

超临界二氧化碳压裂技术实验研究综述

Experimental research review of supercritical carbon dioxide fracturing technology

廖引(中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)

摘要:本文从超临界二氧化碳特点、超临界二氧化碳压裂岩体实验研究、压裂煤体研究以及超临界二氧化碳压裂现场应用现状进行了详细的调研总结,探讨了目前超临界二氧化碳压裂技术的研究进展与不足,并在起裂机理、裂缝扩展机理等方面的研究提出了建议,对超临界二氧化碳压裂技术未来的发展具有参考意义。

关键词:超临界二氧化碳; 无水压裂; 现场应用; 综述

Abstract:In this paper, the characteristics of supercritical carbon dioxide, the experimental study of supercritical carbon dioxide fracturing rock mass, the study of fracturing coal and the field application of supercritical carbon dioxide fracturing are investigated and summarized in detail, the research progress and deficiency of supercritical carbon dioxide fracturing technology are discussed.

Key words:supercritical carbon dioxide; water-free fracturing; applications in the field; survey

1 前言

近年来,非常规资源的发展使得我国能源结构不断优化^[1]。页岩气和煤层气是非常规天然气的重要组成部分,而压裂技术是目前开采页岩气和煤层气的主要增产手段。其中,在压裂设计中,压裂液的选取对增产效果具有重要影响。目前,在页岩气和煤层气的开采过程中,水力压裂液在压裂工艺中使用较为普遍,但水力压裂技术在开采过程中不仅耗水量较大,而且改造效果不明显,同时污染环境。另外,我国页岩气储层黏土含量普遍较高,黏土矿物遇水容易发生膨胀最终导致堵塞气体渗流通道伤害储层。因此,迫切需求探索出开发非常规资源的新技术。

近年来,超临界二氧化碳作为一种新的压裂介质,成为研究的热点。超临界二氧化碳流体取代水,对页岩气储层和煤层进行压裂改造,实现无水压裂技术,达到增产、增渗的目的。

2 超临界二氧化碳特点

二氧化碳存在四种相态:气、液、固及超临界相态,其压力-温度相态图如图1所示。二氧化碳在温度高于31.3℃以及压力大于9.38 MPa时,处于超临界状态^[2]。

超临界二氧化碳是介于气、液两者之间的一种流体,具有独特的性质,它既具有液体的高密度又具有气体的低黏度,且表面张力很低,扩散系数高,渗透能力强,具体见表1。

3 超临界二氧化碳压裂岩体实验研究

J P. Verdon 等用超临界二氧化碳代替水对储层进

文章编号:

1672-609X(2021)02-0045-03

中图分类号: TD712

文献标志码: A

作者简介: 廖引(1990-),男,湖北天门人,硕士,毕业于重庆大学采矿工程专业,主要从事煤层气、页岩气开发方面的研究工作。

基金项目: 企业技术创新项目(2018YBXM32)

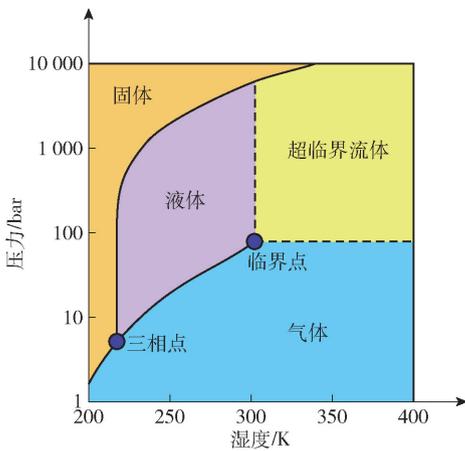


图1 二氧化碳压力-温度相态图

表1 二氧化碳气态、液态、超临界态的物理性质

参数	气态	液态	超临界态
密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	0.6~2	600~1600	200~500
动力黏度/ $10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$	1~3	20~30	1~3
扩散系数/ $10^{-7}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	100~400	0.002~0.030	0.2~0.7

Inui 等^[6]分别采用水、稠油以及超临界二氧化碳对花岗岩进行压裂,研究表明超临界二氧化碳压裂生成的是波形状态裂缝,它能够诱导更多分支裂缝,最终形成裂缝网络。Zhang 等使用 CT 更为直观的观测到超临界二氧化碳比水压压裂页岩能形成更为复杂的裂缝,并通过自适应二值法实现了对 CT 扫描的裂缝图像进行数据提取,获得了复杂裂缝量化参数和几何模型。

在压裂的理论模型上,郭建春等^[7]研究了不同注入温度、压力、排量所引起的井底参数的变化,建立了井筒温度-压力耦合模型。孙小辉等^[8]提出了裂缝温度场模型,得到了滤失系数和压裂时间对压裂裂缝温度场的影响规律,对现场压裂施工参数的选择具有重要意义。

侯磊等^[9]构建了支撑剂的跟随性计算模型,研究了多参数对携砂能力的影响,同时评价了超临界二氧化碳压裂液的携砂能力。

方长亮等构建了页岩裂缝二维平面模型,对比了水、滑溜水及超临界二氧化碳压裂后裂缝的张开和长度。

Jia 等构建了新的流固耦合压裂裂缝扩展有限元模型,研究得到了流体黏度对压裂裂缝形态的微观控制机制。

综上所述,超临界二氧化碳压裂的起裂压力明显低于水力压裂,形成的裂缝形态也更为复杂,易形

行改造,发现能实现和水力压裂一样的增产效果。李根生等^[3]室内试验研究发现超临界二氧化碳相比水在喷射压裂上能实现更好的效果。K. Aoyagi 和 T. Ishida 对花岗岩试件进行了水、液态二氧化碳、超临界二氧化碳三种介质的压裂实验,研究结果表明,超临界二氧化碳的起裂压力最低,压裂后的影响范围最大,效果最好。

陈立强等^[4]构建了起裂压力的预测模型,并从理论上推算出超临界二氧化碳比液态二氧化碳的起裂压力低 20.5%,比水力压裂的起裂压力低约 75%。

在裂缝的形态研究上,Kizaki 等^[5]采用花岗岩和凝灰岩进行了超临界二氧化碳压裂和水力压裂,

成网络裂缝。由于超临界二氧化碳压裂产生的裂缝非常复杂,还需从温度、水平地应力差、层理、黏度、滤失作用等多角度对裂缝形态的影响进行研究。此外,超临界二氧化碳起裂的主导机理也不够明确,建议通过实验对比不同岩性的超临界二氧化碳压裂,确定主导机理。

4 超临界二氧化碳压裂煤体实验研究

针对超临界二氧化碳压裂煤体的实验研究较少。王磊等^[10]利用大尺寸真三轴压裂渗流装置,模拟了煤系压裂过程,结果表明超临界二氧化碳压裂更容易起裂,且在压裂的过程中能够生成更多层理裂缝和分叉裂缝,但相比清水压裂,裂缝宽度较狭窄,两者裂缝宽度最大相差 2 个数量级左右。李畅等^[11]采用无烟煤试件开展了清水、超临界二氧化碳压裂,并对压裂后的试件进行了 CT 和三维形态扫描分析,揭示了清水、超临界二氧化碳致裂煤体裂纹形态与形成机制,提出了超临界二氧化碳煤系地层压裂的工程建议。

综上所述,国内关于超临界二氧化碳压裂煤体的实验研究尚处于探索阶段,特别是对裂纹形成机理研究不够深入。

5 超临界二氧化碳压裂技术现场应用现状

我国延长石油页岩气勘探开发区内页岩气藏具

有低渗、特低渗油的特点,基本没有自然产能,压裂是该开发区高效开采最重要的手段。水力压裂技术存在水敏和水锁以及压裂液返排低等突出问题。针对这一情况,2017年延长石油在“延长石油国家陆相页岩气示范区”延2011井进行了我国乃至全球首次陆相页岩气超临界二氧化碳压裂现场试验,具体如图2所示,填补了国内技术空白。



图2 延2011井现场压裂试验

超临界二氧化碳在煤层气领域的研究鲜少,现场应用更是未见报道。

6 结论

(1) 超临界二氧化碳压裂技术相比传统水力压裂,压裂效果良好。此外,既能节约水资源的,又能有效将二氧化碳这种温室气体进行封存。目前,在页岩气开采领域有初步应用,在煤矿领域研究较少,现场应用更是尚未见报道,需要加强推广应用。

(2) 超临界二氧化碳压裂的起裂压力低,比相同条件下水力压裂的起裂压力低约75%。但主导的起裂机理还不能确定,建议后续从理论上升华超临界二氧化碳压裂机理。

[参考文献]

[1] 王道富,高世葵,董大忠,等. 中国页岩气资源勘探开

发挑战初论[J]. 天然气工业,2013,33,231(1):8-17.

- [2] 丁勇,马新星,叶亮,等. CO₂ 破岩机理及压裂工艺技术研究[J]. 岩性油气藏,2018,30(6):151-159.
- [3] 李根生,王海柱,沈忠厚,等. 超临界 CO₂ 射流在石油工程中应用研究与前景展望[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(5):76-80+87.
- [4] 陈立强,田守增,李根生,等. 超临界 CO₂ 压裂起裂压力模型与参数敏感性研究[J]. 岩土力学,2015,36(S2):125-131.
- [5] Akihisa Kizaki, Hiroharu Tanaka, Katsushi Ohashi, et al. Hydraulic fracturing in Inada granite and Oginotuff with supercritical carbon dioxide [C]. 7th Asian Rock Mechanics Symposium. Seoul, South Korea, October 15-19, 2012.
- [6] Inui S, Ishida T, Nagaya Y, et al. AE monitoring of hydraulic fracturing experiments in Granite blocks using supercritical CO₂, water and viscous oil [C]. The 48th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium held in Minneapolis, MN, USA, 1-4 June 2014.
- [7] 郭建春,曾冀. 超临界二氧化碳压裂井筒非稳态温度-压力耦合模型[J]. 石油学报,2015,36(2):203-209.
- [8] 孙小辉,孙宝江,王志远. 超临界 CO₂ 压裂裂缝温度场模型[J]. 石油学报,2015,36(12):1586-1592.
- [9] 侯磊,孙宝江,蒋廷学,等. 支撑剂在超临界二氧化碳中的跟随性计算[J]. 石油学报,2016,37(8):1061-1068.
- [10] 王磊,梁卫国. 超临界 CO₂ 清水压裂煤体起裂和裂缝扩展试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38,360(S1):2680-2689.
- [11] 李畅,梁卫国,侯东升,等. 水、ScCO₂ 致裂煤体裂纹形态与形成机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39,365(4):761-772.