

文章编号:1673-1689(2007)03-0121-06

分子蒸馏技术研究进展

王宝辉, 张学佳, 纪巍, 范印帅, 柳荣伟

(大庆石油学院 化学化工学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要: 综合评述了分子蒸馏技术的基本原理、技术特点及设备, 并对其优缺点进行分析评价; 介绍了分子蒸馏技术在工业生产中的应用及存在的问题和解决办法; 提出了未来分子蒸馏领域的重点研究方向。分子蒸馏技术作为一种环境友好的高新分离技术, 向人们展示出广阔的应用前景。

关键词: 分子蒸馏技术; 特点; 设备; 应用; 展望

中图分类号: TQ 028

文献标识码: A

Progress in the Research on Molecular Distillation Technology

WANG Bao-hui, ZHANG Xue-jia, JI Wei, FAN Yin-shuai, LIU Rong-wei

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, China)

Abstract: Molecular distillation as a environment-friendly new separation technology shows a broad prospect of application. Firstly, the basic principle, main equipment and technological features of molecular distillation technology are summarized in this manuscript. Secondly, the industrialized application and the practical problems existing in the application are introduced at length, the methods how to solve them are also presented. Finally, the key research orientation of molecular distillation technology in the future is finally brought forward.

Key words: molecular distillation technology; characteristic; equipment; application; prospect

蒸馏技术作为一种较成熟的分离技术在工业生产中有着广泛的应用。但是随着绿色生产技术与环境化工等领域的兴起发展, 人们对蒸馏技术提出了很多新的要求(低能耗、高纯度、无污染等), 而分子蒸馏技术则作为环境友好的分离技术备受人们青睐, 是蒸馏过程由宏观向微观发展的技术创新。分子蒸馏(molecular distillation)又称短程蒸馏(short-path distillation), 是利用不同物质的分子运动平均自由程的差异实现分离目的, 能解决常规蒸馏技术所不能解决的问题。目前已广泛地应用于石油化工、医药、农药、食品和日用品等行业。

1 分子蒸馏原理

分子蒸馏是依靠不同物质分子运动平均自由程的差异来实现物质分离的。所谓分子运动平均自由程, 就是一个分子在与相邻两次分子碰撞间隔内所走的路程的平均值。Langmuir 根据热力学原理推导出分子平均自由程的定义式为^[1]:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma} = \frac{KT}{\sqrt{2}nd^2P} = \frac{RT}{\sqrt{2}nd^2N_A P}$$

式中: $\bar{\lambda}$ 是分子平均自由程; d 是分子有效直径; T 是分子所处环境温度; P 是分子所处环境压强; K

收稿日期: 2007-01-15.

作者简介: 王宝辉(1960-), 男, 黑龙江肇州人, 教授, 博导, 主要从事新能源与环境科学方面的研究. Email: wang-baohui60@163.com

是波尔兹曼常数; R 是气体常数, 为 8.314 ; N_A 是阿佛加德罗常数, 为 6.02×10^{23} 。

从上式可以看出, 不同的分子由于有着不同的分子有效直径, 故它们的平均自由程也不相同。分子蒸馏技术就是利用不同物质分子受热逸出液面后的平均自由程大小的不同, 来实现分离提纯的。具体方法是在液面上方大于重分子平均自由程而小于轻分子平均自由程处设置一冷凝面, 使得重分子达不到冷凝面而返回液面, 保持原有的平衡; 而轻分子则不断地在冷凝面上冷凝, 从而破坏了轻分子的动态平衡, 结果是混合液中的轻分子不断从液相逸出, 最终达到分离的目的^[2-3]。分子蒸馏原理如图 1 所示。

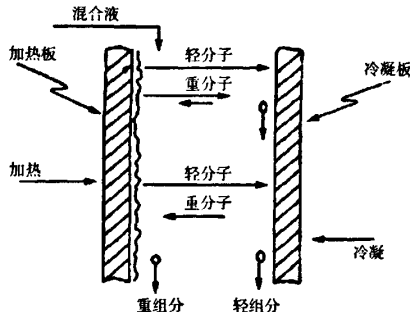


图 1 分子蒸馏原理图

Fig. 1 Scheme diagram of molecular distillation

因此, 要利用分子蒸馏技术分离物料, 必须满足 3 个条件: 首先, 轻、重分子的平均自由程要有差异, 且差异越大越好; 其次, 蒸发面与冷凝面的间距要小于轻分子平均自由程; 另外, 分子蒸馏系统中应保持较高的真空度且蒸发面与冷凝面之间应保证较高的温度差。

2 分子蒸馏器

完整的分子蒸馏装置主要由脱气系统、真空系统、控制系统和蒸馏器(包括加热器、冷凝器、捕集器等)组成。脱气系统是将物料中所溶解的挥发性组分尽量排出, 避免蒸馏过程中发生爆沸。真空系统是保证分子蒸馏过程能够进行的前提^[4-5]。分子蒸馏装置系统如图 2 所示。分子蒸馏器是实现分子蒸馏技术的关键, 大体可分为简单蒸馏型与精密蒸馏型, 现今使用的装置大多为简单蒸馏型。根据分子蒸馏器的结构形式及操作特点, 又可分为间歇式、降膜式、刮膜式和离心式分子蒸馏器。

间歇式分子蒸馏器(batch molecular still): 出现最早, 结构最简单, 由蒸馏釜和内置冷凝器组成, 类似于简单蒸馏实验装置。其特点是有一个静止

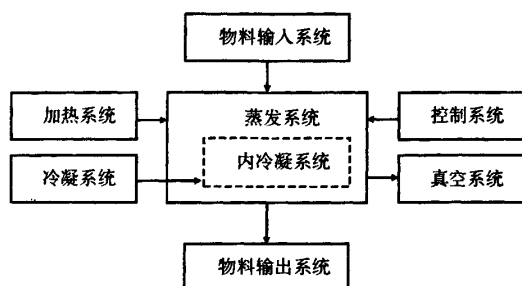


图 2 分子蒸馏装置系统

Fig. 2 System of molecular distillation equipment

不动的水平蒸发表面, 按其形状不同, 可分为釜式、盘式等。物料在分子蒸馏过程中静止不动, 停留时间较长(几分钟), 分离效果差, 热分解危险性大, 生产能力低, 一般只适用于实验室及小批量生产, 工业生产已不采用。

降膜式分子蒸馏器(falling-film molecular still): 主要由圆柱形的蒸发器和同轴的冷凝器组成, 蒸发面位于中央, 冷凝面位于外周且相距很近。物料从顶部进入, 靠重力作用在蒸发表面流动形成一层薄膜, 液膜在流动过程中被蒸发, 逸出的分子被冷凝器表面冷凝。与间歇式分子蒸馏器相比, 蒸发表面所形成的液膜厚度小, 停留时间短(数 10 秒), 热分解几率降低, 并且蒸馏过程可以连续进行, 生产能力有很大的提高。但液体在向下流动时常发生翻滚现象, 不能保证蒸发表面都形成均匀薄膜, 容易形成过热点使热敏性组分分解, 降低了分离效率。虽然在实验室及工业生产中有一定应用, 但生产规模非常有限。

刮膜式分子蒸馏器(wiped-film molecular still): 是在降膜分子蒸馏装置内设置一个转动的刮膜器, 刮膜器结构有刷膜式、刮板式、滑动式和滚筒式等多种形式。物料在从顶部进入时, 借助刮膜器的机械作用, 使物料在蒸发表面形成厚度均匀、连续更新的液膜, 液膜呈湍流流动, 既强化了物料的传热和传质过程, 又可避免局部过热。同降膜式分子蒸馏器相比, 物料停留时间更短, 液膜厚度更薄且均匀, 热分解可能性更小。可是液体分配装置还是难以保证所有的蒸发表面都被液膜均匀覆盖, 过程中产生的雾沫也常溅到冷凝面上。但由于该装置结构相对简单, 价格相对低廉, 操作参数容易控制, 维修也较方便, 故是实验室及工业生产中应用较为广泛的一种分子蒸馏设备。

离心式分子蒸馏器(centrifugal molecular still): 内部有一个高速旋转的圆锥盘, 物料被输送到高速旋转的转盘中央, 在离心力作用下, 物料沿蒸发面自由向外移动并在旋转面扩展形成均匀薄

膜,同时液膜受热蒸发并在对面的冷凝面上冷凝。与其它装置相比,由于转盘高速旋转,可得到极薄且分布更均匀的连续液膜,停留时间更短(几秒),蒸馏过程中几乎没有压力损失,很少有发泡的危险,处理量更大,分离效果好,非常适用于热敏性强及高粘度的物料分离,是目前工业上较为理想的分子蒸馏装置。但是其结构复杂,转盘的高速旋转需要高真空密封技术,制造难度大,相对投资较大。

随着人们对分子蒸馏技术的深入研究,对分子蒸馏器进行了许多有效的改进,特别是针对不同的物料,其装置结构与配套设备有不同的特点,相继出现了多种不同类型的分子蒸馏器^[6-8],如E型、V型、M型、擦膜式和立式等。目前应用范围最广泛的还是刮膜式和离心式分子蒸馏器。

不论采用上述何种分子蒸馏器,分子蒸馏过程一般可分为以下5个步骤^[9]:物料在加热表面上形成连续液膜;液膜在加热表面上的自由蒸发;蒸发逸出的分子向冷凝面运动;蒸发分子在冷凝面上冷凝;馏出物和残留物的收集。

3 分子蒸馏技术特点

3.1 分子蒸馏技术的优越性

从分子蒸馏的技术原理及设备设计的形式看,分子蒸馏技术具有如下一些优点:

3.1.1 蒸馏温度低 常规蒸馏是依靠物料中不同物质的沸点差进行分离的,因此料液必须加热至沸腾。而分子蒸馏是利用不同种类的分子受热逸出液面后的平均自由程的不同来实现分离的,只要蒸汽分子由液相逸出就可实现分离,可在远低于沸点的温度下进行操作,是一个没有沸腾的蒸发过程。由此可见,分子蒸馏技术更有利于节约能源,特别适用于一些高沸点热敏性物料的分离,且可以分离常规蒸馏中难以分离的共沸混合物。

3.1.2 蒸馏压强低 常规蒸馏装置存在填料或塔板的阻力而难获得较高的真空度,而分子蒸馏本身是必须降低蒸馏体系的压强来获得足够大的分子运动平均自由程。分子蒸馏装置内部结构比较简单,整个体系可以获得很高的真空度(一般只有0.133~1 Pa),物料不易氧化受损且有利于沸点温度降低^[10]。此外,分子蒸馏可以通过真空度的调节,有选择性地蒸出目的产物,去除其它杂质,还可以通过多级分离同时分离多种物质。

3.1.3 受热时间短 分子蒸馏技术要求加热面与冷凝面间的距离小于轻分子的平均自由程,距离很小且轻分子由液面逸出后几乎未发生碰撞即射向

冷凝面,受热时间极短(0.1~10 s)。另外,蒸发表面形成的液膜非常薄,加之液面与加热面的面积几乎相等,传热效率高,这样物料受热时间就变得 shorter。从而在很大程度上避免了物料的分解或聚合,降低热损伤,使产品的收率大幅度提高。

3.1.4 分离程度高 分子蒸馏常常用来分离常规蒸馏不易分开的物质。对用两种方法均能分离的物质而言,分子蒸馏的分离程度更高。常规蒸馏的相对挥发度为^[11]:

$$\alpha = \frac{P_1}{P_2}$$

而分子蒸馏的相对挥发度为:

$$\alpha' = \frac{P_1}{P_2} \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}$$

式中: M_1 —轻分子相对分子质量; M_2 —重分子相对分子质量; P_1 —轻分子饱和蒸汽压; P_2 —重分子饱和蒸汽压。

对比可以看出,由于 M_2 大于 M_1 ,因此分子蒸馏的相对挥发度 α' 大于常规蒸馏的相对挥发度 α ,这就表明分子蒸馏较常规蒸馏更易分离,且随着轻重分子相对分子质量相差愈大,这种差别愈显著。

3.1.5 不可逆性 普通蒸馏是蒸发与冷凝的可逆过程,液相与气相间形成平衡状态。而分子蒸馏过程中,轻分子从蒸发表面逸出直接飞射到冷凝面上,中间不与其它分子发生碰撞,理论上没有返回蒸发面的可能性,为不可逆过程。加之分子蒸馏设备的结构特点,使得分离效率远高于常规蒸馏。

3.1.6 没有沸腾和鼓泡现象 普通蒸馏有鼓泡、沸腾现象。而分子蒸馏是液层表面的自由蒸发,液体中无溶解空气且在较高的真空度下进行,因此蒸馏过程中不能使整个液体沸腾,没有鼓泡现象。

3.1.7 清洁环保 分子蒸馏技术被人们一致认为是一种温和的绿色技术,无毒、无害、无污染、无残留,能极好地保证物料的天然品质,收率高且操作工艺简单、设备少,还可用作脱臭、脱色^[12]。另外,分子蒸馏技术还可与多种技术配套使用,如超临界流体技术、膜分离技术等。

3.2 分子蒸馏技术的局限性

任何技术都有其局限性,我国分子蒸馏技术工业化应用存在的问题主要体现在下述方面:

3.2.1 理论研究较少 分子蒸馏技术是近几十年发展起来的新型技术,其相关过程的基础理论尚未完全揭示,不能准确地了解分子蒸馏器内的真实状况,缺乏一些关键数据,工艺设计盲目性较大,很难确定最佳设计方案,至今为止用以揭示分子蒸馏技术的数学模型还未完全建立^[13]。这些都严重限制

了分子蒸馏技术的工业化应用。

3.2.2 生产能力较小 由于分子蒸馏的蒸发表面积受设备结构的限制,远远小于常规精馏塔的受热面积,并且物料在面积不大的蒸发壁上呈薄膜状且受热面积与蒸发壁面几乎相等,其汽化量非常小,生产能力不大。此外,分子蒸馏在远低于常压沸点条件下操作,其汽化量相对于在沸点附近操作的常规蒸馏还要少得多,相同生产能力下,分子蒸馏设备体积要比常规蒸馏设备大得多。

3.2.3 设备投资较高 分子蒸馏技术要求体系达到很高的真空度,故对整套设备真空密封性要求很高,决定了其需要高真空排气装置、高真空动静密封结构等辅助系统,初期一次性投资大。并且蒸发面和冷凝面之间的距离要适中,致使生产技术难度大,设备投资相对较大,相应的维修费用也较高,导致生产成本增加。

3.2.4 应用范围 分子蒸馏技术只适用于液体或适当加温即具流动性的半固体物质的分离纯化,并且物料内各组分的分子平均自由程相差应较大。另外,分子蒸馏设备是纯粹的分离仪器,必须与其它提取设备连用,且分子蒸馏对物料的前期预处理要求很高。

4 分子蒸馏技术在工业中的应用

在20世纪60年代以前,分子蒸馏技术只在日本、美国等少数国家有些研究和应用,且应用面狭窄,发展较慢。随着工业化的发展,进入20世纪80年代后,分子蒸馏技术作为一种温和高新的工业技术,以其诸多优点被越来越多的科研单位及企业所接受,目前已在国民经济很多领域得到了应用^[14]。

4.1 石油化学工业

原油的渣油及其类似物质的分离^[12];表面活性剂的提纯及化工中间体的精制,如高碳醇、乙烯基吡咯烷酮等的纯化,糖脂、聚亚氧烷基乙二醇以及天然脂肪酸的提炼;碳氢化合物的分离;真空泵油、制动液、废油回收^[13],及低蒸汽压油、沥青脱蜡,聚氨酯制品的生产等。

4.2 食品工业

混合油脂的分离和提纯,如硬脂酸单甘油酯、月桂酸单甘油酯、丙二醇酯等的分离;从动植物中提取天然产物,如精制鱼油^[17]、米糠油、小麦胚芽油;从甜橙香油与棕榈油中提取类胡萝卜素,以及连翘挥发油、干姜和大蒜有效成分的分离^[18];动物脂肪中胆固醇的脱除,对高酸值花椒籽油的脱酸^[19],马铃薯叶子中提取茄呢醇^[20],以及脂肪酸及

其衍生物、天然色素的提取和微量溶剂的脱除;还可用于精炼食用油,固醇等多种高价值产品的提炼和分离。

4.3 医药工业

提取浓缩药用级天然维生素A、维生素E及 β -胡萝卜素;制取氨基酸及葡萄糖衍生物,并可通过分子蒸馏获得激素缩体、天然鱼肝油、各种天然药物标准品;脱除中药中残留的农药、有害金属和化学残留物,脱溶剂、脱色;乳酸及其聚合物制备,柠檬醛纯化^[22],大豆油提取生育酚^[23]及中碳链脂肪酸甘三酯精制;还可提取可用于保健品的EPA和DHA,以及川芎挥发性成分和当归的提取分离等。

4.4 农药工业

精制和提纯农药及农药中间体,如氯菊酯、增效醚、胡椒基丁醚和氧乐果等。

4.5 塑料工业

树脂类物质的精制及高分子物质的脱臭,如环氧树脂、丙烯酸酯、异氰酸酯等的精制;增塑剂型脂类的提纯,如去除邻苯甲酸二辛酯、癸二酸二辛酯等增塑剂的凝聚液体和催化剂残留物^[24]。

4.6 香精、香料工业

天然精油的脱臭、脱色及提纯,如桂皮油、玫瑰油、香根油、香茅油、山苍籽油等的提纯;从果汁、山核桃、奶酪、茉莉、扇贝、调味大料油等香料中分离获取香精油以及精制芳香油等^[25-26]。

4.7 核工业

Tebus等利用分子蒸馏技术安全有效地从铯中分离出铯^[27],Brewer等利用多级式分子蒸馏器成功地浓缩了铯235和铯238^[28]。

4.8 其他工业

分子蒸馏技术还广泛应用于蜡工业,如天然石蜡、蜂蜡、棕蜡、维晶蜡和高熔点蜡的提纯^[29];分离聚合物中残留过量单体或杂质,如在硅产业中从聚合物混合体中去除较低相对分子质量或较高相对分子质量的聚合物^[30];从鼠尾草提取物中成功地分离出了活性最大的天然抗氧化剂;生产低游离TDI^[31],羊毛脂及其衍生物的提取,合成Guerbet醇过程中重金属的脱除^[32],以及不饱和脂肪酸的分离和除臭等。

5 分子蒸馏技术研究展望

分子蒸馏技术是一项工业应用前景十分广阔的高新技术^[33-34]。但目前尚未实现大规模工业化,许多研究还需完善和深入,为使其成为一门真正实用的工业技术,建议今后继续以下几方面的研究。

5.1 分子蒸馏技术理论研究

对分子蒸馏各过程进行基础理论研究,并模拟建立相应的数学模型,为工业化应用提供理论依据。为此必须研究各步骤能量和质量的传递过程,分析过程中相关因素之间的影响,建立描述主体和表面温度以及组成之间关系的数学模型。通常影响分子蒸馏过程的因素较多,建立起的数学模型较为复杂,必须将模型研究和试验验证结合起来。今后还需深化在非理想、多组分物料分离方面的应用,以及强化湍流、提高分离效率方面的研究,为优化蒸馏操作以及对其预测提供理论依据。

5.2 分子蒸馏技术设备研制

对分子蒸馏装置进行系统性研究,加强新型高效节能分子蒸馏器的研制开发,并对特定工艺中各种设备进行能量集成及调优,最大限度地利用能源。另外,还需有效解决体系真空密封问题,使其安全性价比高。

5.3 工艺操作影响参数研究

分子蒸馏技术是工艺与设备的结合体,必须将分子蒸馏装备与产品的工艺要求结合起来,按照产品的物料性质与对产品质量和纯度的要求,实际设

置分子蒸馏器的结构及参数,以实现最佳效果。还需研究基于不同化学原理的各种单元技术的耦合联用,加强基础试验研究并积累相关数据,进一步分析找出不同物料与最佳操作条件之间的规律并与理论研究结果相比较,实际的工业应用应依赖于放大实验和实践经验。

5.4 应用领域研究

扩大分子蒸馏技术适用范围研究,加强在热敏感、高附加值物料的分离上的应用,特别要加强在天然物质的分离和提纯上的应用,还可加强在一些物料脱臭、脱色上的应用。

5.5 学术交流

分子蒸馏技术工业化应用在国内刚刚起步,应大力加强各高校及科研单位间的技术合作与交流,建立相应的协会,定期召开分子蒸馏技术相关的研讨会,深入基础理论研究,针对各环节中存在的问题,采取相应的措施,同时积极吸取国外的先进技术经验,从技术与工艺两方面使分子蒸馏技术不断完善与发展,推动工业化应用进程,使其成为一门真正实用的工业技术。

参考文献(References):

- [1] Langmuir I. Condensation and Evaporation of gas molecular[J]. *Phys Rev*, 1916, 7:302.
- [2] Burrows G. Molecular distillation[M]. Oxford: Oxford University Press, 1960:78-86.
- [3] Jural Lutisan, Cvengros. Mean free path molecules on Molecular distillation[J]. *The Chemical Engineering Journal*, 1995, 56:39-50.
- [4] 杨村,冯武文,于宏奇.分子蒸馏技术与绿色精细化工[J]. *精细化工*, 2005, 22(5):321-323.
YANG Cun, FENG Wu-wen, YU Hong-qi. Technique of Molecular Distillation and Green Fine Chemical Industry[J]. *Fine Chemicals*, 2005, 22(5):321-323. (in Chinese)
- [5] Rees G J. Centrifugal molecular distillation[J]. *Chemical Engineering Science*, 1980, 35:837-840.
- [6] Lutisan J, Micov M, Cvengros J. The influence of Entrainment separator on the process of molecular distillation[J]. *Separation science and technology*, 1998, 33(1):83-96.
- [7] 张逸如. 降膜回流式分子蒸馏装置[J]. *江苏化工*, 1995, 23(5):35-37.
ZHANG Yi-ru. Recycled falling-film molecular still[J]. *Jiangsu Chemical Industry*, 1995, 23(5):35-37. (in Chinese)
- [8] Lutisan J, Micov M, Cvengros J. The influence of Entrainment separator on the process of molecular distillation[J]. *Separation Science and Technology*, 1998, 33(1):83-89.
- [9] 张亚静,朱瑞芬.分子蒸馏及其应用[J]. *宁波高等专科学校学报*, 2002, 14(2):1-4.
ZHANG Ya-jing, ZHU Rui-fen. Molecular Distillation and Its Application[J]. *Journal of Ningbo College*, 2002, 14(2):1-4. (in Chinese)
- [10] 邢红丽.分子蒸馏技术的应用与发展[J]. *武汉工业学院学报*, 2005, 24(1):65-67.
XING Hong-li. Application and development of molecular distillation technology[J]. *Journal of Wuhan Polytechnic University*, 2005, 24(1):65-67. (in Chinese)
- [11] 姚玉英.化工原理(下册)[M].天津:天津大学出版社,2000.
- [12] Kiaus J, Erdweg K J. Molecular and short-path distillation[J]. *Chemistry and Industry*, 1983, 2(5):623-626.
- [13] 喻健良,翟志勇.分子蒸馏技术的发展及研究现状[J]. *化学工程*, 2001, 29(5):70-74.
YU Jian-liang, ZHAI Zhi-yong. Development of Molecular Distillation Technique[J]. *Chemical Engineering*, 2001, 29(5):70-74. (in Chinese)

- [14] 王军武, 许松林, 徐世民, 等. 分子蒸馏技术的应用现状[J]. 化工进展, 2002, 21(7): 499-501.
WANG Jun-wu, XU Song-lin, XU Shi-min, et al. Application Status of Molecular Distillation Technology[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2002, 21(7): 499-501. (in Chinese)
- [15] Kappenberger Peter. Process for the further processing of the Vacuum distillation residue in a crude oil refinery; CA 1287593[P]. 1991-08-13.
- [16] Alexander T kac, Jan Cvengros. Method of treating waste engine oils; US 4333822[P]. 1982-06-08.
- [17] 李兆新. 鱼油中高度不饱和脂肪酸工业化提取技术的研究[J]. 中国海洋药物, 1999, 72(4): 24-28.
LI Zhao-xin. A Study of Pyloric Fat Acid Distilled from Fish Oil by Multigrade Molecular Distillation Method[J]. *Chinese Journal of Marine Drugs*, 1999, 72(4): 24-28. (in Chinese)
- [18] 张忠义, 雷正杰. 超临界 CO₂ 萃取-分子蒸馏对大蒜化学成分的提取与分离[J]. 分析测试学报, 2002, 21(1): 65-67.
ZHANG Zhong-yi, LEI Zheng-jie. Studies on Chemical Composition of Garlic by Supercritical CO₂ Fluid Extraction and Molecular Distillation[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2002, 21(1): 65-67. (in Chinese)
- [19] 马传国. 分子蒸馏对高酸值花椒籽油脱酸的初步探讨[J]. 中国油脂, 2001, 26(3): 50-52.
MA Chuan-guo. Removing of FFA from Chinese Prickly Ash Seed Oil with High Acid Value by Molecular distillation[J]. *China Oils and Fats*, 2001, 26(3): 50-52. (in Chinese)
- [20] Asahina. Process for the manufacture of solanesol; US 4013731[P]. 1990-03-22.
- [21] 许松林, 徐世民, 干爱华. 天然产物分离的新技术—分子蒸馏[J]. 中草药, 2001, 32(6): 562-563.
XU Song-lin, XU Shi-min, GAN Ai-hua. Application of Molecular Distillation on Separation of Natural Products[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2001, 32(6): 562-563. (in Chinese)
- [22] 王发松. 柠檬醛分子蒸馏纯化新工艺与毛叶木姜子果油成分分析[J]. 天然产物研究与开发, 2002, 14(2): 55-56.
WANG Fa-song. Molecular distillation purifying technics of citra from essential oil of fruits of litsea mollis and its chemical constituents analysis[J]. *Natural Product Research and development*, 2002, 14(2): 55-56.
- [23] Shimada. Facile Purification of Tocopherols from Soybean Oil deodorizer Distillate in High Yield Using Lipase[J]. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 2000, 77(10): 1009-1013.
- [24] Kawala Z, Stephan K. Evaporation rate and separation factor of molecular distillation[J]. *Chemical Eng Technol*, 1989, 12: 406-413.
- [25] Batistella C B, Moraes E B, Maciel Filho R, et al. Molecular Distillation process for recovering biodiesel and carotenoids From palm oil[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2002, 98: 1149-1159.
- [26] 陆韩涛, 程玉镜. 芳香油的分子蒸馏提纯[J]. 精细化工, 1993, 16(3): 44.
LU Han-tao, CHENG Yu-jing. Purification of essential oil with Molecular Distillation[J]. *Fine Chemicals*, 1993, 16(3): 44.
- [27] Tebus V N, Petrov V B, Klabukov. Tritium recovery from lithium by means of the jet nonequilibrium molecular distillation[J]. *Atomnaya Energiya*, 1998, 84(3): 260-269.
- [28] Brewer A K, Taylor T I, Madorsky S L. Concentration of Uranium isotopes by molecular distillation of uranium poly alkoxides; CA 553571[P]. 1958-02-15.
- [29] Xu Song-lin, Wang Jun-wu, Xu Shi-min, et al. Purification of Octacosanol by Agitated-Path Distillation[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2003, 11(4): 480-482.
- [30] Harmsen Johan. Polyester mixture, its preparation and use; CA 2027788[P]. 2000-03-14.
- [31] 王建中. 分子蒸馏技术在游离 TDI 分离上的应用[J]. 中国涂料, 2003, (5): 42-44.
WANG Jian-zhong. The use of molecular distillation technique in removing the free TDI from the isocyanate pro_plymer [J]. *China Paint*, 2003, (5): 42-44. (in Chinese)
- [32] Herrmann, Albert Thomas, Scherf, et al. Process For Producing Metal-Free Querbet Alcohols; CA 2298545[P]. 2001-11-29.
- [33] 卓震, 许进文, 张晶. 分子蒸馏技术分析[J]. 化工装备技术, 2005, 26(6): 29-32.
ZHUO Zhen, XU Jin-wen, ZHANG Jing. Molecular distillation technics analysis[J]. *Chemical Equipment Technology*, 2005, 26(6): 29-32. (in Chinese)
- [34] 吴鹏, 张东明. 短程蒸馏原理及工业应用[J]. 化工进展, 2000, 19(1): 49-52.
WU Peng, ZHANG Dong-ming. Principles and Industrial Applications of Short Path Distillation [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2000, 19(1): 49-52. (in Chinese)

(责任编辑: 秦和平)