

第九章 智能高分子材料

■学习目标

- 列举、分析智能高分子材料的基本特点、分类与应用；
- 解释、分析形状记忆高分子材料的过程与基本原理、制备方法、种类与应用；
- 描述、解释智能高分子凝胶的刺激响应类型与应用。

■素质目标

强化合作精神，批判创新思维

第九章 智能高分子材料

■ 主要教学内容

9.1 智能高分子材料概述

9.2 形状记忆高分子材料

9.3 智能高分子凝胶

■ 重点、难点

- 形状记忆高分子材料，高分子形状记忆的过程与基本原理
- 高分子凝胶的体积相转变

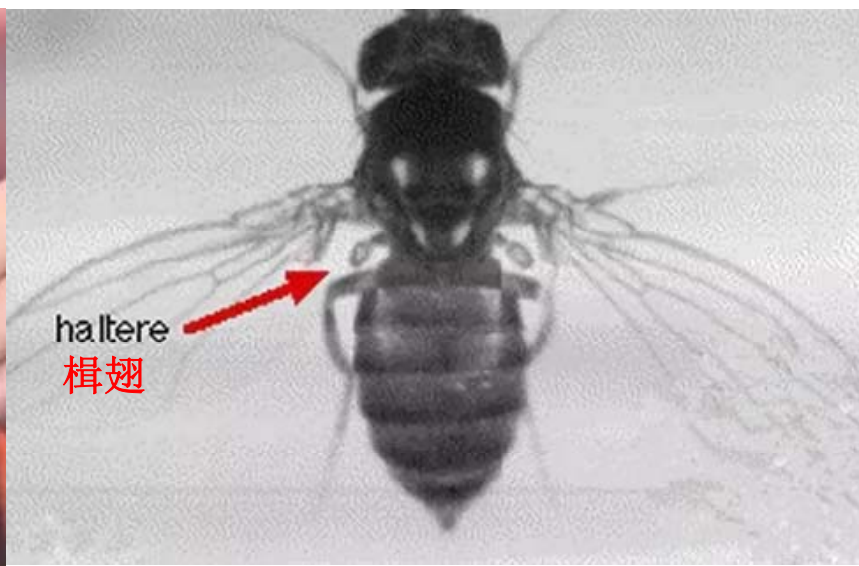
9.1 智能高分子材料概述

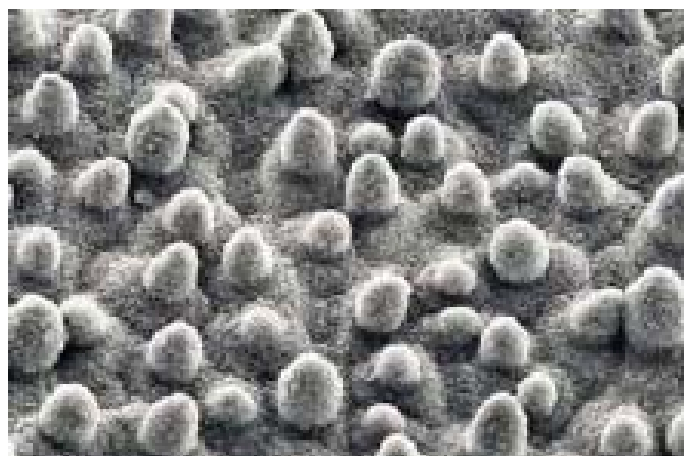
■智能材料（Intelligent Material, Smart Material）

●构思：源于仿生（成分、结构、功能仿生等）

仿生学（**Bionics**）：美国，斯蒂尔，1960年

涵盖结构与材料、运动与机械、功能与传感、能源与生态等

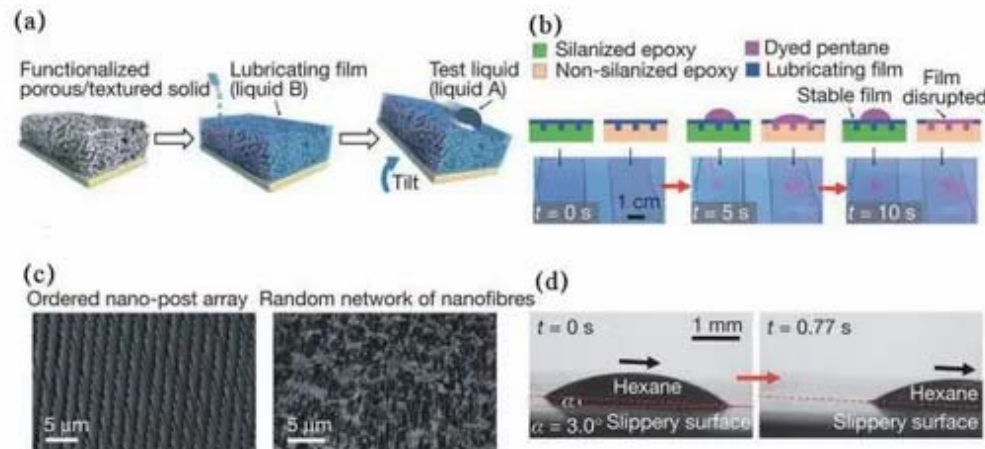




“荷叶自清洁效应”：多重超微纳米结构+疏水蜡质层



猪笼草



在捕虫笼的中上部，存在一个特殊的蜡质区域，这个区域内，内壁覆盖着一层具有微小突起的蜡质，这种设计使得该区域具有超疏水的特性，类似于我们所熟知的“荷叶效应”。这种超疏水的特性使得捕虫笼的内壁极为光滑，几乎达到了令人难以置信的程度。

模仿猪笼草的湿滑表面特性，科学家研究出SLIPS（液体浸润多孔光滑表面）材料，具备自修复和全方位疏液功能。这种材料表面呈现出分子级别的光滑度，融合了全方位疏液、自修复、高透明度、优异的温度和压力稳定性等诸多特性。

SLIPS材料在马桶、窗户、太阳能板、管道等方面展示其优异性能。



水黾稳定的水上运动特性源于：特殊的微纳米结构

水黾的腿能排开**300**倍于其身体积的水量，一条腿在水面上能支撑起**15**倍于身体的重量，在水面上每秒可滑行**100**倍于身体长度的距离，相当于身高**1.8**米的人以每小时**400**英里的速度游泳。

水黾的腿部有数千根按同一方向排列的**多层微米尺寸**的**刚毛**（直径约**3**微米），刚毛表面形成螺旋状的**纳米沟槽**结构。

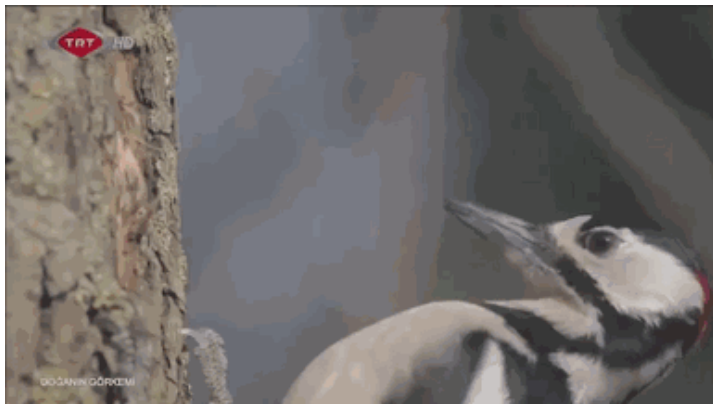
空气被有效地吸附到这些**缝隙**内，在其表面形成**一层稳定的气膜**，阻碍水的浸润，宏观上表现出**超疏水**特性。使其在水面上行动自如，即使在狂风暴雨和急速流动的水流中也不会沉没。



啄木鸟每天叩击树皮数百次，速度达555米/秒，是音速（334米/秒）的1.7倍左右。头部受到的冲击力约为所受重力的1000倍，而一辆时速为56公里的汽车撞在一堵墙上，受到的冲击力仅为所受重力的10倍左右。但令人惊奇的是，啄木鸟居然不会脑震荡。

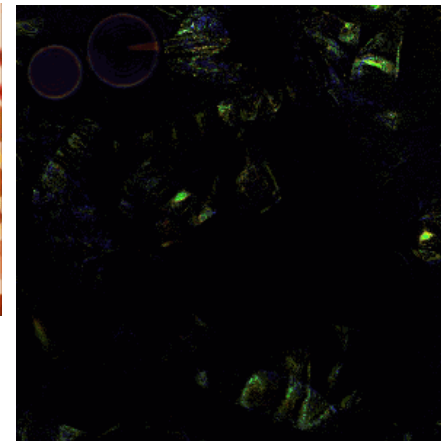
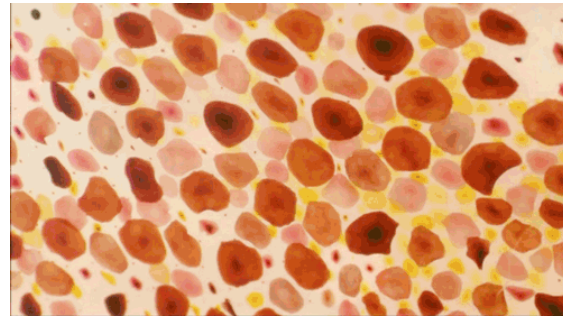
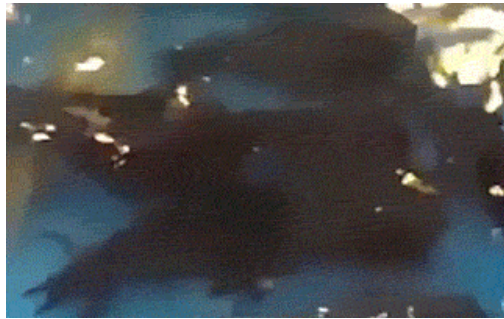


原来，啄木鸟头部的构造与众不同，头颅特别坚硬，骨质松且呈海绵状，里面有液体，具有良好缓冲作用；头部内部有一层坚韧的外脑膜，外脑膜与脑髓之间，有一狭窄的空隙，可减弱震波的流体传播；脑壳外围还长满了能起消除震动的肌肉。当啄木鸟啄树时，头部是严格地作直线运动的。



安全帽：帽顶与头顶之间留有空隙，中间填充有弹性的海绵状物体，用于减震防震。





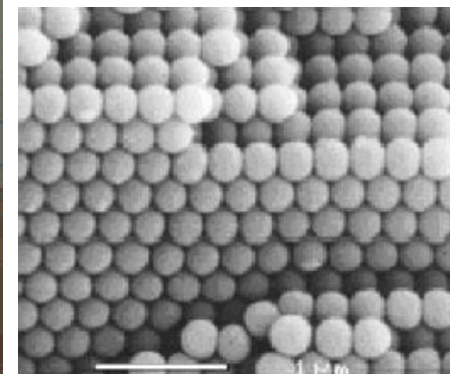
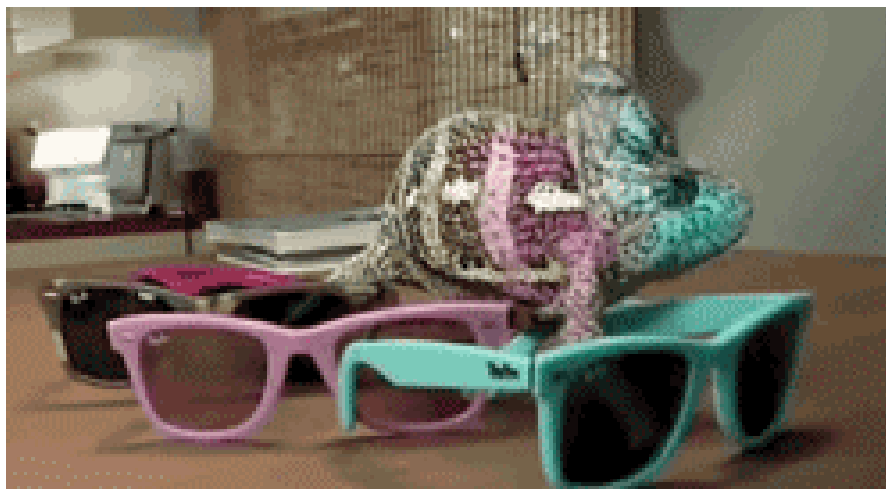
乌贼（墨鱼）



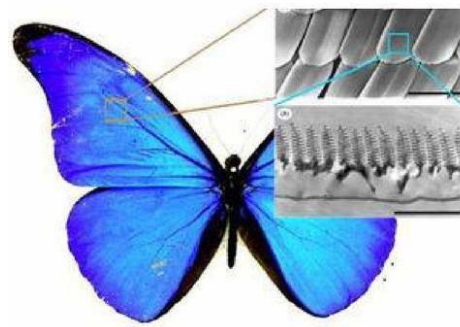
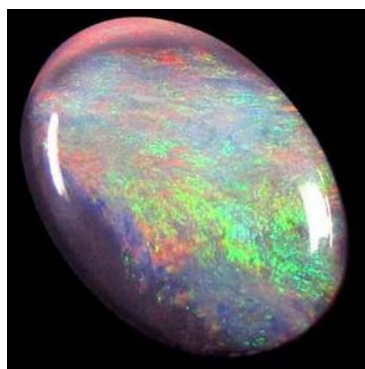
章鱼：睡觉时也能变色

色素细胞内存在色素，可以呈现红、黄、褐、黑等不同颜色。
它的色素被储存在色素囊内，整个细胞周围有肌肉纤维拉扯。
在受到神经信号作用时，这些肌纤维会收缩或舒张，使得色素细胞胀大或缩小。
在整体看上去，软体动物的身体就变色了。

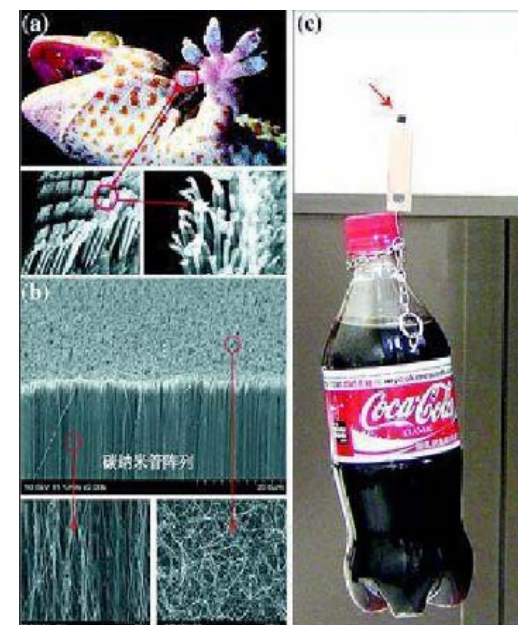
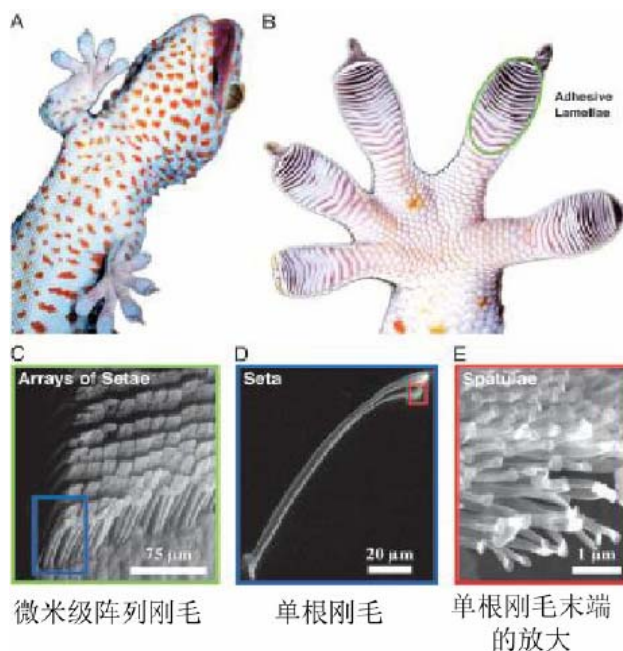
墨鱼在色素细胞的下层还有一层虹细胞，从而使得墨鱼呈现黄色、绿色、蓝色等金属光泽。
虹细胞内部具有复制的堆叠结构，能够反射和折射光线，从而形成金属色泽。
神经系统也能控制这些虹细胞内部堆叠的排列，从而折射和反射不同波长的光，
使得其皮肤颜色更为多变。



颜色不是基于色素，而是基于所谓的“**结构色**”，由**光子晶体**来控制。
这些粒子的**周期性**改变材料反射光、折射光、干涉光等波长。
颜色会根据光照条件或粒子之间距离的变化等因素而发生变化。
蛋白石、**蝴蝶翅膀的彩虹色**、**孔雀的羽毛**是自然界光子晶体的例子。



智能皮肤？



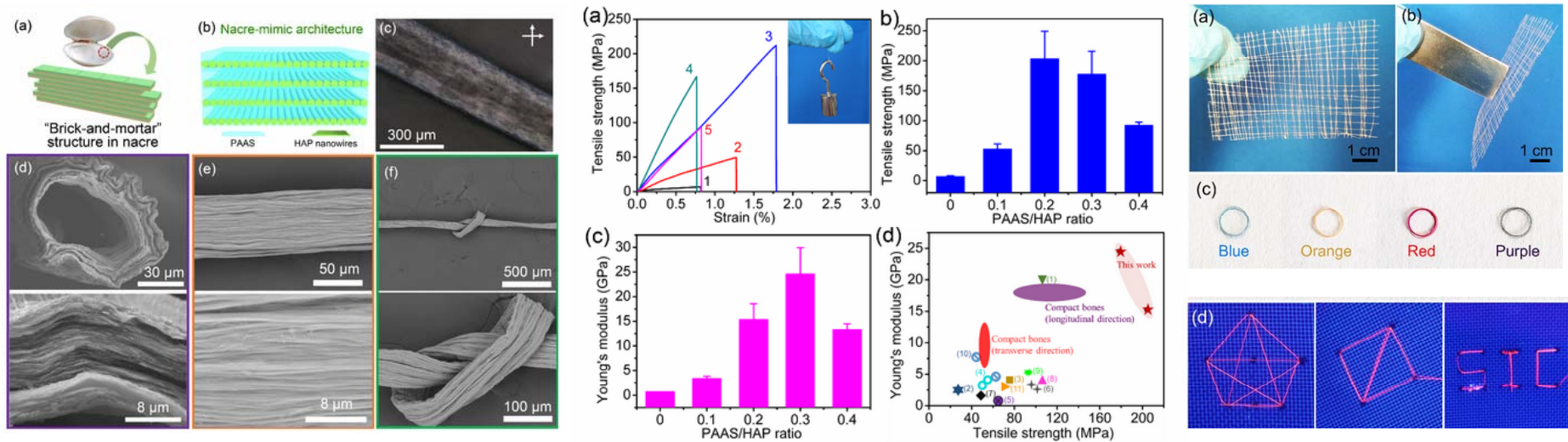
壁虎能在光滑的墙壁上行走自如，是由于它的每只脚底长着大约**50万根**极细的刚毛，每根刚毛长约**100微米**，刚毛末端有大约**400-1000根**更细小的分支。

这种**特殊的粘附力**是由壁虎脚底大量的刚毛与物体表面分子间**距离非常近**，由此而产生的**范德华力**。

4×4平方毫米的碳纳米管阵列
自吸附在垂直玻璃的表面上
悬挂一瓶约**650g**的可乐瓶

贝壳的主要成分：碳酸钙和少量的壳质素复合材料组装形成的“砖块水泥层状有序结构”

骨骼：羟基磷灰石纳米晶/胶原纤维组装形成的有序结构

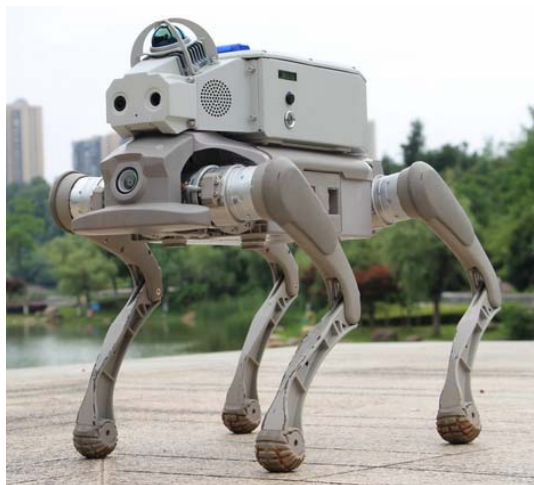


羟基磷灰石超长纳米线有序阵列结构+“砖块水泥层状结构”的高性能仿生柔性复合纤维



树脂增强的羟基磷灰石超长纳米线基仿牙釉质高度有序结构材料

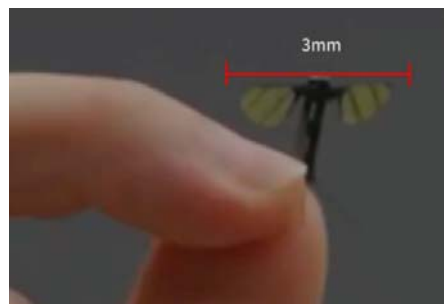
机器狗、机器狼（四足仿生机器人）



● 视频



水下幽灵



机器蚊



九天” 无人机

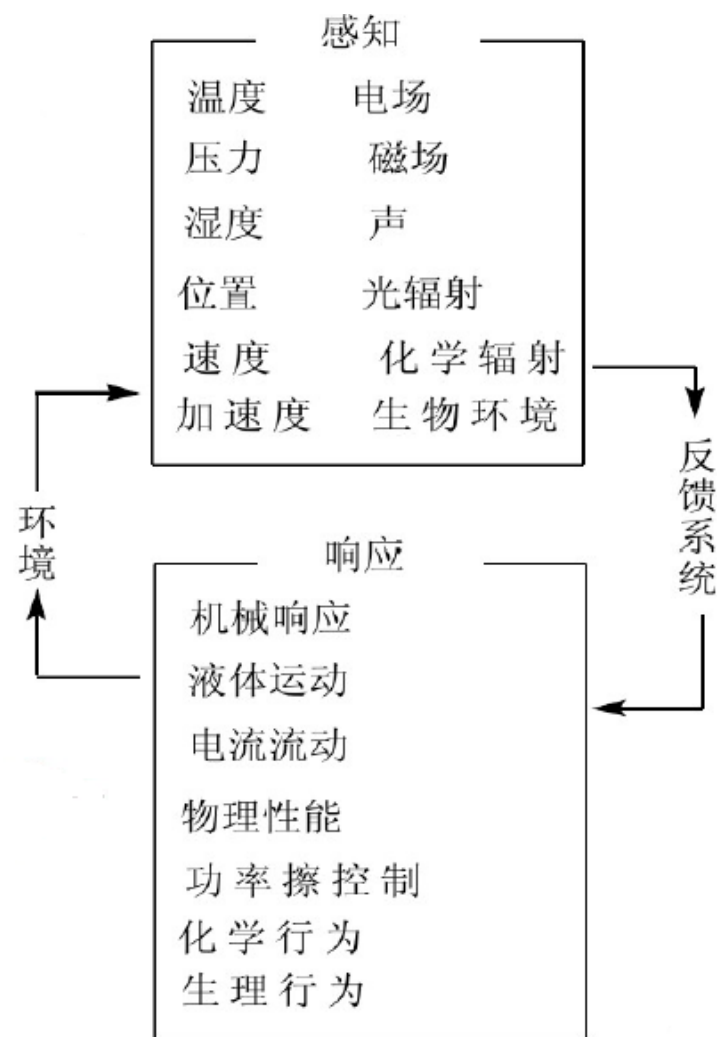
■智能材料（Intelligent Material, Smart Material）

●定义：

具有感知环境刺激，
对其进行分析、处理、判断等，
并采取一定的措施进行适度响应的材料。

●目标：

获得类似于生物各种功能的“活”的材料，
使材料系统集成智能与生命特征，
并产生自适应功能。



■智能材料

●特点（智能性体现）：

- 具有感知功能：能够检测并识别周围环境的变化，
如，应力、应变、热、光、电、磁等；
- 具有驱动功能，能够响应环境变化；
- 具有传输功能，能以设定的方式选择和控制响应；
- 反应灵敏、及时、恰当；
- 刺激消除后，能够迅速恢复到原始状态。

■智能材料

- 根据材料的来源，智能材料可分为：

- 智能金属材料：形状记忆合金、形状记忆复合材料

- 智能无机非金属材料：应用在电流变体、压电陶瓷、电致变色等

- 智能高分子材料

■智能材料

- 智能高分子材料：是集感知、驱动、信息处理于一体，形成类似于生物所具有智能属性的高分子材料。

- 特点：

- 多水平结构层次

- 较弱的分子间作用力

- 侧链易引入官能团



利于感知判断环境，实现环境响应

- 便于分子设计和精细控制

- 质轻，易涂覆

■智能材料

- 智能高分子材料一般包括：形状记忆高分子材料、智能高分子凝胶、智能高分子膜、智能高分子复合材料、智能纤维织物等。

类别	性质	应用
记忆功能高分子材料	对应力形状体积色泽等有记忆效应	医用材料，包装材料织物材料，热收缩管
智能纤维织物	聚乙二醇与各种纤维共混物热适应性，可逆收缩性	服装 保温系统，传感/执行系统，生物医用压力绷带
智能高分子凝胶	三维高分子网络与溶剂组成的体系，体积相转变	组织培养，环境工程，化学机械系统，调光材料，智能药物释放体系
智能高分子复合材料	集成传感器、信息处理器和功能驱动器，多学科交叉产物	自愈合，自应变，自动修补混凝土，减震速造建筑材料，形状记忆合金与复合功能器件，压电材料
智能高分子膜	选择性渗透、选择性吸附和分离等膜的组成、结构和形态的变化—智能化	选择透过膜材，传感膜材，仿生膜材，人工肺

返回

9.2 形状记忆高分子材料

一、概述

●视频:



形状记忆合金

1、定义

●形状记忆材料主要包括:

形状记忆合金(SMA)、形状记忆陶瓷(SMC)和形状记忆高分子。

形状记忆合金和形状记忆高分子研究最多，应用最成功。

●形状记忆高分子（**Shape Memory Polymer, SMP**），
是指具有初始形状的制品，
在一定的条件下，改变其初始形状并固定后，
通过外界条件（如光、热、电、化学感应等）的刺激，
又可恢复其初始形状的高分子材料。

2、形状记忆高分子的种类与基本原理

- 形状记忆高分子的记忆过程：

就是完成

记忆起始态  固定变形态  回复起始态
的循环过程。

- 引发形状记忆效应的外部环境因素：

- 物理因素：热、光、电、声等。

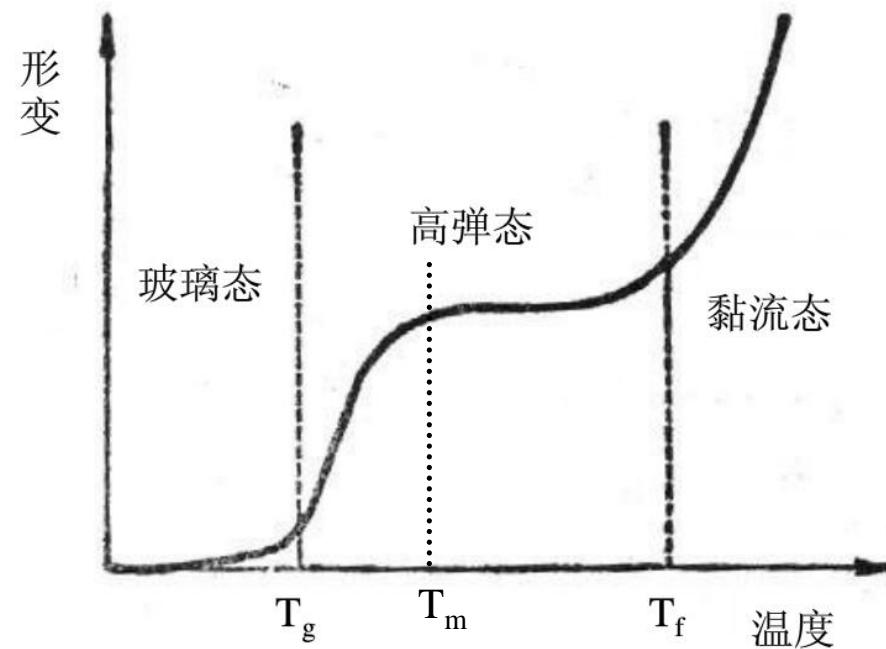
- 化学因素：酸碱度、螯合反应、相转变反应等。

■产生记忆效应的内在原因

- 由于柔性高分子材料的长链结构，
分子链的长度与直径相差非常悬殊，柔软而易于互相缠结，
每个分子链的长短不一，要形成规则的完全晶体结构是很困难的。
- 这就决定了大多数高分子的宏观结构是结晶和无定形的共存体系。
- 高分子未经交联时，一旦加热温度超过其结晶熔点，
就表现为暂时的流动性质，观察不出记忆特性；
- 高分子经交联后，原来的线性结构变为三维网状结构，
加热到熔点以上时，不再熔化，
而是在很宽的温度范围内表现出弹性体的性质。

■产生记忆效应的内在原因

- 在玻璃化温度 T_g 以下的为玻璃态，分子链的运动是冻结的，表现不出记忆效应。
- 当升高到玻璃化温度 T_g 以上时，运动单元得以解冻，开始运动。受力时，链段很快伸展开来，外力去除后，又可恢复原状。即高弹形变。
- 高弹形变，是高分子材料具有记忆效应的先决条件。

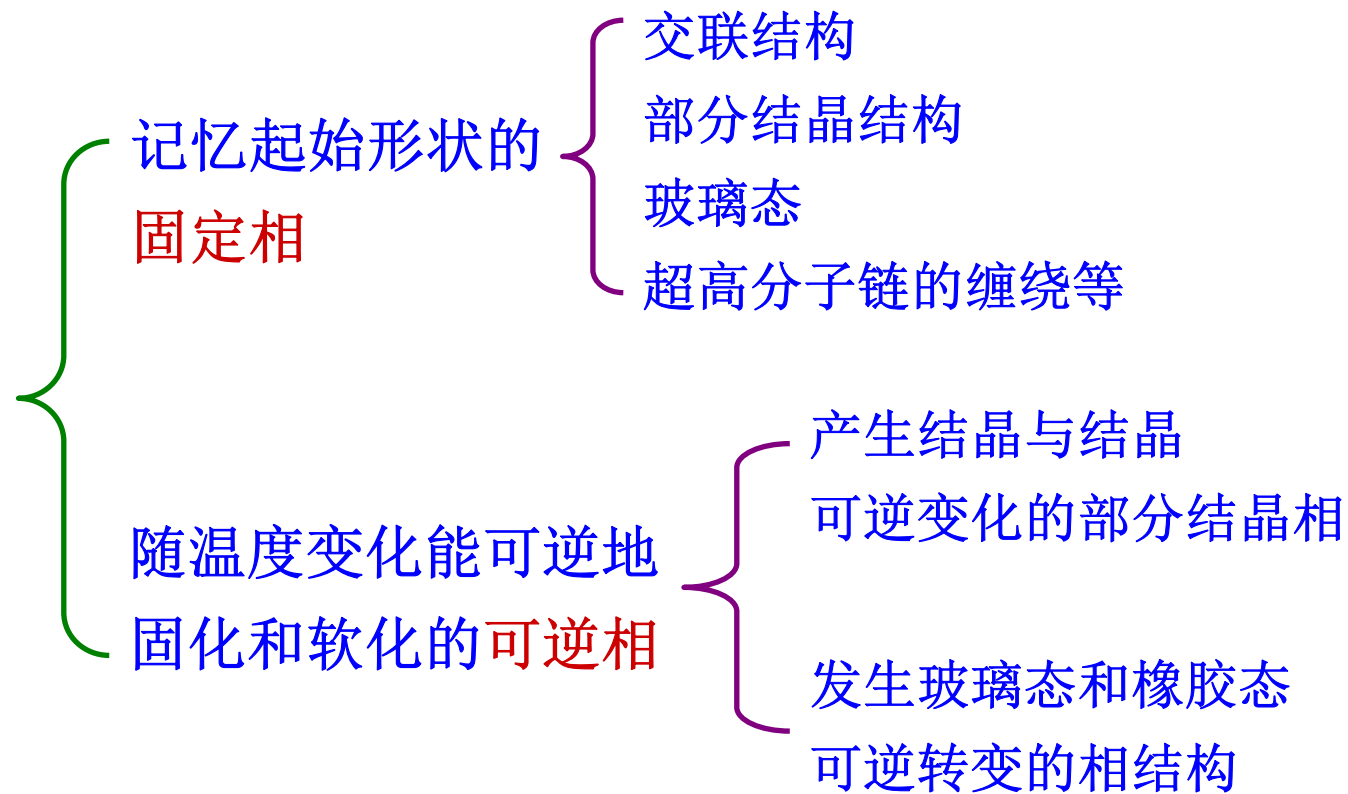


高分子形变与温度的关系

■形状记忆高分子的必要条件

- 高分子材料本身应具有结晶和无定形的两相结构，且两相结构的比例适当。
- 在玻璃化温度或熔点以上的较宽温度范围内呈现高弹态，并具有一定的强度，以利于实施变形。
- 在较宽的环境温度条件下应具有玻璃态，保证在储存状态下冻结应力不会释放。

■ 形状记忆高分子的相结构



根据记忆响应机理，形状记忆高分子可分为以下几类：

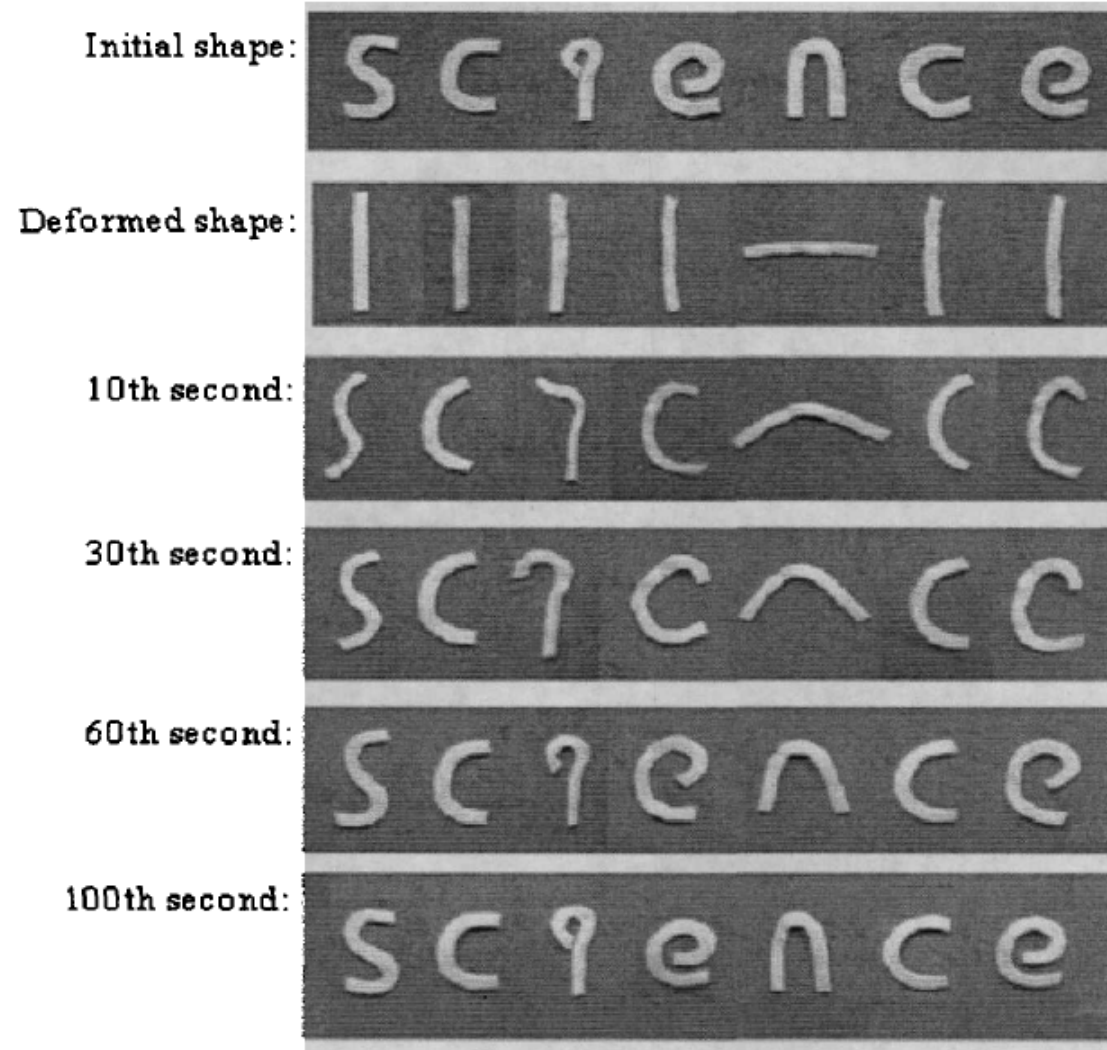
- 热致感应型SMP：应用最广泛，研究最成熟
- 光致感应型SMP
- 电致感应型SMP
- 化学感应型SMP

二、热致感应型形状记忆高分子

●定义：

在室温以上一定温度变形，并能在室温固定形变，且长期存放，当再升温至某一特定温度时，能很快恢复初始形状的高分子。

- 先将材料加热至其相转变温度以上(通常是玻璃化温度或者熔点)，待材料完全软化后，对其施加一定的外力使之变形。
- 然后在维持外力的情况下，迅速降温使材料内部的应力冻结，从而在宏观上固定住材料的形状。
- 撤掉外力，将固定好形状的材料重新升温至其相转变温度，则可观察到形状记忆回复的过程。



数码拍摄的PDLLA/HA复合材料制作的“science”字母形状记忆回复过程

- 通常认为，热致感应型SMP的内部存在两相：固定相和可逆相。

- 固定相

高分子交联结构或部分交联结构，在工作温度范围内保持稳定，用以保持成型制品形状，即记忆起始态。

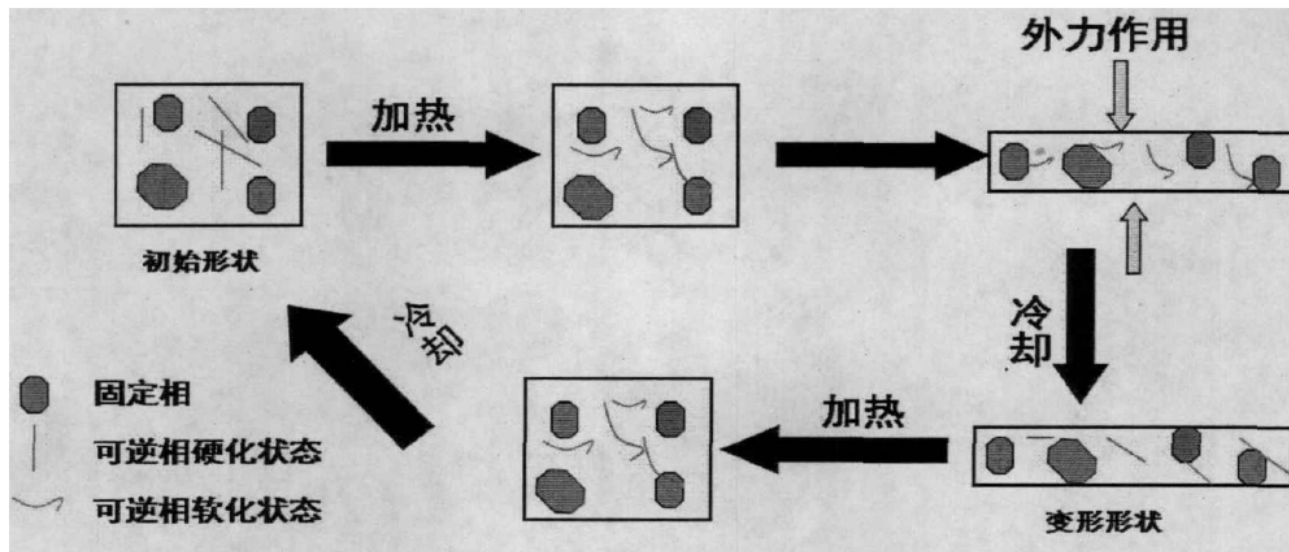
- 可逆相

能够随温度变化

在结晶与结晶熔融态（ T_m ）或玻璃态与橡胶态间（ T_g ）可逆转变，相应结构发生软化、硬化可逆变化，以保证成型制品可以改变形状。记忆其变形的形状。

■热致感应型SMP的形状记忆过程：以热塑性SMP为例

- 当温度升高至材料相转变温度以上，并对其施加外力以后，固定相形状不变，但可逆相软化，其形状随着外力发生改变，然后通过降温过程，可逆相形状固定并维持着材料的宏观形状。
- 随着温度再次回升，可逆相软化，但此时由于没有外力作用，固定相的形状将占据主导地位，材料便自动回复成初始的形状。



■热致感应型形状记忆高分子的制备1：化学交联法

- 用该法制备的热固性SMP制品时，
常采用两步法或多步法，在产品定型的最后一道工序进行交联反应。
否则会造成产品在成型前发生交联而使材料成型困难。
- 如：将丙烯酸十八醇酯与丙烯酸交联共聚，用亚甲基双丙烯酰胺做交联剂，
合成了具有形状记忆功能的高分子凝胶。

■热致感应型形状记忆高分子的制备2：物理交联法

- 大多数产生形状记忆功能的高分子，都是通过辐射交联制得的，如聚乙烯、聚己内酯。
- 优点：
 - 可以提高高分子的耐热性、强度、尺寸稳定性等。
 - 没有分子内的化学污染。

■热致感应型形状记忆高分子的制备3：共聚法

- 将两种不同转变温度（ T_g 或 T_m ）的高分子材料聚合成嵌段共聚物。
- 可通过共聚调节软段的结构组成、分子量及含量等，控制制品的软化温度和回复应力等，从而可以改变高分子的形状记忆功能。

■热致感应型形状记忆高分子的制备4：分子自组装法

- 相对传统的化学合成方法，其制备简单，节能环保。
- 以静电作用力、氢键等为驱动力。
- 适用的高分子种类有限。

■几种重要的热致感应型形状记忆高分子

●聚降冰片烯

- 由环戊二烯和乙烯通过双烯加成反应制备。
- 商品名：Norsorex（诺索勒克斯）
- 平均分子量：**300万以上**，比普通塑料高**100倍**。
- T_g : **35℃**，接近人体温度。

室温下为硬质，固化后环境温度超过**40℃**时，可在很短时间恢复原来的形状，且温度越高恢复越快，适于制作**人用织物**。
- 热塑性**树脂，可通过压延、挤出、注射、真空成型等工艺加工成型。
- 强度高，具有减震功能。
- 具有较好的耐湿气性和滑动性。

● 苯乙烯-丁二烯共聚物

- 商品名：阿斯玛
- 固定相：高熔点（120℃）的聚苯乙烯（PS）的结晶部分
- 可逆相：低熔点（60℃）的聚丁二烯（PB）的结晶部分
- 加工成型容易，形状恢复速度快，常温时形状的自然恢复极小。
- 形变量可高达400%，重复形变可达200次以上。
- 有良好的耐酸碱性和着色性，
易溶于甲苯等溶剂，便于涂布和流延加工，且粘度可调。
用于制造海绵橡胶、浸渍纤维和织物，可直接用作胶粘剂、涂料等。
- 缺点：恢复精度不够高。

●形状记忆聚氨酯

- 由聚亚甲基二醇、4,4-二苯甲烷二异氰酸酯和链增长剂聚合而成，是含有部分结晶态的线性高分子。
- 通过原料的配比调节 T_g ，可得到不同响应温度的形状记忆聚氨酯。
- 聚氨酯分子链是直链结构，具有热塑性，可通过注射、挤出和吹塑等加工方法加工。
- 具有极高的湿热稳定性和减震性能，着色容易，形变量大（最高可达400%），耐候重复形变效果好。

三、电/磁致型形状记忆高分子

- 利用施加的外部电场/磁场来诱导高分子的形变回复。
- 这类材料主要是将能够导电或具有磁性能的无机粒子(碳纳米管、炭黑、四氧化三铁等)或者半导体高分子(聚吡咯，聚苯胺等)等加入热致型形状记忆聚合物基体中，然后利用电场或者磁场诱导其中的粒子发热，从而使基体材料升温，达到其相转变温度后引发回复。

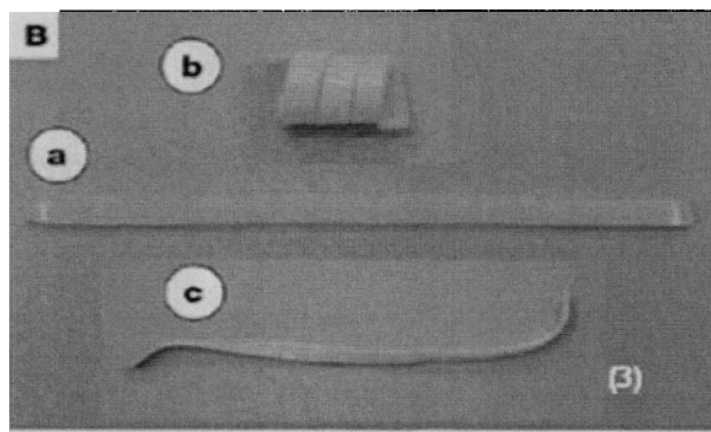
这类材料，从本质上来看其实也是一种热致型形状记忆复合材料。

三、电/磁致型形状记忆高分子

- 将具有超顺磁性的 Fe_3O_4 纳米颗粒分别与PDLLA和化学交联的PCL复合，得到了两种新的磁致型形状记忆复合材料。
- 这种材料能够在一定强度磁场的诱导下实现形状记忆的回复，并且回复率能够达到95%以上。

四、光致型形状记忆高分子

●德国研究人员首次提出了这类高分子的概念，他们在丙烯酸丁酯(BA)、甲基丙烯酸-2-羟乙酯(HEMA)等的化学交联结构中引入了一种含有肉桂酸(CA)基团的高分子，然后通过不同波长的紫外光照射使其发生伸展，收缩等形状变化。



利用不同波长的紫外光引发的光致型形状记忆效应

四、光致型形状记忆高分子

- 它与热致型形状记忆材料形变回复机理有着很大的区别。
- 光致型形状记忆材料的形变以及回复，是通过其分子链上的光致变色基团来实现。当材料置于不同波长的光照射下，光致变色基团就会发生转动，从而使整个分子骨架产生顺反异构体，最终实现形状的可逆变化。
- 总体而言，光致型形状记忆材料这种“见光变形”的特点，在工业，医学领域有着巨大的潜力和应用价值。

五、形状记忆高分子的应用

- 形状记忆高分子由于具有质轻价廉，形变量大，成型容易，赋形容易，形状恢复温度便于调整等优点。
- 目前已应用在医疗、包装、建筑、玩具、汽车、报警器材等领域。

9.3 智能高分子凝胶

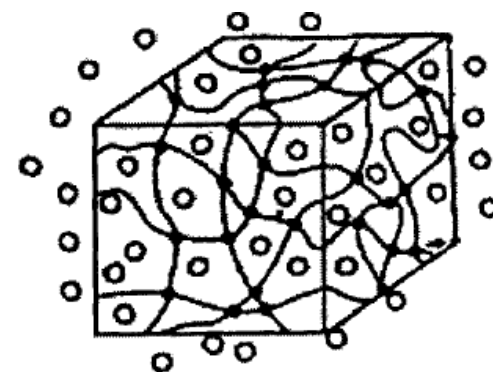
● 视频:



水凝胶

一、概述

- 高分子凝胶是由三维网络结构的高分子和溶剂组成，可被溶剂溶胀。
- 由于溶剂与高分子网络的亲和性，溶剂被高分子网络封闭在里面，失去了流动性，因此，凝胶会象固体一样显示出一定的形状。
- 由于凝胶材料中含有液体，不像固体那样维持其形状，因此，凝胶材料也曾被称为“湿材料”或者“软材料”。
- 根据溶剂的不同，可分为高分子水凝胶和高分子有机凝胶。



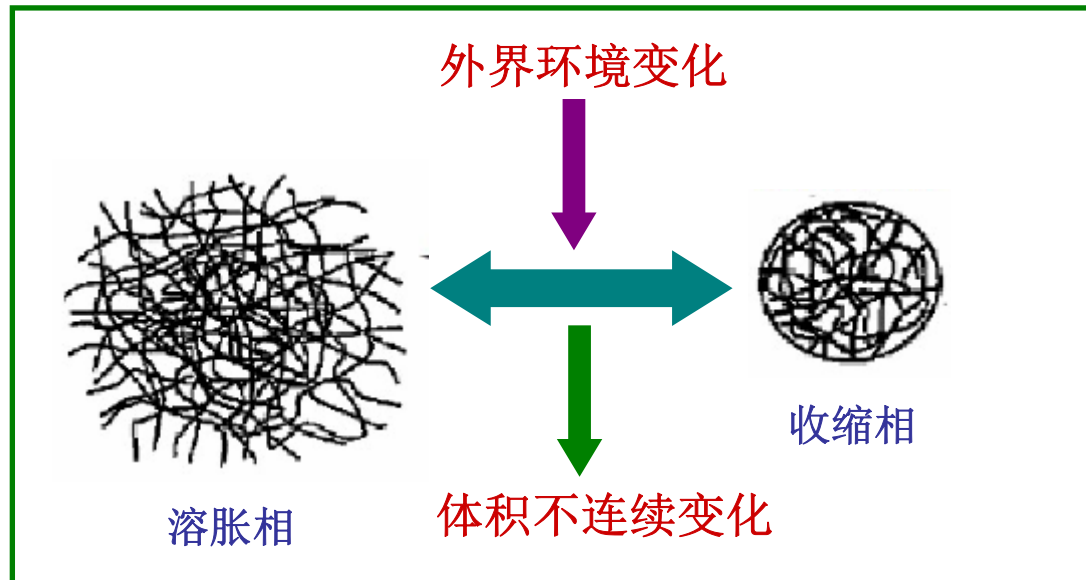
一、概述

- 智能高分子凝胶是
由溶剂与高分子网络所组成的三维网络结构，
其大分子主链或侧链上含有离子解离性、极性或疏水性基团，
从而使之具有类似生物体的特性，
对溶剂组分、温度、pH值、盐浓度、光和电场等环境变化
能产生一定的响应，发生可逆的不连续的体积变化。
- 突出特点：体积相转变

二、高分子凝胶的体积相转变

随外界环境的变化，凝胶平衡溶胀体积产生不连续变化。

- 内因：范德华力、氢键、疏水作用、静电作用的相互组合与竞争。



- ◆溶剂试图渗入高分子网络内使其体积膨胀；
- ◆高分子体积膨胀，导致网络分子链向空间伸展，使网络受到应力产生弹性收缩；
- ◆当两种相反的倾向相抗衡时，达到了溶胀平衡。

- 在 高分子凝胶中出现相转变，表现为网络的增大、网络失去弹性、网络的体积急剧变化（可变化几百倍），甚至在三维网络结构中不再存在凝胶相。这些变化是可逆的、不连续的。

三、高分子水凝胶的制备

聚合物成为高分子水凝胶材料必须具备两个条件：

- 高分子主链或侧链上带有大量的亲水基团；
- 有适当的交联网络结构。

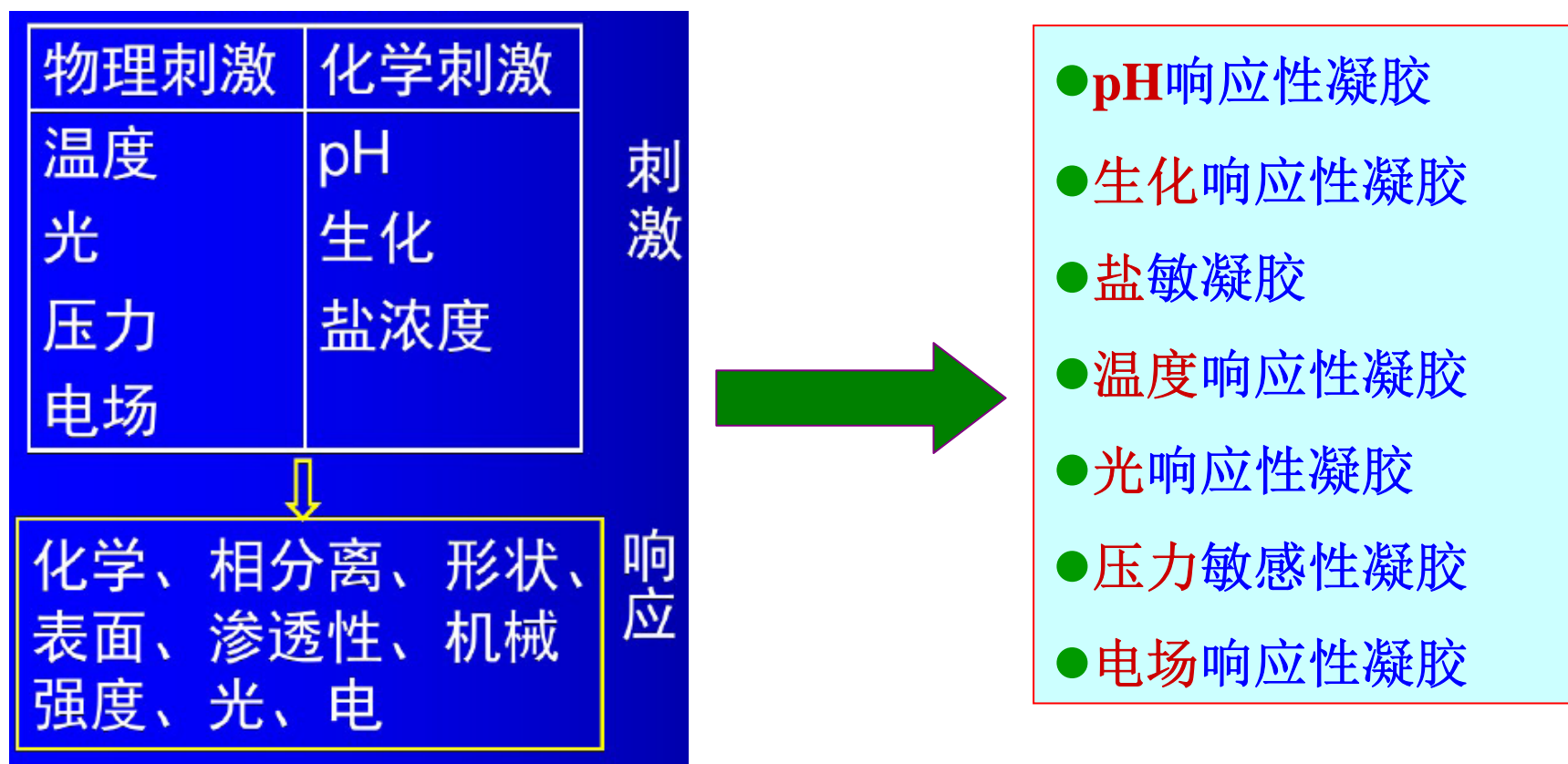
三、高分子水凝胶的制备

- 起始原料：可以是单体、聚合物、或者是单体和聚合物的混合物。
- 制备方法有：
单体的交联聚合、接枝聚合和水溶性高分子的交联等，
单体交联是目前制备高分子凝胶的最主要方法。

三、高分子水凝胶的制备

- **单体交联聚合**：在交联剂存在的情况下，单体经自由基均聚或共聚而制得高分子凝胶的方法。
- 在聚合反应过程中，可通过加入或改变引发剂、螯合剂、链转移剂等来控制聚合动力学，以及所得高分子凝胶的性质。
- 制备高分子凝胶的单体：
主要有**丙烯酸系列**、**丙烯酰胺系列**和**醋酸乙烯酯**等。
- 聚合反应可以借助引发剂引发和辐射引发完成，交联结构最主要的是利用交联剂来完成，如**双乙烯基交联剂**。

四、高分子凝胶的刺激响应性与分类



1、物理刺激响应性

A、温度响应性

- 温敏水凝胶：

分子中有一定比例的亲水和疏水基团，
温度的变化可以影响这些基团的亲水疏水作用以及氢键作用，
从而使凝胶的网络结构改变，导致发生体积相转变的一类凝胶。

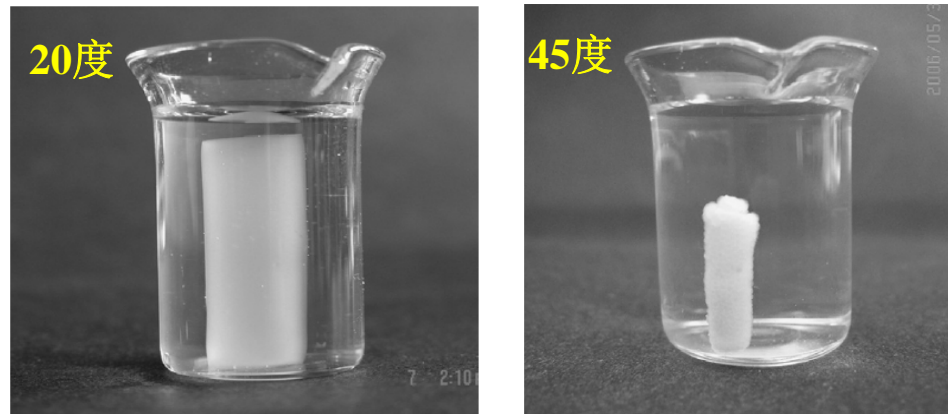
A、温度响应性

- 温敏水凝胶分为高温收缩性凝胶和低温收缩性凝胶。
- 温敏水凝胶发生体积相变的温度，称为临界相变温度：
 - 低于LCST，凝胶在水溶液中溶胀；
➤ 高于LCST，凝胶发生体积相变而收缩。
➡ 高温收缩性凝胶
 - 低于UCST，凝胶发生体积相变而收缩；
➤ 高于UCST，凝胶在水溶液中溶胀。
➡ 低温收缩性凝胶
- 低临界溶解温度（Lower Critical Solution Temperature, LCST）
- 高临界溶解温度（Upper Critical Solution Temperature, UCST）

A、温度响应性

- 溶胀比 q ：温敏水凝胶溶胀和收缩时的体积比。
- 凝胶的临界相变温度LCST/UCST和溶胀比 q ，是决定其应用的关键因素，也是设计温敏水凝胶的主要参数。

● 典型的高温收缩性水凝胶：聚(N-异丙基丙烯酰胺) (PNIPAm)



LCST: 32°C

< 32°C: 水与氨基形成氢键，高分子被溶胀，大分子链呈伸展构象；

> 32°C: 氢键被破坏，疏水基团间相互作用，水从凝胶中排出，大分子链构象收缩。

疏水性以及氢键的剧变，会使其由亲水的膨胀态急剧转变为疏水的收缩态

- 典型的低温收缩性水凝胶：

聚丙烯酸(PAAC)和聚N,N,-二甲基丙烯酰胺(PDMAAM)形成的互穿网络凝胶

UCST: 60°C

< 60°C：凝胶网络内形成氢键，体积收缩；

> 60°C：氢键解离，凝胶溶胀。

1、物理刺激响应性

B、电场响应性

- 日本某研究组在1983年首次报道了凝胶对电场的响应：
在电场刺激下，凝胶产生溶胀和收缩，并将电能转换机械能。
- 科学家们将凝胶视作人工肌肉的候选材料，希望能在机器人驱动元件或假肢方面得到应用。



1、物理刺激响应性

C、磁场响应性

- 美国MIT研究者最早进行凝胶响应磁场而溶胀和收缩的研究工作。

将磁铁“种植”在凝胶内，当施加磁场时铁磁体发热，使周围凝胶温度升高，诱发溶胀或收缩，去除磁场后，凝胶冷却恢复至原来的尺寸。

1、物理刺激响应性

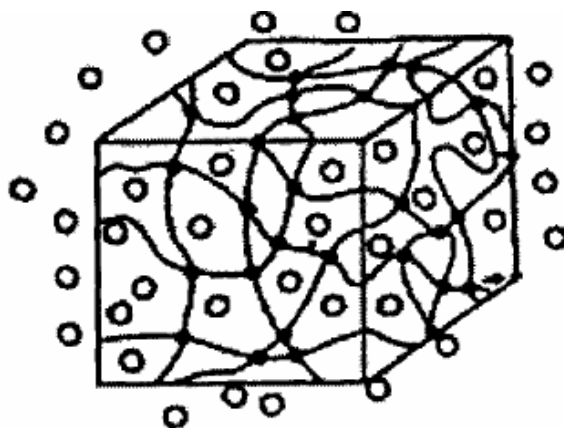
D、光响应性

- 光响应材料的设计，涉及到将能产生光化学反应的发光基团引入高分子材料中。
- 此类材料在光记录介质、化学传感器和非线性光学材料等方面应用前景良好。

2、化学刺激响应性

A、pH响应性

- 通过线形聚合物之间交联或互穿而形成的体型大分子网络结构；网络中含有可离子化的酸性或碱性基团，随着介质pH值、离子强度的改变，这些基团会发生电离，导致网络内大分子链段间氢键的解离，产生不连续的溶胀体积变化。



2、化学刺激响应性

B、分子识别型刺激响应性

- 蛋白质可记忆和复制独特的构象，以难以置信的特异性识别外界的分子，并以极高的效率催化化学反应。
- 模仿生物体系的分子识别功能，并将此类功能引入高分子材料乃是一个诱人的研究方向。

五、新型智能高分子水凝胶

1、快速响应性水凝胶

- 传统水凝胶溶胀速度较慢，但有许多场合需要分子网络能很快地溶胀。
- 为了提高水凝胶的响应速度，在传统水凝胶的基础上制备了几种新型水凝胶，如微凝胶、大孔及超孔水凝胶等。

2、物理交联水凝胶

- 化学交联剂不仅会影响包埋物质的完整性，而且经常是有毒化合物，因此，化学交联水凝胶使用之前，必须除去未反应的交联剂。
- 物理交联凝胶：
当如温度、pH等条件改变时，可以原位形成凝胶，
可以避免使用交联剂。
因此，近年来对于物理交联水凝胶的研究兴趣越来越浓。

2、物理交联水凝胶

- 物理交联水凝胶的形成条件：

体系中须有物理交联点形成，

可以通过多种方式，如疏水亲水、结晶、氢键作用等。

- 物理交联水凝胶可用于制备可注射式药物缓释体系：

使药物在温和的条件下混合在分子溶液中，

再注射到身体的一定部位，在一定的生理条件下形成水凝胶，

其中的药物通过凝胶的分解或以其它方式缓慢释放，

从而达到控制药物释放的目的。

3、具有规则构造的水凝胶

- 溶胀的水凝胶通常是**无定型的**，没有特别的分子水平的有序结构，这可能是合成高分子水凝胶**缺乏机械强度以及快速响应**的原因之一。
- 生物凝胶通常能形成**非常有序的聚集体**，
从而使得生物器官具有**足够的机械强度和灵活的功能**。
合成具有规则构造的水凝胶是智能型水凝胶改性的一个主要研究方向。

3、具有规则构造的水凝胶

- 在水凝胶中引入有序结构的方法主要有两种：

- 一是引入能通过分子间相互作用形成有序结构的分子，
例如聚电解质凝胶同带相反电荷的表面活性剂之间复合物的形成。

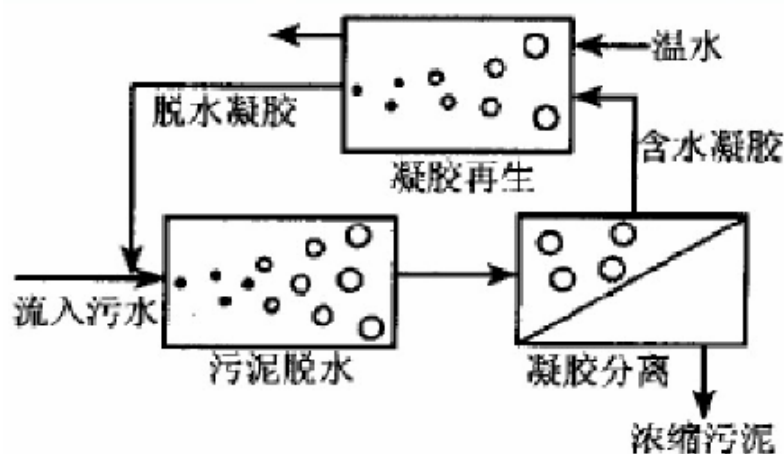
- 另一种方法是通过化学键在水凝胶中引入能自组装的侧基，
如含有晶体或液晶侧基的疏水性单体和亲水性单体的共聚属于这一类。

- 水凝胶通过它们的有序-无序或有序-有序转变对外界刺激呈现出非常快速的响应，因此这些水凝胶将是制造人造肌肉的合适材料。

六、高分子凝胶的应用

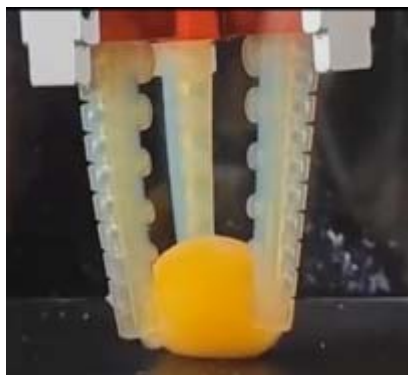
凝胶因其独特的性质，

可以应用在药物控释系统，物料分离，动力和机械系统，组织工程，水处理等方面。



机械手：人工肌肉

● 视频:



仿章鱼自适应水凝
胶吸盘

● 视频:



G1进化过程

返回