

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs. 2021064

引用格式: 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.

## 覆膜支撑剂导气阻水效果可视化试验研究

谭晓华<sup>1</sup>, 丁磊<sup>1</sup>, 胥伟冲<sup>2</sup>, 瞿霜<sup>3</sup>, 温中林<sup>4</sup>

(1. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川成都 610500; 2. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 四川成都 610041; 3. 四川川庆石油钻采科技有限公司, 四川广汉 618300; 4. 中国石油青海油田天然气开发公司, 青海格尔木 816000)

**摘 要:** 为评价覆膜支撑剂的导气阻水效果, 为应用覆膜支撑剂实现低渗水驱气藏控水稳产提供依据, 采用喷涂工艺制备了用于水侵低渗气井压裂的覆膜支撑剂, 采用水滴试验评价了其疏水性; 通过填砂管相对渗透率试验, 分析了覆膜支撑剂与普通石英砂的气-水两相渗透规律; 模拟渗流通道建立渗流模型, 进行了可视化水驱气试验, 研究驱替过程中气水在普通石英砂带和覆膜支撑剂带的运移方向和规律。通过相渗试验发现, 覆膜支撑剂具有提高气相相对渗透率、抑制水相流动的作用。通过可视化水驱气试验发现, 覆膜支撑剂具有疏水导气的作用, 与模型中处于普通石英砂带模拟井相比, 处于覆膜支撑剂带模拟井的产气量大幅提高、产水量大幅降低。TN 气田 X21 井采用覆膜支撑剂进行重复压裂后, 产气量恢复正常, 产水量大幅降低, 实现了二次生产。研究结果表明, 覆膜支撑剂具有较好的导气阻水效果, 可以为低渗水驱气藏控水稳产提供技术支持。

**关键词:** 覆膜支撑剂; 疏水导气; 水侵; 渗流模型; 相对渗透率

**中图分类号:** TE357.1<sup>+</sup>2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2021)03-0117-07

## Research on Visualization Experiment of the Gas Conduction and Water Blocking Effects of Coated Proppants

TAN Xiaohua<sup>1</sup>, DING Lei<sup>1</sup>, XU Weichong<sup>2</sup>, QU Shuang<sup>3</sup>, WEN Zhonglin<sup>4</sup>

(1. Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China; 2. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China; 3. CCDC Petroleum Drilling and Production Technology Co., Ltd., Guanghan, Sichuan, 618300, China; 4. Natural Gas Development Company, PetroChina Qinghai Oilfield Company, Geermu, Qinghai, 816000, China)

**Abstract:** To evaluate the effect of gas conduction and water blocking effects of coated proppants and provide the basis for achieving water control and stable production with coated proppant in low-permeability water flooding gas reservoirs, a coated proppant was developed for fracturing the water-invaded low-permeability gas wells with a spraying process, and water drop test was conducted to assess the hydrophobicity of the coated proppant. Relative permeability test of sand-filled pipes was carried out to analyze the rule for permeability of gas-water phase with the coated proppant and conventional quartz sand. To study the migration directions and laws of gas and water in the conventional quartz sand zone and the coated proppant zone during displacement, a seepage model was built by simulating the seepage channel, and a gas reservoir water flooding visualization experiment was conducted. The relative permeability test showed that the coated proppant could improve the relative permeability of the gas phase and inhibit the flow of the water phase. Through the visual water drive gas experiment, it is found that the coated proppant

收稿日期: 2020-08-14; 改回日期: 2021-04-06。

**作者简介:** 谭晓华 (1986—), 男, 四川成都人, 2008 年毕业于杭州电子科技大学电子信息工程专业, 2011 年获西南石油大学油气田开发工程专业硕士学位, 2015 年获西南石油大学油气田开发工程专业博士学位, 副教授, 硕士生导师, 主要从事油气藏渗流理论、油气藏工程方面研究。E-mail: xiaohua-tan@163.com。

**基金项目:** 国家科技重大专项“莺琼盆地高温高压气藏渗流机理与产能评价方法研究”(编号: 2016ZX05024-005)和“复杂气藏不同类型气井稳产能力及开发效果评价”(编号: 2016ZX05052-002)、国家自然科学基金青年科学基金项目“页岩气储层双分形孔隙-裂缝网络模型及气水传输机理研究”(编号: 51704246)、中国石油-西南石油大学创新联合体科技合作项目(编号: 2020CX010402)联合资助。

has the effect of "hydrophobic gas conduction". Compared with the simulated well in the conventional quartz sand zone in the model, the gas production of the simulated well in the coated proppant zone increased while its water production decreased. After re-fracturing with the coated proppant in the Well X21 of TN gas field, the gas production returned to normal and the water production plummeted, realizing the secondary production. The research results demonstrate that the coated proppant possesses a good gas conduction and water blocking effect, and can provide technical support for water control and stable production of low-permeability water drive gas reservoirs.

**Key words:** coated proppants; gas conduction and water blocking; water invasion; seepage model; relative permeability

目前我国大多数气藏均属于不同程度的水驱气藏,其中边底水活跃的气藏大概占40%~50%。对于水驱气藏,随着开发进行,地层压力不断降低,导致气藏周围的边底水进入储层的渗流通道,形成复杂的气水关系,可能出现水锥、水窜等现象;与此同时,气相相对渗透率大幅降低,并在井筒中形成积液,影响气井的产量,甚至会因水淹报废。因此,对于水驱气藏的开采应该采取适当的技术措施,阻止水体进入井筒,实现水驱气藏的有效开发。

为提高水侵气井的产量,实现气井二次生产的目的,可以对压裂支撑剂(石英砂等)进行覆膜,使其具有疏水导气的能力,利用其支撑压裂裂缝时,裂缝对气相具有高导流能力,并抑制水相流动。国内外关于覆膜支撑剂的研究较多,1970年B. M. Young<sup>[1]</sup>将糠醇或糠醇树脂涂覆在固体颗粒上,制成第一批覆膜支撑剂;20世纪80年代,国外学者将热固化树脂涂覆在骨料上,发明了预固化覆膜支撑剂,具有强度高、密度低、球圆度好和破碎率低等优点<sup>[2-3]</sup>;后来为解决压裂后地层出砂、返排吐砂的问题,研制了可固化的覆膜支撑剂<sup>[4-10]</sup>,在地层条件下,树脂在骨料上发生固化、胶结,形成阻止出砂、返排吐砂的过滤网;此后,相继研制出了自悬浮支撑剂<sup>[11-15]</sup>、疏水支撑剂<sup>[16-17]</sup>、自聚性支撑剂<sup>[18]</sup>和低密度支撑剂<sup>[19]</sup>等具有优异性能的覆膜支撑剂,解决了油气田压裂改造中的大多数问题。近年来,针对覆膜支撑剂强度、防出砂和防回流方面的研究较多,但对覆膜支撑剂疏水导气方面的研究较少<sup>[20]</sup>。

基于上述现状,笔者针对水侵气藏出水严重的问题,制备了一种覆膜支撑剂,通过可视化试验研究了覆膜支撑剂的导气阻水效果,以期应用覆膜支撑剂实现水驱气藏控水稳产提供依据。

## 1 覆膜支撑剂的制备

制备覆膜支撑剂所用覆膜剂是自主研发的一种常温固化型液体,其黏度为1.2 mPa·s,分子结构中的硅氧烷键(Si—O—Si)具有强大的键合能量,耐

温性能极好,在250℃的高温环境中也不发生分解。选取30/40目石英砂作为制备覆膜支撑剂的原材料,将覆膜剂均匀喷洒在石英砂表面,同时不断搅拌石英砂,覆膜剂会在石英砂表面形成一层均匀的薄膜,待薄膜风干固化之后会紧贴在石英砂表面,形成覆膜支撑剂。覆膜支撑剂具有光泽度高、丰满度高、透明性好和强度高等特点,并且覆膜能长时间保持稳定的低表面能,具有良好的疏水性和导气性。

为初步评价覆膜支撑剂的疏水性,分别将水滴在石英砂、覆膜支撑剂和经过高温流体冲刷的覆膜支撑剂上,观察亲水性,结果见图1。由图1可知:石英砂具有较强的亲水性,水滴到石英砂上,水会快速渗透;覆膜支撑剂具有疏水性,水滴到覆膜支撑剂上,水会停留在覆膜支撑剂表面,并且经高温流体冲刷后其仍然保持了稳定的疏水能力。

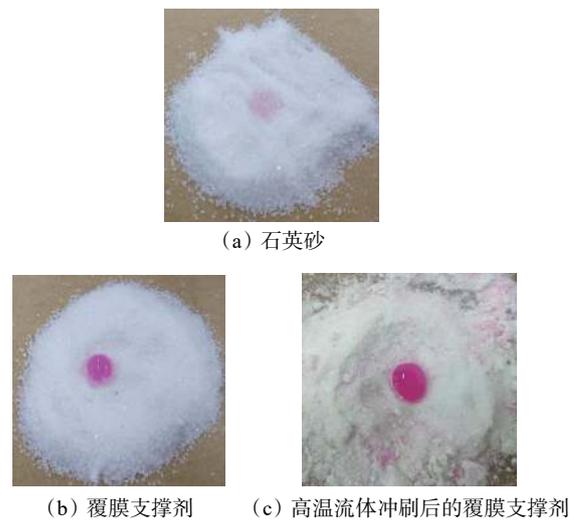


图1 石英砂和覆膜支撑剂的滴水试验结果

Fig.1 Water drop test results of conventional quartz sand and coated proppant

## 2 覆膜支撑剂相对渗透率试验

为了对比覆膜支撑剂与普通石英砂的气-水两

相渗透规律, 笔者将石英砂和覆膜支撑剂分别充填在相同尺寸的填砂管中, 充分压实后测定其气-水相的相对渗透率。

### 2.1 试验装置

试验装置主要由平流泵、压力表、填砂管、气液分离器、U形管和气量计组成(见图 2), 其中填砂管是试验装置的关键部分。压力表采用 YN60 型耐震真空负压表, 量程为 0~0.25 MPa。

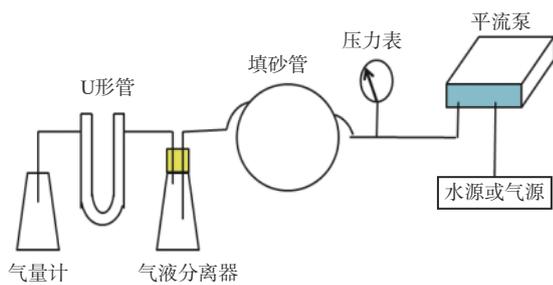


图 2 相对渗透率试验装置示意

Fig.2 Schematic diagram of device for relative permeability test

### 2.2 试验步骤

#### 2.2.1 制作填砂管

截取 2 根长度为 5 m 的透明胶管制作填砂管。该胶管外径 6.0 mm, 内径 4.0 mm。将 30/40 目的石英砂和覆膜支撑剂分别填充到 2 根透明胶管中, 采用“一堵一填”的填充方式, 即透明胶管一侧密封封堵, 从另一侧填充石英砂和覆膜支撑剂。填充过程中不停甩动透明胶管, 使填充物在作用力下完全接触, 达到充分压实的目的。待透明胶管填满并充分压实后, 在透明胶管两侧入口处填入纱布, 防止渗流过程中砂粒运移流失。

#### 2.2.2 相对渗透率试验

1) 用平流泵驱替地层水以一定的流速通过石英砂填砂管, 待填砂管出口端不再产气时, 表示填砂管已达到饱和地层水的状态。记录流量和填砂管进出口的压差, 连续测定 3 次水相渗透率, 其相对误差小于 3% 时, 以此水相渗透率作为水-气相对渗透率的基础值。

2) 调整出口气液分离器、U形管和气量计, 用平流泵从填砂管入口泵入空气, 开始气驱水, 记录各个时刻的驱替压力、产水量及产气量。

3) 气驱水至残余水状态, 测定残余水状态下的气相渗透率后, 结束试验。

4) 取下填砂管, 清洗、调整试验装置, 改用覆膜支撑剂填砂管重复上述试验。

### 2.3 试验结果及分析

按照石油天然气行业标准《岩石中两相流体相对渗透率测定方法》(SY/T 5345—2007)中相对渗透率的计算方法, 分别计算石英砂填砂管和覆膜支撑剂填砂管的气-水相对渗透率, 并绘制气-水相对渗透率曲线(见图 3)。从图 3 可以看出, 在相同试验条件下, 覆膜支撑剂的气相相对渗透率明显高于石英砂, 并且覆膜支撑剂的水相相对渗透率明显低于石英砂。由此可见, 覆膜支撑剂可以提高气相相对渗透率, 抑制水相流动, 即覆膜支撑剂具有疏水导气作用。

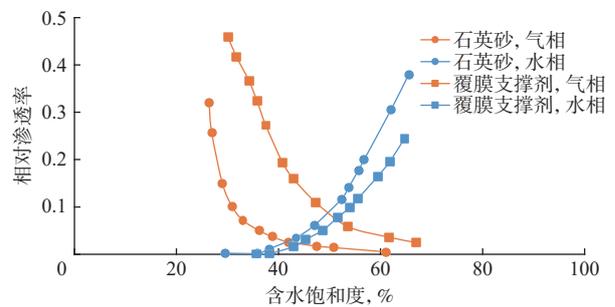


图 3 石英砂与覆膜支撑剂的气-水相相对渗透率曲线

Fig.3 Relative permeability curves of the gas-water phase with conventional quartz sand and coated proppant

## 3 导气阻水可视化试验

相对渗透率试验结果表明, 覆膜支撑剂具有良好的疏水导气作用, 为进一步了解覆膜支撑剂在层中的性质, 进行了导气阻水可视化试验, 即利用密封渗流模型, 在矩形渗流槽边部填入石英砂, 在渗流槽中部填入覆膜支撑剂, 模拟压实胶结的地层, 然后利用平流泵以恒速驱替的方式向渗流槽内注入染色的水, 将渗流槽中已经饱和的气驱替出来, 观察并记录驱替过程中气水运移的方向和运移规律。

### 3.1 试验装置

导气阻水可视化试验装置主要由平流泵、渗流模型、气液分离器、U形管和气量计组成(见图 4), 其中渗流模型是试验装置的关键部分。

根据相似性原则, 利用 0.60 m×0.40 m×0.01m 的渗流模型模拟半径 20 m、厚度 60 m 的圆形地层。假定水体为无限水体(即驱替压力恒定), 将渗流模型单井产气量作为地层单井累计产气量, 将渗流模型单井产水量作为地层单井累计产水量。

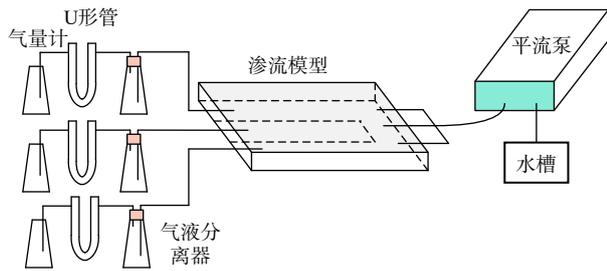


图 4 可视化试验装置示意

Fig. 4 Visualization experiment device schematic diagram

### 3.2 试验步骤

#### 3.2.1 渗流模型制作

渗流模型由 700 mm×500 mm×20 mm 的有机玻璃板制作而成，中间渗流槽尺寸为 600 mm×400 mm×10 mm，在渗流槽中部 500 mm×120 mm×10 mm 范围内填入 30/40 目覆膜支撑剂，形成中部覆膜支撑剂带，在渗流槽其余位置填入 30/40 目石英砂（见图 5），并充分压实，在渗流槽进口端和出口端填入纱布，以防止砂粒运移流失，盖上盖板、并用螺杆固定。

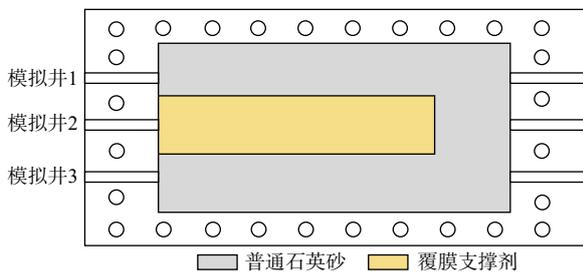


图 5 渗流模型

Fig.5 Seepage model

#### 3.2.2 可视化试验

将试验装置的各部分连接好，并确保其密封性，采用恒速 ( $v=6 \text{ mL/min}$ ) 驱替的方法，用染色的水驱替渗流模型中饱和的气体，观察气水运移规律，并分别记录 3 口模拟井的累计产水量和累计产气量；当气液分离器中不再产生气体时，说明渗流模型中的气体被驱替完毕，再记录一段时间的数据后，关闭平流泵，结束试验。

### 3.3 试验结果及分析

图 6 所示为不同驱替时间观察到染色水的运移情况。图 7 所示为 3 口模拟井不同驱替时间下的生产曲线。

从图 6 可以看出，当水体驱替速度为 6 mL/min 时，经过 40 min 的驱替，渗流模型基本被染色水充满。从图 6 还可以看出，整个驱替过程大致分为 4 个

阶段：

第 1 阶段，即堵水阶段，驱替时间 0~20 min。在此阶段，当驱替水体在压差作用下渗入砂体后，沿着石英砂体缓慢渗流。由于石英砂具有亲水性，毛细管力方向指向水体前进方向，毛细管力与驱替压力的合力形成推动水体前进的动力；而覆膜支撑剂具有疏水性，毛细管力方向与水体前进方向相反，形成阻止水体前进的阻力（见图 8）；并且根据图 7，模拟井 2 的产气量明显高于两侧，由于覆膜支撑剂具有导气性，因此推测出上下两侧部分被驱替出的气体通过覆膜支撑剂带流出模型（见图 9）。

第 2 阶段，即突破阶段，驱替时间 20~30 min。随着水体不断侵入，越来越多的水体聚集在覆膜支撑剂与石英砂交界处，来不及向两侧运移，使水体驱替压力逐渐增大，水体开始向覆膜支撑剂带内运移（见图 10）。根据图 7，此阶段模拟井 2 的产气量仍然远高于上下两侧模拟井，因此推测出模型内上下两侧部分被驱替出的气体进入覆膜支撑剂带内，与覆膜支撑剂带内的气体一同被驱替出模型（见图 11）。

第 3 阶段，即偏向阶段，驱替时间 30~40 min。当水体驱替压力大于覆膜支撑剂的突破压力时，其开始向覆膜支撑剂带内运移，但在运移通道上仍不断受到覆膜支撑剂毛细管力的作用；随着水体不断向前运移，水体驱替压力逐渐降低，而覆膜支撑剂的毛细管力不变，导致覆膜支撑剂带内的水体运移速度逐渐降低，使覆膜支撑剂带内水体聚集。随着水体重新聚集，水驱气前缘压力升高，此时，处于覆膜支撑剂带边界处的水体将在压差作用下向石英砂带运移，使水体开始偏向两侧石英砂带（见图 12）。由第 3 阶段水体流向（见图 13）可知，上侧石英砂带仍显示有未被水体侵入的白色条带，这是因为中部覆膜支撑剂带水体向两侧运移时，进入上侧石英砂带后只是聚集在了石英砂带边部。此阶段因为石英砂带气水前缘较为靠近，模型中的气体大部分通过对应的模拟井被驱替出（见图 14）。

第 4 阶段，即水淹阶段，驱替时间 40~60 min，此阶段模型两侧完全被水体侵入，模型中部还存在部分剩余气。根据图 7，模型上下两侧产水量剧增，而中部覆膜支撑剂带产水量一直较低，说明了覆膜支撑剂具备良好的疏水性。

根据以上试验和分析结果可以预测，水驱气藏使用覆膜支撑剂进行压裂时，能够实现导气阻水的目的，提高气井产量。

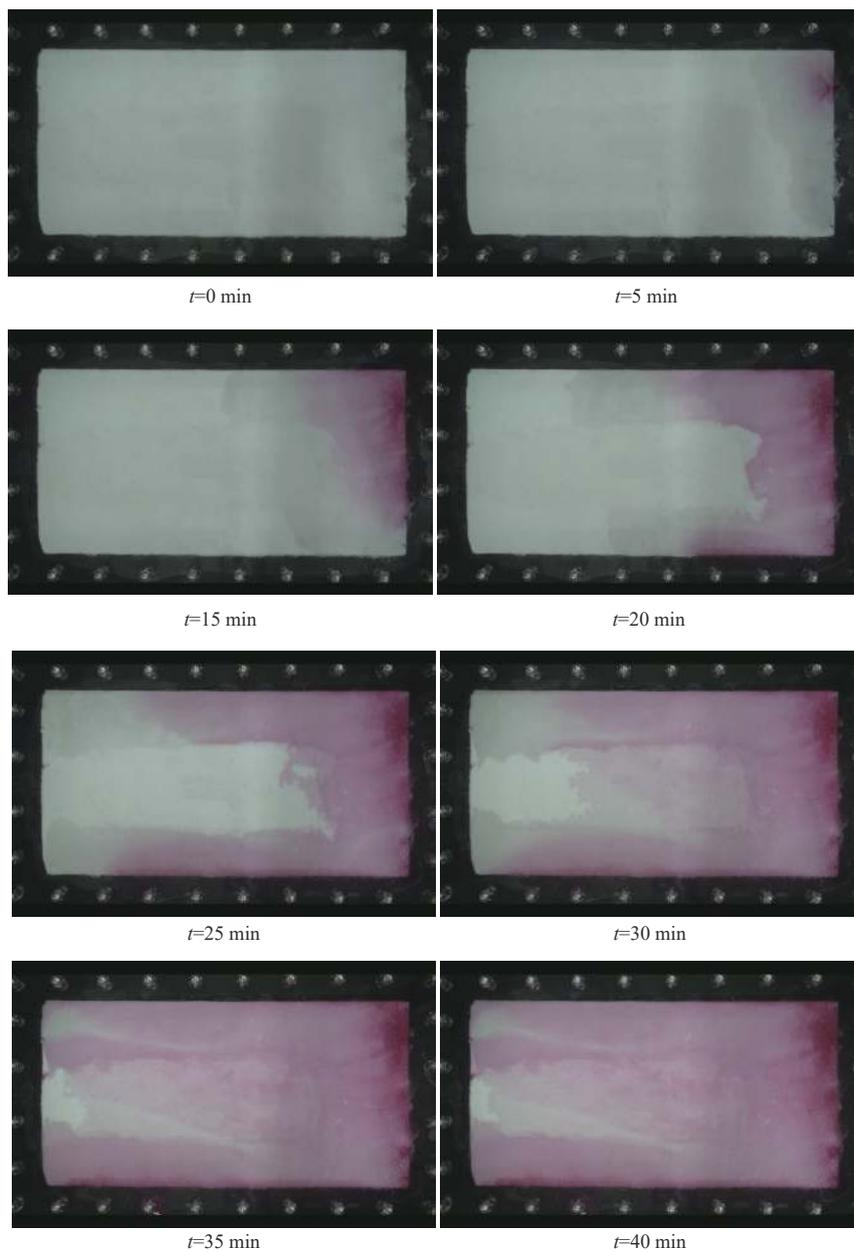


图 6 可视化试验染色水运移情况  
Fig.6 Dyed water migration in visualization experiment

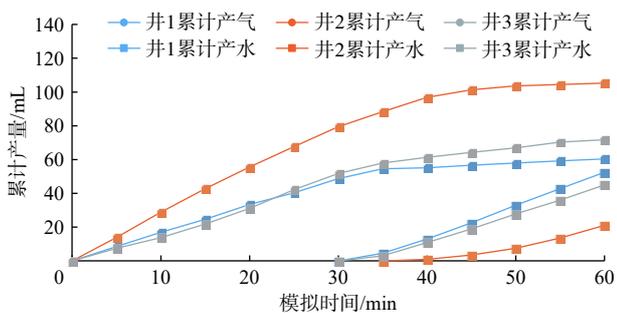


图 7 可视化试验生产曲线  
Fig. 7 Production curves of visualization experiment

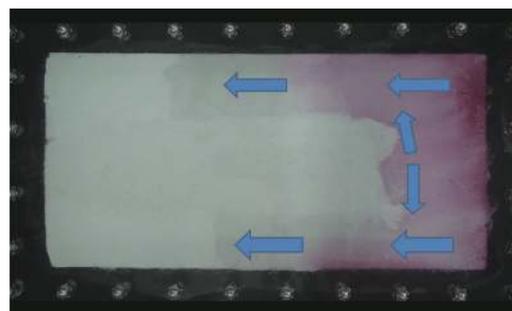


图 8 第 1 阶段水体流向  
Fig. 8 Water flow direction at the first stage

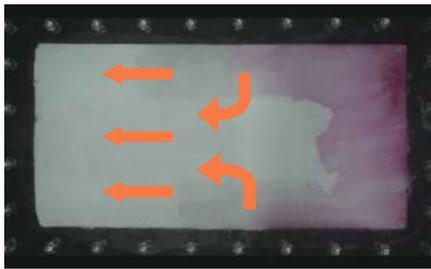


图 9 第 1 阶段气体流向  
Fig. 9 Gas flow direction at the first stage

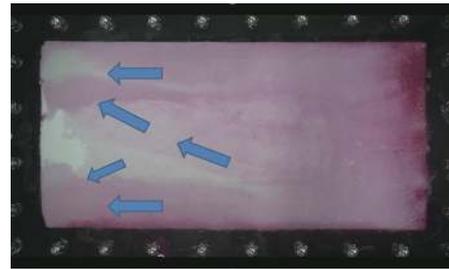


图 13 第 3 阶段水体流向  
Fig. 13 Water flow direction at the third stage

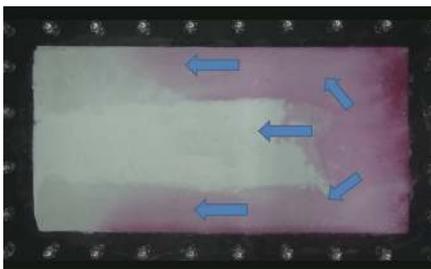


图 10 第 2 阶段水体流向  
Fig. 10 Water flow direction at the second stage



图 14 第 3 阶段气体流向  
Fig. 14 Gas flow direction at the third stage

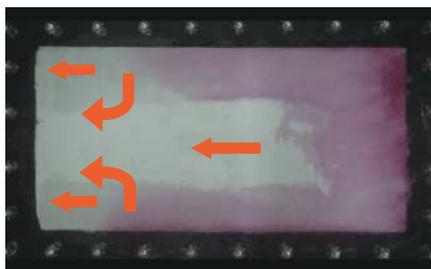


图 11 第 2 阶段气体流向  
Fig. 11 Gas flow direction at the second stage

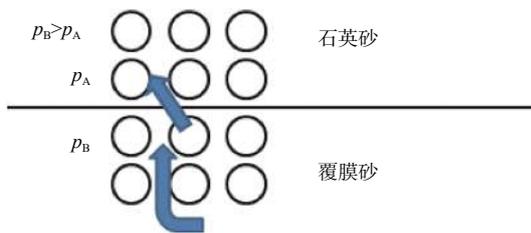


图 12 边界水体流向  
Fig. 12 Boundary water flow direction

#### 4 现场试验

TN 气田位于柴达木盆地中东部的三湖坳陷地区, 储层整体表现出高孔中低渗的特点, 非均质性强, 边水易沿着高渗带快速突进, 开采难度大。截至 2018 年 6 月, TN 气田已进入气水同产阶段, 水侵严重, 导致低产井、积液井占比接近 2/3, 严重影响

了该气田的开发<sup>[21]</sup>。为此, 利用覆膜支撑剂对该气田 X21 井进行了重复压裂。

TN 气田 X21 井于 2009 年 4 月 8 日完井, 完井井深 1 250.00 m。2019 年 3 月 12 日—5 月 18 日平均产气量 800 m<sup>3</sup>/d, 平均产水量 51.0 m<sup>3</sup>/d, 由于水淹严重导致躺井。为试验覆膜支撑剂的疏水导气特性, 2019 年 6 月 26 日对 X21 井进行了重复压裂, 重复压裂井段 1059.50~1062.10 m, 施工最高压力 27.0 MPa, 最大排量 4.5 m<sup>3</sup>/min, 施工总液量 292.5 m<sup>3</sup>, 共注入覆膜支撑剂 100.0 m<sup>3</sup>, 净液量 192.5 m<sup>3</sup>, 平均砂比 43.38%, 反洗井液量 4.9 m<sup>3</sup>, 施工周期 81 h。7 月 4 日采用  $\phi$ 5.0 mm 油嘴生产, 平均产气量 0.41 $\times$ 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d, 平均产水量 13.5 m<sup>3</sup>/d; 8 月 20 日更换成  $\phi$ 9.5 mm 油嘴生产, 平均产气量 1.23 $\times$ 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d, 平均产水量 21.4 m<sup>3</sup>/d。X21 井采用覆膜支撑剂重复压裂后, 产水量大幅降低, 产气量明显提高, 说明覆膜支撑剂具有疏水导气特性。

#### 5 结论与建议

1) 以石英砂、常温固化型液体为原料, 制备了一种覆膜支撑剂, 其覆膜能长时间保持较低的表面能。水滴试验表明, 覆膜支撑剂即使经过高温流体长时间冲刷仍具有良好的疏水性。

2) 通过石英砂和覆膜支撑剂的相对渗透率试验

发现,覆膜支撑剂可以有效提高气相的相对渗透率,抑制水相的流动。

3)模拟地层可视化水驱气试验结果表明,覆膜支撑剂具有疏水导气的特性。

4)现场试验表明,采用覆膜支撑剂对水侵气井进行重复压裂改造,可以提高产气量,降低产水量,实现水侵气井的二次生产,可为水驱气藏的开发提供一种新的技术手段。

5)覆膜支撑剂室内试验还不够完善,无法同时满足试验可视化与模拟实际气藏温度压力条件的要求,建议与数值模拟相结合进行更为全面的模拟试验研究。

### 参 考 文 献

#### References

- [ 1 ] YOUNG B M, WEINRICH L A. Method of coating particulate solids with an infusible resin: US3492147DA[P]. 1970-01-27.
- [ 2 ] GLAZE H O, UNDERDOWN D R. Proppant charge and method: US4564459[P]. 1984-05-12.
- [ 3 ] EVANS J A, SHARP J. Process for preparing pre-cured proppant charge: US4581253[P]. 1986-04-08.
- [ 4 ] SINCLAIR A R, GRAHAM J W, SINCLAIR C P. Improved well stimulation with resin-coated proppants[R]. SPE 11579, 1983.
- [ 5 ] 朱富林,宋淑娥.水乳液型不饱和聚酯树脂防砂剂[J].油田化学,1994,11(1):23-25,60.  
ZHU Fulin, SONG Shue. An aqueous emulsion of unsaturated polyester resin for sand control in production and injection well[J]. Oilfield Chemistry, 1994, 11(1): 23-25, 60.
- [ 6 ] 于庆红,王宏飞,隋向云,等.树脂包覆支撑剂控制回流方法研究[J].石油钻采工艺,2005,27(增刊1):66-68.  
YU Qinghong, WANG Hongfei, SUI Xiangyun, et al. Research of backflow control of resin coating propping agent[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005, 27(supplement 1): 66-68.
- [ 7 ] 徐艳伟.脲醛树脂固砂工艺技术在文留油田的应用[J].油田化学,2001,18(3):196-198.  
XU Yanwei. Urea-formaldehyde aqueous gelling fluid for sand consolidation and its uses at Wenliu Oil Fields[J]. Oilfield Chemistry, 2001, 18(3): 196-198.
- [ 8 ] 李怀文,邵力飞,曹庆平,等.大港油田多涂层预包防砂支撑剂研制与应用[J].石油钻探技术,2011,39(4):99-102.  
LI Huaiwen, SHAO Lifei, CAO Qingping, et al. Development and application of multi-coated pre-encapsulated sand control proppant in Dagang Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(4): 99-102.
- [ 9 ] 兰艾芳,赵海龙,傅奎仕,等.改性呋喃树脂固砂剂用于热采稠油井防砂[J].油田化学,1998,15(3):228-232.  
LAN Aifang, ZHAO Hailong, FU Kuishi, et al. Modified furan resin sand-consolidating agent and its use for sand control in oil wells of thermal recovery[J]. Oilfield Chemistry, 1998, 15(3): 228-232.
- [ 10 ] 胡奥林,陈吉开.包胶支撑剂及回流控制技术的新进展[J].钻采工艺,1999,22(3):44-46,98.  
HU Aolin, CHEN Jikai. Recent advances in coated proppants and its flowback control technologies[J]. Drilling & Production Technology, 1999, 22(3): 44-46, 98.
- [ 11 ] RADWAN A. A multifunctional coated proppant: a review of over 30 field trials in low permeability formations[R]. SPE 187329, 2017.
- [ 12 ] GOLDSTEIN B, VANZEELAND A. Self-Suspending proppant transport technology increases stimulated reservoir volume and reduces proppant pack and formation damage[R]. SPE 174867, 2015.
- [ 13 ] GOLDSTEIN B, JOSYULA K, VanZEELAND A, et al. Improve well performance by reducing formation damage[R]. URTEC 2151737, 2015.
- [ 14 ] 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 Longsheng, 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.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] 王海栋,刘义坤.压裂裂缝充填覆膜支撑剂控水增油试验[J].油气地质与采收率,2019,26(6):136-142.  
WANG Haidong, LIU Yikun. Experimental study on coated proppants packed in fractures for controlling water cut to increase oil production[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(6): 136-142.
- [ 17 ] 宋金波,郑铎,梅明霞,等.超疏水复合控水砂表面结构及疏水性研究[J].油田化学,2011,28(4):402-405.  
SONG Jinbo, ZHENG Duo, MEI Mingxia, et al. Study on the surface structure and hydrophobicity of superhydrophobic composite water control sand[J]. Oilfield Chemistry, 2011, 28(4): 402-405.
- [ 18 ] 浮历沛,张贵才,张弛,等.高通道压裂自聚性支撑剂研究进展[J].油田化学,2016,33(2):376-380.  
FU Lipai, ZHANG Guicai, ZHANG Chi, et al. Research progress of self-initiated aggregating proppant in channel fracturing technique[J]. Oilfield Chemistry, 2016, 33(2): 376-380.
- [ 19 ] 孙婉莹,姚晓.树脂包覆免烧超低密度支撑剂性能研究[J].硅酸盐通报,2015,34(10):2900-2904.  
SUN Wanying, YAO Xiao. Proformance of resin coated unburned ultra-low density fracturing proppant[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(10): 2900-2904.
- [ 20 ] 蒋艳芳.杭锦旗区块控水支撑剂优选及应用[J].天然气勘探与开发,2020,43(4):92-97.  
JIANG Yanfang. Optimal selecting water-control proppant and its application to Hangjinqi Block, Ordos Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2020, 43(4): 92-97.
- [ 21 ] 胥伟冲.非均质气藏水侵机理与压裂产能模型研究[D].成都:西南石油大学,2019.  
XU Weichong. Study on water invasion mechanism and fracturing well productivity model of heterogeneous gas reservoir[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.