

# 新型劣质柴油加氢催化剂的制备及应用

张文秀<sup>1</sup>, 丁巍<sup>1,3\*</sup>, 王鼎聪<sup>2</sup>, 赵德智<sup>1</sup>

(1. 辽宁石油化工大学石油化工学院, 辽宁抚顺 113001; 2. 中国石化抚顺石油化工研究院, 辽宁抚顺 113001; 3. 中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室, 北京 102249)

**摘要:**以大孔、低堆积密度纳米自组装氧化铝为载体,通过共浸剂改性制备负载 Mo-Ni 双金属活性组分的纳米自组装 Mo-Ni-P 柴油加氢催化剂。利用 BET 方法对催化剂的孔结构进行表征。并在固定床微型反应装置上,通过脱硫率的考察,确定最佳反应条件:压力为 6.5 MPa,温度为 370℃,空速为 1.5 h<sup>-1</sup>,氢油比为 700:1。同时,对 5 种不同金属配比的 Mo-Ni-P 催化剂进行 40 h 的加氢性能评价。实验结果表明,Mo/Ni 质量比为 5:1 时,加氢效果较好,其平均脱硫、脱氮和芳烃饱和率分别为 95.92%、97.84% 和 73.50%。

**关键词:**加氢催化剂;催化裂化柴油;脱硫,脱氮,芳烃饱和

中图分类号:O643

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2015)01-0114-04

## Preparation and application of a novel hydrogenation catalyst for inferior diesel

ZHANG Wen-xiu<sup>1</sup>, DING Wei<sup>1,3\*</sup>, WANG Ding-cong<sup>2</sup>, ZHAO De-zhi<sup>1</sup>

(1. School of Petrochemical Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China;

2. Fushun Research Institute of Petroleum and Petrochemicals, Fushun 113001, China;

3. State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** Using self-assembled nano alumina with the large aperture and low bulk density as support, the nano-assembly bimetallic Mo-Ni agents are used to prepare the supported Mo-Ni-P diesel hydrogenation catalysts by co-impregnation method. The pore structures of the catalysts are characterized by the BET method. The optimal experimental conditions are obtained by examining the desulfurization rate in the fixed-bed microreactor: 6.5 MPa of the pressure, 370℃ of temperature, 1.5 h<sup>-1</sup> of the space velocity and 700:1 of hydrogen to oil. Meanwhile, the 40 hours of hydrogenation performance of the catalysts with different metal proportions are evaluated. The results show that better hydrogenation effect can be achieved when the mass ratio of Mo/Ni is 5:1. The average desulfurization rate, denitrification rate and dearomatic saturation rate are 95.92%, 97.84% and 73.50%, respectively.

**Key words:** hydrogenation catalyst; catalytic cracking diesel; desulfurization; denitrification; dearomatic saturation

随着全球柴油型汽车数量的增长,国内外对柴油的需求强烈,因此各炼油企业都致力于增产柴油。齐立志等<sup>[1]</sup>在低温、低氢油比等较差的条件下对混合油进行实验,研制了一种有较高脱氮性能的加氢催化剂(LH<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),并应用于胜利油田,以胜利催柴建立动力学模型<sup>[2]</sup>,满足了对油品质量的更高要求<sup>[3]</sup>;Cheng 等<sup>[4]</sup>在固定床微型反应装置上采用并流和逆流操作对柴油进行加氢处理,当操作条件相同时,逆流操作的脱氮率高于并流操作,氮质量分数从 457 μg/g 减少到 1.8 μg/g,但这些技术存在催化剂孔径小,扩散阻力大,活性低等缺点;Wandas<sup>[5]</sup>用 Co-Mo、NiMo 和 NiW 等催化剂进行加氢脱氮处理,通过该催化剂可以得到氮质量分数非常低的产品;中国石化北京石油化工科学研究院(RIPP)<sup>[6]</sup>用 RN 催化剂系列,在空速比常规脱硫技术高 80% 的情况下,生产出硫质量分数较低的油;王鼎聪<sup>[7]</sup>研究了

一种纳米自组装大孔径介孔氧化铝载体的制备方法。以上实验均采用加氢精制技术,而加氢处理的核心是制备加氢催化剂,载体性能是制备优良加氢处理催化剂的关键<sup>[8]</sup>。

笔者以大孔、低堆积密度的氧化铝为载体,利用共浸剂改性方法合成纳米自组装 Mo-Ni-P 柴油加氢催化剂,进行 BET 表征,通过对劣质柴油的加氢脱硫处理,确定最佳工艺条件,并对一系列催化剂进行筛选,使其具有较好的脱硫、脱氮及芳烃饱和性能。

## 1 实验部分

### 1.1 主要试剂及原料

聚异丁烯、马来酸三乙醇胺酯、自制 150HVI(润滑油基础油)工业品、去离子水、磷酸、MoO<sub>3</sub>、碱式碳酸镍(化学纯)、硼酸(化学纯)、九水硝酸铝(化学

收稿日期:2014-07-09

基金项目:中国石油化工集团资助项目(030801);大学生创新创业训练项目(乙类)(201410148039)

作者简介:张文秀(1993-),女,本科在读,研究方向为应用化学,1097943490@qq.com;丁巍(1978-),女,博士在读,讲师,研究方向为清洁燃料,重质油加工,通讯联系人,cicy1125@163.com。

纯)、柠檬酸(分析纯)、尿素(化学纯)、十六烷基溴化铵(分析纯)。

## 1.2 催化剂的制备

采用王鼎聪发明的一种体相催化剂及其制备方法<sup>[9]</sup>,将共浸剂加入到不同金属配比的钼镍磷溶液中,通过自组装方法形成透明胶束,将此超增溶胶束与纳米自组装载体采用分步共浸法进行均匀浸渍。然后,烘干,焙烧,得到一系列纳米自组装 Mo-Ni-P/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 柴油加氢处理催化剂。

## 1.3 微型固定床反应装置工艺流程

加氢工艺流程如图1所示。将制备好的纳米自组装 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂 10 mL(按体积计)装入反应器中,用微量泵将质量分数 2% 的 CS<sub>2</sub> 煤油送入反应器,经过 230℃ 4 h、330℃ 8 h 的催化剂的预硫化后,停止通入硫化油,进催化裂化柴油,保持 330℃ 一段时间后,对反应器进行升温,调整工艺参数,在不同温度、压力、氢油比及空速条件下反应得到不同的油品,确定最佳工艺条件,并在最佳条件下对一系列催化剂的加氢性能进行评价。

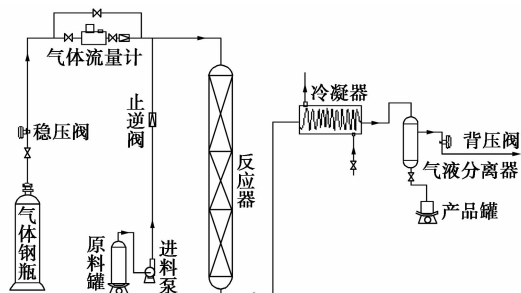


图1 加氢装置工艺流程

## 1.4 原油的基本性质

实验所用原料油为镇海炼化的劣质催化裂化柴油,其主要性质见表1。

表1 原料油的基本性质

| 基本性质                          | 镇海炼化 FCC 柴油 |
|-------------------------------|-------------|
| w(硫)/%                        | 1.24        |
| w(氮)/%                        | 1507        |
| 闪点(闭口)/℃                      | 86          |
| 酸值(电位滴定法)                     | 0           |
| 密度(20℃)/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 962.2       |
| w(族组成)/%                      |             |
| 饱和烃                           | 16.8        |
| 环烷烃                           | 6.7         |
| 单环芳烃                          | 6.0         |
| 双环芳烃                          | 7.9         |
| 多环芳烃                          | 69.3        |
| 总芳烃                           | 83.2        |

从表1可以看出,FCC 柴油的原料油中硫、氮和芳烃的质量分数都较高,说明原料油的质量较差。其中总芳烃质量占总质量的 83.2%,单环芳烃的质量分数为 6.0%,多环芳烃的质量分数为 69.3%,可以看出多环芳烃占大多数。原油中的这些多环芳烃在加氢的同时也伴随着脱氢反应,发生缩聚,从而造成催化剂的结焦<sup>[10]</sup>,使装置运转周期缩短,生产成本提高。然而,实验所制备的催化剂具有较好的加氢脱硫、脱氮及芳烃饱和性能,能够明显提高装置运转周期,降低成本。

## 2 结果与讨论

### 2.1 催化剂的孔性质

以大孔、低堆积密度纳米自组装氧化铝为载体,通过共浸剂改性制备一系列负载 Mo/Ni 质量比为 1:1、2:1、3:1、4:1 和 5:1 的双金属纳米自组装 Mo-Ni-P 柴油加氢催化剂,其孔性质如表2所示。从表2可以看出,纳米自组装催化剂的孔容为 0.28 ~ 0.31 cm<sup>3</sup>/g,比表面积为 176.54 ~ 186.97 m<sup>2</sup>/g,平均孔径为 6.07 ~ 6.94 nm,堆积密度在 0.53 g/cm<sup>3</sup> 左右,孔径在 <6 nm 和 30 ~ 100 nm 的范围内高度集中,说明纳米自组装催化剂具有高比表面积、低堆积密度和双峰孔的结构。其中,小孔所占的比例较大,最高为 67.23%。这些大量的小孔为加氢脱硫反应提供大量的反应器,增强加氢脱硫效果,而大孔的存在又有利于大分子反应物和产物的扩散,提高了催化剂的容杂质能力,从而抑制催化剂结焦的产生<sup>[11-12]</sup>。所以,系列催化剂适合于劣质催化裂化柴油的加氢处理。

表2 不同催化剂的孔性质

| 催化剂                                     | MNP-1  | MNP-2  | MNP-3  | MNP-4  | MNP-5  |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| 比表面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> ) | 186.97 | 185.48 | 179.72 | 181.89 | 176.54 |
| 平均孔径/nm                                 | 6.07   | 6.31   | 6.47   | 6.64   | 6.94   |
| 最可几孔径/nm                                | 8.90   | 8.90   | 8.90   | 8.90   | 8.90   |
| 孔容/(cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )  | 0.28   | 0.29   | 0.30   | 0.30   | 0.31   |
| 堆积密度/(g·cm <sup>-3</sup> )              | 0.58   | 0.55   | 0.53   | 0.53   | 0.52   |
| 金属质量分数/%                                | 33.22  | 32.07  | 31.73  | 31.73  | 30.05  |
| 孔分布/%                                   |        |        |        |        |        |
| <6 nm                                   | 67.23  | 61.03  | 60.89  | 56.20  | 52.32  |
| 30 ~ 100 nm                             | 21.28  | 23.36  | 21.25  | 18.48  | 22.83  |

### 2.2 反应温度对脱硫率的影响

在体积空速为 1.5 h<sup>-1</sup>,氢油比为 700:1,压力

为 6.5 MPa 下,考察反应温度对脱硫性能的影响,结果如图 2 所示。

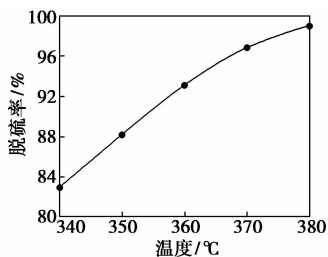


图 2 反应温度对脱硫率的影响

由图 2 可以看出,Mo-Ni-P/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂在温度为 380°C 时,脱硫率为 98.01%;370°C 时,脱硫率为 97.01%。脱硫率随着温度的升高而增大,但提高温度将增加生产成本,所以,实验选择 370°C 为最佳的反应温度。

### 2.3 体积空速对脱硫率的影响

在反应温度为 370°C,氢油比为 700:1,压力为 6.5 MPa 下,考察体积空速对脱硫性能的影响,结果如图 3 所示。

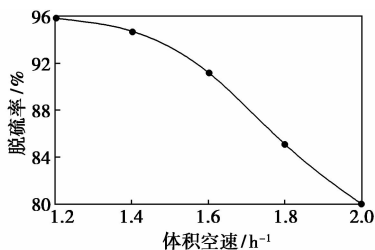


图 3 体积空速对脱硫率的影响

由图 3 可以看出,体积空速从 1.2 h<sup>-1</sup> 增加到 2.0 h<sup>-1</sup> 时,脱硫率从 95.90% 下降到 80.08%。空速降低,延长了催化剂与反应物的接触时间,增加了精制的深度;若空速过低,催化剂的利用率也会随之下降。在实验条件下,体积空速对脱硫率的影响较大。为了获得较高的脱硫率,体积空速应选择 1.5 h<sup>-1</sup>。

### 2.4 氢油比对脱硫率的影响

在温度为 370°C,体积空速为 1.5 h<sup>-1</sup>,压力为 6.5 MPa 的条件下,考察氢油比对脱硫性能的影响,结果图 4 所示。

由图 4 可以看出,随着氢油比的增加,脱硫率呈先上升后下降的趋势。当氢油比达到 800:1 时其脱硫率最高;氢油比继续增加时,脱硫率呈下降趋势。这是因为,氢油比较大时,总的气相分率与氢分压也增加,反应速度随之增加,当反应物完全气化后,则反应物的分压降低,从而抵消氢分压增加对转化率

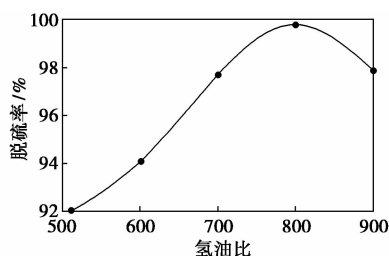


图 4 氢油比对脱硫率的影响

的影响<sup>[13]</sup>,使转化率降低。从经济效益因素等考虑,选择氢油比为 700:1。

### 2.5 反应压力对脱硫率的影响

在反应温度为 370°C,氢油比为 700:1,体积空速为 1.5 h<sup>-1</sup> 的条件下,考察压力对脱硫性能的影响,结果如图 5 所示。

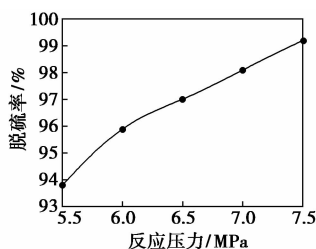


图 5 反应压力对脱硫率的影响

由图 5 可以看出,随着反应压力的增大,脱硫率增加。高压有利于含硫化合物的氢解反应,但是,高压对装置的要求较苛刻,通常加氢脱硫不采用较高的压力,当压力较高时,装置稳定塔压力不稳定,从而不利于反应的进行。实验压力达到 7.5 MPa 下,脱硫率达到 99.19%,而压力为 6.5 MPa 时,脱硫率为 96.97%,可以满足生产超低硫柴油的要求,故选择反应压力为 6.5 MPa。

综合上面的实验,最佳的工艺条件为:反应温度为 370°C,体积空速为 1.5 h<sup>-1</sup>,氢油比为 700:1,反应压力为 6.5 MPa。

## 3 催化剂加氢性能评价

在最佳工艺条件下,利用微型固定床反应装置进行催化剂的筛选,确定加氢性能较好的柴油加氢处理催化剂。

### 3.1 催化剂脱硫性能评价

在相同反应条件下,反应稳定后,每 8 h 取 1 次样,总反应时间为 40 h,考察不同金属配比的 Mo-Ni-P 纳米自组装催化剂对催化裂化柴油加氢脱硫处理效果,如表 3 所示。

表3 催化剂的 Mo/Ni 质量比对加氢脱硫性能的影响

| 时间/h | 脱硫率/% |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | MNP-1 | MNP-2 | MNP-3 | MNP-4 | MNP-5 |
| 8    | 84.0  | 91.1  | 83.1  | 91.9  | 92.8  |
| 16   | 84.9  | 89.9  | 94.7  | 90.0  | 93.9  |
| 24   | 82.1  | 93.7  | 84.0  | 90.8  | 97.8  |
| 32   | 88.0  | 90.0  | 93.6  | 93.1  | 97.0  |
| 40   | 84.3  | 92.4  | 88.1  | 92.3  | 98.1  |

从表3可以看出,5种不同配比的 Mo-Ni-P 催化剂中,1:1的催化剂脱硫效果较差,3:1的催化剂稳定性较差,而2:1、5:1和4:1的催化剂的稳定性较好,其中,4:1和5:1的催化剂脱硫率较高,平均脱硫率分别为91.62%和95.92%。可见,Mo/Ni 质量比为5:1的催化剂具有较好的脱硫效果和稳定性,其性能优于其他不同配比的催化剂。

### 3.2 催化剂脱氮性能评价

在相同的反应条件和反应时间下,同时考察了一系列 Mo-Ni-P 纳米自组装催化剂对脱氮处理效果的影响,结果如表4所示。

表4 催化剂的 Mo/Ni 质量比对加氢脱氮性能的影响

| 时间/h | 脱氮率/% |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | MNP-1 | MNP-2 | MNP-3 | MNP-4 | MNP-5 |
| 8    | 88.2  | 95.3  | 84.2  | 95.1  | 96.1  |
| 16   | 90.2  | 97.0  | 96.8  | 92.5  | 98.2  |
| 24   | 84.6  | 96.8  | 90.1  | 95.2  | 98.3  |
| 32   | 89.8  | 94.7  | 90.2  | 96.3  | 98.4  |
| 40   | 87.2  | 95.1  | 93.2  | 95.8  | 98.2  |

从表4中可以看出,5种不同配比的 Mo-Ni-P 催化剂中,1:1和3:1的催化剂脱氮效果和稳定性都较差,2:1和5:1催化剂的脱氮率和稳定性都较好,平均脱氮率分别为95.78%和97.84%,而4:1的催化剂虽然脱氮率较高但稳定性稍差。可见,Mo/Ni 质量比为5:1的催化剂的脱氮性能也优于其他催化剂。

### 3.3 催化剂芳烃饱和性能评价

在相同的反应条件和反应时间下,同时考察了不同金属配比的 Mo-Ni-P 纳米自组装催化剂对催化裂化柴油加氢芳烃饱和效果,结果如表5所示。

从表5中可以看出,5种不同配比的 Mo-Ni-P 催化剂中,3:1的催化剂芳烃饱和效果和稳定性都较差,1:1的催化剂稳定性较差,2:1、3:1和5:1催化剂的芳烃饱和率和稳定性都较好,平均芳烃饱和率分别为63.88%、64.40%和73.50%,相比较而言,

表5 催化剂的 Mo/Ni 质量比对芳烃饱和性能的影响

| 时间/h | 芳烃饱和率/% |       |       |       |       |
|------|---------|-------|-------|-------|-------|
|      | MNP-1   | MNP-2 | MNP-3 | MNP-4 | MNP-5 |
| 8    | 59.2    | 62.1  | 55.1  | 60.2  | 72.1  |
| 16   | 60.8    | 67.1  | 67.1  | 58.1  | 75.2  |
| 24   | 49.3    | 68.2  | 40.8  | 67.8  | 75.4  |
| 32   | 61.2    | 59.9  | 54.8  | 69.1  | 72.2  |
| 40   | 50.3    | 62.1  | 40.6  | 66.8  | 72.6  |

Mo/Ni 质量比为5:1的催化剂的芳烃饱和性能仍优于其他配比的催化剂。

## 4 结论

(1)利用纳米自组装法合成一系列不同 Mo/Ni 质量比的 Mo-Ni-P 双金属催化剂,其孔容为0.28~0.31 cm<sup>3</sup>/g,比表面积为176.54~186.97 m<sup>2</sup>/g,平均孔径为6.07~6.94 nm,低堆积密度在0.53 g/cm<sup>3</sup>左右,孔分布在<6 nm和30~100 nm范围内高度集中。

(2)通过单因素实验确定最佳工艺条件:压力为6.5 MPa,温度为370℃,空速为1.5 h<sup>-1</sup>,氢油比为700:1。在此条件下,对系列催化剂进行加氢性能评价,确定 Mo/Ni 质量比为5:1的催化剂具有较好的脱硫、脱氮、芳烃饱和的性能,其平均脱硫、脱氮和芳烃饱和率分别为95.92%、97.84%和73.50%。

## 参考文献

- [1] 齐立志. LH203 柴油加氢精制催化剂器外再生及应用[J]. 齐鲁石油化工, 2005, 33(3): 199-202.
- [2] 李大东. 炼油催化剂发展趋势[J]. 石油炼制与化工, 1994, 25(1): 7-11.
- [3] 韩崇仁, 方向晨, 赵玉琢. 催化裂化柴油一段加氢改质的新技术—MCI[J]. 石油炼制与化工, 1999, 9(30): 1-4.
- [4] 程启昂. RN-10 催化剂在柴油加氢装置的工业应用[J]. 工业催化, 2003, 11(11): 17-20.
- [5] Wandas R, Chrapek T. Hydrotreating of middle distillates from destructive petroleum processing over high-activity catalysts to reduce nitrogen and improve the quality[J]. Fuel Processing Technology, 2004, 85(11): 1333-1343.
- [6] Cheng Zhenming, Fang Xiangchen. Deep removal of sulfur and aromatics from diesel through two-stage concurrent and countercurrently operated fixed-bed reactor[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(22/23): 5465-5472.
- [7] 聂红, 石亚华, 高晓东, 等. RIPP 生产清洁油品的加氢技术[C]. 加氢技术论文集, 抚顺: 中国石油化工集团公司加氢科技情报站, 2004: 18-48.

为 50℃ 烘箱中烘 24 h 后,制得外加剂 FL-1。

### 1.3 岩样的准备

为控制大理石与酸液的接触面积,提高酸液与大理石的反应速率的准确性,利用岩样钻取机将大理石制作成直径为 25.26 mm 的圆柱体岩样<sup>[8-9]</sup>,采用环氧树脂对大理石进行包裹,将大理石与酸液的接触面积固定为 5 cm<sup>2</sup>。

### 1.4 缓速性能的测定

固定大理石与酸液的接触面积后,保持一定的温度,在反应器中加入一定量的酸液,向反应器中加入磁力搅拌子,让酸液流动,岩石静止。在此条件下采集单位时间内酸岩反应生成 CO<sub>2</sub> 的体积(即排出水的体积)。然后,通过收集的 CO<sub>2</sub> 气体体积,利用盐酸与大理石的反应方程式反推出碳酸钙的溶蚀量和酸岩溶蚀速率。

由酸岩反应原理,单位时间内的溶蚀速率为:

$$\begin{aligned} u &= [n(\text{碳酸钙}) \times M(\text{碳酸钙})] / (S \times t) \\ &= [n_2 \times M(\text{碳酸钙})] / (S \times t) \\ &= [(V_2 / 1\ 000) / V_1 \times M(\text{碳酸钙})] / (S \times t) \\ &= [0.004\ 09V^2 / (S \times t)] (\text{g/cm}^2 \cdot \text{min}) \end{aligned}$$

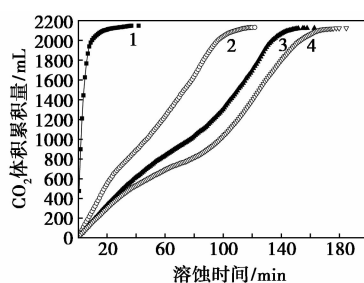
式中: $u$  为酸岩溶蚀速率, g/cm<sup>2</sup>·min;  $n_2$  为单位时间内产生的 CO<sub>2</sub> 摩尔质量, mol;  $V_2$  为单位时间内产生的 CO<sub>2</sub> 体积, mL;  $S$  为酸岩反应接触面积, cm<sup>2</sup>;  $V_1$  为 25℃ 时气体摩尔体积;  $t$  为单位溶蚀时间。

## 2 结果与讨论

### 2.1 FL-1 质量分数对缓速性能的影响

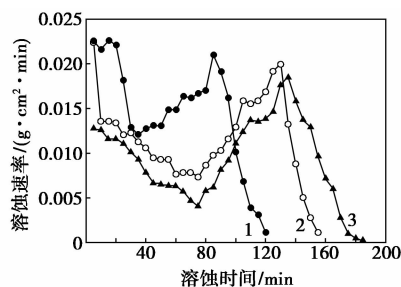
向 20% 的盐酸中加入不同质量分数的 FL-1,搅拌均匀后,将酸液倒入酸岩反应烧瓶中,并将集热式磁力搅拌器的转速调至 400 r/min,待酸液温度稳定在 75℃ 时,加入酸岩接触面积为 5 cm<sup>2</sup> 的大理石,开始采集产生的 CO<sub>2</sub> 体积累量。在 CO<sub>2</sub> 气体采集装置中测定产生的气体体积,结果如图 1 所示,最后,由 CO<sub>2</sub> 体积计算出溶蚀速率,结果如图 2 所示。

由图 1 可知,随着酸岩反应的进行,生成的 CO<sub>2</sub> 体积总量逐渐增加,20% 盐酸空白样在 30 min 时溶蚀已完成,而加入缓速外加剂 FL-1 后,随着其质量



1—20% HCl; 2—20% HCl+0.4% FL-1;  
3—20% HCl+0.5% FL-1; 4—20% HCl+0.6% FL-1

图 1 FL-1 质量分数对 CO<sub>2</sub> 累计体积量的影响



1—0.4% FL-1; 2—0.5% FL-1; 3—0.6% FL-1

图 2 不同质量分数的 FL-1 在不同时间点的溶蚀速率

分数的增加,CO<sub>2</sub> 体积累量增加速度逐渐减小,酸岩反应时间逐渐增大。当 FL-1 质量分数为 0.5% 时,鲜酸转变为残酸的时间可达 140 min 以上。由图 2 可知,FL-1 在不同质量分数下,溶蚀速率先减小后增大,最后逐渐减小。这是由于外加剂 FL-1 逐渐吸附在岩石表面,吸附保护膜逐渐建立,阻碍了 H<sup>+</sup> 与岩石表面的接触;随着反应的进行,溶蚀速率先逐渐增大后逐渐减小,这是由于外加剂达到吸附饱和后,外加剂发生部分水解,吸附膜逐渐解析,酸岩反应的接触机会增多;最后,H<sup>+</sup> 浓度下降,溶蚀速率变慢,使得溶蚀速率最后逐渐下降。

### 2.2 含盐质量浓度对缓速性能的影响

用 20% 的盐酸配置质量分数为 0.5% 的 FL-1 缓速外加剂 30 mL,再加入不同质量浓度的 NaCl,搅拌均匀后,待酸液温度稳定在 75℃ 时,加入酸岩接触面积为 5 cm<sup>2</sup> 的大理石,并将集热式磁力搅拌器

(上接第 117 页)

[8] Seck Leong Lee. Latest developments in Albemarle hydroprocessing catalysts[J]. Catalysts Courier, 2006, 63: 8-9.

[9] 王鼎聪. 纳米自组装合成大孔容介孔氧化铝[J]. 中国科学 B 辑: 化学, 2009, 39(5): 420-431.

[10] 乔志强, 田松柏. FCC 催化剂结焦原因分析及对策[J]. 广石化科技, 2006, 11: 42-48.

[11] 丁巍, 王鼎聪, 赵德智, 等. 纳米自组装催化剂金属分散度对催化活性的影响[J]. 现代化工, 2014, 34(5): 113-116.

[12] 甄晓波, 王鼎聪, 丁巍, 等. 纳米自组装催化剂对催化裂化混合油抗结焦性能的研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2013, 26(1): 11-16.

[13] 吴福君. 氢油比对加氢工艺的影响[J]. 经济技术协作信息, 2010, 31: 91. ■