多物理场驱动微纳马达的运动机理及应用

常晓丛, 李天龙, 周德开, 张广玉, 李隆球*

哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001

* 联系人, E-mail: longqiuli@hit.edu.cn

2016-07-31 收稿, 2016-08-31 修回, 2016-09-23 接受, 2016-10-25 网络版发表

国家自然科学基金(51175129, 51521003)、机器人技术与系统国家重点实验室基金(SKLR201607C)、中国博士后科学基金(2012T50339)和高校引进人才计划(B07018)资助

摘要 多物理场驱动微纳马达是一种介于纳米和微米尺度的致动器, 它能够将化学能、磁能、电能、光能、热能以及超声能转换为机械能, 从而实现其在靶向药物运输、粒子离散、生物传感、仿生制造以及环境修复等领域的应用. 本文评述了近年来我国微纳马达运动控制领域重要的研究进展和代表性成果, 以及微纳马达在各领域的应用研究, 阐述了微纳马达当前存在的关键性问题, 并探讨了微纳马达未来的应用前景及发展方向和趋势, 为深入开展微纳马达的科学研究和工程化应用提供一定的借鉴和参考.

关键词 微纳马达, 多物理场, 运动机理, 应用前景

纳米科技是21世纪发展起来的新兴科学技术, 它是继信息技术和生物技术之后, 又一影响世界政治、经济和国防的重要技术. 许多发达国家的政府和企业都对纳米科技的研发投入了大量的资金, 试图抢占这一科技战略制高点.

纳米科技综合了生物、化学、电子、物理、材料及机械等诸多学科, 有望成为新时代科学技术的基础学科. 作为纳米技术研究的热点之一, 微纳马达是一种介于纳米与微米尺度的动力装置, 它能够将光能、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^[1]. 根据驱动能量来源的不同, 微纳马达可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(表S1). 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, 能够将氧化还原反应中的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. 外物理场驱动微纳马达主要是将光源、磁场、

超声场等外界能量转换为机械能驱动微纳马达运动; 常见的外物理场驱动方式主要有光源驱动、磁场驱动、超声驱动. 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, 因此其具有生物兼容性, 应用范围较广, 在生物医疗领域具有广阔的应用前景. 混合动力驱动微纳马达将化学驱动微纳马达及外物理场驱动微纳马达的驱动机理中任意2种结合进行微纳马达的驱动, 该马达能够在多种驱动力作用下运动, 因此其应用范围相对其他2种驱动方式更加广泛.

微纳马达不仅可以作为能量转换装置, 还可以作为微尺度粒子吸附剂实现污染物及毒素清除, 作为微尺度传感器可实现微流体黏度测量及微裂纹检测修复, 作为药物颗粒载体可实现药物的靶向运输, 作为微粒子机构载体可实现纳米粒子组装及操控, 因此微纳马达在传感检测、毒素清除、靶向药物、纳米组装等生物医疗领域及微机械系统领域具有巨大的应用前景.

随着纳米科技的发展, 我国在21世纪制定了《国

引用格式: 常晓丛, 李天龙, 周德开, 等. 多物理场驱动微纳马达的运动机理及应用. 科学通报, 2017, 62: 122–135

Chang X C, Li T L, Zhou D K, et al. Propulsion mechanisms and applications of multiphysics-driven micro- and nanomotors (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 122–135, doi: 10.1360/N972016-00844

家纳米科技发展纲要》，对国家新世纪的纳米技术发展方向进行了规划。本文综述了近年来我国学者在微纳马达领域的研究进展和代表性研究成果，分析了多物理场微纳马达的运动机理，讨论了微纳马达在各领域的典型应用及当前面临的关键科学和技术问题，并探讨了微纳马达未来的应用前景以及发展方向和趋势，为今后微纳马达的发展方向提供了借鉴价值，为实现微纳马达在生物医学以及工程领域的应用奠定了研究基础。

1 多物理场驱动马达运动机理

1.1 化学驱动微纳马达

化学驱动是目前研究较多的一种驱动方式，主要是以介质环境中过氧化氢、酸、水等为化学燃料，通过氧化还原反应将化学能转换为机械能，从而驱动微纳马达运动。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及检测传感等领域。

1.1.1 浓度梯度驱动

浓度梯度驱动微纳马达作为化学驱动微纳马达的一种，主要是通过氧化还原反应在微纳马达的催化端与非催化端产生一定浓度梯度来进行自驱动^[2,3]。通过仿真分析与实验相结合的方法，本课题组^[2]建立了一种新型的催化线型微纳马达模型，研究了浓度梯度驱动的双金属线微纳马达的运动规律(图1)。随着氧化还原反应的进行，浓度梯度驱动的线型微纳马达的运动速度先迅速增加，而后逐渐达到1个稳定值；当催化段与非催化段比率一定时，微纳马达的运动速度不随马达长度的变化而变化。浓度梯度驱动微纳马达的运动速度较低，国内对浓度梯度驱动微纳马达的研究相对较少。

图1 (网络版彩色)催化纳米线马达的催化端化学反应区域^[2]

Figure 1 (Color online) Chemical reaction region in the catalytic end of nanowire motor^[2]

1.1.2 自电泳驱动

自电泳驱动微纳马达是一种在低浓度过氧化氢溶液中通过氧化还原反应过程中产生的电场来作为动力源的微纳马达。虽然自电泳驱动微纳马达的运动速度较低，但由于各离子间存在相互作用力，因此具有一定的群集性及趋化性，有望应用于微纳粒子的自组装和传感检测领域。Wang等人^[4]通过实验研究与仿真分析相结合的方法，研究了自电泳驱动的Au/Pt双金属微纳马达的运动机理及自组装行为。双金属微纳马达的阳极Pt端与阴极Au端分别发生氧化和还原反应，随着氧化还原反应的进行，马达两端产生质子溶度梯度，因此马达内部产生1个由Pt端指向Au端的电场，自身携带负电荷的Au/Pt微纳马达在该电场作用下朝Pt端进行自电泳驱动，其在1~2 mol/L的过氧化氢溶液中的运动速度约20 $\mu\text{m/s}$ 。同向运动的Au/Pt微纳马达之间能够在吸引力与排斥力相互作用下进行交错组装，也能够吸附介质环境中带电荷的微粒子，有望用于纳米粒子组装与制造。

1.1.3 气泡驱动

气泡驱动微纳马达作为最常见的化学驱动方式，主要是以过氧化氢、酸、水等作为化学燃料，通过氧化还原反应将化学燃料分解生成气泡^[5-15]。根据动量守恒定理，气泡聚集脱离马达的同时，会产生一个反推力驱动微纳马达运动，因此，气泡驱动微纳马达的运动速度通常取决于气泡的产生速率与大小。

梅永丰课题组^[5]首次提出自卷曲纳米技术，通过应力释放驱动纳米薄膜自卷曲为纳米管状结构。通过自卷曲技术制备了一种气泡驱动的催化微纳马达，如图2(a)所示，该微纳马达为管状多层结构，内层的Pt能与介质环境中的过氧化氢发生氧化还原反应产生氧气泡，并在管状结构中聚集并排出，从而推动微纳马达进行自驱动运动。该自卷曲微纳马达的运动轨迹主要有以下几种：直线运动、曲线运动、圆形运动、螺旋运动以及自旋转运动等，且速度高达2 mm/s。自卷曲微纳马达多层结构中间引入磁导层-Fe层，能在外部磁场作用下按预定方向运动，从而完成选择性装载、靶向运输微粒子及微金属片等工程应用，如图2(b)所示^[6]。在上述研究的基础上，梅永丰课题组^[7]通过电子束蒸镀与自卷曲技术相结合的方法，制备了一种表面具有纳米微孔的增速管状微纳马达，如图2(c)所示。纳米微孔的存在增大了催化表面积以及Pt与过氧化氢的接触速率，从而加速过氧化氢分

图2 (网络版彩色)(a) 自卷曲方法制备Pt/Au/Fe/Ti示意图^[5]; (b) 外界磁场控制气泡驱动微马达实现微粒子与微金属片的负载、运输以及组装^[6]; (c) 表面具有纳米微孔的增速管状微纳马达的制备^[7]; (d) 自驱动催化微纳马达局部加热处理^[8]

Figure 2 (Color online) (a) A rolled-up microtube consisting of Pt/Au/Fe/Ti multilayers on a photoresist sacrificial layer^[5]. (b) Microfactory showing wireless control of microbots by an external magnet, assisted loading, transporting, delivery, and assembly of microparticles and nanoplates in fuel solution^[6]. (c) The fabrication method for the nanoporous microtubes^[7]. (d) The co-focus setup for localized laser heat treatment on self-propelled catalytic microengines^[8]

解速率并增大气泡的产生速率,实现了自卷曲微纳马达的加速.基于上述气泡产生速率增高有利于微纳马达加速的原理,他们通过激光辐射微纳马达运动区域致使局部加热以提高过氧化氢分解速率及氧气泡的产生速率,从而实现微纳马达的增速,由于加热装置可控,因此微纳马达的加速过程可逆,如图2(d)所示^[8].综上所述,自卷曲的气泡驱动微纳马达有望应用于微尺度领域的热传感器.

气泡驱动微纳马达的结构多样,除了上述的锥管结构外,常见的还有双面球结构微纳马达.贺强课题组与Wang课题组^[10]合作通过离子溅射技术与自组装技术相结合的方法,制备了一种具有生物兼容性的气泡驱动微纳马达—RBC-Mg双面球微纳马达.该马达不仅能与水发生氧化还原反应产生的氢气泡推动马达自驱动,而且具有天然红细胞膜的表面官能团,因此RBC-Mg微纳马达具有生物兼容性,能够在富含蛋白质的生物体内环境畅通无阻,快速吸附体内 α -毒素、甲基对氧磷以及化学有害试剂,其平均速

度为 $172\ \mu\text{m/s}$,高于未包覆红细胞膜的微纳马达.贺强课题组^[10]在RBC-Mg球状微纳马达引入惰性金属—金来防止镁球钝化,而官建国课题组^[11]则是引入惰性金属Pt与碳酸氢钠来阻止镁球马达钝化,从而连续与水反应产生氢气泡推动微纳马达进行自驱动.

官建国课题组^[12,13]提出一种基于微球状结构的光激发气泡驱动微纳马达,在 TiO_2 微球表面溅射一层惰性金属金构成双面球微纳马达,另一种为 TiO_2 管状结构.这种光触发的微纳马达在没有外界紫外光源照射时, TiO_2 表面被一层氧化物覆盖,阻隔了过氧化氢催化反应的进行;当紫外光源照射时,紫外光激发 TiO_2 产生电子转移到氧化物表面,催化过氧化氢分解为氧气泡推动 TiO_2 微纳马达前进,其平均速度为 $325\ \mu\text{m/s}$;且随着紫外光强度的增加,气泡驱动微纳马达的运动速度随之增加,因此通过控制紫外光的开关以及强度可实现气泡驱动微纳马达的启停控制及速度控制.

在上述气泡驱动微纳马达的实验研究基础上,

梅永丰课题组^[14]基于微气泡在锥管中的运动过程,建立了一种气泡驱动微纳马达的运动模型,如图3(a)所示.研究发现气泡驱动微纳马达的运动速度与介质环境中过氧化氢的浓度成正比,且微纳马达的长度、半径等结构参数也会影响气泡驱动微纳马达的运动速度.基于上述研究,本课题组^[15]建立了一种新型气泡驱动微喷管马达的流体动力学模型,研究了气泡在锥管马达尾部的排出过程,提出了气泡脱离马达时半径的计算方法,如图3(b)所示.研究结果表明浮力是气泡脱离马达的决定性因素,气泡驱动微纳马达的运动速度与气泡半径、过氧化氢浓度、马达半径、长度、锥角等参数有关.在此基础上,本课题组^[16]对不同形状气泡驱动微纳马达在低雷诺数液体中运动时受到的液体阻力进行了研究,结果发现除了球形马达外,马达的阻力系数随长径比的增加而增大,且锥角对单锥台马达阻力影响较大.气泡驱动锥管微纳马达理论模型的建立为后续设计并研究管状微纳马达的运动规律提供了理论依据.

1.2 外物理场驱动微纳马达

外物理场驱动的微纳马达不需要介质环境提供过氧化氢、酸等生物兼容性差的化学燃料,可通过外界的光源、磁场以及超声场等作为动力源驱动微纳马达在介质环境中运动,因此相较于化学驱动微纳马达,外物理场驱动微纳马达具有较高的生物兼容性以及运动可控性,已经广泛应用于生物医学及纳米组装领域.

1.2.1 光驱动微纳马达

光驱动微纳马达是一种能够将光能转换为机械能的致动器.相对于紫外光和可见光,近红外光不易

被生物活体组织或器官吸收而造成热损伤,因此目前国内研究的光驱微纳马达主要是在近红外照射下,基于金纳米粒子的等离子共振原理,将光能转换为热能产生温度梯度来驱动微纳马达运动.

贺强课题组^[17]通过层层自组装与静电吸引相结合的方法制备了一种近红外光驱动的微纳马达(PSS/PAH)₂₀AuNS.该光驱微纳马达内层的金纳米粒子层能在近红外光照射下发生等粒子共振,将吸收的近红外光能转换为热能,在不对称的锥管状微纳马达内外层形成一定的温度梯度,从而在微纳马达轴向方向产生热泳力推动锥管状微纳马达向小端方向运动,平均速度为160 $\mu\text{m/s}$,如图4所示.这种近红外光驱动的微纳马达不仅能够远程控制锥管马达的启停,而且具有较高的生物兼容性,能够在细胞培养基中自由运动,有望应用于生物体内的靶向药物运输.

基于上述研究,贺强课题组^[18]通过离子溅射技术在多孔二氧化硅球单侧溅射了一层金层,制备了一种近红外光驱动的多孔硅双面球微纳马达(JMSNMs).该光驱微纳马达单侧的金层同样能够在近红外光照射下发生等离子共振,通过光热转换效应在多孔硅双面球微纳马达表面产生温度梯度,从而在热泳力作用下进行自驱动.当近红外光照射多孔硅双面球微纳马达时,马达能够在热泳力作用下运动,且随着近红外光强的增大其运动速度随之增大;当关闭近红外光后,温度梯度消失,多孔硅双面球微纳马达只能在介质溶液中进行无规则的布朗运动,因此近红外光控的多孔硅双面球微纳马达同样能够实现马达的启停控制.

1.2.2 磁场驱动微纳马达

磁场驱动微纳马达能够将外界磁场能转换为机

图3 (网络版彩色)(a) 气泡驱动微纳马达自驱动过程示意图^[14]; (b) 气泡驱动微纳马达尾部气泡排出过程示意图^[15]

Figure 3 (Color online) Schematic diagram of (a) the microjet-bubble system deformation process in one moving step^[14] and (b) the bubble formation process of micromotors^[15]

图4 (网络版彩色)近红外光对微纳马达启停的远程控制^[17]

Figure 4 (Color online) Schematic illustrating the NIR-controlled "On/Off" motion of the rocket^[17]

械能,从而驱动微纳马达在低雷诺数环境中运动,常见的有类鞭毛的螺旋前进、类鲨鱼的摆动前进等运动^[19-21].这种磁场驱动的微纳马达能够在外界磁场作用下实现定向运动,可应用于纳米组装、货物靶向运输等领域.

微纳马达通过外界磁场控制能够在复杂平面上实现精确的运动控制,张立课题组^[19]通过模板电沉积技术制备了一种磁场驱动的镍纳米线马达,实现了微纳马达在水溶液中沿复杂表面旋转前进,而且能够通过调控外界磁场的开关实现纳米线马达的启停控制.该磁场驱动纳米线马达能够在外界磁场的调控下在水平、竖直以及曲面墙壁附近实现精确的定向运动,因此可以运送聚苯乙烯(PS)微球等货物穿过微沟壑,实现货物的靶向运输,如图5所示,这种磁驱动微纳马达有望应用于微纳马达在靶向药物运输及货物运输领域.

基于上述研究,张立课题组^[20]进一步拓展了磁场驱动的镍纳米线马达在货物运输领域的应用.通过调控外部磁场方向及强度,完成了镍纳米线马达对单个PS微球的微操控,实现了对PS微球的捕获、运输及释放.该磁场驱动镍纳米线马达不仅可以操控聚合物小球的运动,而且能够实现对单个鞭毛微生物以及血细胞的靶向运输有望应用于生物单细胞分析系统.

1.2.3 超声驱动微纳马达

超声波是一种频率高于20000 Hz的声波,方向

图5 (网络版彩色)镍纳米线在外界磁场控制下沿墙面翻越沟壑及负载转移PS微球^[19]

Figure 5 (Color online) Schematic illustrating upward propulsion of a nanowire along a vertical wall inside a microchannel and pick-and-place of a PS micobead using nanowire by tumbling^[19]

性好,穿透能力强,且能够获得较为集中的声能,因此在医学、军事、工业及农业上有广泛的应用.由于超声驱动的频率具有较高的生物兼容性和较强的能量,因此已应用于微粒子的驱动与操控.Wang等人^[22]通过理论分析与实验研究相结合的方法,制备了一种超声驱动的金属棒微纳马达,可以在外界超声波调控作用下,完成自驱动运动、自旋运动、首尾排列及自组装等运动,且运动速度高达200 $\mu\text{m/s}$,如图6所示.超声驱动的金属棒微纳马达首尾排列组成环状结构或条纹状结构,其半径或间距近似等于超声波波长的1/2.该超声驱动微纳马达不仅具有生物兼容性,而且能够在高离子溶度环境运动.他们将该金属棒微纳马达与海拉癌细胞共同培养48 h,大量金

图6 (网络版彩色)3.7 MHz超声驱动下纳米线马达的运动形态^[22]

Figure 6 (Color online) The kinds of motion of metal microrods in a 3.7 MHz acoustic field^[22]

属棒微纳马达会进入海拉细胞内部；在外界超声磁场作用下，海拉细胞内的部分金属棒微纳马达仍然能够产生定向运动与旋转运动^[23]。金纳米棒微纳马达在活体细胞内部的运动为研究活体细胞内部亚细胞结构以及细胞对内部机械力的应激行为奠定了研究基础。

天然红细胞微纳马达能在血液中自由运动，Wu等人^[24]将天然红细胞与微纳粒子相结合，提出了一种具有自装载能力与生物相容性的天然红细胞仿生微纳马达，这种新型红细胞微纳马达内部装载有分布不对称的四氧化三铁粒子，在外源超声场作用下，红细胞马达的不对称结构和磁性粒子的不均匀分布产生压力梯度，驱动红细胞马达运动。该天然红细胞微纳马达具有良好的生物兼容性，在生物体血液中运动时不会被巨噬细胞吞噬，能够在未稀释的血液中进行超声自驱动运动。

1.3 混合动力驱动微纳马达

随着纳米马达研究的进行，为了拓展微纳马达的应用领域，使其能够在多种介质环境中进行自驱动以完成复杂的生物学及工程领域应用，国内外学者将化学驱动与外物理场驱动方式相结合，对混合动力驱动微纳马达进行了大量研究。目前国内学者在混合动力驱动微纳马达领域已经取得了显著成果。

(i) 磁场及超声场混合动力驱动微纳马达。李金星等人^[25]通过模板电沉积技术与化学腐蚀相结合的方法，制备了一种混合动力驱动的微纳马达。该马达由1段磁性螺旋结构与1段尾部凹坑的金纳米棒结构组成，不需要外界提供化学燃料，能够在外部超声场及磁场作用下实现混合驱动，且2种驱动方式下马

达的运动方向相反。在旋转磁场下，该混合动力驱动微纳马达的运动速度为12.2 $\mu\text{m/s}$ ；在超声场作用下，运动速度为16.8 $\mu\text{m/s}$ ，如图7所示。该混合驱动的微纳马达能够在外界超声场作用下(频率为2.66 MHz)产生群集行为，而在外界磁场作用下能够产生可逆的离散行为。这种混合动力微纳马达能够在动态变化的外界环境中呈现出不同的运动形态，不仅能够进行单个微纳马达的运动控制，还能实现对多个微纳马达的运动控制，在纳米尺度微操控领域具有巨大的应用前景。

(ii) 浓度梯度及超声场混合动力驱动微纳马达。虽然浓度梯度驱动微纳马达的运动速度比较低，但是其与超声场驱动方式相结合能够实现微纳马达的

图7 (网络版彩色)磁场及超声场混合动力驱动原理图^[25]

Figure 7 (Color online) Scheme of dual propulsion modes under the acoustic and magnetic fields^[25]

聚集与离散, Wang等人^[26]通过模板电沉积技术制备了一种金-钌双金属混合驱动微纳马达, 能够在浓度梯度与外界超声波的共同作用下实现混合驱动. 在浓度梯度驱动下, 该金-钌双金属能够在溶液底层沿钌端运动, 运动速度为 $(33 \pm 6) \mu\text{m/s}$; 在外界超声场作用下, 马达从底层慢慢悬浮至超声波驻波节点层, 并在超声波作用下沿金端运动, 运动速度为 $(63 \pm 7) \mu\text{m/s}$. 这种金-钌双金属微纳马达同样能够在混合驱动作用下实现马达的群集与离散, 有望应用于微纳离子的轨迹分析与粒子分离.

(iii) 气泡及超声场混合动力驱动微纳马达. Xu等人^[27]通过模板电沉积技术制备了一种超声驱动与化学驱动共同作用的混合动力驱动管状微纳马达. 在外界超声场关闭时, 该马达内层的Pt能与介质环境中的过氧化氢发生氧化还原反应产生氧气泡, 推动马达沿锥管大端运动; 当外界超声场作用时, 超声场会抑制氧气泡的排出, 导致气泡驱动力减弱, 降低管状微纳马达的运动速度, 如图8所示. 综上所述, 通过调节外界超声场的有无和强弱, 可实现气泡驱动微纳马达的速度调节以及快速、可重复的启停控制.

1.4 多物理场驱动马达行为控制存在的问题及未来发展方向

尽管国内学者已经在化学驱动微纳马达、外物理场驱动微纳马达以及混合动力驱动微纳马达的行为控制领域取得了重大的进展和突破, 但是在微纳马达的驱动机理、运动速度、靶向控制、生物兼容性等方面还不能满足在生物医疗、纳米组装、环境修复、粒子富集等领域的应用要求. 当前多物理场驱动微

纳马达的行为控制面临的挑战性的问题如下.

(i) 驱动机理不明确. 微纳马达在介质环境中运动形态的影响因素多而复杂, 其驱动力来自多方面, 且在微纳马达的运动过程中同时存在. 由于微纳马达尺寸的限制, 目前微纳马达的驱动机理研究尚处于起步阶段.

(ii) 运动速度低. 运动速度是描述物体运动行为的关键要素, 运动速度的大小是微纳马达在生物医学及环境工程等领域的应用的一个重要指标. 然而, 目前国内学者研究的微纳马达的运动速度普遍偏低, 自电泳微纳马达速度低至 $20 \mu\text{m/s}$, 运动速度最高的微纳马达为自卷曲技术制备的气泡驱动微纳马达, 其运动速度也仅为 2 mm/s . 运动速度低是目前多物理场驱动微纳马达普遍存在的共性问题.

(iii) 运动控制不精确. 目前微纳马达的靶向控制是在马达结构中引入磁性层, 通过外部磁场控制微纳马达的运动方向, 或是通过控制介质溶液中的环境温度或溶液的浓度来控制微纳马达的运动速度, 因此只能实现微纳马达运动速度及方向的简单控制.

(iv) 生物兼容性差. 国内研究较多的化学驱动微纳马达主要依靠介质环境中的过氧化氢、酸溶液等对人体有害的化学物质作为化学燃料, 因此生物兼容性较差, 无法真正地应用于生物体环境. 而外物理场的驱动通常是由聚合物和重金属等生物兼容性较差的材料合成, 在生物体环境中会被巨噬细胞吞噬, 因此生物兼容性差是微纳马达应用于生物医疗领域的最大障碍.

综上所述, 微纳马达的行为控制目前仍存在许多挑战性的问题, 如何获得微纳马达的运动机理、提高微纳马达的运动速度、实现微纳马达运动的精确控制、改善微纳马达的生物兼容性等是微纳马达未来亟待解决的问题.

2 微纳马达工程应用

2.1 清杂质与水处理

随着科技的发展、时代的进步, 世界人口出现了迅猛增长, 人类赖以生存的环境遭到破坏. 其中, 水污染主要是由人类活动过度排放污染物造成的, 以工业废水为主, 它所含污染物多, 成分复杂, 不易净化且处理较困难. 近年来, 随着纳米科技的不断发展, 我国研究者开始尝试利用微纳马达进行环境修

图8 (网络版彩色)化学驱动PEDOT/Ni/Pt微纳马达在超声调控下的运动启停示意图及显微镜图^[27]

Figure 8 (Color online) Schematic and microscope images of the ultrasound-based modulated motion of a chemically powered PEDOT/Ni/Pt microengine^[27]

复及污染物处理^[28-33]。

将吸附性能较好的聚合物与人工合成微纳马达相结合,可实现微纳马达在环境修复领域的应用,本课题组^[28]将层层自组装技术与模板电沉积技术相结合,制备了一种多层聚合物微纳马达(PAH/PSS)₅-PEDOT/Pt,如图9所示。该马达内部含有Ni层,能够在外界磁场作用下实现马达的定向运动,从而实现对环境中有机污染物的清理。

利用镁粒子的可生物降解特性和环境友好性,Gao等人^[29]设计并制备了一种气泡驱动的镁球微纳马达,一侧溅射有镍层与金层。镍层作为磁性物质可在外界磁场作用下实现镁球微纳马达在海水中的定向运动;金层作为功能层,不仅可以防止镁球钝化,提高镁球与海水的反应效率,还有助于镁球微纳马达表面修饰烷基硫醇长链分子层,从而捕获海水中的油滴等污染物,并将油滴从海水中清除,为人工合成微纳马达在环境修复领域的应用提供了可能性。

利用Fe₃O₄粒子的铁磁性和Ag粒子的抗菌性,张立课题组^[31]制备了一种微纳马达Fe₃O₄/PDA/Ag NPs,通过硅烷化和硫醇对该微纳马达进行表面改性,使Fe₃O₄/PDA/Ag NPs表面具有超疏水性和超亲油脂性表面,能够在水油混合物中吸附油滴,完成水油分离。

Lin等人^[32]通过层层自组装技术制备了一种聚合物多层结构的壳状微纳马达(PAH₉/PSS₉)₁₀Pt,该壳状微纳马达内层为金属Pt,能够催化介质环境中的过氧化氢分解,产生氧气泡推动马达运动。壳状微纳马达的聚电解质外壳携带正电荷,能够吸附碱性溶液中(pH>9)带负电荷的有机染料6-CF,由于正负电

荷的相互作用,壳状马达表层的聚电解质能够从溶液中吸附将近89%的6-CF;碱性溶液稀释为中性(pH 7.4)时,有机燃料与聚合物多层结构之间电荷的相互作用被高离子浓度缓冲液屏蔽,吸附的有机染料逐渐释放在中性溶液中,这种聚合物多层结构的壳状微纳马达有望应用于水质监测。

随着纳米科技的发展,微纳马达不仅能够吸收环境中的污染物,也可用于吸收生物体内的毒素。红细胞能够在生物体内循环运输氧气,受此启发,Wu等人^[33]通过模板电沉积技术与超声波处理技术相结合的方法,制备了一种红细胞膜包覆的超声驱动微纳马达。该红细胞伪装的微纳马达不仅具有天然红细胞的生物兼容性,而且能够吸收血液中的毒素,也能够未稀释的生物体液中有效且长期的可控运动。

2.2 黏度计

黏度是流体的一种重要物理性质,它表示流体在流动过程中产生的内部摩擦力大小。在工业生产和科学研究中,通常需要通过测量微流体的黏度来进行质量鉴别和黏度监测。然而传统的毛细管式黏度计、旋转式黏度计以及振动式黏度计由于受到尺寸、精度和成本的限制,不适用于微流体系统黏度的测量。本课题组^[34]基于微纳马达PEDOT/Pt在介质环境中运动速度与介质环境黏度的线性关系,通过模板电沉积技术设计并制备了一种基于微纳马达的微流体黏度计。该气泡驱动微纳马达是由催化层Pt层以及保护层PEDOT层组成的双层锥管结构,当介质环境中过氧化氢溶度一定时,随介质环境中黏度的增加,PEDOT/Pt微纳马达在介质环境中的运动速度呈线性下降的趋势。通过测量PEDOT/Pt微纳马达在介质环境中的运动速度,可推算微流体环境的黏度。

2.3 电路修复

由于制备工艺过程以及表面疲劳磨损的存在,仪器设备表面易出现微裂纹或物理缺陷。微裂纹的存在将导致设备材料的宏观光电性质、光热性质和机械特性发生变化,甚至引起仪器设备的失效,通常需要通过探伤技术对仪器设备表面的裂纹等缺陷进行检测。然而,常见的探伤方法,如射线探伤方法、超声波探伤方法、磁粉探伤方法、渗透探伤方法,操作复杂、表征不直观、不敏感和裂纹尺寸的限制,不适用于仪器设备表面微裂纹的探测,特别是精密的集

图9 (网络版彩色)人工合成多层结构微纳马达的自驱动运动及污染物清除示意图^[28]

Figure 9 (Color online) Schematic representation of the self-propulsion and pollutants purification by artificial multilayered microrocket^[28]

成电路设备、微电子设备等,因此设计一种微尺寸自修复系统尤为重要。

生物组织系统受伤后能够进行自修复以及组织再生, Li等人^[35]受此启发,通过仿真分析及实验研究相结合的方法,设计并制备了一种微纳马达仿生自修复系统.该系统不仅能够检测微结构表面的完整性,而且能够自动修复微结构表面的初期损伤,实现自我调节及自我修复.微电子设备或集成电路通电后,表面裂纹处形成的能垒与势阱会和微纳马达的功能表面之间相互吸引,导电性良好的Au/Pt微纳马达会自动运动至表面微裂纹处排列,从而接通电路恢复电器回路的导电性,如图10所示.这种仿生自修复系统的检测与修复过程不仅具有可重复修复性,而且不会影响电器设备以及材料的固有特性。

2.4 群集及靶向药物

自然界中生存着许多群聚动物,如蜜蜂、蚂蚁、金枪鱼、蓝鲸等,在生活中无论进食、睡觉还是迁移等行为都是以集体为单位,彼此间相互关照、相互协助.受自然界中群聚动物的启发,如何实现人工合成微纳马达的群集与离散受到广泛关注. Xu等人^[36]调控外部超声场的频率及电压等参数,实现了化学驱动Au/Pt纳米线马达的聚集与分离.当外部超声场打开时,超声作用区域会产生压力梯度,Au/Pt纳米线马达会聚集在压力较低的区域;超声场关闭后,Au/Pt纳米线马达在化学驱动的作用下在溶液中离散运动,如图11所示,因此Au/Pt纳米线马达的这种群集行为具有可逆性。

药物制剂的给药途径与方法对药物在体内的作用效率至关重要.传统的口服给药主要受到2种首过效应的影响,即胃肠道上皮细胞中酶系的降级、代谢及肝中各酶系的生物代谢.许多药物成分会因首过效应而代谢失效,如多肽、蛋白类药物、 β -受体阻滞

剂等.为了提高药物的利用率和疗效、降低药物的副作用,利用经过表面修饰的微纳马达携带药物,定向、定量、定时进行靶向给药以及药物控释具有巨大的生物医用价值^[37~45].

为了实现人工合成微纳马达在靶向药物领域的应用, Wu等人^[37]通过模板电沉积技术与层层自组装技术相结合的方法,设计并制备了一种聚合物多层管状微纳马达,马达内部的Pt纳米颗粒能催化介质环境中的过氧化氢分解产生氧气泡,推动马达在介质环境中的自驱动运动.多层管状微纳马达内部具有磁性离子 Fe_3O_4 ,能够在外部磁场的作用下实现马达的定向运动到达病变的海拉细胞,并在外界超声场的作用下释放马达内部组装的抗癌药物DOX,从而实现靶向给药杀死癌细胞.该多层管状微纳马达运动速度和方向可通过介质环境中过氧化氢浓度以及外界磁场方向进行控制,同时可以作为药物载体实现药物靶向运送及药物远程控释。

用胶囊装载药物可降低药物对食道和胃黏膜的刺激,同时可以避免药物被唾液分解,因此胶囊的存在既保护了药物药性不被破坏,也保护了消化器官和呼吸道. Wu等人^[38]结合层层自组装技术和微触印刷技术,设计并制备了类胶囊结构的双面球微纳马达.该马达一侧组装有Pt纳米粒子,能够催化过氧化氢产生氧气推动双面球微纳马达运动.马达外壳为聚合物多层结构(PSS/PAH)₅,其渗透性可通过控制介质环境中的有机溶剂进行调节,当介质环境中含有乙醇时,聚合物多层结构具有较高渗透性,可吸收药物吸入马达内部空腔;当介质环境中不含有乙醇等有机溶剂时,聚合物多层结构的渗透性降低,可作为药物载体储存吸入空腔的药物,并在磁导的作用下实现药物的运输。

目前多数人工合成微纳马达是由生物兼容性、降解性较差的材料组成,严重影响了其在生物医学领

图10 (网络版彩色)人工合成微纳马达自修复破损电路示意图^[35]

Figure 10 (Color online) Schematic of autonomous repair of broken electronic pathways by artificial nanomotors^[35]

图 11 (网络版彩色)化学驱动Au-Pt微纳马达群集行为^[36]

Figure 11 (Color online) The swarming behavior of chemically powered Au-Pt nanomotors^[36]

域的应用。研究能够降解为无毒成分、且能够与活体组织具有良好生物兼容性的微纳马达对其在生物医学领域的应用具有重要意义。

大多数人工合成微纳马达为重金属或聚合物,无法在人体内降解,贺强课题组^[40]基于金粒子的光热转效应和明胶的热敏特性,将模板电沉积与层层自组装技术相结合,制备了一种可生物降解的自驱动聚赖氨酸/牛血清白蛋白多层微纳马达(PLL/BSA)。该微纳马达的明胶外壳组装有抗癌药物阿霉素、金粒子和过氧化氢酶,能够在气泡驱动、磁导作用下定向运输抗癌药物至癌细胞处,金粒子在近红外光辐射下吸收能量转化为热能诱导明胶的相变,从而实现药物控放(图12(a))。PLL/BSA多层微纳马达能够在生理环境中通过酶处理分解为对生物体无害的成分,同时通过明胶的热敏特性实现了抗癌药物的有效控放。基于上述研究,贺强课题组^[41]又制备了一种光控释放抗癌药物的球状微纳马达,能够在外界磁场的作用下定向抵达病变细胞层,并在近红外光作用下实现抗癌药物-阿霉素的可控释放,如图12(b)所示。

为了实现对微纳马达靶向药物的远程控制,Wu等人^[42]结合理论分析与实验研究,制备了一种功能型聚合物-金壳多层微管马达。在近红外光照射下,聚合物-金壳多层微管马达内部组装的金纳米粒子能够将光能转换为热能,马达内部的水分迅速蒸发致使马达在癌细胞附近发生爆炸,爆炸过程中产生的压力波、热辐射、微管马达爆炸碎片导致癌细胞死亡。理论研究发现聚合物-金壳多层微管马达的爆炸过程

图 12 (网络版彩色)具有生物降解性的蛋白微纳马达(a)和类胶囊状双面球微纳马达(b)的光触发药物控释示意图^[40,41]

Figure 12 (Color online) Schematic representation of (a) drug transportation and light-triggered release using biodegradable protein-based rockets and (b) targeted movement and light-triggered drug release of Janus capsule motors^[40,41]

所需热量主要取决于内部金粒子的尺寸和粒子排列方式。

目前人工合成微纳马达的靶向药物研究多为体外实验,Gao等人^[43]用自上而下的组装方法制备了一种仿生干细胞膜包裹的明胶微纳马达,表面具有功能基团,能够定向识别活体老鼠内部的癌细胞,完成老鼠体内药物的靶向运输与释放,如图13所示。仿生干细胞膜包裹的明胶微纳马达不仅具有类似天然干细胞的生物学特性而且能够在体外及体内实验中表现出良好的稳定性与生物兼容性,开启了微纳马达在活体生物内进行靶向药物的新篇章。

随着微纳马达靶向药物应用的不断发展,为了维持体内正常的血药浓度,避免药物累计中毒,微纳马达药物控释技术成为微纳马达靶向药物的另一研究热点。任碧野课题组^[44]制备了一种可用于药物可控释放的微纳马达。该马达通过多孔碳酸钙微球吸附介质环境中的消炎药物——布洛芬,而后通过层层自组装技术将聚电解质膜——硫酸鱼精蛋白膜(PRO)与聚苯乙烯磺酸钠膜(PSS)包覆在多孔碳酸钙微粒子外侧,形成类胶囊状的载药微纳马达。该马达能够在肠液和胃液环境中实现药物控释,且在肠液中的药物释放速度低于胃液中的释放速度。

基于聚N-异丙基丙烯酰胺胶体(PNIPAM)的热敏

图13 (网络版彩色)仿生干细胞膜包裹的明胶微纳马达制备流程及在小鼠体内的肿瘤靶向药物运输^[43]

Figure 13 (Color online) Schematic of the preparation of stem cell membrane-coated gelatin nanogels and their tumor-target drug delivery *in vivo*^[43]

特性, 官建国课题组^[45]通过表面改性技术与离子溅射技术相结合, 制备了一种具有生物兼容性的气泡驱动双面球微纳马达Mg/Pt-PNIPAM, 如图14所示. 当介质环境温度保持在4℃时, 马达一侧的热敏胶体PNIPAM能够吸收并储存药物, 另一侧的镁球能够与水发生反应生成氢气泡, 推动微纳马达在模拟体液或未稀释的血浆液中自驱动来运输药物; 当介质环境温度升高至37℃时, 热敏胶体PNIPAM发生收缩完成药物释放. 该药物控放技术能维持体内正常的血药浓度, 避免了药物累计中毒.

综上所述, 随着微纳马达研究的进展, 多物理场驱动微纳马达已经能够实现污染物清除、微流体黏度计、电路裂纹寻迹及修复、粒子富集、靶向药物以及药物控释等工程领域的应用, 但距离微纳马达真正实现在生物体内的应用还有很远的距离. 如何提高微纳马达的生物兼容性, 实现其在生物体环境中精确的运动控制是我国微纳马达未来研究亟待突破的问题.

3 总结与展望

本文总结了国内对多物理场驱动微纳马达运动

图14 (网络版彩色)Mg/Pt-PNIPAM双面球微纳马达的药物温控释放^[45]

Figure 14 (Color online) Drug releasing behaviors of the Mg/Pt-PNIPAM Janus micromotors^[45]

机理的研究及其在众多领域的应用. 微纳马达根据动力源的不同可分为化学驱动微纳马达、外物理场驱动微纳马达、混合动力驱动微纳马达. 外物理场驱动微纳马达不需要外界环境提供过氧化氢、酸溶液等对人体有害的化学燃料, 相对于化学驱动微纳马达具有较高的生物兼容性. 混合动力驱动是通过化学驱动方式与外物理场驱动方式中的任意2种及2种以上驱动方式的结合, 来驱动微纳马达的一种方式, 相对于化学驱动及外物理场驱动具有较高的环境适应性. 通过调控多物理场驱动微纳马达动力源的大小、强度、方向, 并对微纳马达进行表面改性及结构材料设计等, 可实现微纳马达对环境中的杂质及污染物的清除、对人体环境中毒素的吸附、对微流体环境中黏度的测量、对仪器设备表面的微裂纹进行探测及自修复、对环境中的微粒子进行聚集及离散、以及在体外环境及生物体环境中进行靶向药物等多领域的应用.

虽然我国在微纳马达研究领域已经取得了重大的进展和突破, 但是目前微纳马达的研究还存在诸多关键性问题, 如微纳马达的驱动机理不明确、运动速度较低、运动控制不完善以及生物兼容性差等问题, 因此如何解决这些关键性难题对于微纳马达实现在生物体环境中的生物医疗应用以及环境修复等工程领域的应用具有重要意义, 也是未来微纳马达研究亟待突破的难题.

尽管国内对微纳马达的研究尚处发展初期, 面临许多挑战性难题, 但是微纳马达的研究具有巨大的发展潜力, 有望应用于纳米组装、环境修复、生物医疗以及电路自修复等领域. 通过更深入的研究, 加强多学科交叉与融合, 运动高度可控的多物理场驱动微纳马达未来必将成为下一个重要的关键成果.

参考文献

- 1 Wang Z S. A little engine that could: An introduction to nanomotor (in Chinese). *Chin J Nat*, 2006, 28: 160–163 [王志松. 能干的小引擎—纳米马达. 自然杂志, 2006, 28: 160–163]
- 2 Wang L, Li L Q, Li T L, et al. Locomotion of chemically powered autonomous nanowire motors. *Appl Phys Lett*, 2015, 107: 063102
- 3 Wang L, Li L Q, Xu H G, et al. A new molecular dynamic model of nanowire motor. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng*, San Diego: SPIE, 2014
- 4 Wang W, Duan W T, Sen A, et al. Catalytically powered dynamic assembly of rod-shaped nanomotors and passive tracer particles. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110: 17744–17749
- 5 Solovev A A, Mei Y F, Ureña E B, et al. Catalytic microtubular jet engines self-propelled by accumulated gas bubbles. *Small*, 2009, 5: 1688–1692
- 6 Solovev A A, Samuel S, Martin P, et al. Magnetic control of tubular catalytic microbots for the transport, assembly, and delivery of micro-objects. *Adv Funct Mater*, 2010, 20: 2430–2435
- 7 Li J X, Liu Z Q, Huang G S, et al. Hierarchical nanoporous microtubes for high-speed catalytic microengines. *NPG Asia Mater*, 2014, 6: 1–5
- 8 Liu Z Q, Li J X, Wang J, et al. Small-scale heat detection using catalytic microengines irradiated by laser. *Nanoscale*, 2013, 5: 1345–1352
- 9 Chang X C, Li L Q, Li T L, et al. Accelerated microrockets with a biomimetic hydrophobic surface. *RSC Adv*, 2016, 6: 87213–87220
- 10 Wu Z G, Li J X, de Avila B E F, et al. Water-powered cell-mimicking Janus micromotor. *Adv Funct Mater*, 2015, 25: 7497–7501
- 11 Mou F Z, Chen C R, Ma H R, et al. Self-propelled micromotors driven by the magnesium-water reaction and their hemolytic properties. *Angew Chem Int Ed*, 2013, 52: 7208–7212
- 12 Li Y, Mou F Z, Chen C R, et al. Light-controlled bubble propulsion of amorphous TiO_2/Au Janus micromotors. *RSC Adv*, 2016, 6: 10697–10703
- 13 Mou F Z, Li Y, Chen C R, et al. Single-component TiO_2 tubular microengines with motion controlled by light-induced bubbles. *Small*, 2015, 11: 2564–2570
- 14 Li J X, Huang G S, Ye M M, et al. Dynamics of catalytic tubular microjet engines: Dependence on geometry and chemical environment. *Nanoscale*, 2011, 3: 5083–5089
- 15 Li L Q, Wang J Y, Li T L, et al. Hydrodynamics and propulsion mechanism of self-propelled catalytic micromotors: Model and experiment. *Soft Matter*, 2014, 10: 7511–7518
- 16 Li L Q, Wang J Y, Li T L, et al. A unified model of drag force for bubble-propelled catalytic micro/nano-motors with different geometries in low Reynolds number flows. *J Appl Phys*, 2015, 117: 104308
- 17 Wu Z G, Si T Y, Gao W, et al. Superfast near-infrared light-driven polymer multilayer rockets. *Small*, 2015, 12: 577–582
- 18 Xuan M J, Wu Z G, Shao J X, et al. Near infrared light-powered Janus mesoporous silica nanoparticle motors. *J Am Chem Soc*, 2016, 138: 6492–6497
- 19 Li Z, Petit T, Yang L, et al. Controlled propulsion and cargo transport of rotating nickel nanowires near a patterned solid surface. *ACS Nano*, 2010, 4: 6228–6234
- 20 Zhang L, Petit T, Peyer K E, et al. Targeted cargo delivery using a rotating nickel nanowire. *Nanomed Nanotechnol Biol Med*, 2012, 8: 1074–1080
- 21 Li T L, Li J X, Zhang H T, et al. Magnetically propelled fish-like nanoswimmers. *Small*, 2016, doi: 10.1002/sml.201601846
- 22 Wang W, Castro L A, Hoyos M, et al. Autonomous motion of metallic microrods propelled by ultrasound. *ACS Nano*, 2012, 6: 6122–6132
- 23 Wang W, Li S X, Lamar M, et al. Acoustic propulsion of nanorod motors inside living cells. *Angew Chem Int Ed*, 2014, 53: 3201–3204
- 24 Wu Z G, Li T L, Li J X, et al. Turning erythrocytes into functional micromotors. *ACS Nano*, 2014, 8: 12041–12048
- 25 Li J X, Li T L, Xu T L, et al. Magneto-acoustic hybrid nanomotor. *Nano Lett*, 2015, 15: 4814–4821
- 26 Wang W, Duan W T, Zhang Z X, et al. A tale of two forces: Simultaneous chemical and acoustic propulsion of bimetallic micromotors. *Chem Commun*, 2015, 51: 1020–1023
- 27 Xu T L, Soto F, Gao W, et al. Ultrasound-modulated bubble propulsion of chemically powered microengines. *J Am Chem Soc*, 2014, 136: 8552–8555
- 28 Li T L, Li L Q, Song W P, et al. Self-propelled multilayered microrockets for pollutants purification. *ECS J Solid State Sci Technol*, 2015, 4: S3016–S3019

- 29 Gao W, Feng X M, Pei A, et al. Seawater-driven magnesium based Janus micromotors for environmental remediation. *Nanoscale*, 2013, 5: 4696–4700
- 30 Mou F Z, Pan D, Chen C R, et al. Magnetically modulated pot-like MnFe_2O_4 micromotors: Nanoparticle assembly fabrication and their capability for direct oil removal. *Adv Funct Mater*, 2015, 25: 6173–6181
- 31 Wang B, Yang L, Zhang Y B, et al. Bioinspired superhydrophobic Fe_3O_4 @polydopamine@Ag hybrid nanoparticles for liquid marble and oil spill. *Adv Mater Interface*, 2015, 2: 1500234
- 32 Lin Z H, Wu Z G, Lin X K, et al. Catalytic polymer multilayer shell motors for separation of organics. *Chem Eur J*, 2015, 22: 1587–1591
- 33 Wu Z G, Li T L, Gao W, et al. Cell-membrane-coated synthetic nanomotors for effective biodetoxification. *Adv Funct Mater*, 2015, 25: 3881–3887
- 34 Wang L, Li T L, Li L Q, et al. Microrocket based viscometer. *ECS J Solid State Sci Technol*, 2015, 4: S3020–S3023
- 35 Li J X, Shklyaev O E, Li T L, et al. Self-propelled nanomotors autonomously seek and repair cracks. *Nano Lett*, 2015, 15: 7077–7085
- 36 Xu T L, Soto F, Gao W, et al. Reversible swarming and separation of self-propelled chemically-powered nanomotors under acoustic fields. *J Am Chem Soc*, 2015, 137: 2163–2166
- 37 Wu Z G, Wu Y J, He W P, et al. Self-propelled polymer-based multilayer nanorockets for transportation and drug release. *Angew Chem Int Ed*, 2013, 52: 7000–7003
- 38 Wu Y J, Wu Z G, Lin X K, et al. Autonomous movement of controllable assembled Janus capsule motors. *ACS Nano*, 2012, 6: 10910–10916
- 39 Mhanna R, Qiu F M, Zhang L, et al. Artificial bacterial flagella for remote-controlled targeted single-cell drug delivery. *Small*, 2014, 10: 1953–1957
- 40 Wu Z G, Lin X K, Zou X, et al. Biodegradable protein-based rockets for drug transportation and light-triggered release. *ACS Appl Mater Interface*, 2015, 7: 250–255
- 41 Wu Y J, Lin X K, Wu Z G, et al. Self-propelled polymer multilayer Janus capsules for effective drug delivery and light-triggered release. *ACS Appl Mater Interface*, 2014, 6: 10476–10481
- 42 Wu Z G, Gao C Y, Frueh J, et al. Remote-controllable explosive polymer multilayer tubes for rapid cancer cell killing. *Macromol Rapid Commun*, 2015, 36: 1444–1449
- 43 Gao C Y, Lin Z H, Jurado-Sánchez B, et al. Stem cell membrane-coated nanogels for highly efficient *in vivo* tumor targeted drug delivery. *Small*, 2016, 12: 4056–4062
- 44 Wang C Y, He C Y, Zhen T, et al. Combination of adsorption by porous CaCO_3 microparticles and encapsulation by polyelectrolyte multilayer films for sustained drug delivery. *Int J Pharm*, 2006, 308: 160–167
- 45 Mou F Z, Chen C R, Zhong Q, et al. Autonomous motion and temperature-controlled drug delivery of Mg/Pt-poly(*N*-isopropylacrylamide) Janus micromotors driven by simulated body fluid and blood plasma. *ACS Appl Mater Interface*, 2014, 6: 9897–9903

补充材料

表 S1 微纳马达驱动机理分类

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “多物理场驱动微纳马达的运动机理及应用”

Propulsion mechanisms and applications of multiphysics-driven micro- and nanomotors

CHANG XiaoCong, LI TianLong, ZHOU DeKai, ZHANG GuangYu & LI LongQiu*

School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

* Corresponding author, E-mail: longqiuli@hit.edu.cn

Multiphysics-driven synthetic micro/nanomotors can convert chemical or other types of energies, such as magnetic, electrical, photochemical, thermal, acoustic energies into mechanical energies in terms of motion and velocity. Significant efforts have been dedicated to preparing micro/nanomotors as well as the applications of micro/nanomotors. This paper provides a comprehensive review on the research for a large variety of micro/nanomotors recently investigated in China. Three types of propulsion mechanisms are proposed for multiphysics-driven synthetic micro/nanomotors, i.e., chemical propulsion, external-physical-fields propulsion and hybrid propulsion. It is shown that chemical propelled micro/nanomotors can convert the chemical energy caused by the redox reactions into mechanical energy, such as concentration-gradient propelled micro/nanomotors, self-electrophoresis micro/nanomotors and bubble-propelled micro/nanomotors. Among the diverse chemical propelled micro/nanomotors, the micro/nanomotors prepared by rolled-up or electrodeposition technique show a higher velocity and a more controllable motion. External-physical-fields propelled micro/nanomotors can transfer light, magnetic energy, ultrasonic energy into mechanical energy. There is no need to require any additional chemical fuel which is harmful to human body such as hydrogen peroxide, strong acid, alkaline, Br_2 , or I_2 solutions, for the micro/nanomotors propelled by external-physical-fields. Therefore, it has better biocompatibility and broader applications than the chemical propelled micro/nanomotors. Hybrid propelled micro/nanomotors can combine the chemical propulsion mechanisms with external-physical-fields propulsion mechanisms simultaneously. The hybrid propelled micro/nanomotors not only can move in the chemical fuel, but also can be propelled by light, magnetism or ultrasonic energy. It has more powerful applicability and a broader application than that propelled by the other two propulsion mechanisms. Although the existed researches of micro/nanomotors are still of limitations, such as ambiguous propulsion mechanisms, low velocity, imprecise motion control and poor biocompatibility, the Chinese researchers have made significant progress and breakthroughs in recent years. The micro/nanomotors, which move autonomously in fluids, are studied for a growing number of applications that include targeted drug delivery, separation, biosensor, and fabrication of active biomimetic systems, environmental remediation and other emerging applications. The micro/nanomotors can be used as adsorbent of microscale particle to achieve reversible swarming and separation of micro/nanomotors, eliminate the pollutants in environment and the toxin in human body. In recent years, the micro/nanomotors can also be used as microscale sensor to measure micro-fluid viscosity, search and repair the microcracks. In addition, the micro/nanomotors can be applied for drug carrier to pick up and deliver the drug particles to targeted locations and can effectively control-release drug molecules to avoid drug accumulation. Nowadays, the micro/nanomotors also can be applied to control and assemble the microparticles and this technique is expected to be applied for biological single-cell analysis system. Although the micro/nanomotors can be applied in different fields, the real application of micro/nanomotors is still far away to reach, especially to be used in human body. In conclusion, various propulsion mechanisms have been demonstrated in this review. Furthermore, typical applications in various fields are also presented. The prospects, challenges and future trends of the investigation on micro-and nanomotors are discussed. It is helpful for researches who are working in micro/nano motors research area as well as in engineering applications.

micro/nanomotors, multiphysics-driven, propulsion mechanism, applications prospect

doi: 10.1360/N972016-00844