

船舶运输 CO₂ 注入工艺研究

王思瑶 (中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257100)

摘要: 我国华东沿海地区新型炼化企业集中, 碳排放量约占全国 25%。在“双碳”大背景下, 计划利用东海盆地的西湖凹陷实现 CO₂ 海上地质封存。本文基于低温运输船来流及封存地注入条件, 运用 hysys 软件开展注入工艺模拟。旨在为后续海上平台 CO₂ 注入封存工程的实施提供帮助和指导。

关键词: 相态分析; 注入工艺模拟; 海上封存; 船舶输送; 液态 CO₂

中图分类号: TE89 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 033-0118-03

Research on CO₂ Injection Process in Ship Transportation

Wang Siyao (Sinopec Petroleum Engineering & Construction Co., Ltd., Dongying Shandong 257100, China)

Abstract: The concentration of new oil refining enterprises in the coastal regions of East China accounts for approximately 25% of the country's total carbon emissions. Under the dual carbon goals, plans are underway to achieve offshore geological storage in the Xihu Sag of the East China Sea Basin. Based on the inflow conditions of cryogenic carriers and the injection requirements of the storage site, this study employs HYSYS software to simulate the injection process. The aim is to provide assistance and guidance for the subsequent implementation of offshore platform CO₂ injection and storage projects.

Keywords: Phase analysis; Injection process simulation; Offshore storage; Ship transportation; Liquid carbon dioxide

CO₂ 减排是当前国际关注的重点问题, 而将 CO₂ 注入地下地质构造实现永久封存是 CO₂ 减排的有效途径。其主要包括: 陆地封存和海上封存。就陆地封存而言, 全球已有多个陆地 CO₂ 封存示范项目在运行中, 如: 中石油在吉林油田开展的 CCUS-EOR、中石化“齐鲁石化-胜利油田百万吨级 CCUS 项目”等, 且已有部分项目开始实现商业化应用, 这些项目通过捕集工业排放的 CO₂ 并将其注入地下储层, 实现了减排和经济效益的双重目标。相比之下, 海上 CO₂ 封存技术仍处于初期阶段, 碳源多为海上油田伴生 CO₂, 对于陆地 CO₂ 离岸封存模式下的注入工艺研究较少。

我国华东沿海地区高碳企业较为集中, 但路上沉积盆地面积小、人口密集、CO₂ 封存条件有限; 而位于东海盆地的西湖凹陷储层物性好, 沉积层厚, 十分适合开展海上 CO₂ 封存。因此本文以运输船来液及封存地环境作为基础条件, 利用 HYSYS 软件对海上 CO₂ 注入工艺进行设计和优化, 为后续海上 CO₂ 封存项目提供方案选择, 助力海上 CO₂ 注入标准化设计的实现。

1 研究基础

密相 CO₂ 物理性质变化稳定, 可提高其在流程中的流动稳定性, 减少因流动不稳定引发的流体动力噪声、振动、冲刷等问题, 降低对流程管线和设备的损害。其次, 从升温能耗角度, 在起始温度相同的情况下, 密相注入温度小于超临界态, 意味着密相注入工艺升温能耗更低, 此外密相注入工艺流程更短、设备更少, 可提高整个注入过程的效率和经济性, 因此 CO₂ 选择密相注入。

2 密相注入工艺模拟设计

根据注入相态确定中密相 CO₂ 注入流程设计思路, 其工艺应包括 3 个方面: 分离、气相处理及增压加热单元。

2.1 分离

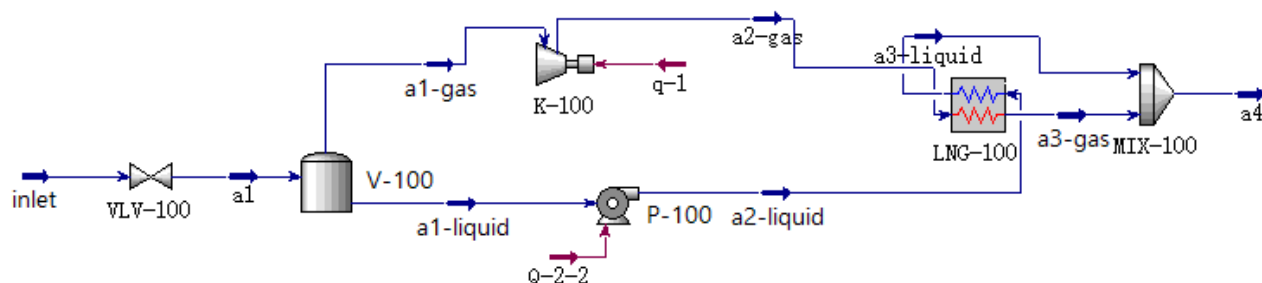
考虑到低压二氧化碳运输船来流存在气液两相, 直接进行增压处理可能会造成注入泵发生汽蚀, 因此在工艺流程中需要先设置缓冲罐对来流进行初步分离, 减小气相 CO₂ 对后续增压设备的影响, 同时可以减少卸船时的流量波动, 保证后续增压设备可被稳定给液。根据来流状态, 确定 CO₂ 缓冲罐的设计压力为 1.5MPa, 设计温度为 -60℃。根据初选出的 CO₂ 缓冲罐参数, 在 HYSYS 中搭建分离流程, 模拟缓冲罐出口气液两相分离情况, 具体数据见表 1。根据表中数据可知, 缓冲罐气相出口流量为 10550kg/h, 占全部 CO₂ 的 8.86%。

表 1 运输船来流分离流程中各物流参数

物流	inlet	a1	a1-gas	a1-liquid
温度 (℃)	-50	-51.41	-52.16	-51.88
压力 (kPa)	1100	1000	950	970
质量密度 (kg/m ³)	250	215.7	21.33	1150
质量流量 (kg/h)	119050	119050	10550	108500

2.2 气相处理

对于分离出的气相 CO₂, 提出两种处理方式: 一是利用增压后气液两相温差实现气体液化, 二是气相 CO₂ 回流至舱室补压。下面将在 HYSYS 软件中探究两

图1 CO₂增压后两相换热流程图

种处理方式的可行性。

2.2.1 利用增压后气液两相温差液化气体

根据含杂质CO₂相平衡曲线可知，当缓冲罐气相出口温度处于-50℃时，液化压力需达到2795kPa以上。因此在模型中将气液两相同时增压至3000kPa，探究气液两相换热后气相能否达到该压力下的液化温度，模拟流程及结果可见图1、表2。

表2 换热流程中各物流参数

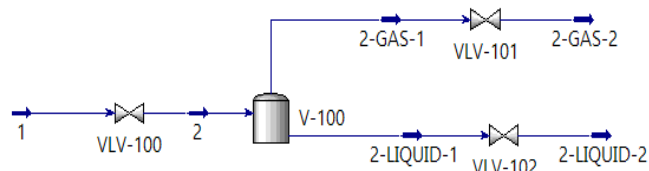
物流	inlet	a1	a1-gas	a1-liquid	a2-gas	a2-liquid
温度 (°C)	-50	-51.41	-52.16	-51.88	42.73	-50.84
压力 (kPa)	1100	1000	950	970	3000	3000
质量密度 (kg/m ³)	250	215.7	21.33	1150	47.09	1151
质量流量 (kg/h)	119050	119050	10550	108500	10550	108500
物流	a3-gas	a3-liquid	a4			
温度 (°C)	-26	-44.95	-36.8			
压力 (kPa)	2950	2950	2950			
质量密度 (kg/m ³)	902	1129	946.7			
质量流量 (kg/h)	10550	108500	119050			

由模拟数据可知，在气相CO₂增压过程中温度急速升高，在压力增至3000kPa时温度已达42.73℃，根据含杂质CO₂相平衡曲线判断，此条件下CO₂仍为气相，实现液化需将其温度降至-25.75℃以下。而同压力下液相CO₂温度较低，仅为-50.84℃，二者通过换热器换热后，气相CO₂温度可达到-26℃，满足液化温度要求。

2.2.2 气相回流至舱室补压

利用hysys软件搭建舱室模型（图2），模拟输送介质不断输出时舱室压力随时间的变化情况。当舱室内不采取任何补气措施时，其内部压力呈现先上升后下降的趋势。分析认为，在卸船初始阶段，随着输送介质的流出，舱室内压力开始降低，致使部分液相CO₂发生气化，增加或维持罐内气体压力。但随着流出介质的增多，依赖罐内CO₂自身气化量已无法维持罐内压力恒定，于是开始下降，直至约41min后舱室

内压力降低至705kPa以下，根据含杂质CO₂相特性曲线判断，此时舱室内CO₂均成气相。

图2 低压LCO₂运输船舱室出液流程

为避免上述情况的发生，在舱室内压力下降时，应采取一定的补气措施，所需要的补气量可根据介质的质量平衡计算，公式如式1所示。通过计算得知，在舱室出液流量为552m³/h时，舱室内所需的补气流量应为5342m³/h。考虑到舱室内流出的介质中含有一部分气相CO₂，且缓冲罐能够对气液进行简单分离，因此可在缓冲罐上部增设气相回流管线，利用这部分气相来协助舱室稳压，通过换算得知在舱室条件下缓冲罐出口气相流量为473.51m³/h，未超出舱室补气需求，因此可直接汇入运输船补气系统管线。

$$L \times \rho_L + V_1 \times \rho_{g1} = V_2 \times \rho_{g2} \quad (\text{式1})$$

式中：

L —液相CO₂流出速率，m³/h；

ρ_L —流出条件下液相CO₂的密度，kg/m³；

V_1 —气相CO₂流出速率，m³/h；

ρ_{g1} —流出条件下气相CO₂的密度，kg/m³；

V_2 —补气时气体流入速率，m³/h；

ρ_{g2} —舱室条件下气相CO₂的密度，kg/m³。

对比两种处理方式发现，缓冲罐气相出口介质回流至舱室补压既可减少舱室外加气体用量，又节省气相增压和换热部分的能耗，减少设备数量和占地面积，更符合海上工艺设计标准。

2.3 增压换热

CO₂注入泵对增压液体含气量十分敏感，一旦混有气体，泵的效率会降低，若气体含量过高则会停止排液。因此严格控制高压注入泵吸入液态CO₂中的气体含量是提高泵效率的关键。缓冲罐内气液两相已经

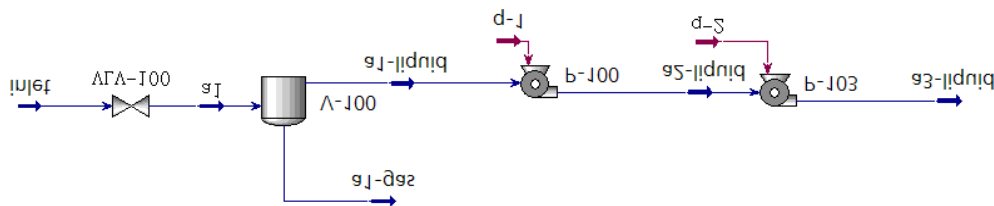


图3 液态CO₂增压工艺流程

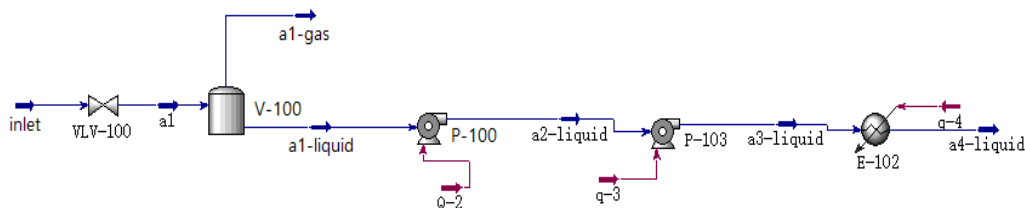


图4 低压运输船来液时液态CO₂注入工艺

达到平衡状态，但在泵启动时由于环境条件的转变，不可避免会有气相析出，影响注入泵效率。而控制注入泵内含气量的方法有两种：一是降低液体的温度，二是提高液体压力。对于-51.88℃的液态CO₂来说，增压比降温更易实现。在注入泵前可采用喂液泵将液态CO₂的压力提升至2-3MPa，确保注入泵进口液态CO₂处于过冷状态。

在HYSYS中搭建增压模型，设置喂料泵将液态CO₂压力提升至3MPa，再进入注入泵进行二次增压，具体模拟流程及模拟数据如图3、表3。

表3 增压过程中各物流参数

物流	inlet	a1	a1-gas	a1-liquid	a2-liquid	a3-liquid
温度（℃）	-50	-51.41	-52.16	-51.88	-50.84	-45.77
压力（kPa）	1100	1000	950	970	3000	12970
质量密度（kg/m ³ ）	250	215.7	21.33	1150	1151	1153
质量流量（kg/h）	119050	119050	10550	108500	108500	108500

根据表3可知，经过两级增压后的液态CO₂温度为-45.77℃，根据注入相态分析中提到的注入温度范围，需要对增压后的液态CO₂进行加热。考虑到热媒加热、海水换热等方式皆需要单独的换热介质加热系统，涉及设备较多，电加热方式更加方便且节省空间，因此采用电加热器来提升液态CO₂温度。

综上所述，液态CO₂注入工艺流程（图4）为低压运输船来液进入缓冲罐，经短暂分离后气相回流至舱室补气系统，液相CO₂先后进入喂料泵、注入泵增压，达到注入压力（12.97MPa）后进入电加热器升温，将注入CO₂温度提升至-20℃以上。根据hysys搭建的液态CO₂注入工艺模型，得知整个工艺流程能耗为1101.59kW，其中电加热器能耗最高，达682.47kW。

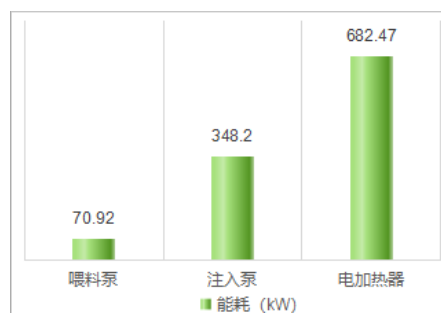


图5 主要设备能耗

3 小结

本文结合项目基础数据和HYSYS模拟软件对海上平台CO₂注入工艺流程进行设计和优化，对注入工艺进行模拟研究，从分离、气相处理、增压加热3个方面展开分析，形成低压CO₂运输船方式下的液态CO₂注入工艺流程。

参考文献：

- [1] 喻西崇,李志军,郑晓鹏,等.含杂质CO₂体系相态特性及CO₂低温液态储存蒸发特性实验研究[J].中国海上油气,2009,21(3):4.
- [2] 汪蝶,张引弟,杨建平,等.CO₂输送、液化与储存方案流程的HYSYS模拟及优化[J].油气储运,2016,35(10):6.
- [3] 孙锐艳.CO₂管输及超临界注入技术研究与应[D].北京:中国石油大学,2013.
- [4] 王国锋.吉林油田二氧化碳捕集、驱油与封存技术及工程实践[J].石油勘探与开发,2023,50(1):219-226.
- [5] 叶静,赵顺超,宋涛,等.二氧化碳注入设备的应用研究[J].应用化工,2015(9):113.

作者简介：

王思瑶（1998-），女，汉族，山东济宁人，硕士，助理工程师，研究方向：海洋油气储运。