

自悬浮支撑剂研究进展及应用现状

梁莹

中国石化西南石油工程有限公司井下作业分公司 四川德阳 618000

通讯作者:Email:scslcly@163.com

项目支持:中石化西南石油工程有限公司科技研发项目“难动用储量合作开发技术研究及先导试验”(xn202008)

引用:梁莹. 自悬浮支撑剂研究进展及应用现状[J]. 油气井测试,2022,31(1):47-51.

Cite: LIANG Ying. Research progress and application status of self-suspension proppant [J]. Well Testing, 2022,31(1):47-51.

摘要 阐述了膨胀型自悬浮支撑剂、黏弹型自悬浮支撑剂、气悬浮支撑剂的研究现状;从常规物理性能、导流能力、悬浮性能、包覆层溶液性能等方面探讨了自悬浮支撑剂性能评价现状;详细分析了自悬浮支撑剂的国内外应用情况。综合分析认为,自悬浮支撑剂作为一种新型支撑剂,将支撑剂与压裂液合二为一,不借助常规压裂液体系就能长时间悬浮,可实现清水压裂,在低渗、易受损储层及页岩气等非常规气藏具有显著的技术优势。国内自悬浮支撑剂的抗温能力还需进一步提高,同时应加强其配套工艺研究。

关键词 自悬浮支撑剂;压裂液;清水压裂;性能评价;研究现状;现场应用;发展趋势

中图分类号:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.01.008

Research progress and application status of self-suspension proppant

LIANG Ying

Downhole Operation Branch, SINOPEC Southwest Petroleum Engineering Co., Ltd., Deyang, Sichuan 618000, China

Abstract: This paper describes the research status of expansive self-suspension proppant, viscoelastic self-suspension proppant and gas-suspension proppant; In addition, this paper also discusses the evaluation status of the performance of self-suspended proppant from the aspects of conventional physical properties, conductivity, suspension properties and coating solution properties, and analyzes the application of self-suspended proppant at home and abroad in details. Comprehensive analysis shows that as a new type of proppant, self-suspension proppant combines proppant and fracturing fluid, which can be suspended for a long time without the help of conventional fracturing fluid system and can realize clean water fracturing. It has significant technical advantages in low permeability, easily damaged reservoirs, and unconventional gas reservoirs such as shale gas reservoir. The temperature resistance of domestic self-suspension proppant needs to be further improved, and its supporting process research should be strengthened.

Keywords: self-suspension proppant; fracturing fluid; clean water fracturing; performance evaluation; research status; field application; development trend

水力压裂技术作为油气资源开发,特别是页岩气等致密油气开发最重要的核心技术,涉及的材料主要包括瓜胶液、滑溜水等流体,以及石英砂、陶粒等固相支撑剂^[1]。支撑剂主要作用是压裂后保持裂缝开启,提高地层导流能力。随着压裂技术不断进步,对支撑剂性能要求越来越高,研发了各种类型和用途的新型支撑剂,其中李小刚将低密度支撑剂分为空心球类、多孔类、低密度材料类和自悬浮四种类型^[2]。自悬浮支撑剂作为一种新型支撑剂,将支撑剂与压裂液合二为一,不借助常规压裂液体系就能长时间悬浮,可实现清水压裂,降低施工成

本,简化配液流程^[3-5],在低渗、易受损储层及页岩气等非常规气藏增产改造中具有显著的技术优势和应用效果,但还没有大规模应用。因此,了解和掌握该类支撑剂发展和应用现状,对压裂支撑剂的研究应用和相关行业的技术进步有一定的指导意义。

1 自悬浮支撑剂类型及制备方法

根据悬浮机理的不同,自悬浮支撑剂分为三种:膨胀型自悬浮支撑剂、黏弹型自悬浮支撑剂和气悬浮支撑剂^[6]。

1.1 膨胀型自悬浮支撑剂

由常规支撑剂颗粒和高分子水凝胶涂层组成,与水接触后,水凝胶涂层自发膨胀在支撑剂周围形成稳固的水化层,支撑剂的总体积增加,有效视密度降低,在压裂液中支撑剂之间相互支撑,提高支撑剂的悬浮性能,且支撑剂表面涂层在水中溶解后交联形成黏性液体,产生与瓜胶压裂液相同的悬砂效果^[7](图1)。国内从2014年进行该类自悬浮支撑剂的研发工作,各大支撑剂厂家,如北京仁创科技公司^[8],巩义天祥有限公司^[9],山东诺尔生物科技有限公司^[10],北京昆仑隆源石油开采有限公司^[11],万力事业发展有限公司^[12]都相继发表了关于自悬浮支撑剂的制备专利。另外,各大高校、中国石油化工股份有限公司、中国石油天然气股份有限公司也开展了相应研究^[13-16]。

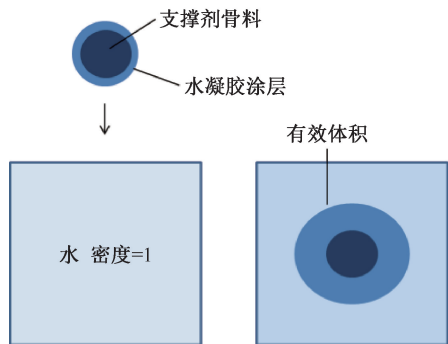


图1 膨胀型自悬浮支撑剂悬浮机理示意图

Fig.1 Schematic diagram of suspension mechanism of expansive self-suspension proppant

1.2 黏弹型自悬浮支撑剂

该支撑剂由常规支撑剂颗粒和聚合物涂层组成,表面的聚合物涂层遇水后溶解,聚合物溶解于水后的压裂液符合黏弹性流体的性质,流体密度增加,稠度系数增加,黏弹型自悬浮支撑剂沉降速度降低,不需要高性能的压裂液,实现清水压裂(图2)。

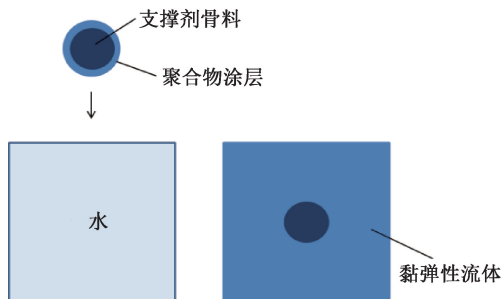


图2 黏弹型自悬浮支撑剂悬浮机理示意图

Fig.2 Schematic diagram of suspension mechanism of viscoelastic self-suspension proppant

展了该类自悬浮支撑剂的研制和评价工作。

1.3 气悬浮支撑剂

由常规支撑剂颗粒和疏水亲气涂层组成,表面的聚合物覆膜改变了支撑剂表面的润湿性,增加支撑剂表面对气体的亲附力。在加砂过程中将少量气体加入携砂液,产生的气泡将附着在支撑剂表面,导致其表观比重显著降低。气悬浮支撑剂可以在气体存在的条件下长时间保持悬浮状态(图3)。该类型支撑剂的制备技术主要由美国 Fairmount Santrol 公司和 Preferred Sand 公司所掌握^[17-18],其配方及制备技术都少有文献报道^[19]。

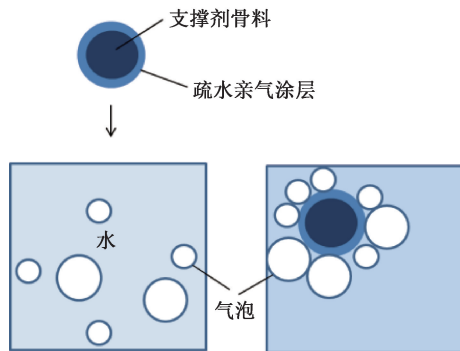


图3 气悬浮支撑剂悬浮机理示意图

Fig.3 Schematic diagram of suspension mechanism of air suspension proppant

国内的膨胀型和黏弹型自悬浮支撑剂制备技术相对成熟,国内已经进行了现场应用。

2 实验评价现状

目前自悬浮支撑剂的常规物理性能和导流能力参照相近的行业标准,但没有自悬浮支撑剂悬浮性能、包覆层溶液性能等行业标准,尚未形成统一的评价方法和标准。ZHANG J C 等认为,评价自悬浮支撑剂的常规物理性能和导流能力意义不大,评价重点应放在自悬浮支撑剂体系的悬浮性能、抗剪切性能、破胶性能及敏感性等方面^[20]。

2.1 常规物理性能

自悬浮支撑剂物理性能的评价方法主要参照标准《水力压裂和砾石充填作业用支撑剂性能测试方法》(SY/T 5108-2014)。支撑剂常规物理性能包括圆度、球度、酸溶解度、浊度、体积密度、视密度、破碎率。一般地,视密度是指支撑剂颗粒的密度,视密度数值较体积密度数值大。自悬浮支撑剂是在普通支撑剂外层包裹了聚合物,遇水溶胀,体积增大,在相同质量下,会导致测量的视密度偏小。因此,中国石油新疆油田分公司工程技术研究院孟

雪认为,应该先将自悬浮支撑剂溶于水,待外层聚合物完全溶解后去除外层,烘干后按照标准进行评价^[21]。

2.2 导流能力

自悬浮支撑剂导流能力的评价方法主要参照标准《压裂支撑剂充填层短期导流能力评价推荐方法》(SY/T 6302-2009)对自悬浮支撑剂的导流能力进行评价。评价实验表明,随闭合压力增加,裂缝导流能力减小;随着填砂浓度增加,裂缝导流能力

增加,自悬浮支撑的导流能力高于普通覆膜砂或石英砂,略低于陶粒。自悬浮支撑剂加工过程中并未对支撑剂抗压能力和裂缝导流能力造成较大影响。

2.3 悬浮性能

自悬浮支撑剂悬浮性能评价方法尚未形成统一的标准。根据国内外学者的研究,自悬浮支撑剂悬浮性能评价内容主要有悬浮时间,静态悬浮性,动态悬浮性,膨胀倍数,悬浮稳定性。对应的评价方法见表 1。

表 1 自悬浮支撑剂悬浮性能评价方法
Table1 The performance evaluation of self-suspending proppant

项目	测试方法	不足
悬浮时间	自悬浮支撑剂表面的悬浮材料遇水溶解后使支撑剂达到悬浮状态需要的时间称为悬浮形成时间。	砂比、温度、搅拌速度不定。砂比增大,温度升高,会缩短悬浮时间。
静态悬砂性	在量筒中配制 200 ml 不同砂比携砂液,充分悬浮后,分别测试不同温度下沉降时间。	温度、砂比不定。
动态悬砂性	采用 20% 砂比自悬浮支撑剂清水携砂液,充分悬浮后,分别在常温 and 65 ℃,以及不同剪切时间下,测试其沉降时间。	剪切速率和搅拌时间不定。剪切速率越大,搅拌时间长,会轻微分层。
膨胀倍数	在 500 ml 的量筒中量取 50 ml 自悬浮支撑剂,然后加入 200 ml 的水,用玻璃棒充分搅拌,摇匀后,使之完全膨胀,然后读取膨胀体积,计算膨胀倍数。	用于评价膨胀型自悬浮支撑剂。随着水质硬度增加,膨胀倍数减小。
悬浮稳定性	将砂比为 10% 的自悬浮支撑剂压裂液,放入密闭试管中,测定不同温度下自悬浮支撑剂完全沉降下来所需要的时间。	温度、砂比不定,影响悬浮稳定性和耐温性。

2.4 包覆层溶液性能

自悬浮支撑剂依靠表面的包覆层,在水中分散溶胀,形成一定黏度的溶液,实现支撑剂的悬浮^[21]。因此,包覆层溶液的性能会直接影响水力压裂的效

果。根据国内外学者的研究,包覆层溶液性能主要有流变性、防膨性、助排性、破胶性等。对应的评价方法见表 2,主要参照 SY/T 5107-2016《水基压裂液性能评价方法》,部分实验参数有所调整。

表 2 自悬浮支撑剂包覆层溶液性能评价方法
Table 2 Performance evaluation method of self-suspension proppant coating solution

项目	优点	不足
流变性	取砂比为 10%~30% 的自悬浮支撑剂压裂液沉降后取上层清液,采用流变仪测不同温度,剪切速率 170 s ⁻¹ 下压裂液黏度随剪切时间的变化情况。	测试温度和测试时间由目的层温度和压裂施工时间确定,尚未形成统一标准。
防膨性	在砂比为 10% 的自悬浮支撑剂压裂液的破胶液中,加入 1% 黏土稳定剂(防膨剂),或不加黏土稳定剂,一定温度下采用离心法测定防膨性能。	根据储层情况添加防膨剂,防膨剂加量不定。
助排性	在砂比为 10% 自悬浮支撑剂压裂液的破胶液中,加入 1% 助排剂,一定温度下测定助排性。	测试温度由目的层确定,尚未形成统一标准。
破胶性	在自悬浮支撑剂压裂液中加入一定量的破胶剂(如过硫酸铵),在不同温度下进行破胶,每隔一段时间测定溶液的表观黏度,表观黏度度不再发生变化时,即为完全破胶。	压裂施工不同阶段砂浓度不同,破胶剂用量不同,且破胶剂种类不定。

3 应用现状

2013 年,美国首次在 Mississippi 进行自悬浮支撑剂的应用。2016 年,美国 Fairmount Santrol 公司在 South texas 进行了自悬浮支撑剂与常规砂的对照试验,压后 60 d 的天然气产量比常规砂提高了 55%^[22]。2017 年,Preferred Sand 公司生产的气悬浮支撑剂在北美地区和阿根廷的低渗-超低渗地层进行了 60 井次的应用。与常规压裂相比,压裂时间

缩短了 41%,压裂液节约了 38%,压后生产预计最终采收率提高 43%^[23-24]。

2015 年,国内开始对自悬浮支撑剂进行现场应用,多采用“前置液造缝+活性水携砂”的工艺。前置液通常为瓜胶压裂液或聚合物压裂液,采用清水或活性水携砂,活性水由助排剂、防膨剂组成。携砂阶段的砂比大于 10%,需全程添加破胶剂,并根据地层温度确定关井时间^[25]。

2015-2018 年间,自悬浮支撑剂在苏北油田、吉

林油田、延长油田等油井进行应用,压后单井产量增加,比同区块邻井增产 1~2 倍^[26]。2017 年,在四

川盆地致密砂岩气井进行先导试验,压后效果一般。自悬浮支撑剂的国内应用情况见表 3。

表 3 自悬浮支撑剂国内应用情况
Table 3 Application of self-suspension proppant in China

应用区块	井深/m	井温/ ℃	储层情况			工艺	排量/ (m ³ ·min ⁻¹)	砂比/ %	返排 率/%	应用评价
			孔隙度/ %	渗透率/ mD						
苏北油田	2 373 ^①	/	20	50.50	/		2.4~2.6	/	/	日增油 6.87 t,平均产量的三倍
吉林油田	1 348	65	/	20.00	前置液+清水携砂		2.5	18~30	35	日产油 0.8 t(压前 0.1 t/d)
延长油田 X-1	1 103 ^②	53	/	/	前置液;聚合物压裂液; 活性水;1%助排剂+防膨剂 1%		1.8	29	/	初期 2.8 t/d,3 个月内 1.7 t/d,约邻井的两倍
苏北砂岩油气藏陈 101 井	2 350	84	/	/	前置液;0.22%瓜胶+0.2%交联剂; 活性水;0.4%助排剂+0.2%防膨剂		1.8~2.6	18~30	35	产油 8.33 t/d,常规压裂井的两倍
四川致密砂岩气井	2 000	55	10	0.23	前置液+活性水携砂		3.0~4.0	19	59	效果一般,未改造到主力产层 JP ₃ ²

①差油层;②低产井。

从国内现场应用的情况可知,自悬浮支撑剂可以应用于油井和气井,应用井深多在中浅层(1 000~2 000 m),井温不高(53~84 ℃),油井的施工排量为 1.8~2.6 m³/min,气井为 3~4 m³/min,砂比控制在 18%~30%,从改造效果上看,油井改造效果较好;文献中的气井由于未改造到主力产层 JP₃²,导致改造效果一般。

自 2018 年,中石化西南分公司和中石化西南石油工程公司进行了自悬浮支撑剂的技术攻关,2020 年已在威远页岩气井开展自悬浮支撑剂的现场应用。目前,应用 4 井次,施工成功率 100%。

4 发展趋势

(1)自悬浮支撑剂各项性能良好,可在致密气和页岩气井中推广应用。应加强配套工艺研究,为其大规模应用提供保障。

(2)自悬浮支撑剂覆膜材料和覆膜工艺依旧是研究热点,使用表面改性技术,如单体分子聚合、ATRP 改性技术等,从分子层面改性支撑剂,形成界面稳定的改性支撑剂。

(3)自悬浮支撑剂的评价还不够全面,重要实验方法和参数未形成统一标准。常规压裂液和支撑剂的评价方法对于自悬浮支撑剂不完全适用,因此需要建立针对自悬浮支撑剂特殊性能的相关评价方法。

(4)自悬浮支撑剂的抗温能力还需进一步提高。

致谢:感谢西南石油工程有限公司井下作业分公司同意本文公开发表。

参考文献

[1] 刘艳艳,刘大伟,刘永良,等. 水力压裂技术研究现状及发展趋势[J]. 钻井液与完井液,2011,28(3):75-78.
LIU Yanyan, LIU Dawei, LIU Yongliang, et al. Study progresses of hydraulic fracturing technology [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2011,28(3):75-78.

[2] 李小刚,廖梓佳,杨兆中,等. 压裂用低密度支撑剂研究进展和发展趋势[J]. 硅酸盐通报,2018,37(10):3132-3135.
LI Xiaogang, LIAO Zijia, YANG Zhaozhong, et al. Development and prospect of fracturing lightweight proppants [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018,37(10):3132-3135.

[3] 黄博,熊炜,马秀敏,等. 新型自悬浮压裂支撑剂的应用[J]. 油气藏评价与开发,2015,5(1):67-70.
HUANG Bo, XIONG Wei, MA Xiumin, et al. Application of novel self suspending fracturing proppant [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2015,5(1):67-70.

[4] 董林芳,陈新阳. 自悬浮支撑剂的性能评价与现场应用[J]. 石油钻探技术,2018,46(6):90-94.
DONG Linfang, CHEN Xinyang. Performance evaluation and field application of a self-suspending proppant [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018,46(6):90-94.

[5] 傅玉,李永明,丁咚. 川西地区自悬浮支撑剂加砂压裂技术先导试验[J]. 油气井测试,2018,27(1):42-47.
FU Yu, LI Yongming, DING Dong. Field test of self-suspending proppant for sand fracturing technology in West Sichuan[J]. Well Testing, 2018,27(1):42-47.

[6] 邓琪. 自悬浮支撑剂性能评价及缝内输送规律研究[D]. 成都:西南石油大学,2019.
DENG Qi. Performance evaluation and study on the law of in-slot transportation of self-suspending proppant [D].

- Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
- [7] 张鑫,王展旭,汪庐山,等. 膨胀型自悬浮支撑剂的制备及性能评价[J]. 油田化学,2017,34(3):449-455.
ZHANG Xin, WANG Zhanxu, WANG Lushan, et al. Preparation and performance evaluation of intumescent self-suspending proppant [J]. Oilfield Chemistry, 2017, 34(3):449-455.
- [8] 张龙胜,秦升益,雷林,等. 新型自悬浮支撑剂性能评价与现场应用[J]. 石油钻探技术,2016,44(3):105-108.
ZHANG Longshen, QIN Shengyi, LEI Lin, et al. Property evaluation and field applications of a new self-suspending proppant [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(3):105-108.
- [9] 张天成,薛建国,刘现伟. 一种用于清水压裂的自悬浮支撑剂及其制备方法:CN 104893707A [P]. 2015-09-09.
- [10] 荣敏杰,许永升,于庆华. 压裂用低摩阻自悬浮支撑剂的制备方法:CN 105754580A [P]. 2016-03-25.
- [11] 候孟婧,马沁玥,马永敏,等. 一种自悬浮支撑剂及其制备方法:CN 106675548A [P]. 2017-05-17.
- [12] 王长太,张东言,王万里,等. 一种应用于清水压裂体系的自悬浮支撑剂:CN 106147746A [P]. 2016-11-23.
- [13] 左明明,袁续周,左晓兵,等. 一种制备自悬浮陶粒的新方法:CN 106281298A [P]. 2017-01-04.
- [14] 张鑫. 自悬浮支撑剂的制备及性能评价[D]. 青岛:青岛科技大学,2017.
ZHANG Xin. Preparation and performance evaluation of self-suspended proppant [D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2017.
- [15] 张锁兵,赵梦云,苏长明,等. 一种自悬浮支撑剂及其制备方法:CN 107459986A [P]. 2017-12-12.
- [16] 王历历,李宪文,丁里,等. 一种用于滑溜水压裂的气悬浮支撑剂及其制备方法和使用方法:CN 106832145A [P]. 2017-06-13.
- [17] 马奥尼 R P,索恩 D S,赫尔灵 M K,等. 用于水力压裂的自悬浮支撑剂:CN 104379697A [P]. 2015-02-25.
- [18] 索恩 D S,马奥尼 R P,赫尔灵 M K,等. 耐湿自悬浮支撑剂:CN 106103891A [P]. 2016-11-09.
- [19] 田中原,卢祥国,曹伟佳,等. 自悬浮与普通支撑剂裂缝导流能力实验研究[J]. 石油化工高等学校学报,2019,32(3):33-38.
- TIAN Zhongyuan, LU Xiangguo, CAO Weijia, et al. Experimental study on fracture conductivity of self suspension and ordinary proppant [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2019,32(3):33-38.
- [20] ZHANG Jingchen, LIU Kaiyu, CAO Ming. Experimental study on modified polyacrylamide coated self-suspending proppant [J]. Fuel, 2017,199(2):185-190.
- [21] 孟雪. 包覆聚合物类自悬浮支撑剂性能评价方法研究[J]. 中国石油和化工标准与质量,2019,39(14):3-5.
MENG Xue. Property evaluation of polyacrylamide coated self-suspending proppant [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2019,39(14):3-5.
- [22] KINCAID K P, SNIDER P M, HERRING M, et al. Self-suspending proppant [C]. SPE 163818, 2013.
- [23] ABOUSHABANA M, GOLDSTEIN B, VANZEELAND A. Self-suspending proppant transport technology increases stimulated reservoir volume and reduces proppant pack and formation damage [C]. SPE 174867, 2015.
- [24] RADWAN A. A multifunctional coated proppant: A review of over 30 field trials in low permeability formations [C]. SPE 187329, 2017.
- [25] 吴俊. 一种水凝胶覆膜自悬浮支撑剂的性能评价与应用[J]. 石油知识,2018(2):54-55.
WU Jun. Property evaluation and applications of self-suspending proppant [J]. Petroleum Knowledge, 2018(2):54-55.
- [26] 李占争. 自悬浮支撑剂的研发与应用[J]. 化学工程与装备,2017(6):95-96.
LI Zhanzheng. Preparation and application of self-suspending proppant [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2017(6):95-96.

编辑 刘振庆

第一作者简介:梁莹,女,1988年出生,硕士,工程师,2014年毕业于西南石油大学化学工程专业,现在从事储层改造工作液及材料的研究工作。电话:0838-2607466,15282820940; Email:scslcly@163.com。通信地址:四川省德阳市金沙江西路699号,邮政编码:618000。