

# 项目申请指南

## 高分子科学近期重要进展与国家自然科学基金相关动态简介

董建华\*

(国家自然科学基金委员会化学科学部,北京 100085)

**摘要:** 高分子应用范围的广泛性特点致使高分子学科研究领域的多学科交叉性日趋增强。本文涉及的研究进展表明,多学科交叉高分子研究的成果非常引人注目。在国际化学与材料新兴前沿或热点前沿中的高分子相关方向,我国学者均表现不俗,在国家奖励和高分子技术转化方面也都有可圈可点之处。此外,本文对2018年国家自然科学基金委员会化学科学部资助代码与名称调整进行了简要说明。

**关键词:** 高分子科学; 学科进展; 国家自然科学基金

高分子学科的发展动态与趋势是笔者常常关注的事情。一年一度应邀概述这方面的情况是本文的主要任务。高分子研究进展部分分为高分子合成、共价有机框架聚合物、光电功能高分子、生物医用高分子、高分子组装、新型高分子材料等领域。由于每年都撰写此类概述,各分支领域年度间取舍略有不同。限于作者水平,选材与评述定有不妥之处,而篇幅所限也不允许本文包罗万象。与此同时,读者们很关心国家自然科学基金资助的相关动态,本文对此予以呼应、给予介绍,同时还对学科发展的其它方面进行了讨论。

## 1 高分子研究进展

### 1.1 高分子化学

**1.1.1 杂化聚合** 杂化聚合是指聚合体系中两种以上的不同机理的反应同时进行的聚合过程。朱新远和颜德岳等最早提出此概念<sup>[1]</sup>。他们以KH和寡聚聚乙二醇为引发体系,以甲基丙烯酸缩甘油酯为单体进行聚合,反应跟踪观察到单体的环氧基团的开环聚合与碳-碳双键链式聚合同时发生,即发生了杂化聚合。聚合产物为超支化聚醚-酯,在水中具有低临界溶解温度(LCST),通过调节寡聚聚乙二醇和单体比例或聚合物乙酰化反应可以改变所获得的超支化聚合物的亲疏水性,该类聚合物的LCST可在0℃~100℃范围调控。随后,张广照等<sup>[2]</sup>以乙烯基单体和环状单体这两类性质完全不同的单体,在单一有机催化剂作用下,实现两种单体以加成或开环聚合进行无规杂化共聚,所得到的乙烯类与酯类重复单元链段共同组成的线形共聚物是其它方法无法获得的。

**1.1.2 多组分聚合与无金属催化聚合** 通过合成获得序列精密控制的聚合物具有重要意义。多组分聚合是近期非常活跃的聚合方法,通过单体调变能够获得结构多样的功能高分子,同时也是一种精密控制单体序列的有效方法。胡蓉蓉等<sup>[3]</sup>提出“一锅、两步、三组分”的串联聚合,将第一步生成的活性中间体原位转化成高分子产物,避免了中间体的分离提纯,旨在开发简单高效、绿色环保的高分子合成方法。他们发展了无需金属催化的炔烃、单质硫和胺的多组分聚合,即由活化炔、芳香二胺、醛类化合物多组分一锅煮串联聚合反应<sup>[4]</sup>,聚合得到序列结构可控的聚芳杂环如四氢嘧啶、二氢吡咯酮聚合物,其分子量可达近7万,单体转化率达99%。这类聚合物是其它方法难以获得的,具有发光等特殊功能。他们以氨基与炔的点击聚合获得区域与立构控制的反式结构聚( $\beta$ -氨基丙烯酸酯)<sup>[5]</sup>。这是一种功能高分子的新合成

方法。

将具有聚集诱导发光特性的四苯基乙烯单元引入到聚合物主链中,实现了在爆炸物检测以及生物成像中的应用。该自发的点击聚合反应不仅操作简单、条件温和、反应高效、原子经济,还具有优异的区域选择性和立体选择性,同时催化剂成本低,避免了产物中金属催化剂残留的问题。

无金属催化聚合对生物医用或光电功能高分子的应用非常重要。前文<sup>[2~5]</sup>提到的聚合反应,通过调控单体结构活化可聚合基团,实现了从金属催化到无金属催化的跃升。

五元环  $\gamma$ -丁内酯是可替代石油基化学品的生物质衍生物之一,但  $\gamma$ -丁内酯环张力太小,其开环聚合很具挑战性。李志波等<sup>[6]</sup>从改变催化剂入手,设计并合成了新型环三磷腈碱(CTPB)。与传统的磷腈催化剂相比,CTPB的合成方法简单,成本低廉,可大批量制备。该环状环状磷腈有机碱具有三元碱性质,能催化己内酯、丙交酯、环氧丙烷或环氧丁烷的开环聚合,合成聚醚或聚酯,具有高活性和可调控性,适于制备高分子量生物可降解聚酯,并可实现嵌段共聚物的合成。该研究不仅拓宽了磷腈催化剂的种类,也为新型无金属催化聚合反应的开发提供了新的思路和方法。

胡蓉蓉等<sup>[7]</sup>以水为共聚单体进行聚合,不仅突破传统单体范围,而且为制备聚酰胺提供新反应路线。通过 Sonogashira 反应和取代反应,可对所得聚酰胺进行后官能化,此后修饰反应不需要纯化聚合物,采用“一锅法”就能进行。

陈永明等<sup>[8]</sup>以脂肪族一级胺与硫单质直接聚合获得聚硫代酰胺,研究了系列脂肪族二胺与对二卞胺的共聚合,所得聚合物具有较高的折光指数。

1.1.3 光氧化还原聚合 以有机化合物的光诱导氧化还原产生可控聚合活性中心、实现可控聚合是近年来的前沿热点,其中自由基可控聚合最为活跃。中国科学院科技战略咨询研究院、中国科学院文献情报中心和 Clarivate Analytics 共同发布的《2017 研究前沿》中(以下文中简称《2017 研究前沿》)，“可见光诱导的活性自由基聚合”的研究方向再一次列入化学与材料科学热点前沿(位列第三)。

通过催化剂的设计,利用实验与 DFT 计算研究光氧化还原自由基可控聚合机理。他们的研究表明:原子转移聚合光氧化还原催化剂 *N,N*-二芳基二氢吩嗪受光激发形成分子间电荷转移(CT)<sup>[9]</sup>,该 CT 类似于金属到配体的电荷转移。极化 CT 态处于最低激发能级,进而增强光激发催化剂与底物的电子转移。改变溶剂极性能观察到溶致变色,溶剂的极性既影响去活化路径,又影响氧化光催化剂和溴负离子的离子对强度。将此机理用于聚合调控,实现了甲基丙烯酸甲酯可控聚合,所得聚合物分子量分布小于 1.10。

具有“开关”调控转换态的聚合反应在材料设计与制备中非常重要。通过光、电场、立构震荡、试剂、酸碱度、力场等调控转换的可控自由基聚合已有许多报道。而在同一催化体系多重转换实现类似逻辑门的可控聚合仍然是一个具有挑战性的问题。Chen 等<sup>[10]</sup>报道了共价链接有 10-苯基吩嗪(PTH)的热响应有机凝胶与水凝胶,该类凝胶制备简便。在这样一个体系中,可同时实现温度高低、光照开关和有无催化试剂存在进行自由基聚合转换,适用于多种引发转移剂/引发剂和多种单体(包括丙烯酸酯、甲基丙烯酸酯、丙烯酰胺、乙烯基酯、乙烯基酰胺)。运用含 PTH 凝胶和光源,进行 RAFT/引发转移剂或 ATRP 聚合,利用引发链增长的多种刺激的多种排列组合与转换,获得了可控自由基聚合的“AND”门逻辑,实现了催化剂的循环利用,合成了嵌段共聚物。

以光氧化还原 Ni/Ir 催化剂与烷氧基锌共用,进行 *O*-羰基酸酐开环聚合,能很好地控制聚合物结构<sup>[11]</sup>,所得聚( $\alpha$ -羧基酸)分子量高达 140kDa 以上,分子量分布小于 1.1,具有全同立构规整性。该催化体系在 -20℃ 能加速开环与脱羧反应进行链增长,同时避免了生成羰基镍这类不期望出现的副产物。聚合的可控性和聚合物的性能都远高于其它有机催化或有机金属催化体系。

1.1.4 配位聚合 链式聚合中,连续在一个链端加聚成千上万个单体而形成高分子。如何获取实时链增长动力学仍然是个难题。在玻璃表面固定带有磁性粒子的易位开环聚合催化剂,进行环烯烃的易位聚合,通过磁性镊子利用磁性粒子对高分子增长链施加力场,使之克服链段间作用力伸展,实时观测到了单

个高分子链聚合增长过程<sup>[12]</sup>,在拉伸力场下,链增长表现出停滞-阶跃特征,意味着聚合过程并非连续过程,可归结为临近催化活性中心新形成的聚合物链段发生缠结、包覆催化剂,阻碍了单体插入并继续发生链增长,待其构象变化后,暴露出催化剂,再继续链增长过程。理论计算模拟重现了这个结果。

Coates 等<sup>[13]</sup>报道制备了具有序列长度精确可控的乙烯/全同聚丙烯嵌段和多嵌段共聚物。先加入丙烯,形成全同聚丙烯链段,待丙烯彻底消耗完毕后,将乙烯加入到聚合反应体系中,通过顺序加料两步法得到了聚乙烯/全同聚丙烯两嵌段共聚物。聚合物分子量随着单体转化率线性增加,并接近其理论值,也验证了这是一个活性聚合体系。聚丙烯段的链长可以通过调节单体与催化剂的比例来调节,而聚乙烯段的链长则可以更简单地通过调节乙烯的供给时间来实现控制。这类新的嵌段共聚物与聚乙烯/全同聚丙烯共混体系两相间具有良好的界面性能,并能够很好地改善共混体系相容性,得到韧性优异的聚乙烯/聚丙烯共混材料。

吴春姬和刘波等<sup>[14]</sup>以杂环稠合金属钪烷基配合物催化乙烯和丁二烯共聚合,成功制备出乙烯结构单元含量高达 45%(mol)的新型顺丁橡胶。与传统的顺丁橡胶相比,该新型橡胶拉伸强度高,抗冷流性好。结合理论计算阐明,丁二烯插入形成的金属钪烯丙基活性中心能够异构化为金属钪烷基活性种,这是实现乙烯和丁二烯顺 1,4-选择性共聚合的关键所在。向配体中引入大位阻的吸电子取代基,不仅提高了乙烯的插入几率,而且有效缩小了乙烯和丁二烯插入活化能的差别,采用连续加入丁二烯溶液的策略,可有效抑制结晶聚乙烯序列的形成。

利用稀土金属体系催化苯基联烯类单体的聚合,可以实现对于苯基联烯、对甲基苯基联烯、对氟苯基联烯和对甲氧基苯基联烯的高 2,3-选择性和高活性聚合<sup>[15]</sup>,发现在苯环的对位引入取代基可以得到结晶性聚合物,这是首例结晶苯基联烯类聚合物。上述<sup>[14,15]</sup>都是崔冬梅课题组长期致力于聚合新催化剂的研究所取得的系列成果。

陈昶乐等<sup>[16,17]</sup>基于 Pa 和 Ni 催化“链行走”聚合机理研究进行催化剂设计取得进展,其中配体结构对催化剂作用的影响始终是核心问题。该类催化体系可以用来合成功能化超支化聚合物或共聚物。他们提出了配体次级配位效应的概念,通过在配体上引入一个次级配位基团,次级配位基团与金属的相互作用强于极性官能团 X 与金属的作用,同时弱于乙烯的配位。这样,就可以有效地避免 X 与金属的配位以及相应的消除反应,同时又保持着烯烃聚合的活性。他们通过在配体上引入几类含氮的次级配位基团,成功验证了这一设想,实现了乙烯与一系列极性单体的共聚合反应。

他们又提出了配体-底物效应的概念,通过配体与极性单体上极性官能团的弱相互作用,有效地避免极性官能团与金属中心的配位以及相应的消除反应,从而实现对共聚过程的调节<sup>[18]</sup>。为了验证这一设想,他们将聚乙烯醇单元引入到膦磺酸钨以及镍催化剂中。聚乙烯醇单元中的氧原子可以与羧酸、醇、酰胺等单元形成有效的相互作用。实验表明,含有多个聚乙烯醇单元的金属催化剂在乙烯与极性单体的共聚反应中的性能更加优良。

将具有拉电子效应的五氟磺酸基引入到水杨醛亚胺基 Ni(II)有机金属催化剂配体取代基,用于乙烯聚合,能明显降低  $\beta$ -氢消除反应,进而能获得支化度低、高分子量的产物<sup>[19]</sup>,由于中性镍配合物对极性基团的容忍性,该体系能够用于水中进行乙烯聚合,获得超高分子量、无缠结、线形聚乙烯,产物以纳米晶分散在水中。

可持续发展是当今社会和经济发​​展所需考虑的重要因素。在聚合物领域,由于聚合物的不可降解或降解选择性差等问题会导致大量聚合物废弃物的产生。通常,聚合物降解条件非常苛刻,如高温、高压等,导致最终得到的原始单体收率低。如何将废弃的聚合物降解为原始单体是一项极具挑战性的难题。刘野等<sup>[20]</sup>设计了一种新型的环氧烷烃单体,可以与 CO<sub>2</sub> 在双核金属催化剂作用下发生交替共聚合反应,获得一种可循环使用的聚碳酸酯塑料。在 100℃ 条件下,这种聚碳酸酯塑料能够完全转化为环氧烷烃单体,转化率和选择性都高于 99%;而且,聚合/降解的可逆过程可以通过温度进行控制。多次循环利用过后,无论是环氧单体还是聚合物的性质都不会发生改变。

## 1.2 共价有机框架聚合物

“共价有机框架化合物”的研究方向,列入《2017 研究前沿》化学与材料新兴前沿热点前沿(位列第一)。

谭必恩采用了新的缩聚方法作为构建共价三嗪环骨架的新策略,在低温和简易条件下能制备三嗪环骨架材料<sup>[21]</sup>。该类材料具有层状结构和高比表面积,保持了本征的能带结构,避免了高温碳化失去能带结构的缺点。通过光解水测试,发现该类材料具有优异的光催化产氢性能,在可见光下最大产氢量比同类材料具有很大的提升。由于独特的层状结构,材料在碳化之后还可作为钠离子电池的负极材料,充放电容量很高。为该类材料的发展提供了一种新的策略。

赵新等以 D2h 对称四苯乙烯四胺与两种链长的 C2-对称联苯二甲醛和三联苯二甲醛缩合获得具有大三角形孔、小三角形孔和不等边六边形孔组合而成的三种异孔多结构混合链接的共价有机框架分子<sup>[22]</sup>,其结构经粉末 X-衍射和孔径分布分析所证实。

郭佳等<sup>[23]</sup>通过室温端炔基氧化偶联反应,在密胺海绵上原位聚合锌卟啉,形成了大孔海绵和 CMP 凝胶相互穿插的结构,除去凝胶中的溶剂后,可以使锌卟啉基 CMP 牢固附着在密胺骨架上,形成微孔和大孔的相互贯通。在催化酰基转移反应中,微孔结构中相邻的锌卟啉单元与底物形成反应中间体,而大孔结构有助于底物和产物分子的扩散,因此展现了很好的催化效率;相比于均相催化以及单纯 CMP 催化,反应速率显著提高。此外,当 CMP 在海绵中的负载率达到~50%时,海绵复合物仍然可以保持较好的弹性和复合稳定性,显示了该聚合物在实际使用中的应用潜力<sup>[24]</sup>。

江东林等<sup>[25]</sup>通过 Knoevenagel 反应,以有序的方式连接由  $sp^2$  碳构成的有机单元,并使其通过碳-碳双键连接成为特定的拓扑结构,获得高结晶性的二维  $sp^2$  碳全共轭共价有机框架结构( $sp^2$ c-COF)。该材料有序的二维层状结构,使其电子沿着二维  $sp^2$  碳构成的拓扑网络结构流动形成共轭。这种二维全共轭共价有机聚合物有别于传统的二维共价有机框架结构聚合物,在空气中可以长期放置(一年),并且在各种有机溶剂、水、酸或碱性条件下都表现出良好的稳定性。该  $sp^2$ c-COF 是一种有机半导体材料,其带隙为 1.9eV。

## 1.3 光电功能高分子

1.3.1 非富勒烯电子受体太阳能电池 在基于非富勒烯受体的聚合物太阳能电池领域,我国学者获得了系列原创性成果,取得突破性进展,处于国际领先地位。根据中国科学院科技战略咨询研究院、中国科学院文献情报中心和 Clarivate Analytics 共同发布的《2016 研究前沿》中,“基于非富勒烯受体的聚合物太阳能电池”的研究方向,在化学领域热点领域排第一位,也是中国学者引领国际研究的领域。中国在贡献度、引领度以及卓越表现上均大大超过美国。《2017 研究前沿》中,该领域再一次列入化学与材料科学热点前沿(位列第四)。基于该领域的卓越成果和可能进一步取得突破进展,国家自然科学基金委员会以科学部前沿导向“重点项目群”研究项目方式予以继续资助。

占肖卫等提出了稠环电子受体新概念,创新研制了氰基茚酮类芳杂稠环电子受体新体系,设计合成了多种高性能非富勒烯电子受体,构筑了高效率有机太阳能电池。占肖卫等发明的氰基茚酮类芳杂稠环电子受体是国际上最好的有机太阳能电池受体材料。他们的原创性工作引起了国内外同行的广泛关注和跟进,引领着非富勒烯受体领域的发展。两篇论文<sup>[26,27]</sup>入选“中国百篇最具影响国际学术论文”,且均入选 ESI 热点论文和 ESI 高被引论文。

侯剑辉等根据氟取代效应在分子能级、光谱调控和载流子迁移率的相关性系统研究所得到的规律,设计了几种新型有机光伏材料,包括非富勒烯电子受体、新型电子给体聚合物,将单结聚合物太阳能电池效率推进到 13.1%,而且在厚度在 100nm~200nm 时,电池 PCE 仍高达 12%,该结果对聚合物太阳能电池实用化很有意义。他们制备的叠层聚合物太阳能电池 PCE 推进到 13.8%。这两个结果都是当时世界上有机光伏电池最好的结果<sup>[28,29]</sup>。

刘俊等<sup>[30]</sup>创新性设计了含硼氮配位键的高分子受体材料,可以有效调节分子能级,获得两类含硼氮

配位键的高分子电子受体材料,以该材料替代富勒烯所制得的太阳能电池光电转换效率较高。我国学者在非富勒烯电子受体聚合物太阳能电池领域不断拓展和丰富着研究工作<sup>[31,32]</sup>。

双苝酰亚胺(PBI)因其很强的缺电子性质,可作为有机太阳能电池的电子受体。李韦伟等<sup>[32]</sup>设计合成了链节中带有单个 PBI 和 PBI 二聚体的共轭高分子,虽然它们的分子量、吸收光谱和能级相当,DFT 研究表明:因 PBI 二聚体中两个 PBI 间有很大二面角,其聚合物拥有高度扭曲的主链结构,利用这两类聚合物制备的太阳能电池性能有些差别,基于 PBI 二聚体的聚合物太阳能电池短路电流密度更高,PCE 达到 4.5%,该差别可归结为相态结构的差别。

陈红征等<sup>[33]</sup>设计制备的交叉交叉构型的二酮基吡咯并吡咯(DPP)衍生物,其中双螺茱萸为核、外围带四个 DPP 臂。以该化合物能级结构与 P3HT 给体匹配,能作为非富勒烯电子受体,制备的太阳能电池 PCE 达 5%~6%,电池热稳定性也大幅提高。

1.3.2 聚合物太阳能电池 “全聚合物太阳能电池”的研究方向再一次列入《2017 研究前沿》中化学与材料科学热点前沿(位列第六)。

李永舫和张志国等<sup>[34]</sup>将具有 A-D-A 结构的强吸收、窄带隙小分子受体结构单元与噻吩单元共聚合合成聚合物受体,该聚合物具有窄带隙和高吸收系数的宽吸收。选用宽带隙聚合物作为给体、此聚合物为受体制备的全聚合物太阳能电池的 PCE 高达 9.19%,这是全聚合物 PSCs 当时的效率最高值。利用光诱导力显微镜-纳米红外光谱技术,研究了该全聚合物太阳能电池的形貌观测,这种技术能够根据给受体官能团的不同,从纳米尺度阐释活性层形貌与器件性能的关联,为 PSCs 形貌优化提供了指导。与小分子电子受体的电池相比,全聚合物太阳能电池聚集态结构更为稳定。

阳仁强等研究发现环状烷烃侧链虽然扭曲了分子链,但使得 HOMO 能级下降,从而有利于提高电池的开路电压,环烷烃大多采用椅式、半椅式等构型,从而特别有利于引导分子排列和层状堆积,提高了微区结晶性,因而可以提高电池的短路电流和填充因子,相对于直链烷烃,大幅提高了聚合物太阳能电池 PCE。这个研究结果拓展了对共轭聚合物侧基与性能关系的认识,为提高聚合物太阳能电池性能提供了新途径<sup>[35]</sup>。

1.3.3 利用聚集诱导发光聚合物检测爆炸物 爆炸物检测在国土安全与反恐、居民安全和环境保护等领域起着非常重要的作用。目前所研究的各类检测方法中用到的荧光探针分子中,具有聚集诱导发光效应(AIE)的高分子因具有固态或聚集时强发射特征备受关注。

AIE 是唐本忠等于 2001 年基于自己研究小组的实验异常现象在国际上提出的概念。唐本忠等开展了系统深入研究,这个概念提出以来,已为发光材料的设计提供了新策略,为拓展光物理基础理论提供了新思想,由此开创了一个由我国科学家引领、多国科学家竞相跟进的新研究领域。据汤姆森-路透社与中国科学院文献情报中心联合发布的《2015 年研究前沿》报告,“聚集诱导发光化合物的合成、性质及其细胞成像应用”在化学和材料领域十大研究前沿中排名第二。基于该领域的卓越成果和可能进一步取得突破进展,国家自然科学基金委员会批准了“基础科学中心”研究项目。

秦安军和唐本忠系统总结并评述了 AIE 聚合物放大猝灭效应用于爆炸物检测的研究进展<sup>[36]</sup>。在聚合物分子构筑结构对检测灵敏度和选择性影响的系列研究中发现,树状超支化结构聚合物分子的性能比其线性结构分子性能更好,原因在于树状结构具有三维立体和多支链结构,提供了多重激子迁移通道和扩散路径。将 AIE 基元链接在金属有机骨架材料(MOFs)内,所获得的材料在检测某种爆炸物时,呈现出少有且期盼的从暗到亮的荧光开启模式。更为可喜的是,将 AIE 聚合物涂覆在滤纸上或者层析色谱板上制备的原型器件能够非常灵敏地检测爆炸物,有望为爆炸物的可携带现场检测提供新技术。

用 AIE 聚合物检测爆炸物方法的局限性也需正视,目前该方法仅适用于含硝基芳香族化合物这类传统爆炸物,而芳香族硝胺或硝酸酯类爆炸物检测是鲜见报道的难题。AIE 聚合物用于爆炸物检测与其它方法相比的优势仍有待挖掘和提升,而且需要发展更多的从暗到亮的荧光开启检测模式;基于 AIE 聚合物的灵敏而快速检测爆炸物的器件和仪器设备的发展是未来非常值得关注的目标。

## 1.4 生物医用高分子

杨鹏等<sup>[37]</sup>通过利用高效二硫键还原剂三(2-羧乙基)膦(TCEP)解折叠溶菌酶而得到蛋白质溶胶,成功在此溶胶中得到了蛋白质纳米片晶。这些蛋白质纳米片晶具有特殊的“核-壳”结构:结晶的“核”是由 $\beta$ -sheet聚集体组装形成,而分散在核周围的“壳”是解折叠的分子链。在一定温度条件下,这些蛋白质纳米片晶可以进一步组装形成二维蛋白质介晶,其尺寸可以达到微米级。柔性大分子的晶体介观组装能够为设计新材料提供新途径,并具有广泛的潜在用途。

申有青等<sup>[38]</sup>提供了一种高效合成树枝状大分子的新方法。利用异硫氰酸酯-氨基和甲基丙烯酸酯基-巯基这两种高效类点击反应,即可高效制备该树枝状大分子,产物纯化过程简单。内部含酰基硫脲基团的树枝状大分子抗肿瘤能力显著优于含硫脲基团的大分子。他们提出了利用非细胞毒化物、通过作用于肿瘤的微环境来达到抑瘤效果的设想,发现聚硫脲树枝状高分子在体外对正常细胞和肿瘤细胞没有任何毒副作用。在不携带任何药物分子的情况下,能够在荷瘤小鼠体内作用于过量的铜元素,并降低肿瘤细胞内的活性氧簇浓度,从而有效地抑制肿瘤新生血管的生成并诱导肿瘤细胞死亡,抑瘤效果比临床一线抗肿瘤药物阿霉素更高。该聚合物不但能够有效抑制实体瘤的肿瘤转移,而且能够抑制血液中循环肿瘤细胞在肺中的着床及肿瘤形成,因而具有很强的抗转移能力,其效果比临床 III 期实验药物四硫代钼酸盐好。

《2017 研究前沿》中,“位点特异的蛋白质化学”的研究方向再一次列入化学新兴前沿(位列第七)。

蛋白质-高分子偶联物是潜在的长循环蛋白质药物。虽然传统高分子如 PEG 用于蛋白偶联已取得临床成功,但因其不可降解性以及缺乏可修饰官能团,严重限制了其广泛应用。而聚氨基酸具有可降解、生物相容性好、含侧链官能团等特点,有望替代 PEG 用于蛋白药物修饰。

吕华课题组发展了蛋白质-聚氨基酸拓扑偶联的简洁合成方法<sup>[39]</sup>。该方法能够在聚氨基酸链增长的过程中原位引入可修饰活性基团,得到两端分别含有不同生物正交官能团的异遥爪聚合物,从而极大地简化了后续的蛋白质-高分子偶联步骤,得到了一批位点特异、且具有不同拓扑结构的绿色荧光蛋白-聚氨基酸偶联物,包括环状的偶联物。干扰素 $\alpha$ 是一种抗病毒和抗肿瘤的蛋白质药物,然而其临床表现受到了稳定性差、体内循环时间过短等缺陷的制约。用此方法制备的一系列不同拓扑结构的干扰素 $\alpha$ 与聚氨基酸的偶联物,可提高干扰素 $\alpha$ 体外的酶稳定性。其中,头尾相接的环状偶联物可以显著地提高干扰素的热稳定性,显示出其在长循环蛋白药物方面的巨大潜力。

高卫平等<sup>[40]</sup>研究了可控合成生物相容且可降解的蛋白质-高分子偶联物自组装体。在蛋白质特定位点接上聚合引发剂,原位合成了人源白蛋白-聚(甲基丙烯酸-2-羟丙酯)偶联物(HSA-PHPMA)。这种生物大分子与合成高分子因具有两亲性,而自发形成组装体。通过增加水溶性 PHPMA 的分子量可以连续调控 HSA-PHPMA 自组装体的形貌,如从球形、到蠕虫形、再到囊泡形。可将外源蛋白原位包裹在 HSA-PHPMA 囊泡中,用于 GFP 的胞内递送。

程义云等<sup>[41]</sup>在分子链上接枝蛋白质结合、细胞膜融合模块,获得了一种高性能蛋白质载体。高分子表面的胍基可通过氢键、盐桥与蛋白质结合,与胍基相邻的苯基可通过膜融合的方式促进蛋白质复合物从内涵体中逃逸。该高分子在体外、体内均展现了极高的效率和生物相容性,适用的蛋白包括牛血清蛋白、藻红蛋白、绿色荧光蛋白、 $\beta$ -半乳糖苷酶、细胞色素 c、皂角素、不同序列的小肽等多种不能跨膜的生物分子,而且能保持这些分子的生物活性。他们设计了一种可远程、时空精确调控蛋白质释放的高分子载体<sup>[42]</sup>。该高分子递送体系的独特之处在于,不仅可以通过红外光来触发蛋白质释放,而且可开关红外光来控制蛋白质释放的通道开通与关闭,从而实现蛋白类药物按需递送。

于谦和陈红等<sup>[43]</sup>发展了具有“杀菌-释菌”功能转换的智能抗菌表面的方法,利用刺激响应性高分子,调控细菌与表面的相互作用,实现对细菌的捕获、杀灭和释放,构建了一系列具有可循环使用、按需转换功能的新型抗菌高分子表面。这类表面不仅能够高效杀死黏附在表面的细菌,同时可以在环境刺激下释放凋亡细菌及其碎片,使聚合物表面恢复清洁,从而保持长期有效的抗菌活性。他们总结了智能抗菌表

面的研究进展,对该领域的未来的研究方向和主要挑战进行了展望。

### 1.5 高分子组装

张川系统评述了以 DNA 为构筑基元设计并构建三维纳米组装体及其应用的国内外研究进展<sup>[44]</sup>。近年来,以 DNA 作为大分子通过程序化组装形成纳米尺度的有序结构正成为新材料和纳米功能器件构筑的研究热点。三维 DNA 纳米结构研究在过去三十年取得了可喜而丰硕的成果,可以获得任意尺寸、形状和拓扑结构的三维纳米结构,该文重点介绍了三种主要构筑方法,并对于这些方法的原理、设计原则分别予以介绍,特别介绍了三维 DNA 纳米结构在新材料合成、新器件制备和生物医用材料应用方面的最新动态。最后,作者展望了该领域的挑战和发展趋势,预计在今后一段时间仍将快速发展并有望取得更多的应用。该文的一个特点是不回避本领域争论,摆出各种观点。

张望清等<sup>[45]</sup>详细介绍了原位形成的嵌段共聚物聚合诱导组装。制备简便廉价的两亲性嵌段共聚物纳米粒子近年来备受瞩目。嵌段共聚物制备路线包括 RAFT、水相乳液 RAFT、分散 RAFT 和刚起步的种子 RAFT 方法。种子 RAFT 方法适于合成 ABC 或 ABB'嵌段共聚物纳米组装体,随着第三段聚合物链增长,能够跟踪第三嵌段如何影响纳米组装体结构的。嵌段共聚物含量高达 50%的纳米组装体已由可控合成路线实现,组装体形貌与粒径可通过聚合过程进行调控。

唐本忠等将四苯乙烯与多重氢键给受体基团 2-脲基-4[1H]-嘧啶酮(TPE-UPy)结构键联,得到顺反异构体(Z)-TPE-UPy 与(E)-TPE-UPy。两者具有不同的超分子聚合组装行为,两种超分子聚合物的光物理性质存在明显差异,(Z)-TPE-UPy 组装体发绿光,环形二聚体空腔可以用作汞离子的探针,而(E)-TPE-UPy 组装体形成线形超分子聚合物,发蓝光,可以利用该超分子聚合物制备发光纤维、二维与三维的图案化聚合物阵列<sup>[46]</sup>。

### 1.6 新型高分子新材料

将具有可切换相变特性的微夹杂物结合到无反应性水凝胶基质中,制备得到了机械性能可变且具备自愈合特性的双相凝胶<sup>[47]</sup>。由于可转换的微夹杂物结合到水凝胶基质中,材料表现出优异的可切换力学和形状记忆性能;异质结构衍生的可变机械性能使得材料具备较高的应变和刚度形状记忆效应。由于双相异构网络的非共价效应,材料表现出优异的自愈合能力。该方法为未来智能柔性材料的设计和制备提供了新方法。

有机水凝胶既不溶于水,又不溶于油,由于微有机凝胶掺杂和水凝胶框架的协同效应,所制备的有机水凝胶具有优异的热机械性能和形状记忆效应<sup>[48]</sup>。该材料在形变过程中,表现出的可拉伸形变达到了 2600%,在 20 倍自身重量的负载下表现的压缩可达到 85%。同时,该有机水凝胶在形状记忆变化过程中表现出高应力应变能力。该类有机水凝胶将来有望用作智能材料。

低能刺激产生的机械响应具有非常重要的技术前景。汪长春等<sup>[49~51]</sup>在近红外热缩冷胀类高分子材料领域取得了重要进展。这个研究进展为发展室温热能存储与转化、近红外大分子开关和马达、零膨胀系数的材料提供了新途径。含有 s-二苯并环辛二烯基团的聚丙烯酰胺膜在近红外低能外场刺激下能发生可逆的非常规热收缩,其原因可归结为扭船式-椅式构象变化,分子不对称性能明显降低结晶性并促进构象变化动力学,交联聚丙烯酰胺显示出罕见的新光热行为。在近红外辐照下,抵消正常热膨胀后,显出很大比例的可逆收缩。这种高分子材料负热膨胀系数比已报道的材料高 10 倍。含有苯并环丁烯三嵌段共聚物的前驱体中,聚丙烯酰胺与寡壁碳纳米管具有很强的相互作用,碳纳米管的含量高至 5%(wt)时,碳纳米管分散仍非常均匀。寡壁碳纳米管上的双键与苯并环丁烯通过加成反应形成碳纳米管与聚合物间的共价键,使聚合物刚性增加 2 倍。光热转换最佳性能时的碳纳米管含量为 3%(wt),收缩应力增强因子高达 24kPa~166kPa,而没有碳纳米管的对照体系仅为 7kPa。这类光热收缩巨大的新材料可用于制作生物近红外执行器。

提高材料的刚性与延展性常常互为矛盾,很难实现同时提高。如对于聚合物弹性体来说,增加其交联密度能提高其强度,但会导致韧性降低变脆。受海洋贻贝角质层结构启发,在环氧树脂中引入牺牲性

可逆邻苯二酚-铁交联结构,带来该材料的刚性、抗张强度和断裂伸长同时增大 2~3 个数量级,可逆性离聚物纳米微区引起的链受限和铁-邻苯二酚螯合导致交联密度升高,这两类作用的协同效应使聚合物保持延展性的同时,获得了迟滞能量耗散,拉伸伸长达到 50%。随后,一旦压力消失,螯合键会重新形成,使其能反复可逆利用。与不带离聚物的相同环氧树脂相比,具有可逆键的塑料弹性模量提高 770 倍,抗张强度提高 58 倍,韧性提高 92 倍<sup>[52]</sup>。

## 2 高分子学科概况

### 2.1 高分子领域成果应用转化与国际影响力及获奖

高分子学科研究总体上仍然处于提升状态,表现在基础研究创新能力的提高、年轻人才的成长,也体现在为社会经济发展、解决工业技术问题的贡献度上。

2016 年 8 月在南京举办的高分子青年学者研讨会上,青年学者们的工作非常出色,与会人员的素质让我们对学科发展充满信心。2016 年 10 月在杭州举行的“NSFC-RSC 中英高分子双边研讨会”、2017 年 10 月在苏州举办的“北京论坛 2017:生物医用高分子”和在成都的“中美双边高分子会议”上,中方报告者的水平获得与会国外学者的高度赞赏与评价。

在 Clarivate Analytics 发布的高被引作者中,我国学者逐年增多,2017 年高分子领域入选学者有曹镛、陈永胜、侯剑辉、黄飞、黄飞鹤、黄维、李永舫、马东阁、石高全、唐本忠、危岩、杨英威、占肖卫、智林杰和张希。他们是活跃在光电功能、太阳能电池、石墨烯和超分子聚合物等领域的学者。

石高全等因题为“化学修饰石墨烯可控组装与复合的基础研究”获得 2016 年国家自然科学奖二等奖 1 项;陈文兴等因题为“管外降膜式液相增黏反应器创制及溶体直纺涤纶工业丝新技术”获得 2016 年国家技术发明二等奖 1 项;张清华等因题为“干法湿纺聚酰亚胺纤维制备关键技术及产业化”获国家科学技术进步二等奖 1 项。

唐本忠等因题为“聚集诱导发光”的研究成果获得 2017 年国家自然科学一等奖 1 项;胡源等长期从事阻燃高分子领域研究,取得系列成果,他们题为“聚合物/层状无机物纳米复合材料的火、灾安全设计与阻燃机理”的研究成果获得 2017 年国家自然科学二等奖 1 项;张秋禹等题为“吸附分离聚合物材料结构调控与产业化应用关键技术”的成果获得 2017 年度国家科技进步奖二等奖 1 项。

前文提到,环氧烷烃可与 CO<sub>2</sub> 在催化剂作用下发生交替共聚合反应,获得一种二氧化碳基聚碳酸酯塑料(PPC)。基于王献红等研究成果,建设 30 万吨 PPC 的生产线于 2017 年在吉林省吉林市开工,预期一期 5 万吨线将在 2018 年投产,这是世界上第一条 5 万吨高品质 PPC 生产线。

杨万泰等创新性的建立了可控/活性自由基聚合新方法,基于此方法发展出低分子量窄分布聚丙烯酸及聚丙烯酸钠合成新技术,并已在山东威海成功转化于实际生产线;他们所开发的支化型聚丙烯酰胺聚合新技术,已在江苏张家港实现产业化。他们研发的自稳定沉淀聚合可使聚合物粒子“活性增长”,在制备尺寸均匀可控的球、核壳和空心聚合物纳/微粒子等产物的技术中成为迄今最为简单的新工艺,此技术已在江苏淮安实现规模生产;以此为基础,与中国石化北京化工研究院合作,成功开发出  $\alpha$ -甲基苯乙烯(AMS)共聚微球制备新方法和聚碳酸酯高效光扩散材料成套技术,已在中国石化燕山石化公司定点生产。这项技术既可将异丙苯制苯酚/丙酮的副产物 AMS 加以利用,又可将聚碳酸酯变为高值 LED 灯罩材料。

吴一弦课题组多年开展顺丁橡胶研究,最近在聚合稀土催化剂研究中,研制成功第二代高活性、高定向催化剂,不仅能进一步提高聚合产物性能,而且能大幅降低催化剂用量,明显降低成本。她与中国石化公司北京燕山分公司橡胶厂合作,成功进行了 6 万吨/年顺丁橡胶新催化剂工业试验。

### 2.2 学科发展趋势

*Nature* 于 2016 年底发表了一系列高分子领域综述,如“软物质 3D 打印”<sup>[53]</sup>、“塑料生物电子学之滥



筋”<sup>[54]</sup>、“聚合物材料功能仿生及其生物医用”<sup>[55]</sup>、“基于可再生资源的可持续聚合物”<sup>[56]</sup>、“自主性生命周期循环可控的聚合物”<sup>[57]</sup>。这些综述给出了高分子某些研究领域的热点、趋势或愿景,可供参考。

### 3 国家自然科学基金资助有关事项:

很多读者关心国家自然科学基金委员会化学科学部资助领域与申请代码的调整。在此稍作介绍,正好也是本文所在栏目的要求。在国家自然科学基金委员会化学科学部资助领域调整后,2018 年开始启用新的申请与资助代码。高分子各分支方向大致分布见表 1。

表 1 国家自然科学基金化学科学部高分子领域主要研究方向申请与资助新调整代码

Table 1 New codes for funding application related to research fields in polymer programs of Department in NSFC

| 原分支领域         | 研究方向                         | 新调整代码   |
|---------------|------------------------------|---------|
| 高分子化学         | 各类聚合反应与方法,拓扑构筑,精密合成          | B0104   |
| 高分子物理与高分子物理化学 | 高分子物理、高分子物理化学                | B0307   |
| 功能与智能高分子      | 生物医用,吸附分离,液晶,光电磁             | B0502   |
|               | 智能与仿生,刺激响应,可修复,表界面功能仿生       | B0505   |
|               | 药物传输与缓释                      | B050203 |
|               | 爆炸物检测、固体推进剂                  | B050604 |
|               | 储能相变、光电转换、热电转换、光热转换,其它能量转换   | B0510   |
|               | 电容器、电极、电池隔膜,燃料电池             | B0508   |
|               | 太阳能电池,燃料敏化太阳能电池              | B050804 |
|               | 锂(钠、铝等)离子电池,锂空电池,锂硫电池,各种化学电源 | B050803 |
|               | 共价有机框架,二维高分子                 | B050405 |
|               | 柔性可穿戴材料                      | B050406 |
|               | 配位聚合物                        | B010505 |
| 天然高分子         | 基于可再生资源的高分子                  | B050305 |
|               | 生物大分子及其衍生物                   | B0502   |
| 高分子组装与超分子体系   | 超分子聚合物                       | B010605 |
|               | 高分子组装与有序化                    | B0106   |
|               | 动态共价键与可修复体系                  | B050501 |
| 应用高分子物理与化学    | 阻燃、降解与稳定,高性能                 | B0503   |
|               | 有机无机杂化高分子                    | B050402 |
|               | 聚合物基复合材料                     | B050403 |
|               | 反应加工成型,改性,3D 打印              | B050301 |
|               | 化学纤维、弹性体                     | B050303 |
| 高分子科学         | 高分子科学研究仪器                    | B0407   |
| 聚合反应工程        | 聚合反应工程                       | B080305 |

需要强调的是:新代码只是试用于国家自然科学基金项目申报、评审,并没有科学分支实质意义,也不是严格的科学名词,许多代码仅是多个研究领域的堆砌与无逻辑关系的机械归并,请读者们不要将其泛化。

这里只能大致给个检索导引,具体填报申请书时,领域代码最好选到 6 位数,四位数也可以,只填 2 位数代码属于对自己的项目申报不负责任,会造成不良后果。请查阅《2018 年国家自然科学基金项目指

南》(纸质版或网络版)仔细斟酌选填。特别要提醒的是:每个领域代码下还有研究方向、关键词等需选择,研究方向与关键词的选择对于后续专家评审过程的顺利进行非常重要,建议申请书中填写的5个关键词从申请系统中专家们已设定的关键词库中至少选2个,申请者一定要重视,避免按惯性随意填写。

近年来高分子领域重点项目、青年基金、地区基金和重点国际合作项目申报量都偏少。

国家自然科学基金化学科学部资助领域调整后,所有仪器相关项目归并到一个口,申请代码一并使用B0407。

### 3 结语

本文只是在当前这个时间节点上从个人角度概述了高分子进展与相关概况,在分子历史中,也许只是大厦上的一块砖。我国高分子科学发展的历程是值得回味的,江明撰写综述<sup>[58]</sup>进行了介绍。我国高分子学科发展从无到有、从小到大发展的路并不平坦。当前我国关心高分子学科的主流基本问题与经典问题的学者似乎尚不多。未来我们国家的科技发展要进入引领阶段,需要摆脱“跟随”惯性,不惟欧美为圭臬。建设科技创新性国家、使我国高分子学科从大国走向强国是中青年学者肩负的历史使命。

### 参考文献:

- [1] Jia ZF, Li GL, Zhu Q, Yan DY, Zhu XY, Chen H, Wu JL, Tu CL, Sun J. *Chem Eur J*, 2009, 15: 7593~7600.
- [2] Yang H, Xu J, Pispas S, Zhang G. *Macromolecules*, 2012, 45: 3312~3317.
- [3] Li WZ, Wu XY, Zhao ZJ, Qin AJ, Hu RR, Tang BZ. *Catalyst-Free, Macromolecules*, 2015, 48: 7747~7754.
- [4] Wei B, Li WZ, Zhao ZJ, Qin AJ, Hu RR, Tang BZ. *J Am Chem Soc*, 2017, 139(14): 5075~5084.
- [5] He BZ, Su HF, Bai TW, Wu YW, Li SW, Gao M, Hu RR, Zhao ZJ, Qin A J, Ling J. *J Am Chem Soc*, 2017, 139(15): 5437~5443.
- [6] Zhao N, Ren CL, Li HK, Li YX, Liu SF, Li ZB. *Angew Chem Int Ed*, 2017, 56: 12987~12990.
- [7] Zhang J, Wang WJ, Liu Y, Sun JZ, Qin AJ, Tang BZ. *Macromolecules*, 2017, 50(21): 8554~8561.
- [8] Sun ZY, Huang HH, Li L, Liu LX, Chen YM. *Macromolecules*, 2017, 50(21): 8505~8511.
- [9] Lim CH, Ryan MD, McCarthy BG, Theriot JC, Sartor SM, Damrauer NH, Musgrave CB, Miyake GM. *J Am Chem Soc*, 2017, 139(1): 348~355.
- [10] Chen M, Deng S H, Gu Y W, Ling J, MacLeod M J, Johnson J K. *J Am Chem Soc*, 2017, 139 (6): 2257~2266.
- [11] Feng Q Y, Tong R. *J Am Chem Soc*, 2017, 139(17): 6177~6182.
- [12] Liu C, Kubo K, Wang E, Han K S, Yang F, Chen G, Escobedo F A, Coates G W, Chen P. *Science*, 2017, 358(6361): 352~355.
- [13] Eagan J M, Xu J, Girolamo R D, Thurber C M, Macosko C W, LaPointe A M, Bates F S, Coates G W. *Science*, 2017, 355(6327): 814~816.
- [14] Wu CL, Liu B, Lin F, Wang MY, Cui DM. *Angew Chem Int Ed*, 2017, 56 (24): 6975~6979.
- [15] Lin F, Liu ZH, Wang TT, Cui DM. *Angew Chem Int Ed*, 2017, 56(46):14653~14657.
- [16] Guo LH, Dai SY, Sui XL, Chen CL. *ACS Catal*, 2016, 6(1): 428~441.
- [17] Li M, Wang XB, Luo Y, Chen CL. *Angew Chem Int Ed*, 2017, 56(38): 11604~11609.
- [18] Zhang D, Chen CL. *Angew Chem Int Ed*, 2017, 56(46):14672~14676.
- [19] Kenyon P, Mecking S. *J Am Chem Soc*, 2017, 139(39): 13786~13790.
- [20] Liu Y, Zhou H, Guo J Z, et al, *Angew Chem Int Ed*, 2017, 56: 4862~4866.
- [21] Wang KW, Yang LM, Wang X, Guo LP, Cheng G, Zhang C, Jin SB, Tan BE, Cooper A. *Angew Chem Int Ed*, 2017, 56(45): 14149~14153.
- [22] Pang ZF, Xu SQ, Zhou TY, et al. *J Am Chem Soc*, 2016, 138(14): 4710~4713.
- [23] Tan J, Namuangruk S, Kong W F, et al. *Angew Chem Int Ed*, 2016, 55: 13979~13984.
- [24] Wu K Y, Guo J, Wang C C. *Angew Chem Int Ed*, 2016, 55: 6013 ~6017.
- [25] Jin EQ, Asada M, Xu Q, Dalapati S, Addicoat M A, Brady M A, Xu H, Nakamura T, Heine T, Chen QH, Jiang D L. *Science*, 2017, 357: 673~676.
- [26] Lin Y Z, Zhao F W, He Q, Huo L J, Wu Y, Parker T C, Ma W, Sun Y M, Wang C R, Zhu D B. *J Am Chem Soc*, 2016, 138:

4955~4961.

- [27] Lin Y Z, He Q, Zhao F W, Huo L J, Mai J Q, Lu X H, Su C J, Li T F, Wang J Y, Zhu J S. *J Am Chem Soc*, 2016, 138: 2973~2976.
- [28] Zhao WC, Li SS, Yao HF, Zhang SQ, Zhang Y, Yang B, Hou JH. *J Am Chem Soc*, 2017, 139(21): 7148~7151.
- [29] Cui Y, Yao HF, Gao BW, Qin YP, Zhang SQ, Yang B, He C, Xu BW, Hou JH. *J Am Chem Soc*, 2017, 139(21):7302~7309
- [30] Zhao RY, Dou CD, Liu J, et al, *Chin J Polym Sci*, 2017, 35(2): 198~206.
- [31] Zhang K, Liu XY, Xu BW, et al, *Chin J Polym Sci*, 2017, 35(2): 219~229.
- [32] Yang F, Li C, Feng GT, Jiang X D, Zhang AD, Li W W. *Chin J Polym Sci*, 2017, 35(2): 239~248.
- [33] Li SX, Liu WQ, Shi MM, Mai JQ, Lau TK, Wan JH, Lu XH, Li CZ, Chen HZ. *Energy Environ Sci*, 2016, 9(2): 604~610.
- [34] Zhang ZG, YK, Yao J, Xue LW, Chen SS, Li XJ, Morrison W, Yang CD, Li YF. *Angew Chem Int Ed*, 2017, 56(43):13503~13507.
- [35] Han LL, Jiang HX, Ouyang D, Chen WC, Hu T, Wang JY, Wen SG, Sun ML, Yang RQ, *Nano Energy*, 2017, 36, 110~117.
- [36] Wu YW, Qin AJ, Tang B Z. *Chin J Polym Sci*, 2017, 35(2): 141~154.
- [37] Tao F, Han Q, Liu KQ, Yang P. *Angew Chem Int Ed*, 2017, 56(43):13440~13444.
- [38] Shao SQ, Zhou Q, Si JX, Tang JB, Liu XR, Wang M, Gao JQ, Wang K, Xu RZ, Shen YQ. *Nat Biomed Eng*, 2017, 1: 745~757.
- [39] Hou YQ, Yuan JS, Zhou Y, Yu J, Lu H. *J Am Chem Soc*, 2016, 138: 10995~11000.
- [40] Liu XY, Gao WP. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2017, 9(3): 2023~2028.
- [41] Chang H, Lü J, Gao X, Wang X, Wang H, Chen H, He X, Li L, Cheng YY. *Nano Lett*, 2017, 17(3): 1678~1684.
- [42] Hu JJ, Chen YH, Li YQ, Zhou ZJ, Cheng YY. *Biomaterials*, 2017, 112(1): 133~140.
- [43] Wei T, Tang ZC, Yu Q, Chen H. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2017, 9(43):37511~37523.
- [44] Wu XR, Wu CW, Zhang C. *Chin J Polym Sci*, 2017, 35(1): 1~24.
- [45] Chen SL, Shi PF, Zhang WQ. *Chin J Polym Sci*, 2017, 35(4): 455~479.
- [46] Peng HQ, Zheng XY, Han T, Kwok R T K, Lam J W Y, Huang XH, Tang B Z. *J Am Chem Soc*, 2017, 139(29): 10150~10156.
- [47] Zhao Z G, Liu Y X, Zhang K J, Zhuo S Y, Fang R C, Zhang J Q, Jiang L, Liu M J. *Angew Chem Int Ed*, 2017, 56(43):13464~13469.
- [48] Zhao Z G, Zhang K J, Liu YX, Zhou J J, Liu M J. *Adv Mater*, 2017, 29(33):1701695.
- [49] Shen XY, Viney C, Johnson E R, Wang CC, Lu J Q. *Nat Chem*, 2013, 5: 1035~1041.
- [50] Shen X Y, Viney C, Wang C C, Lu J Q. *Adv Funct Mater*, 2014, 24(1): 77~85.
- [51] Shen XY, Connolly T, Huang Y, Colvin M, Wang CC, Lu JQ. *Macromol Rapid Commun*, 2016, 37(23): 1904~1911.
- [52] Filippidi E, Cistiani T R, Eisenbach C D, Waite J H, Israelachvili J N, Ahn B K, Valentine M T. *Science*, 2017, 358(6362): 502~505.
- [53] Truby R L, Lewis J A. *Nature*, 2016, 540: 371~378.
- [54] Someya T, Bao Z N, Malliaras G G. *Nature*, 2016, 540: 379~385.
- [55] Green J J, Elisseff J H. *Nature*, 2016, 540: 386~394.
- [56] Zhu Y Q, Romain C, Williams C. *Nature*, 2016, 540: 354~362.
- [57] Patrick J F, Robb M J, Sottos N R. *Nature*, 2016, 540: 363~370.
- [58] 江明. *高分子学报*, 2017, 9: 1~7.

## Overview on the Progress of Polymer Science and the NSFC Funding

DONG Jian-hua\*

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

**Abstract:** The diverse applications of polymers in all aspects evoke research of macromolecules with a characteristic of multidiscipline. The notable achievements have been obtained in multidiscipline intersection as revealed by the progress introduced in this review. Chinese polymer scientists contributed core paper in those top fields in polymer chemistry or material science frontiers report by Clarivate Analytics. Several National Scientific Awards granted to polymer scientists recently. Numerous transformations of technological achievements to polymer industry have been successfully preceded in last year. Finally, the changes in framework of NSFC funding programs related to polymer as well as issues in application in 2018 have been introduced briefly.

**Key words:** Polymer sciences; Rsearch progress; NSFC funding