

- [6] McNally T, McShane P, Nally G M, Murphy W R, Cook M, Miller A. *Polymer*, 2002, 43(13): 3785~3793.
- [7] Da Silva A L N, Tavares M I B, Politano D P, Coutinho F M B, Rocha M C G. *J Appl Polym Sci*, 1997, 66(10): 2005~2014.
- [8] Bensason S, Minick J, Moet A, Chum S, Hiltner A, Baer E. *J Polym Sci, Part B: Polym Phys*, 1996, 34(7): 1301~1315.
- [9] Cecchin G, Morini G, Pelliconi A. *Macromol Symp*, 2001, 173(1): 195~209.
- [10] Galli P, Collina G, Sgarzi P, Baruzzi G, Marchetti E. *J Appl Polym Sci*, 1997, 66(9): 1831~1837.
- [11] Galli P, Vecellio G. *Prog Polym Sci*, 2001, 26(8): 1287~1336.
- [12] Galli P. *Prog Polym Sci*, 1994, 19(6): 959~974.
- [13] Galli P, Haylock J C, DeNicola A. *Macromol Symp*, 1995, 100: 95~100.
- [14] Galli P, Haylock J C. *Makromol Chem Macromol Symp*, 1992, 63: 19~54.
- [15] Cecchin G, Morini G, Pelliconi A. *Macromol Symp*, 2001, 173(1): 195~210.
- [16] 牛慧. 高性能/功能化聚烯烃的聚合制备研究: 新型聚丙烯釜内合金及反应性聚丙烯. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- [17] 义建军, 崔春明, 李华姝, 尹宝作, 张建颖, 郎笑梅, 吴林美. CN 200710118854. X. 2007.
- [18] 义建军, 尹宝作, 崔春明, 李志飞, 崔亮, 李华姝, 黄伟欢, 张建颖, 王莉. CN 200810226206. 0. 2008.
- [19] Resconi L, Piemontesi F, Camurati I, Sudmeijer O, Nifant'ev I E, Ivchenko P V, Kuzmina L G. *J Am Chem Soc*, 1998, 120(10): 2308~2321.
- [20] Alt H G, Köppl A. *Chem Rev*, 2000, 100(4): 1205~1222.
- [21] Kaminsky W. *J Polym Sci, Part A: Polym Chem*, 2004, 42(16): 3911~3921.
- [22] Prieto Ó, Perena J M, Benavente R, Cerrada M L, Pérez E. *Macromol Chem Phys*, 2002, 203(12): 1844~1851.
- [23] Thomas C Y. *Polym Eng Sci*, 2001, 41(4): 656~671.
- [24] Collina G, Braga V, Sartori F. *Polym Bull*, 1997, 38(6): 701~705.
- [25] Collina G, Pelliconi A, Sgarzi P, Sartori F, Baruzzi G. *Polym Bull*, 1997, 39(2): 241~247.
- [26] 董金勇, 朱博超, 韩志超, 张长军, 牛慧, 韦绍义. CN 200510134356. 5. 2005.
- [27] Mirabella J F M. *Polymer*, 1993, 34(8): 1729~1735.
- [28] Zacur R, Goizueta G, Ciapiati N. *Polym Eng Sci*, 1999, 39(5): 921~929.
- [29] 杜兆芳, 高春燕, 董灿君, 曹建飞. *纺织学报*, 2006, (5): 94~96.
- [30] 胡瑞华, 胡魁华, 宋帮才. *汽车工艺与材料*, 2007, (3): 61~63.
- [31] 曲丽君. *产业用纺织品*, 2002, 20(143): 36~39.

Study on Key Technologies for Singleness of Automobile-used Polyolefin Materials

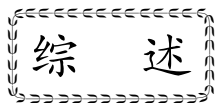
HU Xu-teng^{1*}, ZHAO Xu-tao¹, DONG Jin-yong², YI Jian-jun¹

(1. *PetroChina Petrochemical Research Institute, Beijing 100195, China;*

2. *Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract: This paper reviewed the achievements in catalyst preparation, polymerization technology design, structure-property correlation and practical application of PP in-reactor alloys. The basic PP in-reactor alloys ranging from high rigidity to high toughness were successfully produced in the pilot experimental device for PP, which was catalyzed by the modified Ziegler-Natta catalyst with the addition of novel sulfonyl electron donor or Ziegler-Natta/metallocene complex catalyst. A series of automobile-used PP special materials, obtained by blending the basic resins with additives or natural fibers, were used to prepare typical automobile components. The molding technology and practical application of the automobile components were systematically investigated.

Key words: PP in-reactor alloys; Singleness; Preparation of catalyst; Pilot experimental device; Molding and application



大分子链的溶致凝聚过程

吴其晔

(青岛科技大学高分子科学与工程学院, 青岛 266042)

摘要:研究大分子链的凝聚从溶液考虑比较合适。溶液从稀溶液向亚浓、浓溶液的转变过程,本质上就是分子链从孤立单链状态向多链穿透、关联、缠结、凝聚的过程,称其为溶致凝聚过程。分子链溶致凝聚的类型十分丰富,包括凝聚成无定形态、结晶态和溶胶-凝胶转变等,讨论了这些过程中分子链溶致凝聚的特点。简要介绍了分子链凝聚过程涉及的基本物理问题:多体问题、复杂关联效应、平均场近似、临界指数,以及研究溶致凝聚的重要方法——标度律方法。

关键词:大分子;凝聚态;溶致凝聚过程

高分子凝聚态物理无疑是当代高分子科学最活跃的研究领域之一。在讨论凝聚态物质的本质时,有一个问题萦绕于人们脑海挥之不去,即大量(巨量)分子、原子是如何聚集在一起,形成大千世界形形色色的凝聚态物质的?

1 大分子链凝聚过程的特点

凝聚态主要指液态和固态。凝聚过程指原本孤立分散的分子(气态)聚集成大量分子聚集体(液态或固态)的过程。普通物质的凝聚过程相对简单。从热力学角度看,普通物质分子(小分子)的凝聚大致是在低温、高压下实现的。处于气态的分子相距很远,作高速无规热运动,内能高,相互弹性碰撞。在降温或(和)施压过程中分子动能减弱,间距缩小,相互接近,当近到分子或原子引力起作用的范围(见图1),分子或原子通过化学键或范德华力结合,遂凝聚为液体或固体^[1, 2]。此时分子的平动被约束,只能在平衡位置附近振动,具有确定体积。液态与固态的差别在于固态晶体具有三维长程有序结构,而液态的内能较高,可自由流动,具短程有序特点。液体与固体一样有确定体积,分子间平均距离与固体比仅改变3%左右,热运动形式和相互作用力的数量级与固体相仿。由此可见小分子凝聚过程中体系内能变化起决定性作用。凝聚时体系释放大潜热,热焓降低,这种凝聚可称为“冷致凝聚”(cooling condensation)。虽然小分子凝聚时体系熵值也有变化,但由于小分子物质结构简单,熵值小,因熵减引起的自由能上升远抵不上内能下降对自由能的贡献,因此是内能变化决定了小分子物质的相变,这类相变也称能致相变(energy induced phase transition)。

大分子链的凝聚与小分子不同。大分子链结构复杂,分子量巨大,不可能象小分子一样作剧烈热运动,因此高分子材料无气态,只有液态和固态。但同一个问题仍然存在,原本孤立分散的分子单链究竟是如何聚集和结合在一起,形成高分子材料复杂的凝聚态的?

由于无气态,因此高分子材料不存在从气态向液态、固态的冷致凝聚。这使得研究大分子链凝聚从溶液考虑较为合适。分子链可溶于恰当溶剂,在极稀溶液中分子链相互分离,为单链线团,分子链构象取决于链的柔顺性和排除体积。随着浓度增大,溶液从稀溶液向亚浓溶液、浓溶液转变,微观上分子链从孤立单链状态向分子链相互穿透、关联、缠结、凝聚,形成多链聚集体转变。这一过程可称之为“溶致凝聚过程”(lyotropic condensation),见图2。它与溶致液晶的形成有些相似。在凝聚过程中,分子链的构象、链

收稿:2011-11-28; 修回:2011-12-23;

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50973050);

作者简介:吴其晔,教授,博士生导师。E-mail: wuqiye@qust.edu.cn; web: http://polymer.qust.edu.cn.

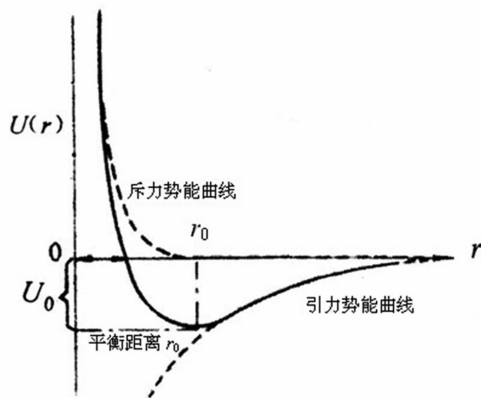


图 1 分子势能曲线

Figure 1 Potential energy curve of molecule

间相互作用和关联作用发生变化,使分子链聚集状态和溶液性质发生变化。因此我们认为,沿着从稀到亚浓,到浓溶液的溶致凝聚路线研究不同浓度高分子溶液的结构、性质差别和相互联系,应是研究大分子链凝聚过程的恰当途径,对于了解大分子链的凝聚本质很有帮助。

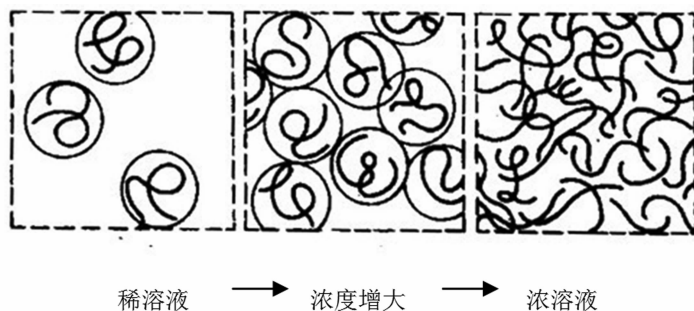


图 2 从单链线团到多链聚集体的溶致凝聚示意图

Figure 2 Sketch map of the lyotropic condensation of macromolecular chains

从热力学考虑,大分子链凝聚过程同样遵循 Gibbs 自由能原理。但由于凝聚时分子链间的相互作用属于次价键力,键能低,因此内能变化对相变的贡献不大。而另一方面,由于大分子独特的结构特点:分子量巨大,分子链具有巨大长径比和不同柔顺性,构象熵值高;大量分子链聚集时,既有单链构象熵变化,又有大量分子链的混合熵变化,因此在凝聚态形成和变化过程中,熵变的贡献十分突出,常常超过内能的贡献,发生所谓“熵致相变”(entropy induced phase transition)。熵致相变是软凝聚态物质相变的主要特征之一,因此掌握熵致相变的规律和特点对理解大分子凝聚和高分子材料的相变本质也具有十分重要的意义^[3,4]。

虽然只有液态和固态,但与小分子材料相比,高分子材料的凝聚态结构形式非常丰富。高分子液态包括不同浓度的溶液及熔体(粘流态),不同浓度溶液中分子链的构象和聚集方式不同。高分子固态有结晶态(不同的晶型)、非晶玻璃态、非晶高弹态和黏弹态。从热力学角度看,非晶玻璃态、高弹态本质上属于力学性质不同的液态。此外,还有高分子液晶态、交联高分子的凝胶态、复杂高分子体系(如支化高分子、共聚高分子、高分子共混体系)的织态,以及外场作用下的多种激发态(光、电、磁、热等)。普遍的情形是一种高分子材料中几种凝聚态同时并存,如结晶态与非晶态并存(半晶高分子)、热力学稳定态与亚稳定态并存、基态和激发态并存,且并存寿命很长^[5]。这使得大分子链的凝聚过程也形式复杂,种类较多。

2 几种典型的分子链溶致凝聚形式

讨论大分子凝聚过程必须考虑其链式分子结构特点和物质特性。在溶致凝聚中,长链分子的柔顺性

是分子链相互穿透、聚集的结构保证,而柔顺性与单键内旋转及结构单元的相互作用有关。柔顺性好的分子链穿透能力强,聚集的无规程度高,容易形成非晶无定型聚集态;分子链刚性大,穿透能力小,更倾向于规则排列形成大分子晶体。

无定形态(amorphous)是高分子材料特有的最重要的凝聚态,存在于几乎所有高分子材料中。根据运动单元和力学性能的差别无定形态包括玻璃态、高弹态、黏流态以及结晶聚合物的非晶区等。微观上无定型态是大量长链分子以无规线团状凝聚在一起,高度穿插、缠结、关联,自由状态下长链分子取 Gauss 链构象。对无定形聚合物作广角 X 射线衍射实验,得到的衍射图样仅有单个弥散环,说明其中无三维远程有序结构,堆砌方式类似液体,有序性低,对称性高,本质上是热力学状态类似液体的准固态物质。大分子链聚集成无定形态时,内能(链间相互作用能)变化不大,体系自由能的改变主要因混合熵增大所致。

除相互穿插、交叠、缠结以无规线团状凝聚外,温度较低时经常有分子链或局部分子链规整排列,形成三维长程有序的点阵结构,生成结晶高分子(crystalline)。已知小分子结晶的主要驱动力为化学键力,如离子晶体(NaCl)通过离子键结合形成晶体;原子晶体(金刚石)以共价键结合形成晶体;金属晶体(包括金属单质及合金)由金属键结合形成晶体,见图 3。而长链大分子不同,其规则排列形成长程有序结构的驱动力为次价键,因此高分子晶体属于分子晶体。有些有机小分子晶体也为分子晶体,如外层电子已饱和的分子如 I₂、HCl、CO,或原子如惰性气体,通过范德华力形成晶体。大分子晶体的特点,一是沿不同晶轴方向的键力不同,其中平行于主链的晶轴为主价键力,通常规定该晶轴为 *c* 轴;而沿 *a*、*b* 两轴为次价键力,因此高分子晶体本征地呈现各向异性;二是大分子结晶过程复杂,晶体结构不完善,多为半晶聚合物,结晶过程更多地受动力学因素控制。

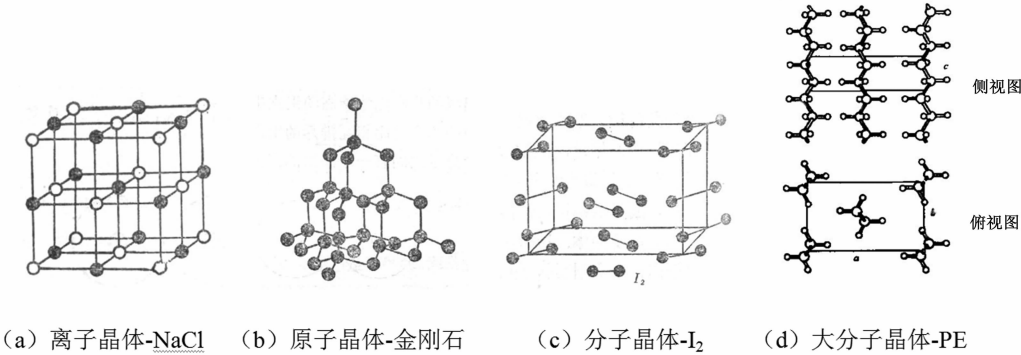


图 3 几种结晶物质的点阵结构示意图
Figure 3 Sketch map of the crystal lattices of different matters

从热力学角度看,分子链结晶时体系的内能和熵都发生变化。无规线团的热运动能量较大,只有降低温度,放出相变潜热,减少内能,才能使分子链或链段有序性增大,对称性降低,规则排列。与此同时分子链构象熵和混合熵也发生变化,熵值减少不利于规则排列和结晶。内能变化和熵变竞争,使大分子结晶过程变复杂,不仅有晶区和非晶区并存,也有多种晶型(折叠链片晶、球晶、伸直链晶体、串晶)并存。但就结晶而言,内能变化占主导位置,因此大分子结晶是一种冷致凝聚过程,或称能致相变。大分子晶体不属于软物质。

大分子结晶的复杂性可从凝聚过程去理解。首先,无规线团的大分子不可能直接进行有规排列,相互缠结的分子链进入晶区前必先解缠结,这一过程由于很高的熵活化位垒需要一定时间。不能解缠的部分无法进入晶区;其次,由于分子链很长且长短不一(分子量分布宽),因此不可能完全规则排列形成完善晶层。很多情况下形成折叠链片晶,链末端游离在晶层外,形成晶界区;再次,由于一个晶胞无法容纳整条分子链,一条分子链往往穿过几个晶胞或晶层,使晶层间存在着大量无规排列的分子链段落。因此结晶高分子通常为晶相和非晶相并存的两相结构,结晶过程可描述成一种两相结构的分离过程:相对较为伸展、容易规则排列的链序列形成晶相,而仍处于缠结的部分链,以及链末端、无规共聚单元、短支链、无

规立构缺陷等被排出晶区,构成无定形非晶相。两相分离的驱动力遵从热力学自由能最低原则,晶区内分子链取内旋转势能最低的伸展链构象,而无规线团构象或弯折链或立构缺陷的能量较高,它们富集在能量较高的无定形区^[6]。

需要指出的是,在大分子溶致液晶形成过程中,熵变在与内能竞争时往往占上风。例如由各向同性相到向列相液晶的转变属于熵致相变。液晶致晶基元通常为刚性棒状分子,具有平动和转动两种运动形式。溶液浓度低时,两种运动均无阻碍,熵值都很大;浓度增大后,分子转动受限制,此时只有取平行排列才能保证平动的自由度,使平动熵值大而自由能减少。因此液晶属于软物质。另外,无定形聚合物力学状态转变中体系的熵值也发生变化,但熵变的程度不同。力学状态转变时的熵变为渐变,熵变尚不足以使体系自由能突变,未导致相变。如高弹态分子链拉伸取向,构象熵降低,发生熵弹性,但取向态并非热力学稳定态。

高分子材料另一类重要的溶致凝聚过程为凝胶化过程,属于一种特殊的有化学反应参与的连接性转变(connectivity transition)。它是指由分子量有限的分子组成的可自由流动的液体溶胶,通过分子间逐步反应、凝聚成分子量“无限大”的网络和固体凝胶的过程,又称溶胶-凝胶转变(sol-gel transition),是一种广义的液-固相变。溶胶-凝胶转变的临界点称凝胶化转变点。典型例子有多官能度单体的缩聚合和无定形橡胶的硫化。缩聚合属于小分子的凝胶化转变,可视为零维粒子连接成三维网状结构的转变。橡胶硫化是大分子的凝胶化转变,是由一维线型长链分子反应,生成支化聚合物,然后由支化发展到超支化,而后形成三维分子链网络的过程。最早定量描述溶胶-凝胶转变的理论是 Flory-Stockmayer 平均场理论。该理论指出,具有 z 官能度的前体分子的凝胶化转变点的反应程度为: $p_c = 1/(z-1)$ 。平均场理论对于描述远离凝胶点的凝胶化过程,特别对于描述大分子的硫化是有效的,但它不适于描述非常接近凝胶点(临界点)区域的情形,后者用临界逾渗理论描述更合理。

3 大分子凝聚时的多体问题和复杂关联效应

凝聚过程和相变是大量分子参与的与多方面因素相联系的复杂合作现象,涉及的根本物理问题有多体问题(many-body effects)和关联效应(correlation)。

多体是相对于单体而言的。单体问题研究单个分子、原子、电子所遵循的运动规律。在经典力学和量子力学中这些规律非常成功。固体物理学建立在单电子近似的能带理论,以及具有弱相互作用(弱关联)电子系统的低能激发理论基础上。该理论对于区分绝缘体、半导体、金属以及理解它们物理性质的差别也是成功的,但在遇到包含大量电子和原子核的固体系统时必须作大量简化,如把系统简化为单电子在周期势场中的运动再进行处理。因此这种理论只能描述一些相对简单体系(如晶体),而对具有复杂结构的多粒子系统无能为力。

多体问题不研究单个粒子的性质,而研究它们作为一个集合体整体展现的新现象和新规律。其中最受关注的是大量粒子集合时出现的各种合作现象、强关联、竞争序及自发对称破缺等,这些相互作用不再是微弱的修正,而是决定各种有序相出现的重要原因。这些现象不能通过单粒子物理规律的简单叠加,或作类似固体物理中的简化处理能够解决,而必须考虑多粒子系统的复杂性^[7]。复杂性是一个重要概念。复杂性不仅表现在物质体系的千差万别,还表现在由于外界参量或某种相互作用的微小变化会导致体系性质的巨大差异,出现完全不能预期的合作现象和竞争序。很显然采用常规力学方法处理具有复杂关联效应和合作现象的多体问题是十分困难和几乎不可能的,因此研究多体问题时,平均场近似方法成为人们首选的方案。

平均场近似方法(mean field approximation)是量子力学计算中一种求解全同多粒子系的定态 Schrödinger 方程的近似方法。用一个平均场代替其他粒子对某一粒子的相互作用,同时将平均场用单粒子波函数表示,从而将多粒子系的 Schrödinger 方程简化成单粒子波函数所满足的非线性方程组来求解。凝聚过程和相变属于典型多粒子系统问题,历史上许多人采用平均场方法处理各种相变现象都取得成功。包括一级相变和二级相变,Landau 集各种相变理论之大成,提出了唯象的二级相变理论,包含了所有这些平均场理论的要素,具有充分的普适性。在研究理想分子链构象及聚合物溶液性质时,Flory 的

平均场理论也取得很大成功。

在平均场理论中,相变(对称破缺)微观上是由于体系内大量粒子的相互作用和关联效应引起的。当温度降低或压力增大时,不同种类的关联作用使系统自由能改变,通过对称破缺导致产生不同的有序相。图 4 中,处于对称破缺和有序态的系统能量较低,而处于高度对称和无序态的系统能量较高。图中将完全有序态(晶态)视为基态,其有序度最高、对称性最低、能量最低;其他高对称性、低有序度的相态能量高,视为激发态;完全无序态(气态)的能量最高。由基态向激发态的转变(相变)是通过各种“元激发”(elementary excitation)或拓扑型激发(topological excitation)实现的。

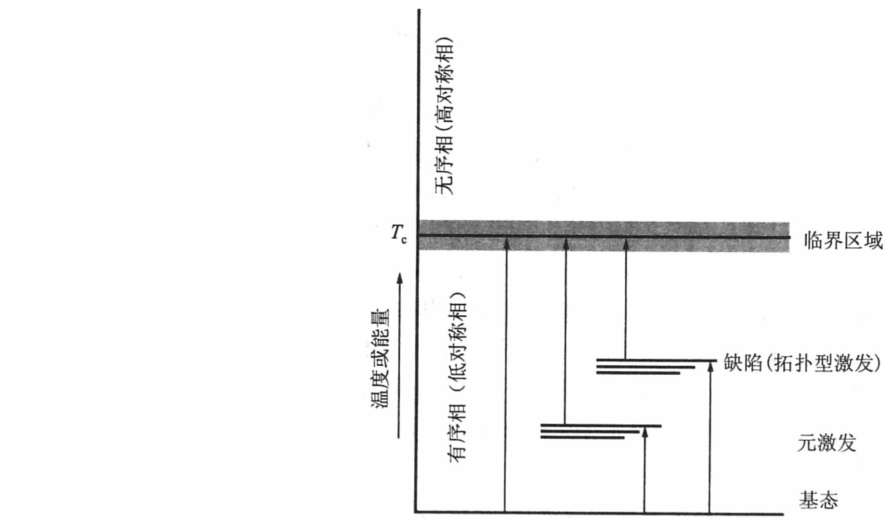


图 4 多粒子系统的凝聚相及能态示意图,注意对称度的改变和临界区域

Figure 4 Sketch map of the energy levels of many-body systems, pay attention to the change of symmetry and to the critical interval

虽然平均场方法的适用范围很广,但是在对某些物质(主要是软物质体系)的临界指数精确测量时发现, Landau 理论在相变临界点 T_c 附近极小的临界区域内失效(图 4 中的阴影范围)。在该区域内 Flory 根据平均场理论计算的溶胶-凝胶转变的各项临界指数,以及橡胶硫化过程的各临界指数都与严格的临界逾渗理论的计算值有差别。平均场方法失效的原因归结为这些体系在临界区域内涨落的关联长度相当大,趋于宏观尺度,以致于微观相互作用的细节不产生影响,使平均场理论失效。

在大分子链溶致凝聚过程中,在从稀溶液向浓溶液转变的分子链聚集过程中,结构单元以及分子整链之间发生复杂的关联效应,影响分子链构象和聚集形态的变化。这些关联包括因分子热运动(能量在 kT 数量级)和排除体积效应间的竞争而产生的“热关联”,和因远程屏蔽效应而产生的“长程关联”。这些关联效应的作用尺度相等长, de Gennes 将高分子亚浓体系视为具有长程关联的无序系统。由于这些关联,使分子链在不同浓度溶液和在不同尺度观察的构象状态不同。讨论这种变化,不能用平均场方法(失效),取而代之是引入若干新概念,如粗粒化链段、自相似性、分形、逾渗、重征化、热关联长度、长程关联长度、串滴链模型等,和引入新方法——标度律方法,结果使分子链的溶致凝聚过程得到清晰的说明,在临界区求得的临界指数与实验结果很好吻合。新理论的出现和发展还带来科学和哲学意义上的进步,它指出在分子凝聚态物理领域存在着一系列与化学结构无关的普适物理规律,在人们熟知的固体材料和液体材料之间,还存在一大类与人们生活息息相关的软物质,它们遵循不同于常规材料的新规律和新行为,从而大大开阔了科学家的视野,开拓和深化了材料科学的研究领域。

作为结束语,我们再强调一下研究凝聚过程和相变的重要性。以往科学家在探索自然界构架时,习惯于还原论(Reductionism)的思维方法,即从大到小,一分再分,将复杂万物还原为简单、再简单的基元,如复杂生物体还原为简单的细胞、染色体、基因,宇宙万物分解为分子、原子、基本粒子等。然后在构建宇宙时,又简单地认为将各种基元集合在一起就可重建复杂宇宙。但实践证明从简单基元构筑复杂万物

(凝聚)的方法和理论并不象还原论者设想的那样简单。当人们借助于牛顿力学、量子力学和相对论可以自由翱翔于基本粒子小宇宙和超银河系大宇宙时,却对眼前形形色色的材料和物质的微观、亚微观、介观和宏观的结构与性能之间的联系知之不多。这个世界实在太丰富太熟悉又太陌生了,简单的基元集合根本无法得到关于复杂的世界的真实规律的描述。P. W. Anderson 曾对还原论方法提出质疑:“将万事万物还原成简单的基本规律的能力,并不蕴含着从这些规律重建宇宙的能力。当面对尺度与复杂性的双重困难时,重建论的假设就崩溃了。其结果是大量基本粒子的复杂聚集体的行为并不能依据少数粒子的性质作简单外推就能得到理解。取而代之的是在每一复杂性的发展层次中呈现了全新的性质,从而我认为要理解这些新行为所需作的研究,就其基础性而言,与其它相比毫不逊色。”

这种在不同的聚集层次和聚集尺度上物质会展现全新性质和规律的现象称“层展现象”(emergent phenomena),这种性质称层展性。正因为如此,在研究不同层次的物质凝聚过程时,决不能简单地采用外推、叠加或归纳方法。在不同的聚集层次,不仅物性和特征参数不同,研究方法和基本理论也不相同。对小分子物质是如此,对大分子物质同样是如此。这正是凝聚态物理学所要研究和解决的最基本问题之一。认识这一点非常重要。因为在当今材料科学(包括高分子材料科学)研究中,追求材料在宏观、介观、亚微观、微观间多尺度、多层次的关联、衔接和贯通十分热门,而对于层展性的认识不够。由于“层展性”,一个尺度上材料的性质不可能由另一个尺度上的性质简单地演绎或归纳出来,不同层次间物质结构与物性的关联还需要大量出色的基础性和积累才能得以理解。

参考文献:

- [1] 马本堃,高尚惠、孙煜. 热力学与统计物理学. 北京: 人民教育出版社, 1981.
- [2] Sengers J L. How fluids unmix. Amsterdam; Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, 2002.
- [3] de Gennes P E. Scaling Concepts in Polymer Physics. Cornell University Press, 1985; 中译本, 高分子物理学中的标度概念. 吴大诚等译. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [4] Rubinstein M and Colby R H. Polymer Physics. Oxford University Press, 2003; 中译本, 高分子物理. 励杭泉译. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [5] 吴其晔, 张萍, 杨文君, 林润雄. 高分子物理学. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [6] Strobl G. The Physics of Polymers. Berlin Heidelberg; Springer-Verlag, 2007; 中译本, 高分子物理学. 胡文兵等译. 北京: 科学出版社, 2009.
- [7] 冯端, 金国钧. 凝聚态物理学(上卷). 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [8] Landau L D, Lifshitz E M. Statistical Physics I. Oxford: Pergomon Press, 1980.
- [9] Anderson P W. Basic Notions of Condensed Matter Physics. Menlo Park; Benjamin, 1984.

The Lyotropic Condensation of Macromolecular Chains

WU Qi-ye

(Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: The study of macromolecular chains condensation will be beneficial with the discussion about polymer solutions. The transitions from dilute solution to semi-dilute and to concentrated solution were in nature the process of interlace, entanglement and condensation of a lot of isolated single chains. This can be known as lyotropic condensation. The types of chains lyotropic condensation are varied, e. g. condensed to amorphous state, to crystal state, and sol-gel transition etc. The characters of these processes were discussed. The basic physical problems in lyotropic condensation: e. g. many-body effects, correlations, mean field approximation, critical index and the new study method——scaling laws were brief introduced.

Key words: Macromolecular chain; Condensed state; Lyotropic condensation