

基于高级形状记忆技术的产品设计，制造和再循环

王韬熹，胡嘉恩，Salvekar Abhijit Vijay，翁毅伟，黄为民

(南洋理工大学 机械与宇航学院，新加坡 639798)



黄为民

摘要：在经历了大“塑性”变形后，通过施加某种特定激励（如变温、浸泡化学溶剂、试剂、光照等），材料能够恢复到原来的形状。具有这种形状记忆效应功能的材料被称为形状记忆材料。一系列试验表明，聚合物材料大都具有热驱动和化学驱动的形状记忆效应。最近的研究更证实了：依据多种基本原理，人们不仅可以通过修改已有的材料（如各种工程塑料），来设计新材料，并且可以优化材料，使之具有我们需要的形状记忆功能去满足工程应用的要求。因此，此种技术可以被称为高级形状记忆技术，以区别过去只局限于某些特定材料的形状记忆及其技术。高级形状记忆技术可以为产品从设计、制造到最终再循环提供不同于传统方法的思路。着重介绍了这一方面的最新进展。

关键词：聚合物；形状记忆；产品设计；制造；再循环

中图分类号：TB381 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-3962(2016)08-0613-09

Advanced Shape Memory Technology for Product Design, Manufacturing and Recycling

WANG Taoxi, AW Jia En, SALVEKAR Abhijit Vijay, WENG Yiwei, HUANG Weimin
(School of Mechanical and Aerospace Engineering, Nanyang Technological University, 639798, Singapore)

Abstract: After being severely and quasi-plastically deformed, upon applying a particular stimulus, some materials are able to recover their original shape. Such a phenomenon is known as the shape memory effect (SME) and materials with this feature are called shape memory material (SMM). Recent experiments reveal that heating-/chemo-responsive SMEs are almost intrinsic features of polymers. Further investigation confirms that based on various basic mechanisms, we are able to not only enable the SME in currently used materials, but also design a new SMM and further more optimize their performance. Hence, this technology may be termed advanced shape memory technology (ASMT), in order to distinguish it from the previous definition, which is limited to some particular SMMs. ASMT is able to reshape product design, fabrication and even recycling. This paper aims to review recent development in this area.

Key words: polymer; shape memory; product design; manufacturing; recycling

1 前言

形状记忆效应(SME)是指材料在某种特定刺激的作用下恢复其初始形状的现象。具有这种效应的材料被称为形状记忆材料^[1-3]。形状记忆技术(SMT)的提出最初是专门针对形状记忆合金及其工程应用^[4,5]。最近的一系列研究表明，聚合物材料(包括许多工程塑料)大都具有加热驱动和化学溶剂驱动的形状记忆效应^[6]。因此有人

提出聚合物的形状记忆功能在很多场合下可以完全改变传统的产品设计概念^[7]。不仅如此，我们也已经看到形状记忆功能还可以应用于产品制造和再循环^[8-12]。近年来，随着许多与形状记忆相关的新现象和新技术的发展，传统的形状记忆技术(SMT)可以进一步扩展为高级形状记忆技术(ASMT)^[13]，其主要内容包括以下3个方面：①使传统材料具有形状记忆效应的技术；②设计/合成某种特定的材料，使其具有某一特定工程应用所需要的形状记忆功能；③优化材料形状记忆性能的技术。尽管高级形状记忆技术并不是只局限于聚合物材料，本文将以聚合物材料为例，着重探讨其在产品设计、制造和再循环这一完整的产品生命周期中的应用前景。

本文第二节将概述可以用于实现形状记忆效应的几

收稿日期：2015-7-30

第一作者：王韬熹，男，1991年生，博士研究生

通信作者：黄为民，男，1968年生，副教授，博士生导师，

Email: MWMHuang@ntu.edu.sg

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2016.08.08

类通用工作机理；第三节将讨论采用高级形状记忆技术的几个典型设计；第四节将介绍基于高级形状记忆技术的几种制造工艺；第五节是关于高级形状记忆技术在自修复和再循环中的应用；第六节总结一些主要的结论。

2 工作机理

形状记忆效应的实现可以基于某些特定的物理现象或者不同的工作机理^[14]。其中一些依赖于所具体采用的材料和应用的特定环境，甚至与尺寸大小相关(也就是所谓的尺寸效应)。这里，只简单介绍 3 种可应用于实现聚合物的热驱动形状记忆效应的通用工作机理^[15]，如图 1 中(I)，(II)和(III)所示。

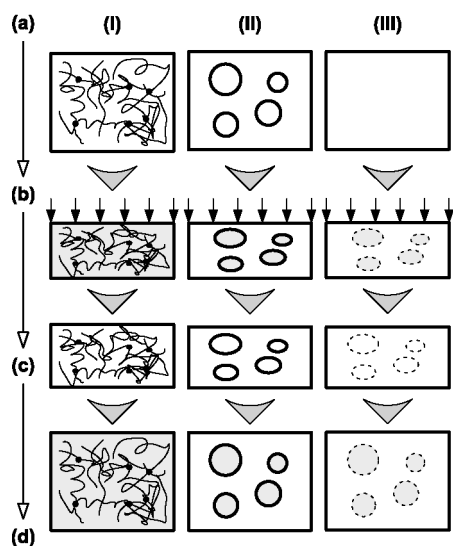


图 1 工作机理^[15]

Fig. 1 Working mechanisms^[15]

双态机理(DSM)(图 1 I)

一个典型的例子是利用聚合物的玻璃化转换。在温度高于玻璃化转变温度(T_g)时，聚合物处于较软的弹性态，可以被轻易地压缩(b)。当冷却到 T_g 以下后，聚合物处于较硬的玻璃态。去除约束后，大部分的压缩变形可以被保留(c)。而一旦再次加热到 T_g 以上，聚合物再次恢复到其初始形状。在压缩变形过程中，聚合物分子链的交联部分(可以是化学交联或物理交联)储存弹性能，在之后的加热恢复过程中，储存的弹性能提供形状恢复的动力。

双成分机理(DCM)(图 1 II)

在这一机理中，聚合物至少包含两个部分，可以是硬段(Hard Segment)与软段(Soft Segment)或者是基体(Matrix)和夹杂物(Inclusion)。硬段(基体)必须在某一特定实际应用的工作温度范围内一直保持弹性，而软段(夹杂物)受热后变软，由此材料变得容易变形(b)。和双态

机理一样，冷却并且移除约束之后，软段(夹杂物)变硬，因此压缩变形可以基本被保持(c)。当材料被再次加热导致软段(夹杂物)变软而解除对硬段(基体)的约束，从而导致形状恢复(d)。

局部转化机理(PTM)(图 1 III)

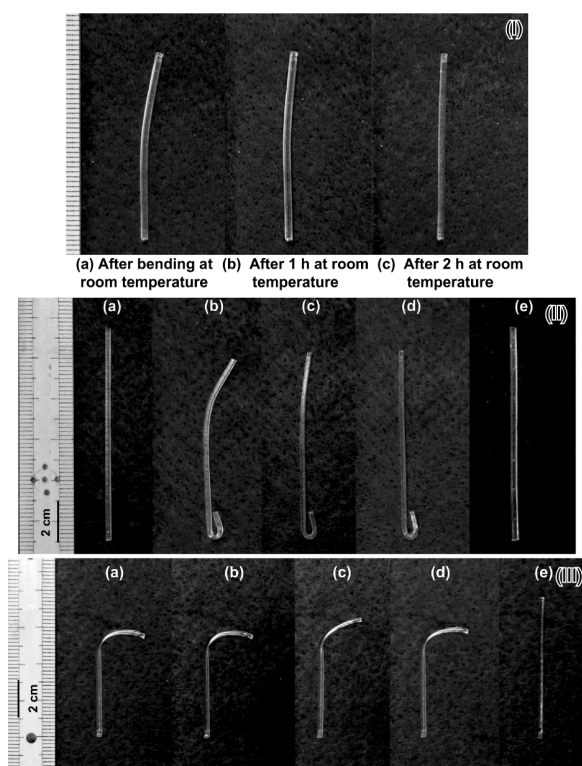
在没有分子链的交联或者硬/软段(基体/夹杂物)的情况下，加热材料到某一转化温度(比如热熔胶的融化温度)范围内。因为聚合物只有一部分变软，我们可以将此时的材料看成是一个如前面说谈到的由基体和夹杂物组成的双成分系统。因此，这一机理可以被用来实现材料的形状记忆效应。

在形状记忆聚合物领域，双态机理和双成分机理被之前的大多数研究工作所采用，而局部转化机理之前并没有引起人们特别的关注。实际上，局部转化机理在近期的一些研究(比如基于单一转变的多形态记忆效应)中是与前两种机理结合在一起的。

一般来说，一个完整的形状记忆效应过程包括两个步骤。第一个步骤是预设材料的临时形状(Programming)；而接下来的步骤是形状恢复(Shape Recovery)。需要指出的是，和其他形状记忆材料(比如形状记忆合金或陶瓷)相比较，虽然高恢复应变和高形状恢复率是形状记忆聚合物的特性，但在实际工程应用中，这两者都不一定是必需的。比如说，5%以下的压缩恢复应变就可以导致起皱现象，而在这一类工程应用中，100%的形状恢复率也并非必需的^[16]。

根据上述 3 种工作机理，我们可以使某些聚合物材料具有形状记忆效应，也可以通过 DIY 的方式设计所需要的形状记忆材料，还可以简单地通过改变某些预设过程中的参数(温度和应变)，来实现形状记忆功能的优化和实现特定的形状记忆功能^[17]。

如图 2 所示，普通的有机玻璃(PMMA)(T_g 约 110 ~ 120 °C)可以通过不同的预处理方式实现指定的形状恢复。(I)为室温(约 22 °C)下略微弯曲后，样品由于蠕变效应缓慢地恢复原来的形状；(II)中，样品的两端在不同温度下预弯。上部为在略低于 T_g 的水中(96 °C)轻度弯曲，而下部在高于 T_g (130 °C)下大幅度弯曲。在之后的逐步加热过程中，于 90 °C下，上部弯曲略微恢复，而到 98 °C时，完全变直。下部在加热到高于 T_g 后预变形才全部恢复；在(III)情况下，上部在不同温度下弯曲两次。第一次在高于 T_g 的温度下向右弯曲，而第二次在 98 °C下轻微弯直。在之后的逐步加热过程中，样品上部在 98 °C时往下弯，而继续加热到 T_g 以上时恢复原来直线状态。这一在加热过程中的往复变形现象被称为多形状记忆效应(Multiple-SME)^[18]，并已经被证明是大多聚合物的通性^[19]。

图2 有机玻璃的形状恢复^[20]Fig. 2 Shape recovery in PMMA^[20]

3 产品设计

高级形状记忆技术提供了新的设计思路 and 方案，从而实现使用传统的材料及技术难以实现的某些特殊功能。以下为一系列实例，包括在4D打印、微创手术器械、防伪/温度标签及变形结构蒙皮中的应用。

3.1 4D打印

所谓4D打印，与3D打印相比多了一维。目前有多种不同的方法来定义这一增加的维度，可以是指材料的不均匀性(可以采用，比如多个打印头来实现^[21])，也可以是指3D打印出的结构具有形状/形貌变化的能力。这里采用后面的定义。3D打印结构的形状变化可以通过传统的结构设计方法来实现。如图3a所示，通过结合双稳定结构和柔性结构这两个传统的设计概念，可以3D打印出一个结构具有在两个稳定状态之间变化的功能。为了实现多次反复的变化，必须精心设计结构的尺寸，特别是在柔性铰链的部分，避免过大的内应力而又不能丧失结构的整体刚度。因为热驱动形状记忆效应是众多聚合物都具有的本性^[6]，我们完全可以利用形状记忆效应来实现4D功能。如图3b所示，3D打印(MakerBot Replicator II)出的聚乳酸(PLA)结构(上)可以经加热后容易地变形(下)。再次加热后，结构完全恢复原来的形状。

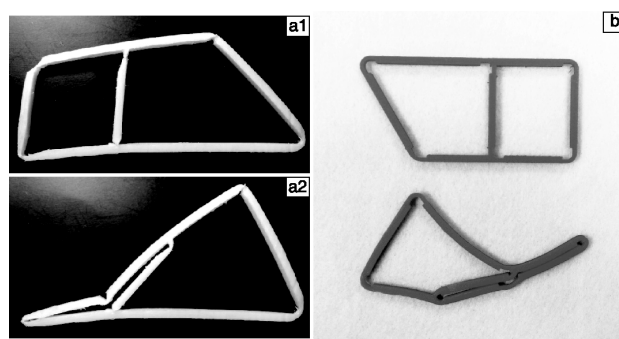
图3 3D打印结构的形状变化：(a)双稳定柔性结构(尼龙)；
(b)形状记忆效应(聚乳酸)

Fig. 3 Shape switching in 3D printed structures: (a) Bi-stable compliant structure (nylon) and (b) SME (PLA)

图4是用光固化(Polyjet)打印出的卡片(下)。卡片中的乔布斯头像是从乔布斯的照片根据灰度直接转换成3维图像后，用Vero White打印。这张卡片加热后可以弯卷(上)，再次加热后恢复原状。

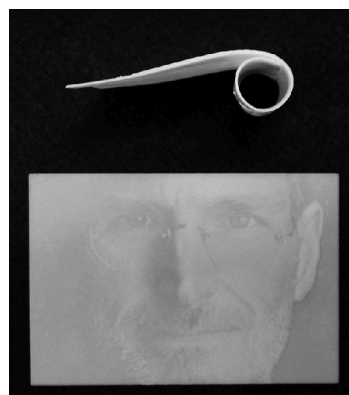


图4 用Vero White材料3D打印出的卡片

Fig. 4 3D printed card using VeroWhite

3.2 微创手术器械

微创手术取代传统大创口手术已经成为目前手术发展的一大趋势，但是微创手术仍然需要伤口缝合。目前采用的手术订如聚乳酸，为生物可降解材料，但没有自动收缩的功能^[14]。图5a验证了3D打印出的聚乳酸钉可以通过加热到略高于人体温度而恢复原来的尺寸，从而实现手术订的自收缩。图5b是另一个3D打印出的可降解聚乳酸器械，可用于肝脏肿瘤治疗中的栓塞疗法。打印出的聚乳酸血管栓为螺旋形(下图)。加热后可以拉直塞入导管(上图)，再由导管输送到指定的部位推出。经过再次加热后，血管栓逐步恢复到原来的形状从而达到封堵血管的目的。

在体内手术中,热驱动的形状记忆效应存在加热温度不均匀及可能过热的问题。水驱动的形状记忆效应则可以完全避免这一类问题的发生。干水凝胶不仅具有水驱动的形状记忆效应^[22],而且由于其显著的吸水溶胀效应,还往往伴随着局部和整体失稳现象的出现(如图6)。通过结构设计,我们可以利用这样的失稳现象实现快速的水驱动血管封堵。

聚乙二醇(PEG)和聚乳酸-共-乙醇酸(PLGA)都是生物可降解的材料,通过了美国食品和药物管理局(FDA)的认证,可以用于人体内。通过分析,丝状的PEG(凝胶)/PLGA复合结构(如图7a)可以在体液(如血液)的作用下,于两分钟之内将血管完全封堵死,阻止体液的流动(如图7b),4~6周后随着复合结构的降解,血管重新打开。

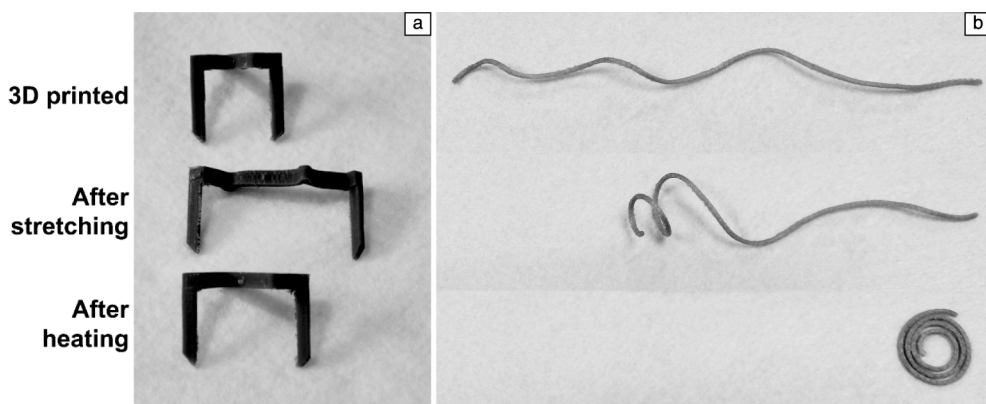


图5 3D打印的可降解自收缩手术钉(a)和血管栓(b)^[13]

Fig. 5 3D printed biodegradable self-tightening staple (a) and vascular plug (b)^[13]

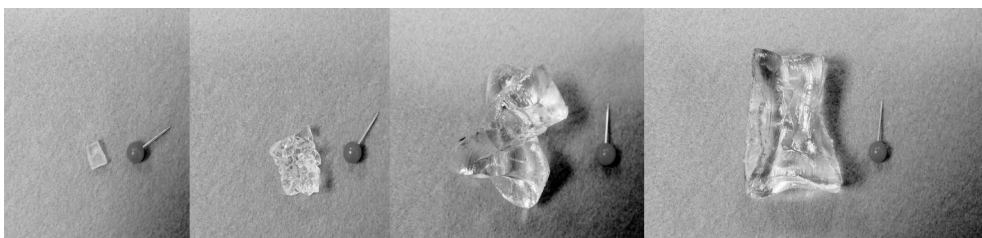


图6 干水凝胶浸水后溶胀伴随着失稳(从左向右)

Fig. 6 Swelling and buckling in wetting hydrogel in water (from left to right)

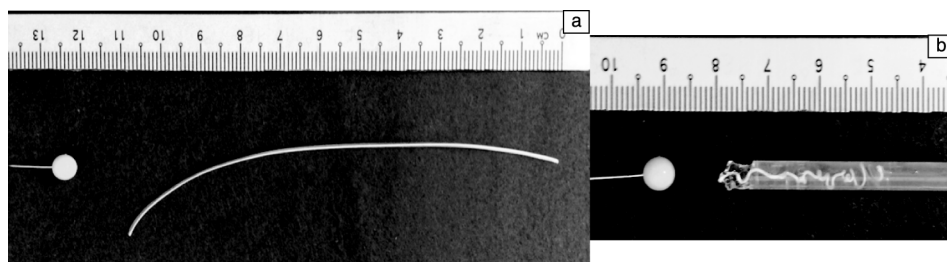


图7 PEG/PLGA 血管栓

Fig. 7 PEG/PLGA vascular plug

3.3 防伪/温度标签

“道高一尺,魔高一丈”,新的防伪技术不断涌现。目前已有的形状记忆聚合物防伪标签一般都是加热后形貌出现或消失^[23,24],只有一次变化。为了增

强防伪性能,可以在聚合物标签里加入水印(图8a),在加热到某一指定温度后,标签的表面形貌会发生变化(图8b),再进一步加热后,表面图案彻底消失(图8c)。

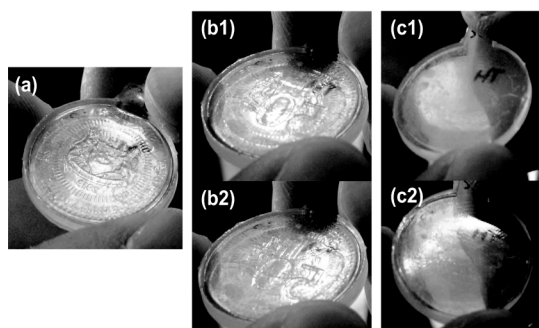


图8 带水印的形状记忆聚合物标签

Fig. 8 Shape memory polymeric anti-counterfeit label with a water-mark

揭开留字标签(Void Paper)(图9a1)是目前最常用的防止恶意开启的封印手段之一。但是不法之徒仍然可以加热后完整地揭下标签(图9a2),之后再次加热将标签贴回。利用聚合物的形状记忆效应,可以使标签具有原来的揭开留字功能(图9b1),同时一旦被加热就出现破损,从而达到标签防止被加热转移的目的(图9b2~3)。其他可以实现防加热转移的方法包括,加热后表面纳米结构消失导致结构色消失(图10中部),加热后二维码变得不可读(图11)^[25]等。

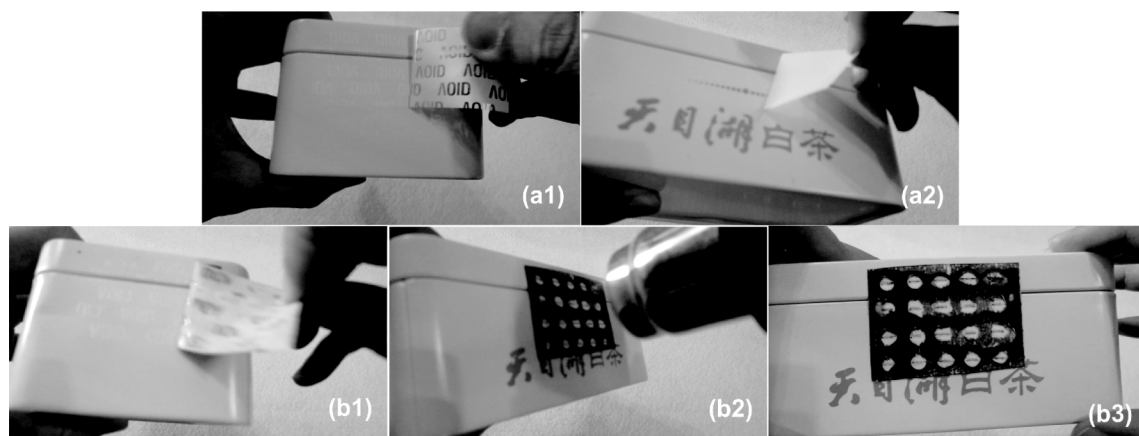


图9 防加热转移揭开留字标签

Fig. 9 Anti-heat transfer void paper



图10 加热后纳米结构消失,从而引起结构色消失

Fig. 10 Upon heating nano structure disappears and so does structural color

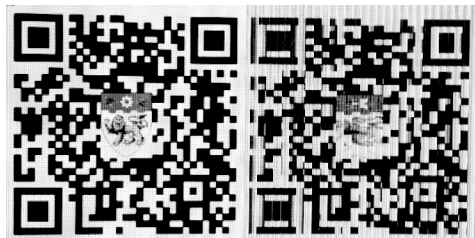
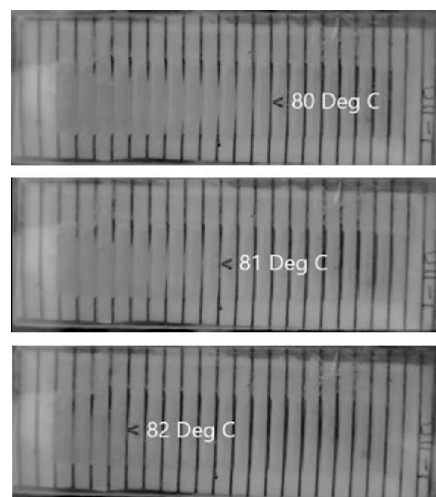


图11 二维码(左图),加热后不可读(右图)

Fig. 11 After heating, QR code (left) becomes unrecognizable (right)

除了在防伪中的应用,聚合物还可以用来检测最高的历史温度。如图12所示,在从80℃加热到82℃的过程中,聚合物中部原来看不见的竖线条自右向左逐步出现。我们可以将这一方法和射频识别(FRID)相结合实现无需电源,快速批量地扫描所经历过的最高温度。也可与近场通讯(NFC)结合用手机扫描冷冻物品是否超温过。

图12 形状记忆温度标签^[13]Fig. 12 Shape memory temperature label^[13]

3.4 变形结构的蒙皮

变翼飞机等变形结构目前最大的技术难点不是变形机构本身,而是由大变形所引起的蒙皮内部应变不匹配所导致的局部屈曲。仿照人体皮肤的褶皱机理,可以利用形状记忆效应实现可控的微小褶皱。图 13 中,

a 是不受力时的自由状态,而 b 和 c 分别是横向受压和竖向受压时的状态。由于表面本身有通过形状记忆效应形成的预设的微小缺陷,在之后任意受力状态下由屈曲引起的变形都可以被局限在一定的范围里。

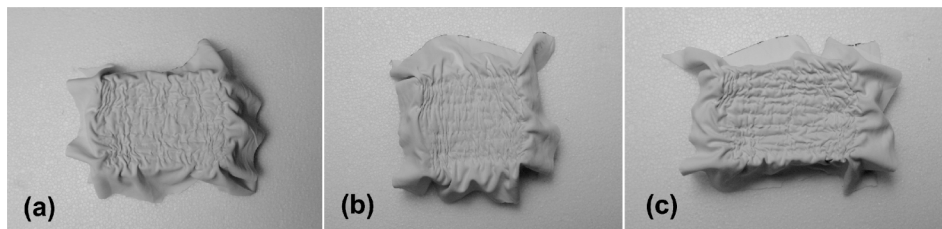


图 13 形状记忆蒙皮

Fig. 13 Shape memory skin

4 制造

形状记忆效应可以用来作为一种新型的制造技术,比如可重复使用的内模^[10],自组装/自折叠结构^[26,27],还有主动装配^[8]等都是些很典型的应用。

4.1 自组装

热缩管/膜是形状记忆效应在聚合物中的经典应用。图 14 中,聚合物套管加热后直径明显收缩。和形状记忆合金相比,聚合物热缩管具有变形大,价格低,容易加工等显著优势。更进一步的应用是形状记忆聚合物螺栓。在图 15a 中,将预拉伸过的聚合物圆棒插入需要连接的两个部件的孔洞中,经加热后,聚合物膨胀从而将部件紧密连接在一起。在图 15b 中,孔洞是有内螺纹的,加热膨胀后的聚合物螺栓可以用螺丝起子移去。这样的螺栓具有很好的通用性,可以用于一系列不同大小尺寸的孔洞。

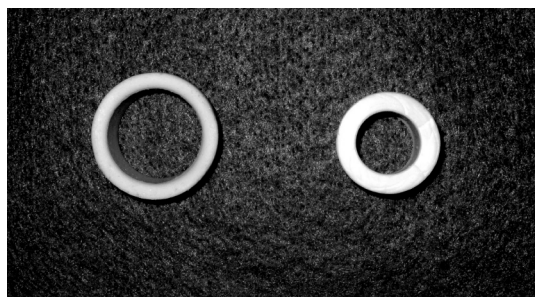


图 14 聚合物加热收缩套管^[8]

Fig. 14 Polymeric heat shrinkable tube^[8]

4.2 表面微形貌

无论是否有预设变形,以聚合物为基底,利用其上层弹性膜的表面起皱能够形成各类如图 16 中所呈现的表

面图案。与传统的制备方法相比,利用形状记忆效应来保持预变形可以免除在加工中维持基体变形的麻烦。而且聚合物的形状记忆效应可以为形成各种起皱图案提供极大的灵活性和便利性。

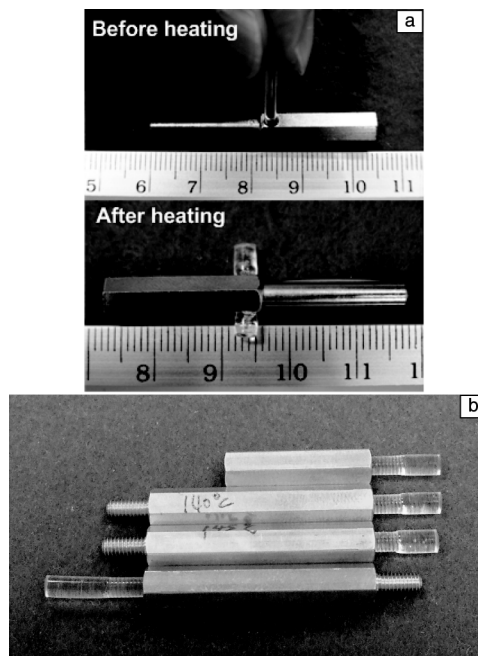


图 15 聚合物无螺纹(a)和有螺纹(b)螺栓^[8]

Fig. 15 Polymeric screws without (a) and with (b) thread^[8]

利用聚合物的形状记忆效应还可以实现材料表面形貌图案的自发形成而无需借助任何涂层或表面化学改性。图 17 是利用形状记忆效应处理过的聚苯乙烯表面。将皱纹的波长减小到微米以下后可以形成结构色,达到“黄金不是黄金色,但检测结果都显示是纯正黄金”的效果。

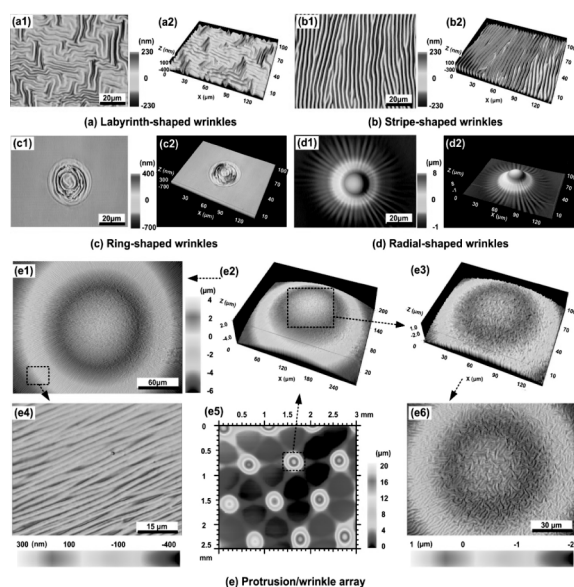
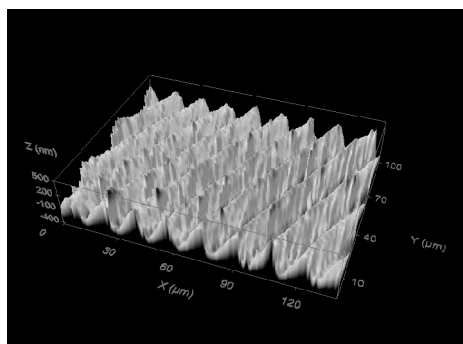
图 16 聚合物表面的各种起皱图案^[11]Fig. 16 Wrinkling atop polymer substrates^[11]

图 17 自发形成的表面形貌

Fig. 17 Self-formed surface pattern

4.3 复合微透镜阵列

3D 复合微透镜阵列(或者昆虫复眼)不仅可以提供大视角,同时也可以捕捉形成3D图像。与传统的制造方法相比,形状记忆效应提供了极为方便的另类微加工工艺。图18是利用有机玻璃在乙醇中产生应力增强溶胀现象和有机玻璃的热驱动形状记忆效应相结合而制造出3D微透镜阵列。对于这种透镜阵列,对焦不再是问题,因为每个单独的微镜头有不同的焦距,可以实现“先拍摄后聚焦”。图19中,每个镜头约20微米大,特别适用于微型监视镜头和微型内窥镜。

4.4 自适应产品/用品

传统批量制造工艺的产品都是标准化的,大家只能从中挑选。3D打印虽然可以做到个性化,但需要提供单独的3D模型,且打印的价格不菲,性能上至少目前还不能做到完美。利用形状记忆效应,我们可以做到批

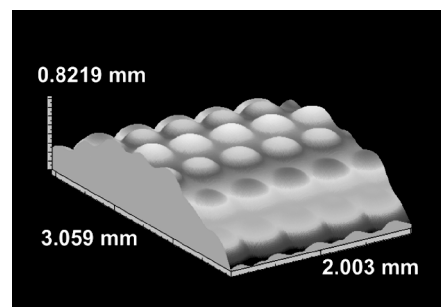


图 18 3D 复合微透镜阵列

Fig. 18 3D compound microlens array

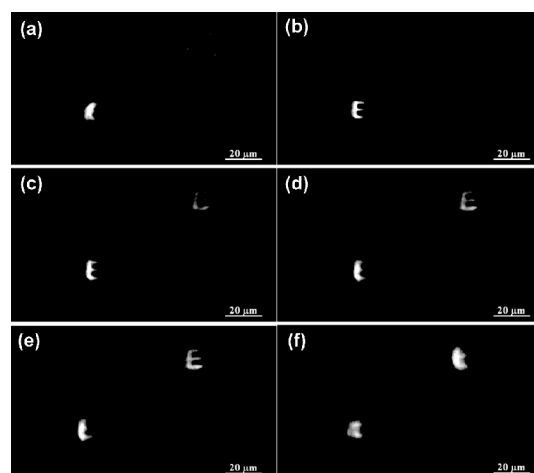


图 19 两个微透镜在不同焦距下的成像效果

Fig. 19 Images of two microlenses at different focus lens

量生产和个性化的有机结合。图20是聚合物制成的“私人定制”把手。把手可以批量生产,当加热到50多度后再冷却至室温,即可握出适合自己手型的把手。图21是可以随时合脚的鞋。批量生产的鞋没有码,也不分左右。加热到超过45℃后穿上,等冷却后就是合脚的鞋,有弹性,也不会脱下后缩回去(图21c上部的鞋)。如果脚在一天中发生了细微变化,随时加热重穿就可保证其合脚。



图 20 个性化的把手

Fig. 20 Personalized handle



图 21 随时合脚鞋

Fig. 21 Comfort fitting shoes

5 自修复和再循环

产品在使用过程中会损坏，最终被遗弃。损坏的修复和废弃产品的再循环利用都是目前热门的研究课题。

5.1 划痕自修复

塑料制品的表面容易出现划痕。虽然利用热驱动的形状记忆效应可以有效地减低划痕的程度，但是要求的加热温度可能过高。化学驱动的形状记忆效应可以避免过度加热。图 22 中聚苯乙烯表面有用锋利的刀片切除的划痕。划痕的下半部分用丙酮湿润后，划痕完全消失，而上半部分未经处理，划痕依旧。

5.2 电器自拆卸

废旧电器的回收再循环目前主要依靠手工拆卸再分类回收。利用聚合物的形状记忆效应，可以实现在逐步加热的过程中，电器逐步自动分解，如图 23 所示。

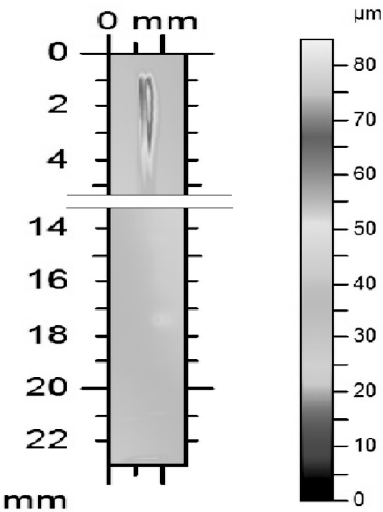


图 22 划痕修复(3D 扫描)

Fig. 22 Healing of scratch (3D scanning)

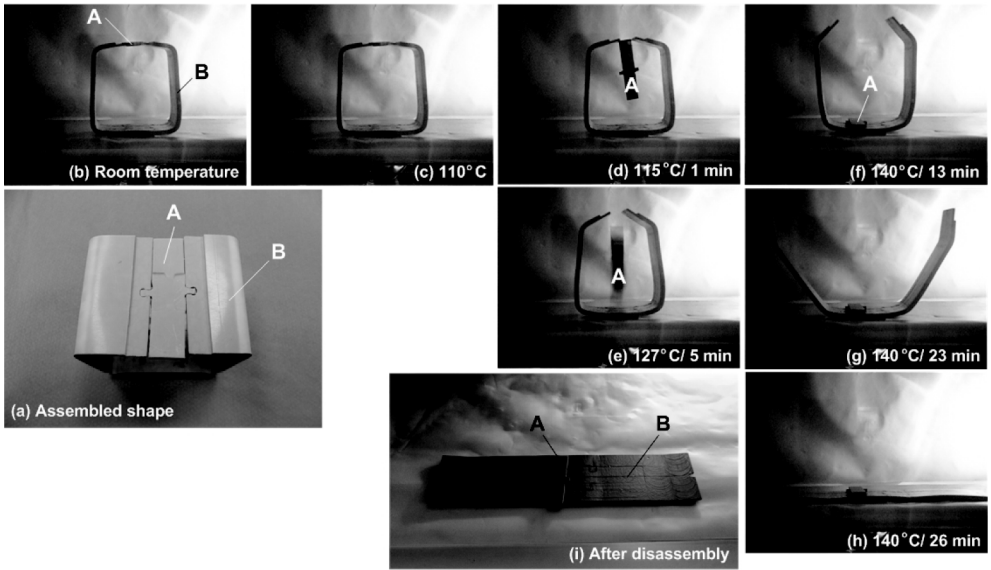


图 23 在加热过程中逐步自拆卸^[8]

Fig. 23 Step-by-step disassembly upon heating^[8]

5.3 零部件自分解

拆卸下的零部件需要进一步分解再利用。对大多数聚合物来说, 分解成单体基本是个复杂, 不环保, 而且非经济的过程。另一途径是把聚合物分解成小单元。图24中, 部件由水凝胶颗粒在高温下压制而成。浸泡入水后, 水凝胶颗粒吸水脱落。分解后的颗粒可以经干燥后重新利用。当然, 我们还可以利用水凝胶的热驱动形状记忆效应达到自分解, 水凝胶也可以换成其他聚合物。

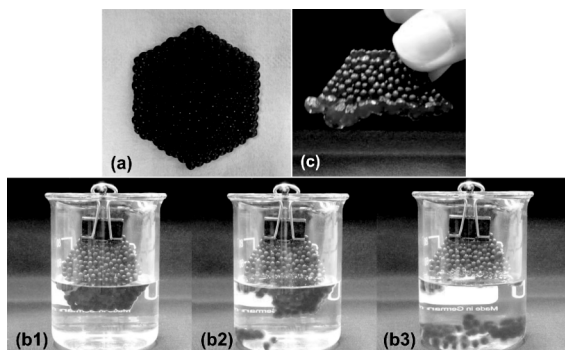


图24 部件在水里自动分解成水凝胶颗粒

Fig. 24 Self-disassembly of component into small hydrogel particles upon wetting in water

6 结 语

本文简要介绍了高级形状记忆技术的概念及其与聚合物相关的基本工作原理。通过一系列实例, 展示了高级形状记忆技术在产品设计, 制造和再循环中的各种运用。与其他已经成熟或目前正在发展的技术(如3D打印, 纳米压痕印刷, 结构色, 二维码, 射频识别, 近场通讯, 自修复, 自拆卸和微透镜等)有机地结合, 我们可以看到高级形状记忆技术具有非常广阔的应用前景。

参考文献 References

[1] Otsuka K, Wayman C M, eds. *Shape Memory Materials* [M]. 1998, Cambridge University Press: Cambridge.

[2] Huang W M, Ding Z, Wang C C, et al. *Materials Today* [J], 2010, 13(7): 54–61.

[3] Wei Z G, Sandstrom R, Miyazaki S. *Journal of Materials Science* [J], 1998, 33(15): p. 3743–3762.

[4] Duerig T W, Melton K N, Stockel D, et al. *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys* [M]. 1990, Woburn, MA: Butterworth-Heinemann.

[5] Funakubo H, ed. *Shape Memory Alloys* [M]. 1987, Gordon and Breach Science Publishers: New York.

[6] Huang W M, Zhao Y, Wang C C, et al. *Journal of Polymer Research* [J], 2012, 19(9): 1–34.

[7] Toensmeier P A. *Plastics Engineering* [J], 2005, 61(3): p. 10–11.

[8] Sun L, Huang W M, Lu H B, et al. *Assembly Automation* [J], 2014, 34(1): 78–93.

[9] Chiodo J D, Anson A W, Billett W H, et al. *Eco-design for active disassembly using smart materials*, in *Proceedings of the Second International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies* [M]. Pelton A, et al, Editors. 1997, SMST. p. 269–274.

[10] Everhart M C, Nickerson D M, Hreha R D. *High-Temperature Reusable Shape Memory Polymer Mandrels*-Art. No. 61710K, in *Smart Structures and Materials 2006: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies* [M]. White E V and Davis L P, Editors. 2006: K1710-K1710.

[11] Zhao Y, Huang W M, Fu Y Q. *Journal of Micromechanics and Microengineering* [J], 2011, 21(6): p. 067007.

[12] Zhao Y, Wang C C, Huang W M, et al. *Optics Express* [J], 2011, 19(27): 26000–26005.

[13] Yang W G, Lu H, Huang W M, et al. *Polymers* [J], 2014, 6(8): 2287–2308.

[14] Huang W M, Song C L, Fu Y Q, et al. *Advanced Drug Delivery Reviews* [J], 2013, 65(4): 515–35.

[15] Wu X, Huang W M, Zhao Y, et al. *Polymers* [J], 2013, 5(4): 1169–1202.

[16] Zhao Y, Huang W M, Wang C C. *Nanoscience and Nanotechnology Letters* [J], 2012, 4(9): p. 862–878.

[17] Sun L, Huang W M, Wang C C, et al. *Journal of Polymer Science Part A Polymer Chemistry* [J]. 2011, 49(16): 3574–3581.

[18] Xie T. *Nature* [J]. 2010, 464(7286): 267–270.

[19] Sun L, Huang W M. *Soft Matter* [J], 2010, 6(18): p. 4403–4406.

[20] Lu H, Huang W M, Lian Wu X, et al. *Smart Materials & Structures* [J], 2014, 23(23): 182–186.

[21] Ge Q, Qi H J, Dunn M L. *Applied Physics Letters* [J], 2013, 103(13): p. 131901.

[22] Zhang J L, Huang W M, Lu H B, et al. *Materials & Design* [J], 2014, 53(1): 1077–1088.

[23] Ecker M, Pretsch T. *Rsc Advances* [J], 2014, 4(1): p. 286–292.

[24] Pretsch T, Ecker M, Schildhauer M, et al. *J Mater Chem* [J], 2012, 22(16): 7757–7766.

[25] Ecker M, Pretsch T. *Smart Materials and Structures* [J], 2013, 22(9): p. 094005.

[26] Ge Q, Dunn C K, Qi H J, et al. *Smart Materials & Structures* [J], 2014, 23(9): 639–650.

[27] Felton S M, Tolley M T, Shin B H, et al. *Soft Matter* [J], 2013, 9(32): 7688–7694.

(本文为本刊约稿, 编辑 盖少飞)