

改性榴莲壳对结晶紫的吸附性能研究

廖颖敏 李晓慧 蔡 婷 张 清

(河口生态安全与环境健康福建省高校重点实验室,厦门大学嘉庚学院,漳州 363105)

摘 要 以改性榴莲壳作为吸附剂,采用静态吸附法处理结晶紫模拟废水溶液。结果表明,提高改性榴莲壳投加量、振荡速率、pH 以及延长吸附时间有利于对结晶紫的吸附,而温度的变化对结晶紫的吸附影响不明显。当改性榴莲壳投加量为 0.5g,结晶紫初始质量浓度为 20mg/L,吸附时间为 60min,振荡速率为 140r/min 时,改性榴莲壳对结晶紫的去除率可达 99.78%。吸附动力学过程可用准二级动力学模型描述,等温吸附过程可由 Freundlich 吸附等温模型描述。改性榴莲壳与结晶紫之间发生多层吸附,最大吸附量为 298.51mg/g,吸附过程是以物理吸附占主导的自发、放热过程。改性榴莲壳在印染废水中有较好的应用前景。

关键词 改性榴莲壳,结晶紫,吸附,动力学,热力学

Study on the adsorption behavior of crystal violet with modified durian shell

Liao Yingmin Li Xiaohui Cai Ting Zhang Qing

(Key Laboratory of Estuarine Ecological Security and Environmental Health of Fujian Province,
Tan Kah Kee College of Xiamen University,Zhangzhou 363105)

Abstract The crystal violet simulated wastewater solution was treated with modified durian shell as adsorbent using static adsorption method. The results showed that the increase of the dosage of modified durian shell, the removal rate, the adsorption time and pH were beneficial to the adsorption of crystal violet. The temperature had no significant effect. The optimum conditions were as follows: the dosage was 0.5g, the initial concentration was 20mg/L, the adsorption time was 60min, the oscillation rate was 140r/min. The removal rate under above condition was 99.78%. The adsorption process was determined as an endothermic process based on the pseudo second-order kinetics equation and the Freundlich isotherm equation. The maximum multilayer adsorption capacity between them was 298.51mg/g. Thermodynamics showed that the experiment could be carried out spontaneously, mainly by physical adsorption. Modified durian shell had a good application prospect on dye wastewater treatment.

Key words modified durian shell, crystal violet, adsorption, kinetics, thermodynamics

结晶紫又称龙胆紫,属阳离子染料,具有水溶性,广泛应用于纺织、皮革、造纸和印染等行业。结晶紫会富集在水产品和其他食物中而进入人体,使皮肤发炎严重时引起人体器官病变,被认为是高度致癌、致突变的毒药;结晶紫还会造成严重的环境污染,因此如何有效去除废水中的结晶紫引起关注。目前吸附法因效率高、可操作性强、能耗低^[1]且能根据相关吸附理论和模型对吸附过程进行理论分析而被广泛应用^[2]。活性炭是最佳的吸附剂,但不可再生性和昂贵的价格限制了其在治理印染废水中的应用。近年来,低廉易得、吸附容量大的废弃物制备的

吸附剂受到研究者的青睐。国内外学者利用农业废弃物(如稻草^[3]、花生壳^[4]、改性麦壳^[5]、香蕉皮^[6]、高粱秸秆^[7]、红茶叶^[8]、扁桃壳^[9]、银杏落叶^[10]、杏仁壳^[11])制备吸附剂对废水中结晶紫进行处理,取得了较好的效果。

榴莲壳廉价易得且含天然吸附材质,改性后具有较强吸附能力,可用于吸附重金属离子(如 Pb^{2+} 和 Cr^{3+} ^[12]等)和染料(如亚甲基蓝^[13]和次甲基蓝^[14]等)。本研究以改性榴莲壳作为吸附剂,考察在改性榴莲壳投加量、结晶紫溶液初始质量浓度、pH、温度、振荡速率及吸附时间不同条件下,改性榴莲壳对

基金项目:漳州市科学技术局 2017 年度自然科学基金项目(ZZ2017J22);福建省高校青年自然基金重点项目(JZ160494);福建省中青年骨干教师教育科研项目(产学研项目)(JAT160642)

作者简介:廖颖敏(1979-),女,副教授,博士,硕士生导师,主要研究方向为吸附材料的制备及其在工业废水处理中的应用。

结晶紫的吸附效果,通过正交试验确定最佳吸附条件,通过吸附动力学和热力学实验,进一步探讨改性榴莲壳对结晶紫的吸附机理,为改性榴莲壳净化处理印染废水奠定基础。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

结晶紫、氢氧化钠、甲醛、硫酸和盐酸均为分析纯;榴莲壳取自水果摊;实验用水为二次蒸馏水。

紫外-可见分光光度计(UV-1100型),上海美谱达仪器有限公司;台式恒温振荡器(THZ-312型),上海精宏实验设备有限公司;电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9140A型),上海精宏实验设备有限公司;台式离心机(TDL80-2B型),上海安亭科学仪器厂;高速多功能粉碎机(JP-350A-8型),上海冰都电器有限公司;pH计(STARTER3100型),上海奥豪斯仪器有限公司;电子分析天平(BSA224S型),北京赛多利斯仪器系统有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 改性榴莲壳的制备

将榴莲壳洗净,切成小块,于348K烘干,磨粉过筛目数控制在20~50目;称取100g榴莲壳粉末放入配制好的1000mL甲醛/硫酸混合溶液中(甲醛与硫酸质量比为1:5,硫酸浓度0.1mol/L,甲醛溶液质量分数为37%),在磁力搅拌机中于323K搅拌1h,洗涤至中性放入温度348K烘箱内烘干。

1.2.2 吸附实验

准确称量0.2g改性榴莲壳粉末,投加到质量浓度20mg/L的结晶紫溶液中,在振荡速率150r/min、温度298K条件下振荡吸附1h,离心取上清液用紫外-可见分光光度计测吸光度,并绘制标准曲线。根据式(1)和式(2)分别计算改性榴莲壳对结晶紫的去除率和吸附量。

$$\eta = [(C_0 - C)/C_0] \times 100\% \quad (1)$$

$$q_t = [(C_0 - C)V]/m \quad (2)$$

式中, η 为结晶紫的去除率,%; C_0 为吸附前结晶紫的质量浓度,mg/L; C 为吸附后结晶紫的质量浓度,mg/L; q_t 为吸附 t 时刻改性榴莲壳对结晶紫溶液的吸附量,mg/g; V 为结晶紫溶液的体积,L; m 为改性榴莲壳的质量,g。

2 结果与讨论

2.1 改性榴莲壳投加量对结晶紫去除率的影响

改性榴莲壳投加量对结晶紫去除率的影响见

图1。由图看出:随着投加量的增加,结晶紫去除率从31.10%上升至95.83%;当投加量超过0.4g后,结晶紫去除率逐渐趋于稳定,为92.74%~95.83%。这是由于在静态吸附中,吸附效果与吸附剂和溶液的有效接触面积有关^[15],随着投加量的增大,结晶紫溶液与改性榴莲壳的有效接触面积逐渐缩小。

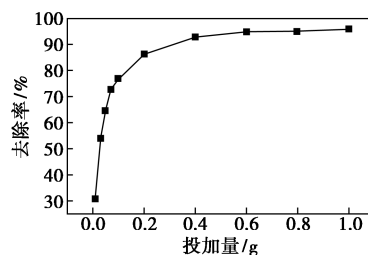


图1 改性榴莲壳投加量对结晶紫去除率的影响

2.2 振荡速率对结晶紫去除率的影响

振荡速率对结晶紫去除率的影响见图2。由图可知:振荡速率较低时,改性榴莲壳会堆积在一起,分散不均,使得固液间接触面积较小,故结晶紫去除率也较低;随着振荡速率提高,加快了扩散速度,改性榴莲壳的比表面积增大,结晶紫去除率从41.90%提高到89.04%,最后趋于稳定。

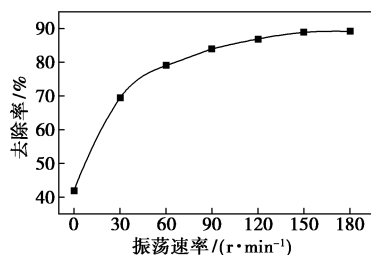


图2 振荡速率对结晶紫去除率的影响

2.3 吸附温度对结晶紫去除率的影响

吸附温度对结晶紫去除率的影响见图3。由图看出:当温度从298K上升至338K时,结晶紫去除率从298K时的86.93%先略微升高至308K时的88.60%,随后降低至87.43%(328K),去除率总体变化不大。原因是结晶紫的吸附存在动态平衡,随着温度的升高,结晶紫的解吸附作用越强,有更多的

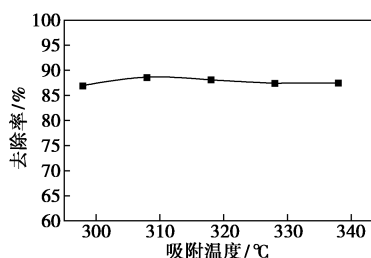


图3 吸附温度对结晶紫去除率的影响

结晶紫从吸附剂上脱落,但总体影响不大。因此在实际应用中,可根据染料废水的实际温度确定吸附温度是否需要调整^[16]。

2.4 pH 对结晶紫去除率的影响

pH 对结晶紫去除率的影响见图 4。由图看出: pH=2~6 时,结晶紫去除率从 50.39% 上升至 91.63%; pH>6 时,结晶紫去除率上升缓慢甚至略微下降到 88.18%,随后又上升至 94.35%。通常情况下, pH 增大增加了溶液中的 OH⁻,促使改性榴莲壳表面官能团的解离而形成活性位点,使其带负电荷。结晶紫为碱性染料,其水溶液带正电荷离子,有利于改性榴莲壳对结晶紫的吸附。

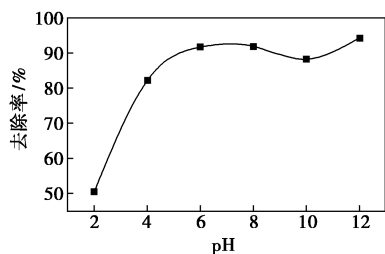


图 4 pH 对结晶紫去除率的影响

2.5 吸附时间对结晶紫去除率的影响

吸附时间对结晶紫去除率的影响见图 5。由图看出: 吸附时间从 5min 延长到 30min 时,结晶紫去除率从 55.85% 上升至 84.78%; 吸附时间超过 30min 后,结晶紫去除率逐渐趋于平稳。这是因为刚开始吸附时,结晶紫溶液带正电荷,使得改性榴莲壳表面带有官能团而形成活性位点^[17],超过 30min 后随着吸附时间的延长,活性位点逐渐被结晶紫占据而减少,吸附趋于饱和状态,导致去除率逐渐平稳。

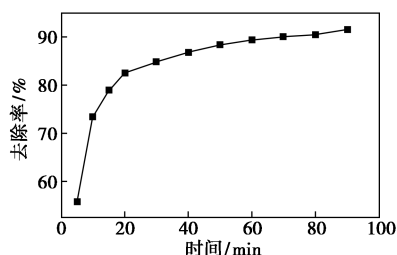


图 5 吸附时间对结晶紫去除率的影响

2.6 结晶紫初始质量浓度对去除率的影响

结晶紫初始质量浓度对去除率的影响见图 6。由图看出: 当结晶紫初始质量浓度从 10mg/L 增加到 70mg/L 时,去除率从 91.21% 下降至 81.29%,且越来越平缓。原因可能是由于结晶紫溶液初始质量浓度的提高,减弱了紫外-可见光穿透溶液的能力,从而导致质量浓度上升至 40mg/L 后吸光度变

化不大,因此结晶紫去除率趋于平稳;也可能是由于吸附在改性榴莲壳表面的溶质质点较多,减少了其表面的活性位点,导致改性榴莲壳表面参与反应的官能团减少^[17],结晶紫的去除率也随之降低。由此说明改性榴莲壳对结晶紫溶液具有一定的吸附量,当吸附量越来越趋于饱和状态时,结晶紫去除率逐渐趋于平衡。

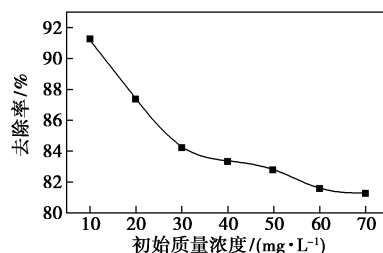


图 6 结晶紫初始质量浓度对去除率的影响

2.7 正交试验

综合考虑上述单因素实验的结果,使用 L₉(3⁴) 正交表对吸附条件进行了优化,每个因素取 3 个水平:改性榴莲壳的投加量取 0.4g、0.5g、0.6g;结晶紫初始质量浓度取 10mg/L、15mg/L、20mg/L;吸附时间取 60min、70min、80min;振荡速率取 140r/min、150r/min、160r/min。对正交试验数据进行分析发现,极差 R 分别为 0.586(投加量)、0.896(结晶紫初始质量浓度)、0.267(吸附时间)和 0.383(振荡速率),表明结晶紫溶液初始质量浓度对去除率影响最大,而吸附时间影响最小。通过正交试验确定的最佳吸附条件为:改性榴莲壳投加量 0.5g,结晶紫初始质量浓度 20mg/L,吸附时间 60min,振荡速率 140r/min,此条件下改性榴莲壳对结晶紫的去除率达到最大,为 99.78%。

2.8 吸附动力学研究

将 0.2g 改性榴莲壳粉末分别放入质量浓度为 10mg/L、20mg/L、30mg/L 的结晶紫溶液中,在温度 298K、振荡速率 150r/min、振荡 70min 条件下,利用准一级动力学模型方程[见式(3)]和准二级动力学模型方程[见式(4)]对改性榴莲壳吸附结晶紫的实验数据进行拟合,拟合结果见表 1。

$$\lg(q_e - q_t) = \lg q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (3)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4)$$

式中, k_1 为准一级动力学模型平衡常数, min⁻¹; k_2 为准二级动力学模型平衡速率常数, g/(mg·min); q_e 为吸附平衡时改性榴莲壳对结晶紫溶液的吸附量, mg/g; q_t 为吸附 t 时刻改性榴莲壳对结晶紫溶

液的吸附量, mg/g ; t 为吸附时间, min 。

由表 1 可知, 改性榴莲壳对结晶紫的吸附过程更符合准二级动力学模型(相关系数 $R^2 \geq 0.9995$)。吸附速率由吸附剂表面未被占用的吸附空位数目的平方值决定^[18], 所以改性榴莲壳表面与结晶紫分子之间存在电子交换。

表 1 改性榴莲壳对结晶紫的吸附动力学拟合数据

$C_0/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	准一级动力学模型			准二级动力学模型		
	$k_1/$ (min^{-1})	$q_e/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	R^2	$k_2/[\text{g} \cdot$ ($\text{mg} \cdot \text{min})^{-1}]$	$q_e/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	R^2
10	0.044	1.92	0.9344	0.051	9.99	0.9999
20	0.056	3.12	0.9799	0.031	9.54	0.9999
30	0.045	3.75	0.8953	0.023	13.82	0.9995

注: C_0 为吸附前结晶紫的质量浓度。

2.9 吸附等温分析

将 0.2g 改性榴莲壳粉末置于质量浓度 10~60mg/L 的结晶紫溶液中, 在温度 298K、308K、318K, 振荡速率 150r/min、振荡 70min 条件下, 利用 Langmuir 等温吸附方程[见式(5)]和 Freundlich 等温吸附方程[见式(6)]对改性榴莲壳吸附结晶紫的等温吸附实验数据进行拟合, 拟合结果见表 2。

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_{\max}} + \frac{1}{q_{\max} k_L} \quad (5)$$

$$\ln q_e = \ln k_F + \frac{\ln C_e}{n} \quad (6)$$

式中, C_e 为吸附平衡时结晶紫溶液的质量浓度, mg/L ; $q_{\max}$ 为改性榴莲壳对结晶紫的饱和吸附量, mg/g ; k_L 为 Langmuir 等温吸附方程的平衡常数, L/mg ; k_F 为 Freundlich 等温吸附方程的平衡常数; n 为与吸附强度相关的常数, 无量纲。

由表 2 可知, 改性榴莲壳对结晶紫的吸附过程更符合 Freundlich 等温吸附模型(相关系数 $R^2 \geq 0.9918$), 说明改性榴莲壳粉末表面不均匀, 与结晶紫之间发生多层吸附, 最大吸附量为 298.51mg/g。

表 2 利用 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附方程拟合的参数

温度/ K	Langmuir 等温吸附方程			Freundlich 等温吸附方程		
	$q_{\max}/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$k_L/(\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$	R^2	$1/n$	k_F	R^2
298	298.51	0.023	0.9015	0.71	5.61	0.9918
308	233.64	0.042	0.9787	0.65	6.22	0.9962
318	214.13	0.049	0.9651	1.64	6.17	0.9983

2.10 吸附热力学研究

在温度 298K、308K、318K 条件下, 收集改性榴莲壳对质量浓度 40mg/L 结晶紫溶液的吸附等温曲线数据, 根据式(7)和式(8)计算吸附过程中的热力学参数。

$$\ln\left(\frac{q_e}{C_e}\right) = \frac{\Delta H^\theta}{RT} + \frac{\Delta S^\theta}{R} \quad (7)$$

$$\Delta G^\theta = \Delta H^\theta - T\Delta S^\theta \quad (8)$$

式中, q_e/C_e 为吸附分配系数; R 为理想气体常数, 取 $8.314\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为绝对温度, K ; ΔG^θ 为标准吉布斯自由能变, kJ/mol ; ΔH^θ 为标准反应焓变, kJ/mol ; ΔS^θ 为标准反应熵变, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

由计算结果可知, 不同温度条件下(298K、308K、318K), ΔG^θ (-3.64kJ/mol 、 -3.48kJ/mol 、 -3.14kJ/mol)和 ΔS^θ ($[-16.11\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})]$)均小于零, 可见改性榴莲壳对结晶紫的吸附可自发进行, 且焓变是吸附过程主要的驱动力。随着温度的升高, ΔG^θ 减小, 说明自发反应趋势减弱, 且 ΔH^θ (-8.437kJ/mol)小于 0, 这是由于解吸水分子吸收的热量小于吸附结晶紫分子放出的热量, 因此吸附过程总体呈现一个放热状态, 吸附以物理吸附为主。

3 结论

用甲醛/硫酸混合溶液处理榴莲壳制备的改性榴莲壳吸附剂对结晶紫具有一定的去除效果, 且受到改性榴莲壳投加量、振荡速率、pH 和吸附时间等因素的影响。当改性榴莲壳投加量超过 0.4g 时, 结晶紫去除率逐渐趋于稳定, 为 92.74%~95.83%。随着振荡速率的提高, 扩散速度加快, 改性榴莲壳吸附剂的比表面积增大, 结晶紫去除率从 41.90% 提高到 89.04%, 最后趋于稳定。pH 增大增加了溶液中的 OH^- , 促使改性榴莲壳表面官能团的解离而形成活性位点使其带负电荷, 结晶紫为碱性染料, 其水溶液带正电荷离子, 有利于改性榴莲壳对结晶紫的吸附。吸附时间超过 30min 后, 结晶紫去除率大于 84.78%, 随后逐渐趋于平稳。正交试验结果表明, 当改性榴莲壳投加量为 0.5g、结晶紫初始质量浓度为 20mg/L、吸附时间为 60min、振荡速率为 140r/min 时, 改性榴莲壳对结晶紫的去除率可达 99.78%。吸附过程是以物理吸附占主导的自发、放热过程, 改性榴莲壳与结晶紫之间发生多层吸附, 最大吸附量为 298.51mg/g。

参考文献

- [1] Tang Y, Zhou Q, Zhao Y, et al. Efficient removal of methyl vi-

- olet from aqueous solution by a low-cost adsorbent-camphor a fallen leaves powder[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2017, 38(8): 1135-1141.
- [2] Tang Y, Zeng Y, Hu T, et al. Preparation of lignin sulfonate-based mesoporous materials for adsorbing malachite green from aqueous solution[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2016, 4(3): 2900-2910.
- [3] Shamik C, Sagnik C, Papita D. Adsorption of crystal violet from aqueous solution by citric acid modified rice straw, equilibrium, kinetics, and thermodynamics[J]. Separation Science and Technology, 2013, 48(9): 1339-1348.
- [4] Zhang J X, Ou L L. Kinetic, isotherm and thermodynamic studies of the adsorption of crystal violet by activated carbon from peanut shells[J]. Water Science and Technology, 2013, 67(4): 737-744.
- [5] 张敬华, 陈慧娟. 改性麦壳对结晶紫的吸附作用研究[J]. 化工新型材料, 2013, 41(7): 187-189.
- [6] 房宏艳, 张润林, 吕培颖, 等. 香蕉皮粉对结晶紫废水的吸附动力学与吸附热力学研究[J]. 化工新型材料, 2014, 42(10): 146-148.
- [7] 赵二劳, 王迎进. 高粱秸秆粉对结晶紫吸附性能的初步研究[J]. 化工新型材料, 2015, 43(9): 163-165.
- [8] 马会强, 李阳, 石珍瑜, 等. 红茶粉末对结晶紫吸附性能研究[J]. 化工新型材料, 2016, 44(11): 220-222.
- [9] Ishaq M, Javed F, Amad I, et al. Adsorption of crystal violet dye from aqueous solutions onto low-cost untreated and NaOH treated almond shell[J]. Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering-International English Edition, 2016, 35(2): 97-106.
- [10] 李薇, 王梅, 马宏飞, 等. 银杏落叶对结晶紫的生物吸附性能研究[J]. 化工新型材料, 2017, 45(4): 193-195.
- [11] Goksu A, Tanaydin M K. Adsorption of hazardous crystal violet dye by almond shells and determination of optimum process conditions by Taguchi method[J]. Desalination & Water Treatment, 2017, 88: 189-199.
- [12] 吴文炳, 李晓, 张卫英, 等. 羧基功能化榴莲壳对水中 Pb(II) 和 Cr(III) 的生物吸附研究[J]. 功能材料, 2015, 46(22): 22037-22044.
- [13] Latib E H A, Mustfha M S, Sufian S, et al. Methylene blue dye adsorption to durian shell activated carbon[J]. Key Engineering Materials, 2014, 594-595: 350-355.
- [14] 黄晓东, 李茜, 黄雅丽. 榴莲壳粉-聚偏氟乙烯复合膜对次甲基蓝吸附的研究[J]. 环境工程, 2018, 36(2): 54-59.
- [15] 闫宗兰, 尉震, 莫德伦, 等. 竹炭对溶液中龙胆紫的吸附性能[J]. 江苏农业科学, 2014, 24(11): 401-448.
- [16] 岳新霞, 俸海凤, 林海涛, 等. 蔗渣基吸附剂的制备及对刚果红的吸附性能[J]. 广西科技大学学报, 2017, 28(2): 120-124.
- [17] 蒋宇翔, 李洋, 田浪, 等. 锆酸锶晶体纳米线光催化降解龙胆紫的研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2014, 42(1): 25-28.
- [18] 姜飞虹, 袁亚宏, 任婷婷, 等. 磁性壳聚糖微球吸附苹果汁有机酸的动力学及热力学特性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 307-314.

收稿日期: 2018-03-21

修稿日期: 2019-04-29

(上接第 227 页)

- [3] Wang F, Wang J Y, Ren H. Multi-shelled LiMn_2O_4 hollow microspheres as superior cathode materials for lithium-ion batteries[J]. Inorg Chem Front, 2016, 3: 365-369.
- [4] Xiong L, Xu Y, Tao T, et al. Synthesis and electrochemical characterization of multi-cations doped spinel LiMn_2O_4 used for lithium ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2012, 199: 214-219.
- [5] Kim Y, Lim J, Kang S. Investigation on the dissolution of Mn ions from LiMn_2O_4 cathode in the application of lithium ion batteries: first principle molecular orbital method[J]. International Journal of Quantum Chemistry, 2013, 113: 148-154.
- [6] Hirayama M, Ido H, Kim K, et al. Dynamic structural changes at LiMn_2O_4 /electrolyte interface during lithium battery reaction[J]. Journal of the American Chemical Society, 2010, 132: 15268-15276.
- [7] Li X, Yang R, Cheng B, et al. Enhanced electrochemical properties of nano- Li_3PO_4 coated on the LiMn_2O_4 cathode material for lithium ion battery at 55°C [J]. Materials Letters, 2012, 66: 168-171.
- [8] Tan C L, Zhou H J, Li W S, et al. Performance improvement of LiMn_2O_4 as cathode material for lithium ion battery with bismuth modification[J]. J Power Sources, 2008, 184(2): 408.
- [9] Sahan H, Goktepe H, Patat S. A novel method to improve the electrochemical performance of LiMn_2O_4 cathode active material by CaCO_3 surface coating[J]. J Mater Sci Technol, 2011, 27(5): 415-420.
- [10] Park S B, Shin H C, Gye W, et al. Improvement of capacity fading resistance of LiMn_2O_4 by amphoteric oxides[J]. J Power Sources, 2008, 180(1): 597-601.
- [11] Lin Y M, Wu H C, Yen Y C, et al. Enhanced high-rate cycling stability of LiMn_2O_4 cathode by ZrO_2 coating for Li-ion battery[J]. J Electrochem Soc, 2005, 152(8): A1526-A1532.
- [12] Zhao G Y, Lin Y B, Zhou T. Enhanced rate and high-temperature performance of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ -coated $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ cathode materials for lithium ion battery[J]. Journal of Power Sources, 2012, 215: 63-68.

收稿日期: 2018-03-14

修稿日期: 2018-04-23