

杂质气体对二氧化碳驱最小混相 压力和原油物性的影响

尚宝兵^{1,2}, 廖新维¹, 赵晓亮¹, 蔡振华³, 李俊飞², 何逸凡², 苏宪科⁴

(1. 中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 中海石油(中国)有限责任公司天津分公司, 天津 300452; 3. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300452; 4. 中国石油大庆头台油田开发有限责任公司, 黑龙江 大庆 166500)

摘要: 注入二氧化碳中混有的杂质气体会不同程度地影响二氧化碳驱最小混相压力和原油物性。研究杂质气体含量对二氧化碳驱的影响对制定合理有效的开发方案具有重要意义。利用数值模拟方法, 在原油 PVT 数据拟合的基础上, 研究了甲烷与氮气这 2 种杂质气体的含量对二氧化碳驱最小混相压力的影响, 分析了杂质气体对二氧化碳驱原油物性的影响。结果表明, 甲烷与氮气会不同程度地增大二氧化碳驱最小混相压力, 且氮气对最小混相压力的影响更显著。当注入气的摩尔分数为 60% 时, 纯二氧化碳气体可使原油粘度降低 71.9%, 体积膨胀系数达 1.42; 含 30% 摩尔分数的甲烷注入气使原油粘度降低 69.72%, 体积膨胀系数为 1.41; 而含 30% 摩尔分数氮气的注入气使原油粘度降低 65.92%, 体积膨胀系数为 1.36。对于目标区块, 注入二氧化碳中甲烷的临界摩尔分数为 5.6%, 氮气的临界摩尔分数为 2%。

关键词: 二氧化碳驱 甲烷 氮气 最小混相压力 原油物性 临界摩尔分数 数值模拟

中图分类号: TE357

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2014)06-0092-03

二氧化碳驱是提高采收率的重要方法之一, 且混相驱的驱油效率比非混相驱高得多^[1-4]。只有当驱替压力高于最小混相压力时, 才能实现混相驱替。因此, 在进行二氧化碳驱方案设计与优化时, 最小混相压力是一个非常重要的参数。

在矿场应用中, 注入的二氧化碳通常会含有一定量的杂质气体^[5]。例如, 为节约成本, 在将油井产出气与二氧化碳一起回注到油藏的情况下, 注入的二氧化碳中会含有一定量的甲烷; 由烟道气提纯得到的二氧化碳注入气中会含有一定量的氮气。甲烷与氮气等杂质气体的存在会不同程度地影响二氧化碳驱最小混相压力^[6], 且对二氧化碳驱过程中原油物性, 如原油饱和压力、粘度、体积系数、体积膨胀系数产生影响^[7-9]。

目前, 确定最小混相压力的方法主要是实验测量法和理论计算方法^[10-11]。其中, 实验测量法中的细管实验方法是中外公认的最可靠的方法^[12]。针对目标区块原油, 笔者采用数值模拟方法, 通过模拟二氧化碳在一维长细管模型中的驱替过程, 定量

研究杂质气体含量对二氧化碳驱最小混相压力的影响, 确定了所注入二氧化碳中杂质气体的临界摩尔分数; 模拟了注气膨胀实验, 研究杂质气体对二氧化碳驱原油物性的影响。

1 油藏原油 PVT 实验数据拟合

目标区块油藏具体物性参数包括: 地层压力为 23.7 MPa, 原油饱和压力为 7.01 MPa, 地层温度为 98 °C, 地层原油密度为 0.77 g/cm³, 地层原油粘度为 1.92 mPa·s, 原油体积系数为 1.16 m³/m³, 溶解气油比为 34.05 m³/m³。

以目标区块的原油为研究对象, 为满足油藏数值模拟的需要, 按照组分相近的原则对原油组分进行重组; 然后选用常用的三参数 Peng-Robinson 状态方程, 对目标区块原油的 PVT 实验数据进行拟合, 包括原油泡点压力、溶解气油比、地层原油粘度、地层原油密度、原油体积系数的拟合, 最终得到可以反映地层流体特征的状态参数(表 1)。

收稿日期: 2014-08-31。

作者简介: 尚宝兵, 男, 硕士, 从事油气田开发工程方面的研究。联系电话: 18810415792, E-mail: shangbaobing@126.com。

基金项目: 国家科技重大专项“复杂油气田地质与提高采收率技术”(2011ZX05009), 国家“973”计划“二氧化碳减排、存储和资源化利用的基础研究”(2011CB707302)。

表1 油藏流体拟组分回归参数

拟组分	摩尔质量/(g·mol ⁻¹)	状态方程 系数A	状态方程 系数B	临界压力/MPa	临界温度/K	临界体积/(L·mol ⁻¹)	临界因子	偏心因子
N ₂	28.01	0.46	0.08	3.39	126.20	0.09	0.29	0.04
CO ₂	44.01	0.46	0.08	7.39	304.70	0.09	0.27	0.23
C ₁	16.04	0.46	0.08	4.60	190.60	0.10	0.28	0.01
C ₂₊	36.49	0.40	0.11	4.59	411.26	0.17	0.23	0.12
C ₄₊	72.25	0.49	0.08	3.37	564.13	0.31	0.22	0.24
C ₇₊	116.61	0.46	0.08	2.70	592.83	0.47	0.26	0.34
C ₁₁₊	237.03	0.44	0.08	1.67	694.76	0.87	0.25	0.61
C ₂₈₊	542.10	0.45	0.08	0.60	1 042.84	2.04	0.14	1.33

2 杂质气体对二氧化碳驱最小混相压力的影响

2.1 细管实验的数值模拟及准确性验证

利用数值模拟方法模拟细管实验,就是根据实验室细管模型的基本参数,建立注气驱替的一维长细管模型,模拟实际的细管实验过程。在前期原油PVT数据拟合的基础上,建立组分模型,利用Eclipse的E300模块模拟驱替过程。根据采出程度与驱替压力的关系曲线,确定注入气体驱油的最小混相压力。

对于研究的目标区块,油井产出气中甲烷的摩尔分数为31.65%,氮气的摩尔分数为39.44%,而其他中间烃的摩尔分数为28.91%。为节约成本,计划将油井的产出气与二氧化碳气体混合后回注进行驱油。对于纯二氧化碳气体以及注入二氧化碳中混入不同摩尔分数油井产出气的2种混合气体,利用数值模拟方法,得到目标区块原油采出程度与驱替压力的关系(图1)。应用细管实验方法确定了以上3种气体的最小混相压力(表2),将实验结果与模拟结果进行对比(表2)可以看出,对于3种不同的注入气体,通过数值模拟方法确定最小混相压力的准确度均较高。这也说明,在准确地拟合原油PVT数

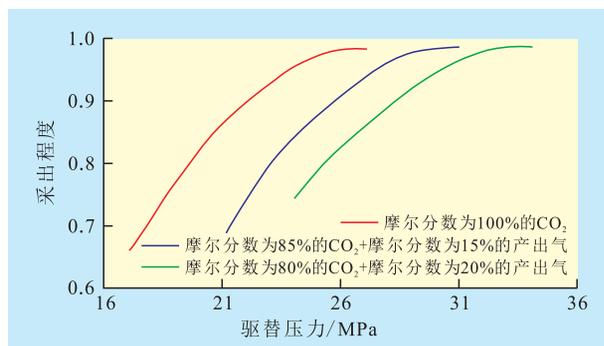


图1 不同注入气体原油采出程度与驱替压力的关系

表2 最小混相压力的模拟结果与实验结果对比

注入气体	细管实验 结果/MPa	模拟结 果/MPa	相对误 差,%
摩尔分数为100%的CO ₂	22.3	22.5	0.9
摩尔分数为85%的CO ₂ + 摩尔分数为15%的产出气	24.7	25.4	2.83
摩尔分数为80%的CO ₂ + 摩尔分数为20%的产出气	29.2	29.3	0.34

据的基础上,通过该方法可以较为准确地确定注入气体与原油的最小混相压力。

2.2 最小混相压力变化规律

利用目标区块原油的PVT数据,模拟细管实验,研究当注入二氧化碳中混入不同摩尔分数的甲烷或氮气时,注入气体与原油最小混相压力的变化特征,从而可以定量研究甲烷与氮气摩尔分数对二氧化碳驱最小混相压力的影响。

当注入二氧化碳中甲烷或氮气的摩尔分数分别为0,5%,10%,15%和20%时,通过数值模拟方法得到了不同注入气体的最小混相压力(图2)。由图2可见,随着注入二氧化碳中甲烷或氮气摩尔分数的增加,注入气体与原油的最小混相压力都有逐渐增大的趋势。其中,在杂质气体摩尔分数不超过20%的条件下,甲烷摩尔分数每增加5%,最小混相

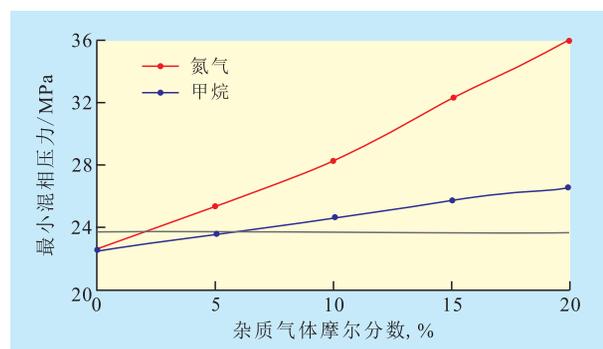


图2 二氧化碳中混入不同摩尔分数甲烷或氮气时的最小混相压力

压力增大0.2~0.6 MPa;氮气摩尔分数每增加5%,最小混相压力增大2.2~3.2 MPa。由此表明,与甲烷相比,氮气对二氧化碳驱最小混相压力的影响更显著。

以最小混相压力不高于目前地层压力23.7 MPa为条件,考虑当注入二氧化碳中仅含一种杂质气体的情况,则可确定注入二氧化碳中甲烷的临界摩尔分数为5.6%,而氮气的临界摩尔分数为2%(图2)。如果注入二氧化碳中存在多种杂质气体,也可以通过数值模拟方法,确定最小混相压力,从而准确地确定杂质气体的临界含量。

3 杂质气体对二氧化碳驱原油物性的影响

当向地层中注入二氧化碳后,二氧化碳与地层原油之间会发生不同程度的混溶,导致流体的物理化学性质发生变化。研究杂质气体对二氧化碳驱原油物性的影响,有助于更加深入地分析注气提高采收率的作用机理,以及杂质气体对二氧化碳驱油效果的影响。当注入纯二氧化碳、摩尔分数为70%的CO₂+摩尔分数为30%的CH₄、摩尔分数为70%的CO₂+摩尔分数为30%的N₂这3种不同的气体时,得到原油饱和压力以及饱和压力下的原油粘度、原油体积系数和体积膨胀系数(图3)。

向地层中注入3种不同气体均会使原油的饱和压力增大、粘度降低、体积膨胀。注纯二氧化碳后原油饱和压力增加幅度最小,而在二氧化碳中混入甲烷或氮气均会使原油饱和压力增加的幅度变大;

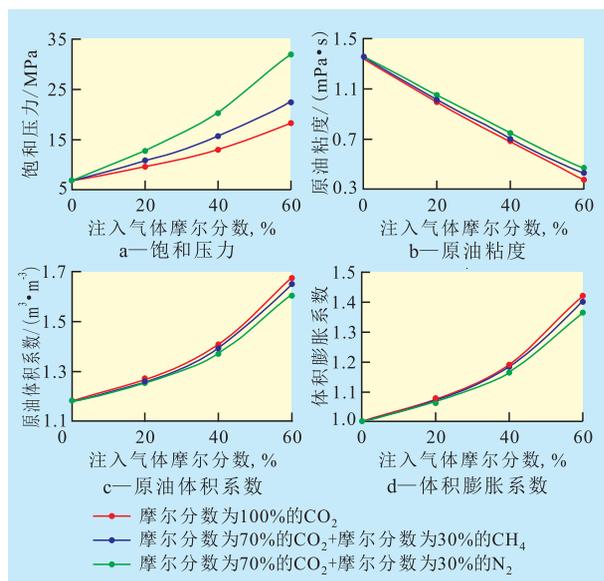


图3 不同注入气体原油物性的变化

由于注气后饱和压力增加得越少,说明气体在原油中的溶解性越好,越容易与原油混相,由此可以推断,甲烷与氮气的存在将导致注入二氧化碳与原油混相的难度增大,且氮气的影响更大。

此外,当注入二氧化碳中含有一定摩尔分数的甲烷或氮气时,注入气使原油粘度降低、体积膨胀的作用减弱。如当注入60%摩尔分数的纯二氧化碳气体后,原油粘度降低71.9%,体积膨胀系数达1.42;而当注入二氧化碳中含有30%摩尔分数的甲烷时,原油粘度降低69.72%,体积膨胀系数为1.41;对于含30%摩尔分数氮气的注入气,原油粘度降低65.92%,体积膨胀系数为1.36。由此可见,注入含有杂质气体的二氧化碳,其改善原油流动性的效果变差、依靠原油膨胀作用采出的油量减少。甲烷与氮气对注二氧化碳提高采收率作用机理的这些影响,将导致注入二氧化碳的驱油效果变差,且氮气的影响比甲烷更大。

4 结束语

通过数值模拟方法可较为准确地确定注入气体与原油的最小混相压力。在缺少细管实验数据的情况下,可通过该方法确定二氧化碳驱最小混相压力。

甲烷或氮气的存在会使二氧化碳驱最小混相压力增大,且氮气的影响比甲烷大。对于目标区块,以最小混相压力不大于目前地层压力为条件,确定注入二氧化碳中甲烷的临界摩尔分数为5.6%,氮气的临界摩尔分数为2%。若注入二氧化碳中同时含有多种杂质气体,则可通过相同的方法确定杂质气体的临界摩尔分数。注纯二氧化碳后原油饱和压力增加幅度最小,而混入甲烷或氮气后均会使原油饱和压力增加的幅度变大;注入二氧化碳中混入甲烷或氮气后,注气使原油粘度降低、体积膨胀的作用减弱,且氮气的影响更明显。

甲烷与氮气2种杂质气体对二氧化碳驱的影响表现为使气驱最小混相压力增大,改善原油物性的效果变差。因此,在经济允许的条件下,应尽量提纯注入气体,降低注入二氧化碳中这2种杂质气体的含量。

参考文献:

- [1] 罗二辉,胡永乐,李保柱,等.中国油气田注CO₂提高采收率实践[J].特种油气藏,2013,20(2):1-7,42.

(下转第98页)