研究与开发

工业萘两步加氢制十氢萘的实验研究

张大奎[1],张立伟[1],张继庆[2],徐志强[1],于洪才[1],李闯[3],梁长海[3]
(1.鞍钢化学科技有限公司,辽宁 鞍山 114021; 2.鞍钢股份有限公司制造管理部,
辽宁 鞍山 114021; 3.大连理工大学,辽宁 大连 116024)

摘要: 工业萘中含有硫茚、喹啉及其衍生物,在加氢过程中会导致催化剂中毒,大幅缩短催化剂的寿命。设计了工业萘固定床加氢精制-深度加氢两步加氢制十氢萘工艺,加氢精制过程主要脱除工业萘中的S和N,使用NiMo硫化物催化剂作为加氢精制催化剂,可实现S含量由3 200ppm降至34ppm以下,N含量由102ppm降至38ppm以下。深度加氢使用Pt-Pd/SiO_2-Al_2O_3催化剂,以加氢精制产品为原料,萘和四氢萘全部转化为十氢萘,产物中反式十氢萘含量稳定在87.2%左右,反顺比最高为6.8。两个催化剂在1 000 h稳定性实验中均表现出优异的稳定性,没有失活现象。

关键词: 工业萘;加氢精制;深度加氢;十氢萘;顺反结构
中图分类号: TQ241 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4613(2026)03-0038-09
DOI:10.3969/j.issn.1006-4613.2026.03.007

Experimental Research of Two-step Hydrogenation of Industrial Naphthalene to Decalin

ZHANG Dakui[1], ZHANG Liwei[1], ZHANG Jiqing[2],
XU Zhiqiang[1], YU Hongcai[1], LI Chuang[3], LIANG Changhai[3]
(1. Angang Chemical Technology Co., Ltd., Anshan 114021, Liaoning, China;
2. Department of Manufacture Management of Angang Steel Co., Ltd., Anshan 114021,
Liaoning, China; 3. Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: Industrial naphthalene contains thionaphthene, quinoline, and their derivatives, which can cause catalyst poisoning during the hydrogenation process, significantly reducing catalyst lifespan. A two-step hydrogenation technology involving fixed-bed hydrofining and deep hydrogenation of industrial naphthalene was designed to produce decalin. The hydrofining process mainly removed sulfur and nitrogen impurities from industrial naphthalene. Using NiMo sulfide catalysts for hydrofining, sulfur content was reduced from 3 200ppm to below 34ppm, and nitrogen content from 102ppm to below 38ppm. Taking the hydrofining product as the raw material for deep hydrogenation, a Pt-Pd/SiO_2-Al_2O_3 catalyst was used in deep hydrogenation process and then both naphthalene and tetraline were completely converted to decalin, with the trans-decalin content in the product stabilized at approximately 87.2% and a maximum trans-/cis- of 6.8. Both catalysts exhibited excellent stability over a 1 000-hour test, showing no signs of deactivation.

基金项目:辽宁省"揭榜挂帅"科技计划项目(2023JH1/10400040)
张大奎,高级工程师,博士,2010年毕业于大连理工大学化学工程与技术专业。E-mail: dakuiansteel@163.com

Key words: industrial naphthalene; hydrofining; deep hydrogenation; decalin; cis-trans structure

工业萘是煤焦油进一步加工分离出的产品，萘深度加氢产品十氢萘有非常广泛的应用，是煤炭直接液化的最佳供氢溶剂，同时也是生产聚乙烯纤维干法纺丝工艺中的最佳溶剂，是可用质子交换膜燃料电池的最佳贮氢媒介[1]。十氢萘有两种顺反异构结构，其中顺式十氢萘常用作增塑剂，反式十氢萘是航空煤油重要添加组分。目前，十氢萘主要依靠进口，美国杜邦公司和德国德固萨公司是全球最大的十氢萘生产厂家。

萘加氢反应是可逆的放热反应，降低反应温度对萘加氢有利。萘首环加氢的平衡浓度随温度升高而增加，在较低温度时，反应压力的增加会导致平衡浓度降低[2]。米星[3]以Ni/Al_2O_3为催化剂，采用高压固定床反应器考察反应条件对萘加氢反应行为的影响，尤其考察反应条件对反式十氢萘和顺式十氢萘选择性的影响。结果表明，反式十氢萘和顺式十氢萘的选择性与反应条件密切相关，反式十氢萘与顺式十氢萘的比例随着氢油体积比和温度的升高而增加，而随着压力和空速的增加而减小。在反应温度为260~290 ℃、反应压力为5~7 MPa、空速为1.0~1.5 h^{-1}及氢油体积比>250时，十氢萘的选择性可达99%以上，萘的转化率接近100%，产物中反式和顺式十氢萘的比例最高，可达4左右。米星[3]还对$Ni/\gamma-Al_2O_3$催化剂的稳定性进行了考察，初步发现催化活性组分的烧结和活性金属Ni被硫化是催化剂失活和影响产物中顺反式比例的主要原因。过渡金属硫化物催化剂虽然有较好加氢脱硫活性，但是其操作条件一般在高温高压下进行，而高温不利于萘加氢反应的正向进行，因此萘加氢饱和深度不高，十氢萘收率偏低[4-5]。Cuauht′emoc等人[6]采用共沉淀法制备$Fe_2O_3-TiO_2$复合氧化物催化剂，在萘加氢反应中金属Fe没有促进芳环的氢化，金属价态影响十氢萘顺反式结构。刘晨光[7]制备高活性、高负载量的NiMo和NiMoW硫化催化剂，在反应温度>200 ℃时，萘转化率>99.0%，对十氢萘的选择性超过99.9%，其中反式十氢萘>90%。贵金属催化剂具有高加氢活性，在温和加氢条件下可实现萘高选择性加氢制十氢萘，如Pt和Pd金属[8-12]。但贵金属加氢催化剂极易被含S和含N的化合物毒化失活，故不适用于工业萘加氢制十氢萘。研究人员又制备出了新型加氢催化剂，即过渡金属碳化物[13]、过渡金属硅化物催化剂[14]，虽然这种催化剂表现出了较好的加氢活性，但对深度加氢产品十氢萘收率普遍偏低，而且还存在易被硫毒化的缺点。

由于顺式十氢萘的能量高于反式十氢萘，因此升高温度有利于反式十氢萘的生成。Huang[15]和Jongpatiwut[16]等人研究表明，萘的深度加氢会抑制顺式和反式十氢萘的异构化，Ito等[17]在甲苯、四氢萘和萘的混合物加氢实验中得出相同结论。

针对萘中含有的S、N杂质影响加氢催化剂寿命的问题，研究人员开发了萘两步釜式加氢制合成十氢萘工艺[18-19]。第一步采用抗硫催化剂对萘进行中度氢化，同时将原料中绝大部分S除去，避免第二步深度加氢催化剂上负载的Pt、Rh、Ru等贵金属中毒。萘两段加氢反应合成十氢萘的生产方式为实现工业萘两步加氢制十氢萘打下基础。Norihito等人[20]以脱硫后的萘为原料，利用超临界CO_2作为萘加氢反应的溶剂，考察负载型Rh和Ru等催化剂对萘加氢的影响。在60 ℃下，Rh/C催化剂的萘转化率较高，而Ru/C催化剂对顺式十氢萘的选择性较高。

目前以工业萘为原料，采用固定床连续加氢制备十氢萘的工艺鲜有报道，针对萘加氢催化剂寿命短的问题，本文提出以工业萘为原料，采用固定床两步加氢法，以$NiMo/Al_2O_3$硫化物及$Pt-Pd/Al_2O_3$为催化剂，考察工业萘加氢精制和深度加氢反应条件（温度、压力、氢油体积比、空速）对加氢脱S脱N和深度加氢十氢萘顺反式比例的影响，并完成催化剂1 000 h寿命实验，研究开发出工业萘固定床加氢精制-深度加氢制十氢萘连续加氢工艺。本文对此做一介绍。

1 实验部分

采用气质色谱联用方法对工业萘原料进行组分分析，按照国标和行标检测工业萘S和N含量。表1为工业萘原料的组分及含量，S、N含量检测标

准分别为GB/T 17674、SH/T 0253。由表1可知,工业萘中的S含量较多,在对其深加工制精细化学品时首先需要对工业萘进行加氢精制以去除其中含有的S。

表1 工业萘原料的组分及含量

Table 1 Components and Contents of Industrial Naphthalene Raw Material

萘/%	苯并噻吩/%	甲基苯甲腈/%	二甲基苯酚/%	三甲基苯酚/%	甲基乙基苯酚/%	二甲基苯并呋喃/%	S含量(ppm)	N含量(ppm)
91.70	4.40	0.20	2.78	0.26	0.41	0.25	3 200	102

实验在自建的微型反应装置上进行,反应装置如图1所示。



图1 反应装置

Fig. 1 Reaction Apparatus

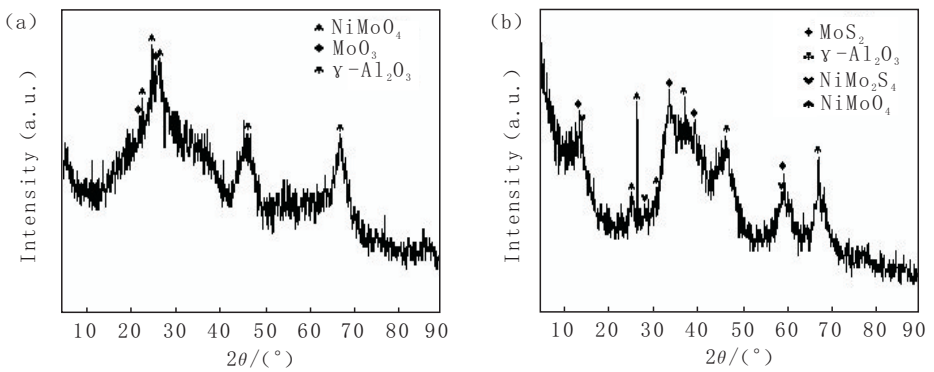
加氢精制装置催化剂装填量为25 mL,上下分别填充陶瓷环用以支撑催化剂。催化剂使用之前需预硫化,把氧化态的金属Ni、Mo转化为具有催化活性的硫化态。采用湿式预硫化,硫化剂选用CS_2,质量分数为1%,溶剂为环己烷。催化剂干燥完成后,向系统内泵入硫化油,温度由150 ℃升至350 ℃,升温速率为30 ℃/h,在350 ℃停留14 h完成硫化,然后反应器降温至反应温度开始反应。

深度加氢实验以碱洗过后的加氢精制产品为原料,选用具有一定耐硫性的贵金属Pt-Pd/SiO_2-Al_2O_3催化剂,考察深度加氢反应的工艺条件,所得产品用NaOH溶液进行充分碱洗,去除溶液中所含H_2S。采用氢气做催化剂还原用的还原剂,采用程序升温,升温速率5 ℃/min,温度升至300 ℃停留120 min还原完毕,然后反应器降温至反应温度开始反应。

2 催化剂表征

2.1 X射线衍射表征(XRD)

图2为氧化态和硫化态$NiMo/Al_2O_3$催化剂的XRD谱图。



(a)氧化态;(b)硫化态

图2 氧化态和硫化态$NiMo/Al_2O_3$催化剂的XRD谱图

Fig. 2 XRD Spectrum of Oxidized and Sulfided $NiMo/Al_2O_3$ Catalysts

由图2(a)和图2(b)可以确定反应活性物种,其中谱图中46.2°、67.3°的宽峰为载体γ-Al_2O_3的

衍射峰，23.4°、27.4°是MoO_3不同晶面的特征衍射峰，25.5°、26.6°、28.8°的强峰是$NiMoO_4$不同晶面的衍射峰。由图2(a)可知，催化剂上存在Ni-Mo晶体，$NiMoO_4$晶体中存在的Ni^{2+}、Mo^{6+}、Mo^{5+}是活性组分Ni-Mo-S的前体。在硫化阶段$NiMoO_4$可转化为活性相Ni-Mo-S。经过预硫化后，氧化态的金属生成了加氢脱硫的活性成分MoS_2以及$NiMo_2S_4$，后者包含Ni-Mo-S活性键。经过硫化的高温处理后，晶体的特征衍射峰强度没有出现太大变化，说明催化剂上的晶体没有发生团聚。

图3为深度加氢Pt-Pd/SiO_2-Al_2O_3催化剂的XRD谱图。由图3可知，2θ=46.3°和67.2°处是载体SiO_2-Al_2O_3的特征峰，从图3中还可以看到有许多的杂质峰，主要是SiO_2的衍射峰，Pt和Pd双组分贵金属催化剂并没有表现出特征衍射峰，这主要是因为金属颗粒较小，且在载体表面分散均匀。

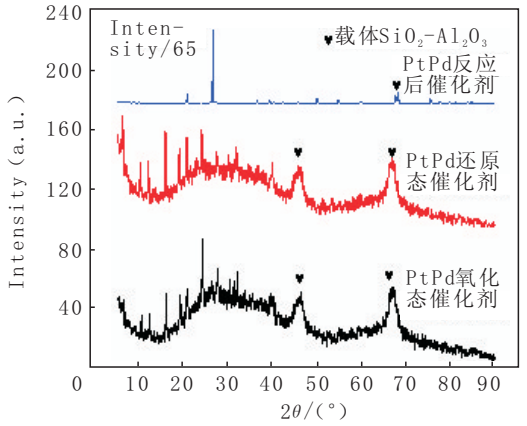


图3 深度加氢Pt-Pd/SiO_2-Al_2O_3催化剂的XRD谱图

Fig. 3 XRD Spectrum of Pt-Pd/SiO_2-Al_2O_3 Catalyst in Deep Hydrogenation Process

2.2 比表面积检测表征(BET)

图4为加氢精制催化剂的氮气吸脱附等温曲线。图4为明显的IV型，是介孔特有的线型。

表2为加氢精制催化剂的织构性质数据。由表2可以看出，催化剂的比表面积为171 m^2/g，平均孔径较大，为5.1 nm，较大的孔径有利于硫茚、喹啉及其同系物的加氢脱S脱N。

图5为Pt-Pd/SiO_2-Al_2O_3催化剂等温吸附线。可以判断其属于IV型等温线，这类回滞环等温线没有明显的吸附平台，说明其孔结构很不规整。

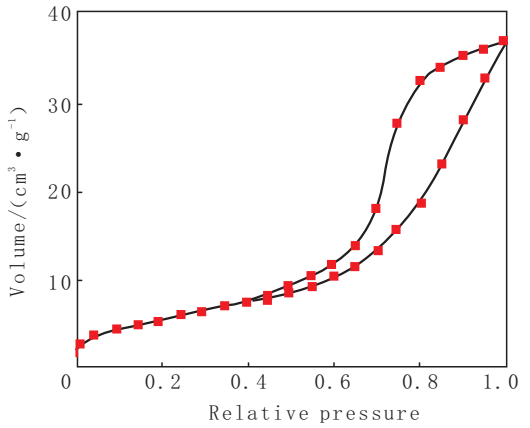


图4 加氢精制催化剂的氮气吸脱附等温曲线

Fig. 4 Nitrogen Adsorption-desorption Isotherm Curve of Hydrofining Catalyst

表2 加氢精制催化剂的织构性质数据

Table 2 Textural Property Data of Hydrofining Catalyst

催化剂	比表面积/(m^2/g)	总孔体积/(cm^3/g)	平均孔径/nm
NiMo/Al_2O_3	171	0.44	5.1

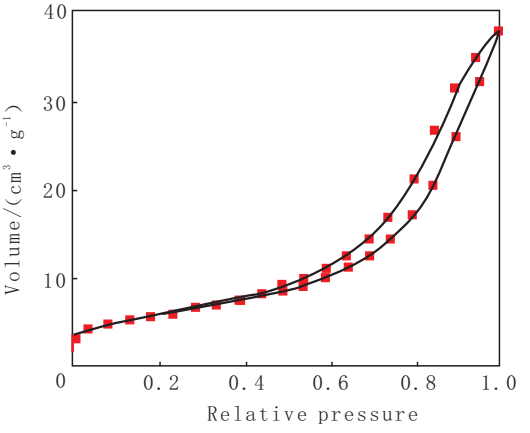


图5 Pt-Pd/SiO_2-Al_2O_3催化剂等温吸附线

Fig. 5 Nitrogen Adsorption-desorption Isotherm Curve of Pt-Pd/SiO_2-Al_2O_3 Catalyst

表3为Pt-Pd/SiO_2-Al_2O_3催化剂的织构性质数据。由表3可以看出，SiO_2-Al_2O_3载体提供了较大的比表面积，催化剂比表面积高达236 m^2/g，较大的比表面积有利于金属颗粒分散均匀。

表3 Pt-Pd/SiO_2-Al_2O_3催化剂的织构性质数据

Table 3 Textural Property Data of Pt-Pd/SiO_2-Al_2O_3 Catalyst

催化剂	比表面积/(m^2/g)	总孔体积/(cm^3/g)	平均孔径/nm
Pt-Pd/SiO_2-Al_2O_3	236	0.64	8.2

3 结果与讨论

3.1 加氢精制

在工业萘加氢精制反应中,反应温度、压力和空速是影响催化剂性能的重要因素。图6为不同温度下工业萘加氢精制的反应结果,反应条件为压力5 MPa、空速1 h^{-1}。由图6可以看出,随着反应温度的升高,萘转化率明显增加,加氢精制产品中S、N含量显著下降。但温度由325 ℃升高至345 ℃时,反应性能增加不明显。主要原因是适当提高反应温度,催化剂的活性位点与反应物的相互作用增强,促进加氢反应进行。然而,温度过高会破坏催化剂结构,导致活性组分流失,萘转化率降低。为节能考虑,加氢精制反应温度确定为325 ℃。

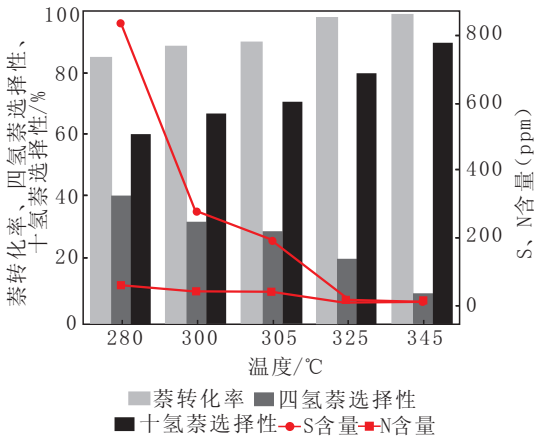


图6 不同温度下工业萘加氢精制的反应结果

Fig. 6 Reaction Results of Industrial Naphthalene Hydrofining at Different Temperatures

不同压力下工业萘加氢精制的反应结果见图7,反应条件为温度325 ℃、空速1.0 h^{-1}。

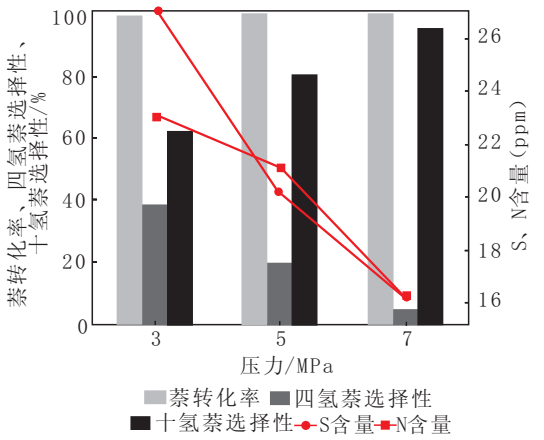


图7 不同压力下工业萘加氢精制的反应结果

Fig. 7 Reaction Results of Industrial Naphthalene Hydrofining under Different Pressures

由图7看出,压力增加,萘转化率变化不明显,稳定在99%左右;四氢萘选择性大幅度下降;S和N含量呈现下降趋势。由于萘加氢反应是体积减小的反应,提高压力有利于化学平衡向生成十氢萘的方向移动,所以压力升高,中间产物四氢萘选择性降低。提高压力可增加催化剂表面的反应物和氢气浓度,从而提高反应速率。在萘加氢精制反应中,压力升高会促进萘分子与氢气的接触频率,使脱S、脱N反应更充分。压力为5 MPa时,S和N含量已经降至22ppm以下,满足深度加氢反应要求。综合能耗和反应性能考虑,反应压力确定为5 MPa。

图8为不同空速下工业萘加氢精制的反应结果,反应条件为温度325 ℃、压力5 MPa。

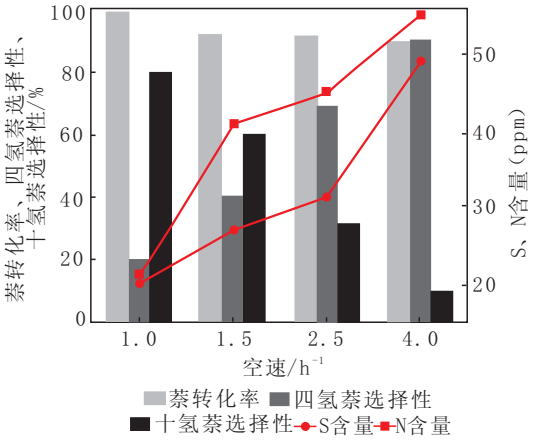


图8 不同空速下工业萘加氢精制的反应结果

Fig. 8 Reaction Results of Industrial Naphthalene Hydrofining under Different Space Velocities

由图8可以看出,随着空速的增加,萘转化率下降,S和N含量明显升高。空速增加,单位时间内通过催化剂的萘含量增加,萘在催化剂上的停留时间缩短,反应深度变浅,导致萘转化率降低。所以空速不宜过大,适宜值为1.0 h^{-1}。当加氢后产品不进行碱液洗涤处理时,测得S含量均大于3 000ppm,加氢精制后产品中S含量比原料高,原因是加氢精制使用硫化物催化剂,催化剂在使用前需要预硫化,残留的硫化液可能进入反应产物中或者溶剂中有溶解的硫化氢,致使加氢精制产物S含量升高。通过对加氢精制产物进行碱洗处理可有效去除溶解在溶剂中的硫化氢,图6~图8中的S含量均为碱洗后所测量的数据。可以看出碱洗能有效降低产品中的S含量。

图9为加氢精制催化剂1 000 h稳定性实验结果，反应条件为温度325 ℃、压力5 MPa、氢油体积比600、空速1.0 h^{-1}、S和N含量为碱洗后测量结果。从图9可以看出，工业萘转化率始终保持在95%以上，四氢萘选择性基本保持在20%~40%，十氢萘的选择性为60%~80%。加氢精制产品碱洗后测量的S含量低于34ppm，N含量低于38ppm，说明加氢精制催化剂具有良好的反应稳定性。萘加氢精制使用硫化物催化剂，所以，该催化剂能适应原料S、N的范围较宽。因工业萘原料中S含量较高，根据原料及循环氢硫化氢的检测结果，反应过程中不需要补S。

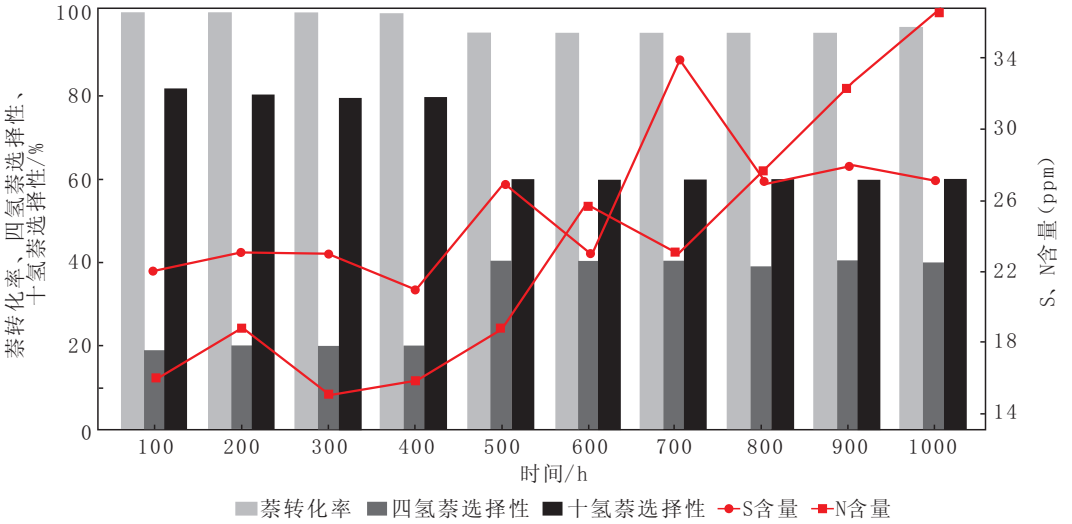


图9 不同时段工业萘加氢精制催化剂1 000 h稳定性实验的反应结果

Fig. 9 Reaction Results of 1 000-hour Stability Test of Industrial Naphthalene Hydrofining Catalyst at Different Time Intervals

3.2 深度加氢

取工业萘加氢精制稳定性评价反应的产品为深度加氢原料。表4为深度加氢原料和加氢后产品的组分及含量。工业萘继续深度加氢采用固定床反应器，以Pt-Pd/SiO_2-Al_2O_3为深度加氢的催化剂，探究反应温度、压力、氢油体积比、空速对深度加氢反应的影响，反应条件为温度140~220 ℃，压力3~7 MPa，氢油体积比400~800，空速0.5~2.0 h^{-1}。

表4 深度加氢原料和加氢后产品的组分及含量

Table 4 Components and Contents of Deep Hydrogenation Raw Material and Post-hydrogenation Products %

物质	深度加氢原料	加氢后产品
萘	<0.6	0
四氢萘	20.1	0
反式十氢萘	42.6	87.2
顺式十氢萘	36.7	12.8

图10为不同反应温度下的深度加氢结果，反应条件为压力5 MPa、氢油体积比600、空速1.0 h^{-1}。由图10可知，当温度从140 ℃增加至180 ℃时，萘全部转化，继续升温至200 ℃时，四氢萘全部转化为十氢萘。提高温度增加了反应物分子的动能，从而加快了反应速率。这有利于四氢萘进一步加氢生成十氢萘。当温度继续增加至220 ℃时，有部分反式十氢萘会转化为顺式十氢萘。

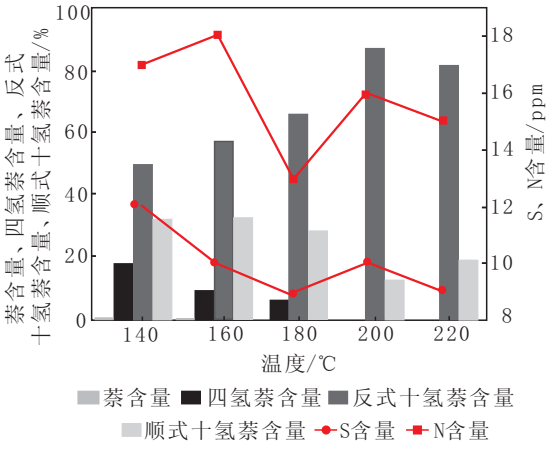


图10 不同反应温度下的深度加氢结果

Fig. 10 Results of Deep Hydrogenation at Different Temperatures

图11为不同反应压力下的深度加氢结果,反应条件为温度200 ℃、氢油体积比600、空速1 h^{-1}。由图11看出,压力升高有利于萘及四氢萘加氢反应进行,原因是萘加氢反应是体积减小的反应,提高压力有利于平衡向生成十氢萘的方向移动,从而促进十氢萘的生成。但当四氢萘全部转化为十氢萘后,增加压力有利于反式十氢萘生成,主要是因为反式十氢萘比顺式十氢萘具有更好的热力学稳定性。随着压力升高,反应更倾向于生成热力学稳定的反式十氢萘。

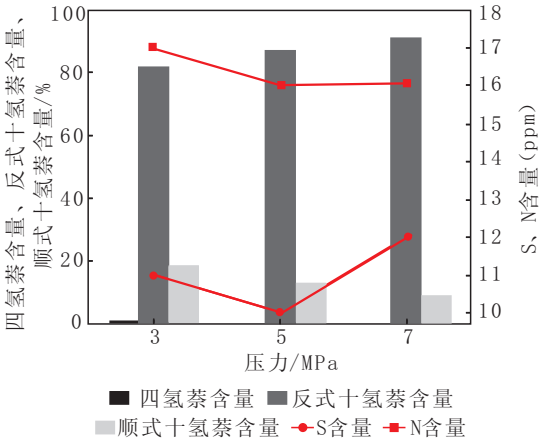


图11 不同反应压力下的深度加氢结果

Fig. 11 Results of Deep Hydrogenation under Different Reaction Pressures

图12为不同空速下的深度加氢结果,反应条件为温度200 ℃、压力5 MPa、氢油体积比600。

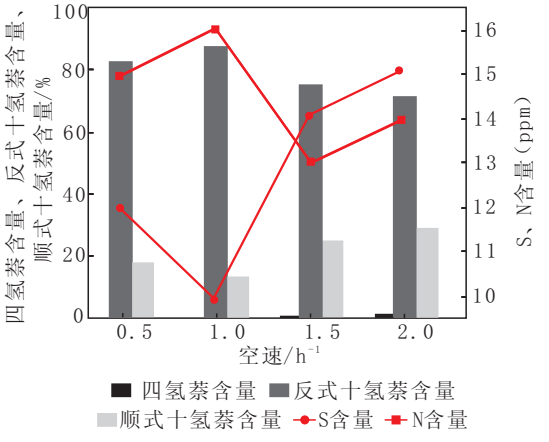


图12 不同空速下的深度加氢结果

Fig. 12 Results of Deep Hydrogenation under Different Space Velocities

由图12可以看出,随着空速从0.5 h^{-1}提高至2.0 h^{-1},产物中反式十氢萘含量逐渐降低,顺式十氢萘含量逐渐增加。反式十氢萘的生成是热力学控制过程,低空速下反应更利于生成热力学稳定的产物。

图13为氢油体积比对深度加氢的影响,反应条件为温度200 ℃、压力5 MPa、空速1.0 h^{-1}。

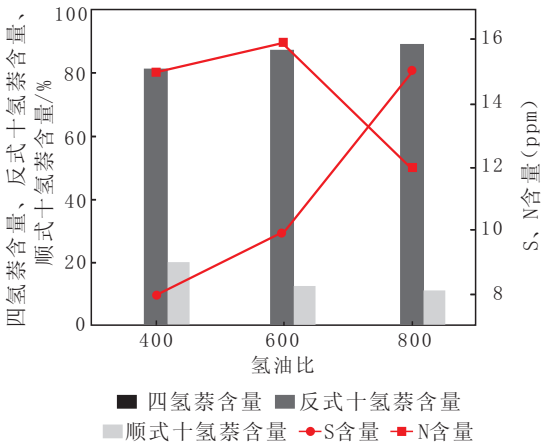


图13 氢油体积比对深度加氢的影响

Fig. 13 Influence of Hydrogen to oil Volume Ratio on Deep Hydrogenation

由图13看出,增加氢油体积比反应活性增加,有助于反式十氢萘生成。较高的氢油体积比增加了反应体系中氢气的浓度,提高了氢气在催化剂表面的吸附量,加快了四氢萘向十氢萘的转化速率,尤其是生成反式十氢萘。充足的氢气还可以抑制裂解、异构化等副反应。但是,氢油体积比增加至800基本不影响活性及十氢萘顺反结构。因此确定深度加氢条件为:反应温度200 ℃,压力5 MPa,氢油体积比600,空速1.0 h^{-1}。

图14是工业萘深度加氢催化剂1 000 h稳定性实验结果,反应条件为温度200 ℃、压力5 MPa、空速1.0 h^{-1}。从图14中可以看出,该催化剂表现出了优异的稳定性,1 000 h内没有出现失活现象。工业萘和四氢萘全部转化为十氢萘,产物中反式十氢萘含量稳定在87.2%左右,顺式十氢萘含量约12.8%,反顺比最高达到6.8。

根据工业萘所含有的杂质设计工业萘加氢精制-深度加氢制十氢萘工艺路线图见图15。先将工业萘在溶剂中溶解,再经过加氢精制、碱洗、深度加氢和精馏制备高纯度十氢萘,工业萘在加氢生成四氢萘的同时,工业萘中的苯并噻吩和喹啉同时也加

氢生成乙基环己烷和丙基环己烷，加氢使用的催化剂为金属硫化物催化剂；碱洗后产品进入深度加氢塔进行深度加氢，所使用的催化剂为贵金属催化剂，通过四氢萘的深度加氢进而得到十氢萘产品。

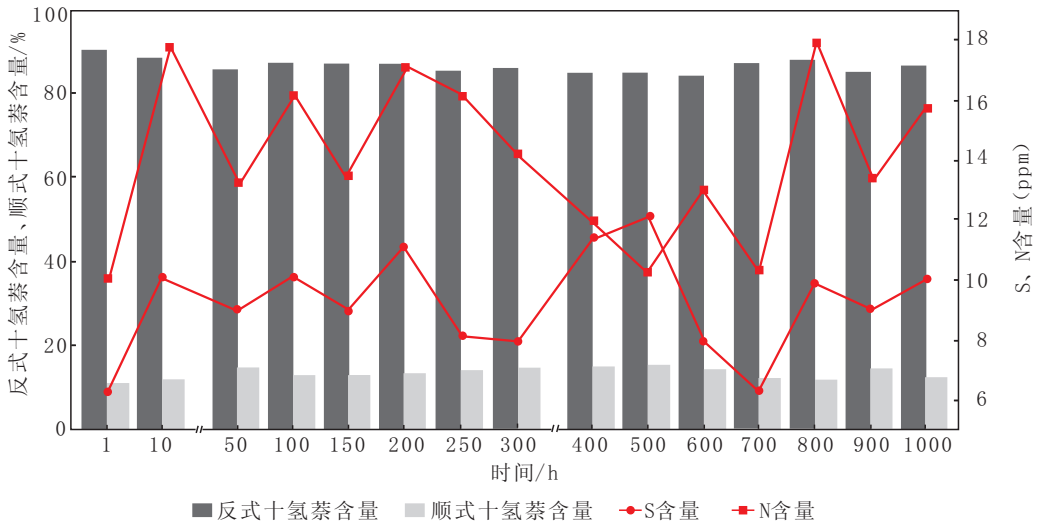
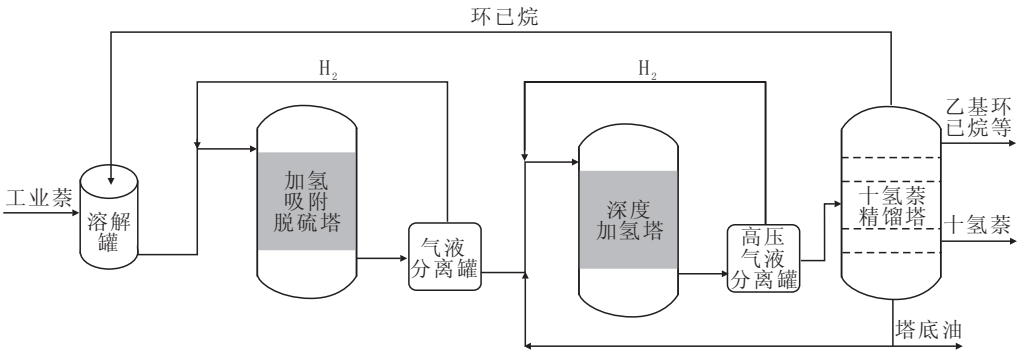


图14 工业萘深度加氢催化剂1 000 h稳定性实验结果

Fig. 14 1 000-hour Stability Test Results of Industrial Naphthalene Deep Hydrogenation Catalyst



1-溶解罐；2-加氢吸附脱硫塔；3-气液分离罐；4-深度加氢塔；5-高压气液分离罐；6-十氢萘精馏塔。

图15 工业萘制十氢萘工艺路线图

Fig. 15 Process Route Diagram of Decalin Production from Industrial Naphthalene

4 结论

（1）以NiMo硫化物催化剂为工业萘加氢精制催化剂，在温度325 ℃，压力5 MPa，氢油体积比600，空速1.0 h^{-1}的反应条件下，实现高效脱S、脱N，S含量由3 200ppm降至34ppm以下，N含量由102 ppm降至38ppm以下。

（2）以Pt-Pd/SiO_2-Al_2O_3为深度加氢催化剂，以加氢精制产品为深度加氢原料，在温度200 ℃、压力5 MPa，氢油体积比600，空速1.0 h^{-1}的反应条件下，萘和四氢萘全部转化，产物中反式十氢萘含量稳定在87.2%左右，反顺比最高为6.8。十氢萘产品的顺式和反式比例受深度加氢反应温度影响较大。

（3）设计的工业萘加氢精制-深度加氢制十氢萘工艺路线保证了深度加氢贵金属催化剂的寿命，在1 000 h稳定性实验中，催化剂表现出优异的稳定性，没有出现失活现象。

参考文献

[1] Shinya H, Hiroshi A, Shigeki T, et al. Catalytic decalin dehydrogenation naphthalene hydrogenation pair as a hydrogen

source for fuel-cell vehicle[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2003,28:1255-1262.

[2] Cooper B H, Donnis B B. Aromatic saturation of distillates: an overview[J]. Applied Catalysis A-General,1996,137:203-223.

[3] 米星,何广湘,郭晓燕,等. Ni/γ-Al_2O_3催化剂上萘加氢生成十氢萘的催化反应研究[J]. 燃料化学学报,2018,46(7): 779-785.

[4] Monteiro-Gezork A, Effendi A, Winterbottom J. Hydrogenation of naphthalene on NiMo and Ni/Al_2O_3 catalysts: Pre-treatment and deactivation[J]. Catalysis Today,2007,128:63-73.

[5] Fu W, Zhang L, Wu D, et al. Mesoporous zeolite-supported metal sulfide catalysts with high activities in the deep hydrogenation of phenanthrene[J]. Journal of Catalysis,2015,30:423-433.

[6] Cuauht′emoc I, Estudillo-Wong L A, Jim′enez-Vazquez A. Synthesis and characterization of Fe_2O_3-TiO_2 magnetic materials: Effect of heat-treatment on catalytic activity of naphthalene hydrogenation[J]. Catalysis Today,2022,392-393:167-179.

[7] Liu H, Liu C G, Yin C l, et al. Low temperature catalytic hydrogenation naphthalene to decalin over highly-loaded NiMo, NiW and NiMoW catalysts[J]. Catalysis Today,2016,276:46-54.

[8] Yu W, Porosoff M, Chen J. Review of Pt-based bimetallic catalysis: from model surfaces to supported catalysts[J]. Chemical Reviews,2012,112:5780-5817.

[9] Escobar J, Barrera M C, Santes V, et al. Naphthalene hydrogenation over Mg doped Pt/Al_2O_3[J]. Catalysis Today, 2017, 296: 197-204.

[10] Zhang M, He Z, Zhang M, et al. Tuning the location of Pd on HY zeolite by a dual-solvent method for efficient deep hydrogenation saturation of naphthalene[J]. Fuel,2022,316:123166.

[11] Zhang M, Song Q, He Z, et al. Tuning the mesopore-acid-metal balance in Pd/HY for efficient deep hydrogenation saturation of naphthalene[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2022,47:20881-20893.

[12] Pawelec B, Mariscal R, Navarro R M, et al. Hydrogenation of aromatics over supported Pt-Pd catalysts[J]. Applied Catalysis A:General,2002,225(1-2):223-237.

[13] Pang M, Liu C, Xia W, et al. Activated carbon supported molybdenum carbides as cheap and highly efficient catalyst in the selective hydrogenation of naphthalene to tetralin [J]. Green Chemistry,2012,14(5):1272-1276.

[14] Zhao A, Zhang X, Liang C H, et al. Cobalt Silicide Nanoparticles in Mesoporous Silica as Efficient Naphthalene Hydrogenation Catalysts by Chemical Vapor Deposition[J]. The Journal of Physical Chemistry C,2010,114(9):3962-3967.

[15] Huang T C, Kang B C. Kinetic study of naphthalene hydrogenation over Pt/Al_2O_3 catalyst[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,1995,34:1140-1148.

[16] Jongpatiwut S, Li Z, Resasco D E, et al. Competitive hydrogenation of poly-aromatic hydrocarbons on sulfur-resistant bimetallic Pt-Pd catalysts [J]. Applied Catalysis A: General, 2004, 262: 241-253.

[17] Ito K, Kogasaka Y, Kurokawa H, et al. Preliminary study on mechanism of naphthalene hydrogenation to form decalins via tetralin over Pt/TiO_2[J]. Fuel Process Technology,2002,79:77-80.

[18] Nippon Oil Corp. Manufacture of Decalin from Naphthalene with 2-Step Hydrogenation Process: Japan, 2003160515[P]. 2003-06-03.

[19] Nippon Oil Corp. Process for Manufacturing Decalin by Hydrogenation of Naphthalene:Japan,2003212800[P]. 2003-07-30.

[20] Norihito H, Mitsumasa O, Chandrashekar V, et al. Hydrogention of Benzothiophene-Free Naphthalene over Charcoal-Supported Metal Catalysts in Supercritical Carbon Dioxide Solvent[J]. Applied Catalysis A:General,2007,331:1-7.

(编辑 许营)

修回日期:2025-05-10

(上接第23页)

[3] 白尧,周易.高压直流断路器检测系统的研究与应用[J].湖北电力,2015,39(8):5-8.

[4] 吴梦泽,宋建成,高云广,等.真空断路器真空度检测方法研究现状与展望[J].工矿自动化,2018,44(6):6-10.

[5] 曹晖,岳滨,耿泽飞,等.断路器远程离线单元故障检修方法研究[J].自动化仪表,2023,44(11):44-47.

[6] 贺瑞斌,王建华.高压断路器分闸时间带电检测技术[J].电工技术,2021(14):2-3.

[7] 安成万,李玉珊,白钢.高压断路器机械状态在线监测的探讨[J].山西电力技术,2000(6):29-32.

[8] 李琼,孙进,杨彦冬,等.真空断路器灭弧室检测技术的发展及应用[J].电器工业,2020(2):48-50.

[9] 马宏明.基于辐射电磁波信号的高压断路器分闸时间带电检测技术研究[J].高压电器,2020,56(12):272-276.

(编辑 许营)

修回日期:2025-12-27