

引用格式:魏伟.煤层气压裂用低密度坚果壳支撑剂性能评价与现场试验[J].油气藏评价与开发,2020,10(4):93-96.

WEI W. Performance evaluation and field test of low-density nut shell proppant in CBM fracturing[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(4): 93-96.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.04.014

煤层气压裂用低密度坚果壳支撑剂性能评价与现场试验

魏伟

(中国石化华东油气分公司石油工程技术研究院,江苏南京 210031)

摘要:延川南煤层气井采用清水石英砂压裂,前期的生产效果显示压裂产生的支撑缝缝长有限,导致施工的加砂难度大,同时,后期的采气效果也不理想。针对此问题,通过室内实验研究,对比评价了常规石英砂支撑剂与低密度坚果壳支撑剂在不同闭合压力下的破碎以及裂缝导流能力。实验结果显示:两者的破碎率均能满足工程要求,在较高闭合应力(35 MPa)条件下,拥有相类似的裂缝导流能力,但低密度坚果壳支撑剂相较于传统石英砂支撑剂价格更加低廉,因此,更能够满足降本增产的目的。该工艺现场试验取得了良好的应用效果。

关键词:煤层气;低密度;支撑剂;压裂;坚果壳

中图分类号:TE357.12

文献标识码:A

Performance evaluation and field test of low-density nut shell proppant in CBM fracturing

WEI Wei

(Petroleum Engineering Technology Research Institute, Sinopec East China Oil & Gas Company, Nanjing, Jiangsu 210031, China)

Abstract: At present, the clean quartz sand is used in the fracturing of southern Yanchuan CBM wells. According to the production effect in the early stage, the limited length of supporting seam generated by the clean quartz sand fracturing leads to the difficulty of adding sand in the construction, and the gas production effect in the later stage is not ideal. In order to solve this problem, laboratory experiments have been conducted to compare and evaluate the crushing and fracture conductivity of conventional quartz sand proppant and low-density nut shell proppant under different closing pressures. The experimental results show that the fracturing rates of both can meet the engineering requirements. Under high closure stress (35 MPa), they have similar fracture conductivity. However, low-density nut shell proppant is cheaper than traditional quartz sand. Therefore, low-density nut shell proppant is more able to meet the current goal of cost reduction and production increase. The field test of this technology has obtained good results.

Key words: coal bed methane, low-density, proppant, fracturing, nut shell

目前,国外水力压裂施工主要采用石英砂、陶粒和覆膜支撑剂^[1-5],国内水力压裂施工则主要为陶粒与石英砂支撑剂。支撑剂的密度越大其抗压强度往往越大,但支撑剂密度越大,支撑剂在随着压裂液运移的过程中的沉降速度也会越快,致使支撑剂难以被压裂液携带到裂缝的端部或分支缝内,最终无法形成较大的有效改造体积。煤层气藏具有压力系数低、饱和度低、渗透率低、非均质性强的特点,煤层气

理、裂缝发育^[6],导致压裂液体滤失增加,液体效率降低,支撑剂在近井地带堆积,进而出现砂堵风险,因此,为了将支撑剂携带到裂缝深部,通常采用提高压裂液体黏度的方式来改善液体携砂能力,但煤层具有低温低压,且吸附能力强的特点^[7-8],高黏度的压裂液体会对储层造成更大的损害,所以,延川南煤层气井通常采用清水压裂液进行施工。

支撑剂的密度高低对最终的压裂效果有很大的

收稿日期:2020-05-07。

作者简介:魏伟(1990—),男,本科,助理研究员,从事储层改造方面研究。通讯地址:江苏省南京市浦口区新马路182号,邮政编码:210031。E-mail:823282416@qq.com

影响,通过室内对比不同类型的支撑剂性能发现,低密度坚果壳支撑剂较常规支撑剂,性能相近,但密度更低、价格更便宜,因此,优选低密度坚果壳支撑剂,并在现场进行试验,取得良好效果。

1 低密度坚果壳支撑剂性能评价

1.1 支撑剂沉降速度

流体携带微粒的能力是跟微粒在周围流体中的沉降速度成反比^[9-14]。流体为水时,可以通过斯托克斯定律^[14-17]算出该液体中的微粒的最终沉降速度,其公式为:

$$v_i = \frac{(\rho_p - \rho_f)gd_p^2}{18\mu_f} \quad (1)$$

式中: v_i 为最终沉降速度,m/s; ρ_p 为支撑剂密度, kg/m^3 ; ρ_f 为压裂液密度, kg/m^3 ; d_p 为粒径,m; μ_f 为液体黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

根据斯托克斯定律可知:影响微粒在液体中的最终沉降速度主要有微粒直径、微粒密度、液体密度、液体黏度等^[18-20]。同等压裂液体系及支撑剂粒径条件下,支撑剂的密度越大,沉降速度越快,压裂过程中越容易在近井地带形成堆积。

室内试验按照石油与天然气行业标准 SY/T 5108—2014《水力压裂和砾石充填作业用支撑剂性能测试方法》的规定,对常规石英砂支撑剂和低密度坚果壳支撑剂的物理性能进行评价,实验结果如表1所示。

表1 支撑剂物理性能测试结果

Table 1 Physical performance test results of proppant

支撑剂类型	粒径范围/ μm	视密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	体积密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	浊度/ %	圆度	球度
石英砂	425~850	2.62	1.63	41	0.83	0.78
低密度坚果壳	425~850	1.21	0.66	55	0.66	0.66

从物理性能的测试结果来看,低密度坚果壳支撑剂与常规石英砂支撑剂相比,在相同粒径下,拥有更低的体积密度,代入式(1)计算发现低密度坚果壳支撑剂的沉降速度更慢,在水力压裂时,能够被压裂液体输送到裂缝的更深部或分支裂缝网络处,获得更长的支撑裂缝,从而达到更好的产层覆盖性,增产效果更加明显。

1.2 支撑剂抗破碎与导流能力

支撑剂作为水力压裂工艺中的重要材料,对最

终的压裂改造效果起着关键的作用,而支撑剂的抗破碎能力与导流能力是评价支撑剂性能的重要指标。支撑剂具有较高的抗破碎能力,才能在地层压力下形成更少的碎屑与更多的有效体积来维持形成的储层裂缝,扩大渗流通道,进而提高有效渗流面积。导流能力是评价支撑剂随压裂液铺置在储层内之后,形成有效渗流通道的能力。

1.2.1 支撑剂抗破碎能力

根据延川南工区的施工经验,储层的闭合压力约为30 MPa,所以室内在28 MPa条件下,对2种支撑剂进行抗破碎能力的测试,实验结果见表2。

表2 支撑剂抗破碎能力室内试验测试结果

Table 2 Test results of proppant crushing resistance

支撑剂类型	粒径范围/ μm	破碎率(28 MPa)/%
石英砂	425~850	8.0
低密度坚果壳	425~850	2.6

虽然低密度坚果壳支撑剂的密度比石英砂支撑剂小,但是,由于低密度坚果壳支撑剂的塑性优于石英砂支撑剂,在28 MPa压力下,产生的形变量大于石英砂支撑剂,从而导致支撑剂颗粒之间的接触面积变大,因此,低密度坚果壳的抗破碎能力优于石英砂。

1.2.2 支撑剂导流能力

室内使用山东中石大石仪科技有限公司的支撑剂导流能力测试仪,按照石油与天然气行业标准 SY/T 6302—2019《压裂支撑剂充填层短期导流能力评价推荐方法》的规定,在室温(25℃)条件下,选取闭合压力范围为10~35 MPa,在铺砂浓度为5 kg/m^2 情况下,用蒸馏水对目数相同(20/40目)的常规石英砂和低密度坚果壳支撑剂的导流能力进行测试,实验结果显示:在相同的铺砂浓度、低闭合应力条件下,低密度坚果壳支撑剂的导流能力低于石英砂支撑剂的导流能力;在闭合应力10~20 MPa时低密度坚果壳支撑剂出现明显破碎,导致导流能力急剧降低,石英砂支撑剂则呈现一个相对较稳定的递减趋势;在较高闭合压力时(35 MPa),低密度坚果壳支撑剂和石英砂支撑剂的导流能力则相差较小(图1)。

2 低密度坚果壳支撑剂现场试验

2013年,对Y40井山西组2号煤层(压裂井段

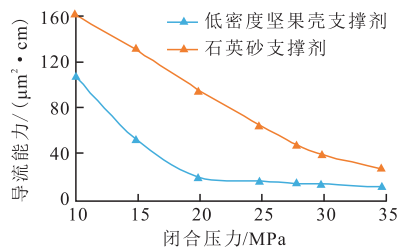


图1 不同闭合压力下支撑剂导流能力对比

Fig. 1 Comparison of proppant conductivity under different closing pressures

1 420.4 ~ 1 425.8 m, 视厚 5.4 m) 实施光套管水力加砂压裂, 加入常规石英砂支撑剂 51.1 m³, 其中 40/70 目 10 m³, 20/40 目 41.1 m³, 平均砂比 10.7%。前置液量 364.0 m³, 携砂液量 420.5 m³, 顶替液量 17.9 m³, 累计液量 802.4 m³。破裂压力 40.0 MPa, 前置液阶段排量 7 ~ 8 m³/min, 携砂液阶段施工压力 35.5 ~ 37.7 MPa。压裂施工全程压力基本平稳, 停泵压力 28.0 MPa(图2)。

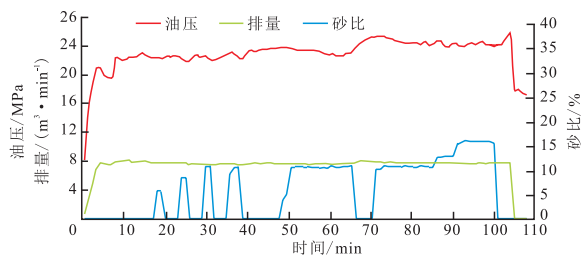


图2 Y40井全石英砂压裂施工曲线

Fig. 2 Fracturing by quartz sand only in well-Y40

Y40 井第一次压裂后投产, 日产气量稳定在 300 m³左右, 最高日产气量 801.6 m³。

2019 年, 对 Y40 井山西组 2 号煤层(压裂井段 1 420.4 ~ 1 425.8 m, 视厚为 5.4 m) 实施光套管水力加砂重复压裂。选取活性水压裂液进行造缝, 采用低密度坚果壳支撑剂与石英砂支撑剂相结合。前期使用石英砂支撑剂段塞进行降滤, 后期阶梯式加入低密度坚果壳支撑剂, 穿过原有支撑剂带, 形成新裂缝, 降低支撑剂在煤层内的嵌入效果, 从而增加支撑剂裂缝宽度与长度, 有效沟通煤层割理裂隙, 提高储层的渗流能力, 增大储层流体的渗流面积, 达到更好的改造效果, 增加煤层产气量。

施工共计加入 20/40 目低密度坚果壳支撑剂 31 m³, 40/70 目石英砂支撑剂 5 m³, 20/40 目石英砂支撑剂 41 m³, 平均砂比为 11.7%。前置液量为 214.0 m³, 携砂液量为 660.0 m³, 顶替液量为 4 m³, 累计液量为 878 m³。破裂压力为 35 MPa, 前置液阶段排量为

7 ~ 8 m³/min, 携砂液阶段施工压力为 30 ~ 33 MPa。压裂施工时, 前期压力基本平稳, 后期支撑剂加入规模较大, 裂缝全部充填, 施工压力上涨明显, 停泵压力为 31 MPa(图3)。

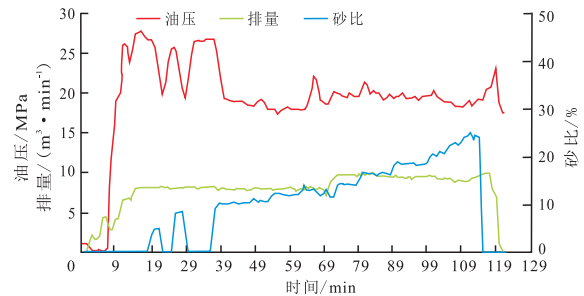


图3 Y40井低密度坚果壳与石英砂相结合的支撑剂压裂施工曲线

Fig. 3 Fracturing by proppant combined of low-density nut shell with quartz sand in well-Y40

Y40 井施工压力较高, 经过前置液阶段加入低砂比的常规石英砂细砂进行打磨、降滤后, 施工压力降至 30 MPa 左右, 在实施低密度压裂支撑剂技术改造阶段, 压力波动升高, 说明地质情况复杂、非均质性强, 造成施工压力差异性大。在加入石英砂最后阶段, 由于加入规模较大, 石英砂在近井地带堆积形成砂堵, 施工较为困难, 但形成了较好的主裂缝, 达到了预期改造的效果。

Y40 井重复压裂后投产, 最高日产气 1 497 m³, 日产气稳定在 1 200 m³左右, 增产 900 m³左右。从最终产气效果来看, 采用低密度坚果壳支撑剂进行重复压裂取得了较好的改造效果。

3 结论

1) 低密度坚果壳支撑剂与传统石英砂支撑剂相比, 可以有效降低支撑剂的沉降速度, 从而减少支撑剂在近井地带的堆积, 获得更大的改造范围。

2) 在同样铺砂浓度条件下, 对比低密度坚果壳支撑剂和传统石英砂支撑剂, 虽然在低闭合压力下, 导流能力弱于传统石英砂支撑剂, 但是在较高闭合压力下, 与传统石英砂支撑剂拥有相近的导流能力。

3) 低密度坚果壳支撑剂相较于传统石英砂支撑剂价格更加低廉, 在一定闭合压力条件下, 能够获得更好的导流效果, 值得进一步推广应用。

参考文献

- [1] 马新仿,张士诚.水力压裂技术的发展现状[J].河南石油,2002,16(1):44-47.
MA X F, ZHANG S C. Status of development of hydraulic fracturing technologies[J]. Henan Petroleum, 2002, 16(1): 44-47.
- [2] 贾旭楠.支撑剂的研究现状及展望[J].石油化工应用,2017,36(9):1-6.
JIA X N. Overview of the proppant development and prospect[J]. Petrochemical Industry Application, 2017, 36(9): 1-6.
- [3] 贾新勇.我国支撑剂的发展应用及现状[J].企业技术开发,2011,30(19):105-106.
JIA X Y. The applications and agent status of propping agent in China[J]. Technological Development of Enterprise, 2011, 30(19): 105-106.
- [4] 张遂安,张典坤,彭川,等.中国煤层气产业发展障碍及其对策[J].天然气工业,2019,39(4):118-124.
ZHANG S A, ZHANG D K, PENG C, et al. Obstacles to the development of CBM industry and countermeasures in China[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(4): 118-124.
- [5] 刘智恪,谭锐,牛增前,等.山西煤层气井压裂工艺技术与研究[J].油气井测试,2014,23(2):45-47.
LIU Z K, TAN R, NIU Z Q, et al. Introduction of fracturing technology for Shanxi CBM well and its research[J]. Well Testing, 2014, 23(2): 45-47.
- [6] 陆松嵩,杨宇,李东,等.煤层气降滤失工艺技术研究[J].石油化工应用,2014,33(12):66-68.
LU S S, YANG Y, LI D, et al. The research of the technology of reducing fluid loss during the development of coal bed methane[J]. Petrochemical Industry Application, 2014, 33(12): 66-68.
- [7] 吴信波,王谦,张俊.彬长矿区煤层气井水力压裂效果影响因素分析[J].非常规油气,2017,4(6):100-104.
WU X B, WANG Q, ZHANG J. Analysis on influencing factors of hydraulic fracturing effect of coalbed methane wells in Binchang Mining Area[J]. Unconventional Oil & Gas, 2017, 4(6): 100-104.
- [8] 郑力会,李秀云,苏关东,等.煤层气工作流体储层伤害评价方法的适宜性研究[J].天然气工业,2018,38(9):28-39.
ZHENG L H, LI X Y, SU G D, et al. Applicability of working fluid damage assessment methods for coalbed methane reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(9): 28-39.
- [9] 黄禹忠,任山,林永茂,等.川西马井气田蓬莱镇组气藏储层改造技术研究应用[J].钻采工艺,2007,30(1):35-37.
HUANG Y X, REN S, LIN Y M, et al. Applied research on stimulation technology in Penglaizhen formation in Majing gas field of west Sichan[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(1): 35-37.
- [10] 李小刚,廖梓佳,杨兆中,等.压裂用低密度支撑剂及研究进展和发展趋势[J].硅酸盐通报,2018,37(10):3132-3135.
LI X G, LIAO Z J, YANG Z Z, et al. Development and prospect of fracturing lightweight proppants[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(10): 3132-3135.
- [11] 陶红胜,王满学,杏毅,等.低黏度清洁压裂液黏弹性与悬砂能力的关系[J].油田化学,2015,32(4):494-498.
TAO H S, WANG M X, XING Y, et al. Relationship between suspended proppant ability and viscoelasticity of clean fracturing fluid with low viscosity[J]. Oilfield Chemistry, 2015, 32(4): 494-498.
- [12] 肖博,张士诚,郭天魁,等.页岩气藏清水压裂悬砂效果提升实验[J].东北石油大学学报,2013,37(3):94-99.
XIAO B, ZHANG S C, GUO T K, et al. Laboratory experiment on the method for improving proppant-carrying capacity of slickwater fracturing in shale gas reservoirs[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2013, 37(3): 94-99.
- [13] 温庆志,罗明良,李佳娜,等.压裂支撑剂在裂缝中的沉降规律[J].油气地质与采收率,2009,16(3):100-103.
WEN Q Z, LUO M L, LI J N, et al. Principle of proppant settlement in fracture[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(3): 100-103.
- [14] 刘钰豪,徐永驰,陈泓洁.煤层气压裂中支撑剂沉降模型的对比与优选[J].当代化工,2015,44(6):1253-1256.
LIU Y H, XU Y C, CHEN H J. Comparison and selection of proppant settling models in the CBM fracturing[J]. Contemporary Chemical Industry, 2015, 44(6): 1253-1256.
- [15] LIANG F, SAYED M, AL-MUNTASHERI G, et al. Overview of existing proppant technologies and challenges[C]// paper SPE-172763-MS presented at the SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference, 8-11 March 2015, Manama, Bahrain.
- [16] 岳俊磊.超低密高强度压裂支撑剂的制备及性能研究[D].太原:太原理工大学,2017.
YUE J L. Preparation and properties of ultra-light weight and high strength fracturing proppant[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.
- [17] LI D, WANG J H. Estimation of proppant size distribution using image analysis[J]. Particulate Science & Technology, 2015, 33(5): 517-521.
- [18] 梁莹,罗斌,黄霞.水力压裂低密度支撑剂铺置规律研究及应用[J].钻井液与完井液,2018,35(3):110-113.
LIANG Y, LUO B, HUANG X. Study on distribution of low density proppants in hydraulic fracturing operations and the application thereof[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2018, 35(3): 110-113.
- [19] GU M, DAO E, MOHANTY K K. Investigation of ultra-light weight proppant application in shale fracturing[J]. Fuel, 2015, 150: 191-201.
- [20] STANCIU C, VO L K, NGUYEN P D, et al. Maintaining well productivity through controlling fines migration and scale formation[C]// paper SPE-174364-MS presented at the EUROPEC 2015, 1-4 June 2015, Madrid, Spain.

(编辑 余聪)