

高分子的软物质特性

谢封超, 张青岭, 刘结平, 何天白^{*}

(中国科学院长春应用化学研究所, 高分子物理与化学国家重点实验室, 长春 130022)

摘要:介绍了软物质的一般特征和发展过程, 例举出若干已有的高分子研究结果中所揭示出的高分子的弱影响强响应的软物质特性, 而后总结了如何利用高分子的弱影响强响应的软物质特性, 通过外场调控的实验方法来改变和制造高分子的相态结构及其相关性质和功能, 最后提出一些开展高分子软物质特性研究的建议。

关键词:软物质; 受限; 嵌段共聚物; 液晶高分子

物质科学的研究对二十世纪人类社会文明的进步作出了关键性的贡献。虽然信息科学将会对即将到来的二十一世纪人类社会文明的进步作出重要贡献, 但物质科学的研究还将继续发挥重要作用。因为人类社会离开物质是无法生存的, 更谈不上发展。今后一个时期物质科学研究的一个重要方面将是开展软物质的研究。

1 软物质研究的提出

1991 年诺贝尔物理学奖得主 Pierre-Gilles de Gennes 将软物质 (soft matter) 作为其获奖演讲的题目^[1], 提出了软物质的研究^[2,3]。字面上的理解软物质是指触摸起来感觉柔软的那类凝聚态物质。由于“软”来自于在触摸压力下有较大变形的感觉, 因此按照我们的理解, 软物质是指对相对弱的外界影响, 比如物质组成或结构的微小变化, 比如施加于物质之上的瞬间的或微弱的刺激等, 都能作出相对显著的响应和变化的那类凝聚态物质, 即具有弱影响强响应特征的那类凝聚态物质。

近年来出版的一系列有关软物质的专著影响和推动了软物质研究的开展^[4~6]。de Gennes 以天然橡胶树汁为例来说明软物质的概念。在天然橡胶树汁的分子中, 只要平均每 200 个碳原子中有一个碳原子和硫发生反应, 就会使流动的橡胶树汁变成固体的橡胶, 这种如此之小的化学结构的变化使其发生了从液态到固态的变化, 揭示了高分子这类物质具有会因弱外部作用而发生明显状态变化的软物质的特性。日常生活中还发生着许多类似的现象。为了使洗涤用品中的油性粒子均匀分散避免发生分离, 需加入少量的表面活性剂。在洗涤用品中加入的表面活性物质的量虽然很小, 由于它们分散在水中后能将油性粒子包裹起来, 降低了其表面能而防止了分离的发生。表面活性物质也是一类典型的软物质, 它们的微量存在能使其作用的对象性质和状态发生明显的变化。

de Gennes 提出的软物质包括液晶、高分子、两亲分子、生物大分子和胶体等, 而美国的科学界将液晶、高分子和胶体等称作复杂流体。事实上欧洲的软物质与美国的复杂流体所涉及的对象应

资助项目:国家自然科学基金资助项目 (29425005);

作者简介:谢封超 (1973—), 男, 1995 年 7 月获理学学士学位, 同年到中国科学院长春应用化学研究所攻读博士学位, 师从何天白研究员进行液晶聚合物的相结构及外场效应的研究, 现在香港科技大学物理系 B. K. C. Tusi 教授处作博士后;

^{*} 通讯联系人。

该是同一类凝聚态物质。软物质的提出推动了物理、化学和生物学三大传统学科间的交叉和交流,不仅出现了专门研究软物质的软凝聚态物质物理,简称软物理,还开展了软物质应用的研究,出现了软材料的提法。de Gennes 成为使凝聚态物理学向新世纪转型的第一人^[7]。自 90 年代以来世界上的一些著名物理学期刊都针对软物质的研究作出了专门安排,刊登软物质物理的研究论文。欧洲的《欧洲物理学期刊》(European Physical Journal)1998 年改版时登载凝聚态物理研究的 B 分册中专门辟有软凝聚态物质一栏,进而在 2000 年新增加了 E 分册作为软物质研究的专辑。美国的《物理评论》(Physical Review)E 分册则专门报道复杂流体的研究工作。

研究高分子的软物质特征,不仅可以利用物质科学的研究成果和进展丰富高分子的学科内容,推动高分子的学科发展,还有助于高分子材料的开发和应用。高分子作为软物质其有序性的形成是熵诱导的结果^[8,9],不仅能形成硬物质通常所具有的三维有序性,还能因其对外场作用的敏感而产生有序相的畸变,形成其它一些层次的有序相。一方面外场能控制远离平衡状态的相态稳定存在,另一方面外场的影响导致产生新的微结构和相变^[10]。温度场、力场或电场等的作用会使具有传递热、电、光、磁等信息功能的分子链发生取向而形成结构的各向异性,即外场赋予了这些高分子能有方向性地传输信息。由于外场可在分子尺度上控制复杂结构链的各向异性的形成,使得可将纳米尺度的功能高分子链取向排列而得到单分子功能器件,从而能在宏观上大面积的通过单个分子实施信息的传递。更为重要的是通过改变和调节外场的类型和强度,可以实时现场地调控结构各向异性的形成,实现信息传递的方向和大小的动态和现场调控,从而使高分子的性质和功能能根据外界条件而变化,发掘出高分子的自适应性。而研究高分子对外界变化的自适应性,是研究高分子作为智能材料应用可能性的学科基础^[11]。

软物质的研究虽然目前主要还是在凝聚态物理的学术圈中进行,但其研究领域则涉及数学、化学、化工、材料、生物及其交叉学科,被认为是今后一段时期内物质科学及其相关学科中的重要研究内容之一。本文首先从对软物质的理解,即软物质具有弱影响强响应的特性,例举出若干已有的高分子研究结果中所揭示出的高分子的弱影响强响应的软物质特性,而后总结如何利用高分子的弱影响强响应的软物质特性,通过外场调控的实验方法来改变和制造高分子的相态结构及其相关性,最后则提出一些如何开展高分子软物质特性研究的建议。

2 高分子的弱影响强响应的软物质特性的实验现象

尽管在软物质概念提出之前人们并未认识到高分子所表现出的软物质特征,但迄今发现和了解到的高分子研究中的许多实验现象,在不同程度上体现了高分子的软物质特性。

2.1 化学结构的影响

分子链的构象、构型的变化会显著影响高分子的聚集态结构和宏观性能是一熟知的现象,这明显体现出了高分子弱影响强响应的软物质特性。在等规、间规和无规三种构型的聚丙烯中,等规分子链能形成螺旋链构象,间规分子链能形成平面锯齿型构象,这两种构型的分子链都能形成有序的聚集态结构,而缺乏立体规整性的无规聚丙烯分子链则只能形成无序的聚集结构。

在茂金属催化聚合的支化聚乙烯中,即使每 400 个主链碳原子上只接有 1~3 个正丁基支链,其单晶生长温度与相同分子量的线性聚乙烯有着明显的差别,约高 20℃^[12]。并且由于少量支链的存在,低分子量支化聚乙烯熔体单晶的形态改变依赖于单晶生长方式的改变,这种现象与低分子量线性聚乙烯不同^[13]而与高分子量线性聚乙烯相同^[14]。

由于液晶基元及柔性间隔基的种类、长度及联接方式的变化,液晶高分子会产生丰富的液晶

相, 这样一类事实也体现出了高分子的弱影响强响应的软物质特性。在一种液晶均聚醚中发现的高有序近晶相, 其相转变行为不仅随间隔基长度的改变而改变, 而且相转变温度和相转变的焓和熵等热力学参数还随间隔基亚甲基数目的奇偶性表现出明显的奇偶效应^[15, 16]。即使在间隔基上改变一个亚甲基单元的长度, 其液晶相行为和相结构都会发生明显变化。而在其对应的液晶共聚醚中, 由于分子链上引入了不同长度的柔性间隔基, 其相结构由层状结构的近晶相转变为非层状的六方柱状排列的液晶相, 并随柔性间隔基长度的变化, 而表现出不同的相转变行为, 这是由于柔性间隔基长度的差异, 破坏了分子链方向的周期性, 使得在分子链方向不能形成周期性的层状结构, 导致液晶均聚物中的层状近晶相转变为液晶共聚物中的非层状的六方柱状排列的液晶相^[17, 18]。

2.2 物理条件的影响

嵌段共聚物的聚集态结构及其相应的性能很容易受聚集条件的影响, 是高分子研究中一个常识性的结果, 这其中也体现出了高分子的弱影响强响应的软物质特性。嵌段共聚物中的不同化学组成的链段在热力学上一般是不相容的, 因此不同链段之间易发生相分离, 但是由于不同链段之间有共价键相连, 使其相分离的尺寸不能过大。其最终的结果是形成了长程有序的周期性的聚集态结构来减小不相容组分间的接触面积。这种结构的一个有趣特点在于其周期性聚集态结构的尺寸与嵌段共聚物的分子尺寸相近, 一般都在几十纳米, 而其相结构的类型则随各组分的体积分数的不同, 可以形成体心立方堆积的球状, 六方堆积的柱状, 三维有序双连续双金刚石状和交替堆积的层装有序结构等^[19, 20]。由于不同链段的 Flory-Huggins 相互作用参数 χ 随温度的升高而减小, 当温度升高到一定值时, 有序的结构又转变为均相结构, 发生有序-无序转变, 在对应的有序-无序转变温度附近, 嵌段共聚物的低频储存模量和损耗模量均有一突变。

运用平均场理论对嵌段共聚物相图的研究发现, 对于对称性($f=0.5$)的两嵌段共聚物熔体的均相结构在(χN)_c=10.5 处有一从无序到片层结构的二阶相变^[21]。但由于涨落影响了嵌段共聚物的相行为, 使这一转变由平均场理论所预期的二阶相变转变为实际上是涨落诱导的弱的一阶相变^[22]。这两个理论都预测了温度的改变是如何实现嵌段共聚物聚集态从无序态到片层结构、六方和体心立方结构的依次转变。

2.3 多分散性的影响

分子量的多分散性几乎存在于所有类型的合成高分子中, 对高分子的影响非常大。多分散性也是软物质的一个典型特征^[6, 23]。在一个多分散体系中相区有一定的尺寸分布, 不同尺寸的相区分布可以看作是一种涨落效应, 而软物质的特点即是不取决于其平均性质而取决于涨落^[5]。在多官能团的聚苯乙烯星形聚合物中, 末端的联结能形成凝胶, 其光学和衍射强度依赖于官能度和星形聚合物的多分散性效应。在具有相同分散度的苯乙烯和二乙烯基苯的嵌段共聚物凝胶中, 类似的现象也被观察到, 其多分散性起了决定性的作用^[24]。

每一个足够大的高分子颗粒组成一个明确的相态, 但是分子量的多分散性带来的相区尺寸分布的涨落对它们的性质影响很大。如在不相容 AB 型嵌段共聚物中, 共聚物的序列长度的涨落导致了共聚物中熵的变化, 推动了嵌段共聚物中不同相结构的形成。AB 段通过末端连接在一起, 由于不相容, A 与 B 之间必然发生相分离, 但由于 AB 段连接在一起, 使其相分离尺寸不能过大。其结果是在微观上产生许多分别包括 A 和 B 段的相区。由于在这些相区的边缘, A 和 B 必须连接在一起, 因而相区的尺寸大小是受到限制的。增加相区尺寸会降低相区间的界面区域, 降低了焓, 但同时会使链伸展, 降低了熵, 这一竞争过程的最终结果是在熵的驱动下形成了长程有序的周期性的微结构来减少不相容组分的接触面积, 其相结构依赖于 A 和 B 的相对长度(即组成)。

涨落效应在液晶高分子中更为显著。液晶分子对光有强烈的双折射,这是由于液晶分子取向的涨落而引起强烈的光散射所致。液晶是多畴的物质,每个相畴里的分子沿一个方向单矢取向,由于热、电、磁的扰动,改变了不同相畴中分子的取向,引起了不同液晶相畴中光轴的涨落,从而局部改变光轴的方向。

3 高分子的弱影响强响应的软物质特性的利用

由于将高分子作为软物质的研究才刚刚开始,还没有报道软物质的引入对高分子研究的具体发展和贡献。本节通过总结文献上用实验方法来改变和控制高分子的相态结构及其相关性质和功能,来说明如何在高分子的研究中引入和利用软物质的概念,利用高分子的弱影响强响应的软物质特征,通过改变外场的类型和强度,对具有特殊化学结构、符合特定要求的分子链实现外场操纵分子链的搬迁、堆积和聚集^[25],突出某个方向或某个层次上的物理结构,从而影响相应方向或层次上的高分子的性质或功能。

3.1 表面受限的作用

分子链在某一表面受到的限制能诱导其取向,因为分子的表面取向能使表面能降低。表面的锚定作用能使液晶分子单矢取向^[26,27]。表面诱导作用能使向列相中的液晶均聚醚形成高有序的单矢畴及亚稳态的相结构^[28],而在相应的液晶共聚醚中,表面诱导作用能使在有序性较高的柱状相中也能形成高有序的、规整的单矢畴^[18]。

表面受限对 PS-*b*-PMMA 嵌段共聚物的作用,使原本平行于基板表面排列的柱状相转变为垂直于基板表面的柱状相^[29]。当基板表面存在着与嵌段共聚物周期性结构尺寸相匹配的周期结构时,也可使通常平行于基板表面排列的层状结构垂直于基板表面^[30]。硅板表面对聚乙烯基吡啶的选择性作用可使苯乙烯乙烯基吡啶嵌段共聚物在硅板表面形成层状结构,而远离硅板表面处则仍为柱状结构^[31]。

高分子分子链和溶剂分子之间以及它们分别与基板表面间的相互作用,使得某些聚酰亚胺薄膜中的分子链呈现面内择优取向,导致了薄膜平面与薄膜厚度方向上的光学双折射,使这类薄膜具有光学补偿性质^[32~34]。

3.2 力场取向的作用

剪切力场可以使嵌段共聚物形成高度有序的“单晶”样品,其柱状相中柱的方向或层状结构中片层的方向都沿剪切方向取向^[35~37]。在聚丁二烯为连续相的 SBS 类的嵌段共聚物中,通过力场取向玻璃态的聚苯乙烯柱状相,能使嵌段共聚物在沿其柱方向上具有玻璃态的模量而在垂直于柱方向上则具有橡胶态的模量^[38]。控制嵌段共聚物相结构的恰当取向可以实现其力学、光学、电学等的各向异性。嵌段共聚物中排列规整的球状或柱状相结构通过选择性刻蚀可以得到量子点或量子线,而高有序的片状和柱状相结构产生的双折射则可作为光学器件^[39]。

对于更易形变的液晶高分子,力场作用不但会使分子链接力场方向取向,例如向列相在剪切作用下会形成特征的条带织构,而且采用片层修饰技术会观察到液晶片层在力场作用下弯曲,液晶基元则表现出展曲形变,在力场的进一步作用会使片层依照低能量的向错线及缺陷墙排列^[40~42]。

对柔性链高分子,力场的作用会使结构和性质发生改变,如聚碳酸酯拉伸后分子链沿膜平面排列,表现正性光学双折射,而聚苯乙烯拉伸后则为负性光学双折射^[43]。

3.3 电磁场诱导的作用

受边界及连续流动条件的限制,力场的取向作用有一定的局限性。电磁场取向则具有远距离

遥控、可以实现局部取向等特点。

液晶高分子中分子链沿指向矢取向导致液晶中产生了各向异性的电极化率 ϵ 和磁极化率 χ 。在电磁场作用下液晶高分子的分子链会被重新取向,当液晶指向矢方向与垂直于此指向矢方向的外场极化率之差 $\Delta\epsilon$ 或 $\Delta\chi$ 为正时,指向矢沿场方向取向,当 $\Delta\epsilon$ 或 $\Delta\chi$ 为负时,指向矢沿垂直于场的方向取向^[44]。电磁场作用下液晶高分子还会形成周期性的不稳定结构,由于高分子的粘度大而使不稳定的周期性结构能稳定存在^[45,46]。

电磁场除了能使液晶中的分子链重新取向以外,还会使分子链和液晶中的片层发生形变。在电磁场的作用下,分子链会发生展曲、弯曲和扭曲形变,而液晶片层一般会弯曲。分子链展曲和片层弯曲形变的结果是使片层依照拓扑学上的向错线排列,这是液晶高分子对电磁场作用所作出的降低能量的响应^[47]。在电磁场的作用下,液晶片层间还会存在强烈的相互作用。电磁场使分子链和片层的取向发生改变会进一步改变液晶的织构,电场作用于胆甾相时,发生平面织构、焦锥织构及单矢取向织构之间的转换。在电场作用下平面织构和焦锥织构能保持下来,其织构形式由场频率、强度及振幅来决定,这种织构转变可被用于彩色显示^[48]。

在研究电场对主链型液晶共聚酯的诱导取向时发现,在低电场强度时液晶片层平行于电场方向取向,但在高场强时片层按照 $+1$ 向错线取向,且向错线之间存在强烈的相互作用^[49]。

把嵌段共聚物的薄膜加热到其有序无序转变温度以上,然后在电场的作用下缓慢降温,可使嵌段共聚物的柱状或片层结构沿电场方向取向,同时在嵌段共聚物中还观察到了缺陷的移动和缺陷之间的相互作用^[44,50]。通过电场下调控嵌段聚合物的微观结构,可为半导体器件的纳米刻蚀提供模板,这是传统的刻蚀技术所无法达到的。已经报道了 PS-*b*-PB 两嵌段共聚物可在覆盖氮化硅的硅基板上生成高密度周期性的 20nm 大小的空穴或点 (10^{11} 个/ cm^2)^[51,52]。还报道了用电场诱导 PS-*b*-PMMA 嵌段共聚物有序化的方法得到了长程有序的柱状相^[53,54]。如果柱状相可以通过选择性金属沉积的方法变为导体,则可以通过这种方法得到互相平行排列的量子线。如果嵌段共聚物的一段有光电功能,则可以得到具有纳米分辨率的光电器件。

高压电场能够改变聚乙烯结晶的形态、结构和动力学行为^[55],但高压场仅适合于本体高分子,而电场却是一种能够很好地调控薄膜高分子结构形态的外场。静电场作用下的支化聚乙烯的形态、结构和动力学行为与没有电场时的完全不同。电场作用下形成的圆形单晶,与没有电场时所形成的单晶相比,单晶的结构是一种分子链松弛堆积的正交结构,并且由于分子链的松弛堆积使得圆形单晶易于发生增厚生长^[56]。剪切场和电场对软物质的调控作用是可以相互补充的,根据不同的需要选择合适的外场来实现对其微观结构及相应的其它性能的调控。

4 高分子软物质特性研究的展望

软物质的研究目前作为凝聚态物理学的一个前沿领域,无论国外还是在国内都正处于起步发展阶段。由于软物质的研究对生命科学和材料科学等具有的科学意义和应用价值,其未来发展趋势不可低估。采用软物质的概念研究高分子,是高分子与其它学科相互交叉共同发展的一个切入点。高分子的软物质特性的研究,是在传统的高分子研究的基础上的。作者建议开展以下一些研究工作。

4.1 高分子的结构对其弱影响强响应特性的影响

研究高分子的结构对其弱影响强响应特性的影响,应在分子层次和分子以上层次上开展。分子层次的结构即分子链的结构,如化学组成、基团性质、序列分布和链的拓扑性等。分子以上层次

的结构即分子链聚集体的结构,如分子链的多分散性、分子链的堆积方式和密度、分子链聚集的有序性和各向异性、分子链聚集的稳定性和转变等。可能开展的研究问题有:功能原子或基团的种类、位置及序列精确可控的分子链的合成;管状、树状、碟状、超支化等特殊拓扑链的合成和组装;分子链有序聚集体的物理微结构和形态;分子链聚集体的相转变和亚稳定性等。

4.2 调控高分子弱影响强响应特性的方法

利用高分子的弱影响强响应的特性,通过变化外场的类型和强度对具有特殊结构、符合特定要求的分子链的搬迁、堆积、聚集,实现分子链的有目的地聚集及结构各向异性的调控,突出在某个方向或某个层次上的物理结构,从而影响相应方向或层次上的高分子的性质或功能。可能开展的研究问题有:外场诱导的分子链的搬迁、堆积、聚集;表面和界面上的受限分子链的分子形态、相行为和状态性质;薄膜中的分子链的固态自组织;相尺寸和多分散性对分子链有序聚集的影响等。

4.3 高分子的弱影响强响应特性的应用

高分子的弱影响强响应的软物质特性使得可以动态和现场地调控高分子的微结构和相态,实现高分子的性能和功能随外界条件的变化而改变,发掘高分子的自适应性。而自适应性是高分子作为智能材料应用所应具备的基本条件。可能开展的研究问题有:高分子的结构形态的动态和现场调控;高分子的结构各向异性的变化与性质各向异性变化间的关系;高分子的性质和功能的外场寻优等。

参考文献:

- [1] de Gennes P G. *Angew Chem Int Edit*, 1992, 31, 842.
- [2] de Gennes P G. *Rev Mod Phys*, 1992, 64(3), 645.
- [3] de Gennes P G. *Science*, 1992, 256, 495.
- [4] de Gennes P G. Badoz J. *Fragile Objects*, Springer-Verlag New York, Inc., 1996.
- [5] Daoud M, Williams G E. *Soft Matter Physics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1999.
- [6] Chaikin P M, Lubensky T C. *Principles of Condensed Matter Physics*, Cambridge University Press, 1995.
- [7] 欧阳钟灿. *科学*, 1999, 5, 3.
- [8] Lubensky T C. *Solid State Communications*, 1997, 102, 187.
- [9] Witten A. *Reviews of Modern Physics*, 1999, 71, s367.
- [10] Cheng S Z D, Keller A. *Annu Rev Mater Sci*, 1998, 28, 533.
- [11] 何天白, 王佛松. *化学通报*, 1999, 10, 23.
- [12] 刘结平, 谢封超, 杜滨阳, 等. *Polymer*, 2000, 41, 8573.
- [13] Chiu F-Ch, Fu Q, Leland M, et al. *Macromol Sci-Phys B*, 1997, 36, 553.
- [14] Toda A, Keller A. *Colloid and Polymer Science*, 1993, 271, 328.
- [15] Yoon Y, Zhang A, Ho R-M, et al. *Macromolecules*, 1996, 29, 294.
- [16] Yoon Y, Ho R-M, Moon B, et al. *Macromolecules*, 1996, 29, 3421.
- [17] Zheng R-Q, Chen E-Q, Cheng S Z D, et al. *Macromolecules*, 1999, 32, 3574.
- [18] Zheng R-Q, Chen E-Q, Cheng S Z D, et al. *Macromolecules*, 1999, 32, 6981.
- [19] Bates F S. *Ann Rev Phys Chem*, 1996, 41, 525.
- [20] Tassoni R, Schrock R R. *Chem Mater*, 1994, 6, 744.
- [21] Leibler L. *Macromolecules*, 1980, 13, 1602.
- [22] Fredrichson G H, Helfand E J. *Chem Phys*, 1987, 87, 697.
- [23] Bartlett P. *Physics World*, 1998, 11, 23.
- [24] Mendes E, Griard B, Buzier M, Boue F, Bastide J. *Macromolecules*, 1993, 26, 6873.
- [25] 何天白. *中国科学基金*, 1998, 国家杰出青年基金专刊, 35.
- [26] Dornski D, Perlmutter S H, Modell G. *Appl Opt*, 1994, 33, 2608.

- [27] Jin S H, Lee J C, Park D K. Polym Bull, 1996, 37, 799.
- [28] Ho R-M, Yoon C-Y, Leland M, et al. Macromolecules, 1996, 29, 4528.
- [29] Kellog G J, Walton D G, Mayes A M, et al. Phys Rev Lett, 1996, 76, 2504.
- [30] Pereira G G, Williams D R M. Macromolecules, 1999, 32, 758.
- [31] Liu Y, Zhao W, Zheng X, et al. Macromolecules, 1994, 27, 4000.
- [32] Russell T P, Guggen H, Swalen J D. J Polym Phys Edit, 1983, 21, 1745.
- [33] Harris F W, Lin S-H Li F, Cheng S Z D. Polymer, 1996, 37, 5049.
- [34] 李宝忠, 何天白, 丁孟贤. Chem Phys Lett, 1997, 275, 222.
- [35] Wang H, Newstein W C, Krishnan A, et al. Macromolecules, 1999, 32, 3695.
- [36] Scott D B, Waddon A J, Lin Y-G, et al. Macromolecules, 1992, 25, 4175.
- [37] Alkalak R J, Thomas E J. J Polym Sci Polym Phys Ed, 1994, 32, 341.
- [38] Albalak R J, Thomas E L. Polymer, 1995, 35, 4115.
- [39] Urbas A, Fink Y, Thomas E L. Macromolecules, 1999, 32, 4748.
- [40] Chen J, Zhang A, Yandrasites M A, Cheng S Z D. Makromol Chem, 1993, 194, 3135.
- [41] Barclay G G, Ober C K. Prog Polym Sci, 1993, 18, 899.
- [42] Warner M, Terentjev E M. Prog Polym Sci, 1996, 21, 853.
- [43] James L, White, Mukerrem C. Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, John Wiley & Sons, 1988, New York, 595.
- [44] Amundson K R. Plat Eng(N Y), 1998, 45, 1079.
- [45] Lonberg F, Fraden S, Hurd A J, Meyer R E. Phys Rev Lett, 1984, 52, 1903.
- [46] Srajer G, Fraden S, Meyer R B. Phys Rev A, 1989, 39, 4828.
- [47] Hudson S D, Thomas E L. Phys Rev A, 1991, 44, 8128.
- [48] Heilmeier G H, Goldmacher J E. Appl Phys Lett, 1969, 13, 132.
- [49] 谢封超, 肖学山, 闫东航, 程正迪, 何天白. 上海, 99 高分子学术论文报告会论文集, 1999, c-54.
- [50] Amundson K, Helfand E, Quan X, et al. Macromolecules, 1994, 27, 6559.
- [51] Park M, Harrison C, Chailin P M, et al. Science, 1997, 276, 1401.
- [52] Mansky P, Harrison C K, Chailin P M, et al. Appl Phys Lett, 1996, 68, 2586.
- [53] Morkved T L, Lu M, Urbas A M, et al. Science, 1996, 273, 931.
- [54] Mansky P, DeRouchey J, Russell T P, et al. Macromolecules, 1998, 31, 4399.
- [55] Hikosaka M, Amano K, Rastogi S, Keller A. Macromolecules, 1997, 30, 2067.
- [56] 刘结平, 杜滨阳, 谢封超, 等. 广州, Preprints 6th Pacific Polymer Conference, 1999, 186.

Soft Matter Characters of Polymers

XIE Feng-chao, ZHANG Qing-ling, LIU Jie-ping, HE Tian-bai

(State Key Laboratory of Polymer Physics and Chemistry, Changchun Institute of Applied Chemistry,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: General characters of soft matter and its development were introduced first. And then the soft matter characters of polymer, the pronounced responses to the weak influences, were revealed from research works on polymers existed. External fields modulated structure, property and function of polymers were reviewed based on the view of soft matter characters of polymers of the pronounced responses to the weak influences. Suggestion for the future polymer research based on the soft matter concept was raised also.

Key words: Soft matter; Confinement; Block copolymer; Liquid crystal polymer