

文章编号: 1000-0747(2018)04-0698-07 DOI: 10.11698/PED.2018.04.15

# 功能微纳结构在石油领域潜在应用

刘合<sup>1</sup>, 金旭<sup>1,2</sup>, 周德开<sup>3</sup>, 杨清海<sup>1</sup>, 李隆球<sup>3</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 国家能源致密油气研发中心, 北京 100083; 3. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41602159)

**摘要:** 以微纳马达与超材料为典型代表, 介绍功能微纳结构的研究现状, 对微纳结构设计与制造技术在石油领域的应用前景进行展望。功能微纳结构是为实现特定目标所制备的具有特殊功能的微纳结构与器件, 新型功能微纳结构可分为以微纳马达为代表的运动型微纳结构, 以及以超材料为代表的固定型微纳结构, 3D 打印技术是微纳结构的新兴制造方法。结合油气田勘探开发需求及智能微纳结构研究现状, 认为潜在的应用方向有 3 个: ①以超材料、智能涂层为代表的智能微纳结构可应用于采油工程技术与装备领域, 提高石油装备的稳定性与可靠性; ②以微纳马达、智能微球材料为代表的智能微纳机器人可应用于提高采收率新材料开发领域, 有效提高稠油、页岩油等资源的开发效率; ③以 3D 打印技术为代表的智能结构制造技术可应用于储集层流体微流动研究领域, 对指导矿井驱油剂选择及提高开采效率具有巨大作用。表 1 参 65

**关键词:** 石油工业; 微纳结构; 微纳马达; 超材料; 3D 打印; 应用方向; 采油工程; 石油装备; 提高采收率

中图分类号: TE93 文献标识码: A

## Potential application of functional micro-nano structures in petroleum

LIU He<sup>1</sup>, JIN Xu<sup>1,2</sup>, ZHOU Dekai<sup>3</sup>, YANG Qinghai<sup>1</sup>, LI Longqiu<sup>3</sup>(1. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China*; 2. *China National Oil and Gas Exploration and Development Company Ltd., Beijing 100083, China*; 3. *Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

**Abstract:** This paper takes micro-nano motors and metamaterials as examples to introduce the basic concept and development of functional micro nano structures, and analyzes the application potential of the micro-nano structure design and manufacturing technology in the petroleum industry. The functional micro-nano structure is the structure and device with special functions prepared to achieve a specific goal. New functional micro-nano structures are classified into motor type (e.g. micro-nano motors) and fixed type (e.g. metamaterials), and 3D printing technology is a developed method of manufacturing. Combining the demand for exploration and development in oil and gas fields and the research status of intelligent micro-nano structures, we believe that there are 3 potential application directions: (1) The intelligent micro-nano structures represented by metamaterials and smart coatings can be applied to the oil recovery engineering technology and equipment to improve the stability and reliability of petroleum equipment. (2) The smart micro-nano robots represented by micro-motors and smart microspheres can be applied to the development of new materials for enhanced oil recovery, effectively improving the development efficiency of heavy oil, shale oil and other resources. (3) The intelligent structure manufacturing technology represented by 3D printing technology can be applied to the field of microfluidics in reservoir fluids to guide the selection of mine flooding agents and improve the efficiency of mining.

**Key words:** petroleum industry; micro-nano structures; micro-nano motor; metamaterials; 3D printing; application direction; oil production engineering; oil equipment; enhanced oil recovery

引用: 刘合, 金旭, 周德开, 等. 功能微纳结构在石油领域潜在应用[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 698-704.

LIU He, JIN Xu, ZHOU Dekai, et al. Potential application of functional micro-nano structures in petroleum[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 698-704.

## 1 概述

### 1.1 研究背景

近年来,老油田剩余潜力挖潜、非常规资源高效开发和采油工程装备更新换代等领域新技术不断取得突破,对资源劣质化加剧难题的缓解起到重要作用。然而,现有石油开采技术尤其是极端井况下的防护、传感、检

测与控制技术等方面难以满足新兴采油技术的发展需求。同时,由于开采难度增大,石油污染等环境问题也逐年严重,制约石油经济的可持续发展<sup>[1-4]</sup>。因此,必须大力开展新兴技术在石油领域的研究,才能促进石油开采的可持续发展。近年来,以功能微纳结构等为代表的新兴技术由于表现出与宏观尺度下不同的材料特性和功能特征,已经成为全球科技发展的重要方向,其可为

目前石油领域存在的问题提供新的解决方法与思路。

## 1.2 功能微纳结构简介

功能微纳结构可以定义为：为实现特定目标所制备的具有特殊功能的微纳结构与器件。功能微纳结构由于其尺寸在微米量级甚至纳米量级，表现出与宏观尺度下不同的材料属性，结合优化设计与智能调控，可以实现大比表面积、高推重比、机械波/电磁波传输智能控制等特殊性质或功能。根据功能微纳结构的作用属性和特征，新型功能微纳结构可分为以微纳马达为代表的运动型微纳结构，以及以超材料为代表的固定型微纳结构。

## 1.3 功能微纳结构潜在应用

功能微纳结构因其作用属性及特征不同，其典型应用领域也存在差异。目前，运动型功能微纳结构——微纳马达的典型应用主要集中在微纳尺度的药物输送与手术、环境修复、传感检测、微纳加工等领域，结合石油领域发展需求，运动型微纳结构在油质检测、微孔隙驱油、石油污染清理、石油勘探及石油运输管道清洁等领域具有极大的潜在应用价值（见表1）。另一方面，固定型功能微纳结构——超材料的典型应用则集中在电磁、热、声、光等特征的调控方面，包括减振降噪、隐身、传播路径调控、超分辨成像等，结合石油装备需求，未来将在井下设备隔振、特殊传感元件、管道防护等领域具有突出的应用潜力（见表1）。

表1 典型微纳结构及应用

微纳结构类型	典型代表	典型应用	石油领域潜在应用
运动型	微纳马达	靶向药物	油质检测
		环境修复	微孔隙驱油
		传感检测	石油污染清理
		微纳加工	石油勘探
		纳米手术	石油运输管道清洁
固定型	电磁超材料	天线	井上、井下信号通讯
		电磁隐身	高灵敏度、高精度元件
		吸波材料	电磁防护层
		超分辨率聚焦	超精密传感器
		超分辨率及全息成像	地质探测
固定型	声学超材料	减振降噪	井下设备隔振
		声隐身	声波测井
		超分辨率成像	声学传感元件
		声波路径调控	声波流量计
		声单向传播	声波通讯
固定型	热学超材料	热隐身	石油管道热防护
		热聚焦器	无干扰热传感器
		热二极管	井下装备防隔热

本文以微纳马达与超材料为典型代表，介绍功能微纳结构的研究现状，同时对复杂三维微纳结构的重要制造方法——3D打印技术进行介绍，并对相关技术在石油领域的应用前景进行展望。

## 2 功能微纳结构研究现状

### 2.1 运动型功能微纳结构——微纳马达

#### 2.1.1 驱动机理

微纳马达是一种微米—纳米尺度的动力装置，它能够将介质环境中的光能、电能、磁能以及化学能等转化成机械能，从而实现直线、圆圈以及螺旋等特定的运动<sup>[5]</sup>。根据驱动能量来源的不同，微纳马达可细分为化学驱动微纳马达、外物理场驱动微纳马达以及混合动力驱动微纳马达<sup>[6]</sup>：①化学驱动微纳马达主要以过氧化氢、水溶液或酸溶液作为化学燃料，能够将化学能转化为机械能驱动微纳马达运动，常见的化学驱动方式主要有浓度梯度驱动、自电泳驱动以及气泡驱动<sup>[7-14]</sup>。化学驱动微纳马达由于原理简单、驱动力强、易于制备等优点，已广泛应用于环境修复、粒子组装以及检测传感等领域。②外物理场驱动微纳马达能将光源、磁场、超声场等外界能量转换为机械能驱动微纳马达运动<sup>[15-19]</sup>。外物理场驱动微纳马达运动过程不需要额外提供化学燃料，因此具有较好的生物兼容性，在生物医疗领域具有广阔的应用前景。③混合动力驱动微纳马达是将化学驱动微纳马达以及外物理场驱动微纳马达的驱动机理中任意2种相结合进行马达驱动，该马达能够在多种驱动力作用下运动，因此应用范围相对其他2种驱动方式更加广泛<sup>[20-23]</sup>。

#### 2.1.2 发展现状

目前，针对微纳马达的研究主要集中在以下几个方面：①微纳马达驱动机理，探索微纳马达新的驱动方式，提高微纳马达的环境适应性，扩展微纳马达的应用前景；②微纳马达集群行为，针对微纳马达单体间相互作用及集群机理开展研究，并探索集群体微纳马达的应用前景；③微纳马达的潜在应用，探索微纳马达在生物医疗、微纳传感、环境保护等领域的潜在应用，并研究微纳马达在微纳加工、微操作等方面的应用前景。

### 2.2 固定型功能微纳结构——超材料

超材料是21世纪新兴发展方向之一，通过在材料关键物理尺寸上的结构有序设计，可以突破某些表现自然规律的限制，获得超出自然界原有普通物理特性的微纳结构，可实现热隐身、声波及光波定向-定频传输，满足特殊环境下的材料需求。将超材料应用于石油领域，将为采油技术及高端装备的发展提供新的研究方向。超材料根据其调控对象，主要分为电磁超材料、热学超材料、声学超材料3大主要方向，以及部分力学或机械超材料。

### 2.2.1 电磁超材料

电磁超材料是指一些具有天然材料所不具备的超常电磁性质的复合材料或结构。电磁超材料基于电磁学定律,用远小于特征波长的空间结构设计,让整体材料表现出天然材料所不具备的超常性质。例如介电常数和磁导率同时为负的左手材料、磁导率为负并和空气达到阻抗匹配的吸波超材料、基于电磁波相位变化调控出射波电场分布的超透镜等。

电磁超材料的潜在应用主要集中在以下几个方面:①超材料天线,具有高增益及高灵敏度特征,可以捕捉微弱的电磁信号变化,其高增益天线、小型化天线、雷达以及漏波天线宽角度扫描等领域具有广泛应用<sup>[24]</sup>;②电磁隐身,通过结构设计达到和特定频段电磁波的谐振进而耗散掉电磁波的能量,从而实现电磁波隐身<sup>[25]</sup>;③吸波材料,通过结构设计让超材料的阻抗和周围环境介质的阻抗匹配(如空气),尽量减少入射波的反射和透射,增大吸收率,从而实现电磁波的吸收<sup>[26-27]</sup>;④可调电磁能量聚集,通过将超材料与计算机相结合,可制备出可编程电磁超材料,实现对微波能量的可控按需调节,有望应用于未来太赫兹射线(THz)成像、地下矿物探测、雷达器件设计等领域<sup>[28]</sup>;⑤异常反射表面,通过结构设计使光照入射角与反射角不相等,相关超材料光学器件未来有望应用于太阳能接收装置<sup>[29]</sup>;⑥超分辨率成像超透镜,通过结构设计,该超材料可突破衍射极限的聚焦,实现可见光频段的超透镜,未来将广泛应用于多个成像领域<sup>[30-31]</sup>;⑦全息成像超表面,通过结构设计,该超材料可以解决传统全息照片无法动态显示、分辨率低等缺点,有望应用于裸眼3D成像及全息动态显示等方面<sup>[32-33]</sup>。

### 2.2.2 热学超材料

热学超材料是指一些具有天然材料所不具备的超常热学性质的复合材料或结构<sup>[34-35]</sup>。热学超材料的设计基于潘德利的变换光学理论,即在各个坐标空间中热学物理定律具有形式不变性的原理,通过扭曲空间来让热场的通量按照设计的线路前行,设计出对应的导热系数非均匀的热学结构,再制造出相应功能器件。

热学超材料的潜在应用主要集中在以下几个方面:①热隐身衣<sup>[36-41]</sup>,研究者将光学隐身衣的概念推广到无源稳态热学领域,提出热隐身衣的设计原理及理论模型,研究结果将广泛应用于隔热材料及结构中;②热学聚集器<sup>[40-43]</sup>,研究者基于温度相关的非线性变换热学,提出了一种能同时汇聚电/热流并且不扰乱外部场分布的双功能聚集器,该研究结果将广泛应用于热流调控、芯片散热等领域。

### 2.2.3 声学超材料

声学超材料是指一些具有天然材料所不具备的超常声学性质的复合材料或结构。声学超材料设计是根据声波在介质中传播的基本原理,针对特定的声学应用设计特定结构,实现对声波的超常调控。

声学超材料的潜在应用主要集中在以下几个方面:①减振降噪,等效质量或者等效弹性模量为负的声学超材料可以实现对特定频段声波的隔离,从而实现减振降噪,可应用于军事或民用等领域;②声隐身,通过坐标变换可以实现声波的绕射,从而实现声隐身,该特性可在潜艇等水下武器装备的反探测领域发挥重要作用;③超分辨率成像,通过声学结构的设计,可以将倏逝波转换为传递波,突破衍射极限,实现超分辨率成像,该特性可应用于医用声学成像、材料结构缺陷检测等领域;④声波传播路径调控,通过声学超表面结构设计,可以实现对声波传播路径的任意调控,包括超常折射、超常反射、声波聚焦、传递波转化为倏逝波等,该特性可应用于新型声学元器件开发等;⑤声单向传播,通过声学结构设计,可以实现声能沿单一方向的流动,该特性可用于声二极管、声单透玻璃等器件制作<sup>[44-48]</sup>。

## 2.3 功能微纳结构制造方法

### 2.3.1 微纳结构传统制造方法

生物医疗、能源装备等技术的高度智能化、信息化要求,促使其系统核心器件向微型化、高精度、高可靠性与多功能集成等一体化方向发展。例如,电磁/声学/热学隐身超材料、微纳机器人、微纳传感器与执行器等,是目前国际学术前沿和研究的热点方向,也是世界各国高度重视的战略技术。然而,由于功能的高度集成,结构的复杂化、三维化,尺寸的小型化,给微纳制造技术带来新的技术挑战。传统微尺度制造技术如光学光刻、X光深刻精密电铸模造成形(LIGA)技术、键合技术,以及纳米尺度制造技术如纳米压印、刻蚀、原子操纵等,虽能在一定程度上满足功能微纳结构的跨尺度制造需求,但在微纳尺度复杂三维结构制造方面只能实现2维或2.5维特征的制造,无法实现对微螺旋、微空腔、微桁架等特征结构的加工制造,难以满足材料多样性、生产效率、加工成本等方面的实际需求,且存在制造成本高、周期长、制造环境要求高、装配困难等问题<sup>[49-51]</sup>。因此,传统制造方式在复杂三维结构跨尺度制造方面的局限,已成为制约高新技术发展的瓶颈,迫切需要探索新型制造方法实现对复杂三维微纳结构的加工制造。

### 2.3.2 微纳结构新兴制造方法——3D打印

3D打印是近年来快速发展的先进制造技术,又称

增材制造、快速原型、分层制造、实体自由制造等<sup>[49]</sup>。不同于传统的材料去除加工技术,3D打印以数字化模型为基础对材料进行逐层叠加,最终实现“自下而上”的材料累加制造。3D打印技术在复杂三维结构、高深宽比结构和复合(多材料)材料结构制造方面具有无可比拟的技术优势,且具备成本低、效率高、材料种类多、直接成形等优点,在航空航天、生物医疗、柔性传感、微纳机电系统、超材料等技术领域极具发展前景<sup>[45]</sup>。美国《时代》周刊将3D打印列为“美国10大增长最快的工业”,英国《经济学人》认为3D打印将“与其他数字化生产模式一起推动实现第3次工业革命”,2012年奥巴马将3D打印列为美国制造业发展的11项重要技术之一,2013年麦肯锡发布报告《展望2025:决定未来经济的12大颠覆技术》将3D打印排在第9位,2015年国务院印发的《中国制造2025》中明确提出重点支持3D打印等前沿技术与装备的发展<sup>[49-51]</sup>。

近年来3D打印技术发展迅速,已发展出以立体光刻、双光子聚合激光直写、熔融沉积、选择性激光烧结、粉末层喷头3D打印等为代表的一系列较为成熟技术,对3D打印技术的研究重点,也逐渐从制造原理、工艺与装备研究转移到对3D打印应用技术的研究。

### 2.3.3 微纳3D打印的典型应用

利用微纳尺度的光固化、多材料池光固化、双光子直写等3D打印技术可以实现复杂微纳结构的制备。

①超材料。结合单固化层多重拼接以及物理气相沉积技术,利用3D技术打印的超硬超轻超材料,可以承受至少16万倍于自身重量的负荷<sup>[52]</sup>。利用3D技术打印的具有受压扭转等特殊性能的超材料<sup>[53]</sup>,在航空航天、轨道交通、高端装备等领域具有重要应用前景。

②微型机械零部件。利用3D技术打印的具有复杂三维结构的微尺度机械零件,或一体化打印微型机械传动零件,在微纳机械系统制造领域将发挥重要作用<sup>[54]</sup>。

③生物支架。利用3D技术打印的细胞培养框架、定制化可降解血管支架等生物功能器件<sup>[55]</sup>,在生命科学、个性化医疗等领域具有重要应用潜力。

④一体化机电器件。采用光固化3D技术打印机电器件结构框架,采用直写3D技术打印金属电路、嵌入电源、处理器等电路元件,实现复杂三维机电器件的一体化制造<sup>[56]</sup>,在机器人、高端机电装备等领域具有重要应用前景。

⑤微纳机器人。利用3D打印对微纳尺度复杂三维结构微纳机器人进行一体化制造<sup>[57]</sup>,对推动微纳机器人技术发展、促进相关技术在精准医疗/智能装备等领域的应用具有重要意义。

⑥新型光学器件。对光子晶体、光学透镜、超材料超分辨率透镜等新型光学器件进行三维结构一体化制造<sup>[58]</sup>,解决传统制造方式在上述结构制造中结构复杂性、尺度跨越性、制造过程高效性、个体结构差异性等方面的不足,对推动光学、成像等领域新兴技术发展具有重要意义。

⑦4D打印新型传感器与驱动器。通过结构-材料一体化有序设计,在实现多材料、复合材料二维或复杂三维传感器3D打印的基础上<sup>[59]</sup>,使3D打印结构具备随外界环境变化或随时间变化的能力,实现4D打印结构的构建<sup>[60-61]</sup>,并以此为基础研制新型传感器、驱动器,在航空航天、军事国防、生物医疗、高端装备等领域具有重要价值。

## 3 微纳结构设计与制造技术在石油领域应用前景

微纳马达、超材料等功能微纳结构是近年来国际学术前沿与热点,研究正逐渐从基本理论向优化设计、智能控制与应用技术深入。微纳结构在石油领域的应用研究目前还相对较少,但现有科学理论和研究成果表明,功能微纳结构在石油领域具有重要的应用潜力与价值。

### 3.1 采油工程技术与装备领域

采油工程技术与装备伴随油气田开发的整个生命周期,涵盖完井、注入、采出、举升、修井、地面作业等诸多领域,是实现油气资源高效开发的核心。全面提升采油工程技术与装备水平是解决中国资源供需矛盾的重要途径,而微纳结构超材料和仿生工程技术将有望实现关键技术装备和井下仪器的升级换代,并大幅降低能耗及开发管理成本,为石油工业可持续发展储备新型技术。

采油工程作业中,装备表面防腐、流体与管道内壁减阻、装备自清洁能力等已成为采油装备与管柱防腐和加工领域的重要课题,也是亟待解决的关键问题。大自然是科学家和工程师无限灵感的源泉,一直不断启发着人类不断地进行创造发明和开拓设计新型的材料和器件。比如可以通过直接简单的化学法,实现对金属表面微纳米复合结构的仿生构筑,形成类似荷叶表面的不同尺度微纳米突起<sup>[62]</sup>,并通过低表面能物质修饰,获得疏水甚至超疏水、超疏油的特殊润湿性金属表面(静态油水接触角大于 $150^\circ$ 、滚动接触角小于 $2^\circ$ ),能够实现防油污、防蜡、耐酸碱腐蚀、流体减阻及表面自清洁等功能,可有效提高采油装备及管柱的表面耐腐蚀性能、实现金属表面的自清洁作用、减小流体与管道内壁的摩擦阻力<sup>[63-64]</sup>。另外,通过优选有机-无机材料的复合掺杂改性方法可实现仿贝壳复合结构防

防腐层的构筑,弥补有机质对一些腐蚀介质防御能力较弱的劣势;仿贝壳层状垛堞结构的合成,可极大增强复合材料的力学强度,提高耐摩擦性能等力学特性;化学修饰调控每一层物质的组成,在保证层与层之间良好结合力的同时,还可对不同物质产生不同耐腐蚀能力,建立适应不同地区腐蚀工况条件的智能防腐涂层体系。这种构筑装备表面特殊润湿性的技术将在众多领域有重要的应用前景,例如在管道运输系统、微流控体系、油水分离装备和液体定向传输运动及深海油气开发等方面均有巨大的应用潜力和广阔的应用前景。

超材料可通过微纳特征结构的有序设计得到,并获得传统材料所不具备的特殊性质,实现对电磁波、声波等的智能控制,在采油工程领域具有广阔的应用前景。如电磁超材料可以应用于复杂环境下信号的传输与处理,以及对环境的检测;声学超材料可应用于石油装备的隔振、降噪;热学超材料可应用于井下装备核心机电器件的防隔热、提高系统稳定性与可靠性等。3D打印技术在采油装备领域可应用于装备、管道原位修复,以及零部件快速制造等传统领域,同时也是微纳马达、超材料等复杂三维微纳结构的重要制造方法,在未来微纳结构有望应用于石油领域,为目前石油领域所面临的技术难题提供全新的解决思路。

### 3.2 提高采收率新材料开发领域

中国老油田含水已超过90%,剩余油分布十分复杂,注水驱油的开发难度越来越大。聚合物驱后检查井资料表明油层中仍有大量高度分散的剩余可动油,未波及油层岩石孔隙通道半径小、迂曲度大、内壁粗糙、毛细管力作用显著,水驱、聚合物驱均难以有效波及,开发难度不断增加,而微纳米材料合成及功能化技术为低渗透、超低渗透以及非常规油气开发提高采收率新技术提供了思路和可能性。

微纳米材料制备技术不仅代表一种尺寸,更重要的是一种设计理念、性能上的突变提升及新材料智能化程度。将纳米材料有序组装成各种尺度的有序结构将会使材料产生更优异的整体协同性能,并可对分级结构材料进行表面修饰等功能化调控,这对于以纳米材料为基础来制备特殊功能提高采收率微纳新材料具有重要的意义。

针对目前驱油技术难以波及到的剩余油问题,可以通过微纳米级基础颗粒或乳液的制备,并利用化学或物理手段对基础颗粒表面进行智能化修饰或改性,使其具有环境敏感、减弱毛细管力等多种功能,高效分散水、聚并油,获得具有广泛应用前景的微纳米功能性驱油材料<sup>[65]</sup>。另外,还可通过微纳结构设计,制备一种具

有外场响应驱动功能的井下高效吸油微球材料,实现在恶劣环境下高效、可重复使用、具备外场驱动能力的操作。如通过微纳米新材料制备技术实现智能吸油微球材料的开发,有望成为油藏纳米机器人的超前储备基材。

微纳马达是油藏纳米机器人的核心器件,具有低成本、高效率、生物兼容性强等优点,在环境监测、水质修复、油污清除以及环境传感领域具有巨大的应用前景。微纳马达由于能够将化学能、光能、电能等能量转化成动能或驱动力,有望应用于石油领域的油藏资源探测及原油驱动。微纳马达可随注入水进入地层,根据自身材料的物理化学特性,在地层运动过程中沿途感知并实时记录油藏及流体信息,包括油藏温度和压力、孔隙形态及油水分布等,并将这些信息通过自身材料特性变化记录并随采出液回收。另外,还可以根据流体流动情况,通过多种物理场驱动使其在剩余油富集区域内跟随流体运动;通过表面吸附、负载催化剂等方法在油藏中进行原位吸附和催化分解;同时利用表面特殊润湿性将油水分离,与油滴高效结合并实现定向运输,实现对剩余油的实时监测和高效开采,有效提高稠油、页岩油等资源的开发效率。

### 3.3 储集层流体微流动研究领域

非常规油气储集层具有孔隙小、结构复杂、比表面积大、黏土矿物类型丰富等特点,致使流体在储集层狭小空间内流动时产生强烈的微流动效应,包括稀薄效应、表面张力效应、低雷诺数效应、多尺度多相态效应等,以达西公式为基础的渗流理论已经难以满足研究需求和开发预测,因此亟待开发孔径参数可调、重复可控的物理模拟模型,来开展流体在储集层复杂微孔道中的渗流规律研究,3D打印技术是针对此需求最合适的工具。

利用CT、聚焦离子束扫描电镜等实验手段,可获取真实岩心微观孔隙结构并建立纳米级分辨率的三维数字岩心模型,通过高精度3D打印设备打印出微纳米尺度的岩心实物模型,应用打印岩心进行微观流动模拟实验的同时,又能实现微观孔隙结构的重复打印,为实验提供标准的可重复样品,进行系统性实验操作和理论分析。同时,还可以应用3D技术打印不同尺度的岩心微观实验模型来实现微观流动机理研究的可能性,探索吸附效应和扩散效应影响下的渗透率计算公式,更真实地描述非常规油气储集层多尺度流动特征,建立考虑非常规油气储集层特征的试井分析模型和产能评价模型,为开发方案的制定和调整提供实验条件,也为测试资料解释提供有效的理论基础。另外,还可利用3D打印技术和表面修饰技术来控制打印岩心的孔壁润湿性,可以很好地屏蔽非均质润湿性的干扰,从而探索单一主控因

素对流体在微纳米孔隙结构中流动的影响，甚至可以对不同类型驱油剂的有效性进行定量评估，解决缺乏驱油剂性能评价实验室手段的难题，大幅减少现场实验成本并提前预判新研制驱油剂效果及改进方案，对指导矿井驱油剂选择及提高开采效率具有巨大作用。

#### 4 总结与展望

功能微纳结构技术是为实现特定目标所制备的具有特殊功能的微纳结构与器件，由于其尺寸为微米—纳米量级，表现出与宏观尺度下不同的材料属性。结合油气田勘探开发需求及智能微纳结构研究现状，潜在的应用方向包括以下3个方面：①以超材料、智能涂层为代表的功能微纳结构有望应用于采油工程技术与装备领域。通过微纳特征结构的有序设计，获得传统材料所不具备的特殊性质，从而提高石油装备在防护、传感、抗腐蚀等方面的能力，提高石油装备的稳定性与可靠性，为目前石油领域所面临的技术难题提供全新的解决思路。②以微纳马达、智能微球材料为代表的功能微纳机器人有望应用于提高采收率新材料开发领域。通过微纳结构特殊设计，可对狭小空间内的剩余油进行有效开采，并能根据自身物理化学特征，感知记录地层信息，实现剩余油的实时监测和高效开采，有效提高稠油、页岩油等资源的开发效率。③以3D打印技术为代表的功能结构制造技术有望应用于储集层流体微流动研究领域。通过3D打印技术制备标准岩心，可为实验提供标准的可重复样品，进行系统性实验操作和理论分析。结合CT、聚焦离子束扫描电镜等实验手段，可对微纳孔隙内地层流动进行定量评估，大幅减少现场实验成本，对指导矿井驱油剂选择及提高开采效率具有巨大作用。

综上所述，以微纳马达、超材料等为代表的功能微纳结构技术，以及面向微纳结构制造的3D打印技术，目前尚处于由基础技术开发向综合发展应用迈进的过渡阶段，但已在石油领域表现出了巨大的科学价值和应用潜力。对其基础理论与应用技术的研究，将为目前石油领域所面临的技术难题提供全新的解决思路，对推动中国石油技术发展具有重要的意义。

#### 参考文献：

- [1] 刘合. 中国致密油工程技术面临的挑战与对策[J]. 世界石油工业, 2016(5): 15-18.  
LIU He. Challenges and countermeasures for tight oil engineering technology in China[J]. World Petroleum Industry, 2016(5): 15-18.
- [2] 杨金川. 浅谈聚合物驱采油技术[J]. 中国化工贸易, 2017, 9(19): 72.  
YANG Jinchuan. Discussion on the technology of polymer flooding[J]. China Chemical Trade, 2017, 9(19): 72.
- [3] 韩涛, 张倩, 金玉俊, 等. 深井采油工艺配套技术研究[J]. 石油化

工应用, 2009, 28(7): 46-49.

- HAN Tao, ZHANG Qian, JIN Yujun, et al. Technological research of deep lifting of wells[J]. Petrochemical Industry Application, 2009, 28(7): 46-49.
- [4] 张大刚. 深海油田的开发: 当前国际应用及发展趋势[J]. 中国造船, 2005, 46(4): 41-46.  
ZHANG Dagang. Deepwater oilfield development: Current international practice and trend[J]. Shipbuilding of China, 2005, 46(4): 41-46.
- [5] 王志松. 能干的小引擎: 纳米马达[J]. 自然杂志, 2006, 28(3): 160-163.  
WANG Zhisong. A little engine that could: An introduction to nano-motors[J]. Chinese Journal of Nature, 2006, 28(3): 160-163.
- [6] CHANG X C, LI T L, ZHOU D K, et al. Propulsion mechanisms and applications of multiphysics-driven micro- and nanomotors[J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(2/3): 122-135.
- [7] WANG L, LI L Q, LI T L, et al. Locomotion of chemically powered autonomous nanowire motors[J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(6): 063102.
- [8] SOLOVEV A A, SAMUEL S, MARTIN P, et al. Nanomotors: Magnetic control of tubular catalytic microbots for the transport, assembly, and delivery of micro-objects[J]. Advanced Functional Materials, 2010, 20(15): 2430-2435.
- [9] LI J X, LIU Z Q, HUANG G S, et al. Hierarchical nanoporous microtubes for high-speed catalytic microengines[J]. NPG Asia Materials, 2014, 6(4): 1-5.
- [10] CHANG X C, LI L Q, LI T L, et al. Accelerated microrockets with a biomimetic hydrophobic surface[J]. RSC Advances, 2016, 6(90): 87213-87220.
- [11] WU Z G, LI J X, LI T, et al. Water-powered cell-mimicking janus micromotor[J]. Advanced Functional Materials, 2016, 25(48): 7497-7501.
- [12] LI Y, MOU F Z, CHEN C R, et al. Light-controlled bubble propulsion of amorphous TiO<sub>2</sub>/Au janus micromotors[J]. RSC Advances, 2016, 6(13): 10697-10703.
- [13] MOU F Z, LI Y, CHEN C R, et al. Single-component TiO<sub>2</sub> tubular microengines with motion controlled by light-induced bubbles[J]. Small, 2015, 11(21): 2564-2570.
- [14] LI L Q, WANG J Y, LI T L, et al. Hydrodynamics and propulsion mechanism of self-propelled catalytic micromotors: Model and experiment[J]. Soft Matter, 2014, 10(38): 7511-7518.
- [15] WU Z G, SI T Y, GAO W, et al. Superfast near-infrared light-driven polymer multilayer rockets[J]. Small, 2015, 12(5): 577-582.
- [16] XUAN M J, WU Z G, SHAO J X, et al. Near infrared light-powered janus mesoporous silica nanoparticle motors[J]. Journal of the American Chemical Society, 2016, 138(20): 6492-6497.
- [17] LI T L, LI J X, ZHANG H T, et al. Magnetically propelled fish-like nanoswimmers[J]. Small, 2016, 12(44): 6098-6105.
- [18] WANG W, LI S X, LAMAR M, et al. Acoustic propulsion of nanorod motors inside living cells[J]. Angewandte Chemie, 2014, 53(12): 3201-3204.
- [19] WU Z G, LI T L, LI J X, et al. Turning erythrocytes into functional micromotors[J]. ACS Nano, 2014, 8(12): 12041-12048.
- [20] LI J X, LI T L, XU T L, et al. Magneto-acoustic hybrid nanomotor[J]. Nano Letters, 2015, 15(7): 4814-4821.
- [21] WANG W, DUAN W T, ZHANG Z X, et al. A tale of two forces: Simultaneous chemical and acoustic propulsion of bimetallic micromotors[J]. Chemical Communications, 2015, 51(6): 1020-1023.
- [22] XU T L, SOTO F, GAO W, et al. Ultrasound-modulated bubble propulsion of chemically powered microengines[J]. Journal of the American Chemical Society, 2014, 136(24): 8552-8555.
- [23] SOLER L, SANCHEZ S. Catalytic nanomotors for environmental monitoring and water remediation[J]. Nanoscale, 2014, 6(13): 7175-7182.
- [24] PORTO J A, GARCIA-VIDAL F J, PENDRY J B. Transmission resonances on metallic gratings with very narrow slits[J]. Physical Review Letters, 1999, 83(14): 2845-2848.
- [25] SCHURIG D, MOCK J J, JUSTICE B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. Science, 2006,

- 314(5801): 977-980.
- [26] SHEN X, YANG Y, ZANG Y, et al. Triple-band terahertz metamaterial absorber: Design, experiment, and physical interpretation[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(15): 154102.
- [27] LIU X, TYLER T, STARR T, et al. Taming the blackbody with infrared metamaterials as selective thermal emitters[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(4): 045901.
- [28] ZHANG L, LIU S, CUI T J. Theory and application of coding metamaterials[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 1-12.
- [29] SUN S, YANG K Y, WANG C M, et al. High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient meta-surfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(12): 6223-6229.
- [30] FANG N, LEE H, SUN C, et al. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens[J]. *Science*, 2005, 308(5721): 534-537.
- [31] VERSLEGERS L, CATRYSSSE P B, YU Z, et al. Planar lenses based on nanoscale slit arrays in a metallic film[J]. *Nano Letters*, 2009, 9(1): 235-238.
- [32] HUANG Y W, CHEN W T, TSAI W Y, et al. Aluminum plasmonic multicolor meta-hologram[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(5): 3122-3127.
- [33] PENDRY J. Photonics: Metamaterials in the sunshine[J]. *Nature Materials*, 2006, 5(8): 599-600.
- [34] 沈翔瀛, 黄吉平. 热超构材料的研究进展[J]. *物理*, 2013, 42(3): 170-180.  
SHEN Xiangying, HUANG Jiping. Research progress in thermal metamaterials[J]. *Physics*, 2013, 42(3): 170-180.
- [35] 沈翔瀛, 黄吉平. 变换热学: 热超构材料及其应用[J]. *物理学报*, 2016, 65(17): 99-125.  
SHEN Xiangying, HUANG Jiping. Transformation thermotics: Thermal metamaterials and their applications[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(17): 99-125.
- [36] FAN C Z, GAO Y, HUANG J P. Shaped graded materials with an apparent negative thermal conductivity[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(25): 1780.
- [37] HAN T, BAI X, GAO D, et al. Experimental demonstration of a bilayer thermal cloak[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(5): 054302.
- [38] MA Y, LIU Y, RAZA M, et al. Experimental demonstration of a multiphysics cloak: Manipulating heat flux and electric current simultaneously[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(20): 205501.
- [39] LI Y, SHEN X, WU Z, et al. Temperature-dependent transformation thermotics: From switchable thermal cloaks to macroscopic thermal diodes[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(19): 195503.
- [40] GUENNEAU S, AMRA C, VEYNANTE D. Transformation thermodynamics: Cloaking and concentrating heat flux[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 8207.
- [41] NARAYANA S, SATO Y. Heat flux manipulation with engineered thermal materials[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(21): 214303.
- [42] HAN T, ZHAO J, YUAN T, et al. Theoretical realization of an ultra-efficient thermal-energy harvesting cell made of natural materials[J]. *Energy & Environmental Science*, 2013, 6(12): 3537-3541.
- [43] LAN C, LI B, ZHOU J. Simultaneously concentrated electric and thermal fields using fan-shaped structure[J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): 24475-24483.
- [44] SHENG P, ZHANG X X, LIU Z, et al. Locally resonant sonic materials[J]. *Science*, 2000, 289(5485): 1734-1736.
- [45] ZHANG S, XIA C, FANG N. Broadband acoustic cloak for ultrasound waves[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 106(2): 024301.
- [46] ZHU J, CHRISTENSEN J, JUNG J, et al. A holey-structured metamaterial for acoustic deep-subwavelength imaging[J]. *Nature Physics*, 2011, 7(1): 52-55.
- [47] XIE Y, WANG W, CHEN H, et al. Wavefront modulation and subwavelength diffractive acoustics with an acoustic metasurface[J]. *Nature Communications*, 2014(5): 5553.
- [48] LIANG B, GUO X S, TU J, et al. An acoustic rectifier[J]. *Nature Materials*, 2010, 9(12): 989-992.
- [49] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展[J]. *机械制造与自动化*, 2013, 42(4): 1-4.
- LU Bingheng, LI Dichen. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology[J]. *Machine Building & Automation*, 2013, 42(4): 1-4.
- [50] 兰红波, 李涤尘, 卢秉恒. 微纳尺度 3D 打印[J]. *中国科学: 技术科学*, 2015 (9): 919-940.
- LAN Hongbo, LI Dichen, LU Bingheng. Micro-and nanoscale 3D printing[J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2015 (9): 919-940.
- [51] 李涤尘, 贺健康, 田小永, 等. 增材制造: 实现宏观结构一体化制造[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(6): 129-135.
- LI Dichen, HE Jiankang, TIAN Xiaoyong, et al. Additive manufacturing: Integrated fabrication of macro/microstructures[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(6): 129-135.
- [52] ZHENG X, LEE H, WEISGRABER T H, et al. Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials[J]. *Science*, 2014, 344(6190): 1373-1377.
- [53] FRENZEL T, KADIC M, WEGENER M. Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist[J]. *Science*, 2017, 358(6366): 1072.
- [54] HUANG T Y, SAKAR M S, MAO A, et al. 3D printed microtransporters: Compound micromachines for spatiotemporally controlled delivery of therapeutic agents[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(42): 6644-6650.
- [55] RICHTER B, HAHN V, BERTELS S, et al. Guiding cell attachment in 3D microscaffolds selectively functionalized with two distinct adhesion proteins[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(5): 1604342.
- [56] MACDONALD E, SALAS R, ESPALIN D, et al. 3D Printing for the rapid prototyping of structural electronics[J]. *IEEE Access*, 2014, 2: 234-242.
- [57] XU H, MEDINASÁNCHEZ M, MAGDANZ V, et al. Sperm-hybrid micromotor for targeted drug delivery[J]. *ACS Nano*, 2017, 12(1): 327-337.
- [58] GISSIBL T, THIELE S, HERKOMMER A, et al. Two-photon direct laser writing of ultracompact multi-lens objectives[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(8): 554-560.
- [59] MUTH J T, VOGT D M, TRUBY R L, et al. 3D printing: Embedded 3D printing of strain sensors within highly stretchable elastomers[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(36): 6307-6312.
- [60] QI G, SAKHAEI A H, LEE H, et al. Multimaterial 4D printing with tailorable shape memory polymers[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 31110.
- [61] WANG Q, JACKSON J A, GE Q, et al. Lightweight mechanical metamaterials with tunable negative thermal expansion[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(17): 175901.
- [62] MAO L, GAO H, YU S, et al. Synthetic nacre by predesigned matrix-directed mineralization[J]. *Science*, 2016, 354(6308): 107-110.
- [63] JIN X, ZHANG X, PENG Y, et al. Multifunctional engineering aluminum surfaces for self-propelled anti-condensation[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2015, 17(7): 961-968.
- [64] JIN X, SHI B, ZHENG L, et al. Bio-inspired multifunctional metallic foams through the fusion of different biological solutions[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(18): 2721-2726.
- [65] 刘合, 金旭, 丁彬. 纳米技术在石油勘探开发领域的应用[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(6): 1014-1021.  
LIU He, JIN Xu, DING Bin. Application of nanotechnology in petroleum exploration and development[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(6): 1014-1021.

第一作者简介: 刘合 (1961-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 中国工程院院士, 中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师, 主要从事低渗透油气藏增产改造、机采系统提高系统效率、分层注水和井筒工程控制技术等方面的科研工作。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院院办, 邮政编码: 100083。E-mail: liuhe@petrochina.com.cn

联系作者简介: 金旭 (1982-), 男, 吉林长春人, 博士, 中国石油勘探开发研究院高级工程师, 主要从事油气储集层表征、微观综合模拟技术和微米复合材料研究。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心, 邮政编码: 100083。E-mail: jinxu@petrochina.com.cn

收稿日期: 2018-04-25 修回日期: 2018-05-22

(编辑 王晖)