

油田伴生气乙烷回收工艺改进

钟荣强^{1*}, 李鹏², 杨思远², 游香杨³

(1. 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830011;

2. 中国石化缝洞型油藏提高采收率重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830011;

3. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川成都 610500)

摘要:针对我国目前普遍应用 LSP 工艺将低温分离器凝液直接进脱甲烷塔塔顶造成回流中重烃含量高、冷凝吸收效果差、乙烷回收率低的问题, 提出 2 种低压 (<2.2 MPa) 外输气乙烷回收工艺: 改进流程 GAL, 脱甲烷塔塔顶回流为低温分离器部分气相; 改进流程 FSP, 部分原料气作为脱甲烷塔塔顶回流。研究了不同油田伴生气气质、不同原料气中 CO₂ 摩尔分数对 2 种改进流程能耗、回收率的影响, 以及原料气分流比对改进流程 FSP 能耗、回收率的影响。通过 HYSYS 软件对 2 种改进流程进行模拟, 结果表明, 在 2 种低压外输气改进工艺中 FSP 工艺对原料气中 CO₂ 含量适应性更强。

关键词: 油田伴生气; 乙烷回收; 工艺改进; 流程模拟

中图分类号: TE646

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2020)10-0230-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2020.10.048

Improvement of ethane recovery process from associated gas in oilfield

ZHONG Rong-qiang^{1*}, LI Peng², YANG Si-yuan², YOU Xiang-yang³

(1. Sinopec Northwest Oil Field Company, Urumqi 830011, China; 2. Sinopec Key Laboratory of

Enhanced Recovery for Fracture-cave Oil Reservoir, Urumqi 830011, China; 3. State Key Laboratory of Oil & Gas

Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: In view of the widespread application of LSP process in China, low-temperature separator condensate enters directly into the top of the demethanizer tower, which resulting in high heavy hydrocarbon content in the reflux, poor condensation absorption effect, and low ethane recovery rate. According to the external gas transmission pressure level, two improved low pressure (<2.2 MPa) external gas ethane recovery processes are proposed: (1) the improved GAL process, in which the reflux from demethanizer column top is the low temperature separator part gas phase; (2) the improved FSP process, in which part of feed gas is used as the reflux of the demethanizer top. The effects of CO₂ content in different oilfields on the energy consumption and recovery rate of the two improved processes are studied, and the effect of the feed gas split ratio on the energy consumption and recovery rate of the improved FSP process are also investigated. Two improved processes are simulated by HYSYS software, showing that the improved FSP process is more adaptable to CO₂ content in the feed gas than the improved GAL process.

Key words: associated gas in oilfield; ethane recovery; process improvement; process simulation

目前, 国外的乙烷回收装置主要采用膨胀机制冷、冷剂制冷+膨胀机制冷的低温分离工艺。20 世纪 80 年代 Orloff 公司在传统的单级膨胀机制冷工艺 (ISS) 和多级膨胀制冷工艺 (MTP) 的基础上提出了液体过冷工艺 (liquid subcooled process, LSP), 并得到广泛的应用。2000 年又在气体过冷工艺 (gas subcooled process, GSP) 基础上提出压缩气补充精馏工艺 (supplemental rectification with compression, SRC), 该工艺乙烷回收率可达 98%。国内外的科研人员对天然气乙烷回收技术做了许多研究, 如 Diaz 等^[1] 研究 GSP、BTEP、LSP 工艺对原料气气质的适应性, 发现 GSP、LSP 工艺分别适用于贫气、富气, 随着天然气中 CO₂ 含量增加, 乙烷回收流程整体能耗

增加。Chebbi 等^[2] 通过优化脱甲烷塔压力及对整体流程进行经济分析, 发现原料气气质较富时 (乙烷摩尔分数为 15%), 通过降低脱甲烷塔压力可获得良好的经济效益。Getu 等^[3] 在不同气质条件下对 GSP、CRR、RSV、IPSI-1、IPSI-2 5 种乙烷回收工艺进行经济评价, 发现 IPSI-1 工艺年度总成本最低, 由于该工艺从脱甲烷塔引出的一股物流作为混合制冷剂, 可大幅降低对外部冷量的需求。

目前, 我国在大庆、辽河、中原等油田建有油田伴生气乙烷回收装置, 但存在规模小、凝液回收率低、能耗大等问题。如杏树岗油田 90×10⁴ m³/d 油田气深冷处理装置、北 I-1 油气处理厂 70×10⁴ m³/d 油田气深冷处理装置, 中原油田第三气体处理厂

收稿日期: 2020-04-17; 修回日期: 2020-08-03

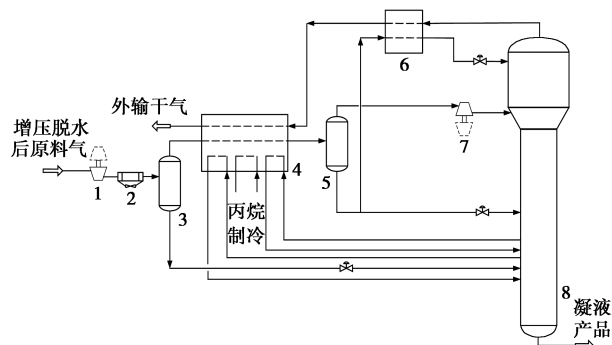
作者简介: 钟荣强 (1984-), 男, 硕士, 副研究员, 从事油气田地面工程工作, 通讯联系人, 0991-3161639, 497837717@qq.com。

$100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 深冷装置,均采用改进 LSP 工艺(丙烷制冷+膨胀机)运行^[4],但能耗较大,乙烷回收率低,效益欠佳。因此,开展高效乙烷回收工艺技术研究,对实现油气田高效经济开发具有重要意义。本文中针对低压油田伴生气乙烷回收工艺,提出了2种改进流程,并对改进工艺进行特性及适应性分析,对我国油田伴生气田的高效开发,提高气田的经济效益具有重要意义。

1 油田伴生气乙烷回收流程

1.1 LSP 乙烷回收流程

目前国内油田伴生气乙烷回收主要采用 LSP 工艺,流程示意图如图 1 所示。LSP 工艺是 1979 年美国 Orloff 公司在单级膨胀机制冷工艺 (ISS) 和多级膨胀机制冷工艺 (MTP) 的基础上开发的改进工艺,流程采用液相过冷作为脱甲烷塔顶回流,主要用于处理原料气气质较富的油田伴生气(乙烷及以上重烃组分按液态计大于 $400 \text{ mL}/\text{m}^3$)^[5]。LSP 乙烷回收流程将低温分离器底部凝液经过冷后作为脱甲烷塔塔顶进料。由于低温分离器底部凝液中乙烷及以上重组分含量多,乙烷等组分会在脱甲烷塔第一块塔板大量气化进入外输气中,影响了冷凝吸收效果,乙烷回收率低。



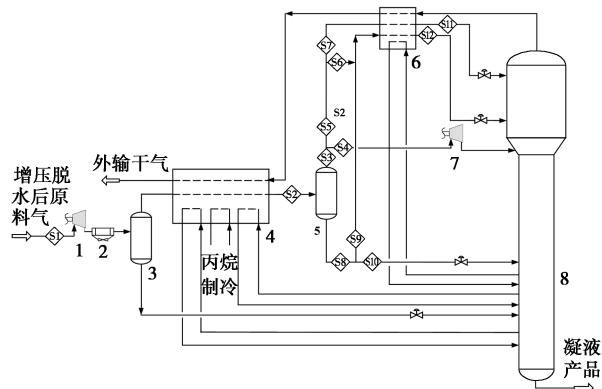
1—透平膨胀机压缩端;2—空冷器;3—分离器;4—冷箱 I;
5—低温分离器;6—冷箱 II;7—透平膨胀机膨胀端;8—脱甲烷塔

图 1 LSP 乙烷回收工艺流程示意图

1.2 GAL 乙烷回收流程

为解决 LSP 工艺应用于乙烷回收工艺中回收率低、能耗高的问题,在 LSP 流程基础上脱甲烷塔增加一股气相过冷进料 S11,一股混合相过冷进料 S12,提出气液两相过冷 (gas and liquid subcooled process, GAL) 乙烷回收工艺,流程如图 2 所示。GAL 乙烷回收工艺流程特点有:①采用部分低温分离器气相作为脱甲烷塔塔顶进料,该股气质贫(含大量甲烷)能够提高冷凝吸收效果,乙烷回收率

高^[6-7];②低温分离器气相与液相混合过冷后作为脱甲烷塔第二股进料,其中低温分离器分离气相轻组分含量丰富,可降低混合相过冷温度并提高乙烷回收率,而分离液相中的丙烷及以上组分可提高脱甲烷塔上层塔板的抗 CO_2 冻堵裕量。

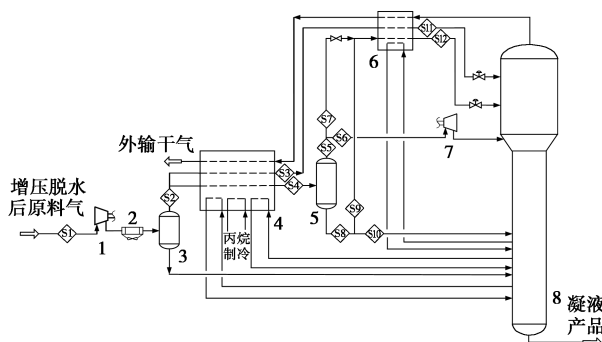


1—透平膨胀机压缩端;2—空冷器;3—分离器;4—冷箱 I;
5—低温分离器;6—冷箱 II;7—透平膨胀机膨胀端;8—脱甲烷塔

图 2 GAL 油田伴生气乙烷回收工艺流程

1.3 FSP 乙烷回收流程

在高乙烷回收率下,为提高 GAL 工艺对原料气中 CO_2 的适应性,在 GAL 基础上采用部分原料气作为塔顶回流,提出原料气分流过冷 (feed gas split subcooled process, FSP) 工艺,工艺流程如图 3 所示。塔顶回流气相经过冷后节流降压,其中大量的丙烷及以上组分冷凝出来可以起到脱甲烷塔防冻剂的作用,从而提高脱甲烷塔 CO_2 冻堵裕量。FSP 乙烷回收工艺流程特点有:①采用部分原料气作为脱甲烷塔塔顶回流,与塔内由下至上流动的气相甲烷接触,不断吸收甲烷气中的乙烷及以上组分,有效提高乙烷回收率^[8-10];②塔顶回流原料气中的丙烷及以上重组分在脱甲烷塔顶部冷凝,可以吸收顶部气相和



1—透平膨胀机压缩端;2—空冷器;3—分离器;4—冷箱 I;
5—低温分离器;6—冷箱 II;7—透平膨胀机膨胀端;8—脱甲烷塔

图 3 FSP 油田伴生气乙烷回收工艺流程

液相中的 CO_2 , 使脱甲烷塔塔顶偏离冻堵形成条件, 提高 CO_2 冻堵裕量。

2 模拟与分析

采用 Aspen HYSYS 软件对 3 种乙烷回收工艺流程进行模拟, 热力学模型选用 Peng-Robinson 方程, 原料气压力 0.3 MPa, 温度 40°C , 处理量 $200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 膨胀机组膨胀端绝热效率为 85%, 压缩端绝热效率为 75%, 流程模拟中丙烷制冷提供的最低温度为 -35°C , 选用的低压油田伴生气模拟气质见表 1。

表 1 各油田伴生气气质组分表 mol%

N_2	CO_2	C_1	C_2	C_3	$i\text{C}_4$
0.6546	1.2588	79.7180	8.3484	5.0957	1.0675
$n\text{C}_4$	$i\text{C}_5$	$n\text{C}_5$	C_6	C_{7+}	
2.0745	0.6546	0.3827	0.3323	0.4128	

2.1 LSP 工艺模拟

图 4 展示了在不同乙烷回收率条件下, 低温分离器液相中甲烷与原料气中甲烷质量比的变化过程, 以及主体装置总压缩功的变化趋势。由图 4 可知, 随着乙烷回收率由 70% 升高至 86% 时, 低温分离器液相中甲烷与原料气中甲烷质量比从 12% 升至 23%, 总压缩功耗增加了 7.5%。主要原因在于乙烷回收率与低温分离器温度直接相关, 低温分离器温度越低, 原料气冷凝量越多, 原料气中的更多轻组分进入低温分离器液相, 低温分离器的分离气相也因更低的分离温度变得更贫, 使得透平膨胀机膨胀制冷效果更佳, 乙烷回收率更高。更低的低温分离器温度必然导致所需的冷量更多, 总压缩功耗增加。

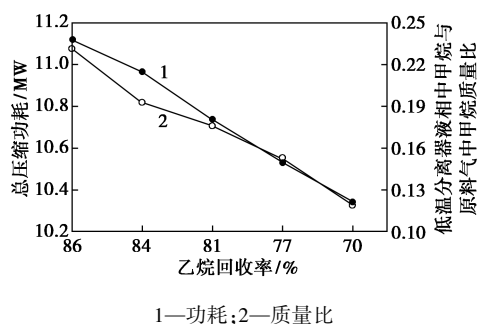
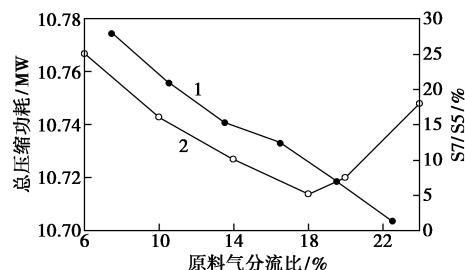


图 4 LSP 乙烷回收工艺在不同乙烷回收率下各参数变化曲线

2.2 FSP 工艺关键参数模拟分析

模拟过程中保持乙烷回收率 94% 的条件下, 通

过改变原料气分流比例, 分析其对脱甲烷塔第二股进料气相占低温分离器分离气相比、主体装置总压缩功的影响, 模拟结果如图 5 所示。



1—脱甲烷塔第二股进料气相占低温分离器气相总量比值;
2—总压缩功耗

图 5 总压缩功耗、脱甲烷塔第二股进料气相占低温分离器气相总量比值随原料气分流比的变化曲线

(1) 在原料气分流比 S_3/S_1 为 18%、脱甲烷塔第二股进料气相占低温分离器分离气相比 S_7/S_5 约 10% 时, 系统总压缩功耗最低, 之后随着 S_7/S_5 的不断降低, 系统总压缩功耗不断增加。其原因在于脱甲烷塔第二股进料采用混合相进料, 即在液相混入少量高含甲烷的气相, 可降低混合相泡点温度, 经冷箱换热后获得更低的过冷温度, 同时降低了气化潜热, 经节流阀降压获得更大的温差, 提高了乙烷回收率。

(2) S_3/S_1 从 6% 变化至 24% 的过程中, S_7/S_5 由 28% 降低至 1.5%, 总压缩功耗先降低并且分流比为 18% 时最低, 而后不断增加。这是由于当 S_3/S_1 为 6%、 S_7/S_5 为 28% 时, 说明该股回流不能够为塔顶提供足够的冷量, 需要增加第二股进料的气相量, 然而第二股进料位于塔顶下第四块塔板, 在向上传质换热的过程中冷量不能够充分传递至塔顶, 并且经节流阀减压后气化率过高, 影响塔顶的气化制冷效果, 根据气液平衡原理大量乙烷及以上重组分随外输气外排, 回收率降低^[11-12], 过多的外输气量将增加总压缩功耗。

2.3 工艺模拟对比

针对油田伴生气乙烷回收, 在外输气压力低 ($< 2.2 \text{ MPa}$) 的工况条件下, 为提高乙烷收率、降低能耗提出改进流程, 并对其进行模拟对比分析及流程特性研究。为进一步了解 FSP 工艺是否可提高脱甲烷塔 CO_2 冻堵裕量、降低能耗, 模拟分析在相同乙烷回收率下 3 种乙烷回收工艺主体装置总压缩功的变化, 模拟结果见表 2。

表2 相同气质下LSP、GAL、FSP乙烷回收流程对比

乙烷回收流程	LSP	GAL	FSP
脱甲烷塔第一股进料气相占低温分离器气相比例/%	—	22.2	13
脱甲烷塔第二股进料气相占低温分离器气相比例/%	—	6.21	—
脱甲烷塔最小CO ₂ 冻堵裕量/℃	12.0	5	7
丙烷制冷压缩机功率/kW	1145	1132	1090
前增压压缩机能耗/kW	9960	9787	9651
总压缩功耗/kW	11120	10932	10741
乙烷回收率/%	86	94	

注:原料气采用气质2,CO₂摩尔分数1%,原料气压力0.3 MPa,温度40℃,处理量200×10⁴ m³/d,丙烷制冷方式。

(1)LSP工艺脱甲烷冻堵裕量较高,由于使用部分富含丙烷及以上重组分的液烃作为塔顶回流,提高了脱甲烷冻堵裕量,但乙烷回收率降低。

(2)GAL工艺与LSP工艺相比,乙烷回收率增加了7.67%,装置能耗降低了169 kW。由于GAL工艺脱甲烷塔精馏段采用2股进料,其中脱甲烷塔第二股进料可吸收离开提馏段气相中大部分乙烷及以上组分,故只需少量的塔顶回流来吸收气相中剩余的乙烷及以上组分,进入膨胀机组气相量增加,减少了外部冷量的需求,降低了主体装置能耗。但当原料气中CO₂含量较高时,该工艺脱甲烷塔的冻堵风险增加并且主体能耗也大幅增加,对原料气中CO₂适应性较差。

(3)在乙烷回收率相同情况下,FSP工艺与GAL工艺相比,总压缩功耗分别降低了195 kW,脱甲烷塔最小CO₂冻堵裕量提高了2℃,塔顶液相与气相中的CO₂含量均有所降低,由于采用组成较富的部分原料气相作为塔顶回流,充分利用了原料气中的丙烷及以上重组分,有效解决了CO₂冻堵问题。

2.4 改进流程CO₂适应性分析

为研究2种改进工艺对原料气CO₂含量适应性,模拟过程中通过改变原料气中的CO₂含量,分析其对2种改进工艺乙烷回收率、主体装置总压缩功的影响,模拟结果如图6、图7所示。

(1)从图6可以看出,2种改进工艺在保持相同乙烷回收率和CO₂冻堵裕量的条件下,当原料气中CO₂摩尔分数大于0.5%时,FSP工艺总压缩功耗低于GAL工艺,这是由于FSP工艺塔顶回流中的丙烷及以上重组分作为防冻剂可相应降低脱甲烷塔压力

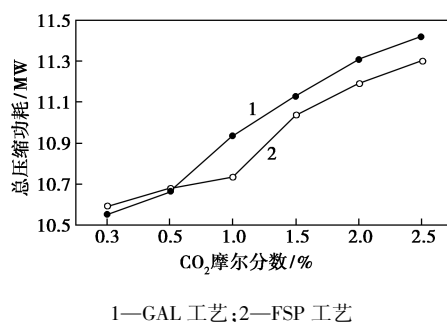
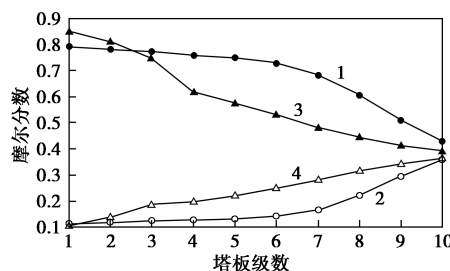


图6 2种改进工艺不同原料气CO₂摩尔分数对能耗的影响



1—FSP工艺脱甲烷塔各塔板液相中甲烷含量；
2—FSP工艺脱甲烷塔各塔板液相中乙烷含量；
3—GAL工艺脱甲烷塔各塔板液相中甲烷含量；
4—GAL工艺脱甲烷塔各塔板液相中乙烷含量

图7 原料气CO₂摩尔分数为0.5%时2种改进工艺各塔板的液相组分含量

(低于GAL工艺),塔压越低则天然气中甲烷与其他烃类的相对挥发度就越大,有利于提高分离效果和降低能耗^[13],故在相同回收率下,总压缩功耗低于GAL工艺。

(2)当原料气中CO₂摩尔分数小于0.5%时,FSP工艺总压缩功耗高于GAL工艺,由图7可以看出,GAL工艺较FSP工艺相比脱甲烷塔精馏段各塔板液相中的甲烷摩尔分数普遍降低并且最低达到3.6%,脱甲烷精馏段各塔板液相中的乙烷摩尔分数则普遍增加并且最高达到73.4%。表明GAL工艺脱甲烷塔精馏段对乙烷的吸收效果更好,这是由于GAL工艺比FSP工艺的塔顶回流气相更贫,该股回流不仅可提高制冷效果,还可吸收塔上部气相中更多的乙烷及以上重组分,大幅提高乙烷回收率,进而增加膨胀机的进气量从而降低对外加冷量的需求,降低总压缩功耗。

(3)随着原料气中CO₂含量的增加,2种改进工艺总压缩功耗分别增加了9.45%、8.14%,这是由于随着原料气中CO₂含量的增加,需要通过提高塔压和引入重烃来防止CO₂冻堵,则系统从膨胀机获得的冷量减少,丙烷制冷需求量增加,引起总压缩能

耗增加。

3 结论

(1) 针对不同外输压力下的油田伴生气乙烷回收工艺, 提出 GAL 与 FSP 2 种低压外输气改进流程, 2 种改进流程通过将 LSP 流程塔顶液相回流换为气质较贫的气相回流, 再与脱甲塔内自下向上的气相接触, 不断吸收气相中的乙烷及以上重组分, 也提高了气化制冷效果及乙烷回收率, 乙烷回收率可达到 95%。

(2) 在外输气压力较低的工况下, 当原料气中 CO₂ 含量较低时, 改进流程 GAL 比 FSP 的塔顶回流气质更贫, 在一定回收率下可减少回流量及冷量需求, 推荐使用 GAL 工艺。当原料气中 CO₂ 含量较高时, FSP 工艺回流气相中的重烃在塔顶冷凝出液相, 起到 CO₂ 防冻剂的作用, 可降低脱甲烷塔压, 提高膨胀制冷量并减少丙烷制冷量, 推荐使用 FSP 工艺。

(3) 通过对 FSP 工艺参数优化, 发现该工艺对原料气气质以及 CO₂ 含量适应性较强, 可通过降低脱甲烷塔压力、原料气分流比、低温分离器气相比来降低主体装置能耗。

参考文献

- [1] Diaz M S, Serrani A, Bandoni J A, *et al.* Automatic design and optimization of natural gas plants [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1997, 36(7): 2715-2724.
- [2] Chebbi R, Al-Amoodi N S, Jabbar N M A, *et al.* Optimum ethane recovery in conventional turboexpander process [J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2010, 88(5/6): 779-787.
- [3] Getu M, Mahadzir S, Long N V D, *et al.* Techno-economic analysis of potential natural gas liquid (NGL) recovery processes under variations of feed compositions [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2013, 91(7): 1272-1283.
- [4] 马宁, 周悦, 孙源. 天然气轻烃回收技术的工艺现状与进展 [J]. *油气田地面工程*, 2008, 27(5): 3-4.
- [5] 乔在朋, 蒋洪, 牛瑞. 油田伴生气凝液回收工艺改进研究 [J]. *石油与天然气化工*, 2015, 44(4): 44-49.
- [6] Cuellar K T, Martinez T L, Wilkinson J D, *et al.* Hydrocarbon gas processing; US, 20080078205 [P]. 2008-03-12.
- [7] Luyben, William L. Effect of natural gas composition on the design of natural gas liquid demethanizers [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(19): 6513-6516.
- [8] Chebbi R, Al-Amoodi N S, Jabbar N M A, *et al.* Optimum ethane recovery in conventional turboexpander process [J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2010, 88(5/6): 779-787.
- [9] Mehrpooya M, Vatani A, Mousavian S M A. Introducing a novel integrated NGL recovery process configuration (with a self-refrigeration system (open-closed cycle)) with minimum energy requirement [J]. *Chemical Engineering & Processing Process Intensification*, 2010, 49(4): 376-388.
- [10] Huebel R R, Foglietta J H, Patel S N. Hydrocarbon gas processing for rich gas streams; US, 20050229634 [P]. 2005-06-11.
- [11] Chebbi R, Al-Amoodi N S, Jabbar N M A, *et al.* Optimum ethane recovery in conventional turboexpander process [J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2010, 88(5): 779-787.
- [12] Luyben W L. NGL demethanizer control [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(33): 11626-11638.
- [13] 张世坚, 蒋洪. 直接换热常规流程的改进及分析 [J]. *化工进展*, 2017, 36(10): 3648-3656. ■

巴斯夫投资 Pyrum 公司以充分利用废旧轮胎热解油

巴斯夫欧洲公司将向 Pyrum Innovations AG 投资 1 600 万欧元, 以支持该公司在德国迪林根扩建废轮胎热解工厂, 并进一步推广该技术。Pyrum Innovations AG 是一家专门从事废旧轮胎热解的科技公司, 总部位于德国萨尔州迪林根。

目前, Pyrum 公司正在运营一家废旧轮胎热解工厂, 年加工量 10 000 t, 并计划于 2022 年底在现有工厂的基础上再增设两条生产线。作为“化学循环”(Chem-Cycling™) 的一部分, 巴斯夫将使用该工厂所生产的热解油并将其加工成高性能化学产品。此外, Pyrum 公司还

计划与有意向的合作伙伴共同建造更多的废轮胎热解工厂, 这有利于加速推动其专有技术的量产进程。巴斯夫与 Pyrum 公司预计, 携手其他合作伙伴, 有望在未来数年内实现 10 万 t 的废旧轮胎热解油生产能力。

在采用质量平衡方案的基础上, 用热解油制成的产品其性能与化石原料制品无异。咨询公司 Sphera 代表巴斯夫进行的生命周期评估 (LCA) 表明, 与传统产品相比, 热解油制品的碳排放更低, 如采用质量平衡方案用热解油生产尼龙 6 (PA6), 每吨可减少 1.3 t 二氧化碳排放量。(马存宇)