

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2022100

引用格式: 刘红磊, 周林波, 陈作, 等. 中国石化页岩气电动压裂技术现状及发展建议 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(1): 62-68.

LIU Honglei, ZHOU Linbo, CHEN Zuo, et al. The up-to-date electric shale gas fracturing technologies of Sinopec and suggestions for further improvements [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(1): 62-68.

中国石化页岩气电动压裂技术现状及发展建议

刘红磊^{1,2}, 周林波^{1,2}, 陈作^{1,2}, 薄启炜³, 马玉生³

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 102206; 2. 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206; 3. 中国石化油田勘探开发事业部, 北京 100027)

摘 要: 随着技术的进步和环保要求的日益提高, 页岩气压裂施工采用传统柴油机驱动压裂泵车组施工噪声大、能耗高和占地面积广等不足逐步显现出来, 电动压裂设备因其功率和排量大、噪声和能耗低、施工占地少等优势逐步得到规模应用。在系统总结分析国内外电动压裂技术的发展应用历程及特点的基础上, 重点介绍了中国石化电动压裂技术的应用规模、时效和成本, 剖析了存在的不足, 提出了全面升级电动压裂系统、强化施工过程管理、大规模推广应用全电动压裂技术等建议, 以期推动我国电动压裂技术发展和应用, 为我国深层和常压页岩气开发提供经济高效的技术手段。

关键词: 页岩气; 低成本开发; 绿色开发; 电动压裂设备; 发展建议; 中国石化

中图分类号: TE934⁺.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2023)01-0062-07

The Up-to-Date Electric Shale Gas Fracturing Technologies of Sinopec and Suggestions for Further Improvements

LIU Honglei^{1,2}, ZHOU Linbo^{1,2}, CHEN Zuo^{1,2}, BO Qiwei³, MA Yusheng³

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing, 102206, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing, 102206, China; 3. Sinopec Oilfield Exploration and Development Division, Beijing, 100027, China)

Abstract: As technology develops and the requirements for environmental protection rise, the disadvantages of traditional diesel-powered fracturing pumping units manifested themselves and they include loud construction noise, high energy consumption, and large space requirements for operations. As a result, electric fracturing equipment has gradually been adopted on a large scale owing to its advantages of high power, high pumping rate, low noise and energy consumption, and small space requirements for operations. The characteristics of electric fracturing technologies and their development and application history in China and abroad were studied and enumerated. The application scale, timeliness, and cost of Sinopec's electric fracturing technologies were highlighted, and the shortages were analyzed. Multiple suggestions were proposed, including comprehensively upgrading the electric fracturing system, improving treatment process management, and conducting large-scale promotion and application of all-electric fracturing technologies. This research is expected to promote the development and application of fracturing technologies and provide economic technical means for the development of deep and normal-pressure shale gas in China.

Key words: shale gas; low-cost development; green development; electric fracturing equipment; develop suggestion; Sinopec

我国页岩气地质资源量 $134 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 可采资源量 $25 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[1], 已累计探明地质储量 $2 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 2020 年全国页岩气产量达到了 $200.4 \times 10^8 \text{ m}^3$, 在天然气产量中的占比首次超过了 10%, 位居世界第二

收稿日期: 2022-09-09; 改回日期: 2022-12-10。

作者简介: 刘红磊 (1976—), 男, 河北景县人, 1999 年毕业于石油大学 (华东) 石油工程专业, 研究员, 主要从事储层改造理论研究与现场技术推广等工作。E-mail: slofhl@163.com。

基金项目: 国家重点研发计划项目“深层地热资源探测评价关键技术研究”课题 5“火成岩地区深层热储改造与评价关键技术研究”(编号: 2019YFC0604905)、中国石化科技攻关项目“盐间页岩油增产工艺及试采技术研究”(编号: P19013-5)和“东南深层热储工程关键技术与开发评价研究”(编号: P20041-3)联合资助。

位^[2]。水平井多级分段压裂是页岩气增储上产的关键技术^[3-5],但其主要依靠压裂泵车组来完成,压裂泵车组施工费用通常占单井压裂总费用的 35%~45%,可见压裂泵车组的运行质量、施工时效及运行成本直接影响着页岩气区块的经济性。国内页岩气井多位于川渝山区,施工井场面积、平整度等地面条件有限,为满足页岩气井高泵压大规模压裂,通常需要配备 10~20 台压裂泵车^[6-8],现场施工组织难度较大。2015 年前,国内压裂泵车几乎全部是柴油驱动,柴油驱动压裂泵车组在中国石化页岩气勘探突破和大规模开发中发挥了重要作用,创造了多项施工纪录。随着页岩气勘探开发向深层和常压层发展,对压裂设备提出了更高要求,柴油驱动压裂泵车组的单机功率低、噪声高、购置维护费用高、污染大、能耗高、结构复杂、传动效率低和占地广等问题越来越突出。电动压裂泵车是通过顶置电动机直接驱动压裂泵,采用机电融合方式,将电动机与压裂泵纳入一体化设计,从而在有限空间内大幅提高单机的功率。电动压裂泵车通过内部关键承载部件^[9-13],满足了超大功率下的连续运转要求。电动压裂泵车的出现打破了柴油驱动压裂泵车组垄断市场的格局。2015 年底,中国石化尝试引进了电动压裂泵车^[14-15],边实践、边总结、边改进、边提升,在 2020 年实现了全电动压裂施工。笔者归纳总结了国内外电动压裂技术的发展历程与优势,分析了中国石化电动压裂技术现场应用的时效、成本和不足,提出了下一步的发展建议,以期推动我国电动压裂技术的发展,为我国页岩气开发提供经济高效的技术手段。

1 电动压裂技术发展历程及特点

1.1 国外发展历程

电动压裂技术是指压裂泵注设备采用电力作为动力的压裂施工技术,其核心装备是大功率电驱动的压裂泵。北美油气开采逐步采用电驱动的动力就是降本。利用现场多余的天然气进行发电,为钻机和压裂泵车组提供动力,既减少了直接排放天然气造成的浪费,也节约了运输天然气的费用。传统压裂设备制造商以 Halliburton、Stewart & Stevensen LLC、SPM、FMC、OFM 等公司为主,随着新一轮页岩油气开发的热潮袭来,北美的压裂设备制造商不再是 Halliburton、Stewart & Stevensen LLC 等公司,而是 U.S. Well Services(USWS)和发展油气井服务公

司(EWS)。USWS 公司于 2014 年推出了 Clean Fleet[®] 电动压裂泵车组,这是一种天然气驱动的纯电动、可移动式压裂系统,泵车为双机双泵的半挂车结构,单泵功率为 2 574 kW(水马力 3 500 HHP)。同年,Antero Resources 公司在 Marcellus 页岩开采区进行了首次电动压裂试验,以 3 台天然气涡轮发电机为动力源,试验结果远超预期。采用 USWS 电动压裂泵车组可减少 99% 的氮氧化物排放和降低噪声污染,并可节省 90% 燃料费用。在耐用性上,Clean Fleet[®] 电动压裂泵车组电动机第 1 次的维护周期为 30 000 h,预期寿命长达 20 年,相比于传统的柴油发电机需要每个月维护,电动压裂泵车组使用寿命长、维护时间短、可提高作业效率,2015 年开始在北美地区进行小范围工业应用。

1.2 国内发展历程

我国电动压裂设备的主要厂家有中石化四机石油机械有限公司、宝鸡石油机械有限责任公司、四川宏华石油设备有限公司和烟台杰瑞石油装备技术有限公司等。四川宏华石油设备有限公司是国内最早专注电动压裂设备研发的企业,首台 4 413 kW(水马力 6 000 HHP)电动压裂车于 2012 年亮相国际海洋油气技术大会(Offshore Technology Conference, OTC),随后于 2015 年投入工业应用,先后在美国加州 AERA 井场、四川宜宾 H9、重庆涪陵焦页 194-2HF 和 195-1HF 等页岩气平台参与压裂施工作业^[16-17]。中石化四机石油机械有限公司依托国家重大专项“超大功率电动成套压裂装备研制”项目支持^[18],从 2014 年开始研发电驱压裂设备,主要产品包括 3 309.7 kW(水马力 4 500 HHP)、3 677.5 kW(水马力 5 000 HHP)、4 045.2 kW(水马力 5 500 HHP)撬装电驱压裂泵组和 3 309.7 kW 拖挂电驱压裂泵组,是国内少数采用单机双泵配套方案的厂家。宝鸡石油机械有限责任公司从 2017 年开始研发电驱压裂设备,现已形成系列化产品,包括 1 838.7 kW(水马力 2 500 HHP)电动压裂车、2 206.5 kW(水马力 3 000 HHP)和 5 148.5 kW(水马力 7 000 HHP)撬装电驱压裂泵组,电动机工作电压涵盖 0.69, 3.3, 6.0 和 6.6 kV。烟台杰瑞石油装备技术有限公司在 2016 年推出了 3 677.5 kW 撬装电驱压裂泵组,已在新疆、四川等地参与压裂作业,同时结合北美压裂工况,该公司还相继推出了 5 148.5 和 7 355.0 kW(水马力 10 000 HHP)型电动压裂设备^[19],目前初步形成电动压裂成套装备的系统解决方案,包括电动压裂设备、电动混砂设备、电动混配设备和电动连

续输砂装置等。国内外同时起步研发电动压裂设备,国内的研究实力和技术水平不逊于国外,部分技术甚至领先国外。

1.3 技术特点

电动压裂技术是为满足大功率、大规模、低噪声和连续施工等需求发展起来的压裂技术,其主要有以下特点:

1)功率和排量大。电动压裂装备的单机功率和排量大,1台3 677.5 kW电动压裂泵可替代2台柴油动力的1 838.7 kW的压裂车。电动压裂装备同时配备了4套液体添加系统,采用交流变频控制,控制精度高、响应快、调速范围宽,流量压力可无级调节,提高了混配排量,混配质量也提高了10%~20%。

2)噪声和成本低。电动压裂设备的电动机采用直驱传动,噪声低、清洁无污染,而且省去了常规压裂车柴油机、变速箱和底盘车的维护保养工作,可使操作人员数量减少一半,工作噪声降至65 dB以下,可实现24 h连续作业,使用和维护成本低。

3)时效高。撬装电动压裂泵组采用框架式模組设计,结构强度高,管汇结构简单,整机振动小,拆卸、安装、维护方便。电动机直驱的传动效率高。重要系统采用冗余设计,某个设备发生故障时能够继续进行施工作业,施工时效高。

4)绿色环保、占地少。与柴油动力压裂占地面积大不同,电动压裂机组占地面积可减小50%~65%。柴油机每消耗1 t柴油,排出烟气量366 206.4 m³,其中含145.32 kg二氧化硫、25.9 kg烟尘、93 kg一氧化氮和二氧化氮、5 kg一氧化碳;电动压裂设备可基本实现零排放,能耗费用比常规压裂泵车节约40%~50%,综合开发成本降低20%以上^[20]。

2 电动压裂技术应用现状

2.1 电动压裂设备分布情况

截至2020年12月,国内电动压裂设备市场规模约110×10⁴ kW(见图1),约占整个压裂装备市场的23.8%,受制于油田投资计划,国内电动压裂装备以租赁服务为主。最大的电动压裂装备租赁供应商为四川宏华石油设备有限公司,其电动压裂装备共178台,总计79.6×10⁴ kW,58%在中国石化服务,33%在中国石油服务。中石化四机石油机械有限公司的电动压裂装备规模总计10.4×10⁴ kW,主要在涪陵、南川、威远等区块进行压裂技术服务。中国石

油主要在威远、长宁等页岩气区块使用电动压裂设备,2020年起逐渐在长庆陇东庆城、新疆吉木萨尔等页岩油示范区推广电动压裂。北美自2014年7月应用Clean Fleet[®]电动压裂泵车组以来,USWS应用电动压裂泵车组在Marcellus和Utica盆地内完成了100多口井4 000多段的压裂,并在2019年在Eagle Ford和Permian盆地分别建立了一个全电动压裂车队,电动压裂技术持续发展,服务范围也不断扩大,2020年以后逐渐在Bakken、Haynesville和Niobrara等地区推广。

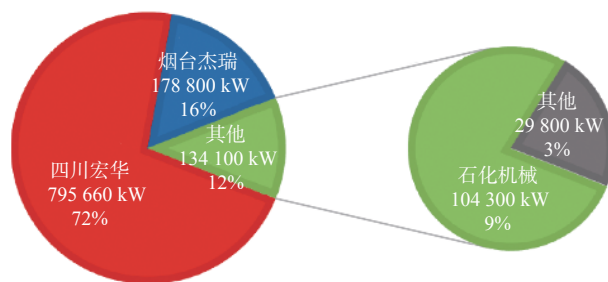


图1 国内电动压裂装备分布情况

Fig.1 Distribution of electric fracturing equipment in China

2.2 电动压裂技术现场应用

2.2.1 电动压裂技术应用概况

国内电动压裂技术发展势头迅猛,2015年电动压裂不超过100段,经过3年的摸索试验和不断改进,电动压裂提效降本的优势得到认可,各大油田纷纷加大应用推广力度,2018年电动压裂超过1 000段,2021年突破4 000段(见图2),随着页岩气开发步入2.0时代^[21],电动压裂应用范围将继续加大。

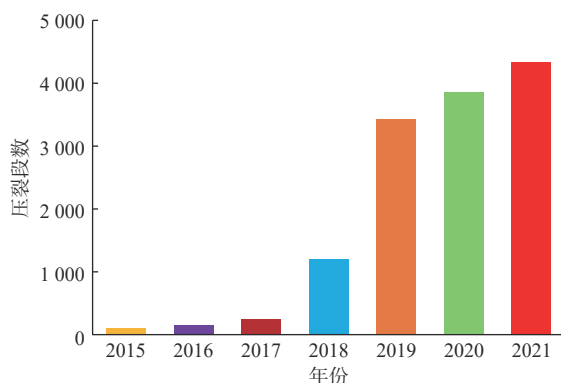


图2 国内历年电动压裂段数统计

Fig.2 Statistics of electrically fractured sections in China over the years

中国石化的电动压裂多集中在川渝页岩气工区,2020年和2021年电动压裂施工分别达到1 314

和 2 519 段(见图 3)。电动压裂降本成效显著,现场服务工作量增长迅速,2020 年川渝页岩气地区电动压裂井占全部压裂井的 30% 以上。随着电力资源逐步完善,电动压裂应用规模快速增长,多井平台成为电动压裂主战场。仅 2021 年,电动压裂井占比由 2020 年的 29.9% 增长至 60.1%。

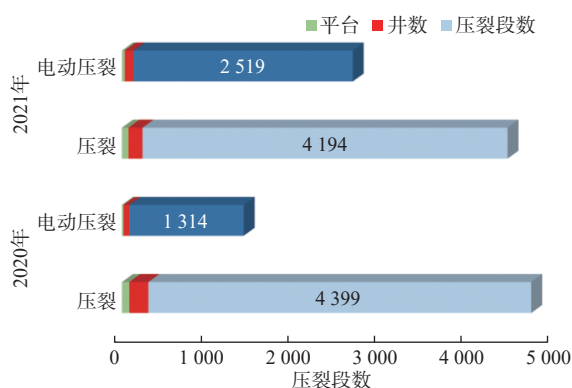


图 3 2020-2021 年中国石化电动压裂施工段数统计

Fig.3 Statistics of electrically fractured sections constructed by Sinopec in 2020-2021

2.2.2 中国石化电动压裂应用效果评价分析

2020 年初,中国石化涪陵页岩气田电动压裂的平均压裂速率仅为 2.5 段/d,压裂速率低的主要原因有以下几点:

1) 设备集成化程度较低,辅助设备性能有限。尽管主压裂装备由柴油机驱动改为电驱动,其他配套设备尚为柴油机驱动,整个压裂系统属于“油电混动”,提速存在不同步现象。电驱动压裂配套电气设备的增加及压裂提速的需求,打破了原有井场布局模式,导致井场布局不够优化,多路车辆并行受限,地面管汇存在液量分配不均、安装不便、无独立泵送流程和节流较大的问题。

2) 设备运行效率较低,维护保养周期长。平台压裂施工过程中存在电网和设备工作参数及作业数据未系统采集显示的问题,导致对设备运行状态掌握不清,停工保养时机不当,从而导致压裂速率低。

3) 安全防护措施不完善。有关高压用电保护措施不完善、高压防护保护措施未加强、视频监控系统未全方位覆盖,需要进一步加强相关措施改进和完善。

通过加快电网建设、强化地质工程一体化管理模式,持续推进“学习曲线”和引进、研发新工具,进一步丰富提速提效措施。焦页 X 扩平台为涪陵区块的页岩气平台,该平台部署了 4 口水平井,采用中石化四机石油机械有限公司 3 677.5 kW (5 000 HHP) 撬装电动压裂泵及配套设备进行压裂,施工总功率 51 852.6 kW,施工周期 19 d,累计压裂 117 段,平均压裂速率 6.2 段/d,平台生产运行效率相较年初(压裂速率 2.5 段/d)提高 148%。该平台在施工的第 14 个工作日,压裂了 9 段(见图 4),创造了当时国内单平台单日压裂最高段数纪录。

通过分析该平台的压裂费用得知,与常规柴油机驱动压裂相比,压裂设备维护修理费用单井可节约 20 万元左右,人工操作成本单井可节省 11.25 万元,综合考虑设备折旧方面和柴油价格等因素,平均单井压裂费用节省 200 多万元。与以柴油机为动力的压裂泵相比,电动压裂噪声降低约 30%,占地减少 18.75%,单井固体废弃物排放量减少 5 t,废气排放量减少 4.72 t。

现场应用结果表明,电动压裂技术在提高施工时效、降低施工成本、节约占地及降低环境噪声等方面表现出明显的优势,具备了大规模推广的基本条件。

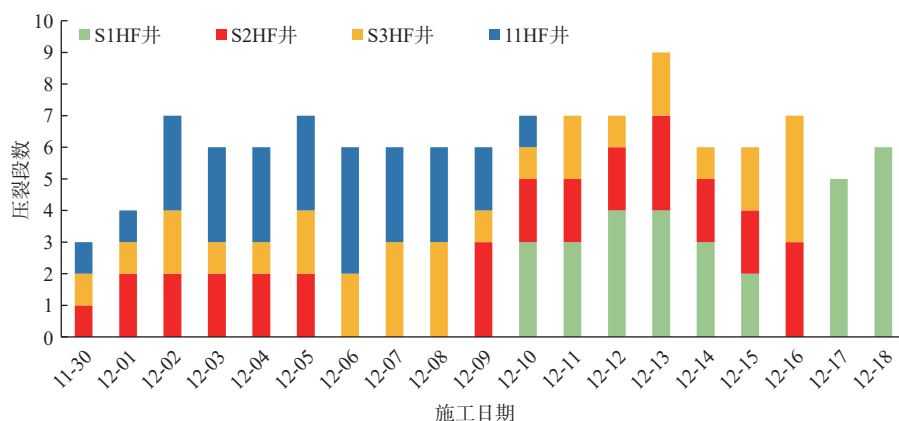


图 4 焦页 X 扩平台单日压裂段数

Fig.4 Number of sections fractured per day on the Jiaoye X extended platform

3 电动压裂技术的不足与发展建议

3.1 电动压裂技术的不足

电动压裂技术作为一项新的压裂技术,经过现场应用证明了其优势,但要大规模推广应用,在压裂设备配套、应用区域和运行过程管理等方面还存在以下不足:

1)压裂装备未实现全部以电为动力。当压裂泵车由柴油机驱动改为电驱动后,施工效率大幅提高;但混砂车、混配车和供液撬等还是柴油机驱动,支撑剂还需人工填加,整个施工流程未能与电动压裂泵车组配套,属于“油电混动”,距离“全电动压裂”还有较大差距。

2)应用区域受限。电动压裂要求井场必须具备完整的电网或者其他形式的电力。国外多采用燃气发电机提供电力,但国内大多数区域的油气探井由于没有充足的天然气,缺乏提前规划,加之部署35 kV工业电网一次投入过大,无法应用电动压裂技术,只能采用常规压裂技术。

3)电动压裂运行条件较为严苛,抗风险能力较弱。电动压裂系统采用一条供电线路给1台或多台泵车组串联供电,施工现场装备类型众多(电动压裂泵车组、变频控制房、施工管汇和压裂液罐等),一旦某一环节出现问题,考虑用电安全,必须立即中止施工。例如,加砂过程中某个撬装电动设备的高压管线刺漏,需要切断供电线路,势必造成其他撬装电动设备停止运转,支撑剂会沉积在多个泵头和高压管汇内,对泵头等核心设备伤害很大,后期处理难度和工作量大,造成施工周期的延长、财力和人力的浪费。由于早期电路设计不科学、井场布局不合理,造成电动压裂系统的抗风险能力较弱。

4)单机功率大带来的储备风险。常规柴油驱动压裂现场考虑设备的冗余需要,通常会额外准备几台压裂车备用。对于电动压裂技术,一口水平井压裂只需8台电动压裂车即可满足施工要求,虽然大幅减少了压裂车的数量,但储备风险显著增加,施工过程如果1台压裂车出现问题,输出功率和排量至少损失12.5%,极易造成砂堵等复杂情况的发生,大大增加了单台装备失效带来的施工隐患。

3.2 电动压裂技术发展建议

为了大规模推广电动压裂技术,需要在设备配套、技术协同和过程管理等方面进一步进行发展和完善。

3.2.1 全面升级电动压裂系统

1)升级井场电力系统和压裂配套设备的能力。4 413.0 kW电动压裂泵由8/10台增至12/14台,电力系统的容量由25 000 kVA升至35 000 kVA,清水供水能力由10 m³/min升至16 m³/min,现场连续配液能力由8 m³/min提高至20 m³/min,混砂供液能力由16 m³/min提高至20 m³/min。

2)优化改进自动输砂装置,提高输砂效率。将人工加砂方式改为电动输砂,采用双仓式一体化连续输砂装置、螺旋蛟龙式连续输砂装置等自动连续输砂装置,输砂效率可提高30%以上。

3)推广电子监控设备,实现流程自动化、决策信息化。压裂施工指挥方式由初期的控制压裂泵进行数据检测逐渐换代为集成部分设备控制,最终升级为电动仪表控制中心,实现对电动压裂泵、混砂、混配和供砂装置的远程集中控制、监控和流程的自动化。同步研发远程监控决策系统,实时监测每台压裂设备的工作参数和施工参数,用手机即可远程实时查看每台压裂设备的工作参数和各项施工参数,可跨专业全体系协同工作及远程指导。

3.2.2 科学细化压裂井场布置

电动压裂配套电气设备的增加及压裂提速的需求,打破了原有井场布局模式;泵送射孔与压裂施工共用一套供液流程,无法进行模块划分;压裂提速增加了物流车辆进场频次,原有物流通道无法满足现有需求。为避免井场电缆被碾压,应合理设计运/转砂通道、换泵头通道,提高物流运行效率。施工前要对高压变电区进行勘察并硬化地面,除保证强度外,还需考虑川渝地区山区多水对防潮的影响,保障用电安全。

1)井场布置优化原则。井场布置区域主要包括供砂、压裂、测井及配液等作业区。供砂作业区应靠近井场进出口,便于物料装卸及车辆出入;压裂作业区应优化高压管汇走向,预留足够的安全空间;测井作业区应合理布置泵送射孔装置,便于2套装置同时作业;配液作业区的混配装置应靠近水源,并优化供液管线走向。

2)井场设备模块化分组布置。可将井场设备分为变电、高压作业、混砂等10个作业模块布置,高压电模块必须进行集中封闭式管理。每个模块从连接、接口和占地面积等方面进行梳理,形成作业指导规范,指导井场布局,保障布局更加合理。

3.2.3 合理优化交叉施工工序

根据生产任务安排,提前制定压裂运行计划,采

取“拉链式压裂+独立泵送”的施工模式,实时优化压裂井位和井段交叉组合,保障压裂提速。要建立独立泵送流程,并将桥塞泵送撬的控制流程移出高压区,以保障施工安全,同时配备独立仪表车,可实现压裂-泵送同步,缩短或消除泵送-压裂交叉等待时间,提高压裂效率。

1)平台各井按照压裂、泵送的交替顺序,通过分流管汇控制调节,依顺序交替执行;2)为节省时间并保证安全,优化射孔施工工序;3)提高施工时效,优化相邻工序衔接,同步实施设备巡检等工序。

单平台多井电动压裂模式如图5所示。下面以3口井为例进行分析,按照“拉链式压裂+独立泵送”方式,首先压裂A井的第1段,结束后压裂B井的第1段,与此同时,独立泵送A井第2段用的桥塞和射孔枪;上一步结束后,压裂C井的第1段,与此同时,独立泵送B井第2段用的桥塞和射孔枪;上一步结束后,开始压裂A井的第2段,与此同时,独立泵送C井第2段用的桥塞和射孔枪,直到平台3口井全部完成压裂施工(见图5)。这种压裂方式可以大大缩短施工等待时间,提高施工效率。

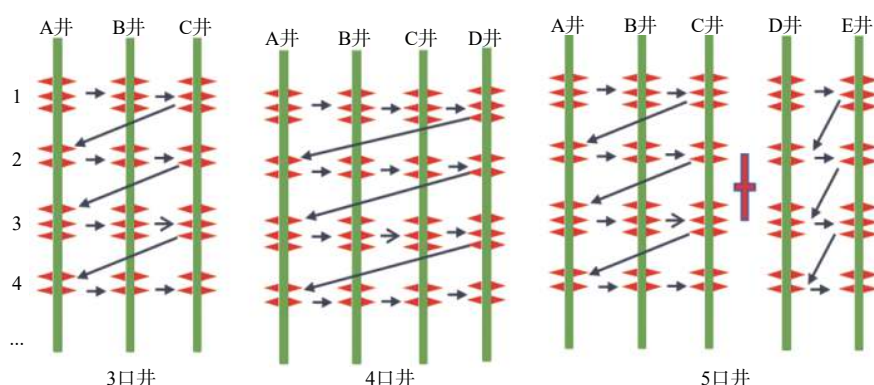


图5 单平台多井电动压裂模式

Fig.5 Electric fracturing mode of multiple wells on single platform

3.2.4 持续强化施工过程管理

强化过程管理,是在完成压裂部署后对后续施工过程进行跟踪、协调、调度和干预的一系列管理措施。例如,压裂设备的维护保养,初期在压裂、泵送施工作业全部完成后集中进行检修维护;现在泵送施工独立进行,压裂后即可维护保养压裂设备,无需等待泵送,可有效提高压裂速度。加强新技术、新工艺、新工具的引进和应用,如将泵送桥塞射孔联作分段压裂工艺优化为泵送可溶桥塞分段压裂工艺,再升级为无限级固井滑套分段压裂工艺,可以完全消除泵送桥塞、射孔等施工环节。采用泵送桥塞射孔联作分段压裂工艺的压裂速率为2~3段/d,采用泵送可溶桥塞分段压裂工艺可加快到4~6段/d,而采用无限级固井滑套压裂工艺可达8~12段/d。另外,以柴油发电机为动力的压裂设备数量众多,搬迁安装需要8~12 d,而电动压裂通过设备撬装化、模块化、便捷化和标准化,搬迁安装时间缩短至5~7 d。

4 结束语

由于电动压裂泵车组具有单机功率和排量大、

施工噪声和操作成本低、管汇结构简单、结构强度和施工时效高、绿色环保、占地少(占地面积减小了50%~65%)、零排放等优势,具备推广应用前景。电动压裂技术在国内页岩气井压裂中逐步得到应用,为深层和常压页岩气的低成本压裂提供了技术手段。全电动压裂技术仍然需要不断升级、完善、改进和推广,才能真正实现页岩油气的低碳绿色发展,对优化我国能源结构,保障国家能源安全,推动“碳达峰、碳中和”目标的实现具有重要的现实意义和战略意义。

参考文献

References

- [1] 我国页岩气可采资源潜力为25万亿立方米[EB/OL]. (2012-03-29)[2022-01-10]. <http://www.cinic.org.cn/xw/kx/279172.html?from=timeline>.
The recoverable resource potential of shale gas in China is 25 trillion m³[EB/OL]. (2012-03-29) [2022-01-12]. <http://www.cinic.org.cn/xw/kx/279172.html?from=timeline>.
- [2] 吕红桥. 2020年我国页岩气产量增长超过3成 成为天然气增产主力军[EB/OL]. (2022-02-10)[2022-0-11]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1691289018212061353&wfr=spider&for=pc>.
LYU Hongqiao. China's shale gas production will increase by more

- than 30% in 2020 and become the main force of natural gas production increase[EB/OL]. (2022-02-10) [2022-02-11].<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1691289018212061353&wfr=spider&for=pc>.
- [3] 曾波, 王星皓, 黄浩勇, 等. 川南深层页岩气水平井体积压裂关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2020, 48(5): 77–84.
- ZENG Bo, WANG Xinghao, HUANG Haoyong, et al. Key technology of volumetric fracturing in deep sShale gas horizontal wells in Southern Sichuan[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(5): 77–84.
- [4] 李军, 李玉梅, 张德龙, 等. 页岩气井分段压裂套损影响因素分析 [J]. 断块油气田, 2017, 24(3): 387–390.
- LI Jun, LI Yumei, ZHANG Delong, et al. Analysis of casing damage for staged fracturing in shale gas well[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2017, 24(3): 387–390.
- [5] 陈新安. 页岩气水平井分段压裂微地震监测认识及应用 [J]. 特种油气藏, 2017, 24(1): 170–174.
- CHEN Xin'an. Understanding and application of microseism monitoring over staged fracturing in horizontal wells for shale gas development[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2017, 24(1): 170–174.
- [6] 张树立, 李心成. 适合中国大型页岩气压裂成套装备的解决方案 [J]. 石油机械, 2018, 46(12): 60–67.
- ZHANG Shuli, LI Xincheng. The solution of massive hydraulic fracturing of shale gas in China[J]. *China Petroleum Machinery*, 2018, 46(12): 60–67.
- [7] 杨怀成, 夏苏疆, 高启国, 等. 常压页岩气全电动压裂装备及技术示范应用效果分析 [J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(3): 348–355.
- YANG Huaicheng, XIA Sujiang, GAO Qiguo, et al. Application effect of full-electric fracturing equipment and technology for normal pressure shale gas[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2021, 11(3): 348–355.
- [8] 张国荣, 王俊方, 张龙富, 等. 南川常压页岩气田高效开发关键技术进展 [J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(3): 365–376.
- ZHANG Guorong, WANG Junfang, ZHANG Longfu, et al. Key technical progress in efficient development of Nanchuan normal-pressure shale gas field[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2021, 11(3): 365–376.
- [9] 赵绪平, 孔丹, 常亮. 2500 型超高压页岩气压裂车开发研究 [J]. 石油规划设计, 2017, 28(3): 12–14.
- ZHAO Xuping, KONG Dan, CHANG Liang. Development and research of model 2500 ultra high pressure shale gas fracturing truck[J]. *Petroleum Planning & Engineering*, 2017, 28(3): 12–14.
- [10] 田雨, 谢梅英. 新型大功率电动压裂泵组的研制 [J]. 石油机械, 2017, 45(4): 94–97.
- TIAN Yu, XIE Meiyang. Development of new-type superpower electric fracturing pump skid[J]. *China Petroleum Machinery*, 2017, 45(4): 94–97.
- [11] 王云海, 陈新龙, 吴汉川, 等. 页岩气压裂连续输砂关键设备的研制 [J]. 石油机械, 2016, 44(3): 102–104.
- WANG Yunhai, CHEN Xinlong, WU Hanchuan, et al. Continuous sand transport unit for fracturing in shale gas development[J]. *China Petroleum Machinery*, 2016, 44(3): 102–104.
- [12] 王晓宇. 国外压裂装备与技术新进展 [J]. 石油机械, 2016, 44(11): 72–79.
- WANG Xiaoyu. Advances in foreign fracturing equipment and technology[J]. *China Petroleum Machinery*, 2016, 44(11): 72–79.
- [13] 张斌, 李磊, 邱勇潮, 等. 电驱压裂设备在页岩气储层改造中的应用 [J]. 天然气工业, 2020, 40(5): 50–57.
- ZHANG Bin, LI Lei, QIU Yongchao, et al. Application of electric drive fracturing equipment in shale gas reservoir stimulation[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(5): 50–57.
- [14] 王庆群. 利用电力开展页岩气压裂规模应用的分析及建议 [J]. 石油机械, 2018, 46(7): 89–93.
- WANG Qingqun. Analysis and suggestion on the application of electric power on shale gas fracturing[J]. *China Petroleum Machinery*, 2018, 46(7): 89–93.
- [15] 樊开赞, 荣双, 周劲, 等. 电动压裂泵在页岩气压裂中的应用 [J]. 钻采工艺, 2017, 40(5): 81–83.
- FAN Kaiyun, RONG Shuang, ZHOU Jin, et al. Application of electric fracturing pump in fracturing in shale gas reservoirs[J]. *Drilling & Production Technology*, 2017, 40(5): 81–83.
- [16] 刘红磊, 韩倩, 李颖, 等. 彭水区块水平井清水连续加砂压裂技术 [J]. 石油钻探技术, 2015, 43(1): 13–19.
- LIU Honglei, HAN Qian, LI Ying, et al. Water fracturing with continuous sand for horizontal wells in the Pengshui block[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(1): 13–19.
- [17] 曾雨辰, 杨保军. 页岩气水平井大型压裂设备配套及应用 [J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(6): 78–82.
- ZENG Yuchen, YANG Baojun. Equipment outfitting and application for large-scale fracturing in shale gas horizontal wells[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2013, 35(6): 78–82.
- [18] 吴汉川. 大型压裂装备应用问题解析及发展方向 [J]. 石油机械, 2017, 45(12): 53–57.
- WU Hanchuan. Issue Analysis of large scale fracturing equipment application and its development trend[J]. *China Petroleum Machinery*, 2017, 45(12): 53–57.
- [19] 张增年, 李华川, 郑家伟, 等. 压裂设备应用评价及技术发展展望 [J]. 钻采工艺, 2020, 43(2): 41–44.
- ZHANG Zengnian, LI Huachuan, ZHENG Jiawei, et al. Application evaluation and technical development prospect of fracturing equipment[J]. *Drilling & Production Technology*, 2020, 43(2): 41–44.
- [20] 童征, 展恩强, 刘颖, 等. 国内电驱压裂经济性和制约因素分析 [J]. 国际石油经济, 2020, 28(7): 53–62.
- TONG Zheng, ZHAN Enqiang, LIU Ying, et al. Analysis of economy and constraints of electric-powered fracturing application in China[J]. *International Petroleum Economics*, 2020, 28(7): 53–62.
- [21] 程强. 中国页岩气发展迎来 2.0 时代 [N]. 中国石化报, 2020–12–07(005).
- CHENG Qiang. China shale gas development ushered in the 2.0 era[N]. *Sinopec News*, 2020–12–07(005).