

超临界二氧化碳钻井技术

张琳, 胥豪, 牛洪波, 刘晓兰

(中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东 东营 257017)

摘要:当温度和压力分别达到 31.10 °C、7.38 MPa 及以上时, CO₂ 成为超临界状态, 超临界 CO₂ 具有类似于液体的密度, 而其粘度又比空气和氮气大, 可以驱动井下动力钻具旋转破岩, 并携带岩屑, 形成超临界 CO₂ 钻井技术。超临界 CO₂ 钻井具备破岩速度快、油气层保护好、驱替效率高等优势, 对于非常规油气藏开发具有明显优势。超临界 CO₂ 钻井与连续管钻井技术相结合, 应用于压力欠平衡钻井和压力衰竭地层前景广阔。介绍了超临界 CO₂ 物理特征、超临界 CO₂ 钻井技术流程及其技术优势, 最后阐述了超临界 CO₂ 钻井技术的研究进展及发展趋势。

关键词:超临界二氧化碳; 钻井; 密度; 粘度; 连续管; 温度; 压力; 携岩

中图分类号: TE242; P634 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2014)04-0010-04

Supercritical CO₂ Drilling Technology/ZHANG Lin, XU Hao, NIU Hong-bo, LIU Xiao-lan (Drilling Technology Research Institute, Shengli Petroleum Engineering Co., Ltd., SINOPEC, Dongying Shandong 257017, China)

Abstract: When the temperature and pressure are higher than 31.10°C and 7.38MPa respectively, CO₂ becomes into supercritical state, the density of supercritical CO₂ is similar to that of liquid, but the viscosity is higher than that of air and nitrogen gas, so it can drive the down-hole motor working and carry the cuttings out of the wellbore, which comes into being supercritical CO₂ drilling technology. Supercritical CO₂ drilling technology has the advantages of fast rock breaking speed, good gas and oil protection and high displacement efficiency, especially has the obvious advantages in the unconventional oil and gas reservoirs development. There are broad prospects for the application of combination of supercritical CO₂ drilling and coiled tubing drilling technology in the pressure under balance drilling and pressure depletion formation. The paper introduces the supercritical CO₂ technology about its physical characteristics, drilling process and the technical advantages as well as the related research progress and development trend.

Key words: supercritical CO₂; drilling; density; viscosity; coiled tubing; temperature; pressure; cutting carrying

气体钻井有别于常规钻井技术, 其采用空气、天然气或者氮气等作为循环介质, 携带岩屑并冷却钻头, 但由于其循环介质密度太低, 难以产生足够的扭矩来驱动井下马达, 因此气体钻井通常只应用于直井段钻进。为了克服这个难题, 美国路易斯安那州立大学在 20 世纪 90 年代对超临界 CO₂ 钻井可行性进行了研究和现场试验。CO₂ 在温度高于 31.1 °C 和压力高于 7.38 MPa 的情况下为超临界流体^[1-6]。利用超临界 CO₂ 进行钻井时, 超临界状态的 CO₂ 具有接近于液体的密度, 同时其粘度也比较大, 因此可以驱动马达转动并携带岩屑, 可以应用于定向井和水平井。

7.38 MPa^[5-14], 当温度和压力大于临界点时, 其达到超临界状态(见图 1)。

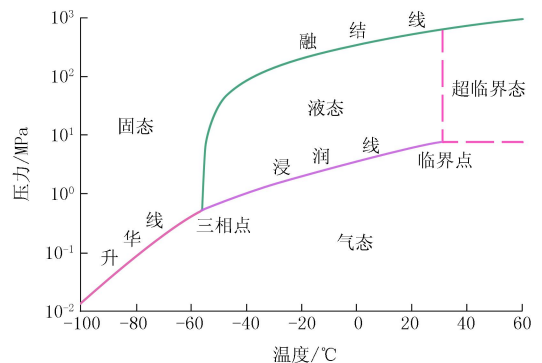


图 1 CO₂ 相态图

当 CO₂ 气体温度和压力逐渐升高时, CO₂ 从气态变为液态, 同时密度也逐渐增加; 当温度和压力高于临界点后, 呈现为超临界状态。在从气态变为超

1 超临界 CO₂ 物理特性

CO₂ 气体无色无味, 分布广泛, 获取简单, 三相点为 -56.56 °C、0.52 MPa, 临界点为 31.10 °C、

收稿日期: 2013-10-21; 修回日期: 2013-12-20

基金项目: 中国石化集团前瞻项目“超临界二氧化碳钻井技术可行性研究”(JP130141-32015)部分成果

作者简介: 张琳(1970-), 男(汉族), 山东东营人, 中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院工程师, 油藏工程专业, 主要从事钻井工程设计和研究工作, 山东省东营市北一路 827 号钻井院钻井所, slzjyzi@163.com。

临界状态时,其密度变化是连续的。CO₂ 气体的密度可调范围非常大^[11],最大密度可达 1200 kg/m³,与常规钻井液和欠平衡钻井时的钻井液密度比较接近(见图 2),显示出超临界 CO₂ 钻井技术广泛的应用前景。另一方面,随着相态的变化,CO₂ 气体的粘度变化范围也较大,特别是从气态变化为液态时出现粘度突变^[11]。当 CO₂ 呈超临界状态后,其粘度还将进一步增加,但总体介于液态和气态之间。因此可知,超临界 CO₂ 具有常规钻井液的密度范围,其粘度又介于气体和液体之间,可以驱动井下马达工作,并携带井筒岩屑,同时低粘度还有利于降低循环压耗,在深井和超深井钻井时具有极大的优势。

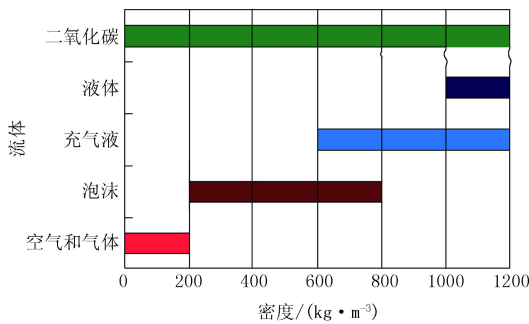


图 2 超临界 CO₂ 与常规欠平衡钻井流体密度对比

2 超临界 CO₂ 钻井技术流程

超临界 CO₂ 钻井技术主要应用于一些特殊的油气藏,如非常规油气藏、压力衰竭型油气藏等,并且多配合连续管技术使用。图 3 为超临界 CO₂ 连续管钻井示意图,CO₂ 存储于储罐内,并通过制冷机确保低温状态,确保其处于液态,便于通过高压泵注入连续管内;进入连续管的 CO₂ 随着压力的升高进入到超临界状态,从而驱动井下马达转动破岩并携带岩屑返出井筒,最后经气体净化器分离,分离后的 CO₂ 再次进入储罐从而循环利用。

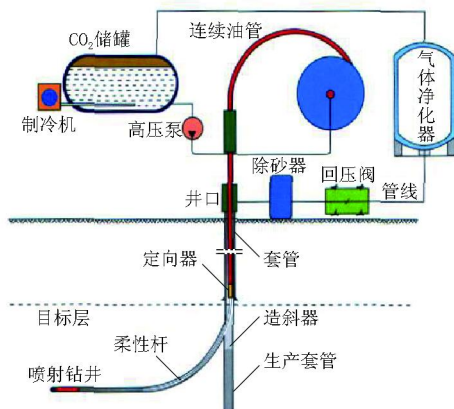


图 3 超临界 CO₂ 连续油管钻井

3 超临界 CO₂ 钻井技术的优势

超临界 CO₂ 钻井属于一种新的钻井技术,由于流体的密度、粘度比较特殊,因此体现出诸多的钻井优势。

3.1 有利于提高钻井速度,缩短建井周期

超临界 CO₂ 钻井提高钻井速度,缩短钻井周期主要来源于以下 3 个方面的优势。

3.1.1 水楔作用更强

超临界 CO₂ 钻井破岩机理与常规水射流破岩机理相类似,主要体现为空化破坏作用、水射流冲击作用、水楔作用等,但由于其密度、粘度、扩散性等方面与常规钻井液有很大的区别,因此其水楔作用更加突出^[11]。图 4 为常规水射流与超临界 CO₂ 射流破岩的一个对比示意图。当采用水射流破岩时,水流在压差作用下进入地层裂缝,并向深部流动,但受制于毛管力的作用,其进入深度有限;而采用超临界 CO₂ 钻井时,由于超临界状态下的 CO₂ 粘度小、扩散性好,并且不存在表面张力,因此不会受制于毛管力的作用,可以进入到更深的裂缝,从而提高射流能量的传递,提高破岩速度。

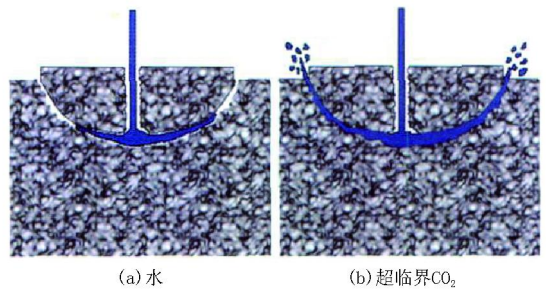


图 4 常规水射流与超临界 CO₂ 射流破岩对比

3.1.2 门限压力更低

Kollé 和 Marvin 的研究成果充分证明采用超临界 CO₂ 钻井时,破岩门限压力比常规钻井液钻井要低,其中大理石岩样的破岩门限压力比常规钻井时低约 2/3,页岩岩样的破岩门限压力比常规钻井时要低 1/2 甚至更多;同时室内试验证明,在曼柯斯页岩中利用超临界 CO₂ 作为钻井液的钻进速度是用水时的 3~4 倍,破岩所需比能仅为用水力钻井时的 1/5^[11]。

3.1.3 钻井复杂情况少

由于超临界 CO₂ 钻井时井筒流体不含水分,因此可以避免上部泥页岩地层遇水膨胀、垮塌、缩径等复杂情况,从而减少复杂情况发生的机率,减少钻井周期。

3.2 有效保护储集层,提高原油采收率

常规水基钻井液含有大量的固相颗粒,这些固相颗粒在钻进过程中会逐渐进入地层,堵塞油气流通通道;另一方面钻井液滤液渗入地层并与地层内的粘土矿物发生反应,也会堵塞孔喉,导致储层伤害、产量降低。而超临界 CO₂ 钻井时,流体里不含水分和固相,因此不会造成储层伤害;同时还能改善近井地带的油气渗流通道^[2],从而提高原油采收率。

3.3 对于低渗透油气藏、非常规油气资源意义重大

低渗透油气藏和非常规油气藏开发难度大,常规开发方式经济效益较低,而采用超临界 CO₂ 钻井技术却可以大大提高开发效率。其原因主要在于超临界 CO₂ 钻井可大大提高机械钻速、降低复杂情况发生机率、减少储层伤害、改善油气流通通道,另外由于超临界 CO₂ 表面张力为零,有利于油气资源的置换和驱替。

3.4 充分发挥连续管钻井技术优势

连续管技术起源于第二次世界大战期间,近年来发展比较迅速,但受制于连续管不能旋转、循环压耗大、携岩能力弱等问题,其应用范围受到了极大的限制,而超临界 CO₂ 钻井有望极大地发挥连续管钻井的技术优势。首先超临界 CO₂ 钻井破岩门限压力低,降低了泵压要求;其次可以利用马达进行定向井、水平井钻井;再者超临界 CO₂ 流体粘度远低于常规钻井液粘度,循环压耗小;最后低粘的超临界 CO₂ 流体易形成紊流,提高携岩效果。

3.5 经济优势

由于超临界 CO₂ 钻井钻速快,大大缩短了钻井周期,并且降低了钻井设备功率,减少了能源耗费,因此可以大大降低开发初期的钻井成本;同时超临界 CO₂ 钻井避免了储层伤害,可以节约相应的投产前期近井带储层改造费用,节约开发成本。

3.6 环境保护优势

超临界 CO₂ 不仅可以利用 CO₂ 进行强化采气,换得清洁能源,而且还可以将大量 CO₂ 注入储层,实现永久封存,并从碳排放较多的企业或国家获取碳交易方面的收益,从而进一步降低页岩气开发成本。此外,超临界 CO₂ 钻井液适应性广,与常规水基或油基钻井液相比,它容易回收利用,对环境无污染,节约了钻井液和环境治理费用。

4 超临界 CO₂ 钻井技术发展现状及趋势

4.1 流体物性研究

早在 19 世纪 50 年代,Robb W L 等人就对超临界 CO₂ 流体的粘度和扩散性进行了研究,发现超临

界 CO₂ 流体的粘度比常压气体的粘度高出一个数量级,其扩散系数远远高于液体的扩散系数,具有良好的传质性能。1972 年,Jasper J J 等人对 CO₂ 的表面张力规律进行了研究,发现当 CO₂ 变为超临界状态时,表面张力降至零。2000 年左右,Marr R 等人研究了超临界 CO₂ 的密度随温度、压力变化规律,发现其密度对温度和压力的变化十分敏感,微小的波动即可导致其密度的急剧变化。

2005 年,西南石油学院袁平等分析国外相关的状态方程模型,优选出适合于超临界 CO₂ 相态计算的 PR - EOS 模型,并从相态理论和状态方程出发,研究超临界 CO₂ 相变行为,并对超临界 CO₂ 可能导致井喷的原因进行了分析^[7]。2007 年,美国路易斯安那州立大学 Aladwani 等人进行了数值模拟研究,提出了钻井液 PVT 模型,模拟了钻井液物性参数粘度、密度、压缩因子随深度变化的规律。沈忠厚、王海柱等人通过理论分析,对比研究了超临界 CO₂ 钻井液与氮气、空气等钻井流体的密度、粘度等物性,研究结论证明超临界 CO₂ 密度变化范围较大,几乎涵盖了所有钻井液密度调控范围^[9]。

4.2 井筒温度压力规律研究

1996 年,Kabir 提出了钻井过程中超临界 CO₂ 单相流动和地层出水以后两相流的循环流动和热传导模型,计算分析了超临界 CO₂ 温度随深度的变化规律,及其在井内流动时的静液柱压力、钻柱中不同高度处的压力损耗、岩屑输送比和喷射冲击力等。2000 年,陈听宽等人对超临界压力下内螺纹管摩擦阻力特性进行研究,发现超临界 CO₂ 在相变点处摩擦阻力系数存在突变。2003 年,Tohru Yamashitah 等人在超临界压力条件下,对小直径管的流体的热传导和流动压降进行了研究。研究表明在近临界区域管中流体的流动压降随着热通量的增加而降低,并指出在传热恶化区域流动的压降降低幅度尤为明显。2003 年,Koji Okamoto 等人对强制对流换热条件下,超临界 CO₂ 流动的瞬时速度分布进行了研究。

2010 年,邱正松、王在明等人对超临界 CO₂ 钻井流体井筒温度传递特性进行了研究,建立了井眼温度传递数学模型^[6],给出了钻具内和环空流体温度计算解析式,结合具体钻具尺寸,绘制了钻具和环空中流体温度分布剖面,得到了超临界 CO₂ 钻井液温度随井深的变化规律。2010 年,沈忠厚等人以超临界 CO₂ 流体钻井为例研究了钻头渐缩喷嘴压力、温度、流速变化对声速流的影响,表明在气体钻井设计时,尤其是高压、大排量喷射钻井时,应制好井

底与钻头上游之间的压力关系,避免声速流的发生。2011年,王海柱、沈忠厚等人以 Span - Wagner 气体状态计算方法为基础,建立了井筒流动和传热数学模型^[3],从而对超临界 CO₂ 钻井井筒压力温度进行耦合计算,并对超临界 CO₂ 连续管钻井进行实例分析,同时还研究了超临界 CO₂ 连续管钻井过程中地层水侵入对井筒温度和压力的影响。2010年,王在明、邱正松等人建立了考虑井筒流体与地层换热对井筒流体温度影响的井筒传热模型,根据能量守恒推导出了井筒流体温度计算模型^[8],利用有限元推导出了井筒内 CO₂ 钻井流体的压力计算公式。

4.3 射流及破岩规律研究

美国 Tempress 公司的 J. J. Koue 等人在 2000 年时,利用 55 ~ 193 MPa 的不同射流压力对泥岩、大理岩、花岗岩等坚硬岩石进行超临界 CO₂ 射流破岩室内研究,证实超临界 CO₂ 射流破岩的门限压力比水射流要低很多,能够显著提高机械钻速^[12]。2009年,王瑞和、倪红坚等人建立了国内首套超临界 CO₂ 射流高效破岩试验装置,有效模拟了井下实际工况,已获得超临界 CO₂ 直射流、旋转射流、脉冲射流的破岩规律。

4.4 携岩规律研究

沈忠厚等人建立了临界 CO₂ 流体携岩的数学模型和物理模型^[4],研究了超临界 CO₂ 流体在水平井段的携岩规律,研究表明超临界 CO₂ 流体的携岩能力随着其密度和粘度的增加而增强,当小于某一临界密度时其携岩能力明显降低。2006年,中国石油大学(华东)的邱正松教授和王在明博士等人研制了超临界 CO₂ 钻井液循环模拟实验装置^[9],在此基础上实验研究了温度、压力以及井斜角对超临界 CO₂ 携岩的影响,并对 CO₂ 水合物形成和溶解特性进行了实验研究。

5 结语

(1) 超临界 CO₂ 钻井作为一项新兴的钻井技

术,具有诸多的优势,较大的应用范围,特别是对压力枯竭型地层以及非常规油气藏开发方面具有非常独特的优势,显示出良好的应用前景。

(2) 目前国内外对于超临界 CO₂ 钻井技术的研究更多处于理论研究和室内研究阶段,真正的现场应用屈指可数,超临界 CO₂ 钻井也还存在着一些亟待解决的问题,如出水地层 CO₂ 腐蚀问题、井口高精度压力控制问题、CO₂ 增加粘度技术的问题、钻头压降和温度控制问题以及连续管配套设备的问题。

参考文献:

- [1] 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,2011,29(3):30-35.
- [2] 段飞飞,夏宏南,文涛,等. 超临界 CO₂ 钻井技术浅析[J]. 长江大学学报(自然科学版),2010,7(3):230-231.
- [3] 王海柱,沈忠厚,李根生. 超临界 CO₂ 钻井井筒压力温度耦合计算[J]. 石油勘探与开发,2011,38(1):97-102.
- [4] 沈忠厚,王海柱,李根生. 超临界 CO₂ 钻井水平井段携岩能力数值模拟[J]. 石油勘探与开发,2011,38(2):233-236.
- [5] 李孟涛,单文文,刘先贵,等. 超临界二氧化碳混相驱油机理实验研究[J]. 石油学报,2006,27(3):80-83.
- [6] 邱正松,谢彬强,王在明,等. 超临界二氧化碳钻井流体关键技术研究[J]. 石油钻探技术,2012,40(2):1-7.
- [7] 袁平,李培武,施太和,等. 超临界二氧化碳流体引发井喷探讨[J]. 天然气工业,2006,26(3):68-70.
- [8] 王在明,邱正松,朱宽亮. 超临界二氧化碳钻井流体井筒温度传递特性[J]. 钻井液与完井液,2010,27(6):1-3.
- [9] 李良川,王在明,邱正松,等. 超临界二氧化碳钻井流体携岩特性实验[J]. 石油学报,2011,32(2):355-359.
- [10] Gupta A P, Gupta A, Langlinais J. Feasibility of supercritical carbon dioxide as a drilling fluid for deep underbalanced drilling operation[J]. SPE 96992,2005.
- [11] 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(6):743-747.
- [12] Kelle J J. Coiled-tubing drilling with supercritical carbon dioxide[J]. SPE 65534,2000.
- [13] 王海柱,沈忠厚,李根生. 地层水侵入对超临界 CO₂ 钻井井筒温度和压力的影响[J]. 石油勘探与开发,2011,(6):362-367.
- [14] 张智,施太和,吴优,等. 高酸性气井超临界态二氧化碳硫化氢的相态变化诱发钻采事故探讨[J]. 钻采工艺,2007,30(1):94-95,104.

《页岩气资源/储量计算与评价技术规范》推荐性行业标准发布实施

国土资源部科技与国际合作司消息 国土资源部 2014 年 4 月 17 日发布“国土资源部关于发布《页岩气资源/储量计算与评价技术规范》推荐性行业标准的公告【2014 年第 6 号】”。公告说:《页岩气资源/储量计算与评价技术规范》推

荐性行业标准已通过全国国土资源标准化技术委员会审查,现予批准、发布,于 2014 年 6 月 1 日起实施。该行业标准编号为:DZ/T0254-2014《页岩气资源/储量计算与评价技术规范》。