

二氧化碳压裂技术研究进展

*王 彬

(四川省威沃敦石油科技股份有限公司 四川 618000)

摘要: 水力压裂开发非常规油气存在用水量大、引发储层伤害和污染地下水等问题。二氧化碳压裂技术因拥有造缝范围广、裂缝复杂、增产效果好、对地下水污染小、返排速率快等优势,且响应国家“双碳政策”要求,正逐渐成为非常规油气资源开发的热点。本文调研了国内外二氧化碳压裂技术发展历史及二氧化碳干法压裂、二氧化碳泡沫压裂、超临界二氧化碳压裂三类基本二氧化碳压裂技术,总结了二氧化碳压裂技术的基本工艺流程、增产原理、技术特点并介绍了近年来改进的二氧化碳压裂新方法和增产效果,为今后二氧化碳压裂技术的深入研究和现场应用提供一定的借鉴意义,有利于我国“双碳”目标的实现。

关键词: 非常规油气; 二氧化碳压裂; 二氧化碳泡沫压裂; 超临界二氧化碳压裂; 增产效果

中图分类号: TE357 **文献标识码:** A

DOI: 10.20087/j.cnki.1672-8114.2024.12.009

Research on the Progress of Carbon Dioxide Fracturing Technology

Wang Bin

(Sichuan Weiwodun Petroleum Technology Co., Ltd., Sichuan, 618000)

Abstract: Unconventional oil and gas development through hydraulic fracturing has problems such as high water consumption, reservoir damage, and groundwater pollution. Carbon dioxide fracturing technology is gradually becoming a hot topic in the development of unconventional oil and gas resources due to its advantages such as wide fracture range, complex fractures, good production increasing effect, low groundwater pollution, and fast backflow rate, as well as its response to the national "carbon peaking and carbon neutrality goals" requirements. This paper investigates the development history of carbon dioxide fracturing technology at home and abroad and three basic carbon dioxide fracturing technologies, namely, carbon dioxide dry fracturing, carbon dioxide foam fracturing, and supercritical carbon dioxide fracturing. This provides certain reference significance for the in-depth research and on-site application of carbon dioxide fracturing technology in the future, which is conducive to the achievement of China's "carbon peaking and carbon neutrality goals" goals.

Key words: unconventional oil and gas; carbon dioxide fracturing; carbon dioxide foam fracturing; supercritical carbon dioxide fracturing; increase production effect

近年来,随着非常规油气开发的需要和对环境保护需求的提高,水力压裂开发用水量大、引发储层伤害、污染地下水等问题逐渐显现,更加高效环保的二氧化碳压裂技术逐渐成为油气开采领域的研究热点之一。二氧化碳压裂技术主要包括二氧化碳干法压裂、二氧化碳泡沫压裂、超临界二氧化碳压裂^[1-2]。与传统水力压裂相比,二氧化碳压裂技术具有显著的优势,例如,降低对水资源的需求,减少对地下水的污染,提高采收率的同时进行二氧化碳封存等^[3-4]。这一技术的发展,有望降低传统水力压裂技术所产生的一些环境和资源压力,促进温室气体的减排,为能源生产可持续化发展提供了全新的解决方案^[4]。本文调研了国内外二氧化碳压裂技术发展历程、技术工艺流程、增产机理及改进的二氧化碳压裂新方法,为今后二氧化碳压裂技术研究和现场应用提供一定借鉴意义。

1. 二氧化碳干法压裂

二氧化碳干法压裂技术采用100%液态二氧化碳作为压裂液,利用高压泵向注入井注入液态二氧化碳,使地下储层产生裂缝并扩展延伸^[5]。随后通过混砂车向地下储层注入用于支撑裂缝的支撑剂,使地下储层

在近井地带产生高渗通道,提高油气渗流能力,从而达到增产目的。二氧化碳干法压裂增产机理包括压后增能作用、溶解降黏作用、置换作用及溶蚀作用^[6]。

1981年加拿大首次提出将100%液态二氧化碳注入地层用于压裂^[7],随后加拿大Fracmaster公司于Glaucinite油藏进行了长达一年的先导实验。1993年,美国首次在Big Sandy气田进行二氧化碳干法压裂试验^[8]。随后为维持和提高气井产能,美国开始在Galbraith储层进行纯液态二氧化碳干法压裂作业,并取得成功。目前,国外已有超过千口井进行过二氧化碳干法压裂作业,对于页岩气储层,二氧化碳干法压裂可提高3~5倍的产气量,增产效率可提升50%。

我国最早于2013年在长庆苏里格气田进行二氧化碳干法压裂先导实验,并取得成功。2014年延长油田在鄂尔多斯盆地延长组长7层组进行了页岩气井的二氧化碳干法压裂试验^[9],结果表明与滑溜水压裂相比,二氧化碳干法压裂后页岩气井的放喷返排率可提高17%,最终返排率可提高35%,效果明显。杨兆臣等^[10]对乌夏地区中深层稠油油藏采用水平井前置二氧化碳蓄能压裂技术的开发效果进行了数值模拟研究。通过

注入纯液态二氧化碳使近井地带地层产生微裂缝,随后液态二氧化碳气化膨胀,使得近井地带压力增加并产生裂缝,提高二氧化碳的波及范围。二氧化碳干法压裂技术所需设备包括二氧化碳存储罐车、储液罐、储砂罐、混砂车、高压泵车、二氧化碳压裂车等^[11]。

二氧化碳干法压裂技术工艺主要步骤为:(1)利用高压泵车将液态二氧化碳输送至地面井口,连通管道系统将液态二氧化碳注入到井眼中;(2)增加注入液态二氧化碳的压力,使其克服地层岩石的抗压强度而产生裂缝,实现对近井地带岩石的压裂;(3)在裂缝形成后,注入支撑剂(例如,砂岩颗粒)来支撑裂缝;(4)支撑剂段塞完全注完后,注入纯液态二氧化碳进行顶替,将已经注入的支撑剂挤入裂缝;(5)压裂操作完成后,停止液态二氧化碳的注入,监测井眼压力和流量,确保井眼稳定^[12]。

2. 二氧化碳泡沫压裂

二氧化碳泡沫压裂技术采用以二氧化碳为内相、胶液为外相的二氧化碳泡沫作为压裂液,主要是针对低渗水敏性气藏开发的压裂工艺^[12]。二氧化碳泡沫压裂液是一种压缩系数极大的流体,二氧化碳的相态会随着施工的进行而发生改变。二氧化碳以液态形式和水基压裂液在地面进行混合,注入地下储层后,二氧化碳的相态转变为超临界态,与水基压裂液混合后可产生二氧化碳泡沫^[13]。与利用纯液态二氧化碳为介质的干法二氧化碳压裂技术相比,泡沫二氧化碳压裂技术具有携砂能力强的优势,有利于裂缝纵向剖面的有效布置和支撑^[14]。

1982年初在美国的阿肯色州-路易斯安那州-德克萨斯州进行了二氧化碳泡沫压裂的首次试验。该二氧化碳泡沫压裂液体系包含70%的液态二氧化碳和30%的水。到1983年5月1日,Ark-La-Tex地区85口井的104个区域已经进行了二氧化碳泡沫压裂。以Arkana油田为例,与常规水力压裂相比,相邻井采用二氧化碳泡沫压裂产生的裂缝更长,产量也更高^[15],如表1所示。

表1 Arkana 油田水力压裂与二氧化碳泡沫压裂生产结果

井名	压裂方式	产生裂缝长度/m	日产量/(m ³ /d)
Barnett No. 2	传统水力压裂	289.56	54.87
Barnett A-1	传统水力压裂	310.90	26.43
Hamiter H-1-L	传统水力压裂	454.15	70.75
Williamette H-1	传统水力压裂	481.58	35.77
Barnett No. 3	二氧化碳泡沫压裂	457.20	99.05
Barnett No. A-3	二氧化碳泡沫压裂	454.15	111.78
Foster B-1-L	二氧化碳泡沫压裂	463.30	118.15
PCO No. K-1	二氧化碳泡沫压裂	304.80	113.91

国内二氧化碳泡沫压裂工艺也取得了不小的发展。针对常规胶压裂液在酸性条件下无法交联,导致在二氧化碳泡沫压裂施工过程中的加砂量少,且存在损害储层渗透性等问题,段瑶瑶等^[16]研发了酸性缔合交联压裂液体系,该压裂液具有抗剪切、稳定性高、不易滤失的优点,通过改变泡沫质量和排量优化了二氧化碳泡沫压裂技术工艺,有效克服了二氧化碳泡沫压裂液的酸性交联问题,增加了加砂量。吕其超等^[17]采用二氧化硅纳米颗粒作为强化剂强化二氧化碳压裂液体系,该强化二氧化碳压裂液体系生成泡沫的能力有所降低,但是生成的泡沫稳定性较高,其析液半衰期延长了4~6倍,且泡沫生成能力随压力的升高而增加,二氧化硅纳米颗粒的加入使得该压裂液产生的泡沫黏度增加了2~5倍。

3. 超临界二氧化碳压裂

与二氧化碳干法压裂技术相比,超临界二氧化碳压裂的相关研究直到21世纪后开始进行。当温度大于31.1℃,压力大于7.31MPa时,二氧化碳便会处于超临界状态^[17],如图1所示。

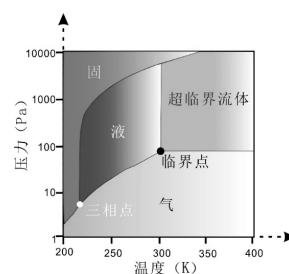


图1 二氧化碳相态图

此时二氧化碳密度接近于液体,扩散系数接近于气体,为液体的10~100倍,黏度介于液体和气体之间^[18]。超临界二氧化碳压裂最早由沈忠厚^[19]院士提出。随后王海柱等^[20]通过分析页岩气储层物性特征和超临界二氧化碳特性,并结合超临界二氧化碳喷射破岩实验结果,得出超临界二氧化碳可作为压裂介质应用于页岩气的开发。超临界二氧化碳压裂技术工艺与二氧化碳干法压裂的主要区别在于如何确保在压裂施工过程中二氧化碳处于超临界态^[21]。当目标储层埋深较深,二氧化碳可直接达到超临界状态;当目标储层埋深较浅时,需要配备加热、加压设备,以确保在注入和压裂施工过程中二氧化碳处于超临界状态。

超临界二氧化碳射流的射孔机理与水射流类似,例如,楔劈作用、射流冲击作用等。超临界二氧化碳更易进入储层岩石细小孔隙和裂缝,减小储层岩石的抗压强度,降低压裂施工的难度^[21]。Kizaki等^[22]对15 cm³的Inada花岗岩进行了水力压裂和超临界二氧化碳压裂的物理模拟实验,得到了在不同压裂方式下

岩石产生的裂缝形态,如图2所示。可以看出超临界二氧化碳压裂产生的裂缝分支数量明显多于水力压裂产生的裂缝分支数量,且超临界二氧化碳压裂产生的裂缝形态更加复杂。

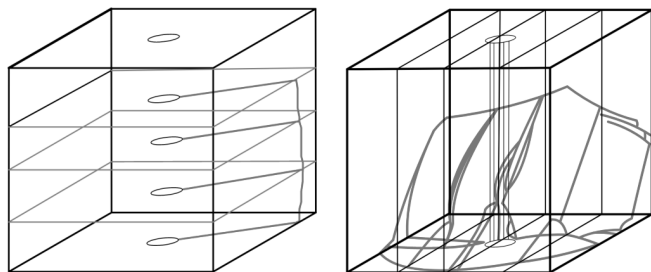


图2 水力压裂与超临界二氧化碳压裂的裂缝对比

超临界二氧化碳的低黏度、强流动性等特征可以有效地解决流动阻塞和解吸的问题,但同时超临界二氧化碳由于黏度低,其携砂能力较差。卢伟等^[23]针对二氧化碳压裂携砂性较差和松辽盆地南部G1H井青一段储层可压性较差的特点,提出了设计采用前置超临界二氧化碳+体积压裂复合改造工艺技术,并于2019年进行了现场实施,结果表明采用前置超临界二氧化碳压裂的造缝能力是传统水力压裂的4.6倍,且裂缝覆盖范围更广、更分散,日产油最高为36 t,提高采收率效果显著。

4. 结论与建议

(1) 二氧化碳干法压裂技术使用100%二氧化碳进行压裂,增产效果较好,但由于黏度低的原因,其携砂能力和导流能力差,影响了增产效果。

(2) 二氧化碳泡沫压裂采用二氧化碳与水混合的压裂液,与二氧化碳干法压裂相比,泡沫二氧化碳压裂技术在保持二氧化碳破岩能力强的同时,还具有较强的携砂能力。

(3) 超临界二氧化碳压裂需要保证二氧化碳在地层中保持超临界状态,发挥其扩散系数大、易流动的特点,进入更深、更细小的储层孔隙中,产生复杂裂缝,但是如何保持二氧化碳的超临界态,以及携砂能力较差是超临界二氧化碳压裂所面临的主要问题。

(4) 针对各二氧化碳压裂方法的优缺点,今后研究非常规储层二氧化碳压裂开发时,应注意其携砂能力,提出新的改进型二氧化碳压裂方法,同时尽可能减少其对储层产生的污染,促进二氧化碳压裂技术的现场应用,推动非常规油气资源的开发。

【参考文献】

- [1] 刘凯新,杜布戈,李杰,等. 玛湖凹陷砾岩储层CO₂前置压裂工艺支撑剂嵌入特征[J/OL]. 大庆石油地质与开发: 1-11 [2024-07-02]. <https://doi.org/10.19597/J. ISSN. 1000-3754. 202308070>.
- [2] 严雨荷,潘启,张瀚文. 致密气藏CO₂压裂与地质埋存研究进

展[J]. 山东化工, 2023, 52(23): 163-165.

[3] 卫颖菲,曹永波,罗向东,等. CO₂准干法压裂技术在鄂尔多斯盆地低压致密气藏的应用[J]. 化学工程与装备, 2023(10): 5-7.

[4] 赵坤,李泽阳,刘娟丽,等. 吉木萨尔页岩油井区CO₂前置压裂工艺参数优化及现场实践[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(01): 83-90.

[5] 张怀文,周江,高燕. 二氧化碳干法压裂技术综述[J]. 新疆石油科技, 2018, 28(1): 30-34.

[6] 张健,徐冰,崔明明. 纯液态二氧化碳压裂技术研究综述[J]. 绿色科技, 2014(04): 200-203+206.

[7] 刘刚,白小丹,马中国,等. 常压混砂准干法压裂技术的研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2021, 38(03): 375-379.

[8] 吴辰,朱沫,欧宇钧,等. CO₂干法压裂用增稠剂的发展现状[J]. 化工技术与开发, 2023, 52(03): 38-44+59.

[9] 王香增,吴金桥,张军涛. 陆相页岩气层的CO₂压裂技术应用探讨[J]. 天然气工业, 2014, 34(01): 64-67.

[10] 杨兆臣,卢迎波,杨果,等. 中深层稠油水平井前置CO₂蓄能压裂技术[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(01): 178-184.

[11] 谢平,侯光东,韩静静. CO₂压裂技术在苏里格气田的应用[J]. 断块油气田, 2009, 16(05): 104-106.

[12] 刘广春. 二氧化碳干法压裂发展现状及难点问题分析[J]. 当代化工研究, 2021(12): 15-16.

[13] 周长林,彭欢,桑宇,等. 页岩气CO₂泡沫压裂技术[J]. 天然气工业, 2016, 36(10): 70-76.

[14] 田鸿照,苑秀发,李云云,等. 基于地质工程一体化的CO₂泡沫压裂优化设计与实践——以苏里格气田苏X区块为例[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(05): 126-134.

[15] WAMOCK W E, HARRIS P C, KING D S. Successful Field Applications of CO₂-Foam Fracturing Fluids in the Arkansas-Louisiana-Texas Region[J]. Journal of Petroleum Technology, 1985, 37(01): 80-88.

[16] 段瑶瑶,卢拥军,管保山,等. CO₂泡沫压裂工艺技术研究及现场实践[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2017, 36(04): 14-19.

[17] 吕其超,张星,周同科,等. SiO₂纳米颗粒强化的CO₂泡沫压裂液体体系[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(03): 114-123.

[18] 吴林,罗志锋,赵立强,等. 超临界二氧化碳压裂井筒温压及相态控制研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2023, 45(02): 117-125.

[19] 沈忠厚,王海柱,李根生. 超临界CO₂连续油管钻井可行性分析[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(06): 743-747.

[20] 王海柱,沈忠厚,李根生. 超临界CO₂开发页岩气技术[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(03): 30-35.

[21] 王海柱,李根生,郑永,等. 超临界CO₂压裂技术现状与展望[J]. 石油学报, 2020, 41(01): 116-126.

[22] KIZAKI A, TANAKA H, OHASHI K, et al. Hydraulic Fracturing in Inada Granite and Ogino Tuff with Super Critical Carbon Dioxide[C]//ISRM Regional Symposium-7th Asian Rock Mechanics Symposium, Seoul, Korea, 2012.

[23] 卢伟,张华,韩永亮,等. 页岩油前置超临界二氧化碳压裂造缝技术[J]. 油气井测试, 2023, 32(01): 38-44.

【作者简介】

王彬(1983-),男,汉族,四川德阳人,本科,中级工程师,研究方向:压裂酸化工艺。