评述

自驱动微马达专题

自驱动迷你马达及其在超分子自组织与能量转换中的应用

肖萌^{1,2}, 成梦娇¹, 石峰^{1*}

1. 化工资源有效利用国家重点实验室, 北京化工大学, 北京 100029

2. 南洋理工大学材料科学与工程学院, 新加坡 6397981, 新加坡

*通讯作者, E-mail: shi@mail.buct.edu.cn

收稿日期: 2016-08-04; 接受日期: 2016-09-02; 网络版发表日期: 2016-11-21

国家自然科学基金面上项目(编号: 21674009)和国家自然科学基金委优秀青年科学基金(编号: 51422302)资助项目

摘要 随着新型智能材料的迅速发展, 自驱动马达在生物医学、货物运输、环境治理、微机器人等方面的研究中受到了广泛关注. 本文以驱动力的形态作为分类标准, 总结了近几年自驱动马达以物理及化学形式作用力为主要驱动力, 实现毫米至厘米的迷你尺度器件的快速运动的研究进展. 基于超分子化学的概念, 总结了自驱动迷你马达在超分子自组织方面的应用研究. 基于法拉第电磁感应定律, 对自驱动迷你马达驱动宏观器件运动过程中, 将化学能转变为机械能, 并进一步转变为电能的能量转换过程的研究进行了总结.

关键词 自驱动, 迷你马达, 物理驱动力, 化学驱动力, 超分子自组织, 能量转换

1 引言

自驱动马达是可自发运动或可以为物体提供驱动力并使其运动的体系. 正是自驱动马达可自发运动的特性, 使得其在未来生物医药、传感、环境科学等方面的发展中有着潜在的应用价值^[1-3]. 自驱动马达于 2002 年开始受到关注, 美国哈佛大学 Whitesides 等^[4]发表了一篇题为“自发运动与自组装(autonomous movement and self-assembly)”的报道, 该报道中, 作者利用铂催化双氧水产生氧气泡这一体系作为驱动力, 推动厘米级构筑基元自发运动, 并进一步形成组装体^[4]. 该报道指出, “运动所需的能源来自于产生的

气泡在爆破的瞬间液体的反作用力”. 此后数 10 年里, 拥有自驱动功能的马达在靶向给药、处理癌细胞、货物运输、环境治理等方面开辟出光明的发展前景^[5-10]. 然而, 当前国内外各高校与研究所对自驱动马达的研究多集中在微纳米尺度, 如美国加利福尼亚大学圣地亚哥分校的 Wang 等^[11,12], 德国莱布尼兹固体和材料研究所的 Schmidt 等^[13,14], 德国马克斯普朗克智能系统研究所的 Sánchez^[15,16], 宾夕法尼亚州立大学的 Sen 等^[17], 新加坡南洋理工大学的 Pumera 等^[18,19], 哈尔滨工业大学的贺强等^[20-22]与王威等^[23,24], 复旦大学的梅永丰等^[25,26], 武汉理工大学的官建国等^[27,28], 苏州大学的董彬等^[29,30], 华南理工

引用格式: 肖萌, 成梦娇, 石峰. 自驱动迷你马达及其在超分子自组织与能量转换中的应用. 中国科学: 化学, 2017, 47: 40-61
Xiao M, Cheng M, Shi F. Self-propelling mini-motor and its applications in supramolecular self-assembly and energy conversion. *Sci Sin Chim*, 2017, 47: 40-61, doi: 10.1360/N032016-00161

大学的任碧野等^[31,32], 香港中文大学的张立等^[33,34], 而在毫米至厘米尺寸的迷你尺度上(为了与纳米尺度区分开来, 我们称之为“迷你尺度”)的研究较少.

迷你尺度微小物体运动的研究具有很多潜在应用: (1) 自然界中微小生物如水龟、隐翅虫的运动机制研究以及相应的仿生研究. (2) 构建多级多层次复杂体系, 展开具有功能协同的微型智能器件的研究, 将扩大自驱动体系的应用范畴. 当前自驱动复杂体系的研究大多集中在纳米尺度颗粒的集群行为(collective behaviors)研究. 而在“迷你尺度”上, 对单个目标运动物体而言, 体积力、流体阻力变得显著, 运动物体的设计、制备以及动力负载则要求对颗粒与环境整体进行综合考虑, 此时的目标颗粒的运动本身已经成为一个复杂体系, 这方面的研究不仅有利于理解“迷你尺度”颗粒的自驱动机理, 而且可以为微型智能器件和功能化应用提供新的思路. (3) 在流体力学方面, “迷你尺度”自驱动方面的研究为流体阻力研究提供了新的平台. 然而, 迷你尺度的物体与微纳米尺度物体相比, 在运动过程中存在着由于尺寸较大而导致的流体阻力大的问题, 这一问题的出现导致运动实体体系中负载的自驱动马达所提供的驱动力中, 很大一部分都用来抗衡流体阻力, 因而导致驱动力大打折扣, 因此, 对于毫米至厘米尺寸的迷你运动体系而言, 发展一种有效的驱动力是实现迷你尺度物体快速运动的必要前提. 本文主要从驱动方式出发, 对当前毫米至厘米的迷你尺度自驱动马达进行综述, 并着重在超分子自组织及能量转换两个方面阐述其应用.

为了更好地理解本章主题, 我们将根据推动宏观物体运动的驱动力对运动体系进行区分. 目前, 常用来有效推动宏观物体运动的驱动力主要分为两类: 物理驱动力, 如磁场、电场、光场、热梯度等; 化学驱动力, 如气泡驱动、化学 Marangoni 效应等. 在运动方式和运动状态方面, 典型的纳米微米级物体的自驱动运动过程, 通常是通过设计非对称性结构或动力负载, 导致运动物体所受到的净合力不为零, 从而按照加速度方向进行持续运动. 而对于“迷你尺度”乃至宏观物体的运动而言, 其运动状态更加丰富: 利用一些材料本身的智能刺激-响应特性, 通过外界调控运动物体在不同热力学稳定能量状态之间切换, 从而发生可逆的、重复性的变形, 引发运动形态的转变. 例如, 带电凝胶在电场中的运动、热敏高分子复合物在温度调控下的运动.

2 物理驱动力

顾名思义, 物理驱动力是不涉及化学反应、没有化学物质的变化或驱动系统没有向运动体系中释放化学物质的一类驱动力. 此类驱动力一般是由外界环境中磁场、电场、光场、热梯度等对运动物体施加的场作用力或器件自身的变形产生的机械作用力实现运动的.

2.1 电场驱动

根据迷你马达中电场的类型(交流电、直流电)进行区分, 利用电场驱动固体物质的运动方式一般有两种: (1) 利用二极管将交流电整流为直流电的特性, 实现二极管在水面上的直线运动. 北卡罗莱纳州立大学的 Velez 等^[35]在以半导体二极管为运动实体的运动体系的两端加载一对交流电电极, 二极管对周围负载的电压进行整流并在周围流体中形成局部区域的电渗流, 从而驱动二极管在水面上进行直线运动(图 1(a)). 流体通道内壁上二极管的嵌入增强了通道内流体中的电渗流效应, 进而加快了二极管在水面上的运动速度, 这一现象进一步证明了二极管在水面上运动的机理为局部直流电所产生的电渗流效应. 另外, 当以发光二极管作为运动实体时, 在交流电极的驱动下, 二极管器件进行直线运动, 并伴随着灯泡发亮; 当以一个光电二极管作为运动实体时, 在交流电极的驱动下, 二极管器件进行直线运动, 当用光对器件进行辐照时, 器件停止运动.

(2) 利用溶液中的离子在直流电场的作用下向带有相反电荷的电极一端扩散, 实现凝胶在直流电场中的运动过程. 1992 年, 茨城大学的 Osada 等^[36]利用直流电场实现水溶液中凝胶的运动. 所制备的带正电的聚(2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸) (PAMPS)凝胶两端分别负载上塑料棒作为双足, 当体系中通入直流电时, 溶液中带正电的表面活性剂分子向负极扩散, 吸附在 PAMPS 凝胶背对负电极的一侧, 导致凝胶两侧渗透压不均一, 从而使得凝胶向吸附有表面活性剂分子的一侧弯曲; 当直流电消失时, 表面活性剂分子重新扩散至水溶液中, 弯曲的凝胶发生舒张还原. 如此, 凝胶的往复弯曲-舒张过程, 使凝胶在单向的锯齿模板上缓慢定向移动(图 1(b)).

除上述两种直接利用外界电场驱动固体运动的方式之外, 利用直流电电解水产生氢气与氧气, 气泡

图1 电场驱动物体运动. (a) 交流电驱动固态物体在水面上的运动^[35]; (b) 直流电驱动凝胶在溶液中运动^[36] (网络版彩图)

的释放与爆破也可以实现导体在电场中的定向运动. 法国波尔多大学的 Kuhn 等^[37]向放置有一个导体的水体系统中通入直流电, 此时, 水发生电解, 在导体面向电极的阳极与阴极两侧分别发生还原反应产生氢气与氧化反应产生氧气, 且两种气体的体积比为 2:1. 因此, 在较多的氢气气泡驱动下, 导体在水中发生阳极到阴极的直线运动. 通过向体系中加入氧化电位更低的对苯二酚, 面向阴极的导体一端发生对苯二酚的氧化反应产生对苯醌, 而没有气泡产生, 在导体另一端产生的氢气气泡的推动下, 导体向阴极直线运动(图 2(a)). 进而, 向运动体系中引入多个二极管

并控制其连接方向, 即可以通过调节正负极的方向, 对运动物体的运动方向进行调节, 并控制发电二极管的发光情况(图 2(b))^[38]. 在此单向垂直运动的基础上, 通过对运动场所进行改良, 实现了垂直方向的往复运动. 如图 2(c)所示, 当两个电极放置在垂直体系的两端(阳极连通下方)时, 面向阴极的导体一端表面, 溶液中的氢醌发生氧化反应产生苯醌, 连通阳极的导体一端发生水分子的还原反应产生氢气气泡, 气泡的产生推动导体在垂直方向的管道中向上运动; 若管道上部内径大于下部, 随着导体的上升, 气泡从导体四周扩散并上升至液面释放到大气中, 进

图2 直流电驱动物体运动. (a) 导体在溶液中的水平运动^[37]; (b) 垂直运动伴随LED灯选择性发光^[28]; (c) 垂直方向上浮下潜运动^[39] (网络版彩图)

而引起气泡产生的浮力小于导体重力, 导体下降, 随着水分子持续的还原反应产生氢气, 当气体产生的浮力再次大于重力时, 导体再次上浮. 随着气泡的反复聚集-释放的过程, 导体在垂直方向的管道中完成上浮-下潜运动^[39].

2.2 磁场驱动

运动实体中存在顺磁性或铁磁性物质是磁场驱动物体运动的必要前提. 根据运动方式进行划分, 磁场驱动的迷你马达自发运动一般分为两种: (1) 外界磁场引起运动物体变形, 在运动场所的协同作用下进行定向运动. 日本京都大学的 Kimura 等^[40]将带有磁性的不锈钢丝混入硅橡胶预聚物中, 在空间磁场的诱导下, 所制得的硅橡胶-不锈钢丝复合物中的不锈钢丝以扇形的形状进行排列. 当作为运动实体的条状复合物放置在单向棘齿结构表面时, 在径向方向上施加一个 0.23 T 的水平磁场时, 嵌入到复合物内部的不锈钢丝会选择顺着磁感线进行分布, 从而引起具有一定弹性的复合物的变形而形成上弧形; 当磁场撤销时, 复合物再次变为平板状, 在磁场加载-撤销的往复操作下, 硅橡胶-不锈钢丝复合物实现上

弧形-平板形状的往复变形, 进而在底部单向棘齿结构的作用下做直线运动(图 3(a)). (2) 直接通过操控外界磁铁的方向和距离, 从而控制运动实体在水面上或水体中的运动. Shi 等^[41]通过交替层状自组装的方法在直径为 0.7 mm、长度为 3.7 cm 的玻璃毛细管引入磁性 Fe_3O_4 纳米粒子, 利用粒子的磁性与外界磁场的引导, 实现了玻璃毛细管在水面上的可控运动. 通过计算, 证实单位质量的 Fe_3O_4 纳米粒子可以推动相当于自身重量 10000 倍的运动实体在水面上运动(图 3(b)).

由于磁场作为驱动力推动物体运动具有不涉及化学物质的引入这一优势, 因此, 常在生物医药等方面得到应用. 约翰·霍普金斯大学的 Gracias 等^[42]将具有铁磁性的金属镍(Ni)与具有温度响应性的甲酚醛漆树脂(转变点为 40~60°C)相结合, 实现了微抓器的磁控定向运动与温度响应性抓取物质的目的, 并验证了其在生物医药靶向抓取癌细胞的可能性. 微抓器是由铬/铜/镍/温敏性聚合物多层结构构成的, 利用金属镍的铁磁性, 通过对外界磁场进行操控, 实现了微抓器(此时, 微抓器处于开放状态)的可控运动; 到达指定定位点时, 升高体系温度至 40°C 以上, 聚合

图3 磁场驱动物体运动. (a) 硅橡胶-不锈钢丝复合物在循环磁场下的水平运动^[40]; (b) 修饰有 Fe_3O_4 纳米粒子的玻璃毛细管在磁场下的水平运动^[41] (网络版彩图)

物的机械性能发生转变, 进而导致微抓器关闭, 抓取体系中的物质. 同样的, 可引起聚合物溶解或层离的化学物质也可以实现微抓器同样的可控关闭效果. 进而, 利用外界磁铁的进一步诱导, 可以将微抓器抓取的物质分离出来(图 4(a)).

作为一种长程力, 磁场的另外一个优势是可远程操控磁性物质定向运动, 这也就满足了在无法触及的封闭体系中进行远程操控的目的, 从而可以发展其在环境治理方面的应用. 利用这一点, 本课题组通过无电化学沉积技术在泡沫镍基底上沉积一层金属银颗粒, 进而在正十二硫醇气氛中进行化学气相沉积, 从而得到带有铁磁性的超亲油器件. 当将其放入一盛有油水混合物表面时, 在外界磁铁的引导下, 超疏水器件可定向运动至水面油滴处, 进而吸附油滴, 实现了封闭体系中的油水分离(图 4(b))^[43].

2.3 光场驱动

作为地球上取之不尽、用之不竭的一类能量来源, 光常被用来转换成其他多种能源形式进行使用, 且光的强度与波长很容易调节, 因此, 光也被用于推动宏观物体的运动.

光驱动物体运动的形式一般有两种. (1) 光的辐照引起介质表面某物理性质(如表面张力)的改变, 导致局部区域该性质的差异, 从而为介质表面上的物体运动提供了驱动力. 在法国巴黎高等师范学院的

Baigl 等^[44]的报道中, 将一个体积为 $3\ \mu\text{L}$ 的油酸液滴放置在含有 4-乙醚基-4'-苄基偶氮苯三甲基溴化铵这一表面活性剂分子的水溶液表面, 当用 $365\ \text{nm}$ 紫外光对油滴一侧进行辐照时, 油滴会被推着做直线运动; 当用 $475\ \text{nm}$ 紫外光进行辐照时, 油滴被拉着做直线运动. 这一现象是由不同紫外光下偶氮苯光能团的异构化所产生的表面张力差引起的. 当油滴一侧被 $365\ \text{nm}$ 紫外光辐照时, 辐照区域内水溶液中的偶氮苯官能团从反式转变为顺式, 此区域内水溶液的表面张力高于油滴另一侧, 水面上表面活性剂分子从低表面张力区域向高表面张力区域扩散, 引起水相中的液体循环与油滴内部的液体环流, 成为推动油滴在水面上直线运动的驱动力; 相反, 当油滴一侧被 $475\ \text{nm}$ 紫外光辐照时, 辐照区域内水溶液中的偶氮苯官能团以反式为主, 此区域内水溶液的表面张力低于油滴周围其他区域, 产生的水相中的液体流动拉动油滴在水面上直线运动(图 5(a)). (2) 光驱动运动的方式是光的辐照改变了场体系中的某一个特性, 如磁化率, 使运动实体的平衡系统发生失衡, 从而引起物体的运动. 日本青山学院大学的 Abe 等^[45]利用热解石墨的抗磁性, 实现了其在 NdFeB 永磁铁上方的运动. 抗磁性使得热解石墨在 NdFeB 永磁铁上方以一定高度悬浮, 且热解石墨在永磁铁上方的悬浮高度是受温度影响的, 温度越高, 单位质量热解石墨的磁化率越高, 使得其在永磁铁上悬浮的高度越

图 4 磁场驱动物体运动. (a) 磁场-温度双响应微抓器用于生物分离^[42]; (b) 磁操控用于封闭体系中的油水分离^[43] (网络版彩图)

图5 光场驱动物体运动. (a) 紫外光驱动偶氮苯油滴在水面上的运动^[44]; (b) 红外光驱动抗磁性物质在永磁铁上的运动^[45] (网络版彩图)

低. 因此, 当用 405 nm 激光对热解石墨的一侧进行辐照时, 由于热解石墨与空气之间明显的热导差异 (热解石墨热导率为 $1600 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 空气热导率为 $0.0241 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), 导致热解石墨与 NdFeB 永磁铁之间的空气局部受热, 而使该区域的热解石墨磁化率升高, 悬浮高度降低, 打破了热解石墨的平衡, 从而实现了其在永磁铁上方的旋转运动 (圆形永磁铁) 与直线运动 (大范围永磁铁) (图 5(b)).

2.4 超声场驱动

超声场作为一种频率和强度均易调控的能量场, 可实现场区域内选择性操控单一物体运动的目的. 超声场驱动物体运动的方式有两种. (1) 利用超声场的频率与运动实体中所储存的气泡直径形成共振, 从而推动物体运动. 美国宾夕法尼亚州立大学的 Huang 等^[46]利用多次光刻技术制备了一类含有开放空腔的微小器件, 并在空腔中储存有一定量的空气, 当将器件放置在水中时, 空腔中形成具有一定直径的气泡. 当外界超声场的振动频率与器件内部储存的气泡直径相吻合, 两者发生共振时, 器件运动速度最快, 从而实现了利用超声场选择性操控单一器件运动的目的. 器件的运动轨迹与器件中空腔的分布情况及空腔的对称性有极大关系. 当器件中心处只有一个空腔时, 在超声场驱动下做直线运动; 当器件内部有一个空腔且不处于中心位置时, 做顺或逆时针运动; 当器件中有多个大小一样的空腔时, 空腔分

布对称的器件运动时呈现直线轨迹, 分布不对称或空腔内部容积不同时, 器件轨迹向小空腔一侧弯曲 (图 6(a)). (2) 超声场的驱动作用还可以通过流体的流动引起的作用力实现. Huang 等^[47]通过设计运动实体, 制备了一种端部带有尖锐边缘结构的齿轮型器件, 在压电传感器将电能转变为超声场的作用下, 器件边缘的尖锐结构发生振荡, 从而引起周围流体的微流动, 而该流动反过来推动器件进行旋转运动 (图 6(b)).

2.5 热驱动

热量作为驱动力推动宏观物体运动的方式一般有两种. (1) 热梯度引起表面张力梯度, 即热 Marangoni 效应, 从而推动物体运动. 加利福尼亚大学伯克利分校的 Fréchet 课题组^[48]在厘米级聚二甲硅氧烷块一端修饰了一层黑度极高的、垂直排列的碳纳米管簇, 将该器件放置在水面上时, 用红外激光器对器件尾部的碳纳米簇进行辐照, 其可吸收红外光并将其转换为热量, 对毗邻区域的水体进行加热, 温度较高 (紧邻碳纳米簇) 的水体, 表面张力较低, 温度较低 (远离碳纳米簇) 的水体, 表面张力较高, 因此在水面上形成了表面张力梯度, 水面上的水分子从低表面张力区域向高表面张力区域扩散, 根据牛顿第三定律, 扩散中的水分子对水面上反向的物体产生推动力, 驱使其向前运动. 这一运动体系也可在日光下实现运动过程 (图 7(a)). (2) 利用热驱动宏观物体的方式, 是利用热光源的辐照改变物体自身的密度, 调

图 6 超声场驱动物体运动. (a) 超声场频率与气泡直径发生共振驱动物体运动^[46]; (b) 超声场引起的流体流动推动器件运动^[47] (网络版彩图)

图 7 热驱动物体运动. (a) 热梯度驱动厘米级 PDMS 块体在水面上的运动^[48]; (b) 红外光改变密度驱动复合物的运动^[49] (网络版彩图)

节其在介质密度上下转变,从而实现物体在介质中的上浮下潜运动.北京石油化工学院的Liu等^[49]制备了一种由丙烯酸十八酯(SA)、甲基丙烯酸(MA)、还原氧化石墨烯(RGO)组成的复合物 S53M47G0.6,该复合物结晶态密度高于水的密度,而熔融态下的密度低于同温度下水的密度.利用这一基本原理,用近红外激光这一热光源对水下的复合物 S53M47G0.6进行局部加热,被加热区域由于受热而从结晶态转变为熔融态,则该区域密度低于水的密度,产生向上的作用力,随着近红外光辐照时间的延长,浮力逐渐升高直至大于该复合物的重量,从而驱动物体向上

运动.停止红外光辐照后,复合物温度降低,熔融态部分重新变为结晶态,复合物密度升高,从而使物体下沉.通过改变运动实体的形状及近红外光辐照位置,可以使物体以不同方式运动,如翻滚、双足走步等(图 7(b)).

2.6 机械驱动力

作为一种以利用力学的最基本原理对物体作用而产生的驱动力,机械驱动力涉及运动实体自身的形变,即物体由于受到外力而变形时,在物体内部各零件之间产生相互作用的力,使得物体完成运动过

程. 生物界中有一类生物, 由于其能够进行“水上漂”的特点而被命名为“耶稣蜥蜴”, 经科学家们研究探索发现, 如此大重量的蜥蜴之所以可以水上漂, 主要有 3 个原因: (1) 水体自身的表面张力导致水面对其表面的物体有一定向上的托力; (2) 蜥蜴在水上的运动速度极快; (3) 蜥蜴在水面上奔跑时, 四只脚与膝盖的活动轨迹可以与其快速的运动配合, 完美地支撑自身在水面上保持直立, 而不掉入水中. 通过对耶稣蜥蜴的仿生, 卡耐基梅隆大学的 Sitti 等^[50]制备了 4 只具有一定柔性、可变形的脚掌, 并与可进行动量传递的四杆机构相配合, 在直流发电机的驱动下, 4 条腿以极高的频率进行摆动, 实现了较大型机器(长 300 mm×宽 125 mm)在水面上的快速运动(图 8).

物理驱动力作为一种不涉及外界化学物质引入的驱动力, 可以有效驱动宏观物体的快速运动, 然而, 上述不同驱动方式均有着不同的弊端. 例如, 磁场推动物体运动过程中, 由于需要物体对外界磁场有响应性, 因此运动实体自身要具有顺磁性或铁磁性, 类似的, 电场驱动的运动实体被要求带有一定的电性或可摩擦生电; 光场驱动或热驱动的运动体系中, 对物体表面的要求较高, 制备工艺复杂不易; 机械作用力驱动的运动体系中, 由于涉及运动实体的变形, 因此要求物体尺寸较大, 在实际应用中或会受到局限. 因此, 上述物体驱动力很难普适性地推动宏观物体的运动. 相反, 化学作用力作为一种外加的且已经发展成熟的驱动力, 可作为一种普适性的驱动力推动几乎所有物体的有效运动.

图 8 机械力驱动物体运动仿生“耶稣蜥蜴”^[50] (网络版彩图)

3 化学驱动力

化学驱动力是与物理驱动力相对应的, 涉及化学反应, 或驱动系统从环境中吸附或向环境中释放化学物质的一类驱动力. 自 2002 年美国哈佛大学 Whitesides 教授^[4]报道了以铂催化双氧水产生氧气泡体系为驱动力实现厘米级物体快速运动以来, 化学驱动力这一外加能源成为科学家们实现驱动物体快速运动最常用的一种驱动力. 常见的化学驱动力一般有 3 类: 气泡驱动、化学 Marangoni 效应驱动及聚合物驱动.

3.1 气泡驱动

最常用来推动宏观物体运动的气泡体系为催化剂催化双氧水产生氧气泡体系. 美国加利福尼亚大学的 Wang 等^[51]利用微尺度连续光学打印技术制备厘米级三维人造鱼, 其尾部引入铂纳米粒子作为催化剂, 头部掺入四氧化三铁磁性物质作为磁诱导因素. 将人造鱼放入一定浓度的双氧水溶液中时, 鱼尾部的金属铂催化双氧水分解产生氧气泡, 气泡的释放与爆破过程对人造鱼做功, 产生了推动力, 从而驱动人造鱼向头部方向运动. 通过对外界磁场方向进行调节, 可以调控人造鱼的运动方向(图 9(a)). 当人造鱼体内掺入活性炭时, 利用其对水相中污染物的吸附作用, 可以实现水清洁的效果, 且人造鱼的自驱动功能能够对其产生强化效应. 与已经报道的微米马达相比, 大尺寸的人造器件及其自驱动功能有望在大范围环境治理方面得到应用(图 9(b))^[52].

在水平方向上, 由于水面上的运动过程中, 流体阻力对器件的运动有极大的阻碍, 因此我们将功能协同系统的概念引入到水平方向的运动中, 以实现器件在水面上的开-停-开智能运动. 所谓功能协同系统, 即两个或多个功能性表面或材料集成到一个体系中, 依次完成功能性, 从而实现既定的复杂目标. 通过泡沫镍表面粗糙金基底的制备与正十二硫醇的修饰, 作者制得具有减阻效果的超疏水船体; 利用 pH 响应性超疏水/超亲水可逆转变的智能表面作为开关, 控制另一功能表面, 即可催化双氧水分解产生氧气泡的金属铂表面与双氧水之间的接触, 从而控制驱动力的供给与否, 进而实现器件运动状态的调控. 在酸性溶液中, 智能表面显超疏水性, 阻碍了金属铂与双氧水之间的接触, 体系中没有驱动力, 因此器件

在水面保持静止;当溶液调节至碱性时,智能表面转变为超亲水性,双氧水溶液浸润该表面并与金属铂接触,分解为氧气泡,气泡的释放与爆破推动了器件向前运动;当溶液再次调节为酸性时,智能表面转变为疏水,再次阻碍了金属铂催化双氧水产生氧气泡的反应,器件停止;如此反复,通过调节溶液酸碱性,实现了器件在水面的开-停-开智能运动(图 10(a))^[53].

目前报道的水平运动形式中,很少有往返运动的报道.为了实现这一目的,我们向运动体系中引入双驱动器,通过两个产生不同气泡的驱动器的竞争,实现了器件在水平方向的往返运动.为了增大器件的运动速度,器件表面修饰有一层具有减阻效果的超疏水涂层,并在器件两端分别负载金属铂与金属镁.将器件放置在酸性溶液中时,金属镁与溶液中的酸反应产生氢气气泡,推动器件向金属铂一端运动;当溶液调节至碱性时,金属镁一端的反应受到抑制,器件运动停止;进一步加入双氧水溶液,金属铂在碱性条件下可催化双氧水快速分解产生氧气气泡,推动器件向金属镁一端运动,从而实现了器件的往返

运动(图 10(b))^[54].

在宏观物体水平运动的响应性方面,印度理工学院的 Chattopadhyay 等^[55]也进行了深入研究.首先,他们制备了一种含有金属钯(Pd)的马达,利用该金属对双氧水的催化产生氧气泡,从而推动物体在双氧水溶液中运动.当运动体系中引入一个碱液注入位点,马达会向溶液中的高 pH 区域方向运动.这一方向选择行为主要有两个原因:(1) pH 高的区域中,马达表面 Pd 催化双氧水的分解速率更快,因此在马达周围形成了一个局部双氧水压力失衡;(2) 高 pH 溶液中双氧水自身的分解速率高于低 pH,造成整体溶液中越接近碱液注入位点处双氧水的浓度越低,这一情况进一步放大马达界面上的渗透压失衡.上述两个因素共同作用导致马达沿着 pH 升高的方向加速(图 11(a))^[55].当马达中引入磁性粒子时,马达会对外界磁场及溶液 pH 共同作用,从而实现了双响应行为(图 11(b))^[56].另外,以滤纸为基底, Bandyopadhyay 等^[57]在其底部与上部分别溅射一层二氧化锰纳米粒子与磁性纳米粒子,并在上层表面负载罗丹明 6G 分

图 9 金属铂催化双氧水产生氧气泡体系驱动物体运动. (a) 厘米级三维人造鱼的运动及其磁响应性^[51]; (b) 厘米级三维人造鱼用于环境治理^[52] (网络版彩图)

图 10 气泡驱动物体进行水平运动. (a) pH 响应性水平运动^[53]; (b) 氢气泡-氧气泡驱动的水平往复运动^[54] (网络版彩图)

图 11 催化剂-双氧水产生氧气泡体系驱动物体运动. (a) pH 响应性水平运动^[55]; (b) pH-磁场双响应性水平运动^[56]; (c) 磁场响应性纸器件的水平运动^[57] (网络版彩图)

子作为药物分子模型, 从而制备出一种可负载药物的毫米级微管. 由于二氧化锰对双氧水的催化效果, 将微管放入双氧水溶液中时, 微管可自发运动, 配合磁性纳米粒子, 可通过外界磁场的操控, 调节微管的运动方向, 实现了器件上功能分子的负载及其可控运动(图 11(c)).

气泡是一类极轻的物质, 其在运动实体中的吸附与释放, 可以显著影响物体的密度, 考虑到这点, 我们联想到在海洋中可以通过吸入与排出海水来调节自身比重从而实现上浮下潜的潜水艇, 我们设想或许可以通过气泡的产生与释放调节运动物体的比重, 进而调节器件在水相中的浮力, 从而实现器件的上浮下潜运动. 利用无电化学沉积技术在具有多孔结构的泡沫镍基底上沉积一层银纳米粒子粗糙结构, 结合正癸硫醇与 1-巯基十一烷酸的混合硫醇的修饰, 制备得到 pH 响应性超疏水/超亲水可逆转变的表面, 引入金属铂, 将制得的器件放入酸性溶液中时, 由于表面呈现超疏水性, 器件浮在水面上; 当溶液转变为碱性时, 由于器件表面羧基去质子化而形成羧酸根, 界面自由能升高, 结合粗糙基底的放大效果, 器件由超疏水转变为超亲水, 双氧水溶液进入器件内部, 急剧增加了器件的密度, 从而沉入水底; 调节溶液 pH 至酸性, 器件表面的羧酸根逐渐质子化为羧基, 表面能降低, 导致器件表面逐渐由超亲水转变为疏水, 与此同时, 加入双氧水溶液, 进入到器件内部的双氧水在金属铂的催化下分解产生氧气

泡, 聚集在器件内部, 使器件的密度逐渐降低, 直至小于溶液密度时, 器件上浮. 当内部气体冲破多孔泡沫表面并释放到大气中时, 器件再次下潜. 进一步通过调节溶液 pH 可以实现器件多次上浮下潜运动(图 12(a))^[58].

发展功能协同系统这一概念, 我们进一步将由泡沫镍沉积金属金粗糙结构, 并修饰聚异丙基丙烯酸酰胺制得的温度响应性超疏水/超亲水可逆转变的智能表面与金属铂相结合, 实现了双氧水溶液中低温下(28℃)器件下沉, 高温下(41℃)器件上浮的智能运动, 且该过程是可以通过调节体系温度进行多次操控的. 当运动发生在油-水-油三相体系中, 且上层油中溶有染料小分子时, 通过器件的智能上浮下潜运动, 可以将上层染料小分子代入下层油相中, 实现小分子的定向运输(图 12(b))^[59].

3.2 化学 Marangoni 效应驱动

早在 1995 年, 日本北海道大学的 Osada 等^[60]就发现在有机溶剂中浸泡过的宏观尺寸凝胶可以在水

图 12 气泡驱动物体进行垂直运动. (a) pH 响应性上浮下潜运动^[58]; (b) 温度响应性上浮下潜运动^[59] (网络版彩图)

面上自发快速运动, 且当时证实该运动的驱动力来自凝胶中的有机溶剂在水面上的扩散过程. 之后指出该运动是由 Marangoni 效应驱使的^[61]. Marangoni 效应是由于温度或浓度的变化引起界面处表面张力变化, 产生表面张力梯度, 溶液表面吸附的分子由低表面张力区域向高表面张力区域迁移, 引发界面不稳定性, 产生宏观液体流动的现象. 这一液体流动导致界面处物体周围表面张力失衡, 从而实现运动^[62,63]. 利用这一驱动机理, 科学家们在运动实体中引入低表面能物质, 该物质向水中的扩散, 实现了运动实体在水面上的自发运动, 且运动速度最高可以达到近 40 cm s^{-1} ^[64-67].

对由 Marangoni 效应驱使物体运动的研究只有 20 年之久, 故相关研究中的运动方式一般都基于简单的低表面能物质的释放, 因此, 这类器件中 Marangoni 效应的引入就牵涉到低表面能物质的储存, 最常见的低表面能物质的储存器为樟脑丸, 另外还有聚二甲基硅氧烷(PDMS), 带有金属-有机物框架(MOF)的结构, 对紫外光有响应的正性光刻胶、琼脂糖及聚砜等聚合物. 而常用到的低表面能物质一般分为两种, 即溶于水的低表面能物质与表面活性剂.

其中, 前者主要为一些低表面张力的有机物小分子, 如乙醇、乙醚、苯醌等; 后者种类较多, 最常用的为十二烷基硫酸钠(SDS)、溴化十六烷基三甲铵(CTAB)等离子型表面活性剂. 总之, 凡可引起器件周围表面张力发生变化与失衡的物质均会导致 Marangoni 效应的产生, 当所引起的表面张力差足够大时, 即可推动器件运动.

调控由化学 Marangoni 效应驱使的物体运动状态的方式一般有以下 4 种: (1) 改变运动实体的形状, 改变表面活性剂释放过程的对称性, 从而实现物体的不同运动方式, 如旋转、直线、摇摆等(图 13(a, b))^[68-71]; (2) 改变樟脑丸中负载的表面活性剂的浓度, 从而实现物体随着浓度的升高, 从持续运动到间歇运动, 最后在浓度过高时不运动的状态(图 13(c))^[72]; (3) 改变运动实体中释放表面活性剂的驱动系统的位置, 从而改变运动实体的运动形态(图 13(d))^[73]; (4) 向溶液中加入可还原作为驱动物质的苯醌的还原剂, 使释放出来的苯醌转变为没有表面活性的氢醌. 当溶液中还还原剂浓度较低时, 苯醌的还原不影响物体的运动, 此时表现为持续运动; 当溶液中还还原剂浓度升高时, 刚释放出来的苯醌驱动物体运动, 但随着周

图 13 基于 Marangoni 效应驱使的运动的调节方式. (a, b) 运动实体形状的调节^[69,70]; (c) 表面活性剂浓度的调节^[72]; (d) 运动实体中驱动系统位置的调节^[73]; (e) 溶液中还还原剂的调节^[74] (网络版彩图)

围溶液中的苯醌还原形成氢醌,使得物体周围包围着氢醌分子而无法运动;随着苯醌的再次释放,器件再次被推动运动;当水溶液中还原剂浓度再次升高时,刚释放出来的苯醌可以推动物体运动,且扩散在溶液中的大量苯醌被还原为氢醌,而氢醌极易与苯醌反应形成复合物醌氢醌,该复合物不溶于水,吸附在运动实体表面,阻碍了表面活性剂的继续释放,从而导致物体停止运动(图 13(e))^[74].

作为一种自发运动的驱动力,有效控制由化学 Marangoni 效应驱动的运动停止与开启是一个难以攻克的难题.为实现运动智能停止的目的,日本奈良教育大学的 Nakata 等^[75]在距运动体系有一定距离的地方安置一个乙醚位点,蒸发出的乙醚溶于开放的运动体系,降低了水体的表面张力,导致运动体系中表面张力梯度消失,从而使化学 Marangoni 效应失效,导致樟脑丸停止运动(图 14(a)).美国纽约城市大学的 Matsui 等^[76]制备了一类金属-有机框架(MOF)包含疏水缩氨酸(DPA)的复合物,MOF 的分解导致 DPA 分子释放在水体中,由于水面上的疏水 DPA 发生重排,距离远的水区域表面 DPA 分子重新结晶成有序结构,而近水域处 DPA 分子简单重组而不结晶,因此在水面上形成表面张力差,从而推动复合物运动(图 14(b)).DPA 分子的疏水性及其在水面的重排是复合物运动的两个必要因素,进一步通过在水相中引入一个碱性释放位点,使得 DPA 分子在该位点附近溶解度急剧增大而不产生表面张力梯度,从而使得复合物在该位点正上方停止运动(图 14(c))^[77].

在由化学 Marangoni 效应驱使的物体智能开启运动方面,本课题组制备了一个由具有减阻效果的超疏水船体作为运动实体,pH 响应性超疏水/超亲水转变的智能表面,及储存有乙醇水溶液的微容器 3 个

组件组成的功能协同智能器件.将该器件放置在酸性溶液中时,由于智能表面为疏水性的,防止了乙醇的释放,器件保持静止;向溶液中加入碱液调节溶液至碱性时,智能表面由超疏水转变为超亲水,水位上升,接触到智能表面上方的微容器,乙醇释放到水中并扩散,引起表面张力梯度,从而推动器件向前运动,因此实现了器件的智能开启运动(图 14(d))^[78].

然而,上述工作中,低表面能物质的释放并不可控,即一旦接触到水面,立刻释放完全,无法实现器件的再次运动;另外,为了使智能表面由超疏水转变为超亲水状态,需要将溶液整体转变为碱性,溶液的调节过程及智能表面浸润性转变的过程均是耗时的.为了解决以上难题,引入紫外光作为不涉及溶液 pH 转变的环境刺激,实现器件的开-停-开运动.我们将表面活性剂溶于正性光刻胶中,并将该混合物固化在硅片上制得微驱动器,进而负载在超疏水船体的尾部,将集成的这一智能器件放置在碱性洗脱液表面,利用 50 mW cm^{-2} 的光强对所制备的微驱动器进行辐照,光刻胶分解并溶解在洗脱液中,则包裹在其中的表面活性剂释放产生表面张力梯度,从而推动器件向前运动;由于此时的微驱动器中仍有包裹有表面活性剂的光刻胶剩余,则紫外光的再次辐照可以实现器件的再次运动.此体系不仅可以实现直线运动的智能开启与停止,还可以在同一智能器件中负载多个微驱动器,实现器件运动方向的选择(图 15(a))^[79].类似的,苏州大学的董彬等^[80]实现了包裹有表面活性剂的固体正性光刻胶在水底的紫外光响应性开-停-开智能运动(图 15(b)).另外一种不涉及微驱动器中物质分解的一类紫外光响应性开-停可控智能运动是由偶氮苯官能团的特性实现的.4-甲氧偶氮苯(MeOAB)的反式(*trans*-)异构体极难溶于水,相反

图 14 基于 Marangoni 效应驱使的运动的智能停止与开启. (a) 环境中低表面能物质的引入^[75]; (b) MOF-DPA 体系的运动^[76]; (c) DPA 溶解度增加引起物体停止运动^[77]; (d) pH 响应性智能开启运动^[78] (网络版彩图)

的, 顺式异构体(*cis*-)的溶解度高许多. 当将 *trans*-MeOAB 晶体放置在水面时, 由于其几乎不溶于水, 晶体保持静止; 当用紫外光进行辐照时, 晶体中被辐照区域的反式偶氮苯官能团转变为顺式异构体, 形成的 *cis*-MeOAB 溶于水而降低该水域的表面张力, 进而形成表面张力梯度, 推动晶体运动(图 15(c))^[81].

化学 Marangoni 效应在驱动物体运动的同时, 其所引起的流体内循环或界面上的表面活性剂的释放还可引起协同效应, 如运动过程中自组装、汲油等. 美国西北大学的 Grzybowski 等^[82]制备了一类可在水面自发运动的包含有甲醇的琼脂糖块体, 甲醇的释放引起水面上分子由块体向远水域扩散, 而水相中则相反, 同时也导致块体周围渗透压的差异, 两者共同作用的结果导致多个块体在水深 h 为 1.4~1.8 mm 的水面上发生自组装, 同时形成的松散组装体在水面上自发运动(图 16(a)). 另外, 南洋理工大学的 Pumera 等^[83]利用运动物体释放的表面活性剂在水面的扩散过程实现了水面上油滴的收集过程, 为油水分离提供了新思路(图 16(b)).

3.3 聚合物驱动

高分子化学作为近半世纪以来发展非常迅速的一个领域, 在基础化学、材料科学、机械加工等领域均有所应用. 某些聚合物的机械性能可以通过外界环境的刺激发生改变, 将这些聚合物与其他材料相结合, 也可以实现物体或物体的某一部分的运动. 聚 *N*-异丙基丙烯酰胺(pNIPAM)作为刺激响应性智能高分子的代表, 在临界共溶温度(LCST, 32~33℃)以下时, 高分子链段呈舒展状态, 在水溶液中吸收水分子

并形成高分子链段与水分子之间的氢键, 导致聚合物整体体积膨胀; 当温度高于 LCST 时, 高分子链段收缩并形成链段分子内部的氢键, 将水分子排出, 导致聚合物整体体积收缩. 利用 pNIPAM 这一温度响应特性, 美国加利福尼亚大学的 Javey 等^[84]将 SWNT-pNIPAM 复合物(单壁碳纳米管的加入可以增强复合物内部的传热效应与水分子的传质过程)负载在平整低密度聚乙烯模型上, 并将其放置在 48℃ 热水中, 模型即在 30 s 内自发折叠成盒状; 当器件放入冷水中时, 盒状组合体重新展开形成平板形状(图 17(a)).

聚吡咯(PPy)是另一类可以吸收水分并改变自身形状的刚性较强的聚合物, 结合柔性的季戊四醇乙氧基化物(PEE), 可制得一类对湿度梯度迅速响应的复合物(PPy-PEE), 该复合物中两个组分之间形成氢键. 将该复合物放置在湿基底(如湿润的滤纸)上, 由于基底中水分子的挥发, 基底上的复合物吸收水分子并形成 PPy 链段或 PEE 链段与水分子之间的氢键作用, 由于在靠近基底的空气中形成下方湿度大、上方湿度小的梯度, 则复合物中也形成下部复合物水分子浓度大于上部的梯度, 从而使复合物内部的机械性能不均衡, 进而导致复合物发生宏观的形变而运动. 当将该复合物与压电装置结合时, 复合物的运动导致压电效应, 从而实现电信号的产生(图 17(b))^[85].

4 自驱动迷你马达的应用

自驱动迷你马达赋予宏观物体的自驱动功能, 为宏观物体的应用提供了多种可能性. 例如, 物体自

图 15 基于 Marangoni 效应驱使的运动的智能运动. (a) 紫外光响应性厘米级智能运动^[79]; (b) 紫外光响应性微米级智能运动^[80]; (c) 偶氮苯晶体的紫外光响应性智能运动^[81] (网络版彩图)

图 16 Marangoni 效应驱动的运动中的协同效应. (a) 自组装过程^[82]; (b) 水面汲油^[83] (网络版彩图)

发运动过程中的高效碰撞, 使得宏观物体能够实现自发组织形成组装体; 物体的自发运动过程引起的

物体之间的相对运动, 结合法拉第电磁感应定律, 可以实现物体运动的机械能到电能的能量转换过程. 本章中, 我们将着重从宏观超分子自组织及能量转换这两个方面对自驱动迷你马达的应用进行阐述.

4.1 宏观超分子自组织

宏观超分子自组织是指特征尺寸在百微米及以上尺度的构筑基元, 通过分子间相互作用(如静电相互作用、氢键、配位作用、疏水相互作用、 π - π 堆叠作用等)自发组织成为有序结构的过程. 由于宏观超分子自组织具有实验条件温和、自下而上灵活构筑以及生物相容性体系丰富等特点, 该方面的研究有望用于三维复杂组织工程支架材料的可控制备, 从而为研究细胞-三维环境相互作用提供新思路 and 平台. 当前, 宏观超分子自组织仍是一个新兴的研究领域, 由于宏观构筑基元远超越了分子尺度, 随之而来的问题和挑战在于传统自组装过程中分子热运动已经难以实现构筑基元之间的快速碰撞和相互作用, 因而需要发展适应于宏观超分子自组织的有效自驱动方法, 使其不但具有分子层次的随机运动特点, 而且能够为大尺度构筑基元的运动提供足够的动力.

图 17 聚合物形变驱使的物体运动. (a) 温敏型聚合物响应环境温度驱使的运动^[84]; (b) 聚合物响应环境湿度驱使的运动^[85] (网络版彩图)

目前为止, 为了使构筑基元有效运动并发生碰撞, 研究者们向组装体系中引入机械搅拌或机械振荡, 使构筑基元能够较快速地运动, 发生有效碰撞与组装, 但这样的组装过程导致构筑基元的运动过程较随机, 进而使得构筑基元之间的碰撞随机, 因而最后形成的组装体往往不是有序的。因此, 我们认为, 宏观构筑基元的可控快速运动是实现其有序组装的先决条件。

就在已有研究的基础上, 我们利用磁场操控修饰有聚二烯丙基二甲基氯化铵/聚丙烯酸(PDDA/PAA)多层膜的玻璃纤维在玻璃基底上运动, 利用 PAA 中的羧基与 Fe_3O_4 表面多余的 Fe 空轨道发生多齿配位作用, 可以对玻璃纤维进行固定, 并可进一步形成复杂图案(“CHEM”) (图 18(a))^[86]。同样, 当玻璃纤维表面修饰有 Fe_3O_4 纳米粒子与偶氮苯官能团时, 在外界磁场的诱导下, 玻璃纤维可以在玻璃基底上定向运动; 进而, 利用修饰在玻璃基底上的 β -环糊精与玻璃纤维表面偶氮苯官能团之间的分子识别作用, 可以实现玻璃纤维在玻璃基底上的图案化(“BUCT”)及其稳定化。利用分子识别作用的动态、可逆的特征, 向体系中引入与 β -环糊精有更强结合能力的金刚烷分子, 可实现组装体的解组装过程(图 18(b))^[87]。

基于以上工作, 我们将磁操控与分子识别作用从二维平面拓展到三维空间。首先制备了具有磁响

性的构筑基元, 在构筑基元表面选择性修饰了环糊精-偶氮苯主客体识别层, 利用磁场诱导对构筑基元在三维空间进行精确定位, 通过构筑基元与基底、构筑基元之间的超分子识别实现构筑基元的固定, 得到了具有可控空间结构的三维支架材料, 并通过细胞黏附和四甲基偶氮唑盐比色法(MTT)实验证明了该支架材料良好的生物相容性, 为未来的组织培养提供可能; 进而利用该方法自下而上组装的特点, 通过对特定构筑基元进行表面蛋白识别位点的修饰, 可以在三维结构制备过程中实现模型蛋白亲和素的定向引入, 从而为细胞诱导分化模板和仿生组织工程支架的制备提供了一种新的思路(图 18(c))^[88]。

除了利用外界磁场人为引导宏观构筑基元的运动与组装外, 化学驱动力的引入可以实现宏观组装体系中构筑基元的自发运动, 避免了外加强烈搅拌或振荡过程引起的组装体无序的问题。我们以毫米级 PDMS 长方体(8 mm×8 mm×3.5 mm)作为构筑基元, 并在其两侧面负载一层金属铂, 当将构筑基元放入双氧水溶液中时, 金属铂即刻开始催化双氧水分解产生氧气气泡, 推动构筑基元自发运动, 进而利用 PDMS 自身的疏水表面与金属铂的亲水表面之间的浸润性差异, 为进一步的组装过程提供路径。裸露的 PDMS 侧面形成水的负弯液面, 而铂侧面形成正弯液面, 根据界面自由能最小化原理, 当两个构筑基元相

图 18 运动在微米级超分子组装中的应用. (a) 基于金属-有机物配位作用的超分子组装^[86]; (b) 基于环糊精-偶氮苯分子识别作用的超分子组装^[87]; (c) 三维有序支架的构筑及在生物组织工程支架中的应用^[88] (网络版彩图)

互靠近时, 只有形成相互匹配(相同)的弯液面的侧面才会进一步相互靠近并组装, 且在水/空气界面上, 疏水面相互组装所引起的界面自由能降低量大于亲水面相互组装, 因此, 运动中的构筑基元以疏水-疏水相互作用为组装推动力形成组装体, 且这一组装体的形状可以通过调节构筑基元侧面的浸润性进行调控(图 19(a))^[89]. 然而, 在这样一个自组织的体系中所形成的组装体中, 由于组装作用力为疏水-疏水相互作用, 且产生的气泡极易吸附在构筑基元表面, 使得所形成的组装体极度依赖于水/空气界面存在, 而无法独立稳定存在. 因此, 我们拟通过引入 β -环糊精与偶氮苯之间的分子识别作用对组装体进行稳定. 作为一类温和的化学驱动力, 化学 Marangoni 效应可以实现这一目的.

然而, β -环糊精与偶氮苯之间的分子识别作用能够起到稳定作用的前提是亲水相互作用进行组装, 而现存的界面组装推动力多以疏水-疏水相互作用进行组装. 为此, 通过增大构筑基元的密度调节其在油/水界面上所形成的弯液面, 从而使构筑基元的组装推动力从疏水-疏水相互作用转变为亲水-亲水相互作用; 进而在构筑基元的亲水面上分别修饰 β -环糊精与偶氮苯官能团, 利用两者之间的分子识别作用对组装体进行稳定化, 则所形成的组装体可以被取出界面而存在(图 19(b))^[90].

4.2 能量转换

早在 1998 年, 日本北海道大学的 Osada 等^[91,92]制备了一类包含低表面能小分子的凝胶作为驱动器, 并将其嵌入成型的铝箔器件中, 并在器件上表面负载一个 2300 Oe 磁场强度的小磁铁. 将器件放在水面上并固定其运动位置时, 凝胶中低表面能小分子的释放引起水面表面张力梯度, 形成化学 Marangoni 效应, 驱动器件旋转运动; 根据法拉第电磁感应定律, 当磁铁运动轨迹正上方固定一个回路中的螺线圈时, 运动中的小磁铁经过螺线圈区域时, 螺线圈不断切割磁铁的磁感线, 引起磁通量变化, 则螺线圈的闭合回路中就会产生感应电动势(图 20(a)). 利用相同的运动机理与发电机理, 美国纽约城市大学的 Matsui 等^[93]利用 MOF 结构中疏水小分子 DPA 的释放与重排引起的化学 Marangoni 效应驱使负载有小磁铁的器件做旋转运动, 当运动中的小磁铁经过螺线圈区域时, 则引起闭合回路中感应电动势的产生, 因而实现了由 DPA 的自由能向器件运动的机械能, 最后到电能的转变过程(图 20(b)).

以上工作是通过经典的法拉第电磁感应定律, 利用化学 Marangoni 效应驱动的运动引起闭合回路切割磁感线, 从而引起电信号的产生, 但由于低表面能物质在水面的富集导致表面张力梯度逐渐消失, 使得化学 Marangoni 效应无法实现持久运动与发电过

图 19 运动在毫米级超分子组装中的应用. (a) 金属铂催化双氧水体体系用于宏观超分子组装^[89]; (b) 化学 Marangoni 效应与环糊精-偶氮苯分子识别作用相结合实现稳定有序组装体的构筑^[90] (网络版彩图)

图 20 Marangoni 效应驱动的运动在能量转换方面的应用. (a) 含低表面能小分子的凝胶驱动宏观物体运动体系^[91,92]; (b) MOF-DPA 驱动系统驱动宏观物体运动体系^[93] (网络版彩图)

程. 为了解决这一问题, 我们制备了一个由稳定超疏水三叶轮转盘、稳定金属铂表面及磁铁 3 个部分组成的微发电机, 利用铂催化双氧水产生氧气气泡驱动超疏水器件旋转运动, 引起器件中磁铁经过位于正上方的闭合回路中的螺线管, 导致磁通量变化, 从而在螺线管导线中产生感应电动势, 且器件在双氧水溶液中可以实现长达 7 h 的发电过程, 因而实现了由双氧水的化学能向器件运动的机械能, 最后到电能的转变过程(图 21(a))^[94].

根据法拉第电磁感应定律, 磁通量的变化即可导致闭合回路导线中形成感应电动势, 而实现磁通量变化是由磁铁和闭合回路中的导线做相对运动实现的, 实现的方式有两种: (1) 磁铁运动, 经过螺线管区域, 如上述几个工作; (2) 利用可运动的器件带动闭合回路中的导线切割匀强磁场的磁感线. 为了实现第 2 种发电方式, 我们将功能协同智能器件引入到发电体系中, 即在 pH 响应性超疏水/超亲水可逆转变的智能器件内部负载金属镁条, 利用智能材料响应溶液的 pH 响应从超疏水向超亲水性质的转变, 实现器件可控下潜运动; 进而加入盐酸溶液调节溶液 pH 为酸性, 所负载的金属镁条与加入的盐酸反应所产生的氢气气泡在器件内部富集并逐渐降低器件的密度, 当器件密度小于水时, 器件的浮力大于重力, 则器件实现上浮运动, 与此同时, 溶液的酸性将智能材料转变为疏水性质, 器件内部气体通过器件上表面释放到大气中, 而溶液通过器件下表面进入器件内部, 造成器件比重急剧增加, 器件实现再次下潜.

图 21 气泡驱动的运动在能量转换方面的应用. (a) 金属铂催化双氧水产生氧气气泡驱动水平运动在能量转换方面的应用^[94]; (b) 镁条-盐酸产生氢气气泡驱动上浮下潜运动在能量转换方面的应用^[95] (网络版彩图)

然而, 在这一过程中, 智能材料响应溶液酸碱性进行超疏水/超亲水之间的转变过程是一个耗时过程. 因此, 我们将上表面替换为疏水表面, 大幅度缩减了由于上表面进行超亲水向疏水性的转变过程进而释放气体所需要的时间. 当将闭合回路中的一部分导线与器件相结合, 并将运动体系放入一个匀强磁场中

时, 器件运动引起导线在垂直方向上切割磁感线, 从而在导线中产生感应电动势, 因而实现了由盐酸与金属镁的化学能向器件运动的机械能, 最后到电能的转变过程(图 21(b))^[95].

类似的, 金属铂催化双氧水产生氧气泡也可实现器件的上浮下潜运动, 因而也可以进一步应用到能量转换中. 通过考察不同形状的器件所实现的发电过程, 发现器件形状所导致的运动中的流体阻力对发电过程有很大影响(图 22(a))^[96]. 然而, 双氧水分解过程中有大量活性氧产生, 对 pH 响应性表面的硫醇分子有很大的破坏作用, 因此, 利用方解石与盐酸反应产生二氧化碳这一惰性气体作为驱动器件上浮下潜运动的驱动体系, 实现器件在垂直方向上的器件运动及进一步的发电过程(图 22(b))^[97]. 同时, 印度理工学院的 Chattopadhyay 等^[98]制备了一个内含金属钯(Pd)纳米粒子的聚合物复合物, 并负载一个微米尺寸的磁性粒子, 将器件放入双氧水溶液中时, Pd 催化双氧水分解产生氧气气泡, 气泡附着在微器件上表面, 降低器件密度小于水的密度, 实现器件的上浮运动, 水体表面覆盖一层低表面张力液体, 当接触器件时, 上方的气泡由于溶液表面张力太低而无法支

撑, 进而释放, 导致器件密度急剧上升而下潜. 金属 Pd 催化双氧水分解产生氧气泡与上层低表面张力液体的共同作用, 是微器件在螺线圈内部溶液中垂直方向上实现较快速的上浮下潜运动, 导致螺线管中的导体切割磁体产生的磁感线, 从而在螺线管中产生感应电动势(图 22(c)).

5 结论与展望

现有所研究的运动存在以下几个问题. (1) 研究尺寸多集中于微米或纳米尺度. 由于尺寸较小, 无论是垂直方向还是水平方向, 器件运动所需要的驱动力较小, 可以实现其运动的驱动方式选择性更广, 如生物马达^[99-101]、自电泳^[102,103]、扩散电泳^[104,105]、生物电化学^[106]、微悬臂梁^[107]等, 当运动物体的尺寸增大到百微米及以上时, 一方面, 由于力大小的限制, 上述驱动力无法实现宏观尺度物体的快速运动, 另一方面, 如此大的物体一般质量较大, 无论是水平方向的运动中需要与流体阻力抗衡, 还是垂直方向的运动中需要与物体重力抗衡, 运动体系中的驱动系统所提供的驱动力都将大打折扣, 导致百微米及以

图 22 气泡驱动的运动在能量转换方面的应用. (a) 金属铂催化双氧水产生氧气泡驱动垂直运动在能量转换方面的应用^[96]; (b) 方解石-盐酸产生二氧化碳气泡驱动上浮下潜运动在能量转换方面的应用^[97]; (c) 金属铂催化双氧水产生氧气泡驱动毫米级垂直运动在能量转换方面的应用^[98] (网络版彩图)

上尺寸的物体无法实现快速运动。因此,我们认为,驱动系统提供有效的驱动力是实现宏观物体快速运动的先决条件。在所综述的上述驱动力中,物理作用力对器件有特殊要求,如有磁性、静电能力、特殊表面、尺寸过大等,相反的,化学驱动力作为一个外加的且已成熟的驱动力,可以作为一种普适性的驱动力推动多种物体进行快速运动,有着广泛的应用前景。(2) 现有的大多数可控的运动形式多表现在磁场控制运动的方向,而在运动开始与停止方面多表现为“有燃料就有运动,没有燃料就没有运动”,控制性不强。由于驱动力自身一般不具有可控性。为了解决这一问题,可以向体系中引入对外界环境刺激有响应并可做出相应判断与措施的智能材料,通过控制智能材料的性质,从而调控驱动系统中驱动力的供给与否。然而,简单的驱动力或智能材料无法实现宏观物体的可控快速运动,因此就需要驱动系统与智能材料相互协同,共同完成复杂的既定目标。(3) 当前有关

宏观物体运动过程的应用价值存在一定争议。微米甚至纳米尺度的运动物体一般被公认为可以应用于生物体内部癌细胞处理、靶向给药、微流体通道中离子检测、货物运输等。然而,由于物体尺寸的限制,物体运动速度很慢,无法满足实际应用中较大空间内需要经过较远距离才能进行下一步动作的要求。此时,若物体尺寸增大至百微米甚至厘米级,在强驱动力的推动下,实现快速运动便不再成为挑战;进而,通过器件内部的特殊设计,或可以实现大范围环境治理、远距离货物运输等的目标,且这一过程与微纳米尺寸相比得到大幅度强化。

综上所述,在宏观物体的运动这一领域中,还有很多问题需要解决,很多工作有待继续完成,很多应用价值需要挖掘。我们相信,对宏观尺度运动系统的研究对理解运动机理、微型机器人的发展,甚至对材料向器件的发展都有着极大的推进作用。

参考文献

- Paxton WF, Sundararajan S, Mallouk TE, Sen A. *Angew Chem Int Ed*, 2006, 45: 5420–5429
- Sánchez S, Soler L, Katuri J. *Angew Chem Int Ed*, 2015, 54: 1414–1444
- Maria-Hormigos R, Jurado-Sánchez B, Escarpa A. *Lab Chip*, 2016, 16: 2397–2407
- Ismagilov RF, Schwartz A, Bowden N, Whitesides GM. *Angew Chem Int Ed*, 2002, 41: 652–654
- Patra D, Sengupta S, Duan WT, Zhang H, Pavlick R, Sen A. *Nanoscale*, 2013, 5: 1273–1283
- Wang J, Gao W. *ACS Nano*, 2012, 6: 5745–5751
- Guix M, Mayorga-Martinez CC, Merkoçi. *Chem Rev*, 2014, 114: 6285–6322
- Wang J. *Lab Chip*, 2012, 12: 1944–1950
- Soler L, Sánchez S. *Nanoscale*, 2014, 6: 7175–7182
- Campuzano S, Kagan D, Orozco J, Wang J. *Analyst*, 2011, 136: 4621–4630
- Gao W, Sattayasamitsathit S, Orozco J, Wang J. *J Am Chem Soc*, 2011, 133: 11862–11864
- Gao W, Sattayasamitsathit S, Manesh KM, Weihs D, Wang J. *J Am Chem Soc*, 2010, 132: 14403–14405
- Magdanz V, Sanchez S, Schmidt OG. *Adv Mater*, 2013, 25: 6581–6588
- Sanchez S, Solovev AA, Mei YF, Schmidt OG. *J Am Chem Soc*, 2010, 132: 13144–13145
- Solovev AA, Xi W, Gracias DH, Harazim SM, Deneke C, Sánchez S, Schmidt OG. *ACS Nano*, 2012, 6: 1751–1756
- Baraban L, Harazim SM, Sánchez S, Schmidt OG. *Angew Chem Int Ed*, 2013, 52: 5552–5556
- Liu R, Sen A. *J Am Chem Soc*, 2011, 133: 20064–20067
- Moo JGS, Wang H, Pumera M. *Chem Commun*, 2014, 50: 15849–15851
- Wang H, Zhao GJ, Pumera M. *J Am Chem Soc*, 2014, 136: 2719–2722
- Shao JX, Xuan MJ, Dai LR, Si TY, Li JB, He Q. *Angew Chem Int Ed*, 2015, 54: 12782–12787
- Xuan MJ, Shao JX, Lin XK, Dai LR, He Q. *Colloid Surface A*, 2015, 482: 92–97
- Wu ZG, Wu YJ, He WP, Lin XK, Sun JM, He Q. *Angew Chem Int Ed*, 2013, 52: 7000–7003
- Wang W, Duan WT, Ahmed S, Sen A, Mallouk TE. *Acc Chem Res*, 2015, 48: 1938–1946
- Wang W, Castro LA, Hoyos M, Mallouk TE. *ACS Nano*, 2012, 6: 6122–6132
- Solovev AA, Mei YF, Ureña EB, Huang GS, Schmidt OG. *Small*, 2009, 5: 1688–1692
- Li JX, Huang GS, Ye MM, Li ML, Liu R, Mei YF. *Nanoscale*, 2011, 3: 5083–5089

- 27 Mou FZ, Pan D, Chen CR, Gao YR, Xu LL, Guan JG. *Adv Funct Mater*, 2015, 25: 6173–6181
- 28 Mou FZ, Chen CR, Ma HR, Yin YX, Wu QZ, Guan JG. *Angew Chem Int Ed*, 2013, 52: 7208–7212
- 29 Su MD, Liu M, Liu LM, Sun YY, Li MT, Wang DL, Zhang H, Dong B. *Langmuir*, 2015, 31: 11914–11920
- 30 Liu LM, Liu M, Dong YG, Zhou W, Zhang LN, Su YJ, Zhang H, Dong B. *J Mater Sci*, 2016, 51: 1496–1503
- 31 Zhang QL, Dong RF, Chang XY, Ren BY, Tong Z. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2015, 7: 24585–24591
- 32 Dong RF, Zhang QL, Gao W, Pei A, Ren BY. *ACS Nano*, 2016, 10: 839–844
- 33 Tottori S, Zhang L, Qiu FM, Krawczyk KK, Franco-Obregón A, Nelson BJ. *Adv Mater*, 2012, 24: 811–816
- 34 Zhang L, Petit T, Lu Y, Kratochvil BE, Peyer KE, Pei R, Lou J, Nelson BJ. *ACS Nano*, 2010, 4: 6228–6234
- 35 Chang ST, Paunov VN, Petsev DN, Velev OD. *Nat Mater*, 2007, 6: 235–240
- 36 Osada Y, Okuzaki H, Hori H. *Nature*, 1992, 355: 242–244
- 37 Loget G, Kuhn A. *Nat Commun*, 2011, 2: 535
- 38 Roche J, Carrara S, Sanchez J, Lannelongue J, Loget G, Bouffier L, Fischer P, Kuhn A. *Sci Rep*, 2014, 4: 67605
- 39 Loget G, Kuhn A. *Lab Chip*, 2012, 12: 1967–1971
- 40 Kimura T, Umehara Y, Kimura F. *Soft Matter*, 2012, 8: 6206–6209
- 41 Shi F, Liu SH, Gao HT, Ding N, Dong LJ, Tremel W, Knoll W. *Adv Mater*, 2009, 21: 1927–1930
- 42 Leong TG, Randall CL, Benson BR, Bassik N, Stern GM, Gracias DH. *T Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106: 703–708
- 43 Cheng MJ, Ju GN, Jiang C, Zhang YJ, Shi F. *J Mater Chem A*, 2013, 1: 13411–13416
- 44 Diguët A, Guillermic R-M, Magome N, Saint-Jalmes A, Chen Y, Yoshikawa K, Baigl D. *Angew Chem Int Ed*, 2009, 48: 9281–9284
- 45 Kobayashi M, Abe J. *J Am Chem Soc*, 2012, 134: 20593–20596
- 46 Ahmed D, Lu MQ, Nourhani A, Lammert PE, Stratton Z, Muddana HS, Crespi VH, Huang TJ. *Sci Rep*, 2015, 5: 9744
- 47 Kaynak M, Ozelcik A, Nama N, Nourhani A, Lammert PE, Crespi VH, Huang TJ. *Lab Chip*, 2016, 16: 3532–3537
- 48 Okawa D, Pastine SJ, Zettl A, Fréchet JMJ. *J Am Chem Soc*, 2009, 131: 5396–5398
- 49 Wang L, Liu Y, Cheng Y, Cui XG, Lian HQ, Liang YR, Chen F, Wang H, Guo WL, Li HQ, Zhu MF, Ihara H. *Adv Sci*, 2015, 2: 1500084
- 50 Park HS, Sitti M. Compliant footpad design analysis for a bio-inspired quadruped amphibious robot. In: *The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. St. Louis, 2009. 645–651
- 51 Zhu W, Li JX, Leong YJ, Rozen I, Qu X, Dong RF, Wu ZG, Gao W, Chung PH, Wang J, Chen SC. *Adv Mater*, 2015, 27: 4411–4417
- 52 Kumar R, Kiristi M, Soto F, Li JX, Singh VV, Wang J. *RSC Adv*, 2015, 5: 78986–78993
- 53 Xiao M, Guo XP, Cheng MJ, Ju GN, Zhang YJ, Shi F. *Small*, 2014, 10: 859–865
- 54 Yu LL, Cheng MJ, Song MM, Zhang DQ, Xiao M, Shi F. *Adv Funct Mater*, 2015, 25: 5786–5793
- 55 Dey KK, Bhandari S, Bandyopadhyay D, Basu S, Chattopadhyay A. *Small*, 2013, 9: 1916–1920
- 56 Singh AK, Dey KK, Chattopadhyay A, Mandal TK, Bandyopadhyay D. *Nanoscale*, 2014, 6: 1398–1405
- 57 Singh AK, Mandal TK, Bandyopadhyay D. *RSC Adv*, 2015, 5: 64444–64449
- 58 Gao YF, Cheng MJ, Wang BL, Feng ZG, Shi F. *Adv Mater*, 2010, 22: 5125–5128
- 59 Ju GN, Cheng MJ, Xiao M, Xu JM, Pan K, Wang X, Zhang YJ, Shi F. *Adv Mater*, 2013, 25: 2915–2919
- 60 Matsumoto S, Gong JP, Osada Y. *Jpn J Appl Phys*, 1995, 34: L511
- 61 Gong JP, Matsumoto S, Uchida M, Isogai N, Osada Y. *J Phys Chem*, 1996, 100: 11092–11097
- 62 Scriven LE, Sternling CV. *Nature*, 1960, 187: 186–188
- 63 Lauga E, Davis AMJ. *J Fluid Mech*, 2012, 705: 120–133
- 64 Bassik N, Abebe BT, Gracias DH. *Langmuir*, 2008, 24: 12158–12163
- 65 Wang H, Sofer Z, Moo JGS, Pumera M. *Chem Commun*, 2015, 51: 9899–9902
- 66 Jin H, Marmur A, Ikkala O, Ras RHA. *Chem Sci*, 2012, 3: 2526–2529
- 67 Zhang H, Duan WT, Liu L, Sen A. *J Am Chem Soc*, 2013, 135: 15734–15737
- 68 Renney C, Brewer A, Mooibroek TJ. *J Chem Educ*, 2013, 90: 1353–1357
- 69 Pimienta V, Antoine C. *Curr Opin Colloid In*, 2014, 19: 290–299
- 70 Sharma R, Chang ST, Velev OD. *Langmuir*, 2012, 28: 10128–10135
- 71 Nakata S, Iguchi Y, Ose S, Kuboyama M, Ishii T, Yoshikawa K. *Langmuir*, 1997, 13: 4454–4458
- 72 Nakata S, Kirisaka J, Arima Y, Ishii T. *J Phys Chem B*, 2006, 110: 21131–21134
- 73 Suematsu NJ, Ikura Y, Nagayama M, Kitahata H, Kawagishi N, Murakami M, Nakata S. *J Phys Chem C*, 2010, 114: 9876–9882
- 74 Suematsu NJ, Miyahara Y, Matsuda Y, Nakata S. *J Phys Chem C*, 2010, 114: 13340–13343

- 75 Nakata S, Matsuo K. *Langmuir*, 2005, 21: 982–984
- 76 Ikezoe Y, Washino G, Uemura T, Kitagawa S, Matsui H. *Nat Mater*, 2012, 11: 1081–1085
- 77 Ikezoe Y, Fang J, Wasik TL, Shi ML, Uemura T, Kitagawa S, Matsui H. *Nano Lett*, 2015, 15: 4019–4023
- 78 Xiao M, Cheng MJ, Zhang YJ, Shi F. *Small*, 2013, 9: 2509–2514
- 79 Xiao M, Jiang C, Shi F. *NPG Asia Mater*, 2014, 6: e128
- 80 Dong YG, Liu M, Zhang H, Dong B. *Nanoscale*, 2016, 8: 8378–8383
- 81 Norikane Y, Tanaka S, Uchida E. *CrystEngComm*, 2016, 18: 7225–7228
- 82 Soh S, Branicki M, Grzybowski BA. *J Phys Chem Lett*, 2011, 2: 770–774
- 83 Zhao GJ, Seah TH, Pumera M. *Chem Eur J*, 2011, 17: 12020–12026
- 84 Zhang XB, Pint CL, Lee MH, Schubert BE, Jamshidi A, Takei K, Ko H, Gillies A, Bardhan R, Urban JJ, Wu M, Fearing R, Javey A. *Nano Lett*, 2011, 11: 3239–3244
- 85 Ma MM, Guo L, Anderson DF, Langer R. *Science*, 2013, 339: 186
- 86 Cheng MJ, Gao HT, Zhang YJ, Tremel W, Chen JF, Shi F, Knoll W. *Langmuir*, 2011, 27: 6559–6564
- 87 Cheng MJ, Liu Q, Xian YM, Shi F. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2014, 6: 7572–7578
- 88 Cheng MJ, Wang Y, Yu LL, Su HJ, Han WD, Lin ZF, Li JS, Hao HJ, Tong C, Li XL, Shi F. *Adv Funct Mater*, 2015, 25: 6851–6857
- 89 Cheng MJ, Ju GN, Zhang YW, Song MM, Zhang YJ, Shi F. *Small*, 2014, 10: 3907–3911
- 90 Xiao M, Xian YM, Shi F. *Angew Chem Int Ed*, 2015, 54: 8952–8956
- 91 Mitsumata T, Ikeda K, Gong JP, Osada Y. *Appl Phys Lett*, 1998, 73: 2366–2368
- 92 Mitsumata T, Ikeda T, Gong JP, Osada Y. *Langmuir*, 2000, 16: 307–312
- 93 Ikezoe Y, Fang J, Wasik TL, Uemura T, Zheng YT, Kitagawa S, Matsui H. *Adv Mater*, 2015, 27: 288–291
- 94 Xiao M, Wang L, Ji FQ, Shi F. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, 8: 11403–11411
- 95 Song MM, Cheng MJ, Ju GN, Zhang YJ, Shi F. *Adv Mater*, 2014, 26: 7059–7063
- 96 Song MM, Xiao M, Zhang LN, Zhang DQ, Liu YT, Wang F, Shi F. *Nano Energy*, 2016, 20: 233–243
- 97 Zhang LN, Song MM, Xiao M, Shi F. *Adv Funct Mater*, 2016, 26: 851–856
- 98 Sailapu SK, Chattopadhyay A. *Angew Chem Int Ed*, 2014, 53: 1521–1524
- 99 Behkam B, Sitti M. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 023902
- 100 Carlsen RW, Sitti M. *Small*, 2014, 10: 3831–3851
- 101 Park SJ, Bae H, Kim J, Lim B, Park J, Park S. *Lab Chip*, 2010, 10: 1706–1711
- 102 Wang W, Chiang T-Y, Velegol D, Mallouk TE. *J Am Chem Soc*, 2013, 135: 10557–10565
- 103 Paxton WF, Baker PT, Kline TR, Wang Y, Mallouk TE, Sen A. *J Am Chem Soc*, 2006, 128: 14881–14888
- 104 Ebbens SJ, Howse JR. *Langmuir*, 2011, 27: 12293–12296
- 105 Pavlick RA, Sengupta S, McFadden T, Zhang H, Sen A. *Angew Chem*, 2011, 123: 9546–9549
- 106 Mano N, Heller A. *J Am Chem Soc*, 2005, 127: 11574–11575
- 107 Su M, Dravid VP. *Nano Lett*, 2005, 5: 2023–2028

Self-propelling mini-motor and its applications in supramolecular self-assembly and energy conversion

Meng Xiao^{1,2}, Mengjiao Cheng¹, Feng Shi^{1*}

¹State Key Laboratory of Chemical Resource Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

²School of Materials Science and Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 6397981, Singapore

*Corresponding author (email: shi@mail.buct.edu.cn)

Abstract: With the booming development of smart materials, self-propelling motors have drawn much attention in the research on biomedical science, cargo transportation, environmental remediation and mini-robot, etc. In this review, based on the classification of the type of driving force, we summarized the recent progress of rapid locomotion of mini-devices (from centimeter to millimeter scale) propelled by physical and chemical driving force. Based on the concept of supramolecular chemistry, we summed up the applied research of self-propelling mini-motor on the supramolecular self-assembly. Based on the Faraday's law of electromagnetic induction, we summarized the applications of self-propelling mini-motor in the energy conversion process from chemical energy to mechanical form, and then to electricity.

Keywords: self-propelling, mini-motor, physical driving force, chemical propulsion, supramolecular self-assembly, energy conversion

doi: 10.1360/N032016-00161