

压裂施工中井底压力的计算方法及其应用

蒋 廷 学

(中国石油天然气总公司石油勘探开发科学研究院廊坊分院)

在水力压裂施工中,精确地掌握井底压力至关重要。确定井底压力的最精确方法是采用井下压力计进行实时测量,但由于现场条件的制约,有时只能简单地对井口压力进行监测,以间接地估算井底的实际压力。此时如果井底装有封隔器或者进行油套混注,监测的井口压力中就包含有井筒摩阻的影响,而且随着支撑剂浓度的增加,井筒静液柱压力和混砂浆的摩阻都将发生显著变化,给压裂施工中尤其是加砂阶段解释井底压力带来了一定的困难。不同支撑剂浓度下的井筒静液柱压力确定,关键是确定不同支撑剂浓度下的井筒摩阻。迄今为止,尚无精确的计算混砂浆摩阻的理论公式,如单纯地从流变学的角度进行推导,既困难,又缺乏可信性,如用实验室实验的方法,目前的流变仪尚不能以混砂浆,特别是高浓度混砂浆进行这方面的研究。鉴此,本文根据井口监测压力、混砂浆密度及井底监测压力等,对不同密度的混砂浆摩阻进行计算,并进行无因次处理,得出的结论具有普遍的适用性,不受泵注排量、压裂管柱及压液流变性等因素的影响。

选井条件及使用公式

1. 研究的选井条件

为了使本文的研究具有可对比性,选井条件必须满足以下要求:

(1) 压裂期间的流体性质保持稳定。

(3) 工艺措施采气。1995 年 9 月 30 日,集气于灵 2 井站的灵 7 井投产,我们利用灵 7 井对灵 2 井实施气举排水,产气量和产水量同时上升,效果很好;但由于冬季发生冰堵和灵 7 井储量很低压力下快,于 1996 年 2 月 1 日停止气举,1996 年 3 月 3 日利用平衡灌注泡沫实施泡排采气,每日注 CT-2 起泡剂 3~ 5 kg,气井产量有所回升。到 1997 年 2 月底,套压 10.97 MPa,油压 2.60 MPa;本月产气 0.78 × 10⁴ m³/d,产水 13.0 m³/d。油管内流态呈段塞流,阶段累计采气 300 × 10⁴ m³,采出程度提高到 30.77%,累计排水 1.086 × 10⁴ m³。

认识与建议

(1) 建立稳定生产制度是高渗大水井排水采气的根本。纵观灵 2 井开发历程(参数见表 1)。摸索合理的生产制度,在没有外力帮助条件下,采取“控气排水”方法,降低了生产

(2) 泵注排量基本稳定。

(3) 压裂施工正常,没有出现砂堵。

(4) 具较为准确齐全的压裂施工资料,主要包括连续记录的井口和井底压力、总压裂液量、前置液量、泵注排量、阶段施工砂液比、支撑剂的体积密度和颗粒密度等。

(5) 支撑剂从井口到达井底的时间相对较短,以便简单地考察整个井筒中只充满一个砂比段时的混砂浆摩阻。

2. 使用的基本公式

以油管注入,环空监测为例,油管的井底压力与井口压力的关系为:

$$p_{bt} = p_w + p_H - p_f \tag{1}$$

由于环空中没有井筒摩阻,其井底压力与井口压力的关系为:

$$p_{ba} = p_i + p_h \tag{2}$$

由于油管和环空中的井底压力始终相同,故联立公式(1)、(2)可得:

$$p_f = p_w - p_i + p_H - p_h \tag{3}$$

式中: p_{bt} ——油管的井底压力,MPa;

p_w ——油管的井口压力,MPa;

p_H ——油管中静液柱压力,MPa;

p_f ——油管中摩阻,MPa;

p_{ba} ——环空的井底压力,MPa;

压差,从而使气井流体在产层中达到了稳定流动,合理的回压和对应的流量也为流体在井筒举升达到了气水井连续生产的目的。

(2) 稳定生产有效降低了水体能量,采取“控气排水”连续生产排水 1.631 × 10⁴ m³,有效降低了水体能量。

(3) 由于灵 2 井原是单井生产等因素,排水工艺未能及时跟上,若在“控气排水”阶段辅以泡沫排水,气水量都将上升,开发效果更好。

(4) “控气排水”后关井计算地层压力为 17.684 MPa,地层压力下降率为 21.16%,此时采出程度为 24.89%,地层压力下降低于采出程度,这在早期出水的大水量气水井开发中还是少见。目前气井采出程度低,井口套压高,建议用柱塞泵注泡沫,重新调整泡排生产制度,加大排水量,这对提高气井采收率十分有利。

(编辑 钟水清)

p_i ——环空的井口压力, MPa;
 p_h ——环空中静液柱压力, MPa。
在泵注前置液阶段, 油管和环空中的静液柱压力相等。由公式(3)可知, 此时的油管和环空的井口压力差即为压裂液的井筒摩阻。在泵注携砂液阶段, 油管和环空中的静液柱压力是不相等的, 原因是环空中的静液柱压力在整个压裂过程中始终等于纯携砂液的静液柱压力, 而油管中由于支撑剂的加入, 随时都在变化。

研究方法及过程

根据上述假设条件, 选择安徽吴庄油田吴 101 井进行研究, 由于该井采用油管注入、环空监测, 由环空监测压力中估算出来的井底压力中不包含井筒摩阻, 因而能较真实地反映出井底的实际压力。

为精确起见, 首先对油管和环空中的井口压力曲线进行数字处理, 然后根据施工数据确定开始加砂的时间和每个砂比段的起止时间, 在此基础上, 应用公式(3)进行计算。计算时, 每个砂比段的时间中都要除去支撑剂从井口到达井底的时间(吴 101 井支撑剂从井口到达井底的时间只有 1.63 min), 以便简单地考察单一砂比段的混砂浆摩阻。为使计算结果具有代表性, 每个砂比段都计算了许多点, 最后进行加权平均。

定义无因次摩阻为混砂浆的摩阻与相同排量和相同压裂管柱尺寸下的纯携砂液的摩阻之比, 即:

$$\Delta p_r = \frac{p_{sf}}{p_{lf}} \tag{4}$$

式中: Δp_r ——无因次摩阻, 无因次;
 p_{sf} ——混砂浆的井筒摩阻, MPa;
 p_{lf} ——纯携砂液的井筒摩阻, MPa。

定义无因次密度为混砂浆的密度与纯携砂液的密度之比

$$\Delta \rho_r = \frac{\rho_s}{\rho_l} \tag{5}$$

式中: $\Delta \rho_r$ ——无因次密度, 无因次;
 ρ_s ——混砂浆的密度, kg/m³;
 ρ_l ——纯压裂液的密度, kg/m³。

式(5)中混砂浆密度的计算公式如下:

$$\rho_s = \frac{\rho_l + \rho_b SOR}{1 + \frac{\rho_b}{\rho_l} SOR} \tag{6}$$

式中: ρ_b ——支撑剂的体积密度, kg/m³;
 ρ_l ——支撑剂的颗粒密度, kg/m³;
 SOR ——施工砂液比, 小数。

由公式(3), 根据在泵注前置液阶段时的油管和环空中井口压力差, 确定吴 101 井的纯携砂液摩阻为 17 MPa。在泵注携砂液段的混砂浆摩阻由公式(3)计算。本井最终的计算结果及其拟合情况如表 1 所示。据表 1 数据作回归得规律如下:

表 1 吴 101 井各砂比段无因次摩阻与无因次密度间的关系

Table 1. Relation between dimensionless frictional resistance and dimensionless density of sand in well Wu 101

砂比(%)	无因次密度	无因次摩阻
15	1.152	1.118
23	1.222	1.126
33	1.303	1.272
36	1.325	1.262
52	1.434	1.282

$$\Delta p_r = 1.012\ 605 \Delta \rho_r^{0.699\ 473} \tag{7}$$

纯携砂液的井筒摩阻对计算井底压力至关重要, 可用实验方法和现场方法求取。在泵注前置液的前期停泵一次, 因为这时的裂缝刚刚延伸, 裂缝摩阻可认为是零, 如不是限流量压裂, 孔眼摩阻也可认为是零(如是限流压裂, 可用孔眼摩阻公式进行计算), 所以此时的停泵压力落差即可认为是纯携砂液的井筒摩阻(如是限流压裂为停泵压力落差与孔眼摩阻的差值)。如现场条件不允许前置液阶段停泵, 可采用公式来近似地计算纯携砂液的井筒摩阻, 公式如下:

$$Re = \frac{10^{-1} g v^{2-n'} d'^n \rho_l}{k' 8^{n'-1}} \tag{8}$$

如 $Re < 2\ 100$, 则 $f = \frac{64}{Re} \tag{9}$

如 $Re > 2\ 100$, 则 $f = 0.079 Re^{-0.25} \tag{10}$

则 $p_f = \frac{5.1 \times 10^{-6} l_p v^2 f \rho_l}{d} \tag{11}$

式中: v ——压裂液的流动速度, m/s;
 Q ——泵注排量, m³/min;
 d ——压裂管柱内径, m;
 Re ——雷诺数, 无因次;
 ρ_l ——压裂液密度, kg/cm³;
 n' ——压裂液的流态指数, 无因次;
 k' ——压裂液的稠度系数, Pa·s ^{n'} ;
 f ——压裂液的摩阻系数, 无因次;
 p_f ——压裂液的沿程摩阻, MPa;
 g ——重力加速度, m/s²;
 l_p ——压裂管柱深度, m。

实 例 验 证

为了验证本文结论的可靠性, 现以鄯善油田鄯 10—7 井为例进行计算。选取该井主要基于以下几点:

(1) 该井压裂时的排量及压裂液的性质基本稳定, 施工正常。

(2) 该井压裂用的流体性质、支撑剂性能、压裂管柱尺寸及压裂方式、泵注排量以及井深等条件与安徽吴庄油田吴 101 井均有显著差别(表 2)。若吴 101 井的规律与鄯 10—7 井一致则说明方法具有普遍的适用性。

表 2 鄯 10—7 井与吴 101 井压裂施工参数对比表

Table 2. Contrast of the fracturing parameters of well Shan 10- 7 and Wu101

	吴 101	鄯 10—7
井 深(m)	1 700	3 000
注入方式	Ø63. 5mm 油管	Ø177. 8mm + Ø76. 2mm 环空
监测方式	环空	油管
施工排量(m/ min)	3. 1	4. 9

(3) 该井采用了环空注入、油管监测的方法,因而可以比较精确地求出压裂时的井底压力,便于将预测的井底压力与实际的井底压力进行对比。

4. 该井压裂目的层较深,又采用环空注入,支撑剂从井口到井底的时间较长(约为 10 min),因而井筒中不存在单一砂比段的简单情况,需采取分段计算方法,因此如计算结果与实际情况吻合,更增强了本文所推规律的可信度。

分段计算的方法示例如下:

设井筒中砂比为 25%、35%、45% 的混砂浆段的长度各占据了井筒的 1/ 3; 设支撑剂的体积密度为 1. 8 g/ cm³, 颗粒密度 3. 0 g/ cm³; 设纯携砂液的密度为 1. 03 g/ cm³, 整个井筒的纯携砂液摩阻为 15 MPa(与三个砂比段所占据的井筒长度相对应的纯携砂液摩阻各为 5 MPa); 设整个井筒纯携砂液的静液柱压力为 21 MPa(与三个砂比段所占据的井筒长度相对应的纯携砂液的静液柱压力各为 7 MPa); 设井口的压力为 40 MPa, 依据公式(6) 计算的三个砂比段混砂浆的静液柱压力分别为 $p_{H1}= 8. 75\text{ MPa}$, $p_{H2}= 9. 32\text{ MPa}$ 和 $p_{H3}= 9. 85\text{ MPa}$, 则总的静液柱压力 $p_H= p_{H1}+ p_{H2}+ p_{H3}= 27. 9\text{ MPa}$; 由公式(6) 和(7) 计算的摩阻分别为 $p_{s1}= 5. 92\text{ MPa}$, $p_{s2}= 6. 2\text{ MPa}$ 和 $p_{s3}= 6. 46\text{ MPa}$, 则总的混砂浆阻 $p_{s1}= p_{s1}+ p_{s2}+ p_{s3}= 18. 6\text{ MPa}$ 。最后由公式(1) 计算的井底压力为:

$$p_b= p_w+ p_H- p_{s1}= 40+ 27. 9- 18. 6= 49. 27\text{ MPa}$$

如井筒中还混有纯携砂液段,也可按上例方法进行计算。

鄯 10—7 井压裂施工的携砂液段依次分为 15%、25%、33%、46% 四个砂比段,按示例的分段计算方法进行分段计算。首先将实际监测的油管井口压力曲线进行数字处理,并分别得出每个砂比段结束时(即下一个砂比段开始的时刻)实际的平均井底压力,然后根据现场记录的环空井口压力值,按上述示例方法计算出每一个砂比段结束时的井底压力,最终结果如表 3 所示。

由表 3 可见,计算的井底压力与实际监测的井底压力基本吻合。

有了计算的井底压力值,就可根据压力上升的速度,判断是否发生砂堵及砂堵位置。以 PKN 型裂缝为例,如发生砂堵,则砂堵的位置为:

表 3 鄯 10—7 井计算与监测井底压力对比表

Table 3. Contrast between calculated and measured bottom hole pressure of well Shan 10- 7

砂 比 (%)	实际监测井底压力 (MPa)	计算井底压力 (MPa)	误差 (%)
15	56. 1	56. 8	+ 1. 2
25	55. 5	56. 6	+ 2. 0
33	56. 0	57. 3	+ 2. 3
46	56. 6	56. 4	- 0. 4

$$X_f= \frac{2E'\eta Q}{\pi H_f^2 m} \tag{14}$$

式中: X_f ——砂堵的裂缝长度, m;

E' ——平面应变模量, MPa;

η ——压裂液效率, 小数;

Q ——泵注排量, m³/ min;

H_f ——裂缝高度, m;

m ——井底压力上升的速度, MPa/ min。

如果计算结果表明没有发生砂堵,说明设计的压裂参数是能够适应地层的; 如果计算结果表明发生了砂堵,则说明对地层特性的认识程度不够。此时,需对油藏的岩石力学参数,主要是杨氏模量和泊松比进行重新评价,同时需要对部分压裂设计参数进行重新优选; 如前置液量和泵排量在可能的条件下尽量调大,在压裂液的滤失上还应作进一步的工作; 此外,压裂加砂泵注程序也应相应地进行必要的调整。

另外,还可以根据计算的井底压力值,由井底压力与泵注时间的双对数线判断裂缝的特征及其延伸状况(对含有井筒摩阻的压裂后压力测试解释提供一定的依据),也可进行实时分析,及早发现砂堵的征兆,并及时采取相应的补救措施。

结论和建议

(1) 本文应用现场压裂施工的资料,研究了混砂浆摩阻与纯携砂液摩阻间的关系,由于采用了无因次变量的方法,推导出的公式具有普遍的适用性。

(2) 该方法简单、可靠,可用于压后的评估分析或压裂的实时分析。

(3) 建议今后加强对现场压裂资料的录取工作,特别是井下没有装封隔器的井,如没有采用油套混注,应尽可能取全、取准油管和环空两个井口压力值,以便对本文的研究结论进行校核和修正。

成文中,得到我院教授级高级工程师俞绍诚及高级工程师李安启等同志的热情帮助和指导,在此表示诚挚的谢意!

(编辑 华桦)