文章编号:1673-5005(2012)04-0093-04

超临界二氧化碳射流破岩试验

杜玉昆[1], 王瑞和[1], 倪红坚[1], 霍洪俊[1], 黄志远[2], 岳伟民[3], 赵焕省[1], 赵 博[1]

(1. 中国石油大学 石油工程学院,山东 青岛 266580; 2. 中国石化胜利油田 钻井工艺研究院,山东 东营 257000; 3. 北京探矿工程研究所,北京 100083)

摘要:采用超临界二氧化碳射流进行破岩钻井是一种极具潜力的非常规油气藏钻采方法。依据石油钻完井的特点和超临界二氧化碳流体的特性,研制超临界二氧化碳钻完井试验系统,并进行超临界二氧化碳射流破岩试验。结果表明:超临界二氧化碳射流比高压水射流破岩具有显著优势;喷嘴直径、喷距、射流压力和岩石性能对超临界二氧化碳射流与高压水射流破岩的影响规律基本一致;井底环境温度对超临界二氧化碳射流破岩效果影响显著,在向超临界态转变的过程中,射流破岩效果随着温度的升高急剧增强,当温度超过临界值后,温度升高对射流破岩效果的改善趋缓。

关键词:二氧化碳; 超临界流体; 射流; 岩石破碎; 钻完井

中图分类号: TE 248 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2012.04.017

Rock-breaking experiment with supercritical carbon dioxide jet

DU Yu-kun[1], WANG Rui-he[1], NI Hong-jian[1], HUO Hong-jun[1], HUANG Zhi-yuan[2], YUE Wei-min[3], ZHAO Huan-xing[1], ZHAO Bo[1]

(1. *School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao* 266580, *China*; 2. *Drilling Technology Research Institute, Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying* 257000, *China*; 3. *Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Drilling with supercritical carbon jet is an unconventional oil and gas reservoirs drilling and production method with great potential. The supercritical carbon jet experimental system was developed based on the basic characteristics of supercritical carbon dioxide combined with the actual drilling and completion technology features. The rock-breaking experiment was carried out with the experimental system. The results show that the rock-breaking ability of supercritical carbon dioxide jet is much better than the high pressure water jet. The effect of the nozzle diameter, standoff distance, jet pressure and rock parameter on the rock-breaking ability of supercritical carbon dioxide jet agrees well with that of high pressure water jet, while the effect of bottom-hole temperature on the rock-breaking ability of supercritical carbon dioxide jet is very marked. And the rock-breaking effect sharply increases as the increase of jet temperature and the increase trend reflects a slowing decline after the temperature exceeding the critical value.

Key words: carbon dioxide; supercritical fluid; jet; rock-breaking; drilling and completion

随着国民经济的发展,各国的油气资源需求量增加,不少国家的原油对外依存度逐年增大。为应对能源危机,储量丰富的非常规油气已成为主要接替能源,但非常规油气资源的开发面临着产能低、储层易伤害、采收率低等困难。超临界二氧化碳(SC-CO_2)流体具有接近于液体的高密度和接近于气体的低黏度、高扩散系数,SC-CO_2 射流能够降低破岩的门限压力,提高机械钻速[1],并可通过控制井口回压调节钻采过程中井筒内流体的密度,实现井下欠平衡、平衡和过平衡状态的转化[2-3],从而有效保护油气层,因此采用 SC-CO_2 射流破岩钻井是一种极具潜力的非常规油气藏钻采方法[4]。笔者依据

收稿日期:2012-03-10

基金项目:国家"973"计划课题(2010CB226703);国家自然科学基金项目(50974130/51034007);山东省自然科学基金项目(2011ZRE28107);中国石油大学(华东)优秀博士学位论文培育计划以及研究生自主创新项目(11CX06021A)

作者简介:杜玉昆(1983-),男(汉族),山东莱州人,博士研究生,主要从事高压水射流和超临界流体钻完井理论与技术研究。

万方数据

石油钻完井的特点和超临界二氧化碳流体的特性,研制超临界二氧化碳钻完井试验系统,并进行超临界二氧化碳射流破岩试验。

1 试验装置

在现有钻采技术中,保护油气层的钻完井技术已被实践证明,能有效提高非常规油气藏最终采收率,SC-CO_2 是一种极具应用潜力的保护油气层钻完井流体介质[5-6]。路易斯安娜州立大学开展了 SC-CO_2 欠平衡钻井作业的可行性研究[7],Tempress 技术公司提出了 SC-CO_2 连续油管钻井方案,并进行了探索性试验[8],发现 SC-CO_2 可以提高机械钻速。但是,现有研究大都停留在可行性研究阶段,基础试验研究不足,研究者基于 SC-CO_2 流体特性和钻完井工况,研制了 SC-CO_2 钻完井试验系统[9-10]。该系统试验流程(图 1)为:首先在 CO_2 储罐内存储足量的液态 CO_2,经增压泵组增压后达到试验要求压力(增压泵 1 可增压至 100 MPa,增压泵 2 可增压至 50 MPa,二者可根据试验需要并联使用,最高工作压力为 50 MPa,流量为 125 L/min);经过加热器加热至试验要求温度(最高升温至 120 ℃)后进入模拟井筒,作用于模拟岩心;试验后的流体首先经过固相分离器分离岩屑等固体杂质,再经过液相分离器分离水蒸气等液体杂质,最后纯净的 CO_2 流体经过制冷器降温至储罐存储温度,返回 CO_2 储罐[11-12]。

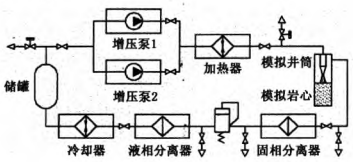


图 1 破岩试验系统流程

Fig. 1 Flow chart of experimental system

SC-CO_2 射流破岩模拟井筒(图 2)可以模拟围压、孔隙压力和地层温度等井下实际工况,射流破岩时间通过挡板控制器抽拉挡板实现精确控制,SC-CO_2 在喷射以及井筒流动过程中的流体特性变化通过在井筒轴向、岩石侧壁和井底径向上布置的高灵敏度的温度、压力传感器实时采集和存储。

选用直径为 25.4、38.1 和 100 mm 系列岩心,在进行探索性试验时,首先使用人工模拟岩心(抗压强度分别为 25、29 和 35 MPa,由水泥/石英砂混合制成),在获得基本规律后再选取抗压强度为 65 MPa 的致密砂岩和 95 MPa 的大理岩等天然岩心进行验证性试验。射流破岩时间设置为 120 s。

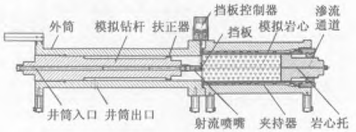


图 2 模拟井筒

Fig. 2 Simulation well bore

2 试验结果分析

2.1 SC-CO_2 与高压水射流对比分析

高压水射流是目前普遍采用的清洗和辅助破岩提高钻速的重要措施,为了进一步提高破岩效率,提出了 SC-CO_2 射流破岩方法,并与水射流进行了对比分析,结果见图 3、4(试验条件为射流压力 10 ~ 50 MPa,温度 70 ℃,喷嘴直径 2.3 mm,喷距 4.6 mm)。结果显示,相比于水射流,SC-CO_2 射流的破岩优势显著,在 30 MPa 以下 SC-CO_2 射流提高破岩能力的幅度较大,是水射流破岩能力的 3 倍以上,在高压下提高的幅度减缓,从 40 MPa 时的 2 倍降到 50 MPa 时的 1.6 倍,且多为体积破碎。

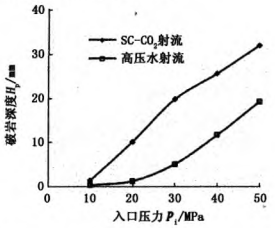


图 3 SC-CO_2 射流与水射流破岩效果对比

Fig. 3 Rock-breaking ability comparison of supercritical carbon dioxide jet and water jet



图 4 增压条件下射流破岩效果外观

Fig. 4 Outside view of rock-breaking effect in pressurization condition

主要原因是在射流破岩初期形成岩石损伤破坏

万方数据

的主体,破岩起主要作用的是应力波,破岩后期岩石内已有的微孔隙、微裂缝等继续扩展,这时起主要作用的是射流的准静态压力[13]。由于 SC-CO_2 流体黏度低、扩散系数大,与水射流相比更易向微孔隙、微裂纹中继续扩展,射流作用范围增大,体积膨胀泄压后可以在岩石破碎坑周围形成比较大的拉应力,从而使岩石破碎坑的直径变大,较易造成体积破碎,降低射流破岩的门限压力,提高破岩效率。在高压下随着 SC-CO_2 流体性质逐渐趋近液态,此时破岩主要依靠射流的冲击应力,故 SC-CO_2 射流提高破岩能力的趋势减缓。

2.2 喷嘴直径的影响

射流压力 30 MPa、温度 70 ℃、喷嘴直径 1 ~ 3 mm、喷距为 2 倍喷嘴直径条件下喷嘴直径对 SC-CO_2 射流破岩效果的影响如图 5 所示。分析图 5 可得,随着喷嘴直径的加大,射流破岩效果先增强后减弱,本试验条件下最优喷嘴直径为 2.3 mm。喷嘴直径过小时射流能量损耗多,射流没有足够冲击力;喷嘴直径达到一定尺寸后,射流能耗降低,到达岩石后的冲击载荷随喷嘴直径的增加而增大;当喷嘴直径过大时,射流速度降低导致冲击载荷减小,射流破岩效果随之降低。

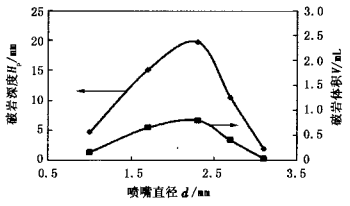


图 5 喷嘴直径对破岩效果的影响

Fig. 5 Effect of nozzle diameter on rock-breaking ability

2.3 喷距的影响

射流压力 30 MPa、温度 70 ℃、喷嘴直径 2.3 mm、喷距为 1 ~ 3 倍喷嘴直径条件下射流喷距对 SC-CO_2 射流破岩效果的影响如图 6 所示。由图 6 可以看出,随着喷距的增大,射流破岩效果先增强后减弱,本试验条件下破岩最佳喷距为 2 倍喷嘴直径。喷距较小时,SC-CO_2 射流发展得不够充分,冲击到岩石面的作用区域较小,冲击岩样后的返回流与冲击射流的相互干扰作用较强,射流能量消耗较多;当喷距增加到一定尺寸后,冲击区域变大,射流获得充分发展,破岩效果逐渐增强;当喷距过大时,射流作用区域虽然增大,但射流喷射速度与冲击载荷下降,射流的破岩效果降低。

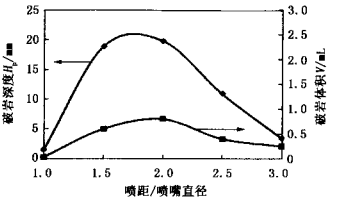


图 6 喷距对破岩效果的影响

Fig. 6 Effect of standoff distance on rock-breaking ability

2.4 射流压力的影响

射流压力 15 ~ 70 MPa、温度 70 ℃、喷嘴直径 2.3 mm、喷距 4.6 mm 条件下 SC-CO_2 射流压力对破岩效果的影响如图 7 所示。由图 7 可以看出,SC-CO_2 射流破岩效果随着射流压力的增大而增强。射流冲击载荷随着射流压力的增加而逐渐增加,SC-CO_2 射流作用在岩石表面上的能量增大,射流破岩效果加强。

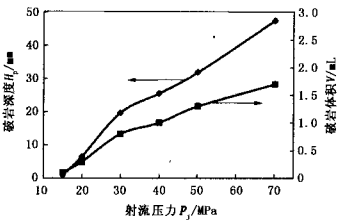


图 7 射流压力对破岩效果的影响

Fig. 7 Effect of jet pressure on rock-breaking ability

2.5 岩石强度的影响

射流压力 30 MPa、温度 70 ℃、喷嘴直径 2.3 mm、喷距 4.6 mm 条件下岩石强度对 SC-CO_2 射流破岩效果的影响如图 8 所示。5 种岩心分别选用抗压强度为 25、29、35 MPa 系列的水泥/石英砂混合岩心、65 MPa 的致密砂岩和 95 MPa 的大理岩,分析发现,岩石抗压强度越大,破坏时所需要的机械能越

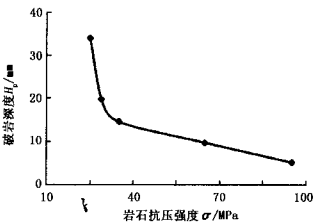


图 8 岩石强度对破岩效果的影响

Fig. 8 Effect of rock strength on rock-breaking ability

万方数据

大,破碎越困难,破岩效率越低。

2.6 井底环境温度的影响

SC-CO_2 钻完井过程中井口对液态 CO_2 沿钻柱下行时随着井深的增加,地层温度升高,钻柱内流体与井筒环境(即环空和地层)发生热量传递其温度不断升高,并在一定井深处达到超临界态,因此井底环境温度直接决定着 CO_2 流体自钻头喷出后的状态和破岩性能。射流压力 30 MPa、温度 25 ~ 70 ℃、喷嘴直径 2.3 mm、喷距 4.6 mm 条件下井底环境温度对 SC-CO_2 射流破岩效果的影响如图 9 所示。由图 9 可以看出,SC-CO_2 射流破岩效果随着井底环境温度的升高而增强。

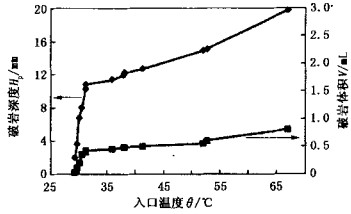


图 9 井底环境温度对破岩效果的影响

Fig. 9 Effect of bottom-hole temperature on rock-breaking ability

在井底环境温度未达到临界值时,尚处于液态的 CO_2 射流与水射流的破岩机制相同,都是主要依靠冲击破碎功;随着井底环境温度的升高,CO_2 相态由液态向超临界态转变,射流的破岩性能急剧增强;当温度达到了临界值后,SC-CO_2 流体具有了接近于气体的低黏度和高扩散系数,极易渗透到岩心深处的孔隙和裂纹中,并使射流冲击造成的损伤继续扩展,从而降低射流破岩的门限压力,增强射流的破岩效果;随着温度的继续升高,SC-CO_2 射流破岩性能增速变缓,破岩性能曲线出现了拐点。在实际钻井过程中,随着地层温度的升高和井筒换热过程的进行,钻杆内的 CO_2 流体在不到 1 km 井深处即可以超过临界值,易于实现井底超临界状态喷射钻井。

3 结 论

(1)相比于高压水射流,SC-CO_2 射流的破岩优势显著,具有应用于破岩钻井的巨大潜能。

(2)随着喷嘴直径和喷距的增大,射流破岩效果先增强后减弱,存在最优值,而射流压力越高、岩石强度越低,破岩效果则越好。

(3)井底环境温度对 SC-CO_2 射流破岩效果影响显著,温度超过临界值后射流破岩效果急剧增强。

参考文献:

[1] KOLLE J J. Coiled-tubing drilling with supercritical carbon dioxide[R]. SPE 65534, 2000.

[2] FAISAL Aladwani, JULIUS P, RICHARD Hughes. Modeling of an underbalanced drilling operation utilizing supercritical carbon dioxide[R]. SPE 114050, 2008.

[3] 徐同台, 赵忠举, 冯京海. 2005 年国外钻井液新技术[J]. 钻井液与完井液, 2007,24(1):61-70.
XU Tong-tai, ZHAO Zhong-ju, FENG Jing-hai. Development in drilling fluid technologies abroad in 2005[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2007,24(1):61-70.

[4] 王瑞和, 倪红坚, 沈忠厚. 二氧化碳在非常规油气藏开发中的应用[R]. 成都:钻井基础理论研究与前沿技术开发新进展学术研讨会, 2010-10-24.

[5] SUEHIRO Y, NAKAJIMA M, YAMADA K, et al. Critical parameters of $\{xCO_2+(1-x)CHF_3\}$ for $x=(1.0000, 0.7496, 0.5013,$ and $0.2522)$[J]. Chem Thermodyn, 1996,28:1153-1164.

[6] BERT M. IPCC special report on CO_2 capture and storage[M]. London UK: Cambridge University Press, 2005.

[7] GUPTA A P. Feasibility of supercritical carbon dioxide as a drilling fluid for deep underbalance[R]. SPE 96992,2005.

[8] KOLLÉ J J. Coiled tubing drilling with supercritical carbon dioxide US, 6347675B1[P]. 2002-02-19.

[9] DU Yu-kun, WANG Rui-he, NI Hong-jian, et al. Application prospects of supercritical carbon dioxide in unconventional oil and gas reservoirs: International Conference on Energy and Environmental Protection, Hobhot, China, May 14, 2012[C]. Switzerland: Trans Tech Publications, 2012.

[10] 王瑞和, 倪红坚, 杜玉昆. 超临界流体钻完井模拟试验装置 CN 201120017722[P]. 2011-08-10.

[11] 廖传华, 王栋, 顾海明. 超临界 CO_2 萃取技术及成套装备[J]. 石油化工设备, 2002,31(5):32-34.
LIAO Chuan-hua, WANG Dong, GU Hai-ming. Preliminary study of supercritical CO_2 extraction technology and equipment[J]. Petro-chemical Equipment, 2002, 31(5):32-34.

[12] 王在明. 超临界二氧化碳连续管钻井液特性研究[D]. 东营:石油大学石油工程学院,2008.
WANG Zai-ming. Feature research of supercritical carbon dioxide drilling fluid[D]. Dongying: College of Petroleum, China University of Petroleum, 2008.

[13] 倪红坚. 高压水射流破岩机理的数值模拟研究[D]. 东营:石油大学石油工程学院, 2002.
NI Hong-jian. Numerical simulation study on rock breaking mechanism under high pressure water jet[D]. Dongying: College of Petdeum Engineering, University of Petroleum, China, 2002.

(编辑 李志芬)

万方数据