

煤制芳烃技术进展及发展建议

徐瑞芳,张亚秦,刘 弓,郝西维,张变玲,陈亚妮
(陕西煤化工技术工程中心有限公司,陕西 西安 710075)

摘要:为选择适宜的煤制芳烃技术路线,分析了国内外煤制芳烃技术的最新进展和主要芳烃产品的市场。已经工业化的煤制芳烃技术主要包括甲醇制芳烃技术和甲苯甲醇烷基化制芳烃技术。2 种技术主要产品不同,甲醇制芳烃技术以混合芳烃产品为主,甲苯甲醇烷基化制芳烃技术以对二甲苯产品为主。目前主要芳烃产品中对二甲苯的市场缺口较大,新建甲醇制芳烃装置不仅要考虑煤制芳烃技术的成熟度与可靠性,同时要结合芳烃产品市场选择一条抗风险能力强的技术路线,建议企业选择甲苯甲醇烷基化制芳烃技术。

关键词:煤;甲醇;芳烃;对二甲苯

中图分类号:TQ241 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2016)05-0048-05

Technoical progress and development suggestions of coal to aromatics

XU Ruifang,ZHANG Yaqin,LIU Gong,HAO Xiwei,ZHANG Bianling,CHEN Yani
(Shaanxi Coal Chemical Technology Engineering Center Co.,Ltd.,Xi'an 710075,China)

Abstract:In order to provide a suitable technical route for the coal to aromatics plants,the latest development of coal to aromatics technologies in China and abroad as well as the aromatic market were analyzed.The results showed that the industrialized technologies of coal to aromatics mainly included methanol to aromatics and toluene alkylation with methanol to aromatics.The products of the former were the mixed aromatic products,and the products of the latter were p-xylene which had a larger market demand.Considering the maturity and reliability of technology and the product market,the technology of toluene alkylation with methanol to aromatics was a better choice.

Key words:coal;methanol;aromatics;p-xylene

0 引 言

苯、甲苯和二甲苯(BTX)称为“三苯”,是重要的有机化工原料,广泛应用于农药、日化、材料、家电等众多领域^[1]。我国石油资源相对短缺,原油进口不断增长^[2]。英国 BP 公司发布的《世界能源展望(2016 年版)》预测,到 2035 年我国石油进口依存度将从 2014 年的 59% 增至 76%。原油进口依存度反映了我国的能源安全,高于 50% 的原油进口依存度对国民经济的发展存在极大风险。近年来煤化工产业发展迅速,而甲醇是现代煤化工的重要产品和中间体^[3],2015 年我国甲醇产能约为 6 976 万 t/a,产量约为 3 930 万 t/a,甲醇产能严重过剩^[4]。因此,

由煤经甲醇制芳烃成为发展现代煤化工产业的必然选择。近年来,以煤基甲醇为原料制备芳烃技术获得了国内外众多科研院所及大型企业的广泛重视^[5]。有工业化应用业绩的主要包括美国 Mobil 公司、清华大学和中国科学院山西煤炭化学研究所甲醇制芳烃(MTA)技术,美国 Mobil 公司、上海石油化工研究院和陕西煤化工技术工程中心有限公司的甲苯甲醇烷基化制芳烃技术。对于国内新建装置如何选择一条具有市场应用前景的以煤基甲醇为原料制备芳烃的技术路线是困扰企业的难题。笔者通过分析国内外已经工业化的甲醇制芳烃技术和甲苯甲醇烷基化制芳烃技术,认为 2 种芳烃生产技术均已成熟,但主产品不同。同时对苯、甲苯和对二甲苯

收稿日期:2016-06-06;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2016.05.009

基金项目:陕西省科技统筹创新工程计划资助项目(2011KTZB01-01)

作者简介:徐瑞芳(1984—),女,山西临汾人,工程师,硕士,从事煤化工领域技术开发工作。E-mail:xurf@sxceec.com

引用格式:徐瑞芳,张亚秦,刘 弓,等.煤制芳烃技术进展及发展建议[J].洁净煤技术,2016,22(5):48-52.

XU Ruifang,ZHANG Yaqin,LIU Gong,et al.Technoical progress and development suggestions of coal to aromatics[J].Clean Coal Technology,2016,22(5):48-52.

(PX)3种主要芳烃产品的市场进行详细分析,以期通过两者的综合考虑为新建装置提供一条经济可行的以甲醇为原料生产芳烃的技术路线。

1 甲醇制芳烃技术进展

1.1 美国 Mobil 公司 MTA 技术

20世纪70年代,美国 Mobil 公司开始进行甲醇制芳烃的研究,该研究最初来源于甲醇制汽油(MTG)技术。20世纪80年代 Mobil 公司研究发现,以甲醇为原料,改性 ZSM-5 分子筛催化剂对于芳烃选择性较高^[1]。Mobil 公司以 ZSM-5 分子筛为催化剂,采用固定床反应器,可达到甲醇转化率 96%,单程芳烃收率 37.1%,其中二甲苯质量分数 57%^[6]的技术指标。随后 Mobil 公司对该技术进行一系列改进^[7-8],但目前 Mobil 公司仅对 MTG 工艺进行了工业化,其开发的 MTA 工艺尚未工业化。

1.2 沙特基础工业公司 MTA 技术

国外进行 MTA 研究的还有沙特基础工业公司^[9]。其以改性 ZSM-5 分子筛为催化剂,采用固定床反应器,最终可达到总芳烃收率 9%~19%,BTX 选择性 70%~80%,BTX 产率 7%~14%的技术指标。该技术 BTX 产率较低,未见到工业化应用的报道。

1.3 清华大学 FMTA 技术

清华大学以甲醇或二甲醚为原料,开发了流化床甲醇制芳烃(FMTA)技术^[10-12]。2013年1月清华大学与中国华电集团合作的世界首套万吨级 FMTA 工业试验装置在陕西榆林试车成功。工业试验装置包括 2 个反应器,一个为甲醇制芳烃循环流化床反应器,另一个为轻烃芳构化反应器。以改性 ZSM-5 为催化剂,在压力 0.1 MPa,反应温度 450℃的工艺条件下进行芳构化反应。试验结果表明,甲醇转化率接近 100%,芳烃基收率为 74.47%,吨芳烃甲醇单耗为 3.07 t^[13]。万吨级工业化试验完成后中国华电集团拟建设百万吨级甲醇制芳烃工业装置,目前项目暂无最新进展报道。

清华大学 FMTA 技术开发以来受到了国内甲醇企业的广泛关注。考虑到多数厂家对混合芳烃产品中 PX 的需求,清华大学采取以混合芳烃苯、甲苯与甲醇反应方式增产 PX,但目前 FMTA 技术尚未见工业化应用报道。

1.4 中国科学院山西煤炭化学研究所 MTA 技术

2005年,中国科学院山西煤炭化学研究所与赛

鼎工程有限公司合作进行固定床甲醇制芳烃研究。该技术以改性分子筛为催化剂,反应装置采用 2 台串联形式的固定床反应器。2012年2月,由赛鼎工程公司设计,采用中国科学院山西煤炭化学研究所 MTA 技术的内蒙古庆华集团 10 万 t/a 甲醇制芳烃装置一次试产成功^[1,14]。工业试验结果表明,生产 1 t 烃类产品甲醇单耗为 2.5 t,催化剂使用寿命为 32 d^[15]。该技术芳烃产品为混合芳烃,多以调油为主。目前在我国陕西、新疆地区均有该技术工业化应用的报道。中国科学院山西煤炭化学研究所 MTA 技术是目前甲醇制芳烃技术中工业化应用报道最多的技术。

2 甲苯甲醇烷基化制芳烃技术

甲醇与甲苯进行甲基化反应生产 PX 的技术称为甲苯甲醇烷基化技术,该技术为甲苯转化和廉价甲醇利用提供了新的途径。与甲醇制芳烃技术相比,其优势在于能获得较高的 PX 选择性,且不产生苯^[16]。

2.1 美国 Mobil 公司甲苯甲醇烷基化技术

Mobil 公司于 1972 年开发了 ZSM-5 分子筛,随后利用 ZSM-5 分子筛催化剂进行了甲苯甲醇烷基化方面的基础研究^[17-18]。经过 30 多年研究,2003 年 Mobil 公司利用硅元素改性的 ZSM-5 催化剂开发了高选择性制 PX 的工艺。反应工况为:温度约 600℃、压力约 0.28 MPa,反应配水和 H₂,甲苯、甲醇、氢、水物质的量比为 2:1:6:6。反应技术指标为:甲苯转化率为 28.4%,甲醇转化率为 98%,PX 选择性约为 96.8%,副产物较少。但该报道未见稳定性方面的数据。Mobil 公司是世界上最早进行甲苯甲醇烷基化方面研究的公司,但其后续并未见工业化应用方面的报道。

2.2 美国 GTC 公司 GT-TolAlk 甲苯甲基化制 PX 技术

美国 GTC 公司在甲苯甲基化方向也进行了开发,其委托印度石化公司开发甲苯烷基化工艺称为 GT-TolAlk 甲苯甲基化制 PX 技术。该反应以高硅 ZSM-5 分子筛为催化剂,采用多个多段层式固定床反应器,以便于实现甲醇分段进料,提高甲醇的甲基化利用率。同时为了抑制反应积碳和便于催化剂烧碳,反应过程中配有一定量的 H₂,同时多个固定床反应器切换进行反应。反应工况为:温度 400~450℃,压力 0.1~0.5 MPa,甲苯与甲醇质量比为

1.35 : 1。反应技术指标为: 甲苯单程转化率最高可达 40%, 甲醇有效利用率约为 50%, PX 选择性 > 85%^[19]。

2.3 上海石油化工研究院甲苯甲醇烷基化技术

国内中国石油化工集团公司(中石化)上海石油化工研究院开展了甲苯甲醇甲基化的研究, 采用 La_2O_3 、 MgO 以及 La_2O_3 - MgO 复合改性的 HZSM-5 分子筛^[20], 利用水蒸气钝化处理催化剂, 有效提高了产物中 PX 的选择性。最终 PX 选择性超过 94%, 甲苯转化率接近 20%。理论上每生产 1 t PX 只需要消耗 1 t 的甲苯。

2012 年 12 月, 由中石化洛阳工程公司承担工程设计, 上海石油化工研究院提供工艺包和专有催化剂, 扬子石油化工公司负责装置建设 200 kt/a 甲苯甲醇甲基化工业示范装置成功完成工业运行试验, 这也标志着上海石油化工研究院成为世界唯一工业化的甲苯甲醇甲基化技术专利商。但该装置首次运转采用的是平衡型甲基化催化剂^[21-22], PX 选择性仅为 23% ~ 25%。

2.4 陕西煤化工技术工程中心有限公司甲苯甲醇烷基化技术

2012 年 7 月, 由陕西煤化工技术工程中心有限公司负责组织, 与中国科学院大连化学物理研究所成功完成了甲苯甲醇制 PX 流化床技术中试试验。与传统的甲苯歧化工艺相比, 该工艺技术的最大优势是反应过程中引入低成本的甲醇作为甲基化试剂, 与甲苯共同作为原料生产出高选择性的 PX, 同时兼顾了下游聚酯产业对 PX 和烯烃的需求; 而副产物苯含量很低, 甲苯利用率高, 每生产 1 t PX, 甲苯单耗约为 1 t。

该技术成果于 2012 年 10 月通过了中国石油和化学工业联合会组织的成果鉴定, 最终技术指标为: 甲苯转化率为 18% ~ 35%, PX 选择性大于 90%, C_1 ~ C_5 产品中乙烯+丙烯选择性为 70% ~ 80%。

该项目已于 2013 年 11 月与中海石油炼化有限责任公司惠州炼化分公司签订 20 万 t/a 合作合同, 项目正在积极推进。

2.5 大连理工大学甲苯与甲醇烷基化技术

大连理工大学于 1984 年开始甲苯甲醇烷基化合成 PX 工艺研究及催化剂研制工作, 在其开发的 Si-P-Mg 改性纳米 ZSM-5 催化剂上, 采用固定床反应装置, 连续运转 500 h 以上, 甲苯转化率为 22% ~ 25%, PX 选择性稳定在 98% 以上^[18]。大连

理工大学是国内较早开展甲苯甲醇烷基化研究的高校, 其优势在于采用反应稳定性良好的自主开发的纳米 ZSM-5 催化剂, 有效延长了催化剂的使用寿命。但目前尚未见工业化应用报道。

3 主要芳烃产品市场分析

芳烃中最有价值的为“三苯”产品, 具体包括苯、甲苯和二甲苯。从国内来看, 我国三苯市场不尽相同。苯已经供需过剩, 甲苯供需缺口稳定, 二甲苯供需趋紧, 尤其对 PX 产能长期不足^[23]。

3.1 苯

纯苯在常温下为一种无色、有甜味的透明液体, 具有强烈的芳香气味。纯苯是一种碳氢化合物也是最简单的芳烃, 难溶于水, 易溶于有机溶剂。作为一种石油化工基本原料, 苯的产量和生产技术水平是一个国家石油化工发展水平的标志之一。亚洲是全球最大的纯苯供应地, 生产能力占全球总生产能力的 40% 以上, 主要生产国家包括中国、韩国、日本等。截至 2015 年, 我国纯苯生产总能力达到 1 117 万 t/a, 位居世界第一。

2011—2015 年, 我国纯苯产能从 860 万 t/a 增至 1 117 万 t/a, 产量则从 650 万 t 增至 790 万 t, 纯苯的装置开工率约为 70% 左右, 纯苯产业产能已过剩。考虑到纯苯的主要下游产品——苯乙烯、苯酚、环己酮、苯胺等市场的不景气^[24-25], 近期内对于纯苯市场无显著的拉动作用。因此, 预计我国纯苯市场供大于求的趋势近期不会改变。

3.2 甲苯

甲苯是一种常用的化工原料, 其下游主要用于掺合汽油组成及作为生产甲苯衍生物、炸药、染料中间体、药物等的主要原料, 还常替代有毒性的苯作为有机溶剂使用。近年来由于环保要求日益严格, 甲苯用量缓慢增长。2011 年我国甲苯需求量为 485 万 t, 2015 年甲苯需求量为 664 万 t, 虽然甲苯需求量呈增长趋势, 但甲苯进口量变化不大, 2011—2015 年进口量在 66 万 ~ 100 万 t, 说明我国甲苯供需缺口基本稳定。

近几年国内甲苯部分用于调油, 随着高清洁成品油的推广和应用, 甲苯进入油品应用环节将对甲苯下游需求形成一定利好。随着国五汽油标准的实施, 将在很大程度上刺激甲苯调油的活跃性和积极性, 但该政策对于甲苯市场的促进仍需一定的过程和相应政策支持。

3.3 对二甲苯

PX 是重要的芳烃产品之一,主要用于制备对苯二甲酸(PTA)以及对苯二甲酸二甲酯(DMT),PTA 与乙二醇又是生产聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)的主要原料^[26]。我国 90% 以上的 PX 均用于生产 PTA。因此,PTA、PET 的市场与 PX 的市场息息相关。近年来,随着我国 PET 产能的快速增长,PX 生产能力不断增长,但仍旧无法满足需求量的增长,年供需缺口在 1 000 万 t 左右,2011—2015 年自给率均小于 60%。2011—2015 年我国 PX 供求平衡状况见表 1。

表 1 2011—2015 年我国 PX 供求平衡状况

Table 1 PX supply and demand balance of China in 2011—2015

年份	产量/ 万 t	进口量/ 万 t	出口量/ 万 t	表观消费 量/万 t	自给 率/%
2011 年	669.3	498.2	34.80	1 132.7	59.1
2012 年	720.0	628.6	19.22	1 329.4	54.2
2013 年	964.0	905.3	18.10	1 851.2	52.1
2014 年	950.0	997.3	12.30	1 935.0	49.1
2015 年	876.0	1 164.9	14.50	2 026.4	43.2

4 煤制芳烃技术发展建议

煤制芳烃技术是煤化工和石油化工相结合的技术,近年来保持了良好的发展势头。但不同煤制芳烃技术,最终产品不同。甲醇制芳烃技术以混合芳烃产品为主,甲苯甲醇烷基化制芳烃技术以 PX 产品为主。对于新建甲醇制芳烃装置建议如下:

1) 首先应当考虑产品和技术市场竞争力,对比甲苯甲醇烷基化制芳烃技术和甲醇制芳烃技术,PX 在芳烃产品中市场供需缺口最大,建议选择以 PX 产品为主的甲苯甲醇烷基化制芳烃技术。

2) 考虑技术成熟度与可靠性,对于相同原料和产品的不同技术而言,应优先考虑有工业化应用业绩的技术或工业化放大风险较小的技术。

3) 目前周边国家纷纷建厂向我国出口 PX 产品,而另一方面国内 PX 项目屡遭抵制,群众事件频发^[27]。因此从国家技术发展和能源安全的角度,建议政府合理引导舆论导向,并积极鼓励创新技术的应用及 PX 项目的落地。

参考文献 (References):

[1] 赖先熔,黎园,陈仕萍,等. 甲醇制芳烃技术的发展现状[J].

石化技术与应用,2014,32(1):80-85.

Lai Xianrong, Li Yuan, Chen Shiping, *et al.* Progress in methanol to aromatics technologies [J]. Petrochemical Technology & Application, 2014, 32(1): 80-85.

[2] 韩宝庆. 甲醇制低碳烯烃技术现状及前景分析[J]. 天津化工, 2013, 27(4): 10-12.

Han Baoqing. Analysis of the present situation and prospect of low carbon olefins with methanol [J]. Tianjin Chemical Industry, 2013, 27(4): 10-12.

[3] 李健,闫龙,李妮娜,等. 榆林市甲醇产业现状及发展建议[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(4): 46-54.

Li Jian, Yan Long, Li Ni'na, *et al.* Status and development suggestions of methanol industry in Yulin [J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(4): 46-54.

[4] 李敏. 2015 中国甲醇市场分析与前景展望[J]. 中国石油和化工经济分析, 2016(3): 67-69.

Li Min. 2015 analysis and prospect of methanol market in China [J]. Economic Analysis of China Petroleum and Chemical Industry, 2016(3): 67-69.

[5] 张晶,孙显锋,乔婧,等. 合成气制芳烃研究进展[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(5): 60-62, 67.

Zhang Jing, Sun Xianfeng, Qiao Jing, *et al.* Research on syngas to aromatics [J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(5): 60-62, 67.

[6] 孙富伟,劳国瑞,卢秀荣,等. 煤基甲醇芳构化技术的研究及应用进展[J]. 现代化工, 2014, 34(2): 27-32.

Sun Fuwei, Lao Guorui, Lu Xiurong, *et al.* Research and application on coal based methanol aromatization process [J]. Modern Chemical Industry, 2014, 34(2): 27-32.

[7] Chao P K, Knob K J, Yurchak S. Control of temperature exotherms in the conversion of methanol to gasoline hydrocarbons; US4544781 [P]. 1985-10-01.

[8] Chu C C. Aromatization reactions with zeolites containing phosphorous oxide; US4590321 [P]. 1986-05-20.

[9] 梁龙虎. 甲醇制芳烃技术进展及技术经济分析[R]. 洛阳: 中国石化集团洛阳石油化工工程公司, 2012.

[10] 邹琥,吴巍,扈雷,等. 甲醇制芳烃研究进展[J]. 石油学报(石油加工), 2013, 29(3): 539-544.

Zou Hu, Wu Wei, Xi Lei, *et al.* Review of methanol to aromatics [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2013, 29(3): 539-544.

[11] 魏飞,蹇伟中,汤效平,等. 一种甲醇或二甲醚转化制取芳烃的系统与工艺; CN101823929A [P]. 2010-09-08.

[12] 蹇伟中,魏飞,田涛,等. 二甲醚连续芳构化与催化剂再生的方法及装置; CN101792362A [P]. 2010-02-11.

[13] 王程俊. 甲醇制芳烃技术及经济性浅析[J]. 安徽化工, 2014, 40(3): 1-7.

Wang Chengjun. Technical and economic analysis of methanol aromatization process [J]. Anhui Chemical Industry, 2014, 40(3): 1-7.

[14] 李玉阁,曹祖宾,赵荣祥,等. 甲醇下游产品技术进展[J]. 石化技术与应用, 2013, 31(6): 526-529.

- Li Yuge, Cao Zubin, Zhao Rongxiang, *et al.* Technical progress in methanol downstream products[J]. *Petrochemical Technology & Application*, 2013, 31(6):526-529.
- [15] 连作桦. 甲醇一步法制芳烃(汽油)装置的运行情况[EB/OL]. (2012-12-10) [2016-06-06]. <http://www.doc88.com/p-3167137871510.html>.
- [16] 戴厚良. 芳烃生产技术展望[J]. *石油炼制与化工*, 2013, 44(1):1-10.
- Dai Houliang. Outlook of aromatics production technology[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2013, 44(1):1-10.
- [17] 曹劲松, 张军民, 许磊, 等. 甲苯甲醇烷基化制PX技术的开发优势[J]. *石油化工技术与经济*, 2010, 26(1):8-10.
- Cao Jinsong, Zhang Junmin, Xu Lei, *et al.* Superiorities for developing PX production process through alkylation of toluene alcohol[J]. *Technology & Economics in Petrochemicals*, 2010, 26(1):8-10.
- [18] 顾道斌. 甲苯甲醇催化烷基化制对二甲苯技术研究进展[J]. *天然气化工(C1化学与化工)*, 2013, 38(6):62-66.
- Gu Daobin. Research advances in technologies of catalytic alkylation of toluene with methanol to para-xylene[J]. *Natural Gas Chemical Industry*, 2013, 38(6):62-66.
- [19] 朱伟平, 李飞, 薛云鹏, 等. 甲醇制芳烃技术研究进展[J]. *现代化工*, 2014, 34(4):36-42.
- Zhu Weiping, Li Fei, Xue Yunpeng, *et al.* Advances in methanol to aromatics technology[J]. *Modern Chemical Industry*, 2014, 34(4):36-42.
- [20] 刘艳, 常琴琴, 杨萌, 等. 甲醇制芳烃工艺研究进展[J]. *化学工程*, 2015, 43(9):74-78.
- Liu Yan, Chang Qinqin, Yang Meng, *et al.* Research progress of methanol to aromatics[J]. *Chemical Engineering (China)*, 2015, 43(9):74-78.
- [21] 李木金, 杨卫胜, 贺来宾, 等. 甲苯甲醇择形甲基化工艺在芳烃联合装置中的应用[J]. *炼油技术与工程*, 2015, 45(5):6-9.
- Li Mujin, Yang Weisheng, He Laibin, *et al.* Research on application of toluene methanol selective methylation process in aromatic complex[J]. *Petroleum Refinery Engineering*, 2015, 45(5):6-9.
- [22] 邹薇, 杨德琴, 孔德金, 等. 硅改性HZSM-5沸石上甲苯与甲醇选择性甲基化的研究[J]. *化学反应工程与工艺*, 2006, 22(4):305-309.
- Zou Wei, Yang Deqin, Kong Dejin, *et al.* Selective methylation of toluene with methanol over HZSM-5 zeolite modified by chemical liquid deposition[J]. *Chemical Reaction Engineering and Technology*, 2006, 22(4):305-309.
- [23] 李霞. 我国甲醇制芳烃行业的前景研究[J]. *乙烯工业*, 2015, 27(2):15-17.
- Li Xia. Prospects of MTA industry in China[J]. *Ethylene Industry*, 2015, 27(2):15-17.
- [24] 米多. 2015年纯苯市场调查[J]. *化学工业*, 2015, 33(6):32-34.
- Mi Duo. The pure benzene market survey in 2015[J]. *Chemical Industry*, 2015, 33(6):32-34.
- [25] 郑宝山, 张东明, 李宇静. 我国石化行业分析——炼油、乙烯、芳烃现状和展望[J]. *化学工业*, 2013, 31(5):8-16.
- Zheng Baoshan, Zhang Dongming, Li Yujing. Analysis of China's petrochemical industry: refining, ethylene and aromatics status quo and outlook[J]. *Chemical Industry*, 2013, 31(5):8-16.
- [26] 崔小明. 我国对二甲苯生产技术现状及市场分析[J]. *上海化工*, 2012, 37(12):31-35.
- Cui Xiaoming. Production technology and market situation of p-xylene analysis in China[J]. *Shanghai Chemical Industry*, 2012, 37(12):31-35.
- [27] 李明. 我国对二甲苯的供需现状及发展建议[J]. *乙醛醋酸化工*, 2013(6):20-23.
- Li Ming. Supply and demand situation and development suggestions of p-xylene[J]. *Acetaldehyde Acetic Acid Chemical Industry*, 2013(6):20-23.
- (上接第99页)
- [7] 王运波, 柏海燕, 于洋飞. 液化石油气中硫化物浓度的表征及单位换算[J]. *石油与天然气化工*, 2016, 45(2):83-86.
- Wang Yunbo, Bai Haiyan, Yu Yangfei. Characterization and unit conversion of sulfides concentration in LPG[J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2016, 45(2):83-86.
- [8] 莫娅南, 王伯. 液化气脱硫技术及其工业应用[J]. *炼油与化工*, 2011, 22(5):15-17.
- Mo Ya'nan, Wang Bo. LPG desulfurization technology and its industrial application[J]. *Refining and Chemical Industry*, 2011, 22(5):15-17.
- [9] 柯明, 许赛威, 李成翠, 等. 液化石油气脱硫醇技术进展[J]. *石油炼制与化工*, 2008, 39(3):22-27.
- Ke Ming, Xu Saiwei, Li Chengcui, *et al.* Progress in LPG sweetening process[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2008, 39(3):22-27.
- [10] 陈赓良. 克劳斯法硫磺回收工艺技术发展评述[J]. *天然气与石油*, 2013, 31(4):23-28.
- Chen Gengliang. Review on development of claus process used for sulfur recovery[J]. *Natural Gas and Oil*, 2013, 31(4):23-28.
- [11] 殷树青, 徐兴忠. 硫磺回收及尾气加氢催化剂研究进展[J]. *石油炼制与化工*, 2012, 43(8):98-104.
- Yin Shuqing, Xu Xingzhong. Research headway of sulfur recovery and tail gas hydrogenation catalysts[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2012, 43(8):98-104.
- [12] 张黎, 肖鸿亮, 陈赓良. SSR硫磺回收尾气处理工艺及其应用[J]. *石油与天然气化工*, 2014, 43(5):478-482.
- Zhang Li, Xiao Hongliang, Chen Gengliang. Process and application of tail gas treatment for SSR sulfur recovery[J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2014, 43(5):478-482.