N-(末端三丁基锡取代基)酰亚胺的光诱导单电子转移成环反应

金英学 王欣 曲凤玉 谭广慧 岳群峰*

(哈尔滨师范大学化学化工学院 哈尔滨 150025)

摘要 合成了两种新的分子内给受电子体系 *N*-[2-(2-三丁基锡甲硫基)乙基]邻苯二甲酰亚胺(**1a**)和 *N*-(3-三丁基锡丙基)马来酰亚胺(**1b**), 并在甲醇、乙腈-30%水、乙腈中进行了光诱导单电子转移反应. 化合物 **1a** 在光诱导下发生分子内单电子转移反应, 以很高的产率和区域选择性生成环胺醇 **2**. 化合物 **1b** 在光诱导下发生分子内单电子转移反应生成环胺醇 **3**, 同时有[2+2]环加成副反应产物 **4** 生成. 以上所有新化合物的结构经质谱和核磁共振谱验证.

关键词 光诱导; 单电子转移; 环合反应; 三丁基锡; 酰亚胺

Photoinduced Single Electron Transfer Cyclization Reactions of *N*-(Trimethylstannyl terminated substituent group)imide

Jin, Yingxue Wang, Xin Qu, Fengyu Tan, Guanghui Yue, Qunfeng*

(College of Chemistry & Engineering, Harbin Normal University, Harbin 150025)

Abstract Two novel intramolecularly electronical donor-acceptor systems *N*-[2-(2-tributylstannylmethyl-sulfenyl)-ethyl]phthalimide (**1a**) and *N*-(3-tributylstannylpropyl)maleimide (**1b**), were synthesized, and their photoinduced single electron transfer (SET) reactions in MeOH, CH₃CN-30% H₂O and pure CH₃CN were carried out, respectively. Compound **1a** occurred intramolecular SET to provide cyclic amidol **2** with highly yield and high regioselectivity. Compound **1b** occurred intramolecular single electron transfer (SET) to provide cyclic amidol **3** with small amount of photoinduced [2+2] dimerization product **4**. Structures of all new compounds were characterized by MS (FAB) and NMR data.

Keywords photoinduced; single electron transfer (SET); cyclic reaction; tributylstannyl; imide

杂环化合物广泛应用在超分子化学、材料学、药学、生物学等领域, 探索杂环化合物的简单绿色的合成方法日益受到研究者的重视. 光诱导电子转移成环法是新的合成氮杂环化物的方法^[1~3]. 由共轭酰亚胺和醚或胺基链构成的分子内给受电子体系, 在光诱导下生成氮杂、氧杂、硫杂环化物或冠醚^[4~7], 且产率和区域选择性都很高, 其反应历程如 Scheme 1 所示. 由于光致激发态 **I*** 单电子转移(SET)反应速度大于氢提取反应(Norrish Type II)速度, 所以 SET 反应完全抑制了 Norrish Type II 反应, 只生成中间体双离子自由基 **III**. **III** 在甲醇、水等极性溶剂的溶剂化效应辅助作用下, 离去基团(SiMe₃)以正离子形式离去, 再经二次单电子转移生成双端位离子自由基 **IV**, **IV** 偶合生成含氮杂环化物或冠醚 **VI**. 此

反应在合成小、中环冠醚或其它环化物时表现出极好的区域选择性和很高的产率, 与经典的 Pederson 直接法^[8]和 Busch 模板法^[9]相比, 不受高度稀释和金属离子模板等条件的限制, 且不发生线性聚合反应. 然而在一些反应中, 如 *N*-(末端三甲基硅亚甲基硫醚)邻苯二甲酰亚胺(**I**)光反应制备氮杂环硫醚 **VI** (X=S) (Scheme 1)时, 区域选择性较差、产率较低(六元环产率 50%), 脱氢反应(deprotonation)和脱三甲基硅反应(desilylation)发生竞争, 一部分中间体 **III** 发生脱氢反应生成分子内自由基对 **V**, 自由基偶合生成不含硫的氮杂环化物 **VII**; 另一部分中间体 **III** 发生脱三甲基硅反应生成分子内双端位自由基 **IV**, 双端位自由基偶合生成氮杂环硫醚 **VI**, 因此大大降低了光反应的区域选择性和环化物的产率.

* E-mail: yenghak@hrbnu.edu.cn

Received May 22, 2012; revised August 10, 2012; published online August 21, 2012.

Project supported by the National Natural Sciences Foundation of China (Nos. 20972036, 21171045), the Natural Sciences Foundation of Heilongjiang Province (No. B200913) and the Program for Scientific Technological Innovation Team Construction in Universities of Heilongjiang Province (No. 211TD010).

国家自然科学基金(Nos. 20972036, 21171045)、黑龙江省自然科学基金(No. B200913)和黑龙江省高校科技创新团队计划(No. 2011TD010)资助项目.

Scheme 1

通过激光闪光光解(laser flash photolysis)实验分析光反应产物分配比例^[10,11], 证实提高离去基团的离去能力可以提高反应的区域选择性和提高环化物的产率. 基于此, 为了提高区域选择性和氮杂环硫醚的产率, 在本研究中选用离去能力更强的基团 Bu_3Sn 代替 Me_3Si , 设计合成了 N -[2-(2-(三丁基锡甲硫基)乙基)邻苯二甲酰亚胺(**1a**), 并在甲醇、乙腈-30%水、乙腈等溶剂中进行了光反应, 以很高的产率和单一的区域选择性得到了氮杂环硫醚 **2**(产率 98%), 同时还合成了 N -(3-(三丁基锡丙基)马来酰亚胺(**1b**). **1a** 和 **1b** 两种化合物在甲醇、乙腈-30%水、乙腈等溶剂中进行光反应, 除得到预期的氮杂环己烷 **2** 和 **3** 外, 还得到了[2+2]环加成产物 **4** (Scheme 2).

1 结果与讨论

1.1 光反应底物的合成

N -[2-(2-(三丁基锡甲硫基)乙基)邻苯二甲酰亚胺(**1a**)和 N -(3-(三丁基锡丙基)马来酰亚胺(**1b**)的合成路线如 Scheme 3 所示. 2-羟基硫醇在干燥的四氢呋喃溶剂中与金属钠和三丁基锡碘甲烷反应得到 2-(三丁基锡甲硫基)乙醇(**5**), **5** 与邻苯二甲酰亚胺发生 Mitsunobu 反应得到光反应底物 N -[2-(2-(三丁基锡甲硫基)乙基)邻苯二甲酰

亚胺(**1a**). 烯丙基醇的双键与三丁基锡烷加成得到 3-(三丁基锡)丙醇(**6**), **6** 与马来酰亚胺发生 Mitsunobu 反应得到光反应底物 N -(3-(三丁基锡丙基)马来酰亚胺(**1b**).

1.2 光反应实验

将 Pyrex 套管套在汞灯上, 使透过 Pyrex 管照在反应器上的光波长大于 290 nm. 将光反应物溶于相应的溶剂中, 置于光反应器内, 通氮气驱除光反应体系内空气, 20 min 后打开光源照射反应器, 薄层分析跟踪反应, 当反应物完全转化时终止反应, 用旋转蒸发仪除去溶剂, 残余物用硅胶柱层析分离提纯. 反应条件及产物列于表 1 中. 光反应产物 **2**~**4** 的结构经 ^1H NMR, ^{13}C NMR, MS 表征.

表 1 浓度为 $15\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时化合物 **1a**, **1b** 的光化学反应
Table 1 Photoreactions of compounds **1a**, **1b** at concentration of $15\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$

Compd.	Solvent	t/h	Conversion/%	Product (yield/%)
1a	MeOH	1.2	100	2 (98)
1a	CH_3CN -30% H_2O	1.0	100	2 (98)
1a	CH_3CN	1.2	100	2 (97)
1b	MeOH	1.5	100	3 (67), 4 (20)
1b	CH_3CN -30% H_2O	1.0	100	3 (60), 4 (23)
1b	CH_3CN	2.0	100	6 (68), 4 (19)

Scheme 2

Scheme 3

1.3 *N*-[2-(2-三丁基锡甲硫基)乙基]邻苯二甲酰亚胺 (1a)的光反应

化合物 **1a** 分别在甲醇、乙腈-30%水、乙腈等溶剂中进行光反应, 都得到单一的环化产物 **2**, 产率几乎相同. 元素 Sn 与 S 相比, Sn 更容易失去电子而被氧化, 所以根据 Lewis 共轭酸碱理论, 氧化态 Sn 的给电子能力远低于 S, 致使化合物 **1a** 在光诱导下首先硫原子上一个电子转移 (SET) 给发色基团的羰基氧, 生成分子内双离子自由基 **7**, 然后三丁基锡基团以正离子形式离去, 形成双端位自由基 **8**, 自由基迅速偶合成环 **9**. 双离子自由基中间体 **7** 也存在 C—H σ 键断裂反应 (route b) 与 C—Sn σ 键断裂反应 (route a) 的竞争, 但是因为 C—Sn σ 键能 (225 kJ/mol) 远远小于 C—H σ 键能 (411 kJ/mol), C—Sn σ 键更易断裂且速度很快, 三丁基锡的离去能力起主导作用 (route a), 完全抑制了 C—H σ 键断裂反应 (route b). 因此, 化合物 **1a** 的光反应以绝对的优势得到单一含氮环硫醚 **9**. 极性溶剂的溶剂化辅助效应与离去基团的离去能力相比, 对反应影响很小, 所以无论在极性较大的溶剂还是在极性较小的溶剂, 反应区域选择性都很高. 化合物 **1a** 的光反应历程如 Scheme 4 所示.

1.4 *N*-(3-三丁基锡丙基)马来酰亚胺 (1b)的光反应

光致激发态既可以通过 C—H σ 键断裂的 Norrish Type II 反应而猝灭, 也可以 C—M (M=Si, Sn) σ 键断裂而猝灭. Norrish Type II 反应与 C—M σ 键断裂反应是相互竞争的关系, 反应的区域选择性和产物的分配比例取决于 C—H σ 键能和 C—M σ 键能. 因为 C—Sn σ 键能

Scheme 4

(225 kJ/mol) 比 C—H σ 键能 (411 kJ/mol) 小近 1/2, 因此 C—Sn σ 键断裂反应速度远远大于 C—H σ 键断裂速度, C—Sn σ 键断裂反应优先发生. 分析化合物 **1b** 的光反应结果, 无论是在极性较大的甲醇溶剂中, 还是在极性较

小的乙腈溶剂中, 都发生了 C—Sn σ 键断裂生成分子内双端位自由基 **12** 的反应, 双端位自由基偶合成环 **3**. 在产物中没有发现 Norrish Type II 反应产物. 化合物 **1b** 发生 C—Sn σ 键断裂反应生成环化物 **3** 的同时, 还生成了分子间偶合产物 **4**, 说明 **1b** 激发态的羰基发色团反应与双键协同环合加成反应同时存在. **1b** 激发态一部分发生了 C—Sn σ 键断裂反应, 另一部分发生了双键的[2+2]环加成反应. 由于 C—Sn σ 键断裂反应速度很快, 因此 C—Sn σ 键断裂反应是主反应. 极性溶剂的溶剂化效应辅助作用进一步加快了 C—Sn σ 键断裂反应, 因此在极性较大的甲醇和乙腈-30%水中, C—Sn σ 键断裂反应产物比例较高, 而[2+2]环加成产物比例在极性较小的乙腈中略有增加. 化合物 **1b** 的光反应如 Scheme 5 所示.

Scheme 5

2 结论

合成了两种新的以三丁基锡为离去基团的分子内给电子体系 *N*-[2-(2-三丁基锡甲硫基)乙基]邻苯二甲酰亚胺(**1a**)和 *N*-(3-三丁基锡丙基)马来酰亚胺(**1b**), 在甲醇、乙腈-30%水、乙腈等溶剂中分别实施了光反应, 得到了相应的环化物 **2**~**4**. *N*-[2-(2-三丁基锡甲硫基)乙基]邻苯二甲酰亚胺(**1a**)光诱导 SET 反应无论在溶剂辅助作用较小的乙腈中, 还是在溶剂辅助作用较大的甲醇、乙腈-30%水中, 其区域选择性都极高, 以 98% 的产率得到 SET 反应产物氮杂环硫醚 **2**. 在含硫的邻苯二甲酰亚胺衍生物 **1a** 中, 三丁基锡的离去能力完全主导反应的区域选择性和提高氮杂环硫醚 **2** 的产率, 可以忽略溶剂的极性对 **1a** 光诱导 SET 成环反应的影响, 利用此反应可以合成较大环的含硫环化物或硫杂冠醚. 马来酰亚胺衍生物 **1b** 的光反应区域选择性较差, 光致激发态的马来酰亚胺的双键具有较高的反应活性, 即使是离去能力很强的三丁基锡也不能完全主导反应的区域选择性, 在发

生光诱导 SET 成环反应的同时发生分子间[2+2]环加成反应.

3 实验部分

3.1 仪器与试剂

Varian-300 核磁共振谱仪(TMS 为内标), Thermo Fishe Flash EA1112 元素分析仪, 70 eV Hitachi VG-7070 质谱仪. 所有的溶剂均经过纯化, HANOVIA 450 W 中压汞灯为光源; 丙烯基醇、偶氮异丁腈(azodiisobutyronitrile 简称 AINB)、2-巯基乙醇、偶氮二甲酸二异丙酯、三丁基锡碘甲烷、马来酰亚胺、邻苯二甲酰亚胺等试剂均购自 Aldrich 公司.

3.2 2-(三丁基锡甲硫基)乙醇(**5**)的制备

将 2-巯基乙醇(3.12 g, 40.0 mmol)溶于 20 mL 干燥四氢呋喃中, 加入金属钠(0.92 g, 40.0 mmol), 待钠完全溶解滴加三丁基锡碘甲烷(17.24 g, 40.0 mmol), 回流 24 h, 用正戊烷和 20%氯化钠萃取, 合并有机层, 无水硫酸钠干燥, 浓缩, 剩余物硅胶柱[洗脱剂: *V*(乙酸乙酯): *V*(正己烷)=1:5]纯化, 得淡黄色油状物, 产率 67%. ^1H NMR (CDCl_3 , 300 MHz) δ : 0.81~1.59 (m, 27H, SnBu_3), 2.41 (s, 2H, $\text{SCH}_2\text{SnBu}_3$), 2.32 (t, $J=2.6$ Hz, 1H, OH), 2.71 (t, $J=2.2$ Hz, $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$), 3.76 (q, $J=2.2$ Hz, 2H, $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$); ^{13}C NMR (CDCl_3 , 75 MHz) δ : 9.5, 13.6, 27.2, 27.4, 29.0, 41.1, 58.5; MS (FAB) m/z : 339.2 [$\text{M}-\text{C}_4\text{H}_9$] $^+$. Anal. calcd for $\text{C}_{16}\text{H}_{36}\text{OSSn}$: C 48.62, H 9.18, S 8.11; found C 48.71, H 9.02, S 8.36.

3.3 *N*-[2-(2-三丁基锡甲硫基)乙基]邻苯二甲酰亚胺(**1a**)的制备

将 2-(三丁基锡甲硫基)醇(**5**, 1.91 g, 5 mmol)溶于 30 mL 干燥的四氢呋喃中, 加入邻苯二甲酰亚胺(0.74 g, 5 mmol), 三苯基膦(1.31 g, 5 mmol), 搅拌 5 min, 滴入偶氮二甲酸二异丙酯(1.01 g, 5 mmol), 搅拌 24 h, 然后用 100 mL 二氯甲烷萃取三次, 合并有机层, 用 5%盐水洗涤, 无水 Na_2SO_4 干燥, 硅胶柱层析[洗脱剂: *V*(乙酸乙酯): *V*(正己烷)=1:5]纯化, 得到产物 **1a**, 产率 73%. ^1H NMR (CDCl_3 , 300 MHz) δ : 0.81~1.59 (m, 27H, SnBu_3), 2.33 (s, 2H, $\text{SCH}_2\text{SnBu}_3$), 3.12 (t, $J=3.1$ Hz, $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{S}$), 3.38 (t, $J=3.1$ Hz, 2H, $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{S}$), 7.41~7.81 (m, 5H, aromatic); ^{13}C NMR (CDCl_3 , 75 MHz) δ : 8.8, 13.3, 13.6, 26.2, 28.5, 43.1, 52.3, 121.2, 132.5, 133.3, 169.2; MS (FAB) m/z : 454 [$\text{M}-\text{C}_4\text{H}_9$] $^+$. Anal. calcd for $\text{C}_{23}\text{H}_{17}\text{NO}_2\text{SSn}$: C 54.13, H 7.31, N 2.74, S 6.28; found C 54.36, H 7.11, N 2.63, S 6.14.

3.4 3-(三丁基锡)丙醇(6)的制备

将烯丙基醇 0.51 mL (7.44 mmol) 溶于 20 mL 干燥的四氢呋喃中, 搅拌下加入少量的 AINB, 在室温下滴加三丁基锡烷(2.17 g, 7.44 mmol), 滴毕, 回流反应 3 h. 冷却至室温, 减压蒸馏除去四氢呋喃, 残余物用正戊烷-水萃取, 有机层用无水硫酸钠干燥, 过滤, 浓缩滤液, 残余物经硅胶柱层析[洗脱剂: $V(\text{乙酸乙酯}): V(\text{正己烷})=1:10$]纯化得无色油状物 **2**, 产率 60%. ^1H NMR (CDCl_3 , 300 MHz) δ : 0.75~1.73 [m, 31H, SnBu_3 , $(\text{CH}_2)_2$], 2.20 (s, 1H, OH), 3.48~3.54 (t, $J=5.8$ Hz, 2H, CH_2OH); ^{13}C NMR (CDCl_3 , 75 MHz) δ : 3.9, 8.7, 13.6, 27.3, 29.2, 29.3, 66.2; MS (FAB) m/z : 293.05 [$\text{M}-\text{C}_4\text{H}_9$] $^+$. Anal. calcd for $\text{C}_{11}\text{H}_{25}\text{Sn}$: C 45.24, H 8.63; found C 45.51, H 8.90.

3.5 *N*-(3-三丁基锡丙基)马来酰亚胺(1b)的制备

将 3-(三丁基锡)丙醇(**6**, 1.75 g, 5 mmol)溶于 30 mL 干燥的四氢呋喃中, 加入马来酰亚胺(0.49 g, 5 mmol), 三苯基膦(1.31 g, 5 mmol), 搅拌 5 min, 滴入偶氮二甲酸二异丙酯(1.01 g, 5 mmol), 搅拌 24 h, 然后用 100 mL 二氯甲烷萃取三次, 合并有机层, 用 5% 盐水洗涤, 无水 Na_2SO_4 干燥, 硅胶柱层析[洗脱剂: $V(\text{乙酸乙酯}): V(\text{正己烷})=1:10$]纯化, 得到产物 **1b**, 产率 52%. ^1H NMR (CDCl_3 , 300 MHz) δ : 0.68~1.75 [m, 31H, $\text{Sn}(\text{CH}_2)_3\text{CH}_3$, $(\text{CH}_2)_2$], 3.31 (m, $J=7.3$ Hz, 2H, CH_2), 6.55 (s, 2H, CH); ^{13}C NMR (CDCl_3 , 75 MHz) δ : 5.0, 8.4, 13.4, 27.1, 28.9, 41.2, 133.7, 170.4; MS (FAB) m/z : 372 [$\text{M}-\text{C}_4\text{H}_9$] $^+$. Anal. calcd for $\text{C}_{19}\text{H}_{35}\text{NO}_2\text{Sn}$: C 53.29, H 8.24, N 3.27; found C 53.42, H 8.12, N 3.41.

3.6 *N*-[2-(2-三丁基锡甲硫基)乙基]邻苯二甲酰亚胺(1a)和 *N*-(3-三丁基锡丙基)马来酰亚胺(1b)的光反应

将光反应物 **1a** 和 **1b** 分别溶于 200 mL 溶剂中, 置于光反应器内, 通氮气驱除光反应体系内空气, 20 min 后打开光源照射反应器, 薄层分析跟踪反应, 当反应物完全转化时, 终止反应, 用旋转蒸发仪除去溶剂, 残余物硅胶柱层析分离提纯.

4a-羟基-1,2,4,4a-四氢-3-硫-9a-氮芴-9-酮(**2**): ^1H NMR (CDCl_3 , 300 MHz) δ : 2.55~2.71 (m, 2H, $\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{S}$), 2.72 [d, $J=19.7$ Hz, 1H, $\text{C}(\text{OH})\text{CH}_2\text{S}$], 3.12 [d, $J=19.7$ Hz, 1H, $\text{C}(\text{OH})\text{CH}_2\text{S}$], 3.27~3.45 (m, 1H, NCH_2CH_2), 4.33 (s, 1H, OH), 4.46~4.62 (m, 1H,

NCH_2CH_2), 7.52~7.83 (m, 4H, ArH); ^{13}C NMR (CDCl_3 , 75 MHz) δ : 33.2, 53.5, 66.7, 84.2, 122.4, 123.6, 130.0, 131.4, 131.9, 144.2, 165.3; MS (FAB) m/z : 221.7 (M^+). Anal. calcd for $\text{C}_{11}\text{H}_{11}\text{NO}_2\text{S}$: C 59.71, H 5.01, N 6.33, S 14.49; found C 59.38, H 5.36, N 6.21, S 15.27.

7a-羟基-5,6,7,7a-四氢吡咯里嗪-3-酮(**3**): ^1H NMR (CDCl_3 , 300 MHz) δ : 1.42~1.59 (m, 1H, NCH_2CH_2), 2.01~2.20 (m, 1H, NCH_2CH_2), 2.22~2.37 (m, 1H, NCH_2CH_2), 2.41~2.73 (m, 1H, NCH_2CH_2), 3.19~3.25 (m, 1H, $\text{C}(\text{OH})\text{CH}_2$), 3.34~3.43 (m, 1H, $\text{C}(\text{OH})\text{CH}_2$), 3.75 (s, 1H, OH), 5.83~5.87 (m, 1H, $\text{CH}=\text{CHCO}$), 7.05~7.08 (m, $\text{CH}=\text{CHCO}$); ^{13}C NMR (CDCl_3 , 75 MHz) δ : 22.4, 29.3, 31.2, 84.5, 128.4, 148.1, 170.1; MS (FAB) m/z : 139.4 (M^+). Anal. calcd for $\text{C}_7\text{H}_9\text{NO}_2$: C 60.42, H 6.52, N 10.07; found C 60.31, H 6.22, N 10.29.

2,5-二(3-三丁基锡丙基)四氢环丁并[1,2-*c*:3,4-*c'*]二吡咯-1,3,4,6-四酮(**4**): ^1H NMR (CDCl_3 , 300 MHz) δ : 1.23~1.87 (m, 66H, $2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2$, 2Bu_3), 3.39 (s, 4H, cyclobutane ring-H); ^{13}C NMR (CDCl_3 , 75 MHz) δ : 25.1, 27.2, 27.5, 29.3; MS (FAB) m/z : 856.3 (M^+). Anal. calcd for $\text{C}_{38}\text{H}_{70}\text{N}_2\text{O}_4\text{Sn}_2$: C 53.29, H 8.24, N 3.27; found C 52.96, H 8.68, N 3.59.

References

- [1] Kanaoka, Y.; Migita, Y.; Koyama, K. *Tetrahedron Lett.* **1973**, 1193.
- [2] Kanaoka, Y.; Koyama, K.; Flippen, J. *J. Am. Chem. Soc.* **1974**, 96, 4719.
- [3] Machida, M.; Takechi, H.; Kanaoka, Y. *Synthesis* **1982**, 1078.
- [4] Yoon, U. C.; Mariano, P. S. *Acc. Chem. Res.* **2001**, 34, 523.
- [5] Cho, D. W.; Yoon, U. C.; Mariano, P. S. *Acc. Chem. Res.* **2011**, 44, 204.
- [6] Tan G.-H.; Wei, S.-Q.; Yue, Q.-F.; Zhao, J.-M.; Jin, Y.-X. *Chin. J. Org. Chem.* **2010**, 30, 1021 (in Chinese). (谭广慧, 魏树权, 岳群峰, 赵俊明, 金英学, 有机化学, **2010**, 30, 1021.)
- [7] Jin, Y.-X.; Yuan, W.; Qu, F.-Y.; Yoon, U. C.; Wei, S.-Q.; Yue, Q.-F.; Tan, G.-H. *Acta Chim. Sinica* **2011**, 69, 2407 (in Chinese). (金英学, 苑望, 曲凤玉, 尹雄灿, 魏树权, 岳群峰, 谭广慧, 化学学报, **2011**, 69, 2407.)
- [8] Thompson, M. C.; Busch, D. H. *J. Am. Chem. Soc.* **1962**, 84, 1762.
- [9] Pedersen, C. J. *J. Am. Chem. Soc.* **1967**, 89, 7017.
- [10] Zhang, X. M.; Yeh, S. P.; Hong, S.; Freccero, M.; Albin, A.; Falvery, D. F.; Mariano, P. S. *J. Am. Chem. Soc.* **1994**, 116, 4211.
- [11] Su, Z. Y.; Falvery, D. E.; Yoon, U. C.; Oh, S. W.; Mariano, P. S. *J. Am. Chem. Soc.* **1998**, 120, 10676.

(Zhao, C.)