

热感应型形状记忆高分子材料

郑一泉^{1,2,3}, 任少平^{1,2,3}, 凌有道^{1,2,3}, 吕满庚^{1,2,*}

(1 广东省电子有机聚合物重点实验室, 广州 510650;

2 中国科学院广州化学研究所, 广州 510650;

3 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:热感性型形状记忆高分子材料(thermostimulative shape memory polymer, TSMP)不仅具有形变量大、赋形容易, 形状回复温度便于调节、加工方便等特点, 而且种类丰富。按其固定相结构的不同, 可分为热塑性 TSMP 和热固性 TSMP。本文从表征方法、记忆机理等方面简述了热感应型形状记忆高分子材料最新的发展, 其中重点阐述了近期热感应型形状记忆可降解高分子的形状记忆原理及其应用。

关键词:功能高分子材料; 热感应; 形状记忆材料

自 20 世纪 60 年代起, 形状记忆材料以其独特的性能引起世界的广泛关注, 有关研究也得以迅速发展。形状记忆是指具有初始形状的制品, 经形变固定之后, 通过加热等外部条件刺激手段的处理, 又可使恢复初始形状的现象。形状记忆材料包括形状记忆合金(SMA)、形状记忆陶瓷(SMC)和形状记忆高分子(SMP)。

例如, 在高温下处理成一定形状的金属急冷下来, 在低温状态下经塑性变形为另一种形状, 然后加热到高温相成为稳定状态的温度时, 通过马氏体逆相变恢复到低温塑性变形前的形状的现象称为形状记忆效应。具有这种形状记忆的金属通常由两种以上的金属元素构成的合金, 故称为形状记忆合金。形状记忆效应来源于马氏体相变, 参与马氏体相的高温相和低温相分别称为母相和马氏体相。形状恢复的推动力是加热温度下母相和马氏体相的自由能之差。

按形状恢复的形式, 形状记忆效应分为三类: (1)在受力变形, 加热时恢复高温相形状, 冷却时不恢复低温相形状的现象称为不可逆形状记忆效应或单程形状记忆效应; (2)加热时恢复高温形状, 冷却时恢复低温形状, 即通过温度升降自发的可逆的反复恢复高低温形状的现象称为可逆形状记忆效应或双程形状记忆效应; (3)加热时恢复高温形状, 冷却时变为形状相同而取向相反的高温相形状的现象称为全程记忆效应。

同 SMA 类似, SMP 在常温范围内具有塑料的性质, 即形状稳定性; 而在一定的温度下即所谓的记忆温度下, 具有橡胶的特性, 表现为材料的可变性和形状恢复性。与形状记忆合金相比, 形状记忆高分子不仅形变量大、赋形容易、形状响应温度便于调整, 而且具有保温、绝缘性能好、不锈蚀、易着色、可印刷、质轻价廉等特点。目前已应用在许多相关领域, 尤其在医疗和日常用品等方面。

此外, SMP 还具有以下特点: 形状记忆合金形变量低(10%以下), 而 SMP 较高, 例如, 形状记忆聚氨酯和反式聚异戊二烯(TPI)高于 400%; SMP 的形状恢复温度可以通过化学方法改变, 而具体品种的 SMA 的恢复温度一般较为固定; SMP 的恢复应力较低, 为 9.8~29MP, 而 SMA 一般高于 1000MP; SMA 的耐疲劳性较为理想, 重复变形次数可达 10^4 以上, 而 SMP 仅为 5000 次; SMP 仅有单向记忆功能, 而一些 SMA 具有双向记忆功能。

基金项目:国家自然科学基金(20444001);

作者简介:郑一泉, 男, 博士研究生, 主要从事热固性液晶高分子的合成与性能研究。 <http://www.cn>

* 通信联系人, E-mail: mglu@mail.gic.ac.cn

形状记忆高分子材料根据回复原理可分为:热致感应型、电致感应型、光致感应型、化学感应型等。其中热致感应型(TSMP)是指在一定温度变形并能在室温固定形变并长期存放,当升温至某一特定响应温度时,能快速回复初始形状的聚合物。由于形变采用温度控制,使用简便,因此对其研究与开发也最为活跃,本文就热感应型形状记忆高分子进行详细阐述。

TSMP 的形状记忆功能主要来源于材料内部存在不完全相容的两相——保持成型品形状的固定相和随温度变化会发生软化——硬化可逆变化的可逆相。可逆相可为熔点较低的结晶态或玻璃化温度较低的玻璃态,具有物理交联结构。而固定相可具有物理交联结构(T_m 或 T_g 较高的一相在较低的温度时形成结晶或分子缠结),也可具有化学交联结构。具有物理交联结构固定相的聚合物称为热塑性 TSMP,具有化学交联结构固定相的则为热固性 TSMP。固定相和可逆相具有不同的软化温度(T_h , T_s)。在一次成型过程中,将材料加热到 T_h 上时固定相和可逆相均处于软化状态,将其冷却到 T_s 以下,固定相和可逆相分别硬化,材料成型。二次成型则将成型材料加热至可逆相的软化温度大于 T_s , 小于 T_h , 成为任意的第二种形状,保持应力并冷却固化就可得到新的形状。如果再次加热至适当的温度,可逆相软化,固定相在恢复应力的作用下,制品可回复到初始形状。

一般认为处于橡胶态的 TSMP 在外力作用下发生的形变包括三个部分:瞬间形变、松弛形变和蠕变形变。外力解除后,已经固化的变形受热时发生瞬间形变和蠕变形变。由于松弛形变为塑性形变,其形变率恢复极小,但当加热至形变温度时,松弛变形恢复,至此材料恢复原状。

由高分子材料形状记忆原理可知,可逆相对于 TSMP 的形变特性影响较大,而固定相对于其形状恢复特性影响较大。可逆相的分子链的柔韧性增大,TSMP 的形变量相应提高,形变应力下降。热固性 TSMP 与热塑性 TSMP 相比,热固性 TSMP 的形状由化学交联得到,而热塑性 TSMP 的形状由高温转变相分子链物理缠结固定下来,因此热固性 TSMP 形状恢复的速度快、精度高、应力大,但不能回收使用。

目前 TSMP 的综合性能不够理想,材料强度、耐热性、耐久性和耐候性等尚待提高。因此形状记忆高分子材料的分子设计技术和材料改性技术,是当前 TSMP 研究的热点。

1 形状记忆的特征方法

1.1 拉伸试验

形状记忆效果可由热力学测试手段定量的表征。这种表征可由带有加热炉的拉伸仪完成。一个单独的测试周期包括拉伸和形状的恢复两个过程。具体如下:样条在 T_s 以上被拉伸到最大应变,这种情况下热塑性 TSMP 的拉伸温度不能高于样条 T_h ,接着样条在最大拉伸中温度降到 T_s 以下固定这种变形,松开样条上的应力将两个夹具间的距离调节到原始样条的长度而导致样条弯曲变形,再次将恒温炉的温度加热到 T_s 以上,变形将得以恢复^[3]。

测试的结果通常用应力-应变曲线表示。曲线的变化的原因有多种,特别是在不同的温度下热膨胀系数的变化导致熵弹性,而体积的变化常对应于 T_s 时的结晶度变化。弹性模量由起始阶段的斜率决定,形状记忆特性由应变回复率 R_r 表征。

应变回复率 $R_r(N)$ 是指在 N 次循环记忆其 N 次永久变形的能力(式 1), $R_{r, tot}(N)$ 是指 N 次循环后材料记忆其初始永久变形的能力(见式 2):

$$R_r(N) = \frac{\epsilon_m - \epsilon_p(N)}{\epsilon_m - \epsilon_p(N-1)} \tag{1}$$

$$R_{r, tot}(N) = \frac{\epsilon_m - \epsilon_p(N)}{\epsilon_m} \tag{2}$$

N 是循环次数, ϵ 是应变变量。

1.2 弯曲试验

在指定的 T_s 以上,样条被弯成指定的角度 θ_i ,降温至 T_s 以下并保持这个形状并松开夹具,接着将样条置于 T_s 以上的炉中,记录下变形的角度 θ_f ^[4,5]。形状恢复速率为

$$R_b = \frac{\theta_i - \theta_f}{\theta_i}$$

2 物理交联 TSMP

2.1 玻璃化转变温度为 T_h

共聚物型 TSMP 可形成微相分离的结构,通过形成物理交联点,有较高转变温度的固定相一方面使材料在 T_h 以下具有一定力学强度,另一方面使材料具有形状记忆性。依据可逆相链段的热转变行为不同,可将此种 TSMP 分为两类,即 T_g 对应于熔融温度和 T_g 对应于玻璃化转变温度。在第一类 T_g 范围窄,而第二类 T_g 相对较宽。

在微相分离的嵌段共聚物中,玻璃化温度对应于 TSMP 的 T_h 。一般要求玻璃化转变温度区域较窄,且高于此 TSMP 的工作温度。该类 TSMP 均为聚氨酯体系,其中可逆相常由聚醚、聚酯等组成,固定相由异氰酸酯(如 MDI)和扩链剂组成。可逆相与固定相区域相分离完全时, T_g 与构成可逆相聚合物的玻璃化温度一致,相分离不完全时, T_g 在两者玻璃化温度之间。比如:MDI 含量较低的聚氨酯中,可逆相的 T_g 为 $-58 \sim -50^\circ\text{C}$,而固定相的 T_h 范围为 $40 \sim 80^\circ\text{C}$ ^[4,5]。这是因为可逆相柔性链段含量高时,固定相结晶困难,但由于氢键等相互作用的影响,固定相链段仍然存在近程有序和远程有序现象。

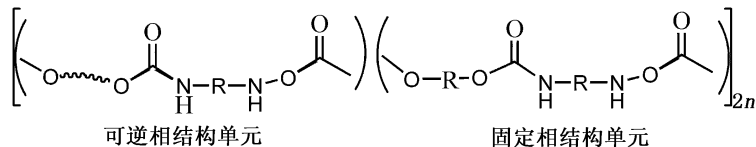


图 1 形状记忆聚氨酯结构示意图

Figure 1 Schematic representation of switching-segment block and hard-segment block for shape-memory polyurethane

2.2 结晶熔融温度为 T_h

Kim 小组开发的用聚己内酰胺做可逆相的聚氨酯嵌段 TSMP,就是采用 MDI 和丁二醇的预聚物为固定相^[6~8]。 T_h 在 $200 \sim 240^\circ\text{C}$ 之间变化,对应于固定相决定的熔点温度;而可逆相由分子量为 $1600 \sim 8000$ 的聚己内酰胺构成, T_g 在 $45 \sim 55^\circ\text{C}$ 间变化,决定于可逆相的重量份数及其分子量的大小。在共聚物中,己内酰胺的结晶度受其它链段的抑制,只能达到 $10\% \sim 40\%$ 。当聚己内酰胺链的分子量小于 2000 时,由于相分离程度低,聚己内酰胺的基本上不结晶。由较高分子量的聚己内酰胺和较高分子量的 MDI 和丁二醇的预聚物共聚而成的聚氨酯具有形状记忆功能;该材料应力恢复率可达 98% ,应变回复率达 80% 。此外,形状记忆性也受所施加应变的影响;当应变达到 250% 时,形变回复率开始下降,由 90% 下降到 80% 。除了可逆相结晶度的影响,固定相微区在 T_h 以上时构相变化及其稳定性也将影响回复性能。当固定相的重量份数低于 10% 时,固定相微区不再物理交联。当该材料经历 3 次应变循环后,由于倾向于生成理想弹性体, T_g 有所上升。

在过氧化异丙苯和马来酸酐作用下尼龙-6 接枝聚乙烯也可表现出形状记忆功能^[15]。在该 TSMP 材料中,构成固定相的尼龙-6 的重量分数为 $5\% \sim 20\%$,熔点可达 220°C (T_h),其微区尺寸为 $0.3 \mu\text{m}$,分散于聚乙烯的母相中。该 TSMP 的 T_g 对应于聚乙烯的熔点 120°C ,应变固定率为 99% ,而应变恢复率为 $95 \sim 97\%$ 。

2.3 固定相中引特殊相互作用

以前有研究者将离子间和介晶基元相互作用引入固定相的微区中,试图通过离子和介晶基元的引入来增加相分离的程度,最终影响形状记忆功能^[9]。出于这种考虑,MDI 和 1,4-丁二醇的预聚物 Poly-ether urethanes 被合成出来,其中部分 1,4-丁二醇被 2,2-二羟甲基丙酸取代,这种取代可以增加分子间相互作用。分子量在 $2000 \sim 8000$ 的聚己内酰胺预聚体作为可逆相。 T_g 在 $44 \sim 55^\circ\text{C}$ 之间,固定相中丙酸通过三

乙胺处理后形成的离子间相互作用可以增加固定相的稳定性。这类改性高分子相比之下拥有较高的弹性模量和较高的强度,依据聚己内酰胺的重量份数不同,25℃时,弹性模量可比未改性高分子增加 24%~34%。

通过 MDI 和 BEBP, BHBP 反应将介晶基元导入固定相中,将增加链段与聚基内酰胺($M_n=4000$)所组成可逆相间相容性,因此可逆相和固定相的玻璃化转变温度均有所上升和下降^[10]。可逆相的重量份数为 60%~80%时,加入 BEBP 可增加 20%的形变量。

2.4 生物降解形状记忆材料

近期,合成可降解的植入材料在医药材料领域得到极大的发展,其中形状记忆高分子是一个非常引人注意的发展方向^[21]。

早在 20 世纪 70 年代,合成材料已经应用于外科手术缝合线^[22]。这些到现在仍然在广泛的使用生物降解材料是坚硬、耐磨、结晶性的聚乙烯醇、乳酸和羟基乙酸的共聚物,如聚丙交酯、聚乙交酯等。

生物降解形状记忆材料通过小的切口植入人体内,然后在人的体温作用下回复原来的形状,经过一段时间,材料被人体吸收排泄。这样将会极大的缓解病人的痛苦。同时,由于化学科学的进步,聚合物材料的毒性可通过选材得以极大的降低。医用生物降解材料的应用决定于以下几个性能:力学性能、降解速率、降解行为以及生物相容性等。然而,医用生物材料的性能变化只能局限于有限的区域。因此,需要不断开发新的材料以满足上述要求。形状记忆高分子材料是一类非常有前途的医用材料,因为通过小的化学结构的变化即可使宏观性能发生很大的变化,以满足医用材料的要求。

现在镍钛记忆合金支架已经被广泛用于心血管扩张,但是这类材料的力学性能变化窄,变形量有限和形状记忆回复温度高等限制了应用。同时人们越来越关注镍钛记忆合金导致的血栓源性、植入的永久性、再狭窄及导致动脉瘤形成或管壁穿孔等问题出现。生物降解性支架的出现,就可以从根本上解决上述局限性。这类支架具备金属支架的持久的支撑作用,足够的机械性能和维持足够的通液腔面积,能在一定的时间内保持血管的通畅,并在完成支撑作用后在一定时间内降解成无毒的产物而避免支架材料长期存在带来的并发症,支架材料被吸收后,血管壁能维持正常的功能。具备记忆功能的可降解高分子形状记忆材料由于从理论上和个别实验结果显示是目前用来发展可降解支架的最具潜力高分子聚合物,因而正在引起整个行业的广泛关注。

同样在医疗领域,随着微型外科手术的普及,能否熟练地进行微型手术操作成了许多医生必须面对的挑战。在微型手术中,最艰巨的任务就是将缝合线打结以封闭伤口。缝合时应当使缝线具有适当张力。如果缝得太松,组织无法正常愈合,而太紧又会损伤周围组织。然而现在 Langer 等制造了一种可被生物降解的缝合线,它可以被打成松结,但当被体温加热时又会自动缩紧。在伤口愈合之后,它又会像传统可降解缝合线那样分解掉。

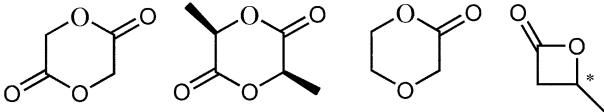


图 2 常用的合成可降解形状记忆高分子的单体
Figure 2 Schematic representation of monomers of diesters
and lactones for biodegradable shape memory polymers

这种智能塑料缝合线是聚乙二醇低聚物与内酯和环二酯(见图 2)开环共聚得到可降解形状记忆高分子材料^[23]。该共聚酯的结构可以通过催化剂进行调整。热转变温度在 30℃左右,该材料在室温下是弹性体,拉伸比可达 650%~1000%。此外,该材料是嵌段聚合物,可逆相是聚二氧六烷,而固定相是乳酸和内酯的共聚体;这种共聚酯在几周内可完全水解(见图 3)。

为了制出这种缝合线,研究者采用了被绕成稳定而紧密的螺旋样的聚合纤维。然后他们把纤维加热到 50℃并拉伸到原来长度的两倍,从而使螺旋松弛。再把纤维冷却到室温时就制成了松弛的缝合线,用于缝合死鼠腹部的伤口。伤口在室温下仍是张开的,但当加热到活鼠体温的时候,那种室温下稳定的化

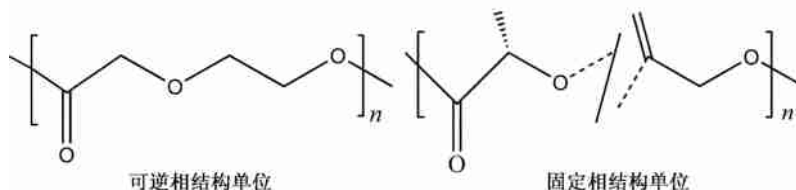


图 3 可降解 TSMP 结构单元

Figure 3 Schematic representation of switching segment and hard segment block for biodegradable TSMP

学键发生断裂,缝合线紧缩到原来长度,从而封闭了伤口。对伤口着力大小的测量表明缝合处的压力是合适的。这种新的能自我调整的缝合线仅仅是形状记忆塑料用于改进外科手术的一项尝试,可以相信这种材料将有极广阔的应用前景。

除了在医疗领域,可降解形状记忆高分子材料还可用于其它领域。日本 NEC 成功开发出了以植物为原料的具有形状记忆特性的可降解塑料。此类塑料一旦成型,尽管在外力的作用下而变形,但是在 60℃ 左右的温度下加热约 30s,就可恢复原状。这种可降解塑料是通过使植物原料的聚乳酸具备可反复在高温下分离、在冷却时重新结合的热可逆特性而实现的。该材料有望在机身越来越薄的电脑等电子产品领域达到实用化水平。

2.5 其它类型的热塑性 TSMP

世界上第一例 TSMP 是由法国 1984 年开发的聚降冰片烯,聚降冰片烯分子量一般为 300 万,含有 70%~80% 摩尔数的顺式降冰片烯结构单元,玻璃化转变温度在 35~45℃ 之间。形状记忆功能来源于无定形高分子量线性结构形成的物理交联,和玻璃化转变区的高弹态^[2,11]。聚降冰片烯在玻璃化温度以上是高弹态,在此时将拉伸的聚降冰片烯迅速降温到玻璃化温度以下,聚降冰片烯的分子链来不及滑动和解缠结。当温度重新升到玻璃化温度以上时,聚降冰片烯可回复成原状。

但聚降冰片烯不是完全的无定形结构,有学者发现在应力诱导下聚降冰片烯可结晶^[12,13]。聚降冰片烯在 90℃ 下拉伸,迅速降温到 0℃。用差热扫描仪发现在 85℃ 有个熔点, X 衍射也发现有结晶峰出现,这归结于反式和顺式降冰片烯链段结晶所致。由于聚降冰片烯结构单元上的双键易于被氧化,故有学者将 POSS 结构接枝上聚降冰片烯可以提高材料的耐久性^[14]。大的取代基的存在可以增加物理交联点,同时提高玻璃化转变温度。当 POSS 含量达到 50% 时,改性聚降冰片烯的形状记忆温度可达 130℃。

3 化学交联 TSMP

3.1 热固性 TSMP

有两种方法合成网状形状记忆高分子:第一种是采用辐射等方法将线性聚合物接枝或交联,第二种方法是采用多官能团聚合的方法合成。Charlesby 首先用低剂量的辐射得到聚乙烯 TSMP 材料^[16]。通过辐射交联后,聚乙烯在熔点温度以上拉伸,当迅速降温后,聚乙烯结晶形成的物理交联点将形状记忆下来,再次加热到熔点以上,材料将重新回到交联时的形状。随着辐射剂量的增加^[17],交联点增加;当辐射剂量达到 160kGy 时,交联点可达 60%。交联点的增加使材料有更为精确的形状记忆性,同时热记忆温度也随之上升。这种 TSMP 材料已经被广泛应用于廉价的热收缩管材中。

聚乙烯和聚醋酸乙烯酯在过氧化异丙苯作用下交联^[18]。当聚醋酸乙烯酯含量为 28% 时,聚乙烯的熔点为 70℃,但交联对熔点影响不大。当该材料加热到 80℃,在拉伸 100%,迅速降温到 20℃,然后再加热到 90℃,形状能很快恢复原状。长链丙烯酸和异丁烯酸在交联剂的作用下聚合所得的材料也具有形状记忆功能。形状记忆的 T_g 对应于长侧链所形成的结晶熔融温度。当长链丙烯酸含量在 25% (摩尔比) 时,记忆 T_g 可达 35℃。

3.2 液晶弹性体

形状记忆材料不仅需要有一定的热转变温度,而且需要有一定的力学强度,这种特性很容易通过液晶弹性体(LCE)实现。近期 Mather 小组首次观察到液晶弹性体(LCE)具有形状记忆功能^[24]。将 LCE 加热到清亮点以上,近晶 C 型多畴交联体系丧失其近晶有序性(见图 4),降温到清亮点以下,已被拉伸的交联体系可保持其拉伸后的形状,该形状具有高度的取向近晶 C 型。当把该体系加热到清亮点以上,体系将恢复到最开始的形状。由于形状记忆液晶弹性体的形状源于多畴的液晶结构有序性的变化,故形状回复温度对应于体系的清亮点,这为以后的形状记忆液晶弹性体的开发创造有利条件。形状记忆液晶弹性体有望在要求低模量、低变形温度,如人造肌肉等领域有着广泛的应用前景。

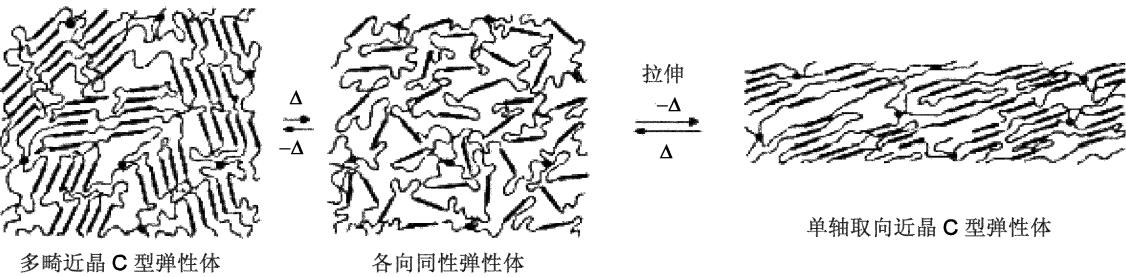


图 4 形状记忆液晶弹性体机理示意图
Figure 4 Schematic representation of shape-memory mechanism
for smectic liquid crystalline elastomers

4 结束语

热感应型形状记忆高分子材料不仅种类繁多,形状记忆的反应方式灵活、而且状态多样,具有广阔的研究领域和开发前景。今后 LCE 形状记忆高分子材料的发展方向是:完善形状记忆原理,为 TSMP 的开发和应用奠定基础;充分运用分子设计原理和材料改性技术,提高形状记忆高分子材料的综合性能;特别值得关注的是近期出现的可降解热感应型形状记忆高分子材料和热感应型形状记忆液晶聚合物,预期在未来的 TSMP 研究与应用中占有显著的位置。

参考文献:

[1] 张福强: 高分子通报,1993,3,34.
[2] 本间敏夫: 化学工业,1985,36(1):49.
[3] Lendlein A, Schmidt A M, Lanfer R, Proc Natl Sci USA, 2001,98,842.
[4] Lin J R, Chen L W, J Appl Polym Sci, 1998,69,1563.
[5] Lin J R, Chen L W, J Appl Polym Sci, 1998,69,1575.
[6] Kim B K, Lee S Y, Xu M, Polymer, 1996,37(26):5781.
[7] Li F, Zhang X, Hou J, Xu M, Kim B K, J Appl Polym Sci, 1997,64,1511.
[8] Jeong H M, Kim B K, Choi Y J, Polymer, 2000,41,1849.
[9] Kim B K, Lee S Y, Lee J S, Baek S H, Choi Y J, Polymer,1998,39,2803.
[10] Jeong H M, Kim B K, Choi Y J, J Mater Sci, 2000,35,279.
[11] Mather P T, Jeon H G, Haddad T S, Polym Prep, Am Chem Soc Div, Polym Chem, 2000,41,528.
[12] Sakurai K, Takahashi T, J Appl polym Sci, 1989,38,1191.
[13] Sakurai K, Kashiwagi T, Takahashi T, J Appl polym Sci, 1993,47,937.
[14] Mather P T, Jeon H G, Romo-Uribe A, Macromolecules, 1999,32,1194.
[15] Li F, Chen Y, Zhu W, Zhang X, Xu M, Polymer, 1998,39,6929.
[16] Charlesby A, Atomic Radiation and Polymers, Pergamon Press, Oxford, 1960, pp198-257.
[17] Kumar S, Pandya W V, J Appl Polym Sci, 1996,64,823.
[18] Li F, Zhu W, Zhang X, Xu M, J Appl Polym Sci, 1999,71,1063.

- [3] 余学海, 陆云, 高分子化学·第1版·南京大学出版社, 1994.
- [4] G·奥迪安, 聚合反应原理·第一版·北京: 科学出版社, 1987
- [5] 张子勇·高分子通报, 2002, (04): 77.

Study and Teaching of Radical Polymerization Kinetics

YANG Jian-guo

(School of Chemical & Chemistry, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

Abstract: Polymerization kinetics is very important in the study and teaching of radical polymerization. In this presentation, the fundamental condition of radical polymerization kinetics, the expression of the polymerization reaction rate, the physical meaning of kinetic chain length, and the relationship between the number-average degree of polymerization and kinetic chain length is discussed carefully.

Key words: Polymerization chemistry; Polymerization kinetics; Kinetic chain length; Number-average degree of Polymerization

(上接第 75 页)

- [19] Kagami Y, Gong J P, Osada Y. Macromol Rapid Commun, 1996, 17, 539.
- [20] Goethal E J, Reyntjens W, Lievens S. Macromol Rapid Commun, 1998, 132, 57.
- [21] Brennan M. Chem Eng News, 2001, 79(6): 5.
- [22] Lendlein A. Chem Unserer Zeit, 1999, 33, 279.
- [23] Lendlein A, Neuenchwander P, Suter U W, Macromol Chem Phys, 2000, 201, 1067.
- [24] Rousseau I A, Mather P T. J Am Chem Sci, 2003, 125, 15300.

Thermostimulative Shape Memory Polymer

ZHENG Yi-quan^{1,2,3}, REN Shao-ping^{1,2,3}, LING You-dao^{1,2,3}, LÜ Man-geng^{1,2}

(1 Key Laboratory of Polymer Materials for Electronics, Guangdong 510650, China;

2 Guangzhou Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;

3 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Thermostimulative Shape Memory Polymer Materials have the advantages of large deformation, light mass, rich variety, good processability, convenient to deform and easy regulate shape memory temperature. This article reviews the progress of TSMP based on the characterization and mechanics of shape memory and highlights mechanism and application of the biodegradable shape memory polymer.

Key words: Functional materials; Thermostimulative; Shape memory polymer