

专·论·与·综·述

## 共混聚合物辐射效应研究的进展

赵文伟 徐俊 孙家珍

(中国科学院长春应用化学研究所, 长春, 130022)

**摘要** 本文综述了近十几年来国内外共混聚合物辐射效应研究的进展情况。内容包括辐射交联理论在共混聚合物体系中的适用性、共混体系的相容性、相态结构对辐射效应的影响及共混组份间的辐射敏化及保护效应等。

**关键词** 聚合物共混物、辐射效应、辐射交联与裂解、相容性、相结构

### 1 引言

50年代初, Dole和Charlesby先后发现聚乙烯在高能射线作用下能产生交联反应, 打破了过去传统认为辐射对聚合物材料只能起破坏作用的观点, 开辟了辐射改性聚合物材料的新方向。目前, 聚合物辐射效应的研究已经进行得相当深入, 聚合物材料的辐射加工技术也已获得了广泛的实际应用, 辐射交联电线电缆、形状记忆材料等都已形成较大规模的工业生产。另一方面, 随着日益复杂的工程需要和聚合物科学的发展, 共混改性已成为当前聚合物材料开发的主要途径之一, 实际应用的聚合物材料中共混聚合物所占比例很大, 品种繁多, 就辐射加工聚合物材料而言, 也正由单一品种聚合物向聚合物共混物发展<sup>[1]</sup>。因此, 共混聚合物辐射效应的研究是一个具有重要理论价值和实用价值的新课题, 引起了日益广泛的关注。

### 2 聚合物辐射交联的凝胶理论在共混体系中的新发展

聚合物经辐射交联后生成空间网状结构, 不能再完全溶解于原来的溶剂, 凝胶含量的大小表示了聚合物的交联程度。对于单一组分的聚合物来说, 按如下假定: (a) 交联反应是无

规进行的; (b) 高分子内交联可忽略不计; (c) 裂解度和交联度都比较小; (d) 裂解和交联反应是独立进行的; (e) 交联度与辐照剂量成正比; (f) 裂解度与辐照剂量的 $\beta$ 次方成正比。张万喜、孙家珍等在Charlesby-Pinner关系式(1)<sup>[2]</sup>和陈-刘-唐关系式(2)<sup>[3]</sup>的基础上推导出了具有更广泛的适用性的关系式(3)<sup>[4]</sup>。

$$(S + S^{0.5}) = \frac{p_0}{q_0} + \frac{1}{q_0 \mu_1} \frac{1}{R} \quad (1)$$

$$R(S + S^{0.5}) = \frac{1}{q_0 \mu_1} + \frac{p_0^1}{q_0} R^{0.5} \quad (2)$$

$$R(S + S^{0.5}) = \frac{1}{q_0 \mu_1} + \frac{p_0^1}{q_0} R^\beta \quad (3)$$

式中 $S$ 是溶胶分数;  $R$ 是辐照剂量;  $\mu_1$ 是高分子起始数均聚合度;  $p_0$ 、 $q_0$ 分别是单位剂量产生的裂解度、交联度;  $p_0^1$ 为常数;  $\beta$ 是与高分子结构因素有关的参数, 对于大多数高分子,  $\beta$ 与其玻璃化转变温度有如下关系:



**赵文伟** 1966年生于河南省西峡县, 1988年毕业于郑州大学化学系, 同年考入中国科学院长春应用化学研究所, 1991年获理学硕士学位并留所工作。现主要从事高分子辐射化学的研究。

$$\beta = 0.206 + 0.002T_g \quad (4)$$

该式把高分子的结构因素引入到辐射交联的凝胶理论中,解释了一些前两个式子不能解释的实验现象。

对于聚合物的共混物,在受到辐照时,由于组分间的相互作用,其辐射反应并不是独立进行的,而是存在着相互影响,因此,不能把(3)式直接应用到共混体系中。

对于相容性好的聚合物共混物,体系不再显示组分本身各自原有的玻璃化转变温度,而是只有一个新的玻璃化转变温度 $T_g b$ ,其值可用实验的方法(如DSC)直接求出,或用Kelley-Bueche经验公式(5)求出,

$$T_g b = \frac{T_{g1} + (KT_{g2} - T_{g1})\phi_2}{1 + (K-1)\phi_2} \quad (5)$$

式中 $\phi_2$ 是组分2的体积分数, $K$ 是两组分在玻璃化转变温度以上和以下热膨胀系数数值的比值( $K = \Delta\alpha_2/\Delta\alpha_1$ )。这样求出体系的 $T_g b$ 以后,便可应用(3)、(4)式<sup>[5,6]</sup>。

但是大多数聚合物共混物都不是热力学相容体系,在这种情况下需要进行如下修正<sup>[7,8]</sup>:

$$\text{修正1: } \beta = \frac{\beta_1 + (K'\beta_2 - \beta_1)\phi_2}{1 + (K'-1)\phi_2} \quad (6)$$

式中 $K'$ 是表征两组分对共混体系 $\beta$ 值贡献大小的参数,应用(6)式处理的共混体系有 PEO(聚环氧乙烷)/PVA(聚乙酸乙烯酯)、PVDF(聚偏氟乙烯)/PEA(聚丙烯酸乙酯),EPR(乙丙橡胶)/SBR(丁苯橡胶)、1,2-PBD(聚丁二烯)/LDPE、EVA(乙烯-乙酸乙烯共聚物)/LD-PE,实验结果与理论计算值符合得很好。

$$\text{修正2: } R^0 = \sum f_i R^{0i} \quad (7)$$

$$\text{修正3: } \beta = \sum f_i \beta_i \quad (8)$$

式中 $\beta$ 为共混体系 $\beta$ 值; $f_i$ 为 $i$ 组分的重量分数; $\beta_i$ 为 $i$ 组分的 $\beta$ 值。(7)、(8)两式被用于讨论PP/EPDM及其它一些聚烯烃共混物的辐射交联,得到了比较满意的结果。

经过以上修正,可以把单一组分聚合物的凝胶理论推广应用到聚合物的共混体系,成功

地预期了一些共混体系辐射交联的规律。但也可以看出,这些结果仅仅是初步的和半经验的,缺乏明确的物理意义和普遍性。目前还没有看到国外关于这方面的文献报道。

另外,张万喜、王谋智等还把数学期望法推广应用于研究聚合物共混体系的辐射交联反应,推导出了多元共混体系的凝胶化条件,讨论了凝胶点前后体系的性质与反应机率的关系,并应用这些结果着重处理了二元高聚物共混体系的辐射交联<sup>[9]</sup>。

### 3 共混体系的相容性与辐射效应之间的关系

研究表明,聚合物的共混物在受到辐照时,凝胶含量一般不符合简单的加和规则。显然,各组分在体系中的辐射反应不是独立进行的,而是存在着相互影响。这种相互影响除了高分子本身的结构因素外,主要决定于体系的相容性。聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)与一系列聚合物共混,辐射效应的研究结果表明,在PMMA/PEO体系中凝胶含量远远超过了其中交联型聚合物PEO的总含量,说明PMMA也发生了交联,而在其它的共混体系中PMMA仍然是无规降解的<sup>[10]</sup>。这除了与PEO的比较柔顺的分子链有关以外,主要因为PEO与PMMA高分子之间有较强的相互作用,体系是分子水平相容的。对PMMA/PS(聚苯乙烯)和PMMA/SAN(苯乙烯-丙烯腈共聚物)共混物辐射效应的研究发现,前者苯基的存在并没有对PMMA起到保护作用,而后者苯基则在一定程度上阻碍了PMMA的辐射降解,这主要归因于后一体系是相容体系,而前一体系是不相容的<sup>[11,12]</sup>。对于PVC(聚氯乙烯)/NBR(丁腈橡胶)共混物,当NBR中AN含量为21.7%时是两相体系(PVC/NBR-1),AN含量为41.6%时是均相体系(PVC/NBR-2),紫外线辐照后两体系的性能差别很大(图1)<sup>[13]</sup>。在PSt/EPDM(三元乙丙橡胶)共混物中加入共聚物增容剂,辐照后可使抗冲击强度大大提高<sup>[14]</sup>。另外,共混物的

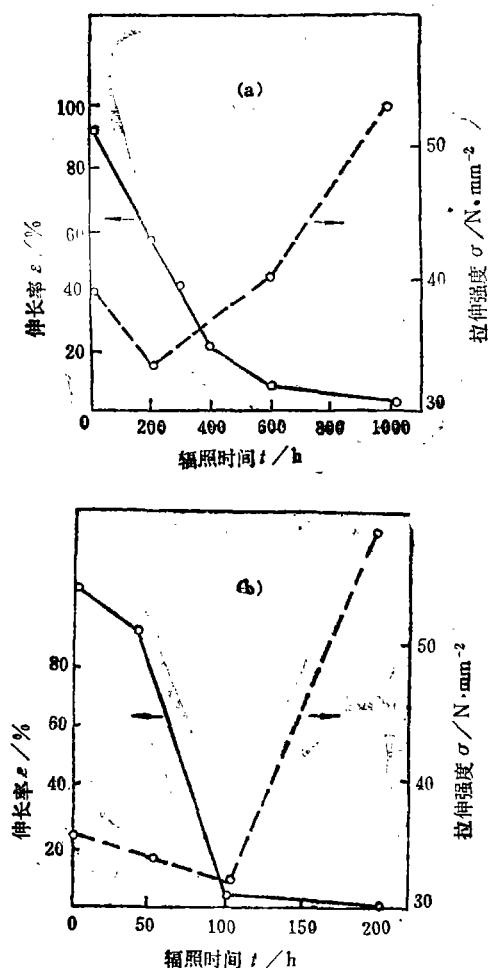


图1 PVC/NBR体系的相容性与共混物辐照后力学性能的关系<sup>[13]</sup>

(a) PVC/NBR-1; (b) PVC/NBR-2  
——拉伸强度; ——断裂伸长

制备方法和共混时的条件会对体系的相容性产生影响, 这种影响也会引起辐射效应的差别。对PMMA/PEO共混体系, 溶剂挥发的温度不同, 辐照后凝胶含量有相当大的差别(图2)。熔融共混物LDPE(低密度聚乙烯)/iPP(等规聚丙烯), 如果在空气中缓慢冷却辐照后断裂伸长随辐照剂量没有明显变化, 而骤冷样品辐照后断裂伸长值则随剂量增加而迅速降低<sup>[15]</sup>。

反过来, 通过聚合物共混物辐射行为可以研究共混体系的相容性<sup>[16, 17]</sup>; 辐照使共混物组分间发生接枝或交联反应能提高体系的相容

性<sup>[18, 19]</sup>。PSD(取代聚苯乙烯)/PVME(聚甲基乙烯基醚)是具有最低临界相容温度的条件相容体系, SANS(小角中子散射)研究表明,  $\gamma$ -辐照可使临界相容温度大大提高(由149℃提高到450℃)(图3)<sup>[18]</sup>。尼龙与聚乙烯的相容性较差, 要想通过共混对尼龙进行有效地增

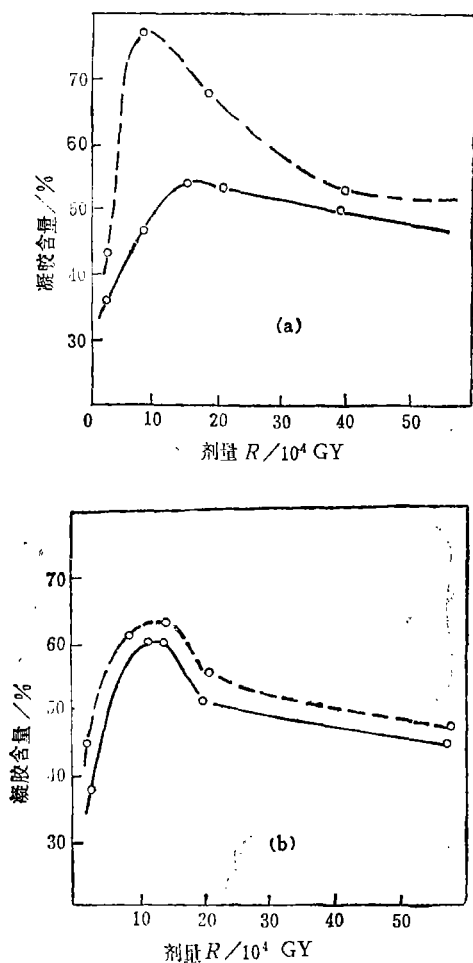


图2 溶剂挥发温度与PMMA/PEO体系辐射效应的关系<sup>[10]</sup>

——35℃; ——60℃  
(a) PMMA 30(wt %); (b) PMMA 40(wt %)

韧, 需要在聚乙烯上引入极性官能团。研究表明, 辐照氧化可达到这一目的, 而且比其它的化学方法简便得多<sup>[19]</sup>。首先使PE在有氧存在的情况下辐照, PE因氧化而产生极性侧基, 然后再与尼龙共混, 界面上两组分的极性基团发

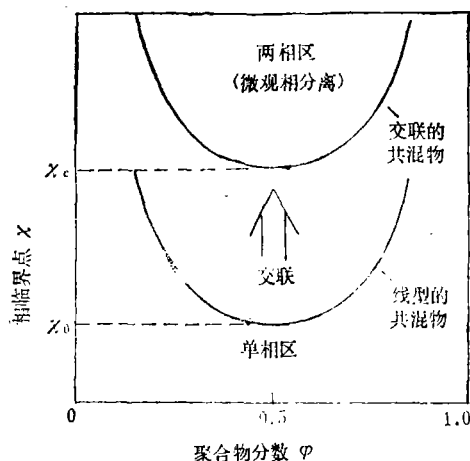


图3  $\gamma$ -辐照对PVME/PS体系相容性的影响 (示意图)<sup>[18]</sup>

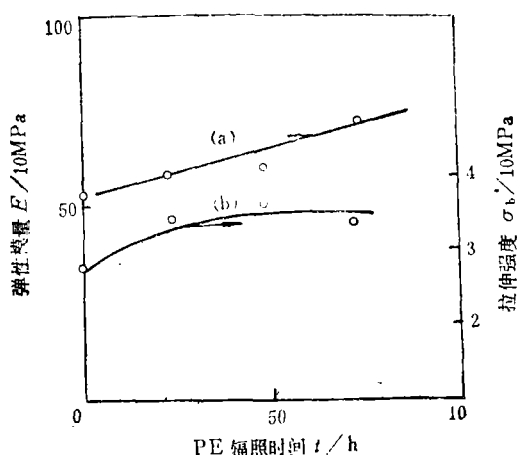


图4 辐照PE对PE/尼龙-6共混物性能的影响<sup>[19]</sup>

(a)弹性模量; (b)拉伸强度

生接枝反应,从而起到增容作用(图4)。

从上讨论可以看出,共混物的相容性对体系的辐射效应有重要影响。相容性越好,组分间相互作用越强,辐照时组分间的相互影响就越严重,从而起到一种组分对另一组分的交联反应的敏化作用或裂解反应的保护作用,甚至一种组分可以完全改变另一组分的辐照行为。反之,辐射反应生成的组分间的接枝物可起到增容作用。

## 4 共混体系相态结构与辐射效应的关系

大多数聚合物共混物是热力学不相容的,具有某种尺寸上的两相或多相结构,相与相之间通常存在界面层(过渡),在此区域发生两相的粘附和聚合物链段之间的相互扩散,两种聚合物相互扩散的深度即界面层的厚度取决于两种聚合物的互容程度。共混物在受到辐照时,组分间的相互反应是发生在界面层的,因此相结构(相畴的大小、界面层的厚度等)直接影响多相体系的辐射效应<sup>[20~22]</sup>。相容性差的体系,相畴较大,组分间的相互扩散比较微弱,辐照时组分间的相互影响就比较弱,交联或裂解反应主要按照体系中占优势聚合物的反应方式进行的。随着互容程度的增加,相互扩散程度提高,两相之间的相互作用增强,辐照时聚合物组分间的相互影响增大,在界面层产生两组分间相互反应的接枝或交联产物,这对于提高组分间的粘合力和提高材料的使用性能有很重要的意义。不过这些结论主要是从材料的使用性能的变化或宏观的手段(如凝胶含量的测定)得来的,直接从本质上来表征相互接枝物或交联物的结构,目前还很少有文献报道,这主要是因为聚合物辐射交联的产物不溶不融,而且交联的密度相当小,通常的表征方法难以奏效。

此外,在多相聚合物体系中,体系性能随组成的变化不是均匀的,而是在某一很小的组成区域内会发生性能指标的数量级的突变,即发生了连续相和分散相的倒转。研究表明,在多相体系的相倒转区域附近,辐照行为有特殊性。张月芳等研究PDMVS(甲基乙烯基硅橡胶)/EVA(乙烯-醋酸乙烯共聚物)共混体系时发现<sup>[23]</sup>,相倒转区(PDMVS重量百分数25%~33%),凝胶化剂量发生突变,交联的G值有最大值,交联密度有最小值(图5)。同时,凝胶分数与辐照剂量关系式[见式(3)]中的 $\beta$ 值在此区域附近为0.5,而在其它组成区域则接近于1.0,显然,在相倒转区域体系交联的机理

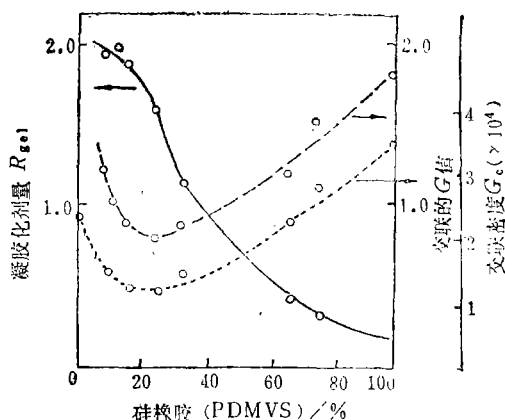


图5 PDMVS/EVA体系相态对辐射效应的影响<sup>[23]</sup>

——凝胶化剂量；———交联的G值；·····交联密度

与其它组成时有较大差别。在对其它体系的研究中,也发现类似的现象,比如PMMA/PEO共混体系,PMMA质量含量为70%(相倒转点)时PMMA参与交联的程度最大<sup>[10]</sup>;辐照PP/EVA共混物的机械性能指标在PP含量30%(相倒转点)出现极大值<sup>[16]</sup>。相倒转区域体系辐射效应的特殊性是由此组成下体系特有的相结构决定的,因此值得进行深入研究。

共混物的相结构直接影响体系的辐射效应,反过来,辐照也会对体系的相态产生作用。利用辐射交联可以作为固定多相聚合物相态的手段<sup>[14,24]</sup>,比如在橡胶增韧塑料时,需要有合适大小的橡胶分散颗粒和适当的相态的结构才能得到理想性能的共混材料。虽然在混合设备中可以达到这个要求,但在成型加工过程中的剪切作用会破坏原来的相结构。辐射交联固定相结构的方法如图6所示。将预先混合好的具有适当相结构的共混物(橡胶组分B以适当的尺寸分散于基质A中),在成型加工之前用电子束(EB)辐照,这样分散相交联而连续相基本不受影响,然后再进行成型加工(如注射成型),在加工过程中原来的相结构便可以维持下来。当然,在应用这一方法时选用具有不同辐射稳定性的聚合物组分(即要求分散相比基质更易被交联)是必要的。另外,对于某些

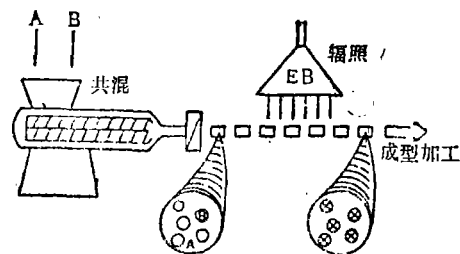


图6 辐射交联固定共混物相态结构的方法(示意图)<sup>[24]</sup>

体系,比如PP/EPDM,由于组分本体粘度的差别,要得到有适当分散性的PP/EPDM共混物就需要很高分子量的PP,而这会影响到材料的成型加工性能。把已经混合好的有适当分散性的PP/EPDM共混物(此时PP分子量很高)进行辐照,PP发生辐射裂解使分子量降低,这样就得到具有良好加工性能的材料,而且在余下的加工过程中体系的相结构可保持不变。

## 5 共混体系中聚合物组分交联反应的敏化和裂解反应的保护

我们知道,聚合物在受到辐照时按其辐射效应的不同可分为两种类型,以交联反应为主的称交联型,以裂解反应为主的称裂解型,通常,交联使聚合物使用性能得到提高,而裂解则使这些性能受到破坏,因此,聚合物辐射交联的敏化和裂解的保护对于提高材料的使用性能和应用范围都有重要价值,向聚合物中添加自由基引发剂或多官能团单体进行强化交联的方法已经得到应用<sup>[25]</sup>。最近,利用聚合物共混的手段来进行敏化交联的研究已有文献报道。Spenadel研究了PE/EPDM、PP/EPDM共混体系在辐照时EPDM对PE、PP交联的敏化作用,并讨论了EPDM的第三单体的种类、双键含量和分子量与体系辐照后的凝胶含量的关系<sup>[26]</sup>。研究还表明,PDMVS对EVA辐射交联有敏化作用,共混体系的凝胶化剂量随PDMVS含量的增加而降低<sup>[23]</sup>;EVA能够加快PE的辐

射交联, 其影响程度与体系为EVA组分的含量及EVA组分中VA的含量有关, 而且与LDPE相比, 这种加快作用对HDPE更为明显<sup>[27]</sup>; 另外, 环氧氯丙烷与PMMA共混物辐照时, 使PMMA裂解反应敏化<sup>[28]</sup>。

对于裂解型聚合物(如PMMA, PIB)当其单体与耐辐射聚合物单体共聚时, 如Poly(dimethyl-diphenyl-co-disiloxane)、Poly(isobutylene-co-styrene), 在辐照过程中由于分子内能量转移而使裂解型聚合物受到保护。在共混物中要达到这种保护作用的效果, 组分间良好的相容性是必要条件。挥发溶剂得到的PMMA/PSt共混物辐照时PSt仅是一种稀释剂, 对PMMA无保护作用, 但在冻干(freezing-drying)样品中PSt则显示出对PMMA一定的保护作用<sup>[29]</sup>。辐照PMMA/SAN共混物, PMMA组分裂解的G值随体系中苯乙烯含量升高而降低, SAN对PMMA的保护作用系数随体系中苯乙烯含量升高而升高, 当St mol %达到40%后趋于稳定, 其值不低于相应共聚物中对PMMA的保护作用系数(图7)<sup>[11, 12]</sup>。在PMMA与PVC共混物中, PVC对PMMA的辐射裂解也有保护作用<sup>[30]</sup>, 但是这与上边所讨论的有所不同, 这种作用不是来自分子间的能量转移, 而是源于一种协同效应: PVC辐照脱

HCl, 催化了PMMA的脱酯反应而生成交联型的聚甲基丙烯酸或酸酐。通过共混使裂解型聚合物发生辐射交联, 在我们实验室研究PMMA/PEO<sup>[10]</sup>、PIB/EPDM等体系中都已发现, 数学期望法从理论上解释了这一现象<sup>[9]</sup>, 但交联的机理和交联产物的结构仍需要进行更深入的研究。

## 6 聚合物共混物辐射交联后性能的变化

共混和辐照都会对聚合物的性能产生直接影响。共混是为了把组分的有利性能结合起来从而获得综合性能优良的制品, 但是共混物组分在其相界面层往往存在缺陷而使其性能受到影响, 而辐照时相界会发生接枝或交联反应, 这可起到提高组分间粘合力的作用, 从而提高材料性能。PP与EPDM的共混物在辐照前体系的性能(如拉伸强度、断裂伸长)随组成的变化与线性加和关系相比呈负偏差, 经 $\gamma$ -射线辐照以后, 拉伸强度和断裂伸长都显示正偏差(如图8)<sup>[21]</sup>, 并且拉伸强度在一定组成时不但超过组分单独存在时的强度, 也超过该组成下未辐照共混物的强度, 这说明辐射交联共混聚合物材料的某些性能是单一组分聚合物辐射交联或者聚合物只经过共混所达不到的, 把共混和辐射交联两种手段结合起来, 才能够得到性能更优良的材料。

共混聚合物在辐照后变化较显著的是力学性能。通常, 辐射交联使材料的模量、拉伸强度提高, 而断裂伸长则下降。比如聚乙烯的拉伸强度随剂量增加持续降低, 而PE/NR(天然橡胶)共混物则在辐照达到一定剂量后抗拉伸度随剂量升高而有所提高; 辐照EVA/LDPE共混物的TMA曲线上出现交联聚合物特有的高弹态, 高弹模量依赖于体系的组成和辐照剂量。由于组分各自交联的难易程度不同, 体系中存在的是不均匀的统计网络, 交联点间链段度分布很宽, 高弹模量的大小可以用来评估体系的平均交联密度<sup>[20]</sup>。SEM方法研究共混聚

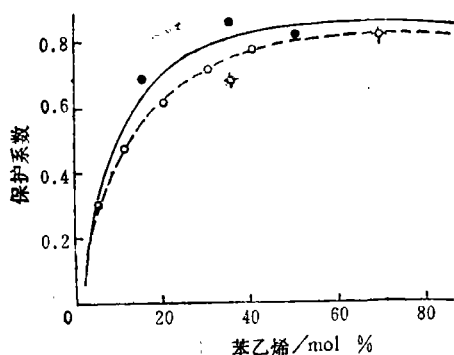


图7 苯乙烯对体系中裂解型聚合物的保护作用<sup>[11]</sup>

- 二甲硅烷-二苯基硅烷共聚物;
- 异丁烯-苯乙烯共聚物;
- 聚异丁酸酐和苯乙烯-丙烯腈共聚物的共混物

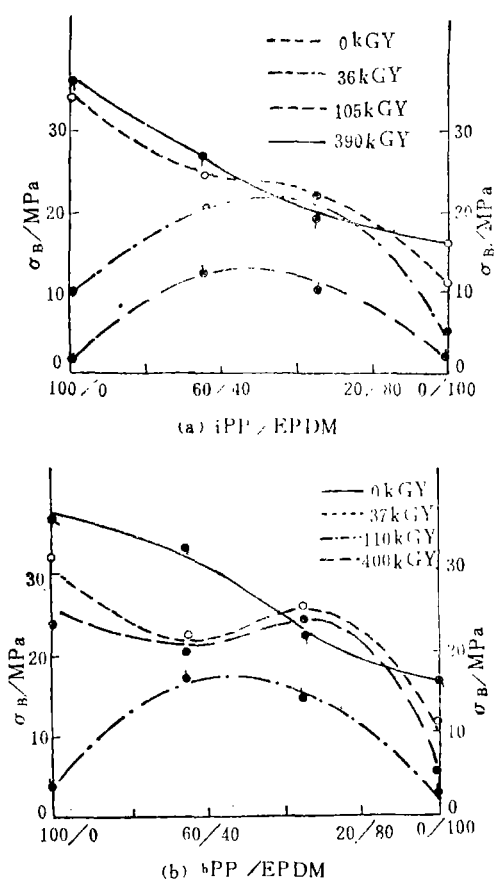


图 8 辐照对共混体系性能(拉伸强度)的影响<sup>[21]</sup>

合物断裂面的相态还表明, 辐射交联后体系一般呈韧性断裂<sup>[22,31]</sup>。

对于结晶聚合物的共混物, 辐照对体系性能的影响比较复杂<sup>[15,32]</sup>, 因为辐照一方面会破坏结晶的完整性、降低结晶度, 使其性能(如模量)下降, 而另一方面辐射交联则使其强度提高, 最终的结果取决二者中哪一个主要的。因此要选择适当的共混体系和适当的辐照条件, 才能得到性能优良的材料。

辐照对共混物热学性能的影响主要表现在结晶熔化温度的降低, 这是与体系的结晶完整性相关的, 共混和辐照往往会破坏结晶的完整性<sup>[30,33]</sup>。辐射交联往往会阻碍结晶重排、降低结晶度, 但也有研究表明, 辐照会诱发有序相区的结晶重排, 图9是LDPE/LLDPE机械

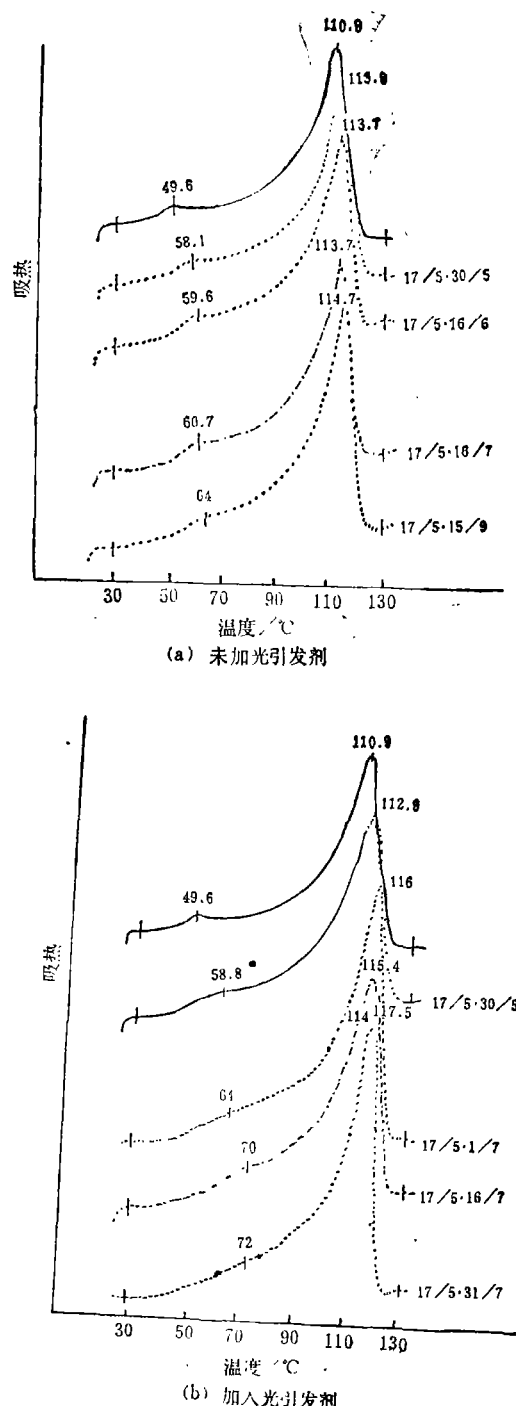


图 9 辐照LDPE/LLDPE共混物(75/25)的DSC曲线<sup>[34]</sup>

共混物的DSC曲线, 低温熔融峰的位置随辐照时间的增加而向高温方向移动<sup>[34]</sup>。对于

UHMxPE (超高分子量聚乙烯)/HDPE 共混物, 辐照前后结晶度由线性加和关系的负偏差转变为正偏差, 研究者认为辐照使 UHMxPE 的支链断裂而导至结晶重排<sup>[35,36]</sup>。此外有些半结晶聚合物与非晶聚合物共混辐照后, 会使结晶熔融峰发生分裂 (如图10)<sup>[37]</sup>, 其原因目前还不清楚。总之结晶性的变化受多种因素影响, 比如聚合物的热历史、共混条件、辐照条件, 辐照后的热处理等等, 不同的研究者往往会得到不同的结果。

对辐射交联聚合物共混物电学性能的研究在制造电线电缆材料时也是很重要的<sup>[38,39]</sup>。

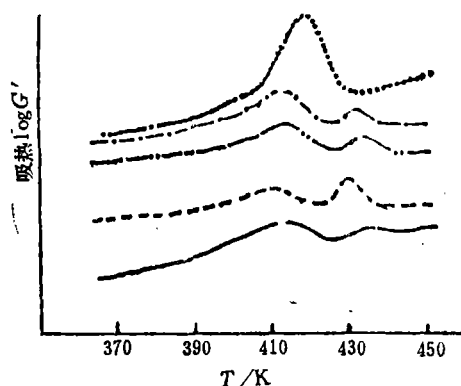


图 10 辐照PVDF/PEA共混体系DSC  
曲线[PVDF 9(wt %)]<sup>[37]</sup>

..... 0; ---  $6 \times 10^4$  Gy; - - -  $2.55 \times 10^5$  Gy;  
- · -  $4.5 \times 10^5$  Gy; —  $7.5 \times 10^5$  Gy

## 7 辐射交联共混聚合物材料的应用

辐射交联聚合物广泛地被用于制造形状记忆材料。美国Raychem公司50年代末就开始生产形状记忆材料, 并长期垄断国际市场, 目前该公司在英国、比利时、德国、法国、丹麦、日本等国都有分公司。在我国, 目前已经有自己研究出的产品并形成一定规模的工业生产。由于配方严格保密, 这方面的报道绝大部分都是以专利文献的形式出现的。从使用的材料看, 以共混聚合物为基材的形状记忆材料的

专利最近几年迅速增多, 这大致可分为: 塑料-塑料共混物, 如聚烯烃与EVA共混, 不同种类的聚烯烃的共混; 塑料-橡胶共混物, 如聚烯烃与硅橡胶共混, 聚烯烃与EPDM、PB等弹性体的共混; 橡胶-橡胶共混物等。当然上述聚合物共混材料还广泛地被用于制造辐射交联电线电缆、包装材料等等。此外还有, 用含氟聚合物 (如氟橡胶、聚偏氟乙烯等) 的共混物辐射交联制造的特殊耐高温材料, 辐射交联发泡材料, 导电材料及其它材料。

## 8 参考文献

- 1 Tabata Y. Radiat. Phys. Chem. 1990, 35(1~3):15
- 2 Charlesby A. Atomic Radiation and Polymers. Pergamon, Oxford, 1960
- 3 陈欣方, 刘克静, 唐敖庆. 吉林大学学报. 1977; (4):39
- 4 张万喜, 何天白, 孙家珍, 钱保功. 科学通报. 1986(3):189
- 5 吕英涛, 张万喜, 孙家珍. 辐射研究与辐射工艺学报. 1988 6(4):12
- 6 王洪, 张万喜, 孙家珍. 辐射研究与辐射工艺学报. 1989 7(3):5
- 7 张万喜, 吕英涛, 孙家珍. 高分子学报. 1990(4):473
- 8 蒋淮渭, 李希明, 林铭镡, 西本清一. 高分子学报. 即将发表
- 9 张万喜, 王谋智, 孙家珍. 辐射研究与辐射工艺学报. 即将发表
- 10 Zhang Wanxi, Wang Hong, Sun Jiazhen. J. Macromol. Sci. -Phys., 1991, B30(1~2):41
- 11 Nguyem T Q, Kawsch H H. J. Appl. Polym. Sci., 1984(29):455
- 12 Daro A, Zabeau F, David C. Eur. Polym. J., 1989, 25(1):71
- 13 Skowronski T, Rabek S F, Ranby B. Polym. Eng. Sci., 1984, 24(4):273
- 14 Van Gisbergen S G M, Borgmans C P J H, Vander Sanden M C M, Lemstra P. J. Polym. Commun., 1990(31):162
- 15 Kostoski D, Babic D, Stojanovic Z, Gal O. Radiat. Phys Chem, 1986, 28(3):269
- 16 Gordlichuk T N, Gordienko V P. Teor. Eksp. Khim., 1989, 25(3):633
- 17 Leumer G, Rossbach V. Makromol. Chem. Macromol. Symp, 1989, 23:37
- 18 Briber R M, Bauer B J. Macromolecules, 1988, 21:3296
- 19 Curto D, Valenza A, Lamantia F P, J. Appl. Polym. Sci, 1990, 39:865
- 20 Minkova L, Nikolova M. Polym. Degrad.

- Stab, 1987, 18:189
- 21 Harnischfeger P, Kinzel P, Jungnickel B J. Makromol. Chem, 1990, 175:157
- 22 Thomas S, Gupta B R, De S K, Thomas K T. Radiat. Phys Chem, 1986, 28(3):283
- 23 张月芳, 葛学武, 孙家珍. 辐射研究与辐射工艺学报. 1985(3):40
- 24 Van Gisbergen S G M, Meijer H E H, Iemstra P J. Polymer, 1989(30):2153
- 25 Charlesby A. Radiat. Phys. Chem, 1981, 18(1~2):59
- 26 Spenadel L. Radiat. Phys. Chem, 1979, 14:683
- 27 Gordiichuk T N, Gordineko V P. Kompoz. Polim, Mater, 1988(38):33
- 28 Jubinsky T A, Groele R J, Rodriguez F, Namaste M Y, Obendorf S K. ACS Symp. Ser, 346, 1987:P149
- 29 Shultz A R, Mankin G I. J. Polym. Sci., Symp, 1976, 54:541
- 30 Hayward D, Afrossman S, Pethrick R A. Polym. Commun, 1987, 28:344
- 31 Akhtar S, De P P, De S K. J. Appl. Polym. Sci, 1986, 32:4169
- 32 Spadaro G, Acierno D, Calderaro E. Radiat. Phys. Chem, 1984, 23(4):445
- 33 Sawatari C, Matsuo M. Polymer J, 1987, 19(12):1365
- 34 Trihian M, Daro A, Tacobs R, David C. Polym. Degrad. Stab, 1990, 28:275
- 35 Minkova L. Dokl. Bolg. Akad. Nauk, 1987, 40(11):99
- 36 Bhateja S K, Andrews E H. J. Mater. Sci, 1986(20):2839
- 37 张万喜, 吕英涛, 孙家珍. 辐射研究与辐射工艺学报. 1990, 8(3):155
- 38 李树忠, 裴玉兰, 何忠达, 刘海英. 辐射研究与辐射工艺学报. 1990, 8(2):65
- 39 Spenadel L. J. Ind. Irradiat. Technol, 1985, 3(1):7

## Advances in Radiation Effects of Polymer Blends

Zhao Wenwei, Xu Jun, Sun Jiazhen

(Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

**Summary** The present paper deals with recent progress in radiation effects of polymer blends both in China and abroad. The content includes the suitability of the application of crosslinking theory to polymer blend systems; the effects of miscibility and morphology of blend systems on radiation effects and also the protection and sensitizing effects between component in polymer blends.

**Key words** Polymer blend, radiation effects, radiation crosslinking and degradation, miscibility, morphology

(上接第176页)

报(日本). 昭63-215709

- 18 约翰. R. 威勒. 发明专利申请公开说明书. CN 86 1 00925 A

- 19 刘松林, 硕士论文. 北京航空航天大学. 1990
- 20 沈静姝, 刘松林, 钱人元. 石油化工. 1991, 9
- 21 Rado R, Simunkova D, Malak L. Vysokomol. Soedin, 1962, 4:304

## Crosslinking of Polypropylene

Shen Jingshu, Liu Songlin

(Institute of Chemistry, Academia Sinica, Beijing 100080)

**Summary** In this paper a general review on the progress of radiation crosslinking, chemical crosslinking and two-step crosslinking by moisture for polypropylene has been given. In particular, for the two-step crosslinking the effects of various factors on gel amount and crosslinking efficiency have been discussed.

**Key words** polypropylene, radiation crosslinking, chemical crosslinking, two-step crosslinking by moisture.