

聚氨酯互穿聚合物网络阻尼性能研究进展

杨宇润¹, 黄微波¹, 丁德富¹, 李效玉², 焦书科²

(1. 化工部海洋化工研究院, 青岛, 266071; 2. 北京化工大学, 北京, 100029)

摘要:介绍了聚氨酯互穿聚合物网络(PU IPN)作为阻尼材料的研究进展,分别讨论了聚氨酯(PU)/环氧树脂(EP)IPN和PU/乙烯基聚合物IPN的阻尼性,以及影响阻尼性能的因素,并比较了不同类型的PU IPN的优缺点及新的可能的探讨方向。

关键词:聚氨酯互穿聚合物网络; 环氧树脂; 乙烯基聚合物; 阻尼性能; 微相分离

引言

高分子阻尼材料是一种能够有效吸收振动能量的功能材料,早期主要用于军事、航天等领域,随着人们对环保的日益重视,开始大量用于民用,发展极为迅速。高分子材料一般在玻璃化转变区表现出最好的阻尼性能^[1],这是由于在 T_g 以下,外力作用于高分子材料上,引起键长和键角的改变,这种形变很小、很快,足以跟得上应力的变化,所以内耗小; T_g 区内分子链刚开始运动,而体系粘度很大,链运动受到很大的摩擦阻力,形变滞后于应力的变化,内耗很大;高于 T_g 时分子链运动变得比较自由,内耗能力减小^[2]。评价阻尼材料的标准有二方面,在 T_g 区内具有高的损耗因子和宽的损耗温域(即 T_g 峰宽)。一般高性能的阻尼材料要求在较宽的温宽范围($40^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 以上)内 $\tan \delta > 0.7$ ^[3]。

均聚物一般只有一个高而窄的损耗峰,使用温度范围较窄。过去的研究表明普通的共混也很难得到高性能的阻尼材料,因为普通的共混要么由于热力学相容性很好,表现出均聚物的性质,要么由于热力学相容性较差,形成的共混物相分离程度很大,很难得到适当微相分离程度的共混物,在动态力学性能上表现为二个窄的 T_g 单峰,不能成为良好的阻尼材料。而互穿聚合物网络(简称IPN)是一类由交联网络的永久性物理互锁环连体组成的新颖聚合物合金^[4~5]。理想的IPN(true IPN)^[6]应是完全相容的,在动态力学性能上表现出均聚物的性质,而事实上由于聚合物组合物往往存在一定的热力学不相容性,而且合成条件的不同,赋予了IPN各种不同程度的相分离形态。相容性很差的IPN不能作为阻尼材料;具有适度半相容性的IPN由于热力学的不相容与物理缠绕的强迫相容二种作用,形成微相分离结构,在动态力学谱上可以看到形成IPN的各组份的 T_g 发生内迁,通过调节适当的微相分离程度,就有可能得到具有较宽的玻璃化损耗峰的优良的阻尼材料^[6]。因此近年来关于IPN阻尼材料的研究十分活跃,同时从上面的分析也可以看到,决定IPN阻尼性能的关键在于相容性即微相分离程度,相容性太好(相畴 $< 1\text{nm}$)或太差(相畴 $> 100\text{nm}$)的IPN均不能成为良好的阻尼材料。

PU IPN是研究较多的并且具有实用价值的阻尼材料,PU材料自身具有大量氢键,还表现出

作者简介:杨宇润 化工部海洋化工研究院工程师。1991年毕业于华东理工大学高分子材料系,主要从事船舶用阻尼材料、水声吸声材料、隔声密封材料等声学功能高分子材料的研究,获得国家科技进步三等奖一项、化工部科技进步二等奖一项、国家发明专利授权一项,并在公开发行人刊物上发表了十余篇文章,现在北京化工大学攻读在职硕士。

一定微相分离结构, 有较高的损耗因子, 形成 IPN 后, 更可大大拓宽阻尼温域, 此外 PU/IPN 还具有易于实施、种类繁多等特点, PU/IPN 阻尼材料主要有二种类型: (1) PU/EP(环氧树脂) IPN; (2) PU 与乙烯基聚合物形成的 IPN, 以下分别就这两类 PU/IPN 材料阻尼性能研究进行文献评述。

1 PU/EP IPN

PU/EP IPN 是研究较早聚氨酯 IPN, 并且很早就被发现具有作为优良阻尼材料的潜力, 受到广泛的重视。底特律大学的 Frisch 和 Klempner 等人, 研究了一步法 PU 与 EP 形成的同步 IPN(即 Simultaneous IPN 简称 SIN), 利用 DMA、DSC、电镜等对影响 PU/EP IPN 阻尼性能的因素进行了分析^[7~14], 发现 PU/EP IPN 具有很好的相容性, 往往表现出一个较宽的 T_g 单峰, 并得出以下结论。

(1) PU 采用不同软段表现出不同的阻尼性能, 阻尼性优劣排序为: 聚环氧丙烷二醇(PPG) > 含 21% 丙烯腈改性的聚环氧乙烷-环氧丙烷三醇 > 聚四氢呋喃二醇(PTMG) > 聚 1,6-己二醇碳酸酯(PC)。

(2) EP 种类对 IPN 的相分离影响很大, 双酚 A 型 EP 与 PU 可以形成相容性较好的 IPN, 表现出较宽的 T_g 峰(见图 1), 阻尼性好。而酚醛 EP 和三官能度 EP 形成的 IPN 相容性不好, 阻尼性差。李玉玮等人也得到了相似结果^[15], 并认为双酚 A 结构具有较好的链旋转能力, 所以与 PU 相容性较好, 而酚醛 EP 和三官能度 EP 则由于太硬、相容性不好, 阻尼性差。以下均以双酚 A 型 EP 为研究对象。

(3) PU 的扩链剂种类和用量对 IPN 阻尼性能影响很大, 增加扩链剂用量即提高硬段含量, 相分离增大、 T_g 峰升高, 由于 IPN 相容性较好, 所以适当增大相分离程度使 T_g 峰加宽、升高, 对阻尼性能有利, 但由于常规阻尼材料的使用温域为 $-10^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$, 所以扩链剂有一个合适用量(一般为 $5\% \sim 10\%$)。另外使用含有侧基尤其是含苯环侧基的扩链剂如 Isonol C-100 有利于提高阻尼性。作者也发现同样现象^[16], 而且在扩链剂中引入侧基对阻尼性的贡献大于在软段中引入侧基, 作者认为在扩链剂中引入侧基不但增加了分子链运动阻力, 而且由于空间位阻使硬段不易聚集, 分散与软段中的硬段大大增大了运动阻力, 阻尼性能明显提高, 而在软段中引入侧基只起到前一种作用。

(4) EP 的固化剂不能采用氨、酸酐等, 因为它们会与 PU 发生化学反应, 作为 PU/EP IPN 用的 EP 固化剂有三氟化硼乙醚(BF₃-etherate)、三氯化硼氨(BCl₃-amine)、DMP-30。三氟化硼乙醚交联度小, 阻尼性较好, 而后二者交联度太大, 阻尼性能较差。

(5) PU/EP 的比例影响 T_g 的峰宽和峰高, 一般 EP 含量提高 T_g 升高, 由于所选用的 PU 和 EP 结构不同, 最佳的 PU/EP 比例也不同, 必须以实际要求的使用温域和试验为依据。

(6) 填料有利于提高 IPN 的阻尼性和模量, 玻璃纤维使阻尼性提高, 云母使模量增加, Al(OH)₃ 使 T_g 移向高温但对模量影响很小。刘景江等^[17]认为填料使 T_g 峰变的不对称, 低于 T_g 区, 填料主要起提高 T_g 作用, 受体积效应控制。 T_g 以上区域, 分子链运动显著加剧, 此时填料明显增加了链运动的内耗和滞后, 使高温部分损耗因子提高。作者^[16,18]也曾进行过此方面的研究, 认为片状填料(如云母、石墨)对阻尼性有明显提高, 而非片状填料则作用不大。

(7) 后固化对 IPN 阻尼性有明显影响, 后固化时间短的样品 T_g 峰宽且高, 而延长后固化时间, T_g 升高同时变窄, 根据作者的数据, 经 100°C 16 h 的后固化, IPN 的 T_g 升高了约 20°C , $\tan \delta$ 由 0.9

降至 0.7, 作者归因于延长后固化时间, EP 固化程度提高, IPN 更完善, 提高了 PU/EP 的相容性, 使 T_g 峰变窄。

为进一步拓宽 PU/EP IPN 的阻尼温域, Klempner 等在 PU/EP IPN 中又引入第三组份 UPR (不饱和聚酯)^[19~21], 由于 UPR 比 PU、EP 溶解度参数低, T_g 又与 EP 接近, 所以 PU/EP/UPR = 50/25/25 时, 在 20℃~80℃ 范围内 $\tan \delta > 0.7$, 表现出优异的阻尼性能(见图 1)。

Usman Sorathia 等^[22~23]研究了由 PTMG, MDI, 1,4-丁二醇(1,4-BDO), 三羟甲基丙烷(TMP)组成的 PU 与双酚 A 环氧的 IPN, 所有样品都表现出一个宽的 T_g 峰或双肩宽峰, 说明相容性良好。PTMG 分子量越低, 样品密度越大, 互穿越完全。改变 PU/EP 的比例, T_g 随 EP 含量提高而上升(见图 2), 当 PU/EP = 70/30 时有较宽的阻尼峰。电镜也表明 IPN 相容性较好, 相畴约为 5nm~20nm。WANG 等研究了线性 PU 与 EP 形成的 IPN^[24], 也得到了与前面相似的结果。

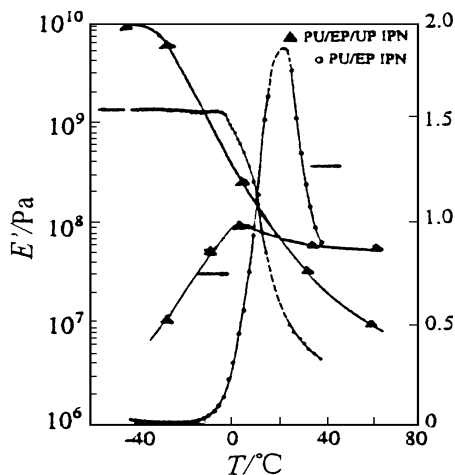


图 1 PU/EP(50/50) IPN 和 PU/EP/UPR (50/25/25) IPN 的动态力学谱

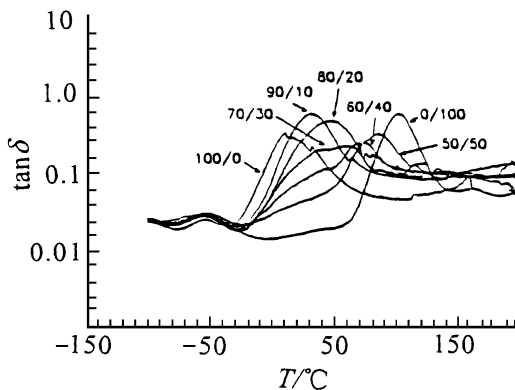


图 2 不同 PU/EP 比例 IPN 的动态力学谱

国内长春应用化学研究所、吉林大学等对 PU/EP IPN 阻尼材料也进行了较多研究, 除了上面谈到的普通类型的 PU/EP IPN 外, 还进行了许多特殊组成的 PU/EP IPN 的研究。如李玉玮等用 PEG、TDI、BDO、TMP 体系的 PU 与 EP6101 进行互穿^[25~27], IPN 表现出较好的相容性和阻尼性, 样品形成一个宽的 T_g 峰或一个宽的双肩峰。最好的阻尼性出现在 PU/EP = 75/25, TMP/BDO = 0.5 时, 此时 IPN 在 0℃~60℃ 左右范围内 $\tan \delta > 0.8$, 为一个双肩宽峰。李玉玮等还研究了端羟基丁腈(HTBN) PU/EP IPN^[28], 电镜显示 IPN 相容性较好, 软段中引入丙烯腈极性结构, 与 EP 相容性增加, 在 -35℃~35℃ 左右范围内 $\tan \delta > 0.7$ 。

韩孝族等人研究了蓖麻油(CO) PU 与端羟基丁腈(HTBN)改性环氧的 IPN^[28~29], 环氧改性后, 橡胶态的 HTBN 在环氧中形成“Phase within Phase”结构, 相畴减小, DMA 谱显示一个宽的 T_g 峰, 并且 T_g 随 EP 含量增加而上升, 可以通过改变 EP 用量得到各种使用温域的阻尼材料。而当 PU 软段改为 PTMG 后, 却表现出明显的不相容, 这可能和 PTMG 软段与 EP 中 HTBN 的极性相差太大, 相容性不好有关。

贾得民等^[30]研究了丁羟(HTPB) PU/EP IPN, DMA 谱上显示出完全的相分离, 这归因于 HTPB 极性很低, 与 EP 的极性结构极不相容。

综合以上研究结果可以得出这样结论:决定 PU/EP IPN 相容性的关键因素是 PU 软段与 EP 的相容性,常用的 PPG、PEG、HTBN 以及聚酯等 PU 软段由于均含极性基团,与双酚 A 环氧有良好的相容性,所得的 IPN 的相容性也较好,表现出良好的阻尼性能;而 HTPB 极性极低,与 EP 不相容,IPN 表现出明显的相分离,同样对于极性很大的软段(如 HTBN)与极性不高的 EP(如脂肪族 EP)互穿也会表现出明显的不相容,其阻尼性能较差。其它关于 PU/EP IPN^[31~33]动态力学性能的研究与前文的结果基本相似,此处不再赘述。

2 PU 与乙烯基聚合物形成的 IPN

PU 与乙烯基聚合物可以形成很多种 IPN,如 PU/PS(聚苯乙烯)IPN,PU/PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)IPN 等,为讨论方便本文将 PU/UPR IPN,PU/VER(乙烯基酯)IPN 等由乙烯基单体固化的热固性材料与 PU 形成的 IPN 也包括在内一并讨论。由于 PU 为逐步聚合而乙烯基聚合物为自由基聚合,所以聚合时相互干扰少,可形成较理想的 IPN。此外乙烯基单体种类繁多,可以自由地选择不同软硬的单体以得到各种 T_g 的 IPN,所以比 PU/EP IPN 表现出更大的灵活性。

韩国 Lee 和 Kim 等人较系统地研究了 PU/PS、PU/PMMA IPN,认为影响 IPN 动态力学性能的关键仍在于 IPN 的相分离,并提出影响相分离的因素有^[34]:(1) 各组份相容性(与溶解度参数,极性有关);(2) 各组份反应速率;(3) 交联点间分子链长(Mc);(4) 各组份重量比;(5) 凝胶时的聚合度;(6) 分子链的运动能力;(7) 退火的影响。

他们研究了(PTMG)PU/PS IPN,该体系表现出明显的不相容性,同步 IPN 比逐步 IPN 相容性稍好,提高交联密度有利于增加相容性。动力学研究表明当 PU 先凝胶时,形成以 PU 为连续相的网络,IPN 模量低,主要体现 PU 的性能;反之当 PS 先凝胶时,则 PS 为连续相,IPN 模量高,体现 PS 的性能;两网络凝胶时间越接近,相分离程度越小。Lipatov 等在研究 PU/PBMA(聚甲基丙烯酸丁酯)IPN^[35]时,更详细地研究了动力学对 IPN 的影响,当 PBMA 反应快时,尽管 PU 交联而 PBMA 为线性结构,但只要 PBMA 含量大于 15%,IPN 中 PBMA 就是连续相。另外 Onset gel point 是相分离发生的时刻,对 IPN 有很大影响,此时由于相分离造成的体积变化使动力学曲线在此点形成折线。

Lee 等还用 PU ($T_g = -46^\circ\text{C}$) 与 PBMA ($T_g = 20^\circ\text{C}$) 和 PMMA ($T_g = 105^\circ\text{C}$) 进行三元互穿^[36~37],以期得到宽温域阻尼材料,结果表明 PU/PMMA IPN、PU/PBMA IPN 均为不相容体系。当 PU/PMMA 形成的 IPN 溶于 BMA 中形成逐步 IPN,DMA 谱表现为 3 个相连的峰;而 PU/PBMA IPN 形成的 IPN 溶于 MMA 中形成的 IPN 则出现 2 个 T_g 峰,一个为软段峰,一个是 PMMA 与 PBMA 的相容峰,造成这种现象的原因在于 MMA 的溶解度参数与 PBMA 接近,因此形成一个 PMMA 与 PBMA 的相容峰,而 BMA 与 PMMA 的溶解参数相差较大,因此各自存在一个 T_g 峰。

尽管 Lee 等进行了三元共聚 IPN 的尝试,但由于 PU 与 PS、PMMA 相容性很差,所以没有得到阻尼性较好的 IPN。Lee 等最有特色的工作在于研究了聚合条件对 IPN 形态的影响^[38~42],对于以上不相容体系,当增加合成压力时,相分离明显减小,当压力从 122.5Mpa 升至 1960Mpa 时,IPN 相畴尺寸由 30nm 降至 3nm,达到分子水平的混容,作者归因于高压下分子链运动减慢,相分离速度相对反应速度变小,从而形成较完善的互穿。当压力超过 490Mpa 后,原来相容性很差的 PU/PS IPN 只显示一个 T_g 峰,压力为 735Mpa 时, T_g 的峰宽最大,阻尼性能最好(见图 3)。

改变合成温度也出现同样效果,降低合成温度,相分离程度减少,当合成温度低于 80°C 时,由于 PS 的 $T_g > 80^{\circ}\text{C}$, PS 的分子运动被冻结,相分离速度相对反应速度变小,相分离程度明显减少。基于同样道理,由于 PU 分子运动性强,因此改变 PU 的交联密度对 IPN 的影响大于 PS,不同交联情况的 IPN 的相分离程度从小到大为 $\text{IPN} > \text{半(Semi)-IPN(PU 交联)} > \text{半(Semi)-IPN(PS 交联)} > \text{线性 IPN}$ 。因此对于不相容的 IPN 可以通过提高合成压力或降低合成温度来得到半相容的阻尼材料,但缺点是工艺复杂、成本高。

Lee 等对退火的研究表明,高压下相容的 IPN,经退火又发生了明显相分离,这归因于原来由分子链冻结造成的强迫相容,退火后,由于热力学的不相容性,未完全互穿部分又重新发生了相分离,因此 IPN 的后固化条件也是影响阻尼性的重要因素。

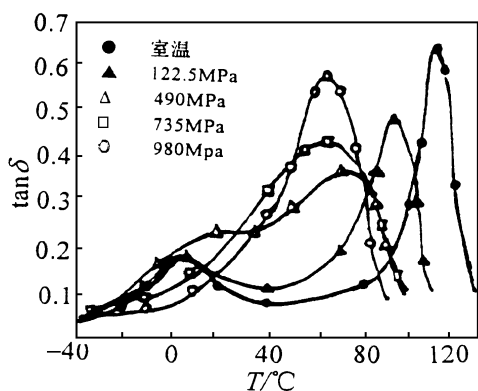


图3 不同压力下 PU/PS IPN 的动态力学谱

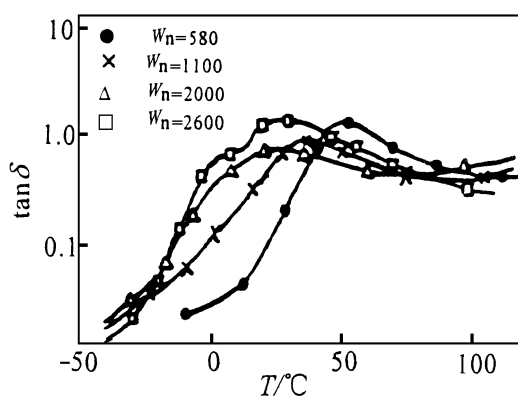


图4 不同分子量 PECH 的 PU/PMMA IPN 的动态力学谱

国内对 PU 与乙烯基聚合物 IPN 的研究也十分活跃,陈宝铨、韩孝族等人研究了不同软段 PU/PMMA IPN 的相容性^[43],当 PU 软段溶解度参数与 PMMA 接近时,形成的 IPN 相容性较好,如软段为聚环氧氯丙烷(PECH)时,IPN 只显示一个 T_g 峰,而软段为 PPG、PEG、HTPB 时,由于它们与 PMMA 溶解度参数相差大,表现出明显的相分离,与李玉玮^[44~45]、王静媛^[46~47]等人的研究结果一致。对相容性较好的(PECH)PU/PMMA IPN 的进一步研究^[48]表明:(1) PU 硬段含量提高,相分离加剧,当 $\text{TMP/PECH} < 0.23$ 时,只有一个 T_g 峰,而 $\text{TMP/PECH} > 0.23$ 时为两个 T_g ;(2) (PECH)PU/PMMA = 80/20 时, $\tan \delta_{\max} > 1.1$, $\tan \delta > 0.8$ 的温域宽约 60°C ,表现出良好的阻尼性(见图4),与姚树人等对纯(PECH)PU 的研究结果^[49]对照,IPN 表现出更宽的阻尼温域。

当研究(PECH)PU/PS IPN 时^[50~51],与(PECH)PU/PMMA IPN 明显不同,前者表现出了明显的不相容性,DMA 谱显示的 2 个 T_g 峰几乎没有内迁,说明 PECH 与 PS 极不相容,只有当 PS 含量很少时($< 25\%$),由于笼蔽效应,St 只能形成低分子量 PS,起增塑作用,才能得到较好的相容性。

薛曙昌、张志平等研究了 PPG^[52]、HTPB^[53]为软段的 PU 与 PS 的 IPN,尽管它们的相容性比与 PMMA 形成的 IPN 略好,但 DMA 谱上仍表现为 2 个单峰,说明仍无法达到较好的相容状态。韩国庆等研究了(PEG)PU/PS IPN^[54],相容性也较差,只有当 $\text{NCO/OH} > 1.8$,PU 大量交联时,才能得到较好的相容性;而通过增加 PU 扩链剂官能度的办法提高交联度,由于此时 PU 凝胶太快,反而使相分离更大。Houston 等人^[55,56]研究 PU/PS IPN 的结果与前面相似,是典型的不相容体系,只有通过引入较多的化学交联(含羟基的乙烯基单体)形成接枝 IPN 以及引入特殊的相容剂时,相

容性才得以提高。因此,综前所述,尽管人们对 PU 与 PMMA、PS 的 IPN 进行了大量研究,但除了软段为 PECH 外,其它均表现出明显的相分离,难以用常规方法得到较好的阻尼材料。

PU/VER IPN 是从 PU/UPR IPN 发展来的,主要用作结构材料,华耀和^[57]等曾研究了 PU/VER 阻尼泡沫,提出 VER 用量增加,阻尼性能提高,但有待进一步深入研究。范连华、胡春圃等对 PU/VER IPN 结构材料进行了大量研究^[58~62],指出引入 VER 使 PU 硬段不完善,相分离减小,当 VER 中含有 OH 时形成的 IPN 有良好的相容性,力学强度也较高,不含 OH 的 VER 则相容性差。关于 PU/VER IPN 的阻尼性目前研究得不多,笔者认为 VER 中既含有环氧结构,与 PU 有良好的相容性,同时又含有 St,与 PU 又有一定的不相容性,通过调节 St 在 VER 中的用量、PU/VER 比例以及 VER 中 OH 含量可以得到各种相容程度的 PU/VER IPN,有可能得到阻尼性较好的材料。

另一种比较特殊的 PU IPN 为蓖麻油(CO)PU 与乙烯基单体形成的 IPN,由于蓖麻油中含有双键,因此可与乙烯基单体发生接枝,形成接枝 IPN^[63],对(CO)PU/PS IPN^[64]、(CO)PU/PS-CO-AN IPN^[65]、(CO)PU/PMMA IPN^[66]、(CO)PU/PnBA IPN^[67]的研究均表明这些 IPN 的各组份具有较好的相容性,但缺点是 $\tan \delta$ 的峰值普遍不高,可能与蓖麻油结构有关。HTPB 结构中也含有双键,但可能是这些双键活性较低,所以(HTPB)PU 的 IPN 未表现出(CO)PU IPN 的良好相容性。

3 结语

综前所述,PU IPN 是一种较有研究和实用价值的阻尼材料,决定 IPN 阻尼性的关键在于其微相分离程度。常规的聚醚、聚酯型 PU 与 EP 形成的 IPN 表现出良好的相容性和阻尼性,但由于 EP 粘度大,应用受到一定限制。研究方面,尽管 PU/EP IPN 的阻尼性能研究的较多,但对 EP 中 OH 与 PU 反应接枝对 IPN 阻尼性能影响的研究还较少。

在 PU/PS IPN,PU/PMMA IPN 方面,常规的软段如 PPG、PEG、PTMG、HTPB 构成的 IPN 均表现出明显的不相容性,只有经特殊工艺如高压下才能形成适度的相容状态,工艺复杂、成本高。以 PECH 为软段的 PU/PMMA 表现出良好的相容性和阻尼性,但 PECH 目前国内尚无工业化产品,仅限于实验研究。

目前 PU/VER IPN 作为阻尼材料的研究较少,由于 VER 中含有 EP 结构,又含有 St 单体,因此可同时表现出 PU/EP IPN,PU/PS IPN 的性能,笔者认为适当调节 VER 的成份、结构有可能得到较好的阻尼材料。而且 VER 粘度低,较 EP 更易操作和成型。

参考文献:

- [1] Sperling L H. Sound and Vibration Damping with Polymers: Basic Viscoelastic Definitions and Concepts. In Editor: Sperling L H, Corsaro R D. Sound and Vibration Damping with Polymers ACS Washington DC, 1990.
- [2] 金日光,华幼卿等. 高分子物理,北京:化学工业出版社,1991.
- [3] 戴德沛. 阻尼减振降噪技术. 西安:西安交通大学出版社,1986; 阻尼技术的工程应用. 北京:清华大学出版社,1991.
- [4] Lipatov L, Sergeeva L. Interpenetrating Polymer Network, Naukova Dumka, Kiev, 1979.
- [5] Frisch H L, Klempner D, Frisch K C. J Polym Sci, Polym Letters. 1969, 7: 775; J Polym Sci, A-2, 1970, 8: 921; J Polym Sci, B, 1970, 8: 525.
- [6] Ting R Y, Capps R N, Klempner D. Acoustical Properties of Some Interpenetrating Polymer Network Polymers: Urethane-Epoxy Networks. In Editor: Sperling L H, Corsaro R D. Sound and Vibration Damping with Polymers ACS Washington DC, 1990.
- [7] Frisch H L, Cifaratti J, Palma R, et al. Polymer Alloys, 1977, 10, 97.

[8] Kingsbury H B,Cho K L,Powers W R,et al·J Cell Plastics,1978,2;113.

[9] Klempner D C,Wang C L,Ashtian M,et al· J Appl Polym Sci,1986,32;4197.

[10] Klempner D C,Frisch K C· Polyurethanes World Congress,1987;656.

[11] Klempner D C,Berkowski L,Frisch K C,et al· Rubber World,1985,192(6) :16.

[12] Ting R Y· Undersea Defense Tech London,1990;699.

[13] Klempner D C,Frisch K C,Xiao X H,et al· Polym Eng Sci 1985,25(8) .

[14] Chang M C, OThomas D A,Sperling L H,et al·J Polym Sci,Polym Phys Ed,1988,26;1627.

[15] 李玉玮,栗宜明,张丽梅等·高等学校化学学报,1984,5;105.

[16] 黄微波,杨宇润,刘东晖·高分子材料科学与工程,1992,4;42;黄微波,杨宇润,刘东晖·高分子材料科学与工程,1995,2;102.

[17] 刘景江,候春荣,余赋生,等·合成橡胶工业,1986,9(1) :55.

[18] Huang W B,Zhan F C· J Appl Polym Sci,1993,50(2) :277.

[19] Muni B H,Klempner D C,et al· A·C·S 19th Central Regional Conf,1987.

[20] Klempner D C,Muni B H,Okoroafor M,et al· Advances in Interpenetrating Polymer Networks Lancaster,1990,2(24) :1.

[21] Sophia D,Klempner D C,Sendjarevic V,et al· Adv Chem Ser,1994,239;39~75.

[22] Sorathia U,Yeager W,Dapp T· Advanced Damping Materials for Marine Application In Editor:Sperling L H,Corsaro R D· Sound and Vibration Damping with Polymers ACS Washington DC,1990.

[23] Sorathia U,Yeager W,Dapp T· USUS 5331062,1994.

[24] Wang D T H,Williams· J Appl Polym Sci,1983,28(7) .

[25] 李玉玮,王静媛,栗宜明,等·高等学校化学学报,1988,6;643.

[26] 李玉玮,王静媛,栗宜明,等·高等学校化学学报,1988,9;1282.

[27] 李玉玮,赵东辉,张丽梅,等·涂料工业,1990,3;6.

[28] 李玉玮,汤心颐,等·塑料工业,1984,1;40.

[29] 王颖,韩孝族,范世霞,等·高分子学报,1991,4;405.

[30] Bian X S,Han X Z,Zhang Q Y· Advances in Interpenetrating Polymer Networks, Lancaster,1991,3(25) :203.

[31] 贾得民,潘静,洪旭东,等·合成橡胶工业,1993,16(3) :142.

[32] 管云林,郭锦棠,邵蕾,等·高分子材料科学与工程,1996,12(5) .

[32] 王源升,郑淑贞,姚树人·高分子材料科学与工程,1987,(3) :69.

[33] 王源升,张宝真,姚树人·高分子材料科学与工程,1991,(6) :115.

[34] Park I H,Lee J H,Kim S C· Polymer Bulletin,1983,10;126.

[35] Lipatov Y S,Alekseeva T T,Rosovitsky V F,et al· Polymer,1992,33(3) :610.

[36] Lee J H,Kim S C· Polymer J,1984,16(6) :453.

[37] Hsu T J, Lee J H· J Appl Polym Sci,1988,36(5) :1157.

[38] Lee D S,Kim S C· Macromolecules,1984,17;268.

[39] Lee D S,Kim S C· Macromolecules,1984,17;2193.

[40] Lee D S,Kim S C· Macromolecules,1984,17;2222.

[41] Lee D S,Kim S C· Macromolecules,1985,18;2173.

[42] Lee D S,Kim S C· Polymer J,1991,23(1) :241.

[43] 陈宝铨,韩孝族,郭凤春·高分子材料科学与工程,1995,11(2) :62.

[44] 李玉玮,王静媛,栗宜明,等·高等学校化学学报,1991,2;271.

[45] 邢佩祥,王静媛,李玉玮,等·应用化学,1996,13(5) :41.

[46] 王静媛,李玉玮,李跃先,等·塑料工业,1991,1;17.

[47] 王静媛,李玉玮,汤心颐,等·合成橡胶工业,1991,14(2) :116.

[48] 陈宝铨,韩孝族,郭凤春·应用化学,1995,12(4) :66.

[49] 贾铭椿,沈联芳,钱保功,等·高分子学报,1993,4.

[50] 陈宝铨,韩孝族,郭凤春·高等学校化学学报,1995,10;1637.

- [51] 陈宝铨, 韩孝族, 郭凤春. 材料研究学报, 1996, 5: 551.
- [52] 薛曙昌, 张志平, 应圣康. 高等学校化学学报, 1990, 11(9): 1040.
- [53] 薛曙昌, 张志平, 应圣康. 高分子学报, 1989, 5.
- [54] 韩庆国, 汤心颐, 等. 高等学校化学学报, 1995, 4: 653.
- [55] Houston D J, Zia J. J Appl Polm Sci, 1984, 29: 629.
- [56] Houston D J, Schaefer F U. High Perform Polym, 1996, 8(1): 19.
- [57] 华耀和, Klemptner D C, Frisch K C. 高分子材料科学与工程, 1994, 4: 41.
- [58] 黄学成, 胡春圃, 陈永林. 华东理工大学学报, 1994, 20(5): 621.
- [59] Fan L H, Hu C P, Ying S K. Polymer, 1996, 37(6): 975.
- [60] Fan L H, Hu C P, Ying S K. J Appl Polym Sci, 1996, 59: 1417.
- [61] 范连华, 胡春圃, 应圣康. 功能高分子学报, 1996, 4: 481.
- [62] 范连华, 胡春圃, 应圣康. 合成橡胶工业, 1997, 20(1): 51.
- [63] Tan Peiwen. Adv. Chem. Ser, 1994, 239: 595.
- [64] Xie H Q, Zhang C X, Guo J S. Adv Chem Ser, 1994, 239: 557.
- [65] 周宁琳, 夏小仙. 功能高分子学报, 1996, 2: 195.
- [66] 张晨曦, 谢洪泉. 高分子学报, 1992, 2: 229.
- [67] 马嵩, 马荣堂, 张军. 高分子学报, 1992, 4: 449.

Recent Advances in Vibration Damping Properties of Polyurethane Interpenetrating Polymer Networks

YANG Yu-run¹, HUANG Wei-bo¹, DING De-fu¹, LI Xiao-yu², JIAO Shu-ke²

(1. Marine Chemical Research Institute of the Ministry of Chemical Industry, Qingdao, 266071, Chian;

2. Beijing University of Chemical Industry Technology, Beijing, 100029, Chian)

Abstract: The development of polyurethane interpenetrating polymer networks used as vibration damping materials were reviewed in this paper. The damping properties and its influence factor of PU/EP IPN and PU/vinyl-polymer IPN were discussed. The advantages and disadvantages of different type of PU IPN were compared. Finally, the authors forwarded some new possibly research direct.

Key words: Polyurethane interpenetrating polymer networks; Epoxy resin; Vinyl-polymer; Damping properties; Microphase separation

欢迎订阅《高分子通报》

《高分子通报》为 16 开本, 季刊, 96 页。2000 年定价: 8 元/期, 全年 4 期, 共计 32 元。每季末出版, 欢迎到各地邮局订阅, 邮发代号: 18-109。漏订的读者可在编辑部补订。