

酸化压裂与体积压裂的技术对比与应用分析

程 鑫 邱思杨 陈 鹏

西南石油工程公司井下作业分公司 四川 德阳 618000

摘要：本文对酸化压裂与体积压裂技术展开对比与应用分析。酸化压裂结合酸液与压裂工艺，通过酸液溶蚀岩石形成导流通道，适用于碳酸盐岩和砂岩油气藏等。体积压裂旨在形成复杂裂缝网络，应用于低渗透及非常规油气藏。对比两者在裂缝形态、作用机理、适用地层等方面的差异，分析了各自的应用范围与增产效果，探讨联合应用及注意事项，为油田增产措施选择提供参考。

关键词：酸化压裂；体积压裂；技术对比；应用分析

1 酸化压裂技术原理与应用

1.1 技术原理

酸化压裂技术是结合酸液与压裂工艺的油气井增产手段。其原理是借助高压泵组，以超地层吸收能力的排量将酸液注入井内，在井底憋压。当压力超过井壁附近地层破裂压力时，地层形成裂缝，酸液持续注入使裂缝延伸扩展。酸液与裂缝壁面岩石反应，溶解碳酸盐岩地层中的碳酸钙、碳酸镁等成分，在壁面形成溶蚀沟槽。这些沟槽增大裂缝导流能力，停泵后裂缝不会完全闭合，能为油气从地层流向井筒提供通道，实现增产。酸化压裂中，酸液化学反应速度与裂缝扩展速度相互影响。若酸液反应过快，近井地带就完全反应，无法有效延伸裂缝和增大远井地带导流能力；若反应过慢，溶蚀效果可能不佳。因此，需依据地层具体情况，合理选择酸液类型和施工参数，达成酸液反应速度与裂缝扩展速度的最佳匹配。

1.2 酸液类型与选择

酸液是酸化压裂技术核心材料，不同类型性能有别，适用不同地层。常见酸液类型有：（1）盐酸：常用酸液，适用于碳酸盐岩地层，反应快、溶蚀强，但腐蚀性强，高温地层反应速度过快，有效作用距离短。

（2）土酸：盐酸和氢氟酸混合酸液，氢氟酸能与砂岩地层黏土矿物和硅质成分反应，降低地层伤害、增加渗透率，适用于砂岩地层，但腐蚀性更强，高温下氢氟酸易挥发^[1]。（3）有机酸：如甲酸、乙酸，反应速度慢、腐蚀性小，高温地层能保持稳定反应速度，延长有效作用距离，适用于高温碳酸盐岩或对腐蚀性要求高的地层。

（4）缓速酸：添加缓速剂降低反应速度，能在表面形成保护膜，深入地层更远距离，适用于深部地层。选择酸液类型要综合考虑地层岩石类型、温度、压力等因素。碳酸盐岩地层优先选盐酸或有机酸，砂岩地层选土酸，

同时根据温度和压力选合适浓度和缓速剂。

1.3 应用范围与优势

酸化压裂技术广泛应用于各类油气藏，尤其在碳酸盐岩和砂岩油气藏增产效果显著，应用范围包括：碳酸盐岩油气藏：地层低孔隙度、低渗透率，油气流动阻力大。酸化压裂能溶解碳酸盐岩，形成裂缝和溶蚀孔隙，提高渗透率，增加油气产出，如塔里木盆地碳酸盐岩油气藏开发中，低产井经处理后产量大幅提高。砂岩油气藏：砂岩地层含黏土矿物，开采时易水化膨胀等堵塞孔隙和裂缝，降低渗透率。土酸酸化压裂能溶解黏土矿物，清除地层伤害，恢复和提高渗透率，改善油气流动条件。老井增产：对开采时间长、产量下降的老井，可再次改造地层，解除近井地带堵塞，恢复导流能力，延长生产寿命，提高最终采收率。其优势在于增产效果显著，可使油井产量提高数倍甚至数十倍；施工成本相对较低，设备和材料成本不高，工艺简单，施工时间短；适用范围广，不同油气藏和地层条件均可采用。

2 体积压裂技术原理与应用

2.1 技术原理

体积压裂技术旨在通过在储层构建复杂裂缝网络，显著提升储层改造体积与油气采收率。其原理是借助高排量、大液量的压裂液和支撑剂，在储层中生成多条主裂缝，再经主裂缝延伸与分支，形成相互交织的复杂网络。压裂时，压裂液以高排量注入井内，井底压力迅速攀升，当超过地层破裂压力，便形成第一条主裂缝。随着压裂液持续注入，主裂缝不断延伸。受地层非均质性和天然裂缝影响，主裂缝在延伸时会转向、分支，形成次生裂缝。支撑剂随压裂液进入裂缝并填充其中，防止停泵后裂缝闭合，维持裂缝导流能力。该技术的核心在于创造足够复杂的裂缝，使裂缝网络覆盖更大储层体积，增加油气与裂缝接触面积，提高油气渗流能力。与

传统压裂技术相比，体积压裂形成的裂缝网络更复杂，能更有效沟通储层中的天然裂缝和孔隙，改善油气流动条件，实现更高增产效果。

2.2 关键技术

体积压裂技术成功实施依赖多项关键技术：高排量、大液量压裂技术：形成复杂裂缝网络需采用此技术。高排量能让压裂液快速充满裂缝，促使其转向分支；大液量可保证裂缝有足够延伸长度和宽度，形成一定规模的网络。同时要配备大功率压裂设备与高效压裂液循环系统，以满足高排量、大液量压裂的施工要求。支撑剂选择与泵送技术：支撑剂选择和泵送对保持裂缝导流能力至关重要。需依据储层压力、温度、闭合应力等条件，选择合适粒径、强度和密度的支撑剂。泵送时要采用合理工艺，确保支撑剂均匀分布，避免出现桥堵问题^[2]。暂堵转向技术：这是实现裂缝转向和分支的重要手段。通过向裂缝注入暂堵剂，暂时堵塞部分已形成的裂缝，使后续压裂液和支撑剂转向进入其他方向，形成新裂缝。暂堵剂选择要依据储层条件和施工要求，需具备良好的封堵性能、可降解性和与压裂液的配伍性，能有效增加裂缝复杂程度，提高储层改造体积。微地震监测技术：是实时监测裂缝扩展情况的重要手段。在井下或地面布置微地震监测传感器，接收压裂过程中产生的微地震信号，经过数据处理和分析，可确定裂缝的延伸方向、长度、宽度和复杂程度等参数，为优化压裂施工参数提供实时反馈，提高体积压裂效果。

2.3 应用范围与优势

体积压裂技术主要应用于低渗透、特低渗透油气藏及页岩气、致密油等非常规油气藏开发。这些油气储层渗透率低、孔隙度小、油气流动阻力大，传统压裂技术增产效果不理想。体积压裂技术通过形成复杂裂缝网络，大幅提高储层改造体积与油气采收率，成为非常规油气藏开发的关键技术。其优势显著：一是大幅提高储层改造体积，复杂裂缝网络覆盖更大储层，增加油气与裂缝接触面积，让更多油气流入井筒，提升采收率。二是显著提高单井产量，该技术形成的裂缝网络改善油气流动条件，降低流动阻力，使油井产量大幅提高，部分页岩气田采用后单井产量较传统技术提高数倍。三是适应复杂地质条件，能依据储层非均质性和天然裂缝分布，自动调整裂缝延伸方向与形态，提升压裂效果。四是延长油井生产寿命，复杂裂缝网络使油气在储层均匀流动，减少局部过度开采，延长生产寿命，提高油田最终采收率。

3 酸化压裂与体积压裂的技术对比

3.1 技术差异

酸化压裂技术形成的裂缝相对较为简单，通常是以一条或几条主裂缝为主，裂缝的延伸方向主要受地层的应力和天然裂缝的影响。而体积压裂技术则致力于形成复杂的裂缝网络。酸化压裂技术主要是通过酸液与岩石的化学反应溶解岩石，形成溶蚀孔隙和裂缝，同时依靠压裂力使裂缝扩展。体积压裂技术则主要是通过高排量、大液量的压裂液和支撑剂，在储层中产生多条裂缝，并通过裂缝的转向和分支形成复杂网络，不涉及酸液与岩石的化学反应。酸化压裂技术更适用于碳酸盐岩和含有黏土矿物的砂岩地层，通过酸液溶解岩石和黏土矿物来提高地层渗透率。体积压裂技术则主要应用于低渗透、特低渗透油气藏以及页岩气、致密油等非常规油气藏，通过形成复杂裂缝网络来增加储层改造体积。酸化压裂技术的施工参数主要包括酸液类型、浓度、排量、施工压力等，重点在于控制酸液的反应速度和裂缝的扩展程度。体积压裂技术的施工参数则更为复杂，包括压裂液排量、液量、支撑剂类型、粒径、加砂浓度以及暂堵剂的使用等，需要综合考虑多个因素来实现裂缝的复杂扩展。

3.2 适用范围对比

如前文所述，酸化压裂技术在碳酸盐岩油气藏和含有黏土矿物的砂岩油气藏中应用广泛。对于碳酸盐岩地层，酸化压裂能够有效溶解碳酸盐岩，形成裂缝和溶蚀孔隙，提高地层的渗透率。在砂岩油气藏中，土酸化压裂可以清除地层中的黏土矿物伤害，恢复地层的导流能力。酸化压裂技术也适用于一些老井的增产改造，通过解除近井地带的堵塞，提高油井的产量。体积压裂技术主要针对低渗透、特低渗透油气藏以及页岩气、致密油等非常规油气藏。这些油气藏的储层物性较差，传统的压裂技术难以实现有效的增产。体积压裂技术通过形成复杂的裂缝网络，能够大幅提高储层的改造体积和油气采收率，成为这些非常规油气藏开发的核心技术。

3.3 增产效果评估

酸化压裂技术的增产效果主要取决于酸液的溶蚀能力和裂缝的导流能力。在合适的条件下，酸化压裂能够显著提高油井的产量，但增产效果相对较为有限，通常增产幅度在数倍以内。而且，酸化压裂的效果受到地层岩石类型、酸液类型和施工参数等多种因素的影响，如果参数选择不当，可能会导致增产效果不理想。体积压裂技术由于形成了复杂的裂缝网络，能够大幅提高储层的改造体积和油气采收率，增产效果更为显著。在一些页岩气田的开发中，采用体积压裂技术后，单井产量较传统压裂技术提高了数倍甚至数十倍。然而体积压裂技

术的施工成本相对较高，对设备和技术的要求也更为严格，需要在增产效果和成本之间进行综合考虑^[3]。

4 酸化压裂与体积压裂的应用分析

4.1 酸化压裂的应用

在实际油气田开发中，酸化压裂技术有着广泛的应用案例。以某碳酸盐岩油田为例，该油田部分油井由于长期开采，近井地带地层堵塞严重，产量大幅下降。采用盐酸酸化压裂技术对这些油井进行增产改造，通过优化酸液浓度、排量和施工压力等参数，使酸液在近井地带充分溶解碳酸盐岩，形成溶蚀孔隙和裂缝。施工后，这些油井的产量得到了显著提高，平均单井产量提高了3-5倍，取得良好的经济效益。在砂岩油气藏中，土酸酸化压裂技术也发挥了重要作用，某砂岩气田在开发过程中，由于地层中黏土矿物的存在，导致气井产量逐渐下降。采用土酸酸化压裂技术，通过合理选择土酸配方和施工参数，有效溶解了地层中的黏土矿物，清除了地层伤害，恢复了气井的导流能力。施工后，气井的产量得到了明显恢复，部分气井的产量甚至超过了开发初期的水平。

4.2 体积压裂的应用

体积压裂技术在非常规油气藏开发中取得了举世瞩目的成就。以美国的页岩气开发为例，通过采用体积压裂技术，在页岩储层中形成了复杂的裂缝网络，使页岩气能够从微小的孔隙和裂缝中流入井筒，大幅提高了页岩气的采收率。在我国，体积压裂技术也在致密油、页岩气等领域得到了广泛应用。以长庆油田的致密油开发为例，通过优化体积压裂的施工参数和技术方案，在致密储层中形成了有效的裂缝网络，提高致密油的采收率。一些采用体积压裂技术的致密油井，单井产量较传统压裂技术有显著提高，为致密油的有效开发提供技术支持。

4.3 两种技术的联合应用

在某些复杂的地质条件下，单一的酸化压裂或体积压裂技术可能难以达到理想的增产效果，此时可以考虑将两种技术进行联合应用。可以先采用酸化压裂技术，利用酸液溶解近井地带的碳酸盐岩，形成一定的溶蚀孔隙和裂缝，改善地层的渗透性；然后再进行体积压裂，通过高排量、大液量的压裂液和支撑剂，在已形成的裂缝基础上进一步扩展和分支，形成复杂的裂缝网络。这

种联合应用方式能够充分发挥两种技术的优势，实现更好的增产效果^[4]。在砂岩油气藏中，对于一些含有黏土矿物且地层渗透率较低的区域，也可以采用酸化压裂与体积压裂联合应用的技术。首先使用土酸进行酸化压裂，清除地层中的黏土矿物伤害，恢复地层的导流能力；然后进行体积压裂，形成复杂的裂缝网络，提高储层的改造体积和油气采收率。

4.4 应用中的注意事项

在应用酸化压裂或体积压裂技术之前，必须对地层进行详细的评价。只有充分了解地层情况，才能选择合适的技术和施工参数，确保增产效果。酸化压裂和体积压裂施工都涉及到高压、高腐蚀性的液体和气体，施工过程中必须严格遵守安全操作规程，采取必要的安全防护措施，确保施工人员和设备的安全。酸化压裂和体积压裂过程中产生的废液和废气可能对环境造成污染，必须采取有效的环保措施进行处理。酸化压裂和体积压裂技术的施工成本相对较高，在应用过程中需要合理控制成本。可以通过优化施工方案、选择性价比高的材料和设备、提高施工效率等方式来降低成本，提高经济效益。

结束语

酸化压裂与体积压裂技术各有特点与优势，在油气田开发中发挥着重要作用。酸化压裂适用于特定地层，增产效果显著且成本较低；体积压裂则为非常规油气藏开发带来突破。两者联合应用可应对复杂地质条件。在实际应用中，需做好地层评价、保障施工安全、注重环境保护与成本控制。未来，随着技术发展，应不断优化两种技术，提高油气采收率，推动油气行业持续发展。

参考文献

- [1] 赵战江, 安琦, 李德. 致密气井体积压裂技术可行性研究与认识[J]. 石油工业技术监督, 2022, 38(09):55-59. DOI:10.20029/j.issn.1004-1346.2022.09.014.
- [2] 贾奔, 杨宏业, 张艺耀. 石油开发中体积压裂技术的应用[J]. 石化技术, 2022, 29(08):203-205.
- [3] 杨雷, 巩卫军, 王成顺, 张德鑫, 张波. 体积压裂技术在超低渗油藏应用及效果评价[J]. 石油化工应用, 2022, 41(05):61-64.
- [4] 贾奔, 杨宏业, 张艺耀. 石油开发中体积压裂技术的应用[J]. 石化技术, 2022, 29(8):203-205.