

# 分子蒸馏的应用及发展

唐智亮, 王 红

(北京联合燃气技术研究发展中心, 北京 100029)

**摘要:**介绍了分子蒸馏技术的原理及设备组成, 简述了近几年分子蒸馏在石油化工和精细化工领域的应用, 阐明了分子蒸馏技术在化工中的广泛应用前景。

**关键词:**分子蒸馏技术; 原理; 设备; 应用

**中图分类号:** TQ28.8

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2014)10-0044-05

## Application and development of molecular distillation

TANG Zhi-liang, WANG Hong

(Beijing United Gas Technology Research & Development Center, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The principle and equipments for molecular distillation technology are introduced. The applications of molecular distillation in petrochemical and fine chemical industry in recent years are reviewed. The broad application prospect of molecular distillation technology in chemical industry is proposed as well.

**Key words:** molecular distillation technology; principle; equipment; application

分子蒸馏的特性使其成为国际上较受欢迎的一种高新液液分离技术。该技术最早起源于二战之前, 伴随着高真空和真空条件下的蒸馏而产生。希克曼博士于 1920 年通过不断地实验和尝试, 将分子蒸馏发展到了中试规模, 进一步推进了分子蒸馏的发展。分子蒸馏在二战后得以定型, 这得益于 Kawala 和 Stephan 的不懈努力, 通过大量实验发现了蒸馏面和冷凝面之间距离的真正作用, 虽然对分子蒸馏加热速率和分离效果影响不是很大, 但却与处理量息息相关, 因此他们提出“分子蒸馏”又可称之为“短程蒸馏”<sup>[1]</sup>。由于分子蒸馏很好地消除了传统蒸馏所具有的缺陷, 可以在高沸点、热敏性精细化学品分离方面很好地应用, 各项优异的性能使分子蒸馏技术在 20 世纪 30—60 年代得到了深入的研究, 由于其应用面比较窄, 发展比较缓慢, 但其优异的各项性能一直受到人们的各方面关注和重视, 并不断对其进行改进和完善, 80 年代初, 绿色天然科学的出现, 分子整理作为一种物理分离技术, 除了本身不会产生污染以外, 还会很好地消除污染物, 得到了前所未有的快速发展。我国工业起步晚, 造成对分子蒸馏的引进也比较晚。最早于 20 世纪 60 年代, 才由天津大学樊利秋<sup>[2]</sup>首次引入, 并发起了对分子蒸馏技术的相关讨论和研究, 经过近 20 年的努力才将分子蒸馏真正地在国内化工行业中开始使用, 但仅仅是应用于脂肪酸单甘脂的分离, 而且整套装备全部来自于国外, 目前来说, 分子蒸馏技术作为一种高真空条件下的高新液液分离技术, 不仅在石

油加工、化妆品、医药及食品等行业的分离和提纯方面得到广泛的应用, 还很好地实现了重质油深度分离, 实现资源化利用<sup>[3]</sup>。

## 1 分子蒸馏的原理及设备组成

常规蒸馏技术运行原理是根据混合物中不同物质具有不同的相对挥发度来实现混合物的分离, 查阅分离混合物中不同物质的相对挥发度, 根据产品的要求, 设定操作温度, 加热混合物使所需物质气化后再冷凝, 从而获得所需要的产品。当前蒸馏技术已经非常成熟, 并广泛应用于工业生产中。但对于热敏性、高沸点、黏度大的物质束手无策, 在蒸馏过程中这些物质会出现热分解等现象, 所以这种方法对该种物质的分离并不适用。为解决该问题, 人们对蒸馏设备做了多种研究开发, 如间歇减压真空蒸馏。虽然这种设备一定程度上很好地保证了热敏性、沸点高、黏度大的物料的品质, 但薄膜蒸发器仍属于常规减压蒸馏, 尽管它的空载真空度较高, 由于蒸发的气相需要靠一定压力由蒸发器内部移至外部冷凝器, 移动过程存在一定的摩擦, 导致整个蒸馏过程的压降不断损失, 导致加热面上具有很高的操作压力, 因此薄膜蒸发器在高沸点、热敏性、黏度大的混合物分离方面仍然无法实现。

为了实现热敏性、黏度大的物系的分离, 分子蒸馏作为一种新型的液-液分离技术应运而生<sup>[4]</sup>。分子蒸馏是在高真空下利用不同分子具有不同的分子自由程来实现分离的一种特殊蒸馏分离技术。

## 1.1 分子蒸馏的原理

定温条件下,在密闭容器内加热溶液使其沸腾并达到气液平衡,此刻液体表面上的蒸气压力等于该温度下测得的液体饱和蒸气压力,由此可知液体的温度和饱和蒸气压之间存在一定的关系,两者的关系符合克劳修斯-克拉贝龙(Clausius-Clapeyron)方程。由此可知克劳修斯-克拉贝龙方程很好地表述了相平衡时压强与温度变化的关系,因此为分子蒸馏技术的建立提供了理论基础。理论模型具体如公式(1)所示:

$$\ln(p_2/p_1) = -(\Delta_{\text{vap}}H_m/R)(1/T_2 - 1/T_1) \quad (1)$$

式中, $\Delta_{\text{vap}}H_m$ 为气相的蒸发焓, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $R$ 为气体常数, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ;  $p_1$ 为常压,Pa;  $p_2$ 为操作压强,Pa;  $T_1$ 为常压下沸点,K;  $T_2$ 为操作压强下的沸点,K。

由此可知分子蒸馏(molecular distillation)是在蒸馏技术的不断改进和实验研究中产生一种与高真空有关的新兴技术。每个分子在进行分离时自由程都会变化。一定条件下气体的分子在一定时间内进行碰撞时的平均距离就是指分子的平均自由程,每种物质的分子都具有各自的平均自由程。

不同物质由于蒸发时吸收的能量不同,也具有不同的分子自由程,因此不规则运动能够到达的距离也不同,在某个产品范围内的轻组分分子的平均自由程被称作分子的平均自由程。当物料在加热面

上被加热获得足够的能量时,就会逸出,设置蒸发器与冷凝器之间的距离等于所需产品的轻分子的平均自由程,使得蒸发产生的轻分子在冷凝面上被冷凝,从而得到分离所需要的产品。另分子蒸馏冷凝器属于内置冷凝器,减小了加热逸出的分子运动到冷凝面的距离,使得过程中的压差较小,从而保证了设备的高真空度,具体数学模型如下:

$$\lambda_m = (K/2^{1/2}\pi) \cdot (T/d_p^2) \quad (2)$$

式中, $\lambda_m$ 为分子平均自由程;  $K$ 为波尔兹曼常数;  $d$ 为分子半径,m;  $P$ 为分子所处环境压强,Pa;  $T_1$ 为分子所处环境温度,K。

根据式(2)推导结果可以看出,能够对分子平均自由程产生明显影响的因素为操作时的温度、真空度及分子半径。当分子的半径为确定值时,提高操作温度,就增加了不同分子相互之间碰撞的几率,使得分子运动更加剧烈,最终增大了分子的平均自由程;而降低操作压力会减少单位体积内存在的分子数目,减小不同分子相互之间碰撞的几率,最终减小了分子的平均自由程。

## 1.2 分子蒸馏的过程

操作分子蒸馏运行时,主要有5个进程:物料通过重力沿着分子蒸馏器的筒壁做自由下落,在这个过程中在刮板作用下行程均匀的液膜平摊在筒壁上;液膜在筒壁上开始被加热,液体得到足够能量后表面开始逸出气相分子;分子逸出后开始朝向冷凝

(上接第43页)

[21] Bijleveld J C, Zoombelt A P, Mathijssen S G J, *et al.* Poly(diketopyrrolopyrrole-terthiophene) for ambipolar logic and photovoltaics [J]. *J Am Chem Soc*, 2009, 131: 16616 - 16617.

[22] Ide M, Koizumi Y, Saeki A, *et al.* Ambipolar low-bandgap copolymers consisting of dithienoketopyrrole for all-polymer solar cells [J]. *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 2013, 26: 217 - 221.

[23] Ye L, Xia H, Xiao Y, *et al.* Ternary blend bulk heterojunction photovoltaic cells with an ambipolar small molecule as the cascade material [J]. *RSC Adv*, 2014, 4: 1087 - 1092.

[24] Naik M A, Patil S. Diketopyrrolopyrrole-based conjugated polymers and small molecules for organic ambipolar transistors and solar cells [J]. *Polym Chem*, 2013, 51: 4241 - 4260.

[25] Loudet A, Burgess K. BODIPY dyes and their derivatives: Syntheses and spectroscopic properties [J]. *Chem Rev*, 2007, 107: 4891 - 4932.

[26] Zheng Q D, Xu G X, Prasad P N. Conformationally restricted BODIPY dyes; Highly fluorescent multi-color probes for cellular imaging [J]. *Chem-Eur J*, 2008, 14: 5812 - 5819.

[27] Yilmaz M D, Bozdemir O A, Akkaya E U. Light harvesting and efficient energy transfer in a boron-dipyrin (BODIPY) functionalized peryleneimide derivative [J]. *Org Lett*, 2006, 8: 2871 - 2873.

[28] Ziessel R, Goze C, Ulrich G, *et al.* Intramolecular energy transfer in pyrene-Bodipy molecular dyads and triads [J]. *Chem-Eur J*, 2005, 11: 7366 - 7378.

[29] Veldman D, Bastiaansen J, Langeveld-Voss B M W, *et al.* Photoinduced charge and energy transfer in dye-doped conjugated polymers [J]. *Thin Solid Films*, 2006, 511: 581 - 586.

[30] Zhu M, Jiang L, Yuan M, *et al.* Efficient tuning nonlinear optical properties: Synthesis and characterization of a series of novel poly(aryleneethynylene)s co-containing BODIPY [J]. *Polym Sci: Polym Chem*, 2008, 46: 7401 - 7410.

[31] Groenendaal B L, Jonas F, Freitag D, *et al.* Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) and its derivatives: Past, present, and future [J]. *Adv Mater*, 2000, 12: 481 - 494.

[32] Algi F, Cihaner A. An ambipolar neutral state green polymeric electrochromic [J]. *Organic Electronics*, 2009, 10: 453 - 458.

[33] Forgie J C, Vilela F, Vobecka Z, *et al.* New redox sable low band gap conjugated polymer based on an EDOT-BODIPY-EDOT repeat unit [J]. *Chem Mater*, 2009, 21: 1784 - 1786. ■

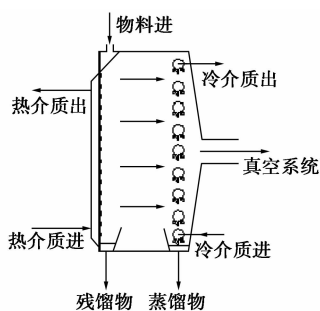


图 1 短程蒸馏装置结构示意图

面做不规则运动;物料分子运动到冷凝面上的分子被捕捉;馏出产品和残渣<sup>[5]</sup>分别进入收集罐。流程示意图如图 1。

### 1.3 设备组成

分子蒸馏装置主要分为 2 部分,一部分是机械驱动部分,另一部分是加热冷凝装置。驱动部分由提供机械能的电机和减速机、形成液膜的刮板等部件组成;蒸发部分是整个分子蒸馏器的中心,由形成液膜的蒸发器、捕捉轻分子进行冷凝的冷凝器和冷凝后的接受装置储罐。在整个装置中刮板属于核心部件,刮板主要作用是将物料在加热面上形成厚度均匀的蒸发液膜,并使整个过程中液膜得到不断更新和覆盖,发展至今,刮板的结构形式在设计上做了很多改进,冷却和加热系统也不断在提高效率。目前,随着分子蒸馏技术的不断发展和改进,分子蒸馏设备总共出现了 3 种形式,降膜式、离心式和刮膜式。

分子整理设备的组成决定了分子蒸馏技术相对于普通蒸馏技术具有以下特点:①加热温度低(沸点);②物料受热时间短;③可以分离热敏性、沸点高的物质;④真空度低,最低操作压力可达到 0.1 Pa;⑤冷凝器内置,进行内部冷凝。

## 2 分子蒸馏技术的应用

### 2.1 在石油化工领域的应用

社会的不断发展,对能源的需求量不断增大,但能源储备有限,供需平衡被打破,为了将来的可持续发展,近年来,如何最大化地利用能源,节约能源,已成为近几年来国际间石油资源利用的准则,

分子蒸馏法的出现成功解决了传统蒸馏中存在的缺陷,根据不同物质分子具有不同的分子平均自由程实现了混合物的分离,在整个生产过程中无废水、废渣、废气“三废”排放,真正实现了石油化工行业的废物利用、减量化处理,成为新一代的绿色化工

技术。

### (1) 道路沥青的脱蜡技术研究

沥青中含有一定量的蜡且对其性质有很大的影响,当含量增大时,会增加沥青的热敏性,并使得各项性能指标下降,例如沥青的塑性、黏结性、高温黏度、低温延迟。普通的石油沥青具有较高的蜡含量,因此造成它的软化点接近流动温度,工程中使用沥青时,温度一旦加热到软化点沥青就会出现流动状态,施工时容易发生流淌,因此要对沥青进行脱蜡,提高其性能后才能应用于道路铺设。沥青的蜡含量是沥青质量的直接影响因素,也是评价沥青性能的重要指标<sup>[6]</sup>。使用分子蒸馏技术脱蜡可以达到很高的蜡脱率<sup>[7]</sup>。分子蒸馏已经成为发展沥青脱蜡生产技术的必然趋势。

### (2) 高纯度硅油的提纯

硅油作为一种有机硅烷,外观无色透明,且无不良气味,蒸气压和黏度较小,闪点和燃点较高,可以耐高低温、抗氧化、绝缘性好、具有生理惰性,常用作美容保健、高级润滑油、阻尼硅油、刹车油、擦光剂等<sup>[8]</sup>,广泛应用于电子电器、医疗卫生和汽车等与生活息息相关的国民行业中。由于硅油生产过程需要加入多类添加剂,致使所得硅油会含有一定的杂质,从而不能应用于电子电器、医疗卫生等行业的高端行业,因此高纯度硅油的生产需求较为迫切。因硅氧烷混合物具有高沸点且属于热敏性物质<sup>[9]</sup>,常规蒸馏无法将其分离,分子蒸馏技术的各项优点正好可以解决硅油生产及提纯过程中多项问题。

### (3) 石油工业中渣油的减量化处理

许多国家都十分重视重质渣油加工和对重质渣油组分分析和研究。我国每年要加工处理原油 3.2 亿 t,其中产生重质渣油约 1.3 亿 t,占原油加工量约 40%。由于我国原油组成较重,一般渣油收率高达 40%~50%。近年来各油田还相继发现和开采了重质馏分油,其渣油收率更高,可达到 50%~60%。到 2010 年,中国润滑油市场容量将达 790 万~810 万 t,其精制过程产生重质渣油约 25%,约 200 万 t;在润滑油使用过程废弃重油按 70%可回收计,废润滑油可再生量将达 560 万 t,约二次产生重质渣油 150 多万 t。因此其深度分离及合理利用是炼油工业亟待解决的问题。重质油是一种混合物,其中有许多分子质量较大的大链的饱和烃,导致其黏度很大,呈黏稠状,密度较大,饱和的直链烃类决定了它具有很高的沸点,由于深埋在地下千年,杂质含量较高,其中硫、氮、氯以及重金属含量

较高,因此导致对其加工分离比较困难。

采用萃取方法对渣油进行分离时,得到的分离效率不高,无法高效地获得渣油中的全部润滑油和石蜡,而萃取得到的润滑油和石蜡产品都掺杂一定的高分子类杂质,对产品质量产生了影响。另外减压蒸馏的组成较为复杂,沸点高,受热容易分解,因此更无法采用实沸点蒸馏法。

分子蒸馏技术采用内置冷凝器,物料停留时间短,可达到高真空度,最低操作压力可以达到0.1 Pa,可以应用于热敏性、高沸点的物质的分离,因此选用分子蒸馏技术可以对渣油进行深度分离。

#### (4) 废弃润滑油的回收

经济的发展使得汽车和机械行业高速发展,造成对于机械和车辆不可或缺的润滑油的使用量连年增长。每年全球使用润滑油的量至少达到5 000万t<sup>[10]</sup>,其中40%~50%未作任何处理就扩散到环境中<sup>[11-12]</sup>,不仅对环境造成很大破坏,而且给能源也带来了很大的压力。然而就目前来看,全球的润滑油回收再生技术并不成熟完善,回收率都不高。

润滑油使用后会发生化学变质,生成一定量氧化物沥青质、胶质等,因此当润滑油使用到一定期限时,由于其各项特性和指标的降低不再适合继续使用,必须进行更换。润滑油含有大量杂质,如不进行处理而直接倒掉或进行燃烧,不仅造成严重的资源浪费,还加大了对环境的污染<sup>[13-14]</sup>。因此润滑油的回收不仅可以保护环境,还可以更加合理地实现资源的回收再利用。选用分子蒸馏对润滑油进行分离能够回收再生得到高品质的润滑油基础油,产生了一系列的经济和社会效益,同时整个过程绿色无污染,实现了回收再利用,消除了环境污染隐患的同时,还得到了一定的经济效益。

## 2.2 在绿色精细化工方面的应用

科技的发展,使化工产品充斥在人们生活的各个角落中。随着人们生活水平的提高,绿色化工的概念逐渐在人们的意识中形成并掀起了绿色化精细化工热,当今工业生产中,研究使用绿色化工艺技术已经成为精细化工行业的潮流和趋势。

绿色化工不仅指产品的绿色化,还指原料及生产过程的绿色化。原料的主要来源分为天然品和化学合成品。原料的绿色化对天然原料而言需要做到天然品的提取过程无毒,或者清除提取物中的有毒物质;对化学品而言需要做到将化学品的合成中不参与反应的有毒成分清除,以及除掉反应后产品中的有毒物质。精细化学品的生产主要使用化学精制

的方法,包括酸碱法、化学溶剂法等,这将造成新的污染,真正要做到生产过程的无毒害需要新型技术来替代以上方法<sup>[15]</sup>。分子蒸馏技术的各项功能决定了分子蒸馏可以真正做到无毒、无害、无污染,研究分子蒸馏在精细化工方面的应用,将会成为发展绿色化工的关键。

#### (1) 分子蒸馏在化妆品行业的应用

化妆品是女性不可或缺的生活用品。科技水平和生活水平的提高,化妆品的质量不仅成为化妆品行业竞争的决定性因素,还是女性选择的首要目标。化妆品生产制造过程中,分离和提纯是决定化妆品质量高低的关键。选用一种绿色、高效率的分离提纯技术是化妆品生产厂家的制胜法宝。分子蒸馏的应用,正好填充改进了这一高新技术空缺,目前分子蒸馏已成功对羊毛酸、羊毛醇及多种精油进行了提纯分离。下面以玫瑰精油为例对此技术进行简要介绍。

苦水玫瑰颜色鲜艳、香气清香,是出油率高的传统杂交玫瑰品种。玫瑰香水一般采用水蒸汽蒸馏法和有机溶剂萃取法进行生产,玫瑰粗油采用有机溶剂法脱蜡纯化。但产率不高、时间较长,高温和有机溶剂还会破坏玫瑰精油的品质和天然活性。而采用亚临界萃取技术和分子蒸馏技术相结合,出油率接近0.1%<sup>[16]</sup>,此项技术不仅提高了玫瑰精油的产率,还大大缩短了萃取时间,分子蒸馏可以很好地实现萃取剂和精油的分离以及粗油中蜡的脱除。低温分离提纯还完好地保存了玫瑰精油的天然活性,使提出的精油气味更接近天然花香,最重要的是生产分离过程无毒无害,真正实现了绿色化工。另外采用蒸馏的方法生产玫瑰香水时,产率不高,相当一部分玫瑰精油还存在于分离后的玫瑰花瓣中,对这一部分存在于花渣中的玫瑰精油可以选用分子蒸馏技术进行分离回收<sup>[17]</sup>,因此实现了资源的再利用。

#### (2) 分子蒸馏在医药行业的应用

药品在人们生活中占有相当重要的地位,它的特殊性要求对其质量和纯度进行严格控制检测,必须保证患者使用的安全有效性。日常中使用的药物基本上都是来自于混合物的分离提纯,而为了保证药品的纯度需要在高温条件下长时间精馏,这样会对某些成分的效果造成破坏。因此分子蒸馏作为一种新型的高真空分离技术,因其有别于常规精馏的优势,在药物提纯的分离上起到了无可替代的重要作用<sup>[18]</sup>。目前分子蒸馏已成功对氨基酸酯、鱼油、葡萄糖衍生物、茄尼醇、萜烯酯及天然维生素E进

行了提纯分离<sup>[19-20]</sup>。

### (3) 分子蒸馏在食品加工行业的应用

在如今各种化工合成产品充斥的社会中,食品的安全性成为各国关注的重要话题。严格控制食品的安全性,为人们的生活提供最基础的保障已经成为各国政府的首要目标。改进食品及食品添加剂的生产方法,采用高新技术进行生产加工和处理是食品安全和质量的重要措施。分子蒸馏的优势很好地适用于食品生产,因此受到了各方关注。目前分子蒸馏已经成功地分离出脂肪酸及其衍生物、种子油、米糠油、单甘脂、乳酸、辣椒油树脂、丙二醇酯等,下面以单甘脂为例对此技术进行简要介绍。

单甘酯(甘油一酸酯)主要作为食品乳化剂和稳定剂,生产工艺一般采用油脂与脂肪酸酯化和油脂与甘油醇解 2 种方法进行制取,反应得到的产物中单甘酯质量分数一般为 40% ~ 50%<sup>[21]</sup>,并含有一定量的双甘酯和三甘酯,而单甘酯作为食品乳化剂需要质量分数达到 90% 以上,因此需要对产物进行分离和提纯。传统的分离提纯单甘酯的主要方法为溶剂浸提法、尿素加成法,然而这些传统方法容易造成单甘酯发生皂化反应,对纯度和收率产生较大的影响;另外油脂类化合物作为高沸点、热敏性、黏度大的混合性物质,传统的蒸馏工艺无法进行很好地分离。因此需要使用分子蒸馏对其进行分离,用分子蒸馏技术将各组分进行分离提纯,在得到高品质的单甘酯的同时还可以分离得到双甘酯和三甘酯作为副产品,整个分离过程环保无污染。

## 3 结语

分子蒸馏技术是一项新型的现代化液-液物理分离技术,与传统真空蒸馏相比,具有分离真空度高、蒸馏温度低、物料受热时间短并且在高真空度下实现基本绝氧等优势,收集的产品质量、收率都高于真空蒸馏的产品,因此特别适合于具有高附加值、易氧化、热敏性等药物活性体的分离提纯与精制。分子蒸馏技术的出现克服传统分离提纯方法的各种缺陷,避免了传统分离提取方法易引起环境污染的潜在危险,而且工艺简便,耗时少,节约了能源,其各项优势使其在工业化生产中得到广泛应用并得到了各国各行业的认可,最大可能地实现了化工行业的绿色化。在我国由于这方面的研究应用起步相对较晚,需要进一步了解改进设备,探索分离与纯化的最佳工艺条件,扩大分子蒸馏在各行各业的应用,实现

产业化。随着分子蒸馏技术研究的不断深入,相信分子蒸馏技术将会取得突破性的发展。

## 参考文献

- [1] 李沛虹,呼丽丽. 浅谈分子蒸馏技术[J]. 硅谷,2010,(14):43.
- [2] 樊丽秋. 分子蒸馏技术的研究[D]. 天津:天津大学,1964.
- [3] Rinco J, Canizares P, Garcia M T. Improvement of the waste-oil vacuum-distillation recycling by continuous extraction with dense propane[J]. *Ind Eng Chem Res*,2007,46:266-272.
- [4] 陈立军,陈焕钦. 分子蒸馏技术及其应用的研究进展[J]. 香料香精化妆品,2004,(5):22-26.
- [5] David L Compton, Joseph A Laszlo, Fred J Eller, et al. Purification of 1,2-diacylglycerols from vegetable oils; Comparison of molecular distillation and liquid CO<sub>2</sub> extraction [J]. *Industrial Crops and Products*,2008,28(2):113-121.
- [6] 朱宝璋,刘松,冯志豪. 分子蒸馏技术在石油化工中的应用[J]. 化工进展,2009,28(s1):41-44.
- [7] 侯文良,耿志超,韩钢. 关于分子蒸馏技术应用的研讨[J]. 中国科技博览,2011,(22):278-278.
- [8] Peter Kappenberger. Process for the further processing of the vacuum distillation residue in a crude oil refinery: US,4925558 [P]. 1990-05-15.
- [9] 孙炜伟,杨学刚. 高纯度硅油的制备方法: CN,200910230723. X [P]. 2011-06-01.
- [10] 刘先斌,廖兰. 废润滑油再生资源产业化问题的研究[J]. 资源科学,2006,28(2):186-189.
- [12] Qian Bozhang. Analysis of world lubricating oil production supply and demand [J]. *International Petroleum Economics*,2005,(8):7-11.
- [13] 鱼蓉,马广印. 外废润滑油的再生利用技术[J]. 石化技术,2010,17(1):58-61.
- [14] 张传斌,张学明,张雪柏. 无机膜应用于废润滑油再生[J]. 重庆工商大学学报,2009,26(4):364-367.
- [15] Vorapot Kanokkantung, Worapon Kiatkittipong, Bunyarit Panyapinyopon, et al. Used lubricating oil management options based on life cycle thinking [J]. *Resources, Conservation and Recycling*,2009,53(5):294-299.
- [16] 杨东伟,王莹. 分子蒸馏技术及绿色精细化工的几点思考[J]. 科技创新与应用,2012,(23):98-101.
- [17] 常进文,曹珊,阳辉文,等. 用亚临界四号溶剂和分子蒸馏技术提取苦水玫瑰挥发油[J]. 香料香精化妆品,2013,(11):11-13.
- [18] 郭永来,张静菊,王庆文,等. 从玫瑰花渣中提取玫瑰精油的技术研究[J]. 香料香精化妆品,2012,(17):98-98.
- [19] 陈子国,牛克生,牛根群,等. 分子蒸馏技术在医药行业的应用及研究进展[J]. 化工生产与技术,2012,19(2):37-40.
- [20] Wiley Organics Inc. Process for isolating phytosterols and tocopherols from deodorizer distillat: US,2007073218 [P]. 2008-01-17.
- [21] 乔国平,王兴国. 分子蒸馏技术及其在油脂工业中应用[J]. 粮食与油脂,2002,(5):25-27. ■