

## 二氧化碳纯干法压裂技术及装备研究进展

林树军<sup>1</sup>,张天临<sup>1</sup>,黄鹏洲<sup>2</sup>,张龙洋<sup>1</sup>,巨静斋<sup>1</sup>,魏双会<sup>1</sup>,曹常青<sup>1</sup>

(1.兰州兰石石油装备工程股份有限公司,甘肃兰州 730314;

2.兰州航空职业技术学院机电工程系,甘肃兰州 730314)

[摘要]油田以二氧化碳纯干法压裂技术作为储层改造技术,达到增产增效的目的。同时也是CCUS技术中二氧化碳的资源化利用与封存技术,对“双碳”目标实现具有较强的现实意义。因此,本文为探究二氧化碳纯干法压裂技术的发展情况,通过文献调研,现场实地调研的方式,全面了解掌握了二氧化碳纯干法压裂技术及装备的研究现状。发现二氧化碳纯干法压裂技术优势明显,可有效改造储层对非常规油气资源开发意义重大,可有效保障国家能源安全;当然该技术的发展目前瓶颈问题突出,有待从各个方向进一步突破,特别是装备方面的突破,需要石油装备从业人员、学者、企业家、社会资本等多方面共同努力,从而实现二氧化碳纯干法压裂技术的大规模推广应用。

[关键词]液态二氧化碳;纯干法压裂工艺;储液罐;增压泵设备;密闭混砂设备;压裂泵车

[中图分类号]TE357.11 [文献标识码]A [文章编号]1673-5285(2025)07-0006-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-5285.2025.07.002

## Research progress of carbon dioxide pure dry fracturing technology and equipment

LIN Shujun<sup>1</sup>,ZHANG Tianlin<sup>1</sup>,HUANG Pengzhou<sup>2</sup>,ZHANG Longyang<sup>1</sup>,

JU Jingzhai<sup>1</sup>,WEI Shuanghui<sup>1</sup>,CAO Changqing<sup>1</sup>

(1.Lanzhou LS Petroleum Equipment Engineering Co.,Ltd.,Lanzhou Gansu 730314,

China;2.Department of Mechanical and Electrical Engineering,Lanzhou Aviation

Technology College,Lanzhou Gansu 730314,China)

[Abstract]The oilfield uses carbon dioxide pure dry fracturing technology as a reservoir stimulation technology to achieve the purpose of increasing production and efficiency. At the same time, it is also the resource utilization and storage technology of carbon dioxide in CCUS technology, which has strong practical significance for the realization of the "double carbon" target. Therefore, in order to explore the development of carbon dioxide pure dry fracturing technology, this paper has a comprehensive understanding of the research status of carbon dioxide pure dry fracturing technology and equipment through literature research and on-site investigation. It is found that carbon dioxide pure dry fracturing technology has obvious advantages, and it can effectively transform reservoirs, which is of great significance to

\* 收稿日期:2024-11-27

作者简介:林树军(1992—),男,工程师,2020年硕士研究生毕业于中国石油大学(华东)石油与天然气工程专业,现从事石油装备开发、CCUS等工作。E-mail:lsj17upc@163.com

the development of unconventional oil and gas resources, and can effectively guarantee national energy security. It is a breakthrough in equipment, and requires the joint efforts of petroleum equipment practitioners, scholars, entrepreneurs, social capital, etc., so as to realize the large-scale promotion and application of carbon dioxide pure dry fracturing technology.

[**Key words**] liquid carbon dioxide; pure dry fracturing process; liquid storage tank; booster pump equipment; closed sand mixing equipment; fracturing pump truck

我国致密油气、页岩油气和煤层气等非常规油气资源丰富,其中,非常规石油可采储量与常规石油可采储量大致相当,非常规天然气可采储量是常规天然气可采储量的三倍之多。近年来,我国加大勘探开发力度,已经成为全球第二大非常规油气资源开发利用地区<sup>[1-2]</sup>。

在“双碳”目标的背景下<sup>[3]</sup>,将 CCUS(二氧化碳捕集、利用与封存)技术与非常规油气资源开发相结合对发展非常规能源保障国家能源安全、改善环境、节约水资源等方面具有重大意义。

二氧化碳纯干法压裂是指利用液态二氧化碳代替传统水基压裂液,完全实现无水压裂的储层改造技术。该技术作为二氧化碳的利用技术主要用于“低孔、低渗、低储层压力系数”和水敏、水锁等储层的非常规油气储层改造,主要利用二氧化碳特殊的物理化学性质,提高对储层的改造效果,附带滞留储层的作用,达到封存二氧化碳的效果,是未来 CCUS 技术与非常规油气资源大规模开发利用相结合的关键技术<sup>[4]</sup>。

## 1 二氧化碳纯干法压裂技术特点

### 1.1 二氧化碳纯干法压裂技术优势

1.1.1 储层改造能力强 有学者通过室内实验、数值模拟分析及矿场试验对水力压裂技术与二氧化碳纯干法压裂技术进行对照研究,研究表明在同等条件下水力压裂形成的裂缝形态单一、形成的裂缝面较为平整,波及体积即改造体积较小;同等条件下二氧化碳纯干法压裂技术利用二氧化碳压裂液的特殊性,即二氧化碳特殊的物理化学性质,二氧化碳可有效增加孔隙压力,降低破裂压力 20%~40%,并实现多方位致裂,裂缝面粗糙度提高 15%。二氧化碳压裂可减少地应力对裂缝扩展的影响,形成复杂缝网,改造体积为水力压裂的 2.6 倍以上。因此,根据二氧化碳纯干法压裂与

水力压裂效果对比结果,可以清晰地认识到二氧化碳纯干法压裂技术具有较强的储层改造能力。

1.1.2 对储层伤害低 二氧化碳利用其特殊的物理化学性质,作为一种非极性分子与地层流体和岩石有着较好的配伍性。进入地层的二氧化碳遇到地层水后,部分二氧化碳溶解于地层水中,形成 pH 值较小的弱酸性碳酸溶液。当这些溶液与储层中的黏土矿物相遇时,会发生化学反应,可以有效抑制黏土膨胀。以纯二氧化碳作为压裂液注入地层,从根本上杜绝了水锁效应和岩石润湿性反转等危害的出现,确保储层的高渗透性。压后返排过程中,二氧化碳以气相迅速返排,无残渣,最大限度保护储层不受伤害<sup>[5]</sup>。

1.1.3 助力后期原油开采 注入地层的部分二氧化碳与原油相遇后,在地层温度与压力条件下,迅速溶解于原油中,由于羧化反应,油分子间的引力减小,流动时的内摩擦力减小,因而原油黏度降低,提高了原油的流动性。由于二氧化碳在原油中的溶解量较大,可使原油黏度降低为原来黏度的 10~100 倍,而且原油初始黏度越大,其下降范围越明显。利用降低原油黏度助力后期原油开采。

注入地层的部分二氧化碳溶解于原油中,膨胀原油体积,随着后期原油开采,油层压力下降,溶解的二氧化碳气体逸出,产生气体推动力为溶解气驱提供能量,助力后期原油开采。

注入地层的部分二氧化碳在地层温度、压力条件下,其溶解原油中轻烃类组分的能力超越了油相,使得原油中的轻烃组分向二氧化碳中转移,萃取原油中轻烃组分,形成混相驱替带,助力后期原油开采。

1.1.4 滞留地层助力“双碳”目标实现 注入地层的部分二氧化碳依靠地质构造俘获、束缚空间俘获、溶解俘获和矿化俘获四种机理滞留于地层中,达到封存二氧化碳的效果,助力“双碳”目标的实现。

地质构造俘获机理:受油藏地质构造特征的影响,

注入油藏中的二氧化碳会因浮力作用而存在向上运移的趋势,当遇到盖层、断层或格挡层后,由于浮力远小于不渗透层的毛管压力,使得二氧化碳停止继续向上运移,被滞留在地质构造中从而达到封存的效果,该机理也是二氧化碳得以长期封存的主要机理。

**束缚空间俘获机理:**二氧化碳在油藏中运移时会因毛细管力的存在被吸附到岩石表面,进而被束缚在较小的岩石孔隙或裂隙内,是实现二氧化碳有效封存的一种重要机理。束缚空间俘获机理一般和溶解俘获机理同时作用,最终使二氧化碳溶解于储层流体中。

**溶解俘获机理:**二氧化碳注入油藏后会不断与原油和地层水接触,最终溶解其中。尽管大多数溶解二氧化碳会与采出流体一起排出,但仍有相当一部分会和残余油、残余水一起滞留在油藏中,二氧化碳因此而被封存。

**矿化俘获机理:**注入的二氧化碳溶于地层水会生成碳酸,导致地层水 pH 值降级,能够将部分岩石矿物溶解为  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等,进而与二氧化碳发生矿化反应,生成新的碳酸盐矿物,将二氧化碳以固体碳酸盐的形式封存起来,是最安全的碳封存机制。

研究表明二氧化碳封存量大小顺序依次为:地质构造俘获、束缚空间俘获、溶解俘获和矿化俘获。二氧化碳纯干法压裂技术可使部分二氧化碳封存于储层中,有利于我国“双碳”目标的实现。

**1.1.5 节水、保水利人类** 淡水资源是人类赖以生存的宝贵资源,节约水资源、保护水资源是人类的使命。水力压裂技术矿场作业时,用水量巨大,单井作业注水量达到万立方米级别,且水基压裂液所用水为淡水。利用 100% 的二氧化碳作为压裂液代替水基压裂液,对缺水干旱地区意义重大。

另一方面,水力压裂往往会有污染地层水的风险,而以二氧化碳作为压裂液注入地层,不会对地层水造成污染,最大限度保护了地下水资源不被污染。

## 1.2 二氧化碳纯干法压裂技术瓶颈

**1.2.1 现有密闭混砂设备加砂能力有限** 二氧化碳纯干法压裂技术要求,压裂液泵入井前二氧化碳始终保持以液态存在,因此,需要防止液态二氧化碳发生相变。因此,常规混砂设备不能满足二氧化碳纯干法压裂技术需求,需要开发专用混砂设备以保持液态二氧化碳的压力与温度恒定。因此,二氧化碳纯干法压裂混砂设备要求密闭带压作业,且保持低温状态,特别是液态二氧化碳与环境温度下的支撑剂相遇后,会发生汽化现象,故需对支撑剂进行提前预冷,使支撑剂温度与液

态二氧化碳温度达到平衡且保持液相不变。

随着二氧化碳纯干法压裂技术的发展,目前,市场上出现了少量的专用混砂装置,但现有二氧化碳专用混砂装置都有加砂规模受限,不能实现连续加砂作业的现象。现有密闭混砂设备加砂能力有限,往往出现 1 罐砂加完后不得不停止作业,继续准备的现象,这主要是因为现有设备主要以单体单储罐的思路设计,单体单储罐主要受罐体尺寸限制,单个储罐最大有效容积约为  $25 \text{ m}^3$ ,即意味着一台设备最大的加砂量仅有  $25 \text{ m}^3$ ,而大规模储层改造过程中压裂工艺设计往往远大于这一数据。也有学者提出使用多台现有设备并联以满足现场大规模作业需求,目前,矿场也在如此应用,但整体来看目前仍然是加砂规模较小的作业,只需 2~3 台并联即可。若用此思路大规模作业则会带来专用混砂设备数量的剧增,给压裂作业带来巨大的成本增幅,且作业现场场地规模往往有限,设备现场布置难以完成,故现有二氧化碳专用混砂装置难以满足该技术的大规模作业应用需求。

**1.2.2 低黏度导致携砂和降滤失能力差** 液态二氧化碳在  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $2 \text{ MPa}$  的温度、压力条件下呈液态存在,其黏度约为  $0.1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,当其进入地层后温度、压力升高超过  $31.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $7.38 \text{ MPa}$  后呈超临界状态存在,其黏度约为  $0.01 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,其低黏度特性导致了砂比浓度过低,携砂能力弱,严重制约了压裂液携带支撑剂进入裂缝支撑裂缝的能力。同时由于其低黏度特性,液态二氧化碳在储层中的流动性较好,流动速度快,造成滤失速度快、滤失量大的现象,降低滤失能力差,导致压裂液用量增加,成本增加<sup>[6-7]</sup>。

目前,针对二氧化碳压裂液携砂和降滤失能力差这一问题,国内外学者提出一方面可以改善二氧化碳压裂液自身黏度,向二氧化碳中添加增稠剂,是目前控制流速,遏制黏性指进现象,增强携砂能力、降低二氧化碳在地层和裂缝表面滤失最有效的方法之一。目前,增稠剂的应用一般是向二氧化碳中加入聚合物提高黏度,但也存在一些问题,如高分子聚合物难溶于二氧化碳,常常需要加入一定量的助溶剂;低分子聚合物由于其极性键降低了其在二氧化碳中的溶解度;新研发的一些新型聚合物虽然不需要加入助溶剂但成本相对较高<sup>[8]</sup>。目前,国内外二氧化碳增稠剂一般分为表面活性剂、碳氢聚合物、含氟聚合物、含硅类聚合物等<sup>[9-10]</sup>。其中,含硅类聚合物和含氟聚合物增黏效果相对较好<sup>[11]</sup>。但由于成本及环境问题,含氟聚合物不具有现场实用性<sup>[12]</sup>。矿场应用时倾向于推荐含硅类聚合物作为增黏

剂,但需要结合岩石、原油、地层水等物质进一步深入研究<sup>[13]</sup>。

另一方面通过降低支撑剂密度,以增大二氧化碳压裂液的携砂能力。有学者也在同步研发适合二氧化碳纯干法压裂的支撑剂,但相关研究相对较少。杨宸<sup>[14]</sup>探究了支撑剂颗粒粒径、支撑剂密度对静态悬砂的影响。整体认为当粒径增大时压裂液对支撑剂颗粒的拖曳力减弱,减小了阻止颗粒沉降性能,支撑剂颗粒下落速度增强,静态悬砂性能减弱。颗粒下落速度随支撑剂颗粒密度增大而增大,下落速度提高,压裂液悬浮能力降低。相反,下落速度随压裂液密度增大而降低,压裂液悬砂能力增强,有助于支撑剂的悬浮,矿场推荐使用小粒径、低密度支撑剂。

因此,众多学者从二氧化碳增黏和改善支撑剂两个角度开展研究,共同克服二氧化碳携砂和降滤失能力差的问题,共同推动二氧化碳纯干法压裂技术的应用。

1.2.3 摩阻大导致排量受限 液态二氧化碳作为牛顿流体,其特性是具有较大的摩阻,摩阻大小受液态二氧化碳的密度影响。具体摩阻计算首先需要根据雷诺数进行流态判断分析,再计算出摩阻系数,最后确定摩阻产生的压力降<sup>[15]</sup>。

GUPTA 等<sup>[16]</sup>提出,液态二氧化碳在压裂管柱中流动时因摩阻造成的压力降遵循 Fanning 公式:

$$\Delta p = 2f \frac{L \rho v^2}{d} \quad (1)$$

$$f = [4 \lg(d/\delta) + 2.28]^{-2} \quad (2)$$

$$Q = \frac{\pi}{4} d^2 v \quad (3)$$

由式(1)(2)(3)联立可得式(4):

$$\Delta p = 32f \frac{L \rho v^2}{\pi d} Q^2 \quad (4)$$

式中: $\Delta p$ -管内压力降,Pa; $\rho$ -气态或液态二氧化碳混合物密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $f$ -摩阻系数,量纲一; $v$ -液态二氧化碳流速, $\text{m}/\text{s}$ ; $d$ -压裂管柱内直径,m; $L$ -管柱长度,m; $\delta$ -压裂管柱粗糙度,量纲一; $Q$ -液态二氧化碳排量, $\text{m}^3/\text{min}$ 。

由式(4)可见,当压裂管柱一定、液态二氧化碳密度一定时,摩阻造成的压力降与排量平方成正比。而压裂现场往往以大排量作业为主,因此,若二氧化碳纯干法压裂排量增大,则其对应的压裂管柱摩阻损失增大,造成能量损失,功率损耗。高摩阻导致作业排量受限,因此,推动二氧化碳纯干法压裂技术的大规模推广应

用,还需对降低液态二氧化碳摩阻和管柱方面开展深入研究,研发出更加匹配的管柱与高效的液体二氧化碳减阻剂<sup>[17-18]</sup>。

1.2.4 碳源不稳定导致成本高 当二氧化碳作为压裂液时,对其量的需求是巨大的,而目前碳源与压裂现场的匹配还不太成熟,存在距离远,碳源价格高等不稳定的因素。目前,我国碳源企业捕集的二氧化碳成本在400元/吨左右,其运输方式基本以公路槽车为主,特别是在二氧化碳压裂方面的应用。单台槽车运输能力有限,压裂现场往往有几十台槽车往返运输,且目前二氧化碳槽车运输成本约为1元/(吨·公里),若压裂作业现场距离碳源企业较远时,二氧化碳到井场的成本价剧增,造成压裂成本居高不下。因此,制约了二氧化碳纯干法压裂技术的大规模推广应用。

1.2.5 矿场储存能力有限 目前,国内也有部分二氧化碳纯干法压裂作业案例,但作业规模相对较小,单井注入液态二氧化碳量最大也没有超过1000 $\text{m}^3$ 。压裂现场主要以储罐存储液态二氧化碳,以备压裂作业时使用,单个储罐储存能力约50 $\text{m}^3$ ,因此,达到千立方米级别的压裂作业规模至少需要20个储罐,占地面积较大,但井场场地有限,设备摆放布置需尽最大可能减小占地,故现有矿场储存二氧化碳的能力有限,难以满足二氧化碳纯干法压裂技术的大规模应用要求。

## 2 二氧化碳纯干法压裂技术研究进展

### 2.1 二氧化碳纯干法压裂技术

二氧化碳纯干法压裂技术以纯液态二氧化碳作为压裂液,首先,将支撑剂在密闭混砂设备内加压降温到储罐内液态二氧化碳的压力和温度,其次,将液态二氧化碳以压裂泵高压泵入地层,依靠其造壁功能,在储层中形成缝网;然后,将液态二氧化碳压裂液与已冷却好的支撑剂进行混合,并加入增黏剂等添加剂,提高液态二氧化碳的携砂能力,将其顶替进入裂缝有效支撑裂缝,形成高导流能力的渗流通道;最后,放喷返排完成作业<sup>[19]</sup>。

### 2.2 二氧化碳纯干法压裂技术要求

二氧化碳纯干法压裂技术要求,首先,要有充足的二氧化碳储备,且储备设备占地不宜太大;其次,所需管汇要求耐低温约-30 $^{\circ}\text{C}$ ;由于二氧化碳在地面管路中流动时会出现压力损失与环境温度升高造成二氧化碳气化且压裂泵和混砂车自吸能力有限,因此,为保证二氧化碳始终处于液态(-20 $^{\circ}\text{C}$ 、2 MPa)状态,并保证

压裂泵和混砂车可以获得充足的不含气相液态二氧化碳,液态二氧化碳储罐与压裂泵或混砂设备之间需要增压装置,二氧化碳增压泵以降低压力损失并进行喂液;混砂设备需要用专用设备,保证一定的温度、压力不影响液态二氧化碳的相态变化;压裂泵需要对传统压裂泵进行易损件等的更换。二氧化碳纯干法压裂流程示意图见图1。

### 3 二氧化碳纯干法压裂装备研究进展

#### 3.1 二氧化碳储液罐研究进展

液态二氧化碳储罐是保障井场二氧化碳纯干法压裂作业的基础设备,同时也是保证二氧化碳相关驱油和压裂工艺稳定的重要设备。井场储罐内的二氧化碳为液相,一般要求保证罐内液态二氧化碳温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压力为 $2\text{ MPa}$ ,罐体容积多为 $50\text{ m}^3$ ,罐体设计压力一般达到 $3\text{ MPa}$ 。

液态二氧化碳储罐在井场实际应用中,往往是外界环境温度高于罐内要求温度,故要求罐体具有良好的绝热能力。针对低温液体储罐传热漏热研究在国内国外已经有了较丰富的研究成果。目前,矿场应用主要以卧式双层罐体结构为主,夹层采用真空粉末绝热等手段,保证罐内温度的恒定。

高飞等<sup>[20]</sup>针对长庆油田第五采油厂黄X井区二氧化碳注入站内的液态二氧化碳储罐,使用计算流体动力学的方法,对储罐在存储过程中的动态流动换热情况进行了分析研究,为液态二氧化碳存储系统的安全性和经济性分析提供有力的支撑。马鸣等<sup>[21]</sup>对低温液态二氧化碳球形储罐损伤进行研究,提出了识别与预防措施。崔婷<sup>[22]</sup>对低温液态二氧化碳储罐制造工艺从

零部件的加工成形、焊接、无损检测、焊后热处理、耐压和泄漏试验、抽空检漏等方面进行了研究论证。葛亮亮等<sup>[23]</sup>对液态二氧化碳储罐用材 $16\text{MnDR}$ 及其他零部件用材 $16\text{Mn}, 0\text{Cr}18\text{Ni}9$ 的焊接性能分析,制定了相应的焊接工艺并应用于生产中,取得了良好的效果。目前来看液态二氧化碳储罐材料、焊接工艺、绝热结构等方面较为成熟,市场应用效果良好。但在二氧化碳纯干法压裂的压裂井场需求方面,目前研究较少,若二氧化碳纯干法压裂技术大规模应用,现有二氧化碳储罐难以满足井场需求,需从储罐提高容纳量、减小占地面积两个角度出发,研究更加适合二氧化碳纯干法压裂技术大规模作业现场的储罐。

#### 3.2 二氧化碳增压泵设备研究进展

液态二氧化碳在储罐内通常处于饱和蒸汽压作用下的临界平衡状态,微弱的吸热和压力降都会破坏相平衡,导致液态二氧化碳发生汽化。因此,在二氧化碳纯干法压裂作业过程中,二氧化碳增压泵设备可给管路中的液态二氧化碳进行加压,减小压力波动、保证压力稳定,同时降低供液不足的概率,避免产生干冰堵塞管道等现象。可利用气液分离器排出已经汽化产生的二氧化碳气体,确保为后续设备如压裂泵车提供的液态二氧化碳不含气相,防止泵发生气蚀等现象。因此,二氧化碳增压泵设备是二氧化碳纯干法压裂作业的核心设备<sup>[24]</sup>。

二氧化碳增压泵车/撬主要由底盘(底座)、动力系统、气液分离系统、吸入排出管汇系统、控制系统、增压泵系统等组成。二氧化碳增压泵车是一种由底盘车提供动力,利用取力器将动力从底盘车取出,输入到液压泵,液压泵使整个液压系统增压,带动液压电动机,液压电动机驱使二氧化碳增压泵工作,使整个增压泵车提供需求压力下的液态二氧化碳。另一种底盘车台上

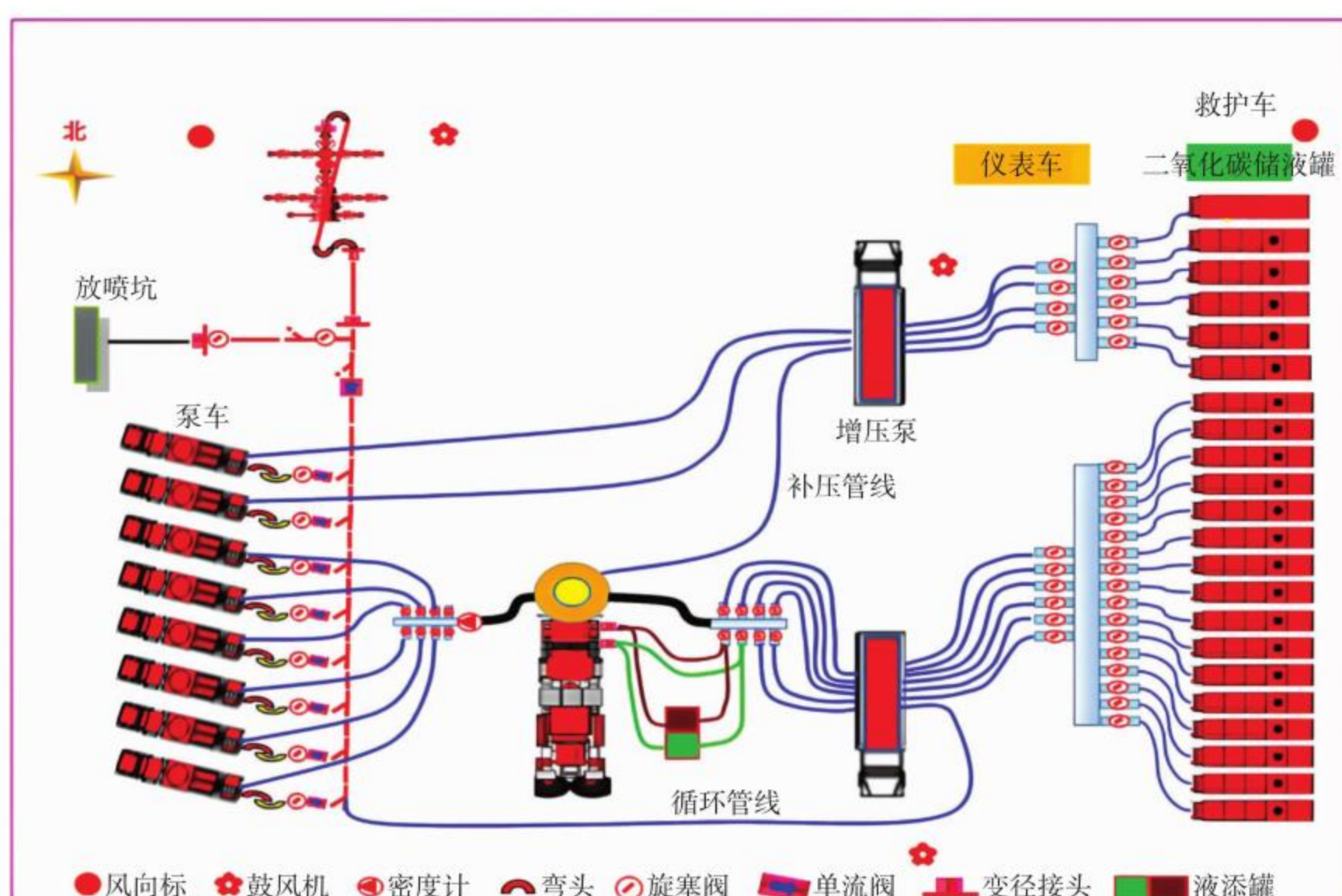


图1 二氧化碳纯干法压裂流程示意图

设置柴油发动机驱动液压系统。

二氧化碳增压泵的动力来源一般为电动机驱动,也有部分设计为柴油发动机驱动液压系统提供动力。“双碳”背景下,电动机驱动的二氧化碳泵撬凭借现场零排放、零污染,体积小、占地少等特点,将是未来发展的主流方向。

早期国内使用的二氧化碳增压设备主要进口美国 Stewart & Stevenson 公司的产品,该性能指标能满足当时的二氧化碳泡沫压裂作业。中原油田 2003 年引进了美国 SS 公司生产的 2 台增压泵车(额定压力:2.41 MPa、最大排量:4.65 m<sup>3</sup>/min)、8 台 20 t 液体容量的罐车等设备,可以完成二氧化碳泡沫压裂地面工艺流程,形成一套完整的设备,可以实现二氧化碳增压、泡沫伴注压裂的工程施工<sup>[24]</sup>。

目前,国内该设备开发相对成熟,今后的主要研究方向是满足大排量作业的需求,可以向二氧化碳纯干法压裂作业现场提供一种稳定性高、排量大的增压设备。国内现有主要开发厂家有杰瑞装备、中石化四机厂、川庆钻探、宝鸡三泉泵业等。该设备被广泛应用于二氧化碳前置压裂、泡沫压裂、准干法压裂等相关压裂技术作业现场,市场需求量大。

### 3.3 二氧化碳密闭混砂设备研究进展

20 世纪 80 年代,Bullen 首次开发了液体二氧化碳和支撑剂混合装置<sup>[25]</sup>。随后国外开发了一种效果更佳的液态二氧化碳密闭混合装置,该装置成功应用于矿场多口井压裂作业。随着技术发展又对其进行改进,该新型混砂装置应用于工程现场,在 3.3 m<sup>3</sup>/min 的施工处理量下,最大砂浓度可达 540 kg/m<sup>3</sup>,单台设备最大处理量可以达到 8.0 m<sup>3</sup>/min,在北美地区广泛应用。

目前,国内对二氧化碳密闭混砂设备的研究相对较少,主要有杰瑞装备、川庆钻探和三一石油,而矿场应用的仅有杰瑞装备和川庆钻探的设备。但目前都表现为加砂量小,加砂速度慢的特点,未能实现连续加砂作业,不能满足大规模压裂作业的需求。

杰瑞装备已开发了车载立罐式、车载卧罐式和撬装立罐式三种专用带压混砂设备<sup>[24]</sup>,目前,投入矿场应用的以车载立罐式为主。其参数具体为单台设备加砂能力约为 25 m<sup>3</sup>,最大输砂能力 2 m<sup>3</sup>/min,额定流量可达 8 m<sup>3</sup>/min。

川庆钻探开发的二氧化碳密闭混砂设备以卧式撬装为主见图 2,形成两种型号的二氧化碳密闭混砂装置,具备单次作业加砂 60 m<sup>3</sup> 以上的能力,其具体参数见表 1<sup>[26]</sup>。



图 2 川庆钻探二氧化碳密闭混砂设备

表 1 川庆钻探二氧化碳密闭混砂设备参数

主要参数	I 型	II 型
工作介质	液态二氧化碳与支撑剂	
工作温度/°C	-30	-30
额定工作压力/MPa	2.5	3.5
最大加砂量/m <sup>3</sup>	8	15
最大输砂速度/(m <sup>3</sup> /min)	0.8	1.0
数量/套	2	3

三一石油智能装备有限公司申请了一项发明专利 CN 114673478 A,一种二氧化碳压裂加砂<sup>[27]</sup>,但目前未见其设备及其矿场使用情况。也有一些学者基于文丘里原理研究二氧化碳密闭混砂设备,但未将其应用于矿场装备上进入矿场应用<sup>[28]</sup>。

因此,二氧化碳密闭混砂设备在加砂量及加砂速度方向瓶颈的突破,是二氧化碳纯干法压裂技术大规模推广应用的必经之路。需要更多的学者、企业关注投资,开发出性能更优、更大加砂能力或连续加砂作业的智能化二氧化碳密闭混砂设备,以满足大规模矿场应用。

### 3.4 二氧化碳压裂泵车研究进展

二氧化碳压裂泵车作为二氧化碳纯干法压裂技术的核心装备,其主要作用是向井底泵入高压流体造缝的核心装备。与传统压裂泵车作用相同、工作原理相同。但由于液态二氧化碳的低温特性,需要对传统压裂泵车进行改动,以更好地适应-20 °C 的低温环境,更高效地向地层供应高压流体。根据现场作业经验,目前只需对传统压裂泵车更换低温凡尔胶皮、盘跟、低压管汇部分等即可满足二氧化碳纯干法压裂的矿场需求。因此,压裂泵车通用性极强,降低了二氧化碳纯干法压裂的固体设备投资成本,有利于其大规模推广应用。

## 4 总结及展望

### 4.1 总结

二氧化碳纯干法压裂技术在北美地区已取得巨大成功<sup>[29]</sup>,在国内发展目前还处于初级阶段,该技术对储

层改造具有明显的优势,但同时目前也存在不少瓶颈,需要从各个领域对其进行逐个突破,共同推动该技术的大规模推广应用。作为石油装备开发人员,笔者重点关注二氧化碳纯干法压裂技术的成套设备开发情况,特别是二氧化碳储液罐、增压泵设备、密闭混砂设备和压裂泵车等核心设备的开发。

笔者从关键核心设备的开发方向入手,在其单位的大力支持下,为突破装备方面的瓶颈努力,力争实现突破,结合其他方向的突破共同推动二氧化碳纯干法压裂技术的大规模推广应用,进一步为我国“双碳”目标实现贡献力量。

#### 4.2 展望

二氧化碳纯干法压裂技术具有独特的优势,特别是对于页岩油气、致密油气等非常规油气资源开采储层改造方面,其是理想技术。当二氧化碳纯干法压裂技术瓶颈问题突破后,该技术将成为非常规油气资源开采的核心技术,是保障国家能源安全的重点技术。

“双碳”目标将有效加快二氧化碳纯干法压裂技术的发展,国家“双碳”目标和政策将带动各个领域对二氧化碳的研究。二氧化碳纯干法压裂技术具有封存大量二氧化碳、节约大量淡水资源等优势,对于碳达峰、碳中和、节约淡水资源意义重大。

综上所述,未来二氧化碳纯干法压裂技术发展前景更为广阔。

#### 参考文献:

- [1] 郑焰,白小丹,罗于建,等.非常规油气二氧化碳压裂技术研究进展[J].中国石油和化工标准与质量,2019,39(17):221-224,226.
- [2] 赵靖舟.非常规油气有关概念、分类及资源潜力[J].天然气地球科学,2012,23(3):393-406.
- [3] 梁锋.碳中和目标下碳捕集、利用与封存(CCUS)技术的发展[J].能源化工,2021,42(5):19-26.
- [4] 高智星.二氧化碳压裂液的研究及应用[J].化学工程与装备,2023,(6):78-79.
- [5] 刘安.二氧化碳干法压裂技术的应用及优缺点[J].化工管理,2020,(13):86-87.
- [6] 陈尧.二氧化碳干法压裂技术——应用现状与发展趋势[J].化工管理,2016,(30):77.
- [7] 周东强,王毅,王寅秋.二氧化碳压裂技术研究进展[J].山东化工,2023,52(1):94-96.
- [8] 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.
- [9] 李强,王彦玲,李庆超,等.新型 CO<sub>2</sub> 压裂用增稠剂的增稠性能及机理[J].钻井液与完井液,2019,36(1):102-108.
- [10] 闫若勤,赵明伟,李阳,等.二氧化碳压裂液增稠剂研究进展[J].油田化学,2022,39(2):366-372.
- [11] 孙宝江,孙文超.超临界 CO<sub>2</sub> 增黏机制研究进展及展望[J].中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(3):76-83.
- [12] 李晓枫.超临界二氧化碳增稠剂的筛选与性能评价[D].北京:中国石油大学(北京),2021.
- [13] 吴辰,朱沫,欧宇钧,等.CO<sub>2</sub> 干法压裂用增稠剂的发展现状[J].化工技术与开发,2023,52(3):38-44,59.
- [14] 杨宸.大分子聚合物对致密页岩 CO<sub>2</sub> 压裂液悬砂性影响模拟[J].当代化工,2021,50(5):1060-1063,1068.
- [15] 郑维师,宋振云,苏伟东.液态二氧化碳压裂施工压力分析研究与应用[C].2020 油气田勘探与开发国际会议论文集,2020.
- [16] GUPTA D V S,BOBIER D M.The history and success of liquid CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> fracturing fystem[C].SPE Gas Technology Symposium,1998.
- [17] 王燕平,付美龙,王俊.液态二氧化碳压裂管流摩阻计算与分析[J].能源化工,2023,44(2):43-47.
- [18] 刘广春.二氧化碳干法压裂发展现状及难点问题分析[J].当代化工研究,2021,(12):15-16.
- [19] 宋远飞.二氧化碳干法压裂技术应用现状与发展趋势[J].化工设计通讯,2017,43(12):71,75.
- [20] 高飞,郭志强,赵大庆,等.液态 CO<sub>2</sub> 储罐动态存储特性研究[J].化学工程与装备,2023,(2):160-164,173.
- [21] 马鸣,王继伟,纪鹏振,等.低温液态二氧化碳球形储罐损伤模式识别及防范措施[J].电站辅机,2022,43(4):10-14.
- [22] 崔婷.低温液态二氧化碳储罐制造工艺研究[J].石油和化工设备,2016,19(1):40-42.
- [23] 葛亮亮,姜永建,蔡云芳,等.液态二氧化碳储罐焊接工艺[J].石油化工设备,2011,40(S1):54-56.
- [24] 张树立,韩增平,潘加东.CO<sub>2</sub> 无水压裂工艺及核心设备综述[J].石油机械,2016,44(8):79-84.
- [25] 李珊,郑维师.国外新型 CO<sub>2</sub> 密闭混砂装置及液态 CO<sub>2</sub> 压裂案例分析[J].钻采工艺,2017,40(5):36-38.
- [26] 杨延增,叶文勇,聂俊.CO<sub>2</sub> 密闭混砂装置在长庆苏里格气田的应用[J].石油科技论坛,2017,36(S1):148-150,201.
- [27] 边疆,马壮壮,谢学志.二氧化碳压裂加砂设备及加砂系统、加砂方法:CN 114673478 A[P].2022-06-28.
- [28] 马卫国,牟荻,彭平生.基于 CFD 的液态 CO<sub>2</sub> 密闭混砂器结构参数设计[J].石油机械,2018,46(4):60-64.
- [29] 田磊,何建军,杨振周,等.二氧化碳蓄能压裂技术在吉林油田的应用[J].钻井液与完井液,2015,32(6):78-80,84,109.