

页岩气解吸方法研究进展

魏强^{1,2}, 晏波¹, 肖贤明¹

(1. 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, 广东 广州 510640;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:页岩含气量评价对页岩气资源预测、储量计算、勘探开发规划具有重要的意义。解吸法是页岩含气量评价中应用非常广泛的一种直接测量方法。页岩气的解吸方法主要沿用了煤层气的技术,将岩心或岩屑封装于解吸罐后,测定解吸气和残留气,计算损失气,3部分的总和即页岩储层的含气量。经过多年的发展,解吸装置在不断改进,解吸数据分析方法一直在优化。目前已经发展了USBM法、多项式法、Smith-Williams法、下降曲线法、Amoco法等多种解吸数据处理方法。在实际应用中,温度等环境因素、损失时间、采用的拟合方法以及解吸装置本身都会对解吸结果产生明显的影响。由于页岩气的扩散机制和解吸过程与煤层气存在一定差异,简单沿用煤层气的方法与技术评价页岩含气量,可能存在明显的误差。未来的研究将致力于改进解吸装置,发展符合页岩气体解吸机理的数学模型,规范解吸方法,建立相关行业标准。

关键词:页岩;含气量;解吸装置;解吸方法

中图分类号:TE122.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1926(2015)09-1657-09

引用格式:Wei Qiang, Yan Bo, Xiao Xianming. Research progress on the desorption methods of shale gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(9): 1657-1665. [魏强, 晏波, 肖贤明. 页岩气解吸方法研究进展[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(9): 1657-1665.]

0 引言

美国“页岩气革命”的出现,使得页岩气的勘探开发成为世界关注的焦点。美国能源信息署(EIA)2013年发布的全球页岩油气资源评价结果显示,全球页岩油和页岩气技术可采资源量分别为 $473 \times 10^8 \text{ t}$ 和 $207 \times 10^{12} \text{ m}^3$,分别占油气资源总量的10%和32%,我国页岩气和页岩油技术可采资源量分别为 $31.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 和 $44.1 \times 10^8 \text{ t}$,分别排名世界首位和第三位^[1]。

页岩含气量是计算页岩气资源潜力、储量预测的重要参数,并对页岩气勘探开发具有重要的意义。页岩含气量是指每吨页岩中所含天然气在标准状态(0℃, 101.325kPa)下的体积,包括游离气、吸附气和溶解气^[2]。

页岩含气量的确定目前缺乏专门的行业标准,主要参照煤层气行业的技术方法。含气量的确定方法大致可分为直接法和间接法2个大类。直接法即解吸法,是指通过测定现场钻井岩心或有代表性岩屑的解吸行为获取实际含气量。间接法则是通过等温吸附实验模拟以及测井解释等方法分别获取吸附气和游离气的含量^[3]。由于吸附和解吸过程并不完全可逆,等温吸附实验模拟方法完全依赖于理论计算,获得的结果往往比页岩的实际含气量大,一般只有缺少现场解吸数据时才用来定性评价页岩含气量^[2]。而解吸法能够在模拟地层实际环境的条件下直接测定页岩的含气数量,较为可靠,因此被作为页岩含气量测定的最基本方法。

岩心解吸方式包括快速解吸和慢速解吸2种方法。快速解吸的时间短,一般在8~24h之间,总解

收稿日期:2015-04-28;修回日期:2015-05-22.

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”)项目(编号:2012CB214705);中国科学院战略性先导专项(编号:XDB10040300)联合资助。

作者简介:魏强(1991-),男,湖南岳阳人,博士研究生,主要从事油气地球化学研究. E-mail: qwei@gig.ac.cn.

通讯作者:晏波(1980-),男,湖南常德人,副研究员,博士,主要从事有机地球化学和环境科学研究. E-mail: yanbo2007@gig.ac.cn.

吸气量包括损失气、解吸气和残留气 3 部分; 慢速解吸的时间长达 45d 以上, 总解吸气量包括损失气量和解吸气量 2 部分^[4]。其中, 损失气为岩心地层钻开后到装罐前散失的气量, 损失气的起算时间为岩心提至钻井液压力等于页岩层流体压力的时间, 或采用提钻到井深一半的时间。解吸气包括岩心装罐解吸获得的天然气和为获取残留气在碎样过程中释放的天然气 2 部分; 残留气为样品粉碎到一定目数后解吸获得的天然气量^[5]。解吸气和残留气都可以通过直接测定, 而损失气却是通过各种数值方法, 进行回归获得。因此, 准确获取损失气的含量成为了解吸法测定页岩气含气量的关键之一。解吸数据的处理方法主要借鉴煤层气的经验, 包括 USBM 法、修正的直接法、Smith-Williams 法、下降曲线法和 Amoco 法等^[6]。不同方法有不同的适用性, 而在实地解吸过程中, 环境因素等控制条件也对正确拟合损失气含量存在一定影响。

我国页岩气具有巨大的资源潜力, 但勘探开发尚处于探索阶段, 大多数页岩储层缺乏含气量数据。因此, 参考国内外近些年来对煤层气及页岩气解吸装置的研发, 了解页岩气解吸过程中的各种影响因素及数据处理方法, 将为我国页岩含气量测定提供理论指导。

1 解吸装置及发展

对于煤层气的解吸过程研究, 最早应用于煤矿矿井安全。此后, 由于解吸法可直接获取样品的储存气量, 逐渐被认为是煤层气含量评价的最可靠方法。由于页岩气和煤层气在赋存状态和理化特性上有一定相似性, 页岩含气量的直接测定法也延用了煤层气含量直接测定法的基本思路。20 世纪 70 年代, Bertard 等^[7]首先提出了对煤层气含量的直接测定法。其后, 美国矿务局对直接法进行修正和标准化, 提出了 USBM 法^[8]。该方法采用排水集气的原理, 测定解吸气和残余气量, 用直线回归法估算损失气。也是目前直接测定页岩含气量的基本方法。

USBM 法解吸装置主要由解吸罐和收集量筒 2 部分组成(图 1)。样品装到解吸罐后, 通过导管将气体导入装水的倒置量筒中, 通过记录不同时刻的排水量换算成解吸气量。其后的 20 多年里, 针对解吸数据的处理, 先后衍生了下降曲线法^[9]、改进的直接法^[10]、Smith-Williams 法^[11]、Amoco 法^[12]等方法。20 世纪 90 年代, 澳大利亚研究人员对 USBM 法的解吸装置进行优化, 采用多个气缸串联的方法

收集气体, 当一个气缸收集满后, 解吸气会自动开始填充下一个气缸。同时, 该方法提出用酸化卤水作为排空液, 以减小 CO₂ 等气体在水中的溶解。SCI-RO-CET 快速解吸法则在解吸罐中加入了不锈钢珠, 用 USBM 法获得损失气后, 直接在解吸罐中将样品破碎, 获取解吸气和残余气的总量, 以此提高解吸效率^[13]。美国天然气研究所(GRI)指出, 含气量最大的误差来源于在地表温度下进行解吸, 因此 GRI 法采用水浴后达到地层温度的解吸数据来恢复损失气^[14]。同时, GRI 法对 USBM 法的解吸时间零点进行了修正, USBM 法将提钻到一半时定为解吸时间的零点^[15], 而 GRI 将零点定为钻井液的静水压力与储层压力相等时, 因而需要测量取心过程中的压力变化史^[16]。

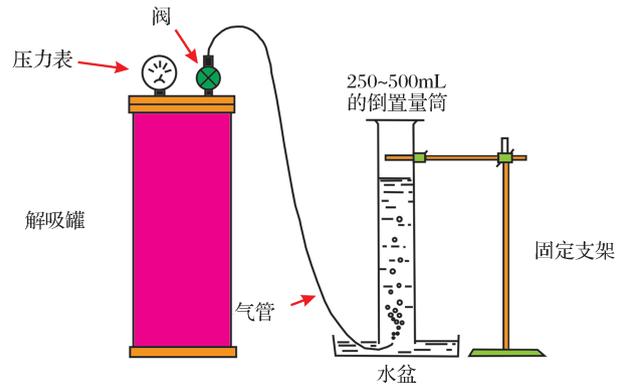


图 1 USBM 直接法解吸量气装置^[6]

Fig. 1 USBM direct method gas volume measurement apparatus^[6]

我国煤层气的行业标准仍采用排液集气的方法, 并采用 USBM 直接法拟合损失气含量。解吸罐要求体积 1 000cm³ 以上, 样品要求不少于 800g。样品装罐后第一次 5min 以内测定, 然后以 10min 间隔测满 1h, 以 15min 间隔测满 1h, 以 30min 间隔测满 1h, 以 60min 间隔测满 1h, 以 120min 间隔测试 2 次, 其后根据解吸罐压力表数值确定适当的间隔时间, 最长不超过 24h。自然解吸持续到连续 7d 平均每天解吸量不超过 10cm³, 结束解吸测定^[17]。随着煤层气和页岩气在我国的迅速发展, 国内近年来也对解吸装置进行了不断的优化, 并在这方面取得了一定数量的专利成果(表 1)。从专利的发展历程不难看出, 页岩气解吸装置基本由解吸罐和收集端 2 部分组成, 但通过检测手段的不断更新, 解吸气的测量在朝向小体积、少样品、高精度及多组分在线测定的方向发展。

由于损失气的不可测量性, 通过解吸装置获取

解吸数据仅仅是第一步。根据解吸规律以及理论假设的不同,需要对解吸数据进行回归分析等相应的

处理,方能获得损失气的含量,从而得到页岩样品的含气量数据。

表 1 我国煤层气/页岩气解吸测量的相关专利

Table 1 Patents about coalbed methane/shale gas desorption in China

时间	申请人	专利名	特点
2007	中国石油天然气股份有限公司	煤层含气量快速解吸仪 ^[18]	密封罐中加入搅拌块破碎样品进行快速解吸,收集方法为排水集气法
2009	中国石油天然气股份有限公司	煤层含气量数据采集系统 ^[19]	压力传感器和气体流量计作为气体含量的测试装置,提高了检测精准度,并实现了测量信号的数字管理
2011	张金川	高精度含气量测试仪 ^[20]	包括标有刻度的圆锥形透明筒体以及带有通气孔和排水孔的筒底,测量精度更高、体积小、结构简单
2012	张金川	全程可视化含气量测试仪 ^[21]	采用钢化玻璃材质的透明罐体及透明量气筒体,实现了解吸过程的全程可视化
	中国石油天然气股份有限公司	页岩气、煤层气含气量测试装置 ^[22]	采用气体质量流量计作为气体计量装置,并且在气体体积测量装置中加入了干燥剂
	重庆地质矿产研究院	页岩气含气量便携测量仪 ^[23]	排液集气法
2013	恒泰尚合能源技术(北京)有限公司	一种新型页岩含气量测试仪和页岩含气量测定方法 ^[24]	具有样品解吸过程的压力和温度实时测试系统,利用温压转换关系,解决了自由空间的气体会随测试环境的温压条件而改变的问题
	国家地质测试中心	含气量测量及气体采集装置 ^[25]	测量筒包含有活塞、位移传感器和压力传感器,可以自动、连续、准确地测量出页岩气等非均质气体
	国家地质测试中心	含气量测量装置及方法 ^[26]	包括氢火焰离子化检测器,能够直接测量从岩石中解吸出来的烃类气体体积及其随时间的变化情况,且测量结果不会受到非烃类气体及解吸罐体系中空气死体积的干扰
	中国地质调查局油气资源调查中心	含气量连续测量装置 ^[27]	收集端元采用饱和和盐水,使用液位传感器代替了常规的量筒或电子天平来测定气体体积
2014	中国石油化工有限公司	解吸气测定仪 ^[28]	将解吸气体干燥后,连接甲烷组分红外气体传感器和二氧化碳组分红外气体传感器。实现了无压阻、连续组分和微压损的测定,能够实时计算解吸气含量、解吸甲烷含量和累计解吸气

2 解吸数据处理方法

2.1 直接法及 USBM 法

在煤层含气量测试过程中,煤层气从煤样品中解吸出来主要受控于扩散,假定煤中的甲烷气体为球形扩散。从理论上讲,其扩散机制服从菲克扩散定律^[29]。

$$\frac{dV}{dt} = -D \frac{\partial^2 V}{\partial^2 r} \quad (1)$$

解上式获得:

$$\frac{V}{V_{\infty}} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{D^2}{r^2} n^2 \pi^2 t\right) \quad (2)$$

式中: V 为 t 时刻的解吸气体积; V_{∞} 为解吸气总体积; D/r^2 为有效扩散速率; r 为球半径; t 为逸散时间与实测解吸时间之和。

直接法应用上述理论,并假定扩散速率为常数,即为恒温扩散。球体内初始浓度一致且为常数,球的边界浓度为 0。据此假定煤岩孔隙为单峰孔隙结构。损失时间越短,估算结果越准确。当 $V/V_{\infty} < 0.5$ 时,上式的方程解成为最常用的直线回归法,即在解吸初期,解吸量与解吸时间的平方根近似直线关系,表达式如下:

$$Q_d = Q_0 + b \sqrt{t + t_0} \quad (3)$$

式中: Q_d 为总解吸气量; Q_0 为损失气量; t_0 为损失时间; t 为实测解吸时间; b 为对解吸初期部分数据进行直线回归获得的斜率。

根据单孔扩散模型的方程进行推导,同样也可以获得一元多次方程,选用其中相关系数最高的拟合损失气,这也就是应用同样很广泛的多项式拟合

法,一般采用二次方程或三次方程比较常见(图 2)。

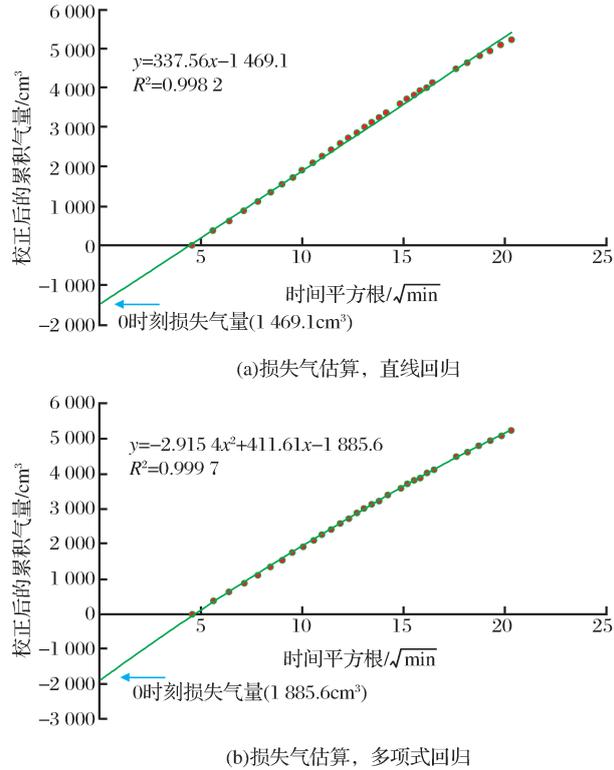


图 2 直线回归和多项式回归估算损失气量^[4]

Fig. 2 Linear fitting and polynomial fitting on lost gas projection^[4]

2.2 Smith-Williams 法

Smith-Williams 法在美国有广泛应用,方法假设也是单孔隙模型。方法假设从钻遇地层到岩心或岩屑返出地面这段时间泥浆压力随时间呈线性变化,得到单孔隙扩散模型的解^[3,11,30]。这个方法首先需要获得地表时间比 $STR = (T_s - T_D) / T_s$, 以及损失时间比 $LTR = T_s / T_{25\%}$ 。然后通过由 STR 和 LTR 组成的数据表查表可得体积校正因子 N (图 3)。接着通过下式可以获得损失气含量 Q_l :

$$Q_l = (N - 1) Q_d \quad (4)$$

式中: T_D 为开始取心到到达地表的时间; T_s 为开始取心到封罐的时间; $T_{25\%}$ 为从取心到解吸气量达到总解吸气量的 25% 的时间; Q_l 为总损失气量; Q_d 为总解吸气量。

2.3 下降曲线法

下降曲线法的损失气恢复方法与 USBM 法类似,但是解吸气采用解吸速率和累计解吸气量的关系回归得到,优点在于能够预测未来的解吸表现,而不用等到实际解吸完成(某些样品可能长达数月)。在下降曲线法中,假定连续 7d 平均每天解吸率不超

过 $0.001 \text{ cm}^3/\text{g}$ 时,解吸达到终点。采用解吸速率和累计解吸气量来作图,则可以通过初始一段时间的解吸速率来推导解吸终点时的累计气量(图 4)。

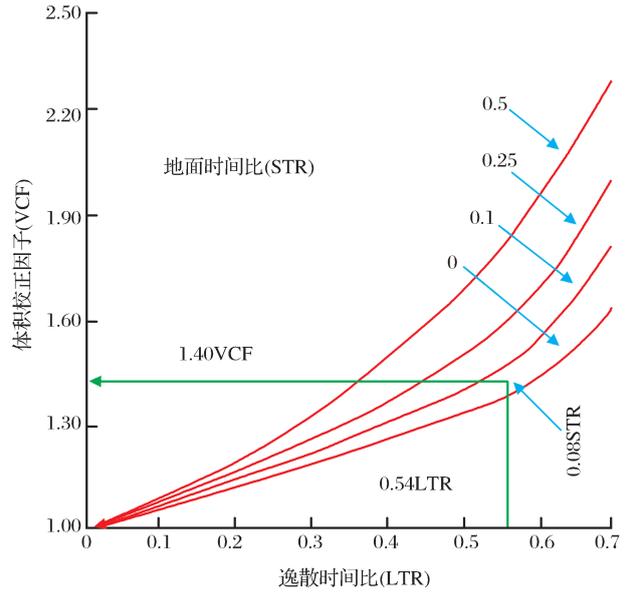


图 3 Smith-Williams 法体积校正因子^[30]

Fig. 3 Smith and Williams volume correction factors^[30]

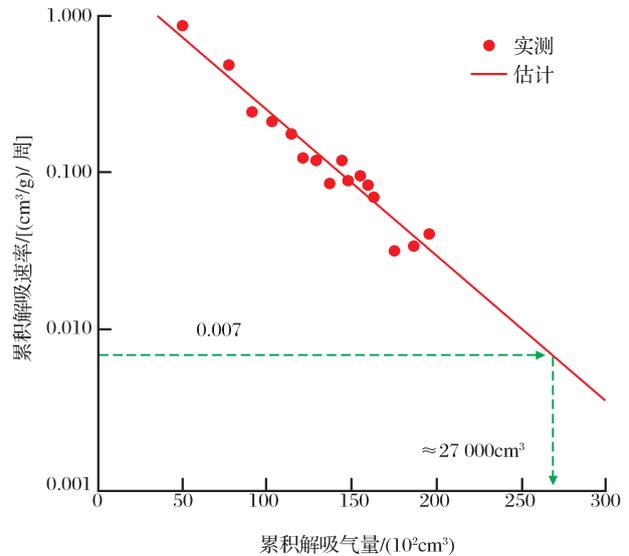


图 4 下降曲线法估算预测解吸终点^[31]

Fig. 4 Decline curve graph for estimating the volume of desorbable gas^[31]

2.4 Amoco 法

Amoco 法也称曲线拟合法,上述方法都是通过解吸初期的部分数据进行拟合,而 Amoco 法则通过所有的解吸数据与扩散方程的解拟合求得。其解吸公式为:

$$V_D(t) = V_{LD} \left[1 - \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \frac{D}{r^2} t\right) \right] - V_L \quad (5)$$

式中: V_D 为解吸气量; V_{LD} 为解吸气和损失气的总

和 V_L 为损失气; t 为时间; D/r^2 为有效扩散速率; D 为扩散系数; r^2 为特效扩散长度。

对于一个样品来说, D/r^2 为一常数,根据实测数据对上式进行曲线拟合求解,即可求得 V_{LD} 和 V_L ^[12]。

3 解吸过程中影响因素

一般来说,为了提高页岩含气量测量的准确性,实地解吸工作中需要满足以下条件:最大化岩心恢复率,尽量减小提钻、封罐等准备工作的时间;解吸罐需要放置在恒定的温度下,且温度与储层温度相等;全程记录好气体体积、压力、罐温、空气温度等环境参数;气体体积需要进行标准化;校正自由空间的体积^[5]。

从上述要求不难看出,解吸装置本身数据采集的精准度是关键的影响因素。不同解吸装置对于解吸过程的处理也使得结果存在差别。例如,解吸罐中加入钢珠的快速解吸法可对样品进行球磨,从而较早进入残余气解吸阶段,相对传统方法可提高测试效率,并且避免了常规方法中多次开闭解吸罐造成的误差;采用饱和食盐水可有效减少 CO_2 等气体的溶解;电子天平称液法、压力传感器、气体流量计、氢火焰离子化检测器等量气法相对传统排液量气法有更高的测量精度;空气浴相对水浴可避免水浴加热存在 $100^\circ C$ 上限的问题。

环境因素和取心过程对解吸结果会有一定的影响。当地面温度明显低于储层温度,煤样中气体解吸速率明显偏低^[30]。页岩样品从取心到封罐解吸,温度会经过一个先降低后升高的过程(图5)。在解吸初期,解吸罐中岩样在水浴里不能立刻平衡到储层温度,因此其前几个测量点的解吸速率会偏低,并不能正确地反映解吸规律。在计算损失气量时,如果使用了未平衡的测量点,会造成计算结果偏小。而取心时间或者暴露时间过长,同样会导致损失时间的过长,从而造成损失气计算结果偏小(图6)^[32]。

更为重要的是,拟合方法的不同会使含气量结果存在明显的差异。直接法在损失气量小于含气量的20%时结果较为准确。而Smith-Williams方法在损失气量占总含气量的50%时仍比较可靠。但Smith-Williams法和Amoco法由于需要全部的解吸数据,不能快速估算损失气量,只能在解吸测试结束后采用此办法^[30]。徐成法等^[33]通过模拟实验对比了各类解吸方法,认为当逸散时间较短时,应该用直线法计算;当逸散时间较长时,应该用曲线法或多项式法计算;当煤样较破碎,逸散时间又较长时用

Smith-Williams法计算。

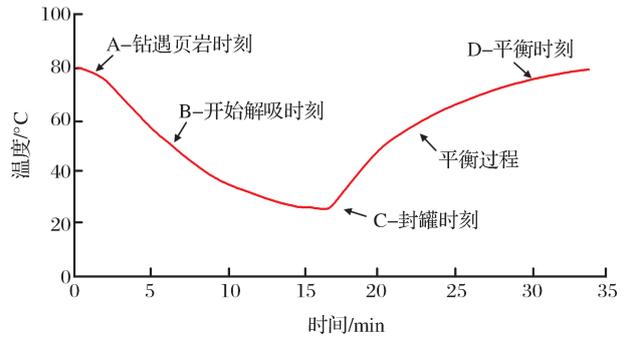
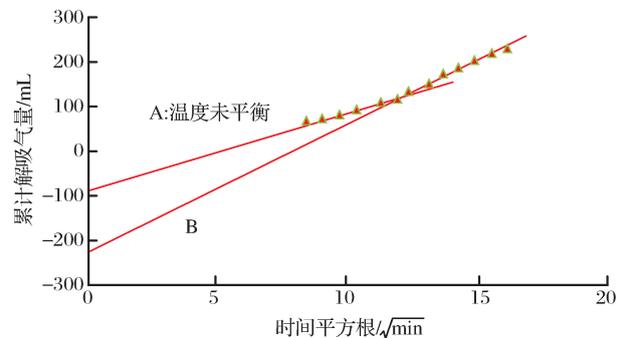
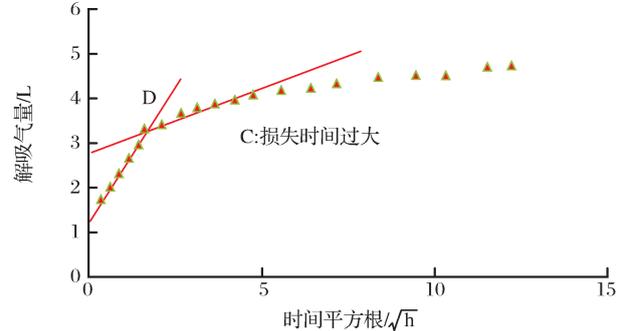


图5 取心温度史^[32]

Fig. 5 Core temperature history^[32]



(a)温度未平衡条件下损失气量的估计



(b)过大的损失时间条件下损失气的估计

图6 温度平衡和损失时间对损失气估算的影响^[32]

Fig. 6 The influence of temperature and lost time on lost gas projection^[32]

针对以上多种因素的影响,要获得可靠的页岩含气量数据,需要考虑如下几个方面:尽量减小损失时间;模拟地层温度,并且只使用温度平衡后的数据点进行分析;根据不同情况选用合适的解吸方法,完善损失气量计算;提高残余气准确性,优化解吸装置^[3]。

4 页岩气解吸分析存在的问题

虽然页岩气的解吸分析中大多沿用煤层气的处理方法,但页岩气的解吸行为并不完全与煤层气相同。Javadpour等^[34]的研究结果表明,甲烷等气体从页岩样品中溢出需要依次经过4个阶段:①在微

孔中的扩散,符合菲克扩散定律;②在纳米孔中的扩散,符合努森扩散定律;③从干酪根和黏土矿物的表面向孔隙网络中的扩散;④从干酪根和黏土的内部向其表面的扩散。陈强等^[35]认为,在页岩多尺度孔隙中,页岩气的传质方式为无滑脱渗流、存在滑脱渗流、过渡流动以及分子扩散等。吴剑等^[36]则采用微元法分析了自由气体滑脱流动、克努森扩散、孔隙壁

面气体解吸和溶解气体从干酪根扩散等过程,推导出了页岩气在基质孔隙中的渗流模型。因此,页岩气的解吸规律可能不同于煤层气解吸速率不变的球形扩散模型。由于页岩的物性结构并不符合单孔隙模型的假设,在解吸过程中,解吸速率会随时间而变化。对于页岩气的解吸来说,高斯分布模型要优于常规煤层气的球形扩散模型(图7)^[34-38]。

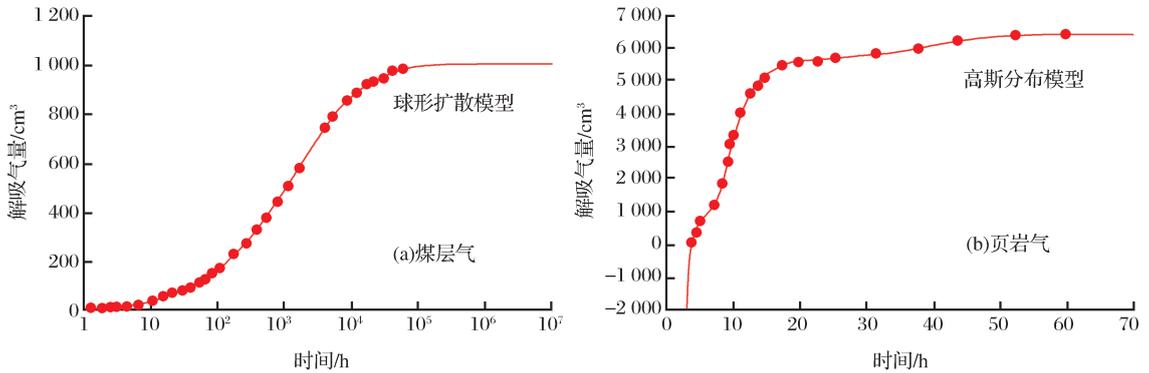


图7 煤层气(a)和页岩气(b)累积产气曲线^[37]

Fig. 7 Coalbed methane(a) and shale gas(b) cumulative gas production curves^[37]

页岩气的取心过程也并不符合煤层气行业标准的约束条件,煤层气测定中要求尽量缩短采样时间,提心速率不得超过2min/100m,样品到达地面后,10min内装入解吸罐。而页岩的提钻速率约为16min/100m,暴露时间约为30~120min^[39]。在钻井条件存在差异的情况下,简单套用煤层气的行业标准,可能对页岩气含气量准确评估带来较大的误差。另一方面,煤层气行业标准(USBM法)采用的直线回归法通常在应对较小的损失气量(<20%)时

比较准确,但页岩气的损失量往往比较大。如:我国沁水盆地某煤层气的损失气含量约为16.8%,我国南方奥陶系五峰组—志留系龙马溪组某页岩的损失气含量则高达57.9%,北美某气田页岩的损失气量同样达到29.4%(表2)。王杰等^[40]通过对不同类型页岩富集烃气能力的模拟实验认为,由实验得到的解吸气产率要高于页岩现场解吸量和损失气量2部分之和,说明目前对损失气量的恢复偏小了,有必要开展对页岩损失气量估算方法的研究。

表2 直接法测定含气量实例数据

Table 2 Gas content determined by the direct method

地点	损失气/(m ³ /t)	解吸气/(m ³ /t)	残余气/(m ³ /t)	数据来源
中国沁水盆地某煤层	0.21~4.69/1.49	0.63~13.25/5.11	0.28~5.45/2.29	李相方等 ^[41]
华南O ₃ w-S ₁ l某页岩	0.11~3.90/1.14	0.31~1.40/0.79	0.01~0.07/0.04	石文睿等 ^[42]
北美某页岩(快速解吸)	0.55~1.97/0.84	0.64~3.89/1.20	0.41~1.59/0.82	Vasilache ^[43]

注:“/”后为平均值

5 结语

经过数十年的发展,国内外在解吸装备方面均取得了巨大进步,未来的解吸装置将向小体积、少样品、高精度及多组分在线测定等方向继续发展。煤层气在解吸数据的处理方面已经形成比较完善的体系,但页岩的气体扩散机制与煤不同,采用煤层气行业的标准方法测定页岩气含量可能导致明显的误

差。未来的方向可着重于页岩气全解吸过程、气体扩散机制的研究,发展解吸动力学模型,建立符合页岩钻井工艺的相关行业标准。

参考文献(References):

- [1] Jiang Huaiyou, Ju Binshan, Li Zhiping, et al. A study on world's shale gas resource today [J]. Sino-Global Energy, 2014, 19(3): 14-22. [江怀友, 鞠斌山, 李治平, 等. 世界页岩气资源现状研究[J]. 中外能源, 2014, 19(3): 14-22.]

- [2] Tang Ying, Zhang Jinchuan, Liu Zhujiang, *et al.* Use and improvement of desorption method in shale gas content tests [J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(10): 108-111. [唐颖, 张金川, 刘珠江, 等. 解吸法测量页岩含气量及其方法的改进 [J]. *天然气工业*, 2011, 31(10): 108-111.]
- [3] Dong Qian, Liu Xiaoping, Li Wuguang, *et al.* Determination of gas content in shale [J]. *Natural Gas and Oil*, 2012, 30(5): 34-37. [董谦, 刘小平, 李武广, 等. 关于页岩含气量确定方法的探讨 [J]. *天然气与石油*, 2012, 30(5): 34-37.]
- [4] Li Yuxi, Qiao Dewu, Jiang Wenli, *et al.* Gas content of gas-bearing shale and its geological evaluation summary [J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(2): 308-317. [李玉喜, 乔德武, 姜文利, 等. 页岩气含气量和页岩气地质评价综述 [J]. *地质通报*, 2011, 30(2): 308-317.]
- [5] Waechter N B, Hampton III G L, Shippis J C. Overview of coal and shale gas measurement: Field and laboratory procedures [C]// 2004 International Coalbed Methane Symposium. The University of Alabama, Tuscaloosa, Alabama, 2004.
- [6] Diamond W P, Schatzel S J. Measuring the gas content of coal: A review [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1998, 35(1): 311-331.
- [7] Bertard C, Bruyet B, Gunther J. Determination of desorbable gas concentration of coal (direct method) [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1970, 7(1): 43-65.
- [8] Kissell F N, McCulloch C M, Elder C H. The Direct Method of Determining Methane Content of Coalbeds for Ventilation Design [R]. US Bureau of Mines Report of Investigations, RI7767, 1973: 1-17.
- [9] McCulloch C M, Levine J R, Kissell F N, *et al.* Measuring the methane content of bituminous coalbeds [R]. US Bureau of Mines Report of Investigations, RI8043, 1975.
- [10] Ulery J, Hyman D. The modified direct method of gas content determination: Applications and results [C]// The 1991 Coalbed Methane Symposium Proceedings, Tuscaloosa, Alabama, May, 1991: 13-17.
- [11] Smith D, Williams F. New technique for determining the methane content of coal [C]// Proceeding of Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. (United States). Univ of NM, Albuquerque, 1981.
- [12] Yee D, Seidle J P, Hanson W B. Gas sorption on coal and measurement of gas content [J]. *Hydrocarbons from Coal: AAPG Studies in Geology*, 1993, 38: 203-218.
- [13] Australian Standard AS 3980. Guide to the Determination of Gas Content of Coal-Direct Desorption Method [S]. Standards Association of Australia, 1991.
- [14] Saghafi A, Williams D, Roberts D. Determination of Coal Gas Content by Quick Crushing Method [R]. CSIRO Investigation Rep. CET/IR391R, Sydney, 1995.
- [15] Mavor M, Pratt T. Improved Methodology for Determining Total Gas Content, Volume 2: Comparative Evaluation of the Accuracy of Gas-in-place Estimates and Review of Lost Gas Models [R]. Gas Research Institute, GRI-94/0429, 1996.
- [16] MacLennan J D, Schafer P S, Pratt T J, *et al.* A Guide to Determining Coalbed Gas Content [R]. Gas Research Institute, GRI-94/0396, 1995.
- [17] GB/T 19559-2008. Method of Determining Coalbed Gas Content [S]. 2008. [GB/T 19559-2008. 煤层气含量测定方法 [S]. 2008.]
- [18] Liu Honglin, Wang Hongyan, Li Jingming, *et al.* Fast Desorption Meter for Gas Content of Coal Seam: China, CN101034050A [P]. 2007-09-12. [刘洪林, 王红岩, 李景明, 等. 煤层气含量快速解吸仪: 中国, CN101034050A [P]. 2007-09-12.]
- [19] Liu Honglin, Wang Hongyan, Li Guizhong. Gas Content Data Collecting System for Coal Layer: China, CN201273875Y [P]. 2009-07-15. [刘洪林, 王红岩, 李贵中. 煤层气含量数据采集系统: 中国, CN201273875Y [P]. 2009-07-15.]
- [20] Zhang Jinchuan, Lin Lamei, Tang Xuan, *et al.* High-precision Gas Content Tester: China, CN202362223U [P]. 2012-08-01. [张金川, 林腊梅, 唐玄, 等. 高精度含气量测试仪: 中国, CN202362223U [P]. 2012-08-01.]
- [21] Zhang Jinchuan, Tang Xuan, Lin Lamei, *et al.* Whole-course Visualized Gas Content Tester: China, CN202362222U [P]. 2012-08-01. [张金川, 唐玄, 林腊梅, 等. 全程可视化含气量测试仪: 中国, CN202362222U [P]. 2012-08-01.]
- [22] Xue Huaqing, Wang Hongyan, Liu Honglin, *et al.* Gas Content Testing Device for Shale Gas and Coalbed Methane: China, CN202837134U [P]. 2013-03-27. [薛华庆, 王红岩, 刘洪林, 等. 页岩气、煤层气含气量测试装置: 中国, CN202837134U [P]. 2013-03-27.]
- [23] Cheng Lijun, Liu Junfeng, Lu Chaohui, *et al.* Portable Measurement Instrument for Gas Content of Shale Gas: China, CN202903638U [P]. 2013-04-24. [程礼军, 刘俊峰, 陆朝晖, 等. 页岩气含气量便携测量仪: 中国, CN202903638U [P]. 2013-04-24.]
- [24] Wang Junfang, Wu Hui, Zhao Binjie. Novel Shale Gas Content Tester and Shale Gas Content Detecting Method: China, CN103063545A [P]. 2013-04-24. [王军芳, 吴辉, 赵斌杰. 一种新型页岩含气量测试仪和页岩含气量测定方法: 中国, CN103063545A [P]. 2013-04-24.]
- [25] Qin Jing, Lu Ran, Xia Xianghua, *et al.* Gas Content Measurement and Gas Collection Device: China, CN103245588A [P]. 2013-08-14. [秦婧, 芦冉, 夏响华, 等. 含气量测量及气体采集装置: 中国, CN103245588A [P]. 2013-08-14.]
- [26] Wang Shuangqing, Yang Renzheng, Wu Fei, *et al.* Device and Method for Measuring Gas Content: China, CN103308634A [P]. 2013-09-18. [汪双清, 杨仁政, 吴非, 等. 含气量测量装置及方法: 中国, CN103308634A [P]. 2013-09-18.]
- [27] Ren Shoumai, Wu Fei, Yang Renzheng, *et al.* Device for Continuous Measurement of Gas Content: China, CN204008369U [P]. 2014-12-10. [任收麦, 吴非, 杨仁政, 等. 含气量连续测量装置: 中国, CN204008369U [P]. 2014-12-10.]
- [28] Yang Huajian, Zou Changming, Wu Shizhong, *et al.* Desorbed

- Gas Tester; China. CN104251836A[P]. 2014-12-31. [杨华建, 邹常铭, 吴诗中, 等. 解吸气测定仪: 中国, CN104251836A [P]. 2014-12-31.]
- [29] Zhou Shengguo. Coalbedgas content simulation test and application[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2002, 30(5): 25-28. [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.]
- [30] Guo Shumin. Methods of lost gas calculation of coal sample [J]. *Journal of Jiaozuo Institute of Technology*, 1999, 18(2): 8-13. [郭淑敏. 煤样逸散气量的求取方法[J]. 焦作工学院学报, 1999, 18(2): 8-13.]
- [31] Chase R. Comparison of methods used for determining the natural gas content of coalbeds from exploratory cores[R]. US Department of Petroleum Engineering. MET/CR-79/18, 1979.
- [32] Liu Honglin, Deng Ze, Liu Dexun, *et al.* Discussion on lost gas calculating methods in shale gas content testing[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2010, 32(supplement 1): 156-158. [刘洪林, 邓泽, 刘德勋, 等. 页岩含气量测试中有关损失气量估算方法[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(增刊 1): 156-158.]
- [33] Xu Chengfa, Zhou Shengguo, Guo Shumin. Study on the measurement method of coalbed gas contents[J]. *Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science*, 2005, 24(2): 106-108. [徐成法, 周胜国, 郭淑敏. 煤层含气量测定方法探讨[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2005, 24(2): 106-108.]
- [34] Javadpour F, Fisher D, Unsworth M. Nanoscale gas flow in shale gas sediments[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2007, 46(10): 55-61.
- [35] Chen Qiang, Kang Yili, You Lijun, *et al.* Micro-pore structure of gas shale and its effect on gas mass transfer[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(6): 1298-1304. [陈强, 康毅力, 游利军, 等. 页岩微孔结构及其对气体传质方式影响[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(6): 1298-1304.]
- [36] Wu Jian, Chang Yuwen, Liang Tao, *et al.* Shale gas flow model in matrix nanoscale pore[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(3): 575-579. [吴剑, 常毓文, 梁涛, 等. 页岩气在基质纳米孔隙中的渗流模型[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(3): 575-579.]
- [37] Guo Ping, Wang Delong, Wang Zhouhua, *et al.* Investigation on the characteristics and development mechanism of shale gas reservoir[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2012, 31(6): 118-123. [郭平, 王德龙, 汪周华, 等. 页岩气藏储层特征及开发机理综述[J]. 地质科技情报, 2012, 31(6): 118-123.]
- [38] Li Wuguang, Yang Shenglai, Chen Feng, *et al.* The sensitivity study of shale gas adsorption and desorption with rising reservoir temperature[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2012, 32(2): 115-120. [李武广, 杨胜来, 陈峰, 等. 温度对页岩吸附解吸的敏感性研究[J]. 矿物岩石, 2012, 32(2): 115-120.]
- [39] Xue Xiaohui, Yue Xiaojin, Wei Wei. Some suggestion on shale gas content measuring process[J]. *Coal Geology of China*, 2013, 25(4): 27-29. [薛晓辉, 岳小金, 韦巍. 页岩含气量测定过程中的几点建议[J]. 中国煤炭地质, 2013, 25(4): 27-29.]
- [40] Wang Jie, Qin Jianzhong, Rao Dan, *et al.* Microstructure and simulation experiments of extracted gas capability in different types of shale[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 23(4): 652-658. [王杰, 秦建中, 饶丹, 等. 不同类型页岩富集烃气能力模拟实验及微观结构特征研究[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(4): 652-658.]
- [41] Li Xiangfang, Pu Yunchao, Sun Changyu, *et al.* Recognition of absorption/desorption theory in coalbed methane reservoir and shale gas reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(6): 1113-1129. [李相方, 蒲云超, 孙长宇, 等. 煤层气与页岩气吸附/解吸的理论再认识[J]. 石油学报, 2014, 35(6): 1113-1129.]
- [42] Shi Wenrui, Guo Meiyu, Zhang Jianping, *et al.* Experimental study on the adsorption and desorption of shale gas[J]. *Mud Logging Engineering*, 2015, 26(1): 9-12, 84. [石文睿, 郭美瑜, 张建平, 等. 页岩吸附与解吸气量实验研究[J]. 录井工程, 2015, 26(1): 9-12, 84.]
- [43] Vasilache M A. Fast and Economic Gas Isotherm Measurements using Small Shale Samples[EB/OL]. [2015-04-30]. <http://www.scalinc.com/QuickDesorption.pdf>.

Research Progress on the Desorption Methods of Shale Gas

WEI Qiang^{1,2}, YAN Bo¹, XIAO Xian-ming¹

(1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The evaluation of shale gas content has a great significance on resource prediction, reserve calculation, and exploration and development planning. Desorption method is one of the methods which is widely applied to the evaluation of shale gas content. The present shale gas desorption method has mainly followed coalbed methane technologies. After the core or cutting shale sample is sealed in the desorption canister, desorbed gas and residual gas are measured, and the lost gas is fitted using the measured data. Their sum is the total gas content. After years of development, desorption apparatuses as well as data analytical methods

have been improved continuously. USBM method, polynomial method, Smith-Williams method, decline curve method and Amoco method have been successively developed to analyze desorption process. In actual applications, temperature and other environmental factors, lost time, fitting method and desorption apparatuses will influence the result of desorption. Due to the differences in diffusion mechanism and desorption process between shale gas and coalbed methane, evaluation of shale gas content based on methods from coalbed methane may lead to a significant error. Future research will target to improve desorption apparatuses, develop shale gas desorption models, standardize desorption methods as well as set up a relevant industry standard.

Key words: Shale; Gas content; Desorption apparatuses; Desorption methods

公告

《天然气地球科学》论文摘要撰写规范

摘要 是科技论文的重要组成部分,是对论文的内容不加注释和评论的简短陈述,通常包括研究的目的、方法、结果和结论等要素。摘要撰写总体要求:语言精练、逻辑清晰、简明扼要、言简意赅、术语规范、表述准确、独立成篇。摘要一般分为报道性、指示性和报道—指示性 3 种类型,不同类型摘要撰写的侧重点存在差异。报道性摘要概述了原始文献基本论点对原始文献的主要内容进行浓缩,起到报道作用,通常包括文章的目的、方法、结果、结论等内容。指示性摘要是只指出文章的主题范围与内容梗概,一般不涉及研究方法、对象及对结论认识的一种摘要。报道—指示性摘要介于二者之间,为一种混合摘要。本刊要求投稿论文采用报道性摘要撰写方式。根据 GB7713-87、GB6447-86《文摘编写规则》以及 EI 文摘撰写规范,对论文摘要撰写要求如下。

一、中文摘要撰写要求

(1) 内容充实,不空洞。摘要部分一般交代文章的研究目的(背景、意义)、研究对象、关键研究方法和手段、取得的主要结论(研究结果、结论、认识等)、成果的理论 and 实践意义等。摘要中不出现本学科领域已成常识的内容;不出现自我评价性词语,应该简明、具体地给出定量或定性的信息。

(2) 摘要详简适度,言简意赅。摘要长度一般为 200~500 个汉字,以说明问题为准,不出现空话、套话,不要写作者将来的研究计划等。每篇论文一般列出 3~8 个关键词,尽可能多选用《汉语叙词表》等词表提供的规范词,并按重要程度进行排序。

(3) 采用客观的角度对文章内容进行简要阐述,一般不用“本文”“我们”“作者”等作为句子的主语;通常用过去时态叙述作者工作,用现在时态叙述作者结论。

(4) 摘要具有相对独立性。摘要中一般不使用数学式、化学结构式、插图、表格,不应出现公式号、参考文献序号等。

二、英文摘要撰写要求

英文摘要撰写可不与中文摘要在文字上保持一一对应,但二者所表达的意思要一致。英文摘要文字长度一般不超过 200 个英文单词,在不遗漏主题概念的前提下,文摘应尽量简洁。在时态上一般采用过去时或现在时,用过去时态叙述作者工作,用现在时态叙述作者结论。

此外,英文摘要撰写应符合英语语法规则,不能出现“、”“—”~“等汉语标点符号,同时需注意避免单词拼写错误。所列举的英文关键词要与中文关键词一致,并保持一一对应。