

# 基于 CO<sub>2</sub> 干法压裂井筒压力与相态控制研究

何 京 (长庆油田分公司第四采油厂, 陕西 榆林 718500)

**摘要:** 在液态 CO<sub>2</sub> 干法压裂的过程中, 井筒压力和相态转变是影响裂缝起裂和延展的两大原因。基于这样的情况, 我们可以建立 CO<sub>2</sub> 干法压裂井筒流动传热模型, 利用改模型就可以揭示 CO<sub>2</sub> 干法压裂过程中井筒压力与相态之间的规律。经过研究表明: CO<sub>2</sub> 的摩阻非常的高, 在我们普通施工条件下, 摩阻能产生的压强十分巨大, 所以摩阻对 CO<sub>2</sub> 干法压裂的影响很大。井筒的排量和油管内径对井筒压降的影响十分巨大, 所以我们可以选择在携砂可以满足通过的情况下根据以上两种情况, 用适当的方法来降低摩阻, 达到提升效率的作用。该研究结果可为 CO<sub>2</sub> 干法压裂与 CO<sub>2</sub> 增强压裂, 提供理论知识指导和现场借鉴。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 干法压裂; 井筒压力; 相态控制

二氧化碳干法压裂可以形成具有非常有价值的工业油气流。然而我国非常规汽油主要富集于缺水地区, 且储存非常规油气的层内粘土含量普遍较高, 若使用常规水力压裂供水资源消费巨大, 还有环境污染等许多问题。这些问题使得水力压裂受到了极大的限制。和二氧化碳可以有效的避免这些问题的发生, 使得二氧化碳干法压裂成为非常规储层改造的一种有效手段。目前二氧化碳干法压裂的研究重点集中在超临界态实现与控制, 工艺参数对井筒流动传热影响因素分析。分析了二氧化碳干法压裂过程中的控制机理, 优化了对应的施工工艺参数, 为二氧化碳干法压裂提供了理论知识指导。

## 1 二氧化碳干法压裂技术概述

### 1.1 二氧化碳干法压裂技术理论要点

二氧化碳干法压裂技术主要是使用液态二氧化碳作为压力介质, 从而能够将支撑剂加压降温到相应的温度, 再用专门的混砂机与液态二氧化碳进行融合, 从而对井筒进行压裂, 二氧化碳干法压裂技术是当前较为常用的勘测技术, 能够在常规情况下对油气资源进行开发, 通过二氧化碳干法压裂技术能够有效的完善污水压力技术的缺口, 是当前较为常见的干法压裂技术之一。

二氧化碳干法压裂工艺主要是将若干二氧化碳储罐, 避免并依次的与混砂机井口装置进行连通, 从而能够通过仪表车来监控相应车辆的工作状态。在这样的基础上, 能够将支撑剂装入密封的罐砂罐内从而注入液态二氧化碳进行预冷, 直到不断的对液态二氧化碳进行压缩, 在支撑剂注完后对二氧化碳进行顶替, 直到支撑剂刚好全部进入地层, 在这样的情况下既能够有效的控制反弹的速度, 又能够最大限度地利用二氧化碳进行反弹, 逐渐加大油嘴口径, 从而能够利用二氧化碳监测仪监测二氧化碳当前的浓度变化情况, 通过这样的方法能够有效的对颈筒内的情况进行了解。由此可见, 二氧化碳干法压裂技术是当前较为常用的压裂技术, 能够始终处于密闭高压的环境下, 与常规水力压裂有所不同, 但是在当前的应用过程中具有着较为显著的应用优势。

### 1.2 二氧化碳干法压裂技术的发展现状

二氧化碳干法压裂技术在北美地区取得了巨大的成

功, 并且在国内也有了初步的运用, 其压力机理和工艺方法都已经不断的成熟, 但是当前的发展现状还受到了一定的限制, 在运用的过程中还存在以下几个方面的不足。

首先是液态二氧化碳摩擦阻力, 液态二氧化碳是牛顿流体摩擦阻力较高, 在油管内运用液态二氧化碳势必会出现相应的摩擦力摩擦因子, 会由于流速和粗糙程度的不同, 在不断的加大, 从这样的情况下能够看出, 随着排量的不断增加, 摩擦阻力也会进行相应的增大, 从而影响到了二氧化碳干法压裂技术的效果。其次二氧化碳的悬杀能力和降律性能也有相应的不足, 压裂施工条件下业态二氧化碳的悬杀能力较差, 这会是导致施工失败的最主要原因, 液态二氧化碳的泵送速度与悬杀能力有直接的关系, 因此流体在高速运动下所产生的摩擦力会一定程度影响到支撑剂的进入情况, 在此情况下, 支撑剂就会减缓成长的速度, 从而增大了施工过程中的摩擦力, 增加了相应的安全隐患。最后采用二氧化碳干法压裂技术来进行施工的过程中会由于二氧化碳变化难以预测, 从而导致二氧化碳干法压裂出现相应的失误。二氧化碳在压力的过程中会出现相应的变化及压力温度, 都是影响到二氧化碳干法压裂技术应用的效果, 另外二氧化碳的密度粘度, 溶解性都会随着压力的改变产生剧烈的变化, 同时也会使周围的温度出现降低的情况, 从而影响到了施工的效果。

## 2 井筒流动与传热相数学模型

### 2.1 基本假设

在压裂过程中, 在井筒范围内, 二氧化碳流体可能会存在可能, 其中一种可能存在相态转变。由于其模型相对复杂, 所以我们对模型进行了部分的简化, 一共分为 4 个假设: ①在研究过程中, 我们利用特殊的流动方式, 使我们同一截面上流体温度, 压力以及流体物性相; ②而地层, 井壁和油管的传热方式不一样, 分为非稳态, 传热与稳态传热, 用这样的方式来模拟出二氧化碳干法压裂的过程; ③内热源处理时, 要控制好摩擦降压梯度和流速, 从而控制好排量产生的摩擦热量; ④在一定假设中, 由于能量会引起其他情况的发生, 我们要注意二

氧化碳相变引起的能量变化。

## 2.2 井筒流动压降模型

井筒流动压降模型利用二氧化碳进行操作,井筒流动压降模型相对于常规水力压裂有更好更高的压缩性,则得益于压裂过程中二氧化碳。有更好更高的压缩性,在密度方面也有更好的恒定性。利用连续性方程与动能定理即可求出二氧化碳干法压裂过程中油管向下流动压降公式,为我们的研究提供理论知识指导。

## 3 相关参数介绍及模式求解

### 3.1 二氧化碳流体密度和定压热容

计算二氧化碳状态方程的 Span-Wagner 模型中有采用 Helmholtz 自由能,临界密度等物理量去计算,可将密度误差控制在很小的范围内。同样的,二氧化碳流体密度定压热容也可以用一个方程来表示,这就可以用以上的物理量计算出二氧化碳流体密度定压热容,从而为该研究得到了相关参数的计算结果。

### 3.2 摩擦因数计算以及黏度,导热系数

摩擦因数是影响二氧化碳干法压裂的一个重要因素,因为摩擦因素的大小会影响到摩阻,所以我们在进行二氧化碳干法压裂的过程中,就要关注一下井筒表面的粗糙程度,从而确保计算误差控制在较小范围内。二氧化碳流体黏度与导热系数也是一个重要的因素,这两个方面我们则采用两种不同的计算方法,减小误差。使得我们在油管内二氧化碳流体与油管壁换热属于强对流时,能满足工程计算的要求。

### 3.3 模型求解

在二氧化碳干法压裂过程中,想要进行传热模型的求解就要关注多种方面,包括油管内压力,二氧化碳流速,二氧化碳温度以及二氧化碳流体密度。因为这些因素都会导致井筒压力变化,从而影响传热模型的求解。在传热模型求解的步骤中,要利用微元法将整个井筒分为多个微元段进行数学离散计算,并且用各种方法计算出二氧化碳流体压力与温度。在迭代求解出这三者的参数,直到符合条件为止。

## 4 案例分析

### 4.1 相态分析

井筒流体温度与井深成正相关关系,而二氧化碳流体的温度与压力则会使二氧化碳流体在干法压裂的过程中体现为液态和超临界态两种形式。二氧化碳流体保持为液态时,可避免由于相态变化产生的压力波动。若想要采用超临界二氧化碳压裂则需要通过其他方法去提升二氧化碳流体的温度与压力,从而实现超临界状态二氧化碳压裂。

不同地区地温梯度差异较大时,同样会对二氧化碳相态转变产生一定影响。在不同地温梯度区域时,井筒流体温度与井深同样呈正相关关系,但该正相关关系会体现得比较微小。所以可以认为井筒流体注入温度的影响大于地温梯度的影响。在控制二氧化碳干法压裂时,适当的控制井口注入温度。是一个避免发生相态转变的

一个有效方法。

## 4.2 施工排量与注入温度的影响

施工排量与注入温度均可以影响到二氧化碳流体携砂能力和井筒二氧化碳流体温度与压强。施工排量会通过影响二氧化碳流体流动速度,使地层换热时间改变,从而影响注入温度;而施工排量对井筒压力的影响较为复杂,同时也会影响到二氧化碳流体摩阻。不同的施工排量,在增加井深时压力的变化不同,有的增大,有的减小。只有将施工排量控制在一定范围内,使得压裂过程中保持井底压力稳定,降低二氧化碳流体摩阻,才能提高二氧化碳流体压裂效率。而施工排量对携砂能力的影响主要在二氧化碳流体黏度与密度上,但是二氧化碳流体黏度的影响远大于密度,所以在提高携砂能力时改变施工排量,也是一个主要的手段。注入温度对携砂能力的影响与施工排量不同,其主要体现在避免二氧化碳流体发生相态转变,在维持二氧化碳流体较高密度的同时也能提高携砂能力。注入温度也会对二氧化碳流体黏度造成影响,其变化范围大,变化方向与施工排量类似,同样能提高二氧化碳流体携砂能力,进而提高压裂效果。

## 5 结语

二氧化碳流体摩阻是影响压力效果的一大主要原因,所以控制油管内径与施工排量,减小二氧化碳流体摩阻,甚至使用二氧化碳流体减阻剂都是很有必要的。减少了大排量施工的流体摩阻,提高压裂效率,达到降低成本的目的。二氧化碳干法压裂过程中是否发生相态转变也会影响到压裂的效率,而控制井底温度就会影响到相态转变发生与否。在常规干法压裂过程中,与地温梯度或深井二氧化碳干法压裂时,控制温度的方法也不同,但其主要目的都是避免发生相态转变而影响到携砂能力。

井筒内流体黏度和密度都能影响二氧化碳流体的携砂能力,其主要表现在井筒内温度与压力上,尤其是受温度影响巨大。增加二氧化碳流体黏度,降低密度,有利于压裂扩展,提高携砂能力。井底压力是该研究体现出的最后一个因素。主要影响井筒压力的是施工排量和油管内径,维持井底压力稳定性均可通过这两个方面采用有效手段。但是降低施工排量增大油管内径的同时也会影响携砂能力,所以要将施工排量与油管内径控制在一定范围内,达到降低二氧化碳流体摩阻和携砂能力较高的双重目的。

### 参考文献:

- [1] 吴春方, 窦亮彬, 刘建坤. CO<sub>2</sub> 干法压裂井筒压力与相态控制研究 [J]. 石油机械, 2019, 47(07): 71-79.
- [2] 张超伟. CO<sub>2</sub> 相态变化在干法压裂中的应用——以锦125井为例 [J]. 石油化工应用, 2018, 37(01): 33-36.

### 作者简介:

何京 (1993-), 男, 民族: 汉, 籍贯: 甘肃省庆阳市, 当前职务: 井区技术员, 学历: 成人本科。