甲醛羰基化制备乙醇酸的研究

李志飞[1,2],李俊诚[1,2*],杨 鹏[1,2],武靖为[1,2],张 越[1,2],郭轩亨[1,2]
(1.内蒙古伊泰集团有限公司,内蒙古 鄂尔多斯 017010;
2.内蒙古自治区煤基新材料重点实验室,内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要:随着石油基塑料废弃物问题日益突出,开发可生物降解材料成为迫切需求。乙醇酸(GA)作为聚乙醇酸(PGA)单体,对其高效合成具有重要意义。以甲醛和一氧化碳为原料,围绕甲醛羰基化合成乙醇酸甲酯(MG)及MG水解制备GA两个关键步骤展开。在羰基化阶段,通过$AlCl_3$改性Amberlyst-15催化剂,在0.1 mol/L负载浓度下使MG收率达到63.42%,但甲醛转化率未显著提高。水解阶段筛选发现Amberlyst系列树脂具有优异性能,其中Amberlyst 36催化下GA收率达92.6%。采用低成本强酸性阳离子树脂001*7进一步优化水解工艺,在酯水物质的量比1∶25、催化剂质量分数6.90%、85℃、7 h条件下,GA收率达86.8%,MG转化率为93.1%。研究表明,001*7树脂水解性能与Amberlyst系列相当且成本优势显著,为甲醛羰基化法制备乙醇酸的工业化提供了可行的技术参考。

关键词:甲醛羰基化;乙醇酸甲酯;乙醇酸;催化剂;水解
中图分类号:TQ225 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-4320(2026)11-0171-06
DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.11.028

Research on the preparation of glycolic acid via formaldehyde carbonylation

LI Zhi-fei[1,2], *LI Jun-cheng*[1,2*], *YANG Peng*[1,2], *WU Jing-wei*[1,2], *ZHANG Yue*[1,2], *GUO Xuan-heng*[1,2]
(1.Inner Mongolia Yitai Group Co., Ltd., Ordos 017010, China;
2.Inner Mongolia Enterprise Key Laboratory of Coal-based New Materials, Ordos 017000, China)

Abstract: With the increasing severity of petroleum-based plastic waste issues, the development of biodegradable materials has become an urgent need. Glycolic acid (GA), as the monomer of polyglycolic acid (PGA), is of great significance for its efficient synthesis. This study employed formaldehyde and carbon monoxide as raw materials, focusing on two key steps: the carbonylation of formaldehyde to synthesize methyl glycolate (MG) and the hydrolysis of MG to produce GA. In the carbonylation stage, using an $AlCl_3$-modified Amberlyst-15 catalyst with a loading concentration of 0.1 mol/L, the yield of MG reached 63.42%; however, the conversion of formaldehyde was not significantly improved. In the hydrolysis stage, screening revealed that Amberlyst series resins exhibited excellent performance, with Amberlyst 36 achieving a GA yield of 92.6%. Further optimization of the hydrolysis process was conducted using the low-cost, strongly acidic cation exchange resin 001*7. Under the conditions of a molar ester-to-water ratio of 1∶25, catalyst mass fraction of 6.90%, temperature of 85℃, and reaction time of 7 hours, the GA yield reached 86.8% with an MG conversion of 93.1%. The study demonstrates that the hydrolysis performance of resin 001*7 is comparable to that of the Amberlyst series while offering significant cost advantages, providing a feasible technical reference for the industrialization of glycolic acid via the formaldehyde carbonylation route.

Key words: formaldehyde carbonylation; methyl glycolate; glycolic acid; catalyst; hydrolysis

随着时代的发展和科学技术的进步,塑料以其轻质、耐用、成本低廉等特点,已成为现代工业生产与日常生活中不可或缺的基础材料[1-5]。然而,伴随全球塑料产量持续攀升及其应用范围不断扩大,塑料废弃物也呈现爆发式增长,由此引发的环境污染问题日益严峻[6-7]。在这一背景下,开发环境友好、可自然降解的替代材料,已成为全球科研与产业关注的重点方向[8-9]。乙醇酸(GA)作为结构最简单的α-羟基酸,不仅具备良好的水溶性,还可与醇、酸等发生酯化反应,更可通过自聚形成可完全生物降解的聚乙醇酸,因而在有机合成中间体、生物医用材料、环保型清洗剂及绿色高分子材料等领域展现出广泛的应用潜力[10-12]。

目前,乙醇酸的工业化制备途径主要包括氯乙酸水解法、羟基乙腈水解法、草酸二甲酯加氢法以及甲醛羰基化法等[13]。我国能源结构呈现“富煤、贫油、少气”的特点,因此以煤炭为原料合成高附加值化学品具有重要的战略意义与经济价值。在众多技术路线中,草酸二甲酯加氢法与甲醛羰基化法均可依托煤基原料实现乙醇酸的制备,具有较好的适配

收稿日期:2025-12-31;**修回日期**:2026-08-08
基金项目:鄂尔多斯市科技领军人才项目《煤基可降解塑料(PGA等)绿色合成工艺研究》
作者简介:李志飞(1980-),男,博士,正高级工程师,研究方向为煤化工,zhifeili@tsinghua.org.cn;李俊诚(1978-),男,博士,正高级工程师,研究方向为煤化工,通讯联系人,1033230052@qq.com。

性[14]。其中,草酸二甲酯作为煤制乙二醇工艺的关键中间体,其合成乙醇酸的路径相对复杂、流程较长,涉及多步转化与分离过程[15-16]。相比之下,甲醛羰基化法以甲醛和一氧化碳为原料,在酸性催化剂作用下于高温高压条件下反应生成乙醇酸甲酯(MG),再经水解制得乙醇酸[17-18]工艺路线相对简单。该工艺中甲醛可通过甲醇氧化获得,而甲醇和一氧化碳均可来源于成本较低的煤或天然气,具有原料来源广泛、反应路径简短、综合成本可控等优势,被认为是一种具有良好发展前景的绿色合成路线[19-21]。

基于上述分析,本文聚焦于甲醛羰基化法制备乙醇酸的工艺,并重点针对其中甲醛羰基化及乙醇酸甲酯水解生成乙醇酸的关键步骤展开系统研究。首先,在甲醛羰基化方面,采用不同离子改性筛选出合适的羰基化催化剂,并研究离子改性对催化剂和产物的影响,其次通过对比不同催化体系的活性与选择性,筛选出适用乙醇酸甲酯水解过程的高效催化剂,在此基础上,系统考察了反应温度、反应时间、催化剂用量、以及乙醇酸甲酯与水的物质的量比等多个关键因素对水解反应的影响,旨在通过优化工艺条件,实现乙醇酸甲酯的高效转化与乙醇酸的高选择性生成,最终为甲醛羰基化法制备乙醇酸的工业化应用提供可能性。

1 实验

1.1 实验原料及催化剂

乙醇酸甲酯(分析纯)、三聚甲醛(分析纯)、甲醇(纯度 99.5%, Macklin)、环丁砜(纯度 > 99%, Macklin)、一级水、Amberlyst36(Macklin)、Amberlite IR120(Macklin)、Amberlyst15(Macklin),磷钨酸(Macklin)、001 * 7 催化剂(Macklin)、H_2SO_4、对甲苯磺酸(Macklin)、ZSM-5(Macklin)。采用液相色谱仪对反应后的 GA 以及 MG 取样分析。GA 收率=水解反应中生成的 GA 的摩尔量/MG 变化的摩尔量;MG 转化率=水解反应中 MG 减少的摩尔量/初始 MG 的摩尔量。

1.2 甲醛羰基化实验

在反应前,需要进行药品的称重和减压阀的安装与检查装置气密性。甲醛羰基化反应通常需要使用电子天平准确称取 7.5 g 三聚甲醛、4.5 g 水和 3 g 的催化剂,用量筒量取 100 mL 环丁砜并称重,将这些药品放入高压反应釜中。密封反应釜,用 N_2 进行置换 3 次。用 CO 置换反应釜中的 N_2,重复 3 次,关闭排气阀,通入 CO 至 8 MPa,关闭进气阀。将反应釜程序设定为在 30 min 内从室温升温到 160℃,保温 2 h,随后 30 min 内温度降到 15℃。待反应釜冷却到室温后,将排气阀打开,将气体排出,反应釜的压力慢慢降到常压后,打开反应釜。酯化反应:量取 60 mL 甲醇并称重,加进甲醛羰基化反应结束后的反应液中,密封反应釜,将反应釜程序设定为在 15 min 内从室温升温到 80℃,在 80℃保持 2 h,15 min 内温度降到 15℃。等温度降至室温后,将排气阀打开,之后打开反应釜。装置图如图 1 所示。

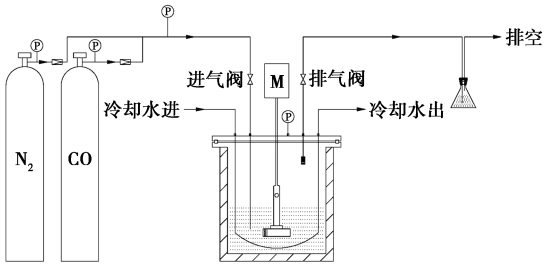


图 1 甲醛羰基化反应装置

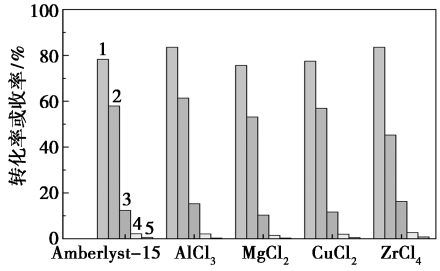
1.3 水解实验

在装有冷凝管、温度计的 500 mL 三颈瓶中,加入一定量的催化剂、MG 和一级水,在一定温度下反应一定时间。反应结束过滤除去固体树脂催化剂,取滤液稀释后进液相色谱分析。

2 结果与讨论

2.1 羰基化催化剂改性筛选

选取了 $MgCl_2$、$CuCl_2$、$AlCl_3$ 和 $ZrCl_4$ 4 种金属氯化盐,分别配制成 0.05 mol/L 的乙醇溶液,用于负载到 Amberlyst-15 中,得到的金属盐改性 Amberlyst-15 催化剂,实验条件为:7.5 g 三聚甲醛、3 g 金属盐改性 Amberlyst-15、4.5 g 水、100 mL 环丁砜、常温通入 8 MPa 的 CO、160℃,反应 2 h,不同金属盐改性 Amberlyst-15 的催化性能如图 2 所示。



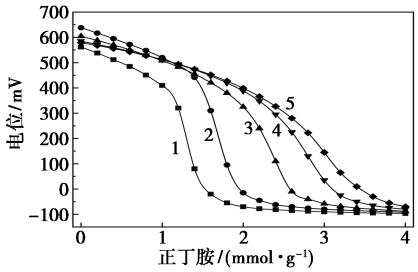
1—甲醛;2—乙醇酸甲酯;3—甲酸甲酯;4—甲氧基乙酸甲酯;5—二甘醇酸二甲酯

图 2 不同金属盐改性 Amberlyst-15 的催化性能

甲醛羰基化反应结果表明,在 4 种金属离子改性的催化剂中,强 L 酸型的 $AlCl_3$ 改性 Amberlyst-15 催化剂表现出最优的催化活性,适宜的 B-L 酸协同结构可高效活化甲醛与一氧化碳,大幅推动主反应进行,目标产物乙醇酸甲酯(MG)收率可达 61.38%,受活化效果增强影响,体系内副反应轻微加剧,该实验现象与文献报道中 $FeCl_3$ 改性树脂催化体系呈现的变化规律相近[22]。

中等 L 酸的 $CuCl_2$ 和弱 L 酸高 B 酸的 $MgCl_2$ 改性 Amberlyst-15 催化剂并未显著提高甲醛转化率以及 MG 的选择性,这可能与改性后几乎无新增 Lewis 酸活性位点有关,而超强 L 酸型的 $ZrCl_4$ 改性的催化剂,催化性能出现明显衰减,高价 Zr^{4+} 会大量占据树脂磺酸活性位点,大幅消耗本征高活性 B 酸,过量 Lewis 酸无法匹配甲醛羰基化主反应路径,还会引发部分活性位点团聚失活,最终导致催化剂各类产物收率均出现明显下降,乙醇酸甲酯(MG)收率仅为 45.16%,催化效果劣于原始树脂。

树脂负载金属离子后的催化剂,其酸性会随着金属离子的差异产生不同,研究了上述 4 种改性树脂催化剂的酸性,结果如图 3、表 1 所示。



1—$ZrCl_4$-A15;2—$AlCl_3$-A15;3—$CuCl_2$-A15;
4—$MgCl_2$-A15;5—Amberlyst-15

图 3　不同金属盐改性 Amberlyst-15 的正丁胺电位滴定曲线

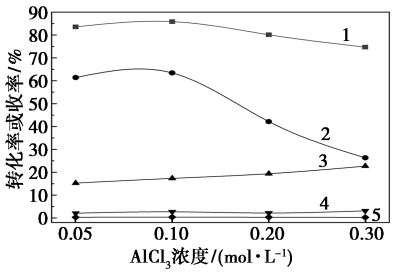
表 1　不同金属盐改性 Amberlyst-15 催化剂的酸强度及酸量

金属盐负载	初始电位/mV	电位>550 mV/(mmol·g⁻¹)	电位>450 mV/(mmol·g⁻¹)
Amberlyst-15	579.3	0.959	3.995
$AlCl_3$	638.5	0.786	1.582
$MgCl_2$	607.0	0.881	1.944
$CuCl_2$	590.2	0.725	1.987
$ZrCl_4$	562.1	0.294	1.512

4 种金属盐对 Amberlyst-15 树脂进行改性之后,催化剂的酸强度、强酸位点含量以及总酸量均出现了明显差异。$AlCl_3$ 改性后树脂的酸强度最大,初始电位达到 638.5 mV。其余离子改性的催化剂强酸位点含量均有所下降。由电位>450 mV 得到的总酸量结果可知,改性后的催化剂总酸量相较于原始树脂(3.995 mmol/g)均有所降低,其总酸量排序为 Amberlyst-15>$MgCl_2$>$CuCl_2$>$AlCl_3$>$ZrCl_4$。

2.2　金属离子含量对改性树脂羰基化性能的影响

以不同浓度的 $AlCl_3$ 乙醇溶液(0.05、0.1、0.2、0.3 mol/L)制备了一系列的改性 Amberlyst-15,反应条件为:7.5 g 三聚甲醛、3 g 的 $AlCl_3$ 改性 Amberlyst-15、4.5 g 水、100 mL 环丁砜、常温通入 8 MPa 的 CO、160℃,反应 2 h,催化结果如图 4 所示。

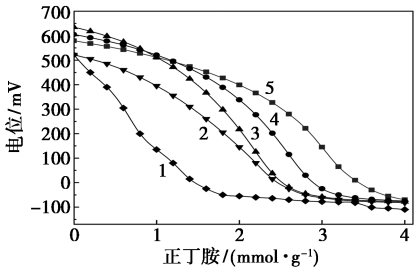


1—甲醛;2—乙醇酸甲酯;3—甲酸甲酯;4—甲氧基乙酸甲酯;
5—二甘醇酸二甲酯

图 4　不同 $AlCl_3$ 浓度改性 Amberlyst-15 的催化性能

图 4 数据显示,$AlCl_3$ 改性浓度对 Amberlyst-15 催化剂的性能同样具有显著影响。甲醛转化率随 $AlCl_3$ 浓度升高呈逐渐下降的趋势,但下降幅度较小。而在产物收率方面,不同改性条件下的催化剂选择性差异较为显著:当浓度为 0.1 mol/L 时,乙醇酸甲酯的收率为 63%;增至 0.2 mol/L 和 0.3 mol/L 时,收率分别降至 42.16% 和 24.31%,表明较高浓度的 $AlCl_3$ 改性不利于 MG 的转化,在 0.05~0.1 mol/L 浓度的离子改性最为合适。与此同时,副产物甲酸甲酯(MF)是随着 Al^{3+} 离子浓度提高而增大,在 0.3 mol/L 时,其转化率可高达 22.67%。

在酸性表征方面,不同 $AlCl_3$ 浓度改性的催化剂呈现出明显的酸性变化规律。当 $AlCl_3$ 浓度在 0.05~0.1 mol/L 时,催化剂酸强度相应增强,这主要归因于 Al^{3+} 与磺酸基团发生配位,形成酸性更强的酸位点,但总酸量呈下降趋势,说明 Al^{3+} 部分替代了磺酸基团上的质子。当 $AlCl_3$ 浓度大于 0.1 mol/L 时,改性后催化剂的酸性显著降低,表明大部分磺酸基团上的 H^+ 已被 Al^{3+} 取代,导致强酸位点减少,如图 5、表 2 所示。



1—0.3 Al/A-15;2—0.2 Al/A-15;3—0.1 Al/A-15;
4—0.05 Al/A-15;5—A-15

图 5 不同金属盐浓度改性 Amberlyst-15 的正丁胺电位滴定曲线

表 2 不同金属盐浓度改性 Amberlyst-15 催化剂的酸强度及酸量

催化剂	初始电位/mV	电位>550 mV/(mmol·g⁻¹)	总酸含量/(mmol·g⁻¹)
A-15	579.3	0.959	3.995
0.05Al/A-15	638.5	0.786	1.582
0.1Al/A-15	639.3	0.799	1.877
0.2Al/A-15	550.4	0.639	1.237
0.3Al/A-15	502.1	0.294	1.119

2.3 水解催化剂的筛选

MG 与水的物质的量比为 1∶25、反应温度为 85℃、催化剂加入的质量分数为 5%、反应 7 h,冷凝回流下进行,催化剂的种类为 Amberlyst15、磷钨酸、AmberliteIR120、Amberlyst36、001 * 7、H_3PO_4、H_2SO_4、对甲苯磺酸、ZSM-5。使用气相色谱仪分析所得 GA 和 MG 纯度和质量的变化,结果见表 3。

表 3 不同催化剂对 MG 的转化率及 GA 的收率

序号	催化剂	收率(GA)/%	转化率(MG)/%
1	—	65.4	66.7
2	Amberlyst15	92.0	94.2
3	磷钨酸	85.3	89.8
4	AmberliteIR120	84.5	88.5
5	Amberlyst36	92.6	96.6
6	001 * 7	86.2	90.3
7	H_3PO_4	85.0	94.0
8	H_2SO_4	86.5	
9	对甲苯磺酸	85.8	92.2
10	ZSM-5	84.5	85.3

由表 3 可知,相同条件下,Amberlyst 系列催化剂对 MG 的转化率及 GA 的收率相对较高,其中 Amberlyst15 和 Amberlyst36 的 GA 收率分别为 92.0%、92.6%,转化率为 94.2%、96.6%,其次为磷钨酸、H_3PO_4、001 * 7、ZSM-5 等催化剂,在 MG 的水解反应中,树脂催化剂相比于其他催化剂有着优异的转化效果,这和树脂催化剂的酸性和分子结构有关。

2.4 不同催化剂条件下酯水比对乙醇酸甲酯水解的影响

由于 MG 与水的物质的量比过大,分离可能难以进行,因此使用 Amberlyst15、Amberlyst36 催化剂对酯水比进行探究。控制催化剂质量分数为 5%、反应温度为 85℃、反应 7 h 条件不变,冷凝回流,并改变 MG 与水的物质的量比为 1∶5、1∶10、1∶15、1∶20、1∶25。

表 4 2 种催化剂在不同酯水比下对 MG 的转化率及 GA 的收率

酯水比	Amberlyst36		Amberlyst15	
	收率(GA)/%	转化率(MG)/%	收率(GA)/%	转化率(MG)/%
5	61.6	63.0	60.2	61.0
10	75.9	80.7	77.4	80.8
15	82.5	85.9	86.5	89.3
20	90.5	92.2	87.1	93.8
25	92.6	96.6	92.0	96.6

由表 4 可知,随着酯水比的提高,Amberlyst 系列催化剂对 MG 的转化率均有所提升,同时 GA 的收率也有所增加,但当酯水比为 25 时,两者的转化率基本不再增加。因此,认为酯水比对于 MG 的水解反应有较大的影响,后续选用 001 * 7 作为反应的催化剂,继续研究酯水比对 MG 和 GA 的影响。

2.5 以 001 * 7 作为反应催化剂,不同酯水比对乙醇酸甲酯水解的影响

以 001 * 7 为催化剂、催化剂的质量分数为 6.90%、反应温度为 85℃、冷凝回流条件下反应 7 h,分别设定 MG 与水的物质的量比为 1∶5、1∶10、1∶15、1∶20、1∶30、1∶35,探究 MG 与水的物质的量比对水解反应的影响。

由表 5 可得,采用 001 * 7 反应的催化剂时,酯水比对于 MG 和 GA 均有明显的影响。随着酯水比的增加,MG 的收率和 GA 的转化率是先增高后减小,当酯水比为 25 时,两者的百分比达到最大值,随后开始随着酯水比的增大而减小。001 * 7 为催化剂与 Amberlyst 系列催化剂相比,其在价格方面有极

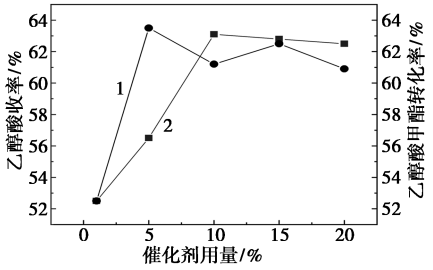
表 5　001 * 7 为催化剂在不同酯水比下对 MG 的转化率及 GA 的收率

酯水比	收率(GA)/%	转化率(MG)/%
5	56. 1	62. 9
10	62. 2	71. 8
15	68. 5	72. 7
20	76. 6	83. 9
25	86. 8	93. 1
30	78. 5	89. 6
35	72. 9	81. 3

大的优势,且在相似的条件下,001 * 7 为催化剂也可达到与 Amberlyst 系列相近的效果。因此采用 001 * 7 为反应的催化剂,具备成本优势。

2. 6　催化剂用量对乙醇酸甲酯水解的影响

以 001 * 7 为反应的催化剂、反应时间为 7 h、反应温度为 85℃,设定 MG 与水的物质的量比为 1∶25,探究催化剂在不同用量(1%、5%、10%、15%、20%)下对水解反应的影响。



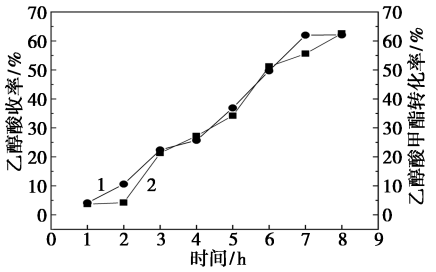
1—乙醇酸收率;2—乙醇酸甲酯转化率

图 6　不同催化剂用量下乙醇酸甲酯的转化率及乙醇酸的收率

由图 6 数据分析可知,随着催化剂用量的增加,乙醇酸(GA)的收率在催化剂质量分数达到 5%后变化趋于平缓,表明在该用量水平下反应已达到较高催化活性,继续增加催化剂用量对目标产物收率的提升效应逐渐减弱。然而,乙醇酸甲酯(MG)的转化率在催化剂用量增至 10%后方趋于稳定,说明反应物转化对催化剂的依赖程度更高,需较高的催化剂负载量以实现反应完全。综合考量催化效率与经济性,催化剂质量分数在 6%~8%范围内可实现较高的反应效率。

2. 7　反应时间对乙醇酸甲酯水解的影响

以 001 * 7 作为反应的催化剂,分别设定反应时间为 1、2、3、4、5、6、7、8 h、催化剂加入的质量分数为 6. 90%、反应温度为 85℃、MG 和水的物质的量比为 1∶10,冷凝回流,结果见图 7。



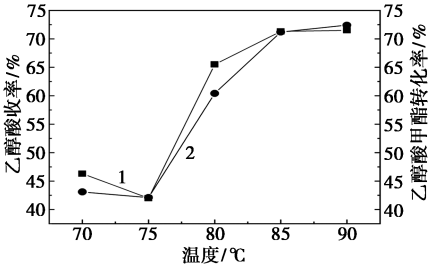
1—乙醇酸收率;2—乙醇酸甲酯转化率

图 7　不同反应时间下乙醇酸甲酯的转化率及乙醇酸的收率

由图 7 可知,随着反应时间的增加,GA 的收率与 MG 的转化率均在提升,但在反应 7 h 后,GA 收率变化不大,因此,认为反应时间为 7 h 时,该反应的转化率达到最大值。

2. 8　反应温度对乙醇酸甲酯水解的影响

以 001 * 7 作为反应的催化剂、催化剂的质量分数为 6. 90%、MG 和水的物质的量比为 1∶10、反应时间为 7 h,分别采用不同的反应温度:70、75、80、85、90℃,探究温度对水解反应的影响。



1—乙醇酸收率;2—乙醇酸甲酯转化率

图 8　不同反应温度下乙醇酸甲酯的转化率及乙醇酸的收率

由图 8 可知,随着反应温度的增大,GA 的收率与 MG 的转化率均在提升,但在反应温度为 85℃后,反应收率变化不大,因此,认为反应温度 85℃为最佳温度。

3　结论

本文对甲醛羰基化制备乙醇酸的催化剂、反应条件进行筛选,确定了合适的反应条件。实验结果表明:$AlCl_3$、$CuCl_2$、$MgCl_2$、$ZrCl_4$ 4 种金属盐对 Amberlyst-15 进行改性后,均未显著提高甲醛转化率,但影响了产物选择性。$AlCl_3$ 改性催化剂表现出最优性能,MG 收率达 60%以上,同时副产物甲酸甲酯(MF)收率有所上升。其他金属改性催化剂效果

接近或低于未改性催化剂。$AlCl_3$ 改性显著增强了催化剂的酸强度,其初始电位达 639.3 mV,但总酸量有所降低,表明 Al^{3+} 与磺酸基团的相互作用形成了更强的酸性位点,且随 $AlCl_3$ 负载浓度升高,催化剂酸强度先增后降。$AlCl_3$ 浓度为 0.1 mol/L 时,MG 收率最高(63.42%)

在乙醇酸甲酯水解反应中,强酸性阳离子交换树脂类催化剂(如 Amberlyst15、Amberlyst36 和 001 * 7)表现出较高的催化活性,其中 Amberlyst36 的催化效果最优,乙醇酸收率达 92.6%,乙醇酸甲酯转化率达 96.6%。酯水物质的量比对水解反应有显著影响。随着水的比例增加,乙醇酸收率和乙醇酸甲酯转化率均先升高后趋于稳定。除此之外,酯水比,催化剂用量、反应时间和反应温度均存在最优范围。以 001 * 7 为催化剂,最佳工艺条件为:催化剂质量分数 6%~8%、反应时间 7 h、反应温度 85℃,最佳酯水比为 1∶25,此时水解效率达到较高水平,且催化剂利用效率和经济性较好。

参考文献

[1] 董露茜,徐芳,翁云宣.聚乙醇酸改性及其应用研究进展[J].中国塑料,2022,36(4):166-174.

[2] 宋芳.聚羟基乙酸的合成技术与发展前景[J].石油化工技术与经济.2008,24(5):23-27.

[3] 蔡智敏.聚乙烯蜡在塑料加工中的应用[J].当代化工,2013,42(1):86-90,94.

[4] 尚金龙,李思海,陈贻明.纤维增强塑料在航空航天领域中的应用[J].塑料工业,2019,47(1):148-151.

[5] 钱志国,姚晓宁,景肃,等.工程塑料及其合金在汽车工业上的应用[J].工程塑料应用,2008,36(11):45-49.

[6] 王亚韡,张秋瑞,于南洋,等.新污染物[J].化学进展,2024,36(11):1607-1784.

[7] 汤桂兰,胡彪,康在龙,等.废旧塑料回收利用现状及问题[J].再生资源与循环经济,2013,6(1):31-35.

[8] Seth K,Elisabeth R V,Cecily R,*et al*.Reducing the environmental impacts of plastics while increasing strength:Biochar fillers in biodegradable,recycled,and fossil-fuel derived plastics[J].Composites Part C,2022,8:100253.

[9] 刘子溱,王俊丽,周晓芳.生物可降解塑料包装材料的降解性能研究[J].塑料包装,2025,35(5):7-9.

[10] Samantaray P K L,Haddleton A,David M,*et al*.Poly(glycolic acid)(PGA):A versatile building block expanding high performance and sustainable bioplastic applications[J].Green Chemistry,2020,22(13):4055-4081.

[11] 王晓静,魏琦峰,任秀莲.乙醇酸和聚乙醇酸的制备与分离研究进展[J].化工进展,2018,37(9):3577-3584.

[12] Qin P,Wu L,Jie S.Poly(glycolic acid) materials with melt reaction/processing temperature window and superior performance synthesized via melt polycondensation[J].Polymer Degradation and Stability,2024,220:110641.

[13] 王晓晨.新型煤基乙醇酸甲酯合成技术与应用研究进展[J].现代化工,2024,44(S1):52-58.

[14] 高鹏伟,李成科,温艳梅,等.煤制乙二醇工艺中草酸二甲酯合成控制要点[J].广州化工,2024,52(21):187-189,197.

[15] 赵建平,陈景,李鸿雄,等.草酸二甲酯选择性加氢制乙醇酸甲酯催化剂研究进展[J].应用化工,2025,54(8):2176-2185,2190.

[16] 穆仕芳,尚如静,魏灵朝,等.煤制乙二醇产业链衍生产品分析[J].现代化工,2018,38(1):12-17.

[17] Xie T,Ai S,Huang Y,*et al*.Synthesis and purification of glycolic acid from the mixture of methyl levulinate and methyl glycolate via acid-mediated hydrolysis reactions and extraction[J].Separation and Purification Technology,2021,268:118718.

[18] 李秀峥,白富栋,张雷,等.乙醇酸甲酯合成工艺的研究及应用进展[J].低碳化学与化工,2024,49(1):60-69.

[19] Sun Y,Wang H,Shen J,*et al*.Highly effective synthesis of methyl glycolate with heteropolyacids as catalysts[J].Catalysis Communications,2008,10(5):678-681.

[20] Song H,Li Z,Chen J,*et al*.Brönsted acidic ionic liquids as efficient and recyclable catalysts for the carbonylation of formaldehyde[J].Catalysis Letters,2011,142(1):81-86.

[21] Zhao Y,Liu Q,Duan Y,*et al*.A multi-dimensional feasibility analysis of coal to methanol assisted by green hydrogen from a life cycle viewpoint[J].Energy Conversion and Management,2022,268:115992.

[22] 王敏.甲醛羰基化制备乙醇酸的研究[D].北京:北京化工大学,2023.■

《现代化工》欢迎广大作者踊跃投稿,投稿系统:http://www.xdhg.com.cn