

中石化西南区块二氧化碳前置压裂施工流程优化

程鑫 邱思杨 唐银鹏 段睿泉

中石化西南石油工程有限公司井下作业分公司 四川 德阳 618000

摘要: 目的: 旨在通过优化CO₂前置压裂施工流程, 实现中石化西南区块施工效率与作业安全性的提升。方法: 梳理理想化CO₂前置压裂的施工流程, 剖析其内循环冷泵失效、试压不完整、闸阀倒换复杂问题, 并通过理论推导与现场实践予以解决。结果: 通过实施CO₂泵车同步循环冷泵、液态CO₂试压、单段单次开关井等措施, 形成标准化CO₂前置压裂施工流程。结论: 标准化CO₂前置压裂施工流程将单段施工时间平均缩短1.5h, 并显著提升作业安全性与操作便捷性, 具备在中石化西南区块推广的应用价值。

关键词: 二氧化碳; 二氧化碳前置压裂; 内循环冷泵; 二氧化碳相态变化; 试压不全

0 引言

CO₂前置压裂技术优势显著, 且国内外已有较多实践^[1,2], 但在中石化西南区块, 该技术

的现场应用案例仍相对有限, 可供参考的本地化工程经验不足。目前, 其工艺参数与施工流

程多依赖外部经验或理论推导, 未能结合本区块的工程条件进行针对性优化。此外, 工艺实

施中涉及的高压、低温及CO₂相变等复杂工况, 也带来了诸多潜在安全风险^[3,4]。这些因素

共同制约该技术在本区域的规模化推广与安全高效应用。

本文针对中石化西南区块CO₂前置压裂施工流程的应用痛点, 对比优化前后施工效率与作业周期等关键指标, 最终形成适配本区块工程条件的标准化CO₂前置压裂施工流程。

1 CO₂前置压裂施工流程在的问题

1.1 内循环冷泵失效问题

CO₂泵车内循环冷泵作业中, 采用单台槽车作为碳源供应, 每次仅启动一台泵车进行冷泵与排空操作, 其余泵车保持闭锁状态。如图1所示, 单台泵车液态CO₂排量约为0.4m³/min, 冷泵持续2100秒(约35分钟)后, 关闭

内循环阀门后, 使用CO₂泵车进行备压操作。经过数次打压尝试, 管线内最高压力仅达2.1MPa, 无法继续积压。

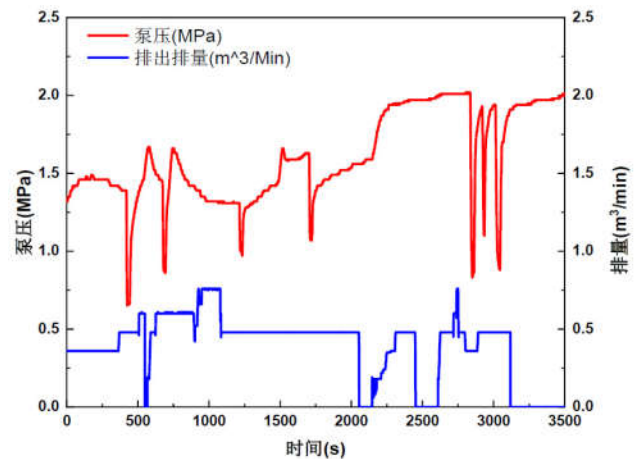


图1 内循环冷泵作业及打备压曲线

原因在于4台CO₂泵车, 每台泵车最低档位排量为0.4m³/min。但内循环冷泵作业中, 仅使用一台槽车供碳, 单台槽车碳源最大仅能提供液态CO₂排量0.5m³/min, 所以4台CO₂泵车并不能同时运行, 而采取泵车逐一冷泵循环策略, 造成冷泵循环失效, 具体流程如图2所示。

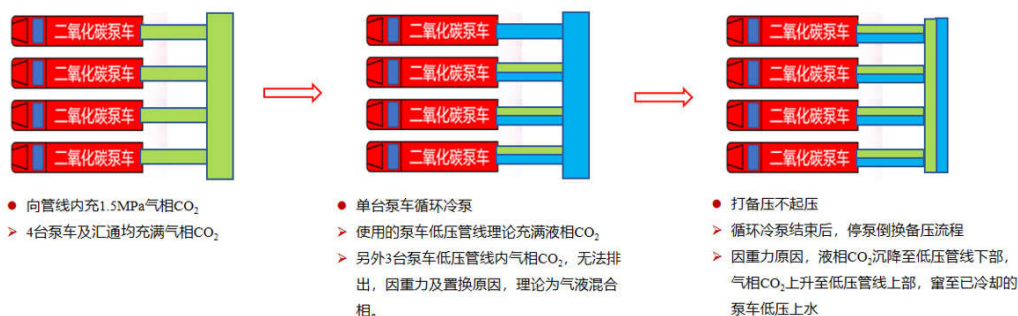


图2 内循环冷泵失效原因

1.2 CO₂管线高压区试压不完整问题

在对CO₂管线高压区进行氮气试压时，由于单流阀的

单向流动特性，使得CO₂泵车出口至单流阀之间的这段高压管线成为试压盲区，如图3所示，无法检测其承压完整性。

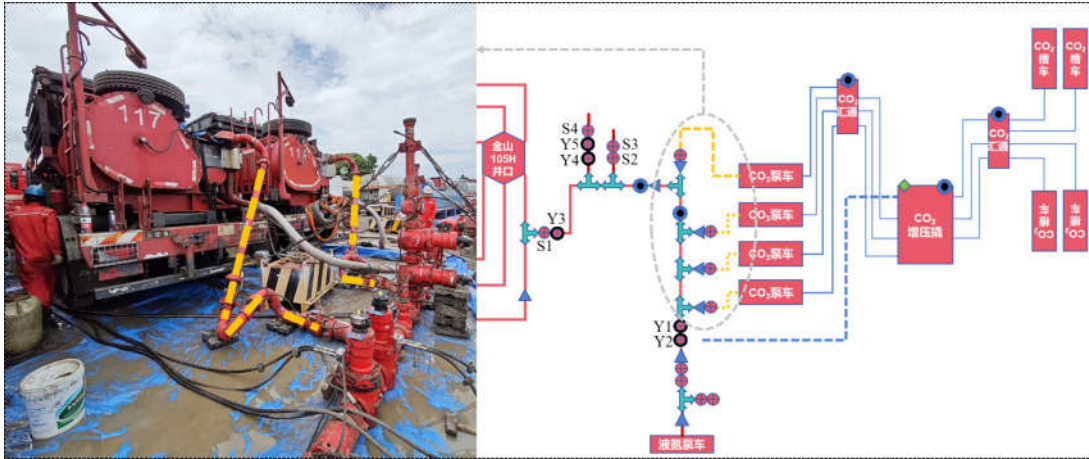


图3 CO₂泵车排出管线氮气试压盲区

1.3 压裂施工闸阀倒换复杂问题

目前CO₂前置压裂施工流程，共包含三次“开关井”作业程序，依次为：前置液造缝、CO₂前置注入和主体压裂施工。增设开关井程序的核心目的是实现压裂液与液态CO₂的流道物理隔离，从而避免因液态CO₂的低温效应导致压裂液冻结，继而引发高压管线冰堵乃至超压爆管的风险。

2 施工流程问题的解决措施

2.1 同步冷泵提质提效

为避免CO₂泵车低压管线上部积聚的气相CO₂无法有效排出，现采用4台CO₂泵车同时进行内循环冷泵作业，每台泵车以最低档位运行，排量约0.4m³/min；每台槽车提供0.5m³/min排量，即对应配置4台槽车，实现泵车同步冷泵与排空。如图4所示，内循环冷泵约40分钟后，关闭内循环闸门后，使用CO₂泵车进行打备压，管线内最高压力达24.9MPa，内循环冷泵作业效果良好。

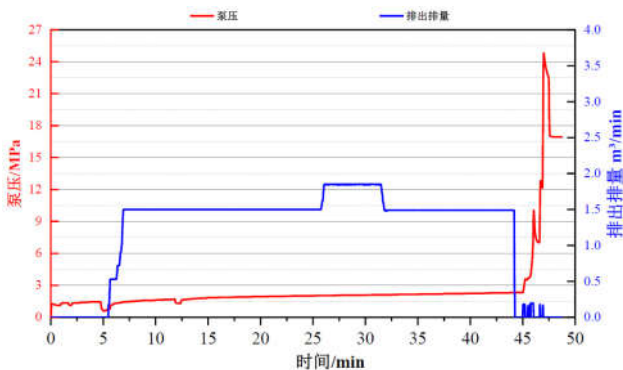


图4 4台CO₂泵车同步内循环冷泵作业及打备压曲线

2.2 液态CO₂试压管线的完整性与相态分析

CO₂前置压裂流程为避免试压盲区，理论上可采用液

态CO₂试压。但实际不宜采用，主要风险在于：试压期间若发生管线刺漏，泄漏的液态CO₂会急剧气化并大量吸热，导致刺漏点局部温度骤降，可能使管内残余CO₂凝固为固态干冰，堵塞刺漏部位。该堵塞会阻碍泄压，导致刺漏问题无法及时排查，进而延误施工进度

参考美国国家标准局（NIST）官网发布的CO₂相态数据^[5]绘制对应的CO₂三相图，如图5所示。泵车低压管线温度在内循环40分钟后基本稳定在-10℃左右；槽车内液态CO₂温度约为-20℃、压力约为2.5MPa，处于稳定液相状态。若试压期间使用液态CO₂加压至70MPa，在-20℃至-10℃的温度区间内，对照CO₂三相图可确认CO₂仍保持液相，无转变为固相（干冰）的风险。

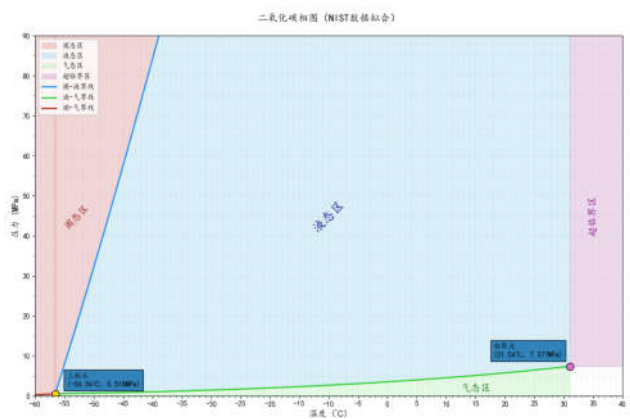


图5 二氧化碳三相图(0~90MPa)

2.3 压裂施工闸阀倒换步骤简化

当只进行一次“开关井”作业时，前置液造缝阶段结束后，CO₂泵车打备压略高于破裂压力，开启CO₂注入管线截断闸门，此时液态CO₂与前置液接触。若前置液未因液

态CO₂的低温效应发生冻结而堵塞管线，CO₂泵车便可提排量继续前置CO₂压裂施工，从而显著提升作业效率。

某井4段压裂施工的平均破裂压力为38.6MPa，施工中液态CO₂温度约为-10℃，如表1所示，前置液采用的低粘滑溜水可近似视作纯水体系。在此条件下，当前置液与低温液态CO₂在高压38.6MPa下接触时，两者界面处会迅速反应，生成一层致密、连续的固态CO₂水合物薄膜^[6]，如图6所示。该薄膜具有双重屏障作用：其一，薄膜阻隔了水分子与CO₂分子的相互扩散，使前置液水分子无法接触新的CO₂以继续生成水合物；其二，薄膜也起到隔热层的作用，有助于减缓低温液态CO₂的传热，使前置液温度下降极为缓慢。

CO₂水合物是一种笼形化合物，通用化学式表示为CO₂·nH₂O。在高压低温条件下，其晶体结构主要为I型，水分子通过氢键构成多面体笼形骨架，CO₂分子被包

裹在笼腔内部，约每6个水分子包裹1个CO₂分子。该水合物CO₂·6H₂O的生成是放热过程，标准生成焓ΔH约为-57至-65kJ/mol，反应释放的热量有助于缓解前置液的温度下降^[7]。

又因为在高压38.6MPa下，水的冰点下降至-3.0℃，存在前置液与液态CO₂短时间接触后，不会立刻结冰堵塞管线的可能。此外，界面处的CO₂水合物薄膜极不稳定，仅在静态条件下暂时形成，一旦CO₂泵车提排量、流体流动，界面处的薄膜破裂，则可正常进行前置CO₂压裂施工。

表1 某井前置液施工破裂压力记录表

段号	日期	破裂压力/MPa	泵车低压管线温度/℃
1	2.28	32.2	/
2	3.1	41.2	/
3	3.2	36.5	-12.9
4	3.3	44.5	-9.3

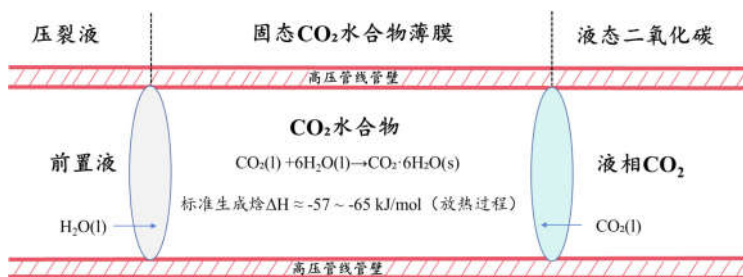


图6 高压管线中前置液-液态CO₂界面反应生成水合物示意图

通过上述解决措施优化后，CO₂前置压裂施工流程改进如下：①CO₂注入管线高压区采用液态CO₂试压；②内循环阶段所有CO₂泵车同步冷泵循环，并同时完成主压区前置液造缝；③CO₂前置压裂施工期间仅执行一次开关井作业。

3 结论

(1) 在CO₂前置压裂的内循环冷泵过程中，通过合理匹配储罐（或槽车）与CO₂泵车的数量，并令所有泵车同步启动、执行内循环冷泵，可有效提升整体冷泵效率与效果。

(2) 在高压（38.6MPa）与低流速（接近静态）条件下，当液态CO₂与压裂液接触时，界面处会形成一层CO₂水合物薄膜过渡层。该过渡层具有三重作用：阻碍两相之间的传质与传热；其生成过程伴随放热效应；且对排量变化敏感、易于破裂。从而有效防止高压管线中压裂液冻结，避免冰堵发生。

(3) 相较于理想化CO₂前置压裂施工流程，标准化CO₂前置压裂施工流程将单段作业周期平均缩短1.5小时，并提升了作业安全性与操作规范性，能够有效满足中石化西南区块的施工要求。

参考文献

[1] 代旭. 页岩油前置二氧化碳压裂技术[J]. 石油知识. 2025(03): 20-21.

[2] 齐银, 薛小佳, 戴彩丽, 等. 页岩油储层前置CO₂压裂返排提高原油动用机理——以长庆油田为例[J]. 西安石油大学学报(自然科学版). 2025, 40(01): 32-38.

[3] 徐周鸿达, 郑君, 窦斌, 等. 超临界CO₂压裂技术研究现状与发展挑战[J]. 地质找矿论丛. 2026, 41(01): 39-49.

[4] 季军美, 王旭. 深层常压页岩气前置CO₂辅助水力压裂工程实践[J]. 石化技术. 2025, 32(06): 260-263.

[5] National Institute of Standards and Technology. Saturation properties for carbon dioxide — Temperature increments [DB/OL]. (n.d.) [2026-03-14]. [https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/\[Z\].](https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/[Z].): 2026.

[6] 邵子越, 申小冬, 李延霞, 等. 生物胶对二氧化碳水合物生成动力学影响实验研究[J]. 低碳化学与化工. 2023, 48(02): 155-161.

[7] 崔晓媛. 多孔材料上水合物法捕集二氧化碳技术研究[D]. 河北工业大学, 2020.