

超临界二氧化碳流体引发井喷探讨*

袁平¹ 李培武² 施太和¹ 李培君³ 熊继有¹

(1.西南石油大学 2.中国石油辽河油田分公司勘探开发研究院 3.中国石油辽河油田兴隆台采油厂)

袁平等.超临界二氧化碳流体引发井喷探讨.天然气工业,2006,26(3):68-70.

摘要 针对超临界流体状态下 CO₂ 的特性,结合 $p-T-\rho$ 图和 PR 状态方程,计算了天然气与 CO₂ 按各种不同比例构成的混合物的 $p-Z$ 图,从密度、偏差因子和压缩系数的角度,对二氧化碳可能导致井喷的原因加以分析。提出了地层中一定含量的超临界二氧化碳流体可能引发井喷的观点。并且通过对国内外一些类似的井喷事故原因研究后,提出了有效的防喷措施,为高含量 CO₂ 和 H₂S 的油气井钻井作业提供一定参考。

关键词 超临界流体 二氧化碳 相态 偏差因子 压缩系数 井喷原因 防喷措施

近几年,世界各地相继钻成了一些 CO₂ 含量高的气井。有些井在钻井、生产过程中出现井喷,如美国新墨西哥州、科罗拉多州和怀俄明州的 CO₂ 气井井喷^[1]。同时在石油工业三次采油中,持续注入的 CO₂,使得地层中 CO₂ 含量高。在石油开发过程中,井喷的频繁发生给生产活动造成巨大损失。Willis 能源损失数据库的统计资料显示,井喷占有(石油工业生产)事故的 90%。当地层中一定量的 CO₂ 处于超临界状态,加上井身结构腐蚀老化,一旦压力失控,CO₂ 急剧膨胀,极易发生井喷。本文针对超临界流体状态下 CO₂ 特性,通过 PR 状态方程分别计算了天然气与 CO₂ 按各种不同比例构成的混合气体的偏差因子,结合二氧化碳 $p-T-\rho$ 图,对超临界 CO₂ 可能导致井喷的原因加以分析,并且对国内外一些类似的井喷事故原因进行研究,提出了有效的防喷措施,为高含量 CO₂ 和 H₂S 的油气井钻井作业提供一定参考。

一、超临界 CO₂ 流体的特性

1. 超临界流体性质

超临界流体(Supercritical Fluid 简称 SCF)指该流体处在其临界温度(T_c)和临界压力(p_c)以上的状态。超临界流体不同于气体和液体,气液界面张力为零,自扩散系数、粘度接近于气体,具有近似于气体的流动行为,而密度却和液体接近^[2](见表1),同时

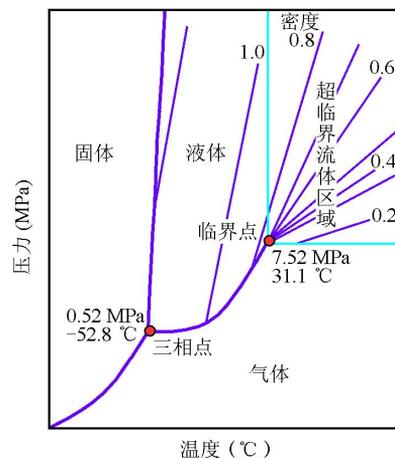
表1 SCF 与气体、液体物性区别

物性	气体 (常温、常压)	SCF	液体 (常温、常压)
密度(g/cm ³)	$(0.6\sim 2.0)\times 10^{-3}$	0.2~0.9	0.6~1.6
扩散系数(cm ² /s)	0.1~0.4	$(0.2\sim 0.7)\times 10^{-3}$	$(0.2\sim 2.0)\times 10^{-5}$
粘度(mPa·s)	0.01~0.03	0.01~0.09	0.2~3.0

具有很强的溶解能力。

2. 地层中 CO₂ 的高压物性

从图1可看到,CO₂ 的临界温度和临界压力($T_c = 31.1\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $p_c = 7.52\text{ MPa}$)很低。其密度线在临界点附近收缩,在比临界点稍高一点的温度区域内压

图1 二氧化碳的 $p-T-\rho$ 曲线

* 本文系国家自然科学基金资助项目(编号:90210022)。

作者简介:袁平,女,1979年生,硕士研究生;从事油藏流体研究。地址:(610500)四川省成都市新都区西南石油大学硕2003级(2)班。电话:13551241116。E-mail:yp588@163.com

力稍有变化,其性质变化显著,此时 CO₂ 的密度接近于液体。由于 CO₂ 在地下岩层的空隙或裂缝中聚集,其体积受地层孔隙压力控制呈密集压缩状态。如果地层温度和 CO₂ 分压均超过其临界温度和临界压力,则 CO₂ 处于超临界状态,其密度可达 500~800 km/m³,近似于液体,同时由于等温密度线在其临界点出现收缩,即使压力降低很小,也会导致体积大幅度增加。

二、井喷原因分析

1. CO₂ 的相态变化

在钻井、开采过程中,处于超临界状态的 CO₂ (流体)从气层到井口的上升过程中,随着井筒温度、压力的降低,CO₂ 会发生连续的相态变化,由气相转变为饱和蒸气相,吸热后在转变为过热蒸气相(不饱和蒸气相),其密度发生较大变化。处于超临界态 CO₂ 转变为气态时,密度和体积都发生显著变化。

2. 不同 CO₂ 含量组成的混合气体的 p-Z 图

拟天然气(NG)组分:C₁=0.89;C₂=0.04;C₃=0.01;CO₂=0.02;H₂S=0.04。通过 PR^[5] 状态方程计算了分别在 T=304.19 K, T=320 K 时,按不同比例(100% CO₂, 80% CO₂ + 20% NG, 60% CO₂ + 40% NG, 40% CO₂ + 60% NG, 20% CO₂ + 80% NG, 100% NG)组成的混合气体的偏差因子(Z)。由于非烃气体的影响,计算时考虑了适用于 PR 状态方程的二元交互作用系数(K_{ij})。结果见图 2~3。

从图 2、3 中可以看出:温度处于 CO₂ 临界温度 T=304.19 K,偏差因子在 CO₂ 临界压力 p=7.52 MPa 附近变化很大。其中纯 CO₂ 的偏差因子随压力的变化最大,当压力从 7.38 MPa 下降到 5 MPa 过程中,斜率 ∂Z/∂p 最大。随着混合物中 CO₂ 组分含量逐渐增大,偏差因子随压力的变化率也逐渐增大;同时按真实气体状态方程可得混合物的压缩系

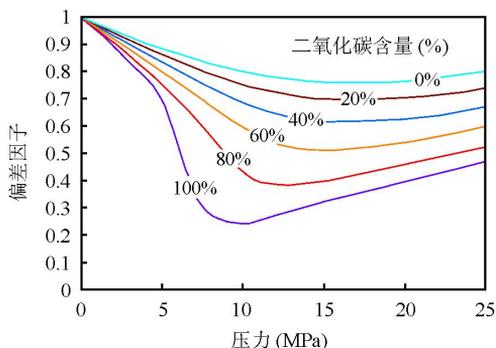


图 2 T=304.19 K 时各不同组成混合气体 p-Z 图

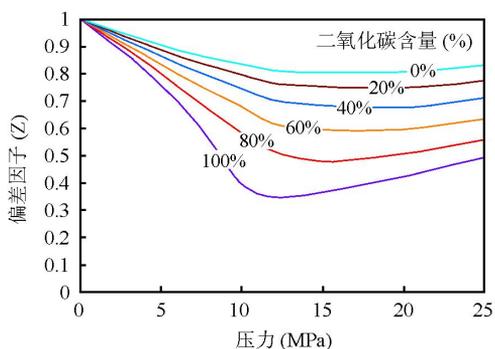


图 3 T=320 K 时各不同组成混合气体 p-Z 图

数 $C_g = \frac{1}{p} - \frac{1}{Z} \frac{\partial Z}{\partial p}$, 如图所示混合气体的压缩系数也相应增大。这表明混合气体在等温条件下,体积随压力变化的体积变化率增大,压力稍微降低一点,其体积膨胀幅度大。随着温度的升高,混合气体的压缩因子增大,偏差因子随压力的变化率降低。说明越接近临界温度,压力的减小对 CO₂ 体积膨胀作用越明显。同时所有曲线在 p→0 时,接近于理想气体, Z=1。

3. 超临界 CO₂ 流体引发井喷原因分析

结合 CO₂ 的 p-T-ρ 相图和不同 CO₂ 含量组成的混合气体的 p-Z 图分析,可以得出超临界二氧化碳流体引发井喷的原因。当地层中所处的 CO₂ 的温度及分压达到其临界温度、临界压力时,CO₂ 处于超临界流体状态。在钻进过程中,一旦地层中 CO₂ 进入井筒,将随钻井液到达井口,在到达井口的沿途,其体积会随着上部液柱压力减少而增大。处于超临界态的 CO₂ 流体,在临界点附近密度随压力变化很大。压力略微降低,其体积就会急剧膨胀,膨胀速度很快。同时由于 CO₂ 在地层中处于压缩状态,在临界点附近压缩系数随压力的变化很大。如果未对进入井筒的地层气体进行控制(关井),地层气体将连续进入井筒,在井口首先表现为溢流,当压力失控时,井筒压力骤降,使得 CO₂ 由超临界流体转化为气体状态过程中,体积急剧膨胀,气体沿井眼向上移动,随着压力的进一步降低,气体体积继续膨胀,封闭压力下降,流速相应增加。井内的钻井液很快被气体顶出,液柱压力减小,使更多地层气体进入井筒,导致井喷。

4. 井喷带来的其他负面影响

CO₂ 井喷后,由于 CO₂ 的膨胀吸热,流温逐渐降低,可能形成低温异常区,就会快速形成固体干冰颗粒。这种独特的物相特性带来几个特殊问题^[1]:

①使地面修井复杂化,工作受到高速气流的威胁,干冰经常形成豌豆及石子大小颗粒以高的速度喷出,对人造成伤害;②形成的水合物聚集在封井器、井口及其它地面设备里;③冷 CO₂ 使大气水分冷凝在井口周围形成白雾,影响视线;④井口排出的游离油和冷凝的混合相聚集地面,造成火灾隐患;⑤固体干冰小颗粒堵塞管线,形成冰堵。

三、防范措施

(1)通过室内试验,选择适当的泥浆流速以减少井筒气体聚集。

(2)采用生产封隔器永久完井,防止地层酸性气体接触腐蚀油管柱。

(3)采用旋转防喷器(RBOP),保障人生安全和保护环境。目前在美国和加拿大约有四分之一钻机使用。

(4)现场储备重泥浆和加重材料,以便溢流发生后能够及时压井,防止井喷发生。

(5)利用特制钻井液中使用清洁剂消除部分侵入井筒的地层流体。

(6)提高从事钻井作业人员的素质,增强井队井控能力,加强井控设备保养并定期检查其性能,对可疑井增加井控设备。

总之,要安全科学地处理 CO₂ 井喷需要认识到这类井喷与气井或油井井喷不同。通过进行正确的

培训,制定可行的应急措施,深入了解超临界 CO₂ 的特性,就一定能够减少 CO₂ 井喷的发生。同时开展超临界流体的研究是我国石油天然气工业发展的迫切要求,对防止井喷,以及提高油气井及相关设备寿命具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] LES SKINNER. CO₂ Blowouts: An emerging problem [J]. World Oil, 2003.
- [2] 朱自强. 超临界流体技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [3] COLIN LESCH, DAVID SCHWARTZ. Well control: Past, present and future [J]. World Oil, 2000.
- [4] ROJAS G, REQUENA O. A new method to estimate compressibility factors for CO₂ hydrocarbon mixtures [J]. SPE 23661, 1992.
- [5] PENG D, ROBINSON D B. A new two-constant equation of state [J]. Ind Eng Chem Fund, 1976, 15.
- [6] 李士伦, 等. 天然气工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- [7] 郭念发, 等. 黄桥 CO₂ 气田特征及勘探远景[J]. 天然气工业, 2000, 20(4): 14-18.
- [8] 马宗金. 总结经验教训提高天然气井钻井井控能力[J]. 钻采工艺, 2004, 27(4): 1-3.

(收稿日期 2005-09-17 编辑 钟水清)