

室温磺酸催化多聚甲醛合成双酚 F 的研究

陆雨虹, 蒋 炜, 刘长军, 李子元*
(四川大学化学工程学院, 四川 成都 610207)

摘要:为提升 4,4'-双酚 F 的选择性,采用磺酸作为催化剂、多聚甲醛为甲醛源,在较低温度下的有机溶剂中开展了双酚 F 合成研究,考察了磺酸种类、溶剂种类、反应温度、酚醛比、酸醛比、溶剂量、反应时间对合成反应的影响。结果表明,在以三氟甲烷磺酸为催化剂、以异丙醚作溶剂、反应温度 25℃、酚醛比 10:1、酸醛比 0.1:1、溶剂量 5 mL、反应时间 24 h 的最佳反应条件下,双酚 F 收率为 86.31%,4,4'-双酚 F 选择性可达 60.12%,4,4'-双酚 F 收率为 51.89%。

关键词:双酚 F;磺酸;多聚甲醛;异构体;选择性

中图分类号:TQ421

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S1-0095-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.017

Research on the synthesis of bisphenol F from paraformaldehyde through sulfonic acid catalysis at room temperature

LU Yu-hong, JIANG Wei, LIU Chang-jun, LI Zi-yuan*

(School of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610207, China)

Abstract:To improve the selectivity of 4,4'-bisphenol F, a study on the synthesis of bisphenol F was conducted in an organic solvent at a relatively low temperature, using sulfonic acid as the catalyst and paraformaldehyde as the formaldehyde source. The effects of sulfonic acid type, solvent type, reaction temperature, phenol-to-formaldehyde molar ratio, acid-to-formaldehyde molar ratio, solvent dosage and reaction time on the synthetic reaction were investigated. The results indicated that under the optimal reaction conditions—trifluoromethanesulfonic acid as the catalyst, isopropyl ether as the solvent, reaction temperature of 25℃, phenol-to-formaldehyde molar ratio of 10:1, acid-to-formaldehyde molar ratio of 0.1:1, solvent dosage of 5 mL and reaction time of 24 h—the yield of bisphenol F reached 86.31%, the selectivity of 4,4'-bisphenol F could reach 60.12%, and the yield of 4,4'-bisphenol F was 51.89%.

Key words:bisphenol F; sulfonic acid; paraformaldehyde; isomer; selectivity

双酚 F (bisphenol F, BPF) 是一种双酚系化合物,由苯酚与甲醛在酸催化下缩合而成的二羟基二苯基甲烷类化合物。由于它的分子结构中连接两个苯酚基的亚甲基具有较大旋转性,这一特性使得以双酚 F 为原料制备的高分子材料具备独特优势^[1]。合成的环氧树脂黏度远低于双酚 A 环氧树脂,可减少甚至无需添加有毒活性稀释剂,适用于常温施工的建筑防腐蚀、大型风电叶片加工成型等场景,同时还能改善酚醛树脂的加工性能、力学性能与电性能^[2]。双酚 F 具有 3 种同分异构体:4,4'、2,4'和 2,2'-双酚 F,其中性能最佳的是 4,4'-双酚 F^[3],合成的树脂耐热性更好^[4]、力学性能更优异^[5]。

合成双酚 F 反应为亲电取代反应,从反应机理^[6]得知亲电试剂不仅可以进攻苯酚的对位,也有可能进攻苯酚中电荷密度较大的邻位。另外,在双酚 F 的合成过程中,苯酚和甲醛在酸性体系下也可以发生缩聚反应,显示很强的缩聚反应的倾向,可生成类似于 Novolak 型酚醛树脂的低聚物^[7]。因

此在双酚 F 合成反应中,整个反应过程不易控制,会产生副产物(多酚)的同时,还难以调控 3 种异构体比例。目前,双酚 F 的合成工艺方法主要采用苯酚与甲醛在酸催化下的羟烷基化反应,常用的催化剂有无机酸^[8](包括磷酸、盐酸、硫酸等),有机酸^[9](包括甲酸、苯甲酸、草酸等),卤化物^[10](包括 KX、NaX、CaX₂ 等),以及固体酸^[11](分子筛、杂多酸和固体超强酸等)。其中,磷酸法技术最成熟,应用最广泛。综合国内外磷酸法工艺,双酚 F 收率在 60%~90%,主要异构体是 2,4'-双酚 F,而性能最佳的 4,4'-双酚 F 收率仅为 23%~40%^[12]。

近年来研究者尝试多种策略来优化提高双酚 F 收率和 4,4'-双酚 F 选择性。首先,国内沈阳化工研究所^[13]研发了两步法合成双酚 F 工艺路线,大大降低了生产成本,双酚 F 收率为 60%~80%,其中 4,4'异构体的含量高达 60%~80%。其次,可以通过调控反应条件来抑制副反应和促进双酚 F 的生成,如严格控制温度、增大酚醛比^[14]和降低甲醛滴

收稿日期:2026-01-08;修回日期:2026-03-09

作者简介:陆雨虹(1998-),男,硕士生,研究方向为高分子化合物的单体合成工艺研究,luyhscu@163.com;李子元(1984-),男,博士,副教授,研究方向为精细化工与制药化工,通讯联系人,liziyuan@scu.edu.cn。

加速率^[15]。同时,开发新型固体酸催化剂来改变反应活性,如多孔全氟磺酸树脂^[16]、磷钨酸负载金属有机框架^[17]、Zr-Ce-SBA-15 固载酸性离子液体^[18]、双金属掺杂 SBA-15^[19],提高催化剂的活性,促进双酚 F 的合成,还可以调节邻位和对位电子重排,有利 4,4'-双酚 F 的生成。然后,部分研究还提出了采用甲醛缓释源,如多聚甲醛^[20]和多聚甲醛二甲基醚^[21],降低体系甲醛含量,减少副产物生成,从而实现高选择性合成双酚 F。另外,通过研究发现在双酚 F 合成反应 3 种异构体的生成中^[22],4,4'-双酚 F 生成速率先快后慢,受动力学控制,2,4'和 2,2'-双酚 F 生成速率先慢后快,受热力学控制。再结合本课题组之前的研究^[23],磺酸和有机溶剂由于氢键作用形成大位阻中间体,增大了苯酚邻位进攻难度,有利于生成对位产物。

因此,为提升双酚 F 合成反应中 4,4'-双酚 F 的选择性,本文采用磺酸作为催化剂,多聚甲醛作为甲醛源,在有机溶剂中较低温度下合成双酚 F。采用单因素法筛选了磺酸种类、溶剂种类、反应温度,并通过正交实验优化了酚醛比($n_{\text{苯酚}}/n_{\text{多聚甲醛}}$)、酸醛比($n_{\text{磺酸}}/n_{\text{多聚甲醛}}$)、溶剂量、反应时间 4 个反应条件,得到了一条双酚 F 收率和 4,4'-双酚 F 选择性都较高的工艺路线。

1 实验部分

1.1 试剂

苯酚(99%)、多聚甲醛(95%)、4,4'-双酚 F(98%)、2,4'-双酚 F(98%)、2,2'-双酚 F(98%)、对甲苯磺酸一水合物(99%)、2,5-二甲基苯磺酸(98%)、间二甲苯-4-磺酸水合物(95%)、1-萘磺酸(98%)、2-萘磺酸水合物(98%)、甲烷磺酸(99%)、三氟甲烷磺酸(99%)、1,4-二氧六环(99.5%)、四氢呋喃(99.5%)、甲基叔丁基醚(99%)、异丙醚(99.5%)、正丁醚(99%)、四氯化碳(99.5%)、二硫化碳(99%)、甲苯(99.5%)、1,2-二氯乙烷(99.5%)。

1.2 仪器

梅特勒-托利多 MA204/A 型电子天平,予华 ZNCL-G 型恒温磁力搅拌器,岛津 Essentia LC-16 型系列液相色谱仪。

1.3 双酚 F 测定

采用液相色谱仪外标法测定双酚 F 含量,色谱条件为^[24]:色谱柱为岛津 Shim-pack GIST C18-AQ 型(4.6 mm×250 mm,5 μm);柱温 30℃;紫外检测器波长 270 nm;流动相为 V(甲醇):V(水)=65:35,

使用前超声处理 30 min;流速 0.8 mL/min;进样量 10 μL;检测时间 20 min。

1.4 双酚 F 合成

先将一定量的苯酚和有机溶剂加入至配有冷凝回流管和水银温度计的三口烧瓶中,然后加入一定量的磺酸,搅拌混合均匀后,再一次性加入 5 mmol 多聚甲醛粉末,恒温回流反应。反应完成后定容取样,用液相色谱对双酚 F 收率(Y_{BPF} ,以甲醛计)和 4,4'-双酚 F 选择性($S_{4,4'-\text{BPF}}$)进行定量分析,计算公式如下。

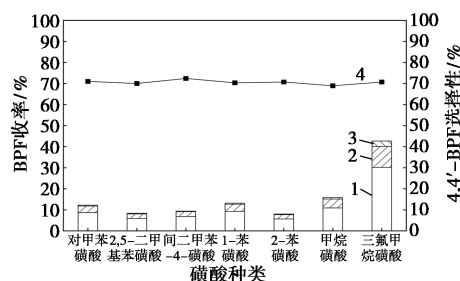
$$Y_{\text{BPF}} = [n(\text{BPF 实际生成量}) / n(\text{BPF 理论生成量})] \times 100\% \quad (1)$$

$$S_{4,4'-\text{BPF}} = [n(4,4' - \text{BPF 实际生成量}) / n(\text{BPF 实际生成量})] \times 100\% \quad (2)$$

2 结果与讨论

2.1 磺酸种类的影响

为考察不同磺酸对双酚 F 收率及 4,4'-双酚 F 选择性的影响,以异丙醚作溶剂、反应温度 25℃、5 mmol 多聚甲醛、酚醛比 8:1、酸醛比 0.01:1、溶剂量 10 mL、反应时间 24 h 为反应条件,筛选了以下 7 种磺酸:对甲苯磺酸、2,5-二甲基苯磺酸、间二甲苯-4-磺酸、1-萘磺酸、2-萘磺酸、甲烷磺酸、三氟甲烷磺酸,结果如图 1 所示。7 种磺酸催化下的 4,4'-双酚 F 选择性没有明显差异,都集中在 70% 左右,但是三氟甲烷磺酸催化下的双酚 F 收率十分显著,最高为 42.67%,而其他 6 种磺酸催化下的双酚 F 收率仅为 10%~20%。这是因为三氟甲烷磺酸的酸性最强,在有机体系中催化反应活性最高,双酚 F 的生成速率最快。且有研究表明^[25]催化剂酸性有利于对位反应,碱性有利于邻位反应。所以最佳磺酸选定为三氟甲烷磺酸。



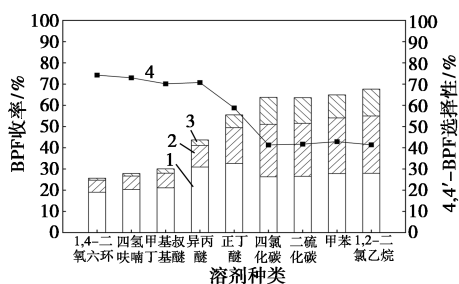
1—4,4'-BPF 收率;2—2,4'-BPF 收率;3—2,2'-BPF 收率;
4—4,4'-BPF 选择性

图 1 磺酸种类的影响

2.2 溶剂种类的影响

为考察不同有机溶剂对双酚 F 收率及 4,4'-双

酚F选择性的影响,以三氟甲烷磺酸作催化剂、反应温度 25℃、5 mmol 多聚甲醛、酚醛比 8:1、酸醛比 0.01:1、溶剂量 10 mL、反应时间 24 h 为反应条件,筛选了如下 9 种有机溶剂:1,4-二氧六环、四氢呋喃、甲基叔丁基醚、异丙醚、正丁醚、四氯化碳、二硫化碳、甲苯、1,2-二氯乙烷,结果如图 2 所示。9 种有机溶剂的双酚 F 收率和 4,4'-双酚 F 选择性都有着显著区别。其中,非醚类溶剂的双酚 F 收率都较好,集中在 65%~70%,但是 4,4'-双酚 F 选择性都较差,仅集中在 40%~45%。而醚类溶剂的 4,4'-双酚 F 选择性都较好,集中在 60%~75%,但是双酚 F 收率却有着较大差异。当异丙醚作为溶剂时,双酚 F 收率为 42.67%,4,4'-双酚 F 选择性为 70.72%,收率和选择性综合较优。这是因为有机体系中,醚类溶剂与磺酸由于氢键作用形成了大位阻中间体^[24],增大了苯酚邻位进攻难度,抑制了邻位产物的生成,有利于对位产物的生成,从而提高了 4,4'-双酚 F 选择性。所以最佳反应溶剂选定为异丙醚。



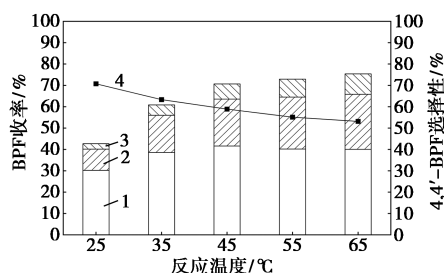
1—4,4'-BPF 收率;2—2,4'-BPF 收率;3—2,2'-BPF 收率;
4—4,4'-BPF 选择性

图2 溶剂种类的影响

2.3 反应温度的影响

为考察不同反应温度对双酚 F 收率及 4,4'-双酚 F 选择性的影响,以三氟甲烷磺酸为催化剂、异丙醚作溶剂、5 mmol 多聚甲醛、酚醛比 8:1、酸醛比 0.01:1、溶剂量 10 mL、反应时间 24 h 为反应条件,进行了如下 5 个反应温度的实验:25、35、45、55、65℃,结果如图 3 所示。随着反应温度的升高,双酚 F 收率逐渐提高,从 42.67% 升高至 75.37%,但是 4,4'-双酚 F 收率基本无变化,2,4' 和 2,2'-双酚 F 的收率和占比却在逐渐增大,4,4'-双酚 F 选择性逐渐降低,从 70.72% 降低至 54.01%。这是因为 2,4' 和 2,2'-双酚 F 是热力学产物,4,4'-双酚 F 是动力学产物,升高温度同时提高了苯酚邻位和对位的反应活性,而邻位位点数又大于对位,此时进攻苯酚邻位的概率变大,更有利于生成邻位产物,从而导致

4,4'-双酚 F 选择性降低。所以最佳反应温度选定为 25℃。



1—4,4'-BPF 收率;2—2,4'-BPF 收率;3—2,2'-BPF 收率;
4—4,4'-BPF 选择性

图3 反应温度的影响

2.4 酚醛比、酸醛比、溶剂量、反应时间的影响

通过上述实验,确定了最佳磺酸催化剂、有机溶剂和反应温度后,还需考察酚醛比、酸醛比、溶剂量和反应时间 4 个因素对双酚 F 收率和 4,4'-双酚 F 选择性的影响。而正交实验法利用正交表安排和分析多因素试验,适用于多因素多水平优化问题,其通过科学选取代表性试验方案,能以较少试验次数获取有效数据,具有效率高、操作简便的特点。因此,以三氟甲烷磺酸催化剂、异丙醚溶剂、反应温度 25℃、5 mmol 多聚甲醛为反应条件,对酚醛比(A)、酸醛比(B)、溶剂量(C)、反应时间(D)作 4 因素 3 水平的正交实验设计,正交实验因素与水平如表 1 所示。

表1 正交实验因素与水平

水平	因素			
	酚醛比(A)	酸醛比(B)	溶剂量(C)/mL	反应时间(D)/h
1	6:1	0.01:1	5	12
2	8:1	0.05:1	10	24
3	10:1	0.1:1	15	36

根据 $L_9(3^4)$ 正交实验正交表,对上述 4 个因素和各自 3 个水平设计了 9 组实验,以双酚 F 的收率 (Y_{BPF})、4,4'-双酚 F 选择性 ($S_{4,4'-BPF}$) 和 4,4'-双酚 F 收率 ($Y_{4,4'-BPF}$) 作为评价指标,正交实验设计与结果如表 2 所示。

表2 正交实验设计与结果

序号	A	B	C	D	$Y_{BPF}/\%$	$S_{4,4'-BPF}/\%$	$Y_{4,4'-BPF}/\%$
1 [#]	1	1	1	1	41.51	69.31	28.77
2 [#]	1	2	2	2	47.63	68.09	32.43
3 [#]	1	3	3	3	48.64	65.36	31.79
4 [#]	2	1	2	3	50.13	70.86	35.52

续表

序号	A	B	C	D	$Y_{\text{BPF}}/\%$	$S_{4,4'\text{-BPF}}/\%$	$Y_{4,4'\text{-BPF}}/\%$
5 [#]	2	2	3	1	50.24	71.66	36.00
6 [#]	2	3	1	2	69.89	58.44	40.84
7 [#]	3	1	3	2	52.45	75.68	39.69
8 [#]	3	2	1	3	74.49	58.95	43.91
9 [#]	3	3	2	1	72.10	62.76	45.25

通过以下参数和统计量评估因素对响应变量的影响。 k 值为每个因素各水平响应的平均值,通常表示该因素在不同水平下的响应值。 R 值为每个因素各水平 k 值中最大值与最小值的差值,反映了因素变化对响应变量的影响程度。正交实验双酚 F 收率、4,4'-双酚 F 选择性和 4,4'-双酚 F 收率的结果分析分别如表 3、表 4 和表 5 所示。

表 3 正交实验双酚 F 收率结果分析

项	A	B	C	D
k_1	45.93	48.03	61.96	54.62
k_2	56.75	57.45	56.62	56.66
k_3	66.35	63.54	50.44	57.75
极差 R	20.42	15.51	11.52	3.14
最佳水平	A3	B3	C1	D3
主次因素	A>B>C>D			

由表 3 分析可知,各因素对双酚 F 收率的显著性顺序为:酚醛比(A)>溶剂比(C)>酸醛比(B)>反应时间(D),最佳水平组合为 10[#](A₃B₃C₁D₃)。以 10[#]水平组合的反应条件进行实验,得到双酚 F 收率为 86.33%,4,4'-双酚 F 选择性为 56.02%。这是因为提高酚醛比,增大了反应物苯酚的量,使甲醛更容易与苯酚接触反应,抑制了甲醛与双酚 F 进一步反应生成副产物。提高酸醛比,增大了催化剂的量,加快了催化反应速率。延长反应时间,使双酚 F 合成反应更加彻底。而减小溶剂比,增大了体系中反应物和催化剂的浓度,加快了反应速率。

表 4 正交实验 4,4'-双酚 F 选择性结果分析

项	A	B	C	D
k_1	67.59	71.95	62.23	67.91
k_2	66.99	66.23	67.24	67.40
k_3	65.80	62.19	70.90	65.06
极差 R	1.79	9.76	8.67	2.85
最佳水平	A ₁	B ₁	C ₃	D ₁
主次因素	B>C>D>A			

由表 4 分析可知,各因素对 4,4'-双酚 F 选择性的显著性顺序为:溶剂比(C)>酸醛比(B)>反应时间(D)>酚醛比(A),最佳水平组合为 11[#](A₁B₁C₃D₁)。以 11[#]水平组合的反应条件进行实验,得到 4,4'-双酚 F 选择性为 80.23%,但双酚 F 收率仅为 30.45%。这是因为低酚醛比、低酸醛比、高溶剂比、较短反应时间情况下,反应物质和催化剂浓度较低,反应速率较慢且反应时间较短,整个反应过程处于初期阶段,此时动力学产物 4,4'-双酚 F 生成快,而其他热力学产物生成慢,所以双酚 F 收率较低,4,4'-双酚 F 选择性较高^[17]。

表 5 正交实验 4,4'-双酚 F 收率结果分析

项	A	B	C	D
k_1	31.00	34.66	37.84	36.67
k_2	37.45	37.45	37.73	37.66
k_3	42.95	39.29	35.83	37.07
极差 R	11.96	4.63	2.01	0.98
最佳水平	A ₃	B ₃	C ₁	D ₂
主次因素	A>B>C>D			

由表 5 分析可知,各因素对 4,4'-双酚 F 收率的显著性顺序为:酚醛比(A)>酸醛比(B)>溶剂比(C)>反应时间(D),最佳水平组合为 12[#](A₃B₃C₁D₂)。以 12[#]水平组合的反应条件进行实验,得到双酚 F 收率为 85.85%,4,4'-双酚 F 选择性为 60.15%,4,4'-双酚 F 收率为 51.64%。在高酚醛比、高酸醛比、低溶剂比的反应条件下,双酚 F 合成反应速率最快,较高双酚 F 收率的同时对位选择性也较高,所以 4,4'-双酚 F 收率也较高。而反应时间从 12 h 到 36 h,4,4'-双酚 F 收率先增大后减小,最佳反应时间为 24 h,此时 4,4'-双酚 F 生成已经达到了接近平衡的状态,继续延长反应时间会使甲醛和 4,4'-双酚 F 反应生成副产物。

2.5 验证实验

根据以上正交实验结果分析,双酚 F 收率和 4,4'-双酚 F 选择性都较高的水平组合为 12[#](A₃B₃C₁D₂),再开展 3 组平行实验进行验证,结果如表 6 所示。由表可得,该水平组合下的双酚 F 收率、4,4'-双酚 F 选择性和 4,4'-双酚 F 收率的 RSD 值都<1%,正交实验优化的反应条件结果稳定可行,且实验结果优于正交实验表所有组别。因此,合成 4,4'-双酚 F 的最佳反应条件为:酚醛比 10:1、酸醛比 0.1:1、溶剂比 5 mL、反应时间 24 h,最佳实验结果为:双酚 F 收率 86.31%、4,4'-双酚 F 选择性

60.12%、4,4'-双酚F收率51.89%。

表6 最佳水平组合验证

序号	$Y_{\text{BPF}}/\%$	$S_{4,4'\text{-BPF}}/\%$	$Y_{4,4'\text{-BPF}}/\%$
12 [#]	85.85	60.15	51.64
12 ¹	86.31	60.12	51.89
12 ²	85.65	60.23	51.59
12 ³	86.22	60.03	51.76
平均值	86.01	60.13	51.72
RSD/%	0.36	0.14	0.26

3 结论

本文对磺酸催化下的双酚F合成反应进行了研究,采用单因素法确定了最佳磺酸催化剂为三氟甲烷磺酸、最佳有机溶剂为异丙醚、最佳反应温度为25℃。再通过正交实验对酚醛比、酸醛比、溶剂量、反应时间4个条件进行优化和验证,得到合成4,4'-双酚F的最佳反应条件为:酚醛比10:1、酸醛比0.1:1、溶剂量5 mL、反应时间24 h。该反应条件下的最佳实验结果为:双酚F收率86.31%,4,4'-双酚F选择性60.12%,4,4'-双酚F收率51.89%。相比现有方法,在磺酸催化下,以多聚甲醛作为甲醛源,4,4'-双酚F的选择性显著提高,反应条件更加温和,为开发4,4'-双酚F高选择性合成工艺提供了一种思路。

参考文献

- [1] 张在利,刘守贵,王家贵,等.双酚系化合物及其环氧树脂的合成和性能综述(上)[J].化工新型材料,2004(5):44-47.
- [2] 李志宏,盘毅,谢凯.双酚F/间苯二酚共聚型环氧树脂[J].热固性树脂,2005(1):15-17,27.
- [3] Kuratomi L, Kenichiro A. Method for producing 4,4'-bisphenol F of high purity and bisphenol F of general-purpose purity simultaneously: JP 2006257026A [P]. 2006-09-28.
- [4] 邓玉媛,霍稳周,李花伊,等.同分异构体对双酚F环氧及其固化物性能的影响[J].热固性树脂,2017,32(4):1-5.
- [5] 陈立新,曹魏,宋家乐,等.双酚F中同分异构体的比例对合成环氧化物性能的影响[J].材料工程,2007(S1):184-187.
- [6] 盘毅,胡芸,宁威.二酚基甲烷的合成与表征[J].国防科技大学学报,2005,27(2):15-19.
- [7] Robert G, Michel F. Solid bisphenol F particulates: US 4338470 [P]. 1982-07-06.
- [8] 马怡.双酚酸及其衍生物的合成工艺研究[D].郑州:郑州大学,2008.
- [9] 王庆,刘杰,吴志民,等.Brønsted酸性离子液体催化苯酚羟烷基化反应合成双酚F[J].高校化学工程学报,2014,28(4):758-763.
- [10] 夏迪,李勇飞,董劲,等.H₃PO₄协同AlCl₃改性无序介孔羟基磷灰石催化合成双酚F[J].石油学报(石油加工),2016,32(1):64-72.
- [11] 任蕊,皇甫慧君,杨金明,等.双酚F的合成方法及其应用研究[J].应用化工,2018,47(4):780-784,788.
- [12] 陈燕霞.双酚F合成工艺的研究[D].上海:上海应用技术大学,2022.
- [13] 张宏涛,吴虹,唐齐超.双酚F的合成及其应用研究综述[J].热固性树脂,1996(4):43-45.
- [14] 邓玉媛,乔凯,霍稳周,等.双酚F合成体系热力学和动力学分析[J].化学工程,2017,45(3):46-51.
- [15] Garade A C, Kshirsagar V S, Rode C V. Selective hydroxyalkylation of phenol to bisphenol F over dodecatungstophosphoric acid (DTP) impregnated on fumed silica [J]. Applied Catalysis A: General, 2009, 354(1/2): 176-182.
- [16] 蒲杨,朱晔,吴中,等.多孔全氟磺酸树脂催化合成双酚F[J].现代化工,2025,45(11):172-177,183.
- [17] 严家其,谈瑛,李勇飞,等.金属有机框架MIL-100(Cr)和MIL-101(Cr)负载磷钨酸催化合成双酚F[J].化工学报,2015,66(2):576-583.
- [18] 刘宁,王丹凤,伍素云,等.短孔道介孔分子筛Zr-Ce-SBA-15固载酸性离子液体催化合成双酚F[J].应用化学,2020,37(9):1038-1047.
- [19] 谈瑛,李崇裔,余小光,等.双金属掺杂SBA-15催化合成双酚F及其同分异构体调控[J].无机盐工业,2023,55(11):147-152.
- [20] 涂亚辉,赵超敏,徐仲杰.稳定同位素标记双酚F-D₈的合成研究[J].化学试剂,2020,42(10):1251-1254.
- [21] 王辉,朱健,沈俭一.多聚甲醛二甲基醚在双酚F合成中的应用[J].精细化工,2016,33(1):86-91.
- [22] Jana S, Kugita T, Namba S. Bisphenol F synthesis over mesoporous aluminosilicate MCM-41 molecular sieves [J]. Catalysis Letters, 2003, 90(3/4): 143-147.
- [23] Zhuang D L. Three-component formal metathesis via remote activating strategy enabled (RASE) domino activation of two C(sp³)-O bonds in alkyl ethers [J]. Organic Chemistry Frontiers, 2024, 11: 4138-4148.
- [24] 张文雯,何明阳,陈群.高效液相色谱法测定双酚F反应液中4,4'-二羟基二苯基甲烷的含量[J].化学工程师,2005(12):27-28,64.
- [25] 陈优.催化剂的酸碱性对双酚F催化合成的影响研究[D].长沙:湖南大学,2018. ■

欢迎订阅《现代化工》杂志,邮发代号82—67。