

煤在降温和减压过程中天然气释放的模拟实验 及在鄂尔多斯盆地的初步应用

王云鹏 彭平安 卢家烂 刘德汉

(中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室, 广州 510640. E-mail: wangyp@gig.ac.cn)

摘要 进行了煤在降温和减压过程中的生气实验, 研究了煤在高温高压下的储气能力及煤在降温和减压过程中的生气潜力. 通过煤的吸附性能和天然气的 PVT 计算, 初步探讨了高温高压状态下天然气在煤中的赋存状态. 结合鄂尔多斯盆地上古生界气藏的地质背景, 测定了煤在降温及减压进程中释放的气体体积、组成及碳同位素, 计算了上古生界煤系在晚白垩世抬升以后释放天然气的产率, 研究了该盆地抬升以后天然气的供给能力, 并对气藏成因进行了初步探讨. 结果表明鄂尔多斯盆地上古生界抬升以后, 储存在煤中的天然气的仍具有较大供给能力, 气藏存在弱的气体供给-逸散的动态平衡, 这为鄂尔多斯盆地可能是一深盆气藏提供了另一个证据.

关键词 煤 降温 减压 天然气释放 模拟实验 鄂尔多斯

进行煤在降温和减压过程中的生气实验主要有两个原因: 一是生烃模拟实验时, 煤在停止加热以后还有相当数量的天然气产出^[1]; 二是鄂尔多斯盆地上古生界气藏形成的特殊性, 即高有机质丰度的烃源(煤系地层)与低丰度气藏共存. 鄂尔多斯上古生界气藏气源以煤系为主, 有机质含量高, 热演化程度高, 孔渗性好, 具有很强的生气能力, 而储层为河流-三角洲相的低孔、渗致密砂岩(孔隙度 5%~10%, 渗透率 $(0.2\sim6) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)^[2]. 这样的生、储配置形成的气藏充满度应该非常高, 但勘探表明鄂尔多斯上古生界气藏是一低丰度、低压和低产气藏^[3]. 目前对气藏的形成机制尚没有统一的认识. 一些专家认为该气藏是深盆气藏^[4-6], 主要是由于鄂尔多斯盆地上古气藏为河流、三角洲相的岩性圈闭, 低孔渗储层, 盆地构造简单, 早期快速沉降, 后期整体抬升(尤其是盆地中东部), 而且气藏存在区域上气-水倒置, 在盆地东部存在水封现象等和加拿大阿尔伯达盆地相似^[5,6]. 但是和阿尔伯达盆地深盆气藏相比, 鄂尔多斯盆地是否为深盆气藏的一个关键是否存在气体供给-逸散动态平衡^[7]. 已证实鄂尔多斯盆地东北部存在大量的油苗和天然气逸散区^[5], 而上古生界煤系的供气能力由于受到构造抬升和古地温降低的影响, 已大大降低. 动力学的研究表明, 上古生界煤系不存在抬升后的二次生烃^[8]. 因此对气藏主要源岩——煤在抬升(即降温减压)过程的供气的能力研究就非常必要.

研究表明鄂尔多斯盆地在晚侏罗世~早白垩世存

在异常高地温场, 煤系地层最深埋深达 4000 多米, 早白垩世以后开始降温, 异常高地温场消失, 而且地层从 4000 m 整体抬升到 2100 m(最大)左右, 即早白垩世以后, 盆地煤系源岩主要以抬升(降温和降压)为主^[9]. 问题是在这个过程中煤系是否还有生气能力? 生气量是多少? 生气机制和生气类型是什么? 这是判断鄂尔多斯盆地是否存在天然气供给-逸散动态平衡及上古生界气藏类型的关键因素之一. 本文主要通过实验研究煤在高温高压下的储气能力, 煤在降温减压进程中生气量及其分子与碳同位素特征, 结合该盆地的地质特征对上古生界的成藏机制进行了初步探讨.

1 实验方法

我们用高压微重天平研究了煤的吸附性能, 它是根据吸附气体后质量微小变化的精确测量而得到的^[10]. 为了模拟抬升后的降温和减压过程, 我们采用了两种装置, 一种是开放的压机, 主要是模拟随着地层压力降低的降温过程, 系统通过外部加压方式使样品受压来模拟地层压力, 通过外加热模拟受热过程, 压机的结构图详见文献[1]. 由于这种装置主要是模拟地层压力, 因此也可称为干系统. 根据鄂尔多斯地质情况, 共设计了两个深度, 假设埋深从 4000 ~ 2000 m, 温压条件分别为: 第一平衡点压力为 104 MPa, 温度为 400℃; 第二平衡点压力为 60 MPa, 温度为 320℃. 另一种装置是带特殊控制开关的高压釜,

主要是模拟随着流体压力降低的降温过程. 该装置利用一个外部控制螺丝控制(打开或关闭)内部的一个圆锥形开关, 即能够在高温高压条件下, 将固液态与气态从物理上分隔开来, 并能单独对固、液部分进行降温 and 减压过程的模拟. 由于这种装置主要是模拟流体压力, 因此也可称为湿系统. 该装置同样也设计了两个温压条件, 即第一平衡点温度为 450℃, 流体压力为 40~60 MPa, 第二平衡点温度为 350℃, 流体压力为常压.

模拟实验过程分为两个阶段: 升温增压阶段和降温减压阶段. 首先快速升温升压至第一温度点, 用集气装置收集气体, 并恒温 50 h, 直达到平衡(即没有明显的气体产生), 测量并分析气体; 然后缓慢降温减压到第二个温度点, 重新收集在降压温过程中的气体, 并恒温 30 h 直达到平衡, 测量并分析气体.

2 实验结果

2.1 煤在高压下的气体吸附量

煤是有机质高度富集, 孔隙非常发育的有机岩石, 在高压下可以吸附相当数量的天然气^[10], 这一特征对于煤成天然气在高压下的保存和后期的释放都有一定程度的影响. 我们用高压微重天平测试了4个样品, 其气体吸附等容线(CH_4 , 30℃)见图1.

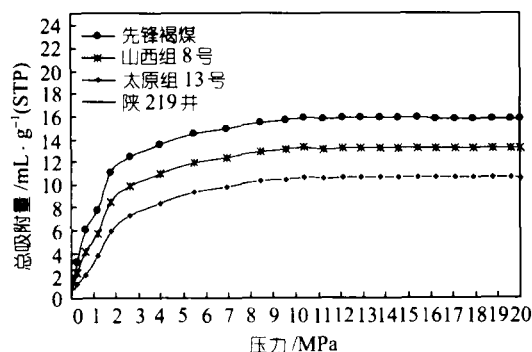


图1 4个煤样的气体吸附等容线(CH_4 , 30℃)

关于煤在高压的吸附性能, 国外已进行了许多研究^[10~14]. 本次研究中我们测试了模拟实验的褐煤及鄂尔多斯盆地石炭-二叠系煤样的高压气体吸附量(图1). 可以看出: 先锋褐煤最大吸附量达到 15.75 mL/g(STP); 山西组 8 号煤样最大吸附量达到 13.15 mL/g(STP); 太原组 13 号煤样最大吸附量达到 10.55 mL/g(STP); 陕 219 井山西组煤样最大吸附量为 6.55

mL/g(STP). 总的来看, 鄂尔多斯盆地煤的气体最大吸附量介于 6.55~13.15 mL/g(STP), 平均 10.08 mL/g(STP). 同时也可以看出气体吸附量还受煤的成分和成熟度的影响, 这些结果与国内外的研究结果基本一致^[10~15].

2.2 煤在降温减压过程中的气体产率

表1为利用上述两种装置模拟实验的结果. 从表1可以看出, 煤在模拟的降温减压过程中还有相当数量的天然气产出. 压机系统产率在 19.4~29.0 mL/g 之间, 高压釜系统产率在 14.55~79.5 mL/g 之间. 由于实验中在第一个温度点已达到平衡点, 可以认为在降温减压过程中没有新的天然气形成, 因此降温减压过程中所产的天然气主要是储存在煤中的天然气. 这一结果也表明煤在高温高压条件下有较高的储存天然气的的能力, 以上述结果为例, 煤在 400~450℃, 104 MPa 条件下(相当于埋深 4000 m 左右)储存天然气能力介于 15~79.5 mL/g 之间. 如果将第一个温度点看作煤热解产气过程的结束, 则第一到第二温度点可看作煤中储存的天然气的释放过程. 可以看出地层抬升(如 2000 m)后所产天然气中约 55%~75%(最高 79%)已在煤中饱和和后先期排出了, 储存释放天然气约占总产气量的 25%~45%(最高 57%).

在利用湿系统模拟流体压力时, 由于高压釜是开放的, 因此流体压力不可能太高, 这一点可以从表1中发现, 一般流体压力不超过 6 MPa, 这与实际地质情况相差很大. 例如根据压力史的模拟, 鄂尔多斯盆地上古生界最大古压力已接近或超过 50 MPa. 为了模拟较高的流体压力, 可以将高压釜开关关紧, 并相应增加煤样的重量和提高填充度, 即采取密闭加温的办法增大流体压力. 通过上述办法, 可以模拟到 30~51 MPa 的流体压力(见表1的后两个样品), 这为研究煤在高温高压下的储气能力及降温减压过程中天然气的释放过程提供了可能. 从上述两个样品的模拟结果看, 随着流体压力的提高, 煤在降温 and 减压过程中释放气体的体积大大增加, 到流体压力 51 MPa 时, 释放气体的体积已达到 136 mL/g(不降温).

为了预测煤在降温 and 减压过程中天然气的释放量, 我们对表1中的气体释放产率与最大流体压力进行了回归统计分析(WL-16 为只减压不降温过程, 故没有参加统计). 回归图见图2, 回归预测方程为: $y = 0.0001x^3 - 0.0552x^2 + 4.4189x - 0.2467$ ($R^2 = 0.9746$). 其中: x 为最大流体压力(MPa), y 为气体释放产率

表 1 高温高压体系中煤成气生成和降温减压进程中天然气释放的模拟实验结果

系统	编号	样品/g	温度/℃	压力/MPa	生气量/mL	产率/mL · g ⁻¹	阶段产率/mL · g ⁻¹	阶段生气比例/%
干系统	WL-3	辽河褐煤	450	104	629	29.30	20.89	71.30
		30	350	60	250		8.41	28.70
	WL-4	辽河褐煤	400	104	475	19.38	11.88	61.30
		40	320	60	300		7.50	38.70
	WL-5	先锋褐煤	450	5	112	14.55	6.27	43.10
		18	350	2	150		8.32	57.20
湿系统	WL-6	先锋褐煤	450	6	850	73.25	42.49	58.00
		20	350	2	615		30.77	42.00
	WL-7	先锋褐煤	450	8.2	950	79.50	47.46	59.70
		20	350	4	640		32.04	40.30
	WL-8	太原组 13#煤	450	4.1	826	60.80	41.30	67.93
		20	350	2.4	390		19.50	32.07
	WL-9	山西组 8#煤	450	4.4	975	70.25	48.75	69.40
		20	350	1	430		21.50	30.60
	WL-10	陕 219 井太原组煤	450	1	225	15.50	11.25	72.58
		20	350	0.4	85		4.25	27.42
	WL-15 ^{a)}	山西组 8#煤	580	26 ~ 13	3365	79.55	42.30	33.65
		10	300	13 ~ 0	4590		57.70	45.90
	WL-16 ^{a)}	抚顺镜煤	510	51 ~ 25	3845	136.0	28.30	38.45
		100	510	25 ~ 0	9764		71.70	97.64

a) 第一阶段为密闭升温升压

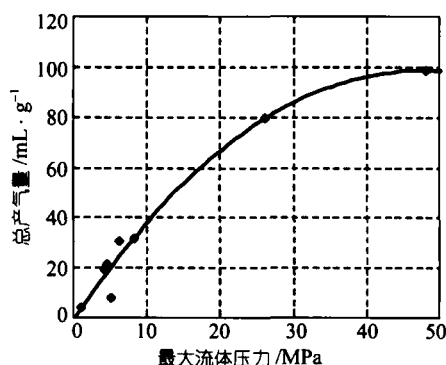


图 2 煤的气体释放产率与最大流体压力的回归图

(mL/g). 可以看出, 相关系数较高, R^2 达到 0.9746, 该方程可以用来预测煤在降温减压过程中天然气的释放量.

另外, 为了研究煤在降温减压过程中每降低单位压力气体释放的速率, 我们计算了煤在降温减压过程中每降低 1MPa 的平均气体产率. 对上述 8 次实验的平均表明, 煤在降温减压过程中气体释放速率为 $6.61 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{MPa}$. 但应该注意, 该平均值

在不同的压力阶段是不一样的, 我们在下面将详细讨论这个问题.

2.3 煤在降温和减压过程中的气体释放过程

为了更为准确地了解煤在降温和减压过程中的气体释放过程, 我们又精确测量了煤在减压过程中分阶段及累积的气体释放体积与释放速率(见图 3). 该实验也是利用高压釜(即湿系统), 增加样品量(抚顺镜煤 100 g), 增大填充度, 密闭升温至 400℃, 使流体压力达到 50 MPa 以上. 然后逐渐降压(恒温), 分阶段收集和测量气体, 实验结果见图 3.

从图 3 可以看出, 在不同的压力阶段, 随着压力的降低, 天然气释放的体积和速率并不一样. 从 50 ~ 20 MPa 的压力范围, 天然气释放的体积和速率较低, 累积释放气体产率约为 50 mL/g, 累积释放速率约为 3 mL/g.MPa; 而在 25~0 MPa 的压力范围, 天然气释放的体积和速率较高, 累积释放气体产率可达到 140 mL/g, 累积释放速率约为 9 mL/g.MPa. 各阶段气体释放的产率与速率也具有同样的规律. 上述结果表明, 在相对高压条件下(>20 MPa)的降压过程中释

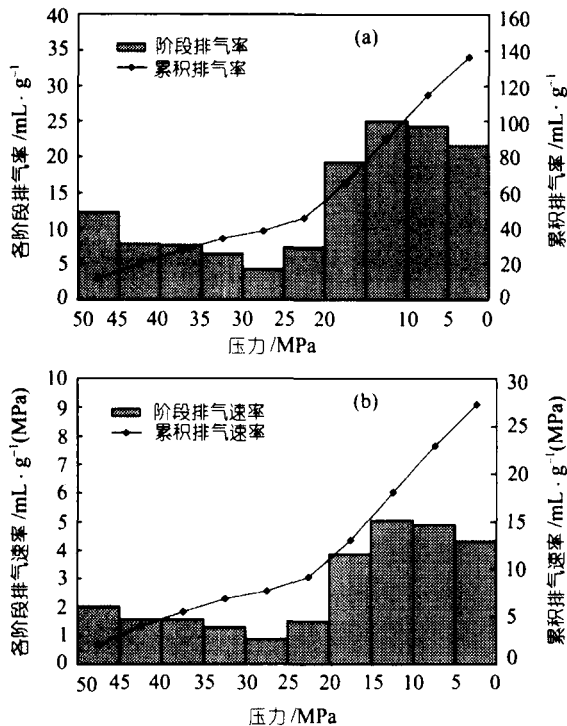


图3 煤在降温和减压过程中释放气体的阶段与累积产率(a)与速率(b)

放气体的产率和速率相对较低，而在相对低压的条件下(<20 MPa)的降压过程中释放气体的产率和速率相对较高，这可能和气体在煤中的存在状态有关。

2.4 煤在降温和减压过程中的气体组成与同位素特征

对煤在降温和减压过程中释放气体的组分和单体碳同位素进行了分析，分析结果见表 2。正如前面所述，第二阶段的气体主要是降压释放的，和第一阶段的天然气相比，降压释放的天然气具有如下特点：

- (1) 非烃含量较高，烃类气体含量较低，烃类气体一般低 4%~6%；
- (2) 烃类气体中，甲烷含量较低，重烃含量较高，干燥系数较低；
- (3) 烃类气体的单体碳同位素都相对较轻，一般轻 3‰~4‰。

上述特征反映出释放天然气的成熟度较低，具有早期热解气的组成特征。这也说明，该类气体主要是释放早期储存在煤中的气体，而不是后期热解形成的。

为了研究在相对较高的压力条件下降压所释放出的气体组分与同位素，我们对图 3 实验中的各阶段所释放气体组分与同位素也进行了分析，结果见表 3。

可以看出，表 3 与表 2 具有相似的规律，即随着压力的降低，释放出的气体烃类气体含量越来越低，非烃含量越来越高；烃类气体的干燥系数也越来越低；非烃气体中 CO₂ 和 CO 含量增高，而 O₂ 含量降低；烃类气体(C₁, C₂, C₃)的碳同位素也越来越轻。上述结果表明早期释放出的气体具有较高的成熟度，晚期释放出的气体成熟度相对较低。这也说明煤系这种特殊的气源岩，有机质高度富集，孔隙非常发育，在高压下具有很强天然气储存能力。早期形成的气体先被煤吸附储存，而后生成的气体后被储存，达到平衡后再生成的天然气将直接排出。而随着压力的降低，后期生成的气体先被释放出来，这就是为什么后期释放出来的气体成熟度反而低的缘故。

3 初步应用及讨论

3.1 高压下气体在煤中的储存形式

煤是高度富集的有机质，可以吸附相当的天然气。同时研究表明，煤中的孔隙非常发育，孔隙大小介于 0.5~100 nm，而天然气中主要气体分大小介于

表 2 煤在降温和减压过程中释放气体的主要组分和单体碳同位素

编号	温度/℃	压力/MPa	气体产率/mL·g ⁻¹	烃气/%	C ₁ /%	C ₂ [*] /%	干燥系数	δ ¹³ C ₁ /‰	δ ¹³ C ₂ /‰	δ ¹³ C ₃ /‰
WL-4	400	104		6.92	3.71	3.21	0.57	-34.54	-25.70	-27.94
	320	60	19.40	17.52	8.73	8.79	0.52	-40.63	-29.89	-28.62
WL-6	450	6.0	73.25	13.21	7.75	5.46	0.60	-35.00	-29.82	-29.98
	350	2.0		9.48	4.76	4.72	0.55	-36.76	-29.56	-27.97
WL-7	450	8.2	79.50	40.11	22.82	17.29	0.59	-31.75	-25.96	-26.51
	350	4.0		9.21	6.21	3.00	0.69	-34.51	-27.38	-27.80
WL-8	450	4.1	60.80	72.74	54.57	18.17	0.76	-30.07	-24.51	-24.35
	350	2.4		68.16	48.89	19.28	0.72	-34.55	-24.55	-25.34
WL-9	450	4.4	70.25	76.30	61.64	14.66	0.81	-31.45	-23.02	-23.03
	350	1.0		70.99	59.40	11.59	0.84	-33.41	-23.84	-23.74

表3 煤在降温和减压过程中各阶段释放气体的主要组分和单体碳同位素

编号	压力降低/MPa	烃类气体/%	C ₁ /%	C ₂₊ /%	干燥系数	CO ₂ /%	O ₂ /%	CO/%	δC ₁ /‰	δC ₂ /‰	δC ₃ /‰
WL16-G-1	51~35	53.83	29.35	24.48	0.55	36.57	1.52	1.00	-28.80	-24.65	-23.85
WL16-G-2	35~15	48.04	23.26	24.78	0.48	37.20	1.43	1.59	-29.32	-25.77	-24.82
WL16-G-3	15~0	30.82	11.53	19.28	0.37	59.25	0.70	2.41	-30.81	-25.87	-25.70

3~6Å之间^[16],因此,相对于气体分子,煤中的孔隙空间也是很大的.除了吸附以外,气体应该还有其他的存在形式,这方面已有相关的研究^[17~19].一般来讲,天然气在煤中主要有吸附态、游离态和溶解态3种形式.上述实验结果表明:煤吸附气的量为6.55~15.75 mL/g(STP),平均11.5 mL/g(STP).降温和减压过程中释放气体约30~50 mL/g(在高压情况下更大),远大于煤的吸附气体量,说明还有相当一部分气体是以游离态存在.对于煤中以游离态存在的天然气是否存在相变也是一个至关重要的问题,因为如果存在气体相变的话,煤中储存气体的能力将大大增加.因此我们又利用PVTsim软件模拟了天然气在高温高压下的相变特征.图4为苏16井天然气的相图,可以看出:在这个温-压状态下,苏16井的纯天然气不可能有气态到液态的相变.通过分析也可以发现,绝大多数的煤成天然气在这个温压状态下都不可能有气态到液态的相变.至于溶解气以及气体在煤这种有机质高度富集的多孔介质中,相变温度与压力是还会产生明显的变化,由于本文没有研究,尚不能给出结论.

3.2 在鄂尔多斯盆地的初步应用

在本次实验中选用了褐煤、镜煤及鄂尔多斯盆地太原组山西组四种不同类型的煤样,从实验结果

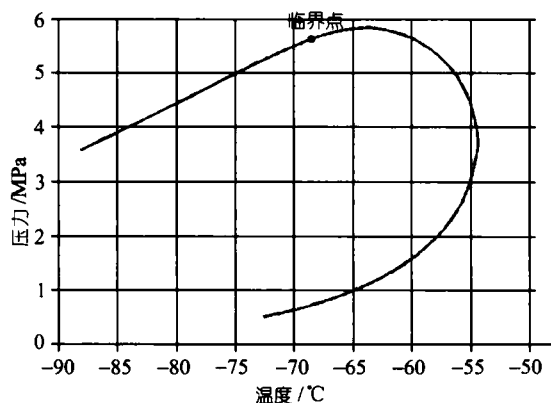


图4 鄂尔多斯盆地苏16井天然气的相图

天然气组成(%): N₂: 0.847, CO₂: 1.851, C₁: 86.964, C₂: 7.969, C₃: 1.661, iC₄: 0.277, nC₄: 0.284, iC₅: 0.106, nC₅: 0.041

看,煤样的组成及成熟度对于实验的结果还是有一定的影响(表1).根据鄂尔多斯盆地的地质背景,我们初步假设其上古生界煤层从埋深4000 m抬升到2000 m左右.当对应的古压力从40 MPa降低到20 MPa,从实验可知,太原组的煤释放气的产率相对较低,介于4.25~19.5 mL/g之间,平均11.88 mL/g,山西组的煤释放气的产率相对较高,介于21.5~57.7 mL/g之间,平均39.6 mL/g.山西组与太原组的平均释放气体产率为25.74 mL/g.利用上述煤在降温和减压过程中天然气的释放量预测方程,计算出其气体释放的产率为27.738 mL/g.二者也比较接近.

从上述实验和计算结果可以看出来,鄂尔多斯盆地上古生界煤层从埋深4000 m抬升到2000 m左右,可能释放出的天然气量还是很大的.结合气体的释放过程(图3),我们知道,如果压力继续降低到20 MPa以下,煤中释放出的气体量和释放速率还将更大,这一方面说明作为源岩的煤系地层中还有相当数量的气体没有释放,另一方面也说明在鄂尔多斯盆地抬更为强烈的地区(压力小于20 MPa),从煤中释放出的气体量应该更大一些.

另外我们可以根据鄂尔多斯盆地西部(如苏里格气田)天然气的组成和同位素也可以判定是否为释放气.实际上许多研究都注意到了鄂尔多斯盆地天然气组成及气体同位素与源岩的成熟度并不匹配,特别是甲烷同位素偏轻、干燥系数较低与源岩的成熟度较高并不匹配^[21].如苏里格地区石炭-二叠纪煤成熟度(*R*_o%)均超过2.0,但苏里格地区有些地区天然气却较湿(干燥系数可达到86%),而甲烷同位素却较轻(-29.96‰~36.45‰)^[2],利用Stahl的公式也可以发现这一现象^[20].另外相对于其他地区,苏里格地区天然气中非烃气体的含量也较高,这些都表现出气体的成熟度低于源岩(煤)的成熟度.前期有的研究认为是混入了下古生界的油型气^[21,22],也有的研究认为是混入了石炭-二叠纪的油型气^[2,23].但是从本次实验的结果看,这种成熟度较低的天然气很可能早期形成

并储存在煤系源岩中,由于后期的抬升而从煤系中释放出来的煤成气。而且苏里格地区位于盆地西部,后期抬升幅度确实较大,我们认为这也许正好解释了该地区天然气成熟度与源岩(煤)的成熟度不匹配的现象。如果是这样,可以初步判断,鄂尔多斯盆地在后期抬升及源岩停止生烃以后,储存在源岩中的天然气还可以向储层供气,气藏存在弱的气体供给-逸散的动态平衡。

当然本文主要从实验的结果探讨,由于煤的复杂性及在实际地质情况下压力的降低在各个地区并不一样,因此,上述结果应用于地质实际还需进一步的工作。

4 结论

本文进行了煤在降温和减压过程中的生气实验,研究了煤在高温高压下的储气能力及煤在降温和减压过程中的生气潜力。实验结果说明,煤系作为一种孔隙非常发育的有机岩,具有很大气体储藏能力。其中煤的气体最大吸附量介于 6.55~13.15 mL/g(STP),平均 11.5 mL/g (STP)。在降温和减压过程中会有相当数量的天然气释放出来,释放气体约 30~50 mL/g。通过相图分析发现,绝大多数的煤成天然气在煤中主要以吸附与游离态存在。

本文还研究了煤在降温和减压过程中的气体释放过程,发现在相对高压条件下(>20 MPa)的降压过程中释放气体的产率和速率相对较低,而在相对低压的条件下(<20 MPa)的降压过程中释放气体的产率和速率相对较高,这可能和气体在煤的存在状态有关。通过对释放气体组分与同位素分析表明:煤系早期形成的气体先被煤吸附储存,而后生成的气体后被储存。而随着压力的降低,后期生成的气体先被释放出来,早期释放出的气体具有较高的成熟度,晚期释放出的气体成熟度相对较低。利用这一结果,可以解释鄂尔多斯盆地西部地区天然气成熟度与源岩(煤)的成熟度不匹配的现象,并初步推断该地区(如苏里格气田)可能为从煤中释放的气体。

鄂尔多斯盆地上古生界煤层从埋深 4000 m 抬升到 2000 m 左右,所产气体中有相当部分来自于储存在煤系地层中。实验表明,山西组与太原组的平均释放气体产率为 25.74 mL/g,利用煤在降温和减压过程中天然气的释放量预测方程,计算出其气体释放的产率为 27.738 mL/g。抬升和生烃作用停止以后,储

存在煤孔隙中的天然气由于降温和减压作用而释放出来,也可以继续向储层供气。由此推测,鄂尔多斯盆地上古生界气藏存在弱的气体供给-逸散的动态平衡,这为鄂尔多斯盆地可能是一深盆气藏提供了一个证据。

致谢 中国科学院广州地球化学研究所刘金钟研究员、张惠芝研究员和向同寿高级工程师协助进行了有机分析,特致以诚挚谢意。本工作受中国科学院知识创新方向性项目(KZCX2-110)、国家重点基础研究发展规划项目(编号:2001CB209101)及国家自然科学基金项目(批准号:40171077)资助。

参 考 文 献

- 1 傅家谟,盛国英,刘德汉,等. 煤成烃地球化学. 北京:科学出版社,1990
- 2 戴金星,陈践发,钟宁宁,等. 中国大气田及其气源. 北京:科学出版社,2003
- 3 付金华,段晓文,席胜利. 鄂尔多斯盆地上古生界气藏特征. 天然气工业,2000,20(6): 16~19
- 4 孙粉锦,许化政,陈孟晋. 鄂尔多斯深盆地. 现代地质,2001,15(3): 309~314
- 5 李振铎,胡义军,谭芳. 鄂尔多斯盆地上古生界深盆地研究. 天然气工业,1998,18(3): 10~16
- 6 李振铎. 鄂尔多斯盆地上古生界深盆地勘探研究新进展. 天然气工业,1999,19(3): 15~17
- 7 Masters J A. Deep basin gas trap, Western Canada. AAPG Bulletin, 1979, 63(2): 152~181
- 8 付少英,彭平安,张文正,等. 鄂尔多斯盆地上古生界煤的生烃动力学研究. 中国科学, D 辑, 2002: 32(10): 812~818
- 9 刘新社,席胜利,付金华,等. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气生成. 天然气工业,2002,20(6): 19~22
- 10 Krooss B M, van Bergen F, Gensterblum Y, et al. High-pressure methane and carbon dioxide adsorption on dry and moisture-equilibrated Pennsylvanian coals. International Journal of Coal Geology, 2002: 51(2002): 69~92
- 11 Bustin R M, Clarkson C R. Geological controls on coalbed methane reservoir capacity and gas content. International Journal of Coal Geology, 1998, 38: 3~26
- 12 Clarkson C R, Bustin R M. Variation in micropore capacity and size distribution with composition in bituminous coal of the Western Canadian Sedimentary Basin. Fuel, 1996, 75: 1483~1498
- 13 Clarkson C R, Bustin R M. Binary gas adsorption/desorption isotherms: effect of moisture and coal composition upon carbon dioxide selectivity over methane. International Journal of Coal Geology, 2000, 42: 241~271

- 14 Crosdale P J, Beamish B B, Valix M. Coalbed methane sorption related to coal composition. *International Journal of Coal Geology*. 1998, 35: 147~158.
- 15 张胜利, 李宝芳. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气控件因素探讨. *石油勘探与开发*, 1996, 23(4): 11~14
- 16 戴金星, 钟宁宁, 刘德汉, 等. 中国煤成煤成大中型气田地质基础和主控因素. 北京: 石油工业出版社, 2000. 210~223
- 17 Crooss B M, Bergen F, Gensterblum Y, et al. High-pressure methane and carbon dioxide adsorption on dry and moisture-equilibrated carboniferous coals. In: Martin F, eds. *Emerging Concepts in Organic Petrology and Geochemistry*. Banff: The Society for Organic Petrology, 2002. 9~10
- 18 Levine J R. Understanding and measuring the sorption/desorption of methane and other volatile constituents from coal. In: Martin F, eds. *Emerging Concepts in Organic Petrology and Geochemistry*. Banff: The Society for Organic Petrology, 2002. 10~11
- 19 Yunpeng Wang, Jialan Lu, Dehan Liu, et al. Gas generation simulated experiment of coal in process of temperature and pressure decreasing: implications to coal storage capacity of gases and formation of the deep-basin gas reservoir in Ordos Basin, China. *The 20th International Meeting on Organic Geochemistry*, P II /019, 2003, 9. Krakow, Poland
- 20 Stahl W J. Carbon isotope fractionations in natural gases. *Nature*, 1974, 251(5471): 134~135
- 21 徐永昌, 沈平, 张晓宝. 中国西部大中型气田同位素特征及西气东输的资源储备. *矿物岩石地球化学通报*, 2002, 21(2): 73~77
- 22 黄第藩, 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地中部大气田的气源判别. *科学通报*, 1996, 41(17): 588~1592
- 23 夏新宇, 赵林, 李剑锋, 等. 长庆气田天然气地球化学特征及奥陶系气藏成因. *科学通报*, 1999, 44(10): 1116~1119

(2004-08-05 改稿, 2004-11-25 收修改稿)

《科学通报》投稿指南

在《科学通报》发表的原创性研究论文应同时具备以下条件:

- (i) 是自然科学基础理论或应用研究的最新成果.
- (ii) 有重要科学意义, 属国际研究热点课题.
- (iii) 有创新(新思路、新方法、新认识、新发现等).
- (iv) 对本领域或/和相关领域研究有较大的促进作用.
- (v) 就内容和写作风格而言, 对大同行或非同行科学家都有可读性和启发性.

文章应论点明确、数据可靠、逻辑严密、结构简明; 尽量避免使用多层标题; 文字、图表要简练, 在较少的篇幅内提供较大的信息量; 论述应深入浅出、表达清楚流畅; 专业术语的运用应准确, 前后保持一致.

题目是文章的点睛之处, 要紧扣主题, 有足够的信息, 能引起读者的兴趣; 应避免使用大而空的题目, 最好不用“…的研究”、“…的意义”、“…的发现”、“…的特征”等词; 回避生僻字、符号、公式和缩略语. 一般不超过 24 个汉字, 英文以两行为宜. 不使用副标题.

摘要应反映文章的主要内容, 阐明研究的目的、方法、结果和结论, 尽量避免使用过于专业化的词汇、特殊符号和公式. 摘要的写作要精心构思, 随意从文章中摘出几句或只是重复一遍结论的做法是不可取的.

关键词用于对研究内容的检索. 因此, 关键词应紧扣文章主题, 尽可能使用全国科学技术名词审定委员会颁布

的主题词, 不应随意造词.

引言是文章的重要组成部分, 关系到文章对读者的吸引力. 在引言中应简要回顾本文所涉及到的科学问题的研究历史, 尤其是近 2~3 年内的研究成果, 需引用参考文献; 并在此基础上提出本文要解决的问题; 最后扼要交代本研究所采用的方法和技术手段等.

讨论和结论部分应该由观测和实验结果引申得出, 切忌简单地再罗列一遍实验结果. 讨论得出的结论与观点应明确, 实事求是.

致谢部分应先向对本文有帮助的有关人士表示谢意; 然后列出本工作的资助基金来源, 并注明项目批准号.

参考文献引用是否得当, 是评价论文质量的重要标准之一. 如果未能在论文中引用与本项研究有关的主要文献, 尤其是近 2~3 年内的文献, 或是主要引用作者自己的文献, 编辑可能会认为对这篇文章感兴趣的读者不多. 对文中所引参考文献, 作者均应认真阅读过, 对文献的作者、题目、发表的刊物、年代、卷号和起止页码等, 均应核实无误, 并按《科学通报》体例要求的顺序排列. 切忌转引二手文献的不负责任的做法.

科技论文的署名是一件十分严肃的事情, 在论文中署名的每一位作者都应对文中的论点和数据负责. 第一作者应保证每一位作者在投稿前都读过这篇文章, 并同意署名. 文章的署名在投稿后不可随意更改.