

磁场对大分子构象的影响研究进展

李 红^{1,2} 胡道道^{1*} 房 喻¹ 王明珍¹ 高改玲¹

(1 陕西师范大学 化学与材料科学学院, 西安 710062;

2 西安工程科技学院, 西安 710004)

摘要: 对近年来有关磁场对大分子构象的影响研究进展进行了较全面综述。

关键词: 磁场; 大分子; 构象

过去化学家认为化学反应的进行取决于体系的能量, 化学反应的最终结果直接决定于参与反应的各种分子所具有的能量, 热量、光能和电能是激发化学反应发生的手段。磁场的能量与反应所需活化能相比是微不足道的。因此, 磁场似乎不可能影响化学反应。早在 1971 年美国布朗大学的劳勒教授就指出, 处于磁场中的化学反应体系, 反应物的未成对电子的自旋将受到影响, 从而影响了体系的熵, 进而影响化学反应进程。大量的研究表明: 磁场对化学领域所涉及的许多方面产生影响。由于自由基及单电子对磁场具有敏感性, 因此, 磁场对涉及这些粒子参与过程有较为明显的影响。例如, 磁场对自由基引发聚合反应产生影响^[1~5], 以及磁场对分子发光行为产生影响^[6~9]。除此之外, 磁场对溶剂的有关物理参数及溶质在其中的结晶行为的影响也进行了广泛的研究^[10~19]。随着磁场在化学领域应用研究中的不断深入, 有关研究内容更加广泛, 磁场对催化反应以及电聚合反应影响也有文献报道^[20~23]。尤其是近年来有关磁场在生物医学方面的应用研究更是倍受各国科技工作者的关注^[23, 24]。有关这方面的研究涉及到生物医学的许多方面, 其中磁性微球的生物医学研究在目标生物产品的分离、靶向给药、磁性微粒固定化酶及免疫分析等^[25, 26]。有关磁粒在生物医学方面的研究文献多集中在应用上, 而磁场对磁粒上的大分子的构象行为影响的研究文献很少。众所周知, 生物大分子的构象是其生物活性的灵魂。因此, 为了更有效地将磁粒应用于生物医学方面, 研究磁场对生物大分子在固液界面上构象行为的影响是非常必要的。同时越来越多电器的使用加剧了我们生存空间的磁场强度, 磁场对有机体的作用研究也显得非常重要。另外, 磁场对大分子构象影响可能引起大分子在空间的有序排列, 这对于制备具有特殊性能的材料具有积极意义。本文仅将磁场对大分子构象行为的影响的有关研究文献给予综述, 希望对上述研究具有一定借鉴意义。

大分子的构象是组成分子的原子和基团由于链上多种弱相互作用使链在空间形成的某种排布方式。由于这些次级键的作用力很弱, 因此, 维系构象的作用力对外环境特别敏感。长期以来人们对外环境对大分子构象影响进行了广泛而深入地研究。这些外环境条件主要涉及温度、pH、盐度、溶液极性、电场及某些添加物等。正是基于维系构象的作用力是弱的相互作用, 具有施加强弱作用力的磁场有可能成为影响大分子构象的新因素。因此, 随着磁学在化学和生物医学领域研究中的应用, 有关磁场对大分子构象的研究逐渐受到人们的重视。

基于一切物质都具有或弱或强的磁性, 任何空间都存在或低或高的磁场。现代科学的发展已经揭示出近自我们自身, 远至天体和宇宙空间都存在磁场。最近的研究进一步说明在生命世界中上述论断的正确性。生物磁学涉及的面很广, 这一研究领域的发展也极大促进了磁致生物效应, 其中不乏涉及磁场致生物大分子结构效应。

基金项目: 国家自然科学基金(20173035); 教育部(03148)资助项目;

作者简介: 李红(1972—), 西安人, 西安工程科技学院环境与化工学院助教, 主要从事高分子溶液等方面的研究

* 通讯联系人

1 磁场对酶活性及构象的影响

近年来,人们对磁场影响生命活动和生物特性的研究日益深入,磁场对酶活性的影响已有一定文献报道。我国华东理工大学与湖南大学合作在这方面作了大量工作。较广泛地对磁场影响酶活性进行了研究。在对固定化乳酸脱氢酶的研究中发现,磁场对酶的影响表现在酶的稳定时间变短,酶活性降低的程度随着磁场强度的增大而增大,当场强达到 0.230T 时,活性降低百分率趋于稳定并接近最大值^[27]。对大肠杆菌及胞内谷氨酸脱羧酶的研究中发现在不同的磁场强度、不同的作用时间下,磁化底物的影响并不一致。活性最高可达 45.2%,且有滞后和恢复效应^[28]。磁场作用使碳酸酐酶活力升高,在 210mT 下作用 4h,其活力增加了 17%,随着磁化时间的延长,其磁场效应基本趋于一致。且观察到了磁酶效应的可逆性,实验还发现磁场使酶-底物反应的活化能降低^[29]。在磁场对固定化葡萄糖异构酶的研究中,发现在不同的磁化时间,温度,磁场强度和 pH 条件下磁化底物,使其活性增加可达 28.6%。并且具有可逆性,但磁化固定化酶或磁场作用于酶-底物反应体系,未见酶活性的明显降低^[30]。以羧甲基纤维素为底物评价纤维素酶活性,研究了不同条件下静磁场对酶活性及构象的影响。研究发现,以蛋白质分子中色氨酸荧光行为考察磁场对构象的影响。从荧光光谱最大波长发生红移,且荧光强度也有不同程度的增强。可见磁场作用下其构象发生了变化。但其变化无一定规律性,仅与磁化温度,磁场强度和磁化时间有关,似乎基本符合失活越严重,构象变化越大的规律^[31]。

颜流水等利用荧光光谱探讨了恒定磁场引起 α -淀粉酶构象的影响。研究发现,经磁场处理 30min, α -淀粉酶活性无显著性差异,而磁化 10h 的酶较未磁化酶的活性增高。磁场对酶反应速率无明显影响。作者对有关实验结果的解释为:该酶分子中的—OH 和 —NH₂ 等基团的未成对电子、苯环的离域 π 电子以及对稳定该酶构象具有重要作用的 Ca²⁺ 受到磁场作用以后,使得维持原构象的次级键发生一定程度的变化,从而导致色氨酸残基的微环境的改变。同时,磁场对酶反应的影响与酶存在形式有很大关系。其实质似乎主要是构象的差异性^[32]。他们在研究磁场影响葡萄糖氧化酶活性时发现,磁场能显著提高固定化葡萄糖氧化酶的催化活性。同时在比较了磁场对固定化和溶液中游离葡萄糖氧化酶影响的差异性时发现,磁场对这两种状态下的酶活性有不同的影响。磁场对固定化酶比非固定化酶活性的影响要明显。磁场对酶活性影响在温度较高时比常温低时更为明显。这种现象也许表明,磁场对处于不稳定状态酶的影响要比处于稳定状态时更明显^[33]。

张军等利用紫外光谱和荧光光谱对磁化过氧化氢酶的稳定性影响研究中发现,经磁化以后的过氧化氢酶,其构象发生变化,且活性提高具有滞后性,明显不同于天然酶。在放置过程中,活性下降慢于天然酶,相对活性随滞后时间的延长而增加,活性变化随磁感应强度增加而呈规律性变化。磁场对酶的激活效应可能与过氧化氢酶的活性部位顺磁性的高自旋 Fe³⁺ 在磁场中的磁化作用有关。由于活性部位的构象有相当大的柔性,所以 Fe³⁺ 的磁化效应可能保持较长时间,因而磁场对过氧化氢酶的激活效应也可维持较长时间^[34]。

尽管磁场对酶所产生的影响研究有文献报道,但对构象影响的研究报道很少,在寻求磁场对酶产生影响的原因时,文献中仅仅作为可能的因素进行推测。贺华君等利用荧光光谱法研究不同磁场强度、温度、介质和磁化时间下,磁场对乳酸脱氢酶、肌酸激酶、尿酶和超氧化物歧化酶构象影响。蛋白质中具有荧光发色基团 Tyr(色氨酸)、Tyr(酪氨酸)和 phe(苯丙氨酸)。由于 Tyr 荧光往往由于被熄灭变得很弱,苯丙氨酸荧光量子产率很低。因此,通常利用 Tyr 的荧光变化研究蛋白质分子构象的变化^[35]。在磁场作用下,乳酸脱氢酶、肌酸激酶和超氧化物歧化酶中 Tyr 的荧光强度随磁场强度的增大而降低。说明磁场对酶构象产生了一定影响。但不一定使酶活性产生影响。温度能对酶构象产生很大影响。而磁场能加速或减缓这种影响。基本符合磁化酶的活性随温度升高活性逐渐增强,达到一定程度后又随温度升高而减弱,甚至使酶失活。通过以上有关实验结果,他们认为磁场可能通过影响活性中心金属离子而影响酶的构象。如磁场通过影响 SOD 酶中起催化作用的 Cu²⁺ 而使酶的构象及活性产生一定的影响;或通过影响构筑蛋白质高级结构的弱相互作用而实现的;或使生物大分子共轭结构和二硫键上的自由电子发生跃

迁。

从以上研究结果看出,磁场对酶活性的影响是比较复杂的,这可能是酶的复杂结构及各种酶的不同组成所导致的必然结果。但不容质疑的是磁场对酶的活性会产生一定的影响,这种影响与酶的构象变化有关。

2 磁场对其它生物大分子的影响

除磁场对酶活性及构象产生影响研究外,磁场对其他生物大分子产生影响也是非常重要的研究内容。Marmur 1961 年发现, DNA 双螺旋结构在热微扰后,可以使双螺旋解体。当冷却时,这种结构又会重新完美地恢复。此过程可通过紫外可见光谱进行检测。在分子水平上,意味着这个过程是氢键破坏与重组的过程。1995 年, Semina 和 Rein 曾报道 DNA 的结构对电磁场具有一定的敏感性。说明了能量场能够影响 DNA 的双螺旋结构的构象。Maria Sydona 博士对移动电话产生的电磁场对离体 DNA 构象产生影响进行了研究。结果表明:将 DNA 溶于含有 NaCl 溶液中,然后加热使 DNA 的双螺旋结构破坏。如果在冷却的上述溶液旁放置一移动手机。结果 DNA 双螺旋结构的恢复速度比无电磁场作用时明显缓慢。此结果说明,电磁场对 DNA 双螺旋结构的恢复存在明显的阻碍作用。

俄罗斯科学家 Novikov 等在早期的研究中发现,低的交变磁场作用下可明显提高从腹水肿瘤细胞染色体和鼠脑中分离出 DNA 得到脱氧核糖核酸酶的敏感性,并探讨了其机理,认为磁场是作用于对脱氧核糖核酸酶起阻碍作用的组蛋白和非组蛋白,使其功能活性降低,而并未作用于 DNA 分子本身。为了进一步研究作用机理,通过荧光光谱法研究了磁场预处理的 DNA 和磁场预处理的蛋白质、多肽的相互作用^[36~38]。磁场对大分子产生影响研究领域取得了卓有成效的研究成果。他们发现在恒频或变频磁场作用下,可显著增加从肿瘤细胞染色体中分离 DNA 的敏感性。为了了解产生这一现象的机理,他们利用荧光光谱研究了在磁场存在下 DNA 与组蛋白、多肽(如聚精氨酸)及鱼精蛋白等的相互作用。基于组蛋白 H₃ 具有内源荧光特性,其特征发射在 305nm,通过检测荧光光谱变化研究与 DNA 的相互作用。研究发现,将 DNA 加入到组蛋白 H₃ 会导致该蛋白内源荧光的衰减。同时,磁场预处理、未处理组蛋白与 DNA 相互作用的滴定曲线相似,但曲线平移。这表明组蛋白中酪氨酸的微环境极性在磁场处理时降低。用荧光探针 1,8-ANS(1-氨基萘-8-磺酸)和 DAPI(溴化 3,8-二氨基-5-乙基-6-苯基菲啶)分别与蛋白质及 DNA 键合。对 DNA-组蛋白相互作用的细节进行了研究。以 1,8-ANS 在 460nm 的荧光强度作为指标对不同体系进行了检测。磁化前、后的组蛋白与 DNA 相互作用了产生明显的影响。利用 1,8-ANS 标记的蛋白质与 DNA 的相互作用也得到了同样结论。利用 DAPI 作为 DNA 荧光探针,研究它与组蛋白的相互作用,结果发现:磁场处理的组蛋白与 DNA 相互作用时,DAPI 荧光强度变化比较复杂。磁场未处理的组蛋白在同样条件与 DNA 相互作用,DAPI 荧光强度变化不大;表明磁场作用影响组蛋白与 DNA 的相互作用。聚精氨酸及鱼精蛋白硫酸盐是经常被用做 DNA 释放于细胞中的试剂。因此,研究磁场对它们之间相互作用影响是非常重要的。以 1,8-ANS 作探针考察磁场对形成 DNA-聚精氨酸复合物及 DNA-的影响,结果表明:磁场处理使 DNA-聚精氨酸复合物量增加,而 DNA-组蛋白的复合物并未增加。实验结果还表明:磁场处理可使 DAPI 与 DNA 易于接近,磁场处理和未处理聚精氨酸可与 DNA 形成不同的复合物。他们在研究中还发现:磁场处理蛋白质可使其构象中的微环境发生变化,以及加速蛋白质水解,这种现象可能说明磁场作用使液相的性质发生了变化^[39]。

基于上面的实验结果:可以推测磁场对蛋白质与核酸在细胞内的相互作用的影响,将可能影响染色体组表达及以肿瘤、衰老等过程。

Novikov 等还利用荧光光谱法对磁化水中牛血清白蛋白构象的影响研究表明:磁化水中牛血清白蛋白内在荧光强度下降,并使探针 1,8-ANS 与蛋白质结合力增强。这一作用被归结为,在此条件下,蛋白质变性导致蛋白质构象发生变化,可能改变了蛋白质分子的微环境,而且实验发现蛋白质的内在荧光在磁化二次蒸馏水比一次蒸馏水中有更为明显的增强,以上结果不难看出磁场对蛋白质构象确实产生了影响。在磁场处理的二次蒸馏水中,牛胰岛素 β 链水解可明显加速。溶于磁处理二次蒸馏水中的多肽,在

室温放置 20h 可使多肽水解成小分子片段,其结果通过高效液相色谱中相关成分滞留时间与起初多肽不同而得到证实。

Atef 研究了磁场对血红蛋白构象所产生的影响^[40]。研究发现:将小鼠暴露于不同强度(1000 ~ 4000G)的静磁场 10min 后,对其血红蛋白的功能、构象稳定性、自氧化动力学及粘度等进行了研究,血红蛋白(Hb)紫外光谱结果表明:在将小鼠置于 3500 ~ 4000G 磁场中,其氧合血红蛋白(HbO₂)吸收带发生变化,血红蛋白在 275nm 的吸收降低,比黏度 $\eta_{sp}c$ 发生显著下降。这些变化可能反映了血红蛋白的聚集态和微环境发生了变化。这也反映了血红蛋白在磁场作用下,其三级构象发生了变化。而这种变化与 HbO₂ 的自氧化有很大关系。

静磁场对 Hb 构象的间接作用,可通过它与过氧化氢酶的相互作用给予证明。这种静磁场作用使酶活性提高,同时产生 H₂O₂ 和 HO 自由基中间体的副反应破坏血红蛋白。这种作用会产生更稳定的 Hb 三级结构。这种作用依赖于磁场强度^[41, 42]。

静磁场对 Hb 构象的直接影响,可通过它与水的相互作用得到证实,水在保持蛋白质大分子天然状态方面发挥非常重要的作用。众所周知,静磁场会对水的结构产生影响^[43~45]。在磁场作用下,水中的氢键长变短,使键变得更强,从而形成更稳定结构。因此,由于生物体系中大量水的存在使静磁场对生物学体系影响成为一个不可避免的因素^[46]。水通过稳定球蛋白的亲水作用,而使 HbO₂ 保持更稳定构象。从而保护 HbO₂ 不发生形成高铁血红蛋白的自氧化作用^[47]。磁场的作用可使 HbO₂ 自氧化下降。同时其 Hb 的载氧能力提高。

3 磁场对其它大分子的影响

磁场对大分子构象研究除了涉及生物大分子外,还涉及其它大分子。尽管这些研究对象比较分散,但有关这方面的研究对于了解磁场对大分子构象影响具有一定的积极意义。

磁场对高分子合成及结晶行为的影响也将涉及到对其构象产生影响。宁超峰等对磁场存在下制备的聚氨酯弹性体的形态进行了研究,在磁场强度分别为 1.5T、1.0T 及不存在磁场情况下合成了硬段质量分数均为 50% 的聚氨酯弹性体,用 WAXD 和 SEM 表征了它们的形态。结构表明:磁场存在下制备的聚氨酯弹性体的结晶度明显增大,磁场强度越强,结晶度越大。这种作用无疑是磁场对高分子在空间排布及构象行为影响的一个明显例证。这种作用对于改善高分子材料性能是非常有意义的^[48]。

马伟等研究了以纤维素为主的植物高分子硅酸改性新型絮凝剂的性能。以给水水源为研究对象,在磁场的协同作用下,以浊度和耗氧量等指标考察了磁场对絮凝剂的性能的影响。结果表明:磁场作用下有利于高分子絮凝降铝。研究者认为磁场促进了吸附过程和高分子絮凝剂的搭桥作用,使得水体系的微颗粒净化效果得以改善。利用高倍动态观察仪和电子扫描电镜对絮体形状观察,发现具有分形和自相似特征,这种现象与高分子的构象变化有直接关系^[49]。

磁场对液晶形成的影响是磁场影响溶液中分子聚集行为的另一个典型。Fung 等^[50]通过 ²H NMR 研究发现磁场的大小对十六烷基三甲基溴化铵和水杨酸钠在 D₂O 中形成液晶的排列方式、液晶状态以及液晶形成速度会产生明显影响。文献^[51]综述了磁场对类似小分子形成液晶的影响研究。除此之外,磁场对大分子胆甾型液晶相的研究也有大量的报道,在磁场作用下胆甾相液晶分子会克服螺旋扭转力的作用而趋向于沿平行于磁场方向排列。并且随着磁场强度的增大,液晶分子越来越多地倾向于磁场方向,从而使得液晶分子扭转的周期增大即螺距增大。在场强足够大的情况下,液晶分子完全平行于磁场方向。液晶分子还能在胆甾相扭转力的作用下形成螺旋轴平行于磁场方向的螺旋结构,从而保持胆甾相的结构。外加场会对液晶相态或有序排列方式产生影响。如外加取向场会使多肽各向同性至各向异性的转变以及线圈状至螺旋状分子构型的转变得加速^[52]。外加取向场的强度对这种转变也有影响。磁场和电场可使胆甾液晶相转变成向列液晶相,若此时在磁场中将液晶态溶液中的溶剂蒸发掉,则这一结构将保留到固态膜中从而获得单轴取向膜。因此,利用这种方式可以在磁场作用下,得到具有一定分子趋向的膜材料。液晶高分子施加外场(电、磁等)可改变液晶分子排列和取向,同时产生光电性能的改变(如显

示、光干涉、光散射等), 这些特性将使这类液晶聚合物有各种应用的可能。

4 磁场作用可能的机理

值得一提的是由于磁场影响大分子的构象因素较多。因此, 使磁场对大分子构象影响变得复杂化。这些因素包括两个方面: 磁场对介质性能的影响, 从而导致大分子的构象发生变化; 磁场对大分子间及分子内弱相互作用的影响, 从而直接使大分子的构象发生变化。

大分子的构象强烈依赖于介质的性能, 磁场对介质性能的影响必然会影响大分子的构象。本文中所涉及的磁化水对大分子构象的影响就充分说明了这一点。研究发现: 磁场能改变溶剂水的 pH、表面张力、蒸汽压、溶解氧及难溶盐的溶解度、密度、电导率、挥发性等诸多物理化学性能^[5, 11~13]。这些结果表明, 水经磁化处理后, 引起水结构的变化。磁场引起较大的缔合态水分子变为较小的缔合态水分子能较合理地解释以上的种种变化。磁场中水结构的这种变化无疑会对大分子的构象产生一定的影响。

大分子间及分子内弱相互作用是维持大分子构象的主要作用力, 因此, 磁场对大分子内及大分子间的弱相互作用影响必然也影响大分子的构象。这些弱相互作用包括氢键作用、疏水相互作用、静电作用及范德华力等。同时大分子结构中如果存在过渡金属元素, 且过渡金属原子在许多情况下呈顺磁性, 因而可能通过磁场作用于顺磁原子来影响大分子的构象。在酶结构中有相当可观的一部分含有微量过渡金属元素(如 Mn、Fe、Co、Cu 等), 这些微量元素往往是这些酶和蛋白质的活性中心。磁场通过对这些离子的作用改变酶和蛋白质的构象。

5 问题与展望

有关磁场对大分子构象影响研究文献报道不是很多, 但从这些有限的文献中足以看出磁场不仅对大分子构象产生影响, 而且研究这种影响是非常有意义的。从以上有关磁场对大分子构象的影响研究可以看出: 有关磁场对大分子体系产生影响的宏观观察结果报道较多, 磁场对大分子构象影响的研究较少。要想有效利用磁场对大分子行为的影响, 深入研究磁场对大分子构象影响的细节是非常必要的。我们认为磁场对大分子构象影响研究应注意以下问题: (1) 酶活性在磁场中的变化必然与构象变化存在一定联系。但是构象的变化却不一定引起酶活性的变化。对于酶活性部位功能基团间的“正确”几何关系的任何细微变化都会影响酶的活力, 且酶活性部位构象的完整性依赖于整个酶分子构象完整性。但与活性部位构象紧密相关的构象变化使酶活性变化更为明显。因此, 在以荧光光谱为手段研究生物大分子构象时, 引起酶分子中产生荧光光谱变化的发色基团微环境的变化是否涉及到活性中心构象变化, 这对于联系构象与活性间的关系是非常重要的。尽管荧光光谱研究大分子构象变化与酶活性变化间存在一定的局限性, 即荧光光谱未发生不能说明构象一定未发生变化, 但至少荧光光谱的变化可以说明构象将发生了一定变化, 当然这种构象变化也许并不对酶活性产生明显影响, 这与发色基团所处的部位有关。(2) 在研究大分子构象行为时要利用多种手段和多种方法。光物理是研究大分子构象行为的重要手段, 利用这种手段在方法上的多样性, 如荧光探针、荧光猝灭、能量传递、荧光标记、荧光各向异性、时间分辨荧光光谱等, 可得到更多的信息。除光物理手段外, 圆二色性、激光光散射、X 光小角散射法、核磁共振及差示扫描量热分析等技术也是研究大分子构象的重要手段, 只有综合运用这些技术才可能得到更多有关大分子的构象信息。我们相信, 磁场对大分子构象的影响研究对环境科学、生命科学以及材料科学等领域产生非常积极的作用。

参考文献:

- [1] 蒋秉植, 杨健美. 化学通报, 1991, (10): 11~15.
- [2] Turro N J, Chow M F, Chung C J, et al. J Am Chem Soc, 1980, 102: 7391~7393.
- [3] 王国全. 化学进展, 1998, 1: 30~32.
- [4] 金福云, 段成志. 西南民族学院学报, 自然科学版, 1996, 22(1): 89~92.

- [5] Hiroshi M, Noriaki U, Yasuhiro N, et al. J Appl Polm Sci, 1989, 38: 1997 ~ 2007.
- [6] Ulriche S, Thomas U, Chem Rev, 1989, 89: 54 ~ 147.
- [7] 张勇, 朱光亚, 杜新贞, 黄贤智, 陈国珍. 高等学校化学学报, 1998, 19(1): 39 ~ 42.
- [8] 张勇, 黄贤智, 许金钧, 周炜, 等. 光谱学与光谱分析, 1994, 14(4): 23 ~ 26.
- [9] 张勇, 黄贤智, 许金钧, 陈国珍. 分析测试学报, 1995, 14(3): 10 ~ 14.
- [10] 汪仲清. 石油大学学报, 1998, 22(4): 116 ~ 119.
- [11] 张敏卿, 唐洪波, 周维义. 化学工程, 1999, 27(5): 42 ~ 44.
- [12] 唐洪波, 张敏卿. 沈阳工业大学学报, 2000, 22(6): 528 ~ 532.
- [13] 马伟, 马文骥, 马荣骏, 申殿帮. 中国有色金属学报, 1998, 8(3): 502 ~ 506.
- [14] 朱元保, 颜流水, 曹祉祥, 等. 湖南大学学报(自然科学版), 1999, 26(1): 21 ~ 32.
- [15] 虞美云, 陈亦强, 孙宏伟, 等. 苏州丝绸工业学院学报, 1999, 17(2): 58 ~ 60.
- [16] 周开学, 卢贵武, 黄乔松. 石油大学学报(自然科学版), 1999, 23(5): 109 ~ 112.
- [17] 李扬, 马伟, 马荣骏, 等. 有色金属, 1998, 50(3): 85 ~ 89.
- [18] 戴立益, 胡跃华, 李伟. 赣南师范学院学报, 1998, 3: 54 ~ 56.
- [19] 孔力, 徐怒宏, 皮振帮. 华中理工大学学报, 1996, 24(5): 67 ~ 68.
- [20] 蔡林涛, 姚士冰, 周绍民. 电化学, 1995, 1(2): 159 ~ 165.
- [21] 朱传征, 戴立益, 杨宝林, 等. 华东师范大学学报(自然科学版), 1998, 2: 51 ~ 54.
- [22] 郭灿城, 郝旭东, 张晓兵, 等. 高等学校化学学报, 1997, 18(6): 906 ~ 907.
- [23] 毛宁, 黄彦彦. 生物学通报, 2000, 35(5): 6 ~ 9.
- [24] 李国栋. 物理, 1994, 23(6): 362 ~ 366.
- [25] 王胜林, 王强斌, 古宏晨, 等. 化学世界, 2001, 7: 384 ~ 386.
- [26] 魏衍超, 杨连生. 磁性材料与器件, 1999, 30(6): 18 ~ 21.
- [27] 朱元保, 钟科军, 何双娥, 曹祉祥. 湖南大学学报, 1996, 23(5): 57 ~ 61.
- [28] 贺华君, 朱元保, 范秋领, 曹祉祥, 何双娥. 吉首大学学报(自然科学版), 1999, 20(3): 25 ~ 29.
- [29] 贺华君, 朱元保, 范秋领, 黄金明, 曹祉祥, 何双娥. 吉首大学学报(自然科学版), 1999, 20(2): 1 ~ 5.
- [30] 贺华君, 朱元保, 曹祉祥, 何双娥, 梁慧聪. 吉首大学学报(自然科学版), 1999, 20(1): 20 ~ 24.
- [31] 贺华君, 朱元保, 钟科军, 曹祉祥, 何双娥. 吉首大学学报(自然科学版), 1998, 19(1): 41 ~ 46.
- [32] 颜流水, 魏治, 史蓉蓉, 张平, 朱元保, 何双娥. 南昌航空工业学院学报, 1996, 1: 16 ~ 20.
- [33] 颜流水, 魏治, 史蓉蓉, 张平. 南昌航空工业学院学报, 1996, 2: 10 ~ 15.
- [34] 张军, 孙凡, 陈德万, 李光林. 西南农业大学学报, 2001, 23(3): 273 ~ 275.
- [35] 袁勤生, 赵健, 王维宵. 应用酶学. 上海: 华东理工大学出版社, 1994: 202 ~ 207.
- [36] Novikov V V, Shvetsov U P, Fesenko E E, Novikova N I. BioFizika, 1997, (42): 733 ~ 737.
- [37] Novikov V V, Shvetsov U P. BioFizika, 1997, (42): 742 ~ 745.
- [38] Novikov V V, Rudenko O A, Shvetsov U P, et al. Abstracts of papers (Open City Scientific Conference of Pushchino Young Researchers, Pushchino), 1997: 99 ~ 104.
- [39] Novikov V V, Kuvichkin V V, Novikova N I. Biophysics, 2000, 45(2): 234 ~ 238.
- [40] Atef M M, Abd El-Baset M S, Abd El-Kareem Aida S, et al. Int J Biol Macromol, 1995, 17(2): 105 ~ 111.
- [41] Vainer L M, Podoplelov A V, Leshina T V, et al. Biofizika, 1978, 23: 234 ~ 241.
- [42] Watkins A J, Kawarishi S, Caughey W S. Biochem Biophys Res Commun, 1985, 132: 742 ~ 748.
- [43] Markov M S, Todorov S I, Ratcheva M R. In 'Physical and chemical basis of biological information transfer', Plenum Press, New York, 1975, 441 ~ 457.
- [44] Yaneva E G, Hadjioloff A I, Veltcheva M S, et al. Biol Biochim, 1982, 35: 969 ~ 974.
- [45] Likun Y, Renjie Li, Xizheng Yu. Beijing Huagong Xueyuan Xuebao (Ziran Kexueban), 1990, 17: 83.
- [46] Markov M S. in 'International Symposium on Bioelectricity and Bioenergy', University of Nottingham, 1984: 319.
- [47] Nedjar-Aroume N, Guilbchon D, Piot J M, Thomas D. Biotechnol Appl Biochem, 1991, 13: 303.
- [48] Ning C F, Li G Y, Hu C P. China Synthetic Rubber Industry, 2000, 23(5): 320 ~ 321.
- [49] 马伟, 萧锦, 崔蕴霞, 郭丽燕. 大连铁道学院学报, 1998, 19(2): 5 ~ 7.
- [50] Rapp A, Emmolev K, Fung B M. J Phys Chem B, 1999, 103: 1705 ~ 1711.
- [51] Forrest B J, Reeves L W. Chem Rev, 1981, 81: 1 ~ 13.
- [52] 江雪平, 金顺子, 漆宗能, 张树范. 高分子学报, 1997, 2: 249 ~ 252.
- [53] 朱元保, 颜流水, 曹祉祥, 文陵飞, 陈宗璋. 湖南大学学报(自然科学版), 1999, 26(1): 21 ~ 25.

[10] L. E. 尼尔生. 聚合物流变学, 北京: 科学出版社, 1983, 22 ~ 26.

Analysis of Macromolecular Motion Characteristics from its Dependence on Temperature

ZHU Ping-ping, YANG Hai-yang, HE Ping-sheng

(*Department of Polymer Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

Abstract: Macromolecular motion is one of the most fundamental and important issues in polymer science, and it is also a principle point in teaching. The issue is a bridge to connect the microstructure with physical properties of polymers. This paper mainly discusses the characteristics of macromolecular motion, especially the temperature dependence of motion. Therefore the relationship between structure and physical properties of polymers is better understood.

Key words: Macromolecular motion; Temperature; Mechanical state; WLF equation; Arrhenius equation

(上接第 113 页)

Research Progress of Magnetic Field Effect on Macromolecular Conformation

LI Hong, HU Dao-dao, FANG Yu, WANG Ming-zhen, GAO Gai-ling

(*1 Key Laboratory for Macromolecular Science of Shanxi Province, School of Chemistry and Materials Science,*

Shanxi Normal University, Xi'an 710062, China;

2 Xi'an University of Engineering Science & Technology, Xi'an 710062, China)

Abstract: Research progresses of magnetic field effect on macromolecular conformation are reviewed in this paper.

Key words: Magnetic field; Macromolecule; Conformation

(上接第 141 页)

Design Thinking and Preparing Technology of Intelligent Fibers

SHEN Xin-yuan

(*College of Material Science and Engineering, State Key Laboratory for Modification of Chemical Fibers and Polymer Materials,*

Donghua University, Shanghai 200051, China)

Abstract: The intelligent fibers have an important position and special usefulness in the materials field. In this paper, the train of thought for designing intelligent fibers was reviewed, including bionics, molecular design and complex technology; the preparing technology of intelligent fibers was described, including the direct spinning of intelligent polymer-forming fiber, graft copolymerization, crosslinking, blending and addition, composite spinning and hybridization, chemical reaction of polymer as well as post-treatment and so on; it was suggested that the research and development of intelligent fiber should be paid more attention in China.

Key words: Intelligent; Fiber; Design; Preparing technology