

聚乳酸立体复合物的结构与性能研究进展及展望

戈 欢,朱志国*,王 睿,王 锐

(北京服装学院 材料科学与工程学院,北京 100029)

摘要:聚乳酸(PLA)类材料以其独特的生物相容性和生物可降解性备受关注。将其两种旋光对映体,即 PLLA 与 PDLA 共混,会产生一种具有更高熔点的立体复合物(sc-PLA),并能提高聚合物的结晶度、结晶速率以及耐热性,对于 PLA 类材料的开发和应用具有重要意义。本文从结晶机理、球晶形态、热稳定性和降解性能等方面综述了近年来有关 sc-PLA 结构与性能的研究进展,并对 sc-PLA 研究方向提出了作者的观点。

关键词:聚乳酸; 立体复合物; 结晶机理; 热稳定性

引言

PLA 根据其旋光性可以分为左旋聚乳酸(PLLA),右旋聚乳酸(PDLA)以及外消旋聚乳酸(PDLLA),目前工业化品种主要是 PLLA,而 PDLA 的合成成本仍然较高,且应用领域稍显局限。PLA 作为一种生物可降解材料,具有安全、无毒等优点,符合现代社会对绿色和环保的需要,且其原料乳酸来源具有生物资源的优势;在食品包装膜、生物医用材料等领域有较为广泛的应用,同时在功能材料领域也有较广泛的应用前景^[1~3]。

但是,作为一种半结晶聚合物,单独的 PLLA(或者 PDLA)具有结晶速度慢、结晶度低、热稳定性较差以及材料韧性不足等缺点。研究人员开发了一系列利用纤维或无机粉体增强增韧的 PLA 基复合材料并取得了一定的效果^[4~6]。1987 年 Ikada 首次发现将两种旋光异构体 PDLA 和 PLLA 通过溶液或熔融共混后,能够形成一种新的晶体结构—立体复合聚乳酸(sc-PLA),其熔点为 230℃左右^[7,8],远远高于单独的 PLLA 或者 PDLA(其熔点, T_m ,约为 170℃)。后期研究发现,sc-PLA 的结晶性、耐热性和耐水解等方面的性能均要优于 PLA,引起了对 sc-PLA 的广泛研究^[9,10]。Opaprakasit^[11]利用红外光谱证明,C—H...O=C 之间氢键是形成立体复合的主要推动力;Tsuiji 研究表明,新形成的 sc-PLA 晶体可以成为 PLLA 结晶过程的高效成核剂^[12]。高分子量的样品通常具有更优异的热稳定性和机械性能,因此,很多研究着眼于提高 sc-PLA 的分子量^[13,14]。但高分子量的 PLLA 和 PDLA 直接通过熔融或溶液共混很难得到单一的 sc-PLA 结构^[15],控制加工条件以及通过重复溶液浇铸,可适当提高 sc-PLA 在共混物中的比例^[16,17]。除此之外,研究人员还开辟了新的途径,即利用低分子量的 PLLA 和 PDLA 作为原料,通过熔融-固相缩聚法^[18,19]制备高分子量立体嵌段聚乳酸(sb-PLA)(T_m 约为 200℃)。最近的研究表明,通过生物发酵也能产生部分 sc-PLA^[20],在生物工程领域颇受关注。近年来针对 PLLA/PDLA 共混形成的 sc-PLA 在促进 PLA 结晶成核以及提高热稳定性、降解性能等方面的研究成果丰硕,本文从结晶机理、球晶形貌、热稳定性以及降解性能等方面综述了 PLLA/PDLA 共混物的研究进展。

1 PLLA/PDLA 共混物结晶机理

PLLA/PDLA 共混物中通常存在两种相互竞争的晶体,一种是 PLA 中最常见的 10₃ 螺旋均聚物晶

10.14028/j.cnki.1003-3726.2015.11.005

收稿:2014-09-29;修回:2015-05-14;

基金项目:北京市属高等学校创新团队建设与教师职业发展计划项目(KJCG02140203);北京市教委专项经费-北京服装学院 2014 年研究生科研创新(X2014-089);

作者简介:戈欢,男(1989—),在读研究生,主要研究方向为生物降解材料;

* 通讯联系人:E-mail:clyzgzg@bift.edu.cn.

体(hc),属于 α 晶型,另一种为更紧密排列的 3_1 螺旋立体复合晶(sc),为 β 晶型^[21]。Ikada的研究表明,当重均分子量低于 6×10^4 时,等比例的PLLA和PDLA通过溶液共混,待溶剂缓慢挥发后,形成的晶体结构几乎全部为sc;随着分子量提高,sc的比例逐渐降低,而hc则逐渐增加;对于非等比例共混物,多为两种晶体结构共存,且共混比例偏离1:1越多,hc的含量越高。采用熔融共混制备sc-PLA时,仅形成sc-PLA时PLLA和PDLA的临界分子量更低^[15]。

加入少量PDLA能够促进PLLA结晶正是利用共混物中预先形成一定量的sc晶体,它在PLA结晶时可以作为基底。Sun^[22]探究了熔融温度和PDLA含量对分子量相近的非等比例PLLA/PDLA共混物结晶性能的影响。当熔体从250℃降温时,PLLA/PDLA(90/10)中形成的sc含量较少,且晶体结构不完善,使得hc和sc几乎同时产生,sc促进hc结晶的作用并不明显。随着PDLA含量的增加(PLLA/PDLA为70/30),sc含量明显增加,虽然晶体结构依然不完善,但是高含量使得它可以作为hc的成核剂,熔融结晶温度(T_{mc})增加(见图1a)。当熔融温度选为240℃时,共混物熔体中残留了部分未熔融的sc结构,它既可以作为sc的成核剂(均相成核)又可作为hc的成核剂(异相成核),有利于形成完善结构的sc,同时能提高PLLA的结晶速率。与PLLA/PDLA(90/10)相比,PLLA/PDLA(70/30)中残留的sc含量更多,因而促进作用更明显(见图1b)。熔体从190℃降温时,sc晶体全部未熔融,PLLA/PDLA(90/10)中sc含量较少,可以均匀分散到PLLA熔体中并作为成核剂诱导hc晶体产生,而PLLA/PDLA(70/30)中sc晶体较多,一定程度上阻碍了PLLA分子链的运动,成核作用降低(见图1c)。Narita^[23]通过XRD测试验证了添加PDLA促进PLLA结晶的最佳温度,可以选择在sc全部熔融时,即238℃左右。Schmidt^[24]研究认为当PDLA的含量为15%时,促进PLLA结晶的效果最佳。Rahman^[25]研究了PDLA的分子量对PLLA结晶的促进作用。结果表明,添加高分子量且经过预结晶处理的PDLA对促进PLLA的结晶更有效。

通过溶液共混形成的sc晶体随着熔融温度的升高或时间的延长,结晶速率和结晶度均下降,具体表现为样品经过升温-降温-升温过程后熔点下降。He^[26]研究认为这种特殊的结晶行为并不是因为热降解和热氧化,而是依赖于sc晶体最初的熔融状态。熔融方式存在两种,即链段连续的沿外侧脱离熔融(表面熔融,非均相,不稳定)和以团簇的方式急剧地整体熔融(团簇熔融,均相,较稳定)。表面熔融发生的温度低,在此温度下,PLLA/PDLA分子链之间的作用力依然存在。随着熔融温度的升高或熔融时间的延长,不稳定的非均相变为均相熔融(表面熔融变为团簇熔融),PLLA/PDLA分子链之间的相互作用消失,PLLA(或PDLA)分子链之间更容易形成一种网状物理交联作用微区,这种微区抑制了PLLA(或PDLA)分子链向立体复合晶格扩散,降低了结晶能力。

高分子量sb-PLA是低分子量的PLLA/PDLA通过熔融共混继而通过固相缩聚制备的。低分子量的聚合物在熔融共混中易于形成完全的立体复合晶体,固相缩聚形成的sb-PLA更有利于PLLA和PDLA链段之间的接触、缠绕以及复合等相互作用,使得sb-PLA分子链之内和相邻的分子链之间均能形成sc-PLA,提高了sb-PLA中sc的含量。Fukushima^[27]研究了sb-PLA作为相容剂促进sc-PLA的形成,sb-PLA分子量越低越有利于sc-PLA的形成,sb-PLA可以与均聚物分子链发生作用,抑制hc的形成,从而提高sc的比例。Hirata^[28]先通过PLLA和PDLA(非等比例)共混制备sb-PLA的预聚体,然后在共混物中添加单体调整D/L的比例。比较发现,当D/L为等比例混合时产生的sc含量反而低于非等比例混合的样品,新加入的单体抑制sb-PLA的分子链与高分子量均聚物分子链之间作用。

2 球晶的形态结构

PLA的球晶形态已有较广泛的研究,球晶产生明显的黑十字消光现象,同时容易观察到环带状球晶、裂纹等。环带状球晶是由片晶周期性扭曲产生,裂纹的产生除与热收缩以及热膨胀系数有关外还受到分子量和温度等影响。sc-PLA的晶体中至今并未有环带状球晶的报道,而裂纹现象也只是在某些特

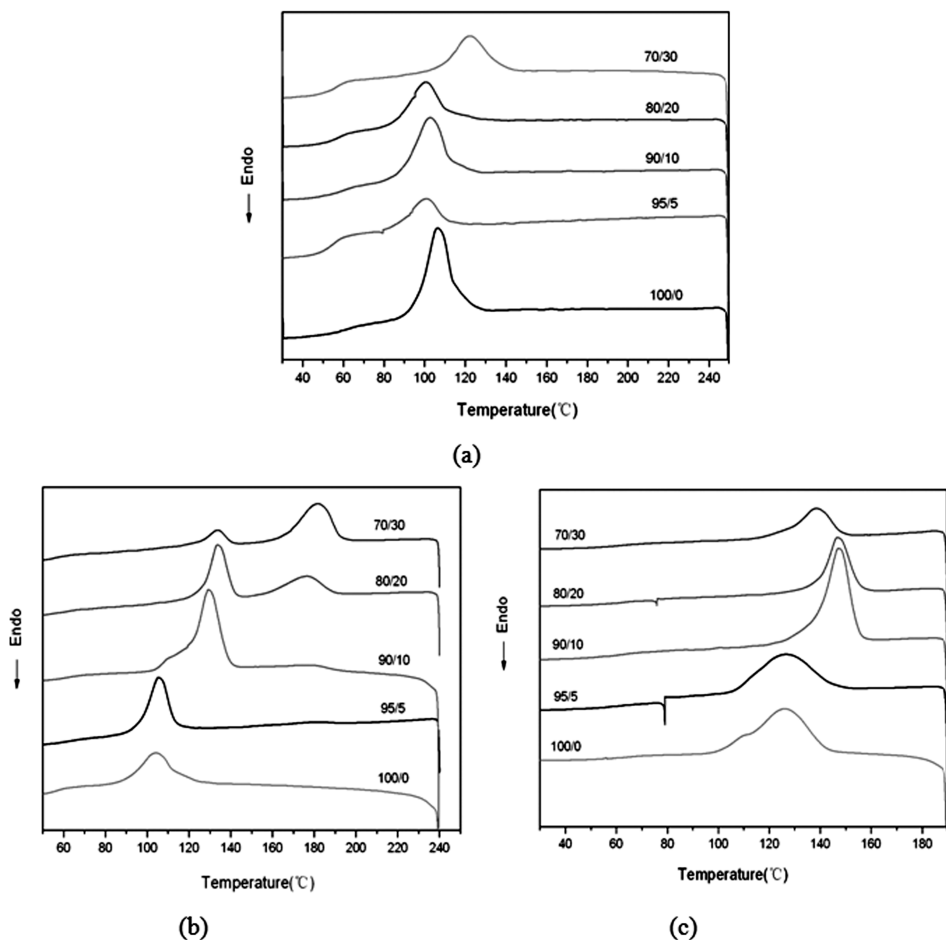


图 1 PLLA/PDLA 共混物 DSC 降温扫描曲线

分别从(a) 250℃,(b) 240℃和(c) 190℃降温至室温,降温速率:5℃/min^[22]。

Figure 1 DSC thermograms of PLLA/PDLA blends during cooling runs from a top temperature to room temperature at a cooling rate of 5℃/min. The top temperatures were (a)250℃, (b) 240℃and (c) 190℃ respectively^[22].

殊的条件下才能观察到。随着 PLLA/PDLA 共混比例偏离 1:1,球晶的密度增加,黑十字消光和球晶轮廓变得模糊(如图 2 所示)。

研究表明,等温结晶的温度选择在 170℃ 以下时,通常会产生两种类型的晶体。Chang^[29] 选择熔点相差较大的 PLLA 和 PDLA 进行共混,通过原子力显微镜(AFM)对均聚物球晶在立体复合物球晶上的形成过程进行了观测,并阐述了二者之间的关联性。他认为,均聚物球晶的生长可分为三个阶段进行(如图 3 所示),较小的 PDLA 球晶中形成的片晶为微纤状(fibril-like),随着晶体数量的增加,片晶的形态由微纤状变为串珠状(bead-on-string),然后串珠状的片晶通过聚集形成了麻花状(dough-like)的晶体;随后,在麻花状片晶的表面继续形成微纤状晶体,后者经过自组装,形成串珠状晶体,成为该共混物最终的晶体类型。在结晶过程中,片晶厚度的增加主要发生在串珠状向麻花状片晶的转变过程中。在 PLLA/PDLA/PHB 三元共混物中^[30],PHB 含量以及等温结晶的温度都会影响球晶的形态,PLA 球晶先形成羽毛状(feather-like)后形成楔形(wedge-like)结构。Wang^[31] 研究认为,随着 PLLA/PDLA 共混比例趋于 1:1,球晶中片晶的取向从负球晶转变为复合球晶进而转变为正球晶;等比例混合物在 175℃ 等温结晶时产生裂纹,而非等比例混合物并不出现这一现象。Nurkhamidah^[32] 也只是当 PLLA/PDLA(90/10)的共混物在 190℃ 熔融后,降温至 140℃ 等温结晶时观察到裂纹;而经过 240℃ 熔融后,降温至 140℃ 等温结晶

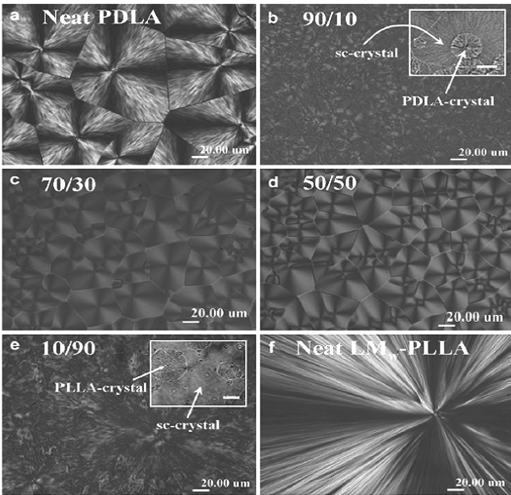


图 2 不同共混比例下 PDLA/低分子量 PLLA 共混物球晶在 120℃ 等温 60min 后的 POM 图
放大部分为共混比为 90/10 和 10/90 时结晶 4min 的 OM 图^[29]

Figure 2 POM graphs of PDLA/LMw-PLLA blend of various compositions melt-crystallized at 120℃ for 60 min.
Inset: non-polarizing OM graph of 90/10 and 10/90 blends crystallized for 4 min^[29]

时并没有观察到这一现象,证明了 sc 作为成核剂能诱导 PLLA 产生裂纹,而两种晶体同时产生时能避免或减弱这种现象。这可能是因为,经高温消除热历史后再进行等温结晶(240℃ ~ 140℃),所形成的 PLLA 晶体结构更加紧密,因此不易形成裂纹。

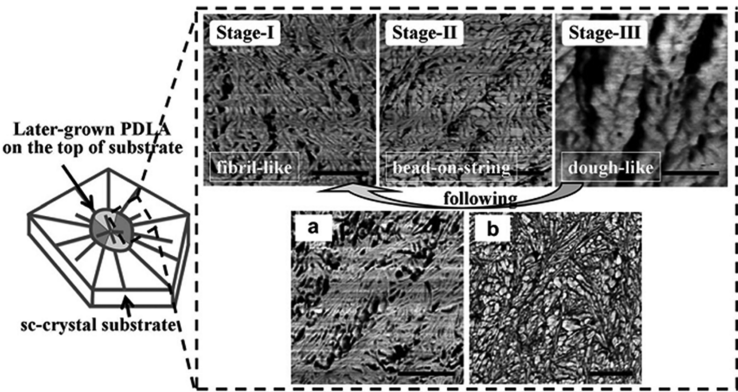


图 3 PDLA 在 sc-PLA 基体上生长机理图^[29]

Figure 3 Schematic illustration for the evolution of the later-grown
PDLA-crystal in the pre-formed sc-crystal spherulite^[29]

大部分研究表明,PDLA 的加入能有效提高 PLLA 的结晶能力,同时提高球晶的径向生长速率。但是,Rahman^[25]认为加入 PDLA 会略微降低 PLLA 球晶的生长速度,这是因为 sc-PLA 并不是在 PLLA 中孤立存在,而是通过形成物理交联网络与 PLLA 相互作用,抑制了 PLLA 球晶的径向生长。Lauritzen-Hoffman 区域结晶理论研究已在次级生长过程得到广泛的运用,利用球晶径向生长速度获得相关转变温度,通常成核常数 K_g 会随着分子量的变化而变化。Bouapao^[33] 和 Tsuji^[34] 的研究发现,PLLA 的结晶方式转变温度并未随着 PDLA 的加入而改变,说明球晶的生长方式并未发生改变,Ⅱ区与Ⅲ区的转变温度依然保持在 120℃ 附近。

3 sc-PLA 的热稳定性

对于立体复合物,热稳定性不仅表现在起始分解温度,而且体现在经过加工后 PLLA/PDLA 共混物中依然能含有较高比例的立体复合物晶体。丙交酯开环聚合制备的高分子量 PLA 在热稳定性方面已达到能进行多次加工的要求。虽然 sc-PLA 熔点高出近 50℃,与 PLLA(或 PDLA)相比较,其起始热分解温度基本没有差别。因此,在熔融加工中,即使具有高含量,甚至全部为 sc-PLA,仍然表现出耐热性不足的缺点,成为 sc-PLA 开发中的一个瓶颈。Tsuji^[35]通过等温降解研究发现,立体复合物晶体降低了链段的活动能力,提高了热稳定性。热降解反应主要从端基开始,因此研究端基对降解有重要的作用。Fan^[36]利用降解活化能研究了三种端基结构的 sc-PLA。利用甲醇和盐酸清洗数次(有效去除 Sn 类催化剂)得到的 sc-PLA-H(端基类型为—OH 和—COOH)能获得最大的热稳定性(无规降解);而只用盐酸进行清洗仍残留 Sn 类金属离子获得的 sc-PLA-pr(端基类型为—OH),分子内产生环化作用同时还发生着酯交换;未进行任何处理 sc-PLA-ap(—OSn)的降解主要通过回咬进行。三种不同端基的 sc-PLA 的热失重曲线如图 4 所示。

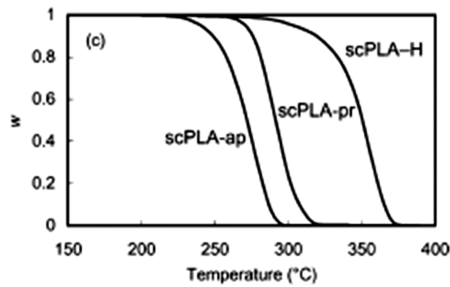


图 4 不同端基类型的 sc-PLA 的热降解图(降温速度 5℃/min,氮气流速 100mL/min)^[36]
Figure 4 Thermogravimetric curves of sc-PLAs at a heating rate of 5K/min
under N₂ flow of 100mL/min^[36]

陈璐^[17]利用二次熔融共混法制备出高耐热性 PLLA/PDLA 共混物。随着二次熔融共混温度的升高,sc 晶体的生成率和结晶度均逐渐下降。但在相同共混温度下的样品经过二次熔融后,sc 晶体生成率和结晶度提高(210℃下熔融共混的样品 sc 晶体的熔点高达 229℃,生成率高达 98.1%)。同时,经 120℃等温退火后的样品维卡软化点高达 126℃。

另外,利用填料提高材料的热稳定的研究也取得较好的效果。例如,粘土通过形成插层型或剥离型结构,能够限制高分子链的运动,或通过原位聚合利用添加剂与聚合物分子链形成化学键的结构,提高本体聚合物的热稳定性。

Brzezin^[37]将有机化接枝改性的碳纳米管作为共引发剂引发丙交酯聚合,所得 PLA 的结晶度接近 100%,熔点为 191℃,将上述方法制备的 PLLA 和 PDLA 溶液共混,结果发现,分子量大于 10⁵ 的聚合物经过熔融-降温-升温的 DSC 扫描循环后,仍然保持了单一的 sc 晶体。Monticelli^[38]利用笼型倍半硅氧烷(POSS)改性 sc-PLA 也得到类似的结论。Furuhashi^[39]采用溶液共混法制备 sc-PLA/OMMT 纳米复合材料并进行了不同温度下的退火处理。研究发现,在 170℃下处理能同时提高 hc 和 sc 的结晶度,在 200℃下退火只能增加 sc 的含量,同时添加的 OMMT 限制了高分子链的运动,使起始分解温度提高了 40℃。

4 sc-PLA 的降解性能

PLA 类材料的降解主要包括水解和酶解两种方式。降解过程与降解液浓度和温度有关,通常从无

定形区域开始,继而发展到分子链排列规整的结晶区域,降解速度也逐渐下降。在 PLA 中加入 PGA(聚乙醇酸)可制备降解速度可控的 PLGA(乳酸-乙醇酸共聚物),在药物缓释体系以及植入性骨材料中具有广泛的应用。对于 PLLA/PDLA 共混物的降解研究不多但是具有重要的应用价值。

Tsuji^[40]研究发现低分子量的 PLLA/PDLA 共混制备的 sc-PLA,由于分子链的排布比 PLA 均聚物中的折叠链的排布规整,sc-PLA 的耐水解性能要优于 PLA,同时与溶液共混相比,熔融共混法制备的 sc-PLA 的片晶厚度更大一些,在水解过程中,后者表现出更好的耐水解性,即在相同的时间内,降解后残留物的分子量较大。Fundador^[41]利用 K 蛋白酶来研究降解性能,通过静电纺丝制备的 sc-PLA 纤维在蛋白酶 K 中的降解速度要明显慢于 PLLA 纤维,经过退火处理增加结晶度后,sc-PLA 纤维的降解速度明显降低(见图 5)。He 验证了 sc-PLA 降解速率快慢的主要控制因素是结晶度而不是立体规整度^[26]。

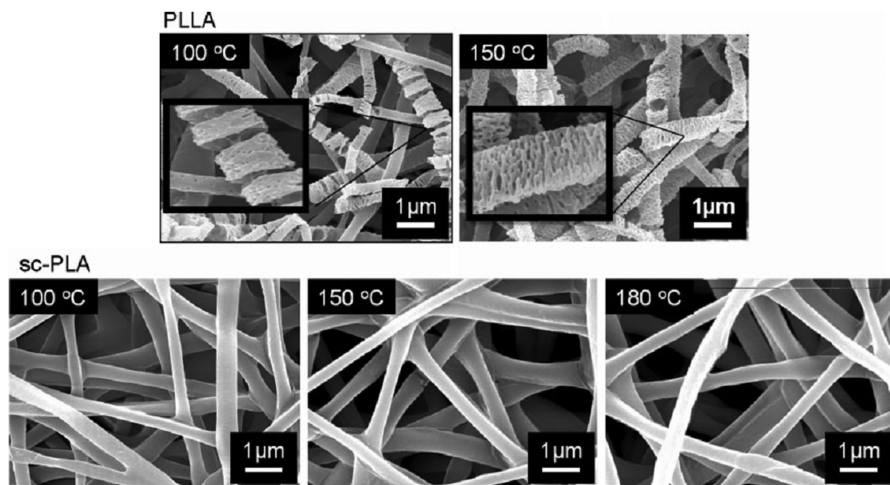


图 5 退火处理的 PLLA, sc-PLA 纤维在不同温度下酶解 24h 后 SEM 图^[41]

Figure 5 SEM images of annealed PLLA and sc-PLA nanofibers after 24 h of enzyme hydrolysis^[41]

5 结论及展望

PLLA 和 PDLA 溶液或熔融共混,能够形成特殊的立体复合物结构,可提高 PLA 类材料的的结晶速度和结晶度,增强其耐水解性和热稳定性,对于拓宽其使用范围有利。但高分子量的 PLLA/PDLA 共混制备难以形成单一的 sc 结构,同时生成的 sc 部分的结晶度受共混原料(主要是分子量)、共混比例以及受热条件等影响,且此类结构对热循环稳定性也不足,其实际应用价值尚待提高。

对于 PLLA/PDLA 共混获得 sc-PLA 的研究方向可以包括以下几点:(1)寻求 sc-PLA 的特效成核剂抑制,尽可能抑制 hc 的含量;(2)通过原位聚合等方法掺杂纳米粒子制备纳米复合物,期望对形成 sc 有利,且提高 PLA 的热分解稳定性;(3)添加 PGA 或羟基磷灰石等物质等制备三元或多元共混物探索 sc-PLA 在生物医用材料的用途;(4)制备高分子量的 sc-PLA,对于开发其应用也十分有必要。

参考文献:

- [1] 杨斌. 绿色塑料聚乳酸. 化学工业出版社. 北京, 2007: 1~18.
- [2] 吴之中,张政朴,鲁格. 高分子通报, 2001, 1: 73~79.
- [3] 曹丹,吴林波,李伯耿. 高分子通报, 2007, 10: 15~20.
- [4] Castiello S, Coltelli M, Conzatti L. J Appl Polym Sci, 2012, 125: E413~428.
- [5] 马朝勤. 原位熔融-固相缩聚制备聚乳酸/SiO₂ 纳米复合材料. 杭州. 浙江大学硕士学位论文, 2011.
- [6] Krok M, Pamula E. J Appl Polym Sci, 2012, 125: E187~199.
- [7] Ikada Y, Jamahidi K, Tsuji H, Hyon S H. Macromolecules, 1987, 20: 904~906.
- [8] Tsuji H, Ikada Y. Macromolecules, 1992, 25: 5719~5723.

- [9] Tsuji H, Ikada Y. *Macromolecules*, 1993, 26: 6918~6926.
- [10] Tsuji H, Tsuruno T. *Macromol Mater Eng*, 2010, 295:709~715.
- [11] Opaprakasit P, Opaprakasit M. *Macromol Symp*, 2008, 264:113~120.
- [12] Tsuji H, Takai H, Fukuda N, Takikawa H. *Macromol Mater Eng*, 2006, 291:325~335.
- [13] Duan Y, Liu J, Sato H. *Biomacromolecules*, 2006, 7: 2728~2735.
- [14] Furuhashi Y, Kimura Y, Yoshie N. *Polymer*, 2006, 47: 5965~5972.
- [15] Tsuji H, Hyon S H, Ikada Y. *Macromolecules*, 1991,24: 5651~5656.
- [16] Tsuji H, Yamamoto S. *Macromol Mater Eng*, 2011, 296: 583~589.
- [17] 陈璐, 唐颂超, 夏季, 蒲文亮, 李瑞. *高分子学报*, 2013, 8:1006~1011.
- [18] Hirata M, Kobayashi K, Kimura Y. *J Polym Sci Part A: Polym Chem*, 2010, 48: 794~801.
- [19] Fukushima K, Furuhashi Y, Sogo K, Miura S, Kimura Y. *Macromol Biosci*, 2005, 5: 21~29.
- [20] Shozui F, Matsumoto K, Motohashi R, Sun J, Satoh T. *Polym Degrad Stab*, 2011, 96: 499~504.
- [21] Sawaid S, Tsugane Y, Tamada M, Kanamoto T. *J Polym Sci Part B: Polym Phys*, 2007, 45: 2632~2639.
- [22] Sun J, Yu H, Zhuang X, Chen X S, Jing X B. *J Phys Chem B*, 2011, 115: 2864~2869.
- [23] Narita J, Katagiri M, Tsuji H. *Macromol Mater Eng*, 2011, 296: 887~893.
- [24] Schmidt S, Hillmyer M. *J Polym Sci Part B: Polym Phys*, 2001, 39: 300~313.
- [25] Rahman N, Kawai T, Matsuba G, Nishida K, Kanaya T. *Macromolecules*, 2009, 42: 4739~4745.
- [26] He Y, Xu Y, Wei J, Li S. *Polymer*, 2008, 49: 5670~5675.
- [27] Fukushima K, Chang Y H, Kimura Y. *Macromol Biosci*, 2007, 7: 829~835.
- [28] Hirata M, Kimura Y. *Polymer*, 2008, 49: 2656~2661.
- [29] Woo E M, Chang L. *Polymer*, 2011, 52: 6080~6089.
- [30] Chang L, Woo E M. *Polymer*, 2011, 52: 68~76.
- [31] Wang X H, Prud'homme E R. *Macromol Chem Phys*, 2011, 212: 691~698.
- [32] Nurkhamidah S, Woo E M. *Macromol Chem Phys*, 2011, 212: 1663~1670.
- [33] Bouapao L, Tsuji H. *Macromol Chem Phys*, 2009, 210: 993~1002.
- [34] Tsuji H, Takai H, Saha S K. *Polymer*, 2006, 47: 3826~3837.
- [35] Tsuji H, Fukui I. *Polymer*, 2003, 44: 2891~2896.
- [36] Fan Y J, Nishida H, Shirai Y, Tokiwa Y, Endo T. *Polym Degrad Stab*, 2004, 86:197~208.
- [37] Brzeziński M, Boguslawska M, Iličková M, Mosnáček J, Biela T. *Macromolecules*, 2012, 45: 8714~8721.
- [38] Monticelli O, Putti M, Gardella L. *Macromolecules*, 2014, 47: 4718~4727.
- [39] Furuhashi Y, Morioka K, Tamegai H, Yoshie N. *J Appl Polym Sci*, 2013, 127: 1615~1622.
- [40] Tsuji H, Tsuruno T. *Polym Degrad Stab*, 2010, 95: 477~484.
- [41] Fundador N G, Takemura A, Iwata T. *Macromol Mater Eng*, 2010, 295: 965~971.

Research Development on Structure and Property of Stereocomplexed Poly(lactic acid) and Possible Prospect

GE Huan, ZHU Zhi-guo*, WANG Rui, WANG Rui

(School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Fashion Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Absrtact: Much attention has been paid to poly(lactic acid) (PLA) due to its biodegradability and biocompatibility. Stereocomplexed PLA (sc-PLA), prepared through solution or melt-blending PLLA and PDLA, show higher melt temperature (T_m). In addition, the stereocomplexation structure leads to improvements on crystallinity, rate of crystallization, and heat resistance of PLLA and/or PDLA. The review gives an introduction on the research development related to the sc-PLA, focusing on crystallization mechanism, spherulites morphology, thermal stability and biodegradability, etc. Finally, a simple research prospect on sc-PLA is shown from the views of the authors.

Key words: Poly(lactic acid); sc-PLA; Crystallization mechanism; Thermal stability