

# 锂系聚合物 SBC 三釜凝聚系统优化

彭遂平\*

(中石化巴陵石油化工有限公司, 湖南 岳阳 414014)

**摘要:**溶液法锂系聚合物 SBC 生产中溶剂脱除的三釜凝聚工艺尚未完全国产化, 且存在消耗偏高、首釜气相夹带严重、设备运行稳定性差等一系列问题。通过采用模拟计算方法对三釜凝聚系统进行针对性的改进, 优化三釜工艺和结构, 达到节能降耗、消减气相夹带和设备稳定运行的效果。

**关键词:** 锂系聚合物; 凝聚; 节能; 模拟计算; 优化

中图分类号: TQ334.3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2023)S1-0267-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.S1.053

## Optimization of three-kettle condensing system for lithium-catalyzed SBCs production

PENG Sui-ping\*

(Sinopec Baling Petrochemical Company Limited, Yueyang 414014, China)

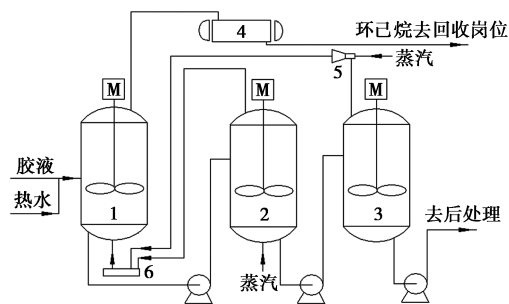
**Abstract:** China's companies have not thoroughly worked out the three-kettle condensing process for solvent removal in the production of lithium-catalyzed SBCs by solution method, and there are a series of problems such as high consumption, serious gas phase entrainment in the first kettle, and poor equipment operation stability. By using the simulation calculation method to renovate the three-kettle condensing system, and optimize the process and kettle structure, the system realizes the achievements such as energy saving, consumption reduction, gas phase entrainment reducing and stable operation.

**Key words:** lithium-based polymer; condensing; energy saving; simulation calculation; optimization

锂系聚合物 SBC 是苯乙烯类热塑性弹性体的总称, 主要包括 SBS、SIS、SEBS、SEPS 等一系列品种。SBC 产品具有耐老化、无毒、安全、可循环使用的特点, 在医疗、军用等领域有巨大需求, 属国家战略性新兴产业的重点发展产品。

SBC 工业生产过程中, 聚合反应得到的胶液进入凝聚釜后, 在蒸汽和热水的作用下凝聚成胶粒, 胶粒与水的混合物经泵送入下道工序, 胶液中的溶剂汽化后经凝聚釜顶部排出后进行回收处理。凝聚过程最初为单釜凝聚工艺, 后来发展到双釜凝聚工艺, 中石化巴陵石油化工有限公司在国内率先开发出顺丁橡胶三釜凝聚工艺(如图 1 所示), 并经过不断完善而逐渐推广到 SBS、SIS、SEBS 等 SBC 锂系聚合物工业生产过程。在中石化巴陵石油化工有限公司自主开发的多套 SBC 成套技术中, 凝聚工艺采用的是行业内主流的三釜凝聚技术, 但该技术目前主要存在首釜气相夹带严重、蒸汽消耗偏高、中末釜运行稳定性差等问题, 影响工业生产的经济性和稳定性, 且凝聚首釜的搅拌器技术长期以来受到国外相关企业的垄断。因此, 亟需对三釜凝聚工艺开展进一步研究, 以提高三釜凝聚过程的效率, 节能降耗并延长凝

聚釜的操作周期, 实现三釜凝聚工艺成套化技术的完全国产化。



1—凝聚首釜; 2—凝聚中釜; 3—凝聚末釜; 4—冷凝器;  
5—蒸汽喷射泵; 6—蒸汽分佈器

图 1 三釜凝聚系统流程示意图

## 1 优化思路

根据上述三釜凝聚过程中的常见问题, 提出如下工艺优化思路:

(1) 对三釜凝聚工艺进行流程模拟计算, 确定各釜适宜的操作温度、压力, 以及优化循环热水分配比例, 从而优化三釜凝聚工艺操作条件。

(2) 采用先进的计算流体力学 (CFD) 方法, 对

收稿日期: 2023-02-27; 修回日期: 2023-05-04

作者简介: 彭遂平 (1973-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为化工设备, 通讯联系人, pengsp.blsh@sinopec.com。

凝聚釜内的流动场进行数值模拟研究,改进釜体结构、搅拌桨型式等参数,确定优化的凝聚釜釜体及其搅拌系统和操作条件。

## 2 三釜凝聚工艺条件优化

在溶液法合成橡胶的生产装置中,通常采用水蒸汽凝聚汽提工艺实现聚合物与溶剂的分离,其操作过程所需能耗约占装置总能耗的 60% 左右<sup>[1]</sup>。因此,若要实现降低装置总能耗的目标,可从凝聚汽提环节的优化入手,突破节能降耗瓶颈。

凝聚汽提工艺通常采用预凝聚与三釜差压凝聚相结合的技术路线,其具体工艺流程为:

(1)在汽水混合器中,用定量的蒸汽作为热源,将部分循环热水加热为过热水。

(2)将过热水送入胶液-过热水混合器中,使聚合后的胶液与过热水充分混合,得到温度较高并具有一定压力的胶液-热水混合物。

(3)经喷嘴将胶液-热水混合物喷入凝聚首釜,同时向凝聚首釜通入另一部分循环热水,为大量溶剂的脱除提供充足的热量。

(4)向凝聚中釜和末釜中分别通入定量的蒸汽,为剩余溶剂的脱除提供热量。

(5)各凝聚釜顶部得到的含大量水蒸汽的溶剂气体经冷凝、油水分离操作后,所得含微量水的湿溶剂送入罐区的湿溶剂罐,待精制操作后循环利用。

对上述预凝聚与三釜差压凝聚相结合的凝聚技术使用流程模拟软件 Aspen One V7.2 进行优化,通过改变蒸汽加入方式、各釜操作压力等条件考察凝聚过程的蒸汽消耗变化情况,研究该凝聚技术的节能方法<sup>[2]</sup>。

因 SEBS 单浓较低,凝聚过程溶剂蒸发量大,对凝聚的要求更高,故在本文中以 SEBS 生产物料条件为例,如表 1 所示。

表 1 给定物料条件

序号	物料名称	给定条件
1	胶液 (PS)	组成 = 丁苯聚合物 + 环己烷溶剂 处理量 = 30 t/h 胶浓 = 12% (质量分数, 3.6 t 干胶/h)
2	循环热水 (HWR-0、 HWR-1)	总流量 = 140 m <sup>3</sup> /h 温度 = 90℃ 至汽水混合器 (HWR-0) 流量 = 80 m <sup>3</sup> /h 至凝聚首釜 (HWR-1) 流量 = 60 m <sup>3</sup> /h

3	过热水 (HHW)	温度 = 100℃
4	蒸汽 (LS-0、 LS-2、LS-3)	压力 = 0.52 MPa (G) 温度 = 160℃
5	含水胶粒 (3-OUT-L)	溶剂残余量 ≤ 0.2% 温度 < 100℃

在表 1 的给定物料条件下,主要通过改变凝聚中釜、末釜的蒸汽加入量,及末釜操作压力来考察蒸汽消耗的变化情况,上述变化的操作条件如表 2 所示。

表 2 可变操作条件

序号	操作条件	条件 1	条件 2	条件 3	条件 4
1	胶液来料温度/℃	70	80	70	80
2	凝聚首釜压力/MPa (G)	0.004	0.004	0.004	0.004
3	凝聚中釜压力/MPa (G)	0.03	0.03	0.03	0.03
4	凝聚末釜压力/MPa (G)	-0.002	-0.002	-0.013	-0.013

流程模拟计算得到的结果如表 3 所示。从表中可以看到,采用条件 3、4 中的操作条件进行预凝聚、减少中釜蒸汽量与三釜差压凝聚相结合的凝聚工艺

表 3 流程模拟计算结果

序号	计算结果	条件 1	条件 2	条件 3	条件 4
各凝聚釜温度					
1	凝聚首釜温度/℃	85.14	85.48	85.0	85.0
	凝聚首釜相变温度/℃	85.14	85.48	77.67	78.07
2	凝聚中釜温度/℃	105.13	105.19	104.57	104.57
3	凝聚末釜温度/℃	98.88	98.89	95.85	95.85
各凝聚釜残余溶剂量 (以总溶剂量为基准)					
1	凝聚首釜残余溶剂量/%	6	6	6	6
2	凝聚中釜残余溶剂量/%	1	1	1	1
3	凝聚末釜残余溶剂量/%	0.2	0.2	0.2	0.2
蒸汽消耗量统计					
1	蒸汽至汽水混合器流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1.7	1.7	1.7	1.7
2	蒸汽至凝聚中釜流量/(t·h <sup>-1</sup> )	8.6	8.6	2.24	2.24
3	蒸汽至蒸汽喷射泵流量/(t·h <sup>-1</sup> )	3.0	3.0	7.96 <sup>①</sup>	7.84 <sup>②</sup>
4	总蒸汽消耗量/(t·h <sup>-1</sup> )	13.3	13.3	11.9	11.78
5	吨干胶蒸汽消耗量/ [t·(t 干胶) <sup>-1</sup> ]	3.69	3.69	3.31	3.27

注:①含首釜胶液由相变温度 77.67℃ 升至 85℃ 所需蒸汽量 2.16 t/h;②含首釜胶液由相变温度 78.07℃ 升至 85℃ 所需蒸汽量 2.04 t/h。

操作,可得到较为优化的三釜凝聚操作工艺条件,此时 SEBS 的处理量为 30 t/h,胶浓 12%,即 3.6 t(干胶)/h,凝聚首釜的液相温度为 85℃,气相温度为 78℃,凝聚中釜的温度为 105℃,凝聚末釜的温度为 96℃,蒸汽消耗量控制在 3.3 t/t 干胶左右。

### 3 凝聚釜优化

在凝聚釜的优化过程中,按釜体实际尺寸构建凝聚首釜模型,将反应釜中的流体所覆盖的区域作为计算域。为保证模拟计算的精度,对搅拌桨所在的区域进行了网格加密,计算域内网格总数约为 2 500 万。

计算流体力学模拟在商用软件 ANSYS 16.0 上进行,其中旋转运动的桨叶采用多重参考系(MRF)方法进行描述和处理,即将计算域分成两大部分:一部分区域包含了运动的搅拌桨,采用旋转参考坐标系;另一部分区域为搅拌桨运动区域以外的流体域,使用静止参考坐标系。数值模拟中的湍流模型采用工程上常用的标准  $k-\varepsilon$  模型,离散格式均为二阶精度,各物理量的残差均下降至  $1 \times 10^{-4}$ 。

#### 3.1 凝聚釜结构型式

##### 3.1.1 凝聚首釜

凝聚首釜直径为 3 600 mm,其中的搅拌器为组合桨型式,釜体采用标准全挡板条件。优化前的搅拌器为 2 层组合桨,上层桨为斜叶搅拌桨,下层桨为直叶搅拌桨;优化后的搅拌器仍为 2 层组合桨,上层桨为具有强循环能力的高效轴向流搅拌桨,下层桨为具有强分散能力的高效涡轮搅拌桨。优化前后的凝聚首釜模型如下图 2 所示。

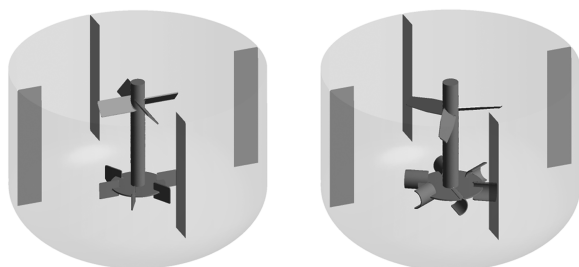


图 2 优化前后的凝聚首釜模型

##### 3.1.2 凝聚中末釜

优化前后的凝聚中末釜直径分别为 3 600 和 4 200 mm,釜体为标准全挡板条件。优化前的搅拌器为 3 层组合桨,上层桨为平叶搅拌桨,下层桨为直叶搅拌桨;优化后的搅拌器仍为 3 层组合桨,上层桨

为具有强循环能力的高效轴向流搅拌桨,下层桨为具有强分散能力的高效涡轮搅拌桨。优化前和优化后的凝聚釜模型如图 3 所示。

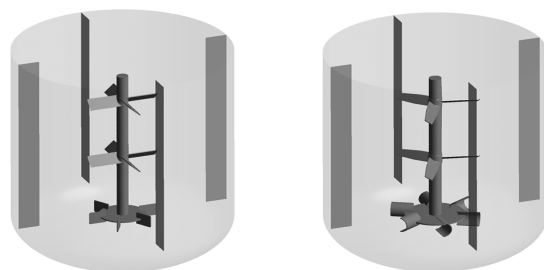


图 3 优化前后的凝聚中末釜模型

#### 3.2 凝聚釜的流场结构

凝聚首釜是凝聚系统中关键的单元设备,凝聚过程中大量通入的蒸汽和来自于胶液罐的胶液的分散均在该釜内完成。因此,凝聚首釜担负着气体分散和液体分散的重要功能。图 4 所示为凝聚首釜搅拌器优化前后所形成的流场。从图 4(a)中可以看到,优化前的双层搅拌器使得液相在全釜内形成一个较大的单循环流动结构,但是作为气体分散的底层搅拌桨叶端产生的射流被上层搅拌桨形成了严重的干扰,其叶端甩出的流体被显著抑制且指向釜底,而后再回到液面。此时,底层桨典型的“双循环”结构被打破,而不利于底浆发挥其气液分散的功能和作用。

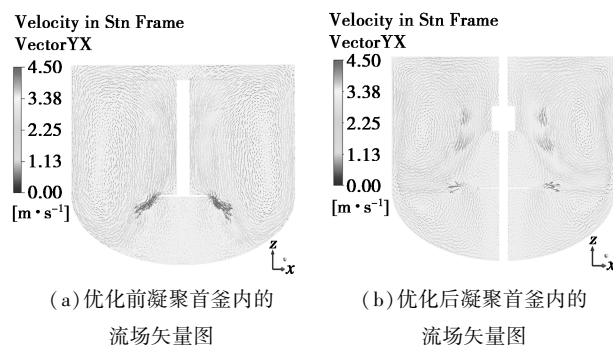


图 4 优化前后凝聚首釜内的流场矢量图

从图 4(b)中则可以看到,与优化前的搅拌器方案相比,虽然搅拌桨的数量、总轴功率均与其保持一致,但是由于高效轴流桨的使用,使得分配于上方搅拌器的功率相比于优化前方案显著降低,上方轴向流搅拌桨的旋转对底桨叶端射流的影响减弱,底桨径向流涡轮桨的“双循环”结构得以保持。与此同时,更多的功率被分配至底层搅拌桨,进一步保证了该搅拌系统对通入的大量蒸汽的分散效

果。最后,从合速度云图分布来看,优化后凝聚釜内各处的速度分布比较均匀,尤其是液面处的流动状态也得到了强化,无明显的流动“死区”存在,为釜内气体的分散和物料的轴向循环提供了有力的保障。

与凝聚首釜相比,凝聚中末釜对搅拌和流动的要求则更多地体现在全釜的流体循环上。通过比较图 4(a)和图 4(b),优化前的凝聚中末釜并不能形成流畅的全釜循环,尤其靠近液面处液相的速度低于 1 m/s,且在靠近液面的部分角落存在流动死区。通过对搅拌桨型式和各搅拌桨功率分配的优化,将功率分配向轴流式搅拌桨倾斜,一方面可以保证流体在全釜形成显著的轴向循环结构,另一方面还能够显著提高液面处的液相流动速度(最高可达 1.5 m/s 以上),从而避免橡胶颗粒在液面处的堆积。此外,从底层桨叶端的排出流来看,优化前的底层桨附近的“双循环”结构仍然被显著地抑制,而优化后的流场中,底层桨附近的“双循环”结构还能够得以维持,有利于蒸汽在该区域的循环与再分散。

如图 5 所示,凝聚釜的 CFD 模拟优化结果表明,对于凝聚首釜采用高效轴流桨与高效涡轮桨组成的双层组合搅拌桨时,釜内的流场结构合理,不仅能够保证胶液和蒸汽的快速分散,还能保证分散后的胶粒在釜内的均匀分散;对于凝聚中釜和末釜,采用高效轴流桨与高效涡轮桨组成的 3 层组合搅拌桨,可以使得釜内流场整体流畅连贯,保证蒸汽和胶粒在釜内的均匀分散,并且通过功率分配的调节,保证用于胶粒全釜分散和循环所需的功率,有利于增加凝聚中末釜的操作稳定性。

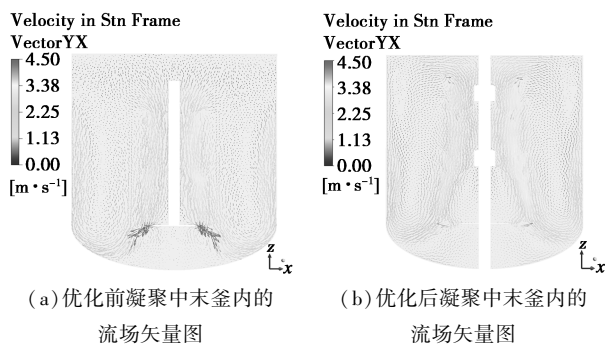


图 5 优化前后凝聚中末釜内的流场矢量图

## 4 研究结果的工业应用

2020 年 5 月,凝聚首釜投入运行,运行稳定、流体混合效果良好、胶粒分散均匀,各项工艺参数在控制指标之内,尤其是液位控制困难、液位波动大的现象得到明显改善,蒸汽单耗量下降 8.1%,达到了预期效果,如表 4 所示。

表 4 优化后工业过程中三釜蒸汽消耗

蒸汽消耗情况	原凝聚系统	优化后凝聚系统
累计产量/t	1682	829
累计蒸汽消耗总量/t	5836	2645
蒸汽单耗/(t 蒸汽·t <sup>-1</sup> )	3.47	3.19

连续取样跟踪优化后的凝聚系统回收粗溶剂中固含量,发现该含量稳定在 0.004%~0.007% 的范围内,且优于原凝聚系统中 0.007%~0.010% 的固含量比例。上述固含量的降低有利于减少塔系排残量,且减少因处理排残带来的蒸汽消耗。

2021 年 2 月,优化后的中末釜投入运行,搅拌运行稳定,流体混合效果良好,各项工艺参数在控制指标之内,且较以往大高径比的釜体振动显著减小,设备运行的稳定性得到改善。

## 5 结论

本文通过对溶液法锂系聚合物 SBC 生产中溶剂脱除的三釜凝聚工艺采用流程模拟和 CFD 模拟的方法进行优化,结合工业生产实际情况,结果表明:

- (1) 三釜凝聚优化后,工艺参数受控,系统夹带减少,蒸汽消耗降低 5% 以上。
- (2) 三釜凝聚优化后,设备运行稳定性提高。
- (3) 实现了三釜凝聚技术的完善,解除了对进口设备的依赖性,已在新建装置获得应用,优化后的工艺技术具有推广价值。

## 参考文献

- [1] 贺卉昌,蔡江伟,杨虎龙.溶液聚合橡胶的凝聚节能降耗技术[J].合成橡胶工业,2009,32(6):443-448.
- [2] 陈力军,罗军,侯志强.三釜凝聚工艺在顺丁橡胶生产中的应用[J].合成橡胶工业,2013,36(1):7-11. ■