

# 溶剂气浮法分离甲基异丁基酮模拟废水

肖波<sup>1,2</sup>, 常志东<sup>1</sup>, 马印臣<sup>1,2</sup>, 刘会洲<sup>1</sup>

(1. 中国科学院过程工程研究所绿色过程与工程实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 采用溶剂气浮法对含弱疏水性、有一定挥发性甲基异丁基酮(MIBK)的模拟废水(0.20%,  $\varphi$ )进行了分离研究. 考察了气浮时间、氮气(N<sub>2</sub>)体积流速、油水相体积比、共溶质及表面活性剂等对 MIBK 溶剂气浮分离效率的影响, 获得了各参数的优化结果. 结果表明, 当 N<sub>2</sub> 流速为 40 mL/min、油水相体积比为 1:30、氯化钠浓度为 0.50%( $\omega$ )、乙醇浓度为 1.0%( $\varphi$ )时, 溶剂气浮法对模拟废水中 MIBK 的分离效率可以达到 25%~30%左右, 而表面活性剂对提高溶剂气浮分离效率作用非常有限, 仅在-10%~5%范围内.

**关键词:** 溶剂气浮; 分离; 甲基异丁基酮; 模拟废水

**中图分类号:** TQ028.8      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-606X(2008)03-0472-06

## 1 前言

溶剂气浮(Solvent sublation), 又称溶剂浮选, 它是水溶液中存在的具有一定表面活性的溶质吸附于水相中上升气泡的表面, 随着气泡的上升而被带入主体水相表层不溶于水的有机溶剂中, 从而达到分离的目的<sup>[1]</sup>. 由于溶剂气浮过程不受液液平衡的限制, 所以其分离效率较高, 正是由于这一独特的性能, 溶剂气浮受到科研工作者的广泛关注.

溶剂气浮先后被用于含有机染料、强疏水性有机毒物污水的预处理<sup>[2-9]</sup>, 化学分析鉴定过程的预处理、预富集<sup>[10-12]</sup>, 生物处理废水后填埋渗滤液的后处理<sup>[13,14]</sup>, 也被用于从中草药中分离富集有效成分<sup>[15,16]</sup>. 所涉及的研究体系中待分离溶质的主要特征为分子量较大、浓度极低、疏水性较强或易与表面活性剂缔合等. 这些特性对溶质的溶剂气浮分离均可起到促进作用. 为了考察含少量小分子、中等极性的有机溶剂的废水体系的溶剂气浮分离特点, 本研究组曾采用溶剂气浮法处理了来自抗生素企业的含乳液特性的乙酸丁酯废水, 考察分析了部分工艺参数对该体系分离效率的影响, 结果表明, 溶剂气浮法对该体系具有良好的分离效率<sup>[17,18]</sup>. 制药企业的废水中含有一定浓度的甲基异丁基酮(Methyl Isobutyl Ketone, MIBK), 其在水中的饱和溶解度较大, 疏水性不强, 又具备一定的挥发性, 这些特性与国内外研究工作涉及的分离对象所具有的性质相比有较大的差异. 采用溶剂气浮法能否对含 MIBK 的废水进行有效分离, 未见相关报道. 本工作以 MIBK 为研究对象, 考察溶剂气浮法对小分子溶质的分离规律, 为溶剂气浮法分离具备

一定溶解度、挥发性和弱疏水性的有机物提供基础.

## 2 实验

### 2.1 实验试剂

正己烷、甲基异丁基酮、氯化钠、乙醇、十六烷基三甲基溴化铵(Cetyltrimethylammonium Bromide, CTAB)均为分析纯, 十二烷基硫酸钠(Sodium Dodecyl Sulfate, SDS)和 Span-40 为化学纯. 所有试剂均从北京化学试剂公司购得.

### 2.2 实验设备和方法

图1为溶剂气浮实验装置图, 气浮柱为内径2.5 cm、高100 cm的玻璃塔, 距塔底15, 30, 45, 60, 75, 90 cm的高度设有取样口, 塔底有耐酸砂芯漏斗(孔径20~30  $\mu\text{m}$ )作为气体分布器. 压缩氮气(N<sub>2</sub>)经过缓冲罐后, 由转子流量计控制流速, 经过塔底的气体分布器布气后进入气浮柱.

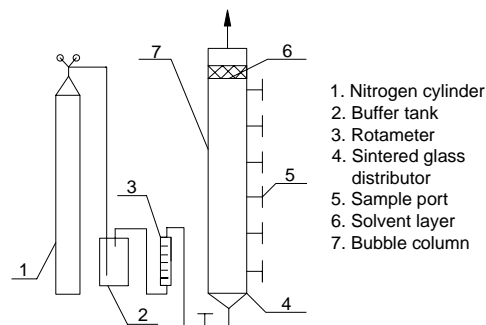


图1 溶剂气浮实验装置图

Fig.1 Schematic diagram of solvent sublation apparatus

实验前, 将 MIBK 与自来水按 1:500 的体积比配制模拟废水, 即 MIBK 含量为 0.2%( $\varphi$ ). 进行溶剂气浮实验时, 将 500 mL 废水从柱顶转入气浮柱, 再根据不同的油水相体积比( $V_{org}/V_{aq}$ )将气浮有机溶剂(正己烷)从柱顶加入到气浮柱, 并使之漂浮在主体水相的表面, 然后开始充入  $N_2$ , 用转子流量计控制流速并开始计时. 在所需的时间间隔下, 从 15 cm 高的取样口取出水相样品约 7 mL 置于 10 mL 试管中以待进一步处理和分析.

### 2.3 分析方法

在 5 mL 样品中加入 2 mL 正己烷, 用混合振荡器混合 1 min. 静置后, 用微量进样器(1  $\mu$ L)吸取试管中的上层油相 0.3  $\mu$ L, 用气相色谱仪(Agilent 6890)分析, 采用外标法定量. 色谱条件为使用氢火焰离子化检测器(FID)和毛细管柱(DB-FFAP, 30 m $\times$ 0.53 mm $\times$ 1  $\mu$ m, J&W Scientific Inc.), 分流比为 5:1, 载气( $H_2$ )流量 40 mL/min, 进样口温度 200  $^{\circ}C$ , 柱温 95  $^{\circ}C$ , 检测器温度 250  $^{\circ}C$ .

## 3 结果与讨论

MIBK 模拟废水分离效率的定义如下:

$$E_s = (C_0 - C_t) / C_0 \times 100\%$$

式中,  $E_s$  为分离效率(%),  $C_0$  为 MIBK 模拟废水的初始浓度(%),  $\varphi$ ,  $C_t$  为溶剂气浮处理后水相样品中 MIBK 的浓度(%),  $\varphi$ .

### 3.1 时间对 MIBK 分离效率的影响

图 2 给出了在不同的鼓泡时间下, 对 MIBK 水溶液进行溶剂气浮和气提实验时的分离效率. 其中溶剂气浮时的油水相体积比( $V_{org}/V_{aq}$ )为 1:50, 溶剂气浮和气提时的  $N_2$  体积流速均为 20 mL/min. 由图可以看出, 在对 MIBK 水溶液进行溶剂气浮分离时, MIBK 的分离效率随着鼓泡时间的延长而增加. 可能的原因是鼓泡时间越长, 产生的气泡就越多, 由此产生的气液界面面积就越大, 从而有利于 MIBK 分子通过吸附于气泡的气液界面而分离; 同时更多的气泡还可以形成更多被气泡夹带的液膜, 以供 MIBK 分子通过液膜的携带而分离.

由图 2 还可以看出, 溶剂气浮实验前 20 min 分离效率增加的速率比气浮时间更长时大, 这可能是在溶剂气浮初始阶段水溶液中溶质含量相对较高, 从水相向气液界面或液膜的溶质传质速率更大, 从而有利于溶质的分离. 当气浮时间达到 60 min 时, MIBK 的分离效率接近 20%, 但从图可以看出, 分离效率还没有达到稳定值, 还有继续增加的趋势, 仍可能通过进一步延长气浮时间来提高分离效率.

而 MIBK 的气提分离效率基本维持在 -2%~5% 的范

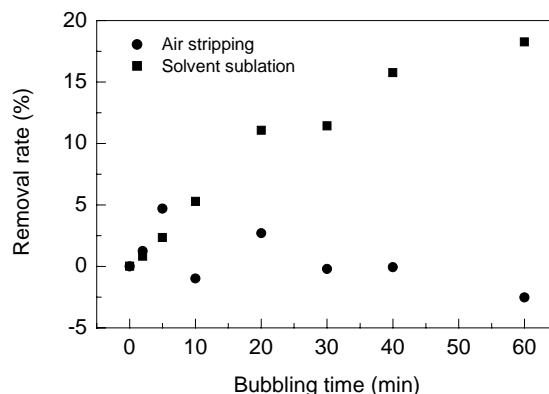


图 2 鼓泡时间对 MIBK 分离效率的影响

Fig.2 Effect of bubbling time on removal rate of MIBK

围内, 水溶液中的 MIBK 基本难以通过气泡的携带而分离, 说明气提操作不能对该研究体系中的 MIBK 进行有效的分离. 相对于适合采用气提分离的有机物, MIBK 较低的饱和蒸汽压(2.653 kPa, 20  $^{\circ}C$ )也决定了采用气提对其进行分离是不合适的. 另外, 由于水溶液中 MIBK 的浓度非常低, 仅为 0.20%( $\varphi$ ), 这部分溶于水的 MIBK 也难以通过气提而分离. 随着时间的延长, 气提的分离效率波动较大, 可能是由于在气泡上升过程中, 气浮柱中水相被气泡扰动, 从而使气浮柱底部的部分 MIBK 在气浮柱的顶部富集, 但由于它们不能从主体水相中分离, 这部分 MIBK 就一直在气浮柱中随着气泡扰动, 使取样口水相样品中的 MIBK 浓度不稳定.

### 3.2 体积流速对 MIBK 分离效率的影响

图 3 给出了当溶剂气浮油水相体积比( $V_{org}/V_{aq}$ )为 1:30、气浮时间为 20 min 时,  $N_2$  流速对 MIBK 的溶剂气浮分离效率的影响. 由图可以看出, 随着流速的增加, MIBK 的分离效率先增加, 达到最高值后又逐渐降低.

当  $N_2$  流速分别为 40 和 80 mL/min 时, MIBK 的分离效率相差约 4 倍, 这也证实了流速在溶剂气浮过程中所起的作用非常明显. 当  $N_2$  流速从 20 mL/min 提高到 40 mL/min 时, 分离效率提高近 10%, 这是由于在气泡直径变化不大的情况下,  $N_2$  流速的提高可以增加单位时间内单位体积水相中的气泡数, 这直接增加了气液界面面积和气泡所夹带的液膜的体积, 水相中的溶质就更易于通过气泡气液界面的吸附和液膜携带而分离. 当流速在 40 mL/min 时, MIBK 的分离效率达到最高值, 继续增加流速到 80 mL/min, MIBK 的分离效率反而降低. 这是由于在流速超过 40 mL/min 后, 气浮柱中气泡的直径增大, 此时流速的增加不能直接增加单位时间内单位体积水相中的气液界面面积和夹带液膜的体积; 同时, 由于气泡直径的增大, 气泡受到的浮力增大, 它在水相中的停留时间缩短, 缩短了上升气泡与水相的接触传质时

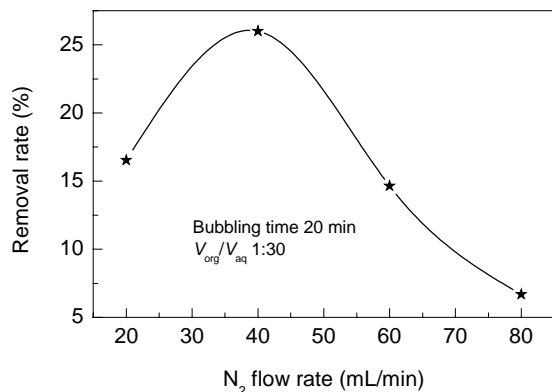


图3 N<sub>2</sub> 流速对 MIBK 分离效率的影响  
Fig.3 Effect of N<sub>2</sub> flow rate on removal rate of MIBK

间,不利于溶质在气泡表面的传质,从而使分离效率降低.另外,当N<sub>2</sub>流速为60和80 mL/min时,实验中可以观察到气浮柱顶部的有机相和水相之间的液液界面的扰动明显加强,这有可能导致部分已溶解在表层有机溶剂中的MIBK在气泡的扰动下通过反向传质而返回主体水相中,从而使MIBK的分离效率降低,而这也可以说明溶剂气浮分离机理与液液萃取通过混合来提高分离效率的机理是有差别的.

### 3.3 油水相体积比对 MIBK 分离效率的影响

图4给出了当N<sub>2</sub>流速为20 mL/min、气浮时间为20 min时,油水相体积比( $V_{org}/V_{aq}$ )对MIBK分离效率和油相中MIBK浓度的影响.尽管文献[4,6,17]中提到由于溶剂气浮过程的分离机理不同于溶剂萃取过程,所以溶剂气浮时 $V_{org}/V_{aq}$ 对分离过程的影响很小,在有些情况下甚至可以忽略不计,但也有研究<sup>[3,17]</sup>提到 $V_{org}/V_{aq}$ 对分离效率有一定的影响.而在本研究工作中,油水相体积比对分离效率的影响不容忽视.由图4可以看出,将 $V_{org}/V_{aq}$ 由1:200提高到1:30时,MIBK的分离效率有非常明显的提高.可能的解释为,在溶剂气浮时,油相中MIBK浓度随着水相MIBK浓度的降低而逐渐升高,如果油相的体积太小,其中的MIBK就可能很快达到较高的浓度,这时在油相和水相之间就会存在较大的MIBK浓度梯度,使已经分离并富集于油相中的MIBK穿过油水两相的液液界面而向主体水相进行反向传质,从而降低MIBK分离效率.另外,气泡穿过液液界面对油相的扰动也会促进这种反向传质而使分离效率降低.在有机溶剂体积较小时,较薄的有机溶剂层更容易被上升的气泡扰动,而在有机溶剂层较厚时,这种扰动效果就不太明显.所以适当增加油相与水相的体积比可以限制油相中MIBK浓度过高,并减小油相的扰动程度,从而达到降低反向传质的目的.如图4所示,油相中MIBK浓

度随着油水相体积比的增加而降低,刚好可以起到降低油水两相浓度梯度、减小反向传质、提高MIBK分离效率的作用.

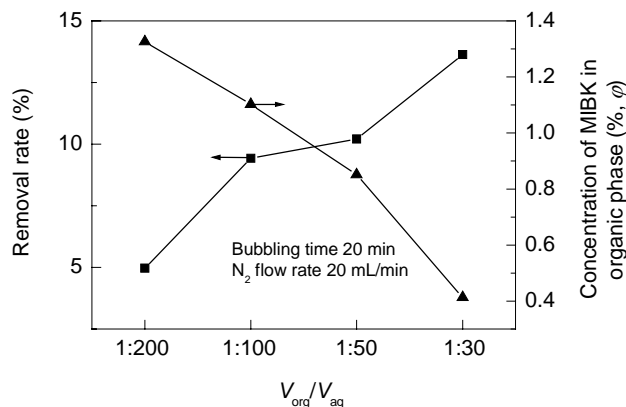


图4 油水相体积比对 MIBK 分离效率的影响  
Fig.4 Effect of  $V_{org}/V_{aq}$  on removal rate of MIBK

### 3.4 NaCl 对 MIBK 分离效率的影响

图5给出了油水相体积比( $V_{org}/V_{aq}$ )为1:30及N<sub>2</sub>流速为40 mL/min条件下,共溶质(NaCl)浓度对MIBK分离效率的影响.由图可看出,随着气浮时间的延长,MIBK的分离效率逐渐增加,这也符合气浮时间对分离效率的影响规律;同时,当水相中NaCl浓度较低时,MIBK的分离效率随NaCl浓度的升高而增加,当NaCl浓度为0.50%( $\omega$ )左右时,相同气浮时间下的分离效率达到最大值,而继续增加水相中NaCl浓度到1.0%( $\omega$ ),分离效率反而降低,随后分离效率不再发生明显变化.这可以解释为,根据盐析效应,盐的存在可以使更多的水分子被束缚在无机离子周围形成离子水化层,从而减少了可以用来溶解有机物的水分子的数量,间接提高了有机物的疏水性,所以水溶液中较低浓度的盐类可以通过

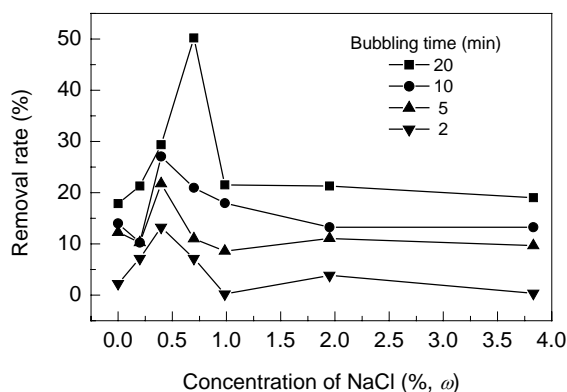


图5 NaCl 对 MIBK 分离效率的影响  
Fig.5 Effect of NaCl on removal rate of MIBK

增加 MIBK 分子的疏水性而促进其从主体水相中分离; 另外, 低浓度的盐也可能为气泡的合并引入一个能垒, 减少气泡合并的可能, 从而降低气泡直径, 提高总的分离效率.

图 6 为 NaCl 浓度对 MIBK 水溶液(0.20%,  $\varphi$ )表面张力的影响. 由图可以看出, MIBK 水溶液的表面张力比纯水的表面张力(72.6 mN/m)低. 同时盐的存在可进一步降低水溶液的表面张力, 当 NaCl 浓度在 0.50%( $\omega$ )时, MIBK 水溶液的表面张力降到最低, 为 48 mN/m, 而盐浓度的继续升高则使水溶液的表面张力又升高. 表面张力越低, 水溶液中形成的气泡的直径就可以更低, 这与图 5 中的描述一致.

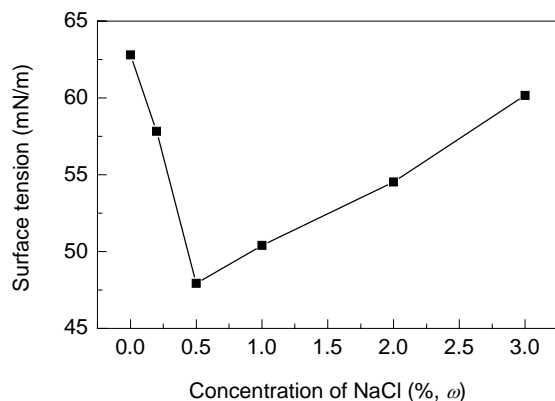


图 6 NaCl 浓度对 MIBK 水溶液表面张力的影响  
Fig.6 Effect of NaCl on surface tension of MIBK solution

### 3.5 乙醇对 MIBK 分离效率的影响

图 7 给出了当油水相体积比( $V_{org}/V_{aq}$ )为 1:30 及  $N_2$  流速为 40 mL/min 时, 共溶质(乙醇)浓度对 MIBK 分离效率的影响. 由图可以看出, 随着气浮时间的延长, 分离效率也逐渐增加, 这也与前面的描述一致. 同时, 随着乙醇浓度的增加, 相同气浮时间下 MIBK 的分离效率也增加. 当乙醇浓度为 0.50%~1.0%( $\varphi$ )时, MIBK 的分离效率达到最高值, 而乙醇浓度继续增加, 则会降低 MIBK 的分离效率, 这是由于适量的乙醇可以降低气泡的直径, 增加单位时间单位体积水相中气液界面面积和液膜体积, 这有利于主体水相中更多的 MIBK 分子通过上升的气泡而分离. 另外, 由于溶剂气浮过程中有机溶剂表面泡沫的形成对分离效率的提高有负面影响, 而适量的乙醇可以降低溶液的表面张力, 使到达液液界面的气泡更易破裂, 减少了过程中泡沫的形成, 这也有利于分离效率的提高. 不同乙醇浓度下分离效率的差别可以达到 10%, 由此可见乙醇浓度可以对 MIBK 的分离产生比较大的影响.

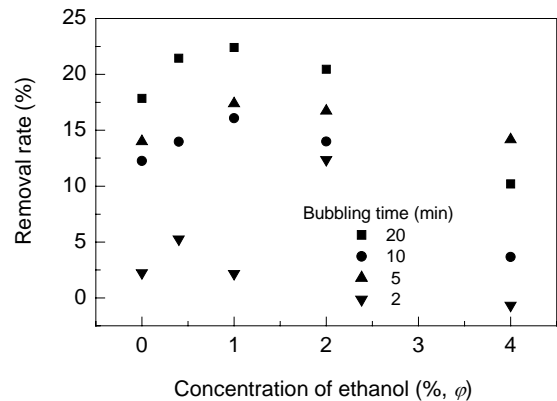


图 7 乙醇浓度对 MIBK 分离效率的影响  
Fig.7 Effect of ethanol on removal rate of MIBK

图 8 为乙醇浓度对 MIBK 水溶液的表面张力的影响. 由图可以看出, 乙醇的存在也可降低水溶液的界面张力, 但在乙醇浓度为 1.0%( $\varphi$ )时表面张力有升高的趋势, 随后又降低. 在乙醇浓度大于 1.0%( $\varphi$ )后, 即使表面张力仍降低, 但 MIBK 的分离效率不再升高, 相反有降低的趋势, 这可能是由于过量的乙醇将与 MIBK 分子竞争气液界面的吸附中心, 可能降低 MIBK 的分离效率; 另外乙醇浓度过高也可能增加有机物的溶解度, 从而使分离效率降低.

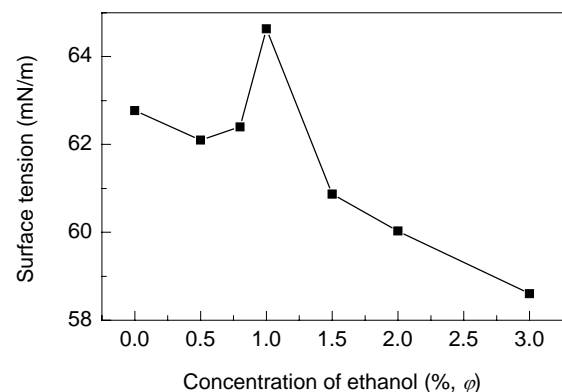


图 8 乙醇浓度对 MIBK 水溶液表面张力的影响  
Fig.8 Effect of ethanol on surface tension of MIBK solution

### 3.6 表面活性剂对 MIBK 分离效率的影响

在溶剂气浮分离有机染料和其他大分子溶质时, 表面活性剂起着至关重要的作用. 待分离溶质需要与表面活性剂分子结合成疏水性的缔合物, 再吸附于上升气泡表面, 从而实现分离的目的<sup>[2,5,6]</sup>. 图 9 给出了当油水相体积比( $V_{org}/V_{aq}$ )为 1:30 及  $N_2$  流速为 40 mL/min、表面活性剂浓度为 0.50 mmol/L 时, 不同的表面活性剂在不同气浮时间下对 MIBK 分离效率的影响. SDS, CTAB 和 Span-40 分别作为阴离子表面活性剂、阳离子表面活性剂和非离子表面活性剂添加到 MIBK 模拟废水中.

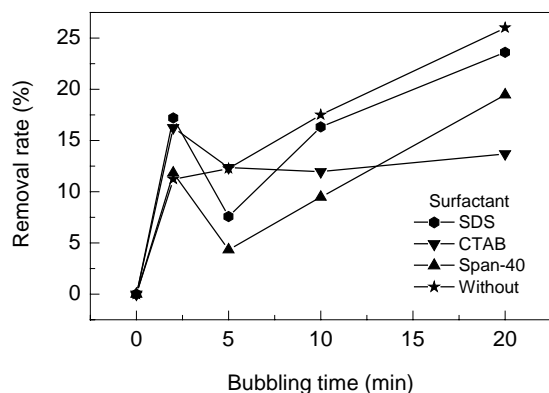


图9 表面活性剂对 MIBK 分离效率的影响  
Fig.9 Effect of surfactants on removal rate of MIBK

由图9可见,当气浮时间较短时(2 min),表面活性剂的存在促进了 MIBK 的分离,这是由于表面活性剂可与 MIBK 分子结合,由于表面活性剂分子的碳链较长,结合了 MIBK 分子的表面活性剂更易被吸附到气泡的气液界面,从而通过吸附分离而使水相中的 MIBK 分离.但随着气浮时间的延长,添加了表面活性剂的水溶液的分离效率比没有表面活性剂时低,这可能是由于表面活性剂通过与 MIBK 分子的结合随着气泡的上升或自身被气泡携带而到达气浮柱顶部的液液界面附近,此时表面活性剂的存在可降低主体水相与有机溶剂相的界面张力,上升的气泡在到达液液界面时,会更容易引起界面的扰动,使有机溶剂发生返混,加速了有机溶剂中已溶解的 MIBK 的反向传质,致使分离效率降低.

### 3.7 分离机理分析

溶剂气浮法的分离机理主要为气泡的气相携带分离、气泡气液界面吸附分离、气泡夹带液膜分离和液液界面的分子扩散传递分离<sup>[19,20]</sup>.

水相中具有挥发性的有机物可以通过扩散作用进入到气泡的气相内而随着气泡上升,当气泡在气浮柱顶油相中上升并破裂时,气相内的有机物可以溶入水相或挥发到尾气中,达到分离的目的<sup>[3,6,21,22]</sup>.而本工作的研究体系不同于上述分离研究对象,本工作中的 MIBK 的挥发性有限,同时 MIBK 的浓度极低,这部分处于真溶状态的 MIBK 较难通过气泡的气相携带而上升到气浮柱顶.如图2所示,与溶剂气浮相比,基于气泡气相携带分离的气提操作对本体系中的 MIBK 分离的效果十分有限,这也体现出了溶剂气浮与气提之间的差异.

具有强疏水性的溶质分子或缔合物可以吸附于气泡的气液界面,并随气泡上升而进入到气浮柱顶的油相中.另外,在气泡上升的过程中,其夹带的液膜也可以溶解一部分溶质,并在油相中通过液液传质而进入有机

相<sup>[5,7,8,19]</sup>.本研究体系中 MIBK 分子较小,但由于其具有一定的疏水性和溶解度,它也可以通过气液界面吸附和液膜携带而分离.如图2所示,气浮时间越长,气泡数量就越多,增大了气液界面面积和液膜体积,从而使溶剂气浮的分离效率增加.从图3,5,7的分析中也可得知 N<sub>2</sub> 流速、NaCl 和乙醇浓度等对溶剂分离过程中上升气泡的数量和直径的影响,均能够直接影响到分离过程中的气液界面面积和液膜体积,从而最终影响到 MIBK 的分离效率.而在图9中,表面活性剂的存在也在较短的气浮时间内促进了 MIBK 分子通过与表面活性剂的结合并吸附于气泡的气液界面而分离,而随着气浮时间的延长,表面活性剂则有可能与待分离溶质竞争气泡的吸附界面,减少了可吸附于气液界面的溶质的量,从而降低了溶剂气浮的分离效率.

由于油水两相间的浓度梯度,部分溶质可以在油水相液液界面进行传质而影响分离效率<sup>[19,20]</sup>.在溶剂气浮初始阶段,油相中 MIBK 浓度小于水相中 MIBK 浓度,此时少量的 MIBK 可能穿过液液界面向有机相转移,对分离起到促进作用;但随着溶剂气浮过程的继续,有机溶剂捕集了被气泡分离出来的 MIBK,使有机相中 MIBK 浓度逐渐增加并超过水相中浓度,此时的浓度梯度会使 MIBK 从油相反向传质到水相,不利于 MIBK 的分离.对图3的进一步分析认为,过大的气速也加强了 MIBK 的反向传递,降低了分离效率.而从图9也可得知表面活性剂的存在使液液界面的界面张力降低,界面扰动加剧,促进了反向传质.如图4所示,适当增加油水相的体积比可以降低油相中 MIBK 的浓度及油水两相的浓度梯度,从而减少反向传质,提高分离效率.

## 4 结论

采用溶剂气浮分离方法对含有弱疏水性、有一定挥发性的 MIBK 水溶液(0.20%,  $\varphi$ )进行了分离,考察了气浮时间、N<sub>2</sub> 流速、油水相体积比( $V_{org}/V_{aq}$ )、共溶质和表面活性剂对 MIBK 分离效率的影响.得到如下结论:

(1) 溶剂气浮法能够对含 0.20% ( $\varphi$ ) MIBK 的模拟废水体系进行一定分离,在优化条件下,溶剂气浮法对模拟废水中 MIBK 的分离效率可以达到 25%~30%左右.气泡气液界面吸附和液膜携带是该体系溶剂气浮过程主要的分离机理,气泡内气相携带对分离过程影响不大,有机溶剂相与水相之间的液液界面反向传质不利于分离效率的提高.

(2) 部分工艺参数对分离效率的影响与文献基本一致,但油水相体积比对分离过程的影响比文献中提到的明显,在不同的油水相比条件下,溶剂气浮分离效率的

差别最大可以达到 10%, 可见适当增加油水相体积比有利于提高分离效率。

#### 参考文献:

- [1] 孙兴华, 常志东, 刘会洲. 溶剂气浮法分离有机物稀溶液的研究进展 [J]. 化工进展, 2004, 23(9): 938-942.
- [2] Womack J L, Lichter J C, Wilson S J. Removal of Refractory Organics from Water by Aeration: II. Solvent Sublation of Methylene Blue and Methyl Orange [J]. Sep. Sci. Technol., 1982, 17(7): 897-924.
- [3] Valsaraj K T, Porter J L, Liljenfeldt E K, et al. Solvent Sublation for the Removal of Hydrophobic Chlorinated Compounds from Aqueous Solutions [J]. Water Res., 1986, 20(9): 1161-1175.
- [4] Valsaraj K T, Springer C. Removal of Traces of Pentachlorophenol from Aqueous Acidic Solutions by Solvent Extraction and Solvent Sublation [J]. Sep. Sci. Technol., 1986, 21(8): 789-807.
- [5] Cheng M H, Huang S D. Solvent Sublation and Adsorbing Colloid Flotation of Direct Red [J]. J. Colloid Interface Sci., 1988, 126(1): 346-354.
- [6] Shin H S, Coughlin R W. Removal of Organic Compounds from Water by Solvent Sublation [J]. J. Colloid Interface Sci., 1990, 138(1): 105-112.
- [7] Bryson B G, Valsaraj K T. Solvent Sublation for Waste Minimization in a Process Water Stream—A Pilot-scale Study [J]. J. Hazard. Mater., 2001, 82(1): 65-75.
- [8] Lu Y J, Li J Z, Zhang X L, et al. Studies on the Mechanism of Indigo Carmine Removal by Solvent Sublation [J]. J. Colloid Interface Sci., 2005, 292(1): 210-218.
- [9] 吕玉娟. 溶剂气浮法去除水中的刚果红的研究 [J]. 分析实验室, 2007, 26(8): 48-51.
- [10] 董慧如, 张利静, 刘国文. 溶剂浮选法分离富集工业废水中痕量有机污染物的研究 [J]. 分析实验室, 2005, 24(5): 19-23.
- [11] 董惠茹, 孟凡春, 张利静. 溶剂浮选法分离富集污水中痕量羧酸类和胺类有机污染物的研究 [J]. 分析科学学报, 2005, 21(6): 607-609.
- [12] 张利静, 董慧如. 对羟基苯甲酸的溶剂气浮研究 [J]. 理化检验—化学分册, 2006, 42: 372-374.
- [13] Lu Y J, Liu J H, Tang J, et al. The Removal of Humic Acids from Water by Solvent Sublation [J]. J. Colloid Interface Sci., 2005, 283(1): 278-284.
- [14] 吕玉娟, 李继贞, 张雪利, 等. 溶剂气浮法去除水中腐殖酸的动力学和热力学初步研究 [J]. 分析化学, 2006, 34(2): 239-242.
- [15] 董惠茹, 王士辉. 溶剂浮选法分离富集麻黄草中有效成分 [J]. 分析化学, 2004, 32(4): 503-506.
- [16] Dong H R, Bi P Y, Wang S H. Separation and Enrichment of Baicalin in SBG by Solvent Sublation and Its Determination by HPLC and Spectroscopy [J]. Anal. Lett., 2005, 38(2): 257-270.
- [17] Sun X H, Chang Z D, Liu H Z. Recovery of Butyl Acetate in Wastewater of Penicillin Plant by Solvent Sublation: I. Experimental Study [J]. Sep. Sci. Technol., 2005, 40(4): 927-940.
- [18] Sun X H, Chang Z D, Liu H Z. Effects of Emulsion Properties on Recovering Butyl Acetate from Wastewater of Penicillin Plant by Solvent Sublation [J]. Colloids Surf., A: Physicochem. Eng. Aspects, 2006, 286(1/3): 8-17.
- [19] Smith J S, Valsaraj K T, Thibodeaux L J. Bubble Column Reactors for Wastewater Treatment: I. Theory and Modeling of Continuous Countercurrent Solvent Sublation [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 1996, 35(5): 1688-1699.
- [20] Sun X H, Chang Z D, Liu H Z. Recovery of Butyl Acetate in Wastewater of Penicillin Plant by Solvent Sublation: II. Theoretical Modeling [J]. Sep. Sci. Technol., 2005, 40(4): 941-957.
- [21] Ososkov V, Kebbekus B, Chen M. Emission of Volatile Organic Compounds to the Atmosphere in the Solvent Sublation Process: I. Toluene [J]. Sep. Sci. Technol., 1996, 31(2): 213-227.
- [22] Ososkov V, Kebbekus B, Chou C C. Emission of Volatile Organic Compounds to the Atmosphere in the Solvent Sublation Process: II. Volatile Chlorinated Organic Compounds [J]. Sep. Sci. Technol., 1996, 31(10): 1377-1391.

## Separation of Methyl Isobutyl Ketone from Simulated Wastewater with Solvent Sublation

XIAO Bo<sup>1,2</sup>, CHANG Zhi-dong<sup>1</sup>, MA Yin-chen<sup>1,2</sup>, LIU Hui-zhou<sup>1</sup>

(1. Laboratory of Green Process and Engineering, Inst. Process Eng., Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Solvent sublation was applied to separate methyl isobutyl ketone (MIBK) from simulated wastewater containing MIBK at the concentration of 0.20% ( $\varphi$ ), which is of limited hydrophobic property and volatility. The effects of bubbling time,  $N_2$  flow rate,  $V_{org}/V_{aq}$  ratio, concentration and type of co-solutes and surfactants on MIBK removal rate of solvent sublation were investigated, and the optimal results were obtained. The results show that the MIBK removal rate can be 25%~30% when the  $N_2$  flow rate is 40 mL/min, the  $V_{org}/V_{aq}$  ratio 1:30, the concentration of NaCl 0.50% ( $\omega$ ) and the concentration of ethanol 1.0% ( $\varphi$ ), while the positive effect of surfactants on the removal rate of solvent sublation is very limited, which varies from -10% to 5%.

**Key words:** solvent sublation; separation; methyl isobutyl ketone; simulated wastewater