

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20160362

泡沫碳化硅陶瓷波纹规整填料的全生命周期成本评价

乔玉栋¹, 高鑫^{1,2,3}, 李洪^{1,2,3}, 李鑫钢^{1,2,3}

(¹天津大学化工学院, 天津 300072; ²精馏技术国家工程研究中心, 天津 300072;

³天津化学化工协同创新中心, 天津 300072)

摘要: 利用全生命周期成本理论 (LCC) 方法, 对新型泡沫碳化硅陶瓷波纹规整填料 (SCFP-SiC) 和传统的金属波纹板规整填料 (SCMP) 从原材料采购、填料生产以及使用的整个生命周期进行经济评价比较。结果表明, SCFP-SiC 填料的生产成本相比 SCMP 填料的生产成本偏高, 但 SCFP-SiC 填料生产成本受原材料价格波动影响较小; 在使用阶段, 无论是降低塔高从而降低固定成本方面, 还是降低回流比从而降低可变成成本方面, SCFP-SiC 填料均具有总成本优势。另外综合新型 SCFP-SiC 填料所具有的超强耐腐蚀性能, 未来使用新型泡沫碳化硅陶瓷波纹规整填料替代传统金属波纹板规整填料具有明显的经济性优势。

关键词: 规整填料; 生产; 蒸馏; 经济; 全生命周期; 成本评价

中图分类号: TQ 02

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2016) 08—3459—09

Life cycle cost evaluation of structured corrugation SiC-foam packing

QIAO Yudong¹, GAO Xin^{1,2,3}, LI Hong^{1,2,3}, LI Xingang^{1,2,3}

(¹School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China; ²National Engineering Research Center of Distillation Technology, Tianjin 300072, China; ³Collaborative Innovation Center of Chemical Science and Engineering (Tianjin), Tianjin 300072, China)

Abstract: Structured packing has been widely used in distillation processes. An economic feasibility analysis of a new structured packing, the structured corrugation SiC-foam packing (SCFP-SiC), was compared to traditional structured corrugation metal packing (SCMP) in the whole life cycle from raw materials, production to end use by life cycle cost (LCC) theory. Results showed that the production cost of SCFP-SiC was higher than that of SCMP but was less affected by price fluctuation of raw materials. In end use, SCFP-SiC could have overall cost saving advantages by whether decreasing the tower height to reduce the fixed cost or decreasing the reflux ratio to reduce the variable cost. Assuming that SCFP-SiC could increase 1.5 times more theoretical plate number, the total cost would be lower for SCFP-SiC than SCMP in only 6.8 months' separation operation of xylene mixture. Considered its remarkable corrosion resistance, SCFP-SiC could significantly benefit end users from economic viewpoint as a SCMP replacement in separation processes.

Key words: structured packing; production; distillation; economics; life cycle; cost assessment

2016-03-29 收到初稿, 2016-05-19 收到修改稿。

联系人: 李洪。第一作者: 乔玉栋 (1992—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21336007); 国家重点基础研究发展计划项目 (2012CB215005); 国家高技术研究发展计划项目 (2015AA03A602); 天津市科技支撑计划重点项目 (15ZCZDGX00330)。

Received date: 2016-03-29.

Corresponding author: LI Hong, lihongtju@tju.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (21336007), the National Basic Research Program of China (2012CB215005), the National High Technology Research and Development Program of China (2015AA03A602) and the Key Technology R&D Program of Tianjin (15ZCZDGX00330).

引 言

波纹规整填料经过不断发展,已经成为当今填料塔中最常用的填料,广泛应用于石油化工、制药、香料工业和精细化工等领域^[1-3]。但其主要材质是 304 不锈钢,耐腐蚀较差,使用周期短,同时其传质性能的提高也受到材质的限制愈发困难^[4]。

泡沫碳化硅陶瓷材料是近几十年来发展起来的一种新型陶瓷材料,它具有化学稳定性好、耐化学腐蚀、密度小、热导率高、孔隙率高、比表面积大等优良特性,被广泛应用于化工、能源、冶金等领域^[5-7]。将其应用到填料领域的研究近些年也层出不穷^[8-14]。天津大学精馏技术国家工程研究中心联合中国科学院金属研究所开发出泡沫碳化硅陶瓷波纹规整填料(SCFP-SiC)^[15],经过大量研究比较,SCFP-SiC 填料的干、湿压降相比 BX 金属丝网波纹填料略低,而其传质效率显著提高^[16]。使用环己烷-正庚烷物系在相同喷淋密度下其理论板数是 BX 填料的 1.3~1.7 倍^[16]。但对于其工业化应用还有一些关键问题需要解决,特别是对其从生产到使用整个过程的经济性评价对于新产品的应用至关重要,且未有相关方面的文献报道,因而在投入大规模使用之前需要对此进行详细的评估。

全生命周期是指产品从设计、制造、销售、使用,直到回收的全过程。全生命周期成本(life cycle cost, LCC)的概念最早是由美国国防部提出^[17]。其定义为:政府为了设置和获得系统以及系统一生所消耗的总费用,其中包括开发、设置、使用、后勤支援和报废等费用^[18]。

LCC 理论在多个领域得到了广泛的应用。波音公司在设计阶段运用 LCC 理论计算研发成本^[19];在制造业,通过估算机器的全生命周期成本,从用户环节达到控制成本的目标^[20],同时将 LCC 方法应用于设备的购置和管理,从而降低成本^[21];在汽车领域,采用神经网络算法在概念设计阶段估算并降低全生命周期成本^[22];在交通领域,用生命周期成本理论分析轻轨交通实施的经济可行性^[23]。在化工领域,采用 LCC 的研究方法表明木薯燃料乙醇的成本比汽油高,无论以何种形式应用木薯燃料乙醇,都需要政府的财政补贴支持^[24];将 LCC 理论运用到天然气制乙炔过程,得到在电弧裂解法、部分氧化法和等离子裂解法 3 种工艺中,部分氧化法制得乙炔的生产工艺最优^[25]。但在精馏分离领域还未见到用相关方法进行经济性评价的案例。

本文旨在利用全生命周期成本理论,综合全生命周期的概念,对新型泡沫碳化硅陶瓷波纹规整填料和传统的金属波纹板规整填料从经济角度进行分析比较。在分析中,产品生命周期包括原料(包括生产过程使用的原材料、使用过程消耗的能源)从开采、加工到可被企业或用户使用的过程。因此,本文所研究的系统边界限定为从原材料的开采、加工、填料的制造、产品在精馏过程中的使用所发生的成本的总和。

1 生产过程、流程模拟与数据来源

1.1 两种填料的生产过程

图 1 为传统金属波纹板规整填料的生产过程。在传统填料中选择 500X 这一型号与新型填料进行比较。在 SCMP 填料的生产过程中最主要的原材料是 304 不锈钢。填料生产厂家从市场上购买 304 不锈钢卷,随后经过一系列物理加工过程制得 SCMP 填料。所有的加工过程都是电力驱动的。

图 2 为新型泡沫碳化硅陶瓷波纹规整填料的生

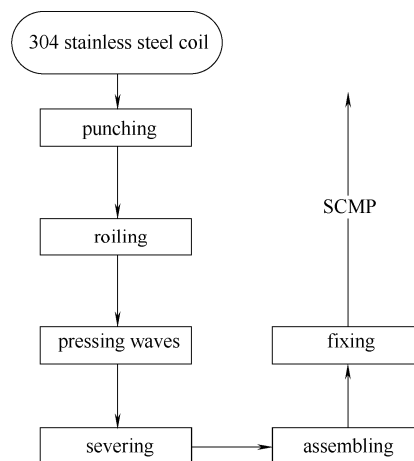


图 1 SCMP 填料的生产过程

Fig.1 Production procedures for SCMP

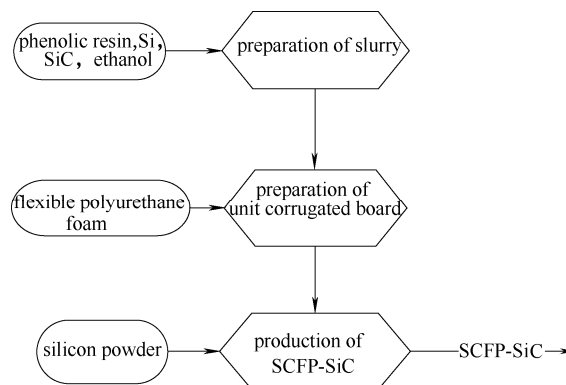


图 2 SCFP-SiC 填料的生产过程

Fig.2 Production procedures for SCFP-SiC

产过程。在新型填料中选择一种和 500X 填料具有相同比表面积和其他结构参数的 SCFP-SiC 填料与传统填料进行比较。SCFP-SiC 填料的生产过程相对而言更加复杂,也需要更多的原材料。整个生产过程可以分为 3 个主要步骤:首先是料浆的制备,其次是泡沫碳化硅陶瓷波纹板的制备,最后一个步骤是将陶瓷波纹板进行进一步加工,即可制得 SCFP-SiC 填料。

1.2 使用过程的流程模拟

混合二甲苯是邻二甲苯(OX)、间二甲苯(MX)和对二甲苯(PX)以及乙苯(EB)的混合物^[26]。该混合物系的分离是一个典型的化工分离过程,各分离产物用途也较广,因而在本文的比较中,混合二甲苯的分离过程被作为使用过程中两种填料进行比较时的参考分离流程。

图3为采用 Aspen Plus 软件对混合二甲苯的分离进行模拟的流程。混合二甲苯首先进入第1个塔 DE-EB 从塔顶脱除成分中的乙苯。剩余部分随后进入第2个塔 SE-OX 以便从底部分离邻二甲苯。对二甲苯和间二甲苯的混合物则从第2个塔的塔顶采出,随后用其他的分离方法进行分离。后续流程则不在本文的讨论和比较之中。

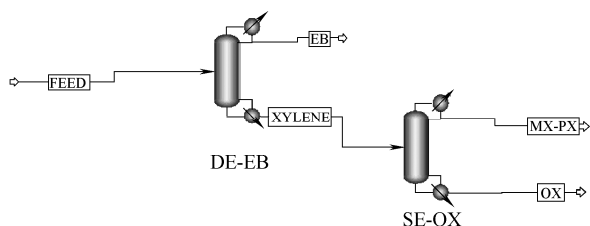


图3 混合二甲苯分离过程模拟流程

Fig.3 Simulation flow for separation of mixed xylenes

在流程模拟中,根据工业实际生产中的数据设定了一系列的初始模拟参数。整套装置的产量定为 4000 吨/年。进入第1个塔的混合二甲苯原料的组成分别为:20% (质量分数,下同)的邻二甲苯、45%的间二甲苯、20%的对二甲苯以及 15%的乙苯,这一组成是从重整油中得到的混合二甲苯的组成比例^[27]。

同时设定第1个塔 DE-EB 塔顶采出的乙苯纯度为 99.6%,第2个塔 SE-OX 塔底采出的邻二甲苯纯度为 98%。此外,分别设定塔顶采出占进料量的比例在两个塔中分别为 0.147 和 0.765。

使用传统金属波纹板规整填料的精馏塔被作为比较新型泡沫碳化硅陶瓷波纹规整填料的基准。SCMP 填料的等板高度为 0.32 m,也就是说 1 m 该

填料的理论塔板数为 3.1 块^[28]。模拟结果表明,使用 SCMP 填料时,塔 DE-EB 的回流比和理论塔板数分别为 103.5 和 314 块理论塔板,则该塔的高度和内径分别为 102 m 和 1 m。相似地,塔 SE-OX 的回流比和理论塔板数分别为 12.0 和 119 块理论塔板,则其塔高和内径分别为 39 m 和 0.8 m。根据以上结果,所需的 SCMP 填料体积总计为 99.7 m³。使用 SCFP-SiC 填料的模拟结果和 SCFP-SiC 填料的传质效率有关,将在后文阐述。

1.3 数据来源

本文中,生产传统金属波纹板规整填料的原材料和能源消耗数据采集于设立在天津市的北洋国家精馏技术有限公司实际生产中的数据,该公司生产 SCMP 填料的方法在工业上具有典型性和代表性。新型泡沫碳化硅陶瓷波纹规整填料的生产数据采集于研究团队位于沈阳市的中国科学院金属研究所。原材料的价格数据为本文撰写时的当期价格。

2 结果与讨论

2.1 生产过程

2.1.1 生产成本 表1和表2分别为生产 1 m³ SCFP-SiC 填料和 SCMP 填料所需要的原材料和能源的消耗数据。选择 1 m³ 为比较基准是因为该单位是填料生产和销售时的常用单位。

假设在 SCFP-SiC 填料的生产过程中原材料的

表1 生产 1 m³ SCFP-SiC 填料所消耗的原材料和能源
Table 1 Consumption of raw materials and energy for producing 1 m³ SCFP-SiC

Category	Substance	Amount
raw materials	silicon carbide	217.2 kg
raw materials	silicon	271.5 kg
raw materials	phenolic resin	108.6 kg
raw materials	ethanol, 99.8%	108.6 kg
raw materials	flexible polyurethane foam	54.3 kg
energy	electricity	3258 kW · h
labor	labor force	275 man-hour

表2 生产 1 m³ SCMP 填料所消耗的原材料和能源
Table 2 Consumption of raw materials and energy for producing 1 m³ SCMP

Category	Substance	Amount
raw materials	304 stainless steel	452.1 kg
energy	electricity	221.94 kW · h
labor	labor force	125 man-hour

价格和消耗量分别为 P_i ($i=1, 2, 3, 4, 5$) 和 M_i ($i=1, 2, 3, 4, 5$); 在 SCMP 填料的生产过程中的原材料 (即 304 不锈钢) 价格为 P_6 , 电力价格为 P_7 , 人工时的价格为 P_8 , 两种填料生产过程中的其他费用均为 Q 。则有:

1 m³ SCFP-SiC 填料的生产成本

$$C_1 = \sum_{i=1}^5 P_i M_i + 3258P_7 + 275P_8 + Q = 217.2P_1 + 271.5P_2 + 108.6P_3 + 108.6P_4 + 54.3P_5 + 3258P_7 + 275P_8 + Q \quad (1)$$

1 m³ SCMP 填料的生产成本

$$C_2 = 452.1P_6 + 221.94P_7 + 125P_8 + Q \quad (2)$$

需要说明的是, 本文假设两种填料生产过程中的其他费用均为 Q , 但其他费用的覆盖面比较广, 比如新型填料的生产工艺远比传统填料更加复杂, 因而安全、环保等成本可能更高, 但考虑到在这两种填料的生产过程中这一费用所占的比重并不是很大, 因而将其归为其他费用, 做出二者其他费用相当的简单假设应当是可行的。

根据 2015 年原材料市场的平均价格, C_1 比 C_2 高出 42.4%, 即 SCFP-SiC 填料的生产成本比 SCMP 填料偏高。

2.1.2 生产成本对生产要素价格的敏感度 在该部分的讨论中, 当改变一种原材料或者其他要素价格时, 其他要素价格和成本保持不变。对于 SCMP 填料而言, 其对不同的生产要素价格变化的敏感度如图 4 所示。

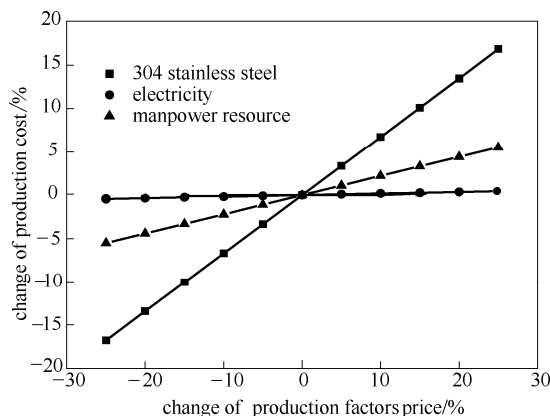


图 4 SCMP 填料生产成本敏感度

Fig.4 Sensitivity of SCMP production cost

由图 4 可知, SCMP 填料的生产成本和 304 钢材价格的变动有很大关系, 当 304 钢材价格升高 20% 时, 其生产成本升高 13.4%。人力成本对 SCMP 填料的生产成本也有一定的影响, 当人力成本的价格上升 20% 时, SCMP 填料的生产成本上升 4.4%; 但 SCMP 填料的成本和电价的变动几乎并没有太大关系。

对于 SCFP-SiC 填料而言, 假设电力和人力成本不随其他成本发生变化, 当一种原材料 i 价格变化幅度为 r_i 时, 原材料 j 价格变化幅度为 $a_{ij}r_i$, 其中 a_{ij} 称为原材料 i 和原材料 j 的价格相关系数。则 SCFP-SiC 填料生产成本和原材料价格的关系式变为

$$C_1 = \sum_{i=1}^5 P_i M_i + 3258P_7 + 275P_8 + Q + 3258P_7 r_7 + 275P_8 r_8 + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 P_j M_j a_{ij} r_i \quad (3)$$

式 (3) 中, r_7 和 r_8 表示的是电力和人力的价格变化幅度。

考虑这 5 种原材料可以大致分为两大类, 即无机硅原材料 (包括硅粉和碳化硅粉), 有机原材料 (包括无水乙醇, 酚醛树脂和聚氨酯泡沫), 假定每一类中相互之间的价格相关系数为 1, 而不同类之间价格相关系数为 0。即

$$a_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

则其生产价格随不同生产要素的价格变化的敏感度如图 5 所示。

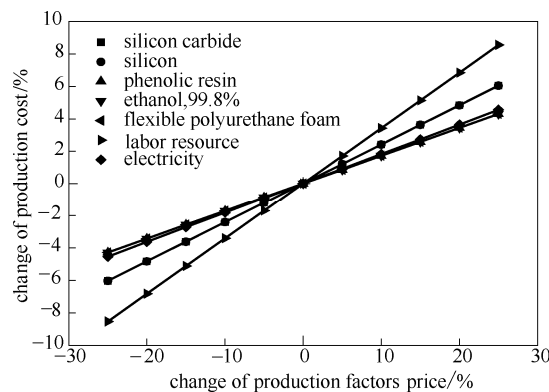


图 5 SCFP-SiC 填料生产成本敏感度

Fig.5 Sensitivity of SCFP-SiC production cost

由图 5 可知, SCFP-SiC 填料的生产成本与多种要素有关, 其中人力成本的变动对 SCFP-SiC 填料的生产成本影响最大。当人力成本上升 20% 时, SCFP-SiC 填料的生产成本上升 8.5%。

根据以上结果, 由于 SCMP 填料的价格深受 304 钢材价格的影响, 而 SCFP-SiC 填料的生产成本与多种要素有关, 并且每种生产要素都对其成本变动有着有限的影响。因而考虑到市场变化, 可以认为新型泡沫碳化硅陶瓷波纹规整填料的生产成本

相比传统的金属波纹板规整填料具有较好的稳定性, 受生产要素市场价格的变动影响较小。

2.2 使用过程

填料的使用过程的成本可以分为两大部分, 即填料的购置费用和操作费用, 其中填料的购置费用是固定成本, 而操作费用是可变成本。填料的购置费用是完成一定量的生产任务所需要的填料自身的成本价格, 在填料的生命周期内不随使用过程中的回流比等参数发生变化, 但当需要替换填料时, 填料的购置费用即有所增加。操作费用主要是使用过程中的蒸汽和能耗费用, 随使用过程中的回流比的改变发生变化, 同时也和使用时间有关。

由于 SCFP-SiC 填料具有较好的耐腐蚀性以及较高的理论板数, 因此在保持生产能力不变的情况下, 有两种方法可以发挥出其优势。一是不改变回流比, 降低塔高, 并且延长使用时间, 从而可以减少填料的购置费用, 降低固定成本; 二是不改变塔高, 降低回流比, 从而可以减少使用过程中的能耗和操作费用, 降低可变成本。这两种方法在下文中分别进行考虑。

需要进行说明的是, 在该部分的分析中, 由于固定成本涉及到填料的生产成本, 因而本节得出的结论不只是使用过程的经济性评价, 进一步说, 是连接了生产过程和使用过程的整个生命周期的总成本评价。

2.2.1 降低塔高的数学模型 为了定量比较两种填料在使用过程的经济性, 建立了简易的数学模型进行分析。模型中的相关给定参数如下所示:

- ① 使用 SCMP 填料的填料塔的塔高为 $H(\text{m})$;
- ② 满足分离要求和生产要求时, 使用 SCMP 填料的填料塔内填料消耗为 $V(\text{m}^3)$;
- ③ SCFP-SiC 填料相比 SCMP 填料, 单位填料层高度理论塔板数提高 α 倍;
- ④ 单位立方米 SCFP-SiC 填料和 SCMP 填料的成本价格分别为 C_1 和 C_2 ;
- ⑤ SCFP-SiC 填料和 SCMP 填料的使用寿命分别为 T_1 和 T_2 ;
- ⑥ 一个完整的使用寿命为 T_1 。

基于以上假设, 可以算出在一个完整的使用寿命内, SCFP-SiC 填料和 SCMP 填料的消耗分别为 V/α 和 $T_1 V/T_2$ 。即在一个完整的使用寿命内, 使用两种填料时的固定成本分别为 $C_1 V/\alpha$ 和 $T_1 C_2 V/T_2$ 。即 SCMP 填料的固定成本是 SCFP-SiC 填料的 $\alpha T_1 C_2/C_1 T_2$ 倍。后续部分将对该数据进行详细讨论。

2.2.2 降低塔高时的比较 根据之前的讨论结果, SCMP 填料的购置费用是 SCFP-SiC 填料的 $\alpha T_1 C_2/C_1 T_2$ 倍。由于该方法并未改变使用过程中的回流比和能耗, 从而并未改变可变成本。因此两者的对比主要集中在固定成本的比较之中。

C_1 和 C_2 是单位立方米 SCFP-SiC 填料和 SCMP 填料的成本价格, 其大小已在生产成本的分析中给出, 即: $C_2/C_1 = 1/(1 + 42.4\%) = 0.702$, 考虑到生产成本的波动, 假设 C_2/C_1 的取值范围为 $0.6 \sim 1.2$ 。考虑到 SCFP-SiC 填料的实际传质效率和使用的物系有关。根据使用环己烷和正庚烷标准物系的实验数据^[16], 假设 SCFP-SiC 填料的理论塔板数是 SCMP 填料的 $1.1 \sim 1.8$ 倍, 即 α 的取值范围为 $1.1 \sim 1.8$ 。环己烷和正庚烷标准物系是测定填料的传质性能的常用物系, 其结果具有代表性, 是可以作为参照的。考虑到 SCFP-SiC 填料的使用时间比 SCMP 填料长, 假设 T_1/T_2 的取值分别为 1 、 2 、 5 。图 6 为倍数 $\alpha T_1 C_2/C_1 T_2$ 与 3 种因素的相互影响。当倍数大于 100% 时, 新型 SCFP-SiC 填料具有成本优势。

由图 6 可以发现, SCFP-SiC 填料相比 SCMP 填料的使用时间越长, 即 T_1/T_2 越大, SCFP-SiC 填料的成本优势越明显。当两种填料使用周期相同, 即图 6(a) 所示 $T_1 = T_2$ 时, 若两种填料的价格不发生变动, 即 $C_2/C_1 = 0.702$, α 须大于 1.42 , SCFP-SiC 填料才能相比 SCMP 填料具有成本优势, 而这一结果在环己烷-正庚烷物系的测试中是可以达到的。若 SCMP 填料价格相比 SCFP-SiC 填料上涨, 即 C_2/C_1 增加, SCFP-SiC 填料也会更有成本优势。

在一些强腐蚀性的分离过程中, 如三氯氢硅的分离提纯, 在中试装置的测试中, SCMP 填料的使用寿命不到 1 年, 而 SCFP-SiC 填料可以使用超过 3 年依旧保持较好的传质效果。因而使用周期的比值 T_1/T_2 可以超过 2 甚至更多, 从而即便 $\alpha = 1$, 相比较而言 SCFP-SiC 填料长期来看依旧具有明显的成本优势。如图 6(c) 所示, 当 T_1/T_2 为 5 时, 在图中表示的其他两个因素所有范围之内, SCFP-SiC 填料都具有明显的成本优势。

2.2.3 降低回流比时的塔参数 图 7 和图 8 分别为使用不同填料时 DE-EB 和 SE-OX 两个塔的模拟结果。横坐标代表的是 SCFP-SiC 填料提高理论塔板数的倍数。横坐标为 1 的坐标点对应的纵坐标即为模拟数据, 其结果已在前文详细给出。在该分析部分新型填料的使用并未减少填料的体积, 因而使用 SCFP-SiC 填料时, 填料总体积同样为 99.7 m^3 。

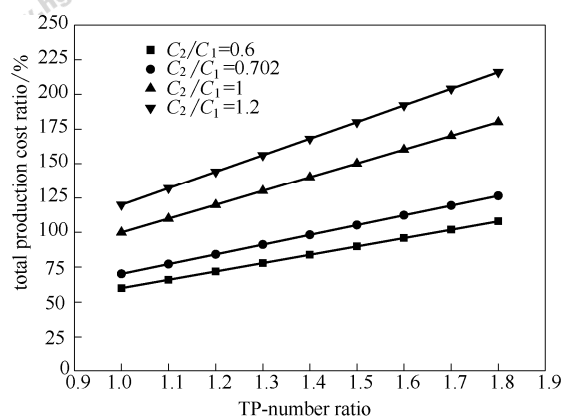
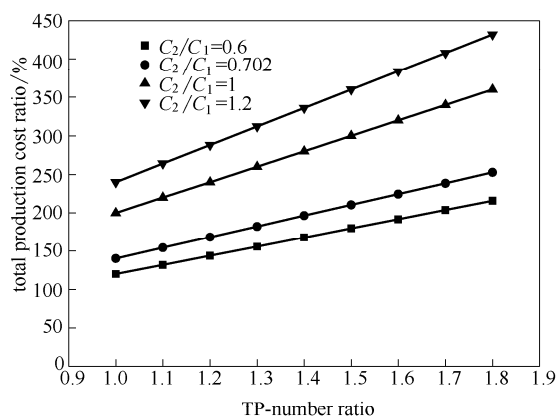
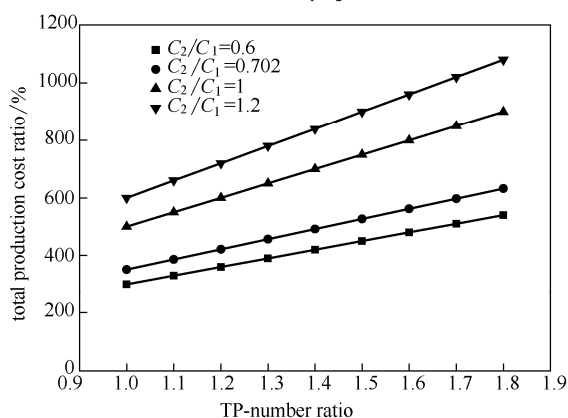
(a) $T_1/T_2=1$ (b) $T_1/T_2=2$ (c) $T_1/T_2=5$

图 6 3 种因素对两种填料生产成本的影响

Fig.6 Effect of three factors on production cost of two structured packing

在使用过程中, 由于 SCFP-SiC 填料具有较高的传质效率, 提高了填料塔的理论塔板数, 回流比和能耗都有明显的下降。如果 SCFP-SiC 填料的理论塔板数是 SCMP 填料的 1.5 倍, 第 1 个塔 DE-EB 的回流比可以从 103.5 降低到 92.1, 也就是相比 SCMP 填料降低了大约 11%。相似地, 第 2 个塔 SE-OX 的回流比从 12.0 降低到 9.8。但当 SCFP-SiC 填料的理论塔板数继续增加时, 回流比的下降幅度

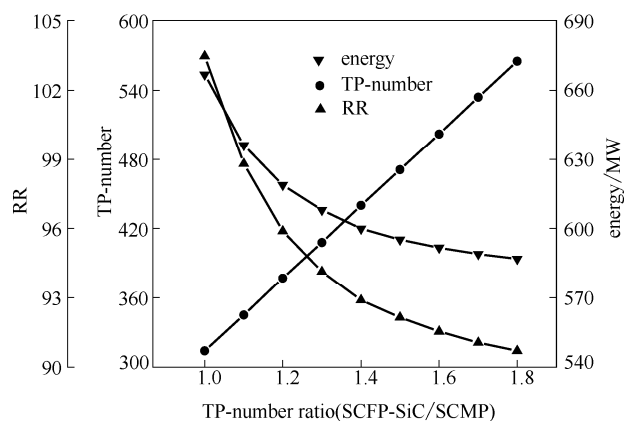


图 7 使用不同填料时 DE-EB 塔参数

Fig.7 Simulation results of DE-EB tower

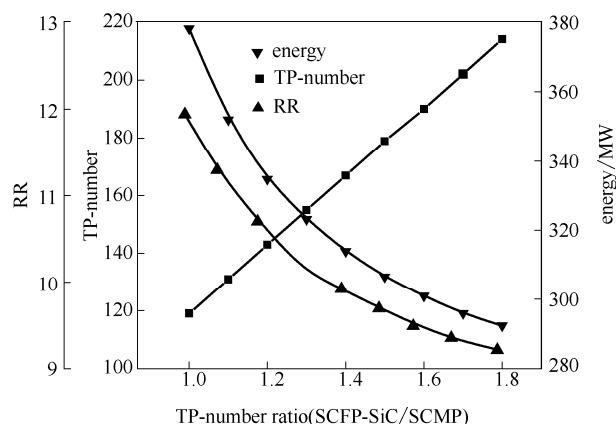


图 8 使用不同填料时 SE-OX 塔参数

Fig.8 Simulation results of SE-OX tower

明显减慢, 这是因为其回流比已经降低到接近最小回流比受到限制。由于能耗和回流比具有很大的关联性, 因而能耗的变化趋势和回流比有相似之处。如果 SCFP-SiC 填料的理论塔板数是 SCMP 填料的 1.5 倍, 第 1 个塔 DE-EB 的能耗功率可以从 666.8 kW 降低到 595.2 kW, 第 2 个塔 SE-OX 的能耗功率从 378.1 kW 降低到 306.6 kW。对整个分离过程而言, 使用 SCMP 填料和 SCFP-SiC 填料的能耗功率分别为 1044.9 kW 和 901.8 kW。同样可以发现, 其能耗功率的进一步降低受到最小回流比的限制。但也应注意到, 即便是能耗的降低幅度较小, 如果考虑到使用时间的延长, 使用 SCFP-SiC 填料从长期来看也能大幅度降低分离过程能耗, 从而节省使用阶段的成本费用。这一问题在接下来的部分会做进一步讨论。

2.2.4 降低回流比时的数学模型 为了定量评价降低回流比时, 两种填料的使用过程对经济的影响, 同样建立了简单的数学模型。模型中的相关给定参数如下所示:

① 满足分离要求和生产要求时, 使用 SCMP 填料的填料塔内填料消耗为 V (m^3);

② SCFP-SiC 填料相比 SCMP 填料, 单位填料层高度理论塔板数提高 α 倍;

③ 单位立方米 SCFP-SiC 填料和 SCMP 填料的成本价格分别为 C_1 和 C_2 ;

④ 填料塔的年操作费用和理论塔板数提高倍数 α 之间满足函数式 $f(x)$;

⑤ 填料塔的使用时间为 t 。

基于以上假设, 使用 SCMP 填料和 SCFP-SiC 填料时的总成本分别为 $C_2V + f(1)t$ 和 $C_1V + f(\alpha)t$ 。若 SCFP-SiC 填料相比 SCMP 具有成本优势, 需要满足条件

$$C_1V + f(\alpha)t < C_2V + f(1)t \quad (5)$$

根据图 7 和图 8, 理论塔板数提高倍数越大, 能耗越低, 定性可以做出推论, 填料塔的年操作费用越低, 因而 $f(x)$ 是一个单调递减函数, 即 $f'(x) < 0$, 从而当 α 在 1.1~1.8 范围之内时, $f(1) > f(\alpha)$, 从而不等式的解为

$$t > \frac{(C_1 - C_2)V}{f(1) - f(\alpha)} \quad (6)$$

将这一点定义为填料的比较平衡点(break-even point, BEP)。

根据以上定义, 比较平衡点是指泡沫碳化硅陶瓷波纹规整填料的总成本开始小于金属波纹板规整填料的总成本所需要的使用时间。

对式(6)右端求导

$$t'(\alpha) = \frac{(C_1 - C_2)Vf'(\alpha)}{[f(1) - f(\alpha)]^2} \quad (7)$$

之前得到, $f'(\alpha) < 0$, 从而可得 $t'(\alpha) < 0$, 即 SCFP-SiC 填料理论塔板数的提高倍数越大, 比较平衡点越小, 意味着使用 SCFP-SiC 填料的填料塔可以更快地具有总成本优势。

上述讨论是在定性比较填料使用过程的总成本, 可以用比较平衡点这个概念对使用过程做进一步定量比较。

2.2.5 降低回流比时的比较 图 9 为塔的年操作费用和比较平衡点与 SCFP-SiC 填料可以提高的理论塔板数倍数之间的关系。可以发现两者的变化具有相似之处。随着 SCFP-SiC 填料效率的提高, 塔的年操作费用有明显的下降。如果 SCFP-SiC 填料的理论塔板数是 SCMP 填料的 1.5 倍, 塔的年操作费用可以从 909 万人民币/年降低到 824 万人民币/年, 节省了约 85 万人民币, 比例约为 9.3%。但当

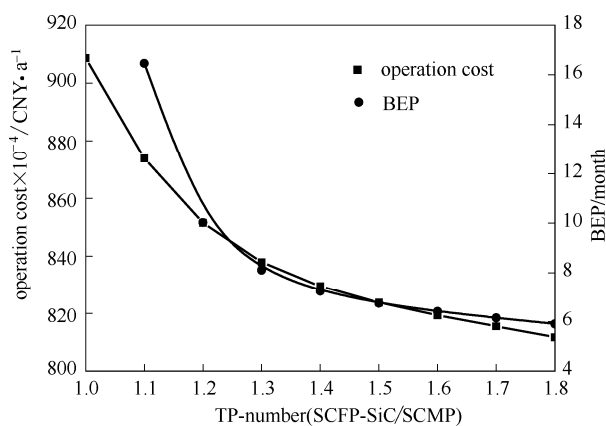


图 9 年操作费用和比较平衡点与 SCFP-SiC 填料效率提升倍数的关系

Fig.9 Relationship between annual operation cost and BEP with improved efficiency ratio

SCFP-SiC 填料的效率继续提高时, 操作费用并没有明显下降, 这是回流比降低幅度受到限制, 从而能耗降低幅度受限所致。

同样地, 随着 SCFP-SiC 填料效率的提高, 比较平衡点所对应的时间逐步缩短。如果 SCFP-SiC 填料的理论塔板数是 SCMP 填料的 1.5 倍, 其比较平衡点约为 6.8 个月, 意味着在使用新型泡沫碳化硅陶瓷波纹规整填料 6.8 个月之后, 相比传统金属波纹板规整填料开始具有总成本优势。此外, 即便理论板数的提高只有 1.1 倍, SCFP-SiC 填料的比较平衡点也不过升高到 16.4 个月。考虑到 SCFP-SiC 填料具有极好的耐腐蚀性, 其使用寿命一般可以超过 2 年。因而从长远来看, 使用 SCFP-SiC 填料具有相当大的成本优势。

3 结 论

本文利用全生命周期成本理论, 从经济的角度比较了新型泡沫碳化硅陶瓷波纹规整填料和传统金属波纹板规整填料从原材料采集、填料生产以及使用全过程的经济性。从分析结果中可以得到如下结论:

(1) 新型泡沫碳化硅陶瓷波纹规整填料的生产成本相比传统金属波纹板规整填料偏高, 根据当期价格, 前者成本约比后者高出 42.4%;

(2) 新型泡沫碳化硅陶瓷波纹规整填料的生产成本受市场上原材料价格波动影响较小, 但由于新型 SCFP-SiC 填料的生产成本中人工成本的比重较大, 其受人工成本上涨的影响要大于传统金属波纹板填料;

(3) 在使用过程中, 无论是降低塔高从而降低固定成本, 还是降低回流比从而降低操作费用, 新型 SCFP-SiC 填料都具有明显的成本优势;

(4) 考虑到新型 SCFP-SiC 填料所具有的耐腐蚀性和较高的理论板数, 新型填料在难分离物系或者腐蚀性较强的分离物系中具有明显的优势。因而从经济的角度进行考虑, 未来使用新型泡沫碳化硅陶瓷波纹规整填料替代传统金属波纹板规整填料具有明显的经济性优势。

符 号 说 明

- a_{ij} ——原材料 i 和原材料 j 的价格相关系数, $i = 1, 2, \dots, 5, j = 1, 2, \dots, 5$
- C_1 —— 1 m^3 SCFP-SiC 填料的生产成本
- C_2 —— 1 m^3 SCMP 填料的生产成本
- $f(x)$ ——填料塔年操作费用和新型填料理论塔板数提高倍数之间满足的函数式
- H ——使用传统填料时的填料塔塔高
- M_i ——原材料消耗量, $i = 1, 2, \dots, 5$
- P_i ——生产要素价格, $i = 1, 2, \dots, 8$
- Q ——生产过程其他费用
- r_i ——原材料 i 的价格变化幅度, $i = 1, 2, \dots, 8$
- T_1 ——SCFP-SiC 填料的使用寿命
- T_2 ——SCMP 填料的使用寿命
- t ——填料塔的使用时间
- V ——使用传统填料时的填料消耗量
- α ——单位填料层高度新型填料相比传统填料提高的理论塔板数倍数

References

- [1] 袁孝竞, 余国琮. 填料塔技术的现状与展望 [J]. 化学工程, 1995, 23 (3): 5-14.
YUAN X J, YU G C. The present situation and the prospect of the packed column technology [J]. Chemical Engineering (China), 1995, 23 (3): 5-14.
- [2] 曹伟. 国外填料的发展及新型填料介绍 [J]. 石油化工设备, 1992, 21 (1): 25-27.
CAO W. The development of packings abroad and the introduction of new type packings [J]. Petro-Chemical Equipment, 1992, 21 (1): 25-27.
- [3] 袁孝竞, 陈智钊. 苏尔寿型波纹填料的性能及其工业应用 (第一部分) [J]. 化学工业与工程, 1989, 1: 57-61.
YUAN X J, CHEN Z Z. The performance and industrial application of Sulzer corrugated packing [J]. Chemical Industry and Engineering, 1989, 1: 57-61.
- [4] WU Z, CALIOT C, BAI F, *et al.* Experimental and numerical studies of the pressure drop in ceramic foams for volumetric solar receiver applications [J]. Applied Energy, 2010, 87 (2): 504-513. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.08.009.
- [5] YAO X, YANG Y, LIU X, *et al.* Effect of recoating slurry compositions on the microstructure and properties of SiC reticulated porous ceramics [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2013, 33 (15): 2909-2914. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2013.04.007.
- [6] VOGT U F, GYÖRFY L, HERZOG A, *et al.* Macroporous silicon carbide foams for porous burner applications and catalyst supports [J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2007, 68 (5): 1234-1238. DOI: 10.1016/j.jpcs.2006.12.008.
- [7] THOMPSON C R, MARÍN P, DÍEZ F V, *et al.* Evaluation of the use of ceramic foams as catalyst supports for reverse-flow combustors [J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 221 (4): 44-54. DOI: 10.1016/j.cej.2013.01.080.
- [8] GARRIDO G I, PATCAS F C, LANG S, *et al.* Mass transfer and pressure drop in ceramic foams: a description for different pore sizes and porosities [J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63 (21): 5202-5217. DOI: 10.1016/j.ces.2008.06.015.
- [9] ZHANG L H, LIU X, LI X G, *et al.* A novel SiC foam valve tray for distillation columns [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2013, 21 (8): 821-826. DOI: 10.1016/S1004-9541(13)60552-2.
- [10] LÉVÊQUE J, ROUZINEAU D, PRÉVOST M, *et al.* Hydrodynamic and mass transfer efficiency of ceramic foam packing applied to distillation [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64 (11): 2607-2616. DOI: 10.1016/j.ces.2009.02.010.
- [11] 曾菁, 高鑫, 李洪, 等. 泡沫碳化硅波纹规整填料的流体力学及传质性能 [J]. 现代化工, 2012, 32 (10): 70-73. DOI: 10.3969/j.issn.0253-4320.2012.10.018.
ZENG J, GAO X, LI H, *et al.* Hydrodynamic and mass transfer efficiency of foam SiC ceramic structured packing [J]. Modern Chemical Industry, 2012, 32 (10): 70-73. DOI: 10.3969/j.issn.0253-4320.2012.10.018.
- [12] 王辰晨, 高鑫, 李鑫钢, 等. 泡沫碳化硅脉冲规整填料的气相流场模拟研究 [J]. 现代化工, 2014, 34 (9): 155-160. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2014.09.014.
WANG C C, GAO X, LI X G, *et al.* Simulation study on gas flow field of foam SiC pulse structured packing [J]. Modern Chemical Industry, 2014, 34 (9): 155-160. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2014.09.014.
- [13] 李洪, 姚跃宾, 王方舟, 等. 液相流动方式对波纹规整填料性能的影响 [J]. 化工学报, 2014, 65 (12): 4760-4766. DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.12.016
LI H, YAO Y B, WANG F Z, *et al.* Effect of liquid flow behaviour on performance of corrugated structured packing [J]. CIESC Journal, 2014, 65 (12): 4760-4766. DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.12.016.
- [14] LI H, WANG F Z, WANG C C, *et al.* Liquid flow behavior study in SiC foam corrugated sheet using a novel ultraviolet fluorescence technique coupled with CFD simulation [J]. Chemical Engineering Science, 2015, 123: 341-349. DOI: 10.1016/j.ces.2014.11.027.
- [15] 张劲松, 田冲, 杨振明, 等. 碳化硅泡沫陶瓷波纹规整填料及其制备方法和应用: CN102218293A[P]. 2011-10-19.
ZHANG J S, TIAN C, YANG Z M, *et al.* The preparation method and application of structured corrugation SiC-foam packing: 102218293A [P]. 2011-10-19.
- [16] 曾菁. 新型规整填料开发与性能研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
ZENG J. The development and research of new structured packing [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.

- [17] 陈晓川, 方明伦. 制造业中产品全生命周期成本的研究概况综述 [J]. 机械工程学报, 2002, **38** (11): 17-25.
CHEN X C, FANG M L. Summaries of product life cycle cost in manufacturing [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, **38** (11): 17-25.
- [18] 束庆, 张旭. 生命周期评价和生命周期成本分析的整合方法研究 [J]. 同济大学学报(社会科学版), 2003, **14** (4): 81-86.
SHU Q, ZHANG X. Study on the way to integrate life cycle assessment and life cycle cost analysis [J]. Tongji University Journal (Social Science Section), 2003, **14** (4): 81-86.
- [19] MARX W J, MAVRIS D N, SCHRAGE D P. Cost/time analysis for theoretical aircraft production [J]. Journal of Aircraft, 1998, **35** (4): 637-646. DOI: 10.2514/2.2348.
- [20] ZHU H, HU W. An instance based on a 3-dimensional model of life cycle cost for overhead lines[C]//International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering. 2010: 431 - 434. DOI: 10.1109/CMCE.2010.5610532.
- [21] SHIA Y. Maintenance integration in advanced equipment management at Nippon steel and its results [J]. SEAISI Quarterly (Malaysia), 1998, **27** (1): 35-47.
- [22] 陈晓川, 马伟. 家用轿车全生命周期成本特征分析与成本估算 [J]. 机械科学与技术, 2006, **25** (8): 953-955. DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.2006.08.018.
CHEN X C, MA W. Feature analysis and cost estimation of life cycle costs for family cars [J]. Mechanical Science and Technology, 2006, **25** (8): 953-955. DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.2006.08.018.
- [23] KIM G T, KIM K T, LEE D H, *et al.* Development of a life cycle cost estimate system for structures of light rail transit infrastructure [J]. Automation in Construction, 2010, **19** (3): 308-325. DOI: 10.1016/j.autcon.2009.12.001.
- [24] 王芸, 张国庆. 燃料乙醇生命周期成本模型及分析 [J]. 会计之友, 2011, (14): 70-73.
WANG Y, ZHANG G Q. The life cycle cost model and analysis of fuel ethanol [J]. Friends of Accounting, 2011, (14): 70-73.
- [25] 黄智贤, 钱宇. 生命周期成本分析及其应用研究 [J]. 化工进展, 2007, **26** (8): 1186-1191. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6613.2007.08.027.
HUANG Z X, QIAN Y. Life cycle cost analysis and its application [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, **26** (8): 1186-1191. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6613.2007.08.027.
- [26] 单秀杰, 管浩, 郭兰芬, 等. 混合二甲苯中邻二甲苯的分离提纯 [J]. 甘肃石油和化工, 2011, (3): 19-21.
SHAN X J, GUAN H, GUO L F, *et al.* The separation and purification of *o*-xylene in the mixed xylene [J]. Gansu Petroleum and Chemical Industry, 2011, (3): 19-21.
- [27] 陈艳华. 浅谈混合二甲苯的分离方法 [J]. 辽宁师专学报(自然科学版), 2003, **5** (3): 21-22.
CHEN Y H. The separation method introduction of mixed xylene [J]. Journal of Liaoning Teachers College (Natural Science Edition), 2003, **5** (3): 21-22.
- [28] 刘乃鸿. 工业塔新型规整填料应用手册 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1993: 45-56.
LIU N H. The Application Manual of New Structured Packing in Industrial Tower [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1993: 45-56.