

不同光引发剂的丙烯酸酯 UV 热熔压敏胶的性能研究

卢晨晨¹, 钱 军^{1*}, 石一峰²

(1. 华东理工大学材料科学与工程学院, 上海 200237; 2. 上海宏顶房科技有限公司, 上海 200237)

摘要:以丙烯酸异辛酯(2-EHA)、丙烯酸甲酯(MA)和丙烯酸(AA)为共聚单体,分别以 UVC、UVA-1 以 UVA-2 为功能单体合成了 3 种可进行 UV 固化的丙烯酸酯压敏胶。考察了中压汞灯与 UV-LED 的辐射 2 种光源分别对 3 种压敏胶性能的影响。结果表明,UVC 压敏胶在汞灯的辐射下可以有效交联固化,UVA-1、UVA-2 在 LED 灯的辐射下可以有效交联固化,在确保有效交联的前提下,3 种压敏胶之间的性能差别不大。此外,多次照射对压敏胶带来的变化也不大,光引发剂在这种体系中的作用仅仅是交联作用,只要交联效果相近,性能依然取决于聚合物主体的组成与分子量分布。

关键词:丙烯酸酯压敏胶; 硫杂蒽酮; 二苯甲酮; 光固化; 光引发剂

中图分类号:TQ436

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)03-0189-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.03.034

Study on properties of acrylic UV hot melt pressure-sensitive adhesive with different photoinitiators

LU Chen-chen¹, QIAN-Jun^{1*}, SHI Yi-feng²

(1.School of Materials Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2.Shanghai Hongdingfang Technology Co., Ltd., Shanghai 200237, China)

Abstract:Three kinds of UV-curable acrylic pressure-sensitive adhesive are synthesized through using 2-ethylhexyl acrylate (2-EHA), methyl acrylate (MA), and acrylic acid (AA) as copolymerization monomers, UVC, UVA-1, and UVA-2 as functional monomers, respectively. The effects of radiation from two kinds of light source, medium pressure mercury lamp and UV-LED lamp, on the properties of three kinds of pressure-sensitive adhesive are investigated. It is found that UVC pressure-sensitive adhesive can effectively crosslink and cure itself under the radiation of mercury lamp, while UVA-1 and UVA-2 can effectively crosslink and cure themselves under the radiation of LED lamp. On the premise of ensuring effective cross-linking, the performance differences among the three pressure-sensitive adhesives are not significant. In addition, it is found that multiple exposures do not cause significant changes in the pressure-sensitive adhesive tape. Photoinitiator in this system plays a crosslinking role only, and as long as the crosslinking effect is similar, the performance of the adhesives still depends on the composition and molecular weight distribution of the main body of polymer.

Key words: acrylic pressure-sensitive adhesive; thioxanthone; benzophenone; photocuring; photoinitiator

丙烯酸酯是压敏胶行业的主要原料之一,市面上的丙烯酸酯压敏胶根据其涂布时的形态和引发剂引发机制可分为溶剂型、乳液型、UV 光固化压敏胶等胶种^[1-3],其中 UV 光固化压敏胶又可分为 UV 光聚合型和 UV 光交联热熔型两类^[4]。

传统的溶剂型丙烯酸酯压敏胶因为溶液聚合的便利性和性能的优异性而一直存在至今^[5]。乳液型丙烯酸酯压敏胶则是当前丙烯酸酯压敏胶的主要品种,尽管乳液聚合较之溶液聚合技术因素更多、配方调节困难、涂布技术要求高、必需添加剂的环保问题,但乳液型压敏胶的高速涂布有效提高了生产效率,降低了压敏胶涂布的制造成本,在一些单一大量

性能要求不高的应用中有很强的竞争力^[6]。

20 世纪 60 年代德国标志性的木工清漆 UV 固化技术为日后的光聚合型与光交联热熔型丙烯酸酯压敏胶提供了技术基础。UV 光固化压敏胶中的 UV 光交联热熔压敏胶(常称为 UV 热熔压敏胶)以紫外光为能量来源,辐射光照物料体系中的光引发剂(俗称光引发剂,实为光交联剂),引发低聚物发生交联反应,从而快速固化成所需性能的压敏胶^[7]。这种 UV 热熔压敏胶具有不含或含微量溶剂、基本无污染、固化速度快、可实现厚涂等优点,因此,下游涂布厂不需要危险化学品相关资质,可实现高速涂布,提高生产效率^[8]。

收稿日期:2024-06-11;修回日期:2025-01-05

作者简介:卢晨晨(1998-),男,硕士生,研究方向为丙烯酸酯压敏胶,Y82210264@mail.ecust.edu.cn;钱军(1965-),男,教授,研究方向为为高分子合成、胶粘剂、涂料的开发,通讯联系人,qianjun@ecust.edu.cn。

丙烯酸酯 UV 热熔压敏胶的通常做法是以溶液聚合为基础,在聚合时将光引发剂接入聚合物链,后继以脱溶剂工艺,得到溶剂含量极小的热熔胶型丙烯酸酯聚合物,在热熔涂布加 UV 光照射后,得到所期望的压敏胶性能。从这种做法中可见,光引发剂是低分子质量预聚物转变为高分子质量压敏胶的重要一环^[9]。

光引发剂根据其产生自由基机理的不同分为两类:Norris I 裂解型光引发剂和 Norris II 夺氢型光引发剂^[10-11]。UV 热熔胶常见的 Norris II 夺氢型光引发剂一般都为芳基-酮-芳基类化合物,如硫杂蒽酮类、二苯甲酮类、蒽醌类。由于 Norris II 夺氢型光引发剂键连的 CO-芳基键能量太高,吸收的 UV 能量无法使键断裂,因此经 UV 辐射后电子由基态跃迁到激发单线态,经过系间窜越至激发三线态,并与助引发剂作用形成激发态复合物,即 Norris II 光引发剂激发的 $n-\pi^*$ 三重态发生了夺氢过程^[12]。自由基的产生过程中需要一个氢供体,即助引发剂,助引发剂通常含有杂原子且 α 位上有活性氢原子,常见的氢供体有叔胺、醇、醚、酯、硫醇等,氢供体将一个氢原子转移到激发的光引发剂上,成为一个非常活泼的供体自由基,值得注意的是芳酮自由基对丙烯酸酯的聚合反应性很低,一般参与链终止反应^[13-15]。

光引发剂对紫外光有着不同的吸收波段,只有在这些波段的紫外光能量才能被用于引发反应,目前 UV 热熔压敏胶使用的光引发剂普遍为二苯甲酮类 UVC 波段吸收强烈的品种,而 UV 汞灯光源中, UVC 波段能量往往比较少。具体而言,中压汞灯所消耗的能量中,只有 28% 被转换为紫外光,其中 UVC 占 14% 左右, UVA 和 UVB 各占 7% 左右。剩下的 70% 左右能量均被转换为可见光和红外。UVA 波段是汞灯紫外光源的主要波段,目前普遍使用的 UV-LED 光源可以可靠而经济地输出 UVA 波段能量用于油墨印刷等行业^[16],因此,开发 UVA 波段适用的丙烯酸酯 UV 热熔压敏胶是在 UVC 类压敏胶之外的重要课题。

笔者以丙烯酸异辛酯(2-EHA)、丙烯酸甲酯(MA)、丙烯酸(AA)为共聚单体,以不同光引发剂为功能单体,合成 3 种可经 UV 光交联固化的丙烯酸酯压敏胶,并涂布制备 3 种丙烯酸酯 UV 热熔压敏胶,分别采用常用的中压汞灯与 UV-LED 灯进行辐射固化,研究不同光引发剂制备的 UV 热熔压敏胶在不同照射光源下的力学性能。

1 仪器及试剂

1.1 仪器

HH501 型数显恒温水浴锅,上海易友仪器有限公司生产;RW20 型机械搅拌器,德国 IKA 生产;BT100-2J 型蠕动泵,兰格恒流泵有限公司生产;A10002 型分析天平,上海精天电子科学仪器有限公司生产;KJ-6107B 型自动涂膜器,广东科建仪器有限公司生产;DHG-9140A 型电热鼓风干燥箱,一恒科学仪器有限公司生产;UV-LED 线面光源光固化设备,上海宏顶房科技有限公司生产;T503 型循环水冷设备,上海宏顶房科技有限公司生产;Waters1515 型凝胶渗透色谱仪,美国 Waters 公司生产;Q800 型动态力学分析仪,美国 TA 公司生产;KJ-6031 型环形初粘性试验机,广东科建仪器有限公司生产;KJ-1065A 型电脑式拉力试验机,广东科建仪器有限公司生产;KJ-6012A 型烘箱型保持力试验机,广东科建仪器有限公司生产;YH-500 型 500 mL 加热套,江苏近湖教学仪器厂生产。

1.2 试剂

UVA-1(M_w 308)、UVA-2(M_w 322)、UVC(M_w 304)、丙烯酸甲酯(MA)、丙烯酸(AA)、丙烯酸异辛酯(2-EHA)、偶氮二异丁腈(AIBN)、乙酸乙酯(EAC),均为工业纯,上海宏顶房科技有限公司生产。

2 实验方法

采用 2 种 UVA 型光引发剂(硫杂蒽酮结构)和 1 种 UVC 型光引发剂(二苯甲酮结构)制备了 3 种可以经 UV 光照固化的丙烯酸酯压敏胶。

2.1 丙烯酸酯压敏胶的制备

丙烯酸酯压敏胶的聚合过程为传统溶液聚合,以 65:32.6:2.4:0.5:100:0.5 的质量比取 2-EHA、MA、AA、AIBN、EAC 溶剂和光引发剂,按 1:9 的质量比配底料与滴加液,在 85℃ 水浴中用四口烧瓶进行反应,滴加时间控制在 2 h。加入完毕后,保温 3 h 使其充分反应。结束后停止加热,待产物降至室温后转移至密封避光容器保存。产物经过脱溶剂和涂布,即为丙烯酸酯 UV 热熔压敏胶制品。

2.2 丙烯酸酯压敏胶的辐射固化

采用中压汞灯和 UV-LED 灯对涂膜样品进行固化,其中中压汞灯的光照能量控制为常见的 120 mJ/cm² 水平,UV-LED 采用 395 nm 波长照射,光照能量控制为 6 000 mJ/cm²。光照完毕后,覆上

PET膜,即得到了PET/压敏胶/离型纸结构的样品用于后续力学性能测试。

2.3 紫光可见光光谱测试

利用UV-1800型紫外-可见分光光度计对3种光引发剂进行紫外光谱扫描。

2.4 凝胶色谱测试

利用Waters e2695型凝胶渗透色谱仪(GPC)对3种压敏胶的分子质量及其分布进行测试。

2.5 力学性能测试

环形初黏测试:参照标准GB/T 31125—2014,用KJ-6031型环形初黏性试验机对3种配方压敏胶的初黏强度进行测试。

180°剥离强度测试:参照标准GB/T 2792—2014,用KJ-1065A型拉力试验机对3种配方压敏胶的剥离强度进行测试。

持黏性测试:参照标准GB/T 4851—2014,用KJ-6012A型烘箱型保持力试验机对3种配方压敏胶的持黏强度进行测试。

2.6 动态热机械测试

动态热机械测试(DMA):用Q800动态热机械分析表征APSA的机械性能。测试温度范围为-60~150℃。

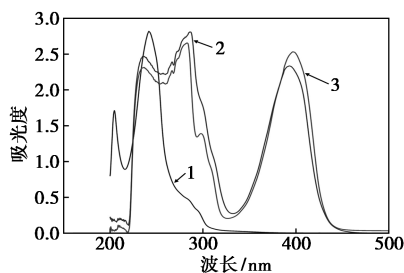
2.7 凝胶度测试

采用索氏提取器,用EAC溶剂对样品反复冲洗48 h后测量未洗脱部分,得到凝胶度。

3 结果与分析

3.1 紫外-可见光光谱分析

3种光引发剂的UV光谱图如图1所示。从图1中可以看出,UVA-1、UVA-2和UVC光引发剂在紫外光波段都有较强的吸收峰。其中,UVC光引发剂的主要吸收波长在250 nm左右,而UVA-1、UVA-2的主要吸收波长在270 nm与395 nm左右。UVA-1、UVA-2光引发剂的主要结构为硫杂蒽酮,



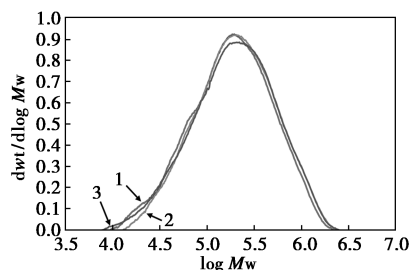
1—UVC;2—UVA-1;3—UVA-2

图1 UVC、UVA-1、UVA-2引发剂的UV吸收光谱

因此,光谱图中395 nm左右的吸收峰是由于硫杂蒽酮羰基的 $n-\pi^*$ 所引起的,在270 nm附近的吸收峰则源于硫杂蒽酮苯环结构的 $\pi-\pi^*$ 跃迁引起的^[17]。

3.2 凝胶色谱分析

3种光引发剂合成的压敏胶的分子质量分布测试结果如图2所示。从图2中可以看出,3种压敏胶的分子质量与分布也非常一致,因此后续力学性能差异,可以排除分子质量分布差别的影响。

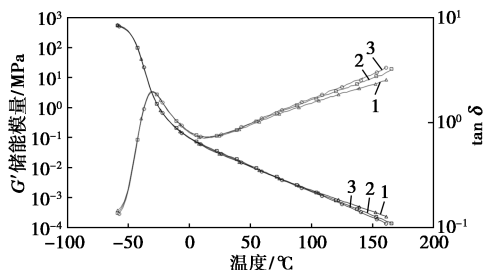


1—UVC;2—UVA-1;3—UVA-2

图2 3种光引发剂对应的压敏胶分子质量分布

3.3 动态热机械分析

3种光引发剂在相同实验配方下聚合物的DMA曲线如图3所示。



1—UVC;2—UVA-1;3—UVA-2

图3 UVC、UVA-1、UVA-2引发的3种压敏胶的DMA曲线

从图3中可以看出,3种光引发剂的分子质量接近,尤其UVA-1和UVA-2的分子质量只差了一个甲基,可以看出,3种光引发剂制备的压敏胶的DMA曲线几乎一致,因此,后续的力学性能差异可以排除黏弹性不一致的影响因素。

3.4 力学性能测试

3种聚合物经过不同次数光照以后的力学性能结果如表1所示,斜体数字表示破坏模式为粘接破坏,其余的破坏模式均为内聚破坏。

由表1可见,在常见的中压汞灯照射下,UVC引发的胶表现出了正常的结果,即持黏较高,破坏模式为黏接破坏,表现出了光照交联度效果,而UVA

表 1 3 种聚合物经过不同 UV 光源照射后的性能

光引发剂	照射方式	一次照射				二次照射				三次照射			
		初黏/ (N· in ⁻¹)	20 min 剥离力/ (N· in ⁻¹)	24 h 剥离力/ (N· in ⁻¹)	持黏/ [1 kg· (1in * 1in) ⁻¹]	初黏/ (N· in ⁻¹)	20 min 剥离力/ (N· in ⁻¹)	24 h 剥离力/ (N· in ⁻¹)	持黏/ [1 kg· (1in * 1in) ⁻¹]	初黏/ (N· in ⁻¹)	20 min 剥离力/ (N· in ⁻¹)	24 h 剥离力/ (N· in ⁻¹)	持黏/ [1 kg· (1in * 1in) ⁻¹]
UVC	汞灯@120 mJ/cm ²	11.73	7.06	8.59	>24	9.93	8.27	9.04	>24	9.37	7.21	8.21	>24
UVA-1	汞灯@120 mJ/cm ²	24.77	15.82	17.25	0.03	23.89	16.36	16.41	0.12	20.04	13.17	14.26	0.35
UVA-2	汞灯@120 mJ/cm ²	21.36	14.45	13.69	0.03	22.38	14.28	15.28	0.34	18.76	12.88	15.03	0.57
UVC	395LED@6000 mJ/cm ²	22.08	18.97	20.57	0.04	22.19	19.81	20.29	0.05	20.03	19.02	20.19	0.04
UVA-1	395LED@6000 mJ/cm ²	12.54	6.35	8.94	>24	9.73	6.86	9.32	>24	8.47	6.65	7.47	>24
UVA-2	395LED@6000 mJ/cm ²	11.34	7.26	9.28	>24	10.15	6.98	11.01	>24	8.01	6.31	9.71	>24

引发的 2 个胶,在这种汞灯的照射下却出现了很差的持黏效果,即便照射次数增加,似乎略有交联,但依然没有表现出明显的交联效果。而当照射光源改为 395 nm 的 UV-LED,情况却发生了反转,UVC 胶的持黏很差,且破坏模式为内聚破坏,照射次数对 UVC 胶的影响几乎可以忽略,而 UV-LED 引发的胶的持黏明显上升。

对比表 1 中的初黏与剥离力数值可以发现,这 3 种不同光引发剂的压敏胶在交联与非交联情况下总体性能基本接近,说明这 3 种光引发剂在同样配方中所起的作用仅仅是交联作用,当紫外光源的波段与他们的吸收波段相近时,交联发生,UVA-1 和 UVA-2 的甲基个数并没有明显改变交联度程度。

光照次数的增加使 UVA 型压敏胶的性能略有改变,毕竟汞灯的 UV 光谱是全光谱,在 395 nm 处依然有微弱的输出,累积照射,能量增加,也能够改变压敏胶的性能,但十分有限,从持黏的增加很小可以看出,微弱的 395 nm 能量累积只能微弱改变持黏,这种改变甚至可以被看作误差而忽略不计。

而 395 nm LED 的光谱输出由于过于狭窄,对于 UVC 引发剂没有作用,反复照射也不见效果,因此性能几乎维持不变。对 UVA 型压敏胶,反复照射会有性能改变。

综合对比表 1 中 3 种经有效交联后的压敏胶的初黏、20 min 剥离力与 24 h 剥离力,可以发现在确保有效交联的前提下,3 种压敏胶之间的性能差别不大,多次照射带来的变化也不大,表明光引发剂在这种体系中的作用仅仅是交联作用,只要交联效果相近,性能依然取决于聚合物主体的组成与分子量分布。

3.5 凝胶率测试

3 种光引发剂合成的压敏胶在不同光源多次辐射后的凝胶率对比结果如表 2 所示。

表 2 3 种压敏胶在不同光源多次辐射后的凝胶率

光引发剂	照射方式	一次照射 凝胶率	二次照射 凝胶率	三次照射 凝胶率
UVC	汞灯@120 mJ/cm ²	65.00	66.00	67.00
UVA-1	汞灯@120 mJ/cm ²	0.20	0.50	0.70
UVA-2	汞灯@120 mJ/cm ²	0.30	0.67	0.90
UVC	395LED@6000 mJ/cm ²	0.39	0.56	0.48
UVA-1	395LED@6000 mJ/cm ²	68.00	75.00	74.00
UVA-2	395LED@6000 mJ/cm ²	69.00	73.00	78.00

从表 2 中可以看出,UVC 压敏胶经中压汞灯辐射后具有较高的凝胶率,UVA-1、UVA-2 压敏胶经 LED 灯辐射后有较高的凝胶率。且光照次数的增加多少能改变压敏胶的凝胶率,但并不能看出显著的差别,这与上面的力学性能对比结果相符。

4 结论

(1)以 2-EHA、MA 和 AA 为共聚单体,分别选取了 UVC、UVA-1、UVA-2 为 UV 光引发剂,合成了 3 种 UV 交联型丙烯酸酯压敏胶。

(2)通过紫外-可见光光谱测试发现,UVC 光引发剂的最大吸收波长在 UVC 波段,UVA-1、UVA-2 在 UVA、UVC 波段均有较强的吸收峰。

(3)通过凝胶色谱仪、动态热机械测试对 3 种压敏胶进行表征,结果表明,3 种压敏胶的分子量及其分布、热力学性能与结构相似,玻璃化转变温度 T_g 相近,产生的轻微差异主要来源于压敏胶分子链

上不同的光交联结构。

(4)经UVC辐射固化的3种压敏胶中,UVA-1、UVA-2压敏胶表现出最佳的环形初黏性能与剥离强度,UVC压敏胶的持黏强度最优。经UVA辐射固化的3种压敏胶中,UVC压敏胶的初黏性能与剥离强度最好,而UVA-1、UVA-2压敏胶均表现出良好的持黏性能。并且在确保有效交联的前提下,3种压敏胶之间的性能差别不大。

(5)多次照射对压敏胶带来的变化也不大,表明光引发剂在这种体系中的作用仅仅是交联作用,只要交联效果相近,性能依然取决于聚合物主体的组成与分子量分布。

参考文献

- [1] 董忍娥,乔勋,马吉胜,等.一种新型环保非异氰酸酯聚氨酯丙烯酸酯胶黏剂制备工艺[J].现代化工,2019,39(6):135-139,141.
- [2] 鲁程程,尹朝辉,张玉红.丙烯酸酯压敏胶的研究进展[J].胶体与聚合物,2020,38(3):141-145.
- [3] 张筱榕,薛燕波,杨化浩,等.胶黏剂检测评价技术研究进展[J].现代化工,2024,44(4):233-236.
- [4] Lang M, Himer S, Wiesbrock F, et al. A review on modeling cure kinetics and mechanisms of photopolymerization[J]. Polymers, 2022, 14(10):2074.
- [5] Chen J, Li S, Wang X, et al. Synthesis and characterization of pressure-sensitive adhesives based on a naphthyl curing agent[J]. Polymers, 2023, 15(23):4516.
- [6] Lovell P A, Schork F J. Fundamentals of emulsion polymerization[J]. Biomacromolecules, 2020, 21(11):4396-4441.
- [7] Kim J S, Kim H J, Kim Y D. Flexibility properties of pressure-sensitive adhesive with different pattern of crosslinking density for electronic displays[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15:1408-1415.
- [8] Kim H J, Czech Z, Bartkowiak M, et al. Study of UV-initiated polymerization and UV crosslinking of acrylic monomers mixture for the production of solvent-free pressure-sensitive adhesive films[J]. Polymer Testing, 2022, 105:107424.
- [9] Kim G T, Go H B, Yu J H, et al. Cytotoxicity, colour stability and dimensional accuracy of 3D printing resin with three different photoinitiators[J]. Polymers, 2022, 14(5):979.
- [10] Sousa C M, Fernandes J R, Coelho P J. Naphthopyrans as efficient dual color photoinitiators for volumetric 3D printing[J]. European Polymer Journal, 2023, 196:112312.
- [11] Jagtap A, More A. A review on self-initiated and photoinitiator-free system for photopolymerization[J]. Polymer Bulletin, 2021, 79(10):8057-8091.
- [12] Chen Y C, Liu T Y, Li Y H. Photoreactivity study of photoinitiated free radical polymerization using Type II photoinitiator containing thioxanthone initiator as a hydrogen acceptor and various amine-type co-initiators as hydrogen donors[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2020, 18(1):99-106.
- [13] Zhao X, Li Y, Lin S, et al. DFT studies of solvent effect in hydrogen abstraction reactions from different allyl-type monomers with benzoyl radical[J]. BMC Chemistry, 2023, 17(1):111.
- [14] 郭瑞林,钱军,石一峰.照射条件对UV光固化丙烯酸酯压敏胶性能的影响[J].中国胶粘剂,2022,31(6):8-13.
- [15] Dumur F. Recent advances on core-extended thioxanthenes as efficient photoinitiators of polymerization[J]. European Polymer Journal, 2024, 206:112794.
- [16] Park J W, Shim G S, Back J H, et al. Characteristic shrinkage evaluation of photocurable materials[J]. Polymer Testing, 2016, 56:344-353.
- [17] Nikitas N F, Gkizis P L, Kokotos C G. Thioxanthone: A powerful photocatalyst for organic reactions[J]. Organic & Biomolecular Chemistry, 2021, 19(24):5237-5253. ■
- [18] Kim T, Kim G P, Jang J, et al. An investigation on the selective hydrodealkylation of C_9^+ aromatics over alkali-treated Pt/H-ZSM-5 zeolites[J]. Canadian Medical Association Journal, 2016, 6(14):1170.
- [19] 王骊骐.不同硅铝比纳米片层ZSM-5分子筛的合成与应用[D].银川:宁夏大学,2022.
- [10] 赵鹏.丝光沸石的合成与改性及其二甲醚羰基化反应性能[D].上海:华东理工大学,2020.
- [11] 孙厚刚.碱土金属修饰的纳米H β 沸石的制备及其2-甲氧基萘酰基化性能研究[D].大连:大连理工大学,2022.
- [12] Röger H P, Möller K P, O'Connor C T. The reaction network in the conversion of 1,2,4-trimethylbenzene over HZSM-5[J]. Journal of Catalysis, 1998, 176(1):68-75.
- [13] Souverijns W, Parton R, Martens J A, et al. Mechanism of the paring reaction of naphthenes[J]. Catalysis Letters, 1996, 37:207-212. ■

(上接第188页)

- [2] 郭宗文.偏三甲苯加氢转化分子筛和Ni-Al复合氧化物催化剂的研制[D].长春:吉林大学,2010.
- [3] 刘彤,王杰广,王嘉欣,等.一种由 C_9^+ 链烷烃生产轻质芳烃的方法;CN115232640A[P].2022-10-25.
- [4] Cheng J C, Oliveri C G. Process and Catalyst for C_9^+ Aromatics Conversion; US WO2015/009409A2[P].2015-01-22.
- [5] Lim D, Jang J, Kim T, et al. Selective hydrodealkylation of C_9^+ aromatics to benzene, toluene, and xylenes (BTX) over a Pt/H-ZSM-5 catalyst[J]. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2015, 407:147-151.
- [6] 刘玉洁.Y型分子筛的酸性和孔道在煤热解气态焦油催化改质中的作用[D].太原:太原理工大学,2018.
- [7] Xiao X, Butler J R. Method of conversion of heavy aromatics; US 2003/0092950A1[P].2003-05-15.