

形状记忆高分子材料在生物医学领域的应用

陈辉玲^{1,2}, 童德文², 曹新宇¹, 尚红梅^{1,2}, 李引乾², 马永梅¹

(1. 中国科学院化学研究所 北京分子科学国家实验室新材料实验室, 北京 100190)

(2. 西北农林科技大学动物医学院, 陕西 杨凌 712100)



曹新宇

摘要: 形状记忆高分子材料(SMPs)作为一种新型功能材料具有生物相容性好、形变率大、形变温度可调、易于加工、可引入生物降解组分等特点, 近年来, 特别是在生物医学领域, SMPs已成为研究人员广泛关注的焦点之一。根据SMPs的功能及其应用研究现状, 着重综述了近年来SMPs在矫形固定材料、药物缓释体系、手术缝合、微创医疗器械以及组织工程等生物医学领域的主要研究和应用, 并展望了SMPs在生物医学领域未来的研究方向和前景, 同时, 简要介绍了SMPs的发展概况及其具有形状记忆效应的原理。

关键词: 形状记忆高分子; 生物医学; 生物相容性

中图分类号: TB381 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2011)11-0040-06

Research and Application of SMPs in Biomedical Field

CHEN Huiling^{1,2}, TONG Dewen², CAO Xinyu¹, SHANG Hongmei^{1,2},
LI Yinqian², MA Yongmei¹

(1. Beijing National Laboratory for Molecular Science (BNLMS) Laboratory of New Materials, Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2. College of Veterinary Medicine, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: As a kind of “smart” functional material, shape memory polymers (SMPs) have good biocompatibility, large deformation ratio, adjustable range of deformation temperature, easy processing, and possible biological degradability, and they have drawn much great attention in the field of biomedical research and application in recent years. The research and application of SMPs in biomedical field are reviewed, for example, in orthopaedic fixed materials, drug release system, surgical equipment, suture and tissue engineering. Further perspectives are discussed for SMPs, and their research progress and relevant mechanism are briefly introduced meanwhile.

Key words: shape memory polymers; biomedicine; biocompatibility

1 前言

形状记忆材料是指能够感知环境变化(如温度、力、电磁、溶剂等)的刺激, 并响应这种变化, 对其力学参数(如形状、位置、应变等)进行调整, 从而回复到其预先设定状态的材料^[1]。形状记忆材料主要包括形状记忆合金(Shape Memory Alloy, SMA)和形状记忆高分子材料(Shape Memory Polymers, SMPs)。SMA强度高、形状记忆性比较稳定, 已在医疗、电气、航天等领域有许多实际应用。与SMA相比, SMPs具有良好的生物相容性, 适中的感应温度, 可回复形变大, 加工成型容易, 成本较低等优点, 自20世纪90年代以来发展迅速, 受

到广泛关注。特别是作为生物医用材料, SMPs在诊断、治疗或替代机体中的组织、器官或增进其功能等方面展示了很好的应用前景。

本文介绍了SMPs具有形状记忆效应的原理及其发展概况, 并按照其在生物医学领域的功能和应用, 综述了近年来SMPs主要的应用研究。

2 SMPs 简介

2.1 SMPs 的发展概况

1959年, Charlesby首次对辐射交联聚乙烯所具有的形状记忆现象进行了描述^[2], 但在当时和其后相当长的一段时间内, 人们对于这种发现并没有给予足够重视。直到20世纪70年代中期, 随着美国国家航空航天局对其在航空航天领域的开发应用, 对不同型号的辐射交联聚乙烯的记忆特性进行了仔细研究, 才引起人们的

收稿日期: 2011-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(51073163)资助

通信作者: 曹新宇, 女, 1969年生, 副研究员

广泛关注^[1,3]。目前,许多聚合物已被发现具有形状记忆性能,如形状记忆聚氨酯(Shape Memory Polyurethane, SMPU)、聚酯、聚氯乙烯、聚四氟乙烯等。

SMPs 的种类很多,根据形状回复响应条件的不同大致可分为热致感应型、光致感应型、化学感应型、电/磁致感应型等。根据固定相交联方式的不同可分为热塑性 SMPs(固定相为物理交联结构)和热固性 SMPs(固定相为化学交联结构)。

目前,有关形状记忆效应表征和测试常用的指标主要有形变固定率、形状回复率、回复温度、回复应力、材料模量等。

2.2 SMPs 具有形状记忆效应的原理

SMPs 之所以具有形状记忆效应是因为其具有可逆相与固定相,可逆相在外场刺激下可以发生“软-硬”转变,从而可以发生变形和固定形变。可逆相这种“软-硬”转变是通过聚合物的相变来实现的,比如由结晶-熔融的转变、或由玻璃态-高弹态等的转变,其 T_{trans} (转变温度)分别为 T_m (结晶熔融温度)或 T_g (玻璃化温度)。固定相则由高分子链的化学交联或物理交联构成,固定相可以防止分子滑移和应力松弛,从而帮助形变和应力的冻结和记忆。

由于温度便于控制,方法简单,很大一部分 SMPs 为热致感应型^[4],即在一定温度下 SMPs 受应力变形,并能在室温(或较低温度)固定形变并长期保存,当升温至某一特定响应温度时, SMPs 又能回复至初始形状。热致感应型 SMPs 的形状记忆过程可用图 1 所示的拉伸形变、固定和回复模型来描述^[5]。形状 B 为 SMPs 的初始形状,当温度高于 T_{trans} 时, SMPs 在外力作用下可被拉伸至临时形状 A。在保持外力条件下逐渐冷却至室温,就可以得到变形、固定后的临时形状 A。当温度再

次高于 T_{trans} 时,临时形状 A 可自动回复至初始形状 B,表现出记忆初始形状 B 的性质。

3 SMPs 在生物医学领域的应用研究

作为生物医用材料, SMPs 的形状回复温度可较容易地调至机体体温附近,生物相容性好,便于改性和功能化,在生物医学领域有广阔的应用前景。近年来, SMPs 在矫形固定、药物缓释体系、智能缝合、医疗器械和组织工程等生物医学领域的研究已广泛开展。SMPs 因组分不同,功能不同,应用环境不同,对其的要求也不尽相同。本文按照 SMPs 在该领域的应用功能分类,对其研究工作进行了综述。

3.1 矫形固定材料

传统的矫形固定材料存在硬度大、较笨重、透气性差等缺点。与传统的矫形固定材料相比, SMPs 矫形固定材料具有随体性好,便于安装,可随时调节形状,具有轻巧舒适,透气性好,力学性能良好等优点,可以在矫形固形材料方面发挥作用。

潘道成等^[6]早在 1990 年就报导了 SMPs 可以作为医疗用固定材料,指出 SMPs 具有安装方便和易于脱卸的特点。蔡伟等^[7]2004 年公开了一种聚 L-乳酸作为医用形状记忆材料的专利,将聚 L-乳酸在温度为 190 ~ 210 °C、压力为 2 ~ 10 MPa 下成型为初始形状,得到具有形状记忆特性的聚 L-乳酸。由于聚 L-乳酸在 100 °C 以下可以变形,且具有很好的形状记忆性,此外,相对于聚 D, L-乳酸的力学性能好,降解速度慢,因此聚 L-乳酸更适于作骨折固定材料。随着研究的深入,越来越多的 SMPs 被应用于矫形固定材料。朱光明等^[8]2005 年报导了聚异戊二烯、聚降冰片烯、聚氨酯以及脂肪族聚酯类等 SMPs 均可以用于骨折的内固定。马跃宇^[9]2010 年报导了一种可再吸收的 SMPs 移植骨骼的制备方法,该聚合物的主要特征是具有热激活延伸性能和形状记忆性能。这种热激活智能材料的中心是纳米粒子,具有类似生物体组织的性能和强度,而且在医学上可以安全使用,能够与周围组织结合成一体。

目前市场上已有和形状记忆矫形材料相关的商业产品的报导,如奥菲特公司开发了一种形状记忆骨科外固定热塑夹板(骨定板-PBT),其质轻,生物相容性好,而且透气性强、抗菌、赋形、固形,形状回复可以通过温度控制,可多次使用,是传统石膏类固形材料的理想替代品。

另外,当作为牙齿矫形固定材料时,需要 SMPs 具有较好的强度及形变固定率和形状回复率, Jung 等^[10]2010 年报导了一种可用于牙齿矫形的 SMPU 线的制备方法,其主要由聚己内酯、二苯基甲烷二异氰酸酯和 1,

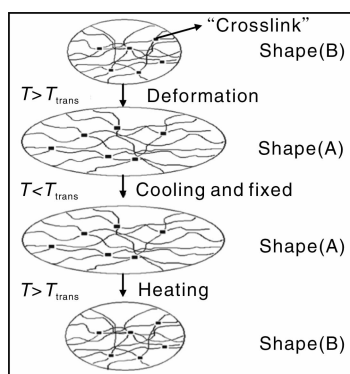


图 1 热响应的 SMPs 形状记忆的机理, T_{trans} 代表可逆相的热转变温度

Fig. 1 Micromechanism of shape memory effect of temperature-induced SMPs, T_{trans} represents the transition temperature of the reversible phase

4-丁二醇共聚而成。当二苯基甲烷二异氰酸酯的添加量为 40 % 时, 该材料的形变固定率和形状回复率均达到 85 % 以上, 且机械性能良好。50 ℃ 环境下, 该材料的形变回复力保持时间长达 3 个月之久, 是一种应用前景良好的牙齿矫形固定材料。

3.2 药物缓释体系

理想的给药方式是在需要的时刻, 药物以合适的速

率和剂量释放到病灶位置, 这种给药方式称为智能药物释放体系^[9]。将 SMPs 应用于载药系统, 可实现药物的缓释和智能控制释放^[11] (如图 2 所示), 首先将药物包覆于具有大表面积 of SMPs 当中, 然后通过形变来减小载药高分子的形状和表面积, 当这个载药系统进入生物体内之后, 可以通过控制高分子体系表面积的大小来达到缓释和控制释放药物的目的。

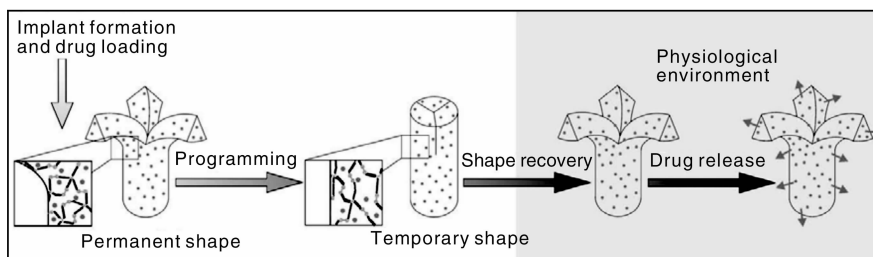


图 2 SMPs 载药系统的形状回复和药物缓释

Fig. 2 Shape recovery and drug release of drug loaded SMP devices

具有形状记忆性的聚合物凝胶是由交联的聚合物网络和填充其间的流体成分所构成, 如将凝胶置于一定的溶液中, 其内部与外部溶液中的溶剂之间存在化学势的差异, 可与外界的物质、能量和信息进行交换, 从而导致凝胶的形状、大小和性能发生变化, 呈现出形状记忆性。聚合物凝胶可响应的刺激的种类很多, 如温度、pH 值、离子、血糖、生理活性物质等^[12]。

Wischke 等^[13-14] 2009 年报导了一种聚酯型聚氨酯的制备, 其主要由 rac-乳交酯、乙交酯、2, 2, 4-三甲基-1, 6-二异氰酸盐和 2, 4, 4-三甲基-1, 6-二异氰酸盐共聚而成。该聚酯型聚氨酯同时具有形状记忆性、药物控释性以及生物可降解性 3 种性质。Serrano 等^[15] 2011 年报导了一种通过脂肪族二醇与柠檬酸的聚合而成的形状记忆弹性体, 其具有接近室温的相转变温度以及对疏水性药物的控释效果。

3.3 手术缝合

普通手术缝合线缝合伤口时需要较精细的打结技术, 而 SMPs 手术缝合线无需打结, 便捷的同时还可实现智能收紧。SMPs 缝合线还可兼具良好的生物相容性、生物降解性以及较适宜的收缩速度等特性。

早在 1962 年 Davis and Geck 公司^[16] 就首次研制出了聚乙交酯可吸收缝合线, 并于 1970 年上市。Lendlein 等^[17] 2002 年报导了一种以己内酯二醇为软段的 SMPU 的制备方法, 该材料兼形状记忆性和生物降解性于一体。SMPU 被制成单纤维丝可用于伤口缝合, 动物实验显示在温度适宜的环境下, 缝合线会自动回复至初始形状, 从而使伤口很好闭合^[17] (如图 3 所示)。冷劲松等^[18] 2008 年公开了一种生物可降解的形状记忆缝合线

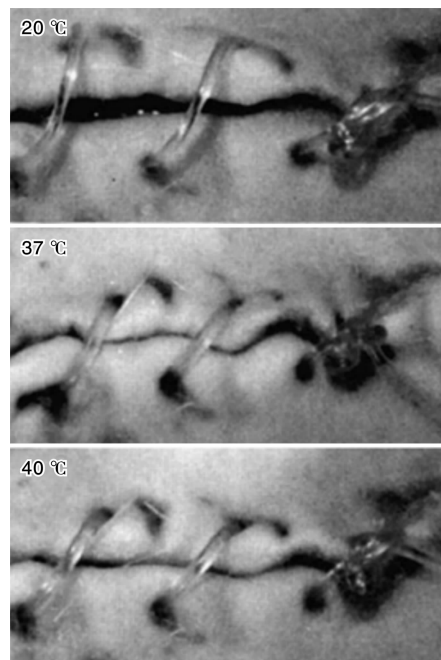


图 3 可降解的 SMP 手术缝合线用于伤口缝合, 加热过程中, 缝合线收缩可使伤口边缘很好地闭合

Fig. 3 Degradable SMP suture for wound closure that shrinks upon heating in order to join the edges of the wound for optimal healing

的制备和应用, 该聚合物具有良好的形状记忆性和生物降解性, 同时制备该聚合物的原料种类增多, 并对多种外驱动 (如, 光、热、磁、水等) 均可响应。Goraltchouk 等^[19] 2011 年公开了一种自固位缝线包含丝, 包含丝的表面具有固位体 (Retainers), 缝合线可以通过固位体衔接并保留组织, 不需要系结, 并且可以在组织中布置缝

线之前、过程中或之后，施加转换刺激，该材料是一种更为智能化的手术缝合线。

随着研究的深入，有关新的、可作为生物医用的 SMPs 缝合线必将越来越多。

3.4 微创医疗器械

随着新的医疗技术和治疗理念的层出不穷，迫切需要将各种材料的优异性能结合起来。SMPs 可以根据需要制成不同的临时形状，可以实现不同的功能和用于各种精密的医疗器械，如清除凝血块的微驱动器、治疗动脉瘤的 SMPU 泡沫、输卵管避孕器及神经电极等高精密的医疗仪器等。SMPs 医疗器械用于微创治疗时具有高效、快捷、彻底、无毒副作用等优点。

Metzger 等^[20]2002 年报导了一种可用于治疗缺血性中风的形状记忆微驱动器^[20]（如图 4 所示），即用一种热固性 SMPU 线刺入血块并摘除它们。清除血块的原理是：把 SMPU 线固定在一根光纤的末端并把它们插入 0.5 mm 直径的导管，然后将导管刺入血块中，一旦血块被刺中，导管就撤回来，而把 SMPU 线留在原来的地方。然后用光纤中的红外线加热 SMPU 线，使其变成螺旋线圈，线圈从后面扣住血块，然后将整个血块拉出来。这种方法快捷、彻底、无毒副作用，避免了中风病人救治稍不及时，可能偏瘫或丧失说话能力的发生。同时，病人也不会因为服用溶解血块的药物而引起脑溢

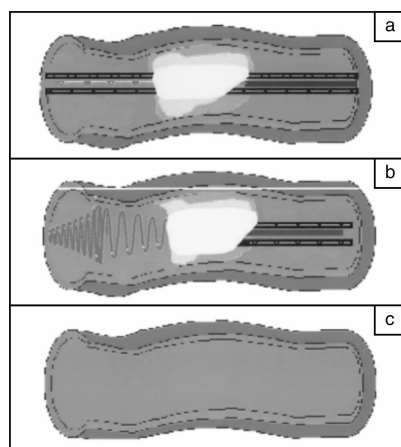


图 4 治疗缺血性中风的 SMPs 微驱动器装置：(a) 导管刺入血块，(b) SMPU 线被激活，形成螺旋线圈形状，(c) 螺旋线圈形状的 SMPU 线将导管和血栓同时拉出，起到治疗局部缺血的作用

Fig. 4 Schematic representation of SMP microactuator used in treating ischemic stroke: (a) the guide catheter is pushed through or around the blockage, (b) the SMPU device is pushed out of the guide catheter and actuated, and (c) the catheter, coil and clot are pulled in unison proximally to relieve the ischemia

血，是治疗血栓的一种有效途径。同年就有利用 SMPs 材料制备的释放栓塞线圈装置^[21]的报导。

Ortega 等^[22]2007 年报导了一种可以用来治疗动脉瘤的 SMPU 泡沫及其应用，首先在体外将 SMPU 泡沫压缩，然后将压缩后的泡沫填充到动脉瘤腔内，之后用外部加热的方法使泡沫回复至其初始形状，最终薄弱的动脉瘤腔因 SMPU 泡沫的填充而闭塞，血液不再进入这个动脉瘤腔内，也就起到了止血的效果。李永刚等^[23]2009 年报导了基于 D, L-聚乳酸的完全可降解形状记忆聚合物，通过将 SMPs 制备成输卵管避孕器并以兔子为模型进行了研究，结果表明，该 SMPs 材料具有良好的组织相容性，有望在避孕、节育领域获得广泛应用。

特别是当治疗脑、眼睛等敏感部位的疾病时，更需要安全、高效的精密医疗器械来保证手术的顺利进行，以最小的侵袭和最小的生理干扰达到最佳疗效。神经电极是由顶端附有导体的 SMPs 微驱动装置构成^[24]，该神经电极在进行脑部检测时，由于 SMPs 可以具有非常缓慢的形状回复率，可以使检测电极缓慢地插入脑部组织，从而大大减少了不必要的刮伤。另外，神经电极插入脑部组织后，由于 SMPs 成分的柔软、温和，使其能更好地与脑组织周围微环境相匹配。

3.5 组织工程

SMPs 良好的生物相容性和生物降解性使得该材料在组织工程领域有很大的发展空间，SMPs 在该领域的研究现已深入到细胞水平。Sundback 等^[25]2005 年对植入聚癸二酸丙三醇酯材料表面的雪旺氏细胞的新陈代谢、黏附、繁殖和凋亡情况等进行了研究，结果表明，该材料是一种合适的神经导管支架材料。罗彦凤等^[26]2010 年通过将 D, L-聚乳酸基形状记忆聚合物与人脐静脉内皮细胞在体外复合培养的实验，说明该 SMP 在细胞黏附和增殖方面表现良好，对细胞的生长没有抑制作用，这就为 SMPs 组织工程支架在体内的应用奠定了基础。

随着科研工作者对 SMPs 的研究越来越多，其应用范围也逐渐扩大。除了上述应用之外，SMPs 在血液透析器^[24]、人工肌肉和器官、肥胖治疗等领域均显示了潜在的应用前景。

4 展 望

与其它形状记忆材料相比，SMPs 具有良好的生物相容性、生物降解性、感应温度低、易加工成型等优点，因此这种材料在当今的生物医学领域有很大的潜在应用价值。但要满足临床上的应用，需要 SMPs 兼备各种优良性能于一体，如与机体体温接近的相变稳定、良

好的生物相容性、一定的生物降解性以及适宜的强度等。由于许多 SMPs 材料在一开始并不是针对生物医学而研发的,其在生物医学领域的实际应用也更多地集中在体外,对体内的应用相对较少,因此 SMPs 作为生物医用材料的综合性能还有待于进一步提高。除了通过合成过程中的化学改性、适当提高交联度等方法之外,SMPs 还可与其他有机/无机材料复合,特别是使用纳米复合材料可能对此是一种有效的途径^[27]。

目前应用的 SMPs 多为热致响应型,但有些情况下,如为了对置入体内某一特定部位的 SMPs 进行调控,为避免周围组织的损伤或直接加热 SMPs 所需要的热介质无法实现时,采用其它的外场,包括光、电、磁、pH 值等刺激将体现出优越性,但如何使 SMPs 响应回复的条件更好地适合生物体的要求,仍存在许多有待解决的问题。此外,传统的 SMPs 是单向记忆的,即 SMPs 从暂时形变回复到初始形状后,如果要再次实现形状记忆过程,必须在外场下再次施加外应力使其变形,而不能在没有外应力作用下自动重复这一过程。其单向的形状记忆性无疑使 SMPs 的应用和研究受到了很大的限制。比如:作为人工肌肉、微电子器件的响应器时,双向的响应就显得十分必要^[28-29],目前双向响应的 SMPs 仍是一个非常重要又具有挑战性的研究方向^[30-31]。

随着研究的广泛深入,生物医用 SMPs 必将展现极为广阔的应用前景。

参考文献 References

- [1] Zhu Guangming (朱光明). *Shape Memory Polymers and Its Application* (形状记忆聚合物及其应用) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [2] Charlesby A. *Atomic Radiation and Polymers* (原子辐射与聚合物) [M]. Translated by Li Shijin (李世缙), Zhang Weisheng (张蔚盛). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1963.
- [3] Zhao Xing (赵兴). *The Synthesis and Characterization of Storage Shape Memory Polyurethanes* (储能形状记忆聚氨酯的合成与表征) [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2006.
- [4] Leng J S, Lu H B, Liu Y J, et al. Shape-Memory Polymers—a Class of Novel Smart Materials [J]. *MRS Bulletin*, 2009, 34 (11): 848–855.
- [5] Ratna D, Karger-Kocsis J. Recent Advances in Shape Memory Polymers and Composites; a Review [J]. *Journal of Materials Science*, 2008, 43 (1): 254–269.
- [6] Pan Daocheng (潘道成), Zhang Hegeng (张和庚), Zhang Yinxi (张隐西). 形状记忆聚合物的原理和应用 [J]. *Chemistry World* (化学世界), 1990 (12): 584–587.
- [7] Cai Wei (蔡伟), Lu Xili (鲁玺丽), Zhao Liancheng (赵连城). *The New Application of Poly(L-Lactic Acid) as a Medical Shape Memory Material* (聚 L-乳酸作为医用形状记忆材料的新用途): China, 200410013749. 6 [P]. 2004–05–13.
- [8] Zhu Guangming (朱光明), Liu Zhongrang (刘忠让). 形状记忆聚合物及其在生物医学工程中的应用 [J]. *Biomedical Engineering Press* (生物医学工程学杂志), 2005, 22 (5): 1 082–1 084.
- [9] Ma Yueyu (马跃宇). 由可再吸收的形状记忆聚合物制作的移植骨骼 [J]. *The New Dynamic of Materials* (现在材料动态), 2010 (10): 12–13.
- [10] Jung Y C, Cho J W. Application of Shape Memory Polyurethane in Orthodontic [J]. *Journal of Materials Science-Materials in Medicine*, 2010, 21 (10): 2 881–2 886.
- [11] Liu Lili (刘丽莉). *Microstructure and Shape Memory Effect of Biodegradable PGS and PGGS* (可生物降解的 PGS 和 PGGS 的微观结构与形状记忆效应) [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [12] Dai Yani (戴亚妮), Li Ping (李平), Wang Aiqin (王爱勤). 智能高分子材料在智能给药系统中的应用 [J]. *Progress in Chemistry* (化学进展), 2007, 9 (2): 362–369.
- [13] Wischke C, Neffe A T, Steuer S, et al. Evaluation of a Degradable Shape-Memory Polymer Network as Matrix for Controlled Drug Release [J]. *Journal of Controlled Release*, 2009, 138 (3): 243–250.
- [14] Alteheid A, Feng Y K, Kelch S, et al. Biodegradable, Amorphous Copolyester-Urethane Networks Having Shape-Memory Properties [J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, 2005, 44 (8): 1 188–1 192.
- [15] Serrano M C, Carbajal L, Ameer G A. Novel Biodegradable Shape-Memory Elastomers with Drug-Releasing Capabilities [J]. *Advanced Materials*, 2011, 23 (19): 2 211–2 215.
- [16] Liu Qing (刘青), Wang Pengyan (王彭延). 国外医用缝合线的发展概况 [J]. *Foreign Medical Science Biomedical Engineering Fascicle* (国外医学生物医学工程分册), 1993, 16 (6): 324–328.
- [17] Lendlein A, Langer R. Biodegradable, Elastic Shape-Memory Polymers for Potential Biomedical Applications [J]. *Science*, 2002, 296 (5573): 1 673–1 676.
- [18] Leng Jinsong (冷劲松), Liu Yanju (刘彦菊), Wu Xuelian (吴雪莲), et al. *Biodegradable Shape Memory Suture* (生物可降解的形状记忆缝合线): China, 101332310A [P]. 2008–12–31.
- [19] Goralchouk A, Lai J, Herrmann R A, et al. *Shape Memory Self-Retaining Sutures, Methods of Manufacture, and Methods of Use*: US, 0125188A1 [P]. 2011–03–26.
- [20] Metzger M F, Wilson T S, Schumann D, et al. Mechanical Properties of Mechanical Actuator for Treating Ischemic Stroke [J]. *Biomedical Microdevices*, 2002, 4 (2): 89–96.
- [21] Maitland D J, Metzger M F, Schumann D, et al. Photothermal Properties of Shape Memory Polymer Micro-Actuators for Treating

- Stroke[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2002, 30(1): 1–11.
- [22] Ortega J, Maitland D, Wilson T, *et al.* Vascular Dynamics of a Shape Memory Polymer Foam Aneurysm Treatment Technique [J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2007, 35(11): 1 870–1 884.
- [23] Li Yonggang (李永刚). *Shape Memory Polymer Based on Poly(D, L-Lactide) for Oviduct Contraception* (具有形状记忆功能的 D, L-聚乳酸基输卵管避孕材料的制备与研究) [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [24] Lendlein A, Behl M, Hiehl B, *et al.* Shape-Memory Polymers as a Technology Platform for Biomedical Applications [J]. *Expert Review of Medical Devices*, 2010, 7(3): 357–379.
- [25] Sundback C A, Shyu J Y, Wang Y D, *et al.* Biocompatibility Analysis of Poly (Glycerol Sebacate) as a Nerve Guide Material [J]. *Biomaterials*, 2005, 26(27): 5 454–5 464.
- [26] Luo Yanfeng (罗彦凤), Liu Zhao (刘 钊), Li Yonggang (李永刚), *et al.* 人脐静脉内皮细胞在 D, L-聚乳酸基形状记忆聚合物上的黏附和增殖行为研究[J]. *Journal of Chinese Bio-technology* (中国生物工程杂志), 2010, 30(5): 1–5.
- [27] Meng Q H, Hu J L. A Review of Shape Memory Polymer Composites and Blends [J]. *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, 2009, 40(11): 1 661–1 672.
- [28] Shenoy D K, Thomsen D L, Srinivasan A, *et al.* Carbon Coated Liquid Crystal Elastomer Film for Artificial Muscle Applications [J]. *Sensors and Actuators A-Physical*, 2002, 96(2–3): 184–188.
- [29] Thomsen D L, Keller P, Naciri J, *et al.* Liquid Crystal Elastomers with Mechanical Properties of a Muscle [J]. *Macromolecules*, 2001, 34(17): 5 868–5 875.
- [30] Chen S J, Hu J L, Zhuo H T. Properties and Mechanism of Two-Way Shape Memory Polyurethane Composites [J]. *Composites Science and Technology*, 2010, 70(10): 1 437–1 443.
- [31] Zotzmann J, Behl M, Hofmann D, *et al.* Reversible Triple-Shape Effect of Polymer Networks Containing Polypentadecalactone-and Poly(Epsilon-Caprolactone)-Segments [J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(31): 3 424–3 429.

2011 年度何梁何利基金获奖科学家年轻化突出

2011 年 8 日下午，何梁何利基金 2011 年度颁奖大会在京举行。我国高性能计算机领域杰出科学家、国防科技大学杨学军教授荣获“科学与技术成就奖”，丁伟岳等 35 人获“科学与技术进步奖”，吴朝晖等 15 人获“科学技术创新奖”。中共中央政治局委员、国务委员刘延东向大会发来贺信，全国人大常委会副委员长桑国卫、全国政协副主席万钢出席会议并为获奖代表颁奖。何梁何利基金评选委员会主任朱丽兰向大会作工作报告。

刘延东在贺信中首先向获奖科技工作者表示热烈祝贺，向全国科技工作者致以亲切问候和良好祝愿，并向基金创立者和捐款人表示敬意和感谢。她说，何梁何利基金创立 17 年来，在中央人民政府以及香港特区政府的关怀指导下，在社会各界的大力支持下，始终恪守公平、公正、公开的宗旨，坚持科学管理、制度透明、规范运作的原则，遴选和表彰了一大批优秀科学家和工程师，培育了激励科技人才、激发创新活力的特色品牌，促进了内地与港澳地区的科技交流合作，树立了社会力量创办科技奖励的典范，为国家培养科技人才和推动科技进步作出了重要贡献。她希望何梁何利基金总结成功经验，适应时代特点，坚持以人为本，服务国家需求，提高评选质量，努力办得更具特色、更具影响。希望获奖科学家和广大科技工作者再接再厉，奋力拼搏，勇攀科技高峰，取得更多的创新成果，为创新型国家建设和中华民族的伟大复兴再立新功。

据介绍，今年获奖人平均年龄 52.7 岁，较去年 55.5 岁降低近 3 岁，获奖科学家年轻化趋势突出；40~60 岁获奖人占总人数 86.3%，非院士的比例为 82.4%，显示出我国科研队伍年龄梯队日趋合理，科研中坚力量强大。

(来源：http://tech.southcn.com/t/2011-11/09/content_32859252.htm)