

二氧化碳前置增能压裂工艺中的装备集成化与智能化升级实践

孙怀志

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：二氧化碳前置增能压裂作为川西致密气藏提高储层改造体积和单井产能的重要手段，具有增能补能、促进复杂裂缝形成、降低储层伤害及提高返排效率等优势。然而在现场应用过程中，由于二氧化碳具有低温、高压、易相变等特性，冷泵终点长期依赖经验判断，装备系统相互独立、控制分散、数据孤岛等问题突出，造成施工效率低、二氧化碳损耗高及安全风险增加。针对上述问题，本文结合川西区块二氧化碳前置增能压裂现场实践，建立“工艺机理—状态感知—智能决策—装备执行”的技术体系。首先分析二氧化碳前置增能压裂作用机理及冷泵过程相态变化规律，构建基于温度、压力及环境因素的冷泵终点智能识别模型；其次提出储供系统、混配系统、泵注系统及控制系统一体化集成方案，构建“感知—决策—执行”三层智能控制架构；最后依托数字孪生平台实现远程协同控制和在线优化。现场应用结果表明，该系统可实现冷泵终点智能识别，减少过度冷泵现象，装备安装时间缩短60%以上，现场作业人员减少50%，二氧化碳损耗率由12.5%降低至6%以下，为二氧化碳前置增能压裂规模化应用提供技术支持。

关键词：二氧化碳压裂；前置增能；冷泵识别；装备集成化；智能控制；数字孪生

引言：随着川西致密气藏开发逐步向深层、超深层推进，传统滑溜水压裂在储层能量补充、返排效果及裂缝复杂程度方面逐渐暴露出局限性。二氧化碳前置增能压裂通过在主压裂施工前注入液态二氧化碳，可有效提高裂缝复杂度、改善返排效果、增强储层能量，已成为川西区块储层改造的重要技术方向。近年来，西南地区累计开展二氧化碳前置压裂百余井次，取得了良好的增产效果。但现场施工过程中仍存在冷泵终点依赖经验判断、装备布局分散、系统协同能力不足、参数调节滞后等问题。其中冷泵阶段是二氧化碳损耗最为集中的环节，传统依靠观察结霜情况或固定时间判断的方法容易造成过度冷泵，大量液态二氧化碳提前气化损失。同时，各类设备控制系统相互独立，难以形成统一协同控制平台，制约了二氧化碳压裂施工效率与智能化水平提升。因此，有必要从工艺机理出发，建立冷泵终点智能识别模型，构建装备集成化与智能化控制体系，实现二氧化碳压裂施工全过程精准控制。

1 二氧化碳前置增能压裂机理与现场难题分析

1.1 二氧化碳前置增能压裂作用机理

二氧化碳前置增能压裂是在主压裂液注入前，将液态二氧化碳作为前置段塞注入储层，通过其特殊的热力学性质改善储层改造效果。

（1）增能补能作用。液态二氧化碳进入储层后受地层温度影响发生相态转变并产生体积膨胀，为储层持续

补充能量，提高裂缝内部压力水平。（2）降低启动压力梯度作用。二氧化碳具有较强扩散能力，可进入微纳米孔喉结构，降低天然气流动阻力，提高储层渗流能力。

（3）促进复杂裂缝形成作用。液态二氧化碳黏度低、摩擦阻小，能够进入天然裂缝及微裂缝系统，在相变过程中形成局部压力脉动，促进裂缝扩展和裂缝网络形成。（4）降低储层伤害作用。前置二氧化碳段塞可减少压裂液与储层接触时间和范围，降低水锁效应，提高储层导流能力。（5）促进返排作用。压裂结束后，储层中的二氧化碳逐渐气化膨胀，持续释放能量，促进压裂液返排，提高单井初期产量^[1]。

1.2 冷泵工艺机理

冷泵的本质是通过循环液态二氧化碳，使整个输送系统达到稳定低温状态，从而保证后续施工过程中二氧化碳保持液态输送。冷泵过程主要经历三个阶段：第一阶段为设备降温阶段，管汇及设备温度快速下降，压力波动较大；第二阶段为气液两相共存阶段，系统逐渐建立稳定低温环境，温度下降趋缓；第三阶段为液相稳定阶段，系统温度和压力基本稳定，具备正式施工条件。目前现场主要采用观察结霜情况、依赖服务商经验判断以及固定时间冷泵三种方式确定冷泵终点，缺乏统一标准，容易造成过度冷泵和二氧化碳浪费。

1.3 现场应用存在的主要难题

（1）冷泵终点缺乏量化判据；（2）设备控制系统相

互独立；（3）二氧化碳状态无法实时感知；（4）施工参数调整依赖人工经验；（5）现场与后方技术支持无法实时协同。

2 冷泵终点智能识别模型构建

2.1 模型总体思路

针对传统经验判断方式存在的问题，建立冷泵终点智能识别模型。

模型输入参数包括：温度T、压力P、环境温度E、降雨量R、海拔高度H、时间序列t、流量Q。

模型输出结果为：Y=0，冷泵未完成；Y=1，冷泵完成。

2.2 CO₂冷泵终点智能研判模型构建

2.2.1 冷泵过程机理分析

在二氧化碳前置增能压裂施工中，冷泵（Cool Down）是正式注入液态CO₂前的关键工序，其本质是利用低温液态CO₂对管线、阀门、泵体及高压管汇进行预冷，使整个流动通道达到液态CO₂稳定输送条件。若预冷不足，则CO₂进入高温管线后发生闪蒸，形成气液两相流，导致：增压困难、压力波动剧烈、排量不稳定、管线振动加剧、CO₂大量损耗。若冷泵时间过长，则会造成：无效耗碳增加、施工周期延长、成本增加^[2]。因此需要建立冷泵终点智能识别模型，实现最佳冷泵结束时机判定。

2.2.2 CO₂三相图辅助判定模型

根据CO₂热力学特性：

临界点：T_c = 31.1℃、P_c = 7.38MPa

三相点：T_t = -56.6℃、P_t = 0.518MPa

施工过程中实时采集：T(t)、P(t)

映射至CO₂三相图：S = f(T,P) 其中：S——相态状态；S=1（液态）S=2（气液两相）S=3（气态）

当连续时间窗口内：S=1

且压力波动满足：σ_p < 0.3MPa

则判定系统已进入稳定液态输送区。

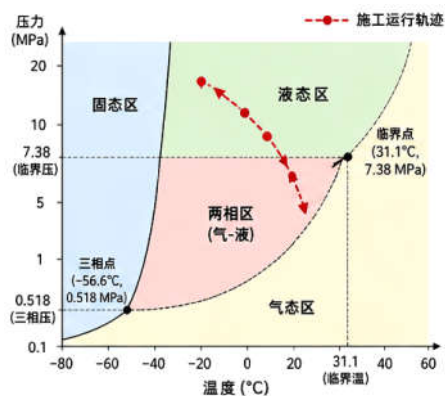


图1 CO₂三相图及施工运行轨迹

2.2.3 冷泵终点LSTM预测模型

由于冷泵过程属于典型时间序列问题，因此采用LSTM神经网络进行建模。

输入特征：X = [T,P,Q,H,R,E]其中：

T——温度、P——压力、Q——流量、H——海拔、R——降雨量、E——环境温度

模型输出：Y = {1冷泵完成0冷泵未完成}

损失函数：loss = -∑_{i=1}ⁿ [y_i ln ŷ_i + (1 - y_i) ln (1 - ŷ_i)]

采用Adam优化器：θ_{t+1} = θ_t - α $\frac{m_t}{\sqrt{v_t} + \epsilon}$

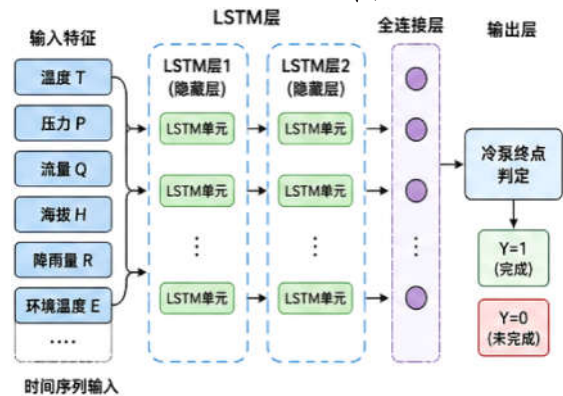


图2 冷泵终点识别LSTM网络结构图

2.3 神经网络模型建立

采用LSTM时序神经网络建立冷泵终点识别模型。模型通过学习冷泵过程中温度和压力变化规律，实现对冷泵完成状态的实时预测。同时建立基于三相图约束的物理规则模型，对神经网络输出结果进行校核，实现“大数据+物理规则”双驱动识别机制。

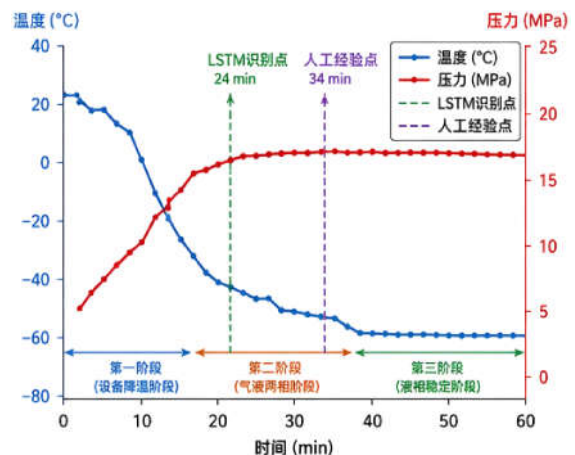


图3 冷泵过程中温度与压力变化曲线

3 装备集成化设计

3.1 集成化总体架构

针对传统CO₂压裂装备分散、安装周期长的问题，构建“储供—增压—混配—泵注—控制”五位一体集成化

体系,涵盖CO₂储供、冷泵循环、增压泵注、混配施工及智能控制五大模块。各模块采用标准化撬装结构,通过标准接口快速对接,实现工厂化预制、模块化运输与现场快速组装,大幅缩短施工准备周期。

3.2 储供与冷泵系统集成

储供与冷泵系统采用双层绝热储罐与低温泵一体化设计,配置压力、温度、流量及密度传感器,实现储罐状态实时监测与CO₂相态判别。冷泵回路集成低温电磁阀与旁路调节阀,可自动切换循环路径。一体化设计消除了现场临时管线连接,减少泄漏风险点,提高系统密封可靠性与施工安全性。

3.3 CO₂增压撬与泵送系统集成

将低温柱塞泵、变频电机、润滑系统、冷却系统及出口缓冲器集成于同一撬座,实现CO₂、压裂液及支撑剂自动计量与实时比例控制。变频调节系统自动调节注入排量 and 压力,确保连续稳定;智能控制系统根据出口压力变化自动调整电机转速,实现恒压恒排量注入,减少现场管线连接与调试工作量,降低安全风险^[3]。

4 智能化控制系统设计

4.1 智能感知层

智能感知层通过在关键工艺节点部署传感器,实时采集温度、压力、流量、密度、设备振动及环境CO₂浓度等参数,所有数据上传至控制中心,采样频率不低于1Hz,关键参数达10Hz,为上层决策提供可靠的数据基础。

4.2 智能决策层

智能决策层部署冷泵终点识别、设备健康诊断及施工参数优化三类模型,实时接收感知数据,判断冷泵完成状态、预警设备故障、动态优化排量与注入比例,生成最优方案供确认或自动执行,实现智能化决策支持。

4.3 智能执行层

智能执行层通过PLC与执行机构联动,实现自动结束冷泵、切换模式、调整排量及注入比例等功能。采用闭环控制策略,执行后实时反馈验证,未达预期自动二次调节,确保施工参数始终处于设定范围内。

4.4 数字孪生平台

数字孪生平台将现场设备、管汇连接、流体流程等物理对象进行1:1数字化映射,在虚拟空间中构建与现场完全对应的三维数字模型,实现施工全过程远程可视化监控。平台具备三维场景展示功能,操作人员可在中控室直观查看各设备运行状态、管线走向及关键参数实时数值。同时支持远程协同诊断,后方技术专家无需到达现场即可同步查看施工工况,参与方案会诊与异常分

析^[4]。平台还具备预测性维护功能,基于设备运行数据变化趋势,提前预判维护需求,减少非计划停机,有效打破现场操作端与后方技术支持端的时空壁垒。



4.5 现场操作方式的实质性转变

智能识别模型与集成化装备的应用,使现场操作方式发生三个层面的实质性变化。冷泵操作由“看霜”转为“看数”,操作人员无需靠近高压低温管汇,中控室大屏即可实时查看温度趋势与模型判定结果,安全水平明显提升。设备切换由分散操作转为集中控制,冷泵结束后中控室通过PLC程序即可完成流程切换,避免了因操作顺序不当造成的压力波动。异常处置由被动响应转为主动预警,系统根据参数变化趋势提前提示,操作人员可在偏离前介入调整。

5 结论

(1) 二氧化碳前置增能压裂对装备低温适应性、密封可靠性及连续供液能力提出了更高要求;(2) 装备集成化是提高施工效率、降低现场风险的重要发展方向;(3) 冷泵终点识别是当前CO₂压裂现场应用的关键技术瓶颈;(4) 基于温压时序数据与CO₂相态机理构建LSTM智能研判模型具有较好的理论可行性;(5) 现场数据采集与模型训练相结合的研究路线,为后续实现CO₂压裂智能化提供了技术基础。

参考文献

- [1] 王建军,石海鸿,袁帅,等.前置液增能压裂技术在志丹油田的探索与现场应用[J].中国化工贸易,2021(23):89-90.
- [2] 孙虎,苏伟东,王军闯,等.非常规油气藏二氧化碳压裂技术进展及展望[J].钻采工艺,2024,47(6):102-109.
- [3] 王翠翠,宣高亮,杨旭,等.前置二氧化碳压裂技术在吉林油田的应用[J].石油知识,2021(1):44-45.
- [4] 杜少波.海上二氧化碳前置压裂技术研究[J].石油石化物资采购,2025(6):103-105.