

导电高分子^{*}

万梅香

(中国科学院化学研究所, 100080, 北京)

提要 介绍导电高分子的结构特征、基本物理性能和技术上应用前景; 评价导电高分子领域突破性的研究进展和讨论 21 世纪导电高分子面临的挑战与机遇。

关键词 导电高分子, 掺杂, 孤子, 极化子, 双极化子, 分子导线, 分子器件, 齐聚物, 发光二极管

自从掺杂聚乙炔(Polyacetylene, 简称 PA) 呈现金属导电特性以来^[1], 新型交叉学科——导电高分子领域诞生了。它的出现不仅打破了高分子仅为绝缘体的传统观念, 而且它的发现和发展为低维固体电子学, 乃至分子电子学的建立和完善作出重要的贡献, 进而为分子电子学的建立打下基础, 而具有重要的科学意义。同时, 导电高分子具有特殊的结构和优异的物理化学性能使它在能源、光电子器件、信息、传感器、分子导线和分子器件, 以及电磁屏蔽、金属防腐和隐身技术上有广泛、诱人的应用前景。因此, 导电高分子自发现之日起就成为材料科学的研究热点。经过 20 余年的研究, 导电高分子无论在分子设计和材料合成、掺杂方法和掺杂机理、可溶性和加工性、导电机理、光、电、磁物理性能及相关机理以及技术上的应用探索都已取得重要的研究进展, 有些正向实用化的方向迈进。但是, 导电高分子发展至今, 无论在理论上、材料合成上和技术应用上它仍面临着许多挑战, 而这些挑战恰恰给导电高分子在 21 世纪的发展带来极好的发展机遇。本文介绍导电高分子的结构特征和基本的物理化学特性; 评述导电高分子的重要的研究进展; 讨论导电高分子在 21 世纪面临的挑战和机遇。

1 导电高分子的结构特征、基本性能及应用前景

所谓导电高分子是由具有共轭 π 键的高分子经化学或电化学“掺杂”使其由绝缘体转变为导体的一类高分子材料。它完全不同于由金属或碳粉末与高分子共混而制成的导电塑料。因此, 导电高分子的可分子设计结构特征为除了具有高分子结构外, 还含有由“掺杂”而引入的一价对阴离子(p-型掺杂)或对阳离子(n-型掺杂)。所以, 通常导电高分子的结构特征是由有高分子链结构和与链非键合的一价阴离子或阳离子共同组成。因此, 导电高分子不仅具有由于掺杂而带来的金属(高电导率)和半导体(p-和 n-型)的特性之外, 还具有高分子的可分子设计结构多样化, 可加工和比重轻的特点。为此, 从广义的角度来看, 导电高分子可归为功能高分子的范畴。

正因为导电高分子具有上述的结构特征和独特的“掺杂”机制, 使导电高分子具有优异的物理化学性能和广阔的技术应用前景。

(1) 导电高分子室温电导率可在绝缘体-半导体-金属态范围内(10^{-9} S/cm $\sim$ 10^5 S/cm)变化(如图 1 所示)。这是迄今为止任何材料无法比拟的。表 1 给出典型的导电高聚物的分子结构如室温电导率^[2]。

正因为导电高分子的电学性能覆盖如此宽的范围, 因此它在技术上的应用呈现多种诱人前景。例如, 具有高电导的导电高分子可用于电、磁屏蔽, 防静电、分子导线等技术上的应用。而具有半导体性能的导电高分子, 可用于光电子器件(晶体管, 整流管)和发光二极管(light emitting diode, LED)。

(2) 导电高分子不仅可以掺杂, 而且还可以脱掺杂并且掺杂/脱掺杂的过程完全可逆。这是导电高分子独特的性能之一。如果完全可逆的掺杂/脱掺杂特性与高的室温电导率相结合, 则导电高分子可成为二次电池的理想电极材料, 从而可能实现全塑固体电池。另外, 可逆的掺杂/脱掺杂的性能若与导电高分子的可吸收雷达波的特性相结合, 则导电高分子又是目前快速切换的隐身技术的首选材料。实验发现导电高分子与大气某些介质作用其室温电导率会发生明显的变化, 若除去这些介质又会自动恢复到原状。这种变化的实质是掺杂/或脱掺杂过程, 并且其掺杂/脱掺杂完全可逆。利用这一特性导电高分子可实现高选择性、灵敏度高和重复性好的气体或生物传感器。

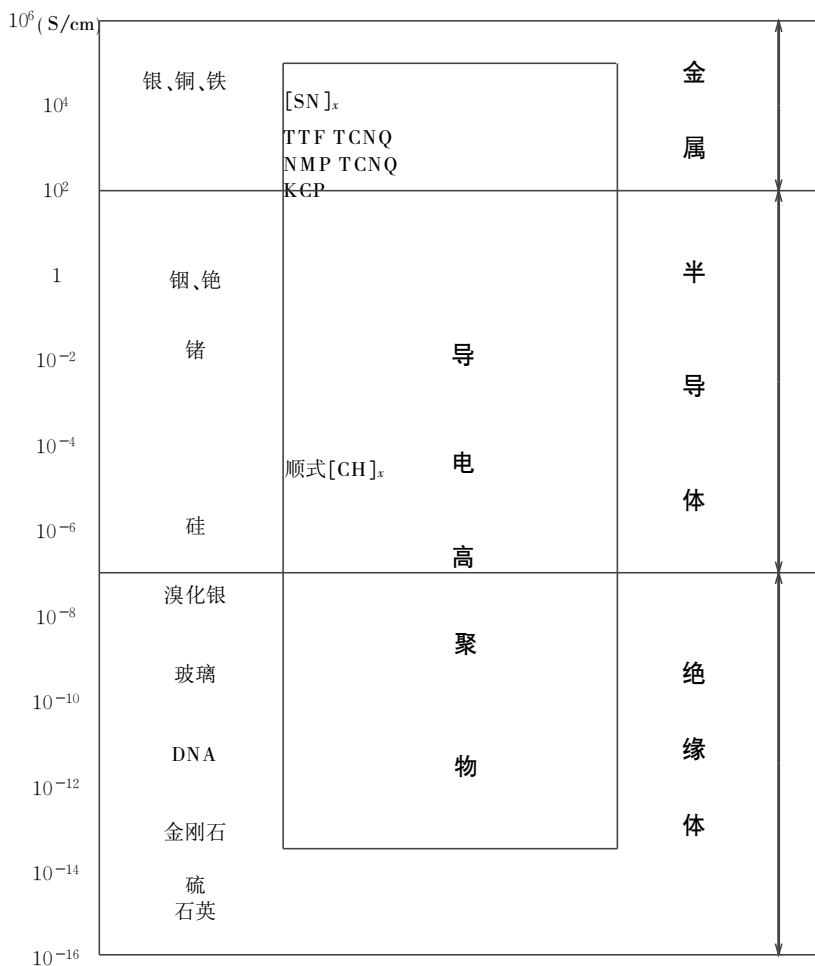


图 1 导电高聚物电导率覆盖范围

(3) 导电高分子的掺杂实质是氧化/还原反应, 而且氧化/还原过程完全可逆。在掺杂/脱掺杂的过程中伴随着完全可逆的颜色变化。如图 2 所示, 聚苯胺从 -0.2 至 $+0.8\text{V VS}\cdot\text{SCE}$ (甘汞电极) 氧化/还原过程伴随着发生淡黄 $\rightleftharpoons$ 兰色 $\rightleftharpoons$ 紫色的变化^[3]。因此, 导电高分子这一独特的性能可能实现电致变色或光致变色。这不仅在信息存贮、显示上有应用前景, 而且也可用于军事目标的伪装和隐身技术上。

(4) 由于导电高分子具有 π 共轭的结构, 因此, 它具有响应速度快 (10^{-13}sec) 和高的三阶非线性光学系数 ($\chi^{(3)} = 10^{-9} \sim 10^{-13}\text{esu}$)^[4]。它将用于信息存贮、调频、光开关和光计算机等技术上。综上所述, 导电高分子是一种性能优良的新型功能材料, 并在 80~90 年代研究进展迅速, 成为材料科学的研究中心, 并世界各国科学家致力于导电高分子的实用化。

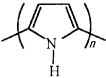
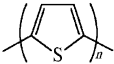
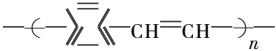
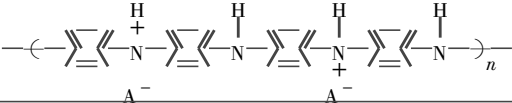
2 导电高分子领域的突破性研究进展

导电高分子的研究已有 20 余年的历史, 导电高分子无论在材料合成、新材料体系探索、可溶性和加工性、掺杂和导电机理以及技术应用等方面都有迅速的进展。依作者之见, 在 20 年内导电高聚物领域的突破性的研究进展主要体现在以下几方面。

2.1 掺杂实质的深入了解和孤子导电机理的提出

导电聚乙炔一出现, 导电高分子为什么会导电? 导电的机理是什么? 导电高分子的导电机理与金属和半导体的导电机理是否相同? 等一系列根本问题引起科学家的极大关注, 并致力于研究。很快, W. P. Su, J. R. Schrieffer 和

表 1 典型的导电高聚物

名称	发现时间	结构	最高室温电导率 /S · cm ⁻¹
聚乙炔	1977		10 ³
聚吡咯	1978		10 ³
聚噻吩	1981		10 ³
聚苯撑	1979		10 ³
聚对苯乙烯	1979		10 ³
聚苯胺	1980		10 ²

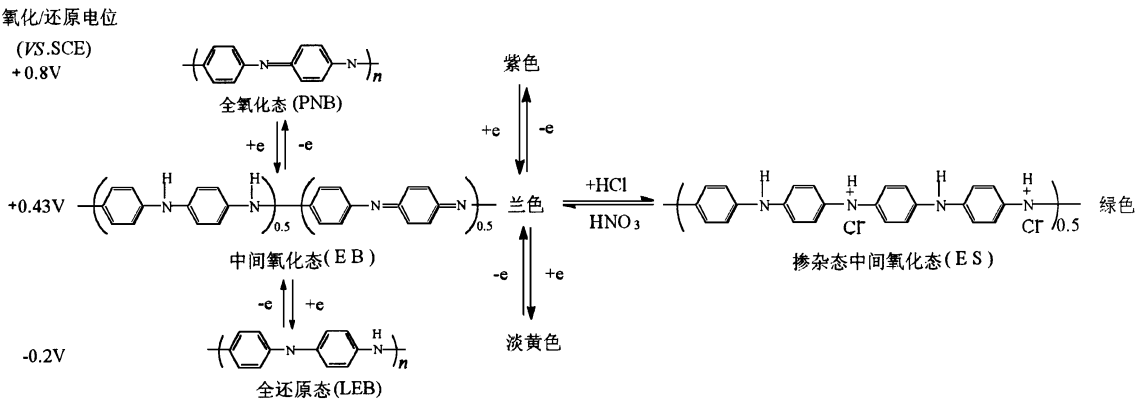


图 2 聚苯胺的氧化/还原态和掺杂/脱掺杂态所对应的颜色变化

A·J·Heeger^[6]于 1979 年就提出孤子(Soliton)理论(简称 SSH 理论)。根据这一理论,孤子、极化子(Polaron)和双极化子(bipolaron)被视为导电高分子的载流子^[6]。实验证明它既不同于金属的自由电子也不同于无机半导体的电子和空穴。这一全新的导电机理不仅能解释所观察到的实验现象,而且为低维固体电子学奠定基础。另外,导电聚乙炔的出现首先向科学家提出导电高分子的掺杂概念与无机半导体的掺杂术语是否相同?其次,掺杂是否是实现导电高分子的唯一途径?掺杂的机理和实质是什么等一系列问题。实验发现借助“掺杂”手段,除导电聚乙炔以外,一系列如表 1 所示的新型导电高分子及其衍生物相继出现。这不仅证实“掺杂”是实现导电高分子的有效途径,而且证实了它的可靠性和实用性。但是,大量的实验事实也揭示在导电高分子领域中的“掺杂”概念无论在掺杂实质、掺杂量、掺杂后形成的载流子的性质、掺杂/脱掺杂的可逆行等方面与无机半导体的掺杂概念有本质的差异^[2~3]。因此,对“掺杂”实质、掺杂后导电机理的深入了解为探索新的掺杂方法和新型的导电高分子打下坚实的基础。

2.2 导电高分子的金属性电导率-温度依赖性的实验证实

通常,电导率-温度依赖性判断金属和半导体的依据之一,即电导率随温度的降低而增加($\frac{\partial \sigma}{\partial T} < 0$)则为金属;相反若电导率随温度的增加而增加($\frac{\partial \sigma}{\partial T} > 0$)则为半导体或绝缘体。大量的实验事实表明尽管导电高分子的室温电导率在金属的范围内(如 $10^1 \text{ S/cm} \sim 10^5 \text{ S/cm}$),但是它的电导率-温度依赖性却只呈现半导体特性。因此,了解这种异常现象的根源以及探寻有效的方法从实验上证实导电高分子的金属性电导率-温度依赖性成为 80 年代初期的研究热点。作者采用电压端短路法(Voltage Shorted Compaction, 简称 VSC)首次于 1983 年从实验上观察到掺杂聚乙炔的金属性电导率-温度依赖性^[6]。随后在聚噻吩(Polythiophene, PTH)和聚吡咯(Polypyrrole, PPy)和聚苯胺(Polyaniline, PANI)等体系上也观察到类似的现象^[7]。这些实验结果不仅揭示导电高分子的半导体的电导率-温度依赖性来源于导电高分子链间或颗粒间的接触电阻,而且也证实了 VSC 法的可靠性和实用性。

2.3 可溶性导电高聚物

通常,导电高分子是不溶不熔的,它极大地限制了导电高分子的结构表征和技术上的广泛应用。因此,在 80 年代后期解决导电高分子的可溶性和加工性是深入开展导电高分子的基础研究和技术上实用化的关键。经过科学家的努力,在 85~95 期间,可溶性导电高分子的研究发展很快并取得突破性进展。目前,科学家可以通过结构修饰(衍生物、接枝、共聚)、掺杂诱导、乳液聚合和化学复合等方法获得可溶性或水溶性导电高分子。3-位取代的聚噻吩是用结构修饰方法实现兼顾导电性($10^2 \text{ S/cm} \sim 10^3 \text{ S/cm}$)和可溶性的最成功的实例。而可溶性聚苯胺则是用大尺寸对阴离子掺杂诱导实现可溶性的典型实例,其室温电导率可高达 400 S/cm ^[2]。另外,在聚苯胺高分子链上引入磺酸基团是实现水溶性导电高分子的典型实例^[8]。

2.4 聚合物发光二极管(Light emitting diode, LED)

如前所述,导电高分子在能源、光电子器件、分子器件、电磁屏蔽及隐身技术上都有广阔的应用前景,到目前为止导电高分子的真正实用化还有相当的距离。但是,自从 1990 年英国剑桥大学 R·H·Friend^[9]首次报道具有半导体特性的导电高分子可以用于高分子发光二极管(Al/PPV/SnO)以来,高分子发光二极管的研究已成为 90 年代的研究热点。与传统的无机发光二极管相比,高分子发光二极管具有颜色可调、可弯曲、大面积和低成本等优点。当前的研究主要是解决器件的发光效率及其寿命,正向实用化的方向发展。这一研究热点似乎成为导电高分子领域科学家实现导电高分子实用化的突破口。

2.5 导电高分子的功能化

导电高分子由于具有 π -共轭结构,故在可见光区内都有强的吸收,以及力学性能差等局限性。而这些都限制了它们在技术上的广泛应用。因此,导电高分子的多功能化是实现它在技术上应用的关键。为此,从 90 年代初期开始导电高分子与高力学性能、高透明度、耐高温的高分子的复合制备兼顾电学与力学性能、电学与透光性能以及热稳定的新型复合材料的研究,并已取得了长足的研究进展。这些研究为导电高分子在光电子器件、航空航天等高技术上的应用打下基础。作者在兼顾导电高分子的电、磁性能及其电磁来源等方面开展了深入的研究。采用化学复合方法成功地获得含纳米磁性颗粒($D = 15 \text{ nm} \sim 100 \text{ nm}$)的导电聚苯胺复合物^[10]。这些复合物都具有高的饱和磁化强度($M_s = 10 \sim 33 \text{ emu/g}$),低矫顽力($H_c = 0$) (如图 3 所示),高居里温度($T_c > 300 \text{ K}$),高电导率($10^{-4} \text{ S/cm} \sim 10^0 \text{ S/cm}$)和低密度($d \approx 1.2 \text{ g/cm}^3$)。这些材料在微波吸收,电磁屏蔽和电流变等技术上有广泛的应用前景。

中国科学院化学研究所钱元院士紧跟国际上导电高分子的研究,于 70 年代末期开创了我国导电高分子的研究。该所在导电聚乙炔、聚噻吩、聚吡咯、聚苯胺等典型的导电高分子体系上,开展了深入的研究,在分子设计、合成、结构表征,光、电、磁物理性能,结构与性能关系,掺杂和导电机理以及技术上应用探索等方面取得卓有成效的研究成果,并在国际国内具有较高的学术地位。除此之外,长春应用化学所,浙江大学,南京大学,吉林大学,华中工学院,华南理工学院,西安交大等单位也相继开展了导电高分子的研究。近几年我国导电高分子的研究已逐渐成为材料研究的热点,特别是高分子发光二极管的研究显得尤为突出。

3 导电高分子面临的挑战与机遇

如前所述,在短短的 20 余年里导电高分子领域发展迅速,硕果累累。但是,导电高分子发展至今天,无论在理

论上,分子设计和材料性能可控性以及技术应用上仍面临许多的挑战。而这些挑战恰恰为导电高分子在 21 世纪的发展带来极好的机遇,其挑战与机遇主要体现在:

3.1 “合成金属”是对掺杂型导电高分子的挑战

到目前为止,所发现的导电高分子都属于掺杂型的,即“掺杂”是实现导电高分子的重要手段。事实上,“合成金属”(Synthetic Metals)是导电高分子领域科学家的初衷。然而,至今所合成出的导电高分子无论在能隙、室温电导率和电导率-温度依赖性等方面都不能真正满足金属的要求,而仅仅停留在半导体的范畴。首先,从能带的观点看,导电高分子的能隙在半导体的范围($E_g = 1.5 \text{ eV} \sim 4.2 \text{ eV}$),这远不能满足金属能隙为零的要求。其次,目前导电高分子的电导率在 $10^{-1} \text{ S/cm} \sim 10^3 \text{ S/cm}$ 范围内,并且拉伸取向后电导率可提高 1~2 数量级,最高电导率可达 10^5 S/cm 。为此,从室温电导率来看,导电高分子离金属的电导率还有相当的距离。另外,“掺杂”是导电高分子领域的重要概念,虽然它与无机半导体的掺杂术语有根本区别。但是,从能带的观点看,“掺杂”是不能改变能隙,而仅仅是在能隙间引入定域态,即杂质能级,为此,从这种定义上讲,目前所研制的掺杂型导电高分子仍然没有脱离半导体的范畴。如前所述,可逆的掺杂/脱掺杂是导电高分子的重要特性之一,也正因为这一优异的特性使导电高分子在能源、电致变色、传感器、快速切换的隐身技术以及计算机的加密技术等有着广泛的应用前景。但是,脱掺杂却是导电高分子不稳定的根本原因之一。为此,不经掺杂而直接合成出具有金属电导率、低能隙($E_g \leq 0.1 \text{ eV}$)的导电高分子是对目前掺杂型导电高分子的挑战,也是真正实现“合成金属”的有效途径。

事实上,科学家早在 90 年代初就已经开始关注这一问题,尤其关于低能隙高分子理论计算研究非常活跃并卓有成效。类石墨结构^[11],交替键长理论^[11]和电子给体-电子受体交替排列^[13]等低能隙高分子的物理模型相继提出。这些都为低能隙高分子的分子设计提供了理论依据。关于各种理论模型的内涵、典型实例以及存在的问题请参阅参考文献^[2]。这里值得一提的是交替键长模型。该模型指出在芳环体系的高分子基态中引入醌环的高分子的能隙是随交替键长的增加而减少,即随醌环数目的增多而能隙减少。按照这一理论预计 Polyisothianaphthene 的能隙可达 0.01 eV ,这是目前世界上最接近零能隙的高分子。但遗憾的是到目前为止该化合物尚未合成出来。然而实验中却发现由 $\text{S}-\text{N}(0.155 \text{ nm})$ 和 $\text{N}-\text{S}(0.173 \text{ nm})$ 链交替构成的聚硫氮($\text{SN})_n$ 不经掺杂就具有金属电导,其分子结构式见右图。

($\text{SN})_n$ 的金属性已被下述实验事实证实^[14~15]: (1) 不经掺杂室温电导率高达 10^8 S/cm ; (2) 电导率-温度依赖性呈金属特性[负温度系数即($\frac{\sigma}{T} < 0$)]; (3) 塞贝克(Seebeck)系数为 μK 数量级,而且为负值,表明为电子导电; (4) 磁化率 χ 不随温度变化,并具有抗磁性($\chi = -3.1 \times 10^7 \text{ emu/g}$)。因此, ($\text{SN})_n$ 不仅是目前交替键长理论的成功范例,也是目前世界上第一个低能隙的导电高分子。综上所述,虽然各种低能隙本征(无须掺杂)的导电高分子理论模型已经提出,而且有些理论也被实验证实或部分证实。但是,在材料合成上都遇到非常大的困难。除($\text{SN})_n$ 以外,尚未从实验中合成出不需掺杂而具有金属电导率的低能隙导电高分子。这意味着低能隙理论的完善和材料合成将成为导电高分子的发展带来极好的机遇。

3.2 结构确定、具有金属电导率的导电高分子齐聚物的分子设计和合成

由于,导电高分子具有高分子的结构多样化和凝聚态结构的复杂性带来结构-性能关系的不确定性,从而阻碍了导电高分子结构-性能关系的深入研究。但是,大量的实验事实证明当 $n \geq 10$ 的齐聚物(Oligomer)的室温电导率与高分子的电导率相当。这为导电的齐聚物的研究提供了实验依据。事实上,由于齐聚物具有确定的分子结构、可溶、易结晶等特点,因此,有可能深入研究齐聚物的分子结构与载流子的产生、传输和复合的关系,为进一步完善现有的孤子导电机理和发现新型的导电机理打下基础。同时,也有利于结构-性能关系的深入研究。特别是具有结构

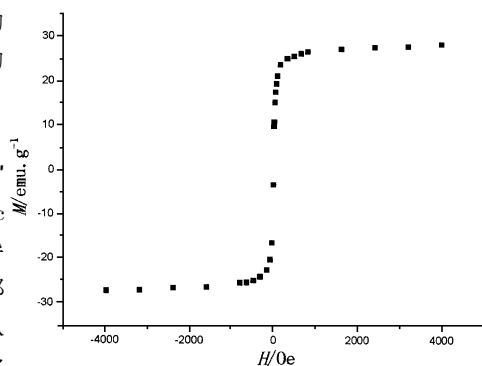
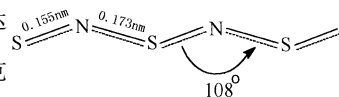


图3 含纳米磁性颗粒的导电聚苯胺复合物的磁学性能



确定和金属电导的齐聚物分子设计和合成将为 21 世纪高分子材料的发展方向,它为分子导线的制备打下基础。

3.3 分子导线和分子器件

自从 1991 年碳纳米管(carbon Nanotubes)发现以来^[16],它作为世界上最细的“分子导线”(直径仅为 1.5nm)引起科学家的广泛重视。在短短的几年内碳纳米管的研究不断在 Science 和 Nature 杂志上发表。我国科学家在碳纳米管的取向生长和超长制备上取得重要成果^[17~18]。作者在碳纳米管与导电高分子(聚吡咯,PPy)的复合^[19],碳纳米管的三阶非线性光学系数 $\chi^{(3)}$ ^[20]的测定,碳纳米管的新型分散剂的探索^[21]以及单根碳纳米管结构的 STM^[22]观察等方面作出重要贡献。在碳纳米管发现后,氮化硼(BN)纳米管^[23],BC₂N 纳米螺旋管^[24]和银纳米导线^[25]相继出现。科学家之所以如此热衷于管状纳米材料的研究是因为:首先,纳米管是制备“纳米导线”或“分子导线”的理想模板;其次,纳米管可作聚合或反应场所而合成所谓的“纳米线圈”或“分子线圈”。其三,含填充材料的纳米管可能呈现新的物理化学(光、电、磁)性能,有可能在催化、分离、存贮等技术上得到应用。因此,纳米管状材料的研究已成为材料科学的研究热点,具有重要的科学意义和技术应用背景。

另外,随着超大规律集成技术的发展,由分子材料替代半导体材料和电子工程向分子工程的过渡已是微电子技术发展的趋势。为此,分子器件和功能分子等新概念相继出现。事实上,导电高分子本身就是分子导线。但是,用常规的方法所得到的导电高分子均为颗粒形貌。因此,“分子导线”或导电高分子微管(或纳米管)的研究引起科学家的广泛关注,最近几年有长足的进展。例如,Martin^[26~29]等采用“模板聚合”(Template Polymerization)方法成功地制备出聚乙炔、聚噻吩、聚吡咯和聚苯胺微管。特别是 Kondo 等^[30]采用分子束沉积方法在 GaAs(100)上制备出聚二乙炔导线。作者采用现场掺杂聚合(in-situ doping Polymerization)成功地制备出导电聚吡咯和聚苯胺微管^[31~33]。与“模板聚合”和分子束沉积方法相比,作者所采用的方法更为简便,但是,用该方法所得到的微管的重现性和规整性仍需进一步改善。

综上所述,从理论上讲虽然导电高分子可以看成分子导线,但是从实验中如何获得纳米级或分子导线和分子线圈?如何从功能分子“自组装”为分子器件等系列问题都是对导电高分子的严峻挑战。这些挑战不仅涉及深层次的基础理论研究,而且也涉及高难度的纳米、超薄和自组装技术。显然,这些都为导电高分子的发展开拓了广阔的发展机遇。

3.4 导电高分子实用化面临的挑战与机遇

如前所述,导电高分子在能源、光电子器件、电磁屏蔽、隐身、乃至生命科学都有广泛的应用前景。但是,至今未实现导电高分子的实用化。事实上,实现导电高分子在技术上的实用化是一个相当复杂的过程。它不仅涉及导电高分子材料本身的基础理论和研究的广度和深度,而且还必须解决技术应用中所涉及的技术工艺等问题。因此,导电高分子的技术上实用化是一个系统工程。为了实现导电高分子技术上的应用,首先必须解决导电高分子本身的稳定性,功能化,加工性和纳米化等问题。如前所述,脱掺杂是导电高分子电学和热稳定性差的根本原因。因此,不经掺杂实现导电高分子或阻止导电高分子的脱掺杂过程的发生是改善导电高分子的稳定性的有效途径。其次,技术上的应用往往要求导电高分子多功能化,如电磁屏蔽和隐身技术则要求导电高分子兼具电磁功能。又如,为了实现导电高分子在光电子器件上的应用,则往往要求导电高分子兼具透明性和导电性。因此,通过物理或化学方法使导电高分子或复合物赋予多种功能以满足技术上应用要求是对导电高分子技术上实用化的另一重要挑战。第三,导电高分子虽然具有高分子结构多样化的特点,但是它无论在可溶性、拉伸性和可塑性、成膜和成纤等方面远不如普通的高分子材料。因此,解决导电高分子的加工性和满足绿色化学的要求是实现导电高分子技术上实用化而面临的又一挑战。众所周知,由于尺寸和量子效应使纳米材料具有特异的物理和化学性能从而拓宽了材料的技术应用范围,致使纳米材料成为材料科学的研究热点。同样,21 世纪导电高分子也面临着纳米化的严峻挑战。

4 结语

尽管导电高聚物研究仅有 20 余年的历史,但无论在材料的设计和合成,掺杂和导电机理,结构与性能,加工性和稳定性以及在技术上的应用探索等方面均已取得长足的进展,并正向实用化的方向迈进。但是,在基础理论研究方面,导电高聚物面临着“合成金属”、分子导线和分子器件的挑战;在应用基础和技术应用方面,导电高聚物也面

面临着材料功能化, 纳米化和实用化的挑战。若这些挑战所带来的发展机遇与导电高聚物本身的强大的生命力相结合, 坚信这必将成为 21 世纪材料科学的研究前沿。

5 参考文献

- 1 Shirakawa H, et al. J Chem Soc, Chem Commun, 1977, 578
- 2 万梅得, 李永舫. 有机固体. 朱道本, 王佛松主编, 上海: 上海科学出版社, 1999 年, 印刷中
- 3 万梅香. 高技术有机高分子材料进展, 黄维恒, 闻建勋主编, 北京: 化学工业出版社, 1994, 188~222
- 4 万梅香. 香港化学, 1998, 2: 25
- 5 Su W P, Schrieffer J R, Heeger A J, Phys Rev Lett, 1979, 42: 1698; Phys Rev B, 1980, 22: 2209
- 6 Wan Meixiang, Wang Ping, Cao Yong, Qian Renyuan. Solid State Commun, 1983, 47: 759
- 7 Wan Meixiang. Chinese J Polym Sci, 1989, 7: 330
- 8 范俊华, 万梅香, 朱道本. 高分子通报, 1997, 1: 22
- 9 Burroughes J H, et al. Nature, 1990, 347: 359
- 10 Wan Meixiang, Zhou W X, Li J C, Synth Met, 1996, 78: 27
- 11 Brédas J L, et al. J Chem Phys, 1981, 75: 255
- 12 Havinga E E, et al. Synth Met, 1993, 55~57: 299
- 13 Brédas J L, Synth Met, 1989, 17: 115
- 14 Fincher C R, et al. Solid State Commun, 1978, 27: 489
- 15 Weinberger B R, et al. Phys Rev, B, 1979, 20: 233
- 16 Lijima S. Nature, 1991, 34: 56
- 17 Xie S S, et al. Science, 1996, 274: 1701
- 18 Pan Z W, Xie S S, et al. Nature, 1998, 394: 631
- 19 Fan Junhua, Wan Meixiang, et al. J Polym Sci, in press
- 20 Xuchun Li, et al. Appl Phys Lett, 1999, 74: 164
- 21 万梅香, 范俊华. 中国专利, 专利申请号 981206298.8, 申请日期 98.10.19
- 22 Wan Meixiang, Fan Junhua, Zhu Chuanfeng, Wang Chen. Chem Mat, in press
- 23 中国科学, 1997 年 6 月 16 日报导
- 24 Louis, et al. Phys Rev B, 1995, 51: 11229
- 25 Korgel B A, et al. Adv Mater, 1998, 10: 661
- 26 Martin C R, et al. Adv. Mater, 1991, 3: 457
- 27 Martin C R, et al. Synth Met, 1993, 55: 1165
- 28 Cai Z, et al. J. Am. Chem Soc, 1989, 111: 4138
- 29 Liang W, et al. J Am Chem Soc, 1989, 112: 9666
- 30 Kondo T, Ishii A, Muekata H. Physica E (Amsterdam), 1998, 2: 991
- 31 Huang Jie, Wan Meixiang. Solid State Commun, 1998, 108: 255
- 32 Huang Jie, Wan Meixiang. J Polym Sci Polym Chem, 1999, 37: 151
- 33 Shen Youqing, Wan Meixiang. J Polym Sci, in press

Conducting Polymers

Wan Meixiang

(Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, P.R.China)

Summary A review with 33 refereces on structure characteristics, physical and chemical properties, technical application, progress and challenge for the conducting polymers.

Key words Conducting polymes, Doping, Soliton polaron, Bipolaron, Molecular wire and devices, Light-emitting diode(LED)