

# 环丁砜对裂解汽油一、二段 加氢催化剂的影响

马好文<sup>1,2,3</sup>, 宋健强<sup>4\*</sup>, 胡晓丽<sup>1</sup>, 梁顺琴<sup>1</sup>, 孙利民<sup>1</sup>, 冯辉霞<sup>2,3\*</sup>

(1. 中国石油石油化工研究院兰州化工研究中心, 甘肃 兰州 730000;

2. 兰州理工大学石油化工学院, 甘肃 兰州 730000;

3. 兰州理工大学, 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

4. 中国石油兰州石化公司, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**在固定床反应装置上考察了环丁砜对裂解汽油一、二段加氢催化剂加氢性能的影响, 结果表明, 环丁砜对裂解汽油一段 Pd 系与 Ni 系加氢催化剂基本没有毒害作用, 原因是环丁砜的硫原子最外层电子结构处于稳定状态, 不存在孤对电子, 无法向活性金属 d 空轨道提供电子, 故不会在催化剂活性组分 Pd、Ni 中心发生吸附; 当环丁砜质量分数 > 100  $\mu\text{g/g}$  时, 则会降低二段 Mo-Co-Ni 加氢催化剂脱硫效率, 这是因为随着原料中总硫质量分数的升高, 必然增加脱硫难度, 但通过提高入口反应温度可迅速使产品合格。

**关键词:** 裂解汽油; 加氢催化剂; 环丁砜; 苯乙烯抽提

中图分类号: TQ032

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2017)08-0113-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2017.08.026

## Effects of sulfolane on performance of catalysts for two stages hydrogenation of pyrolysis gasoline

MA Hao-wen<sup>1,2,3</sup>, SONG Jian-qiang<sup>4\*</sup>, HU Xiao-li<sup>1</sup>, LIANG Shun-qin<sup>1</sup>,  
SUN Li-min<sup>1</sup>, FENG Hui-xia<sup>2,3\*</sup>

(1. Lanzhou Petrochemical Research Center, PetroChina Petrochemical Research Institute, Lanzhou 730000, China;

2. School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China;

3. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China; 4. PetroChina Lanzhou Petrochemical Company, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The effects of sulfolane on the performance of catalysts for the first stage and second stage hydrogenation of pyrolysis gasoline are investigated with a fixed-bed reactor. The results show sulfolane has hardly toxic effect on activity of Pd-based or Ni-based catalyst for first-stage hydrogenation of pyrolysis gasoline. The possible reason is that the outermost orbital electronic structure of sulfur atom in sulfolane is in a stable condition without lone pair electrons, which is not able to provide electrons to empty d orbit of active metal. Therefore, the active sites of Pd or Ni, active ingredients of catalyst, cannot adsorb sulfolane, and then cannot be poisoned. The desulfurizing efficiency of second-stage catalyst (Mo-Co-Ni) decreases when the content of sulfolane exceeds 100  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ . This is because rising of the content of total sulfur is bound to increase difficulty of desulfurization. However, increasing reaction temperature at the entrance can solve this problem and qualified product is quickly obtained.

**Key words:** pyrolysis gasoline; hydrogenation catalyst; sulfolane; styrene extraction

裂解汽油是蒸汽裂解制乙烯装置的重要副产物, 主要为  $\text{C}_5 \sim \text{C}_9$  馏分, 产量为乙烯生产能力的 60%~80% (质量分数), 是抽提芳烃的重要原料<sup>[1-2]</sup>。由于裂解汽油中含有大量的不饱和烃 (双烯、单烯) 以及硫、氮等杂质, 导致其稳定性较差, 极易生成胶质, 传统方法是将裂解汽油  $\text{C}_5 \sim \text{C}_9$  馏分进行分离分出  $\text{C}_5$  与  $\text{C}_9$  馏分作为石油树脂原料, 剩余  $\text{C}_6 \sim \text{C}_8$  中间馏分进行两段加氢<sup>[2-4]</sup>。一段加氢主要是在低温条件下将双烯烃与链烯基芳烃选择性加氢为单烯烃和烷基芳烃, 一般选用贵金属钯基催化剂或非贵金属镍基催化剂; 二段加氢属于全加氢反应,

在高温下脱除剩余烯烃与硫等杂质, 经加氢后的  $\text{C}_6 \sim \text{C}_8$  馏分被送到下游芳烃抽提装置进一步精馏分离出苯、甲苯和二甲苯产品<sup>[5-8]</sup>。

裂解汽油中含有 4%~6% 的苯乙烯 (SM), 他是一种重要的基本有机化工原料, 主要用于合成树脂、制药、染料、农药等行业<sup>[9-10]</sup>。近年来受下游行业快速发展的刺激, 我国苯乙烯产量严重供不应求。然而传统裂解汽油加氢工艺把大量高附加值的苯乙烯 ( $\text{C}_8$  馏分) 饱和为价值低的乙苯, 不仅造成了资源浪费, 增加了能耗、氢耗, 缩短了加氢催化剂寿命, 且较多的乙苯也降低了混合二甲苯品质<sup>[11]</sup>。

收稿日期: 2017-04-25

作者简介: 马好文 (1984-), 男, 博士研究生, 工程师, 主要从事化工加氢催化研发工作, 0931-7982787, mahaowen@petrochina.com.cn; 冯辉霞 (1965-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事复合材料的研究, 通讯联系人, fenghx@163.com。

近年来,随着乙烯规模的大型化发展,裂解汽油产量大幅增加,从裂解汽油中抽提苯乙烯技术已受到了广泛关注<sup>[12-13]</sup>。为了进一步提高装置经济效益,可将苯乙烯抽余物料返回裂解汽油加氢装置。苯乙烯抽提溶剂一般选用环丁砜<sup>[14]</sup>,导致苯乙烯抽余物料会残留微量的溶剂环丁砜( $<20 \mu\text{g/g}$ ),然而环丁砜对裂解汽油加氢催化剂的影响目前还不明确。因此,笔者详细考察了环丁砜对裂解汽油一、二段加氢催化剂加氢性能的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 催化剂制备

#### 1.1.1 裂解汽油一段加氢 Ni 系催化剂(Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

称取一定量的拟薄水铝石,加入适量田菁粉、硝酸与水进行捏合,然后挤条成型,120℃干燥,1 000℃焙烧后制得载体。配置一定浓度的 Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 溶液,利用等体积浸渍法制备催化剂,经 120℃干燥和 300℃焙烧后制得裂解汽油一段加氢用 Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂。

#### 1.1.2 裂解汽油一段加氢 Pd 系催化剂(Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

称取一定量的拟薄水铝石,加入适量田菁粉、硝酸与水进行捏合,然后挤条成型,120℃干燥,1 000℃焙烧后制得载体。配置一定浓度的 PdCl<sub>2</sub> 溶液,利用浸渍法制备催化剂,经 120℃干燥和 450℃焙烧后制得裂解汽油一段加氢用 Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂。

#### 1.1.3 裂解汽油二段加氢催化剂(Mo-Co-Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

称取一定量的拟薄水铝石,加入适量田菁粉、硝酸与水进行捏合,然后挤条成型,120℃干燥,600℃焙烧后制得载体。利用氨水将活性组分 Mo、Co、Ni 的无机盐完全溶解配制成浸渍液,等体积浸渍氧化铝载体,经 120℃干燥和 450℃焙烧后制得裂解汽油二段加氢用 Mo-Co-Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂。

### 1.2 环丁砜对催化剂性能影响的评价

一段加氢催化剂在 500 mL 绝热床装置上进行评价,催化剂装填量均为 200 mL,为了便于控制反应温升,采用 300 mL 氧化铝载体将催化剂均匀稀释。Ni 与 Pd 催化剂使用之前用氢气分别在 450℃ 与 110℃ 条件下进行还原活化处理。

二段加氢催化剂在 250 mL 绝热床装置上进行评价,催化剂装填量为 150 mL,为了便于控制反应温升,采用 100 mL 氧化铝载体将催化剂均匀稀释。

催化剂使用之前用硫化剂 CS<sub>2</sub> 在 300℃ 条件下进行硫化处理。

对一、二段加氢催化剂进行评价时,压力为 2.8 MPa,氢油比为 200:1。

### 1.3 分析表征

催化剂活性组分质量分数用美国瓦里安公司生产的 AA240FS 原子吸收光谱仪进行测试。催化剂比表面积和孔体积用美国 Micromeritics 公司生产的 TriStar II 3020 全自动比表面与孔隙分析仪进行测试。催化剂强度用法国 Vinci 公司生产的颗粒强度测定仪进行测试(ASTMD-4179 方法)。裂解汽油原料及加氢产品双烯值与溴价分别采用苹果酸酐法与氯化碘法进行分析。原料及产品硫质量分数用微库仑仪进行分析。

### 1.4 试验原料油

一段加氢试验原料油采自兰州石化分公司乙烯厂汽油加氢装置 C<sub>6</sub>~C<sub>7</sub> 馏分;二段加氢试验原料采用一段加氢产品。原料油的主要性质如表 1 所示。

表 1 原料油性质

项目	一段原料	二段原料
密度/(g·mL <sup>-1</sup> )	0.846	0.846
双烯值/[g I·(100 g) <sup>-1</sup> ]	13.02	—
溴价/[g Br·(100 g) <sup>-1</sup> ]	23.07	15.86
w(硫)/(μg·g <sup>-1</sup> )	—	92.45

## 2 结果与讨论

### 2.1 催化剂理化性质

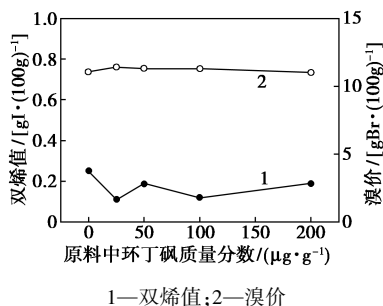
制备的裂解汽油一、二段加氢催化剂的理化性质如表 2 所示。

表 2 催化剂理化性质

项目	规格		
	一段 Ni 系 催化剂	一段 Pd 系 催化剂	二段 催化剂
活性组分	Ni	Pd	MoO <sub>3</sub> -CoO-NiO
外观	黑色 三叶草条	浅褐色 三叶草条	蓝灰色 三叶草条
尺寸/mm	2.0×3.0~ 8.0	2.9×3.0~ 8.0	1.2×3.0~ 8.0
堆积密度/(g·mL <sup>-1</sup> )	0.70	0.61	0.70
径向抗压碎力/(N·cm <sup>-1</sup> )	121	194	218
比表面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	110	103	260
w(活性组分)/%	12.6	0.31	MoO <sub>3</sub> :14.5 CoO:3.7 NiO:2.1

## 2.2 环丁砜对裂解汽油一段加氢 Ni 系催化剂 (Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 的影响

环丁砜对裂解汽油一段加氢 Ni 系催化剂的影响如图 1 所示。由图 1 可以看出,环丁砜对 Ni 系催化剂基本不具有毒化作用,原料中环丁砜的加入对产品双烯值及溴价基本没有影响,即使环丁砜质量分数高达 200 μg/g,产品双烯值与溴价仍保持稳定(双烯值约为 0.2 g l/100 g,溴价约为 11.3 g Br/100 g)。

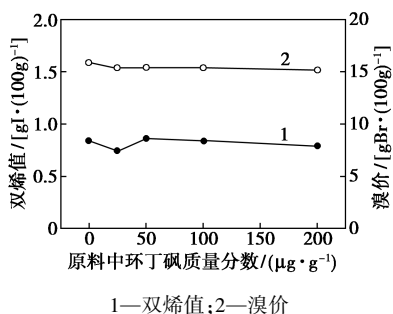


注:工艺条件:入口温度为 45℃,空速为 3.0 h<sup>-1</sup>,稀释比为 1:1。

图 1 环丁砜质量分数对一段加氢 Ni 系催化剂加氢性能的影响

## 2.3 环丁砜对裂解汽油一段加氢 Pd 系催化剂 (Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 的影响

环丁砜对裂解汽油一段加氢 Pd 系催化剂的影响如图 2 所示。由图 2 可以看出,环丁砜对 Pd 系催化剂依然不具有毒化作用,原料中环丁砜的加入对产品双烯值及溴价基本没有影响,即使环丁砜质量分数高达 200 μg/g,产品双烯值与溴价仍保持稳定(双烯值约为 0.8 g l/100 g,溴价约为 15.4 g Br/100 g)。



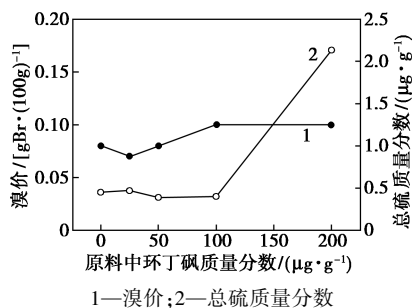
注:工艺条件:入口温度为 40℃,空速为 2.0 h<sup>-1</sup>,稀释比为 2:1。

图 2 环丁砜质量分数对一段加氢 Pd 系催化剂加氢性能的影响

## 2.4 环丁砜对裂解汽油二段加氢催化剂 (Mo-Co-Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 的影响

环丁砜对裂解汽油二段加氢催化剂的影响如图 3 所示。由图 3 可以看出,环丁砜对催化剂的烯烃

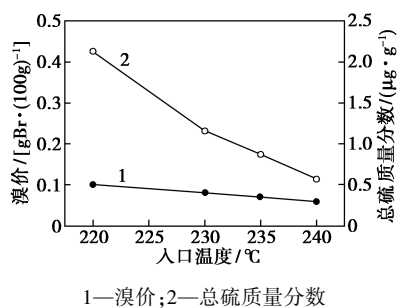
饱和性能基本没有影响,即使环丁砜质量分数高达 200 μg/g,产品溴价依然只有 0.1 g Br/100 g。原料中环丁砜质量分数 ≤ 100 μg/g 时,产品总硫质量分数一直保持稳定(约 0.5 μg/g);但当环丁砜质量分数达到 200 μg/g 后,产品总硫质量分数迅速上升至 2.1 μg/g,这是由于环丁砜本身就是硫化物(硫质量分数为 26.67%),随着环丁砜质量分数的增加,原料总硫的质量分数也在增加,从而对催化剂的脱硫活性提出了更高的要求。



注:工艺条件:入口温度为 220℃,空速为 2.0 h<sup>-1</sup>。

图 3 环丁砜对二段加氢催化剂加氢性能的影响

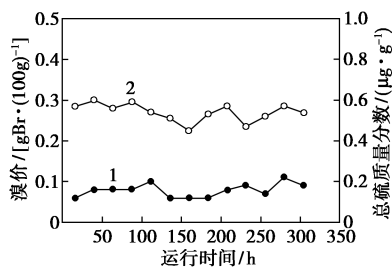
在原料中环丁砜质量分数为 200 μg/g 条件下,考察了反应器入口温度对催化剂性能的影响,结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,随着入口温度的提高,产品溴价基本保持稳定,但产品总硫质量分数逐渐降低,当入口温度 ≥ 235℃,产品总硫质量分数即可满足裂解汽油二段加氢控制指标(总硫质量分数 < 1.0 μg/g)。因此,可通过适当提高反应入口温度来解决原料中环丁砜质量分数超标的问题。



注:工艺条件:空速为 2.0 h<sup>-1</sup>,原料环丁砜质量分数 200 μg/g。

图 4 入口温度对加氢产品规格的影响

在原料中环丁砜质量分数为 200 μg/g 条件下的二段加氢催化剂的稳定性结果如图 5 所示。连续 300 h 的实验结果表明,制备的二段加氢催化剂具有稳定的加氢和脱硫活性,加氢产品溴价 ≤ 0.11 g Br/100 g,总硫质量分数 ≤ 0.6 μg/g。



1—溴价;2—总硫质量分数

注:工艺条件:空速为  $2.0 \text{ h}^{-1}$ ,入口温度为  $240^\circ\text{C}$ ,原料环丁砜质量分数为  $200 \mu\text{g/g}$ 。

图 5 二段催化剂稳定性评价结果

## 2.5 机理分析

### 2.5.1 一段加氢机理

金属态催化剂的加氢机理是活性金属的空 d 轨道与氢分子成键电子及反应物双键相互作用,使得氢分子解离为氢原子并吸附在金属表面,同时烯烃也被吸附在金属表面, $\pi$  键被削弱,氢原子与烯烃双键结合后,金属催化剂对烷烃吸引力减弱,烷烃离开催化剂表面,完成加氢。对于此类催化剂,发生硫中毒的原因是硫化物通过物理/化学吸附形成的硫—金属键占据催化剂活性金属中心,从而使其失去吸附氢气与烯烃分子的能力<sup>[15]</sup>。

裂解汽油一段加氢催化剂的活性中心是金属态的 Pd、Ni 微晶,属于金属态催化剂加氢;而环丁砜分子结构如图 6 所示,其硫原子最外层电子结构处于稳定状态,不存在孤对电子,无法向活性金属 d 空轨道提供电子,故不会在催化剂活性组分 Pd、Ni 中心发生吸附,因此,环丁砜对裂解汽油一段加氢催化剂 Pd 与 Ni 系催化剂均没有毒化作用。



图 6 环丁砜分子结构

### 2.5.2 二段加氢机理

裂解汽油二段加氢催化剂的活性相是过渡金属 (Co、Mo、Ni) 硫化物,目前对于该类催化剂的加氢脱硫催化作用机理还存在许多争论,尤其对于过渡金属硫化物活性相的形成机制和结构,表面吸附物种和表面反应物种,表面反应步骤的直接实验证据还较为缺乏,但大多数研究者普遍接受 Co-Mo-S 或 Ni-Mo-S 活性相理论,并认为在 Co-Mo-S 和 Ni-Mo-S 表面存在 S 阴离子空穴,其与解离吸附的  $\text{H}_2$  分子形成—SH 基,有机硫化物分子则通过 S 原子在 S 空穴上的“端连吸附”(氢解脱硫或直接脱硫)和

芳香环(或噻吩环)上的  $\pi$  电子的“平躺吸附”(加氢脱硫)2 种平行反应途径进行脱硫<sup>[16]</sup>。

由于环丁砜属于硫化物,随着原料中环丁砜质量分数的升高,势必会增加脱硫的难度,然而反应温度的提高大大促进了加氢和直接氢解路径,且前者的增幅大于后者。因此,当二段加氢产品总硫质量分数超标时,可通过提高入口温度使其合格。

## 3 结论

(1)实验结果和理论分析均表明,环丁砜对于裂解汽油一段加氢 Pd 与 Ni 系催化剂基本没有影响。

(2)环丁砜对裂解汽油二段加氢催化剂的烯烃饱和性能基本没有影响;但当环丁砜质量分数超过  $100 \mu\text{g/g}$  后,对脱硫效率具有一定的影响,然而可通过提高入口温度使产品总硫质量分数快速达到合格。

(3)工业装置实际运行过程中, $\text{C}_8$  抽余油中环丁砜最高只有  $20 \mu\text{g/g}$ ,且将其掺入  $\text{C}_6 \sim \text{C}_7$  或  $\text{C}_5 \sim \text{C}_7$  馏分裂解汽油中后再进裂解汽油装置时,其质量分数会更低。因此,将  $\text{C}_8$  抽余油配入到裂解汽油原料中进行加氢时,不会对裂解汽油一段钯系、镍系催化剂及二段催化剂的使用性能产生影响。

## 参考文献

- [1] 钱颖,康宏敏,王宗宝,等.新型镍基裂解汽油一段加氢催化剂 LY-2008 侧线评价[J].化工进展,2010,29(6):1168-1171.
- [2] Qian Ying, Liang Shunqing, Wang Tinghai, et al. Enhancement of pyrolysis gasoline hydrogenation over Zn-and Mo-promoted Ni/ $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  catalysts[J].Catalysis Communications,2011,12:851-853.
- [3] 刘瑞成.裂解汽油加氢一、二段催化剂反应性能的研究[J].乙烯工业,1994,6(2):50-63.
- [4] 肖晨光,殷北冰,王刚.新型裂解汽油一段加氢催化剂的研制[J].炼油与化工,2005,16(1):19-22.
- [5] 梁顺琴,龚光碧,吴杰,等.高分散 Ni/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂的制备及其裂解汽油一段加氢性能[J].化工进展,2010,29(9):1649-1653.
- [6] Gaspar A B, dos Santos G R, de Souza Costa R, et al. Hydrogenation of synthetic PYGAS—Effects of zirconia on Pd/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  [J]. Catalysis Today,2008,133-135:400-405.
- [7] Authayanun S, Pothong W, Saebea D, et al. Modeling of an industrial fixed bed reactor based on lumped kinetic models for hydrogenation of pyrolysis gasoline[J].Journal of Industrial and Engineering Chemistry,2008,14(6):771-778.
- [8] 吴杰,马好文,郑云弟,等.高抗结焦、高选择性裂解汽油二段加氢催化剂[J].化工进展,2010,29(增刊):194-197.

液,取一定体积置于锥形瓶中,以 0.2 mol/L 硫酸调节初始 pH,加入一定量 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$  和硫酸亚铁,置于恒温振荡反应器中反应 60 min,期间按设定的时间间隔取样,为使取样后的溶液  $\text{pH} > 10$ ,从而终止 Fenton 反应,在取样管中预先加入 0.1 mol/L NaOH 溶液。

### 1.3 分析方法

利用高效液相色谱法(HPLC)测定溶液中苯并噻唑浓度。色谱柱条件:柱温为 25℃,流动相为甲醇:水(体积比为 80:20),流速为 0.6 mL/min,进样量为 5  $\mu\text{L}$ 。

利用离子色谱法测定硫酸根离子、硝酸根离子。离子色谱检测条件为:AG-11-HC 保护柱(4 mm×50 mm),AS-11-HC 阴离子分析柱(4 mm×250 mm),淋洗液:20 mmol/L KOH 溶液,流速为 1.0 mL/min,进样量为 25  $\mu\text{L}$ 。柱温为 25℃。

利用高效液相色谱-质谱联用技术对苯并噻唑降解产物进行分析。色谱条件:流动相为甲醇:水(体积比为 90:10),流速为 200  $\mu\text{L}/\text{min}$ ,进样量为 1  $\mu\text{L}$ 。质谱条件:电喷雾(ESI),正离子模式条件(GS1 55,GS2 55,CUR 35,TEM 500,电压 5 000 V),负离子模式条件(GS1 55,GS2 55,CUR 35,TEM 500,电压-4 500 V)。

### 1.4 动力学模拟

在苯并噻唑氧化降解过程中,以去除率和降解动力学来评价其降解效果与降解速率:

$$\text{去除率} = (c_0 - c_t) / c_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: $c_t$  为任一  $t$  时刻苯并噻唑的质量浓度,mg/L; $c_0$  为苯并噻唑的初始质量浓度,mg/L。

一级降解动力学公式为:

$$-dc/dt = kc \quad (2)$$

经积分后转换为:

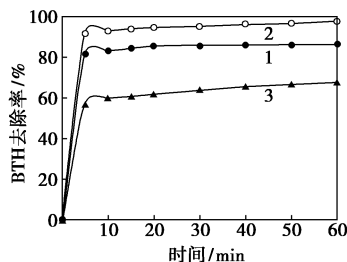
$$kt = \ln(c_0/c_t) \quad (3)$$

式中: $k$  为一级反应动力学常数,由苯并噻唑降解率与反应时间  $t$  拟合而得。

## 2 实验结果

### 2.1 初始 pH 的影响

控制反应温度为 30℃, $\text{H}_2\text{O}_2$  体积分数为 4 mL/L, $n(\text{H}_2\text{O}_2)/n(\text{Fe}^{2+})$  为 10:1,用硫酸调节 pH 分别为 2、2.5、3,对 100 mg/L 的苯并噻唑水溶液进行氧化降解,结果如图 1 所示。



1—pH=2;2—pH=2.5;3—pH=3

图 1 pH 对苯并噻唑降解的影响

由图 1 可以看出,反应前 10 min 内,苯并噻唑氧化降解反应速度较快,初始 pH 分别为 2、2.5、3 时,降解率分别为 82.88%、92.76%、59.54%。反应进行 20 min 后,苯并噻唑质量浓度趋于稳定。当 pH 为 2.5 时,芬顿体系下对苯并噻唑的去除效果最佳,反应 20 min 后,苯并噻唑质量浓度由开始的 100 mg/L 降低到 5.63 mg/L,去除率达到 94.37%。

### 2.2 $\text{H}_2\text{O}_2$ 体积分数的影响

控制反应温度为 30℃,pH 为 2.5,控制反应过程中  $n(\text{H}_2\text{O}_2)/n(\text{Fe}^{2+}) = 10:1$ ,30%  $\text{H}_2\text{O}_2$  投加量为 3~6 mL/L,考察  $\text{H}_2\text{O}_2$  体积分数对苯并噻唑降解效果的影响,结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出,反应 5 min 内, $\text{H}_2\text{O}_2$  体积分数为 5 mL/L 以上的苯并噻唑去除率可达 74.35% 以上, $\text{H}_2\text{O}_2$  体积分数分别为 3、4 mL/L 时,苯并噻唑去除率分别为 80.99%、86.81%。因此, $\text{H}_2\text{O}_2$  体积分数并非越大越好。另根据文献[15], $\text{H}_2\text{O}_2$  体积分数过高会产生氧化能力远弱于  $\cdot\text{OH}$  的  $\text{HO}_2\cdot$ ,降

(上接第 116 页)

- [9] 金春玉,王萍,赵铁真.从裂解汽油中回收苯乙烯工艺及技术分析[J].化工科技,2011,19(6):80-83.
- [10] 曾远森.裂解汽油苯乙烯抽提技术的应用[J].广东化工,2013,40(15):108-109.
- [11] 庞海舰,阚一群,曾远森,等.苯乙烯抽提技术配套工艺[J].广东化工,2014,41(8):39-40.
- [12] 李涛.从裂解汽油中分离回收苯乙烯技术综述[J].化工进展,2004,23(5):492-495.

- [13] 庞海舰,阚一群,曾远森.裂解汽油抽提苯乙烯技术中苯乙炔加氢技术[J].广东化工,2014,41(16):246-248.
- [14] 徐志东,侯凯湖,薛新.环丁砜连续萃取精馏从  $\text{C}_8$  芳烃中分离苯乙烯[J].石油与天然气化工,2009,38(2):93-95.
- [15] 梁顺琴,吕龙刚,马好文,等.硫化物对裂解汽油一段加氢用 Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂性能的影响[J].现代化工,2014,34(9):85-87.
- [16] 柴永明,安高军,柳云骥,等.过渡金属硫化物催化加氢作用机理[J].化学进展,2007,19(2/3):235-242. ■