

# 负泊松比材料研究进展

史 炜, 杨 伟, 李忠明, 谢邦互, 杨鸣波<sup>\*</sup>

(四川大学高分子科学与工程学院, 高分子材料工程国家重点实验室, 成都 610065)

**摘要:**介绍了近年来材料科学的一大热点——负泊松比材料的研究概况, 通过讨论负泊松比材料的微观结构与形变机理, 阐述了该材料所具有的特殊物理机械性能, 并通过与普通材料的性能的比较, 指出了此类材料所具有的巨大应用前景和实用价值。

**关键词:**负泊松比; 微观结构; 形变机理

## 引 言

以著名法国数学家西蒙·泊松命名的泊松比, 定义为负的横向收缩应变与纵向伸长应变之比。用公式表示为:

$$\nu_{ij} = -\epsilon_j / \epsilon_i$$

式中:  $\epsilon_j$  表示横向收缩应变,  $\epsilon_i$  表示纵向伸长应变。 $i, j$  分别为两相互垂直的坐标轴。

通常认为, 几乎所有的材料泊松比值都为正, 约为 1/3, 橡胶类材料为 1/2, 金属铝为 0.33, 铜为 0.27, 典型的聚合物泡沫为 0.1~0.4 等, 即这些材料在拉伸时材料的横向发生收缩。而负泊松比(Negative Poisson's Ratio)效应, 是指受拉伸时, 材料在弹性范围内横向发生膨胀; 而受压缩时, 材料的横向反而发生收缩。这种现象在热力学上是可能的, 但通常材料中并没有普遍观察到负泊松比效应的存在。近年来发现的一些特殊结构的材料具有负泊松比效应, 由于其奇特的性能而倍受材料科学家和物理学家们的重视。

1987 年, Lakes<sup>[1]</sup> 把一个 110×38×38mm 的普通聚氨酯泡沫放入 75×25×25mm 的铝制模具中, 进行三维压缩后再对其进行加热、冷却和松弛处理, 得到的泡孔单元呈内凹(re-entrant)结构(如图 1 所示), 首次通过对普通聚合物泡沫的处理得到具有特殊微观结构的负泊松比材料, 并测得其泊松比值为-0.7。自此, 这一领域内的研究开始蓬勃发展起来。

1989 年, Evans 等<sup>[2,3]</sup> 在研究具有微孔(microporous)结构的聚四氟乙烯(PTFE)的性能时, 也发现了负泊松比效应的存在。Alderson 和 Evans<sup>[4]</sup> 发现, 经过特殊方法形成的其它一些微孔聚合物, 如超高分子量聚乙烯(UHMWPE)呈现负泊松比效应, 其泊松比值在径向受压时为-1.24, 轴向受压时为零。Choi 等<sup>[5,6]</sup> 则较为深入的探讨了呈现负泊松比效应的材料其微观结构的形成方法和受力过程的结构变化, 并提出了呈现负泊松比效应的机理。

本文从迄今为止所发现的负泊松比材料的种类、特殊的微观结构、形变的机理及其与普通材料

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(20074022);

**作者简介:**史炜, 25 岁, 男, 四川大学高分子科学与工程学院 2001 级研究生, 研究方向为负泊松比材料。

<sup>\*</sup> 通讯联系人。

相比性能上的差异和应用前景等方面,对这种材料进行了详细的介绍。

## 1 负泊松比材料的种类

一般而言,负泊松比材料可以分为多孔状负泊松比材料—包括泡沫(Foam)材料和蜂巢状(Honeycomb)结构材料、负泊松比复合材料及分子负泊松比材料等。

### 1.1 多孔状负泊松比材料

多孔材料指一相为固体,另一相完全由孔隙或液体组成的复合材料,如自然界的岩石、木材等。多孔状固体材料可能具有二维结构,也可能具有三维结构,目前已经发

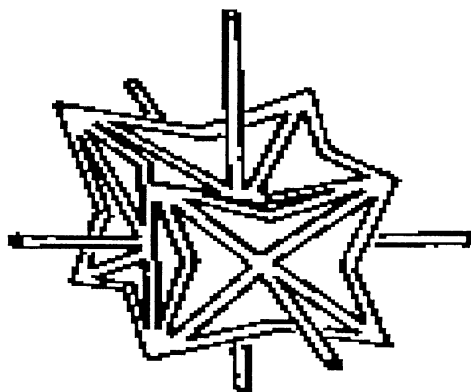


图1 负泊松比聚合物泡沫泡孔单元示意图

现由内凹泡孔结构单元组成的二维蜂窝状固体材料具有负的泊松比值<sup>[7,8]</sup>。Almgren<sup>[8]</sup>发现在二维或三维尺度上,通过设计由棒、弹簧和滑块组成的宏观结构,可以实现负泊松比效应,其内部结构单元与蜂窝状材料的内凹泡孔单元类似。Lakes在1987年通过对普通泡沫进行热机械方法处理<sup>[1]</sup>制备的负泊松比聚氨酯泡沫也属于多孔状负泊松比材料。Lakes和Friis等认为具有软化点的聚合物泡沫、延展性金属泡沫以及某些热固性聚合物泡沫<sup>[1,9]</sup>也能制成为负泊松比材料,并发现所制得的铜泡沫具有-0.8的泊松比值。但是负泊松比泡沫材料的缺陷在于材料强度和硬度太低,若通过增强的方法提高其强度和硬度,其负泊松比效应就会消失。

上述这些材料都是各向同性的,对于各向同性材料,经典弹性理论认为 $-1 \leq \nu \leq 1/2$ 。近年来,在各向异性材料如Evans等制备的微孔聚合物等材料中,也发现了负泊松比效应的存在。Caddock和Evans<sup>[2,3]</sup>就发现某些通过特殊的加工方法得到的微孔材料呈各向异性,在某些方向上具有负泊松比效应,且其泊松比值比各向同性负泊松比材料更低。

### 1.2 负泊松比复合材料

在某些各向异性的纤维填充复合材料中,同样发现了负泊松比效应的存在。如Herakovich<sup>[10]</sup>发现在一些由纤维组成的多层次的(hierarchical)材料中,通过控制不同尺度叠层的次序,在垂直于纤维层的方向上,理论上可以得到泊松比为-0.81的材料。Miki和Morotsu<sup>[11]</sup>也认为通过控制叠层次序可使多层次材料具有负泊松比效应,但是他们的研究仅限于理论层面的分析。1992年,Milton<sup>[12]</sup>首先制备了在二维或三维方向上力学性质各向同性的多层次结构负泊松比复合材料,通过控制各层组分的尺寸及选择适当的连续相组分,获得了泊松比值接近于-1的负泊松比材料,实现了负泊松比复合材料理论向实验阶段的飞跃。

由于研究多孔状固体负泊松比材料的理论和模型已日趋成熟,近年来,关于负泊松比复合材料的研究逐渐多了起来。Theocaris等通过基于数字均一化理论<sup>[13]</sup>的有限元分析,认为纤维增强复合材料内部若包含横截面呈星形、具有内凹角的微孔结构单元时,可呈现出负泊松比效应。魏高原和Edwards<sup>[14]</sup>在理论上分析了当复合材料中分散相的体积分数超过某临界值且分散相的杨氏模量与基体的杨氏模量之比在某一范围内时,材料具有负泊松比效应,并通过平均场理论、二维平面、三维体积内交互作用理论<sup>[15~17]</sup>进一步得出在各向同性的球形包埋物中,当基体的泊松比值从1/2降到零,球形分散相出现负泊松比效应时所占的体积分数由0.4174降到零。Stagni<sup>[18]</sup>研究发现在多层中空纤维增强复合材料中,当中空纤维达到一定的体积分数时,能使其成为负泊松比材料,并同时

提高该材料的有效横向弹性模量。最近,杨鸣波<sup>[19]</sup>发现用共混法制备的特殊聚烯烃共混物也具有负泊松比性能,获得了一1.4的稳定负泊松比值,且材料的模量和强度较多孔状负泊松比材料有较大提高。

### 1.3 分子负泊松比材料

分子负泊松比材料包括一些具有特殊微观结构的聚合物<sup>[20]</sup>和某些晶体材料,如沸石<sup>[21]</sup>、二氧化硅晶体<sup>[22]</sup>和一些元素金属等<sup>[23]</sup>。

一般认为,大多数聚合物的泊松比在 $1/3$ 左右。但某些聚合物凝胶在严格的温度条件限制下,当发生相转变时表现出负泊松比效应<sup>[24]</sup>。1991年,Evans等在分子水平上设计了一种能够再现蜂巢状负泊松比材料内部所具有的内凹结构特征单元,同时经过理论分析得出该材料具有负泊松比效应<sup>[20]</sup>。此后,Griffin等把液晶高聚物作为分子结构的主链,同时主链上通过合成的方法连接上具有棒状结构的分子单元,这样的一种分子设计使材料在拉伸应力状态下横向发生膨胀,实现负泊松比效应,并通过X射线散射的方法得到了证实<sup>[25]</sup>。Bowick等通过蒙特卡洛(Monte Carlo)发现微观结构类似于鱼网状的二维结晶膜具有一0.37的泊松比值<sup>[26]</sup>。

有研究表明,纳米尺寸的分子链构成的呈多面体框架微观结构的沸石,由于包含分子尺度的规整空洞,具有负的泊松比值<sup>[21]</sup>。在对 $\alpha$ 方英石的研究中发现,构成这种晶体材料的子单元二氧化硅,在其旋转和分离的过程中,能够产生负泊松比效应<sup>[27]</sup>。在随后的研究中,研究人员进一步通过旋转四面体模型(rotating tetrahedral model)、膨胀四面体模型(dilating tetrahedral model)和协同四面体模型(concurrent tetrahedral model)分别计算得到 $\alpha$ 方英石的最小泊松比可达到 $-1$ <sup>[28]</sup>。

对于某些金属元素,研究发现同样具有负的泊松比值。Baughman指出,69%的立方晶系元素在 $[110]$ 晶面方向上具有负的泊松比<sup>[23,29]</sup>。Rovat通过正交晶弹性对称理论,模拟分析得到铜、铝、镍合金(CuAlNi)在晶面交角为 $(0, \pi/2)$ 之间具有负的泊松比值<sup>[30]</sup>。

## 2 负泊松比材料的微观结构与形变机理

### 2.1 多孔状负泊松比材料的微观结构与形变机理

近年来,科学家们通过先进的仪器设备<sup>[31]</sup>、有效的数学推导<sup>[32]</sup>、有限元分析<sup>[33,34]</sup>、蒙特卡洛法<sup>[35]</sup>、拓扑优化法(topology optimization)<sup>[36]</sup>等手段对负泊松比材料的微观结构与形变机理做了大量的工作。根据材料类型的不同,目前已提出了几种解释负泊松比效应的机理。可以明确的是,负泊松比材料所具有的独特性能取决于其特殊的微观结构。前文提到Lakes通过热机械处理的方法将普通泡沫制备成具有负泊松比效应的泡沫材料,通过观察该材料的微观形态,发现负泊松比泡沫与普通泡沫在内部微观结构上有很大差异,其内部泡孔单元的微观结构模型如图2所示。图2a为普通泡沫的泡孔单元,图2b为负泊松比泡沫的泡孔单元结构。其中,图2a所示的泡孔单元的基本形状中,AB段为泡孔单元的肋,t为肋厚,L段为肋长。可见,普通泡沫的微孔单元为六角蜂窝状直肋结构,而负泊松比泡沫的泡孔单元呈内凹结构。

Evans认为<sup>[37]</sup>正是由于通过热机械处理的方法<sup>[1]</sup>使得普通泡沫从一般的六角蜂窝状微孔单元结构到具有内凹结构<sup>[1]</sup>,肋与肋之间形成凹角的这一转变,才使材料呈现负泊松比效应。在外力的作用下,负泊松比泡沫的微孔单元通过肋的展开,肋角的改变,肋的薄厚变化以及肋与肋之间的褶曲(flexure)、弯曲(bend)、铰链(hinge)作用来实现负泊松比效应。Evans等通过光学显微镜研究了负泊松比泡沫在不同载荷下的微观结构,同时也比较了不同密度的泡沫在外力作用下微观尺寸的变化,认为在大应变下,肋的褶曲是呈现负泊松比效应的主要机制,其次是肋的层曲(buckling)。而在

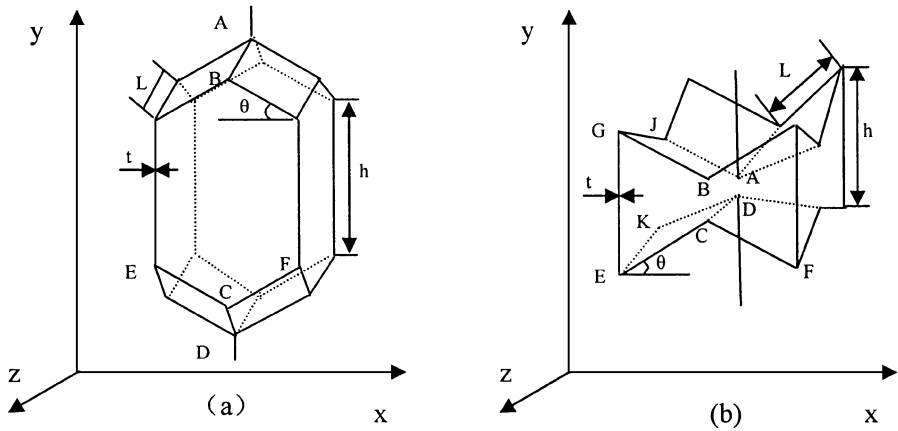


图 2 聚合物泡沫的泡孔单元模型

(a)普通泡沫 (b)负泊松比泡沫

剪切力的作用下,负泊松比效应主要通过肋的拉伸、铰链和弯曲三者的共同作用来实现,并在与外力呈  $45^\circ$  的方向上发生泡孔肋的弯曲失效。

Alderson 和 Evans 构建了节点(Nodule)-原纤(Fibril)几何模型<sup>[38~40]</sup>来阐释某些微孔聚合物,如 PTFE<sup>[2,3]</sup>, UHMWPE<sup>[5]</sup> 和 PP<sup>[41]</sup> 等具有负泊松比效应的机理,如图 3(a)所示。

这些负泊松比微孔聚合物是通过压缩、烧结及特殊口模的挤出三个步骤<sup>[5]</sup>制备得到的。研究结果<sup>[42]</sup>表明,原纤是由高度规整性的材料(如晶体)组成,与原纤连接的无定形不规则形状块体为节点。在低应变下,产生负泊松比效应是因为原纤之间在外力作用下发生铰链,从而引起节点自身位置的变化。但这个理论并不适合解释材料在大应变下为什么

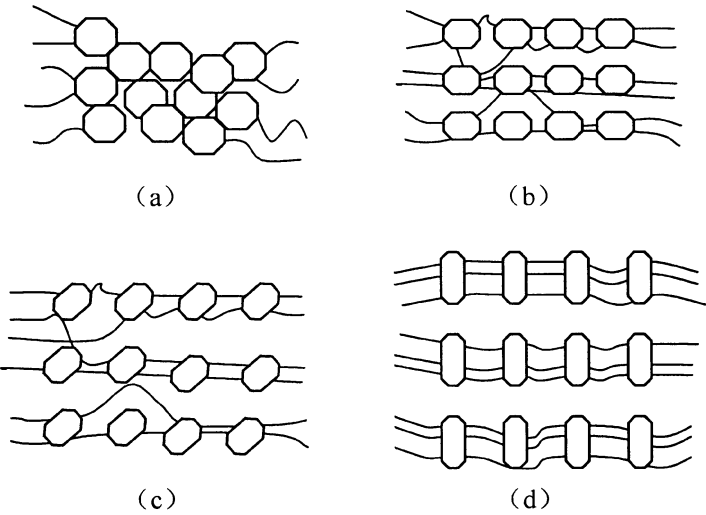


图 3 多孔聚合物负泊松比材料结构模型形变示意图

同样具有负泊松比效应。因此,Evans 提出了更为完善的三段式原纤拉伸理论<sup>[43]</sup>,该理论认为在原纤和节点之间还存在一个过渡区。在形变的第一阶段,由于节点尺寸要比过渡区和原纤尺寸大许多,所以节点所承受的力要相对小得多,因而过渡区的材料受力被拉伸至一个有序状态,并向原纤区转变,如图 3(b)所示。当所有的过渡区都被拉成纤维状时,第一阶段结束;在第二阶段中,由原纤组成的材料受到进一步拉伸,增加了原纤的取向度,模量上升,且原纤的杨氏模量在此阶段为最大值,如图 3(c)所示;最后,不再形变的高模量原纤带动相对较低模量的节点产生运动,进而带动节点发生旋转,最终导致负泊松比效应的产生,如图 3(d)所示。综上所述,微孔聚合物负泊松比效应产生的整个过程和节点与原纤之间产生的拉伸、弯曲、铰链的共同作用是紧密相关的。

此后,Alderson 等<sup>[44]</sup>在研究 PTFE、UHMWPE 的回弹韧性时,又提出了如图 4 所示的形变示意

图。由图可知,对普通烧结材料施以压应力的时候,横向发生膨胀,而对于负泊松比材料来说,由于其独特的节点-原纤微观结构,在受到压应力时,刚性原纤带动低模量节点产生向内的运动,使得材料在压缩时发生收缩,产生负泊松比效应。

## 2.2 分子负泊松比材料的微观结构与形变机理

分子负泊松比材料的微观结构大体上可划为两类,一类是通过聚合物分子设计而得到的微观结构;另一类就是晶体负泊松比材料微观结构。

Evans<sup>[20]</sup>从多孔固体材料内部的内凹微观结构单元中得到启发,设计了如图 5b 所示的分子水平上的负泊松比材料。Evans 认为,通过改变垂线和对角线上乙炔键连接的数目,理论上可以实现负泊松比效应,而在乙炔键的连接处加入苯环,是为了再现类似于图 5a 所示的二维平面结构。

此后,Griffin 等<sup>[25]</sup>认为化学合成蜂窝状结构的分子难度较大,于是在分子水平上设计了另外一种能够呈现负泊松比效应的微观结构,如图 6 所示。此结构的主链由液晶高聚物构成,在主链上连接上一定数量的,分子结构呈棒状(rods)的组分。若单位体积内聚合物分子链数目一定,而整个材料的体积又发生了膨胀,那么唯一的可能就是分子链间的距离变大,这就是聚合物分子产生负泊松比效应的基本机理。具体的,在拉应力作用下,聚合物主链的间距发生扩张,使原来大致平行于拉伸方向的棒垂直于主链或拉伸方向排列。当沿着拉伸方向的分子间范德华力不足以阻碍棒的重新取向,且棒又有足够的长度时,材料体积即发生膨胀,产生负泊松比效应。

晶体负泊松比效应的机理可由如图 7 所示的体心立方结构模型得到诠释<sup>[23,29]</sup>。图中,在 $[110]$ 晶面方向施加外力  $F$ , 2、4 号原子因此向外有一个位移,导致键角的减小,但由于原子间需要保持一个比较紧密的排列,那么 1、3 号原子必然向中心移动,结果是 $[\bar{1}\bar{1}0]$ 晶面方向上的 5、6 号原子向外位移,实现了负泊松比效应。

Grima 和 Evans 在解释某些晶体材料为什么具有负泊松比效应时,又提出了“格子旋转”(rotating squares)的理论模型<sup>[45]</sup>,如图 8 所示。

根据文献报道<sup>[46]</sup>,在某些无机晶体材料中,发现其内部正是这种坚硬的晶体通过彼此的铰链而作用在一起并呈方格状排列的微观结构。假设每个格子长为 1,格子与格子之间的夹角为  $\theta$ ,则每个单元内:

$$X_1 = X_2 = 2l[\cos(\theta/2) + \sin(\theta/2)] \quad (1)$$

根据泊松比的微分定义:

$$\nu = -d\epsilon_j/d\epsilon_i \quad (2)$$

式中:  $d\epsilon_i$  为沿着应力施加方向的微小形变增量;

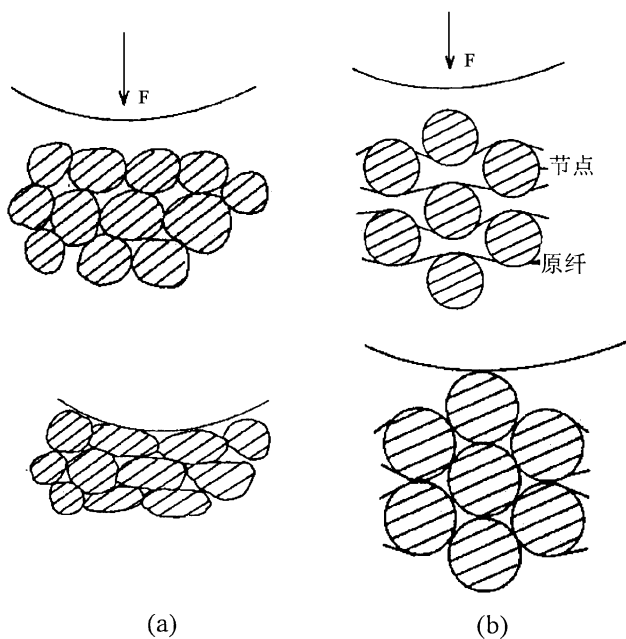


图 4 普通烧结材料与负泊松比材料压缩形变过程的结构响应

(a)普通烧结材料 (b)负泊松比材料

$$d\epsilon_i = dX_i/X_i \tag{3}$$

(式中  $dX_i$  是每个单元尺寸  $X_i$  在沿着受力方向的微小形变);

假设每个格子本身并不发生形变, 则:

$$d\epsilon_i = \frac{1}{X_i} \frac{dX_i}{d\theta} d\theta \tag{4}$$

$$(式中 \frac{dX_i}{d\theta} = l[\sin(\theta/2) - \cos(\theta/2)]) \tag{5}$$

联解(1)、(2)、(3)、(4)、(5)式, 计算得到材料的泊松比值  $\nu=-1$ 。

### 2.3 负泊松比复合材料的微观结构和形变机理

对于负泊松比复合材料的机理研究, 所提出的理论模型与机理解释目前还不是很多, 值得一提的是 1992 年 Milton 对其制备的二维负泊松比复合材料建立的“杆铰链框架”模型<sup>[12]</sup>, 如图 9 所示。Milton 认为这种材料的结构是多层次的, 材料的微观结构呈层次排列, 而每一层内又包含有层次排列的结构。图 9 中深色部分和浅色部分便是反映这种多层次的材料微观结构, 经简化, 得到图 9b 所示的框架模型。Milton 认为通过控制各层次成分的尺寸和排列顺序, 可以使材料有负的泊松比值。

### 3 负泊松比材料的机械性能

负泊松比材料由于其特殊的微观结构, 表现出与普通材料不同的物理机械性能及其它性能, 本文仅介绍其物理机械性能方面的研究。Evans 在研究普通泡沫与负泊松比泡沫材料的回弹韧性时<sup>[47]</sup>, 发现负泊松比泡沫的回弹韧性随落球实验的进行呈增高趋势, 而普通泡沫的杨氏模量增加到一定程度后, 材料迅速发生弹性崩塌。两者的载荷-位移曲线也显著不同, 这是因为其机械性能行为不仅依赖于泡孔单元肋的性质和落球的尺寸, 还取决于泡孔单元的几何尺寸。由于普通泡沫内部泡孔单元为六角蜂窝状结构, 载荷首先必须克服每根直肋固有的刚性, 因而使得材料的模量上升, 当泡孔的肋开始弯曲以至不能承受所施加的应力时, 发生弹性崩塌; 相反, 负泊松比泡沫的泡孔肋由于其特殊的加工方法, 受力前就具有内凹结构, 因而在落球的冲击下, 泡孔肋进一步弯曲, 发生局部密度增大, 密度的增加抵抗了外力的进一步作用, 使材料的杨氏模量维持不变。

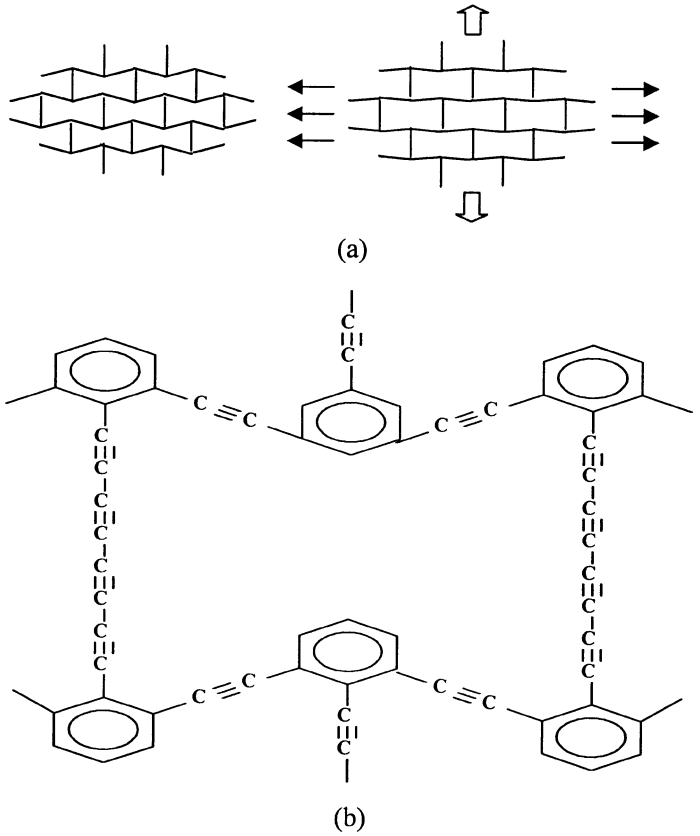


图 5 a 二维内凹蜂窝状结构 b 分子负泊松比材料微观结构

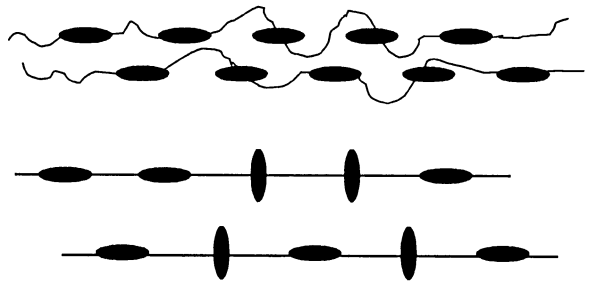


图 6 液晶聚合物分子负泊松比材料微观结构

普通泡沫和负泊松比泡沫的压缩、拉伸和剪切研究表明<sup>[48]</sup>,负泊松比泡沫在压应力的作用下,经历小应变后,即发生局部密度增大,使模量迅速提高。而要使普通泡沫的模量上升则需要更长的响应时间,但普通泡沫的杨氏模量在小应变下约为负泊松比泡沫模量的两倍。在拉伸作用下,同样发现在线性弹性区域内,两种材料存在这样的模量比值。而泡孔单元肋的尺寸和形状则是造成模量差异的主要原因。

静、动态剪切研究表明<sup>[49]</sup>,负泊松比泡沫的剪切模量更高,并且随着负泊松比效应的增加而提高。同时,负泊松比泡沫的损耗角正切要高于普通泡沫,意味着负泊松比泡沫可以作为优良的阻尼材料使用。

Scarpa 等<sup>[50]</sup>通过有限元分析方法研究负泊松比材料和普通

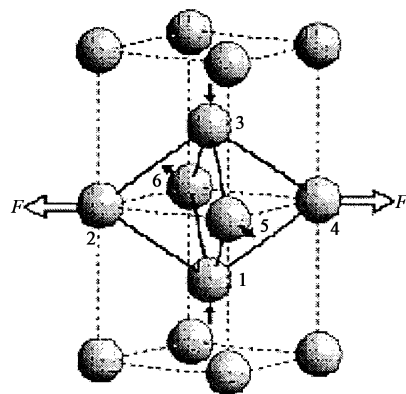


图 7 负泊松比晶体材料体心立方结构示意图

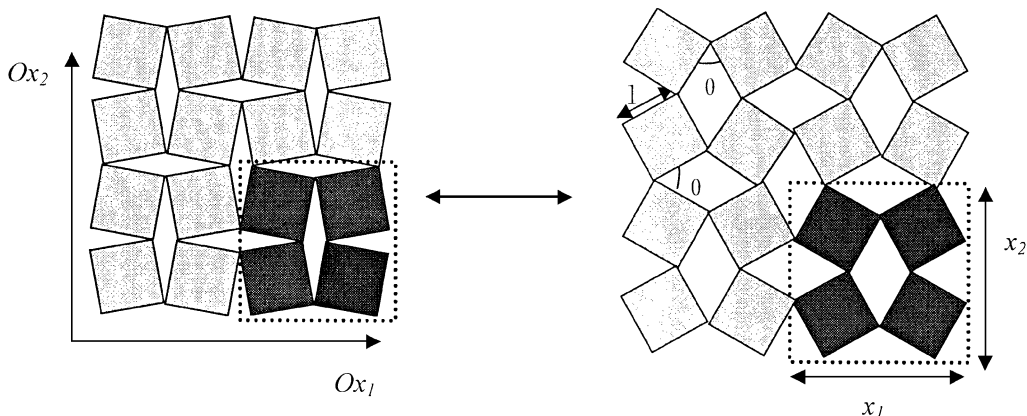


图 8 负泊松比晶体材料方格旋转模型示意图

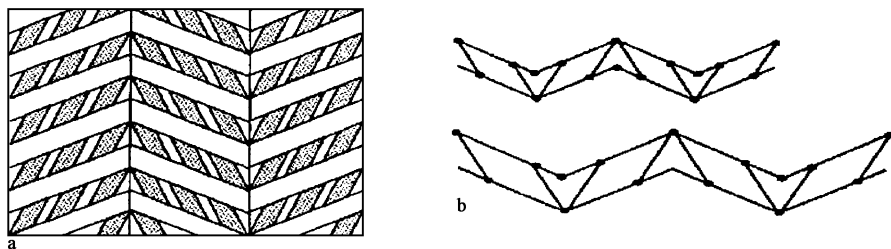


图 9 负泊松比复合材料多层次结构示意图  
(a)多层次结构 (b)杆铰链框架模型

材料的静态和动态粘弹行为时,发现具有内凹结构的负泊松比材料储能模量和静态模量更高,同时指出,负泊松比材料对于外界的应力损耗与微孔单元在材料中所占的体积分数以及每个单元上的应力分布有着很大的关系。

除了上述物理机械性能外,负泊松比材料具有更为优良的吸声能力。研究表明<sup>[51,52]</sup>,小泡孔型负泊松比材料对于 630Hz 以上的频率吸收性比大泡孔型负泊松比材料优良。在研究材料的截止频率<sup>[52]</sup>时,由于微观机理模型建立在泡孔肋的共振基础上,发现材料的截止频率随着泡孔肋弯曲程

度的增大而降低。

## 4 负泊松比材料的优势和应用前景

负泊松比材料由于具有不同于普通材料的独特性质,在很多方面具备了其他材料所不能比拟的优势,尤其是材料的物理机械性能有了很大的提高,如提高了材料的剪切模量、材料的抗缺口性能、抗断裂性能以及材料的回弹韧性。另外,由于材料的泊松比影响到应力波的传输和反射,应力的消除和在裂纹附近的应力分布,所以负泊松比材料适合制造紧固件或安全带<sup>[53]</sup>,在受外力时材料的横向膨胀可以抵消外力的作用,从而提高这些部件的抗负荷能力。进一步可以想见,如果将负泊松比材料用于医学领域,可以很大程度上缓解由于动脉硬化、血栓等疾病对人体造成的危险。当负泊松比材料用于制造夹芯板时<sup>[54]</sup>,由于受弯时是向外膨胀从而吸收更多的能量,而不是像泊松比为正值的材料那样向内凹陷被破坏,因此,由负泊松比材料制成的夹芯板其安全性大大提高。负泊松比泡沫还具有特殊的弹性和对声音的吸收能力<sup>[55,56]</sup>,可以用于制造隔音材料。最近有研究表明,具有负泊松比效应的微孔陶瓷材料,由于其微观结构在大幅热量变化下能够保持不变,可作内燃机中催化剂转化器的载体材料<sup>[57]</sup>。

最近的研究表明,引起负泊松比效应的机制还可以用来分析白矮星和中子星的核反应和地震行为<sup>[58]</sup>。如果材料的泊松比足够小,还可以用于缓冲材料,可以设想,若将此种材料用于军事领域,其意义是举足轻重的,显然具有负泊松比效应的材料对冲击能量的吸收要大于普通材料。负泊松比材料由于在外场作用下其微观结构本身被破坏的可能性大大低于普通材料,因此还可以作为非常优良的电磁材料<sup>[59]</sup>。

Alderson 已经成功制得了可用作增强纤维的细丝状和纤维状负泊松比聚合物材料,该材料除了可用于汽车车体、缓冲器用纤维增强复合材料外,还有广泛的用途,如用作防弹背心、护胫、护膝、护套等等。该材料与普通材料相比,能量吸收性质更优,纤维拔出阻力更大。加入了该纤维材料或由该纤维材料制得的编织结构抗压能力和低速冲击韧性都有所提高<sup>[60]</sup>。

Jones 在其发明的耳机中采用了负泊松比泡沫塑料,使耳机能更容易的包覆在具有不规则外形的耳廓上,降低了空气渗漏,并提高了耳部的舒适程度<sup>[61]</sup>。

总之,负泊松比材料不仅在生活用品如瓶塞、座垫<sup>[62]</sup>的制造等具有重要意义,同时对于国家的某些重要领域,如航空、国防、电子产业也有着巨大的潜在价值。

## 参考文献:

- [1] Lakes R S. Science, 1987, 235, 1038.
- [2] Caddock B D, Evans K E. J Phys D: Appl Phys, 1989, 22, 1877.
- [3] Evans K E, Caddock B D. J Phys D: Appl Phys, 1989, 22, 1883.
- [4] Alderson K L, Evans K E. Polymer, 1992, 33, 650.
- [5] Lakes R S. Advanced Materials, 1993, 5, 293.
- [6] Choi J B, Lakes R S. Int J Fract, 1996, 80, 73.
- [7] Kolpakov A G. Prikl Mat Mekh, 1985, 59, 969.
- [8] Almgren R F. J Elasticity, 1985, 15, 427.
- [9] Friis E A, Lakes R S, Park J B. J Mater Sci, 1988, 23, 4406.
- [10] Herakovich C T. J Compos Mater, 1985, 18, 447.
- [11] Miki M, Morotsu Y. JSME Int J, 1989, 32, 67.

- [12] Milton G J. *Mech Phys Solids*, 1992, 40; 1105.
- [13] Theocaris P S, Stavroulakis G E, Panagiotopoulos P D. *Archive of Appl Mech*, 1997, 67; 274.
- [14] Wei G Y, Edwards S F. *Physica A*, 1998, 258; 5.
- [15] Felderhof B U, Iske P L. *Phys Rev A*, 1992, 45; 611.
- [16] Felderhof B U. *Physica A*, 1994, 207; 13.
- [17] Torquato S. *Phys Rev Lett*, 1997, 79; 681.
- [18] Stagni L. *Composite Science and Technology*, 2001, 61; 1729.
- [19] 阳霞, 杨鸣波, 李忠明等. *高分子学报*, 2003, 2; 221.
- [20] Evans K E, Nkansah M A, Hutchinson I J, et al. *Nature*, 1991, 353; 124.
- [21] Amir Y H, Donald J, Weidner, et al. *Science*, 1992, 257; 650.
- [22] Grima J N, Jackson R, Andrew A, et al. *Adv Mater*, 2000, 12; 1912.
- [23] Baughman R H, Shacklette J M, Zakhidov A A, et al. *Nature*, 1998, 392; 362.
- [24] Hirotsu S. *Macromolecules*, 1990, 23; 903.
- [25] He C B, Liu P W, Griffin A C. *Macromolecules*, 1998, 31; 3145.
- [26] Bowick M, Cacciuto A, Thorleifsson G, et al. *Phys Rev Lett*, 2001, 87(14); 148103—1.
- [27] Alderson A, Evans K E. *Phys Chem Miner*, 2001, 28; 711.
- [28] Alderson A, Evans K E. *Phys Rev Lett*, 2002, 89(22); 225503—1.
- [29] Baughman R H, Stafström S, Cui C X, et al. *Science*, 1998, 279; 1522.
- [30] Rovati M. *Scripta Materialia*, 2003, 48; 235.
- [31] Brandel B, Lakes R S. *J Mater Sci*, 2001, 36; 5885.
- [32] Masters I G, Evans K E. *Composite Structures*, 1996, 35; 403.
- [33] Matsuoka T, Yamamoto S, Takahara M. *J Mater Sci*, 2001, 36; 3627.
- [34] Yang D U, Lee S, Huang F Y. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2003, 39; 187.
- [35] Wojciechowski K W, Tretickov K V. *Computational Methods in Science and Technology*, 2000, 1; 25.
- [36] Yin L Z, Yang W. *Computers and Structures*, 2001, 79; 1839.
- [37] Chan N, Evans K E. *J Mater Sci*, 1997, 32; 5725.
- [38] Alderson K L, Evans K E. *J Mater Sci*, 1993, 28; 4092.
- [39] Neale P J, Alderson K L, Pickles A P, et al. *J Mater Sci Lett*, 1993, 12; 1529.
- [40] Evans K E. *J Phys D Appl Phys*, 1989, 22; 1870.
- [41] Pickles A P, Alderson K L, Evans K E. *Polym Eng Sci*, 1996, 36(5); 636.
- [42] Alderson A, Evans K E. *J Mater Sci*, 1995, 30; 3319.
- [43] Alderson K L, Evans K E. *J Mater Sci Lett*, 1998, 17; 1415.
- [44] Alderson K L, Fitzgerald A, Evans K E. *J Mater Sci*, 2000, 35; 4039.
- [45] Grima J N, Evans K E. *J Mater Sci Lett*, 2000, 19; 1563.
- [46] Grima J N, Alderson A, Evans K E. In *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Materials Chemistry Conference*, Dublin, July 1999, p. 81.
- [47] Chan N, Evans K E. *J Cell plas*, 1998, 34(3); 231.
- [48] Chan N, Evans K E. *J Cell plas*, 1999, 35(2); 131.
- [49] Chan N, Evans K E. *J Cell plas*, 1999, 35(2); 167.
- [50] Scarpa F, Remillat C, Landi F P, et al. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2000, 3989; 336.
- [51] Howell B, Prendergast P, Hansen L. *Applied Acoustics*, 1994, 43 (2), 141.
- [52] Chen C P, Lakes R S. *J Eng Mater Tech, Transactions of the ASME*, 1996, 118(3), 285.
- [53] Choi J B, Lakes R S. *Cellular Polymers*, 1991, 10(3), 205.
- [54] Lakes R S. *Journal of Mechanical Design, Transactions Of the ASME*, 1993, 11; 5696.
- [55] Chen C P, Lakes R S. *Cell Polym*, 1989, 8; 343.
- [56] Scarpa F, Massimo R, Francesco S. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2002, 4697; 63.
- [57] Huang X, Blackburn S. *Key Engineering Materials*, 2001, 206; 201.
- [58] Baughman R H, Rantas S O, Stafström S, et al. *Science*, 2000, 288; 2018.
- [59] Smith F G, Scarpa F, Burriesci G. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2002, 4701; 582.

- [60] Alderson K L, Simkins V R. US, WO0053830, 2000.  
 [61] Jones O, US, 6,412,593, 2002.  
 [62] Wang Y C, Lakes R S. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39;4825.

## Advances in Negative Poisson's Ratio Materials

SHI Wei, YANG Wei, LI Zhong-ming, XIE Bang-hu, YANG Ming-bo

(College of Polymer Science and Engineering, Sichuan University, State Key Laboratory of Polymer Materials Engineering, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** A novel class of materials exhibiting negative Poisson's ratio—a popular research field of materials science in recent years, is presented. By analyzing the microstructure and deformation mechanism of negative Poisson's ratio materials and comparing with the conventional polymer materials, detailed interpretation of special physical properties are given in this paper. Meanwhile, it should be pointed out that this kind of materials has the bright prospect of applications and practical significance.

**Key words:** Negative Poisson's ratio; Microstructure; Deformation mechanism; Properties; Applications

(上接第 47 页)

- [21] Reneker D H, Chun I. Nanotechnology, 1996,7;216.  
 [22] Reneker D H. J Appl Phys, 2000,87(9);4531.  
 [23] Wang X Y, Drew C, Lee S H, et al. Nano Lett, 2002,2(11);1273.  
 [24] MacDiarmid A G, Jones W E, Pinto N J, et al. Synth Met, 2001, 119;27.  
 [25] Li W J, Laurencin C T, Catterson E J, et al. J Biomed Mater Res, Part A, 2002,60(4);613.  
 [26] Bognitzki M, Hou H, Ishaque M, et al. Adv Mater, 2000,12(9);637.  
 [27] Hou H Q, Jun Z, Reuning A, et al. Macromolecules, 2002,35;2429.  
 [28] Caruso R A, Schattka J H, Greiner A. Adv Mater, 2001, 13(20);1577.  
 [29] Gibson P W, Shreuder-Gibson H L, Rivin D. AIChE J, 1999,45;190.  
 [30] Gibson P W, Shreuder-Gibson H L. US Army Soldier and Biological Chemical Command Technical Report, Natick/TR-99/016L 1999.  
 [31] Gibson P, Gibson H S, Rivin D. Coll and Surf, A;Physicochem Egin Asp, 2001,187-188;469.  
 [32] Burghoef M M, Vancso G J. Adv Mater, 1999,11(16);1362.  
 [33] Kenawy E R, Bowlin G L, Mansfield K, et al. J Controlled Release, 2002,81;57.  
 [34] Bognitzki M, Czado W, Frese T, et al. Adv Mater, 2001,13(1);70.

## Electrospinning and Ultrafine Polymer Fibers

ZENG Jing, CHEN Xue-si, JING Xia-bin

(State Key Laboratory of Polymer Physics and Chemistry, Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130022, China)

**Abstract:** Electrospinning is a simple and low-cost technology to prepare ultrafine polymer fibers. The concept and research progress of electrospinning, and applications of electrospun fibers are described in detail. Brilliant prospect is made of the applications of electrospun ultrafine fibers in various fields.

**Key words:** Electrospinning; Ultrafine fibers; Applications