

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.2019108

## 石墨烯在石油工程中的应用现状与发展建议

耿黎东, 王敏生, 蒋海军, 光新军

(中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

**摘 要:** 石墨烯因具有独特的物理、化学性质而成为国内外研究热点,但在石油工程领域的应用研究还处于起步阶段。介绍了石墨烯及其衍生物的物理、化学特性,分析了石墨烯在油气探测技术、井下工具、井下流体、提高采收率技术和油水分离技术等方面的研究进展和应用情况,指出石墨烯在石油工程领域的发展需要进一步加强基础理论攻关、拓展石墨烯在石油工程领域的应用范围、加快石墨烯在油气行业的大规模推广应用,以引导油气行业新技术革命和促进我国油气资源的经济高效开发。这为促进石墨烯及其衍生物在石油工程领域的快速应用和发展具有借鉴意义。

**关键词:** 石墨烯; 井下工具; 提高采收率; 油水分离; 应用现状; 发展建议

**中图分类号:** TE19      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-0890(2019)05-0080-06

### The Status of the Development of Graphene Applications in Petroleum Engineering

GENG Lidong, WANG Minsheng, JIANG Haijun, GUANG Xinjun

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

**Abstract:** Graphene has become a hot research topic at home and abroad because of its unique physical and chemical properties, but its research and application in petroleum engineering are still in its infancy. In order to promote the rapid development and wide application of graphene and its derivatives in petroleum engineering, the excellent physical and chemical properties of graphene and its derivatives were introduced. An analysis of the current state of graphene research and application of graphene looked at five aspects: oil and gas exploration technology, downhole tools, downhole fluids, enhanced oil recovery (EOR) and oil-water separation technology. Finally, recommendations were made for additional research into graphene in petroleum engineering. It is recommended that the research on the key technologies mentioned above should be carried out, so as to further strengthen the basic theoretical research, and extend the application range of graphene in petroleum engineering, accelerate the large-scale popularization and application of graphene in the oil and gas industry, and provide reference for guiding the new technological revolution in the oil and gas industry and facilitating the economic and efficient development of China's oil and gas resources.

**Key words:** graphene; downhole tool; enhanced oil recovery; oil and water separation; application status; development suggestion

2004 年,英国物理学家采用机械剥离法从石墨中分离出石墨烯,证明单层石墨烯是可以稳定存在的<sup>[1]</sup>;2008 年,美国麻省理工学院将石墨烯晶体管技术评选为当年的十大新兴技术之一;2009 年,《Science》将“石墨烯研究取得新进展”列为 2009 年十大科学进展之一。目前,石墨烯材料已在储能<sup>[2]</sup>、化工<sup>[3]</sup>、生物医学<sup>[4]</sup>、航空航天<sup>[5]</sup>和电子信息<sup>[6]</sup>等领域得到了广泛应用。

目前,我国常规油气资源勘探开发难度越来越大,资源品质越来越差,复杂油气藏、非常规油气藏、剩余油气挖潜和深水等油气资源将成为我国油

气勘探开发的重点领域;然而,当前的石油工程技术水平极大地限制了以上油气资源的有效动用<sup>[7]</sup>。石墨烯及其衍生物独特的力学、电学和光学等性

收稿日期:2019-02-11;改回日期:2019-08-21。

**作者简介:** 耿黎东(1988—),男,河北昌黎人,2011年毕业于中国石油大学(北京)石油工程专业,2017年获中国石油大学(北京)油气井工程专业博士学位,助理研究员,主要从事石油工程战略规划研究。E-mail: genglid.sripe@sinopec.com。

**基金项目:** 中国石化科技攻关项目“国内外石油工程技术装备发展趋势与中石化发展战略研究”(编号: P19029-5)、中国石化基础前瞻项目“钻完井人工智能技术现状及中石化战略对策”(编号: P19002)联合资助。

质,使其在地球物理勘探、钻井完井、固井和提高采收率等方面具有巨大的潜在应用价值<sup>[8]</sup>,为难动用油气资源的高效开发提供了新的技术思路。为了加快我国石墨烯在石油工程领域的应用速度,提高石油工程技术水平,更好地满足油气资源高效勘探开发的需求,介绍了石墨烯及其衍生物的特性,分析了石墨烯在石油工程中的应用现状,并提出石墨烯在石油工程领域的发展建议。

1 石墨烯及其衍生物的特性

石墨烯是由单层碳原子构成的二维蜂窝网状晶体,其碳原子之间以  $sp^2$  杂化轨道构成的六边形排布(见图 1)。作为二维纳米材料,石墨烯具有卓越的物理、化学性质。它是目前人类发现的厚度最薄却最坚硬的纳米材料,其硬度是钢的 200 倍<sup>[9]</sup>;具有优异的电学和光学性能,其电阻率仅为  $10^{-6} \Omega \cdot m$ ,是目前世界上电阻率最低的材料;超高载流子迁移率达到  $2 \times 10^5 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ,光学透明度达 97.7%<sup>[10]</sup>;导热性能好,室温下导热系数达  $5\,300 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,已超越块体石墨、碳纳米管和钻石等同素异形体的极限,远超银、铜等金属材料;比表积极高,理论值可高达  $2\,630 \text{ m}^2/\text{g}$ ,吸附性能优异,对铅的吸附量高达  $800 \text{ mg}/\text{g}$ ,远远高于活性炭的  $60 \sim 120 \text{ mg}/\text{g}$ <sup>[11]</sup>。

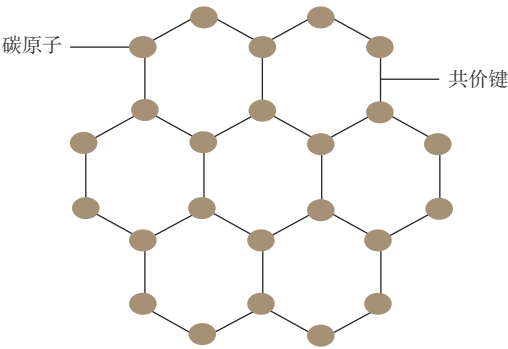


图 1 单层石墨烯晶格结构示意图  
Fig.1 Schematic diagram of monolayer graphene lattice structure

氧化石墨烯(graphene oxide, GO)作为石墨烯的衍生物,其特点与石墨烯有所不同(见表 1)。它是将石墨进行氧化插层处理,使部分碳原子由  $sp^2$  杂化状态转变为  $sp^3$  杂化状态。GO 片层平面和边缘存在丰富的羟基、环氧基、羰基和羧基(见图 2),这些含氧基团都是亲水基团,所以氧化石墨烯具有良好的亲水性,能够均匀稳定地分散于水中,形成稳

定的水性溶胶<sup>[12]</sup>。氧化石墨烯分散液经过脱水后, $sp^2$  区域的  $\pi-\pi$  键与含氧官能团之间的氢键相互作用使 GO 二维片层之间紧密结合,片层之间的黏附作用使 GO 具有良好的力学性能。同时,含氧基团使 GO 具有多个活性位点,可以大量吸附有机物。

表 1 石墨烯与氧化石墨烯部分特性对比  
Table 1 Comparison of partial characteristics of graphene and graphene oxide

| 特性                                                                     | 石墨烯             | 氧化石墨烯               |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------|
| 碳氧比                                                                    |                 | 2~4                 |
| 杨氏模量/GPa                                                               | 1 000           | 207.6±23.4          |
| 超高载流子迁移率/<br>( $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | $2 \times 10^5$ | 绝缘体                 |
| 21 ℃下导热系数/<br>( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )   | 4 840~5 300     | 取决于氧化程度,<br>最小可达8.8 |
| 水溶性                                                                    | 不溶于水            | 可溶于水                |
| 生产成本                                                                   | 高               | 低                   |

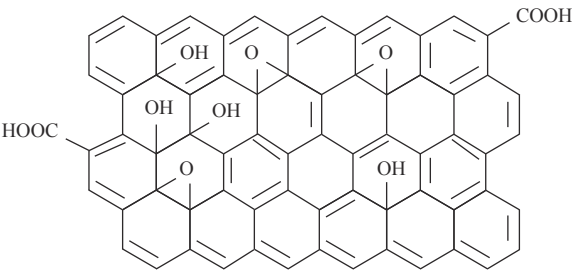


图 2 氧化石墨烯分子结构示意图  
Fig.2 Schematic diagram of the molecular structure of graphene oxide

2 石墨烯在石油工程中的应用现状

目前,石墨烯及其衍生物在化工、电子信息、航空航天领域的应用研究呈井喷式发展态势,但在石油工程中的应用研究还处于起步阶段<sup>[13]</sup>。

2.1 油气探测

油气勘探常采用光波导探测目的层的地质特征、井下环境参数(包括温度、压力等)和近井地带流体特点等,波导中包括光纤电缆、光纤传感器和其他光学部件。井筒富氢环境下,游离的氢原子扩散进入波导与光纤中的缺陷位点发生反应,影响了光在波导中的传输,导致信号质量衰弱,这种现象称为“氢暗化”。S. G. Bhongale等人<sup>[14]</sup>提出将石墨烯作为保护层,附着于波导表面。石墨烯力学性质

优异,可以延长波导的使用寿命,阻止氢原子扩散,使“氢暗化”减弱。此外,石墨烯透光性强,作为保护层能够提高信号的清晰度。

石油勘探往往需要同时使用多个声波传感器,以保证空间分辨率的质量。轻量级膜片材料的研究进展直接影响声波传感器的发展。目前,基于硅或二氧化硅材料的常规传感器存在灵敏度不高的问题;基于高分子材料的传感器虽然灵敏度较高,但机械强度有限,在渗透结构和水汽环境下不稳定<sup>[15]</sup>。Ma Jun 等人<sup>[16]</sup>利用  $\phi 25\ \mu\text{m}$  石墨烯膜片研制了压力灵敏度达到  $39.2\ \text{nm/kPa}$  的 F-P 压力传感器;之后,又利用厚度约  $100\ \text{nm}$ 、直径  $125\ \mu\text{m}$  的石墨烯膜片研制了光纤 F-P 声波传感器,其动态压力敏感度高达  $1\ 100\ \text{nm/kPa}$ ,可探测到最小  $60\ \mu\text{Pa/Hz}^{1/2}$  的声压信号<sup>[17]</sup>。

油基钻井液导电性较差,会阻断直流电流,导致随钻电阻率测井技术无法应用。磁性石墨烯纳米带(MGNRs)是一种准一维的石墨烯基材料,其特殊的边缘限域效应使其性质灵活可调,利用价值更大。例如,由于磁性石墨烯材料的导带和价带间不存在间隙而无法直接使用,但将其裁剪成尺度较小的 MGNRs 时就可应用于场效应晶体管(FET)中。B. Genorio 等人<sup>[18]</sup>将 MGNRs 作为导电涂层附着于油基钻井液颗粒表面,以提高井筒中传感器传递信息的可靠性。此外, MGNRs 的尺寸可达纳米级,可以进入更小的孔隙、裂缝中探测剩余油气的位置,尤其适用于富含纳米孔隙和微裂缝的页岩储层。

## 2.2 井下工具

钻井工具是石墨烯应用的主要方向之一。钻井过程中,钻头和井下动力钻具是破碎岩石的主要工具。井下高温高压的恶劣环境对钻井工具提出了较高要求,石墨烯涂层具有优异的力学性能,可优化金属的表面形态和特性,提高钻井工具的抗磨损、抗腐蚀和耐冲击性能,防止工具表面氧化生锈。S. Chakraborty 等人<sup>[19]</sup>将金刚石颗粒表面涂覆石墨烯薄膜,并应用于 PDC 钻头,使钻头寿命增长,且抗温能力达到  $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ 。M. K. Keshavan 等人<sup>[20]</sup>同样在 PDC 钻头的金刚石颗粒材料中加入石墨烯,提高了钻头的抗磨损性、热稳定性和耐冲击能力。

橡胶失效是石油工程中常见的井下工具故障之一。奥瑞拓能源公司在丁腈橡胶中加入质量分数为 1.7% 的石墨烯纳米管浓缩液,使丁腈橡胶的拉伸模量增加了约 30%,并将其应用于螺杆钻具的橡胶

定子,使橡胶定子的耐磨性提高了 20%,机械钻速也提高了 20% 以上<sup>[21]</sup>。

## 2.3 井下流体

石墨烯在石油工程中的另一个应用方向是钻井液。将 GO 加入钻井液中,可提高钻井液降滤失性能,改善滤饼质量。A. Jamrozik<sup>[22]</sup>利用电镜扫描,对低固相钻井液加入质量分数 1.5%GO 前后分别形成的滤饼微观结构进行了对比,结果发现:未加入 GO 的钻井液形成的滤饼含有很多高孔隙度的聚结物,该聚结物由方解石晶体构成,上面嵌有氯化钾晶体(见图 3(a));加入 GO 的钻井液形成的滤饼中嵌有氯化钾晶体的碳酸盐岩矿物微晶,表面覆有高度聚合的 GO,形成的滤饼更加致密,更有利于稳定井壁(见图 3(b))。这是因为 GO 存在多个含氧官能团,在表面和边缘易与低固相钻井液中的聚合物发生反应,形成的滤饼可以阻止水进入储层。宣扬等人<sup>[23]</sup>应用 GO 制备了一种钻井液降滤失剂,在无膨润土的情况下,GO 的加量由 0.2% 提高到 0.6% 时,钻井液 API 滤失量由  $137.0\ \text{mL}$  降至  $14.7\ \text{mL}$ ,降滤失效果明显。

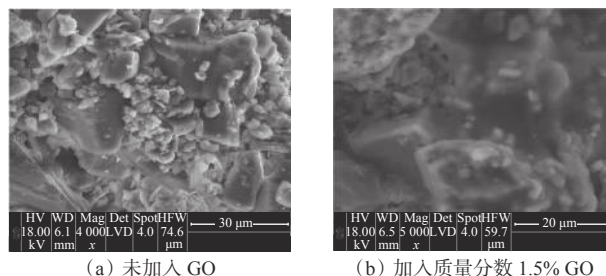


图 3 低固相钻井液形成的滤饼微观结构对比<sup>[22]</sup>

Fig. 3 Comparison of the microstructure of filter cake formed by low solid phase drilling fluid<sup>[22]</sup>

石墨烯也可以改善水泥浆的流变性。王琴等人<sup>[24]</sup>采用流变仪和激光共聚焦显微镜定量研究了 GO 加量对水泥浆流变参数的影响。结果表明,分散的水泥颗粒受 GO 的影响会再次发生凝聚,形成重组絮凝结构,进而影响水泥浆的流变性。加入 GO 后水泥浆的触变性、塑性黏度和屈服应力均显著增加,水泥浆的稳定性也大幅提高。

石墨烯还可以提高泥页岩的稳定性。A. Aftab 等人<sup>[25]</sup>比较了泥页岩在不同钻井液(KCl 钻井液、KCl 钻井液+部分水解聚丙烯酰胺、KCl 钻井液+石墨烯纳米薄片、KCl 钻井液+纳米二氧化硅和 KCl 钻井液+多壁碳纳米管)中的膨胀性。X 射线衍射结果

表明, 泥页岩在 5 种钻井液中浸泡 20 h 后, 其在 KCl 钻井液+石墨烯纳米薄片中的体积膨胀最小, 说明钻井液中加入石墨烯可提高泥页岩的稳定性。

石墨烯具有优异的自润滑性能, 可提高钻井液的润滑性。赵磊等人<sup>[26]</sup>采用球面接触往复移动方式, 对比研究了 PAO4 润滑油在添加 0.01% 石墨烯前后的润滑磨损性能, 结果发现, 加入石墨烯后 PAO4 润滑油的摩擦系数最大可降低 78%, 磨损率最大可降低 95%。N. M. Taha 等人<sup>[27]</sup>研发了一种石墨烯表面活性剂, 其可进入金属表面的微孔, 并在高压作用下结晶形成保护膜, 提高钻井液的润滑性, 防止钻头泥包。室内试验表明, 水基聚合物盐水钻井液在加入体积分数 1%~5% 的石墨烯后, 其极压润滑系数最高可降低 80%; 而加入常用的酯基润滑剂后其极压润滑系数仅降低 30%~40%。石墨烯材料还能显著提高完井液的储层保护性能, 石墨烯完井液与储层作用后, 储层渗透率恢复率达 41%, 而常规完井液只有 5%。缅甸一口试验井在钻井液中加入体积分数 2% 的石墨烯后, 机械钻速由原来的 3.0~4.0 m/h 提高到 9.0 m/h, 摩阻下降了 70%~80%, 钻头寿命延长了 75%, 钻头磨损小, 且钻头表面未见泥包(见图 4)。

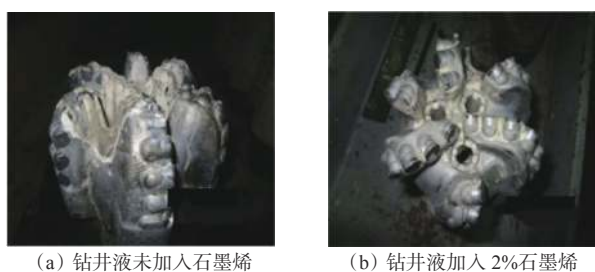


图 4 钻头磨损情况对比<sup>[27]</sup>

Fig. 4 Comparison of bit worn states<sup>[27]</sup>

## 2.4 提高稠油采收率

2016 年, Luo Dan 等人<sup>[28]</sup>研发了一种厚度仅为 1 nm 左右的非对称化学异性石墨烯纳米片材料。该材料在结构上严格不对称, 一侧表面含有亲水官能团, 而另一侧表面含有亲油官能团, 使其表现出既亲水又亲油的双亲特性。石墨烯纳米片材料在中、高浓度盐水和原油中会自动聚集在油水界面, 并发生自组织, 从而降低油水界面张力。在水动力学条件下, 非对称化学异性石墨烯纳米片材料会在油水界面形成一层具有可恢复性的固体弹性膜, 将油水两相分离后驱替油相前进。室内试验结果表明, 质量分数 0.01% 的石墨烯纳米片材料可使采收

率提高 15.2%, 是传统提高采收率技术的 3 倍以上。

我国稠油储量巨大, 目前主要采用蒸汽吞吐、蒸汽驱等热力方式进行开采。热力开采方式一方面可以通过加热而降低稠油黏度, 另一方面可使稠油中长碳链分子的碳链断裂, 提高其流动性。稠油热力开采过程中加入热传导率高的纳米颗粒, 有助于提高热传导效率, 从而提高稠油降黏效果<sup>[29]</sup>。M. Elshawaf<sup>[30]</sup>向稠油中加入质量分数 0~0.5% 的 GO 纳米颗粒, 测量稠油在温度 40~100 °C 下的黏度。结果表明, GO 纳米颗粒可使稠油黏度降低 25%~60%; 温度 40~70 °C 时降黏效果较好, GO 纳米颗粒质量分数为 0.02%~0.08% 时降黏效果最优。此外, 经济性分析表明, 采用质量分数 0.50% 的纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒可达到相同的降黏效果, 但成本比采用 GO 纳米颗粒增加 40%~50%。

利用微波开采稠油具有加热过程连续、不受埋藏深度影响、过程易控制和对环境污染小等优点, 目前多个国家均在相关研究和试验。但稠油介电常数较小, 微波在稠油储层中穿透深度有限, 影响了降黏增产效果。二维片状石墨烯具有极高的电导率、热导率和纵横比, 对微波可以产生较强的电损耗; 磁性纳米物质(如 Fe、Co、Ni 和 Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 等)对微波具有较强磁损耗。将石墨烯与磁性纳米粒子复合, 可以得到兼具电损耗和磁损耗的石墨烯磁性纳米复合材料, 有利于拓宽吸收频带和阻抗匹配, 提高微波吸收能力<sup>[31]</sup>, 将其应用于稠油开发中, 可增加微波的穿透深度, 改善降黏增产效果。

## 2.5 油水分离

油水分离是油气开发中的重要环节, 直接影响开发的成本和收益。由二维石墨烯为基本单元构成的三维石墨烯具有孔道丰富、表面积较高和疏水亲油的特点, 逐渐成为新兴的油水分离材料。虽然常规石墨烯泡沫所用的氧化石墨烯表面具有大量含氧官能团, 通过化学处理后可在一定程度上提高其疏水性, 但还不具有超疏水特性, 使该材料不具有油水选择性。YANG Sudong 等人<sup>[32]</sup>通过调节材料表面的粗糙度和表面能, 设计出具有超疏水特性的石墨烯泡沫材料, 其制备方法如下: 1) 利用抽滤技术制备 GO 薄膜; 2) 运用发泡技术制得具有一定官能团的石墨烯泡沫; 3) 在石墨烯泡沫表面均匀负载氧化硅纳米颗粒, 并经过硅烷修饰, 制备得到具有超疏水特性(水的接触角是 153°)的石墨烯泡沫材料。性能评价试验表明, 该石墨烯泡沫材料对油和

多种有机溶剂具有良好的吸附性能。

邱丽娟等人<sup>[33]</sup>采用GO对三聚氰胺海绵表面进行改性,制备了超疏水的还原氧化石墨烯/三聚氰胺海绵(RGO-MS)。室内试验结果表明,RGO-MS对表面浮油和水下重油均有较好的吸附效果,静止和搅拌情况下的油水分离效率分别可达 $4.5 \times 10^3$ 和 $3.0 \times 10^3 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 。此外,RGO-MS经过50次吸附—挤压循环测试后,仍具有90%以上的吸附能力,说明其具有一定的循环使用性。

### 3 发展建议

1)石墨烯及其衍生物的作用机理研究还不深入,需要加强基础理论研究,明确石墨烯及其衍生物对钻井液、固井水泥等材料性能影响的机理,对石墨烯及其衍生物分子结构进行优化设计,以获得具有特定作用的石墨烯材料。

2)石墨烯在石油工程领域的应用范围较小,除了上述应用外,石墨烯在纳米传感器油气探测、完井液、压裂液和纳米薄膜堵漏等方面具有较大的应用潜力,应进一步加强攻关研究。此外,石墨烯量子点、石墨烯纳米带等石墨烯衍生物技术发展迅速,应进一步予以关注。

3)石墨烯制备、分散、应用和环保等部分关键技术和装备尚未突破,还未形成稳定、低成本和规模化的生产能力。亟需加强关键技术攻关,加快关键技术成果转化,实现石墨烯的规模化、高品质、低成本和大尺寸宏量制备技术的实质性突破,以推动石墨烯技术产业化,满足石油工程的现场应用需求。

### 4 结束语

石墨烯作为一种新型材料,从实验室发现到工业化应用是一个循序渐进的过程,更要遵循新型产业的发展规律。目前,石墨烯在油气行业应用的研究还处于探索阶段,但其凭借优异的力学、化学、电学和光学等性能,在油气探测、井下工具、井下流体、提高采收率和油水分离技术等方面具有广阔的应用前景。

### 参 考 文 献

#### References

- [1] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004,

306(5696): 666–669.

- [2] 胡明明, 赵高峰. 锂改性点缺陷石墨烯储氢性能的第一性原理研究[J]. *原子与分子物理学报*, 2019, 36(3): 443–451.  
HU Mingming, ZHAO Gaofeng. The hydrogen storage properties of lithium decorated point defect in graphene: a theoretical study[J]. *Journal of Atomic and Molecular Physics*, 2019, 36(3): 443–451.
- [3] 武思蕊, 李斌, 李覃, 等. 石墨烯基柔性薄膜复合材料及其功能化的研究进展[J]. *高分子材料科学与工程*, 2019, 35(1): 176–182.  
WU Sirui, LI Bin, LI Qin, et al. Progress in graphene based flexible film composite and its functionalization[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2019, 35(1): 176–182.
- [4] 史范平. 基于半导体量子点和石墨烯量子点的功能性荧光纳米生物传感器的构建及在生物医学分析中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2017.  
SHI Fanping. Functionalized fluorescence nano-biosensors based on semiconductor quantum dots and graphene quantum dots and their application in biomedical and analytical field [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [5] CHENG Qunfeng, WU Mengxi, LI Mingzhu, et al. Ultratough artificial nacre based on conjugated cross-linked graphene oxide[J]. *Angewandte Chemie(International Edition)*, 2013, 52(13): 3750–3755.
- [6] 闫昕, 梁兰菊, 张璋, 等. 基于石墨烯编码超构材料的太赫兹波束多功能动态调控[J]. *物理学报*, 2018, 67(11): 253–264.  
YAN Xin, LIANG Lanju, ZHANG Zhang, et al. Dynamic multifunctional control of terahertz beam based on graphene coding metamaterial[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(11): 253–264.
- [7] 胡文瑞. 地质工程一体化是实现复杂油气藏效益勘探开发的必由之路[J]. *中国石油勘探*, 2017, 22(1): 1–5.  
HU Wenrui. Geology-engineering integration: a necessary way to realize profitable exploration and development of complex reservoirs[J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22(1): 1–5.
- [8] HOELSCHER K P, STEFANO G D, RILEY M, et al. Application of nanotechnology in drilling fluids[R]. SPE 157031, 2012.
- [9] QIN Zhao, JUNG G S, KANG M J, et al. The mechanics and design of a lightweight three-dimensional graphene assembly[J]. *Science Advances*, 2017, 3(1): e1601536.
- [10] DREYER D R, PARK S J, BIELAWSKI C W, et al. The chemistry of graphene oxide[J]. *Chemical Society Reviews*, 2010, 39: 228–240.
- [11] CRACIUN M F, RUSSO S, YAMAMOTO M, et al. Tuneable electronic properties in graphene[J]. *NanoToday*, 2011, 6(1): 42–60.
- [12] 罗海燕, 周靖, 张燕娟, 等. 氧化石墨烯的制备及其对罗丹明B的吸附性能[J]. *化工新型材料*, 2019, 47(1): 172–176.  
LUO Haiyan, ZHOU Jing, ZHANG Yanjuan, et al. Preparation of graphene oxide and its adsorption for rhodamine B[J]. *New Chemical Materials*, 2019, 47(1): 172–176.
- [13] NEUBERGER N, ADIDHARMA H, FAN Maohong. Graphene: a review of applications in the petroleum industry[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 167: 152–159.
- [14] BHONGALE S G, GAZDA J, SAMSON E M. Graphene barriers on

- waveguides, WO/2016/068952 [P]. 2016-05-06.
- [15] LI Cheng, GAO Xiangyang, GUO Tingting, et al. Analyzing the applicability of miniature ultra-high sensitivity Fabry-Perot acoustic sensor using a nano thick graphene diaphragm[J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(8): 122–130.
- [16] MA Jun, JIN Wei, HO H L. High-sensitivity fiber-tip pressure sensor with graphene diaphragm[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2493–2495.
- [17] MA Jun, XUAN Haifeng, HO H L, et al. Fiber-Optic Fabry-Perot acoustic sensor with multilayer graphene diaphragm[J]. *Photonics Technology Letters*, 2013, 25(10): 932–935.
- [18] GENORIO B, PENG Zhiwei, LU Wei, et al. Synthesis of dispersible ferromagnetic graphene nanoribbon stacks with enhanced electrical percolation properties in a magnetic field[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(11): 10396–10404.
- [19] CHAKRABORTY S, DIGIOVANNI A A, AGRAWAL G, et al. Graphene-coated diamond particles and compositions and intermediate structures comprising same, US 201113283021 [P]. 2011-10-27.
- [20] KESHAVAN M K, ZHANG Youhe, SHEN Yuelin, et al. Polycrystalline diamond materials having improved abrasion resistance, thermal stability and impact resistance, US 201414507590 [P]. 2014-10-06.
- [21] Ocsial Company. Drilling speed increased by 20%: yet another upgrade in the oil & gas sector made possible by graphene nanotubes[OL]. [2019-01-14]. <https://ocsial.com/en/news/340/>.
- [22] JAMROZIK A. Graphene and graphene oxide in the oil and gas industry[J]. *AGH Drilling, Oil, Gas*, 2017, 34(3): 731–744.
- [23] 宣扬, 蒋官澄, 黎凌, 等. 高性能纳米降滤失剂氧化石墨烯的研制与评价[J]. *石油学报*, 2013, 34(5): 1010–1016.
- XUAN Yang, JIANG Guancheng, LI Ling, et al. Preparation and evaluation of nano-graphene oxide as a high-performance fluid loss additive[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(5): 1010–1016.
- [24] 王琴, 王健, 吕春祥, 等. 氧化石墨烯水泥浆体流变性能的量化研究[J]. *新型炭材料*, 2016, 31(6): 574–583.
- WANG Qin, WANG Jian, LYU Chunxiang, et al. Rheological behavior of fresh cement pastes with a graphene oxide additive[J]. *New Carbon Materials*, 2016, 31(6): 574–583.
- [25] AFTAB A, ISMAIL A R, IBUPOTO Z H. Enhancing the rheological properties and shale inhibition behavior of water-based mud using nanosilica, multi-walled carbon nanotube, and graphene nanoplatelet[J]. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2017, 26(2): 291–299.
- [26] 赵磊, 蔡振兵, 张祖川, 等. 石墨烯作为润滑油添加剂在青铜织构表面的摩擦磨损行为[J]. *材料研究学报*, 2016, 30(1): 57–62.
- ZHAO Lei, CAI Zhenbing, ZHANG Zuchuan, et al. Tribological properties of graphene as effective lubricant additive in oil on textured bronze surface[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2016, 30(1): 57–62.
- [27] TAHA N M, LEE S. Nano graphene application improving drilling fluids performance [R]. IPTC-18539, 2015.
- [28] LUO Dan, WANG Feng, ZHU Jingyi, et al. Nanofluid of graphene-based amphiphilic Janus nanosheets for tertiary or enhanced oil recovery: High performance at low concentration[J]. *PANS*, 2016, 113(28): 7711–7716.
- [29] 袁路路. 石墨烯负载镍、钴纳米复合材料的制备及其在稠油催化降粘中的应用研究[D]. 开封: 河南大学, 2017.
- YUAN Lulu. Preparation of graphene-supported nickel-cobalt nanocomposites and their application in viscosity reduction of heavy oil[D]. Kaifeng: Henan University, 2017.
- [30] ELSHAWAF M. Investigation of graphene oxide nanoparticles effect on heavy oil viscosity [R]. SPE 194037, 2018.
- [31] 贾海鹏, 苏勋家, 侯根良, 等. 石墨烯基磁性纳米复合材料的制备与微波吸收性能研究进展[J]. *材料工程*, 2013, 41(5): 89–93, 100.
- JIA Haipeng, SU Xunjia, HOU Genliang, et al. Progress in fabrication and microwave absorption capacity of graphene-based magnetic nanocomposites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2013, 41(5): 89–93, 100.
- [32] YANG Sudong, CHEN Lin, WANG Chunchun, et al. Surface roughness induced superhydrophobicity of graphene foam for oil-water separation[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2017, 508: 254–262.
- [33] 邱丽娟, 张颖, 刘帅卓, 等. 超疏水、高强度石墨烯油水分离材料的制备及应用[J]. *高等学校化学学报*, 2018, 39(12): 2758–2766.
- QIU Lijuan, ZHANG Ying, LIU Shuaizhuo, et al. Preparation and application of superhydrophobic and robust graphene composites oil/water separation material[J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2018, 39(12): 2758–2766.

[ 编辑 滕春鸣 ]