

综合评述

[60]富勒烯的化学修饰及其功能材料性能研究

林阳辉 蔡瑞芳*

(复旦大学化学系 上海 200433)

摘 要 本文总结了近十几年的文献资料,对 [60]富勒烯的化学修饰及其功能材料性能研究进行综述。

关键词 [60]富勒烯,化学修饰,功能材料,性能

中图分类号: O613.71

文献标识码: A

文章编号: 1000-0518(2002)02-0103-06

[60]富勒烯(以下简称 C_{60})是 K_{roto}等在 1985 年发现的碳的第 3 种同素异形体,当时采用激光蒸发石墨法制备,只能得到微量级,直到 1990 年 Kratschmer-Huttman 等采用石墨棒电弧蒸发法获得克量级的 C_{60} 产品,从而有力地促进了全碳分子的研究。 C_{60} 分子是由 12 个五边形环与 20 个六边形环稠合所构成的笼状 32 面体,其形状很象一个足球,五边形环为单键(键长约 0.145 nm),2 个六边形环的公共棱边则为双键(键长约 0.138 nm),共有 12 根双键,因而 C_{60} 分子具有缺电子芳香烃的一些性质。它能发生环加成反应,亲核、亲电加成,自由基加成,包合反应,聚合反应,光化学反应,氧化还原反应等。迄今对它的研究已涉及无机化学、有机化学、物理化学、分析化学、材料科学、高分子科学、生命科学等众多学科及应用领域。

本文从 [60]富勒烯的化学修饰及功能材料性能两方面综述过去十几年 [60]富勒烯研究的概况。

1 [60]富勒烯的化学修饰

C_{60} 的化学修饰主要集中在它的化学活性、反应和机理研究以及设计、合成功能性化合物,包括 C_{60} 的二次衍生物上。根据修饰方法不同,可分为:经典有机化学反应,金属有机化学反应和电化学合成 3 大类。

1.1 [60]富勒烯的有机化学反应

C_{60} 具有典型的缺电子芳香烃的性质,容易与供电子的亲核基团反应。多数情况下,亲核试剂是进攻 C_{60} 分子的 6,6 环共用边双键,有时也会发生重排而得到插入 5,6 环共用边键的衍生物。可通过不同反应,用各种试剂对 C_{60} 进行化学修饰,得到各种类型的 C_{60} 的有机基团衍生物,最简单的单加成产物就有开式结构及形成三元环、四元环、五元环、六元环等不同衍生物。

C_{60} 的氢化:理论上 C_{60} 完全氢化可生成 $C_{60}H_{60}$,但由于 $C_{60}H_{60}$ 的表面的 60 个氢原子之间的强相互作用,至今未能制备出 $C_{60}H_{60}$ 。Hanufler 等^[1a]用还原方法得到部分氢化的白色固体产物 $C_{60}H_{36}$ 。这是迄今为止 C_{60} 笼上结合氢最多的氢化物;而对于最简单氢化物 $C_{60}H_2$ 的制备,现已有多种方法。1993 年 Smith 等^[1b]先将重氮甲烷与 C_{60} 生成吡唑啉衍生物,再将其热解得到了开环的 1,6- $C_{60}H_2$;如果进行光解,则得到 1,2- $C_{60}H_2$ 和 1,6- $C_{60}H_2$ 。

用 $BH_3 \cdot THF$ 还原 C_{60} ,再用醋酸分解,或用金属锌-酸还原也可得到 $C_{60}H_2$;用 Pd/C 催化氢化,钼氢化反应, $Cr(OAc)_2$ 与连二亚胺等都可制备 C_{60} 的氢化物。

C_{60} 的卤化反应^[2] 1993 年 Kniaz 系统研究了 C_{60} 碳笼的氟化,认为氟化 C_{60} 的反应,主要生成 $C_{60}F_{36}$,

2001-06-11 收稿, 2001-11-12 修回

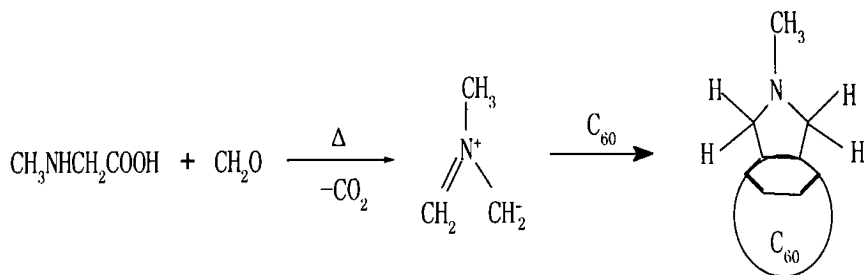
国家自然科学基金资助项目 (29890216)

通讯联系人:蔡瑞芳,男,1941 年生,教授,博士生导师; E-mail: organd@ Fudan. edu. cn; 主要从事金属有机化学和富勒烯化学方面的研究

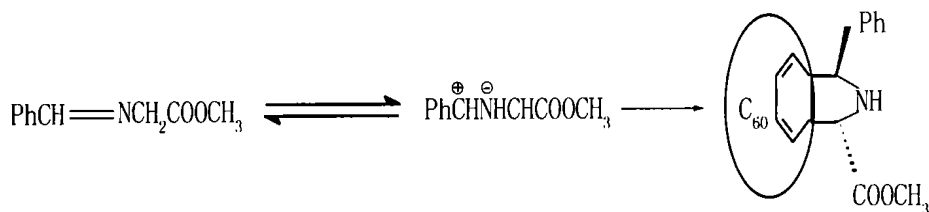
全氟化合物 $C_{60}F_{60}$ 仅占主要产物的十万分之一;此外,用六氟铂酸钾与 C_{60} 反应,合成了低氟化合物 $C_{60}F_{18}$,并通过 ^{19}F NMR 谱表征;在流动反应器中,通过加热至 625 K,将 F_2 与 C_{60} 反应制得 $C_{60}F_{48}$,同时还有少量 $C_{60}F_{46}$ 及痕量的 $C_{60}F_{48}O$ 生成;将 Cl_2 在 $250^\circ C$ 下通入装有 C_{60} 的封管中,反应 5 h 后,可生成 $C_{60}Cl_{24}$;用液氯与 C_{60} 作用生成 $C_{60}Cl_{12}$,氯化产物加热到 $550^\circ C$ 或用三苯基膦处理,均可以脱去氯而重新得到 C_{60} . 室温纯溴与 C_{60} 反应,可以得到 $C_{60}Br_{12}$, $C_{60}Br_{14}$, $C_{60}Br_{16}$, $C_{60}Br_{18}$, $C_{60}Br_{24}$ 等多种溴化产物,其中 $C_{60}Br_6$, $C_{60}Br_8$, $C_{60}Br_{24}$ 的单晶结构已被测定.

C_{60} 的经典有机化学反应中,研究最多的是环加成反应,其中 $[4+2]$ 环加成反应报道的最多^[3a-3d],主要有:与环戊二烯的加成反应,与茚类的加成反应,与蒽类的加成反应以及与苯并异呋喃类的加成反应等.

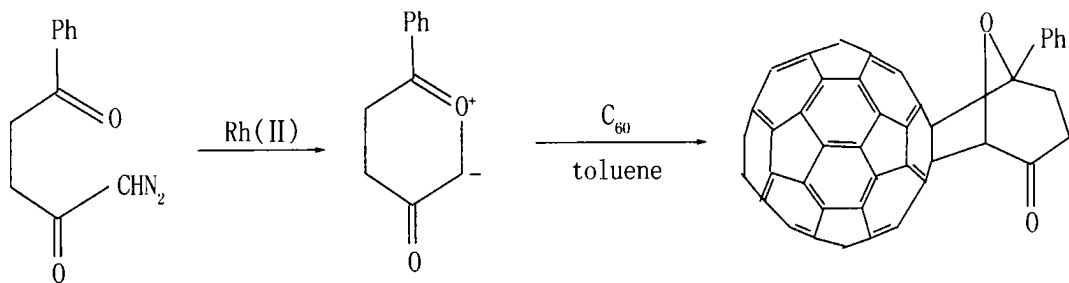
对 $[3+2]$ 环加成反应报道亦不少,其中以 1,3-偶极子形式与 C_{60} 反应制备五元环最多,如将氨基酸与醛脱羰后得到的 1,3-偶极子与 C_{60} 进行 $[3+2]$ 环加成反应,生成 C_{60} 的吡咯烷衍生物^[4]:



亚胺类 1,3-偶极子也可与 C_{60} 发生 $[3+2]$ 环加成反应. 如脯氨酸酯与 C_{60} 在甲苯中回流反应^[5]:



$Rh(II)$ 对重氮类化合物的催化反应制得相应羰基叶立德,再与 C_{60} 发生 $[3+2]$ 环加成反应,如 $Rh(II)$ 催化 1-重氮-5-苯基-2,5-戊二酮,得到羰基叶立德与 C_{60} 发生环加成反应^[6].



C_{60} 还可进行 $[2+1]$ ^[7a], $[2+2]$ 等^[7b] 环加成反应,但相对比较少.

C_{60} 易与亲核的自由基反应,但生成物相对复杂,报道较多的是 C_{60} 与卡宾如 $:CCl_2$, $:CBr_2$ 等加成反应生成 $C_{60}(CCl_2)_n$ ^[8a], $C_{60}(CBr_2)_n$ ^[8b],与苄基自由基反应,生成 $C_{60}(CH_2Ph)_n$ ^[8c].

1.2 金属有机化学反应

通过金属有机反应合成 C_{60} 金属衍生物,是一种比较新的思路,是合成 $[60]$ 富勒烯金属有机衍生物和金属 $[60]$ 富勒烯盐的有效方法.

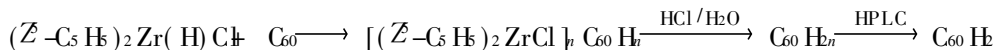
合成 C_{60} 金属衍生物的方法中,除电化学方法外,主要有:1) C_{60} 与过渡金属有机配合物反应,使 C_{60} 笼 6:6 边的 $C=C$ 键以 Z^2 键形式与金属原子配位,形成金属的 C_{60} 配合物;2) 富勒烯被金属还原形成

富勒烯盐,如 C_{60} 被活泼的碱金属还原生成相应的 C_{60} 碱金属盐; 3) 配合物中的金属原子连结到 C_{60} 笼上的加成反应; 4) 富勒烯和金属化合物反应生成共晶化合物。

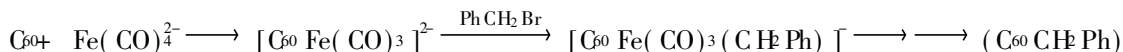
迄今所合成的富勒烯金属有机衍生物,几乎都是通过 C_{60} 分子直接与相应金属有机配合物在有机溶剂中反应制备的,使用的溶剂一般为苯、甲苯或邻二氯苯等,反应条件包括回流、光照等,对已合成的典型 [60]富勒烯金属有机衍生物,测定了部分过渡金属的衍生物的晶体的分子结构^[9a-9f]。

C_{60} 金属有机衍生物,尽管制备方法相对简单,但由于 C_{60} 与金属的配位能力较弱,所以选择适宜的反应条件,特别对溶剂的选择非常重要。

在用金属有机试剂合成 C_{60} 的有机基团衍生物的工作中,较多的是用有机锂试剂、格氏试剂等亲核试剂,特别是用有机锆试剂 (Schwartz reagent)^[10] 与 C_{60} 的反应:



及羰基铁配阴离子 (Collman reagent)^[11] 与 C_{60} 的反应:



碱金属 [60]富勒烯盐合成一般采用固相反应,但需要高温、高压,且反应时间长,产率低。我们在国际上较早采用液相反应法合成了 C_{60} 碱金属盐,并将其与亲电试剂反应,高选择性地合成了 C_{60} 的有机衍生物^[12]。已合成的过渡金属 [60]富勒烯盐有 Pd、Pt、Ru、Ni、Co 等的盐,其合成方法有两种:一是将 C_{60} 直接在溶液中与金属配合物反应,另一种是通过 C_{60} 负离子与金属卤化物等发生亲核反应制备。已合成的稀土金属 [60]富勒烯盐有 Eu、Yb、Sm 等,其制备方法分固相反应和溶液反应 2 种,后者是通过 C_{60} 负离子途径制备。

1.3 电化学合成方法

1993 年 Caron 等^[13] 在苕腈/甲苯混合液中电解 C_{60} 与 CH_3I ,选择性地得到了 $(CH_3)_2C_{60}$,产物经 1H NMR 与 ^{13}C NMR 表征。在这个过程中 C_{60} 首先被电解为负离子,再与 CH_3I 发生亲核加成。

1998 年 Balch 等^[14] 以高氯酸四正丁基铵为支持电解质,电解 C_{60} 与 $Ir(CO)_2Cl$ (*p*-toluidine) 的乙腈/甲苯混合溶液,在电极上得一黑色薄层,经能量分散 X 射线谱、IR 谱、激光吸收质谱及化学方法分析,认为是 $C_{60}\{Ir(CO)_2\}_n$; 同样,电解 C_{60} 与 $(CF_3CO_2)_4Rh_2$ 的混合物,得黑色薄层,经 IR 谱、激光解析质谱, ^{19}F (1H) NMR 等表征,确认为 $C_{60}\{(CF_3CO_2)_4Rh_2\}_n$ 。

电化学合成在一定条件下是合成 C_{60} 衍生物及其薄膜材料的一种有效方法,但反应的机理有待进一步研究。

2 [60]富勒烯及其衍生物功能材料的性能

C_{60} 及其衍生物在催化、超导、磁性、发光等诸多方面表现出一些独特的性能和潜在的应用前景。目前合成出越来越多的 C_{60} 衍生物,为 C_{60} 功能材料研究提供了基础。

2.1 催化性能

除了 [60]富勒烯本身由于电子亲和力较高,能够催化氧化硫化氢成单质硫外,许多富勒烯的金属衍生物也表现出独特的催化性能: Nagashima 等^[15a,15b] 发现 $C_{60}Pd$ 、 $C_{60}Pt$ 对烯烃和炔烃氢化的催化活性; Osbaidiston 等^[16] 合成的 $[Rh(PPh_3)_2(CO)(\bar{Z}-C_{60})H]$ 对乙烯、丙烯的羰基化具有很高催化活性; 此外, $C_{60}Pt(PPh_3)_3$ 、 $C_{60}Pd(PPh_3)_3$ 、 C_{60} 的手性磷配合物 $Nd(C_{60}AlmCl)_3$ 、 $Ru(C_{60}-Cs^+)/SiO_2$ 、 $C_{60}M_6$ ($M = Cs, K, Na$) 等也具有独特的催化性能。催化性质研究已成为富勒烯科学发展的一个重要方向,具有潜在的工业应用前景。

2.2 超导性能

C_{60} 分子本身是不导电的绝缘体,但当 C_{60} 分子与碱金属键合或碱金属嵌入 C_{60} 分子之间的空隙后,由于碱金属与 C_{60} 的相互作用,会使碱金属的最外层电子形成一个导电带,从而使其具有导电性能。

碱金属 [60]富勒烯盐的超导性能研究是早期富勒烯研究的热门方向之一^[17a-17g],因其 T_c 还在液氮温度下,离实际应用还有相当距离。

2000 年 Schon 等^[18]报道了在 52 K 时空穴掺杂 C_{60} 获得的场效应晶体管呈超导态,这是迄今报道的非氧化铜超导体中超导温度最高的。

2.3 光学特性

由于 C_{60} 及其衍生物分子中存在三维的高度非定域 π 电子共轭结构,因而具有优良的光学及非线性光学性能,有望在光转换器、信号转换和数据存储等光电子领域获得应用,已从四方面开展了研究:从反饱和吸收的角度,研究其光限幅性能;从三阶非线性系数角度,研究超快非线性光学特性;从稳态和瞬态角度,研究光电效应;制备 LB 膜(单层、多层),研究其光谱特性。

Tutt 等^[19]最早研究了 C_{60} 的光限幅性质,发现 C_{60} 在 532 nm 波长处具有良好的光限幅性能,开展了实用光限幅器件的研究,如将 C_{60} 分散于有机高分子制成膜^[20a]以及通过溶胶-凝胶(sol-gel)方法将 C_{60} 嵌埋于玻璃介质中等。我们合成的一系列 C_{60} 的 Diels-Alder 加成物中,已发现其中的 [60]富勒烯 1,1'-联茚加合物^[20b],在 THF 中溶解度较大,热稳定性好,其光限幅性能也稍优于 C_{60} 本身。可以认为,通过化学修饰,改善 C_{60} 的溶解性和提高它的光限幅性质是可行的。

C_{60} 的非线性光学性质也引起关注,测定了它的三阶非线性系数。因为三阶非线性系数 $\chi^{(3)}$ 是光电子应用一个重要特性参数。它的三阶非线性光学极化率在红外和可见区约 $\times 10^{-13} \sim \times 10^{-12}$ esu。我们合成的铂、钼的 [60]富勒烯盐,采用物理喷束法(PJD)在熔融的石英片上制成薄膜,它们的 $\chi^{(3)}$ 值都比 C_{60} 的大,有的可提高 1 个数量级^[21]。

许多实验证明 C_{60} 是具有较大光生伏效应的一种新材料,用 C_{60} 和 MEH-PPV 制成的 MEH-PPV/ C_{60} 双层结构其界面具有类似半导体 PN 结的性质。

近年来,人们对 C_{60} 及其衍生物薄膜的特性日益感兴趣。在制膜技术上除了使用 PJD 法外,还有使用 Langmuir-Blodgett 技术的。前者特别适用于不溶物以及衍生物无对称中心的制膜,后者主要适用于可溶物质在空气和水的界面上形成稳定的 C_{60} 衍生物的单分子膜转移到基板上成膜。虽然对高度有序 C_{60} 薄膜的研制做了大量工作,但由于 C_{60} 固有的特性,制成的 LB 膜易形成多层膜,只有少数 C_{60} 的化学修饰衍生物可制成单层 LB 膜。我们曾用所合成的 [60]富勒烯 1,1'-联茚衍生物制备了 LB 膜(单层、多层)并研究了它们的光谱特性。

2.4 功能高分子材料

C_{60} 作为一种特殊的功能基团可以引入高分子的主链,侧链又可以与高分子材料共混。如多羟基 C_{60} 衍生物可作为具有三维空间伸长的聚合材料的中间体,把不同聚合物与 C_{60} 上的羟基相接合,可制成具有不同物理化学性质的叶脉状高分子材料。Chiang 等^[22]通过富勒醇与脲烷聚醚反应合成一种可溶性的棕红色胶状固体,经 GPC 表征,每个 C_{60} 分子上平均键合 6 条支链,多分散系数为 1.45;将其进一步改性可得到高度交联的高分子衍生物,它的抗张强度、伸缩性及热和机械稳定性等都获得很大改进。Barbour 等^[23]将 C_{60} 与 *p*-碘化杯-4 芳基苯醚共结晶,得到一种 C_{60} 分子很好地有序排列的层状结构体。我们曾将金属有机试剂与高分子材料作用,现场制备高分子负碳离子与 C_{60} 反应合成了不同键型(链状、星状、枝状)的高分子材料^[24]。

2.5 生物活性

C_{60} 及其衍生物的生物活性也是当前富勒烯研究的一个热点。Friedman 等^[25a]从理论和实验上都证明了某些水溶性 C_{60} 衍生物对人体免疫缺损病毒蛋白酶 HIV P (Human immunodeficiency virus) 有抑制作用,他们认为 C_{60} 分子本身先与 HIV P 的活性部分相结合,而 C_{60} 衍生物的亲水性基团则在表面与水形成溶剂层,从而阻断了 HIV P 的活性部位,抑制 HIV P 生长,这是因为 HIV P 的活性部分是一类似开放式圆柱体,其朝外部分几乎仅仅由疏水性氨基酸组成,而 C_{60} 分子直径与此圆柱体相近, C_{60} 分子基本上又是疏水性的,故 C_{60} 分子可与 HIV P 的活性部分相结合。他们也发现 C_{60} 对 2 个具有催化作用的丁氨二酸(ASP25, ASP125) 有促进水分子切断肽链的作用。由于水溶性的 C_{60} 氨基酸具有生物活性,促进了这类衍生物的合成工作;1997 年《Science》^[25b]报道了含 6 对水溶性羧酸的 C_{60} 衍生物具有活化饥饿细胞的作用,并可使 Lou Gehrig 疾病的老鼠寿命延长 10 d,比迄今的其它药物的效果都好,引起广大神经医学研究者的兴趣;Tokuyama 等^[26]发现某些水溶性 C_{60} 羧酸及其盐衍生物在光照下有抑制毒性细胞生长

作用,为 C_{60} 衍生物的光动力药物提供了重要信息. Chiang 等^[22]发现富勒醇的水溶液可降低血液中自由基浓度而抑制细胞畸变,还发现富勒醇能清除由黄嘌呤和黄质氧化酶产生的超氧阴离子自由基. Da Ros 等^[27]发现所合成的 C_{60} 衍生物能杀死不同的真菌和细菌.

C_{60} 分子本身具有很高电负性,因过高的电负性会对细胞产生毒性. 通过化学修饰,降低 C_{60} 的电负性,从而可降低它们的生物毒性; Sun 等^[28]制成了高水溶性 C_{60} 聚合物,也具有光动力活性;有人用水溶性 C_{60} 衍生物制成了类似生物膜的人造类脂膜; Yamakosh 等^[29]认为水溶性 C_{60} 聚乙烯吡咯烷酮掺和物有可能广泛用作医学和化妆品分散剂以及粘合调节剂,溶血实验表明对血液无任何影响.

我们发现 C_{60} 化学修饰的水溶性高分子化合物(聚乙烯吡咯烷酮)对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌有抑制作用. 还发现低浓度下对肝癌细胞生长有抑制作用,但在较高浓度下出现逆反效应^[30a].

还有人在有机软铁磁体方面进行了研究,测得 C_{60} (TDAE)_{0.86} (TDAE 为(二甲胺基)乙烯)的居里温度为 16.1 K,电导率为 10^{-2} S/cm^[30b].

参 考 文 献

- 1 a) Haufler R E, Conceicao J, Chibante L P F, *et al.* *J Phys Chem* [J], 1990, **94** 8 634
b) Smith III A B, Robert M S, Laurant B, *et al.* *J Am Chem Soc* [J], 1993, **115** 5 829
- 2 Kniaz K, Fischer J E, Selig H, *et al.* *J Am Chem Soc* [J], 1993, **115** 6 060
- 3 a) Tsuda M, Ishida T, Kurono S, *et al.* *J Chem Soc Chem Commun* [J], 1993 1 296
b) Puplouskis A, Kacens J, Neilands O, *et al.* *Tetrahedron Letters* [J], 1997, **38**(2): 285
c) Duerte-Ruiz A, Müller T, Wurst K, *et al.* *Tetrahedron* [J], 2001, **57**: 3 709
d) Kreher D, Liu S G, Cariou M, *et al.* *Tetrahedron Lett* [J], 2001, **42** 3 447
- 4 Maggini M, Scorrano G. *J Am Chem Soc* [J], 1993, **115** 9 798
- 5 Wu S H, Sun W Q, Zhang D W, *et al.* *J Chem Soc, Perkin Trans* [J], 1998, **1** 1 733
- 6 Nair V, Sethumadhavan D, Sheela K C, *et al.* *Tetrahedron Lett* [J], 1999, **40** 5 087
- 7 a) Wharton T, Kini V U, Mortis R A, *et al.* *Tetrahedron Lett* [J], 2001, **42** 5 159
b) Howada M, Hino T, Kinbara K, *et al.* *Tetrahedron Lett* [J], 2001, **42** 5 069
- 8 a) Tsuda M, Ishida T, Nogami T, *et al.* *Tetrahedron Lett* [J], 1993, **34** 6 911
b) Benito A M, Darwish A D, Kroto H W, *et al.* *Tetrahedron Lett* [J], 1996, **37**: 1 085
c) Krusic P J, Wasserman E, Keizer P N, *et al.* *Science* [J], 1991, **254** 1 183
- 9 a) Song L C, Liu J T, Hu Q M, *et al.* *Organometallics* [J], 2000, **19** 1 643
b) Usatov A V, Peregodova S M, Denisovich L I, *et al.* *J Organomet Chem* [J], 2000, **599** 87
c) Bashilov V V, Magdesieva T V, Kravchuk D N, *et al.* *J Organomet Chem* [J], 2000, **599** 37
d) Song H, Lee K, Lee C H, *et al.* *Angew Chem Int Ed* [J], 2001, **40**(8): 1 500
e) Correlsky S I, Magriesteva T V, Butin K P. *Russ Chem Bull* [J], 1996, **45** 1 383
f) Song H, Lee Y M, Choi Z-H, *et al.* *Organometallics* [J], 2001, **20**(14): 3 139
- 10 Ballenweg S, Gleiter R, Kratschuer W. *Tetrahedron Lett* [J], 1993, **34**(23): 3 737
- 11 Miki S, Kitao M, Fukunishi K. *Tetrahedron Lett* [J], 1996, **37**(12): 2 049
- 12 Chen Y, Cai R F, Huang Z E, *et al.* *J Chem Soc Chem Commun* [J], 1995 1 553
- 13 Caron C, Subramanian R, Souza F D, *et al.* *J Am Chem Soc* [J], 1993, **115** 8 505
- 14 Balch A L, David A C, Winkler K. *J Am Chem Soc* [J], 1998, **120** 9 614
- 15 a) Nagashima H, Nakaoaka A, Saito Y, *et al.* *J Chem Soc Chem Commun* [J], 1992 377
b) Nagashima H, Kato Y, Yamagachi H, *et al.* *Chem Lett* [J], 1994 1 207
- 16 Osbaldiston R J C, Markel E J. *J Mole Cataly* [J], 1994, **81**: 106
- 17 a) Margadonna S, Prassides K, Neumann D A, *et al.* *Phys Rev B* [J], 1999, **59** 943
b) Chen X, Maniwa Y, Kuper C A, *et al.* *Chem Mater* [J], 1997, **36** 486
c) Ceulemans A, Chibotard L F, Cimpoesu F. *Phys Rev Lett* [J], 1997, **78** 3 725
d) Ishii K, Watanuki T, Fujiwara A, *et al.* *Phys Rev Lett* [J], 1999, **59** 3 956
e) Becker L, Poreda R J, Bada J L. *Science* [J], 1996, **272** 249

- f) Kosaka M, Tanigaki K, Prassides K, *et al.* *Phys Rev B* [J], 1999, **59**: 6 628
- g) Kanowski M, Werner H, Schlogl R, *et al.* *Appl Maagn Res* [J], 1996, **11**: 285
- 18 Schön H, Kloc Ch, Batlogg B. *Nature* [J], 2000, **408**: 549
- 19 Tutt L W, Kost A. *Nature* [J], 1992, **356**: 225
- 20 a) Maggini M, Scorrano G. *J Am Chem Soc* [J], 1993, **115**: 9 798
 b) LIN Yang-Hui(林阳辉), ZHANG Li-Xin(张立新), CAI Rui-Fang(蔡瑞芳), *et al.* *Acta Chem* (化学学报) [J], 2001, **59**(12): 2 197
- 21 Lin Y H, Cai R F, Chen Y, *et al.* *J Mat Sci Lett* [J], 1999, **18**: 1 383
- 22 Chiang L Y, Wang L Y. *J Chem Soc Chem Commun* [J], 1994: 2 675
- 23 Barbour L J, Willian G. *Chem Commun* [J], 1997, **115**: 1 439
- 24 Chen Y, Huang Z E, Cai R F, *et al.* *J Eur Polym* [J], 1998, **34**(2): 137
- 25 a) Friedman S H, Decamp D L. *J Am Chem Soc* [J], 1993, **115**: 6 506
 b) Trisha G. *Science* [J], 1997, **277**: 1 207
- 26 Tokuyama H, Yamago S. *J Chem Soc Chem Commun* [J], 1994: 2 675
- 27 Da Ros T, Prato M. *J Org Chem* [J], 1996, **1**(25): 9 071
- 28 Sun Y P, Liu B. *Chem Commun* [J], 1996, **24**: 2 699
- 29 Yamakoshi Y N, Yagami T. *J Chem Soc Chem Commun* [J], 1997: 517
- 30 a) LIN Yang-Hui(林阳辉). Doctoral Dissertation(博士学位论文). Shanghai(上海): Fudan University(复旦大学), 2000
 b) Allemand P M, Khemani K C, Koch A, *et al.* *Science* [J], 1991, **253**: 301

Current Studies on the Functionalization of [60] Fullerene and Functional Material Properties of [60] Fullerene Derivatives

LIN Yang-Hui, CAI Rui-Fang*

(Department of Chemistry, Fudan University, Shanghai 200433)

Abstract The recent achievements in the functionalization of [60] fullerene are reviewed. The properties and potential applications of the functional materials obtained from [60] fullerene derivatives in materials science and technology are summarized briefly.

Keywords [60]fullerene, functionalization, functional material property