



## 双壳型覆膜支撑剂DSCP的研制及现场试验

张龙胜 王维恒

### Preparation and Field Test of Double-Shell Coated Proppant (DSCP)

ZHANG Longsheng, WANG Weiheng

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023014>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 南海低渗透储层支撑剂导流能力试验研究

Experimental Study of Proppant Conductivity in Low Permeability Reservoirs in the South China Sea

石油钻探技术. 2021, 49(6): 86–92 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021064>

#### 自悬浮支撑剂的性能评价与现场应用

Performance Evaluation and Field Application of a Self-Suspending Proppant

石油钻探技术. 2018, 46(6): 90–94 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018144>

#### 压实与嵌入作用下压裂裂缝导流能力模型建立与影响因素分析

Propped Fracture Conductivity Evolution under a Combination of Compaction and Embedment: Establishing a Model and Analyzing the Influencing Factors

石油钻探技术. 2018, 46(6): 82–89 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018148>

#### 双级双速钻井工具设计与现场试验

The Design and Field Testing of Two-Stage and Two-Speed Drilling Tools

石油钻探技术. 2019, 47(1): 59–64 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019010>

#### 免钻式膨胀管补贴技术研究及现场试验

Research and Field Test of Non-Drilling Plug Expandable Casing Patching Technology

石油钻探技术. 2017, 45(5): 73–77 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201705013>

#### 压裂多级裂缝内动态输砂物理模拟实验研究

Experimental Study on the Physical Simulation of Dynamic Sand Transport in Multi-Stage Fractures

石油钻探技术. 2020, 48(4): 106–110 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020093>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2023014

引用格式: 张龙胜, 王维恒. 双壳型覆膜支撑剂 DSCP 的研制及现场试验 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(1): 91-97.

ZHANG Longsheng, WANG Weiheng. Preparation and field test of double-shell coated proppant(DSCP) [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(1): 91-97.

## 双壳型覆膜支撑剂 DSCP 的研制及现场试验

张龙胜, 王维恒

(中国石化华东油气分公司石油工程技术研究院, 江苏南京 210004)

**摘 要:** 压裂深层页岩气井时, 要求所用支撑剂具有良好的抗压强度和导流能力。为了寻找一种抗压强度高、导流能力好且价格适中的适用于高闭合压力油气井压裂的支撑剂, 以酚醛树脂、多元醇聚合物和固化剂等为原材料, 采用物理表面涂覆和化学改性相结合的方法, 按照一定质量比制备了双壳型覆膜支撑剂 DSCP。DSCP 内壳的主要成分为酚醛树脂, 用于提高抗压强度; 外壳的主要成分是惰性合成树脂, 在进一步提高抗压强度的同时, 提高支撑剂的导流能力。室内评价了 DSCP 的抗压强度、导流能力等性能, 结果为, DSCP 在压力 69 和 86 MPa 下的破碎率分别为 1.21% 和 2.35%, 在温度 90 °C、压力 90 MPa 下的导流能力为 3.12 mD·cm, 表明其具有良好的抗压强度和导流能力。现场试验表明, 相较于使用陶粒压裂的水平井, 在达到相同压裂规模和相当工艺参数的前提下, 使用 DSCP 时支撑剂费用降低 30% 左右。研究结果表明, DSCP 能够在高闭合压力井压裂中使用, 具有较好的推广应用前景。

**关键词:** 支撑剂; 双层覆膜; 导流能力; 研制; 性能评价; 现场试验

中图分类号: TE357.1<sup>+</sup>2

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2023)01-0091-07

## Preparation and Field Test of Double-Shell Coated Proppant (DSCP)

ZHANG Longsheng, WANG Weiheng

(Petroleum Engineering Research Institute, Sinopec East China Oil & Gas Company, Nanjing, Jiangsu, 210004, China)

**Abstract:** The fracturing development of deep shale gas wells requires that proppants should have good compressive strength and flow conductivity. Therefore, phenol-formaldehyde resins, polyol polymers, and curing agents were taken as raw materials to prepare the double-shell coated proppant (DSCP) by a certain mass ratio with the combination of physical surface coating and chemical modification methods. The effort was to find a proppant with high compressive strength, good flow conductivity, and moderate costs. It could be applied to the fracturing of oil and gas wells with high closure pressure. For the prepared DSCP, its inner shell was mainly made of phenol-formaldehyde resins to enhance the compressive strength, and the outer shell was mainly made of inert synthetic resins to further improve the compressive strength and strengthen the flow conductivity. Laboratory experiments were carried out to evaluate the performance of DSCP, such as compressive strength and flow conductivity. The experimental results indicated that the crushing rates of DSCP at 69 and 86 MPa were 1.21% and 2.35% respectively, its flow conductivity was 3.12 mD·cm at 90 °C and 90 MPa. In other words, DSCP had good compressive strength and flow conductivity. Field tests showed that compared with the case of horizontal wells fractured with ceramisite, the cost of proppants could be reduced by about 30% on the premise of the same fracturing scale and technical parameters. The research result suggests that DSCP can be applied to the fracturing of wells with high closure pressure and has good prospects of popularization and application.

**Key words:** proppant; double-shell coated; flow conductivity; development; performance evaluation; field test

收稿日期: 2022-03-09; 改回日期: 2022-12-13。

作者简介: 张龙胜 (1968—), 男, 湖北鄂州人, 1990 年毕业于江汉石油学院油田化学专业, 高级工程师, 主要从事采油采气工艺方面的研究工作。E-mail: 183911057@qq.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目“常压页岩气钻完井及配套工艺技术研究”(编号: P21087-5)资助。

压裂开发深层页岩气藏时,要求所用支撑剂具有良好的抗压强度和导流能力,这是深层页岩气效益开发的关键<sup>[1-2]</sup>。压裂施工材料以“压裂液+支撑剂”为主,主要通过压裂液将支撑剂运移到裂缝中,起到防止裂缝闭合并形成有效通道的作用。支撑剂的抗压强度越高,导流能力越强,储层改造效果越好,增产效果越好<sup>[3-5]</sup>。传统支撑剂主要为石英砂、传统覆膜砂和陶粒,其使用量占压裂支撑剂的90%以上。但是,石英砂抗压强度不够,不能应用于高闭合压力的油气井;传统覆膜砂在高温高闭合压力下覆膜的树脂层易软化黏结,导致导流能力变差,影响后期排水产气;陶粒具有优异的抗压强度,但体积密度大、价格高,限制了其大规模使用<sup>[6]</sup>。因此,在保证压裂效果的前提下降低支撑剂成本,是目前页岩气开发中的一大难题。

截至目前,国内外对覆膜支撑剂已进行了大量研究<sup>[7-13]</sup>,以酚醛树脂、环氧树脂及其他添加剂,采用不同方法制得了一些覆膜支撑剂,比如:李祥<sup>[14]</sup>以水性聚氨酯和酚醛树脂为覆膜材料,制备出体积密度 $1.48\text{ g/cm}^3$ 、69 MPa压力下破碎率为1.09%的覆膜石英砂;徐泉等人<sup>[15]</sup>以石墨烯和纳米复合材料为原料,研制出体积密度 $1.41\text{ g/cm}^3$ 、69 MPa压力下破碎率为2.5%的悬浮型支撑剂。这些支撑剂抗压强度高,但原材料价格昂贵,难以规模化应用。另外,夏冰冰<sup>[16]</sup>用改性二元共混树脂,通过超声搅拌制备出覆膜石英砂,其53 MPa压力下的破碎率为2.61%;王萌等人<sup>[17]</sup>制备的超低密度树脂覆膜砂,具有良好的运移能力,其52 MPa压力下的破碎率为8.2%;R. B. Reddy<sup>[18]</sup>以二氧化钛和高分子聚合物为覆膜材料制得一种覆膜支撑剂,具有良好的化学稳定性,抗压强度可达55 MPa。但这3种支撑剂的不足在于,只能适用于压裂闭合压力60 MPa以下的地层。S. Monastiriotis等人<sup>[19]</sup>以多元树脂为原料制得的固结增强型覆膜支撑剂,抗压强度可达82.7 MPa;L. K. Vo等人<sup>[20]</sup>在对支撑剂覆膜时,采用湿法覆膜工艺进行覆膜,能克服高温下软化黏结的问题。但上述2种支撑剂由于技术保护,难以在国内进行大规模推广应用。

基于上述分析,笔者以石英砂、酚醛树脂、多元醇聚合物、固化剂等为原材料,通过物理涂覆和化学改性相结合的方法进行二次覆膜制得双壳型覆膜支撑剂DSCP。然后通过室内性能评价试验证明DSCP具有良好的抗压强度和导流能力。最后进行了现场试验,现场试验中压裂规模及工艺参数均与

同规格陶粒相当,说明DSCP适用于69 MPa以上高闭合压力油气井压裂。

## 1 双壳型覆膜支撑剂DSCP的制备

### 1.1 DSCP的结构设计

以石英砂、酚醛树脂、多元醇聚合物和固化剂等为原材料,用物理涂覆和化学改性相结合的方法,通过控制温度、时间和加料顺序,在支撑剂表面形成内外两层“壳”。其中,选用石英砂或者河砂,能大幅度降低产品成本;内壳的主要成分为工业上覆膜石英砂最常用的酚醛树脂,用于提高支撑剂的抗压强度;外壳选用多元醇聚合物合成的惰性合成树脂,在进一步提高抗压强度的同时,能有效改善高温下软化黏结,提高支撑剂的导流能力。DSCP的结构如图1所示。

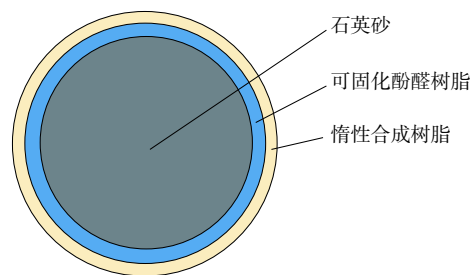


图1 DSCP的结构

Fig.1 Structure of DSCP

### 1.2 制备用材料及相关仪器

主要材料:酚醛树脂、多元醇聚合物、固化剂(六次甲基四胺)、硅烷偶联剂(KH550)、增塑剂(邻苯二甲酸二丁酯)、润滑剂(硬脂酸钙)、二乙烯三胺和金属催化剂,以上材料均为工业级;40/70目和70/140目的石英砂和陶粒。

主要仪器:电子分析天平,全自动智能混砂机,高温恒温试验箱,马弗炉,视体显微镜,长期裂缝导流能力评价装置,自动振筛机。

### 1.3 DSCP的制备步骤

1)将经过筛分的石英砂用蒸馏水、有机试剂进行清洗,然后烘干;

2)将石英砂放在硅烷偶联剂中浸泡1 h,然后将石英砂加热至 $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

3)将石英砂迅速转入全自动智能混砂机中,按一定比例依次加入酚醛树脂、增塑剂、固化剂和润滑剂,搅拌、冷却至 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

4)按一定比例依次加入多元醇聚合物、二乙烯

三胺、固化剂和金属催化剂, 搅拌、冷却至 50 ℃;

5) 加入硬脂酸钙, 搅拌、冷却至室温;

6) 将部分粘结的固体破碎后, 用不同目数的振动筛分选出相应规格产品, 封袋保存, 即得双壳型覆膜支撑剂 DSCP。

## 2 DSCP 的性能评价

### 2.1 体积密度评价试验

体积密度是影响支撑剂在压裂液中悬浮及其运移能力的重要因素, 体积密度越小, 在压裂液中的悬浮性越好, 越能运移到裂缝远端, 压裂改造效果越好。将酚醛树脂和多元醇聚合物的质量之和与石英砂质量的比定义为聚合物总量, 理论上, 当加入的聚合物均能完全覆在石英砂上时, 聚合物总量越大, DSCP 体积密度越小。暂定酚醛树脂和多元醇聚合物的质量比为 1:1, 将按不同聚合物总量 (1.0%~5.0%) 覆膜的石英砂 (DSCP), 按照支撑剂体积密度测定方法分别测出其体积密度, 并与石英砂 (聚合物总量为 0%) 进行对比, 结果如图 2 所示。

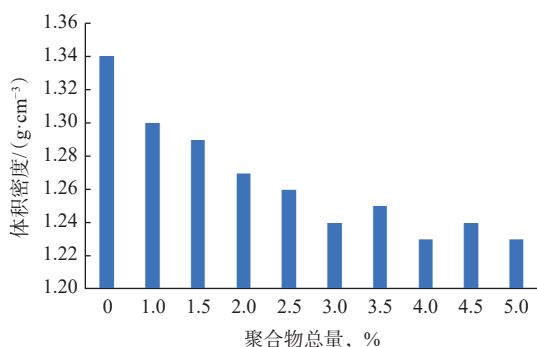


图 2 不同聚合物总量 DSCP 的体积密度

Fig.2 Bulk density of DSCP with different total polymer amount

由图 2 可知: 随着聚合物总量增大, DSCP 体积密度逐渐降低; 聚合物总量大于 3.0% 时, DSCP 体积密度的变化开始不规律, 可能是由于石英砂圆球度和粒径大小分布不同所致, 推测当聚合物总量为 3.0% 时有效聚合物覆膜量达到最大, 故认为最佳聚合物总量为 3.0%。

### 2.2 灼烧损耗评价试验

用灼烧损耗率表征 DSCP 的覆膜程度。将清洗过的石英砂置于 950 ℃ 马弗炉中灼烧 2 h 后, 取出置于干燥箱中冷却至室温, 按照不同聚合物总量 (1.0%~5.0%) 进行覆膜; 再用振筛机筛选出 40/70 目

DSCP 将其置于 950 ℃ 马弗炉中灼烧 2 h, 然后取出并在干燥器中冷却至室温。通过称量灼烧前后的质量, 计算其灼烧损耗率, 结果如图 3 所示。

由图 3 可知, 灼烧损耗随着聚合物总量增加而增加, 当聚合物总量大于 3.0% 时, 灼烧损耗率几乎不变。聚合物总量在 3.0%~5.0% 时, DSCP 的灼烧损耗率与聚合物总量 3.0% 时的灼烧损耗率相近, 证明聚合物总量为 3.0% 时已经达到覆膜最大值。结合体积密度试验结果, 推测由于石英砂的圆球度不同和粒径大小分布存在差异, 导致聚合物总量在 3.0%~5.0% 时 DSCP 的有效覆膜量呈不规则变化, 故确定最佳聚合物总量为 3.0%。

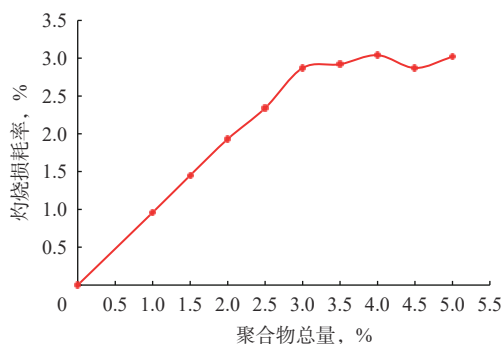


图 3 不同聚合物总量 DSCP 的灼烧损耗率

Fig.3 Burning loss rate of DSCP with different total polymer amount

### 2.3 抗压强度和导流能力评价试验

支撑剂最大的作用是填充支撑地层裂缝, 为后期排采提供通道。抗压强度往往决定支撑剂的适用范围, 抗压强度越高, 适用范围越广, 越能在高闭合压力下填充并支撑裂缝。孔隙度是直接表现排水采气效率的性能, 在实验室通常以导流能力来表征孔隙度, 孔隙度越高, 导流能力越强, 排水采气效果越好。抗压强度和导流能力在一定程度上呈正相关关系, 即抗压强度越高, 导流能力越强, 但某些支撑剂在高温高压下易变形黏结导致孔隙度降低, 此时抗压强度可能没有明显变化, 但导流能力会明显降低。所以, 要结合抗压强度和导流能力客观地评价支撑剂的综合性能。

控制聚合物总量为 3.0%, 将酚醛树脂和多元醇聚合物按不同质量比混合给石英砂覆膜, 测试 DSCP 在 69 和 86 MPa 压力下的破碎率和 90 MPa 压力下的导流能力, 结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 随着酚醛树脂与多元醇聚合物质量比减小, DSCP 的破碎率先降低后升高。两者质



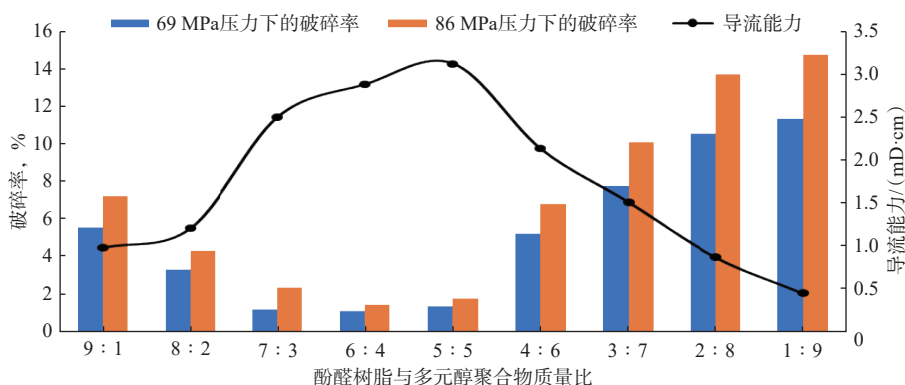


图4 酚醛树脂与多元醇聚合物质量比对 DSCP 主要性能的影响

Fig.4 Effect of mass ratio of phenolic resin to polyol polymer on main properties of DSCP

量比在 9:1~6:4 时,由于整体酚醛树脂比例大,抗压强度高,惰性合成树脂具有一定包裹能力,导致压碎的支撑剂吸附在外壳内,破碎率逐渐降低;随着多元醇聚合物比例增大,惰性树脂的防黏结能力变强,导流能力增强。质量比在 6:4~1:9 时,由于酚醛树脂量减少,抗压强度降低,抗压强度不够导致破碎率迅速升高。试验结果表明:酚醛树脂的加量决定抗压强度;导流能力受支撑剂破碎率和软化形变能力综合影响,破碎率越高、形变能力越强,导流能力越弱。酚醛树脂和多元醇聚合物的质量比在 9:1~5:5 时,多元醇聚合物加量增大,外壳惰性材料增多,支撑剂形变能力减弱,此时形变能力对导流能力的影响大于破碎率,导流能力增强;两者质量比在 5:5~1:9 时,破碎率对导流能力的影响大于形变能力,导流能力减弱。根据综合性能及性价比考虑,酚醛树脂与多元醇聚合物的最佳质量比为 6:4。

#### 2.4 不同温度下导流能力评价试验

导流能力是支撑剂非常重要的性能,特别是高温高压下的导流能力更贴合地层实际情况。常规酚醛树脂覆膜砂结构中的酚羟基和亚甲基易氧化,导致耐热性、抗氧化性受到影响,固化后的酚醛树脂受温度影响易软化、黏结,导流能力变差,影响后期返排液产出。为此,在室内以相同树脂加量制备出酚醛树脂覆膜砂和双壳型高强度覆膜砂 DSCP,并在温度 25~150 ℃、压力 10~90 MPa 条件下测试两者的导流能力变化情况,结果如图 5 和图 6 所示。

由图 5 可知:酚醛树脂覆膜砂的导流能力随温度变化较大,受温度影响较明显;温度由常温升至 100 ℃ 时,酚醛树脂覆膜砂不同压力下的导流能力均降低了一半以上;在 150 ℃ 温度、90 MPa 压力下酚醛树脂覆膜砂的导流能力仅为 0.18 mD·cm,表明

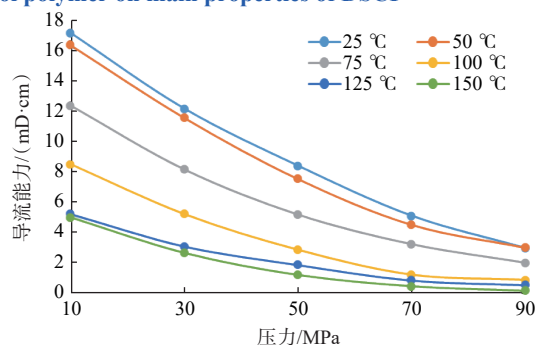


图5 酚醛树脂覆膜砂在不同温度和压力下的导流能力

Fig.5 Flow conductivity of sand coated with phenol-formaldehyde resins at different temperatures and pressure

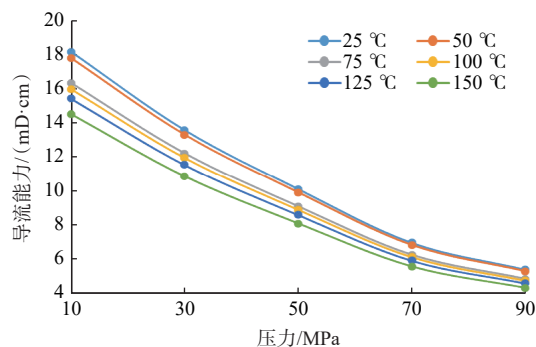


图6 DSCP 在不同温度和压力下的导流能力

Fig.6 Flow conductivity of DSCP at different temperature and pressure

此时酚醛树脂已软化黏结,支撑剂形变导致孔隙度急剧降低,导流能力变差。

由图 6 可知,DSCP 的导流能力随温度升高有所下降,但降幅远低于树脂覆膜砂,在温度 150 ℃、压力 90 MPa 下仍达 4.34 mD·cm,表明 DSCP 在高温高压下仍具有良好的导流能力。

#### 2.5 DSCP 的综合性能

利用长期裂缝导流能力评价装置,在室内评价

了树脂覆膜砂、DSCP 和陶粒在不同压力下的破碎率和导流能力。然后,利用视体显微镜观察树脂覆膜砂、DSCP 和陶粒试验前后的表面结构,并进行对比,以评价不同支撑剂的综合性能。树脂覆膜砂、DSCP 和陶粒在不同压力下的破碎率和在 90 ℃ 温度、不同压力下的导流能力见表 1,树脂覆膜砂、DSCP 和陶粒试验前及在 90 ℃ 温度、90 MPa 压力下试验后的表面结构如图 7 所示。

由表 1 可知: DSCP 的破碎率明显低于同规格的陶粒,说明该产品具有优异的抗压强度;导流能力略低于陶粒,一方面是由于石英砂的圆球度不如陶粒,另一方面是由于 DSCP 在高温高压条件下会轻微形变,颗粒之间的孔隙变小,但也明显优于树脂覆膜砂,表明 DSCP 具有良好的综合性能。

由图 7 可知,覆膜总量相同的树脂覆膜砂和 DSCP 圆球度差异不大(见图 7(a)和图 7(c)),说明

表 1 树脂覆膜砂、DSCP 和陶粒的综合性能

Table 1 Comprehensive properties of resin coated sand, DSCP and ceramsite

| 支撑剂          | 不同压力下的破碎率, % |        | 不同压力下的导流能力/(mD·cm) |        |        |        |        |
|--------------|--------------|--------|--------------------|--------|--------|--------|--------|
|              | 69 MPa       | 86 MPa | 10 MPa             | 30 MPa | 50 MPa | 70 MPa | 90 MPa |
| 40/70目树脂覆膜砂  | 11.54        | 15.23  | 11.10              | 6.61   | 2.86   | 1.63   | 0.88   |
| 40/70目DSCP   | 1.21         | 2.35   | 17.14              | 12.61  | 8.86   | 5.63   | 3.12   |
| 40/70目陶粒     | 5.73         | 7.12   | 18.73              | 13.95  | 9.77   | 6.59   | 3.86   |
| 70/140目树脂覆膜砂 | 8.11         | 11.66  | 9.93               | 4.73   | 2.81   | 0.53   | 0.31   |
| 70/140目DSCP  | 1.12         | 2.16   | 11.93              | 7.73   | 5.25   | 3.06   | 1.78   |
| 70/140目陶粒    | 4.64         | 6.23   | 13.40              | 9.23   | 6.51   | 4.12   | 2.43   |

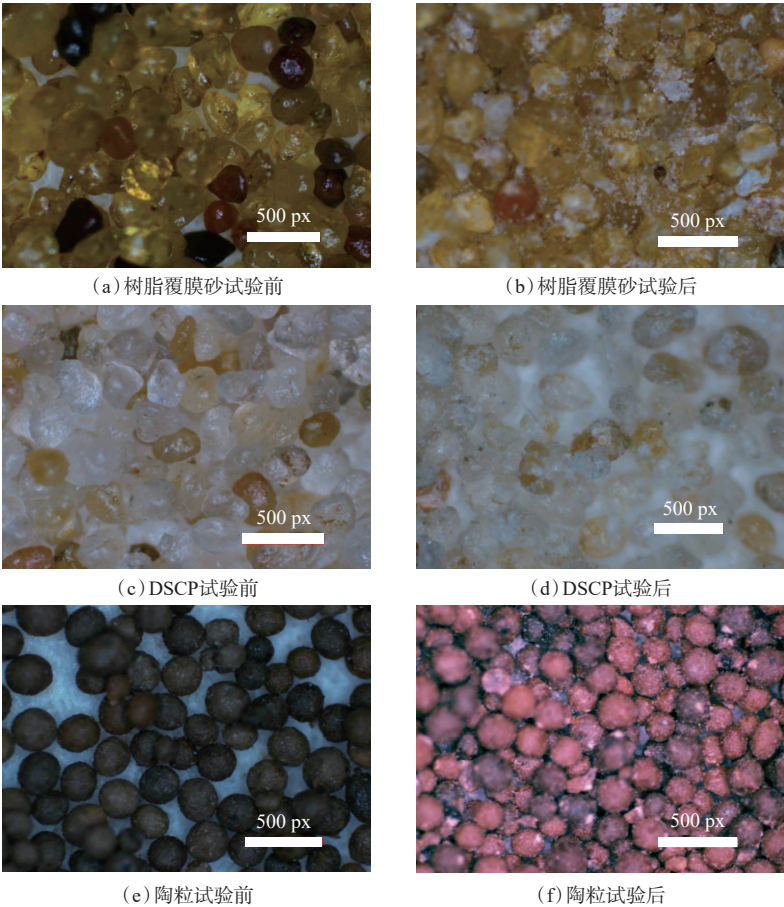


图 7 树脂覆膜砂、DSCP 和陶粒试验前后的表面结构

Fig.7 Surface structure of resin coated sand, DSCP and ceramsite before and after test

主要受石英砂自身圆球度的影响。树脂覆膜砂由于其覆膜的树脂软化黏结,导致其在高温高压下试验后黏结在一起(见图7(b)),覆膜的树脂已大量破碎、脱落,破碎颗粒附着在树脂表面,导致测试出的破碎率较低,但实际破碎率远高于测试结果;其次由于树脂软化黏结,支撑剂孔隙度降低,导流能力急剧变差。DSCP在高温高压下试验前后整体变化不大(见图7(c)和图7(d)),试验后有部分颗粒外壳破碎(见图7(d)),但几乎没有颗粒黏结情况,大部分依旧呈分散状态,整体情况与陶粒(见图7(e)和图7(f))类似,表明DSCP具有良好的抗压能力和导流能力。由于内壳酚醛树脂为黄色,外壳多元醇聚合物是白色,从图7(d)可以看出部分颗粒白色外壳破裂、脱落,露出黄色内壳,进一步证明DSCP具有双壳结构。

### 3 现场试验

双壳型覆膜支撑剂DSCP在涪陵页岩气田平桥南区块的JY03HF井进行了现场试验。该井是一口小井眼水平井,摩阻高、施工难度大。与其同期且同平台的3口井压裂时以陶粒为支撑剂,3口井的平均施工压力105 MPa,平均闭合压力80 MPa,最大砂比12%,平均单井加砂量 $1\,235\text{ m}^3$ ,平均单段加砂量 $95\text{ m}^3$ ,压裂后稳定平均产气量 $7.12\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。

根据现场实际情况,JY03HF井采用“高降阻率滑溜水+DSCP”的加砂模式。为了更好地评价DSCP的性能,在保证压裂施工安全的前提下,该井除了采用DSCP,其他所有参数均不变。JY03HF井的压裂施工曲线如图8所示。

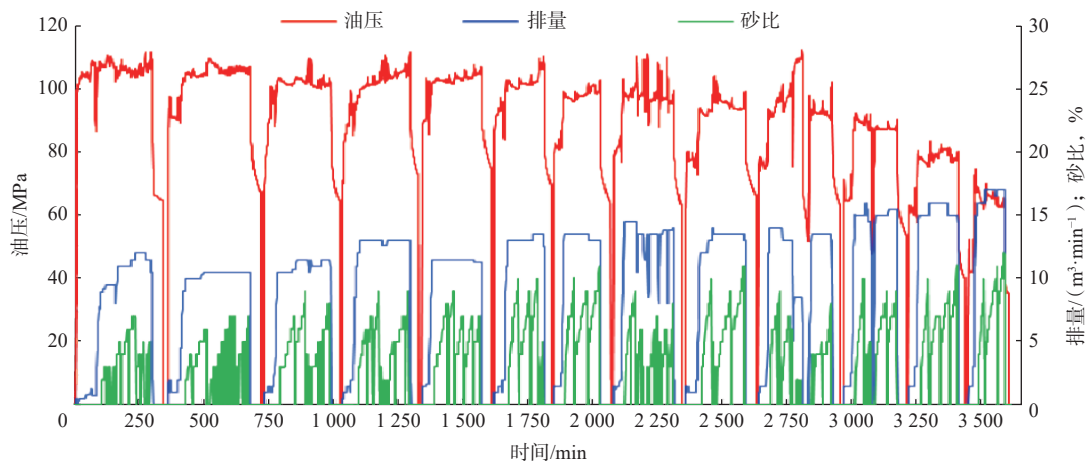


图8 JY03HF井的压裂施工曲线

Fig.8 Fracturing curve of Well JY03HF

由图8可知,JY03HF井施工中最高压力达110 MPa,最高排量 $16.5\text{ m}^3/\text{min}$ ,最大砂比12%,平均单段加砂量 $99.6\text{ m}^3$ ,总加砂量 $1\,300\text{ m}^3$ (40/70目和70/140目DSCP的质量比为6:4)。压裂规模与同平台3口以陶粒为支撑剂的井相当,全程无砂卡、砂堵等异常情况,顺利完成压裂作业。压裂结束后,稳定产气量达到 $8\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 以上,套压稳定在10 MPa左右。相较于使用陶粒的同压裂规模的水平井,JY03HF井压裂支撑剂费用降低30%左右,取得了良好的经济效益。

### 4 结 论

1)在室内以酚醛树脂、多元醇聚合物、固化剂

等为原材料,采用物理表面涂覆和化学改性相结合的方法,按一定质量比制备了双壳型覆膜砂支撑剂DSCP。室内评价结果表明,酚醛树脂和多元醇聚合物的质量比为6:4、聚合物总量为3.0%时制得DSCP的综合性能最佳。

2)DSCP在69和86 MPa压力下的破碎率分别为1.21%和2.35%,在90 MPa压力下的导流能力为 $3.12\text{ mD}\cdot\text{cm}$ ,表明其具有良好的抗压强度和导流能力。

3)现场试验表明,与以陶粒为支撑剂相比,在相同压裂规模和工艺参数下,采用DSCP时单井压裂支撑剂费用降低30%左右,DSCP具有较好的推广应用价值。

## 参 考 文 献

## References

- [1] 张锦宏. 中国石化页岩油工程技术现状与发展展望[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(4): 8–13.  
ZHANG Jinhong. Present status and development prospects of Sinopec shale oil engineering technologies[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(4): 8–13.
- [2] 蒋廷学, 王海涛. 中国石化页岩油水平井分段压裂技术现状与发展建议[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(4): 14–21.  
JIANG Tingxue, WANG Haitao. The current status and development suggestions for Sinopec's staged fracturing technologies of horizontal shale oil wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(4): 14–21.
- [3] 谭晓华, 丁磊, 胥伟冲, 等. 覆膜支撑剂导气阻水效果可视化试验研究[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(3): 117–123.  
TAN Xiaohua, DING Lei, XU Weichong, et al. Research on visualization experiment of the gas conduction and water blocking effects of coated proppants[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(3): 117–123.
- [4] 吴百烈, 杨凯, 程宇雄, 等. 南海低渗透储层支撑剂导流能力试验研究[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(6): 86–92.  
WU Bailie, YANG Kai, CHENG Yuxiong, et al. Experimental study of proppant conductivity in low permeability reservoirs in the South China Sea[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(6): 86–92.
- [5] 梁天成, 才博, 蒙传幼, 等. 水力压裂支撑剂性能对导流能力的影响[J]. 断块油气田, 2021, 28(3): 403–407.  
LIANG Tiancheng, CAI Bo, MENG Chuanyou, et al. The effect of proppant performance of hydraulic fracturing on conductivity[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(3): 403–407.
- [6] 光新军, 王敏生, 韩福伟, 等. 压裂支撑剂新进展与发展方向[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(5): 529–533.  
GUANG Xinjun, WANG Minsheng, HAN Fuwei, et al. Proppants for fracturing fluids: new progress made and direction of future development[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2019, 36(5): 529–533.
- [7] 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.
- [8] 黄博, 雷林, 汤文佳, 等. 自悬浮支撑剂清水携砂压裂增产机理研究[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(3): 459–464.  
HUANG Bo, LEI Lin, TANG Wenjia, et al. Stimulation mechanism of self suspension proppant in sand-carrying fracturing by water[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3): 459–464.
- [9] 李小刚, 廖梓佳, 杨兆中, 等. 表面改性技术在压裂支撑剂领域的应用[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(9): 2841–2844.  
LI Xiaogang, LIAO Zijia, YANG Zhaozhong, et al. Research on surface modified fracturing proppants[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(9): 2841–2844.
- [10] GALCHENKO R, LIU Qing, GAO Yan, et al. Completion and stimulation trends in North American unconventional plays and resulting impact on well productivity[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(10): 1–12.
- [11] XU Quan, FAN Fan, LU Zhaohui, et al. Reversible adhesion surface coating proppant[J]. Chinese Chemical Letters, 2021, 32(1): 553–556.
- [12] ZOU Yushi, MA Xinfang, ZHANG Shicheng, et al. The origins of low-fracture conductivity in soft shale formations: an experimental study[J]. Energy Technology, 2015, 3(12): 1233–1242.
- [13] MA Xiaoxia, TIAN Yuming, ZHOU Yi, et al. Sintering temperature dependence of low-cost, low-density ceramic proppant with high breakage resistance[J]. Materials Letters, 2016, 180: 127–129.
- [14] 李祥. 一种高强度聚氨酯覆膜支撑剂的制备及性能研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.  
LI Xiang. Study on the preparation and properties of a high strength polyurethane coating proppant[D]. Chongqing: Southwest University, 2018.
- [15] 徐泉, 田守峭, 盛茂, 等. 用于非常规储层水力压裂的覆膜支撑剂及制备和应用: CN201910328777.3[P]. 2019-08-23.  
XU Quan, TIAN Shouqiao, SHENG Mao, et al. Film coated proppant for hydraulic fracturing of unconventional reservoirs and its preparation and application: CN201910328777.3[P]. 2019-08-23.
- [16] 夏冰冰. 改性碳纳米管增韧树脂覆膜砂支撑剂的制备与性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.  
XIA Bingbing. Preparation and characterization of resin coated sand proppant toughened by modified carbon nanotubes[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [17] 王萌, 杨贤友, 石阳, 等. 树脂膜包覆的高分子复合材料支撑剂颗粒及其制法与应用: CN201710897128.6[P]. 2019-04-05.  
WANG Meng, YANG Xianyou, SHI Yang, et al. Preparation and application of polymer composite proppant particles coated with resin film: CN201710897128.6[P]. 2019-04-05.
- [18] REDDY R B, LIANG Feng. Coated proppants and methods of making and use thereof: US 2021/0171824[P]. 2021-06-10.
- [19] MONASTIRIOTIS S, MCDANIEL R R, MCCRARY A L, et al. Proppant with enhanced interparticle bonding: US 11098242 B2[P]. 2021-08-24.
- [20] VO L K, PRINCE P, PARTON C R. Wet-coated proppant and methods of making and using same: US11015113 B1[P]. 2021-05-25.

[编辑 令文学]