

文章编号: 1000-4092(2017)02-374-07

# 二氧化碳压裂技术研究综述\*

孙鑫<sup>1</sup>, 杜明勇<sup>1</sup>, 韩彬彬<sup>2</sup>, 孙永鹏<sup>1</sup>, 赵明伟<sup>1</sup>, 管保山<sup>3</sup>, 戴彩丽<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 重质油国家重点实验室, 山东 青岛 266580; 2. 中国石油新疆油田公司实验检测研究院采收率研究所, 新疆 克拉玛依 834000; 3. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北 廊坊 065007)

**摘要:** 二氧化碳压裂技术具有低伤害、易返排等优点, 特别适合低压低渗透、致密及水敏性强的复杂岩层, 对油层污染严重、含水率较低的储层改造效果良好。本文从技术原理、压裂液制备、特点及应用方面介绍了二氧化碳泡沫压裂技术和二氧化碳干法压裂技术, 并对超临界二氧化碳压裂技术和二氧化碳干法泡沫压裂技术两类比较特殊的二氧化碳压裂技术进行了简要介绍。图3参60

**关键词:** 二氧化碳压裂; 二氧化碳泡沫压裂; 二氧化碳干法压裂; 超临界二氧化碳压裂; 二氧化碳干法泡沫压裂; 综述  
**中图分类号:** TE357   **文献标识码:** A   **DOI:** 10.19346/j.cnki.1000-4092.2017.02.035

自1947年压裂技术首次应用于油气开发领域, 其优良的增产效果就得到了业内人士的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。传统压裂技术使用的压裂液主要是含有胍胶聚合物以及破胶剂等添加剂的水基压裂液, 我们称这种技术为水力压裂技术。长久以来, 水力压裂技术凭借其优异的造缝及携砂能力而被广泛应用于油田生产中<sup>[3-4]</sup>。

随着油气田开发技术的进步, 低渗透、致密等非常规油气资源的开发越来越受到重视。低渗透油气资源是指油气储层渗透率低, 储量丰度低, 单井产能低的油气资源<sup>[5]</sup>。我国低渗透油气资源储量丰富, 分布广泛, 约占全国已探明储量的2/3以上, 开发潜力巨大<sup>[6]</sup>。压裂技术作为低渗透油气田增产的主要措施, 已经在国内外得到了广泛的应用。

然而, 传统的水基压裂液存在破胶不完全, 返排不彻底, 在地层中滞留量大等问题, 对地层伤害严重。因此, 主要应用于非常规储层增产的新一代

低伤害压裂技术相继问世, 如混合压裂技术、高速通道压裂技术以及二氧化碳压裂技术等<sup>[7]</sup>。其中, 二氧化碳压裂技术具有低伤害、易返排等优势, 目前已经得到了广泛的关注与研究<sup>[8-9]</sup>。室内及矿场试验表明, 二氧化碳压裂技术具有很高的技术可行性以及较好的投入产出比<sup>[10]</sup>。目前国内外应用的二氧化碳压裂技术主要分为二氧化碳泡沫压裂技术、二氧化碳干法压裂技术以及一些特殊的二氧化碳压裂技术(如超临界二氧化碳压裂技术、二氧化碳干法泡沫压裂技术等)。

## 1 二氧化碳泡沫压裂技术

二氧化碳泡沫压裂液是水基压裂液的一种。二氧化碳泡沫压裂技术最早在20世纪70年代于美国开始研究, 并从80年代正式发展起来<sup>[11-12]</sup>; 国内二氧化碳泡沫压裂技术开始较晚, 直至1999年才针对这项技术开展研究<sup>[13]</sup>。近年来, 二氧化碳泡沫压裂

\* 收稿日期: 2016-08-01; 修改日期: 2016-10-01。

**基金项目:** 国家科技重大专项项目“CO<sub>2</sub>无水压裂液增稠机理与材料研发”(项目编号2017ZX05023003-002), 国家杰出青年科学基金“提高采收率与油田化学”(项目编号51425406)。

**作者简介:** 孙鑫(1993-), 男, 中国石油大学(华东)油气田开发专业在读博士研究生(2016-), 研究方向为提高采收率与采油化学, E-mail: upcsunxin@163.com。戴彩丽(1971-), 女, 教授, 博士生导师, 本文通讯联系人, 主要从事油田化学教学和科研工作, 通讯地址: 266580 山东省青岛市经济技术开发区长江西路66号中国石油大学(华东)石油工程学院, 电话: 0532-86981183, E-mail: daicl306@163.com。

技术发展迅速,目前已在国内多个油田的油气井中成功应用,应用前景良好<sup>[14-17]</sup>。

### 1.1 二氧化碳泡沫压裂技术原理

二氧化碳泡沫压裂技术通常使用二氧化碳、起泡剂、增稠剂、助排剂、破胶剂及其他化学添加剂作为压裂介质<sup>[18-19]</sup>。由于压裂液中加入了增稠剂,增加了体系的造壁能力,因此二氧化碳泡沫压裂具有滤失系数低、滤失量小的特点。另外,由于体系中的泡沫所具有的独特结构,会使得在砂比较高的情况下体系依然能依靠自身的能力使砂子的沉降速度非常小,具有很好的悬砂及携砂性能。由于压裂液本身的液相含量较少,滤失量小,因此渗入地层的液体也相对较少。加之压裂液自身具有返排迅速等特点,使得液体与产层的接触时间短,从而最大限度地避免黏土矿物的水化和运移,因此适用于水敏地层的压裂增产<sup>[20]</sup>。

### 1.2 二氧化碳泡沫压裂液的制备

二氧化碳泡沫压裂液主要由聚合物、交联剂、表面活性剂、水和二氧化碳组成。目前常用的聚合物有羟丙基胍胶、羟甲基胍胶与羟甲基羟丙基胍胶等;国内使用最广泛的聚合物是羟丙基胍胶;选用的交联剂为酸性交联剂,主要是由于二氧化碳压裂液呈酸性,pH值3~4,因此最好选用适合于羟丙基胍胶的酸性交联剂;压裂液中的表面活性剂主要有

增大二氧化碳在水中的溶解能力以及起泡和助排的作用,通常分为阴离子、阳离子、两性离子及非离子四种,其中阴离子表面活性剂起泡性能好,用量少,可作为起泡剂的主剂,但也存在泡沫半衰期较短,稳泡性欠佳等不足,因此压裂液中的表面活性剂通常复配使用,以应对复杂的地下储层及流体状况<sup>[21-22]</sup>。

二氧化碳泡沫压裂施工的地面流程图如图1所示。配制胍胶溶液,在混砂车内将胍胶溶液与砂混匀,通过压裂泵车泵输。罐车中的二氧化碳通过管汇进入到泵车,进而泵送到井口。两台泵车分别泵出液态二氧化碳和胍胶溶液,通过控制流量,使二者进入混合器混合均匀。该混合液向井下注入过程中温度逐渐升高,二氧化碳开始气化形成气液两相混合液,其中二氧化碳为气相,胍胶溶液为液相。气液两相流体最终在达到目的地层之前形成二氧化碳泡沫压裂液<sup>[23-24]</sup>。

### 1.3 二氧化碳泡沫压裂技术特点

泡沫由气液两相组成,由于二氧化碳泡沫流体的构成独特,使二氧化碳泡沫压裂液具有如下的良好性能<sup>[25-27]</sup>。(1)滤失量低,对油气层的伤害小。二氧化碳泡沫压裂液中水的用量很少,主要以泡沫形式存在。泡沫进入近缝基质后,由于贾敏效应,气相在喉道处渗流困难。因此,大大降低了进入油气

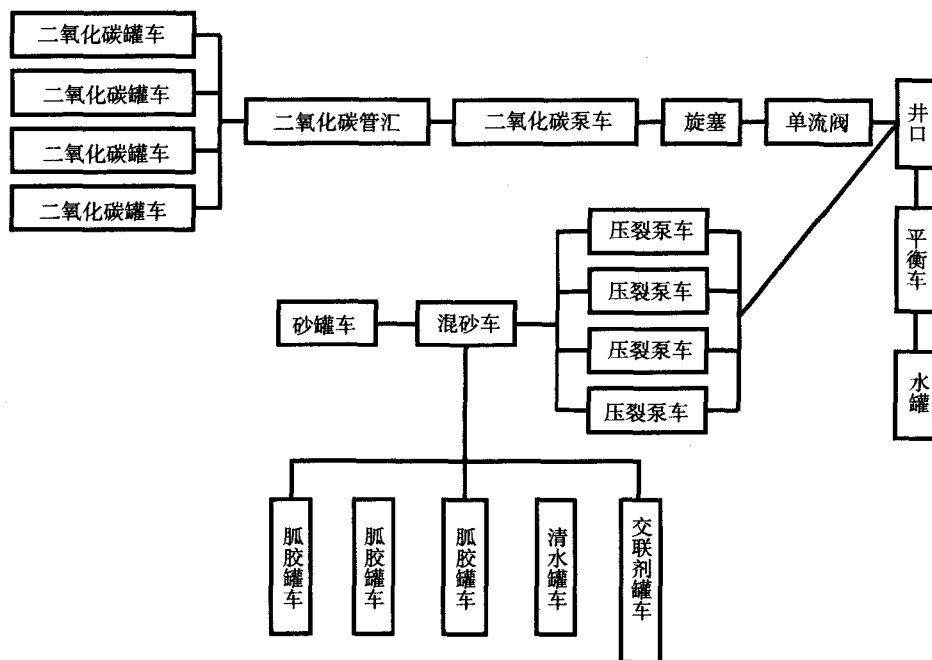


图1 二氧化碳泡沫压裂施工流程图

层的液体量,进而减少滤失量,降低压裂液对储层渗流通道造成的伤害。(2)抑制黏土膨胀,有效解堵。在储层温度和压力下,二氧化碳易溶于地层水,进而形成酸性溶液,pH值为3~4,是抑制黏土膨胀的最佳pH值,此时黏土颗粒收缩,渗流通道增大,对解堵有一定的帮助。同时由于形成的液体酸性较低,不足以溶解钙、镁、铁等矿物成分,因此可以减少压裂过程中沉淀的产生。(3)压裂液黏度高,压裂效果好。二氧化碳泡沫压裂液黏度高,可以有效提高砂比,携砂性和抗剪切性好,有利于深井和较大规模的压裂作业。(4)界面张力低,返排迅速。压裂液中的起泡剂是表面活性剂,使得压裂液的界面张力是清水的20%~30%,压裂液的前缘在多孔介质中接触油相的过程中,短时间内水相夹在气相和油相之间,降低了气水相和油水相的表/界面张力,有利于气水相的返排和油水相的运移。同时,二氧化碳在储层中气化后体积迅速膨胀,增大返排能量,也有助于返排效率的提高。(5)二氧化碳溶于原油,降低原油流动阻力。在储层条件下,二氧化碳在原油中溶解性好,可有效降低储层原油的黏度,减小渗流阻力,进而提高油井产能。(6)适用于高压地层。与氮气泡沫压裂液相比,二氧化碳泡沫压裂液的液柱压力高,可以显著降低井口的压力,因此二氧化碳泡沫压裂液也适用于深层、高压地层的压裂作业。

#### 1.4 二氧化碳泡沫压裂技术矿场应用

国外早在20世纪60年代就对泡沫压裂液展开了相关研究工作,目前国外泡沫压裂液施工已非常普遍,且压裂成功率及压裂后增产效果均十分显著。20世纪90年代,美国和加拿大就有90%的气井和30%的油井采用二氧化碳泡沫压裂技术,且该技术的市场份额还在不断增加<sup>[28-29]</sup>。

虽然国内二氧化碳泡沫压裂技术相比欧美地区起步较晚,但目前也已经成功在矿场开展了应用<sup>[30]</sup>。2004年,二氧化碳泡沫压裂液在永乐油田葡萄花油层三口井进行了试验,采用石英砂为支撑剂。压裂后初期增产效果明显,截至2004年10月底,单井平均日增液5.0 t,日增油4.2 t,有效期180 d,累计增油922 t。压后初期,二氧化碳压裂增油强度明显好于普通压裂和多裂缝压裂的效果,但二氧化碳压裂后产量递减幅度较快,因此做好压后保护工

作是下一阶段工作的重点。同时,应该尽快发展不动管柱多层压裂工艺技术,减小选井难度,从而促进二氧化碳压裂的广泛应用<sup>[31]</sup>。长庆油田公司先后在榆林、苏里格、靖边等天然气井上也开展了一系列二氧化碳泡沫压裂研究,共实施了21口井23个层位,深度3000~3500 m,大多数井在压裂后取得了明显的增产效果<sup>[22]</sup>。大庆油田杏南试验区的三口井经过二氧化碳泡沫压裂施工后也表现出良好的增产效果,经济效益可观<sup>[23]</sup>。

## 2 二氧化碳干法压裂技术

### 2.1 二氧化碳干法压裂技术原理

二氧化碳干法压裂技术使用液态二氧化碳或添加其他化学添加剂作为压裂介质。二氧化碳干法压裂液中不含任何水<sup>[32]</sup>,添加的化学剂主要是在二氧化碳中溶解性能好、可以增大液态二氧化碳黏度的增黏剂<sup>[33-34]</sup>。依靠液态二氧化碳的造壁性,在储层中形成一条动态裂缝,为油气流动提供一条导流能力较高的渗流通道。二氧化碳溶于原油,可以大幅降低原油黏度,增加溶解气驱的能量,同时可以溶解在油层的水中形成碳酸,抑制黏土矿物膨胀,利于返排,从而达到增产改造的目的。

### 2.2 二氧化碳干法压裂技术特点

从本质上来讲,二氧化碳干法压裂使用的压裂液是非水基压裂液,具有多种水基压裂液所不具有的如下优点<sup>[32,35-37]</sup>。(1)对地层伤害极小。二氧化碳干法压裂技术可以完全避免常规水基压裂液中的水相入侵油气层而产生的伤害,压裂液中残渣少,可以保证裂缝面和导流床的清洁。(2)返排快,排液时间短,施工成本低。地层压力释放后,二氧化碳气体膨胀,可以实现压裂液快速返排,排液时间短,施工现场不需要压裂罐,返排压裂液的收集及处理等相关维护费用都可以省去。(3)可以降低原油黏度。二氧化碳在原油中溶解度大,溶于原油后可以大大降低原油黏度,有利于储层原油渗流。(4)可以高效置换甲烷。二氧化碳在页岩层的吸附能力远远大于甲烷,因此可以有效替换储层中的甲烷,提高单井产量,同时可以将二氧化碳封存在地层中减少温室效应。(5)二氧化碳流动性强。压裂过程中,二氧化碳易于流入储集层中的微裂缝,从而更好地连通储集层中的天然裂缝。

液态二氧化碳干法压裂技术具有以上优点的同时,还存在着一些缺点<sup>[32,35]</sup>。一方面,液态二氧化碳压裂液黏度低,携砂能力差,降滤失能力低,摩阻高,不利于压裂造缝,产生的裂缝比传统水基压裂的窄,影响裂缝导流能力,同时由于黏度较低,漏失问题相对严重,因而只适合于特低渗、超低渗或致密储层的改造;另一方面,压裂过程中二氧化碳压裂液的相态变化复杂,由于压力、温度导致的相变问题难以准确预测与控制,有待实验室的进一步研究。因此,研究溶解效果好的增黏剂以提高二氧化碳压裂液黏度与研究压裂液的相态变化控制过程就变得非常重要<sup>[38-41]</sup>。

### 2.3 二氧化碳干法压裂工艺

二氧化碳干法压裂技术地面管汇图如图2所示。将存有加压降温后的液态二氧化碳储罐并联,储罐中的二氧化碳保持在 $-34.4^{\circ}\text{C}$ 、 $1.4\text{ MPa}$ 条件下;通过二氧化碳泵车将液态二氧化碳泵入到装有支撑剂的密闭混砂车中,对支撑剂进行预冷;对高压管线、井口试泵,管线试压,测试结果符合要求后,使用压裂泵车将温度为 $-25\sim-15^{\circ}\text{C}$ 的液态二氧化碳泵入地层;地层被压开后打开密闭混砂设备注入支撑剂,之后顶替直至支撑剂完全进入地层,停泵;压裂结束后关井 $90\sim 150\text{ min}$ ;控制返排速度进行放喷返排,最大限度利用二氧化碳能量返排的同时防止吐砂,并使用二氧化碳检测仪监测出口处二氧化碳浓度的变化情况<sup>[42]</sup>。

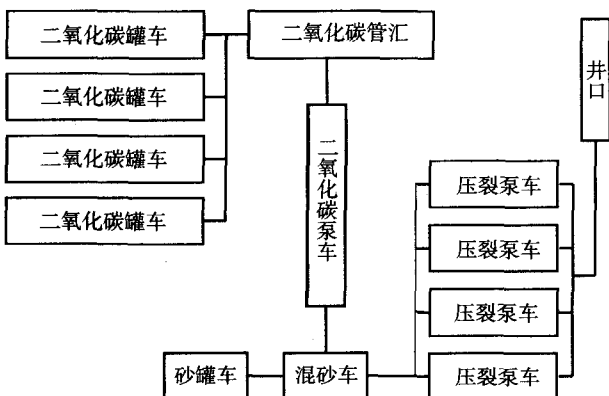


图2 二氧化碳干法压裂技术地面管汇图

二氧化碳干法压裂过程中,相态变化情况复杂<sup>[43-45]</sup>,如图3中点1~点6所示<sup>[35]</sup>。储罐中的二氧化碳以液态形式存储,如点1;经过增压泵车后液态

二氧化碳压力和温度升高,直至点2条件下,注入高压泵;压裂泵出口处液态二氧化碳压力进一步升高直至施工压力(点3);然后二氧化碳被泵入井底,二氧化碳的压力与温度都进一步增加(点4);二氧化碳进入储层裂缝后,温度、压力趋于储层条件,压力下降,温度上升,处于超临界状态(点5);二氧化碳压裂液返排,二氧化碳最终以气态形式返排至地面(点6),另外有一部分被储层吸收。

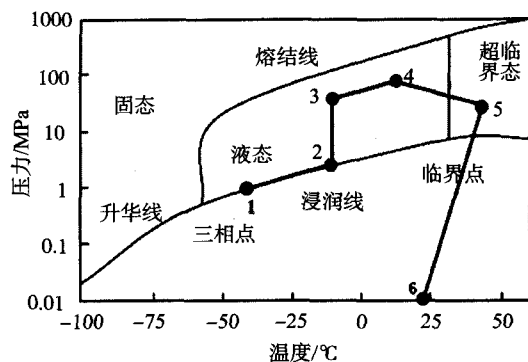


图3 二氧化碳干法压裂过程中二氧化碳相态图

### 2.4 二氧化碳干法压裂技术矿场应用

二氧化碳干法压裂技术自20世纪80年代在北美首次现场应用以来,经过不断的改革与完善,目前已广泛应用于渗透率 $(0.1\sim 10000)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的各种地层中,在超过1000口井中进行了压裂作业,最大井深超过3000 m,井底温度在 $10\sim 100^{\circ}\text{C}$ <sup>[35,46]</sup>。

我国苏里格气田属于低压、低渗、低丰度的“三低”气藏,水敏性强,压裂后返排困难,基本没有自然产能。针对这一情况,2013年长庆油田对苏里格气田的一口天然气井进行了二氧化碳干法压裂作业,共计入井液态二氧化碳 $254\text{ m}^3$ ,施工排量每分钟 $2\sim 4\text{ m}^3$ ,加入陶粒 $2.8\text{ m}^3$ ,平均砂比 $3.48\%$ ,最高砂比达 $9\%$ ,开创了国内无水压裂的先河,填补了国内技术空白<sup>[36,47-49]</sup>。

## 3 特殊二氧化碳压裂技术

### 3.1 超临界二氧化碳压裂技术

常温常压下,二氧化碳为无色无味的气体,当温度压力大于其临界值( $T_c=31.1^{\circ}\text{C}$ 、 $p_c=7.38\text{ MPa}$ )时,二氧化碳就会达到超临界状态,成为超临界二氧化碳流体<sup>[50-51]</sup>。二氧化碳的相态图如图3所示<sup>[35]</sup>。在压裂施工的高压高温条件下,二氧化碳很容易达

到超临界状态。目前,国内外很多课题组已经对超临界二氧化碳钻井、超临界二氧化碳驱油等技术进行了深入的探索与研究<sup>[52-54]</sup>。

超临界流体既不同于气体,也不同于液体,它具有许多独特的物理化学性质。超临界二氧化碳的密度接近液体,黏度接近气体,而且扩散系数较高,表面张力接近于0,具有很强的渗透能力。

超临界二氧化碳压裂技术是二氧化碳干法压裂技术的一种特殊形式。同普通液态二氧化碳流体相比,超临界二氧化碳流体具有很多优势。超临界二氧化碳流体密度大,溶剂化能力强,能有效溶解近井地带的重油组分,从而增加油气通道的渗流能力;能抑制黏土膨胀,使黏土矿物脱水,颗粒变小,增大地层孔隙,提高渗透率;超临界二氧化碳的表面张力几乎为零,对页岩层的吸附能力远远大于甲烷在页岩中的吸附能力,从而能高效置换地层中的甲烷。超临界二氧化碳压裂技术具备传统二氧化碳干法压裂技术的全部优点,而且增产效果更好,施工压力小,对混砂车要求低,是二氧化碳压裂技术的研究趋势。

然而,由于超临界二氧化碳的黏度较低,因此其作为压裂液的可靠性也一直存有争议,特别是在高砂比情况下其对支撑剂的携带方面,另外对其本身在地层中的滤失性能也知之甚少。虽然目前国内研究人員合成了用于超临界二氧化碳增黏的聚合物及表面活性剂,但均因增黏效果不理想或不能满足现场应用条件而没有真正用于现场施工。综上所述,超临界二氧化碳压裂液技术虽然具有很多优势,但目前也存在技术上的不足,距离将来的大规模现场应用还有较长的路要走<sup>[55-59]</sup>。

### 3.2 二氧化碳干法泡沫压裂技术

目前,还有一类比较特殊的二氧化碳干法压裂技术,即二氧化碳干法泡沫压裂技术<sup>[60]</sup>。该技术利用起泡剂在液态二氧化碳中形成氮气泡沫,既能增加压裂液黏度又能保护液态二氧化碳不被破坏。

非常规二氧化碳泡沫压裂液使用的是一种液态/超临界二氧化碳可溶性起泡剂,可保持压裂液的稳定性,不留残留物质。在压裂过程中氮气为惰性气体,二氧化碳可以以液态或超临界状态存在。非常规泡沫比液态二氧化碳具有更高的黏度,可以更好地控制滤失;摩阻小于液态二氧化碳压裂液摩

阻,支撑剂可以在较低的泵送速度下泵入地层。这种非常规泡沫压裂处理的典型对象是对压裂液敏感、处于低压状态下的干气井。

## 4 结论

二氧化碳泡沫压裂技术相对于常规胍胶压裂液而言,胍胶使用量很少,能减小对低渗透油气田的伤害、减少储层污染,解决常规水力压裂中存在的聚合物残渣多、水敏严重、排液困难等问题。特别适合低压低渗透、致密及水敏性强的复杂岩层,对油层污染严重、含水率较低的储层改造效果非常明显。

二氧化碳干法压裂技术、超临界二氧化碳压裂技术及二氧化碳干法泡沫压裂技术均完全不含水,不会对水敏地层造成伤害,可以有效降低储层原油的黏度,提高原油渗流能力,进而提高采收率。但压裂液黏度较低,只适合于低渗储层,如何进一步提高高压裂液黏度是下一步研究的重点。

### 参考文献:

- [1] SLEYTR U B, ROBARDS A W. Freeze-fracturing: a review of methods and results [J]. *J Microsc*, 1977, 111(1): 77-100.
- [2] BARATI R, LIANG J T. A review of fracturing fluid systems used for hydraulic fracturing of oil and gas wells [J]. *J Appl Polym Sci*, 2014, 131(16): 318-323.
- [3] VENGOSH A, JACKSON R B, WARNER N, et al. A critical review of the risks to water resources from unconventional shale gas development and hydraulic fracturing in the United States [J]. *Environ Sci Technol*, 2014, 48(15): 8334-8348.
- [4] KAHRILAS G A, BLOTEVOGEL J, STEWART P S, et al. Biocides in hydraulic fracturing fluids: a critical review of their usage, mobility, degradation, and toxicity [J]. *Environ Sci Technol*, 2014, 49(1): 16-32.
- [5] CUI X, BUSTIN A M M, BUSTIN R M. Measurements of gas permeability and diffusivity of tight reservoir rocks: different approaches and their applications [J]. *Geofluids*, 2009, 9(3): 208-223.
- [6] 胡文瑞. 中国低渗透油气的现状与未来[J]. *中国工程科学*, 2009, 11(8): 29-37.
- [7] 李庆辉, 陈勉, 金衍, 等. 新型压裂技术在页岩气开发中的应用[J]. *特种油气藏*, 2012, 19(6): 1-7.
- [8] 李保振, 李相方, SEPEHRNOORI K. 低渗油藏CO<sub>2</sub>驱中注采方式优化设计[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2010, 32(2): 101-107.
- [9] 郭平, 李士伦, 杜志敏, 等. 低渗透油藏注气提高采收率评价

- [J]. 西南石油学院学报, 2002, 24(5): 46-50.
- [10] 段百齐, 王树众, 沈林华, 等. 干法压裂技术在实施中的经济分析[J]. 天然气工业, 2006, 26(8): 104-106.
- [11] PHILLIPS A M, COUCHMAN D D, WILKE J G. Successful field application of high-temperature rheology of CO<sub>2</sub> foam fracturing fluids [C]. //Low Permeability Reservoirs Symposium, Society of Petroleum Engineers, 1987.
- [12] 朱洪涛, 陈冬林, 刘华杰, 等. CO<sub>2</sub>泡沫压裂工艺技术在川西低渗致密气藏的应用[J]. 钻采工艺, 2009, 32(1): 53-54.
- [13] 丛连铸, 吴庆红, 赵波, 等. CO<sub>2</sub>泡沫压裂技术在煤层气开发中的应用前景[J]. 中国煤层气, 2004, 1(2): 15-17.
- [14] 曾雨辰. 中原油田二氧化碳压裂改造初探[J]. 天然气勘探与开发, 2005, 28(2): 27-31.
- [15] LIU He, WANG Feng, ZHANG Jing, et al. Fracturing with carbon dioxide: application status and development trend [J]. Pet Explor Dev, 2014, 41(4): 513-519.
- [16] 王振铎, 王晓泉, 卢拥军. 二氧化碳泡沫压裂技术在低渗透低压气藏中的应用[J]. 石油学报, 2004, 25(3): 66-70.
- [17] 郑存川, 唐晓东, 黄元东, 等. CO<sub>2</sub>在油田开发中的应用[J]. 油田化学, 2011, 28(3): 349-354.
- [18] 陈挺, 袁青, 李风光, 等. 国内二氧化碳泡沫压裂现场应用及室内研究进展[J]. 石油化工应用, 2016, 35(4): 10-14.
- [19] 周继东, 朱伟民, 卢拥军, 等. 二氧化碳泡沫压裂液研究与应[J]. 油田化学, 2004, 21(4): 316-319.
- [20] 闫鹏, 文贤利, 巩家芹. 二氧化碳泡沫压裂的分析与研究[J]. 新疆石油科技, 2013, 23(4): 21-23.
- [21] 高志亮, 段玉秀, 吴金桥, 等. 酸性交联CO<sub>2</sub>泡沫压裂液起泡剂的研制及其性能研究[J]. 钻井液与完井液, 2013, 30(5): 79-81.
- [22] 袁辉, 马喜平, 代磊阳, 等. 泡沫压裂液常用起泡剂研究综述[J]. 化工管理, 2015, 1(9): 1-2.
- [23] 马健, 张春龙. CO<sub>2</sub>压裂技术在杏南试验区的应用研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(3): 98-101.
- [24] 雷群, 李宪文, 慕立俊, 等. 低压低渗砂岩气藏CO<sub>2</sub>压裂工艺研究与试验[J]. 天然气工业, 2005, 25(4): 113-115.
- [25] 金春余. 扶扬油层CO<sub>2</sub>泡沫压裂后产能效果分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013(5): 76.
- [26] 宋振云, 李振铎, 李康民, 等. 长庆上古生界气层CO<sub>2</sub>增能压裂工艺[J]. 石油钻采工艺, 2002, 24(4): 50-52.
- [27] 邵艳梅. 二氧化碳压裂增产技术[J]. 油气田地面工程, 2006, 25(6): 17.
- [28] 宫长利. 二氧化碳泡沫压裂理论及工艺技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2009: 2-3.
- [29] 杨发, 汪小宇, 李勇. 二氧化碳压裂液研究及应用现状[J]. 石油化工应用, 2014, 33(12): 9-12.
- [30] 郑新权. 长庆上古生界气藏CO<sub>2</sub>泡沫压裂技术研究[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(4): 111-113.
- [31] 潘晓梅, 沈文刚. 二氧化碳压裂增产技术在低渗透油田的尝试[J]. 特种油气藏, 2005, 12(6): 85-87.
- [32] 张强德, 王培义, 杨东兰. 储层无伤害压裂技术——液态CO<sub>2</sub>压裂[J]. 石油钻采工艺, 2002, 24(4): 47-50.
- [33] LANCASTER G W, BARRIANIOS C, LI E, et al. High phase volume liquid CO fracturing fluids [C]. //Annual Technical Meeting, Petroleum Society of Canada, 1987.
- [34] GREENHORN R E, LI E. Investigation of high phase volume liquid CO fracturing fluids [C]. //Annual Technical Meeting, Petroleum Society of Canada, 1985.
- [35] 刘合, 王峰, 张劲, 等. 二氧化碳干法压裂技术——应用现状与发展趋势[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(4): 466-472.
- [36] 韩烈祥. CO<sub>2</sub>干法加砂压裂技术试验成功[J]. 钻采工艺, 2013, 36(5): 99.
- [37] 周波, 叶凯, 杨风柱. 试析液态CO<sub>2</sub>压裂技术及在油田增产中的运用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 32(6): 114.
- [38] BAE J H, IRANI C A. A laboratory investigation of viscosified CO<sub>2</sub> process [J]. SPE Adv Technol Ser, 1993, 1(1): 166-171.
- [39] ENICK R M, BECKMAN E J, SHI C, et al. Direct thickeners for carbon dioxide [C]. //SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium. Society of Petroleum Engineers, 2000.
- [40] HUANG Zhihua, SHI Chunmei, XU Jianhang, et al. Enhancement of the viscosity of carbon dioxide using styrene/fluoroacrylate copolymers [J]. Macromolecules, 2000, 33 (15) : 5437-5442.
- [41] ENICK R M, BECKMAN E J, HAMILTON A. Novel CO<sub>2</sub>-thickeners for improved mobility control [D]. Pittsburgh: University of Pittsburgh (US), 2001.
- [42] LILLIES A T, KING S R. Sand fracturing with liquid carbon dioxide [C]. //SPE Production Technology Symposium, Society of Petroleum Engineers, 1982.
- [43] NIEZGODA T, MIEDZIŃSKA D, MAŁEK E, et al. Study on carbon dioxide thermodynamic behavior for the purpose of shale rock fracturing [J]. Bull Pol Acad Sci: Tech Sci, 2013, 61(3): 605-612.
- [44] 陆友莲, 王树众, 沈林华, 等. 纯液态CO<sub>2</sub>压裂非稳态过程数值模拟[J]. 天然气工业, 2008, 28(11): 93-95.
- [45] PERERA M S A, RANJITH P G, AIREY D W, et al. Sub- and super-critical carbon dioxide flow behavior in naturally fractured black coal: an experimental study [J]. Fuel, 2011, 90 (11) : 3390-3397.
- [46] HARRIS R P, AMMER J, PEKOT L J, et al. Liquid carbon dioxide fracturing for increasing gas storage deliverability [C]. // SPE Eastern regional meeting, 1998: 161-175.
- [47] 张新民. 二氧化碳干法加砂压裂在长庆首获成功[N]. 中国石油报, 2013-09-04(001).
- [48] 苏伟东, 宋振云, 马得华, 等. 二氧化碳干法压裂技术在苏里格气田的应用[J]. 钻采工艺, 2011, 33(4): 39-40.
- [49] 谢平, 侯光东, 韩静静. CO<sub>2</sub>压裂技术在苏里格气田的应用

- [J]. 断块油气田, 2009, 16(5): 104-106.
- [50] SPAN R, WAGNER W. A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa [J]. *J Phys Chem Ref Data*, 1996, 25(6): 1509-1596.
- [51] CHENG Yuxiong, LI Gensheng, WANG Haizhu, et al. Pressure boosting effect in perforation cavity during supercritical carbon dioxide jet fracturing [J]. *Atomization Sprays*, 2013, 23(5): 463-474.
- [52] 程宇雄, 李根生, 王海柱, 等. 超临界CO<sub>2</sub>连续油管喷射压裂可行性分析[J]. *石油钻采工艺*, 2013, 35(6): 73-77.
- [53] 程宇雄, 李根生, 王海柱, 等. 超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂孔内增压机理[J]. *石油学报*, 2013, 34(3): 550-555.
- [54] 王海柱, 李根生, 沈忠厚, 等. 超临界CO<sub>2</sub>钻井与未来钻井技术发展[J]. *特种油气藏*, 2012, 19(2): 1-5.
- [55] TERRY R, ZAID A, ANGELOS C, et al. Polymerization in supercritical CO<sub>2</sub> to improve CO<sub>2</sub>/oil mobility ratios [R]. SPE 16270, 1987.
- [56] DESIMONE J M, MAURY E, MENCELOGLU Y, et al. Dispersion polymerizations in supercritical carbon dioxide [J]. *Science*, 1994, 265(5170): 356-359.
- [57] TAPRIYAL D. Design of non-fluorous CO<sub>2</sub> soluble compounds [D]. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 2009.
- [58] EASTOE J, GOLD S, ROGERS S, et al. Designed CO<sub>2</sub>-philes stabilize water in carbon dioxide microemulsions [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2006, 118(22): 3757-3769.
- [59] ENICK R. The effect of hydroxy aluminum disoaps on the viscosity of light alkanes and carbon dioxide [R]. SPE 21016, 1991.
- [60] 许贞, 李莉. 非常规发泡技术在油田现场的应用: 液态二氧化碳压裂技术的推广[J]. *石油石化节能*, 2005, 21(1): 19-20.

### Review on Carbon Dioxide Fracturing Technology

SUN Xin<sup>1</sup>, DU Mingyong<sup>1</sup>, HAN Binbin<sup>2</sup>, SUN Yongpeng<sup>1</sup>, ZHAO Mingwei<sup>1</sup>, GUAN Baoshan<sup>3</sup>, DAI Caili<sup>1</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), State Key Laboratory of Heavy Oil, Qingdao, Shandong 266580, P R of China; 2. Institute of Recovery, Research Institute of Experimental Testing, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, P R of China; 3. Langfang Filial of Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Langfang, Hebei 065007, P R of China)

**Abstract:** Carbon dioxide fracturing technology had the advantages of low damage and easy flowback. It was especially suitable for low pressure, low permeability, dense and strong water sensitivity complex reservoir. This technology had a good effect on formations with low water cut and serious oil pollution. In this paper, carbon dioxide fracturing and carbon dioxide foam fracturing technology were introduced from the aspects of technical principle, fracturing fluid preparation, characteristics and applications. In addition, two kinds of special fracturing technique including super critical carbon dioxide fracturing and liquid carbon dioxide foam fracturing were also introduced.

**Keywords:** carbon dioxide fracturing; carbon dioxide foam fracturing; liquid carbon dioxide fracturing; supercritical carbon dioxide fracturing; liquid carbon dioxide foam fracturing; review