

页岩气压裂裂缝网络形成机制与控制因素分析

王乃璐

中国石化西南油气分公司 四川 成都 610041

摘要: 本文详细阐述了页岩气压裂裂缝网络的形成机制,包括天然裂缝的激活、水力裂缝的扩展与分支以及裂缝网络的相互作用等过程。同时,从地质因素、工程因素和流体因素等多个方面分析了影响页岩气压裂裂缝网络形成的控制因素,并探讨了各因素之间的相互关系。通过研究,旨在为页岩气压裂工程的设计与实施提供理论依据和技术支持。

关键词: 页岩气; 压裂裂缝网络; 形成机制; 控制因素

1 引言

全球能源需求激增,常规天然气资源渐趋枯竭,储量丰富的页岩气作为非常规天然气资源备受瞩目。其主要赋存于富含有机质的页岩层系,因储层低孔隙度、低渗透率,需借助水力压裂等增产手段开发。水力压裂通过注入高压流体使储层生成裂缝网络,增气体流通通道、提采收率。故研究其裂缝网络形成机制与控制因素,对优化工艺、提升开发效果意义重大。

2 页岩气压裂裂缝网络形成机制

2.1 天然裂缝的激活

页岩储层中通常存在大量的天然裂缝,这些天然裂缝是在地质历史时期由于构造运动、成岩作用等因素形成的。在水力压裂过程中,高压流体的注入会使天然裂缝周围的应力状态发生改变。当流体压力超过天然裂缝的启裂压力时,天然裂缝将被激活,开始张开并扩展。天然裂缝的激活不仅增加了裂缝的长度和宽度,还为水力裂缝的扩展提供了通道,促进了裂缝网络的形成。此外,天然裂缝的走向、倾角和密度等特征也会影响裂缝网络的形态和分布。例如,当天然裂缝的走向与最大水平主应力方向一致时,更容易被激活和扩展,从而形成沿最大水平主应力方向的裂缝带。

2.2 水力裂缝的扩展与分支

水力裂缝是在高压流体的作用下,从井筒周围开始向储层深处扩展的裂缝。水力裂缝的扩展过程受到多种因素的影响,包括地应力状态、岩石力学性质、流体性质和施工参数等。在压裂过程中,水力裂缝是垂直于最小主应力方向扩展,当遇到天然裂缝或其他地质构造时,可能会发生转向或分支。裂缝分支是指水力裂缝在扩展过程中产生新的裂缝分支,形成复杂的裂缝网络^[1]。裂缝分支的产生机制主要包括应力干扰、流体压力梯度变化和岩石非均质性等。应力干扰是指相邻裂缝之间的应力相互

作用,当水力裂缝扩展到一定距离时,其产生的应力场会影响周围岩石的应力状态,从而促使新的裂缝分支产生。流体压力梯度变化会导致流体在裂缝中的流动方向发生改变,进而引起裂缝分支。岩石非均质性,如岩石的层理、节理和矿物成分差异等,也会使水力裂缝在扩展过程中遇到阻力不均,从而产生裂缝分支。

2.3 裂缝网络的相互作用

在页岩气压裂过程中,天然裂缝的激活、水力裂缝的扩展与分支相互交织,形成了复杂的裂缝网络。裂缝网络中的各个裂缝之间存在着相互作用,这种相互作用会影响裂缝网络的形态、连通性和导流能力。一方面,裂缝之间的应力干扰会改变裂缝的扩展方向和速度。当两条裂缝相互靠近时,它们之间的应力场会相互叠加,使裂缝尖端的应力集中程度发生变化,从而影响裂缝的进一步扩展。另一方面,裂缝之间的流体交换也会影响裂缝网络的导流能力。在压裂过程中,高压流体在裂缝网络中流动,当裂缝之间相互连通时,流体可以在不同裂缝之间进行分配,从而提高了整个裂缝网络的导流能力。此外,裂缝网络的相互作用还会导致裂缝的闭合和再张开现象。在压裂结束后,随着流体压力的降低,部分裂缝可能会由于地应力的作用而发生闭合,但当储层中的气体压力升高时,这些裂缝又可能会再次张开,从而影响页岩气的长期产能^[1]。

3 页岩气压裂裂缝网络形成的控制因素

3.1 地质因素

3.1.1 地应力状态

地应力是影响页岩气压裂裂缝网络形成的关键地质因素之一。地应力包括最大水平主应力、最小水平主应力和垂向主应力,它们的大小和方向决定了水力裂缝的扩展方向和形态。通常情况下,水力裂缝是垂直于最小主应力方向扩展。当最大水平主应力与最小水平主应

力差值较大时,水力裂缝容易形成单一的主裂缝,裂缝网络的复杂性较低;而当最大水平主应力与最小水平主应力差值较小时,水力裂缝更容易发生转向和分支,形成复杂的裂缝网络。此外,地应力的各向异性也会影响裂缝网络的形态,例如,当地应力在水平方向上存在明显差异时,水力裂缝可能会沿着应力较小的方向优先扩展,形成不规则的裂缝网络。

3.1.2 岩石力学性质

页岩的岩石力学性质,如弹性模量、泊松比、抗拉强度和抗压强度等,对裂缝网络的形成具有重要影响。弹性模量和泊松比反映了岩石的变形能力,弹性模量越大、泊松比越小的岩石,其抵抗变形的能力越强,水力裂缝扩展所需的压力越高,裂缝网络的扩展难度也越大。抗拉强度和抗压强度决定了岩石的破裂能力,抗拉强度较低的岩石更容易在水力压力作用下发生张性破裂,形成裂缝;而抗压强度较高的岩石则需要更高的压力才能使其发生剪切破裂。此外,岩石的脆性也是影响裂缝网络形成的重要因素。脆性较高的页岩在水力压裂过程中更容易产生大量的裂缝分支,形成复杂的裂缝网络,而韧性较高的页岩则裂缝扩展相对困难,裂缝网络复杂性较低。

3.1.3 天然裂缝特征

如前文所述,页岩储层中天然裂缝的存在对裂缝网络的形成具有重要作用。天然裂缝的走向、倾角、密度、张开度和充填情况等特征都会影响裂缝网络的形态和分布。走向与最大水平主应力方向一致的天然裂缝更容易被激活和扩展,从而形成沿优势方向的裂缝带;而倾角较大的天然裂缝可能会使水力裂缝在扩展过程中发生更大的转向。天然裂缝的密度越高,裂缝网络中裂缝的连通性越好,有利于提高页岩气的导流能力。张开度较大的天然裂缝在压裂过程中更容易被流体充满,形成有效的气体流动通道;而充填情况良好的天然裂缝可能会阻碍流体的流动,降低裂缝网络的导流能力^[2]。

3.1.4 页岩储层物性

页岩储层的物性参数,如孔隙度、渗透率、有机质含量和含气量等,也会间接影响裂缝网络的形成。孔隙度和渗透率反映了页岩储层的储集和渗流能力,虽然页岩本身具有低孔隙度和低渗透率的特点,但较高的孔隙度和渗透率有利于流体的流动和扩散,在一定程度上可能会影响水力裂缝的扩展和裂缝网络的形成。有机质含量是衡量页岩气资源潜力的重要指标,有机质含量高的页岩通常具有较高的生气能力和吸附能力,同时有机质的分布和性质也会影响岩石的力学性质和裂缝的扩展。

含气量则直接关系到页岩气开发的经济效益,较高的含气量需要更有效的裂缝网络来实现气体的采出。

3.2 工程因素

3.2.1 压裂液性质

压裂液是水力压裂过程中的工作介质,其性质对裂缝网络的形成具有重要影响。压裂液的粘度、密度、滤失性和携砂能力等参数都会影响裂缝的扩展和支撑剂的分布。高粘度的压裂液可以携带更多的支撑剂进入裂缝,提高裂缝的导流能力,但同时也会增加流体在裂缝中的流动阻力,影响裂缝的扩展速度和形态。低粘度的压裂液流动性好,容易进入微小裂缝和天然裂缝中,激活和扩展更多的裂缝,但携砂能力相对较弱。压裂液的密度会影响流体在裂缝中的压力分布,从而影响裂缝的扩展方向。滤失性是指压裂液向地层中的渗透能力,滤失性过大会导致压裂液大量损失,降低裂缝内的压力,影响裂缝的扩展;而滤失性过小则可能会使地层压力升高过快,引发地层破裂等安全问题^[1]。携砂能力决定了支撑剂在裂缝中的分布情况,良好的携砂能力可以使支撑剂均匀地分布在裂缝中,形成稳定的裂缝导流通道。

3.2.2 施工参数

施工参数包括压裂排量、泵压、加砂规模和施工时间等,这些参数直接控制着水力压裂的过程和效果。压裂排量是指单位时间内注入压裂液的体积,排量越大,流体在裂缝中的流动速度越快,裂缝内的压力越高,越有利于裂缝的扩展和分支。但过大的排量可能会导致地层破裂压力过高,引发井筒和地层的破坏。泵压是克服地层破裂压力和流体流动阻力所需的压力,泵压的大小直接影响裂缝的启裂和扩展。加砂规模决定了裂缝中支撑剂的数量,足够的加砂量可以保证裂缝在压裂结束后保持一定的开度,提高裂缝的导流能力。施工时间则影响着压裂液在地层中的作用时间和裂缝的扩展程度,适当的施工时间可以使裂缝充分扩展,形成复杂的裂缝网络^[3]。

3.2.3 压裂工艺

不同的压裂工艺对裂缝网络的形成具有不同的影响。常见的压裂工艺包括常规压裂、分段压裂、同步压裂和体积压裂等。常规压裂通常采用单段压裂的方式,形成的裂缝网络相对简单,主要为裂缝和少量分支裂缝。分段压裂是将水平井段分成多个小段进行压裂,通过控制每段的压裂参数,可以形成多个相对独立的裂缝段,增加裂缝的覆盖面积和连通性。同步压裂是在相邻的两口或多口井同时进行压裂,利用井间应力干扰效应,促进裂缝的扩展和分支,形成更复杂的裂缝网络。体积压裂是一种旨在形成复杂裂缝网络的压裂工艺,通

过采用大排量、大液量、低粘度压裂液和大规模加砂等技术手段,使水力裂缝在页岩储层中充分扩展和分支,与天然裂缝相互连通,形成具有高导流能力的立体裂缝网络。

3.3 流体因素

3.3.1 流体类型

在水力压裂过程中,常用的流体类型包括水基压裂液、油基压裂液和泡沫压裂液等。不同类型的流体具有不同的物理化学性质,对裂缝网络的形成也会产生不同的影响。水基压裂液具有成本低、来源广泛、环保性好等优点,但其滤失性相对较大,对地层的伤害可能较为严重。油基压裂液具有较好的抑制性和润滑性,能够有效减少对地层的伤害,但成本较高,且存在环保问题^[4]。泡沫压裂液是一种以气体为分散相、液体为连续相的分散体系,具有粘度高、滤失性低、携砂能力强等特点,适用于低压、水敏性地层,但泡沫压裂液的稳定性较差,施工难度相对较大。

3.3.2 流体压力

流体压力是控制裂缝扩展和裂缝网络形成的关键因素之一。在压裂过程中,流体压力需要克服地层的破裂压力才能使岩石破裂并形成裂缝。随着流体压力的升高,裂缝会不断扩展和分支,裂缝网络的复杂性也会增加。然而,过高的流体压力可能会导致地层破裂过度,引发井筒和地层的破坏,同时也会增加施工成本和风险。因此,合理控制流体压力是保证压裂效果和施工安全的重要环节。

3.3.3 流体温度

流体温度对页岩的力学性质和压裂液的性能都会产生影响,进而影响裂缝网络的形成。页岩的力学性质,如弹性模量、抗拉强度等,通常会随着温度的变化而发生改变。在高温条件下,页岩的脆性可能会增加,更有利于裂缝的形成和扩展;而在低温条件下,页岩的韧性可能会增强,裂缝扩展难度加大。此外,压裂液的性能也会受到温度的影响,例如,压裂液的粘度会随着温度的升高而降低,这可能会影响压裂液的携砂能力和在裂缝中的流动特性。

4 各控制因素之间的相互关系

页岩气压裂裂缝网络形成的控制因素间关系复杂。地质因素是根基,决定储层特征与裂缝网络形成的潜在条件,如地应力状态和岩石力学性质影响水力裂缝扩展方向与形态,天然裂缝特征和储层物性为裂缝网络形成提供初始通道和物质基础。工程因素在地质因素基础上,通过人为干预控制裂缝网络,施工参数和压裂工艺需依地质条件优化。例如,在特定页岩储层中,可选体积压裂工艺并调整参数形成复杂裂缝网络。流体因素贯穿压裂全程,与地质、工程因素相互影响,其性质影响裂缝中流动与压力分布,压力和温度变化又受地质和工程操作制约。实际工程中,需综合考量各因素关系,系统分析优化,通过多种手段深入了解,制定科学方案,实现裂缝网络最优形成,提高页岩气采收率^[4]。

结语

页岩气压裂裂缝网络形成复杂,涉及天然裂缝激活、水力裂缝扩展与分支等环节,受地质、工程、流体因素控制,各因素相互关联,需综合考量优化。目前研究虽有一定进展,但仍有问题待解。未来可深入研究微观机制、完善多因素耦合模型、加强现场监测与评价、探索新型压裂技术和材料,以提高开发效率和采收率,推动产业可持续发展。

参考文献

- [1]姚同玉,曹昕乐,崔传智,等.页岩储层水力压裂形成复杂裂缝的主控因素[C]//中国地质大学(武汉),西安石油大学,陕西省石油学会.2023油气田勘探与开发国际会议论文集 I.中国石油大学(华东)石油工程学院;深层油气全国重点实验室(中国石油大学(华东));长江大学石油工程学院;中国石油西南油气田公司勘探开发研究院;2023:22-33.
- [2]魏超.预脉冲组合压裂下水力裂缝扩展及缝网形成机制研究[D].山东大学,2022.
- [3]孟祥瑞.黔北下寒武统页岩多期裂缝分布预测模型及页岩气复杂压裂裂缝形成机制研究[D].贵州大学,2024.
- [4]郑永香.页岩储层水力压裂裂缝网络形成机制研究[D].西南石油大学,2020.