己二酸二酰肼改性沙棘枝条粉吸附茜素红S的研究

孙 丽[1,4] 邢建宇[1,4] 白 波[1,4*] 丁晨旭[2] 王洪伦[2] 索有瑞[2] 段 洁[3] 樊 成[3]

(1.长安大学环境科学与工程学院,西安 710054;2.中科院西北高原生物研究所,西宁 810001;
3.陕西省产品质量监督检验研究院,西安 710048;
4.旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室,西安 710054)

摘 要 沙棘枝条富含木质纤维素,填埋、焚烧会污染环境而且浪费资源。为充分利用闲置沙棘枝资源,采用己二酸二酰肼(ADH)为改性剂,对沙棘枝条粉(SBP)进行改性,制得ADH改性的沙棘枝条粉(ADH@SBP)。通过扫描电镜和傅里叶变换红外光谱仪对ADH@SBP产品的形貌和结构进行表征。将ADH@SBP应用于吸附去除水中茜素红S,考察了pH、温度和时间等因素对ADH@SBP吸附茜素红S的影响。结果表明:ADH@SBP吸附茜素红S的最佳条件在pH=2,温度为50℃。吸附过程符合准二级动力学吸附模型。

关键词 己二酸二酰肼,沙棘枝条,茜素红S,吸附

Adsorption of alizarin red S by sea buckthorn branche powder modified with acid hydrazide

Sun Li[1,4] Xing Jianyu[1,4] Bai Bo[1,4] Ding Chenxu[2] Wang Honglun[2] Suo Yourui[2] Duan Jie[3] Fan Cheng[3]

(1.College of Environmental Science and Engineering,Chang'an University,Xi'an 710054;
2.Northwest Plateau Institute of Biology,Chinese Academy of Sciences,Xining 810001;
3.Shaanxi Province Product Quality Supervision and Inspection Institute,Xi'an 710048;
4.Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas,Ministry of Education,
Xi'an 710054)

Abstract Sea buckthorn branches are composed of ample lignocelluloses. The traditional treatment for these, like discarding outside or burning are characterized by serious resource waste and environmental pollution. Adipic acid hydrazide (ADH) was used as modifier. The ADH@SBP was prepared by decorating sea buckthorn branch powder (SBP) with adipic acid hydrazide (ADH) molecular. The structure and morphology of samples were characterized by fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) and scanning electron microscopy (SEM), respectively. Moreover, their absorptive removal for alizarin red S from aqueous solutions was systematically investigated. Specifically, the effect of modifier concentration, initial dye concentration, adsorbent additive quantity, pH, temperature and contact time on the removal of alizarin red S were evaluated. The results showed that the optimal pH value about 2, the temperature of 50℃ were helpful for the adsorption of alizarin red S onto ADH@SBP. The adsorption followed pseudo-second-order kinetics, and the adsorption isotherm can be fitted better by langmuir equation than freundlich equation. Thermodynamic analysis showed that the adsorption process was spontaneous and endothermic.

Key words adipic acid hydrazide, sea buckthorn branche, alizarin red S, adsorption

考虑到低浓度染料废水对生态系统和人居环境造成的潜在严重危害,针对低浓度染料废水处理技术的研究成为近年来的研究热点[1]。目前,低浓度染料废水处理技术主要有物理转移[2]、化学氧化[3]和生物降解[4]。其中,吸附法因其易操作、安全的优点,成为应用最广泛的操作方法之一[5]。尤其是以常见农林副产品如废棉[6]、树皮[7]和椰糠[8]等物质作为廉价吸附剂,吸附性转移水中低浓度染料,既节约了资源,又达到了以废治废的目的。

沙棘是一种落叶性灌木。我国沙棘种植面积超

基金项目:中国博士后特别资助项目(201104615);中央高校基本科研业务费专项资金(310829162014和310829161015)
作者简介:孙丽(1994-),女,硕士研究生,主要从事新型功能材料方面的研究工作。
联 系 人:白波(1972-),博士研究生导师,主要从事纳米复合物的制备及应用。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

过200万公顷，占世界沙棘总种植面积的90%以上[9]。沙棘果实普遍采用果、枝同采工序，在此工序中会有大量的废弃枝条。传统处理沙棘枝条的方式为填埋、焚烧或野外丢弃，不仅污染环境而且严重浪费资源。在结构上，天然沙棘枝条可归属于木质纤维素，是具有内部导管的管体材料[10]。沙棘枝条自身富有的多孔结构必然导致其具有较大的比表面积，因而可展现出良好的吸附性能。然而，与工业常用的表面官能团丰富的活性炭吸附材料相比，仅仅借助于沙棘枝条中的纤维素、木质素、几丁质等化学组分所具有的官能团，天然沙棘枝条作为吸附剂必然存在吸附位点少、选择性差、吸附容量低的问题。据此，笔者提出一种基于己二酸二酰肼(ADH)的表面改性方法。ADH是一种无毒无诱变的共价交联剂，具有对称的分子结构，含有羰基和端氨基，可与羧基交联，生成酰胺键[11-12]。基于其高反应活性的双酰肼官能团，ADH作为双功能改性剂已广泛应用于水凝胶[13]、细胞膜[14]和药物载体[15]等方面。比如Agrahari等[16]证明透明质酸和ADH以形成酰胺键的形式，制备杀菌剂。Ito等[17]利用ADH改性羧甲基葡聚糖，制备可注射凝胶，用于预防腹膜粘连。ADH可与木质纤维素上的羧基交联形成酰胺键，不仅消除传统预处理过程的副作用，且易与木质纤维素上所需官能团进行二级反应。然而，ADH应用于改性木质纤维素材料鲜有报道。

茜素红S，属于蒽醌类化合物，具有较高的毒性、复杂结构等特点，为污水中常见的有机污染物之一[18]。据此，本研究以预处理沙棘枝条粉(SBP)为基底，经ADH改性后，获得改性沙棘枝条粉(ADH@SBP)，并将其应用于茜素红S废水的吸附处理。研究表明，将ADH@SBP用作新型、环境友好吸附剂处理低浓度染料废水，不仅实现了废弃枝条生物质资源的充分利用，而且能为我国经济林生物质材料的利用提供补充。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

沙棘枝条，青海德令哈区采集；己二酸二酰肼(ADH)，东京化成工业株式会社；茜素红S，上海公私合营新中化学厂；NaOH，广东光华科技股份有限公司；HCl，洛阳昊华化学试剂有限公司。

微型植物粉碎机(FZ102型)，天津泰斯特仪器有限公司；紫外-可见分光光度计(752型)，上海仪电分析仪器有限公司；多头磁力搅拌器，常州丹瑞实验仪器设备有限公司；电子天平，梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司；傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR，Bio-Rad FTS135型)，铂金埃尔默公司；扫描电镜(SEM，S-4800型)，日本日立公司。

1.2 改性沙棘枝条粉(ADH@SBP)的制备

将沙棘枝条洗净、干燥、粉碎，过100目筛，即得待用的预处理沙棘枝条粉(SBP)。将ADH和SBP分别按1∶2、1∶1、3∶2、2∶1、5∶2和3∶1的质量比放于6个150mL三口瓶中，其后加入适量蒸馏水，通氮气20min并水浴加热至50℃。中高速条件下搅拌2h，分别将产物冲洗2—3次，于80℃烘干，即得待用的ADH@SBP。

经实验分析，ADH∶SBP＝3∶1时，吸附性能最好，因此以下实验均采用此比例所制ADH@SBP进行研究。

1.3 染料吸附实验

分别称取25mL茜素红S染料置于两个40mL具塞锥形瓶中，以SBP和ADH@SBP为吸附剂分别进行吸附实验。使用HCl溶液和NaOH溶液调节pH。分别考察pH、吸附温度和吸附时间对改性前后沙棘枝条粉单位吸附容量的影响。吸附结束后用定性滤纸过滤，采用分光光度计法在460nm测定滤液中茜素红S染料的吸光度，并按式(1)和式(2)计算吸附量：

$$Q_t = \frac{(C_0 - C_t) \cdot V}{M} \tag{1}$$

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{M} \tag{2}$$

式中，Q_t和Q_e分别为茜素红S在时间t和平均吸附容量，mg/g；C_0、C_t和C_e分别为茜素红S的初始浓度、t时刻的浓度和平衡浓度，mg/L；V为所取溶液体积，mL；M为所用吸附剂的质量，mg。

2 结果与讨论

2.1 改性沙棘枝条粉的结构表征

图1为ADH、SBP和ADH@SBP的FT-IR谱图。由图1曲线(a)可知，SBP在3320cm^{-1}处有明显的特征峰(—OH伸缩振动)，在1041和890cm^{-1}(β-1,4-糖苷键)处有纤维素结构的特征吸收峰，1650cm^{-1}处有C═O的吸收峰[19]。由图1曲线(b)可知，3315、3180和1633cm^{-1}处分别为—NH_2、—NH和—C═O的特征振动峰，1432cm^{-1}为C—N的特征吸收峰，2863和1466cm^{-1}分别为饱和C—H的伸缩振动峰和弯曲振动峰，700cm^{-1}左右的中强吸收峰说明有长链—$(CH)_4$—存在，综合分析为ADH

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的结构[20]。由图 1 曲线(c)可知，经 ADH 改性后，沙棘枝条粉的 FT-IR 谱图发生了明显变化，3365、3083 和 1633cm^{-1} 左右出现新的振动峰，分别为 —NH_2、—NH 和—C═O 振动峰[20]，且 1630 和 1533cm^{-1} 处分别有酰胺Ⅰ、酰胺Ⅱ的吸收峰[21]，证明 SBP 被 ADH 改性成功，同时，可以观察到在 1432(—CN 的伸缩振动)、2861 和 1466cm^{-1}(—CN 的伸缩振动和弯曲振动)出现吸收峰。将改性前后的沙棘枝条粉分别放入茜素红 S 溶液中，相比 SBP 而言，ADH@SBP 表面含有大量的氨基和羟基，可与茜素红 S 上的 H 原子和羟基形成氢键。因此，茜素红 S 被牢牢吸附在 ADH@SBP 表面。与原始的 SBP 相比，ADH@SBP 将会表现出较高的吸附性能。

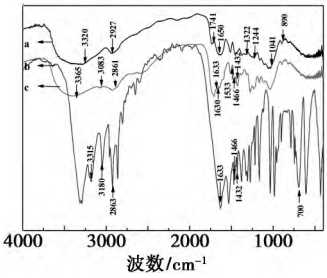

图 1　SBP(a)、ADH(b)及 ADH@SBP(c)的 FT-IR 谱图

2.2　初始 pH 和吸附温度对 ADH@SBP 吸附性能的影响

pH 是影响吸附剂对染料吸附效果的重要因素。初始 pH 和吸附温度对 ADH@SBP 吸附性能的影响见图 2。由图可知，随着初始 pH 的增加，吸附剂对茜素红 S 的吸附容量减少，吸附剂在 pH＝2 时吸附容量最大。因为 pH 越小，H^+ 浓度越大，形成的氢键越多，在吸附剂表面上吸附的茜素红 S 分子越多，ADH@SBP 对茜素红 S 的吸附容量越大。此外，ADH@SBP 比 SBP 对茜素红 S 的吸附容量大，表明经过 ADH 改性后，SBP 的吸附容量显著增加。并且随着吸附温度上升，两种吸附剂对茜素红 S 的吸附容量均有增加，说明吸附温度增加有利于吸附过程的进行，即 SBP 和 ADH@SBP 对茜素红 S 的吸附是吸热过程。温度上升至 50℃，SBP 和 ADH@SBP 对茜素红 S 的吸附都达到吸附容量最大值，分别为 17.70 和 18.42mg/g。温度继续上升，两种吸附剂对茜素 S 的吸附量下降。对于吸附材料和染料之间形成的氢键，随着温度增加，茜素红 S 分子运动增加，氢键成键率增加，同时也加快了氢键结构的松弛过程；50℃时，氢键结构的松弛速率等于氢键成键率，氢键数目达到最大值，SBP 和 ADH@SBP 的吸附容量均达到最大值，分别为 17.7 和 18.42mg/g；在 50℃以后，氢键结构的松弛速率大于成键率，氢键数目下降，所以吸附容量下降[22]。因此，50℃最适宜 SBP 和 ADH@SBP 吸附茜素红 S 染料。

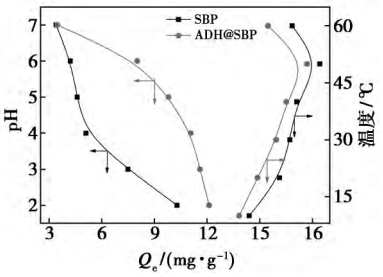

图 2　初始 pH 和吸附温度对 ADH@SBP 吸附性能的影响

2.3　动力学研究

在动力学实验中，准一级吸附动力学和准二级吸附动力学用方程式表示[23-24]。颗粒扩散模型是扩散吸附模型的进一步补充[25]。对于改性前后沙棘枝条粉对茜素红 S 的吸附动力学模型分别采用这 3 类模型进行拟合，见式(3)—式(5)。各模型的动力学曲线见图 3，各模型参数见表 1。

准一级动力学：

$$\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - K_1 t \tag{3}$$

准二级动力学：

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{K_2 Q_e^2} + \frac{t}{Q_e} \tag{4}$$

颗粒内扩散：

$$Q_t = K_i \times t^{0.5} + c \tag{5}$$

式中，Q_t 和 Q_e 分别为茜素红 S 在时间 t 和平均吸附容量，mg/g；K_1(min^{-1})和 K_2(mg^{-1}·min^{-1})分别为准一级吸附动力学和准二级吸附动力学的速率常数；K_i 为持续扩散速率，mg/(g·min$^{1/2}$)；c 为吸附过程中的相关截距，mg/g。

时间对改性前后沙棘枝条粉吸附茜素红 S 的影响见图 3(a)。由图可知，吸附 200min 之内，由于溶液中茜素红 S 浓度高，茜素红 S 向吸附剂表面的扩散速率较大，且吸附剂表面的有效活性位点较多，因而吸附速度快，吸附容量迅速上升；吸附 250min 之后，因溶液中茜素红 S 浓度降低，染料的扩散速率降低，且吸附剂表面有效活性位点减少，因而吸附速率下降，直至吸附逐渐达到平衡。此时，SBP 和 ADH@SBP 均达到最大吸附容量，分别为 11.76 和 12.90mg/g。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

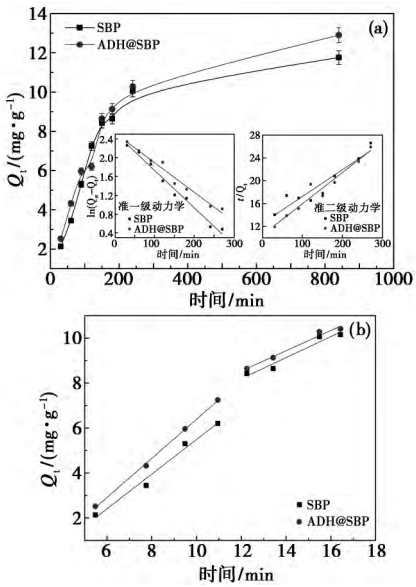

图3 时间对改性前后沙棘枝条粉吸附茜素红S的影响(a)和改性前后沙棘枝条粉对茜素红S染料吸附动力学曲线图(颗粒扩散模型)(b)

(图a插图分别为准一级动力学和准二级动力学曲线图)

表1 动力学模型参数

模型	因素	SBP	ADH@SBP
准一级动力学			
$\ln(Q_e-Q_t)-t$	K_1/(min^{-1})	0.00794	0.00629
	$Q_{e,calc}$/(mg·g^{-1})	12.428	12.414
	$Q_{e,exp}$/(mg·g^{-1})	11.76	12.90
	R_1^2	0.98247	0.97148
准二级动力学e			
$t-t/Q_t$	K_2/(mg^{-1}·min^{-1})	2.308×10^{-4}	2.837×10^{-4}
	$Q_{e,calc}$/(mg·g^{-1})	19.36	18.17
	$Q_{e,exp}$/(mg·g^{-1})	11.76	12.90
	R_2^2	0.93525	0.95431
颗粒内扩散			
$t^{1/2}-Q_t$	K_{i1}/(mg·g^{-1}·min$^{-1/2}$)	0.77039	0.86968
	K_{i2}/(mg·g^{-1}·min$^{-1/2}$)	0.48721	0.45044
	c_1(mg·g^{-1})	−2.21211	−2.30584
	c_2/(mg·g^{-1})	2.59162	3.13053
	R^2	0.97683	0.99798

由表可知,对于SBP,通过准一级动力学方程计算的吸附容量$Q_{e,calc}$与实验测定值$Q_{e,exp}$相近,且对于ADH@SBP,通过准二级动力学方程计算的$Q_{e,calc}$与实验测定值$Q_{e,exp}$相近。准一级动力学拟相关系数得到R_1^2接近于1,更加适合描述SBP和ADH@SBP吸附茜素红S的过程。SBP和ADH@SBP的颗粒内扩散方程所拟合曲线不过原点,且相关系数R^2都大于0.97,接近于1,可知吸附过程主要受颗粒内扩散控制,但颗粒内扩散不是唯一的速率控制步骤[26]。通过研究SBP和ADH@SBP对茜素红S的吸附动力学,发现准一级动力学方程和颗粒内扩散方程可描述吸附过程。

3 结论

(1)以ADH为改性剂处理SBP,可获得对茜素红S染料具有高效吸附能力的ADH@SBP,改性方法简单易行。在pH=2,温度50℃下适宜ADH@SBP吸附茜素红S染料。

(2)改性前后沙棘枝条粉对茜素红S染料的吸附动力学模型符合准一级动力学模型和颗粒内扩散模型。化学吸附是主要吸附控速步骤。

(3)ADH@SBP吸附剂适宜应用于污水处理等方面,可提高水的利用率。我国是沙棘资源大国,占世界沙棘资源量的90%以上,利用废弃沙棘枝条粉制备吸附剂有非常好的发展前景。

参考文献

[1] Gong J L, Wang B, Zeng G M, et al. Removal of cationic dyes from aqueous solution using magnetic multi-wall carbon nanotube nanocomposite as adsorbent[J]. J Hazard Mater, 2009, 164(2-3): 1517-1522.

[2] Amini M, Arami M, Mahmmodi N M, et al. Dye removal from colored textile wastewater using acrylic grafted nanomembrane[J]. Desalination, 2011, 267(1): 107-113.

[3] Dukkanci M, Gunduz G, Yilmaz S, et al. Heterogeneous Fenton-like degradation of rhodamine 6G in water using CuFeZSM-5 zeolite catalyst prepared by hydrothermal synthesis[J]. J Hazard Mater, 2010, 181(1-3): 343-350.

[4] Nguyen T A, Fu C C, Juang R S. Biosorption and biodegradation of a sulfur dye in high-strength dyeing wastewater by acidithiobacillus thiooxidans[J]. J Environ Manage, 2016, 182(1): 265-271.

[5] Rafatullah M, Sulaiman O, Hashim R, et al. Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: a review[J]. J Hazard Mater, 2010, 177(1-3): 70-80.

[6] Ertas M, Acemioglu B, Alma M H, et al. Removal of methylene blue from aqueous solution using cotton stalk, cotton waste and cotton dust[J]. J Hazard Mater, 2010, 183(1-3): 421-427.

[7] Deniz F. Dye biosorption from water employing chemically modified calabrian pine cone shell as an effective biosorbent[J]. Environ Prog Sustain, 2015, 34(5): 1267-1278.

[8] Premkumar Y, Vijayaraghavan K. biosorption potential of co-

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

co-peat in the removal of methylene blue from aqueous solutions[J].Sep Sci Technol,2015,50(9):1439-1446.

[9] 齐虹凌,于泽源,李兴国.沙棘研究概述[J].沙棘,2005,18(2):37-41.

[10] 刘晓丽.沙棘材的构造与材性及水分迁移的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2002.

[11] Wei Z,Yang J H,Liu Z Q,et al.novel biocompatible polysaccharide-based self-healing hydrogel[J].Adv Funct Mater,2015,25(9):1352-1359.

[12] Maia J,Ferreira L,Rui C,et al.Synthesis and characterization of new injectable and degradable dextran-based hydrogels[J].Polymer,2005,46(23):9604-9614.

[13] Hennink W E,Nostrum C F V.Novel crosslinking methods to design hydrogels[J].Adv Drug Deliv Rev,2012,54(1):13-36.

[14] Park J K,Yeom J,Oh E J.Guided bone regeneration by poly(lactic-co-glycolic acid) grafted hyaluronic acid bi-layer films for periodontal barrier applications[J].Acta Biomater,2009,9(5):3394-3403.

[15] Emoto S,Yamaguchi H,Kamei T,et al.Intraperitoneal administration of cisplatin via an in situ cross-linkable hyaluronic acid-based hydrogel for peritoneal dissemination of gastric cancer[J].Surgery Today,2014,44(5):919-926.

[16] Agrahari V,Chi Z,Tao Z,et al.Hyaluronidase-sensitive nanoparticle templates for triggered release of HIV/AIDS microbicide *In Vitro*[J].Aaps J,2014,2(2):181-193.

[17] Ito T,Yeo Y,Highley C B,et al.Dextran-based in situ,cross-linked injectable hydrogels to prevent peritoneal adhesions[J].Biomaterials,2007,28(23):3418-26.

[18] Gautam R K,Mudhoo A,Chattopadhyaya M C.Kinetic,equilibrium,thermodynamic studies and spectroscopic analysis of alizarin red S removal by mustard husk[J].J Environ Chem Eng,2013,1(4):1283-1291.

[19] Liang R,Yuan H,Xi G,et al.Synthesis of wheat straw-g-poly(acrylic acid) superabsorbent composites and release of urea from it[J].Carbohydr Polym,2009,77(2):181-187.

[20] Yang H,Bremner D H,Tao L,et al.Carboxymethyl chitosan-mediated synthesis of hyaluronic acid-targeted graphene oxide for cancer drug delivery[J].Carbohy Poly,2016,135:72-78.

[21] 林敏,尤崇杓.固氮粪产碱菌(Alcaligenes faecalis)胞外多糖的理化特性分析[J].核农学报,1996,10(3):181-185.

[22] 张秀新.液态水分子间氢键相互作用的从头分子动力学研究[D].天津:河北工业大学,2007.

[23] Ayad M M,El-Hefnawy G,Zaghlol S.Facile synthesis of polyaniline nanoparticles:its adsorption behavior[J].Chem Eng J,2013,217:460-465.

[24] Chen L,Bai B.Equilibrium,kinetic,thermodynamic,and in situ regeneration studies about methylene blue adsorption by the raspberry-like TiO_2 @ yeast microspheres[J].Ind Eng Chem Res,2013,52(44):15568-15577.

[25] Saliby I E,Erdei L,Kim J H,et al.Adsorption and photocatalytic degradation of methylene blue over hydrogen-titanate nanofibres produced by a peroxide method[J].Water Res,2013,47(12):4115-4125.

[26] McKay G,Ho Y S.Pseudo-second-order model for sorption processes[J].Process Biochem,1999,34(15):451-465.

收稿日期:2017-01-09

苏州纳米所仿生人工肌肉研究取得重要进展

仿生人工肌肉材料是 20 世纪 90 年代迅速发展起来的一类新型智能材料,正不断地掀起全球研究热潮,在航空航天、仿生机器人以及生物医疗等工程领域具有重要的应用价值。离子聚合物-金属复合材料(IMPC),也称为电化学驱动器,是一种典型的仿生人工肌肉材料。它是由两层电极与离子聚合物组装而成的三明治结构,在电场作用下,依靠离子在电极界面的可逆脱嵌过程,实现电能与机械能的转换。因其低电压驱动、柔性大变形等特性,在软体机器人、智能穿戴以及医疗器械等方面的应用前景广阔。

目前学术界公认的 IPMC 材料驱动机制是电容致动机理,在驱动电压刺激下,一定数量的离子在电极层中的预膨胀、嵌入、嵌出,引起电极材料的可逆膨胀与收缩效应,这种效应导致了驱动器的宏观应变。换言之,电极材料储能越大,驱动效应越强。基于此机制,各种高储能的纳米材料都被尝试用作 IPMC 电极,驱动性能相比于传统 IPMC 材料得到大幅提升,但是较实际应用仍然存在较大的差距,曾经一度成为人们难以理解的困惑。究其原因,储能与驱动性能之间并不总是正相关的,它们之间存在一个能量转换效率的问题。经过大量的调研与探索发现,电极的能量转换效率主要由材料的电学特性、孔道构型、分子结构以及力学特性等复杂因素决定。因此,要在驱动性能和应用上取得突破,就必须发展新型纳米结构活性材料,探索新的储能-转换机制。

近期,中科院苏州纳米所陈韦研究员课题组与中科院北京化学所李玉良院士以及香港理工大学陶肖明教授合作,设计制备了一种基于石墨炔新材料的电化学驱动器,并从石墨炔材料微观分子驱动机制的发现,到宏观驱动器件的高能量转换效率驱动特性,开展了全面系统的研究。提出并实验验证了一种新型分子驱动机制——石墨炔烯炔互变效应,该机制完全不同于传统的电容驱动机制,它是基于可逆配位转换效应引起的材料结构变化。由于常规检测手段难以捕捉这一分子尺度的配位转换效应,于是,该团队创造性的利用高灵敏的原位和频共振光谱技术,从实验上验证了这一分子驱动机制。正是由于这种活性功能单元的作用,石墨炔 IPMC 柔性电极不仅表现出优异的电化学储能特性,同时,也表现出电-机械能量转换能力。石墨炔驱动器比电容高达 237F/g,倍率特性良好,换能效率高达 6.03%,远高于同类电化学换能器件,能量密度高达 11.5kJ/m^3,与哺乳动物生物肌肉能量密度相当,将电化学驱动器的性能提升到了一个新的水平。　　(新型)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net