

引用格式: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]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3): 348-355.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.03.009

常压页岩气全电动压裂装备及技术示范应用效果分析

杨怀成¹,夏苏疆²,高启国²,毛国扬²

(1.中国石化华东油气分公司,江苏南京 210019;2.中国石化华东油气分公司采油气工程服务中心,江苏泰州 225300)

摘要:常规压裂装备存在效率低、环境污染大以及国内市场水功率保障不足等问题,不能满足国内页岩气开发扩大化和促进产能提升的需求,因此,推荐在页岩气压裂工程中应用全电动压裂装备。通过重点分析全电动压裂装备及技术在常压页岩气资源区块示范应用效果,论证其在页岩气效益开发和绿色低碳发展方面的优势,结果表明:全电动压裂装备能稳定实现高负载、高可靠和连续大排量施工,且施工效率高。相比燃油压裂装备,可节约施工设备、动力、人工以及维护等方面的综合成本40%以上,污染排放总量减少70%,有效控制厂界噪声,有利于推动实现常压页岩气效益开发和建设绿色矿山企业。

关键词:常压页岩气;全电动压裂;示范应用;效益开发;绿色低碳

中图分类号:TE377

文献标识码:A

Application effect of full-electric fracturing equipment and technology for normal pressure shale gas

YANG Huaicheng¹, XIA Sujiang², GAO Qiguo², MAO Guoyang²

(1.Sinopec East China Oil and Gas Company, Nanjing, Jiangsu 210019, China;

2.Oil and Gas Engineering Service Center, Sinopec East China Oil and Gas Company, Taizhou, Jiangsu 225300, China)

Abstract: With the expansion of domestic shale gas development demand and production capacity, the all-electric fracturing equipment and technology has become the recommended application technology for normal pressure shale gas fracturing engineering due to the low efficiency of conventional fracturing equipment, large environmental pollution and insufficient water power guarantee in the domestic market. This paper focuses on analyzing the demonstration application effect of all-electric fracturing technology in atmospheric shale gas resource block, demonstrating its advantages in shale gas benefit development and green and low-carbon development. Results show that the all-electric fracturing all-electric case can achieve stable high load, high reliable and continuous construction of the large displacement, high construction efficiency. The comprehensive costs of construction equipment, power, labor and maintenance, etc., fell by more than 40%, pollution emissions by 70%, the effective control of noise at boundary of atmospheric pressure shale gas can effectively help realize benefit the development and construction of green mining enterprises of the forehead.

Key words: atmospheric shale gas, full electric fracturing, demonstration application, benefit development, green low-carbon

中国页岩气资源丰富,现今,页岩气已成为保障国家能源战略安全的新型接替资源^[1]。2007年以来,四川威远和重庆涪陵等地区的高压页岩气藏先后实现了商业开发,配套工程工艺技术也取得了丰硕的

成果^[2-4]。与高压页岩气藏相比,常压页岩气藏的地层能量较小,实现效益开发难度大^[5-8]。当前,页岩气形成商业开发的主要途径仍然是以水力压裂技术为主^[9],通常以3000型以下柴油机组编队进行页岩气大

收稿日期:2020-11-30。

第一作者简介:杨怀成(1973—),男,硕士,教授级高级工程师,主要从事油气田开发工程工作。地址:江苏省南京市建邺区江东中路375号金融城9号楼,邮政编码:210019。E-mail: Huaichengyang73@163.com

基金项目:国家科技重大专项“彭水地区常压页岩气勘探开发示范工程”(2016ZX05061);中国石化科技开发部项目“南川复杂构造带页岩气勘探开发关键技术”(P19017-3)。

规模压裂施工,但其施工能耗较高,经济和环保性较差^[9-17],与页岩气低成本、绿色低碳的开发理念不相符。“十三五”以来,中国石化华东油气分公司针对常压页岩气藏效益开发难题,率先运用全电动压裂装备及技术实施创新攻关和示范应用^[9,11],于2019年形成了规模化、常态化的全电动压裂装备应用模式,成为南川地区常压页岩气资源区块低成本勘探开发工程工艺中的品牌技术之一。

结合全电动压裂装备及技术在常压页岩气资源区示范应用情况,重点评价和总结全电动压裂装备技术集成的配套情况、示范应用效果以及社会效益等,以期巩固和深化其在页岩气勘探开发过程中的技术、经济和社会效益优势。

1 全电动压裂装备技术集成

全电动压裂装备由电动压裂泵送设备、电动混砂设备、仪表监测设备、电动混配设备、电动输砂设备、电动供液设备、电动储液设备和远程自动供水设备等组成,以电力作为主动力能源,能够完成压裂施工中压裂液、支撑剂的泵注、控制以及相关数据采集、存储、显示、远程传输等成套压裂装备及技术集成(图1)。

1.1 电动压裂泵送设备及技术集成

电动压裂泵送设备技术融合了机电融合技术、直驱传动技术、高压供电技术、大功率中压变频技术、大功率交流变频电机技术、智能控制技术和电子

安全阀技术这七大技术系列,形成由供配电系统提供动力,中压变频系统调节控制,驱动电动压裂泵送设备完成压裂液和支撑剂的泵注工作(图2)。

示范应用的电动压裂泵送设备是HH6000型电动泵,配置6000型五缸压裂泵,采用6 000 kV异步变频电机直驱,常用冲次为每分钟100~160次(1.5~2.5 m³/min,4.5柱塞),最高施工泵压140 MPa。

1.2 电动混砂设备技术集成

电动混砂在技术方面与电动压裂泵送技术理念相通,采用撬装式设计、变频控制和电动直驱技术,部分结构应用冗余设计满足多用途功能,提高配合多类型施工的能力^[17]。其额定功率为770 kW,工作压力为0.7 MPa,最大排量为20 m³/min,输砂量介于0~12 000 kg/min。

1.3 配套设备电动化技术集成

辅助设备电动化集成主要针对混配设备、输砂设备、供液设备、储液装置、远程供水系统和管汇系统等,采用电动直驱和电液控制、PLC(可编程逻辑控制器)集成控制等技术对主体设备进行功能设计优化和升级,同时,采用电动执行器控制管汇流程及

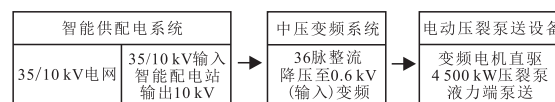


图2 电动压裂泵送设备技术集成及工作原理
Fig. 2 Technical integration and working principle of electric fracturing pumping equipment

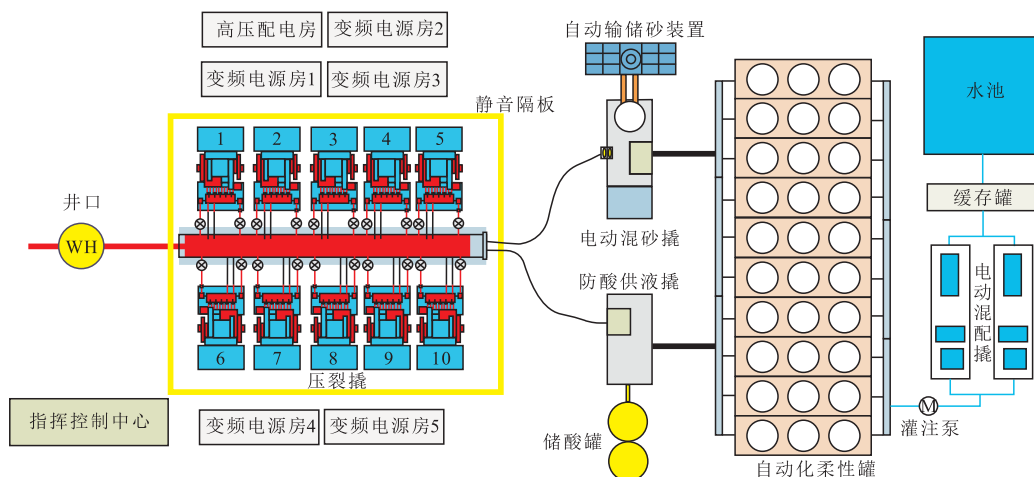


图1 全电动压裂施工流程
Fig. 1 All-electric fracturing construction process

设备的进出口阀门,辅助余位监测和故障报警等技术,最终形成全电动化辅助配套装备。

1.4 全电动压裂自动化控制技术集成

在电动压裂泵送装备控制系统^[23]的基础上,拓展集成包括:电动混砂设备、仪表监测设备、电动混配设备、电动输砂设备、电动供液设备、电动储液设备和远程自动供水设备等,实现了全电动压裂自动化技术的一体化控制(表1)。以PLC-L30ER作为主控制器,通过集成应用变频控制技术、PLC技术、分布式I/O模块数据采集技术、PID(积分—微分控制器)自动控制技术和高速工业以太网环网传输技术,形成自动控制系统,以自动控制系统、实时监控系统和数据分析系统实现自动化控制技术集成。另外,使用适合于工业环境和对时间要求比较苛刻的面向对象的网络协议(EtherNet/IP协议、EtherNet/IP协议),能够保证网络上隐式的实时I/O信息和显式信息(包括用于组态参数设置、诊断等)的有效传输,具备性能稳定、安全性高、可靠性高、灵活性强的技术特点,在保证压裂作业安全稳定的同时,提高了压裂作业的效率,有效地降低了能耗费用^[22-24]。

1.5 全电动压裂装备及技术优势分析

1.5.1 技术融合方面

应用电动化和信息化等技术实现了一体化集成和控制模式,自动化作业程度高。一方面,全电动压裂装备通常采用机电融合和电动直驱技术,高压供电技术优化应用了36脉整流降压技术,驱动效率和可靠性能得到有效保障,同时,采用中压变频DTC直接控制交流电机的扭矩和转速,调控精度高、响应快,能够及时有效地应对压裂施工过程中压力和排

量组合随变量调整的需求。另一方面,利用智能控制技术和环网通讯技术,全电动压裂设备联网通讯有效稳定,通过iFracOPS系统实现自主控制、集群控制和电动输砂设备订单式完成泵送程序表控制。

1.5.2 技术配套方面

全电动压裂装备及技术国产化程度高,具有单机功率密度大和制造周期短等特点^[18-20],更容易向撬装式大规模发展。成套装备采用撬装式或紧凑式一体化设计,有利于设备搬迁运输,采用模块化、分区域标准流程安装,占地面积小,在页岩气井工厂大规模、长周期施工模式下优势明显,符合生产制造国产化和页岩气压裂工程工厂化。

1.5.3 技术需求方面

我国页岩气储量大,四川盆地龙马溪组资源量达到 $39.2 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中,常压及深层页岩气资源量占比约86.2%。目前,页岩气主攻对象转向深层和常压^[21],中国石化主导的东胜—平桥西五峰组—龙马溪组常压页岩气资源区块探明储量达到 $1.916 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。近年来,攻关形成常压页岩气低成本配套技术系列,其中,全电动压裂装备及技术是其中之一,能够有效地降低压裂施工的综合成本,保障盆外残留向斜常压页岩气实现效益开发。

2 全电动压裂装备及技术应用情况

南川常压页岩气资源区块累计完成压裂工程项目70井次1499段,其中,全电动压裂装备及技术应用32井次611段,占比达到40%以上,验证了技术的适应性和运行的可靠性,经济效益优势明显。

表1 全电动压裂集成控制技术主要节点及内容

Table 1 Main nodes and contents of all-electric fracturing integrated control technology

设备模块	主要节点	主要控制项目
电动泵送设备	7	精确启动控制、排量控制、限压控制、系统急停、参数控制、报警监控、参数监视
电动混砂设备	7	启停控制、供液控制、液位控制、输砂控制、干添控制、液添控制、泵主程序订单模式集成控制
电动输砂设备	4	启停控制、砂阀和速度控制、余量监控
电动供液设备	2	启停控制、供液速度控制
电动储液设备	3	进出液控制、余量监控、阀门控制
电动混配设备	3	设备启停、配液参数控制、运行状态监控
远程自动供水系统	3	远程启停、液位监控、参数控制

2.1 全电动压裂装备及技术配套优化

1) 全电动压裂供电系统

川渝地区电网容量足,南川常压页岩气资源区配套30/10 kV电网。

2) 全电动压裂装备及技术配套

参照南川常压页岩气资源区压裂工程设计和施工经验,优化全电动压裂装备配置(表2)。

2.2 全电动压裂装备高负载连续作业能力评价

2.2.1 全电动压裂装备高负载能力评价

页岩气压裂与常规油气压裂相比,施工压力普遍较高,常用压裂装备等级分为105 MPa和140 MPa,示例选取140 MPa压力等级装备对12个样本井段分析。

样本井段采用10台HH6000-2型全电动压裂泵送装置4 in(约101.6 mm)柱塞泵施工(表3),施工压力保持在95.0~111.7 MPa区域,最大排量达到16 m³/min,最高砂比为13%,实际使用最大功率为27 287.188 kW,功率利用率为61%,设备运行稳定,压裂泵耐压性好,验证了全电动压裂装备及技术的高负载能力。

2.2.2 全电动压裂装备连续作业能力评价

页岩气压裂工程连续施工作业是提质增效的重要途径。国内页岩气压裂连续作业模式主要包括单井连续作业和平台井拉链式连续施工作业。通过选取的样本,对全电动压裂装备在页岩气单井压裂施工时的连续作业能力进行评价(图3)。

X井采用2种完井方式分30段压裂投产,其中,

表2 全电动压裂成套装备配置

Table 2 All-electric fracturing complete equipment configuration

配套设备	型号	参数	配置数量
智能配电装置	PCR-30	输入30 kV;输出10 kV;容量:2.5~25 MVA	1
	PCR-10	输入10 kV;输出10 kV;容量:2.5~25 MVA	
VFD变频系统	HHE6000-2	输入:30/10 kV;输出:0.6 kV;功率:2×4 500 kW。	5~6
电动泵送设备	HH6000-2	总功率:45 000 kW	10~12
电动混砂设备	HSQ130	20 m ³ /min	1
电动供液设备	HHAT60	15 m ³ /min	2
电动混配设备	HPQ720	12 m ³ /min	2
自动输砂设备	CSG120	容量:120 m ³ ,输砂排量:2.0 m ³	1
电控柔性储罐	SHG210	2 100 m ³	1
智能控制中心	HHDV-3	iFrac.PC、iFrac.BC、iFrac.View	1
高低压管汇撬	SJGH-20	接口12个,φ180/105 MPa或140 MPa	1

表3 全电动压裂泵送设置高压区间压裂施工参数

Table 3 High pressure interval fracturing operation parameter of all-electric fracturing pumping device

样本井序号	破裂压力(MPa)	施工压力(MPa)	最高压力(MPa)	排量区间(m ³ /min)	最大排量(m ³ /min)	单泵排量(m ³ /min)	实际功率(kW)	功率利用率(%)	最高砂比(%)	平均砂比(%)
1	105.2	104.1~102.3	104.1	11~13.0	13.0	1.30	22 896.978	0.51	4	2.6
2	95.8	96.7~99.3	99.3	12~13.0	13.0	1.30	21 841.388	0.49	8	5.0
3	96.5	95.6~101.1	101.1	13~14.9	14.9	1.49	25 487.090	0.57	8	4.8
4	98.9	98.1~105.0	105.0	8~10.5	10.5	1.05	18 653.730	0.42	7	4.5
5	104.1	104~108.1	108.1	7~9.4	9.4	0.94	17 192.316	0.38	8	4.9
6	107.4	104.2~110.7	110.7	4~9.8	9.8	0.98	18 355.330	0.41	8	4.6
7	107.6	98.3~109.1	109.1	0.5~9.6	9.6	0.96	17 720.484	0.40	8	4.7
8	107.8	105.5~111.7	111.7	6~8.5	8.5	0.85	16 064.364	0.36	8	4.8
9	97.6	95~97.8	97.8	13.5~14	14.0	1.40	23 165.538	0.52	12	6.1
10	97.1	95.2~100.2	100.2	14~14.5	14.5	1.45	24 582.192	0.55	13	6.2
11	93.1	96.2~100.4	100.4	13~14	14.0	1.40	23 781.734	0.53	9	5.6
12	97.3	94.9~100.8	100.8	15~16	16.0	1.60	27 287.188	0.61	13	5.7

第1~15段为趾端滑套+无极滑套完井压裂工艺,第16~30段为套管完井可溶桥塞分段压裂工艺。

1) 第1~15段组织2次连续施工,均完成7段,分别耗时1 700 min和1 370 min,施工压力57.5~90.9 MPa,施工排量11~13 m³/min(无极滑套排量限制14 m³/min),加砂强度1.73 m³/m,实际使用最大功率为19 685.448 kW,功率利用率为44%,施工进度突破7段/d。

2) 第16~30段组织3次连续施工。其中,第一次和第三次均完成3段,分别耗时1 099 min和900 min,第二次完成4段,耗时1 230 min,施工排量16~18 m³/min,平均加砂强度1.7 m³/m,实际使用最大功率为26 495.682 kW,功率利用率为59%。

综上所述,全电动压裂装备及技术基于电动化技术和自动化控制技术的集成应用,成套装备以电力作为动力源,通过集成控制系统指挥控制,连续进行压裂液和支撑剂的泵注效率高,较常规压裂效率至少提高2倍以上。

2.3 全电动压裂低噪声和低排放效果评价

2.3.1 全电动压裂施工噪声评价

按照全电动压裂模式,选取11个样本,采用分区域检测法对电动压裂核心设备进行了噪音监测,50 m厂界噪声在开机待命状态和施工状态时分别为58.8 dB和66 dB,噪声监测结果基本满足中华人民共和国生态环境部标准《声环境质量标准:GB 3096—2008》中第3类规定的最大噪声为65 dB的要求^[22](表4)。

2.3.2 全电动压裂大气污染控制评价

全电动压裂装备及技术替代常规柴油驱压裂泵组后,单段耗电 3.95×10^4 kW·h,减少柴油消耗14.5 t/段,产建区大气污染物排放量为零。

参照全国平均发电污染物排放率计算,单段施工减少废气 4.39×10^4 m³、CO₂约42.3 t、SO₂约138.28 kg、NO_x约120.38 kg、烟尘16.76 kg,大气污染物总排放量下降了77%,大气污染物控制效果明显(表5)。

3 社会经济效益分析

3.1 经济效益评价

相较于常规压裂,应用全电动压裂装备及技术后,综合成本下降40%以上,其中,在105 MPa等级压裂时,施工成本下降43%,单井费用节省570万元;在140 MPa等级压裂时,施工费用下降48%,单井费用节省842万元(表6)。

3.2 社会效益评价

3.2.1 厂界噪声污染控制

在距离传统2500型压裂车组1~2 m处加装隔声墙板,50 m外的噪声值最低为73 dB,而全电动压裂装备及技术应用后,50 m厂界噪音基本达到中华人民共和国生态环境部标准《声环境质量标准:GB 3096—2008》中第3类规定的最大噪声为65 dB的要求^[22]。

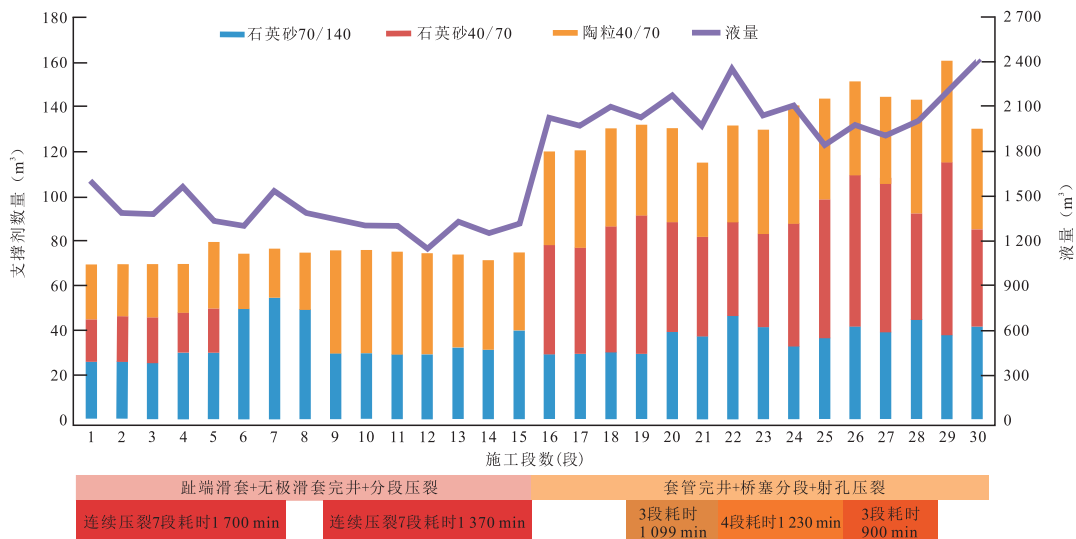


图3 南川页岩气田东胜区块X井1~30段全电动压裂泵注曲线

Fig. 3 Full electric fracturing pump injection curves of 1~30 section in Well-X, Dongsheng Block of Nanchuan Shale Gas Field

3.2.2 大气污染控制评价

全电动压裂装备及技术应用后,在产建区成套装备施工,大气污染排放为零排放。参照全国平均发电污染物排放率计算,大气总体污染下降77%,大气污染控制效果明显。

4 推广应用前景分析

1) 全电动压裂核心设备在高负载、高可靠性和

自动化控制方面优势明显,具备推广应用条件。全电动压裂装备及技术较常规压裂装备先进,通过近十年的验证、评价和配套升级,高压供配电技术、中压变频技术、电机直驱技术以及智能化控制技术应用成熟可靠,具备推广应用潜力。

2) 全电动压裂装备能够快速弥补页岩气压裂工程水功率不足缺口。国内外页岩气开发需求大,井工区大规模压裂施工需求的窗口大,常规压裂装备装置投资费用高、制造周期长、关键设备受国外进口限制,而全电动压裂装备国产化程度大于95%,制

表4 全电动压裂噪音检测数据
Table 4 All-electric fracturing noise detection data

样本 编号	开机待命状态						施工状态						dB
	A区半径50 m		B区半径80 m		C区半径100 m		A区半径50 m		B区半径80 m		C区半径100 m		
	A-1	A-2	B-1	B-2	C-1	C-2	A-1	A-2	B-1	B-2	C-1	C-2	
1	55.3	62.2	49.9	50.1	47.6	46.9	66.3	65.3	63.3	58.1	61.8	51.2	
2	54.7	61.8	49.8	51.4	46.8	47.1	65.9	65.6	63.8	60.1	60.9	51.3	
3	56.1	61.8	50.1	50.2	47.3	47.0	64.7	63.1	57.9	59.5	60.7	51.1	
4	54.7	60.9	48.7	51.2	48.2	45.3	65.9	65.3	62.7	60.1	60.9	50.5	
5	55.1	63.1	48.7	51.1	48.1	47.1	66.5	64.7	63.2	57.8	60.9	51.5	
6	56.5	61.8	48.4	51.2	49.2	47.9	67.1	65.8	64.1	59.5	60.9	51.2	
7	54.9	61.1	50.1	51.1	47.4	46.5	67.1	66.1	62.7	57.9	60.8	51.2	
8	54.9	61.7	48.7	51.2	47.8	45.9	67.1	66.4	61.2	59.1	60.7	50.9	
9	57.1	63.5	51.2	51.2	48.1	47.2	68.1	66.1	64.1	59.2	60.9	50.7	
10	57.3	61.9	51.3	50.3	48.4	47.2	66.5	66.2	63.5	60.2	61.1	52.4	
11	56.1	62.2	51.2	51.1	48.4	46.6	67.2	66.3	62.8	57.4	61.5	50.9	
样本平均	55.7	62.0	49.8	50.9	47.9	46.8	66.6	65.5	62.7	58.9	61.0	51.2	
区域平均	58.8		50.4		47.4		66.0		60.8		56.1		

注:施工工况为某平台4口井全电动压裂施工,施工压力为70 MPa,施工介质为清水+返排液。

表5 全电动压裂单段施工大气污染物控制评价
Table5 Evaluation of air pollutant control in single-stage construction of all-electric fracturing

能耗类型	大气主要污染物排放值				
	废气(10 ⁴ m ³)	CO ₂ (t)	SO ₂ (kg)	NO _x (kg)	烟尘(kg)
柴油	5.70	54.93	179.58	156.34	21.76
电	1.31	12.63	41.30	35.95	5.00
吨标准煤排放系数 ^[23-24]	0.27	2.60	8.50	7.40	1.03

表6 全电动压裂单井施工经济效益评价
Table 6 Evaluation table of economic benefit of single well construction in all-electric fracturing

压裂类别	成本(万元)				
	不同压裂等级施工设备		动力	人工	维护
	105 MPa	140 MPa			
常规压裂	1 096	1 536	89	42	60
全电动压裂	634	802	29	23.5	30

注:费用按照20段/井次折算。

造周期短、投资见效快。全电动压裂装备及技术能够快速与常规压裂装备形成互补优势,有效保障国内页岩气压裂工程市场需求。

3) 全电动压裂装备及技术应用符合国家发展战略和社会经济发展需求,在压裂工程降本增效、安全隐患消减、噪声污染控制以及大气排放控制方面具有明显优势,而且能够提高国内大型装备制造厂商国产化的综合能力和技术水平^[26],紧跟国家“十四五”规划目标,为高压深层油气勘探开发积累装备技术经验。

5 结论与建议

1) 全电动压裂装备及技术通过现场示范应用,充分验证了工艺技术的适应性和设备配套的可靠性。在常压页岩气开发过程中,全电动压裂装备及技术优势明显,在电能满足的条件下可以替代传统的油区压裂工艺,满足压裂工程需求。

2) 全电动压裂装备及技术通过智能化软件系统集成控制,可以实现常压页岩气大规模连续压裂施工模式,为页岩气压裂工程提速提效奠定了基础。

3) 国内西南地区电力资源丰富,高压电网分布广,而且页岩气储量规模大,全电动压裂装备及技术规模化应用后,在常压页岩气资源的效益开发方面,不仅能够发挥低成本、高效率优势,同时也符合国家绿色低碳发展的要求。

压裂工程地面配套技术通过电动化、自动化和信息技术集成后,应用效果较好,但高压管汇通道的远程控制技术研究尚处于空白阶段,需要加强技术攻关和应用实践,进一步降低安全风险,提高生产效率。深层页岩气资源储量大,目前仅对部分区块采用140 MPa等级的全电动压裂装备及技术进行小规模测试评价。针对深层页岩气开发需求,需要加大攻关集成承压为175 MPa的这类级别高、施工排量大的全电动压裂装备及技术,为高压、深层页岩气压裂工程做好技术储备。国内常规油气和煤层气储量大,开发前景广阔。针对煤层气和常规油气低渗透储层的开发需求,开展压裂工程电动化和自动化技术的应用和实践,为降低勘探开发成本、提高发展质量方面提供了新的模式。

参考文献

[1] 邹才能.页岩革命助推我国能源结构转型[J].气体分离,

2018,16(5):73.

ZOU Caineng. Shale revolution helps transform China's energy structure[J]. Gas Separation, 2018, 16(5): 73.

[2] 赵文智,贾爱林,位云生,等.中国页岩气勘探开发进展及发展展望[J].中国石油勘探,2020,25(1):31-44.

ZHAO Wenzhi, JIA Ailin, WEI Yunsheng, et al. Progress in shale gas exploration in China and prospects for future development[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 31-44.

[3] 聂海宽,何治亮,刘光祥,等.中国页岩气勘探开发现状与优选方向[J].中国矿业大学学报,2020,49(1):13-35.

NIE Haikuan, HE Zhiliang, LIU Guangxiang, et al. Status and direction of shale gas exploration and development in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(1): 13-35.

[4] 王晓川,吴根,闫金定.世界页岩气开发及技术发展现状与趋势[J].科技中国,2018,2(12):17-21.

WANG Xiaochuan, WU Gen, YAN Jinding. Status and trend of world shale gas development and technology development[J]. Science and Technology in China, 2018, 2(12): 17-21.

[5] 何希鹏,王运海,王彦祺,等.渝东南盆缘转换带常压页岩气勘探实践[J].中国石油勘探,2020,25(1):126-136.

HE Xipeng, WANG Yunhai, WANG Yanqi, et al. Exploration practices of normal-pressure shale gas in the marginal transition zone of the southeast Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 126-136.

[6] 聂海宽,汪虎,何治亮,等.常压页岩气形成机制、分布规律及勘探前景——以四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组为例[J].石油学报,2019,40(2):131-143.

NIE Haikuan, WANG Hu, HE Zhiliang, et al. Formation mechanism, distribution and exploration prospect of normal pressure shale gas reservoir: a case study of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its periphery[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(2): 131-143.

[7] 何希鹏,何贵松,高玉巧,等.渝东南盆缘转换带常压页岩气地质特征及富集高产规律[J].天然气工业,2018,38(12):1-14.

HE Xipeng, HE Guisong, GAO Yuqiao, et al. Geological characteristics and enrichment laws of normal-pressure shale gas in the basin-margin transition zone of SE Chongqing[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(12): 1-14.

[8] 潘仁芳,李笑天,金吉能,等.渝东南盆缘转换带常压页岩气储层非均质性特征及主控因素[J].天然气工业,2018,38(12):26-36

PAN Renfang, LI Xiaotian, JIN Jineng, et al. Heterogeneity characteristics and controlling factors of normal-pressure shale gas reservoirs in the basin-margin transition zone of SE Chongqing[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(12): 26-36

[9] 周成香,吴壮坤,丁桥.电动压裂泵在页岩气井压裂中的先导试验[J].石油机械,2018,46(11):104-108.

ZHOU Chengxiang, WU Zhuangkun, DING Qiao. Pilot test of electric fracturing pump in shale gas well[J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(11): 104-108.

[10] 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.
- [11] 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 shale gas fracturing[J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(5): 81-83.
- [12] 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.
- [13] JACOBS T. New automated hydraulic fracturing tech cuts time and workforce needs[J]. Journal of Petroleum Technology, 2017, 69(5): 32-33.
- [14] 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.
- [15] SURJAATMADJA J B, LOGAN T, HUNTER T H, et al. High-pressure, high-flow-rate stimulation equipment for shale fracture treatments[C]// Paper SPE-194880-MS presented at the SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, 18-21 March, 2019, Manama, Bahrain.
- [16] 刘克强,王培峰,贾军喜.我国工厂化压裂关键地面装备技术现状及应用[J].石油机械,2018,46(4):101-106.
LIU Keqiang, WANG Peifeng, JIA Junxi. Status and applications of surface equipment for factory fracturing in China [J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(4): 101-106.
- [17] 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.
- [18] 高启国,高银胜.130BPM全电动混砂撬在页岩气压裂施工中的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2019,39(24):131-132.
GAO Qiguo, GAO Yinsheng. Application of 130BPM fully electric sand-mixing pry in shale gas fracturing[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2019, 39(24): 131-132.
- [19] 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.
- [20] 王江阳.HHE6000-02电动压裂系统研制[Z].四川宏华电气有限责任公司,2017.
WANG Jiangyang. Development of HHE 6000-02 electric fracturing system[Z]. Sichuan Honghua Electric Co. Ltd., 2017.
- [21] 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.
- [22] 程强.中国页岩气发展迎来2.0时代[N].中国石化报,2020-12-07(5).
CHENG Qiang. China shale gas development ushered in the 2.0 era[N]. Sinopec News, 2020-12-07(5).
- [23] 环境保护部,国家质量监督检验检疫总局.声环境质量标准:GB 3096—2008[S].北京:中国环境科学出版社,2008:5.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Environmental quality standard for noise: GB 3096—2008[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008: 5.
- [24] 省级温室气体清单编制指南(试行)[S].北京:省级温室气体清单编制指南编写组.
Guidelines for the preparation of provincial greenhouse gas inventories (trial) [S]. Beijing: Group for the preparation of guidelines for provincial greenhouse gas inventories.
- [25] 石油化工生产企业CO₂排放量计算方法:SH/T 5000—2011[S].北京:中华人民共和国工业和信息化部,2011.
The calculation method of CO₂ emissions for petrochemical production: SH/T 5000—2011[S]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, 2011.
- [26] 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 technology development prospect of fracture equipment[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(2): 41-44.

(编辑 余聪)