

页岩气开发中压裂液对储层伤害机理研究

王乃璐

中国石化西南油气分公司 四川 成都 610041

摘要:页岩气作为一种重要的非常规天然气资源,在全球能源结构中占据着日益重要的地位。压裂液在页岩气开发中起着关键作用,它能够有效地改造储层,提高页岩气的采收率。然而,压裂液在应用过程中也可能对储层造成伤害,影响页岩气的开发效果。本文深入探讨了页岩气开发中压裂液对储层伤害的机理,包括物理伤害、化学伤害以及生物伤害等方面,分析了影响伤害程度的因素,并提出了相应的减少储层伤害的措施,旨在为页岩气开发提供理论支持和技术指导,促进页岩气的高效、可持续开发。

关键词:页岩气开发;压裂液;储层伤害;机理研究

1 引言

全球能源需求攀升,常规天然气资源渐减,页岩气作为储量丰富的非常规天然气资源备受瞩目。它主要赋存于富含有机质的泥页岩及其夹层,因低孔隙度、低渗透率,需借助水力压裂等技术改造储层才能经济开发。压裂液是水力压裂核心工作液,其性能和作用对压裂及开发成效起决定性影响。但压裂液注入储层时,可能与岩石、流体相互作用,使储层物性变差、渗透率降低,造成伤害。故深入研究其伤害机理,对优化配方、提升压裂效果、降低伤害、高效开发页岩气意义重大。

2 页岩气储层特征及压裂液作用概述

2.1 页岩气储层特征

页岩气储层具有独特的岩石学特征和储集空间特征。从岩石学特征来看,页岩主要由黏土矿物、石英、长石等矿物组成,黏土矿物含量较高,一般在20%-60%之间,不同矿物的物理化学性质差异较大,这决定了页岩的力学性质和化学性质较为复杂。在储集空间方面,页岩气储层具有纳米级孔隙发育的特点,孔隙类型多样,包括有机质孔、黏土矿物孔、粒间孔等,这些微小孔隙构成了页岩气的主要储集空间。此外,页岩气储层还具有超低渗透率(一般小于0.1mD)的特征,这使得页岩气在自然状态下难以开采,必须通过压裂等增产措施来提高储层的渗透性,促进页岩气的流动和采出。

2.2 压裂液在页岩气开发中的作用

压裂液在页岩气开发中承担着多重重要功能。首先,它能够在高压作用下将储层岩石压开,形成裂缝网络,增加储层的渗透性,为页岩气的流动提供通道。其次,压裂液携带支撑剂进入裂缝,支撑剂在裂缝中沉积,防止裂缝闭合,保持裂缝的导流能力。此外,压裂液还可以冷却压裂设备,降低压裂过程中的温度,保护

设备正常运行。不同类型的压裂液,如水基压裂液、油基压裂液、泡沫压裂液等,具有不同的性能特点,适用于不同的地质条件和开发需求。在页岩气开发中,水基压裂液因其成本低、环保性相对较好等优点得到了广泛应用,但也面临着一些储层伤害问题^[1]。

3 压裂液对储层伤害的物理机理

3.1 固相颗粒堵塞伤害

压裂液中可能含有一定量的固相颗粒,如支撑剂颗粒、未完全溶解的添加剂颗粒等。当这些固相颗粒随压裂液进入储层后,可能会在孔隙和裂缝中发生堵塞。在页岩气储层中,纳米级孔隙和微裂缝广泛存在,固相颗粒容易在这些微小空间中滞留,导致孔隙和裂缝的流通通道变窄甚至完全堵塞,从而降低储层的渗透率^[1]。例如,一些微小的固相颗粒可能会在页岩的纳米孔隙中形成“桥堵”,阻碍页岩气的流动。此外,固相颗粒的堵塞还会影响压裂液在储层中的分布和流动,进一步加剧储层伤害。

3.2 液锁伤害

液锁现象是压裂液对储层造成物理伤害的另一个重要方面。当压裂液进入储层后,由于毛细管力的作用,压裂液可能会滞留在孔隙和裂缝中,形成液锁。液锁的存在会阻止页岩气的解吸和扩散,使得页岩气难以从储层中流出。在页岩气储层中,由于孔隙和裂缝的尺寸较小,毛细管力作用显著,液锁现象更为突出。当压裂液在孔隙和裂缝中形成液锁后,页岩气在解吸过程中需要克服更大的阻力才能突破液锁进入裂缝,这大大降低了页岩气的采收率。而且,液锁还可能会随着时间的推移而逐渐加重,对储层造成长期的伤害。

3.3 水敏伤害

水敏伤害是指压裂液中的水与储层中的黏土矿物发

生相互作用,导致黏土矿物膨胀、分散和运移,从而堵塞孔隙和裂缝,降低储层的渗透率。页岩气储层中通常含有一定量的黏土矿物,如蒙脱石、伊利石等,这些黏土矿物对水非常敏感。当水基压裂液进入储层后,黏土矿物会吸收水分发生膨胀,使孔隙和裂缝的通道变窄。同时,黏土矿物的膨胀还可能导致其结构破坏,分散成更小的颗粒,这些颗粒在流体作用下发生运移,进一步堵塞孔隙和裂缝,造成严重的储层伤害。水敏伤害的程度与黏土矿物的类型、含量以及压裂液的性质密切相关。

3.4 应力敏感伤害

页岩气储层在开发过程中,随着页岩气的采出,储层压力会逐渐降低。这种压力变化会导致储层岩石的应力状态发生改变,从而引起储层物性的变化,即应力敏感伤害。当压裂液进入储层后,其存在可能会影响储层岩石的应力分布和传递,加剧应力敏感伤害。例如,压裂液在储层中的流动可能会改变岩石内部的应力平衡,使得岩石的孔隙结构更容易受到压力变化的影响,导致孔隙度和渗透率进一步降低。此外,压裂液与储层岩石的相互作用还可能会改变岩石的力学性质,使其在应力作用下更容易发生变形和破坏,进一步加重应力敏感伤害。

4 压裂液对储层伤害的化学机理

4.1 酸碱反应伤害

压裂液的酸碱度(pH值)对储层岩石和流体有着重要的影响。如果压裂液的酸碱度与储层流体或岩石不匹配,可能会发生酸碱反应,导致储层伤害。例如,当压裂液呈酸性时,可能会与储层中的碳酸盐矿物发生反应,溶解岩石中的碳酸盐成分,使岩石骨架变得疏松,孔隙结构发生改变,从而降低储层的强度和渗透率^[2]。同时,酸碱反应还可能会产生沉淀物,这些沉淀物会堵塞孔隙和裂缝,进一步影响页岩气的流动。相反,当压裂液呈碱性时,也可能与储层中的某些矿物或流体发生不良反应,导致储层物性变差^[2]。

4.2 氧化还原反应伤害

压裂液中的某些成分可能会与储层中的有机质、硫化物等发生氧化还原反应。在页岩气储层中,有机质是页岩气的主要来源,硫化物等物质也可能存在。当压裂液与这些物质发生氧化还原反应时,可能会改变储层的化学环境,影响页岩气的赋存状态和流动性。例如,氧化反应可能会导致有机质的结构发生变化,降低页岩气的吸附能力,使更多的页岩气难以从岩石中解吸出来。此外,氧化还原反应还可能会产生一些有害物质,这些物质可能会对储层岩石和流体造成进一步的伤害。

4.3 离子交换与沉淀伤害

压裂液中含有的各种离子,如钠离子、钙离子、镁离子等,在与储层流体接触时,可能会发生离子交换反应。离子交换反应会改变储层流体的离子组成和化学性质,进而影响储层的渗透性。例如,当压裂液中的高价阳离子(如钙离子、镁离子)与储层流体中的低价阳离子(如钠离子)发生交换后,可能会导致一些不溶性的盐类沉淀生成。这些沉淀物会在孔隙和裂缝中沉积,堵塞流体通道,降低储层的渗透率。此外,离子交换还可能影响储层岩石表面的电荷性质,改变岩石与流体之间的相互作用,进一步影响页岩气的开采效果。

4.4 化学吸附伤害

压裂液中的某些化学成分可能会被储层岩石表面吸附,从而改变岩石的表面性质和孔隙结构。例如,一些高分子聚合物添加剂可能会在岩石表面形成一层吸附膜,这层吸附膜会减小孔隙的有效直径,增加流体在孔隙中的流动阻力,导致储层渗透率降低。此外,化学吸附还可能影响岩石与页岩气之间的吸附-解吸平衡,使页岩气更难从岩石中解吸出来,降低页岩气的采收率。不同的化学成分对岩石表面的吸附能力不同,因此需要合理选择压裂液的添加剂,以减少化学吸附伤害。

5 压裂液对储层伤害的生物机理

5.1 微生物活动影响

虽然页岩气储层通常处于相对封闭的环境,但仍然可能存在一些微生物。压裂液的引入可能会改变储层的生态环境,影响微生物的活动。某些微生物可能会以压裂液中的有机物为营养源,大量繁殖。微生物的代谢活动可能会产生一些酸性或碱性物质,改变储层流体的酸碱度,从而引发酸碱反应伤害。此外,微生物的代谢产物还可能会与储层岩石或流体发生其他化学反应,产生沉淀物或改变岩石的表面性质,导致储层伤害。

5.2 生物膜形成

在压裂液与储层流体接触的过程中,微生物可能会在岩石表面形成生物膜。生物膜由微生物及其分泌的胞外聚合物组成,它会在岩石表面形成一层致密的膜结构。这层生物膜会堵塞孔隙和裂缝,降低储层的渗透率。同时,生物膜还可能影响流体在孔隙中的流动特性,增加流体的流动阻力。此外,生物膜的存在还可能会改变岩石表面的润湿性,进一步影响页岩气的开采效果^[3]。

6 影响压裂液对储层伤害程度的因素

6.1 压裂液性质

压裂液的组成、黏度、密度、表面张力等性质都会影响其对储层的伤害程度。例如,压裂液中固相颗粒的含量和粒径分布直接影响固相颗粒堵塞的可能性,固相

颗粒含量越高、粒径越大,堵塞风险越大。压裂液的黏度过高可能会导致其在储层中流动困难,增加液锁伤害的程度;而黏度过低则可能无法有效携带支撑剂,影响压裂效果。此外,压裂液的表面张力会影响其与储层岩石的润湿性,进而影响化学吸附和液锁现象的发生。

6.2 储层特征

储层的岩石类型、矿物组成、孔隙结构、渗透率、含水饱和度等特征对压裂液伤害程度有重要影响。不同类型的岩石对压裂液的敏感性不同,例如,富含黏土矿物的岩石更容易发生水敏伤害。储层的孔隙结构决定了压裂液在其中的流动和分布,复杂的孔隙结构可能会增加固相颗粒堵塞和液锁的风险^[3]。储层的渗透率越低,压裂液对储层物性的影响越显著,伤害程度可能越大。含水饱和度较高的储层,压裂液进入后更容易引发水锁和酸碱反应等伤害。

6.3 施工参数

压裂施工的压力、排量、温度等参数也会影响压裂液对储层的伤害。过高的施工压力可能会导致储层岩石破裂,产生更多的微裂缝,这些微裂缝可能会增加压裂液与储层的接触面积,从而加重伤害程度。排量过大会使压裂液在储层中冲刷过度,破坏储层原有的结构,导致更多的固相颗粒脱落和运移,加剧堵塞伤害。施工温度的变化可能会影响压裂液的物理化学性质以及与储层的相互作用,例如,温度升高可能会加速化学反应的进行,增加化学伤害的风险。

7 减少压裂液对储层伤害的措施

7.1 优化压裂液配方

选择合适的压裂液添加剂是减少储层伤害的关键。应尽量减少压裂液中固相颗粒的含量,选择粒径合适、对储层伤害小的支撑剂和添加剂。对于水基压裂液,可以添加防膨剂来抑制黏土矿物的膨胀,添加破乳剂来降低液锁伤害,添加缓蚀剂来减少对储层岩石的腐蚀。此外,还可以研发新型的环保型压裂液,如低伤害的水基压裂液、清洁压裂液等,以降低对储层的化学伤害。

7.2 改进压裂施工工艺

合理控制压裂施工参数可以有效减少储层伤害。在施工过程中,应根据储层的特征和压裂液的性质,优化施工压力和排量,避免过高的压力和排量对储层造成过度破坏。采用分段压裂、限流压裂等先进的压裂工艺,可以更精确地控制压裂液的分布和流动,减少对非目标区域的伤害^[4]。此外,在压裂后及时进行返排作业,将压裂液尽可能多地排出储层,降低液锁和化学伤害的程度。

7.3 储层预处理

在压裂作业前,对储层进行预处理可以降低压裂液伤害的风险。例如,可以采用酸化、碱化等预处理措施来改善储层的渗透性,减少压裂液在储层中的滞留时间。对于富含黏土矿物的储层,可以提前进行黏土稳定处理,降低水敏伤害的可能性。此外,通过地质勘探和储层评价,准确了解储层的特征,为压裂液的选择和施工参数的确定提供依据,也有助于减少储层伤害^[4]。

结语

页岩气开发中压裂液致储层伤害机理复杂,涵盖物理、化学、生物伤害。物理伤害有固相堵塞等,化学伤害含酸碱反应等,生物伤害包括微生物活动等。伤害程度受压裂液性质、储层特征和施工参数影响。减少伤害需优化压裂液配方、改进工艺和储层预处理。深入研究机理并采取措施,对页岩气高效开发意义重大。未来可探讨不同压裂液与储层作用机制,开发环保高效技术。

参考文献

- [1]康智超.压裂液对致密储层伤害机理分析[J].化学工程与装备,2024,(10):58-60+90.
- [2]褚占宇,蒋建方,刘金栋,等.柴204井区页岩储层现场压裂液伤害机理[J].科学技术与工程,2024,24(28):12112-12118.
- [3]陈磊,秦世利,曹波波,等.压裂液破胶液对低渗储层伤害机理研究[J].精细石油化工,2024,41(01):42-45.
- [4]常进,许可,易新斌,等.压裂液对页岩储层伤害机理研究综述[J].应用化工,2023,52(10):2920-2923+2928.