

# 页岩气 CO<sub>2</sub> 泡沫压裂技术

周长林<sup>1</sup> 彭欢<sup>1,2</sup> 桑宇<sup>1</sup> 冉立<sup>1</sup> 刘炼<sup>3</sup> 李松<sup>1</sup>

1. 中国石油西南油气田公司工程技术研究院 2. 页岩气开采与评价四川省重点实验室

3. 重庆页岩气勘探开发有限责任公司

周长林等. 页岩气 CO<sub>2</sub> 泡沫压裂技术. 天然气工业, 2016, 36(10): 70-76.

**摘要** 页岩气开发过程中不仅要注重产量的突破, 还应加强对节水/无水压裂等技术的攻关, 以确保水资源紧缺地区页岩气开发的有序进行。为此, 比较了 CO<sub>2</sub> 泡沫压裂与滑溜水压裂、其他节水/无水压裂技术的特点与优势, 认为 CO<sub>2</sub> 泡沫压裂技术能大幅减少用水量, 通过增加施工排量 and 规模可弥补其在改造体积方面与滑溜水压裂所存在的差距, 设备改造要求、混注工艺、施工难度较其他节水/无水压裂低, 安全风险小; 分析了 CO<sub>2</sub> 泡沫压裂液物理特性, 由于 CO<sub>2</sub> 相态变化复杂, 储层条件下处于超临界状态的 CO<sub>2</sub>, 与水基压裂液形成 CO<sub>2</sub> 泡沫; 研究了 CO<sub>2</sub> 泡沫压裂施工设备及工艺技术, 认为在施工设备、分段工艺、施工步骤、安全保障方面, 增加了液态 CO<sub>2</sub> 泵注流程, 需考虑 CO<sub>2</sub> 的特殊性, 制定相应的施工保障、安全预防措施。此外, 还调研了 CO<sub>2</sub> 泡沫压裂在美国 Ohio 和 Lewis、加拿大 Monteny、延长油田页岩气开发中的应用情况, 发现其增产改造效果明显。所取得的研究成果为四川盆地页岩气的压裂改造提供了新的思路和方法, 也为水资源紧缺地区页岩气开发提供了重要的技术储备与补充。

**关键词** 页岩气 CO<sub>2</sub> 泡沫压裂 物理性质 压裂设备 分段工艺 施工步骤 现场应用

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2016.10.009

## CO<sub>2</sub> foam fracturing technology in shale gas development

Zhou Changlin<sup>1</sup>, Peng Huan<sup>1,2</sup>, Sang Yu<sup>1</sup>, Ran Li<sup>1</sup>, Liu Lian<sup>3</sup>, Li Song<sup>1</sup>

(1. Engineering and Technology Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu, Sichuan 610017, China; 2. Key Laboratory of Shale Gas Evaluation and Production of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610017, China; 3. Chongqing Shale Gas Exploration and Development Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 36, ISSUE 10, pp.70-76, 10/25/2016. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

**Abstract:** Shale gas development in areas with deficient water resources should focus on water-conservative or water-free fracturing technologies besides production. In this paper, first, CO<sub>2</sub> foam fracturing was compared with slickwater fracturing and other water-conservative or water-free fracturing technologies in terms of their technical characteristics and advantages. It is indicated that CO<sub>2</sub> foam fracturing is advantageous in that much less water is consumed; that its stimulated reservoir volume (SRV) can be as good as that of slickwater fracturing if its displacement rate and volume are increased; and that it presents lower requirements for equipment reformation, less difficulty in mixed injection and operations, and lower safety risks compared with other water-conservative or water-free fracturing technologies. Second, the physical properties of CO<sub>2</sub> foam fracturing fluid were analyzed. It is shown that CO<sub>2</sub> in the reservoir conditions is at a supercritical state due to the complexity of CO<sub>2</sub> phase change, and it, together with water-based fracturing fluid, forms CO<sub>2</sub> foam. Third, the equipment and technologies for CO<sub>2</sub> foam fracturing were reviewed. In view of equipment, staged technology, operational procedure and security insurance, liquefied CO<sub>2</sub> pumping process is added, so the special properties of CO<sub>2</sub> should be considered and corresponding security precautions should be taken. Finally, the application of CO<sub>2</sub> foam fracturing in Ohio and Lewis of the USA, Monteny of Canada, and Yanchang of China was investigated, and remarkable stimulation results were obtained. The study results provide a new idea and method for fracturing stimulation of shale gas in the Sichuan Basin, as well as important technical reserves and supplement for shale gas development in water shortage areas.

**Keywords:** Shale gas; CO<sub>2</sub> foam fracturing; Physical properties; Fracturing equipment; Staged technology; Operational procedure; Field application

**基金项目:** 中国石油西南油气田公司科研计划“CO<sub>2</sub> 泡沫压裂实验评价及工艺技术研究”(编号: 2015SY-03)。

**作者简介:** 周长林, 1979年生, 工程师, 硕士; 从事压裂酸化工艺技术研究及应用工作。地址: (610017) 四川省成都市青羊区小关庙后街25号。电话: (028) 86010426。ORCID: 0000-0003-0027-4418。E-mail: zhouchanglin@petrochina.com.cn

北美地区在页岩气勘探开发中所取得巨大的成功,使页岩气成为了目前全球最热门的非常规天然气资源,世界各大油气资源国都掀起了页岩气勘探开发的热潮,中国也加入到“页岩气革命”中,期望复制北美页岩气的成功,从而缓解我国天然气供需矛盾,调整能源结构,促进节能减排。页岩气开发过程中不仅应注重产量的突破,还应加强对节水/无水压裂等技术的攻关与突破,掌握适用于我国页岩气开发的增产改造核心技术<sup>[1]</sup>,为页岩气的压裂改造提供新的思路和方法,以确保页岩气开发有序进行。

## 1 研究背景

### 1.1 天然气需求量大

2015年我国天然气产量为 $1\ 318 \times 10^8 \text{ m}^3$ (不含煤层气),还存在大约 $600 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右的供应缺口需要依靠进口天然气补充<sup>[2]</sup>,预计到2020年,国内天然气缺口将达 $1\ 000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。我国天然气供不应求的局面将长期存在,加快包括页岩气在内的天然气勘探开发节奏,是缓解我国天然气供需矛盾的必然选择,对调整和优化能源结构、减少温室气体排放具有重要意义。

### 1.2 页岩气资源丰富

四川盆地是目前中国页岩气勘探开发的主战场,也是最成功的地区。四川盆地有利页岩气区面积 $9.43 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,核心区面积约 $6.44 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,估算技术可采资源量 $2.64 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,具有较好的发展前景<sup>[3]</sup>,四川盆地页岩气资源勘探开发在较大程度上反映和影响我国页岩气的发展前景,对推动我国页岩气勘探开发具有重要意义。

### 1.3 水资源压力大

滑溜水压裂是在页岩气藏改造中发展起来的一项技术,在美国得克萨斯州Barnett页岩气开发中取得巨大成功而备受关注<sup>[4]</sup>,国内页岩气开发也多采用此技术<sup>[5-8]</sup>。目前页岩气的开发重心集中在如何取得产量上的突破,忽略了页岩气资源开发可能面对的水资源挑战、环境影响及其相应的防治措施等问题<sup>[9-10]</sup>。水力压裂作为页岩气开发的关键技术之一,据统计在2010年采用滑溜水压裂开发1口页岩气井需要消耗 $0.8 \times 10^4 \sim 2.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 水资源<sup>[11]</sup>,美国页岩气开发大多分布在平原地区,水资源较为充足,而四川盆地多为丘陵山区,比较缺水,水资源压力大(图1),严重制约页岩气的大规模工业化开发。

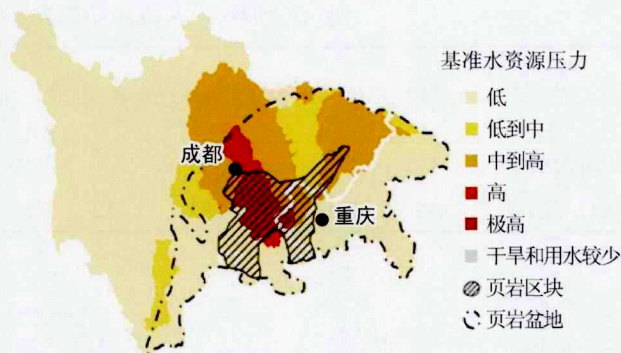


图1 四川盆地页岩气及基准水资源压力分布图

### 1.4 鼓励开展新型压裂液技术攻关

由于面临水资源压力大等问题,《页岩气发展规划(2011—2015年)》中鼓励开展新型压裂液的技术攻关,客观上节约大量用水<sup>[1]</sup>;《页岩气产业政策》中提出依靠科技进步,推进井场集约化建设和无水、少水储层改造及水资源循环使用,实现安全、高效、清洁生产,建设资源节约、环境友好、协调发展的页岩气资源勘探开发利用体系。并且新《安全生产法》和《环境保护法》已正式实施<sup>[12]</sup>,返排不完全可能污染地下水以及处理返排污水费用高昂等问题变得突出,有必要加强节水/无水压裂等技术的攻关与突破。

## 2 CO<sub>2</sub> 泡沫压裂优势与特点

### 2.1 与滑溜水压裂比较

滑溜水压裂在美国barnett页岩开发中成功应用而被逐渐推广,但用水量巨大,在水资源紧缺地区可能限制了页岩气大规模开发;在2008—2012年,为缓解水资源压力,加拿大Monteny页岩气对1364口井进行水力压裂改造中,采用增能、泡沫压裂共737口(占有压裂施工井数的54%),其中部分滑溜水压裂和CO<sub>2</sub>泡沫压裂施工统计资料如表1所示<sup>[13]</sup>。从表1中可以看出,CO<sub>2</sub>泡沫压裂极大降低了水力压裂施工用水量,并且由于施工规模减小、作业时间缩短等也降低了成本。

为评价滑溜水压裂和CO<sub>2</sub>泡沫压裂在改造体积(SRV)的差异,2013年加拿大Pembina油田利用两口相邻的水平井进行滑溜水压裂和泡沫压裂微地震监测施工(图2),两口井分段方法一致,支撑剂用量相同,其中滑溜水压裂施工排量为 $12.0 \text{ m}^3/\text{min}$ ,泡沫压裂施工排量为 $3.0 \sim 5.0 \text{ m}^3/\text{min}$ 。从两口井的微地震监测可知,滑溜水压裂由于大排量、大规模

表 1 加拿大 Monteny 页岩气部分滑溜水与 CO<sub>2</sub> 泡沫压裂施工情况对比表

工艺类型	井数	厚度 /m	水平段总长 /m	段数	段长 /m	每段支撑剂用量 /t	每段用水量 /m <sup>3</sup>	支撑剂浓度 / (kg·m <sup>-3</sup> )	支撑裂缝导流能力 / (mD·m)	每口井成本 / (万美元)
滑溜水压裂	11	47.2	1 755	9	222	141	708	204	4.08	584.9
CO <sub>2</sub> 泡沫压裂	12	38.0	1 523	12	135	85	115	731	6.75	322.8

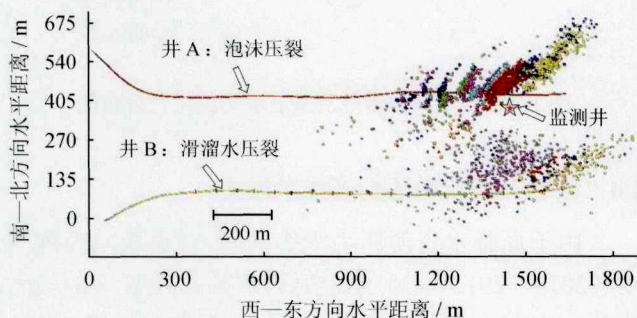


图 2 加拿大 Pembina 油田滑溜水、泡沫压裂液微地震监测图

的改造思路,其更容易形成复杂缝网;而泡沫压裂由于施工排量、规模较低,改造体积低于滑溜水压裂<sup>[14]</sup>。通过分析,认为增加 CO<sub>2</sub> 泡沫压裂施工排量、规模可弥补其在改造体积方面与滑溜水压裂所存在

的差距。

## 2.2 与其他节水/无水压裂比较

在节水/无水压裂技术中,LPG、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>等无水压裂技术在国内处在探索阶段,对设备和作业人员技术要求高、安全风险大,其现阶段的推广应用受到一定限制<sup>[15-17]</sup>。CO<sub>2</sub>泡沫压裂自20世纪70年代末出现以来,具有对储层伤害低、可大幅减少用水量、携砂性能强、黏度高等优点,性能优于N<sub>2</sub>泡沫压裂液(施工压力、防膨、置换页岩气等方面),设备改造要求小,混注工艺简单、施工难度较无水压裂液低,安全风险小,并成功应用于低压低渗水敏砂岩油气藏及煤层气藏。CO<sub>2</sub>泡沫压裂技术在国外页岩气已得到广泛应用,在国内的现场试验工作也取得较好的效果。目前已有的节水/无水压裂技术情况如表2所示。

表 2 节水/无水压裂技术比较表

项目	节水压裂		无水压裂			
	N <sub>2</sub> 增能、CO <sub>2</sub> 增能	N <sub>2</sub> 泡沫、CO <sub>2</sub> 泡沫	CO <sub>2</sub> 、N <sub>2</sub>	LPG	N <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> 泡沫	油基液体
优点	增压助排,可操作性好	大幅减少用水量	破岩效果好、造缝性强,伤害低	返排快速彻底,投产快	造缝性好,成本适中	配伍性好、携砂性能好
缺点	减少用水量有限	性能不易掌握,施工具有一定难度	携砂性能差,施工难度极高	成本高,存在安全隐患,施工难度高	起泡条件复杂	成本高,存在安全隐患
是否用于页岩气	是	是	是	是	否	否

## 3 CO<sub>2</sub> 泡沫压裂液物理特性

CO<sub>2</sub> 泡沫压裂液是由 CO<sub>2</sub>、稠化剂、起泡剂等相关化学添加剂与水组成的混合体系。CO<sub>2</sub> 泡沫压裂液的研制与单相水基压裂液的研制密切相关,其难点在于 CO<sub>2</sub> 溶于水后显酸性,对稠化剂、交联剂及起泡剂的性能要求更高。与常规单相水基压裂液不同,CO<sub>2</sub> 泡沫压裂液属于气液两相可压缩性极强的流体,CO<sub>2</sub> 相态变化复杂,导致其前期室内评价的难度更大。对 CO<sub>2</sub> 泡沫压裂液物理特性的认识和掌握程度是影

响优选配方、工艺设计、压裂施工及压后效果的重要因素之一。

### 3.1 CO<sub>2</sub> 泡沫压裂过程中 CO<sub>2</sub> 相态变化

CO<sub>2</sub> 泡沫压裂液的物理特性受 CO<sub>2</sub> 相态变化影响,CO<sub>2</sub> 泡沫压裂过程中 CO<sub>2</sub> 相态变化如图3所示:CO<sub>2</sub> 开始以液态形式存储在 CO<sub>2</sub> 罐车中,经过 CO<sub>2</sub> 增压泵后,进入 CO<sub>2</sub> 压裂泵车,并被加压至施工压力,随后在井口与水基压裂液汇合,在此过程中 CO<sub>2</sub> 均处于液态;液态 CO<sub>2</sub> 与水基压裂液混合后泵至井底进入储层后,温度逐渐升高,CO<sub>2</sub> 处于超临界状

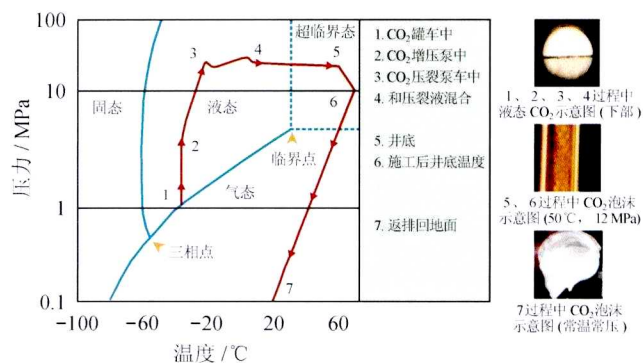


图3 CO<sub>2</sub>泡沫压裂施工中CO<sub>2</sub>相变过程及外观示意图

态, 由于超临界CO<sub>2</sub>流动性与气体类似, 从而可与水基压裂液形成CO<sub>2</sub>泡沫; 施工结束并开始返排后, CO<sub>2</sub>超临界流动性与气体类似, 可从井底返排回地面, 过程中压力逐渐下降, 最终以气态形式返排回地面。在此过程中, CO<sub>2</sub>泡沫压裂液的密度、黏度等都随着其温度、压力的改变而剧烈变化。

### 3.2 CO<sub>2</sub>泡沫压裂液性能评价

国内CO<sub>2</sub>泡沫压裂物理特性的研究重点在性能评价中的理论认识和实验设备。理论认识是需掌握CO<sub>2</sub>泡沫压裂液携砂机理、在不同条件下CO<sub>2</sub>泡沫压裂液的流变模型, CO<sub>2</sub>相态转变、超临界CO<sub>2</sub>特性对CO<sub>2</sub>泡沫压裂液流变性、携砂性能等的影响; 实验设备是由于国内目前CO<sub>2</sub>泡沫压裂液实验评价设备相对有限, 不利于技术的推广, 需在研发仪器设备方面取得突破, 尽量准确、客观地反映CO<sub>2</sub>泡沫压裂液在施工过程中的性能参数, 通常使用大型物理模拟装置, 如大型多功能泡沫回路试验装置<sup>[18]</sup>、页岩气藏超临界CO<sub>2</sub>致裂增渗实验装置<sup>[19]</sup>、大型高参数泡沫压裂液试验回路<sup>[20]</sup>, 模拟CO<sub>2</sub>泡沫压裂液的施工过程, 研究CO<sub>2</sub>泡沫压裂液在高温、高压、高剪切条件下的流变性、起泡、稳泡、携砂、动态滤失等性能。

CO<sub>2</sub>泡沫压裂液的黏度高、携砂性能好、滤失量低, 酸性环境可有效抑制黏土膨胀, 用水量少可降低页岩的自吸<sup>[21]</sup>及软化, 对地层和裂缝伤害小。根据CO<sub>2</sub>泡沫压裂液性能特点, 结合页岩气目前体积压裂工作液实验评价现状, 需使用大型物理模拟装置, 并结合常规实验仪器完成CO<sub>2</sub>泡沫压裂液的实验评价, 较为准确获取CO<sub>2</sub>泡沫压裂液性能参数, 建立页岩储层与CO<sub>2</sub>泡沫压裂液适应性评价方法, 为页岩气CO<sub>2</sub>泡沫压裂工艺设计和现场施工提供理论依据和技术支撑。

## 4 CO<sub>2</sub>泡沫压裂装备与工艺技术

### 4.1 CO<sub>2</sub>泡沫压裂装备

目前国内已经具备开展CO<sub>2</sub>泡沫压裂施工的能力, 中原、长庆、吉林和大庆等油田已完成装备配套完善, 并对施工的现场组织和实施有一定的积累和认识。

与常规水力压裂不同, CO<sub>2</sub>泡沫压裂施工是两套独立流程, 一套泵注液态CO<sub>2</sub>, 一套泵注纯水基压裂液, 两套流程在井口汇合后再向地层泵注(图4)。泵注液态CO<sub>2</sub>需如下设备: ①CO<sub>2</sub>罐车, 用于储存加压低温的液态CO<sub>2</sub>; ②CO<sub>2</sub>增压泵车, CO<sub>2</sub>泡沫压裂作业的核心设备, 为液态CO<sub>2</sub>进行保压和加压, 减少压力波动和供液不足, 为压裂车提供大排量的液态CO<sub>2</sub>; ③CO<sub>2</sub>压裂泵车, 工作原理与常规压裂泵车相同, 但因低温液态CO<sub>2</sub>的穿透性较强, 对设备的密封性与防穿刺性能要求更高; ④CO<sub>2</sub>仪表车, 通过配备控制面板, 可实现集中控制; ⑤配套设备, 针对CO<sub>2</sub>施工的特点, 需在CO<sub>2</sub>罐车低压管汇等位置配备气动或液动阀门, 可从仪表车上远程控制阀门的开启和关闭, 防止发生缺氧、冻伤、炮弹效应等伤害<sup>[22-23]</sup>, 对于CO<sub>2</sub>泵入井底到达储层后不能达到超临界温度的浅井, 还应增加地面加热装置, 以便有效形成CO<sub>2</sub>泡沫。



图4 CO<sub>2</sub>泡沫压裂现场施工图

### 4.2 CO<sub>2</sub>泡沫压裂分段工艺

水平井分段压裂改造已成为目前国内外页岩气效益开发的必要手段。在加拿大Monteny页岩气CO<sub>2</sub>泡沫压裂开发中, 采用桥塞/射孔联作、裸眼封隔器/投球、连续油管/封隔器等分段工艺, 与其他液体和工艺相比, CO<sub>2</sub>泡沫压裂与桥塞/射孔联作施

工后的12个月累计量最高。

### 4.3 CO<sub>2</sub> 泡沫压裂施工步骤

CO<sub>2</sub> 泡沫压裂施工准备阶段, 与常规压裂相似, 先通井/洗井, 再下入压裂管柱, 连接井口与地面管线后开始准备试压, CO<sub>2</sub> 泡沫压裂在试压阶段与常规压裂有所不同, 需要将CO<sub>2</sub> 注入CO<sub>2</sub> 泵注流程, 降低管线温度, 检查系统密闭性, 并确保CO<sub>2</sub> 在地面施工过程中处于液态; 然后再进行压裂施工作业, 施工过程中需要用N<sub>2</sub> 对CO<sub>2</sub> 储罐加压, 保持CO<sub>2</sub> 处于液态, 施工结束后关井, 再放喷排液。

### 4.4 CO<sub>2</sub> 泡沫压裂安全保障

为保障CO<sub>2</sub> 泡沫压裂施工安全顺利进行, 施工过程中CO<sub>2</sub> 增压泵、CO<sub>2</sub> 罐车距离其他设备和井口至少15 m, 并防止干冰堵导致管线爆炸; 由于CO<sub>2</sub> 会降低空气中O<sub>2</sub> 浓度, 所以CO<sub>2</sub> 设备的摆放区域应远离工作人员区域并处于下风口, 防止窒息; 压后放喷返排期间, 用CO<sub>2</sub> 检测仪监测出口CO<sub>2</sub> 浓度变化。

## 5 页岩气 CO<sub>2</sub> 泡沫压裂应用现状

CO<sub>2</sub> 泡沫压裂具有对储层伤害低、可大幅减少用水量、携砂性能强等优点, 在低压(压力系数为0.8~1.0)、低渗透、黏土矿物含量高的水敏油气藏增产改造中具有明显优势, 并且可以通过地面预加热处理方式应用于温度较低的油气藏, 从而拓宽适用的油气藏温度条件。

CO<sub>2</sub> 泡沫压裂在美国 Ohio 和 Lewis 页岩气的开发过程中成功应用并取得突破<sup>[22]</sup>。在2008—2012年, 加拿大 Monteny 页岩气对1 364口井进行水力压裂改造, 其中增能、泡沫共737口(54%), 极大缓解了当地水资源压力<sup>[24]</sup>, 与滑溜水压裂相比, CO<sub>2</sub> 泡沫压裂减少平均每段支撑剂用量、用水量, 增加支撑剂浓度, 支撑裂缝导流能力, 增产改造效果显著<sup>[13,25]</sup>。CO<sub>2</sub> 泡沫压裂在延长油田页岩气井得到成功应用, 某页岩气井CO<sub>2</sub> 泡沫压裂施工期间, 施工压力低、加砂成功率100%, 单井无阻气量达到 $10.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 是邻井产量的3倍, 增产改造效果明显, 同时实现部分CO<sub>2</sub> 就地封存<sup>[26-27]</sup>。

## 6 结论与建议

1) 页岩气开发过程中不仅应注重产量的突破, 还应加强节水/无水压裂等技术的攻关与突破, 确保

水资源紧缺地区页岩气开发有序进行。CO<sub>2</sub> 泡沫压裂相对于滑溜水压裂, 能大幅减少用水量, 可通过增加施工排量、规模可弥补其在改造体积与滑溜水压裂的差距; 在设备改造要求、混注工艺、施工难度较其他节水/无水压裂技术低, 安全风险小。

2) CO<sub>2</sub> 泡沫压裂液属于气液两相可压缩性极强的流体, 施工过程中CO<sub>2</sub> 相态变化复杂, 液态CO<sub>2</sub> 与水基压裂液混合后泵至井底进入储层后, 温度逐渐升高, CO<sub>2</sub> 处于超临界状态, 由于超临界CO<sub>2</sub> 流动性与气体类似, 从而可与水基压裂液形成CO<sub>2</sub> 泡沫, 导致其前期室内评价的难度更大。根据CO<sub>2</sub> 泡沫压裂液性能特点, 结合页岩气目前体积压裂工作液实验评价现状, 需使用大型物理模拟装置, 并结合常规实验仪器完成CO<sub>2</sub> 泡沫压裂液的实验评价, 较为准确获取CO<sub>2</sub> 泡沫压裂液性能参数, 建立页岩储层与CO<sub>2</sub> 泡沫压裂液适应性评价方法, 为页岩气CO<sub>2</sub> 泡沫压裂工艺设计和现场施工提供理论依据和技术支撑。

3) 目前国内已经具备开展CO<sub>2</sub> 泡沫压裂施工的能力。与常规水力压裂不同, CO<sub>2</sub> 泡沫压裂施工是两套独立流程, 在压裂设备中需要增加CO<sub>2</sub> 泵注设备。加拿大 Monteny 页岩气CO<sub>2</sub> 泡沫压裂开发采用桥塞/射孔联作, 取得了较好的改造效果。施工步骤和安全保障中需要考虑CO<sub>2</sub> 特殊性, 制定相应的施工保障、安全预防措施。

4) CO<sub>2</sub> 泡沫压裂在美国 Ohio 和 Lewis 页岩气的开发过程中成功应用并取得突破, 在加拿大 Monteny 页岩气藏大规模应用, 目前在国内延长页岩气井得到成功应用, 增产改造效果明显。旨在为四川盆地页岩气的压裂改造提供新的思路和方法, 也为水资源紧缺地区页岩气开发提供重要的技术储备与补充。

5) 下一步页岩气CO<sub>2</sub> 泡沫压裂技术攻关研究方向中, 应准确掌握CO<sub>2</sub> 泡沫压裂液性能, 建立页岩储层与CO<sub>2</sub> 泡沫压裂液适应性实验评价方法, 并通过完善相关施工配套设备和工艺设计方法, 将CO<sub>2</sub> 泡沫压裂技术集成到目前页岩气的“工厂化”压裂中。

### 参 考 文 献

- [1] 张大伟.《页岩气发展规划(2011—2015年)》解读[J]. 天然气工业, 2012, 32(4): 6-8.  
Zhang Dawei. Important measures for promoting the shale gas exploration and development in China: An explanation of *The Shale Gas Development Programming for 2011 to 2015*[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(4): 6-8.

- [2] 钱兴坤, 姜学峰. 2015年国内外油气行业发展概述及2016年展望[J]. 国际石油经济, 2016, 24(1): 27-35.  
Qian Xingkun, Jiang Xuefeng. Overview of international oil and gas industry developments in 2015 and outlook for 2016[J]. International Petroleum Economics, 2016, 24(1): 27-35.
- [3] 董大忠, 高世葵, 黄金亮, 管全中, 王淑芳, 王玉满, 等. 论四川盆地页岩气资源勘探开发前景[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 1-15.  
Dong Dazhong, Gao Shikui, Huang Jinliang, Guan Quanzhong, Wang Shufang, Wang Yuman, et al. A discussion on the shale gas exploration & development prospect in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(12): 1-15.
- [4] 董大忠, 王玉满, 李新景, 邹才能, 管全中, 张晨晨, 等. 中国页岩气勘探开发新突破及发展前景思考[J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 19-32.  
Dong Dazhong, Wang Yuman, Li Xinjing, Zou Caineng, Guan Quanzhong, Zhang Chenchen, et al. Breakthrough and prospect of shale gas exploration and development in China[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(1): 19-32.
- [5] Boyer C, Kieschnick J, Suarez-Rivera R, Lewis R, Waters G. Producing gas from its source[J]. Oil Field Review, 2006, 18(3): 36-49.
- [6] 张军涛, 吴金桥, 高志亮, 丁浩民. 陆相页岩气藏滑溜水压裂液的研究与应用[J]. 非常规油气, 2014, 1(1): 55-59.  
Zhang Juntao, Wu Jinqiao, Gao Zhiliang, Ding Haomin. Research and application of slick water fracturing fluid on continental shale reservoir[J]. Unconventional Oil & Gas, 2014, 1(1): 55-59.
- [7] 陈鹏飞, 刘友权, 邓素芬, 吴文刚, 雷英全, 张亚东, 等. 页岩气体积压裂滑溜水的研究及应用[J]. 石油与天然气化工, 2013, 42(3): 270-273.  
Chen Pengfei, Liu Youquan, Deng Sufen, Wu Wengang, Lei Yingquan, Zhang Yadong, et al. Research and application of slick water for shale volume fracturing[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2013, 42(3): 270-273.
- [8] 桑宇, 杨胜来, 郭小哲, 陈浩. 一种已压裂页岩气水平井的产量预测新方法[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2015, 37(3): 17-24.  
Sang Yu, Yang Shenglai, Guo Xiaozhe, Chen Hao. A new productive prediction method for fractured horizontal wells in shale gas reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2015, 37(3): 17-24.
- [9] 殷诚, 高世葵, 董大忠, 朱文丽, 王欣蕊. 页岩气产业发展的影响因素[J]. 天然气工业, 2015, 35(4): 117-125.  
Yin Cheng, Gao Shikui, Dong Dazhong, Zhu Wenli, Wang Xinrui. Influencing factors for the development of shale gas industry[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(4): 117-125.
- [10] 夏玉强. Marcellus页岩气开采的水资源挑战与环境影响[J]. 科技导报, 2010, 28(18): 103-110.  
Xia Yuqiang. Challenges of water resources and the environmental impact of Marcellus Shale gas drilling[J]. Science & Technology Review, 2010, 28(18): 103-110.
- [11] Luo XR, Wang SZ, Jing ZF, Wang ZG. Experimental research on rheological properties of slick water mixed with CO<sub>2</sub> system[J]. Advanced Materials Research, 2014, 910: 95-100.
- [12] 王耀之, 罗杰, 郭蕊莹, 李亚东. 新“两法”形势下的钻前工程造价管理[J]. 天然气工业, 2015, 35(9): 123-126.  
Wang Yaoshi, Luo Jie, Guo Ruiying, Li Yadong. Pre-drilling engineering cost management in the background of two new laws[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(9): 123-126.
- [13] Reynolds MM, Bachman RC, Peters WE. A comparison of the effectiveness of various fracture fluid systems used in multistage fractured horizontal wells: Montney Formation, unconventional gas[C]//SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 4-6 February 2014, The Woodlands, Texas, USA. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/168632-MS>.
- [14] Lamson B, Keith D, Zotskine YD, Yule K. An unconventional approach to a conventional field, how slickwater has changed the Game in the Cardium[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 30 September-2 October 2013, New Orleans, Louisiana, USA. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/166268-MS>.
- [15] Leblanc DP, Martel T, Graves DG, Tudor E, Lestz R. Application of propane (LPG) based hydraulic fracturing in the McCully Gas Field, New Brunswick, Canada[C]//North American Unconventional Gas Conference and Exhibition, 14-16 June 2011, The Woodlands, Texas, USA. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/144093-MS>.
- [16] Yost AB. Analysis of production response to CO<sub>2</sub>/sand fracturing: A case study[C]//SPE Eastern Regional Meeting, 8-10 November 1994, Charleston, West Virginia, USA. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/29191-MS>.
- [17] 孙张涛, 吴西顺. 页岩气开采中的水力压裂与无水压裂技术[J]. 国土资源情报, 2014(5): 51-55.  
Sun Zhangtao, Wu Xishun. Review on hydraulic fracturing and non-aqueous fracturing in shale gas development[J]. Land and Resources Information, 2014(5): 51-55.
- [18] 陈彦东, 卢拥军, 田助红, 杨艳丽, 梁利. CO<sub>2</sub>泡沫压裂液的流变特性研究[J]. 钻井液与完井液, 2000, 17(2): 25-27.  
Chen Yandong, Lu Yongjun, Tian Zhuhong, Yang Yanli, Liang Li. A study on the rheological behavior of CO<sub>2</sub> foam fracturing fluid[J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 2000, 17(2): 25-27.
- [19] 鲜学福, 殷宏, 周军平, 姜永东, 张道川. 页岩气藏超临界CO<sub>2</sub>致裂增渗实验装置研制[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2015, 37(3): 1-8.  
Xian Xuefu, Yin Hong, Zhou Junping, Jiang Yongdong, Zhang Daochuan. A new experiment apparatus for fracturing shale gas reservoir to enhance permeability with supercritical carbon dioxide[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2015, 37(3): 1-8.
- [20] 王树众, 王志刚, 林宗虎, 王斌, 张爱舟. CO<sub>2</sub>泡沫压裂液两相流流动特性的试验研究[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(9): 975-978.  
Wang Shuzhong, Wang Zhigang, Lin Zonghu, Wang Bin, Zhang Aizhou. Experimental research on the two-phase flow characteristic of CO<sub>2</sub> foam fracturing fluid[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(9): 975-978.
- [21] Farah N, Ding DY, Wu YS. Simulation of the impact of fracturing

