

超声空化场强化甲苯烷基化 反应生成乙苯的研究

魏 威, 谷晓凤, 朱 瑛, 粟 智, 汪 鑫, 冶育芳*
(新疆师范大学化学化工学院, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要:为实现甲苯的低温烷基化反应, 提高乙苯产率, 利用超声空化强化甲苯烷基化反应。首先以单因素实验为基础, 考察了甲苯体积分数、乙醇质量分数对产物分布的影响, 并结合空化产物的分析对反应历程进行了推导; 通过响应面法与单因素实验考察甲苯烷基化生成乙苯的最佳工艺条件为: 甲苯质量分数为 20%、超声功率为 850 W、超声时间为 90 min、pH 为 6。最佳工艺条件下, 乙苯最佳产率为 34%。

关键词:超声空化; 乙苯; 烷基化反应; 反应机理

中图分类号: TQ241.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2021)04-0112-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2021.04.024

Study on synthesis of ethyl benzene from toluene alkylation enhanced by ultrasonic cavitation field

WEI Wei, GU Xiao-feng, ZHU Ying, SU Zhi, WANG Xin, YE Yu-fang*

(School of Chemistry & Chemical Engineering, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

Abstract: Toluene alkylation can be enhanced through ultrasonic cavitation to increase the yield of ethyl benzene under lower temperature. Based on single factor experiment, the impacts of the volumetric fraction of toluene and the mass fraction of ethanol on product distribution are investigated. Combined with analysis on cavitation products, the reaction process is deduced. Response surface method is utilized to obtain the optimal process conditions for the synthesis of ethyl benzene from toluene alkylation as follows: the mass fraction of toluene is 20%, ultrasonic power is 850 W, and the ultrasonic time is 90 min. The optimal yield of ethyl benzene reaches 29.54% under the optimal conditions.

Key words: ultrasonic cavitation; ethyl benzene; alkylation reaction; reaction mechanism

乙苯是合成塑料与橡胶的重要化工原料之一^[1-2]。工业上生产乙苯的工艺都存在反应条件复杂、反应温度及压力较高、能耗较高等问题^[3-10]。超声空化现象是指液体中的微气泡或空泡因为超声波的作用在极小的时间间隔(ms)内形成、生长、随后溃灭的现象。空泡的溃灭瞬间会释放巨大的能量产生局部的高温(高达 10 000 K)、高压(10~500 MPa), 并形成微射流^[11-12]。这些瞬间释放的能量一方面可以打开物质的化学键; 另一方面也可为反应提供相对高温高压的环境。如 Jadhav 等^[13]利用超声空化强化酚醛缩合反应生成酚醛树脂, 与常规的加热制备相比, 既实现了酚醛树脂常温下的制取, 又使其反应时间大幅度减少, 由 5 h 减少到了 30 min; 马晨等^[14]利用超声空化促进月桂氮草酮的合成, 发现超声空化不仅能使反应温度从原本的 110℃ 降到 80℃, 反应时间从 6 h 变为 1.5 h, 而且还能使产品收率从 87% 提高到 89%。

笔者利用超声空化强化甲苯烷基化反应生成乙苯, 采用单因素实验考察不同甲苯质量分数与乙醇质量分数对乙苯及产物分布的影响, 结合产物的分析对实验反应机理进行初步探讨; 在单因素实验的基础上, 用响应面法分析出最佳的反应物体积比、超声功率、超声时间以及最佳反应 pH。

1 实验部分

1.1 实验试剂和仪器

试剂: 甲苯、无水乙醇、苯酚、蒸馏水。

仪器: 超声细胞破碎仪, 宁波新芝生物科技股份有限公司生产; 气相质谱联用仪, 岛津公司生产; 紫外-可见分光光度计, 北京普析通用仪器有限责任公司生产; 电子天平, 上海菁海仪器有限公司生产。

1.2 实验方法

超声空化装置如图 1 所示, 主要由功率为 1 000 W 的换能器和规格为 $\phi 25$ mm 的变幅杆组成。选取甲

收稿日期: 2020-11-30; 修回日期: 2021-02-19

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2018D01B31)

作者简介: 魏威(1995-), 男, 本科, 研究方向为过程强化, 1648182708@qq.com; 冶育芳(1985-), 女, 博士, 讲师, 研究方向为过程强化, 通讯联系人, cynthia_34229636@sina.com。

苯-水体系为反应物,利用超声空化装置,在超声频率 20 kHz 下对不同体积比的甲苯-水溶液进行空化,整个反应过程通过冷水浴控制反应体系温度,使其不高于 55℃,反应体积 100 mL。

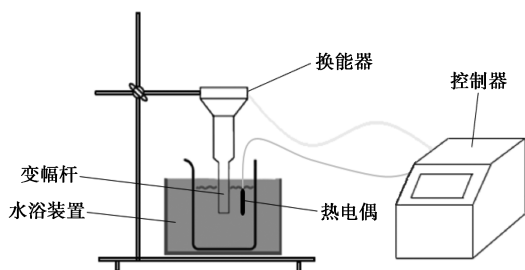


图 1 超声空化装置示意图

反应结束后将产物静置冷却直至分层。上层有机相用气相质谱联用仪分析产物组成及产率。下层水相用紫外-可见分光光度仪全波长扫描并分析产物。

2 结果与讨论

2.1 产物分析及反应历程

甲苯-水空化反应产物上层中几种新物质的气-质联用结果如图 2 中表中数据所示。由表中数据可知,常温下甲苯与水的体系在超声空化作用下生成乙苯和乙基环己烷,说明在该反应过程中,甲苯发生了烷基化反应和加成反应。这是由于空化汽泡溃灭瞬间,释放的高能量使得水发生解离,产生高活性的·H 和·OH^[15-18],也使体系中有机物大分子上的 C—C 键发生断裂,产生如·CH₃、苯自由基等小分子自由基,从而引发一系列的自由基反应^[19]。

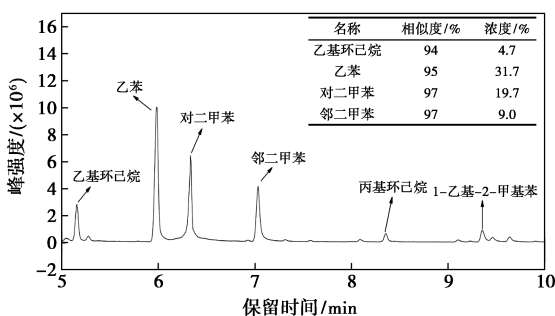
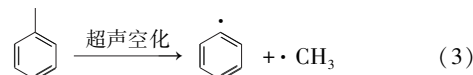
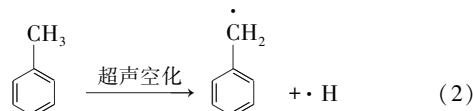
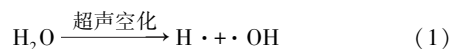


图 2 上层有机相的气相质谱联用仪检测结果

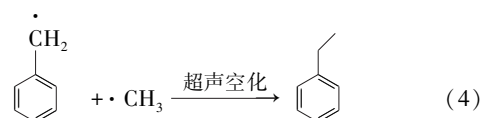
根据图 2 结果,甲苯烷基化反应的历程如下:

首先,在超声空化的作用下水分子发生解离生成·H 和·OH[见式(1)]。甲苯分子脱去 1 个·H 生成亚甲基苯自由基[见式(2)],也可解离生成·CH₃和苯自由基[见式(3)]。其中水分子 H—OH 键的解离能较高,但是其解离生成的·H 和·OH 活性较

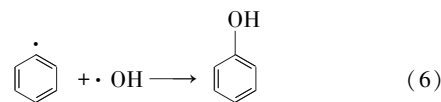
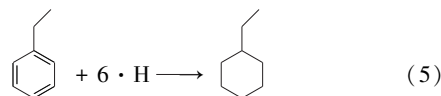
高;甲苯中 C—H 键解离能较低,但是其解离生成的亚甲基苯自由基与·H 活性较低:



其次,游离·CH₃与甲苯发生烷基化反应,生成乙苯:



最后生成的乙基会与·H 加成生成乙基环己烷;苯自由基也会和·OH 加成生成苯酚:



由反应方程式(6)可知,水相产物中应该有苯酚存在。为了更好地验证机理的准确性,对水相中是否有苯酚进行测定,对水相进行了紫外全波长扫描,进行机理验证。配置质量浓度为 80 mg/L 的苯酚标准水溶液,进行紫外全波长扫描。取 10 mL 水相产物,稀释 50 倍,进行紫外全波长扫描,结果如图 3 所示。

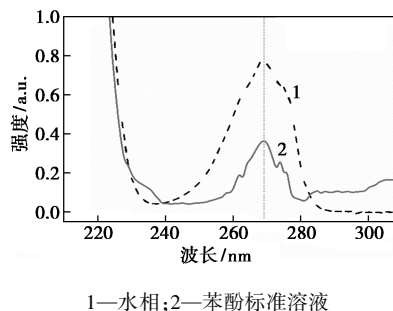


图 3 苯酚标准溶液和试液紫外全波长扫描结果

由图 3 可知,两溶液均在波长 270 nm 处具有最大吸收峰,且曲线形状相似,表明水相中确有苯酚存在。

2.2 单因素实验结果分析

2.2.1 甲苯体积分数对乙苯产率的影响

甲苯在超声空化场中发生烷基化反应,甲苯体积分对乙苯产率的影响如图 4 所示。由图 4 可

知,随着甲苯体积分数的增加,乙基环己烷和乙基苯的产率均呈先增大后减小的趋势,在甲苯体积分数为 12.5% 时,乙基苯与乙基环己烷均得到最大产率,分别为 14% 与 4.9%。结合方程(2)、(3)和(4)可知,甲苯会为乙苯的生成提供反应物,所以在一定范围内增加甲苯的用量可以提高乙苯的产率。当基本体积分数大于 12.5% 时,乙苯产率随着甲苯的体积分数的增加而减小,这是由于甲苯的增加使液体的表面张力、饱和蒸汽压和密度变小,从而影响了反应的空化效果^[19]。在超声空化场作用下,形成的空泡溃灭时产生的能量越高;饱和蒸汽压较大的液体沸点愈低,在相同温度下汽化率愈高,形成的空泡数量较多。因此,水量增加能增强空化强度,有助于增加反应物系中自由基的浓度,而当反应总体积恒定时,体系中的甲苯体积分数增加会导致水量减少,空泡数会减少,空化强度会减弱,显然不利于空化反应的进行。

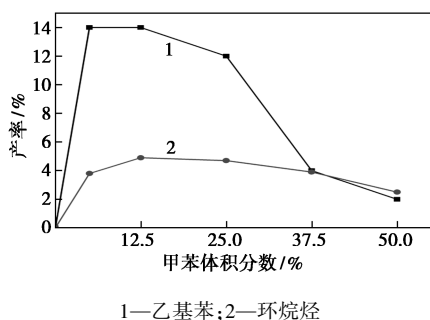


图 4 甲苯体积分数对有机相产物中各组分产率的影响

2.2.2 乙醇质量分数对甲苯超声空化反应的影响

乙醇质量分数对有机相产物中各组分产率的影响如图 5 所示。由图 5 可知,在该实验条件下,随着乙醇质量分数的增加,乙苯与乙基环己烷这 2 种产物的产率呈现出先增加后降低的趋势,在乙醇质量分数为 12.5% 时,乙苯与乙基环己烷最佳产率分别为 28% 与 7.1%,与甲苯-水体系相比,产率得到大幅增加,增加幅度分别为 100% 与 45%。由此表明,提高甲苯与水的互溶度确实影响空化反应效果,增大甲苯与水的互溶度,能提高甲苯的转化率^[20]。当乙醇质量分数大于 12.5% 时,随着乙醇的增加,乙苯与乙基环己烷的产率都呈现出不同程度的降低。这是因为乙醇饱和蒸气压过高,增加乙醇质量分数,导致体系中空泡数量的增多,由于缓冲效应,反而降低了空化的强度,所以加入过量的乙醇降低了空泡破灭的强度,导致乙苯与乙基环己烷的产率降低;另一方面,由方程式(5)可知,水含量的减少会导致体

系·H 自由基浓度的降低,间接导致了乙基环己烷产率的降低。当乙醇质量分数为 87.5% 时,即物料体系不含水,产物中几乎没有乙基环烷烃,这意味着反应(5)游离·H 与乙基苯的加成反应完全被阻断。这显然是由于反应体系中无水存在,无反应(1)发生,体系中无·H 自由基。

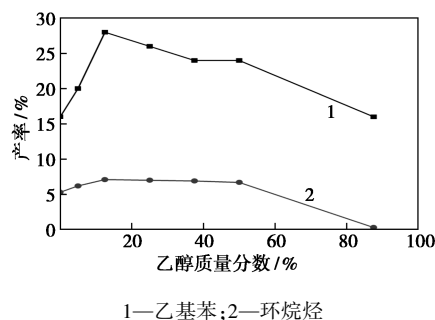


图 5 乙醇质量分数对有机相产物中各组分产率的影响

2.3 响应面实验结果分析

2.3.1 响应面实验因素和水平的选取

以单因素实验为基础,考察甲苯体积分数、超声功率及超声时间这 3 个因素对乙苯产率的影响及各因素之间的交互作用,实验因素及水平如表 1 所示。

表 1 响应面分析因素及水平

因素	水平		
	-1	0	1
功率(A)/W	600	800	1000
时间(B)/min	30	60	90
体积分数(C)/%	12.5	25	37.5

2.3.2 响应面实验设计与结果分析

通过 Design Expert 软件中的 Box-Behnken 方法对功率、时间及体积分数进行实验设计,结果如表 2 所示。

表 2 Box-Behnken 设计方案及响应值结果

实验编号	水平			产率 / %		
	A	B	C	实验值	预测值	差值
1	800	30	12.5	22.23	22.49	-0.260
2	600	60	12.5	21.16	21.02	0.146
3	1000	60	37.5	21.51	21.65	-0.146
4	600	90	25.0	23.11	23.32	-0.210
5	800	90	37.5	25.04	24.78	0.260
6	800	60	25.0	27.98	28.28	-0.300
7	800	60	25.0	28.11	28.28	-0.170
8	1000	60	12.5	23.05	23.00	0.050
9	800	60	25.0	28.20	28.28	-0.080

续表

实验 编号	水平			产率/%		
	A	B	C	实验值	预测值	差值
10	800	60	25.0	28.24	28.28	-0.040
11	800	90	12.5	28.77	28.70	0.070
12	800	30	37.5	23.04	23.11	-0.070
13	800	60	25.0	28.87	28.28	0.590
14	1000	30	25.0	21.87	21.66	0.210
15	1000	90	25.0	25.53	25.64	-0.110
16	600	30	25.0	19.53	19.41	0.120
17	600	60	37.5	19.02	19.07	-0.050

通过对实验数据进行二次拟合,可得到以产率为目标函数回归方程为: $Y=28.28+1.14A+1.97B-0.83C+0.02AB+0.05AC-1.14BC-4.68A^2-1.09B^2-2.42C^2$ 。结果表明,实验值与预测值相差不大,说明此回归方程符合实验真实情况。

对该模型进行方差及显著性分析,结果如表 3 所示。由表 3 中可以看出,模型显著性检验 $P < 0.05$,说明实验模型有统计学意义;失拟项 $F > 0.05$,说明回归方程极显著。 R^2 、 R^2_{Pred} 与 R^2_{Adj} 数值接近,且都约为 1,说明实验模型不需要进一步优化,此回归方程与实验数据拟合度较高; $Std.Dev.$ 与 $C.V.$ 分别为 0.33、1.36,同样说明实验误差较小,此模型和回归方程可以用来预测各因素对乙苯产率的影响。

表 3 响应面模型及其回归系数的方差分析结果

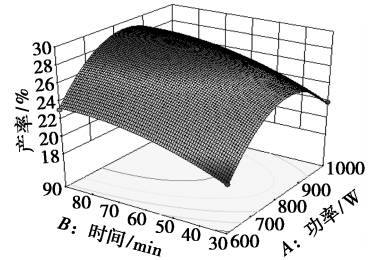
方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	Prob>F	显著性
模型	183.7	9	20.41	184	<0.0001	significant
A	10.44	1	10.44	94.14	<0.0001	
B	31.13	1	31.13	280.6	<0.0001	
C	5.44	1	5.44	49.09	0.0002	
AB	1.60E-03	1	1.60E-03	0.014	0.9078	
AC	0.09	1	0.09	0.81	0.3977	
BC	5.15	1	5.15	46.45	0.0002	
A ²	92.12	1	92.12	830.46	<0.0001	
B ²	5.03	1	5.03	45.3	0.0003	
C ²	24.61	1	24.61	221.83	<0.0001	
残差	0.78	7	0.11			
失拟项	0.3	3	0.1	0.85	0.536	not significant
误差项	0.48	4	0.12			
总误差	184.47	16				
Std. Dev.	0.33					C. V. %
						1.36
R^2	0.9958					
R^2_{Pred}	0.9698					
R^2_{Adj}	0.9904					

对各因素的方差及显著性分析可以看出,因素 A、B、A²、C² 对乙苯产率影响极显著 ($P < 0.0001$),因素 C、BC、B² 对乙苯产率影响显著 ($P < 0.05$);

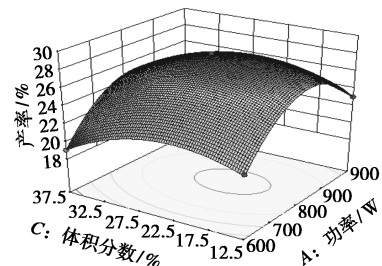
$F(A) = 94.14, F(B) = 280.6, F(C) = 49.09$,所以实验中三因素对于乙苯产率影响程度大小顺序为:时间>功率>体积分数。

2.3.3 响应曲面分析与优化

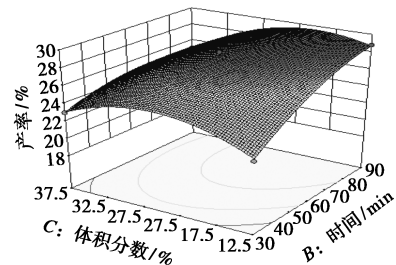
通过回归方程计算两两因素对于乙苯产率的影响,其响应曲面图与等高线图如图 6 所示。



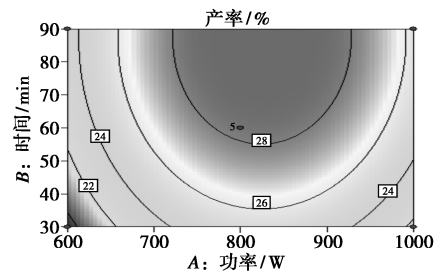
(a) 功率与时间相互作用的响应曲面图



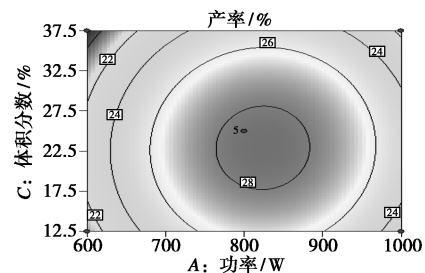
(b) 功率与体积分数相互作用的响应曲面图



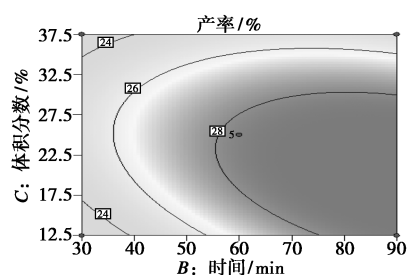
(c) 时间与体积分数相互作用的响应曲面图



(d) 功率与时间对相互作用的等值线图



(e) 功率与体积分数相互作用的等值线图



(f) 时间与体积分数相互作用的等值线图

图 6 各因素交互作用对乙基苯产率的影响

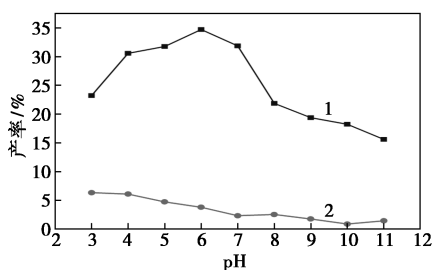
由图 6(e) 可以看出, 此实验拥有最佳功率与体积分数。由图 6(d)、图 6(f) 可以看出, 其等高线图呈半椭圆状, 说明适当增加反应时间可以提高反应产率。

由图 6(d)、图 6(e)、图 6(f) 可知, 两两因素对乙基苯产率的相互作用等高线图为椭圆, 说明各因素之间都具有相互作用; 各因素之间相互作用的显著性强弱顺序可以从图 6(a)、图 6(b)、图 6(c) 相应曲面的陡峭程度中也可以看出, 交互作用强弱顺序为: 时间与体积分数的交互作用最强, 功率与体积分数的交互作用次之, 功率与时间的交互作用最低。

通过回归方程求解出最佳反应条件为: 功率为 850 W、时间为 90 min、体积分数为 20%, 此时乙基苯最佳产率为 29.54%, 因此根据最优条件进行实验, 得到乙基苯产率为 29.87%, 与预测值相近, 进一步说明该试验模型与实验数据具有较高的拟合度。

2.4 pH 对产物中乙基苯浓度的影响

由上述推导分析可知, pH 将显著影响反应产物的选择性。因此, 设计了 pH 在 3.0~11.0 范围内甲苯-水-乙醇体系的超声空化反应过程, 结果如图 7 所示。



1—乙基苯; 2—环烷烃

图 7 pH 对有机相产物中各组分产率的影响

由图 7 可知, pH 在 3.0~6.0 范围内变化时, 生成物中乙基苯产率随 pH 的增大而增大, 产率最大可达到 34%; pH 在 6.0~11.0 范围内, 生成物中乙基苯产率随 pH 的增大而减小, 总体来说, 弱酸性条件下

有利于乙基苯的生成。但是, pH 对乙基环己烷的影响却与乙基苯完全不同, 总体表现为随着溶液酸性的减弱、碱性的增强, 生成物中乙基环己烷的产率逐渐减小。依据反应机理方程式(5), 酸性条件下, 氢离子浓度高, 空化过程中产生的·H 自由基多, 促进反应的进行, 有利于烷基环烷烃的生成, 因此强酸性的条件会导致乙基苯生成乙基环己烷, 生成物中乙基苯浓度降低; 另一方面, 溶液中·OH 过多会导致·OH 自由基本身自猝灭^[21], 不利于自由基反应的进行, 所以在碱性条件下乙基苯与乙基环己烷的浓度都有所下降。

3 结论

(1) 在超声空化场的强化下, 甲苯与水在 50℃ 左右即可反应生成乙基苯和乙基环己烷; 通过单因素实验可知: 在甲苯体积分数为 12.5%、乙醇质量分数为 12.5%、乙基苯产率达到最佳, 为 28%; 根据产物分布与紫外全波长扫描检测, 简单推导了反应历程并证明了反应历程的合理性。

(2) 通过 Design Expert 软件建立实验模型并对各因素进行分析, 模型显著, 可以很好地预测各因素对乙基苯产率的影响; 当功率为 850 W、时间为 90 min、甲苯体积分数为 20% 时, 乙基苯最佳产率为 29.54%。

(3) 通过考察溶液 pH 对产物中乙基苯产率的影响, 进一步的验证了反应机理, pH 对乙基苯产率影响显著。以乙基苯产率为目标, 最佳 pH 为 6, 最佳产率为 34%。

参考文献

- [1] 孙洪敏. 乙基苯生产技术及市场分析[J]. 石油化工技术与经济, 2019, 35(5): 18-23.
- [2] 米多, 姜日元, 王涛. 芳烃产品生产及市场分析[J]. 化学工业, 2019, 37(4): 17-25.
- [3] 李睿, 金月昶, 金熙俊. 乙基苯的生产现状及工艺进展[J]. 当代化工, 2018, 47(5): 1075-1079.
- [4] Yang Weimin, Wang Zhendong, Sun Hongmin. Advances in development and industrial application of ethylbenzene processes[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2016, 37: 16-26.
- [5] Gerzeliev I M, Khadzhiev S N, Sakharova I E. Ethylbenzene synthesis and benzene transalkylation with diethylbenzenes on zeolite catalysts[J]. Petroleum Chemistry, 2011, 51(1): 39-48.
- [6] Arif H, Le Q M, Moonyong L. Intensification of the ethylbenzene production process using a column configured with a side reactor[J]. Chemical Engineering & Processing, 2017, 122: 204-212.

(下转第 121 页)

- [6] Borah P, Ma X, Nguyen T, *et al.* Vanadyl complex grafted to periodic mesoporous Organosilica: A green catalyst for selective hydroxylation of benzene to phenol [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2012, 51: 7756–7761.
- [7] Xu D, Jia L, Guo X. Direct hydroxylation of benzene to phenol over mixed-crystal particles of mesoporous VO_x/TiO_2 catalyst mixed-crystal VO_x/TiO_2 for benzene [J]. *Catalysis Letters*, 2012, 142(10): 1251–1261.
- [8] Jiang T, Wang W, Han B. Catalytic hydroxylation of benzene to phenol with hydrogen peroxide using catalysts based on molecular sieves [J]. *New Journal of Chemistry*, 2013, 37(6): 1654–1664.
- [9] Fenton H. Oxidation of tartaric acid in the presence of iron [J]. *Journal of the Chemical Society*, 1884, 65: 1279–1288.
- [10] Pirutko L, Chernyavsky V, Starokon E, *et al.* The role of α -sites in N_2O decomposition over FeZSM-5 Comparison with the oxidation of benzene to phenol [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2009, 91: 174–179.
- [11] Zhao L, Zhao Y, Zhan X, *et al.* One-pot hydrothermal synthesis of mesoporous V-SBA-16 with a function of the pH of the initial Gel and its improved catalytic performance for benzene hydroxylation [J]. *Catalysis Letters*, 2012, 142: 619–626.
- [12] Li M, Jian X, Han T, *et al.* Reaction-controlled phase-transfer catalyst $\text{K}_3\text{PV}_4\text{O}_{24}$ for synthesis of phenol from benzene [J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2004, 25(9): 681–682.
- [13] Xu J, Liu H, Yang R, *et al.* Hydroxylation of benzene by activated carbon catalyst [J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2012, 33: 1622–1630.
- [14] Zhao P, Zhang Y, Li D, *et al.* Mesoporous polyoxometalate-based ionic hybrid as a highly effective heterogeneous catalyst for direct hydroxylation of benzene to phenol [J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2018, 39: 334–341.
- [15] 王旺, 王建波, 王秀云, 等. 微波辅助 $\text{V}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 催化剂催化苯羟基化制备苯酚反应 [J]. *化工技术与开发*, 2018, 47: 11–14.
- [16] 刘青青, 郎春燕, 黄军左, 等. 类水滑石的制备及其焙烧产物催化苯制苯酚 [J]. *工业催化*, 2012, 20: 60–63.
- [17] 王晓, 张天永, 姜爽, 等. 含铁催化剂催化苯直接羟基化制备苯酚的研究进展 [J]. *化工进展*, 2015, 34: 381–388.
- [18] Wang X, Tan X, Meng B, *et al.* One-step hydroxylation of benzene to phenol *via* a Pd capillary membrane microreactor [J]. *Catalysis Science & Technology*, 2013, 3: 2380–2391.
- [19] Fujishima A, Honda K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode [J]. *Nature*, 1972, 238: 37–38.
- [20] 王旭, 萨嘎拉, 照日格图. 光催化苯羟基化制苯酚研究进展 [J]. *工业催化*, 2015, 23: 251–257.
- [21] 党伟荣, 陈西波, 白晨龙. 电化学合成技术在精细化工绿色化的作用 [J]. *化工管理*, 2019, 24: 172–173.
- [22] Hu Y, Tang W, Yu Q, *et al.* In situ electrochemical synthesis of novel lithium-rich organic cathodes for all-organic cathodes for all-organic Li-ion full batteries [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11: 32987–32993.
- [23] Mi D, Gao X, Wang S, *et al.* 67th ASMS conference on mass spectrometry and allied topics [C]. San Diego, California, United States, 2018.
- [24] Christina W, Jim C, Matthew W. Electroreduction of carbon monoxide to liquid fuel on oxide-derived nanocrystalline copper [J]. *Nature*, 2014, 508: 504–507. ■
-
- (上接第 116 页)
- [7] Liu Shenglin, Chen Fucun, Xie Sujuan, *et al.* Highly selective ethylbenzene production through alkylation of dilute ethylene with gas phase-liquid phase benzene and transalkylation feed [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2009, 18(1): 21–24.
- [8] Junqueira P G, Caxiano I N, Mangili P V, *et al.* Environoeconomic analysis of conceptual intensification alternatives applied to the ethylbenzene production [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2020, 136: 106783.1–106783.15.
- [9] 孙新德, 郭志军, 李宏冰, 等. 乙苯合成催化剂及工艺研究进展 [J]. *天然气化工 (C1 化学与化工)*, 2005, 30(3): 48–53.
- [10] 王兰海, 韩金玉, 王小为. 乙苯合成生产工艺及技术研究进展 [J]. *甘肃科技*, 2006, 22(2): 108–112.
- [11] Yi Chunhai, Lu Qianqian, Wang Yun, *et al.* Degradation of organic wastewater by hydrodynamic cavitation combined with acoustic cavitation [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 43: 156–165.
- [12] Merouani S, Hamdaoui O, Boumediene H. Acoustic cavitation in 1-butyl-3-methylimidazolium bis (trifluoromethyl-sulfonyl) imide based ionic liquid [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 41: 143–155.
- [13] Jadhav N L, Sastry S K C, Pinjari D V. Energy efficient room temperature synthesis of cardanol-based Novolac Resin using acoustic cavitation [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 42: 532–540.
- [14] 马晨, 孙昌俊, 郝爱友, 等. $\text{KF-Al}_2\text{O}_3$ 催化合成皮肤促进剂月桂氮革酮的新方法 [J]. *化学研究与应用*, 1998, (6): 53–55.
- [15] 王永杰, 晋日亚, 孔维甸, 等. 文丘里管与孔板组合降解苯酚废水研究 [J]. *现代化工*, 2017, 37(4): 160–163.
- [16] 张波, 沈立, 龚文娟. H_2O_2 强化水力空化降解罗丹明 B 废水 [J]. *环境工程学报*, 2015, 9(11): 5364–5368.
- [17] Mosleh S, Reza Rahimi M. Intensification of Abamectin pesticide degradation using the combination of ultrasonic cavitation and visible-light driven photo-catalytic process: synergistic effect and optimization study [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 35: 449–457.
- [18] 梁雅琼, 马凤云, 冶育芳, 等. 水力空化场对水解离过程中羟基自由基的影响 [J]. *现代化工*, 2018, 38(5): 104–108.
- [19] Gogate P R, Pandit A B. Hydrodynamic cavitation reactors: A state of the art review [J]. *Reviews in Chemical Engineering*, 2001, 17(1): 1–85.
- [20] Liu Jingmei, Ma Fengyun, Zhu Yonghui, *et al.* Hydrodynamic cavitation for the enhancement of toluene disproportionation; study of the products distribution [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2018, 125: 34–43.
- [21] Bagal M V, Gogate P R. Wastewater treatment using hybrid treatment schemes based on cavitation and Fenton chemistry: A review [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2014, 21(1): 1–14. ■