



高分子科学的几个重要研究方向与进展

董建华

(国家自然科学基金委员会化学科学部, 北京 100085)

摘要:介绍了能源高分子、催化功能高分子和基于一碳化学的高分子合成等领域的研究动态、进展与尚需关注的重要问题。

关键词:光电功能高分子; 储能高分子材料; 共价多孔有机高分子; 高分子催化剂; 一碳化学

本文是为纪念我的导师江英彦先生而撰写的综述。有关江先生的学术与科技交流等方面的业绩请读者参阅专论^[1]。结合作者目前所从事工作实际,选取了江英彦先生生前曾经涉猎过的几个研究领域,如能源高分子、催化功能高分子和基于一碳化学的高分子合成等,对这几个领域的近年来的研究进展、目前研究尚需解决的主要问题等进行介绍。

1 能源高分子

在修订国家自然科学基金高分子学科的资助领域代码时,考虑到用于能源领域高分子材料越来越重要,将原相关条目整合并扩充,特增加了“能源高分子”条目。该条目到底包括哪些研究领域,有哪些重要科学问题,有哪些重要进展,这些就是本段落要回答的。

光电转换功能高分子:塑料光伏,新型高性能有机太阳能电池因具有重量轻、柔性、可湿法加工从而易于大面积化而受到广泛关注。高分子太阳能电池目前的前沿方向有:设计合成 D-A 型共轭嵌段高分子,使其能形成 p-n 异质结;在聚合物链中引入 N、S、Se、P 和 F 等杂原子,通过改变化学结构调整聚合物能级;发展 n 型半导体聚合物,逐步实现全高分子型太阳能电池;设计合成具有二维结构共轭高分子,因主链和侧链分别吸收不同波长的太阳能而拓宽吸收,提高太阳能利用率;通过在聚合物侧基引入离子化等基团优化共轭高分子层间界面性能;通过优化器件结构提高光电转换效率和器件稳定性,通过聚集态结构调控等获得优异器件稳定性;发展适合大面积生产的溶液制备工艺加工技术如卷对卷技术、喷墨打印技术,为大规模工业化技术做储备^[2,46]。

在有机电致发光领域,有机发光二极管(OLED)已经发展了 20 多年。OLED 具有低耗、环保、安全等特点,可以制成柔性、透明且十分轻薄的器件,被认为是目前最有发展前景的照明技术之一。白光 OLED 研究已取得显著进展,但还需进一步提高器件的性能,特别是高亮度下的功率效率和寿命。

塑料激光是有机高分子电泵浦激光的简称。该领域自 1996 年发展至今,尚未取得重大突破。塑料激光具有增益系数高、自吸收系数小的特点,具有发展前景。在该领域,如何降低损耗、提高激光增益,提高载流子迁移率、固态发光效率、热稳定性,减小光损失仍是需要努力的。设计合成了多臂聚合物,采用该类有机半导体获得了优异结果^[3,4],受到国际同行广泛关注。

值得注意的是:有机光电材料固态发光效率低常与聚集发光猝灭有关,而唐本忠提出并发展的“聚集诱导增强发光”(AIE)效应对解决此问题有着重要意义^[5]。

热电高分子材料是非常有希望的一类能源高分子。一般有机高分子材料热导性很低,而这恰恰是最适合于热电材料的特性,但是,一般有机高分子材料电导性差,不利于作为热电材料。解决该问题的途径

是采用复合体系,如以单臂碳纳米管、聚(3,4-二氧乙撑噻吩)(PDOT)、磺化聚苯乙烯、聚乙酸乙烯酯复合,获得的复合材料室温下热电系数高达 $160\mu\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}^2)$,比已有聚合物复合体系提高一个数量级^[6]。室温下电导率高达 $10^5\text{S}/\text{m}$ 。碳纳米管最佳含量为 60%(wt)。该研究表明某些导电高分子/碳纳米管复合体系是轻质、柔性热电转换材料。

储能高分子体系:锂离子电池具有许多特点,如高能量密度、高输出电压、长循环寿命、环境污染小等,虽已在消费电子市场占据主导地位,并力争在未来电动汽车和可再生能源储存等大规模储能领域发挥重要作用,但仍有一些问题须解决。

以聚合物电解质代替有机电解质,大幅提高这类电池安全性和能量密度等综合性能,可有效缓解甚至消除电解质与电池材料之间发生的化学反应,避免电解质渗漏;因机械强度高和柔韧性好,有望利用聚合物电解质以“印刷”技术制备锂离子电池,拓展锂离子电池在“柔性”器件上的应用,并进一步降低制造成本。聚乙二醇是最早应用的聚合物,长期以来,许多研究者通过各种途径提高其离子迁移速度。最近,以离子液体为单体,合成聚离子液体来获得新型聚电解质方面也取得了重要进展。锂离子电池电解质必须具备宽的电化学窗口和优异的离子传导性和热稳定性。发展高密度储能、快速充放电高分子体系仍然是具有挑战性的研究课题。

质子传导高分子可以作为燃料电池质子交换膜,聚合物电解质膜燃料电池的优点是:具有工作温度低、启动快、能量转化效率高、工作电流和比功率高等,因而受到广泛关注。燃料电池膜要求具有如下性质:良好的质子电导率、水分子电渗透作用小、气体渗透性尽可能小、电化学稳定性好、干湿转换性能好、力学性能、可加工性好和价格适中。

将磷鎓基团引入聚乙烯侧基实现功能化,改性方法简单、获得的聚合物具有优异的离子传导性和力学强度,性能稳定性好,在 15M KOH 条件下一个月都没有降解或性能降低^[7]。

由于质子交换膜燃料电池存在缺点,如不耐 CO 的污染、阻醇性能差、催化剂主要为铂、钌等贵金属催化剂,品种少且价格昂贵等。

近年来,阴离子交换膜燃料电池成为另一类备受研究者广泛关注的燃料电池。在具有阴离子交换功能的高分子膜发展中,人们注意到如下问题:在碱性介质中,尤其在较高温度下,高分子链上所带季铵基团容易受到氢氧根离子进攻发生亲核取代反应;如果高分子链中存在 β -氢,氢氧根离子也会进攻 β -氢发生霍夫曼降解,此时高分子膜失去了离子传导性。同时,有些聚合物主链,如聚芳醚类,在碱性条件下容易受氢氧根离子进攻发生链降解反应,导致高分子膜力学性能大幅下降而失去使用价值。此外,与质子交换膜相比,阴离子交换膜的离子传导率较低,这主要是因为氢氧根离子在稀水溶液中的迁移率低于质子迁移率。因此,提高阴离子交换膜的碱稳定性、离子传导率成为亟待解决的关键问题。严锋等^[8]以 DFT 计算、设计合成多种聚离子液体,研究了具有大空间位阻的咪唑阳离子基团的碱稳定性,揭示了离子化合物的 LUMO 能级与其耐碱稳定性之间的关系,实现了阴离子交换聚合物膜的可控设计,基于此设计合成了耐碱稳定性优异的咪唑盐阴离子交换膜。

彭慧胜课题组在高性能纤维状新能源高分子复合材料和器件领域取得了一系列重要突破,这些成果适应了现代电子技术微型化、集成化和柔性化的发展要求。

以具有优异力学和电学性能的取向碳纳米管和高分子/取向碳纳米管复合纤维为电极,发展出新型纤维状太阳能电池、超级电容器和锂离子电池,提出并发展了可以同时实现利用太阳能通过光电转换发电和利用该复合体系储存电能的纤维状集成器件。与传统的平面状能源器件相比,直径在微米尺度的纤维状太阳能器件具有质量更轻、柔性更好、集成性更强等优势,更为独特的是可以通过纺织技术进行大规模、低成本制造,便于应用。

以取向碳纳米管复合纤维或高分子基复合纤维为电极,对两个纤维电极进行缠绕,分别发展出纤维状染料敏化太阳能电池和聚合物太阳能电池。发现新型纤维电极具有三维跃迁导电模式,可以有效促进电荷的快速分离和传输,从而获得高效率的太阳能电池。他们设计的高度均匀取向碳管纤维确保了高效率的电荷传输,比目前文献已有的其它工作更有效。经第三方认证,发展的纤维状太阳能电池光电转化

10.14028/j.cnki.1003-3726.2014.12.001

效率达到 8.45%。这是目前文献报道的纤维状太阳能电池的最高效率。在此基础上,他们还提出并发展了具有弹性的纤维状染料敏化太阳能电池和聚合物太阳能电池,以满足柔性电子学的发展要求。

精细纳米结构的复合纤维电极具有比表面积高和电学性能优异等特点,可以同时作为超级电容器和锂离子电池的活性物质和集流体。彭慧胜课题组把包裹电解液的高分子复合纤维相互缠绕,直接制备纤维状储能器件,并通过复合导电聚合物或者金属氧化物等有效提高纤维状器件的电化学性能。另外,为了满足纤维状器件在集成和编织过程中可拉伸的要求,他们还将弹性高分子纤维与取向碳纳米薄膜复合,提出并发展了可拉伸纤维状超级电容器和锂离子电池^[9]。可拉伸锂离子电池的代表性工作见文献^[10]。

为了进一步满足微电子产品高度集成化和微型化的发展要求,彭慧胜课题组在纤维状太阳能电池和超级电容器的研究基础上,提出并发展了纤维状光电转换与储能集成器件。在典型的纤维状集成器件中,光电转换和能量存储单元共享纤维电极,其中纤维电极的一端涂有光电转换活性物质,另一端涂有电化学储能材料,通过简单且低成本的方法,在一根纤维上同时实现光电转换和储能^[11]。在全纤维状能源系统迈出了关键一步,为发展下一代光伏器件指出了富有前景的新方向。

由于纤维状的电极材料和能源器件具有独特的结构和性能,彭慧胜课题组将其进行编织,得到织物状能源器件。他们主要通过两种方法实现连续构建:一方面,通过对纤维状能源器件进行编织,得到大面积的织物状太阳能电池、锂离子电池、超级电容器以及光电转换与储能的集成器件;另一方面,基于纤维电极的高度取向纳米结构和良好的柔性,可以将其编成织物作为高性能电极,然后两个织物电极堆叠得到织物状能源器件^[12]。

太阳光催化分解水制氢是未来最重要和最便捷的制氢技术之一,采用二维氮化碳骨架作为光催化剂,成功实现了高效的可见光分解水制氢,量子效率已提高至 9.6%,光吸收边带可红移到 750nm。这种通式为 C_3N_4 的二维高分子半导体能将光能转化,催化分解水制氢、制氧或转化 CO_2 ,打破了光催化剂都含有金属的传统认识^[13]。

在聚四氟乙烯多孔膜上,进行导电高分子聚合制得聚(3,4-二氧乙撑噻吩)(PEDOT)获得还原性电极,能催化还原,生成氧气,实验表明该电极运行 1500 小时仍保持性能不变。

该膜所具有的大表面积使氧气还原速率可与铂电极相媲美,能替代以昂贵的铂电极将水转化为氢气和氧气。与铂电极不同,这种有机电极的催化速率不会因一氧化碳的存在而减慢,而一氧化碳会在某些应用场合以污染物存在^[14]。

相变储能材料:利用有机高分子材料室温附近结晶与融化过程吸热或放热,进行能量转换储存,调整环境温度。这类相变储能材料具有清洁、可重复利用和高效的特点,一般存在高分子过冷结晶和储热量低等不足。将这类聚合物包覆在在微胶囊中,利用微纳尺度空间中聚合物的受限结晶来调控聚合物结晶是该领域的重要研究方向。此外,通过设计合成梳状聚合物改进聚合物结晶性能也是重要途径之一,我国学者开展了系统的受限结晶和相态转变行为研究,详见文献^[15,16]。

2 聚合物催化剂

自然界中,许多化学反应都是经催化过程完成的,而催化过程多与酶相关,即大分子物质中具有特殊活性位点,这些位点一般是金属配合物,而合成化学的催化剂多为金属配合物。目前 90% 以上的化工过程是基于催化剂实现的,现代化学工业对于高选择性和高产率产品提出越来越高的要求。高分子催化剂经历了由带功能基团的高分子与金属配合物配位固载、配位聚合物等历程。这里着重介绍具有催化功能的多孔共价有机高分子材料研究近况。

大家熟悉的多孔催化材料是沸石分子筛。但沸石分子筛材料的孔尺寸偏小,变化范围偏少,且仅有少数几种,难以进行特殊的功能化等。为了解决这些问题,发展了介孔分子筛。以有机分子为模版,通过如正硅酸乙酯等缩聚反应进行溶胶-凝胶化,形成有硅氧三维网络结构材料,用溶剂去除有机分子模版就得到具有介孔的分子筛,使其具有高度有序的孔道结构;孔径远大于传统分子筛,且孔径尺寸可在较宽范

围变化,能实现孔径单一分布、介孔形状多样、孔壁组成和性质的可调控,拓宽了分子筛在催化等许多领域的应用价值。此发现使得许多传统有机硅合成反应、溶胶-凝胶化学等成为热门研究领域。但该方法依然存在孔尺寸与结构可变性等方面的局限性。随后发展了配位骨架材料(MOF),MOF 是由含氧、氮等元素的多齿有机配体与过渡金属离子形成的配位聚合物,其具高孔隙率、孔径可调、大的比表面积、物理化学性质可调,以及以有机官能团修饰较容易等优点,使其在包括催化在内的许多领域具有潜在的应用前景。然而该类材料通常由弱的配位键连接而成,热稳定性相对较弱;对酸、碱、空气、水汽等相对敏感,其化学稳定性尚不能满足许多应用需求。在脱除孔道中客体分子的过程中易发生骨架的坍塌。这促使人们去寻找新的构筑永久多孔材料的方法。由有机分子以共价键连接形成的共价有机骨架材料(COF)应运而生,并以其大的比表面积、低的骨架密度、可控的化学物理性质、易功能化以及合成策略多样化等优点,在短短的十年中得到了蓬勃的发展。

与配位和自组装得到的多孔骨架材料相比,共价高分子骨架的稳定性、反应的可靠性和重复性均获得大大提高。而且,因有机构筑单元和合成反应的丰富多样性,特别适合于设计稳定的功能化多孔骨架材料。共价有机骨架材料具有可以设计的孔径,由于有机分子构筑基元的丰富多样性和可功能化,能够形成柱状点阵结构和敞开的一维孔道,这为高分子科学开辟了前所未有的结构和功能设计的新时代。催化功能 COF 研究尚较少,作为新型多孔材料,COF 规整的孔结构、可调控的内部化学环境及在酸碱条件的稳定性使其在催化领域展现出较强前景。设计出可以简洁合成的功能化构筑基元,然后采用自下而上的策略,通过在 COF 的孔道引入催化中心和功能基团,可以提高 COF 的催化性能。

非均相催化在化工生产中具有重要的研究价值。基于多样的化学合成,共价有机骨架材料可以同时具有多孔性与催化活性相结合,将催化活性单元共价连接成有机骨架,或是后修饰到骨架上,从而极大提高其与反应物分子的作用,有望实现在催化反应中的择型、手性选择和多次循环利用等;此外,还需发展降低成本技术,探索大规模工业化生产及实际应用技术。

目前,利用共价有机骨架作为催化剂的反应有氧化反应、Suzuki 偶联反应、酰化反应、光催化反应、非对称加成反应等。具有配位能力的共价有机骨架可高效络合金属,比表面积大,显示出优异的催化活性。例如,铁卟啉构筑的无定型共价有机骨架,其比表面积高达 $1270\text{m}^2/\text{g}$ 。含有高密度铁卟啉催化活性中心和大比表面积的骨架^[17],催化氧化硫化物的反应转化数可达 10^5 ,催化氧化烯烃的转化数可高达 10^7 以上,显示出对多种底物的高效催化能力^[18]。具有共价有机骨架的功能基团还可以络合钯、铂、铱等过渡金属,展示了多种催化作用^[19~21]。采用“编织”的方法将苯和三苯基膦共交联成多孔有机材料,络合二氯化钯用于多相芳基氯代物的 Suzuki-Miyaura 偶联反应^[22]。由于微孔结构的存在,有效地分散了钯活性位,阻止了钯的团聚和沉降,使该催化体系展现出很高的催化活性,在温和反应条件下,催化芳基氯代物与苯硼酸的偶联效果远高于均相的氯化钯及二氯化二(三苯基膦)钯,拓展了超交联微孔聚合物材料在传统 Suzuki-Miyaura 偶联反应中的应用。该类催化剂的合成方法简单,条件温和,合成效率高。

以均三苯甲醛和对苯二胺作为构筑基元,构建了孔道上含有亚胺键的 COF 材料,通过与醋酸钯的配合形成具有催化活性位点的 Pd/COF 材料,在催化 Suzuki 反应中呈现出非常好的活性和底物适用性,而且可以很好地回收利用^[23]。谢志刚合成了带有催化剂基元的共价有机聚合物材料,并获得了可见光催化反应活性^[24]。

对这样一类新型高分子,多学科交叉研究是非常必要的。我们高分子学科的学者需要打破传统思维框框,积极拓展研究领域。千万不要见到这样的工作,就按传统高分子去要求,机械僵化地询问这类高分子分子量是多少,要知道这类高分子的功能主要取决于三维结构,而非分子量。

另一个值得提及的是超分子配位聚合物作为高分子催化剂的工作^[25]。单体一端带有手性膦配体,另一端带有可形成多重氢键的 U_{py} 基元,与铈配位获得的聚合物具有催化氢化的作用,且立体选择性 ee 值高达 90%,该高分子催化剂合成简单、易回收重复利用。

催化过程不仅对形成共价键的合成化学非常重要,而且对于以弱相互作用进行的组装过程更为重要,只是这类问题的认识与研究才刚刚开始,还很粗浅,值得关注。事实上,在自然界的生命过程中有许

10.14028/j.cnki.1003-3726.2014.12.001

多催组装^[26,27]。催组剂是一类能够在不改变总吉布斯自由能变化的条件下加速组装的物质,这一被促进的过程可称为催组装“catassembly”。

3 一碳化学与高分子合成

一碳化学与我们高分子学科相关性最强的就是将二氧化碳、一氧化碳等作为单体聚合,形成高分子。

我国学者在二氧化碳与环氧烷共聚合成脂肪族聚碳酸酯方面取得一系列成果。作者曾详细介绍过吕小兵课题组的研究进展^[28],读者也可阅读他们课题组的相关综述^[29]。

他们既能将反应产物几乎全部转化为环状碳酸酯,也能都生成交替共聚物,最为首创的是将环己烯环氧烷或环戊烯环氧烷与二氧化碳进行完全交替共聚、对映选择性高立构规整聚合,获得结晶性脂肪族聚碳酸酯^[30]。

利用其它系统采用非均相的锌-钴双金属氰化络合物双金属氰化络合物催化剂,对二氧化碳与环氧烷共聚合成脂肪族聚碳酸酯进行研究,也取得了一系列重要进展,实现了非均相催化 C1 单体与环氧化物高效率、区域选择性和全交替共聚^[31,32]。

一氧化碳作为单体的研究主要集中在与烯烃共聚形成聚酮,如与苯乙烯交替共聚,再经溴化、脱溴化氢环化反应获得共轭高分子^[33]。

一氧化碳与亚胺进行交替共聚获得聚多肽类新型高分子,其意义在于不用氨基酸做原料就能获得聚多肽类化合物^[34~36]。聚合反应在压力为 55bar、50℃下进行,反应 6h 获得的聚合物分子量高达 28000,其 DP 仅为 1.18。一氧化碳与丙烯酸酯或乙酸乙烯酯等共聚可获得无规共聚物^[37],如一氧化碳与丙烯酸酯共聚^[38]。对于二氧化碳与环氧烷共聚合成脂肪族聚碳酸酯形成产业化技术、向大工业转移这样一个难度很大的研发工作,王献红等开展了卓有成效的工作^[39]。其它未提及的相关进展参见文献^[39]。

4 结语

在上述领域,江英彦先生是国内最早开展研究并取得具有一定影响的成果,此外,江先生还带领团队在国内较早开展了气体分离膜、高分子配合物液晶、氢键型高分子复合体系、高吸水性树脂和传感高分子等领域的研究工作。当前,十分热门的许多领域或多或少都是基于上述早期研究而演变或衍生出来的。如今,分离膜领域依然十分重要和活跃^[40],水凝胶^[41]和超分子聚合物等领域吸引了非常多的研究小组,响应性高分子材料^[42]、倍半硅氧烷笼^[43](POSS)、液晶弹性体^[44]、硅橡胶^[45]等也都是目前热点领域。其它高分子领域研究进展,限于篇幅,不再赘述,读者可参阅文献^[28,46]。

参考文献:

- [1] 白春礼主编.《20 世纪中国知名科学家学术成就概览 化学卷 第四分册》.科学出版社,北京 2014:371~379.
 - [2] 李永舫,何有军,周炜.聚合物太阳能电池材料和器件,化学工业出版社,北京,2013.
 - [3] Lai W Y, Xia R D, He Q Y, Levermore P A, Huang W, Bradley D C. Adv Mater, 2009, 21(3): 355~360.
 - [4] Lai W Y, He Q Y, Zhu R, Chen Q Q, Huang W. Adv Funct Mater, 2008, 18(2): 265~276.
 - [5] Qin A, Lam J W Y, Tang B Z. Prog Polym Sci, 2012, 37, 182~209.
 - [6] Yu C G, Choi K, Yin L, Grunlan J C. ACS Nano, 2011, 5(10): 7885~7892.
 - [7] Noonan K J T, Hugar K M, Kostalik H A IV, Lobkovsky E B, Abruña H D, Coates G W. J Am Chem Soc, 2012, 134(44): 18161~18164.
 - [8] Lin B, Dong H, Li Y, Si Z, Gu F, Yan F. Chem Mater, 2013, 25: 1858~1867.
 - [9] Yang Z, Deng J, Chen X, Ren J, Peng H. Angew Chem Int Ed, 2013, 52: 13453~13457.
 - [10] Ren J, Zhang Y, Bai W, Chen X, Zhang Z, Fang X, Weng W, Wang Y, Peng H. Angew Chem Int Ed, 2014, 53(30): 7864~7869.
 - [11] Chen T, Qiu L, Yang Z, Cai Z, Ren J, Li H, Lin H, Sun X, Peng H. Angew Chem Int Ed, 2012, 51: 11977~11980.
 - [12] Pan S, Yang Z, Chen P, Deng J, Li H, Peng H. Angew Chem Int Ed, 2014, 53: 6110~6114.
- 10.14028/j.cnki.1003-3726.2014.12.001

- [13] Zhang J, Zhang G, Chen X, Lin S, Möhlmann L, Lipner G D, Antonietti M, Blechert S, Wang X. *Angew Chem Int Ed*, 2012, 51: 3183~3187.
- [14] Winther~Jensen B, MacFarlane D R. *Science*, 2008, 321: 671~674.
- [15] Su Y L, Liu G M, Xie B Q, Fu D S, Wang D J. *Acc Chem Res*, 2014, 47: 192~201.
- [16] Shi H F, Zhao Y, Dong X, Zhou Y, Wang D J. *Chem Soc Rev*, 2013, 42: 2075~2099.
- [17] Chen L, Yang Y, Jiang D. *J Am Chem Soc*, 2010, 132: 9138~9143.
- [18] Chen L, Yang Y, Guo Z, Jiang D. *Adv Mater*, 2011, 23: 3149~3154.
- [19] Jiang J X, Wang C, Laybourn A, Hasell T, Clowes B, Cooper A I. *Angew Chem Int Ed*, 2011, 50: 1072~1075.
- [20] Palkovits R, Antonietti M, Kuhn P, Thomas A, SchuÅNth F. *Angew Chem Int Ed*, 2009, 48: 6909~6912.
- [21] Zhang P, Weng Z H, Guo J, Wang C C. *Chem Mater*, 2011, 23: 5243~5249.
- [22] Li B Y, Guan Z H, Wang W, Yang X J, Hu J L, Tan B E, Li T. *Adv Mater*, 2012, 24: 3390~3395.
- [23] Ding S Y, Gao J, Wang Q, Zhang Y, Song W G, Su C Y, Wang W. *J Am Chem Soc*, 2011, 133: 19816~19822.
- [24] Xie Z G, Wang C, deKrafft K E, Lin W B. *J Am Chem Soc*, 2011, 133: 2056~2059.
- [25] Shi L, Wang X, Sandoval C A, Li M, Qi Q, Li Z, Ding K. *Angew Chem Int Ed*, 2006, 45: 4108~4112.
- [26] 王宇, 林海昕, 丁松园, 刘德宇, 陈亮, 雷志超, 范凤茹, 田中群. *中国科学化学*, 2012, 42(4): 525~547.
- [27] Wang Y, Lin H X, Chen L, Ding S Y, Lei Z C, Liu D Y, Cao X Y, Liang H J, Jiang Y B, Tian Z Q. *Chem Soc Rev*, 2014, 43: 399~411.
- [28] 董建华. *化学通报*, 2014, 77(7): 631~653.
- [29] Lu X B, Ren W M, Wu G P. *Acc Chem Res*, 2012, 45(10): 1721~1735.
- [30] Wu G P, Jiang S D, Lu X B, Ren W M, Yan S K. *Chin J Polym Sci*, 2012, 30(4): 487~492.
- [31] Wei R J, Zhang X H, Du B Y, Fan Z Q, Qi G R. *Macromolecules*, 2013, 46: 3693~3697.
- [32] Zhang X H, Wei R J, Sun X K, Zhang J F, Du B Y, Fan Z Q, Qi G R. *Polymer*, 2011, 52: 5494~5502.
- [33] Cheng C, Guironnet D, Barborak J, Brookhart M. *J Am Chem Soc*, 2011, 133: 9658~9661.
- [34] Sun H L, Zhang J, Liu Q H, Yu L, Zhao J Y. *Angew Chem Int Edi*, 2007, 46(32): 6068~6072.
- [35] Sun, H L, Gu J L, Zhang Z S, Lin H, Ding F, Wang Q C. *Angew Chem Int Edi*, 2007, 46: 7498~7500.
- [36] Jia L, Sun H L, Shay J T, Allgeier A M, Hanton S D. *J Am Chem Soc*, 2002, 124: 7282~7283.
- [37] Chen E Y X, *Chemical Review*, 2009, 109: 5127~5214.
- [38] Nakamura A, Munakata K, Kochi T, Nozaki K, *J Am Chem Soc*, 2008, 130(26): 8128~8129.
- [39] 中国化学会编著. 二氧化碳的化学转化利用, 2012—2013 化学学科发展报告. 中国科学技术出版社, 北京, 2014, 204~216.
- [40] Li X L, Zhu L P, Jiang J H, Yi Z, Zhu B K, Xu Y Y. *Chin J Polym Sci*, 2012, 30(2): 152~163.
- [41] 姜雪, 贺继东, 代元坤, 张鑫. *高分子通报*, 2013, 8: 22~28.
- [42] Zhang S S, Chen C Y, Li Z B. *Chin J Polym Sci*, 2013, 31(2): 201~210.
- [43] 孙达, 李齐方, 陈广新. *高分子学报*, 2013 (11): 1424~1429.
- [44] 李娟, 吕亚非, 游维涛, 郭琳琳, 刘辰, 张孝阿, 齐士成. *高分子学报*, 2013 (11): 1430~1437.
- [45] 周玉丰, 芦艾, 刘艳伟, 李静莉. *高分子通报*, 2013, 8: 29~35.
- [46] 董建华, 张希, 王利祥主编. *高分子科学学科前沿与展望*. 科学出版社, 2011, 北京.

Progress in Several Topics of Polymer Science

DONG Jian-hua

(*Department of Chemical Science, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China*)

Abstract: The progress, the key issues and the trends in the fields of polymer for energy conversion and storage, polymer with catalysis functionality and the polymer synthesis based on carbon dioxide or carbon mono-oxide are mainly summarized.

Key words: Optical electrical active polymers; Energy storage polymers; Covalent porous polymers; Polymer catalysis; Polymer synthesis based on carbon-oxide chemistry