

填埋气净化分离的实验研究

刘安琪,王小波,罗向荣,赵增立,李海滨

(中国科学院广州能源研究所,中国科学院可再生能源与天然气水合物重点实验室,广东 广州 510640)

摘要: 填埋气的分离技术越来越受到人们的广泛关注。醇胺溶液可以有效地分离垃圾填埋气中的甲烷和二氧化碳,借助实验曲线和评判填埋气分离和 CO₂ 再生的性能指标,考察填埋气在不同醇胺溶液(乙醇胺 MEA、二乙醇胺 DEA、三乙醇胺 TEA)中的分离情况以及 CO₂ 的再生的情况,以及不同实验因素对填埋气分离和 CO₂ 再生性能的影响。实验发现,吸收剂浓度和不同操作条件(如温度、气液接触方式、传热效率等)对以上性能均有不同程度的影响;在相同吸收剂浓度和一样的操作条件下,填埋气分离性能表现为:MEA > DEA > TEA,再生性能的表现刚好相反。

关键词: 填埋气;分离;化学吸收;再生

中图分类号: X799.3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2011)08-0042-05

Study on separating and purifying landfill gas

LIU An-qi, WANG Xiao-bo, LUO Xiang-rong, ZHAO Zeng-li, LI Hai-bin

(Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Science, Key Laboratory of Renewable Energy and Gas Hydrate, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Amine solution can be used as reagent for recovery of CO₂ from landfill gas. This study focuses on ethanolamine (MEA), diethanolamine (DEA), triethanolamine (TEA) which are used in removal of CO₂ from landfill gas by the adsorption and the regeneration of solvent for recycling CO₂. The effects of influencing factors on both the absorption and regeneration properties are investigated by evaluating experimental curves and characteristic index. It is found that absorbent concentration and operating conditions such as temperature, gas-liquid contacting way, heat transfer efficiency, have different effect on performance of absorption and regeneration. The amine solution adsorbs CO₂ in the following order: MEA > DEA > TEA. However, the regeneration presents the opposition under the same conditions,

Key words: landfill gas; separation; absorption; regeneration

垃圾填埋处理是我国目前处理垃圾的主要方式。垃圾经过填埋产生大量填埋气,典型成分为 CH₄ (体积分数为 63.8%)、CO₂ (体积分数为 33.6%)、N₂、O₂ 及微量元素气体^[1]。随着城市垃圾处理量不断递增,任由垃圾填埋气自行排放,会造成环境污染及爆炸安全事故,浪费可回收的资源。CH₄ 和 CO₂ 是垃圾填埋气主要的气体成分,其分离回收技术是影响垃圾填埋气利用的关键技术,对提高我国可再生能源利用效率、减少温室气体排放都具有重要的意义^[2-3]。

CO₂ 回收型分离方法一般有化学吸收法、吸附分离法、膜分离法等。膜法成本一般较高,如美国 Florence Alabamal 采用角柱分离器处理垃圾填埋气,该技术的缺点是甲烷损失大,投资大,操作成本高^[4]。变压吸附已发展成一种新型高效的气体分离技术,但该工艺操作程序较复杂,设备易损坏,投资费用和维护费用很高^[5]。化学吸收法脱碳效果好,技术成熟,是工业生产中脱除二氧化碳的常见方

法^[6]。碱性醇胺水溶液可用于分离气体中的 CO₂, 该法设备成本低,操作简便,净化效果好,引起了广泛关注^[7-9]。董长勋^[10]采用 pH 法测定不用温度和浓度下,乙醇胺溶液吸收 CO₂ 过程中 pH 变化情况。谭大志等^[11]研究了二乙醇胺溶液吸收 CO₂ 时 pH 的变化情况。Yeh 等^[12]对比 NH₃ 和乙醇胺溶液的吸收能力并研究了富液再生的稳定情况。翟彦青等^[13]考察了二乙醇胺、三乙醇胺及 N-甲基二乙醇胺的种类和浓度对吸收和再生能力的影响。

乙醇胺、二乙醇胺和三乙醇胺是常见的醇胺类吸收剂,笔者探索将以上 3 种吸收剂用于填埋气组分的分离实验。通过掌握溶液 pH 与醇胺溶液 CO₂ 含量的对应关系,构建评价填埋气分离回收的量化指标,结合指标和吸收曲线综合考察醇胺法用于填埋气分离回收利用的效果,了解不同实验因素对填埋气分离和 CO₂ 再生能力的影响,为填埋气分离回收技术寻找吸收量大、分离效率高、再生效果好的吸收剂提供参考方法。

收稿日期:2011-05-04

基金项目:自然科学基金项目(0701051001);中国科学院广州能源所所长基金项目(0707g31001)

作者简介:刘安琪(1981-),女,硕士,助理研究员;李海滨(1968-),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事固体废弃物能源利用研究,通讯联系人,020-87057732,lih@ms.giec.ac.cn。

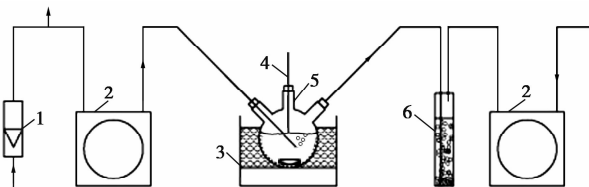
1 实验部分

1.1 实验装置与方法

1.1.1 醇胺溶液中二氧化碳浓度的测定

醇胺溶液中 pH 由胺浓度和 CO₂ 浓度共同决定^[10], 它的水溶液呈碱性, 在吸收 CO₂ 等酸性气体后, 溶液的 pH 会降低。在温度及胺浓度确定的情况下, 溶液的 pH 是固定的。用 pH 对溶液中 CO₂ 的浓度进行标定, 再通过测定醇胺溶液的 pH, 可以确定该溶液中 CO₂ 的含量, 这种方法具有方便、准确的特点。

本实验在 0.1 MPa、25℃ 的室温条件下进行, 将配好的吸收液 0.25 L 加入吸收反应器(见图 1), 反应器是 500 mL 的三口烧瓶, 一个口插入酸度计电极, 另两个分别作为进气口和出气口。将系统预热, 打开磁力搅拌器(固定转速), 用恒温水槽控制吸收液的温度。气体经减压调整后由转子流量计测量流速, 调节气体流量稳定后, 将气体通入反应气路, 同时用秒表计时, 记录 pH 计与进出口累积流量计的读数。实验后, 计算进出口气体流量差, 得到溶液吸收的 CO₂ 的量, 绘制出 CO₂ 含量与 pH 的关系图。当 10 min 内 pH 变化小于 0.01, 认为该溶液已达到饱和, 停止吸收实验。

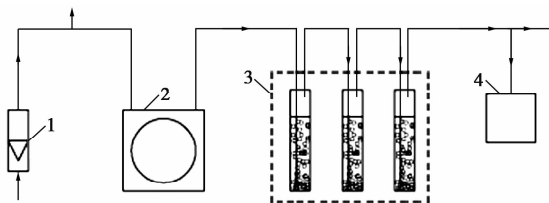


1—转子流量计; 2—干式累积流量计; 3—控速恒温水浴锅;
4—pH 计电极; 5—三口烧瓶; 6—装干燥剂的孟氏洗瓶

图 1 pH 标定实验装置图

1.1.2 填埋气分离模拟实验

利用甲烷和二氧化碳配制填埋模拟气, 用于分离吸收实验(装置见图 2)。操作过程与标定实验



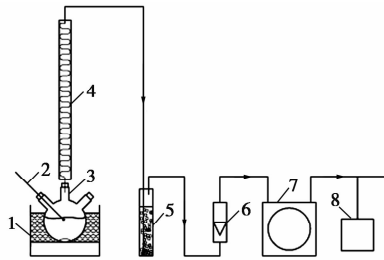
1—转子流量计; 2—干式累积流量计;
3—吸收模块(含 3 瓶装吸收液的孟氏洗瓶及冰水浴); 4—气袋

图 2 模拟填埋气分离吸收装置

大致相同, 在通气的时候打开秒表计时, 每隔一定时间用气袋收集经过吸收液后排出的气体, 并记录累积流量计的读数以此计算进气流量, 采用气相色谱测量气体组成。考察吸收剂种类和浓度、温度、转速对填埋气分离效果的影响。

1.1.3 CO₂ 再生实验

吸收饱和的醇胺溶液也称为富液, 用加热的方法可使 CO₂ 从富液中解吸逸出, 醇胺溶液变成再生贫液。再生实验^[14](装置见图 3)将富液放入三口烧瓶, 用控温油浴锅加热, 将反应器温度控制在一定范围, 保证每次实验的条件基本相同。反应开始前用排气泵将三口烧瓶内快速抽真空, 减少空气对收集气体组成的影响。



1—可调速控温油浴锅; 2—温度计; 3—三口烧瓶;
4—蛇形水冷凝管; 5—装干燥剂的孟氏洗瓶; 6—转子流量计;
7—干式累积流量计; 8—气袋

图 3 CO₂ 再生实验装置

再生液体逸出的气体组分, 通过冷凝管和硅胶干燥器, 除去挥发胺及水蒸气, 使用小量程的干式累积流量计计量出口气体的气量, 可以得到整个再生过程中的气体流量, 并结合转子流量计记录相应气流的瞬时速率。当流速小于 10 mL/min, 且累计流量计的读数基本保持不变时, 认为再生反应结束。反应结束后, 将再生溶液冷却至 25℃, 测量溶液的 pH, 确定溶液中 CO₂ 的含量。

所有实验均在 1.01 × 10⁵ Pa、20℃ 室温条件下进行, 统一取 0.25 L 醇胺饱和溶液进行油浴加热, 考察不同油浴温度、搅拌速度、溶液浓度及溶液种类对 CO₂ 再生性能的影响。

1.2 检测方法

气体产物使用日本岛津公司 GC-20B-1 气相色谱仪进行分析。采用 Thermal Detector(TCD) 检测器, 毛细管色谱柱 GS-Carbonplot(30 m × 0.530 mm × 3.001 μm), 柱温为 65℃, TCD 温度 80℃, TCD 电流为 60 mA, 以氦气(纯度 99.995%)作为载气, 载气压力 0.2 MPa, 载气流速 77.5 mL/min。通过标准气校正法将气体中 CH₄ 和 CO₂ 的成分再进行定量分析。

1.3 pH 与醇胺溶液中 CO₂ 浓度的关系

图 4 是实验测得不同浓度 MEA 溶液、DEA 溶液和 TEA 溶液吸收 CO₂ 的情况。

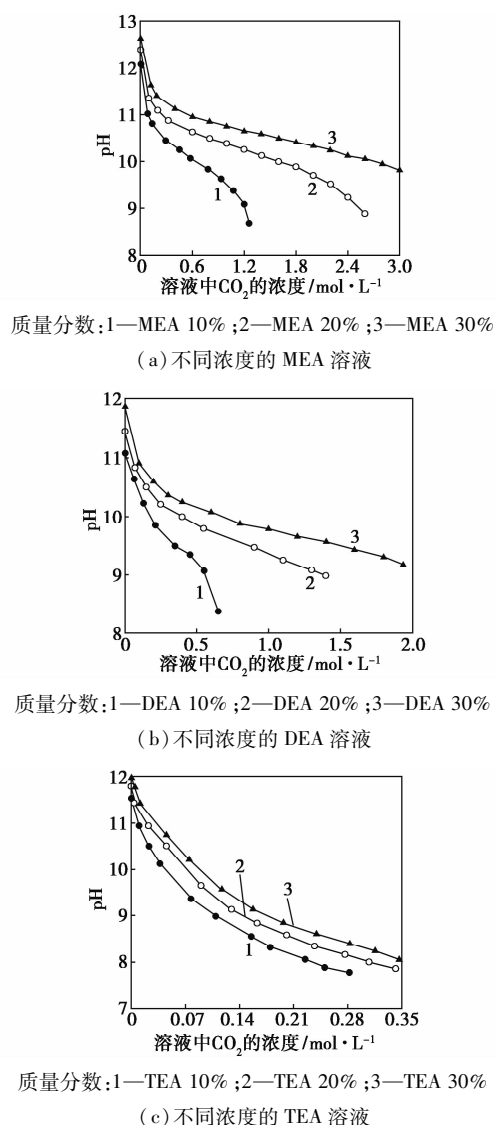


图 4 不同醇胺溶液中 CO₂ 含量与 pH 的关系

为了便于实际运用,本文中采用插值拟合法推算 pH 对应醇胺溶液中 CO₂ 浓度。

1.4 填埋气分离和 CO₂ 再生的性能指标

本研究中探索采用以下 2 个指标分别考察填埋气分离和 CO₂ 再生的性能。

(1) CO₂ 消耗率大于 90% 的处理气量

CO₂ 消耗率指当填埋气通过吸收剂时,被吸收剂吸收的 CO₂ 含量与填埋气中 CO₂ 初始含量的比率,实验发现当醇胺溶液通入一定量的模拟填埋气后,CO₂ 消耗率会开始下降,吸收能力开始下降,本研究中选择 CO₂ 消耗率大于 90% 的处理气量(以下简称处理气量)来衡量吸收剂的吸收性能。在相

同操作下对同种填埋气进行吸收分离实验,处理气量越大说明吸收剂的吸收性能越好。

(2) 再生效率

再生效率是指再生贫液和新鲜醇胺溶液吸收 CO₂ 含量的比值,再生效率越高证明吸收剂的再生性能越好,可以有效衡量 CO₂ 的再生性能^[13],而再生贫液的吸收量与富液的解吸量近似相等^[8],本实验中借助 pH 与醇胺溶液 CO₂ 浓度的对应关系,观测在特定操作条件下新鲜醇胺溶液吸收和解吸过程终点的 pH,推算出理想状态下(统一操作条件排除其他因素干扰)新鲜醇胺溶液吸收量和富液解吸量的比值,如式(1)所示。

$$\begin{aligned} \text{再生效率} &= \text{再生贫液吸收 CO}_2 \text{ 量} / \text{新鲜醇胺溶液吸收 CO}_2 \text{ 量} \\ &= \text{富液解吸 CO}_2 \text{ 量} / \text{新鲜醇胺溶液吸收 CO}_2 \text{ 量} \quad (1) \end{aligned}$$

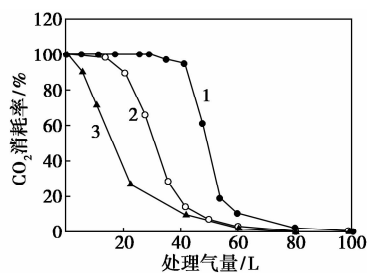
本次实验中所选的操作条件为:吸收装置见图 1,室温下通入纯 CO₂,气速为 0.1 L/min,当 10 min 内 pH 变化小于 0.01 则结束实验,记录吸收终点 pH;再生装置见图 3,选用以上制备的醇胺溶液再生,热源温度为 110℃,高速搅拌,当 10 min 内产气量小于 0.001 L 则结束实验,记录再生终点 pH。根据 CO₂ 含量与 pH 关系(图 4)推算出新鲜醇胺溶液吸收 CO₂ 量和富液解吸 CO₂ 量,进而计算再生效率。

2 结果与讨论

2.1 填埋气分离情况的讨论

2.1.1 吸收剂种类对分离效果的影响

25℃ 下控制进气速率为 0.1 L/min,通入模拟填埋气 $[V(\text{CO}_2)/V(\text{CH}_4) = 40/60]$,考察 20% MEA、20% DEA、20% TEA 分离填埋气的效果,将 CO₂ 消耗率作为纵坐标,处理气量作为横坐标,绘制吸收曲线如图 5 所示。



质量分数: 1—MEA 20%; 2—DEA 20%; 3—TEA 20%
吸收剂用量 0.3 L; 进气速率 0.1 L/min; 温度 298 K

图 5 不同醇胺溶液的吸收曲线

在以上实验条件下进行吸收实验,20% MEA、20% DEA、20% TEA 溶液的处理气量分别是 42.39、

20.26、5.70 L, 说明分离性能: MEA > DEA > TEA。伯胺(MEA)和仲胺(DEA)的吸收遵从两性离子机理, 性能差异可能在于氮原子上烷基的数量, 当烷基增多时, 由于空间效应, 两性离子生成困难, 反应就慢, 造成吸收速率低; 叔胺(TEA)虽然不遵从两性离子机理, 但具有空间位阻效应^[15], 吸收性能远远小于伯胺和仲胺。

2.1.2 吸收剂浓度对分离效果的影响

25℃下控制进气速率为0.1 L/min, 取0.3 L不同质量分数(10%、20%、30%)的MEA、DEA、TEA溶液分别进行吸收实验, 实验数据整理成表1。

表1 不同醇胺溶液的处理气量及其比例关系

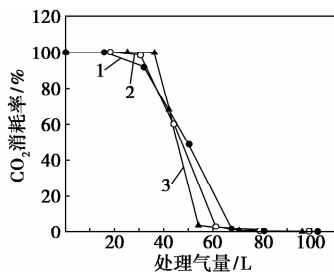
吸收液	处理气量/L	气量比值
MEA10%	25.24	1.00
MEA20%	42.39	1.68
MEA30%	50.13	1.99
DEA10%	10.81	1.00
DEA20%	20.26	1.87
DEA30%	30.37	2.81
TEA10%	4.79	1.00
TEA20%	5.70	1.19
TEA30%	5.82	1.22

注: ①吸收剂用量0.3 L, 吸收液温度25℃, 通气速率约0.1 L/min; ②气量比值指处理气量与质量分数10%对应溶液处理气量的比值。

从表1可看出醇胺溶液浓度增大, 处理气量都有所增大, 而受浓度影响程度为: DEA > MEA > TEA。有报道^[10]称增大MEA浓度会增大溶液黏度, 降低吸收速率, 其气量比值不能随浓度增大而成比例增长。TEA黏度相对较大和吸收反应速率常数相对较小^[16], 浓度对其影响较小。从以上分析可看出, 吸收剂浓度不是越大越好, 应综合考察吸收剂类型、浓度、黏度等因素对吸收性能的影响。

2.1.3 温度对分离效果的影响

图6对比20% MEA溶液在不同温度(25、35、



1—298 K; 2—308 K; 3—318 K

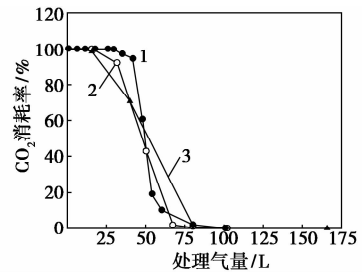
吸收剂为 MEA 20%; 吸收剂用量 0.3 L; 进气速率 0.4 L/min

图6 不同温度下醇胺溶液的CO₂吸收曲线

45℃)范围内分离填埋气的性能, 温度越高, 处理气量略微升高(分别是32.74、33.54、38.06 L), 但变化不大, 这可能是由于温度增加, 溶液的黏度减小^[10], 反应速率加快, 但是温度的影响并不明显, 提高温度增加操作成本, 推荐在常温下进行吸收操作。

2.1.4 气体流速对分离效果的影响

图7是体现不同气速(0.1、0.4、0.8 L/min)下20% MEA溶液吸收性能的实验曲线。可看出气体流速增大, 气体未能充分反应而通过吸收液, 降低处理气量(分别是42.39、32.74、23.41 L), 因此控制通气速率, 或改进气液接触方式, 能较好地实现CO₂的吸收操作。



1—0.1 L/min; 2—0.4 L/min; 3—0.8 L/min

吸收剂为 MEA 20%; 吸收剂用量 0.3 L; 温度 298 K

图7 醇胺溶液在不同气流速度下的CO₂吸收曲线

2.2 CO₂再生情况的讨论

2.2.1 加热温度对CO₂再生的影响

设置不同油浴温度如表2所示, 实验中发现加热源温度超过100℃, 解吸速率明显加快, 再生气量增多, 再生效率增大。当油浴温度超过110℃时, 再生终温不会一直上升, 而恒定在一个固定的值, 通过以后的实验发现, 这个再生终温与溶液的种类、浓度及搅拌速度相关, 都在100℃左右, 因此醇胺溶液再生的加热温度设在110℃比较合适。

表2 不同油浴温度下 MEA20% 饱和溶液再生情况表

油浴温度/℃	再生终温/℃	吸收前 pH	吸收后 pH	解吸后 pH	再生效率/%
75	75	12.39	8.88	8.95	1.5
95	95	12.39	8.88	9.20	7.0
110	102	12.39	8.88	10.27	55.0

注: 高速搅拌。

2.2.2 搅拌速度对CO₂再生的影响

表3显示了搅拌速度对再生终温和再生效率均有影响。实验中搅拌速率由磁力搅拌器的调速旋钮控制, 当调速旋钮由低档调向中档, 再生终温和再生

气量都有明显的提高,再生速率加快。这可能是由于搅拌速度提高,传热效率提高,受热均匀,同时加速微观分子的碰撞,提高反应的速率及反应的程度。因此增大搅拌速度可提高醇胺溶液的再生质量。而由中档调成高档时,再生气量的增加不明显,可见当传热比较均匀时,再增大搅拌速度不能再明显影响醇胺解吸速率。实际操作中应选择适当的搅拌速率,既可保证快速完成二氧化碳的解吸,也不浪费多余的能量。

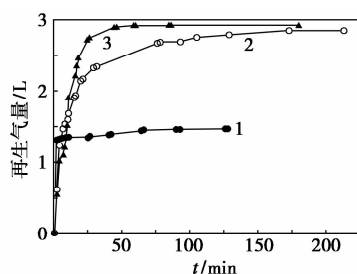
表 3 不同搅拌速度下 MEA10% 溶液的再生情况

搅拌速度	再生终温/℃	吸收前 pH	吸收后 pH	解吸后 pH	再生效率/%
低速	96	12.06	8.67	9.48	19.3
中速	99	12.06	8.67	9.83	35.6
高速	101	12.06	8.67	9.86	40.2

注:加热源温度 110℃。

2.2.3 吸收剂种类对 CO₂ 再生的影响

分别对 10% MEA、10% DEA、10% TEA 饱和溶液进行再生实验,图 8 为加热时间和再生气量的关系图。前 25 min 再生速率非常快几乎成直线增长,其后气体释放速率逐渐减少。



1—TEA 10%; 2—MEA 10%; 3—DEA 10%
吸收剂用量 0.25 L;加热温度 383 K;高速搅拌

图 8 不同醇胺溶液的再生曲线

结合表 4 中再生效率的数据,可以看出解吸速率与吸收速率相反,再生性能:TEA > DEA > MEA,实际应用中应综合吸收和再生性能选择合适的吸收剂。

2.2.4 吸收剂浓度对 CO₂ 再生的影响

表 4 列举了各溶液再生前后的 pH、再生终温和再生效率。从数据中可看出,当溶液浓度增大,TEA 的再生效率略微降低,而 DEA 和 MEA 的再生效率都有所提高。另外,随着浓度提高,所需的再生终温越高,但相差不大。再生反应后,pH 不能恢复到吸收前的 pH,说明仍有一部分 CO₂ 与醇胺溶液紧密

结合,无法继续再生。

表 4 不同浓度醇胺溶液的再生情况表

对象	再生终温/℃	吸收前 pH	吸收后 pH	解吸后 pH	再生效率/%
MEA10%	101	12.06	8.67	9.60	40.2
MEA20%	102	12.39	8.88	10.11	55.0
MEA30%	104	12.63	9.81	10.54	58.9
DEA10%	102	11.08	8.37	10.25	80.2
DEA20%	103	11.45	8.98	10.51	89.3
DEA30%	105	11.87	9.18	10.74	92.1
TEA10%	102	11.53	7.80	10.55	92.4
TEA20%	103	11.79	7.86	10.75	90.5
TEA30%	104	11.98	8.05	10.87	88.7

注:高速搅拌,加热源温度 110℃。

本研究中仅考察了 MEA/DEA/TEA 三种醇胺溶液的吸收和解吸的性能,但可为考察其他醇胺溶液分离回收性能的提供简易可行的实验评价方法。

3 结语

(1)醇胺溶液可以有效地分离垃圾填埋气中的甲烷和二氧化碳。温度对吸收性能影响不明显,改进气液接触方式有利于吸收操作;加热温度提高可增大再生效率,但每种溶液都有恒定的再生终温,一般在 100℃ 左右,适度增大搅拌速度,提高传热效率可提高醇胺溶液的再生效率;

(2)用 CO₂ 消耗率大于 90% 的处理气量可衡量吸收剂分离填埋气的性能,3 种吸收剂分离性能的表现:MEA > DEA > TEA;吸收剂浓度增大,处理气量都有所增大,而受浓度影响程度为:DEA > MEA > TEA。

(3)再生效率可衡量吸收剂的再生性能,3 种醇胺溶液的再生性能:TEA > DEA > MEA,当吸收剂浓度增大,TEA 的再生效率略微降低,而 DEA 和 MEA 的再生效率都有所提高。

参考文献

- [1] 吴满昌,孙可伟,张海东.城市生活垃圾沼气的净化技术进展[J].现代化工,2005,85(S1):111-114.
- [2] Ruf A, Egli S. Application of gas separation shown through the purification of landfill gas[J]. Gas Separation & Purification, 1988, 2(2):90-94.
- [3] 陈家军,张相锋.垃圾填埋气(LFG)的净化及利用前景[J].新材料产业,2007,5:41-44.

(下转第 48 页)

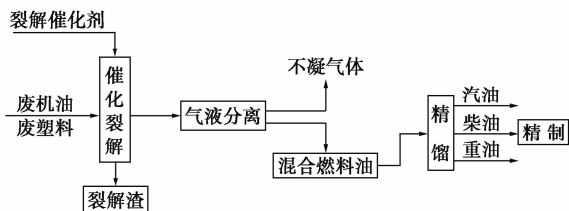
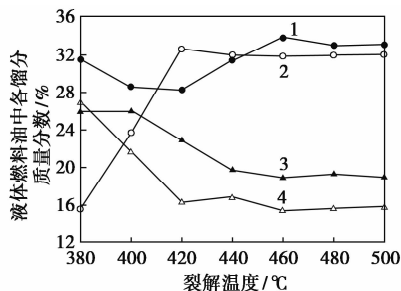


图 1 废塑料与废机油共催化裂解制取燃料油的实验流程图



1—汽油量;2—轻柴油量;3—重柴油量;4—重油量

图 3 裂解温度对燃料油各馏分组成的影响

2 结果与讨论

2.1 裂解温度对产物组成的影响

采用不同温度,在废机油与混合废塑料比(油固比)为 1.5, ZSM-5/50H 分子筛催化剂条件下进行裂解实验,得到不同温度下裂解产物组成变化如图 2、图 3。

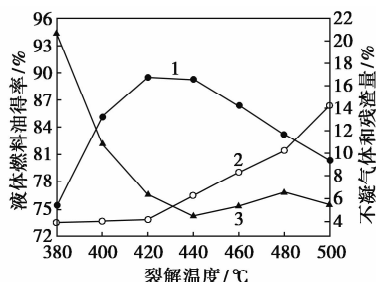
在 380℃ 时,裂解反应没有进行完全,表现为重油得率较多;在 420 ~ 440℃ 时,裂解反应基本进行充分,燃料油得率达到最大,其中汽油和轻柴油馏分

最大;当继续升温时,部分燃料油被进一步裂解成小分子而使不凝气体增加,降低了燃料油的得率。实验数据表明,420 ~ 440℃ 裂解温度最为适宜。

2.2 油固比对产物组成的影响

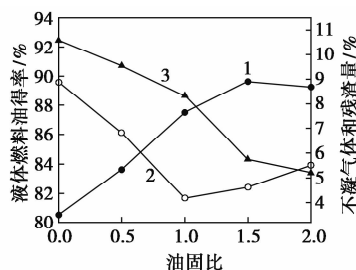
采用不同油固比,在 420℃、ZSM-5/50H 分子筛催化剂条件下进行裂解实验,得到相应条件下的裂解产物组成变化如图 4、图 5。

从图 4 可知燃料油的得率随油固比上升先升后不变,不凝气体(低碳链烷烃)先降后基本不变,而



1—液体燃料油量;2—不凝气体量;3—残渣量

图 2 裂解温度对燃料油及不凝气体和残渣量的影响



1—液体燃料油量;2—不凝气体量;3—残渣量

图 4 油固比对燃料油及不凝气体和残渣量的影响

(上接第 46 页)

[4] 周红军,吴全贵. 垃圾填埋气的回收利用[J]. 环境保护,2001, 8:44-46.
 [5] 袁怡祥,谭春青,马人熊,等. 填埋气综合利用的途径[J]. 能源与环境,2009,5:79-80.
 [6] 梁军. 三种脱碳工艺的比较[J]. 山西化工,2007,27(3):61-63.
 [7] Lin C-C, Lin Y-H, Tan C-S. Evaluation of alkanolamine solutions for carbon dioxide removal in cross-flow rotating packed beds[J]. Journal of Hazardous Materials,2010,175(1/2/3):344-351.
 [8] Gaur A, Park J-W, Maken S, et al. Landfill gas (LFG) processing via adsorption and alkanolamine absorption[J]. Fuel Processing Technology,2010,91(6):635-640.
 [9] Rivera-Tinoco R, Bouallou C. Comparison of absorption rates and absorption capacity of ammonia solvents with MEA and MDEA aqueous blends for CO₂ capture[J]. Journal of Cleaner Production, 2010,18(9):875-880.

[10] 董长勋. pH 法用于乙醇胺吸收二氧化碳的研究[J]. 哈尔滨商业大学学报:自然科学版,2003,19(6):687-690.
 [11] 谭大志,范文杰,张永春,等. DEA 溶液吸收/再生 CO₂ 的研究[J]. 化学工程师,2005,116(5):62-64.
 [12] Yeh J T, Resnik K P, Rygle K, et al. Semi-batch absorption and regeneration studies for CO₂ capture by aqueous ammonia[J]. Fuel Processing Technology,2005,86(14/15):1533-1546.
 [13] 翟彦青,徐新,蒋力培. 醇胺溶液吸收二氧化碳的实验研究[J]. 化学通报,2009,7:660-664.
 [14] 卢敏,武斌,朱家文,等. 醇胺有机溶液吸收和解吸 CO₂ 的研究[J]. 石油与天然气化工,2006,3(2):117-118,124.
 [15] 宿辉,崔琳. 二氧化碳的吸收方法及机理研究[J]. 环境科学与管理,2006,31(8):97-99.
 [16] Mandal B P, Guha M, Biswas A K, et al. Removal of carbon dioxide by absorption in mixed amines: Modelling of absorption in aqueous MDEA/MEA and AMP/MEA solutions[J]. Chemical Engineering Science,2001,56(21/22):6217-6224. ■