[Highlight]

doi: 10.3866/PKU.WHXB201612163

www.whxb.pku.edu.cn

化学反应驱动的自热泳纳米马达

高兆帅 胡 钧

(中国科学院上海应用物理研究所, 物理生物学研究室, 上海光源生物成像中心, 上海 201800)

自驱动生物马达广泛存在于生物体中, 利用化学能量自驱动克服布朗运动的阻力, 进而高效精确地行使特定的生物功能¹。受自驱动生物马达的启发, 激起了关于人工自驱动纳米马达的研究热潮。人工合成自驱动纳米马达在特定的刺激(光、热、化学刺激等)作用下, 可实现速率及方向可控的自驱动运动。依据自驱动机理, 纳米马达分为三大类²: 自扩散泳³、自电泳、自热泳⁴纳米马达。目前, 对于人工纳米马达的研究已取得较好的进展, 并在生物流体中药物的靶向运输及智能纳米机器人的开发等领域展现出巨大的应用前景。

然而, 人工纳米马达的开发与应用受到了多方面条件的制约。其一、有限的追踪手段。传统的光学成像方法很难对纳米粒子在三维空间内的运动实时成像。目前的工作, 通常需要将纳米马达局限在二维平面, 这在一定程度上偏离了纳米马达在溶液中自由运动的实际情况。其二、较大的尺寸。受制于光学成像分辨率的限制, 目前报道的纳米马达通常尺寸较大(大于 100 nm), 这限制了其在真实生物体内的应用。其三、缺乏化学反应速率与马达自驱动运动速率的之间定量关系, 无法从马达设计源头实现对运动速率的准确控制。

基于此, 中国科学院上海应用物理研究所樊春海、李迪团队构建了一种基于等离子体材料的“两面神”(Janus)纳米马达。该纳米马达同时具有优异的催化及局域表面等离子体光学性质。他们利用纳米等离子体材料的共振散射光作为检测信号, 在共振光散射相关光谱(RLSCS)⁵下对催化反应条件下“两面神”纳米马达的扩散行为进行研究。该方法不同于传统的界面上二维追踪方法, 成功地获得了该纳米马达在溶液环境中的扩散系数。

随后, 作者利用该“两面神”纳米马达的催化性质, 催化 $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ 和 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 发生氧化还原反应。研究发现, 催化条件下, Janus 粒子的扩散系

数明显升高。并进一步通过理论和实验证明了其自驱动机理, 是催化反应在 Janus 粒子的催化面与水溶液界面上产生不对称的温度梯度, 引起纳米马达的自热泳。作者系统地研究了这种自热泳纳米马达的运动方向、驱动力与化学反应热之间的关系。从描述颗粒布朗运动的郎之万方程出发, 建立纳米马达自热泳运动的随机模型, 推导出纳米马达扩散系数与化学反应速率之间的关系。

该工作发现了化学反应热可有效驱动纳米马达, 实现底物化学能向马达运动机械能的转化, 较之于光热驱动自热泳⁶, 该方法在小粒径纳米马达的驱动上具有独特的优势, 为纳米马达生物应用奠定了基础。此外, 发现了化学反应速率与自驱动运动速率的关系并建立起了随机模型。通过调节底物浓度以及催化剂的性质可实现对马达运动速率的控制。该理论模型的建立对新型纳米马达的设计、应用具有重大的指导性意义。该研究成果发表于近期 *Angewandte Chemie International Edition* 杂志⁷上。

References

- (1) Browne, W. R.; Feringa, B. L. *Nat. Nanotechnol.* **2006**, *1*, 25. doi: 10.1038/nnano.2006.45
- (2) Ma, X.; Hahn, K.; Sanchez, S. *J. Am. Chem. Soc.* **2015**, *137*, 4976. doi: 10.1021/jacs.5b02700
- (3) Golestanian, R. *Phys. Rev. Lett.* **2009**, *102*, 188305. doi: 10.1103/PhysRevLett.102.188305
- (4) Jiang, H. R.; Yoshinaga, N.; Sano, M. *Phys. Rev. Lett.* **2010**, *105*, 248302. doi:10.1103/PhysRevLett.105.248302
- (5) Liu, H.; Dong, C. Q.; Ren, J. C. *J. Am. Chem. Soc.* **2014**, *136*, 2775. doi: 10.1021/jacs.5b00324
- (6) Xuan, M.; Wu, Z. G.; Shao, J. X.; Dai, L. R.; Si, T. Y.; He, Q. *J. Am. Chem. Soc.* **2016**, *138*, 6492. doi: 10.1021/jacs.6b00902
- (7) Qin, W. W.; Peng, T. H.; Gao, Y. J.; Wang, F.; Hu, X. C.; Wang, K.; Shi, J. Y.; Li, D.; Ren, J. C.; Fan, C. H. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2016**, doi: 10.1002/anie.201609121