

# 油田CO<sub>2</sub>驱地面工程工艺技术分析

王婉青

中油辽河工程有限公司 辽宁 盘锦 124010

**摘要:** 在全球能源需求持续增长与环境保护压力日益增大的背景下, 油田开发技术得以全面创新, 其中二氧化碳(CO<sub>2</sub>)驱油技术作为一种高效、环保的三次采油技术, 近年来受到了广泛关注。该技术不仅能够显著提高油田采收率, 延长油井生产寿命, 还有助于实现CO<sub>2</sub>的封存与减排, 对缓解全球温室效应具有重要意义。因此, 本文将对油田CO<sub>2</sub>驱地面工程工艺技术的深入分析, 以期对相关领域的研究与实践提供参考。

**关键词:** 油田; CO<sub>2</sub>驱; 地面工程; 工艺技术

自20世纪50年代首次提出CO<sub>2</sub>驱油概念以来, 该技术经历了从理论探索到工程实践的漫长历程。早期的研究主要集中在CO<sub>2</sub>与原油的混相驱替机制上, 之后逐渐扩展到非混相驱及超临界CO<sub>2</sub>驱等多个领域。在全球对能源安全和环境保护重视程度提升的形势下, CO<sub>2</sub>驱油技术因其独特的优势而备受瞩目, 该技术不仅能够有效应对低渗、特低渗透油藏开发难题, 还能在实现油田高效开发的同时, 减少CO<sub>2</sub>排放, 促进碳循环经济的发展。

## 1 油田 CO<sub>2</sub> 驱地面工程分析

油田CO<sub>2</sub>驱地面工程是复杂的系统工程, 其中CO<sub>2</sub>捕集系统负责从工业排放源或天然气加工过程中捕集高纯度的CO<sub>2</sub>, 捕集方法包括化学吸收法、物理吸附法、膜分离法等, 具体选择取决于CO<sub>2</sub>源的特性、捕集成本及后续处理需求; CO<sub>2</sub>净化系统负责对捕集到的CO<sub>2</sub>进行净化处理, 去除其中的杂质如水分、烃类气体、硫化物等, 以达到注入地层的技术标准, 净化工艺包括常温蒸馏法、变压吸附法、膜分离法等, 能够提高CO<sub>2</sub>纯度, 减少对地层和设备的潜在损害; CO<sub>2</sub>运输系统用于将净化后的CO<sub>2</sub>安全、高效地运输至油田注入站, 运输方式包含管道输送、槽车运输、船舶运输等; CO<sub>2</sub>注入系统负责在油田注入站将CO<sub>2</sub>注入地层, 实现驱油目的, 注入方式包括连续注入、间歇注入、水气交替注入等。

油田CO<sub>2</sub>驱地面工程的工艺流程主要包括以下几个步骤: (1) CO<sub>2</sub>捕集。根据CO<sub>2</sub>源的特性选择合适的捕集方法, 将CO<sub>2</sub>从排放源或天然气加工过程中分离出来, 捕集过程中需控制操作条件, 以优化捕集效率和降低能耗。(2) CO<sub>2</sub>净化。对捕集到的CO<sub>2</sub>进行净化处理, 去除其中的杂质, 净化工艺的选择需考虑杂质种类、含量及净化后CO<sub>2</sub>的纯度要求, 经过净化处理后的CO<sub>2</sub>需达到注入地层的技术标准, 以确保不会对地层和设备造成损害<sup>[1]</sup>。(3) CO<sub>2</sub>运输。将净化后的CO<sub>2</sub>通过管道、槽车或船舶等

方式运输至油田注入站, 运输过程中需严格控制CO<sub>2</sub>的温度、压力等参数, 以确保其处于安全、稳定的状态, 还需对运输设备进行定期维护和检查, 以消除安全隐患。

(4) CO<sub>2</sub>注入。在油田注入站将CO<sub>2</sub>注入地层, 注入前需对地层进行详细的地质勘探和评价, 以确定合适的注入井位和注入参数; 注入过程中需实时监测地层压力、温度等参数的变化情况, 并根据监测结果及时调整注入量、压力等参数, 以优化驱油效果, 同时需要对注入井进行定期维护和检查, 以确保其正常运行。(5) 监测与控制。监测内容包括地层压力、温度、CO<sub>2</sub>注入量等参数的在线监测; 控制内容包括自动调节注入量、压力等参数以及处理异常情况。通过监测与控制系统的运行, 可以及时发现并解决问题, 确保CO<sub>2</sub>驱地面工程的顺利实施和预期目标的实现。

油田CO<sub>2</sub>驱地面工程在全球范围内得到了广泛应用, 并取得了显著成效, 比如作为全球首个大规模商用CO<sub>2</sub>驱项目, 美国SACROC油田自20世纪80年代开始, 实施CO<sub>2</sub>驱油技术以来取得了巨大成功, 该项目通过连续注入高纯度CO<sub>2</sub>, 实现了油藏采收率的显著提高, 并延长了油井生产寿命, 同时该项目还积累了丰富的经验和数据, 为后续类似项目的开发提供了有力支持; 大庆油田作为我国最大的油田之一, 自20世纪80年代起开始, 进行CO<sub>2</sub>驱油技术的研究和应用工作, 经过多年的努力, 大庆油田已经建立了完善的CO<sub>2</sub>驱地面工程体系, 并在多个区块成功实施了CO<sub>2</sub>驱油项目, 在提高采收率、降低生产成本等方面取得了显著成效, 为大庆油田的可持续发展提供了有力保障。

## 2 油田 CO<sub>2</sub> 驱地面工程工艺技术

### 2.1 超临界CO<sub>2</sub>注入技术

超临界CO<sub>2</sub>是指温度和压力均超过其临界点的CO<sub>2</sub>状态, 在超临界状态下, CO<sub>2</sub>的密度接近液体, 而扩散性则

类似于气体，独特的物理性质使得超临界CO<sub>2</sub>在油田驱油中具有显著优势。CO<sub>2</sub>的临界点为31.1℃和7.39MPa，当温度和压力均超过临界点时，CO<sub>2</sub>进入超临界状态，此时CO<sub>2</sub>的密度、粘度、扩散系数等物理性质介于气态和液态之间，表现出独特的溶解能力和传质性能；在超临界状态下，CO<sub>2</sub>对原油中的某些重质烃类具有良好的溶解能力，通过溶解作用CO<sub>2</sub>能够降低原油粘度，改善其流动性，从而提高驱油效率；在合适的压力、温度和原油组分条件下，超临界CO<sub>2</sub>能够与原油形成混相前缘，混相效应消除了油-气界面张力，使得驱替过程更加高效，采收率显著提升，且超临界CO<sub>2</sub>的扩散系数远高于液态CO<sub>2</sub>，所以在驱油过程中，超临界CO<sub>2</sub>能够更快地渗透到油藏深处，与更多的原油接触并发生作用<sup>[2]</sup>。

超临界CO<sub>2</sub>注入系统在油田地面工程中的应用，是超临界CO<sub>2</sub>注入技术的核心环节，该系统负责将捕集、净化后的超临界CO<sub>2</sub>安全、高效地注入油田地层中，以实现提高采收率的目的。超临界CO<sub>2</sub>注入系统主要由注入泵、注入井、控制系统以及相关的管道和阀门等组成，其中注入泵需具备高压、大流量的特性，以满足超临界CO<sub>2</sub>注入的需求，注入井则经过特殊处理，能够承受高压注入过程中的机械应力和化学腐蚀，控制系统则负责实时监控和控制注入过程中的各种参数，以确保注入的准确性和安全性。

## 2.2 CO<sub>2</sub>管道输送技术

CO<sub>2</sub>管道输送技术主要是利用管道作为载体，将压缩后的CO<sub>2</sub>气体或液化CO<sub>2</sub>从一处输送到另一处，其基本原理基于流体力学和热力学，结合CO<sub>2</sub>的物理化学特性，通过管道设计、压力控制、温度调节等手段，确保CO<sub>2</sub>在输送过程中的安全、稳定和高效。CO<sub>2</sub>管道输送系统类似于天然气和石油制品输送系统，主要包括管道、压缩机站、中间加压站及其辅助设备，输送过程中CO<sub>2</sub>首先通过压缩机进行压缩，提高压力至适合管道输送的水平，然后高压CO<sub>2</sub>进入管道，在管道内流动并可能经过多个中间加压站进行压力补充，最后CO<sub>2</sub>被输送到目的地，如油田注入井或储存设施。在管道输送过程中，需要密切关注CO<sub>2</sub>的相态变化，CO<sub>2</sub>的相态（气态、液态、超临界态）取决于其温度和压力条件，不同的相态对管道材料、输送效率及安全性有不同的要求，比如液态CO<sub>2</sub>需要低温保温措施以防止蒸发；超临界CO<sub>2</sub>则因其高密度和高扩散性而有利于高效输送<sup>[3]</sup>。

在应用管道输送技术时，管道设计是CO<sub>2</sub>管道输送技术的基础，设计过程中需要考虑CO<sub>2</sub>的输送量、输送距离、地形地貌、气候条件等因素，并根据CO<sub>2</sub>的相态特性

选择合适的管道直径、壁厚及材质，比如液态CO<sub>2</sub>输送管道需要采用具有良好保冷性能的材料，并设置隔热层以防止热量传递导致CO<sub>2</sub>蒸发，超临界CO<sub>2</sub>输送管道则更注重材料的耐压性和耐腐蚀性。在CO<sub>2</sub>管道输送过程中，必须做好压力和温度的控制，通过调节压缩机的工作状态和中间加压站的设置，可以控制管道内的压力水平，确保CO<sub>2</sub>在输送过程中保持稳定的相态，同时需采取低温保温措施，防止CO<sub>2</sub>蒸发导致压力升高，温度控制则主要通过隔热层、冷却系统等方式实现<sup>[4]</sup>。

## 2.3 CO<sub>2</sub>净化工艺

CO<sub>2</sub>净化技术的核心目标是将捕集到的CO<sub>2</sub>中的杂质去除，使其达到注入地层的技术标准，净化过程通常基于不同杂质与CO<sub>2</sub>在物理或化学性质上的差异进行分离，常用的CO<sub>2</sub>净化方法包括溶剂吸收法、变压吸附法、膜分离法以及常温蒸馏法等。溶剂吸收法利用特定溶剂对CO<sub>2</sub>的高选择性吸收能力，将CO<sub>2</sub>从混合气体中分离出来。常用的吸收剂有胺溶液等，混合气体通过吸收塔，与吸收剂逆流接触，CO<sub>2</sub>被吸收剂吸收后形成富液，富液经过再生处理释放出CO<sub>2</sub>，吸收剂循环使用；变压吸附法利用吸附剂对混合气体中不同组分吸附能力的差异，在压力变化下实现组分的分离，该过程中混合气体在高压下通过吸附床层，CO<sub>2</sub>被吸附剂吸附，降低压力后，吸附剂上的CO<sub>2</sub>脱附并被收集；吸附剂再生后重新用于吸附过程；膜分离法利用特殊膜材料的选择透过性，允许CO<sub>2</sub>通过而阻止其他气体通过，从而实现分离，先在混合气体在膜的一侧加压，CO<sub>2</sub>在浓度差或压力差驱动下通过膜材料到达另一侧被收集，其他气体则被膜阻挡在原侧；常温蒸馏法利用不同组分沸点的差异，在蒸馏塔中实现组分的分离，混合气体经过预处理后进入蒸馏塔，在塔内通过加热和冷凝过程使不同组分在不同温度下汽化或冷凝，从而实现分离。

在油田CO<sub>2</sub>驱地面工程中，CO<sub>2</sub>净化技术的具体应用涉及多个环节，包括原料气分析、净化工艺选择、设备配置与操作、净化效果监测等。以常温蒸馏为例，在应用时首先需要对捕集到的CO<sub>2</sub>原料气进行详细分析，了解其组成成分及含量，包括CO<sub>2</sub>的含量、水分含量、烃类气体含量、硫化物含量等，原料气分析的结果将直接影响净化工艺的选择和设备配置，之后根据原料气分析结果和净化目标要求，选择合适的净化工艺。其次，蒸馏塔是核心设备，负责实现不同组分的分离，根据原料气组成和净化目标要求设计蒸馏塔的结构和参数；再沸器为蒸馏塔提供热量，使原料气中的低沸点组分汽化并进入塔顶；冷凝器将塔顶流出的汽化组分冷凝成液体并收

集,通常采用液氨作为冷凝介质<sup>[5]</sup>。

#### 2.4 CO<sub>2</sub>驱产出气回收利用技术

CO<sub>2</sub>驱产出气回收利用技术的核心目标,是将产出气中的CO<sub>2</sub>进行有效分离并回收利用,同时尽可能回收其中的轻质油和烃类气体,该技术基于不同组分在物理或化学性质上的差异进行分离,常见的分离方法包括精馏法、低温提馏法等。精馏法利用不同组分沸点的差异,在精馏塔中实现组分的分离,通过加热使低沸点组分汽化并进入塔顶,冷凝后收集;高沸点组分则留在塔底,适用于处理CO<sub>2</sub>含量较高且需要高纯度CO<sub>2</sub>的场合,通过多级精馏可以进一步提高CO<sub>2</sub>的纯度;低温提馏法在低温条件下利用不同组分冷凝点的差异进行分离,通过降低温度使高冷凝点组分液化并收集,而低冷凝点组分则保持气态,适用于处理含有大量轻质油和烃类气体的产出气,通过低温提馏可以有效回收有价值的组分。

在采用CO<sub>2</sub>驱产出气回收利用技术时,首先需要对油田生产井产出的气体进行集中收集,通常通过建设专门的集气站或利用现有的油气处理设施实现,收集过程中需要确保产出气的压力和温度稳定,以防止组分发生变化或形成水合物等不利情况;收集到的产出气通常含有一定的水分、颗粒物等杂质,杂质会对后续的分离提纯过程造成不利影响,所以在进行分离提纯之前,需要对产出气进行预处理,预处理过程包括脱水、除尘、脱硫等环节,以确保产出气的清洁度满足后续工艺要求;分离提纯是CO<sub>2</sub>驱产出气回收利用技术的核心环节,需要将预处理后的产出气送入精馏塔进行初步分离,通过加热使低沸点组分(如甲烷、乙烷等烃类气体)汽化并进入

塔顶,冷凝后收集作为副产品,高沸点组分(主要是CO<sub>2</sub>和少量轻质油)则留在塔底,之后将精馏塔底的高沸点组分送入低温提馏装置进行进一步分离,通过降低温度使轻质油液化并收集,CO<sub>2</sub>则保持气态并通过后续工艺进行回收利用。经过分离提纯后得到的CO<sub>2</sub>和轻质油等产品,具有较高的利用价值,CO<sub>2</sub>可以作为驱油剂再次注入地层以提高采收率,轻质油则可以作为化工原料或燃料进行利用,且分离过程中产生的其他副产品(如甲烷、乙烷等烃类气体)也可以根据实际情况进行回收利用或销售。

### 3 结束语

综上所述,在油田开发过程中,CO<sub>2</sub>驱地面工程技术具有重要作用,所以需要明确其应用要点,掌握关键技术,从而能够提升油田开发效率,促进我国油田工程建设与发展。

### 参考文献

- [1]曹万岩.大庆油田CCUS-EOR上下游一体化地面工艺技术路线浅析[J].油气与新能源,2022,34(3):103-108.
- [2]曹力元.苏北油田CO<sub>2</sub>驱油同心双管分层注气技术[J].石油钻探技术,2022,50(4):109-113.
- [3]袁士义,马德胜,李军诗,等.二氧化碳捕集、驱油与埋存产业化进展及前景展望[J].石油勘探与开发,2022,49(4):828-834.
- [4]张莉.中国石化东部老油田提高采收率技术进展及攻关方向[J].石油与天然气地质,2022,43(3):717-723.
- [5]王香增,杨红,王伟,等.延长油田低渗透油藏提高采收率技术进展[J].油气地质与采收率,2022,29(4):69-75.