

# 压裂支撑剂发展综述与展望

陈思源, 刘浩, 金衍, 史爱萍, 徐泉\*

中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

\* 通信作者, xuquan@cup.edu.cn

收稿日期: 2020-11-05

国家自然科学基金企业创新发展联合基金(U19B6003-05-05)和中国石油大学(北京)青年拔尖人才启动基金(2462023BJRC007)联合资助

**摘要** 支撑剂作为非常规油气开采过程中的一种重要材料, 在提高非常规油气采出率中起着至关重要的作用。随着支撑剂技术的发展, 人们设计制备了一些多功能支撑剂来满足各种需求, 而了解支撑剂在非常规油气开采过程中的作用机理及运移铺置规律也可以更有针对性的指导支撑剂的发展方向。本文介绍了支撑剂的分类、作用及现有技术, 将支撑剂分为常见普通支撑剂和新型支撑剂后, 综述了支撑剂运移铺置规律实验及模拟研究。目前, 国内外支撑剂主要向着低密度高强度、高导流能力和多功能化方向发展, 而结合支撑剂运移铺置实验数据来完善欧拉—欧拉、欧拉—拉格朗日以及拉格朗日—拉格朗日模型的模拟研究也是未来支撑剂运移规律探索的重要发展方向。

**关键词** 支撑剂; 多功能; 沉降运移; 导流能力; 发展趋势

## Review and prospect of fracturing proppant development

CHEN Siyuan, LIU Hao, JIN Yan, SHI Aipin, XU Quan

*State Key Laboratory Petroleum Resources and Prospecting, College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China*

**Abstract** As an important material in the process of unconventional oil and gas production, proppant plays a vital role in improving the recovery rate of unconventional oil and gas. With the development of proppant technology, multifunctional proppants have been designed and prepared to meet various needs. Understanding the mechanism of proppant action and migration patterns during unconventional oil and gas production can also provide more targeted guidance for proppant development. This paper introduces the classification, functions and existing technologies of proppants. After dividing proppants into common proppants and new proppants, experimental and simulation studies on proppant migration and placement rules are reviewed. At present, proppants at home and abroad are mainly developing in the direction of low density, high strength, high conductivity and multi-functionality, and combined with the experimental data of proppant migration and placement to improve the simulation study of Euler-Euler, Euler-Lagrangian and Lagrangian-Lagrangian model is also an important development direction for the exploration of proppant migration rules in the future.

**Keywords** proppant; multifunction; settlement and migration; fracture conductivity; developing trend

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.03.024

引用格式: 陈思源, 刘浩, 金衍, 史爱萍, 徐泉. 压裂支撑剂发展综述与展望. 石油科学通报, 2023, 03: 330-346

CHEN Siyuan, LIU Hao, JIN Yan, SHI Aipin, XU Quan. Review and prospect of fracturing proppant development. Petroleum Science Bulletin, 2023, 03: 330-346. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.03.024

## 0 引言

石油作为一种难以替代的不可再生能源,是国家发展进步中不可或缺的战略物资。二十一世纪以来,我国非常规油气勘探开发获得了“战略性突破”,近几年也逐步步入工业化阶段<sup>[1]</sup>。随着非常规油气开采的进步,其增产措施中的压裂技术<sup>[2-3]</sup>也逐渐成熟起来,由此也促进了支撑剂的发展。

支撑剂是在压裂过程中随着压裂液泵入地层的材料,在支撑人工裂缝后可以形成具有一定导流能力的通道,从而有利于油气的通过并提高产量。在地层条件下,支撑剂的支撑效果受到温度、压力及其自身性能的影响,另外支撑剂的运移铺置情况也不能直观的观察。因此,如何对支撑剂进行改性处理来实现高效运输和长效支撑,以及研究支撑剂运移铺置规律,在油气开采过程中具有重要意义。本文简要介绍了当前支撑剂的使用及发展情况,并通过调研实验及模拟研究展示了支撑剂在油气藏勘探开发过程中运移铺置规律。

## 1 常见支撑剂

支撑剂一般指的是具有一定粒径和规格的砂粒或陶瓷颗粒,也可以在其表面进一步改性研究以得到预期的覆膜支撑剂<sup>[4-5]</sup>。在开采非常规油气时,经过水力压裂后形成的人工裂缝需要通过支撑剂的支撑而不会受到应力释放的作用闭合,形成具有一定长度的支撑带来增大孔隙度、提高渗透率,致使油气从裂缝通道中排出,从而延长油、气井服务年限,保持产层高导流能力。

### 1.1 石英砂和陶粒支撑剂

早在 1947 年,随着水力压裂技术的成功应用,美

国使用了石英砂来支撑压裂开的裂缝<sup>[6-7]</sup>。石英砂主要由 SiO<sub>2</sub> 构成,虽然来源广,相对密度低约为 2.65 g/cm<sup>3</sup>,并且较为便宜,但由于其强度较低,仅适用于低闭合压力的地层或是浅井的压裂生产<sup>[8]</sup>,为了获得更好的性能需要进行进一步的处理。1960 年左右,一些油田选择了核桃壳、玻璃球和塑料球等作为支撑剂,因为它们具有更好的圆球度和强度<sup>[9-10]</sup>。圆球度越高越接近于 1,使得支撑剂表面应力均匀分布以承受更大的载荷而不破碎,且嵌入程度更小排列时能提供更大的导流能力。

1970 年后,美国将铝硅土作为原材料,设计制备了陶粒支撑剂。比如 carbo 公司研发的轻质陶粒支撑剂与常规石英砂相比,具有更高的强度和抗破碎率,其高圆球度和热化稳定性也使得导流能力得到了进一步的提升<sup>[11]</sup>。不过陶粒支撑剂的使用与压裂液的性能及泵送条件都有着较大的关联性,其复杂的制备工艺也使得生产成本较高<sup>[12-13]</sup>。

### 1.2 树脂覆膜支撑剂

石英砂和陶粒都是脆性材料,在地层条件高应力作用下支撑剂之间是点对点接触,可能会发生应力集中造成脆性破碎<sup>[14]</sup>。覆膜是指在传统的支撑剂外部人工包覆一种高分子材料(主要是树脂),树脂可以填平颗粒表面凹凸不平的地方,改善支撑剂的圆球度,降低支撑剂的视密度和体积密度,从而减少压裂液中携砂液和现场泵送设备所需要的成本,并使支撑剂运移至裂缝更深处。支撑剂涂层常用的树脂有酚醛树脂、环氧树脂、呋喃、聚氨酯等,聚合物的类型和性能如表 1 所示<sup>[15]</sup>。覆膜支撑剂表面的树脂膜不仅可以在地层高闭合压力下,使原来骨料颗粒间点接触转变为小面积接触,分散压力负荷使得颗粒抗破碎能力增加;还可以通过连接单个支撑剂颗粒并将破碎的颗粒留在涂层内,减少支撑剂向井筒的回流量,从而使支撑剂

表 1 支撑剂涂层聚合物及其性能<sup>[15]</sup>

Table 1 Proppant coated polymers and their properties<sup>[15]</sup>

有机聚合物	干燥温度/°C	耐热性	耐酸性	耐水性	强度	老化	疏水性	亲水性	耐化学性
环氧树脂	120~205	极好	好	好	好	非常好	好	差	好
呋喃树脂	190	良好	好	好	差	好	中等	差	好
聚酯	100~150	中等	差	好	中等	好	中等	差	良好
尿素醛	120~205	极好	好	好	好	非常好	好	差	好
聚氨酯	98~120	好	差	差	好	好	好	差	良好
酚醛树脂	120~205	极好	好	好	好	非常好	好	差	好
乙烯基酯	100~150	中等	好	好	差	好	中等	差	良好
糠醛醇和糠醛	120~205	极好	好	好	好	非常好	好	差	好

达到更好的工程应用效果。

石英砂、陶粒和覆膜支撑剂作为最常见的3种支撑剂,通常能适用于大部分储层条件,近年来随着非常规油气资源的勘探开发,它们的用量也是在不断的上涨,另外一些具有特殊功能的新型支撑剂也逐渐被研发应用,国内外各种支撑剂的需求量及用量如图1a-b所示<sup>[16-17]</sup>。

## 2 新型支撑剂

除了3种常见支撑剂外,科研人员还在类型、形状和应用等方面对现有支撑剂进行了改进,研发出了多种多样的新型支撑剂,使其能够满足一定的功能需求。

### 2.1 低密度支撑剂

支撑剂密度大意味着更快的沉降速度和更高的成本,因此需要通过化学改性或物理改性等方法制备密度更低的支撑剂来配合低粘度压裂液或高速率泵送工艺使用。

#### 2.1.1 多孔包覆低密度支撑剂

在支撑剂表面包覆上树脂薄膜后,由于树脂的固化反应可以显著降低其密度并增大其强度,而包覆其他材料后可以制备具有一定特殊功效的支撑剂。邓浩等<sup>[18]</sup>制备出的低密度高强度且较为环保的覆膜陶粒支撑剂外部包覆了可以有效降低支撑剂的视密度并提高抗破碎能力的酚醛树脂和环氧树脂混合树脂薄膜。Yang等<sup>[19]</sup>采用两步涂覆法制备了环氧中间层和外部硅油层的疏水支撑剂,兼具涂层砂和疏水性砂的优点,图2a展示了双层涂覆疏水性砂的结构和覆膜材料中官能基交联的反应机理。该支撑剂体积密度和视密度

分别为 $1.41\text{ g/cm}^3$ 和 $2.44\text{ g/cm}^3$ ,69 MPa下破碎率为0.27%,与原砂相比其静态接触角可达 $120^\circ$ ,具有明显的控水效果。

#### 2.1.2 多孔无包覆低密度支撑剂

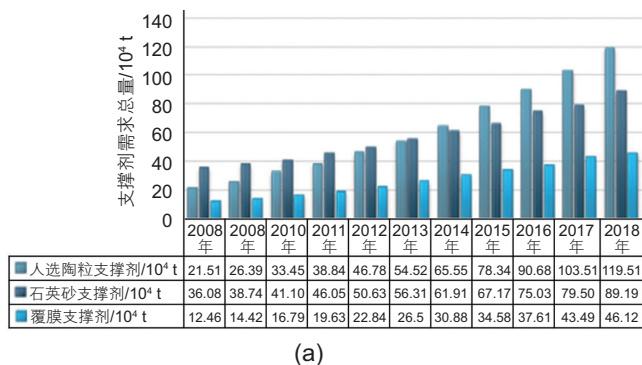
随着陶瓷工业的发展,人们开始致力于人造陶粒支撑剂的研究,其中大多以铝矾土、煤矸石和焦宝石等作为原料结合烧结助剂在一定温度下烧结制得。黄彪等<sup>[20]</sup>以煤矸石和熟焦宝石为原料制备的陶粒支撑剂体积密度为 $1.43\text{ g/cm}^3$ ,在52 MPa闭合压力下的破碎率为8.87%。图2b是不同烧结温度下该支撑剂的密度和破碎率变化图,可见随着温度的增加,样品致密化使得视密度略有增加、破碎率逐渐降低。马俊伟等<sup>[21]</sup>以铝土矿废石为主要原料,制备所得产品体积密度为 $1.42\text{ g/cm}^3$ ,52 MPa闭合压力下破碎率为5.35%。图2c所示的XRD分析图谱表明制备的低密度支撑剂内部晶体主要为莫来石相,可以提供较高的抗压强度。秦梅等<sup>[22]</sup>以铝矾土和煤矸石为原料制备陶粒支撑剂时通过添加碳酸钙细化莫来石晶粒起到增强增韧的效果,提高了支撑剂的强度降低破碎率,制备的陶粒支撑剂在52 MPa闭合压力下破碎率为8.41%。图2d展示了不同碳酸钙添加量下样品的SEM图,可见随着碳酸钙的增加,莫来石相交织形成的网状结构减少了孔隙的存在使得破碎率逐渐降低。

### 2.2 高导流能力支撑剂

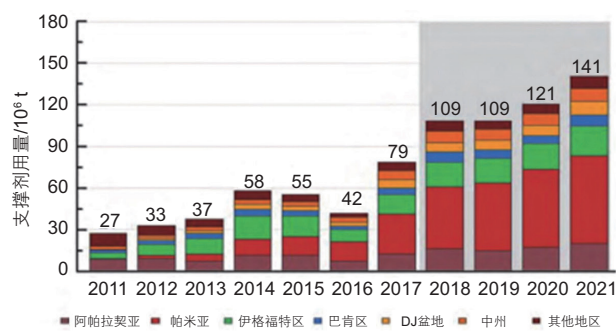
#### 2.2.1 自悬浮支撑剂

与传统支撑剂相比,自悬浮支撑剂不仅可以在线配制携砂液,减少压裂液的制备和运输成本;还可以在高剪切下通过外层水化膜使得支撑剂运移至裂缝更深处<sup>[24]</sup>。

自悬浮支撑剂主要分为膨胀型和增黏型。膨胀型



(a)



(b)

图1 (a) 2008—2018年我国不同类型压裂支撑剂需求总量统计<sup>[21]</sup>; (b) 2011—2021年美国压裂支撑剂用量趋势<sup>[22]</sup>

Fig. 1 (a) Statistics on the total demand for different types of fracturing proppant in China from 2008 to 2018<sup>[21]</sup>; (b) Trends in U.S. frac proppant use from 2011 to 2021<sup>[22]</sup>

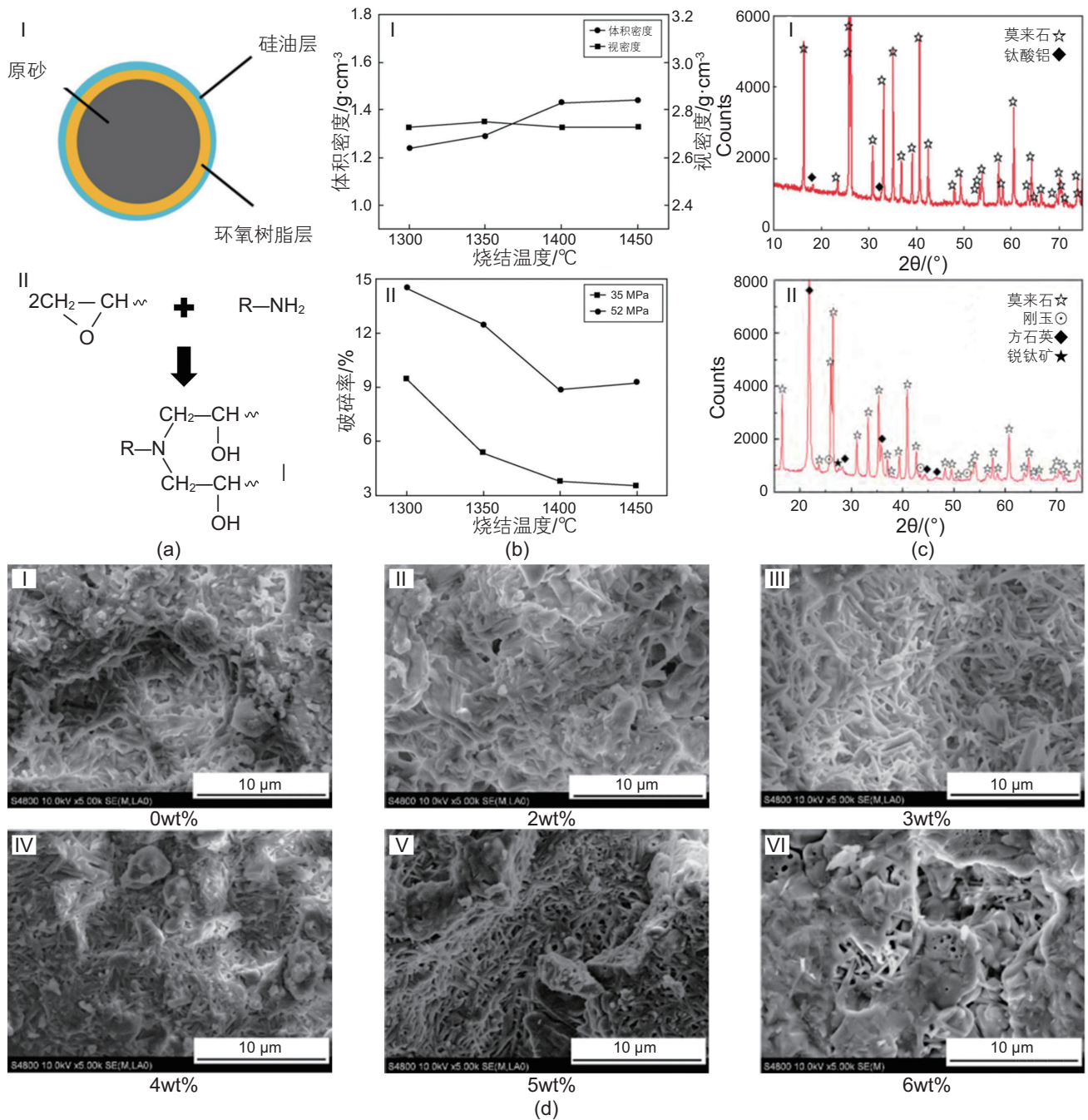


图 2 (a) 环氧树脂和硅油双涂层覆膜低密度支撑剂示意图和机理图<sup>[19]</sup>; (b) 烧结温度对低密度支撑剂密度和破碎率影响<sup>[20]</sup>; (c) 铝土矿选尾矿和废石制备低密度支撑剂 XRD 图<sup>[21, 23]</sup>; (d) 不同碳酸钙添加量低密度支撑剂 SEM 图<sup>[22]</sup>  
 Fig. 2 (a) Schematic diagram and mechanism diagram of epoxy resin and silicone oil coated low density proppant<sup>[19]</sup>; (b) Effect of sintering temperature on low density proppant density and crushing rate<sup>[20]</sup>; (c) Low density proppant XRD patterns were prepared for bauxite tailings and waste rock<sup>[21, 23]</sup>; (d) SEM images of low density proppant with different calcium carbonate additions<sup>[22]</sup>

自悬浮支撑剂的表面涂层可以遇水快速溶胀，在周围形成水化膨胀层，增大体积，降低密度，使其悬浮效果更好<sup>[25]</sup>。张龙胜等<sup>[26]</sup>选择膨胀性树脂作为悬浮性材料，遇水快速溶胀后如图 3a 所示能在支撑剂核心周围形成稳固的水化层，使其长时间悬浮在清水中的同时，

不仅能减少压裂液中稠化剂的使用量，还能简化配液的步骤。张鑫等<sup>[27]</sup>在支撑剂表面通过硅烷偶联剂引入双键，再通过接枝聚合反应将膨胀树脂接枝在支撑剂表面，制得的膨胀型自悬浮支撑剂膨胀倍数为 1~1.5 倍，如图 3b 所示在偏光显微镜下支撑剂遇水膨胀后形

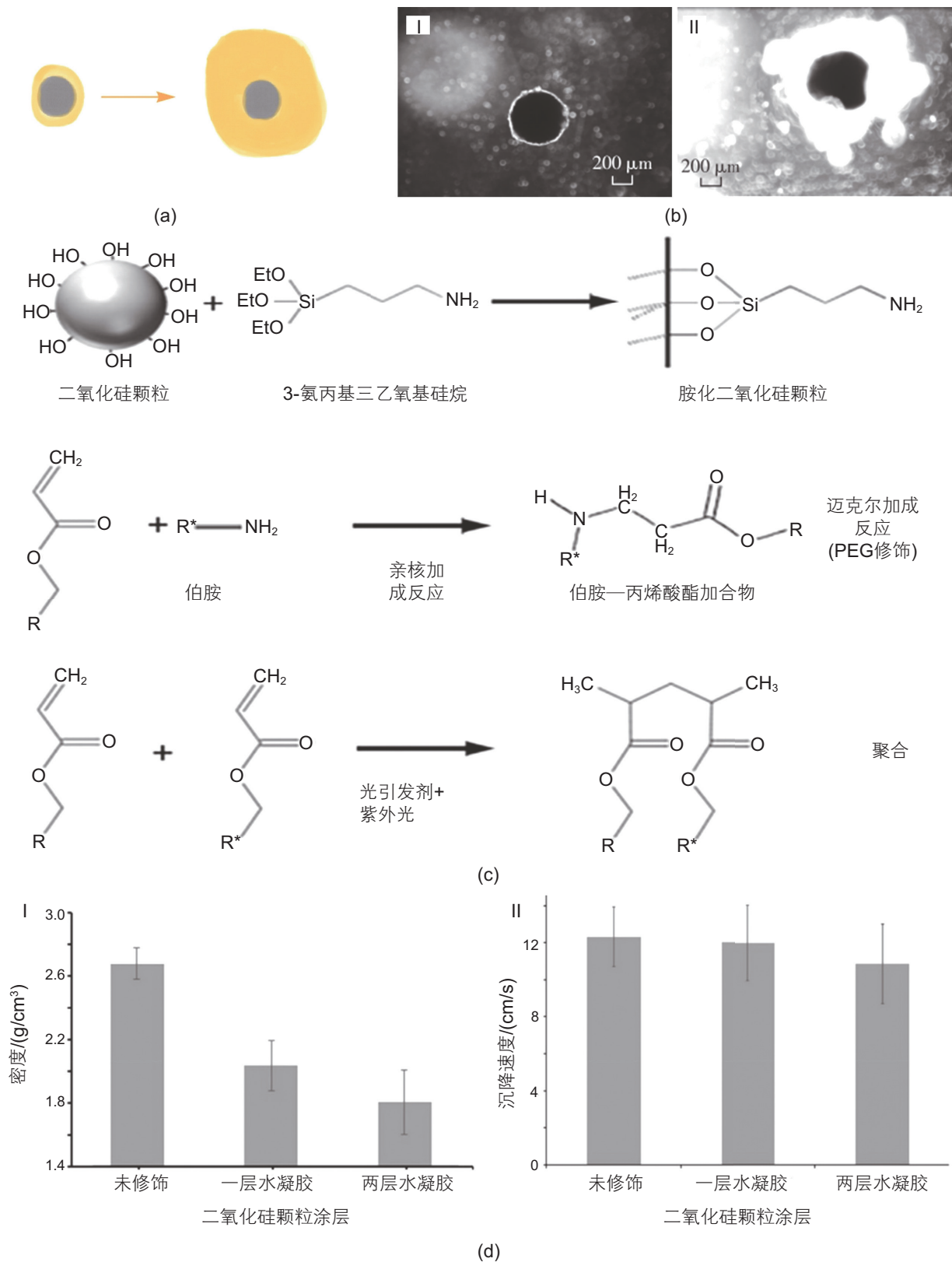


图3 (a) 自悬浮支撑剂悬浮机理图<sup>[26]</sup>; (b) 偏光显微镜下膨胀型自悬浮支撑剂膨胀效果图<sup>[27]</sup>; (c) 二氧化硅颗粒与水凝胶层功能化的步骤<sup>[28]</sup>; (d) 二氧化硅颗粒密度和沉降速度随涂层的变化<sup>[28]</sup>

Fig. 3 (a) Self-suspension proppant suspension mechanism diagram<sup>[26]</sup>; (b) Expansion effect of expansive self-suspension proppant under polarized light microscope<sup>[27]</sup>; (c) The process of functionalizing silica particles and hydrogel layers<sup>[28]</sup>; (d) The density and settling velocity of silica particles vary with the coating<sup>[28]</sup>

成了较厚的膨胀外膜。Gol等<sup>[28]</sup>通过紫外线照射引发的表面接枝反应将水凝胶覆于二氧化硅颗粒表面,图3c展示了硅粒子和水凝胶层功能化的步骤,覆膜后的支撑剂密度降低了约33%,如图3d所示,其沉降速度也降低了约11%。

而增黏型自悬浮支撑剂的表面涂层可以溶解在水中,使其黏度增大,从而降低沉降速度。郜婧文等<sup>[29]</sup>将胍胶细粉黏附在支撑剂表面制备了胍胶自增稠支撑剂,如图4a所示在SEM下支撑剂外层黏附了胍胶颗粒,在高温高矿化度条件下具有优良的悬浮效果。董林芳等<sup>[30]</sup>以陶粒砂、速溶液体改造剂和高分子聚合物作为原料制备了一种黏弹型自悬浮支撑剂,具有较好的悬浮稳定性和耐温耐剪切性能。如图4b所示压裂液的黏度会随着剪切时间的增加和温度的升高而降

低,而该压裂液在110℃下剪切120min后仍能保持50 mPa·s的黏度。Cao等<sup>[31]</sup>以蔗糖作为粘合剂,结合胍胶和SiO<sub>2</sub>纳米颗粒制备了耐温性好、稳定性高的自悬浮支撑剂。如图4c所示当自悬浮支撑剂与陶瓷砂的比例较高时,聚合物压裂液的浓度增大,从而缩短了悬浮时间,延长了沉降时间,提高了支撑剂的自悬浮能力。如图4d所示随着裂缝闭合压力的增大,裂缝导流能力先迅速下降,然后又缓慢下降,当闭合压力达到60 MPa时,支撑剂开始破裂。

### 2.2.2 非球状支撑剂

传统使用的支撑剂一般为球形,其圆球度越接近于1越有利于充填地更紧密并优化裂缝形状和尺寸,但近年来人们提出使用非球状支撑剂可以提供更高的导流能力和更好的回流控制性能。Osipov<sup>[32]</sup>从实验

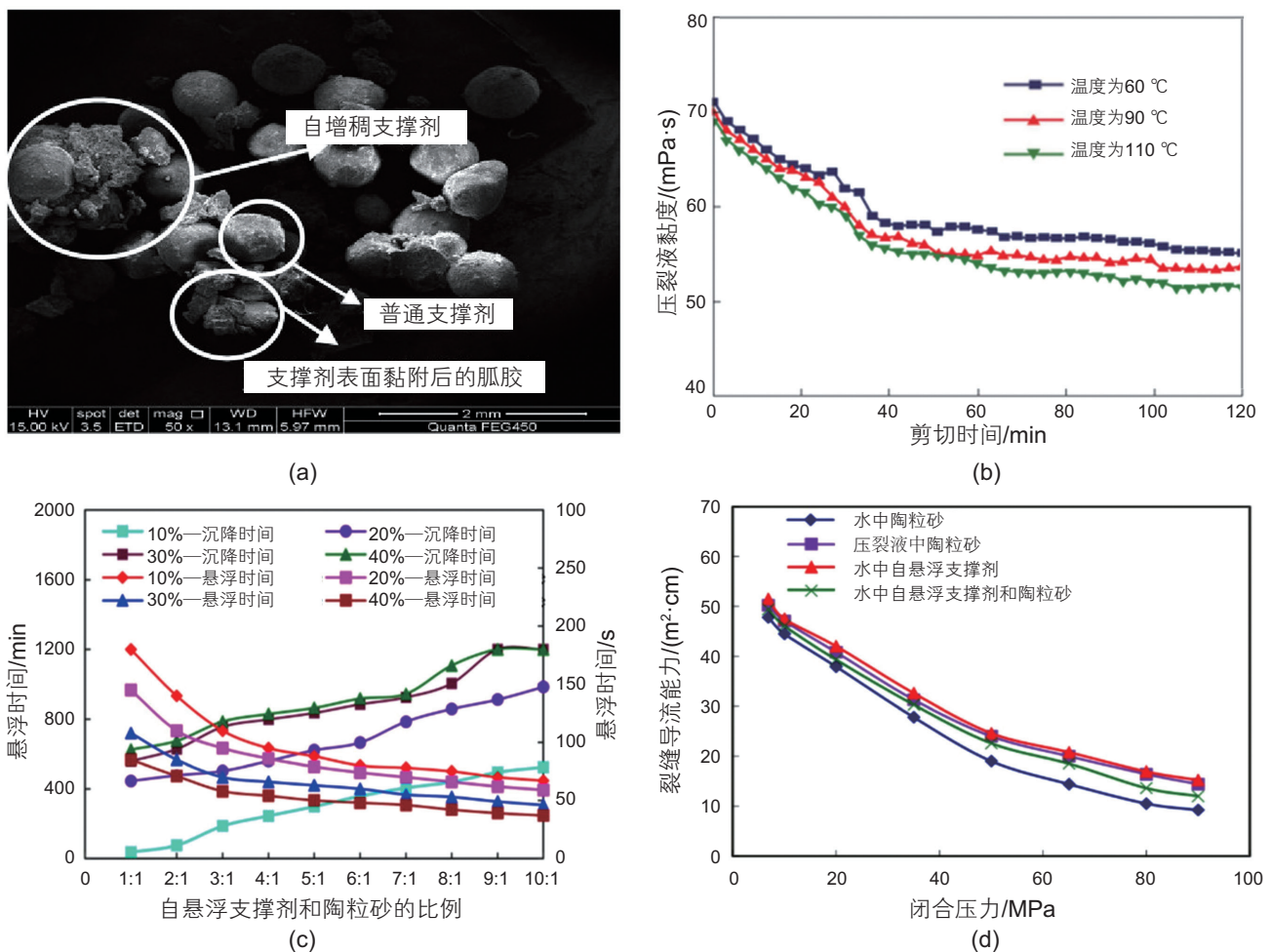


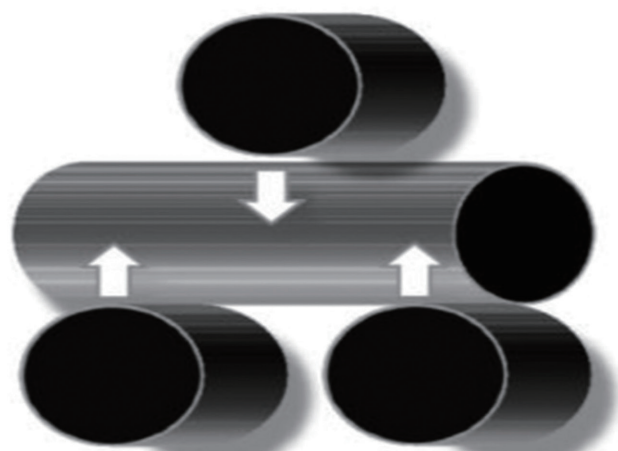
图4 (a) 胍胶自增稠支撑剂SEM图<sup>[29]</sup>; (b) 自悬浮支撑剂压裂液耐温耐剪切性能测试结果<sup>[30]</sup>; (c) 混合物悬浮时间和沉降时间<sup>[31]</sup>; (d) 裂缝导流能力与闭合压力的关系<sup>[31]</sup>

Fig. 4 (a) SEM diagram of guanidine adhesive self-thickening proppant<sup>[29]</sup>; (b) Test results of temperature and shear resistance of self-suspended proppant fracturing fluids<sup>[30]</sup>; (c) Suspension and settling time of the mixture<sup>[31]</sup>; (d) Relationship between fracture conductivity and closing pressure<sup>[31]</sup>

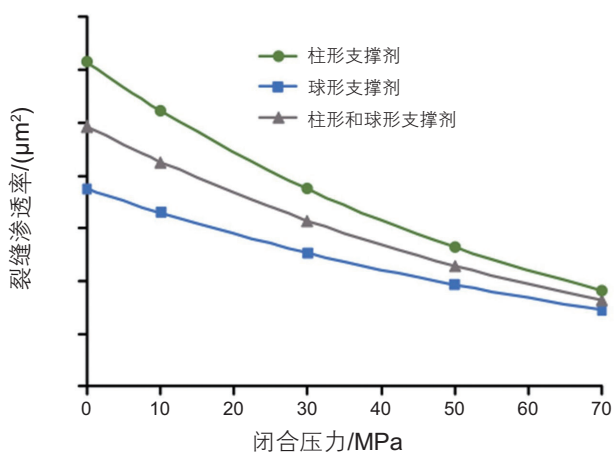
和数值两方面研究了粘性不可压缩流体在不同体积浓度下通过与细长颗粒混合的球体群的三维稳态流动,发现与纯球体或椭球体充填体相比,柱状颗粒充填体具有更高的渗透性和导流能力,其形状如图5a所示,圆柱体组的渗透性和孔隙率随着圆柱体纵横比的增加而增加。杨晓鹏等<sup>[33]</sup>在研究高速通道压裂技术时提出使用杆状支撑剂代替球形支撑剂可以相互接触形成如图5b所示稳定的桥接结构,既可以提高裂缝的导流能力,也可以控制颗粒和纤维碎片的回流作用。Xu等<sup>[34]</sup>用离散元法建立了不同宽度裂缝中非球形支撑剂的无序堆积,采用弹性力学和格子玻尔兹曼方法的耦合模型来模拟裂缝表面的变形和裂缝中的流体流动,发现如图5c-d所示填充圆柱形支撑剂比球形支撑剂可以提供更高的渗透率和导流能力。



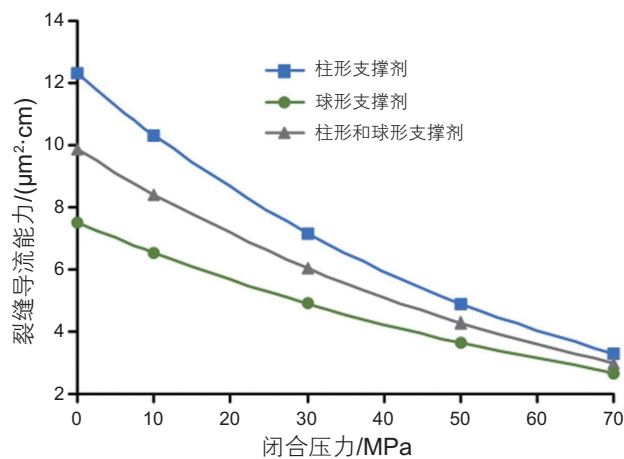
(a)



(b)



(c)



(d)

图5 (a) 杆状支撑剂<sup>[32]</sup>; (b) 杆状支撑剂机械互锁桥接作用<sup>[33]</sup>; (c) 不同支撑剂几何形状下裂缝渗透率的变化<sup>[34]</sup>; (d) 不同支撑剂几何形状下裂缝导流能力的变化<sup>[34]</sup>

Fig. 5 (a) Rod proppant<sup>[32]</sup>; (b) Mechanical interlock bridging of rod proppant<sup>[33]</sup>; (c) Changes in fracture permeability under different proppant geometry<sup>[34]</sup>; (d) Changes in fracture conductivity under different proppant geometry<sup>[34]</sup>

### 2.3.2 原位支撑剂

原位支撑剂是指压裂液在地层特定条件下通过液固转换形成的球形支撑剂，不仅可以有效支撑多尺度裂缝，还可以减少破胶剂等压裂液添加剂对裂缝造成的损害。Chang等<sup>[37]</sup>研究了一种新的化学成分和工艺，使注入的压裂液就地转化为高渗透性球形支撑剂充填。原位形成的球形支撑剂尺寸显著大于常规支撑剂，具有的弹性使其强度较大有利于长时间支撑裂缝。图6a显示了在150 ℉下固体珠的形成过程。左边的照片显示了一种含有可固化固体前体的均匀液体。中间的照片显示了液体在搅拌30 min后开始形成固体。右边的照片显示了凝固60 min后珠体的生成情况。Luo等<sup>[38]</sup>研制的基于超分子自支撑压裂液液固相转化的现场热响应式支撑剂，是一种低温下流动性良好的无固相颗粒支撑液，可以在储层高温刺激下逐渐相变为具有良

好机械强度的固体支撑剂。图6b显示了不同闭合压力下不同尺寸原位生成支撑剂的破碎率以及不同浓度、不同尺寸原位生成支撑剂的导流能力，可见其具有良好的抗压能力和导流能力。

### 3 支撑剂运移铺置实验研究

支撑剂在裂缝中的运移铺置规律影响着天然裂缝的激活和水力裂缝的形成，最终决定了油田储层改造的效果。为了探寻携砂液注入复杂缝网后支撑剂的运移铺置规律，研究人员已经设计了大量实验室实验，来模拟支撑剂在裂缝中的移动情况。这些实验通常以槽流模型为基础，通过透明的玻璃板较为直观的观察支撑剂在裂缝中的运移铺置行为，可以较为准确的预测支撑剂性质、压裂液性能、施工参数等方面因素对

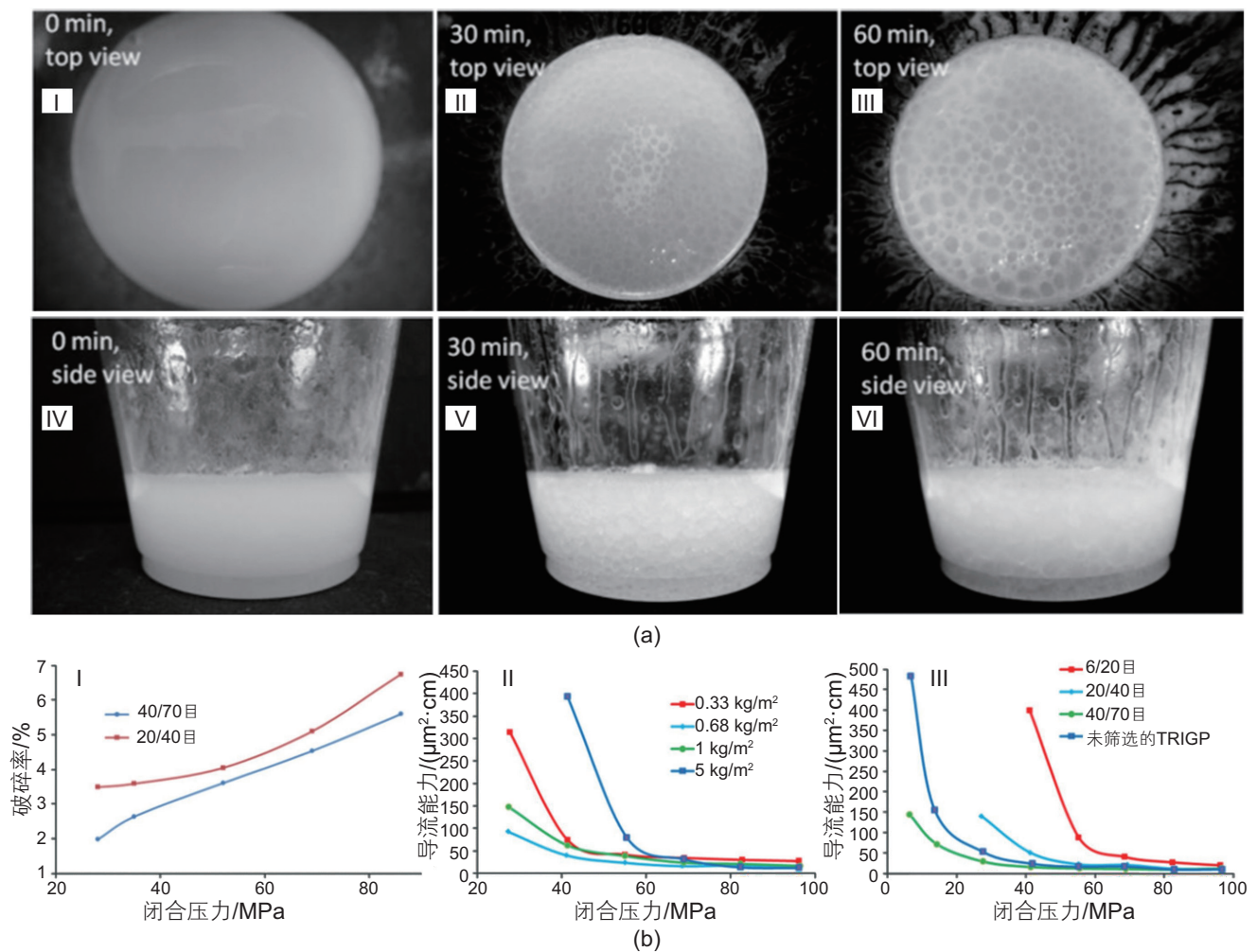


图6 (a) 固体珠粒形成过程<sup>[37]</sup>; (b) 不同闭合压力下不同尺寸原位生成支撑剂的破碎率和不同浓度、不同尺寸原位生成支撑剂的导流能力<sup>[38]</sup>

Fig. 6 (a) The process of the formation of solid beads<sup>[37]</sup>; (b) The process of the formation of solid beads and conductivity of fracture propped by TRIGP under different concentrations and different sizes of TRIGP<sup>[38]</sup>



油田现场的油气开采及压裂效果的影响,从而有效地指导现场压裂施工工艺的优化。

Babcock等<sup>[39]</sup>首次采用两块透明有机玻璃,对支撑剂在单缝中的运移铺置规律进行了可视化研究,结果表明支撑剂的分布可以用平衡速度和砂堤堆积常数来描述,这2个参数都与支撑剂的类型和尺寸、流体性质和裂缝几何形状有关,此实验为后人研究支撑剂沉降运移规律所设计的装置提供了基本思路。Soni<sup>[40]</sup>通过向包括底部、中部和顶部3个注入点的裂缝模型中注入陶瓷支撑剂进行实验,实验研究了射孔位置和密度对水力压裂中支撑剂位置的影响,发现在裂缝中部或顶部射孔可以得到最佳支撑剂位置,促进支撑剂在裂缝中的深度注入。图7a-b展示了研究使用的实验装置及具有平面裂缝的直井压裂增产处理期间支撑剂的输送情况。Li等<sup>[41]</sup>通过携砂液流动实验发现支撑剂连续注入裂缝会形成如图7c所示的4个不同区域,分别是支撑剂沉降带、翻滚带、悬浮带和自由带,区域的大小和分布与支撑剂的尺寸、密度及携砂液的粘度相关,另外适当降低支撑剂的浓度和密度有利于支撑剂在裂缝中良好的输送和分布。

以上研究的支撑剂运移铺置模拟实验是通过平行

玻璃板模拟单个垂直主裂缝进行的,但是在压裂后的储层中形成的水力裂缝会和天然裂缝交错形成复杂的裂缝网络,因此需要对其中的支撑剂运移铺置进行进一步的模拟实验。

Dayan等<sup>[42]</sup>通过建立一个小的—维裂缝模型首次进行了裂缝网络模拟实验,模型包括一个主裂缝和一个相同长度和横截面积的支裂缝,如图8a所示为用于确定在两个通道中驱动流所需的流速阈值的小模型示意图。在该模型中通道的长度是相等的,因此由旁路入口引起的压降是两种通道的区别。研究发现支撑剂随着流体沿着裂缝增长方向或裂缝高滤失区域流动,当流速达到临界值时,支撑剂才随流体进入次裂缝,并且在此之前主裂缝需要有一定的支撑剂堆积。温庆志等<sup>[43]</sup>以离散化模型为基础,在其上建立了伯努利方程,同时结合模拟裂缝装置展开了对支撑剂在裂缝中的运移铺置规律的研究,发现二次裂缝的支撑高度和面积随着靠近井筒而增加。图8b为支撑剂在不同结构类型主裂缝中的运移距离,图8c为所述的6种不同的缝网示意图,支撑剂在不同结构主裂缝中运移距离顺序为:“—”型>“T”型>“H”型>“TF”型>“双T”型>“十”型。Tong等<sup>[44]</sup>通过如图8d所示

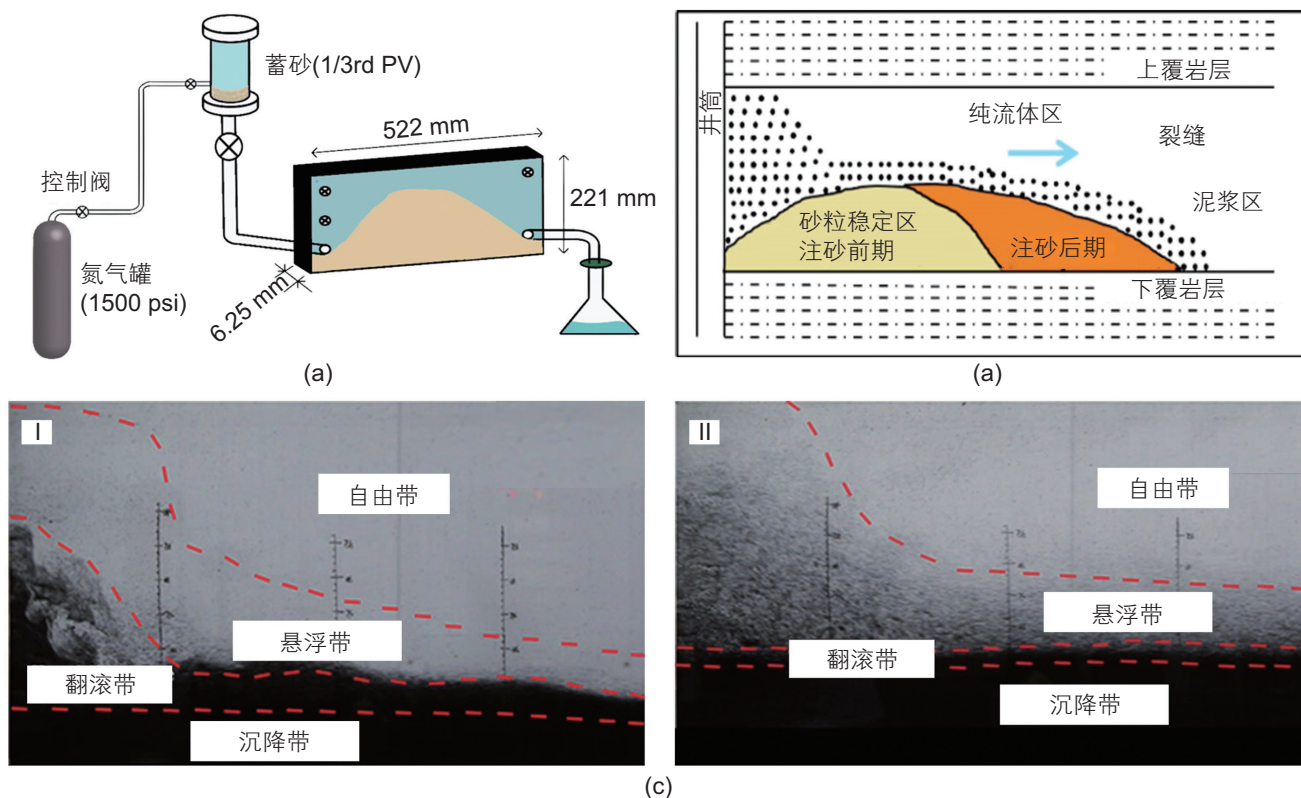


图7 (a) 实验装置示意图<sup>[40]</sup>; (b) 垂直平面裂缝中的输砂示意图<sup>[40]</sup>; (c) 携砂液在裂缝中形成的四个区域<sup>[41]</sup>

Fig. 7 (a) Schematic Diagram<sup>[40]</sup>; (b) Schematic of sand transport in vertical planar fracture<sup>[40]</sup>; (c) Four areas where the carrying fluid forms in the fracture<sup>[41]</sup>

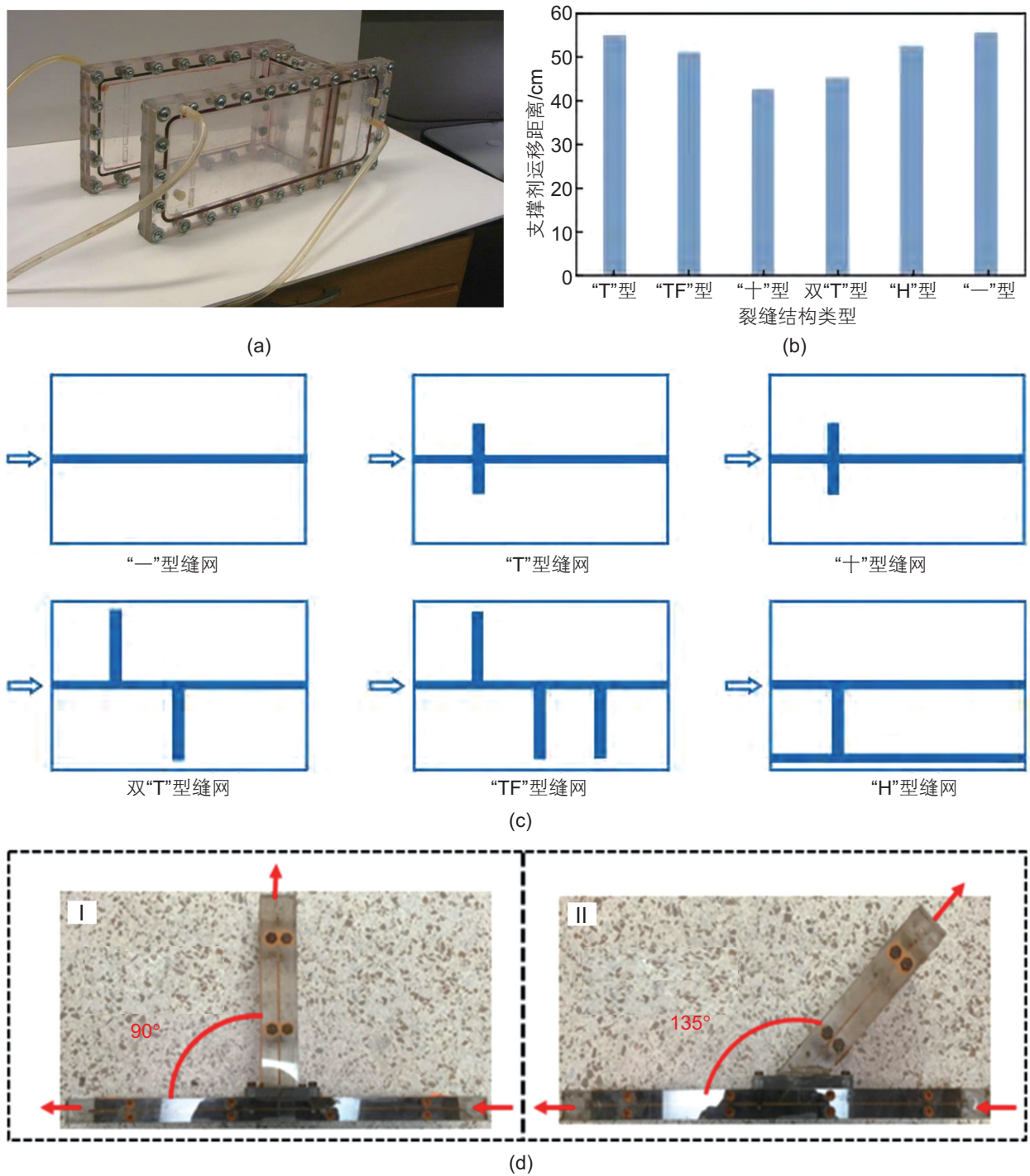


图 8 (a) 分叉槽中泥浆流动的小槽流模型<sup>[42]</sup>; (b) 支撑剂在主裂缝中的运移距离<sup>[43]</sup>; (c) 6 种缝网<sup>[43]</sup>; (d) 不同角度的支裂缝<sup>[44]</sup>  
 Fig. 8 (a) Small slot flow model to test the flow of slurries in a bifurcating slot<sup>[42]</sup>; (b) Comparison of proppant migration distance in the main fracture of six fracture configurations<sup>[43]</sup>; (c) Six fracture configurations<sup>[43]</sup>; (d) Fracture slots with different bypass angles<sup>[44]</sup>

裂缝槽改变主裂缝和次裂缝之间的夹角(45°、90°和135°)研究了角度对次裂缝中砂粒铺置的影响,发现次裂缝中水流速度随着角度的增加而增加,进入次裂缝的砂粒减少,铺置距离也随之减少,所以较小的次裂缝角度更适合砂粒的铺置运移。

#### 4 支撑剂运移铺置模拟研究

支撑剂导流能力的实验模拟可以获得长期导流能力变化的规律,了解影响导流能力的因素以调节支撑

剂性能, 同样决定着压裂效果以及压裂有效期<sup>[45-48]</sup>。实验模拟研究可以较为准确的预测支撑剂性质、压裂液性能、施工参数等方面因素对油田现场的油气开采及压裂效果的影响, 从而有效地指导现场压裂施工工艺的优化, 提高油气的产量<sup>[49-54]</sup>。为了更深入的研究支撑剂的性能及其在油气压裂过程中的作用机理, 科研人员也展开了对支撑剂的运移铺置规律数值模拟研究, 其模拟方法主要建立在欧拉—欧拉、欧拉—拉格朗日以及拉格朗日—拉格朗日框架基础上进行模拟研究。

#### 4.1 以欧拉—欧拉方程为模型的数值模拟工作

欧拉—欧拉模型是指流体流动和颗粒输运都在欧拉网格中求解, 利用欧拉—欧拉模型可以快速求解<sup>[55-57]</sup>。符洋<sup>[58]</sup>利用Fluent中的欧拉模型对3种不同入口处的支撑剂的铺砂形态进行数值模拟, 3种入口位置如图9a所示, 图9b展示为不同类型出口的模拟砂堤形态, 从图中可以看出得出I型和I-II型进口端附近支撑剂铺置率较高。张涛<sup>[59]</sup>考虑液固和固固两相之间的耦合作用, 以欧拉—欧拉模型为基础研究了在使用清水压裂的过程中在注入点位置、注入速度和支撑剂密度等因素对支撑剂铺砂规律的影响, 并通过和实验结果进行对比, 得出了进口位置对支撑剂的铺置有很大影响, 不当的进口位置会对压裂效果产生不利影响, 较快的泵入速度和低密度支撑剂可以增大支撑剂沉降距离, 增大导流能力。周德胜等<sup>[53]</sup>通过Fluent软件对砂堤形成过程中的支撑剂的运移铺置进行了数值模拟研究, 同时将数值模拟结果与实验结果进行对

比, 同时研究了湍流对支撑剂铺置的影响, 给出了在施工前期要采用大排量、低砂比、小粒径和低密度支撑剂的施工方式, 而在后期则相反的建议。在考虑更多的影响因素后, 刘春亭等<sup>[60]</sup>对支撑剂在三维裂缝中的运移铺置规律进行了研究, 建立欧拉—欧拉两相模型, 利用该模型对排量、压裂液黏度等不同施工参数, 支撑剂粒径、密度等支撑剂性质参数以及岩石裂缝壁面粗糙度、注入位置等因素进行较为完整的探究, 图9c-e分别为支撑剂密度、压裂液黏度、支撑剂粒径对支撑剂分布的影响, 随着压裂液黏度的增加, 支撑剂被输送的距离增加, 增加了裂缝有效填充长度。支撑剂密度的增加, 会导致支撑剂颗粒沉降速度变大, 使得支撑剂在裂缝内的水平运移距离减小。支撑剂颗粒粒径增加会增加支撑剂的沉降速度, 粒径越小, 支撑剂对裂缝的有效重提距离越大。图9f为分级注入时砂堤形态, 从中可以看出前期采用大排量、小粒径和低密度的支撑剂, 后期选用小排量、大粒径和高密度的支撑剂注入方式可以增加裂缝有效充填长度。

#### 4.2 以欧拉—拉格朗日方程为模型的数值模拟工作

##### 4.2.1 基于模拟软件的数值模拟

欧拉—拉格朗日模型是指流体流动采用欧拉法求解, 颗粒输运采用拉格朗日法求解。欧拉—拉格朗日模型精度高, 但其耗时较长<sup>[61-63]</sup>。

Tsai等<sup>[64]</sup>采用拉格朗日固体颗粒输运的三维计算流体力学模型对模拟裂缝中的轻质支撑剂运移过程进行了可视化研究。通过可视化模拟裂缝研究得出了在压裂液流速较高和支撑剂密度较低时, 支撑剂在缝网

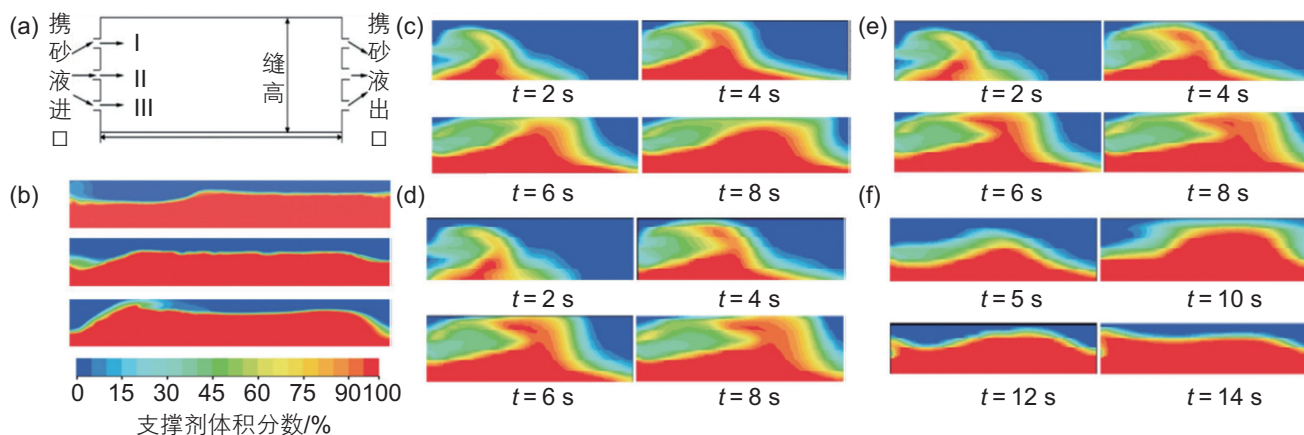


图9 (a) 数值模拟三种不同入口位置图<sup>[58]</sup>; (b) 不同类型出口的模拟砂堤形态<sup>[58]</sup>; (c) 支撑剂密度<sup>[60]</sup>; (d) 压裂液黏度<sup>[60]</sup>; (e) 支撑剂粒径对支撑剂分布的影响<sup>[60]</sup>; (f) 模拟支撑剂分级注入时的砂堤形态<sup>[60]</sup>

Fig. 9 (a) Numerical simulation of three different entrance location maps<sup>[58]</sup>; (b) The simulated sand bank shape of different types of exits<sup>[58]</sup>; (c) Proppant density<sup>[60]</sup>; (d) Viscosity of fracturing fluid<sup>[60]</sup>; (e) Influence of proppant particle size on proppant distribution<sup>[60]</sup>; (f) Simulation of sand bank morphology during fractional proppant injection<sup>[60]</sup>

中的的沉降速度较慢的规律。狄伟<sup>[46]</sup>使用Fluent软件,以欧拉—拉格朗日方法建立模型,并将支撑剂受力情况纳入考虑范围,应用颗粒轨道模型对支撑剂的运移铺置进行数值模拟计算,如图10a所示为I区为稳定砂堤区;II区为颗粒滚流区,此处的支撑剂颗粒处于动平衡状态;III区为颗粒悬浮区;IV区为无砂区。通过数值模拟得到的结果为:采用低密度和小粒径支撑剂、提高泵注排量、降低施工砂比以及增加压裂液黏度可以有效降低砂堤平衡高度,延长砂堤前缘距离裂缝入口的距离,可减小缝内砂堵的几率。Hu<sup>[48]</sup>在欧拉—拉格朗日模型的基础上,建立了直裂缝中的支撑剂模型,能够准确模拟支撑剂在流体中的运移。通过数值结果,可以清楚地了解直形裂缝中支撑剂的分布,考察了注入速度、注入支撑剂浓度、多浓度支撑剂加入顺序和多尺寸支撑剂加入顺序对支撑剂在裂缝中分布的影响。如图10b所示为泵入速度分别为0.05、0.1和0.2 m/s时的支撑剂分布,图10c为支撑剂浓度分别为0.05、0.1和0.2时,支撑剂在单个裂缝中的分布,该研究结果可为非常规油藏增产改造中的抽油方案优化提供参考。为了研究支撑剂在多裂缝中的运移铺展规律,郭宇朦<sup>[65]</sup>通过建立多通道裂缝模拟模型,采用欧拉—拉格朗日两相流数值模拟方法对多通道裂缝内支撑剂的运移铺置规律进行了研究,数值模拟结果表明在水平井段,随着支撑剂密度的增加和支撑剂粒径的增大,携砂性能减小,进而导致运移能力较差。在多裂缝通道内,小粒径支撑剂在远距离出口处的分布比近距离出口处的浓度均匀,大粒径支撑剂则相反,据此给出了在现场施工,要合理配比支撑剂颗粒的结论。

#### 4.2.2 基于CFD-DEM程序的支撑剂裂缝运移模拟

DEM-CFD是模拟刚性颗粒密集聚集相互作用的最合适的计算方法,DEM可以精确捕捉颗粒与颗

粒、颗粒与壁面的相互作用,并且能够模拟双向固液相互作用,能够真实地反映颗粒碰撞的动力学过程,该程序利用颗粒动力学和计算流体力学进行了严格计算<sup>[50,66-68]</sup>。

针对支撑剂的运移数值模拟研究普遍的是基于简单的支撑剂沉降速度模型,其仅限于平面裂缝情况,为了严格评价复杂裂缝,Han<sup>[69]</sup>利用CFD模型,完全耦合支撑剂颗粒与携液相之间的相互作用,跟踪支撑剂在裂缝中的运动,研究了支撑剂在如图11a所示T型和交叉型复杂裂缝系统中的运移铺置规律,还对压裂液黏度、支撑剂密度和注入速度等参数对支撑剂运移输送的影响进行了探究,图11b展示的是数值模拟中2种不同粒径的支撑剂分布,从图中可以看出粒径越小,支撑剂的输送速度越快,通过CFD模型得出,支撑剂在复杂裂缝中的运移受压裂流体动力学和支撑剂性质的影响很大。较高的注入量和低密度可以增加支撑剂的运移距离,该模型充分考虑了支撑剂颗粒与携带流体动力学之间的相互作用,这项工作拓展了目前对复杂裂缝几何条件下支撑剂运动的认识,对优化水力压裂设计,提高非常规油气井的油气产出具有很好的指导意义。朱海燕等<sup>[70]</sup>基于DEM-CFD模型建立了模拟裂缝数值模型,来探究包括裂缝闭合应力、储层弹性模量、铺砂浓度和支撑剂组合形式在内的影响裂缝导流能力的因素进行深入探究,结合数值模拟结果进行分析,模拟结果表明,铺砂浓度与支撑剂颗粒直径越大,裂缝导流能力越强,随着闭合应力和嵌入深度的增加,裂缝导流能力减小。图11c为支撑剂铺置浓度对导流能力和闭合缝宽的影响,在相同的闭合压力下,随着铺砂浓度的增大其相应的闭合缝宽和导流能力也随即增加,其导流能力和闭合缝宽随着闭合压力的增加整体成下降趋势,因此在高闭合压力的情

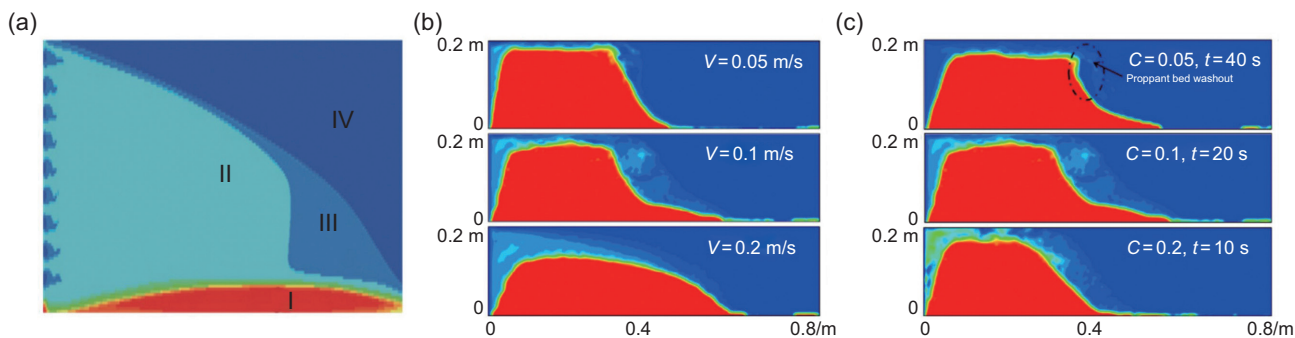


图10 (a) 支撑剂不同区域的分布图<sup>[46]</sup>; (b) 泵入速度分别为0.05、0.1和0.2m/s时的支撑剂分布<sup>[48]</sup>; (c) 支撑剂浓度分别为0.05、0.1和0.2时,支撑剂在裂缝中的分布<sup>[48]</sup>

Fig. 10 (a) Distribution of different proppant regions<sup>[46]</sup>; (b) Proppant distribution at pumping speeds of 0.05, 0.1, and 0.2m/s, respectively<sup>[48]</sup>; (c) Proppant distribution in fractures at concentrations of 0.05, 0.1, and 0.2, respectively<sup>[48]</sup>

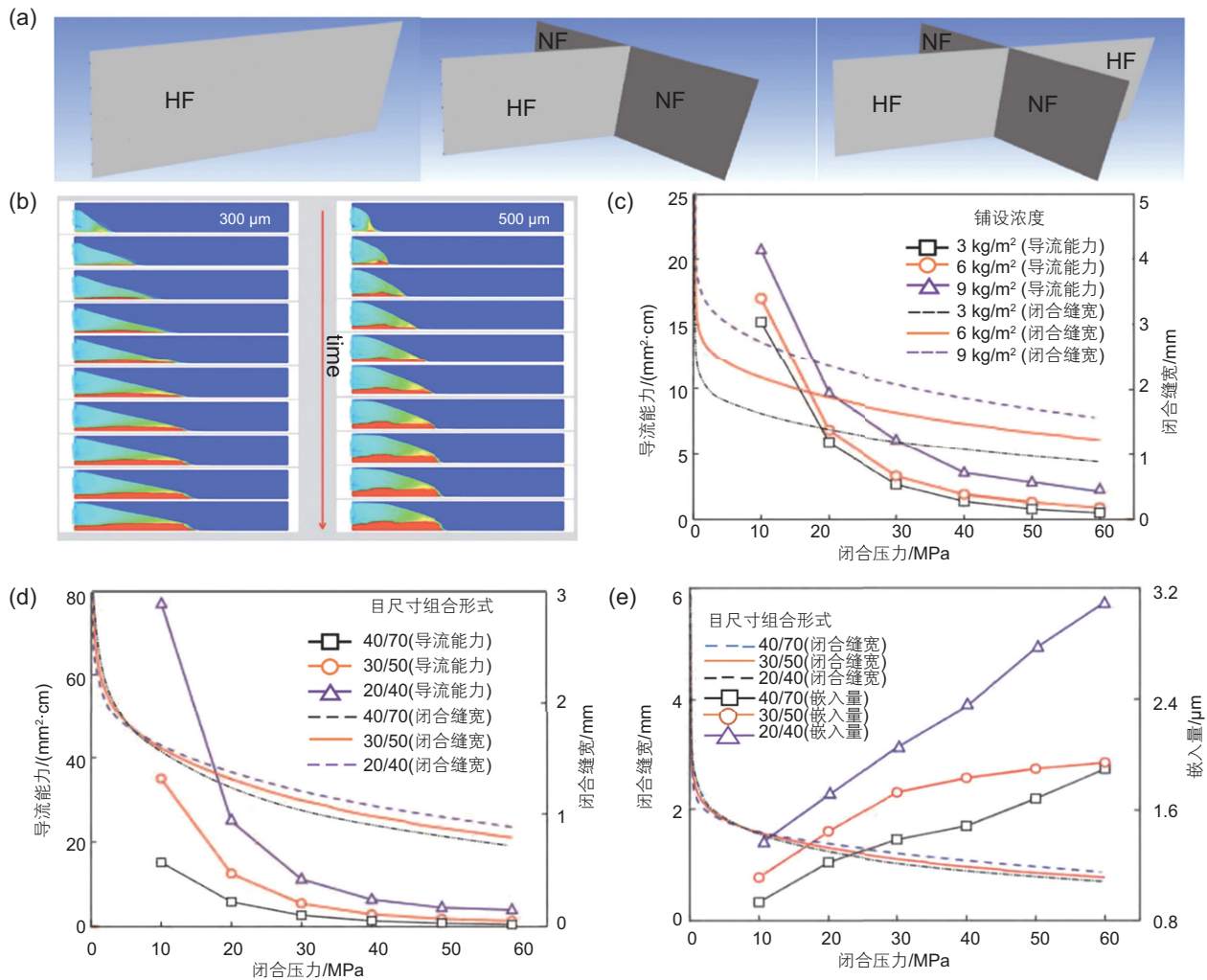


图 11 (a) T-型和交叉型裂缝示意图<sup>[69]</sup>; (b) 两种不同粒径支撑剂随时间变化的分布图<sup>[69]</sup>; (c) 支撑剂铺置浓度对导流能力和闭合缝宽的影响<sup>[70]</sup>; (d) 支撑剂尺寸组合形式对裂缝导流能力和缝宽的影响<sup>[70]</sup>; (e) 不同尺寸的支撑剂组合对闭合缝宽和嵌入量的影响<sup>[70]</sup>

Fig. 11 (a) Schematic diagram of T- and intersecting cracks<sup>[69]</sup>; (b) Distributions of two proppant sizes over time<sup>[69]</sup>; (c) Influence of proppant placement concentration on conductivity and closure gap width<sup>[70]</sup>; (d) Effects of proppant size combinations on fracture conductivity and fracture width<sup>[70]</sup>; (e) Effects of different sizes of proppant combinations on closed slit widths and inserts<sup>[70]</sup>

表 2 支撑剂运移铺置规律模拟研究总结表

Table 2 Summary of studies on simulation of proppant migration and placement rule

模拟方法	模拟结果	参考文献
欧拉—欧拉体系	不同进口位置的湍流效应对铺砂浓度影响较大	[71]
	进口位置对支撑剂的铺置有很大影响, 高泵入速度、低密度支撑剂增加沉降距离, 增大导流能力	[59]
	湍流效应对支撑剂的运移影响较大, 小粒径支撑剂增加运移距离	[72]
	施工前期要采用大排量、低砂比、小粒径和低密度支撑剂的施工方式, 后期则相反	[53]
	低密度、小粒径支撑剂有利于增加运移距离	[60]
欧拉—拉格朗日体系	高泵入速度, 低密度支撑剂增加运移距离及导流能力	[46]
	先注入较大支撑剂, 后注入较小支撑剂可增加运移距离	[48]
	低密度、小粒径支撑剂会增加运移距离及导流能力	[65]
	导流能力随支撑剂密度或粒径的增加而增加	[73]
	高泵入量、低密度支撑剂会增加运移距离	[69]
	铺砂浓度与支撑剂颗粒直径越大, 裂缝导流能力越强	[70]

况下,高浓度的铺砂浓度可以保持较好的导流效果。图 11d 为支撑剂尺寸组合形式对裂缝导流能力和缝宽的影响规律,从图中可以看出 20/40 目支撑剂组合是保持裂缝高导流能力的较优化组合。图 11e 展示了不同尺寸的支撑剂组合对闭合缝宽和嵌入量的影响,较大尺寸的支撑剂可以保持较大的闭合缝宽,但是由于大尺寸支撑剂与缝壁的接触面积相较于小尺寸的支撑剂来说更小,所以小尺寸的支撑剂的嵌入量更小。

## 5 结论与认识

随着世界石油行业对页岩气等非常规油气藏的不断开发以及低渗高压油气层的水力压裂开采的逐步探索,支撑剂的性能要求也不断变得严格,以往的石英砂支撑剂以及陶粒支撑剂已远远不能满足现在的压裂施工所需要的条件。一方面可以寻找低密度高强度的材料作为新一代的支撑剂使用,另一方面是利用表面改性技术对支撑剂表面进行改造,实现多种所需功能

并提高压裂裂缝的导流能力。低密度支撑剂需要在保持高强度的同时尽可能降低密度,高导流支撑剂在进行表面改性和形状变化之外也可以通过其他方式如束缚成团提高裂缝导流能力,功能化支撑剂除了实现示踪和原位生成的同时也需要进行其他功能化的研究。在压裂工艺和支撑剂性能的不断改进下,未来的覆膜支撑剂将在降低成本的基础上,向着功能化和智能化的方向发展。

支撑剂在裂缝中的运移铺置规律同样是急待研究的重要问题。只有支撑剂在颗粒运动的理论模型上更加完善,结合更为拟合现场情况的单缝或复杂裂缝网络的实验模拟,才能进一步突破支撑剂在裂缝沉降运移中所使用的欧拉—欧拉、欧拉—拉格朗日以及拉格朗日—拉格朗日模型的模拟研究,为现场施工过程提供更为准确合理的参数设计,更加有效地指导现场施工从而提高压裂改造功效、缩短钻井周期、增加油气产量。

## 参考文献

- [1] 李国欣,朱如凯. 中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(02): 1-13. [LI G X, ZHU R K. Progress, challenges and key issues of unconventional oil and gas development of CNPC[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(02): 1-13.]
- [2] BARATI R, LIANG J T. A review of fracturing fluid systems used for hydraulic fracturing of oil and gas wells[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(16).
- [3] 杨秀夫,刘希圣,陈勉,等. 国内外水力压裂技术现状及发展趋势[J]. 钻采工艺, 1998, 21(04): 3-5. [YANG X F, LIU X S, CHEN M, et al. Current situation and development trend of hydraulic fracturing technology at home and abroad[J]. Drilling & Production Technology, 1998, 21(04): 3-5.]
- [4] 贾旭楠. 支撑剂的研究现状及展望[J]. 石油化工应用, 2017, 36(09): 1-6. [JIA X N. Overview of the proppant development and prospect[J]. Petrochemical Industry Application, 2017, 36(09): 1-6.]
- [5] 张伟民,刘三琴,崔彦立,等. 树脂覆膜支撑剂研究进展[J]. 热固性树脂, 2011, 26(06): 55-59. [ZHANG W M, LIU S Q, CUI Y L, et al. Research advance of resin coated proppants[J]. Thermosetting Resin, 2011, 26(06): 55-59.]
- [6] 马新仿,张士诚. 水力压裂技术的发展现状[J]. 河南石油, 2002, 16(01): 44-7+1. [MA X F, ZHANG S C. The development status of hydraulic fracturing technology[J]. Henan Petroleum, 2002, 16(01): 44-7+1.]
- [7] 续震,卢鹏. 国内水力压裂技术现状[J]. 石化技术, 2017, 24(05): 280. [XU Z, LU P. Current situation of hydraulic fracturing technology in China[J]. Petrochemical Industry Technology, 2017, 24(05): 280.]
- [8] 李小刚,廖梓佳,杨兆中,等. 压裂用支撑剂应用现状和研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(06): 1920-1923. [LI X G, LIAO Z J, YANG Z Z, et al. Application and development of fracturing proppant[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(06): 1920-1923.]
- [9] LIANG F, SAYED M, AL-MUNTASHERI G, et al. Overview of existing proppant technologies and challenges: Proceedings of society of petroleum engineers[C]. 2015.
- [10] 刘让杰,张建涛,银本才,等. 水力压裂支撑剂现状及展望[J]. 钻采工艺, 2003, (04): 42-5+8. [LIU R J, ZHANG J T, YIN B C, et al. Current status and prospect of hydraulic fracturing proppant[J]. Drilling & Production Technology, 2003, (04): 42-5+8.]
- [11] 赵爽,刘挺,王菊侠. 石油压裂支撑剂的现状及研究进展[J]. 新疆有色金属, 2015, 38(01): 107-108. [ZHAO S, LIU T, WANG J X. Current status and research progress of proppant for petroleum fracturing[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2015, 38(01): 107-108.]
- [12] 崔冰峡,刘军,陈耀斌,等. 陶粒压裂支撑剂研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(02): 458-463. [CUI B X, LIU J, CHEN Y B, et al. Research progress on ceramic fracturing proppants[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(02): 458-463.]

- [13] 周少鹏, 田玉明, 陈战考, 等. 陶粒压裂支撑剂研究现状及新进展[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(06): 1097–1102. [ZHOU S P, TIAN Y M, CHEN Z K, et al. Current research situation and new progress of ceramic fracturing proppants[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(06): 1097–1102.]
- [14] 杜红莉, 张薇, 马峰, 等. 水力压裂支撑剂的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(08): 2625–2630. [DU H L, WANG W, MA F, et al. Research progress of hydraulic fracturing proppants[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(08): 2625–2630.]
- [15] ZOVEIDAVIANPOOR M, GHARIBI A. Application of polymers for coating of proppant in hydraulic fracturing of subterranean formations: A comprehensive review[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 24: 197–209.
- [16] 2008—2018 我国压裂支撑剂规模情况[EB/OL]. <http://www.chyxx.com/industry/201910/791109.html>. [Fracturing proppant scale in China from 2008 to 2018[EB/OL]. <http://www.chyxx.com/industry/201910/791109.html>.]
- [17] Rystad Energy Research. Mixed outlook for proppant in 2019[EB/OL]. <http://www.drillingcontractor.org/mixed-outlook-proppant-2019-49751>.
- [18] 邓浩, 公衍生, 罗文君, 等. 低密度高强度覆膜陶粒支撑剂的制备与性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(05): 1193–1198. [DENG H, GONG Y S, LUO W J, et al. Study on the preparation and performance of low-density and high-strength coated ceramic proppants[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(05): 1193–1198.]
- [19] YANG J, LIU X H, MENG Q N. Development and application of double-layer coated hydrophobic proppant: Proceedings of spring-er[C]. 2019.
- [20] 黄彪, 高云峰, 田玉明, 等. 烧结温度对煤矸石制备支撑剂性能的影响[J]. 太原科技大学学报, 2020, 41(03): 220–3+31. [HUANG B, GAO Y F, TIAN Y M, et al. Effects of sintering temperature on properties of proppant prepared from coal gangue[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2020, 41(03): 220–3+31.]
- [21] 马俊伟, 吴国亮, 张建强. 铝土矿废石制备超低密度陶粒支撑剂的试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(03): 151–4+9. [MA J W, WU G L, ZHANG J Q. Experimental research on preparation of ultra-low-density ceramicsite proppant with bauxite waste rock[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(03): 151–4+9.]
- [22] 秦梅, 郝惠兰, 田玉明, 等. 氧化钙对陶粒支撑剂结构和破碎率的影响[J]. 人工晶体学报, 2019, 48(08): 1522–1526. [QIN M, HAO H L, TIAN Y M, et al. Effect of CaO on structure and breakage ratio of ceramic proppant[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2019, 48(08): 1522–1526.]
- [23] 马俊伟, 吴国亮, 张建强. 铝土矿选尾矿制备低密高强陶粒支撑剂的试验研究[J]. 轻金属, 2019, (10): 8–11. [MA J W, WU G L, ZHANG J Q. Experimental research on preparation of low density and high strength ceramicsite proppant with bauxite tailings[J]. Light Metals, 2019, (10): 8–11.]
- [24] 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(03): 33–38. [TIAN Z Y, LU X G, CAO W J, et al. Experimental study on fracture conductivity of self suspension and ordinary proppant[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2019, 32(03): 33–38.]
- [25] 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(01): 67–70. [HUANG B, XIONG W, MA X M, et al. Application of novel self suspending fracturing proppant[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2015, 5(01): 67–70.]
- [26] 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(03): 105–108. [ZHANG L S, QIN S Y, LEI L, et al. Property evaluation and field applications of a new self-suspending proppant[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(03): 105–108.]
- [27] 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(03): 449–455. [ZHANG X, WANG Z X, WANG L S, et al. Preparation and performance evaluation of expansive self-suspension proppant[J]. Oilfield Chemistry, 2017, 34(03): 449–455.]
- [28] GOL R, WANG C, GUPTA R B, et al. Synthesis of self-suspending silica proppants using photoactive hydrogels[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 157: 651–656.
- [29] 郜婧文, 卢祥国, 曹伟佳, 等. 胍胶自增稠支撑剂性能及其储层伤害性评价[J]. 油田化学, 2019, 36(02): 219–224. [KUAI J W, LU X G, CAO W J, et al. Performance evaluation of guanidine gum self-suspension proppant and its reservoir damage assessment[J]. Oilfield Chemistry, 2019, 36(02): 219–224.]
- [30] 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(06): 90–94. [DONG L F, CHEN X Y. Performance evaluation and field application of a self-suspending proppant[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(06): 90–94.]
- [31] CAO W, XIE K, LU X, et al. Self-suspending proppant manufacturing method and its property evaluation[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 107251.
- [32] OSIPTSOV A A. Hydraulic fracture conductivity: effects of rod-shaped proppant from lattice-Boltzmann simulations and lab tests[J]. Advances in water resources, 2017, 104: 293–303.
- [33] 杨晓鹏, 曾芮. 高速通道压裂技术机理研究与应用[J]. 广东石油化工学院学报, 2015, 25(01): 8–13. [YANG X P, ZENG R. Mechanism research and field application of highway fracturing[J]. Journal of Guangdong University of Petrochemical Technology,

- 2015, 25(01): 8–13.]
- [34] XU J, DING Y, YANG L, et al. Conductivity analysis of hydraulic fractures filled with nonspherical proppants in tight oil reservoir[J]. *Energy Science & Engineering*, 2020, 8(1): 166–180.
- [35] DUENCKEL R J, SMITH H D, WARREN W, et al. Field application of a new proppant detection technology: Proceedings of society of petroleum engineers[C]. 2011.
- [36] 李灿然, 李向辉, 遆永周, 等. 一种非放射性压裂效果评价用钐标记压裂支撑剂的研制[J]. *陶瓷学报*, 2019, 40(01): 57–61. [LI C R, LI XIANG H, TI Y Z, et al. Preparation of a non-radioactive, samarium-tragged fracturing proppant for the evaluation of fracturing effect[J]. *Journal of Ceramics*, 2019, 40(01): 57–61.]
- [37] CHANG F F, BERGER P D, LEE C H. In-situ formation of proppant and highly permeable blocks for hydraulic fracturing: Proceedings of society of petroleum engineers[C]. 2015.
- [38] LUO Z, ZHANG N, ZHAO L, et al. Thermoresponsive in situ generated proppant based on liquid–solid transition of a supramolecular self-propping fracturing fluid[J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33(11): 10659–10666.
- [39] BABCOCK R, PROKOP C, KEHLE R. Distribution of propping agent in vertical fractures: Proceedings of american petroleum institute[C]. 1967.
- [40] SONI S J. Proppant transport with varying injection points and its impact on proppant development inside a fracture [M]//Missouri University of Science and Technology, 2018.
- [41] LI P, ZHANG X, LU X, et al. Experimental study on the self-suspending proppant-laden flow in a single fracture[J]. *REM-International Engineering Journal*, 2018, 71(2): 191–196.
- [42] DAYAN A, STRACENER S M, CLARK P E. Proppant transport in slickwater fracturing of shale gas formations: Proceedings of society of petroleum engineers[C]. 2009.
- [43] 温庆志, 段晓飞, 战永平, 等. 支撑剂在复杂缝网中的沉降运移规律研究[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 31(01): 79–84. [WEN Q Z, DUAN X F, ZHAN Y P, et al. Study on settlement and migration law of proppant in complex fracture network[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition)*, 2016, 31(01): 79–84.]
- [44] TONG S, MOHANTY K K. Proppant transport study in fractures with intersections[J]. *Fuel*, 2016, 181: 463–477.
- [45] HOU T, ZHANG S, MA X, et al. Experimental and theoretical study of fracture conductivity with heterogeneous proppant placement[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 37: 449–461.
- [46] 狄伟. 支撑剂在裂缝中的运移规律及铺置特征[J]. *断块油气田*, 2019, (3): 355–359. [DI W. Migration patterns and placement characteristics of proppant in fractures[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2019, (3): 355–359.]
- [47] RIVAS E, GRACIE R. Numerical considerations for the simulation of proppant transport through fractures[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 180: 1006–1021.
- [48] HU X, WU K, LI G, et al. Effect of proppant addition schedule on the proppant distribution in a straight fracture for slickwater treatment[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 167: 110–119.
- [49] MOBBS A T, HAMMOND P S. Computer simulations of proppant transport in a hydraulic fracture[J]. *SPE Production & Facilities*, 2001, 16(2): 112–121.
- [50] ZHANG G, LI M, GUTIERREZ M. Numerical simulation of proppant distribution in hydraulic fractures in horizontal wells[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 48: 157–168.
- [51] WANG F, LI B, CHEN Q, et al. Simulation of proppant distribution in hydraulically fractured shale network during shut-in periods[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 178: 467–474.
- [52] ZENG J, LI H, ZHANG D. Numerical simulation of proppant transport in propagating fractures with the multi-phase particle-in-cell method[J]. *Fuel*, 2019, 245: 316–335.
- [53] 周德胜, 张争, 惠峰, 等. 滑溜水压裂主裂缝内支撑剂输送规律实验及数值模拟[J]. *石油钻采工艺*, 2017, 039(4): 499–508. [ZHOU D S, ZHANG Z, HUI F, et al. Experiment and numerical simulation on transportation laws of proppant in major fracture during slick water fracturing[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2017, 039(4): 499–508.]
- [54] HOSSEINI N, KHOEI A R. Numerical simulation of proppant transport and tip screen-out in hydraulic fracturing with the extended finite element method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 128.
- [55] KONG X, MCANDREW J, CISTERNAS P. CFD study of using foam fracturing fluid for proppant transport in hydraulic fractures: Proceedings of society of petroleum engineers[C]. 2016.
- [56] KONG X, MCANDREW J. A computational fluid dynamics study of proppant placement in hydraulic fracture networks: Proceedings of society of petroleum engineers[C]. 2017.
- [57] ZHANG Y, LU X, ZHANG X, et al. Proppant transportation in cross fractures: Some findings and suggestions for field engineering[J]. *Energies*, 2020, 13(18): 4912.
- [58] 符洋. 不同进口位置下支撑剂铺置规律及其数值模拟研究[J]. *石油化工应用*, 2019, 38(4): 11–16. [FU Y. Experimental and



- numerical simulation study on proppant laid law in different inlet positions[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2019, 38(4): 11–16.]
- [59] 张涛, 郭建春, 刘伟. 清水压裂中支撑剂输送沉降行为的CFD模拟[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2014, (1): 74–82. [ZHANG T, GUO J C, LIU W. CFD simulation of proppant transportation and settling in water fracture treatments[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 2014, (1): 74–82.]
- [60] 刘春亭, 李明忠, 郝丽华, 等. 水力裂缝内支撑剂输送沉降行为数值仿真[J]. *大庆石油地质与开发*, 2018, 037(005): 86–93. [LIU C T, LI M Z, HAO L H, et al. Numerical simulation of the proppant transportation and setting in the hydraulic fracture[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2018, 037(005): 86–93.]
- [61] BOKANE A B, JAIN S, DESHPANDE Y K, et al. Transport and distribution of proppant in multistage fractured horizontal wells: a CFD simulation approach: *Proceedings of society of petroleum engineers*[C]. 2013.
- [62] BOKANE A, JAIN S, DESHPANDE Y, et al. Computational fluid dynamics (CFD) study and investigation of proppant transport and distribution in multistage fractured horizontal wells: *Proceedings of society of petroleum engineers*[C]. 2013.
- [63] ZHANG J, DUNN-NORMAN S. Computational fluid dynamics (CFD) modeling of proppant transport in a plug and perf completion with different perforation phasing: *Proceedings of society of exploration geophysicists, american association of petroleum geologists, society of petroleum engineers*[C]. 2015.
- [64] TSAI K, DEGALEESAN S S, FONSECA E R, et al. Advanced computational modeling of proppant settling in water fractures for shale gas production[J]. *SPE Journal*, 2012, 18(1): 1389–1394.
- [65] 郭宇朦, 雷贤良, 李会雄, 等. 页岩气多裂缝通道中的沉降特性研究[J]. *计算机仿真*, 2016, 33(1): 116–121. [GUO Y M, LEI X L, LI H X, et al. Study on settlement characteristics of shale gas in multi-fracture channel[J]. *Computer Simulation*, 2016, 33(1): 116–121.]
- [66] TOMAC I, GUTIERREZ M. Micromechanics of proppant agglomeration during settling in hydraulic fractures[J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2015, 5(4): 417–434.
- [67] ZHU H, SHEN J, ZHANG F, et al. DEM-CFD modeling of proppant pillar deformation and stability during the fracturing fluid flowback[J]. *Geofluids*, 2018.
- [68] ZHANG G, GUTIERREZ M, LI M. A coupled CFD-DEM approach to model particle-fluid mixture transport between two parallel plates to improve understanding of proppant micromechanics in hydraulic fractures[J]. *Powder Technology*, 2017, 308: 235–248.
- [69] HAN J, YUAN P, HUANG X, et al. Numerical study of proppant transport in complex fracture geometry: *Proceedings of society of petroleum engineers*[C]. 2016.
- [70] 朱海燕, 沈佳栋, 周汉国. 支撑裂缝导流能力的数值模拟[J]. *石油学报*, 2018, 39(12): 98–108. [ZHU H Y, SHEN J D, ZHOU H G. Numerical simulation on propped fracture conductivity[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(12): 98–108.]
- [71] 符洋. 不同进口位置下支撑剂铺置规律及其数值模拟研究[J]. *石油化工应用*, 2019, 38(04): 17–22. [FU Y. Experimental and numerical simulation study on proppant laid law in different inlet positions[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2019, 38(04): 17–22.]
- [72] 刘平礼, 雷飞云, 李骏, 等. 多因素作用下单裂缝铺砂规律CFD数值模拟[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2019, 34(5): 86–90. [LIU P L, LEI F Y, LI J, et al. Numerical simulation of proppant distribution law in single crack under multi-factors using CFD software[J]. *Journal of Xi'an Shiyu University(Natural Science Edition)*, 2019, 34(5): 86–90.]
- [73] ZHANG F, ZHU H, ZHOU H, et al. Discrete-element-method/computational-fluid-dynamics coupling simulation of proppant embedment and fracture conductivity after hydraulic fracturing[J]. *SPE Journal*, 2017, 22(02): 632–644.

(责任编辑 林伯韬 编辑 马桂霞)