

乙二醇产品塔全回流和 侧采产品液相加氢的工业化应用

林晓霞^{1*}, 刘景刚¹, 王建平²

(1. 新疆生产建设兵团天盈石油化工股份有限公司, 新疆 阿拉尔 843300;
2. 合肥江新化工科技有限公司, 安徽 合肥 230601)

摘要:为提高聚酯级乙二醇收率,同时提高乙二醇产品质量,新疆天盈石化实施了乙二醇液相加氢技改项目,首次设计了 2 种操作工况,分别为乙二醇产品塔全回流液相加氢工况和乙二醇产品塔侧采产品液相加氢工况。工业化运行结果表明,在 2 种工况下,液相加氢提高紫外透光率和降低醛含量效果明显,聚酯级乙二醇收率均提高至 100%;在全回流液相加氢工况下,回流液和侧采产品的紫外透光率得到了提升,且降低了醛含量;在侧采液相加氢工况下,液相加氢后乙二醇产品紫外透光率、醛含量、含水率和轻组分指标均能达到聚酯级指标要求。

关键词:液相加氢;天然气制乙二醇;全回流液相加氢;侧采产品液相加氢

中图分类号:TQ203

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)02-0243-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.02.

Industrial application of liquid-phase hydrogenation for total reflux and side withdrawal in ethylene glycol product tower

LIN Xiao-xia^{1*}, LIU Jing-gang¹, WANG Jian-ping²

(1. Tianying Petrochemical Co., Ltd., Xinjiang Production and Construction Corp., Alar 843300, China;
2. Hefei JiangXin Chemical Science & Technology Co., Ltd., Hefei 230601, China)

Abstract: In order to increase the yield of polyester-grade ethylene glycol and improve the quality of ethylene glycol product, Xinjiang Tianying Petrochemical Company Limited implemented an ethylene glycol liquid-phase hydrogenation technical transformation project, in which two kinds of operating condition are designed for the first time, namely the total reflux liquid-phase hydrogenation in the ethylene glycol product tower and the side withdrawal product liquid-phase hydrogenation in the ethylene glycol product tower, respectively. Industrial operation results show that under these two working conditions, liquid phase hydrogenation has obvious effects on increasing UV transmittance and reducing aldehyde content, and increases the yield of polyester-grade ethylene glycol to 100%. Under the total reflux liquid-phase hydrogenation condition, the UV transmittance of both the reflux liquid and side withdraw products has been improved, and the aldehyde content has been reduced. Under the side withdrawal liquid-phase hydrogenation condition, the UV transmittance, aldehyde content, moisture content and light component indexes of ethylene glycol product can all meet the requirements of polyester-grade product through liquid-phase hydrogenation.

Key words: liquid phase hydrogenation; natural gas to ethylene glycol; total reflux liquid phase hydrogenation; liquid-phase hydrogenation for side withdrawal products

据不完全统计,截至 2024 年 2 月底,合成气制乙二醇的有效产能达到 1 071 万 t/a,逐渐成为我国乙二醇的主要生产工艺。

为提高合成气制乙二醇产品质量和聚酯级收率,国内研究单位进行了深入的研究,并开发了树脂吸附和液相加氢技术,技术得到了工业化应用。树脂吸附主要用于提高乙二醇产品质量,提高紫外透光率和降低醛含量^[1]。液相加氢单元具有操作简单、稳定性高、乙二醇质量提升明显等优点,因此受到越来越多客户的认可和应用^[2]。增加液相加氢单元处理负荷,采用本质安全的负载型催化剂,已成

为行业内的共识和发展趋势。

作为乙二醇质量提升的手段,液相加氢可以用于处理乙二醇精馏单元多处物料。起初,河南能源永金乙二醇项目均采用液相加氢技术对乙二醇产品塔和乙二醇回收塔塔顶工业级乙二醇进行处理,加氢后的物料返回前工序的脱轻塔处理,以此提高乙二醇聚酯级收率。2018 年山东利华益利津炼化有限公司乙二醇液相加氢项目中,合肥江新化工科技有限公司(以下简称“合肥江新”)率先联合客户提出并实施乙二醇产品塔回流液液相加氢技术。项目投产后,液相加氢效果明显,乙二醇聚酯级收率提升

收稿日期:2024-05-13;修回日期:2024-12-05

作者简介:林晓霞(1992-),女,本科,工程师,研究方向为天然气制乙二醇生产,通讯联系人,1150122472@qq.com。

至 100%，侧采产品质量间接提高，洗塔周期显著延长，此后相关企业均采用此液相加氢技术。

为进一步提升乙二醇产品质量，乙二醇产品塔全回流和侧采产品液相加氢是未来研发方向，但是至今仅有小试报道^[3]，尚未得到工业化应用。

新疆生产建设兵团天盈石油化工股份有限公司（以下简称“新疆天盈石化”）一期 15 万 t/a 天然气制乙二醇项目，2018 年 6 月投产后乙二醇的聚酯级收率在 90% 左右，并使用树脂工艺来提高乙二醇产品质量。为提高乙二醇聚酯级收率，同时改善乙二醇产品质量，2023 年新疆天盈石化选用了合肥江新的乙二醇液相加氢技术^[4-5]进行技改，首次设计了 2 种操作工况，分别为乙二醇产品塔全回流液相加氢工况和乙二醇产品塔侧采产品液相加氢工况，2 种操作工况可以通过连接的管道进行切换，新疆天盈石化根据运行效果灵活选用。液相加氢反应器

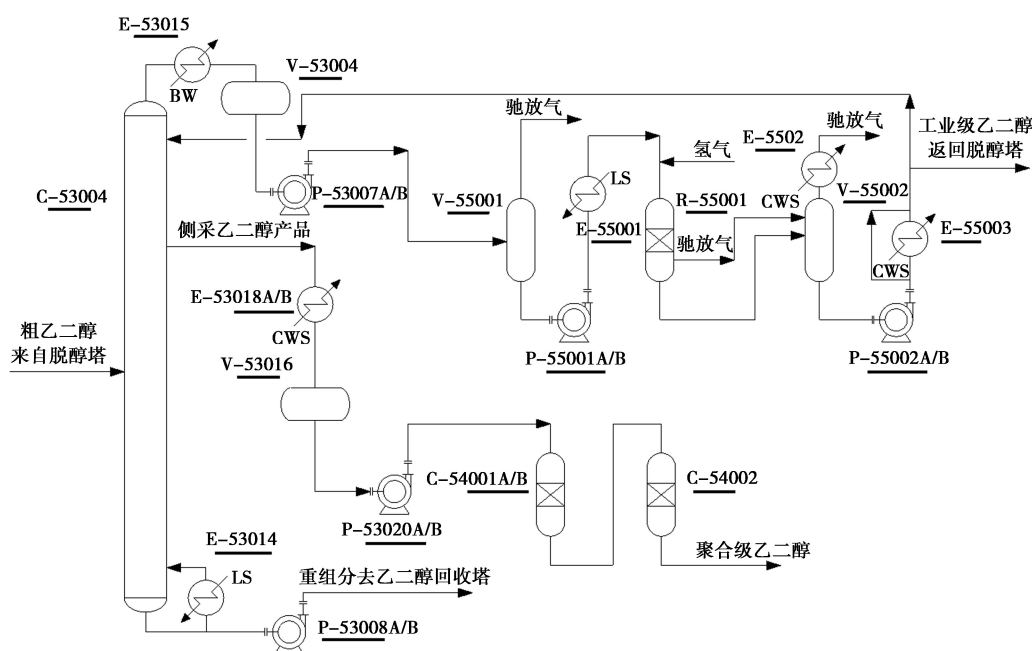
内装填的合肥江新专有催化剂量为 3 m³，液相加氢设计乙二醇最大处理能力为 25 t/h，反应器操作条件为 1.0 MPa、90~140℃。本液相加氢技改项目于 2024 年 1 月 19 日投用，项目投用后即刻全采出聚酯级乙二醇，乙二醇聚酯级收率提升至 100%，达到了技改目标。

本文中首先对液相加氢与乙二醇精馏耦合工艺流程进行简要说明，而后对乙二醇产品塔全回流和侧采产品液相加氢的工业化应用数据进行分析 and 总结。

1 液相加氢与乙二醇精馏耦合工艺流程说明

1.1 乙二醇产品塔全回流液相加氢工艺流程

图 1 为乙二醇产品塔全回流液相加氢工艺流程示意图。



C-53004—乙二醇产品塔；E-53015—乙二醇产品塔废锅；V-53004—乙二醇产品塔回流罐；P-53007A/B—乙二醇产品塔回流泵；V-55001—原料罐；P-55001A/B—原料泵；E-55001—原料预热器；R-55001—液相加氢反应器；V-5502—闪蒸罐；E-5502—弛放气冷却器；P-55002A/B—加氢产品泵；R-55001—液相加氢反应器；E-55003—加氢产品冷却器；E-53014—乙二醇产品塔再沸器；P-53008A/B—乙二醇回收塔进料泵；E-53018A/B—精乙二醇冷却器；V-53016—乙二醇产品中间罐；P-53020A/B—精乙二醇输送泵；C-54001A/B—1#树脂罐；C-54002—2#树脂罐

图 1 乙二醇产品塔全回流液相加氢工艺流程示意图

来自脱醇塔的粗乙二醇进入 C-53004 乙二醇产品塔，乙二醇产品塔塔顶气体首先进入 E-53015 乙二醇产品塔废锅，气体被冷凝，同时副产低压蒸汽，冷凝后含轻组分的乙二醇进入 V-53004 乙二醇产品塔回流罐，再通过 P-53007A/B 乙二醇产品塔回流泵加压后全部去液相加氢。E-53014 乙二醇产

品塔再沸器采用蒸汽加热，塔底重组分通过 P-53008A/B 乙二醇回收塔进料泵加压后送至乙二醇回收塔。

乙二醇产品塔侧线采出的产品首先进入 E-53018A/B 乙二醇产品冷却器冷却至 40℃，送至 V-53016 精乙二醇产品中间罐缓冲，再通过 P-

53020A/B 精乙二醇输送泵送至树脂罐处理。

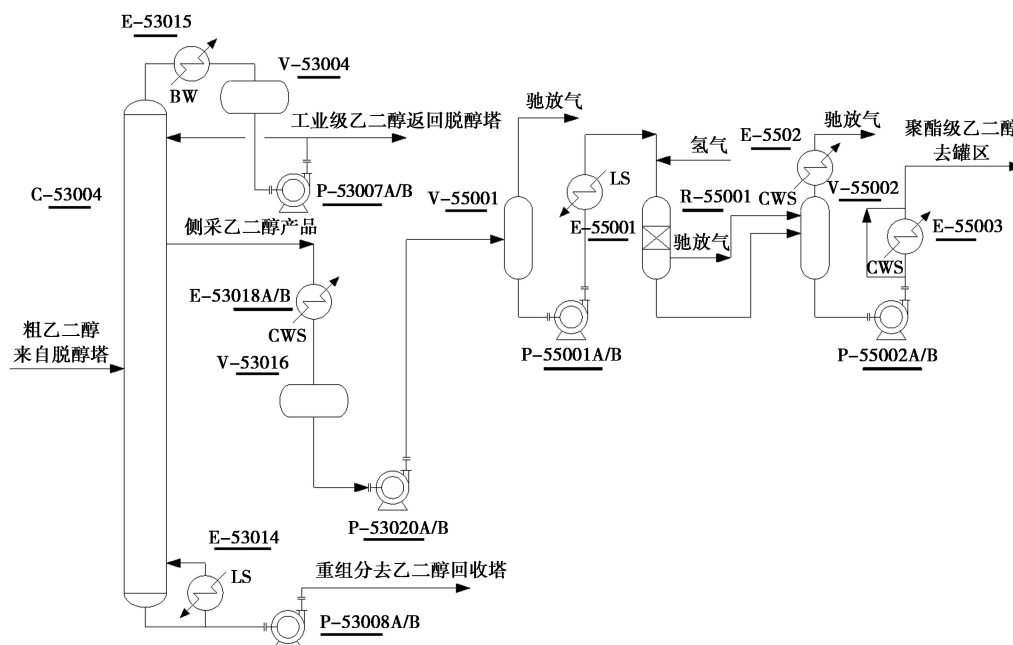
在脱醛树脂单元,来自上游的乙二醇产品首先进入 C-54001A/B 1#树脂罐提高紫外透光率,再送 C-54002 2#树脂罐脱醛,脱醛后的产品送至界外储罐。

在液相加氢单元,来自上游的乙二醇首先进入原料缓冲罐 V-55001 缓冲,再用原料输送泵 P-55001A/B 送至原料预热器 E-55001。来自界区的氢气减压并与加热后的乙二醇混合后再从顶部进入液相加氢反应器 R-55001, R-55001 为滴流床反应器,乙二醇溶液与氢气并流向下,氢气为连续相,乙二醇溶液为分散相。加氢反应开始后,通过将未反

应的氢气和惰性气排放至闪蒸罐 V-55002,保持反应器内部氢气体积分数在 90%~95%以上。加氢后的乙二醇从反应器底部出料,通过物料自身的压力和液位控制系统送至闪蒸罐 V-55002,闪蒸的氢气首先经弛放气冷却器 E-55002 将其中汽化的乙二醇冷凝回收,通过压力控制送至火炬气系统。闪蒸后的乙二醇通过加氢产品泵 P-55002A/B 加压,再走加氢产品冷却器 E-55003 旁路,大部分作为回流液体返回产品塔,少部分返回脱醇塔以脱除轻组分。

1.2 乙二醇产品塔侧采产品液相加氢工艺流程

图 2 为乙二醇产品塔侧采产品液相加氢工艺流程示意图。



C-53004—乙二醇产品塔;E-53015—乙二醇产品塔废锅;V-53004—乙二醇产品塔回流罐;P-53007A/B—乙二醇产品塔回流泵;V-55001—原料罐;P-55001A/B—原料泵;E-55001—原料预热器;R-55001—液相加氢反应器;V-55002—闪蒸罐;E-55002—弛放气冷却器;P-55002A/B—加氢产品泵;R-55001—液相加氢反应器;E-55003—加氢产品冷却器;E-53014—乙二醇产品塔再沸器;P-53008A/B—乙二醇回收塔进料泵;E-53018A/B—精乙二醇冷却器;V-53016—乙二醇产品中罐;P-53020A/B—精乙二醇输送泵;C-54001A/B—1#树脂罐;C-54002—2#树脂罐

图 2 乙二醇产品塔侧采产品液相加氢工艺流程示意图

来自脱醇塔的粗乙二醇进入 C-53004 乙二醇产品塔,乙二醇产品塔塔顶气体首先进入 E-53015 乙二醇产品塔废锅,气体被冷凝,同时副产低压蒸汽,冷凝后的含轻组分的乙二醇进入 V-53004 乙二醇产品塔回流罐,再通过 P-53007A/B 乙二醇产品塔回流泵加压后大部分去回流,少部分返回脱醇塔进料。E-53014 乙二醇产品塔再沸器采用蒸汽加热,塔底重组分通过 P-53008A/B 乙二醇回收塔进料泵加压后送至乙二醇回收塔。

乙二醇产品塔侧线采出的产品首先进入 E-

53018A/B 乙二醇产品冷却器冷却至 90~110℃,再送至液相加氢单元。

在液相加氢单元,来自上游的乙二醇首先进入原料缓冲罐 V-55001 缓冲,再用原料输送泵 P-55001A/B 送至液相加氢反应器 R-55001。来自界区的氢气减压并与乙二醇混合后再从顶部进入液相加氢反应器 R-55001。加氢后的乙二醇从反应器底部出料,通过物料自身的压力和液位控制系统送至闪蒸罐 V-55002,闪蒸的氢气首先经弛放气冷却器 E-55002 将其中汽化的乙二醇冷凝回收,通过压力控

制送至火炬气系统。闪蒸后的乙二醇通过加氢产品泵 P-55002A/B 加压,送加氢产品冷却器 E-55003 冷却至 40℃ 后送产品罐区。

2 全回流液相加氢工业化运行结果与分析

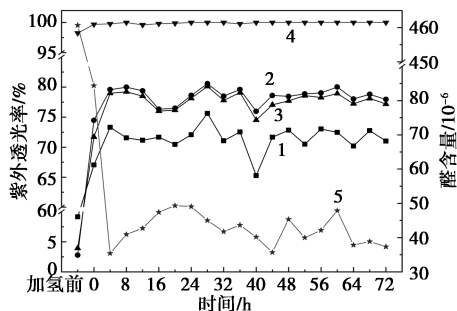
本次乙二醇产品塔全回流液液相加氢选择液相加氢投用前、后的数据进行性能评价,具体时间为 2024 年 1 月 20 日 17:00—2024 年 1 月 23 日 17:00。液相加氢操作条件:乙二醇处理量 21 t/h,液相加氢反应器操作压力 0.6 MPa,操作温度为 115℃,乙二醇体积空速(LHSV)为 7 h^{-1} ,LHSV 指的是单位时间内乙二醇进料体积/催化剂床层体积。

在性能考核期间,全部采出聚酯级乙二醇。

主要分析指标是液相加氢进出口以及产品塔侧采乙二醇的紫外透光率(以下简称“UV 值”)和醛含量。分析方法:用 MBTH 法按照标准 GB/T 14571.3 的测试要求对液相加氢前后乙二醇的醛含量进行测量;采用 UV1201 型紫外分光光度计按照标准 GB/T 14571.4 对液相加氢前后乙二醇的 UV 值进行测定。

2.1 全回流液相加氢工况下乙二醇产品塔回流液的质量分析

图 3 为乙二醇产品塔回流液紫外透光率和醛含量随时间变化折线图,其中第一个数据点为液相加氢投用前 3 d 的乙二醇产品塔回流液的各项质量指标平均值。从图中可以看出,在液相加氢投用后,乙二醇紫外透光率迅速上升,醛含量迅速下降,并在液相加氢投用 8 h 后保持基本平稳。其中,220 nm 紫外透光率平均从 9.16% 提高至 71.38%,提高值为 62.22%;250 nm 紫外透光率平均从 2.77% 提高至 78.38%,提高值为 75.61%;275 nm 紫外透光率平均从 3.93% 提高至 77.55%,提高值为 73.62%;350 nm 紫外透光率平均从 98.24% 提高至 99.91%,



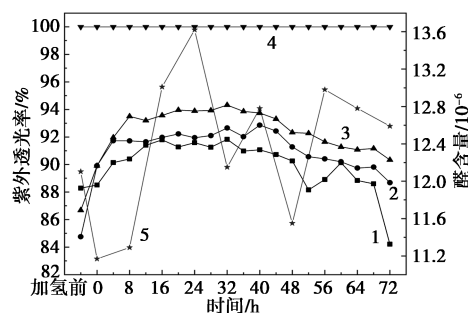
1—220 nm;2—250 nm;3—275 nm;4—350 nm;5—醛含量

图 3 全回流液相加氢工况下乙二醇产品塔回流液紫外透光率和醛含量随时间变化折线图

提高值为 1.67%;醛含量平均从 460.66×10^{-6} 降低至 44.46×10^{-6} ,液相加氢效果明显。

2.2 全回流液相加氢工况下乙二醇产品的质量分析

图 4 为乙二醇产品塔侧采产品紫外透光率和醛含量随时间变化折线图,其中第一个数据点为液相加氢投用前 3 d 的乙二醇产品塔回流液的各项质量指标平均值。从图中可以看出,在液相加氢投用后,随着回流液不断循环加氢,除 350 nm 紫外透光率无变化外,均逐步上升,并在液相加氢投用 12 h 后基本保持稳定,但醛含量无明显变化。其中,220 nm 紫外透光率平均从 88.57% 提高至 90.00%,提高值为 1.43%;250 nm 紫外透光率平均从 85.28% 提高至 91.26%,提高值为 5.98%;275 nm 紫外透光率平均从 87.04% 提高至 92.59%,提高值为 5.56%;350 nm 紫外透光率没有提高,均保持在 99.99%。经脱醛树脂单元脱醛后,即可达到聚酯级要求,乙二醇聚酯级收率 100%。



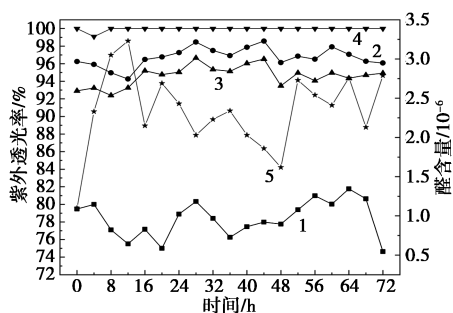
1—220 nm;2—250 nm;3—275 nm;4—350 nm;5—醛含量

图 4 全回流液相加氢工况下乙二醇产品塔侧采产品紫外透光率和醛含量随时间变化折线图

2.3 全回流液相加氢工况下液相加氢进出口乙二醇质量分析

在全回流液相加氢工况下,液相加氢单元进口乙二醇的各项指标与乙二醇产品塔回流液相同,如图 3 所示。图 5 为液相加氢单元出口紫外透光率和醛含量随时间变化折线图,从图中可以看出,在性能评价时间段内液相加氢单元出口紫外透光率和醛含量无明显波动,加氢效果稳定。液相加氢单元进出口紫外透光率和醛含量平均值作对比表,如表 1 所示,220 nm 紫外透光率平均从 71.38% 提高至 78.36%,提高值为 6.98%;250 nm 紫外透光率平均从 78.38% 提高至 96.74%,提高值为 18.35%;275 nm 紫外透光率平均从 77.55% 提高至 94.63%,提高值为 17.09%;350 nm 紫外透光率平均从 99.91% 提高至 99.94%,提高值为 0.03%;醛含量平

均从 44.46×10^{-6} 降低至 2.34×10^{-6} , 降低值为 42.12×10^{-6} 。综上,液相加氢效果明显。



1—220 nm;2—250 nm;3—275 nm;4—350 nm;5—醛含量

图5 全回流液相加氢工况下液相加氢单元出口紫外透光率和醛含量随时间变化折线图

表1 全回流液相加氢工况下液相加氢单元进出口紫外透光率和醛含量对比表

	紫外透光率/%				醛含量/ 10^{-6}
	220 nm	250 nm	275 nm	350 nm	
液相加氢入口	71.38	78.38	77.55	99.91	44.46
液相加氢出口	78.36	96.74	94.63	99.94	2.34

3 侧采产品液相加氢工业化运行结果与分析

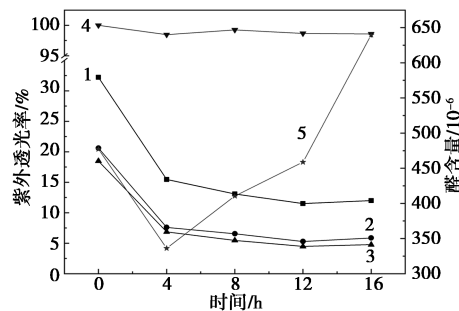
本次乙二醇产品塔侧采产品乙二醇液相加氢性能评价时间从2024年1月24日上午1:00开始,由于乙二醇产品塔侧采紫外透光率持续降低(因工业级乙二醇在精馏系统内循环导致),液相加氢出口紫外透光率有低于聚酯级指标的风险,本次性能评价于2024年1月24日下午17:00结束,共计16 h。在性能评价期间,液相加氢进料量为13~15 t/h,液相加氢反应器操作压力0.6 MPa,操作温度为85~95℃、LHSV为4.3~5.0 h^{-1} 。在性能考核期间,全部采出聚酯级乙二醇。

主要分析指标是液相加氢进出口以及产品塔侧采乙二醇的UV值、醛含量、水含量和轻组分含量。分析方法:UV值和醛含量的分析方法同全回流液相加氢工况,水含量采用卡尔费休水分仪测定,轻组分含量采用气相色谱分析。

3.1 侧采产品液相加氢工况下乙二醇产品塔回流液的质量分析

从图6中可以看出,随着液相加氢工况由全回流液相加氢切换到侧采产品液相加氢,乙二醇产品塔回流液紫外透光率在逐渐下降并趋于平稳,220、250、275 nm紫外透光率降低至 $\leq 20\%$,醛含量在切

换工况后迅速由 37.33×10^{-6} (见图6) 升高至 400×10^{-6} 以上。这主要是由于工业级乙二醇返回脱醇塔进料,杂质在乙二醇精馏系统内循环,乙二醇产品塔内杂质不断累积,从而导致紫外透光率下降和醛含量上升,最后趋于稳定。

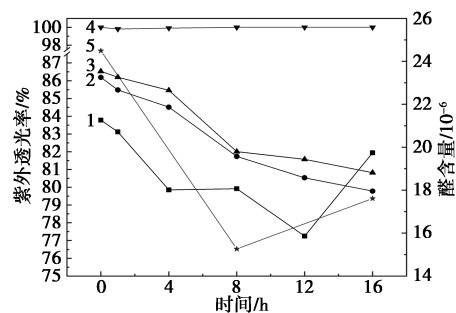


1—220 nm;2—250 nm;3—275 nm;4—350 nm;5—醛含量

图6 侧采产品液相加氢工况下乙二醇产品塔回流液紫外透光率和醛含量随时间变化折线图

3.2 侧采产品液相加氢工况下乙二醇产品的质量分析

从图7中可以看出,受乙二醇产品塔回流液质量不断下降的影响,乙二醇侧采产品220、250、275 nm的紫外透光率也在不断下降,分别降低至81.94%、79.78%、80.82%。若乙二醇产品塔回流液紫外透光率数值能维持在稳定水平,侧采产品的紫外透光率也应在下降至一定数值后保持稳定。



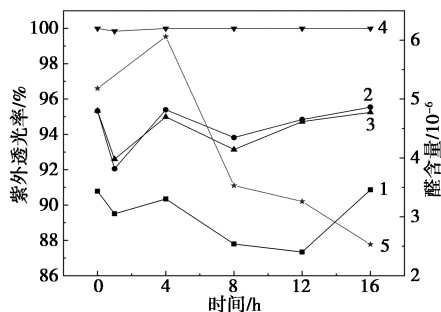
1—220 nm;2—250 nm;3—275 nm;4—350 nm;5—醛含量

图7 侧采产品液相加氢工况下乙二醇产品塔侧采产品紫外透光率和醛含量随时间变化折线图

3.3 侧采产品液相加氢工况下液相加氢进出口乙二醇质量分析

在侧采产品液相加氢工况下,液相加氢单元进口乙二醇的各项指标与乙二醇产品塔侧采产品相同,如图7所示。图8为液相加氢单元出口紫外透光率和醛含量随时间变化折线图,从图中可以看出,性能评价期间液相加氢单元出口紫外透光率和醛含量无明显波动,加氢效果稳定。取性能评价期间液相加

氢单元进出口紫外透光率和醛含量平均值作对比表,如表 2 所示:220 nm 紫外透光率平均从 80.98% 提高至 89.44%,提高值为 8.46%;250 nm 紫外透光率平均从 83.04% 提高至 94.50%,提高值为 11.46%;275 nm 紫外透光率平均从 83.77% 提高至 94.34%,提高值为 10.57%;350 nm 紫外透光率平均从 99.95% 提高至 99.97%,提高值为 0.02%;醛含量平均从 19.12×10^{-6} 降低至 4.11×10^{-6} ,降低值为 15.01×10^{-6} 。综上,液相加氢效果明显。



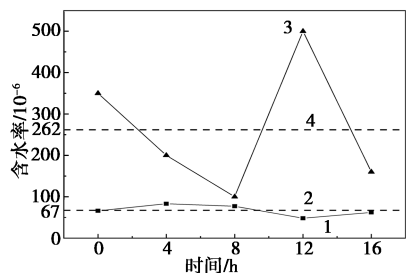
1—220 nm;2—250 nm;3—275 nm;4—350 nm;5—醛含量

图 8 侧采产品液相加氢工况下液相加氢单元出口紫外透光率和醛含量随时间变化折线图

表 2 侧采产品液相加氢工况下液相加氢单元进出口紫外透光率和醛含量对比表

	紫外透光率/%				醛含量/ 10^{-6}
	220 nm	250 nm	275 nm	350 nm	10^{-6}
液相加氢入口	80.98	83.04	83.77	99.95	19.12
液相加氢出口	89.44	94.50	94.34	99.97	4.11

从图 9 可以看出,加氢后乙二醇含水率略微提高,由平均 67×10^{-6} 提升至 262×10^{-6} ,提高约 195×10^{-6} ,主要原因是乙二醇中部分氧化物杂质加氢后生成水,导致含水率增加。液相加氢后乙二醇

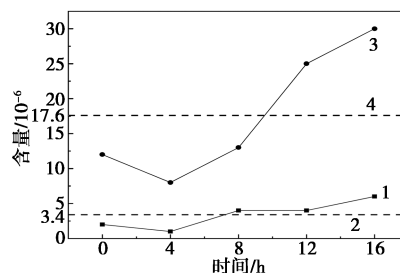


1—液相加氢进口;2—液相加氢进口含水率平均值;
3—液相加氢出口;4—液相加氢出口含水率平均值

图 9 侧采产品液相加氢工况下液相加氢单元进出口乙二醇含水率

的含水率仍在聚酯级指标(含水率 $\leq 800 \times 10^{-6}$)范围内,不影响产品质量。

通过液相加氢会将部分杂质转化为醇类,以甲醇和乙醇为主,图 10 为液相加氢单元进出口乙二醇中轻组分含量,其中甲醇的平均含量为 3.4×10^{-6} ,乙醇的平均含量为 17.6×10^{-6} ,均处于较低水平,不会影响产品质量。



1—甲醇;2—甲醇平均含量;3—乙醇;4—乙醇平均含量

图 10 侧采产品液相加氢工况下液相加氢单元进出口乙二醇中轻组分含量

4 结论

新疆天盈石化乙二醇液相加氢技改项目,首次设计了 2 种操作工况,分别为乙二醇产品塔全回流液相加氢工况和乙二醇产品塔侧采产品液相加氢工况。液相加氢技改项目投用后,在全回流液相加氢工况下和侧采产品液相加氢工况下分别进行了性能评价,得到以下结论。

(1)2 种操作工况下,均能将乙二醇聚酯级收率提高至 100%,同时改善侧采乙二醇产品质量。

(2)2 种操作工况下,相较于液相加氢单元进口,出口乙二醇的紫外透光率都有明显提升,醛含量都有明显下降,液相加氢的效果明显。

(3)在产品塔回流液液相加氢工况下:对乙二醇产品塔回流液连续循环加氢,回流液质量改善明显,220 nm 紫外透光率平均提高值为 62.22%,275 nm 紫外透光率平均提高值为 73.62%,醛含量平均从 460.66×10^{-6} 降低至 44.46×10^{-6} 。侧采产品紫外透光率略有提高,220 nm 紫外透光率平均提高值为 1.43%,275 nm 紫外透光率平均提高值为 5.56%,有望延长洗塔周期。

(4)在产品塔侧采液相加氢工况下:虽然工业级乙二醇在系统内循环导致产品塔回流液和侧采产品紫外透光率不断下降,但是通过液相加氢后乙二醇产品紫外透光率仍能达到聚酯级指标要求,

(下转第 254 页)

3 结论

以红花羊蹄甲叶作为碳源,一步水热法合成简便、环保的生物基碳点。制备的红花羊蹄甲 N-CDs 在紫外光下发蓝色荧光,具有光致发光性、水溶性、激发波长依赖性、光稳定性等特点,N-CDs 可作为检测 Cr^{3+} 的高选择性和灵敏度的荧光探针,检测限为 $0.53 \mu\text{mol/L}$ 。N-CDs 作为荧光探针检测 Cr^{3+} 的灵敏度取决于表面官能团和 N-CDs 的协同效应。所得的 N-CDs 在实际样品检测中具有良好的实用性。

参考文献

- [1] Liu B, Tan H, Chen Y. Upconversion nanoparticle-based fluorescence resonance energy transfer assay for $\text{Cr}(\text{III})$ ions in urine[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2013, 761: 178-185.
- [2] Huangfu C, Hao J, Hao C. Highly sensitive fluorescent probe for Cr^{3+} detection using carbon quantum dots[C]//2017 3rd International Forum on Energy, Environment Science and Materials (IF-EESM 2017). Atlantis Press, 2018: 871-877.
- [3] 吴玉娟,宗洪凤,斯杭珺,等.豌豆荚碳量子点的合成及其性能研究[J]. *现代化工*, 2023, 43(8): 156-161.
- [4] Wang B, Lu S. The light of carbon dots: From mechanism to applications[J]. *Matter*, 2022, 5(1): 110-149.
- [5] Meng W, Bai X, Wang B, et al. Biomass-derived carbon dots and their applications[J]. *Energy & Environmental Materials*, 2019, 2(3): 172-192.
- [6] Klongklaw K, Phromkaew B, Kiatsuksri P, et al. Green one-step synthesis of mushroom-derived carbon dots as fluorescent sensors for Fe^{3+} detection[J]. *RSC Advances*, 2023, 13(44): 30869-30875.
- [7] Chaudhary S, Kumar S, Kaur B, et al. Potential prospects for carbon dots as a fluorescence sensing probe for metal ions[J]. *RSC Advances*, 2016, (6): 90526-90536.
- [8] 陈勇,罗树凯,郑丹菁,等.羊蹄甲属植物引种适应性、观赏性综

(上接第 248 页)

220 nm 紫外透光率平均提高值为 8.46%, 275 nm 紫外透光率平均提高值为 10.57%, 醛含量平均从 19.12×10^{-6} 降低至 4.11×10^{-6} 。液相加氢后乙二醇平均水含率为 262×10^{-6} , 甲醇平均含量为 3.4×10^{-6} , 乙醇平均含量为 17.6×10^{-6} , 均能满足聚酯级产品要求。

(5) 侧采产品液相加氢提高乙二醇产品质量更直接,效果更明显,但是工业级乙二醇在精馏系统内循环导致产品塔侧采乙二醇质量并不稳定。侧采产品液相加氢适合于已有回流液液相加氢的工艺装置,此时不仅可以将聚酯率提高至 100%,还可以替

合评价[J]. *中国城市林业*, 2021, 19(1): 42-47.

- [9] Atchudan R, Edison T N J I, Atchudan R, et al. Betel-derived nitrogen-doped multicolor carbon dots for environmental and biological applications[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, 296: 111817.
- [10] Li W, Huang S, Wen H, et al. Fluorescent recognition and selective detection of nitrite ions with carbon quantum dots[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2020, 412: 993-1002.
- [11] Zu F, Yan F, Bai Z, et al. The quenching of the fluorescence of carbon dots: A review on mechanisms and applications[J]. *Microchimica Acta*, 2017, 184: 1899-1914.
- [12] Guo J, Lu W, Zhang H, et al. Copper doped carbon dots as the multi-functional fluorescent sensing platform for tetracyclines and pH[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, 330: 129360.
- [13] Qi H, Teng M, Liu M, et al. Biomass-derived nitrogen-doped carbon quantum dots: Highly selective fluorescent probe for detecting Fe^{3+} ions and tetracyclines[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, 539: 332-341.
- [14] Zhang Y, Gao Z, Yang X, et al. Fish-scale-derived carbon dots as efficient fluorescent nanoprobes for detection of ferric ions[J]. *RSC Advances*, 2019, 9(2): 940-949.
- [15] Zhang Y, Gao Z, Zhang W, et al. Fluorescent carbon dots as nanoprobes for determination of lidocaine hydrochloride[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 262: 928-937.
- [16] Huang Y, Huang X, Lin H, et al. Room temperature driven highly crystalline fluorine-doped carbon quantum dots for sensitive tetracycline sensing[J]. *Optical Materials*, 2021, 114: 110967.
- [17] Ávila J M, Ayala M R, Kumar Y, et al. Avocado seeds derived carbon dots for highly sensitive $\text{Cu}(\text{II})/\text{Cr}(\text{VI})$ detection and copper(II) removal via flocculation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 446: 137171.
- [18] Ding Y, Zheng J, Wang J, et al. Direct blending of multicolor carbon quantum dots into fluorescent films for white light emitting diodes with an adjustable correlated color temperature[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(6): 1502-1509.
- [19] Wu M, Wang Y, Wu W, et al. Preparation of functionalized water-soluble photoluminescent carbon quantum dots from petroleum coke[J]. *Carbon*, 2014, 78: 480-489. ■

代脱醛树脂或延长脱醛树脂使用寿命。

参考文献

- [1] 毕利君. 煤制乙二醇技术的应用[J]. *山西化工*, 2019, 39(1): 145-146, 149.
- [2] 王宝宝,温艳梅,马达,等.提高煤制乙二醇聚酯级产品回收率及产品质量的研究[J]. *化工管理*, 2021, (28): 36-38.
- [3] 闫卫林,窦守花,李先旺,等.高效液相加氢直接提高煤或合成气制乙二醇产品质量的工艺研发[J]. *煤化工*, 2021, 49(3): 38-42.
- [4] 王建平,崔建民,闫卫林,等.一种提高煤或合成气制乙二醇产品质量的方法: CN201810844188.6[P]. 2024-03-04.
- [5] 王建平,文婷.一种提高乙二醇产品塔侧采乙二醇产品质量的装置及方法: CN202011042411.9[P]. 2020-09-28. ■