

煤层气井井底流压分析及计算

杨焦生^{1,2} 王一兵² 王宪花²

1.中国地质大学(北京)能源学院 2.中国石油勘探开发研究院廊坊分院

杨焦生等.煤层气井井底流压分析及计算.天然气工业,2010,30(2),66-68.

摘 要 煤层气井井底流压的大小直接决定煤层气产量的大小,为了获得高产,必须清楚认识井底流压并精确计算其数值。根据垂直气液两相环空管流理论,首先描述了煤层气的环空流动特征及井底流压的组成部分;结合现场生产测试资料,采用 Hasan-Kabir 解析法和陈家琅实验回归两种方法计算了井底流压值,并分析了其与气体流量的关系。结论认为:①油套环空中流体由上而下分为纯气体段、混气液柱段(高含气泡沫段和普通液柱段),井底流压为套压、纯气柱压力及混气液柱压力三者之和;②两种方法计算的井底流压值大体相同,与实测值误差小,精度高;③井底流压与气体流量呈负相关关系,而且随着井底流压下降,压降漏斗不断扩大,井底流压下降相同的数值能产出更多的煤层气。

关键词 煤层气 井底压力 流动压力 流体流动 环形空间流动 生产制度 流量 计算

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2010.02.016

在煤层气井的生产过程中,井底流压是影响产气量的独立参量,稳定的产气量的大小将实际受控于井底流压和排水量,这是制订合理的排采制度的基础。

煤层气井排水采气井井底流压由套压、油套环空纯气柱压力和混气液柱压力 3 部分组成,其中混气液柱的压力计算是难点。国内外学者都对此进行了研究,在理论推导和实验模拟的基础上,建立了多种不同的计算模型和方法^[1-2]。笔者考虑到煤层气井生产的特殊性,充分分析其垂直环空管流特征的基础上,借鉴 Hasan-Kabir 推导的井底流压解析公式和陈家琅室内模拟实验回归结果,计算了环空混气液柱的压力梯度,进而获得了井底流压值。在此基础上,讨论了计算方法的适用性和精度,并对计算结果进行了对比分析。这些成果有利于深化对煤层气井生产过程的认识及控制。

1 井筒流动特征及井底流压组成

煤层气井投产后,初期只产水。随着排水降压的进行,当井底流压低于临界解吸压力时,井筒附近煤层表面的吸附气开始解吸并扩散到煤层割理、裂缝中,随着解吸气量逐渐增多,在水中形成连续气泡,气体突破

形成流动相,从煤层裂隙流入井筒油套环形空间产出。

如图 1 所示,煤层气在油套环形空间垂直上升时,随着气量和压力的不断变化,气体的流动形态也呈现不断的变化。具有一定稳产能力的煤层气井,油套环空中流体的组成为:上部为纯气体段,下部为混气液柱段,根据含气率的大小,混气液柱段又可细分为泡沫段(段塞流段)和普通液体段(泡流段,其中有小气泡)^[3]。

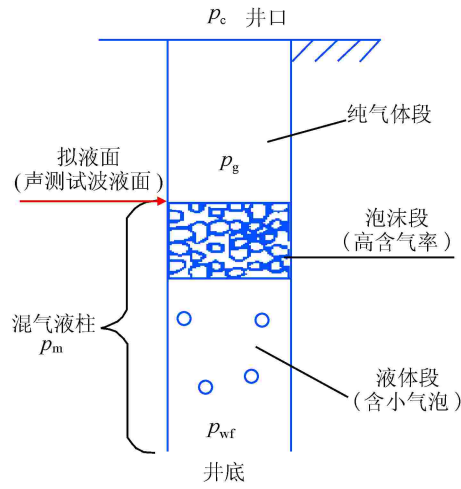


图 1 煤层气井环空流体分布及井底流压组成示意图

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(编号:2009CB219607)的部分成果。
作者简介:杨焦生,1980 年生,工程师,博士研究生;从事煤层气勘探开发研究工作。地址:(065007)河北省廊坊市万庄 44 号信箱。电话:(010)69213379,13513014216。E-mail:yangjiaosheng@126.com

泡沫段其实就是高含气(一般含气率大于60%)的流体段。因此对于气量足够高的井而言,由于泡沫段的存在,使得生产中的环空测试液面(即拟液面^[4])位置反映为泡沫段的上端面,真实液面位置可以通过测试的拟液面与泡沫段长度修正获得。

井底流压由3部分压力组成,及井口的套压、纯气柱压力及混气液柱压力三者之和:

$$p_{wf} = p_c + p_g + p_m \quad (1)$$

式中: p_{wf} 为井底流压; p_c 为井口套压; p_g 为纯气柱压力; p_m 为混气液柱压力。单位均为 MPa。

2 煤层气井井底流压计算方法

2.1 上部纯气柱产生的压力

对于上部纯气体段的流动状态可认为是雾流,可以根据天然气干气井井底流压的计算方法计算气柱产生的压力^[5]。即

$$p_g = \sqrt{p_c^2 e^{2s} + \frac{1.324 \times 10^{-18} f(TZq_{sc})^2}{(d_e - d_i)^3 (d_e + d_i)^2} (e^{2s} - 1)} \quad (2)$$

其中: $s = \frac{0.03415 \gamma_g H}{TZ}$

式中: p_g 为液面处的压力, MPa; q_{sc} 为标准状况下环空气体流量, m^3/d ; p_c 为井口套压, MPa; H 为井口到环空拟液面的深度, m; d_e 为套管内径, m; d_i 为油管外径, m。

2.2 混气液柱压力及井底流压计算

2.2.1 Hasan-Kabir 解析法计算井底流压^[6]

Hasan-Kabir 根据 Godbey-Dimon、Podio 等人的气体空隙度(含气率)相关式推导了井底流压的解析解表达式。即

$$p_{wf} = p_c + p_g + h_L [(1 - f_g) n_L + f_g r_g] \quad (3)$$

在单元高度 dh_L 上积分式(3)得:

$$p_{wf} = p_c + p_g + \int_0^{h_L} n_L (1 - f_g) dh_L + \int_0^{h_L} f_g r_g dh_L \quad (4)$$

气体表观流速为:

$$v_{sg} = \frac{Q_{gsc} TZ p_{st}}{(AT_{st} p)} \quad (5)$$

令 $C = \frac{Q_{gsc} T Z p_{st}}{(AT_{st})}$, 式(5)可写为: $v_{sg} = C/p$ 。代入 Godbey-Dimon 推导的气体空隙度(含气率)相关式得:

$$f_g = v_{sg} / (a + b v_{sg}) = C / (bC + ap) \quad (6)$$

气体表观流速的大小引起环形空间流动形态的变化,导致 a 、 b 的取值也有所不同。当 $v_{sg} < 0.61$ m/s 时,泡流, $a=0.6$, $b=1.2$; 当 $v_{sg} > 0.61$ m/s 时,段塞流, $a=b=1$ 。

由于 r_g 较小, f_g 又是小数,可近似认为:

$$p_{wf} = p_c + p_g + n_L h_L (1 - f_g) \quad (7)$$

其中: $f_g = C / [bC + a(p_c + p_g) + a n_L h_L (1 - f_g)]$

由于 $r_g = gM_p / (ZRT)$, 将式(7)代入式(4)得:

$$p_{wf} = p_c + p_g + n_L h_L - n_L C \times \int_0^{h_L} \frac{dh_L}{bC + a(p_c + p_g) + a n_L (1 - f_g) h_L} + \frac{Mg}{ZRT} \int_0^{h_L} p f_g dh_L \quad (8)$$

$$\text{令 } I_1 = n_L C \int_0^{h_L} \frac{dh_L}{bC + a(p_c + p_g) + a n_L (1 - f_g) h_L}$$

整理计算得:

$$I_1 = \frac{C}{a(1 - f_g)_{av}} \ln \left[1 + \frac{a n_L (1 - f_g)_{av} h_L}{bC + a(p_c + p_g)} \right] \quad (9)$$

$$\text{再令 } I_2 = \frac{Mg}{ZRT} \int_0^{h_L} p f_g dh_L$$

整理计算得:

$$I_2 = \frac{Mg C h_L}{ZRT a} - \frac{Mg C^2 b}{Z R a^2 T r_L (1 - f_g)_{av}} \times \ln \left[1 + \frac{a n_L (1 - f_g)_{av} h_L}{bC + a(p_c + p_g)} \right] \quad (10)$$

将 I_1 、 I_2 代入式(8)得:

$$p_{wf} = p_c + p_g + n_L h_L - I_1 + I_2 \quad (11)$$

式中: r_g 为气体的压力梯度, Pa/m; n_L 为液体的压力梯度, Pa/m; h_L 为混气液柱的长度, m; f_g 为气体空隙度(含气率), 无因次; Q_{gsc} 为标准状况下环空气体流量, m^3/d 。

井底流压的计算步骤为:①先假定 $(1 - f_g)_{av} = 1$, 利用式(11)计算 p_{wf} ;②由计算得到的 p_{wf} 根据式(6)反求 f_g ;③再把 $1 - f_g$ 代入式(11)中重新计算 p_{wf} ;④如此反复迭代,直到满足一定的精度要求。

2.2.2 陈家琅—岳湘安法

陈家琅等人在套管内径为 6.13 cm 的有机玻璃管、油管外径为 3.35 cm 的铁管、井长为 10 m 的实验装置中,模拟空气和水在环形空间的流动,根据实验数据,得出了环空中气体表观流速(v_{sg})和压力梯度校正系数(GCF)之间的关系曲线:

$$GCF = \exp(0.03499 - 0.9631 v_{sg}^{0.67}) \quad (12)$$

式中: $v_{sg} = Q_g / A$, m/s; 该式的使用条件是 $GCF > 0.3$ 。

对于混气液柱产生的压力,为了提高计算精度,需要在混气液柱中按深度分段计算。即

$$p_m = \sum_{i=1}^n r_{mi} H_i = \sum_{i=1}^n GCF_i r_{Li} H_i \quad (13)$$

式中: p_m 为混气液柱产生的压力, MPa; H_i 为每一段

混气液柱的长度, m ; n_i 为液体重度, Pa/m ; Q_g 为环空气体的体积流量, m^3/d ; GCF 为每一段混气液柱的压力梯度校正系数, 无因次。

获得混气液柱压力后, 可据式(1)计算井底流压。

3 计算结果与讨论

3.1 计算结果与实测压力的比较

选择有实测井底流压数据(井下压力计测取)的生

产井, 根据其稳定阶段的测试资料计算井底流压。本次选取了山西沁水盆地 5 口井的 6 组数据资料计算比较(表 1)。计算的基本参数: 气体临界压力为 4.63 MPa, 临界温度为 190.3 K, 气体相对密度为 0.589, 套管内径为 0.124 m, 油管外径为 0.073 m。

6 组数据计算的井底流压值与实际测试值相比较, 误差多在 5% 以内。同时, 在满足陈—岳法实验条件的基础上, 两种方法的计算结果基本相同, 说明理论

表 1 Hasan-Kabir 法和陈—岳法计算结果的对比分析表

井号	煤层中部深度/ m	测试资料							计算压力 /MPa			
		压力测试时间	日产气/ m ³	日产水/ m ³	液面/ m	套压/ MPa	测试深度/ m	测试压力/ MPa	Hasan-Kabir 法	计算误差/ %	陈—岳法	计算误差/ %
Q1	502.2	2006-11-23	1 125	3.8	448	0.48	514.2	1.675	1.593 5	4.87	1.583 9	5.44
Q2	552.6	2007-01-02	262	2.2	545	0.23	568.3	0.461	0.489 3	6.14	0.487 5	5.75
Q3	521.8	2007-01-04	51	5.7	434	0.27	530.3	1.227	1.239 1	0.98	1.237 2	0.83
Q3	521.8	2007-01-16	155	5.5	460	0.4	530.3	1.097	1.041 4	4.55	1.032 2	5.39
Q4	501.8	2007-02-24	835	2.0	493	0.65	511.4	0.825	0.862 2	4.51	0.860 4	4.29
Q5	493.3	2007-01-24	248	5.7	471	0.41	504.7	0.730	0.717 4	1.73	0.713 2	2.30

计算井底流压值完全能反映井底实际压力情况。

3.2 井底流压与气体流量的关系

图 2 显示了在煤层供气充足的条件下井筒中井底流压与气体流量的关系, 可见井底流压与气体流量呈负相关关系, 气体流量随井底流压降低而增加。在解吸产气初期, 井底流压下降快, 但气产量增长缓慢, 表明产气初期煤层压降漏斗范围小, 供气有限; 随着井底流压不断下降, 地层压降漏斗逐渐扩大, 井底流压下降较小的值就能产出大量的煤层气。煤层气临界解吸压力越高, 井底压力下降相同的数值产出的气体越多。这反映了煤层气井的地下渗流压力变化特征。

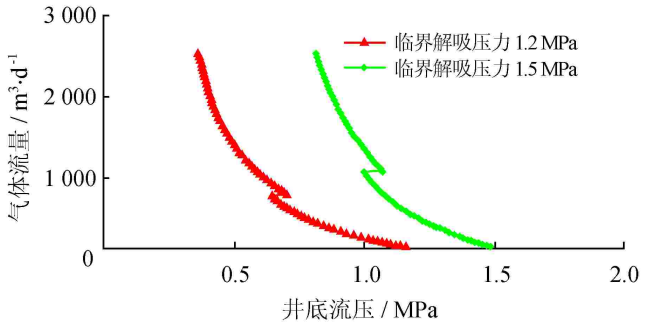


图 2 不同临界解吸压力下井底流压与气体流量的关系图

4 结论

1) 煤层气产出的油套环空中流体由上而下分为纯气体段、混气液柱段, 井底流压为套压、纯气柱压力及

混气液柱压力三者之和。

2) 采用 Hasan 解析方法和陈—岳实验公式计算混气液柱压力, 进而得到煤层气井井底流压的方法是可行的, 两种方法得到的结果大体相同且与实际测试压力值接近, 误差在 5% 之内, 可靠度高。

3) 煤层气量充足的条件下, 井底流压与气体流量存在较强的负相关关系, 而且随着井底流压下降, 压降漏斗不断扩大, 流压下降相同的值能产出更多的煤层气。建议煤层气生产实践中加强对典型井井底流压和动液面的监测工作。

参 考 文 献

[1] RASHID HASAN A, SHAH KABIR C. A study of multi-phase flow behavior in vertical wells [J]. SPE Production Engineering, 1988, 3(2): 263-272.

[2] 陈家琅. 石油气液两相管流 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1989.

[3] 王振松, 陈伟. 高气油比抽油井环空泡沫段量化计算初探 [J]. 吐哈油气, 2006, 11(2): 169-171.

[4] 吴芒, 文伯清, 邹建, 等. 排水采气井井底流压测试计算方法研究与应用 [J]. 钻采工艺, 2002, 25(2): 20-23.

[5] 张荣军, 孙卫. 垂直管流中的气液两相流压力计算 [J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2007, 37(1): 123-126.

[6] 杨涛, 杨桦. 利用气井环空气柱压力计算井底流压新方法的研究与应用 [J]. 天然气工业, 2001, 21(2): 66-70.