的孔—裂隙特征,反映了煤岩孔渗性差异,与煤质参数交会,必然在渗透率变化类型上有所反映。在固灰比—惰镜比交会图(图5d)上,从Ⅱ₂-Ⅰ型煤→Ⅰ型煤→Ⅱ₁型煤→Ⅱ₂型煤,分布范围逐渐由惰镜比和固灰比高值区向低值区偏移。较有利的渗透率变化类型Ⅱ₂型煤分布于Ⅱ₁型煤范围附近,整体上具有较小的惰镜比和固灰比。有利的渗透率变化类型主要分布于Ⅱ₂型范围附近。

综上所述,在对煤储层有利和较有利渗透率变化类型进行预测时,可参考不利渗透率变化类型分布范围。同时,需要采用多种判别模式图进行综合确定。

3 结论

(1)我国煤岩气相(CO₂)渗透率变化主要表现为下降型(Ⅰ)、反弹型(Ⅱ)和上升型(Ⅲ)3大类,其中类型Ⅱ可细分为3个小类(Ⅱ₁、Ⅱ₂和Ⅱ₃)以及3个过渡类型(Ⅱ₁-Ⅰ、Ⅱ₂-Ⅰ和Ⅱ₃-Ⅲ)。有利的渗透率变化类型(Ⅱ₃、Ⅱ₃-Ⅲ和Ⅲ)占7.4%;较有利的渗透率变化类型(Ⅱ₂-Ⅰ和Ⅱ₂)占20.4%;不利的渗透率变化类型(Ⅱ₁、Ⅱ₁-Ⅰ和Ⅰ)达72.2%。

(2)煤变质程度、初始渗透率、显微组分和煤质等指标对于识别渗透率变化类型具有一定指示意义。通过绘制最大镜质组反射率—初始渗透率、惰镜比—初始渗透率、固灰比—初始渗透率和惰镜比—固灰比交会图,可有效识别煤岩气相渗透率变化类型。

参考文献:

- [1] 傅雪海,秦勇,姜波,等.山西沁水盆地中—南部煤储层渗透率物理模拟与数值模拟[J].地质科学,2003,38(2):221-229.
Fu Xuehai, Qin Yong, Jiang Bo, et al. Physical and numerical simulations of permeability of coal reservoirs in central and southern part of the Qinshui basin, Shanxi [J]. Chinese Journal of Geology, 2003, 38(2): 221-229.
- [2] 秦勇,叶建平,林大扬,等.煤储层厚度与其渗透性及含气性关系初步探讨[J].煤田地质与勘探,2000,28(1):24-27.
Qin Yong, Ye Jianping, Lin Dayang, et al. Relationship of coal reservoir thickness and its permeability and gas-bearing property [J]. Coal Geology & Exploration, 2000, 28(1): 24-27.
- [3] 唐书恒.煤储层渗透性影响因素探讨[J].中国煤田地质, 2001, 13(1): 28-30, 86.
Tang Shuheng. Probe into the influence factors on permeability of coal reservoirs [J]. Coal Geology of China, 2001, 13(1): 28-30, 86.
- [4] 叶建平,史保生,张春才.中国煤储层渗透性及其主要影响因素[J].煤炭学报,1999,24(2):118-122.
Ye Jianping, Shi Baosheng, Zhang Chuncai. Coal reservoir permeability and its controlled factors in China [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(2): 118-122.
- [5] 钟玲文,员争荣,李贵红,等.我国主要含煤区煤体结构特征及与渗透性关系的研究[J].煤田地质与勘探,2004,32(增1):77-81.
Zhong Lingwen, Yuan Zhengrong, Li Guihong, et al. The relationship between coal structure and permeability in main coal bearing areas in China [J]. Coal Geology & Exploration, 2004, 32(S1): 77-81.
- [6] 董敏涛,张新民,郑玉柱,等.煤层渗透率统计预测方法[J].煤田地质与勘探,2005,33(6):28-31.
Dong Mintao, Zhang Xinmin, Zheng Yuzhu, et al. The approach on statistic predict of coal permeability [J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(6): 28-31.
- [7] 陈金刚,张景飞.构造对高煤级煤储层渗透率的系统控制效应:以沁水盆地为例[J].天然气地球科学,2007,18(1):134-136.
Chen Jingang, Zhang Jingfei. Systematic control effect of structures on permeability of high coal rank reservoirs [J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(1): 134-136.
- [8] 王有智,王世辉,吴刚.呼和湖凹陷煤储层孔隙特征及其对吸附能力的影响[J].断块油气田,2014,21(4):444-448.
Wang Youzhi, Wang Shihui, Wu Gang. Ore characteristics of coal reservoir in Huhuhu Depression and its effect on adsorption capacity [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2014, 21(4): 444-448.
- [9] Li J Q, Liu D M, Yao Y B, et al. Evaluation and modeling of gas permeability changes in anthracite coals [J]. Fuel, 2013, 111: 606-612.
- [10] 汪吉林,秦勇,傅雪海.多因素叠加作用下煤储层渗透率的动态变化规律[J].煤炭学报,2012,37(8):1348-1353.
Wang Jilin, Qin Yong, Fu Xuehai. Dynamic changes laws of the coal reservoirs permeability under the superimposition of multi influential factors [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1348-1353.
- [11] Li J Q, Liu D M, Yao Y B, et al. Control of CO₂ permeability change in different rank coals during pressure depletion: An experimental study [J]. Energy & Fuels, 2014, 28(2): 987-996.
- [12] Harpalani S, Chen G L. Influence of gas production induced volumetric strain on permeability of coal [J]. Geotechnical & Geological Engineering, 1997, 15(4): 303-325.
- [13] 孟召平,侯泉林.煤储层应力敏感性及其影响因素的试验分析[J].煤炭学报,2012,37(3):430-437.
Meng Zhaoping, Hou Quanlin. Experimental research on stress sensitivity of coal reservoir and its influencing factors [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 430-437.
- [14] 肖晓春,潘一山.低渗煤储层气体滑脱效应试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(增2):3509-3515.
Xiao Xiaochun, Pan Yishan. Experimental study on gas slippage effects in hypotonic coal reservoir [J]. Chinese Journal of Rock

Mechanics and Engineering, 2008, 27 (S2) : 3509-3515.

[15] Mckee C R, Bumb A C, Koenig R A. Stress-dependent permeability and porosity of coal and other geologic formations [J]. SPE Formation Evaluation, 1988, 3 (1) : 81-91.

[16] 傅雪海, 秦勇, 张万红. 高煤阶煤基质力学效应与煤储层渗透率耦合关系分析 [J]. 高校地质学报, 2003, 9 (3) : 373-377. Fu Xuehai, Qin Yong, Zhang Wanhong. Coupling correlation between high-rank coal matrix mechanic effect and coal reservoir permeability [J]. Geological Journal of China Universities, 2003, 9 (3) : 373-377.

[17] Cui X J, Bustin R M. Volumetric strain associated with methane desorption and its impact on coalbed gas production from deep coal seams [J]. AAPG Bulletin, 2005, 89 (9) : 1181-1202.

[18] Shi J Q, Durucan S A. A model for changes in coalbed permeability during primary and enhanced methane recovery [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2005, 8 (4) : 291-299.

[19] Palmer I. Permeability changes in coal: Analytical modeling [J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 77 (1-2) : 119-126.

[20] Connell L D, Lu M, Pan Z J. An analytical coal permeability model for tri-axial strain and stress conditions [J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 84 (2) : 103-114.

[21] 陈振宏, 陈艳鹏, 杨焦生, 等. 高煤阶煤层气储层动态渗透率特征及其对煤层气产量的影响 [J]. 石油学报, 2010, 31 (6) : 966-969. Chen Zhenhong, Chen Yanpeng, Yang Jiaosheng, et al. Reservoir dynamic permeability of high rank coalbed methane and its effect on the coalbed methane output [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31 (6) : 966-969.

[22] Liu S M, Harpalani S, Pillalamarry M. Laboratory measurement and modeling of coal permeability with continued methane production: Part 2, modeling results [J]. Fuel, 2012, 94 : 117-124.

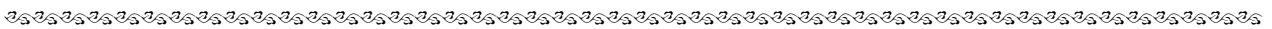
[23] 邵先杰, 董新秀, 汤达祯, 等. 煤层气开发过程中渗透率动态变化规律及对产能的影响 [J]. 煤炭学报, 2014, 39 (S1) : 146-151. Shao Xianjie, Dong Xinxiu, Tang Dazhen, et al. Permeability dynamic change law and its effect on productivity during coalbed methane development [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39 (S1) : 146-151.

[24] 李俊乾, 刘大猛, 姚艳斌, 等. 气体滑脱及有效应力对煤岩气相渗透率的控制作用 [J]. 天然气地球科学, 2013, 24 (5) : 1074-1078. Li Junqian, Liu Dameng, Yao Yanbin, et al. Controls of gas slippage and effective stress on the gas permeability of coal [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24 (5) : 1074-1078.

[25] Li J Q, Liu D M, Yao Y B, et al. Influencing factors of the Young's modulus of anthracite coals [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 295-298 : 2762-2765.

[26] 李俊乾, 姚艳斌, 蔡益栋, 等. 华北地区不同变质程度煤的物性特征及成因探讨 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40 (4) : 111-115. Li Junqian, Yao Yanbin, Cai Yidong, et al. Discussion on coal physical properties and formation with different metamorphic degree in North China [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40 (4) : 111-115.

(编辑 韩 彧)



(上接第 801 页)

[16] Chen J H, Fu J M, Sheng G Y, et al. Diamondoid hydrocarbon ratios: Novel maturity indices for highly mature crude oils [J]. Organic Geochemistry, 1996, 25 (3/4) : 179-190.

[17] Silva R C, Silva R S F, de Castro E V R, et al. Extended diamondoid assessment in crude oil using comprehensive two-dimensional gas chromatography coupled to time-of-flight mass spectrometry [J]. Fuel, 2013, 112 : 125-133.

[18] Wei Z B, Moldowan J M, Jarvie D M, et al. The fate of diamondoids in coals and sedimentary rocks [J]. Geology, 2006, 34 (12) : 1013-1016.

[19] Bastow T P, Van Aarssen B G K, Lang D. Rapid small-scale separation of saturate, aromatic and polar components in petroleum [J]. Organic Geochemistry, 2007, 38 (8) : 1235-1250.

[20] Qiu J X, Wu C M, Fang Y Y, et al. Derivatization and liquid chromatography-UV-tandem mass spectrometric analysis of perfluorinated carboxylic acids [J]. Journal of Chromatography A, 2012, 1235 : 132-140.

[21] Yang C, Piao X F, Qiu J X, et al. Gas purge microsyringe extraction for quantitative direct gas chromatographic-mass spectrometric analysis of volatile and semivolatile chemicals [J]. Journal of Chromatography A, 2011, 1218 (12) : 1549-1555.

[22] Zhu S K, Zhang W F, Dai W, et al. A simple model for separation prediction of comprehensive two-dimensional gas chromatography and its applications in petroleum analysis [J]. Analytical Methods, 2014, 6 (8) : 2608-2620.

[23] 梁前勇, 熊永强, 房忱琛, 等. 两种测定原油中金刚烷类化合物方法的对比研究 [J]. 地球化学, 2012, 41 (5) : 433-441. Liang Qianyong, Xiong Yongqiang, Fang Chenchen, et al. Comparison of two methods for the determination of diamondoids in crude oils [J]. Geochimica, 2012, 41 (5) : 433-441.

[24] Wingert W S. GC-MS analysis of diamondoid hydrocarbons in Smackover petroleum [J]. Fuel, 1992, 71 (1) : 37-43.

(编辑 黄 娟)