

文章编号: 1000-0747(2021)01-0193-09

DOI: 10.11698/PED.2021.01.18

超深油气储集层改造技术进展与发展方向

雷群¹, 胥云¹, 杨战伟¹, 才博¹, 王欣¹, 周朗², 刘会锋³,
徐敏杰¹, 王丽伟¹, 李帅¹

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油西南油气田公司, 成都 610051;
3. 中国石油塔里木油田公司, 新疆库尔勒 841000)

基金项目: 国家科技重大专项“储层改造关键技术及装备”(2016ZX05023); 中国石油天然气股份有限公司
科技重大专项“超深高温高压气井井完整性及储层改造技术研究与应用”(2018E-1809)

摘要: 通过对超深层油气储集层改造技术发展历史的系统总结, 阐述了国内外超深层油气储集层改造技术的新进展。超深层缝网改造机理研究更加深入, 改造液材料性能指标进一步提升, 超深直井精细分层、超深大斜度井/水平井分段多簇改造技术日趋成熟。结合国内超深油气储集层的勘探开发趋势, 论述了超深油气储集层改造的生产需求及技术难点, 包括: ①地质工程一体化技术研究及应用难度大; ②入井改造材料要求高; ③进一步提高超深巨厚储集层纵向剖面动用程度难度大; ④对入井工具及地面配套高压设备要求高; ⑤超深、高温、高压井实现高效改造难度大; ⑥储集层改造直接监测及准确后评估难度大。结合国内超深油气储集层的复杂地质特点, 提出了7个方面的技术发展方向: ①系统构建基础研究方法与评价实验新技术; ②加强地质认识, 完善地质工程一体化工作运行机制; ③研发针对性更强的超深层高效改造材料; ④攻关超深巨厚储集层精细分层改造工艺技术; ⑤探索超深层水平井缝控改造技术; ⑥研发适用于超深油气储集层改造的水力裂缝直接监测技术; ⑦研制耐高温、高压的井下改造工具及高压配套井口设备。图3表2参41

关键词: 超深油气储集层; 高温高压; 储集层改造; 技术现状; 技术难点; 发展方向

中图分类号: TE355 文献标识码: A

Progress and development directions of stimulation techniques for ultra-deep oil and gas reservoirs

LEI Qun¹, XU Yun¹, YANG Zhanwei¹, CAI Bo¹, WANG Xin¹, ZHOU Lang², LIU Huifeng³,
XU Minjie¹, WANG Liwei¹, Li Shuai¹

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China; 2. PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610051, China; 3. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China)

Abstract: By reviewing the development history of stimulation techniques for deep/ultra-deep oil and gas reservoirs, the new progress in this field in China and abroad has been summed up, including deeper understanding on formation mechanisms of fracture network in deep/ultra-deep oil and gas reservoir, performance improvement of fracturing fluid materials, fine stratification of ultra-deep vertical wells, and mature staged multi-cluster fracturing technique for ultra-deep and highly deviated wells/horizontal wells. In light of the exploration and development trend of ultra-deep oil and gas reservoirs in China, the requirements and technical difficulties in ultra-deep oil and gas reservoir stimulation are discussed: (1) The research and application of integrated geological engineering technology is difficult. (2) The requirements on fracturing materials for stimulation are high. (3) It is difficult to further improve the production in vertical profile of the ultra-deep and hugely thick reservoirs. (4) The requirements on tools and supporting high-pressure equipment on the ground for stimulation are high. (5) It is difficult to achieve efficient stimulation of ultra-deep, high-temperature and high-pressure wells. (6) It is difficult to monitor directly the reservoir stimulation and evaluate the stimulation effect accurately after stimulation. In line with the complex geological characteristics of ultra-deep oil and gas reservoirs in China, seven technical development directions are proposed: (1) To establish systematic new techniques for basic research and evaluation experiments; (2) to strengthen geological research and improve the operational mechanism of integrating geological research and engineering operation; (3) to develop high-efficiency fracturing materials for ultra-deep reservoirs; (4) to research separated layer fracturing technology for ultra-deep and hugely thick reservoirs; (5) to explore fracture-control stimulation technology for ultra-deep horizontal well; (6) to develop direct monitoring technology for hydraulic fractures in ultra-deep oil and gas reservoirs; (7) to develop downhole fracturing tools with high temperature and high pressure tolerance and supporting wellhead equipment able to withstand high pressure.

Key words: ultra-deep oil and gas reservoir; high temperature and high pressure; reservoir stimulation; technical status; technical difficulties; development direction

引用: 雷群, 胥云, 杨战伟, 等. 超深油气储集层改造技术进展与发展方向[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 193-201.
LEI Qun, XU Yun, YANG Zhanwei, et al. Progress and development directions of stimulation techniques for ultra-deep oil and gas reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 193-201.

0 引言

近年来, 全球深层—超深层油气储集层已成为重要勘探领域之一, 陆上及海上深层—超深层均取得重大勘探发现^[1]。中国深层—超深层油气资源丰富、分布区域广、储集层类型多样, 近年同样取得了重要突破, 截至 2018 年底, 累计探明石油地质储量超过 40×10^8 t, 累计产量超过 5.7×10^8 t, 累计探明天然气地质储量近 5×10^{12} m³, 累计产量超过 $4\,300 \times 10^8$ m³^[2]。典型代表东部为环渤海湾盆地古潜山、西部为塔里木盆地库车山前和四川盆地地震旦系等^[2]。深层—超深层油气储集层探明率低、产量占比低, 增储上产空间较大。超深油气储集层具有埋藏深 (6 500~8 882 m)、温度高 (150~200 ℃)、压力高 (105~155 MPa) 等特殊地质条件, 储集层改造技术的研发与应用面临诸多难题^[3]。

本文通过回顾超深层油气储集层改造技术的发展历程, 系统阐述了国内外超深层储集层改造技术特色, 明确了目前超深层储集层改造技术已由传统直井笼统改造发展为现代改造理论指导下的直井多层改造及水平井多段缝控改造; 国外发展重点为耐高温高压的装备工具、井筒完整性技术、安全作业技术等成熟配套; 与国外相比, 中国在超深层改造液加重技术、材料研发方面处于领先地位, 但在装备工具方面相对落后。通过全面剖析国内超深层油气藏的地质特点、储集层改造技术存在的主要难点、未来的技术需求, 提出了超深层油气储集层改造技术的发展方向。

1 技术发展现状

1.1 国外超深层油气储集层改造技术发展历程

北美 20 世纪 60 年代开始启动超深储集层钻井试验, 在密西西比、墨西哥湾、北海等区域实现了超深层油气藏效益开发, 最深井达 10 960 m, 超深油气储集层改造技术随着该类油气藏的成功开发不断进步, 其发展历程可分为 3 个阶段。

①直井常规酸化解堵改造 (2000 年之前): 主要以酸化和小规模加砂压裂解除钻完井液污染为目的, 部分巨厚层采用机械分层进行简单分层改造。该阶段主要针对储集层物性较好、压力系数较高的油气藏, 酸化及小规模加砂可有效解除近井筒储集层污染, 取得良好的增产效果^[4]。

②直井加砂压裂改造 (2000—2010 年): 耐高温压

裂液、加重压裂液及耐高温高压机械分层工具取得突破后, 直井多层加砂压裂技术获得较快发展。该阶段开始了超深层安全完井、耐高温高压新材料、封隔器及射孔工具、井下安全阀、智能监控与生产系统的研发, 形成确保井筒完整性的完井压裂及安全作业配套技术^[5]。

③改造技术多样化发展 (2010 年至今): 由于超深储集层类型越来越复杂, 储集层改造技术需求呈现多样化, 超深油气储集层改造技术也呈现多样化的发展趋势。国际油服公司研发了耐温近 180 ℃且耐高压的封隔器与快钻/可溶桥塞、耐温 220 ℃压裂液、与酸液配套的耐温 160 ℃以上缓蚀剂体系、耐高温暂堵转向材料、具有 7 000 m 以深作业能力的连续油管设备、耐高压井口作业设备、泵送设备等一系列新工具、新材料、新设备, 促进了超深油气储集层改造技术的进步, 满足了超深碎屑岩、超深碳酸盐岩及超深火山岩储集层改造需求^[6-7]。

1.2 中国超深油气储集层改造技术发展历程

中国 1976 年完钻第一口 6 000 m 超深井 (女基 1 井), 超深储集层改造技术也随之发展, 从垂深 6 000 m 逐步拓展到 8 000 m 以深井, 截至 2020 年 1 月底, 中国超深油气储集层改造最大井深达 8 882 m。陆上超深层储集层改造技术突破较明显, 海洋石油开发受制于钻井平台技术, 仅能在近海开展勘探开发作业。发展历程同样分为 3 个阶段。

①突破 6 000 m 以深井加砂压裂 (2000 年前): 超深井改造早期受耐高温高压设备、工具及改造液材料性能的限制, 以直井笼统改造为主。20 世纪 70 年代为研究深层地应力, 国家地震局在华北大港油田周边开展了 4 000 m 井深地层破裂压裂试验^[8], 90 年代中期, 塔里木东河油田成功实施了深 6 000 m 注水井加砂压裂, 突破了超深井加砂不成功的技术瓶颈。

②实现 7 000 m 以深井加砂压裂 (2000—2010 年): 超深油气储集层改造技术在该阶段获得快速发展, 以塔里木库车山前超深层碎屑岩直井加砂改造及台盆区碳酸盐岩深层—超深层水平井分段改造为代表, 超深层储集层改造理论、工艺技术、改造液材料等均得到快速发展。加重改造液材料技术也取得明显进步: 塔里木油田柯深 101 井 (井深 6 389 m) 为国内第一次采用溴盐加重酸 (密度 1.35 g/cm³) 酸化技术改造井, 成为探索异常高应力超深井储集层改造新技术的起点; 塔里木油田野云 2 井首次采用加重压裂液进行施工, 成功

加入支撑剂 28.5 m³；塔里木油田大北 3 井成功实现了 7 000 m 井加砂压裂改造^[9]；西南油气田及塔河油田均实现了 7 000 m 以深直井多级大规模酸压改造^[10-11]；深层火山岩储集层改造技术获得突破^[12]。

③实现 8 000 m 以深井成功改造（2010 年至今）：近 10 年超深层改造技术快速发展，实现了 7 000 m 以深碎屑岩直井多级分层改造，同时成功实现 8 000 m 以深井酸压改造。超深层碳酸盐岩储集层开发了复合酸压及水平井分段转向酸压技术。克深 2-2-8 井是塔里木油田实施的第 1 口超深层缝网加砂压裂改造井，采用线性胶+冻胶+转向剂压裂液体系，实现了多级缝内转向并实施了井下微地震监测^[13]。

国内外超深储集层改造井最深已达 10 960 m，地层压力超过 150 MPa，温度超过 200 ℃，改造液体系由常规压裂液发展为加重压裂液，工具及设备作业能力由抗压 105 MPa 提高到 140 MPa。国外主要在耐高温高压的装备工具研发、井筒完整性技术、安全作业技术成熟配套等方面取得了重大突破，国内则主要在超深层改造液加重技术及材料研发方面实现引领^[14-15]。

1.3 中国超深油气储集层改造技术主要进展

超深储集层工况条件复杂，改造技术研究方向主要集中在超深油气储集层改造理论、室内物理模拟实验、耐高温加重改造液材料、耐高温高压井下分层工具、耐高压作业设备、提高超深储集层动用率的优化设计等方面，通过多年的积累，这些技术发展较快。

1.3.1 超深油气储集层改造理论研究及室内物理模拟实验

重点开展了裂缝扩展、流体流动和支撑剂导流 3 个方面的机理研究。超深储集层高应力及高两向应力差特征明显，与射孔工艺相结合，采用单段射孔/双段射孔+纤维暂堵工艺及定向射孔辅助，实现提高超深巨厚储集层纵向改造程度。同时针对超深碳酸盐岩储集层，采用大型透明平行板实验装置，研究了黏性指进、酸岩反应、液体流变特性及输砂形态等，并通过分析酸压及加砂压裂各自的特点，结合交联酸滤失控制及实现深穿透原理，形成了交联酸携砂工艺技术^[16]。

超深储集层实现体积改造需借助天然裂缝，理论分析认为当人工裂缝与天然裂缝夹角小于 30°时，无论水平应力差多大，天然裂缝均可能会张开；夹角为 30°~60°时，水平应力比（水平最大主应力与水平最小主应力之比）为 1.0~1.3 时，天然裂缝会张开，具有形成缝网的条件，水平应力比大于等于 1.5 时，天然裂缝不会张开，人工裂缝直接穿过天然裂缝向前延伸，不具有形成缝网的条件；夹角大于 60°时，无论水平应

力比多大，天然裂缝都不会张开，人工裂缝直接穿过天然裂缝向前延伸，不具有形成缝网的条件^[17]。基于该理论可建立不同地区超深储集层能否形成缝网的理论判识图表。如表 1 即为库车山前天然裂缝发育的超深碎屑岩储集层能否形成缝网的理论判识图表，根据表中地应力方向与裂缝走向夹角大小，以及裂缝密度与交叉缝条数，可判断改造形成缝网可能性及缝网规模。

表 1 库车山前超深井形成缝网判断表及典型应用井

裂缝类别	典型井	裂缝密度/ (条·m ⁻¹)	交叉缝 条数/条	地应力 方向	裂缝 走向	裂缝倾角/ (°)
复杂网状缝	KS8-1	9.93	171	北东 15°	复杂多变	80
中等网状缝	KS8	5.85	81	北东 45°	复杂多变	83
轻微网状缝	KS11	6.20	42	北西 20°	北东 45°	83
简单缝	KS505	7.80		北西 30°	北西 5°	81
简单缝	KS10	2.35		北西 10°	北西 75°	60

为直接观察水力裂缝在岩石中的扩展形态，中国石油勘探开发研究院引进了 Terretak 公司研发的边长 1 m 立方体大岩样全三维应力加载水力压裂实验装备，最大实验加载应力 69 MPa，最大应力差 14 MPa，可加载孔隙压力 20 MPa，配套了 24 路声波信号传感器，可实时监测解释岩样内裂缝扩展形态。实验证实，天然裂缝较发育的碳酸盐岩，水平两向应力差为 15 MPa 时仍然能形成复杂缝网，改造工程参数排量与黏度乘积为 1×10⁻⁸ N·m 数量级时，人工裂缝可沟通更多天然裂缝，形成缝网。在微裂缝发育的致密砂岩储集层中加入暂堵剂材料，可以提高缝内净压力达到开启微裂缝的目的，在此条件下开展实验，有效探索了超深层高效改造工艺技术与超深层缝网的形成机理^[18-19]。

1.3.2 耐高温加重压裂液及多样化酸液材料

改造液材料性能对超深油气储集层改造技术的实施至关重要，可直接决定改造施工的成败：压裂液要求基液黏度低、摩阻低；冻胶耐高温、携砂性能好、伤害低、可加重；酸液要求高温下酸岩反应速度低，对管柱腐蚀速率可控。

近 10 年国内开发的超高温压裂液按稠化剂类型主要分为 3 类^[20]：①以瓜尔胶为稠化剂的耐高温加重压裂液体系，包括羚丙基瓜尔胶压裂液和羧甲基羚丙基瓜尔胶压裂液两种^[21]，此类耐高温压裂液在超高温井应用中瓜尔胶稠化剂使用浓度高，基液黏度过大、额外增加压裂液摩阻，影响压裂液施工排量。在中高温井应用中，中国石油勘探开发研究院压裂中心研发的羧甲基瓜尔胶压裂液表现出良好的低摩阻性能^[22]，与其他类型压裂液相比摩阻降低 40%。在吉林油田超深井（井深 5 130 m）试验成功后，目前已在长庆、吉林、

大庆、华北等 9 个油气田试验应用超过上千井次。②改性瓜尔胶和聚合物混合后作为稠化剂的耐高温压裂液,此类压裂液基液黏度高,配制及使用困难,目前尚未见成功应用报道^[23]。③聚合物耐高温压裂液,该聚合物为聚丙烯酰胺类混合物,具有稠化剂浓度高、交联速度快的特点,现场应用难度较大^[24-25]。

加重压裂液是克服超深井超高施工压力的有效手段^[26-27]。近年来,部分学者在瓜尔胶压裂液基础上,优选溴化钠与硝酸钠复配作为加重剂,硼化合物或有机锆作为交联剂,研发出密度为 $1.20\sim 1.55\text{ g/cm}^3$ 的加重压裂液体系,耐温达 $150\sim 160\text{ }^\circ\text{C}$ ^[28-29]。与非加重压裂液相比,施工排量可提高 $1.0\sim 1.5\text{ m}^3/\text{min}$,井口压力降低 $10\sim 20\text{ MPa}$,直接降低超深井改造施工风险。

2018 年塔里木油田公司联合中国石油勘探开发研究院研发了两套加重压裂液体系:①瓜尔胶氯化钙加重压裂液,瓜尔胶的使用浓度为 0.45% ,使用优质氯化钙,压裂液的交联冻胶可耐温至 $140\text{ }^\circ\text{C}$;②聚合物/氯化钙加重压裂液体系,主要选用工业氯化钙、新型聚合物、交联剂等配套添加剂,配方为 40% 氯化钙+ 0.6% 稠化剂+ 0.2% 温度稳定剂+ 0.5% 交联剂,加重密度为 1.35 g/cm^3 ,耐温达 $180\text{ }^\circ\text{C}$; 170 s^{-1} 速率下剪切 120 min ,黏度仍保持在 $90\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 以上(见图 1)。同时研发了耐盐缓蚀剂,解决了高盐溶液在高温下对完井管柱的腐蚀问题。

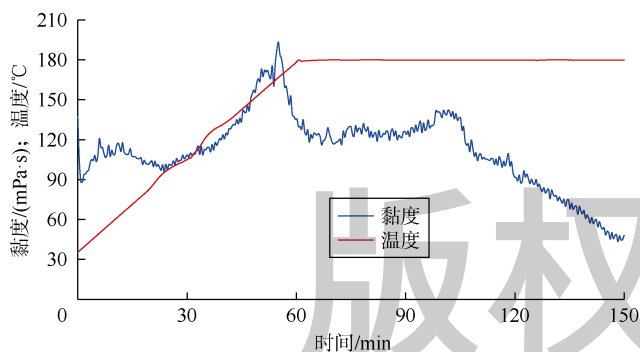


图 1 聚合物/氯化钙加重压裂液流变曲线

近年来形成了自生酸、变黏酸、转向酸等一系列新型酸液体系,呈现多样化的特点^[30]。毛金成等^[31]采用芥酸酰胺丙基二甲基叔胺和环氧氯丙烷合成一种黏弹性表面活性剂,并以其为转向剂构建了清洁转向酸体系,解决了非均质储集层均匀布酸难题。但超深油气储集层改造酸液体系中影响其性能的关键添加剂(耐高温缓蚀剂)技术进展缓慢,满足 $160\text{ }^\circ\text{C}$ 以上碳酸盐岩储集层改造的耐高温缓蚀剂鲜有报道。

1.3.3 耐高温高压井下分层工具及耐高压作业设备

超深储集层改造井下工具主要指各类封隔器。塔里木油田沿用三级胶筒设计模式,采用软件模拟与实验相结合,实现设计最优化:①封隔器最大外径 108.2 mm ,压差 91 MPa ,最小坐封压力 31.2 MPa ,最高耐温 $232\text{ }^\circ\text{C}$,长期耐温 $177\text{ }^\circ\text{C}$;②压裂滑套包括常规投球滑套和定点多簇滑套,耐温 $150\text{ }^\circ\text{C}$,耐压 70 MPa ,配套低密度复合球和可溶球;③裸眼封隔器包括单胶筒压缩式、双胶筒压缩式和自膨胀式 3 种,耐温 $120\text{ }^\circ\text{C}$,耐压 70 MPa ;④不动管柱水力喷砂分段/分层压裂封隔器最高承压 70 MPa ,耐温 $120\text{ }^\circ\text{C}$ ^[32]。耐高温封隔器在塔里木库车山前、西南油气田及华北深层碳酸盐岩改造中得到广泛应用。截至目前封隔器分层改造施工最深井为轮探 1 井(井深 $8\,882\text{ m}$),改造温度最高井为牛东 1 井(地层温度 $205\text{ }^\circ\text{C}$)。深层井下作业工具还包括耐高温高压射孔枪、悬挂器、下入工具、联作总成等。中国压裂车装备技术水平发展较快,已试验研发了 4500 型涡轮式及 6000 型电驱压裂泵车,高压泵头及井口装备耐压均达到 140 MPa ,满足深层高压施工需求。

1.3.4 提高超深储集层动用率的优化设计技术

超深油气储集层改造工艺已由早期直井全井筒酸化或笼统改造发展为复合酸压、暂堵分层及裂缝性储集层加砂压裂改造技术,超深水平井以裸眼封隔器分段酸压、水力喷射分段酸压及水平井加砂压裂改造为主,满足超深层碎屑岩、碳酸盐岩及火山岩改造需求。

超深层暂堵分层改造工艺包括“线性胶+冻胶”复合压裂、“暂堵球+纤维”组合、前置液黏性指进酸压、多级注入酸压(前置液+酸压+前置液+酸压等)等技术;裂缝型储集层加砂改造包括“纤维+陶粒”与“不同粒径暂堵球+纤维”软分层、“线性胶+冻胶”组合的复合加砂压裂、“线性胶+不同功能酸液”酸压(化)等工艺技术^[33-34]。如塔里木盆地库车坳陷克深区块 A 井采用软硬结合分层压裂改造技术(见图 2)改造 $6\,805.0\sim 7\,020.0\text{ m}$ 井段(储集层厚度 215 m),投球滑套分 2 大段,每一大段内采用投球暂堵分层多级改造,全井共分 7 层。使用压裂液量 $2\,560\text{ m}^3$, $0.425\text{ mm}/0.212\text{ mm}$ ($40/70$ 目)高强度陶粒支撑剂 150 m^3 ,改造后 9 mm 油嘴求产,油压 77 MPa ,日产气 $74\times 10^4\text{ m}^3$ 。

水平井裸眼封隔器滑套分段压裂工艺是近几年发展起来的超深层水平井压裂改造技术,该工艺主要应用于超深层碳酸盐岩储集层改造中,包括遇油膨胀式裸眼封隔器、机械封隔式裸眼封隔器^[35]。西南油气田及塔里木油田结合超深碳酸盐岩大斜度井及水平井大规

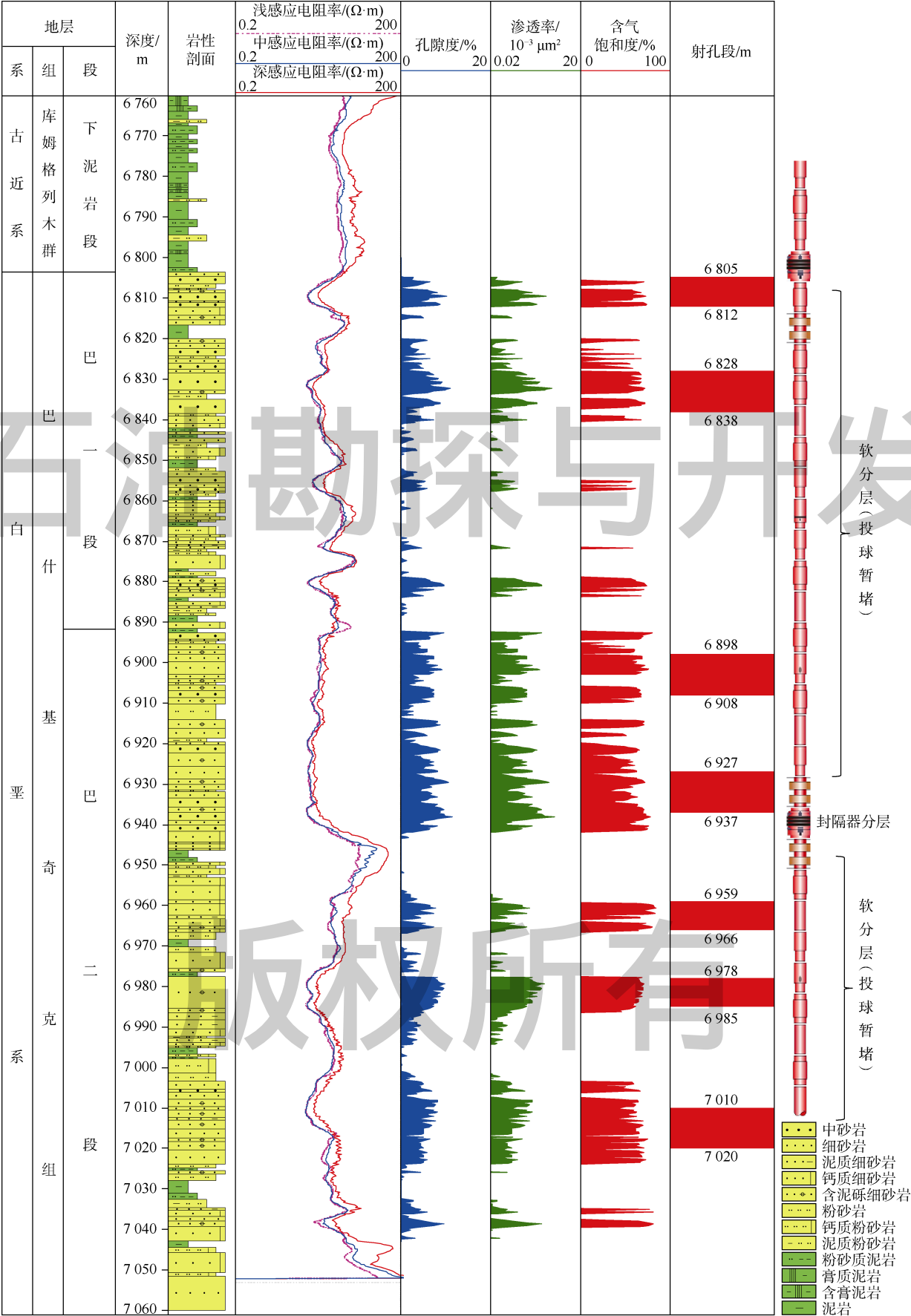


图 2 库车坳陷克深区块 A 井软硬多级分层工艺

模分段改造的需求,研发了水平井大通径分段改造工具组合,关键工具耐温达 200 ℃,耐压差大于 70 MPa^[36-37]。在塔里木油田、西南油气田等应用近 200 口井,为解决碳酸盐岩缝洞发育不连片、储量动用程度差等难题提供了有效的方法。如高石 001-H11 井,井深 5 210~6 410 m,分 7 段酸压,施工排量 2.0~7.1 m³/min,累计注酸 1 358.7 m³,酸压后测试产量 103.3×10⁴ m³/d。

1.3.5 超深层油气储集层改造监测评估技术

微地震监测、微变形测斜仪监测及各种生产测井等储集层改造监测技术随着非常规储集层改造技术的进步得到快速发展,分布式光纤监测、液体示踪、支撑剂示踪等多种新型压裂裂缝监测技术得到了试验应用^[38]。受改造工况条件限制,国内目前已进行的超深油气储集层改造监测评估探索主要有超深层井下微地震监测、示踪剂测试及产液剖面测试等^[39-40]。如塔里木盆地克拉苏构造带超深 B 井在加砂改造过程中,实施了微地震监测(HFM)评估(见图 3),该井垂深 6 761 m,为目前井下微地震监测实施的最深井,评估表明本井改造体积为 1 506×10⁴ m³。西南油气田震旦系碳酸盐岩水平井分段改造评估则采用示踪剂及产气剖面测试技术来研究各段改造效果差异^[41]。西南油气田联合川庆井下作业公司共同研发了井下测试数据无线实时传输系统,该技术在西南油气田超深水平井(磨溪 008-H26 井、磨溪 008-H27 井、磨溪 022-H21 井)改造过程中进行了应用试验,均获得了有效数据信号,最大应用井深近 6 000 m,井温 136 ℃,传输速率 1 组/min,掉包率小于等于 0.4%、准确率 99.5%。

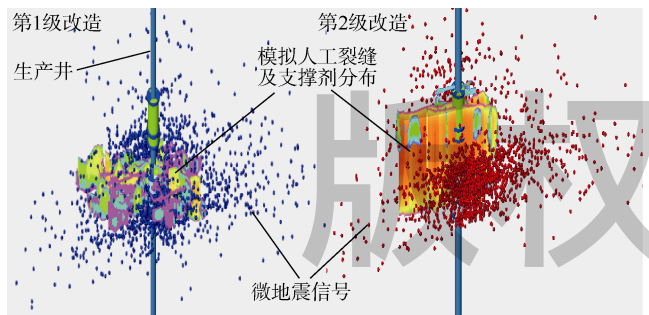


图 3 克拉苏构造带超深 B 井改造体积微地震监测评估

1.4 超深油气储集层改造技术应用成效

近年来,国内平均年钻 6 000 m 以上超深井 246 口,随着超深层油气储集层品位越来越差,高效的超深油气储集层改造技术对超深油气藏勘探开发发挥了重要作用(见表 2):①支撑了超深层勘探突破,超深层单井投资大、建井周期长、井数较少,重点探井单井试油效果对整个区块的地质认识及后期产能部署影

响较大。如西南油气田磨溪 8 井,于 2012 年对该井不同层位采取了前置液酸压、多级注入酸压及酸化解堵改造措施,龙王庙组测试产量达 107×10⁴ m³/d,区块探明储量达 4 403×10⁸ m³,获得重大勘探突破;②有力推进了中国以塔里木盆地及四川盆地为代表的超深层大油气田产能建设。如库车山前超深井改造井比例为 92%,年产能达 220×10⁸ m³。

表 2 中国超深层储集层改造技术指标及代表井

改造参数	参数值	代表井
直井酸化最大深度	8 882 m	轮探 1
直井压裂最大深度	7 620 m	克深 13
最高温度	205 ℃	牛东 1
直井最大分层数(大斜度井)	6 层	高石 001-X25
水平井最大井深	8 008 m	塔中 862H
最长水平段长	1 561 m	塔中 721-8H
水平段最多分段数	12 段	塔中 541-H1
改造液未加重最高施工压力	122 MPa	克深 902
改造液加重最高施工压力	136 MPa	大北 301
最大液量	8 588 m ³	塔中 862H
最大加砂量	159 m ³	克深 1002
最大排量	11.2 m ³ /min	大北 101-1H

2 技术发展方向

2.1 面临的技术难点

中国在深层油气勘探中获得了新的突破,重点勘探新领域向超深层不断拓展,塔里木油田试油井最深已达 8 882 m(轮探 1 井);新疆准噶尔盆地南缘计划部署风险探井设计井深超过 8 700 m;四川盆地川西地区二叠系超深探井达 8 029 m(红星 1 井);青海及吐哈油田最新风险探井均超过 7 000 m。超深层储集层更深,且具有高温高压特征,改造对象更加复杂,必将面临更多挑战。

①地质工程一体化技术研究及应用难度更大。储集层改造领域的地质工程一体化要求采用逆向思维、正向施工的理念,储集层改造从业者必须从改造实施的角度对钻完井、油气藏层位选择、区域井网部署及开发地质等工作提出具体的要求,一体化工作要求对其他学科做到融会贯通。因此,对于超深层,基于地质工程一体化思路实施储集层改造难度越来越大。

②对入井材料要求更高。压裂液要求耐温 200 ℃以上,同时必须耐剪切、携砂性能稳定、摩阻低(降阻率大于 60%),且现场可配制、泵送性能良好(基液黏度小于 90 mPa·s);压裂支撑剂要求粒径尽量小(小于 0.150 mm(100 目)),在超深层缝宽不足情况下,提高陶粒可输送性,降低砂堵风险;对酸液体系耐温要求更高,缓蚀剂 200 ℃以下腐蚀速率应小于 60 g/(m²·h)。

③进一步提高超深巨厚储集层纵向剖面动用程度难度大。目前超深层封隔器最多实现3层分层改造；井口压力达90 MPa以上的气井，射孔、钻磨、连续油管带压作业井控风险高，无法实现桥塞分层改造；极限限流多簇分层在较小排量（小于 $6\text{ m}^3/\text{min}$ ）射孔孔眼较多（大于60孔）时，限流增压有限（小于3 MPa），无法实现多簇分层改造。

④对入井工具及地面配套高压设备要求更高。超深储集层改造工具面临耐温、耐压及性能稳定等方面的新挑战，亟待攻关耐高温高压材料及压裂装备和工具，实施高效的改造工艺。施工排量是保障，低排量很难保障储集层达到预期改造效果，高排量伴随极高的施工压力，大液量要求高压泵及井口高压设备长时间施工性能稳定、经济可行。

⑤超深、高温、高压井实现高效改造难度大。目前超深油气储集层改造施工排量较低（小于 $6\text{ m}^3/\text{min}$ ），改造规模受限，目前改造效果尚未达到最佳，如何进一步降低施工压力、提高排量是实现高效改造的关键。超深层水平井整体水平段较短、分段少、排量低、液量低，难以形成复杂缝网，亟待升级攻关水平井高效改造与配套技术。

⑥储集层改造直接监测及准确后评估难度更大。超深油气储集层改造直接监测技术未成熟应用，6 000 m以深并微地震信号识别困难；各种直接物理检测设备无法在温度超过 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压力超过120 MPa的井底工况下工作。勘探迈向更深储集层，各类直接监测技术的局限性更加明显。

2.2 主要技术发展方向

预测2030年中国石油天然气股份有限公司天然气年产量达 $1\ 600\times 10^8\text{ m}^3$ ，深层—超深层占比将达40%以上。储集层改造在超深层油气藏效益勘探开发中必将发挥更重要作用，结合未来超深油气储集层改造技术需求，总结梳理国内外超深层储集层改造发展历程、技术差距、技术需求及改造难点，认为中国超深层油气储集层改造技术发展应借鉴非常规油气储集层改造成功经验，工作重点应集中在以下几个方面。

①系统构建基础研究方法与评价实验新技术。针对超深、高温、高压储集层特征，开展高温、高压下的岩石力学特征、地应力场分布规律、裂缝扩展机理及表征技术研究，加强高闭合应力下裂缝网络与导流能力的匹配、支撑剂输送及沉降规律等方面的机理研究，深化超深层复杂地质和极端工况条件下的裂缝起裂、延伸机理研究，探索超深层储集层改造的新理论、新方法、新材料。

②加强地质认识，完善地质工程一体化工作运行机制。更加深入理解地质工程一体化工作内涵，提升复杂勘探对象改造效果，构建4个“一体化”平台：“一体化”评价平台，主要充分利用地质、甜点、地应力、完井品质等评价技术评估储集层品位；“一体化”设计平台，主要将地质模型、油藏模型、裂缝模型、经济模型等融为一体；“一体化”共享平台，主要实现实验结果共享、优化方案共享、施工设计共享；“一体化”分析平台，主要实现压后跟踪、措施评判、效果评价、模型修正，将多学科高度融合，不断提高超深层油气储集层改造设计的针对性。

③研发针对性更强的超深层高效改造材料。包括压裂液：耐高温、低摩阻、可加重、携砂性能稳定及低伤害是超深油气储集层改造压裂液技术发展方向，低成本及绿色环保是规模应用的基本要求；酸液：重点研发高温酸液缓蚀剂，形成超深、高温储集层改造用酸液体系，同时研发降低高温酸液溶蚀速率添加剂，增加酸蚀作用距离；支撑剂材料：小粒径、高强度陶粒型支撑剂是超深油气储集层改造支撑剂的发展方向，同时开展在超深油气储集层改造中使用石英砂替代陶粒的探索研究；暂堵转向材料：投球暂堵实现多级分层改造是超深巨厚储集层较为理想的改造工艺，要求暂堵材料承压高、耐温高及溶解可控，经济可行。

④攻关超深巨厚储集层精细分层改造工艺技术。实现精细分层是超深巨厚储集层改造工艺的研究重点，对纵向天然裂缝较发育的储集层，实现通过纵向局部改造沟通全部厚层。随着储集层深度增加，天然裂缝发育变差，超深井生产测井及页岩油气改造后缝高动态监测、支撑剂示踪剂监测证实，冻胶携砂及大排量低黏携砂形成的有效支撑缝高均远低于预期。因此，必须加强暂堵多级软分层工艺技术研究，借助分层工具实施精细分层施工，有效扩大缝网体积，提高工艺的有效性与经济性。

⑤探索超深层水平井缝控改造技术。“缝控储量”改造技术，是将人工裂缝的长度、间距、缝高等参数，充分与储集层的物性、应力、井控储量相结合并进行优化的技术。随着钻完井技术的发展，超深水平井钻井及改造更加普遍，应强化水平井改造工艺技术研究，实现低排量下的缝控改造。超深水平井缝控重点在于单井人工裂缝对储集层控制最大化及合理化，优化超深井缝控改造技术，实现投入产出比最优。

⑥研发适用于超深油气储集层改造的水力裂缝直接监测技术。强化用于人工裂缝直接监测的工具材料

研究,加强超深层裂缝监测评估方法研究,充分发掘施工过程中基础数据包含的井底人工裂缝变化信息。提高各类裂缝监测仪器远程信号识别及解读水平。耐高温、高压的温度压力监测计是目前超深层常用的监测压裂过程中井底数据变化的仪器,录取的压力、温度等数据较为可靠,加强对该类数据的分析研究,是目前较为经济可行的方法。

⑦研制耐高温、高压的井下改造工具及耐高压配套井口设备。继续强化井下分层工具的研发,保障超深井按照储集层改造需求进行施工,工具能适应 220℃ 以上的工作环境。研发大通径改造工具,降低节流摩阻,提高施工排量,综合提高井下作业能力;研发适用于超深井改造的可溶桥塞及配套组合工具,要求性能可靠,操作简易。地面装备耐高压、大功率压裂机组,配套耐高压井口设备,发展经济环保型压裂装备与低成本绿色能源压裂泵车。

3 结语

超深层油气储集层改造技术在超深层勘探突破、增储上产等勘探开发过程中发挥了重要作用。经过多年发展,国内超深层油气储集层改造技术基本满足不同历史时期超深层油气储集层改造的生产需求,有效支撑了中国塔里木油田、西南油气田等多个大型超深层油气田的产能建设。随着中国在更大范围、更深目的层不断取得勘探突破,超深油气储集层改造技术的需求不断增加、作用和地位将不断提升。努力做好超深油气储集层改造的基础理论、运行机制、材料设备、工具装备等方面的技术攻关,对支撑中国超深层油气增储上产,实现石油稳产、天然气业务快速发展意义重大。

致谢:本文为中国石油勘探开发研究院研究团队的集体成果,高莹、韩秀玲、王辽等参与了该工作,同时中国石油天然气股份有限公司的管理层给予了指导,塔里木油田、西南油气田等在相关技术试验中给予了大力支持,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 张宁宁,王青,王建君,等.近20年世界油气新发现特征与勘探趋势展望[J].中国石油勘探,2018,23(1):44-53.
ZHANG Ningning, WANG Qing, WANG Jianjun, et al. Characteristics of oil and gas discoveries in recent 20 years and future exploration in the world[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(1): 44-53.
- [2] 李阳,薛兆杰,程喆,等.中国深层油气勘探开发进展与发展方

向[J].中国石油勘探,2020,25(1):45-57.

- LI Yang, XUE Zhaojie, CHENG Zhe, et al. Progress and development directions of deep oil and gas exploration and development in China[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 45-57.
- [3] 江同文,滕学清,杨向同.塔里木盆地克深8超深超高压裂缝性致密砂岩气藏快速、高效建产配套技术[J].天然气工业,2016,36(10):1-9.
JIANG Tongwen, TENG Xueqing, YANG Xiangtong. Integrated techniques for rapid and highly-efficient development and production of ultra-deep tight sand gas reservoirs of Keshen 8 Block in the Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(10): 1-9.
- [4] VAN DOMELLEN M S, JACQUIER R C, SANDERS M W. State-of-the-art fracturing in the North Sea[R]. OTC 7890, 1995.
- [5] MALDONADO B, ARRAZOLA A, MORTON B. Ultradeep HP/HT completions: Classification, design methodologies, and technical challenges[R]. OTC 17927, 2006.
- [6] BROWN A, FARROW C, COWIE J. The Rhum Field: A successful HP/HT-gas subsea development (case history)[R]. SPE 108942, 2007.
- [7] HADDAD Z, SMITH M, MORAES F D D, et al. The design and execution of frac jobs in the ultra deepwater lower Tertiary Wilcox formation[R]. SPE 147237, 2011.
- [8] 陈家庚,曹新玲,李自强.水力压裂法测定华北地下深部应力[J].地震学报,1982,4(4):350-361.
CHEN Jiageng, CAO Xinling, LI Ziqiang. Stress measurements at depth in North China by hydraulic fracturing[J]. Acta Seismologica Sinica, 1982, 4(4): 350-361.
- [9] 冯广庆.试油新技术在野云2井的应用[J].油气井测试,2005,14(5):51-53.
FENG Guangqing. Application of new testing tech in well Yeyun2[J]. Well Testing, 2005, 14(5): 51-53.
- [10] 焦方正.塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景[J].石油与天然气地质,2018,39(2):207-216.
JIAO Fangzheng. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei Area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 207-216.
- [11] 陈凌,胡国亮.从酸压机理探讨塔河油田酸压工艺发展方向[J].石油钻探技术,2004,32(4):69-71.
CHEN Ling, HU Guoliang. The developing trend of acid fracturing technique in Tahe Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004, 32(4): 69-71.
- [12] 张以明,才博,何春明,等.超高温超深非均质碳酸盐岩储层地质工程一体化体积改造技术[J].石油学报,2018,39(1):92-100.
ZHANG Yiming, CAI Bo, HE Chunming, et al. Volume fracturing technology based on geo-engineering integration for ultra-high temperature and ultra-deep heterogeneous carbonate reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(1): 92-100.
- [13] 雷群,胥云,蒋廷学,等.用于提高低-特低渗透油气藏改造效果的缝网压裂技术[J].石油学报,2009,30(2):237-241.
LEI Qun, XU Yun, JIANG Tingxue, et al. "Fracture network" fracturing technique for improving post-fracturing performance of low and ultra-low permeability reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2): 237-241.
- [14] CHUPRAKOV D, PRILOU R. Hydraulic fracture height containment by weak horizontal interfaces[R]. SPE 173337, 2015.
- [15] WANG L W, CAI B, QIU X H, et al. A case study: Field application of ultra-high temperature fluid in deep well[R]. SPE 180546, 2016.
- [16] WANG Y H, ZHANG F X, CHENG X S, et al. Proppant fracturing for ultra-high pressure deep gas reservoir[R]. SPE 130905, 2010.
- [17] 程万,金衍,陈勉,等.三维空间中水力裂缝穿透天然裂缝的判别准则[J].石油勘探与开发,2014,41(3):2-10.
CHENG Wan, JIN Yan, CHEN Mian, et al. A criterion for identifying

- hydraulic fractures crossing natural fractures in 3D space[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(3): 2-10.
- [18] 胥云, 雷群, 陈铭, 等. 体积改造技术理论研究进展与发展方向[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(5): 874-887.
XU Yun, LEI Qun, CHEN Ming, et al. Progress and development of volume stimulation techniques[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 874-887.
- [19] 付海峰, 刘云志, 梁天成, 等. 四川省宜宾地区龙马溪组页岩水力裂缝形态实验研究[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(12): 2231-2236.
FU Haifeng, LIU Yunzhi, LIANG Tiancheng, et al. Laboratory study on hydraulic fracture geometry of Longmaxi Formation shale in Yibin area of Sichuan Province[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(12): 2231-2236.
- [20] 才博, 张以明, 金凤鸣, 等. 超高温储层深度酸压液体体系研究与应用[J]. *钻井液与完井液*, 2013, 30(1): 69-71, 74.
CAI Bo, ZHANG Yiming, JIN Fengming, et al. Research on acid fracturing system with improving stimulated reservoir volume[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2013, 30(1): 69-71, 74.
- [21] 杨振周, 陈勉, 胥云, 等. 新型合成聚合物超高温压裂液体系[J]. *钻井液与完井液*, 2011, 28(1): 49-51.
YANG Zhenzhou, CHEN Mian, XU Yun, et al. Research of new ultra high temperature synthetic polymer fracturing fluid[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2011, 28(1): 49-51.
- [22] 徐敏杰, 管保山, 刘萍, 等. 近十年国内超高温压裂液技术研究进展[J]. *油田化学*, 2018, 35(4): 721-725.
XU Minjie, GUAN Baoshan, LIU Ping, et al. Domestic progress of ultrahigh-temperature fracturing fluids in the last decade[J]. *Oilfield Chemistry*, 2018, 35(4): 721-725.
- [23] GAO Y, LIAN S J, SHI Y, et al. A new acid fracturing fluid system for high temperature deep well carbonate reservoir[R]. *SPE 181823*, 2016.
- [24] WANG L W, ZHAI W, CAI B, et al. 220 °C ultra-temperature fracturing fluid in high pressure and high temperature reservoirs[R]. *OTC 26364*, 2016.
- [25] LUNGWTTZ B, BRADY M E, DANIEL S, et al. Viscoelastic stable at high brine concentrations: US 6762154B2[P]. 2004-07-13.
- [26] BAGAL J, GURMEN M N, HOLICEK R A, et al. Engineered application of a weighted fracturing fluid in deep water[R]. *SPE 98348*, 2006.
- [27] RIVAS L, NAVAIRA G, BOURGEOIS B. Development and use of high-density fracturing fluid in deep water gulf of Mexico frac and packs[R]. *SPE 116007*, 2008.
- [28] 侯帆, 仇宇楠, 张雄, 等. 低摩擦高比重耐高温压裂液的制备与性能评价[J]. *油田化学*, 2018, 35(4): 618-621.
HOU Fan, QIU Yunan, ZHANG Xiong, et al. Preparation and performance evaluation of fracturing fluid with low friction, high density and high temperature resistance[J]. *Oilfield Chemistry*, 2018, 35(4): 618-621.
- [29] 程兴生, 张福祥, 徐敏杰, 等. 低成本加重瓜胶压裂液的性能与应用[J]. *石油钻采工艺*, 2011, 33(2): 91-93.
CHENG Xingsheng, ZHANG Fuxiang, XU Minjie, et al. Performance and application of weighted GHPG fracturing fluid with low cost[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2011, 33(2): 91-93.
- [30] 李刚, 郭新江, 陈海龙, 等. 高密度酸加重酸化技术在川西深井异常高压气层增产中的应用[J]. *矿物岩石*, 2006, 26(4): 105-110.
LI Gang, GUO Xinjiang, CHEN Hailong, et al. Application of aggravating acidification of high density acid in stimulation of deep well with surppressure gas reservoir of West Sichuan[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2006, 26(4): 105-110.
- [31] 毛金成, 王晨, 张恒, 等. 阳离子 VES 转向酸体系的研制及性能评价[J]. *石油与天然气化工*, 2019, 48(6): 65-69.
MAO Jincheng, WANG Chen, ZHANG Heng, et al. Development and performance evaluation of cationic VES diverting acid system[J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2019, 48(6): 65-69.
- [32] 牛新明, 张进双, 周号博. “三超”油气井井控技术难点及对策[J]. *石油钻探技术*, 2017, 45(4): 1-7.
NIU Xinming, ZHANG Jinshuang, ZHOU Haobo. Technological challenges and countermeasures in well control of ultra-deep ultra-high temperature and ultra-high pressure oil and gas wells[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(4): 1-7.
- [33] 雷群, 管保山, 才博, 等. 储集层改造技术进展及发展方向[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(3): 168-175.
LEI Qun, GUAN Baoshan, CAI Bo, et al. Technological process and prospect of reservoir stimulation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(3): 168-175.
- [34] 胥云, 陈铭, 吴奇, 等. 水平井体积改造应力干扰计算模型及其应用[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(5): 780-786.
XU Yun, CHEN Ming, WU Qi, et al. Stress interference calculation model and its application in volume stimulation of horizontal wells[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(5): 780-786.
- [35] RABAA W E. Experimental study of hydraulic fracture geometry initiated from horizontal wells[R]. *SPE 19720*, 1989.
- [36] 杨战伟, 胥云, 程兴生, 等. 水力喷射酸压技术在轮南碳酸盐岩水平井中的应用[J]. *钻采工艺*, 2012, 35(1): 49-51.
YANG Zhanwei, XU Yun, CHENG Xingsheng, et al. Research and application of hydraulic jetting and acid fracturing technology in horizontal well of Lunnan carbonate formation[J]. *Drilling and Production Technology*, 2012, 35(1): 49-51.
- [37] 雷群, 杨立峰, 段瑶瑶, 等. 非常规油气“缝控储量”改造优化设计技术[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(4): 719-726.
LEI Qun, YANG Lifeng, DUAN Yaoyao, et al. The “fracture-controlled reserves” based stimulation technology for unconventional oil and gas reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(4): 719-726.
- [38] CIEZOBKA J, COURTIER J, WICKER J. Hydraulic fracturing test site (HFTS): Project overview and summary of results[R]. *SPE 2937168*, 2018.
- [39] ROBERTS G, LILLY T B, TYMONS T R. Improved well stimulation through the application of downhole video analytics[R]. *SPE 18985*, 2018.
- [40] STARK P F, BOHRER N C, KEMNER T T, et al. Improved completion economics through real-time, fiber optic stimulation monitoring[R]. *SPE 194314*, 2019.
- [41] 刘博, 苗红波, 徐刚, 等. 微地震同步压裂监测技术研究与应用[J]. *钻采工艺*, 2017, 40(4): 53-55.
LIU Bo, MIAO Hongbo, XU Gang, et al. Study on microseismic monitoring of synchronous fracturing and its application[J]. *Drilling & Production Technology*, 2017, 40(4): 53-55.

第一作者简介: 雷群(1963-), 男, 宁夏永宁人, 博士, 中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师, 主要从事采油采气工程技术方面的研究工作。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院院办, 邮政编码: 100083。E-mail: leiqun@petrochina.com.cn

联系作者简介: 杨战伟(1982-), 男, 河南太康人, 硕士, 中国石油勘探开发研究院工程师, 主要从事水力压裂技术方面的研究工作。地址: 河北省廊坊市万庄石油分院 44#信箱, 邮政编码: 065007。E-mail: yzw69@petrochina.com.cn

收稿日期: 2020-04-14 修回日期: 2021-01-07

(编辑 唐俊伟)