

# 超重力法脱除海上油田伴生气中 CO<sub>2</sub> 的研究

黄伟莉<sup>1</sup>, 张帮亮<sup>2</sup>, 刘华标<sup>2</sup>, 毛宁<sup>2</sup>

(1. 广东石油化工学院化学工程学院, 广东 茂名 525000;

2. 广东石油化工学院石油工程学院, 广东 茂名 525000)

**摘要:**用容积7 L的气/液逆流反应超重力机, 强化 TEA 水溶液单次瞬时吸收常压, 进气量为 500 mL/min, 含 CO<sub>2</sub> 体积分数为 6% 的模拟海上油田伴生气, 优化出 CO<sub>2</sub> 脱除率达 80.5% 的单一 TEA 型吸收剂的处理条件: TEA 质量分数为 20%, 超重力机转速为 2 000 r/min, 温度为 30℃, 气体体积比为 10:1。为了提高 CO<sub>2</sub> 脱除率, 在 TEA 质量分数为 20% 的水溶液中添加不同质量分数的 NaOH, 组成质量分数为 0~20% 的 NaOH 与 20% TEA 的复合吸收液, 进行了 CO<sub>2</sub> 的脱除实验。结果表明: 5% NaOH + 20% TEA 的复合液对 CO<sub>2</sub> 的单次瞬时脱除率达 98% 以上, 明显高于单一 TEA 溶液对 CO<sub>2</sub> 的脱除率。在 180~480 min 内, 该复合液对 CO<sub>2</sub> 的连续脱除率明显高于 5% NaOH 和 20% TEA 2 种单一吸收剂在相同的时间内对 CO<sub>2</sub> 的脱除率之和, 且无 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 结晶析出过多而阻塞管道的现象。

**关键词:**超重力; 三乙醇胺; CO<sub>2</sub> 吸收; 复合液; 海上油田伴生气

**中图分类号:** TQ028.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2017)03-0113-04

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2017.03.027

## Removal of CO<sub>2</sub> from offshore associated gas with supergravity method

HUANG Wei-li<sup>1</sup>, ZHANG Bang-liang<sup>2</sup>, LIU Hua-biao<sup>2</sup>, MAO Ning<sup>2</sup>

(1. College of Chemical Engineering, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China;

2. College of Petroleum Engineering, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China)

**Abstract:** The CO<sub>2</sub> removal effect from simulated offshore associated gas with 6% CO<sub>2</sub> (volume fraction) and 500 mL/min gas inflow under atmospheric pressure is studied by using gas/liquid reflux supergravity machine to strengthen a single instantaneous absorption process of aqueous solution of TEA. When the CO<sub>2</sub> removal rate is 80.5%, the optimum treatment conditions for single aqueous solution of TEA are: 20% mass fraction of TEA, 2000 r/min of supergravity rotating speed, 30℃ of temperature and 10:1 of the gas-liquid volume ratio. In order to enhance CO<sub>2</sub> removal rate, CO<sub>2</sub> removal experiments from simulated offshore associated gas are carried out with a mixture complex solution containing 0~20% NaOH (mass fraction) and 20% TEA (mass fraction). The results show that complex solution prepared by adding 5% NaOH (mass fraction) into 20% TEA (mass fraction) has the single instantaneous CO<sub>2</sub> removal rate above 98%, which is higher than that of TEA solution. The continuous CO<sub>2</sub> removal rate of the complex solution during 180~480 min is higher than the sum of the separate solution of 5% NaOH (mass fraction) and 20% TEA (mass fraction). Moreover, there is no pipe blockage phenomena caused by excessive precipitation of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> crystal.

**Key words:** supergravity; TEA; CO<sub>2</sub> absorption; complex solution; offshore associated gas

海上油田伴生气的主要成分是低碳烷烃, 由于没有建立管输系统, 很大一部分海上油田伴生气被冷放空或烧掉。近年来, 为了减少油田开发中的碳排放和能源浪费, 考虑将其回收利用<sup>[1-2]</sup>。针对海上油田伴生气产气量小, 气量变化大, 可采年限有限等特点, 综合比较发现, LNG 和 CNG 技术较为适用于处理海上油田伴生气<sup>[3-4]</sup>。但是, 海上油田伴生气通常含 CO<sub>2</sub> 酸性气体, 容易引起管路和装置的腐蚀<sup>[5]</sup>, 而且 CO<sub>2</sub> 容易在低温冷箱中冻结换热器<sup>[6]</sup>、阻塞仪表和管线<sup>[7]</sup>, 增加生产过程的安全隐患。在进行天然气液化装置设计时, 应确定适宜伴生气净化工艺。

考虑到海上平台场地小的特点, 笔者采用强化“三传一反”过程、占地面积小的超重力机, 以 TEA、TEA/NaOH 复合水溶液作吸收剂, 将超重力技术与化学吸收结合起来<sup>[8]</sup>, 提高气液间的传质速率<sup>[9-10]</sup>。实验过程中采用体积分数为 6% 的 CO<sub>2</sub> 混合气(其余为 N<sub>2</sub>)模拟渤海辽东湾海域某油田伴生气<sup>[6]</sup>, 通过实验研究优化超重力法 TEA/NaOH 复合液脱除海上油田伴生气中 CO<sub>2</sub> 的工艺操作条件。

## 1 实验

### 1.1 试剂和仪器

主要实验试剂与仪器如表 1 所示。

表 1 实验试剂与仪器

名称	规格/型号	生产厂家
TEA	分析纯	天津市百世化学试剂有限公司
NaOH	分析纯	西陇化工股份有限公司
N <sub>2</sub>	体积分数≥99.99%	茂名市民兴气体有限公司
CO <sub>2</sub>	体积分数≥99.99%	肇庆市高能达化工有限公司
超级恒温槽	THS-10	宁波天恒仪器厂
蠕动泵	YX100-BE	英翔环保流体科技有限公司
可编程控制式流变仪	LVDV-III Ultra	美国 Brookfield 公司
气相色谱仪	福立 9790	杭州伽钛科学仪器有限公司
超重力机	结构参数见表 2	自行设计制造

表 2 超重力机结构参数

容积/ L	填料 材质	填料材 质直径/ mm	转子 内径/ m	转子 外径/ m	轴向 高度/ m	空隙 率/%	超重力 机转速/ (r·min <sup>-1</sup> )
7	纱网	0.50	0.04	0.23	0.10	0.81	500~2000

### 1.2 实验方法

将 CO<sub>2</sub> 与 N<sub>2</sub> 分别按 30 mL/min 和 470 mL/min 的流速通入气体混合罐,配制成 CO<sub>2</sub> 体积分数为 6% 的模拟伴生气。然后将模拟伴生气通入到超重力机内,稳定通气 15 min 后,启动超重力机,通过变频调速器调整转子转速,开启蠕动泵,按设定流速将超级恒温槽内 500 mL 吸收液打入超重力机,进行气液反应,并定期用气袋收集反应尾气。实验工艺流程如图 1 所示。

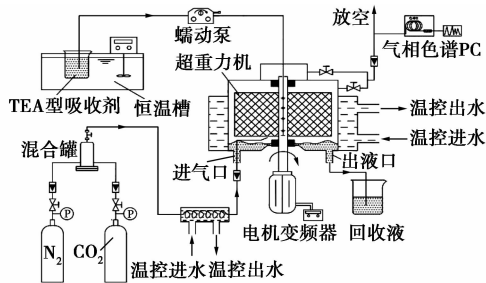


图 1 超重力法强化气液吸收反应实验工艺流程

### 1.3 分析与测定方法

#### 1.3.1 CO<sub>2</sub> 气体分析方法

采用气相色谱法,操作条件: Chromosorb-102 填充柱,Φ3 mm×3 m;气速为 30 mL/min 的 H<sub>2</sub> 为载气;TCD 检测器,温度为 200℃,桥流为 130 mA;检测注气量为 0.3 mL,以 3℃/min 的升温速度由 50℃ 升温至 160℃。检测混合气中的 CO<sub>2</sub> 脱除率的

计算式如下:

$$\eta = [(V_0 - V_1)/V_0] \times 100\%$$

式中:η 为 CO<sub>2</sub> 脱除率,%;V<sub>0</sub> 为反应前 CO<sub>2</sub> 体积分数,%;V<sub>1</sub> 为反应后 CO<sub>2</sub> 体积分数,%。

#### 1.3.2 CO<sub>2</sub> 吸收液表观黏度测试法

开启 Brookfield LVDV-III Ultra 流变仪,调零点,安装 LV<sub>1</sub> 转子于玻璃水循环夹套杯内。开启水浴恒温槽外循环,待温度达到设定值并且稳定 5 min 后,量取 170 mL 预先恒温的吸收液于夹套杯内,稳定 2 min。LV<sub>1</sub> 转子在 5 r/min 转速下测量吸收液的表观黏度值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 超重力强化 TEA 水溶液脱除伴生气中 CO<sub>2</sub> 的研究

#### 2.1.1 超重力机转速对伴生气中 CO<sub>2</sub> 脱除性能的影响

在温度为 40℃,气液体积比为 10,TEA 溶液质量分数为 20% 的条件下,考察转速对 CO<sub>2</sub> 脱除率的影响,结果如图 2 所示。

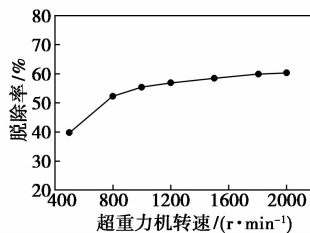


图 2 转速对 CO<sub>2</sub> 脱除率的影响

由图 2 可知,随着超重力机转速从 500 r/min 增加到 800 r/min,CO<sub>2</sub> 的脱除率由 39.8% 迅速增加到 52.4%。但在 1 000~2 000 r/min 的转速范围内,CO<sub>2</sub> 的脱除率仅由 55.3% 缓慢增加到 60.3%。这是因为在超重力场中,由于超重力机转速的增加,通入的 TEA 水溶液被旋转填料切割分散成的液滴尺寸和液膜厚度逐渐减小,加大了气液有效接触面积,强化了传质,提高了 CO<sub>2</sub> 的脱除率。但是当转速增大到一定值后,继续提高转速,液膜的厚度变化很小,CO<sub>2</sub> 与 TEA 液膜接触面积增加很少;另外,转速的增加使得液体在转子内停留时间缩短,不利于气液传质,因此,1 000~2 000 r/min 的转速范围内,CO<sub>2</sub> 的脱除率变化不大。但是,考虑到 TEA 黏度大的特性,取转速为 2 000 r/min 的强分散条件进行实验,以期尽量减小吸收液黏度的影响。

### 2.1.2 吸收反应温度对伴生气中CO<sub>2</sub>脱除性能的影响

在转速为2 000 r/min,气/液体积比为10,TEA溶液质量分数为20%的条件下,考察吸收温度对CO<sub>2</sub>脱除率的影响,结果如图3所示。

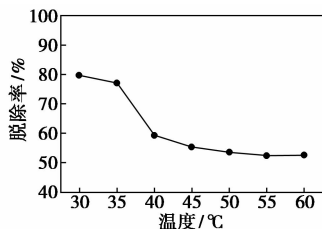
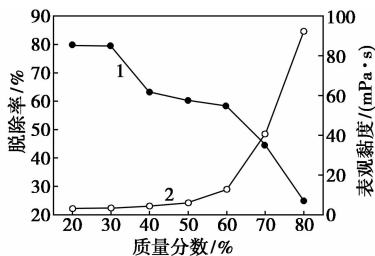


图3 反应温度对CO<sub>2</sub>脱除率的影响

从图3可知,吸收反应温度从30℃升高到35℃时,CO<sub>2</sub>的脱除率无明显变化;继续增加反应温度到40℃,CO<sub>2</sub>的脱除率由79.2%迅速下降到59.3%;吸收温度从40℃提高到60℃时,CO<sub>2</sub>的脱除率呈缓降趋势。综上分析,在本实验条件下,温度超过35℃以后,不利于TEA水溶液脱除CO<sub>2</sub>。虽然升温能够降低TEA水溶液黏度,有利于气液传质。然而,TEA水溶液呈弱碱性,吸收酸性气体过程是可逆的放热反应,升高温度,反应逆向进行,同时,随着温度升高,CO<sub>2</sub>气体在水中的溶解度减小,同样不利于CO<sub>2</sub>的吸收。

### 2.1.3 TEA水溶液质量分数对伴生气中CO<sub>2</sub>脱除性能的影响

在吸收温度为30℃,气/液体积比为10,超重力机转速为2 000 r/min条件下,考察TEA质量分数对溶液黏度及CO<sub>2</sub>脱除率的影响,结果如图4所示。为了保证TEA溶液对CO<sub>2</sub>的吸收容量和提高吸收效率,TEA质量分数以20%为起始值。



1—吸收率;2—表观黏度

图4 TEA水溶液质量分数对CO<sub>2</sub>脱除率和表观黏度的影响

由图4可知,随着TEA溶液质量分数的增加,CO<sub>2</sub>的脱除率降低,质量分数为20%的TEA溶液具有相对高的脱除率,为80.5%。而质量分数为80%

的TEA溶液对CO<sub>2</sub>的脱除率仅为24.8%。原因是气液反应关键部件之一是超重力机内的喷淋管,该管所开孔径仅为0.8 mm。随着TEA质量分数的增加,溶液黏度增大,从喷淋管孔喷射出的液体初速度慢,撞击到转子内端填料表面而被分散的性能差。同样,高黏度的TEA溶液在转子床层内被剪切、拉伸而分散的性能差,液体与气体的接触面积减小,导致对CO<sub>2</sub>脱除率下降。

### 2.1.4 气液体积比对伴生气中CO<sub>2</sub>脱除性能的影响

在超重力机转速为2 000 r/min,温度为30℃,TEA溶液质量分数为20%条件下,考察了气液体积比对CO<sub>2</sub>脱除率的影响,结果如图5所示。

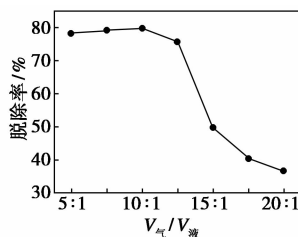


图5 气液体积比对CO<sub>2</sub>脱除率的影响

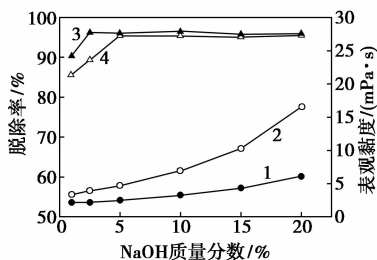
由图5可知,当气液体积比为10时,CO<sub>2</sub>的脱除率为80.5%;气液比大于10后,CO<sub>2</sub>的脱除率明显下降。这是因为相同操作条件下,随着气液体积比的增加,液体流量的减小,床层内液膜更新速度降低,甚至床层得不到完全润湿,不利于CO<sub>2</sub>吸收。相反,减小的气液体积比意味着吸收液量增加,在旋转条件下更加有利于液体润湿和充满整个填料,进而形成了极大的气液接触面积,提高了传递效率,提高对CO<sub>2</sub>气体的脱除率。但是气液体积比小于10后,床层内单位体积内液膜、液丝和液滴的数量变得很大,增加了气体阻力,阻碍了气液间的传质,CO<sub>2</sub>脱除率略有降低。

## 2.2 TEA/NaOH复合液超重力法脱除海上伴生气中CO<sub>2</sub>的研究

### 2.2.1 20% TEA中不同质量分数NaOH对CO<sub>2</sub>脱除率的影响

基于2.1实验结果,因采用超重力机强化TEA吸收剂对CO<sub>2</sub>单次脱除效率不超过85%,在超重力机转速为2 000 r/min,吸收温度为30℃,气/液体积比为10,TEA质量分数为20%的条件下,考察NaOH质量分数对CO<sub>2</sub>脱除率的影响,同时与不同质量分数的NaOH水溶液对CO<sub>2</sub>的脱除率进行对比,并测定了相应条件下的溶液黏度,结果如图6

所示。



1—NaOH 表观黏度;2—NaOH + 20% TEA 表观黏度;  
3—NaOH 脱除率;4—NaOH + 20% TEA 脱除率

图 6 NaOH 质量分数对 CO<sub>2</sub> 的脱除率和表观黏度的影响

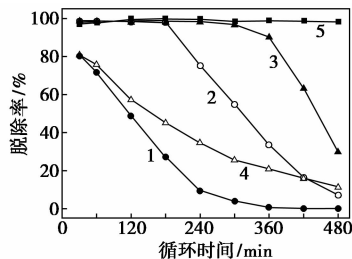
由图 6 可知,不同质量分数 NaOH 溶液对 CO<sub>2</sub> 的脱除率均高于 20% TEA 与 NaOH 组成的复合液,原因主要是受到吸收液黏度的影响。复合液的黏度明显高于 NaOH 溶液的黏度,吸收液黏度高不利于液体在喷射管内喷射,不利于旋转填料将液滴分散成丝、膜,因而黏度相对较低的 NaOH 溶液对 CO<sub>2</sub> 脱除效果好。从图 6 还可以看出,不论是复合液还是单独的 NaOH 溶液,NaOH 质量分数超过 5% 后,吸收液对 CO<sub>2</sub> 脱除率均达 95% 以上。20% TEA + 5% NaOH 复合液对 CO<sub>2</sub> 的脱除率与 5% NaOH 吸收液接近。原因是 NaOH 质量分数超过 5% 后,才能保证在瞬时更新含有的 20% TEA 水溶液的界面上有足够的 OH<sup>-</sup> 与接触到的 CO<sub>2</sub> 快速反应。这也说明,20% TEA 与 NaOH 复合吸收液对 CO<sub>2</sub> 的高的单次瞬时脱除率主要是由 NaOH 贡献的。考虑到复合液中高质量分数的 NaOH 在连续吸收 CO<sub>2</sub> 的反应中有可能产生过多 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 结晶而带来不利影响,优选添加 5% NaOH 的 20% TEA 复合液。

### 2.2.2 20% TEA 与 NaOH 的复合液循环连续反应对 CO<sub>2</sub> 脱除率的影响

在单次吸收实验的基础上,进行了 5 种吸收液循环连续脱除 CO<sub>2</sub> 的实验,结果如图 7 所示。

由图 7 可知,随着循环吸收的进行,单一 TEA 溶液对 CO<sub>2</sub> 的脱除率逐渐下降,直至饱和。含有 NaOH 的吸收液对 CO<sub>2</sub> 的脱除率较高,连续反应 180 min 对 CO<sub>2</sub> 的脱除率仍高达 98% 以上。但在 180 min 后,5% NaOH 的吸收液对 CO<sub>2</sub> 的脱除率几乎呈直线下降。20% TEA + 5% NaOH 复合吸收液循环连续反应 300 min 对 CO<sub>2</sub> 的脱除率仍保持 97% 的高位,高于单独 5% NaOH 吸收液和单独 20% TEA 吸收液对 CO<sub>2</sub> 的脱除率之和(84.3%)。虽然 360 min 后,20% TEA + 5% NaOH 复合吸收液脱除

CO<sub>2</sub> 的效率开始迅速下降,但吸收率数值仍然明显高于前两者之和。在 CO<sub>2</sub> 的通气量和吸收液体积相同的情况下,20% TEA + 5% NaOH 复合吸收液能够长时间保持对 CO<sub>2</sub> 高的瞬时脱除率,也意味着其对 CO<sub>2</sub> 的脱除总量也优于前 2 种吸收液。15.7% NaOH 在循环时间 480 min 内 CO<sub>2</sub> 脱除率一直保持在 98% 以上,但是反应中生成的 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 晶体逐渐增多,在循环反应 400 min 左右,出现超重力机管道堵塞现象。



1—20% TEA;2—5% NaOH;3—20% TEA + 5% NaOH;  
4—29.3% TEA;5—15.7% NaOH

注:4<sup>#</sup>和 5<sup>#</sup>吸收液的数值为 TEA 和 CO<sub>2</sub> 按照 1:1 进行反应,NaOH 和 CO<sub>2</sub> 按照 2:1 进行反应,通过物质的量建立关联,以 5% NaOH + 20% TEA 为基础,将 5% NaOH 和 20% TEA 交互转换成单一吸收剂的浓度。

图 7 循环时间对 CO<sub>2</sub> 脱除率的影响

利用空间体积不到 0.25 m<sup>3</sup> 超重力机,强化 500 mL 的 20% TEA + 5% NaOH 吸收剂,循环反应处理进气量 500 mL/min、体积分数为 6% 的 CO<sub>2</sub> 的模拟海上油田伴生气,达到连续 300 min 内对 CO<sub>2</sub> 的脱除率保持 97% 以上的效果。

## 3 结论

超重力法强化 TEA 水溶液单次瞬时脱除 CO<sub>2</sub> 的优化条件是:气液体积比为 10,反应温度为 30℃,TEA 溶液质量分数为 20%,超重力机转速为 2 000 r/min,此条件下 TEA 溶液对 CO<sub>2</sub> 的脱除率达到 80.5%。

在超重力机中,使用 20% TEA + 5% NaOH 的复合吸收液对 CO<sub>2</sub> 的脱除率较 5% NaOH 和 29.3% TEA 2 种单一吸收液高,循环吸收 360 min,复合液对 CO<sub>2</sub> 的脱除率仍维持在 90% 以上。20% TEA + 5% NaOH 复合吸收液虽然对 CO<sub>2</sub> 的脱除率低于 15.7% 的 NaOH 溶液的数值,但是复合吸收液在整个吸收过程中无 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 结晶析出过多而阻塞管道的现象。

色沉淀后用氨水调节 pH,在室温下搅拌 1 h。加入不同量的  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  粉末,继续超声 2 h。将混合液倒入反应釜在 160℃ 下反应 12 h,取出样品,洗涤离心,80℃ 干燥后,得到  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  的质量分数分别为 5%、10%、15%、20%、25% 的  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{BiOI}$ 。

### 1.3 光催化降解实验

光催化反应于自制的反应容器中进行,光源为球形氙灯,溶液与光源的距离为 25 cm。将 0.1 g  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{BiOI}$  和 100 mL 10 mg/L MB 溶液置于反应器中,避光磁力搅拌 1 h,达到吸附平衡后,打开光源,每隔 10 min 取样,通过外磁场作用分离后取上清液,测其吸光度。计算其降解率 ( $D$ ):

$$D = [(A_0 - A_t)/A_0] \times 100\%$$

式中: $A_0$  为目标降解溶液未降解时的吸光度; $A_t$  为降解  $t$  时间后溶液的吸光度。

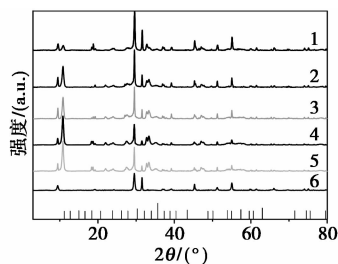
### 1.4 样品的表征

利用日本理学生产的 Dmax2000/PC 型 X-射线粉末衍射仪对样品进行 XRD 测试,分析其晶体结构和相组成;利用日本 GEOS 公司生产的 JSM-7500F 扫描电子显微镜对样品的微观形貌进行观察;UV-Vis DRS 测试在装有 60 mm 积分球的 UV-2550 型紫外-可见分光光度计上进行,以  $\text{BaSO}_4$  (分析纯) 作参比,测定波长为 200 ~ 800 nm,波长扫描间隔为 0.5 nm;利用德国布鲁克 AXS 公司生产的 JSM-7500F/QUANTAX 型能谱元素分析仪测量样品的组成;利用美国 Quantum Design 公司生产的 MPMS-XL-7 型交流直流磁化率测试仪对样品的磁化性能进行表征。

## 2 光催化剂的表征

### 2.1 XRD 分析

不同质量分数的  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  磁性复合样品的 XRD 谱图如图 1 所示。



1—5%  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{BiOI}$ ; 2—10%  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{BiOI}$ ;  
3—15%  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{BiOI}$ ; 4—20%  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{BiOI}$ ;  
5—25%  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{BiOI}$ ; 6—BiOI

图 1 光催化剂的 XRD 图谱

由图 1 可以看出,所制备的  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{BiOI}$  样品的所有特征衍射峰都与  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  的标准卡片 (PDF# 25-1402)、BiOI 的标准卡片 (PDF# 10-0445) 相吻合。未发现其他晶相和杂质的 XRD 衍射峰,说明合成了纯度较高的  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{BiOI}$  复合光催化剂。

### 2.2 SEM 分析

$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  和  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{BiOI}$  复合材料的 SEM 图如图 2 所示。从图 2(a) 中可以看出,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  是粒径为 10 nm 左右大小不同的纳米球形。图 2(b) 中片状 BiOI 表面有小球形颗粒,结合 XRD 分析可知,这些球形颗粒为  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 。因此,  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  成功复合在 BiOI 表面,其粒径为 20 ~ 100 nm。

(上接第 116 页)

### 参考文献

- [1] Solov'yanov A A. Associated petroleum gas faring: Environmental issues[J]. Russian Journal of General Chemistry, 2011, 81(12): 2531-2541.
- [2] Braginskii O B, Chernavskii S Y. Utilization of associated petroleum gas: Economic issues[J]. Russian Journal of General Chemistry, 2011, 81(12): 2542-2546.
- [3] Bian H J, Xu W D, Li X X, et al. A novel process for natural gas liquids recovery from oil field associated gas with liquefied natural gas cryogenic energy utilization[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2011, 19(3): 452-461.
- [4] Li Q Y, Ju Y L. Design and analysis of liquefaction process for offshore associated-gas resources[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(16): 2518-2525.
- [5] Moiseeva L S. Carbon dioxide corrosion of oil and gas field equipment[J]. Protection of Metals, 2004, 41(1): 76-83.
- [6] 范庆虎, 李红艳, 王洁, 等. 海上天然气液化装置中酸性气体的脱除技术[J]. 天然气工业, 2010, 30(7): 93-97.
- [7] 王天明, 邵拥军, 王春燕, 等. 中小型液化天然气装置净化和液化工艺研究[J]. 石油与天然气化工, 2007, 36(3): 191-193.
- [8] 陈建峰. 超重力技术及应用: 新一代反应与分离技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 1-11.
- [9] 邢银全, 刘有智, 王其仓, 等. 超重力法脱除合成氨原料气中二氧化碳的实验研究[J]. 天然气化工(C1 化学与化工), 2008, 33(1): 29-33.
- [10] 高升, 刘学军, 王广全, 等. 喷射式超重力旋转床吸收  $\text{CO}_2$  的研究[J]. 化工进展, 2011, 30(S1): 822-824. ■