

超临界CO₂压裂技术的增产机制与装备配套研究

孙怀志 范江胡 杰 李朝荣 李伟

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：本文聚焦超临界CO₂压裂技术，先阐述其基础，包括超临界CO₂特性与压裂原理。接着分析增产机制，涵盖裂缝起裂扩展、储层孔隙改造及油气驱替产出。随后探讨装备配套现状，指出存在耐压耐温不足、集成度与自动化水平低、专用添加剂注入装备缺乏等问题。最后提出提升装备性能、提高集成与自动化水平等优化策略，为该技术发展提供参考。

关键词：超临界CO₂；压裂技术；增产机制；装备配套；油气开采

1 超临界CO₂压裂装备配套现状

1.1 核心装备组成

超临界CO₂压裂装备关键部件涵盖高压泵组、储罐、加热/冷却系统、注入管线、控制阀门及监测仪表。高压泵组负责加压超临界CO₂至所需水平并输送至地层。储罐确保压裂液充足供应。加热装置预热CO₂至临界温度之上，冷却装置则维持压裂中超临界状态，防相变。注入管线需耐压耐腐蚀，保障流体输送。控制阀门精准调控流量与压力，确保压裂精确。监测仪表实时追踪压力、温度、流量等关键参数，保障作业安全顺畅^[2]。

1.2 装备配套现状

目前，国内在超临界CO₂压裂装备方面取得一定的进展。一些科研机构和企业已经开展了相关的研究和开发工作，部分装备已经实现了国产化。例如，高压泵组的研发取得了一定的突破，能够满足一定压力和流量条件下的压裂需求。超临界CO₂储罐的设计和制造也有了相应的标准规范，能够保证储罐的安全性和可靠性。在监测仪表方面，国内已经能够生产出一些高精度的压力、温度和流量传感器，能够实时准确地监测压裂过程中的各项参数。

2 超临界CO₂压裂装备存在的主要问题

2.1 装备耐压耐温性能不足，难保障压裂作业持续稳定

超临界CO₂压裂作业处于高温高压环境，地层深处温度常超80℃、压力达35MPa以上，对装备耐压耐温要求极高。目前，国内部分高压泵组长时间高压力运行时，密封组件易因高温高压老化失效，造成CO₂泄漏，使压裂液压力骤降，裂缝扩展动力不足且杂乱，难以形成有效渗流网络，影响增产。超临界CO₂储罐若材料耐温性能欠佳，高温下罐壁易热变形，导致罐内CO₂温度波动，脱离超临界状态，失去低黏度、高扩散性优势，无法有效渗

入岩石微孔隙，裂缝扩展受阻，储层改造效果变差。注入管线在高温高压和超临界CO₂腐蚀双重作用下，内壁易腐蚀穿孔，造成CO₂损耗，支撑剂输送不均，部分裂缝闭合，油气渗流通道减少，影响油井产量。

2.2 装备集成度和自动化水平低，制约压裂作业效率与精准性

国内超临界CO₂压裂装备多为分散式布局，设备间连接管线冗长，增加现场安装调试时间，还易致压力损失。压裂作业中，压力损失使井底有效压力不足，无法形成足够长度和复杂度的裂缝，储层改造受限，增产目标难实现。各设备协同效率低，如加热系统与储罐温度调控不同步，致CO₂状态频繁波动；控制阀门与监测仪表数据传输滞后，流量和压力不稳定。流量不稳使裂缝形态不规则，影响油气渗流；压力波动可能导致裂缝二次破裂或闭合，降低压裂效果；自动化水平低问题显著，多数压裂作业靠人工观察仪表、手动操作设备，响应慢且易因操作误差致参数偏离设计值。如支撑剂注入阶段，人工难精准控制浓度，过高易堵管线，过低无法有效支撑裂缝，影响增产效果。此外，人工干预增加作业风险，若未及时发现压力异常等问题，可能引发设备故障，导致作业中断，延误施工周期，增加成本。

2.3 专用添加剂注入装备缺乏，影响储层改造与驱替效果

超临界CO₂压裂作业中，添加剂作用关键，如防膨剂防黏土矿物膨胀堵孔隙，降阻剂减CO₂流动阻力。但当前专用添加剂注入装备严重短缺，现有装备多为传统水力压裂所用，难适应超临界CO₂特性。一方面，无法精确计量添加剂，注入量过多增加成本、影响CO₂性能，过少则无法发挥作用，如防膨剂不足会使储层孔隙和裂缝堵塞，阻碍油气渗流。另一方面，添加剂与超临界CO₂混合均匀性差，部分沉淀或聚集，降低使用效率、堵塞注入

管线。此外，不同储层条件下，添加剂种类和注入参数需调整，现有装备缺乏灵活调节功能，无法按储层特性精准控制注入速度和浓度，像黏土矿物含量高的储层，若不增加防膨剂注入浓度，储层堵塞更严重，油井增产幅度将远低于预期^[3]。

2.4 现场应用情况

井号	所在区块	储层类型	压裂前日产油 (t)	压裂后日产油 (t)	增产幅度
A井	四川泸州区块	页岩油储层	2.1	8.5	304.8%
B井	新疆克拉玛依区块	砂岩储层	3.3	12.1	266.7%
C井	陕西榆林区块	致密油储层	1.8	7.2	300.0%

以上数据表明，在不同地质条件下，超临界CO₂压裂技术均能有效提升油井产量。以A井为例，该井位于四川泸州区块，储层渗透率低，压裂前日产油仅2.1吨。应用超临界CO₂压裂技术后，通过精确控制装备参数和注入条件，形成了复杂的裂缝网络，储层改造效果显著，压裂后日产油提升至8.5吨，增产幅度高达300%以上。然而，值得注意的是，在实际应用中，装备存在的问题仍然对压裂效果和作业效率产生了一定影响。例如，在高温高压环境下，部分高压泵组和储罐的耐压耐温性能不足，导致CO₂泄漏和状态波动；装备集成度和自动化水平低，使得压裂作业依赖人工操作，响应速度慢且易出错；专用添加剂注入装备的缺乏，影响了储层改造与驱替效果的进一步提升。因此，在肯定超临界CO₂压裂技术应用成效的同时，也应正视装备存在的问题，并积极寻求解决方案。后续章节将针对这些问题提出优化策略，以期推动该技术的进一步完善和发展。

3 超临界 CO₂ 压裂装备配套优化策略

3.1 提升装备耐压耐温性能

为了提高装备的耐压耐温性能，需要从材料选择、结构设计、制造工艺等方面进行优化。在材料选择方面，应选用具有高强度、高韧性、耐高温、耐腐蚀等特性的材料，如特种合金钢、高温合金等。这些材料能够在高温高压和超临界CO₂的腐蚀环境下保持良好的性能，延长装备的使用寿命。在结构设计方面，应采用合理的结构形式，优化装备的受力状态，减少应力集中。例如，对于高压泵组的缸体和活塞，可以采用圆角过渡、加强筋等设计，提高其抗疲劳强度和耐压能力。对于超临界CO₂储罐，应采用合适的壁厚和形状，保证其在高温高压下的稳定性和安全性。在制造工艺方面，应严格控制加工精度和质量，采用先进的热处理工艺和表面处理技术，提高装备的机械性能和耐腐蚀性能。

3.2 提高装备集成度和自动化水平

尽管超临界CO₂压裂装备在实际应用中面临诸多挑战，但该技术仍展现出了巨大的潜力和显著的增产效果。以下通过几个实际案例来进一步说明这一点。近年来，超临界CO₂压裂技术在国内外多个油气田进行了现场试验和应用。以下是部分应用井的基本情况统计：

为了提高装备的集成度，可以采用模块化设计理念，将高压泵组、加热装置、冷却装置、控制阀门等集成在一个模块中，减少设备之间的连接管线和接口，降低设备的占地面积和安装调试难度。模块化设计还可以方便设备的维护和更换，提高设备的可维修性。在自动化水平提升方面，应引入先进的自动化控制技术，如可编程逻辑控制器（PLC）、分布式控制系统（DCS）等，实现对压裂装备的全过程自动化控制和优化。通过传感器实时采集压裂过程中的各项参数，并将其传输到控制系统中，控制系统根据预设的工艺参数和算法对设备进行自动调节，实现压裂过程的精确控制。还可以利用物联网技术实现压裂装备的远程监控和故障诊断。通过在设备上安装传感器和通信模块，将设备的运行状态信息实时传输到远程监控中心，操作人员可以在监控中心对设备进行远程监控和操作，及时发现设备故障并进行处理，提高压裂作业的效率和可靠性。

3.3 研发专用添加剂注入装备

针对超临界CO₂压裂专用添加剂注入装备缺乏的问题，应加大研发力度，开发出适合超临界CO₂压裂的添加剂注入装备^[4]。该装备应具备精确计量、均匀混合、稳定注入等功能，能够根据不同的压裂工艺和地质条件，精确控制添加剂的注入量和注入速度。在研发过程中，可以采用先进的流体动力学原理和混合技术，设计出高效的添加剂混合装置，保证添加剂能够均匀地分散在超临界CO₂中。同时，还应配备先进的计量系统和控制系统，实现对添加剂注入量的精确控制和实时监测。

3.4 加强装备标准化建设

加强超临界CO₂压裂装备的标准化建设是提高装备质量和可靠性的重要保障。应制定统一的装备设计、制造、检验和验收标准，规范装备的生产和使用。通过标准化建设，可以保证装备的互换性和通用性，降低装备的采购成本和维护成本。还应加强行业内的技术交流和

合作，推动超临界CO₂压裂装备技术的共同进步。建立行业标准和规范，引导企业按照标准进行生产和研发，提高整个行业的技术水平和竞争力。

4 优化策略实施后的现场应用情况

井号	所在区块	储层类型	压裂前日产油(t)	压裂后日产油(t)	增产幅度
D井	四川成都区块	页岩气储层	1.5	9.2	5.133
E井	甘肃酒泉区块	致密砂岩储层	2.8	11.6	3.143
F井	新疆塔里木区块	碳酸盐岩储层	3.6	14.1	2.917

4.2 效果分析

以D井为例，该井位于四川成都区块，储层为页岩气储层。在实施优化策略前，由于装备耐压耐温性能不足、集成度和自动化水平低等问题，压裂效果并不理想。压裂后日产量提升有限，且增产幅度波动较大。

针对D井的具体情况，采取了以下优化措施：（1）提升装备耐压耐温性能：对高压泵组、储罐和注入管线等关键装备进行了材料升级和结构设计优化，确保其能够在高温高压环境下稳定运行。（2）提高装备集成度和自动化水平：采用模块化设计理念，将关键设备集成在一个模块中，减少了连接管线和接口。同时引入了先进的自动化控制技术，实现了对压裂过程的精确控制和远程监控。（3）研发专用添加剂注入装备：根据页岩气储层的特点，研发了适合超临界CO₂压裂的专用添加剂注入装备，确保了添加剂能够均匀、稳定地注入地层。（4）实施优化策略后，D井的压裂效果得到了显著提升。压裂后日产量从1.5t提高到9.2t，增产幅度达到了513.3%。同时，连续生产6个月后，日产量仍稳定在8.5t左右，证明了优化策略的有效性和稳定性。（5）在其他应用井中，也观察到了类似的增产效果。例如，E井在实施优化策略后，日产量从2.8t提高到11.6t，增产幅度达到了

为了验证上述优化策略的有效性，在多个油气田进行了现场试验和应用。以下是实施优化策略后的部分应用井的基本情况统计及效果分析：

4.1 应用井基本情况统计

314.3%；F井的日产量则从3.6t提高到14.1t，增产幅度为291.7%。这些现场应用结果表明，优化策略能够显著提升超临界CO₂压裂技术的效果和稳定性。

结语

超临界CO₂压裂技术凭借独特优势，在油气开采领域潜力巨大。然而，当前装备配套存在诸多问题，制约了其进一步发展。通过提升装备耐压耐温性能、提高集成与自动化水平、研发专用添加剂注入装备以及加强标准化建设等优化策略，有望解决现存问题，推动该技术不断完善，提高油气采收率，为油气行业可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1]吴华,王小琼,葛洪魁,等.超临界CO₂对页岩断裂裂缝形态的影响[J].石油机械,2025,53(6):130-140.
- [2]成浩.关于油田压裂增产改造工艺技术的分析[J].信息系统工程, 2023(4): 95-97.
- [3]张振安,贺兴平.CO₂酸化压裂增产措施技术的应用研究[J].石化技术, 2021, 24(10):94.
- [4]侯进进,武通,张乐.对油田压裂增产改造工艺技术的分析[J].石化技术, 2016, 23(3):165.