

含三嗪环阴离子 Gemini 表面活性剂的性能研究

赵家乐, 胡志勇, 曹端林, 李鹏飞, 陈啟虎, 王虎山, 李 晨
(中北大学化工与环境学院, 山西 太原 030051)

摘要:研究了含三嗪环阴离子 Gemini 表面活性剂增溶、流变、溶致液晶、囊泡等性能。结果表明:增溶量随 Gemini 表面活性剂疏水链长度的增长而增大, C_8-n-C_8 ($n=2,3,4,6$) 的增溶量随联接基长度增加而增加, $C_{12}-2-C_{12}$ 与 SDS 的复配体系比 SDS 的增溶量大, $C_{12}-2-C_{12}$ 与 CTAB 的复配体系比这 2 种表面活性剂单独使用时的增溶量小; Gemini 表面活性剂溶液分子结构(疏水基和联接基长度)对其水溶液的黏度有相同的影响; C_6-2-C_6 、 C_8-2-C_8 、 C_8-3-C_8 、 C_8-4-C_8 、 C_8-6-C_8 、 $C_{12}-2-C_{12}$ 在质量分数分别为 42.3%、37.8%、33.5%、30.4%、27.6%、20.3% 时均产生层状的溶致液晶; 0.01 mol/L 的单一 Gemini 表面活性剂水溶液均不能形成囊泡, 而当 $n(C_{12}-2-C_{12}):n(\text{CATB})$ 为 8:2 或 9:1 时, 复配体系的水溶液形成了大量的囊泡结构。

关键词:阴离子 Gemini 表面活性剂; 复配; 增溶; 黏度; 溶致液晶; 囊泡

中图分类号: O647.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2011)11-0029-05

Study on performance of anion Gemini surfactant derived from cyanuric chloride

ZHAO Jia-le, HU Zhi-yong, CAO Duan-lin, LI Peng-fei, CHEN Qi-hu, WANG Hu-shan, LI Chen

(School of Chemical Engineering and Environment, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The properties such as solubilization, viscosity, lyotropic liquid crystals and vesicle of Gemini surfactants are studied in this paper. The results show that the solubilization increases with the increase of the hydrophobic chains of Gemini surfactants. The longer spacer length of Gemini surfactants C_8-n-C_8 ($n=2,3,4,6$) leads to the higher solubilization ability. Compared with SDS, the mixed $C_{12}-2-C_{12}/\text{SDS}$ system shows higher solubilization ability. However, the solubilization ability of the mixed $C_{12}-2-C_{12}/\text{CTAB}$ is lower than that of $C_{12}-2-C_{12}$ or CTAB alone. The nature of surfactant molecules (hydrophobic and the spacer groups parts) has the same influence on the viscosity of aqueous Gemini surfactant solution. The aqueous solution of Gemini surfactants, such as C_6-2-C_6 , C_8-2-C_8 , C_8-3-C_8 , C_8-4-C_8 , C_8-6-C_8 and $C_{12}-2-C_{12}$, can form lyotropic liquid crystals when their mass fraction is 42.3%, 37.8%, 33.5%, 30.4%, 27.6%, 20.3% respectively. 0.01 mol/L aqueous solution of Gemini surfactants, such as C_6-2-C_6 , C_8-2-C_8 , C_8-3-C_8 , C_8-4-C_8 , C_8-6-C_8 and $C_{12}-2-C_{12}$ alone, can not form vesicles. However, when $n(C_{12}-2-C_{12})/n(\text{CATB})$ is 8/2 or 9/1, the aqueous solution of the mixed surfactants can form a mass of vesicles.

Key words: anion Gemini surfactants; mix; solubilization; viscosity; lyotropic liquid crystals; vesicle

Gemini 表面活性剂又称双子表面活性剂, 是一类分子中含有 2 个或 2 个以上亲水亲油基团的新型表面活性剂, 由于其结构独特而具有许多优良的性能^[1-3], 如超低的临界胶束浓度、较高的表面活性、较强的增溶能力、独特的流变性能等, 近几年来世界各国对它的研究兴趣异常高涨, 正逐步成为国际胶体科学相关领域和工业应用的研究热点^[4-7]。目前对 Gemini 表面活性剂的研究主要有 2 个方向: 一是根据表面活性剂结构和性能的关系合成新型表面活性剂; 二是研究表面活性剂的性能和应用, 为表面活性剂的产业化提供理论基础。

三聚氯氰是有机合成反应中很理想的原料, 其结构中的均三嗪环具有较高的稳定性, 3 个氯原子受 C=N 不饱和双键的影响活性增强, 容易发生化

学反应。笔者所在课题组利用三聚氯氰的化学反应特性, 制备出了 10 种含三嗪环结构的磺酸盐 Gemini 表面活性剂^[8-9], 7 种含三嗪环结构的甜菜碱型两性 Gemini 表面活性剂^[10]。结果表明含三嗪环结构的 Gemini 表面活性剂具有超低的临界胶束浓度、较高的表面活性、与普通表面活性剂复配有很好的协同作用等优点。笔者着重研究了含三嗪环结构的磺酸盐 Gemini 表面活性剂的增溶性能、流变性能、液晶纹理和囊泡等性能, 以期为以后的应用提供理论依据。

1 实验部分

1.1 试剂和仪器

Gemini 表面活性剂, 分子式为:

收稿日期: 2011-06-23

作者简介: 赵家乐(1979-), 男, 硕士生, zhaojiale66@126.com; 胡志勇(1971-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为精细化学品的合成及性能, 通讯联系人, huzhiyong@nuc.edu.cn。

保护、三次采油以及药物和生物过程等方面都有重要应用。

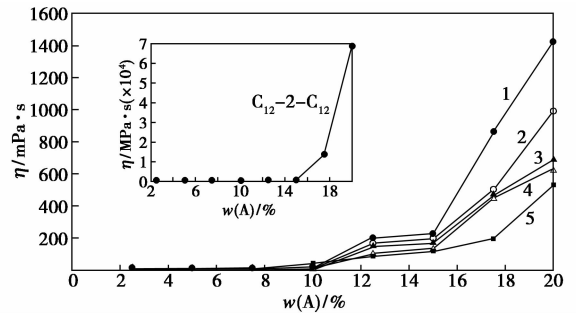
增溶作用是胶团存在的基本性质之一,研究表明^[12-14]:增溶作用主要发生在胶团内核、胶团栅栏层、胶团表面和胶团极性基层 4 个区域。这 4 个区域的空间大小对表面活性剂的增溶能力大小有重要影响。由图 1 可以看出, C_6-2-C_6 、 C_8-2-C_8 、 C_8-3-C_8 、 C_8-4-C_8 、 C_8-6-C_8 、 $C_{12}-2-C_{12}$ 增溶能力依次增大,这是因为 C_6-2-C_6 、 C_8-2-C_8 、 C_8-3-C_8 、 C_8-4-C_8 、 C_8-6-C_8 、 $C_{12}-2-C_{12}$ 随疏水链长度增大,胶束内核体积也依次增大,而苯、乙苯等简单烃类主要增溶在胶束内核,所以增溶能力依次增大;由 C_8 系列的增溶大小可以看出,随连接基长度的增加,其增溶能力也依次增加。这可能是因为连接基在表面活性剂形成胶束时包裹在胶束内核,其长度的增加导致胶束内核的体积增大,所以其增溶能力也增大。

Gemini 表面活性剂与普通表面活性剂复配往往存在很好的协同作用,笔者研究了 SDS 和 CATB 分别与 Gemini 表面活性剂 $C_{12}-2-C_{12}$ 复配体系的增溶作用。由图 1 ~ 图 4 可以看出: $C_{12}-2-C_{12}$ 与 SDS 的复配体系中,增溶量随 Gemini 表面活性剂含量的增加而增大,增溶能力优于单独使用 SDS 时的增溶能力;而 Gemini 表面活性剂与 CTAB 的复配,增溶量随 Gemini 表面活性剂含量的增加先减小再增大,增溶趋势形同“V”字型,阴阳离子电荷数接近于 1:1 时,增溶量迅速降低,甚至复配体系不能形成均一稳定的溶液;当电荷数之比偏离 1:1 时,增溶能力就逐渐增强,但每个复配体系的增溶量均小于单独使用 Gemini 表面活性剂或 CTAB 时的增溶量。

2.2 表面活性剂的黏度

用旋转黏度计测定了 25℃ 下 Gemini 表面活性剂水溶液的黏度与质量分数之间的关系。结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,当质量分数小于 10% 时,表面活性剂溶液的黏度随其质量分数的变化并不显著;当质量分数大于 10% 时,表面活性剂溶液的黏度随其质量分数的增大逐渐增大, C_6-2-C_6 、 C_8-2-C_8 、 C_8-3-C_8 、 C_8-4-C_8 、 C_8-6-C_8 在质量分数为 20% 时,黏度分别增大到 533, 632, 690, 993, 1 426 mPa·s。 Gemini 表面活性剂 $C_{12}-2-C_{12}$ 水溶液在质量分数为 15% 时,黏度更是开始直线上升,在质量分数为 20% 时,其黏度竟达到 69 760 mPa·s。由以上还可以看出随着 Gemini 表面活性剂疏水链长度的增加,溶液的黏度也随着增加,这是由于当表面活性剂的疏水链短时,表面活性剂的疏水性较弱,所形成的聚集

体也较小;随着疏水链长度的增加,表面活性剂形成的蠕虫状聚集体逐渐增大,当质量分数较大时相互交联形成网状结构,极大地增大了溶液的黏度;由 C_8-n-C_8 ($n=2,3,4,6$) 来看,连接链的长度对表面活性剂溶液的黏度也有比较大的影响,随着连接链的增长,其同一质量分数水溶液的黏度逐渐增加。



1— C_8-6-C_8 ; 2— C_8-4-C_8 ; 3— C_8-3-C_8 ; 4— C_8-2-C_8 ;
5— C_6-2-C_6

图 5 Gemini 表面活性剂黏度曲线

2.3 液晶纹理

图 6 液晶纹理照片中,图 6(a) ~ (f) 分别是 C_6-2-C_6 、 C_8-2-C_8 、 C_8-3-C_8 、 C_8-4-C_8 、 C_8-6-C_8 、 $C_{12}-2-C_{12}$ 质量分数为 42.3%、37.8%、33.5%、30.4%、27.6%、20.3% 的偏光纹理照片。

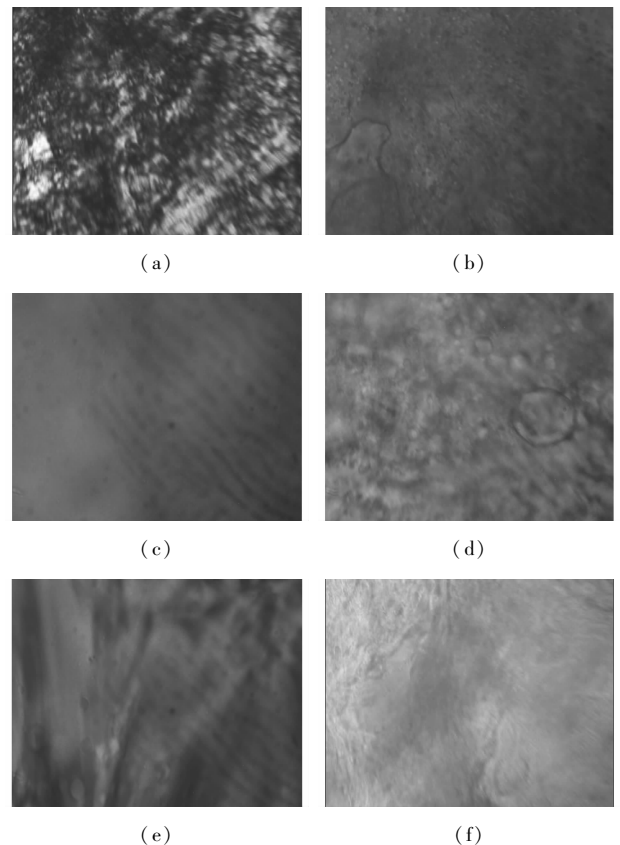


图 6 Gemini 表面活性剂溶液致液晶纹理

由以上实验结果可知,图 6(a)、图 6(b)呈现出镶嵌状纹理,是典型的层状液晶;图 6(c)显示有管状的偏振光纹理,此样品有很大的黏度,而且有偏振光纹理,说明样品有光的各向异性,由此可判断样品应是液晶结构;图 6(d)呈现出油状结构纹理,油状纹理也是典型的层状液晶纹理;图 6(e)呈现出漂亮的羽毛状纹理;图 6(d)偏光照片显示是游丝状纹理。常见的溶致液晶有 3 种:层状液晶、六方液晶和立方液晶^[15]。立方液晶是各向同性的,但这 6 种液晶的偏光纹理表明它们都具有光的各向异性,所以只能是层状液晶或六方液晶,层状液晶在某些条件下,当层间距达到与波长可比时而产生光的干涉现象,从而使液晶体系在偏光显微镜下呈现出漂亮的五彩纹理。六方液晶在偏光显微镜下呈现典型的扇形纹理,而从这 6 张图片来看,并没有出现扇形纹理。所以这 6 种溶致液晶都应该是层状液晶。

随着体系中组成的变化而引起液晶纹理和种类的变化,其原因可从堆积因子 f 分析^[16]:

$$f = V/a_0L_0$$

式中: V 表示表面活性剂分子疏水链的体积; a_0 为其亲水基团的截面积; L_0 为其疏水链长。

当 f 为 0 ~ 1/3 时,体系为球状胶束;当 f 为 1/3 ~ 1/2 时,体系为棒状胶束;当 f 为 1/2 ~ 1 时,体系为层状液晶或囊泡,所以以上表面活性剂堆积因子 f 应为 1/2 ~ 1。而 C_6-2-C_6 、 C_8-n-C_8 ($n=2,3,4,6$)、 $C_{12}-2-C_{12}$ 随疏水链长度的增大,体积也迅速增大,并且体积增大的更快,所以表面活性剂 C_6-2-C_6 、 C_8-n-C_8 ($n=2,3,4,6$)、 $C_{12}-2-C_{12}$ 的溶液形成溶致液晶所需要的质量分数也依次降低。 C_8-n-C_8 ($n=2,3,4,6$) 随连接基长度的增加,体积同样迅速增加,并且体积增加的更快。所以疏水基相同的 Gemini 表面活性剂,随连接链长度的增加,其形成溶致液晶的质量分数也逐渐减小。

2.4 表面活性剂的囊泡

由于表面活性剂形成的囊泡结构有独特的性质和结构,有一水溶性的内核,非常类似于细胞膜,因而可以广泛应用于生物模拟、药物的封装及运送,从而使其成为研究热点。表面活性剂囊泡的制备通常有 2 种方法^[17]:一种方法是靠机械作用,例如超声振荡而形成,但是这种方法制成的囊泡结构不够稳定。当机械作用消失后,囊泡膜的曲率会消失,导致囊泡的形变;另一种方法是 2 种表面活性剂特别是阴阳离子表面活性剂混合,自发形成囊泡。在此研究了 Gemini 表面活性剂水溶液及其与 CTAB 复配

时形成聚集体或囊泡的结构特征。

表 1 总浓度 ($c=0.01 \text{ mol/L}$) 相同 $n(C_{12}-2-C_{12})/n(\text{CATB})$ 体系的状态

$n(C_{12}-2-C_{12})/$ $n(\text{CATB})$	1/9	2/8	7/3	8/2	9/1
状态	稍黏透明	稍黏透明	稍黏透明	稍黏透明	稍黏透明
囊泡	无	无	无	有	有

分别观察了 0.01 mol/L Gemini 表面活性剂 C_6-2-C_6 、 C_8-2-C_8 、 C_8-3-C_8 、 C_8-4-C_8 溶液的聚集体形态,没有发现囊泡的形成。表面活性剂 C_8-6-C_8 透射电镜照片出现了特大的类似囊泡聚集体,囊泡直径竟然达到微米级,见图 7(c)。表面活性剂 $C_{12}-2-C_{12}$ 的透射电镜照片中也显示出现了长 400 nm、宽 200 nm 左右类似囊泡的聚集体,比表面活性剂 C_8-6-C_8 所形成的聚集体小很多,并且出现了大量的直径达到微米级的胶束聚集体,见图 7(d)、图 7(e)。这可能由于碳链越长,疏水性越好,在水溶液里越容易形成聚集体的缘故,所以选用表面活性剂 $C_{12}-2-C_{12}$ 和阳离子表面活性剂进行复配,研究复配后表面活性剂溶液的囊泡形成情况。

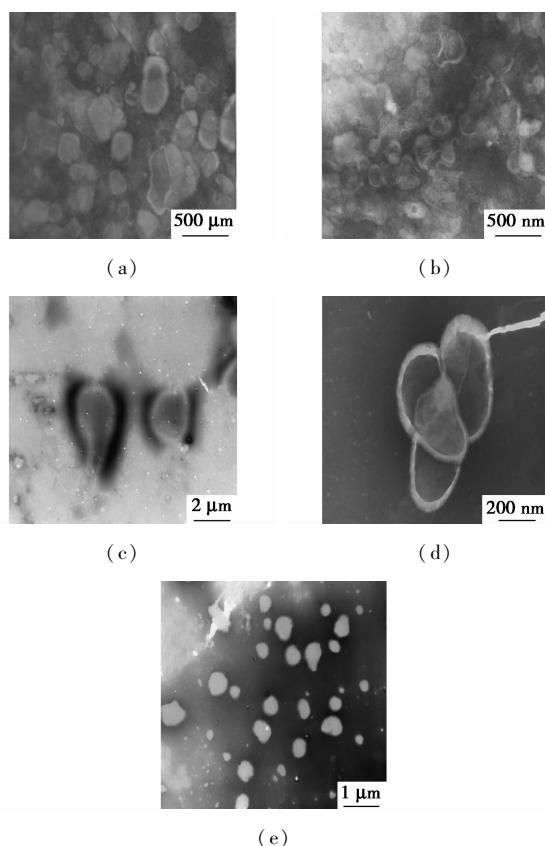


图 7 Gemini 表面活性剂的囊泡

选择 Gemini 表面活性剂 $C_{12}-2-C_{12}$ 与阳离子表

面活性剂 CATB 进行复配,复配体系总浓度为 0.01 mol/L。在透射电镜下观察发现,当 $n(C_{12}-2-C_{12})/n(\text{CATB})$ 为 1/9, 2/8, 7/3 时,没有囊泡出现,当 $n(C_{12}-2-C_{12})/n(\text{CATB})$ 为 8/2, 9/1 时出现了大量的囊泡,囊泡结构如图 7 所示,图 7(a)为 $n(C_{12}-2-C_{12})/n(\text{CATB}) = 8/2$ 的囊泡的透射电镜图片,图 7(b)为 $n(C_{12}-2-C_{12})/n(\text{CATB}) = 9/1$ 的囊泡透射电镜图片。

囊泡的形成机理同样可以用堆积因子 f 来说明,当 f 为 0 ~ 1/3 时,体系为球状胶束;当 f 为 1/3 ~ 1/2 时,体系为棒状胶束;当 f 为 1/2 ~ 1 时,体系为层状液晶或囊泡;当 $f > 1$ 时,形成反胶束。一般情况下,单独一种表面活性剂的极性头所占截面积相对于其疏水链体积较大,所以堆积因子较小,形不成囊泡;当阴阳离子复配时,由于阴阳离子强烈的静电作用而形成离子配合物,离子头所占的截面积相对于其疏水链体积来说就相应变小,从而使得堆积因子变大($f = 1/2 \sim 1$)而形成囊泡。

另外表面活性剂分子的几何构型对囊泡的形成也有重要影响^[18], Gemini 表面活性剂的分子和 CTAB 分子的几何构型如图 8 所示, Gemini 表面活性剂的结构类似于一个圆柱,而 CTAB 分子结构类似于一个圆锥。 Gemini 表面活性剂的分子和 CTAB 分子相互接触时,由于静电吸引作用而相互靠近,最终形成一种杯状结构的离子配合物。根据 Masaniko 模型^[19],圆锥状结构容易形成胶束,柱状结构容易形成双层,杯状结构则容易形成囊泡。因此当 Gemini 表面活性剂与 CTAB 复配后,由于阴阳离子的相互吸引,圆柱和圆锥混合在一起形成杯状结构,最终形成囊泡;如果 Gemini 比例太小时,整体构型依然是圆锥而难以形成囊泡。

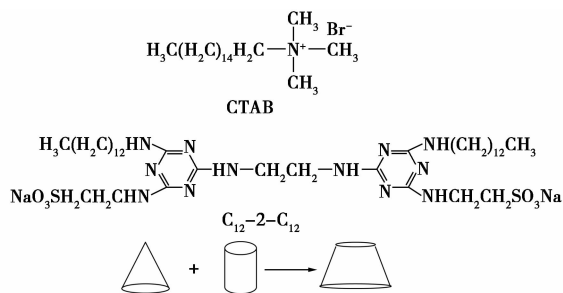


图 8 表面活性剂几何结构示意图

3 结论

(1) Gemini 表面活性剂增溶量随表面活性剂疏水链长度的增加而增加。并且,当疏水基相同时,增

溶量随表面活性剂联接基的增长而增大。

(2) Gemini 表面活性剂与阴离子表面活性剂 SDS 复配时,增溶能力随 Gemini 型表面活性剂含量的增加而逐渐增加,并且都强于单独使用 SDS 时的增溶能力;而与阳离子表面活性剂 CTAB 复配时,增溶能力先减小后增大,但均小于单独使用 CTAB 或 Gemini 型表面活性剂时的增溶能力。

(3) 具有短联接链的 Gemini 型表面活性剂,其胶束的稀溶液具有特殊的流变性,质量分数较低时 ($< 10\%$),其黏度和水相似;质量分数达到一定值时,其水溶液黏度迅速增加,最后 Gemini 型表面活性剂分子聚集体相互交联,形成网状结构,从而使黏度达到最大值。

(4) C_6-2-C_6 、 C_8-2-C_8 、 C_8-3-C_8 、 C_8-4-C_8 、 C_8-6-C_8 、 $C_{12}-2-C_{12}$ 质量分数分别为 42.3%、37.8%、33.5%、30.4%、27.6%、20.3% 时均可形成层状液晶。

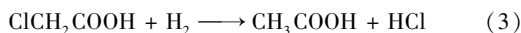
(5) 0.01 mol/L 的 Gemini 表面活性剂 C_6-2-C_6 、 C_8-2-C_8 、 C_8-3-C_8 、 C_8-4-C_8 、 C_8-6-C_8 、 $C_{12}-2-C_{12}$ 不能形成囊泡,而阴阳离子表面活性剂的复配体系中,当 $n(C_{12}-2-C_{12})/n(\text{CATB})$ 为 8/2, 9/1 时出现了大量的囊泡结构。

参考文献

- [1] Zana R. Dimeric and oligomeric surfactants. Behavior at interfaces and in aqueous solution: A review [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2002, 97: 205 - 253.
- [2] Kabir-ud-Dina, Mohammad Shafia, Parvaiz Ahmad Bhatb, *et al.* Solubilization capabilities of mixtures of cationic Gemini surfactant with conventional cationic, nonionic and anionic surfactants towards polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 167: 575 - 581.
- [3] Rosen M J, Li D. Song dynamic surface tension of aqueous surfactant solutions 8. effect of spacer on dynamic properties of Gemini surfactant solutions [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1996, 179(1): 261 - 268.
- [4] Zana R. Gemini (dimeric) surfactants [J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 1996, 1(5): 566 - 571.
- [5] 赵剑曦. 新一代表面活性剂 Gemini [J]. *化学进展*, 1999, 11(4): 348 - 357.
- [6] 查敏, 丁运生. Gemini 型表面活性剂的研究与应用进展 [J]. *日用化学品科学*, 2008, 31(3): 14 - 17.
- [7] 王海峰, 杨勇, 张国印, 等. 新型 Gemini 表面活性剂在三次采油中的应用前景 [J]. *油气地质与采收率*, 2003, 10(6): 59 - 61.
- [8] Li X, Hu Z Y, Zhu H L, *et al.* Synthesis and properties of novel alkyl sulfonate Gemini surfactants [J]. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2010, 13: 353 - 359.

(下转第 35 页)

副反应:



1.2 实验试剂及装置仪器

药品: Pd/C 催化剂, 质量分数为 1%, 自制; 一氯乙酸, 质量分数大于 98.0%, 华阳农药有限公司生产; 二氯乙酸, 质量分数大于 99.0%, 国药集团化学试剂有限公司生产; 醋酸, 质量分数大于 99.5%, 天津市大茂化学试剂厂生产; 氢气, 体积分数为 99.5%, 青岛合利气体有限公司生产; 氮气, 体积分数为 99.99%, 青岛合利气体有限公司生产; 氯化氢气体, 体积分数为 99.9%, 淄博万达利特种气体公司生产。

实验装置仪器: 二氯乙酸催化加氢装置 1 套, 威海汇鑫化工机械有限公司生产; JSM-6700F 型扫描电子显微镜, 日本电子公司生产。

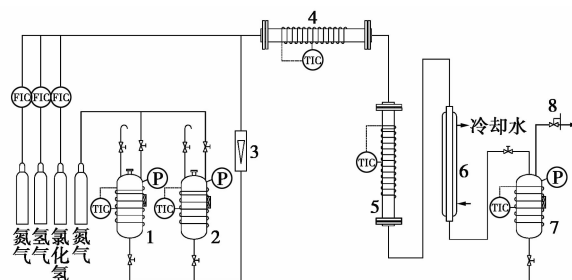
1.2.1 催化剂的制备

催化剂采用浸渍法制备, 载体为 6~8 目片状椰壳活性炭。制备方法^[13-16]: 将稀硝酸溶液缓慢加到装有片状活性炭的烧杯中, 加热回流 4 h, 水洗至中性, 110℃ 烘干后密封保存。取上述活性炭 128.7 g, 加入适量去离子水和相当于含有 2.2 g 氯化钯的溶液, 用氢氧化钠稀溶液中和, 浸渍一段时间后, 加入一定量的甲醛溶液, 并缓慢滴加氢氧化钠稀溶液, 使溶液保持弱碱性, 至 Pd 被彻底还原, 过滤还原液, 用去离子水充分洗涤, 得 1% Pd/C 催化剂。

1.3 流程简介

将配制好的不含氯化氢的料液(一氯乙酸、二氯乙酸、醋酸质量分数分别为 85.83%、4.05%、7.81%) 加入加料罐后保温, 充氮气加压。料液经转子流量计进入锆管预热器, 氯化氢气体、氮气、氢气分别经质量流量计进入预热器。在预热器中填充石英砂, 起到混合作用。混合均匀且达到反应温度的料液及气体进入锆材反应器中流经催化剂床层。

经过一段停留时间, 从反应器底部流出, 经冷却器冷却后进入气液分离器保温, 分离器出来的气体经碱吸收后放空, 液体由气液分离器定时放料、分析。其工艺流程如图 1 所示。



1—加料罐 A; 2—加料罐 B; 3—转子流量计; 4—预热器;
5—反应器; 6—冷凝器; 7—气液分离器; 8—稳压阀
FIC—流量显示控制; TIC—温度显示控制; P—压力指示

图 1 工艺流程图

1.4 分析方法

执行化工行业标准 HG/T 3271—2000 中规定的氯乙酸分析方法。实验结果以二氯乙酸质量分数小于 0.2% 为要求标准, 并尽量提高一氯乙酸的含量, 降低醋酸的含量。

2 实验结果与讨论

2.1.1 实验前后催化剂的表征

实验前新的催化剂 SEM 表征结果见图 2。

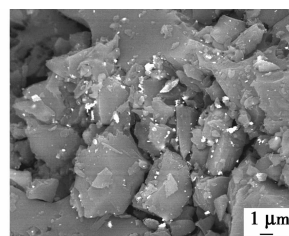


图 2 使用前 1% 钯炭催化剂的 SEM 照片(1 μm)

(上接第 33 页)

[9] Zhao S F, Zhu H L, Li X, *et al.* Interaction of novel anionic gemini surfactants with cetyltrimethylammonium bromide [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2010, 350(2): 480-485.
[10] Xue C L, Zhang T T, ZHU H L, *et al.* Synthesis and properties of novel alkylbetaine zwitterionic gemini surfactants derived from cyanuric chloride [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2011, 375(1/2/3): 141-146.
[11] 毛培坤. 表面活性剂产品工业分析 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 433-434.
[12] 肖进新, 赵振国. 表面活性剂应用原理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 155-199.
[13] Myers D. *Surfactant Science and Technology* [M]. 2nd ed. New York: VCH, 1992.

[14] Fendler J H, Fendler E J. *Catalysis in micellar and macromolecular systems* [M]. New York: Academic Press, 1975.
[15] 姜文清, 郝京城. 水相和特殊介质中有序聚集体的结构、性质和应用: IV. 表面活性剂在水相和离子液体中的有序聚集体 [J]. *日用化学工业*, 2008, 38(4): 257-266.
[16] 陈文君, 翟利民, 李于佐, 等. 囊泡的自发形成—两类表面活性剂复配 [J]. *科学通报*, 2003, 48(6): 562-565.
[17] 余娜, 任殿福, 刘春丽, 等. 阴离子表面活性剂复配自发形成囊泡的研究 [D]. *吉林大学学报: 理学版*, 2007, 45(4): 652-656.
[18] Yukishige K, Hirota U, Masahiko A, *et al.* Spontaneous vesicles formation from aqueous solution of didodecyl dimethyl ammonium bromide and sodium dodecyl sulfate mixtures [J]. *Langmuir*, 1995, 11(7): 2380-2384. ■