

阻尼材料研究进展

王海侨, 姜志国, 黄 丽, 袁海宾, 李效玉^{*}

(北京化工大学纳米材料先进制备技术与应用科学教育部重点实验室,
材料科学与工程学院, 北京 100029)

摘要:对各种阻尼材料的研究进展进行了概述, 内容涉及材料阻尼性能的评价方法, 各种材料的阻尼机理及其影响因素, 还简单介绍了先进的阻尼材料——智能阻尼材料及先进的阻尼技术——等离子真空沉积技术的研究概况。

关键词:阻尼; 评价; 结构; 材料

引言

阻尼减振降噪技术是有效控制结构振动和结构噪声的方法之一, 目前越来越成为工业发达国家的一个热门研究课题。阻尼材料是一种能吸收振动机械能并将之转化为热能而耗散的新型功能材料, 它利用阻尼材料在变形时把动能变成热能的原理降低结构的共振振幅, 增加疲劳寿命和降低结构噪声。各类阻尼材料已广泛应用于许多领域, 包括导弹、卫星、飞机、舰船、汽车工业中等, 而且随着现代工业的不断发展, 对阻尼材料的需求也日益增加。

1 阻尼材料性能评价

由于阻尼材料内部结构复杂, 因此材料的阻尼性能也是很复杂的, 建立一个精确的数学模型去评估材料的阻尼性能非常困难。目前对阻尼材料的评价还缺乏一个统一的标准。比较常见的是动态力学谱方法。由于阻尼材料在交变应力作用下发生的应变滞后现象和力学损耗是其产生阻尼的作用的根本原因, 因此可以用材料在应力作用下的损耗因子 $\tan \delta$ 来表征材料力学损耗或内耗的大小, 即

$$E^* = E' + i E''$$
$$\tan \delta = E'' / E'$$

式中 E' ——实数模量, 又称储能模量, 表示应力作用下能量在试样中的储存;

E'' ——虚数部分, 表示能量的损耗, 称为损耗模量;

i ——复数;

δ ——应变落后于应力的相位角, 也被称为力学损耗角;

$\tan \delta$ ——损耗因子。

LA 法是评价高分子材料阻尼性能的另一种方法。由于高分子材料的阻尼性能取决于体系中各个组分的分子结构, 因此美国 Lehigh 中心的科学工作者在系统地研究了高聚物分子结构中不同分子基团及其在分子链上所处的位置对聚合物阻尼值的贡献之后, 建立了一个材料的阻尼性能与其分子基团之间基本关系的定量公式^[1,2]。

$$LA = \sum_{i=1}^n \frac{(LA_i) M_i}{M} = \sum_{i=1}^n \frac{G_i}{M}$$

式中: LA_i ——第 i 个分子基团对损耗模量曲线下面积的贡献;

作者简介:王海侨, 40, 博士, 教授, 1999 年 5 月至 2001 年 6 月在清华大学高分子所做博士后研究, 主要研究方向为功能高分子材料的合成、制备与应用。

^{*} 通讯联系人

G_i ——第 i 个分子基团的分子损耗常数;
 M_i ——第 i 个分子基团的分子量;
 M ——高聚物的分子量。

不同基团处于分子中不同的位置时的 LA 值可从 Sperling 等制作的表中查到,也可以使用不同的方法来确定^[3]。一般来说,有体积较大侧基和极性侧基的聚合物具有较好的阻尼性能,侧基的极性以及聚合物内部的氢键相互作用也有助于提高体系的阻尼性能。但是对相分离材料,如存在晶区,将会降低材料的阻尼性能。该理论已被广泛的应用于计算一些均聚物和聚合物共混体系的阻尼值^[4~7]。很明显,这个方法为将阻尼材料的研制上升到分子设计的水平奠定了理论基础。

LA 法是耗散模量温度曲线($E'' \sim T$)下包括的面积,因而此法与损耗因子 $\text{tg } \delta$ 是有一定差异的。

2 阻尼结构

一般来说,阻尼材料在使用结构上有两种处理方式,如图 1 所示。一种是自由阻尼(或扩展阻尼),即直接将阻尼材料粘附到需要作减振处理的结构件表面上,当结构件弯曲振动时,通过阻尼层材料的拉伸形变来消耗能量;另一种是约束阻尼,即在阻尼层上再粘附一层高模量的刚性约束层材料,当结构件弯曲时,通过阻尼层材料的剪切形变来消耗能量以达到减振降噪作用。自由阻尼的效果可由损耗模量 E'' 反映,约束阻尼的效果可由损耗因子 $\text{tg } \delta$ 来评估,即 E'' 和 $\text{tg } \delta$ 越大,则阻尼效果越好。自由阻尼比约束阻尼具有结构简单、施工便利的优点,但减振降噪效果却远不及约束阻尼结构^[8,9]。

约束阻尼是提高粘弹性表面涂层阻尼性能的一个非常有效的方法。这个方法最大的局限性是在弯曲和复杂的表面上的应用。一个原因是在这些复杂表面上施工困难,其次是涂层质量一般不好,容易起皮脱落。这种情况特别容易发生在恶劣的气候环境下。针对这种情况,最近人们将等离子沉积技术使用到了复杂表面结构材料的约束阻尼处理上。其具体做法是,使用等离子真空沉积技术先将软的粘弹材料沉积在基材上,接着在其上再沉积一层坚硬的陶瓷层。等离子真空沉积技术保证不同的界面间有着很好的界面强度,也使得在复杂表面上涂层的施工更加方便。使用最新的等离子真空沉积技术加工的阻尼层厚度可以控制在 $25 \sim 50 \mu\text{m}$,而坚硬的约束层的厚度约为 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 。目前的研究结果显示,以这种技术加工的涂层确实具有相当好的阻尼性能。

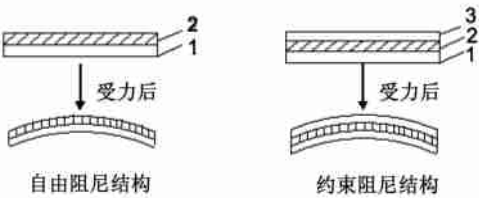


图 1 阻尼结构示意图

1. 结构件; 2. 阻尼层; 3. 约束层

Figure 1 Schematic diagram of damping structure.
1.framework; 2.damping layer; 3.constrained layer

3 阻尼材料

阻尼材料可分成粘弹性阻尼材料、复合阻尼材料、高阻尼合金材料、陶瓷类耐高温阻尼材料和智能阻尼材料等。本文将侧重介绍粘弹性阻尼材料、复合阻尼材料和智能阻尼材料。

3.1 粘弹阻尼材料

粘弹阻尼材料是一种兼具粘性液体在一定流动状态下损耗能量的特性和弹性固体材料贮存能量的特性,也是目前应用最为广泛的一类阻尼材料,而高聚物则是工程上应用最广泛的粘弹性材料。对高聚物来说, E'' 和 $\text{tg } \delta$ 在其玻璃化转变温度(T_g)附近会达到最大值。这是因为当高聚物处于低温或高频的玻璃态时,高分子链段的自由运动是冻结的,形变主要是由高聚物中的键长和键角的变化而引起的,模量高,不能耗散机械能,只能将机械能作为位能贮存起来,损耗因子小;当其处于高温和低频的橡胶态时,链段的运动是协同运动,模量低,也不能耗散机械能,只能将机械能转变为形变能贮存起来,损耗因子也很小。介于这两者之间的是玻璃化转变区,或称为粘弹态,此时链段的运动和外力发生谐振,内摩擦力很大,从而将一部分机械能变成热能耗散掉,损耗峰出现最大值。图 2 是在特定频率下聚合物的动态力学性能随温度的变化曲线。

很明显,高聚物玻璃化转变的温域直接决定了材料的有效阻尼温域。可是对均聚物或无规共聚物来说,其玻璃化转变的温域一般只有 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$,所以其有效的阻尼温域也就只有 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ ^[10~13]。而振动一般是在一个较宽的温度范围内发生的,频率也存在一个高低分布的问题,即实际的应用要求材料的阻尼温域要达到 $60\sim 80^{\circ}\text{C}$,同时其 $\text{tg } \delta$ 要大于 0.3 ^[14]。另外,橡胶的玻璃化转变温度 T_g 一般远低于室温,而塑料的 T_g 又远高于室温,距实际使用温度相差太远,因此绝大部分均聚物是不能作阻尼材料单独使用的。所以在设计高聚物阻尼材料时,一方面要使材料的 T_g 与材料的实际使用温度相适应,同时还要尽量扩大材料的玻璃化转变温度区域。具体来说,拓宽聚合物玻璃化转变温域的方法主要有:(1)加入增塑剂或填料;(2)共混或嵌段、接枝共聚;(3)生成互穿聚合物网络(IPN)。

3.1.1 加入增塑剂或填料 这种方法所能拓宽的温域非常有限。其中,加入增塑剂的手段能够降低材料的玻璃化转变温度,而主要目的是调节材料的 T_g 使其与实际使用温度相匹配。加入填料的目的是使基体与填料之间有足够的粘合,使链段松弛时间增加,从而可以使其 T_g 提高。但要注意的是,填料对聚合物材料阻尼性能的影响有两方面。一方面,填料填充了聚合物分子链段间的间隙,使自由体积减小,限制了分子链段的运动,降低了阻尼值,起副作用;另一方面,在玻璃化转变区内,填料与聚合物及填料之间的内摩擦作用随分子运动的加剧而增大,从而提高了材料的阻尼值^[10]。究竟哪一种作用占优势,取决于填料本身的结构。如片状结构的云母填充于 IPN 中,可以有助于增加层片间聚合物的剪切形变,显示了一种微约束层阻尼机理,使聚合物的阻尼性能和阻尼温域都得到改善。但同是片状的蛭石却反而使体系阻尼性能有所下降^[15~17]。

3.1.2 共混或嵌段、接枝共聚 共混的方法简单易于操作,但能拓宽的温域有限。将两种或两种以上的 T_g 成系列的半相容聚合物以一定的方式共混(如干粉共混、熔体共混、溶液共混和乳液共混等),可以在特定温度内得到较强的阻尼作用^[18~20]。有人将 T_g 不同的多种聚合物与适当的增溶剂共混,也得到了具有平滑且较宽的内耗峰的阻尼材料^[21]。

将不同的聚合物共聚生成嵌段或接枝共聚物,也是常用来拓宽材料使用温度范围的方法。相对于简单物理共混来说,化学共聚的方法可以在一定程度上改善不同聚合物间的相容性,使材料的阻尼性能得到改善。但这种方法的主要问题是两主转变区之间的区域阻尼值较低。

对宽温域阻尼材料的设计,要求阻尼材料组分的 T_g 相隔要远。两组分的复合材料的阻尼温域不可能超过组分中最大 T_g 的上限和低于组分中最小 T_g 的下限,而且形成复合体系后,复合材料的 T_g 会发生内移,所以在设计材料时,两组分的 T_g 值相隔要尽量远一些。

不同聚合物间的相容性对共混或共聚制备的材料阻尼性能有着极大的影响。图 3 示意出各种不同相容性聚合物合金体系的阻尼行为。由图上可以明显看到,不同聚合物组分间完全相容或完全不相容的材料阻尼性能都不是很理想,只有具有合适的微观相分离结构的材料才具有良好的阻尼性能。

3.1.3 生成互穿聚合物网络 共混或共聚的方法虽然可以扩大材料的阻尼温域,但阻尼效果一般不是很理想。目前应用最为广泛的拓宽材料阻尼温域的方法是选用适当的组分,通过控制组分间的相互作用,相畴尺寸,合成出半相容的 IPN 材料,中间相过渡区域的阻尼值得到提高,从而达到宽温域、高阻尼的效果。互穿聚合物网络技术由于交联网络之间的相互贯穿、缠结而产生强迫互溶和协同效应,使 IPN 材料具有宏观上的不分相和微观上的相分离的特点,从而为制备宽温宽频阻尼材料创造了条件。IPN 技术相对于前几种方法来说,对提高材料的阻尼性能和拓宽阻尼温域更加理想,因此在阻尼材料的制备中占有重要的地位。国内外对此领域的研究也表现得最为活跃。目前其主要研究集中在聚氨酯(PU)/环氧树脂(EP)、PU/丙烯酸树脂(PAC)、PAC/PAC、聚苯乙烯(PS/PAC)等领域^[22~29]。影响 IPN 阻尼性能的因素较

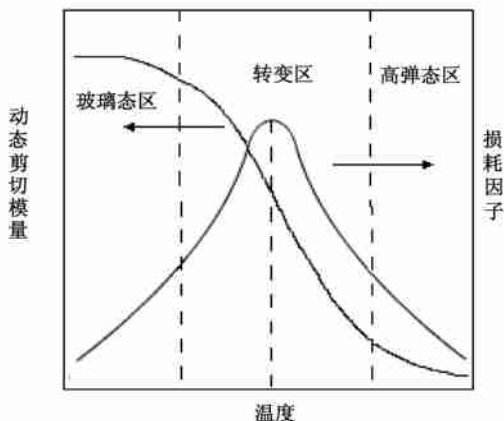


图 2 聚合物动态力学性能随温度的变化
Figure 2 Variety of dynamic mechanical property of polymers with temperature

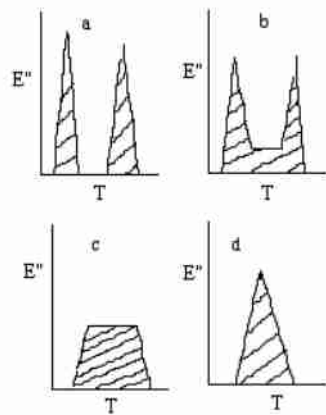


图 3 不同相容性的二元聚合物合金的损耗模量 E'' 和温度 T 的关系
a· 一完全不相容体系;b· 一有限相容体系;c· 一具有细微多相形态结构的部分相容的 IPN;d· 完全相容体系
Figure 3 Relationship of loss modulus E'' with temperature of dipolymer alloys with different compatibility
a· complete incompatible system; b· limited compatible system; c· partial compatible
IPN with polyphase structure; d· homogeneous system

多,主要有组分间相容性及其相互作用的影响、交联剂种类和交联剂用量的影响;不同网络间配比的影响,合成时加料方式和加料顺序的影响以及乳化剂种类和用量的影响等。

组分间完全相容的 IPN,在性能上类似于单组分聚合物,只是阻尼温域有所提高;完全不相容的组分形成的 IPN 类似于共混的情况,虽然可以拓宽材料的阻尼温域,但中间区域则呈现出较低的阻尼性能。只有不同组分间的恰当的网络相容性,才能使组分间过渡区域的阻尼值得到有效地提高。这是因为,在动态力学谱上,平台峰的中间部分实际上是两网络间界面过渡层贡献的结果。相容性太好,则玻璃化转变温度内移严重,阻尼温域减小;相容性太差,动态力学谱上呈两个双峰,中间区域阻尼值下降(见图 3)。另外,实验发现,两网络间分子链间的相互作用和分子链上极性基团都有助于提高材料的阻尼性能。

交联剂种类对 IPN 阻尼性能影响的认识,目前还主要处于经验摸索阶段。交联剂用量的大小则直接反映网络间的交联密度。适度的交联可以提高网络间相互缠结、相互锁合的能力,阻止聚合过程中由于相对分子量的增加而导致的相分离,增加组分间的相容性,并起协同作用,使 IPN 的阻尼性能提高;交联密度太低,则分子链段的活动能力较强,网络间的强迫互锁作用下降,体系相容性变差;交联密度太大,则限制了第二网络单体的渗透,同样使体系相容性下降,同时由于链段运动困难,必然导致阻尼值下降^[14]。另外,交联密度的变化视不同的体系,对处于不同层的网络有着不同的影响。

网络中不同单体的对比对材料阻尼性能也有很大的影响。只有在恰当的单体配比的情况下,网络中各组分互穿的程度高,材料阻尼性能和阻尼温域都能达到一个最佳值。一般而言,增加第一网络中硬单体的相对含量,可以提高体系高温区域的阻尼性能,增加第二网络中软单体的相对含量,可以提高体系低温区域的阻尼性能^[30]。

加料方式和顺序对材料阻尼性能的影响也不容忽视。加料方式和加料顺序不同,直接影响网络结构,相畴的大小,因此导致材料阻尼性能发生改变。

3.2 复合阻尼材料

复合阻尼材料是指用具有高力学强度和高损耗因子的聚合物作基体,用各种纤维增强的材料。其阻尼或损耗能量的机理主要有^[31,32]:

(a) 聚合物基体和/或纤维材料的粘弹属性赋予材料以阻尼性,其中,大部分复合材料的阻尼性能主要是由基体贡献的,而对于像碳纤维和 Kevlar 这些具有高阻尼性能的纤维来说,对复合材料的阻尼性能的贡献也是不容忽视的;

(b) 中间相产生的阻尼性能。中间相是与纤维轴同向的邻近纤维表面的区域^[33]。中间相具有相当的厚度,其性能完全不同于嵌入的纤维和基体材料。中间相的属性或弱或强的影响着其机械性能,从而影响材料的阻尼性;

(c)材料损坏引起的阻尼。它主要包括两类: i. 在基体和纤维界面间无束缚区域的滑动或分层产生的摩擦阻尼; ii. 由基体裂缝或断裂的纤维等引起能量损耗产生的阻尼。据报道,基体和纤维间的滑动可使材料的阻尼性能提高几倍;

(d)粘塑阻尼。在大振幅和高应力的水平下,由于在纤维间存在的局部应力和应变集中,特别是热塑性复合材料呈现出明显的非线性阻尼行为;

(e)热塑阻尼。它是由复合材料中的压力区和张应力区的循环热流引起的。热塑复合材料表现出更大的温升现象,并且是施加负荷、频率、样品厚度和循环次数的函数^[34]。

聚合物复合阻尼材料主要品种有 Kevlar/环氧树脂复合材料,短碳纤维增强复合材料和碳纤维增强塑料复合材料等。

3.3 智能阻尼材料(smart materials)

粘弹性阻尼材料及其常用的阻尼技术具有动态力学性能不可调控的特点。材料的性能和施工处理方式决定了减振结构的动态力学参数。而在很多的使用场合,环境的温度变化和引起结构振动响应变化的情况是经常见到的。这就要求阻尼材料的动态力学性能能够随结构响应振动变化而自我调整,并使之与不同的结构响应振动变化相匹配,于是智能阻尼材料应运而生。智能阻尼材料是一类能从自身表层或内部获取关于环境条件及其变化信息,并进行判断、处理和做出反应,以改变自身结构与阻尼功能并使其很好地与外界协调,具有自适应性的材料^[35]。

近 20 年来,人们对将机械行为与电、磁性能有机结合的智能材料所显现出的阻尼性能表现出极大的兴趣。这些材料在被动或主动模式下的智能阻尼装置中(见图 4),都能够起到减振作用,与传统的阻尼材料结合起来使用可以显著提高材料的阻尼温域。此类材料的主要问题是制备和施工工艺复杂,成本较高,但是近年来,科学家们已经成功开发出一些具有良好阻尼性能,同时制备和施工工艺简单的新型智能阻尼材料^[36]。

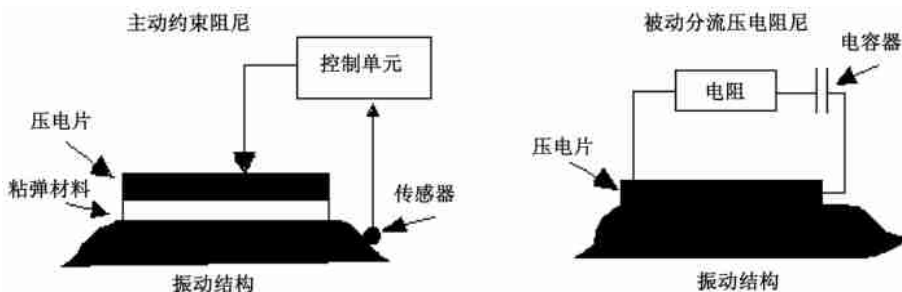


图 4 智能阻尼装置

Figure 4 Smart damping devices

3.3.1 梯度材料 将梯度聚合物材料作为涂层材料来使用,其机械性能如杨氏模量、阻尼因子等将至少沿着一个方向如厚度方向发生改变。其性能的变化可能是连续的,也可能是非连续的。非连续的梯度层可以通过使用多层结构,采用不同的聚合物组成来连续的增加其硬度而获得。改变各层中聚合物的组成比例就能够调整其性能。一般来说,使用这种方法,可以获得任何期望的性能分布。材料性能真正连续的梯度分布可以通过一种扩散加工工艺而一步获得。使用这种扩散加工工艺,线性或指数梯度分布的材料都能够得到。大量的实验数据表明,梯度材料要比单一的阻尼聚合物表现出更大的阻尼温域,但是其代价是材料的阻尼值有一定的下降。

3.3.2 液晶聚合物(LCPs)阻尼材料 LCPs 作为阻尼材料最吸引人的地方是其处在中间相时表现出各向异性,而处于橡胶态时又回复到各向同性。因为 LCPs 是棒状结构,当它们处于中间相时,所有的分子都趋于沿棒的轴线方向取向。当聚合物分子受到振动而产生额外运动后,棒状分子能发生旋转重排而产生阻尼效果。英国剑桥大学的科学家们发现 LCPs 阻尼材料要比传统的阻尼聚合物在大得多的温域内具有更高的阻尼值。

3.3.3 智能磁致伸缩(MS)阻尼材料 磁致伸缩材料将材料的机械性能与材料的磁性能结合于一体。对材料施加一个磁场可以引起材料发生形变(焦耳效应),反之材料形变也会产生磁场(维拉利效应)。在自

然状态下,磁畴“原子或晶体水平的磁性”是任意取向的,不产生净磁或形变。然而在机械负荷或磁场作用下,为了减小内能的变化,磁畴将发生运动。对材料施加一定的应力或磁场,就能够引起很大的净畴(net domain)运动而产生一个可观的磁场或形变。

作为阻尼涂料,MS 材料既可以在被动模式下(此时能量的吸收是由滞后引起的),也可以在主动模式下使用。在被动模式下,MS 材料的阻尼作用源于磁畴内壁甚至整个磁畴的运动。据报道,一种片状 MS 材料 Terfenol-D(一种铁、铋、镓合金)可以吸收将近 80%的振动能,而且硬度和粘弹性都要高于普通粘弹材料。如果将这种材料填充到阻尼涂料中,其性能将会更好。另外,这种材料的阻尼性能与频率没有关系,仅仅依赖于振幅的大小。目前 Terfenol-D 存在的最大问题是拉伸强度较差,使其实际的应用受到一定的局限。

3.3.4 压电阻尼材料 压电阻尼材料是在高分子材料中填入压电粒子和导电材料,材料一旦受到振子的干扰,压电粒子就能将振动转换成电荷,导电粒子再将其转换为热而散发出去,发挥减振作用。

当系统的振动响应增大时,系统的加速增大,系统中的阻尼减振器承受的压力也增大,因而电荷量也增加,更多的振动被转换为热能耗散掉。因而这种压电阻尼材料的最大特点是其阻尼因子是可控的,但这种阻尼材料只能用于兼作承力元件的离散阻尼处理。

3.3.5 电流变阻尼材料 电流变流体现象于 1947 年就由 Winslow 首次发现。但是对电流变流体材料的研究则是近十年的事。约上世纪 80 年代初美国科学家发现由极小的极性粒子与绝缘介质构成的悬浮液,在外加电场的作用下其粘流行为可随场强度发生变化,其悬浮液的物理状态可由液体变成半固体,甚至是固体。这个变化是在瞬间完成的可逆变化。在这个进程中材料的损耗因子可由 0 急剧增至高达 15~18。

4 结语

阻尼材料是近年来发展起来的一种减振降噪材料。合理使用阻尼材料可以提高各类机械产品及工程结构的抗振性和稳定性,延长其工作寿命,提高产品的质量,也能有效地降低噪音,防止噪音对环境的污染。随着高新技术的发展,对阻尼材料的需要愈来愈高。研制与开发综合性能优异的阻尼材料已成为研究热点。IPN 技术、智能材料以及新型的阻尼结构的出现为阻尼材料提供了广阔的发展前景。可以预见,为了进一步提高材料的阻尼性能,能将材料的电-力学和磁-力学性能有机结合的新型材料将是今后阻尼领域一个重要的发展方向;同时,设计出能在分子水平上复制出现有阻尼材料的力学性能,有效减少阻尼设备尺寸的阻尼材料则是一个更具挑战性和实用价值的工作。

参考文献:

[1] Chang M C, Sperling L H. J Polym Sci, Part B: Polym Phys, 1988, 26: 1627.
[2] Fay J J, Marphy C J, Thomas D A, Sperling L H. Vibration and Damping ' 89, 1989: BAA-1.
[3] 万里鹰,肖凌. 高分子材料科学与工程, 1999, 15(2): 1.
[4] Foster J N, Sperling L H, Thomas D A. J Appl Polym Sci., 1987, 33: 2637.

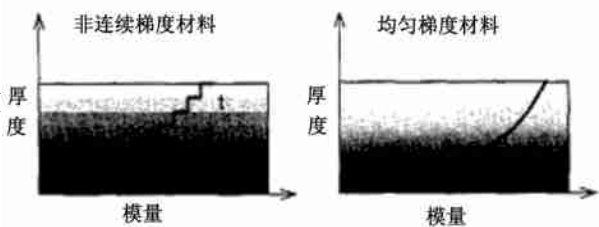


图 5 梯度材料的示意图
Figure 5 Profiles of gradient materials

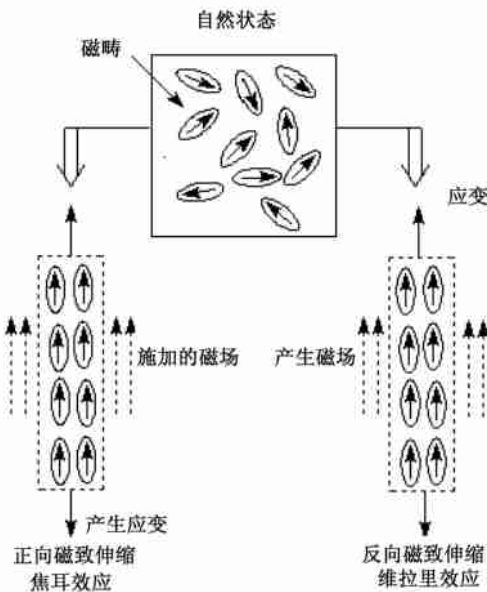


图 6 材料的磁致伸缩示意图
Figure 6 Schematic representation of magnetostrictive materials

- [5] Widmaide J M, Sperling L H. J Appl Polym Sci, 1982, 27, 3515.
- [6] Hourston D J. J Appl Polym Sci, 1984, 29, 2969.
- [7] Hermant I, Damyanidn M, Meyer G C. Polym, 1983, 24, 1419.
- [8] 吴崇键. Inter Noise, 1987, 87(1), 663.
- [9] Ungar E E. Noise and Vibration Control. Beranek LL, ed. New York: McGraw-Hill, 1971.
- [10] 曾威, 李树材. 高分子通报, 2001, 1, 68~73.
- [11] Hu R, Dimonie V L, El-aasser M S, et al. J Polym Sci Polym Phys, 1997, 35, 1501.
- [12] Foster J N, Sperling L H. J Appl Polym Sci, 1987, 33, 2637.
- [13] 华耀和. 聚氨酯工业, 1995, 3, 45-50.
- [14] 袁惠根, 谢雪奋, 唐舜英, 周其云, 潘仁云. 合成橡胶工业, 1997, 20(4), 237.
- [15] 于杰, 战凤昌. 涂料工业, 1994, 4, 1.
- [16] Li S C, Qiu Q W, Jarvela P. J Appl Polym Sci, 2000, 76, 726.
- [17] Nielsen L E. Marcel Dekker, Inc. New York, 1974, Vol II.
- [18] 韩俐伟, 聂玉梅. 化学工程师, 2003, 4, 17.
- [19] 任润桃, 郭万涛, 马玉璞. 噪声与震动控制, 2003, 4, 20.
- [20] Yoon K H, Yoon S T, Park O. J Appl Polym Sci, 2000, 75, 604.
- [21] 杉浦基之, 森屋泰夫, 山本隆. “相溶剂の種類と特性”《工业材料》, 1990, 138(7), 17.
- [22] 吕生华, 梁国正, 范晓东. 中国塑料, 2001, 15(20), 1.
- [23] Houston D J, Schafer F U, Bates J S. J Appl Polym Sci, 1996, 37, 785.
- [24] Tan S S, Zhang D H, Zhou E L. Polym Int, 1997, 42, 90.
- [25] Wang Z, Shi L, Zhang Z. J Appl Polym Sci, 1998, 68, 4363.
- [26] 卢秀萍. 功能高分子学报, 1999, 12(3), 315.
- [27] 刘瑞英, 王静媛, 韩国庆, 等. 高分子学报, 1997, 2, 213.
- [28] 李强, 黄光速. 合成橡胶工业, 2002, 25(1), 1.
- [29] 晏欣, 姚树人. 高分子材料科学与工程, 2003, 19(1), 92.
- [30] 张明珠, 李树材, 卢秀萍, 等. 涂料工业, 1999, 3, 1.
- [31] Chandra R, Singh S P, Gupta K. Composite Structures, 1999, 46, 41.
- [32] Finegan I C, Gibson R F. Composite Structure, 1999, 44, 89.
- [33] Gibson R F, Hwang S J, Kwak H. Proceedings of the 36th international SAMPE Symposium, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, Covia, 1991, 1, 592.
- [34] Curtis J M, Moore D R. Composites, 1988, 19, 446.
- [35] 奚利飞, 郑俊萍, 张红磊, 等. 智能材料的研究现状及展望, 材料导报, 2003, 17, 235.
- [36] Butavalla V R, Remillat C, Rongong J A, Tomlinson G R. Smart Materials Bulletin, 2001, 10-13.

Development of Damping Materials

WANG Hai-qiao, JIANG Zhi-guo, HUANG Li, YUAN Hai-bin, LI Xiao-yu

(The Key Lab of Nanomaterials, Ministry of Education, College of Material Science and Engineering,
Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The status of research on various damping materials was reviewed. The paper presents damping studies involving property-evaluating method, damping mechanism and property-effecting factors of different damping materials. At last, advanced damping materials, smart materials, intelligent materials, and advanced damping technology, plasm vacuum deposition, were also discussed briefly.

Key words: Damping; Evaluate; Structure; Materials