

文章编号: 1000-0747(2019)03-0580-08 DOI: 10.11698/PED.2019.03.16

储集层改造技术进展及发展方向

雷群^{1,2}, 管保山^{1,2}, 才博^{1,2}, 王欣^{1,2}, 胥云^{1,2}, 童征^{1,2},
王海燕^{1,2}, 付海峰^{1,2}, 刘哲^{1,2}, 王臻^{1,2}

(1. 中国石油天然气集团有限公司油气藏改造重点实验室, 河北廊坊 065007; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

基金项目: 国家科技重大专项“储层改造关键技术及装备”(2016ZX05023)

摘要: 通过对储集层改造技术发展历史的总结, 明确了国内外储集层改造技术的新进展, 总结出国内外储集层改造技术的差距, 指出未来面临的技术难点及发展方向。中国与国外储集层改造技术的差距主要表现在储集层改造裂缝扩展机理、软件研发、压裂车装备、工具的耐温耐压性、支撑剂替代、大数据信息化数据库等 6 个方面; 未来面临技术难点主要有地质与工程一体化的深度融合不够、水平井体积改造多裂缝的扩展形态及影响因素不清楚、降本空间小环保压力大、新技术缺乏室内实验及现场试验装备、压裂液体系关键技术欠成熟、工厂化压裂设备功效低等。在此基础上, 结合中国储集层改造技术发展现状, 提出了 6 个方面的建议: ①做好非常规储集层改造机理研究; ②加快地质-工程一体化软件研发; ③促进提高采收率改造工艺升级; ④开展低成本多功能压裂液配方实验; ⑤尽快完成高效压裂装备配备; ⑥全面建设储集层改造大数据、信息化平台及远程决策系统。图 4 表 1 参 43

关键词: 非常规储集层; 储集层改造; 压裂装备; 压裂材料; 压裂设计; 远程决策; 技术进展

中图分类号: TE37

文献标识码: A

Technological progress and prospects of reservoir stimulation

LEI Qun^{1,2}, GUAN Baoshan^{1,2}, CAI Bo^{1,2}, WANG Xin^{1,2}, XU Yun^{1,2}, TONG Zheng^{1,2},
WANG Haiyan^{1,2}, FU Haifeng^{1,2}, LIU Ze^{1,2}, WANG Zhen^{1,2}

(1. CNPC Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Stimulation, Langfang 065007, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: Through reviewing the development history of reservoir fracturing technology, this paper demonstrated the latest research progress at home and abroad and summarized six technical gaps between China and the world, that is fracture propagation mechanism, fracturing software development, fracturing vehicle equipment, downhole tools temperature and pressure resistance, proppant replacement and big data information database. The technical difficulties include lack of geological-engineering deep integration, unclear factors on horizontal well multi-fracture propagation, difficulty in reducing construction costs, environment protection pressure, lack of new experimental and field test equipment, immature techniques for fracturing fluid, and low efficacy of factorized fracturing equipment. We proposed six suggestions on China's reservoir hydraulic fracturing technology: (1) strengthen mechanism study of unconventional reservoir hydraulic fracturing; (2) accelerate the development of geological-engineering integration software; (3) promote the upgrading of EOR fracturing techniques; (4) carry out low-cost multi-functional fracturing fluid formula experiment; (5) complete high-efficiency fracturing equipment; (6) build big database, informational and remote decision-making system of hydraulic fracturing.

Key words: unconventional reservoirs; hydraulic fracturing; hydraulic fracturing equipment; hydraulic fracturing materials; hydraulic fracturing design; remote decision-making; technological progress

引用: 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): 580-587.

LEI Qun, GUAN Baoshan, CAI Bo, et al. Technological progress and prospects of reservoir stimulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 580-587.

0 引言

1947 年石油行业第 1 次尝试水力压裂储集层改造获得成功, 从此储集层改造作为一项持久发展的科学技术, 经历了 70 多年的发展历史^[1-3]。储集层改造技术从基础理论、实验研究到装备、工具、材料、软件及

现场实践等都取得了迅猛的发展, 并已与钻井工程、地球物理勘探并列为勘探开发三大关键工程技术^[4]。特别是近年来, 在全球进入非常规油气、难动用储量开发时代的背景下, 北美通过水平井多段改造技术的大规模应用, 引发了“页岩气”和“致密油”的革命性突破, 钻完井与储集层改造技术协同发展, 纳达西级渗

透率储集层均可得到有效动用和经济开发,使得许多传统的勘探禁区成为现实目标,改变了全球能源格局^[5-8]。储集层改造技术目前是中国石油上游业务实现低成本战略、提高单井产量、有效动用低品位储量的关键技术。

本文通过追溯储集层改造技术的发展历史,总结储集层改造技术的核心要素,分析国内外储集层改造的技术特征,系统地阐述了储集层改造技术由简单到复杂,由直井到水平井分段压裂,由传统解堵压裂到低渗透及非常规储集层高效改造的三大变革。同时通过全面分析、总结国内外储集层改造技术发展现状,对比、借鉴北美同类技术,精准定位中国储集层改造技术的现状,剖析储集层改造技术整体发展趋势,为中国未来将长期面对低渗、深层、海洋、非常规等为主体资源的油气开发提供储集层改造需求方面的借鉴。

1 储集层改造技术发展现状

1.1 国内外技术发展历程

国外储集层改造技术发展主要可概括为4个阶段:①直井常规压裂阶段(1980年以前),主要以单层适度规模压裂、解除地层污染为主^[9];②直井大型压裂阶段,为满足北美致密气压裂需求,20世纪80年代开始,美国 Wattenberg 气田开展了大型压裂技术攻关,加砂量 100 m^3 以上,压后缝长 $400\sim 600\text{ m}$,压后稳产 $(2.0\sim 3.5)\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ^[10];③直井分层压裂阶段,以美国大绿河盆地 Jonah 气田多级压裂技术为代表,压裂 $3\sim 6$ 层(段),纵向改造程度为常规分压的2倍,产量较常规压裂增加90%以上^[11];④水平井分段压裂阶段(2000年至今),为满足致密油气储集层改造的需求,发展了水平井分段压裂技术,并通过作业井数的规模化、批量化实现高效的工厂化压裂,平台布井从2011年 $8\sim 16$ 口上升到 $24\sim 40$ 口,如 Marcellus 的 Cogar 平台达40口井、Encana 公司在二叠盆地的超级平台达64口井^[12-14]。水平井分段压裂技术引发了北美页岩油气二次革命,至2017年底,美国致密油年产量 $2\times 10^8\text{ t}$,页岩气年产量达 $4\ 200\times 10^8\text{ m}^3$ 。

1955年中国在玉门油田尝试压裂的第1口井获得成功,随后经60多年的发展完善,储集层改造技术基本满足了中国石油工业发展的需求。同样可具体概括为4个阶段:①“八五”以前,主要为单井小规模改造,如玉门老君庙 N-1 井采用300型水泥车,以 30 m^3 原油为压裂液,加入 0.5 m^3 石英砂,施工排量 $0.2\text{ m}^3/\text{min}$,压后获 15.4 t/d 的工业油流,开启了中国储集

层改造的新纪元;②“八五”至“十五”期间,为解决低渗透油藏人工裂缝与开发井网的匹配问题,形成了水力裂缝与开发井网优化组合的整体压裂系统开发技术^[15-16],如吐哈鄯善低渗透油田首次开展整体压裂实践,促进了吐哈油田 $100\times 10^4\text{ t}$ 产能的快速建成,长庆靖安油田 ZJ60 开发压裂先导试验56口井,与邻区相比,单井日产量平均提高1.7倍,采出程度提高7%,成为常规低渗透油藏产能建设的必备技术之一;③2000—2015年,针对低品位储集层,开展以复杂缝网为目标的体积压裂技术攻关^[17-21],以长水平井段(大于 $1\ 000\text{ m}$)、千方砂、万方液为标志,助推了涪陵、长宁、威远、昭通页岩气田商业开发,使中国成为继美国、加拿大之后第3个掌握页岩气成套工程技术并实现商业开发的国家;④2015年至今,提出了缝控储量改造的新技术^[22],将某一井控目标区域划分成若干单元,每个单元部署1组或多组相互连通的复杂裂缝,通过这组裂缝(缝网)控制和采出该单元内的油气储量,大幅度降低井间平面范围或层间纵向范围内的“空白油气区域”,油气得到有效控制和采出,如2017年以来,新疆玛湖砂砾岩储集层采用该技术平均单井日产油提高到 26 t ,推动了玛湖致密油规模效益开发。

1.2 储集层改造技术主要进展

近几年,储集层改造技术主要在裂缝扩展、全三维软件及裂缝评估、大功率连续作业装备、高效多段分压工具、多功能及低成本材料、信息化及远程决策方面取得了突出进步。

1.2.1 裂缝起裂模型及扩展理论

水力压裂理论模型发展于20世纪50年代,裂缝扩展理论研究经历了从二维模型(PKN、KGD、径向模型)到拟三维、全三维模型等过程^[23]。以2004年 Yamamoto 等^[24]开发的全三维模型为代表,该模型建立了裂缝张性、剪切破坏及张-剪复合型破坏准则,基于静态和动态断裂力学理论,采用包括有限元、扩展有限元、不连续位移等方法模拟裂缝非平衡、网络扩展模式,可模拟水力裂缝与不同天然裂缝的接触角、水平应力差、裂缝胶结强度下的相互作用关系,并研究多条非平面裂缝的相互作用。其中离散裂缝网络(DFN)、正交线网(Wire-Mesh Model)、非常规裂缝(UFM)等复杂网络裂缝扩展模型也在逐渐完善中,因此全三维模型可有效模拟非常规储集层水力压裂中天然裂缝及储集层多段、多簇射孔的裂缝网络扩展行为,为非常规储集层改造优化设计提供新理论。

在裂缝扩展物理实验研究方面,大型岩石人工裂

缝物理模拟方法是直接掌握裂缝扩展动态特征、直观分析裂缝形态的新兴关键技术,国内外早期的裂缝扩展装置的岩心尺寸为 30 mm×30 mm×30 mm,测试岩心尺寸较小,加压条件低,同时受边界效应影响明显。2010年, Terretak 公司提出一套 1.0 m 见方大岩块全三维应力加载水力压裂实验装备(见图 1)。该套物模实验系统最大加载压力 69 MPa,最大应力差 14 MPa,岩样尺寸 762.0 mm×762.0 mm×914.4 mm,最大中心孔眼尺寸 125 mm,孔隙压力 20 MPa,最大井眼流量 12 L/min。同时具有 24 路传感器实时监测^[25-26],裂缝的形态可通过实时声波检测。目前已经完成了砂岩、煤岩、页岩等共计 50 余块岩心的大型物模实验,探索了页岩脆性、地应力差异、弱面(天然裂缝、层理)、施工缝内净压力(与液体黏度、注入速率有关)对缝网形成的影响,同时初步研究了地应力差异、诱导应力、复合压裂、暂堵转向压裂等对致密砂岩裂缝复杂化的影响程度,有力支撑了复杂裂缝(网缝)压裂的优化设计,同时也为复杂裂缝扩展模型研究奠定了基础。



图 1 大型物理模拟实验装备

1.2.2 储集层改造模拟软件及裂缝评估

压裂设计软件基本可以分为 2 大类:①传统压裂优化设计软件,基本功能包含一维分层建模、压裂设计、酸压设计、简单产能模拟、测试压裂分析、实时数据分析和经济评价等。该类软件基本以国外引进为主,例如 FracPro、Gohfer、StimPlan、Meyer 等。②地质工程一体化软件,在非常规储集层复杂地质、非平面网络裂缝扩展等特殊条件下,只有强化地质-工程有机结合才能更好地发挥储集层改造的效果,因此近期国外在常规软件基础上,发展了地质-工程一体化软件,具备复杂的三维地质建模、天然裂缝建模、地应力建模、压前评价、压裂设计、微地震解释、产能模拟(油藏数值模拟)和经济评价等一体化 workflow 功能。其建模功能、产能模拟功能较传统压裂软件更先进,与地质和油藏工程结合更紧密。常见软件有 Mangrove、

JewelSuite、Fracman 等。近年来中国多家机构也开展了地质-工程一体化软件的研发,主要依托研究项目开展工作,以全三维双翼对称裂缝扩展、单井产能模拟、经济评价 3 个模块为主。

随着非常规储集层的大规模开发,微地震监测、微变形测斜仪监测、分布式光纤温度测试、噪音测试等各种新型的裂缝监测技术不断推出,其中微地震监测技术被认为是实现“页岩气革命”3 大核心技术之一。微变形测斜仪监测技术采用微变形测斜仪,可建立注容比、体积分量差异率、裂缝复杂指数 3 个参数,实现水平、垂直裂缝的有效区分,为非常规储集层裂缝形态的刻画提供了支撑;分布式光纤温度测试以及噪音测试技术可进行流体流动监测、流体分布评价^[27],该技术在北美地区已经大规模应用,而中国对该技术还处于攻关研究阶段。

此外,运用示踪剂法测量原理,开展了示踪剂测试优化技术研究,形成了采用示踪剂评价分段产液量贡献的方法,可用于分析水平井多段改造后裂缝压开程度及压裂产出效果,进而评价分段水平井体积改造的整体效果。2013年 Ghanbari 建立了人工裂缝和基质的含盐浓度与累计返排量的数学关系式,得出盐浓度与人工裂缝宽度的相关关系,通过人工裂缝、基质流动与盐浓度变化特征,建立返排过程中裂缝宽度的数学表征模型,为裂缝复杂形态的分析提供新的理论模型与思路^[28];2018年北美又在二叠盆地开展了水力压裂现场取心试验(HFTS)^[29],该方法通过在压裂水平井的邻井钻大角度(一般 60°,可分析不同井距下裂缝长度和井间距的关系)水平井实现连续取心,用于在矿场实践中监测水力裂缝支撑剂的分布和裂缝扩展形态,评价形成裂缝的有效性,分析井间干扰等现象,进而指导井间距优化、压裂参数优化等。该方法已成为目前的热点,中国的长庆、吉林、吐哈、新疆等油田正在开展该类工作。

1.2.3 大功率连续作业装备

2017年,美国压裂车总功率为 1.641×10^7 W。混砂车分 2 种:①输出排量为 16 m³/min 的混砂车,输砂能力达到 7.2 t/min;②输出排量为 20 m³/min 的混砂车,输砂能力达 9.5 t/min。2 种混砂车均配套了连续混配系统和连续供水系统。由于北美地区高压作业需求较少,压裂机型以 2300 型压裂车为主。

2017年,中国压裂车总功率为 239×10^7 W。虽仅为美国的 14.5%,但储集层改造装备已向大功率、自动化方向快速发展。目前大规模应用的 2500 型、3000

型系列压裂泵车及其配套的混砂车、系列管汇、仪表车等设备^[30]，最高耐压 140 MPa，单车最大排出流量 16 m³/min，可实现水、粉料、砂按比例自动添加，240 桶闭式混砂车最大排量的输砂能力达 38 m³/min。2015 年中国试验研发了 4500 型涡轮式压裂泵车，相当于 2500 型压裂车和 2000 型常规压裂车输出功率的总和。其搭载的涡轮发动机仅重 0.7 t，全车总重和底盘长度与 2000 型压裂车相当，十分适合对分布在崎岖地带的页岩气井实施高难度、高压大型压裂作业。另外为实现大型压裂装备“电代油”、低噪音与节能环保的绿色发展需求，2018 年 6000 型电驱压裂泵车也在页岩气现场试验成功，噪音由 115 dB 降到 95 dB，预计可减少碳排放量 100 t/a，应用前景广阔。

塔里木库车山前油气藏埋深超过 7 000 m，为此研发出 7 000 m 深层变径式连续管作业配套装备，提升力达 680 kN，为塔里木超深井的解堵作业提供了保障。而鄂尔多斯、松辽等盆地的储集层具有低压水敏性特点，同样针对该储集层地质条件研制出 CO₂ 干法压裂装备^[31]，目前最大单层加砂量达 30 m³，最高砂比达 25%，适用最大井深 3 454 m、最高井温 104 ℃。

1.2.4 水平井高效多段分压工具

在水平井及体积压裂成为国内外非常规油气开发主体技术的背景下，水平井分段压裂改造工具逐步向多段、低成本、高效发展。以中国为例，经过“十一五”和“十二五”计划的持续攻关，已经形成了多套压裂工具，并逐步由研发初期的套内封隔器、水力喷砂、裸眼封隔器为主发展到以速钻桥塞为主体的新阶段，速钻桥塞分段压裂工具耐温 120 ℃，耐压差 70 MPa，施工压力最高 90 MPa，可满足大规模储集层改造的要求。至 2017 年 12 月底，中国石油实施水平井改造累计达 6 178 口井，速钻桥塞占比达 48.3%（见图 2）。

此外，可溶性球、可开关滑套、单球打开多滑套、电控滑套、机械编码滑套、平衡滑套、可伸缩式预制

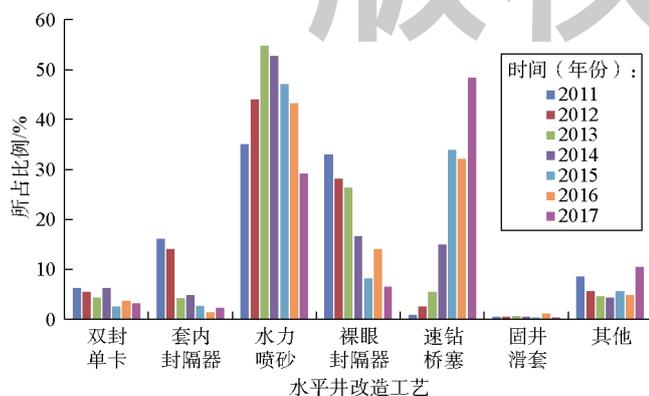


图 2 2011—2017 年不同水平井改造工艺占比

孔道等先进压裂工具也处在攻关研究阶段，这必将进一步推动中国水平井分段压裂技术的发展。

1.2.5 储集层改造材料

为适应国内外油气勘探开发向非常规、超深与超高温等储集层的转变，压裂液围绕“低伤害、低成本、可回收、超高温”方向发展且进展显著，而支撑剂逐步向石英砂替代陶粒的方向发展。

①低伤害压裂液。目前性能优良的羟丙基瓜胶、羧甲基瓜胶以及羧甲基羟丙基瓜胶已经能够将不溶物含量降低到 2% 左右，同时聚合物清洁压裂液也取得了明显进展。苏里格东区致密气储集层具有物性差、孔隙连通性差、储集层敏感性和吸附性强等特点，经研究发现，该地区以往改造效果不理想主要是因为黏土膨胀和残渣的影响。2012 年段瑶瑶等^[32]有针对性地研制出了新型无残渣纤维素压裂液，该体系破胶液表面张力 22.68 mN/m，能在 2 min 内达到其最高黏度的 97.5%，基本无残渣，岩心损害率仅为 13%，极大降低了对储集层和裂缝导流能力的伤害。现场试验井压后平均日产气量是邻井的 5 倍，为苏里格致密气的开发提供了新的高效压裂液体系。

②低成本、可回收滑溜水。2011 年以来，为满足致密油气、页岩气大规模体积压裂要求，研发了低黏、低摩阻、低损害、可回收滑溜水体系。长庆油田 EM30、EM50 型滑溜水体系得到广泛应用，在 0.03%~0.08% 浓度下液体的摩阻降低率可达 70%~80%^[33]。滑溜水也可适应塔里木超深、高温、高压储集层的压裂需求。

③超高温压裂液。目前中国压裂施工最高温度达 210 ℃，杨振周等^[34]、Wang 等^[35]通过聚合物压裂液耐温机理及流变性研究，合成耐温能力达到 230 ℃的聚合物压裂液，浓度为 0.6% 的聚合物交联冻胶在温度 230 ℃、170 s⁻¹ 条件下剪切 2 h 后黏度仍保持为 170 mPa·s（见图 3）。该压裂液体系应用于渤海湾盆地牛东深层，压后获得日产油 60 m³、日产气 10.3×10⁴ m³、降低经济成本 45.6% 的良好效果，对推动渤海湾盆地及中国深层勘探具有里程碑意义^[36]。另外深层储集层具有高温的同时还伴随着高破裂压力的问题，面对塔里木 7 000 m 超深、高压、高应力储集层，提高压裂液密度是降低井口施工压力的有效方法。程兴生等^[37]研发出添加 KCl、NaNO₃ 的有机硼压裂液加重体系，密度分别为 1.15、1.35 g/cm³，NaNO₃ 加重压裂液体系耐温 160 ℃。该压裂液加重体系在塔里木油田成功应用 26 井次，最大改造深度 7 430 m（克深 13 井），成本比溴盐加重体系降低 400×10⁴ 元/井。

近期，支撑剂的研究及应用以石英砂替代陶粒

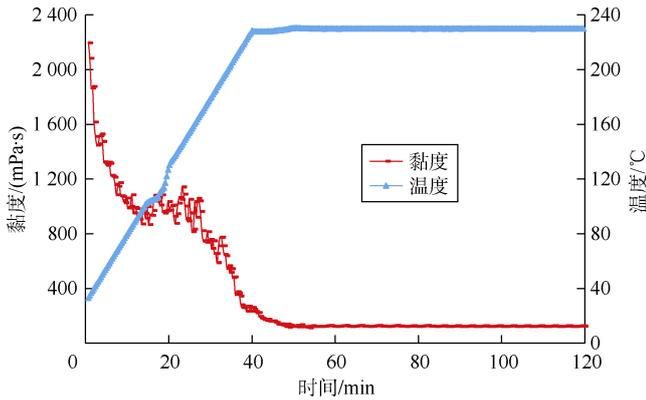


图3 230 °C超高温压裂液体体系流变特性曲线

为主,大幅降低压裂材料的费用。2014年以来,北美增加石英砂在压裂施工中所占比例,有效降低了成本,推动了低油气价条件下页岩油气的效益开发^[38]。据统计,2018年北美石英砂的用量比例已超过90%(见表1),当年需求量高达 1.0×10^8 t。北美11个常规油气主要盆地中,二叠盆地用砂量最大,单季度超过 360×10^4 t,预计年用量将超过 1500×10^4 t。小粒径石英砂成为主流:二叠盆地0.150 mm(100目)压裂砂用量从2015年开始占据主导地位;2016年已超过50%;0.425~0.850 mm(20~40目)的压裂砂占比急剧降低。

表1 北美地区石英砂用量统计表

主要盆地 (区块)	石英砂量/ 10^4 t	石英砂 占比/%	主要盆地 (区块)	石英砂量/ 10^4 t	石英砂 占比/%
Eagle Ford	9.5	95	Haynesville	1.30	93
Appalachia	6.8	100	Barnett	0.90	99
Permian	5.3	90	Fayetteville	0.45	100
Bakken	2.2	92	Unita	0.32	89
Anadarko	2.1	91	Piceance	0.26	96
Julesburg	1.3	98			

统计 Bakken 油田页岩气井累计产量可知,采用100%石英砂、55%覆膜石英砂+45%石英砂、55%陶粒+45%石英砂3种支撑剂压裂施工,其中采用55%覆膜石英砂+45%石英砂支撑剂施工的井初期产量最大。生产1年后,3种支撑剂施工的井产量逐步趋于稳定,并较为接近,说明使用陶粒支撑剂裂缝导流能力较高,但成本高;使用石英砂支撑剂裂缝导流能力虽然较低,但成本低,同样可以满足页岩气井长期生产的需求。

中国目前使用的支撑剂仍以陶粒为主,石英砂为辅,借鉴美国的成功经验,正在开展石英砂的评价和筛选工作,并在西南的页岩气区、新疆和鄂尔多斯的致密油区开展了现场试验。西南页岩气2个平台的典型井应用效果表明,将石英砂比例从约30%提高到70%~80%,单段产气量无明显变化^[39]。新疆玛湖油田在风南4等区块实施9口水平井的石英砂替代陶粒试验,结果表明在生产制度相近的情况下,采用石英砂

替代陶粒,两者日产油量基本相当,但成本降低了20%~30%,效果十分明显。

1.2.6 储集层改造数据信息化及远程决策

随着国内外储集层改造井数的爆发性增加,建立了大数据、云处理等信息化平台,及时掌握和分析压裂动态及效果。2011年美国水资源保护协会(GWPC)创建了FracFocus数据库^[40-41],第1批有17家公司上传了444口井压裂数据,通过逐步完善目前已发展到3.0版。其中的化学试剂、添加剂数据库(CAS),要求石油公司必须将压裂过程中的化学添加剂情况实时上传至该系统,并通过数据库系统向公众发布(见图4),便于用户随时调用。该系统已收集了美国本土超过600家石油公司、 5.5×10^4 口井的压裂数据,实现了大数据平台的共享。



图4 美国FracFocus数据库发展历程

国际大型石油公司正在大力研发远程控制专家决策平台(RTOC),并取得初步成效。如壳牌公司在俄罗斯实现了莫斯科、萨雷姆等4个地点的远程协同工作,随时对压裂施工现场进行指挥操作^[42]。中国也逐步开展了信息化建设工作,中国石油建立了采气工程与地面工程生产运行管理和决策支持系统,具有管理规范、统一、高效、安全等特点,下属部分企业已经开始了远程控制专家决策平台的建设。

1.3 储集层改造技术应用成效

近10年来,中国石油每年新钻井约 1.6×10^4 口,超过70%的井需进行储集层改造,2000年至今,累计改造超过 22×10^4 井次,储集层改造工作量保持在 1.5×10^4 井次/a。储集层改造技术的快速发展,有力推动了中国低渗透、页岩气、致密油、深层4大领域油气资源的勘探和油(气)产量的飞跃发展:①有效支撑了长庆 5000×10^4 t大油气田的建成,目前已具备年产 2500×10^4 t原油、 350×10^8 m³天然气的生产能力;②高效建成了中国川渝地区首个页岩气基地,使中国成为继美国、加拿大之后第3个掌握页岩气成套工程技术并实现商业化开发的国家;③快速推进了新疆准噶尔盆地玛湖 10×10^8 t级大油田的勘探发现,为新疆地区 5000×10^4 t上产提

供了重要支撑；④确保了塔里木、四川盆地两个 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$ 深层大气田的持续勘探发现与高效开发。

2 储集层改造技术发展方向

2.1 储集层改造面临的主要技术难点

国内外油气资源勘探开发逐步向非常规油气、高温、深层等领域发展，储集层改造是油气勘探开发中的关键技术。新的领域中，该技术面临的挑战、难点更复杂：①面对非常规储集层（致密油、页岩气、页岩油等）的复杂地质条件，必须进一步提高储集层改造工程的品质，进一步推进地质与工程一体化的深度融合，才能有效提高改造效果，实现经济有效开发；②非常规储集层中采用水平井体积改造，多裂缝的扩展形态及影响因素目前认识不清，特别是多条裂缝受天然裂缝的弱面、应力、水平两向应力差等的影响，裂缝扩展机理研究需要进一步深化，模拟方法需要改进；在低成本、环保的大环境下，目前降本空间在变小，环保压力越来越大，石英砂替代陶粒支撑剂形成商业化应用仍需开展理论研究和大量的现场试验；④高含水后期稳油控水工艺、原位支撑等新技术缺乏室内实验及现场试验装备；⑤以瓜尔胶、聚合物为主体的压裂液材料环保仍存在技术难题，滑溜水在页岩中的吸附伤害及控制^[43]、超深超高温（8 000 m、200 °C）压裂液体系的抗高温-交联-破胶等关键技术还需大力攻关；⑥工厂化压裂目前设备功效低、作业周期长。如页岩气工厂化压裂作业时时效为每 12 h 完成 2~3 段，压裂周期平均 30 d，时效已提高超过 1 倍，但设备噪音大、作业功率低；⑦储集层改造大数据、云处理信息化数据库建设刚起步，存在数据采集难、共享基础薄弱等问题，同时全过程远程决策系统的实时数据发送-接受、压裂动态效果分析、系统多节点的兼容性均有许多问题亟待解决。

2.2 国内外储集层改造技术的差距

非常规储集层地质甜点、力学特征、矿物组分、敏感性等方面与常规储集层相比具有较大的特殊性，从理论研究、软件研发、压裂装备研发、支撑剂选择等几个方面对比，中国与国外同类技术均存在一定的差距：①储集层改造裂缝扩展机理，国外主要考虑多场耦合、多裂缝扩展模型，中国则多以简化的模型为主，兼顾多场耦合因素；②中国软件整体以引进为主，自主研发了产能预测、支撑剂优选、多层多段裂缝优化等软件模块，但其稳定性、功能性、可持续开发性仍不完善，同时与地质结合不够紧密，商业化程度低，后期持续升级完善工作仍较薄弱；国产压裂车装备

目前基本可以满足生产需求，但核心部件（发动机、变速箱、底盘）仍以进口为主，新型环保高效的双燃料驱动（或电驱动）、橇装式、智能化压裂设备的研发目前处于探索、尝试阶段；④工具的耐高温、耐高压、多次使用和成熟配套与国外相比也有一定差距；⑤石英砂替代陶粒已证实可大幅降低成本并可满足生产需求，但有关这方面的基础研究需要加强；⑥储集层改造大数据、云处理信息化数据库及远程决策系统与北美更是存在明显的差距。

2.3 未来主要技术发展方向

为实现“中国国内原油稳产 $2 \times 10^8 \text{ t}$ ，天然气快速发展”的重要目标，结合未来中国油气勘探开发的储集层对象、储集层改造的技术需求，经梳理储集层改造现状、技术难点及差距，认为中国储集层改造技术今后的工作重点应集中在非常规储集层改造机理研究、地质-工程一体化软件研发、提高采收率改造工艺升级、低成本多功能压裂液研制、高效压裂装备配备、信息化建设 6 个方面。

①继续加强储集层改造基础理论研究及室内实验，丰富非常规储集层压裂理论：深化复杂地质和工况条件下的裂缝起裂、延伸机理研究；加强储集层地质可采性与工程可压性评价；深化大型物理、数值模拟和复杂缝网的形成条件及可控因素研究。国外非常规储集层改造普遍采用滑溜水压裂液，北美多选用 0.075~0.150 mm（100~200 目）石英砂作为支撑剂，通过大型携砂平行板模型研究滑溜水携砂运移、充填剖面规律以及分析真实有效闭合应力下支撑剂受力与导流能力关系也是目前要开展的工作。

②以一体化的理念和方法，结合技术创新成果，实现地质-工程一体化压裂优化设计软件国产化，形成地质-工程-信息一体化的压裂软件平台。

③继续开展“缝控储量”改造技术的攻关研究，提高裂缝控藏程度，大幅提高采收率。降低非达西流动、启动压力等对致密油气渗流的影响，实现裂缝壁面与储集层基质的接触面积最大化，储集层流体从基质流至裂缝的距离最短，基质中流体向裂缝渗流所需压差最小，进而有效提高裂缝控藏程度。通过超长水平段、密切割、多簇射孔、缩小井距等技术方法突破传统井控储量的定义与开发固有的思路，建立多井联动的井群式压裂改造新模式。

④开展低成本多功能压裂液体系研发，在压裂液大规模造裂缝网络的同时，利用低渗透一致密储集层具超高毛细管压力、渗吸作用强的特点，压裂液减排或缓排，延长油水置换时间，可提升压裂液的渗吸置

换功能,达到提高采收率的目的。针对超深、超高温(8 000 m, 200 ℃)储集层,完善适合 230 ℃温度条件、低成本、加重压裂液体系等攻关,探索绿色化学压裂液体系。同时根据中国储集层特点、应力加载条件,加大低成本石英砂支撑剂的现场试验及推广力度,加快石英砂砂源本地化、经济化评价,培育石英砂产业基地,实现对压裂支撑剂成本的有效控制。

⑤继续强化压裂泵车、分段工具研制,大幅度提高设备保障能力。根据中国压裂泵车装备的缺陷,须研发 3 项核心部件(发动机、变速箱、底盘)及 5 大装备(双燃料驱动压裂、电驱动压裂、橇装式压裂、智能化压裂、深层连续油管作业配套)。特别是发展 $5\ 220\times 10^7$ W 大型电驱动橇装式压裂装备,该装备可实现 100% 国产化,已在西南地区页岩气现场试验中取得阶段成果,与现有设备相比,可降低采购成本 20%~30%,降低燃料成本 25%~40%,减少碳排放约 100 t/a,大幅度提高工作效率并满足环保需求。改造工具方面重点攻关 5 项新型高效压裂工具,分别为耐高温可溶桥塞、深层分段压裂、老井重复压裂、小井眼压裂、智能化改造工具。利用可分解材料制作的可溶桥塞工具有可消除磨铣对地层的污染、降低钻铣作业风险、实现全通径等提高作业效率的优势,是未来分段改造工具研发的重要方向。

⑥完善储集层改造信息化系统建设,在“互联网+”快速发展的新机遇下,以油田数字化为契机,加快压裂信息化平台、远程控制专家决策平台的建设与应用,充分发挥“互联网+”技术的集群效应,实现成果高度共享。

3 结语

经过多年发展,中国储集层改造技术基本满足不同历史时期储集层改造的生产需求,有效支撑了中国多个大型油气田的产能建设,其作用和地位不断提升。伴随中国油气资源品质劣质化、目标复杂化的特点,中国未来低渗、深层、海洋、非常规等 4 大油气勘探开发领域中储集层改造需求更大,技术难度更高。有理由相信,做好非常规储集层改造机理研究、地质-工程一体化软件研发、提高采收率改造工艺升级、低成本多功能压裂液研制、高效压裂装备配备、信息化建设 6 个方面的技术攻关,一定可以实现“中国原油稳产 2×10^8 t,天然气快速发展”的重要战略目标。

致谢:本文是中国石油勘探开发研究院研究团队的集体成果,何春明、修乃领、郑伟、梁天成、李帅等参与了该项工作,同时中国石油天然气股份有限公司的管理层给予了关心与指导,相关油田单位在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] SMITH J E. Design of hydraulic fracture treatments[R]. SPE 1286, 1965.
- [2] ACHARYA R. Hydraulic-fracture-treatment design simulation[R]. SPE 17175, 1988.
- [3] KING G E. Thirty years of gas shale fracturing: What have we learned?[R]. SPE 133456, 2010.
- [4] 赵政璋, 杜金虎. 致密油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012. ZHAO Zhengzhang, DU Jinhua. Tight oil and gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [5] 汪海阁, 葛云华, 石林. 深井超深井钻完井技术现状、挑战和“十三五”发展方向[J]. 天然气工业, 2017, 37(4): 1-8. WANG Haige, GE Yunhua, SHI Lin. Technologies in deep and ultra-deep well drilling: Present status, challenges and future trend in the 13th Five-Year Plan period (2016—2020)[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(4): 1-8.
- [6] 赵政璋, 胡素云, 李小地. 能源: 历史回顾与 21 世纪展望[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007. ZHAO Zhengzhang, HU Suyun, LI Xiaodi. Energy: History review and 21st century prospecting[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [7] 胡素云, 朱如凯, 吴松涛, 等. 中国陆相致密油效益勘探开发[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 737-748. HU Suyun, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Profitable exploration and development of continental tight oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 737-748.
- [8] 孙赞东, 贾承造, 李相方, 等. 非常规油气勘探与开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011. SUN Zandong, JIA Chengzao, LI Xiangfang, et al. Unconventional petroleum exploration and exploitation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [9] ECONOMIDES M J, MARTIN T. Modern fracturing enhancing natural gas production[M]. Houston: Gulf Publishing Co., 2008: 116-125.
- [10] FAST C R, HOLMAN G B, COVLIN R J. The application of massive hydraulic fracturing to the tight muddy “J” formation, Wattenberg Field, Colorado[R]. SPE 5624, 1977.
- [11] FINCH R W, SKEES J L, AUD W W, et al. Evolution of completion and fracture stimulation practices in the Jonah Field, Sublette County, WY[R]. SPE 36734, 1996.
- [12] WAN T, SHENG J, SOLIMAN M Y. Evaluation of the EOR potential in fractured shale oil reservoirs by cyclic gas injection[R]. SPE 168880, 2013.
- [13] BUNGER A P, JEFFREY R G, ZHANG X. Constraints on simultaneous growth of hydraulic fractures from multiple perforation clusters in horizontal wells[R]. SPE 163860, 2013.
- [14] CIPOLLA C L, LOLON E P, CERAMICS C, et al. Fracture design considerations in horizontal wells drilled in unconventional gas reservoirs[R]. SPE 119366, 2009.
- [15] 赵惊蛰, 李书恒, 屈雪峰, 等. 特低渗透油藏开发压裂技术[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(5): 93-95. ZHAO Jingzhe, LI Shuheng, QU Xuefeng, et al. Fracturing technique of super-low permeability reservoir development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(5): 93-95.
- [16] 吴亚红, 林涛, 池圣平, 等. 文 23 气田整体压裂改造技术与效果评价[J]. 天然气工业, 2001, 21(1): 69-72. WU Yahong, LIN Tao, CHI Shengping, et al. A study of overall fracturing reformation of Wen-23 gas field and its effect evaluation[J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(1): 69-72.
- [17] 吴奇, 胥云, 王晓泉, 等. 非常规油气藏体积改造技术: 内涵、优化设计与实现[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 352-358. WU Qi, XU Yun, WANG Xiaoquan, et al. Volume fracturing technology of unconventional reservoirs: Connotation, optimization design and implementation[J]. Petroleum Exploration and Development,

- 2012, 39(3): 352-358.
- [18] 吴奇, 胥云, 张守良, 等. 非常规油气藏体积改造技术核心理论与优化设计关键[J]. 石油学报, 2014, 35(4): 706-714.
WU Qi, XU Yun, ZHANG Shouliang, et al. The core theories and key optimization designs of volume stimulation technology for unconventional reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 706-714.
- [19] 吴奇, 胥云, 刘玉章, 等. 美国页岩气体积改造技术现状及对我国的启示[J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(2): 1-7.
WU Qi, XU Yun, LIU Yuzhang, et al. The current situation of stimulated reservoir volume for shale in U. S. and its inspiration to China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(2): 1-7.
- [20] 吴奇, 胥云, 王腾飞, 等. 增产改造理念的重大变革: 体积改造技术概论[J]. 天然气工业, 2011, 31(4): 7-12.
WU Qi, XU Yun, WANG Tengfei, et al. The revolution of reservoir stimulation: An introduction of volume fracturing[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(4): 7-12.
- [21] 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.
- [22] 雷群, 杨立峰, 段瑶瑶, 等. 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.
- [23] 黄荣樽. 水力压裂裂缝的起裂和扩展[J]. 石油勘探与开发, 1981, 8(5): 62-74.
HUANG Rongzun. Initial crack and propagation of hydraulic fracture[J]. Petroleum Exploration and Development, 1981, 8(5): 62-74.
- [24] YAMAMOTO K T, SHIMAMOTOL. Multiple fracture propagation model for a three-dimensional hydraulic fracturing simulator[J]. International Journal of Geomechanics, 2004, 4(1): 46-57.
- [25] 马新仿, 李宁, 尹丛彬, 等. 页岩水力裂缝扩展形态与声发射解释: 以四川盆地志留系龙马溪组页岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(6): 974-981.
MA Xinfang, LI Ning, YIN Congbin, et al. Hydraulic fracture propagation geometry and acoustic emission interpretation: A case study of Silurian Longmaxi Formation shale in Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(6): 974-981.
- [26] 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[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(12): 2231-2236.
- [27] TABATABAEI M, MARK D, DANIELS R. Evaluating the performance of hydraulically fractured horizontal wells in the Bakken Shale Play[R]. SPE 122570, 2009.
- [28] GHANBARI E, ABBASI M, DEGHANPOUR H, et al. Flow back volumetric and chemical analysis for evaluating load recovery and its impact on early-time production[R]. SPE 167165, 2013.
- [29] CIEZOBKA J, COURTIER J, WICKER J. Hydraulic fracturing test site (HFTS): Project overview and summary of results[R]. SPE 2937168, 2018.
- [30] 胥云. 中国压裂技术的未来[J]. 石油与装备, 2012(6): 43-45.
XU Yun. The further of fracturing technology in China[J]. Petroleum and Equipment, 2012(6): 43-45.
- [31] 宋振云, 苏伟东, 杨延增, 等. CO₂干法加砂压裂技术研究与实践[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 55-59.
SONG Zhenyun, SU Weidong, YANG Yanzeng, et al. Experimental studies of CO₂/sand dry-frac process[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 55-59.
- [32] 段瑶瑶, 明华, 代东每, 等. 纤维素压裂液在苏里格气田的应用[J]. 特种油气藏, 2014, 21(6): 123-125.
DUAN Yaoyao, MING Hua, DAI Dongmei, et al. Application of cellulose fracturing fluid in Sulige Gas Field[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(6): 123-125.
- [33] 王晓东, 赵振峰, 李向平, 等. 鄂尔多斯盆地致密油层混合水压裂试验[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(5): 80-83.
WANG Xiaodong, ZHAO Zhenfeng, LI Xiangping, et al. Mixing water fracturing technology for tight oil reservoir in Ordos Basin[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(5): 80-83.
- [34] 杨振周, 刘付臣, 宋璐璐, 等. 耐高温 230 °C 的新型超高温压裂液体系[J]. 钻井液与完井液, 2018, 35(1): 101-104.
YANG Zhenzhou, LIU Fuchen, SONG Lulu, et al. A new fracturing fluid with temperature resistance of 230 °C[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2018, 35(1): 101-104.
- [35] 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.
- [36] 赵贤正, 王权, 金凤鸣, 等. 渤海湾盆地富油凹陷二次勘探工程及其意义[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 723-733.
ZHAO Xianzheng, WANG Quan, JIN Fengming, et al. Re-exploration program for petroleum-rich sags and its significance in Bohai Bay Basin, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6): 723-733.
- [37] 程兴生, 卢拥军, 管保山, 等. 中石油压裂液技术现状与未来发展思考[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(1): 1-5.
CHENG Xingsheng, LU Yongjun, GUAN Baoshan, et al. Current situation and future development of CNPC fracturing fluid technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36(1): 1-5.
- [38] MOHAGHEGH S D, GASKARI R, MAYSAMI M. Shale analytics: Making production and operational decisions based on facts: A case study in Marcellus Shale[R]. SPE 184822, 2017.
- [39] 杨立峰, 田助红, 朱仲义, 等. 石英砂用于页岩气储层压裂的经济适应性[J]. 天然气工业, 2018, 38(5): 71-76.
YANG Lifeng, TIAN Zhuhong, ZHU Zhongyi, et al. Economic adaptability of quartz sand for shale gas reservoir fracturing[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(5): 71-76.
- [40] ARTHUR J D, LAYNE M A, HOCHHEISER H W, et al. Overview of fracfocus and analysis of hydraulic fracturing chemical disclosure data[R]. SPE 168461, 2014.
- [41] LAYNE J D, HOCHHEISER M A, ARTHUR H W, et al. Spatial and statistical analysis of hydraulic fracturing activities in US shale plays and the effectiveness of the FracFocus chemical disclosure system[R]. SPE 168640, 2014.
- [42] SAEVERHAGEN E, KELLAS R A, BOUILLOUTA F, et al. Remote operations centers and re-engineering work processes: Retaining competent personnel in an extremely competitive marketplace[R]. SPE 166743, 2013.
- [43] 郭建春, 李杨, 王世彬. 滑溜水在页岩储集层的吸附伤害及控制措施[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(2): 320-325.
GUO Jianchun, LI Yang, WANG Shibin. Adsorption damage and control measures of slick-water fracturing fluid in shale reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(2): 320-325.

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: 才博 (1979-), 男, 吉林四平人, 博士, 中国石油勘探开发研究院高级工程师, 主要从事压裂酸化技术方面的研究工作。地址: 河北省廊坊市 44 号邮箱, 中国石油勘探开发研究院压裂酸化技术服务中心, 邮政编码: 065007。E-mail: caibo69@petrochina.com.cn

收稿日期: 2018-08-01 修回日期: 2018-11-15

(编辑 唐俊伟)