

活性胶体马达的研究进展及其在电磁波吸收领域的应用展望^{*}

郑靖^{†,a} 刘金坤^{†,a,b} 罗淳译^a 曾国超^a 吴广磊^b 侯旭^{*,a,c,d,e}

(^a 厦门大学化学化工学院 厦门 361005)

(^b 青岛大学材料科学与工程学院 青岛 266071)

(^c 厦门大学固体表面物理化学国家重点实验室 厦门 361005)

(^d 厦门大学物理科学与技术学院 厦门 361005)

(^e 福建能源材料科学与技术创新实验室 厦门 361102)

摘要 活性胶体马达是一种可以自驱动运动的微纳米粒子,具有执行微纳尺度复杂任务的能力,在环境修复、生物医学应用及微纳制造等多个领域显示出了巨大的应用潜力.梳理了活性胶体马达的发展历程及其最新研究进展,讨论了其在不同环境下的驱动机制以及新型胶体马达的开发与其在不同领域的应用探究.最后,基于活性胶体马达和电磁波吸收材料的工作原理,对其应用于电磁波吸收领域的可能性进行了展望,包括活性胶体马达用于电磁波吸收领域的作用机制和可能的制备策略,并对其潜在的性能及新功能应用提出了设想.

关键词 活性物质;胶体马达;驱动机制;电磁波吸收;损耗机制

Research Progress of Active Colloidal Motors and Their Application Perspective in Electromagnetic Wave Absorption^{*}

Zheng, Jing^{†,a} Liu, Jinkun^{†,a,b} Luo, Chunyi^a Zeng, Guochao^a

Wu, Guanglei^b Hou, Xu^{*,a,c,d,e}

(^a College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005)

(^b College of Materials Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071)

(^c State Key Laboratory of Physical Chemistry of Solid Surfaces, Xiamen University, Xiamen 361005)

(^d College of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005)

(^e Innovation Laboratory for Sciences and Technologies of Energy Materials of Fujian Province (IKKEM), Xiamen 361102)

Abstract Active colloidal motors are micro- or nanoparticles that can move actively and perform complex tasks at the micro- or nanoscale. They have great potential for various applications, such as environmental remediation, biomedical applications and micro- and nanomanufacturing. The development and latest research progress of active colloidal motors are reviewed, their driving mechanisms in different environments are discussed, and the development of new colloidal motors and their applications in different fields are explored. Finally, the perspective on the possible application of active colloidal motors in the field of electromagnetic wave absorption, including the mechanism of action, possible preparation strategies for electromagnetic wave absorption, and their potential performance and new functional applications are presented.

Keywords active matter; colloidal motor; driving mechanism; electromagnetic wave absorption; loss mechanism

1 引言

活性胶体马达,又被称作微纳米游泳者、微纳米机器人或微纳米马达(MNMs),是一种通过把系统环境中存储的化学能或其他形式的能量转化为动能进而能够

自主运动的微纳米器件^[1-3].1959年美国物理学家理查德·费曼首次提出了“微型机器”的概念,并指出在微纳米尺寸下设计和制备机器具有一定的可行性^[4].受1966年科幻电影《神奇之旅》的启发,人们开始关注研究电

^{*} Dedicated to the 90th anniversary of *Acta Chimica Sinica*.

^{*} E-mail: houx@xmu.edu.cn

Received April 30, 2023; published September 8, 2023.

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 52025132, 21621091, 22021001, 22121001, 22275207, 22275156, T2241022), the Natural Science Foundation of Fujian Province (No. 2022J02059), the 111 Project (Nos. B17027, B16029), the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (No. 20720220019), the Science and Technology Projects of Innovation Laboratory for Sciences and Technologies of Energy Materials of Fujian Province (No. RD2022070601) and the Tencent Foundation (The XPLOER PRIZE).

^{*} 庆祝《化学学报》创刊90周年.

项目受国家自然科学基金(Nos. 52025132, 21621091, 22021001, 22121001, 22275207, 22275156, T2241022)、福建省自然科学基金(No. 2022J02059)、111项目(Nos. B17027, B16029)、中央高校基本科研专项资金(No. 20720220019)、福建省能源材料科学与技术创新实验室科技项目(RD2022070601)及腾讯基金(XPLOER PRIZE)资助.

[†] 共同第一作者(These authors contributed equally to this work).

机马达如何向微纳米尺度小型化转变^[5]. Sauvage、Stoddart 和 Feringa 三位科学家创造性地设计并合成了分子机器, 并获得了 2016 年诺贝尔化学奖. 目前, 研究人员已经开发出了各种类型的活性胶体马达, 有望将其应用于环境修复、生物医学、显微手术、药物输送、传感和纳米制造等多个领域^[6-8].

尽管大量的人造纳米颗粒已经被证明可用作活性胶体马达, 但这种极微小的纳米马达的最佳工作机制仍有待探究, 因为宏观发动机和分子发动机的驱动机制在微纳米尺寸下不具有适用性^[9-11]. 为此, 研究人员做了大量的工作对 MNMs 新的驱动机制进行了研究探索. 其中通过不同的物理外场对 MNMs 进行驱动是一种有效手段, 大量的研究工作对可见光和近红外光的驱动机制进行了探索研究^[12-13]. 然而, 对于位于微波波段的电磁波却很少有研究涉及.

本文首先从能量来源和驱动机理对活性胶体马达进行了分类总结. 然后, 从材料制备、粒子运动操控和相应的推进机制出发, 讨论了 MNMs 的驱动策略. 最后, 对未来活性胶体马达在电磁波吸收领域的可能应用进行了展望. 希望本文的论述能够启发来自相关领域的研究人员, 推进活性胶体马达在电磁波吸收领域的研究和应用.

2 活性胶体马达的驱动机制

根据活性胶体马达获得能量的来源不同可以将其

分为化学驱动 MNMs 和物理驱动(外场驱动)MNMs^[14-16]. 具体而言, 化学驱动(图 1)是由体系中可获得的化学燃料提供动力^[17-18], 而物理驱动(图 2)是活性胶体在外部的磁场、光场、声场和电场等外场作用下产生的运动^[19-21]. 虽然驱动原理不同, 但是两者的本质都是通过打破活性胶体马达的力学平衡从而使 MNMs 产生运动.

2.1 化学驱动

对于化学驱动的 MNMs 而言, MNMs 可以从 H_2O_2 、 N_2H_4 、尿素和葡萄糖等物质获取能量来自主运动. 通过反应产物分布的不对称性, 达到自推进的效果, 主要有气泡驱动和自泳驱动两种机制^[22-25].

2002 年, Whitesides 等^[26]提出了采用气泡推进毫米级颗粒运动的策略, 利用 Pt 催化分解 H_2O_2 产生氧气气泡, 根据气泡形成的反冲作用力来驱动物质颗粒. 同样地, 在微纳米尺度下这种驱动机制同样适用, 当气泡从微纳米马达表面或内部分离时, 它的动量被传递给粒子, 从而将 MNMs 推向相反的方向. 活性金属 Mg 由于其适当的反应速率以及其与环境和生物系统良好的相容性, 成为构建气泡驱动型 MNMs 的热门材料. 如图 1a 所示, Guan 等^[27]制备了一种 Mg/Pt 微纳米马达, 金属 Mg 表面的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 钝化层在 NaHCO_3 水溶液中可以形成可溶性的 MgCO_3 , 这使得活性 Mg 持续暴露在溶液中, 由此产生的氢气气泡被用来驱动 MNM. 气泡反冲驱动具有驱动力大和速度快等优点, 是微纳米马达的研究热点.

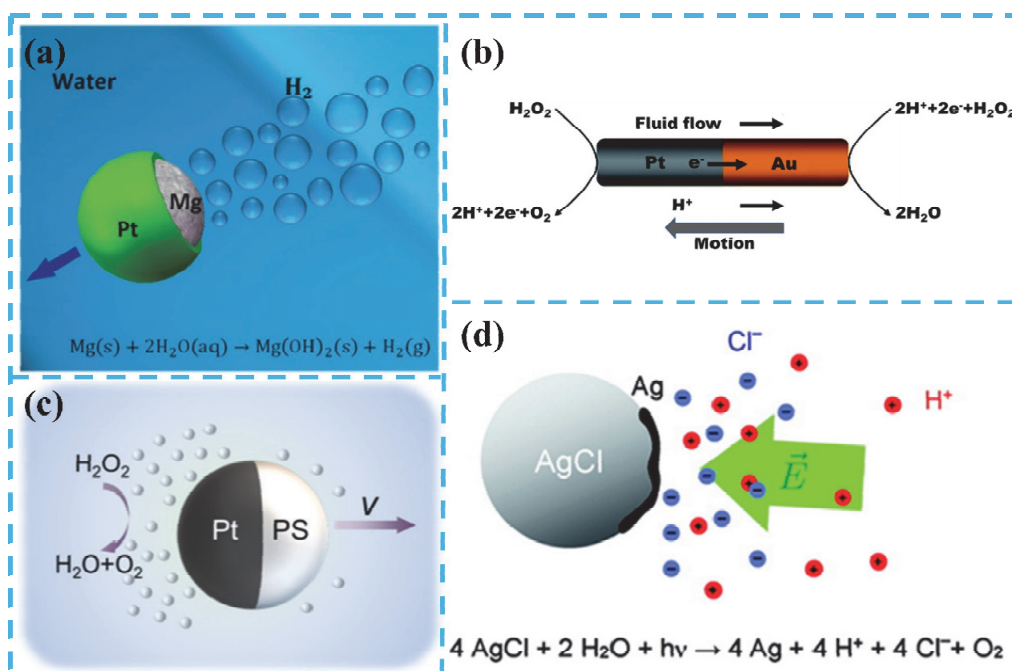


图 1 不同化学驱动机制 MNMs 的示意图

(a) 气泡驱动, (b) 自电泳, (c) 非电解质扩散泳动, (d) 电解质扩散泳动

Figure 1 Schematic representation of MNMs with different chemical driving mechanisms

(a) bubble driving, (b) self-electrophoresis, (c) nonelectrolyte diffusiophoresis and (d) electrolyte diffusiophoresis. The figures (a)~(d) were reproduced from Ref. [27] with permission from John Wiley and Sons Ltd, Ref. [28] with permission from American Chemical Society, Ref. [29] with permission from American Chemical Society, and Ref. [30] with permission from Royal Society of Chemistry

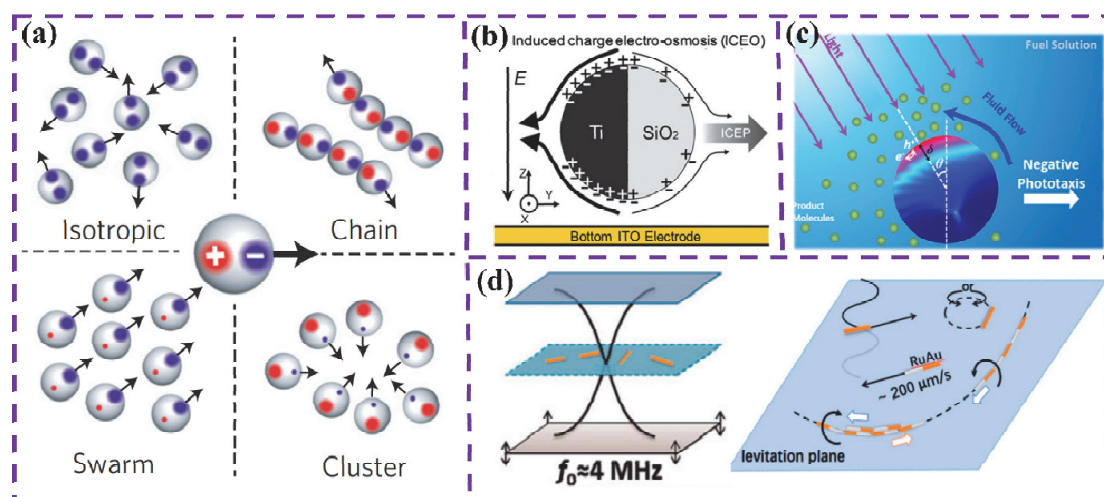


图2 不同物理场驱动机制 MNMs 的示意图

(a)磁场, (b)电场, (c)光, (d)超声

Figure 2 Schematic diagram of MNMs with different physical field driving mechanisms

(a) Magnetic field. (b) Electric field. (c) Light. (d) Ultrasound. The figures (a)~(d) were reproduced from Ref. [34] with permission from Nature Publishing Group, Ref. [14] with permission from American Chemical Society, Ref. [36] with permission from Wiley, and Ref. [37] with permission from American Chemical Society

对于自泳驱动的 MNMs, 化学物质的产生和释放非对称地发生在不对称粒子(Janus)两侧, 在其周围形成电场、浓度梯度或表面张力梯度等不对称的场, 这种不对称的场会诱导 MNMs 表面附近的滑移流动. 特别地, 如果释放的产物为离子型, 在 MNMs 周边产生的场通常为局部电场, 在局部电场的作用下带电粒子发生运动或者聚集排斥行为, 这种驱动机制被称为自电泳(图 1b)和扩散泳(图 1d)^[28-29]; 如果释放的产物为非离子型, 此时无法产生局部电场, 但分子可以通过静电以外的力与粒子发生相互作用(如范德华力和排除体积效应等), 产物分子和粒子表面之间相互作用的差异决定了推进力的强度和方向, 此时发生的自泳驱动为非电解质扩散泳动(图 1c)^[30].

2.2 物理场驱动

相较于化学驱动, 外部物理场(磁场、电场、超声和光等)驱动的活性胶体马达具有运动高度可控的特性, 非常适合需要精确定位的生物医学应用^[31-33].

磁场是最常使用的外部物理场之一, 可用于传导能量和操纵磁阻. 作为空间和时间上高度可控的外场, 磁场具有很好的方向性, 可以引入磁性成分来控制胶体马达的运动方向. 例如, Yan 等^[34]在 MNM 镀层表面引入镍, 可以通过调控外加磁场的方向实现对 MNM 运动方向的精确控制(图 2a). 由于其无需燃料驱动、远程控制以及高生物相容性, 磁驱动的 MNMs 在生物医学和制药领域受到了相当大的关注.

电场与磁场类似, 对 MNMs 的运动具有导向作用. 在外电场的作用下带电粒子可以被移动. 直流电场已被成功用于电泳驱动带电粒子或分子, 而非均匀电场产生的介电泳力也可以推动 MNMs. 在交流电场下, 不对称粒子可以通过电荷电泳和电渗透推进运动(图 2b). 例

如, Ma 等^[35]制备了非对称的聚苯乙烯(PS)二聚体. 由于 PS 不易被极化, 所以在交流电场下感应电荷和电渗流的作用相对较弱. 但当使用导电基板和竖直方向的交流电场时, 非对称的二聚体结构导致电流体流动不平衡, 从而驱动粒子的运动.

光化学、光热和光异构等光响应材料是设计和制造光驱动型 MNMs 的优良材料. 其中驱动力更强的光化学和光热 MNMs 引起了人们的关注. 光化学 MNMs 可编程, 通过调整光照射方向, 可以使 MNMs 沿着预设的轨迹以可控方式移动, 也可以通过轻松地启动/停止光源以达到切换 MNMs 运动状态的目的, 此外 MNMs 的推进速度可以由光的强度加以控制. TiO_2 MNMs 是其中的一个典型例子(图 2c), 在光照下它可以按预设轨迹启动/停止和移动. 含有大消光系数组分的 Janus 粒子, 在近红外光照射下粒子周围可以建立不对称的流体温度分布, 从而使粒子自主运动. 比如一侧经过金或碳包裹的电介质微球, 在近红外光的照射下, 可以产生温差, 推动微球移动^[36].

超声驱动的核磁共振技术在生物或生物医学环境中具有优异的性能, 例如生物相容性高和寿命长等特点. 该技术利用超声场作为外部能量输入, 能够实现无创、按需的运动控制. Xu 等^[37]研究人员成功地利用超声场影响聚乙炔二氧噻吩(PEDOT)/Ni/Pt 管状马达分解双氧水, 形成氧气气泡来控制马达的运动启停(图 2d). 此外, 他们还通过精确调节声场大小, 实现了 MNM 运动速度的精细控制. 超声驱动技术为 MNMs 在生物环境中的运动控制提供了一种可靠、高效且安全的方法.

3 活性胶体马达的运动调控与应用研究

活性胶体马达的小型化、主动靶向能力和运动可控

性,使其成为在药物递送、环境修复、生物手术和生物传感等应用中的流行工具,给生物医学和环境科学等领域带来新的思路.关于活性胶体马达的研究已经取得了相当大的进展.在实际应用过程中,控制 MNMs 的运动速度和方向是非常重要的,因此需要先进的运动操纵策略.具有各种不同形态、尺寸和化学结构的 MNMs 纳米材料已经被开发用来调控 MNMs 的运动状态.在此,我们探讨了 MNMs 材料在运动操纵方法和其在生物医学和环境治理等相关应用方面的研究进展.

3.1 速度调节

物理外场驱动是调整 MNMs 速度的一种直接方法.由光场、磁场和电场等物理外场驱动的 MNMs,通过调节外场的强度(能量输入),MNMs 可以快速响应并调节其运动状态.例如,核壳硅纳米线 MNM 的速度与施加光的强度成正比^[38],由超声波推动的金纳米棒的速度与施加声波的功率密度的平方成正比^[39].化学燃料驱动 MNMs 的速度可以通过控制燃料浓度来调节,这是由于燃料是化学动力纳米材料的能量来源.增加燃料浓度可以提高反应速率,从而提高 MNMs 的速度.这种调节方法类似于调整外场强度,都是通过调整能量输入来实现对 MNMs 的速度控制.例如,瓶形 MNM 在质量分数为 1% H_2O_2 溶液中的平均速度为 $2.43 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,而在质量分数为 10% H_2O_2 溶液中的平均速度为 $30.34 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,高浓度下 H_2O_2 的催化分解速率更高驱动速度更快^[40].

通过以上策略可以有效地控制 MNMs 的速度,但是在实际应用中外部环境是不断变化的(例如人体温度、pH 值和氧化还原电位等),很难保持稳定的外部条

件,因此需要能够主动感知环境并对环境变化做出反应的纳米材料.

如图 3a, 3b 所示, Tu 等^[41]制备了一种化学动力驱动的热敏 MNM, 具体而言, 首先将 Pt 纳米颗粒封装到碗状的聚合物囊泡中, 随后通过表面自由基聚合将聚(*N*-异丙基丙烯酰胺)(PNIPAM)刷接到囊泡表面. PNIPAM 是一种热敏聚合物, 可以在较低的临界溶液温度(LCST)下发生相变, 当温度低于 LCST 时, PNIPAM 聚合物具有表现出亲水性特性, 此时溶液中的 H_2O_2 可以通过开口与 Pt 纳米颗粒接触, 从而产生气泡驱动运动. 而当温度高于 LCST 时, PNIPAM 聚合物展现出疏水特性并阻塞开口, 防止 H_2O_2 接触到囊泡内的 Pt 纳米颗粒, 从而达到温敏控制驱动的目的.

3.2 方向调节

相较于宏观物体, 纳米粒子在液体环境中的运动受到旋转布朗运动的影响, 这主要是由纳米材料与溶剂分子之间的随机碰撞引起的. 这些碰撞会严重干扰 MNMs 的方向, 导致其运动方向随机化并偏离预期目标^[42]. 增加纳米颗粒的尺寸可以有效抑制布朗运动, 但是, 在实际应用中, 通常会对纳米颗粒的大小有限制要求. 例如, 为了确保载药纳米颗粒在体内发挥最佳效果, 其尺寸应小于 200 nm, 因为较大的颗粒会很快被人体排出, 从而降低药效^[43-45]. 如何实现 MNMs 在液体环境中的方向调节一直是重要研究热点. 目前, 基于磁场、电场、光和温度等外场的不对称分布, 已经发展出了磁致型和流变型纳米材料, 可以用来调节 MNMs 的运动方向. 其中, 将磁性纳米颗粒等功能元件引入 MNMs 中可以有

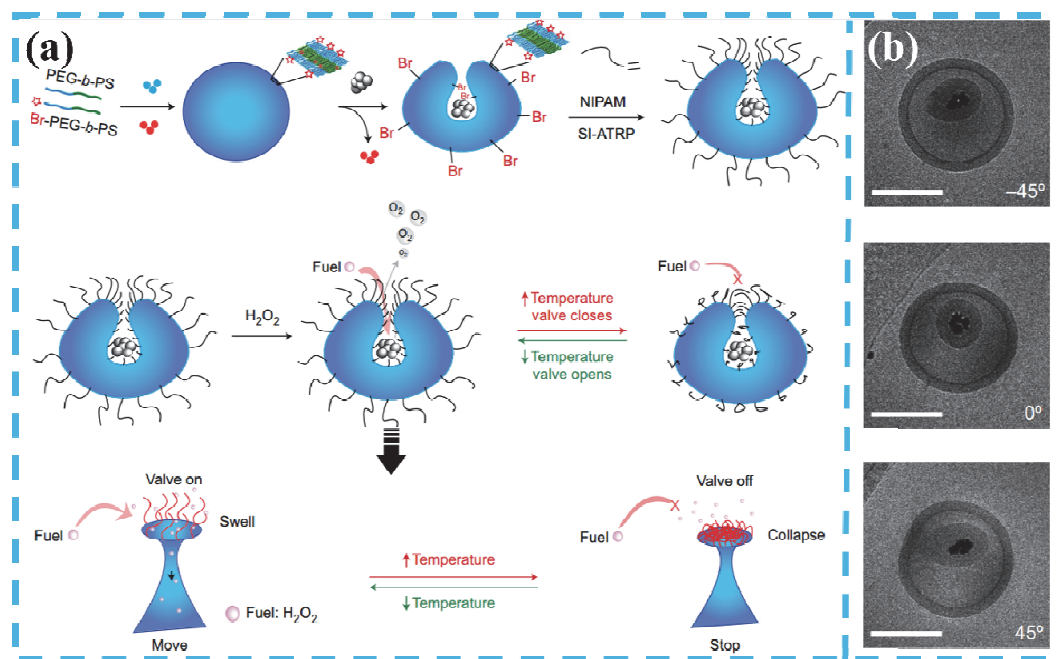


图 3 (a)热敏驱动聚合物囊泡 MNM 的设计及(b)不同角度下 MNM 的 Cryo-TEM 图像

Figure 3 (a) Design of thermally driven polymer vesicle MNM and (b) Cryo-TEM images of the MNM at different angles. The figures (a), (b) were reproduced from Ref. [41] with permission from Nature Publishing Group

效调节其运动方向. 例如, He 等^[46]将 Fe_3O_4 纳米颗粒组装到 MNMs 中, 并利用外部磁场进行转向.

与磁场相比, 光可以很容易地通过光学透镜聚焦, 并可以通过强度、频率、偏振和方向进行调制, 为复杂的操作提供了更多的设计空间. 最近, Tang 等^[38]受光合微生物启发(图 4a~4c), 制备合成了一种 Janus 纳米树 MNM, 其两端分别含有纳米结构的光电阴极和光电阳极, 可以分别释放阳离子和阴离子, 通过自电泳驱动 MNM. 通过化学修饰, 可以控制光电阳极的 Zeta 电位, 并对 MNM 进行编程, 使其表现出正或负的趋光性, 从而控制 MNM 的运动方向. 但是现在的科学研究大多集中在可见光和近红外附近的区域, 对于 MNMs 在位于微波波段电磁波的应用还有待研究^[47-49].

3.3 活性胶体马达在生物医学方面的应用

得益于超小的尺寸, MNMs 能够在传统设备无法到达的微观环境中进行运动及执行操作, 在生物医学领域显示出巨大的应用潜力, 包括靶向给药、医学成像和纳米外科等多个方向.

化疗是目前治疗癌症的基本手段之一, 但会带来全身毒性等严重的副作用. 为了解决这一问题, 近年来, 利用 MNMs 的微/纳米载体进行肿瘤靶向给药化疗得到了广泛关注. 这种新型化疗方法可以确保化疗药物有效递送到肿瘤部位, 提高治疗效果, 同时减轻对正常组织的损伤^[50-51]. Srivastava 等^[52]报道了一种单细胞显微外科生物管 MNM, 该 MNM 装载了喜树碱(一种抗癌药

物), 用于肿瘤化疗. 通过电子束沉积工艺在生物管上涂覆 Fe-Ti 层以实现磁致驱动, 并对抗肿瘤药物喜树碱进行负载. MNM 可以靶向输送喜树碱, 显著减少癌细胞的增殖并促使其死亡(图 5a). 这种 MNM 靶向给药技术有望为癌症治疗带来革命性变化, 提供更加精准和有效的化疗方法, 从而帮助患者更好地对抗癌症.

荧光成像技术对于 MNMs 的可视化非常关键, 能够实现基于运动、路径规划和视觉反馈的自主导航. 荧光成像技术具有非侵入性、成本低、灵敏度高、可实现多色成像以及操作简单等优点. 因此, 荧光成像技术和 MNMs 的结合不仅可以方便地观察和实时跟踪 MNMs 的运动, 还可以扩大 MNMs 在生物医学应用范围. 例如, Nelson 等^[53]开发了一种人工细菌鞭毛微型马达(图 5b), 并利用近红外荧光染料对其进行标记. 近红外荧光染料具有长波长发射, 可以穿透深层组织进行全身荧光成像. 将 MNM 注射到小鼠体内后, 荧光信号可以从小鼠腹腔下部观察到.

3.4 活性胶体马达在环境治理方面的应用

化工、制药、纺织和农药等工业制造造成了严重的环境污染问题. 胶体马达可在水介质中主动操纵微/纳米颗粒, 有望提高其相互作用效率和时空精度. MNMs 的发展为环境治理提供了新的解决方案.

如图 6a 所示, Wang 等^[54]报道了一种包括可磁化离子交换树脂球的自驱动 MNM, 该 MNM 可用于从非海水中动态去除或分离微纳米塑料(MNP). 由于可回收的

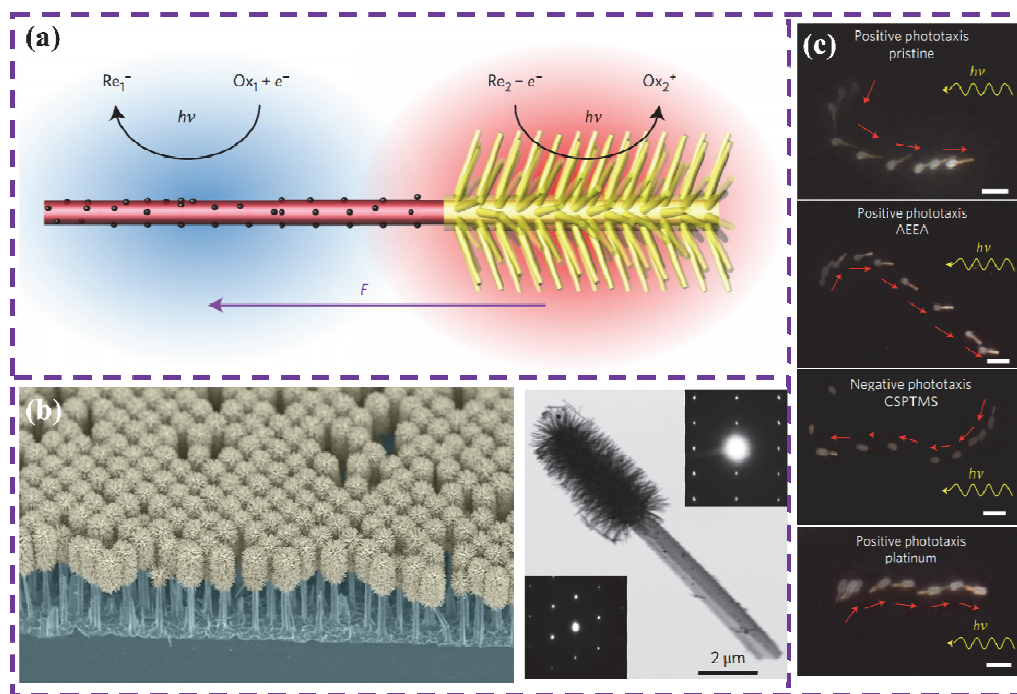


图 4 (a)光驱动 Janus MNM 的设计原理图、(b) Janus 纳米树的扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)图像及(c)化学处理下单个 Janus 纳米树的可编程趋光性

Figure 4 (a) Design schematic of the light-driven Janus MNM, (b) scanning electron microscope (SEM) and transmission electron microscope (TEM) images of Janus nanotree and (c) programmable phototaxis of an individual Janus nanotree by chemical treatment
The figures (a)~(c) were reproduced from Ref. [38] with permission from Nature Publishing Group

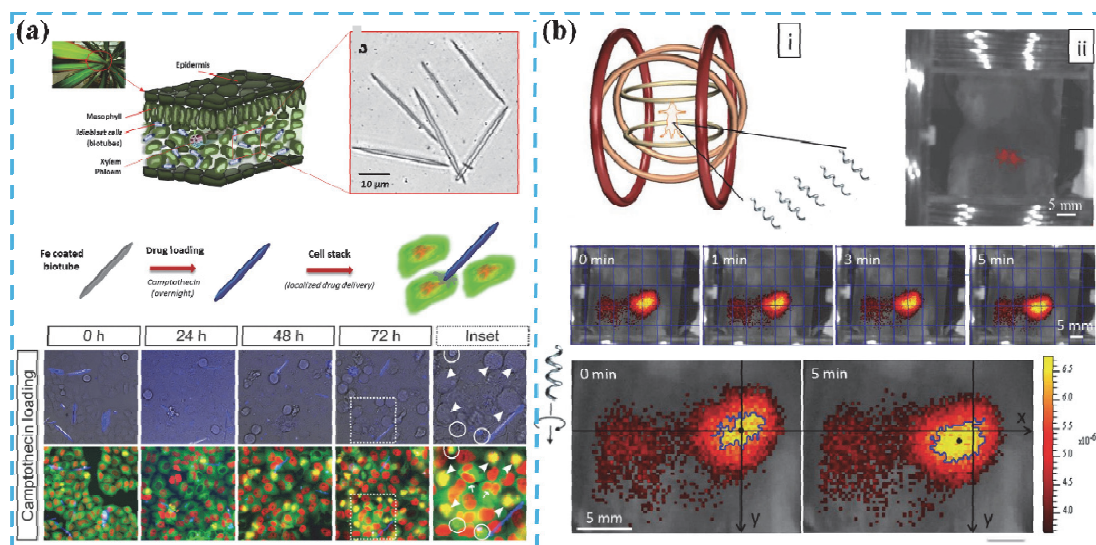


图5 (a)载有治疗药物的 MNMs 的靶向化疗及(b)体内 MNMs 的荧光成像

Figure 5 (a) Targeting chemotherapy of the MNMs loading with therapeutic drug and (b) fluorescence imaging of MNMs in vivo. The figures (a), (b) were reproduced from Ref. [52-53] with permission from Wiley

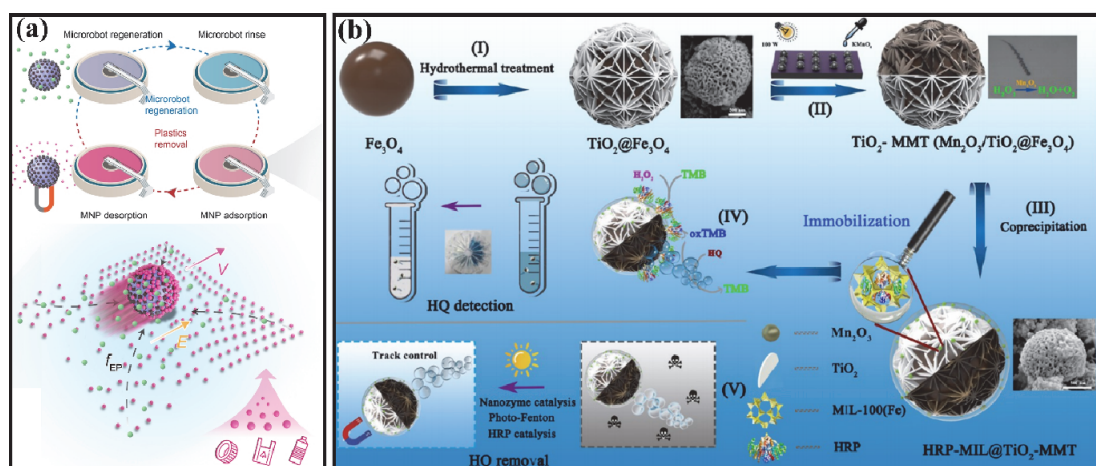


图6 (a)用于去除 MNP 的可回收和自驱动 MNM 及(b) HRP-MIL-100(Fe)@TiO₂@Fe₃O₄ MNM 的合成和应用示意图

Figure 6 (a) Recyclable and self-driven MNM for MNP removal and (b) schematic illustration of synthesis and application of the HRP-MIL-100(Fe)@TiO₂@Fe₃O₄ MNM

The figures (a), (b) were reproduced from Ref. [54-55] with permission from American Association for the Advancement of Science's and American Chemical Society

离子交换树脂建立了长程电泳吸引, 磁浮子在 100 个处理循环中显示出大于 90% 的 MNP 可持续去除效率. 并且这种技术对于不同的塑料成分、尺寸和形状以及非海洋水样具有广泛的适用性. Yang 等^[55]通过使用具有 3D 分级结构的多核壳 HRP-MIL-100(Fe)@TiO₂@Fe₃O₄ Janus 微纳米马达(图 6b), 实现了对水中氢醌的快速去除. 并且多功能的 Janus 磁性 MNM 具有制造方法简单可行和检测灵敏等优点, 表现出优异的环境修复能力.

4 展望

电磁波吸收材料是一种通过不同的损耗机制把入

射电磁波(2~18 GHz 微波波段)转换为热能和其它形式能量的一种复合材料. 这种吸收外场能量并转化为其他形式能量的行为与活性胶体马达的运行机制高度相似, MNMs 有望通过改变自身的形态和构造, 实现对电磁波吸收特性的调控.

4.1 电磁波对活性胶体马达可能的作用机理

电磁波吸波材料的损耗机制主要有介电损耗和磁损耗. 介电损耗主要分为界面极化、偶极极化、缺陷诱导极化和电导损耗^[56-57], 磁损耗则通过共振、磁滞和涡流损耗等机制衰减电磁波^[58]. 结合 MNMs 的驱动机制, 当电磁波照射到微纳米机器人表面时, 产生的电磁波损

耗机制主要有: (1)电磁波在活性胶体颗粒中传播时, 材料的本征电阻会产生焦耳热, 产生电导损耗; (2) MNMs 中极性或非极性分子中偶极子在电磁场的作用下产生的取向和位移运动, 这种偶极子的运动会耗散电磁波能量; (3)材料中的缺陷位点会捕获载流子, 破坏电荷分布平衡, 从而产生极化过程并衰减电磁波; (4)在外部电磁场的作用下, 具有磁性组分材料会发生共振和涡流损耗。

与此同时, 这些损耗机制的发生有可能转化电磁波成为驱动 MNMs 的动力。特别是对于具有电导损耗和磁损耗机制的 MNMs。最近, Lv 等^[59]报道了一种以纳米颗粒为模板圆形纳米多孔石墨烯的合成, 有序的纳米多孔石墨烯能够有效吸收低频电磁波并将其转换为热, 产生相关的温度梯度, 并且通过塞贝克效应输出直流电。无论是在电磁波衰减过程中产生的温度梯度变化还是第一热电效应产生的直流电都可以作为动力, 驱动 MNMs 进行运动。

4.2 活性胶体马达在电磁波吸收领域的可能设计方案

结合上述机制, MNMs 用于电磁波吸收的可能设计方案主要有以下几种, 一是制备具有优良电组分(例如聚吡咯和聚苯胺等导电聚合物)的 MNMs, 加强其电导损耗; 二是引入磁性组分, 获取共振和涡流等磁损; 三是活性胶体马达可以通过改变其形态和构造, 调控其对电磁波的吸收特性, 例如, 通过表面功能化修饰, 有望增强活性胶体马达对特定频段电磁波的吸收能力。最后, 活性胶体马达还可以利用自身的运动特性, 增加电磁波与其之间的相互作用, 提高电磁波的吸收效率。

4.3 活性胶体马达应用于电磁波吸收领域的机遇与挑战

活性胶体马达的驱动机制和电磁波吸收材料的损耗机理有异曲同工之处。这为 MNMs 在电磁波吸收领域的应用提供了可能, 这其中存在很多机遇与挑战, 两者的结合可能会带来意想不到的优势。例如, 在医学肿瘤治疗中可以利用 MNMs 的灵活驱动性使其准确到达病灶, 然后在微波照射下吸收能量并尽可能多地将其转化为热能, 进而提高病灶周围的温度以诱导癌组织死亡。但是如何解决低浓度下 MNMs 的电磁波吸收问题仍是一个巨大的挑战。Zhang 等^[60]设计了一种 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/低密度聚乙烯(LDPE)双层致动器, 由于 MXenes 卓越的光吸收和光热/电热特性, MXene/LDPE 致动器可以被近红外光、电和热等许多刺激驱动。MXene 的这种高效的光热转化效率和电导率有望成为解决上述问题的潜在材料。

5 结语

最新的设计、制造和操作技术显著提升了活性胶体马达的功率、功能和多功能性。这些微型机器拥有理想

的小尺寸以及可以被控制的运动方向和速度, 能够在各种复杂环境下不受限制地自由运动, 从而能够出色地执行多种任务, 具备广泛的应用潜力。基于活性胶体马达的驱动机制, 寻求其在更多领域的应用可能将是当前乃至今后一段时间里值得不懈努力的科学目标。

作者简介



郑靖, 厦门大学化学化工学院副教授、博士生导师。2012 年获中国科学技术大学学士学位, 2019 年获香港大学博士学位, 2018 年至 2021 年在香港大学从事博士后研究, 2022 年 2 月起, 入职厦门大学化学化工学院, 主要从事仿生活性物质研究。



刘金坤, 厦门大学化学化工学院博士研究生。2016 年获青岛大学学士学位, 2020 年获青岛大学硕士学位, 主要从事电磁波吸收材料和活性胶体的研究。



侯旭, 国家杰出青年基金获得者、国家重点研发计划纳米科技重点专项项目负责人, 现任厦门大学化学化工学院、物理科学与技术学院双聘南强特聘教授, 厦门大学固体表面物理化学国家重点实验室副主任、电化学科学与工程研究所所长, 博士生导师。侯旭教授所引领的原创“液体门控技术”被世界权威化学组织“国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)”评为 2020 年全球“化学领域十大新兴技术”。他曾获得全国创新争先奖、科学探索奖、中国十大新锐人物等重要奖项。

References

- [1] Li, J.; Esteban-Fernández de Ávila, B.; Gao, W.; Zhang, L.; Wang, J.

- Sci. Robot.* **2017**, 2, eaam6431.
- [2] Yang, Q.; Xu, L.; Zhong, W.; Yan, Q.; Gao, Y.; Hong, W.; She, Y.; Yang, G. *Adv. Intell. Syst.* **2020**, 2, 2000049.
- [3] Guo, N.; Wang, B.; Liu, F. *Acta Chim. Sinica* **2018**, 76, 196 (in Chinese). (郭妮, 王斌, 刘峰毅, 化学学报, **2018**, 76, 196.)
- [4] Mirkovic, T.; Zacharia, N. S.; Scholes, G. D.; Ozin, G. A. *ACS Nano* **2010**, 4, 1782.
- [5] Sengupta, S.; Ibele, M. E.; Sen, A. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2012**, 51, 8434.
- [6] Zheng, J.; Dai, B.; Wang, J.; Xiong, Z.; Yang, Y.; Liu, J.; Zhan, X.; Wan, Z.; Tang, J. *Nat. Commun.* **2017**, 8, 1438.
- [7] Wu, J.; Balasubramanian, S.; Kagan, D.; Manesh, K. M.; Campuzano, S.; Wang, J. *Nat. Commun.* **2010**, 1, 36.
- [8] Zheng, J.; Wang, J.; Xiong, Z.; Wan, Z.; Zhan, X.; Yang, S.; Chen, J.; Dai, J.; Tang, J. *Adv. Funct. Mater.* **2019**, 29, 1901768.
- [9] Yu, M.; Zhao, W.; Zhang, K.; Guo, X. *Acta Chim. Sinica* **2021**, 79, 500 (in Chinese). (于淼, 赵武, 张凯, 郭鑫, 化学学报, **2021**, 79, 500.)
- [10] Wang, J.; Xiong, Z.; Zheng, J.; Zhan, X.; Tang, J. *Acc. Chem. Res.* **2018**, 51, 1957.
- [11] Blickle, V.; Bechinger, C. *Nat. Phys.* **2012**, 8, 143.
- [12] Frangioni, J. V. *Curr. Opin. Chem. Biol.* **2003**, 7, 626.
- [13] Vahrmeijer, A. L.; Hutteman, M.; Van Der Vorst, J. R.; Van De Velde, C. J. H.; Frangioni, J. V. *Nat. Rev. Clin. Oncol.* **2013**, 10, 507.
- [14] Yang, M.; Guo, X.; Mou, F.; Guan, J. *Chem. Rev.* **2022**, 123, 3944.
- [15] Li, H.; Li, Y.; Liu, J.; He, Q.; Wu, Y. *Nanoscale* **2022**, 14, 7444.
- [16] Ahmed, D.; Baasch, T.; Jang, B.; Pane, S.; Dual, J.; Nelson, B. J. *Nano Lett.* **2016**, 16, 4968.
- [17] Dong, R.; Cai, Y.; Yang, Y.; Gao, W.; Ren, B. *Acc. Chem. Res.* **2018**, 51, 1940.
- [18] Wang, W.; Duan, W.; Ahmed, S.; Mallouk, T. E.; Sen, A. *Nano Today* **2013**, 8, 531.
- [19] Chen, X.; Jang, B.; Ahmed, D.; Hu, C.; Marco, C. D.; Hoop, M.; Mushtaq, F.; Nelson, B. J.; Pané, S. *Adv. Mater.* **2018**, 30, e1705061.
- [20] Han, K.; Shields IV, C. W.; Velez, O. D. *Adv. Funct. Mater.* **2017**, 28, 1705953.
- [21] Chen, H.; Zhao, Q.; Du, X. *Micromachines* **2018**, 9, 41.
- [22] Moran, J. L.; Posner, J. D. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **2017**, 49, 511.
- [23] Zhou, C.; Zhang, H.; Tang, J.; Wang, W. *Langmuir* **2018**, 34, 3289.
- [24] Popescu, M. N.; Uspal, W. E.; Dietrich, S. *Eur. Phys. J.: Spec. Top.* **2016**, 225, 2189.
- [25] Yang, F.; Qian, S.; Zhao, Y.; Qiao, R. *Langmuir* **2016**, 32, 5580.
- [26] Ismagilov, R. F.; Schwartz, A.; Bowden, N.; Whitesides, G. M. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2002**, 41, 652.
- [27] Mou, F.; Chen, C.; Ma, H.; Yin, Y.; Wu, Q.; Guan, J. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2013**, 52, 7208.
- [28] Paxton, W. F.; Baker, P. T.; Kline, T. R.; Wang, Y.; Mallouk, T. E.; Sen, A. *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, 128, 14881.
- [29] Ibele, M. E.; Lammert, P. E.; Crespi, V. H.; Sen, A. *ACS Nano* **2010**, 4, 4845.
- [30] Wang, W.; Lv, X.; Moran, J. L.; Duan, S.; Zhou, Z. *Soft Matter* **2020**, 16, 3846.
- [31] Yu, H.; Tang, W.; Mu, G.; Wang, H.; Chang, X.; Dong, H.; Qi, L.; Zhang, G.; Li, T. *Micromachines* **2018**, 9, 540.
- [32] Londhe, V.; Sharma, P. *Mater. Sci. Eng., C* **2020**, 117, 111330.
- [33] Chen, H.; Zhao, Q.; Wang, Y.; Mu, S.; Cui, H.; Wang, J.; Kong, T.; Du, X. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2019**, 11, 15927.
- [34] Yan, J.; Han, M.; Zhang, J.; Xu, C.; Luijten, E.; Granick, S. *Nat. Mater.* **2016**, 15, 1095.
- [35] Ma, F.; Yang, X.; Zhao, H.; Wu, N. *Phys. Rev. Lett.* **2015**, 115, 208302.
- [36] Wang, W.; Castro, L. A.; Hoyos, M.; Mallouk, T. E. *ACS Nano* **2012**, 6, 6122.
- [37] Chen, C.; Mou, F.; Xu, L.; Wang, S.; Guan, J.; Feng, Z.; Wang, Q.; Kong, L.; Li, W.; Wang, J.; Zhang, Q. *Adv. Mater.* **2017**, 29, 1603374.
- [38] Dai, B.; Wang, J.; Xiong, Z.; Zhan, X.; Dai, W.; Li, C.; Feng, S.; Tang, J. *Nat. Nanotechnol.* **2016**, 11, 1087.
- [39] Ahmed, S.; Wang, W.; Bai, L.; Gentekos, D. T.; Hoyos, M.; Mallouk, T. E. *ACS Nano* **2016**, 10, 4763.
- [40] Zhou, C.; Gao, C.; Lin, Z.; Wang, D.; Li, Y.; Yuan, Y.; Zhu, B.; He, Q. *Langmuir* **2020**, 36, 7039.
- [41] Tu, Y.; Peng, F.; Sui, X.; Men, Y.; White, P. B.; Van Hest, J. C. M.; Wilson, D. A. *Nat. Chem.* **2017**, 9, 480.
- [42] Liu, T.; Xie, L.; Price, C. A. H.; Liu, J.; He, Q.; Kong, B. *Chem. Soc. Rev.* **2022**, 51, 10083.
- [43] Tang, Y.; Pei, F.; Lu, X.; Fan, Q.; Huang, W. *Adv. Mater. Technol.* **2019**, 7, 1900917.
- [44] Yao, Z.; Carballido-Lopez, R. *Annu. Rev. Microbiol.* **2014**, 68, 45913291329.
- [45] Soto, F.; Wang, J.; Ahmed, R.; Demirci, U. *Adv. Sci.* **2020**, 7, 2002203.
- [46] Wu, Z.; Wu, Y.; He, W.; Lin, X.; Sun, J.; He, Q. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2013**, 52, 7000.
- [47] Wu, Z.; Li, L.; Yang, Y.; Hu, P.; Li, Y.; Yang, S. Y.; Wang, L. V.; Gao, W. *Sci. Robot.* **2019**, 4, eaax0613.
- [48] Huang, Y.; Li, T.; Gao, W.; Wang, Q.; Li, X.; Mao, C.; Zhou, M.; Wan, M.; Shen, J. *J. Mater. Chem. B* **2020**, 8, 5765.
- [49] Piszczek, G.; Gryczynski, I.; Maliwal, B. P.; Lakowicz, J. R. *J. Fluoresc.* **2002**, 12, 15.
- [50] Chen, S.; Sun, X.; Fu, M.; Liu, X.; Pang, S.; You, Y.; Liu, X.; Wang, Y.; Yan, X.; Ma, X. *Biomaterials* **2022**, 288, 121744.
- [51] Tang, X.; Manamanchaiyaporn, L.; Zhou, Q.; Huang, C.; Li, L.; Li, Z.; Wang, L.; Ren, L.; Xu, T.; Yan, X.; Zheng, Y. *Small* **2022**, 18, 2202848.
- [52] Srivastava, S. K.; Medina-Sanchez, M.; Koch, B.; Schmidt, O. G. *Adv. Mater.* **2016**, 28, 832.
- [53] Servant, A.; Qiu, F.; Mazza, M.; Kostarelos, K.; Nelson, B. J. *Adv. Mater.* **2015**, 27, 2981.
- [54] Li, W.; Wu, C.; Xiong, Z.; Liang, C.; Li, Z.; Liu, B.; Cao, Q.; Wang, J.; Tang, J.; Li, D. *Sci. Adv.* **2022**, 8, eade1731.
- [55] Yang, J.; Yan, X.; Lyu, Y.; Xing, N.; Yang, P.; Song, P.; Zuo, M. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2022**, 14, 6484.
- [56] Li, L.; Hao, B.; Xiang, C.; Tong, G.; Chen, K. *Acta Chim. Sinica* **2010**, 68, 583 (in Chinese). (李良超, 郝斌, 向晨, 童国秀, 陈柯宇, 化学学报, **2010**, 68, 583.)
- [57] Yang, X.; Gao, W.; Chen, J.; Lu, X.; Yang, D.; Kang, Y.; Liu, Q.; Qing, Y.; Huang, W. *Chin. J. Chem.* **2023**, 41, 64.
- [58] Han, Y.; Li, S.; Liu, J.; Yu, M. *Acta Chim. Sinica* **2011**, 69, 53 (in Chinese). (韩宇, 李松梅, 刘建华, 于美, 化学学报, **2011**, 69, 53.)
- [59] Lv, H.; Yao, Y.; Li, S.; Wu, G.; Zhao, B.; Zhou, X.; Zhou, Y.; Xi, S.; Liu, B.; Che, R.; Wu, R. *Nat. Commun.* **2023**, 14, 1982.
- [60] Luo, X.; Li, L.; Zhang, H.; Zhao, S.; Zhang, Y.; Chen, W.; Yu, Z. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, 13, 45833.

(Zhao, C.)