

文章编号: 0253-9993(2009)12-1649-06

# 煤层气损失气含量模拟试验及结果分析

张 群, 范章群

(煤炭科学研究总院 西安研究院, 陕西 西安 710054)

**摘 要:** 利用高压解吸试验装置, 模拟煤芯在绳索取芯时钻孔提芯、地面暴露和密封罐中3个阶段经历的压力变化, 对2种煤阶3种粒级的5个煤样, 分别在高压匀快速降压和正常大气压条件下进行了解吸试验, 实测了模拟损失气量, 揭示了煤样在3个连续阶段甲烷气体的解吸变化规律, 并将实测的模拟损失气量与美国矿业局直接法估算的损失气量进行了对比。结果表明: 煤样的甲烷气体解吸量曲线呈明显的3段型, 在3个不同阶段, 甲烷气体的平均解吸速率差异很大, 前两者分别是后者的12~20和6~8倍; 煤样粒度大小对甲烷气体解吸速率影响大, 同一煤层粒度分别为1~3 mm煤样, 30~50 mm煤样和 $\phi 89$  mm柱状煤芯的煤样, 甲烷气体平均解吸速率的比值约为3:2:1; 实测的模拟损失气量比美国矿业局直接法估算的损失气量高很多, 前者是后者的8~16倍, 并且较小粒级的煤样, 两者的差异更大。认为美国矿业局直接法估算的损失气量不准确, 比实际低很多, 该方法有待进一步完善。

**关键词:** 煤层气; 损失气; 高压解吸

中图分类号: P618.11 文献标识码: A

## Simulation experiment and result analysis on lost gas content of coalbed methane

ZHANG Qun, FAN Zhang-qun

(Xi'an Research Institute, China Coal Research Institute, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** A high pressure desorption apparatus was established. The pressure changes experienced by coal core during three stages of core recovery, exposed to atmosphere and sealed-in canister were simulated. Desorption experiments for five coal samples with three particle sizes from two rank coals were respectively performed under rapid drop pressure from approximate 8 MPa to ambient pressure. Volumes of simulated lost gas of methane were measured. The desorption characteristics of methane gas from coal samples were revealed during the above three stages. Comparison between the measured volume of simulated lost gas and the volume estimated by USBM Direct method was made. The result shows that the curves shapes of methane desorption volume from coal samples all have the characteristics of three section pattern. Average desorption rates of methane in above three stages have great differences, the rates in the former two stages are almost respectively 12~20 times and 6~8 times as large as in the last stage. Coal particle size also has much influence on desorption rate of methane gas from coal sample. The ratios of average desorption rates of methane gas from the three distinct samples with 1~3 and 30~50 mm particle sizes and  $\phi 89$  mm core size of the same coal are about 3:2:1. The measured volume of the simulated lost gas is much higher

收稿日期: 2009-08-24 责任编辑: 王婉洁

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50534070); 国家科技重大专项大型油气田及煤层气开发项目(2008ZX05040-004)

作者简介: 张 群(1958—), 男, 安徽巢湖人, 研究员, 博士生导师. Tel: 029-87862376, E-mail: zhangqun1@vip.163.com

than one estimated by USBM Direct method, the former is 8 ~ 16 times larger than the later, and the smaller the particle size, their ratio is much more different. It is thought that the lost gas volume estimated by USMB Direct method is inaccurate, and much lower than the original one. This method needs to be modified by performing further research work.

**Key words:** coalbed methane; lost gas; high pressure desorption

煤层气含量是表征煤层气储层特征的关键储层参数之一, 准确获取煤层气含量对于煤层气资源勘探开发和煤矿瓦斯灾害防治具有重要意义<sup>[1-2]</sup>. 按照煤田地质勘探和煤层气勘探过程中通用的从钻孔采取煤芯方法和煤层气含量测定方法<sup>[3]</sup>, 煤层气含量等于解吸气含量、残余气含量和损失气含量 3 部分之和, 其中解吸气含量和残余气含量是通过解吸试验直接实测的; 损失气含量是钻孔中煤芯在提升过程与地面暴露过程中散失掉的那一部分气体量, 无法测得, 只能按照一定的方法进行估算. 国内外学者们先后提出了许多估算煤层气损失气含量的方法<sup>[4-5]</sup>, 但是实际勘探工作中, 广泛采用美国矿业局 (USBM) 于 1973 年在前人研究成果基础上改进提出的直接法 (Direct method)<sup>[6-7]</sup> 来估算损失气含量. 尽管如此, 由于美国矿业局直接法在推导过程中, 为了求解容易, 采用的初边条件与实际情况差异较大, 加之又对解析解作了简化处理以使结果表达式更简单<sup>[8]</sup>, 因而利用直接法估算的损失气含量的准确程度受到质疑. 许多煤矿瓦斯数据表明, 开采煤层的实际煤层气含量普遍高于煤田勘探阶段测得的煤层气含量, 一些按勘探结果确定为低瓦斯的煤矿, 投产后成为高瓦斯矿井, 究其根源可能与直接法估算的损失气含量偏低有关.

本文利用高压解吸试验装置, 首先将有代表性不同煤级和粒级大小的煤样密封于高压容器中吸附甲烷气体, 直至达到吸附平衡. 然后模拟煤芯在绳索取芯时从钻孔孔底提升到孔口、地面暴露以及密封于解吸罐中 3 个阶段经受的的压力变化过程, 进行高压匀快速降压解吸试验和正常大气压下解吸试验, 分别实测了这 3 个阶段即煤芯在模拟的钻孔提芯阶段、地面暴露阶段解吸出的气体量, 以及密封罐中解吸出的气体量. 为区别起见, 本文将前者称为模拟损失气量, 后者称为罐中解吸气量. 并分析了解吸气产出的速率、变化规律及其影响因素; 最后将本文实测的模拟损失气量与美国矿业局直接法估算的损失气量进行了对比, 对后者估算结果的准确性作了分析评价.

## 1 煤样和实验

煤样采自石炭-二叠纪河东煤田离柳煤矿区的柳林和侏罗纪黄陇煤田焦坪煤矿区的下石节, 煤岩煤质分析和高压等温吸附试验结果见表 1. 用于高压解吸试验煤样的粒级和质量见表 2.

表 1 试验煤样的煤岩煤质分析和高压等温吸附试验结果

Table 1 The results of coal petrology and chemistry analysis and isothermal adsorption test from coal samples

| 样品组号 | 采样地点 | 煤岩分析/% |      |     |             | 工业分析/%   |       |           |                               | 等温吸附试验    |     | 煤类 |
|------|------|--------|------|-----|-------------|----------|-------|-----------|-------------------------------|-----------|-----|----|
|      |      | 镜质组    | 惰质组  | 壳质组 | $R_{o,max}$ | $M_{ad}$ | $A_d$ | $V_{daf}$ | $V_{L,ad}/(m^3 \cdot t^{-1})$ | $p_L/MPa$ |     |    |
| 1    | 陕西焦坪 | 36.4   | 62.8 | 0.8 | 0.57        | 3.48     | 9.43  | 27.53     | 17.88                         | 5.53      | 不黏煤 |    |
| 2    | 山西柳林 | 83.9   | 10.8 | 5.3 | 1.41        | 0.76     | 6.38  | 20.40     | 27.50                         | 4.06      | 焦煤  |    |

表 2 试验煤样的粒级和质量

Table 2 Particle size and mass of coal samples

| 样品编号 | 粒级大小/mm  | 质量/g |
|------|----------|------|
| 焦坪-1 | 1~3      | 500  |
| 焦坪-2 | 30~50    | 640  |
| 焦坪-3 | φ89 柱状煤芯 | 901  |
| 柳林-1 | 1~3      | 680  |
| 柳林-2 | 30~50    | 629  |

高压解吸试验装置包括样品缸、参考缸、连接管线、阀门、针型微调阀、气体计量仪、恒温水浴、温度和压力传感器、数据采集和记录系统、高压气瓶、提升系统等. 模拟试验方法和步骤: ① 将煤样装入样品缸密封, 放入 39 °C 恒温水浴中; ② 向样品缸中充入高压甲烷气体直至压力达到 8.3 MPa 后关闭阀门; ③ 让煤样吸附甲烷气体, 直到吸附平衡(连续 3 h 内样品缸的压力波动等于或小于

0.001 5 MPa), 达到吸附平衡的时间为 3 ~ 8 d, 与煤样粒级大小有关; ④ 向样品缸中注水, 驱替出样品缸中的自由气体, 持续 1 h; ⑤ 模拟煤芯在绳索取芯时从钻孔孔底提升到孔口阶段经受的压力变化过程, 按照 0.667 MPa/min 的速率进行匀快速降压, 直到压力降为正常大气压, 同时每间隔 1 min 计量降压过程中解吸出的气体量; ⑥ 将样品缸提出水浴, 模拟地面暴露过程, 在大气压下解吸 8 min, 计量每 1 min 内解吸出的气体量; ⑦ 把样品缸放回恒温水浴, 按照常规方法继续进行 6 h 的解吸试验, 其中有 2 个煤样一直持续到解吸试验结束, 并做了残余气试验, 以分析模拟损失气量在总的气含量中所占比例.

此外, 将样品缸充满水, 按上述试验过程计量水中析出的溶解气量, 折算出不同解吸压力下单位质量水中气体的溶解量, 根据每个煤样试验时样品缸中水量算出不同解吸压力下总的溶解气量, 从相应压力下煤样解吸气体量中扣除, 以消除水中溶解气对煤样解吸气的影响, 最后将计量的气体量换算为标准状态下的气体量.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 水样和煤样的解析压力及变化特征

1 个水样和 5 个煤样的初始解吸压力和模拟各阶段的解吸时间见表 3. 试验过程中, 通过精细调节样品缸排气口的阀门开启大小, 确保每个煤样在试验的第 1 阶段, 即模拟绳索取芯时钻孔提芯阶段, 缸内解吸压力呈匀速快速下降, 水样和焦坪 3 煤样的解吸压力随时间下降情况如图 1 所示, 其他 4 个样品的情况与其类似. 试验的第 2 和第 3 阶段, 水样和煤样是在正常大气压下解吸的. 试验中虽然各样品的钻孔提芯时间和地面暴露时间稍有差异, 但是对研究结果影响不大.

表 3 试验样品的初始解吸压力和解吸时间

Table 3 Initial desorption pressure and the time in each test stage

| 样品编号 | 初始解吸压力/MPa | 解吸时间/min |      |              |
|------|------------|----------|------|--------------|
|      |            | 钻孔提芯     | 地面暴露 | 密封罐中         |
| 水样   | 8.15       | 14       | 8    | 365          |
| 焦坪 1 | 8.24       | 14       | 10   | 365          |
| 焦坪 2 | 8.31       | 14       | 8    | 365          |
| 焦坪 3 | 8.17       | 13       | 8    | 365 + 33 249 |
| 柳林 1 | 8.09       | 18       | 8    | 365          |
| 柳林 2 | 8.32       | 13       | 8    | 365 + 12 840 |

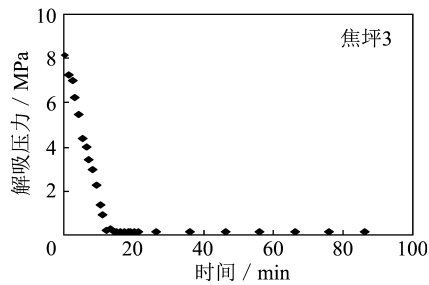
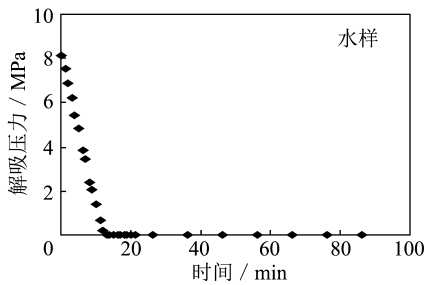


图 1 解吸压力与时间关系

Fig. 1 Relation between desorption pressure and time

### 2.2 水样的溶解气试验结果及分析

水样的溶解气试验结果分别见表 4 和图 2. 由图 2 (a) 可知, 在试验第 1 阶段, 随着解吸压力匀快速下降, 溶解气累计产出量随时间呈线性增加; 但在第 2, 3 阶段, 溶解气产出量很少. 图 2 (b) 表明, 在试验第 1 阶段, 解吸压力与单位质量水中释放的溶解气量也成呈线性关系. 煤样试验时, 在样品缸中气体吸附达到平衡后向其中注入水

表 4 水样的溶解气试验结果

Table 4 The results of dissolved methane gas test for water sample

| 模拟阶段 | 初始解吸压力/MPa | 溶解气释放量              |  |
|------|------------|---------------------|--|
|      |            | 气体量/cm <sup>3</sup> | 气含量/(cm <sup>3</sup> · g <sup>-1</sup> ) |
| 钻孔提芯 | 8.16       | 1 083.52            | 0.880                                    |
| 地面暴露 |            | 6.09                | 0.005                                    |
| 密封罐中 |            | 43.51               | 0.035                                    |
| 合计   |            | 1 133.12            | 0.920                                    |

注: 缸内水体积为 1 235 cm<sup>3</sup>.

驱替剩余自由气体,一些剩余自由气体溶解到水中,在随后的降压过程中,从样品缸产出的气体不仅是由煤样解吸出的吸附气体,也包括部分由水释放出的溶解气体. 鉴于本文水样试验和煤样试验过程中控制的压力下降情况基本相同,因而基于图 2 (b) 所示的线性关系和各个煤样试验时注入样品缸中的水量,可以计算出各煤样试验过程中在不同时刻的相应压力下产出的溶解气量. 从样品缸产出的气体量中扣除溶解气量,就得到各煤样由吸附气解吸产出的解吸气量.

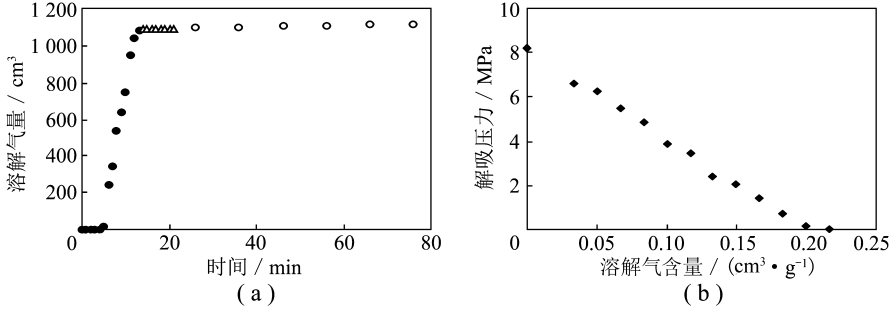


图 2 水样的溶解气释放量与解吸压力和时间的关系

Fig. 2 Relation among release amount of dissolved methane gas, desorption pressure and time

2.3 煤样的解吸气试验结果及分析

煤样的解吸气试验结果见表 5 和图 3. 为了使图面突出显示模拟提芯和地面暴露阶段的试验结果,图 3 省去了 100 ~ 400 min 之间的试验结果.

表 5 煤样的解吸气试验结果及分析

Table 5 The results and analysis of desorbed methane gas from coal samples

| 参 数   | 样 品      |          |          |          |          |          |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|   | 焦坪 1     | 焦坪 2     | 焦坪 3     | 柳林 1     | 柳林 2     |          |
| 模拟损失气量/cm <sup>3</sup>                      | 钻孔提芯     | 2 643.69 | 2 342.94 | 1 639.08 | 8 046.93 | 1 138.30 |
|   | 地面暴露     | 795.19   | 536.68   | 494.08   | 1 228.34 | 554.41   |
|   | 合计       | 3 438.88 | 2 879.62 | 2 133.16 | 9 275.27 | 1 692.71 |
| 密封罐中解吸气量/cm <sup>3</sup>                    | 1 174.85 | 878.05   | 207.26   | 3 368.15 | 2 487.10 |          |
| 模拟损失气含量/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> ) | 6.88     | 4.50     | 2.37     | 12.88    | 2.69     |          |
| 模拟气含量/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )   |          |          | 9.17     |          | 15.94    |          |
| 理论气含量/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )   | 10.70    | 10.74    | 10.66    | 18.31    | 18.48    |          |
| 模拟损失气含量占模拟气含量的比例/%                          |          |          | 26       |          | 17       |          |
| 模拟损失气含量占理论气含量的比例/%                          | 64       | 42       | 22       | 70       | 15       |          |

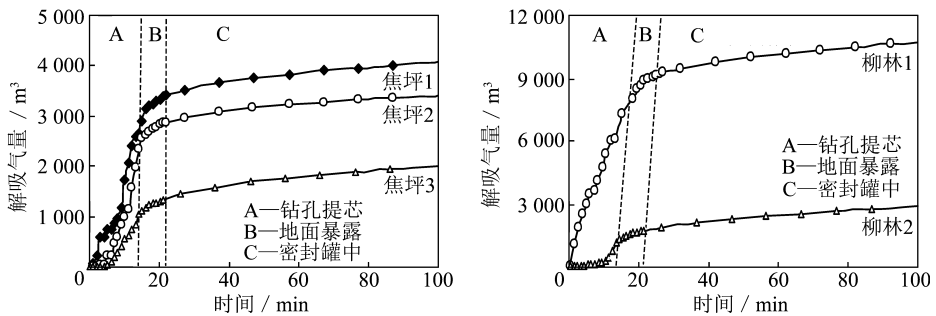


图 3 煤样的气体解吸量曲线

Fig. 3 Methane gas desorption curves of coal samples

图 3 显示 5 个煤样的甲烷气体解吸量随时间的变化曲线, 简称甲烷气体解吸量曲线, 都呈现明显的 3 段型, 曲线斜率在模拟钻孔提芯、地面暴露和密封罐中阶段存在显著差异, 前者明显大于后者. 进一步分析看出, 煤样解吸气量的平均解吸速率, 即各阶段的单位时间内解吸气量, 在模拟钻孔提芯阶段最大, 地面暴露阶段居中, 在密封罐中阶段最小 (表 6), 钻孔提芯、地面暴露、密封罐中 3 个阶段的平均解吸速率比值主要为 (12~20):(6~8):1, 也就是说, 煤样在钻孔提芯阶段和地面暴露阶段的平均解吸速率一般分别是密封罐中阶段的 12~20 和 6~8 倍.

表 6 煤样的平均气体解吸速率及其比较

Table 6 The average gas desorption rates and its comparison of coal samples

| 样品<br>编号 | 平均解吸速率/( $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ) |      |      | 与罐中解吸速率的比较/倍 |      |      | 与大粒级解吸速率比较/倍 |      |      |
|----------|--|------|------|--------------|------|------|--------------|------|------|
|          | 钻孔提芯   | 地面暴露 | 密封罐中 | 钻孔提芯         | 地面暴露 | 密封罐中 | 钻孔提芯         | 地面暴露 | 密封罐中 |
| 焦坪 1     | 0.38   | 0.16 | 0.02 | 19.86        | 8.36 | 1    | 2.91         | 2.91 | 2.66 |
| 焦坪 2     | 0.26   | 0.10 | 0.01 | 20.67        | 8.28 | 1    | 2.01         | 1.90 | 1.74 |
| 焦坪 3     | 0.14   | 0.07 | 0.01 | 12.55        | 6.15 | 1    | 1            | 1    | 1    |
| 柳林 1     | 0.66   | 0.21 | 0.03 | 19.46        | 6.29 | 1    | 6.54         | 5.07 | 3.73 |
| 柳林 2     | 0.14   | 0.11 | 0.03 | 5.22         | 4.13 | 1    | 1            | 1    | 1    |

图 3 和表 6 表明, 煤样的粒度大小对解吸气的平均解吸速率影响很大. 以焦坪煤样为例, 1~3 mm 煤样、30~50 mm 煤样、 $\phi 89$  mm 柱状煤芯煤样的解吸气平均解吸速率比值, 在模拟钻孔提芯阶段分别为 2.91:2.01:1; 在模拟地面暴露阶段和密封罐中阶段, 解吸速率比值的差异情况也类似. 由此可见, 煤样粒度越小, 解吸速度越大, 反之越小.

### 3 与美国矿业局直接法估算结果的比较

按照美国矿业局直接法, 利用煤样在罐中的自然解吸数据, 绘制时间平方根与罐中初期累计解吸气体量关系图, 分别估算了各个煤样的模拟损失气量, 结果见表 7, 以焦坪 2 煤样为例作图求取损失气量的方法, 如图 4 所示.

表 7 实测的模拟损失气量与 USMB 直接法估算的损失气量的对比

Table 7 Comparison of the measured volume and the volume estimated by USMB Direct method for lost gas

| 参 数                       | 样 品      |          |                |          |          |
|---------------------------|----------|----------|----------------|----------|----------|
|                           | 焦坪 1     | 焦坪 2     | 焦坪 3           | 柳林 1     | 柳林 2     |
| 样品粒度/mm                   | 1~3      | 30~50    | $\phi 89$ 柱状煤芯 | 1~3      | 30~50    |
| 直接法估算的损失气量/ $\text{cm}^3$ | 320.71   | 174.66   | 286.91         | 978.22   | 606.57   |
| 实测的模拟损失气量/ $\text{cm}^3$  | 3 438.88 | 2 879.62 | 2 133.16       | 9 275.27 | 1 692.71 |
| 实测量/估算量                   | 10.72    | 16.49    | 7.43           | 9.48     | 2.79     |

由表 7 可看出, 试验实测的模拟损失气量比采用美国矿业局直接法估算的损失气量高很多, 前者是后者的 7.43~16.49 倍, 柳林 2 煤样的低一些, 为 2.79 倍; 并且较小粒级的煤样, 两者之间的差异更大. 根据等温吸附试验结果计算了煤样的理论饱和气含量, 按照 2 个煤样完整的解吸试验数据计算了模拟气含量. 对比结果表明, 实测的模拟损失气含量占理论饱和气含量的比例, 2 个 1~3 mm 煤样分别为 64% 和 70%, 1 个煤芯煤样则为 22% (表 5). 与其类似, 2 个较大粒级煤样的实测模拟损失气含量分别占模拟气含量的 17% 和 26%. 而美国矿业局直接法估算的损失气含量仅占理论饱和气含量的 2.54%~7.85%.

分析认为, 美国矿业局直接法估算的损失气量比试验实测的模拟损失气量低的原因, 主要是美国矿业局在推导损失气量表达式的过程中, 为求解方便, 对微分方程的初边条件和解析解形式进行了过分简化,

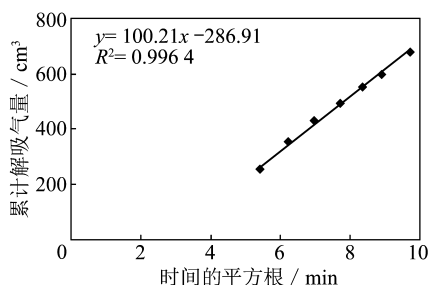


图 4 焦坪 3 煤样模拟损失气量估算

Fig. 4 Estimation of simulated lost gas volume for Jiaoping 3 coal sample

与实际情况差距太大, 得出的累计解吸气量与时间平方根成线性正比关系式不能完全描述煤样解吸的真实情况. 模拟结果表明, 钻孔提芯阶段和地面暴露阶段, 煤样解吸速率远远大于密封罐中的解吸速率. 显然, 美国矿业局直接法利用密封罐中阶段相对低很多的解吸速率来估算解吸速率相对高很多的钻孔提芯和地面暴露阶段的损失气量, 是导致损失气量低的主要原因. 由此认为, 许多生产煤矿, 尤其是构造煤发育的区域, 在煤田勘探阶段测得的煤层气含量普遍比投产开采后实际的煤层气含量低, 可能主要与采用直接法估算的损失气含量低有关. 因此, 应深入开展研究工作, 提出更加科学合理的损失气含量估算方法, 或采用密闭取芯技术, 为安全高效煤矿的设计和开采提供准确可靠的煤层气含量数据.

提出更加科学合理的损失气含量估算方法, 或采用密闭取芯技术, 为安全高效煤矿的设计和开采提供准确可靠的煤层气含量数据.

## 4 结 论

建立了模拟钻孔绳索取芯过程实现高压匀快速降压、注水驱气和测定模拟损失气量的试验方法; 揭示了煤样在模拟钻孔提芯、地面暴露和密封罐中 3 个连续阶段甲烷气体的解吸规律, 甲烷气体解吸量曲线形态呈明显的 3 段型. 煤样的甲烷气体平均解吸速率在模拟钻孔提芯阶段最大, 地面暴露阶段居中, 密封罐中解吸阶段最小, 前两者分别是后者的 12~20 和 6~8 倍; 煤样粒级大小对甲烷气体解吸率影响大. 粒级分别为 1~3 mm 煤样, 30~50 mm 煤样和  $\phi 89$  mm 柱状煤芯的同一煤样, 在模拟钻孔提芯阶段的甲烷气体平均解吸速率的比值为 2.91:2.01:1; 在地面暴露和密封罐中阶段的比值情况与其类似; 试验实测的模拟损失气量比美国矿业局直接法估算的损失气量高很多, 前者是后者的 8.01~16.49 倍; 并且较小粒级的煤样, 两者的差异更大. 认为美国矿业局直接法估算的损失气量不准确, 比实际低很多, 该方法有待进一步完善.

## 参考文献:

- [1] 张新民, 张遂安, 钟玲文, 等. 中国的煤层甲烷 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1991.
- [2] 张 群, 冯三利, 杨锡禄. 试论我国煤层气的基本储层特点及开发策略 [J]. 煤炭学报, 2001, 26 (3): 230-235. Zhang Qun, Feng Sanli, Yang Xilu. Basic reservoir characteristics and development strategy of coalbed methane resource in China [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26 (3): 230-235.
- [3] GB/T 19559-2008. 煤层气含量测定方法 [S]. GB/T 19559-2008. Method of determining coalbed methane content [S].
- [4] 王兆丰. 空气、水、泥浆介质中瓦斯解吸规律及应用研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2001. Wang Zhaofeng. Study on characteristics and application of coal gas desorption in air, water and mud [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2001.
- [5] 周胜国. 煤层含气量模拟试验方法及应用 [J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30 (5): 25-28. Zhou Shengguo. Method and application of simulation experiment for coalbed gas content [J]. Coal Geology and Exploration, 2002, 30 (5): 25-28.
- [6] Ulery J P, Hyman D M. The modified direct method of gas content determination: application and results [A]. Proceedings of the 1991 coalbed methane symposium [C]. Tuscaloosa: 1991: 489-500.
- [7] McLennan J D, Schafer P S, Pratt T J. A guide to determining coalbed gas content [R]. Chicago: Gas Research Institute Report, 1995.
- [8] Gas Research Institute. A guide to coalbed methane reservoir engineering [R]. Chicago: GRI Reference, 1996.